

博士學位論文

(論文内容の要旨及び論文審査の要旨)

第14号

令和元年5月

八戸工業大学

は し が き

博士の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）
第8条の規程に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の
要旨をここに公表する。

目 次

課程博士

| 学位記番号 | 博士の 専攻分野の 名称 | 氏 名 | 論 文 題 名 | 頁 |
|-----------|--------------------|------|--|---|
| 博 第 5 6 号 | 博士（工学） | 功刀 智 | 感潮水域における塩水遡上に関する研究 (Study on salt water Intrusion in Estuary) | 1 |

| | |
|------------|--|
| 氏名 | 功刀 智 |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士（工学） |
| 学位記番号 | 博 第56号 |
| 学位授与年月日 | 平成31年3月20日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 学位論文題目 | 感潮水域における塩水遡上に関する研究 (Study on salt water Intrusion in Estuary) |
| 論文審査委員 | (主査) 八戸工業大学教授 佐々木 幹夫 (副査) 八戸工業大学教授 竹内 貴弘 (副査) 八戸工業大学教授 武山 泰 |

論文の内容の要旨

本研究では現地における感潮水域として青森県の東部に位置する小川原湖と青森県の西北部に位置する十三湖を調査対象水域にしている。小川原湖は湖沼面積 **62.12km²**、水面の標高は2014年平均水位が **0.291m** となっている。小川原湖は日本の湖沼では11番目の面積規模を有している(汽水湖のなかでは5番目)。青森県では、最大の湖である。また、流入河川は七戸川や花切川など6主要河川で、流出河川は高瀬川となっている。小川原湖の水質が平成16年から平成26年にかけて急激に悪化している。水質悪化の原因として進入塩分量の増加や、塩淡水境界面上昇が考えられている。しかし、湖への塩水進入については不明な点が多く、解明が急がれる。そこで、本研究では、湖口における塩水の遡上を調べ、小川原湖に進入する塩水の挙動を明らかにすることを調査研究の目的としている。2016年および2017年には、湖口部の北部湖岸近くに位置する滯筋における遡上塩水塊の挙動を現地観測により調べ検討している。

十三湖は湖沼面積 **18.0 km²**、水面標高 **0.0m**、水戸口により日本海へと結ばれている汽水湖でありヤマトシジミが生息しており、日本で有数のシジミの産地である。岩木川を幹川とする流入河川淡水は水戸口より日本海へと流出している。十三湖も小川原湖と同様に塩水の遡上については未解明なところが多く、海水遡上の影響を受けて変化する汽水環境を明らかにすることは非常に重要となっている。本研究は2013年から2017年の1月から12月までの塩水進入を明らかにし湖口に遡上した塩水の塩分鉛直分布を明らかにしている。

小川原湖口における塩分遡上特性の解明

現地観測方法

観測は自記式の流向流速計、塩分水温計を用いて、2016年は6月14日から10月3日と10月16日から11月27日までの6ヶ月間行った。2017年は6月14日から11月27日までの6ヶ月間行った。

流速観測の予測

現地観測では限られた期間の流速がわかる。しかし、水位より流速が予測可能なため高瀬川河口と小川原湖の水位を取り寄せ、計算により流速の計算ができる。計算と現地観測結果との照合により流速の予測に必要な流速係数を明らかにしている。

塩水遡上特性

小川原湖に塩分・水温計・流向・流速計を設置し、現地観測を実施し遡上塩分を調べた結果以下のことを明らかにした。

(1) 湖水位および河口水位より湖口付近の流速の予測が出来るようになった。

(2) 下層は塩分濃度が高く出ているが上層では低い値になっており強混合の進入形態となっている場合が少なく。

(3) 湖口内部の奥では塩分濃度が高く出ているところに対応している逆流もあるが、逆流に対応していない塩分上昇がある。底面付近では流れに影響されない塩水塊独自の動きが認められた。

感潮水域における塩水遡上予測理論の検討

汽水域では塩水の遡上が多すぎても少なすぎてもそこで生息する生き物の環境が変化し被害を受ける事になる。汽水域は感潮水域となっており、感潮水域では外海と内水の水位差に応じて順流、逆流が生じており、塩水は逆流に乗り陸側に進入する。塩水の動きを支配しているのは順流と逆流である。塩水がどこまで遡上するのは逆流の強さと流れの継続時間による。潮汐の影響を受けている河口域や湖口域では逆流や順流により海水が遡上したり流下したりしており移流現象が支配的になっている。本研究では、河口における海水の挙動は移流拡散方程式により表されるものとして海水の遡上現象を Sasaki, Tanaka and Umeda(2009,2012,2015)により示されている基礎方程式から検討を行っている。河口の塩水の動きに関する理論は最初に Sasaki, Tanaka and Umeda(2012)によって示されている。この理論は塩分の垂直分布を明確にするため、湖底から水面までの全水深をいくつかの水層に分割し、水平分割水層の内部で拡散現象をとらえようとしたものであり、この理論は Sasaki, Tanaka and Umeda(2017)によってさらに発展させられている。しかし、分割水層間における垂直方向の物質移動については、少し不合理な表現があり、本研究では、水層間の物質移動に関する項を物理的に表現し理論の改善を試みている。河口における塩水進入の基本式は物質移動の拡散方程式で表され、分割した水平水層内でこの式を成立させたとき、分割水平水層間の物質移動は吹上現象と吸い込み現象であることを見だし、物質移動の合理的な表現を始めて与えた。さらに、本研究では海から湖に逆流が始まる瞬間の境界条件を合理的に与えている。本研究は、河口における海水遡上に関する理論を発展させている。また、本研究では Sasaki, Tanaka and Umeda の理論が感潮水域であれば適用可能であることを示している。Sasaki, Tanaka and Umeda の理論は順流・逆流が強いほど予測精度が良い。しかし、地形の影響の強い水域では予測精度が落ちることを明らかにしている。さらに、Sasaki, Tanaka and Umeda 同様に本研究は塩分観測の値が1つでもあれば、塩分の時間的、空間的変化が予測できることを明らかにしている。

十三湖における塩水遡上特性

本研究により以下のことがあきらかとなった。

(1) 十三湖に入る塩水の割合は、3月と4月を除く全月で30%に達する。

(2) 3月と4月には、塩水の割合が数%減少する。4月には新鮮な水がある。4月の淡水は99%に達する。3月と4月には山地からの融雪による小洪水があるため、岩木川の淡水量は春先に

多くなる。その後、春から夏にかけて湖に遡上する塩水の割合が増加する。

(3) 塩水侵入量は7月が最も多い。

(4) 9月に湖に流れ込む塩水の量が減少する。9月の塩水侵入の減少は、日本の台風シーズンの大量の降雨によるものである。

(5) 2013年から2017年までの5年間の平均的な塩水侵入量は、3月と4月を除くと毎月50～80 Mm³に達する。塩水は3月に23Mm³に減少し、4月にさらに減少し4Mm³となる。塩水は7月に80 Mm³に達する

(6) 2017年7月、8月、9月の塩水侵入はほぼ毎日発生しているが、湖底近くの高密度の塩水はほぼ毎日一掃されている。高密度の塩水は、2017年に長期にわたって湖の底に留まらない。

(7) 十三湖の湖口においては中層および上層で塩分が変化し塩分は低下する。

ABSTRACT

The estuaries observed in field surveys for this study were Lake Ogawara in east Aomori Prefecture and Lake Jusan in northwest Aomori Prefecture. Lake Ogawara has a total area of 62.12 km² and its mean elevation in 2014 was 0.291 m. It is the eleventh-largest lake in area in Japan (among brackish lakes, the fifth-largest) and the largest lake in Aomori Prefecture. Six principal rivers, including the Shichinohe and the Hanakiri, flow into this lake, and the outflow is named the Takase River. The water quality of Lake Ogawara deteriorated sharply between 2004 and 2014. This is believed to have been caused by an increase in the volume of salt water intrusion and the rise of the salt-fresh water interface. However, many aspects of the salt water invasion remain unknown, and it is urgent to explain them. The objective of this study was to examine intrusion of salt water into the lake mouth and to describe the behavior of the intruding salt water in Lake Ogawara. The behavior of the intruding salt water mass along the main channel, which ran near the north shore of the lake mouth, was observed by direct measurements in 2016 and 2017 and investigated.

The area of Lake Jusan is 18.0 km² and its elevation is 0.0 m. It is a brackish lake, connected to the Japan Sea through Mitoguchi. One of only a small number of Japanese habitats for fresh-water clams, it is home to Japanese basket clams. Its principal source of fresh water is the Iwaki River, which drains to the Japan Sea via Mitoguchi. Like Lake Ogawara, much remains unknown about the salt water intrusion into Lake Jusan, and it is vital to fully describe the variations in the brackish water environment under the influence of salt water intrusion. This study succeeded in describing salt water invasion from January through December 2013-2017, and in describing the vertical distribution of salinity in the invading salt water at the lake mouth.

Characteristics of salt water intrusion at Lake Ogawara mouth

Method of direct observations

Observations were carried out with an automatic electro-magnetic current meter to measure flow speed and direction and a logger for water salinity and temperature for 6 weeks in 2016, from June 14 to October 3 and from October 16 to November 27. Observations were also conducted for 6 weeks in 2017, from June 14 to November 27.

Prediction of flow speeds

The flow speeds are known from direct observations over a limited time span. As they can be estimated from the water levels, these data were gathered from the Takase River mouth and Lake Ogawara, allowing the speeds to be calculated. The calculation results were then cross-checked against the measured data to produce the coefficients needed to make accurate predictions.

Characteristics of salt water intrusion

Instruments were placed in Lake Ogawara to record the salinity, water temperature, flow direction and flow speed. The results of these direct observations and of examination of the intruding salinity

- (1) It is possible to predict the flow speeds near a lake mouth from the lake water surface and

the river mouth water surface

(2) The lower layers of flow show greater salt concentrations than the upper layers. Few cases of strongly mixed flow were seen.

(3) There was some reversed (upstream) flow in the upper water layers of the lake mouth with high salinity, despite the absence of reversed flow. The salt water mass near the river bottom moved without influence from the other flows.

Investigation of theory for prediction of salt water intrusion in an estuary

Whether a brackish region undergoes either excessive or inadequate salt water intrusion, the living things inhabiting that region suffer a negative impact. Brackish regions are estuaries which experience both outward flow and reversed flow, depending on the levels of the adjacent ocean and of the inlet, and salt water is carried inland by reversed flows. The movement of salt water is dominated by the flow, whether outward or reversed. The extent to which the salt water intrudes the estuary and river course depends on the strength of the reversed flow and the time of the flow continues. The river mouth and lake mouth regions, which are influenced by the tide, show alternating reversed and outward flow, all dominated by advection. Investigations of salt water intrusion represent these phenomena with the advection diffusion equation, which has been shown by Sasaki, Tanaka and Umeda (2009, 2012, 2015) to apply to the behavior of salt water at a river mouth. Sasaki, Tanaka and Umeda (2012) were the first to publish a theory about the movement of salt water at a river mouth. In order to specify the vertical distribution of salinity, this theory divides the entire depth of a river from the bottom to the surface into some number of layers, and handles diffusion phenomena within each layer of water. This theory has been further developed by Sasaki, Tanaka and Umeda (2017). With respect to vertical movement of matter in the layers; however, this allows for implausible phenomena, so in this study, we attempted to improve their theory with terms expressing the physics of movement of substances between water layers. The fundamental equation representing salt water intrusion a river mouth is the diffusion equation for the motion of substances. Having established this equation for the interior of a layer, expressions were then added to account for uptake and settling of substances between layers. A simplified form of the interface conditions was also incorporated in this study, representing the moment reversed flow begins from the ocean into the lake. This study further develops the theory of salt water intrusion at a river mouth. It shows that Sasaki, Tanaka and Umeda's theory is applicable to estuaries and provides increasingly accurate estimates with increasing volumes of the outward and reversed flows. However, it also shows that the prediction accuracy suffers when topography has much effect on flow. In addition, as noted by Sasaki, Tanaka and Umeda, this study found that temporal and spatial variations in salinity can be predicted from a single course of salinity observations.

Characteristics of salt water intrusion at Lake Jusan

The following results were obtained from this study.

(1) Aside from the months of March and April, salt water reaches up to 30% of the volume of water into Lake Jusan.

(2) In March and April, the volume of by salt water falls by single digits. There is a new supply of fresh water in April, and at that time, fresh water accounts for 99% of the water volume. There is minor flooding in March and April due to runoff from the mountains, increasing the flow of the Iwaki River in early spring. Subsequently, the fraction of the water volume represented by salt water increases due to intrusion from the sea, during spring and summer.

(3) Salt water intrusion volume is greatest in July.

(4) Salt water intrusion into the lake begins to decrease in September. This is due to the heavy rainfall accompanying the onset of typhoon season in September in Japan.

(5) The mean intruding volume of salt water during the 5 years from 2013 through 2017 was 50 – 80 Mm³ in the months other than March and April. It fell to 23 Mm³ in March and 4 Mm³ in April and reached 80 Mm³ in July.

(6) Salt water intrusion occurred nearly every day during July, August and September of 2017, but the layer of the highest density near the lake bottom was also swept out nearly every day.

High-density salt water almost never remained at the lake bottom for long periods on 2017.

(7) The salinity of the medium-depth and shallow layers at the mouth of Lake Jusan varied, but remained at low levels.

論文の審査結果の要旨

本研究は現地における感潮水域として青森県の東部に位置する小川原湖と青森県の西北部に位置する十三湖を調査対象水域にしている。小川原湖の水質が平成 16 年から平成 26 年にかけて急激に悪化している。水質悪化の原因として進入塩分量の増加による塩淡水境界面上昇が考えられている。しかし、湖への塩水進入については不明な点が多く、解明が急がれる。そこで、この研究では、湖口における塩水の遡上を調べ、小川原湖に進入する塩水の挙動を明らかにすることを調査研究の目的とし、2016 年および 2017 年には、湖口部の北部湖岸近くに位置する滞筋における遡上塩水塊の挙動を現地観測により調べ検討している。

本研究で現地対象水域としている十三湖は水戸口河道により日本海と結ばれている汽水湖でありヤマトシジミが生息しており、日本で有数のシジミの産地となっている。十三湖も小川原湖と同様に塩水の遡上については未解明なところが多く、海水遡上の影響を受けて変化する汽水環境を明らかにすることは非常に重要となっている。当該研究は 2013 年から 2017 年の 1 月から 12 月までの塩水進入を明らかにし湖口に遡上した塩水の塩分鉛直分を明らかにしている。

本研究は全 4 章よりなり、第 1 章では調査研究の意義および目的、従来の研究について述べており、既往の研究を十分把握していることを示しており、その中での当該研究の位置づけを明確に示している。

第 2 章では感潮水域における塩水遡上予測理論の理論的な考察を行い、理論をさらに発展させている。当該研究では、河口における海水の挙動は移流拡散方程式により表されるものとして海水の遡上現象を Sasaki, Tanaka and Umeda(2009,2012,2015)により示された基礎方程式から検討を行い、水層間の物質移動に関する項の改善を試み、分割水平水層間の物質移動は吹上現象と吸い込み現象であることを見だし、物質移動の合理的な表現を始めて与えており、新たな知見を示している。さらに、厳密解の順流（陸から海への流れ）から逆流（海から内陸部への流れ）への転流時の境界条件についての検討を行い、転流時の塩分濃度の連続性が保たれるような境界値設定を提案し、既往の研究では与えていなかった新たな設定式を示している。当該研究で発展させた理論を小川原湖に適用した結果、湖口に遡上する塩水には鉛直方向の分散が認められ、下層の塩分濃度が高く、上層が低くなっており、強混合の進入形態でないことを明らかにしている。

第 3 章では十三湖における塩水遡上特性を各月ごとに明らかにしており、塩水遡上が上流域山地の積雪水量の影響を受けていることを解明しており、遡上塩水の鉛直分布を明らかにしている。第 4 章にこの研究で解明した内容をまとめている。

以上の研究成果は新たな知見を有し、博士（工学）の学位を授与するに十分といえる。

最終試験の結果の要旨

本人が提出した学位論文の公表状況を以下に報告する。

学術論文として国際英文誌 International Journal of Engineering and Innovative Technology(IJEIT)(事務局アメリカ、フロリダ)に掲載された査読付き論文2篇、国際会議の発表論文(英文)として2016 & 2017 Vietnam-Japan Workshop on Estuaries, Coasts and Rivers の3篇、2017 & 2018 International Symposium on Engineering and Natural Science の3編、東北地域自然災害科学調査研究3篇、自然災害科学調査研究東北地区部会口頭発表3篇、計14編である。

次に、学位論文の審査状況について報告する。

平成31年1月25日に、八戸工科大学にて審査委員の全員出席のもと予備審査が行われた。本研究で明らかにした内容をより明確にさせることなどが指摘された。平成31年2月6日に、八戸工科大学にて審査委員の全員出席のもと本審査が行われた。発表後の質疑に対して適切かつ明確に回答できた。

以上のことから、十分な研究能力と知識を有していると認められ、博士(工学)の学位を授与するに相応しいと判断する。

