

博士学位論文審査要旨

2011年2月16日

論文題目：琵琶湖における水質環境の広域音響モニタリングに関する研究

学位申請者：北村暁晴

審査委員：

主査：生命医科学研究科 教授 渡辺好章
副査：工学研究科 教授 松川真美
副査：工学研究科 教授 土屋隆生

要旨：

地球温暖化現象をはじめとした環境問題への取り組みを行う場合の基本資料として、その対象パラメータの時系列変化を精度よく観察する技術の確立は必須要件となる。本論文の対象域である琵琶湖は、わが国最大の面積の湖であることながら「近畿の水がめ」と呼ばれるようにその貯水量も最大であるため飲料水の供給源としても重要な湖沼である。そのため、琵琶湖の周囲環境負荷の低減や汚染の拡散状況の現状把握とその解明は琵琶湖の環境保全にとって極めて重要な要素となる。特に琵琶湖内における湖水の流れや循環は、琵琶湖およびその周辺環境を左右する重要な要因であるため、さまざまな観点から検討が進められている。たとえば、琵琶湖北湖の水平面内を巡る環流は面内汚染の拡散に、湖面から湖底に至る垂直循環は湖底堆積汚染物の再放出に、それぞれ関連があるとされている。また、南北湖の水深の違いによる熱容量の差から生じる密度流は南湖の汚染物質の北湖への流入に関係していると考えられており、これらの解明は琵琶湖環境保全の重要課題として認識されている。

これら湖水の流れは琵琶湖内部の水温分布に起因することが知られており、このような環境保全の課題に対しては、水温の精密なモニタリングが必要となる。しかしながら、一般に環境モニタリングで行われている手法は、観測点まで舟艇を出し、当該地点で舟艇を静止させた後、観測機器を水中に沈めて計測を行うという古典的な方法が現在でも主となっている。この方法では、その地点の深さ方向の水温分布は把握できるが、これは広範な領域の一点の結果を与えるのみに過ぎない。このため、湖内水温の空間分布を把握するためには舟艇の移動が必須となり、これに伴う時間と経費が膨大にかかることになる。また、この従来手法は他の船舶の往来に支障をきたすために常時のモニタリングは難しく、さらには空間的なモニタリングの同時性の確保は極めて困難となる。

著者は、これらの問題の解決手法として音波を用いた広域モニタリング技術を提案し、その実現性について詳細に述べている。すなわち、音波は、その伝搬する過程において媒質である湖水の状態による影響を受ける。特に、音速は水温、塩分、流れなどに敏感に反応することが知られており、音速を計測することにより逆に水温などの計測が可能となる。また、音波を用いると遠隔的な計測ができるため、船舶の往来に支障をきたすことなく常時モニタリングが可能となる。さらに、複数の観測地点間の音速を計測することにより音響トモグラフィ手法において水温の空間分布の把握も可能となる。これらの観点から著者は、従来海洋で用いられていた音響トモグラフィ手法の淡水域への適用に向けて、精度の高い淡水中の音速計算式について検討を行っている。さらに、得られた高精度音速計算式を用いて、実際に音速から湖水温を推定する試みを行うと共に音速を水質環境の指標として用いるこ

とについても考察を試みている。

論文は、8章で構成されており、前半の第1章から第5章は本論文の背景と基礎理論について述べられている。すなわち、第1章では目的と経緯、第2章では海洋音響トモグラフィの原理と実施例、第3章では琵琶湖の水環境変化についてこれまでの研究例の紹介、第4章では本論文で重要となる音速計算式について海水と淡水の違いに焦点をあてての先行研究のレビュー、第5章では本提案手法に用いる音速計算式としてDel Grossoの音速計算式が最も適合性が良いことの実証、をそれぞれ行っている。

論文の後半では得られた成果を展開している。すなわち、第6章では、(1) 琵琶湖の湖水は純水に比べ速いこと、(2) 塩分換算値（純水との音速差を補正）という概念を導入すると $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内の差において水温推定が可能であることを、(3) 塩分換算値は、季節ならびに計測地点によって差があること、(4) 塩分換算値と水質との関係を考察し塩分換算値を用いて水質が判断できる可能性があること等を見出している。第7章では、本研究の工業的応用の観点から、広域観測を目指しての音響トモグラフィの導入に向けた基礎検討を行い、音源の配置について、水温躍層の存在を考慮すべきであることを示すと共に、音速プロファイルは表面付近、湖底付近に音速変化が異なる層があるという興味深い結果を示している。また背景雑音の測定から、琵琶湖域における音響トモグラフィに使用可能な音源周波数範囲も示している。さらに、音響トモグラフィの目的である水温推定において、その要求精度に応じた補正方法が存在することを示し、最適な補正を行うことにより $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ の単位において実測水温と一致することも示している。また、これらの結果を総合すると淡水湖である琵琶湖において、音速は水質指標として使用できること、ならびに水温推定のための音響トモグラフィによる広域観測が可能であると結論づけている。第8章では、本研究全体の総括を行うと共に今後の研究課題、展望について述べている。

以上示したように、本研究で得られた成果は、琵琶湖の環境保全に向けた広域モニタリングシステムとして極めて有用な技術基盤を与えており、さらに、音響トモグラフィを中心とした海洋技術の進展にもきわめて有為な指針を与えると期待できると同時に学術的価値も高く評価できる。よって、本論文は博士(工学) (同志社大学) の学位論文として十分に価値あるものと認める。

総合試験結果の要旨

2011年2月16日

論文題目：琵琶湖における水質環境の広域音響モニタリングに関する研究

学位申請者：北村暁晴

審査委員：

主査：	生命医科学研究科 教授	渡辺好章
副査：	工学研究科 教授	松川真美
副査：	工学研究科 教授	土屋隆生

要旨：

本論文提出者は、2005年4月に本学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、その後2008年4月に生命医科学研究科生命医科学専攻に転研究科し、それぞれの各年度において優れた研究成果を挙げている。また、本研究科修了に必要な所定の単位を修得するとともに、英語の語学試験にも合格している。

本論文の主要部分は、Jpn. J. Appl. Phys. 誌、海洋音響学会誌に掲載され、既に十分な評価を受けている。2011年1月8日午前10時から約1時間15分にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明によりいずれも十分な理解が得られた。

さらに公聴会終了後、論文に関係した諸問題について、審査委員による口頭試験を実施した結果、提出者の十分な学力を確認することができた。

よって、総合試験の結果は合格であると判定した。

博士学位論文要旨

論文題目：琵琶湖における水質環境の広域音響モニタリングに関する研究
氏名：北村 晓晴

要旨：

本論文の目的は、温暖化に伴う琵琶湖における湖水温の上昇を常時観測することを可能とする音響トモグラフィ手法の淡水域への適用について検討を行うことにある。そのための基礎研究として、音速計算式の淡水域への適用の是非について検討するとともに、この音速計算式を用いて湖水温を推定した結果とさらに水質指標として音速を用いることができるかについても考察を行った。

近年の環境問題への意識の高まりに伴い、琵琶湖においても環境負荷の低減や、汚染拡散の解明等に多くの研究が実施されている。特に琵琶湖内の湖水の流れは、琵琶湖およびその周辺環境を左右する重要な要因であるため、研究対象とされることが多い。たとえば、琵琶湖北湖の水平面内を巡る環流は面内汚染の拡散に関係し、湖面から湖底へ至る垂直循環は湖底堆積汚染物の再放出、また南北湖の水深の違いによる熱容量の差から生じる密度流は南湖汚染物質の北湖への流入などに關係しており、それらの解明は重要課題として認識されている。これら湖内の流れは、琵琶湖内部の水温分布に起因する場合が多いことが報告されている。

このような課題に対しては、水温をはじめとする環境モニタリングが重要な手段として位置づけられている。一般に、水温などの環境モニタリングを実施する場合、観測点まで船艇を出し、観測機器を水中に沈めての計測が行われる。しかし、このような方法では船舶の往来に支障をきたすため常時モニタリングが難しく、また、空間的なモニタリングは困難であり、測定の同時性が確保されないといった問題が指摘されている。

本研究は、これらの問題に対し超音波（水中音響）を用いたモニタリング技術の開発を目的としている。音波は、その伝搬する過程において媒質である湖水の状態による影響を受ける。特に、音速は水温、塩分濃度、流れなどに敏感に反応するため、音速を計測することにより間接的に水温などの計測が可能となる。また、音波を用いると遠隔的な計測が可能となるため、船舶の往来に支障をきたすことなくモニタリングが可能となる。さらに、複数の観測地点間の音速が計測できれば音響トモグラフィ手法により水温の空間分布の把握も可能となる。

論文は、8章で構成されており、以下各章ごとにその内容について簡単に要約する。

第1章においては、本論文の目的および本研究に着手するに至った由来について述べた。

第2章においては、海洋音響トモグラフィの原理を簡潔に、アメリカを中心とした実施例について述べた。

第3章においては、琵琶湖の近年の環境変化（水質、水温）、湖沼についての陸水学をはじめとしたこれまでの研究、現在の琵琶湖における研究課題、滋賀県などのこれまでの行政の水質保全政策についてまとめた。湖水の水理、水温に関する水の特性、琵琶湖における環流、密度流の流れに関する先行研究についても参考文献をもとに整理した。現在の水質監視体制についての課題などは滋賀県環境審議会水環境部会において行われた報告から引用しました。また、琵琶湖に関する研究については、滋賀県琵琶湖研究所の研究誌から、従来からの研究課題と今後の研究の方向性について記載された論文からまとめた。

第4章では、本研究の理論的基礎および過去の音速に関する研究を述べた。琵琶湖においての音響装置、システムを含めた検討を行うためには水中の音速についての知見が不可欠であり、水中音響において音速は重要な物理量と考え、海水中の音速と湖水に関する過去の報告について述

べた。

水中の音波の伝搬速度（音速）については、波動方程式に付随して定義される。しかし、海水においては水温、圧力、塩分によって音速は変化する。そのために、水温、圧力、塩分に応じた音速表、音速計算式を作成することが行われてきた。海水のサンプルを用いて音速を測定して、作成された音速計算式について述べ、次いで湖水の音速計算式について調査した範囲での記載を行った。また、海水の塩分についての定義を日本海洋データセンター発行の資料から抜粋して述べた。

第5章においては、音響トモグラフィにおいて、水温を推定するために使用する音速計算式は、水温を含むさまざまな因子で記述されており、その精度の確立が微細な水温変動を求めるためには非常に重要となる。

そこで、水温、圧力、塩分に関する項について検討することが必要と考え、特に、淡水湖においての音速計算式についての検討が過去には行われておらず、塩分に関する項の扱いについての検討を行うための実験を行った。その実験のためには、音速、水温、水圧の測定を適正に行っていくために測定方法の検討と評価が必要であり予備実験を実施し、その結果を述べた。それを受け、琵琶湖において、水温が一様となる時期である冬季、水温躍層が存在する秋季に、複数の地点において水温、音速について測定を行いその結果を述べた。

音速測定値と Del Grosso の音速計算式において純水として扱った計算音速との差については、冬季は 1.5 m/s から 2.0m/s 速い結果となり、秋季については、各測定地点では、同じ傾向を示し、水温躍層を境として、浅い層では音速測定値と計算音速との差は、0.1 m/s から 0.5 m/s 速く、水温躍層より深い層では、1.8 から 2.1 m/s 速い音速となつたことを述べた。

さらに、音速測定値から推定した水温と実測水温との差については季節によってその傾向が異なることを述べた。

第6章においては、第5章の実験結果についての考察を行い、琵琶湖の湖水は純水に比べ、音速が速いという結果を得た。この結果を得るために測定結果を統計処理することにより、誤差、水温ゆらぎの影響を加味して行った。

音速から水温を推定した値と実測水温との差を減らすための検討を行った。この過程において、塩分換算値という概念を導入することにより、水温推定において実測水温との差を 水温の最小測定単位である 0.01 °C まで減じることが可能になったことを述べた。この塩分換算値は、純水と湖水の音速差にあたり、その差を Del Grosso の音速計算式における塩分項によって置き換え評価できるようにした。

季節を変えた音速測定から、この塩分換算値には季節変化があり、冬季は水深によらず一様であり、安曇川の北に位置する地点と北小松沖の地点においてその値に違いがあった。この値は、水温躍層の発達期にはその水温躍層をはさんで異なる挙動をとることを明らかにした。

次いで、秋季の塩分換算値が水温躍層を挟んで大きく異なっている現象について、水質指標として、滋賀県水産試験場による測定結果から塩化物イオンとクロロフィル a を選び考察を行った。その結果、塩化物イオンは湖水中ではおおむね一様に分布しており、塩分換算値との関係は見出せなかった。しかし、クロロフィル a については、水温躍層より浅い水深においては、塩分換算値と反比例にあり、深い水深では比例関係と考えられた。クロロフィル a については、季節変化があるため年間を通した検討が必要であることを述べた。

冬季の塩分換算値が安曇川沖と北小松沖においてわずかに異なり、北小松沖のほうが低いことからその観測点の沖に流れる、環流が第1と第2と異なっており、水質が違うのではないかと推察した。そこで、環流が存在する秋季の 2010 年 11 月に水温、浮遊物質の測定を実施した。その結果から水温躍層の水深が異なり、浮遊物質の量にも違いが認められ、北小松沖のほうが安曇川沖よりも浮遊物質の量は少なかった。冬季には湖水が垂直循環するため、この浮遊物質の垂直循環により、安曇川沖よりも北小松沖においては、冬季の浮遊物質の量が少なくなり、そのことに

より塩分換算値が低くなったと考えた。このため第1環流と第2環流の周辺に設置した観測点において冬季は、水質に違いがあったと推定した。これらのことから塩分換算値により水質が判断できる可能性を指摘した。

第7章においては、本研究の工業的応用の観点から測定結果および考察内容について整理した。音響トモグラフィの実施に向けた基礎検討として、冬季、秋季の音速測定から音速プロファイルを現地測定により明確にした。背景雑音の測定から音響トモグラフィに使用可能な音源周波数範囲も示した。また、音源の配置について、水温躍層の存在を考慮すべきであること、音速プロファイルは表面付近、湖底付近に音速変化が異なる層があることを示し、一定の示唆を与えたと考える。

水温推定において、その要求精度に応じた補正方法が存在することを示し、最適な補正を行うことにより 0.01°C の単位において実測水温と一致することを示した。これらのことから淡水湖である琵琶湖において、音響トモグラフィの実施は可能と考える。

補正方法として提示した、塩分換算値は、冬季に観測地点によるわずかな差があり、第1環流と第2環流による水質の違いを示唆していることを指摘し、その確認のために秋季に実施した現地計測から水質指標の浮遊物質に差が認められ、音響計測（音速）が水質指標として使用が可能であると提案した。

最後に第8章では、本研究全体の総括を行い、今後の研究課題、展望について述べた。