

第 3 章 湖沼水質に影響を及ぼす負荷の把握

湖沼水質に影響を与える負荷には、外部負荷、内部負荷及び直接負荷がある。最近の調査研究では面源負荷（外部負荷の一部）の寄与がこれまでの見積もりより大きいことが指摘されている。また、これにより、湖沼の水質改善を推進するためには、流入負荷対策と合わせて、これまで湖沼内に蓄積してきた底泥からの溶出負荷（内部負荷の一部）への対策が重要となる。このため、流入負荷及び底泥からの溶出負荷は湖沼水質にとって特に重要であり、精度良く調査を実施する必要がある。

このような背景を踏まえ、本章では流入負荷量調査と底質調査に重点をおいて記述した。

3.1 湖沼に対する負荷の内訳

表 3.1.1 に湖沼に対する負荷の内訳を異なる湖沼で比較した。ここに挙げられた負荷源だけで全ての負荷を網羅しているとは限らないので、厳密にはこれだけで円を閉じることはできないが、ここでは負荷源ごとの内訳を視覚的に比較しやすくするため、円グラフで表示した。

このように、湖内水質に「負荷」として影響を与える因子を抽出し、それらの量（あるいは内訳）をまとめる方法は、物質収支の把握にはならないが、現状の水質汚濁要因の検討や対策のターゲットを絞り込むには分かりやすい整理方法である。

湖沼の負荷は、流域から河川を通じて流入する湖沼外の負荷、降雨や養殖での給餌等の湖面への直接負荷、内部生産や溶出などの湖沼内の負荷に大きく分けられる。

流域面積や流域人口などの条件が違うことにより年負荷量も異なるが、負荷要因の内訳も湖沼ごとに異なっている。例えば、COD について見ると、霞ヶ浦では湖沼内の負荷が大きな割合を占めている。また、宍道湖では湖沼内の負荷と湖沼外の負荷は同程度の割合である。一方、網走湖や中海では湖沼外の負荷が比較的大きくなっている。このように、負荷要因の内訳は湖沼ごとに異なっており、湖沼の特性に応じた対策を個々に考える必要性が浮かび上がってくる。

富栄養化の原因となるリンや窒素等の栄養塩について見ると、湖沼外の負荷のほとんどは流入河川からの負荷が、湖沼内の負荷は底泥からの溶出が占めている。従って、これらの負荷量を精度良く把握することが、効率的な湖沼水質の改善には必要である。

3.1 湖沼に対する負荷の内訳

表 3.1.1 湖沼に対する負荷の内訳(COD、T-P、T-N)

湖沼	網走湖	小川原湖	霞ヶ浦	琵琶湖	宍道湖	中海
湖面積 (km ²)	32.3	63.2	220.0	670.3	81.8	92.1
平均水深 (m)	6.1	11.0	4.0	41.2	4.5	5.4
流域面積 (km ²)	1,380	805.4	2,157	3,174	1,288	595
流域人口 (千人)	50	80	960	1,237	274	163
年回転率	2.6	1.0	1.8	0.2	2.5	3.3
COD 年負荷量 (千トン/年)	-	3.2	124.7	-	12.1	22.1
COD 年負荷量 の内訳						
T-P 年負荷量 の内訳						
T-N 年負荷量 の内訳						

注) 円グラフに示すのは湖沼に対する負荷量の内訳。

3.2 流入負荷量の把握

本節では、湖沼に対する負荷のうち、流入河川等から入ってくる負荷（湖外負荷）を対象とし、負荷量の把握方法の現状やその精度向上に向けた工夫・留意点等を整理していく。

3.2.1 流入負荷の特性

(1) 湖沼の流入負荷源

流域内の負荷発生源は、山林・農地・市街地からの流出（面源負荷）だけでなく、家庭・畜産・産業などの人為的排出源（点源負荷）など多様である。

これらの負荷が、最終的に流入河川に流れ込む場合、流入河川が湖沼に流入する直前に水質調査地点を配置すれば、これらが多様な負荷源が集合した形での流入負荷を把握することができる。

しかし、湖沼に隣接した農地や調査対象とならない小河川から直接湖沼に流入する負荷もあり、全ての負荷を逐一把握することは非常に難しい。

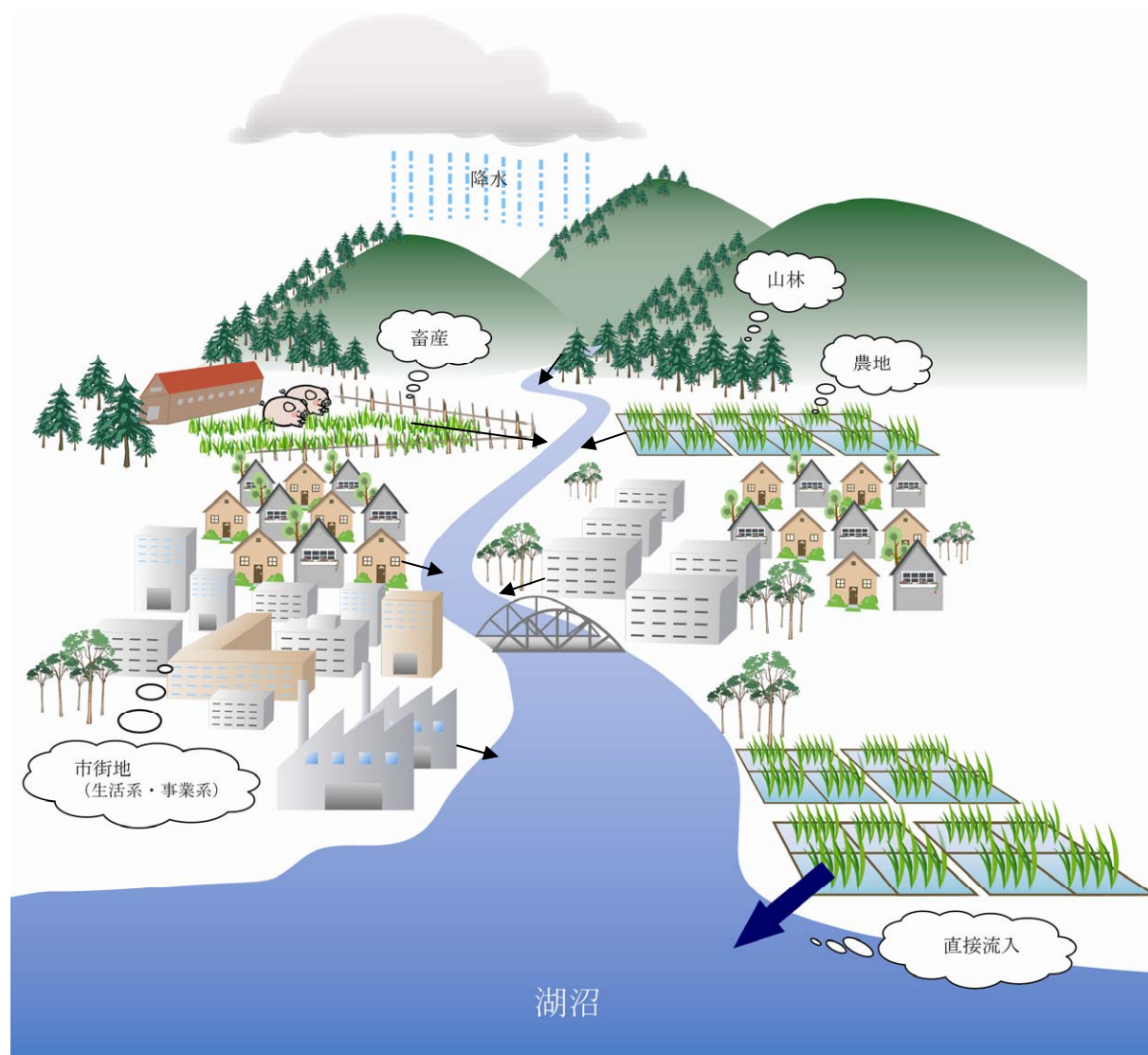


図 3.2.1 流入負荷量の様々な負荷源

(2) 流出経路

前述の多様な負荷源から発生した負荷は、様々な流出経路を経て湖沼に流入する。ここでは主に既往の文献に基づいて、多様な負荷源における流出機構について知見を整理した。

1) 森林からの負荷流出

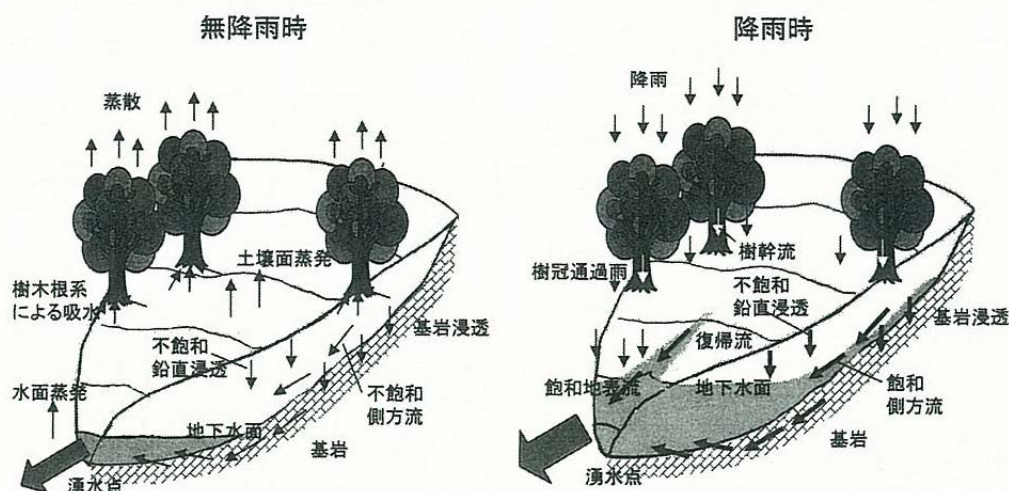
森林流域の水質形成に関わる水文プロセスについて、大手¹⁾ は以下のように記述している。

降水で森林にもたらされた水はまず樹冠を通過する。この際、無降雨時に樹冠に付着した乾性降下物が洗脱される。また、葉や樹皮から有機酸等が溶脱されることもあり、降水よりも樹冠通過雨の方が、溶存態の物質濃度が高いことが多い。

地表に到達した降水は、森林土壌が一般に高い浸透能を持っているため、土壌内に浸透する。地表近くでは、雨水は土粒子、土壌有機物、土壌空気などと接触しながら浸透し、地下水帯に達する。

地下水帯が土壌層の深部や基岩層内に形成される場合、空気の供給が乏しいので還元的环境が成立し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の脱窒やメタンの生成など、表層土壌中とは異なる現象が生じることがある。

無降雨時には、溪流へは主に地下水帯から水が供給されている。降雨時には地下水位が上昇し、湧水点近傍では土壌が表層近くまで飽和し、地表流が発生する。表層近くを浸透流が、表層を地表流が通過するので、リター（落葉）起源の溶存物質が洗脱されやすく、渓流水中の溶存性物質濃度は流量増加にしたがって上昇することが多い。



出典) 大手(2004):「森林流域における水質の形成」、水環境学会誌

図 3.2.2 渓流が始まる斜面を含む森林流域の水文素過程の模式図

なお、上記は、主に溶存性物質濃度について記載されたものである。降雨時には、土壌表層付近の粒子態成分（SS）が加わることになる。

海老瀬²⁾ は霞ヶ浦流域で水質負荷量の懸濁態と溶存態の比率を調査し、流量が増加すると懸濁態の割合が増加することを示している。流量がある程度まで増加すると、この割合はほぼ一定値に近づいていくが、市街地河川がほぼ懸濁態だけになるのに対して、農耕地河川では懸濁態の比率が小さくなる。これは土地利用による地表面の浸透比率の違いが関与していると指摘している。

2) 農地の負荷流出

國松³⁾は農地の物質収支について以下のように述べている。

農耕地に対する栄養塩の供給源には、人為供給源と自然供給源がある。化学肥料と堆肥・きゅう肥などの有機質資材が人為供給される。水系から灌漑水によって、大気から降水・降下塵と土壤微生物による窒素固定によって栄養塩が自然供給される。

一方、農耕地からの栄養塩の排出にも、人為排出と自然排出がある。栄養塩は収穫物と植物残滓の持ち出し・焼却によって、農耕地から人為的に排出される。外部水系に対する排出は、田面水の表面流出・地下浸透によって生じる。さらに窒素については、土壤表面からの $\text{NH}_3\text{-N}$ や NO_x の揮散と脱窒によって大気中に排出される。

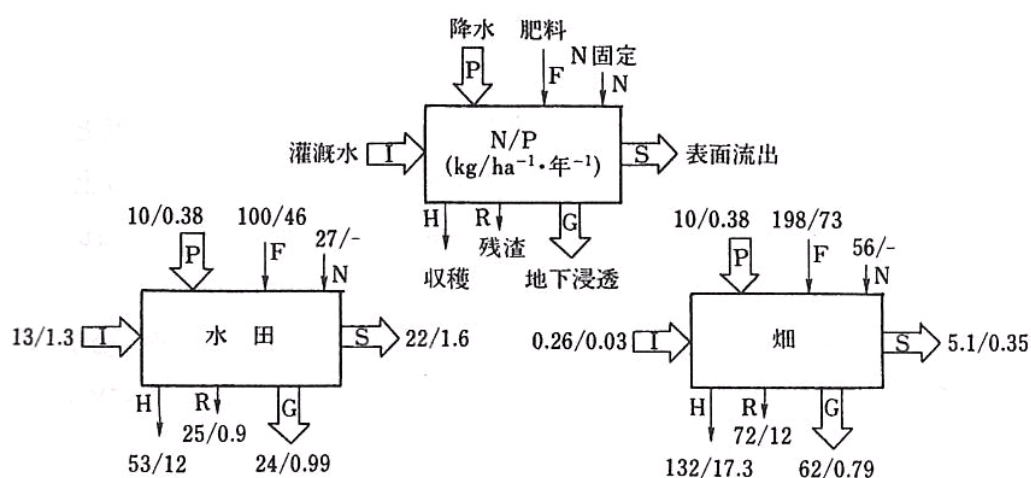


図 3.2.3 水系における農地の物質収支

また、水田の流出負荷量については、水田の立地条件のうち土壤の透水性と灌漑条件、地形の傾斜などによって影響を受ける可能性があること、畑地では地下浸透流出が汚濁負荷の主要な部分を占め、表面流出は降雨の時のみ発生することを述べている。

図 3.2.4は用水と降水により水田に供給されるリン・窒素負荷量と水田から流出する負荷量とを比較したものである。両者の間に相関は認められないが、負荷が増加している水田と負荷が減少している水田とがあることが伺える。このような浄化機能を発揮する水田の多くは灌漑水が汚濁されているか、灌漑水量の少ない水田である。

3.2 流入負荷量の把握

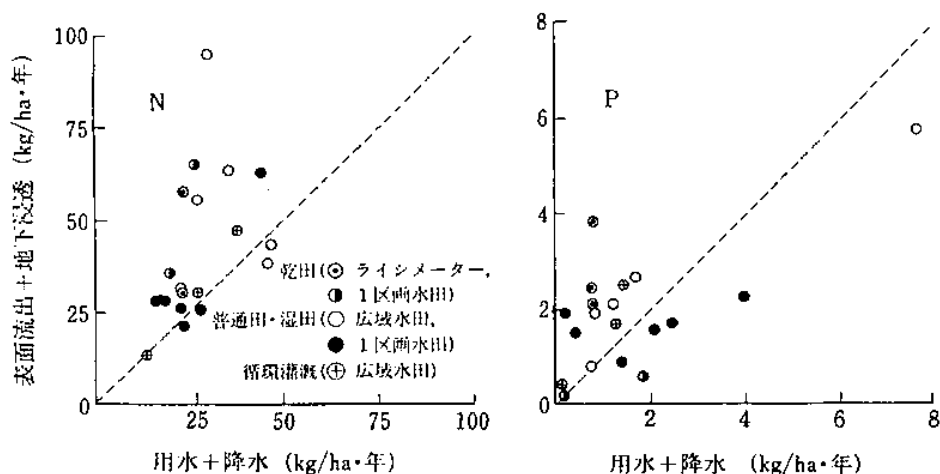
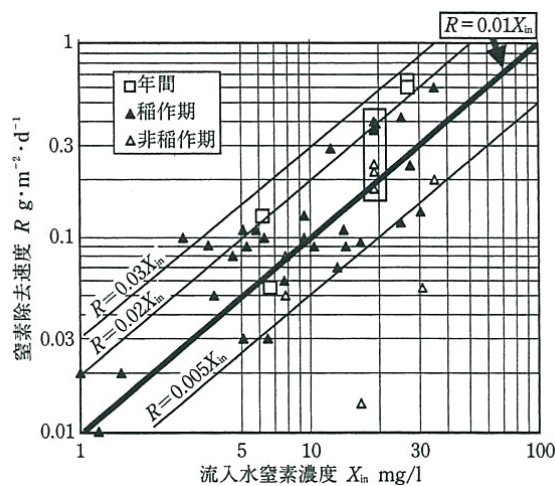


図 3.2.4 用水と降水による供給量と流出負荷量

上記の水田における窒素除去機能は、近年注目を浴びており、各地で実測が行われている⁴⁾⁵⁾
⁶⁾。高濃度の硝酸性窒素が検出される畜産地域や多肥の畑地・樹園地地域では、水田、湿地は窒素除去手段として有用と考えられている。

図 3.2.5は、各地の研究者によって試験区や単位水田、水田群の流下過程で測定された水田への流入水濃度と窒素除去速度の関係であり、以下のような特徴が見られた⁷⁾。

- ・ 除去速度は流入水濃度が高いと大きくなる。
- ・ 稲作期の値は非稲作期の値よりも大きい。(水温と藻類繁茂の影響と指摘)
- ・ 水田の区画形状が正方形に近いと水の流れが偏在し、除去効率が低下する。



出典) 田淵(2006):「水田窒素除去機能の定量化への試み」、農業土木学会誌

図 3.2.5 水田等における流入水濃度と窒素除去速度の関係

3) 放牧地の負荷流出

田淵⁸⁾は、放牧地からの負荷流出について、以下のように述べている。

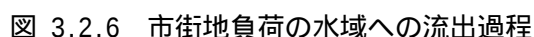
放牧地からの負荷は、豚・牛に関わらず、飼育頭数と近傍河川の窒素濃度は比例関係にあることが指摘されている。

養豚主体の集水域をもつ小河川において、降雨時には流量増大に伴って希釈が起き、硝酸態

窒素濃度の低下が起きる。しかし、流出負荷量は増大する傾向となり、降雨時に洗い出される負荷の存在が示唆されている。また、降雨時の硝酸態窒素負荷量の増大量は、増大時以前の平常時期の長さによって異なり、期間が長いほど平常時より増加する。

和田⁹⁾は、市街地からの負荷流出過程について、以下のように述べている。

住宅・事業場からの負荷は、排水設備から公共柵（汚水柵）を経て公共下水道管渠に流入し、下水処理場で処理後、公共用水域へ放流される。汚水と雨水を同じ管渠系統で送水する合流式下水道では雨天時の流出水量が多いと、すべての流出水を処理できず、一部はそのまま公共用水域へ越流する場合がある。汚水と雨水を別々の管渠系統で送水する分流式下水道では、雨水流出に伴う汚濁負荷はまったく処理されずに雨水管を通じて直接公共用水域へ放流される。



同じ土地利用であっても、季節によって流出機構は異なる。融雪期には、平常時に比べて流

3.2 流入負荷量の把握

入河川の流量は増加するが、降雨出水とは異なり、なだらかな流量変化を示すとともに、大流量の継続時間が長い。こうした特徴を受けて、負荷の流出機構も異なってくる。

鵜木ら¹⁰⁾は、融雪期の流出機構について、以下のように記述している。

気温や日射による積雪上層での融雪水は、浸透する際、雪粒子による捕捉、積雪層内での滞留・再凍結を繰り返し、容易には地表面に到達しない。積雪層内に氷板があり、下方浸透が妨げられる場合には、融雪水は横方向へも移動するが、融雪が進行すると大部分が地表面に到達する。

地表面に達した融雪水は、土壌が凍結していない場合は地下に浸透し、土壌表層が凍結あるいは飽和状態の場合は地表面流出する。河川に流出する過程で表面流去水が地下浸透する場合や、地下浸透水が地表面に復帰する場合も考えられる。

以上のように、融雪水の流出経路は積雪内、地下、地表面に大別でき、これに地下水を合わせて融雪期の河川水が構成される。

融雪水は、流出過程において、流域内の様々な物質を河川に流出させる。積雪中には、降雪過程および積雪後に、大気中から化学物質が取り込まれる。これらの物質は融雪水が積雪内を移動する時に溶出する（→溶存態物質）。また、融雪水が地下浸透する過程では、土壌中の溶存物質を溶脱させる。さらに、地表面を流去する際には、土壌表層に存在する物質を洗い流し、河川に流出させる。

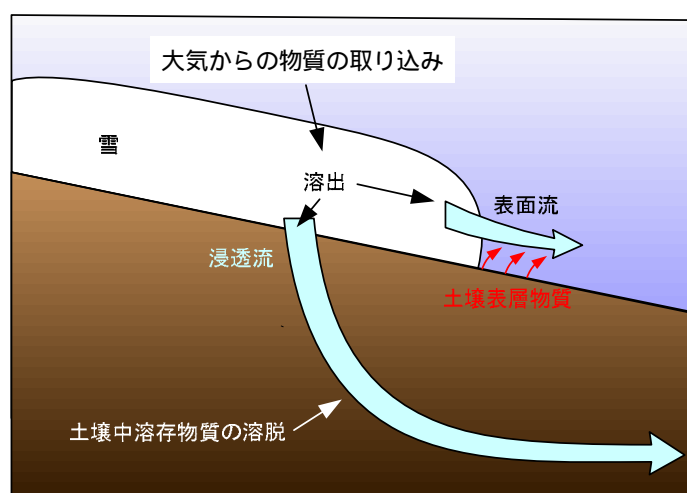


図 3.2.7 融雪期の流出機構（イメージ）

(3) 流量規模別の負荷量分担率

流入負荷量は、出水時には多くの負荷量が短期間に流入する。一方、平常時には日々の負荷量は小さいが、日数は多い。では、湖沼への流入負荷量はどのような流量の時の負荷量が湖沼水質に影響を及ぼしているのだろうか。

に示すのは、代表的な湖沼の流量規模別の負荷量分担率を調べたものである。負荷量分担率は図 3.2.8に示す手順に従って算定している。ここでの負荷量はL-Q式から推定しているため、この精度は水質調査データの統計的信頼性に影響を受けることに注意されたい。

・ 計算方法：

流量データから
L-Q式を用いて
毎時の負荷量を算定

流量規模別に
負荷量を積算

ヒストグラム化

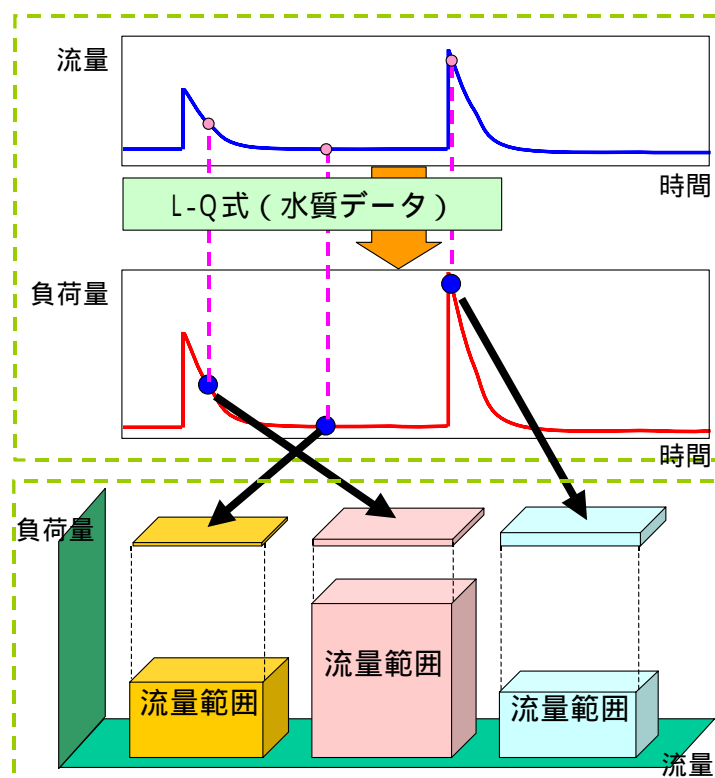


図 3.2.8 流量規模別の負荷量分担率の計算方法

流量規模別の負荷量分担特性は河川ごとに異なる。SS、COD、リンについては、出水時の負荷量が無視できないものと考えられる。これらの項目は流量増加に対する負荷量増分が出水時に大きくなっており、降雨時の表面流出に伴う粒子態の負荷が影響しているものと考えられる。一方、窒素については、SS、COD、リンに比べると出水時の寄与が小さい。窒素の場合、流量増加に対する負荷量増分が出水時と平水時では大きく変わらないことが多い。これは、降雨時の表面流出に伴う負荷増分の影響が小さいためと推察される。

豊水流量以下の流量時に流入する負荷量の割合を下表に示す。いずれも 30～40%以下となっており、出水時の影響が大きいことが示唆される。特に野洲川（琵琶湖）では 10%未満と出水時の負荷量分担が大きくなっている。

負荷量分担率の算定に用いた流量の分布を図 3.2.10に示す。図によれば、野洲川は他河川に見られるような低流量時のピークが明瞭でない。これは、野洲川流域での取水量や伏流水が他河川に比べて多く、平水時の流量が利水により減少している可能性がある。このような、湖沼への流入負荷量を議論する場合、河川からの流入負荷を考えるだけでなく、地下水からの負荷量も重要と考えられる。

表 3.2.1 豊水流量以下の流量時に流入する負荷量の割合

河川名	COD	リン	窒素
網走川（網走湖）	35%	27%	24%
七戸川（小川原湖）	27%	30%	35%
桜川（霞ヶ浦）	20%	12%	30%
野洲川（琵琶湖）	6%	5%	9%
斐伊川（中海・宍道湖）	23%	20%	30%

3.2 流入負荷量の把握

このように、湖沼への流入負荷を考える場合、河川によっては、流域の特徴を踏まえる必要が出てくるものと考えられる。その場合、本検討のように流量規模別の流量・負荷量分担を整理することも、河川の特異性の抽出に資することができる可能性がある。ただし、本検討では L-Q 関係を利用しているため、流量増加時の負荷量（少なくとも月 1 回程度の流量規模）を出水時調査で抑えておくことが望ましい。

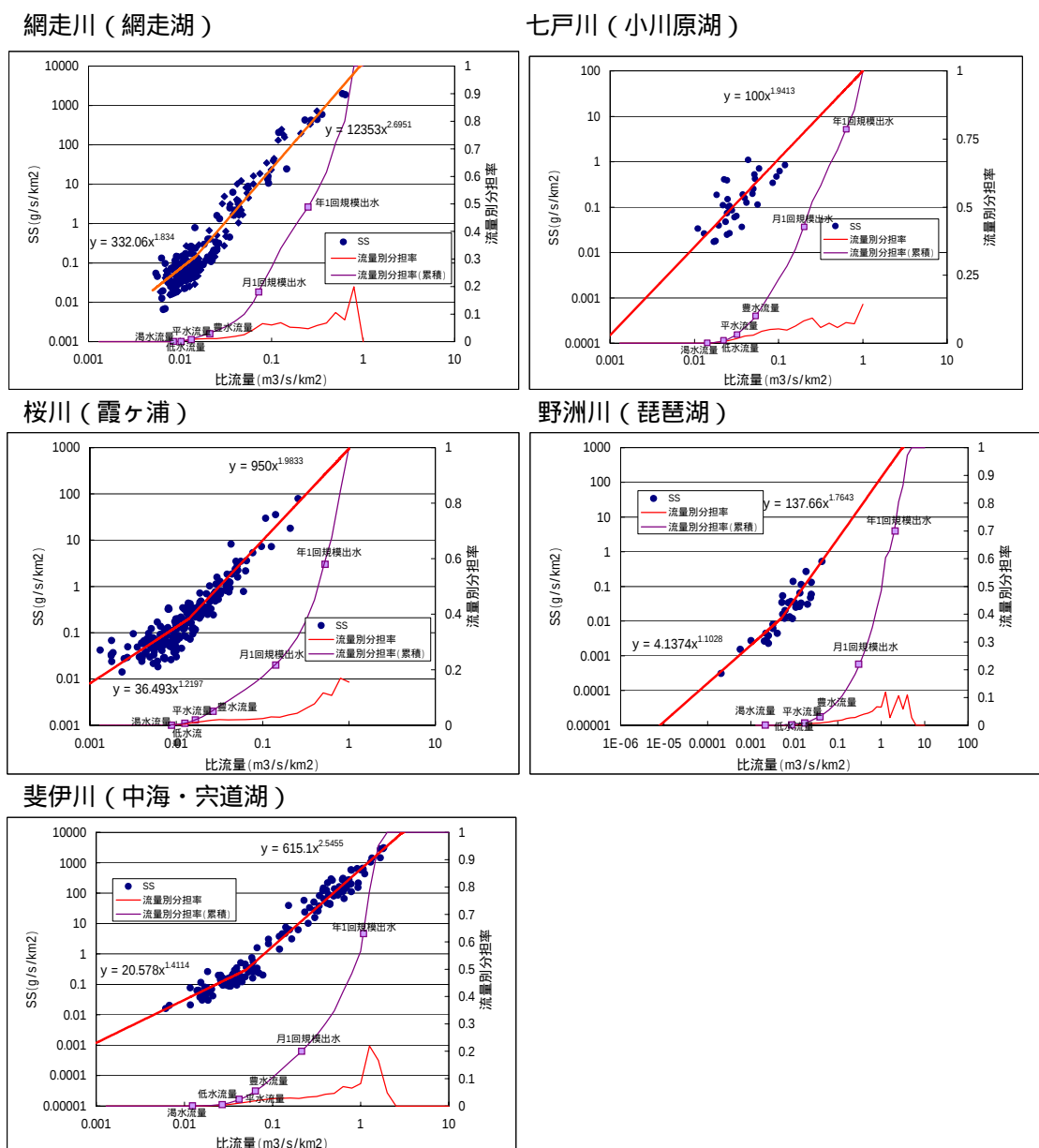
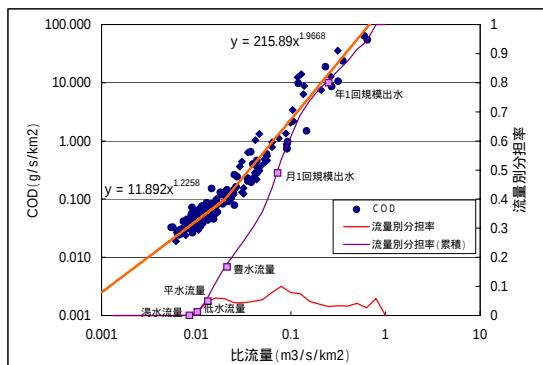


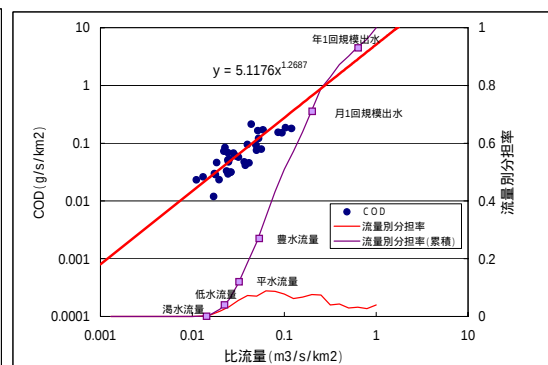
図 3.2.9(1) 主要河川の流量規模別負荷量分担率（SS）

3.2 流入負荷量の把握

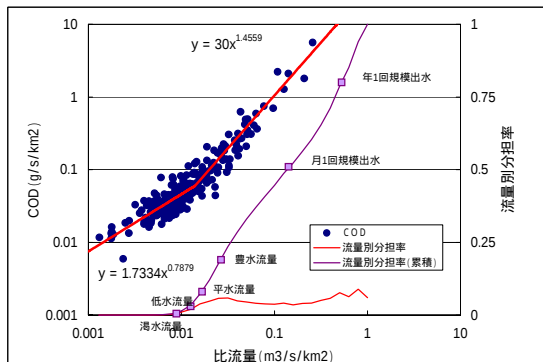
網走川（網走湖）



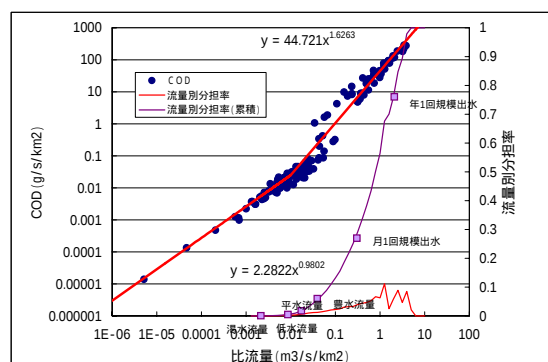
七戸川（小川原湖）



桜川（霞ヶ浦）



野洲川（琵琶湖）



斐伊川（中海・穴道湖）

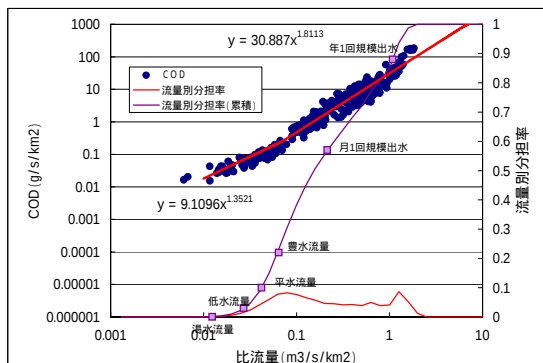
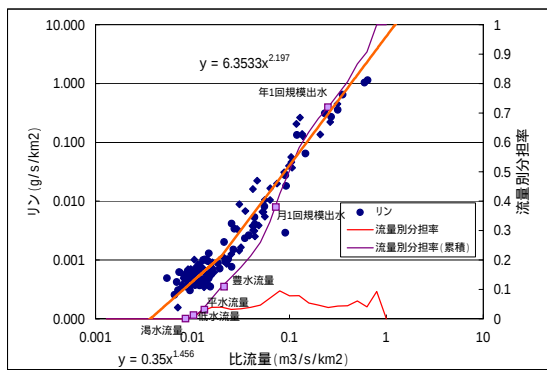


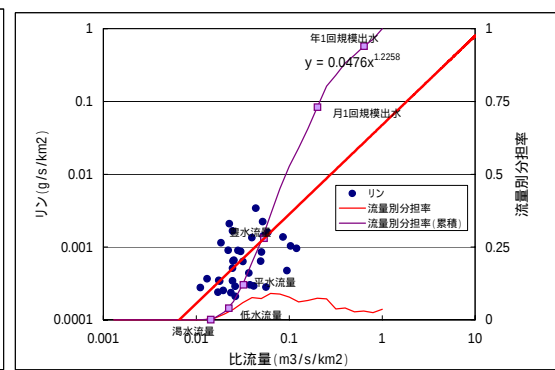
図 3.2.9(2) 主要河川の流量規模別負荷量分担率 (COD)

3.2 流入負荷量の把握

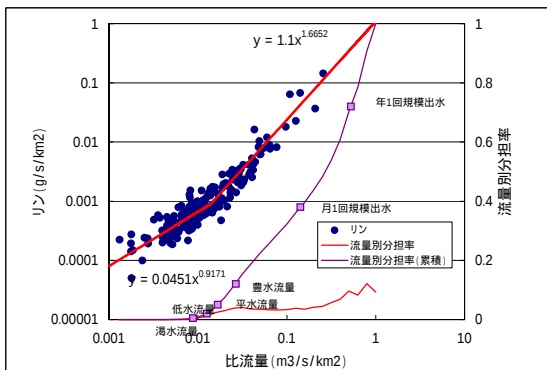
網走川（網走湖）



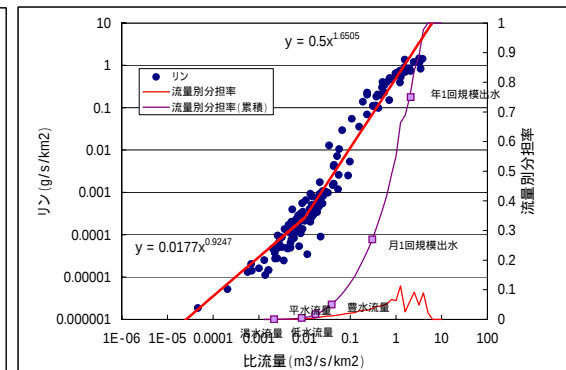
七戸川（小川原湖）



桜川（霞ヶ浦）



野洲川（琵琶湖）



斐伊川（中海・宍道湖）

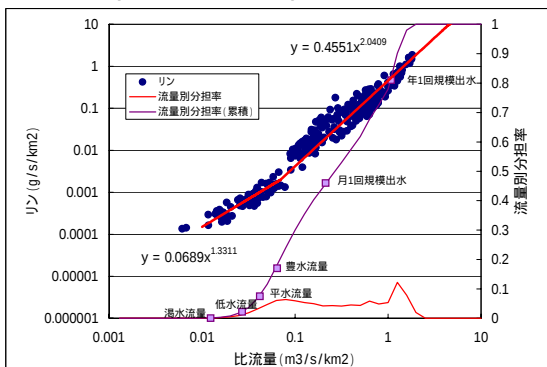
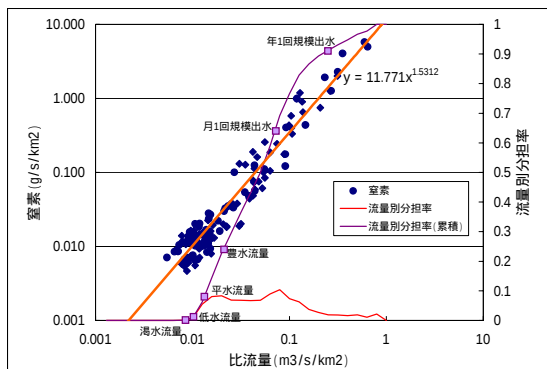


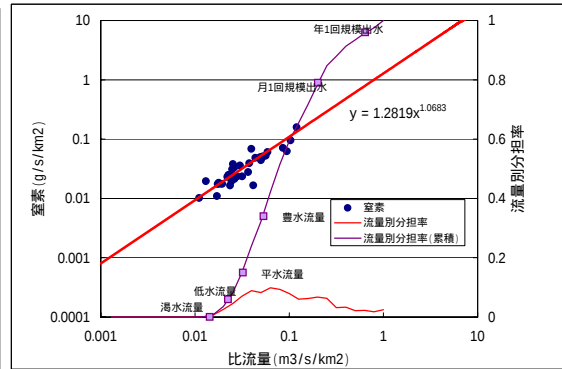
図 3.2.9(3) 主要河川の流量規模別負荷量分担率（リン）

3.2 流入負荷量の把握

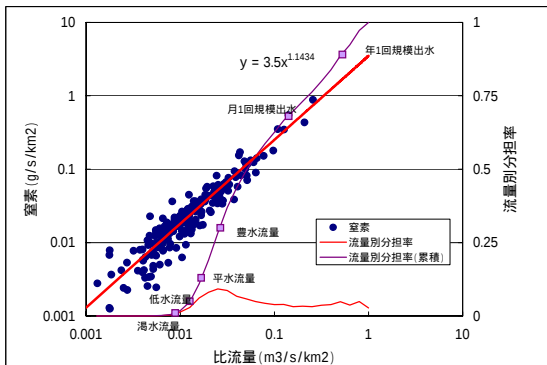
網走川（網走湖）



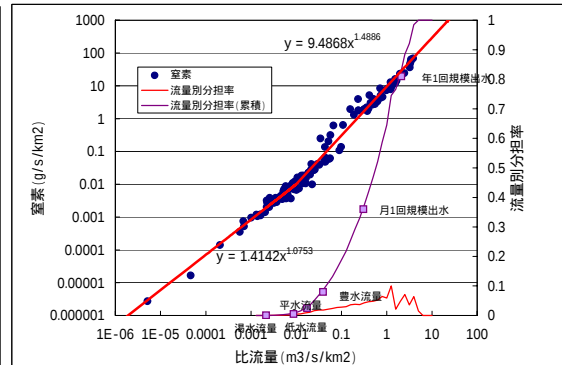
七戸川（小川原湖）



桜川（霞ヶ浦）



野洲川（琵琶湖）



斐伊川（中海・宍道湖）

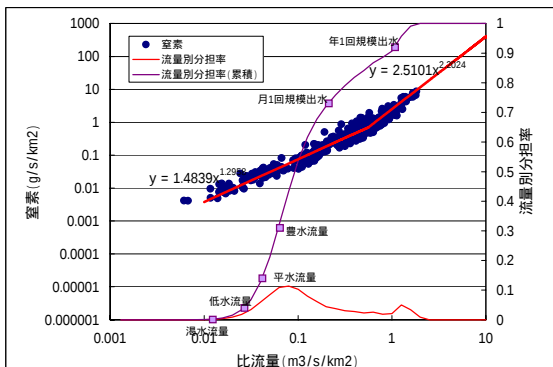


図 3.2.9(4) 主要河川の流量規模別負荷量分担率（窒素）

3.2 流入負荷量の把握

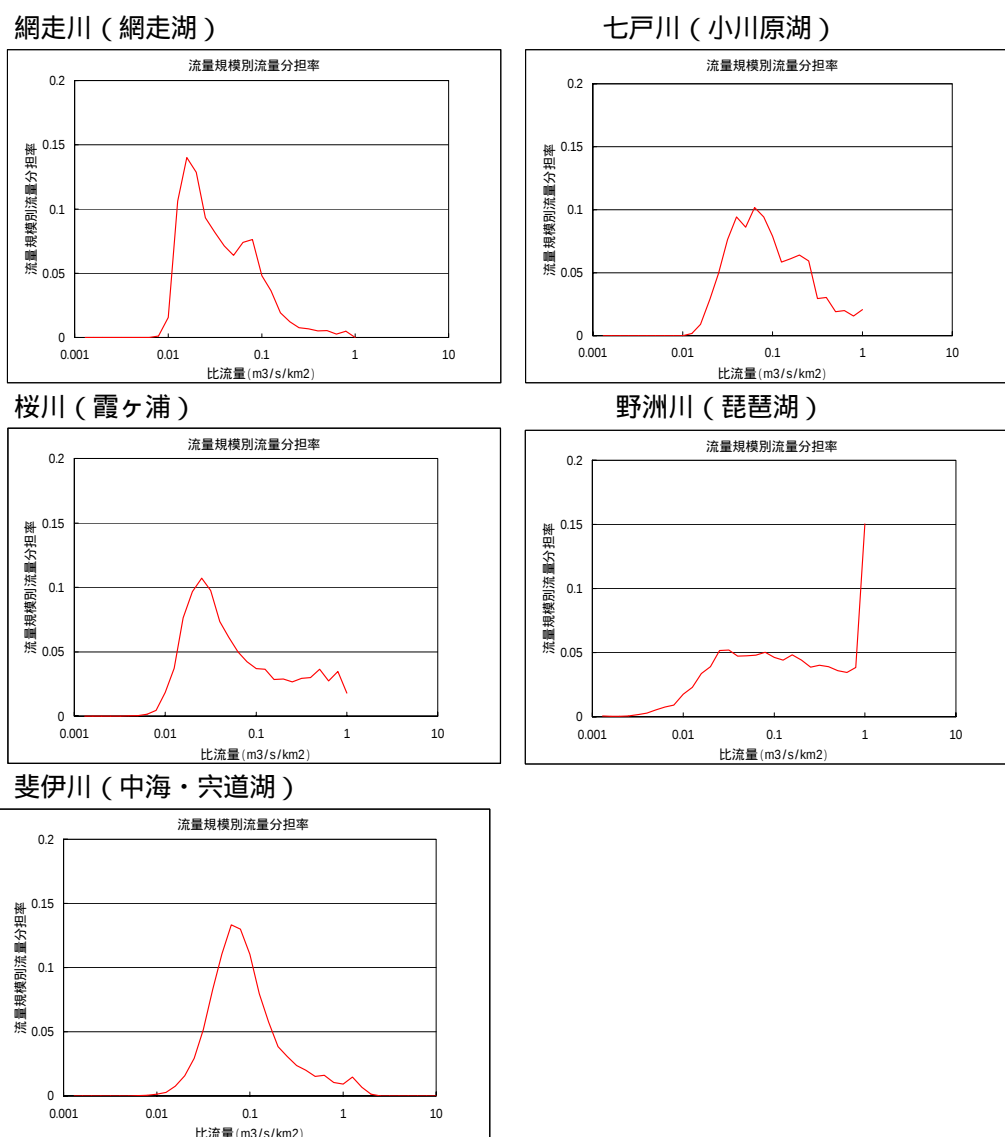


図 3.2.10 検討対象河川の流量規模別流量分担率

(4) 出水時の負荷量変化特性

降雨流出に伴い様々な汚濁負荷物質が流出し、河川・湖沼に流出する。これらは、表面流、中間流、地下水流等、複数の異なる経路で流出し、その形態は流域特性や降雨特性によって変化すると考えられる。また、降雨が発生する直前の流域の状態（それまで降雨が少なく負荷が蓄積されているか、最近に降雨があり負荷が流出した後であるか）によっても異なると考えられる。このように降雨に伴う負荷の流出は、様々な要因により複雑な現象を呈している。

図 3.2.11は、ある河川における降雨時の流量と T-P 負荷量の関係である¹¹⁾。先行降雨が 3 週間なかった降雨時調査結果 (9/20: 図中赤) と、先行降雨が前日にあった降雨時調査結果 (10/14: 図中青) を比較している。図中の矢印は時間の経過を示している。

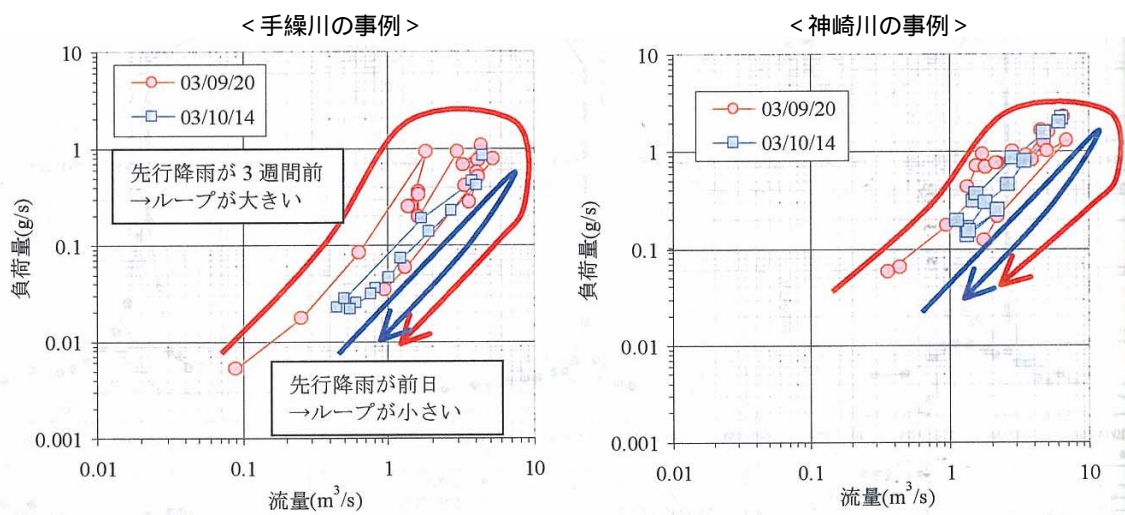
この図に示すように、降雨時の負荷流出は流量増加時と低減時で異なり、流量と負荷量の関係はループを描いている。また、降雨によりループの大きさが異なっており、先行降雨の影響によって負荷流出形態が異なることが伺える。

呉・山田ら^{12) 13) 14)} は、降雨流出に伴う河川渓流水質の変化について、1) 流量ピークより物質

3.2 流入負荷量の把握

濃度ピークが早く現れる初期高濃度型、2)流量ピークより濃度ピークが遅く現れる後期高濃度型、3)流量の希釈効果に伴い流量ピーク時に濃度が最小値をとる流量希釈型の3つに大別できると考え、降雨流出に伴う汚濁物質濃度変化の基礎式を質量保存式から導出し、この式により上記の3パターンの水質変化を再現可能なことを示した。

また、水質ハイドログラフの形成過程における流域からの負荷発生量を、降雨強度と(出水前の)初期濃度の数として扱うことにより、水質ハイドログラフの推定を容易に行えることを示している。



出典) 平成 15 年度 県単河川調査及び河川環境整備合併委託
(印旛沼流域水循環健全化検討) 報告書 千葉県千葉土木事務所

図 3.2.11 先行降雨の違いによる出水時負荷流出形態の比較

3.2 流入負荷量の把握

3.2.2 流入負荷量の調査技術

流入負荷量は河川流量×河川水質濃度で算定される。本項では、(1)、(2)において河川流量と水質濃度それぞれの調査手法を整理し、(3)において、調査時に生じ得る誤差について述べる。さらに(4)においては、(3)での課題等を踏まえ、流入負荷量調査時の留意点を整理する。

(1)調査手法

1)流量計測手法

平常時の流量計測にあたっては、プライス式流速計や電磁流速計等の計測機器を用いられている。また、出水時については、上記の方法に加え、浮子を用いた流量観測が行われている。

この他、近年では、ADCP や H-ADCP や超音波流速計・電波流速計を用いた方法、PIV 法等の画像解析も流量観測手法に取り入れられ始めている。

2)水質計測手法

水質の定量化は、基本的に水質分析によっており、河川水質試験方法(案)や JIS の標準法が用いられている。

また、こうした水質分析のほかに、物理的に計測可能な項目については、2 章で紹介した多項目水質計等を用いる方法もある。

3)調査手法上の誤差

河川の負荷量を調査する過程においても様々な課題があると考えられる。

- ・ 流量の測定誤差
- ・ 水質の分析誤差
- ・ 負荷量把握地点が限られていること

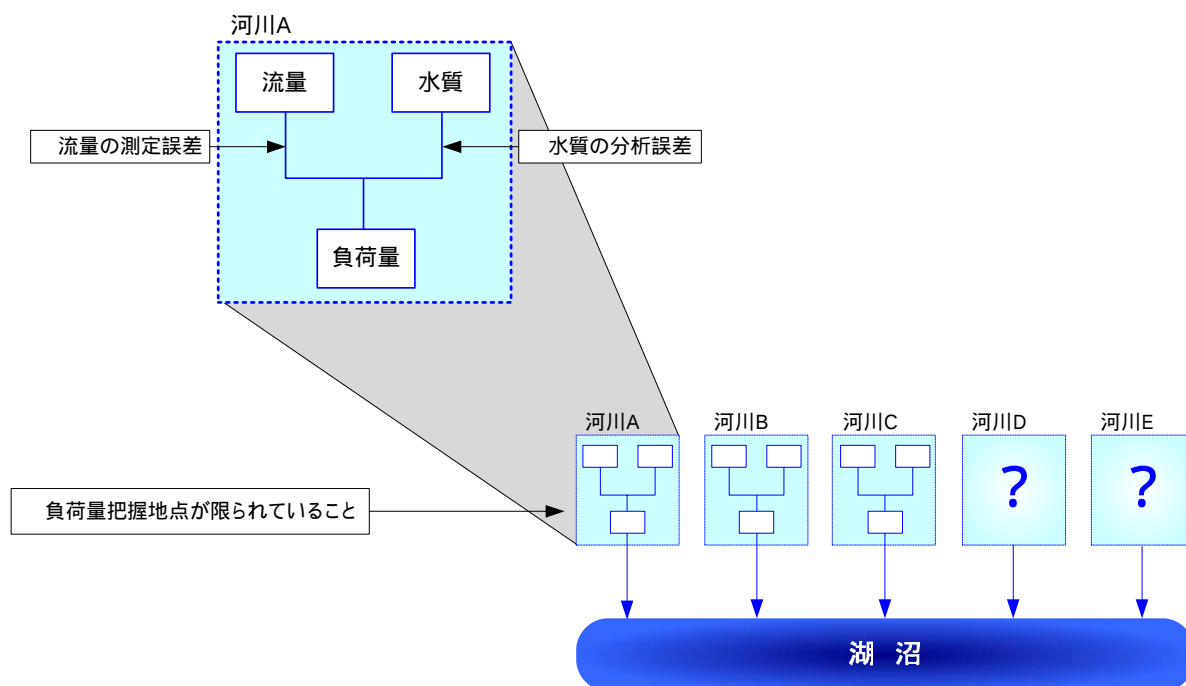


図 3.2.12 調査時に生じる負荷量把握の課題

a) 流量誤差

負荷量推定にあたっては、流量と水質それぞれを測定し、乗じて求めるため、測定流量に誤差が含まれれば、負荷量に影響を及ぼす。流域負荷量の推定に多く用いられる L-Q 式による方法では、流量の測定誤差は以下の 2 点において影響を及ぼす。

- ・ L-Q 式作成時の流量 (= 観測流量) 誤差
- ・ 負荷量推定時の与条件としての流量誤差

i) 流量の測定誤差

表 3.2.2 は代表的な湖沼における、流量観測方法および測定誤差の情報である。

流量の少ない平水時については、プライス流速計や電磁流速計などの計測機器が用いられている。これらの計測機器の測定精度は、実流速の $\pm 2\%$ 程度である。

表 3.2.2 流量観測方法と測定精度

	流量観測方法		流量の測定範囲 および測定精度								
	平水時	出水時									
網走湖	・ プライス式流速計	・ プライス式流速計 ・ 浮子（観測距離 7 ～ 50m）									
小川原湖	・ プライス式流速計	・ 浮子観測 <table><tr><th>観測所</th><th>測線距離</th></tr><tr><td>土場川、赤川、姉沼川</td><td>50m</td></tr><tr><td>七戸川(上野)、砂土路川</td><td>100m</td></tr><tr><td>中津川</td><td>8m</td></tr></table>	観測所	測線距離	土場川、赤川、姉沼川	50m	七戸川(上野)、砂土路川	100m	中津川	8m	
観測所	測線距離										
土場川、赤川、姉沼川	50m										
七戸川(上野)、砂土路川	100m										
中津川	8m										
霞ヶ浦	・ 小型微流速計 ・ 電気流速計	・ 電磁流速計	・ 微流速計 精度 ± 2% ・ 電磁流速計 精度 ± 0.015 ± 2%								
中海 宍道湖	・ 電磁流速計	・ 浮子観測	・ 電磁流速計 0 ～ 25cm/s : ± 0.5cm/s 25 ～ 100cm/s : ± 2.0cm/s 100 ～ 200cm/s : ± 4.0cm/s (概ね数値の 2%程度)								

調査で得られた流速が $\pm 2\%$ 程度の誤差を含むとした場合、L-Q 式とそれによって推定される年間負荷量に及ぼす影響を、霞ヶ浦のデータを用いて試算した。当該データに基づいて作成された L-Q 式 ($L = aQ^b$: Q は流量) は、図 3.2.13 に T-P の例を示しているが、係数 a の値が変わり、係数 b に変化はない。また、推定される年間負荷量は $\pm 2 \sim 3\%$ 程度変動する結果となった (図 3.2.14)。

一方、出水時にはこうした流速計のほか、浮子観測を用いている湖沼が多い。河川砂防技術基準(案)同解説 調査編 (H9) p.38 ~ 39 によれば、浮子測法により河川流速の測定を行う場合、上下流 2 断面間の距離は概ね 50m 以上とするとある。この理由としては、

3.2 流入負荷量の把握

「横断線間隔をあまり長くすると、1回の測定に時間がかかりすぎ、その間の水位・流量の変化などを考え併せると総合的には精度が高くなるとはいえない。一方で、間隔をあまり短くすると測定時間が短くなりすぎて、計時の誤差によって精度が悪くなる」と述べられている。

実際に流量観測が実施されている地点の中にも、こうした条件を満たしていない地点もある。河川の規模や形状・周囲の状況等により、条件を満たすことが難しいケースもあると考えられるが、観測時には観測距離に留意する必要があるだろう。

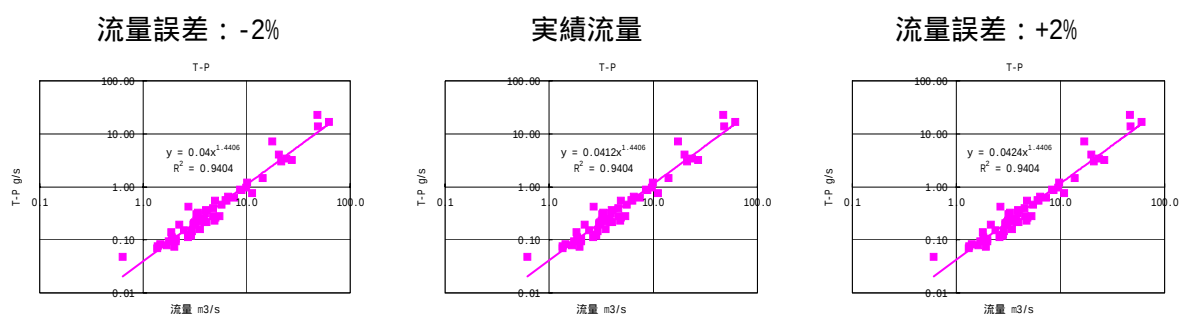


図 3.2.13 流量観測値に定誤差(±2%)が含まれる場合の L-Q 式の変化 (霞ヶ浦・桜川：T-P)

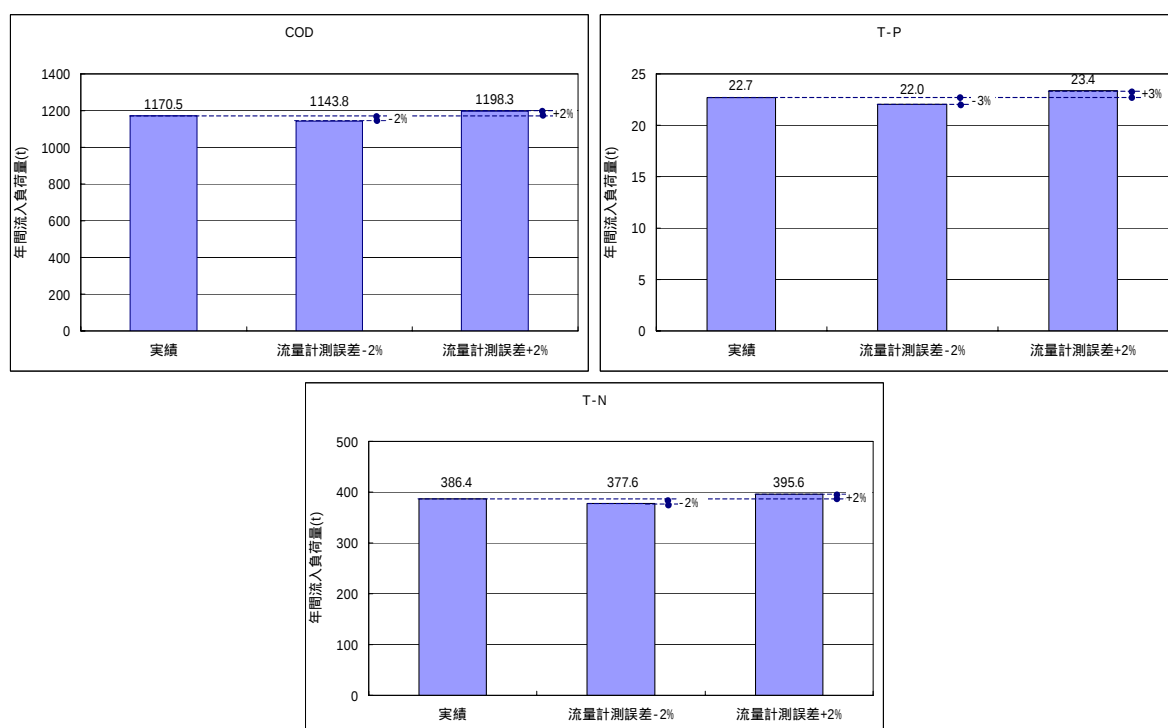


図 3.2.14 流量観測値に定誤差(±2%)が含まれる場合の年間流入負荷量の変動 (霞ヶ浦・桜川)

ii) 負荷量推定時の誤差

表 3.2.3に、代表的な湖沼における、L-Q 式を用いた負荷量推定時の流量の与え方を整理した。日常の流量推定は、水位のモニタリングが行われている地点については、定期調査や出水時調査等のデータで作成された H-Q 式により行われる。また、その他の地点については、水位計測地点の流量から、流域面積等を考慮して推定されている。

H-Q 式は限られた流量観測データから統計的に求められているため、H-Q 式から推定される流量には自ずと誤差が含まれており、湖沼への流入負荷量推定に影響を及ぼす可能性がある。

表 3.2.3 負荷量推定に使用する流量調査

	推定方法	精度														
網走湖	H-Q 式（流域内 5 地点）															
小川原湖	H-Q 式	【平均誤差】 <table><tr><td></td><td>(m³/s)</td></tr><tr><td>七戸川</td><td>4.24</td></tr><tr><td>赤 川</td><td>1.24</td></tr><tr><td>土 場 川</td><td>0.89</td></tr><tr><td>砂土路川</td><td>0.89</td></tr><tr><td>姉沼川</td><td>1.58</td></tr><tr><td>中津川</td><td>0.06</td></tr></table>		(m ³ /s)	七戸川	4.24	赤 川	1.24	土 場 川	0.89	砂土路川	0.89	姉沼川	1.58	中津川	0.06
	(m ³ /s)															
七戸川	4.24															
赤 川	1.24															
土 場 川	0.89															
砂土路川	0.89															
姉沼川	1.58															
中津川	0.06															
霞ヶ浦	流量連続観測実施地点(5 地点)は H-Q 式で算定。 他の河川は上記 5 地点の平均比流量に流域面積を乗じて推定。															
琵琶湖	湖水位変動と利水・放流量から逆算した流入河川流量の総量を、各ブロックに流域面積で配分。	【逆算流入量の精度】 湖水位の分解能:1cm 逆算流入量の分解能：6,703,300m³ 1 時間ピッチで逆算流入量を求めるとすると、計 1862m³/s の誤差が発生する可能性がある。														
中海・宍道湖	斐伊川新伊萱地点の時間流量をもとに、年間の雨量比率を考慮し、流域面積比により算定。															

b) 水質の分析誤差

水質調査地点における採水位置の情報が得られている網走湖・小川原湖の事例では、採水位置はどの地点においても湊筋付近の 1 点（1 水深）である。

これは横断方向の水質分布が一定であることを仮定しているものであるが、大小様々な流入がある河川では、流入水と本川の混合が十分になされず、横断方向・水深方向に不均一に分布している場合もあると考えられる。この場合、推定される負荷量は相応の誤差が含まれることとなる。

3.2 流入負荷量の把握

調査地点の設定について（河川水質調査要領(案) H17.3 国交省より）

合流点の下流地点でその地点を代表する水質を得るためには、流入水と本川の水が十分混合されていることが必要である。上・中流域の比較的川幅が狭く水深の浅い地点では、合流後、2～3 箇所の瀬を通過すれば十分混合しているものと見なせるが、中・下流の川幅が広く横方向の拡散が小さい地点では、数 km 下流でも横断方向の水質が一様にならない場合がある。

また、水質分析結果はある程度の誤差を含むため、これも負荷量に影響を与える一要因である。水質分析方法のうち、T-N と T-P の分析精度は、それぞれ 3～10%、2～10%とされている。（河川水質試験方法(案)）

そこで、T-P と T-N について、水質分析結果が誤差を含む場合に、作成される L-Q 式と推定される年間負荷量に及ぼす影響を、霞ヶ浦のデータを用いて試算してみると、推定される年間負荷量は±6～7%程度変動することになり、流量観測による誤差よりも、流入負荷の推定に及ぼす影響は大きいと考えられる。

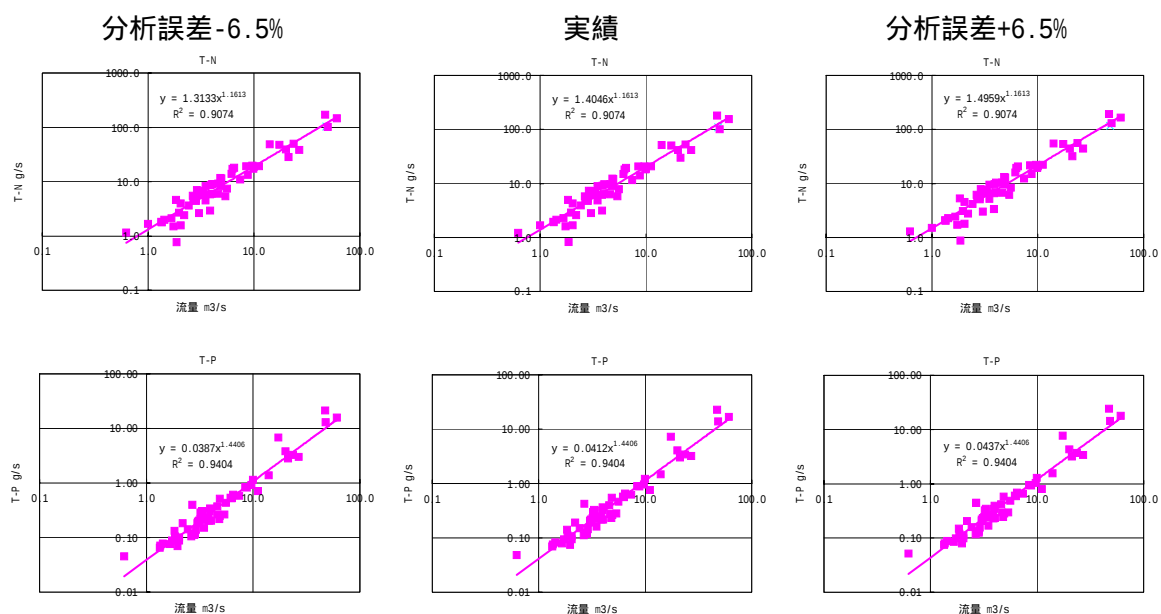


図 3.2.15 水質分析結果に定誤差(±6～7%)が含まれる場合の L-Q 式の変化（霞ヶ浦・桜川）

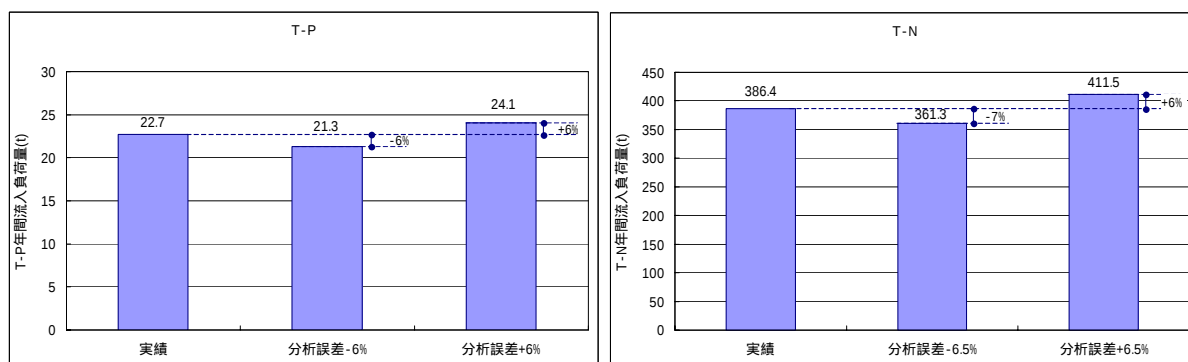


図 3.2.16 水質分析結果に定誤差が含まれる場合の年間流入負荷量の変動～霞ヶ浦・桜川

c) 負荷量把握地点が限られていること

これまでに挙げてきた課題は、流量と水質が実測値で把握されている調査地点について言えることである。しかし、湖沼への流入負荷推定の大きな課題として、こうした調査地点が限られていることが挙げられる。表 3.2.4に、代表的な湖沼について、実績値により作成された L-Q 式で負荷量が把握されている面積の全流域面積に対する比率を整理した。また、残流域の取り扱いについても併せて整理した。

流量、水質の両方が実測されている調査地点により負荷量を把握している流域面積は、各湖沼 60～95%程度である。また、負荷量の把握されていない残流域の取り扱いについては、流量連続観測が行われている地点の流量から流域面積を考慮して推定することが多いようである。霞ヶ浦においては、全河川の水質調査により各河川の水質特性をグループ化し、水質特性の類似した河川の L-Q 式を適用している。

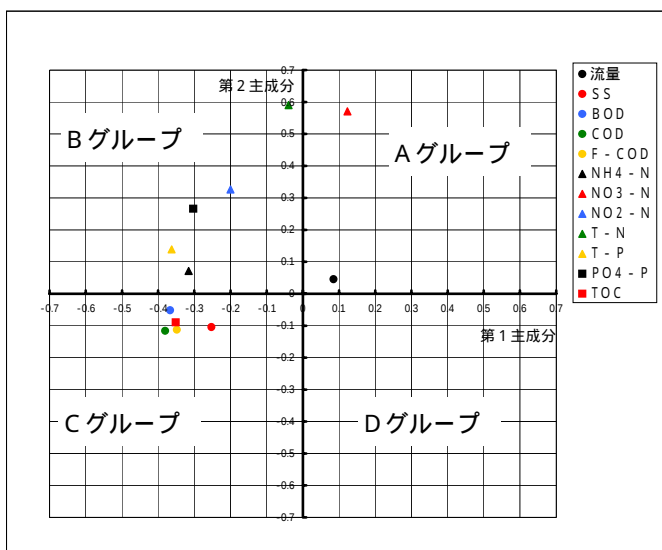
残流域からの流入負荷量把握にあたっては、調査を実施するのが望ましいが、大小様々な流入を対象にした調査を毎年実施するのは非常な費用と労力を要する。従って、流入負荷量が実績ベースで把握されている河川から何らかの方法で推定することとなるが、推定の精度向上にあたっては、単に近傍の河川を用いるだけでなく、霞ヶ浦の事例(図 3.2.17)のような、水質特性や流域特性が類似した河川を用いることが望ましい。

3.2 流入負荷量の把握

表 3.2.4 負荷量推定に使用する流量調査

	全流域 面積 (km ²)	実績の L-Q 式で 負荷量が 把握され ている流 域の面積 (km ²)	実績の L-Q 式で 負荷量が 把握され ている面 積の比率 (%)	実測値で作成した L-Q 式によって 負荷量が把握されている面積の比率 (%)
網走湖	1347.7	1280.2	95%	取り扱っていない。
小川原湖	742.2	600.26	81%	【負荷量算定時の流量】 中津川と残流域の平均流量の比に基づき、中津川流量より算定。 【負荷量算定時の水質】 流入河川 6 調査地点の平均水質
霞ヶ浦	2157	845.6	39%	【L-Q 式の適用方法】 全河川同時水質調査結果(H12 年度)に基づき、水質特性ごとに河川を 4 グループに分類。同じグループに属する負荷量把握河川(8 河川)の L-Q 式を適用。同じグループに複数の負荷量把握河川がある場合には、河川の位置・規模等を考慮。 【負荷量算定時の流量】 流量連続観測を実施している 5 河川の平均比流量を求め、各河川の流域面積を乗じて算定。 【負荷量算定時の水質】 各河川で設定した L-Q 式に依存。
琵琶湖	3174	2051.4	65%	【L-Q 式の適用方法】 全流域を地域ごとに 16 ブロックに分割。同じブロックに属する水質調査実施河川の L-Q 式を適用。水質調査河川の存在しないブロックについては、最寄りのブロックの水質調査実施河川の L-Q 式を適用。 【負荷量算定時の流量】 湖水位変動と利水・放流量から逆算した流入河川流量の総量を、各ブロックに流域面積で配分。 【負荷量算定時の水質】 各河川で設定した L-Q 式に依存。
中海	595.2	473.8	80%	【L-Q 式の適用方法】 水質調査が実施されている近傍河川の L-Q 式を適用。 【負荷量算定時の流量】 斐伊川新伊萱地点の時間流量をもとに、年間の雨量比率を考慮し、流域面積比により算定。 【負荷量算定時の水質】 各河川で設定した L-Q 式に依存。
穴道湖	1288.4	1148.3	89%	各河川で設定した L-Q 式に依存。

3.2 流入負荷量の把握



Aグループ：第1主成分が正、第2主成分が正
(NO₃-Nが高い傾向にある河川)

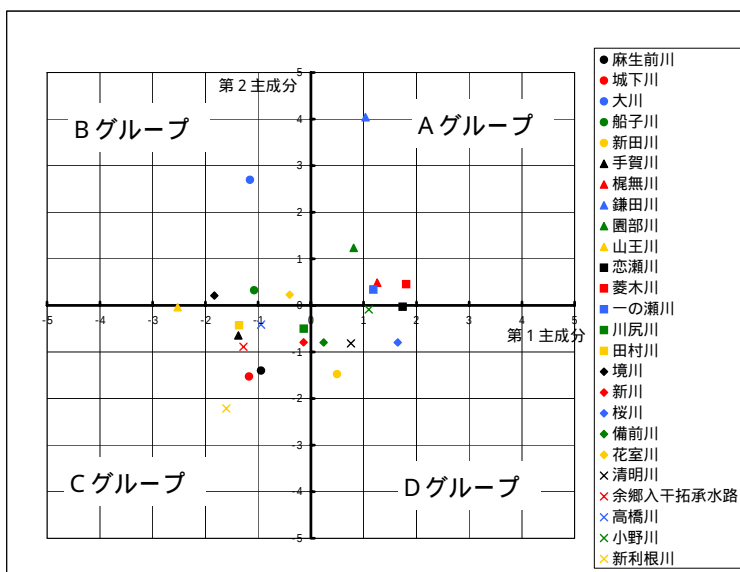
Bグループ：第1主成分が負、第2主成分が正
(NH₄-N、NO₂-N、T-P、PO₄-P等の栄養塩類の項目が高い傾向にある河川)

Cグループ：第1主成分が負、第2主成分が負
(SS、BOD、COD等の濁りと有機物の指標である項目が高い傾向にある河川)

Dグループ：第1主成分が正、第2主成分が負
(相対的に汚濁レベルが低い傾向にある河川)

項目別の固有ベクトル（4回調査の平均）

注：「河川負荷量同時観測調査 報告書 平成13年3月（社）茨城県公害防止協会」における4回の調査結果の主成分分析結果に基づき、各項目の固有ベクトルを平均してグラフに示した。



河川別の主成分スコア（4回調査の平均）

注：「河川負荷量同時観測調査 報告書 平成13年3月（社）茨城県公害防止協会」における4回の調査結果の主成分分析結果に基づき、各河川の主成分スコアを平均してグラフに示した。

図 3.2.17 霞ヶ浦流入河川水質の主成分分析

3.2 流入負荷量の把握

d) まとめ

代表的な湖沼における流入負荷量の調査手法上の誤差について、下表に整理した。

表 3.2.5 流入負荷量推定にあたっての誤差

項目	流量の 測定誤差	水質の 計測誤差	H-Q による 流量誤差	負荷量 把握面積
概要	- 流速計の計測誤差 - 浮子流量観測の横断測線の設定など	- 水質分析時に生じる誤差 - 水質調査地点での横断、水深方向の水質分布の非一様性など	H-Q 式に誤差が含まれることにより、流量値が誤差を含む	流入負荷量を実績値ベースで把握していない流域(残流域)が存在する。
重要度 (L-Q 式に及ぼす影響度)	流入負荷量の推定に及ぼす影響は小さい	流量の測定誤差に比べ若干大きい	流入負荷量の推定に及ぼす影響は大きい	流入負荷量の推定に及ぼす影響は大きい
誤差の量	±2%程度(流速計の計測誤差) - 浮子流観の誤差は定量的には判断できない。	±2～10%程度(河川水質試験方法(案)の記載) - 水質調査地点での水質分布の非一様性については定量的に判断できない。	誤差量は流量観測データ数、流量誤差によって異なる。	定量的に判断できない
精度向上のためにできること	適切な流量測線の設定(地形等の条件で許容する範囲内において)	支川から流入してきた水質が十分に混合されて一様になるとみなせる地点を調査地点に設定する。	H-Q 式作成のための流量観測調査の頻度を増やす。	- 推定方法の向上 - 調査の実施など

(2) 負荷量の把握手法

河川の流入負荷を把握するには、常に河川の水質と流量を測定することが最良であるが、費用と労力の点で現実的ではない。実務的な方法としては、大きく分けて以下の3つの方法があると考えられる。

- ・ L-Q 式を用いた方法

限られた調査データについて、流量等との相関関係から経験的な関係式を作成し、データの得られていない期間についても同様の関係が成り立つとして、関係式から負荷量を推定する方法。

- ・ 水質自動計測による方法

水質自動計により時間的に密なデータを直接計測するもの。

なお、自動計による計測では物理的な原理による間接的な計測となるため、水質分析データによるキャリブレーションを必要とする。

- ・ 原単位法による積み上げ

各流域フレームの原単位から負荷を推定する方法。

これらの手法の長所・短所を整理すると表 3.2.6 のようになる。

表 3.2.6 負荷量の把握手法の特徴比較

手法	長所	短所
L-Q 式	・ 調査データがあれば、高度な技術を要することなく簡単に作成が可能。 ・ データの統計的信頼性があれば、良好な精度を有する。	・ L-Q 式は数多いデータの平均的な式であるため、個々のデータについては、誤差を有している。 ・ 出水時など流量に対するヒステリシスが存在する場合には誤差が大きい。 ・ 実績データに基づいて作成されるため、将来予測には使用できない。
自動計測による方法	・ 時間的に連続したデータを記録できる。 ・ 定期調査・出水時調査のデータで適宜キャリブレーションすることにより、精度を確保できる。	・ 計測機器の測定限界が存在する。 ・ 将来予測には使用できない。
原単位法	・ 負荷源ごとの内訳が分かる。 ・ 将来予測に使用することができる。	・ 原単位のデータ蓄積が不十分 ・ 降雨（流量増加）による負荷の増大を表現できない。

代表的な湖沼において用いられている河川流入負荷量の把握手法の現状について見ると、水質自動計測による方法がとられている河川は非常に少なく、主に統計回帰モデルの1つである L-Q 式を用いているところが多い。各湖沼での L-Q 式の作成方法を表 3.2.7 に示す。

3.2 流入負荷量の把握

表 3.2.7 各湖沼の L~Q 式設定方法 各湖沼の L~Q 式作成方法(概要)

湖沼名	調査地点数	出水時・平水時の区分	調査期間	調査頻度				データ処理方法		
				平水時			出水時年間当りの回数	流量	水質	プロット数
				1 回/月	1 回/月以上	3 回 ~ 6 回/年				
網走湖	1	平水時	H10.1 ~ H14.2	○				調査時の流量観測値	計測値の生データ	120 (BOD、COD) 60(T-N、T-P)
		出水時	H13 ~ H15				2 回/年	同上	同上	32
小川原湖	6	平水時	H7.1 ~ H10.12	○ S63 ~	○ S62 ~			調査日の日平均流量	計測値の生データ	44 ~ 84
		-	-				-	-	-	-
霞ヶ浦	8	平水時	H9 年度		○ 1 回/週			調査時の流量観測値	計測値の生データ	54 ~ 62
		出水時	S56, S58, S59, H7, H13				1 出水あたり 10 回程度。地点により調査期間が異なる	1 調査あたりの観測値の平均	1 調査あたりの分析値の平均	
琵琶湖	22	平水時	H3.1 ~ H7.12	○						59 ~ 109
		出水時	H6.9				1 回/年	同上	同上	
中海・宍道湖	47	平水時	H8.1 ~ H15.12	○				テレメータ値利用調査時の流量観測値	計測値の生データ	17 ~ 72
		出水時	H8.9 ~ H15.1				各洪水に数回調査	調査時の流量観測値	同上	42 ~ 249

(3) 調査における留意点

流入河川の負荷量調査を行う場合、どこで、いつ、どのようなデータをとれば湖沼全体、流域として、より精度が上がるのかに留意し、観測の体制を考えていくことが重要である。

1) 観測河川の選定方法

湖沼の水質に影響を及ぼす河川であるほど、負荷量を把握しておく必要性は高い。しかし、小さい河川であっても、それが多くの流入河川の特徴をあらわす平均的な川であれば、データが必要な場合もある。

また、継続的に水質を監視する必要がない小河川であっても、一度、他の河川と併せて同時に観測を行っておけば、他の河川との相関を調べることによって、その後は必ずしも測定しなくても推定できる可能性がある。

観測地点の選定にあたっては、残流域が少ない、湖沼流入部の直近であることが望ましいが、湖沼湛水域の背水の影響が及ばない地点を選ぶ必要がある。また、出水時に浮子を用いた流量観測を行う場合には、適切な流量測線を配置できる地点を選定する必要がある。さらに、河川の合流点からは、水質が混合するのに十分な流下距離を確保することが望ましい。

2) 測定頻度

建設省河川砂防技術基準（案）によれば、河川（湖沼、ダム貯水池等を除く）の基準点、一般地点における観測測定回数について、以下のように記述されている。

原則として月 1 日以上、1 日について 6 時間間隔の 4 回程度の測定を行うものとする。なお、日間の水質変動が大きい河川では、必要に応じ年間 2 日程度、各 1 日について 2 時間間隔で 13 回の通日調査を実施するものとする。ただし、この場合、日間変動の少ない地点などでは、1 日の測定回数を適宜減じてよいものとする。

なお、採水の日時については、下記の記載がある。人為的負荷の少ない河川であれば、一般的には平水時の日間変動は少ないとして、1 日 1 回ないし 2 回程度の調査が実施されているのが現実と考えられる。

河川の基準地点、一般地点での採水は、降雨中および降雨後の増水期等を避け、原則として流量の比較的安定している低水流量時を選んで行うものとする。河川の基準地点、一般地点での採水は、降雨中および降雨後の増水期等を避け、原則として流量の比較的安定している低水流量時を選んで行うものとする。

これは主に平水時の調査について述べたものであるが、先に述べたように、COD やリンについては、出水時の負荷量の影響が大きいことから、適宜増水時・出水時の調査を実施する必要がある。

では、流入負荷量の精度を確保するためには、どの程度の規模の出水までを調査対象とすべきなのであろうか。ここでは、網走川の COD について、出水時データを除くことによる L-Q

3.2 流入負荷量の把握

式の変化と、それが年間流入負荷量へ及ぼす影響を試算した。

図 3.2.18は網走川における COD の L-Q 式である。ここでのデータは 10 年に 1 回発生するような規模の出水まで含まれており、広い範囲での流量がカバーされた式となっている。図 3.2.19～図 3.2.20に示すのは、規模の大きな出水データを徐々に除いて作成した L-Q 式である。これらの L-Q 式で年間流入負荷量を推定すると、図 3.2.20に示すように、2 年に 1 回発生する規模以上の出水データを除いても、年流入負荷量の推定値はあまり変わらない（最大出水を含む 2001 年で最大 5%程度）が、1 年に 1 回発生する規模以上の出水データを除くと、大規模出水時の流入負荷量が外挿して推定され、年流入負荷量が過大評価となる（最大 30%程度）。また、1 年に 4 回以上の規模未満の出水データを除くと、逆に年流入負荷量は過小評価となり、流況に関わらず、毎年 5%以上の誤差が生ずる結果となった。

以上から、出水時調査については、1 年に 1 回発生するような規模の出水までを調査対象とすることが望ましい。

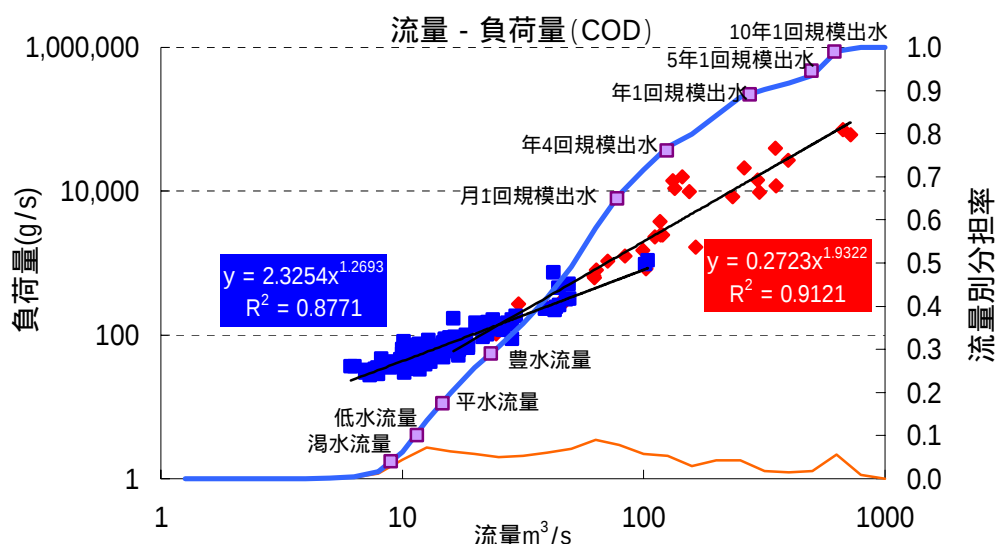
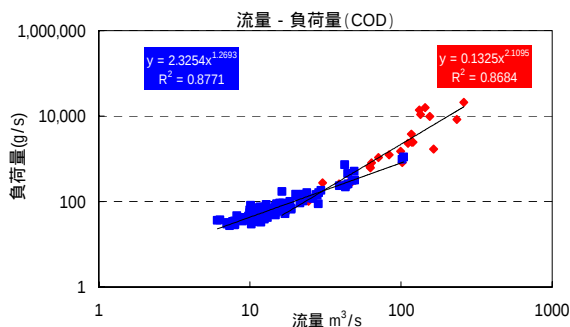


図 3.2.18 L-Q 式と流量別負荷量分担率（網走川・治水橋）

除外対象出水
1 年に 1 回程度の規模以上の出水



除外対象出水
1 ヶ月に 1 回程度の規模以上の出水

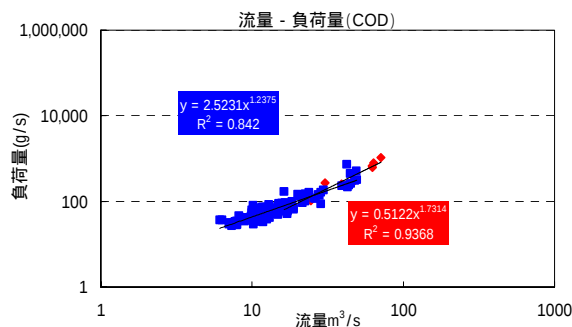


図 3.2.19 大規模出水データを除いて作成した L-Q 式

3.2 流入負荷量の把握

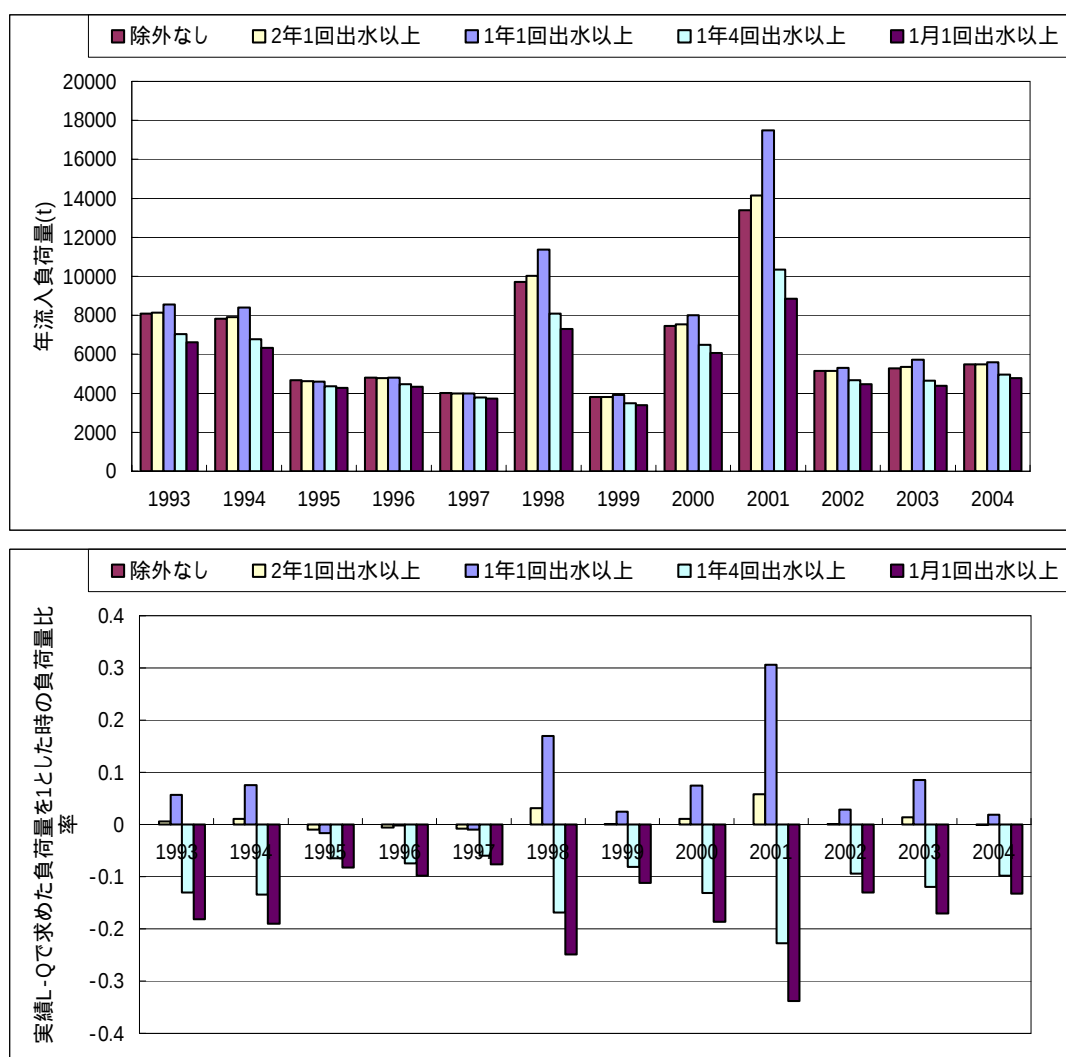


図 3.2.20 データを除いて作成した L-Q 式で推定した年間負荷量の変化

3)測定項目の選定方法

測定項目については、基本的な項目に加えて、個々の湖沼の特性を考慮したうえで、測定項目を追加していく必要がある。

森林域から出水時に出てくる COD は、一般に懸濁性のものが多い。これらは湖沼によっては、すぐに沈降し、しかも生分解性も高くない可能性もある。この場合、これら懸濁性の COD は湖内の水質に寄与しないから、流入負荷を COD の L-Q 式で示すことは過大評価につながる。従って、1つの水質項目でも、溶存態と懸濁態とに分けて調査し、それぞれが湖の水質に及ぼす影響に配慮する必要がある。

この点については、3.2.3でも後述している。溶存態と懸濁態の L-Q 特性については、ここを参照されたい。

3.2.3 流入負荷精度向上に向けた工夫・留意点

(1) L-Q 式の精度向上

本章では各湖沼から収集した水質データに基づき、流量-負荷量(L-Q)関係を整理する。

従来の各湖沼での L-Q 関係の整理方法は、調査結果を全て同一グラフにプロットし、最小自乗法で回帰式を作成するものがほとんどである。

しかし、実際には季節による流域状況や水利用の変化、物質の存在形態の影響を受けるものと考えられる。そこで、ここでは、“流域負荷の流出機構”の考察に資することを目的とし、以下の視点により L-Q 関係を分類・比較した。

- ・ 季節により流域状態が大きく異なる例～流域が雪により被覆されていることによる相違
- ・ 季節により利水状況が大きく異なる例～かんがいの有無による相違
- ・ 負荷物質の存在形態による相違

1) 季節による特性の違い

a) 雪による影響

森林域からの負荷の流出経路としては、大きく地表（表面流出）と土壌内の浸透流（中間流出・基底流出）の2つがある。特にリンについては、T-Pの大部分が溶存態である観測結果が多いが、降雨時には粒子態のリンの比率が高くなる報告がある。また、CODについては、ダム貯水池の検討等において、出水時にSS由来のCODが増加することが報告されている。

これら出水時に増加する粒子態の成分は、降雨時に土壌表面に蓄積された粒子態の物質が洗い流され、表面流出に出てくると考えられる。

冬季に流域で積雪のある河川においては、降雨よりも雪由来の流出が多くなると考えられる。土壌表面が雪に覆われていた場合には、降雨時と異なり、土壌表面の物質はフラッシュされることはなく、むしろ土壌中に浸透して流出する成分が多くなる可能性がある。

そこで、ここでは、積雪の有無により、L-Q 関係の違いを分類できるかどうかを試みた。検討対象は、雪のある季節について回答が得られた、以下の3湖沼とした。

表 3.2.8 各湖沼の積雪（+融雪）期間

検討対象	湖沼名	積雪・融雪期間
●	網走湖	12～5月（融雪期：4～5月）
●	小川原湖	12～3月（融雪期：4月）
	霞ヶ浦	-
●	琵琶湖	12～3月（融雪期：4月）
	中海・宍道湖	-

雪ありの季節において、積雪期と融雪期とで同じ流量に対する負荷量の違いは顕著ではない。また、同じ流量に対しては、融雪期の負荷は、雪のない季節に比べて低い傾向にある。

今回の整理では、積雪・融雪期間においては、それ以外の季節に対して、同じ流量に対する負荷量が小さい傾向となる場合が見られた。こうした河川では、データを季節分類せずに L-Q を整理すると、融雪出水の負荷を過大評価し、降雨出水の負荷を過小評価する可能性が

3.2 流入負荷量の把握

ある。従って、流域で積雪のある河川においては、その点を踏まえてデータ整理を行うことにより、L-Q 式の精度が向上する可能性がある。

なお、積雪が開始される時期や融雪期が終了する時期は、気象条件等の影響により年ごとに微妙に異なることが想定されるため、遷移期間において測定されたデータについては、精査が必要である。

河川によっては、同程度の流量規模で比較した場合に、雪のある期間のデータが相対的に負荷量が小さい傾向が見られた（図 3.2.22）。また、これらの河川については、雪の有無による違いは窒素よりも COD や T-P の方が比較的明瞭に表れているように思われる。

このように、河川によっては、L-Q 関係の整理にあたり、雪の有無によりデータを分類することにより、負荷量推定の精度が向上する場合があると考えられる。

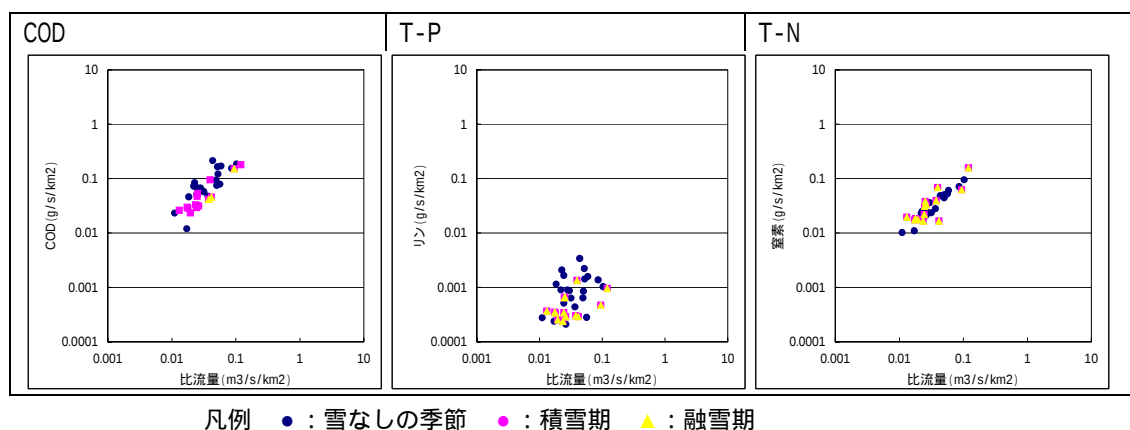


図 3.2.21 (1) 雪の有無による L-Q 関係の違い（小川原湖 七戸川・上野）

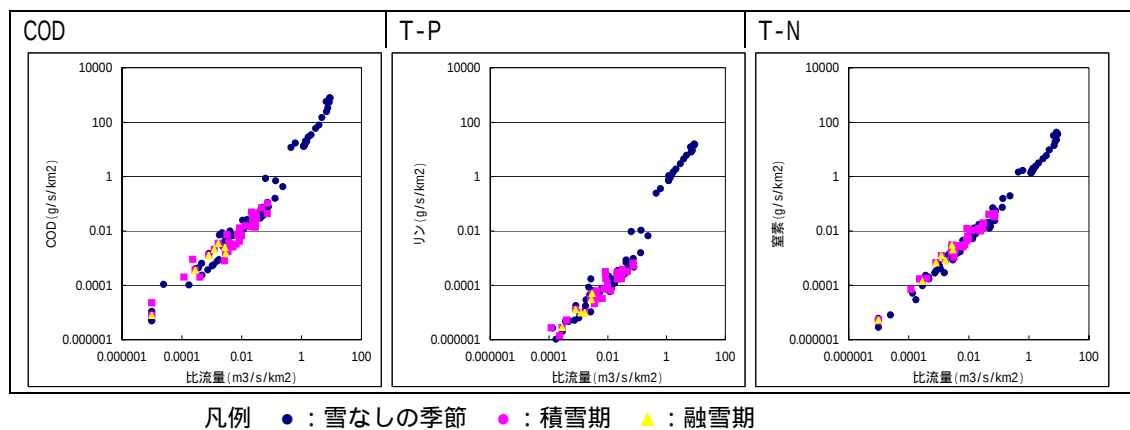


図 3.2.21(2) 雪の有無による L-Q 関係の違い（琵琶湖 愛知川）

3.2 流入負荷量の把握

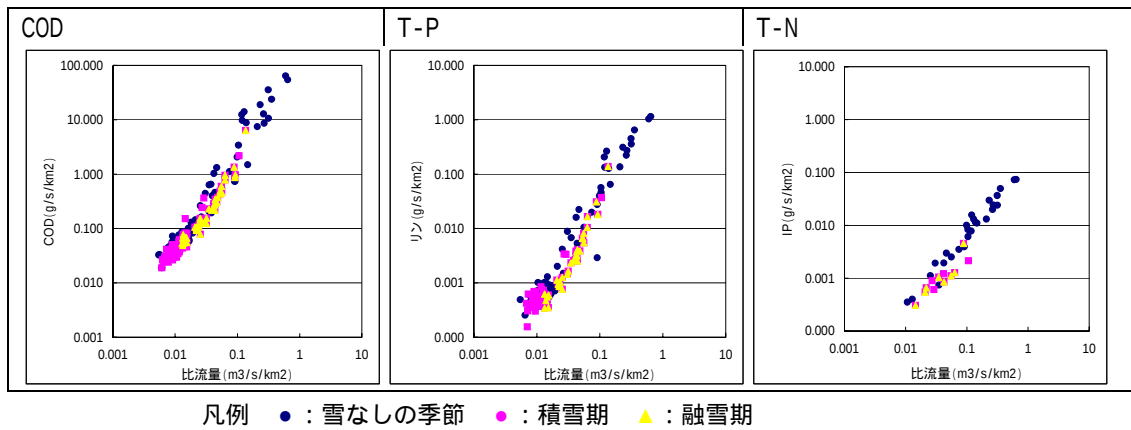


図 3.2.22(1) 雪の有無による L-Q 関係の違い (網走湖 網走川・治水橋)

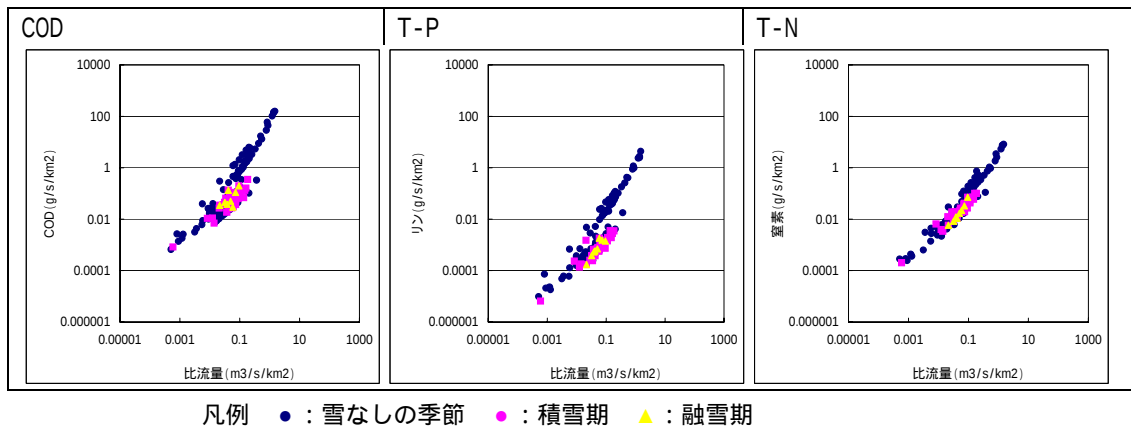


図 3.2.22(2) 雪の有無による L-Q 関係の違い (琵琶湖 安曇川)

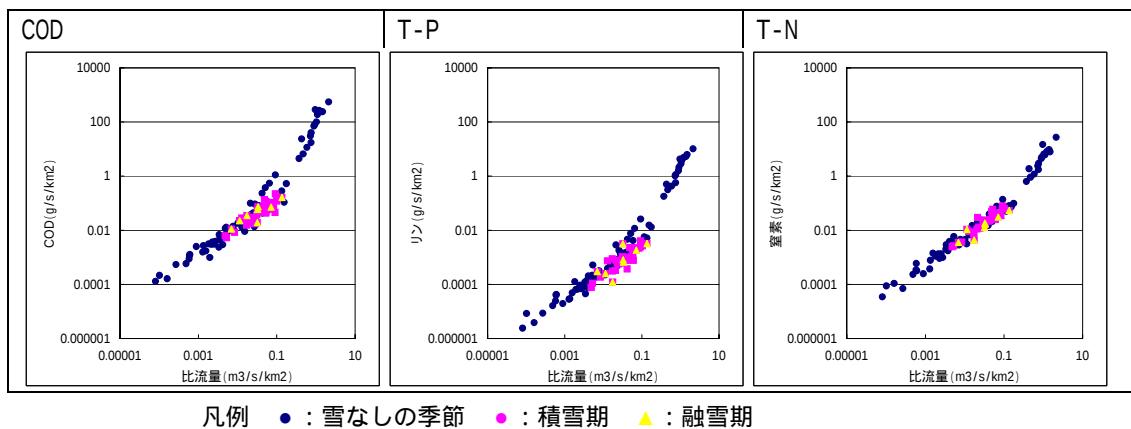


図 3.2.22(3) 雪の有無による L-Q 関係の違い (琵琶湖 姉川)

b) かんがいによる影響

農耕地での負荷源は以下のようなものが挙げられる。

- ・ 降雨
- ・ 大気からの降下物
- ・ 施肥
- ・ 土壌
- ・ 作物

このうち、土壌や作物は栄養塩の取り込み（吸収、一次生産、分解、及び吸着）を行うことから、負荷源として働く一方で浄化機能を持ち合わせている。特に水田では、脱窒機能が高いことが多々報告されている。また代掻き期など稲作工程により、一時的に土壌負荷が増加する場合がある。

水田での流出経路は水田内の排水系である。流入口から排水口へ至るまでの間、粒子態の負荷については沈降、無機態の負荷については脱窒等による吸収がある。

以上のように、かんがい期には非かんがい期にはない負荷源（施肥など）や経路（水田）があるため、河川の L-Q 特性も異なる可能性がある。

そこで、ここでは、かんがい期により、L-Q 関係の違いを分類できるかどうかを試みた。なお、代掻き期には人為的に水田からの濁質負荷が増加することが報告されていることから、かんがい期の内でも別途整理することとした。

かんがい期間はどの湖沼においても設定されているため、全 5 湖沼を対象として整理した。

表 3.2.9 各湖沼のかんがい期間

検討対象	湖沼名	かんがい期間
●	網走湖	5/1～9/10（代掻き期 5 月）
●	小川原湖	5～9 月（代掻き期 5 月）
●	霞ヶ浦	4～8 月（代掻き期 4 月）
●	琵琶湖	4～9 月（代掻き期 4 月）
●	中海・宍道湖	5～8 月（代掻き期 5 月）

図 3.2.23にかんがいの有無による L-Q 関係の違いが現れている事例を示す。

- ・ かんがい期においては、同じ比流量に対する SS の負荷量が増加する。特に代かき期の負荷は大きい。ただし、流量増加とともにかんがい期による違いは見えなくなる。
- ・ 窒素(T-N)については、かんがい期の方が非かんがい期に比べて、同じ流量に対する負荷量は小さい傾向となる。ただし、流量が多い場合、両者の関係は近づいていく。
- ・ かんがい期における窒素(T-N)の減少は主に I-N の減少によるものである。
- ・ 代かき期の T-N は同じかんがい期のデータの中では比較的負荷量が大きくなっている。この傾向は主に I-N については同様であるが、O-N については不明瞭である。
- ・ COD については、かんがい期の方が負荷量が多い傾向が見られる。ただし、その差異は窒素ほど明瞭ではない。
- ・ かんがい期における COD の増加は主に溶存態（D-COD）の増加によるものである。

3.2 流入負荷量の把握

- ・ COD、リン、窒素についても、代掻き期においては、SS と同様に、同じ比流量に対して負荷量が大きく出る傾向がある。
- ・ 図 3.2.23 に桜川の例を示した霞ヶ浦では、湖水(恋瀬川等には霞用水の水が還元されている)や地下水をかんがい水としての利用も、かんがい期の L-Q 変化の影響要因となり得る。

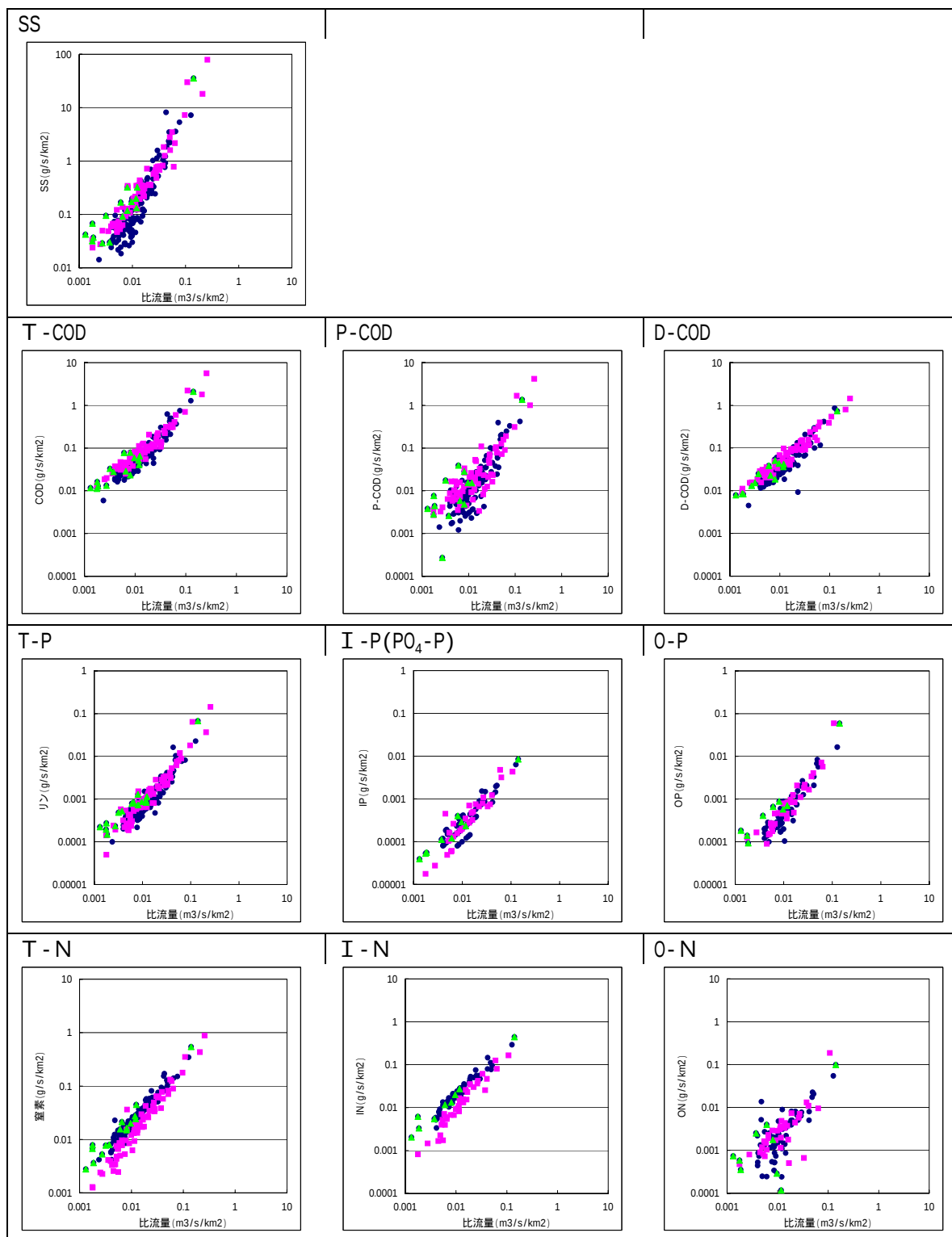
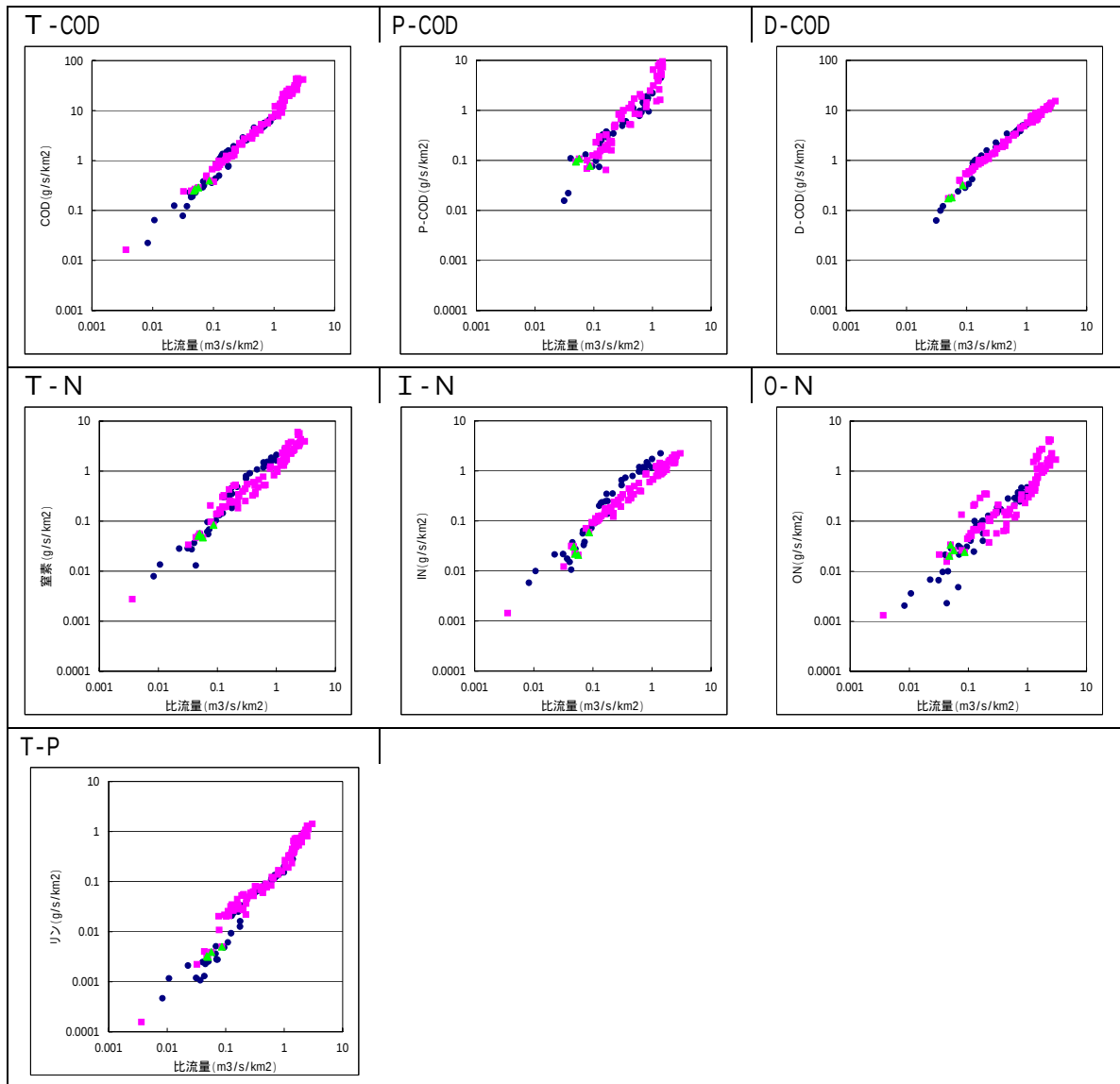


図 3.2.23 かんがいの有無による L-Q 関係の比較 (霞ヶ浦 桜川)

3.2 流入負荷量の把握

- ・ COD やリンについて同様の傾向が見えにくい河川においても、窒素(T-N)、特に I-N については、かんがい期の方が非かんがい期に比べて、同じ流量に対する負荷量は小さい傾向が見られた。



凡例 ● : かんがい期 ● : 非かんがい期 ▲ : 代かき期

図 3.2.24 かんがいの有無による L-Q 関係の比較 (宍道湖 船川)

3.2 流入負荷量の把握

一方、かんがいの有無により明確な L-Q 関係の違いが見られなかった事例として、網走湖・治水橋の L-Q 関係を示す。網走川の流域では、田畑としての土地利用が少なく、森林や原野、牧地に占められており、かんがい期の L-Q 関係の変化に水田が影響を及ぼすことを示唆している。

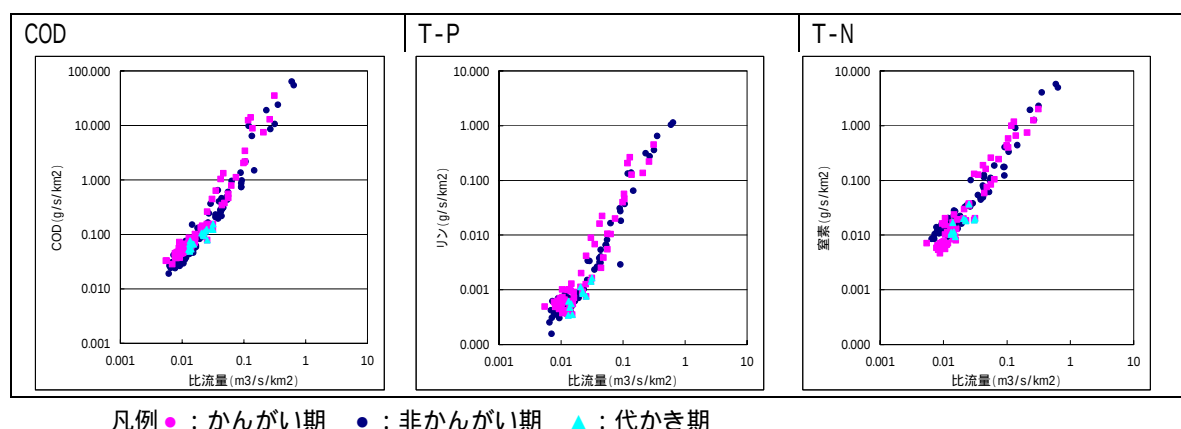


図 3.2.25 かんがいの有無による L-Q 関係の比較（網走湖 治水橋）

以上のように、河川によっては、L-Q 関係の整理にあたり、かんがい期の水利用の特異性を考慮してデータを分類することにより、負荷量推定の精度が向上する場合があると考えられる。

c) 存在形態による特性の違い

降雨時には粒子態のリンや COD の負荷が増加することは前に述べたとおりであるが、これは粒子態と溶存態で負荷源や流出経路が異なるためと考えられる。そこで、ここでは、負荷物質の存在形態（溶存態・粒子態）による L-Q 関係の特性を整理した。

なお、湖沼水中に存在する物質の中で、自然沈降が可能なものは粒径 $1\mu\text{m}$ 以上の粒径のものと考えられており、一般的な水質調査においても便宜上孔径 $1\mu\text{m}$ のフィルタ上に捕捉されるものを粒子態、フィルタを通過するものを溶存態と定義している。この定義に従えば、例えばコロイド粒子の大部分や粘土 ($0.002\mu\text{m}$ 以下¹⁵)の一部は溶存態と定義される。本書でも、この定義に従って粒子態と溶存態を取り扱っている。

図 3.2.26 に粒子態と溶存態による L-Q 関係の違いが現れている事例を示す。

- ・ 溶存態の物質は流量増分に伴う負荷量増分が小さい。一方、粒子態の物質は流量増分に伴う負荷量増分が大きい。
- ・ 流量が少ない範囲では、粒子態の負荷量は溶存態の負荷量に比べて小さい。流量増加とともに両者の差は小さくなり、大小関係が逆転するケースも多い。
- ・ L-Q 関係が途中で折れるように見えるのは、負荷量に対して支配的な物質が、流量増加に伴い、溶存態から粒子態に変化するためと考えられる。

3.2 流入負荷量の把握

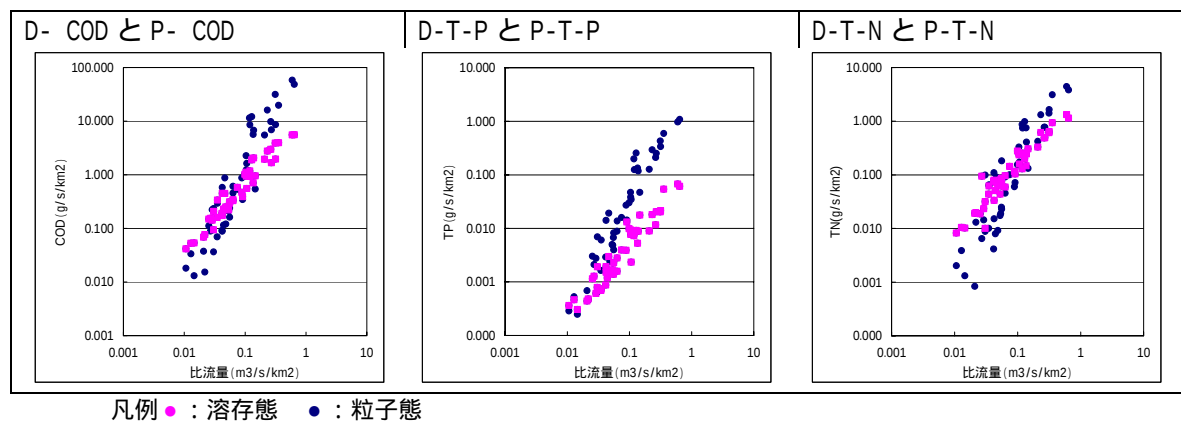


図 3.2.26(1) 存在形態による L-Q 関係の比較：網走川（網走湖）

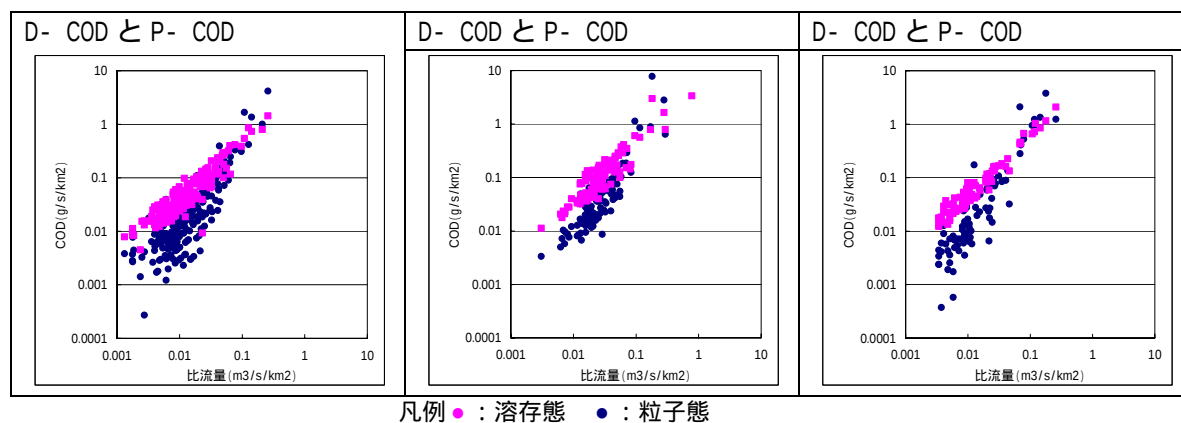


図 3.2.26(2) 存在形態による L-Q 関係の比較：霞ヶ浦（左：桜川、中：園部川、右：一ノ瀬川）

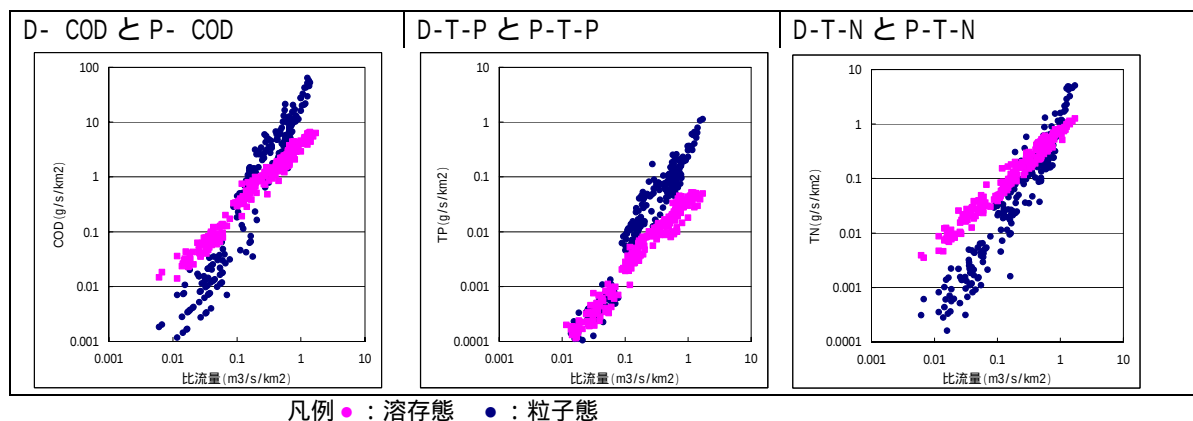


図 3.2.26(3) 存在形態による L-Q 関係の比較：中海・宍道湖（斐伊川）

図 3.2.27に示すのは、C-Q 関係を粒子態と溶存態に分けて整理したものである。両形態の違いは、L-Q での比較より明確に表れており、粒子態は流量増加に伴い濃度が増加するのに対して、溶存態は流量による変化はごく小さい。

3.2 流入負荷量の把握

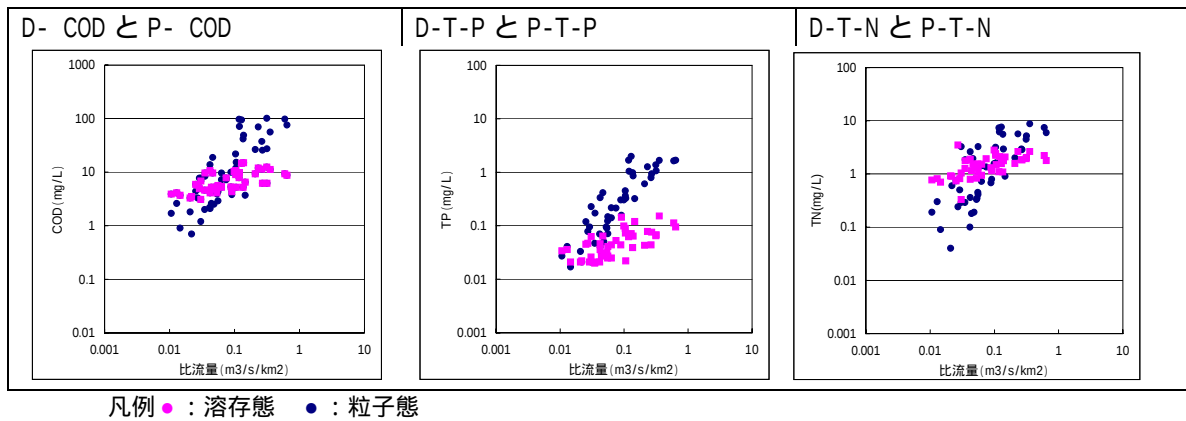


図 3.2.27(1) 存在形態による C-Q 関係の比較：網走湖（網走川）

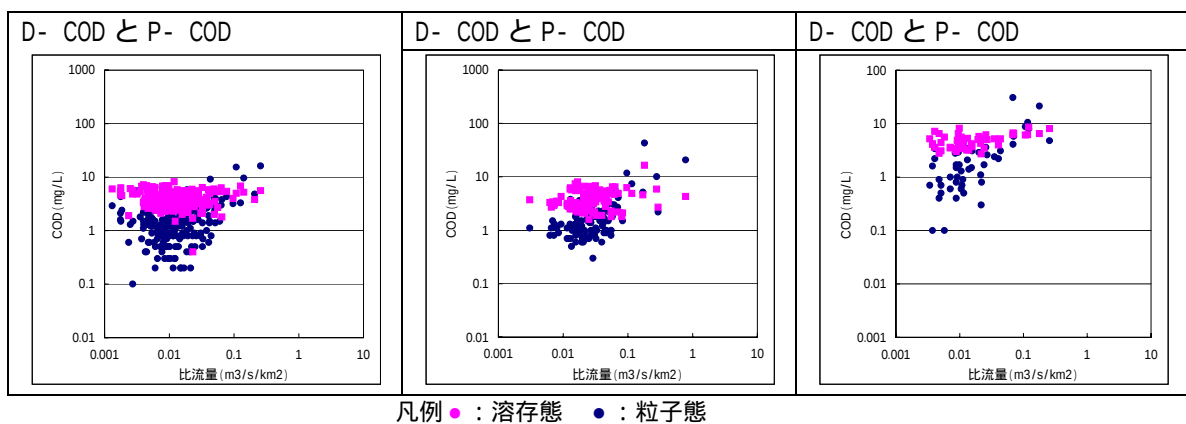


図 3.2.27 (2) 存在形態による C-Q 関係の比較：霞ヶ浦（左：桜川、中：園部川、右：一ノ瀬川）

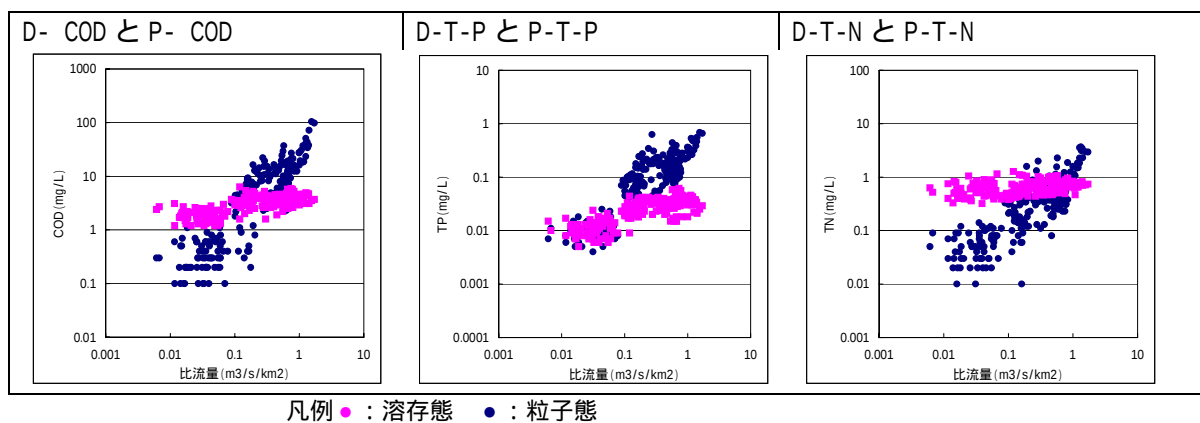


図 3.2.27 (3) 存在形態による C-Q 関係の比較：中海宍道湖（斐伊川）

(2)自動観測の活用

1)自動観測の有効性

自動観測装置による連続観測は、流入負荷量の調査手法の1つであり、計測頻度を密に水質の挙動を追える利点がある。

しかし、自動観測装置では物理的な原理による間接的な計測方法がとられているものが多く、そのアウトプットは採水分析結果とは必ずしも同じではない。そこで、自動観測のデータを有効に活用するためには、適宜採水分析結果によりキャリブレーションを行い、精度向上を図る必要がある。

以下に、網走川（治水橋）のデータを用いて、自動観測装置のキャリブレーションを行った例を示す。ここでは、自動観測による濁度から、SS変化を把握することを考える。

図 3.2.28は、ほぼ同時刻における、自動観測による濁度の値と、定期・出水時調査のSS値との関係である。

SS分析値が大きくなると、濁度値は頭打ちしてしまっている。これは恐らく自動濁度計の計測可能レンジの影響と考えられる。このような場合、濁度値からSS値を推定することはできない。

また、データレンジをより小さくして両者を比較すると、SS値が200mg/Lより小さい範囲においては、両者は概ね等価に近い。ただし、SS分析値が低い時に自動濁度の値が大きい値を示すような、異常値と思しきデータも含まれている。

濁度値の頭打ちと計測異常を考慮し、データを選定して回帰式を作成した。同式により濁度をSSに換算した時系列を実績値とともに図 3.2.29に示す。なお、SS200mg/L以上は、濁度計で計測できないことが分かっているため、ここではSS200mg/L以下の範囲の変動を示している。図中には頭打ちや欠測の主なものを示しているが、実際には細かな欠測が頻繁に生じている。そうした異常が起きていない期間においては、実績値のSSをよく再現しており、なおかつ時間的に連続したデータが得られている。

このように、自動観測を活用することにより、時間的に連続した流入負荷量をより詳細に把握できる可能性がある。

なお、自動観測を活用するにあたっては、以下のような点に留意する必要がある。

- ・ 計測器の計測可能範囲を越えたデータは推定できない。
- ・ 毎時の計測値はノイズを含んでおり、必要に応じて、平滑化等の処理が必要である。
- ・ 異常値、欠測が多い場合、適宜、定期・出水調査を併せて実施することが望ましい。
- ・ 定期、出水調査を活用してキャリブレーションを継続して行っていく。

今回見られたようなデータの頭打ちについては、高濃度濁度計など、計測可能範囲の高いものを利用することで回避できる。しかし、高濃度濁度計では、低濁度時の精度が低下する恐れがあるため、必要に応じて、計測対象範囲の異なる計測器を複数導入するなどの工夫も考えられる。また、近年では計測範囲が状況に応じて可変となる計測器も開発されており、こうした機器の導入により、自動観測の精度が向上すると考えられる。

3.2 流入負荷量の把握

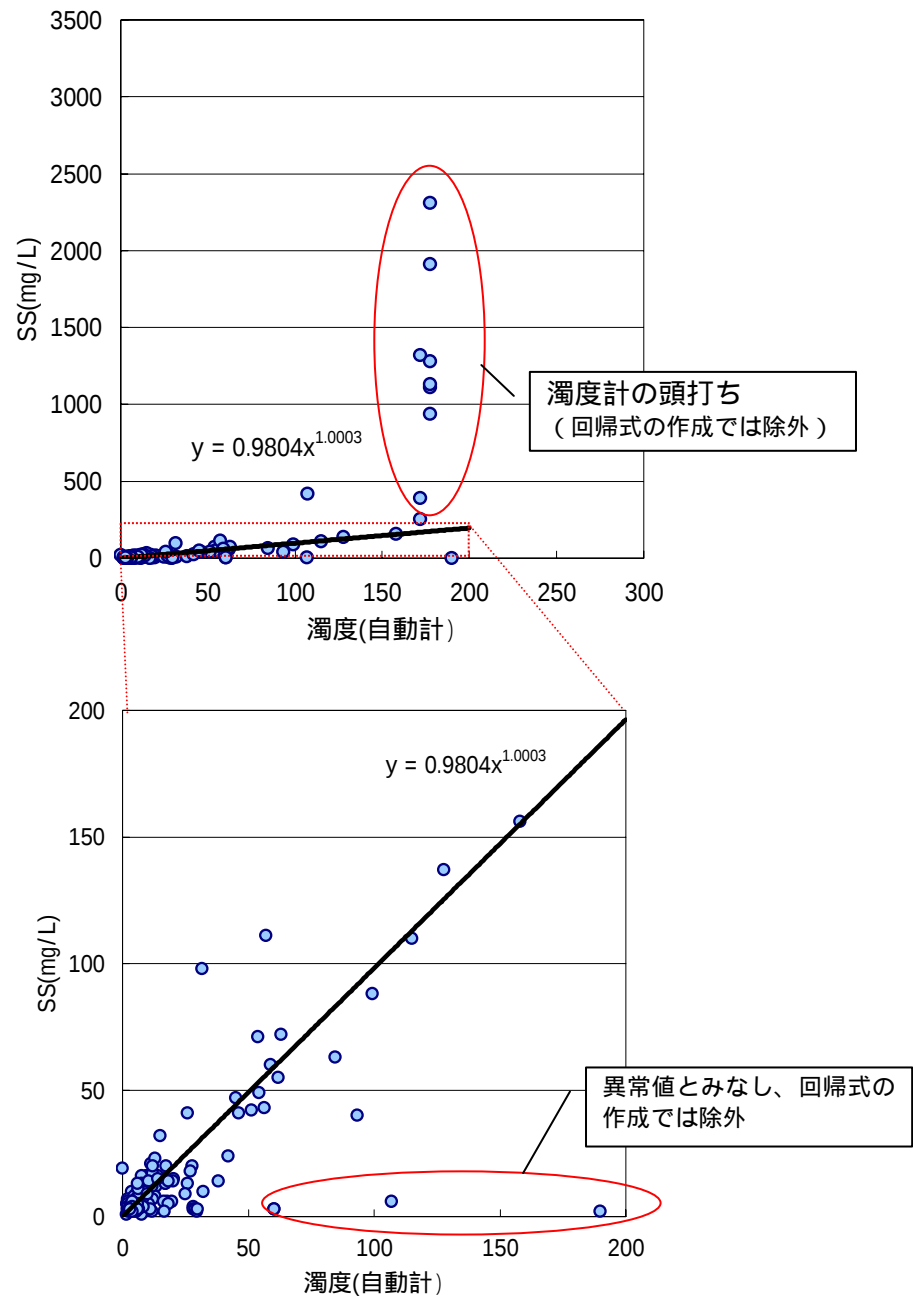


図 3.2.28 自動観測による濁度のキャリブレーション（網走川・治水橋）

3.2 流入負荷量の把握

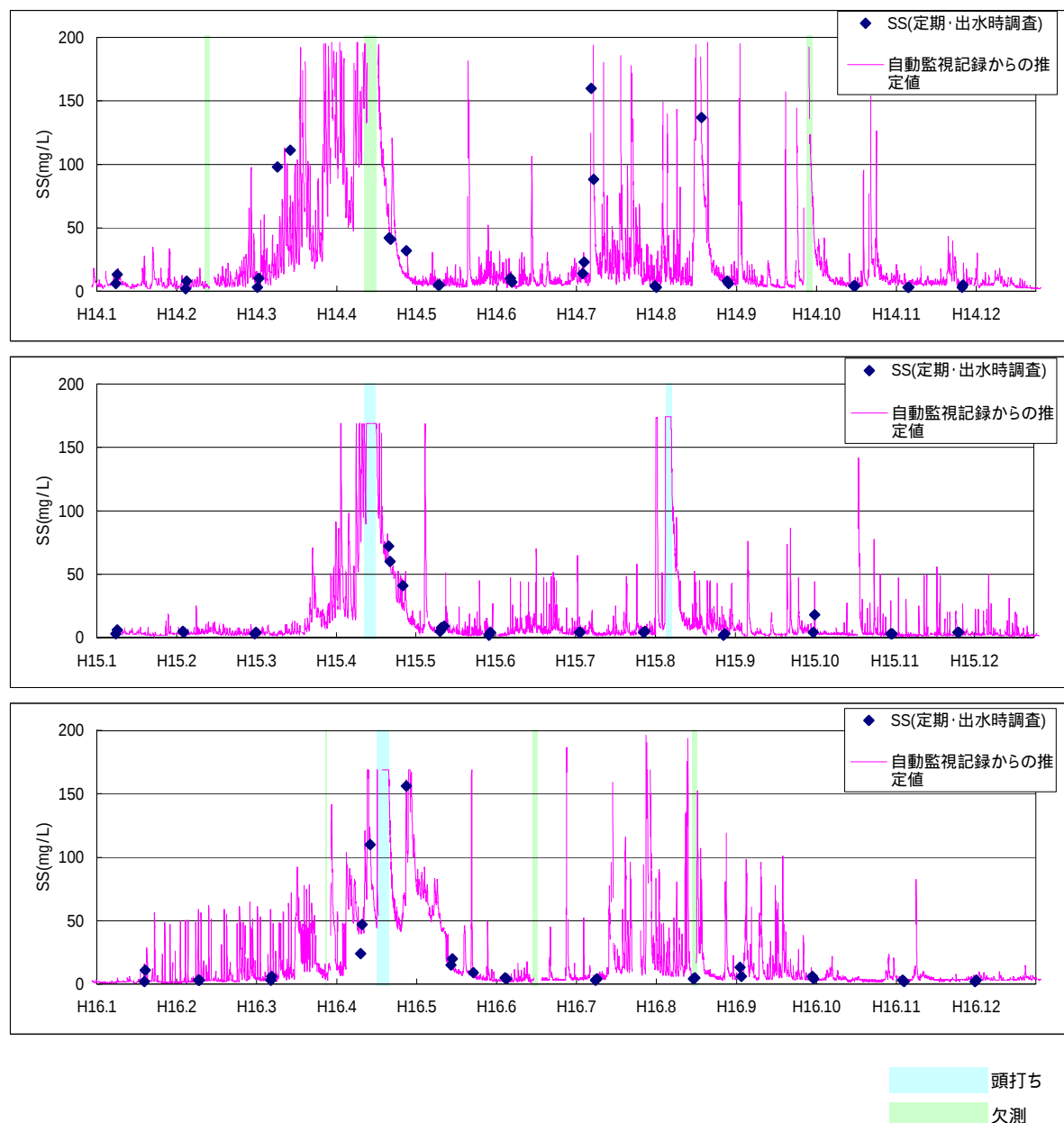


図 3.2.29 自動観測濁度により推定した SS 変化

2) 自動観測値を活用した負荷量精度向上

水質自動観測は、水温や塩分など物理的な観測が可能なもの、濁りやクロロフィル a など光学的に（間接的な）計測が可能な項目に適している。

ここでは、そうしたデータを流量と併用することにより、COD、T-P、T-N などの L-Q 式の精度を向上する可能性について検討する。

霞ヶ浦では、恋瀬川・園部川において、光学測定および水質分析による水質調査を行い、両者の相関から、水質の時間変化を精度良く推定する試みがなされている¹⁶⁾。

ここでは、以下に示すような回帰式が提案されており、主に懸濁態については濁度の、溶存態についてはクロロフィル a 用の周波数帯の光計測値の関数となっている。

【懸濁態負荷濃度の算定法】

$$\begin{aligned}
 P-COD &= \alpha_1 \cdot Tb^{\beta_1} + \gamma_1 \\
 POC &= \alpha_2 \cdot Tb^{\beta_2} + \gamma_2 \\
 POP &= \alpha_3 \cdot Tb^{\beta_3} + \gamma_3 \\
 PIP &= \alpha_4 \cdot Tb^{\beta_4} + \gamma_4 \\
 PON &= C_5 & [Q/A \leq \eta_5] \\
 &= \alpha_5 \cdot Tb^{\beta_5} + \gamma_5 & [Q/A > \eta_5]
 \end{aligned}$$

【溶溶性有機態負荷濃度の算定法】

$$\begin{aligned}
 D-COD &= \alpha_6 \cdot (Chl-a)^{\beta_6} + \gamma_6 & [Chl-a \leq \eta_6] \\
 &= \xi_6 & [Chl-a > \eta_6] \\
 DOC &= \alpha_7 \cdot (Chl-a)^{\beta_7} + \gamma_7 & [Chl-a \leq \eta_7] \\
 &= \xi_7 & [Chl-a > \eta_7] \\
 DOP &= \alpha_8 \cdot (Chl-a)^{\beta_8} + \gamma_8 \\
 DON &= \alpha_9 \cdot (Chl-a)^{\beta_9} + \gamma_9 & [Q/A \leq \eta_9] \\
 &= \zeta_9 \cdot (Chl-a)^{\psi_9} + \xi_9 & [Q/A > \eta_9]
 \end{aligned}$$

【溶溶性無機態負荷濃度の算定法】

$$\begin{aligned}
 DIP &= \alpha_{10} \cdot Q^{\beta_{10}} + \gamma_{10} \\
 NO_3-N &= \alpha_{11} \cdot (Chl-a)^{\beta_{11}} + \gamma_{11} & [Q/A \leq \eta_{11}] \\
 &= \zeta_{11} \cdot (Chl-a)^{\psi_{11}} + \xi_{11} & [Q/A > \eta_{11}] \\
 NH_4-N &= C_{12} & [Q/A \leq \eta_{12}] \\
 &= \alpha_{12} \cdot Tb^{\beta_{12}} + \gamma_{12} & [Q/A > \eta_{12}] \\
 NO_2-N &= C_{13} & [Q/A \leq \eta_{13}] \\
 &= \gamma_{13} & [Q/A > \eta_{13}]
 \end{aligned}$$

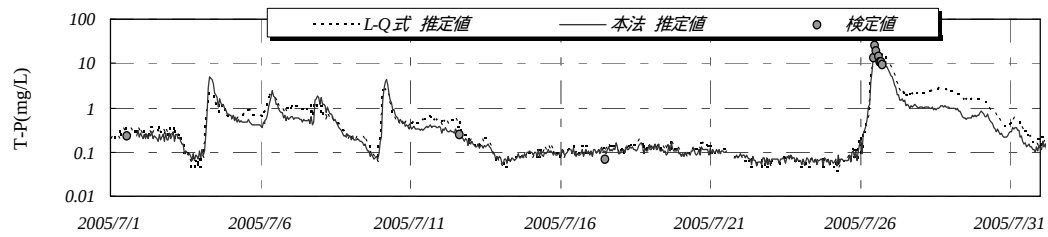
ここに、 Q ：流量[m³/s]、 Tb ：濁度用の周波数帯の光学計測値、 $Chl-a$ ：クロロフィル a 用の周波数帯の光学計測値、 A ：流域面積[km²]、 $\alpha, \beta, \gamma, \zeta, \psi, \xi$ ：係数、 η ：閾値、 C ：定期観測より決定する季節ごとの定数である。

これらの式から推定した負荷量算定値の時系列を、 $L-Q$ 式からの推定値と実績値と併せて図 3.2.30に示す。 $L-Q$ 式による算定値と比較すると、水質の光学計測値を利用した式による算定値が実績値に近づいている。

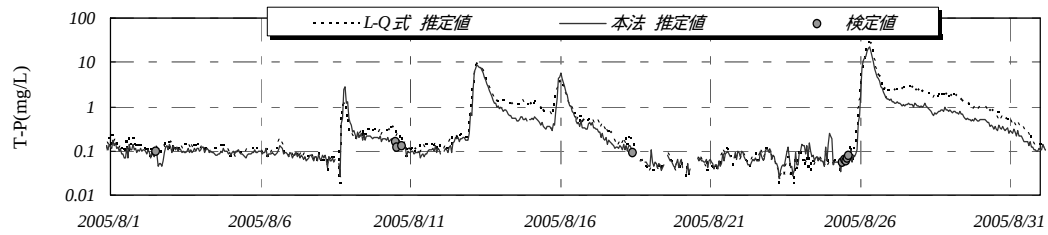
また、図 3.2.31には実績値と $L-Q$ 式および水質の光学計測値を利用した式による推定値の関係を示す。水質の光学計測値を利用することで、実績値をよりよく再現できている。特に、COD 負荷量の推定では精度向上の程度が大きくなっている。これは、リンや COD は窒素に比べて懸濁成分率が高く、また懸濁成分は光計測に反応し易いためと考えられる。

以上のように、自動観測による水質計測値を利用することにより、負荷量（特に光計測値に感応しやすい懸濁性物質について）の推定精度が向上する可能性がある。

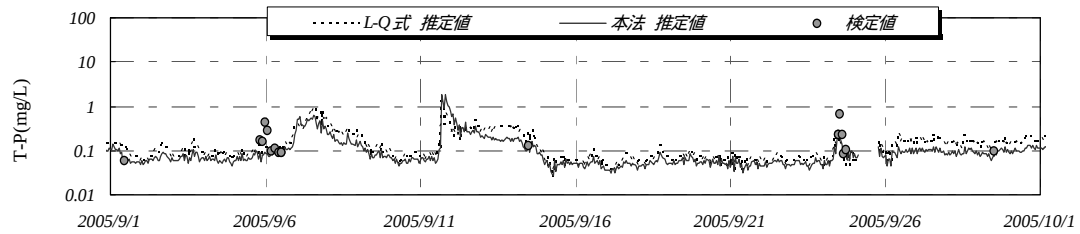
3.2 流入負荷量の把握



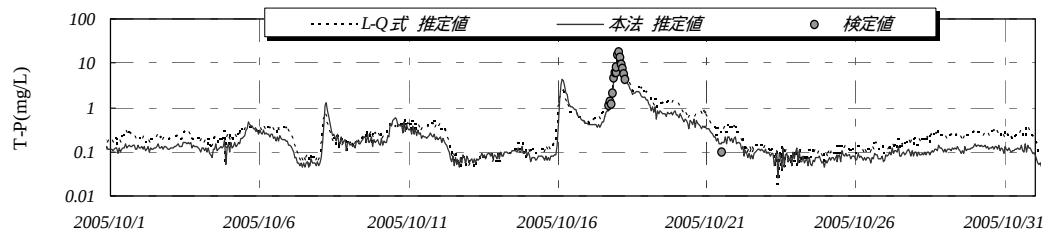
(i)07 / 01~07/31



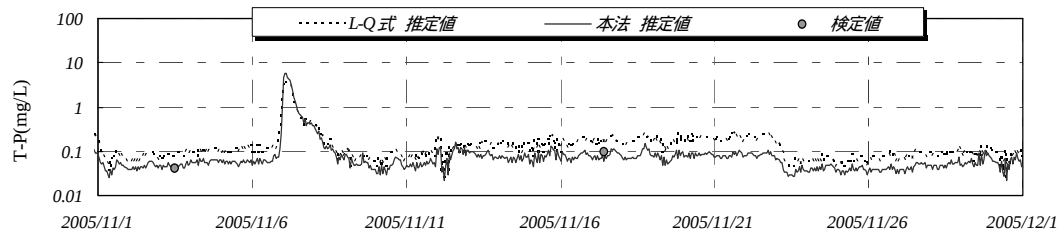
(ii)08 / 01~08/31



(iii)09 / 01~09/30



(iv)10 / 01~10/31

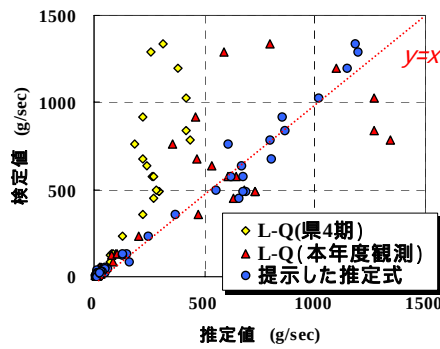


(v)11 / 01~11/30

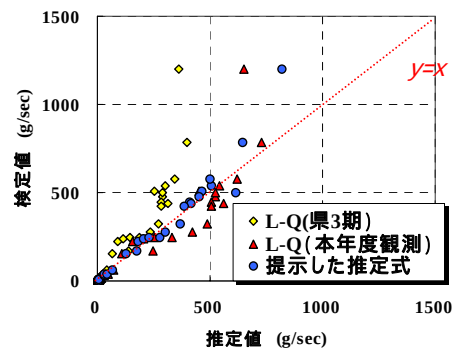
(出典) 平成 17 年度 霞ヶ浦汚濁負荷流入特性検討業務報告書

図 3.2.30 汚濁負荷の時系列推定結果 (T-P、園部川)

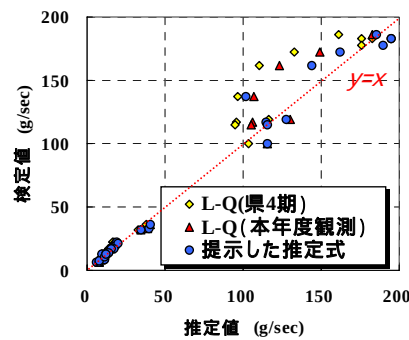
3.2 流入負荷量の把握



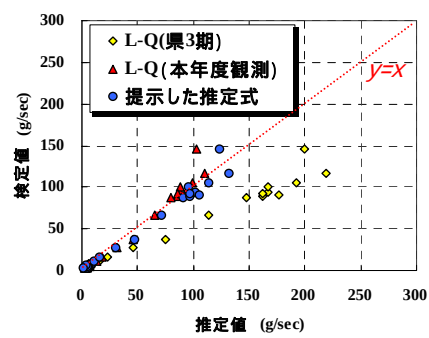
(a) COD推定結果



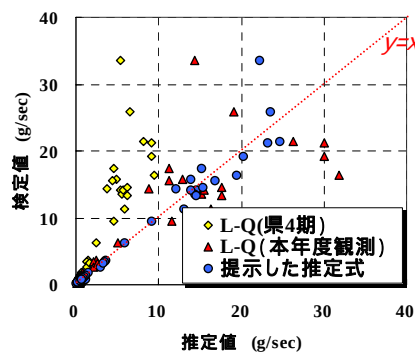
(d) COD推定結果



(b) T-N推定結果

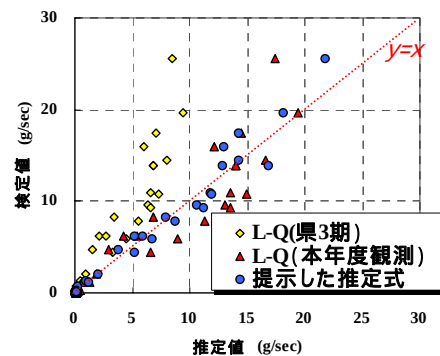


(e) T-N推定結果



(c) T-P推定結果

恋瀬川



(f) T-P推定結果

園部川

(出典) 平成 17 年度 霞ヶ浦汚濁負荷流入特性検討業務報告書

図 3.2.31 汚濁負荷の推定結果

(3)原単位法

1)基本的な考え方

L-Q 式や自動観測は、現状把握にあたっては便利であるが、流域の状態が変わった将来の負荷量を推定することはできない。将来の負荷量推定にあたっては、従来、原単位の積み上げによる方法（以下、原単位法と呼称）が用いられている。

原単位法により負荷量を算出する場合、一般に、各流域ブロックの排出負荷量の合計値を求め、その後に流出率・流達率を乗ずる方法が用いられており、2)、3)では、代表的な湖沼を例にとってその設定方法の現状を整理した。

なお、原単位調査についての基本的な考え方や留意点については、「湖沼水質のための流域対策の基本的考え方～非特定汚染源からの負荷対策～」（平成 18 年 3 月 国土交通省・農林水産省・環境省）や「非特定汚染源負荷調査マニュアル」、「湖沼等の水質汚濁に関する非特定汚濁源負荷対策ガイドライン」、「市街地のノンポイント対策に関する手引き(案)」等のマニュアルを参照されたい。

2)原単位法の現状

a) 原単位の設定方法

流域負荷量を算出するときに使用する原単位について各湖沼からヒアリングを行った。

各湖沼における原単位の設定方法は、大きく文献値による設定、及び独自の調査 による設定に区分できる。ここでは、汚濁負荷源別に原単位の設定方法の概要を表 3.2.10に示す。

）流域内で行われた調査に関する文献を含む

表 3.2.10を見ると、いずれの湖沼においても文献値による原単位、独自調査により設定した原単位の両方を使用しており、各湖沼の流域の特性に応じて独自調査が実施されていることが伺える。

3.2 流入負荷量の把握

表 3.2.10 原単位の設定方法の概要

項目				網走湖	小川原湖	霞ヶ浦	琵琶湖	中海・宍道湖
面源負荷	面源系	耕地	田	文献値	独自調査	独自調査	独自調査	独自調査
			ハス田	-	-	独自調査	-	-
			畑	文献値	-	独自調査	独自調査	独自調査
		市街地	日	文献値	-	独自調査	文献値	(不明)
		山林		独自調査	-	独自調査	独自調査	独自調査
		ゴルフ場		-	-	(山林の原単位を適用)	(田の原単位を適用)	-
		降雨		-	-	-	-	独自調査
		その他		-	独自調査	-	-	-
点源負荷	生活系	し尿計画収集	文献値	独自調査	独自調査	文献値	(積み上げ) ²	
		下水道	文献値	-	独自調査	0 ¹	独自調査	
		下水道(雑排水のみ)	文献値	-	-	0 ¹	文献値	
		合併浄化槽	-	独自調査	文献値	独自調査	文献値	
		単独浄化槽	文献値	独自調査	文献値	文献値	文献値	
		自家処理	文献値	-	(不明)	-	-	
		農業集落排水	-	文献値	独自調査	独自調査	独自調査	
		農地還元	-	-	-	独自調査	-	
		未処理(雑排水)	文献値	-	-	-	文献値	
	家畜系	牛	文献値	独自調査	文献値	文献値	(不明)	
		豚	文献値	独自調査	文献値	文献値	(不明)	
		鶏	文献値	-	-	文献値	-	
	水産系	こい養殖	-	-	独自調査	-	-	
	工業系		文献値	独自調査	独自調査	(積み上げ) ²	文献値、一部独自調査	
	事業系	事業所	文献値	-	独自調査	(積み上げ) ²	-	
		観光客	文献値	文献値	-	-	独自調査	
その他	地下水		-		-	独自調査	-	

1) 事業場からの負荷量で見込む。

2) 各施設の積み上げによる。(事業所ごと放流水質と放流量から負荷量を算出。)

b) 流出率の設定

代表的な湖沼における流出率の算出方法の概要は以下のとおりにとりまとめることができる。

表 3.2.11 流出率の算定方法の概要

	流出率の設定方法の概要	事 例
流出率を算定している	・排出負荷量と流出負荷量の比率を流出率とする。	網走湖 (L-Q 式から求めた年平均流量時の負荷量を原単位法で求めた負荷量で除した値) 小川原湖 (L-Q 式から求めた日平均負荷量を原単位で求めた負荷量で除した値) 霞ヶ浦 (L-Q 式から求めた日平均負荷量を原単位で求めた負荷量で除した値) 中海・穴道湖 (L-Q 式から求めた日平均負荷量を原単位で求めた負荷量で除した値)
流出率を原単位の中に見込んでいる	・既往の調査結果、研究成果等を参考として汚濁源別・水質項目別に流出率を設定。	琵琶湖

c) 原単位法の課題

原単位法による負荷量の算定は、L-Q 式による算定と異なり、土地利用を考慮して負荷量を算出することができる。このため、土地利用の変化に基づく将来の負荷量の予測が可能となる点において有効な手法である。

しかしながら、これまでにとりまとめた現状の原単位法については、以下にあげるような課題がある。

・降雨量の考慮について

原単位法における負荷量の原単位は、「g/ha/日」または「g/人/日」などの単位で設定されており、降雨量による負荷量の変化を考慮できていない。また、負荷の推定に原単位を使用するにあたっては、この点を踏まえて行う必要がある。

(なお、流域からの負荷量は、年間ベースで見ると出水時のシェアは無視できない。(2 章参照))

・流出率について

流出率を排出負荷量と流出負荷量の比率とする場合、流出率は、原単位法により求めた流出負荷量と L-Q 式により求めた流達負荷量とをリンクさせるための単純な計算値となり、また、土地利用や流出経路によらず同一の値となってしまう。

一方で、原単位の中に流出率を見込む場合は、土地利用ごとにその流出率を異なる値で与えるため、土地利用や流出経路による流出率の違いを考慮でき、流出負荷量をより実際に近

い値で表現できる可能性がある。ただし、現状では、原単位の中に流出率を見込む場合であっても、その設定根拠となる調査データは少ない。

負荷量の算定において、流出率が流量ごとに変わるとの整理をした場合、現状の事例では流量増加時に1.0を上回ることがある。これは、特に出水時において、原単位の設定値が実際よりも小さく、流出負荷量が少なく見積もられていることを示唆している。

3.2.4 流入負荷量の検討・予測に向けた今後の展望

湖沼の水質管理にあたっては、湖沼に流入する負荷量の現状を精度良く把握することはもちろん重要であるが、流入負荷量の将来像についても予測できることが望ましい。

従来、将来予測を含めた流域負荷の検討については、流域下水道整備計画等で実施されてきているように、主に原単位法が用いられてきた。しかし、近年では、後に述べるような分布型モデルを用いた流入負荷量の検討・予測も行われるようになってきており、湖沼の水質・流動モデルとカップリングして、湖沼の管理計画を検討していこうという動きも見られる。

分布型モデルは、流域内の物質移動のメカニズムを森林・農地等の土地利用状況ごとにモデル化して、流入負荷量を算定するものである。ここでは流入負荷量の現状把握と予測に有効なツールである、分布型モデルの概略を紹介するとともに、モデルの活用を含めた、流入負荷量の検討・予測をするにあたっての留意点について述べる。

(1) 分布型モデルの活用

ここでは、分布型モデルの例として、SIPHER モデルを紹介する。

SIPHER (Simulation of phenomena through the medium of water) モデルは、湖沼の水質管理にあたり、これまでの個別施策だけではなく、流域マネジメントによるアプローチが必要である現状を踏まえ、現地調査だけでは困難な広範囲の流域の水・物質の挙動を把握することを目的として開発されたモデルである。

SIPHER モデルの特徴として、以下のことが挙げられる。

- 分布型モデル

流域をメッシュに分割し、メッシュ単位で解析を行うことから、任意地点（メッシュ）での水・物質の挙動の解析・出力が可能

- 非定常モデル

平常時、降雨時を含めた任意時間での解析が可能

- 水量・物質連成解析モデル

水の挙動および物質の挙動の同時解析が可能

- 要素モデル統合型モデル

流域内の諸現象（蒸発散・地下水・地表流・河道流・湖沼）に応じて、各要素モデルにより解析し、それらを連成することによって流域全体の現象を解析

- GIS 連成型モデル

GIS を介しての流域データのモデルへのインプットデータ作成、解析結果の格納、可視化

- 施策指向型モデル

雨水浸透枘の設置や生活排水対策等、様々な水循環健全化施策による改善効果を解析することが可能

SIPHER モデルは、分布型物理モデルであり、流域の様々な水・物質の挙動を直接解析する。様々な水・物質循環を解析するために、SIPHER-MODEL は 6 つの要素モデルから構成されている。それぞれのモデルは流域を正方メッシュで要素分割し、各メッシュを単位として流動と水質を計算する。なお、解析対象とする水質は COD、T-N、T-P の 3 項目である。

これら一連の計算をするにあたっては表 3.2.12 に示すような入力情報が必要となる。入力条件の 1 つに原単位も含まれており、こうした分布型モデルを使用する際にも原単位調査での精度確保は重要となる。

図 3.2.32 に、モデルの構造と要素モデルの概略を示す。

- 蒸発散モデル

流域の降雨の分配（蒸発散、地下浸透、表面流出）を行う。

- 地下水モデル

地下での水・物質の挙動（水位、流速、物質移動・拡散）および地表への湧出（湧水量・湧水水質）を解析する。

- 地表流モデル

地表面での水・物質の挙動（水位、流速、物質移動・拡散）および河川・湖沼への流出を解析する。

- 河道モデル

河道での水・物質の挙動（水位、流速、物質移動・拡散）および湖沼への流出を解析する。

- 人工系モデル

生活系・事業所系・畜産系からの排出負荷量を解析する。

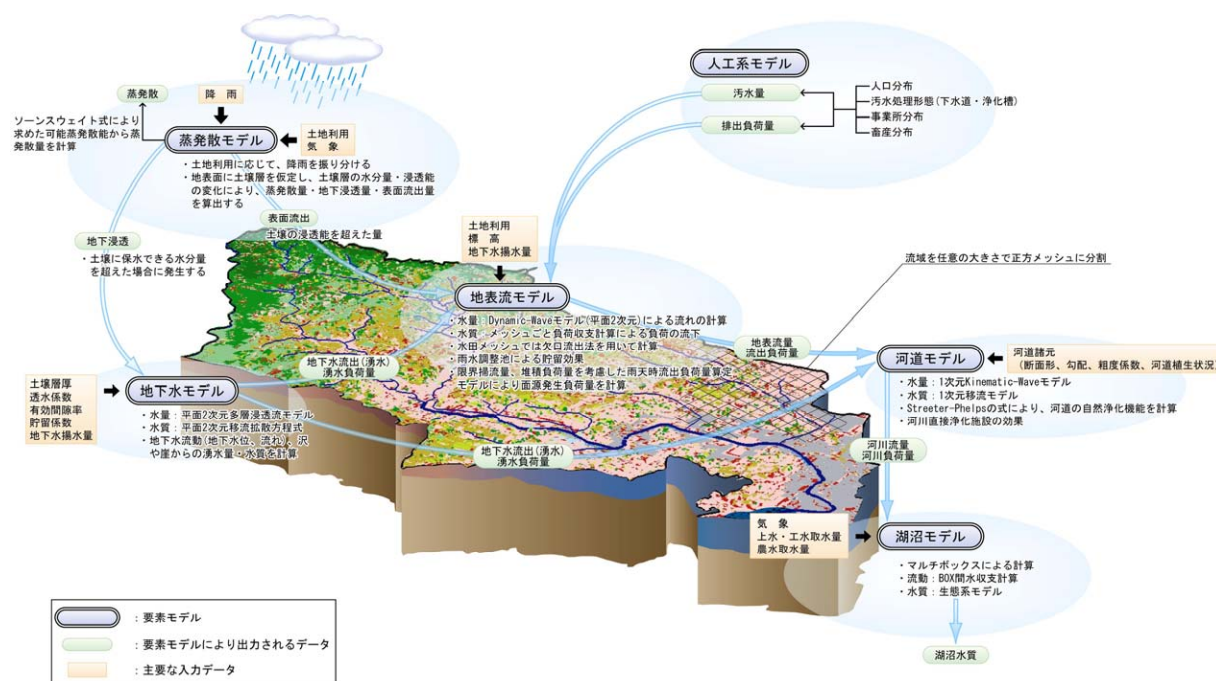
- 湖沼モデル

湖沼（閉鎖性水域）での水・物質の挙動（BOX 間流動、水質）を解析する。

3.2 流入負荷量の把握

表 3.2.12 必要入力情報の一覧

蒸発散モデル		
・降雨 ・土地利用 ・気象		土地利用は GIS を用いたデータ整理、算出を行うと効率的
地下水モデル		
・土壌層厚 ・透水係数 ・有効間隙率 ・貯留係数 ・地下水揚水量		
地表流モデル		
・土地利用 ・標高 ・地下水揚水量		土地利用は GIS を用いたデータ整理、算出を行うと効率的
河道モデル		
・河道諸元 (断面形、勾配、粗度係数、河道植生状況)		
湖沼モデル		
・気象 ・取水量（上水・工水・農水）		
人工系モデル		
・人口分布 ・污水处理形態（下水道・浄化槽）		GIS を用いたデータ整理、算出を行うと効率的
・事業所分布 ・畜産分布 ・原単位		



出典) <http://www2t.biglobe.ne.jp/~bono/study/topics/subjunksan/outline.htm>

図 3.2.32 SIPHER-MODEL の構造

3.2 流入負荷量の把握

藤田ら¹⁷⁾は、霞ヶ浦の湖内水質が昭和40年代以降に悪化してきたメカニズムを、大局的に理解することが重要であるという観点から、水物質循環モデルを用いて、水質が良好であった頃と現況の二時点の再現を試みている。

現況の再現にあたっては、第4期湖沼水質保全計画に係る資料等をもとに流域条件、汚濁負荷源単位等を設定(表3.2.13 現況)し、平成11～15年の5年間についてシミュレーションを実施し、河川流出量・流出負荷量、湖内水質について図3.2.33、図3.2.34(左)に示す再現結果を得ている。現況の霞ヶ浦における水質の年平均でのレベルでの再現性が得られている。

また、過去の状態についても、表3.2.13(過去)の条件で再現を行い、図3.2.34(右)に示すとおり、霞ヶ浦の汚濁が進んでいなかった頃の水質を概ね再現している。

これらの再現結果を用いて、霞ヶ浦で水質が悪化した原因を分析するとともに(図3.2.35)モデルを用いて、表3.2.14に示す施策の水質改善効果を予測し、効率的な流域対策、湖内対策について検討している(図3.2.36)。

このように、湖沼・流域全体を捉えて、湖沼の水質改善検討ができることは、水物質循環モデルの大きな利点と言える。

表 3.2.13 霞ヶ浦流域に係わる設定条件

条件項目	過去(昭和35年)	現況(平成13年)
①流域人口(人)	60万	96万
②生活排水処理形態(%)		
下水道	0	40
農業集落排水	0	4
合併処理浄化槽	0	18
単独処理浄化槽	0	19
し尿処理場	30	19
自家処理	70	0.02
③生活用水(L/人・日)	104	270
④家畜頭数		
牛・馬(頭)	71,294	40,700
豚(頭)	96,183	332,700
⑤土地利用	トレンドから推定	国土数値情報(H9)
⑥湖岸植生帯(ha)	1493.2	12.8
⑦コイ養殖(t)	0	5,001
⑧シジミ漁獲量(t)	3,000	0
⑨底質条件(溶出速度)	(湖心値)	(湖心値)
COD(mg/m ² /day)	35	71
N(mg/m ² /day)	23.2	46.3
P(mg/m ² /day)	0.23	0.47

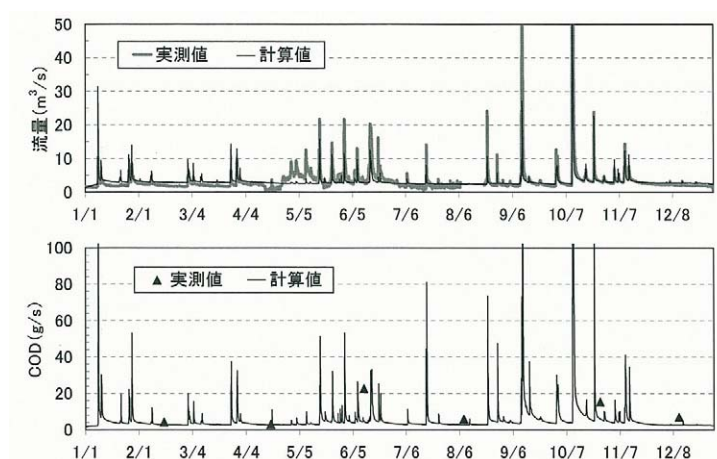


図 3.2.33 流量・負荷量の再現結果(恋瀬川:平成13年)

3.2 流入負荷量の把握

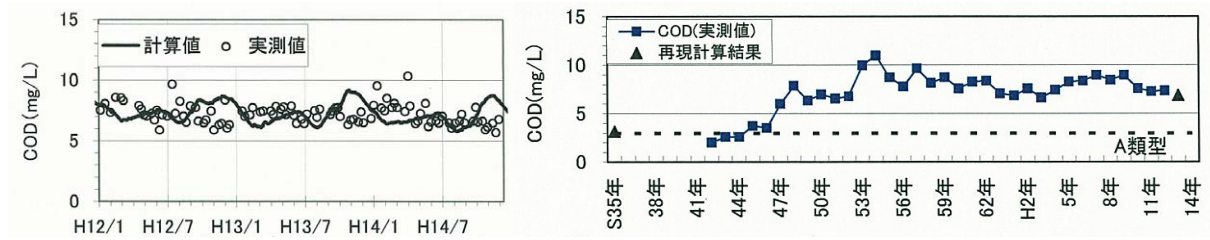


図 3.2.34 左：霞ヶ浦水質の再現結果（湖心：平成 12～14 年） 右：霞ヶ浦水質の変遷（湖心）

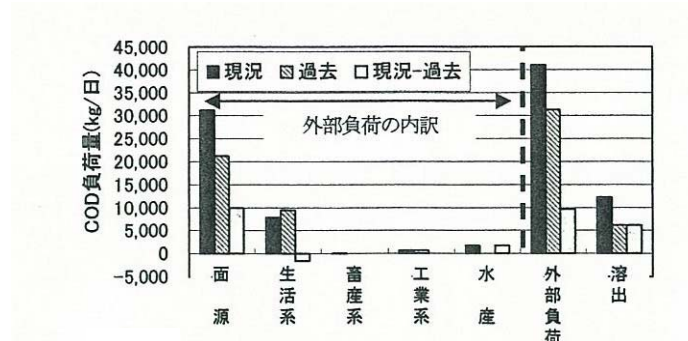


図 3.2.35 霞ヶ浦における負荷量変化のモデルによる計算値

表 3.2.14 感度分析を行った施策の概要

水環境施策		対策
組合せ 1	下水道の整備：流域内の下水道処理人口比率を46%から100%まで向上	流域
	高度処理型合併処理浄化槽の整備：下水道未整備の全人口に対して100%整備	流域
	透水性舗装：流域内の全道路に透水係数 1.0×10^{-2} cm/sの透水性舗装を整備することで表面流出を抑える設定とした	流域
	下水処理水の再利用：全下水処理水を生活用水として再利用することで生活用水取水量と下水処理場からの排水量を削減する設定とした	流域
	浄化用水の導入：那珂川(COD 2.0mg/L, T-N 1.44mg/L, T-P 0.038mg/L)からの浄化用水を土浦に15m ³ /s導水	湖内
組合せ 2	溶出量削減：湖内全域にわたって、底質からの溶出速度を現況設定値からさらにCOD75%, T-N50%, T-P60%削減	湖内
	植生浄化：昭和35年時の植生面積14.932km ² を再生することで植生による浄化(COD 0.08g/m ² /日, T-N 0.07g/m ² /日, T-P 0.006g/m ² /日)の回復を図る	湖内
	シジミ浄化：昭和35年時の漁獲量3,000tを再生することで、シジミによる浄化(シジミ湿重量に対する物質重量比率で、COD 10.158%, T-N 0.575%, T-P 0.0359%)の回復を図る	湖内
	湿地浄化：主要10河川の河口部に1km ² の湿地を確保することで植生・土壌・生態系等の機能を活用した浄化を図る	流域
組合せ 3	各戸雨水貯留浸透の整備：全家庭の屋根全体に貯留高さ10mmの貯留浸透施設を設置することで表面流出を抑える設定とした	流域
	環境保全型ライフスタイルへの転換：全住民が環境保全型ライフスタイルを実行することで排水量が36%削減されると設定した。また、生活雑排水未処理人口の生活雑排水からCOD 28%, T-N 30%, T-P 20%が削減されると設定した	流域
	環境保全型農業：環境保全型農業推進により田畑への施肥量を削減し、作物の生長に必要な分以外を100%削減する設定とした	流域
	家畜し尿の農地還元：全家庭し尿を農地に還元することで家畜由来の負荷量を100%削減する設定とした	流域
	水産負荷対策：コイ養殖からの水産負荷を0にする	湖内
	重点再生エリア：透過堤によって0.09km ² の範囲を囲い込み、那珂川から0.1m ³ /sを導水する	湖内

施策群名称	
組合せ 1	施策群 1 (インフラ主体整備型)
組合せ 2	施策群 3 (自然浄化機能回復型)
組合せ 3	施策群 2 (流域住民参加型)

3.2 流入負荷量の把握

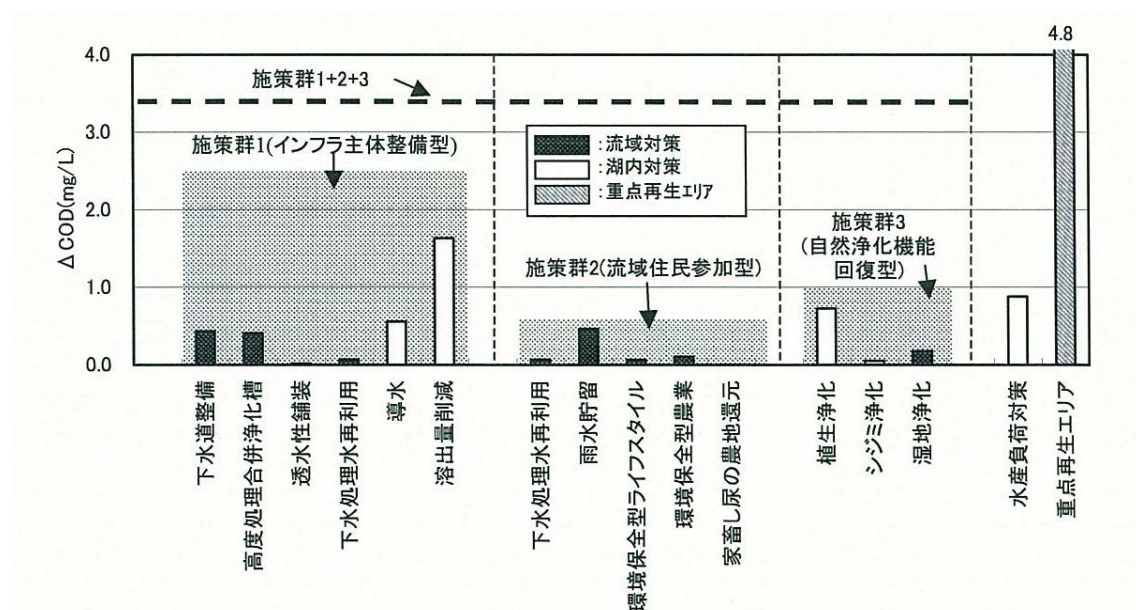


図 3.2.36 湖心の平均水質における種々の施策条件による感度分析結果
(現況計算値：COD6.9mg/L との差分)

(2) 流入負荷量の把握の展望と課題

3.2.3で見てきたように、調査データの整理にあたって、流入負荷量を精度よく把握する重要なポイントとして、以下のような点を考慮することが挙げられる。

- ・ 出水時データの重要性
- ・ 雪の有無など、季節による流出メカニズムの違い
- ・ かんがい期など、季節による水回しの違い
- ・ 粒子態と溶存態の形態別の違い

なお、こうした整理は流域内の土地利用がほぼ同じとみなせる期間のデータ群について可能であることに注意が必要である。流域内の土地利用が変化した場合には、流域から河川へ流出する負荷量の特徴はまた変化すると考えられる。

流域内の土地利用変化に対して、流出負荷量がどのように応答するのかについては、原単位が変化するだけでなく、水の動き方も変化する可能性がある。

その他、これまでの履歴が影響して、流域変化に対する流出負荷量変化の遅れなどもあると考えられる。例えば、流域内にこれまでの負荷源の蓄積があるような場合に、新たに生じる負荷の発生を抑制できても、蓄積された負荷源から染み出した負荷により、なかなか流入負荷量が減少しないことが想定される。特にし尿系や畜産系では、こうした時間遅れを考慮する必要があるが、原単位やL-Q式では時間遅れを扱うことはできないため、今後、こうした時間遅れを考慮できる手法の開発が課題となる。

分布型モデルでは、土地利用（森林、農地、市街地など）ごとに、実際の現象に基づいて、流出過程をモデル化している。従って、与条件を設定することにより、相応の精度をもった結果を得ることができる。

しかし、分布型モデルには与条件の他にも多くのパラメータが含まれており、より精度の高い

結果を得るためには、各流域での流出特性を知った上で設定する必要がある。また、適切なパラメータの同定等、個々の分割要素（小流域）ごとのモデルの再現精度をどこまで上げられるかも精度向上の鍵である。こうしたモデル精度向上の検討には、調査で実測されたデータが不可欠である。つまり、優れたモデルがあっても、調査とそれによって得られるデータの重要性は変わらない。

なお、水質基準点等において、現状で実施されている水質調査は、湖沼へのトータルの流入負荷量を求めるに際しては有効と考えられるが、流域対策を考える上での調査としては必ずしも有効とは言えない。それは、集水域が複数の異なる土地利用で構成されていることが多いためであり、土地利用ごとのL-Q特性が見えにくいからである。

流域対策を考えていく上では、土地利用が単純である小流域ごとの調査を積み重ねていくことが重要と考えられる。このような調査を実施していくことで、流域内の汚濁要因を突き止めることも可能であるかも知れないし、排出原単位と流出負荷量の関係も整理しやすくなる可能性がある。

3.2 流入負荷量の把握

3.2.5 今後の課題

湖沼の水質管理における流入負荷量の把握について、今後の課題を整理した。

(1) 流域情報の蓄積

流域内の負荷発生源は、山林・農地・市街地からの流出（面源負荷）だけでなく、家庭・畜産・産業などの人為的排出源（点源負荷）など多様であるが、流域の負荷源の積み上げに基づいた負荷量把握においては、これら多様な負荷源をどう取り扱うかが課題となる。

湖沼管理にあたっては、流域の自然、社会環境の経時変化や特性（分布状況、内訳等）の把握は重要と考えられる。これらの流域情報は代表的な各湖沼においては、概ね整備されている（表 3.2.15）が、負荷量を把握するにあたっては、依然としてデータは乏しい状況である。

近年では、リモートセンシング技術を活用し、画像処理により土地利用状況等の質的な情報を把握できるようになった。今後、従来の調査に加え、こうした新しい技術も取り入れながら、データを蓄積していくことも課題である。

表 3.2.15 各湖沼における流域情報の収集・整理状況

種別	項目	網走湖		小川原湖		釧路湖		琵琶湖		中海・穴道湖	
		情報の有無 (○又は×)	情報の年次 、○、	情報の有無 (○又は×)	情報の年次 、○、	情報の有無 (○又は×)	情報の年次 、○、	情報の有無 (○又は×)	情報の年次 、○、	情報の有無 (○又は×)	情報の年次 、○、
流域に関する情報	土地利用	○		○		○		○		○	
	人口	○		○		○		○		○	
	汚水処理形態別人口	○		○		○		○		○	
	畜産頭数	○		○		○		○		○	
	工業出荷額	○		○		○		○		○	
	観光客（入り込み客数）	○		○		×		○		○	
	施肥量	×	-	×	-	×		×	-	×	-
	面源負荷の原単位	○	○	○	-	○		○		○	○
	生活系原単位	○	○	○	-	○		○		○	○
	畜産系原単位	○	○	○	-	○		○		○	○
	工業系原単位	○	○	○	-	○		○		○	○
	自然環境										
	気象（降水・風など）	○		○		○		○		○	
	降水の水質	×	-	×		○		○		○	-
	地質	○		○		×		○		○	-
湖沼の負荷収支に関する情報	流入河川流量	○		○		○		一部○		直轄河川（斐伊川）は把握しているが、その他の河川は把握していない。	
	流出河川流量	○	-			○		○		穴道湖・大橋川 ○ 穴道湖・佐陀川 ○ 中海・境水道 ○	○ ○
	流入河川水質	○		○		○		一部○		○	
	流出河川水質	○		○		○		○		○	
	湖水位	○		○		○		○		○	
	湖沼水質（鉛直分布）	○		○		×		一部○		○	
水質目標に関する情報	水利用状況	○	-	○	○	○		○		○	?
	生物生態・生育状況	○		○	国調 総合調査	○		○		○	?

注）情報の年次の ○ は至近年と 10 年程度以上過去のデータを所有
 ○ は至近年のデータのみ所有
 は 10 年程度以上過去のデータのみ所有

(2) 流域変化に対する河川水質応答の遅れ

流域対策等により負荷源は確実に減少しているはずであるのに、河川水質への応答が遅く、対策効果がなかなか現れにくいことが指摘されている。この要因としては、流域内にこれまでの負荷源の蓄積があり、新たな負荷の発生を抑制できても、蓄積された負荷源から染み出すような形での負荷の影響を受けていることが考えられる。

特にし尿系や畜産系では、こうした負荷流出の時間遅れを考慮する必要があるが、原単位や L-Q

3.2 流入負荷量の把握

式では河川水質が負荷の削減と連動してしまうため、今後、負荷流出の時間遅れを考慮できる手法を開発することが課題である。

(3) 流入部における流速急変による負荷量変化

流速が大きく変化する河川の流入部では、滞留時間が長くなり、沈降や有機物の分解等、物質量の生成・消滅が起きている可能性がある。この場合、流入河川の水質調査地点で把握された流入負荷量と、実際に湖沼内へ流入する負荷量に差が生じることが考えられる。

河川流入部におけるこうした現象については、現在あまり調査が実施されておらず、流入負荷量の変化への影響は定かではないと考えられる。当該水域で起きている現象と流入負荷量への影響程度を確認するうえで、主要な流入河川において現地調査を実施し、まず実態を把握する必要がある。

3.3 湖沼底質の把握方法

3.3.1 底泥の特性

(1) 底泥の堆積過程

湖沼の底泥は、湖沼水との相互関係による現象（溶出、巻き上げ等）を通じて水質に影響を与えるものである。

湖沼における物質の挙動について、一般的なイメージ図を以下に示す。

湖沼に流入した汚濁物質（有機物や栄養塩）は、流入後に移流、希釈・拡散し、その一部は沈殿し、湖底に堆積する。また、底泥からは、溶出や巻き上げの作用を受けて汚濁物質の一部が水中に回帰する。その間、水中の有機物は湖底に生息する好気性細菌により分解を受け、栄養塩（無機態窒素・無機態リン）等は無機化される。さらに、無機化により生じた栄養塩や二酸化炭素は植物プランクトンによって摂取される。死滅したプランクトンは沈殿し、湖底に堆積する。

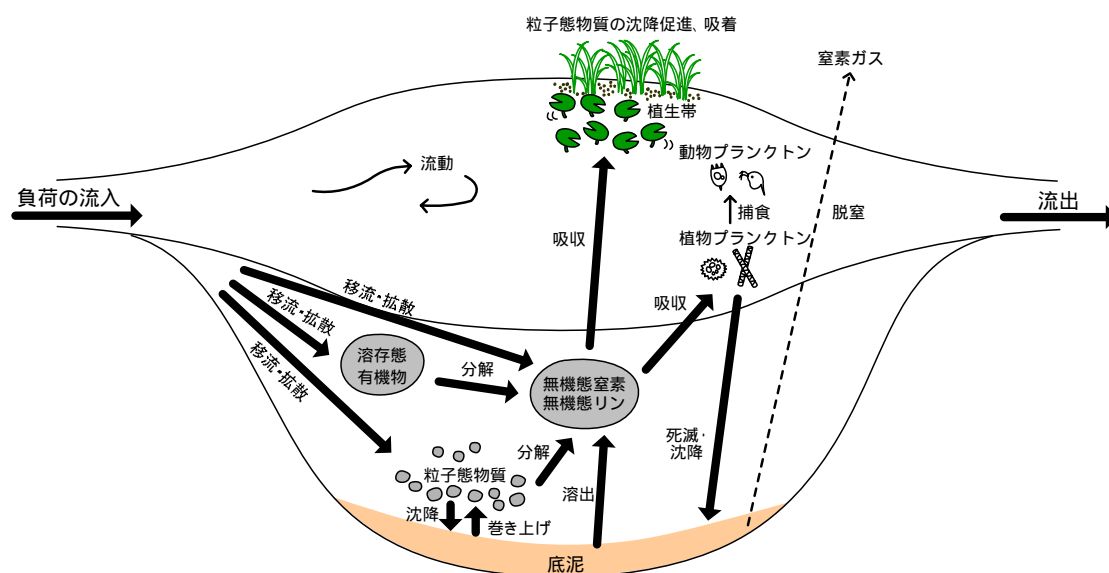


図 3.3.1 湖沼における物質の挙動のイメージ

(2) わが国の湖沼における底質特性

1) 底泥含有量

わが国の代表的な湖沼における底質性状を図 3.3.2、図 3.3.3に示す。

流出部では、強熱減量及び T-P 濃度は比較的低い濃度を示す傾向にある。一方、流入部では、強熱減量は比較的低いものの、T-P 濃度は比較的高い値を示す傾向にある。

閉鎖性が高い水域については、地点により濃度は異なるものの、当該湖沼における最大濃度またはそれに近い高い濃度を示す地点が含まれる。

流入河川からの流入負荷に由来する底質の割合が大きいのは、流入部で濃度の高い T-P と考えられ、COD 及び T-N は流入河川からの流入による影響は比較的小さいと考えられる。

3.3 湖沼底質の把握方法

流出部で底泥濃度が低い要因のひとつとして、水の出入の影響が考えられる。特に網走湖や小川原湖の流出部では潮汐の影響により塩分の移動があるため、底層水に動きがあり、底泥も動きやすく湖中央部よりも好氣的な環境にあると考えられる。

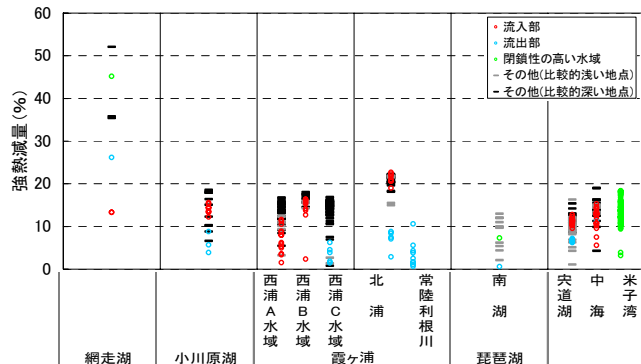


図 3.3.2 代表的な湖沼の底泥強熱減量

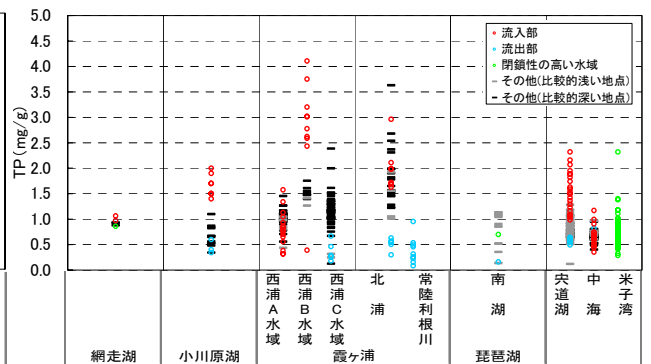


図 3.3.3 代表的な湖沼の底泥 T-P 濃度

図 3.3.4に示すように、底質濃度の各項目間には一定の相関関係があるものと考えられる。しかし、その関係性は湖沼ごとに少しずつ異なるため、相関関係の検討は、湖沼ごとに行う必要がある。

ただし、項目間の相関関係によると、強熱減量が 10%を超えるような地点では、COD 濃度、T-N 濃度及び T-P 濃度が高い値を示すことがある。

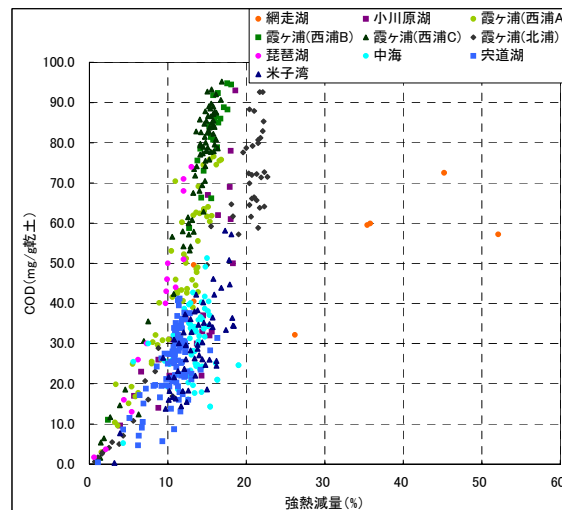
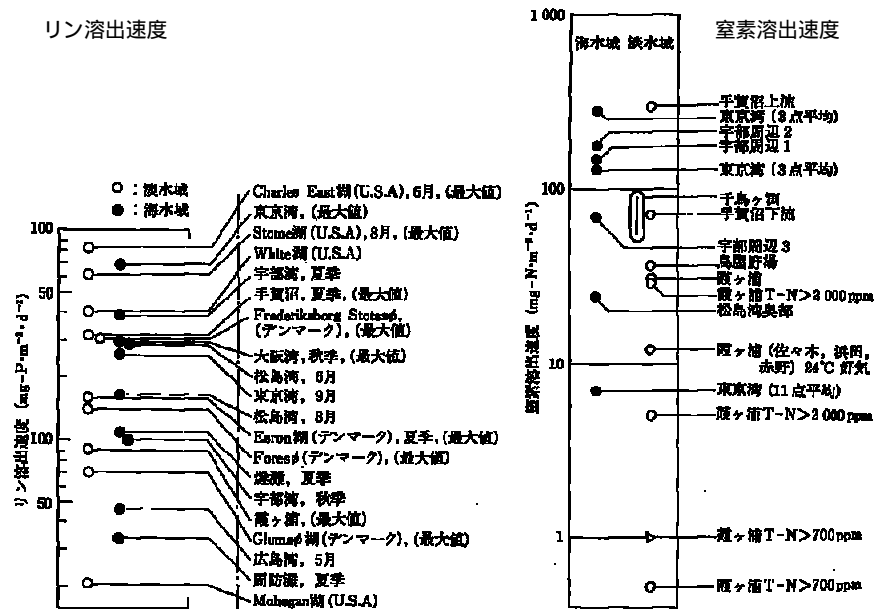


図 3.3.4 強熱減量と底泥 COD 濃度の相関図

2) 底泥溶出速度

海域、湖沼等における底泥溶出速度については、図 3.3.5 のような調査結果がとりまとめられている。



出典：環境工学公式・数値・モデル集

図 3.3.5 底泥からの溶出速度

わが国の代表的な湖沼における底泥溶出速度を見ると、T-N 濃度が高いほど T-N 溶出速度も大きくなる傾向が見られる。一方、他の項目ではそのような傾向は見られない。

また、霞ヶ浦の調査結果によると、T-N 溶出速度及び T-P 溶出速度は、水深の深い地点ほど高い値を示す傾向にある。

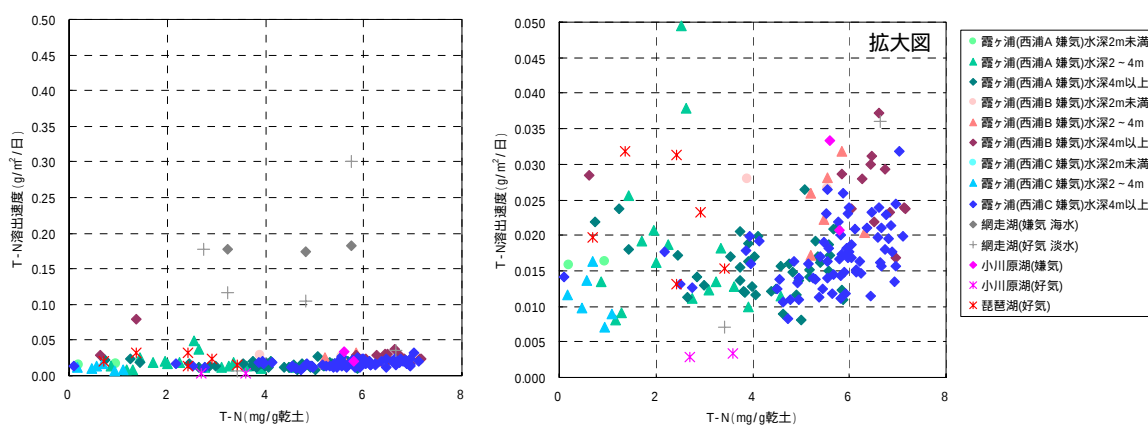


図 3.3.6 底質の T-N 濃度と T-N 溶出速度との関係

3.3 湖沼底質の把握方法

また、水温と溶出速度との関係については、溶解性りんや $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出速度は水温上昇に応じて増加する傾向にあり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は水温上昇に応じて底泥溶出速度が増加する傾向にある。¹⁷⁾¹⁸⁾

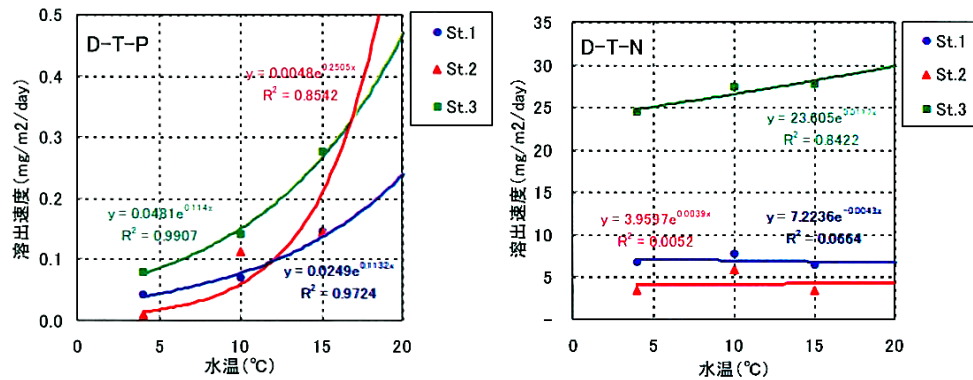


図 3.3.7 水温低下と底泥溶出速度との関係 (文献 1)

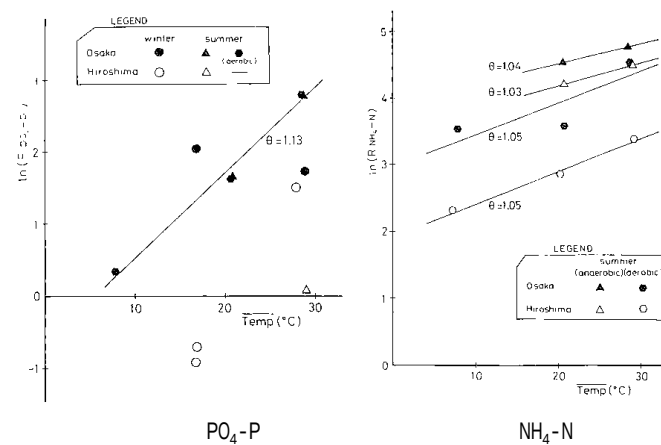


図 3.3.8 溶出速度と温度との関係¹⁸⁾

同様に、霞ヶ浦における調査結果によると、釜谷沖地点の $\text{NH}_4\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4\text{-P}$ 溶出速度は夏期に高い。一方で、汽水湖である中海・宍道湖における調査結果によると、全窒素及び全りん溶出速度は、地点により夏期に高い箇所もあるが、中海湖心等のように春期に高い箇所等もある。

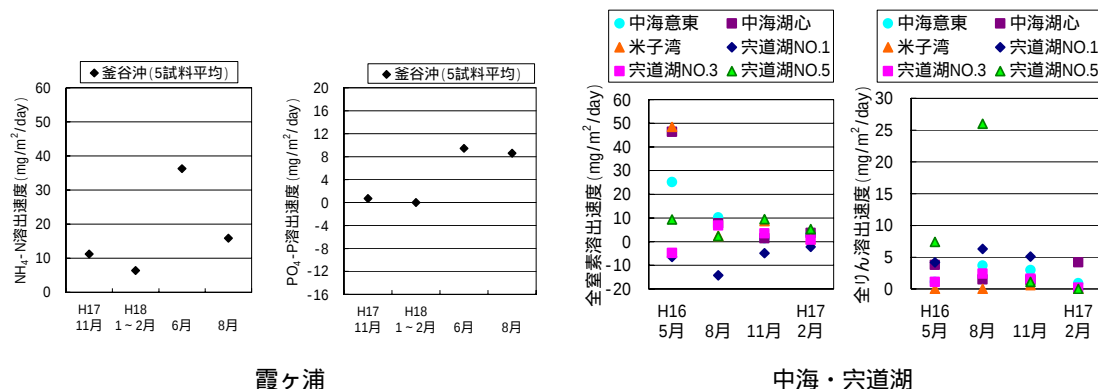


図 3.3.9 季別の底泥溶出速度

3.3 湖沼底質の把握方法

また、DO と溶出速度との関係については、同一の水温条件下では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 T-P の溶出速度は DO が減少するにつれ大きくなる傾向があり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 溶出速度は強い嫌気条件下では大きくなる傾向にある。ただし、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 溶出速度は、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 溶出速度に比べて DO 依存性は小さい。^{18) 19)}

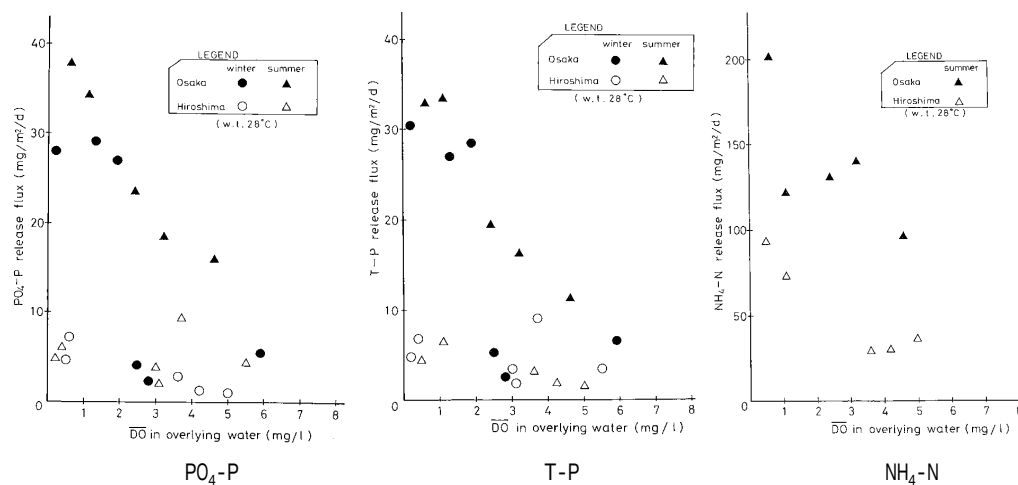


図 3.3.10 DO と溶出速度との関係 (水温 28)¹⁸⁾

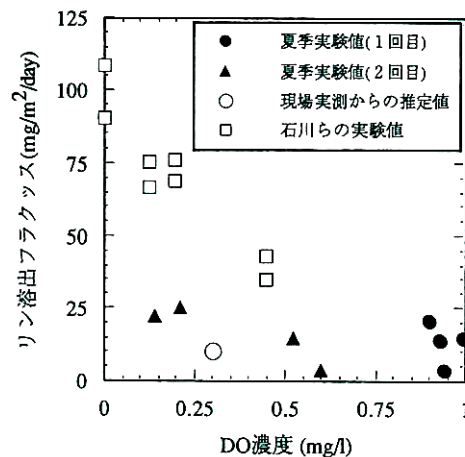
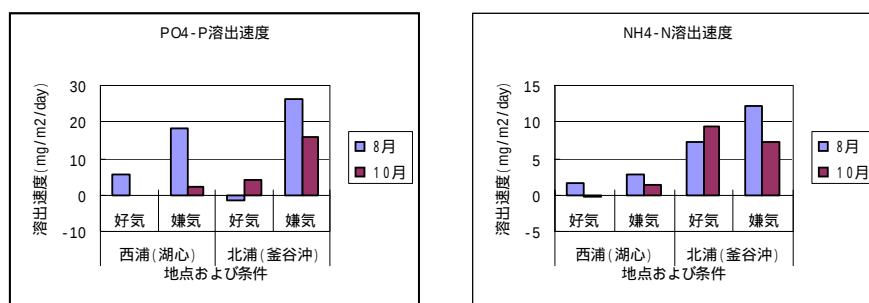


図 3.3.11 DO とリンの溶出速度との関係¹⁹⁾

霞ヶ浦における調査結果によると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出速度は、嫌気条件下において北浦釜谷沖の方が西浦湖心よりも大きな値を示し、底泥の有機物含有量の差異が影響したものと考えられる。また、好気条件下では $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が顕著に抑えられていたが、Fe、Mn 等の酸化状態にあるイオンとの結合によって溶出しにくい状態であったと考えられる。一方、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出速度は好気・嫌気条件による差異は顕著でなく、汚濁程度の異なる北浦・西浦地点間での差異が大きかった。²⁰⁾

3.3 湖沼底質の把握方法



底泥の強熱減量は、西浦湖心で14.8～16.2%、北浦釜谷沖で17.5%であった。

図 3.3.12 溶出速度実験結果²⁰⁾

3) 酸素消費速度

酸素消費速度については、調査事例が多くないため、ここでは網走湖及び霞ヶ浦での調査結果を掲載する。

網走湖の調査結果によると、底泥厚による酸素消費速度への影響は小さい。また、霞ヶ浦の調査結果によると実験時間により酸素消費速度の調査結果は変わってくる。

また、いずれの湖沼でも、地点により酸素消費速度は変化するため、湖沼全体としての酸素消費速度をとらえるためには複数地点で調査を実施する必要がある。

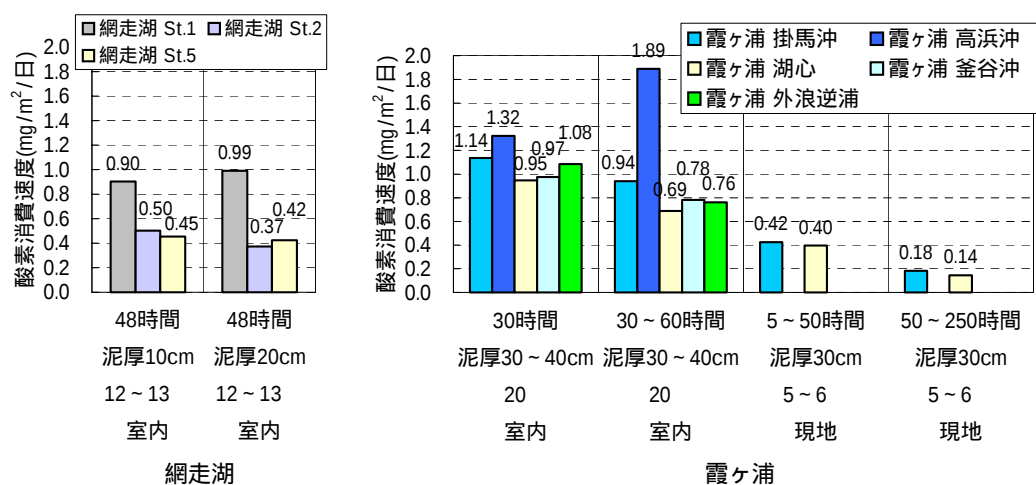


図 3.3.13 酸素消費速度 (網走湖 平成4年、霞ヶ浦 平成16年)

3.3.2 湖沼底質の調査方法

(1)底質調査の種類

1)含有量調査

含有量調査は、底泥の人為的富栄養化による汚濁の実態を把握するための静的な汚濁性状試験である。

わが国の代表的な湖沼では、毎年実施されている定期調査以外に、各湖沼において数年に 1 回程度底質の現況把握、またはパラメータ設定のために実施されている。

底質対策事業を実施している湖沼（霞ヶ浦、琵琶湖、網走湖）においては、事業効果を把握することを目的として、対策開始以後に別途調査されている。調査期間は、霞ヶ浦および琵琶湖においては対策事業開始後ほぼ毎年であり、網走湖においては対策事業開始後 2 年間である。

2)底泥溶出速度実験

底泥溶出速度実験は、湖沼の汚濁負荷の 1 つである底質からの溶出負荷を明らかにするための基礎となる動的な汚濁性状試験である。

わが国の代表的な湖沼では、各湖沼において数年に 1 回程度、底質の現況把握、またはパラメータ設定のために実施されている。なお、底泥溶出速度実験に合わせて、含有量調査も同時に実施されていることが多い。

底質対策事業を実施している湖沼（霞ヶ浦、琵琶湖、網走湖）においては、事業効果を把握することを目的として、対策事業開始以後、ほぼ毎年継続的に調査されている。

3)酸素消費実験

酸素消費実験は、湖沼および海域などの水底に長期間にわたって堆積した汚泥の中に含まれる多量の汚濁物をバクテリアなどが分解するときに消費する酸素の量を測定するものである。酸素消費速度は、底層水の貧酸素化の進行のしやすさ、底生生物の生息環境の悪化しやすさ、底質からの溶出のしやすさの指標となる。

わが国の代表的な湖沼では、底泥の酸素消費量の現況把握、または底泥性状と酸素消費速度の関係把握を目的として実施されている。調査頻度は各湖沼において過去に 1 回実施されている程度であり、調査頻度は比較的低い。湖沼により調査を実施していない湖沼も見られる。

4)巻き上げ量調査

巻き上げ量調査は、浚渫効果の把握、浮上溶出の実態把握等を目的として実施されている。霞ヶ浦で実施例があるのみであり、実施頻度は低い。

5)沈降量調査

沈降量調査は、沈降量・沈降速度の把握、または浮上溶出の実態把握（巻き上げ後の沈降特性の把握）を目的として実施されている。網走湖、霞ヶ浦、中海・宍道湖においてのみ調査が実施されている。3湖沼とも、過去に1～2回調査が実施されている程度である。

6)ベントス量調査

ベントス量調査は、水質浄化対策施設の影響対象としての底生生物の現況把握、または浚渫効果の把握を目的として実施されており、網走湖、霞ヶ浦、中海・宍道湖のみに調査が実施されている。

ほとんどは、現況把握を目的とした調査であるが、霞ヶ浦においては、対策事業効果を把握することを目的として実施された例がある。

7)その他の調査

その他の調査として、隔離幕調査、浮泥層調査、底泥攪乱状況調査、再堆積調査、底泥厚分布調査、および底泥の年代測定等が実施されている。

隔離幕調査は網走湖における調査事例、その他の調査はいずれも霞ヶ浦において調査実績がある。

(2)底質調査方法

底質調査の方法については、表 3.3.1に示す参考文献に記載されているので、詳細の内容については同書を参照されたい。

表 3.3.1 底質調査方法に関する参考文献

	参 考 文 献	
全 般	「水文観測業務規程関係集」	(平成 17 年 国土交通省河川局)
含有量調査	「底質の調査・試験マニュアル」	(平成 15 年 底質浄化協会)
	「河川水質調査要領(案)参考資料」	(平成 17 年 国土交通省河川局河川環境課)*
	「地球環境調査計測事典」	(平成 15 年 フジ・テクノシステム)*
底泥溶出速度実験	「底質の調査・試験マニュアル」	(平成 15 年 底質浄化協会)
	「河川水質調査要領(案)参考資料」	(平成 17 年 国土交通省河川局河川環境課)*
	「地球環境調査計測事典」	(平成 15 年 フジ・テクノシステム)*
酸素消費実験	「河川水質調査要領(案)参考資料」	(平成 17 年 国土交通省河川局河川環境課)
	「地球環境調査計測事典」	(平成 15 年 フジ・テクノシステム)*
沈降量調査	「地球環境調査計測事典」	(平成 15 年 フジ・テクノシステム)
ベントス量調査	「地球環境調査計測事典」	(平成 15 年 フジ・テクノシステム)
備 考	底質の分析方法については、「底質の調査・試験マニュアル」(平成 15 年 底質浄化協会)、「底質調査方法とその解説」(昭和 63 年 環境庁水質保全局水質管理課)及び「湖沼環境調査指針」(昭和 57 年 (社)日本水質汚濁研究協会)に記載されている。公式、及びモデル化における考え方等については、「環境工学公式・モデル・数値集」(平成 16 年 土木学会環境工学委員会)に記載されている。	

*) 詳細の記述はないものの、調査項目の設定など一部の情報が盛り込まれていることを示す。

(3)底質調査における課題

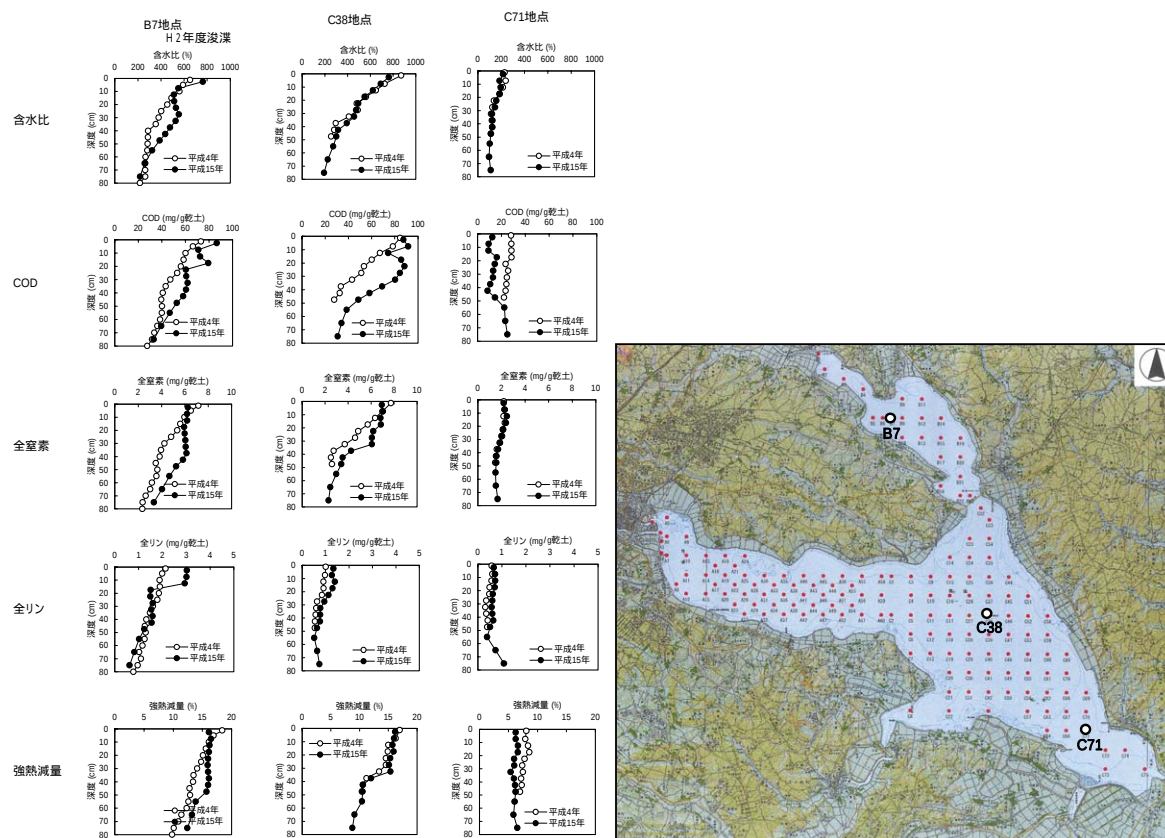
1)底泥鉛直方向の分布による底泥サンプリング誤差

エクマンバージでは、採取できる底泥の深度が底泥の性状（やわらかさ等）により異なりサンプリング誤差の原因となる。また、コアサンプリングでは、コアを底泥にさしこむときの摩擦や圧密により底泥が乱されることがあり、同様にサンプリング誤差の原因となる。これは特に細い径を用いた場合におこりやすい。

鉛直方向の濃度変化が大きい場合にはサンプリング方法による誤差が比較的大きく、逆に、鉛直方向の濃度変化が小さく濃度がほぼ一様の場合にはサンプリング方法による誤差は比較的小さいものと考えられる。全国の湖沼の表層5～10cm程度の底泥性状は、鉛直方向におおむね同様の値を示す地点もあれば、鉛直方向に大きく変化する地点もあり、湖沼により注意を要する場合がある。

ところで、底質の経年的な変化によるばらつきについては、霞ヶ浦における平成4年と平成15年の底泥鉛直分布を見ると、結果には差異が見られる。これは、底泥の堆積、移動などの作用により経年的に底質が変化したためと考えられる。これより、10年程度の期間を隔てると底泥の鉛直分布特性は異なっており、底泥鉛直分布の傾向は経年的に変化するものと考えられる。

このことから、底泥採取にあたっては、サンプリング誤差を念頭におき、あらかじめ、湖内の代表1地点または数地点について鉛直方向の分布を把握しておく必要がある。また、底泥鉛直方向の分布は、10年程度の期間が経過すると変化するため、ローリング調査により多年度にわたり調査する場合にはその周期に留意する必要がある。



出典：霞ヶ浦底質調査業務報告書（平成15年9月）

図 3.3.14 霞ヶ浦における底質含有量の鉛直分布

2) 底泥の平面的なばらつき

霞ヶ浦での調査結果(H15)によると、約2kmのメッシュ内での複数の調査地点での結果のばらつきは図3.3.15のとおりである。

ばらつきが大きいブロックのほとんどは湖岸に近い調査地点を含む箇所であり(図中に○で示したブロック)、湖岸近傍には砂質の底泥が、沖には泥質の底泥が存在するために強熱減量のばらつきが大きいものと考えられる。

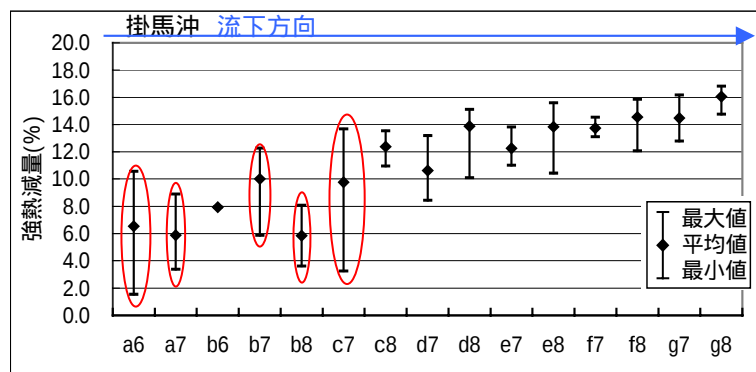


図 3.3.15 ブロック(2kmメッシュ)ごとの強熱減量の分布(H15年 霞ヶ浦)

3) 底泥溶出速度実験結果のばらつき

霞ヶ浦での調査結果(H17~18)によると、底泥溶出速度の調査結果は、窒素、リンともに、水域の特性に応じて20~60%程度のばらつきがあると考えられる。結果の一部を図3.3.16に示す。底泥溶出速度をより正確に把握するためには、同一地点において複数の試料を用いた調査をすることが望ましい。

底泥溶出速度は時期により値が異なり、おおむね夏~秋期は大きい値を、冬~春期は小さい値を示す。このため、底泥溶出速度試験を実施するときには、水温条件の設定に留意する必要がある。なお、現地での溶出速度を再現するためには、現地の底層水温を把握し、実験条件とする必要がある。

底泥溶出速度が大きい時期にはそのばらつきも無視できないものとなる。同一地点における複数の試料を用いた調査を行う場合には、ばらつきの大きい夏~秋期の調査を優先させることが望ましい。

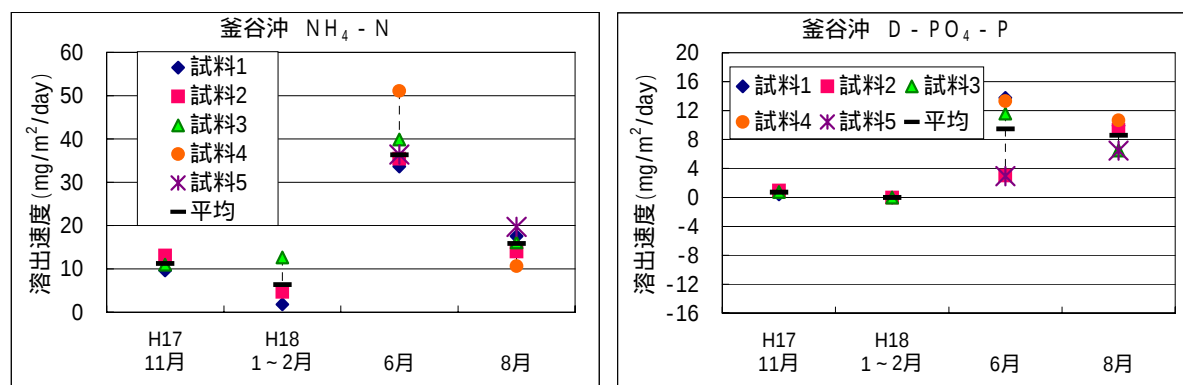


図 3.3.16 底泥溶出速度実験結果(霞ヶ浦 H17~18)

3.3 湖沼底質の把握方法

なお、文献5によると、現場において、D₀濃度は0であるがNO₃-Nが存在する場合、図3.3.17に示すように、嫌気状態での溶出試験においてPO₄-Pの溶出速度が大きく変化することがある。これは、初期のNO₃-N存在期間においてはPO₄-Pの溶出が抑制されているが、脱窒によりNO₃-N濃度が0となった後に、PO₄-P溶出速度が増加したことによる。

このため、調査にあたっては、現場の条件に適合する範囲のデータを用いて、溶出速度を算出することが必要である。

また、脱窒は比較的速やかに進行することから、現場の状況も変わりやすいと考えられる。このため、現場底層水中のNO₃-N濃度の変化に注意し、濃度が0となった場合には、再度、採水・採泥を行い、溶出試験を行うことが望ましい。

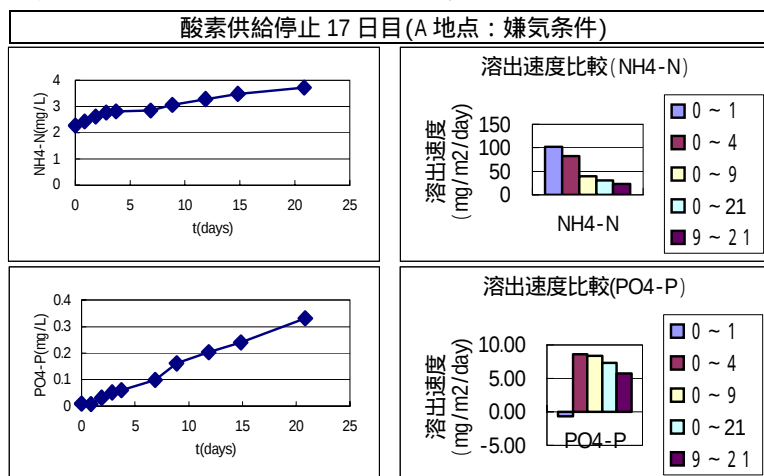


図 3.3.17 現場が無酸素かつ NO₃-N 存在である底泥の嫌気溶出試験結果²⁰⁾

また、現場が好気状態であり、溶出試験においても好気状態で測定を行う場合、図3.3.18に示すように、PO₄-P溶出速度が小さいことが影響して、溶出傾向が安定しないことがある。

このような場合、調査にあたっては、ある程度の期間の平均値として評価するか、または複数カラムを設置して、その平均で評価することが望ましい。

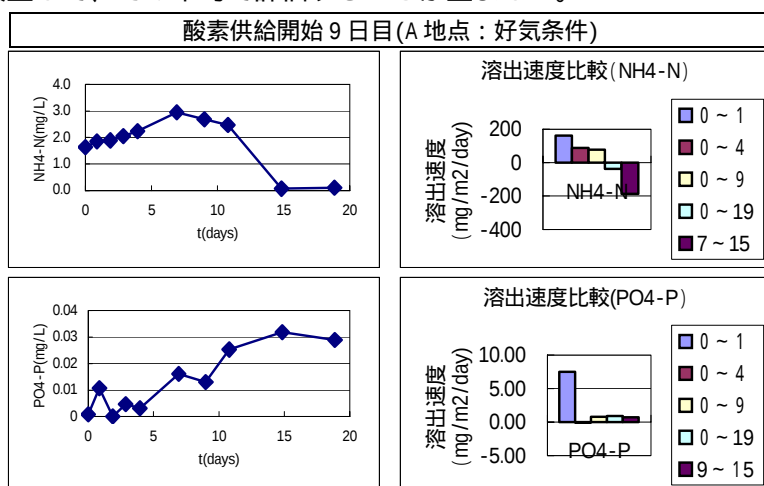


図 3.3.18 現場が好気状態である底泥の好気溶出試験結果²⁰⁾

3.3.3 底質把握方法の工夫

(1)底質の簡易把握方法

3.3.2節にあげたような調査により湖沼の底質平面分布を把握するには、多くの費用が必要となる。そこで、ここでは、簡易な底質調査により湖沼の底質平面分布を把握できる調査費用のかからない調査手法について、基礎資料となる事例を収集した。

1)サイドスキャンソナーによる調査

サイドスキャンソナーは、トウフィッシュとよばれる曳航体、それを曳航するための曳航ケーブル、そして海底等からの散乱音を処理し記録するための船上装置の3つの部分から構成される。トウフィッシュを曳航しながら超音波の送受信を繰り返すことによって、一定幅で海底面等を走査できる。(図 3.3.19)

なお、超音波の周波数は、海底調査では、一般に、大陸棚～深海用として12kHzの周波数が、浅海～大陸棚用として30～200kHzの周波数が使用される。また、表層探査装置では、3～7kHz(底質が軟弱な泥質堆積物の場合には30kHz程度でも探査が可能)の周波数が使用される。

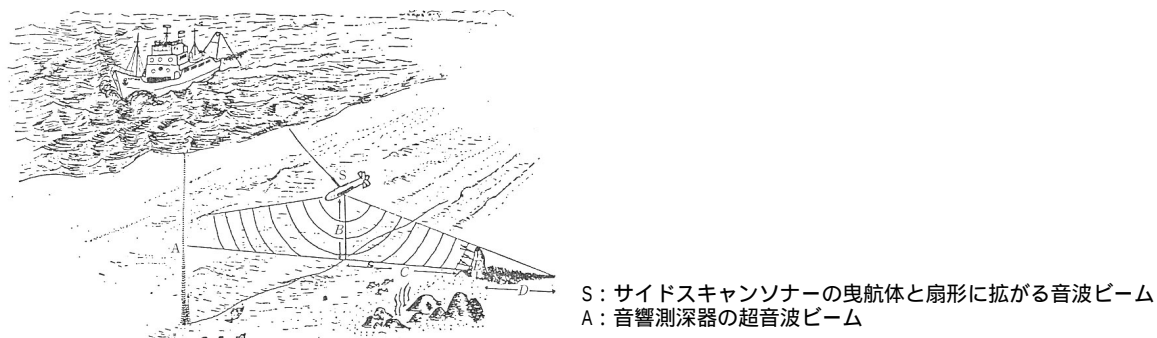


図 3.3.19 サイドスキャンソナーによる海底表面の探査²¹⁾

サイドスキャンソナーの記録例として、図 3.3.20に海底表面状況図を示す。

これによると、左舷側には砂状の底質、右舷側には砂状または泥状の底質が検出されており、その平面的な分布状況も捉えられている。

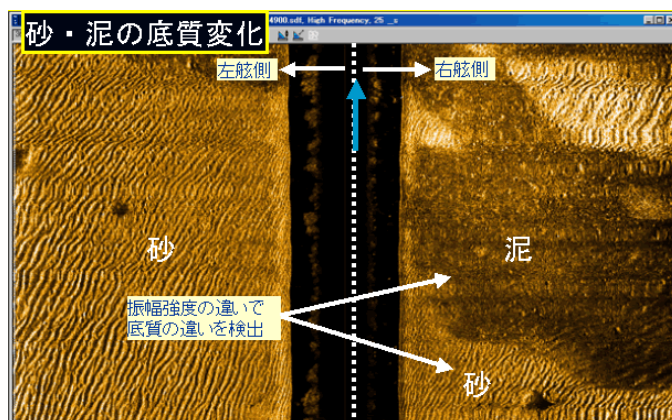


図 3.3.20 海底表面状況図²²⁾

2) 多周波音響探査機による方法

多周波音響探査機は高周波数と低周波数の超音波を同時に使用し、両者の反射音の測定値の差を利用して堆積厚を調査するものである。使用される低周波数としては、8、12、15、30kHz などがある。

ただし、多周波音響探査機による各周波数における反射位置と地質、土質性状との関係は明確でなく、探査機による測定値のみで判定することはできない。従って、使用に当たっては、調査区域内の柱状採泥地点において、柱状採泥による堆積厚測定値と、探査機による測定値と照合し探査機による指示値が堆積泥中の何れの点であるかの確認（反射層の確認）を行う必要がある。

また、多周波音響探査機に使用する周波数よりもっと低い周波数を使用するものに、地層探査機といわれるものがある。低い周波数（3kHz 基準周波数）を使用して、水底深部まで探査するものであり、記録の解読は専門家によってなされ、土質の判定が行われる。図 3.3.21はその一例である。

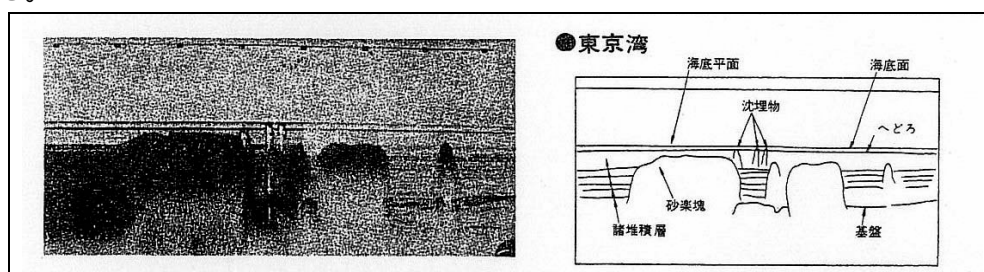


図 3.3.21 多周波音響探査機による記録例²³⁾

3) 代表項目のみの調査による平面分布の把握

底質調査は、その調査の目的に応じて必要となる項目を調査することが基本であるが、調査項目間に相関がある場合は、代表的な項目のみを調査し、その結果から他の項目を推定することが可能となる。

次ページに、わが国の代表的な湖沼における調査結果をもとに作成した相関図を示す。

COD と全窒素については、水域によらず、強熱減量との間に概ね一定の相関関係が見られる。一方、全リンについては、強熱減量と全リンの相関関係が弱い水域が見られる。

このため、強熱減量の値から、COD、窒素、リンの値を推定することがある程度可能であると考えられる。ただし、湖沼や水域によりその相関の特性が異なったり、また、項目によっては相関関係が弱いまたは全く見られないこともあるため、実際に適用するにあたっては、個々の湖沼において事前に項目間の相関性について検討し、当該湖沼または当該水域における特性を十分に把握する必要がある。

3.3 湖沼底質の把握方法

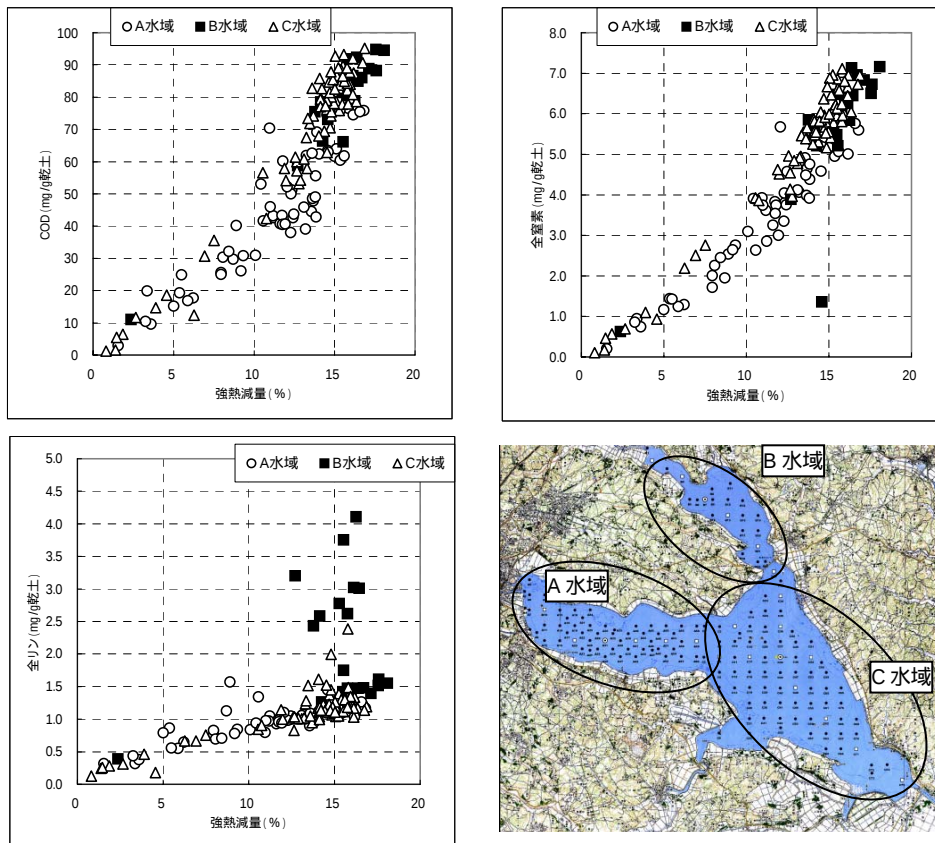


図 3.3.22 物理性状と各調査項目との相関図（霞ヶ浦西浦 平成 15 年 6 月調査）

4) 現地計測による底質平面分布の把握の可能性について

底層水の現地計測

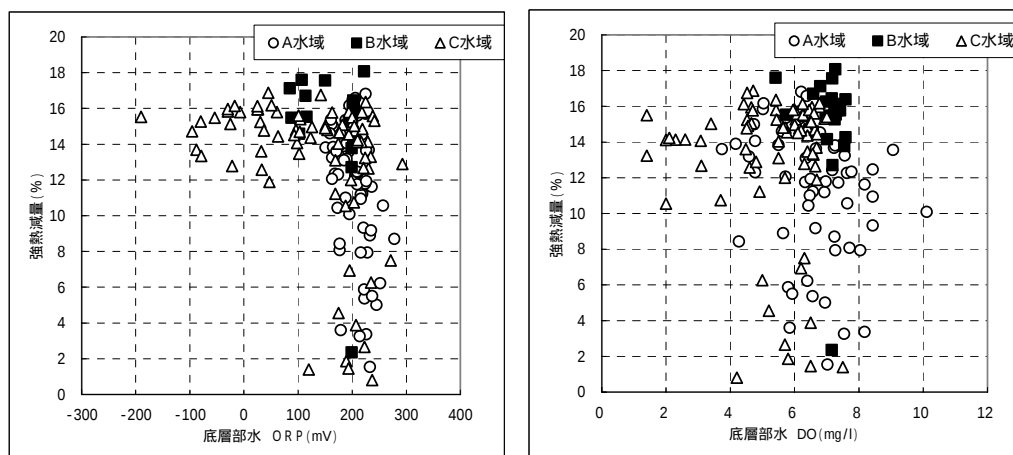
現地で簡易に計測できる底層水（底層水の ORP 及び DO の測定位置は、現地の湖底より 0.1m 上）の ORP 及び DO と底質の平面分布については、霞ヶ浦（西浦）における調査結果によると、底層水の ORP が 100mV 以下の箇所は、強熱減量が比較的高い値となり、また、底層水の DO が約 4mg/L 以下の箇所は、含水比、強熱減量、COD、T-N が比較的高い値となっている。

これより、湖底で比較的高い有機物濃度が高いことを把握する基礎資料としては、底層水の ORP 及び DO のデータがある程度役立つものと考えられる。

なお、図 3.3.23を見ると、底泥の室内分析結果との関係性は、底層水の DO よりも ORP の方がより明確である。このため、底層水を調査する場合には、まず ORP を調査し、可能であれば DO の調査を追加することが好ましい。

ただし、底層水の状態から底泥平面分布を把握する際には、詳細の底質分布状況とは異なる可能性があることに留意する必要がある。

3.3 湖沼底質の把握方法



底層部水のデータは現地の湖底より0.1m上の位置で計測したものである。

図 3.3.23 底層水の状態と底泥含有量濃度の関係（霞ヶ浦西浦 平成 15 年 6 月調査）

底泥の現地計測

現地で簡易に計測できる底泥の ORP と底質の平面分布については、渡良瀬貯水池における調査結果によると、図 3.3.24に示すとおり、干し上げを行うことにより底泥中の ORP が増加し、また、図 3.3.25に示すとおり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出速度が同時に低下する。これより、底泥の ORP が増加することと $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出速度の低下には関わりがあり、底泥から水質への影響を把握するひとつの手段として底泥の ORP の調査があげられる。

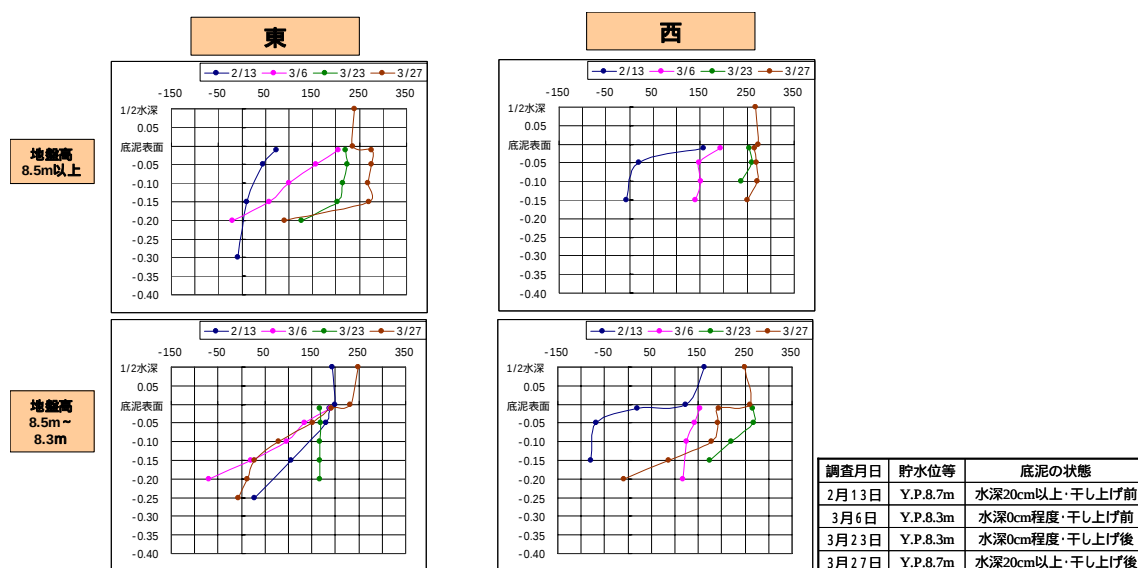


図 3.3.24 干し上げ前後の底泥及び直上水の ORP（渡良瀬貯水池）²⁴⁾

3.3 湖沼底質の把握方法

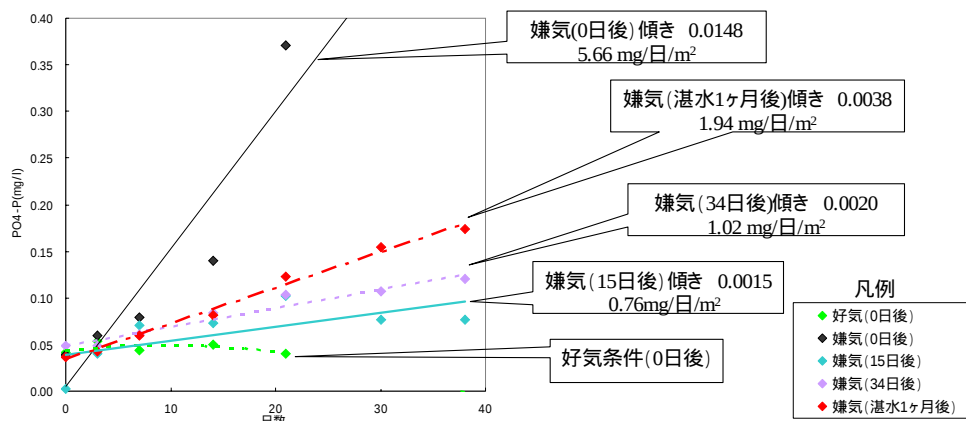


図 3.3.25 $\text{PO}_4\text{-P}$ 溶出濃度の近似曲線と溶出速度 (渡良瀬貯水池 平成 16 年度) ²⁴⁾

3.3.4 底質調査の組み立て方

湖沼の管理段階は、水質問題の発生していない状態（「、水質問題の顕在化前」）及び水質汚濁が進行した状態（対策の実施有無により「、水質問題の顕在化後」または「、対策後」）に区分することができる。

底質管理段階のイメージを図 3.3.26に示す。

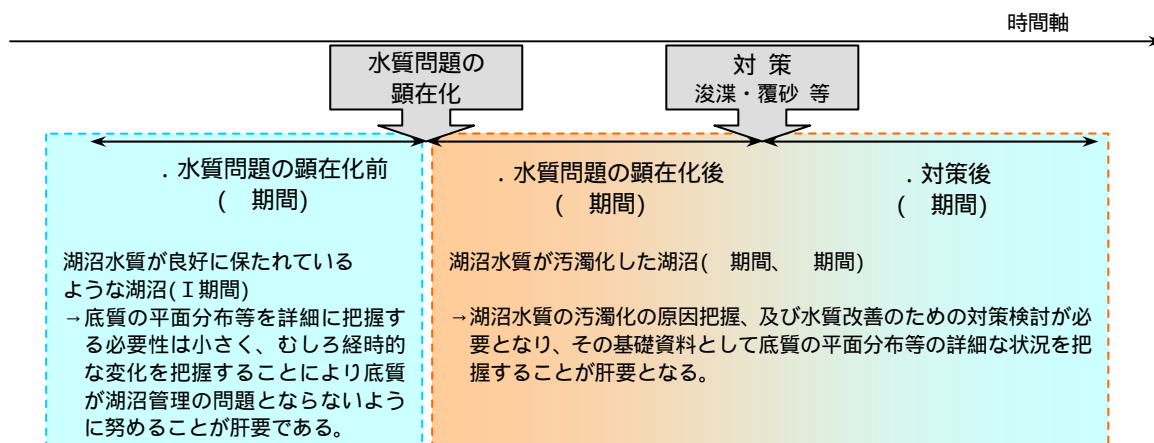


図 3.3.26 底質管理段階のイメージ

湖沼において実施すべき底質調査は、湖沼における底質の管理段階に応じて異なり、それぞれ以下のとおりとなると考えられる。

湖沼水質が良好に保たれているような湖沼（図 3.3.26の 期間に相当）においては、底質から水中への有機物や栄養塩類の溶出による湖沼水質への影響が比較的小さく、底質が湖沼管理上の問題となるようなことはない。このため、底質の平面分布を概略的に把握し、監視すべき水域や地点を絞った上で、その経時的な変化を把握し、底質の経時的な変化の有無をモニタリングすることが肝要である。

一方、湖沼水質が汚濁化した湖沼（図 3.3.26の 期間、 期間に相当）においては、一般に、底質から水中への有機物や栄養塩類の溶出による湖沼水質への影響の度合いが大きく、底質の管理が湖沼管理上の課題の一つとなる。このような場合には、湖沼水質の汚濁化の原因把握、及び水質改善のための対策検討が必要となり、その基礎資料として底質の平面分布等の詳細な状況を把握することが肝要となる。

各底質管理段階において必要となる調査の目的及び調査内容について次ページ以降にとりまとめた。

表 3.3.2 底質管理の第 段階に相当する湖沼における底質調査の目的と内容

フ ロ ー	調 査 の 目 的 と 内 容
<pre> graph TD A[底質の監視] --> B{水質問題の 顕在化} B -- No --> A B -- Yes --> C[第 段階へ] </pre> 水質問題が顕在化していなくても、流域からの汚濁流入や湖盆の地形等が特殊であり、既往の事例等から水質問題の顕在化が予期される場合には、必要に応じて後述の表 3.3.4における“水質問題の原因分析”や“対象事業の実施”(予防的対策)に進むこととする。	・ 水質問題顕在化の有無の把握 ・ 水質問題が顕在化したときに基礎資料となる情報の蓄積 → 底質平面分布の状況把握調査 (表 3.3.5(1)参照) → 底質経年変化の把握調査 (表 3.3.5(2)参照)

注) 各調査の内容を表 3.3.5に示す。

表 3.3.3 底質管理の第Ⅱ段階に相当する湖沼における底質調査の目的と内容

フ ロー	調 査 の 目 的 と 内 容
<pre> graph TD Start[第Ⅱ段階 START] --> Monitor[底質の監視] Start --> Cause[水質問題の原因分析] subgraph LeftPath [継続的な実施] Monitor --> Decision1{新たな水質問題の顕在化※} Decision1 -- No --> Monitor Decision1 -- Yes --> Cause end Cause --> Decision2{シミュレーションによる 検討の必要性の判断} Decision2 -- No --> Decision3{底質対策の 必要性の判断} Decision2 -- Yes --> Cause Decision3 --> End[第Ⅲ段階へ] style LeftPath fill:#e0ffff,stroke:#0000ff,stroke-width:2px style RightPath fill:#ffffe0,stroke:#0000ff,stroke-width:2px </pre> ※水質問題が顕在化していなくても、流域からの汚濁流入や湖盆の地形等が特殊であり、既往の事例等から水質問題の顕在化が予期される場合には、必要に応じて後述の表 3.3.4における“水質問題の原因分析”や“対象事業の実施”（予防的対策）に進むこととする。	- 水質問題顕在化の有無の把握 - 水質問題が顕在化したときに基礎資料となる情報の蓄積 →底質平面分布状況の把握調査 (表 3.3.5(1) 参照) →底質経年変化の把握調査 (表 3.3.5(2) 参照) - 顕在化した水質問題の動向把握 →底質経年変化の把握調査 (表 3.3.5(2) 参照) - 水質問題の原因となる水域の特定 →底質平面分布状況の経年調査 (表 3.3.5(3) 参照) - 水質問題への底質の寄与度の把握 →底質寄与度の概略把握調査 (表 3.3.5(4) 参照) - 底泥溶出速度の把握 - 環境条件や底質濃度による底泥溶出速度の変化の定式化 →底質寄与度の詳細把握調査 (表 3.3.5(5) 参照)

注) 各調査の内容を表 3.3.5に示す。

表 3.3.4 底質管理の第Ⅱ～Ⅲ段階、または第Ⅲ段階に相当する湖沼における底質調査の目的と内容

フ ロー	調 査 の 目 的 と 内 容
<pre> graph TD Start[第Ⅲ段階 START] --> Monitor[底質の監視] Monitor --> Decision1{新たな水質問題の顕在化※} Decision1 -- No --> Monitor Decision1 -- Yes --> Analysis[水質問題の原因分析] Analysis --> Decision2{シミュレーションによる 検討の必要性の判断} Decision2 -- No --> Decision3{底質対策の 必要性の判断} Decision2 -- Yes --> Simulation[シミュレーション モデルによる予測] Simulation --> Decision3 Decision3 -- No --> Monitor Decision3 -- Yes --> Plan[対策事業の検討] Plan --> Implement[対策事業の実施] Implement --> MonitorEffect[事業の効果の モニタリング] MonitorEffect --> Decision4{十分な効果の現れ (問題の解決)} Decision4 -- No --> Analysis Decision4 -- Yes --> StageI[第Ⅰ段階へ] </pre> ※水質問題が顕在化していなくても、流域からの汚濁流入や湖盆の地形等が特殊であり、既往の事例等から水質問題の顕在化が予期される場合には、必要に応じて“水質問題の原因分析”や“対象事業の実施”（予防的対策）に進むこととする。	・水質問題顕在化の有無の把握 ・水質問題が顕在化したときに基礎資料となる情報の蓄積 →底質平面分布状況の把握調査 （表 3.3.5(1) 参照） →底質経年変化の把握調査 （表 3.3.5(2) 参照） ・顕在化した水質問題の動向把握 →底質経年変化の把握調査 （表 3.3.5(2) 参照） ・水質問題の原因となる水域の特定 →底質平面分布状況の経年調査 （表 3.3.5(3) 参照） ・水質問題への底質の寄与度の把握 →底質寄与度の概略把握調査 （表 3.3.5(4) 参照） ・底泥溶出速度の把握 ・環境条件や底質濃度による底泥溶出速度の変化の定式化 →底質寄与度の詳細把握調査 （表 3.3.5(5) 参照） ・底泥浄化事業規模の決定 例）浚渫深度及び浚渫範囲の決定 →事業規模の検討調査 （表 3.3.5(6) 参照） ・事業実施に伴う発生土砂の利用計画 →発生土砂の性状調査 （表 3.3.5(7) 参照） ・事業実施による底泥溶出速度や、底質濃度の変化を把握 →事業効果の把握調査 （表 3.3.5(8) 参照）

注）各調査の内容を表 3.3.5に示す。

3.3 湖沼底質の把握方法

表 3.3.5(1) 調査の目的と調査内容（底質平面分布状況の把握調査）

	底質平面分布状況の把握調査
目 的	水質問題顕在化の有無の把握 水質問題が顕在化したときに基礎資料となる情報の蓄積
調査地点	湖心、流入部、流出部、閉鎖性の高い水域等に地点を配置（ただし地点間隔は湖沼の大きさ等により個別に設定する）
調査項目	底質濃度（強熱減量、T-P 等）、底層水の DO、ORP、汽水湖においては塩分濃度
調査頻度	必要に応じて実施（第 1 段階では少なくとも 1 回）
備 考	・調査（底質平面分布）は、底質の経年的な変化傾向が認められた時、または底質項目間の相関性に変化が見られた時に調査を実施する。

表 3.3.5(2) 調査の目的と調査内容（底質経年変化の把握調査）

	底質経年変化の把握調査
目 的	水質問題顕在化の有無の把握 水質問題が顕在化したときに基礎資料となる情報の蓄積 ～ 段階では、顕在化した水質問題の動向把握
調査地点	湖沼で代表性のある地点（最深部、流入部、底質悪化のしやすい地点）。 ～ 段階では、水質問題の原因と考えられる水域で代表性のある地点を追加。
調査項目	底質濃度（粒度分布、比重、水分、色、臭気、pH、ORP、強熱減量、TOC、COD、T-N、T-P、硫化物）、環境条件（底層の DO、ORP）
調査頻度	年 1 回程度（夏季が望ましい）
備 考	

表 3.3.5(3) 調査の目的と調査内容（底質平面分布状況の経年調査）

	底質平面分布状況の経年調査
目 的	水質問題の原因となる水域の特定
調査地点	湖心、流入部、流出部、閉鎖性の高い水域等に地点を配置（ただし地点間隔は湖沼の大きさ等により個別に設定する）
調査項目	底質濃度（粒度分布，比重，水分，色，臭気，pH，ORP，強熱減量，TOC，COD，T-N，T-P，硫化物）
調査頻度	必要に応じて実施
備 考	・調査項目は、既往調査結果を用いて項目間の相関を把握することにより、削減できる可能性がある。 ・なお、既に水質問題が発現している場合は、水質調査結果より原因となる水域が特定されることもあり得る。

表 3.3.5(4) 調査の目的と調査内容（底質寄与度の概略把握調査）

	底質寄与度の概略把握調査
目 的	水質問題への底質の寄与度の把握
調査地点	代表性のある地点（最深部、流入部、底質悪化のしやすい地点）
調査項目	底泥溶出速度、堆積速度
調査頻度	必要に応じて実施
備 考	・底泥溶出速度の実験条件設定は、水質問題が顕在化したときの現地条件に合わせて設定する。 ・底質鉛直方向の堆積年代測定により堆積速度を推定する。

表 3.3.5(5) 調査の目的と調査内容（底質寄与度の詳細把握調査）

	底質寄与度の詳細把握調査
目 的	底泥溶出速度の把握 環境条件や底質濃度による底泥溶出速度の変化の定式化
調査地点	代表性のある地点（なお、シミュレーションモデルでの水域分割を参考とする）
調査項目	底泥溶出速度およびその環境条件（底質濃度、水温、DO）による変化特性（COD，T-N，T-P など） 底質濃度（COD，T-N，T-P，強熱減量） DO 消費速度およびその環境条件による変化特性
調査頻度	必要に応じて実施
備 考	・シミュレーションモデルによる検討では、底質濃度、水温、DO 条件により溶出速度が変化するとして定式化されている例が多い。調査においては、シミュレーションモデルでの溶出速度の与え方に応じて、底質濃度の異なる複数の調査地点、及び水温や DO を複数ケース設定した実験を実施することが望ましい。

表 3.3.5(6) 調査の目的と調査内容（事業規模の検討調査）

	事業規模の検討調査
目 的	底泥浄化事業規模の決定 例) 浚渫深度及び浚渫範囲の決定
調査地点	メッシュ状に配置(ただし調査対象水域は対策事業の対象水域のみとする)
調査項目	底質濃度(粒度分布, 比重, 水分, 色, 臭気, pH, ORP, 強熱減量, TOC, COD, T-N, T-P, 硫化物) 底泥溶出速度(COD, T-N, T-P など)
調査頻度	必要に応じて実施
備 考	・底泥鉛直方向の調査は、浚渫深度の決定のために必要となる。 調査項目は既往調査の結果を用いて項目間の相関を把握することにより、削減できる可能性がある。

表 3.3.5(7) 調査の目的と調査内容（発生土砂の性状調査）

	発生土砂の性状調査
目 的	事業実施に伴う発生土砂の利用計画
調査地点	対策事業対象水域の代表地点
調査項目	底質濃度(重金属など、利用目的に応じた必要項目)
調査頻度	必要に応じて実施
備 考	・浚渫土の処分、有効利用に係る基準には「水底の土砂に係る判定基準」、「産業廃棄物に係る判定基準」、「土壌の汚染に係る環境基準」がある。

表 3.3.5(8) 調査の目的と調査内容（事業効果の把握調査）

	事業効果の把握調査
目 的	事業実施による底泥溶出速度や底質濃度の変化の把握 対策事業の見直し
調査地点	代表性のある地点
調査項目	底泥溶出速度(COD, T-N, T-P など) 底質濃度(粒度分布, 比重, 水分, 色, 臭気, pH, ORP, 強熱減量, TOC, COD, T-N, T-P, 硫化物) DO 消費速度
調査頻度	年 1 回程度
備 考	・比較のしかた：事業実施区域と未実施区域の比較 または、事業実施前後の比較 ・底質の監視のための調査結果も合わせて整理し、対策効果を把握するための参考とする。

3.3.5 今後の課題

(1)底質に係わる統一調査の実施

底質については、これまで調査が統一的な方法で行われてこなかった。このため、他湖沼との横並び比較ができにくい状況にある。このような状況を受けて、今後、複数の湖沼において統一された手法で底質調査を行い、底質を比較検討することで、湖沼の底質特性に関する知見を得ることは有用と考える。

(2)新しい底質調査手法の開発

底質調査を行う際には、その費用が調査を計画する上で重要な点となる。このため、費用のかからない簡易な調査手法を開発することが望まれる。例えば、泥色の調査は、現状では目視により行われているため、その色の差異がはっきり結果に現れないが、機器により波長等の測定を行うことで、ある程度定量的な調査結果を得られる可能性がある。

また、溶出速度実験では、同一条件下での実験でも、時期により結果が大きくばらつくことが明らかとなっており、こうしたばらつきを最小限とする実験方法が求められている。また、溶出速度については、実際の現地での溶出速度を把握するために、現地において溶出実験を実施している湖沼も見られる。しかしながら、現状では十分な調査方法は確立できておらず、今後も継続して現地の状況を再現できるような溶出実験手法を開発することも重要と考えられる。その際には、連続データを得ることのできる自動監視なども有効な手法となる可能性がある。

(3)底質調査手法の各論

底質性状としての有機物含有量の指標として、これまではCODを把握してきたが、近年はTOCが注目されつつある。こうした動向も踏まえて今後の調査計画を立案する必要がある。

(4)底質調査結果の管理・活用

底質調査結果は、水質調査結果に比較して既往データが十分に管理、活用されていない状況にある。底質調査結果はもちろんのこと、底泥採取時の状況が分かるような野帳等についても、情報を管理し、活用していく必要がある。

また、底質調査結果の水質シミュレーションモデルへの適用については、今まで、底質は水質への栄養塩回帰の要素として取り扱われてきた。今後もそれには変わらないが、底泥そのものが変化するような底泥モデルを開発中の湖沼もあり、今後の動向が注目される。

第3章の参考文献

- 1) 大手信人 (2004) : 森林収集水域の生物地球学 - 水質形成と流出 - , 水環境学会誌, 27, pp.584-590
- 2) 海老瀬潜一 (2001) : 河川の降雨時流出水質について、Vol.12、(財)河川環境管理財団 河川水質勉強会講演集
- 3) 國松孝男 (1983) : 汚水の農地への還元利用 - その理論と実際 (農業土木学会畑地灌がい研究部会編) pp31-62、畑地農業振興会
- 4) 田淵俊雄他編者 (1998) : 清らかな水のためのサイエンス, 農業土木学会, pp.115
- 5) 田淵俊雄 (2000) : 湛水土壤系での窒素除去について, 応用水文, 13, pp.35-43
- 6) 加藤亮・鹿崎隆広・黒田久雄・中曽根英雄 (2006) : 自然流下型実験圃場の窒素除去, 農業土木学会論文集, 244, pp. 659-663
- 7) 田淵俊雄 (2006) : 水田窒素除去機能の定量化への試み, 農土誌, pp.703-706
- 8) 志村もと子、田淵俊雄 (2003) : 養豚地域における降雨増水時の流出窒素負荷量の変動, 農土誌, No.225, pp.703-706
- 9) 國松孝男・村岡浩爾編 (1989) : 河川汚濁のモデル解析、技報堂出版
- 10) 鶴木啓二・長澤徹明・井上京・山本忠男 (2002) : 農業流域における融雪期の水質環境と土地利用, 水文・水資源学会誌, 4, pp. 391-398
- 11) 平成 15 年度 県単河川調査及び河川環境整備合併委託 (印旛沼流域水循環健全化検討) 報告書 千葉県千葉土木事務所
- 12) 呉修一、山田正 (2004) : 単一斜面における水質ハイドログラフ形成過程に関する研究、水工学論文集、第 48 号、p55-60.
- 13) 呉修一、北村知里、江花亮、山田正 (2005) : 小流域における水質ハイドログラフの形成過程に関する研究、水工学論文集、第 49 回、p157-162.
- 14) 呉修一、劉金双、江花亮、山田正 (2006) : 小流域における水質ハイドログラフの形成過程および推定方法に関する研究、水工学論文集、第 50 回、p349-354.
- 15) 平成 17 年度 霞ヶ浦汚濁負荷流入特性検討業務報告書
- 16) 藤田光一、伊藤弘之、小路剛志、安間智之 (2005) : 水環境問題解決への水物質循環モデル適用の試みとその課題、河川技術論文集、第 11 巻、pp.59-64.
- 17) 佐藤徳人、一条正憲 (2005) : 低温水を用いた水質改善効果の検討
- 18) 細川恭史、三好英一、堀江毅 (1981) : 栄養塩溶出速度の温度・DO 依存性について、港湾技研資料 (運輸省港湾技術研究所) No.405, pp.1-39.
- 19) 井上徹教、中村由行、御子神学、山室真澄、神谷宏 (1995) : 底泥からのリンの溶出速度に関する実験的研究、土木学会第 50 回年次学術講演会, pp.900-901.
- 20) 鈴木穰、阿部千雅 (2006) : 底泥 - 水間の物質移動に関する調査、土木研究所成果報告書 (平成 17 年度), 382-422.
- 21) 日本海洋学会編 (1986) : 沿岸環境調査マニュアル〔底質・生物篇〕、恒星社厚生閣
- 22) 株式会社環境シミュレーション研究所 WEB (<http://www.esl.co.jp/04SS/SS10.htm>)
- 23) (社) 底質浄化協会 (2003) : 底質の調査・試験マニュアル
- 24) (財) ダム水源地環境整備センター (2006) : 「第 4 回渡良瀬貯水池水質改善検討委員会」資料

その他の参考となる文献

- 25) H. L. Golterman (2004) The Chemistry of Phosphate and Nitrogen Compounds in Sediments. Kluwer Academic Publishers
- 26) P. E. O Sullivan & C. S. Reynolds (2004) The Lakes Handbooks Volume 1. Blackwell Publishing
- 27) G. D. Cooke, E. B. Welch, S. A. Peterson and S. A. Nichols (2005) Restoration and Management of Lakes and Reservoirs. Taylor & Francis