

13.7 流域規模での水・物質循環管理支援モデルに関する研究(2)

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：水環境研究グループ（水質）

研究担当者：鈴木穰、小森行也、岡安祐司

【要旨】

流域で発生する栄養塩類の閉鎖性水域への流出機構を明らかにするために、生活系、畜産系の汚濁物質発生特性（トレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態）の解明を行い、流域における生活系汚濁排出量とその他の汚濁排出量の割合が異なる複数の流域を対象として、晴天時、雨天時におけるこれらの物質の流達特性を把握した。その結果、トレーサー物質と溶解性栄養塩類の濃度比の整理から、生活系以外の畜産系と考えられる汚濁源の存在を推定することが可能であった。

キーワード： 流域モデル、トレーサー、栄養塩類、流出機構、生活排水、畜産排水、物質循環

1. はじめに

閉鎖性水域や河川において、種々の対策が行われているにも関わらず、栄養塩濃度は横ばい傾向にある。水質改善のために河川管理者によるマスタープラン策定が行われているが、発生源ごとの水域への栄養塩類の流出機構が明確でなく、また、発生源ごとの寄与度と対策効果を総合的に評価できる流域規模の水質評価モデルが存在しないという問題点があるため、目標の実現に不確実性が残る。水質改善計画を確実なものとするためには、発生源ごとに窒素・リン等の栄養塩類の流出過程を追跡する手法と、土地利用や営農形態の変化等の定量的影響やそれらの相互関係を含めて総合的に把握・分析できるツールを開発する必要がある。

本研究では、土木研究所で開発中の流域水・物質循環モデル(WEPモデル)を基盤としつつ、栄養塩類の発生源ごとに水域への流出機構を明らかにし、窒素流出・輸送モデルを改良するとともに新たにリン流出・輸送モデルを追加することで、表流水と地下水の流域規模での総合的な水・物質循環モデルとして実用的なものとする。

水質チームは、①試験流域における水質・水文データ収集を行い、その情報を元に、②発生源ごとの水質特性の解明を行い、③発生源から水域への栄養塩類の流出機構の解明を行う部分を担当する。

2. 平成 20 年度調査の内容

2.1 晴天時流出特性の把握

流域で発生する汚濁負荷が水域へ到達する機構を考察するための基礎情報収集を目的として、流域におけ

る点源と面源の割合が異なる複数の流域を対象として、水質の実態を調査した。

平成 18 年度調査では、生活系の汚濁物質発生特性の解明、および、流域で発生する汚濁負荷が水域へ到達する機構の解明のため、①利根川水系手賀沼流入河川の大津川の支流、②利根川水系北浦流入河川を対象に晴天時のトレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態を調査した。

平成 19 年度は対象流域として、①利根川水系手賀沼流入河川の大津川の支流（平成 18 年度調査に比べて採水地点を増加）、②利根川水系北浦流入河川の鉾田川（平成 18 年度調査で、畜産系排水の混入が示唆された地点）③群馬県赤城山西南麓の河川を選定し、晴天時のトレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態を調査した。

平成 20 年度は対象流域として、利根川水系鬼怒川の支川である山川を選定し、晴天時のトレーサー物質及び栄養塩類の実態を調査した。本支流域内の家畜頭数は人口と同程度の高水準であり、畜産系排水の混入が想定される。

なお、晴天時には、生活系、事業系、大規模な畜産系等の点源で発生する汚濁が、人為的な処理や流下過程で土壌への吸着や生物などへの摂取により低減されて、その残りが恒常的に水域へ到達していると考えられる。閉鎖性水域へ到達する汚濁負荷の総量を考える際には、晴天時に一時的に流域に保持された汚濁負荷が雨天時に移動することも考慮する必要があり、雨天時も含めた調査が必要である。

2.1.1. 山川における非灌漑期晴天時水質の調査

畜産業が盛んで、流域における汚濁発生量総量に占める畜産系汚濁負荷の割合が大きいと考えられる利根川水系鬼怒川右岸山川流域を対象に、トレーサー物質 (Na^+) および溶解性栄養塩類 (K^+ , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{D-PO}_4^{3-}\text{-P}$) の実態調査を実施した。採水は図-1 に示す4箇所で、平成20年12月～平成21年3月の間、各箇所7回晴天時の日中に実施した。結果を図-2～5に示す。ここでは Na^+ を基準に整理した。吉田用水や霞ヶ浦用水は非灌漑期には、必要最小限の維持用水を供給しており、この地域の非灌漑期の基本的な水を構成していると考えられる。 Na^+ 、 K^+ 、D-N ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の合計)、D-P ($\text{D-PO}_4^{3-}\text{-P}$)、DOC 濃度の平均値は、霞ヶ浦用水では、9.69、2.09、0.62、0.004、 $4.28\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であり、 K^+/Na^+ の平均値は0.216であった。一方、吉田用水では、17.10、3.39、4.09、0.120、 $4.04\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であり、 K^+/Na^+ の平均値は0.198であった。

図中には、当該期間に山川流域において発生すると推定される生活排水の Na^+ 濃度の範囲と、生活排水が純水で希釈される場合のトレーサー物質および溶解性栄養塩類の濃度を点線で示した。なお、生活排水中のトレーサー物質および溶解性栄養塩類の濃度は、山川流域内の2ヶ所で同時期に、同頻度で採取された上水の水質測定結果に、生活排水として発生するトレーサー物質および溶解性栄養塩類の濃度³⁾を加えて算出した。

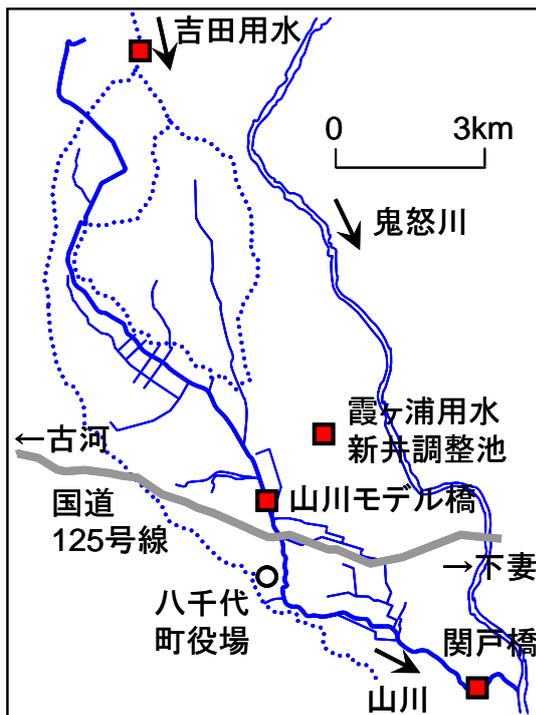


図-1 山川流域採水地点

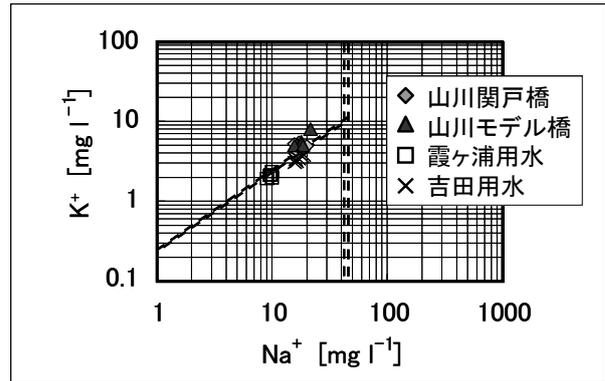


図-2 ナトリウムイオン濃度とカリウムイオン濃度の関係

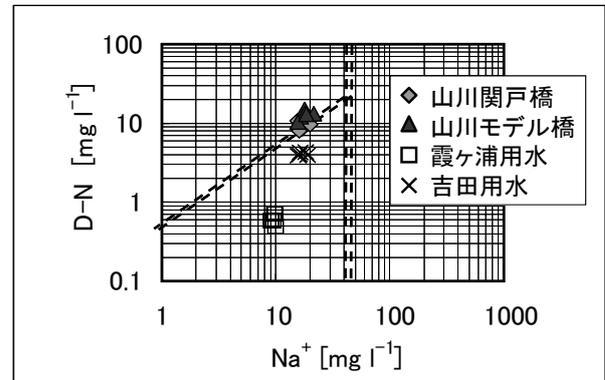


図-3 ナトリウムイオン濃度と溶解性窒素濃度の関係

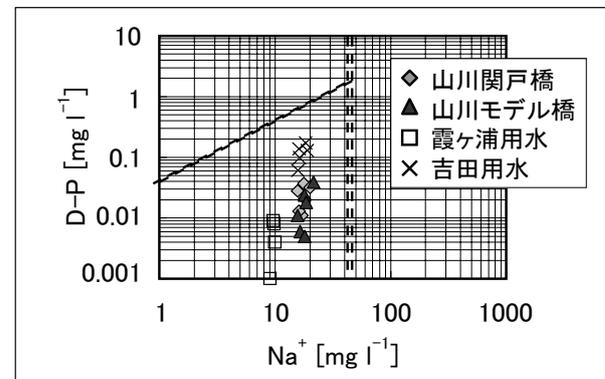


図-4 ナトリウムイオン濃度と溶解性リン濃度の関係

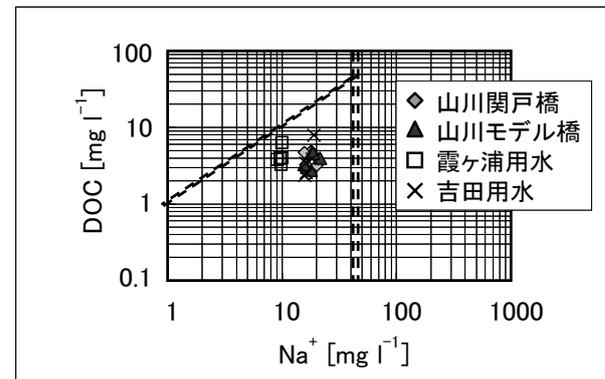


図-5 ナトリウムイオン濃度と溶解性有機炭素濃度の関係

山川関戸橋、山川モデル橋で観測された Na^+ 濃度は $15.62\sim 21.53\text{mg l}^{-1}$ の範囲で、生活排水の推定濃度である $40.4\sim 46.4\text{mg l}^{-1}$ と比べて低く、 Na^+ 濃度が大きい排水の程度は小さいと考えられる。 K^+/Na^+ は、生活排水の推定値は $0.203\sim 0.292$ であり、仮に生活排水以外に汚濁排出源が無く、基底的水（吉田用水や霞ヶ浦用水）で希釈を受けているとすれば、山川流域の K^+/Na^+ は、基底的水の値（0.198、0.216）と生活排水の推定値（0.203～0.292）の間の値となるはずであるが、実際に観測された値は $0.246\sim 0.370$ とやや大きく、この流域には生活排水以外の K^+/Na^+ の大きい排水が混入している可能性があると考えられる。

D-N/ Na^+ に関しても、生活排水の推定値が $0.471\sim 0.546$ であるのに対して、 $0.479\sim 0.826$ と大きく、D-N/ Na^+ の大きい排水が混入している可能性があると考えられる。

D-P、DOC の各プロットは、生活排水が純水で希釈される斜め線よりも下部に位置しており、流域内で負荷が低減されていると考えられる。

2.1.2. 山川流域からの非灌漑期晴天時流達負荷量の調査

山川流域からの非灌漑期の晴天時の流達負荷量を調査するために、山川関戸橋において、平成 20 年 2 月 17 日 12:00～平成 21 年 2 月 18 日 12:00 の間、4 時間間隔で、流量観測及びトレーサー物質（ Na^+ ）、溶解性栄養塩類（ K^+ 、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、 $\text{D-PO}_4^{3--}\text{P}$ ）、BOD、COD、T-N、T-P の水質測定を実施した。得られた負荷量の積分値を表-1 に示す。ここでは、流域面積あたりの比負荷量、 Na^+ 負荷量に対する他の項目の負荷量の比率を合わせて示す。

表-1 山川流域からの晴天時流達負荷量の調査結果

水質項目 <i>i</i>	流達負荷量		i/Na^+
	kg/日	kg/日/ha	
Na^+	820	0.263	—
K^+	257	0.0825	0.312
D-N	810	0.260	0.989
D-P	0.595	0.0002	0.0007
DOC	140	0.0449	0.171
BOD	116	0.0374	0.141
COD	244	0.0782	0.297
T-N	871	0.280	1.065
T-P	4.90	0.0016	0.0060

2.1.3. 山川流域への排出負荷量の推定

山川流域への各排出源からの排出負荷量の推定を、原単位法に基づいて行った。

利根川流域に関しては、国土交通省関東地方整備局が目下、利根川流域別下水道整備総合計画の改訂を進めており、平成 18 年度現在の生活系、事業系、観光系、施設系の排出負荷量について、表-2 のようにとりまとめている。

表-2 生活系及び事業系の排出負荷量 [kg/日]

	生活系	事業系	観光系	施設系	小計
COD	212	743	0	2	957
T-N	86.8	46.5	0.2	4	138
T-P	11.3	19.6	0.0	0.0	31.0

表-3 畜産系のフレーム値及び排出負荷量

畜種	フレーム値 [頭]	項目	排出負荷量	排出
			原単位 [kg/日/頭]	負荷量 [kg/日]
牛	561	COD	31	17.4
		T-N	7.85	24.2
		T-P	0.24	0.135
豚	11208	COD	5.74	88.0
		T-N	5.74	64.3
		T-P	0.12	1.345

表-4 面源系のフレーム値及び排出負荷量

	フレーム値 [ha]	項目	排出負荷量	排出
			原単位 [kg/ha/年]	負荷量 [kg/日]
水田	1167	COD	24.2	77.4
		T-N	9.1	29.1
		T-P	0.26	0.83
畑地・果樹園	1228	COD	8.9	29.9
		T-N	19.2	64.6
		T-P	0.28	0.94
山林	165	COD	14.0	6.35
		T-N	5.7	2.60
		T-P	0.20	0.091
市街地	527	COD	55.8	80.6
		T-N	9.9	14.3
		T-P	0.91	1.31

さらに、畜産系及び面源系については、フレーム値がまとめられている。ここでは、第5期霞ヶ浦の湖沼水質保全計画で用いられている排出負荷量原単位を用いて、表-3、表-4のように排出負荷量を算定した。

さらに、生活系、事業系、観光系、施設系、畜産系及び面源系の排出負荷量を総計した結果、総排出負荷量は、COD、T-N、T-P について、それぞれ、1176kg/日、322kg/日、34.3kg/日と算出された。

2.1.4. 非灌漑期晴天時汚濁負荷流達率の算定

非灌漑期の晴天時の汚濁負荷流達率は、2.1.2.で算定された流達負荷量を、2.1.3.で算定された排出負荷量で除して求められ、COD、T-N、T-P の流達率は、それぞれ、20.7%、270.5%、14.3%と算出された。

一般的には、汚濁源から排出された汚濁物質は、晴天時には多くの部分が流域に滞留し、雨天時に掃流されると考えられ、COD、T-P に関しては、この機構が当てはまると考えられるが、T-N に関しては、流達負荷量が排出負荷量を大きく上回っており、排出負荷量を過小評価している可能性が考えられる。

本流域では、2.1.1.で示したように、非灌漑期晴天時に生活排水以外の K^+/Na^+ の大きい排水が混入している可能性が示された。一方で、本流域では、 K^+/Na^+ の大きい排水を排出する畜産業が盛んなことから、畜産排水の混入が示唆され、これらの関連性について詳細な調査を行う必要があると考えられる。

さらに、今後は、雨天時も含めた流達負荷量の測定を行い、汚濁負荷が水域へ到達する機構の解明を行う予定である。

2.2 雨天時流出特性の把握

流域で発生する汚濁負荷が水域へ到達する機構を考察するための基礎情報収集を目的として、流域における点源と面源の割合が異なる複数の流域を対象として、雨天時水質の実態を調査した。

平成 19 年度は対象流域として、畜産業が盛んな利根川水系北浦流入河川の銚田川を選定し、雨天時のトレーサー物質 (Na^+) 及び溶解性栄養塩類 (K^+ 、 NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ 、 $NO_3^- -N$ 、 $D-PO_4^{3-}-P$) の実態調査を実施した。

平成 20 年度は、流域における汚濁負荷発生総量に占める生活系の割合が大きい利根川流域手賀沼流入河川の支流を対象に、雨天時のトレーサー物質 (Na^+) 及び溶解性栄養塩類 (K^+ 、 NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ 、 $NO_3^- -N$ 、 $D-PO_4^{3-}-P$) の実態調査を実施した。採水は、図-6に

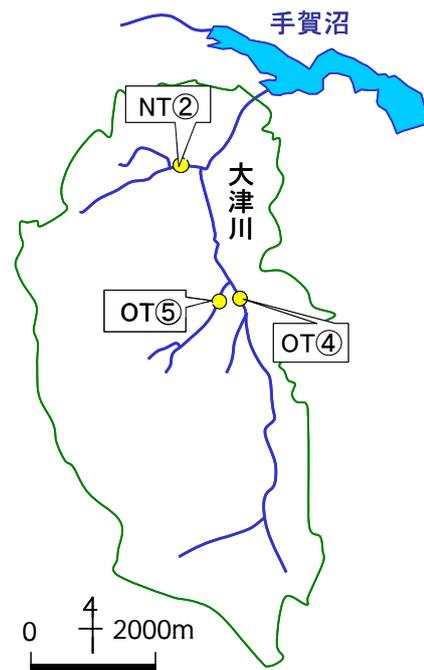


図-6 大津川調査採水地点

示す NT②、OT④、OT⑤の3ヶ所で、平成 20 年 4 月 8 日～9 日の間、各箇所 9 回ずつ採水を実施した。なお、採水時には、採水地点の流量を合わせて測定した。また、採水時の対象流域における降雨量は、国土交通省防災情報提供センターで公開されている国土交通省関東地方整備局千葉国道事務所柏維持修繕出張所（千葉県柏市吉野沢 3-9）での雨量観測結果を用いた。

図-7 に降雨量の時間変化を示す。降雨開始より 2 時間前を 0 時間の基準と設定した。降雨開始後 23 時間の間の累積雨量は 64mm であった。図-8 に各地点での比流量の時間変化を示す。各地点の流出特性が類似していることから、ほぼ同様の流出の状況が観測された。図-9 に比流量とナトリウムイオン負荷量の関係を、図-10 に比流量とカリウムイオン負荷量の関係を示す。比流量と負荷量の関係を

$$L = aQ^b$$

ここで、 L : 負荷量 [$g/s/km^2$]

Q : 比流量 [$m^3/s/km^2$]

a, b : それぞれ定数

と仮定し近似式を得ると、定数 a, b は表-5 のようにまとめられる。今回の調査で観測された比流量の範囲では、NT②での近似式の負荷量の値が他の 2 地点に比べて小さかった。NT②の流域は、系外放流されている下水道の整備が他の流域に比べて進んでおり、浄化槽排水や雑排水の混入密度が小さいことが反映されているものと考えられる。

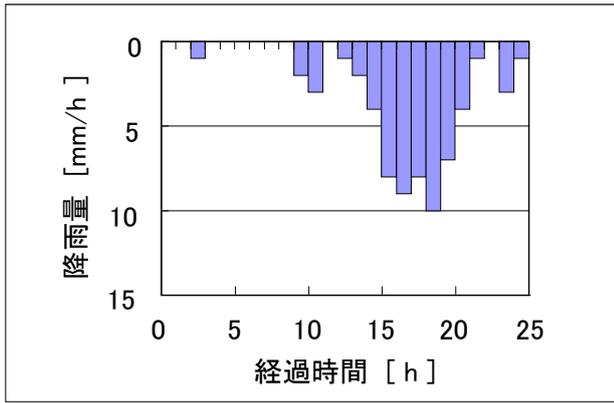


図-7 降雨量の時間変化

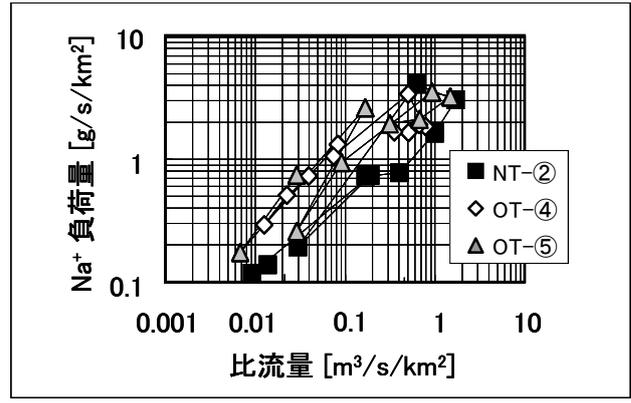


図-9 比流量とナトリウムイオン負荷量の関係

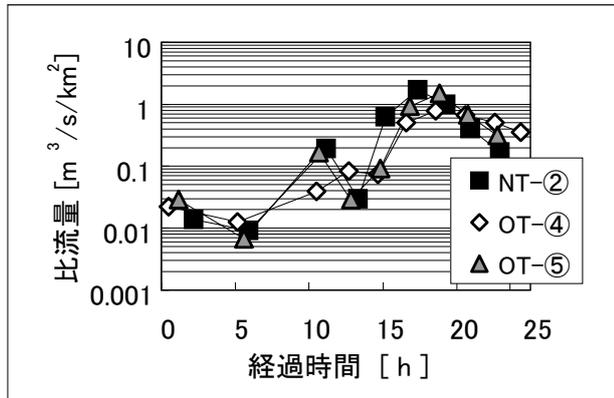


図-8 流量の時間変化

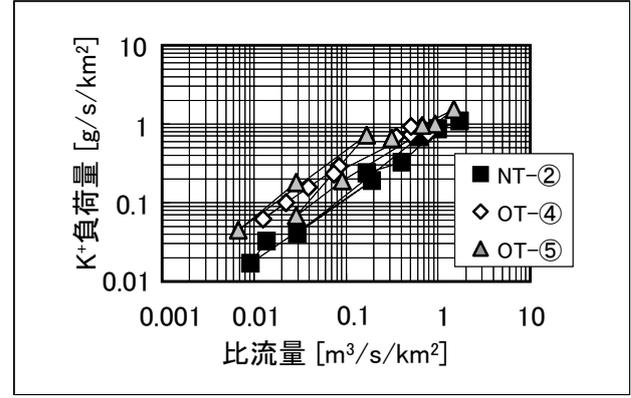


図-10 比流量とカリウムイオン負荷量の関係

表-5 比流量と負荷量の関係

項目↓	地点→	NT-②	OT-④	OT-⑤
Na ⁺	a	2.26	2.76	3.45
	b	0.65	0.44	0.56
K ⁺	a	0.81	1.20	1.27
	b	0.80	0.64	0.67

図-11 に K⁺/Na⁺ の時間変化を示す。各地点とも大きな差は見られなかった。また、K⁺/Na⁺ は流量の増加とともに一時的に 0.5 程度まで増加したが、時間の経過とともに減少した。平成 19 年度に、利根川水系北浦の流入河川である銚田川の支流で実施した雨天時調査結果²⁾では、畜産排水の混入がほとんどなく、流域における汚濁負荷発生総量に占める生活系の割合が大きい支流では、K⁺/Na⁺ が 0.5 程度までの増加で抑えられており、同様の傾向が見出された。なお、平成 19 年度の銚田川雨天時調査では、畜産排水の混入が考えられる支流では K⁺/Na⁺ が 0.6~1.4 程度にまで増加しており、対照的であった。

平成 20 年度の大津川雨天時調査で得られた各栄養塩類、有機汚濁指標負荷量と比流量の関係を図-12~

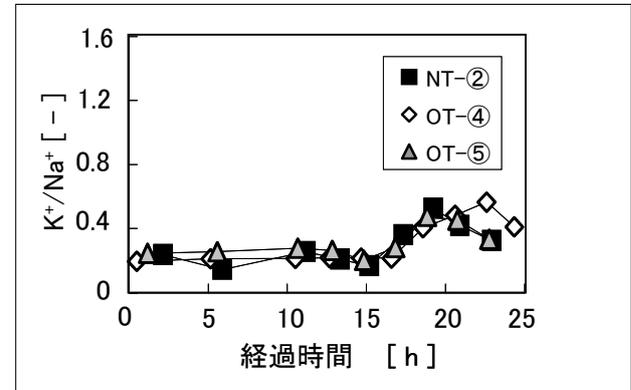


図-11 カリウム/ナトリウムイオン濃度比の時間変化

17 に、得られた近似式の定数 a 、 b を表-6、表-7 に示す。Na⁺、K⁺ と同様に、NT-② 地点での近似式の負荷量の値が、他の 2 地点に比べて小さかった。

図 18~29 に、トレーサー物質 (Na⁺、K⁺) の負荷量と各栄養塩類、有機汚濁指標負荷量の関係を示す。NT-② 地点での Na⁺ 負荷量に対する D-P 負荷量の比率が他の 2 地点と比べて小さく、D-P が懸濁態化している可能性が示唆された。

今後も、雨天時調査を実施し、流出負荷量と流量の関係を把握していく予定である。

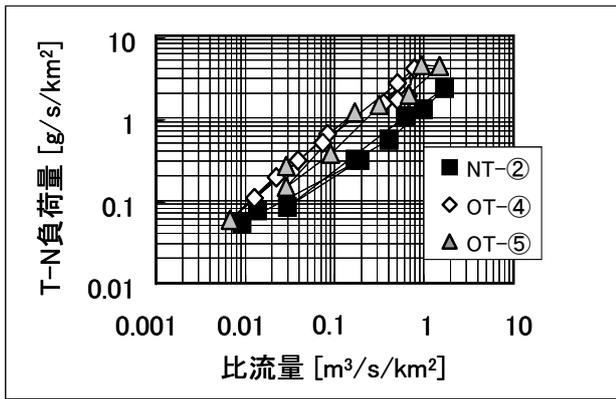


図-12 比流量と全窒素負荷量の関係

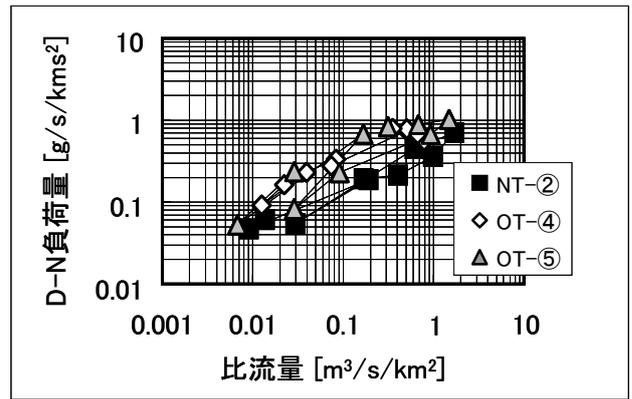


図-15 比流量と溶解性窒素負荷量の関係

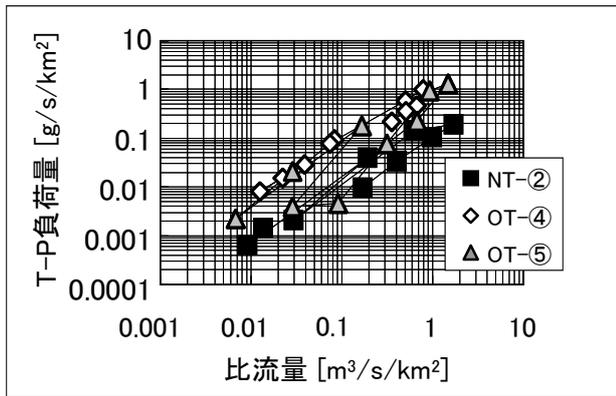


図-13 比流量と全りん負荷量の関係

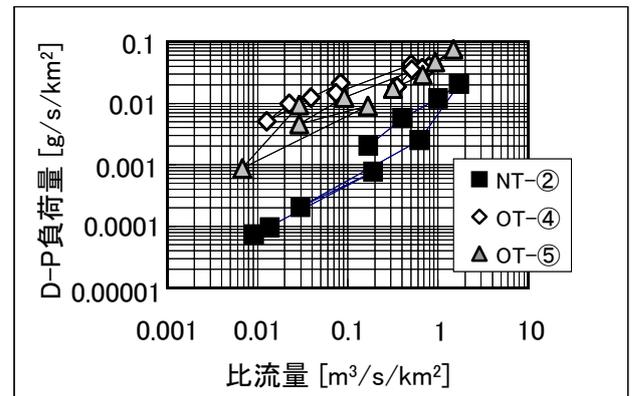


図-16 比流量と溶解性りん負荷量の関係

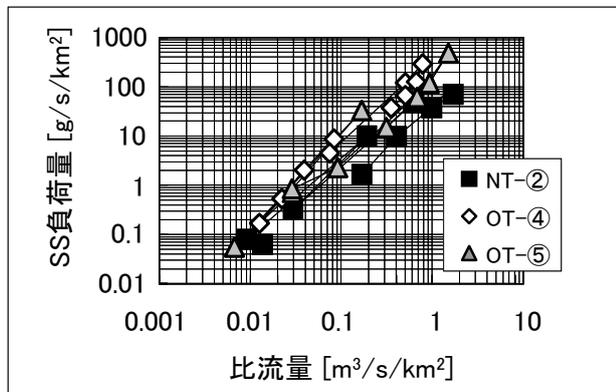


図-14 比流量と浮遊物質負荷量の関係

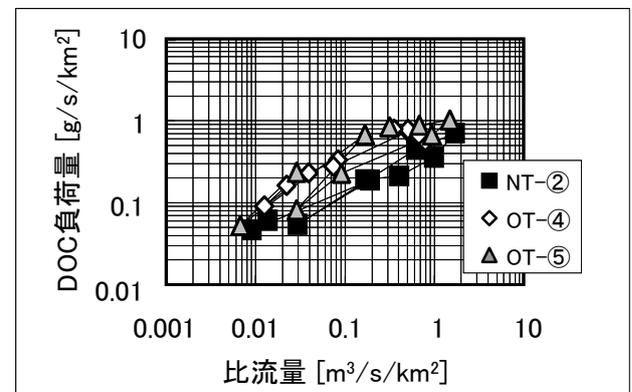


図-17 比流量と溶解性有機炭素負荷量の関係

表-6 比流量と負荷量の関係

項目↓	地点→	NT-②	OT-④	OT-⑤
T-N	a	1.24	3.60	3.53
	b	0.70	0.77	0.82
T-P	a	0.124	0.928	0.543
	b	1.10	1.06	1.20
SS	a	44.0	300	167
	b	1.42	1.64	1.56

表-7 比流量と負荷量の関係

項目↓	地点→	NT-②	OT-④	OT-⑤
D-N	a	0.44	0.94	1.03
	b	0.50	0.47	0.56
D-P	a	0.0091	0.0457	0.0475
	b	1.06	0.44	0.69
DOC	a	1.78	2.35	2.33
	b	0.79	0.70	0.75

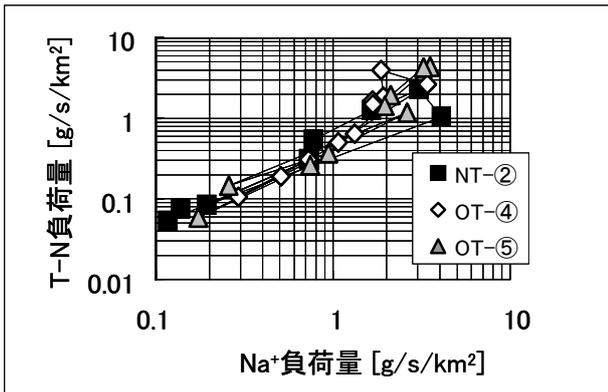


図-18 ナトリウムイオン負荷量と全窒素負荷量の関係

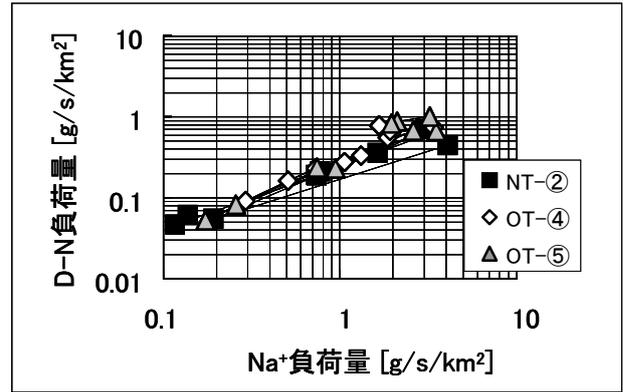


図-21 ナトリウムイオン負荷量と溶解性窒素負荷量の関係

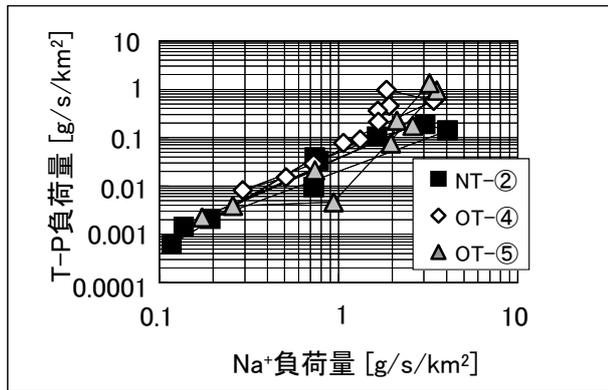


図-19 ナトリウムイオン負荷量と全りん負荷量の関係

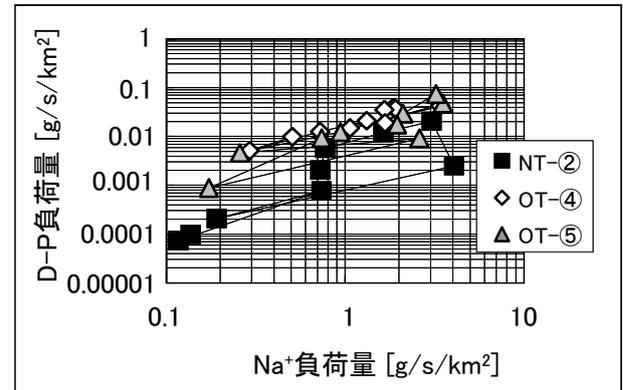


図-22 ナトリウムイオン負荷量と溶解性りん負荷量の関係

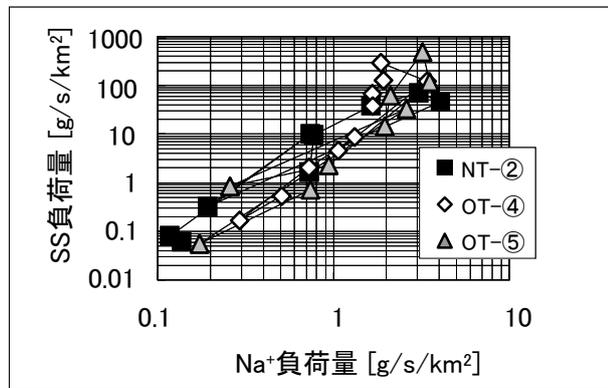


図-20 ナトリウムイオン負荷量と浮遊物質負荷量の関係

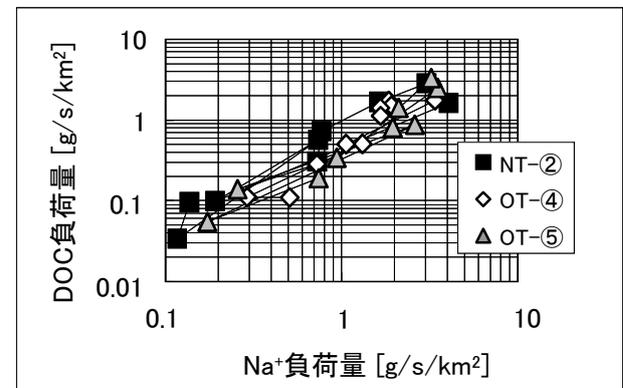


図-23 ナトリウムイオン負荷量と溶解性有機炭素負荷量の関係

3. まとめ

流域で発生する栄養塩類の閉鎖性水域への流出機構を明らかにするために、平成 20 年度は流域で発生する汚濁負荷が水域へ到達する機構を考察するための基礎情報収集を目的として、利根川水系鬼怒川の支川である山川を選定し、晴天時のトレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態を調査した。

その結果、畜産排水の混入について考察するマーカーとして K^+/Na^+ 値が有効であると考えられた。

さらに、利根川水系手賀沼流入河川の天津川支流域

において、雨天時のトレーサー物質、栄養塩類、有機汚濁指標の流出特性についても調査を行い、トレーサー物質と溶解性栄養塩類の流出負荷量、濃度比の整理を行った。

今後は、山川流域において、特に畜産排水に着目した各種発生源の汚濁物質発生特性の把握、土地利用情報収集、懸濁成分の分析、雨天時流出実態調査の充実等の詳細な検討を行い、汚濁発生源から水域への栄養塩類の流出機構の解明を行う予定である。

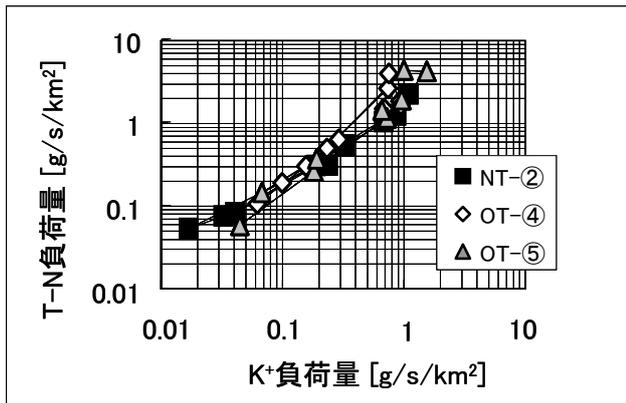


図-24 カリウムイオン負荷量と全窒素負荷量の関係

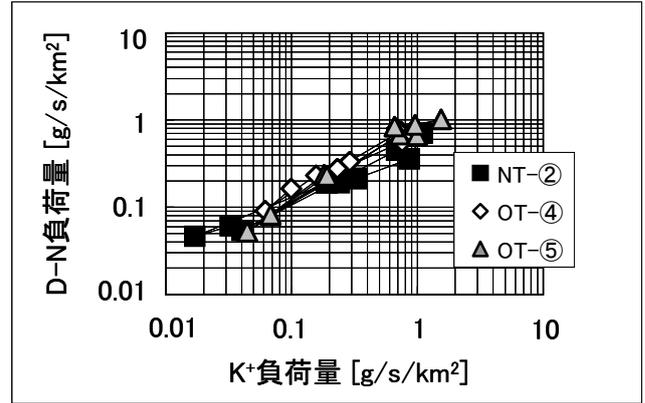


図-27 カリウムイオン負荷量と溶解性窒素負荷量の関係

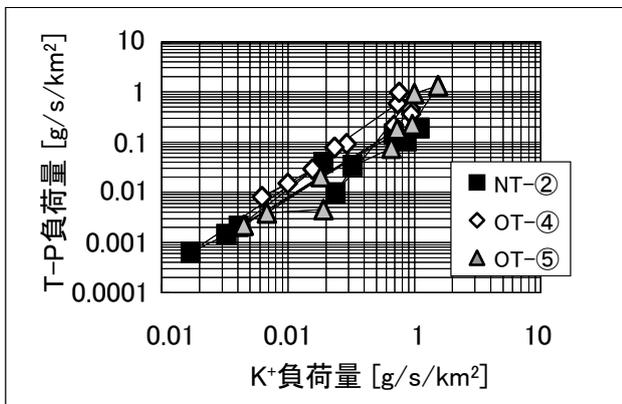


図-25 カリウムイオン負荷量と全りん負荷量の関係

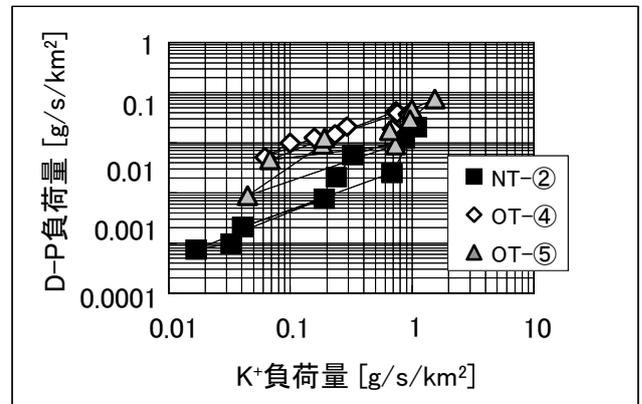


図-28 カリウムイオン負荷量と溶解性りん負荷量の関係

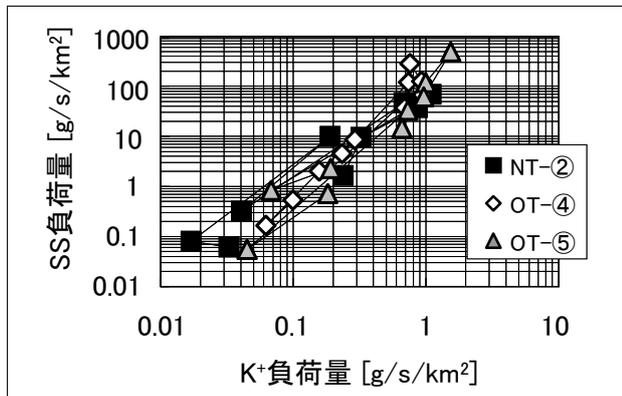


図-26 カリウムイオン負荷量と浮遊物質負荷量の関係

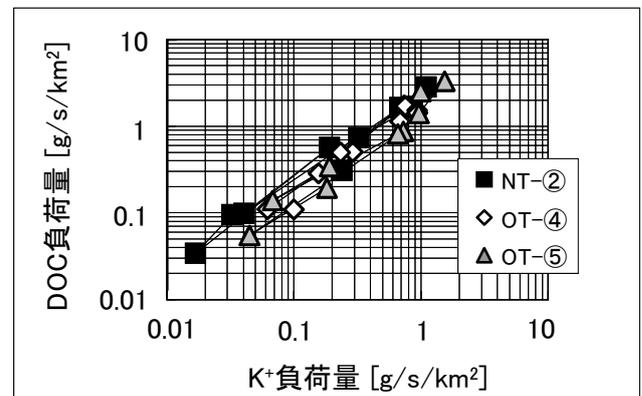


図-29 カリウムイオン負荷量と溶解性有機炭素負荷量の関係

参考文献:

- 1) 平成 18 年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料第 4080 号、pp.21-28、2007
- 2) 平成 19 年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料第 4123 号、pp.117-126、2009
- 3) 岡安祐司、鈴木穰、晴天時における、生活排水、畜産排水起源のトレーサー物質および栄養塩類の流出実態、環境工学研究論文集、45、pp.19-28、2008

STUDY ON RUNOFF-MECHANISMS OF NUTRIENT POLLUTANT AND DEVELOPMENT OF RUNOFF MODEL

In order to understand runoff-mechanisms of nutrient pollutant from watershed to receiving water body, concentrations of a tracer (i.e. sodium ion) and nutrients in domestic wastewater and occurrence of their runoff in dry weather and rainy day were studied. By analyzing ratios of nutrient to the tracer, it was possible to estimate existence of household wastewater. And the result suggested that ration of potassium ion to a tracer (i.e. sodium ion) is a good indicator of contamination of livestock wastewater.

Key words : runoff, tracer, nutrient, domestic wastewater, household wastewater, material cycling

