

◆ 特集：下水道による水・物質の制御 ◆

霞ヶ浦における河川流入負荷特性

森田弘昭*

1. はじめに

河川流入汚濁負荷の質及び量の変動特性と絶対値の把握は、湖沼の物質循環機構解明のために必須の要件¹⁻⁴⁾である。

本報では、霞ヶ浦高浜入を調査対策水域としてここに流入する恋瀬川、山王川、園部川の通年の流入負荷量調査と粒子態栄養塩の可溶化実験から、粒子態栄養塩の湖水質に対する影響特性を考察した結果を報告する。

2. 調査方法

調査は、高浜入に流入する恋瀬川、園部川、山王川の通年流入負荷量調査と高浜入3河川及び桜川の晴天時河川流入粒子態物質の挙動把握調査及び高浜入3河川の晴天時と雨天時の流入粒子態栄養塩の可溶化実験の3種類で構成されており、それぞれの目的と調査方法の概要を以下に示す。(図-1) 具体的な採水方法や分析方法は、建設省河川砂防基準(案)⁵⁾や環境告示、JISに定める方法を採用した。

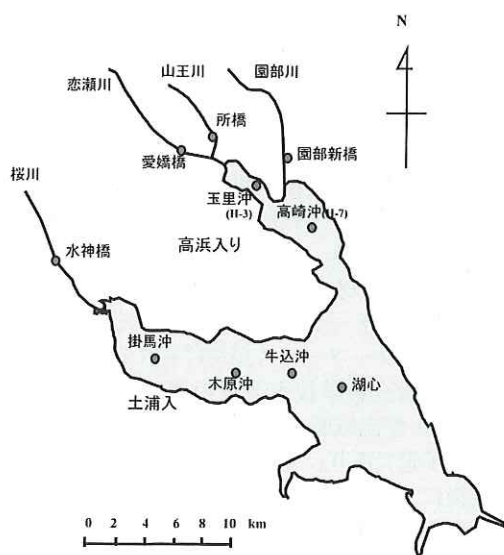


図-1 試料採取地点(霞ヶ浦)

2.1 河川流入負荷量調査

流入河川を通じて輸送されてくる栄養塩負荷を、まず晴天時に流入する栄養塩負荷(以下、晴天時流入負荷)と雨天時に流入するもの(以下、雨天時流入負荷)に分けて推定し、次にそれぞれの栄養塩負荷をさらに粒子態のものと溶存態のものに分類し、それぞれの画分毎の流入負荷量を算出した。調査対象水域は、高浜入湾奥部とここに流入する恋瀬川、山王川、園部川の3河川である。この3河川の流域で高浜入りに流入する全河川の流域(353.15km²)の86%をカバーできる。

2.2 晴天時河川流入粒子態物質の挙動把握調査

晴天時に河川を流送される粒子態物質は、土砂を起源とする粒子態物質、流域から排出される各種粒子態物質、河道内で生産される付着性藻類の剥離⁶⁾したもの等が考えられる。そして、湖内には、河川から流送された粒子態物質が浮遊残存するとともに湖内で増殖した植物プランクトン、巻き上げられた底泥に由来する粒子態物質が存在するが、河川から湖内におけるこれらの粒子態物質の収支は、適切なトレーサー物質を選定することによって起源を特定できる可能性がある。

チタンは、本来、地殻に存在するものであり、粒子態物質中のチタン含有量を定量することによって、粒子態物質の土砂由来の割合を定量することができる⁴⁾。一方、クロロフィルaは植物プランクトンあるいは、河道内の付着性藻類に由来するものであり、粒子態物質中のクロロフィルa含有量を定量することによって粒子態物質中の植物プランクトン由来あるいは、付着性藻類由来の粒子態物質の割合を定量することができる。残りの部分は流域から排出された各種粒子態物質と考えられる。以上のような仮定に基づき、高浜入と土浦入及びこの水域に流入する主要な河川において、粒子態物質の分画・定量を行い、晴天時流入粒子態物質の挙動を推定した。

2.3 粒子態栄養塩の可溶化実験

採取した底泥あるいは浮遊物質は、含水比で

150～200%に調整し、約10g程度を200ml フランビンに入れた。さらに、実験期間中、安定的な嫌気状態を維持するためにグルコースを $50\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ になるように添加した。フランビンに注入する溶媒水はあらかじめ窒素ガスでバク気し溶存酸素を除去した。試料の入ったフランビン を 30℃ 恒温で 60 日間放置した後、溶存態総窒素（以下、DTN）と溶存態総リン（以下、DTP）の測定を行い、試料調製時の DTN、DTP を差し引き可溶化した粒子態栄養塩量を求めた。

3. 調査結果と考察

3.1 年間流入負荷量の推定と分画

表-1 に高浜入の年間流入負荷を示す。

- ① 高浜入の 1983 年度年間総流入負荷量は、SS17,781t、COD2,365.6t、TN1,110.5t、TP70.2t で、そのうち SS の 86% (15,233t)、COD59% (1,404.4t)、TP62% (43.6t)、TN30% (330.2t) が雨天時に流入した。
- ② 粒子態と溶存態というカテゴリーで見ると、COD とリンは粒子態の割合が高く、COD60% (1,415.9t)、リン 72% (50.3t) となっており、逆に窒素は溶存態の割合が 87% を占める。
- ③ 総括的に見ると、COD とリンは雨天時に流入する粒子態負荷の割合が最も大きく、それぞれ 43.3% (1,038.5t)、51.1% (35.9t) と約半分を占め、窒素については晴天時に流入する溶存態負荷が 65% (722.8t) を占め、最もその割合が大きい。

3.2 晴天時河川流入粒子態物質の挙動

流入河川から湖内にかけての粒子態物質の収支は、次式のように整理することができる。

$$C_{ss} = SS_{soil} + SS_{schla} + SS_{other} \quad \cdots (1)$$

$$SS_{soil} = C_{ss} \cdot C_{Ti} / \alpha \quad \cdots (2)$$

$$SS_{schla} = C_{ss} \cdot C_{chla} / \beta \quad \cdots (3)$$

ここで、

C_{ss} : SS 濃度

SS_{soil} : 土砂由来 SS 濃度

SS_{schla} : 植物由来 SS 濃度

SS_{other} : 土砂及び植物由来以外の SS 濃度
(以下、その他の由来 SS)

C_{Ti} : SS 中の Ti 含有量

α : 土砂中の Ti 含有量

C_{chla} : SS 中のクロロフィル a 含有量

β : 付着性藻類あるいは、植物プランクトンのクロロフィル a 含有量

(1) 式の右辺第 2 項は、河川においては付着性藻類や水生植物の剥離物等に由来する SS を意味し、湖内においては植物プランクトン由来の SS を意味するが、両者が同時に存在すると考えられる河口域において両者をクロロフィル a 含有量から区別することはできない。しかし、冬期などの低増殖期で付着性藻類由来の SS 量が無視⁷⁾できれば、植物由来の粒子態物質については、湖内の植物プランクトンとして特定できる。

晴天時に流入する粒子態物質は、湖内の物理的な環境によってその挙動は大きく影響を受ける。

表-1 1983 年度 年間流入量負荷量

河川名 \ 負荷量		SS	TN	PTN	DTN	TP	PTP	DTP	TCOD	PCOD	DCOD	10mm以上の雨天日数
恋瀬川	晴天時	1,472	386.5	25.3	361.2	10.4	6.1	4.3	521.1	191.3	329.8	42日間
	雨天時	10,637	203.2	52.2	151.0	25.2	21.0	4.2	864.7	621.6	243.1	
	計	12,109	589.7	77.5	512.2	35.6	27.1	8.5	1,385.8	812.9	572.9	
園部川	晴天時	815	341.8	24.0	317.8	9.4	5.2	4.2	297.7	113.3	184.4	40日間
	雨天時	3,536	100.1	24.2	75.9	13.0	10.4	2.6	375.8	277.4	98.4	
	計	4,351	441.9	48.2	393.7	22.4	15.6	6.8	673.5	390.7	282.8	
山王川	晴天時	261	52.0	8.2	43.8	6.8	3.1	3.7	142.4	72.8	69.6	41日間
	雨天時	1,060	26.9	12.5	14.4	5.4	4.5	0.9	163.9	139.5	24.4	
	計	1,321	78.9	20.7	58.2	12.2	7.6	4.6	306.3	212.3	94.0	
合計	晴天時	2,548	780.3	57.5	722.8	26.6	14.4	12.2	961.2	377.4	583.8	
	雨天時	15,233	330.2	88.9	241.3	43.6	35.9	7.7	1,404.4	1,038.5	365.9	
	計	17,781	1,110.5	146.4	964.1	70.2	50.3	19.9	2,365.6	1,415.9	949.7	

単位 ($\text{t} \cdot \text{y}^{-1}$)

霞ヶ浦のような、浅い湖沼では、強風によって吹送流が発生すると湖水の鉛直循環が起き、底泥が巻き上げられ、晴天時に流入する粒子態物質も、その粒径や比重によっては、沈降せずに浮遊することが予想される。

しかし、強風時の底泥の巻き上げは一時的な現象であり、長期的な観点からは強風時以外の湖内流下方向の粒子態物質の挙動を把握すれば、晴天時に河川から流入した粒子態物質の挙動もおおむね把握できるものと仮定した。

以上のような仮定のもとに、流入河川から湖内にかけての粒子態物質の収支を3つの成分に分画した結果を図-2に示す。現地調査は、比較的強風の少ない冬季(1986年1月～2月)に、5回行いその平均値を用いた。なお、(2)式、及び(3)式中の定数 α は洪水時現地調査結果⁴⁾から、 $5.5\text{mgTi} \cdot \text{gSS}^{-1}$ 、 β は既往の研究⁸⁾から $6.0\text{mgchl}a \cdot \text{gSS}^{-1}$ とする。

図-2から明らかなように、湖心方向にSS濃度が低下している。植物プランクトン由来の粒子態物質がほぼ一定量存在するのに対して、土砂由来粒子態物質とその他由来の粒子態物質は濃度を低下させており、土浦入の主要な流入河川である桜川の濃度と湖心濃度を比較すれば、その減少率は、85%程度となる。土砂由来物質に着目してみると、流入河川から河口付近(掛馬沖)で80%、湖心にかけてほぼ100%の減少を示していることから、晴天時に河川から流入した土砂由来粒子態物質についてはほぼ100%沈降することが推測された。高浜入でも土浦入と同様な傾向がうかがえる。

いずれの水域も河口部から湖心までは、単純な押し出し流れを仮定すると3ヵ月程度の流下時間

を要することから土砂由来及び植物プランクトン由来以外の粒子態物質の内容は大きく変化しているものと考えられ、河川から流入した粒子態物質がそのままの形態で浮遊残存しているとは考えにくい。仮に、河川における土砂由来粒子態物質とその他由来粒子態物質が湖心まで物質的に変化せず、ゆっくり沈殿しその濃度が低下したと仮定すれば、晴天時流入粒子態負荷も大半が雨天時流入粒子態負荷と同様に一旦沈降し、その湖水質への影響は、直接的ではなく、底泥を介するものと考えられる。少なくとも湖内に流入した粒子態物質がそのまま湖外に流出する割合は極めて小さいものと推定される。

3.3 粒子態栄養塩の湖水質に対する影響

本研究では、溶存態の栄養塩については、植物プランクトンに全量利用され得ると考えており、粒子態の栄養塩についても湖底に沈降後、徐々に溶存態となって湖水に回帰し植物プランクトンの増殖に利用され得るものと推定している。

そこで、形態別の年間流入負荷量と粒子態栄養塩の可溶化率から河川流入負荷量の富栄養化に対する影響度を評価する。粒子態栄養塩の可溶化率は、30℃、60日間、嫌気状態の培養条件で水中に溶け出した栄養塩量を初期の粒子態栄養塩濃度で除したものと定義している、図-3と図-4に結果を示す。

流入河川の粒子態窒素は、山王川の夏季、晴天時データ($\text{DTN} \cdot \text{PTN}^{-1}=0.270$)を除けば、晴天時SS、雨天時SSともほぼ同じ可溶化率(0.107～0.193)である。この値は、湖内底泥の可溶化率(0.016～0.076)より高い。

粒子態リンの可溶化率については、次のような

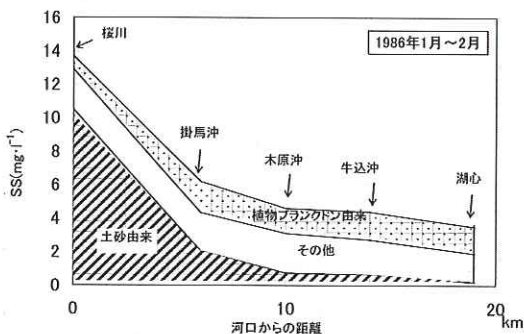


図-2 土浦入における粒子態物質の成分変化

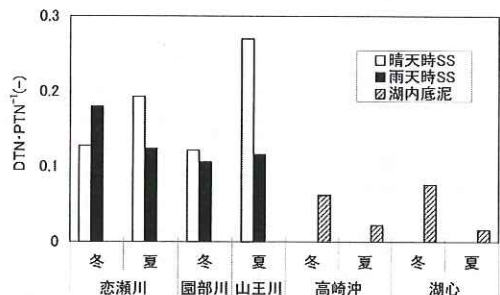


図-3 粒子態窒素中の生物利用可能態窒素の割合

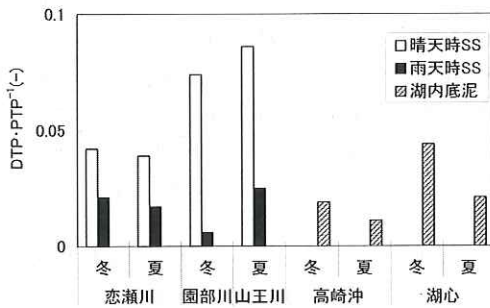


図-4 粒子態リン中の生物利用可能態リンの割合

結果が得られた。

冬季については

(DTP・PTP⁻¹)

- ・恋瀬川…雨天時粒子態リン≧湖内底泥<晴天時粒子態リン
- ・園部川…雨天時粒子態リン<湖内底泥<晴天時粒子態リン

夏季については

(DTP・PTP⁻¹)

- ・恋瀬川…湖内底泥≧雨天時粒子態リン<晴天時粒子態リン
- ・山王川…湖内底泥≧雨天時粒子態リン<晴天時粒子態リン

晴天時に流入する粒子態リンは、雨天時に流入する粒子態リンに比べて可溶化しやすい割合が多く、雨天時粒子態リンは湖内底泥とほぼ同程度の可溶化率を持っていた。以上の結果から、粒子態リンについては、晴天時に流入する負荷の方が雨天時に流入する負荷に比べて2倍以上湖水質に影響する割合が高く、晴天時流入粒子態リンの対策の重要性が示唆される。

本研究における粒子態栄養塩に占める可溶化栄養塩の割合を整理すると以下のようであった。

DTN・PTN⁻¹ 10.7 ~ 27 (%)

DTP・PTP⁻¹ 0.6 ~ 8.6 (%)

この値は、W・F・Cowen^{2, 3)} らが報告している値 (N:70%, P:30%) と比べるとかなり小さく浮田ら⁹⁾ の報告と比べてもリンについては1/3

以下の値になっているが大久保¹⁰⁾ の報告値とは同程度である。

しかし、霞ヶ浦における流入河川のTP濃度が0.19mg・l⁻¹程度かつ4割程度が溶存態リン(0.08mg・l⁻¹)であること及び、湖内水質がTP0.07mg/l程度¹¹⁾であることを考えれば、湖水中のTP濃度は、流入河川水中の溶存態リン濃度とほぼ等しく、湖内のリン循環機構を動的平衡状態にあると仮定し、例えば、W・F・Cowen²⁾ の報告している粒子態リン可溶化率30%を、流入河川水中の粒子態リンに適用すると、湖水中のTP濃度はさらに高くなることが想定されるため、本実験結果が必ずしも過小とは言えない。

可溶化率の絶対値についてはさらなる議論が必要と考えられるが、本研究で得られた可溶化率と年間流入負荷量から、粒子態栄養塩の湖水質寄与度を推定する。粒子態栄養塩の湖水質への寄与度を推定するにあたって、可溶化率については、冬季・夏季を区別せず大きい方の数値を採用した。推定結果を窒素とリンに分けて、図-5～8に示す。

(1) 窒素

高浜入に3河川を通じて1983年度に流入した窒素の総量は、1,110.5tであった。このうち、植物プランクトンにただちに利用され得ると考えられる溶存態窒素量は、晴天時と雨天時をあわせて964.1t (86.8%) で、粒子態窒素量は、146.4t (13%) であった。

各河川で得られた、晴天時と雨天時の可溶化率を晴天時と雨天時それぞれに流入した粒子態窒素量に乗じて、溶存態窒素増加量を算出すると、晴天時10.0t、雨天時13.5t、合計23.5tという結果が得られた。

以上の結果から、窒素についてはそもそも粒子態負荷量の割合が小さく、実験で得られた可溶化率から溶存態負荷の増加量を求めても、23.5tと全流入負荷量に占める割合は2.1%、生物利用可能な負荷量987.6tに占める割合で見ても2.4%とわずかな量であり、粒子態窒素の湖水質への影響は長期的な観点からも小さいことがわかった。窒素について言えば、量的な観点から晴天時負荷対策と雨天時負荷対策の選択ではなく、溶存態窒素対策が優先されるべきと考えられる。

(2) リン

高浜入りに流入したリンの総量は、70.2tで、粒

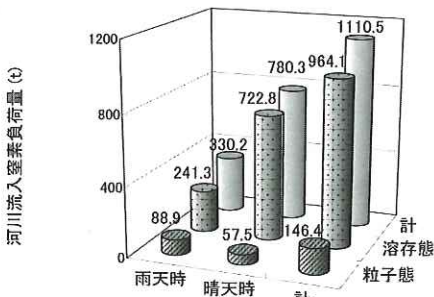


図-5 高浜入に流入する窒素負荷量

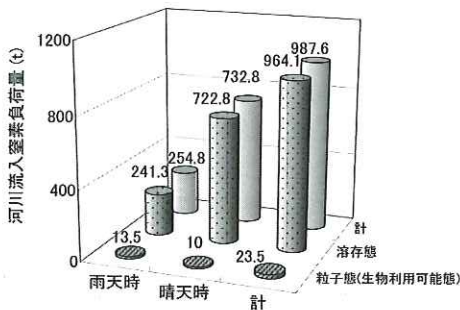


図-6 生物利用可能性から分画した窒素負荷量

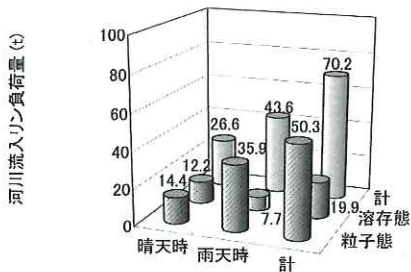


図-7 高浜入に流入するリン負荷量

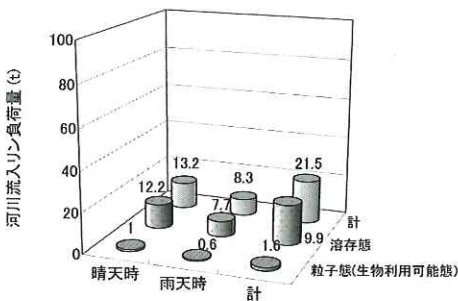


図-8 生物利用可能性から分画したリン負荷量

子態リンは 50.3t (71.7%)、溶存態リンは 19.9t (28.3%) であった。リンの場合は、粒子態リンの割合が大きく、その長期的な影響が懸念されるが、粒子態リンの可溶化量を推定すると晴天時 1.0t、雨天時 0.6t、合計 1.6t となり、全流入負荷量に占める割合は 2.3%、生物利用可能な負荷量 21.5t に占める割合で見ても 7.4% と粒子態リンの湖水質影響度は小さいと言える。よって量的な観点からリン対策を考えると、窒素と同様に晴雨天を問わず溶存態リン対策が、優先されるべきことは、明白である

3.4 制限栄養塩の評価

本研究では、河川流入粒子態栄養塩の湖水質への影響を明らかにするために年間流入負荷量と負荷の生物利用可能性を評価し、粒子態栄養塩の湖水質への影響が無視し得るほど小さいことを明らかにしたが、あわせて河川流入負荷の制限栄養塩についても知見を得ることができた。

霞ヶ浦のような富栄養化が進行した湖沼では、一般的に窒素が植物プランクトン増殖の制限栄養塩であると考えられており、霞ヶ浦でも夏季の湖水については窒素が制限栄養塩であると報告¹²⁾されている。表2に、湖水及び流入河川の窒素とリンの平均水質から求めた N/P 比と高浜入りに流入する総栄養塩負荷量と生物利用可能栄養塩負荷量から求めた N/P 比を示す。

湖水及び流入河川の平均水質と河川流入総負荷量から求めた N/P 比は 15 前後とリンリッチを示すが、生物利用可能な負荷という観点から、河川流入負荷量の N/P 比を評価すると 46 と窒素リッチを示し、河川流入負荷は生物利用可能な負荷という観点から見るとリン制限である可能性が高い。

表-2 霞ヶ浦および流入河川の制限栄養塩

	窒素	リン	N/P	備考
霞ヶ浦の平均水質	1.03	0.07	15	・建設省調査結果 ¹³⁾ ・1972 年から 1998 年の平均
流入河川の平均水質	3.1	0.19	16	・24 河川 ・単位: $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$
流入河川の負荷量	1,110.5	70.2	16	・本調査結果 ・恋瀬川、園部川、山王川の年間負荷量
生物利用可能態流入河川負荷量	987.6	21.5	46	・1983 年度 ・単位: $\text{t} \cdot \text{y}^{-1}$

4. 結 論

- 1) 1983 年度に高浜入には、恋瀬川、園部川、山王川を通じて、SS17,781t、TP70.2t、COD2,365.6t の負荷が流入した。
- 2) 流入する負荷を、晴天時に流入するもの、雨天時に流入するもの、それぞれ粒子態と溶存態に分けると、窒素では晴天時に溶存態で流入する割合 65.1% (722.8t) が最も多く、リンでは、雨天時に粒子態で流入する割合 51.1% (35.9t) が多い。COD では、雨天時に粒子態で流入する割合 43.9% (1,038.5t) が多い。
- 3) 晴天時に流入する粒子態物質のうち、土砂由来物質については、河口付近 (掛馬沖) で 80%、湖心にかけてはほぼ 100% 沈降し、さらに流域から排出されるその他の粒子態物質を加えた量で見ると河口付近までに 70%、湖心までに 85% が沈降するものと推定され、晴天時粒子態負荷も雨天時粒子態負荷と同様、湖水質への直接的影響は小さく、その影響は底泥を介して評価すべきものと考えられる。
- 4) 河川流入粒子態栄養塩の可溶化率 (DTN・PTN⁻¹, DTP・PTP⁻¹) は、窒素で 10.7 ~ 27.0%、リンで 0.6% ~ 8.6% で晴天日に流入する粒子態栄養塩が最も可溶化率が高かった。また晴天時粒子態栄養塩の可溶化率は、湖内底泥よりも可溶化率が高い。
- 5) 高浜入に流入する粒子態窒素の可溶化量は、23.5t であり全流入負荷量に占める割合は 2.1%、生物利用可能な負荷量に占める割合で見ても 2.4% とわずかな量であることが明らかとなり、粒子態窒素の湖水質への影響は長期的な観点からも小さい。よって富栄養化対策としての窒素削減は、晴天時、雨天時を問わず、溶存態窒素対策を優先すべきである。
- 6) 高浜入に流入した粒子態リンの総量は 50.3t (71.7%)、溶存態リンは 19.9t (28.3%) であった。粒子態リンの可溶化量を推定すると晴天時 1.0t、雨天時 0.6t、合計 1.6t となり、全流入負荷量に占める割合は 2.3%、生物利用可能な負荷量に占める割合で見ても 7.4% とわずかな量であり粒子態リンの湖水質影響度は、長期的な観点からも小さいと言える。よって量的な観点からリン対策を考えると、晴雨天を問わず溶存

態リン対策が、優先されるべきことは明白である。

- 7) 生物利用可能性から評価した河川流入負荷の制限栄養塩はリンである。

参考文献

- 1) 花本守、久保裕志 (1986) 河川における降雨時の汚濁流出に関する研究、下水道協会誌、23 (263) 66-78
- 2) W. F. Cowen et al. (1976) Phosphorus Availability in Particulate Materials, Transported by Urban Runoff, JWPCF, 48, No. 3
- 3) W. F. Cowen et al. (1976) Nitrogen Availability in Urban Runoff, JWPCF, 48, No. 2
- 4) 森田弘昭、山田幸男、安中徳二 (1985) 洪水時に湖に流入する粒子性栄養塩の挙動、水質汚濁研究、Vol. 8, No. 4, 233 ~ 238
- 5) 建設省 (1977) 河川砂防技術基準 (案)
- 6) 井上隆信、海老瀬潜一 (1994) 水田および河川における chla の消長、日本陸水学会第 59 回大会
- 7) 井上隆信、海老瀬潜一 (1992) 8 河川における chla の年間流出特性、日本陸水学会第 57 回大会
- 8) 高村義親・野村和輝・萩原富司・平松昭・矢木修身・須藤隆一 (1981) 霞ヶ浦に発生するアオコと Microcystis aeruginosa の化学的組成について、国立公害研究所研究報告、第 25 号、31-46
- 9) 浮田正夫、河合泰治、中西弘 (1979) 富栄養水域の底質評価のための N、P 等分析指標に関する検討、用水と排水、Vol. 21, No. 7
- 10) 大久保卓也、藪中健一、細見正明、村上昭彦 (1995) 都市域流出懸濁物質からの栄養塩回帰、水環境学会誌、18 (3), 199-206
- 11) 河川環境管理財団 (2000) 第 1 回霞ヶ浦環境整備委員会資料
- 12) Seki, M. and E. Takahashi (1983) Spring bloom in a hypereutrophic lake, Lake Kasumigaura Japan I, Water Res., 17, 441-445

森田弘昭*



国土交通省都市・地域整備局下水道部下水道事業課町村下水道対策官、工博
Dr. Hiroaki MORITA