

氏名	藤原 広和
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成13年3月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和61年3月 岩手大学農学部農業土木学科 卒業
学位論文題目	高瀬川の複断面河道部における塩水遡上に関する研究
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

1. はじめに

汽水湖の自然環境は、海水侵入とそれに伴う塩分循環の微妙なバランスの上に成り立っており、塩分循環は、河川流入や河口潮位などの外的条件の影響を受けている。このような汽水湖は、海水性・淡水性の生物が入り交じった豊かな生態系を有している。近年は貴重な自然環境を保全しようとする動きが強まっている。本研究の対象である高瀬川・小川原湖周辺は原子燃料サイクル施設、国家石油備蓄基地などの国家的に重要な施設が稼働し、原子力発電所が計画されている工業開発地区である。一方、小川原湖およびその周辺部は、淡水性、汽水性および塩水性が混在した湖沼、湿地および干潟等が群在し、多彩な動植物が生息している地域でもある。また、小川原湖の水は主として揚水して農業用水に利用され、漁業ではワカサギ、シラウオ、ウナギ、シジミなどの漁獲量が豊富である。このような自然環境と開発が共存する地域の中心に位置する小川原湖・高瀬川は、今後の開発進捗とともにバランスを考えた地域開発が望まれる。そのためには小川原湖における自然環境の成り立ちについての理解を深める必要がある。

本研究では汽水湖である小川原湖の海水流入河川である高瀬川河口部に着目し、どのように塩水が侵入し混合するのかを現地観測および複断面水路に着目した室内実験を通じ、高瀬川における塩水流動の全体像を把握するのが目的の1つである。さらに、観測結果等から河口部に複断面水路部があることに着目した。この高水敷における横断方向混合係数について考察し、混合係数

により複断面水路密度流の特性を知ることがもう1つの目的である。本研究は小川原湖・高瀬川の塩水流動全体の中では対象はその一部分ではあるが、河口部の混合現象は興味深い研究対象でもある。また、水路の横断方向混合係数については多くの研究成果があるが、本研究は複断面水路密度流という点に着目し、水工学の新たな事例を提供している。

流体の混合現象は水系に限れば、塩水の遡上、温排水、水質汚濁、取水、湖の淡水化等、多くの水理環境問題、生体環境に影響を及ぼし、これらの対策・計画上、混合過程、混合量等を適切に評価することは非常に重要である。この中で、塩水遡上は河口域の利水、生態環境を考える上で極めて重要である。混合量を見積もるときはシミュレーションを行うのが一般的な方法であると思われるが、このとき例えば拡散方程式を用いるのであれば、その中の拡散係数をどのように与えればいいかが問題となる。混合係数は、ある程度定量化が進んではいるが、明確な表示が未だ無いのが現状である。また、本研究は高瀬川をフィールドとしての研究であるが、その川の個性から何らかの一般原理を見つけ出すことが目標である。

河口域周辺の密度流は混合型の河口密度流、塩水楔、密度噴流型の問題として研究されており、単断面水路を用いた鉛直2次元的な議論が多い。現状では水平方向の挙動はほとんど明らかにされていない。本研究は、主として河口部の河床地形に着目し、青森県東南部に位置する汽水湖である小川原湖と太平洋を結ぶ感潮河川である高瀬川をフィールドとした塩水混合に関する研究である。高瀬川は、河口部に複断面河道部をもつ感潮河川であり、筆者は現地観測から、この河床地形に着目した。既往の研究では複断面水路における一様密度の流れについては多くのものがあるが、そこでの密度流に関したものは、ほとんど見られない。複断面水路密度流の混合機構に関しては筆者の知る限りでは未だ明らかにされていない点が多い。従って、本研究は高瀬川の塩水遡上についての研究であるとともに、複断面水路密度流についての研究であり、自然科学における基礎的研究としての意味もある。また、本研究は今後の小川原湖に関する研究の資料となり得る。

本論文では、第2章で高瀬川河口部や小川原湖の現地観測結果とそれらによって得られた塩水遡上特性を明らかにしている。第3章で複断面水路模型による室内実験結果とそれによって得られた複断面水路密度流の混合特性を単断面水路との比較により明らかにしている。さらに、第4章で現地観測と室内実験から水路の横断方向混合係数を求め、実験と実測との関係および高瀬川における塩水遡上特性を明らかにしている。第5章は本研究の結論である。

2. 現地観測に基づく塩水遡上特性

ここでは現地観測結果についてまとめている。現地観測の結果については、その観測時期により3つに分けられる。そこでまず、流速および塩素イオン濃度に着目し、高瀬橋において現地観測を行った結果について述べている。これは感潮河川である高瀬川において塩水遡上の実態把握のために実施したものである。順流時・逆流時の流速・塩分の横断面分布などを1989年～1992年の時期に数回測定した結果とその結果得られた高瀬川の塩水遡上特性を考察している。

次に、1998年に実施された小川原湖最深部の塩分・水温調査と高瀬川河口水位計測の結果について述べている。これらの観測は、本研究の目的である高瀬川塩水流動の全体像の考察に関係する。これらの結果より小川原湖の塩分・水温の季節変化、湖の塩分量の変化、および河口の水位変化について考察している。

続いて高瀬川複断面河道における塩水混合の実態把握を目的として、1999年に塩分および水温を複断面河道部で測定した結果と観測により得られた知見について述べている。ここでは水平方向の塩水混合過程について考察されている。

これらの現地観測から河口～高瀬川～小川原湖の塩水流動は以下のように考察された。

小川原湖への塩水侵入は河口と小川原湖の水位差によってほぼ決定されるが、河口では河口外水位と河口内水位が異なる。さらに河口内では狭窄部などの影響、複断面河道部の静振の影響を受け、水位が変化する。これが、水面勾配、流速に影響を与える。水位差により遡上した塩水は河口の複断面河道部で混合・希釈され、さらに上流の狭水路を通過し小川原湖に達する。複断面河道部では初め低水路を塩水が遡上する。その後、塩水は浅瀬（高水敷）で主に水平方向に混合しながら遡上する。河口の潮位変動パターンにより低高潮のときの塩水が河口部に残留することもある。このとき残留塩水は再び複断面による混合効果を受け、上流に遡上する。複断面河道部上流の狭水路では、上層は浅瀬で混合した塩水が遡上し、それとともに下層では低水路を通過した塩水が遡上すると考えられる。高瀬橋で混合型が緩混合から強混合に時間的に変化するのはこのためである。河口から約6.5km上流に小川原湖があるが、ここまで塩水が達したとしても小川原湖へ塩分が貯留されるわけではなく、河口の水位変化と小川原湖の水位変化のトレンドがマッチしたとき小川原湖へ塩分が貯留される。

3. 室内実験における塩水混合の再現

現地観測結果などから、高瀬川河口では複断面河道に起因する複雑な流動形態が生じていることに着目し、実験的に複断面水路密度流の水理特性を明らかにしようとしたものである。ここでは高瀬川の塩水遡上で重要なポイントとなる高瀬川河口の複断面河道部の塩水混合に焦点を絞った実験結果についてまとめている。この実験結果は第4章の混合係数算定の基礎となるデータである。実験水路は高瀬川複断面河道部をモデルとしている。この水路において流速、 Cl^- 濃度の測定、可視化実験を実施した。まず、複断面水路での混合量を見積もるための第一歩として、高瀬川をモデルとした水路模型を作成し、実験を実施した。次に単断面水路において塩水遡上実験を実施し、複断面水路における塩水遡上の実験結果との比較を行った。単断面水路との比較により複断面であることによる塩水混合の影響がどの程度なのか、実験的に明らかにしようとしたものである。また、複断面水路密度流における混合係数算定の際の比較対象となるものである。さらに高瀬川河口の複断面水路部に存在する狭窄部に着目し、高瀬川をモデルとした狭窄部の存在する水路模型を作成し、その混合過程、特性を流速、塩分の測定、可視化手法等によって実験的に明らかにしようとした。ここでは、その実験結果（複断面＋密度流＋狭窄部）と狭窄部のない複断面水路密度流の実験結果（複断面＋密度流）との比較を行った。

複断面水路における塩水混合は、潮汐による河口部の水位変化により、塩水は先に低水路を混合しながら侵入してくる。このとき低水路部では内部波が発生する。その後、低水路と高水敷間の流速差による水平 shear により水平方向への混合が促進される。複断面水路密度流は高水敷上で鉛直方向の内部波による効果と水平 shear による効果が合成され混合が促進される。このため、複断面水路では単断面水路より混合量が多いことが確認された。また、混合の尺度として密度フロントの長さを計算した。密度フロントの長さとは水平方向の表面流速勾配とは関係があることがわかった。さらに、高瀬川河口部の狭窄部にも着目し、狭窄部が存在する複断面水路実験より、塩淡水位差大のとき、複断面水路の効果と狭窄部通過後に生じる渦の効果により混合が促進されることもあることが定性的にわかった。

4. 高瀬川河口の塩水混合特性

第3章で得られた Cl^- 濃度と流速の時系列を使い、拡散方程式により混合係数を求めた。無次元混合係数 $k_y/(u_*h)$ と水路のアスペクト比 B/h の関係をみると、単断面水路の実験結果について

は従来の研究結果とほぼ一致するが、複断面水路での結果は従来の結果と異なっていた。ここに k_y は横断方向拡散係数、 u_* は摩擦速度、 h は水理水深である。水路断面が混合係数に影響するものと考え、複断面水路の $k_y/(u_*h)$ と単断面水路の $k_y/(u_*h)$ の比を計算すると複断面は単断面の 10 倍程度の値を示していた。これは複断面水路の **shear** の効果と考えられる。

さらに第 2 章で述べられた高瀬川河口の複断面河道部において計測されたデータを基に実験値と同様に混合係数を求めてみた。 $k_y/(u_*h)$ は複断面水路の実験値から求められた値と比較すると 3~6 倍であった。高瀬川複断面河道部の浅瀬の $k_y/(u_*h)$ は交番流における既往の実測結果と比較すると 6.2~15.5 倍であった。これらより類推し、高瀬川河口部が複断面河道であることに起因して $k_y/(u_*h)$ が変化しているものであると考えた。一般に複断面水路流れの横断面形の特性は、低水路幅・全水路幅比 b/B 、低水路幅・低水路水深比 b/D 、高水敷水深・低水路水深比 d/D という 3 つのパラメータで表され、パラメータのわずかな変化が流れ場に大きく影響する。断面のパラメータとして d/D 、密度流のパラメータとして塩淡水の相対水位差を使って整理したところ、無次元混合係数と $d/D \times$ (塩淡水の相対水位差) には関係があることがわかった。この関係と現地の高瀬川河口の結果を重ねてみたところ、ほぼ一致した。高瀬川での塩水遡上は複断面河道部における混合に特徴があることがわかった。

論文審査の結果の要旨

河川水と海水の接触する汽水域はしばしば豊富な生態系を有しているが、それらは塩水と淡水の微妙なバランスの上に成り立っている。一方、汽水域は水資源・水産などの点から人間活動も活発であり、その理解・予測および適切な制御の重要性は近年ますます増している。本研究で対象とした高瀬川は、太平洋と小川原湖とを結ぶ一級河川である。一般的な汽水域としての特徴を持つとともに、河道部に狭窄部と複断面部を有し、その淡塩水の混合は極めて複雑である。本論文では、高瀬川における現地観測、水理模型実験を通じ、汽水域の淡・塩水混合機構を明らかにしたものであり、全文5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、研究対象の高瀬川の概要、既往の研究、および、目的を述べている。

第2章は現地観測に基づき高瀬川における塩水遡上について概説している。高瀬川では海域と湖の相対的水位で塩水の浸入がはじまり、途中、狭窄部・複断面部での拡散・希釈を経て小川原湖へ塩水が浸入することを明らかにしている。また、河道部での流速分布・塩分濃度分布等を明らかにしている。これらは重要な知見である。

第3章では現地観測で明らかとなった複断面部での流動を水理模型実験を通じて検討している。複断面水路では高水敷の水平混合が卓越し、また、低水敷では水平混合と鉛直混合の組み合わせたものとなっていることを明らかにしている。さらに、狭窄部の混合効果についても明らかにしている。これは新しい知見である。

第4章では現地観測と水理実験の結果をまとめ、高瀬川における淡塩水混合機構を定量的に明らかにしている。機構の中で最も重要となる混合係数については新しい表示式を提示し、これにより、実験室、現地双方についての混合現象の再現計算を可能としている。これは重要な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文は高瀬川を解析対象として汽水域の水理学的事項を明確にするとともに、その塩水遡上予測法の検討を行ったものであり、水環境システム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。