

氏名	ながお まさゆき 長尾正之
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成11年3月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成5年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程 修了
学位論文題目	小川原湖の塩水傾斜プルームに関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 澤本 正樹 東北大学教授 真野 明 東北大学教授 田中 仁

## 論文内容要旨

汽水湖の水環境に対する関心が、近年高まっている。しかし、一口に汽水湖と言っても、個々の湖の汽水性の程度とそれを支えている塩分循環の過程は様々であり、一概に論じることは難しい。むしろ、汽水湖の環境を理解していく上では、個々の汽水湖での塩分循環の形態の違いを科学的に理解することの方がより大切であると考えられる。そこで本研究では、青森県の小川原湖を具体的な対象として研究を行っている。

小川原湖の塩分循環は、塩水傾斜プルームにより特徴づけられている。このプルームは、排水河川を遡上してくる塩水が湖内の緩斜面上で形成する一種の重力密度流である。そして塩水傾斜プルーム発生の規模と頻度およびプルームの稀釈率が、湖全体の塩分成層を規定している。しかし、傾斜プルームに関する現段階の科学的知見は、必ずしも十分でないため、本研究ではこれに焦点を当てて現地研究を行った。

本論文の構成は以下の通りである。

まず、第1章において小川原湖およびその流域の自然環境の概要に触れた後、塩分循環の様態とその中における塩水傾斜プルームの役割を明確にする。また、傾斜プルームに関する既往の研究成果を示すとともに、現時点で残されている課題を示す。第2章では、塩水傾斜プルームの誘因となる排水河川の塩分遡上現象を確率統計的に考察し、湖内に侵入する塩分が季節的あるいは長期的にどの程度変動するかを調べる。第3章では、塩水傾斜プルームの特性を調べるために行われた現地観測について述べている。第4章では、第3章の観測結果に基づいて連行係数とリチャードソン数を得る具体的な方法を述べ、得られた結果と既往室内実験データを加えて、これまでに提案されている連行則との比較を行う。第5章では、第4章で得られた傾斜プルームの連行関係を検証するため、連行則を  $k-\varepsilon$  乱流モデルから解析的に導き、考察を行っている。第6章では論文全体の総括と今後の課題を述べる。

以下、各章の概要を述べる。

## 第1章 序論

第1章では、既存の計測データを基に小川原湖の水収支と塩分収支、塩分成層の季節変化を明らかにした後、塩分循環システム全体を概観した。そして、特に湖内塩分成層の形成は、湖に侵入した海水が湖心部に達するまでの間の稀釈混合過程に依存していること、そしてこの混合過程は、海水の遡上過程と侵入塩水が傾斜プルームとして湖内斜面を流下する過程の二つに大別されることを示した。

このうち塩水遡上過程は、湖水位と河口水位の相対関係に依存している。すなわち、河口水位が湖水位を大きく上回り、かつその状態が長く続くほど大規模な塩水侵入が発生する。過去の水位関係を検討した結果、このような季節は平均的には6月中旬から7月上旬および11月から1月にかけてであるが、実際には年ごとの気圧変動や風および波浪の変動に両水位が影響されるため、塩水侵入状況は年ごとにかなり異なる。

続いて、塩水傾斜プルームの混合過程について記述を行った。まず、Ellison and Turner(1959)の研究を引用して傾斜プルームの基本的特性について述べた。続いて傾斜プルームの混合過程を記述する場合に一般的に用いられる「連行」の概念について述べ、現在提案されている連行則としては連行係数がリチャードソン数のベキ乗で表される「ベキ乗則」(I型)と、Turner(1986)により提案された、リチャードソン数が1に近づくにつれて急激に連行係数が小さくなるII型の二つに大別されることを示した。けれども、現状においては小規模室内実験データのみではI型、II型のいずれが適当かを判別することは難しく、判別のためには、①現地観測で大スケールの傾斜プルームのデータを得るか、②室内実験によらず乱流モデル等により解析的に連行関係の研究を行うことのいずれかが必要である。小川原湖の塩水傾斜プルームは、室内実験のそれに比べれば遥かに大きなスケールを有している。したがって、①を目的とした精密な現地観測により、傾斜プルームの混合過程について新たなデータを加えられる可能性がある。また、②については、福嶋(1988)の先駆的な研究が挙げられるが、計算条件を系統的に変化させていないため、I型、II型の連行則を判別するまでには至っていない。

## 第2章 塩水傾斜プルーム発生の特徴

第1章で述べたように、小川原湖への塩水流入現象は、湖を取り巻く気象・海象条件の変化に強く影響されている。そこで、本章では、まず塩水流入現象の影響因子の確率統計的性質を分析し、その結果を塩分遡上モデルに代入して、塩水流入現象の規模と頻度を解析した。

河口水位と湖水位の変動を表すために、八戸港実測潮位データ、むつ小川原港波浪データおよび湖水位データをARモデルにあてはめ、確率過程としての時系列解析を行った。この解析結果に基づき、原データと同じ確率特性を持つ水位の擬似データを長期間にわたり作成し、これを塩分遡上モデルの入力として与えて塩分侵入現象をシミュレーションした。このシミュレーションから長期間の塩分侵入量を推定したところ、以下の事柄が明らかとなった。

まず、塩水侵入量は平均的には初夏と冬季に集中する。これは天文潮位と湖水位の持つ季節性によると考えられる。しかし確率統計的性質をモデルに取り込んだ結果、平均的な季節性に比べ月間侵入量の年ごとの偏差は3倍程度あり、さらに年間侵入量は最大で4倍程度の開きを持っていた。したがって、年ごとの気象・海象条件の違いにより、小川原湖への海水侵入量はかなり大きな変動幅を有することが示唆された。最後に、現地観測から得られている湖表層の塩分濃度が、シミュレーションから得られた年

間平均塩分侵入量を用いて説明できるかどうかを確認した。この結果は良好であり、本モデルの妥当性が示された。

### 第3章 傾斜プルームの現地観測

第3章では、塩水傾斜プルームの連行現象を捉えるために行われた現地観測の概要と、主な成果を総括した。

1991年の観測では、小川原湖の塩水傾斜プルームの規模と無次元パラメータが同定された。すなわち、流速は数10cm、層の厚さは約1m、幅数100m、長さ1.5km程度であった。また、レイノルズ数は $10^5$ 程度と大きく、リチャードソン数は1に近い値のため、室内実験とは異なる範囲のデータを新たに提供できる可能性のあることがわかった。この他、塩水傾斜プルームの流動層厚が塩分層厚に比べて大きい傾向があること、非定常なフロント部分とそれに続くほぼ一定な濃度と層厚を持つ後続部分を有することが判明した。続く1992年の観測では、引き続きフロント部と後続部分についての観測が行われた。そして、塩分の鉛直分布の滯筋方向の変化から、後続部が漸変流に近いこと、またフロント部と後続部の速度の対応関係が既存の密度流フロントで認められる関係とほぼ同じであることが示された。さらに連行係数の値とリチャードソン数の概略値が推定され、ベキ乗則から推定される連行係数の値よりも1オーダー小さいことが示唆された。

1993年の観測では、1992年以前の観測で問題となっていた流速計測とSTD計測の問題点を、計器の更新と測定方法の改良により解決した上で、精密な計測を実施した。これにより、リチャードソン数と連行係数を求める際に必要な代表流速と代表相対密度差を正しく求めることができ、第4章における連行則の検討が可能となった。

1997年8月には、流れの横断方向を含めた音響探査観測が実施され、水中反射強度とSTD観測で得られた塩分・水温・濁度との対応関係が調べられた。この結果、界面は、平均的にはコリオリ力に釣り合うように傾いており、同時に滯筋近傍が若干窪んでいることがわかった。この結果、横断方向には圧力偏差が生じ、流れが生じている可能性があった。けれども、横断面全体においては、界面の大きな変位はそれほど認められなかったため、以降の連行現象の解析にあたっては、滯筋近傍のみを対象とすることにした。また、縦断方向の音響画像には、底面の凸凹に従って内部界面が上下している様子が認められた。第4章では、この現象を用いてリチャードソン数の推定が行われた。

### 第4章 現地観測に基づく傾斜プルーム連行則の検討

第4章では、現地観測データから連行係数とリチャードソン数を得る具体的な方法を述べ、その結果を既存の実験データおよび連行則と比べた。まず、塩水傾斜プルームが平衡状態と見なせるかどうかを調べるため、運動方程式の各項のオーダーを観測から得られた値により概算した。この結果、移流慣性項と圧力項は比較的小さく、重力項は界面応力項と底面摩擦項にほぼ釣り合っており、観測区域内では平衡状態にほぼ近い状態が形成されていることが確認された。

続いて、Ellison and Turnerの研究に基づいて連行係数とリチャードソン数の定義を示し、これらの数値を求める上で必要な代表層厚、代表流速および代表相対密度差を観測値から決定する方法を示した。また、塩分および流量の収支式を連立して変形し、連行係数を代表塩分濃度の空間変化から推定する式。

を導出した。

なお、リチャードソン数の推定に当たっては、流れの代表値を用いる方法とは別に、音響画像に映し出された内部界面と底面の変位量より推定する方法も併せて用いた。すなわち、縦断方向の音響画像にはプルーム界面が底面の凸凹に応じて変化する様子が写し出されており、開水路水理学で行われるのと同様に微少区間のエネルギー保存を仮定することにより、リチャードソン数（開水路のフルード数に対応する）を推定することができる。これにより、代表流速から求めた結果の妥当性を確認できるようになった。

以上の方法で推定された連行係数とリチャードソン数を、既存の実験結果とともにグラフにプロットし、従来提案されている連行則と比較したところ、以下の事柄が明らかとなった。すなわち、リチャードソン数が1に近づくにつれて連行係数は急減し、ベキ乗則（I型）で予想されるよりも遥かに小さくなる。この傾向はTurnerが提案している経験式（II型）の傾向とも一致する。

## 第5章 傾斜プルーム連行則への解析的アプローチ

第4章の結果を受け、第5章では、高いレイノルズ数を持つ傾斜プルームがII型の連行特性を持つ可能性について解析的に検討した。具体的には福嶋の研究にならって鉛直二次元の $k-\epsilon$ モデルを用い、傾斜プルームの鉛直分布の相似性を仮定し、鉛直一次元の無次元方程式を導いた。この微分方程式をGalerkin法によって代数方程式化し、種々の条件下で効率的に解を求める方法を導いた。なお、純粋に内部界面の乱流混合を評価するため、壁面摩擦力や、境界層の存在はあえて考慮せずに解析を進めた。

続いて、乱流パラメータを系統的に変化させ多数の条件下に対しての連行係数とリチャードソン数を求め、グラフ上にプロットした。その結果、II型の連行則と定性的に一致する結果が得られた。

## 第6章 結論

第6章では本研究で得られた成果を総括し、今後の課題を取りまとめた。

## 審査結果の要旨

低平地の汽水湖沼では、海水の進入、連行による希釈、成層などの塩分の挙動が、湖沼の環境を大きく支配している。しかし、観測が困難であることから実現象の理解が不十分であるとともに、実験室において決定された諸法則と現地での生じている現象との対比も十分に理解されていない。本研究では、汽水湖の一つである小川原湖を対象として、湖内で生じる塩水傾斜プルームの現地実測、塩水進入の推算、連行則の理論的解明を行ったもので、全文6章よりなる。

第1章は序論であり、研究対象である小川原湖の現状を説明するとともに本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、塩水傾斜プルームの発生を確率統計的に考察している。河口水位と湖水位の高率統計的性質を明らかにするとともに、水位変動をシミュレートし、長期間にわたる塩分進入の頻度・総流入量の年変動等を明らかにしている。これは新しい知見である。

第3章では、小川原湖において生じている現地観測結果をまとめている。1990年より1997年までの現地実測で、塩分分布、流速分布、音響測深機によるプルーム形状測定を行い、小川原湖で実際に発生している塩水傾斜プルームの基本特性を明らかにしている。これらは極めて重要な知見である。

第4章では、観測データに基づき、傾斜プルームの連行則について検討している。この種の研究は、従来は小規模な室内実験に限られていたが、今回の小川原湖における研究では極めて大きなレイノルズ数でのデータが得られており、既存の連行則の適否の議論が可能となっている。これは重要な成果である。

第5章では、 $k-\varepsilon$ モデルを用い、連行則を解析的に導出している。非線形性の強い方程式系にGalerkin法を適用することにより、系統的に近似解を求めることが可能としている。成果は最終的に、連行係数とレイノルズ数の関係として図表表示されている。これは重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は小川原湖で生じている塩水傾斜プルームの実測と連行則の解析を通じ、汽水湖の塩分進入の実態を明らかにするとともに、その連行則をも明らかにしたものであり、環境水理学の分野の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。