

16 食料供給力強化に貢献する積雪寒冷地の農業生産基盤の整備・保全管理に関する研究

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：寒地農業基盤研究グループ長 中村和正

研究担当グループ：寒地農業基盤研究グループ（資源保全チーム、水利基盤チーム）

1. 研究の必要性

世界人口の増加、食生活の変化、異常気象の頻発等により世界の食料需給関係は今後逼迫する方向にある。日本の食料自給率は現状カロリーベースで 37%（平成 30 年度）と先進国中最低であり、新たな「食料・農業・農村基本計画（令和 2 年 3 月 31 日閣議決定）」では令和 12 年度までに 45%へ向上させることが目標であるが、食料生産の担い手の減少と高齢化、耕作放棄地の発生など国内の食料供給力の低下が懸念されている。このような状況のもと、イノベーションによる農業の振興（新技術を活用した生産基盤の整備）が急務となっており、国内の重要な食料生産地である北海道においても大規模な営農や積雪寒冷地といった地域条件とその変化に適合する農業生産基盤の整備・保全管理技術の開発が求められている。

2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、近年北海道内で進められている圃場の大区画化やこれに伴う灌漑排水施設の整備に必要な整備土工技術や灌漑排水技術、積雪寒冷地にある農業水利施設の長寿命化や大規模災害時の防災・減災を目的とした農業水利施設の管理、大規模な酪農地帯や水田地帯における周辺環境との調和に配慮した灌漑排水技術を開発することを研究の範囲として、以下の達成目標を設定した。

- (1) 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発
- (2) 営農の変化と気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発
- (3) 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

このうち、令和元年度は(1)、(2)、(3)について実施している。

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、令和元年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(1) 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

1) 積雪寒冷地における大区画圃場の整備技術に関する研究

圃場の大区画化のための土工で土壌物理性を悪化させないための施工前の土壌診断項目とその基準値を明らかにすることを目的に、国営事業実施地区内で新たに 3 筆の大区画圃場を追加し、施工前後の表土（0-15cm）の物理性を調査した。また、大区画化の施工が下層土の物理性に与える影響を検証するため、下層土の地耐力と水分状態を調査した。これらの圃場の表土は軽埴土であり、下層土は低位泥炭土及び埴土である。

調査の結果は次のとおりである。表土の物理性悪化が抑制される土壌水分は、粘土分が多い表土では pF3.0～3.5 程度であり、粘土分が少ない表土では pF2.0～2.5 程度と違いが見られ、施工開始のための診断基準は、粘土の重量割合別に設定する必要があることが示唆された。また、下層土が泥炭土の場合には、一部の湿潤な区域（pF1.8 未満）では、切盛土直後の地耐力が超湿地ブルドーザの走行に必要な 0.20MPa を下回ったことから、このときの整地作業には超湿地ブルドーザよりさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザの使用が望ましいと考えられた。

今後は、表土の粘土の重量割合に着目した調査の精度を高めることで、施工開始のための診断基準を提案する段階へ研究を進める。

2) 大区画水田圃場における地下水位制御システムの高度利用に関する研究

大区画圃場での転作作物栽培における給排水ムラの実態把握と要因の解明を行い、地下灌漑の実施を可能とする圃場条件を検討するため、B地区とI地区の転作作物栽培圃場で、地下水位および土壌水分変動が大豆栽培に与える影響を調査した。B地区では播種後（6月）及び発芽後（7月）に各2日間程度の地下灌漑を実施し、その結果から、地下水位のばらつきが取水終了直前では取水直前に比べ小さく、水分供給ムラは大きくないことがわかった。また、地表面から深さ5cmの土壌水分は地下水位が深さ10cmまで上昇したときに圃場容水量まで達したこと等から、発芽促進を目的として地下灌漑を利用するためには、水分を供給したい深さの直下まで地下水位を上昇させてから水を落とすことが重要であることを明らかにし、転作作物栽培の効果的な地下灌漑実施方法として重要な成果を得た。

また、地下灌漑の利用が環境負荷に与える影響の評価のために、地下灌漑を実施したB地区の転作大豆畑で温室効果ガスの排出量を調査した。結果、地下灌漑実施時またはその直後にメタンと一酸化二窒素の大きな排出が観測された。今後、引き続き温室効果ガス放出や窒素流出のデータを蓄積し環境負荷に与える影響を評価する。

3) 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究（このうち、大区画水田の高精度な水管理技術の開発と用水量の解明）

水田圃場の大区画化や地下水制御システムの整備が進められる中、整備済みの圃場を対象とし、直播栽培が導入された圃場の水管理及び水収支を調査してきた。令和元年度より、小用水路が開水路からパイプライン化された地区において、圃場整備前後の移植栽培及び乾田直播栽培の圃場水管理及び水収支の調査を新たに実施し、比較を行った。その結果、圃場整備後の乾田直播栽培圃場では、未整備圃場で移植栽培を行った場合の3.5倍の総供給水量となった。大きな違いが生じた要因として、土性や代掻きの有無による圃場浸透量の違い、取水管理の違い（取水時間の変化、強制落水時の再湛水、表面流去の発生等）が考えられるが、引き続きこれらの要因分析を行い、パイプライン化の影響等を解明する必要がある。

(2) 営農の変化や気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発

1) 積雪寒冷地における農業水利施設の長寿命化に関する研究（このうち、農業水利施設の複合劣化を対象とした農業水利施設の維持管理・更新技術の開発）

積雪寒冷地における農業水利施設の長寿命化に関する研究の目的は、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発である。

①では、コンクリートにおける凍害・摩耗及び鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明を行っているが、コンクリートの複合劣化に関して、凍結融解を作用させたモルタル試験体の摩耗促進試験を行った結果、摩耗量は凍結融解サイクル数に応じて増加することがわかった。

②では、凍結・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法の開発を行っているが、複合劣化に対して高耐久性を有する「超高耐久性断面修復・表面被覆技術」の開発と、その耐久性を評価するためのモニタリング調査に着手した。試験施工を行った現地のコンクリートフルーム水路の断面修復・表面被覆材の凍結融解試験を行った結果、凍結融解サイクル数は1,500サイクルを超え、優れた耐凍害性を有することを確認した。

2) 大規模災害時における長大な農業水利施設の災害対応計画策定技術の開発

（※ H30年度で完了。H30年度研究開発プログラム報告書の記載を再掲）

大規模地震災害時には、長大な農業用水路における正確な被害情報が得られない場合がある。そのような場合でも、施設管理者が取水ゲートを閉鎖すべきか否かを適切に判断できる意思決定方法を期待値原理に基づき検証した。その結果、大規模地震災害時の不確実な被害情報を判断基準とせず、幹線水路での被害の発生に対応可能な管理体制が、その時点で構築できるか否かを判断基準とすれば良いことがわかった。

また、平成28年度から3カ年で行った、大規模災害に備えた災害対応計画策定技術の研究の結果を、農業水利施設管理者のための災害対応計画策定マニュアル案としてとりまとめた。

今後、土地改良区（施設管理者）による災害対応計画の策定あるいは見直し作業に活用されるよう、普及を進める。

(3) 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

1) 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究（このうち、周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築）

水田圃場の大区画化や地下水位制御システムの整備の進展に伴って、農区や、これより広域な灌漑区域における流出機構が変化すると予想される。そのため、水田地帯における周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築をめざして、平成 28 年度から水収支および水質の調査を続けている。

令和元年度は、国営事業により新たに末端まで用水路がパイプライン化された地区を対象として、農区レベル及び圃場レベルの水収支及び水質の調査を開始した。パイプライン系の農区では、配水管理用水が殆ど生じないため、これまで調査してきた開水路系の農区の水収支や水質濃度とは異なる可能性が大きい。地域の営農状況や水管理状況等を踏まえて影響を分析し、農業用水が有する環境保全機能を評価する必要がある。

今後は、パイプライン系農区において調査を継続し、水管理時期ごとの水収支構造を解明する。

2) 大規模酪農地帯における効率的なふん尿スラリー調整技術の開発に関する研究

家畜ふん尿を好気性発酵により腐熟させる肥培灌漑施設の効率的な運転管理方法を明らかにすることを目的に、室内試験および肥培灌漑施設の現地調査を行った。

室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明では、臭気指数に着目した連続投入試験を行い、ORP をプラスに維持できない状態においても臭気が低下するまで腐熟させることができること、また、 $8\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ の連続曝気を行うことで臭気指数を悪臭規制値より小さくでき、臭気低減効果が期待できることを確認した。

肥培灌漑施設からの泡流出抑制技術の開発では、1 カ所の肥培灌漑施設で調整槽内部での泡発生と施設稼働の状況を調査した結果、曝気を行っていない時間帯には消泡機は稼働しておらず、この時間帯に液面が上昇すると液面上の泡も上昇し、狭い天端開口部に泡が集中して急上昇することで、地上部への泡流出につながっていることがわかった。また、このとき、消泡機を稼働させることで上昇する泡を破壊でき、泡の上昇を抑制することもわかった。

また、現地施設を用いた効率的なふん尿調整方法の検証では、冬期には調整槽液温が低下すると腐熟の進みが遅くなることから、液温低下抑制のため、1 カ所の肥培灌漑施設で冬期の曝気時間を夏期の 2 倍に延長し液温上昇について調査した。その結果、厳冬期でも調整槽液温が上昇することを確認した。今後、秋～冬～春において、液温低下抑制に必要な曝気時間を検討する。

3) 大規模酪農地帯の水質環境評価技術に関する研究

北海道東部の大規模酪農地帯では、国営環境保全型かんがい排水事業が実施され、事業実施状況が流域の水質環境に与える影響を定量化することが求められている。そのため、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) による水質解析により、大規模酪農地帯の水質環境改善手法を提案する。令和元年度の主な内容と成果は以下のとおりである。

本川流域における河川水質と土地利用・営農状況の関係では、平水時の採水調査により流域広域にわたる河川水質状況を把握し、土地利用図と農業統計値により集水域ごとに乳用牛頭数を集計した。その結果、窒素濃度の平均値と流域面積あたりの乳用牛頭数密度には高い相関関係が得られたこと、近似線から外れるプロットは事業の実施状況との関係性が考えられること等を明らかにした。

支川流域における河川水質状況では、西別川支川であるヒロノ川および熊川を対象流域に選定し、自動採水器により河川水質の連続観測を実施した。酪農の営農状況が異なる支川小流域の水質変動特性を明らかにし、SWAT のモデルパラメータの同定・検証に利用するデータセットを取得した。

SWAT による水質解析では、牧草地の作付け、施肥、収穫等の管理スケジュールを設定した。牧草の生育期間における葉の生育や根の伸長等の作物生長過程を推定し、単収の実測値を再現することにより、地表および土壌面における水・栄養塩物質の流出過程が経時的に表現され、支川下流地点での窒素負荷量の変動を良好に再現した。

今後は、モデル上で水質環境対策を講じた場合の水質濃度の応答性を検討していく。

RESEARCH ON MAINTENANCE AND MANAGEMENT OF AGRICULTURAL INFRASTRUCTURE IN THE SNOWY COLD REGIONS CONTRIBUTING TO IMPROVING FOOD SUPPLY

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Director of Cold-Region Agricultural Development Research Group
NAKAMURA Kazumasa

Research Group : Cold-Region Agricultural Development Research Group (Rural Resources Conservation, Irrigation and Drainage Facilities)

Abstract : The tight balance between global supply and demand of food is expected to continue. In Japan, there is concern over a decline in food supply capability resulted from decrease in and aging of core-farmers. In Hokkaido, a major food-producing region of Japan, there is a need for the development of agricultural infrastructure and of conservation and management technologies that suit the local conditions, such as a large-scale farming enterprise and a cold, snowy climate. Each objective, and major findings of the surveys conducted in fiscal year 2019 are as follows.

Objective (1) : The development of technologies for the efficient consolidation and advanced management of large-scale fields to respond to the expansion of management scale

To establish items and criteria for soil diagnosis, which is conducted prior to a civil engineering work for a large field to prevent deterioration of the soil's physical properties, the physical properties of the topsoil (0-15 cm) were examined before and after construction works. As for soil moisture, which prevents deterioration of the physical properties of the topsoil, the values varied depending on the clay content of the soil, ranging from 2.0-2.5 pF in the topsoil with lower clay content to about 3.0-3.5 pF in the clay-rich topsoil, suggesting that the criteria for starting construction work should be set according to the weight percentage of clay content. As the next step, a more detailed study will be carried out on the weight percentage of clay content in the topsoil so that diagnostic criteria for starting construction work can be developed.

To understand variation in water supply and drainage in large converted fields and the factors that cause the variation, and to determine the field conditions that allow for underground irrigation, the effects of the groundwater level and moisture content changes on the cultivation of soy were examined in converted fields in Districts B and I. In District B, the results showed that the variation of groundwater level just before the end of water intake was smaller than that just before the beginning of water intake, and thus the variation in water supply was less significant. And it is important to raise the groundwater level to just below the target depth before draining off water.

With the development of large paddy fields and groundwater control systems underway, research on water management techniques and water balance has been conducted in direct-seeded fields. Since FY2019, a study on field water management and water balance before and after that fields are unificated and improved has been conducted in transplanted and direct-seeded dryland fields in the districts where small irrigation canals were converted from open channels to pipelines. The results showed that the total amount of water supplied in the dryland field after field preparation was 3.5 times higher than that in the unimproved field. Possible factors that caused such major difference in water supply include soil properties, differences in field infiltration due to plowing, and differences in water abstraction management. Further study is needed to analyze these factors and elucidate the impact of the introduction of pipelines.

Objective (2) : The development of technologies for the maintenance and renewal of agricultural irrigation facilities considering changes in farming and climate

In a study that was conducted on the degradation mechanism of concrete, the frost damage and wear of concrete and the wear and corrosion of steel parts were studied. The results of accelerated wear tests on mortar specimens showed that the amount of wear increases with the number of freeze-thaw cycles. Repair and reinforcement techniques that give facilities

high durability against the combined effects of freezing and wear are being developed. Recently, the development of ultra-durable cross-sectional repair and surface coating technique, which gives high durability against combined degradation, and a monitoring study to evaluate the durability of facilities to which said technique was applied were initiated. Cross-sectional repair and freeze-thaw testing was carried out with a concrete flume channel reinforced with the technique. The channel endured more than 1,5000 freeze-thaw cycles, confirming that the technique gives facilities excellent resistance to freezing and thawing.

At a large-scale irrigation canal, an appropriate decision-making method for the facility administrator to close the water intake gate during a large-scale earthquake disaster was investigated based on the expected value principle. We created a draft of a manual for formulating disaster-response planning for administrators of irrigation facilities. (*Completed in FY2018; cited from the article from FY2018)

Objective (3) : The development of irrigation and drainage technologies that are in harmony with the environment in a large-scale farming area

In FY2019, a study on the water balance and water quality was initiated in areas where entire irrigation canals had been converted to pipelines as part of a national project. Fields with pipeline systems require little water for water distribution management. Therefore, the water balance and water quality of such fields may vary greatly from those of fields with open canal systems, which have been studied so far. It is necessary to analyze the impact of a pipeline system and evaluate the environmental conservation effect of agricultural water, keeping in mind agricultural practices and water management situations in the region. In the future, studies in fields with pipeline systems will be continued to elucidate water balance structures in different water management periods.

The purpose of this research is to establish techniques for the efficient operation and management of manure irrigation facilities where livestock manure is matured by aerobic fermentation. In order to determine the conditions for efficient manure conditioning, continuous feeding tests were conducted with a focus on the odor index, using indoor experiment equipment. The results showed that the manure could be matured to the point where the odor decreased even if the ORP could not be kept positive, and that the odor index could be decreased to lower than the regulated odor value by continuous aeration of 8h/d. As for the development of techniques to control foam outflow from manure irrigation facilities, the status of facility operation and foam generation inside the regulation tank were monitored at a manure irrigation facility. The results showed that the defoamers were not operating during the time when no aeration was performed. As the liquid level rose during this time, the foam on the surface of the liquid also rose, and the foam concentrated in a narrow top opening and rose rapidly, leading to foam outflow to the ground. It was also found that the rising foam could be destroyed by running the defoamer, allowing for control of the rise of the foam.

In a large-scale dairy farming area in eastern Hokkaido, a national environmentally-friendly irrigation and drainage project has been implemented, and there is a need to quantify the impact of the project on the water quality environment in the basin. To this end, analysis on water quality has been conducted using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to propose a method for improving water quality in large-scale dairy farming areas. As for the SWAT water quality analysis, a management schedule for pasture planting, fertilization, and harvesting was established. By estimating crop growth processes, such as leaf growth and root elongation during the growing season of pasture grasses, and by reproducing actual measurements of monocrop yields, a chronological description of the processes of water and nutrient discharge on the ground and soil surface was obtained and the variation in nitrogen loading at a downstream site of a tributary river was well reproduced. Further studies will be conducted using the model to examine how water quality concentrations respond to environmental measures to improve water quality.

Key words: large-scale fields, soil physical properties, sub-irrigation, bearing capacity, direct seeding culture of paddy rice, technologies for maintenance and renewal, complex deterioration, irrigation canal, surface protection method, disaster response plan, delivery water, slurry irrigation, dairy manure, aerobic fermentation, water quality

16.1 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

16.1.1 積雪寒冷地における大区画圃場の整備技術に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（資源保全チーム）

研究担当者：横川仁伸、横濱充宏、大友秀文、中山博敬、
新津由紀、桑原淳、清水真理子

【要旨】

圃場の大区画化整備において、施工に伴う土壌物理性の悪化を抑制する技術を開発することを目的に、施工時の土壌水分状態と施工前後の土壌物理性の変化を調査した。調査は、下層が低位泥炭土である美唄地区と粘性土である美唄茶志内地区で行った。表土（0～15cm（以下括弧書きの cm 表示はすべて地表面下を示す））について、美唄地区では、物理性の悪化を抑制するためには、土壌水分張力である pF が 2.0～2.5 程度まで乾燥した状態で施工する必要があることを明らかにした。pF2.0～2.5 に対応する表土（0～15cm）の地耐力は 0.6～0.7MPa であったため、降雨後に表土（0～15cm）の地耐力が 0.6～0.7MPa 以上にまで回復したのを確認してから施工を開始する必要があると考えられる。一方、美唄茶志内地区では、表土（0～15cm）の物理性の悪化を抑制するためには、pF が 3.0～3.5 程度まで乾燥した状態で施工する必要があることが判明した。美唄茶志内地区の表土は、美唄地区に比べ粘土分の多い細粒な土壌であるため、練り返しを受け土壌構造が破壊された時に土壌物理性が悪化しやすく、所要の pF が高くなるものと考えられる。よって、診断基準（施工開始の診断基準）は粘土の重量割合別に設定する必要があると考えられる。また、下層が泥炭土である美唄地区では、下層土の切盛土直後の地耐力は、泥炭土が湿潤な区域（pF1.8 未満）で超湿地ブルドーザの走行に必要な 0.20MPa を下回る場合があった。このことから、下層土の切盛土後に湿潤な泥炭土（pF1.8 未満）が切盛土表面に出現する区域では、整地作業に使用する施工機械は超湿地ブルドーザよりさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザの使用が望ましいと考えられる。

キーワード：大区画圃場、土壌物理性、土壌水分、地耐力、土壌硬度

1. はじめに

北海道の水田地帯では、農家戸数の減少に伴い、1 戸当たりの経営面積が拡大している¹⁾。農作業の効率化、省力化のため、大型の農業機械の利点を活かせるような農業基盤の整備が必要となっており、圃場を大区画に整備する事業が進められている。整備前の各圃場の基盤標高は異なっていることが多いため、各圃場を合わせて 1 区画にするには、図-1 のように、表土をはぎ、異なる標高の下層土の上面を切土、盛土により均平にし、表土を戻すという一連の作業を行う必要がある。

ところで、北海道の水田で下層が泥炭土である割合は 19%程度であり、また排水不良の土壌に分類される灰色台地土とグライ台地土である割合は 10%程度である²⁾。下層がこうした土壌である施工現場では、下層土の上面が降雨により湿潤になることで、施工工程に制約が生じたり、施工機械による攪拌、練り返し起きて土壌の物理性が悪化したりする恐れがある。このため、天候の急変によって、はいだ表土やむき出しになった下層土の上面

が降雨にさらされることのないよう、表土はぎから表土戻しまでの作業をその日のうちに終わらせる大きさに区域を分割して施工する対策や、超湿地ブルドーザを使用し接地圧を小さくして土壌の練り返しを抑制する対策が行われている。

転作田では、土壌の水はけが良いことが作物の生育に必要な条件であり、土壌の排水性を良好に保持しながら施工する技術は、今後さらに重要になるものと考えられる。一方、現場では降雨後の湿潤な状態を脱却したと判断した後に施工を開始するが、施工を始めてみると土壌が過度に湿潤な状態であることもあり苦慮している。このため、施工開始を判断する定量的な基準が必要と考えられるが、こうした報告事例（北川ら³⁾）は少ない。

本研究は、施工に伴う土壌物理性の悪化を抑制するために必要な施工前の土壌診断の項目と基準値を明らかにすることを目的とする。本研究では、下層が泥炭土である 7 筆の大区画圃場（美唄地区）と下層が粘性土である 3 筆の大区画圃場（美唄茶志内地区）において、表土と

下層土の施工前後の土壌物理性の変化について調査を行った。

2. 方法

2.1 調査地の概要

調査は、表-1に示す10筆の大区画水田圃場で行った。

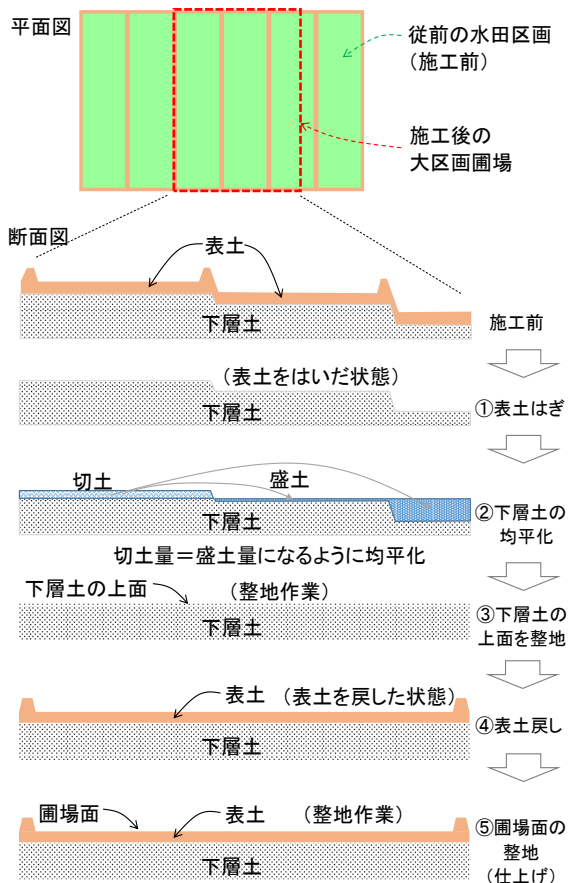


図-1 水田の大区画化施工のイメージ

表-1 調査圃場の概要

圃場名	土性または土壌分類		施工年月
	表土	基盤	
美唄地区			
A	シルト質埴土	泥炭土	2016年6月
B	軽埴土	泥炭土	2017年6月
C	軽埴土	泥炭土	2017年7月
D	軽埴土	泥炭土	2018年7月
E	軽埴土	泥炭土	2018年8月
F	軽埴土	泥炭土	2019年6月
G	軽埴土	泥炭土	2019年7月
美唄茶志内地区			
H	重埴土	重埴土	2016年7月
I	軽埴土	軽埴土	2017年7月
J	軽埴土	軽埴土	2019年8月

各圃場ともに施工前は数筆の小区画であったものが、施工により1.2ha程度の1筆の大区画になっている。

いずれの圃場も、表土は約30cm厚さの鈎質土である。土壌断面調査を行った結果、施工前の表土(0~15cm)は作土層であり、表土(15~30cm)はやや締め固まった耕盤層であった。下層は、A~Gの7圃場ではヨシを主体とした低位泥炭土であり、H~J圃場では粘性土であった。美唄市では、農耕地の土壌が泥炭土である圃場の内、低位泥炭土に分類される圃場は47%を占め、面積にすると3,000ha程度になる⁴⁾。A~G圃場の下層土もこの地域に広くみられる泥炭土であった。ただし、DおよびE圃場では、表土と泥炭土が混じった土層(厚さ10~15cm)が表土直下に確認された。施工は、1)表土はぎ、2)切盛土による下層土上面の均平化、3)表土戻しの順に行われた。ただし、I圃場では下層の均平は切土だけで行われ、切土により発生した土砂はすべて圃場外に搬出された。施工は、6月~8月の夏期に行われた。

2.2 調査内容

調査内容は、施工段階ごとの土壌調査と施工時の土壌水分調査であり、各圃場の6~8地点で行った。調査期間は、2016年からの4ヶ年である。

施工段階ごとの土壌調査は土壌分析、土壌硬度および地耐力の測定であり、施工前(表土はぎ前)、施工後(表土戻し後)および施工1年後の計3回行った。なおF、GおよびJ圃場の施工1年後調査は、2020年秋に行う予定である。土壌分析(表-2)に供する試料について、圃場面下75cmまでをおよそ15cm刻みで5層に分けて、各層から攪乱試料を1試料採取し、非破壊試料を100cc採土管で3試料採取した。土壌硬度の測定は、各層で山中式硬度計を用いて行った。地耐力の測定は、土壌試料の採取地点近傍で深さ1mまでをコーンペネトロメータにより3反復で行った。

施工時の土壌水分調査は以下の通り行った。施工前日に圃場面下45cmまでを15cm刻みで3層に分けて表土および下層土を採取した。採取した土壌試料の含水比を分析し、施工前の調査時に作成した水分特性曲線から施工

表-2 土壌分析項目

分析項目	分析手法
含水比	通風乾燥法
容積重	通風乾燥法
三相比	実容積測定装置法
飽和透水係数	変水位法
pH試験	砂柱法および遠心法
土の粒度試験	沈降法

時の pF を算出した。なお、施工前日に試料採取ができなかった圃場では、施工後の調査を表土戻し直後に行い、採取した表土および下層土の含水比を測定してから、得られた含水比と施工前の調査時に作成した水分特性曲線から施工時の pF を算出した。

3. 結果と考察

3. 1 美唄地区

3. 1. 1 施工前後の表土の物理性

A～E 圃場の施工前における表土 (0～30cm) の粒度分布を表-3 に示す。表土の土性は、表-1 に示したように A 圃場のみシルト質粘土であり、他の圃場では軽粘土に該当した。これは、A 圃場ではシルトの重量割合が 45% を超えたためであるが、表-3 に示すように他の圃場と比較して粒度分布に大きな違いはなく、調査圃場の表土 (0～30cm) はすべて似たような土粒子径の分布状態である。このため、後述する表土の物理性については、A～E 圃場の各調査地点の結果を同一の図に示し、考察した。なお、作土層に対しては土壌診断基準値⁵⁾があるため、この作土層に対応する表土 (0～15cm) については、診断基準値を用いて施工前後の土壌物理性の状態を判断した。

図-2 に表土 (0～15cm) の施工前後の固相率と施工時の pF との関係を示す。図-3 に表土 (0～15cm) の施工前後の飽和透水係数と施工時の pF との関係を示す。両図ともに施工前後で土壌物理性の値に変化がなければ、 $y=x$ 線の上にプロットされる。なお、pF の値が小さいほど施工時の調査地点の表土 (0～15cm) が湿潤状態にあることを表す。診断基準値は、固相率が 30～40% であり、飽和透水係数が $1.0E-04 \sim 1.0E-02 \text{ cm/s}$ である⁵⁾。

施工前と施工後を比較すると、全調査地点の内、41% の地点で固相率が増大し、57% の地点で飽和透水係数が低下した。その結果、施工後は全調査地点の内、固相率で 57% が、また飽和透水係数で 41% が基準値を満たさなかった。施工時の表土 (0～15cm) の pF が重力水に相当する 1.8 を下回る地点に限ると、施工前には固相率で 56% が、

表-3 施工前の表土 (0～30cm) の粒度分布

圃場名	粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)
A	31.7	45.7	22.6
B	33.7	44.4	21.8
C	32.6	42.9	24.2
D	33.4	42.9	23.6
E	34.1	43.4	22.3
F	34.2	43.2	22.6
G	34.1	44.7	21.2

また飽和透水係数で 38% が基準値を満たしていなかったのに対し、施工後には基準値を満たさなかった地点が固相率で 100% に、また飽和透水係数で 88% に増加した。このように、表土 (0～15cm) が pF1.8 未満の湿潤な状態の時に施工すると施工後の土壌物理性が悪化する傾向が顕著であった。一方、施工時の表土 (0～15cm) の pF が 1.8 以上の地点では、施工前に基準値を満たしていなかった地点は固相率で 63% であり、飽和透水係数で 42% であったが、施工後は基準値を満たさなかった地点は固相率で 39% に、また飽和透水係数で 21% に減少した。

3. 1. 2 施工時の土壌 pF と施工後の表土の物理性

図-4、5 に調査地点における表土 (0～15cm) の施工時の pF と施工後の固相率および飽和透水係数との関係を示す。図の網掛け部分は、土壌の診断基準値⁵⁾である。施工後の表土 (0～15cm) は、固相率が基準値を上回っている地点、飽和透水係数が基準値を下回っている地点が多数みられた。特に、施工時の pF が小さい地点ほど、その傾向は顕著であった。これは、施工時の表土 (0～15cm) が過度な湿潤状態であったことから、施工機械での練返しの影響を受け、物理性が悪化したためと考えられた。

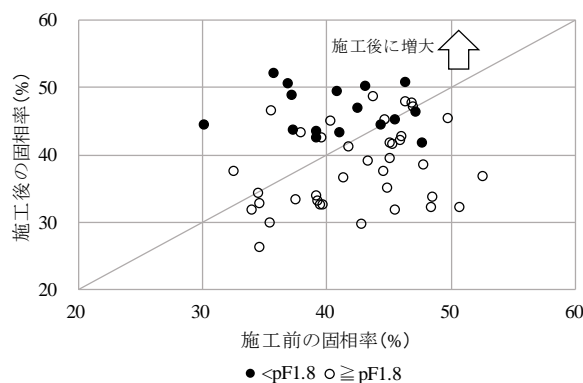


図-2 施工前後の表土 (0～15cm) の固相率と施工時の pF

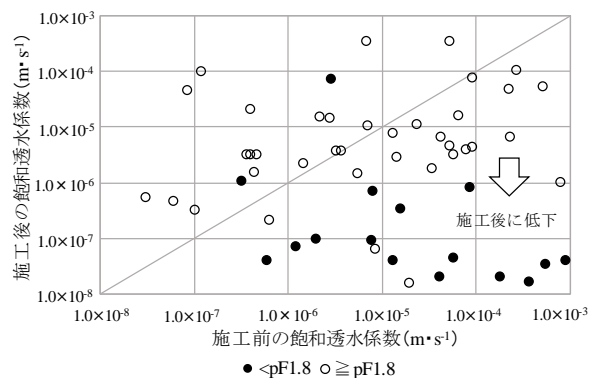


図-3 施工前後の表土 (0～15cm) の飽和透水係数と施工時の pF

このように、施工後の表土 (0~15cm) の物理性を確実に基準値内に収めることができる施工時の pF 条件を提示することは難しい。このため本報告では、施工後の表土 (0~15cm) の物理性を施工前と同程度に維持できる施工時の pF 条件を検証し、施工に伴う土壌物理性の悪化を抑制する技術を提案する。ここでは、施工時の表土 (0~15cm) の pF と固相率の変化率との関係から施工時の pF 条件を考察した。固相率の変化率は、調査地点での施工後の固相率から施工前の固相率を引いた値を施工前の固相率で除し、百分率で示した値である。なお、飽和透水係数は指数表記であり、変化率で評価するのは難しいため、固相率の変化率のみを示す。

図-6 に表土 (0~15cm) の施工時の pF と施工に伴う固相率の変化率を示す。施工時の表土 (0~15cm) の pF が 2.0 以下の地点の多くは、近似線は正の値を取り、施工に伴い固相率が增大することを示している。施工時の pF が 2.0~2.5 程度まで大きくなると、近似線が 0% 程度となった。このことから、表土 (0~15cm) の物理性の悪化を抑制するためには、表土 (0~15cm) が pF2.0~2.5 程度まで乾燥した状態の時に施工する必要があると考えられる。

図-7 には施工に伴う表土 (15~30cm) の固相率の変

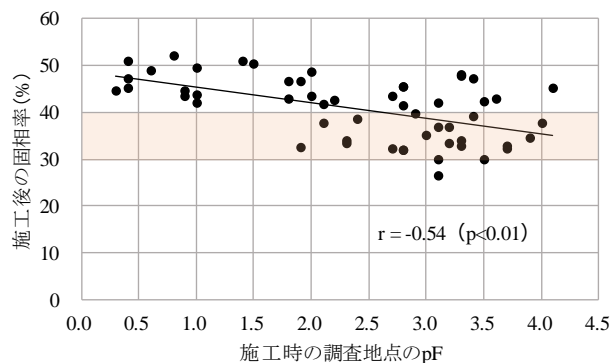


図-4 表土 (0~15cm) の施工後の固相率と施工時の pF

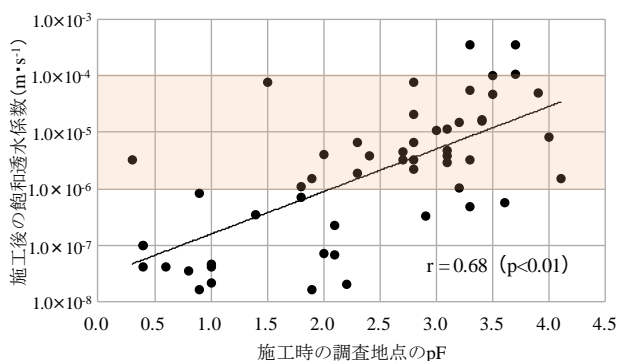


図-5 表土 (0~15cm) の施工後の飽和透水係数と施工時の pF

化率を示す。表土 (15~30cm) の固相率は、変化率 25% 以内に収まり、変化率は施工時の表土 (15~30cm) の pF が 2.0 以下の地点でも増大しなかった。図-6 と比較して固相率に増大傾向がみられなかったのは、施工前の表土 (15~30cm) が、前述した通り耕盤層といった締め固まった不透水性の土層が形成されており、固相率が高い状態にあった (図-8) ためと考えられる。なお、耕盤層は、表土はぎ、表土戻しの過程で破壊され、施工後には存在しない。以上のことから、本調査圃場では、表土 (0~15cm) が pF2.0~2.5 程度まで乾燥した状態であれば、施工に伴う土壌物理性の悪化を抑制できると考えられる。

3. 1. 3 施工開始の簡易な判定手法

施工現場では、表土の pF を容易に測定することはでき

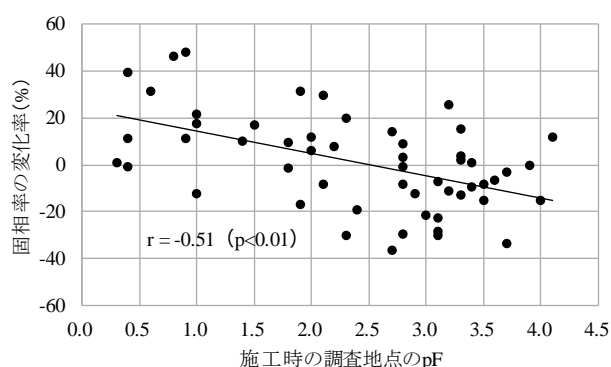


図-6 表土 (0~15cm) の固相率の変化率と施工時の pF

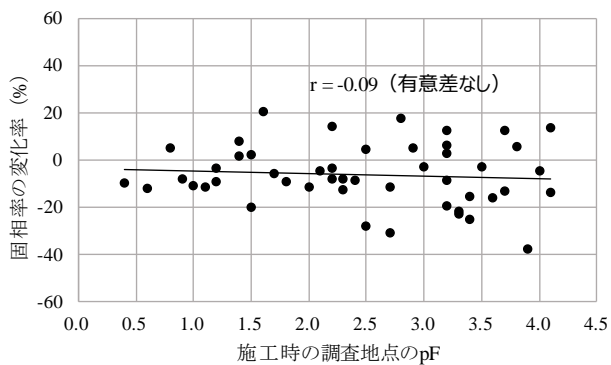


図-7 表土 (15~30cm) の固相率の変化率と施工時の pF

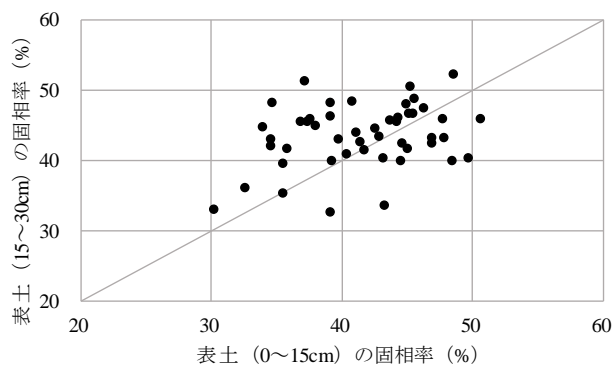


図-8 施工前の表土 (0~15cm) と表土 (15~30cm) の固相率

ない。このため、この pF を現場で比較的容易に測定できる地耐力や土壌硬度の値に置き換えることで、降雨後の施工開始の簡易な判定手法を提案する。

施工前の表土 (0~15cm) の地耐力と pF との関係から、pF2.0~2.5 に対応する表土の地耐力は 0.6~0.7MPa であった (図-9)。同様に施工前の表土 (0~15cm) の土壌硬度と pF との関係から、pF2.0~2.5 に対応する表土の土壌硬度は 16~17mm であった (図-10)。このため、調査圃場の表土の場合、降雨後に表土の地耐力が 0.6~0.7MPa 以上か、土壌硬度の値が 16~17mm 以上に回復してから施工を行えば、表土 (0~15cm) の物理性の悪化は抑制されると考えられる。表土の粒度分布が同様の圃場であれば、地耐力や土壌硬度の測定値は、施工開始の判断基準として用いることができると考えられる。

3. 1. 4 施工1年後の表土の物理性

区画整備後の営農作業が、表土 (0~15cm) の物理性に影響を与えたかを検証するために、施工後調査と施工1年後調査の表土の物理性を比較した。ただし、美唄地区の調査圃場では、表土戻しの施工後に圃場外から運び込まれた粘性土を表土の上に5cmの厚さで敷き均す客土が施工された。敷き均した客土の土性は重植土であった。5cm厚さの客土は、施工1年後には耕起などの営農作業によって表土 (0~30cm) にすき込まれていた。本報告の

施工後調査は、客土前に行っているため客土の影響はないが、施工1年後調査には影響はある。このため、施工後調査と施工1年後調査について、同一地点での表土の物理性の値を単純に比較することはできない。ここでは、施工1年後の表土 (0~15cm) の固相率および飽和透水係数について、全調査地点の内、土壌診断基準値⁵⁾内に収まっている地点数の割合で営農作業による表土 (0~15cm) の物理性への影響を評価した。

図-11、12には施工前と施工1年後の表土 (0~15cm) の固相率および飽和透水係数の関係を示す。全調査地点の内、施工1年後の表土 (0~15cm) が土壌診断基準値内に収まった地点は、固相率で26%であり、飽和透水係数で36%であった。本調査圃場では、施工1年後の表土 (0~15cm) の固相率および飽和透水係数が、土壌診断基準値内に収まっている地点は少なかった。施工前では、土壌診断基準値内に収まっていた地点は、固相率で39%であり、飽和透水係数で59%であった。本調査圃場の表土 (0~15cm) では、土壌診断基準値内に収まっていた地点数の割合は、1年間の営農作業によって施工前の状態まで戻っていなかった。このため、重植土が客土として施工された大区画圃場では、施工に伴う表土の物理性の悪化を抑制することが重要であると考えられる。

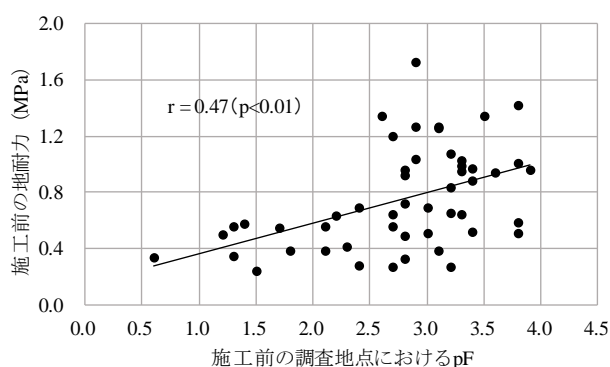


図-9 施工前の表土 (0~15cm) の地耐力と pF

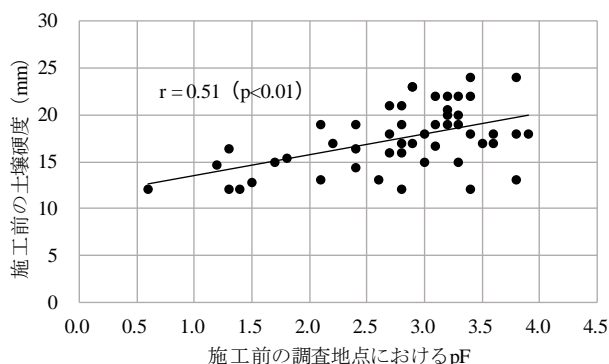


図-10 施工前の表土 (0~15cm) の土壌硬度と pF

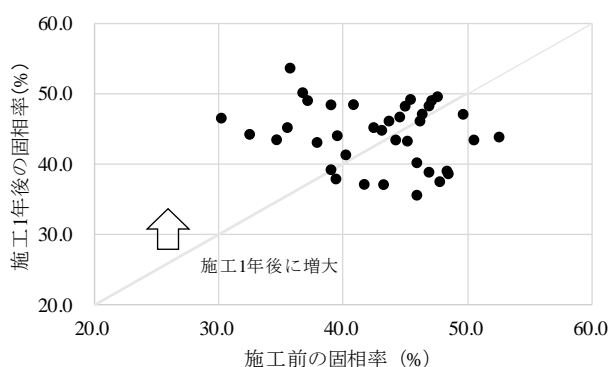


図-11 施工前と施工1年後の表土 (0~15cm) の固相率

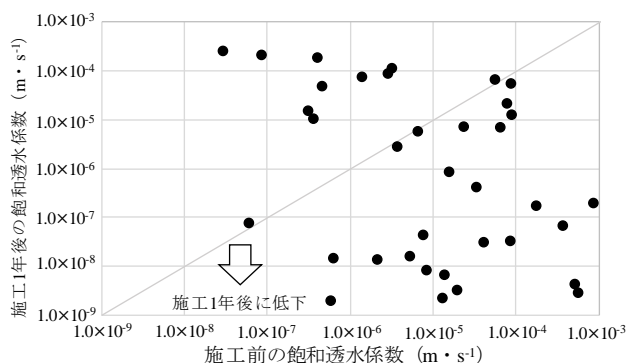


図-12 施工前と施工1年後の表土 (0~15cm) の飽和透水係数

3. 1. 5 下層土（低位泥炭土）の切盛土直後の地耐力と施工機械の選定

大区画化の施工が下層土の物理性に与える影響を検証するために、泥炭土の切盛土直後の地耐力とその地点の水分状態を調査した。得られた地耐力の結果から、切盛土直後に泥炭土表層の均平化を目的に行う整地作業で使用する施工機械の選定について検討した。

表-4 に低位泥炭土の施工前（表土はぎ前）および切盛土直後（表土戻し前）の地耐力を切盛土の区域別に示す。切盛土直後の泥炭土の pF も示した。なお、A 圃場は地耐力のデータ数が不足していたため除外した。また、調査地点の切盛土厚さを平均値で示した。切盛土厚さは、調査地点 6 箇所（箇所の平均値であり、地耐力および pF は切土区域、盛土区域の各 3 箇所の平均値である。

建設機械の走行に必要な地耐力は、超湿地ブルドーザで 0.20MPa 以上、湿地ブルドーザで 0.30MPa 以上とされている⁶⁾。施工前（表土はぎ前）における泥炭土の地耐力は、D および E 圃場以外では、全て 0.40~0.60MPa の範囲に入った。D および E 圃場の施工前の泥炭土の地耐力は、他の圃場と比較して高い値を示した。これは、両圃場の表土直下には表土と泥炭土が混じった土層（厚さ 10~15cm）があるためと考えられる。

施工前と比較すると切盛土直後の泥炭土表層の地耐力は、切土区域、盛土区域ともに低下していた。B 圃場の

切盛土直後の泥炭土表層 15cm の地耐力は、切土区域で 0.31~0.40MPa であり、盛土区域で 0.16~0.36MPa であった。特に盛土区域の表層では、泥炭土の地耐力が超湿地ブルドーザの走行に必要な 0.20MPa 以下にまで低下していた。C 圃場の切盛土直後の泥炭土表層 15cm の地耐力は 0.24~0.29MPa であり、0.20MPa 以下までは低下していなかった。F および G 圃場の切盛土直後の泥炭土表層 5cm の地耐力は、盛土区域と比較して切土区域で低く、切土区域では 0.20MPa 以下まで低下していた。

これらの圃場の泥炭土の地耐力は、泥炭土の水分状態と関係していると考えられる。B 圃場では、切土で発生した泥炭土を湿地ブルドーザによって押し、超湿地ブルドーザで整地した。B 圃場の施工日の 2 日前には 5mm の日雨量があり、泥炭土にはある程度の水分が含まれていたと推察される。このため、切盛土直後の盛土区域の泥炭土の pF は 1.5 と湿潤な状態であり、地耐力が 0.20MPa 以下にまで低下した。C 圃場の盛土区域の調査地点では、1 ヶ月程度仮置きした泥炭土をキャリアダンプで運搬し、超湿地ブルドーザで整地した。1 ヶ月程度仮置きした後であったため、C 圃場の盛土区域における切盛土直後の泥炭土表層の pF は 3.3 であり、乾燥した状態であった。C 圃場の盛土区域の盛土部分で地耐力の低下が抑制されたのは、泥炭土の水分量が小さかったためと考えられる。

表-4 低位泥炭土の施工前および切盛土直後の地耐力

圃場名	測定深さ	施工前		切盛土直後				調査地点の 平均切盛土厚さ
		地耐力 (MPa)		地耐力 (MPa)		pF		
		切土区域	盛土区域	切土区域	盛土区域	切土区域	盛土区域	
B	5cm	0.40	0.50	0.31	0.16	2.2	1.5	11cm
	15cm	0.50	0.45	0.40	0.36	2.1	2.4	
C	5cm	0.41	0.36	0.24	0.24	2.1	3.3	5cm
	15cm	0.44	0.47	0.29	0.24	0.5	3.0	
D	5cm	0.55	0.70	0.24	0.42	2.4	1.7	18cm
	15cm	0.48	0.62	0.35	0.47	1.9	2.2	
E	5cm	0.59	0.62	0.20	0.37	0.9	2.9	22cm
	15cm	0.60	0.65	0.22	0.46	1.5	2.5	
	25cm	0.51	0.52	0.40	0.41	1.7	3.0	
F	5cm	0.44	0.43	0.17	0.25	1.2	2.3	23cm
	15cm	0.40	0.47	0.22	0.31	0.5	2.7	
	25cm	0.41	0.36	0.32	0.32	0.7	2.0	
G	5cm	0.42	0.49	0.18	0.23	0.6	2.1	20cm
	15cm	0.37	0.42	0.27	0.31	1.4	2.7	
	25cm	0.35	0.37	0.29	0.34	0.5	1.7	

また、切盛土厚さが20cm程度ある圃場の切盛土直後では、切土区域の表層で地耐力が低下した。FおよびG圃場では、20~23cmの泥炭土を切土し、湿地ブルドーザによって押し、超湿地ブルドーザで整地した。切盛土直後の盛土区域では、泥炭土表層のpFは2.1~2.3であり、地耐力は0.23~0.25MPaであった。一方、切土区域の泥炭土表層のpFは0.6~1.2であり、地耐力は0.17~0.18MPaであった。地耐力が0.20MPa以下まで低下していた要因として、切土区域では、施工前には深い場所に堆積していた湿潤な泥炭土が表層に露出し、その上を湿地ブルドーザが走行することで、泥炭土が練り返されたためと考えられる。DおよびE圃場では、18~22cmの泥炭土を切土し、湿地ブルドーザによって盛土区域に押し、超湿地ブルドーザで整地した。切盛土直後の盛土区域には、切土区域から押しされた鉍質土混じりの泥炭土が敷き均されたため、地耐力は0.37~0.47MPaと他の圃場の盛土区域より高い値であった。切土区域では、新鮮な泥炭土が表層に露出しており、地耐力は盛土区域と比較して小さかった。

低位泥炭土の切盛土直後の地耐力は、泥炭土が湿潤な区域において超湿地ブルドーザの走行に必要な0.20MPaを下回る事例があった。調査圃場では、湿潤な泥炭土を盛土した盛土区域と新鮮な泥炭土の切盛土厚さが20cm以上ある圃場の切土区域でそうした事例がみられた。この時の泥炭土表層の土壤水分は、重力水に相当するpF1.8未満であった。切盛土後には、泥炭土の地表面を均平化する整地作業が行われるが、調査圃場での整地作業には、超湿地ブルドーザが使用されていた。施工計画を作成する段階で圃場の切盛土厚さを確認し、平常時の切土深までの泥炭土の含水比や新鮮な泥炭土の出現深さなどを固定ピストン式シンウォールサンプラーによる試料採取などで把握することで、整地作業に必要な施工機械を事前に選定できると推察される。

調査圃場の低位泥炭土は、この地域に広く分布しており、この地域では今後も圃場の大区画化の施工が計画されている。それゆえ、このような低位泥炭土に対して用いる施工機械の選定は重要である。下層土の切盛土後に湿潤な泥炭土(pF1.8未満)が切盛土表面に出現する区域では、整地作業に使用する施工機械は超湿地ブルドーザよりさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザの使用が望ましい。

3. 1. 6 小括

下層が泥炭土である美唄地区の7筆の大区画水田圃場において、施工段階ごとの土壌物理性の状態を調査した。

結果は以下の通りである。

- 1) 本調査地区では、表土(0~15cm)の物理性の悪化を抑制するためには、表土(0~15cm)がpF2.0~2.5程度まで乾燥した状態で施工する必要があると考えられる。
- 2) pF2.0~2.5に対応する表土の地耐力は0.6~0.7MPaであり、土壌硬度は16~17mmであった。このため、降雨後に表土の地耐力が0.6~0.7MPa以上まで回復したのを確認するか、または土壌硬度の値が16~17mm以上に回復したのを確認してから施工を行えば、表土(0~15cm)の物理性の悪化は抑制されると考えられる。
- 3) 本調査圃場の表土(0~15cm)では、施工1年後に土壌診断基準値内に収まった地点は、固相率が26%であり、飽和透水係数が36%であった。表土(0~15cm)の物理性が基準値内に収まっている地点数の割合は、1年間の営農作業によって施工前の状態まで戻っていなかった。このため、重植土が客土として施工された大区画圃場では、施工に伴う表土の物理性の悪化を抑制することが重要であると考えられる。
- 4) 下層土の切盛土後に湿潤な泥炭土(pF1.8未満)が切盛土表面に出現する区域では、超湿地ブルドーザの走行に必要な0.20MPaを下回る事例があった。このような区域の整地作業には、超湿地ブルドーザよりさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザの使用が望ましい。

3. 2 美唄茶志内地区

3. 2. 1 施工前の粒度分布

H~J圃場の施工前における表土(0~30cm)の粒度分布を表-5に示す。土性は、表-1に示すようにH圃場は重植土であり、IおよびJ圃場は軽植土に該当する。IおよびJ圃場の表土は美唄地区のB~E圃場の表土(表-1)と同じ軽植土であるが、表土中の粘土の重量割合について、I圃場は美唄地区の圃場の1.2倍程度、J圃場は美唄地区の圃場の1.3倍程度あり、美唄茶志内地区の圃場の方が粘土質な土壌である。

3. 2. 2 施工時の土壌水分状態

H圃場の施工が行われたのは、日降雨量で39mmのまとまった降雨があつてから5日後であった。また、J圃場の施工が行われたのは、日降雨量で6mmの降雨があつてから6日後であった。このため、土壌は乾燥しており、施工時の表土(0~30cm)の水分の平均値は、H圃場でpF3.1、J圃場でpF3.6であった。

一方、I 圃場では日降雨量で 41.5、53.5mm と 2 日間でまとまった降雨のあった 2 日後に施工が行われた。このため、表土 (0~30cm) は湿潤状態にあり、施工時の表土 (0~30cm) の水分の平均値は pF1.5 であった。このように、表土 (0~30cm) が H および J 圃場では乾燥した状態で、I 圃場では湿潤な状態で施工された。

3. 2. 3 土壌水分と地耐力の関係

図-13に施工前のH、IおよびJ圃場の表土 (0~30cm) の pF と地耐力の関係を示す。表土では、pF と地耐力の間には有意な相関関係が認められ、土壌が乾燥するほど地耐力が増大した。表土が pF2.0 以下の湿潤状態の場合、地耐力が湿地ブルドーザの走行可能地耐力 (0.3 MPa 以上)⁶⁾ を下回ることが多かった。

H、I および J 圃場における大区画化施工では、掘削、運土作業には湿地ブルドーザが使用されている。一方、超湿地ブルドーザの利用台数はごく少数で、切土後および盛土後の下層土および表土戻し後の圃場表面の仕上げの整地作業に使用されているのみであった。このような施工機械の利用実態においては、表土が pF2.0 以下に湿潤化するようなまとまった降雨があった場合、湿地ブルドーザによる大区画化施工を行うには、表土が pF2.0 以上に乾燥するのを待つ必要があると考えられた。

3. 2. 4 施工前後の土壌物理性

図-14に表土 (H圃場では0~30cm、IおよびJ圃場では0~15cm) の施工前後の固相率と施工時の pF との関係を示す。この図では施工前後で固相率に変化がなければ変化率の値は y=x 線上にプロットされる。表土の固相率が営農あるいは作物生育に適切であると判断される診断基準値は 30~40% である⁵⁾。

固相率は、土壌調査地点 19 地点のうち、施工前において膨軟で基準値内に収まっていたのは 2 地点のみで、それ以外は堅密で基準値から外れていた。

表-6に施工前後における表土の固相率の変化率と施工時の pF との関係を示す。ここで、変化率は以下の式により

表-5 施工前の表土 (0~30cm) の粒度分布

圃場名	土層(cm)	粘土(%)	シルト(%)	砂(%)
H	0~30	47.4	40.6	12.0
I	0~30	40.8	38.0	21.2
J	0~30	43.0	37.4	19.6

表-6 表土の固相率の変化率と施工時の pF

変化率(%)=C	pF						合計
	≤1.5	1.5~≤2.0	2.0~≤2.5	2.5~≤3.0	3.0~≤3.5	3.5>	
20≤C	2	-	1	0	0	0	3
10≤C<20	0	-	0	1	2	2	5
0≤C<10	0	-	0	2	1	1	4
C<0	0	-	1	0	3	3	7

算出した。

$$\text{変化率(\%)} = (\text{施工後の固相率} - \text{施工前の固相率}) / \text{施工前の固相率} \times 100$$

変化率が大きな正の値を示すほど、施工前に比べ、施工により土壌が堅密化したことを表す。調査地点 19 地点のうち、変化率が 10% を下回った地点が 11 地点と全体の 58% を占めており、調査圃場における施工は表土の顕著な堅密化をもたらすことなく実施されていた。一方で、pF1.5 以下の湿潤状態で施工された 2 地点の表土の固相率の変化率はどちらも 20% 以上となっていた。このことから、湿潤状態で施工された場合、表土が堅密化しやすいと予測された。

そこで、施工時の pF と固相率の変化率との関係について検討した (図-15)。固相率の変化率と施工時の pF との間には有意な負の相関 (R=-0.56) が認められ、表土は、施工時に湿潤であるほど、施工により堅密化しやすい傾向を示した。施工時の表土 (0~15cm) の pF が 3.0~3.5 程度まで大きくなると、固相率の変化率が 0% 程度となった。このことから、表土 (0~15cm) の物理性の悪化を抑制するためには、表土 (0~15cm) が pF3.0~3.5 程度まで乾燥した状態の時に施工する必要があると考えられる。これは前述した美唄地区の診断基準値とは異なる結果である (図-16)。美唄茶志内地区の表土は、美唄地区に比べ粘土分の多い細粒な土壌であるため、練り返しを受け土壌構造が破壊された時に土壌物理性が悪化しやすく、所要の pF が高くなるものと考えられる。よって、診断基準 (施工開始の診断基準) は粘土の重量割合別に設定する必要があると考えられる。

図-17に表土 (H圃場では0~30cm、IおよびJ圃場では0~15cm) の施工前後の飽和透水係数と施工時の pF との関係を示す。この図においても、施工前後で飽和透水係数に変化がなければ変化率の値は y=x 線上にプロットされる。表土の飽和透水係数が営農あるいは作物生育に適切であると判断される診断基準値は 1.0E-04~1.0E-02 cm/s である⁵⁾。表-7 に表土における施工前後での飽和透水係数が基準値内であったかどうかの区分と施工時の pF との関係を整理した。飽和透水係数が施工前には基準値内であったが施工により基準値より小さくなった調査地点は全 19 地点のうち 6 地点に留まる一方で、施工後においても基準値内であった調査地点は 11 カ所に上っていた。このように、調査圃場においては施工による透水性の悪化は顕

表-7 施工前後の表土の飽和透水係数の区分

基準値 (施工前/後)	pF						合計
	≤1.5	1.5~≤2.0	2.0~≤2.5	2.5~≤3.0	3.0~≤3.5	3.5>	
内/内	1	-	1	0	1	4	7
内/外	0	-	0	1	3	2	6
外/内	1	-	0	1	2	0	4
外/外	0	-	1	1	0	0	2

著には現れていなかった。

図-18に表土における施工後の飽和透水係数と施工時のpFとの関係を示す。施工後の飽和透水係数と施工時のpFには全く相関関係がなかった。このように、表土における施工時の土壌水分状態が施工後の透水性におよぼす影響は判然としなかった。今後、更に調査を進め施工時の表土の水分と施工による土壌物理性の変化の関係の解析を進める。

3. 2. 5 小括

粘土質の低地土地帯で施工前後の土壌物理性の変化を調査した。その結果は以下の通りである。

- 1) 調査圃場の施工は、表土の顕著な堅密化や透水性の低下をもたらすことなく実施されていた。
- 2) 表土の水分状態がpF2.0以下の場合に、地耐力が湿地ブルドーザの走行可能地耐力を下回ることが多かった。
- 3) 表土がpF2.0以下にまで湿潤化するようなまとまった降雨があった場合、湿地ブルドーザによる大区画化施工を行うには、表土がpF2.0以上になるまで乾燥するのを待つ必要があると考えられた。
- 4) 表土の固相率の変化率と施工時のpFとの間には有意な負の相関($R=-0.56$)が認められ、施工時の表土が湿

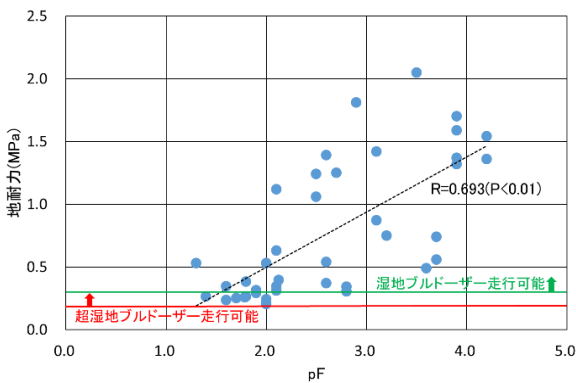


図-13 施工前の表土のpFと地耐力

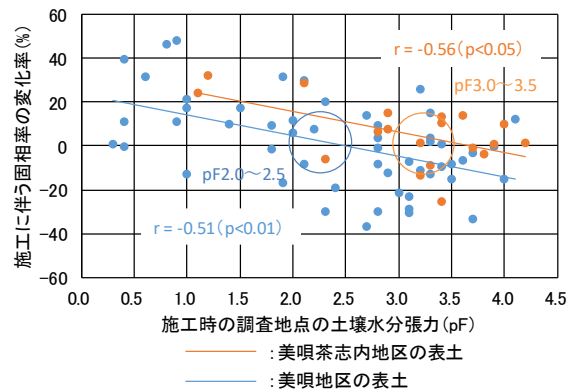


図-16 表土の施工に伴う固相率の変化率と施工時のpF

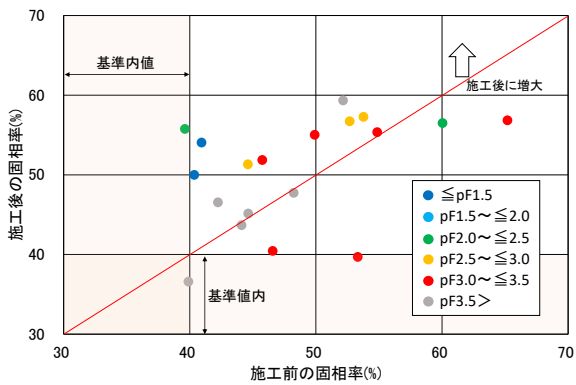


図-14 表土の施工前後の固相率と施工時のpF

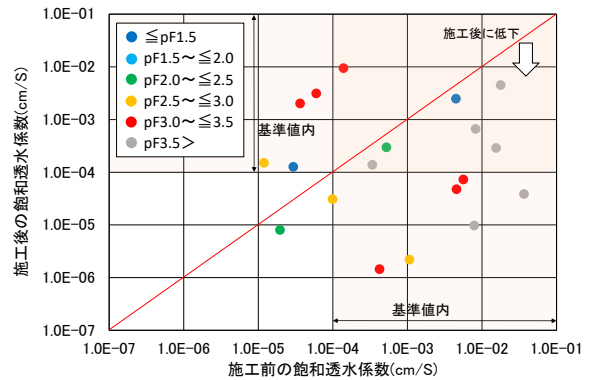


図-17 表土の施工前後の飽和透水係数と施工時のpF

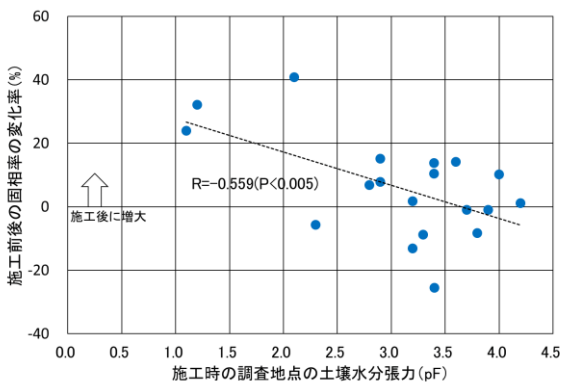


図-15 表土の固相率の変化率と施工時のpF

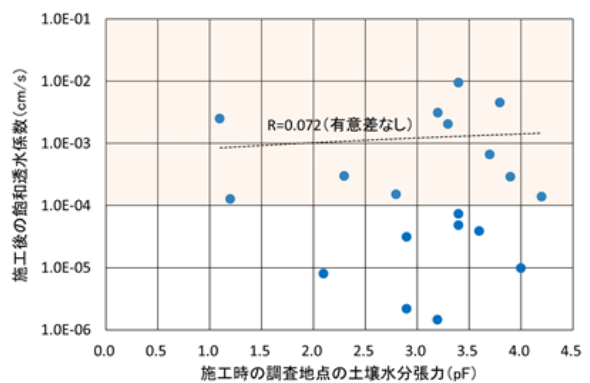


図-18 表土の施工後の飽和透水係数と施工時のpF

潤であるほど、施工により堅密化する傾向を示した。

- 5) 3筆の調査結果では、施工時の表土（0～15cm）のpFが3.0～3.5程度まで大きくなると、固相率の変化率が0%程度となり、美唄地区の診断基準値とは異なる結果となった。美唄地区と美唄茶志内地区では、表土の粘土重量割合に違いがあるため、診断基準（施工開始の判断基準）は粘土の重量割合別に設定する必要があると考えられる。
- 6) 表土の飽和透水係数と施工時の pF との間には有意な相関は認められず、施工による飽和透水係数の低下と施工時の水分状態との関係は判然としなかった。

4. まとめ

圃場の大区画整備において、施工に伴う土壌物理性の悪化を抑制する技術を開発することを目的に、施工時の土壌水分状態と施工前後の土壌物理性の変化を調査した。

下層が泥炭土である美唄地区の7筆の大区画圃場での調査結果は以下の通りである。

- 1) 本調査地区では、表土（0～15cm）の物理性の悪化を抑制するためには、表土（0～15cm）が pF2.0～2.5程度以上まで乾燥した状態で施工する必要があると考えられる。
- 2) pF2.0～2.5に対応する表土の地耐力は0.6～0.7MPaであり、土壌硬度は16～17mmであった。このため、降雨後に表土の地耐力が0.6～0.7MPa以上まで回復したのを確認するか、または土壌硬度の値が16～17mm以上に回復したのを確認してから施工を行えば、表土（0～15cm）の物理性の悪化は抑制されると考えられる。
- 3) 本調査圃場の表土（0～15cm）では、施工1年後に土壌診断基準値内に収まった地点は、固相率で26%であり、飽和透水係数で36%であった。表土（0～15cm）の物理性が基準値内に収まっている地点数の割合は、1年間の営農作業によって施工前の状態まで戻っていなかった。このため、重埴土が客土として施工された大区画圃場では、施工に伴う表土の物理性の悪化を抑制することが重要であると考えられる。
- 4) 下層土の切盛土後に湿潤な泥炭土（pF1.8未満）が切盛土表面に出現する区域では、超湿地ブルドーザ

の走行に必要な0.20MPaを下回る事例があった。このような区域の整地作業には、超湿地ブルドーザよりさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザの使用が望ましい。

下層が粘性土である美唄茶志内地区の3筆の大区画圃場での調査結果は以下の通りである。

- 1) 調査圃場の施工は、表土の顕著な堅密化や透水性の低下をもたらすことなく実施されていた。
- 2) 表土の水分状態がpF2.0以下の時に、地耐力が湿地ブルドーザの走行可能地耐力を下回ることが多かった。
- 3) 表土がpF2.0以下にまで湿潤化するようなまとまった降雨があった場合、湿地ブルドーザによる大区画化施工を行うには、表土がpF2.0以上になるまで乾燥するのを待つ必要があると考えられた。
- 4) 表土の固相率の変化率と施工時のpFの間には有意な負の相関($R=-0.56$)が認められ、施工時の表土が湿潤であるほど、施工により堅密化する傾向を示した。
- 5) 施工時の表土（0～15cm）のpFが3.0～3.5程度まで大きくなると、固相率の変化率が0%程度となり、美唄地区の基準値とは異なる結果となった。美唄地区と美唄茶志内地区では、表土の粘土重量割合に違いがあるため、診断基準（施工開始の判断基準）は粘土の重量割合別に設定する必要があると考えられる。
- 6) 表土の飽和透水係数と施工時の pF との間には有意な相関は認められず、施工による飽和透水係数の低下と施工時の水分状態との関係は判然としなかった。

参考文献

- 1) 北海道農政部：北海道農業・農村の概要、2017。
- 2) 北海道農政部、道総研農業研究本部、ホクレン農業協同組合連合会、社団法人北海道米麦改良協会：北海道の米づくり、pp.52-61、2011。
- 3) 北川巖、塚本康貴、竹内晴信：基盤整備圃場の適切な生産性を確保する土壌物理性管理指標、農業農村工学会誌、vol.83（5）、pp.363-366、2015。
- 4) 北海道開発局農業水産部農業計画課：石狩川水系の土壌図農牧地および農牧適地、216-217、1987。
- 5) 北海道農政部：北海道施肥ガイド2015、p.18、2015。
- 6) 社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、p.391、2009。

16.1 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

16.1.2 大区画水田圃場における地下水位制御システムの高度利用に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（資源保全チーム）

研究担当者：横川仁伸、山本弘樹、新津由紀、清水真理子

【要旨】

泥炭を基盤とする転作作物栽培圃場で、乾燥時に地下灌漑を実施し、地下水位の変動を調査した。北海道美唄市の美唄地区大豆圃場では、地下灌漑により地下水位は上昇したが、農地再編整備前の各区画の土壤物理性の違いの影響を受けて地下水位とその変動にムラが生じた。瀬棚郡今金町の今金南地区小麦圃場では、地下灌漑時に地下水位が変動しなかった。その要因としては、現場の透水性が小さく、土壤構造や亀裂の発達が十分ではないことが考えられた。多雨年における調査では、美唄地区と今金南地区の両方の大豆圃場における収量は、地下水位よりも、15、25 cm 深の土壤水分が圃場容水量より少ない日数の方と強い相関を示した。高い収量を得るためには、地下水位を低下させるだけでなく、作土における土壤マトリックスから余剰水を排水することが重要であると考えられた。大豆発芽期における地下灌漑の実施では、5 cm 深の土壤水分は地下水位が-10 cm まで上昇したときに圃場容水量まで増加した。発芽促進を目的として地下灌漑を利用するためには、水分を供給したい深度の直下まで地下水位を上昇させてから水を落とすことが重要であった。以上の成果は、効果的な地下灌漑実施方法を考えるうえで役立つ。また、水稻移植圃場で、登熟期に地下灌漑を実施し調査した結果、登熟期の水稻への水分供給と収穫期に必要な地耐力の確保が両立できることを確認した。しかし、登熟期における地下灌漑はメタン排出量を増大させる傾向があった。今後、地下水位の最適な設定等の検討が必要である。以上の成果は、作物生産だけでなく環境負荷に与える影響も考慮した地下灌漑利用方法の提案のために役立つ。

キーワード：大区画水田、地下灌漑、地下水位、土壤水分、給排水ムラ

1. はじめに

北海道の大規模水田地帯では、食料生産の体質強化のため、担い手への農地集積や農地の大区画化・汎用化が推進されている¹⁾²⁾。また、北海道の大区画水田圃場では、暗渠排水施設を利用した地下水位制御システムの導入が進められている。

地下水位制御システムの導入は、水稻直播栽培の実現、転作作物の湿害や干ばつ害の回避、水管理の省力化等に有効である。北海道の転作作物栽培で地下水位制御システムを利用する手法として、土壤の乾燥時に地下灌漑を実施することが提案されている。その際、土壤に乾湿のムラが生じると作物の生育にもムラが生じる。その解消のためには、圃場全体に速やかでムラなく給排水できる、地下水位や土壤水分の制御技術が必要である。

水田では、一般に、登熟期に間断灌漑を実施する。その目的には土壤の過度な乾燥を防いで根の活性を高く維持することが挙げられるが、間断灌漑の実施には多くの水や労力を必要とする。そこで、地下水位制御システムを利用し水位を田面下の一定の深さで維持すれば、登熟

期後半まで地表から根に酸素を供給しつつ、地下から生育に必要な水を供給することが可能となる。同時に、地表面付近の土壤のみ乾燥させることで、収穫期に備えてコンバイン走行に必要な地耐力も確保することができる。これは、地下水位制御システムの新たな利用方法の一つと考えられる。

地下灌漑に伴う土壤水分・養分の変動は、温室効果ガス排出や窒素流出等の変動にも影響し、環境に負荷を与えることが想定される。そのため、地下灌漑の利用に伴う環境負荷について体系化が必要である。

以上のことから、本研究では、大区画水田圃場における給排水ムラ対策技術の開発と地下水位制御システムの高度利用技術の提案を目的とし、下記の項目を実施した。

- ① 転作作物栽培時の給排水ムラの実態把握と要因解明
- ② 水稻落水期の水分供給と地耐力向上を両立した地下水位制御技術の検証
- ③ 地下灌漑の実施を可能とする圃場条件の体系化
- ④ 地下灌漑の利用が環境負荷に与える影響の評価

2. 転作物栽培における給排水ムラの実態把握と要因解明

2.1 調査地と方法

2.1.1 調査地

北海道美唄市の美唄地区の転作圃場（B圃場）では、2015年度に国営緊急農地再編整備事業にて区画整理工事が実施された（図-1）。B圃場は長辺約170m、短辺約70mで集中管理孔を備えており、暗渠管（埋設深度0.7～1.0m）の設置間隔は10mを基本としている。整備前には、取水桝から50m地点付近に作業道路が存在した。作業道路の西側は2013年まで6年以上転作畑として利用し、東側は2013年まで水田として利用していた。また、地表から32～60cmより下が泥炭層である。調査開始時における作土層36cmの土性は、砂23～34%、シルト35～40%、粘土31～37%であった。2016年から2019年まで大豆を作付けした。5月下旬に大豆を播種し、10月上旬に収穫を行った。2017年7月10日から11日まで水位調整型水閘を地下水位-30cmに設定し取水して生育促進のため地下灌漑を行った後、7月13日に水閘を解放した。2018年は6月7日と9日に水閘を全閉にし取水して発芽促進のため地下灌漑を行ったが、降雨のため短時間で水閘を開放した。2019年は水閘を全閉にして地下灌漑を2回実施した。1回目は2019年6月10日から12日までで

あり、発芽促進を目的とした。2回目は2019年7月8日から10日までであり、発芽後の生育促進を目的とした。

瀬棚郡今金町の今金南地区の転作圃場（I圃場）では、2014年度に区画整理工事が実施された（図-2）。I圃場は長辺約250m、短辺約65mで地下水位制御システム（FOEAS）を備えており、暗渠管（埋設深度1.0m）の設置間隔は10mを基本としている。地表から35～75cmより下が泥炭層である。調査開始時における圃場中央の作土層28cmの土性は、砂44～59%、シルト27～37%、粘土19～25%で、その下の基盤高調整の盛土層の土性は、砂70%、シルト18%、粘土12%であった。2017年は秋撒き小麦（きたほなみ）を、2018年は大豆（とよまさり）を作付けした。2016年9月下旬に小麦の播種、2017年8月上旬に収穫を、2018年6月上旬に大豆の播種、2018年11月上旬に収穫を行った。2017年5月25日から29日までと6月30日から7月5日までの2回、-40cmの地下水位設定としてFOEASにより地下灌漑取水を制御した。各灌漑期間の最終日には水閘を解放した。2018年は降雨が十分であったため、地下灌漑を実施しなかった。2017年12月から3月までの冬期間は、泥炭沈下の抑制のため水閘を-40cmの地下水位設定とした。

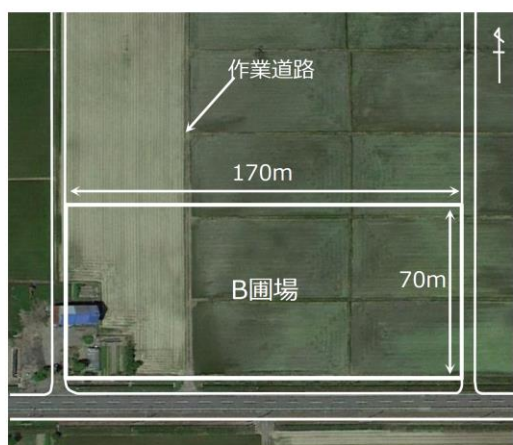


図-1 B圃場の整備前の状況写真と観測地点位置図
（地下水位観測地点および土壌採取地点は白抜き
の赤丸で示す。塗りつぶしの赤丸は土壌水分も測定
した地点を示す。）

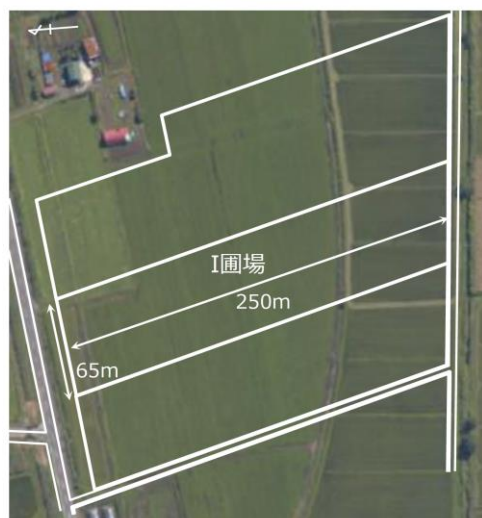


図-2 I圃場の整備前の状況写真と観測地点位置図
（地下水位観測地点および土壌採取地点は白抜き
の赤丸で示す。塗りつぶしの赤丸は土壌水分も測定
した地点を示す。）

2. 1. 2 方法

降水量は、B 圃場およびI 圃場の近傍で転倒マス式雨量計により計測した。

B 圃場の地下灌漑取水量は、10 分間隔で測定した取水柵内水位をHQ 式に代入して求めた。HQ 式は、同一ブロック内の圃場で測定した取水柵水位と、電磁流量計により測定した地下取水量の関係から作成した。I 圃場の地下灌漑取水量は、電磁流量計により1 箇所計測し、他2 箇所の取水量も同じであると仮定した。両圃場の暗渠排水量は、スリット堰により2~10 分間隔で測定した。

地下水位は、圃場内暗渠間21 地点で測定した。渠間のライン1~3 (それぞれL1, L2, L3) において、取水柵から30 もしくは40 m 間隔の21 地点を基本とし、2018 年はB 圃場においてライン0 (L0) の30、90、150 m 地点の3 地点を追加して測定した(図-1、2)。また、暗渠から50cm 離れの地下水位を、B 圃場においてL1 の30、90、150 m 地点で、I 圃場においてL2 の40、130、220 m 地点で測定した。地下水位は、絶対圧式水位計を有孔塩ビ管に格納し埋設し、30 分間隔で測定した。

それぞれの圃場内の21 地点(図-1、2)において、2017 年の収穫後に泥炭層より上の土壌を採取し、透水係数、乾燥密度、三相分布を測定した。

土壌水分は、2018 年はB、I 圃場それぞれ3 地点で測定した。その測定点は、B 圃場ではL0 の30、90、150 m 地点、I 圃場ではL2 の40、130、220 m 地点である(図-1、2)。土壌水分ポテンシャルは、テンシオメータにより各地点3 深度(15、25、35 cm 深)、4 反復で測定し、30 分間隔で記録した。

収量は、2018 年に各圃場の地下水位測定地点で調査した(図-1、2)。各地点において平均的な株数を含む条の1 m を刈り取り、着莢数、精子実重を測定した。

2. 2 転作畑における地下水位の変動

2. 2. 1 気象と水管理

B 圃場における6 月から9 月までの積算降水量は、2017 年、2018 年、2019 年それぞれ667、668、408 mm であった。6 月から9 月までの月降水量は、2017 年は147、145、129、247 mm であったのに対し、2018 年は131、235、275、29 mm で、2017 年と比較し7 月、8 月の降水量が大きく、9 月の降水量が小さかった(図-3)。2019 年の6 月から9 月までの月降水量は、42、56、184、124 mm と特に6 月、7 月の降水量が小さかった。

2017 年は、6 月25 日の36 mm の降水後、7 月16 日まで10 mm を超える降水はなく、7 月10 日10 時から11 日16 時まで取水し地下灌漑を行った。この30 時間での地

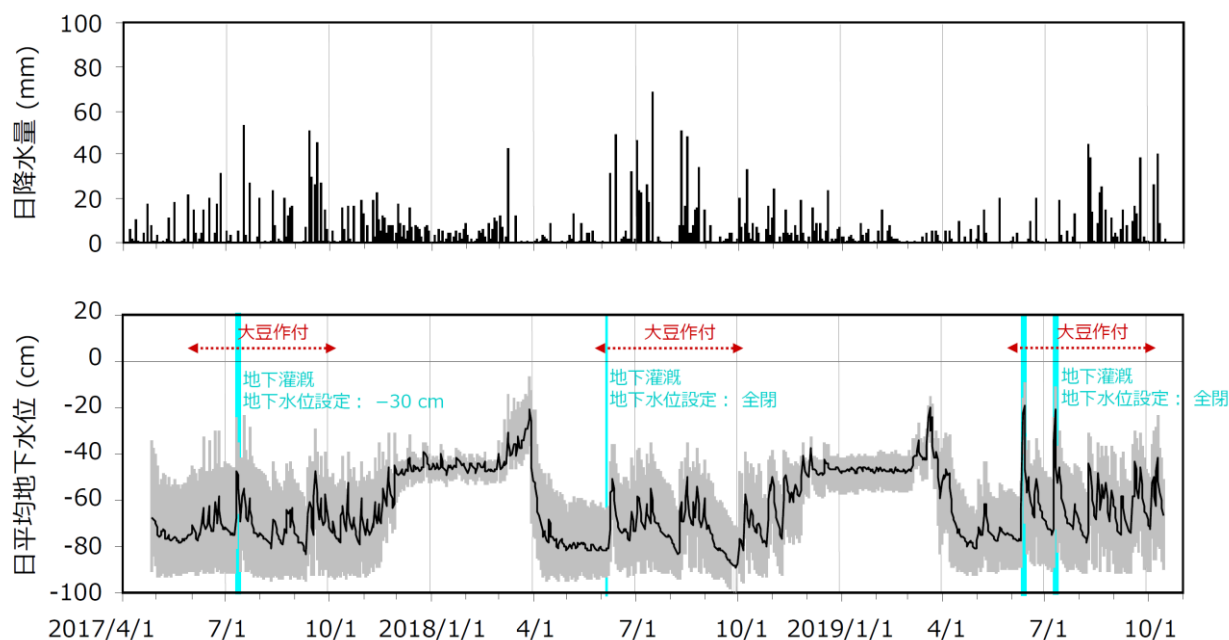


図-3 B 圃場における降水量と日平均地下水位の平均値 (n = 21) の季節変化
(地下水位のエラーバーは、最大最小を示す。)

下灌漑取水量は36 mm、暗渠排水量は12 mmであった。

2019年6月10日11時から12日16時まで取水し地下灌漑を行った。この53時間での地下灌漑取水量は78 mmであった。暗渠排水量は取水中に2 mm、その後水閘を全開してからの24時間で23 mmであった。7月8日17時から10日19時までの50時間での地下灌漑取水量は75 mmであった。この時の暗渠排水量は、取水中に3 mm、その後水閘を全開してからの24時間で15 mmであった。

I圃場における6月から9月までの積算降水量は、2017年、2018年それぞれ541、661 mmであった。6月～9月までの月降水量は、2017年は129、121、83、211 mmであったのに対し、2018年は134、191、223、132 mmで、2017年と比較するとB圃場と同様に7月、8月の降水量が大きかった(図-4)。2017年5月は降水量が小さく、5月25日から4日間地下灌漑を実施した。この時の地下灌漑取水量は24 mmで、灌漑期間中に合計15 mmの降水があった。FOEASの水位管理者と水位制御器の設定水位調整に時間を要したことも影響し、暗渠排水量は32 mmと大きかった。また、6月30日から7月5日までの5日間に2回目の地下灌漑を実施した。この時、地下灌漑取水量は18 mmで、灌漑期間中に合計15 mmの降水があったが、暗渠排水量は1 mmに過ぎなかった。

2. 2. 2 営農期間における地下水位の変動

B圃場における6月から9月の日平均地下水位は、21地点の平均でみると、2017年が-84～-47 cmの範囲、2018年が-85～-47 cmの範囲、2019年が-84～-19 cmの範囲で変動した(図-3)。地下水位は、降水と地下灌漑の実施に応じて上昇し、2017年6月から9月までの期間では7月11日の地下灌漑実施時に最高値を示した。地下水位が最も低下したのは、2017年が9月11日、2018年が9月29日であった。21地点の標準偏差は2017年が7～18 cmの範囲、2018年が7～15 cmの範囲で推移していた。

I圃場における6月から9月の日平均地下水位の21地点の平均は、2017年が-64～-19 cmの範囲、2018年が-60～-20 cmの範囲で変動した。B圃場より地下水位は高く、降水に応じて地下水位は上昇したが、地下灌漑実施時に明らかな地下水位の変化は見られなかった。21地点の標準偏差は2017年が8～16 cmの範囲、2018年が11～17 cmの範囲で、B圃場と同程度であった。

2. 2. 3 地下灌漑実施時における地下水位変動

2017年の地下灌漑実施時における圃場内の渠間の地下水位分布を、地下灌漑実施直前、取水終了直後、水閘解放してから半日後について図-5に示す。

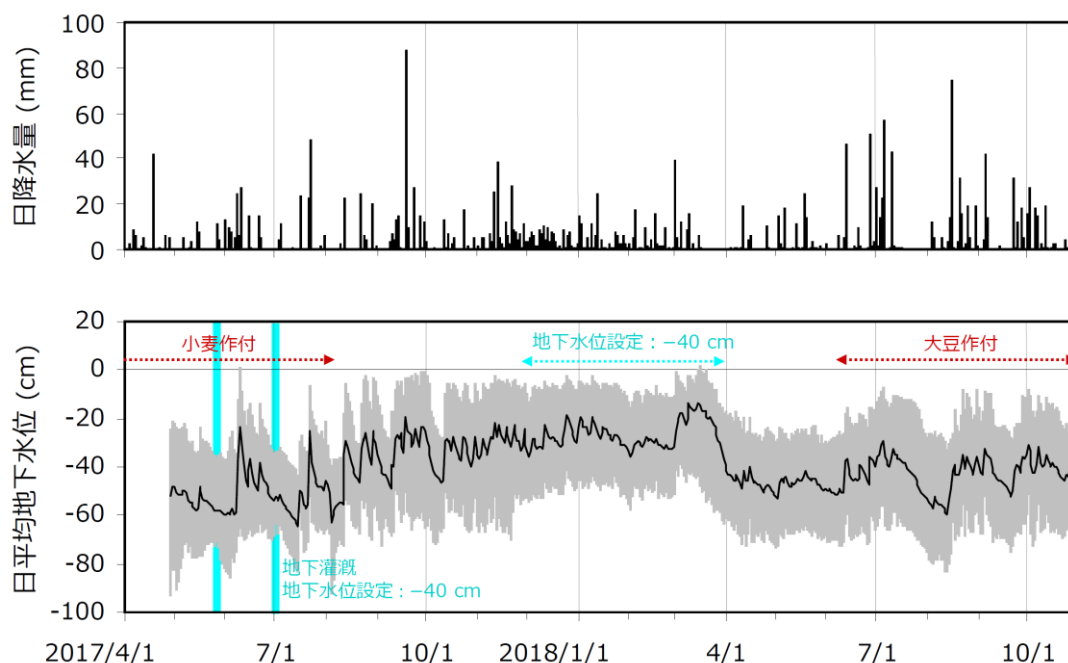


図-4 I圃場における降水量と日平均地下水位の平均値 (n = 21) の季節変化 (地下水位のエラーバーは、最大最小を示す。)

B圃場では、地下灌漑直前の水位は -75 ± 14 cmで、取水柵から30~50 m地点で高い傾向にあった(図-5a)。取水終了直後には、 -45 ± 14 cmと30cm程度水位が上昇し、特に70~90 m地点で $-23 \sim -34$ cmと水位が高かった(図-5b)。水閘解放して半日後には -63 ± 12 cmまで低下した(図-5c)。B圃場の地下水位は、30~50 m地点で高く維持され、地下灌漑実施時の変動も小さかった。50 m付近には整備前に作業道路が存在し(図-1)、この作業道路を挟んで両側の圃場の整備前からの土壌物理性の違いが地下水位分布に影響したと考えられた。

I圃場では、地下水位は地下灌漑直前に -53 ± 12 cm、取水終了直後に、 -51 ± 13 cm、水閘解放半日後に -52 ± 14 cmで、地下水位の変動は非常に小さく、また圃場内の分布も変化しなかった(図-5d, e, f)。I圃場の2回目の地下灌漑実施時においても、同様の傾向であった。

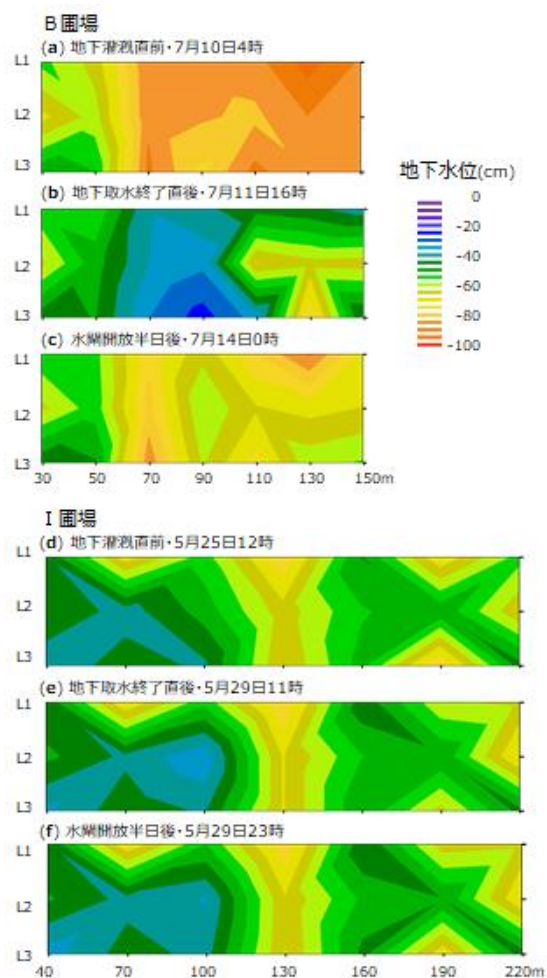


図-5 B圃場およびI圃場における地下灌漑実施時の地下水位分布

(地下水位は渠間で測定した値を用いた。暗渠周辺の地下水位は含まれない。)B圃場とI圃場における飽和透水係数と固層率

B圃場とI圃場での地下灌漑実施時における暗渠脇0.5 m離れと渠間の地下水位変動を図-6に示す。B圃場では、取水側の30 m地点を除いて水閘水位の上昇とともに速やかに上昇し、特に暗渠脇で顕著であった。取水停止後、地下水位は緩やかに低下し、水閘開放後は特に暗渠脇で低下した。一方、I圃場では、取水後に明らかに地下水位が上昇した地点は、暗渠脇0.5 m離れの1地点のみであった。

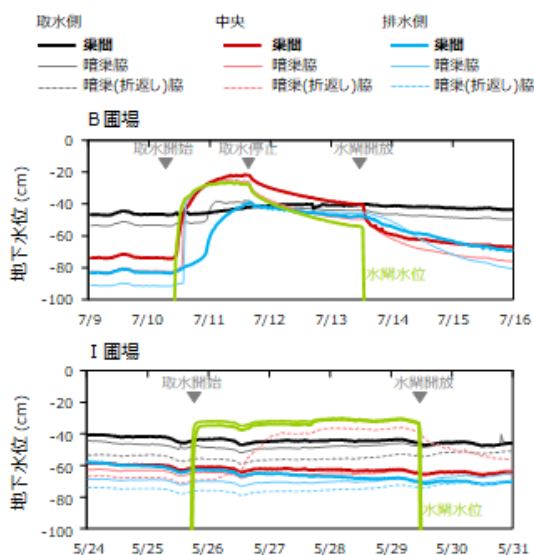


図-6 B圃場およびI圃場における地下灌漑実施時の暗渠脇0.5 m離れと渠間の地下水位変動
(取水側、中央、排水側はB圃場でそれぞれ30、90、150 m、I圃場でそれぞれ40、130、220 m地点を示す。暗渠(折返し)は、I圃場のみである。)

2019年のB圃場では、降水時よりも2回の地下灌漑実施時の方が地下水位は高かった。2回の地下灌漑実施時における取水開始直前、12時間後、24時間後、取水終了直前の地下水位を図-7に示す。1回目の地下灌漑実施時では、地下水位は21地点の中央値で -81 cmから -10 cmまで上昇した。取水開始直前での地下水位の四分位範囲は16 cmで、21地点の地下水位は $-90 \sim -59$ cmの範囲にあった。一方、取水終了直前には四分位範囲は6 cmで、1地点の外れ値を除くと、20地点の地下水位は $-16 \sim -3$ cmの範囲にあった。2回目の地下灌漑実施時では、地下水位は -78 cmから -13 cmまで上昇した。取水開始直前での地下水位の四分位範囲は20 cmで、21地点の地下水位は $-90 \sim -53$ cmの範囲にあった。しかし、取水終了直前には四分位範囲は5 cmで、1地点の外れ値を除くと、20地点の地下水位は $-20 \sim -7$ cmの範囲にあった。

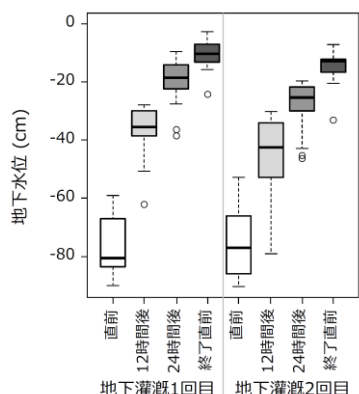


図-7 2019年B圃場における地下灌漑実施時の地下水位

2.3 地下水位変動に影響を与える要因の解析

泥炭が出現する上端はB圃場で41 ± 7 cm、I圃場で53 ± 10 cmであった。B圃場では、全地点において泥炭層までを3層に分けて採取し、それぞれの平均深度は0~9、9~22、22~41 cmであった。飽和透水係数の中央値は、北海道施肥ガイドで推奨される基準値 ($10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s) と比較すると、1層目は同程度であったが、2層目と3層目で大きく下回った (図-8)。一方、固相率の中央値は、1~3層でそれぞれ41.5、41.5、36.7%で、基準値 (40%以下) を上回るものがあるものの大きくは逸脱しなかった (図-8)。B圃場では、地下水位の高い30~50 m地点で3層目の固相率が大きく、透水係数が小さい傾向にあった。整

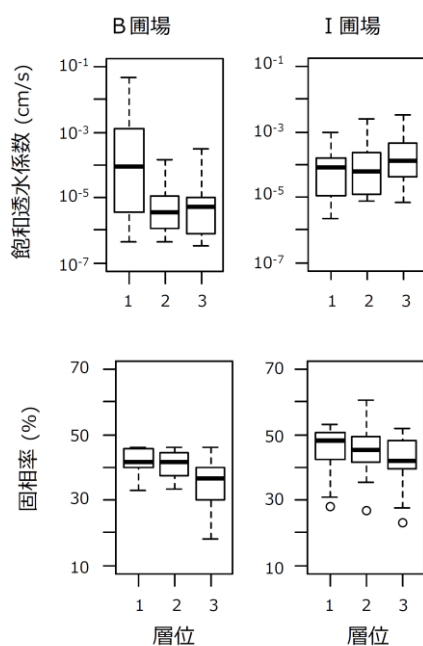


図-8 B圃場とI圃場における飽和透水係数と固相率 (飽和透水係数の統計量算出には対数変換値を用

備前の土地利用状態が、土壌物理性と地下水位に影響を与えたことが示唆された。

I圃場では、10地点で作土層の下に基盤高調整の盛土層が確認されたため、泥炭層までを3層に分けて採取し、11地点では2層で採取した。それぞれの平均深度は、0~23、23~41、41~53 cmであった。飽和透水係数の中央値は、基準値と同程度であったが、固相率の中央値は、1~3層でそれぞれ48.1、44.6、38.9%で、3層目を除き基準値を大きく上回った (図-8)。

2.4 地下水位と土壌水分の変動が大豆生育に与える影響

B圃場の地下水位は、給水側で高く推移し、中央と排水側で同程度であった (図-9)。2018年7月16日から8月8日までと8月31日から9月30日までの期間では日降水量が10 mmを超えるまとまった降雨がなく、地下水位は給水側でも-75 cm程度まで低下し、これらの期間では土壌水分ポテンシャルも大きく上昇した。

I圃場の地下水位は、B圃場と同様に給水側で高く推移した (図-10)。中央と排水側では同程度であったが、まとまった降雨の少ない7月中旬から8月中旬までの期間では、排水側で地下水位が-80 cmまで低下したのに対し、給水側では-30 cm、中央では-55 cmまでの低下であった。8月4日から5日までの合計18 mmの降雨では、15 cm深、25 cm深ともに、給水側と排水側では土壌水分ポテンシャルは速やかに-30 kPaまで低下したのに対し、中央ではともにわずかに低下しただけで-50 kPaを上回っていた。この時、地下水位の上昇幅は中央で10 cmと最も大きく、中央では給水側、排水側よりも下層までの水みちが発達していたと考えられる。

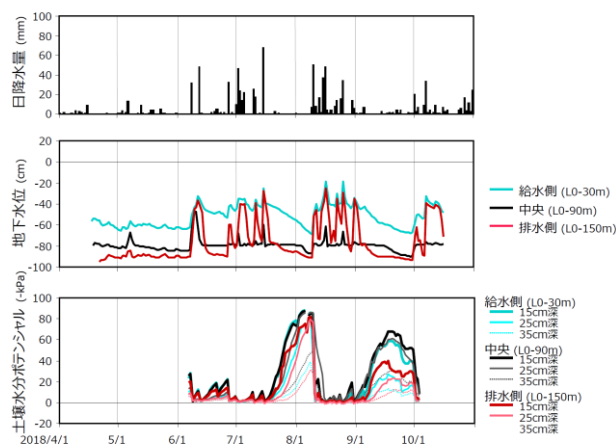


図-9 B圃場における2018年の降水量、地下水位および土壌水分ポテンシャルの季節変化

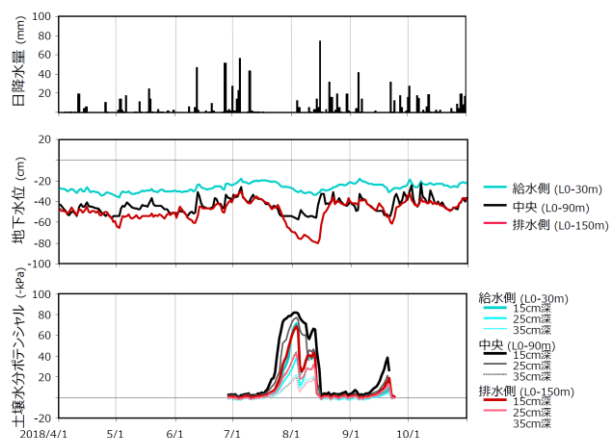


図-10 I 圃場における 2018 年の降水量、地下水位および土壌水分ポテンシャルの季節変化

2018年6月から9月までの各地点の最低地下水位と精子実重の関係を図-11に示す。最低地下水位と精子実重には弱い負の相関 ($r = -0.65, p < 0.01$) があり、地下水位が高いと収量を低下させることが示された。しかし、I 圃場では地下水位が $-80 \sim -60$ cm でも精子実重が非常に小さい地点が確認された。

7月から9月までの期間において、土壌水分が圃場容水量（土壌水分ポテンシャル $= -6$ kPa ; $pF = 1.8$ ）より

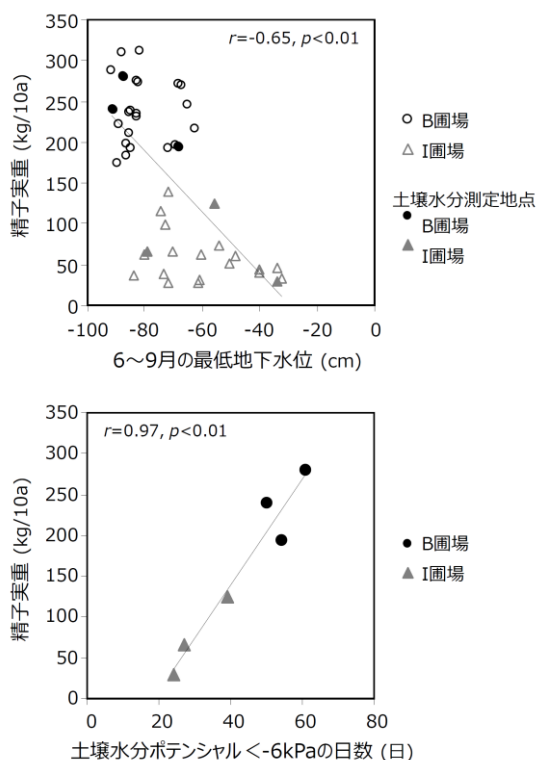


図-11 2018年6月～9月の最低値地下水位と大豆精子実重との関係および2018年7月～9月において土壌水分が圃場容水量より乾燥した日数と大豆精子実重との関係（圃場容水量は土壌水分ポテンシャル $= -6$ kPaとした。）

少ない日数と精子実重の関係を図-11に示す。この日数はB 圃場でI 圃場よりも大きく、精子実重と正の相関を示した（15 cm 深 ; $r = 0.97$ ）。このことは、作土の土壌マトリックスから余剰水が排水された期間が長いことが収量に影響を与えることを示唆すると考えられる。

3. 水稻登熟期の水分供給と地耐力向上を両立した地下水水位制御技術の検証

3.1 調査地と方法

3.1.1 調査地

調査は、2015年度に国営緊急農地再編整備事業にて区画整理工事が実施された北海道美唄市の美唄地区の隣接する2つの水田圃場で行った（図-12）。圃場は、1区画が長辺約170 m、短辺約70 mに整備され、地下水水位制御システムが導入されている。暗渠管は、基本10m間隔で、0.70m \sim 1.00mの深さにある。

対照圃場と試験圃場では、2017年、2018年とも水稻（ななつぼし）の移植栽培を行った。5月下旬に苗を移植、9月下旬に収穫を行った。試験圃場では、2017年は8月8日から22日までの間、2018年は8月6日から23日までの間、田面から10 cm下に地下水水位を設定して取水し地下灌漑を行った後、9月20日まで水閘の設定を -10 cmで維持した。対照圃場では、8月中旬から収穫まで水閘の設定を -40 cmに維持し、この期間に地下灌漑による給水は行わなかった。

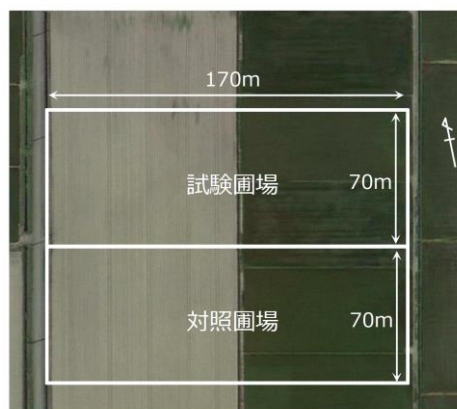


図-12 水田試験圃場と対照圃場整備前の状況写真

3.1.2 方法

降水量は、同一農区内で調査圃場から約450m離れた地点で計測した。

地下水位、土壌水分、水稻出液速度の調査は、各圃場、暗渠から5 m離れた3地点（取水桝から長辺方向に30、90、150 m離れた地点）で行った。地下水位は、絶対圧

式水位計を有孔塩ビ管に格納し埋設し、30分間隔で測定した。土壌水分ポテンシャルは、15cm深に設置したテンシオメータにより30分間隔で測定した。昼間は、気温の急激な変動等によりテンシオメータの圧力センサーの出力値が安定しないため、夜間の21時から3時にかけて測定した値の平均を用いた。

水稻出液速度は、2017年8月31日および2018年9月4日に各地点2~3反復で測定した。また、地耐力は、収穫を半月後に控えた9月8日に、各圃場42地点で、デジタル貫入式土壌硬度計により測定した。

3.2 地下水位と土壌水分の変動

地下水位の季節変化を図-13に示す。2017年は、登熟期地下灌漑を開始した8月8日以降、試験圃場では地下水位は-10cm付近で維持された。一方、対照圃場の地下水位は緩やかに低下し、8月27日には-30cmを下回った。試験圃場の地下水位は、給水停止後で降雨もなかった8

月29日以降に緩やかに低下し、9月10日には対照圃場と同程度となった。登熟期地下灌漑実施期間の土壌水分は、圃場間で差は認められなかった。しかし、9月10日の土壌水分は、対照圃場で試験圃場よりも減少した。

2018年もまた、登熟期地下灌漑実施期間中に試験圃場で地下水位は-10cm付近で維持された。また、対照圃場の地下水位は-40~-30cmで維持された。しかし、この期間には断続的に降雨があったため、土壌水分ポテンシャルは0kPa付近で推移し、圃場間で明らかな差は認められなかった。

3.3 水稻登熟期の地下灌漑が作物生育と地耐力に与える影響

水稻出液速度は、両年とも試験圃場で対照圃場よりも大きい傾向にあり、2018年は有意な差が認められた(図-14)。ただし、両年とも出液速度測定時の土壌水分は両圃場間に差が認められなかった(図-13)。土壌水分は

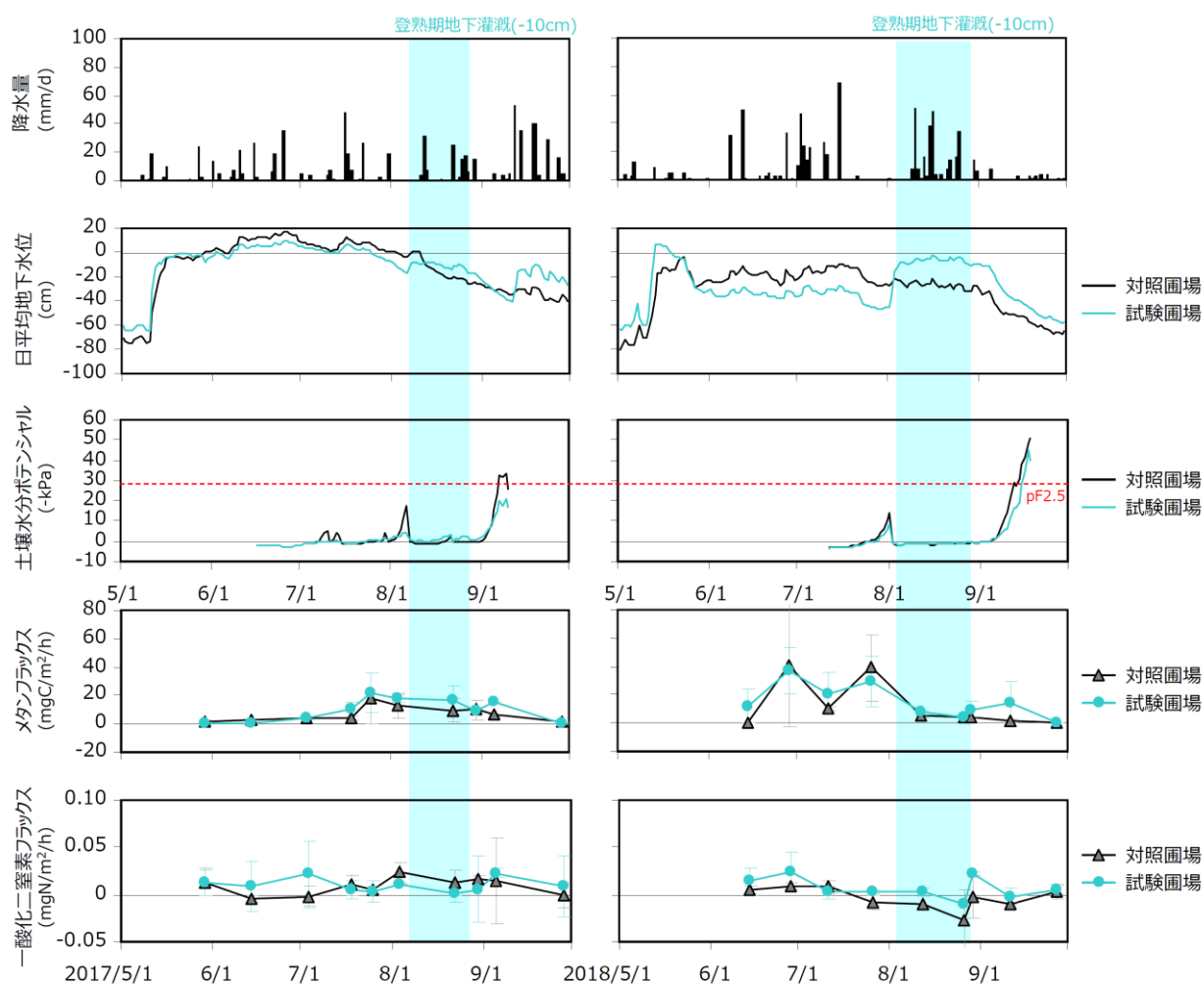


図-13 水田試験圃場と対照圃場における降水量、土壌水分ポテンシャル、メタンフラックス、一酸化二窒素フラックスの季節変化

15cm 深のみで測定したため、水稻根へ供給される土壤水分の深度とは異なった可能性が考えられる。また、収量は兩年とも圃場間で差は認められず、登熟期の地下灌漑は収量に影響を及ぼすものではなかった (図-14)。

0~15cm の地耐力は、2018 年のみ圃場間で有意な差が認められ、試験圃場で対照圃場より小さかった。しかし、2018 年の試験圃場でもコンバイン走行に必要とされる地耐力 (0.25 MPa 以上³⁾) を下回ったのは 42 地点中 1 地点のみであり、平均値は 0.49 MPa であったことから、登熟期に地下灌漑を実施しても、収穫期に必要な地耐力を十分確保できると考えられた (図-14)。

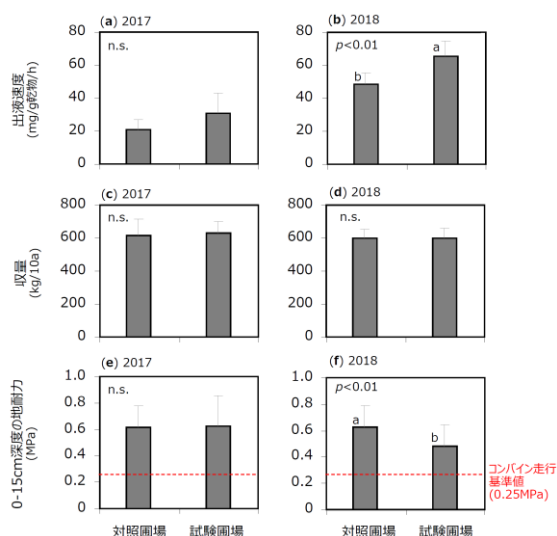


図-14 2017年と2018年の水田試験圃場および対照圃場における水稻出液速度 (a, b)、水稻収量 (c, d)、地耐力 (e, f)

4. 地下灌漑の実施を可能とする圃場条件の検討

4.1 調査地と方法

4.1.1 調査地

調査は、美唄市の美唄地区の大豆畑で 2019 年に行った。圃場は、2.1.1 で述べた圃場と B 圃場と同一である。2.1.1 で述べた通り、2019 年は水閘を全閉にして地下灌漑を 2 回実施した。

4.1.2 方法

地下水位と土壤水分を、渠間のライン 1 (L1) の取水柵から 30 m 地点で測定した (図-1)。地下水位は、絶対圧式水位計を有孔塩ビ管に格納の上、埋設し、30 分間隔で測定した。土壤水分ポテンシャルは、テンシオメータにより 4 深度 (5、15、25、35 cm 深)、4 反復で測定し、30 分間隔で記録した。テンシオメータのポーラスカップの長さは 6 cm であり、その中心部が測定深になるように

埋設した。

4.2 大豆発芽期における地下灌漑の実施

1 回目と 2 回目の地下灌漑時における地下水位と土壤水分の変動をそれぞれ図-15、図-16 に示す。

1 回目の地下灌漑実施では、地下水位の上昇とともに 35、25、15、5 cm 深の順で土壤水分は増加した。5 cm

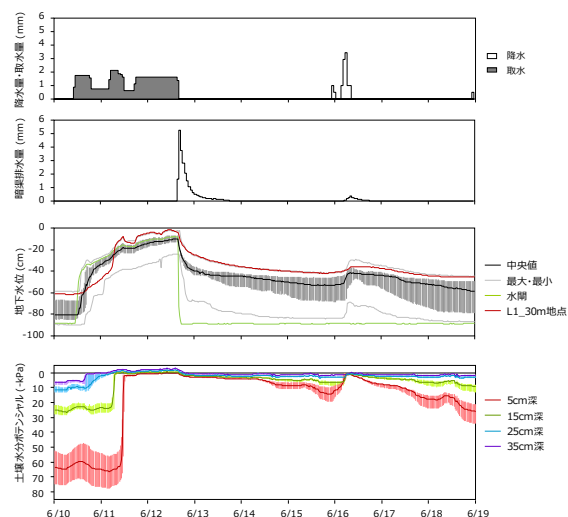


図-15 地下灌漑 1 回目における降水量・地下灌漑取水量と暗渠排水量、地下水位、L1_30m 地点の土壤水分ポテンシャルの経時変化
地下水位は 21 地点の中央値で、エラーバーは四分位範囲を示す。土壤水分ポテンシャルは 4 反復の中央値でエラーバーは最大最小を示す。

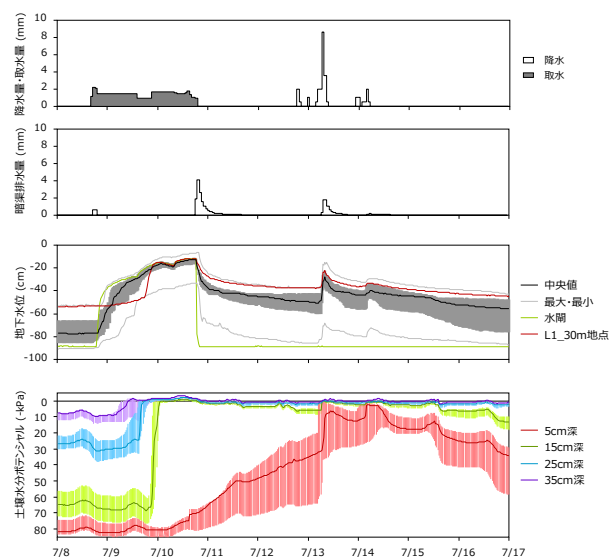


図-16 地下灌漑 2 回目における降水量・地下灌漑取水量と暗渠排水量、地下水位、L1_30m 地点の土壤水分ポテンシャルの経時変化
地下水位は 21 地点の中央値で、エラーバーは四分位範囲を示す。土壤水分ポテンシャルは 4 反復の中央値でエラーバーは最大最小を示す。

深の土壤水分ポテンシャルは、6月11日11時半に-15 kPa (pF 2.2) を、6月11日12時に-2.4 kPa (pF 1.4) を示し、取水を開始してから約25時間後に圃場容水量 (-6 kPa; pF 1.8) を上回る土壤水分となった。この時の同一地点の地下水位は10 cmであった。6月12日16時に水閘を全開した後、土壤水分は減少し15日13時に-10 kPa (pF 2.0) になった。

大豆種子の水分が発芽に必要な水分に達するのに必要な日数は、土壤水分ポテンシャルを-10 kPa で維持した時に0.7~1.1日 (22℃の室温条件下) であることが報告されている⁴⁾。土壤水分の測定は5cm深で、播種深度 (およそ2~3 cm) の下ではあるものの、1回目の灌漑では、およそ大豆種子の給水に必要な水分が供給されたと考えられる。2回目の地下灌漑実施でも、地下水位の上昇とともに土壤水分は増加した。しかし、5 cm 深の土壤水分ポテンシャルは、取水終了時に-70 kPa (pF 2.8) で、この時の地下水位は-12 cm であった。水閘を全開とした後、5 cm 深の土壤水分は緩やかに増加し、7月13日の降水の直前には土壤水分ポテンシャルは-35 kPa (pF 2.5) であった。この間には降水がなかったため、取水終了後に暗渠から排水してもなお下層から水分が供給されたと考えられる。地下灌漑実施時における地下水位と土壤水分ポテンシャルとの関係を図-17に示す。35 cm 深の土

壤水分ポテンシャルは、地下水位-60~-50 cmの時に-6 kPa (pF 1.8) に達した。25 cm 深の土壤水分ポテンシャルもまた、地下水位-50 cm程度で-6 kPa (pF 1.8) に達した。本地点では、地表から約30 cmより下が泥炭層であり、泥炭層およびその直上5cm程度までは、地下灌漑により速やかに水分が供給されと考えられた。一方、5、15 cm 深の土壤水分は、地下水位が測定深度直下まで上昇してから増加した。このことから、播種後やその直後の根が十分伸長していない時の地下灌漑の利用では、水分を供給したい深度の直下まで地下水位を上昇させてから水を落とすことが重要であるといえる。

5. 地下灌漑の利用に伴う環境負荷の評価

5.1 調査地と方法

5.1.1 調査地

調査は、美唄市の美唄地区の大豆畑と水田で行った。

大豆畑では、2019年に地下灌漑を実施した試験圃場と実施しない対照圃場で調査した。試験圃場は、2.1.1で述べた圃場とB圃場と同一である。対照圃場は、同一農区内の圃場で、地下灌漑による取水を除いて試験圃場と同様の営農管理を行った。

水田は、2017年と2018年の登熟期に地下灌漑を実施した試験圃場と実施しない対照圃場で調査した。試験圃場と対照圃場は、3.1.1で述べた圃場と同一である。

5.1.2 方法

土壤表面からの温室効果ガスフラックスをクロズドチャンバー法で測定した。常設した架台にチャンバーを設置した後、0、5、10、15、20分後にチャンバー内のヘッドスペースガスを10mL容の真空バイアル瓶に採取した。測定は暗渠から5.0m地点において、3反復で行った。測定頻度は2~3週間に1度程度とした。

ガス試料のメタン濃度はFID付きガスクロマトグラフ、一酸化二窒素濃度はECD付きガスクロマトグラフで測定した。温室効果ガスフラックス測定時に、気温、5cm深地温、5cm深の酸化還元電位 (Eh) を測定した。

5.2 転作畑における温室効果ガス排出

大豆畑のメタンフラックスは、6月11日の試験圃場を除いて、両圃場-0.03~0.05 mgC/m²/hの範囲で変動推移した (図-18)。地下灌漑実施中であった6月11日の試験圃場では、1.8±1.0 mgC/m²/hの大きなメタン排出が観測されたが、地下灌漑実施2日後には-0.004±0.1 mgC/m²/hと対照圃場と同程度まで低下した (図-18)。

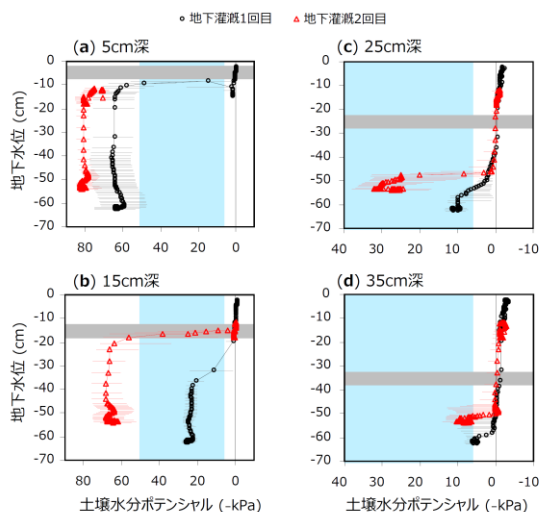


図-17 地下灌漑実施時における地下水位と土壤水分ポテンシャルとの関係

土壤水分ポテンシャルは4反復の中央値で、エラーバーは最大最小を示す。灰色はテンシオメータのポラスカップの埋設位置を示す。水色は易有効水分として圃場容水量 (-6 kPa; pF 1.8) から毛管連絡切断含水量 (-50 kPa; pF 2.7) までの水分を示す。

一酸化二窒素フラックスは、地下灌漑実施中の6月11日には試験圃場と対照圃場でともに $0.1 \pm 0.2 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$ と差は認められなかったが、6月14日に試験圃場で $0.8 \pm 0.3 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$ と対照圃場 ($0.2 \pm 0.2 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$) より有意に大きかった (図-18)。また、2回目の地下灌漑実施2日後でも、試験圃場における一酸化二窒素フラックスは $1.1 \pm 0.3 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$ で、対照圃場 ($0.1 \pm 0.1 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$) より有意に大きかった (図-18)。ただし、6月26日の一酸化二窒素フラックスは試験圃場、対照圃場それぞれ 0.4 ± 0.4 、 $1.3 \pm 1.4 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$ で、対照圃場で大きな排出が観測された。これは6月22日の20mmの降雨によって土壌水分が上昇したことの影響によるものと考えられる。

以上のことから、大豆の発芽期の地下灌漑では、土壌水分の上昇により、メタンと一酸化二窒素の排出が促進される可能性を示唆している。

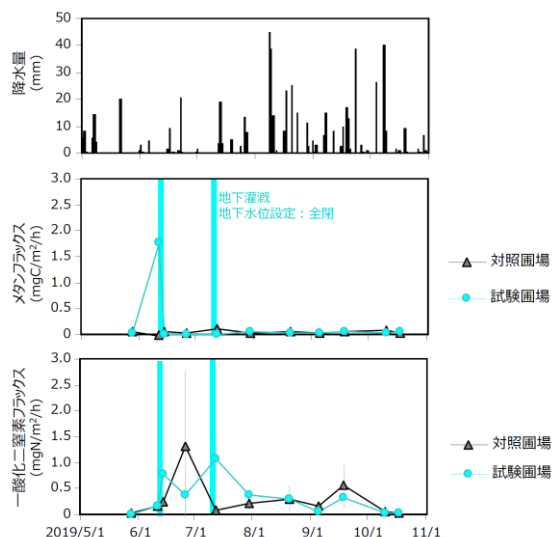


図-18 大豆畑の試験圃場と対照圃場におけるメタンフラックスと一酸化二窒素フラックスの季節変動 (エラーバーは標準偏差 (n=3) を示す。)

5.3 水田における温室効果ガス排出

水田のメタン排出量は、登熟期から収穫までの地下灌漑実施期間において、対照圃場と比べて試験圃場で大きい傾向があった。しかし、圃場内のばらつきが大きく、対照圃場との間に有意な差は認められなかった (図-19)。試験圃場では、登熟期地下灌漑によって地下水位を高く維持することで、メタン排出が促進された可能性が考えられる。今後、地下水位の最適な設定等の検討が必要で

ある。

水田の一酸化二窒素排出量は、メタン排出量と比較し非常に小さかった (図-19)。また、圃場内のばらつきが大きく、試験圃場と対照圃場で有意な差は認められなかった。

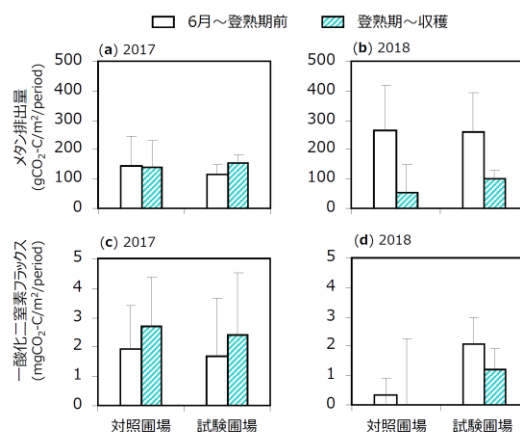


図-19 2017年と2018年の水田の試験圃場および対照圃場におけるメタン排出量と一酸化二窒素排出量 (エラーバーは標準偏差 (n=3) を示す。)

6. まとめ

泥炭を基盤とする転作作物栽培圃場で乾燥時に地下灌漑を実施し、地下水位の変動を調査した。美唄地区大豆圃場では、地下灌漑により地下水位は上昇したが、整備前の各区画の土壌物理性の違いの影響を受けて地下水位とその変動にムラが生じた。今金南地区小麦圃場では、地下灌漑時に地下水位が変動しなかった。その要因としては、現場の透水性が小さく、土壌構造や亀裂の発達が十分でないことが考えられたが、今後要因の体系的な整理が必要である。

2018年は、7月、8月の降雨量が大きく、地下灌漑を実施しなかった。美唄地区と今金南地区の両方の大豆圃場における収量は、地下水位よりも、15、25 cm 深の土壌水分ポテンシャルが圃場容水量を上回った日数の方と強い相関を示した。このことは、作土における土壌マトリックスからの余剰水排除の良し悪しにより収量が左右されることを示唆する。このことから高い収量を得るためには、地下水位の低下だけではなく、営農作業等による亀裂・土壌団粒構造の形成等、作土の排水性の改善が重要であると考えられた。

美唄地区大豆圃場における発芽期の地下灌漑では、水閘を全閉して約2日間地下灌漑を実施した。取水開始直前の地下水位のばらつきに比べ、取水終了直前の地下水

位のばらつきは小さく、水分供給ムラは大きくなかった。また、5 cm 深の土壤水分は地下水位が-10 cm まで上昇したときに圃場容水量まで増加した。発芽促進を目的として地下灌漑を利用するためには、水分を供給したい深度の直下まで地下水位を上昇させてから水を落とすことが重要であった。

泥炭を基盤とする水稻移植圃場で、登熟期に地下灌漑を実施し、水稻への水分供給と地耐力への影響を調査した。登熟期後半の水稻出液速度は、試験圃場で対照圃場より大きかった。しかし、これは収量に影響を及ぼすものではなかった。地耐力は、試験圃場で対照圃場よりも小さかったが、両圃場ともその平均値はコンバイン走行に必要な値を満たしており、登熟期の水稻への水分供給と収穫期に必要な地耐力の確保が両立できることを確認した。

地下灌漑の利用に伴う環境負荷については、大豆畑で温室効果ガス排出を測定した結果、地下灌漑実施時またはその直後にメタンと一酸化二窒素の大きな排出が観測された。また、水稻登熟期には、地下灌漑によりメタン排出量が増大する傾向があった。

参考文献

- 1) 国土交通省：北海道総合開発計画、2016
- 2) 農林水産省：土地改良長期計画、2016
- 3) 北海道農政部：北海道施肥ガイド2015、2015
- 4) 高橋智紀、細川寿、松崎守夫：重粘質転換畑における土壌鎮圧によるダイズ種子の吸水促進効果、日本土壌肥料学会誌、79 (1)、pp. 1~7、2008

16.1 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

16.1.3 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究

(このうち、大区画水田の高精度な水管理技術の開発と用水量の解明)

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（水利基盤チーム）

研究担当者：川口清美、越山直子、大津武士、中村和正

【要旨】

北海道の水田地帯では、農作業の効率化をめざして、圃場の大区画化や地下水位制御システムの整備が進められている。大区画化および地下水位制御システムの整備が実施された地区において、乾田直播栽培、湛水直播栽培、移植栽培を行った圃場を対象に、圃場単位の水管理および水収支を調査した。令和元年度までの成果は、次のとおりである。

- 1) 調査圃場は泥炭地であり、圃場の地下水位が高いことから、代かきの有無に関わらず、各圃場の浸透量はいずれも小さかった。そのため、圃場への取水量の差は、除草剤散布に伴う強制落水や深水灌漑などの栽培管理の違いによって生じた。これらの栽培管理は、特定の栽培方式だけで必要とされるようなものではなく、気象の推移によっては、いずれの栽培方式でも必要になる可能性のあるものであった。3カ年の調査では、ある栽培方式に固有で、用水計画上で見込まなければならない栽培管理用水量は発生していなかった。
- 2) 各栽培方式における生育時期や栽培管理の違いに着目して、将来の直播栽培面積の拡大に対応できる用水計画手法を考案した。移植栽培が主流となっている現況と直播栽培面積が拡大した将来における用水計画のイメージを比較し、将来の用水需要における留意点を抽出した。同様に、農業用水需要が最も高まる灌漑期初期に注目し、圃場群におけるピーク用水量を推定した。この結果、今回の調査対象区域では、直播栽培面積が拡大しても、ピーク用水量が現況を上回ることはないと予測された。
- 3) 小用水路が開水路からパイプラインに整備された地区において、圃場整備前後の移植栽培および乾田直播栽培の圃場水管理を比べた。この結果、整備済み乾田直播圃場では、圃場浸透量、強制落水時の再湛水、表面流水の影響により、未整備圃場よりも供給水量の値が大きくなった。

キーワード：大区画、地下灌漑、直播栽培、水田、水管理

1. はじめに

食料・農業・農村基本計画では、農地の大区画化や汎用化などの基盤整備が重要な施策として位置付けられている¹⁾。北海道は、全国の4分の1を占める耕地面積を有しており、大規模で専門的な農業が展開されている。その一方で、農業者の高齢化等に伴う農家戸数の減少により、農地が急速に担い手へ集積されており、農業経営の大規模化への対応が喫緊の課題となっている。大規模水田地帯では、その対応策として、圃場の大区画化や水管理の省力化を目的とした地下水位制御システムの整備が行われている。これらの整備が実施されたところには、水稲直播栽培を導入し、育苗作業に関わる労働時間の削減と農作業時期の分散により、さらなる労働生産性の向上を図っている地域がある。こうした整備に伴い、灌漑方式や水稲栽培方式の多様化が進展すると、圃場単位における水管理や取水量が変化する²⁾。しかし、地下水位

が比較的高い地域では、水管理が変化しても、移植栽培と直播栽培における圃場への供給水量の差が大きく変わらない例もある³⁾。将来にわたって、農業用水を安定的、効率的に利用するためには、整備済み地区における圃場水管理や用水量の事例を調査し、圃場や農区における水収支特性を分析する必要がある。

そこで、本研究では、水稲の直播栽培面積が増加した場合において、安定的に農業用水を利用するための水管理技術の構築を目的として、圃場が大区画化され、地下水位制御システムが導入された地区の水田において、移植栽培、乾田直播栽培、湛水直播栽培における水管理および水収支の調査を実施した。

2. 調査概要

2.1 美唄地区

2.1.1 地区概要

美瑛市に位置する4筆の圃場(図-1)を対象として、平成28年から平成30年までの3年間、調査を行った。各圃場の水稲栽培方式を表-1に示す。これらの圃場は、平成27年に圃場整備が実施され、地下水位制御システムが整備された。各圃場の面積は1.1~1.2haである。

農業用水は、支線用水路(開水路)から小用水路(開水路)を経由し、各圃場へ取水される。一筆の圃場への用水供給は、地表灌漑2ヶ所、地下灌漑1ヶ所から行える。圃場排水は、地表排水と地下排水で行える。地表排水の数は1圃場当たり2ヶ所である。圃場内には、暗渠管(φ60~125mm、勾配1/500)が田面から0.70m~1.00mの深さに10m間隔で埋設されている。疎水材は砂利である。暗渠水閘の数は、1圃場当たり2ヶ所である。調査圃場の水管理は、すべて同一の農家により行われた。AおよびD圃場については、平成28年のみ、JAによる水管理の指導が行われた。

2. 1. 2 調査方法

D圃場を例として、各圃場における観測地点の位置を図-2に示す。各圃場の水収支を把握するために、電磁流量計により地表取水量、地下取水量、地下排水量を観測した。ただし、地下取水量を観測する電磁流量計は、平成28年度は所有台数が2台であったため、AおよびD圃場にだけ設置し、C圃場には設置しなかった。平成29年度では地下取水量を観測する電磁流量計をA、D、C圃場に、平成30年度ではDs、D、C圃場に設置した。なお、取水量に欠測が生じた期間については、湛水位および地下水位の変化量を基にした圃場の水収支により、取水量を推定した⁴⁾。この推定は、考察に用いるには十分な精度で行えた。各圃場の地表排水量については、直角三角堰を排水口近傍に設置し、観測した。さらに、塩ビ管に格納した絶対圧式水位計を田面から1.3mの深さに埋設し、各圃場内の地下水位を観測した。地下水位観測地点

名は、暗渠ライン名(L1またはL3)-取水桝からの距離(m)-暗渠ラインからの距離(m)を表している。湛水位は、水圧式水位計を各圃場の2ヶ所に設置し観測した。各圃場において湛水があり、かつ取水、排水、降雨がないときにN型減水深計を各圃場内の2点に設置し、減水深を観測した。気象については、A圃場の近傍に気象観測機器を設置し、雨量、気温、風向・風速、日射量、相対湿度、大気圧を観測した。

観測期間は基本的に5月から8月までであるが、地下

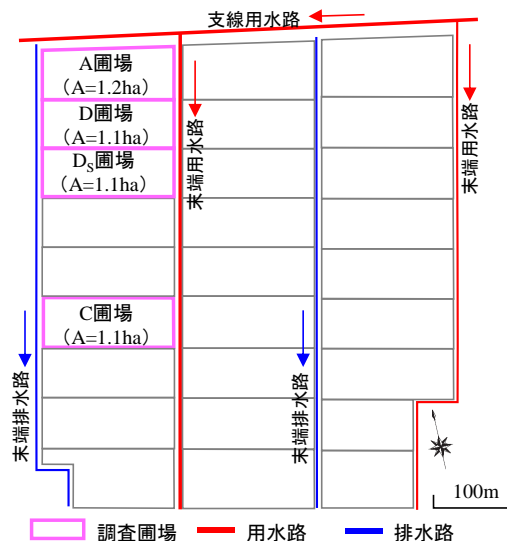


図-1 調査圃場の位置図

表-1 各調査圃場の栽培方式

圃場名	平成28年度	平成29年度	平成30年度
A	乾田直播栽培 (代かきなし)	乾田直播栽培 (代かきなし)	移植栽培 (代かきあり)
D	湛水直播栽培 (代かきあり)	湛水直播栽培 (代かきあり)	湛水直播栽培 (代かきあり)
C	移植栽培 (代かきあり)	移植栽培 (代かきあり)	移植栽培 (代かきあり)
Ds	湛水直播栽培 (代かきあり)	乾田直播栽培 (代かきなし)	乾田直播栽培 (代かきなし)

※着色した箇所では、調査未実施である。

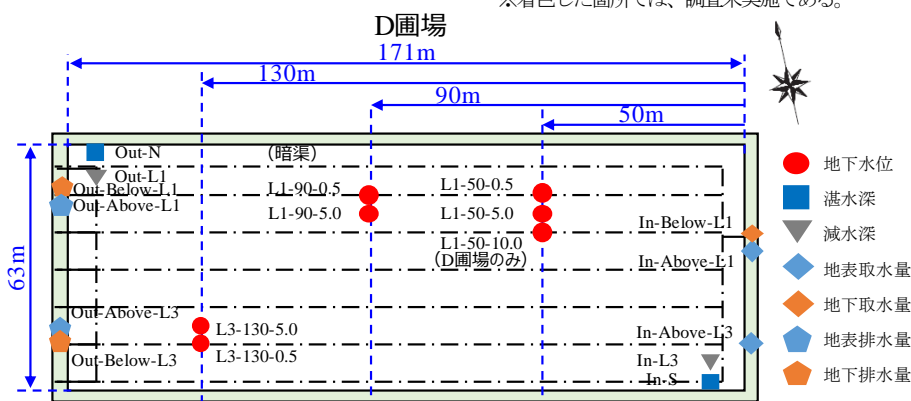


図-2 観測地点の位置 (D圃場の例)

水位は9月下旬までである。測定間隔は10分とした。

なお、蒸発散量については、ペンマン法により推定した。土壌については、各圃場の1地点において深さ100cmまでの土壌断面調査を行うとともに、採取した試料で土壌物理性試験を行った。各圃場の営農管理については、農家への聞き取り調査を行った。

2.2 中富良野地区

2.2.1 地区概要

調査対象は、空知郡中富良野町に位置する4圃場である。調査圃場を含む農区では、平成30年に国営農地再編整備事業により圃場整備が実施され、大区画化およびパイプライン化、地下水水位制御システムの整備が行われた。調査は、平成26年および平成27年に圃場整備前の圃場（以下、未整備圃場）、令和元年に圃場整備後の圃場（以

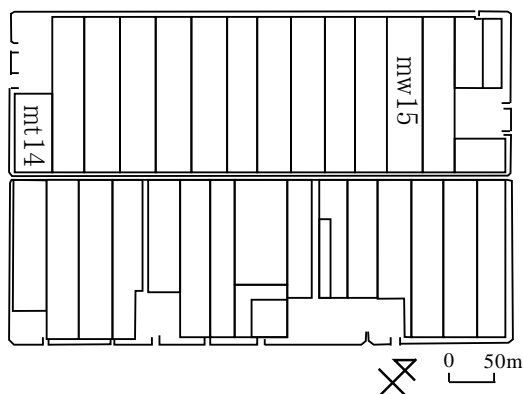


図-3 調査圃場の位置（圃場整備前）

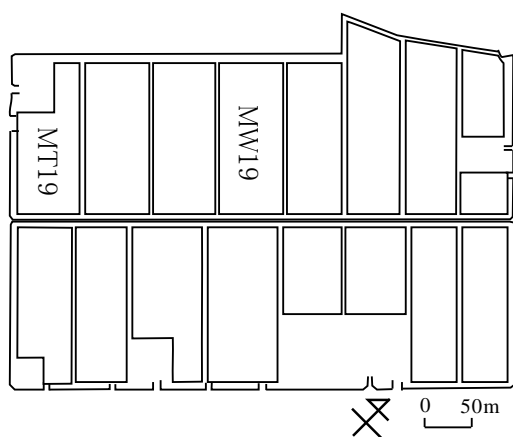


図-4 調査圃場の位置（圃場整備後）

表-2 調査圃場の概要

圃場名	圃場整備	栽培方式	圃場面積(m ²)	調査年度
mt14	未	移植栽培	4,116	平成26年度
mw15	未	乾田直播栽培	5,910	平成27年度
MT19	済み	移植栽培	10,649	平成28年度
MW19	済み	乾田直播栽培	11,971	平成29年度

下、整備済み圃場）において行った（図-3、図-4）。調査圃場の栽培方式は、移植栽培および乾田直播栽培である。各圃場における調査時の圃場整備状況、水稻栽培方式、圃場面積を表-2に示す。乾田直播栽培では、前年度に移植栽培を行うと雑草抑制が期待できることから、mw15では、前年度に移植栽培が行われた。

圃場整備前では、農業用水は、支線水路から小水路を経由し、各圃場へ取水される。どちらとも開水路形式である。各圃場への用水供給は、地表灌漑1ヶ所から行える。各圃場の排水は、地表排水1ヶ所、暗渠排水口1ヶ所から行える。暗渠排水は整備されているが、その配線は不明である。

整備済み圃場では、それぞれ集中管理孔が整備されたことから、地表または地下、あるいはその併用による用水供給が可能となっている。各圃場への用水供給は、地表灌漑2ヶ所、地下灌漑1ヶ所から行える。各圃場の排水は、地表排水2ヶ所、暗渠排水2ヶ所から行える。圃場内には、暗渠管（φ80～90mm、勾配1/1,000）が田面から0.80m～1.00mの深さに約10m間隔で埋設されている。疎水材は木材チップである。

調査圃場における耕作および水管理は、圃場整備前後とも、一人の農業者の判断により行われた。この農業者は、未整備圃場において、平成25年から乾田直播栽培に取り組んでいる。

2.2.2 調査方法

各圃場における観測地点の位置を図-5に示す。未整備圃場では、パーシャルフリューム（写真-1）により、地表取水量を観測した。整備済み圃場では、電磁流量計により地表取水量、地下取水量、地下排水量を観測した。整備済み圃場の地表排水量については、直角三角堰を排水口近傍に設置して観測した。圃場の湛水深は、水圧式水位計を各圃場の2ヶ所に設置して観測した。各圃場内の地下水位は、有孔塩ビ管に格納した絶対圧式水位計を田面から1.3mの深さに埋設し、観測した。この観測値は、厳密には、水位計センサー一部の圧力水頭であるが、本報ではこれを参考にして、地下水位の動きを考察した。地下水位の観測地点については、未整備圃場では、圃場中央部2地点（各地点間の距離は5m程度）とした。整備済み圃場では、給水側および排水側において、それぞれ暗渠付近および暗渠間の中央を観測地点とした。各圃場の浸透量については、取水、排水、降雨がない日を対象として、各圃場の湛水位の変動より一筆減水深を算定し、この値からペンマン法で推定した蒸発散量を差し引いたものを、一筆浸透量として算定した。圃場整備後におけ

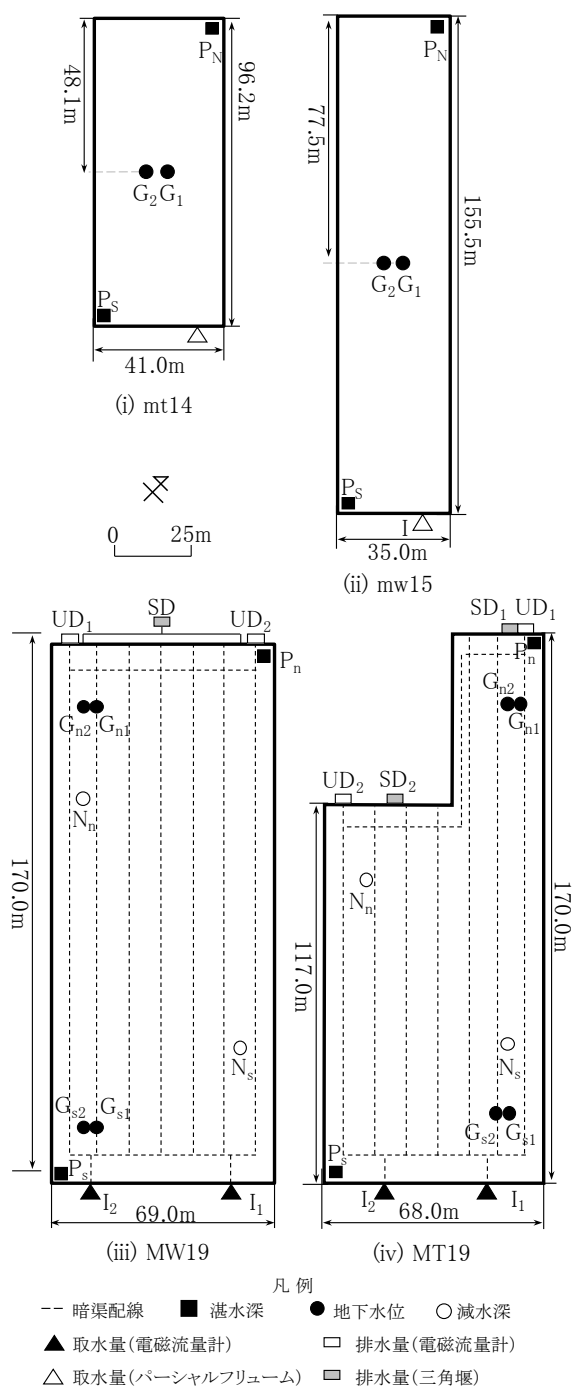


図-5 調査圃場における観測機器の位置



写真-1 パーシャルフリュウム

る日減水深は、各圃場において湛水があり、かつ取水、排水、降雨がないときにN型減水深計を各圃場内の2点に設置し、灌漑期間中に2回観測した。気象については、平成26年および平成27年では、雨量計をmt14圃場の近傍に設置した。ペンマン法による蒸発散量の推定に必要な項目については、アメダス(上富良野)のデータを使用した。令和元年では、MT19圃場の近傍に気象観測機器を設置し、雨量、気温、風向・風速、日照時間、相対湿度、大気圧を観測した。観測期間については、取水量、湛水深、減水深は5月から8月までとし、その他の調査項目については、5月から9月までとした。測定間隔は10分である。なお、蒸発散量については、ペンマン法により推定した。

各圃場における圃場整備前の土壌断面については、北海道開発局旭川開発建設部から資料提供を受けた。圃場の水管理については、農業者への聞き取りを行い、地表取水および地下取水の判別については、農業者の水管理日誌を参考にした。また、平年の営農作業時期については、中富良野町農業センターへの聞き取りを行った。

3. 各栽培方式における水管理および用水量の特性

本章では、美唄地区における水管理および用水量の調査結果について述べる。

3.1 調査年における気象状況

灌漑期間中(5~8月)における降水量の合計値は、平成28年度では772mm、平成29年度では485.5mm、平成30年度では685.5mmであり、気象庁データの平年値と比べると、平成28年度は約1.2倍、平成29年度は約0.8倍、平成30年度は約1.1倍であった。降水量について、月ごとの値と平年値を比べると、6月はいずれの年とも平年値の2.2~2.7倍、平成28年8月は台風の影響により平年値の2.3倍であった。気温については、いずれの年とも平年並みであった。

3.2 各圃場の土壌

A圃場の土壌は、地表から-32cmまでが作土であり、-32cmから厚さ13cmの泥炭層がある。泥炭層以外の土性はシルト質埴土である。D圃場では、地表から-18cmまでが作土である。-37cmから厚さ30cmの泥炭層がある。泥炭層以外の土性は軽埴土である。C圃場では、地表から-25cmまでが作土である。-35cm以深は泥炭層であり、それ以外の土性は軽埴土である。いずれも、室内飽和透水試験による透水係数(cm/s)のオーダーは、作土層で 10^{-6} ~ 10^{-7} 、泥炭土で 10^{-4} ~ 10^{-5} である。

3.3 各圃場の浸透量

3年間にわたる減水深調査における減水深の値から、それぞれの蒸発散量を差し引き、浸透量を算定した。この結果、各圃場における日浸透量の3ヶ年の正の値の平均値(括弧内は最小値および最大値を示す)は、乾田直播栽培(AおよびDs圃場):2.8mm(-3.1~15.8mm)、湛水直播栽培(D圃場):2.2mm(-1.0~5.7mm)、移植栽培(C圃場):2.2mm(-3.1~17.4mm)であった。周辺の地下水位が低い圃場では、代かきが行われない場合、浸透

量が増加する例がある⁵⁾が、調査圃場ではいずれも浸透量の値は概ね小さかった。その理由として、泥炭地域であることから圃場の地下水位が高いことにより、代かきの有無による差が小さかったものと考えられる。

3.4 各栽培方式における圃場の水管理

各調査年度における各圃場の湛水位および地下水位の経時変化と水管理状況を、それぞれ図6~図8に示す。ここで、図中における各年および各圃場のデータは、平

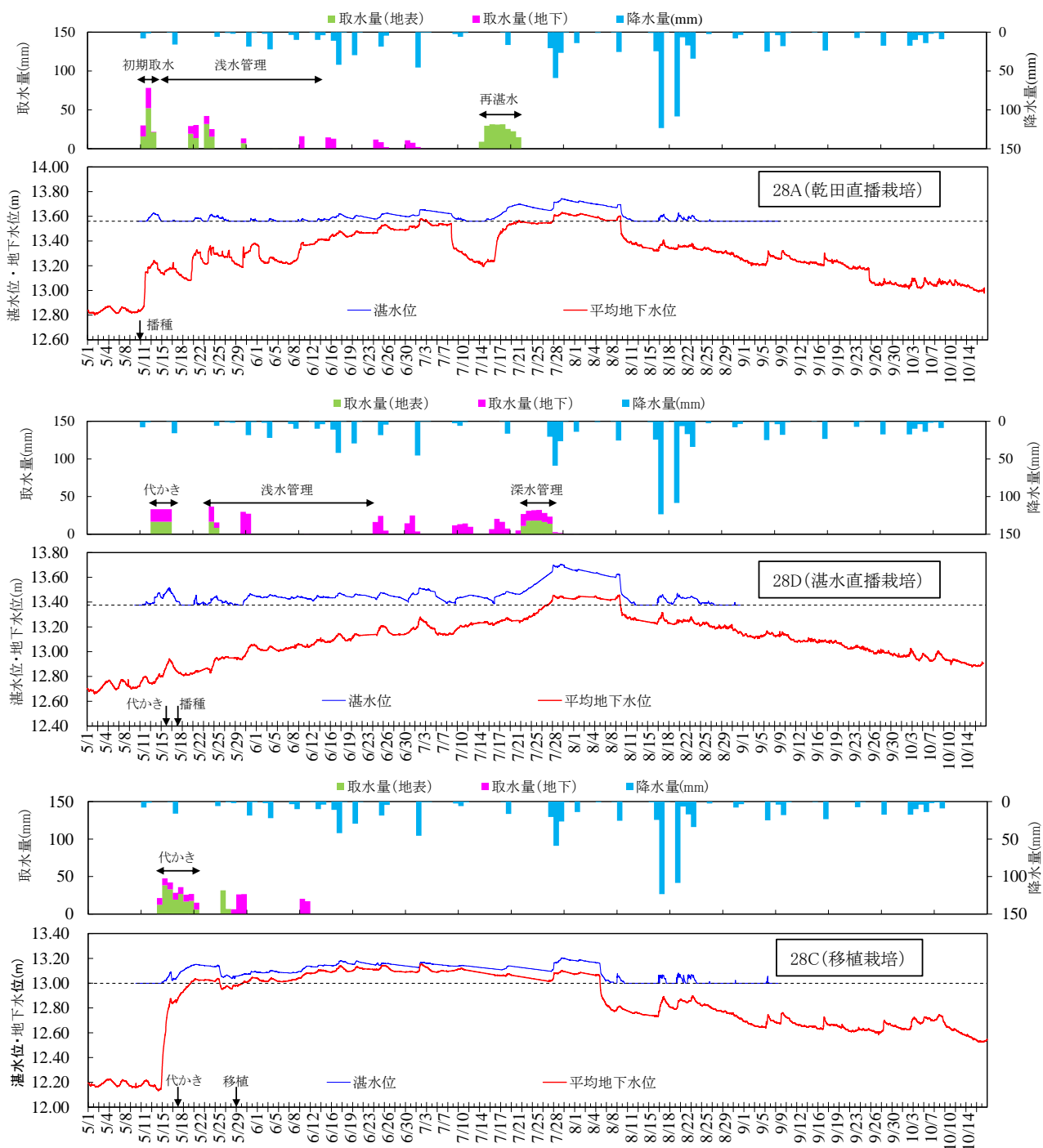


図6 各圃場における湛水位および地下水位の経時変化(平成28年)

成 28 年の A 圃場は「28A (乾田直播)」というように、和暦、圃場名 (括弧内は栽培方式) の組合せにより表している。また、図中の湛水位は 2 地点の平均値を、地下水位は 4 地点 (L1-50-0.5、L1-50-5.0、L3-130-5.0、L3-130-0.5) の平均値を標高換算した値を示した。ここで、直播栽培において行われる「浅水管理」とは、田面を湿潤状態にさせ、地表面が乾いたら再び湿潤にする水管理をいう。浅水管理期間の判定は、水稻の生育や取水

時期、地下水位変化により行った。各圃場の水管理は、以下のとおりである。

3.4.1 A および Ds 圃場 (乾田直播栽培) の水管理

図-6 に示すように 28A では、播種 (5 月 10 日) の翌日に初期取水が行われた後、浅水管理が行われた。浅水管理期間は主に地表灌漑と地下灌漑の併用により取水され、浅水管理後は主に地下灌漑が行われた。7 月中旬に除草材散布のため一時的に落水されており、再湛水時にまと

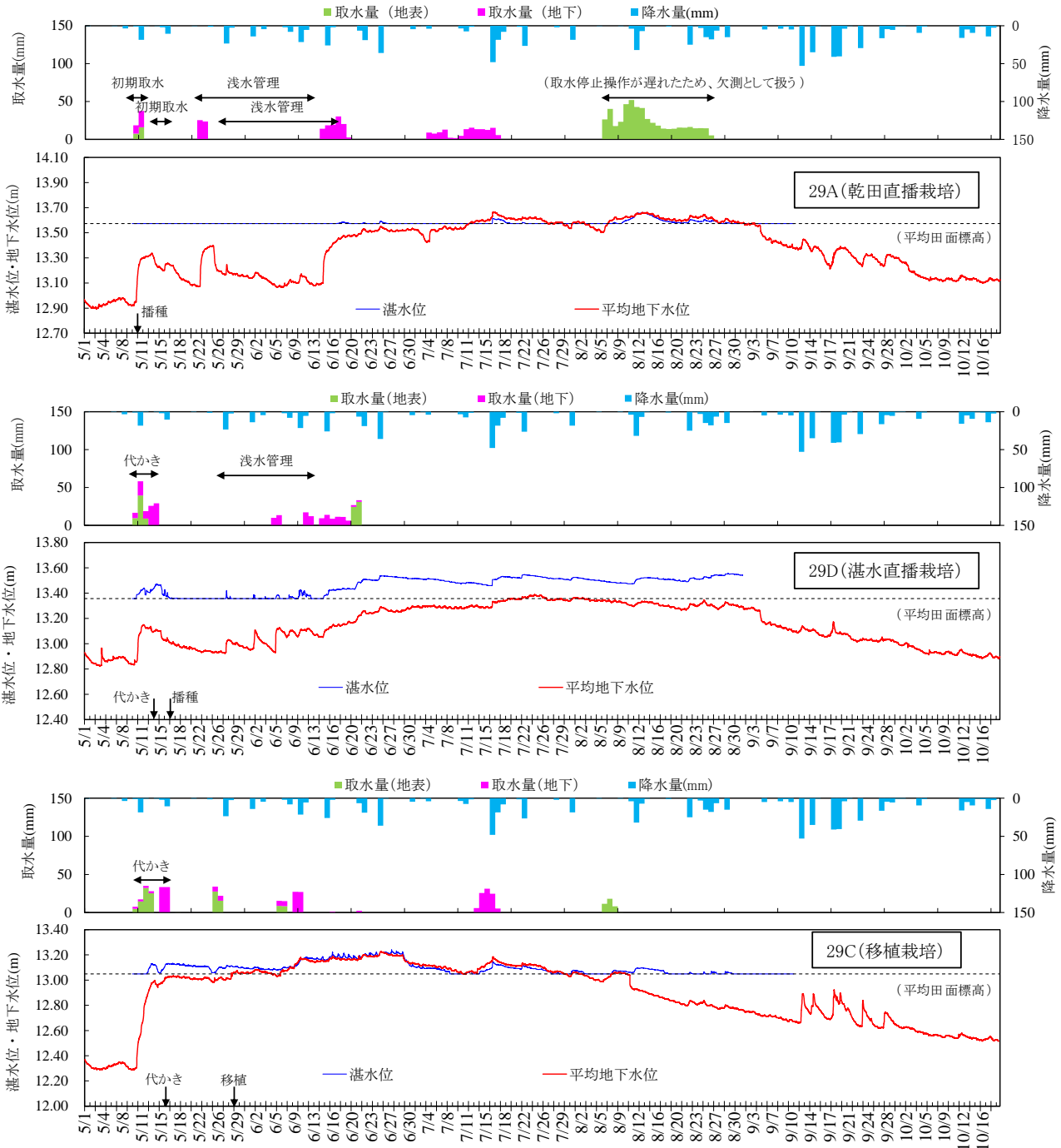


図-7 各圃場における湛水位および地下水位の経時変化 (平成 29 年)

まった取水が行われた。

図-7に示すように29Aでは、播種(5月10日)を行った日の夕方に初期取水が行われた後、3週間程度、浅水管理が地下水取水により行われた。8月7日から8月26日までの地表取水については、農家への聞き取りによると、取水停止の操作が遅れたことから、意図していたよりも取水期間が長くなった。このため、この期間の取水量はゼロとし、排水量は水収支により推定した。

図-8に示すように30Dsでは、播種(5月10日)を行っ

た後に地表灌漑と地下灌漑の併用により初期取水が行われ、その2週間後に地表灌漑と地下灌漑の併用または地表灌漑により浅水管理が行われた。7月中旬には落水され、除草剤が散布された後に再湛水された。

3.4.2 D圃場(湛水直播栽培)の水管理

図-6に示すように、28Dでは、代かき(5月15日)の2日後に播種が行われ、播種後から苗立ちが安定するまでの期間に浅水管理が地下灌漑と地表灌漑の併用または地下灌漑により行われた。浅水管理期後は、主に地下灌

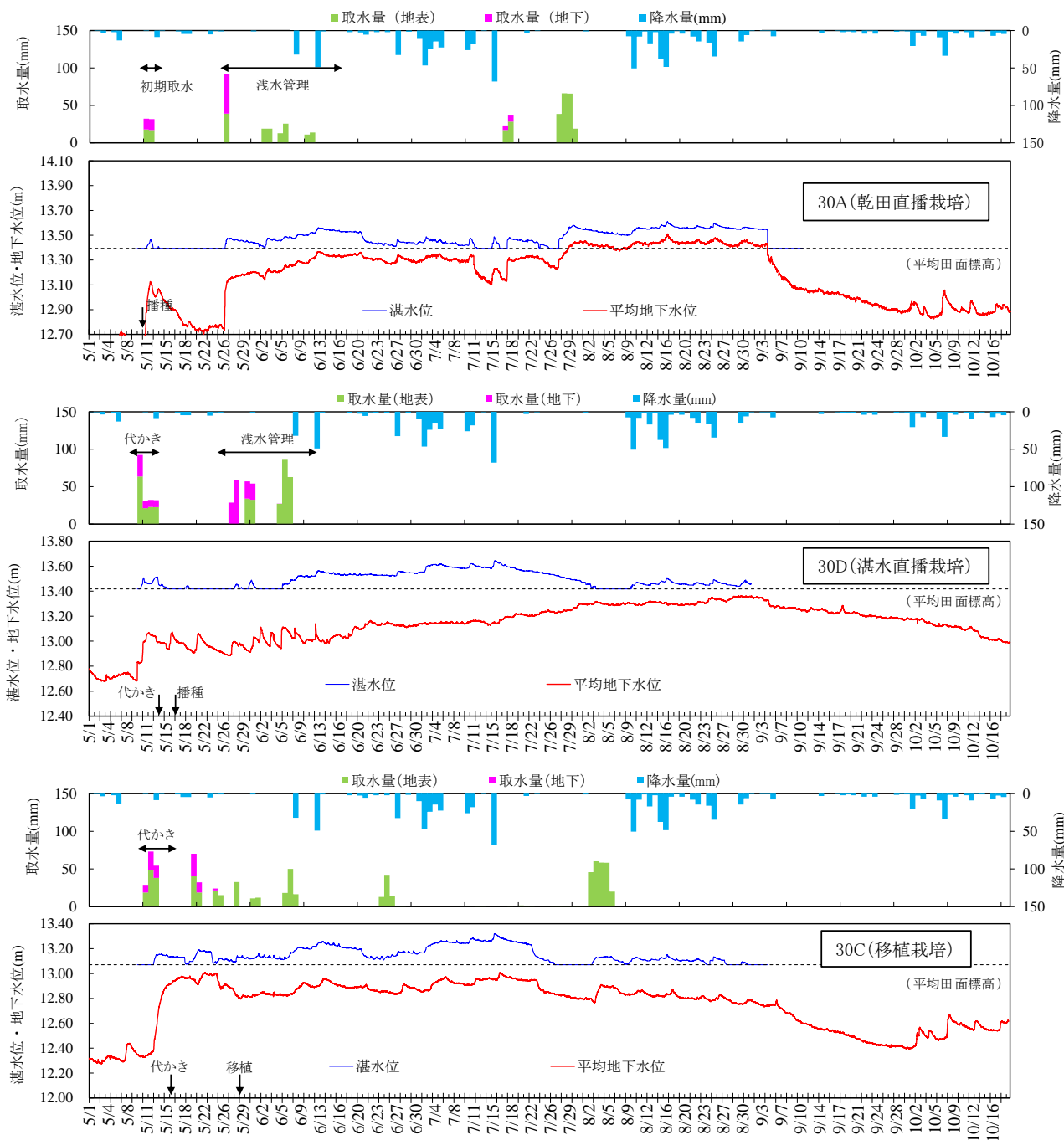


図-8 各圃場における湛水位および地下水位の経時変化(平成30年)

漑が行われ、7月下旬以降は地下灌漑と地表灌漑の併用により取水された。7月下旬から8月上旬までの期間、深水灌漑が行われた。

図-7に示すように、29Dでは、代かき(5月13日)の2日後に播種が行われ、播種後から苗立ちが安定するまでの期間に浅水管理が地下灌漑により行われた。6月中旬以降、湛水管理が行われた。農家への聞き取りによると、例年は8月中旬に落水するが、農家による落水操作が遅れ、9月初めに落水が行われた。

図-8に示すように、30Dでは、6月中旬以降は灌水されず、圃場への供給は降雨のみであった。

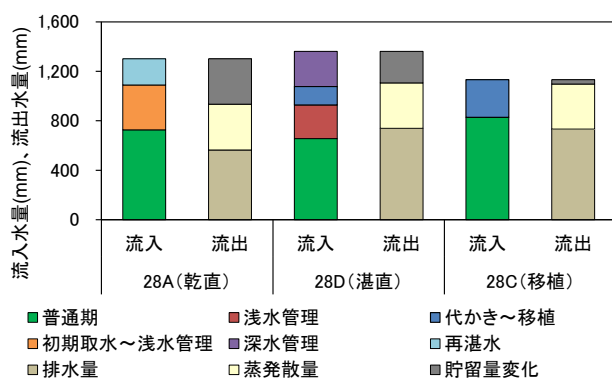


図-9 圃場水収支の比較 (平成28年)

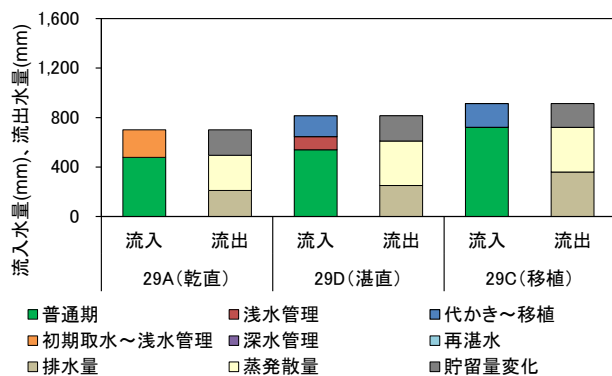


図-10 圃場水収支の比較 (平成29年)

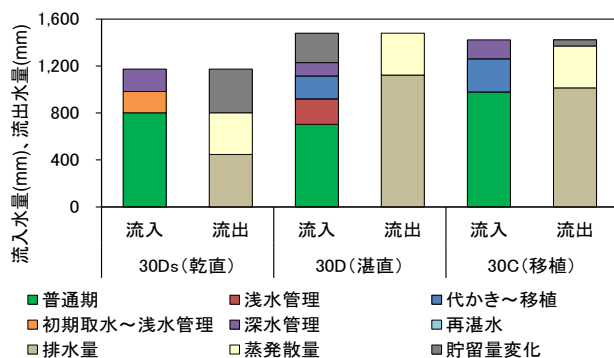


図-11 圃場水収支の比較 (平成30年)

3.4.3 C圃場(移植栽培)における水管理

図-6に示すように、28Cでは、5月14日に地表取水と地下取水との併用により初期取水が行われ、代かき(5月17日)を行った後、湛水状態で管理された。移植後は地下灌漑が行われた。降雨量が多かったことから、6月中旬以降は取水が行われなかった。図-6に示すように、湛水位および地下水位の経時変化をみると、移植栽培では、地表灌漑と地下灌漑の併用による代かき取水に伴い、地下水深が-0.80mから-0.10m程度まで急速に上昇した。湛水期間中における圃場の地下水位は、8月初めまでほぼ湛水位と一体的に変動していた。C圃場における水管理の特徴としては、代かき用水があったこと、中干しが行われなかったために再湛水時の栽培管理用水量がなかったことが挙げられる。

図-7に示すように、29Cでは、初期取水が5月10日に行われ、代かきが5月15日に行われた。その13日後に移植が行われ、その後は湛水状態で管理された。

図-8に示すように、30Cでは、初期取水が5月11日に行われ、5月19日～20日に代かきが、5月24日に移植が行われた。代かき期間までは、地表灌漑と地下灌漑の併用であったが、移植後に地下灌漑が行われた。6月中旬以降は、灌水されず、圃場への供給は降雨のみであった。

3.5 各栽培方式における圃場の水収支の特性

灌漑期における水収支特性をみるために、平成28年から平成30年までにおける各圃場の水収支を比較した(図-9～図-11)。ここでは、取水量および降水量を流入とし、排水量および蒸発散量を流出とした。水収支の算定対象期間は、平成28年8月後半に大雨があったことを考慮し、両年とも、代かき取水または初期取水から8月中旬までとした。ただし、前述のとおり、29Aについては、意図しない取水量が含まれていたため、8月上旬までの期間を対象とした。

各圃場における流入量および流出量の大小関係は、30Dsでは流入が流出を下回っていたが、その他の圃場では流出が流入を上回っていた。前者の理由としては、縦浸透および横浸透による圃場外への流出や圃場内への貯留が生じたこと、後者の理由としては、縦浸透および横浸透による圃場への流入が生じたことが考えられる。

各年における圃場への流入量を比べると、平成29年は他の年よりも値が小さかった。この理由として、平成28年では、8月に大雨があったこと、A圃場の除草剤散布のために落水した後の再湛水量(195mm、地表灌漑)、D圃場の深水用水量(184mm、地表灌漑および地下灌漑の併用)

が、また平成 30 年度ではDs 圃場の除草剤散布のために落水した後の再湛水量 (61mm、地表灌漑および地下灌漑の併用) があったことが考えられる。

3. 6 各栽培方式における特徴的な水管理

各栽培方式における特徴的な水管理を経時的に把握するために、灌漑期間における各圃場への供給水量 (取水量と有効雨量の和) を算定し、累加供給水量を比較した (図-12)。有効雨量については、地表排水量を栽培管理用水量 (圃場へ供給された用水のうち落水口などから表面流去する水量) と無効雨量とに分離する方法⁶⁾により算定した。なお、平成 29 年の A 圃場では、8 月上旬以降は、農家による取水停止操作が遅れたため欠測扱いとし、累加供給水量の計算対象とはしなかった。

各栽培方式における 8 月末時点の累加供給水量をみると、平成 28 年では、28A および 28D の値は 28C より 25% 程度多く、平成 29 年では、いずれも値は同程度であり、平成 30 年では、30Ds および 30C は 30D よりも 20% 程度多い値であった。栽培方式ごとの水管理をみると、28A および 30Ds では 7 月中旬に除草剤散布のための落水に伴う再湛水が行われ、28D では深水灌漑が行われた。栽培管理に伴う主な水管理は、栽培方式に関わらず、以下に述べる状況下において行われた。農家への聞き取りによれば、28A の除草剤散布に伴う落水・再湛水は、栽培方式とは関係なく、水稻の生育状況、雑草の種類や繁茂状況に応じて実施された。28D の深水灌漑については、水稻の生育状況と気象条件に応じて必要とされた。異なる栽培方式では、それぞれの水稻の生育にずれが生じるため、別の時期に低温が到来していれば、他の圃場でも深水灌漑が行われたはずである。

前述したように、各栽培方式の圃場浸透量は、代かきの有無に関わらずいずれも小さい値であった。それゆえ、

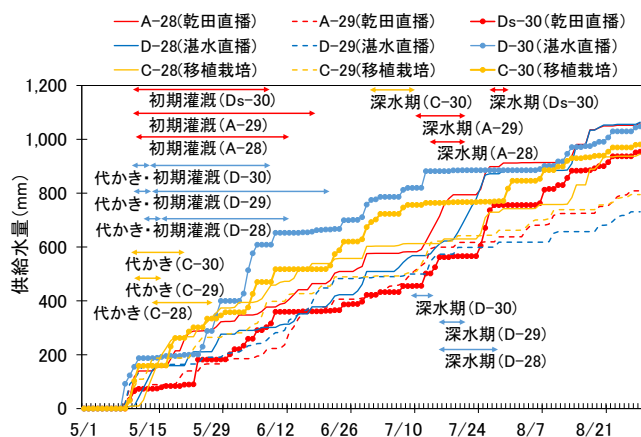


図-12 各圃場における累加供給水量

各栽培方式の用水量の差は、除草剤散布に伴う落水および再湛水や深水灌漑の有無により生じた。これらの栽培管理は、特定の栽培方式だけで必要とされるようなものではなく、気象の推移によっては、いずれの栽培方式でも必要になる可能性のあるものであった。3 種の栽培方式を比べれば同じ日に同じ生育ステージであるとは限らないため、3 圃場が同じ気象条件におかれたとしても、必ずしも同じ防除作業が行われるわけではない。また、ある年にある栽培方式に対して行われた栽培管理が、別の年には別の栽培方式で実施されることもある。このように 3 カ年の調査では、ある栽培方式に固有で、用水計画上で見込まなければならない栽培管理用水量は発生していなかったと考えられる。

4. 将来における農業用水需要の予測手法の提案

これまで述べたように、各栽培方式における供給水量に大きな差は生じなかった。しかし、栽培方式の違いにより、生育時期や各生育時期における水管理および必要水量が異なる。今後も直播栽培面積は拡大すると見込まれていることから、移植栽培を前提とした従来の水利用パターンがどのように変化するかを想定し、用水供給に支障が生じないような用水計画を検討する必要がある。また、用水需要が高まる時期に用水路の通水容量が不足することがないかを確認することも必要である。本章では、将来における灌漑期の用水需要パターンの予測手法および将来における圃場群のピーク用水量の予測結果について、以下に述べる。

4. 1 水稻直播栽培面積が拡大する場合の水利用パターンの予測手法

水利用パターンのイメージ作成のフローを図-13 に示す。各水管理時期における圃場流入量は、圃場への取水量および有効雨量の合計値とした。各栽培方式における水管理の時期および期間は、調査圃場における実績および農業協同組合の栽培暦 (以下、「JA 栽培暦」) を参考に設定した。この JA 栽培暦によれば、乾田直播栽培の播種適期は 5 月 1 日からの 10 日間であり、湛水直播栽培での代かき適期は 5 月 11 日からの 10 日間である。乾田直播栽培を例にとれば、想定する地区内の直播栽培圃場が、播種適期の 10 日間に均等に播種および取水管理をするとして、これらの圃場の合計の用水量を計算する。図-14 は、美咲市の大区画圃場での用水量調査結果 (平成 28 年度~30 年度) を用いて作成した水利用パターンである。

実際の灌漑施設では、図-14 のように頻繁な取水量調整が困難であるから、期別水利権量の示し方としては、

矩形を組み合わせた水利用パターンが一般的である。図-15は、図-14を基にして、栽培方式ごとに矩形の組み合わせで表現した水利用パターンである。

図-16は、乾田直播栽培や湛水直播栽培の面積が拡大した場合の水利用パターンを想定した事例である。これらは、図-14の水利用パターンを用いて、各栽培方式の面積比率を想定し算出した。図-16は、作付比率を移植栽培：乾田直播栽培：湛水直播栽培＝6：2：2と仮定したものである。直播栽培面積が拡大すると、灌漑初期のピーク用水量が減少するとともに、直播栽培における初期の水管理により、従来と比べてピーク用水量の必要期間が延びる。また、各栽培方式における生育のずれにより、深水期が分散されることから、深水用水は従来よりも長期間必要となる。

4.2 圃場群におけるピーク用水量の予測事例

将来、直播栽培面積が増加すると見込まれる場合、圃場群のピーク用水量がその施設容量を上回らないかをあらかじめ確認する必要がある。そこで、前述した水利用パターンの予測手法を基にし、圃場群のピーク用水量の予測を行った結果を以下に述べる。

一般に、移植栽培を前提とした従来の水利用では、ピーク用水量は代かき期に生じることから、灌漑初期を予測の対象期間とした。各栽培方式におけるピーク用水量を算定するために、美咲地区における3通りの栽培方式の

3年間の観測データを基に、渡辺ら⁶⁾の方法で有効雨量を算出し、これと取水量を合計したものを日当たり用水量とした。

予測対象期間は5月1日から6月30日までとし、圃場水管理が湛水状態で安定している期間と、それ以外の期間に区分した。前者では、減水深の平均値(移植栽培：5.5mm/d、乾田直播栽培：7.3mm/d、湛水直播栽培：6.0mm/d)の用水量が圃場水管理に必要であると想定した。後者については、①移植栽培および湛水直播栽培の代かき期、②乾田直播栽培の播種後水管理、③乾田直播栽培および湛水直播栽培の普通期開始期、④乾田直播栽培および湛水直播栽培の浅水管理期に区分し、調査による当該期間

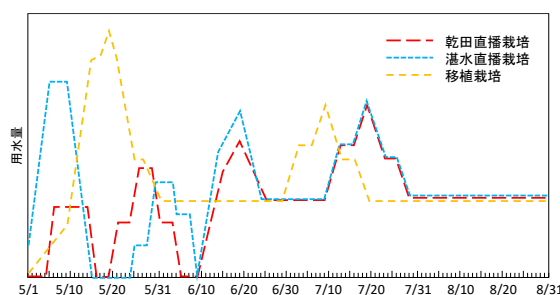


図-14 圃場での日用水量と栽培適期から作成した水利用パターン (イメージ図のため縦軸に数値を記していない)

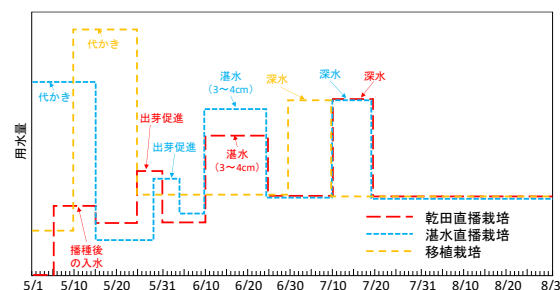


図-15 矩形の組み合わせにした水利用パターン (イメージ図のため縦軸に数値を記していない)

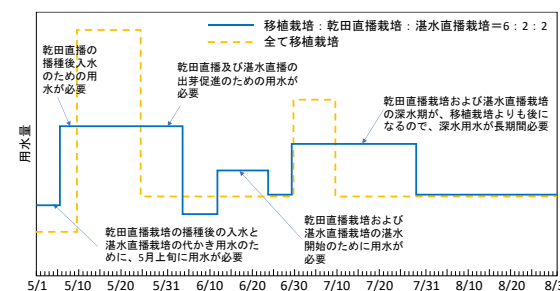


図-16 移植栽培：乾田直播栽培：湛水直播栽培＝6：2：2の場合の水利用パターン

(イメージ図のため縦軸に数値を記していない)

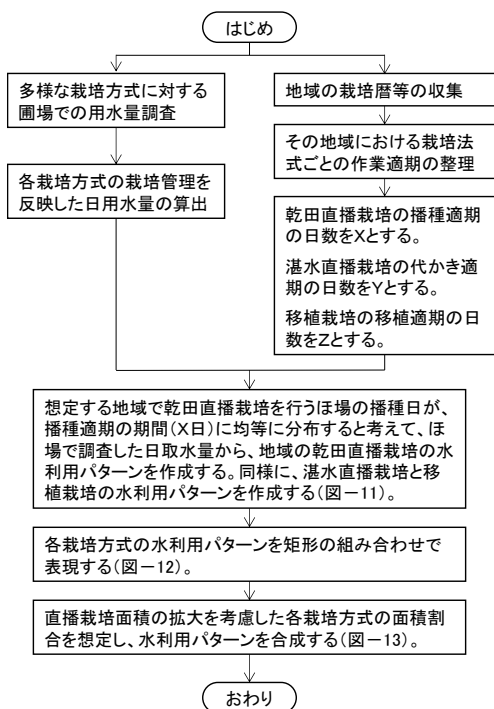


図-13 直播栽培面積が拡大した場合の水利用パターンの予測手順

の用水量の実測値相当量が必要であると想定した。

各栽培方式における水管理期間については、当該地域の「JA栽培暦」による生育適期の幅(日数)を参考に設定した。各栽培方式における計算方法は、以下のとおりである。現況の用水計画における移植栽培の代かき期間は5月11日から25日までの15日間である。移植栽培では、15枚の圃場群を想定し、各圃場の取水開始日を1日ずつずらし、各日の用水量を合計して算出した。乾田直播栽培では、播種の適期が5月1日から5月10日までの10日間であることから、10枚の圃場群を想定して算定した。湛水直播栽培では代かき取水開始から代かき作業終了ま

での期間が5月1日から5月15日までの15日間であることから、15枚の圃場群を想定して算出した。

各栽培方式について、3年間のうちで最もピーク用水量が大きくなった年のデータを用いて得られた圃場群の用水量を図-17に示す。各ピーク用水量は、移植栽培では19.7mm/d、乾田直播栽培では16.2mm/d、湛水直播栽培では18.3mm/dとなった。この結果を用いて、3種の水稲栽培方式の面積割合を移植栽培：乾田直播栽培：湛水直播栽培=a:b:cとして、表-3のように設定し、直播栽培面積が拡大した場合の圃場群の用水量H(mm/d)を次式により推定した。

$$H = \frac{H_i a + H_k b + H_l c}{a + b + c} \quad (1)$$

表-3 将来における水稲栽培方式の面積割合の想定

	移植栽培	乾田直播栽培	湛水直播栽培
	a	b	c
ケース1	50%	25%	25%
ケース2	50%	50%	0%
ケース3	50%	0%	50%
ケース4	0%	50%	50%

ここで、 H_i 、 H_k 、 H_l は、当該月日の移植栽培、乾田直播栽培、湛水直播栽培の用水量(mm/d)である。

将来における圃場群の用水量Hを計算した結果を図-18に示す。ケース1~4の値は、移植栽培100%におけるピーク用水量よりも小さい値であった。これは、栽培方式が異なることから、取水期間が分散されたためである。圃場群における栽培方式がすべて乾田直播栽培または湛水直播栽培になったとしても、ピーク用水量は移植栽培の場合を超えることはない。よって、調査対象地域では、直播栽培面積が拡大しても、現況のピーク用水量を上回ることはいと予想された。

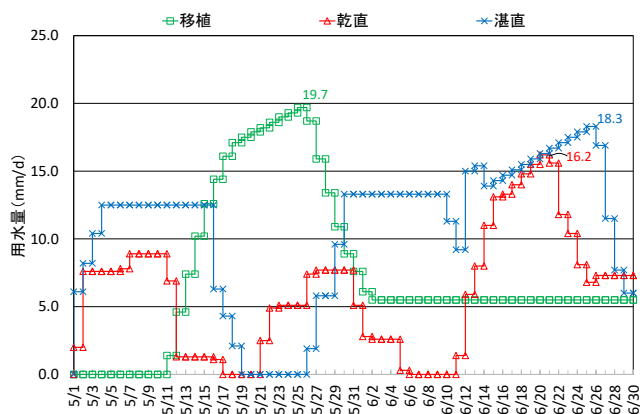


図-17 各栽培方式における灌漑初期のピーク用水量

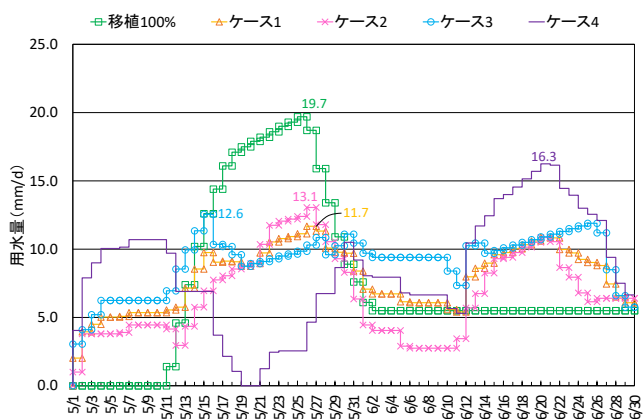


図-18 想定した面積割合におけるピーク用水量

5. 圃場整備前後における移植栽培および乾田直播栽培の水管理の比較

5.1 調査圃場における水管理

ここでは、中富良野地区における圃場整備前後における圃場水管理の調査結果について述べる。各圃場における湛水深および地下水位の経時変化と水管理状況を図-19に示す。図中の湛水深および地下水位は、各地点の田面高をゼロとしている。聞き取りによると、移植栽培における平年の営農作業時期は、代かき期が5月10日~5月15日、移植日が5月18日~5月28日であった。乾田直播栽培における平年の播種日は、5月5日~5月10日であった。各圃場における水管理状況を以下に述べる。

①未整備移植 (mt14)

圃場への取水は、すべて地表灌漑により行われた。圃場は、代かき後から湛水状態で管理された。地下水位は、代かき取水に伴い、-0.85mから田面近くまで急速に上昇したが、湛水期間中では-0.60m程度で推移した。湛水深は、7月後半から8月上旬にかけて、その他の時期より

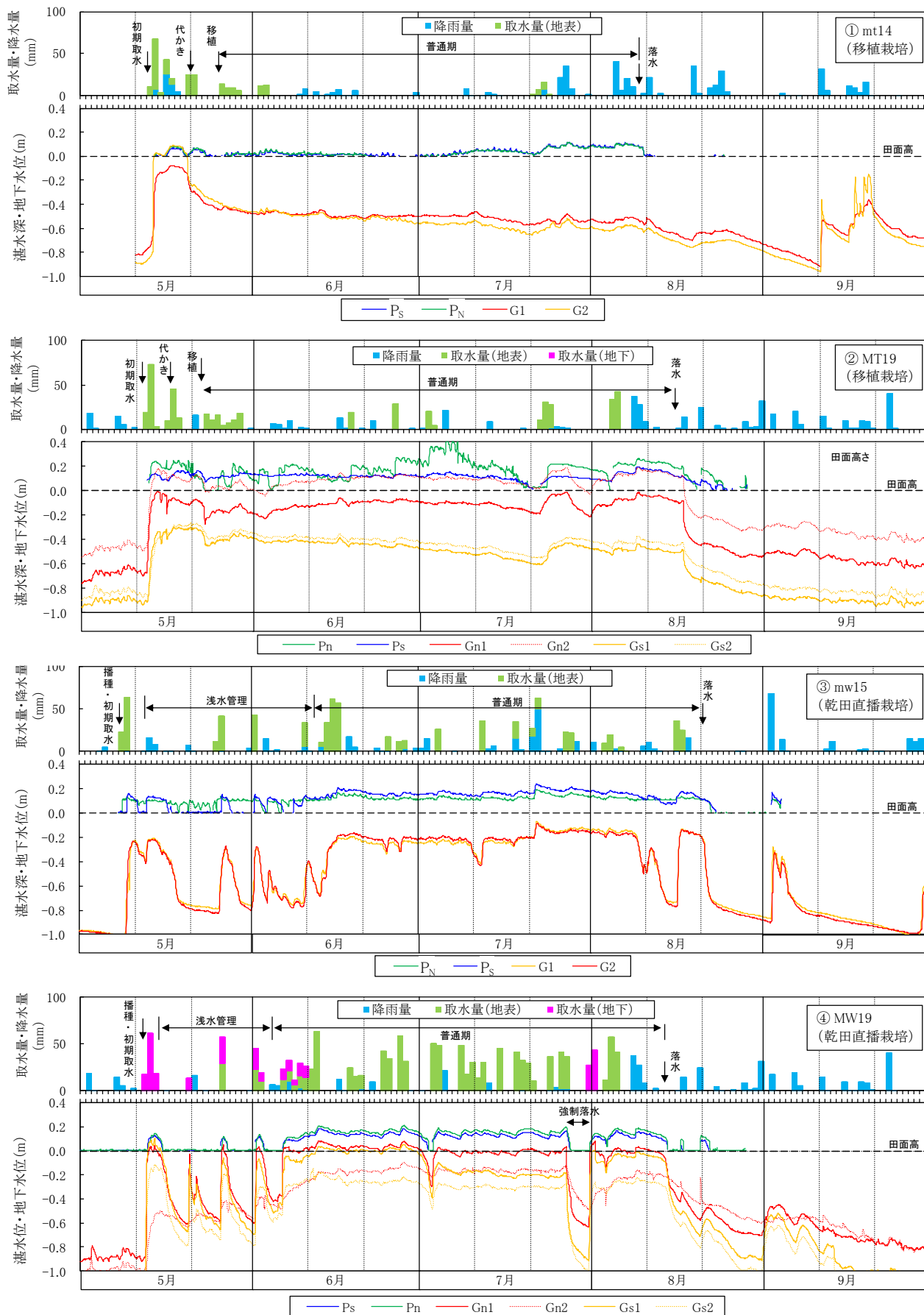


図-19 各圃場における取水量、湛水深、地下水位の経時変化

も深い水深で管理された。6月中旬以降から7月中旬までは、取水が行われなかった。灌漑期間において、中干しのような栽培管理に伴う強制落水や掛け流しは行われなかったため、栽培管理用水量は生じなかった。

②整備済み移植栽培 (MT19)

この圃場では地下灌漑が可能であるが、聞き取りによれば、移植栽培時における圃場への取水は、すべて地表灌漑により行われた。代かき取水では、掛け流し状態となることがあった。地表排水が行われた後に、田植えが行われた。田植え後は、湛水状態で管理された。湛水期間中、強制落水や掛け流し灌漑は行われなかったため、栽培管理用水量は生じなかった。

③未整備乾田直播栽培 (mw15)

圃場への取水は、すべて地表灌漑により行われた。播種の翌日に初期取水が行われた後、約3週間にわたり、浅水管理が行われた。この浅水管理とは、種籾の芽立ちが安定するまでの期間、間断的に圃場を湿润状態にするものである。本報では、水稻の生育や取水時期、地下水位変化により、浅水管理の期間を判定した。湛水期間における地下水位は、比較的田面近くで推移していた。代かきが行われていないため、地表灌漑による供給水が田面からの地下へ浸透しやすくなったと考えられる。8

月中旬に強制落水された後、再湛水が行われた。

④整備済み乾田直播栽培 (MW19)

播種後に初期取水が行われた。その後、6月初めまでの約3週間、浅水管理が行われた。浅水管理の期間の判定は、mw15と同様に行った。灌漑方式についてみると、初期取水、浅水管理の前半および強制落水後の再湛水において、地下灌漑が行われた。浅水管理期の後半および普通期の初めでは、地表灌漑と地下灌漑が併用され、その他は地表灌漑が行われた。湛水期間中、掛け流し状態になっていることがあった。7月末に強制落水が行われた後、再湛水された。8月中旬に落水された。

5.2 取水強度

圃場整備後の水管理の違いとして、整備後では、地表灌漑に加えて、地下灌漑を行えることが挙げられる。そこで、灌漑方式による取水強度を比較することとした。各圃場における主な水管理時期の取水強度を図-20に示す。この取水強度については、取水1回あたりの取水量 (mm) をその取水時間 (h) で除して算定した。この結果、初期取水、浅水管理、再湛水では、灌漑方式による取水強度の差は小さかった。普通期では、すべて地表灌漑が行われたが、MW19でやや値が大きかった。

5.3 土性

mt14では、地表から-27cmまでが作土であり、田面から-59cm以深に泥炭層がある。泥炭層以外の土性は埴壤土である。透水係数 (cm/s) は、作土層で 4.8×10^{-6} 、埴壤土で 2.6×10^{-6} 、泥炭土で 1.0×10^{-5} である。mw15では、地表から-27cmまでが作土であり、-85cm以深に厚さ15cmの泥炭層がある。透水係数 (cm/s) は、作土層で $4.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ 、軽埴土で 5.9×10^{-5} 、重埴土で 1.9×10^{-5} である。

5.4 浸透量

各圃場における一筆浸透量および降下浸透量を図-21に示す。浸透量の値は、移植栽培より乾田直播栽培において大きい傾向が見られた。調査対象の圃場では、土性の違いに加えて、代かきの有無の影響により、浸透量に差が生じたと考えられる。

5.5 各圃場への累加供給水量

各圃場における累加供給水量を図-22に示す。各圃場の供給水量は、日取水量および有効雨量の和を計算し、日ごとの値を累加した。ここでは、農業用水 (水田) の計画基準⁹⁾を参考に、5mm/d以上から80mm/dの降雨を対象とし、その80%を有効雨量とした。各圃場における累加供給水量の値は、6月上旬まではほぼ同程度であったが、その後、特にMW19で顕著な増加がみられた。初期取水から落水までの総供給水量を比べると、mt14の値に対して、MT19

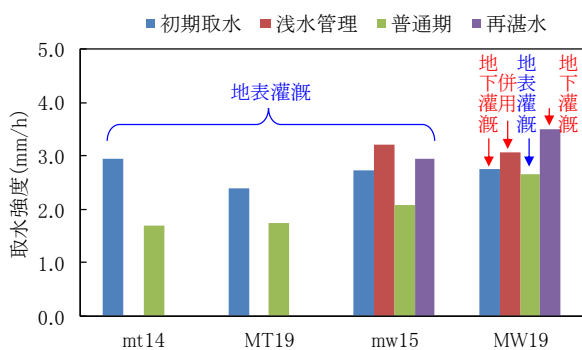


図-20 各圃場における取水強度

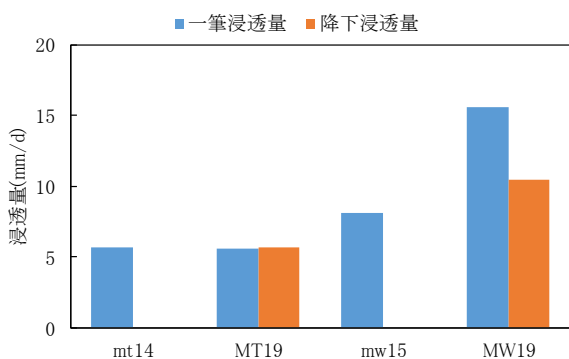


図-21 各圃場の浸透量

では1.4倍、mw15では2.0倍、MW19では3.5倍となった。

5.6 各圃場における供給水量の比較

各圃場における区分別の供給水量を図-23に示す。ここでは、初期取水から落水までの合計供給水量を、主な水管理に応じて、①初期取水から田植えまで(移植栽培)、②初期取水(乾田直播栽培)、③浅水管理(乾田直播栽培)、④普通期に区分した。さらに、④の普通期における供給水量を、⑤再湛水、⑥表面流去、⑦その他に分けた。ここで、表面流去とは、たとえば掛け流し状態による地表流出のように、浸透および蒸発散として圃場から出るのではなく、圃場の落水口から流出した水量である。ただし、未整備圃場(mt14、mw15)では、地表排水量データがないことから、表面流去の区分は行っていない。

圃場整備前後における供給水量を比較した結果、移植栽培では、圃場整備の前後における浸透量の差は小さいことから、供給水量の差も小さかった。乾田直播栽培では、整備前後とも、7月末に強制落水が行われた。農業者への聞き取りによると、中干しは基本的には行わないが、除草剤散布のための落水と中干しが重なる場合があるとのことだった。また、聞き取りによれば、MT19およびMW19の表面流去は、農業者が意図的に行ったものではなかった。圃場整備後における普通期の供給水量の値は、圃場整備前に対して、移植栽培では1.3倍、乾田直播栽培では1.4倍となった。乾田直播栽培において、圃場整備の前後で灌漑期間の総供給水量が増加した要因には、浸透量の違い、強制落水による再湛水、表面流去の発生の影響が考えられる。こうした表面流去水の発生についての検討は、次節で行う。

5.7 表面流去の発生要因

ここで、整備済み圃場においてみられた表面流去の発生要因について分析する。各圃場における取水開始時刻および取水時間を図-24に示す。未整備圃場では、日中に取水が開始され、取水時間は一部を除き、数時間から36時間程度であった。これに対して、整備済み圃場では、取水開始が午前中になる頻度が多く、MW19ではほとんどが午前中であった。取水時間は、一部が72~108時間となったほかは、6~48時間程度であった。このような変化は、パイプライン化されたことにより、農区内の他の圃場の取水状況に関わらず、取水が可能となったことから生じたと考えられる。

また、図-24(ii)に示すように、MW19では、取水時あるいは取水直後に表面流去が生じることが頻繁にあった。これは、パイプライン化による取水時間帯および取水時間の変化により、余剰水が表面流去しやすくなった可能

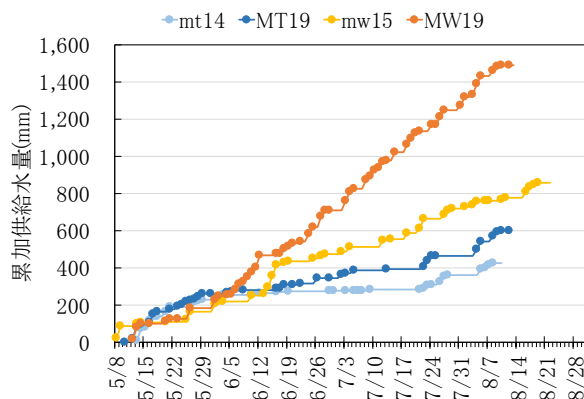


図-22 各圃場の累加供給水量

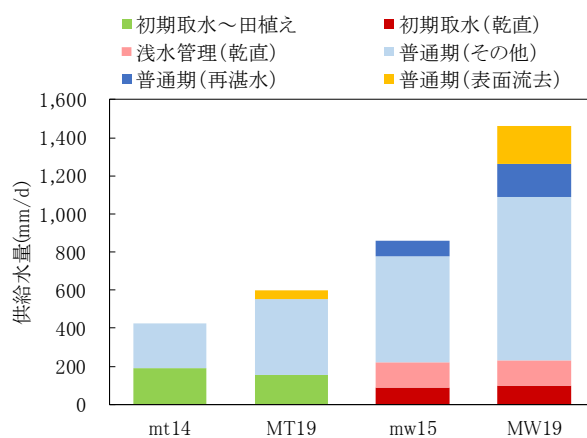


図-23 各圃場の区分別供給水量

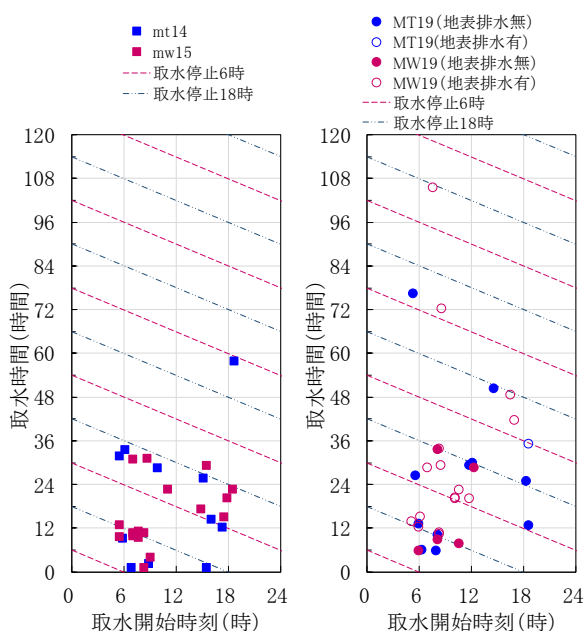


図-24 取水開始時刻および取水時間

性がある。ただし、現段階において、その発生要因は不明であることから、今後、MW19 でみられた表面流去が一時的なものかを検証し、さらに分析する必要がある。

6. まとめ

大区画化および地下水位制御システムの整備が行われた地区において、乾田直播栽培、湛水直播栽培、移植栽培を行った圃場を対象に、圃場単位の水管理および水収支を調査した。令和元年度までの成果は、次のとおりである。調査圃場では、圃場の地下水位が高いことから、代かきの有無に関わらず、各圃場の浸透量はいずれも小さかった。そのため、圃場への取水量の差は、除草剤散布に伴う強制落水や深水灌漑などの栽培管理の違いによって生じた。これらの栽培管理は、特定の栽培方式だけで必要とされるようなものではなく、気象の推移や各々の圃場の生育および雑草の繁茂の状況によって、いずれの栽培方式でも必要になる可能性のあるものであった。3種の栽培方式を比べれば同じ日に同じ生育ステージであるとは限らないため、3圃場が同じ気象条件におかれたとしても、必ずしも同じ防除作業が行われるわけではない。また、ある年にある栽培方式に対して行われた栽培管理が、別の年には別の栽培方式で実施されることもある。3カ年の調査では、ある栽培方式に固有で、用水計画上で見込まなければならない栽培管理用水量は発生していなかった。

さらに、各圃場における水管理および供給水量の3年分のデータを用いて、今後直播栽培が普及した場合の用水需要パターンを予測する手法を作成した。この結果、直播栽培面積が拡大すると、従来よりもピーク用水量の必要期間が延びること、深水用水は従来よりも長期間必要となることが分かった。また、将来における圃場群のピーク用水量を予測した結果、調査対象地域では、直播栽培面積が拡大しても、現況のピーク用水量を上回るこ

とはないことを示した。

小用水路が開水路からパイプラインに整備された地区において、圃場整備前後の移植栽培および乾田直播栽培の圃場水管理を比べた。この結果、整備済み乾田直播圃場では、圃場浸透量、強制落水時の再湛水、表面流去水の影響により、未整備圃場よりも供給水量の値が大きくなった。

次年度以降は、パイプライン地区における圃場単位の水管理特性について考察するとともに、地域条件に適合した灌漑排水施設の計画手法について検討を行う。

最後に、本研究を進めるにあたり、調査へご協力いただいた農業者、美唄市土地改良センター、北海土地改良区美唄事業所、中富良野町農業センター、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部の関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 農林水産省：食料・農業・農村基本計画、2015
- 2) 古檜山雅之、中村和正、鶴木啓二、石田哲也：地下灌漑が可能な大区画水田における圃場水管理、農業農村工学会論文集、290、pp.23-32、2014
- 3) 越山直子、酒井美樹、伊藤暢男、中村和正：大区画水田における移植栽培と直播栽培の用水量の比較、農業農村工学会論文集、304(85-1)、pp. I_7-I_14、2017
- 4) 越山直子、大津武士、中村和正：大区画水田における圃場水収支に基づいた取水量の推定、寒地土木技術研究、780、pp.8-12、2018
- 5) 坂田賢、堀野治彦、三野徹：直播水田における圃場単位の水利用に関する事例的研究、農業土木学会論文集、212、pp.17-22、2001
- 6) 渡辺紹裕、丸山利輔、三野徹：水田圃場における栽培管理用水量の発生形態、農業土木学会論文集、124、pp.11-18、1986

16.2 営農の変化や気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発

16.2.1 積雪寒冷地における農業水利施設の長寿命化に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（水利基盤チーム）、
技術開発調整監（寒地技術推進室）

研究担当者：川口清美、大久保天、石神暁郎、西田真弓、
中村和正、山田 章、南 恭子

【要旨】

本研究では、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を目的としている。①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築では、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発を行った。前者では、造成後 50 年以上が経過した頭首工において、コンクリートの試験・分析を行い、表面近傍における凍害劣化と、カルシウム成分の溶脱現象を伴う摩耗劣化が発生することを明らかにした。さらに、凍結融解を作用させたモルタル試験体の摩耗促進試験を行った結果、摩耗量は凍結融解サイクル数に応じて増加することが分かった。また、供用後 17～36 年が経過した鋼矢板排水路において、経過年数、腐食量、水質の関係を整理・分析することにより、その構造性能の低下機構を考察した。一方、後者では、開水路において、超音波法、機械インピーダンス法の適用性について考察するとともに、金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜試験を行い、最大引抜荷重と超音波伝播速度との関係性を明らかにした。②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発では、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価、凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法の開発を行った。前者では、補修後の開水路を対象とした含水率の調査を行い、電気抵抗式水分測定法の有効性を確認した。また、同位置より採取したコアの凍結融解試験を行い、表面保護工法の種別による母材コンクリートへの影響は大きく、母材コンクリートの健全性や含水状態を把握することが重要であることを明らかにした。一方、後者では、複合劣化に対して高耐久性を有する「超高耐久性断面修復・表面被覆技術」の開発と、その耐久性を評価するためのモニタリング調査に着手した。断面修復・表面被覆材の凍結融解試験を行った結果、凍結融解サイクル数は 1,500 サイクルを超え、優れた耐凍害性を有することを確認した。

キーワード：コンクリート、鋼製部材、凍害、摩耗、腐食、複合劣化、非破壊・微破壊調査手法、凍結融解試験、表面保護工法、超高耐久性断面修復・表面被覆技術

1. はじめに

食料・農業・農村基本計画¹⁾、土地改良長期計画²⁾や北海道総合開発計画³⁾では、農業水利施設の適切な保全管理、戦略的な維持管理が重要な施策として位置づけられている。その中で、積雪寒冷地に位置する農業水利施設には、温暖な地域とは異なる様々な変状が確認されている。施設には、コンクリートに生じる凍害だけでなく、摩耗や種々の外的荷重が生じており、多くの場合、それら劣化外力は複合的に作用している。結果、施設の使用性だけでなく、構造的安定性、第三者（歩行者等への）影響度に関する性能の低下もみられている。

農業水利施設の要求性能を満足させ、その長寿命化を達成していくためには、開水路や頭首工を構成するコン

クリート、ゲートや鋼矢板などの鋼製部材において、複合劣化を対象とした診断・評価方法に関する技術開発が必要不可欠となる。一方で、寒冷地に位置する農業水利施設の規模は大きく、例えば、国内の用水路の中で寒冷地に位置するものは約 4 割にも及ぶ。寒冷条件の厳しい北海道内での研究成果は、北海道内だけでなく他の寒冷地に位置する農業水利施設の長寿命化、保全管理にも活用することができる。

本研究では、積雪寒冷地に位置する社会基盤を構成する施設群の一つである農業水利施設の長寿命化を図るため、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を行い、積雪

寒冷地における農業水利施設の維持管理方法を提案することを目的とする。

平成 28 年度～令和元年度では、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築において、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発を行った。さらに、②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発において、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価、凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法の開発を行った。

2. コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明

2.1 頭首工における凍害・摩耗診断⁴⁾

2.1.1 目的

土地改良長期計画では、老朽化が進行する農業水利施設の機能を将来にわたって安定的に発揮させるため、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る戦略的な保全管理が求められている²⁾。数ある農業水利施設の中で、頭首工は、農業水利システムの中核を成す拠点施設であり、施設数は基幹的施設だけでも全国で 1,952 箇所⁵⁾に及ぶ。一方、そのうち耐用年数を超過した施設は実に 576 箇所⁶⁾に達しており、今後これらの施設の機能を如何に保全し管理していくのが喫緊の課題となっている⁵⁾。

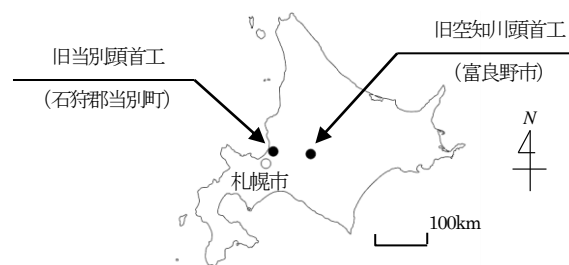
頭首工は、堰体、堰柱、エプロンなど、多くのコンクリート施設により構成される。コンクリートは、時間の経過とともに劣化が進行し、特に積雪寒冷地では凍害劣化が懸念される。凍害劣化が発生したコンクリートでは、躯体内部に発生する層状ひび割れなどによりその健全性が著しく損なわれることが明らかになっており^{6), 7)}、また、水利施設に特有の摩耗劣化との併発により、施設の性能低下が加速される可能性も考えられる。

本研究では、北海道内に位置する 2 つの頭首工の撤去工事に際し、施設の供用中には実施することが難しい、堰体などの主に水中に曝されている部位を対象としたコア採取を行い、劣化状況の詳細調査を行った。ここでは、その結果の概要を示すとともに、凍害劣化と摩耗劣化との関係、ならびに長寿命化を図るための対策工法の適用に際する留意点について考察する。

2.1.2 凍害・摩耗診断の概要

(1) 診断対象の概要

診断対象とした頭首工は、北海道上川地方に位置する旧空知川頭首工、ならびに石狩地方に位置する旧当別頭首工である。各頭首工の位置および撤去時の状況を図-1 に示す。旧空知川頭首工は、昭和 30～32 年に造成され、平成 27 年の撤去時における供用期間は概ね 60 年である。形式は、左岸側に固定堰、右岸側に可動堰を配置する複合堰である。一方、旧当別頭首工は、昭和 35～37 年に造成され、平成 25 年の撤去時までの供用期間は概ね 50 年である。形式は、全面可動堰となっている。いずれの頭首工においても、主に気中に曝されている堰柱は寒暖差の大きい凍結融解環境下に置かれており、外観上からも著しい凍害劣化が確認される。また、主に水中に曝されている堰体やエプロンでは、断面欠損に至る著しい摩耗劣化が確認されている。



旧空知川頭首工



旧当別頭首工

図-1 各頭首工の位置および撤去時の状況
 診断は、各施設より採取したコア試料を試験・分析することにより行った。旧空知川頭首工では、摩耗劣化が比較的軽微な固定堰の堰体の上流側および可動堰のエプロンの上流側と、摩耗劣化が甚大な可動堰のエプロン

の下流側の計3箇所からコアを採取した。一方、旧当別頭首工では、摩耗劣化は比較的軽微であるものの凍害劣化は甚大であると予想される可動堰の導流壁の下流側において、導流壁の天端面、側面気中部（最多頻度水位の上側）、側面干満部（最多頻度水位の近傍）の計3箇所からコアを採取し、水による影響を調べた。

(2) 診断方法の概要

採取したコア試験体について、圧縮強度および静弾性係数、コンクリート表面からの深さ毎の相対動弾性係数、細孔径分布、元素濃度を測定した。

圧縮強度および静弾性係数は、JIS A 1107（コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法）およびJIS A 1149（コンクリートの静弾性係数試験方法）に準拠して測定した。コア試験体の寸法は直径100×高さ200mmである。

相対動弾性係数の測定では、まず、超音波法（透過法）により深さ毎のコアの直径方向の超音波伝播速度を測定し、次に、得られた伝播速度より、緒方ら⁹⁾の研究結果から導き出されている算出式により深さ毎の相対動弾性係数を算出した。なお、算出に必要な健全部の伝播速度は、各頭首工で得られた最速値とした。測定周波数は54kHzである。

細孔径分布の測定では、深さ毎に採取した試料を用いて、水銀圧入法により細孔径毎の細孔容積を測定した。測定圧力範囲は0～228MPa（細孔径で約500～0.0055μm）である。

元素濃度は、JSCE-G 574（EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法（案））に準拠して測定し、コンクリート表面からの元素濃度分布を得た。測定対象元素は、カルシウム（Ca）、けい素（Si）、硫黄（S）、アルミニウム（Al）の4元素である。

2.1.3 凍害・摩耗診断の結果および考察

(1) 診断結果および考察

1) 圧縮強度および静弾性係数

測定結果を図-2に示す。図中の黒色の実線は、土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕」⁹⁾および日本道路協会「道路橋示方書・同解説」¹⁰⁾に示されている圧縮強度による静弾性係数の設計値である。また、灰色の着色範囲は、後者の文献に示されているコンクリートの最低設計基準強度を下回る範囲を明示したものである。圧

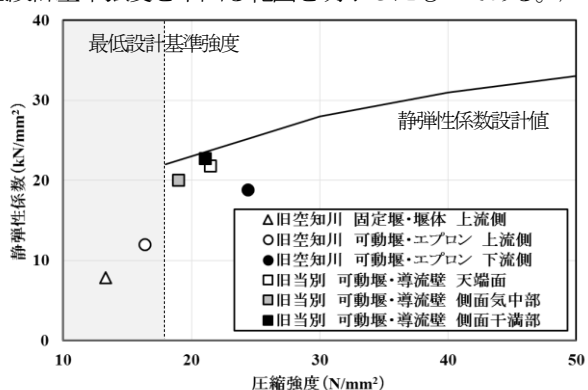


図-2 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

縮強度、静弾性係数ともに造成当初の測定値は不明であるが、固定堰の堰体の上流側、可動堰のエプロンの上流側の測定値は、土木学会、日本道路協会の設計値、基準値に比べ小さかった。一方、可動堰のエプロンの下流側の測定値は、圧縮強度は他の部位に比べ大きかったが、静弾性係数は圧縮強度から推定される値よりも小さかった。可動堰のエプロンの下流側では、すりへり作用による断面欠損が確認されており、圧縮強度が低下したコンクリートが既に消失していた可能性が考えられる。

2) 相対動弾性係数

測定結果を図-3に示す。図中では、土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕」⁹⁾に規定される数値を参考に、相対動弾性係数85%未満60%以上の範囲を灰色に、60%未満の範囲を濃灰色に着色して示している。相対動弾性係数は、総じて低く、また、コンクリート表面に近いほど低くなる傾向がみられた。さらに、水に曝される割合が大きい部位、即ち水による影響を受け易い部位ほど、低くなる傾向が確認された。これらの結果は、施設

が著しい劣化環境下に置かれていることを裏付けるものであり、また、水に起因する劣化外力が表面から発生・進展したことを示している。

3) 細孔径分布

測定結果を図-4に示す。総細孔量は、コンクリート表面に近いほど多くなる傾向がみられた。固定堰の堰体の上流側では、概ね造成当初のコンクリートとみなせる表面からの深さ 100~110mm より採取した試料に比べ、表面からの深さ 0~10mm より採取した試料では細孔径約 0.01~1 μ m 付近の細孔量が、深さ 20~30mm より採取した試料では約 0.01~0.05 μ m 付近の細孔量が多くなっており、表面に近いほど粗な構造となっていることが確認された。また、可動堰のエプロンの上流側では、表面に近いほど、約 0.01~0.05 μ m 付近の細孔量が多くなる傾向がみられた。さらに、可動堰の導流壁の側面気中部では、深さ 20~30mm および 40~50mm より採取した試料において約 0.01~0.05 μ m 付近の細孔量が多くなっていることが確認された。

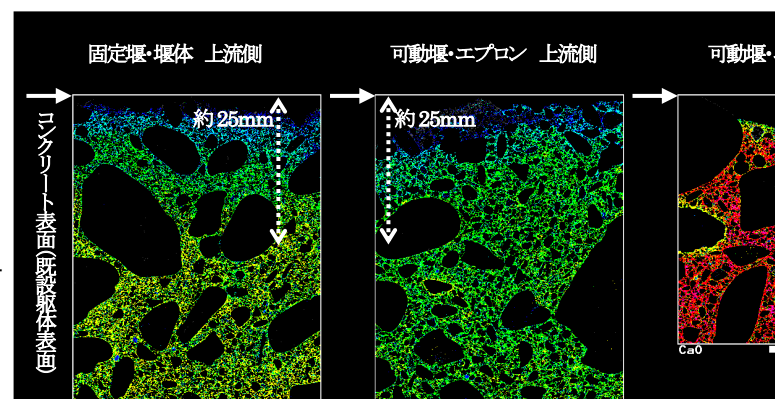
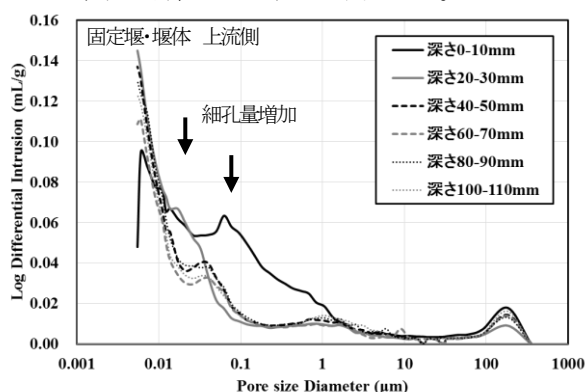
既往の研究結果^{11),12)}では、凍結融解作用により約 0.05~1 μ m 付近の細孔量が増加することが示されている。従って、特に固定堰の堰体の上流側の表面近傍では凍害劣化が発生している可能性が高い。一方、凍害劣化が発生し難いと考えられる可動堰のエプロンの上流側にも約 0.01~0.05 μ m 付近の細孔量の増加が確認された。これは、後述するように、長期間水と接触したことによってカルシウム成分が溶脱^{13),14)}し、セメント硬化体の組織が脆弱化したものと推察される。なお、可動堰の導流壁の側面気中部では、表面からの深さ約 10~50mm の範囲でひび割れの発生が確認されており、細孔量の増加はこのひび割れに影響を受けていることが考えられる。

4) 元素濃度

測定結果のうち、カルシウム (Ca) の濃度の測定結果を図-5に示す。固定堰の堰体の上流側、可動堰のエプロンの上流側では、カルシウム濃度はコンクリート表面に近いほど低くなる傾向がみられ、特に表面からの深さ約 0~25mm の範囲で低下は顕著であった。また、可動堰の導流壁の側面気中部では、ひび割れ近傍でのカルシウム濃度低下も確認された。一方、可動堰のエプロンの下流側では、カルシウム濃度はごく表層においてのみ低下しており、他の部位に比べ総じて高かった。このことか

ら、カルシウム濃度が低下したコンクリートの大部分が既に消失していたことが確認された。

既往の研究結果^{13),14)}では、淡水中に長期間曝され摩耗劣化が発生したコンクリート開水路では通水表面近傍に



においてカルシウム成分の溶脱現象が生じることが示されており、本診断で対象とした頭首工を構成するコンクリート施設においても同様の現象が生じていたことが明らかになった。

(2) 凍害劣化と摩耗劣化との関係

本診断で得られた相対動弾性係数の低下範囲、細孔量の増加範囲、カルシウム濃度の低下範囲は各々よく符合しており、凍害劣化と摩耗劣化は相互に影響を与え合う関係であることが予想される。凍害劣化が摩耗劣化に与える影響としては、ひび割れの発生や細孔量の増加、それに伴う圧縮強度や相対動弾性係数の低下による、すりへり抵抗性の低下などが考えられる。一方、摩耗劣化が凍害劣化に与える影響としては、カルシウム成分の溶脱現象に伴う細孔構造の変化による、凍結融解抵抗性の低下などが考えられる。

(3) 対策工法適用に際する留意点

凍害および摩耗劣化が発生した頭首工を構成するコンクリート施設の補修・補強においては、以下の点に留意する必要がある。一つは、劣化範囲の特定と除去である。本診断で得られた結果からも明らかなように、凍害および摩耗劣化が発生したコンクリートでは、圧縮強度や相対動弾性係数といった力学的特性が表面からある一定の深さまで低下している。この劣化範囲が適切に特定され除去されなければ、対策工法による補修・補強効果を持続的に得ることは難しい。もう一つは、対策工法に対す

る耐凍害性および耐摩耗性の要求である。積雪寒冷地に位置する施設の多くは著しい劣化環境下に置かれている。そのため、新たに適用される対策工法に対しても、この劣化環境下に耐え得るより高度な性能を要求していくことが必要となる。

2.1.4 課題

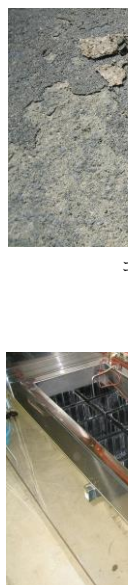
本診断の結果から、積雪寒冷地に位置する頭首工を構成するコンクリート施設は、圧縮強度や相対動弾性係数といった力学的特性の低下を伴う著しい劣化環境下に置かれており、表面近傍における凍害劣化と、カルシウム成分の溶脱現象を伴う摩耗劣化が発生することが示された。今後は、実構造物における診断結果の蓄積とその分析を継続実施するとともに、凍害劣化と摩耗劣化が併発した場合の劣化機構の解明、ならびに対策工法の要求性能の解明などについて、検討を加える予定である。

2.2 凍結融解を作用させたモルタル試験体の摩耗促進試験¹⁵⁾

2.2.1 目的

コンクリート開水路では、近年、種々の表面被覆材を用いた補修が行われている。積雪寒冷地に位置する開水路では、コンクリートにおける凍害劣化と摩耗劣化が確認されており¹⁶⁾、それら劣化外力は補修後の表面被覆材にも作用することが予想される(図-6)。本研究では、コンクリートおよび無機系表面被覆材における凍害劣化が摩耗劣化に与える影響を確認するための検討を行った。ここでは、配合の異なるモルタル試験体において、凍結融解を作用させ、その後に摩耗促進試験を行った結果について報告する。

2.2.2 試験方法の概要



本試験に用いるモルタル試験体は、JIS 標準砂を使用した AE モルタルとした。セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤は AE 剤を使用した(目標空気量 6.0%)。水セメント比 W/C は 45、55、65% とし、砂セメント比 S/C は 3.0 に統一した。試験体の作製では、まず、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱試験体を打設し、 20°C で 28 日間的水中養生を行った。養生期間経過後、 $100 \times 100 \times 200\text{mm}$ の試験体に二分割し、一方では凍結融解試験を行い、もう一方では 5°C の水中浸漬を行った。

凍結融解試験は、JISA 1148 の A 法(水中凍結融解試験方法)に準拠して行った(図-7)。凍結融解サイクル数は 100、200、300 サイクルである。判定指標は相対動弾性係数、打設面からの深さ毎(5~95mm、10mm 間隔)の超音波伝播速度から求まる相対動弾性係数とした。超音波伝播速度からの相対動弾性係数の算出では、緒方ら⁸⁾の研究結果から導き出されている算出式を用いた。また、摩耗促進試験は水流摩耗試験方法¹⁷⁾により行った(図-7)。吐出圧力は 11Mpa、試験時間は 10 時間である。判定指標は平均摩耗深さとした。

2.2.3 試験結果および考察

凍結融解試験結果を図-8 に示す。相対動弾性係数は、 $W/C65$ では試験開始直後より、 $W/C55$ では 200 サイクル経過後より、その低下は大きくなったが、 $W/C45$ では 300 サイクル終了時まで低下はほぼみられなかった。凍結融解試験における打設面からの深さ毎の相対動弾性係数を図-9 に示す。図中では、全ての深さ毎の相対動弾性係数の平均値(全体)に加え、打設面近傍(5~35mm)の測定値を併記している。相対動弾性係数は、総じて打設面に近いほど低くなる傾向がみられ、 $W/C45$ においても、打設面に最も近い深さ 5mm では約 5%の低下がみられた。

水流摩耗試験結果を図-10 に示す。平均摩耗深さは、水セメント比が大きいほど、凍結融解サイクル数が多いほど、その増加は大きくなった。 $W/C45$ においても、300 サイクルでは 0 サイクルに比べ約 2 倍の増加がみられた。 5°C の水中浸漬を行った同材齢の試験体における平均摩耗深さ(10 時間)に対する、凍結融解試験を行った試験体における平均摩耗深さ(10 時間)の比率を相対摩耗深

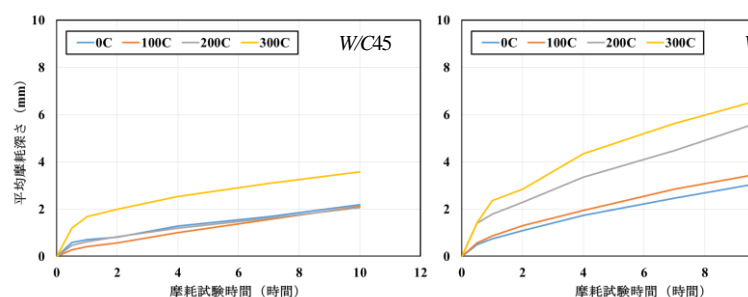


図-10 水流摩耗試験結果(凍結融解サイクル数別)

さとして算出した結果を図-11 に示す。相対動弾性係数はほぼ低下しなかった W/C45 においても、300 サイクル後の相対摩耗深さは増加した。

2.2.4 課題

凍結融解を作用させたモルタル試験体の摩耗促進試験を行った結果、摩耗量は凍結融解サイクル数に応じて増加することが分かった。今後は、無機系表面被覆材の試験を行う予定である。

2. 3 鋼矢板排水路における腐食診断^{18), 19), 20), 21), 22)}

2.3.1 目的

積雪寒冷地であり、かつ、泥炭土、火山灰土、重粘土などの特殊土壌が広く分布する北海道では、排水改良は極めて重要な農業生産基盤整備の一つである²³⁾。北海道における排水改良を担う明渠排水路は、連節ブロックや積ブロック、コンクリート柵渠など、様々な部材により構成されている。その中で鋼矢板は、特に軟弱地盤、泥炭地盤に造成される排水路の構成部材として適用されてきている^{24), 25), 26)}。鋼矢板排水路の延長は、北海道内の国営事業により造成された排水路だけでも約 100km に及ぶ。

近年、排水路を構成する鋼矢板の腐食が全国的に問題となっている。例えば、新潟県内の低平排水不良地域に敷設された鋼矢板では、水位変動域である干満帯付近における局所的な腐食の進行が確認されている^{27), 28), 29)}。一方、積雪寒冷地である北海道内に敷設された鋼矢板では、腐食が進行して倒壊に至る場合もあり、周辺地盤の陥没

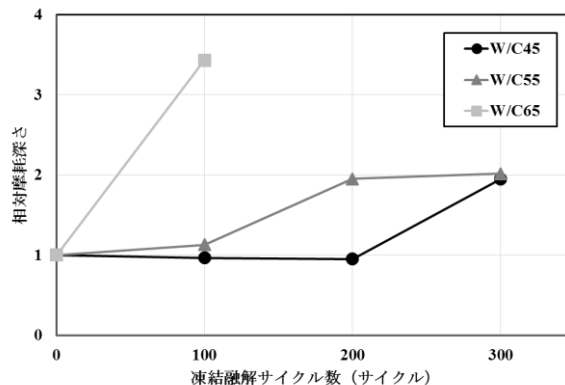


図-11 凍結融解試験結果 (相対摩耗深さ)

など、社会的安全性に影響を及ぼす事例も散見されている(図-12)。排水改良において重要な役割を担い、かつ、長延長を有する鋼矢板排水路において、鋼矢板の腐食と排水路としての性能低下を如何に診断し評価していくのか喫緊の課題となっている。

本研究では、北海道内に造成された鋼矢板排水路を対象とした、鋼矢板の腐食・倒壊の発生要因、ならびに排水路の性能低下要因の究明のための検討を行っている。ここでは、鋼矢板の腐食診断結果の事例を示し、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構について考察するとともに、性能低下の特徴と機能保全における今後の課題について整理する。

2.3.2 鋼矢板の腐食診断

(1) 腐食の現況と診断方法の選定

診断対象とした鋼矢板排水路は、北海道空知地方に位



図-12 北海道内における農業用排水路を構成する鋼矢板の腐食

置する A~N 排水路 (14 路線、42 測点) である。排水路の多くは泥炭性軟弱地盤に造成されており、また、積雪量も比較的多い地域に位置している。排水路を構成する鋼矢板の種類は、一部の普通鋼矢板 (C 排水路 1 測点

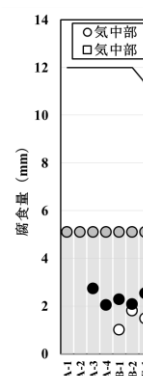


(板厚 10.5mm)、G 排水路 2 測点 (同 8.0mm)、J 排水路 2 測点 (同 8.0mm)、L 排水路 2 測点 (同 10.5mm)、N 排水路 2 測点 (同 8.0mm) を除き、ほぼ全て軽量鋼矢板 (同 5.0mm) である。いずれの排水路においても、供用後 17~36 年が経過しており、腐食は総じて著しい状況にある (図-13)。

鋼矢板の腐食の代表的な現況を図-14 に示す。鋼矢板の表面側では、腐食は干満帯付近の中でも最多頻度水位近傍において特に著しく、直上の気中部、即ち干満帯上部において開孔し、断面欠損へと進展している場合が多い。一方、直下の水中部、即ち干満帯下部においても、腐食・断面欠損が進展している場合も見受けられる。また背面側では、開孔して排水が流入している場合は表面側と同様に腐食が進展し、断面欠損が拡大する傾向にある。また、倒壊に至った鋼矢板では、そのほぼ全てにおいて断面欠損が確認されている。次に、鋼矢板の切断面の拡大写真を図-15 に示す。開孔していない普通鋼矢板では腐食は表面側にのみ発生しているのに対し、開孔した軽量鋼矢板では腐食は表面側に加え背面側にも発生している。

これら腐食の現況から、その発生要因は排水路内を流下する排水にあると考え、腐食状況の定量化を行うとともに、排水について水質に関する各種計測を行った。本診断では、測点毎に、気中部、干満帯上部、干満帯下部の 3 部位において残存する板厚の計測を行い、敷設当初の板厚 (設計板厚+腐食代) から各計測値を差し引いた値を腐食量 (mm) として求めた。板厚の計測は、鋼矢板の表層の鏽を除去した後、超音波厚さ計を用いて行っ

た。また、水質に関する計測では、灌漑期間中、腐食位置に水位が最も近づく夏期において、腐食に影響を及ぼすと予想される溶存酸素濃度、pH、導電率、塩化物イオン濃度の計測を行った。



(2) 診断結果および考察

腐食量の測定結果を図-16 に示す。図中では、測点を経過年数順に並べるとともに、測点毎の敷設当初の板厚を淡灰色に着色して示している。なお、各測点において該当する部位が存在しない場合はその結果を記していない。いずれの部位においても、腐食量は、経過年数が長くなるほど、増加する傾向にあった。一方で、H排水路の4測点など、局所的に増加している測点もあることが分かった。また、腐食量は概ね干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、干満帯上部の多くでは敷設当初の板厚に到達（貫通）していた。

経過年数と腐食量との関係を図-17 に示す。部位毎に示される近似式の傾きは、それぞれ部位毎の腐食速度（1年当たりの腐食量：mm/y）を表している。腐食速度は干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、また、ばらつきも大きいことが分かった。このことから、経過年数以外の要因に影響を受けていることが推察される。さらに、通常は排水に曝されている干満帯下部においても、腐食速度は干満帯上部に準ずる程度に大きいこと、また、普通鋼矢板に比べ、軽量鋼矢板の腐食速度は大きくなる傾向にあることが分かった。

排水の溶存酸素濃度と腐食速度との関係を図-18 に示す。溶存酸素濃度は総じて高く、ほぼ飽和状態にあった。また、濃度が高くなるほど、腐食速度も大きくなる傾向が見て取れた。一方、pHは6.95～7.92、導電率は11.18～13.57（mS/m）、塩化物イオン濃度は5.94～11.01（mg/L）となり、pHが低いほど、導電率が高いほど、塩化物イオン濃度が高いほど、腐食速度は大きくなる傾向が見られたが、いずれも腐食が進みやすい範囲には推移しなかった。このことから、水質に関しては溶存酸素濃度の影響が最も大きいと考えられる。

2.3.3 鋼矢板排水路の性能低下特性

(1) 鋼矢板排水路の構造性能の低下機構

鋼矢板の腐食の現況および診断結果から、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構は以下の通りであると推察される（図-19）。まず、①鋼矢板の表面側では、気中部や干満帯上部において、水および酸素の供給による湿食が発生する（大気中の腐食）。流下する排水中には多量の溶存酸素が含まれるため、この湿食は干満帯下部や水中部においても発生する（淡水中の腐食）。また同時に、干満帯

上部をカソード部（+極）、干満帯下部をアノード部（-極）とするマクロセル腐食電池が形成され（局所的な腐食）、②干満帯上部および干満帯下部においてそれぞれ腐食が進み、浮き錆へと進展する。また、③残存する板厚が小さくなった際に荷重が作用した場合は、鋼矢板は破断し、割れや湧水といった変状を生じるようになる。その後、④干満帯上部および干満帯下部ではさらに湿食が進み、開孔・断面欠損へと進展する。開孔・断面欠損を生じた箇所では排水が背面側にも流入するため、背面側からの腐食も発生する。実際には、これらの過程に、気中部における乾湿繰返し、水中部におけるエロージョン（摩耗）、表面の付着物に起因する通気差腐食などが複合的に作用しているものと推測される。⑤開孔・断面欠損が拡大した箇所では、背面土が吸い出され、また、構造的安定性が失われて、荷重が作用した際に⑥傾倒・倒壊



に至るものと考えられる³⁰⁾。

積雪寒冷地に特有の泥炭地盤に造成された排水路では、泥炭土の圧密、圧縮、分解などにより、鋼矢板の背面側が露出している事例がよく見受けられる。主に鋼矢板の表面側で発生・進展する腐食・断面欠損は、背面側が露出して水および酸素の供給を受け、背面側からの腐食が発生・進展することにより加速される。また、積雪寒冷地に特有の荷重には積雪、雪庇、凍上などが挙げられ、断面欠損が拡大した鋼矢板に対して、傾倒・倒壊を発生させる直接的な要因になっていることが考えられる（図-19 破線部分、図-20）。

(2) 性能低下の特徴と機能保全における課題

積雪寒冷地において鋼矢板の腐食が発生した排水路では、その特有の要因により、構造性能は著しく低下する傾向にある。また、傾倒・倒壊が発生した排水路では、周辺地盤の陥没により歩行者や車両の通行が妨げられるなど、社会的安定性能も低下する場合がある。一方、傾倒・倒壊は積雪などの荷重の作用により最多頻度水位近傍にある腐食位置を基点に発生するため、背面土圧による曲げモーメントが卓越する位置にまで影響を及ぼすことは少なく、排水路の通水断面の阻害に至るまでの背面土の崩壊はほとんど見られない。このため、通水性や排水性といった水理性能は必ずしも低下していない場合が多い。

これら性能低下の特徴を踏まえ、積雪寒冷地に造成された鋼矢板排水路での機能保全における課題を二つ示す。一つは、補修、補強、改築時において構成部材に要求される性能の明確化である。現在、全国各地で排水路を構成する鋼矢板の補修、補強が行われており、今後、補修・補強材料に要求される性能の明確化（品質規格化）が期待される。一方、積雪寒冷地では倒壊に至る場合も少なくはなく、改築を想定した構成部材の性能の向上も必要である。そのためには、供用後の鋼矢板の腐食状況の定量化と、腐食に影響を及ぼす環境要因の精査が必要不可欠となる。もう一つは、構造性能と水理性能の関係性の解明である。用水路では、構造性能が水理性能や水利用性能を下支えする性能であり、構造性能の低下は水理性能、水利用性能の低下に直結する場合が多い。一方、排水路では構造性能の低下が直ちに水理性能の低下を招くとは限らない。構造性能の低下がどの構成部材の劣化に

起因するもので、どのような機構で水理性能の低下に結び付くのかを見極めていく必要がある。

2.3.4 課題

ここでは、北海道内に造成された鋼矢板排水路を対象

とした鋼矢板の腐食診断結果の事例を示し、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構について考察するとともに、その性能低下の特徴と機能保全における今後の課題を整理した。鋼矢板の腐食診断結果からは、腐食速度は、干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、また、経過年数以外の要因に影響を受けることが推察された。さらに、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構の考察では、積雪寒冷地に特有の性能低下要因を示し、それらが鋼矢板の腐食・断面欠損を加速させること、また、傾倒・倒壊を発生させる直接的な要因になっていることを示した。今後は、鋼矢板の腐食状況の定量化を進めるとともに、腐食に影響を及ぼす環境要因の精査を行い、また、鋼矢板排水路の構造性能と水理性能の関係性の解明などについて検討を加える予定である。

3. 非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発

3.1 寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設機能診断手法^{31), 32)}

3.1.1 目的

土地改良長期計画では、老朽化が進行する農業水利施設の機能を将来にわたって安定的に発揮させるため、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る戦略的な保全管理が求められている²⁾。寒冷地に位置する施設においてこのような保全管理を行うためには、コンクリートの凍害劣化に着目する必要がある。凍害劣化を生じたコンクリート施設では、躯体内部に発生する層状ひび割れなどによりその健全性が著しく損なわれることが明らかになっており^{6), 7)}、それら劣化状態を踏まえた保全管理技術を構築する必要がある。農業農村整備に関する技術開発計画では、地域特性に応じた技術開発の必要性が示されている³³⁾。

農業水利施設の保全管理では、適時・適切な機能診断を実施することが肝要となる。この機能診断では、「農業水利施設の機能保全の手引き」³⁴⁾に基づく機能診断調査が行われており、以後の劣化予測や対策工法の検討に必要な情報を得るための、施設の性能低下状態やその要因に対する定量的な調査が行われている。その中で鉄筋コンクリート開水路の施設状態評価では、反発強度法、即ちリバウンドハンマ法による圧縮強度の調査が実施されている。リバウンドハンマ法は、JISにも規定される汎用化された調査手法であるが、コンクリート表面における反発度から強度を推定する手法であるため、この反発度に影響を及ぼす含水率、材齢、劣化状態などに対して

補正を行わなければならない³⁵⁾。しかし、この補正には影響要因毎の強度推定式が必要となり、結果、層状ひび割れなどの内部変状が存在する場合の強度を的確に捉えられない可能性がある。そのため、これら寒冷地の劣化特性に対応した、施設状態を定量的に調査し評価することができる機能診断技術の構築が必要となる。

本研究では、これまでに、北海道内の複数のコンクリート開水路において、コア採取を含む詳細調査を行い、寒冷地における劣化特性について整理・分析するとともに、開水路の凍害診断技術、ならびに維持管理技術の開発を進めてきている。ここでは、寒冷地の劣化特性に対応した機能診断手法の必要性について述べるとともに、非破壊調査手法である超音波法、機械インピーダンス法の適用性について考察する。

3.1.2 寒冷地の劣化特性に対応した機能診断手法の必要性

本研究では、これまでに、北海道内（空知、石狩、後志、日高、檜山、上川、留萌、十勝の各地方）に位置するコンクリート開水路延べ36路線の446測点において、採取したコア試験体における試験を含む劣化状態の詳細調査を行っている。調査対象とした開水路は、最も古い水路は昭和30年代、新しい水路は平成20年代に建設されており、調査時における供用期間は2～56年である。水路型式は、1路線の5測点を除き、ほぼ全て鉄筋コンクリート開水路である。

開水路に発生した凍害劣化による代表的な変状を図-21に示す。凍害劣化は、その初期には微細ひび割れを発生し、スケーリング、骨材の露出・剥落、あるいは内部ひび割れ、層状ひび割れへと進展して、弾性係数の低下を生じさせ、ひいては強度低下に至らせる。終局的には躯体の断面欠損や鉄筋の露出・腐食へと進展し、構造体としての耐荷力や剛性を低下させる。

圧縮強度および静弾性係数の測定結果を図-22に示す。圧縮強度および静弾性係数は、JIS A 1107（コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法）およびJIS A 1149（コンクリートの静弾性係数試験方法）に準拠して測定した。測点数は、全446測点の内、両試験を実施した77測点である。なお、図中では、供用期間が20年未満の水路の測定値を白丸、20年以上40年未満の水路の測定値を灰丸、40年以上の水路の測定値を黒丸で示している。また、図中の黒色の実線は、土木学会「コンクリート標準示方書 [設計編]」⁹⁾および日本道路協会「道路橋示方書・同解説」¹⁰⁾に示される圧縮強度による静弾性係数の設計値である。さらに、淡灰色の着色範囲

は、後者の文献に示されているコンクリートの最低設計基準強度を下回る範囲を明示したものである。圧縮強度、静弾性係数ともに建設当初の測定値は不明であるが、供用期間が 20 年未満の水路では、圧縮強度、静弾性係数ともに測定値は概ね設計値と同程度であるのに対し、20 年以上の水路では、圧縮強度は設計基準強度を満たすものの、静弾性係数の測定値は多くの水路で設計値を下回っていることが分かる。このことは、強度低下の段階にまでは至っていないものの、その兆候として弾性係数の低下を生じている水路が数多く存在することを示している。そのため、凍害劣化を生じた開水路に対しては、強度低下だけでなく、弾性係数の低下を捉えられる機能診断手法の適用が必要であると考えられる。

3.1.3 超音波法、機械インピーダンス法の適用性

寒冷地に位置する開水路における凍害劣化の発生形態、ならびに内部変状の発生により生じる弾性係数の低下の実態を踏まえ、これら寒冷地の劣化特性に対応させることが期待できる機能診断手法として、非破壊調査手法である超音波法、機械インピーダンス法の適用性を検証した。

(1) 機能診断手法および適用性検証方法の概要

超音波法は、20kHz 以上の超音波域の周波数帯を使用し、発振子から接触媒質を介してコンクリート中に発射された弾性波を受振子で測定する手法である。一般に、劣化したコンクリートにおける超音波の伝播速度は健全なコンクリートの伝播速度に比べ小さくなるため、この速度の差異からコンクリートの品質の差異を調べることができる³⁶⁾。コンクリートの超音波伝播速度は、弾性係数、密度、ポアソン比により定まるため³⁵⁾、本法により超音波伝播速度を測定することで、弾性係数を精度よく調査することが期待できる。

機械インピーダンス法は、**図-23** に示す加速度計が内蔵されたハンマでコンクリート表面を打撃し、得られた打撃力波形から打撃対象物の機械インピーダンスを測定して、コンクリートの表面近傍の強度を推定する手法である³⁷⁾。本法で得られる打撃力波形を**図-24** に示す。機械インピーダンス Z_R は、打撃力の最大値 F_{max} およびハンマが反発を受ける際の速度 V_R から式 (1) により算出され、推定強度 STR は、 Z_R から式 (2) により算出される³⁸⁾。一方、 F_{max} は、フックの法則より、コンクリート

の弾性係数と変位量の最大値により定まるため、本法により推定強度を測定することで、弾性係数の変化を捉えることが期待できる。

$$Z_R = F_{max} / V_R^{1.2} \dots\dots\dots (1)$$

$$STR = a \times Z_R^3 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a は較正值 (12.73) である。



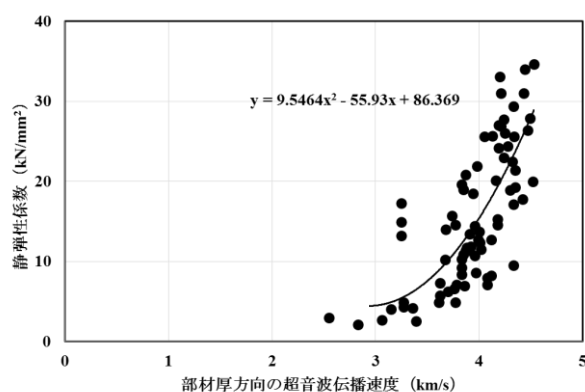
本検証では、上述の圧縮強度および静弾性係数に加え、超音波法により部材厚方向の超音波伝播速度を測定し、さらに、リバウンドハンマ法および機械インピーダンス法によりそれぞれ推定強度を測定して、それらの関係を調べた。

(2) 適用性検証結果および考察

超音波伝播速度と静弾性係数との関係を図-25 に示す。超音波伝播速度は、透過法により、部材厚の方向において測定した。測点数は、上述の圧縮強度および静弾性係数を測定した 77 測点である。なお、超音波伝播速度と弾性係数との関係は二次式により表わすことができるため³⁹⁾、図中では二次多項式による近似曲線を併記している。超音波伝播速度は、元より弾性係数などにより理論的に定まるものであるが、本検証において得られた結果からも、一定の相関性が認められた。このことから、弾性係数の調査における超音波法の有用性が確認された。

リバウンドハンマ法による推定強度と超音波伝播速度との関係を図-26 に、機械インピーダンス法による推定強度と超音波伝播速度との関係を図-27 に示す。リバウンドハンマ法による推定強度は、JISA 1155 (コンクリートの反発度の測定方法) に準拠して測定した。一方、機械インピーダンス法による推定強度は、1 測点当たり 30 回の打撃を行い測定した。測点数は、超音波伝播速度を測定した測点の内、両法をともに適用した 143 測点である。リバウンドハンマ法による推定強度と超音波伝播速度との関係からは、正の関係が認められたが、その相関性は低いことが分かった。一方、機械インピーダンス法による推定強度と超音波伝播速度との関係からは、正の関係が認められることに加え、相応の相関性があることが分かった。リバウンドハンマ法は、コンクリート表面における反発度から強度を推定する手法であるため、その推定強度は、表面の劣化状態の影響を多大に受けるものの、内部の劣化状態の影響は受け難いことが予想される。一方、機械インピーダンス法は、コンクリートの弾性係数により強度を推定する手法であり、推定強度は、表面の劣化状態だけでなく、内部の劣化状態の影響も反映しているものと考えられる。このことから、寒冷地における機能診断手法としてのリバウンドハンマ法の問題点、ならびに機械インピーダンス法の有用性が示された。

圧縮強度とリバウンドハンマ法および機械インピーダ



ンス法による推定強度との関係を図-28 に示す。測点数は、リバウンドハンマ法では 59 測点、機械インピーダンス法では 58 測点である。なお、図中では、リバウンドハンマ法における測定値を灰丸、機械インピーダ

法における測定値を黒丸で示している。また、±0%、±15%、±30%の誤差範囲を、それぞれ黒色の実線、灰色の破線、黒色の破線にて併記している。リバウンドハンマ法では、±15%の範囲には測点の約3割、±30%の範囲には測点の約5割の測定値が入るのに対し、機械インピーダンス法では、±15%の範囲には測点の約5割、±30%の範囲には測点の約6割の測定値が入る。この結果からも、機械インピーダンス法による推定強度は、リバウンドハンマ法による推定強度に比べ、内部の劣化状態の影響をより反映していることが推測される。このことから、機能診断手法としての機械インピーダンス法の有用性が確認され、また、リバウンドハンマ法からの代替の可能性が示された。

3.1.4 課題

ここでは、寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設の機能診断手法の必要性について述べるとともに、非破壊調査手法である超音波法、機械インピーダンス法の機能診断手法としての適用性について考察した。寒冷地に位置するコンクリート開水路のように、圧縮強度や弾性係数などの強度特性が健全に保持されない環境下にある施設では、その機能診断において施設状態を如何に定量的に調査し評価していくのが重要となる。今後は、より精度よく調査・評価することができる機能診断技術の開発・適用が期待される。

3.2 アンカー引抜試験によるコンクリート開水路側壁の凍害劣化診断手法^{40), 41)}

3.2.1 目的

凍害劣化が生じているコンクリート構造物の診断手法としては、非破壊試験として超音波法や共鳴振動法などがあり、局部破壊試験として改良プルオフ試験などがある。ただし、これらの手法では、表層近傍のコンクリートの劣化状況は評価できるものの、コンクリート内部の深さ方向の劣化程度を評価することは難しい。そこで本研究では、任意の深さ位置の劣化程度を評価するための

手法として、芯棒打込み式金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜試験によるコンクリート構造物の凍害劣化診断に関する研究に取り組んでいる⁴²⁾。

ここでは、異なる6箇所のRC現場打ちフリュームの側壁でアンカー引抜試験を実施し、最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係について考察を加える。

3.2.2 アンカー引抜試験の概要

アンカー引抜試験には、接着・付着力引張試験器(サンコーテクノ社製テクノテスターRT-3000LDII型)を用いた。この試験器では、最大荷重30kN、最大変位量10mm(分解能0.01mm)までの測定を行うことができる。また、試験に用いるアンカーは、全長100mm、アンカー本体直径8mmの芯棒打込み式金属拡張アンカー(サンコーテクノ社製SY-810K型)である。アンカーの埋込深さの調整は、1cm刻みの専用の長さ調整具を用いて行い、この長さ調整具を用いることで任意の深さ位置での試験が可能である。

3.2.3 現地試験の概要

現地試験を実施した既設のRC現場打ちフリュームの側壁は6箇所であり、I水路(北海道美唄市)、II水路(岩手県奥州市)、III水路・IV水路(北海道美唄市、I水路とは異なる)、III・IV水路は同じ幹線であるがバレルが異なる)、V水路(北海道岩内郡)、VI水路(北海道瀬棚郡)である。

アンカー引抜試験におけるアンカー埋込深さ(測定深さ)、測定箇所数および番号は表-1に示す通りである。また、各測定箇所の近傍からφ10cmのコアをそれぞれ1本採取し、採取したコアに対しては、表面から深さ方向のコア横断面における超音波伝播速度を側壁における水平方向と上下方向の2方向で測定した。

3.2.4 最大引抜荷重と超音波伝播速度との関係

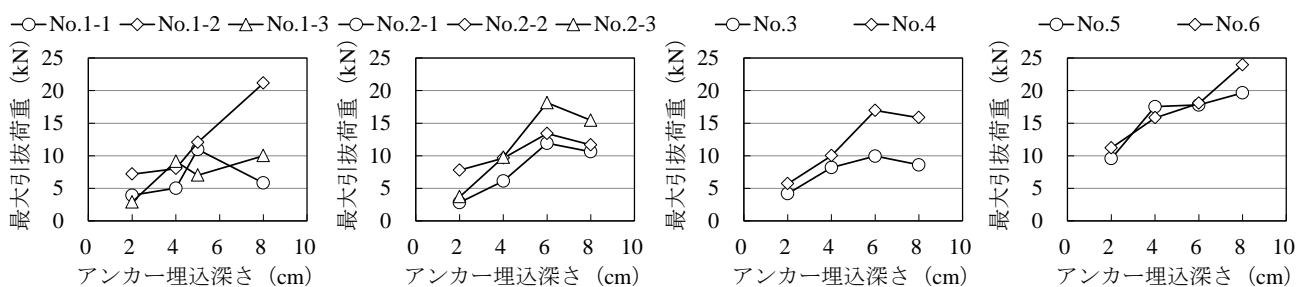


図-29 各埋込深さの最大引抜荷重

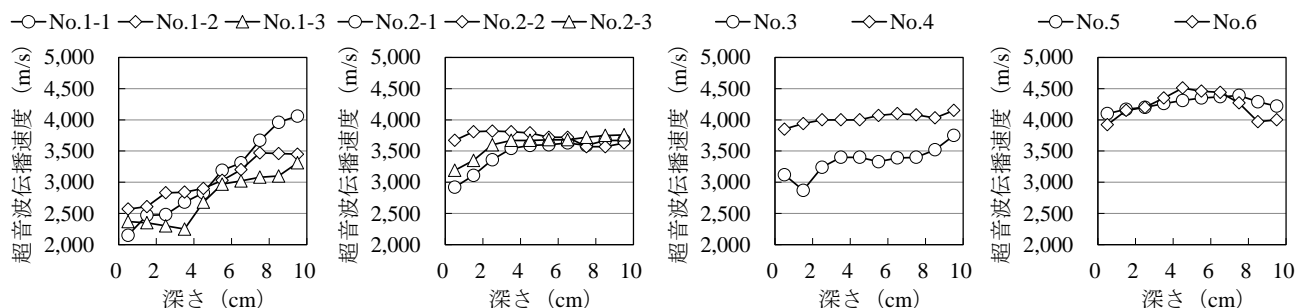


図-30 コアの深さ方向の超音波伝播速度（上下方向）

アンカー引抜試験における各埋込深さの最大引抜荷重を図-29 に示し、コアの深さ方向の超音波伝播速度（上下方向）を図-30 に示す。また、測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と上下方向の超音波伝播速度の関係を図-31 に示す。ただし、8cm 深さは、アンカーの拡張部にすべりが生じている可能性があることから除外している。図からは、アンカー埋込深さ 6cm までの範囲において、超音波伝播速度と最大引抜荷重の間には正の線形関係があることが示唆されるが、関係式は水路によりそれぞれ異なることがわかる。これは、各水路における凍

43)。

$$P_{a2} = \phi_2 \times \alpha_c \times c \sigma_t \times A_c \dots\dots\dots (3)$$
 ここに、 P_{a2} ：コーン状破壊の許容引張力 (N)、 ϕ_2 ：低減係数（長期荷重用：1/3、短期荷重用：2/3）、 α_c ：施工のばらつきを考慮した低減係数 (0.75)、 $c \sigma_t$ ：コーン状破壊に対するコンクリートの割裂強度 (N/mm^2) ($c \sigma_t = 0.31 \sqrt{F_c}$)、 F_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 A_c ：コーン状破壊面の有効水平投影面積 (mm^2)、である。 A_c は式 (4) で求められる。

$$A_c = \pi \cdot l_{ce} (l_{ce} + D) \dots\dots\dots (4)$$
 ($l_{ce} < 4D$ の場合は $l_{ce} = l$ 、 $l_{ce} \geq 4D$ の場合は $l_{ce} = 4l$)
 ここに、 l_{ce} ：アンカーボルトの強度算定用埋込み深さ (mm)、 l ：アンカーボルトの埋込み長さ (mm)、 D ：アンカーボルト軸部の直径 (mm)、である。

この式からコンクリートの割裂強度は、引張力（ここでは最大引抜荷重）をコーン状破壊面の有効水平投影面積で除することで求められ、アンカー引抜試験の各測定深さにおける有効水平投影面積が最大引抜荷重の測定値に影響を及ぼしていることがわかる。つまり、最大引抜荷重に影響を及ぼすのは、アンカー拡張部の局所的なコ

表-1 アンカー引抜試験の概要

水路名称	I水路	II水路	III水路	IV水路	V水路	VI水路
測定深さ(cm)	2, 4, 5, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8
測定箇所数	3	3	1	1	1	1
番号	No. 1-1 ~1-3	No. 2-1 ~2-3	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6

害劣化の状態（コンクリート組織の緩みやひび割れの発生状態）および程度が異なることが影響していると考えられる。

アンカー引抜試験における破壊形態が図-32 に示すようなコンクリート躯体のコーン状破壊である場合、金属拡張アンカーの許容引張荷重は、式 (3) で求められる

埋込深さが小さい範囲（2cm 以下）での検証を、また、補修後の側壁における検証を行う予定である。

4. 農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価

4.1 積雪寒冷地における表面保護工法の現状

コンクリート開水路に施工された表面保護工法には、凍結融解の作用によるものと推定される様々な変状がみられる。その中で代表的な変状としては、表面被覆工法のはく離、膨れ、断面修復工法のはく離および微細ひび割れが挙げられる。断面修復工法の中には表面含浸工法を併用する工法も存在するが、そうした工法であってもはく離やひび割れを生じる場合がある（図-34 参照）。

特に積雪寒冷地に位置するコンクリート開水路では、灌漑期において水路内の流水に曝されるだけでなく、非灌漑期においても融雪水などに曝されることが考えられ、コンクリート躯体は常に高い含水状態に保持されていることが予想される（図-35 参照）。そのため、その撥水効果により表面付近の水分を低減させる表面含浸工法や、その大きな塗布厚により凍結深をコンクリート躯体にまで到達させ難くする断面修復工法であっても、凍結融解

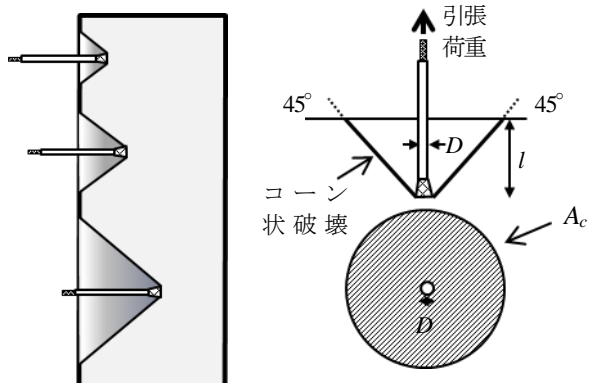


図-32 金属拡張アンカーのコーン状破壊における有効水平投影面積

ンクリートの状態だけでなく、表面からアンカー拡張部までの範囲のコンクリートの状態の2要素であり、前者がアンカー埋込位置における超音波伝播速度であるならば、後者は表面からアンカー埋込深さの範囲における超音波伝播速度の積算値ということになる。

そこで、図-30 に示した超音波伝播速度を二次多項式で近似し、表面からの各アンカー埋込深さの範囲における超音波伝播速度の積算値を求め、この積算超音波伝播速度と最大引抜荷重の関係を検討することにした。両者の関係を図-33 に示す。また、関係式を式 (5) に示す。

$$P_{\max \cdot x} = 0.065 V_{a \cdot x} + 1.3452 \quad (R^2 = 0.75) \quad (5)$$

ここに、 $P_{\max \cdot x}$: アンカー埋込深さ x m における最大引抜荷重 (kN)、 $V_{a \cdot x}$: 表面から x m までの積算超音波伝播速度 (m^2/s)、である。

各水路における凍害劣化の状態は異なるにも関わらず、最大引抜荷重は表面からのアンカー埋込深さの範囲における超音波伝播速度の積算値と線形の関係にあることがわかる。

3.2.5 課題

ここでは、異なる6箇所のRC現場打ちフリュームの側壁でアンカー引抜試験を実施し、各アンカー埋込位置における最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係について考察を加え、最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の間に線形関係があることを明らかにした。今後は、アンカー

- No.1-1 ●No.1-2 ⊙No.1-3 ◆No.2-1 ◆No.2-2
- ◇No.2-3 △No.3 □No.4 ○No.5 ◇No.6

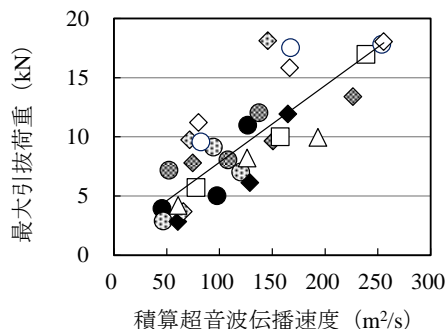


図-33 測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の関係

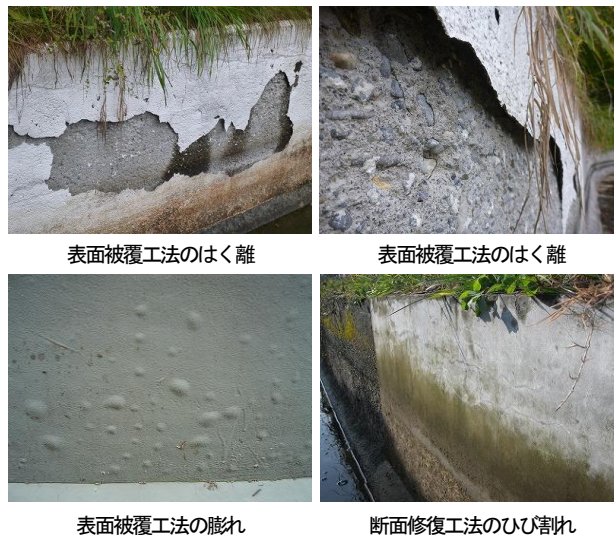


図-34 表面保護工法に作用する凍結融解による変状



難な状態にある。

そこで本研究では、補修効果の有効性やその持続性を検証するためのモニタリング調査手法、ならびにそれらの性能を判定指標とした表面保護工法の評価に関する検討を行った。寒冷地において表面保護工法が施工されて10年が経過した、供用中のコンクリート開水路を対象に、表面保護工法の種別による含水率の調査を試行した。また、この含水率調査を行った同位置から採取したコアの凍結融解試験を行い、表面保護工法の種別による凍結融解試験サイクル数毎の相対動弾性係数の推移、および内面からの深さ毎の含水率と超音波伝播速度の推移から、寒冷地のコンクリート開水路における表面保護工法適用

の作用とそれに伴う変状の発生は避けられないことが考えられる。

4.2 補修後の開水路を対象とした補修効果の検証^{44), 45), 46)}

4.2.1 目的

寒冷地に位置するコンクリート開水路では、凍害劣化を対象とした補修が進められており、この補修では、劣化要因である水分の侵入抑制を期待できる表面保護工法が適用される場合が多い。表面保護工法は、補修後の新たな水分の侵入を抑制し、母材コンクリートを保護することで、施設としての耐久性を維持しなければならず、表面保護工法により補修されたコンクリート開水路は、供用開始時の性能に回復されなければならない⁴⁷⁾。

しかし、農業用のコンクリート開水路では、側壁の背面が土中に置かれることが多いという設置環境から、表面保護工法は、主としてコンクリート開水路の内面のみに施工されることが多い。そのため、母材コンクリートへの背面からの水分の侵入を抑制することはできず、コンクリート開水路内からの水分（灌漑期間）だけではなく、天端や背面からの降雨や地下水の供給による影響も避けられない。

近年、過去に表面保護工法が施工されたコンクリート開水路において、はく離・ひび割れ等の変状が確認されている。表面保護工法適用後のモニタリング調査では、表面保護工法の耐久性は、外観目視等により調査されることが多い。そのため、母材コンクリートへの水分の侵入抑制効果の有無は、表面保護工法の外観の変状から得られる情報により、推測せざるを得ない⁴⁷⁾。表面保護工法に外観上の変状が生じた時点では、母材コンクリートの劣化が再補修での性能回復ができないほど進んでいることも多く、維持管理を行う上で、母材コンクリートの健全性に関する評価や、再補修の適正時期の見極めは困

表-2 対象施設の概要

水路名	建設年度 (供用期間)	補修年度 (経過年数)	表面保護工法
K幹線用水路 (RC現場打ちフリューム水路)	1972 (47年)	2006 (13年)	無機系被覆工法 K-IO
			有機系被覆工法 K-OR
			パネル工法 K-PA
			無補修 K-N
C幹線用水路 (RC現場打ちフリューム水路)	1969 (50年)	2009 (10年)	表面含浸工法 C-IM
			無機系被覆工法 C-IO
			無補修 C-N

後の補修効果を検証した。

4.2.2 対象施設の概要

対象施設は、北海道上川地方に位置する農業用のコンクリート開水路である K 幹線用水路、C 幹線用水路である。対象施設の概要を表-2 に示す。供用期間は、K 幹線用水路は 47 年、C 幹線用水路は 50 年で、構造形式は、いずれも RC 現場打ちフリューム水路である。表面保護工法断面図を図-36、対象施設の状況を図-37 に示す。K 幹線用水路では、無機系被覆工法 K-IO、有機系被覆工法 K-OR、母材コンクリートと表面被覆材である FRPM 板の間に緩衝材を使用したパネル工法 K-PA が適用され、補修後の経過年数は 13 年である。C 幹線用水路では、表面含浸工法 C-IM、無機系被覆工法 C-IO が適用され、経過年数は 10 年である。本研究では、これに無補修の K-N、C-N を加えて検証を行った。なお、C 幹線用水路の含水率調査は、新設コンクリートに打ち換えた躯体(打換母材) に表面保護工法を施工した、C-IO-2、C-IO-3、

有機系被覆工法の C-OR でも実施している。K 幹線用水路は、内幅 6.0m、内高 2.0m、側壁の部材厚は 200～250mm である。C 幹線用水路は、内幅 2.0m、内高 1.5m、側壁の部材厚は 200mm である。

4.2.3 検証方法の概要

本研究では、現地における表面保護工法の種別による含水率の違いが、以後の耐凍害性に及ぼす影響について検証するため、含水率調査と凍結融解試験を実施した。現地にて含水率調査を行い、これと同位置で各 2 本コアを採取し、1 本は炉乾法による含水率測定、1 本は凍結融解試験に供した。コア採取は JIS A 1107 に準拠して行っている。コアの採取位置は、各コンクリート開水路

の侵入を想定し、コアへの水分供給は、コンクリート開水路の内面と背面のみとするため、表面保護工法を含めた側面をエポキシ樹脂によりシールした(図-40 参照)。また、採取したコアの形状は円柱形のため、供試体容器は角柱形ではなく円柱形を用いた。供試体容器に入れるコア 2 本の合計の高さは、JISA 1148 の供試体の寸法である 400mm を目安としてコアを配置した。凍結融解温度の管理については、 $\phi 100 \times 400\text{mm}$ の管理用供試体中心部の温度によって行った。以上の条件により凍結融解試験を行った結果、凍結融解温度の履歴は、最高温度 $5 \pm 2^\circ\text{C}$ 及び最低温度 $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲内で推移し、凍結融解 1 サイクルに要する時間は、3 時間以上、4 時間以内に収まっていた。また、凍結融解試験の終了は、JISA 1148 では、300 サイクルであるが、遮水性を有する表面保護工法を施工したコアを対象としているため、900 サイクル終了時とした。ただし、各凍結融解試験サイクル終了時、供試体の劣化の進行に伴い、シールのひび割れや崩壊等により供試体容器に供試体が収まらなくなった段階で試験終了とした。

JISA 1148 による凍結融解試験では、一次共鳴振動数

の凍結融解の程度が著しい、南側の日当たり面である水路右岸側の気中部(最多頻度水位の上側)及び水中部(最多頻度水位の下側)とし、表面保護工法の浮きやはく離など外観上の変状が軽微な箇所を選定した(図-38 参照)。

(1) 含水率調査

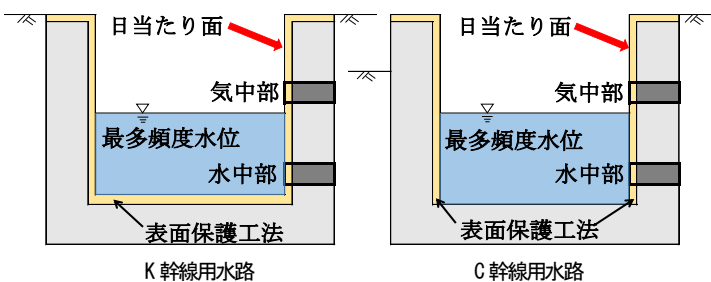
表面保護工法適用後の母材コンクリートにおいて、現地で実施する微破壊調査手法である電気抵抗式水分測定法と、採取したコアを用いた炉乾法により、含水率を測定した。図-39 に調査概要図を示す。電気抵抗式水分測定法は、電気抵抗式水分計(K社製 HI-800 型)を用い、コア採取箇所の左右いずれか一方から水平方向 30mm の位置に、 $\phi 6\text{mm}$ の孔を 30mm 間隔で 2 つ設け、内面からの深さ 10、30、50、70、90、110、130mm の計 7 点の孔間において測定した。炉乾法では、内面からの深さ 0～140mm の範囲を 20mm 間隔で計 7 試料に切断し、JIS A 1476 に準拠して炉乾燥前後の質量より含水率を求めた。

(2) 凍結融解試験

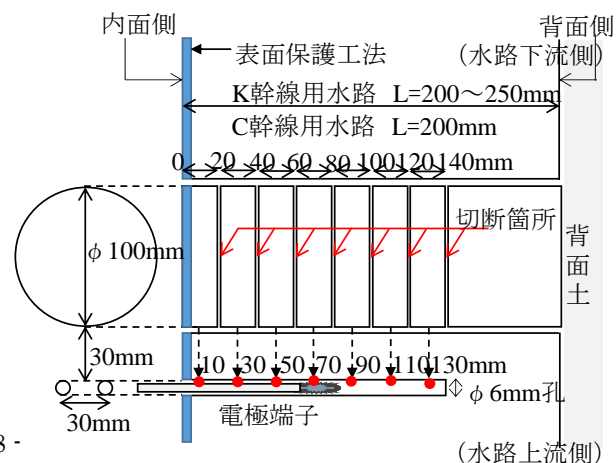
既往の研究^{48), 49), 50)}では、凍結融解試験を促進劣化試験として活用し、以後の劣化予測や耐久性評価を行っている。本研究でも、実施されている表面保護工法適用後の種別による耐久性評価を行うため、現地より採取したコア($\phi 100 \times 200 \sim 250\text{mm}$)を用いて、JISA 1148 に準拠し、凍結融解試験を実施した。実暴露環境での水分



K 幹線用水路 C 幹線用水路
図-37 対象施設の状況



K 幹線用水路 C 幹線用水路
図-38 用水路断面図



【正面図】 【平面図】 ●...測定位置

図-39 含水率の調査概要図

が測定項目とされている。しかし、供用中のコンクリート開水路から採取したコアでは、凍結融解試験実施後、一次共鳴振動数の測定は難しく、凍結融解試験サイクル数が増加するに伴い、正確な測定がさらに困難となる。そこで、既往の研究⁵¹⁾において、超音波伝播速度による動弾性係数の結果が活用されていることから、本研究では超音波法（透過法）を実施し、超音波伝播速度とこれをもとに相対動弾性係数を算出し、判定指標とした。また、超音波法（透過法）により、コンクリート開水路内面からの深さ毎の含水率の測定範囲と、同じ範囲で超音波伝播速度の測定が可能となった。

超音波法（透過法）では、凍結融解試験の各サイクル終了後、超音波試験機（P社製 TICO型）を用いて、深さ方向に10mm間隔で、発・受端子の距離が直径に相当するよう伝播速度を測定した（図-41参照）。表面保護工法の種別によるコア全体の評価は、式（6）により、各々の測点の伝播距離（端子間距離（mm））の合計 ΣL (mm) と超音波伝播時間の合計 ΣT (μ sec) から、平均となる超音波伝播速度 V (m/s) を算出し、これを用いた。

$$V = \Sigma L / \Sigma T \dots\dots\dots (6)$$

次に、所定凍結融解サイクル数経過後の超音波伝播速度 V (m/s) から、式（7）により動弾性係数 E_d (GPa) を算出し、式（8）により相対動弾性係数を算出した。
 E_{dn} は凍結融解サイクル数 n サイクル後の動弾性係数、
 E_{d0} は凍結融解試験開始時の動弾性係数である。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = E_{dn} / E_{d0} \times 100 \dots\dots\dots (8)$$

4.2.4 調査結果および考察

(1) 表面保護工法の種別による含水率

炉乾法により求めた深さ毎の含水率のうち、気中部の結果を図-42に示す。ここで、K-IO、K-OR、C-IO、C-IO-2、

C-IO-3、C-ORの表面から10mmの含水率は、補修材（5～15mm）とコンクリートからなる結果となっており、K-PAはコンクリートが含まれないため測定していない。

既設母材コンクリートでは、同一環境下のコンクリート側壁でも、工法間で含水率に差異が生じていた。一方、打換母材コンクリートでは工法間の含水率の差は小さかった。K幹線用水路では、K-NよりもK-IO、K-ORの含水率は高く、K-PAは同程度となった。C幹線用水路では、C-NよりもC-IM、C-IO-2、C-IO-3、C-ORの含水率は低く、C-IOは同程度となった。C-Nの含水率は8%程度とほぼ飽水状態にある⁵²⁾にも関わらず、C-IM、C-IO-2、C-IO-3、C-ORの含水率は低く保たれていることから、これらの工法は水分の侵入抑制効果が発揮されていると推測される。また、K-PA、K-IO以外の工法では、含水率は表面に近いほど低くなる傾向が見られ、水分が表面付近に極端に滞留することはなかった。

(2) 電気抵抗式水分測定法の試行結果

炉乾法と電気抵抗式水分測定法による含水率の測定結果を図-43に示す。C幹線用水路（打換母材）では、炉乾法と電気抵抗式水分測定法の測定結果はほぼ同程度で、

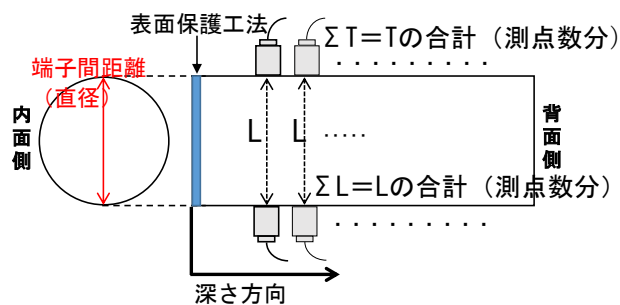
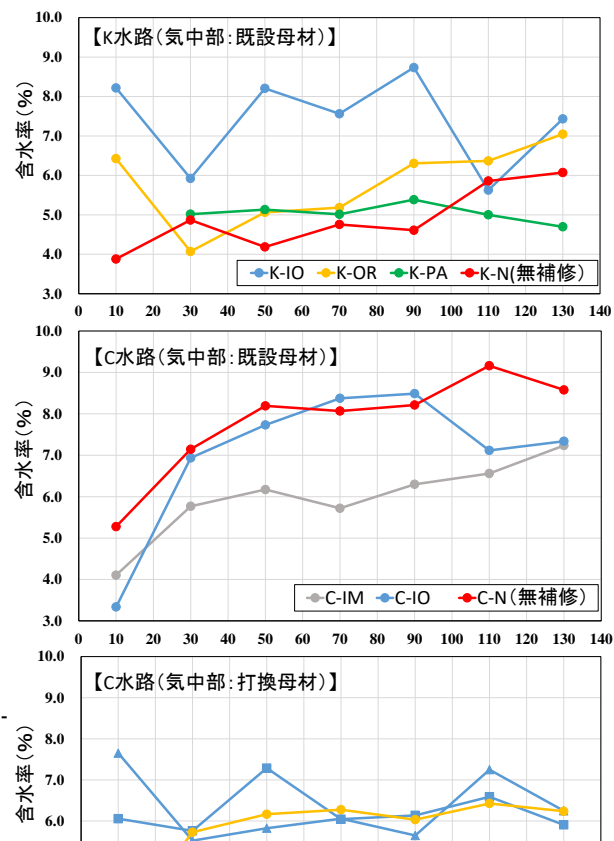


図-41 超音波法（透過法）測定概要



ばらつきは±30%に収まっていた。一方、母材の供用年数が長いK幹線水路(既設母材)とC幹線水路(既設母材)では、ともに、炉乾法よりも電気抵抗式水分測定法による含水率が低く測定されてしまう。しかし、炉乾法による含水率が高くなるほど電気抵抗式水分測定法の含水率も高くなることから、電気抵抗式水分計による測定は、含水率そのものを求めることは難しいが、コンクリート内部の水分を把握するための尺度として扱うことは有効であると考えられる。

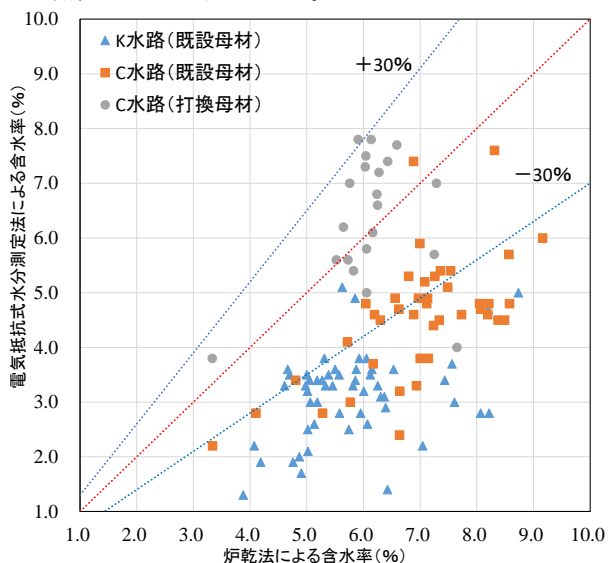


図-43 炉乾法と電気抵抗式水分測定法による含水率

(3) 表面保護工法の種別による相対動弾性係数の推移

表面保護工法の種別による相対動弾性係数の推移を図-44に示す。凍結融解試験終了サイクル数は、K幹線水路では最大756サイクル、C幹線水路では最大648サイクルで試験終了となった。

K幹線水路、C幹線水路ともに、凍結融解サイクル数が増加するに伴い、表面保護工法の有無によらず、相対動弾性係数は減少する傾向となった。また、気中部と水中部の結果を比較すると、全ての表面保護工法にお

いて、気中部の相対動弾性係数の減少が速かった。なお、これら気中部、水中部の減少傾向に大きな違いがあるのはIOであった。図-45に162サイクル終了後のK-IO-気中、K-OR-気中のコア状況を示す。この時点でK-IO-気中は、表面被覆材にスケーリングやひび割れが生じている。これは、無機系被覆工法であるIOは、吸水しやすく、凍結融解作用に対し劣化が生じやすいためであると考えられる。

K-IO-水中は、試験開始後100サイクルまで相対動弾性係数が増加する。これは、表面保護工法の遮水性が、試験に伴う凍結融解作用により失われ、母材コンクリートが吸水したことで、超音波伝播速度が上昇したためであると推測される。K-N-気中、K-N-水中、K-IO-気中では、凍結融解試験開始後から200サイクルにかけて、相対動弾性係数が減少する。これに反して、K-OR-気中、K-OR-水中、K-PA-気中、K-PA-水中は、600サイクルにかけて相対動弾性係数が緩やかに減少する。このことから、表面保護工法により、母材コンクリートへの遮水性が発揮されていたことがわかる。さらに、凍結融解試験終了サイクル数が600サイクルに達しているため、表面

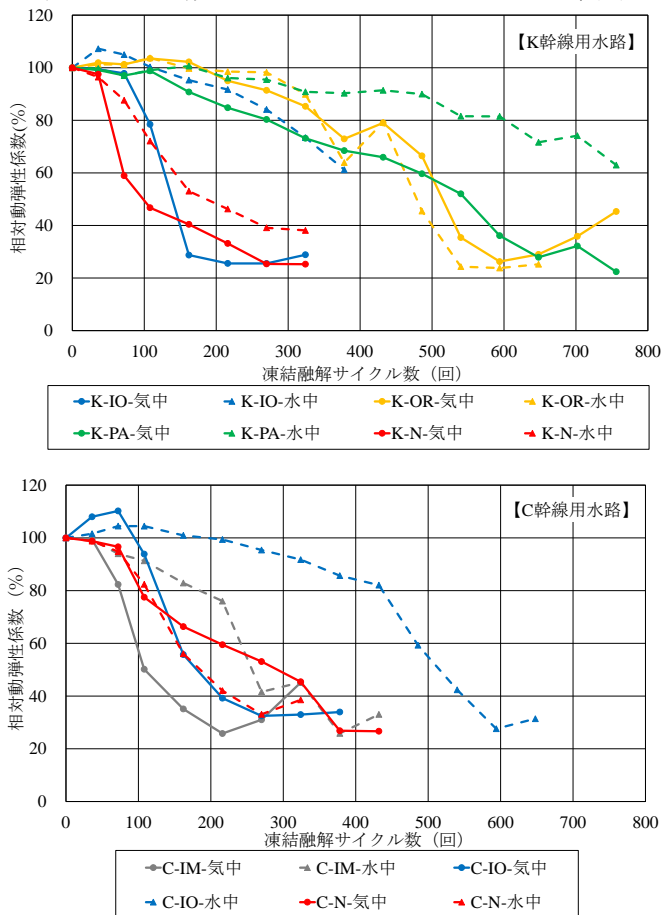
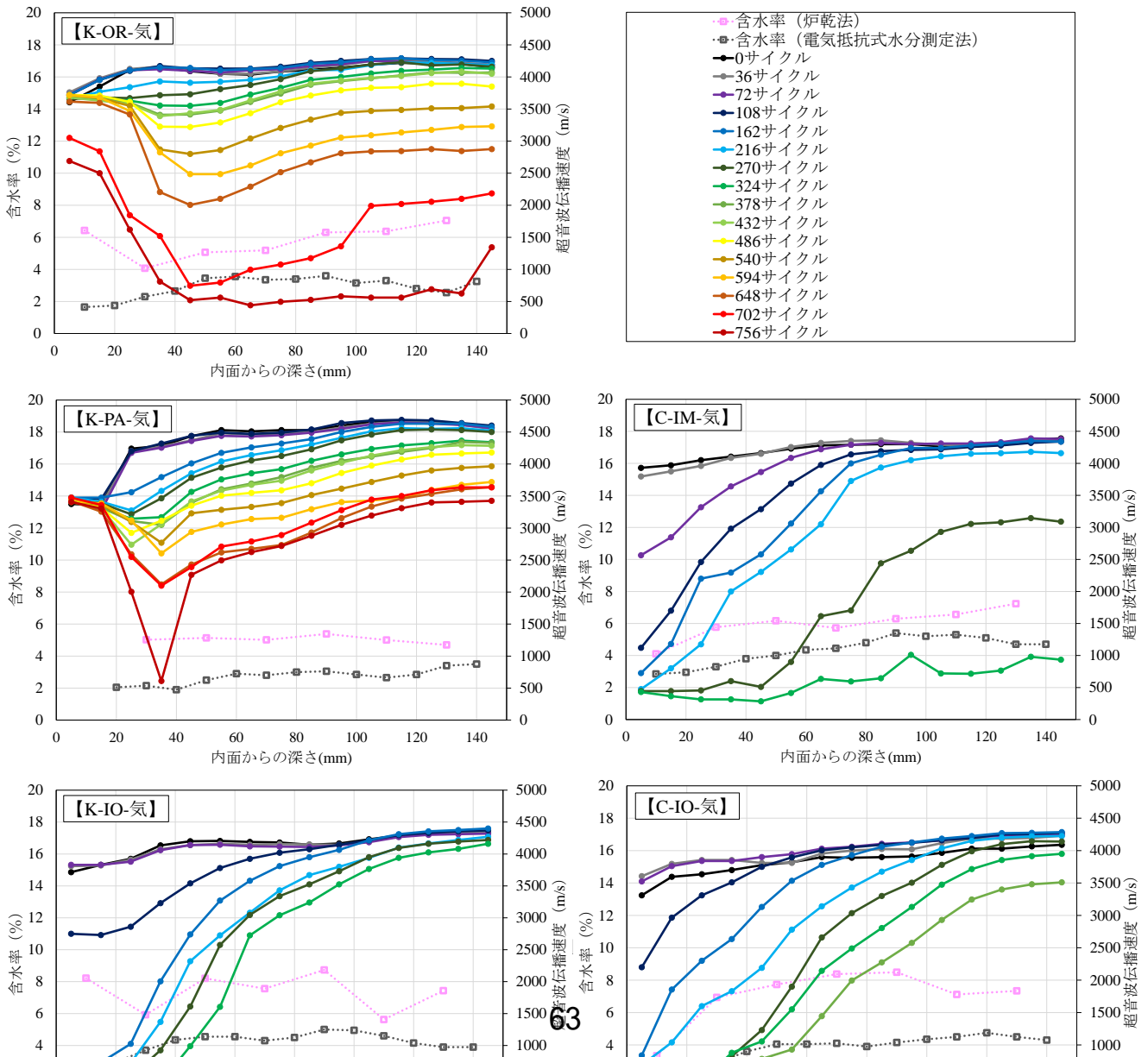


図-44 表面保護工法の種別による相対動弾性係数の推移



保護工法により母材コンクリートが遮水性を有することで、凍結融解作用による劣化が抑制されていることがわかった。

K-IO-水中と同様に、C-IO-気中、C-IO-水中は、100サイクル前後まで相対動弾性係数が増加し、その後、減少に転じる結果となった。また、C-IM-気中、C-IM-水中、C-N-気中、C-N-水中は、凍結融解試験開始後から相対動弾性係数が減少する。この結果から、C-IMはこの時点において、表面保護工法としての遮水性を有していないことがわかった。また、C-N-気中、C-N-水中よりも、C-IM-気中の相対動弾性係数の減少が進んでいることから、表面保護工法の適用による、母材コンクリートの耐



る可能性があることがわかった。一方、K-IO や K-N は表面保護工法の遮水性の低下により、内面から水分が供給され劣化が進むことで、試験の継続ができなかった。このため、K-IO、K-N では、内面からの深さ 0~100mm の範囲で超音波伝播速度の低下が生じている。また、内面からの深さ 100~140mm の範囲では、324 サイクル終了時点まで、超音波伝播速度の大きな低下は見られなかった。

C-IM、C-IO、C-N では、内面からの深さ 0~100mm において、超音波伝播速度の低下が進んでいる。C-IM では、216 サイクルで、内面からの深さ 0~140mm の全ての測点において低下している。C-IO では、378 サイクルで超音波伝播速度が低下し始めるまで、内面からの深さ 140mm 付近での超音波伝播速度の低下は見られなかった。一方、C-N については、432 サイクルまで凍結融解サイクル数が増加しても、内面からの深さ 140mm 付近での超音波伝播速度の低下は見られなかった。このことから、C 幹線水路では、表面保護工法を施工することで母材コンクリートの耐凍害性の低下に影響を与えたと考えられる。

また、各表面保護工法における内面からの深さ毎の含水率と超音波伝播速度について、含水率の変動に超音波伝播速度が多少影響されている測点はあったものの、明確な関係性は得られなかった。ただし、コア採取時点で、高含水率の表面保護工法では、凍結融解試験を行った結果、凍結融解試験終了サイクル数が少なくなり、早期に劣化状態になっていることから、母材コンクリートの含水率の大小は、劣化に影響があると推察される。

4.2.4 課題

ここでは、表面保護工法の種別による母材コンクリートへの影響は大きく、母材コンクリートの健全性や含水状態を把握することの重要性が示された。今後は、工法間の評価を行い、補修効果の有効性や持続性を判定指標とした表面保護工法の評価に関する検討を進める。

4.3 超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発⁵³⁾

4.3.1 目的

寒冷地における農業水利施設では、近年、コンクリートの凍害(図-47 左)を対象とした補修・補強が行われている。この補修・補強では、「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)」⁵⁴⁾の各品質規格に適合する材料が選定され、その中でも寒冷地における個別的性能である耐凍害性を満足する材料が適用される場合が多い。しかしながら、施工後早期にひび割れや浮き・剥離といった変状を生じることも多く、

凍害性の低下の影響が示唆される。

(4) 内面からの深さ毎の含水率と超音波伝播速度の推移

気中部の内面からの深さ 0~140mm における、表面保護工法の深さ毎の含水率と超音波伝播速度の推移(気中部)を図-46 に示す。図中の含水率は、現地で電気抵抗式水分測定法により測定した結果、および戸乾法により算出した結果である。本研究で用いたコアの母材コンクリートでは、試験開始時点の超音波伝播速度は、3,800~4,500m/s に収まっていた。

表面被覆材である内面からの深さ 5、15mm において、K-OR では 648 サイクルまで、K-PA では試験終了となる 756 サイクルまで、超音波伝播速度の低下がないことから、表面被覆材の劣化は生じにくいことがわかった。しかし、その母材コンクリートの超音波伝播速度は、一様に内面からの深さ 140mm に至るまで、サイクル数が増えるにしたがって、低下していることがわかる。これは、K-OR、K-PA の表面保護工法の遮水性により、コアから水分が排出されず、背面から供給された水分がコアの内部に滞留し、母材コンクリート全体の劣化に影響していると推測される。また、コンクリート開水路の内面に限った表面保護工法の対策では、K-OR、K-PA のように、背面からの水分供給を回避できず、遮水することで、母材コンクリートの劣化を助長し、かつ表面から不可視部である母材コンクリートの劣化状況の確認を困難にす

恒久的な長寿命化対策にはなり得ていないのが現状である(図-47右)。

本研究では、農林水産省官民連携新技術研究開発事業において、凍結融解作用に対して高耐久性を有する高炉スラグ系材料を用いた補修・補強工法と、多種多様な形状を有する農業水利施設においても施工品質の確保・向上が図られる機械化施工技術から構成される、超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発を進めている(図-48)。ここでは、超高耐久性断面修復・表面被覆技術の概要を示し、本技術の根幹となる断面修復・表面被覆材料の耐凍害性について報告するとともに、今後の開発の方向性について示す。



開水路側壁の断面欠損 無機系被覆材のひび割れ
図-47 コンクリートの凍害と補修材の早期劣化

本研究では、超高耐久性断面修復・表面被覆技術として、高炉スラグ系複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下、HPFRCC Type と呼ぶ)、ならびに超微粒子高炉スラグ系無機系断面修復・表面被覆材料(以下、PCM Type と呼ぶ)の2タイプの工法を開発を進めている。いずれの工法も、開水路の通水表面等に高炉スラグ系無機系断面修復・表面被覆材料を吹付け・塗布することにより一体化させ、開水路等の構造・水理・水利用性能の回復・向上を図る。HPFRCC Type は、①ウォータージェット工法等により表面近傍の劣化部を除去し、②吹付け工法、左官アシスト工法⁵⁴⁾等により断面修復・表面被覆材料を敷設する工法である(図-49左)。材料の付着性の低下要因となる表面近傍の脆弱部を除去することにより、水路躯体との一体性における耐久性を確保することができる。同時に、吹付け工法、左官アシスト工法等の機械化施工技術を適用することにより、施工品質の向上が図られ、予定供用期間中のメンテナンスフリーを実現することが期待できる。一方、PCM Type は、①超高圧洗浄等により表面の下地処理を行い、②表面改質剤を施し、③プライマーを塗布した後、左官工法等により断面修復・表面被覆材料を敷設する工法である(図-49右)。下地処理において除去し切れなかった脆弱部を改質することにより、同様に水路躯体との一体性における耐

久性を確保することが期待できる。両工法ともに、上述の「マニュアル(案)」⁵⁴⁾の各品質規格に適合している。

4.3.3 超高耐久性断面修復・表面被覆技術の耐凍害性

凍結融解試験結果を図-50に示す。凍結融解試験は、JISA 1148のA法(水中凍結融解試験方法)に準拠して行った。凍結融解50サイクル毎にたわみ振動の一次共鳴振動数の測定を行い、測定が困難となるか相対動弾性係数が90%に到達した時点で試験を終了した。なお、図中では、比較のため、試製セメントモルタル(CM)および市販ポリマーセメントモルタル(PCM)の試験結果⁵⁶⁾を併記している。HPFRCC Type、PCM Typeともに、凍結融解サイクル数は1,500サイクルを超え、優れた耐凍害性を有していることが分かる。

4.3.4 課題

これまでに実施した試験施工の状況を図-51に示す。材料自体の耐久性が担保されれば、予定供用期間中のメンテナンスフリーを実現することができるか否かは、その材料が水路躯体と一体化し続けるか否かによるところが大きくなる。今後は、試験施工箇所の追跡調査を行い、水路躯体との一体性も含めた健全性に対するモニタリ

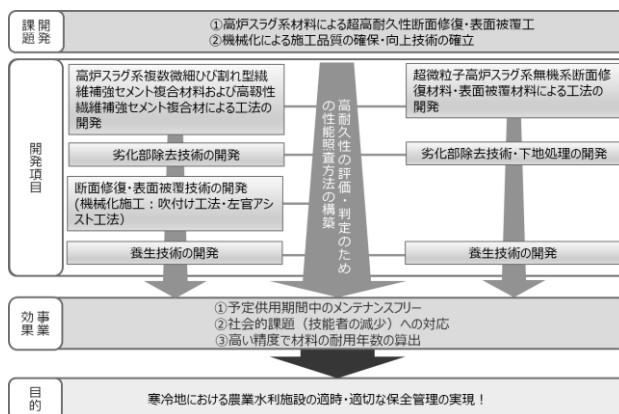


図-48 研究開発フロー

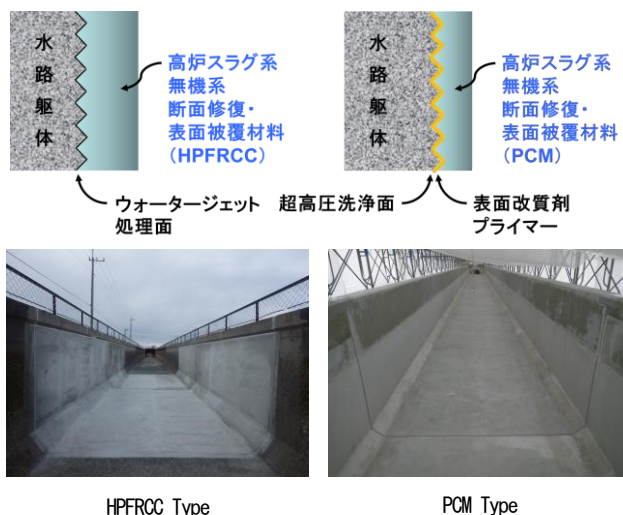
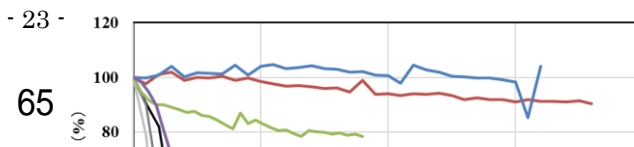


図-49 超高耐久性断面修復・表面被覆技術の概要



グを継続実施するとともに、付着性を判定指標とした耐凍害性の評価を行う予定である。

5. まとめ

本研究では、積雪寒冷地に位置する社会基盤を構成する施設群の一つである農業水利施設の長寿命化を図るため、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を行うことを達成目標としており、これにより、積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理方法を提案することを最終的な研究目的としている。

平成 28 年度～令和元年度では、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築において、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発を行った。さらに、②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発において、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価、凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法の開発を行った。

以下に、実施した主な検討内容と得られた結果の概要を整理する。

- (1) 北海道上川地方および空知地方に位置する造成後 50 年以上が経過した頭首工において、固定堰などの主に水中に曝されている部位を対象とした劣化状況の詳細調査を行った。その結果、積雪寒冷地に位置する頭首工を構成するコンクリート施設は、圧縮強度や相対動弾性係数といった力学的特性の低下を伴う著しい劣化環境下に置かれており、表面近傍における凍害劣化と、カルシウム成分の溶脱現象を伴う摩耗劣化が発生することが示された。
- (2) 配合の異なるモルタル試験体において、凍結融解を作用させ、その後に摩耗促進試験を行った。その結果、平均摩耗深さは、水セメント比が大きいほど、凍結融解サイクル数が多いほど、その増加は大きくなり、摩耗量は凍結融解サイクル数に応じて増加することが分かった。
- (3) 北海道空知地方に位置する供用後 17～36 年が経過した鋼矢板排水路において、鋼矢板の腐食診断を行い、経過年数、腐食量、水質の関係を整理・分析することにより、その構造性能の低下機構について考察した。鋼矢板の腐食診断では、腐食速度は、干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、また、経過年数以外の要因に影響を受けることが推察された。さらに、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構の考察では、積雪寒冷地に特有の性能低下要因を示し、それらが鋼矢板の腐食・断面欠損を加速させること、また、傾倒・倒壊を発生させる直接的な要因になっていることを示した。
- (4) 北海道内に位置する開水路延べ 36 路線の 446 測点において、コア採取を含む劣化状態の詳細調査を行った。凍害劣化の発生形態を整理し、内部変状の発生により生じる弾性係数の低下の実態を明らかにして、寒冷地の劣化特性に対応した機能診断手法の必要性を示した。また、超音波伝播速度と静弾性係数との関係を整理し、超音波法の有用性を確認した。さらに、リバウンドハンマ法の問題点について考察するとともに、機械インピーダンス法の有用性を示した。
- (5) 北海道内および岩手県内に位置する 6 箇所の RC 現場打ち開水路のコンクリート側壁でアンカー引抜試験を実施し、各アンカー埋込位置における最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係について考察を加え、最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の間に線形関係があること、また、この関係を利用して部材内部の凍害劣化診断が可能であることを明らかにした。

- (6) 北海道上川地方に位置する供用後約 50 年で、表面保護工法適用後約 10 年が経過したコンクリート開水路側壁において、表面保護工法の種別による含水率調査と同位置から採取したコアを用いて凍結融解試験を行った。含水率調査の結果から、同一環境下のコンクリートでも、工法間で含水率に差異が生じることが分かった。加えて、含水率の測定に微破壊調査手法である電気抵抗式水分測定法を試行した結果、含水率そのものを求めることは難しいものの、コンクリート内部の水分を把握するための尺度として扱うことの有効性が示された。また、凍結融解試験の結果から、表面保護工法の種別による母材コンクリートへの影響は大きく、母材コンクリートの健全性や含水状態を把握することの重要性を確認した。
- (7) 凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法として、「超高耐久性断面修復・表面被覆技術」の開発と、その耐久性を評価するためのモニタリング調査に着手した。断面修復・表面被覆材の凍結融解試験を行った結果、凍結融解サイクル数は 1,500 サイクルを超え、優れた耐凍害性を有することを確認した。

参考文献

- 1) 農林水産省：食料・農業・農村基本計画、pp.44-45、2015
- 2) 農林水産省：土地改良長期計画、pp.28-32、2016
- 3) 国土交通省：北海道総合開発計画、pp.48-49、2016
- 4) 石神暁郎・蒔苗英孝・池下貴之・春田恵太・森充広：頭首工を構成するコンクリート施設の凍害・摩耗診断、水土の知、第 86 巻、3 号、pp.33-37、2018
- 5) 農林水産省農村振興局：農業基盤情報基礎調査（平成 26 年 3 月 31 日時点）、2016
- 6) 緒方英彦・高田龍一・鈴木哲也・山崎大輔・佐藤周之：RC 開水路の側壁内部における凍害ひび割れの発生形態、水土の知、第 78 巻、5 号、pp.29-33、2010
- 7) 石神暁郎・佐藤智・周藤将司・緒方英彦：コンクリート開水路の凍害劣化の発生形態とその診断手法、水土の知、第 83 巻、10 号、pp.27-30、2015
- 8) 緒方英彦・野中資博・藤原貴央・高田龍一・服部九二雄：超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断、コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集、pp.63-70、2006
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]、pp.34-45、pp.157-160、2013
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I 共通編、pp.73-89、

2012

- 11) 岡本修一・魚本健人：細孔構造からみた凍結融解による劣化機構に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.901-906、1997
- 12) 岡本修一・魚本健人：凍結融解による劣化への初期ひび割れの影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.913-918、1998
- 13) 石神暁郎・森充広・渡嘉敷勝・増川晋：農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.805-810、2005
- 14) 森充広・渡嘉敷勝・山崎大輔・加藤智丈：長期供用された農業用水路のコンクリート通水表面の変質、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.919-924、2009
- 15) 石神暁郎・西田真弓・浅野 勇・川邊翔平・川上昭彦・森充広：凍結融解を作用させたモルタル試験体の摩耗促進試験、2019 年度農業農村工学会大会講演会概要集、pp.464-465、2019
- 16) 石神暁郎・西田真弓・森 充広：積雪寒冷地におけるコンクリート施設の凍害・摩耗診断、平成 30 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.568-569、2018
- 17) 渡嘉敷勝・森 充広・中矢哲郎・森 丈久：カルシウム溶脱したペースト硬化体の耐摩耗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.1、pp.719-724、2010
- 18) 石神暁郎・星野香織・工藤吉弘：積雪寒冷地における排水路鋼矢板の腐食診断、平成 29 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.560-561、2017
- 19) 石神暁郎・星野香織・工藤吉弘：積雪寒冷地における鋼矢板排水路の性能低下特性、水土の知、第 86 巻、5 号、pp.43-46、2018
- 20) 石神暁郎：北海道における鋼矢板腐食実態と排水路性能低下の特徴、鋼矢板水路の腐食実態と補修・補強対策論文集、pp.11-16、2017
- 21) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【鋼矢板水路腐食対策（補修）編】（案）、2019
- 22) 鈴木哲也・浅野 勇・石神暁郎：農業用鋼矢板水路の腐食実態と長寿命化対策—補修・補強・更新への性能設計—、養賢堂、2019
- 23) 北海道開発局農業水産部農業水利課：北海道の明渠排水、pp.3-9、pp.32-46、pp.47-249、1989
- 24) 日置綾人・鈴木一衛・畑中諭・渡辺欣哉：軟弱地盤地帯の明渠排水路施工について、第 25 回（昭和 56 年度）北海道開発局技術研究発表会論文集、pp.1099-1106、1982

- 25) 杉山幸男・奥井宏・斉藤清保・鈴木達也：泥炭地排水路工法について、第32回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集、pp.107-112、1983
- 26) 新井貞夫・仁平勝行・山内勝彦・河合裕志・横山一男・本間公康：泥炭地における排水路の設計例について、第33回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集、pp.5-8、1984
- 27) 峰村雅臣・土田一也・羽田卓也・原斉・森井俊廣・鈴木哲也：新潟県における鋼矢板リサイクルの取り組み、平成24年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.872-873、2012
- 28) 原斉・峰村雅臣・萩原太郎・森井俊廣・鈴木哲也：鋼矢板排水路の腐食実態に関する実証的研究、平成26年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.698-699、2014
- 29) 板垣知也・松木俊郎・江口英弘・長崎文博・鈴木哲也：新潟地域における産官学連携による腐食鋼矢板水路の補修工法の開発、平成28年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2016
- 30) 石神暁郎：農業用排水路の材料劣化に着目した機能診断手法、平成26年度北海道開発局技術開発委員会農業検討部会技術研修分科会（施設保全研修会）講演資料、2014
- 31) 石神暁郎・西田真弓・蒔苗英孝・佐藤智・周藤将司・緒方英彦：寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設機能診断手法、水土の知、第86巻、6号、2018
- 32) 石神暁郎・西田真弓・蒔苗英孝・佐藤智・周藤将司・緒方英彦：コンクリート施設の凍害劣化特性に対応した機能診断手法、平成30年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2018
- 33) 農林水産省農村振興局：農業農村整備に関する技術開発計画、pp.5-8、2017
- 34) 食料・農業・農村政策審議会 農業農村整備部会 技術小委員会：農業水利施設の機能保全の手引き、2015
- 35) 西林新蔵・小柳洽・渡邊史夫・宮川豊章：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.516-530、2009
- 36) 石神暁郎・金田敏和・蒔苗英孝・会沢義徳・西田真弓・佐藤智：超音波伝播速度の測定によるコンクリート開水路の凍害診断、水土の知、第80巻、6号、pp.13-16、2012
- 37) 久保元樹・井上真澄・佐藤智・石神暁郎：機械インピーダンス法を用いたコンクリート開水路の凍害診断手法の検討、コンクリート工学年次論文集36(1)、pp.2110-2115、2014
- 38) 佐藤智・石神暁郎・加藤太吾・安田俊一・大杉周作・蒔苗英孝：機械インピーダンス法によるコンクリート開水路側壁の内部変状の検出、平成26年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.658-659、2014
- 39) 緒方英彦・服部九二雄・高田龍一・野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1563-1568、2002
- 40) 緒方英彦・清水邦宏・石神暁郎・田場一矢：凍害劣化したコンクリートのアンカー引抜試験における最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係、平成28年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2016
- 41) 緒方英彦・清水邦宏・石神暁郎・田場一矢：アンカー引抜試験における最大引抜荷重を利用したコンクリート側壁の凍害劣化診断、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、2016
- 42) 緒方英彦・清水邦宏・石神暁郎・田場一矢：芯棒打込み式金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜き試験によるコンクリート構造物の凍害劣化診断、日本非破壊検査協会コンクリート構造物の非破壊検査論文集、Vol.5、pp.77-84、2015
- 43) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説（第2版）、pp.321-322、2013
- 44) 西田真弓・石神暁郎・山田章・緒方英彦：寒冷地における表面保護工法適用後のコンクリート開水路側壁の含水率、平成30年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2018
- 45) 西田真弓・石神暁郎・緒方英彦：寒冷地におけるRC開水路の表面保護工法による母材コンクリートへの影響、2019年度農業農村工学会大会講演会概要集、2019
- 46) 西田真弓・石神暁郎・緒方英彦：寒冷地のコンクリート開水路における表面保護工法適用後の補修効果の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.1、pp.833-838、2019
- 47) 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の長寿命化のための手引き、pp.2-13-2-14、pp.6-1-6-25、2015
- 48) 熊谷守晃・星俊彦・佐伯昇・太田利隆：50年経過したコンクリートの物理、化学的特性と耐久性、土木学会論文集、No.686/VI-52、pp.41-54、2001
- 49) 小野寺康浩・秀島好昭・高谷智文・奥井宏・館野健悦・田鹿秀則：表面塗覆装した経年水路コンクリートの凍結融解耐久性試験、第50回農業土木学会北海道支部研究発表会講演集、pp.80-83、2001
- 50) 佐藤英隆：金山ダムにおける堤体コンクリート表面の劣化予測、Docon Report、Vol.201、pp.12-17、2016
- 51) 緒方英彦・高田龍一・服部九二雄：コンクリート製開水路の非凍結期の供用環境が凍害に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.1159-1164、2009
- 52) 湯浅昇・笠井芳夫：非破壊による構造体コンクリートの水分測定方法、コンクリート工学、Vol.32、No.9、p.54、1994
- 53) 石神暁郎・西田真弓・南真樹・金沢智彦・緒方英彦・濱幸雄：超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発（その1）

- ー予定供用期間中のメンテナンスフリーを目指した工法ー、
2020年度農業農村工学会大会講演会概要集、2020
- 54) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室：農業
水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補
修編】(案)、2015
- 55) 南 真樹・西谷内龍司：「左官アシスト」を用いたコンクリー
ト補修工法の導入、2019年度農業農村工学会大会講演会概
要集、pp.50-51、2019
- 56) 石神暁郎・田場一矢・中村和正：コンクリート開水路補修
における無機系表面被覆材の凍害劣化予測、平成28年度農
業農村工学会大会講演会講演要旨集、2016

16.2 営農の変化や気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発

16.2.2 大規模災害時における長大な農業水利施設の災害対応計画策定技術の開発

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ
(水利基盤チーム)

研究担当者：川口清美、大久保天、南雲 人
今泉祐治、寺田健司、中村和正

【要旨】

本研究の目的は、基幹的な農業水利施設における大規模災害時に備えた災害対応計画の策定技術を開発することである。そのため、本研究で取り組む課題は、(1)大規模災害時における災害対応の遂行を阻害する被害発生を抑制する対策を検討する方法を開発すること、および(2)大規模災害発生時において迅速かつ適切に現場対応が可能な施設管理体制を提案することである。

(1)の課題に関して、大規模地震対策の検討方法として FTA (Fault Tree Analysis) の適用を検証した。北海道内最大級規模の農業用水路における災害対応を対象に、FTA を用いて、大規模災害時における災害対応が遂行不能になる原因事象を特定しその対策を検討した。その結果、FTA を用いた対策検討の有効性は確認されたものの、原因事象を詳細に追及すれば、FT 図が肥大化して対策検討の作業効率が低下するという実用面における課題が明らかになった。この課題を解消するため、FT 図作成において一定の具体的な原因事象が特定された段階で対策の検討に切り替えるという実用 FTA を案出した。そして、実際の施設管理者による実用 FTA を用いた対策検討の実践を通して、実用 FTA の有効性を検証した。その結果、実用 FTA を用いて従来の FTA と同数かそれ以上の対策を短時間で引き出すことができ、実用 FTA は有効かつ施設管理者自らの手で実施可能な対策検討方法であることを確認した。

(2)の課題に関して、大規模地震発生時には即座に複数名の施設管理者が予め割り当てられた各ゲート設備に急行して対応にあたるという現場管理体制を提案し、その現場管理体制における各ゲート設備への施設管理者の割当人数を最適化する方法を構築した。また、施設管理者の意思決定方法として、現場管理体制構築の可否を、取水ゲートを閉鎖するか否かの判断基準とする方法を提案した。この意思決定方法の導入および FTA により挙げられた対策の実施によって、現行の災害対応が遂行不能になる確率は、震度 6 強において約 60%低減、震度 7 において約 35%低減すると予測された。また、平成 28 年 8 月の台風第 10 号による大雨災害時において実施された農業用ダムの管理の実態を検証して、ダム管理において防災行動計画が有効であることを示した。

以上の研究成果を取りまとめて、農業水利施設管理者のための災害対応計画策定マニュアル案を作成した。

キーワード：大規模地震災害、大雨災害、農業水利施設、災害対応、FTA、意思決定

1. はじめに

基幹的な農業水利施設が大規模な地震や突発的な豪雨により被害を受ければ、広範囲にわたる営農への影響が懸念されるばかりでなく、その被災箇所から流出する多量の水が新たな被害リスクとなって、地域住民の人命や財産に関わる甚大な二次災害を引き起こすことが考えられる。東北地方太平洋沖地震や北海道胆振東部地震をはじめ過去の大規模な地震災害では、多くの農業水利施設が被災した¹⁾。また、平成 28 年 8 月には、北海道および東北地方に上陸した台風によって集中豪雨が発生して、農業水利施設が壊滅的な被害を受けた³⁾。

このような大規模災害に対応するためには、万一施設が被災しても、その後の災害対応により被害拡大を最小限に抑止する減災対策が重要になる。しかし、大規模災害時には、その災害対応に必要な資源である人、情報通信、設備機器、インフラもまた被災して、その機能を喪失してしまうおそれがある。それゆえ、大規模災害時に起こり得る多種多様な被害想定を考慮した災害対応計画を策定しておく必要がある。

そこで、筆者らは、信頼性工学におけるリスク解析手法のひとつである FTA (Fault Tree Analysis) を用いて、大規模地震災害時における農業水利施設管理者の災害対応行

動を阻害するリスクを網羅的に特定するとともに、そのリスクへの対策の効果を定量的に評価した⁴⁾⁵⁾。この既往の研究成果を受けて、本研究では、基幹的な農業水利施設における災害対応力を強化するための災害対応計画策定技術の開発を目的として、次のような課題に取り組んだ。

課題①：FTA を用いたリスク解析および対策検討方法の有効性の検証および体系化

課題②：大規模災害発生時における施設管理者の適切な判断と迅速な対応行動を可能にする災害対応体制の提案

以下、本報告では、2章、3章、4章において、平成29年度までの研究成果を述べ、5章、6章、7章において、平成30年度における研究成果を述べる。

2章では、課題①に関して、国内最大級の灌漑水路システムにおける地震時の災害対応を対象に実施した FTA を用いたリスク解析および対策検討を実施して、FTA の適用性を確認するとともに、その実用面における課題を解決するため、従来の FTA を改良した FTA (実用 FTA) を提案する。

3章では、課題②に関して、地震災害発生後、複数名の施設管理者が取水ゲートなどの各施設に急行して災害対応に当たる現場管理体制の構築を提案し、その現場管理体制の最適化手法の開発および施設管理者の意思決定方法の改善策の検討を行う。

4章では、大雨災害時に実施されたダム管理の実態を記すとともに、FTA を用いたリスク解析から、ダム管理における防災行動計画(タイムライン)の有効性を示す。

5章では、課題①に関して、実用 FTA の手順を一般化するとともに、実際の水路システムを管理する施設管理者による実用 FTA を用いた対策検討の実践を通して、実用 FTA の有効性を確認する。

6章では、課題②に関して、地震発生直後の水路における安全確保を必要条件とする施設管理者の意思決定方法を、基本的な意思決定理論である期待値原理に基づいて検討し、その結果より、現場管理体制が構築できるか否かを判断基準に、取水ゲートを閉鎖するか否かを決定する意思決定方法を提案する。

7章では、本研究成果を取りまとめて作成した「農業水利施設管理者のための災害対応計画策定マニュアル案」の概要を紹介する。

8章では、以上の結果をまとめる。

2. FTA を用いた対策検討方法の改良

2.1 FTA によるリスク特定および対策検討方法

2.1.1 FTA の概要

FTA とは、解析対象とする望ましくない事象(頂上事象)を出発点にして、その発生原因となる事象(中間事象)を FT 図と呼ばれる樹形状の図に整理していくことで、根本的な原因となる事象(基本事象)を網羅的に特定し、頂上事象の発生を低減する対策を明らかにする方法である⁶⁾。FTA は、機械設備の故障からヒューマンエラーまで、特性の異なる事象を統一的に解析することができるので、人や情報通信、インフラなど多種多様な資源が関連する大規模災害時の災害対応過程を解析する手法として適当である。FTA は、①解析対象の把握、②FT 図の作成、③対策の検討の手順で実施する。

2.1.2 解析対象の把握

FTA の第一段階は、解析対象とする災害対応の流れを把握することである。本研究では、基幹的な幹線用水路施設を管理する土地改良区職員(以下、「施設管理者」)に聞き取り調査を実施して、大規模地震災害時に幹線用水路施設において起こり得る被害状況を整理するとともに、その被害状況に対応する施設管理者の災害対応行動の流れを把握した。

2.1.3 FT 図の作成

FT 図は表-1 に示す記号を用いて作成する。FT 図の例を図-1 に示す。最初に解析対象とする事象 F を頂上事象として設定する。次に、頂上事象 F が起こる直接的な原因となる事象を挙げて、それを頂上事象 F の下位に並べて書き出す。この場合は中間事象 A および基本事象 D である。このとき、頂上事象 F の直下の OR ゲートは、中間事象 A および基本事象 D のいずれかひとつが生じた場合

表-1 FT 図に使用される記号

記号	名称	内容
□	頂上事象 中間事象	頂上事象: 解析対象とする事象 中間事象: 上位事象の原因となる事象
○	基本事象	根本的な原因となる事象
∩	ORゲート	下位事象のひとつ以上が発生すれば上位事象が発生
∩	ANDゲート	下位事象のすべてが発生する場合に上位事象が発生

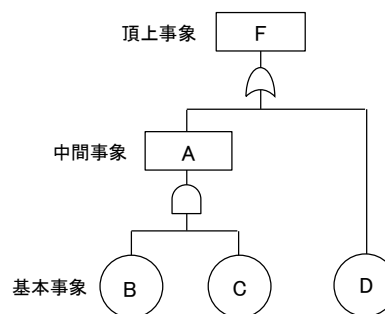


図-1 FT 図の例

に、頂上事象 F が発生することを意味する。中間事象 A が生じる原因は、基本事象 B および C である。この場合は、AND ゲートで結合されているので、基本事象 B と基本事象 C がともに生じた場合に中間事象 A が発生することを意味する。

本研究では、以上のような規則と手順に従って FT 図を作成することで、大規模地震発生直後における災害対応が遂行不能になる根本的な原因事象、すなわち、基本事象を特定した。なお、発想の公平性や一般性を確保するため、FT 図の作成作業は複数名で行うことが望ましい。本研究では、調査対象の施設管理者、災害に関する知見を有する技術者および筆者らを含めた 6 名または 7 名によって FT 図を作成した。

2.1.4 対策の検討

FT 図に示される基本事象に対して適切な対策を施せば、頂上事象の発生を抑制することができる。ただし、ひとつの基本事象に対して複数の対策が考えられる場合がある。その場合には、対策をさらに樹形状の図に整理する「対策検討 FT 図」を作成することが有効である⁷⁾。対策検討 FT 図については、2.4 節および 2.5 節において説明する。

2.2 FTA によるリスク特定および対策検討の実例

2.2.1 解析対象とした災害対応

(1) 対象施設

本研究において解析対象とする灌漑用水路施設は、北海道の水田地帯にある頭首工と開水路からなる H 幹線用水路である。図-2 にその外観を示す。H 幹線用水路の施設規模は、延長約 80km、最大通水量約 42m³/s であり、国内最大級の灌漑用水路である。H 幹線用水路を管理する施設管理者の協力を得て、同施設管理者が想定している大規模地震災害時の災害対応を対象に、FTA による被害リスクの特定および対策の検討を実施した。

(2) 大規模地震発生直後における災害対応

大規模地震災害によって長大な幹線用水路が被害を受けて、万一にも決壊あるいは溢水という事態となれば、その被害箇所周辺の地域に甚大な二次災害が生じることが懸念される。そのため、H 幹線用水路の施設管理者は、地震発生後、即座に水管理システムのデータを確認して、用水路内の水位に異常があれば直ちに取水ゲートを閉鎖して、溢水や決壊による二次災害の発生を防止することを想定している (図-3)。

(3) 頂上事象の設定

以上のように、大規模地震発生直後に施設管理者が直ちに行う災害対応は、取水ゲートを閉鎖して被害拡大を防止することである。そのため、本研究では、取水ゲートが閉



図-2 灌漑期におけるH幹線用水路の外観

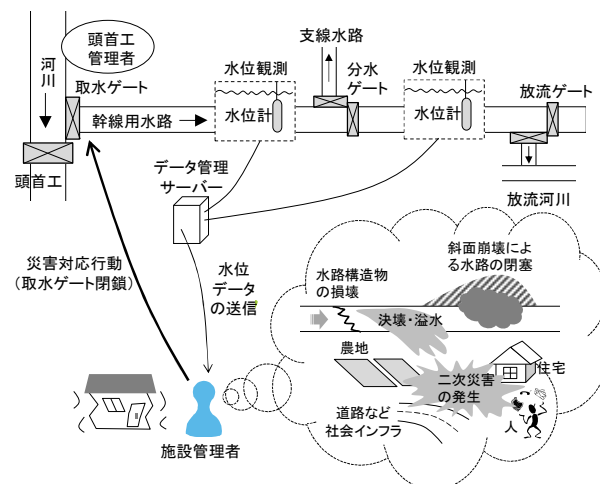


図-3 大規模地震発生直後において想定される災害対応

鎖できないという状況、すなわち、「取水ゲートの閉鎖不能」を FT 図の頂上事象として設定した。

2.2.2 FT 図の作成と対策の検討

H 幹線用水路における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とした FT 図の一部を図-4 に示す。頂上事象の下位に災害対応の各工程が遂行不能となる事象が列挙される。それらの各事象が発現する原因事象を連鎖的に挙げていき、根本的な発生原因となる基本事象を特定した。図中の△の記号は他の FT 図が連結すること、すなわち FT 図がさらに継続することを意味する。それゆえ、基本事象「系統電力の停電」以外の事象にはさらに FT 図が続くことになる。ここでは、「系統電力の停電」を基本事象としているが、その発生原因は、配電設備、送電設備、発電所と遡っていけば、どこまでも詳細に挙げられるということになる。しかし、配電設備以降の原因事象に対して、施設管理者が対応できるものではない。このように、原因事象の追究をさらに進めることができたとしても、施設管理者による対策実施が不可能であることが確認された時点で原因事象の追究を止め、その事象を基本事象とした。

このようにして挙げられた基本事象に対して、対策を検討した。ただし、頂上事象からの原因経路が異なるものの、

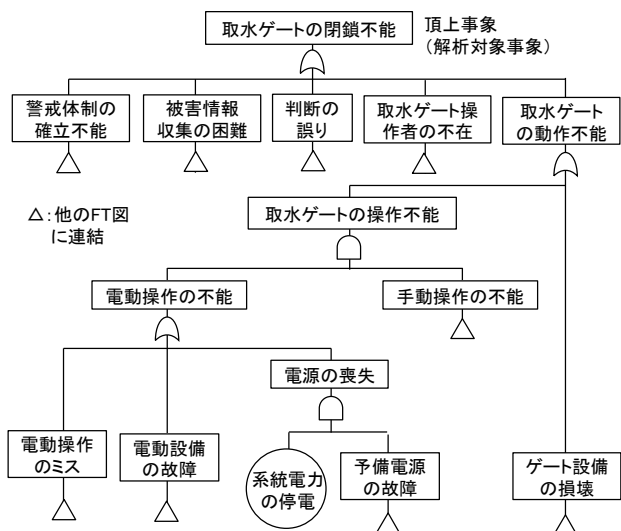


図-4 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とした FT 図の一部

同じ内容の基本事象が重複して得られる場合がある。それらの再整理を行って、最終的に 50 をこえる基本事象と対策が得られた。

2.3 FT 図作成における課題

前節では、H 幹線用水路を対象に、大規模地震災害時における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図を作成し、その発生原因となる基本事象を特定した。これにより、大規模地震の発生に備えて対策すべき内容を明らかにした。しかし、その一方で、こうした FTA を用いた一連の対策検討作業を、土地改良区の実務において適切に実施できるかどうかという疑問の声も、実際に筆者らと FT 図を作成した H 幹線用水路の施設管理者からあがった。

FTA は根本的な原因と考えられる基本事象を明らかにしたうえで、その各基本事象に対する対策を検討していくという手順で行われる。しかし、その基本事象を決定するための客観的な基準は定められていない。それゆえ、無制限に原因事象を挙げていけば、FT 図は極端に肥大化してしまう場合がある。このことは、2.2.2 項で「系統電力の停電」の原因事象に関して述べたとおりである。FT 図が肥大化すれば、言うまでもなくその作成と対策検討に係る時間と労力は増大する。さらに、そこで得られた対策を分類して、対策導入の適否を評価する作業にかかる時間も増大する。また、FT 図が肥大化すれば、その全体像が捉えにくいものとなり、FT 図が有する「頂上事象が発生する原因経路をひと目で把握でき、机上シミュレーションに役立てられる」という利点も損なわれてしまう。

FTA では、基本事象を詳細に追究するほど、その対象を具体化することができる。しかし、そのために FT 図が極端に肥大化してしまうことは、逆に対策の検討を困難にし

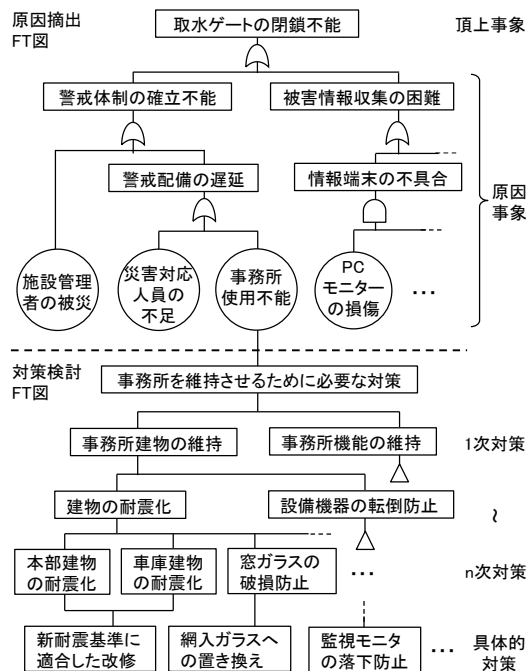


図-5 改良 FT 図の一例

てしまうおそれがある。このことが、FTA を用いて対策検討を行う際の課題である。

2.4 FTA の改良

以上に述べた課題に対する対応策として、筆者らは、FT 図作成において一定の原因事象が特定された段階で、対策の検討に切り替えるという方法（以下、「実用 FT 図」）を案出した。この方法によって、FT 図の肥大化を抑制し、対策を直接的に議論することで、その検討作業の効率化を図ることがねらいである。施設管理者が自らの手で FTA を実施できるような実用性を目指すものである。実用 FT 図の一例を図-5 に示す。この方法では、FT 図による頂上事象の発生原因の追究を、対策を実施する具体的な対象が明確になった時点で休止して、その後は各基本事象に対して対策の検討を進めていく。例えば、基本事象「事務所の使用不能」は、「事務所を維持させるために必要な対策は何か」という観点に切り替えて、対策案を挙げていく。そのとき、多種多様な対策の議論に漏れが生じないように、対策を具体化していく過程を樹形図に整理する。

以上に述べた実用 FT 図による方法を、H 幹線用水路の災害対応における大規模地震対策の検討において試行した。その結果、ねらい通りに、従来の FT 図により挙げられた対策とほぼ同等かそれ以上の対策を効率よく引き出すことができた。このことから、実用 FT 図による対策検討方法の実用性は高いことが示唆された。本報告では、以下、改良 FT 図における頂上事象から基本事象まで部分を「原因抽出 FT 図」、基本事象から具体的な対策までの部

分を「対策検討FT図」と呼ぶ。

2.5 対策検討FT図の具体例

H幹線用水路を対象に試行した実用FTAにおいて特定した基本事象「施設管理者の被災」に対する対策検討FT図を図-6に示す。基本事象「施設管理者の被災」に対する対策を、「施設管理者の被災による災害対応の遂行不能を防止するためには」という観点に切り替えて検討した。まずは一次対策として、「地震の揺れによる被災の防止対策」、「災害対応時の事故防止対策」、「代替要員の確保」、「日常の健康管理」が挙げられた。それらの各対策を自由に議論して、最終的に14の具体的な対策が得られた。その内容は、個人の地震対策から現場対応時における対策、人材育成や職場環境に関する対策まで多岐にわたった。この「施設管理者の被災」に対する対策検討では、従来のFT図により得られた対策よりも、むしろ多数の対策を挙げることができた。

また、他の基本事象についても、実用FT図によって得られた対策は、従来のFT図によって得られた対策とほぼ同数かつほぼ同内容であった。本研究におけるFTAを用いた対策検討の目標は、これまで認識不足であったリスクや想定していなかったリスクを洗い出して、そのリスクに対する対策を明らかにすることである。この目標達成にアプローチする方法として、実用FT図を用いた対策検討方法は、従来のFT図を用いた方法に比べて遜色のないものであることが、今回の調査結果によって示唆された。

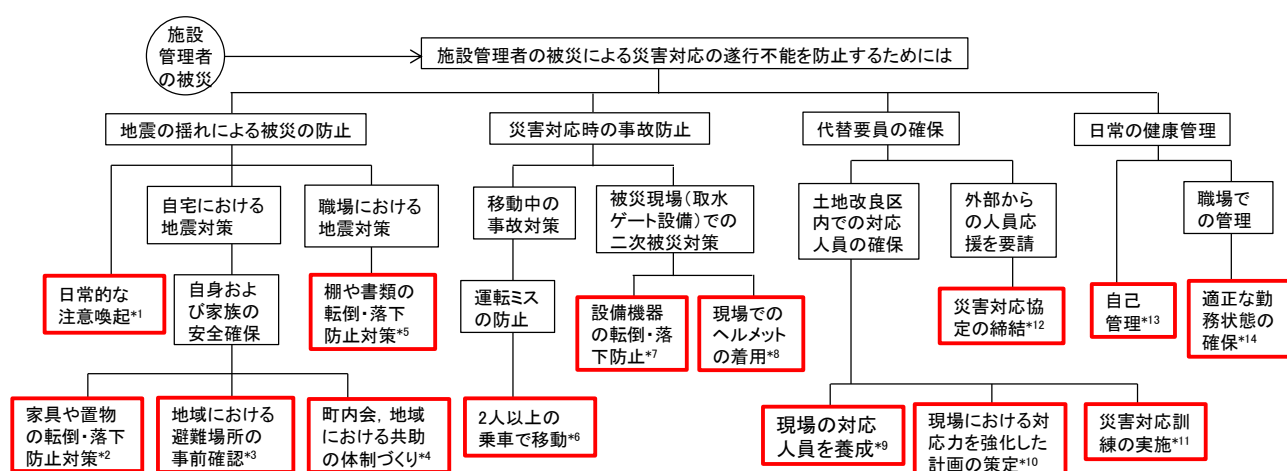
2.6 実用FT図による対策検討の妥当性の考察

実用FT図による対策検討が妥当であることの根拠を、人間の認識や行動に関する体系的な知見から考察するこ

とは、今後の課題である。しかし、実用FT図の妥当性は、次のように推察されよう。

我々は日常的にリスクと対策をほぼ同時に考えている。例えば、「明日は重要な試験日である」という場合、その試験をベストな状態で受験できるように、その前日から入念な対策を考えるであろう。すなわち、「寝坊しないように、目覚まし時計をセットする」、「わすれものをしないように、今晚のうちに持ち物の確認をする」、「万一の食あたりを避けるため、今晚は生ものの摂取を控える」などである。すなわち、我々は日常的にリスクと同時に対策を考えている。対策検討FT図における対策の検討作業は、この人間の思考過程を活かして、リスクと対策を一気に議論してしまおうとするものである。ただし、こうしたリスクと対策がほぼ同時に考えられるのは、対策を講じる対象が限定されていて、想定される具体的なリスクを次々と挙げることができる場合である。それが漠然として明確でないときには、むしろ、従来のFT図に従って、リスク事象の探索から始めるほうが得策である。例えば、「現場における事故の防止」を考える場合、まずは現場においてどのような事故が考えられるのか、それを具体化するところから始めることが必要であろう。

以上の考察から、FT図の肥大化と対策検討の非効率化を招いた原因は、FT図の作成が対策を検討できる段階であったにも関わらず、どこまでもFTAの定石に従おうとしたためであると考えられる。すなわち、頂上事象の発生原因を原因抽出FT図の作成によって探索し、その原因事象がある程度絞り込まれて具体化した時点で、対策検討FT図に切り替えるという対策の検討方法は、従来のFT図



¹施設管理者個人の地震に対する警戒意識の喚起、²施設管理者の自宅における地震対策、³自宅のある地域における家族の避難場所などの確認、⁴地域における地震時の共助体制づくりへの参加（施設管理者自身は用水路の災害対応に向かうことを家族、地域コミュニティにおいて周知）、⁵職場における地震対策、⁶パニックやトラブルを想定して単独による自動車の運転をできる限り回避、⁷首工管理所およびゲート設備における地震対策、⁸対応時における施設管理者の安全確保、⁹現場の設備機器に熟知して、緊急的な災害対応を実施できる人員の養成、¹⁰災害現場において即座に应急响应できる災害対応計画の策定、¹¹新たに養成された災害対応人員と新たな災害対応計画に基づいた訓練の実施、¹²災害協定を締結して外部からも災害対応の応援者を要請、¹³自己の日常的な健康管理、¹⁴職場における職員の健康管理

図-6 基本事象「施設管理者の被災」の対策を検討する対策検討FT図

よる方法よりも、人間の日常的な思考過程を反映した方法であるといえよう。それゆえ、この実用 FT 図による対策検討方法は、現場の実務において、施設管理者が自らの手で災害対応計画を策定する際に、実用的かつ有効に活用されるものと期待できる。

3. 現行の災害対応計画の改善

3.1 現行の災害対応計画の内容と評価

3.1.1 既往研究の概要

筆者らは、大久保ら⁹⁾において、FTA を用いて、大規模地震発生直後における施設管理者の災害対応行動を阻害する原因の特定および対策の検討を行うとともに、その対策導入の効果を算定した。3.1 節では、その研究結果を概説する。

3.1.2 解析対象とした緊急対応

(1) 対象施設

本研究の解析対象とした施設は、北海道の水田地域に灌漑用水を供給する S 幹線用水路である。S 幹線用水路は、延長約 29km、最大計画通水量 21m³/s を有するコンクリートフリーダム水路である。同用水路を管理する S 土地改良区では、十数名の職員（施設管理者）が勤務し、そのうちの 7 名が技術系の施設管理者である。さらに、その施設管理者のひとり（以下、「A 施設管理者」）が頭首工および幹線用水路各施設の現場（以下、単に「現場」）における実務的な施設管理を担当している。灌漑期における日常的な現場の監視および点検作業は、A 施設管理者の監督のもと数名の委託業者によって行われている。A 施設管理者は各種設備機器の配置や操作に熟知しており、災害時には、現場において緊急的な災害対応を実施する。

(2) 大規模地震災害時に想定される災害対応

S 土地改良区では、災害時における職員間の連絡網や関連機関への連絡先、技術部長など責任者からの指示系統などを示した災害対応体制が決められている。これは災害発生後、職員が土地改良区本部へ速やかに参集して、施設の点検や応急処置を適切に実施することを目的とした計画である。しかし、突発的に発生する地震災害の場合、万一にも水路構造物が被害を受けて決壊や溢水といった事態となれば、水路から流出する多量の水によって、農地のみならず近傍の住宅地や道路交通などに対しても甚大な二次災害が及ぶおそれがある。そこで、地震災害時には、まず、A 施設管理者が現場において取水ゲートの閉鎖に向けた対応行動を起こすことになっている。すなわち、実際には、図-7 に示すような 2 段階の災害対応過程が考えられている。第 1 段階の対応は、A 施設管理者によって地震発

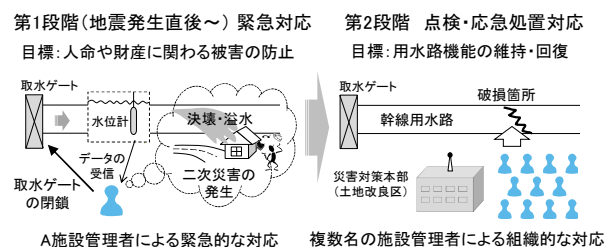


図-7 大規模地震災害時における災害対応過程

生直後から開始される。地震発生後、A 施設管理者は水管理システムにおける水位データを自身が所有する携帯端末によって確認する。そこで水位に異常があれば、直ちに頭首工に向かい取水ゲートを閉鎖して、二次災害の拡大を防止する（以下、「緊急対応」）。その後の第 2 段階の災害対応では、しだいに土地改良区本部へ参集してきた職員らによって、組織的に施設の点検や被災箇所への応急処置を行う（以下、「点検・応急処置対応」）。

(3) 緊急対応の計画策定の必要性

大規模地震災害時の災害対応を強化するための方策として、事業継続計画（BCP : Business Continuity Plan 以下、「BCP」）の策定が考えられる。BCP とは、大規模な災害時においても最重要業務の継続を図るため、それに必要な対策、方針、体制、手順を示した計画のことである。土地改良施設を対象にした BCP 策定マニュアル⁸⁾も作成されており、その啓発・普及が進められているところである。しかし、BCP が主に対象とするのは、点検・応急処置対応であり、緊急対応に相当する内容はほとんど含まれない。なぜならば、BCP は、やや事後の対応に重点がおかれた計画であり、組織的な対応を強化するための体制整備を主な目的とした内容となっているからである。そのため、BCP の策定とは別途に、緊急対応に関する具体的かつ実践的な行動計画を策定することが必要である。

そこで、大久保ら⁴⁾では、大規模地震発生直後における「緊急対応」を対象にして解析を行った。

3.1.3 FT 図の作成と対策の検討

緊急対応の目標は、施設被災による二次災害の発生または拡大を防止するため、的確に取水ゲートを閉鎖することである。そこで、大久保ら⁹⁾では、A 施設管理者による緊急対応において、「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図の作成を行った。その FT 図の一部を図-8 に示す。頂上事象が発現する中間事象を連鎖的に挙げていき、根本的な原因となる基本事象を特定した。この基本事象に対する対策を講じれば、頂上事象の発生を抑制することができる。しかし、対策実施に投入できる費用や労力には制約がある。そのため、施設管理者が実際に実施できる対策

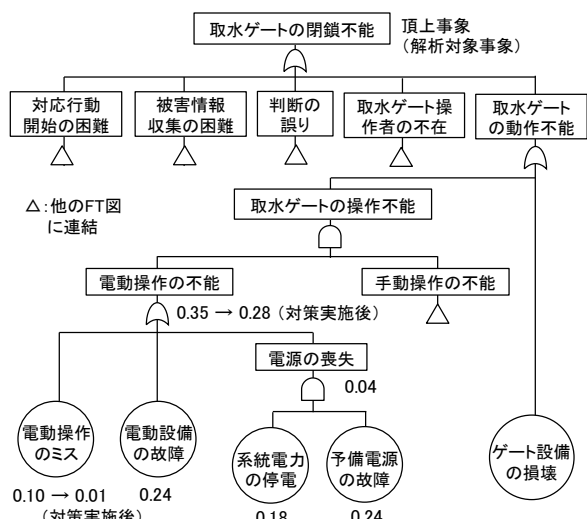


図-8 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図の実例の一部と震度6強における発生確率の算出例 (大久保ら⁵⁾より作成)

表-2 施設管理において実施可能な対策 (大久保ら⁵⁾より作成)

基本事象	対策	内容
電話機の使用不能 防災無線の使用不能 電動操作のミス 手動操作のミス	ヒューマンエラー対策	携帯電話や防災無線の日常管理における確認 ゲート操作方法の日常管理における確認 ゲート操作方法の簡略化 ゲート操作方法の見える化
監視モニターの損傷 観測機器の不具合	観測機器の破損防止対策	監視用パソコンなどの転倒防止対策 観測機器の転倒防止対策 観測機器の振動による破損に対する対策
水位データの誤表示 水位データの不足	水管理システムの強化	振動や故障による水位データの誤表示を確認 水位観測地点の妥当性の確認 水位計の増設

は限られたものになろう。そこで、各基本事象に対する対策の中から、現状の施設管理において実施可能な対策のみを抽出した。その対策を表-2に示す。設備機器の操作ミスなどに対するヒューマンエラー対策や設備機器の転倒防止対策などが挙げられた。

3.1.4 対策効果の定量評価

FTAでは、基本事象に発生確率を与えると、その上位の事象の発生確率を算出することができる。FT図における任意の事象の発生確率 P は、その直下位の N 個の事象の発生確率 P_1, P_2, \dots, P_N を用いて、ANDゲートでは(1)式により、ORゲートでは(2)式により算出される。

$$P = \prod_{n=1}^N P_n \quad (1)$$

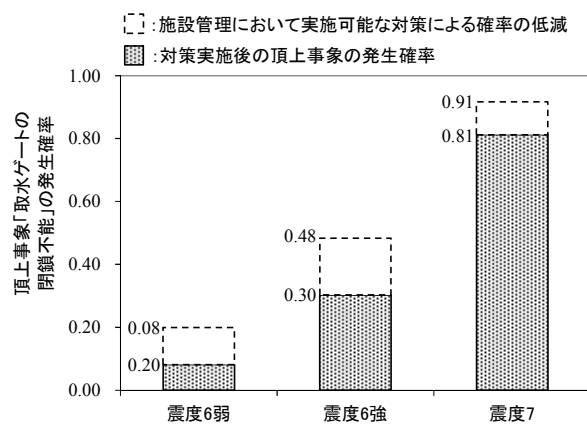


図-9 対策実施前後における各震度階級の頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率 (大久保ら⁵⁾より作成)

$$P = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_n) \quad (2)$$

すなわち、各基本事象の発生確率を設定できれば、(1)式および(2)式を用いて、その上位事象の発生確率を順次計算していくことにより、最終的に頂上事象の発生確率を算出することができる。図-8のFT図中に記した数値は、震度6強における発生確率の算出例である。この場合、「電動操作の不能」の発生確率は0.35と計算できる。このとき、基本事象「電動操作のミス」に対する対策を実施して、その発生確率が対策実施前の1/10に低減できたと仮定した場合、「電動操作の不能」の発生確率は0.28に低減すると評価される。

このようなFTAの定量評価方法を用いて、対策実施前と対策実施後における頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を算出した結果を図-9に示す。対策を実施していない現状では、震度6強以上の震災となれば、頂上事象の発生確率はおおむね0.5以上となり、取水ゲートを閉鎖できないおそれがあることが示された。しかし、対策を講じることによって、震度6強における頂上事象の発生確率は0.3となり、一定の対策効果が期待できることが分かった。しかし、震度7の震災となれば、対策実施による効果はほとんど得られないことが示唆された。

以上が大久保ら⁵⁾において示された主要な結果である。

3.2 緊急対応時の人員配置の最適化

3.2.1 既往の緊急対応みなおしの着眼点

大久保ら³⁾における結果から、現状の災害対応計画では、震度7の震災となれば、取水ゲートを閉鎖する緊急対応が実施できない確率が高い。そこで、本節では、緊急対応過

程を根本からみなおして、緊急対応時に取水ゲートが閉鎖不能になる確率を可能な限り低減することを目指す。そのために筆者らが着目したのは、震災直後に現場において緊急対応を行う施設管理者の増員である。

3.2.2 緊急対応を行う施設管理者の増員

現在、S 幹線水路の施設管理者が想定している災害対応では、地震発生後、真っ先に現場において緊急対応を行うのは、実質的に A 施設管理者のみである。それゆえ、A 施設管理者が被災して対応行動を起こすことが不能となれば、緊急対応の遂行は大幅に遅延することになる。そのため、A 施設管理者と同様な緊急対応を行うことができる施設管理者を養成することが必要である。3.1.2 項で述べたように、現行の災害対応計画では、地震発生後、土地改良区職員は土地改良区本部へ参集することになっている。しかし、図-10 に示すように、施設管理者の何人かを、土地改良区本部への参集ではなく、直接現場に向かうように割り当てることによって、A 施設管理者を含めた複数名の施設管理者らによる現場における管理体制（以下、「現場管理体制」）が構築できるものと考えられる。

また、複数名によって現場管理体制が構築可能であるとすれば、取水ゲート操作だけでなく、放流ゲート操作による減災効果も期待できる。そこで、各ゲートへの施設管理者の割り当て人数をどのようにすれば最も減災効果が高められるのか、という現場管理体制の最適化の問題が生じる。筆者らは、S 幹線水路を対象にして、大規模地震発生時に幹線水路からの放流量を最大化する各ゲートへの施設管理者の割り当て人数を試算した。ただし、ここでの放流量には、取水ゲート閉鎖により止められる取水量も含む。

3.2.3 方法

(1) 緊急対応時における人員配置の最適化手法

各ゲート設備への施設管理者の配置モデルを図-11 に示す。ゲート 1 を取水ゲートとし、ゲート 2 からゲート m までを放流ゲートとする。 n_k ($k=1, 2, \dots, m$) は、 k 番目のゲートにおける緊急対応を割り当てられる施設管理者数である。 $P(n_k)$ はゲート k の操作が実行（取水ゲートの閉鎖あるいは放流ゲートの開放）される確率である。 Q_1 は取水ゲート閉鎖による通水停止流量であり、 Q_k ($k=2 \sim m$) はゲート k からの放流量である。震災時における幹線水路からの全放流量は、確率 $P(n_k)$ を用いて(3)式のように、放流量の期待値 E で表される。本研究では、地震発生後、直接的に幹線水路のゲート設備に急行できる施設管理者の総数 N を制約条件 ((4)式) として、放流量の期待値 E を最大とする各ゲートへの施設管理者の配置数 n_1, n_2, \dots ,

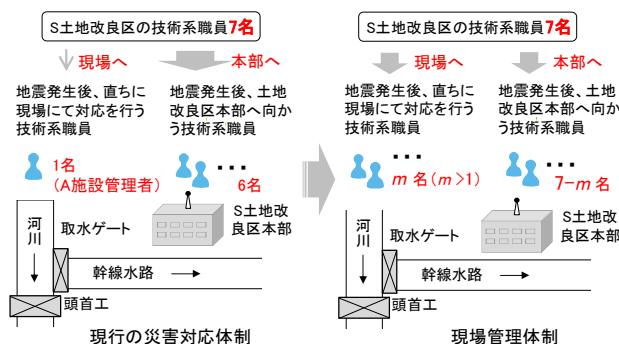


図-10 地震発生後の施設管理者の土地改良区本部と現場（ゲート設備など）への割り当て

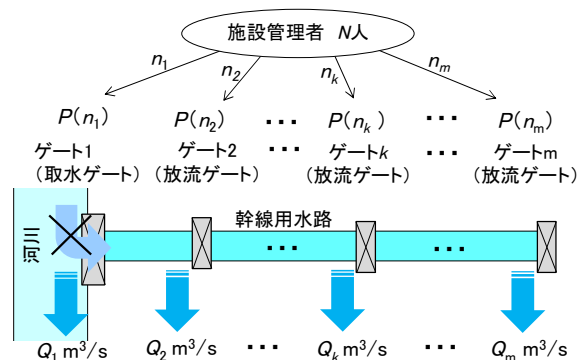


図-11 各ゲート設備への人員の配置モデル

n_m を求める。

$$E = \sum_{k=1}^m P(n_k) \cdot Q_k \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^m n_k = N \quad (4)$$

(2) ゲート k の操作可能確率 $P(n_k)$ の算出

$P(n_k)$ は、図-12 に示すような FT 図をもとにして求められる。図中における P_h は施設管理者がゲート設備に到着できない確率、 P_d はゲート設備が動作不能になる確率である。「施設管理者の到着不能」の下位には、地震発生後のゲート操作を割り当てられた各施設管理者が到着不能となる事象が並列され、それらは上位の「施設管理者の到着不能」と AND ゲートで結合される。このことは、ゲート k への割り当て人数 n_k が多いほど、ゲート k にだれも到着しないという確率、すなわち、「施設管理者の到着不能」が生じる確率が低下することを示す。ただし、本研究では、各施設管理者 1~ N の到着不能となる確率はすべて等しく P_h であるとした。すなわち、「施設管理者のゲート k 設備への到着不能」の発生確率は、 P_h の n_k 乗と表される。一方、「ゲート k の動作不能」とは、地震動によるゲート設

備の破損や不具合などである。そのため、「ゲート k の動作不能」の発生確率 P_d は、施設管理者数 n_k には関係しない。以上のことから、 $P(n_k)$ は「ゲート k の動作不能」が生じる確率の余事象となり、次の(5)式により求められる。

$$P(n_k) = 1 - \left[P_h^{n_k} + P_d - P_h^{n_k} \cdot P_d \right] \quad (5)$$

(3) ゲート k における放流量 Q_k の算定

Q_1 は最大計画通水量とした。 Q_k ($k=2\sim m$) は各放流工の施工図面に基づいて算定した。

(4) 最適解の算出

減災効果を最大化する各ゲート設備への人員配置数を決定する問題は、以上の(3)式、(4)式、(5)式により数理計画問題として定式化される。この問題形式は、例えば、ある資源を N 個の工場に配分することを考えて、 i 番目の工場に x_i の資源を配分して $f(x_i)$ の利得が得られるとき、総利得 $f(x_1)+f(x_2)+\dots+f(x_N)$ を最大化する資源の配分 x_1, x_2, \dots, x_N ($\sum x_i=M$) を決定するといった配分問題にあたる。この種の問題には、一般に動的計画法による解法が知られている⁹⁾。しかし、以上の例において総資源量 M が離散的でごく小さければ、単純に資源配分のすべての組み合わせに対する総利得をしらみつぶしに調べるという方法が最も簡便である。ほとんどの土地改良区では、職員数の制約から現場における緊急対応可能な職員数が 10 名を上回ることは考えにくい。それゆえ、(4)式を満たすすべての組み合わせに対する(3)式の解を比較することで最適解を求める方法が、この場合、実用的で分かり易いものと考えられる。

3.2.4 試算事例および考察

(1) 試算対象とする幹線水路施設の概要

S幹線水路には、取水ゲートのほか6箇所の放流ゲートがある。取水ゲートの操作には電動と手動があるが、本研究では、その取水ゲート操作を電動のみで行うものとした。なぜならば、手動による操作には膨大な時間と労力を要することから、緊急的な対応にはなり得ないからである。取水ゲート設備は停電時に作動する予備電源を備えている。また、放流ゲートの開閉はすべて手動による機側操作のみである。

(2) ゲート操作不能のFT図

図-12のFT図に従って作成した、S幹線水路における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図を図-13に、また、「放流ゲートの開放不能」を頂上事象とするFT図を図-14に示す。施設管理者は、大規模地震発生後、水管理システムなどによる現地の正確な被害情報を待たず、

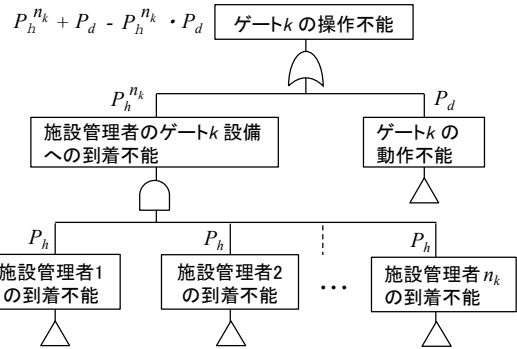


図-12 ゲート k の操作不能を頂上事象とする FT 図

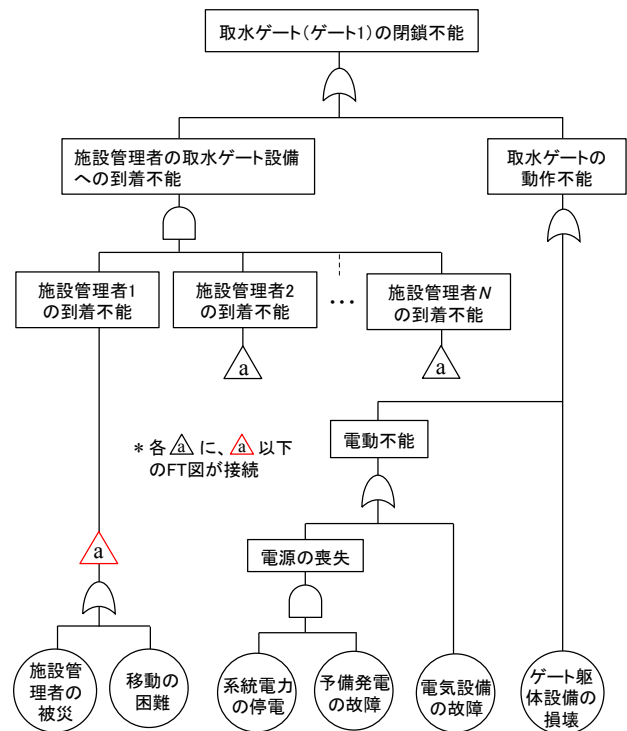


図-13 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図

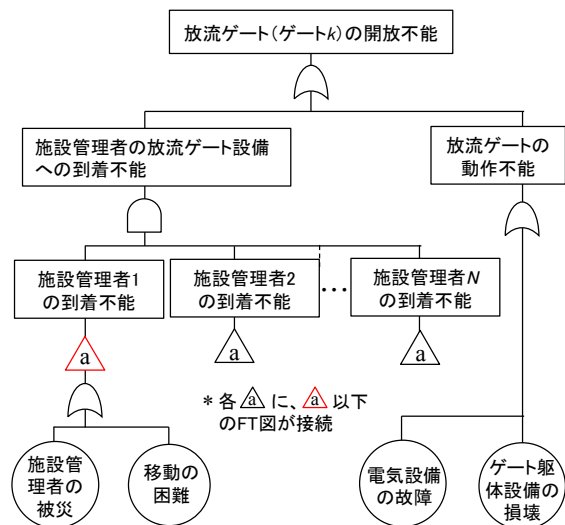


図-14 「放流ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図

表-3 基本事象の発生確率の設定

基本事象	震度7において想定される発生確率	基本事象の発生確率の設定根拠
施設管理者の被災	0.350	震災時における木造住宅の全壊率 ¹⁰⁾ を適用
移動の困難	0.150	震災時における道路のリンク閉塞率 ¹⁰⁾ より推定
動力設備の故障	0.100	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 ¹⁰⁾ を適用
系統電力の停電	0.900	系統電力の停電率は電柱折損率および建物の全壊率に比例するとして、震度6強における停電率18% ¹¹⁾ と震度6強における木造住宅の全壊率 ¹⁰⁾ から、各震度階級の停電率を設定
予備電源の故障	0.100	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 ¹⁰⁾ を適用
電気設備の故障	0.400	建物の倒壊率より大きく、設備機器の転倒率より小さいとして、鉄筋コンクリート建物の倒壊率 ¹⁰⁾ と家具等の移動・転倒率 ¹¹⁾ の平均値を適用
ゲート駆体設備の損壊	0.100	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 ¹⁰⁾ を適用

表-4 試算に用いたデータ (震度7の場合)

ゲート名	P_h	P_d	Q_k m ³ /s
ゲート1(取水)	0.448	0.509	20
ゲート2(放流)	0.448	0.190	3
ゲート3(放流)	0.448	0.190	2
ゲート4(放流)	0.448	0.190	1.5
ゲート5(放流)	0.448	0.190	1
ゲート6(放流)	0.448	0.190	1
ゲート7(放流)	0.448	0.190	0.5

直ちに担当するゲート設備へ向かうものとした。なぜならば、現地の正確な被害情報待ちをしている間に適切な対応の実施時機を逸してしまうこともあり得るからである。そこで、本研究では、「施設管理者の到着不能」の原因となる基本事象として、「施設管理者の被災」と「移動手段的喪失」の2事象のみを挙げた。

(3) 試算に用いたデータの決定

図-13と図-14に記す基本事象の発生確率を表-3のように設定して、「施設管理者の到着不能」の発生確率 P_h と「取水ゲートの動作不能」の発生確率 P_d を求めた。ただし、表-3に挙げた値は震度7の震災時の例である。試算に用いた P_h 、 P_d および Q_k を表-4に示す。

(4) 最適化の試算結果

表-4に示したデータを(3)式、(4)式、(5)式に代入して、最適解を求めた。S幹線水路を管理する土地改良区では、7名の技師のうち、本部にて対応する2名を除いた5名までが震災時に施設管理者として現場のゲート設備において対応可能である。そこで、施設管理者数を1人~5人までの5通りに仮定した。その各人数において最大となる放流量の期待値を図-15に示す。施設管理者総数 N が1人または2人のときは、取水ゲートのみに対応行動を集中させることが最も効果的となった。このことは、施設被災時には直ちに取水ゲートを閉鎖する従来の対応行動の妥当性を示すものである。 N が3人であれば、取水ゲートだけで

■ : ゲート1(取水ゲート)による放流量
 ■ : ゲート2(放流ゲート)による放流量
 ■ : ゲート3(放流ゲート)による放流量

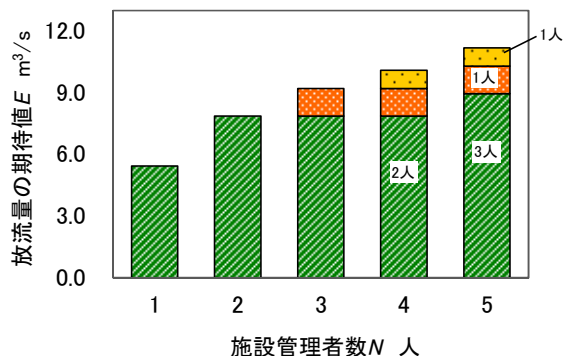


図-15 施設管理者数に対する放流量の期待値

なく、ゲート2の放流ゲートへも施設管理者を1人割り当てたほうが減災効果を高められるという結果となった。 N が4人であれば、さらにゲート3へ人員を配置することで最も放流量が大きくなった。また、 N を5人にできれば、取水ゲートへ3名、ゲート2とゲート3の放流ゲートへそれぞれ1名ずつ配置する体制が最適解として得られた。この場合($N=5$)は、単独の施設管理者(A施設管理者、 $N=1$)によって緊急対応を行う現行の場合よりも約2倍の減災効果が期待できることが示唆された。ただし、施設管理者数が増えるほど、1名増員に対する放流量の期待値の増加量が減少する。すなわち、現場へ割り当てる施設管理者を増員し続けることが、必ずしも適切であるとは限らない。このことから、現場の緊急対応への割り当て人数は、全体の土地改良区職員数と他の災害対応業務のバランスを考慮して決定する必要がある。

3.3 緊急対応時の意思決定方法の改善

3.3.1 現行の意思決定のみなおし

現行の災害対応では、水管理システムによって得られる被害情報をもとに、施設管理者は意思決定を行う。その意思決定における適切な判断を阻害する事象は、図-8のFT図において、「被害情報収集の困難」および「判断の誤り」に発する一連の中間事象および基本事象である。本節では、この現行の意思決定方法を根本からみなおして改善することで、意思決定におけるリスクの回避を目指す。そのため、まずは大規模地震災害時に想定される現行の意思決定方法の課題を明確にする。次に、その課題の解決策として新たな意思決定方法を提案し、その有効性を検討する。

3.3.2 現行の緊急対応における意思決定方法の課題

(1) 大規模地震時の不確実な状況下において想定される意思決定場面

長大な幹線水路は公共性が非常に高いため、その取水

ゲートを閉鎖するか否かの意思決定は、災害対応上の最重要課題である。3.1.2 項で述べた既往の意思決定方法が有効に機能するためには、水管理システムの水位データから得られた情報によって、幹線用水路における決壊や溢水などの二次災害発生の有無が確実に把握できなければならない。しかし、大規模地震災害は極めて強大で、不確実性の高い現象である。それゆえ、水管理システムにより被害状況を把握するという前提もまた不確実になるものと想定される。そのため、大規模地震災害時には、次のように、A 施設管理者の意思決定が困難になる場面が考えられる。

まず、A 施設管理者は水管理システムにより用水路内の水位を確認する。しかし、強大な地震動によって、水位観測設備や通信設備が破損して、その機能を喪失してしまうおそれがある。水管理システムが機能不全を起こせば、それに頼る A 施設管理者は、幹線用水路に関する被害情報を得られないことになる。また、大規模地震災害時には、たとえ水管理システムにおける水位データが確認できたとしても、意思決定を行う当事者（この場合 A 施設管理者）の心理的な面において、次のような問題が生じることも考えられる。

気象庁の震度階級¹²⁾によれば、震災規模が震度 6 強以上であれば、A 施設管理者の周囲では、全壊する建物が現れ、さらに震度 7 となれば周囲のいたるところで甚大な被害が生じている事態となる。こうした被害状況を目の当たりにして、A 施設管理者は、たとえ水管理システムの水位データに異常がみられないからといって、「幹線用水路に被害はない」と即断できるものであろうか。おそらく、A 施設管理者は、その判断に躊躇することであろう。なぜならば、A 施設管理者の中で、水位データが正常値を示している、それがもはや幹線水路の安全性を保障するものがあるという確信が持てないからである。それゆえ、この場合、A 施設管理者は現行の意思決定方法に従って取水ゲートを閉鎖しないか、あるいは万一の被害発生に備えて念のため取水ゲートを閉鎖するか、両者の何れかを選択することに窮することになる。

しかし、いかに被害情報が不確実であったとしても、A 施設管理者はそこで確実な情報待ちをして、災害対応の遂行を停滞させてしまうわけにはいかない。それゆえ、A 施設管理者は何らかの判断基準をもって自らの対応行動を決定しなければならない。

(2) 基幹的な灌漑用水路施設の災害対応に求められる意思決定

以上に述べた課題への解決策として、安全性を重視して、大規模地震発生時には（例えば、震度 5 強以上の地震発生

時には）、とにかく取水ゲートを閉鎖してしまうという考え方もあろう。しかし、幹線用水路が被害を受けて二次災害を引き起こす確率は極めて小さいと考えられる。それゆえ、被害がないにも関わらず取水ゲートを閉鎖してしまう、つまり、「空振り」になる確率が非常に高い。また、基幹的な灌漑用水路は公共性が非常に高いことから、その機能が停止した際、すなわち、取水ゲートを閉鎖して、それが「空振り」となった際の損失は決して小さくないものと考えられる。また、震災後における営農の速やかな復帰や被災地域の早期復旧を考慮すれば、結果的に「空振り」となる対応行動は、施設管理者としてもできる限り避けたいところである。それゆえ、大規模地震発生後にとにかく取水ゲートを閉鎖してしまうという対応は、必ずしも得策であるとはいえない。すなわち、この場合、震災時の被害状況に応じて、「取水ゲートを閉鎖しない」という選択もあり得るような意思決定方法が求められよう。

3.3.3 現場管理体制の構築を判断基準とした意思決定方法の提案

これまでの考察から、大規模地震災害時における現行の意思決定方法（以下、「意思決定方法 1」）には、次のような 3 つの課題がある。①大規模地震災害時には、判断基準となる被害状況の有無を確実に把握することは困難である。そのため、②二次災害が発生しているにも関わらず、「取水ゲートを閉鎖しない」と判断してしまうおそれがある。しかし、その一方で、③被害が発生していないのに取水ゲートを閉鎖してしまう事態、すなわち、「空振り」をしてしまうおそれがある。

こうした大規模地震災害時における意思決定上の課題を解消するための方策として、筆者らは、3.2.2 項で述べた現場管理体制が構築できるか否かを判断基準とした意思決定方法（以下、「意思決定方法 2」）を提案する。すなわち、現場管理体制が構築できれば、取水ゲートを閉鎖しない、現場管理体制が構築できなければ、取水ゲートを閉鎖する。ここでの現場管理体制とは、A 施設管理者を含む施設管理者が取水ゲート設備をはじめとする幹線用水路の各要所へ速やかに移動して、いつ何時、幹線用水路において二次災害が発生しても、即座にそれに対する対応、すなわち、取水ゲートの閉鎖や被害箇所の応急処置を実施できる体制である。現場管理体制のイメージを図-16 に示す。このような現場管理体制の構築が計画の中に入れば、取水ゲートを閉鎖するか否かの意思決定を行う主体は、A 施設管理者だけではなく取水ゲートにおける対応を割り当てられた施設管理者各々ということになる。大規模地震発生後、現場管理体制が支障なく構築できれば、施設管理者ら

自らが現場において用水路の安全を保障することになるので、取水ゲートを閉鎖せずに、(取水ゲートを閉鎖しないと判断して)そのまま幹線用水路の監視を継続する。しかし、図-17に示すように、地震発生後、施設管理者どうし連絡がとれない、施設管理者の何人かが被災して現場へ向かえない、水管理システムがダウンして水位の状況が把握できないなど、満足な現場管理体制が構築できなければ、万一の二次災害発生に対応できないことから、そのときは、取水ゲートへ急行できる施設管理者が「取水ゲートを閉鎖する」と判断して、その対応行動を開始する。この場合、施設管理者は、たとえ単独であっても、自らの判断で取水ゲートを閉鎖できるものとする。

この意思決定方法2に従えば、施設管理者の意思決定は図-18のようになる。水管理システムの水位データが確認できない状況は、それ自身が現場管理体制の重要部分の欠落であるので、直ちに取水ゲートを閉鎖する。水位データが確認できて、その水位に異常があれば即座に取水ゲートを閉鎖する。水位に異常がないときは、現場管理体制が構築できなければ、取水ゲートを閉鎖し、現場管理体制が構築できれば、取水ゲートを閉鎖しないとする。

以上のように、意思決定方法2では、安全性を確保した上で、「取水ゲートを閉鎖しない」という対応行動の選択が可能である。この場合、速やかに現場管理体制が構築できるのであれば、取水ゲートを閉鎖しないので、「空振り」にはならない。しかし、現場管理体制が構築できない場合は、取水ゲートを閉鎖するので、「空振り」となる場合もあり得る。ただし、「空振り」であったとしても、そもそも施設を管理できない状況では、通水を継続することはできないという考えもある。さらに、大規模地震発生後しばらくは余震の発生が懸念されることから、管理できない状態で通水したまま用水路を放置するわけにはいかないだろう。従って、現場管理体制が構築できない場合には、取水ゲートを閉鎖することが妥当であるといえる。

また、「現場管理体制が構築できない」という状況とは、「施設管理者の被災」、「電話連絡の不通」、「水位データの通信遮断」、「停電」などが起きた場合である。こうした被害の有無は、施設管理者が直接的に把握可能な事象である。その事象の有無を正確に把握することは、従来のように水管理システムの水位データによって、用水路のどこかで起こり得る被害の有無を把握することよりもはるかに容易である。それゆえ、施設管理者は、現場管理体制の構築の可否をほとんど迷うことなく判断することができる。

以上のことから、意思決定方法2に従えば、意思決定方

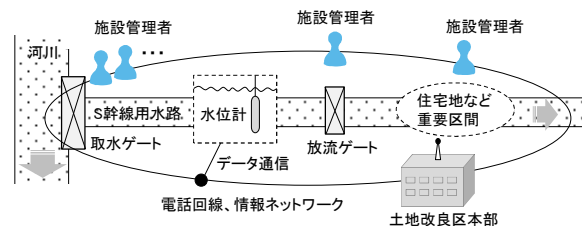


図-16 現場管理体制のイメージ

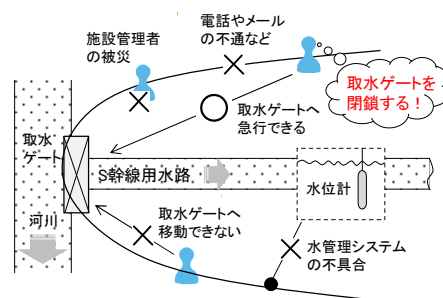


図-17 取水ゲートを閉鎖する意思決定場面の例

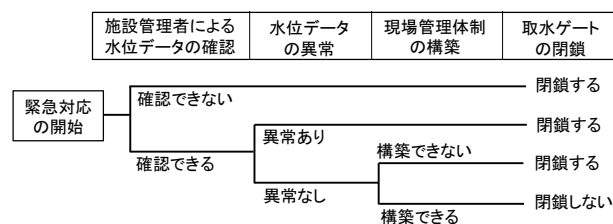


図-18 現場管理体制の構築を判断基準とした意思決定

法1における課題をおおむね解決することができる。

3.4 現行の災害対応計画の改善策の評価

S土地改良区では、地震発生直後における現地のゲート操作に5名の施設管理者を割り当て可能であり、その場合、図-19に示すように、取水ゲートへ3名、放流量が1番目と2番目に大きい放流ゲートへそれぞれ1名ずつ配置する体制が最適解として得られた。この結果に基づいて、地震発生後、直ちに3名の施設管理者が取水ゲートへ急行すると仮定して、「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を試算した。取水ゲートの閉鎖は施設管理者が1名でも実施可能である。その1名の施設管理者が地震時に被災して取水ゲートまで到達できない確率を P とすれば、3名の施設管理者が誰も取水ゲートに到達できない確率は P^3 となる。

また、既往の災害対応では、水管理システムによって被害情報を得て意思決定を行う。しかし、現場管理体制の構築を判断基準とすることで、各施設管理者は水管理システムが被害を受けることやそのために判断を誤ることに

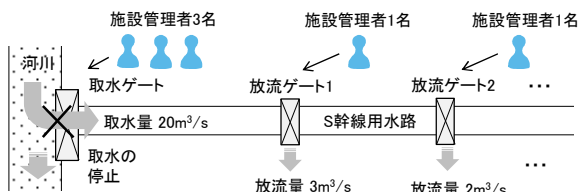


図-19 各ゲートへの人員の配置計画の事例 (S 幹線水路施設の場合)

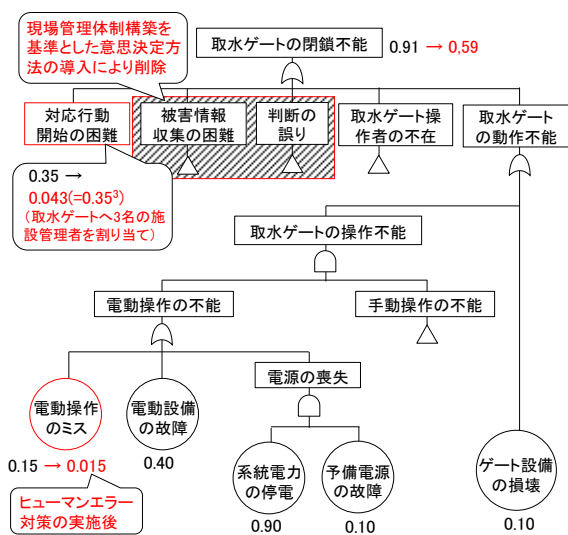


図-20 施設管理者の増員、意思決定方法の改善および対策の実施箇所を記した FT 図

わらず意思決定を行うことができる。それゆえ、FT 図から「被害情報収集の困難」および「判断の誤り」に関する事象を除外した。

図-8 に示した FT 図に、以上に述べた修正を記載した FT 図を図-20 に示す。各事象に添えた数字は、震度 6 強における発生確率であり、黒字は当初の無対策における発生確率、赤字は 3.1.3 項で述べた対策および本節で述べた改善策実施後の発生確率である。この FT 図に基づいて、各震度階級における頂上事象の発生確率を試算した結果を図-21 に示す。震度 6 強における頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率は約 0.2 となり、現行の発生確率から約 60%の低減、震度 7 におけるそれは約 0.6 となり、現行の発生確率から約 35%の低減となった。改善策および対策の実施によって、一定の減災効果が期待できることが分かった。また、この試算は取水ゲートの閉鎖のみを対象としたものであるため、実際には、放流ゲートの開放による効果もこれに加わり、全体の減災効果は、さらに向上することになる。

3.5 緊急対応の強化対策の提案

本章では、S 幹線水路施設を対象として、震災時にお

緊急対応を行う施設管理者の増員、意思決定過程の改善および施設管理において実施可能な対策による確率の低減
 対策実施後の頂上事象の発生確率

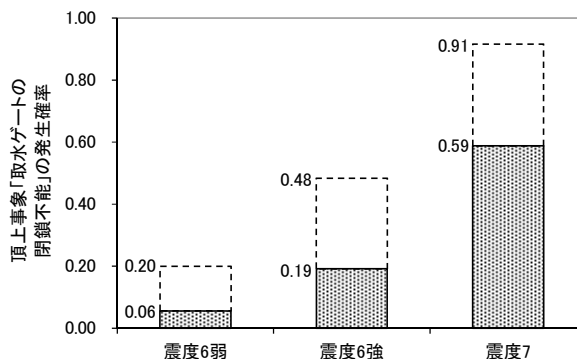


図-21 緊急対応を行う施設管理者の増員、意思決定方法の改善、対策の実施前後における各震度階級の頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率

ける施設管理者の緊急対応行動の阻害要因に対する対策や現地において緊急対応を行う施設管理者の増員、水管理システムに頼る現行の意思決定方法の改善を検討した。その結果、それら対策の実施によって、一定の減災効果が期待できることを確認した。このことにより、本研究では、緊急対応の強化対策として、表-2 に示す対策の実施と図-18 に示す意思決定方法の改善、図-19 に例示する現場管理体制の構築を提案する。

しかし、震度 7 の震災時には、以上のような緊急対応の強化対策の効果に限界があることも示唆された。震度 7 の震災では、緊急対応が遂行不能となり、ある程度の被害発生を許容せざるを得ない。そのときにこそ、BCP の策定が必要になる。被害が生じてしまった場合を想定して、何を優先して対処するのか明確に検討して、早期復旧に向けた事後処理の準備をしておく必要がある。

4. 大雨災害時のダム管理における防災行動計画に関する考察

4.1 研究の目的

平成 28 年 8 月の台風第 10 号の北海道接近に伴い発生した大雨災害（以下、「台風第 10 号大雨災害」）では、農業水利施設や農地が甚大な被害を受けた。寒地土木研究所と公益社団法人農業農村工学会北海道支部は、合同で十勝地域の農業水利施設を主な対象として被害調査を実施した。その被害は、農業用水路の法面がほぼ全沿線にわたり破壊されて、場所によっては隣接する農地の土壌が地表面から深さ 1m 以上も侵食されて消失するといった状況であった¹³⁾。

こうした大規模な豪雨災害の発生を完全に防止するこ

とは困難である。しかし、その被害から人命や個人の財産を第一に守るための災害対応は確実に実施されなければならない。実際に台風第10号大雨災害時において、防災担当者や施設管理者は災害対応に奔走していたものと考えられる。しかし、そうした災害対応がどのような計画によるものであり、どのように実施されたのか、その実態を把握して有効性を評価する試みや課題解決に向けた方策を探究する試みはほとんど行われていない。そこで、本研究では、台風第10号大雨災害において実際に行われたダム管理の実態を検証して、その評価および課題の抽出を行った。さらに、今後の対応策として防災行動計画（タイムライン）の観点からダム管理をみなおし、防災行動計画策定の有効性を示した。

4.2 大雨時におけるダム管理の評価

4.2.1 台風第10号大雨災害時のダム管理の検証

(1) ダム管理者への聞き取り調査

本研究では、北海道の畑作地帯に灌漑用水を供給する農業用ダム（以下、「Aダム」）を管理するB町役場職員のダム主任技術者から、台風第10号大雨災害時におけるダム管理について聞き取りを行った。その結果をもとに、大雨災害に備えて計画されている現行のダム管理の流れ、および北海道大雨災害時において実際に行われたダム管理の経過について、次のとおり整理した。

(2) 大雨災害時のダム管理の流れ

Aダムの管理は、ダム管理主任技術者1名とその補助者4名の計5名（以下、「ダム管理者」）で行われている。通常時、ダム管理者はダム中央管理センターに勤務している。また、ダムサイトにあるダム管理棟には、ダム堤体の管理を委託された2名の業者（以下、「委託管理者」）が8:00から17:00まで勤務し、ダム管理主任技術者の指示のもとにダム管理の実務補助を行っている。通常時、ダム管理者は、ダム中央管理センターにおいて、ダム管理棟から送信されるAダムの流入量や水位、ダム地点の降水量などのデータ（以下、「ダムデータ」）を監視している（図-22）。そこで、地震や大雨などの異常事態となれば、直ちにダム管理者はダムサイトへ移動して、ダムを直接点検する。

大雨時におけるダム管理者の災害対応フローを図-23に示す。大雨警報が発生された場合、ダム管理主任技術者は警戒体制をとり、ダムデータにおけるダムへの流入量とダム地点の降水量、および気象庁が発表する降水量に注視する。そして、そのいずれかの値がAダムの管理規程に定められた基準を超えれば、ダム管理者のうち2名がダムサイトへ急行して、ダム管理棟においてダム堤体を直接監視する。

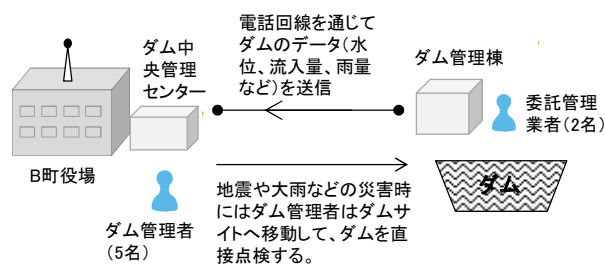


図-22 通常時のダム管理

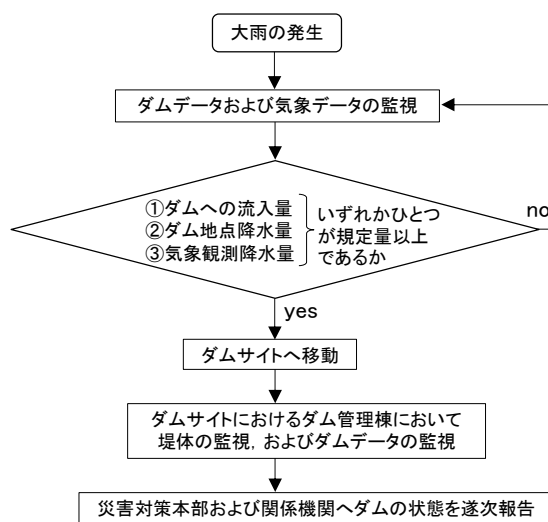


図-23 大雨時におけるダム管理者の対応行動

(3) 台風第10号大雨災害時におけるダム管理の経過

台風第10号による大雨時およびその前後期間（平成28年8月28日から9月2日まで）におけるAダムへの流入量、ダムサイトにおける時間雨量、およびダム管理者の対応行動を図-24に示す。29日の正午頃から時間雨量が増加して、それに伴いダムへの流入量も徐々に増加した。30日の6時にダム流入量が基準の流入量をこえたことから、ダム管理者2名はダムサイトに向けて移動した。ダム管理者は30日午前にはダム堤体の点検および確認を行った。そして、その日の午後には、下流河川の氾濫によって農業用水路が被災したため、ダムサイトを一時離れてその対応を行った。30日の夜（21:00～22:00頃）に再度ダムサイトへ向かったものの、ダムサイトへ向かう山中の管理用道路が土砂崩れのため通行不能となり、ダム管理者はダムサイトへ行くことを断念せざるをえなかった。このとき、ダムサイトには2名の委託管理者が在勤しており、ダムサイトにおける直接監視は委託管理者が行い、その結果をダム管理者へ報告することとした。その後、降雨量は急増して、30日23時から31日1時にかけてダムへの流入量は最大となった。この最大の流入量は設計洪水量のほぼ90%に達した。さらにその夜半には、ダムサイトにおけるダム管理

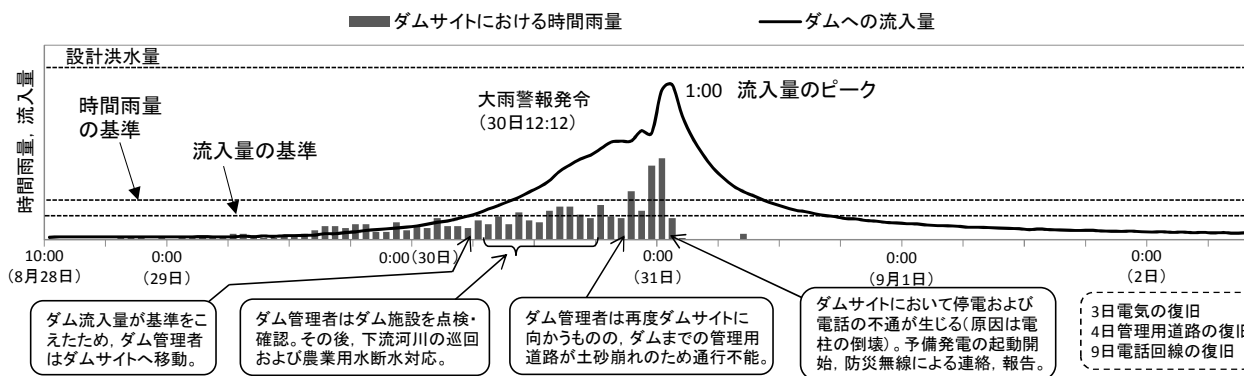


図-24 北海道大雨災害時におけるダム管理の経過

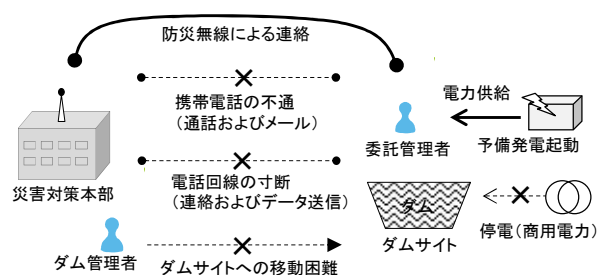


図-25 北海道大雨災害時におけるダム管理の状態

棟の停電および電話の不通が起こった。その原因はダムへつながる電線および電話回線が電柱の倒壊により寸断されたためであった。即座に委託管理者は予備発電を起動してダムサイトにおける電力を確保した。この時点から、ダムサイトの委託管理者とダム管理者の連絡は防災無線のみを通じて行われることになった。その後、幸いにも降雨は収まり、ダムへの流入量は急速に減少していった。商用電力の復旧は9月3日、管理用道路の復旧は9月4日、電話回線の復旧は9月9日となった。

4.2.2 大雨災害時におけるダム管理体制の評価

以上のダム管理の経過にみられるように、Aダムのダム管理が台風第10号大雨災害時に順調に実施されたとはいえない。図-25に示すように、ダム管理者はダムサイトへ移動できず、ダムサイトとの連絡は最終的に防災無線のみとなり、電力は予備発電を起動することになった。しかし、Aダムのダム管理が途絶えることなく継続的に実施されたことは、バックアップ機能を備えた現行ダム管理体制が功を奏したためであると評価するべきであろう。すなわち、ダム管理者、電話通信、商用電力の代替として委託管理者、防災無線、予備発電がそれぞれの確に機能したことで、極めて甚大な大雨災害時においてもダム管理を継続的に実施することができたものと考えられる。このことは、Aダムにおける現行のダム管理体制が有効であることを示すものである。

しかしながら、ダム管理の状態をできる限り健全に行えるように対策を強化する努力は今後とも必要である。そこで、本研究では、Aダムの管理体制および災害対応をさらに強化する方策を明らかにするため、FTAを用いて、大雨災害時におけるダム管理者の対応行動を阻害する原因事象を特定して、その原因事象の発生を低減あるいは回避する対策を検討した。

4.3 大雨災害時におけるダム管理の強化対策と防災行動計画に関する考察

4.3.1 ダム管理の遂行を阻害する原因特定と対策検討

「ダム管理の遂行不能」を頂上事象として展開したFT図を図-26に示す。ダム管理が大雨災害時の被害によって遂行不能となる原因事象を挙げていき、23の基本事象を特定した。これらの基本事象に対して適切な対策を施せば、頂上事象の発生確率を低減することができる。筆者らは、まず「基本事象の発生を低減する」という観点から考えられる対策（以下、「対策1」）を検討した。次に、大雨災害の発生は、天気予報によって予測できる場合が多いことから、「大雨災害が事前に予測される」という前提条件のもと、「基本事象の発生を回避する」という観点から考えられる対策（以下、「対策2」）を検討した。

対策1および対策2の検討結果を表-5に示す。まず、対策が同種となる基本事象をまとめて整理した上で、現状においてダム管理者が実施可能な対策と社会インフラなどの対策が中心となるためダム管理者単独による対策の実施は困難である対策（表-5中の網掛け部分）に仕分けた。対策1では、「操作方法の忘却」や「燃料切れ」など単純ミスに対する「ヒューマンエラー対策」や設備機器の「定期的な点検」などが、ダム管理者が実施可能な対策として考えられる。対策2の場合では、台風予報などに基づいて対応の準備が早期に可能である。すなわち、ダム管理者は、道路の不通で車両が走行不能になる事態を回避するため、大雨災害の発生前にダムサイトへの移動を完了する。

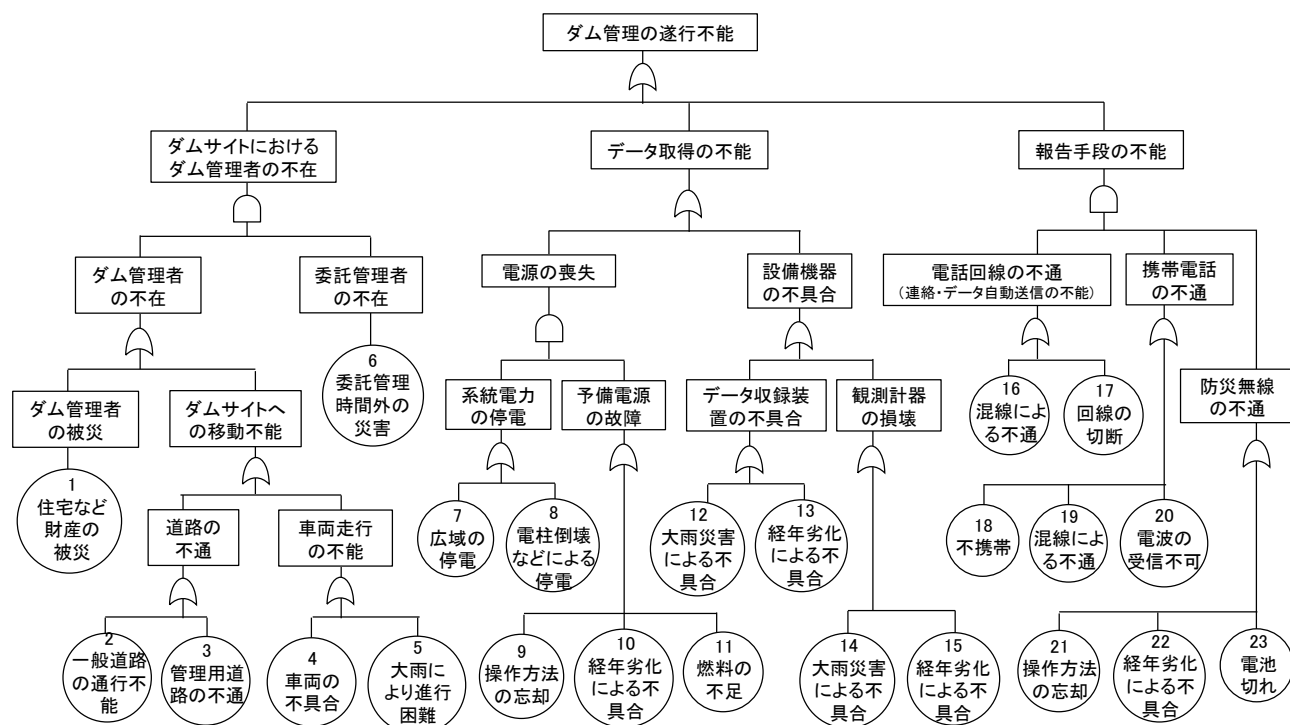


図-26 「ダム管理の遂行不能」を頂上事象とするFT図

表-5 基本事象に対する対策

No.	基本事象	対策1	対策2 (防災行動計画)
9, 21	操作方法の忘却		
11	燃料の不足	ヒューマンエラー対策	
18	不携帯		大雨による災害発生前に確認・点検
23	電池切れ		
4	車両の不具合		
10, 13, 15, 22	経年劣化などによる不具合	定期的な点検	
2	一般道路の通行不能	道路の防災対策の強化	大雨による災害発生前にダムサイトへ移動完了
3	管理用道路の不通		
5	大雨による進行困難		
6	委託管理時間外の災害発生	(対策困難)	
1	住宅など重要財産の被災	住宅や社会インフラの防災対策の強化	住宅や社会インフラの防災対策の強化
7	広域の停電		
8	電柱倒壊などによる停電		
16, 19	混線による不通		
17	回線の切断		
20	電波受信不可		
12, 14	大雨災害による不具合	(対策困難)	(対策困難)

そして、本格的な大雨の発生前にダム管理に必要な設備機器の点検や動作確認を行う。また、それらの作業に時間的かつ精神的な余裕をもってあたることにより、ヒューマンエラーの発生を回避することもできよう。

しかし、対策2が対策1をカバーするものではない。なぜならば、対策1と対策2の具体的な対策内容が異なるからである。例えば、対策1では緊急時のパニック状態など厳しい状況を想定した対策を含むが、対策2はそのパニック状態を回避するため早めの対応を行うものである。そのため、ダム管理者は対策1と対策2のいずれの場合も検討して、その双方の具体的な対策を実施することが望まれる。

4.3.2 防災行動計画の観点から想定される大雨災害時におけるダム管理体制

表-5に示す対策2のとおり、大雨による災害のおそれを予測して早期に対応行動を行うことができれば、FT図によって挙げられた23の基本事象のうち14の基本事象の発生を回避することができる。このことから、事前の対応行動に重点をおく防災行動計画がダム管理において非常に有効であるものと示唆される。防災行動計画は、近年注目される新しい水害対策である。現在、国や自治体を中心にその普及が進められている。防災行動計画はタイムラインとも呼ばれ、国土交通省¹⁴⁾によれば、その定義は「災害の発生を前提に、防災関係機関が連携して災害時に想定される状況を共有した上で、「いつ」、「誰が」、「何を」を時間軸に沿って整理した計画」とされる。

表-6 防災行動計画の観点から想定される大雨災害時のダム管理

時間	ダム中央管理センター	ダム管理棟(ダムサイト)
台風接近 降雨発生	台風・大雨情報に注視 ダムデータを監視	委託管理者による ダムの監視
○時間前	車両の点検	
○時間前	ダム管理者(2名)の ダムサイトへの出発	移動 → ダム管理者の到着
○時間前	ダムデータ データ取得の点検	ダムデータ 観測計器の点検 データ送信の点検
○時間前	防災無線 設備機器の点検 操作方法、通話の確認	防災無線 設備機器の点検 操作方法、通話の確認
○時間前		予備発電機 操作方法の確認 設備機器の点検 燃料の確認
○時間前	報告書の作成 災害対策本部ほか 各関係機関へ報告	ダムの監視 データの送信 ダムの状況報告
ゼロ・アワー (大雨発生)		
○時間後	⋮	⋮

本研究では、FTA を用いて、A ダムの防災行動計画における「何をやる」に該当する対応行動を明らかにした。その結果に基づけば、防災行動計画の観点から、表-6 に示すような大雨災害時のダム管理が考えられる。まず、台風の接近に伴い災害対応体制が発動される。ダム管理者は台風や大雨の情報、ダムデータに注視するとともに、ダムサイトへ移動するための車両の点検・整備を行う。そして、ダム管理者は甚大な被害が起こる前の段階でダムサイトへ移動する。ダムサイトに到着したダム管理者は、堤体監視に必要な準備やダムデータを取得するための観測機器の点検およびデータ送信の確認を行う。また、万一の被災時に必要な防災無線や予備発電機の点検や動作確認を行う。このような事前の対応行動をすべて完了して、台風や大雨災害のピークに備える。

こうした早めの対応行動によって、災害時のダム管理における多くのリスクを回避することができよう。しかし、さらに実践的な防災行動計画とするためには、各対応行動を実施する具体的な時間を設定することが重要である。防災行動計画では、一般に主要な災害の発生時点を「ゼロ・アワー」と定めて、そこから時間を遡って個々の対応行動を実施する時刻（○hour, ○時間前, ○日前など）を設定する。このような対応行動の実施時間を記す防災行動計画は、ダム管理者が的確に災害対応を遂行していくための

基本的な指針となるとともに、その対応行動に漏れがないかを確認するためのチェックリストとして用いられる。

また、防災行動計画では、一般に台風の到来などを「ゼロ・アワー」として定める。しかし、台風第10号による大雨は正確に予測されていたものではなかった。また、4.1.2 で述べたとおり、ダム管理者はダムサイトへ向かったにも関わらず、そのときすでにダムサイトに至る管理用道路が土砂崩れのため通行不能になっていた。こうした台風第10号大雨災害の経験と教訓、地域特有の気象と災害過程の分析を踏まえて、防災行動計画における「ゼロ・アワー」の設定やダム管理者の対応行動の判断基準およびタイミング（時刻）を決定することが、今後の課題である。

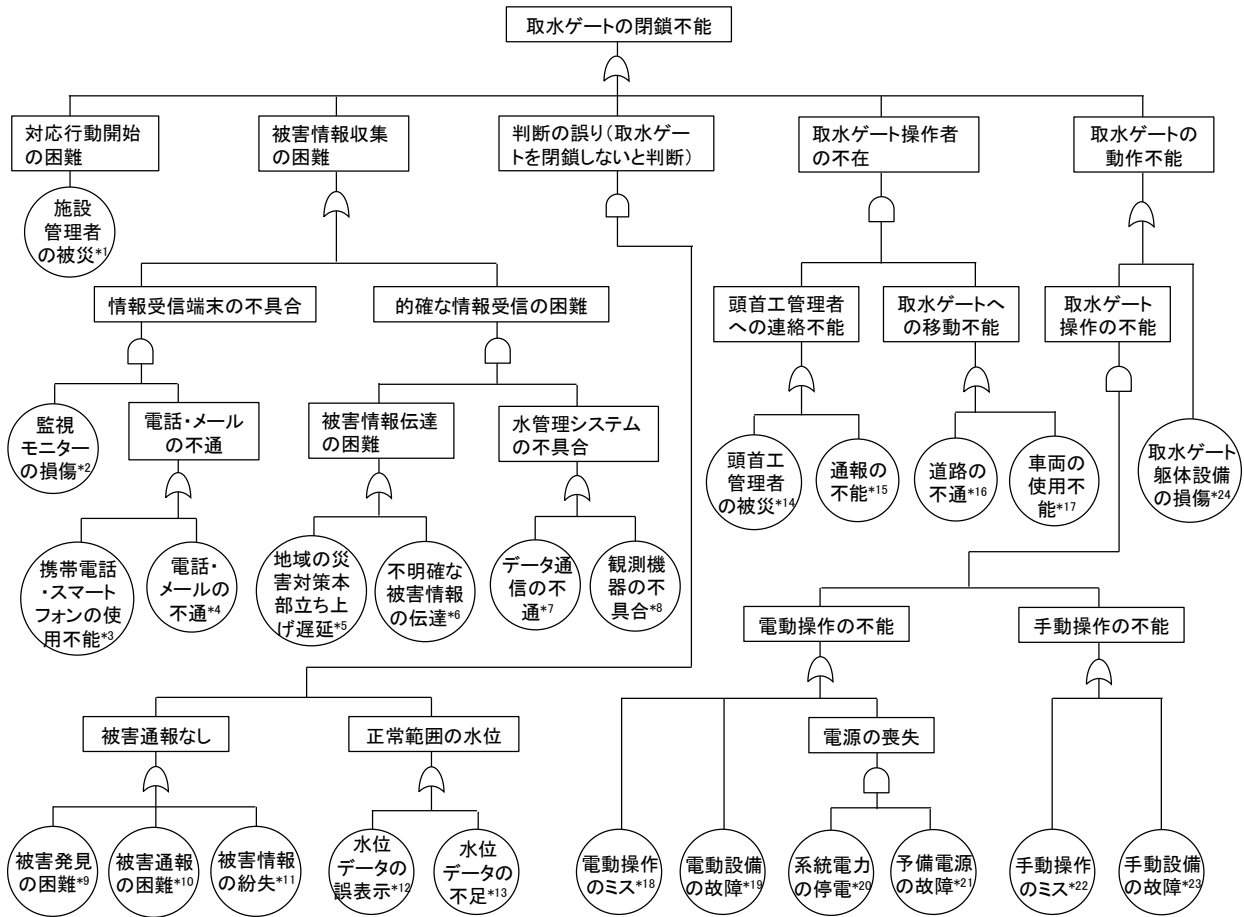
5. FTA を用いた災害対策検討方法の提案と実証

5.1 実用 FTA の提案

5.1.1 実用 FTA の課題と解決策

2章、3章および4章では、FTA を用いて、実際の農業水利施設管理における大規模地震対策を検討した。その結果、FTA は、農業水利施設の災害対応力強化を図るための対策検討方法として有効な方法であることが実証された。しかし、2章で述べたように、FTA の手順に従えば、FT 図は著しく肥大化してしまう場合がある。その肥大化した FT 図は、対策検討の作業効率を低下させる。このことが、現場の施設管理者が自らの手で FTA を用いて対策を検討する際の課題であった。この課題の解決策として、筆者らは、FT 図作成において一定の具体的な原因事象が特定された段階で、それを基本事象とし、対策の検討に切り替えるという実用 FTA を提案した¹⁵⁾。平成29年度の調査では、実用 FTA を用いた対策検討を、実際の施設管理者の協力を得て試行的に実施して、実用 FTA を用いて従来の FTA と同程度の対策を挙げることができることを確認した。しかし、実際に施設管理者が実務において対策検討を行う際に、FT 図（原因抽出 FT 図）を白紙から作成することのハードルの高さや原因抽出 FT 図から対策検討 FTA への切り替えのタイミングをどのように考えればよいかなどの課題が指摘された。

頭首工と開水路からなる水路システムでは、地震発生後、水路に被害が生じれば直ちに取水ゲートを閉鎖するという災害対応が一般的である。そこで、筆者らは、これまでの研究成果をもとに、標準的な原因抽出 FT 図のモデル(以下、「標準モデル」)を作成して、その標準モデルを実用 FTA における原因抽出 FT 図作成のガイドラインとすることを提案した¹⁶⁾。この提案は、対象施設の特徴や管理方法に応じて標準モデルを改良することで、施設管理者が自らの手



*1 施設管理者本人、家族、自宅、近隣の被災（自助、共助）、*2 データ監視用パソコンの転倒などによる損傷、*3 携帯電話の充電切れや電話機の不携帯などによる不通、*4 固定電話および携帯電話の回線の切断および混雑などによる不通、*5 災害対策拠点となる本部庁舎および事務所の倒壊、*6 被害通報が不明確で状況が把握不能、*7 水管理システムにおける水位データの通信不能、*8 地震動による現地の観測機器の損傷、*9 夜間や人気が少ない場所における被害発生など、*10 被害発見者が被災していることによる被害通報の困難、*11 震災時の混乱による被害情報の紛失、*12 水位観測機器の故障により誤表示される状況、*13 被害の有無を的確に捉えるためには水位観測地点数が不足している状況、*14 頭首工管理者およびその家族などの被災、*15 施設管理者と頭首工管理者の連絡が不能、*16 頭首工までの道路の不通、*17 車庫の倒壊、車両の不足、*18 電動操作手順の忘却や操作のミス、*19 地震動による電動設備の故障、*20 系統電力の停電、*21 予備電源設備の故障、*22 手動操作手順の忘却や操作のミス、*23 地震動による手動設備の故障、*24 取水ゲートの躯体設備の損傷

図-27 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする原因抽出 FT 図

で原因抽出 FT 図を容易に作成することを意図したものである。標準モデルに基づく原因抽出 FT 図の作成によって、施設管理者による FTA 実施のハードルが大幅に低減できると考えられる。

5.1.2 実用 FTA の流れ

頭首工と開水路からなる水路システムにおける地震発生直後の災害対応を対象とした原因抽出 FT 図の標準モデルを図-27 に示す。頂上事象は、2 章で述べたとおり、「取水ゲートの閉鎖不能」である。その下位の事象には、各災害対応過程が遂行不能となる事象が記載される。概ね 2 段階から 4 段階の中間事象を経たところで基本事象としている。これらの基本事象は、筆者らによる既往の調査において、具体的な対策検討が実施可能（対策検討 FTA に移行可能）であると判断されたものである。この標準モデル利用を含めた実用 FTA の流れを図-28 に示す。施設管理者は、まず、検討対象とする水路システムの特徴や施設管

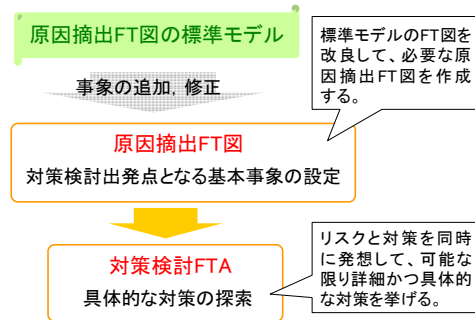


図-28 実用 FTA の流れ

理の状況に応じて、標準モデルに不足の事象があれば、それを標準モデルに追加する、あるいは標準モデルに不必要な事象があれば、それを標準モデルから除外するなどして、検討対象に見合った原因抽出 FT 図を作成する。次に、その原因抽出 FTA の各基本事象に対して対策の検討を行う。施設管理者らは対策を自由に発想して可能な限り挙げて

いく。この場合は、ひとつの基本事象に対して多数の対策が挙げられることになる。そのため、対策検討の議論が煩雑化しないように、対策を具体化していく過程を樹形状の図（対策検討FT図）に整理しながら検討を進める。

5.2 実用 FTA による対策検討の実施例

5.2.1 検討対象

実用 FTA の有効性を検証するため、施設管理者を主体とした実用 FTA による地震対策の検討作業を実施した。検討対象は、北海道の水田地帯にある S 幹線水路における地震発生直後の災害対応である。S 幹線水路の規模は、延長約 20km、最大通水量約 21m³/s である。

5.2.2 原因抽出 FT 図の作成

施設管理者は、標準モデルを用いて、S 幹線水路の震災時災害対応において起こり得る被害リスクを検討した。その結果、施設管理者は、標準モデルの「手動操作不能」の原因事象に、基本事象「手動操作の人員不足」を追加する必要がある（図-28）という結論を得た。

S 幹線水路では、手動による取水ゲートの開閉は可能であるものの、扉体の自重で閉鎖するような仕組みではない。そのため、手動による取水ゲートの閉鎖には非常に多くの時間と労力を要するので、施設管理者がひとりで取水ゲートを手動操作することは非常に困難である。それゆえ、緊急時の手動操作には作業人員の不足が懸念されることから、標準モデルに「手動操作の人員不足」を基本事象として追加した。

5.2.3 対策検討 FTA の例

原因抽出 FT 図の各基本事象に対して対策を検討する。「手動操作の不能」の原因事象（基本事象）である「手動操作のミス」、「手動設備の故障」、「手動操作人員の不足」に対して、施設管理者が対策を検討した結果を、それぞれ図-29、図-30、図-31 に示す。これらの対策検討 FT 図の作成過程は、次のとおりである。

最初に、施設管理者は各基本事象に関して想起される対策（2.6 節に記したとおり実際に想起されるのはリスクと対策のセット）をできるだけ多く挙げた。その対策が出尽くしたところで、それらの対策を分類して対策検討 FT 図を作成した。図-29 に記す「手動操作のミス」の場合では、「誤操作の防止」、「操作方法の忘却防止」、「安全な操作環境の確保」に対策を分類した。さらに、その対策検討 FT 図をみながら、再度対策を挙げていき、それらを対策検討 FT 図に追加した。そうして挙げられた対策において、同様な対策はひとつにまとめ、場合分けが必要な対策は分離するなど整理して、最終的な対策検討 FT 図を作成した。今回実施した実用 FTA では、過年度に S 幹線水路を

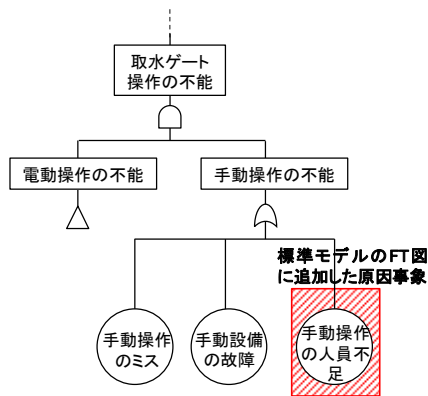


図-28 標準モデルに追加した基本事象の例

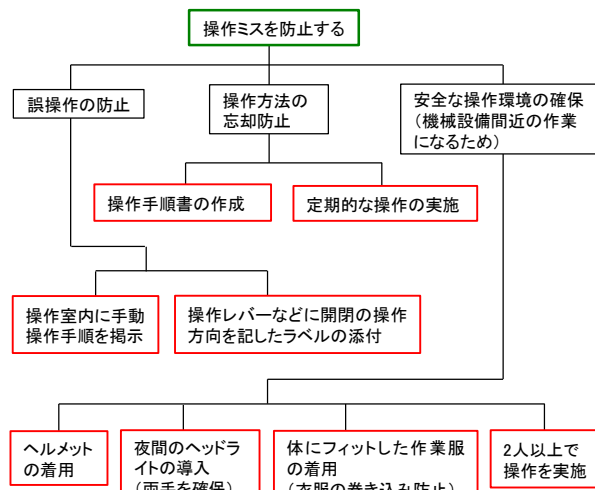


図-29 「手動操作のミス」の対策検討例

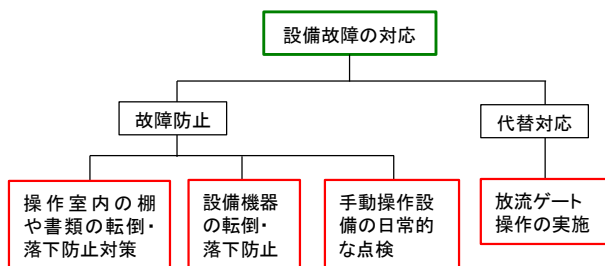


図-30 「手動設備の故障」の対策検討例

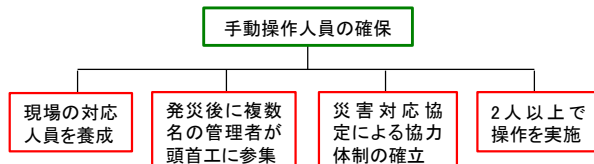


図-31 「手動操作人員の不足」の対策検討例

対象に実施した従来の FTA（これ以上原因を細分化できないという段階まで基本事象を追及する方法）で挙げられ

表-7 「手動操作不能」の対策

事前対策	操作手順書の作成
	定期的な操作の実施
	操作室内に手動操作手順を啓示
	操作レバーなどに開閉の操作方向を記したラベルの添付
	操作室内の棚や設備機器の転倒・落下防止対策
	手動操作設備の日常的な点検
事後対策	夜間のヘッドライトの導入
	ヘルメットの着用
	体にフィットした作業服の着用 (衣服の巻き込み防止)
	2人以上での操作の実施
	放流ゲート操作の実施
	現場の対応人員を養成
	発災後直ちに複数名の管理者が頭首工に参集
	災害時協定による協力体制の確立

た対策とほぼ同様な対策が得られた。また、対策検討 FTA では、「夜間のヘッドライトの導入」や「体にフィットした作業服の着用」など現場における知見や経験により得られたユニークな対策が加えられた。さらに、実用 FTA では、従来の FTA より短時間で効率よく対策を検討できた。このような実証結果から、実用 FTA は、現場の施設管理者が自らの手で対策検討を行うことができる方法として有効であることが示された。

5.3 対策の整理と実施

対策の整理方法に定められたものはないが、その一例として、「手動操作の不能」の対策を「事前対策（被害の未然防止対策）」と「事後対策（被害発生時の対応に資する対策）」に分けて整理した場合を表-7 に示す。何れの対策も現在の施設管理の範疇において概ね実施可能であると考えられる。次のステップとして、対策各々に関して、さらに詳細な議論を重ねて具体的な実施内容を検討していくということになる。例えば、緊急時でも分かりやすい操作手順書の内容検討や転倒・落下防止の実施箇所の検討などである。また、事後対策に分類した対策は、現行の災害対応計画に新たに追加する内容である。災害時における人員の配置など災害対応計画の基本的な見直しが求められる。さらに、日常の施設管理、防災訓練、人材育成など、

中長期的な計画に関わる対策の実施も必要である。一時的な議論で終わらず、防災意識、知見と技術を継承していくことが望まれる。

6. 地震災害時災害対応における意思決定方法の改善

6.1 目的

3章において述べたとおり、筆者らは、現場管理体制を構築できるか否かを判断基準として、取水ゲートを閉鎖するか否かを決定する意思決定方法（意思決定方法2）を提案した。しかし、その意思決定方法2の妥当性をあらためて詳細に説明しようとするならば、文章表現のみで厳密に議論するには限界がある。そこで、本研究では、施設管理者の意思決定を数理モデルによって表現し、その推論から意思決定方法1の課題および意思決定方法2の妥当性を示すことを目的とする。筆者らは、その数理モデルとして、損失の期待値を最小化する対応行動を選択するという期待値原理に着目し、その観点からあらためて震災時の意思決定方法を検証した。

6.2 方法

6.2.1 損失を最小化する対応行動の選択

林¹⁷⁾によれば、合理的な意思決定とは、「人は自己利益の最大化を目標として行動する」という原則に基づいて行われる意思決定である。ただし、本研究のような災害対応を対象とする場合は、その基本原則を「施設管理者は損失を最小化する対応行動を選択する」と読み替える。本研究では、この基本原則に基づいて、施設管理者の意思決定過程を数理モデル（以下、「意思決定モデル」）によって表現する。具体的には、損失の期待値がもっとも小さい対応行動を選択するという「期待値原理」に基づく意思決定モデルを作成する。そして、その意思決定モデルから得られる結果の意味するところを現実の具体的な事象に当てはめて解釈することによって、震災時における意思決定方法を考察する。

6.2.2 地震災害時における災害対応の損失表

施設管理者の意思決定過程を明確にするためには、最初に施設管理者の各対応行動に対する損失を明示する必要がある。ある状態において選択した行動の結果として生じる損失を示した表を損失表という。地震災害時における意思決定を数理モデル化するためには、まず損失表の作成が必要である。

施設管理者の災害対応時の意思決定を表現する損失表を表-8に示す。地震災害時の状態は「被害あり」と「被害なし」である。水路が被害を受けて決壊や溢水が生じている状態を「被害あり」、水路が無被害である状態を「被害

表-8 本研究で用いる損失表

対応行動	状態	
	被害あり	被害なし
取水ゲートを閉鎖する	D_1	D_2
取水ゲートを閉鎖しない	D_3	D_4

なし」とする。また、選択肢となる対応行動として、通水を停止するために取水ゲートを閉鎖する場合、すなわち、「取水ゲートを閉鎖する」と、通水をそのまま継続する場合、すなわち、「取水ゲートを閉鎖しない」を想定する。こうした震災時の状態と対応行動の各組合せにおいて、 $D_1 \sim D_4$ の4通りの損失が考えられる。

6.2.3 損失表を用いた対応行動の決定方法

施設管理者の意思決定過程には、表-8における「被害あり」と「被害なし」の状態を施設管理者が確実に把握できるとした場合（以下、「確実性下」と不確実にしか把握できないとした場合（以下、「不確実性下」）がある。その「確実性下」と「不確実性下」では、基本原則に基づく施設管理者の意思決定方法が異なる。

(1) 確実性下における意思決定

確実性下における意思決定の場合には、表-8における「被害あり」と「被害なし」の各状態において損失を比較して、損失が小さい方の対応行動を選択する。この場合、「被害あり」であれば D_1 と D_3 を比較し、「被害なし」であれば D_2 と D_4 を比較して、損失が小さい方の対応行動を選択する。

(2) 不確実性下における意思決定

不確実性下における意思決定の場合には、「被害あり」と「被害なし」の各状態は、確率として捉えられる。「被害あり」の発生確率を P とすれば、「被害なし」の発生確率はその余事象 $1-P$ となる。このとき、「取水ゲートを閉鎖する」、「取水ゲートを閉鎖しない」の各対応行動の損失 E_1 および E_2 は、確率 P を用いて、それぞれ(6)式と(7)式のように期待値（以下、「期待損失」）として表現される。

$$E_1 = PD_1 + (1 - P)D_2 \quad (6)$$

$$E_2 = PD_3 + (1 - P)D_4 \quad (7)$$

この期待損失 E_1 と E_2 を比較して、その小さい方の対応行動を選択することによって、不確実性下における対応行動が決定される。この意思決定方法が期待値原理である¹⁸⁾。

また、意思決定には、次に述べるような2つがある。現実に施設管理者が知り得るのは、施設管理者自身の主観的な感覚で捉える損失（以下、「主観的損失」と被害発生確率（以下、「主観的確率」）である。施設管理者が行うのは、主観的損失や主観的確率に基づいた期待値原理に従う意思決定（以下、「主観的意思決定」）である。それに対して、客観的に見積もられる損失（以下、「客観的損失」と実際の被害発生確率（以下、「客観的確率」）を用いた期待値原理に従う意思決定（以下、「客観的意思決定」）がある。すなわち、期待値原理による意思決定には、主観的意思決定と客観的意思決定がある。主観的意思決定は、施設管理者がどのような意思決定を行うのかを示し、客観的意思決定は、施設管理者がどのような意思決定を行うべきか、すなわち最適な意思決定を示す。意思決定方法において、その両者が乖離していれば、施設管理者の実施する意思決定（主観的意思決定）は、必ずしも最適な意思決定（客観的意思決定）にならない。すなわち、意思決定方法が妥当であるためには、主観的意思決定と客観的意思決定が合致する必要がある。

そこで、本研究では、先ず任意の損失と確率を用いた期待値原理に従う意思決定方法を導く。そして、その意思決定方法を主観的意思決定と客観的意思決定の両面から捉えて、両者が合致するか否かを検証する。

6.3 現行の意思決定方法の検討

6.3.1 現行の意思決定方法

現行の意思決定方法は、地震災害時であっても、水管理システムが健全に機能して、施設管理者が、その水位データの挙動から、水路における被害発生の有無を確実に把握できるということを大前提としている。現行の意思決定方法をあらためて記せば、「水位に異常な変化がある場合、「被害あり」とみなして取水ゲートを閉鎖し、水位に異常がない場合、「被害なし」とみなして取水ゲートを閉鎖しない」である。先ずは、現行の意思決定方法に関して検討を進める。

6.3.2 現行の意思決定における損失表

現行の意思決定における損失表を表-9に示す。ただし、表中の記号は、 a ：水路の被災に起因して発生する二次災害による損失、 m ：取水ゲートを閉鎖することにより損失 a が低減される割合（ $0 < m < 1$ ）、 b ：水路の通水が停止されることによって発生する損失である。

水管理システムの水位データに異常な変化が確認された後、直ちに取水ゲートを閉鎖したとしても、被害の拡大はある程度進行する。そのため、「被害あり」の状態では、たとえ「取水ゲートを閉鎖する」が選択されても、損失 a

表-9 現行の意思決定における損失表

対応行動	状態	
	被害あり	被害なし
取水ゲートを閉鎖する	$ma+b$	b
取水ゲートを閉鎖しない	$a+b$	0

は0にならない。そこで、「被害あり」の場合でも損失 ma が発生するとした。また、 b は農業用水が供給されないことによる受益者の営農上の損失などである。水路への水供給が停止される状況には、施設管理者が取水ゲートを閉鎖して通水を停止する場合と水路が被害を受けて通水不能になる場合がある。したがって、「取水ゲートを閉鎖する」の行と「被害あり」の列における損失には b が加えられる。また、「被害なし」の状態で、「取水ゲートを閉鎖しない」という場合は何事も起こらず、損失は0である。

6.3.3 現行の意思決定方法の適正検証

以上の損失表を用いて、まず主観的意思決定を検討して、現行の意思決定方法がそれに従うのか検証する。現行の意思決定方法では、「被害あり」と「被害なし」の状態を確実に把握できることが前提であるので、確実性下の意思決定である。表-9における「被害あり」の状態における各対応行動の損失を比較すれば、 $ma+b < a+b$ である ($\because 0 < m < 1$)。従って、この場合の対応行動は、「取水ゲートを閉鎖する」となる。一方、「被害なし」の状態における対応行動の損失を比較すれば $b > 0$ である。従って、その対応行動は「取水ゲートを閉鎖しない」となる。

以上の結果は、現行の意思決定方法に合致するとともに、 m, a, b が主観的損失と客観的損失の何れの場合であっても成立する。それゆえ、現行の意思決定方法は、主観的意思決定と客観的意思決定が合致した適正な意思決定方法である。

6.4 大規模地震災害時における現行の意思決定方法の考察

6.4.1 大規模地震災害時における現行の意思決定

大規模地震災害時には、水管理システム自体が機能を喪失するおそれがあるほか、たとえ水管理システムが健全であり、その水位データに異常がみられなくとも、施設管理者は、想定し得ない不確実な被害が起こることを懸念して、確信をもって「被害なし」と即断することができないと考えられる。それゆえ、施設管理者は、大規模地震災害時における被害の発生状況を、「被害が発生しているかもしれない」という「確からしさ」によって捉えざるをえない。

すなわち、大規模地震災害時における現行の意思決定方法（意思決定方法1）は、被害の発生確率が高ければ、取水ゲートを閉鎖する、被害の発生確率が低ければ、取水ゲートを閉鎖しないとなる。

6.4.2 期待損失の算出

意思決定方法1における被害発生の確からしさを確率 P で表され、意思決定方法1は不確実性下の意思決定となる。それゆえ、取水ゲートを閉鎖するか否かの選択は、(6)式および(7)式を用いて算出される期待損失の比較によって決定される。「取水ゲートを閉鎖する」と「取水ゲートを閉鎖しない」の各対応行動の期待損失をそれぞれ E_1, E_2 とすると、その期待損失は、表-9の損失表から次のように計算される。

$$E_1 = P(ma + b) + (1 - P)b = maP + b \quad (8)$$

$$E_2 = P(a + b) + (1 - P) \cdot 0 = (a + b)P \quad (9)$$

このときの期待損失 E_1, E_2 の大小関係を視覚的に把握するため、(8)式および(9)式を、それぞれ P を変数とする関数であると捉えて、そのグラフを図-32に示す。 E_1 と E_2 の傾きを比較すると、 $ma < a+b$ であるため、交点 G が必ず存在する。その交点 G の P 座標成分 P_c は、

$$P_c = \frac{b}{(1 - m)a + b} \quad (10)$$

である。(10)式において、 $0 < b < (1 - m)a + b$ であることから、 $0 < P_c < 1$ となり、 P_c は必ず P の定義域 ($0 < P < 1$) 内に存在する。それゆえ、 P_c を境にして、 E_1 と E_2 の大きさが逆転する。期待値原理に従えば、 $E_1 > E_2$ ならば、取水ゲートを閉鎖し、 $E_1 < E_2$ ならば、取水ゲートを閉鎖しないということになる。すなわち、このとき、「被害の発生確率が高ければ ($P > P_c$)、取水ゲートを閉鎖し、被害の発生確率が低ければ ($P < P_c$)、取水ゲートを閉鎖しない」という意思決定方法1となる。

6.4.3 意思決定方法1の課題

以上の意思決定モデルから、意思決定方法1の課題を明らかにする。その課題として、次に述べる「主観的意思決定と客観的意思決定の相違」、「意思決定基準の不確実性」および「水路における危険の放置」が考えられる。

(1) 主観的意思決定と客観的意思決定の相違

意思決定方法1では、主観的意思決定と客観的意思決定が必ずしも合致しない。なぜならば、 a, b, m の主観的損

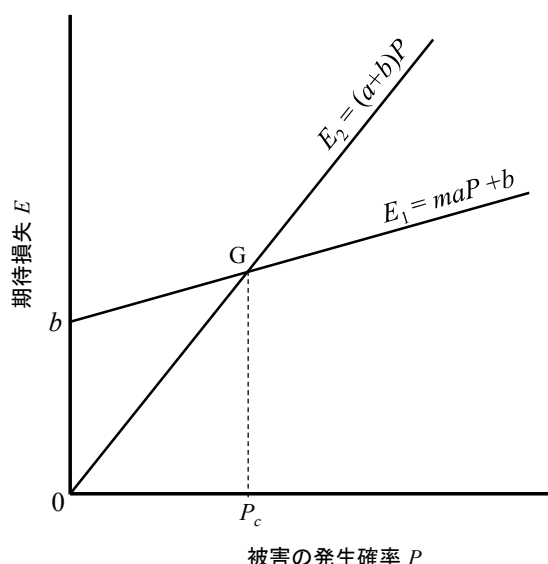


図-32 意思決定方法1の大規模地震災害時における被害の発生確率と期待損失の関係

失と客観的損失が異なれば P_c が異なり、さらに、発生確率 P の主観的損失と客観的損失が異なれば、 P と P_c との大小比較の評価が異なるからである。すなわち、施設管理者は意思決定方法1に基づいて意思決定を行うとしても、それは最適な意思決定であるとは限らない。

(2) 意思決定基準の不確実性

大規模地震災害時には、施設管理者は自らが主観的に評価する P と P_c のみを頼りにして意思決定を行わざるを得ない。意思決定モデルにおいて、 P と P_c が接近した状態は意思決定が困難な状況である。例えば、施設管理者は、被害の発生確率 P を P_c より高く評価して、取水ゲートを閉鎖しようと考えたとする。しかし、その一方で、施設管理者は取水ゲートを閉鎖した場合の営農への影響を重くみて、 b もまた高く評価したとする。このとき、 b が増大すれば、 P_c も増大する（ \because (5)式より、 P_c は b の単調増加関数）ことから、図-32において、 P_c は P に接近する方向へ移動する。その結果、 P と P_c は近接して、施設管理者は、取水ゲートを閉鎖すべきか否か、その対応行動の選択に困惑することになる。

(3) 水路における危険の放置

大規模地震時の意思決定では、 $E_1 > E_2$ の場合、現地の水路における被害の発生如何に関わらず「取水ゲートを閉鎖しない」という選択があり得る。このような選択を行うことは、結果的に水路において起こり得る危険を放置することになる。大規模な用水路における決壊や溢水による二次災害は、人命や財産の喪失に関わる深刻な被害を引き起こすおそれがある。それだけに対応行動の意思決定には慎重を期すべきである。

大規模地震災害時における意思決定方法1には、以上のような課題がある。大規模地震災害時に、施設管理者自らも混乱している状況の中で、明確な指標もなく主観的な感覚のみで、その後の被害損失の大きさと災害対応の行方を左右する重大な意思決定を行わなければならないことは、施設管理者にとってたいへんな負担である。

6.5 課題の解決に向けた新たな意思決定方法の検討

6.5.1 災害対応の目的

大規模地震発生直後における災害対応の目的は、第一に被害から人命や財産を守ることである。ところが前項で述べたとおり、意思決定方法1では必ずしもその目的を果たすことができない。そこで、本章では、大規模地震災害時の安全確保を前提条件に課した新たな意思決定方法を検討する。その結果を先に述べると、この検討から意思決定方法2が導かれ、意思決定方法2は意思決定方法1の課題を解消する。

6.5.2 安全を実現する前提条件

危険源である水路の通水が継続されていても、決壊や溢水などによる被害の発生を防止できる対応策が備えられていれば、水路およびその沿線域の安全は確保される。ここでは、その「被害の発生を防止する対応策」として、3章で述べた「現場管理体制」の構築を考える。現場管理体制とは、地震発生後、複数名の施設管理者が水路の各要所に急行して水路全域の監視を行い、そこでもし被害の発生が確認されれば、直ちに取水ゲートを閉鎖するなどの対応行動を実施するという管理体制である。大規模地震災害時において、施設管理者は、水路において被害が生じていないことの確証を得ることは難しい。さらに、余震の発生が懸念される間は、被害が生じないという保証はない。このような地震発生後の不確実な状況下において、取水ゲートを閉鎖せずに通水したまま水路およびその沿線域の安全を確保するためには、現場管理体制が構築できていることが必要条件（以下、「安全条件」）である。

6.5.3 新たな意思決定方法の想定

上述の安全条件から、「現場管理体制が構築できる場合は、取水ゲートを閉鎖しない。現場管理体制が構築できない場合は、取水ゲートを閉鎖する。」という意思決定方法が考えられる。これは、3章において提案した意思決定方法2である。次に、意思決定モデルから意思決定方法2の妥当性を検証する。

6.5.4 損失表の作成

安全条件を前提とした損失表を表-10に示す。同表中の記号は、 a ：水路の被災に起因して発生する二次災害による損失、 m ：取水ゲートの閉鎖により損失 a が低減される

表-10 安全条件を前提とする損失表

対応行動	状態	
	被害あり	被害なし
取水ゲートを閉鎖する	$ma+b$	b
取水ゲートを閉鎖しない	$ma+b+c$	c

割合 ($0 < m < 1$)、 b : 水路の通水が停止されることによって発生する損失、 c : 現場管理体制の構築に必要な費用 (損失) である。 c とは、現場管理体制の構築に必要な資源が被害を受けて不具合や不足を生じた場合に、直ちにそれを修復、補完して完全な現場管理体制を構築するための費用である。すなわち、地震発生直後に現場管理体制が完全に構築できれば $c=0$ であり、現場管理体制の構築が不完全な場合には $c > 0$ となる。また、対応行動「取水ゲートを閉鎖しない」を選択する場合には、現場管理体制が構築できていることが前提であることから、「取水ゲートを閉鎖しない」という場合の損失には、「被害あり」、「被害なし」の状態に関わらず c が加えられる。さらに、「被害あり」の状態において、「取水ゲートを閉鎖しない」が選択されたとしても、このとき、現場管理体制が構築されていることから、結局のところ、その被害が発生に対して取水ゲートを閉鎖することになるので、その被害の損失は ma に抑えられる。

6.5.5 期待損失の比較

表-10 の損失表において、対応行動「取水ゲートを閉鎖する」を選択した場合の期待損失 E'_1 と対応行動「取水ゲートを閉鎖しない」を選択した場合の期待損失 E'_2 は、それぞれ (6)式および(7)式を用いて、次のように計算される。

$$E'_1 = P(ma + b) + (1 - P)b = maP + b \quad (11)$$

$$E'_2 = P(ma + b + c) + (1 - P)c = (ma + b)P + c \quad (12)$$

この E'_1 と E'_2 の大小関係を視覚化するため、(11)式および(12)式を、被害の発生確率 P を変数とする関数であると捉えて、 P に対する E'_1 と E'_2 のグラフを図-33 に示す。 b は水路の被害状況に関わらない一定値である。それに対して、 c は現場管理体制の構築度合いを示すものであるから、その評価値は直面している震災状況によって異なる。すなわち、 E'_2 の切片 c の大きさによって、 E'_1 と E'_2 の大小関係は異なる。そこで、図-33 では、 $c=0$ 、 $0 < c < b$ 、 $c > b$ の3

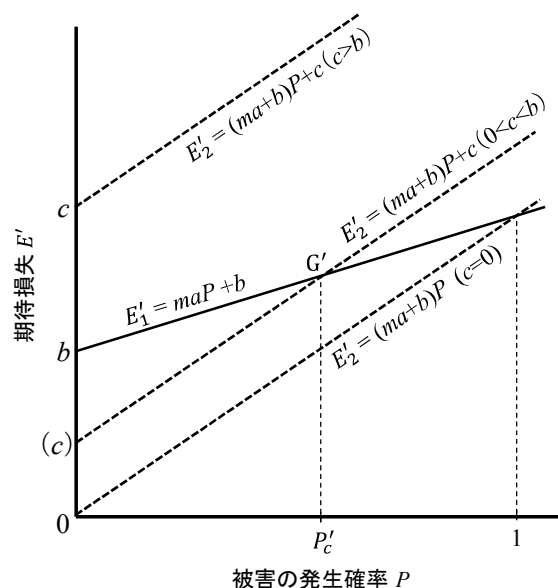


図-33 安全条件を前提とする場合における被害の発生確率と期待損失の関係

ケースに対する E'_2 を破線によって記した。

$c=0$ のとき、 E'_1 と E'_2 の交点の P 座標は 1 である。それゆえ、この場合は P に関わらず、 $E'_1 > E'_2$ となり、対応行動として、「取水ゲートを閉鎖しない」を選択することが適当である。 $0 < c < b$ のとき、 E'_1 と E'_2 は $0 < P < 1$ の変域内において必ず交差する。それゆえ、 E'_1 と E'_2 の大小関係は、 P の大きさと E'_1 および E'_2 の交点 G' の P 座標である P'_c との比較によって異なる。 $c > b$ のときには、 P に関わらず $E'_1 < E'_2$ となり、この場合は、「取水ゲートを閉鎖する」を選択することが適当である。つまり、 c の費用 (損失) をかけて現場管理体制を構築できたとしても、 $c > b$ であれば、取水ゲートを閉鎖したほうが得策ということになる。

6.5.6 意思決定方法 2 の導出

$c=0$ とは、現場管理体制を構築するための費用がかからない、すなわち、現場管理体制を支障なく構築できることを意味する。例えば、施設管理者の勤務時間中に地震が発生し、そのとき、幸いにも現場管理体制に必要な資源が被害を受けなかった場合などがこれに相当する。

それに対して、 $c > 0$ 場合は、現場管理体制を構築するために費用 c がかかる場合である。しかし、現実の問題として、地震発生直後に、水管理システムの不具合、電話連絡の不通、対応人員の不足などのように、現場管理体制の構築に必要な資源が致命的な被害を受けた場合には、そこでいくら費用を投入したところで、直ちに現場管理体制を構築できるものではない。すなわち、地震発生直後において、現場管理体制が明らかに構築できない状況であるとき、それを即座に修復・補完して現場管理体制を構築しようとする

ることは、いわば、不可能を可能にしようすることであり、そのために必要な費用 c とは、上限が定められない莫大な金額になると評価されよう。これに対して、 b は上限がある有限な値である。それゆえ、現場管理体制が構築できないという状況では、 c は b をはるかにこえる値、すなわち $c > b$ であるとみなせる。

以上の考察から、「現場管理体制が構築できる場合は、 $c=0$ 、 $E'_1 > E'_2$ であるから、取水ゲートを閉鎖しない。現場管理体制が構築できない場合は、 $c > b$ 、 $E'_1 < E'_2$ であるから、取水ゲートを閉鎖する」となり、意思決定方法 2 が導かれた。ただし、 $0 < c < b$ に相当する現場管理体制が構築できるか否か明確ではない場合については、6.5.8 項において検討する。

6.5.7 意思決定方法 2 の適正検証

意思決定方法 2 における主観的意思決定と客観的意思決定が合致するのか、次に検証する。

$c=0$ のとき、 $E'_1 > E'_2$ となる関係、および、 $c > b$ のとき、 $E'_1 < E'_2$ となる関係は、 a 、 b 、 m が主観的損失と客観的損失の何れかであっても関わりなく成立する。また、この場合の c の評価は、現場管理体制を構築できる ($c=0$) か否 ($c > b$) かの二択ということになる。施設管理者は、その c の評価を、水管理システムを確認できるか否か、施設管理者どうし連絡ができるか否か、施設管理者が現場へ急行できるか否かなど、現実の事象を客観的に捉えて決定する。それゆえ、 c の主観的損失と客観的損失はほぼ同値である。

従って、意思決定方法 2 は、施設管理者が実際に行い得る意思決定方法であり、同時に損失を最小化する適切な方法である。

6.5.8 現場管理体制の計画策定

意思決定モデルにおける $0 < c < b$ の場合には、現場管理体制が構築できるか否か微妙な場面であり、すなわち、現場管理体制の機能はほとんど損なわれないまでも、その一部が被害を受けた場合である。このとき、意思決定は、 P と P'_c の大小関係によって異なり、施設管理者の P と P'_c の評価に委ねられるということになる。

しかし、この場合には、電話やメールによる連絡が可能である（不可能であれば $c > b$ となる）。それゆえ、実際には、施設管理者が個々に不確実性の中で意思決定を行うのではなく、施設管理者間で互いに連絡を取り合いながら、現場管理体制の構築状況を確認して、その構築度合いに応じて適当な意思決定が行われることになろう。すなわち、この場合は、意思決定方法 1 のような主観的意思決定と客観的意思決定の差異が生じる状況ではなく、その両者がほぼ合致した現実的な意思決定が可能である。

また、この場合を想定して、どの程度の被害までを許容して、「取水ゲートを閉鎖しない」と判断するのか、あらかじめ具体的な条件を施設管理者の間で取り決めておくことが重要である。その計画が策定されていれば、各施設管理者は困惑することなく速やかに意思決定を行うことができると考えられる。

6.5.9 意思決定方法 2 による課題解決

大規模地震災害時における現行の意思決定方法である意思決定方法 1 の課題は、6.4.3 項で述べたとおり、①主観的意思決定と客観的意思決定の相違、②意思決定基準の不確実性、③水路における危険の放置である。意思決定方法 2 では、これらの課題が解消される。①の課題に関しては、6.5.7 項に述べたとおり、意思決定方法 2 では主観的意思決定と客観的意思決定は合致する。②の課題に関して、意思決定方法 2 では、「現場管理体制を構築できない」という状況（具体的に「施設管理者の被災」、「電話連絡の不通」、「水位データの通信遮断」、「停電」など）は、施設管理者が直接的に認識可能であり、その有無の判断に迷う不確実な要素は少ないものと考えられる。また、③の課題に関して、意思決定方法 2 は 6.5.2 項で述べた安全条件を前提としているので、水路およびその沿線域の安全性は確保されている。このことから、大規模地震災害時の意思決定方法として、意思決定方法 2 は有効であると考えられる。

6.6 大規模地震災害に備えた施設管理計画の提案

3 章では、地震発生後の取水ゲートを閉鎖する確度を高めるため、発災後直ちに複数名の施設管理者が幹線水路の各要所に急行する現場管理体制の構築および意思決定方法 2 を提案した。本章では、現行の意思決定方法の課題解決という側面から推論して、意思決定方法 2 の導入とそのために必要な現場管理体制の構築を理論付けた。このことから、筆者らは、大規模地震に備えて、発災後直ちに現場管理体制を構築する計画と意思決定方法 2 を導入した災害対応計画を策定することを提案する。

7. 災害対応計画策定マニュアル案の作成

本研究の成果を取りまとめて、農業水利施設管理者のための災害対応計画策定マニュアル案を作成した。図-34 にそのマニュアル案に記した災害対応計画の策定計画のフローを示す。本マニュアル案では、地震発生直後における初動開始から取水ゲートの閉鎖までの災害対応を対象とし、その災害対応の遂行を阻害するリスクの特定および対策検討を、3 章および 5 章に記した実用 FTA によって実施する方法を解説した。今後は、同マニュアル案に基づく災害対応計画策定の普及に努めていく方針である。



図-34 災害対応計画策定マニュアル案に記した災害対応計画の策定作業のフロー

8. まとめ

平成 28 年度～平成 30 年度に実施した研究の主要な結果は、次のとおりである。

- (1) 頂上事象の発生原因を原因抽出 FT 図の作成によって探索し、その原因事象がある程度具体的に絞り込まれた時点で、対策検討 FT 図に切り替えるという実用 FTA により対策検討を行う方法を提案した。また、実際の施設管理者による実用 FTA を用いた大規模地震対策検討の実践を通して、実用 FTA は施設管理者自らの手で実施可能であり、かつ有効な対策検討方法であることを確認した。
- (2) 大規模地震発生後、直ちに複数名の施設管理者が幹線用水路のゲート設備に向かい対応にあたる現場管理体制の構築を提案した。また、その現場管理体制における各ゲート設備への施設管理者の割当人数を最適化する方法を構築するとともに、その現場管理体制の構築可否を、取水ゲートを閉鎖するか否かの判断基準とする意思決定方法を提案した。また、この意思決定方法の妥当性を期待値原理に基づいて確認した。
- (3) 大雨災害時のダム管理の事例から、現行の管理体制におけるバックアップ機能の重要性が評価された。さらにダム管理の災害対応力を強化するために、防災行動計画(タイムライン)の策定が有効であることが示唆された。

- (4) 本研究成果を取りまとめて、災害対応計画策定マニュアル案を作成した。

謝辞：本研究の実施にあたり、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部農業整備課および帯広開発建設部農業整備課には、調査地の調整や資料の提供などにおいて多大な支援をいただいた。FTA の検証調査および聞き取り調査にご協力いただいた施設管理者には、災害対応の現状や震災時に想定される被害リスクなどについてご教示をいただいた。ここに記して関係者各位に深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所：研究者からみた東日本大震災と復旧・復興、pp.6-50、2016。
- 2) 農業農村工学会北海道支部：平成 30 年北海道胆振東部地震による農地・農業水利施設の被害、水土の知 87(5)、口絵、2019。
- 3) 農業農村工学会北海道支部：平成 28 年 8 月北海道豪雨による農業用排水路および農地の被害、(オンライン)、入手先<http://www.agr.hokudai.ac.jp/nougyoudoboku/hokkaidoshibu/TO_P.html> (参照 2019.6.9)
- 4) 大久保 天、本村由紀央、中村和正、小野寺康浩：大規模地震時における災害対応の遂行を阻害するリスク源の特定—幹線用水路施設を対象としたリスクマネジメント—、農業農村工学会論文集、290、pp.33-42、2014。
- 5) 大久保 天、本村由紀央、中村和正：基幹的な灌漑用水路における大規模地震災害に備えた災害対応力強化対策の評価、農業農村工学会論文集、302、pp.121-130、2016。
- 6) 塩見 弘、島岡 淳、石山敬幸：FMEA、FTA の活用(日科技連信頼性工学シリーズ第 7 巻)、日科技連、pp.12-16、2005。
- 7) 小野寺勝重：国際標準化時代の実践 FTA 手法 信頼性、保全性、安全性解析と品質保証、日科技連、pp.115-131、2007。
- 8) 農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室：土地改良施設管理者のための業務継続計画(BCP)策定マニュアル、2016。
- 9) 小和田 正、沢木勝茂、加藤 豊：OR 入門 意思決定の基礎、pp.45-58、2013。
- 10) 横田 崇、川上徹人、尾崎友亮、下山利浩、近藤さや、岡部来、吉田知央、坂本誠一、能勢 努、辻村晃一、下坪善浩：震度に関する検討について、験震時報、75、pp.61-105、2011。
- 11) 東京都：首都直下地震等による東京の被害想定、第 3 部被害想定手法、(オンライン)、入手先<<http://www.busai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>> (参照 2017.8.22)
- 12) 気象庁：気象庁震度階級関連解説表、(オンライン)、入手先<<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/kaisetsu>>。

Html> (参照 2017.10.7)

- 13) 大久保 天、立石信次、山口 健、桑原 淳、辻 修、宗岡寿美、木村賢人、山崎由里：2016年8～9月の北海道における豪雨災害に関する報告 6 農地・農業用施設の被害について、寒地土木研究所月報、No.771、pp.41-47、2017.
- 14) 国土交通省水災害に関する防災・減災対策本部防災行動計画ワーキング・グループ：タイムライン（防災行動計画）策定、活用指針（初版）、pp.4-5、2016.
- 15) 大久保 天、立石信次、今泉祐治：大規模地震災害に備えた対策の検討方法の提案、平成 30 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.220-221、2018.
- 16) 大久保 天、今泉祐治、寺田健司、川口清美、中村和正：農業用水路における大規模地震災害に備えた災害対応力強化対策の検討方法、令和元年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.306-308、2019.
- 17) 林 春男：災害対応の意思決定モデル、京都大学防災研究所年報、第 39 号、B-2、pp.117-130、1996.
- 18) 石倉智樹、横松宗太：土木・環境コアテキストシリーズ 公共事業評価のための経済学、コロナ社、pp.125-129、2013.

16.3 大規模農業地域における環境との調和した灌漑排水技術の開発

16.3.1 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究

(このうち、周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築)

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（水利基盤チーム）

技術開発調整監（寒地技術推進室）

研究担当者：川口清美、越山直子、大津武士、中村和正、
佐藤 泰規、南恭子

【要旨】

北海道の水田地帯では、農作業の効率化をめざして、圃場の大区画化や地下水位制御システムの整備が進められている。こうした整備の進展に伴い、圃場の用排水管理や農区および灌漑区域における流出機構の変化が予想される。そこで、本研究では、水田地帯における周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築をめざして、圃場整備が進められている地区を対象として、広域レベルおよび農区レベルの水収支および水質の調査を実施した。

農区水収支を見ると、パイプライン系農区では、圃場排水のみが農区外へ流出するのに対し、開水路系農区では、配水管理用水および圃場排水が農区外へ流出していた。なお、開水路系農区における配水管理用水率は、未整備農区および整備済み農区とも同程度であった。代かき・田植えの時期では、開水路系農区およびパイプライン系農区とも、小排水路における T-N、T-P および SS の濃度が高くなる傾向が見られた。開水路系の用水路を有する地域の幹線排水路では、低濃度である配水管理用水が、小排水路の水質濃度を希釈していることがわかった。用水路の形式が開水路からパイプラインへ変わる地域では、圃場排水が希釈されずに高濃度のまま流下するおそれがあることから、排水路の水質を保全するためには希釈水の確保が必要と考えられた。

キーワード：圃場整備、水田、河跡湖、水収支、水質

1. はじめに

北海道では、専門的な農業経営が行われている。たとえば、大規模水田地帯では、2015 年における道内の水田農家の経営面積は 9.1ha であり¹⁾、これは都府県の 4 倍に相当する。その一方で、農業者の高齢化等に伴う農家戸数の減少により、担い手への農地集積が急速に進行しており、経営のさらなる大規模化への対応が喫緊の課題となっている。近年では、その対応策として、圃場の大区画化や地下水位制御システム、用水路のパイプライン化等の整備が実施されている。こうした整備が行われた地域では、水稻直播栽培を導入し、さらに省力化を図るところもある。一方、開水路形式の用水路では、農業用水の一部は圃場を経由せずに、小用水路末端から排水路へ直接流出する。この流出水は「配水管理用水」といい、灌漑区域末端の圃場まで不足なく用水を供給するために必要なものである。圃場整備において、用水路のパイプライン化や用排水系統の再編が行われると、農区や灌漑区域における流出機構が変化すると予想される。整備の

前後での地域的水文環境の変化を、考え得る範囲で網羅的に示せば、次のようになる。

- ① 整備後に、直播栽培面積が拡大する場合がある。地下からの給水が可能になるために、直播栽培での圃場水管理が容易になることが要因のひとつである。
- ② ①が生じると、代かきをしない栽培方式の面積が拡大する場合がある。代かきをしない水田では、代かきをする水田に比べて作土の浸透性が大きい。この場合、圃場の用水量が増加する可能性がある。
- ③ ②のように作土の浸透性が大きい場合には、代かきをしない圃場での地下水位は、整備前に比べて高まる可能性がある。
- ④ 移植栽培のように、整備の前後で代かき等の土壌管理に変化がない場合であっても、整備後に地下からの給水を行うようになれば、圃場の地下水位の挙動は変化する。
- ⑤ 整備前に田越し灌漑を行っている圃場があれば、整備後には田越し灌漑がなくなり、圃場での用水量が

変化する可能性がある。

- ⑥ 支線・小用水路がパイプライン化されると、それらから灌漑区域への用水の流入量が減少する。パイプライン化される前は、送水損失水量等を含む用水量が小用水路に供給され、日内変動を有する圃場での取水量を満たしていた。これに対して、パイプライン化後は、支線用水路の灌漑区域に入ってくるのは圃場に実際に取水された水量だけである。
- ⑦ ⑥と同様に、パイプライン化される前には、圃場に取水されなかった用水が小用水路の末端から排水路に流入していたのに対して、パイプライン化後はこのような流入がなくなる。
- ⑧ ⑦によって排水路の流量が減少すると、地域の河跡湖や沼への供給水量が減少する。このことは、それらの湖沼の水位や水質、湖沼周辺の地下水位に影響を及ぼす可能性がある。
- ⑨ ⑦によって排水路の水位が低下すれば、排水路法面の乾燥が進む可能性がある。これは、さらに排水路法面での亀裂の発生につながる可能性がある。

上記のように、水田地帯では、圃場整備を契機として、水稻栽培方式の多様化が進むとともに、流出機構の変化により、水文環境や農地環境に影響が生じる可能性がある。農業用水は、国内の水資源利用量の3分の2を占めており²⁾、農業地域の水循環の大部分を占めるとともに、営農目的だけではなく、景観や水質等の水環境の保全や地下水の涵養等、多面的かつ公益的な機能を果たしてい

る³⁾。将来にわたって、地域の水環境を保全しながら、農業用水を安定的、効率的に利用するためには、圃場整備前後における農区および広域の水文環境を調査し、圃場や農区における水収支および負荷収支の特性を分析する必要がある。

そこで、本研究では、水田地帯における周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築をめざして、農区レベルおよび広域レベルの水文環境の調査を実施する。ここでは、令和元年度までの調査結果として、灌漑区域における水収支および水文環境と、圃場整備済みの農区（開水路系およびパイプライン系）および未整備農区における水収支および水文環境の概況について報告する。

2. 調査概要

2.1 広域調査

2.1.1 地区概要

広域レベルの水収支および水文環境を把握するために、美唄市に位置する灌漑区域を対象として、広域調査を実施した。観測地点の位置を図-1に示す。この灌漑区域では、平成25年度より、圃場整備が進められている。広域調査の対象地区面積は約1,100haであり、そのうち農地面積は約800haである。平成29年度までの圃場整備率は20%である。地元への聞き取りによると、整備事業地区内における1戸当たりの平均経営面積（水稻、転作を含む）は11haである。美唄市内の令和元年度の水稲作付面積は3,340ha⁴⁾であり、平成29年度における乾田直播栽

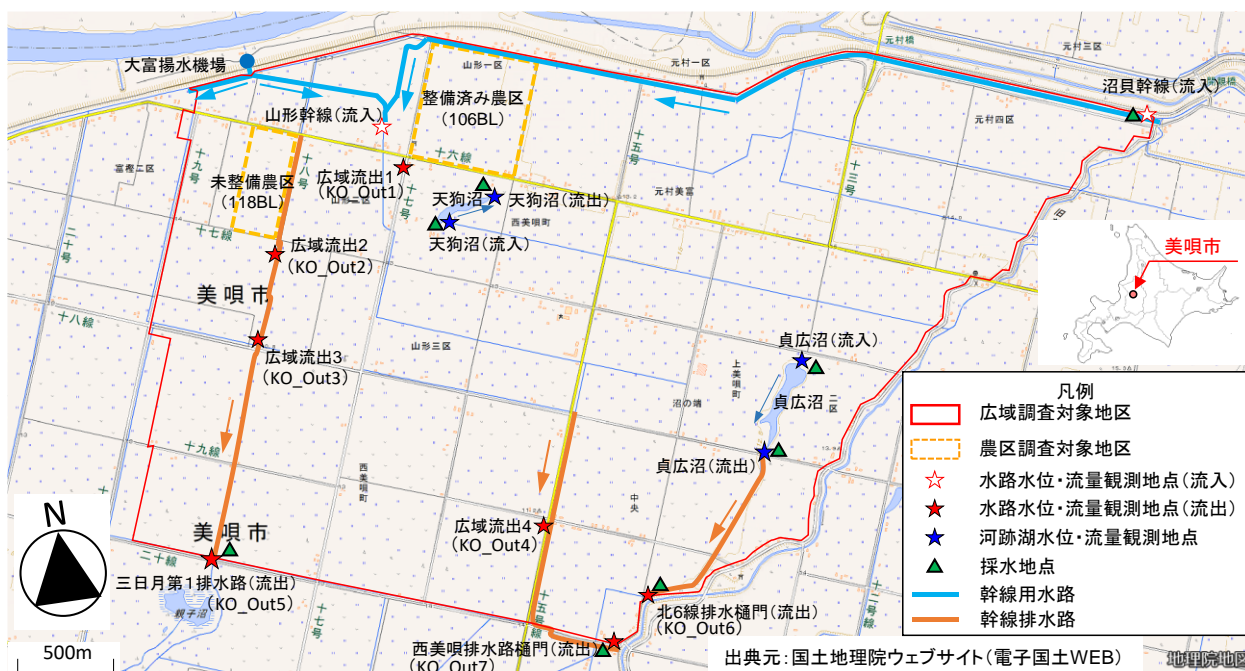


図-1 調査対象とした灌漑区域における観測地点の位置

培面積は188ha、湛水直播栽培面積は85haであった。

地区内の農業用水は、主に沼貝幹線用水路および大富揚水機場から供給される。大富揚水機場の取水量は、大富幹線用水路と山形幹線用水路に分水され、このうち、山形幹線用水路への分水量が対象灌漑区域へ流入する。

農地からの排水は中小の排水路を経由し、三日月第一排水路、北6線排水樋門、西美唄排水樋門等から地区外へ流出する。洪水時には、樋門の操作により流域変更が行われるが、平常時における流出経路はこれらの3地点が主な地点である。

地区内には、天狗沼（水面積：約8ha）と貞広沼（水面積：約20ha）の二つの河跡湖がある。どちらも周辺の土地利用は農地が主体である。天狗沼の周辺農地では、調査実施年度において、水稻、大豆が作付けされていた。沼への流入は、小排水路のほか、圃場排水が直接流入していたが、令和元年度に圃場整備工事が行われたことから、小排水路および圃場からの流入がなくなった。なお、沼からの流出口は、圃場整備前後とも変わらず、支線排水路に接続している。この接続先の排水路では、灌漑期間に堰上げが行われている。貞広沼では、排水路からの流入箇所は1つであり、下流口は排水路に接続している。

2.1.2 調査方法

対象地区内における水収支を把握するために、広域流入地点1箇所および広域流出地点3箇所に水位計を設置するとともに、定期観測として、流量観測（月1回程度）を実施した。この流量観測結果を用いてH-Q曲線を作成し、水位の観測データから灌漑期間における各地点の流量を推定した。さらに、対象区域内の水質状況を把握するため、これらの地点において、流量観測時に採水を行った。採水した試料については、室内でSS、T-N、T-P、CODなどの水質分析を行った。流量および水質の調査は、平成28年度から平成30年度まで行った。大富揚水機場から山形幹線用水路への分水量については、平成29年度および平成30年度に流量観測を行った。

河跡湖の水文環境を把握するため、二つの河跡湖の流入口および流出口の付近に水位計を設置し、湖面水位を観測するとともに、流量観測を月1回程度行った。この流量観測結果を用いてH-Q曲線を作成し、水位観測データから灌漑期間における各地点の流量を推定した。さらに、各河跡湖の流入口および流出口において、流量観測時に採水を行った。採水した試料については、室内でSS、T-N、T-P、CODなどの水質分析を行った。これらの流量

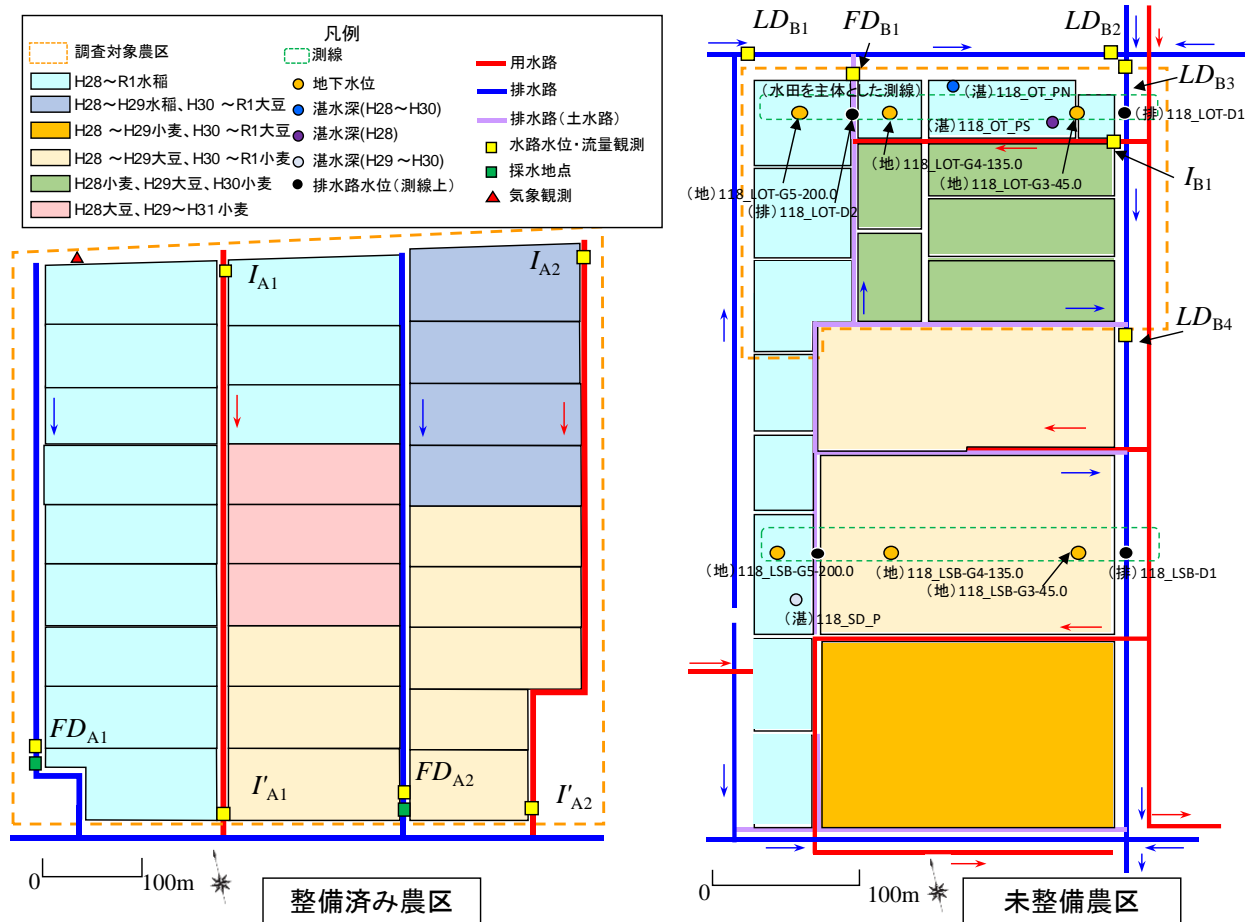


図-2 観測地点の位置（開水路系農区調査）

および水質の調査は、平成 28 年度から令和元年度までに行った。ただし、令和元年度では、天狗沼流入口における小排水路の流路が変更されたことから、この地点における流量観測および採水は行わなかった。

気象については、平成 28 年度から平成 30 年度まで、灌漑区域内 (図-2) に気象観測機器を設置し、雨量、気温、風向・風速、日射量、相対湿度、大気圧を観測した。観測期間は 5 月から 11 月までである。測定間隔は 20 分とした。令和元年度では、アメダス (美唄) のデータを使用した。

2. 2 開水路系農区の調査

2.2.1 地区概要

美唄市に位置する、圃場整備済みの開水路系農区および圃場整備が行われていない開水路系農区を対象として、調査を実施した (図-2)。未整備農区内の北側および西側は水田であり、その他は畑地 (小麦、大豆) となっている。水田一筆の面積は 0.3ha 程度である。水収支調査は、農区内の北側の圃場群 (面積は約 12ha) を対象とした。以下、この対象圃場群を「未整備農区」と呼ぶ。

農業用水の大部分は、支線用水路 (開水路) から小用水路 (開水路) を経由し、水田圃場へ取水される。小用水路の残水は、農区内の土水路を経由して、支線排水路へ流出する。この土水路では、小用水路の残水の流入地点より上流側において圃場からの浸透水が流れているが、その流量は残水量よりも極めて小さいことから、土水路末端における流量は小用水路末端からの残水量にほぼ等しいと考えた。また、未整備農区では、農業用水の一部が揚水機により供給されており、ポンプの運転費用を抑制するために過剰な取水は行われないと考え、小用水路末端からの流出水量をすべて配水管理用水とみなした。

農区内の一部の水田では、田越し灌漑が行われている。暗渠排水は、水閘の故障により開放されたままとなっており、集水渠から地下排水が 0.7L/s 程度流出している (バケツを用いた流量測定による)。農区内の耕作者数は 3 人であり、そのうち 2 人が水田圃場の耕作をしている。圃場の水管理操作は、各耕作者の判断により行われた。

平成 28 年度および平成 29 年度における整備済み農区の作付けは、水稻移植栽培が 16 筆、乾田直播栽培が 1 筆、湛水直播栽培が 2 筆、転作田が 11 筆であり、平成 30 年度では、水稻移植栽培が 12 筆、乾田直播栽培が 1 筆、湛水直播栽培が 2 筆、転作田が 15 筆であった。農業用水は、沼貝幹線用水路から、農区内の西側と東側に位置する用水路へ分水される。用水路は開水路形式であり、圃場へ取水されなかった残水 (配水管理用水) は農区外

へ流出する。圃場を通過した水は、農区内の西側と東側に位置する排水路を通じて、農区外へ流出する。

2.2.2 調査方法

各農区において、平成 28 年度から平成 30 年度までに水収支調査を行った。各農区における観測地点の位置を図-2 に示す。用水路および排水路の流量は、各年度の 5 月から 11 月までの期間に月 1 回程度の定期調査を行い計測した。各流量観測地点において H-Q 曲線を作成し、10 分間隔で観測した水位データを用いて、調査期間における流量をそれぞれ推定した。

各観測データを用いて、整備済み農区内への流入量 FI_A 、整備済み農区内の圃場取水量 I_A 、整備済み農区の小用水路末端からの流出量 I'_A 、整備済み農区内の圃場排水量 D_A を図-2 に示す記号を用いて、それぞれ (1) ~ (4) 式により算定した。

$$FI_A = I_{A1} + I_{A2} \quad (1)$$

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} - (I'_{A1} + I'_{A2}) \quad (2)$$

$$I'_A = I'_{A1} + I'_{A2} \quad (3)$$

$$D_A = FD_{A1} + FD_{A2} \quad (4)$$

ここで、 I_A 、 I'_A ：整備済み農区内の各小用水路上流端の流量、 I_{A1} 、 I_{A2} ：整備済み農区内の各小用水路末端の流量、 FD_{A1} 、 FD_{A2} ：整備済み農区内の各小排水路の支線排水路合流前の流量である。

同様に、未整備農区への流入量 FI_B 、未整備農区内の圃場取水量 I_B 、未整備農区からの小用水路末端からの流出量 I'_B 、未整備農区内の圃場排水量 D_B は、それぞれ (5) ~ (8) 式により算定した。

$$FI_B = I_{B1} \quad (5)$$

$$I_B = I_{B1} - I'_{B1} \quad (6)$$

$$I'_B = I'_{B1} \quad (7)$$

$$D_B = LD_{B2} - LD_{B1} + LD_{B4} - LD_{B3} - I'_{B1} \quad (8)$$

ここで、 LD_{B1} 、 LD_{B2} 、 LD_{B3} 、 LD_{B4} ：未整備農区の排水が流入する各支線排水路の流量、 I_{B1} ：未整備農区内の小用水路の流量、 I'_{B1} ：未整備農区内の土水路末端部の流量で

ある。

各農区への流入水量のうち、配水管理用水が占める割合（以下、「配水管理用水率」という）を R_A および R_B として、それぞれ(9)式および(10)式により算定した。

$$R_A = \frac{I'_{A1} + I'_{A2}}{FI_A} \quad (9)$$

$$R_B = \frac{I'_{B1}}{FI_B} \quad (10)$$

気象観測は、整備済み農区内において、水収支調査期間中に実施した。蒸発散量は、観測データを用いてペンマン法により推定し、作物係数を乗じて求めた。水稻の作物係数については、文献値から $K_c=1.05\sim 1.1$ とした⁵⁾。

未整備農区の水田および畑地を主体とするそれぞれの測線において、圃場の地下水位、土水路の水位、排水路水位を観測した。水位の観測期間は各年度の5月から10月までであり、測定頻度は10分間隔である。

また、未整備農区の支線排水路4箇所および整備済み農区の小排水路2箇所において、流量観測と同日に採水を行った。採水した試料については、室内でSS、T-N、T-P、CODなどの水質分析を行った。

このほか、集中観測として、平成28年度の代かき・田植え期間（5月13日～6月20日）において、整備済み農区の西側の小排水路下流部に自動採水器を設置し、6時間間

隔で連続採水を行った。採水した試料については、室内でSS、T-N、T-Pの分析を行った。

2.3 パイプライン系農区の調査

2.3.1 地区概要

空知郡中富良野町に位置する、圃場整備済みのパイプライン系農区を対象として、調査を実施した（図-3）。農区面積は約17haであり、16筆の圃場を有する。この農区では平成30年度に、大区画化およびパイプライン化、地下水制御システムの整備が行われた。各圃場への用水供給は、地表灌漑2ヶ所、地下灌漑1ヶ所から行える。各圃場では、集中管理孔により、地表または地下、あるいはその併用による用水供給が可能である。各圃場の排水は、地表排水2ヶ所、暗渠排水2ヶ所から行える。圃場内には、暗渠管（φ80～90mm、勾配1/1,000）が田面から0.80m～1.00mの深さに約10m間隔で埋設されている。疎水材は木材チップである。農区内の各圃場における耕作および水管理は、一人の農業者の判断により行われた。

2.3.2 調査方法

対象農区において、令和元年度に水収支調査を行った。観測地点の位置を図-3に示す。用水路および排水路の流量は、5月から11月までの期間に月1回程度の定期調査を行い、計測した。各流量観測地点においてH-Q曲線を作成し、10分間隔で観測した水位データを用いて、調査期間における流量をそれぞれ推定した。気象観測は、農



図-3 観測地点の位置（パイプライン系農区調査）

区内において、水収支調査期間中に実施した。蒸発散量は、開水路系農区と同様の方法により推定した。

各観測データを用いて、整備済み農区内への流入量 FI 、整備済み農区内の圃場排水量 D を図-3 に示す記号を用いて、それぞれ(11)および(12)式により算定した。

$$FI = I_1 A_1 + I_2 A_d \quad (11)$$

$$D = FD_1 + FD_2 \quad (12)$$

ここで、 I_1 ：移植栽培圃場の取水量、 I_2 ：乾田直播栽培圃場の取水量、 A_1 ：農区内の移植栽培面積、 A_d ：農区内の乾田直播栽培圃場面積、 FD_1 、 FD_2 ：農区内の各小排水路の流量である。

また、農区内の小排水路2箇所および圃場取水口1箇所において、流量観測と同日に採水を行った。このほか、集中観測として、令和元年度の5月12日～6月3日において、整備済み農区の西側の小排水路下流部に自動採水器を設置し、6時間間隔で連続採水を行った。いずれも採水した試料については、室内でSS、T-N、T-Pの分析を行った。

3. 水田地帯における水収支

3.1 幹線用水路および幹線排水路の流量

広域調査対象地区の定期調査における月ごとの水収支を図-4 に示す。ここでは、沼貝幹線用水路および山形幹線用水路の合計流量を流入量、三日月第一排水路、北6線排水樋門、西美咲排水路樋門の合計値を流出量とした。

平成30年度の灌漑期では、流入量に対する流出量の割合は、5月は55%、7月は66%となっていたほかは、流入量と流出量はほぼ同程度であった。流入量と流出量との差は、圃場における貯留変化、蒸発散量の推定誤差および地区外への浸透による流出により生じたと考えられる。整備済みの3圃場の調査結果では、浸透量の平均値は1.4～2.8mm/dであった。これらのことから、広域調査対象地区内における下方および横方向への浸透による流出量

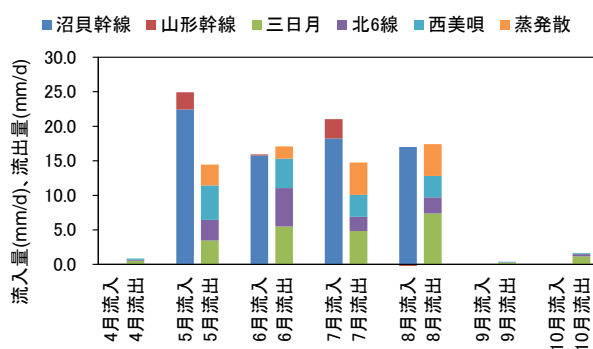


図-4 流入用水路と流出排水路における流量(平成30年度)

は小さいと考えられる。また、非灌漑期では、農業用水が供給されないことから、流出水量の値はきわめて小さかった。平成28年度および平成29年度においても同様の傾向がみられたことから、広域対象地区内では、幹線用水路からの農業用水の取水量や、圃場や用水路および排水路を経由した水量が大部分を占めると考えられる。

3.2 開水路系農区およびパイプライン系農区における水収支

平成29年度における開水路系農区の水収支を図-5 に示す。この農区内の各水量については、流量観測地点の下流において堰上げが行われていない観測日のデータをそれぞれ平均して算出した。未整備農区では、現地調査で観察した際、田越し灌漑が行われている圃場のうち、最下流に位置する圃場の落口から常に排水が生じていた。これは、水管理を省力化すると同時に、各圃場へ不足なく灌漑するために掛け流しが行われていたと考えられる。これに対して、整備済み農区では各圃場の水管理が独立したものとなることから、落口からの常時の排水はみられなかった。このように、整備済み農区では、圃場ごとの水管理が容易になり、田越し灌漑に伴う掛け流しが行われなくなることから、未整備農区と比べて取水量が減少したと考えられる。各農区における配水管理用水率は、平成28年度は整備済み農区では62%、未整備農区では66%であり、平成29年度は整備済み農区では37%、未整備農区では43%であり、どちらもほぼ同程度であった。年による配水管理用水率の差は、降雨状況の違いにより生じたと考えられる。

令和元年度におけるパイプライン系農区の水収支を図-6 に示す。農区内の各水量は、6～7月における圃場水収支を基に算出した。パイプライン系農区では、農区への取水量は農区内の圃場取水量の合計に等しく、圃場排水のみが支線排水路へ流出する水収支構造となっている。開水路系農区との大きな違いは、配水管理用水がない点である。各農区における水収支構造の実態を明らかにしたが、各農区における圃場取水量や降水量などの各要素の値については、水収支算定期間や調査期間における気象状況によって異なると考えられる。このことから、農区ごとの水収支特性を明らかにするには、さらなる分析が必要と考えられる。

3.3 農区内における地下水位の経時変化

圃場整備の前後における農区レベルの流出機構の変化要因として、パイプライン化や用排水系統の再編のほか、転作による水利用の変化の影響が考えられる。一般に、転作田の土壌は、水田と比べて乾燥し、亀裂が発達する

ことから、水田と転作では、圃場内の地下水位が異なる。このため、作付け品目が変わることにより、農区から周辺排水路への浸透量や農区内の貯留量などが変化し、流出機構に影響することが考えられる。聞き取りによれば、平成 28 年度における美唄農協管内の転作率は約 60%であった。今後も、同一農区内においてすべて水稲作が行われるケースの他、水稲作と転作が混在するケースや、水稲作から転作に変わるケースが想定される。こうした圃場整備前後における流出機構の違いを比較するには、

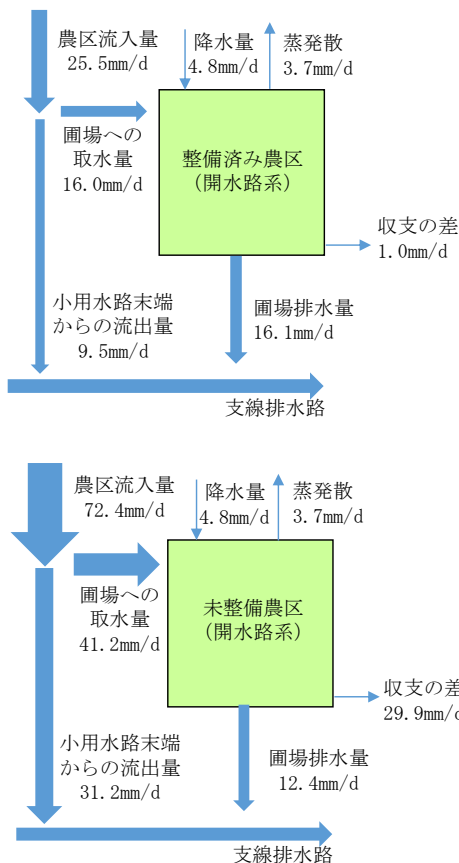


図-5 開水路系農区における水収支 (平成 29 年度)

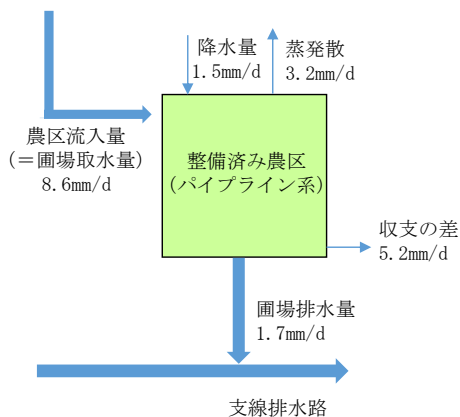


図-6 パイプライン系農区における水収支 (令和元年度)

水稲作および転作における圃場地下水位や、農区内の地下水位分布を把握する必要がある。そこで、農区内における水田または畑地を主体とした測線について、平成 30 年度における測線上の地下水位および水路水位の経時変化をそれぞれ図-7 および図-8 に示す。図中の地盤高は、それぞれの圃場東側端から 200m までの平均値である。圃場湛水位については、2 地点の平均値を用いた。

水田を主体とした測線についてみると、地下水位は、農区の西側に位置する 118_LOT_G5_200.0 と 118_LOT_G4_135.0 で概ね同様となり、118_LOT_G3_45.0 が低く、排水路との距離が近くなるにつれて値が低くなった (図-7)。一方、畑地を主体とした測線における畑地の地下水位の値は、水田主体の測線における地下水位と比べて、降雨に対して敏感に反応する傾向がみられた。

水田主体の測線における 3 地点の地下水位では、灌漑期および非灌漑期の平均値の差は 0.03~0.11m の範囲にあった。これに対して、畑地主体の測線における 3 地点の地下水位では、灌漑期および非灌漑期の平均値の差は 0.11~0.38m の範囲にあり、水田部分の地下水位の差が最も大きく、畑地部分における時期ごとの差はほとんどなかった。両測線の田面の標高値は、西側から排水路方向に低くなっており、その低下幅は畑地を主体とした測線の方が大きかった。田面からの地下水位の深さは、水田を主体とした測線と比較すると、畑地を主体とした測線の方が、灌漑期、非灌漑期とも排水路方向に低下する傾向がみられた。畑地では、土壌の亀裂が発達していると考えられる。これらの未整備農区内における地下水位の傾向は、調査を行った 3 年間とも同様にみられた。未整備農区では、令和元年度に圃場整備が行われたことから、今後、整備後の流出量および地下水位を観測し、農区からの流出機構の変化について比較を行う。

3. 4 河跡湖における流入水量および流出水量

圃場整備による水文環境の変化が、河跡湖の水収支に与える影響を検討するために、集水面積が異なる 2 つの河跡湖を対象として、流入水量および流出水量、湖面水位について調査を行った。

天狗沼および貞広沼における流入水量および流出水量を図-9 および図-10 に示す。また、両沼における湖面水位の経時変化をそれぞれ図-11 および図-12 に示す。過年度では、灌漑期の定期観測時における天狗沼への流入水量は 0.5~3L/s であったが、令和元年度では小排水路および圃場排水からの流入がなくなったことにより、ゼロとなった。令和元年度における天狗沼の流出口地点の灌漑期と非灌漑期の平均水位の差は約 0.30m であり、平成

30年度と同様に、灌漑期間中、流出口と接続する排水路の下流側付近に設置された堰板による影響を受けていたと考えられる。ただし、沼への流入水はなくなったことによる湖面水位への影響は、ここではみられなかった。

貞広沼についても、圃場排水および用水路の残水が流入していたことから、灌漑期および非灌漑期における平均水位の差は0.28mであった。どちらの沼においても、

ら、用排水系統の再編に伴い、流入水量が変化する可能性がある。今後、2つの沼の平均的な水深、圃場整備前後の流入水の状況を精査し、それぞれの沼における水収支特性を明らかにする必要がある。

4. 水田地帯における水質

4.1 幹線用水路および幹線排水路の水質

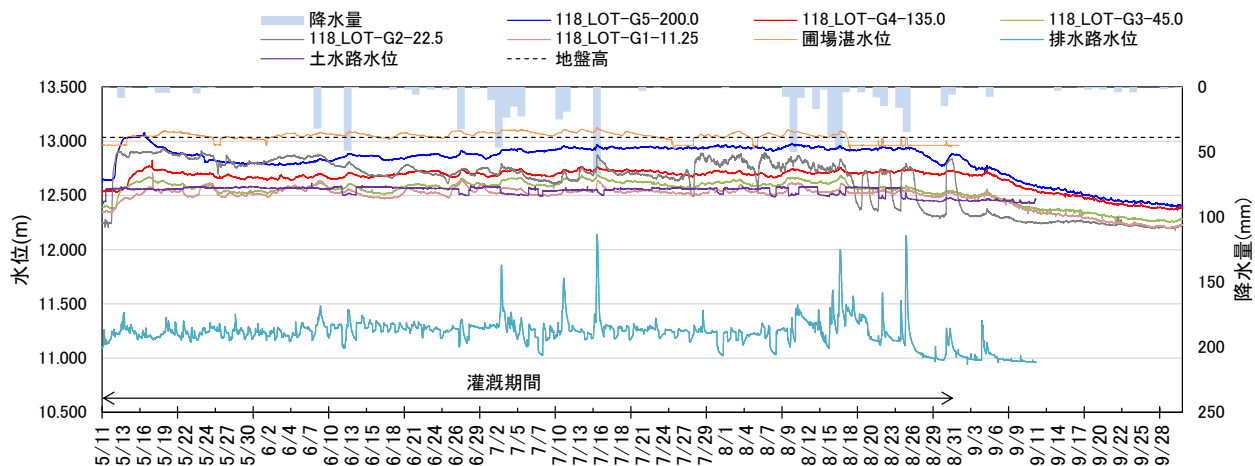


図-7 測線における地下水位および水路水位の経時変化 (平成30年度、水田主体)

それぞれの集水域内で圃場整備が進められていることか

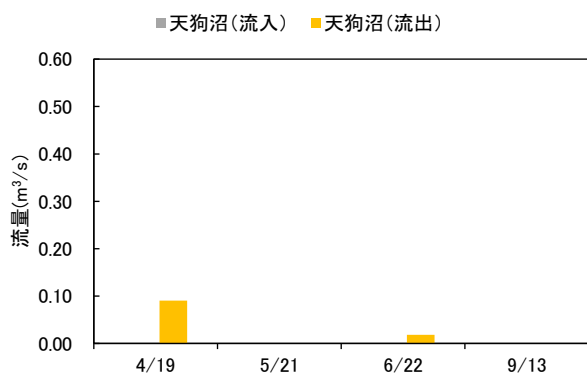


図-9 河跡湖における流入水量および流出水量 (令和元年度、天狗沼)

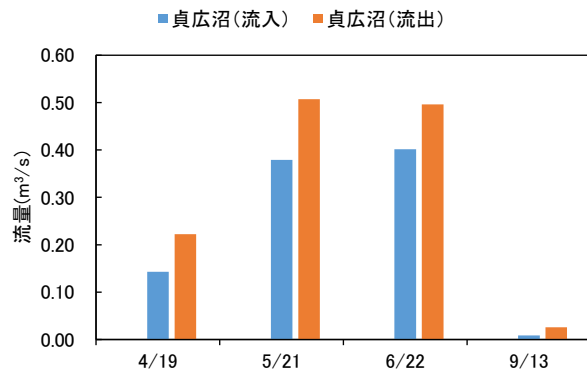


図-10 河跡湖における流入水量および流出水量 (令和元年度、貞広沼)

平成 30 年度における灌漑区域の流入用水路および流出排水路の水質濃度 (SS、T-N、T-P) を、それぞれ図-13～図-15 に示す。SS 濃度では、5 月と 11 月で上昇する傾向がみられた。5 月では、流入地点の用水路である沼貝幹線の値は 15mg/L であったのに対して、地区内の水田で代かきが多く行われていたことにより、排水路 (三日月第一、北 6 線、西美唄) における SS 濃度が 56～429mg/L まで上昇したと考えられる。T-N 濃度では、灌漑期の値は 0.7～5.1mg/L、非灌漑期では 2.2～6.0mg/L の範囲と、時期により差がみられた。T-P 濃度では、11 月以外は図-11 の SS 濃度と類似した傾向がみられた。

4.2 圃場整備済み農区における小排水路の水質

平成 30 年度における定期流量観測と同日における調査農区内の小排水路の水質濃度 (SS、T-N、T-P) を図-16～図-18 に示す。SS 濃度では、両地点とも 1～22 mg/L の範囲で推移した。T-N 濃度については、FD_{A1} 地点では 0.6～3.5mg/L、FD_{A2} 地点では 2.4～7.6 mg/L の範囲で推移しており、畑地面積が比較的多い FD_{A2} 地点で値が大きくなった。T-P 濃度については、両地点とも 0.02～0.16 mg/L の範囲で推移しており、大きな差は見られなかった。

4.3 河跡湖の水質

集水域内の水文環境の変化は、河跡湖の水質に反映されることから、2 つの河跡湖を対象として、水収支および負荷収支を調査している。対象とする河跡湖は、集水面積の規模、周辺土地利用形態等が異なる。それぞれの河跡湖の水質形成機構を明らかにし、圃場整備に伴う環境変化によって水質や水位等がどのように変化するかを推測することを目的としている。

令和元年度における河跡湖の流入地点および流出地点における水質濃度 (SS、T-N、T-P) を図-19～図-21 に示す。天狗沼については、流出点のデータのみをプロットした。

天狗沼についてみると、SS 濃度では、5 月、9 月、10 月において値が上昇したが、その他の月では 5～13mg/L の範囲であった。T-N 濃度では 0.75～2.4mg/L、T-P 濃度では 0.03～0.15mg/L の範囲でそれぞれ推移しており、大きな変動は見られなかった。

貞広沼については、SS 濃度では、4 月および 5 月で値が上昇したが、その他の月は 4～37mg/L の範囲であった。T-N 濃度では、10 月に値が上昇した他は、0.7～3.3mg/L

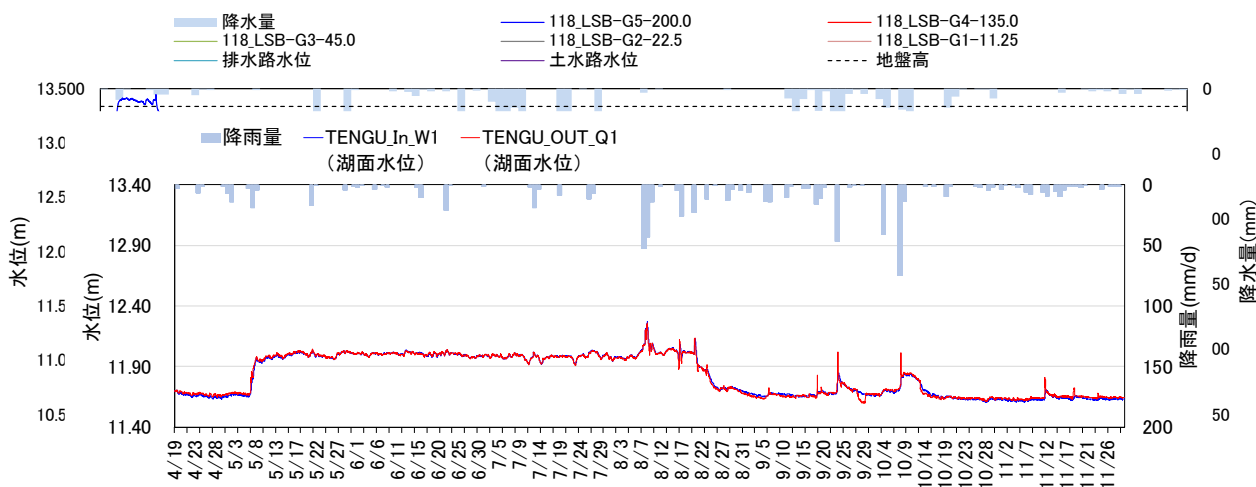


図-8 測線における地下水位および水路水位の経時変化 (平成 30 年度、畑地主体)

図-11 河跡湖における湖面水位の経時変化 (令和元年度、天狗沼)

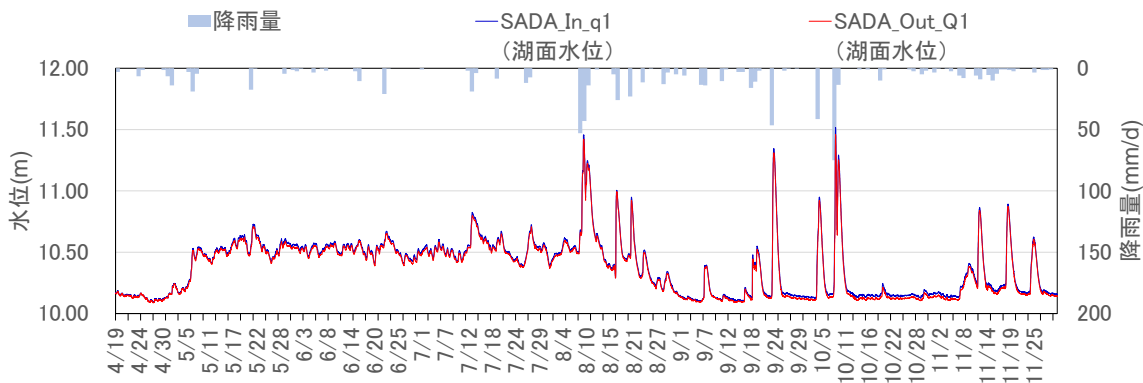


図-12 河跡湖における湖面水位の経時変化 (令和元年度、貞広沼)

の範囲であった。T-P 濃度では、4 月および 5 月に値が上昇したが、その他の月は 0.05~0.12mg/L の範囲であった。

今後、圃場整備に伴う流入量の変化による影響を検討するためには、水収支および水質データを蓄積し、河跡湖への流入負荷量および湖内の水質変化要因を明らかにする必要がある。

5. 配水管理用水による支線排水路の水質保全効果

整備済み農区内では、小用水路末端からの流出水 (I_{A1} 、 I_{A2}) と小排水路からの排水 (FD_{A1} 、 FD_{A2}) は、支線排水路で混合する。開水路形式の農区における配水管理用水の水質保全機能を評価するため、農区内および灌漑区域内の水質および流量について、以下に述べる。

5. 1 灌漑期初期における小排水路の水質濃度

ここでは、主に圃場排水が流入する小排水路における灌漑初期の水質濃度の変化について述べる。

平成 28 年度の灌漑期初期における、整備済み開水路系農区内の小排水路 (FD_{A1}) の T-N、T-P、SS の各水質濃度の推移を図-22 に示す。5 月 13 日から 5 月 30 日までの期間における平均濃度は、それぞれ 3.5mg/L、1.8mg/L、759mg/L であった。整備済み農区内の栽培管理を見ると、移植栽培では、5 月 14 日に代かき取水が行われた後、5 月 17 日に代かき、5 月 28 日に田植えが行われた。湛水直播栽培では、5 月 13 日に代かき取水、5 月 15 日に代かき、5 月 17 日に播種が行われ、乾田直播栽培では、5 月 10 日に播種および初期取水が行われた。図-22 では、5

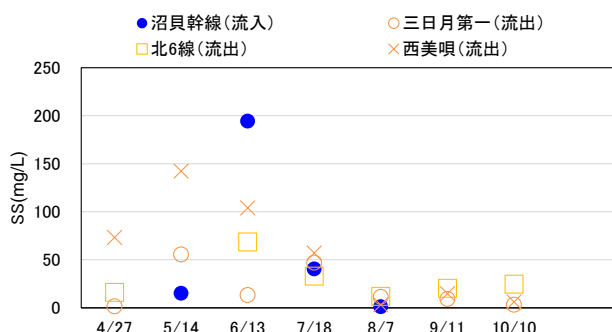


図-13 流入用水路と流出排水路における SS 濃度 (平成 30 年度)

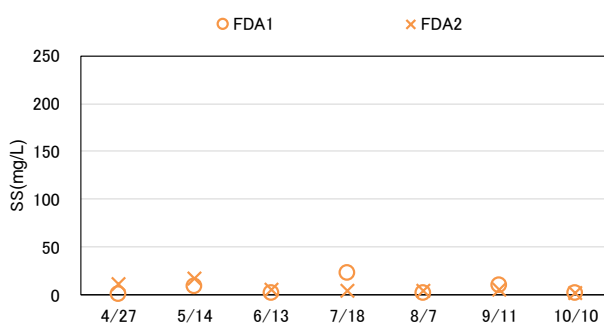


図-16 整備済み農区内の小排水路における SS 濃度 (平成 30 年度)

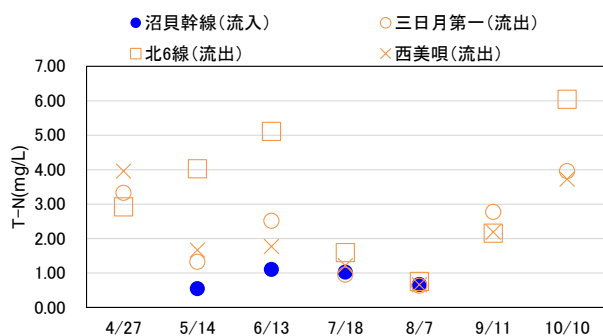


図-14 流入用水路と流出排水路における T-N 濃度 (平成 30 年度)

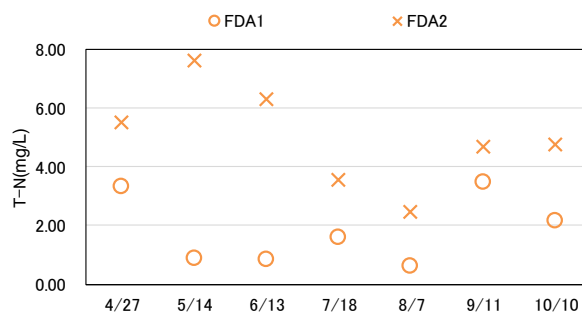


図-17 整備済み農区内の小排水路における T-N 濃度 (平成 30 年度)

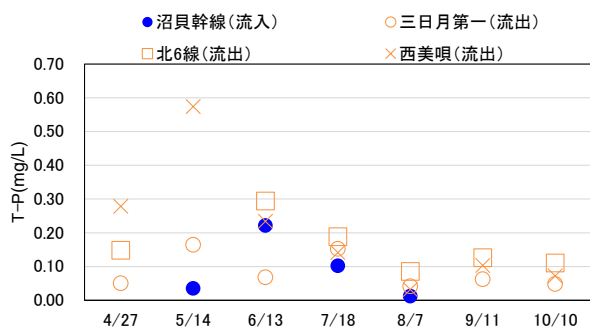


図-15 流入用水路と流出排水路における T-P 濃度 (平成 30 年度)

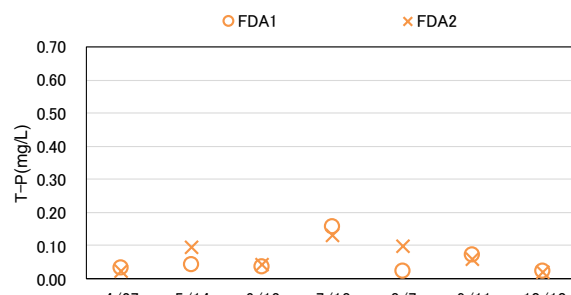


図-18 整備済み農区内の小排水路における T-P 濃度 (平成 30 年度)

月16～20日と5月25～28日において、すべての水質項目について濃度上昇のピークがみられた。これらは、代かきおよび田植え時の水管理により生じたと考えられる。代かき・田植え後の約3週間(5月29日～6月20日)における平均濃度は、それぞれ1.3mg/L、0.08mg/L、31mg/Lまで低下した。

令和元年度におけるパイプライン系農区内の小排水路(FD_1 および FD_2 の観測地点)のT-N濃度、T-P濃度、SS濃度を図-23に示す。代かき・田植えが行われる灌漑初期(5月12日～5月25日)における平均濃度は、それぞれ2.4mg/L、0.72mg/L、187mg/Lであった。農区内の水田では、5月14日～5月17日頃に代かきが、5月24日頃に田植えがそれぞれ行われたときに、水質濃度が上昇した。代かき・田植え後の5月25日～6月3日における平均濃度は、それぞれ2.1mg/L、0.07mg/L、25mg/Lまで低下した。

両農区とも、代かき・田植え時における水質濃度の上昇を確認できた。しかし、パイプライン系圃場と開水路系圃場では、水利用特性が異なることから、今後、各農区における小排水路の負荷量特性について、さらに分析する必要がある。

5.2 灌漑期間における灌漑区域内の水質濃度

平成29年度における灌漑区域内の幹線用水路(C地点)

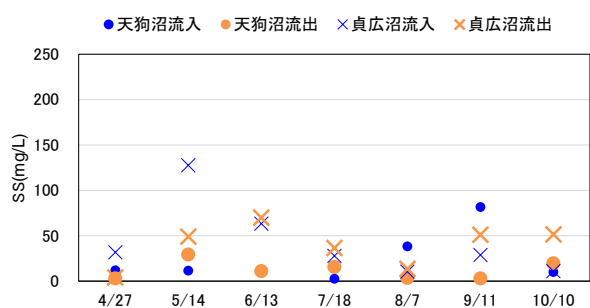


図-19 河跡湖におけるSS濃度 (平成30年度)

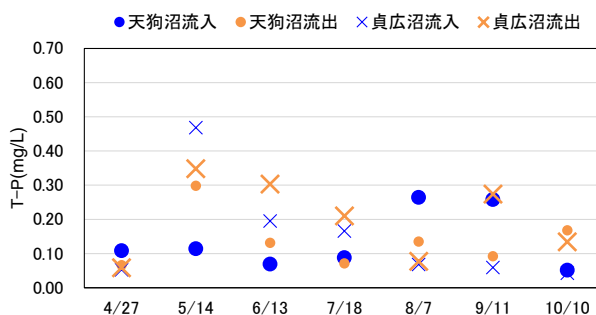


図-21 河跡湖におけるT-P濃度 (平成30年度)

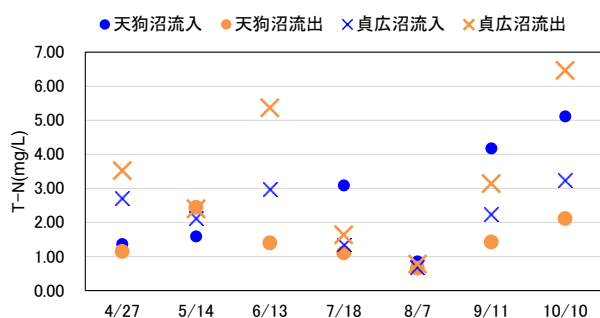


図-20 河跡湖におけるT-N濃度 (平成30年度)

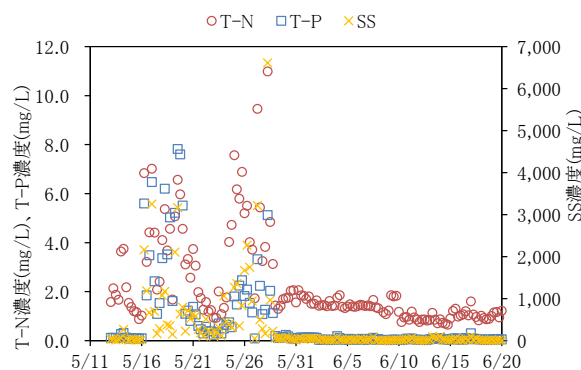


図-22 灌漑期初期における小排水路の水質濃度変化 (平成28年度、開水路系農区)

および幹線排水路(D、E、F地点)、小排水路(FD_{A1} および FD_{A2} の観測地点)のT-N濃度、T-P濃度、SS濃度を図-24に示す。灌漑区域内の用水路はコンクリート製であることから、調査農区の小用水路における水質濃度は、幹線用水路における値と同程度であると考えられる。

小排水路および幹線排水路における水質濃度を比べると、T-Nでは、調査期間を通じて、小排水路の方が幹線排水路よりも値が高くなる傾向が見られた。T-PおよびSSでは、T-Nと同様の傾向が5月に見られたが、その他については、両者とも同程度となる傾向が見られた。代かきに伴い圃場排水が高濃度となる5月では、いずれの水質項目についても、幹線排水路の値の方が低かった。このことから、灌漑区域内の用水路末端からの流出水(配水管理用水)が圃場排水を希釈し、水質保全に寄与していたと推察される。

5.3 配水管理用水による圃場排水の希釈効果

配水管理用水による圃場排水の希釈効果を評価するために、図-24中の平成29年5月18日の定期採水時の流量および水質のデータを用いて、T-N、T-P、SSのそれぞれについて、整備済み農区内の小排水路の排水(FD_{A1})と小水路の残水(I_{A1})が混合した後の支線排水路における水質濃度 G_L を(11)式により推定した。

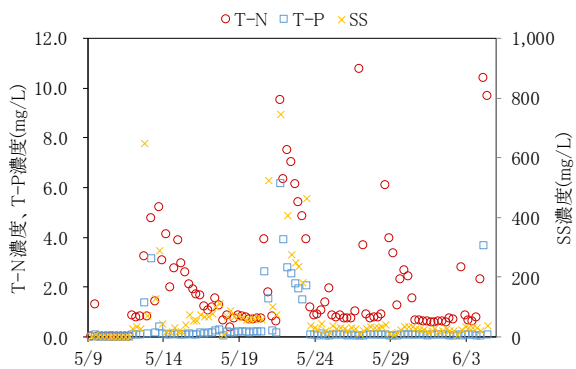


図-23 灌漑期初期における小排水路の水質濃度 (令和元年度、パイプライン系)

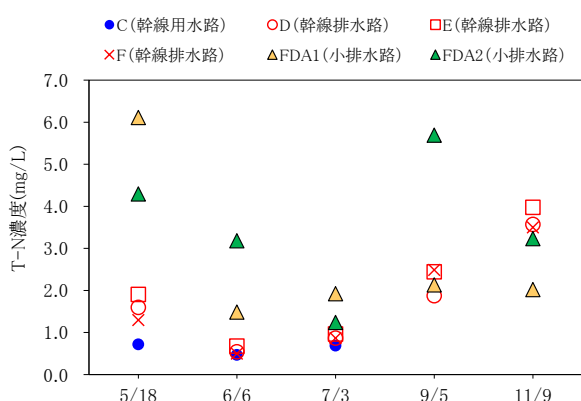


図-24 幹線水路および小排水路のT-N濃度 (平成29年度)

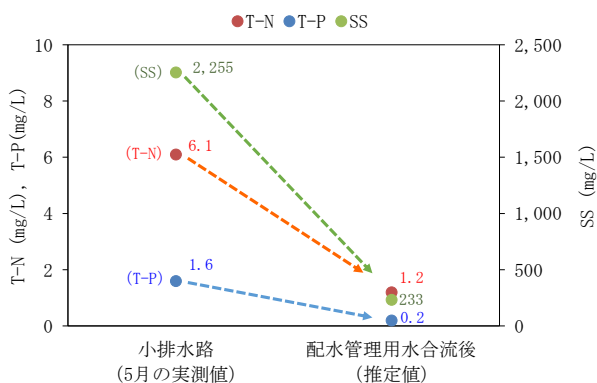


図-25 配水管理用水の混合後における水質濃度の推定結果 (平成29年度)

$$C_L = \frac{C_I I'_{A1} + C_{A1} FD_{A1}}{I'_{A1} + FD_{A1}} \quad (11)$$

ここで、 C_I ：農業用水の水質濃度、 C_{A1} ：小排水路での水質濃度、 I'_{A1} ：小用水路の残水量、 FD_{A1} ：小排水路の流量である。

各水質濃度の推定結果を図-25 に示す。灌漑期初期において、開水路系における用水路末端から流出する配水管理用水は、小排水路における代かき・田植え期間の高濃度の圃場排水を希釈し、8割から9割程度、これらの水質濃度を低下させていることがわかった。これらの推定値は、図-24 に示す平成29年5月18日の幹線排水路(D、E、F地点)の値に近いことから、計算結果は妥当であり、実態を反映していると考えられた。

用水路形式が開水路系からパイプライン系へ変わる地域では、配水管理用水が不要となることから、圃場排水が希釈されることなく濃度のまま流下するおそれがある。将来、パイプライン形式で整備された後も水質保全機能を保持するためには、地域条件に応じて適切な対策を検討することが望ましいと考えられる。

6. まとめ

北海道の水田地帯では、農家戸数の減少に伴い担い手への農地集積が急速に進行している。こうした経営の大規模化へ対応するために、圃場の大区画化や地下水水位制御システムの整備が実施されている。このような整備の進展に伴い、圃場の用排水管理が変化し、さらには農区や灌漑区域における流出機構が変化すると予想される。本研究では、水田地帯における周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築をめざして、圃場整備が現在進められている灌漑区域を対象として、広域レベルおよび農区レベルの水収支および水質の調査を実施した。令和元年度までの成果は、以下のとおりである。

灌漑区域における流入水量と流出水量とを比較した結果、灌漑期での流入量と流出量との差が小さく、対象灌漑区域内における下方浸透量は小さいことが示唆された。このことから、灌漑区域内の水収支を把握できたと考えられる。農区水収支を見ると、パイプライン系農区では、圃場排水のみが農区外へ流出するのに対し、開水路系農区では、配水管理用水および圃場排水が農区外へ流出していた。なお、配水管理用水率は、未整備農区および整備済み農区とも同程度であった。代かき・田植えの時期では、開水路系農区およびパイプライン系農区とも、小排水路におけるT-N、T-PおよびSSの濃度が高くなる傾向が見られた。開水路系の用水路を有する地域の幹線排水路では、低濃度である配水管理用水が、小排水路の水質濃度を希釈していると推察された。用水路の形式が開水路からパイプラインへ変わる地域では、圃場排水が希釈されずに高濃度のまま流下するおそれがあることから、排水路の水質を保全するためには希釈水の確保が必要と

考えられた。

今後、灌漑区域、各農区、河跡湖における水収支および水質のデータを蓄積する。また、それぞれの水収支を精査し、灌漑区域内における負荷流出機構および河跡湖における水質形成機構を明らかにする。これらをあわせて、河跡湖が点在する大規模水田地帯における水文環境保全対策を提案する。

参考文献

1) 北海道農政部：米に関する資料 [生産・価格・需要]、p.3、

2019

2) 国土交通省：平成30年版 日本の水資源の現況、p.6

3) 丸山利輔、中村良太、水谷正一、渡辺紹裕、黒田正治、豊田勝、荻野芳彦、中曾根英雄、三野徹：水利環境工学、朝倉書店、p.20、1998

4) 農林水産省：統計情報わがマチ・わがムラ美唄市基本データ、<http://www.machimura.maff.go.jp/machi/contents/01/215/index.html> (参照 2020.6.15)

5) 北海道土地改良設計技術協会：農業土木技術書翻訳シリーズ1、FAO 灌漑排水技術書、p.71、1986

16.3 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

16.3.2 大規模酪農地帯における効率的なふん尿スラリー調整技術の開発に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ
(資源保全チーム)

研究担当者：横川仁伸、横濱充宏、大友秀文、
中山博敬、田中稔、桑原淳

【要旨】

家畜ふん尿を好気性発酵により腐熟させる肥培灌漑施設では、施設を利用する農家ごとに曝気時間などの運転方法が異なる。本研究では、効率的な運転管理方法を明らかにすることを目的に、肥培灌漑施設の運転状況の現地調査および室内実験を行った。

曝気を行う調整槽の形状と容量が異なる5カ所の肥培灌漑施設での運転状況を比較したところ、曝気ポンプ稼働時間の最大値と最小値の比は約4で、ふん尿スラリーの水学的滞留日数の最大値と最小値の比が約2.5であり、施設によって運転方法が大きく異なっていた。調整槽中の固形物単位量当たりの総曝気量が大きいほど調整液のpHは高かった。この総曝気量が大きい施設でも調整槽内のスラリーpHは腐熟の簡易判定目安であるpH7.8～8.5の下限値程度にまでしか到達しておらず、曝気量不足が示唆された。一部の施設では1日当たりの曝気時間を短く設定しており、その理由の一つは調整槽開口部から地上部への泡の溢流を防止するためであることがわかった。2カ所の肥培灌漑施設で泡溢流とブローポンプによる曝気の時間的關係を日中の写真撮影により調査した結果からは、ブローポンプを含むすべての機器が稼働していなくても泡が溢流するとわかった。また、調整槽内部の泡発生状況を調査した結果、消泡機停止時に液面が上昇すると液面上の泡も上昇し、このことが泡溢流の要因であるとわかった。

室内試験においては、ふん尿スラリーを20℃および30℃に設定したバッチ試験の結果から、液温が20℃よりも30℃で有機物分解量が大きくなることを確認した。また、連続投入試験の結果から、今回使用した実験装置で液温30℃の条件下においては、単位易分解性有機物量当たりの日曝気量が $30\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 程度以上であれば酸化還元電位(ORP)をプラスに維持できることが明らかとなった。一方、臭気指数に着目した連続投入試験では、ORPをプラスに維持できなくても臭気が低下するまで腐熟することが示唆された。

キーワード：肥培灌漑、好気性発酵、曝気、pH、有機物分解量、酸化還元電位(ORP)、泡溢流

1. はじめに

北海道東部の大規模酪農地帯では、家畜ふん尿の有効活用と地域環境保全を目的とした国営環境保全型かんがい排水事業が実施されている。この事業で整備される施設の一つに肥培灌漑施設がある(図-1)。この施設では、ふん尿スラリーを管路移送するために家畜ふん尿に水を加えて流動性を高める。また、ふん尿スラリーを腐熟させるために空気を送り込み(以下、曝気と表記)、同時に攪拌する。配水調整槽に貯留された調整液(曝気処理されたふん尿スラリー)は肥料として圃場へ散布される。

曝気時間や腐熟の目安は過去に国土交通省北海道開発局が取りまとめた報告書(謝辞参照)に示されているが、実際の運転状況は多様である。その背景には、酪農業では牛乳の冷却、畜舎換気、ふん尿処理など、多くのエネ

ルギーを消費しており、近年の電力価格上昇などにより経営収支が悪化する中、酪農家が経費削減のために好気性発酵に費やすエネルギーを節約していることがある。また、肥培灌漑施設には消泡機が整備されており、曝気と同時に消泡機が稼働するように設定されているが(図-2、3)、発酵時に発生する泡が調整槽開口部から地上へ

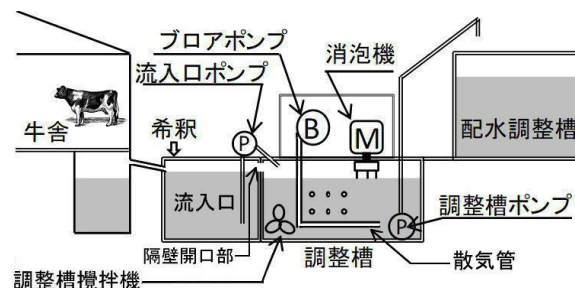


図-1 肥培灌漑施設の概要

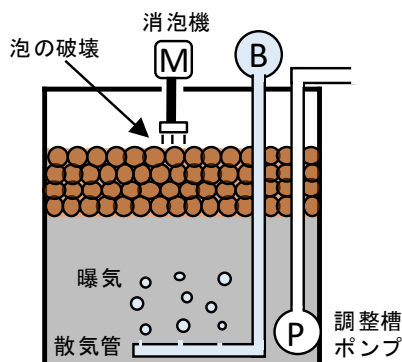


図-2 調整槽内での消泡のイメージ



図-3 稼働中の消泡機

溢流することがあり、その原因が明らかではないため曝気時間を過度に短くするなどの不適切な対策を行っている場合がある。不適切な曝気処理を行うと、調整液の腐熟が進まず臭気が低下しないため、周辺環境への影響が懸念される。

そこで、本研究では、良好な腐熟を維持しながら効率的にふん尿を処理するための運転方法およびシステム改善内容を提示するため、下記の項目を実施する。

- ① 肥培灌漑施設の形状別運転状況と調整液性状の関係解明
- ② 室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明
- ③ 肥培灌漑施設からの泡流出抑制技術の開発
- ④ 現地施設を用いた効率的なふん尿調整方法の検証
- ⑤ 省エネルギー型ふん尿スラリー調整システムの提案

これまで①を目的として、実際に稼働している肥培灌漑施設での運転状況調査を、②を目的として、室内試験装置によるバッチ試験および連続投入試験を行った。また現地施設において、③を目的として、調整槽開口部から地上部への泡溢流時の施設稼働状況調査を、④を目的として、冬期の曝気時間を夏期の2倍に延長し、調整槽液温の変化を調査した。

2. 肥培灌漑施設の形状別運転状況と調整液性状の関係解明

2.1 目的

近年建設されている肥培灌漑施設は、調整槽形状が四

角形または八角形である。そこで、本章では、肥培灌漑施設の形状別運転状況を明らかにし、また、各施設の運転状況と調整液性状の関係を検討する。

2.2 方法

2.2.1 調査対象施設の概要

表-1 に調査対象施設の概要を示す。調整槽の形状は八角形が2施設、四角形が3施設である。施設E、Fは調整槽容量が大きいため、曝気ポンプはそれぞれ2台設置されている。調査期間中の調整液貯留量は、調整液移送ポンプの稼働開始設定水位から算出した。

2.2.2 曝気ポンプ流量測定および稼働時間算出

曝気ポンプの流量測定は、曝気ポンプ吸い込み口にエア用超音波流量計（TRZ100B、愛知時計電機）を取り付けて行った（図-4）。超音波流量計は1台しかないため、5箇所の施設に順次取り付け、短いところでは約10分、長いところでは約3時間、データを取得した。この測定を2018年1～2月に実施した。計測データは、小型データロガーに10秒インターバルで記録した。データから得られた平均の流量は標準状態（0℃、1気圧）に換算して示した（表-2、表-3）。曝気ポンプの稼働時間は、タイマーで設定されている稼働開始時間および終了時間から算出した。

表-1 調査対象施設の概要

施設記号	調整槽形状	調整液貯留量 (m ³)	曝気ポンプ数 (台)
A	八角形	346	1
B	八角形	251	1
D	四角形	206	1
E	四角形	543	2
F	四角形	670	2



図-4 曝気ポンプの流量測定

2.2.3 ふん尿スラリー投入量および調整液性状測定

調整槽へのふん尿スラリー投入量は、1分ごとに測定した調整槽水位を用いて計算した水位上昇速度から推定した。計算に用いた水位データは、2017年3月～2018年2月に計測し、各施設の運転状況が安定している複数

日を抽出した。抽出数は、最も少ない施設で14日分、最も多い施設で30日分である。調整液は2017年8月～2018年3月に月1回サンプリングを行い、pH（ガラス電極法）および固形物含有量（105℃、24時間乾燥）を測定した。

2.3 結果および考察

表-2 に曝気ポンプの運転時流量およびふん尿スラリー1m³当たりの曝気運転時流量を示す。調整液貯留量の違いにより曝気ポンプの能力および台数が異なるが、ふん尿スラリー1m³当たりの曝気運転時流量は最大と最小の比が約1.3であり、大差はなかった。

表-3 に曝気ポンプ稼働時間およびふん尿スラリーの水理的滞留日数を示す。曝気ポンプは間断運転している。ここで示す曝気ポンプ稼働時間は、1日の運転時間の合計である。曝気ポンプ稼働時間は最も長い施設Bで8.25h・d⁻¹、最も短い施設Aで2.00h・d⁻¹であり、最大と最小の比が約4であった。ふん尿スラリー投入量と調整液貯留量から求めたふん尿スラリーの水理的滞留日数は、最も長い施設Aで37.2日、最も短い施設Bで14.7日と最大と最小の比が約2.5であった。このように、施設によって運転方法が大きく異なることが明らかとなった。

表-2 曝気ポンプ運転時流量

施設記号	曝気ポンプ 運転時流量 (m ³ ・h ⁻¹)	ふん尿スラリー1m ³ 当たり 曝気運転時流量 (m ³ ・m ⁻³ ・h ⁻¹)
A	213	0.62
B	149	0.59
D	157	0.76
E	176(No.1) 171(No.2)	0.64
F	261(No.1) 259(No.2)	0.78

表-3 曝気ポンプ稼働時間およびふん尿スラリーの水理的滞留日数

施設記号	日当たり曝気 ポンプ稼働時間 (h・d ⁻¹)	日当たり曝気 積算流量 (m ³ ・d ⁻¹)	日当たりふん尿 スラリー投入量 (m ³ ・d ⁻¹)	水理的 滞留日数 (d)
A	2.00	426	9.3	37.2
B	8.25	1229	17.1	14.7
D	3.25	510	11.6	17.8
E	2.75(No.1) 2.25(No.2)	869	17.0	31.9
F	3.00(No.1) 3.00(No.2)	1560	23.8	28.2

次に、調整槽中にある固形物の単位量当たりの総曝気量とpHを図-5に示す。単位固形物量当たりの総曝気量とは、日当たり曝気量(m³・d⁻¹)に水理的滞留日数(d)を乗じ、調整槽中の固形物量で除した値である。施設B、Eでは調整槽の攪拌に不具合が生じていたため、両施設のデータは除外した。好気性発酵では、腐熟が進行すると、

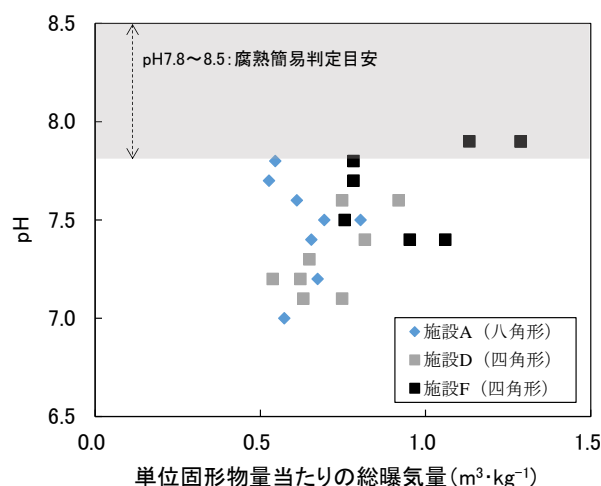


図-5 単位固形物量当たりの総曝気量とpHの関係

有機物の分解により生成されるNH₃によってpHが上昇すると考えられる¹⁾。図-5では、単位固形物量当たりの総曝気量が大きいほどpHが高いが、最もpHが高い調整液でも、腐熟の簡易判定目安であるpH7.8~8.5の下限値付近にとどまっておき、曝気量不足が示唆された。

なお、曝気量と有機物の分解の関係を見るのであれば、投入スラリーと調整液の固形分含有量の差を曝気量で除すという方法があるが、流入口から採取したふん尿スラリー固形物含有量は採取月によって変動が大きく、有機物分解量の誤差が大きくなると考え、その方法を採用できなかった。流入口のふん尿スラリー固形物含有量が変動する要因の一つは、流入口での希釈水の投入操作が手動であり、希釈水量が日々一定ではないためと考えられる。

3. 室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明

3.1 バッチ試験

3.1.1 目的

肥培灌漑施設でふん尿スラリーを好気性発酵で処理する場合、曝気量、曝気時間、ふん尿スラリー中の固形物濃度などを調整することができる。また、好気性発酵では発熱が伴うため、発熱による液温の変化は微生物の活動に影響を与えると考えられる。そこで本章では、基礎的実験として、ふん尿スラリーバッチ試験装置を用いた室内実験を行い、液温とふん尿スラリー固形物濃度の違いがふん尿スラリー中の有機物分解に及ぼす影響を検討する。

3.1.2 方法

図-6に室内実験装置の概要を、図-7に実験状況を、表-4に設定条件を示す。使用した未曝気ふん尿スラリーは、現地調査を実施している肥培灌漑施設の流入口

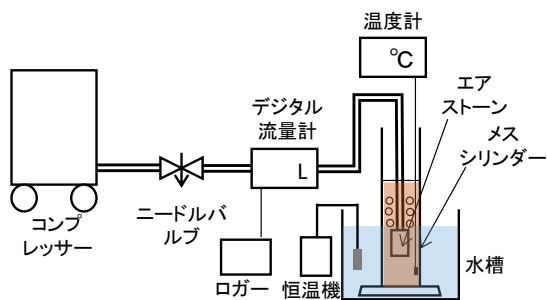


図-6 室内実験装置

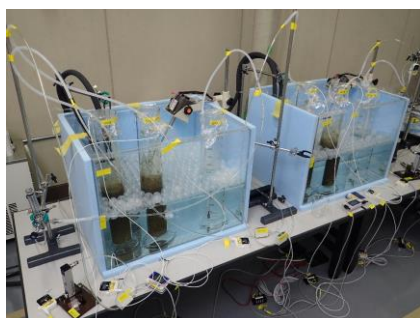


図-7 実験状況

表-4 設定条件

試験区名	液温 (°C)	TS濃度 (%)	曝気流量 (L・min ⁻¹)	曝気時間 (h・d ⁻¹)	ふん尿スラリー量(ml)
20TS4_24h	20	4	0.12	24	1,000
20TS7_24h		7			
30TS4_24h	30	4			
30TS7_24h		7			

より2017年9月26日に採取した。全固形物(TS)濃度は7.0%であった。実験に供した未曝気ふん尿スラリーの濃度は7%と4%である。4%への希釈には蒸留水を用いた。ふん尿スラリーの希釈倍率とTS濃度との関係は、既往の文献²⁾によると2倍希釈でTS濃度が約6%、3倍希釈で約4%と述べられており、これを参考に上記のTS濃度を決定した。実験では、ふん尿スラリー1000mlを2000mlメスシリンダーに投入し、このメスシリンダーは水温を20°Cおよび30°Cに制御した水槽内に静置した。メスシリンダーを水槽に静置した理由は、発酵熱による液温変化を抑えることでふん尿スラリーの温度を一定に保持するとともに、液温条件を2通りに設定することで、有機物の分解と液温との関係を検討するためである。曝気は、メスシリンダー内に配置した観賞魚用エアストーンからの送気で常時行った。曝気流量は、メスシリンダーから泡が吹きこぼれない程度の約0.12L・min⁻¹とした。曝気流量はデジタル流量計で測定し、1分毎に小型データロガーで記録して、それを標準状態(0°C、1気圧)に換算した(表-5)。液温は5分毎にロガー付き温度計で記録した。

実験期間は2017年10月5日～21日の17日間である。

曝気開始時および曝気終了時にふん尿スラリー中のTS量と有機物含量を測定した。TS量はスラリーを105°Cで24時間乾燥した後測定した。また、このTSをさらに550°Cで5時間燃焼して強熱減量(VS)を求め、この値を有機物量とした。実験期間中は1日1回、臭気センサー(畜環研式ニオイセンサ、東京デオドラント(株))で臭気指数を測定した後、一時的に送気を停止し、ガラス棒でメスシリンダー内のふん尿を攪拌し、水素イオン指数(pH)、酸化還元電位(ORP)、電気伝導度(EC)を測定した。

3.1.3 結果

3.1.3.1 曝気量および液温

表-5に曝気流量および液温を示す。各試験区とも曝気流量は安定しており、試験期間中の曝気量合計は2600～2700L程度となった。

ふん尿スラリーの液温は概ね設定した温度で推移した。

表-5 曝気流量および液温

試験区名	曝気流量 ^(※) (L・min ⁻¹)	曝気量合計 (L)	液温 ^(※) (°C)
20TS4_24h	0.12±0.02	2699	19.8±0.1
20TS7_24h	0.12±0.03	2717	19.9±0.1
30TS4_24h	0.12±0.02	2650	30.3±0.1
30TS7_24h	0.12±0.02	2641	30.3±0.1

※: 平均値±標準偏差

3.1.3.2 ORP、pH、EC

図-8にORPの推移を示す。ORPは溶液の酸化力、還元力の強さを表す値で好氣的状態では電位が高く、嫌氣的状態では電位が低い³⁾。TS4%の両区では曝気開始後3日目までORPが低下し、その後-400mV程度で推移した後9～10日目から上昇し始め、30TS4_24h区では13日目以降に20TS4_24h区よりも大きく上昇した。一方TS7%の両区

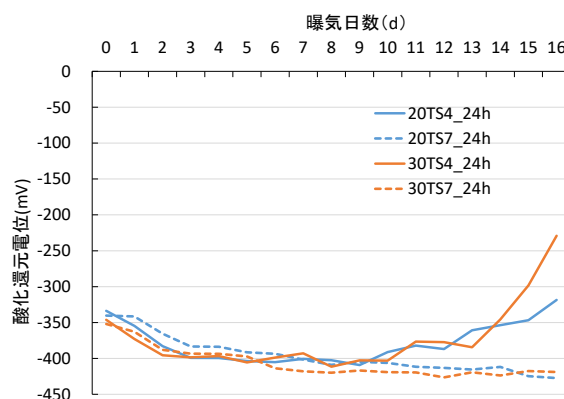


図-8 酸化還元電位 (ORP) の推移

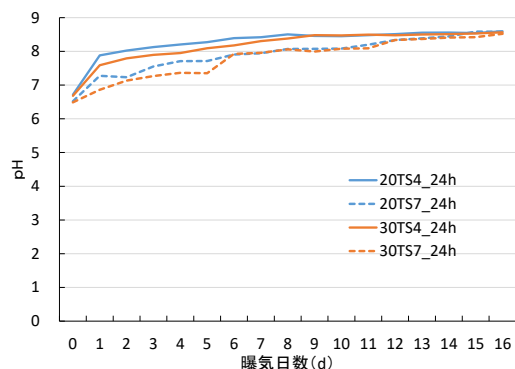


図-9 pHの推移

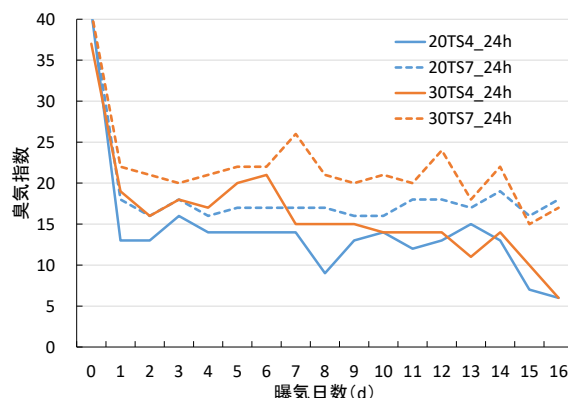


図-11 臭気指数の推移

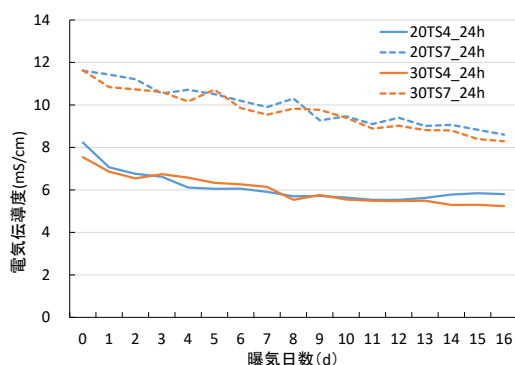


図-10 電気伝導度 (EC) の推移

では試験開始終了時まで、ORP は緩やかに低下し続けた。

図-9 に pH の推移を示す。試験開始時の pH は TS4% の両区で 6.5、TS7% の両区で 6.7 であり、曝気開始後にはすべての試験区で pH が上昇し、曝気開始後 8~9 日目には TS4% の両区で pH が約 8.5 に達した後、概ね一定の値で推移した。TS7% の両区では TS4% の両区より緩やかに上昇し、曝気開始 15~16 日目に約 8.5 となった。

図-10 に EC の推移を示す。EC は溶液中の電解質の総量を表す指標であり³⁾、EC と乾物率から肥料成分含有率を推定できる⁴⁾ ため、肥料成分の変化の目安として計測した。TS4% の両区では曝気開始後 8 日目まで徐々に低下した後、概ね一定の値で推移した。一方 TS7% の両区では試験終了時まで値は低下し続けた。

3.1.3.3 TS量および有機物含量

表-6 に TS 量、有機物含量、有機物減少量を示す。有機物減少量が $0.4\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$ と最も大きかったのは 30TS4_24h 区であり、逆に $0.1\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$ と最も小さかったのは 20TS7_24h 区であった。温度の影響を見るため、20TS4_24h 区と 30TS4_24h 区、20TS7_24h 区と 30TS7_24h 区をそれぞれ比較すると、温度が高い試験区での有機物減少量が大きかった。また、ふん尿スラリーの濃度の影

表-6 TS量および有機物含量

試験区名	TS量 ($\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$)		有機物含量 ($\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$)		有機物減少量 ($\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$)
	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気16日目)	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気16日目)	
20TS4_24h	3.9	3.7	3.3	3.1	0.2
20TS7_24h	6.7	6.6	5.6	5.5	0.1
30TS4_24h	3.9	3.5	3.3	2.9	0.4
30TS7_24h	6.7	6.5	5.6	5.3	0.3

表-7 臭気強度と臭気指数の関係

臭気強度	内容	臭気指数
0	無臭	—
1	やっと感知できるにおい(検知閾値濃度)	—
2	何のにおいかわかる弱におい(認知閾値濃度)	—
(2.5)	(2と3の中間)	11
3	楽に感知できるにおい	16
(3.5)	(3と4の中間)	20
4	強いにおい	—
5	強烈なにおい	—

響を見るため、20TS4_24h区と20TS7_24h区、30TS4_24h区と30TS7_24h区をそれぞれ比較すると、TSが小さい試験区での有機物減少量が大きかった。

3.1.3.4 臭気指数

図-11 に臭気指数の推移を示す。なお、測定に用いた臭気センサーの測定上限が臭気指数 40 までとなっており、曝気開始時の一部の試験区では臭気指数が 40 を超えていた。臭気指数規制ガイドライン⁵⁾ によると、6 段階臭気強度表示法による臭気強度と養牛業における臭気指数の関係は表-7 のとおりである。曝気開始前のふん尿スラリーはすべての試験区において臭気指数が 35 以上となっていた。曝気開始後 1 日目には臭気指数が大きく低下したものの 30TS7_24h 区では臭気指数が 22 を示し「強いにおい」であった。次いで 30TS4_24h 区で 19、20TS7_24h 区で 18 を示し、「楽に感知できるにおい」であった。なお、20TS7_24h 区では臭気指数が 16 以上で推移したものの、30TS4_24h 区では徐々に低下し、試験終了時には臭気指数が 6 となり、においが大きく低下した。

また 20TS4_24h 区は曝気開始後 1 日目の臭気指数が 13 を示し、その後も 16 以下で推移し、試験終了時には臭気指数が 6 となった。

3.1.4 考察

ORPは、TS7%の両区では試験終了まで緩やかに低下し続けたものの、TS4%の両区では曝気開始後10日目以降に上昇に転じた。すなわち、TS4%の両区では9～10日目までに好氣的分解がある程度まで進み、その後、酸素の供給量が消費量よりも多くなったと考えられる。

pHはTS4%の両区において、曝気開始後8～9日目までに徐々に上昇した後、概ね一定の値で推移した。また、ECはTS4%の両区において、曝気開始後8日目まで徐々に低下した後、概ね一定の値で推移した。すなわち、上述のORPが上昇に転じた日数と同じ時期に値が一定となっている。

実験開始時と終了時の測定結果から求めた有機物減少量は、試験開始時のTS量が同じ場合、温度が高い試験区で大きいことが明らかとなった。すなわち、温度を高くすることで腐熟が早く進むということが確認された。また、2つの温度条件ともに、TS量の小さい区の方が、有機物減少量が大きかった。臭気指数は、TS量が大きいふん尿スラリーでは大きい値となり、においの強い状態が継続する。TS量が小さいふん尿スラリーでは小さい値を示し、曝気日数の経過に伴うにおいの低下が顕著であることが明らかになった。

3.2 連続投入試験

3.2.1 目的

乳牛が牛舎で日々排泄するふん尿は、肥培灌漑施設の流入口に移送されて希釈された後、調整槽に流入して曝気される。調整槽内の曝気液は、液面が設定上限値の水位を超えると調整液移送ポンプが稼働して配水調整槽へ汲み出される。本章では、この調整槽を模擬した室内実験装置を用い、曝気強度の違いがふん尿スラリー性状および臭気へ及ぼす効果について検討する。

3.2.2 方法

3.2.2.1 ORPを指標とする腐熟判定

図-12に実験装置の概要を、図-13に実験状況を、表-8に設定条件を示す。実験開始時のステンレス容器内のふん尿スラリーは28Lとした。このふん尿スラリーは、図-12の実験装置を用いて4つのステンレス容器内で20日間以上曝気を行い、ORPが160～205mVに達したものをすべて混合した後、4つのステンレス容器に均等に分けたものである。実験開始時のTS濃度は2.8%である。ステンレス容器への未曝気ふん尿スラリー投入手順は、1

日1回、ステンレス容器内のふん尿スラリーを2L汲み出した後、TS4%に調整した未曝気ふん尿スラリーを2L投入することとした。試験区は、曝気量を0.2、0.8、1.4、2.0L・min⁻¹に設定した4区とした。曝気時間はいずれの試験区も24h・d⁻¹とした。液温は常に30℃を保つようにした。使用したふん尿スラリーは、すべて同一の肥培灌漑施設の流入口から採取したものである。実験期間は2019年1月22日～2月20日の30日間である。

ステンレス容器内のふん尿スラリーの性状を確認するため、pHおよびORPの計測を、毎日、未曝気ふん尿スラリーの投入前と投入後に実施した。これは、ふん尿スラリーの腐熟の過程で生成されるNH₃によってpHが上昇すると考えられること¹⁾と、ORPが好氣的状態では電位が高くなること³⁾からである。

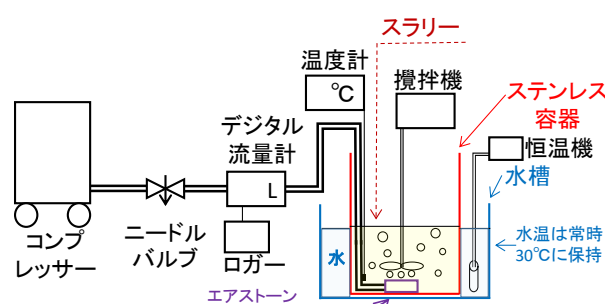


図-12 連続投入実験装置の概要



図-13 実験状況

表-8 設定条件

試験区名	曝気強度 (L・min ⁻¹)	曝気時間 (h・d ⁻¹)	液温 (°C)	スラリー量 (L)	汲み出し・投入量 (L・d ⁻¹)
R30_200ml	0.2	24	30	28	2
R30_800ml	0.8				
R30_1400ml	1.4				
R30_2000ml	2.0				

3.2.2.2 臭気指数を指標とする腐熟判定

図-12に実験装置の概要を、また、表-9に設定条件を示す。事前に27日間の曝気処理を行ったスラリーを容器内に28L投入し、1日1回、2Lのスラリーを汲み出した後、全固形物濃度(TS)を4%に調整した未曝気のスラリー2Lを投入した。R30_No1区は曝気を行わず、他の試験区では曝気強度を $3.0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ とし、試験区毎に1日当たり2、4、8 $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ の連続曝気を行う設定とした。

ステンレス容器内のスラリーの性状を確認するため、酸化還元電位(ORP)を1日1回、当日の曝気の終了前に測定した。

臭気の測定は5日毎に実施した。測定状況を図-14に示す。水温を 25°C 程度に保った水槽内に静置した容量5Lのガラス容器に畜産研式ニオイセンサ、外気吸気用のチューブ、温度計を接続している。畜産研式ニオイセンサは、(財)畜産環境整備機構畜産環境技術研究所が市販のニオイセンサを改良し畜産臭の臭気指数を表示できるようにしたものである⁶⁾。測定手順は以下の通りである。測定日に汲み出したスラリー2Lの一部および投入用スラリーを 20°C に設定した恒温器内で約3時間保温する。その後、測定直前にスラリー50gをプラスチック容器に移してガラス容器内に静置し、速やかにガラス容器の蓋を閉め、5分後の臭気指数を記録する。

表-9 曝気実験の設定条件

試験区名	液温(°C)	曝気強度(L \cdot min $^{-1}$)	曝気時間(h \cdot d $^{-1}$)	攪拌時間(h \cdot d $^{-1}$)	スラリー量(L)	汲み出し・投入量(L \cdot d $^{-1}$)	投入スラリーのTS(%)
R30_No1	30	0.0	0.0	8.0	28	2	4
R30_No2		3.0	2.0				
R30_No3		3.0	4.0				
R30_No4		3.0	8.0				

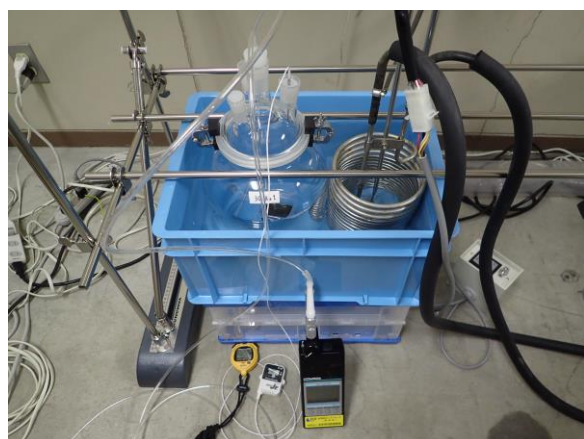


図-14 臭気の測定状況

3.2.3 結果および考察

3.2.3.1 ORPを指標とする腐熟判定

図-15、16に実験期間中におけるpHおよびORPの推移を示す。各試験区のpHは、いずれも投入した未曝気ふん尿スラリーより高く、14日目以降はそれぞれの区でほぼ一定の範囲で推移しており、曝気強度が大きい試験区ほど高いpHを示した。ORPは4日目以降にいずれの試験区でもマイナスとなり、6日目以降には -400mV 前後の値を示した。典型的な好氣的条件とはなっておらず、曝気量不足の可能性はある。

そこで、ORPの値をプラスに維持しながら未曝気ふん尿スラリーを投入し続けることが可能か否かを検討する。ここでは、連続投入試験のすべてのデータを用いて、ふん尿スラリー中の単位易分解性有機物量当たりの曝気量とORPの関係を求めた(図-17)。なお、今回の室内実験ではステンレス容器内のふん尿スラリーおよび投入する未曝気ふん尿スラリーの易分解性有機物量を測定していないため、以下の方法で計算を行った。

- 1) 毎日投入する未曝気ふん尿スラリー中の易分解性有機物量は、同じ現地施設から2018年6月から2019年2月までの隔月に採取して分析した易分解性有機物濃度の平均値から算出する。

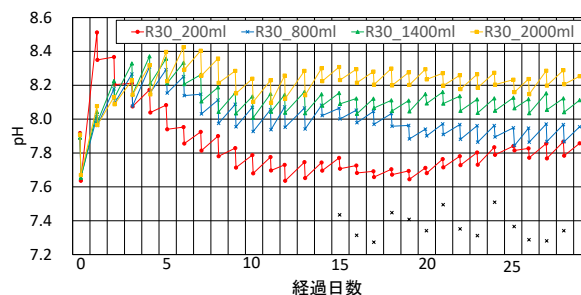


図-15 連続投入試験でのpHの推移

(×は投入スラリーのpHを示す。0~14日目は計測なし)

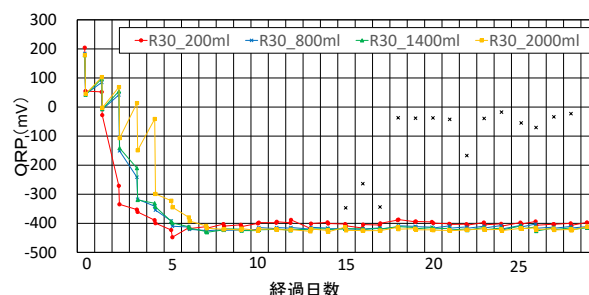


図-16 連続投入試験でのORPの推移

(×は投入スラリーのORPを示す。0~14日目は計測なし)

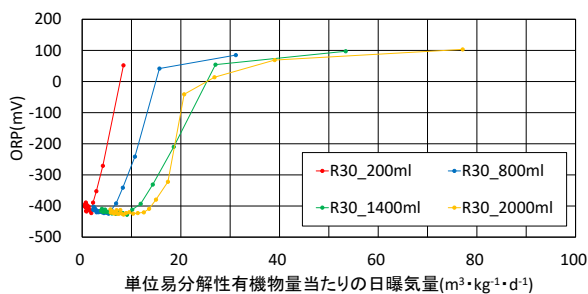


図-17 単位易分解性有機物量当たりの日曝気量と ORP の関係

2) 実験開始時のステンレス容器内のふん尿スラリーは、事前に 20 日間以上の曝気を受け ORP がプラスになっていることから、本計算ではこのふん尿スラリー中の易分解性有機物量はゼロとして扱う。

3) 実験中の易分解性有機物の分解量は考慮しない。

図-17 から、今回使用した実験装置で液温 30℃ の条件下においては、単位易分解性有機物量当たりの日曝気量が $30\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 程度以上であれば、ORP をプラスに維持できることが明らかとなった。すなわち、曝気量の設定によってふん尿スラリーの好气的条件を維持できると考えられた。

3.2.3.2 臭気指数を指標とする腐熟判定

図-18 に臭気指数の推移を示す。試験開始時の各試験区の臭気指数は 10 以下を示した。投入用スラリーの臭気指数は、実験期間中を通して 19~28 の範囲であった。グラフ中の赤点線 (臭気指数: 20) は、悪臭防止法により臭気の規制を設ける場合に規制の基準値となる臭気指数の一例である⁵⁾。

臭気指数は、実験開始後 5 日目には各試験区ともに 17~22 に上昇した。R30_No1、2、3 区は 10 日目以降も上昇を続け、40 日目には 26~29 の値となった。R30_No4 区は 25 日目まで横ばいに推移した後、30 日目から大きく低下し 10~13 の値を示した。曝気時間が長いことで腐熟が進み、臭気が低減したと考えられる。

図-19 に ORP の推移を示す。実験開始時には 110~132mV の値を示していたが、スラリーの投入開始に伴い、実験開始 1 日目には急激に低下し、その後も一部バラツキはあるが概ね -300mV 以下で推移した。R30_No4 区については臭気指数の低下が見られた 30 日目から値が上昇し、33 日目には -38mV となった。臭気指数が 10 を示した 35 日目には -199mV まで下がり、38 日目には再び -400mV まで低下した。ORP の低下後の 40 日目の臭気指数は 13 であり、ORP の上昇している期間と大きな違いはなかった。

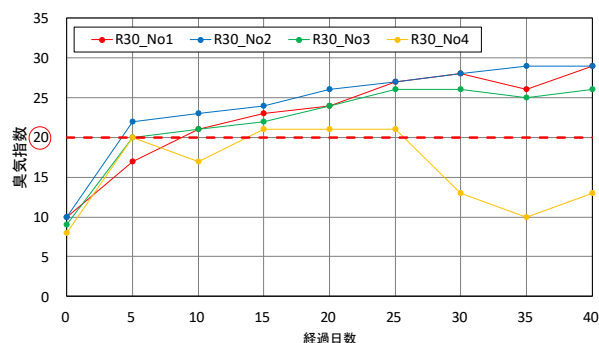


図-18 連続投入試験での臭気指数の推移

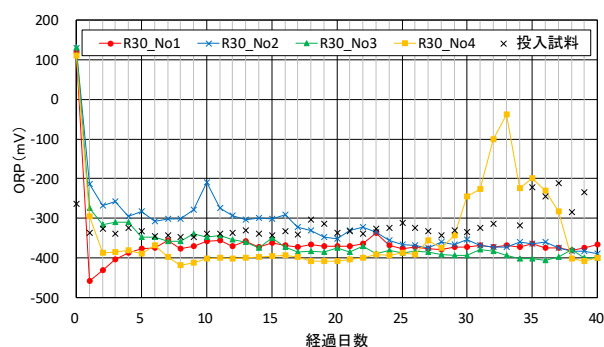


図-19 連続投入試験での ORP の推移

3.2.3.1 では、腐熟を促進するために、好气的条件の指標である ORP をプラスに維持するための曝気量の検討を行ったが、本実験により、ORP をプラスに維持できなくても、臭気が低下するまで腐熟することが示唆された。また、本実験装置の条件であれば、 $8\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ の連続曝気で臭気低減効果が期待できることが確認された。

4. 肥培灌漑施設からの泡流出抑制技術の開発

4.1 目的

前述の「2. 肥培灌漑施設の形状別運転状況と調整液性状の関係解明」では、稼働中の肥培灌漑施設での調査から、曝気量不足が示唆された。一部の施設では、施設稼働開始時に設定された曝気時間を変更し、曝気時間を短くしている事例が見られた。施設利用者への聞き取りにより、曝気時間短縮理由の一つは、調整槽天端開口部から地上部への泡の溢流を防止するためであることがわかった。しかし、曝気時間を短くするとふん尿スラリーの腐熟が遅くなり、臭気低減などの効果を十分に発揮できない。そのため、調整槽開口部における泡の溢流原因を解明し、泡溢流防止策を提案する必要がある。そこで本章では、調整槽開口部からの泡溢流要因を明らかにし、その抑制技術を提案する。

4.2 方法

4.2.1 調整槽開口部での泡溢流時の施設稼働状況調査

表-10に調査対象施設の概要を示す。両施設とも、調整槽の形状は八角形である。調整槽へ送気するブローポンプは1台設置されており、稼働時間はタイマーで制御している。

表-10 調査対象施設の概要

施設記号	調整槽形状	調整槽容量(m ³)	曝気時間 日合計(h・d ⁻¹)	ブローポンプ 稼働時間帯	
B	八角形	251	7.33	0:12~0:53	13:11~13:25
				1:56~2:37	13:27~13:52
				3:41~4:22	15:56~16:37
				6:25~6:53	18:41~19:08
				8:41~9:22	19:56~20:53
				10:40~11:22	22:26~23:08
I	八角形	290	4.58	0:08~1:06	
				1:38~2:36	
				3:07~4:06	
				4:38~5:06	
				5:38~6:06	
				13:52~14:36	

調整槽開口部からの泡溢流の有無は、インターバルカメラで開口部を1分ごとに撮影した映像を、目視で確認して判別した。ただし、用いたインターバルカメラでは夜間の撮影ができないため、日中の泡溢流のみを調査対象とした。ブローポンプなどの機器の稼働・停止の判別は、クランプロガーで計測した機器の電流値の経時変化を基に行った。

施設Bでの調査日は2018年9月4日であり、施設Iでの調査日は2018年9月2日である。

4.2.2 調整槽内部での泡発生状況と施設稼働状況調査

4.2.2.1 調査対象施設の概要

図-20は調査を行った肥培灌漑施設の外観である。この施設は北海道別海町内に建設された。稼働開始時期は2018年度末である。流入槽内の底面積は10.2m²である。調整槽の形状は八角形で、槽内の底面積は135.6m²、底面から槽内天端までの高さは4mである。調整槽内へ空気を送るブローポンプは1台設置されている。調整槽内にはふん尿スラリーを攪拌するための調整槽攪拌機、空気を拡散するための散気管、調整槽から配水調整槽へふん尿スラリーを移送するための調整槽ポンプがそれぞれ1台設置されている。調整槽上部には、これらの機器を調整槽へ出し入れするための天端開口部が2カ所ある。点検時以外は、天端開口部は金属製の蓋で覆われている。この蓋は複数に分割されており、そのうちの1枚には消泡機が固定されている。また、蓋の一部にはポンプをつり下げるワイヤーを通すために切り込みが入っている。天端開口部の面積は、散気管設置部分が5.72m²であり、調整槽ポンプ設置部分が2.0m²である。なお、蓋から調



図-20 調査対象施設の外観



図-21 インターバルカメラ設置状況

整槽内天端までの深さは0.4mである。

各機器の稼働時間は電源タイマーで制御している。ただし、調整槽ポンプの起動には、水位計コントローラーからの信号発信と調整槽ポンプの電源タイマーONの両方の条件が必要である。なお、水位による調整槽ポンプ制御条件は以下の通りである。調整槽水位が3.1m以上になると水位計コントローラーから調整槽ポンプを動かすための信号が発信され、水位が3.0m以下になるとその信号が停止する。

流入槽ポンプは流入槽の水位によって三方弁が切り替わり、流入槽内部でふん尿スラリーを攪拌するか、流入槽から調整槽へ移送するかを制御している。なお、三方弁が切り替わる流入槽の水位条件は未確認である。

4.2.2.2 機器の稼働状況の判別

各種機器の稼働・停止の判別は、クランプロガー(LR5051、日置電機(株))を機器の電力ケーブルに設置して電流値を1分ごとに計測し、その経時変化を基に行った。

4.2.2.3 泡発生状況のモニタリング

調整槽内の泡発生状況のモニタリングは、一定時間間隔で写真撮影が可能なインターバルカメラ(HCLT4G、(株)ハイク)で行った。このカメラは赤外線フラッシュによる暗部での撮影ができる。そこで図-21のように調整槽

天端開口部の蓋を一部撤去して木製の覆いを被せ、インターバルカメラを斜め45度下方に向けて取り付け、消泡機周辺の調整槽内部を撮影した。撮影した写真は携帯電話のLTE(4G)回線経由でメール送信して、泡の状態を遠隔地から監視できるようにした。写真撮影間隔は1分である。また、設置機材の状況を監視するため、開口部近くの地上にインターバルカメラを1台設置した。カメラ設置日は2019年8月1日である。

4.2.2.4 液温および水位測定

調整槽内ふん尿スラリーの液温は、防水型温度計(TR-55i-Pt、(株)ティアンドデイ)を用いて5分間隔で測定した。

調整槽および流入口水位は、施設に設置されている圧力式水位計のアナログ出力値を小型ロガー(LR5031、日置電機(株))にて1分間隔で記録した。

4.3 結果および考察

4.3.1 調整槽開口部での泡溢流時の施設稼働状況調査

図-22、23に施設Bの泡溢流前後の状況を示す。なお、図-22の泡の痕跡は、インターバルカメラで撮影できなかった9月3日夕方～9月4日早朝の溢流によるものである。図-24に、泡が溢流する前から溢流が停止するまでの時間帯における、各種機器の稼働状況を示す。「ON」



図-22 施設Bでの泡溢流開始直前の状況 (2018/9/4 12:32)



図-23 施設Bでの泡溢流停止直後の状況 (2018/9/4 12:59)

の表示は機器が稼働した時刻を示す。図-24に示すように、泡が溢流している時間帯にはフロアポンプを含め、いずれの機器も稼働していなかった。泡の溢流が停止したのは、調整槽攪拌機が稼働した1分後であった。

図-25、26に施設Iの泡溢流前後の状況を、図-27に、泡が溢流する前から溢流が解消されるまでの時間帯における、各種機器の稼働状況を示す。図-27に示すように、泡が溢流している時間帯にはいずれの機器も稼働

泡の溢流			開始	停止
フロアポンプ	ON 10:40	OFF 11:22		
調整槽攪拌機	ON 10:43	OFF 11:24		ON 12:58
調整槽ポンプ				
流入口ポンプ			ON 11:54	OFF 12:07
消泡機	OFF 10:10			

図-24 泡溢流時の施設B稼働状況 (2018/9/4)



図-25 施設Iでの泡溢流開始直前の状況 (2018/9/2 10:51)



図-26 施設Iでの泡溢流停止直後の状況 (2018/9/2 11:07)

泡の溢流			開始	停止
フロアポンプ			10:51	11:07
調整槽攪拌機				
調整槽ポンプ				
流入口ポンプ				
消泡機	ON 9:07	OFF 9:21	ON 10:07	OFF 10:21
			ON 11:07	OFF 11:21

図-27 泡溢流時の施設I稼働状況 (2018/9/2)

していなかった。泡の溢流が停止したのは、消泡機が稼働した時刻であった。

施設BおよびIのいずれも、泡が溢流している時間帯にはブローポンプを含むいずれの機器も稼働していないことがわかった。また、施設Iでは、消泡機が稼働したことで泡の溢流が停止しているが、施設Bでは、泡の溢流が停止する1分前に調整槽攪拌機が稼働を開始している。すなわち、今回の調査では、調整液が攪拌されずに静かに貯留されている時間帯に泡が溢流していた。なお、施設Bの調整液温度は9月4日12時で33℃、施設Iの調整槽液温は9月2日11時で40℃であった。

2018年の調査では、泡の発生と停止のメカニズムや運転との関係は明らかに出来なかった。今後、調整槽内での泡の発達状態を経時的にモニタリングする方法を考案し、泡の発生要因を明らかにする。

4.3.2 調整槽内部での泡発生状況調査

調査対象施設では、泡発生状況のモニタリングを開始した2日後の2019年8月3日夜に、調整槽天端開口部か

ら地上部へ泡が溢流した。その後も泡の溢流が断続的に続いたため、8月6日に消泡機を手動で稼働して溢流を停止させた。8月4日夜の泡溢流時には、調整槽内部を撮影しているインターバルカメラのレンズに泡が付着した。そのため、ここでは8月3日と4日（泡の付着まで）の観測データを考察する。

4.3.2.1 調整槽液温

図-28に調整槽の液温を示す。液温は大きく変化することはなく、32℃前後で推移した。

4.3.2.2 泡溢流時の調整槽内での泡上昇と水位変化

図-29に8月3日の施設稼働状況と流入口水位を示す。図下段の横線は、泡溢流時間または各機器の稼働時間を示す。なお、調整槽水位は水位センサーの出力値が不安定であったため、欠測として扱う。8月3日に観測された泡の溢流は、19時59分から13分間と、20時30分から21分間の2回である。図-30～32は、17時16分の消泡機停止直後から1回目の泡溢流前までの調整槽内の状況である。写真中央に写っている機器が消泡機である。その右側は、この調査

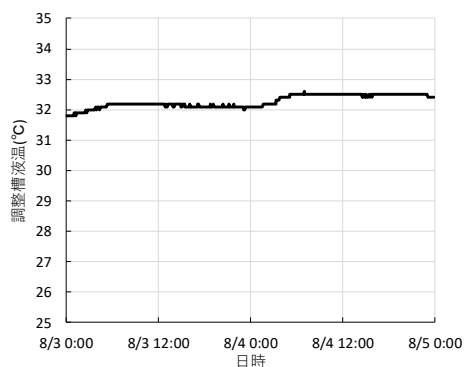


図-28 調整槽液温の推移 (2019年)

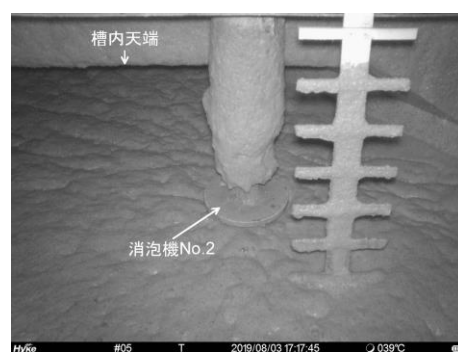


図-30 調整槽内部 (2019/8/3 17:17)

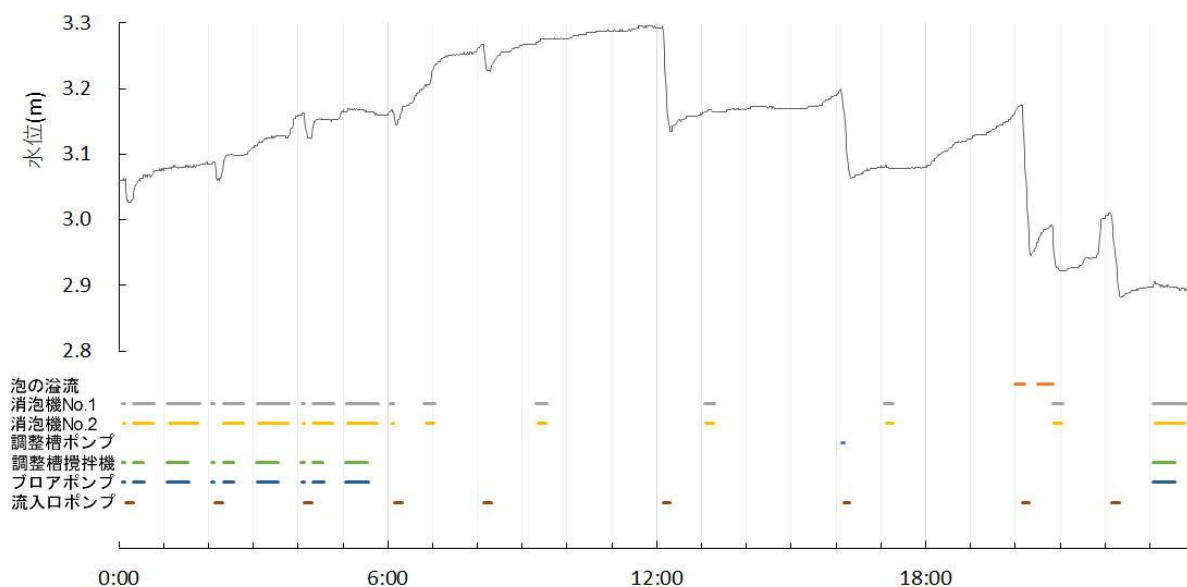


図-29 施設稼働状況と流入口水位 (2019年8月3日)

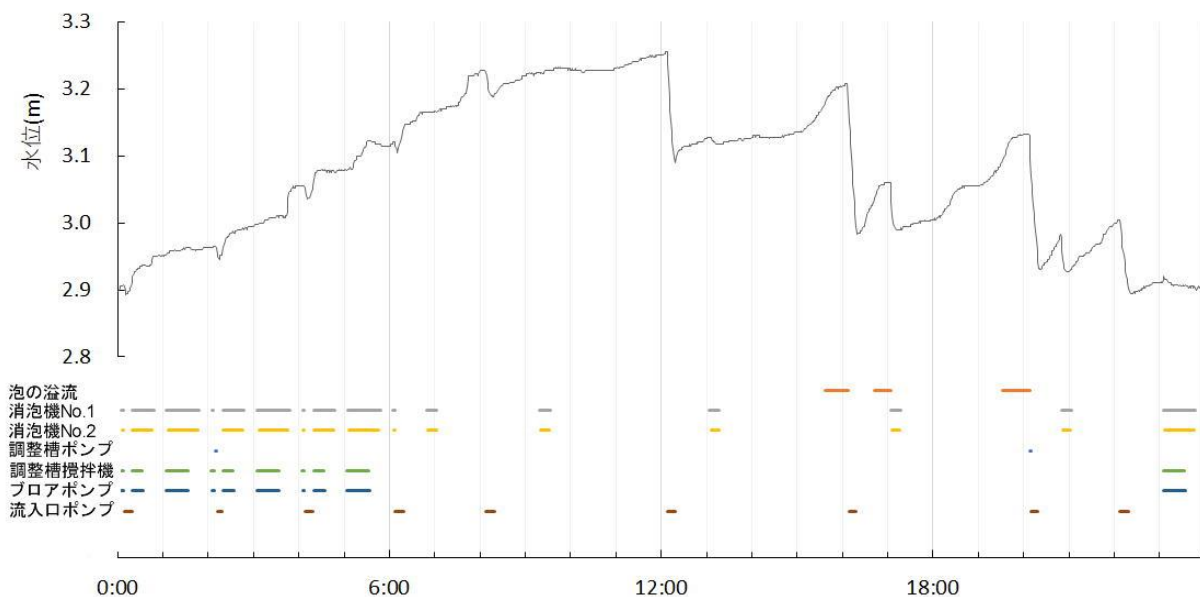


図-33 施設稼働状況と流入口水位 (2019年8月4日)



図-31 調整槽内部 (2019/8/3 19:32)



図-32 調整槽内部 (2019/8/3 19:52)

のために設置した、0.1m 刻みの木製目盛である。消泡機停止直後の図-30 と、泡が上昇して槽内天端まで達した図-31 を比較すると、2時間15分で泡が約0.35m 上昇している。また図-31 と、上昇する泡が天端開口部に集中している図-32 を比較すると、20分で泡が約20cm 上昇している。泡が上昇する理由としては、①液面上昇によって泡が押し上げられる、②泡そのものが増加する、③その両方が同時に起こる、の3つが考えられる。

ここでは泡の密度が一定であると仮定した場合の、水位上昇時の泡上昇量を試算してみる。調整槽内の底面積は 135.6 m^2 なので、深さ 0.01m あたりの体積は 1.356 m^3 である。天端開口部 2 カ所の面積は合計 7.72 m^2 なので、泡が槽内天端に達した後に水位が 0.01m 上昇して天端開口部に泡が集中すると、泡の上昇量は約 0.18m になる。このように、水位上昇量が小さくても、天端開口部内の泡は急上昇する。

4.3.2.3 泡の溢流停止と機器の稼働状況

図-29 に示すように、8月3日の1回目の泡溢流が停止した時刻は20時12分であった。その3分前には流入ポンプが稼働しており、それによって流入槽内の水位が約0.2m 低下している。流入口と調整槽は槽底面から3.5mの高さに位置する隔壁開口部(幅0.6m×高さ0.3m)でつながっているため、調整槽内の泡はすでに流入槽内に流れ込んでいる状態にあったと思われる。そのため、流入口の水位低下に伴って調整槽の泡がさらに流入槽内に流れ込み、それによって天端開口部から地上への泡の溢流が停止したと考えられる。8月3日の2回目の泡溢流の停止時刻は、調査地点とは別の天端開口部に設置されている消泡機No.1が稼働開始した20時50分であった。調査地点で泡の溢流が停止した理由は、消泡機No.1が泡を破壊することで空間が生じ、そこに向かって調整槽内の泡が移動したためと考えられる。その後、20時52分には消泡機No.2が稼働した。

図-33 に8月4日の施設稼働状況と流入口水位を示す。8月4日に観測された泡の溢流が生じたのは、15時38分から31分間、16時43分から23分間、19時32分から

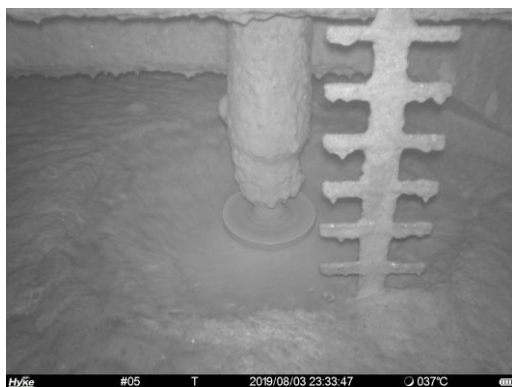


図-34 曝気中の調整槽内部 (2019/8/3 23:33)

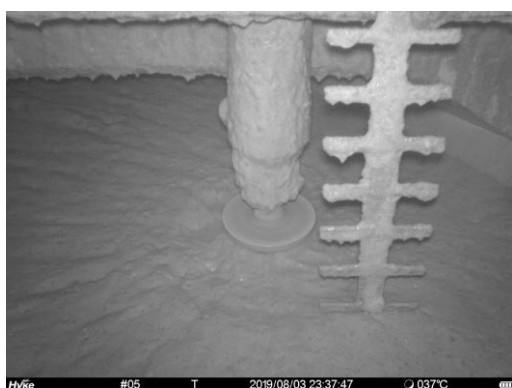


図-35 曝気終了後の調整槽内部 (2019/8/3 23:37)



図-36 調整槽内部 (2019/8/3 17:05)



図-37 調整槽内部 (2019/8/3 17:06)

37 分間の合計 3 回である。8 月 4 日 1 回目の泡溢流が停止した時間帯には、流入ポンプの稼働に伴って流入口の水位が低下しており、8 月 3 日 1 回目と同様の理由で泡溢流が停止したと考えられる。8 月 4 日 2 回目の泡溢流の停止は、同時刻に消泡機 No. 2 が稼働したためと考えられる。8 月 4 日 3 回目の泡溢流が停止した時刻には調整槽ポンプが稼働しており、調整槽ポンプの稼働に伴う調整槽水位の低下によって泡の溢流が停止したと考えられる。

4.3.2.4 泡溢流時以外の調整槽内部の様子

図-34 は曝気中の調整槽内部の様子である。ブローポンプの送気によって発生する泡を消泡機が破壊している。図-35 はブローポンプ停止 3 分後の様子である。このとき、消泡機は稼働を続けているが、ブローポンプの停止によって泡が発生しなくなったため、消泡機による泡の破壊は見られなくなった。

図-36 は 8 月 3 日 17 時 05 分の調整槽内部の様子で、消泡機の円盤が泡に埋没している。その後、図-37 のように 17 時 06 分に消泡機が稼働したことで泡が破壊された。このように、泡が地上へ溢流していない時でも泡は上昇しているが、消泡機が稼働すれば泡の上昇は抑制される。

4.3.2.5 泡溢流防止対策

今回の調査では、泡の溢流が続いている時間帯には消泡機が稼働していなかった。また、調整槽内で泡が上昇しても、消泡機が稼働することで、その上昇を抑制していることがわかった。したがって、泡溢流を防止するためには、曝気を行っていない時間帯の消泡機の運転間隔を短くすべきである。

5. 現地施設を用いた効率的なふん尿調整方法の検証

5.1 目的

肥培灌漑施設の調整槽液温は夏期には 30°C 以上に上昇するが、冬期には液温が低下する。液温が低下すると腐熟の進みが遅くなる。そこで、冬期に曝気時間を延長することによる液温上昇の可否について検討する。

5.2 方法

調査対象施設は、北海道別海町で稼働している肥培灌漑施設で、調整槽の形状は八角形である。詳細は、前述の 4.2.2.1 に記述したとおりである。

曝気時間の変更は 2020 年 1 月 29 日の日中に実施した。変更前後のブローポンプ稼働時間は表-11 のとおりである。設定変更前は、0.5 時間稼働、0.5 時間停止を 7 回繰り返す間欠曝気とし、日合計曝気時間は 3.5 時間である。設定変更後は、7.0 時間の連続曝気とした。

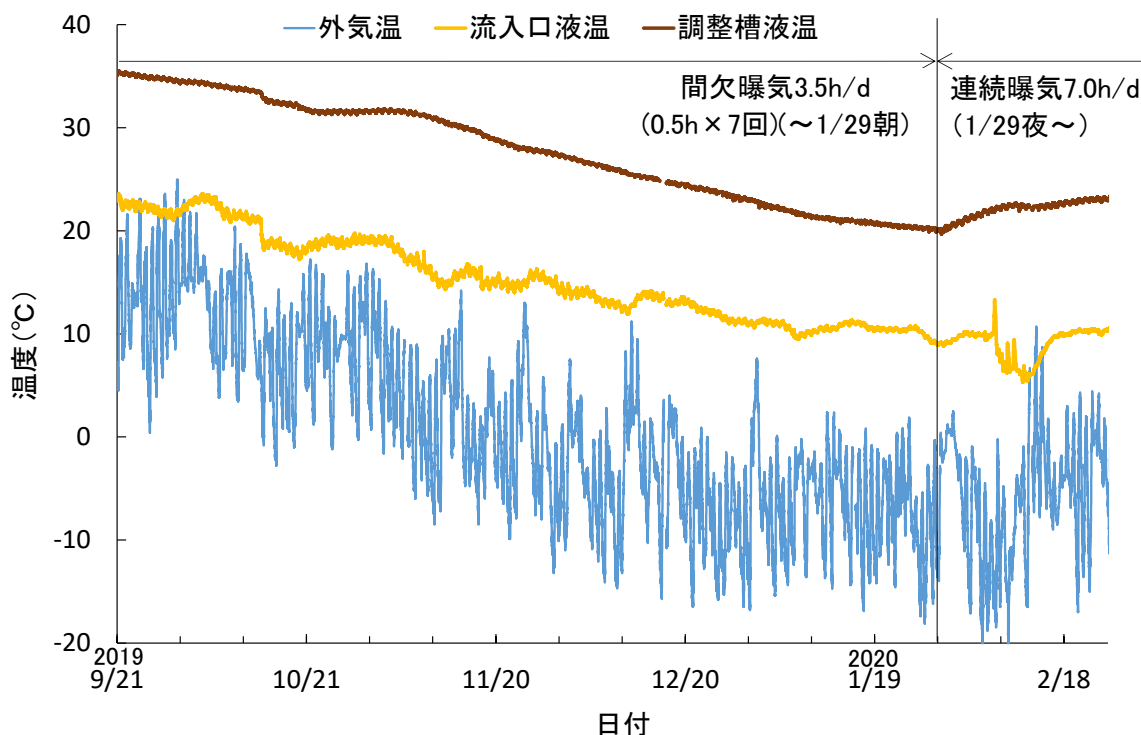


図-38 曝気時間設定変更前後の温度推移

表-11 設定変更前後のプロアポンプ稼働時間

期間	曝気時間日合計 (h・d ⁻¹)	フロアポンプ稼働時間帯
設定変更前 (~2020/1/29朝)	3.5	23:04~23:34 0:05~0:35 1:05~1:35 2:05~2:35 3:05~3:35 4:04~4:34 5:04~5:34
設定変更後 (2020/1/29夜~)	7.0	22:34~5:34

5.3 結果および考察

図-38 に曝気時間設定変更前後の調整槽液温、流入口液温および外気温の推移を示す。2020年1月29日に曝気時間を変更するまでの調整槽液温の推移は、2019年9月中~下旬に最も高い約35℃を記録した後、外気温および流入口液温の低下に伴い、調整槽液温は低下し続けた。1月29日日中には最も低い約20℃を記録した。曝気時間を連続7時間に変更した後は、調整槽液温は上昇に転じ、2月25日時点で約23℃を記録した。従って、厳冬期でも曝気時間を延長することで調整槽液温が上昇することを確認した。今後、秋~冬~春にかけて、液温の低下を抑制するために必要な曝気時間を検討する。

6. まとめ

家畜ふん尿を好気性発酵により腐熟させる肥培灌漑施設では、実際に運転する酪農家ごとに曝気時間などの運転方法が異なる。その背景には、酪農家が経費削減のため

めに好気性発酵に費やすエネルギーを節約していることがある。本研究では、効率的な運転管理方法を明らかにすることを目的に、肥培灌漑施設の運転状況の現地調査および室内実験を行った。

肥培灌漑施設の形状別運転状況と調整液性状の関係解明では、曝気ポンプ稼働時間は最も長い施設と最も短い施設の比は約4であった。また、ふん尿スラリー投入量と調整液貯留量から求めたふん尿スラリーの水理的滞留日数では、最も長い施設と最も短い施設の比は約2.5であった。このように、施設によって運転方法が大きく異なることが明らかとなったが、施設形状と運転方法との関係は特に認められなかった。曝気量と調整液pHの関係では、調整槽中にある固形物の単位量当たりの総曝気量とpHとの関係を整理した。その結果、単位固形物量当たりの総曝気量が多いほどpHが高いことが明らかとなったが、最もpHが高い調整液でも、腐熟の簡易判定目安であるpH7.8~8.5の下限値付近にとどまっており、曝気量不足が示唆された。

室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明では、バッチ試験での実験開始時と終了時の測定結果から求めた有機物減少量は、同じTS量であれば、温度が高い試験区での有機物減少量が大きいことが明らかとなり、温度を高くすることは有機物の分解、すなわち腐熟に有利であることが確認された。曝気処理中の臭気指数は、TS量が大きいふん尿スラリーでは大きい値となり、にお

いの強い状態が継続する。TS量が小さいふん尿スラリーでは小さい値を示し、曝気日数の経過に伴うにおいの低下が顕著であることが明らかになった。

連続投入試験では、今回使用した実験装置で液温 30℃の条件下においては、単位易分解性有機物量当たりの日曝気量が $30\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 程度以上であれば ORP をプラスに維持できることが明らかとなった。一方、臭気指数に着目した連続投入試験では、ORP をプラスに維持できなくても、臭気が低下するまで腐熟することが示唆された。

肥培灌漑施設からの泡流出抑制技術の開発では、日中において、2カ所の肥培灌漑施設で泡溢流とブローポンプによる曝気の時間的關係を調査した結果、ブローポンプを含むすべての機器が稼働していなくても泡が溢流することがわかった。また、調整槽内部での泡発生状況を調査した結果、消泡機停止時に液面が上昇すると液面上の泡も上昇し、このことが泡溢流の要因であるとわかった。さらに、泡が上昇しても消泡機が稼働することで、その上昇を抑制していることがわかった。

現地施設を用いた効率的なふん尿調整方法の検証では、冬期に調整槽液温が低下するのを抑制するため、冬期の曝気時間を夏期の2倍に延長した結果、厳冬期でも調整槽液温が上昇することを確認した。

謝辞

調整液腐熟の簡易判定目安は、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部「平成9年度十勝地域環境保全型農業高度化検討委員会報告書」を参考とした。また、調査対象施設の酪農経営者には、調査機材の設置を快諾いただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 樋元淳一、岩淵和則、松田従三：液状家畜ふん尿の好気性発酵による堆肥化 I. 実験装置の試作、北海道大学農学部邦文紀要、15(3)、p. 261、1987
- 2) 村上功、西脇康善：環境保全型かんがい排水事業における肥培施設整備前後の効果検証—第九報—、第59回（平成27年度）北海道開発技術研究発表会、2016
- 3) 社団法人農業土木学会：農業土木標準用語辞典、改訂五版、2003
- 4) 北海道農業・畜産試験場編：家畜ふん尿処理・利用の手引き2004、p. 58、2004
- 5) 環境省環境管理局：臭気指数規制ガイドライン、pp. 5-22、2001
- 6) 山本朱美、古谷修、小堤恭平、小川雄比古、吉栄康城：畜産臭気における臭気指数と市販ニオイセンサ指示値との関係、日本畜産学会報、79(2)、pp. 235-238、2008

16.3 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

16.3.3 大規模酪農地帯の水質環境評価技術に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤グループ（水利基盤チーム）
技術開発調整監（寒地技術推進室）

研究担当者：中村和正、川口清美、鶴木啓二、田中健二、
村上 功、前川和義、大山武士

【要旨】

北海道東部の大規模酪農地帯では、国営環境保全型かんがい排水事業が実施され、事業実施状況が流域の水質環境に与える影響を定量化することが求められている。本研究では、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)による水質解析により、大規模酪農地帯の水質環境改善手法を提案することを目的とし、本川流域における河川水質と土地利用・営農状況の関係、支川流域における河川水質状況、SWATによる水質解析を実施した。

本川流域における河川水質と土地利用・営農状況の関係では、平水時の採水調査により流域広域にわたる河川水質状況を把握し、土地利用図と農業統計値により集水域ごとに乳用牛頭数を集計した。その結果、窒素濃度の平均値と流域面積あたりの乳用牛頭数密度には、高い相関関係が得られたこと、近似線から外れるプロットは事業の実施状況との関係性が考えられることなどを明らかにした。支川流域における河川水質状況では、西別川支川であるヒロノ川および熊川を対象流域に選定し、自動採水器により河川水質の連続観測を実施した。酪農の営農状況が異なる支川小流域の水質変動特性を明らかにし、SWATのモデルパラメータの同定・検証に利用するデータセットを取得した。SWATによる水質解析では、牧草地の作付、施肥、収穫などの管理スケジュールを設定した。牧草の生育期間における葉の生育や根の伸長などの作物生長過程を推定し、単収の実測値を再現することにより、地表および土壌面における水・栄養塩物質の流出過程が経時的に表現され、支川下流地点での窒素負荷量の変動を良好に再現した。

キーワード：水質；酪農；土地利用；SWAT

1. はじめに

北海道は、広大な土地と夏の冷涼な気候風土により酪農に適した地域であり、1950年代の草地拡大や灌漑排水施設などのインフラ整備を契機に酪農産業が発展してきた。現在では、国内生乳生産量のうち北海道が占めるシェアは50%を超え、安定的な生乳・乳製品の供給地としての役割を果たしている。特に北海道東部は、広大な草地を活用した大規模酪農地帯として知られている。一方で、大規模経営による多頭化に伴い、家畜ふん尿由来の水質汚濁物質の河川環境への流出が懸念されている。釧路・根室地域では、家畜ふん尿の効率的な農地還元により自然環境と調和した資源循環型農業を展開することを目的に、国営環境保全型かんがい排水事業が実施されている。事業では、家畜ふん尿を集積し有機質肥料（スラリー）にする肥培灌漑施設の整備や、土砂かん止林や水質浄化池などの浄化型排水施設の整備をしている。そのため、国営環境保全型かんがい排水事業の実施により、水質汚濁物質の流出経路の変化やそれに伴う動態変化が予

測され、流域規模で水質環境への影響を定量的に評価することが求められている。

流域規模で水質環境を評価する技術としてモデル解析が有効であり、代表的なものとして米国農務省農業研究局が開発したSWAT (Soil and Water Assessment Tool)がある。SWATのモデルパラメータは米国のものであるため日本での適用事例は少ないが、酪農地域に適用した事例として、施肥方法が水質環境に与える影響を評価したもの¹⁾、浮遊土砂物質、懸濁態窒素、リンの予測値と実測値を適合させたもの²⁾などが挙げられる。しかし、水質環境改善手法の評価ツールとして利用された事例は国内には存在しない。

本研究では、水質環境評価技術であるSWATを用いた水質解析により、大規模酪農地帯の水質環境改善手法を提案することを目的としている。そこで、本川流域における河川水質状況の把握、支川流域における河川水質状況の把握、SWATによる水質解析を実施した。本川流域における河川水質状況の把握では、観測地点の集水域ご

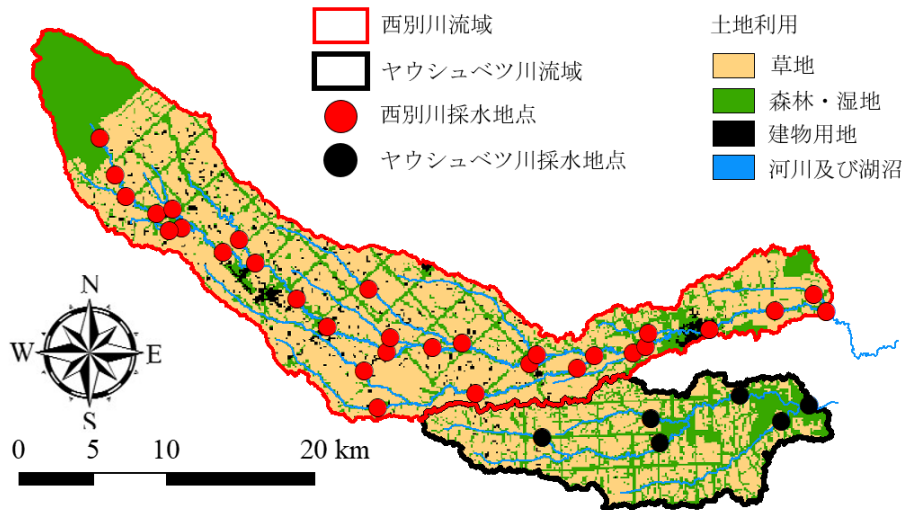


図-1 研究対象流域

とに水質濃度と土地利用・営農状況を集計し、その関係性を調べた。支川流域における河川水質状況の把握では、支川小流域を選定し、水質の変動特性を調べた。SWAT による水質解析では、農地の営農管理スケジュールを設定し、西別川支川の熊川流域に適用した。

2. 本川流域における河川水質状況の把握

2.1 研究対象地

本章の対象流域は、北海道東部の大規模酪農地帯である西別川流域とヤウシュベツ川流域である(図-1)。西別川流域は、別海町、標茶町、中標津町にまたがり、流域面積は41,602 ha である。ヤウシュベツ川流域は別海町に位置し、流域面積 15,670 ha である。西別川は、約 70km の本川の間には主要な支川が 12 本存在し、ヤウシュベツ川は、約 30 km の本川の間には主要な支川が 2 本存在している。本川と支川の位置関係を表す河川概要図を図-2 に示す。両流域とも、国営環境保全型かんがい排水事業地区に大部分が含まれ、別海地区と別海南部地区は事業が完了し、別海北部地区と別海西部地区は事業が継続している。使用したデータは、地形データ、土地利用データ、乳用牛頭数データであり、それぞれ、基盤地図情報より数値標高モデルの平成 26 年版、国土数値情報より土地利用細分メッシュの平成 26 年版、2015 年農林業センサスより農業集落カードを入手した。

2.2 研究方法

2.2.1 流域を対象とした平水時の水質観測

対象流域の水質状況を把握するために、平水時における採水調査を実施した。西別川の採水地点は、本川 16 点、支川 15 点の計 31 点設定し、ヤウシュベツ川の採水地点は、本川 3 点、支川 3 点、計 6 点設定した(図-1)。本川

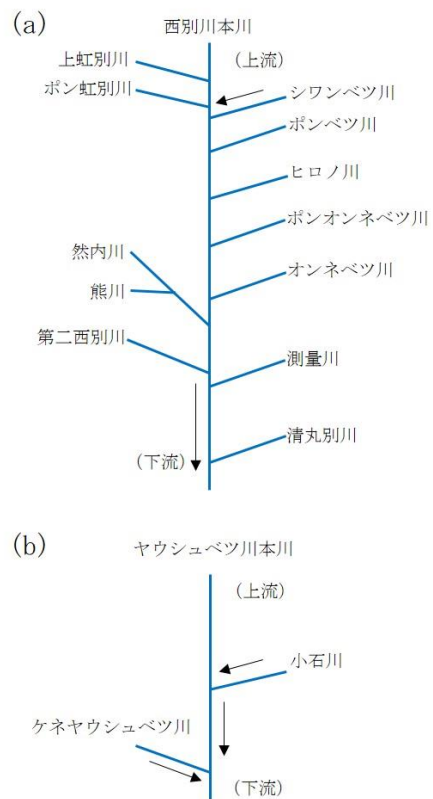


図-2 河川概要図：(a) 西別川、(b) ヤウシュベツ川

の採水地点は、支川が合流した下流に設定し、さらに地点の距離間隔が等しくなるように設定した。支川の採水地点は、本川との合流点付近に設定し、大きな支川の場合は採水地点を複数点設定した。2017 年は 4 月から 11 月までに 15 回、2018 年は 5 月から 11 月までに 14 回実施した。採水した河川水は 100 mL のポリ瓶にて密閉保冷状態で室内に運搬し、水質分析に供した。水質分析項目は T-N 濃度、NO₃-N 濃度、NH₄-N 濃度、T-P 濃度であり、分

析方法は JIS に準拠した。

2.2.2 土地利用・酪農の営農状況の集計

対象流域における土地利用・営農状況を GIS (Geographic Information System) ソフトである Arc GIS を用いて集計した。土地利用状況を集計する範囲は、採水調査地点の受け持つ集水域であり、西別川は 31 流域、ヤウシュベツ川は 6 流域である。なお、下流の集水域は、それより上流の集水域を内包しており、下流の集水域（採水調査地点が受け持つ集水域）ごとに土地利用・営農状況を集計した。

土地利用の諸元として流域草地率と河畔草地率を集計した。流域草地率は集水域ごとに集計し、河畔草地率は河川両岸 100 m を河畔として抽出し、集水域ごとに集計した。乳用牛頭数は、集落ごとに公開されているため、面積按分により集水域で集計した。面積按分の方法は、集落ごとに草地面積あたりの乳用牛頭数密度を計算し、それに重なる草地面積を乗じ、集水域ごとに乳用牛頭数を足し合わせた。その際、2 歳未満の乳用牛 1 頭は、ふん尿量を考慮して成牛 0.42 頭に相当する³⁾として換算した。

西別川およびヤウシュベツ川の集水域の流域草地率・河畔草地率・乳用牛頭数の結果を、表-1、表-2 に示す。西別川本川とヤウシュベツ川本川の流域草地率は 60% 以上、河畔草地率は 50% 以上であり同程度であった。流域全体の乳用牛頭数は、西別川流域がヤウシュベツ川流域より多かったが、流域面積あたりの乳用牛頭数は、西別川流域が 0.89 head/ha、ヤウシュベツ川流域が 0.91 head/ha であり同程度であった。一方で、西別川の集水域では、草

地率と乳用牛頭数が流域ごとにばらついていたが、ヤウシュベツ川の集水域では、同程度の値であった。

2.2.3 河川水質と土地利用・営農状況の関係

本章では、河川の採水調査結果と酪農の営農状況の関係性を調べた。採水調査で得られた水質濃度は自然浄化作用を受けた濃度（排出濃度と定義）であるため、自然浄化作用を受けていない発生源の濃度（発生濃度と定義）を推定した。発生濃度の推定にあたり、前提条件として、ふん尿が草地に全量還元されている、草地から流出した負荷量は河畔の林地で浄化される、とした。

$$C_p = \frac{C_e}{a} \quad (1)$$

$$a = Lu_g \cdot c \quad (2)$$

ここで、 C_p は発生濃度 [mg/L]、 C_e は排出濃度 [mg/L]、 a は排出率 [-]、 Lu_g は河畔草地率 [-]、 c は補正係数 [-] である。本研究では、 a は河畔草地率により定められるとした。つまり、河畔草地率が高いと河畔林や湿地での浄化作用を受けていないことを意味し、発生濃度と排出濃度は同程度になる。逆に、河畔草地率が低いと自然浄化作用を受けていることを意味し、発生濃度は排出濃度より高い値になる。また、 c は 1.0 とし流域内で変化しないものとしたが、実際の排出率は明らかでない。そのため、草地からの流出水（暗渠からの流出水など）を採水し、草地からの発生濃度に合うように c を決定する必要がある、今後の検討課題である。

表-1 西別川本川および主要支川の諸元

水系		流域面積 (ha)	流域草地率 (%)	河畔草地率 (%)	乳用牛頭数 (head)
本川	西別川	41,602	65	50	36,930
	上虹別川	858	61	48	416
	ポン虹別川	831	80	65	710
	シワンベツ川	2,787	42	42	1,364
	ポンベツ川	4,387	59	50	4,230
	ヒロノ川	1,179	80	69	1,132
支川	ポンオンネベツ川	4,144	74	62	4,870
	オンネベツ川	3,718	75	55	4,765
	然内川	7,668	80	61	6,542
	第二西別川	823	77	72	501
	測量川	832	63	41	728
	清丸別川	2,551	70	62	2,712

表-2 ヤウシュベツ川本川および主要支川の諸元

水系		流域面積 (ha)	流域草地率 (%)	河畔草地率 (%)	乳用牛頭数 (head)
本川	ヤウシュベツ川	15,670	62	52	14,225
支川	ケネヤウシュベツ川	3,402	63	56	2,053
	小石川	2,427	69	58	2,485

2. 3 結果・考察

西別川流域およびヤウシュベツ川流域における集水域ごとのNO₃-N濃度分布を図-3に、流域面積あたりの飼養牛頭数分布を図-4に示す。これまでの酪農地域の水質環境を評価する研究⁴⁾において、NO₃-N濃度が指標として利用されているため、本研究でもNO₃-N濃度を水質項目の代表として用いた。NO₃-N濃度は、西別川流域の中流左岸域で高く、上流域で低い傾向がみられ、ヤウシュベツ川流域は全体的に低濃度であり、集水域ごとの差が小さかった。流域面積あたりの乳用牛頭数密度は、西別川流域の中流左岸域で高く、上流域で低い傾向がみられ、ヤウシュベツ川流域は中程度で集水域ごとの差が小さかった。以上から、NO₃-N濃度と乳用牛頭数密度が高い集水域と低い集水域の位置関係が一致しており、空間的に対応した関係が得られた。

集水域ごとのNO₃-N濃度の平均値と流域面積あたりの乳用牛頭数密度の関係を図-5に示す。西別川流域では、NO₃-N排出濃度と乳用牛頭数密度との関係には正の相関関係が得られたが、同程度の流域面積あたりの乳用牛頭数密度の場合でも、NO₃-N排出濃度にばらつきがみられた(図-5(a))。その要因として、発生源からの排出率の違いが考えられる。そこで、排出率を考慮したNO₃-N発生濃度と乳用牛頭数密度の関係は、前述のNO₃-N排出濃度

との関係と比較すると、西別川流域では相関係数が0.73から0.77へ僅かであるが高くなった(図-5(a), (b))。一

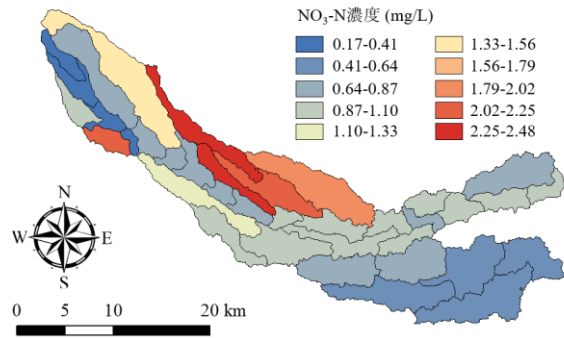


図-3 NO₃-N濃度分布

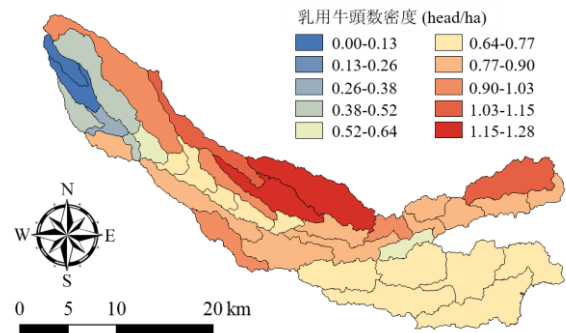


図-4 流域面積あたりの乳用牛頭数密度分布

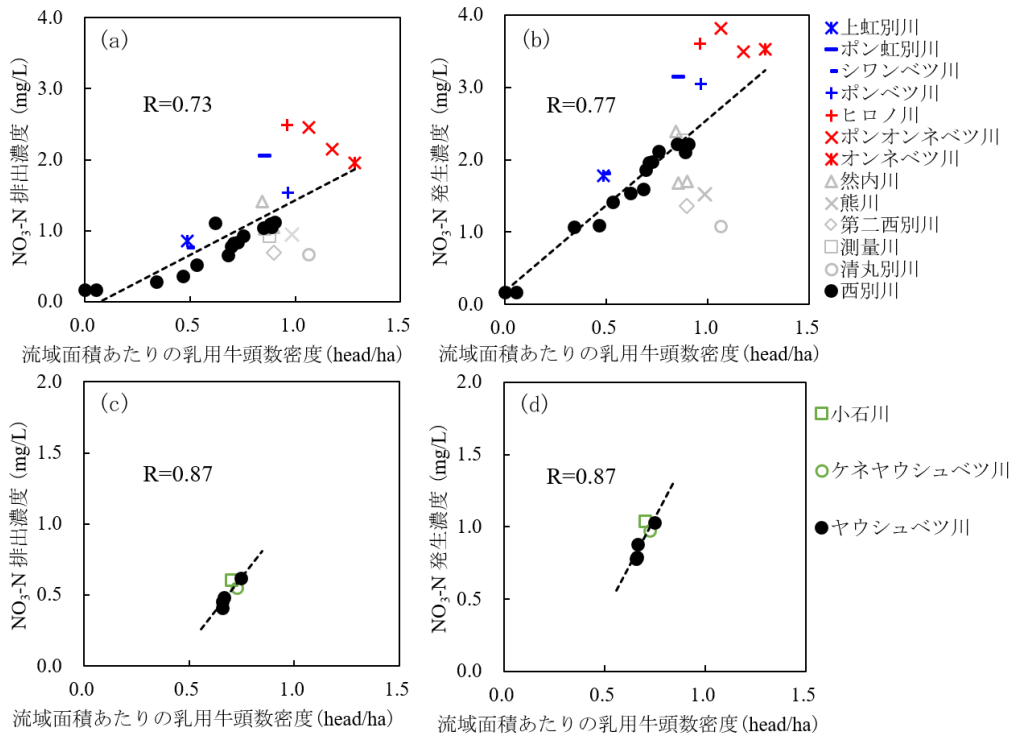


図-5 NO₃-N濃度と流域面積あたりの乳用牛頭数密度の関係：(a) 西別川の排出濃度、(b) 西別川の発生濃度、(c) ヤウシュベツ川の排出濃度、(d) ヤウシュベツ川の発生濃度

方で、ヤウシュベツ川流域では、NO₃-N 排出濃度と乳用牛頭数密度との関係には正の相関関係が得られ、排出濃度と発生濃度共に、相関係数が 0.87 であった(図-5(c), (d))。西別川流域では、流域の本川および支川の集水域のプロットは、近似直線付近に分布しているが、然内川、熊川、第二西別川、清丸別川の集水域は近似直線より下部に、ポン虹別川、ヒロノ川、ポンオンネベツ川の集水域は近似直線より上部に分布し、同程度の乳用牛頭数密度であっても濃度にばらつきがみられた。その原因の一つとして、国営環境保全型かんがい排水事業の実施状況が考えられる。低濃度であった集水域は、事業の完了した別海地区と別海南部地区に含まれ、高濃度であった集水域は、事業が未完了の別海北部地区と別海西部地区に含まれた。このことは、肥培灌漑施設の整備によるふん尿の農地還元の適正化や、水質浄化池や土砂かん止林の整備による草地から河川への排出過程における負荷抑制の可能性を示している。発生濃度を推定し、負荷を抑制する河畔林や湿地を定性的に表現することで、河川水質と土地利用・営農状況の関係性が示されたが、水質浄化池・土砂かん止林の位置関係や物質の浄化メカニズムについては考慮できていない。地形連鎖やそれに伴う物質の動態変化を定量的に表現するためには、物理プロセスを踏まえた水質解析モデルの適用が必要である。

3. 支川流域における河川水質状況の把握

3.1 研究対象地

本章の対象とした支川小流域は、西別川の支川であるヒロノ川と熊川である(図-6)。先述したように、ヒロノ川と熊川は、流域面積あたりの乳用牛頭数密度が同程度であるにもかかわらず、水質濃度の年平均値に差がみられた小流域であるため、本章の対象地に選定した。ヒロノ川の流域面積は1,179 ha、土地利用割合は草地 80%、森林 14%、その他用地 6%であり、乳用牛頭数は 1,132 頭である。熊川の流域面積は1,530 ha、土地利用割合は

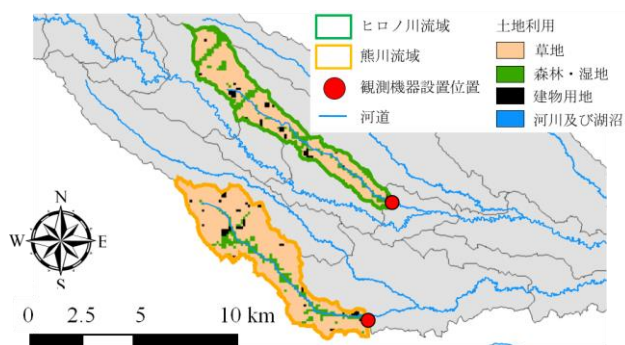


図-6 ヒロノ川流域と熊川流域

草地 83%、森林 7%、その他用地 10%であり、乳用牛頭数は 1,509 頭である。

3.2 研究方法

流域を対象とした平時の水質調査は月 2 回の頻度で実施したため、流域の水質特性を十分に把握できなかった。そこで、本章では、水質濃度の日変化を把握すること、両小流域の水質濃度に差が生じた要因を明らかにすること、水質解析モデルに適用すること、などを目的に水質連続観測を実施した。観測期間は 2018 年 9 月から 2019 年 11 月までであり、冬期は、夜間に河道が凍結することから連続観測を実施していない。それぞれの支川に、自動採水器、画像式流速計、水位計を設置した(写真-1)。自動採水器による採水は、1 日あたり 1 本のポリ瓶に複数の試料を採取するコンポジット採水とした。コンポジット採水は 0 時から開始し 2 時間間隔で行い、計 12 回採水する。採水量は 1 回あたり 80 mL、1 日あたり 960 mL である。これにより、当該日の平均的な水質試料を採水することが可能である。採水した試料は、密閉保冷状態で室内に運搬し、水質分析に供した。水質分析項目は、SS 濃度、T-N 濃度、NO₃-N 濃度、NO₂-N 濃度、NH₄-N 濃度、T-P 濃度であり、分析方法は JIS に準拠した。画像式流速計は、インターバルカメラを河道が写るように設置し、撮影された動画から瞬間流速を計算する手法である⁵⁾。画像式流速計は 10 分間隔で撮影しており、出水時における流量を観測することが可能である。水位計は、河道内に設置し、10 分間隔で水位を連続観測した。観測した流速と水位から出水時を含めた水位流量曲線を作成し、河川流量の連続データを計算した。

3.3 結果・考察

採水試料の水質濃度の経時変化を図-7 に示す。

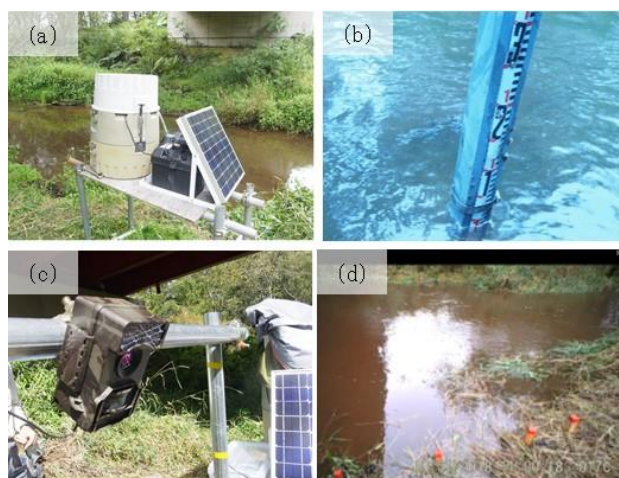


写真-1 観測機器の設置状況：(a)自動採水器、(b)水位計・量水標、(c)インターバルカメラ、(d)出水時の状況

SS 濃度は、日降水量が 20 mm/d 以上の降雨に対応して濃度が高くなり、2 日程度で下降する変動がみられた(図-7)。また、一部の出水を除き、熊川のほうが全体的に高い傾向がみられ、要因として河川形状と河床の状態の違いが考えられた。ヒロノ川の河川形状は直線で、河床は礫が多い状態であるのに対して、熊川の河川形状は蛇行を繰り返し、河床の土砂が堆積している状態である。そのため、出水時の SS 濃度に差が生じたと考えられた。

T-N 濃度と NO₃-N 濃度の経時変化を図-7 に示す。なお、NO₂-N 濃度と NH₄-N 濃度は微量の値が検出されたが、分析機器の測定限界以下の濃度であったため、ここでは考察から除外した。観測期間を通して T-N 濃度の大部分は NO₃-N 濃度であることがわかる。観測期間における NO₃-N 濃度の平均値は、ヒロノ川が 3.06 mg/L、熊川が 1.38 mg/L であり、平水時の採水調査結果(図-5(a))と同様に、ヒロノ川のほうが高い傾向を示した。また、出水

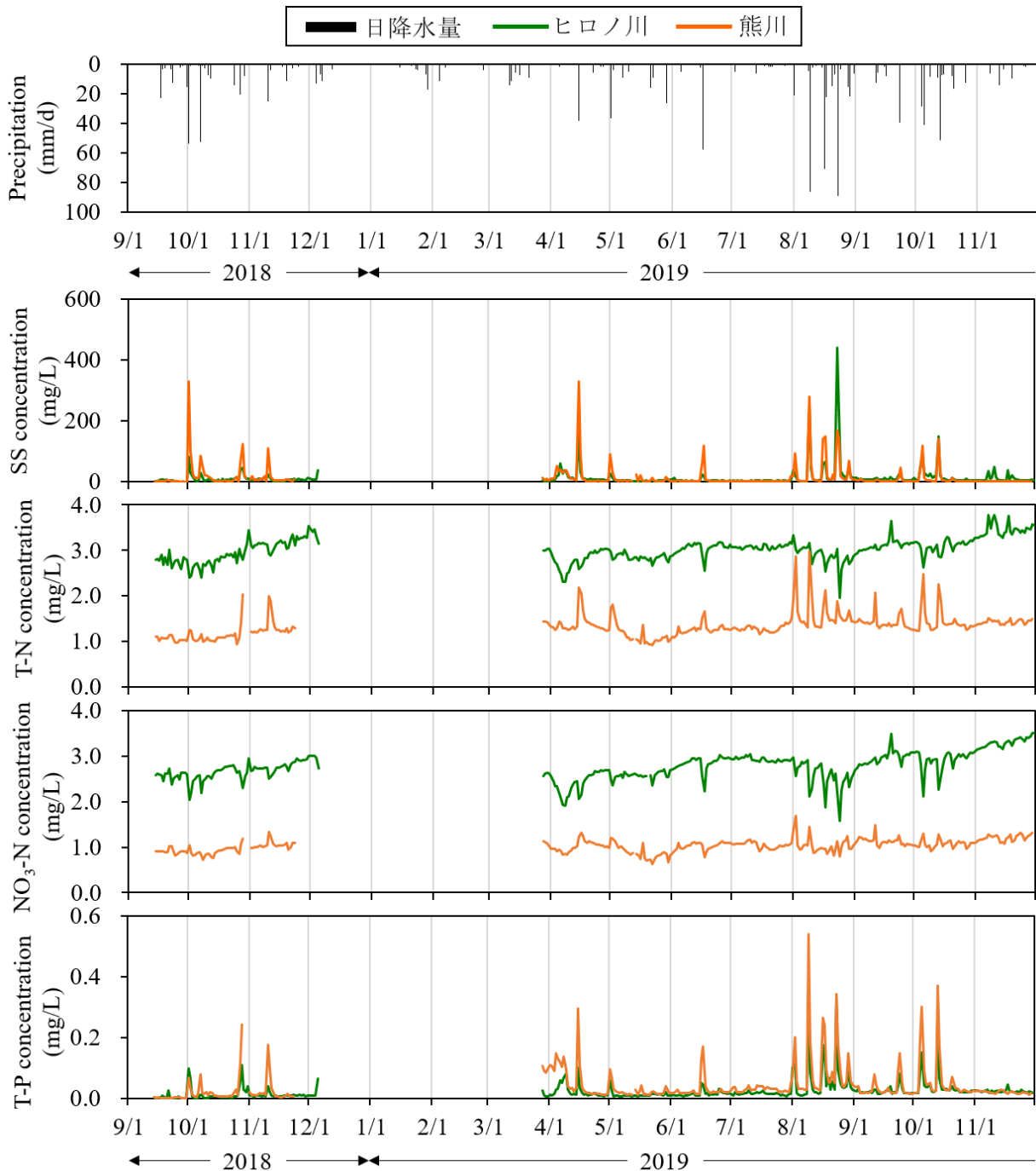


図-7 西別川支川における水質の経時変化

時のNO₃-N濃度は、ヒロノ川では減少するのに対して、熊川では上昇する傾向がみられた。その濃度変動が生じた要因の一つとして流域形状の違いが考えられる。ヒロノ川は流域形状が細長く、草地と河道が近いため、出水時には表面流出が基底流出よりも卓越することで希釈が生じ濃度が低下したと考えられる。一方で熊川は流域形状が広がっており、表面流出が少なく基底流出によって窒素成分が流出するため濃度が上昇したと考えられる。その他にも、濃度差が生じた要因として、事業の整備状況の違いや小流域内の事業地区の位置関係や事業の複合的な効果、地形連鎖による効果などが河川水質に与える影響なども考えられる。

TP濃度は、SS濃度の変動とよく対応している(図-7)。その要因として、リン酸が土粒子に吸着して流出していることが考えられる。SS濃度と同様に、ヒロノ川より熊川のほうがTP濃度が高い傾向にある。

以上より、水質濃度の経時変化から支川小流域の水質特性を明らかにした。同程度の乳用牛頭数密度にもかかわらず濃度差が生じた要因について明らかにするためには、小流域内の事業の実施状況や畜舎などの発生源の位置関係の情報を調べる必要がある。それらの情報をSWATモデルに反映させることが今後の課題である。

4. SWATによる水質解析

4.1 研究対象地

本章では、SWATによる水質解析を実施した。適用流域は、検証データとなる流量と水質データの実測値が長期間揃っていることから西別川流域とした(図-8)。SWATを西別川本川の中流に位置する長栄橋地点の受け持つ小流域に適用した結果、水質データが不定期に採水した瞬時値のデータであったため検証に課題があった。そこで、西別川支川のヒロノ川、熊川の観測地点が受け持つ小流域に適用した。ヒロノ川と熊川は、流域規模と乳用牛頭数密度が同程度であるが、河川水質状況が異なる流域である。SWATモデルの適用期間は、第3章の水質連続観

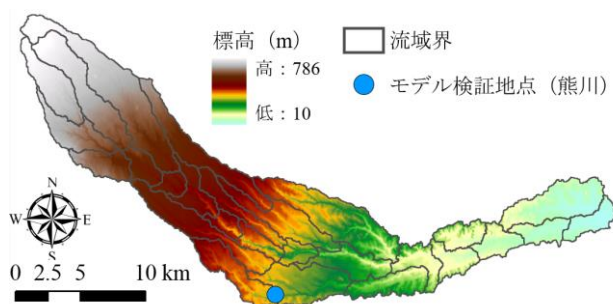


図-8 SWAT適用流域(西別川流域)

測を実施している期間に合わせ、2018年と2019年の2年間とした。SWATモデルの入力値である気象データは、気象庁アメダス観測所(別海、弟子屈、根室)より降水量、気温、相対湿度、風速、日照時間を入手した。なお日射量は、観測値が存在しなかったため日照時間から全天日射量の日平均値を推定する実験式⁶⁾を用いて換算した。

4.2 研究手法

4.2.1 SWATの概要

SWATは、米国農務省農業研究局によって開発された準分布型流出モデルであり、物理的なプロセスモデルである。SWATは、流域において気象、地形、土壌、土地利用、営農管理といった要素により影響を受ける水・物質動態を同時に扱うことができる。十分な精度の結果が得られることや効率的な解析を可能とするGISインターフェイスやサブソフト群が無償で提供されていることから、世界各地で適用されている。

SWATの入力データは、気象データ、空間情報データである。気象データは降水量、日最高気温、日最低気温、相対湿度、風速、日照時間であり日単位の値を入力する。また、土壌侵食量の計算や気象値の欠測を補間するため、気象観測点ごとに月単位の気象統計値をデータベースとして入力する。本研究では、各観測所における過去20年分の気象統計値を集計した。空間情報データは、地形データ、土地利用データ、土壌分類データである。地形データは、基盤地図情報より入手した。SWATでは、地形データから流域界を作成し、河道上にポイントデータを設定することで任意の小流域に分割することができる。本研究ではポイントデータとして水質観測地点を入力することで、西別川流域を31の小流域に分割した。土地利用データは、国土数値情報より入手し、土地利用種類ごとにSWATのデータベースにある該当する土地利用を選択する。土壌分類データは、国土庁土地局より入手し、土壌種類ごとにSWATのデータベースにある該当する土壌種類を選択する。しかし、データベースにない場合は、土壌厚、透水係数、粒径組成などを既往の文献²⁾を参考に新規に設定する。傾斜データは、地形データから傾斜を算出し、任意の標高の幅で分類する。

SWATはHRU(Hydrological Response Unit)と呼ばれる、土地利用、土壌、傾斜の組み合わせによって細かく分類されたグリッドの集合体によって流域を表現している。それぞれのHRU内において、水収支・物質収支により流出量、土砂流出量、栄養塩負荷量が計算され、小流域で集計された後、河道や池、貯水池を通り、流域末端へ流出量が計算される。流出量の計算は、表面流出の計算にSCS-Curve Number法、蒸発散量の計算にPenman-Monteith

法、浸透量の計算に GreenAmpt 法、側方浸透量の計算に Kinematic Wave 法、河道追跡の計算に Muskingum River Routing 法を採用している。SCS-Curve Number 法は、米国農務省土壌保全局によって開発された長期間の降水量と流出量データから得られた関係式である。Curve Number は流域曲線番号であり、土地利用や土壌の浸透能、作物の被覆条件などの流域の特徴を表すパラメータである。そのため、異なる土地利用や土壌タイプでも流出量を推定することが可能であり、実測値の少ない流域や様々な土地利用を持つ流域での流出解析に有効である⁷⁾。一方で、土砂流出量の計算は、Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)法が採用され、表面流出量やピーク流出量の関数などで表現される。窒素およびリンの栄養塩流出は、施肥などの栄養塩の投入および土壌内の形態変化などの物質循環により計算され、表面流出や横方向の地下水流出により下流に運ばれる。

SWAT において、国営環境保全型かんがい排水事業で整備された肥培灌漑施設、土砂かん止林、浄化型排水施設を表現するため、土地利用管理と貯留地の項目を設定する。土地利用管理では、土地利用が農地の場合に作付、耕起、施肥、収穫などの管理スケジュールを設定する。肥培灌漑施設は、家畜ふん尿を有機質肥料(スラリー)にする施設であり、管理スケジュールの施肥の項目で肥料成分としてスラリーを投入する。また、土地利用管理のなかに、HRU の端に土砂流出量や栄養塩流出量をフィルタする機能を設定することができる。この値を設定することで、河川と農地の間に緩衝帯としての土砂かん止林を表現する。貯留地では任意の地点にポイントソースを設定し、水収支、物質収支の計算がされる。位置情報や規模をなどの諸元を入力し、水質浄化池を表現する。本研究では、SWAT で肥培灌漑施設を表現するため農地の営農管理スケジュールについて検討した。

4.2.2 営農管理スケジュールの設定

牧草地の営農管理スケジュールの設定項目は、耕起、作付、施肥、収穫である。道東地域の牧草地の栽培スケジュールは、一番草の施肥は4月25日に、収穫は7月10日に設定し、二番草の施肥は7月20日に、収穫は9月10日に設定した。草地更新は通常、6年から10年に1回の頻度で行われるため、本研究では6年で草地更新するとして、耕起および作付は草地更新時に設定した。栽培スケジュールは、気象条件によって年ごと、農地ごとで異なり、また、草地更新のタイミングも農地ごとで異なるが、本研究では一律に設定した。今後は衛星画像などにより、年ごと農地ごとに栽培スケジュールを把握することが課題である。

牧草地の施肥は、北海道施肥ガイド2015 牧草飼料作物⁸⁾によると、施肥標準と土壌診断に基づき、年間の肥料養分量を算出し、堆肥やスラリーなどの有機物が化学肥料のいずれかで補給するとされている。また、不必要な養分が牧草地に投入されないように配慮するとともに、農家から算出される有機物が、牧草地に毎年無理なく還元されるように対策を講じることが重要とされている。流域のすべての牧草地に、投入された施肥量を把握し SWAT に反映させることは困難なため、本研究では、各農家で生産された有機物は各農家の牧草地に還元されることを前提として施肥種類と施肥量を決定した。肥培灌漑施設がある場合はスラリーとして、無い場合は堆肥として施肥し、施肥標準より不足する場合は化学肥料を追加して施肥する。また、第2章で整理した乳用牛頭数密度に乳用牛一頭あたりのふん尿量⁹⁾を乗じて有機物量を算出し、さらにスラリーの場合は重量あたりの希釈倍率3を乗じて単位面積あたりの施肥量を小流域ごとに決定した。各肥料の窒素、リン、カリの成分量は北海道施肥ガイド2015 牧草飼料作物⁸⁾を参考に設定した。流域平均の乳用牛頭数密度を用いて概算すると、窒素・リン成分の投入量は、概ね施肥標準と同程度であった。

4.3 結果・考察

本章では、肥培灌漑施設が整備済みである熊川流域に SWAT を適用した。なお、ヒロノ川流域は、事業の未完了地区であり施肥などの営農管理スケジュールを十分に設定できなかったため、解析から除外した。モデルの適用期間は、流量と水質の連続データを取得した2018年から2019年の2年間とした。実測値に合うように河川流出量、土砂流出量、栄養塩流出量に関するモデルパラメータを同定した。パラメータの最適化は、SWAT に付与されている自動キャリブレーション機能である SWAT CUP を用いて、繰り返し計算しパラメータの感度分析により実行される。

SWAT を熊川流域に適用した結果を(図-9)に示す。計算結果として、積算バイオマス量、単位収穫量、河川流量、土砂流出量、栄養塩流出量を示す。積算バイオマス量は、牧草の葉の生育や根の伸長などの作物生長を表し、作期を通して増加する変化を示した。単位収穫量は、一番草が5.2t/ha、二番草が2.7t/haと推定され、根室農業改良普及センターの実測値¹⁰⁾と同程度であった。以上から、牧草地の生育状況を再現したことにより、作期を通じた地表・土壌面状態が再現された。河川流量は、実測値と計算値を比較すると、平水時は概ね実測値を再現した結果が得られたが、出水時に過大推定する傾向がみられた。特に、無降雨日が続いた後の出水でその傾向が強くなり、地

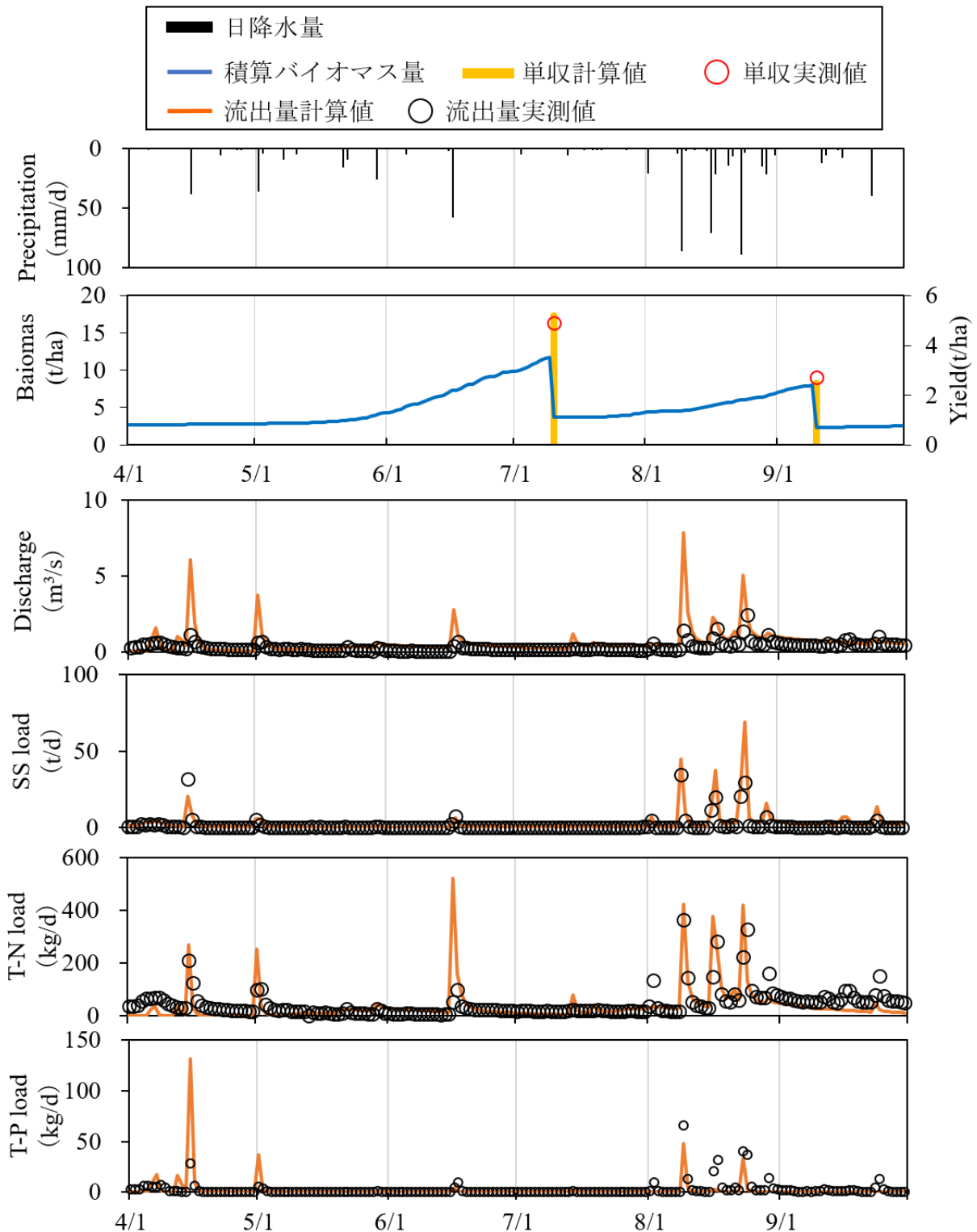


図-9 SWAT 解析結果 (2019年4月~9月)

中に浸透し、側方流出や地下水流出として河川に到達する流出成分が、表面流出として計算されていると考えられる。今後は、土壌の水分状態など適切に計算されているかを分析し、流出成分ごとにパラメータを再調整する必要がある。土砂流出量、栄養塩流出量は、一部の出水で

過大推定する傾向がみられるものの、平水時、出水時ともに概ね実測値を再現した結果が得られた。一番草の作期では、先述した課題により土砂流出と栄養塩流出の再現精度もやや劣るが、二番草の作期では、牧草の生育過程が再現され、地表・土壌面の水文過程が表現されてい

ることにより、土砂と栄養塩の流出過程と減衰過程が再現されたといえる。しかし、出水時に河川流量が過大推定されており、土砂流出と栄養塩流出はパラメータの調整により抑制されている可能性がある。河川流量の計算が改善されれば、土砂流出と栄養塩流出に関するパラメータを再調整する必要がある。

5. まとめ

北海道東部の大規模酪農地帯を対象として、SWATを用いた水質解析により、水質環境改善手法を提案することを目的とした。本研究では、1) 平水時の河川水質と土地利用・営農状況との関係を明らかにし、2) 支川における水質連続観測により水質変動特性を明らかにし、3) SWATの水質解析では、西別川支川の熊川流域を対象として、農地の営農管理スケジュールを設定し、河川流量、土砂流出量、栄養塩流出量に関してパラメータの同定を行った。主要な成果は以下にまとめられる。

- 1) 窒素成分の主成分である $\text{NO}_3\text{-N}$ 排出濃度と流域面積あたり乳用牛頭数密度との関係性を調べた結果、正の相関関係が得られた。また、河畔林や湿地の浄化作用の効果を検討するため、河畔土地利用の草地率を用いて排出濃度から発生濃度への変換を行い、流域面積あたりの乳用牛頭数密度との関係を調べると、相関係数が向上した。近似直線から外れる小流域が存在し、流域規模において、事業の実施により負荷を抑制している可能性が示された。
- 2) ヒロノ川と熊川のSS濃度とTP濃度は、出水時に濃度が高くなり、熊川のほうが、濃度が高くなる傾向がみられ、その要因として河川形状による河床の土砂堆積の状態の違いが考えられた。一方で、ヒロノ川と熊川のTN濃度は差が大きく、その大部分が $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度であることがわかった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に差が生じた要因として、事業の整備状況の違いや小流域内の事業地区の位置関係や事業の複合的な効果、地形連鎖による効果などが河川水質に与える影響が考えられる。また、出水時の濃度変動の違いが生じた要因として、流域形状が異なるため、流出特性に違いが生じたと考えられる。今後は、小流域内の事業の実施状況や畜舎などの発生源の位置関係の情報を調べる必要があり、それらの情報をSWATに反映させることが課題である。
- 3) SWATによる水質解析では、作物の生育状態と流出量を計算し実測値と検証した。牧草の葉の生育や根の伸長などの作物生長が作期を通して表現され、単位収穫量の実測値を再現した。河川流量は、平水時

は実測値を再現し、出水時は過大推定する傾向がみられ、土砂流出量と栄養塩流出量は平水時、出水時ともに概ね再現された。一部の出水で課題がみられるものの、牧草の生育過程が再現され、地表・土壌面の水文過程が表現されていることにより、土砂と栄養塩の流出過程と減衰過程が再現されたといえる。今後は、パラメータを再調整し解析精度を向上させるとともに、営農管理スケジュールを詳細化し、流域特性が異なる小流域（ヒロノ川流域）に適用する必要がある。

参考文献

- 1) 酒井治、三枝俊哉：「草地酪農地帯の養分収支に基づく河川水質の予測：2.SWATによる河川水質予測値の適合性改善」、日本土壤肥科学会講演要旨集、54、p.254、2007 農林水産省：食料・農業・農村基本計画、2015
- 2) Chunying WANG：「SWATモデルによる北海道東部の標津川流域における水、土砂、養分流出予測」、北海道大学博士論文、2014
- 3) 農林水産技術協会：「環境保全と新しい畜産」、p.20、1997
- 4) 志村もと子、田淵俊雄：養牛流域における畜産と河川水窒素濃度との関係－畜産主体の集水域における窒素流出に関する研究（IV）－、農業土木学会論文集、189、pp.45-50、1997
- 5) 国立研究開発法人土木研究所水工研究グループ水文チーム：流量観測の高度化マニュアル（高水流量観測編）Ver1.2、2016
- 6) 近藤純正 編著：「水環境の気象学」、1994
- 7) 清水裕太、小野寺真一：郊外農業流域での栄養塩流出に及ぼす気候変動の影響、陸水学雑誌、73、pp.235-254、2012
- 8) 北海道庁農政部：「北海道施肥ガイド2015V 牧草・飼養作物」、pp.196-229、2015
- 9) 公益財団法人石川県畜産協会：「いしかわのちくさん」、<http://ishikawa.lin.gr.jp/kankyo/02.htm>
- 10) 北海道産業振興部：「令和元年度牧草収量調査結果」、2019