

機関番号：13301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2010

課題番号：19700675

研究課題名（和文） 湖沼流域系における気候変動と物質輸送過程

研究課題名（英文） Matter Transport Processes with Climatic Changes in Lake Biwa

研究代表者

青田 容明（AOTA YASUAKI）

金沢大学・環日本海域環境研究センター・研究員

研究者番号：20397201

研究成果の概要（和文）：

琵琶湖に集積する堆積物の輸送プロセスを明らかにすることを目的として、湖外からの堆積物変動と湖底環境の変動を調べた。堆積物変動は風波に由来する変動と良い一致を見せたが年によって異なる挙動を示した。湖底環境では、泥温由来と考えられる湖底近傍の水温逆転が観測され、更に泥温の方が多くの時期で高温である事が観測された。これらの結果から、底泥を含んだ湖底近傍においては、熱的不安定性が生じる事によって上向きの輸送を促進し得る可能性のある事が分かった。

研究成果の概要（英文）：

For clarifying transport processes of sediments settling from outside of Lake Biwa, we studied a fluctuation of sediments flowing from lake outside and time variation of water temperature near the boundary of lake-bottom and of temperature in lake sediments. Although the fluctuation of sediments well corresponded to monitoring data of the wind around Lake Biwa, its year-to-year trend was different. On the bottom of Lake Biwa, water temperature near the lake-bottom was higher than the temperature above it. Temperature of the sediments below lake-bottom was also higher than the temperature near the lake-bottom. Spectrum analysis showed the possibility that an increase of water temperature near the lake-bottom could partly be induced by increasing the temperature of lake sediments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	400,000	120,000	520,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
年度			
総計	3,500,000	510,000	4,010,000

研究分野：陸水物理

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：自然地域・環境システム

## 1. 研究開始当初の背景

湖沼堆積物は、コアサンプリングによって得られた堆積物の層序の変化から、記録された過去の湖及び周辺の環境変遷情報を引き出し、水文気候変動を推定するために広く用

いられている。数年から数十年オーダーの気候変動については、堆積物の堆積速度や粒子サイズの平均的な変動と降水量の変動が良い対応を示す事や、湖底堆積物中に過去の豪雨や暴風雨に起因する痕跡が記録されてい

る事が、湖や池沼のコア試料分析から推定されている。これらの結果に基づいて、観測記録が存在しない時代（主に百～数百年オーダー）の水文環境の変化や気候変動を推定しようという試みがなされつつある。湖沼堆積物は、海底の堆積物と比較して堆積速度が速いので、周囲の環境変動をより細かな時間解像度で記録している事が利点である。しかし、農業や工業および生活用水として水資源が活発に利用される湖沼域では、気候変動以外の多くの要因が堆積環境に対して及ぼす影響が少なくないため、その推定は困難をともなう。このような推定を更に精度良く定量化するためには、少なくとも豪雨や暴風雨などのイベント的な変化を検出できる時間解像度の細かな調査によって、堆積物の季節変動特性とその変動を支配する気候変動要因を推定するしかない。

セディメントトラップを用いた調査は、一定期間湖内に係留することでそこに捕集された沈降粒子のフラックス及び経時変化を把握するためによく用いられている。ただし、セディメントトラップは係留期間中にトラップ内へ沈降してきた粒子の全てを捕集するため、風波等に起因する湖底泥からの再浮上粒子も同時に捕捉してしまう。したがって、トラップ内に捕捉した粒子の時間的あるいは季節的な変動要因について、風波にともなう湖内での「再生産」と大雨にともなう湖外からの流入との区別が難しい。

琵琶湖は成層期と循環期が一年に一度巡る一循環湖である。一年を通じて台風等のイベントは成層期に多いため、この時期の堆積環境が年変動に対して重要である事は容易に推察される。一方で、循環期には成層期よりも鉛直混合が活発になり、冬季から春季には融雪に伴って河川流入量が増加するため、この時期では河川を通じた土砂流入と湖内での鉛直輸送のいずれも堆積環境に対して影響する。

しかしながら、コア試料に刻まれるような、気候変動が引き起こす年オーダーの湖底堆積環境の変動と、例えば月スケールでセディメントトラップ等により回収される捕集堆積物の変動とは、少なくとも定量的には一致しない。それは、上記影響に加えて、風波に依存した湖底の再巻き上げに起因する影響が、トラップ係留位置においても生じるためである。その結果として、セディメントトラップから推定される年間堆積速度はコア試料から推定されるものよりも一般的に速い事が知られており、堆積機構を推定する事を困難にしている。

したがって、環境変動にともなう湖底の堆積環境変動を、年単位の変動にまで敷衍するためには、風波が主要因であると考えられる

湖内生成と降雨が主要因と考えられる湖外からの流入の影響を評価する事が望まれている。

風波あるいは強風時に引き起こされる物質の輸送機構として、湖底付近の流れや成層期における湖流の急激な変化に起因する湖底泥の再浮上が重要な機構の一つとされており、琵琶湖においても主に姉川河口などの湖岸付近や北湖と南湖境界付近で幾つかの研究がある。しかし、多くはCTDによる調査時における濁度計測にもとづく瞬時値であり、月毎の積算値ではない。北湖北部における堆積機構は、一つの考え方が提示されてはいるものの未だ不明な部分が多く、扱う沈降物質変化の時間スケールにおいても、多くは、降雨の影響をダイレクトに捉える事が主目的であるため、短期間の離散的スケールで行われる場合が多い。本研究のように、数年やそれより長期の気候変動にともなう堆積環境の変化を明らかにする事を目指す場合には、強風時や豪雨時といったイベント的な変動を含む気候の諸変動が、通年の積算的な湖底堆積環境に対してどの程度影響するかを把握する事が重要である。

こうした背景に基づいて、湖底の堆積環境変動がどういった要因に支配されているのかを、時間間隔が密で詳細な連続計測によって推定するという着想に至った。

## 2. 研究の目的

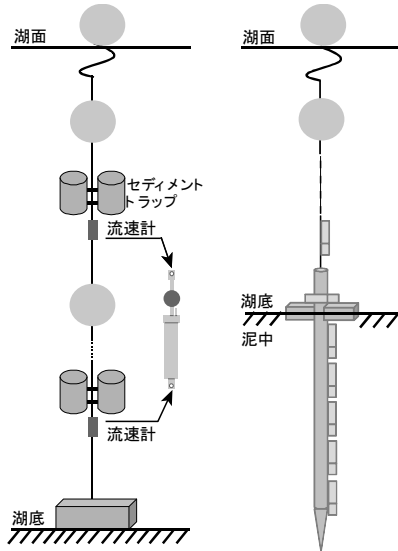
本研究は、湖底の堆積環境変動がどういった要因に支配されているのかを、月スケールや年スケールの湖外もしくは湖内の環境変動を把握することで推定するものである。

具体的には、セディメントトラップにより捕集された堆積物と気象変動の関係を推定し、併せて、湖底の堆積環境に大きく影響を及ぼす湖内における物理要因と考えられる、湖底付近の流れと水温等の物理量の比較的長期の変動を連続計測によって明らかにすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

湖底地形的には、湖内へ流入した物質の集積域とみなせる琵琶湖最深部付近にセディメントトラップを設置し、月毎の変動を把握した。また、湖内における流動場の経時変化を把握するため、水温の鉛直分布や水平流速を連続的に計測できる測器を設置した。セディメントトラップの直下にメモリー電磁流速計を設置し、水平流速と水温を10分～20分単位で連続計測した。また、自記式水温計をトラップ係留地点の近くに、鉛直方向に14点（表面および水深1、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、70、90m）設置し、水温の鉛直断面を10分毎に計測した。

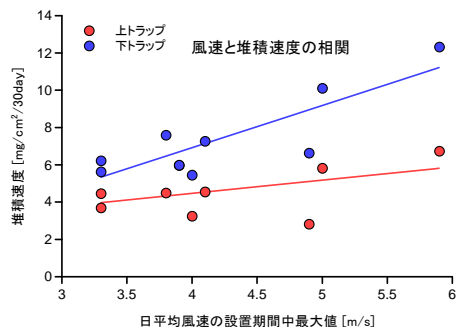
更に、琵琶湖の湖底泥付近における環境が近年変化している可能性が指摘されていることから、湖底泥付近の連続計測を更に詳細化することを試みた。まず、これまで用いてきた自記式水温計よりも10倍以上の精度を持つ小型高精度水温ロガーを湖底付近に設置し、湖底泥付近の水溫の鉛直分布の計測を試みた。また、それらの観測結果から、湖底近傍の水溫だけではなく泥溫も重要な変動が生じている可能性があった事から、図のような計測システムを構築し、同地点で連続計測を行った。



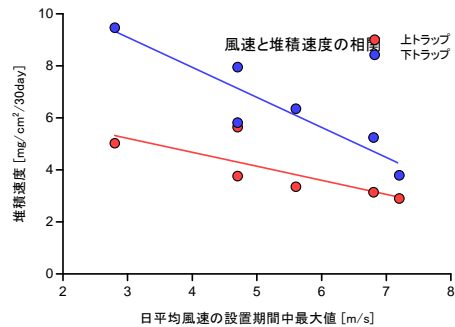
図左：セディメントトラップと水温計係留系  
図右：泥温計測系

#### 4. 研究成果

これまでの観測により連続的に得られたトラップ試料から堆積速度を推定し、様々な気象観測結果と比較すると、下図のように、1年間のトラップ内の堆積速度と風速の間に高い相関が見られた。この高い相関は湖底近傍に設置したトラップの方が顕著 ( $R=0.46$  と  $R=0.84$ ) であり、また、堆積速度も湖底近傍のトラップの方が早い。これらの解析より、トラップ内堆積物は、河川等を通じた単なる沈降だけではなく、底泥の再浮上等に伴う再移動の影響が大きいことが示唆された。

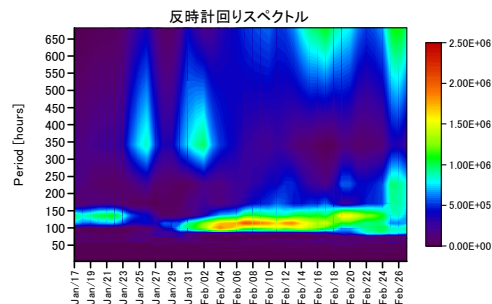


しかしながら、下図に見られるように、次年度の観測時期では、負の相関を示しており、風波を伴う単純な混合プロセスだけではこれらの結果を統一的に説明できない。



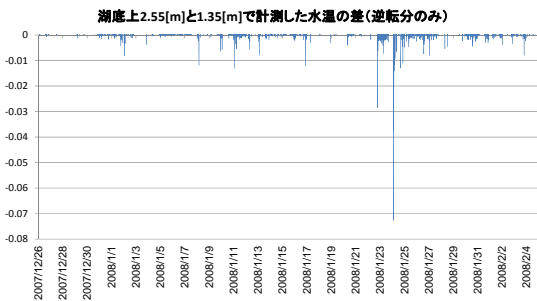
更に、その後の観測では、明確な相関を示さない時期もあり年によって傾向が大きく異なっていた。一方で、琵琶湖の深度が深い地域における湖底の状況について、低酸素化傾向や気泡の発生が頻発する現象等が観測され、湖底近傍の環境が近年変化しているのではないかという可能性が指摘されている。こうした状況の変化から、以降は湖内の物理環境の変化に主眼を置いて検討した。

湖底近傍の流速変化について、セディメントトラップと同じ地点に設置した流速計を用いた連続観測結果から、内部ケルビン波に相当する周期成分だと考えられる、長周期の反時計回り回転スペクトル成分が観測期間中に強く現れていた事が分かった (下図)。



また、このような長周期の波動成分は冬季においても生じている事を確認できた。内部ケルビン波は水温躍層の傾斜と地球自転の影響とのバランスによって生起されるが、水温躍層付近だけではなく最深部の湖底付近においてもこのような長周期波動の影響を受けている事が分かった。また、内部ケルビン波は水柱の鉛直方向における密度不均衡が一要因となって生ずるが、冬季に見られた長周期波動成分がこのようなメカニズムが主要因となって生じたものなのかは、解析に用いた各種パラメータの妥当性も含めて現在検討中である。

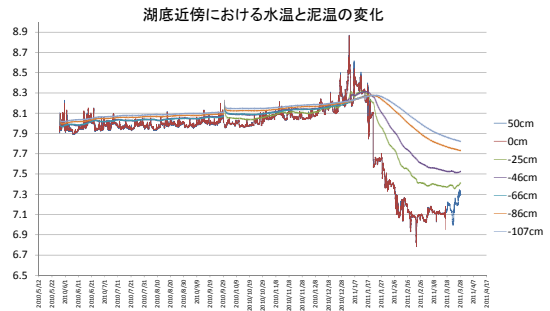
既存の報告から、このような湖底付近における長周期波動の減衰過程が深層水の混合を促進し得る事が指摘されている。長周期スペクトルを精度良く解析するためには、時間間隔が細かい長期の流速あるいは水温データセットの取得が不可欠なことに加えて時間解像度の高いデータ解析方法の確立が必須である事から、今後の継続的な調査と共に、底泥環境の長期的な変動に影響を及ぼす時間解像度のデータ解析に関する問題点を整理した。流速計による先の観測結果および湖底付近の物質輸送に関わる鉛直混合現象をより客観的に評価可能にするために、比較的深い淡水湖沼で長期係留用として利用されている高精度な水温計（精度±0.002℃）を複数台購入し、これまでと同じ地点の湖底から鉛直方向に設置した。この観測によって、琵琶湖深水層における鉛直水温微細構造を冬期においても確認する事ができた。



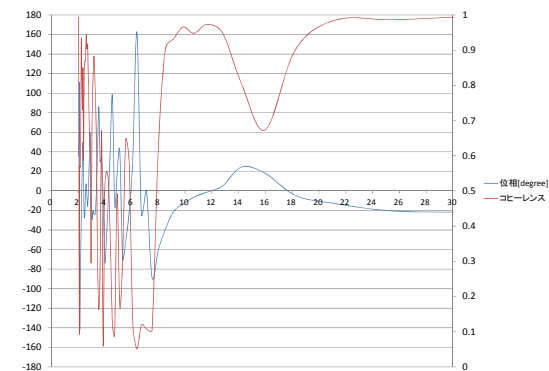
また、非常に興味深いことに、特定の時期において、湖底近くの鉛直水温分布が逆転し、湖底近くの水温の方が高くなるという観測結果が得られた（上図）。このため、湖底近傍の鉛直方向の水温分布について、その形成と維持期間を、湖底泥温も含めた連続モニタリングによって明らかにする事とした。このような湖底近傍における水温逆転層は今回初めて観測されたもののため、どれぐらいの水平領域に広がっているのか、また、どれぐらいの温度差でもってどの程度の期間維持され得るのかという基礎データがほとんど得られていない。当該年度では、現有する機材の制限から、こうした湖底近傍での物理環境変動のうち、逆転層が観測された特定領域に絞ってモニタリングを実施し、湖底堆積環境にインパクトをもたらす可能性のあるこうした現象の基礎データ収集にあたった。

琵琶湖の最深部付近において、湖底面を挟んで鉛直方向に水温計を複数個設置し、湖底境界層付近の水温と底泥の鉛直分布を連続的に計測した。このような計測システムを2地点に設置して約1年間の連続計測を行った結果、水温の逆転がみられた地点と逆転がそれほど顕著ではない地点があり、かつ、水温逆転がみられた地点では泥温が水温よりも高い事が分かった。また、いずれの地点に

おいても、周期的な変動とともに直線的な温度上昇が観測され、冬季に湖水の冷却が進むことで急速に温度低下へ転じた。

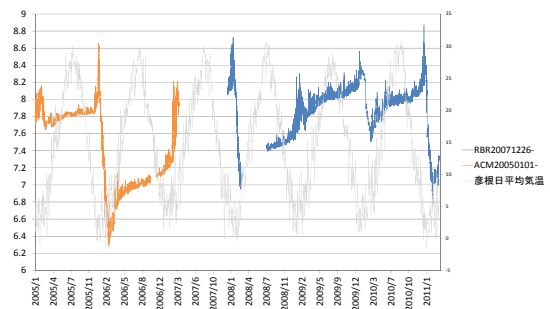


水温と泥温の逆転が顕著な地点では、スペクトル解析の結果より、位相の逆転が特定の周期で生じている事が分かり、時期によっては泥温の温度変化に続いて水温変化が生じている可能性が見いだされた。



地点間のこのような鉛直泥温分布の違いは、仮に地熱のような熱源の影響が考えられたとしても、それが単純に湖底全体を暖めているというメカニズムだけでは説明できない。また、湖底近傍の水温が逆転するという結果および底泥温の方が高いという結果から、底泥を含んだ湖底近傍においては、熱的不安定性が生じる事によって上向きの輸送を促進し得る可能性のある事が分かった。

下図は、湖底近傍に設置した水温計の計測結果と、高精度水温計を設置する以前にほぼ同じ地点に設置していた電磁流速計による水温計測結果である。結果として、2006年の



冬季は、湖面冷却と湖水の混合によって湖底も相対的に良く冷やされていたのに対し、近

年は湖底があまり冷却されていない。特に、2009年の冬季は湖底の冷却がほとんど進んでおらず、そのため2008年後半から2009年後半は直線的とみなせるほど昇温傾向にある。2010年の冬季は冷却が進んだものの、2009年の同時期の水温レベルと同程度であり、一年を通してみても、2009年と傾向が似通っていたが、その後、2011年冬季にはある程度の冷却を示した。

彦根地方気象台が公表している日平均気温と湖底の水温変動を比較した結果、上で述べた水温変動を説明できるような顕著な対応関係は見られなかった。観測期間中に同一地点で計測した表面水温は一部欠測期間があるけれども、日平均気温と同じ変動傾向を示していた。湖水の熱収支を評価しないとはっきりしたことは言えないけれども、これらの結果から、比熱の異なる泥中での温度変化が蓄積系となって湖底付近の水温変動に影響を及ぼしているかもしれない事が一つの昇温メカニズムとして考えられる。このことは、水温と泥温の観測結果や、それから計算された特定周期における位相逆転という結果からも推察される。

以上、湖底近傍の水温が近年昇温傾向にあり、それが少なくとも一部は泥温に起因するものであろう事が連続的な観測結果から明らかになった。もしも、少なくとも観測地点における湖底泥が、水温以外の熱源により暖められているとすると、地熱のような熱源や、何らかの水平移流、もしくは地下水等限局的な要因などに原因を求めるしかない。しかし、こうした熱源を予測するためには、別の新たな観測系が必要となるだろう。湖底近傍の鉛直水温が逆転しているという結果は、湖底近傍において熱的不安定性を生じさせる事から上向きの輸送が促進され、湖底の堆積環境を変化させる要因になる。また、仮にこの層が夏季から秋期に見られる水温躍層と同じような役割を担うとすれば、最初に述べた湖底近傍の冬季におけるケルビン波相当の周期的変動も、こうした湖底近傍における微細層における変化が一つの要因になっているのかもしれない。いずれにせよ、湖底の堆積物輸送メカニズムに関して、湖内、特に湖底近傍のこうした環境変動が大きく寄与しているであろう事が十分考え得る結果が得られた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Tamamura, S., Sato, T., Ota, Y., Aota, Y., Kashiwaya, K. and Kumagai, M., Seasonal

Deposition Fluxes of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Lake Biwa, Japan., *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 198:297-306, 2009. 査読有.

- ② 熊谷道夫, 青田容明, 伊藤靖彦, (総説) 湖沼環境と次世代エネルギーシステムの調和—琵琶湖環境とエネルギーモデル—, *GS Yuasa Technical Report*, Vol.4(2): 1-9, 2007. 査読無.

[学会発表] (計7件)

- ① 長谷川直子, 北澤大輔, 青田容明, 熊谷道夫, 強風時における琵琶湖北湖の水温の東西不均一性, 日本陸水学会 第75回大会, 2010年9月18日, 弘前大学(青森県).
- ② 坂口綾, 山本政儀, 富田純平, 小藤久毅, 青田容明, 熊谷道夫, 琵琶湖水系における天然放射性核種ウラン・トリウム同位体挙動研究, 日本地球化学会第56回年会, 2009年9月16日, 広島大学(広島県).
- ③ Yasuaki AOTA, K. KASHIWAYA and M. KUMAGAI, Seasonal Characteristics of Lake Current and Vertical Mixing Affecting on Sediment Transport in the Hypolimnion of Lake Biwa., The 5th Japan - Korea - China International Workshop, October 9th, 2008, Hakodate, Hokkaido (Japan).
- ④ Yasuaki Aota, Construction of Online Data Access Service in Lake Biwa Environmental Research Institute, Lakes of the Pacific Rim Workshop, March 22-25, 2008, UC Davis Tahoe Environmental Research Center, Nevada (USA).
- ⑤ M. Kumagai, Y. Aota and Y. Ito, Matching of Lake Environments and Future Energy Systems - Lake Biwa Environment and Energy Model -. International Symposium on Environment, Energy, and Materials (organized by KIFEE (Kyoto International Forum for Environment and Energy)). December 4th-7th, 2007. Piazza Omi, Shiga (Japan).
- ⑥ Yasuaki AOTA, K. KASHIWAYA and M. KUMAGAI, Vertical Mixing of Lake Water and Sediment Transport Based on Four Year Continuous Monitoring in the Hypolimnion of Lake Biwa, The 4th China-Japan-Korea Joint International Workshop, September 17-21, 2007, Nanjing (China).
- ⑦ Ishikawa, K., M. Kumagai, R. Walker, Y.

Aota, T. Ura, Observation of dissolved oxygen depletion above the bottom of Lake Biwa using the autonomous underwater vehicle "Tantan". The 30th Congress of SIL (International Association of Theoretical and Applied Limnology), August 12-18, 2007, Montreal (Canada).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青田 容明 (AOTA YASUAKI)

金沢大学・環日本海域環境研究センター・  
研究員

研究者番号 : 20397201