

学位請求論文要旨

連結系汽水湖における流動・水質変化機構とその長期シミュレーション Flow mechanism and quality of the water in a connected brackish lake and numerical flow computation over a long period

溝山 勇

Civil engineering, Isamu Mizoyama

背景と本論の意義

河川や湖沼の汽水域は、古くから人口や資産が集積し人間の活動が活発であり、航路確保や土地拡大を目的とした掘削や埋立て、水利用を目的とした淡水化などさまざまな人工的改変が加えられてきた。昭和30年代に入ると、我が国の高度経済成長に伴い国民の生活様式が変化し、生活系や産業系から排出される汚濁負荷量が増大し、湖沼をはじめ多くの閉鎖的な汽水域で赤潮やアオコなどの水質問題が発生した。このように人間の活動と密接な係わりを持つ汽水域は、常に社会的なインパクトにさらされるため、生物生息をはじめとする汽水域の有する貴重な環境への影響が議論されてきた。

本研究が対象とする中海・宍道湖は、我が国を代表する汽水湖であるとともに、二つの湖が河川（大橋川）によって結ばれ、それぞれの湖が異なる汽水環境を形成する連結系汽水湖である。また、中海・宍道湖は閉鎖性の強い水域であり、塩水の進入による密度成層が形成されるため、湖の富栄養化の進行とともにアオコ（宍道湖）や赤潮（中海）の発生、底層水の貧酸素化を招いている。そして、底層の貧酸素化にともない水質だけでなく、湖沼の生態に深刻な影響をもたらすことが懸念されている。

1960年代に着手された中海干拓淡水化事業は、事業による湖沼水質や水産資源への影響が懸念され、事業中止となった経緯を持つ。このような汽水域における利用と環境の対立は、社会的な問題となる例が多い。将来にわたり環境と調和しながら汽水域の利用と保全を行うには、汽水域が有する流動や水環境の変化機構を把握し、適切な対応をとることが必要である。

中海・宍道湖では、学術研究や種々の事業環境影響調査の対象として、現地観測や数値シミュレーション等による湖内の流動、水質の分析検討が行われてきた。さらに近年の観測技術の進歩により、中海、大橋川、宍道湖の個々の水域における特徴的な流動現象が明らかにされつつある。これまでの数値シミュレーションモデルは週～年単位の各水域の平均的な流動現象の変化については概ね再現しうる段階に至っているが、時間～数日スケールの気象攪乱等に伴う個々の水域の特徴的な流動現象や、このような現象に起因する連結系汽水湖が一体となった流動現象を十分説明できる段階に至っていない。さらに、湖沼の水質を議論する上で最も基本的な要素である負荷量は、原単位を用いた統計的な手法による算定や、単独河川で実測負荷量観測による流入形態の研究報告があるものの、湖沼全体の負荷収支を推定できる観測や算定の事例はない。

湖沼における適切な水環境管理を行うためには、それぞれの湖沼が有する、地形、気象、自然（水質、生物）、社会（利用、産業、流域）環境を総合的に評価し、地域の発展と良好な自然環境の保全を両立するための目標設定と施策の実施が必要となる。中海・宍道湖は、異なる汽水環境を有し、その汽水環境に根ざした漁業や貴重な自然環境、景観が保持される一方で、湖底の貧酸素化や富栄養化現象などの水質障害も頻発する。

本研究では、連結系汽水湖の流動や水質変化機構を明らかにし、これを精度良く長期にわたり再現することで、

湖沼環境に影響を与える施策や事業の評価及び、自然現象に伴う水質障害の監視に寄与する実用的な数値シミュレーションの構築を目的とする。

本論文の内容と成果

本論文は上記の背景を踏まえ、中海・宍道湖の現地観測や既往文献をもとに、両湖の特徴を規定する、流動、密度成層、水質、流入負荷の実態を明らかにし、連結系汽水湖の特徴的な流動や水質変化の実現象を説明し再現する数値シミュレーションモデルの構築を行った。本論文は6章で構成され、各章の内容と成果の概要は以下のとおりである。

第1章「緒論」では、中海・宍道湖の水環境における既往の調査研究の経緯や社会的背景を整理した。既往の知見より、中海・宍道湖の適切な水環境管理を行うためには、連結系汽水湖の流動現象や水質汚濁機構を明らかにすると共に、水環境変化に係る各種の施策や事業の影響を評価できる数値シミュレーションの実用化の必要性を述べた。

第2章「中海・宍道湖の概要」では、中海・宍道湖の、地形、社会環境、気象、水象、水質、自然環境の変遷について概要を整理した。さらに、湖沼環境の歴史的変遷を過去の文献や資料に基づき整理し、流域活動や湖沼の地形変化と湖沼環境変化の関係を概観した。

外海と直接繋がる中海は水位や塩分の影響を海域から強く受け、中海と大橋川を介して海外と繋がる宍道湖は、水位、塩分とも流入する河川の影響を強く受ける。両湖とも海域と陸地の接合部にあたり汽水域として独自の環境を形成している。日本海から容易に塩水が進入する中海は、年間を通じて安定した塩分成層を形成し、夏場を中心に下層が貧酸素化する。下層の貧酸素化により底泥から栄養塩が溶出し、リン濃度の上昇が見られる。宍道湖は、生成、消滅を繰り返す薄く不安定な塩分成層を形成する。宍道湖も塩分成層形成により底層の貧酸素化や、底泥からの溶出によりリン濃度が上昇する。

一方、中海はかつて「豊穰の海」と称されるほど豊かな漁業資源に恵まれた水域であったが、1950年代の短い期間に水質の悪化が進行している。この変化は、①閉鎖的な汽水域であり汚濁に弱い流動構造を有している②流域からの汚濁負荷、農薬など新たな環境負荷の流入③海藻類の衰退や植物プランクトンの増加などの生態変化、が原因と考えられる。以上の背景から、中海・宍道湖の水質汚濁機構の再現を行うためには、連結系汽水湖の特徴的な流動機構を分析・再現するとともに、流域からの流入負荷、底泥からの栄養塩溶出、湖の内部生産など、水質の変化機構の把握と再現可能な水質モデル構築の必要性を述べた。

第3章「流域の負荷量と湖沼の底泥」では、湖沼に流入する負荷の特性や全体量を把握するため、既存研究で用いられている排出負荷量の算定を行うと共に、実測負荷量観測による流入負荷量算定を行い、水質シミュレーションに必要な負荷算定方法を提案した。一方、湖底に堆積した底泥の全容を調査すると共に、底泥から湖水への栄養塩溶出機構を解説し、溶出量算定方法を提案した。

流入負荷量観測は、全国的にも例のない、全流入河川（水路含む）を対象に10年間の観測（晴天時、雨天時）を実施した。観測結果より、流量と負荷量の推計式（L-Q式）を設定し、流入負荷量と排出負荷量の比較を行った。洪水の影響を受ける流入負荷量は、年、月、日、時間単位で変動し、そのため、統計データをベースに算定される排出負量（原単位方式）と乖離することも確認された。

一方、底泥は、河川から流入する汚濁負荷や土粒子が、河口周辺から沈降し河口部ほど底泥が厚くリンの含有

量も多い。底泥は堆積後も波浪や流動による攪乱を受け、比重の低い微粒分は澱みやくぼ地に移動する。底泥中の間隙水質は、水温の影響を受け季節的に変化をするものの、高い濃度で蓄積され、直上水との濃度勾配により溶出すると考えられる。しかし、無機態リンは直上水中の酸素により溶出速度が制御されていた。このような、底泥からの栄養塩溶出機構を再現するため、水温及び溶存酸素による補正を加えた、栄養塩溶出速度・酸素消費速度式の設定を行った。

第4章「中海・宍道湖の流動機構の特徴」では、汽水域の特徴的な流動場である密度成層に着目し、「境水道」「中海と大橋川の接合部」「大橋川」「大橋川と宍道湖の接合部」において流動観測を実施し、日本海～中海～大橋川～宍道湖の汽水環境形成の機構を一体的に把握した。一方、大橋川から遡上する塩分水や湖面風の影響を受け変動する宍道湖の薄層高塩分水塊の調査を行い、生成、移動、消滅の経過と要因を分析した。以上の調査より、中海・宍道湖の流動現象の特徴は以下の通りである。

(境水道・中海)

1. 美保湾に接続する境水道から中海に至る水域は、外海水が容易に進入し、水深3m付近を中心に強固な密度界面が形成され、出水や強風時でも成層は維持される。
2. 西風強風時には、表層は風下側(東方)の流向が卓越し、下層は西向きの流向が卓越し上層を捕捉する。このとき、中海の塩分界面は西側で上昇する。

(大橋川)

3. 中海・宍道湖に比べて狭く長い大橋川が存在により、斐伊川上流域からの洪水流出波形、中海からの潮汐振動や高潮進入波形は大橋川区間で大きく減衰する。
4. 大橋川上流への塩水遡上は、天文潮及び低気圧通過時の高潮に起因し、宍道湖水位<中海水位の状態が長時間に及ぶ場合である。
5. 大橋川を遡上した塩水塊が宍道湖に流入するには、大橋川・宍道湖接合部の地形凸部を乗り越える高い界面標高を保持した塩水遡上が生じた場合である。

(宍道湖)

6. 宍道湖湖心の湖底に到達した塩水塊は、厚さ30cm程度の薄層高塩分水塊を形成して、風速10m以下の湖面風に起因して湖底を移動する。その過程で、湖底薄層水塊内部では酸素消費が進み貧酸素化状態に移行する。
7. 宍道湖の薄層高塩分水塊は、10m以上の強風で消滅し、宍道湖の貧酸素化が長期化する頻度は少ない。

第5章「流動及び水質の長期シミュレーションと湖沼管理への適用」では、中海・宍道湖の水環境管理を目的とし、実態を精度よく表現するとともに実用的な水質モデルの構築を行うため、特徴的な流動現象や流域からの流入負荷の実態を踏まえ、流動及び水質汚濁機構を再現する数値シミュレーションを実施した。

本研究で作成したモデルは、中海・宍道湖の特徴的な塩分界面の変動を再現するため、非定常平面二次元多層密度流モデル、平面座標系は直交曲線座標系、鉛直座標系はシグマレベル座標系とシグマ座標系を採用するとともに底層部分のモデル分割を細密化した。その結果、水位、流速、塩分の分布や密度成層の挙動に至るまで、連結系汽水湖の特徴を再現し予測することが可能となった。一方、新たな課題も明らかになってきた。流動モデルでは観測値に比べ上下混合が進みやすい傾向にある。密度成層の再現精度を向上させるためには、密度成層場の乱流輸送抑制効果の評価方法の検討や水域分割の細密化を図ると共に、実用的な演算時間(本モデルは1カ年計算で100時間を要する)で実施するための計算器機やプログラムの改善による計算速度の高速化が必要である。

水質モデルは、汽水域の流動再現と流入負荷の再現に着目しモデルの検討を行った。成層形成や貧酸素化によ

り起こる底泥からのリン溶出機構を再現するため、底泥の溶出試験及び酸素消費速度試験結果に基づき、水温、溶存酸素の補正を伴うCOD、窒素、リンの溶出速度式を設定した。一方、流入負荷量調査より、降雨量や河川特性に影響されるL-Q式を設定し負荷量を算定した。以上の結果、降雨量に影響され年間の季節変動を概ね再現するとともに、酸素濃度低下にともない上昇するリンの動態も良好に再現した。一方、植物プランクトンによる酸素の過飽和、富栄養化現象に起因する水質の変化、複雑な形態変化を行う窒素など、十分追従できない自然現象による変動など新たな課題を確認した。

本研究で構築した流動・水質シミュレーションは、豊かな汽水湖の生態系を維持するための湖沼環境管理を行うため、人工的な改変はもとより、気象現象に伴う貧酸素水の動態、塩分環境の変化など、生物生息環境への影響を時間的、空間的に予測する手段としてその有用性と具体的な活用策を述べた。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し今後の課題を述べた。

本論文の成果をまとめると次のとおりである。

1. 閉鎖的な汽水湖では、密度成層の形成と底層の貧酸素化が密接な関係を持ち、貧酸素化は底泥からの栄養塩溶出や底質の嫌気など、水質及び底質環境に影響を与えている。
2. 汽水湖において、潮汐や気象などの外力を受け変動する密度界面や、連結系汽水湖の一体的な汽水環境の再現は、湖沼の平面及び縦断地形を極力詳細に表現した非定常平面二次元多層密度流モデル（平面座標系は直交曲線座標系、鉛直座標系はシグマレベル座標系とシグマ座標系）において、実用的な計算時間の中で良好な再現性が得られる。
3. 湖沼への流入負荷は、河川流量により大きく変動する。流入負荷量を算定し水質シミュレーションの適用により、河川の流況による影響を受け変動する水質の再現を行った。
4. 密度成層の再現は、底層の貧酸素化や貧酸素化に伴う底泥からの栄養塩溶出など、汽水湖に特徴的な水質現象を再現した。

本研究から以下に示す課題が挙げられる。連結系汽水湖の流動再現において、非定常平面二次元多層密度流モデル（平面座標系は直交曲線座標系、鉛直座標系はシグマレベル座標系とシグマ座標系）の実用性は評価できた。しかし、再現値を詳細に見ると、観測値に比べ上下混合が進みやすい傾向や湖面風に反応しダイナミックに変動する密度界面の再現に課題が残る。成層構造の再現性をさらに向上するためには、密度成層場の乱流輸送抑制効果の評価や、水域分割の細密化に伴う計算負荷を軽減するためのハード・ソフトの高速化が必要である。

一方、水質モデルでは、植物プランクトンの異常増殖による溶存酸素や水質の上昇に対しての再現や流入水質の季節変化及び底泥の溶出における窒素の形態別濃度の再現性に課題が残る。

湖沼は広大な水域と複雑で多岐にわたる外部環境により流動及び水環境を維持している。このような湖沼の流動及び水環境を理解し、予測するためには数値シミュレーションモデルの利用は不可欠である。本モデルは「流動」と「負荷」という基本的な物質移動について概ね再現することができた。今後は、本モデルを用い、人工的な改変はもとより気象現象に伴う、貧酸素水の動態、塩分環境の変化など、生物生息環境への影響を時間的、空間的に予測し、連結系汽水湖の豊かな生物環境の保全を実現することが湖沼管理上の課題である。