

流動モデルによる数値解析を活用した八郎湖水質改善対策の検討

秋田県立大学 システム科学技術学部

須知 成光

1. はじめに

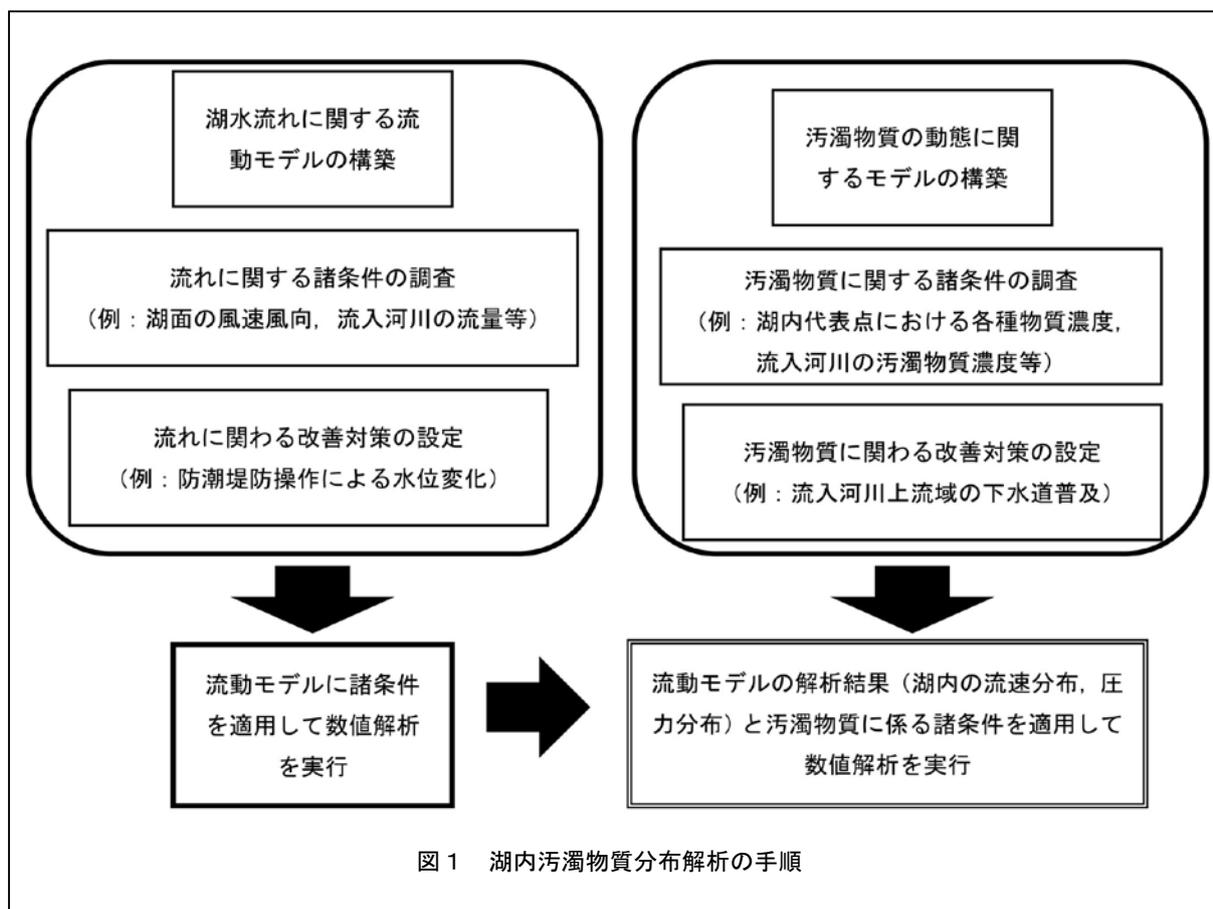
八郎湖の水質改善対策の1つとして、八郎湖における汚濁物質の分布をコンピュータによる数値解析によって予測する試みがこれまでたびたび行われてきた。これまでの解析では、たとえば周辺地域の下水道普及率を上げる、湖水の水位を現状よりも低く保つ、湖内に植物を育成し浄化作用を向上させる、などの対策を想定し、対策を実施した場合にどの程度の汚濁物質削減が可能となるかを評価している。しかし、現在の高性能なコンピュータを用いても長期間にわたる汚濁物質質量の変化を正確に予測することは困難であり、示された結果を正しく解釈し実際の対策に活かすには注意が必要である。本稿ではこのような問題にたいして、これまで行われた数値解析事例を参照しながら、特に流れの解析結果から何を読み取ればよいのかについて述べるとともに、適切な解析結果

を得るために必要な条件設定の重要性について著者らの行った解析結果を例として示した。

2. 汚濁物質の湖内分布に関する数値解析の概要

図1にこれまで行われてきた数値解析による汚濁物質の湖内分布予測手順の概要を示す。すなわち、汚濁物質の湖内分布は、まず湖水がどのように流れるかを決定した上で、その流れにより汚濁物質が湖内全域に運ばれ分散する様子を解析するという流れである。なお、図1の手順においては、流れの解析と汚濁物質の動態の解析はお互いに影響がないように示されているが、実際には汚濁物質の濃度が変化すると湖水の密度、粘性率等が変化するとといったように互いに影響を及ぼす可能性がある。

また、解析を行うにあたっては、図1に示した項目のうち、最初に湖水流れに関する流動モデル



と汚濁物質の動態に関するモデルの構築が問題となる。一般にこれらのモデルは各分野で専門の研究者が作成し、既に一定のレベルの検証を経たものがいくつか存在するため、ここでは既存の研究で構築されたモデルからどれを選ぶかという問題になる。解析しようとする状況を最もよく再現できるモデルを選定できるかどうかの結果の妥当性に大きく影響する。

次に解析結果に大きく影響を与えるのは、流れや汚濁物質に関する諸条件の調査である。少し専門的になるが、流れや汚濁物質の動態に関するモデルは一般的に偏微分方程式の形で表される。この方程式を、与えられた条件にもとづいて解く過程が数値解析である。このとき、前述の諸条件の調査結果として得られたデータ（流入河川からの流入量、湖面の風速風向など）が方程式を解くために与えられる条件となる。つまり、調査結果が現実を正しく反映していない場合、解析結果も現実を正しく模擬することはできない。

3. 八郎湖に関する数値解析の事例

ここではこれまでに秋田県によって行われた八郎湖に関する数値解析事例のうち代表的なものを紹介する。

1) 八郎湖水質汚濁機構解明調査（1984年度） （秋田県、1985）

筆者が調査した範囲では八郎湖に関する数値解析を行った最も初期の事例である。報告書の目次を以下に抜粋して示す。

- I 調査の目的
- II 八郎湖の概要
- III 八郎湖の水質基準と環境保全施設の現況
- IV 八郎湖の水環境
- V 八郎湖の汚濁物質負荷量
- VI 八郎湖の富栄養化機構
- VII 富栄養化シミュレーション
- VIII 八郎湖水質保全対策の方向性と今後の課題

目次からは、まず八郎湖の汚濁の現状を詳細に調査し、その上で適切なモデルの選定を行い、数値解析による将来予測を行うという流れが読み取れる。

この調査では八郎湖の調整池および東部承水路の一部を対象とした解析モデルを構築し、1年を大きく3つの時期（灌漑期、非灌漑期、代かき期）

に分けて数値解析を行っている。これは八郎湖が灌漑期と非灌漑期で水位を大きく変化させることと、特に代かき期の農地からの濁水流入の影響に注目したためである。水質改善対策としては主に周辺地域の下水道普及率の向上による流入河川からの汚濁物質流入量の減少を想定し、これによる湖内汚濁物質濃度の減少量を評価している。この報告書で用いられた解析モデルは、流れについては水深方向の変化を考慮しないモデル（水平面の流速分布のみが得られる）、汚濁物質については深さによる太陽光の影響の変化を考慮したモデルを用いており、解析結果が平面図で表され比較的理解しやすいため、数値解析の実例として少し詳しく結果を示す。

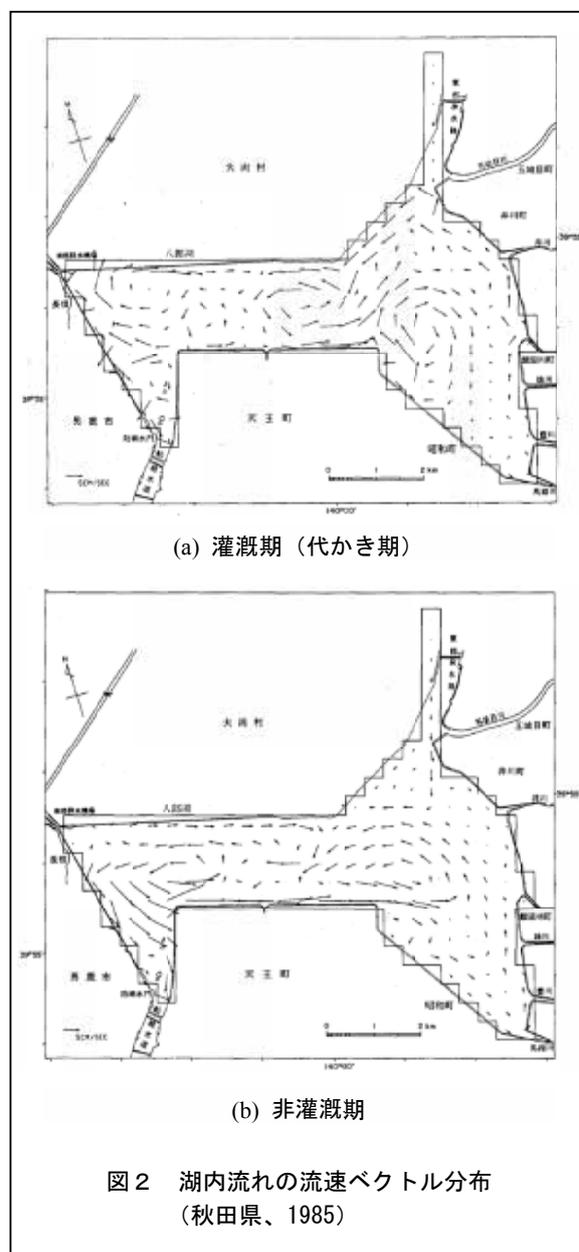


図2 湖内流れの流速ベクトル分布
（秋田県、1985）

まず図2(a)、(b)に流動解析の結果を示す。図2の矢印は湖内代表点における流れの向きと速さをベクトルで示したものである。なお、代かき期に関する解析結果は厳密には図2(a)とは異なっているが、流速ベクトル分布の様子はほぼ同様であったためここでは割愛した。

(a)の灌漑期の場合、調整池東部に大きな一対の循環流が生じていることがわかる。このような流れは汚濁物質の拡散を促進するため、該当箇所では汚濁物質は一樣に分散することが予想できるが、逆に河口付近にこのような流れがある場合は、河口からの流れが阻害され、汚濁物質の拡散を妨げる場合もある。一方、(b)の非灌漑期の場合、流れは大きく変化し、反時計回りの西側へ伸びた大きな循環流が見られる。また、調整池西側に比較的速度の速い領域が生じているが、これは防潮堰からの流出量が灌漑期に比べて増加したためと考えられる。

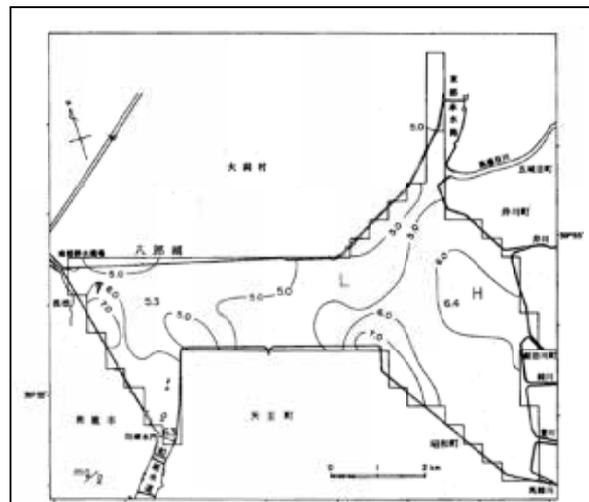
流動解析結果におけるこれらの変化は、解析モデルに与える条件が異なることが原因である。本解析では周辺河川、中央干拓地、防潮堰と調整池の間で起こる水の流入流出量の設定を3つの時期によって変化させている。灌漑期においては八郎潟干拓地との流入を考慮しているが、非灌漑期においてはこれを考慮しないため、東部承水路および馬場目川からの流入が主となり、また防潮堰からの流出量を約1.7倍に増加するものとしている。

次に図2に示した流動解析結果にもとづき、湖内の汚濁物質分布を解析した結果を図3(a)、(b)に示す。報告書では、COD（化学的酸素要求量）とT-P（全リン）を評価対象としているが、ここでは代表例として3つの時期のうち灌漑期のCOD分布に関する結果を示す。

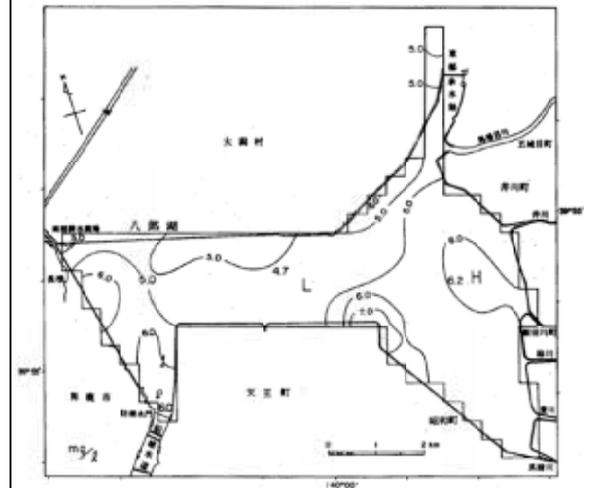
図3(a)は調査当時の状況を再現したものである。図にH、LとあるのはそれぞれCOD値が最高および最低となる位置を示している。この結果から、最も値が高い位置は調整池東部にあり、分布の様子からこの位置で値が高くなっているのは飯塚川河口付近から流入する汚濁物質が原因と考えられる。解析条件の設定では、この河口からのCOD流入総量は他の河口と比べて多いわけではない（隣接する井川と比べて約半分程度）。それにも関わらずこの付近のCOD値が高いのは、該当河口からの流入水量が少なく汚濁物質濃度が高く

なっていることと、前述の循環流の影響で河口からの流れが弱められ拡散が進まないことが原因と考えられる。

一方、図3(b)は周辺の市町村に下水道がほぼ完全に布設されることを想定した場合の約10年後の変化を予測したものである。全体にCOD値は低下しているが、変化量は最も値が低いところで $5.0 \rightarrow 4.7 \text{mg/L}$ と約 0.3mg/L 程度である。また、この報告書では湖内の流動を大きく変化させるような対策案は検討されておらず、分布の様子にはほとんど変化がない。



(a) 1984年調査当時



(b) 1995年時点の予想
(周辺市町村の下水道布設を想定)

図3 汚濁物質分布 (COD値)
(秋田県、1985)

以上のような解析結果より、報告書では周辺地域から流入する汚濁物質の削減対策として、下水道整備が重要であることと、農業由来の汚濁負荷削減の必要性を述べている。

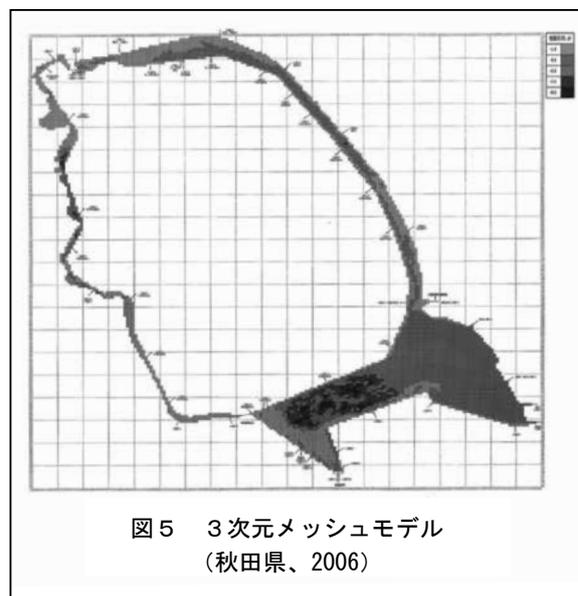
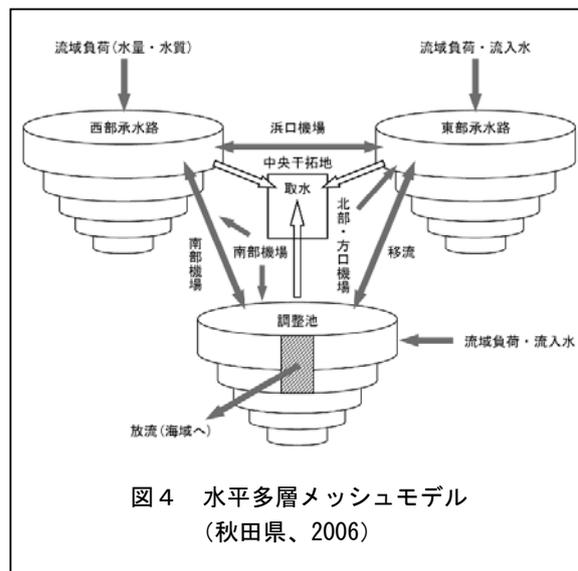
ここで行われた解析は現在の視点から見ると簡易で小規模なものだが、報告書前段の調査データは、周辺地域を含めた自然環境や社会活動などについて幅広いデータを集約しており、高い資料価値を持っている。

2) 八郎湖水質浄化シミュレーション事業 (2005年度) (秋田県、2006)

表1 水質改善対策案リスト (秋田県、2006)	
(1) 流域対策	
A) 下水道の整備促進	
B) 高度処理型合併浄化槽の導入(*)	
C) 家畜排水の対策促進	
D) 環境型農業農法の導入	
E) 中央干拓地の高リン湧水対策(*)	
(2) 流入河川対策	
A) 人工内湖	
B) 人工浮島(*)	
(3) 湖内対策	
A) 人工浮島(*)	
B) 漁獲による負荷持ち出し	
C) 植生浄化	
D) 西部承水路の用水期間の延長(*)	
E) 西部承水路の用水方式の変更	
F) 南部機場から西部承水路に用水する取水点の変更(*)	
G) 南部機場からの中央干拓地排水放流先の変更	
H) 他水系からの導水	
I) 海水導入	
J) 湖底形状の改善	
(*) 検討の結果解析対象から除外されたもの	

本事業は八郎湖全体（調整池および東西の承水路）に関する解析モデルを構築し、水質改善対策を検討したもので、対策を(1)流域対策、(2)流入河川対策、(3)湖内対策と大きく3つに区分して

事業開始時点（2003年）で検討されていた対策案をほぼ網羅する形で評価シナリオを作成している。表1に検討された水質改善対策案のリストを示す。これらの対策の個別の内容については割愛するが、流動解析による評価が重要な項目としては、(3)-E)、G)、H)、I)、J)などが挙げられる。



ここで行われた解析では、流動解析について目的別に2つのモデルを構築している。1つは10年単位の長期的な汚濁物質の動態に関する評価を目的としたもので、調整池、東部承水路、西部承水路をそれぞれ1つの容器とみなして解析するモデル、もう1つは表1に示した個々の対策の効果を短期的（1年程度）に評価することを目的とした

もので、八郎湖全体を100m×100m×2mの立体格子（メッシュ）で分割し、3次元の流動解析を行うモデルである。それぞれのモデルについて図4、5に示す。図5の3次元メッシュモデルは1984年度の調査で行われた解析モデルを拡張したものである。

次に、汚濁物質の動態解析における評価対象項目を表2に示す。ここで塩素イオンを評価項目に含めているのが特徴的であるが、この項目は表1の(3)-I)にある海水導入の効果を検討するためのものである。その他、クロロフィル-aは植物プランクトン（アオコ等）の分布評価指標として追加されている。

表2 評価対象項目（水質予測）
（秋田県、2006）

Cl ⁻ （塩化物イオン）（海水の影響の予測指標）
SS（濁度）
Chl-a（植物プランクトン量として予測）
COD
D-COD(P_COD)
T-N
I-N(O-N)
T-P
I-P(O-P)
DO

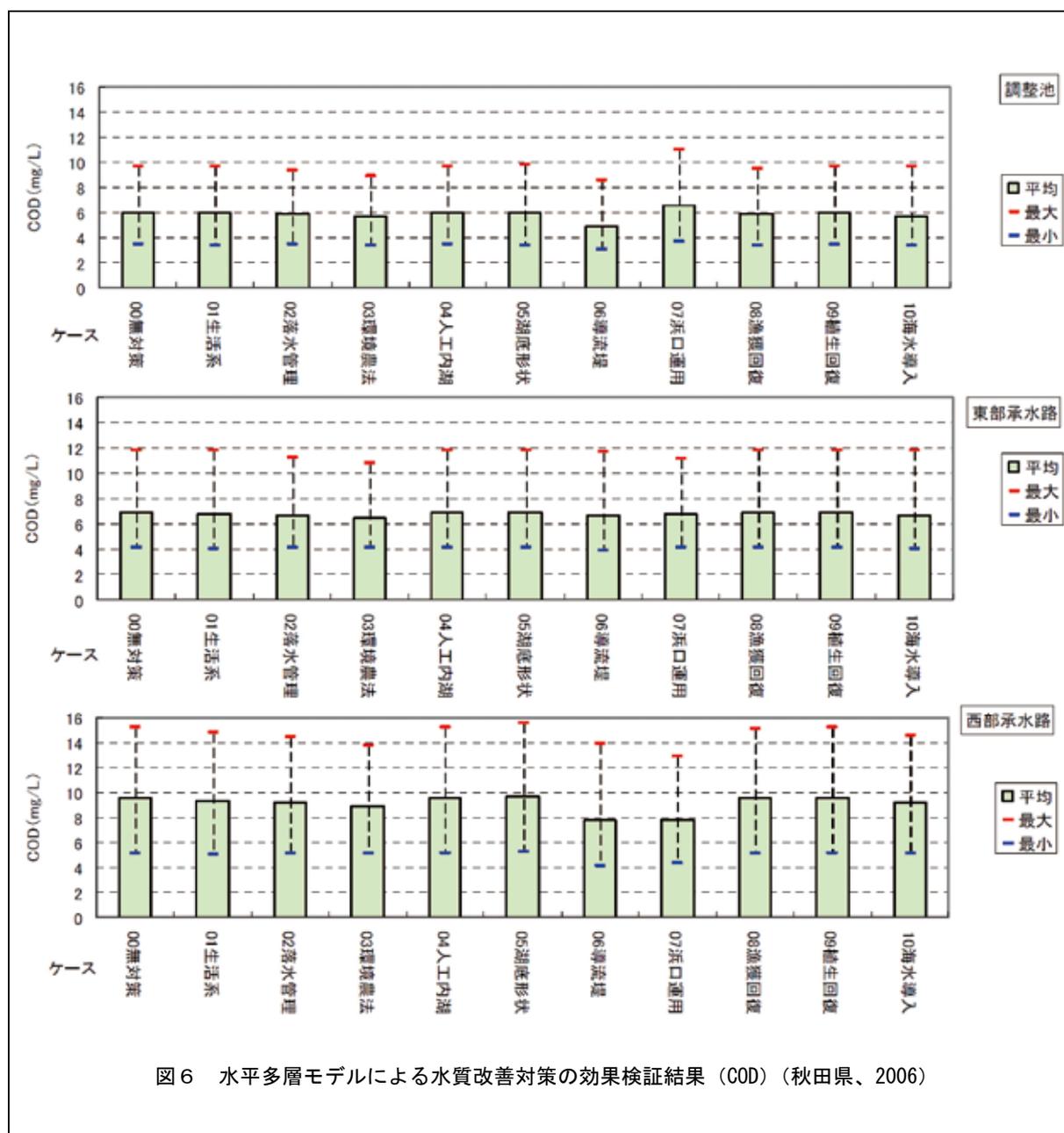


図6 水平多層モデルによる水質改善対策の効果検証結果（COD）（秋田県、2006）

図6に水平多層メッシュによる解析結果の例としてCOD値に対する水質改善対策の効果を評価した結果を示す。

この結果は、現状（2003年）の20年後となる2024年から2033年の10年間（流域の対策が終了した後の10年間で想定）の解析結果に関する平均値、最大値、最小値を示したものである。この結果から、COD値に対する対策の効果は、例えば対策ケース05湖底形状改善について見てみると、この対策は調整池のCOD値は改善するが、西部承水路のCOD値はやや悪化させる効果が見られる。一方で対策ケース07浜口機場運用変更（表1(3)-E)に対応については、この対策は調整池のCOD値を悪化させるが、西部承水路のCOD値に対しては改善効果があることがわかる。このように、水平多層モデルによる解析は、長期間にわたる様々な対策の効果を比較的lowコストで得ることができるが、結果は時間的に平均化されたものとなる。

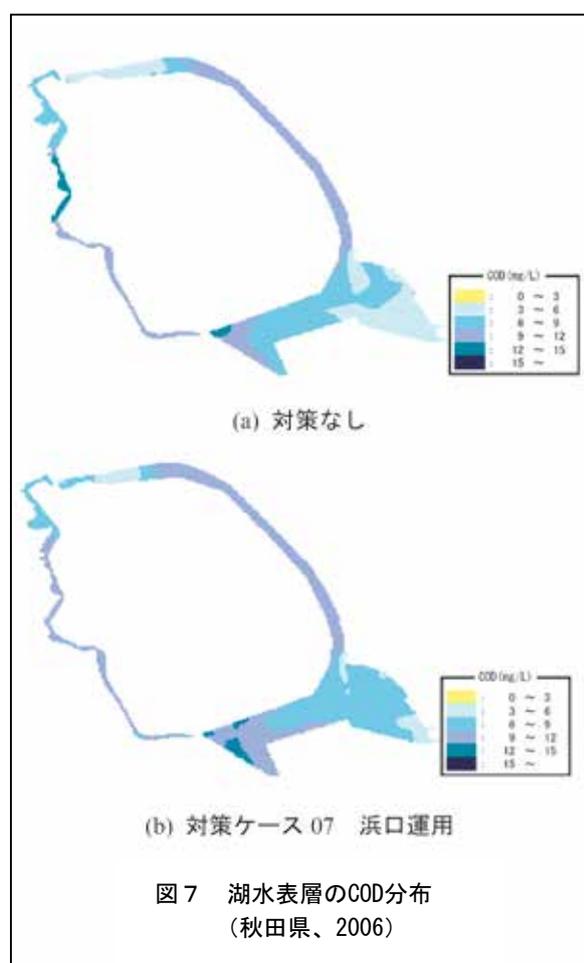


図7 湖水表層のCOD分布
(秋田県、2006)

次に図7に3次元モデルによる解析結果の例を示す。本モデルによる解析は2012年4月1日から

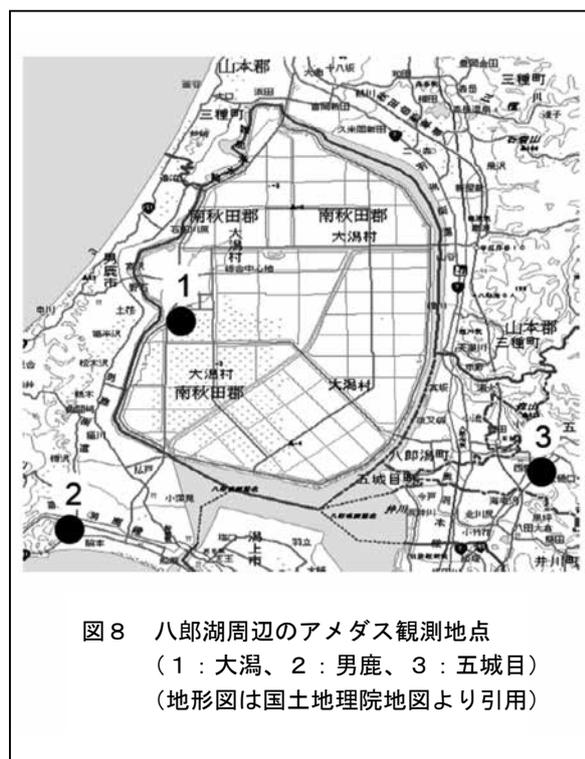
2013年3月31日までを想定した短期間の解析である。ここでは2012年7月15日に対応する解析結果のうち湖水表層におけるCOD分布に関する結果を示す。なお、3次元モデルの流動解析の結果（流れのベクトル図）は割愛する。図7(a)は対策をとらなかった場合、(b)は図6でも述べた対策ケース07浜口機場運用変更を実施した場合の結果である。両者の比較より、図6で示された対策ケース07による効果（調整池では悪化、西部承水路では良化）がどのように現れるかが全体のイメージとして見て取れる。すなわち、(a)の対策なしの場合に比べて(b)では西部承水路の中央より北寄りにあったCOD値の高い部分がなくなり、代わりに調整池西部のCOD値の高い部分が広がっている。このように3次元モデルを用いた解析では、空間的に詳細なデータを得られる利点があるが、解析に要する時間は水平多層モデルの場合と比べて非常に長くなるのが一般的であり、これは解析コストの上昇につながる。

4. 解析のために与えられる諸条件の影響

第3章ではこれまでに実施された八郎湖の水質浄化対策を検討するための2つの数値解析事例を紹介した。数値解析により得られた結果は、視覚的にわかりやすいイメージを提供し、対策の効果を検討するために有用であると考えられる。しかし、第1章で述べたように、数値解析の結果は、解析モデルと解析を実施するために与える諸条件によって決まるため、適切なモデルと条件が与えられているかについては注意が必要である。ここでは、解析のために与えられる条件が結果に及ぼす影響について、著者らが行った研究事例を紹介する。

八郎湖に関して行われた数値解析結果について検証するため、著者らは1984年度の八郎湖水質汚濁機構解明調査で用いられた解析モデルと同様のモデルを独自に構築し、解析のために与える条件を変化させた場合に解析結果に与える影響を調べた（柏原ら、2010）。一般に、浅水湖の湖内流れにおいては、湖面の風の影響が大きいことが知られており、八郎湖もこれに該当する。そのためここでは特に湖表面の流れの条件として与えられる風速・風向に注目した。1984年度の解析事例においては、湖表面における風速・風向は大潟アメダスの情報をもとにして与えられているが、八郎湖

周辺には大潟を含めて3つのアメダス観測地点が存在している。図8にそれらの位置を示す。



これら3つの観測地点において観測された1983年の風速・風向データを表3に示す。表3は該当月の平均風速と最多風向をまとめたものである。なおアメダスの観測データは気象庁のホームページ (<http://www.jma.go.jp/>) に記載のデータを利用した。

	大潟	男鹿	五城目
灌漑期 (7月)	2.3 南南西	2.1 南西	1.8 南西
非灌漑期 (11月)	3.0 西北西	1.6 北北西	1.6 東北東
代かき期 (5月)	3.4 南南西	3.0 南南西	2.7 南西

(風速の単位は m/s)

表3からわかるように、大潟、男鹿、五城目における観測データは観測地点によって異なっている。例えば灌漑期の風速・風向を比較すると。風速は概ね同じと見てよいが、風向については、大

潟では南南西であるのに対し、五城目および男鹿では南西である。このような変化は図8の観測地点の位置関係をみると、調整池の南の日本海から吹く風に起因していることが考えられるが、そのような場合、調整池上における風向は大潟アメダスの南南西よりも南西に近い可能性がある。このように、アメダスによる観測データを解析条件として利用する場合には解析対象地域と観測地点の風況(風速、風向といった風の状態)の違いを考慮する必要がある。

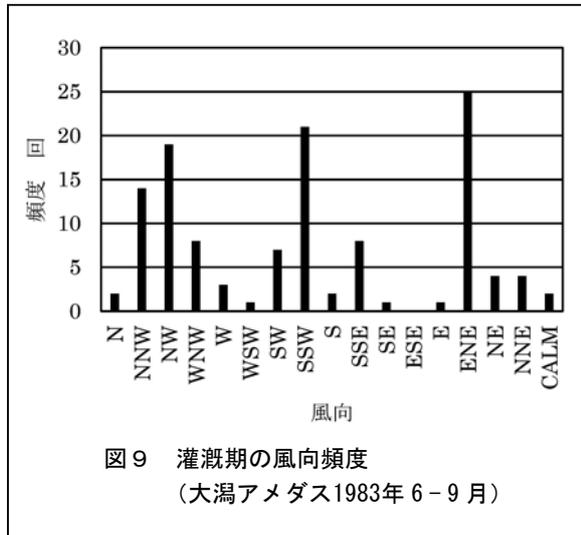
次に観測データから解析に利用する条件を選ぶ場合の問題について検討する。表4に大潟アメダスの1983年の年間を通じた風速・風向の変化についてまとめる。表4の風速値は月間の平均風速、風向は最多風向を示す。

月	風速	風向	月	風速	風向
1	4.8	西北西	<u>7</u>	<u>2.3</u>	<u>南南西</u>
2	4.5	西北西	8	2.4	東北東
3	3.1	西北西	9	2.0	東北東
4	3.5	南南西	10	3.2	西北西
<u>5</u>	<u>3.4</u>	<u>南南西</u>	<u>11</u>	<u>3.0</u>	<u>西北西</u>
6	2.4	北西	12	4.2	西

(風速の単位は m/s)

1984年度の解析では、6～9月を灌漑期、1～4月および10～12月を非灌漑期、5月を代かき期と定義し、それぞれの時期の解析には表4の下線で示した月のデータを用いている。表より、風速については該当時期の代表値として下線の値を用いることは概ね問題がないと考えられるが、風向については特に灌漑期において月毎の違いが大きく、7月の値を代表値とすることには疑問がある。風向についてさらに詳しく検討するため、図9に灌漑期における風向の出現頻度をまとめたグラフを示す。図において横軸が風向、縦軸は1日の代表風向として選ばれた頻度を示す。なお、横軸でCALMとなっているのは風がない日を示す。図9

より灌漑期の風向で最も出現頻度が高いのは東北東であり、南南西の出現頻度は2番目であることがわかる。



以上みてきたように、1983年度の解析において灌漑期の解析条件として湖面の風向を南南西としているが、実際には東北東に同程度の頻度で風が吹いていることがわかった。

次にこの点を解析で考慮するとどの程度結果に影響を与えるかを著者らのモデルを用いて評価を行った。図10に著者らのモデルによる灌漑期の湖内流れの流速ベクトル分布の解析結果を示す。なお図10で解析風速を大潟アメダスの1983年7月の値である2.3m/sではなく3.2m/sとしているのは1983年度報告書に記載の値と合わせたためである。

図10(a)は風向を南南西に設定して1983年度の解析と同条件で解析を行った結果である。この結果を図2(a)と比較すると、細かな点で違いは見られるが、特徴的な東側の循環流れについては再現できており、概ね同様の解析結果と考えることができる。これに対して図10(b)の風向を東北東に変化させた場合の解析結果を見ると、流れは大きく変化し、東に見られた循環流れはほとんど消滅している。この結果から、湖面の風向条件が流動解析の結果に与える影響が大きいことがわかる。

また、今回は湖面の風の条件は湖全体で一様として与えたが、鶴田・石川(1999)の研究では、湖面を流れる風の非一様性に関する観測の重要性が述べられている。湖周辺の地形によっては複雑

に変化する風が湖面上に存在するが、これを詳細に観測することは一般には困難であり、これまで秋田県によって行われてきた解析モデルにおいては、湖面の風の非一様性についてはほとんど考慮されていない。

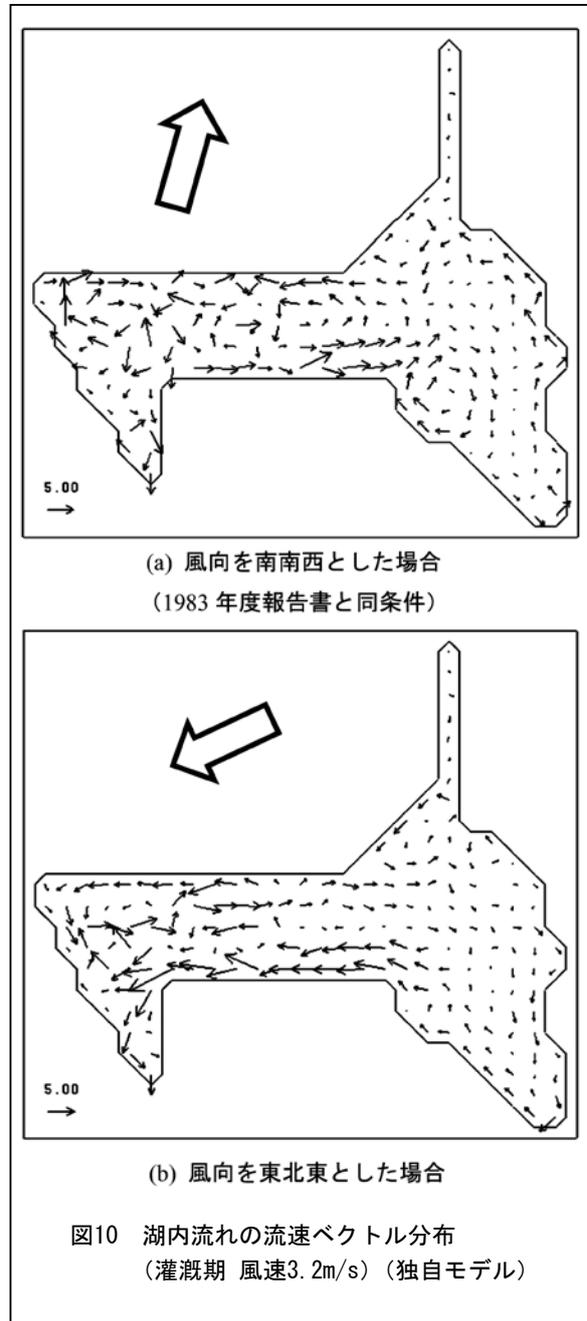


図10 湖内流れの流速ベクトル分布 (灌漑期 風速3.2m/s) (独自モデル)

5. まとめ

本稿では、これまで秋田県によって実施されてきた八郎湖の水質改善対策検討のための数値解析の事例について紹介するとともに、解析結果を正しく評価するためのポイントを紹介した。また解析を行うにあたっては正しい条件設定が重要であ

り、特に八郎湖のような浅水湖においては湖面の風の条件が結果に大きく影響を与えることを示した。

6. 参考文献

- 秋田県1985. 八郎湖水質汚濁機構解明調査総合報告書.
- 秋田県2006. 平成17年度八郎湖水質浄化シミュレーション事業報告書.
- 柏原 2010. 八郎湖調整池の汚染物質拡散に関する数値解析. 秋田県立大学2009年度卒業論文 (指導教員 須知成光).
- 鶴田泰士・石川忠晴1992. 小川原湖における風速分布の現地観測. 水工学論文集, 43, 1043-1048.