

8. 解析モニタリング 2

水環境モニタリングの最適化に関する解析モニタリング

-琵琶湖における水質モニタリング地点最適化の方法論に関する研究-

佐藤祐一・原口和也¹⁾・岡本高弘・北川典孝²⁾・古角恵美

要約

琵琶湖の水質モニタリング地点は単に平面的にメッシュに切った地点設定をしているため、琵琶湖の水質状況を的確に把握できていない可能性がある。本研究では、湖沼を中心とした水質モニタリング地点の空間的な最適配置を決定する方法論として、モニタリングの多様な目的を明示的に考慮し、それらを価値関数により統合化して多目的最適化を行う手法を提案し、それを琵琶湖に適用した。その結果、特にモニタリング地点の継続性に関する重みが大きいことが影響して、地点数を減らすとそれにしたがって目的関数値が悪化すること、20 地点まで減らすと急激に目的関数値が悪化することなどが明らかになった。このことは、地点数は極力減らすべきではないこと、また減らす場合でも 30 地点は維持すべきことを意味している。また 30 地点まで削減するとした場合、18A の南東や 14A の南東、15C の南西には、現行のモニタリング地点ではないにもかかわらずモニタリング地点として望ましいと判断される地点が複数存在していることから、こうした水域は優先的に新たなモニタリング地点の設置を検討すべき場所であると考えられた。そこでこれら 3 地点について、2009 年度冬期より四季における実証調査を行い、それらを追加することによる水質面的分布推定の違いや本研究で提案した手法の特徴などを明らかにした。

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

全地球上の水のうち、人間が使いやすい河川・湖沼の水はわずか 0.01% であり、その中で湖沼の水は 98% 程度を占める (The United Nations, 2006)。今後人口の増加や水需要原単位の増加により、2025 年には世界人口の 47% が水ストレスにさらされるとも言われており (マルク・ド・ヴィリエ、2002)、湖沼の水文・水質状況を定期的にモニタリングし、地域への適切な配分や水質改善のための対策等に活用することは国際的に喫緊の課題である。

日本においても、琵琶湖は滋賀県および近畿 1,400 万人の生存と経済的発展のための重要な淡水資源である反面、人間活動の影響を非常に受けやすく、その保全と利活用には河川など他の水資源とは異なる対応が必要となる。現在の琵琶湖の水質モニタリングの体制 (頻度・地点・分析項目等) は、1979 年に始まって以来ほぼ同様の形で進められてきているが (図 1)、これまで以下のような課題が指摘されている (滋賀県琵琶湖環境部、2005)。

- ① 環境基準等の水質評価の枠組みによる、表層での COD、TN、TP 等各種項目の濃度測定を主眼としたものであるため、必ずしも水質形成機構の解明に有効に寄与するようになっていない
- ② 水環境を巡る物質収支を把握していないことから、流域における汚濁負荷削減対策と水質の関係が把握で

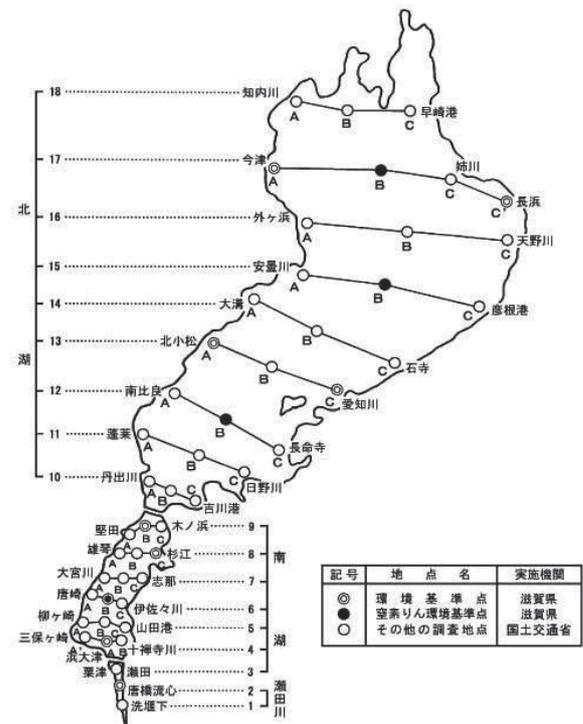


図 1 琵琶湖の水質モニタリング地点

きておらず、適切な対策立案と実施、対策の効果の評価に対して十分な活用ができていない

- ③ 環境基準点 11 地点に対し、全体で 47 地点による定期的な水質調査を実施しているが、単に平面的にメッシ

1) 石巻専修大学理工学部 2) 滋賀県高島環境・総合事務所

ュに切った地点設定をしているため、琵琶湖の水質状況、さらには水環境状況を的確に把握するといった視点から現在のモニタリング地点および数が適切であるかどうかの検証がなされていない

このことにより、琵琶湖の水質形成機構の解明や物質収支の把握などの観点から現在のモニタリング体制の評価を行い、より効果的・効率的なモニタリングのあり方について検討することが必要である。

そこで本研究では、湖沼を中心とした水質モニタリング地点の空間的な最適配置を決定する方法論を提案し、それを琵琶湖に適用することを目的とする。また新たに観測することが望ましいと考えられた地点については、四季における実証調査を行い、それらを追加することによる水質面的分布推定の違いや本研究で提案した手法の特徴などを明らかにする。

1.2 既往研究

水質モニタリングの時間的・空間的配置の最適化に関する既往研究としては、松岡ら(1983)が広範にレビューを行っている。これによれば、

- ① 観測データの検証が中心の「モデルを使用しないもの」
- ② データ間の独立性を仮定するか、時間的・空間的相関を考慮する「統計モデルを使用するもの」
- ③ フィルター理論等の「物理モデルを使用するもの」

の3つに大別される。湖沼を対象とした空間的配置の研究としては、松岡ら(1983)が霞ヶ浦を対象として統計的内挿法により最適監視地点位置を求めたもの、藤原ら(1985)が琵琶湖南湖を対象としてスプライン法により削減可能測定点を求めたものなどがある。

しかしながらこれらのほとんどは、水質の推定分散や面的分布の再現性など、水質値の推定精度を論じたものであり、実際にモニタリング地点検討の際に重要となる利水目的の監視や過去からのモニタリングの継続性、地点配置のバランスなど多目的な要素を考慮してモニタリング地点の最適配置を検討したものは、筆者らの知見の範囲では存在しない。

本研究では多目的を考慮したモニタリング地点の最適配置を検討する手法として、その目的を把握する手法や目的間の尺度の統一化、それらを考慮した最適な地点配置の導出方法などについて検討するものとする。

2. 水質モニタリング地点最適化の方法

本研究で提案する水質モニタリング地点最適化の方法は、以下の3つのプロセスにより構成される。

- ① 水質モニタリングの目的の整理と指標の抽出

- ② 価値関数決定のアンケート実施

- ③ 多目的最適化の実施

以下では各項目についてその方法の詳細と、琵琶湖において実施した調査内容等について述べる。

2.1 水質モニタリングの目的の整理と指標の抽出

水質モニタリングに関する多様な目的を把握するためには、調査担当者などの関係者にヒアリングを行い、目的を体系的に整理することが必要となる。しかし定期的なモニタリングは法で定められた事項として行政で実施されていることがほとんどで、対象水域の特性に応じた目的が体系的にまとめられていることは少なく、またまとめられていても、本来把握したい事項からすると現状のモニタリングでは不十分であることも多いと考えられる。

そこで調査担当者に個別にヒアリングを実施するのではなく、関係者が集まってブレインストーミングを行い、新しい着眼点を掘り起こす方法論であるKJ法(川喜田、1967)を採用する。

一方、こうして整理されたモニタリングの目的は定性的な表現であることがほとんどであり、モニタリング地点配置の適切さを定量的に把握するためには、これらを測る指標を抽出する必要がある。したがって、目的と指標の関係をマトリックスで整理しつつ、目的の達成を測る指標の抽出を行う。

琵琶湖を対象とした調査としては、主に環境基準点の定期モニタリングを実施する滋賀県(琵琶湖再生課(現・琵琶湖政策課)・琵琶湖環境科学研究センター)の調査担当者6名と、主に環境基準点以外の地点の定期モニタリングを実施する国土交通省琵琶湖河川事務所・(独)水資源機構の調査担当者4名に対し、それぞれKJ法による目的の把握を行った(それぞれ2008年6月と7月に実施)。その後、その目的の達成を測るための指標の抽出を行った。

2.2 価値関数決定のアンケート実施

2.1により抽出された指標 i ($i = 1, 2, \dots, m$)の評価値を x_i としたとき、 x_i は i により単位が異なるため、多様な目的を総合的に評価するためには、共通の尺度への変換が必要である。この方法として価値関数を用いる方法があり、これは評価値 x_i を何らかの価値関数 f_i によって価値量 v_i に変換するものである(図2)。

$$v_i = f_i(x_i) \quad (1)$$

Keeney et al. (1993)は価値関数の関数形を決定する方法として、価値中点 ($v_i = 0.5$ となる点) を回答者に直接尋ねることを提案しているが、この質問は分かりにくく正確な回答が得られない可能性が指摘されていること(佐藤ら、2004)から、本研究ではいくつかの x_i に対応する v_i の値を直接回答者に尋ねることとする。

琵琶湖に関する価値関数決定の方法としては、2.1により抽出された各指標に関し、滋賀県の技術担当職員14名(水質調査やその結果の活用に関与する7部局)にアンケートを実施した(2009年8月)。設問内容は以下の2点である。

- ① 各指標 i の評価値 x_i の事例を4つ提示し、それぞれについて5段階で評価してもらう。例えば「継続するモニタリング地点数」という指標についてであれば、現行47地点のうち40、30、20、10地点継続するという4つの事例を提示し、それぞれについて「十分継続性がある」から「全然継続性がない」までの5段階で評価してもらう(図3)。
- ② 各指標 i について、モニタリング地点を検討する際の重要性を「重み」として評価してもらう。具体的には、100点という評価を各指標に割り振り、指標間の重要性に重みをつけてもらう。

これらのアンケート結果から価値関数を設定する方法として、まず5段階の評価は、価値量 v_i の0、0.25、0.5、0.75、1に対応させ、14名分のデータとの二乗誤差が最小となるよう関数形を決定した。また指標の重みについては、合計100点の評価を全て1/100にし、次節で述べる指標の総合化の際に利用した。

2.3 多目的最適化の実施

2.2により、価値量 v_i の次元がどの項目も同一にできれば、これと重み w_i から総合評価値 V が次式で求められる。

$$V = F(w_i, v_i), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

F の関数系は様々な形が考えられるが、最も簡単な線形和によって表せば以下ようになる。

$$V = \sum_{i=1}^m w_i v_i, \quad \sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (3)$$

この V を最大化するようなモニタリング地点の配置 S を求めることが目的であるが、制約条件として、以下の3つを考慮する。

- ① モニタリング候補地点の集合を $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ とする。

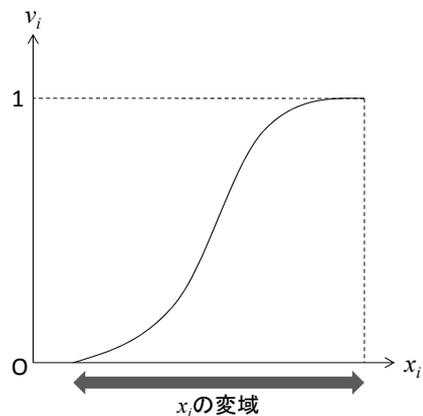


図2 価値関数の例

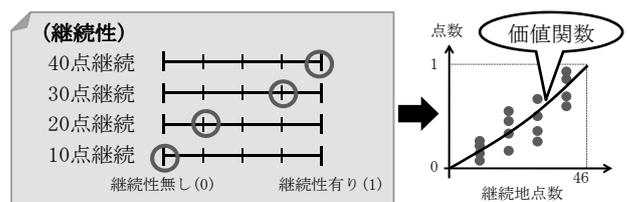


図3 価値関数の関数形を決定するアンケートの例

- ② モニタリング地点の合計数を一定値 c とする(これは予算制約等から決められるものとする)。
- ③ 重要な地点では調査を継続することが強く望まれると考えられ、そのような候補地点の集合を S_0 とする。これより、モニタリング地点の最適配置問題は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} \max \quad & V = \sum_{i=1}^m w_i v_i \\ \text{subject to} \quad & S_0 \subseteq S \subseteq P, \quad |S| = c \end{aligned} \quad (4)$$

この問題を解く方法として、本研究では反復局所探索法(iterated local search: ILS法)(柳浦ら、2001)に基づいた以下のアルゴリズムを与える(Haraguchi et al., 2010)。このアルゴリズムは T 回の局所探索(local search: LS)を行い、探索中に得られた最良の解を出力する。1回のLSでは、適当な初期解 $S \subseteq P$ から始め、その近傍内に $V(S') > V(S)$ を満たす改善解 $S' \subseteq P$ が存在すれば $S' \leftarrow S$ と移動する操作を、近傍内に改善解が存在しなくなるまで反復する。

パラメータ $\delta \in N$ を用いて、解 S の近傍 $N_\delta(S)$ を次のように定義する: 任意のサンプル点 $p_j \in S$ を、マンハッタン距離が δ 以内のメッシュに動かすことで得られるすべての解の集合(すなわち δ は近傍のサイズを制御する)。近傍内の解はランダムな順序で探索し、改善解 $S' \subseteq P$ を発見すればすぐに移動するものとする。最初のLSでは、サイズ c の適当なサンプル点集合を初期解とする。2回目以降のLSでは、それまでの探索で得られた最良の解(暫

定解) $S_{opt} \subseteq P$ を変形することによって得られる解を初期解とする。

上記アルゴリズムを琵琶湖に適用する際、以下のように条件を設定した。

- ① モニタリング候補地点の集合 P を、琵琶湖表層を 1km メッシュに区切った 677 メッシュとし ($n=677$)、モニタリング地点は各メッシュの表層から高々 1 つしか選ばれないものとした (なおこの条件により、現在モニタリングが行われている 47 地点のうち 2 地点については同一メッシュに含まれるため、解析上は現行の観測メッシュ数が 46 として扱われることになる)。
- ② 継続調査が望まれるモニタリング地点集合 S_0 については、現行の環境基準点と水深別調査を実施している合計 12 地点とした。
- ③ モニタリング地点の合計数 c は、40、30、20 地点の 3 パターンについて検討した。
- ④ 考慮する水質項目としては、琵琶湖の生態系形成の上で最も重要であると考えられる TP を対象とした。また各メッシュにおける年間平均値のみを評価の対象とした。
- ⑤ $\delta = 3$ とし、 $T = 10$ 回の LS を初期解を変えて 50 回繰り返した。

3. 琵琶湖への適用結果と考察

3.1 水質モニタリングの目的と指標

KJ 法により水質モニタリングの目的を整理した結果の一例を図 4 に示す。国が近畿 1,400 万人の水がめとしての水資源の確保と水道用水源としての監視を目的として観測を行っているのに対し、県ではその他生物多様性や親水利用、経済的利用など琵琶湖の多様な価値の向上を目的として観測を行っているという特徴の違いが見られた。一方で、「水質の現状把握」「解析」「問題発見」「対策(計画)」「実行」「対策効果把握」などからなる PDCA サイクルの中で観測を位置づけていることが共通点として浮かび上がった。

次に、提示された水質モニタリングの目的からその達成を測る指標を抽出するため、8 つの指標を考え、目的との関連性を整理した (表 1)。水質モニタリングの目的と指標は必ずしも 1 対 1 対応するものではなく、1 つの指標が複数の目的を表現したり、1 つの目的の達成を測る指標が複数存在したりすることがほとんどであるが、表 1 によれば、図 4 で提示された目的は概ね 8 つの指標で測っていくことができると考えられる。しかしながら本研究では、琵琶湖表層の TP のモニタリング地点配置を検討するため、「観測頻度」「観測項目」「鉛直方向の観測」の 3 指標については指標として採用せず、残りの 5 指標について検討を行うものとした。

5 指標を数値化する手法については以下の通りとした。

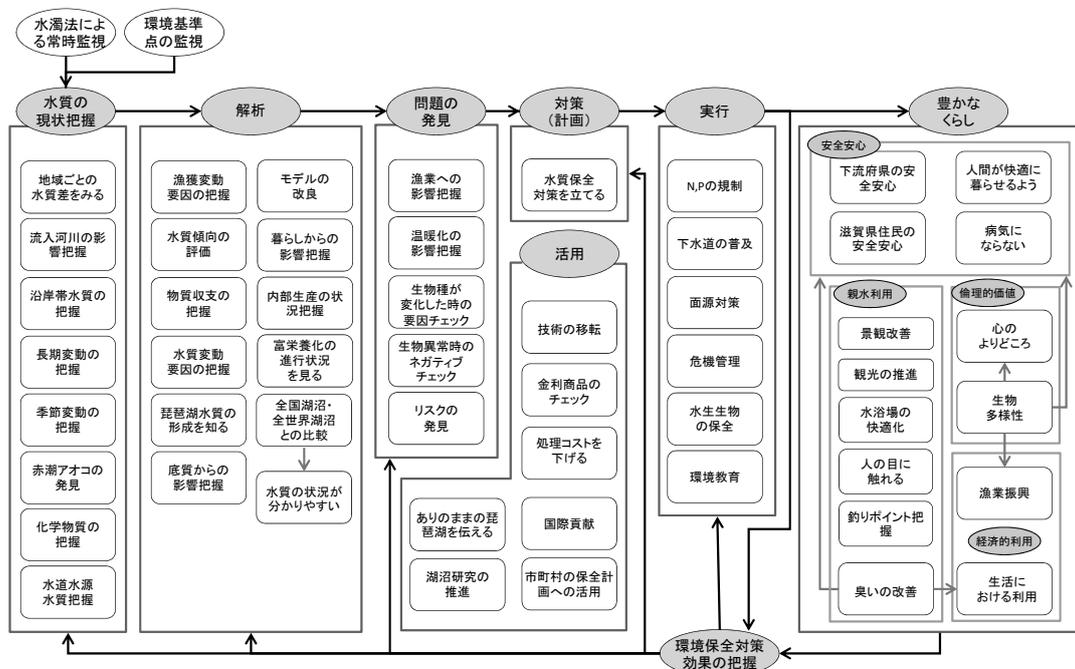


図 4 水質モニタリングの目的の整理 (滋賀県調査担当者 6 名)

① 面的分布の再現性

限られた地点におけるモニタリングの結果から対象とする水域全体の面的分布を推定するために、一般に何らかの内挿補間が行われる（例えば、巾乗型移動平均法、スプライン法、Kriging 法など（松岡ら、1983））。しかし、補間された結果が実際の分布をどの程度再現できているか

は、実際の分布が分からなければ評価することができない。藤原ら（1985）はスプライン法により推定された面的分布からできるだけ誤差が小さくなるようなモニタリング地点を間引く方法を採用しており、現在の地点を削除していく上では有効であるが、新たなモニタリング地点の設置を検討する際にはこうした手法を用いることができない。

表1 水質モニタリングの目的とその達成を測る指標の関連

モニタリングの目的		提示されたWS		目的の達成を測る指標(○:指標の向上が目的の達成につながる)							
項目	内容	県	国	面的分布の再現性	モニタリング地点の継続性	水道水源における観測	沿岸帯における観測	汚濁地点における観測	観測頻度	観測項目(リスク物質の監視など)	鉛直方向の観測
水質の現状把握	地域ごとの水質差をみる	○		○							
	沿岸帯水質の把握	○					○				
	長期変動の把握	○	○		○						
	季節変動の把握	○							○		
	赤潮・アオコの発見	○					○	○			○
	化学物質の把握	○						○	○	○	
	水道水源水質把握	○	○			○					
	連続観測による日変動の把握		○						○		
解析・影響把握	流入河川の影響把握	○					○				
	漁獲変動要因の把握	○		○	○		○	○	○	○	○
	水質傾向の評価	○			○						
	物質収支の把握	○		○	○		○	○	○		
	水質変動要因の把握	○		○	○		○	○	○		
	琵琶湖水質の形成を知る	○		○	○		○	○	○	○	
	底質からの影響把握	○					○				○
	モデルの改良	○		○			○	○	○		○
	暮らしからの影響把握	○					○	○			
	内部生産の状況把握	○		○	○		○		○		
	富栄養化の進行状況を見る	○		○			○	○	○		
	全国湖沼・全世界湖沼との比較	○		○	○		○	○	○	○	○
	点源・面源汚染の影響把握		○				○	○	○	○	○
	生物・植物プランクトンへの影響を見る		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	環境の変化を見る		○	○	○	○	○	○	○	○	○
因果関係を探る		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
CODとBODの乖離原因を探る		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
問題の発見	漁業への影響把握	○		○	○		○	○	○	○	○
	温暖化の影響把握	○			○				○		
	生物種が変化したときの要因チェック	○		○	○		○	○	○	○	○
	生物異常時のネガティブチェック	○		○	○		○	○	○	○	○
	リスクの発見	○				○		○	○	○	○
対策の計画・実行・効果把握	N,Pの規制	○		○	○	○	○	○			○
	下水道の普及	○		○	○	○	○	○			○
	面源対策	○		○	○	○	○	○			○
	危機管理	○				○	○	○	○	○	
	水生生物の保全	○		○	○	○	○	○	○	○	○
	環境教育	○				○	○	○	○	○	○
	琵琶湖開発施設(湖岸堤)の水質への影響把握		○				○				
	琵琶湖総合開発の水質への影響把握		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	適正な水管理計画の検討		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	対策検討の基礎データ		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	浄化施設の効果を見る		○	○	○	○	○	○	○	○	○
【目標】豊かな暮らし・水資源を守る											

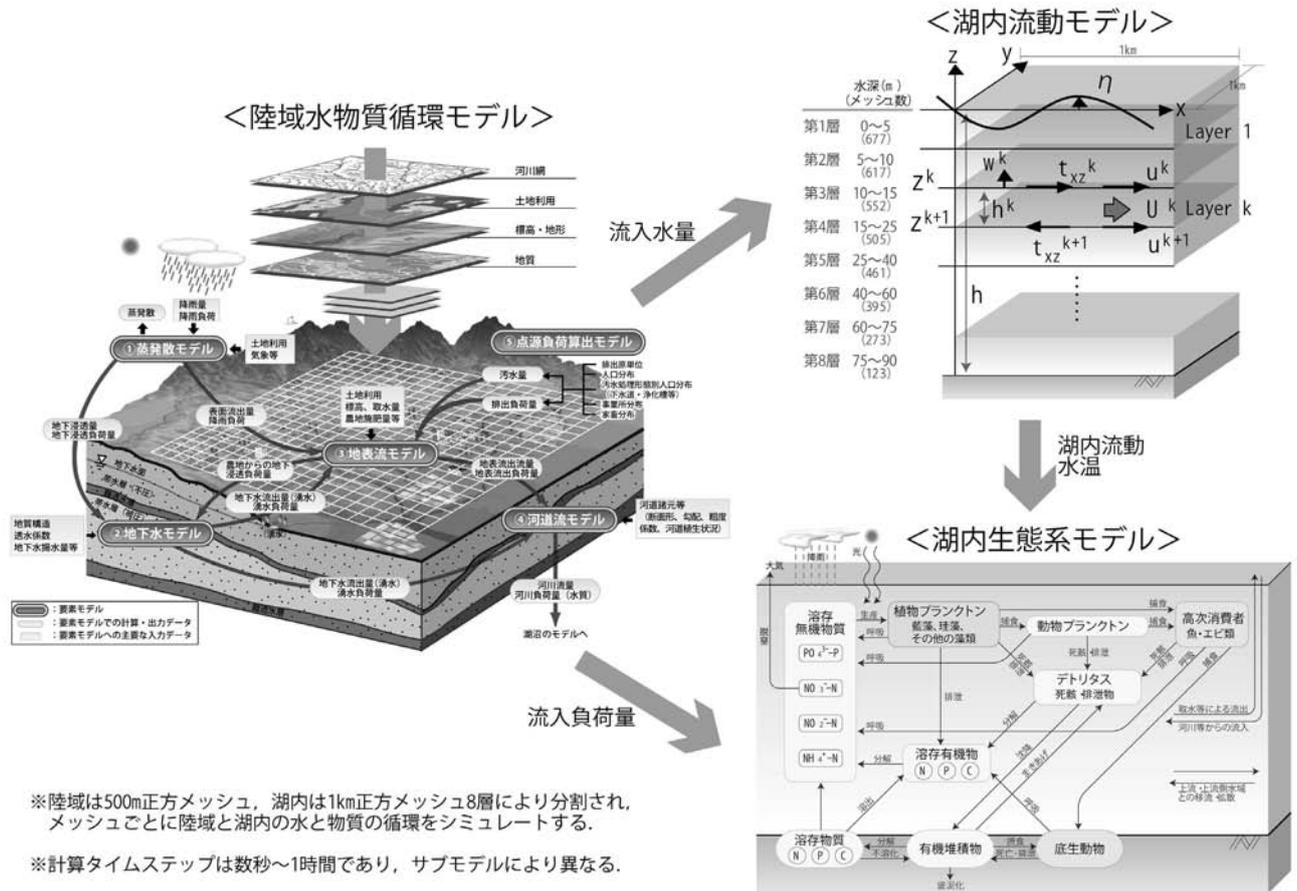


図5 琵琶湖流域水物質循環モデルの概要

そこで本研究では、実際の分布として「琵琶湖流域水物質循環モデル」(図5)(佐藤ら、2009)の2004年度におけるTPの出力結果を用い、琵琶湖や多数の水域で適用事例のある張力付きスプライン法(大西、1975)で推定された補間値との誤差を、面的分布の再現性を表す指標とした。具体的には、以下の式により表現する。

$$x_1 = \sum_{p_j \in P} (d^*(p_j) - d(p_j))^2 \quad (5)$$

ここで、

$d^*(p_j)$: 地点 p_j における実際の水質値(琵琶湖流域水物質循環モデルの出力値)

$d(p_j)$: 地点 p_j において内挿補間された水質値

② モニタリング地点の継続性

現在モニタリングが行われている46メッシュのうち、継続してモニタリングが実施される地点数 x_2 を、継続性を表す指標とした。

③ 水道用水源における観測

2.2で実施したアンケートの結果より、水道用水源の監視を目的とした場合、取水口から平均300m以内でモニタリングを実施する必要があると判断された。このことより、

現在琵琶湖を直接の取水源とする14の浄水場が取水しているメッシュと同一メッシュにおいてモニタリングが実施される地点数 x_3 を、水道用水源における観測を表す指標とした。

④ 沿岸帯における観測

ここでは陸域に接する湖内のメッシュを沿岸帯と定義し(合計214メッシュ)、モニタリング地点のうち沿岸帯にある比率 x_4 を、沿岸帯における観測を表す指標とした。

⑤ 汚濁地点における観測

2.2で実施したアンケートの結果より、TPが平均0.011mg/L以上である場合に汚濁されていると判断された。このことより、TPが0.011mg/L以上のメッシュを汚濁地点と定義し、モニタリング地点のうち汚濁地点にある比率 x_5 を、沿岸帯における観測を表す指標とした。

3.2 各指標の価値関数

2.2で実施したアンケートの結果より、5つの指標に対応する価値関数を以下のように設定した(図6)。

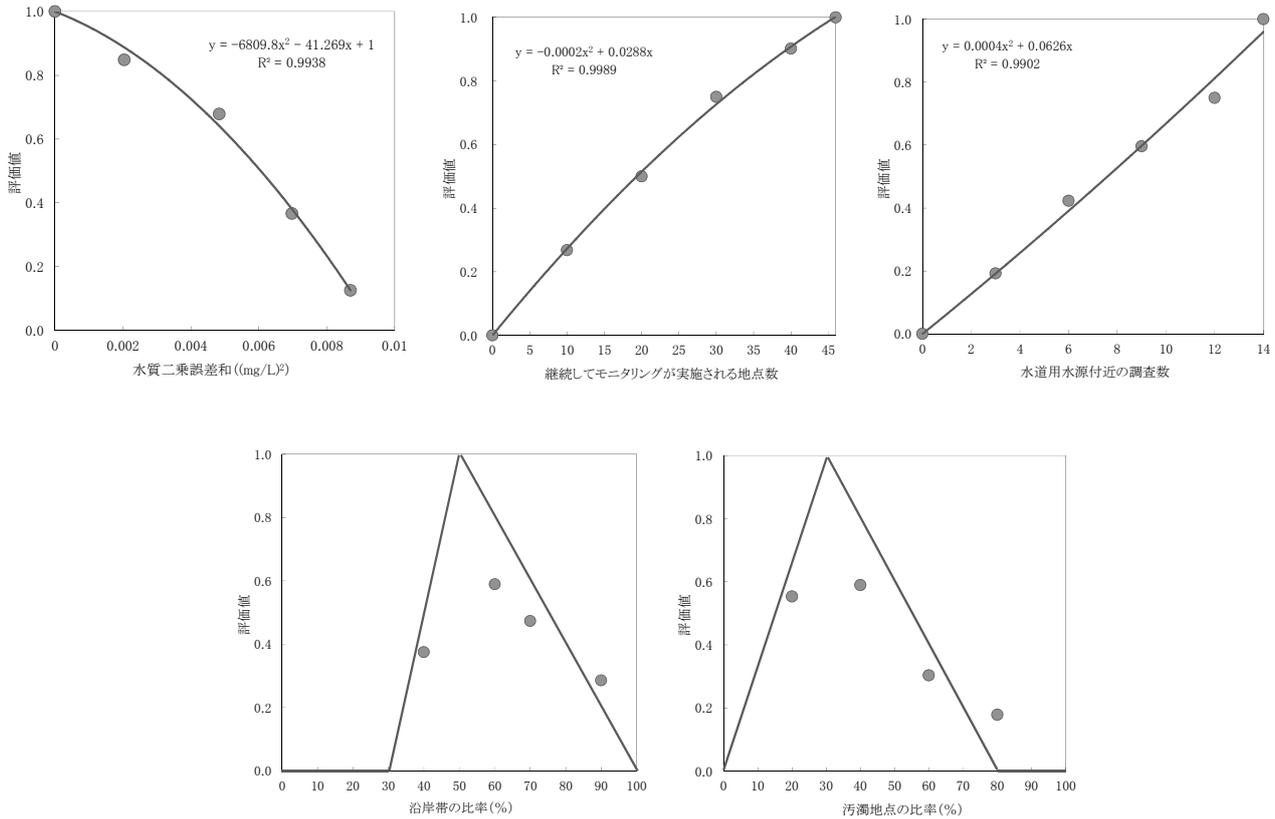


図6 5つの指標に対応する価値関数

- ① 面的分布の再現性
 $v_1 = -6809.8x_1^2 - 41.269x_1 + 1$ (6)
- ② モニタリング地点の継続性
 $v_2 = -0.0002x_2^2 + 0.0288x_2$ (7)
- ③ 水道用水源における観測
 $v_3 = 0.0004x_3^2 + 0.0626x_3$ (8)
- ④ 沿岸帯における観測
 $x_4 < 30$ のとき $v_4 = 0$
 $30 \leq x_4 < 50$ のとき $v_4 = 0.05x_4 - 1.5$ (9)
 $50 \leq x_4$ のとき $v_4 = -0.02x_4 + 2$
- ⑤ 汚濁地点における観測
 $x_5 < 30$ のとき $v_5 = x_5 / 30$
 $30 \leq x_5 < 80$ のとき $v_5 = -0.02x_5 + 1.6$ (10)
 $80 \leq x_5$ のとき $v_5 = 0$

また各指標に対する重みの結果は図7の通りとなり、モニタリング地点の継続性を最も重視し、次に面的分布の再現性を重視する傾向が明らかになった。

3.3 多目的最適化の結果

モニタリング地点の合計数 c を 40、30、20 地点とした場合の最適配置について、現行の 46 地点の場合と指標値を比較した結果を表2に示す。3.2に示したように、継続性の重みが大きいため、地点数を減らした場合には総合評

価値も減少する傾向が見られるが、面的分布の再現性については 30 地点まで減らしても現況以上により結果が得られることが明らかになった。

またモニタリング地点の最適配置の結果と、指標値を価値関数から評価値に直し、分かりやすいよう 100 点満点で表示したものを図8に示す。現行の 46 地点から 40 地点に減らした場合、南湖のモニタリング地点が優先的に削減さ

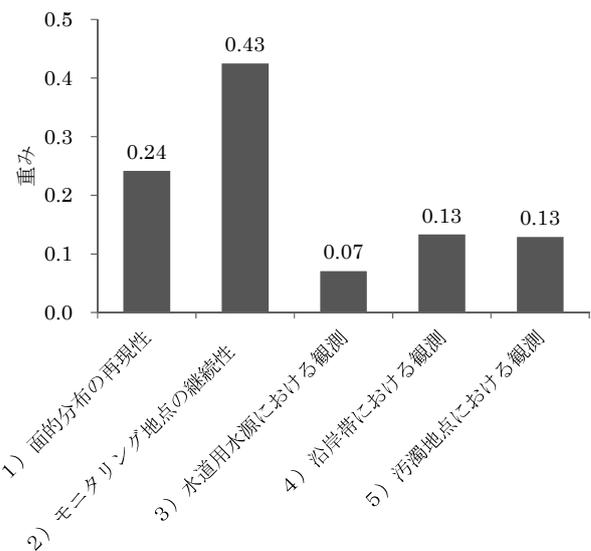


図7 5つの指標の重み

表2 モニタリング地点数ごとの最適配置の指標値

地点数	総合評価値	二乗誤差	継続(個)	水源(個)	沿岸帯(%)	汚濁地点(%)
20	0.716	0.00222	20	2	50.0	30.0
30	0.808	0.00167	28	4	50.0	30.0
40	0.854	0.00151	33	5	50.0	30.0
現況(46地点)	0.875	0.00173	46	4	63.0	37.0

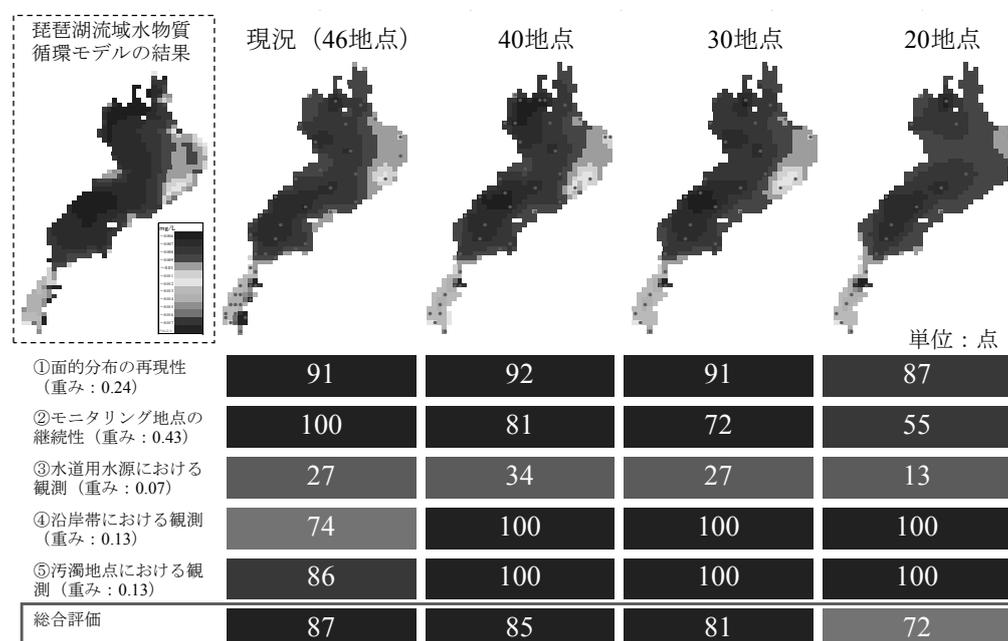


図8 モニタリング地点数ごとの最適配置と評価値
(カラー版は5ページ参照)

れ、一方で北湖の汚濁地点や水質のよい地点に密に観測点が配置される結果となった。また地点数を20地点まで減らすと、総合評価が急激に悪くなることが分かった。水道用水源における観測は、重みが小さいため最適化の過程でもあまり重視されず、いずれのケースでも得点が低い結果となった。

3.4 考察

3.3の結果から、現行モニタリング地点の特徴や今後の地点配置のあり方として以下のようなことが考察される。

- ① 地点数を40程度に削減した場合に、南湖のモニタリング地点数が現行の18から9に半減することから、地点数を削減する際には南湖から優先的に検討することが望まれる。このことは表2より、現行のモニタリング地点が沿岸帯や汚濁地点においてやや多いことも関連している。
- ② 水道用水源における観測が少ないことも特徴的であり、水道用水源監視の目的からは現行のモニタリング地点は十分機能していない可能性がある。しかしながら、取水された水の分析は別途浄水場内で定期的に実

施されていることや、水道用水源における観測の重みが相対的に低いことから、公共用水域での観測においては他の目的に注力した配置となること自体は合理的である。

- ③ 継続性も考慮した総合評価では現行のモニタリング地点配置の得点が最も高く、費用制約等の要請がない限りは現状を維持するのが望ましい。また20地点まで減らすと急激に目的関数値が悪化することから、仮に減らす場合でも30地点は維持すべきことを意味している。

今後モニタリング地点を仮に30地点程度まで削減する場合、地点配置は図8にある形とすることが一案ではある。しかし、最適な地点配置の算出には様々な前提が置かれていること、また若干の総合評価の違いで異なる地点配置も存在しうることから、実際の地点配置の検討の際には、案を一意に提示するよりも、本研究では検討できなかった個別の事情なども考慮できるよう、よりファジーな形で案を提示することが望まれる。

そこで、今回実施した 50 回の繰り返し計算において、各メッシュがモニタリング地点として選択された回数から、新たにモニタリング地点を設置することが望ましい水域、逆に優先的に削減することが望ましい地点などを明らかにすることを試みた。結果を図 9 に示す。現行のモニタリング地点であっても、40 回以上の高い確率で選択され

ている地点もあれば、ほとんどもしくは全く選択されていない地点もある。一方で、18A の南東や 14A の南東、15C の南西には、現行のモニタリング地点ではないにも関わらず選択されるメッシュが固まって存在していることから、こうした水域は優先的に新たなモニタリング地点の設置を検討すべき場所であると判断される。

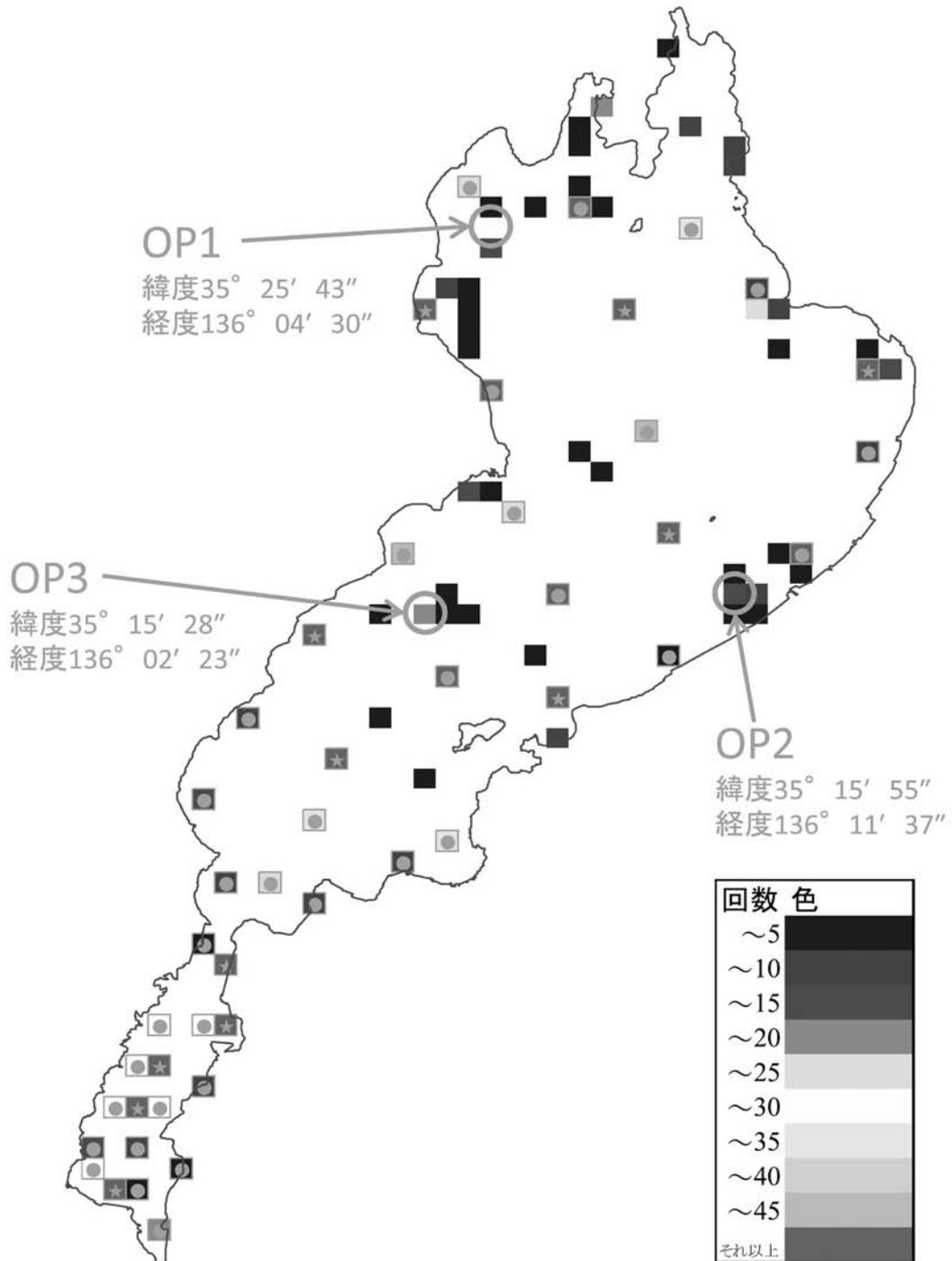


図 9 50 回の繰り返し計算のうちモニタリング地点として選択された回数（★は環境基準点もしくは水深別調査が実施されている地点、●はそれ以外の現行モニタリング地点）（カラー版については佐藤ら（2011）を参照）

表 3 実証調査の結果

月日 地点 採水時刻	2010/3/15			2010/6/7			2010/9/6			2010/12/6		
	OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3
全水深 (m)	82.7	13.6	67.3	85	13.1	69.3	25	13.9	68.5	81.3	12.6	66.7
透明度 (m)	6	6.9	6.4	6.4	6.5	6.4	8.4	8.6	9.7	8.5	7	7.7
水温 (°C)	8.4	8.4	8.4	19.7	19.3	18.5	30.7	30.9	30.5	13.6	13.6	13.4
DO (mg/L)	12.1	12.2	12	10.6	10.7	10.7	7.8	7.9	7.9	10.1	10.4	10.1
DO (%)	103	104	103	116	116	115	105	107	105	97	100	96
COD (mg/L)	2.2	2.4	2.2	2.7	2.9	2.9	2.6	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6
TN (mg/L)	0.32	0.32	0.32	0.26	0.26	0.25	0.15	0.14	0.15	0.22	0.21	0.23
TP (mg/L)	0.008	0.009	0.007	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.008	0.004	0.004	0.004

4. 実証調査

4.1 実証調査の概要

3.4 で明らかになった新たにモニタリングを実施することが望ましい地点について、四季における実証調査を実施した。具体的な内容は以下の通りである。

地点：図 9 に示す OP1~OP3 の 3 地点

時期：2010 年 3 月、6 月、9 月、12 月の四季

調査項目：水深、透明度、水温、DO、COD、TN、TP

調査水深：表層 50cm

琵琶湖流域水物質循環モデルによるシミュレーションでは、OP1 と OP3 は水質が比較的良好な地点、OP2 は水質が比較的良好な地点にあたる。これらの地点を追加することで、仮に 30 地点まで削減した場合でもある程度の調査精度を保持できるようになるかどうかを検証する。

4.2 実証調査の結果

実証調査の結果を表 3 に示す。今回の調査結果からは、地点ごとの目立った水質の違いなどは見受けられなかった。シミュレーションでは降水時や代かき期等を含む毎時刻のデータが出力され、それを元にモニタリング地点を選んでいるが、四季だけではそのような変化が捉えきれなかったことが原因として考えられる。

4.3 新たな調査地点の意義

ここで提案し、また実証調査を行った 3 地点は、仮に 30 地点まで削減した場合に既存調査地点の他に追加することが望ましい地点である。この有用性を検証するために、下記 3 パターンの 2010 年四季 (3 月、6 月、9 月、12 月) における実測値を用いた水質の面的分布を比較した。

- ① 既往 47 地点と OP1~OP3 の合計 50 地点
- ② 既往 47 地点のうち、面的分布をできるだけ再現できるように 30 地点まで逐次地点削減
- ③ 3.4 の結果で選択確率の高い 27 地点と OP1~OP3 の合計 30 地点

ここで②は、既往モニタリング地点から効率的に 30 地点

を選択するための一手法であり、藤原ら (1985) が用いた方法と同様である。③は本研究で提案した手法を活用し、なおかつ OP1~OP3 の 3 地点を調査地点として選定する方法である。①を真の水質分布と仮定すれば、②と③による水質分布を①と比較することにより、本研究で提案した手法ならびに OP1~OP3 を追加することの意義が理解される。

②では具体的には以下の方法により逐次地点削減を行った。

STEP1：既往 47 地点における TP 濃度の四季平均値を用いてスプライン補間を行い、地点 p_j における水質値 $d^*(p_j)$ を算出する。

STEP2：任意の 1 地点を削除し、TP 濃度を用いてスプライン補間を行い、地点 p_j における水質値 $d(p_j)$ を算出する。

STEP3：式 (5) により二乗誤差和を計算する。

STEP4：削除した点を元に戻し、STEP2 に戻る。これを全ての地点について実施する。

STEP5：二乗誤差和が最小となる地点を削除する。削除後、再び STEP2~4 の手順を実施し、目標とする地点数 (今回の場合 30 地点) まで削減する。

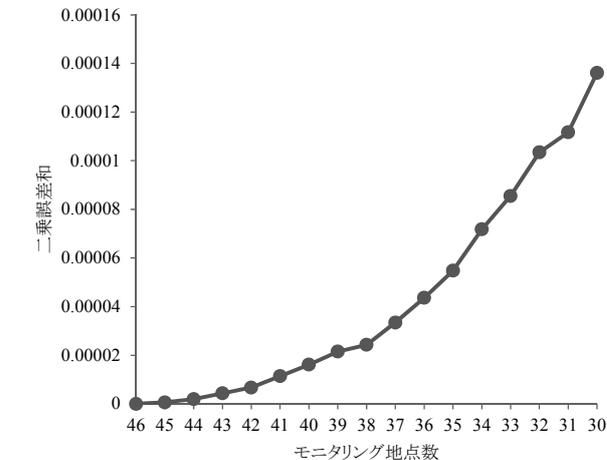


図 10 モニタリング地点数と二乗誤差和の関係

- ① 47地点+OP1~3 ② 30地点まで逐次削減 ③ 最適化上位27地点+OP1~3



図 11 各手法で設定したモニタリング地点

- ① 47地点+OP1~3 ② 30地点まで逐次削減 ③ 最適化上位27地点+OP1~3

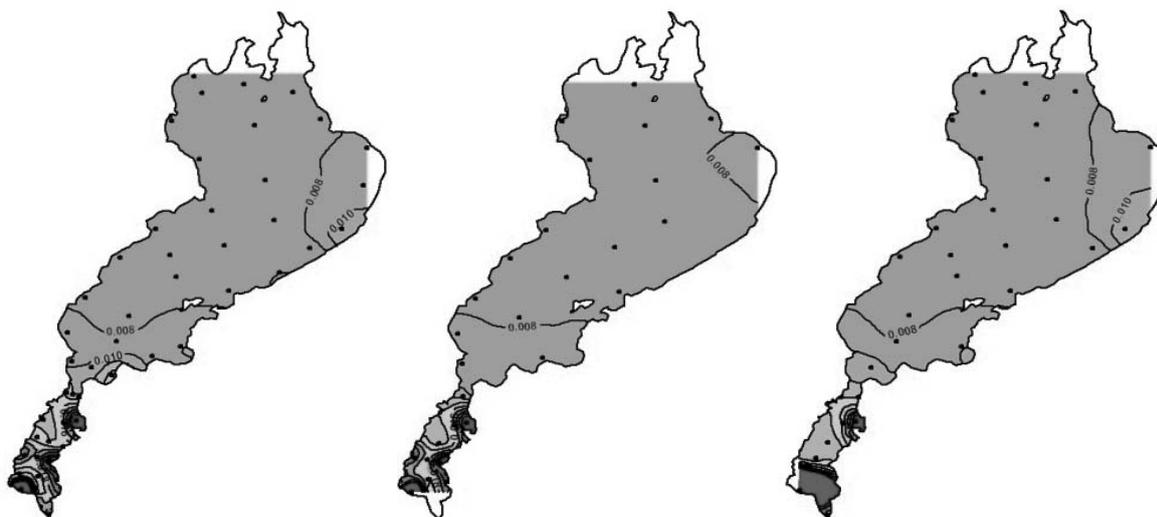


図 12 モニタリング地点配置ごとの水質面的分布の違い

このようにして選定されたモニタリング地点を図 11 に示す。②に比べ③の方が北湖に観測点の多くなる傾向があるが、これは③では水質の面的分布のみならず5つの指標に基づく多目的最適化を行ったことによるものと考えられる。

2010年四季のTP平均値を対象として、①～③の地点を用いた水質面的分布を図示したものが図 12 である。本研究で提案した③の手法では、②に比べ北湖の面的分布再現性は向上しているが、一方で南湖での再現性が落ちる。OP1

～OP3のうち、OP2は追加することで北湖東岸の水質分布の再現性が向上しており、北湖の水質分布を明らかにする上で重要な地点である可能性が示唆されたが、さらにOP1やOP3を加えることでその分南湖における再現性が犠牲になっているという見方もできる。また③で選択した27地点についても、選択確率の高いものから順にモニタリング地点として設定していったため、それらを組み合わせるときに目的関数値が必ずしも高くなるわけではないという課題もある。新たな地点の意義を確認するためには、今

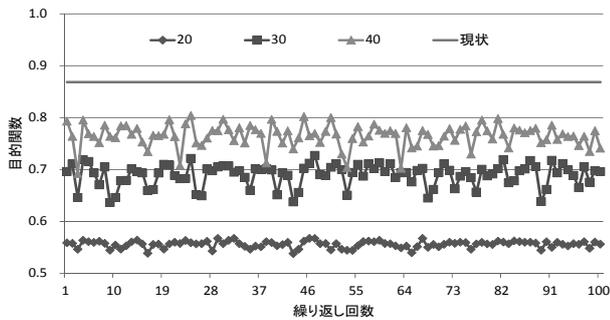


図 13 目的関数値の変化

後さらに他の時期における調査や、2004 年度以外のシミュレーション結果を用いた地点の検証などを進めることが必要である。

5. 補足的検討

5.1 目的関数の再検討

第 3 章の多目的最適化では 5 つの指標を取り上げ、それぞれに価値関数を設定していた。しかし、沿岸帯の比率や汚濁地点の比率については評価値との関係が明瞭ではなく、それぞれ 50%、30% で最大となる他は急速に評価値が減少するという不自然な価値関数となっていた (図 6)。結果として、モニタリング地点の最適化を行った場合は、それぞれ必ず 50%、30% という比率になるように地点配置が行われるという問題があった (図 8)。

そこで、これら 2 つの指標については、目的関数ではなく制約条件として扱うことで、総合評価に与える影響を緩和することにした。具体的には、沿岸帯の比率については 40~70% となること、汚濁地点の比率については 20~50% になることを制約条件とし、他の 3 指標について式 (3) による総合化を行い、モニタリング地点の最適化を行うことにした。

以上を定式化すると、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \max \quad & V = \sum_{i=1}^m w_i v_i \\ \text{subject to} \quad & S_0 \subseteq S \subseteq P, |S| = c \quad (11) \\ & 0.4c \leq |S \cap S_{coast}| \leq 0.7c \\ & 0.2c \leq |S \cap S_{pol}| \leq 0.5c \end{aligned}$$

ここで、 S_{coast} は沿岸帯にある地点の集合、 S_{pol} は汚濁地点にある地点の集合を意味する。また各指標の重みは、合計 1 の重みを図 7 の比率に基づき対象の 3 指標に割り振り、面的分布については 0.32、継続性については 0.58、水道用水源については 0.09 とした。

さらに、最適化計算の回数を増やすことで、より高い目的関数の値が得られるような地点配置を求めた。具体的には、第 3 章では局所探索の回数 $T = 10$ 回、繰り返し計算

の回数を 50 回としていたところを、 $T = 30$ 回、繰り返し計算を 100 回とすることで、精度の向上を図った。

以上により最適化計算を行った結果、モニタリング地点数を 40、30、20 地点とした場合の目的関数値の変化について図 13 に示す。計算回数を増やすことで、高い目的関数値を得る回数も増えていることが分かる。また 100 回の試行計算の結果、最もよい目的関数値を得られた分布をその地点数における最適解と考え、その目的関数値を表したものが図 14 である。沿岸帯や汚濁地点の比率を制約条件としたため、図 8 のケースと比較すると地点数に対応する最適な目的関数値は減少しているが、20 地点まで減らすと目的関数値が急激に減る傾向は類似している。各指標に関する評価値を比較してみると、水質の面的分布 (補間) については地点数 30、40 で、水道用水源については地点数 40 で現状よりもよい結果を得ることができた (図 15)。

地点配置の例として、地点数を 30 としたときの選択回数を図にしたものを図 16 に示す。これは図 9 と対応するものであり、最適化の手法を変更した場合のモニタリング地点の変化を知ることができる。これによれば、図 9 の

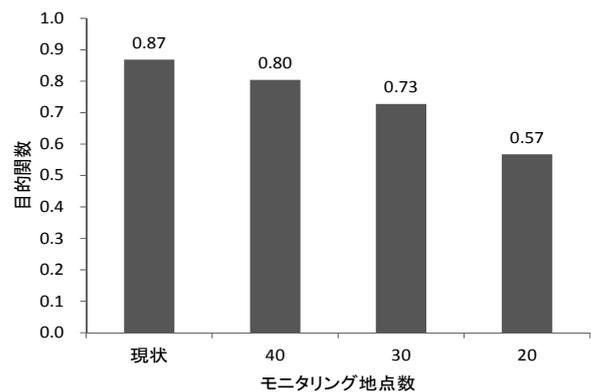


図 14 モニタリング地点数ごとの目的関数値

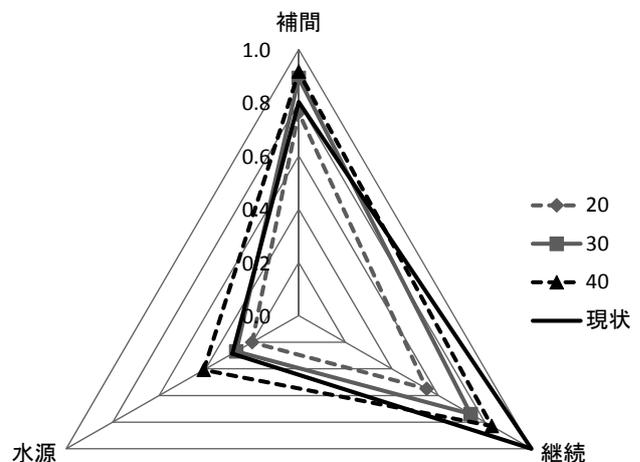


図 15 各指標の評価値の変化

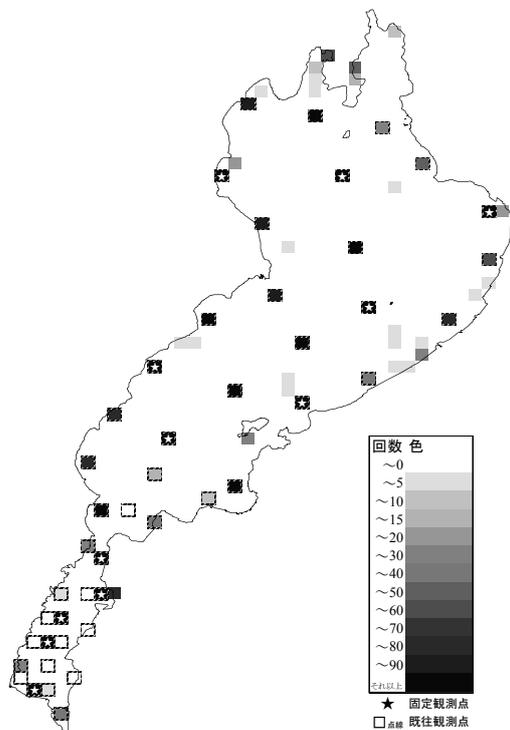


図 16 100 回の繰り返し計算のうちモニタリング地点として選択された回数 (30 地点)

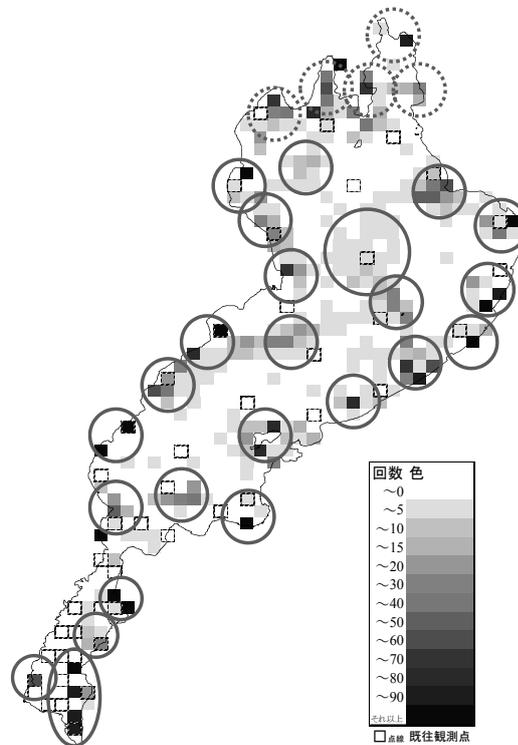


図 17 100 回の繰り返し計算のうちモニタリング地点として選択された回数 (46 地点：継続性の条件なし)

OP1 や OP3 周辺地点は本計算では選ばれていない一方、OP2 周辺については引き続き選択回数が高い地点となっていることから、新たな観測地点としての重要性が示唆される。ただし、OP2 よりもより沿岸部に選択回数の高い地点が移動していることが着目すべき点である。

5.2 継続性を考慮しない場合の最適地点

これまでの計算では、「モニタリング地点の継続性」という指標を考慮し、また環境基準点については必ず選択するという前提のもとで最適化を行っていた。しかしこれらの制約を全て外し、これまで全く観測がなされていないものとして理想的なモニタリング地点の配置を明らかにすることは、現在のモニタリング地点の特徴や課題を明らかにする上で有用であると考えられる。

そこで、5.1 において「モニタリング地点の継続性」に関する指標と、環境基準点の制約を外したケースについて最適化計算を行った。すなわち、沿岸帯における観測と汚濁地点における観測の比率に関する制約を踏まえた上で、「面的分布の再現性」「水道用水源における観測」の 2 つの指標を踏まえた最適なモニタリング地点配置を明らかにする。各指標の修正後の重みは、それぞれ 0.77、0.23 とした。

現在のモニタリング地点と比較するため、地点数を 46 とした場合について、同様に選択回数を図にしたものを図 17 に示す。図中に、選択回数の比較的多い水域を丸で囲

んでいる。北端部は琵琶湖流域水質循環モデルの精度が十分ではなく、水域ごとの濃度差が大きいため選択回数が多くなっているが、これを除外して考えても、現在のモニタリング地点と比較して以下の特徴が見られる。

- ① 沿岸帯にモニタリング地点が多い
- ② 湖心部にはモニタリング地点が少ない
- ③ 南湖にはモニタリング地点が少ない (特に西岸部)

これらのことから、もしモニタリング地点の継続性に対する重要度を下げてモニタリング地点の見直しを進めるのであれば、南湖の地点を少なくし、沿岸部により重点を置いた地点配置を行うことが一案として考えられる。

6. まとめ

本研究では、湖沼を中心とした水質モニタリング地点の空間的な最適配置を決定する方法論として、①水質モニタリングの目的の整理と指標の抽出、②価値関数決定のアンケート実施、③多目的最適化の実施、の 3 つのプロセスを提案した。またこれを琵琶湖のモニタリング地点の最適配置に適用し、以下のことが明らかになった。

- ① モニタリングの目的の達成を測る指標として、「面的分布の再現性」「モニタリング地点の継続性」「水道用水源における観測」「沿岸帯における観測」「汚濁地点における観測」の 5 つが抽出された。またこのうち、「モニタリング地点の継続性」が最も重視されることが分かった。

- ② 5つの指標とそれらの重みを考慮して多目的最適化を実施した結果、総合評価では現行のモニタリング地点配置の得点が最も高くなり、地点数を減らすとそれにしたがって目的関数値が悪化すること、20地点まで減らすと急激に目的関数値が悪化することなどが明らかになった。このことは、地点数は極力減らすべきではないこと、また減らす場合でも30地点は維持すべきことを意味している。
- ③ 現行モニタリング地点の特徴として、南湖のモニタリング地点数がやや多いこと、また水道用水源に観測が少ないことが明らかになった。
- ④ 新たにモニタリング地点を設置することが望ましいと考えられた地点（汚濁の進んだ北湖東岸部や、北湖の清澄な水域）について四季の実証調査を実施したが、シミュレーションで見られたほどの大きな水質差は見られなかった。しかし、北湖の水質分布を再現する上で、北湖東岸部にモニタリング地点を設置することの優位性は確認できた。
- ⑤ 目的関数を再検討して計算したところ、北湖東岸部の地点の重要性は改めて示唆された。また継続性を考慮しない場合の最適地点についても検討したところ、湖心よりも沿岸部によりモニタリング地点が設置されることが分かった。

今後の課題としては、まず、結果に大きく影響する琵琶湖流域水物質循環モデルの精度を高めていくことが必要である。本研究では2004年度の水質のみを対象として検討を進めたが、年度により水質分布は変わるため、より多様な年度において同様の計算を行っていくことが望まれる。また本研究では、琵琶湖表層のTPの年間平均値の分布からモニタリング地点の最適配置を算出しているが、他の水質項目やモニタリングの頻度、鉛直方向の調査についても検討が必要である。

今後より広域的・一体的な調査に向けた検討が行われる場合には、本研究の成果やその手法を応用していくことが望まれる。本研究を実施している期間にも、水生生物の環境基準点として全く新たに湖岸部で4地点が設定され、環境基準項目に1,4-ジオキサンが追加された。さらに、現在、新規項目として底層DOや大腸菌等が追加される見込みであることから、モニタリングの効率化が必要となるが、その際に、項目ごとの調査頻度や地点の見直しの判断に対して客観的な根拠を提示するために、本手法の活用もできるようにする必要がある。

7. 謝辞・引用文献

7.1 謝辞

本研究を実施するにあたり、KJ法によるモニタリング

の目的把握にご協力いただいた国土交通省琵琶湖河川事務所・(独)水資源機構・滋賀県の皆様、またアンケート調査にご協力いただいた滋賀県の皆様に感謝申し上げます。

7.2 引用文献

- 藤原正弘・宗宮功・津野洋・藤井滋穂(1985)：水質汚濁濃度分布パターンのスプライン法による推定と合理的測定点配置の検討. 水質汚濁研究, 8(2)：100-109.
- Haraguchi, K. and Sato, Y. (2010)： Sampling Site Location Problem in Lake Monitoring Having Multiple Purposes and Constraints. Journal of Operations Research Society of Japan, 53(4)：289-304.
- 川喜田二郎(1967)：発想法. 中公新書.
- Keeney, R. L. and H. Raiffa(1993)： Decisions with Multiple Objectives：66-130. Cambridge University Press.
- マルク・ド・ヴィリエ (2002)：ウォーター—世界水戦争—, 鈴木主税・佐々木ナンシー・秀岡尚子(訳). 共同通信社.
- 松岡謙・内藤正明(1983)：水質観測点の適正配置に関するシステム解析. 国立公害研究所研究報告, 48.
- 大西行雄(1975)：スプライン法を用いた2次元補間について. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 31：259-264.
- 佐藤祐一・萩原良巳(2004)：住民意識に基づく河川開発代替案の多目的評価モデルに関する研究. 土木学会環境システム研究論文集, 32：117-126.
- 佐藤祐一・大久保卓也・金再奎・小松英司・永禮英明・湯浅岳史・上原浩(2009)：琵琶湖流域水物質循環モデル(その2)モデルの構造 計算事例. 第12回日本水環境学会シンポジウム講演集：36-37.
- 佐藤祐一・原口和也・岡本高弘・北川典孝・古角恵美(2011)：多目的を考慮した琵琶湖水質モニタリング地点の最適配置. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書, 6：85-104.
- 滋賀県琵琶湖環境部(2005)：琵琶湖および流域の水環境モニタリングのあり方について.
- The United Nations(2006)：Water a shared responsibility, World Water Development Report 2.
- 柳浦睦憲・茨木俊秀(2001)：組合せ最適化～メタ戦略を中心として～. 朝倉書店.