

学位論文題名

寒冷地半閉鎖性水域の流動に関する研究

学位論文内容の要旨

海跡湖等の半閉鎖性水域は、海であった水域が沿岸の砂州等により隔てられ形成された水域であり、その多くが淡水化による水源としての利用および陸地化による農地としての利用等の高度な開発がなされているなか、北海道を代表とした積雪寒冷地域においては本来の自然条件および汽水湖としての特性を保つ湖沼が多く残されている。近年、湖および周辺地域の開発が急速に進み、流入河川域の農地化および湖内における養殖漁業の大規模化にともなう湖内水質環境の変化が起きている。半閉鎖性水域は外海に近い塩分濃度と高い静穏性を有するため、養殖漁業の場として適していると同時に、狭い開口部により外海と通じているため、周辺を含めた環境の変化にともない水質環境を急速に悪化させる危険性をあわせもっている。近年、これらの水域は身近な親水空間としても関心が高まるなか、恒久的な漁場としての利用のためにも水質環境に配慮した開発計画が必要とされており、半閉鎖性水域における水質保全策として海水交換を促進することが挙げられる。海水交換は湖内に流入する外海水量と湖内水の流出量および流入した外海水の湖内における輸送により評価される。本研究においては、北海道サロマ湖を例とし、潮汐流による湖口部を介した流出入および湖内流動を把握するとともに海水交換について考察を行うものである。

寒冷地であるオホーツク海沿岸に位置するサロマ湖は周囲 91.1km、水面面積 151km²、最大水深 19.6m を有し天然の第 1 湖口および人工の第 2 湖口により外海へ通じており、帆立貝等の栽培漁業の場として広く利用されており、湖内には養殖漁業が可能な水深 10m 以上の水域のほぼ全域に養殖施設が設置されている。また寒冷地特有の自然条件下にあり、冬季間には湖面が結氷し、沿岸には流水が到来するため膨潮時には潮汐流により海水が湖内へ流入する。湖口から流入した流水は湖内を移動する際に養殖施設等にたいし被害を与えるため第 1 湖口部には氷盤の流入を制御する防水堤 (Ice Boom) が建設されている。したがって、サロマ湖において湖内流動を把握するためには、自然条件として外海の潮汐変動、河川からの流入、湖面上の風を、また寒冷地特有の自然条件として冬季間の結氷、流水の流入を、また人工的な条件として湖内の養殖施設、第 1 湖口部の防水堤をそれぞれ考慮しなければならない。サロマ湖内の流動解析は過去に幾度か行われ報告されている。しかしながら、上述したような条件を全て考慮した成果は未だ得られていない。以上のことから本研究においては、室内実験により求められた養殖施設および氷盤の流体抵抗を、サロマ湖の現状をもとに設定し流動解析を行うことにより、湖内流動における養殖施設および氷盤の影響を詳細に把握することとする。また解析に際し、サロマ湖における自然条件を検討した結果、外海潮汐は日周期型の変動であり、河川からの流入にたいしては湖口を介した流出入と比較し流量において 10×10^4 のオーダー以下であり、風にたいしては冬季間では西高東低の気圧配置に起因する風速 3.0~5.0m/sec 程度の南西の風であることが確認された。氷盤群にたいし流体力の測定実験により剪断抵抗力係数を算出し、Ice Jam の形成過程にかんする実験より結氷盤下における Ice Jam の成長過程を明らかにし、下面形状の粗度を用い既存研究により報告されている平坦な氷盤群、通常状態の氷盤群、Ice Jam 状態の氷盤群の剪断力係数を整理し、数値解析に用いる氷盤および氷盤群の剪断抵抗力係数を決定し、サロマ湖防水堤において実測された Ice Boom のメインケーブルの張力より剪断抵抗力係数を算出し、実験により得られた係数と比較することにより実験結果の妥当性を確認した。氷盤

群の抵抗係数の設定法を明らかとするため、Ice Boomにおける氷盤群の流体力の作用形態にたいし考察を行い、模型氷を用いた室内実験によりIce Boomの固定構造物間における氷盤群によるArchの形成条件を求め、Ice Jam現象およびArch現象を含め膨潮時および落潮時における湖口付近での氷盤群の挙動を明らかとした。サロマ湖において用いられている延縄式養殖施設は構造上幹綱を基準とした方向性の有る構造物であるため、養殖施設の幹綱にたいし流れが垂直に作用する状態および流れが平行に作用する状態の2状態にたいし実験を行い、各状態における剪断力係数を算出した。実現象において流れは角度をもち養殖施設に作用するものであるが、数値計算において流向はx方向およびy方向の成分に分離し計算されているため、流れの角度は計算上で処理することとする。なお、養殖施設群に作用する流体力は主に、流れが平行に作用する状態においては幹綱より垂下されている養殖籠の形状に由来する側面の粗度に依存し、流れが垂直に作用する状態においては投影面積に依存し決定される結果が得られ、流れが垂直に作用する状態と平行に作用する状態において剪断抵抗力係数は大きく差のある結果となり、養殖施設は設置配置のみでなく設置方向においても湖内流動に大きな影響をおよぼすことを明らかとした。

サロマ湖内流動の把握のためMulti Level Modelにより流動解析を行った。養殖施設の影響は、実験結果により求められた抵抗係数を実地資料に基づく配置および設置方向により設定することにより考慮されている。開氷期の湖内流動において、大瀬付近およびサロマ中央海盆とサロマ別海盆と繋ぐ水路部において流入時には大きな流速で、流出時にも僅かではあるが同一の東方向の流れが確認され、サロマ別海盆において上層と下層で逆方向の流れが発生していることが確認された。これらはサロマ湖湖内流動の特徴である。養殖施設による抵抗力を設定した状態においては流動に養殖施設の配置および設置方向の影響が流向・流速に顕著に表れており、湖内流動は一定の剪断抵抗力を設定することでは再現されず、養殖施設による抵抗力を配置および設置方向を考慮し設定することが重要であることが示された。結氷期において、氷野の状態は、結氷盤のみの状態および氷盤群が流入した状態として上記の考察により明らかとなった氷盤群の挙動を考慮した状態と考慮しない状態の2種類の状態にたいし解析を行った。結氷盤は潮汐流による外海水の流入量に大きな影響をおよぼさないが湖内流動にたいしては大きな影響をおよぼしていることが確認され、氷盤群にかんして挙動を考慮せず設定した状態においては湖内潮位差および湖口部流量の減少のみが確認されたが、挙動を考慮し設定した状態においては流出時と流入時の抵抗力差による湖内潮位変動の基準面の低下、第1湖口と第2湖口における流量比の変化およびそれに付随する湖内流動の変化等の特徴的な流動が確認され、結氷期の流動を把握する上で氷野の状態の把握が重要であることを明らかとした。

流動解析とともに初期状態で湖内に一様に溜められた拡散物質にたいし移流拡散計算を行い物質の減少率および減少域により、潮汐1周期間における海水交換量および流入外海水の湖内輸送を評価した。海水交換量は流出入量に大きく依存しているが、比例関係にはなく、湖内の養殖施設および氷野による外海水の湖内輸送能力の低下により、海水交換の効率が悪化していることが確認され、湖内水質環境にたいし考察を行う際にも養殖施設および氷野の状態を十分把握することが重要であることを明らかとした。本研究においては、これまでに把握された湖内流動特性および海水交換の現状より、外海水の輸送能力を低下させ海水交換を阻害していると推測される養殖施設の配置および設置方向を湖口部からの流入が阻害されにくい配置に変更し同様の解析を行った結果、外海水の湖内輸送能力が向上し海水交換量が増加する結果を得た。水環境は海水交換のみで評価できるものではなく更に多くのパラメータにより評価されるものであるが、サロマ湖における水質環境の改善手法の一つとして養殖施設配置の変更が有効性であることを明らかとした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 伯 浩

副 査 教 授 藤 田 睦 博

副 査 教 授 長谷川 和 義

副 査 助教授 山 下 俊 彦

学 位 論 文 題 名

寒冷地半閉鎖性水域の流動に関する研究

我が国の積雪寒冷地域においては本来の自然条件および汽水湖としての特性を保つ湖沼が多く残されている。近年、湖および周辺地域の開発が急速に進み、流入河川域の農地化および湖内における養殖漁業の大規模化にともなう湖内水質環境の変化が起きている。半閉鎖性水域は外海に近い塩分濃度と高い静穏性を有するため、養殖漁業の場として適していると同時に、狭い開口部により外海と通じているため、周辺を含めた環境の変化にともない水質環境を急速に悪化させる危険性をあわせもっている。近年、これらの水域は身近な親水空間としても関心が高まるなか、恒久的な漁場としての利用のためにも水質環境に配慮した開発及び利用計画が必要とされており、半閉鎖性水域における水質保全策として海水交換を促進することが挙げられる。本研究は、養殖漁場として高度に利用されているサロマ湖を例とし、潮汐流による湖口部を介した流出入および湖内流動を把握するとともに海水交換について考察を行ったものである。

寒冷地であるオホーツク海沿岸に位置するサロマ湖は天然の第 1 湖口および人工の第 2 湖口により外海へ通じており、帆立貝等の栽培漁業の場として広く利用されており、湖内には養殖漁業が可能な水深 10m 以上の水域のほぼ全域に養殖施設が設置されている。また寒冷地特有の自然条件下にあり、冬季間には湖面が結氷し、沿岸には流水が到来するため膨潮時には潮汐流により海水が湖内へ流入する。湖口から流入した流水は湖内を移動する際に養殖施設等にたいし被害を与えるため第 1 湖口部には氷盤の流入を制御する防氷堤 (Ice Boom) が建設されている。したがって、サロマ湖において湖内流動を把握するためには、自然条件として外海の潮汐変動、河川からの流入、湖面上の風を、また寒冷地特有の自然条件として冬季間の結氷、流水の流入を、また人工的な条件として湖内の養殖施設、第 1 湖口部の防氷堤をそれぞれ考慮しなければならない。以上のことから本研究においては、室内実験により求められた養殖施設および氷盤の流体抵抗を、サロマ湖の現状をもとに設定し流動解析を行うことにより、湖内流動における養殖施設および氷盤の影響を詳細に把握することを目的としている。また解析に際し、サロマ湖における自然条件を検討した結果、外海潮汐は日周期型の変動であり、河川からの流入にたいしては湖口を介した流出入と比較し流量において 10×10^4 のオーダー以下であり、風にたいしては冬季間では西高東低の気圧配置に起因する風速 3.0~5.0m/sec 程度の南西の風であることが確認された。氷盤群にたいし流体力の測定実験により剪断抵抗力係数を算出し、Ice Jam の形成過程にかんする実験より結氷盤下における Ice Jam の成長過程を明らかとし、下面形状の粗度をい用い既存研究により報告されている平坦な氷盤群、通常状態の氷盤群、Ice Jam 状態の氷盤群の剪断力係数を整理し、数値解析に用いる氷盤および氷盤群の剪断抵抗力係数を決定し、サロマ湖防氷堤において実測された Ice Boom のメインケーブルの張力より剪断抵抗力係数を算出し、実験により得られた係数と比較することにより実験結果の妥当性を確認した。氷盤群の抵

抗係数の設定法を明らかとするため、Ice Boom における氷盤群の流体力の作用形態にたいし考察を行い、模型氷を用いた室内実験により Ice Boom の固定構造物間における氷盤群による Arch の形成条件を求め、Ice Jam 現象および Arch 現象を含め膨潮時および落潮時における湖口付近での氷盤群の挙動を明らかとした。一般の湖沼に用いられている延縄式養殖施設は構造上幹綱を基準とした方向性の有る構造物であるため、養殖施設の幹綱にたいし流れが垂直に作用する状態および流れが平行に作用する状態の二つの状態に対し水理実験を行い、各状態における剪断力係数を算出した。実現象において流れは角度をもち養殖施設に作用するものであるが、数値計算において流向は x 方向および y 方向の成分に分離し計算されているため、流れの角度は計算上で処理することとしている。なお、養殖施設群に作用する流体力は主に、流れが平行に作用する状態においては幹綱より垂下されている養殖籠の形状に由来する側面の粗度に依存し、流れが垂直に作用する状態においては投影面積に依存し決定される結果が得られ、流れが垂直に作用する状態と平行に作用する状態において剪断抵抗力係数は大きく差のある結果となり、養殖施設は設置配置のみでなく設置方向においても湖内流動に大きな影響をおよぼすことを明らかとした。

湖内流動の把握のため Multi Level Model により流動解析を行った解析に先立ち、湖口部近傍に形成される渦の規模と位置及び湖内外の水位差に着目して、実測値と計算値の比較を行い、解析法の妥当性を確認した。養殖施設の影響は、実験結果により求められた抵抗係数を実地資料に基づく配置および設置方向により設定することにより考慮されている。開氷期の湖内流動において、大瀬付近およびサロマ中央海盆とサロマ別海盆と繋ぐ水路部において流入時には大きな流速で、流出時には僅かではあるが同一の東方向の流れが確認され、サロマ別海盆において上層と下層で逆方向の流れが発生していることが確認された。これらはサロマ湖湖内流動の特徴である。養殖施設による抵抗力を設定した状態においては流動に養殖施設の配置および設置方向の影響が流向・流速に顕著に表れており、湖内流動は一定の剪断抵抗力を設定することでは再現されず、養殖施設による抵抗力を配置および設置方向を考慮し設定することが重要であることが示された。結氷期において、氷野の状態は、結氷盤のみの状態および氷盤群が流入した状態として上記の考察により明らかとなった氷盤群の挙動を考慮した状態と考慮しない状態の二つの種類の状態にたいし解析を行った。結氷盤は潮汐流による外海水の流入量に大きな影響をおよぼさないが湖内流動にたいしては大きな影響をおよぼしていることが確認され、氷盤群にかんして挙動を考慮せず設定した状態においては湖内潮位差および湖口部流量の減少のみが確認されたが、挙動を考慮し設定した状態においては流出時と流入時の抵抗力差による湖内潮位変動の基準面の低下、第 1 湖口と第 2 湖口における流量比の変化およびそれに付随する湖内流動の変化等の特徴的な流動が確認され、結氷期の流動を把握する上で氷野の状態の把握が重要であることを明らかとした。

流動解析とともに初期状態で湖内に一様に溜められた拡散物質にたいし移流拡散計算を行い物質の減少率および減少域により、潮汐 1 周期間における海水交換量および流入外海水の湖内輸送を評価した。海水交換量は流出入量に大きく依存しているが、比例関係にはなく、湖内の養殖施設および氷野による外海水の湖内輸送能力の低下により、海水交換の効率が悪化していることが確認され、湖内水質環境にたいし考察を行う際にも養殖施設および氷野の状態を十分把握することが重要であることを明らかとした。本研究においては、これまでに把握された湖内流動特性および海水交換の現状より、外海水の輸送能力を低下させ海水交換を阻害していると推測される養殖施設の配置および設置方向を湖口部からの流入が阻害されにくい配置に変更し同様の解析を行った結果、外海水の湖内輸送能力が向上し海水交換量が増加する結果を得た。サロマ湖における水質環境の改善手法の一つとして養殖施設配置の変更が有効性であることを明らかとした。

以上の解析手法は、他の寒冷地半閉鎖性水域の流動解析に幅広く適用可能である。

これを要するに、著者は、寒冷地閉鎖水域の流動解析を行うに必要な、各種流体抵抗係数を実験的に行い、養殖施設、結氷盤、侵入流水、防水堤等が明らかにしたもので、水産工学及び湖沼学に寄与するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。