

学 位 論 文 題 名

寒冷地の閉塞塩湖における蒸発量の経年変化

学位論文内容の要旨

古陸水学研究において、内陸性の蒸発流出型閉塞湖の水位変化は、しばしば地域的な気候変化を示す指標として扱われる。

柴達木盆地(Qaidam Basin)は、チベット・青海高原の北縁標高3,000m~5,000mに位置する集水面積およそ250,000km²の広大なプラヤ(playa)である。盆地内部の気候は、降水量が25mm~50mm、年平均気温が2°C~4°Cで冬季の気温は-30°Cにも達する。ここには厚さ60m以上に及ぶ塩類の堆積物が存在し、更新世後期には巨大な閉塞湖であったと考えられている。乾燥・寒冷な気候下で生じた、大量の塩類集積を伴う大湖沼の水位低下と消滅を、降水量の減少あるいは気温の上昇などの気候変化の影響のみで説明することには疑問がある。

蒸発流出型の閉塞塩湖では、湖水の塩分が年々濃縮される。塩分の増加に伴う湖水の物理特性の変化は、湖面蒸発量を次のように変化させる効果をもつ。1) 飽和水蒸気圧降下による減少、2) 氷点温度降下および最大密度温度の低下のために結氷期間が短縮されることによる増加、3) 流入河川から供給される濁水が表面高濁層を形成し、これが日射を吸収して昇温することによる増加。

本研究では、一次元熱拡散モデルを用いた数値実験を行い、塩分の増加が湖面蒸発量に及ぼす影響について検証した。実験対象とした青海湖は、柴達木盆地の東側、湖面標高3,200mに位置する中国最大の閉塞湖で、湖水面積4,500km²、平均水深15mを有する。周辺の気候は、年平均気温-0.6°C、年降水量は375mmで乾燥・寒冷である。湖水の塩分は、1960年代の化学分析結果では12.5g·kg⁻¹、1987年の主要溶存イオンの分析結果ではその合計が12.9g·kg⁻¹である。

湖面の熱収支を計算する際、短波放射量に対する高度効果、長波放射量に対する気温と表面温度の温度差による補正項、潜熱および顕熱輸送量に対する大気安定度の効

果、および湖面の結氷・融解に関する積雪による断熱効果を考慮した。短波放射に対する高度効果は、高地に観測点が多い低緯度地帯（ $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ）について全天日射量の高度分布を調べ、これから標高3,200mにおける補正係数を推定した。

蒸発量に変化をもたらす塩分の効果として、飽和水蒸気圧降下、氷点温度降下、最大密度温度の低下、および河川の豊水期における表面高濁層の形成について評価した。ただし、青海湖水は NaCl が76%、 MgSO_4 が23%、 MgCl_2 が1%の混合水溶液であるとした。

湖水の密度は、溶存物質の見かけのモル体積 ϕ_i から計算できる。ここで、 ϕ_i を求めるためのMassonの関係式（ $\phi_i = A_i + B_i \sqrt{m_i}$ 、 m_i は重量モル濃度）は、広い濃度範囲で適用できるように係数 A_i 、 B_i を新たに求め、それぞれ温度に関する一次式として表した。

表面高濁層の形成条件を検討した結果、濁水のbulk densityと塩水の密度の比較から、湖水の塩分が薄い段階でも高濁層が形成する可能性があることがわかった。また、懸濁粒子の沈降速度と粒径の関係式から、非常に細かい粒子（ $\leq 0.5\mu\text{m}$ ）でなければ長期間高濁層を維持できないことがわかった。懸濁物濃度から日射の透過率を見積ると、50cmの厚さがあれば日射はすべて高濁層に吸収される。

数値実験は、塩分の効果がほとんど無視できる淡水の状態から、湖が結氷しない高塩分の濃縮段階までを想定し、 $0.0\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\sim 187.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ の濃度範囲について行った。現在の塩分を $12.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ とし、1961年～1962年の水温分布の実測値に対して計算結果の水温がフィットするように熱拡散係数を決めた。計算に用いた気象データは29年間の観測による月平均値を1/3ヶ月ごとに加重配分した値を用いた。

現在の塩分 $12.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ における蒸発量は $920\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ となり、このとき結氷期間は4.5ヶ月間、最大氷厚は52cmとなった。淡水の場合の蒸発量は $850\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ となり、結氷期間は5ヶ月間、最大氷厚は60cmとなった。塩分 $187.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ における蒸発量は $990\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ となり、このとき湖は結氷しない。このときの年蒸発量は、淡水の場合に比べて17%の増加である。さらに河川の豊水期に表面高濁層が形成されることを想定して計算すると、塩分 $187.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ のときの蒸発量は $1040\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ となり、22%の増加となる。表面高濁層の効果は、高塩分の濃縮段階ほど顕著になった。

数値実験の結果、湖水の塩分の増加は結氷期間を短縮し、年蒸発量を増加させるこ

とがわかった。経年的に塩分の濃縮が進む閉塞塩湖では、年蒸発量を加速度的に増加させる正のフィードバック効果がはたらき、降水量の減少あるいは気温の上昇を伴わない水位低下を起こすと考えられる。したがって、古陸水学・古湖沼学研究において、閉塞湖の水位の変化を手がかりに古気候を復元しようとするとき、この蒸発量増加機構を十分考慮する必要がある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 尾 欣四郎

副 査 教 授 小 林 大 二

副 査 助教授 浦 上 晃 一

学 位 論 文 題 名

寒冷地の閉塞塩湖における蒸発量の経年変化

チベット・青海高原の柴達木盆地やアンデス山脈のアルチプレーノなどの約4,000mの寒冷で乾燥した高地の広大な旧湖盆に厚い塩類の堆積が見られる。申請者は、これらの湖は、塩分濃縮に伴い湖面蒸発量を増加させる機構が働いているのではないかと推論に達した。この作業仮説を検証する湖として、申請者が1988年に、文部省国際学術研究として参加した青海湖を選んだ。

青海湖はチベット・青海高原の東端に位置する中国最大の閉塞塩湖で、湖面標高3,200m、湖の流域面積30,030km²、湖面積4,480km²、最大水深27m、平均水深は14.8mで、広くて浅い湖盆形態を特徴としている。湖岸の旧汀線痕跡で、最高水位を示すものは現湖面上110mに存在し、堆積物の¹⁴C年代により、形成年代は12,000yr B. P.であった。湖畔の剛察で、1957～1986年に観測された気象データによれば、年平均気温は-0.6℃、年降水量は375mmで、降水量の97%は4月から10月までの期間に集中している。青海湖は、流出河川を持たない蒸発流出型の閉塞湖である。湖は主として西方から流入する布哈河と北から流入する沙柳河によって涵養されている。申請者も参加した1987、1988年の日中合同調査によって明らかにされた同湖の水収支は、湖面降水量375mm・yr⁻¹、湖面蒸発量804mm・yr⁻¹、湖への河川流入量と地下水流入量は、湖水位換算高で、それぞれ、334mm・yr⁻¹および15mm・yr⁻¹であった。その結果、湖水位低下は80mm・yr⁻¹と見積られている。青海湖の湖水塩分は、12.5g・kg⁻¹で、NaCl 76%、MgSO₄ 23%、MgCl₂ 1%の主要成分で構成されている。蒸発流出型の閉塞湖である青海湖では、湖水の塩分は年々濃縮される。完新世以来、流入河川のCl⁻濃度11.4mg・ℓ⁻¹から現湖水のCl⁻濃度5.9g・ℓ⁻¹に達する迄の時間は、成分収支により5,700年と

見積られた。申請者は湖水塩分の増加に伴う湖水の物理特性の変化は、湖面蒸発量を次の如く変化させる効果を持つと考えた。1)飽和水蒸気圧降下による蒸発量の減少、2)氷点温度降下および最大密度温度の低下により結氷期間の短縮と蒸発量の増加、3)流入河川から供給される濁水が表面高濁層を形成し、表水層が日射吸収により昇温することによる蒸発量の増加、である。本研究では、青海湖の湖水塩分濃度が初期の淡水の場合から、現在の塩分 $12.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ から $187.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ までの濃縮段階に達した場合の蒸発量を計算した。蒸発量増加に対する塩分効果を検証するための数値実験は基本的に熱収支法によった。湖面の熱収支解析では、湖面高度が $3,200\text{m}$ であることを考慮し、入射する短波太陽放射量については、全天日射量の高度分布を調べ、高度補正係数を見出した。また、湖面からの長波放射量に対する見積には、気温と表面温度との温度差による補正項を与える放射収支を提案している。また、潜熱および顕熱輸送量に対する大気安定度の効果を与えるとともに、冬期間の湖面結氷・融解に関する熱収支計算では、湖水上の積雪被覆の効果を折り込んでいる。さらに、湖水の貯熱量変化は、一次元熱拡散モデルに準拠し、1961年～1962年に測定された水温鉛直分布の季節変化に対して、塩分 $12.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ の計算水温が一致するように熱拡散係数を決定した。計算に用いた気温、湿度、風速、日照時間の気象資料は29年間の月平均値を1/3ヶ月ごとに加重配分した値である。湖水塩分増加に伴う最大密度温度降下、氷点降下、飽和水蒸気蒸気圧低下は水温鉛直分布の季節変化、特に、冬期間の結氷期間、氷厚に著しく影響する。申請者は、上記の物性変化を NaCl , MgSO_4 , MgCl_2 の三成分混合溶液として、 -20°C の低温領域まで溶液物理学の立場から系統的に明らかにした。数値計算の結果、淡水の場合の蒸発量は $850\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ で、結氷期間は5ヶ月間、最大氷厚は 60cm となった。また、現在の塩分 $12.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ での蒸発量は $920\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ で、結氷期間は4.5ヶ月、最大氷厚は 52cm となり、測定値とほぼ一致する。更に、濃縮が進行し、塩分 $187.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ に達すると、蒸発量 $990\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ となり、冬期結氷は起こらず、年蒸発量は淡水の場合に比べて17%増加となる。また、豊水期に河川からの濁水流入が表面高濁層を形成した場合を想定すると、塩分濃度 $187.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ の時、蒸発量は $1,040\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ で22%の増加となる。表面高濁層の効果は、高塩分の場合ほど顕著となる。湖水塩分の増加は結氷期間を短縮し、年蒸発量を増加させる。経年的に塩分濃縮が進行する閉塞塩湖では、塩分増加が年蒸発量を加速的に増加させる機構が明らかとなった。

本研究は自然湖沼において、湖水塩分と蒸発量との関係を初めて明らかにしたもので、本論文の成果は古湖沼学、古気候学の発展への貢献が極めて大きい。よって、審査員一同、申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。