

⑩-2 土地利用や環境の変化が閉鎖性水域の水質・底質におよぼす影響に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水環境研究グループ（水質）

研究担当者：岡本誠一郎、平山孝浩、柴山慶行
對馬育夫

【要旨】

霞ヶ浦では、近年再びアオコが発生するようになり、H23 には大発生した。一方で、H13 から H20 ごろまでは、発生が少ない期間が続く等、アオコ発生に寄与する湖沼環境の変化が考えられた。本研究では、気象等の環境要因や流域からの栄養塩類負荷の変化、底質の溶出量の変化等について検討した。気象等の環境要因の解析からは、H23 のアオコの大発生を説明する因子として、気温や日射だけでは説明できず、特に H22~24 の中では、H23 だけが雨量の多かったことから雨天時に流域から流入する栄養塩類がアオコ発生に影響を及ぼすことが示唆された。風向・風速の解析からは、アオコ発生の多かった年には東寄りの風が強かったことが分かり、市外地である土浦市周辺にアオコが吹き寄せられて景観障害や異臭等の苦情が生じやすかったことも分かった。また、雨天後の底質溶出試験からは雨天時に湖内に流入する栄養塩類が底質からの溶出速度に影響を与えていることが示唆された。

キーワード：霞ヶ浦、閉鎖性水域、底質、雨天時の栄養塩類負荷

1. はじめに

霞ヶ浦では、近年再びアオコが発生するようになり、平成 23 年には大発生した。一方で、H13 から H20 ごろまでは、発生が少ない期間が続く等、アオコ発生に寄与するなんらかの湖沼環境の変化が考えられた。アオコ発生に関わる因子としては、湖盆形態的、気象学的、水理学的、水質学的要因が挙げられる¹⁾。平成 25 年度は、気象等の環境要因とアオコ発生の関係について検討した。また、流域からの栄養塩類負荷の変化や底質の溶出量の変化等について解析した。図 1 に湖沼で移送される物質のイメージ図を示すが、25 年度調査では、この内、流域と底質からもたらされる栄養塩類負荷の変化についてデータを収集した。さらに、雨天時に流域からもたらされる栄養塩類負荷が底質の溶出傾向にどのような変化をもたらすのかについて、溶出試験を実施して考察を行った。

2. 気象条件について

2. 1 方法

風向・風速データについては霞ヶ浦河川事務所より提

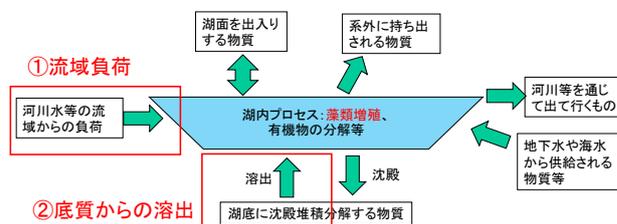


図 1 湖沼で移送される物質のイメージ図
(湖沼技術研究会資料²⁾ より一部改変)

供のあったデータを用いた。霞ヶ浦西浦の湖心の自動観測所で測定したものであり、1 時間ごとに 16 方位で記録されているものである。まず、風向・風速の大まかな傾向を把握するために、北 (N)、西 (W)、南 (S)、東 (E) にベクトル分解した。次に、ベクトル分解後の風速の強さごとに、1 時間あたりを 1 回として回数を積み上げた。例えば、風向が西で風速が 4m/s の観測値の場合は、W で 4m の頻度に 1 回積み上げて、風向が北西で風速が 4m の観測値のときは N に 2.8m/s の風速で 1 回積み上げ、W にも 2.8m/s の風速で 1 回積み上げた。

気温、雨量データについては、気象庁の土浦アメダスの測定結果³⁾を、水温については国土交通省霞ヶ浦河川

事務所より提供のあった西浦湖心の表層の観測データを用いた。藍藻類は水温 25 度付近で増殖速度がもっとも大きくなるといわれている。ここでは藍藻類が増殖すると考えられる表層の水温が高かったかどうかを判断するために、1 時間ごとの観測結果について、気温 25 度（水温 25 度）を超えたときに 25 度との差を月ごとに合計して比較した。雨量データは月ごとの合計値を年度ごとに比較した。

日射データはつくばのアメダス観測結果⁴⁾を用いた。こちらにも月ごとに合計値を算出して比較した。

2. 2 結果

8～9 月の風速の平均値を図 2 に、風向・風速の分布を、アオコの少なかったといわれている H13～19 とアオコが多く発生したとされる H20～24 について図 3 と図 4 に、また、H23 については図 5 に示す。図 3 と図 4 については、図 5 との比較を容易にするため、年平均として図化してある。

H23 はアオコが大量発生した年であるが、図 2 によると 8～9 月の風速の平均値で特段目立った特徴は見られなかった。H13～19 と H20～24 の傾向の違いとして、東寄りの風と南寄りの風の分布傾向が挙げられる。東寄りの風では、H20～24 で 2m/s 付近のピークがなくなっている一方で 4m/s 付近で H13～19 と比較して高い傾向がある。南風では、2～4m/s において H20～24 で頻度が高くなっている。H23 の図 5 と比較するとこの傾向がさらに顕著になっていることが分かった。東風が卓越していたことは、湖内で発生したアオコが、風下にあたる土浦市付近に集積することに寄与したと考えられる。土浦市周辺は霞ヶ浦の湖岸の中でも市街化が進んでいる地域であり、景観障害やアオコの腐敗臭が漂うことで市民への影響が発生することになったと考えられる。

7 月～9 月の気象・水象データを図 6～図 9 に示した。図 6 に気温を、図 7 に水温、図 8 に雨量、図 9 には日射量を示す。

図 6 より、H22～24 は 8 月の気温が高い傾向にあったことが分かり、アオコ発生との関係が示唆された。一方で、H23 の 7～8 月では、H16 と同等であることや H22～24 で H23 は、H22 と比較して低い値となっていた。水温も同様の傾向を示しており、H23 の大発生を気温、水温だけでは説明できないことが分かった。

雨量については、H13～19 では H13 を除き、7 月の雨量が大きかった年が多い。H20～24 の範囲で比較すると H23 の 7 月は雨量が多くなっており、降雨による流域か

らの栄養塩類負荷がアオコ発生の一因となっている可能性が考えられる。

最後に、日射量については、H22～24 は他の年と比較してやや高い傾向にあり、アオコ発生との関係が示唆されるが、H23 が他の年と比較して高いわけではないため、日射量だけで H23 の大発生を説明することはできないことがわかる。

以上より、H23 のアオコ大発生を説明する際立った気象・水象現象は確認されなかったが、気温、降雨量など藻類増殖を促進する要因が見出された。また、H23 には東向風が他の年より卓越していた傾向がみられ、藻類の土浦周辺への集積に寄与した可能性が考えられた。

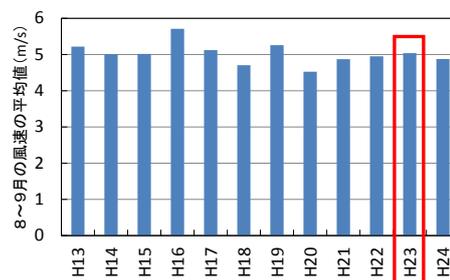


図 2 8～9 月の風速の平均値

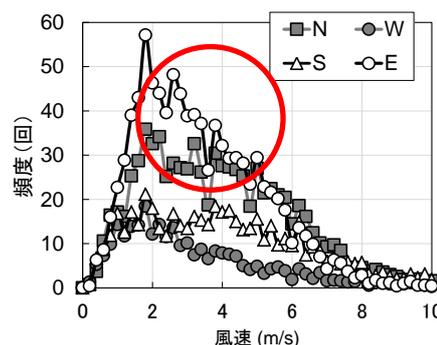


図 3 H13～19 の風向・風速の分布 (7 年平均)

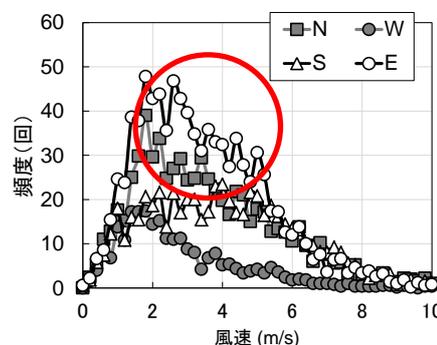


図 4 H20～24 の風向・風速の分布 (5 年平均)

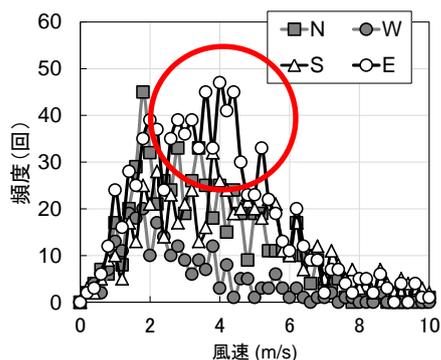


図5 H23の風向・風速の分布

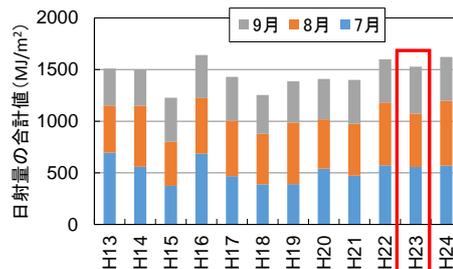


図9 年ごとの日射量の比較

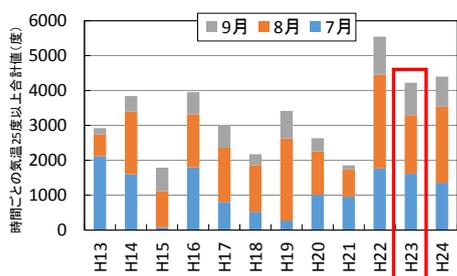


図6 年ごとの気温の比較

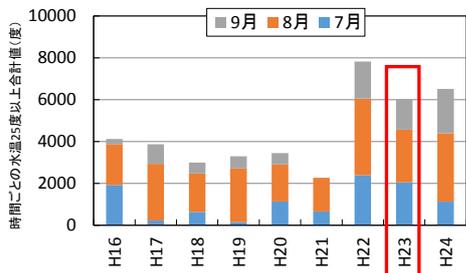


図7 年ごとの表層水温の比較

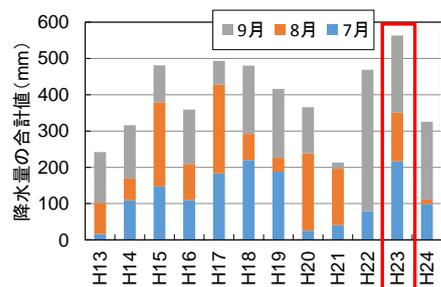


図8 年ごとの雨量の比較

データと流量データは、茨城県のホームページで公開されているH13からH23までの公共用水域の水質等測定結果⁹⁾を用いた。本測定結果には、土浦入に流入する河川として、川尻川、境川、新川、桜川、備前川、花室川、清明川の7河川のデータが示されている。表1に7河川の概要を示す。この7河川の内、川尻川は測定が2ヶ月に1回であること、新川と備前川は流量が測定の下限値を下回る月があること、さらにH23の流量で比較すると川尻川と新川、備前川は流入7河川の流入量に占める割合がそれぞれ1%以下になると考えられたため、境川、桜川、花室川、清明川の4河川を対象として流域からの栄養塩類負荷の変化を検討した。1ヶ月に1回の測定値をその月の値として、1ヶ月の時間を掛け合わせて月あたりの負荷量とした。

3. 1. 2 底質からの溶出について

底質の状態を把握するために、土浦入の代表地点として掛馬沖を、比較地点として湖心を選び、柱状のサンプルを用いた静置型の溶出試験を行った。内径200mmのアクリルコアを用いて、深さ30cm程度の底質を各地点で4本、合計8本採取した。直上水は採取した底層水をGFBフィルターでろ過した後、静かに流入させて、地点ごとに嫌気状態と好気状態を設定して、摂氏20度の暗条件にて実験を行った。嫌気状態は、窒素ガスで直上水を曝気してDOが1mg/L以下となるように調節し、好気状態は、空気曝気により溶存酸素濃度を調節した。底質のばらつきによる影響を抑えるために、1条件につき2本の底質を使用して実験を行った。水質分析に際しては、2本のコアから水を等量抜き取り混合して供した。溶存態の窒素やリンの分析は、実験開始から、0、1、3、5、7、10、15、20日目の水試料を用いてイオンクロマトグラフ法にて、金属成分の分析は、0、1、5、10、20日目の水試料を用いてICP/MSにより行った。測定方法は、河川水質試験方法(案)【1997年版】に従った。なお、底質の採取ならびに溶出試験は、平成25年1月に実施した。

3. 流域からの栄養塩類負荷と底質からの溶出の変化について

3. 1 方法

3. 1. 1 流域からの負荷の変化について

図10に検討対象とした土浦入の水域を示す。水質



図10 対象水域の図

表1 土浦入の流入7河川

| 河川名 | 河川延長 ^⑥ (km) | 流域面積 ^⑥ (km ²) | H13-H23の年間流出量 の平均 ^⑤ (億m ³) |
|-----|---------------------------|---|--|
| 川尻川 | | 15.0 | |
| 境川 | 1.52 | 19.9 | 0.07 |
| 新川 | 2.4 | 15.6 | |
| 桜川 | 63.41 | 350.3 | 1.70 |
| 備前川 | 3.8 | 4.1 | |
| 花室川 | 10.6 | 38.8 | 0.23 |
| 清明川 | 10.1 | 25.5 | 0.12 |

3. 2 結果

3. 2. 1 流域からの負荷の変化の把握

図11と図12に、対象とした4河川について、月ごとに合計して算出した土浦入へのTN、TP流入負荷量を示す。また、算出負荷量が大きかった月数を把握するため、TNについては50(t/月)以上の月数を、TPについては、2(t/月)以上の月数をカウントして、同時に表示した。このとき、採水時に雨天の影響を強く受けていると考えられたデータがあったため、土浦アメダスにおける観測結果³⁾にて、測定前10日間で合計100mm以上の雨が観測されていたものについてはカウントせず、年平均の算出でも除外した。

年単位で平均したものを比較するとTNとTPとともにH18が高くなっているが、H18は比較期間中でもっとも年降水量が多かった年であり、その影響を受けていると考えられる。比較期間中でさらに平均するとTN、TP負荷量はそれぞれ、H13~H19で36.2(t/月)、1.44(t/月)、H20~H23で38.7(t/月)、1.63(t/月)となり、公表データに基づく概算の比較結果ではあるが、アオコの発生が再び確認されたH20以降の負荷量は大きくなっていった。

TN、TP負荷量はH22とH23で大きかった月が多く、H23のアオコの発生との関連が示唆される。一方で、アオコ発生が少なかったとされているH13からH19のTN負荷量

では、H15とH17、H19が50(t/月)以上の月がゼロとなっている等、比較的負荷量が少ない傾向にあったと考えられる。また、TP負荷量ではH14からH17で2(t/月)以上の月が少ない一方で、H18以降ではH21のような例外はあるものの、2(t/月)以上の月が多く、負荷量が多い傾向にあったと考えられる。

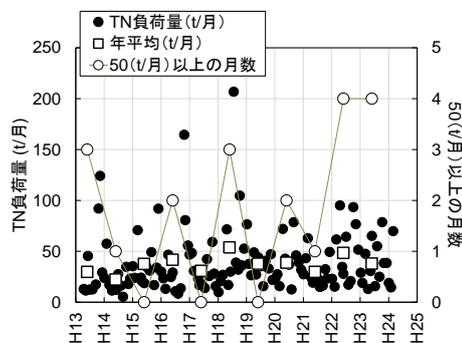


図11 TNの土浦入への負荷量

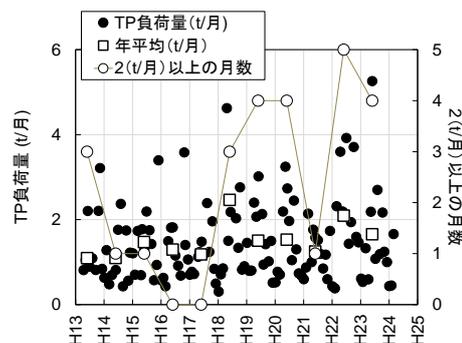


図12 TPの土浦入への負荷量

3. 2. 2 底質からの溶出の変化の把握

図13~図16に、溶出試験での水質測定結果を用いて溶出速度を算出した結果を示す。溶存態リンの溶出速度については、H20に実施した西浦湖心と掛馬沖での結果⁷⁾についても比較のためにグラフに表示した。

PO₄-Pの溶出は、直上水が貧酸素状態のときに底泥からの溶出により大きくなることが知られているが、H25の結果でも嫌気状態の試験結果で溶出速度が大きく、好気状態のときは嫌気状態と比較して溶出速度が小さくなっている。湖心と掛馬沖を比較すると掛馬沖で溶出速度が小さかった。掛馬沖では、霞ヶ浦の水質改善を目的とした浚渫が実施されており、一定の効果が示唆される結果となった。H20とH25の結果を比較すると、湖心と掛馬沖の両方の地点にてH25の方で溶出速度が高い結果となった。これは、流域からの負荷が底質からの溶出に影響を与えた可能性や、H23にアオコが大発生した際に堆積した有機物等が影響を与えた可能性が示唆される。霞ヶ浦

西浦の湖心ではH21以降の夏季において、底層と表層の溶存酸素の差が大きくなり、さらにH22以降では底層が貧酸素傾向にあったことが報告されている⁸⁾。溶出速度の増加に流域からの栄養塩類の負荷が寄与する割合が大きい場合は、底質の悪化と貧酸素状態が重なり、溶出が促進されるとともに、アオコ発生に影響を与えたことが考えられる。

NH₄-N、D-Fe の溶出速度も、掛馬沖よりも湖心の方が大きい結果となった。掛馬沖底質の嫌気条件では、D-Mn の溶出がほとんど生じなかったが、この原因は不明である。

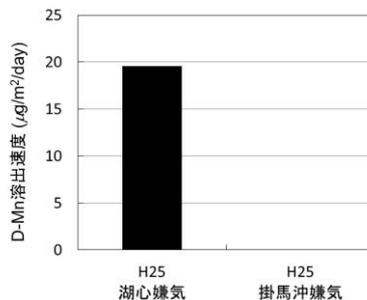


図16 D-Mnの溶出速度

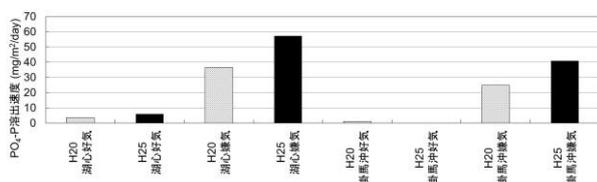


図13 PO₄-Pの溶出速度

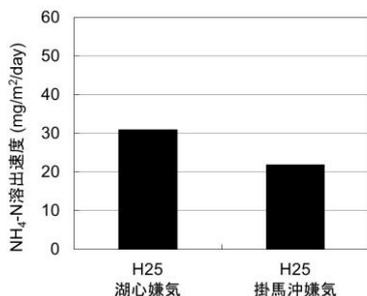


図14 NH₄-Nの溶出速度

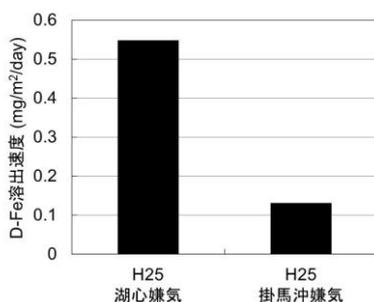


図15 D-Feの溶出速度

4. 雨天時の栄養塩類負荷が底泥からの溶出に及ぼす影響について

4.1 方法

底泥の採取は2013年9月21日に行った。図17に気象庁の土浦アメダスにおける観測結果を示すが、台風18号の影響により前10日間に合計79.5mmの降雨が確認されている。また、台風18号の降雨は8月以降で、時間最大雨量も総雨量も多く、流域からの栄養塩類負荷も大きかったと推察される。

内径200mmのアクリルコアを用いて、深さ30cm程度の底泥を湖内3地点にて採取した。採取地点と土浦入における主な流入河川を図17に示す。直上水は採取した底層水をGFBフィルターでろ過して静かに流入させた後、嫌気状態と好気状態を設定して、摂氏30度の暗条件にて実験を行った。嫌気状態は窒素ガスで直上水を曝気することによりDOが1mg/L以下となるように調節し、好気状態は空気曝気により溶存酸素濃度を調節した。溶存態の窒素やリンの分析は、実験開始から0、1、3、5、7、10、15、20日目の水試料を用いてイオンクロマトグラフ法にて行った。水質分析は河川水質試験方法(案)【1997年版】に従った。

採取した泥も定量分析に供した。深さ0~10cmの泥を混合した後、TOC、全窒素、全リン、乾燥減量、強熱減量について測定した。底質分析は、底質調査方法(平成24年、環境省)に従った。

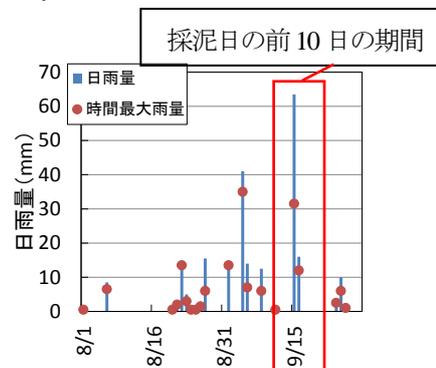


図17 土浦アメダスにおける雨量観測結果

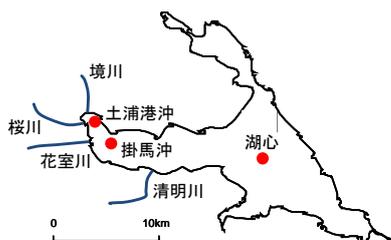


図 18 調査地点と土浦入における流入河川

4. 2 結果

溶出試験を行った採泥箇所の下層の状態だが、土浦港沖では、桜川の流下物と思われる流木や葉等の物質が表層に堆積しており、粒径も砂状のものが多かった。一方で湖心と掛馬沖では粒径が細かくシルト成分が多かった。

図 19 には硝酸態窒素の溶出速度算出結果を、図 20 にはアンモニア態窒素の溶出速度を算出した結果を示す。2013 年の湖心好気の試料はエビの影響により、泥が乱されて値が安定しなかったため除外した。図 21 にはオルトリン酸態リンの算出結果を示す。これらの図には、過去に実施した溶出試験結果も表示した。なお、2008 年と 2012 年の試験では摂氏 20 度で試験したものである。2013 年の結果は、湖心から土浦市方面に向かうにつれて、溶出速度が大きくなっていることがわかる。しかし、2008 年と 2012 年の結果は、いずれも湖心の方で溶出速度が大きくなっており、2013 年の結果とは異なる傾向を示している。

表 2 には、底質の定量分析結果について示す。湖心が、TOC、全窒素、全沈ともに一番値が高く、強熱減量も大きかった。土浦港沖で溶出速度が大きかったが、底質の分析結果からは、土浦港沖で特に底泥中に有機物や窒素、リンの含有量が多くないことがわかる。

以上より、雨天時に流域からもたらされた栄養塩類負荷あるいは土浦入奥部で頻繁に観察されたアオコ様の植物プランクトンが死滅、沈降した有機物は、底層の貧酸素状態では湖心など沖合部の底泥と比較して、栄養塩類の溶出速度が高いことが示唆され、水質への影響を与えやすい可能性があることが明らかになった。

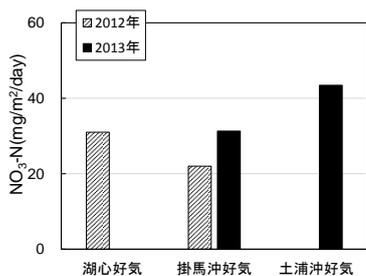


図 19 NO₃-N の溶出速度

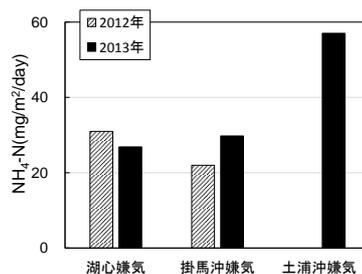


図 20 NH₄-N の溶出速度

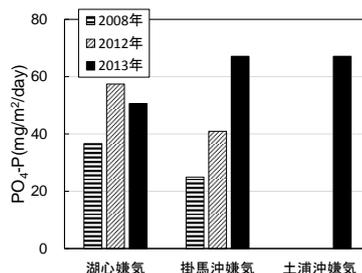


図 21 PO₄-P の溶出速度

表 2 深さ 0~10cm の底質分析結果

| 測定項目 | 単位 | 2013 年 9 月 21 日 | | |
|------|----------|-----------------|----------------|----------------|
| | | 湖心 0~10cm | 掛馬沖 0~10 cm | 土浦沖 0~10 cm |
| TOC | mg/g(DS) | 55.40 | 27.85 | 14.20 |
| 全窒素 | mg/g(DS) | 7.74 | 3.49 | 1.47 |
| 全リン | mg/g(DS) | 1.42 | 0.94 | 0.57 |
| 乾燥減量 | % | 83.81 | 77.55 | 49.83 |
| 強熱減量 | % | 15.62 | 10.17 | 5.04 |

5. おわりに

平成 25 年度の研究より明らかになった結果を以下に示す。

1) アオコ発生が少なくなった H13 以降の気象・水象データを分析した結果、H23 のアオコ大発生を説明しうる際立った現象は確認されなかったが、気温、降雨量など藻類増殖を促進しうる要因が見出された。また、H23 には東向風が他の年より卓越していた傾向がみられ、藻類の土浦周辺への集積に寄与した可能性が考えられた。

2) 土浦入の 4 流入河川について、公表データを基に TN、TP の流入負荷量を概算した結果、負荷量は H22 と H23

で高かった月が多くなっていた。

3) 湖心と掛馬沖の底泥の溶出試験結果より、湖心と比較して掛馬沖で溶出速度が小さく、浚渫による一定の効果が示唆される結果となった。H20 と H25 の結果を比較すると、湖心と掛馬沖の両方の地点にて H25 の方で溶出速度が高い結果となった。

4) H25 の台風による大雨直後の採泥による底泥の溶出試験結果より、雨天時に流域からもたらされた栄養塩類負荷あるいは土浦入奥部で頻繁に観察されたアオコ様の植物プランクトンが死滅、沈降した有機物は、底層の貧酸素状態では湖心など沖合部の底泥と比較して、栄養塩類の溶出速度が高いことが示唆され、水質への影響を与えやすい可能性があることが明らかになった。

参考文献

- 1) 八木正一：湖沼工学 藻類の異常発生と制御，岩佐義朗（編著），pp.366-393，山海堂，1990.
- 2) 湖沼技術研究会：湖沼における水理・水質管理の技術，2007.
- 3) 気象庁：気象統計情報 茨城県土浦アメダス，<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> アクセス日時：2013.09.23
- 4) 気象庁：気象統計情報 茨城県つくばアメダス，<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> アクセス日時：2013.09.23
- 5) 茨城県環境対策課：公共用水域の水質等測定結果，<http://www.pref.ibaraki.jp/bukyoku/seikan/kantai/water/kokyooyosuiiki.html> アクセス日時：2013.09.23
- 6) 藤田光一，伊藤弘之，小路剛志，安間智之：国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告 自然共生型流域圏・都市の再生 資料集（Ⅱ）水物質循環モデルを活用した水環境政策評価 ～霞ヶ浦とその流域を対象として～，国土交通省国土技術政策総合研究所，2006.
- 7) 南山瑞彦，久岡夏樹，中藺孝裕：閉鎖性水域の貧酸素化に及ぼす陸域負荷の影響と対策手法に関する研究，pp.218-226，独立行政法人土木研究所 平成21年度下水道関係調査研究年次報告集，2010.
- 8) 柴山慶行，鈴木穰，池田茂：霞ヶ浦における水質・環境の変化とアオコ発生の関係，p.566，第47回日本水環境学会年会講演集，2013.

STUDY ON QUALITY OF WATER AND SEDIMENT IN CLOSED WATER BODY WITH CHANGE OF ENVIRONMENT AND LAND USE OF BASIN

Budget: Grants for operating expenses (General Account)

Research Period: FY2011-2015

Research Team: Water Environment Research Group (Water Quality)

Authors: OKAMOTO Seiichiro, HIRAYAMA Takahiro, SHIBAYAMA
Yoshiyuki, TSUSHIMA Ikuo

Abstract:

This study aims at clarifying the trend of water and sediment quality of lakes in response to the change of basin environment and land use. We focused on the blue-green algae blooms in Lake Kasumigaura. The blooms have occurred since the 1960s with the urbanization of catchment area, but the blooms did not frequently occur from 2000 to 2007. However the blooms recurred since 2011. We surveyed the quality and the dissolution rate of nutrient of bottom sediment at Lake Kasumigaura. The dissolution rate was increased after the heavy storm in 2013. It is suggested from the result that the particle-associated nutrient which flew into the lake after the storm affected the water quality variation in Lake Kasumigaura.

Key words: Lake Kasumigaura, blue-green algae bloom, sediment, land use