

博士（地球環境科学） 篠 塚 良 嗣

学位論文題名

The variability of inorganic elemental profiles  
in sediment cores of Lake Suigetsu  
and Lake Biwa across the late-glacial/Holocene

（晩氷期／完親世における水月湖と琵琶湖の堆積物コア中の  
無機化学組成変化に関する研究）

学位論文内容の要旨

日本中央部の若狭湾に隣接する水月湖で採取した年縞堆積物コア試料 (10,220-15,700 years before the present (yr B.P.))と同じく日本中央部に位置する琵琶湖で採取した3本のピストンコア試料 (コア A、B、C)、及び各々の湖周辺集水域で採取した陸上の表層堆積物を用いて、無機化学組成の分析を行った。この無機化学組成の変動と、地質構造や気候変動などの堆積環境変化との関連について調べた。本研究で調べた環境変化を検出するための地球化学的指標は以下の4項目である。1) Ti/Al、Th/Sc、Yb/Ce、Yb/Eu、Hf/Sc 比等：これらの元素は風化に抵抗性のある重鉱物に含まれているため、これらの元素同士の比は風化の運搬過程においても保存される。したがって、これらの元素同士の比は供給源から湖へと流れ込む碎屑物の種類や量の変遷を知るのに役に立つと推測できる。2) Mn/Fe 比：鉄とマンガンは酸化的な環境下では不溶性の水酸化物として存在する。マンガンと鉄の水酸化物の沈殿量を比較すると、酸化的な状態が進むとマンガンの方が沈殿する割合は大きくなることが報告されている。このため、Mn/Fe 比は湖水の溶存酸素濃度の変化を反映していると考えられる。3) 生物起源シリカとリンの含有量：前者は湖内の珪藻の量を反映しており、後者は植物によって取り込まれ利用されることが報告されている。そのため、両者は生物生産性を反映しているといえる。4) 琵琶湖のヒ素の含有量：琵琶湖で多数の地点で採取された湖底表層堆積物中のヒ素含有量と水深との間には強い相関関係があることが報告されている。

まず、水月湖では、Ti/Al、Th/Sc、Yb/Ce、Mn/Fe 比、及び生物起源シリカフラックスの変化から、急激に降水量が増加したことで、母岩から水月湖へ流入する碎屑物の量と水量が増加し、それに伴い湖内の溶存酸素と生物生産性が変化したと推測できる4つの時期 (15,060-15,020、14,950-14,920、11,340-11,320、及び 11,110-11,080 yr B.P.)を検出した。さらに、降水量が増したことで湖内の溶存酸素濃度と生物生産性が上昇したと考えられる時期 (15,000-13,100 yr B.P.)も検出した。また、すでに報告されている海洋環境と水月湖の花粉分析の結果から、日本中央部におけるベーリングの始まりは 15,060~14,920 yr B.P. であり、後氷期の始まりは 11,340~11,080 yr B.P.

である可能性があると推測した。このベーリングの始まりはすでに報告されている同コアの花粉分析の結果とも一致しており、グリーンランドのそれより数百年早いという結果を示している。

次に、琵琶湖ではコア堆積物中のヒ素の含有量は湖水深のプロキシーとして提案されているので、琵琶湖中央部で採取したコア A とコア B を用いて、過去四万年間の古環境変化とヒ素の含有量との間の関係を調べてみた。その結果、コア A から得られた過去 9 千年間のヒ素含有量の変化は、約 2,000-9,000 yr B.P.までは水深に直すと約 10m 程度しか変化していなかった。またそれ以後は人為的な影響と考えられる変化を除くと以前に報告したようにヒ素の含有量は増加傾向にあった。しかし、コア B から得られた過去 4 万年間のヒ素含有量の変化から求めた水深の変化は非常に大きいため、断層運動のみでは説明することができない。琵琶湖周辺で風化された岩石等からヒ素が湖水へ流入すると、直ちに鉄の水酸化物に収着されて湖底に堆積する。ヒ素含有量は湖の水深以外に、集水域から湖へと流れ込むヒ素の量によっても大きく影響されると考えられる。

また、過去 43 万年間の堆積環境を保存している琵琶湖掘削コア中の Th/Sc 比と氷期間氷期サイクルの間に相関関係をみつけている。そこで、過去 4 万年間の堆積環境を保存しているコア A 中の Th/Sc 比を分析してみたが、最終氷期から後氷期への変化は検出できなかった。この不一致は、Hf/Sc 比の垂直分布から、断層運動によって採取地点まで運搬されるハフニウムを多く含む重鉱物であるジルコンの粒径の違いによって説明することができる。また、粒径分画をした後、化学分析を行うことで、Th/Sc 比と氷期間氷期サイクル間の相関関係は風成塵ではなく、温暖期に降水量が増加したことで、母岩から高濃度のトリウムを含む重鉱物の流入量が増加したために起ったものと推測した。したがって、Th/Sc 比は降水量の増加の指標となり、Hf/Sc 比は古地震の指標となる可能性がある。

そして、3 本のピストンコア堆積物中の Ti/Al 比、Th/Sc 比、Yb/Ce 比、Mn/Fe 比、及び生物起源シリカとリンの含有量の変化から、コア A の約 7,500yrB.P. と 3,200yr B.P. に Mn/Fe 比とリンと生物起源シリカの含有量に変化を検出した。また、コア-B の約 16,500-15,000yr B.P. と 12,000-10,700 yr B.P. の期間には Ti/Al 比、Mn/Fe 比とリンの含有量に変化を検出した。約 16,500-15,000yrB.P. の期間の変化は日本近海の海洋環境と気候変化に関する文献からも、前者は気温変化によって生物生産性と、湖内の溶存酸素濃度が変化に関連していると考えた。一方、12,000-10,700yrB.P. の期間の変化は降水量の変化によって、母岩から琵琶湖への物質の供給量が変化し、それにともない生物生産性と、湖内の溶存酸素濃度が変化したのではないかと推測した。ところがコア C からは気候変化に対応する環境変化は検出できなかった。これはコア C の採取地点は流量の多い安曇川河口に近く、河川からの流入の影響の変動を強く受けるために堆積環境の変動が激しいためと考えた。このように琵琶湖でも日本中央部の晩氷期以降の気候変化に関係した可能性のある環境変化を検出することができた。また、100-200 年間程度の高時間分解能で無機化学組成の分析から検出するには、コア A とコア B の採取地点である琵琶湖中央部の地点が適している。

最後に、水月湖においては日本中央部の気候変化に関係した環境変化を検出することができ、そして日本中央部におけるベーリングと後氷期の開始時期がグリーンランドの

水床コアとは数百年ずれている可能性のある時期を示唆した。また、琵琶湖においては、本研究よりもより高分解能な数十年単位での分析を行うことで、水月湖同様にベーリングの始まりなどを検出できる可能性がある。

このように、本研究は湖底堆積物コア中の無機化学元素比の変動が過去の様々な堆積環境変化と関連している事を明確に示唆したものであり、湖の堆積物コア中の無機化学組成を高精度に分析する事で今後古環境変動を新しい視点から解明する事が期待される。

## 学位論文審査の要旨

主査 助教授 豊田和弘  
副査 教授 岩熊敏夫  
副査 教授 田中俊逸  
副査 助教授 古月文志  
副査 名誉教授 大場忠道（北海道大学）

### 学位論文題名

The variability of inorganic elemental profiles  
in sediment cores of Lake Suigetsu  
and Lake Biwa across the late-glacial/Holocene

（晩氷期／完親世における水月湖と琵琶湖の堆積物コア中の  
無機化学組成変化に関する研究）

湖底堆積物は中緯度での環境変動の時間高分解能な記録媒体として注目されている。1995年には数万年間を高分解能に解析する事を目的に琵琶湖湖底の3地点でピストンコアが採取された。本研究では、その琵琶湖中央部の南北に3本のコア中の、南から北へ約180試料、約450試料、約100試料（それぞれ過去8,000年間、過去38,000年間、一万年前～二万一千年前の堆積年代）、及び水月湖の1本の掘削コア中の約420試料（15700年前～10200年前の堆積年代）についてICP発光分析と放射化分析を併用して、主成分元素と微量元素の定量を行った。

琵琶湖掘削コア中のトリウム／スカンジウムの含有量比（Th/Sc比）の変動が過去43万年間の氷期間・氷期サイクルと連動していると報告されている。本研究で琵琶湖コア試料について粒度別分析をおこなうと、20 $\mu\text{m}$ 以上の粒度成分中のTh/Sc比などは著しく大きく、粗粒成分がバルク組成のTh/Sc比を左右する事が分かった。琵琶湖の西岸と南岸には花崗岩があり、その地域の土壤にはモナザイトやジルコンなどの重鉱物粒がある。トリウム、セリウムやハフニウムはこれらの重鉱物に濃縮されている事が多く、スカンジウムは粘土鉱物中に残留するため、Th/Sc比は起源の推定の指標として利用できる。温暖期にはこの重鉱物の流入量が急増したために、バルク組成中のTh/Sc比が大きくなったと推測した。

本研究で得られた南のピストンコア中のTh/Sc比やCe/Sc比の垂直分布では過去五百年間に著しく増大している事が目立つ。これは室町時代末期から琵琶湖湖南岸に広がる森林が急激に伐採されたために花崗岩が露出したこととその風化土壤中のモナザイト粒の琵琶湖中央部への流入量が著しく増えたためと考えた。また、南と中央のピストンコア中では過去3万1千年前から千年前までの間に約

15回のTh/Sc比とCe/Sc比のスパイク状の増大が起り、これは台風や洪水の回数が急増した時期に、南岸からのモナザイトの流入量が一時的に増えたためと考えた。実際1万2千年前、1万4千5百年前など、それら変動のいくつかは、氷期中の急激な温暖時期ともかなり一致している。

北のピストンコアの化学組成の垂直分布では1万6千7百年前で不連続的にTi/Al比が減少してHf/Sc比の増大していることから、なんらかの原因でコア堆積物の供給源が堆積岩主体から花崗岩主体に移動したと考えた。中央のコアの組成比変動でも、1万6千年前から約千年に1度位の割合でHf/Sc比のスパイク状の増加が発生している。琵琶湖西岸にはシリコン粒に富んだ比良花崗岩体があり、また西岸湖底には活断層帯が連なっている。琵琶湖西岸は地質学的にも千年から二千年間隔で断層運動による沈降が生じているとされている。したがって、中央のコア中のHf/Sc比のスパイク状の増加は、地震による乱泥流により運ばれた西岸の花崗岩土壌中のジルコン粒の流入によるものと考えた。

なお、水月湖コア中でもこれらの微量元素含有量比などにスパイク状の増大が検出された。それらの原因についても琵琶湖コアと同様に考察をしようとしたが、乱泥流や台風洪水を示唆する堆積速度の増大した層と重鉱物の多く含まれる層との間に不一致が見られるため、琵琶湖コアと同様な考察が成立しない。

さらに、琵琶湖コア中のTh/Sc比がスパイク状に増大するもう一つの原因として、日本ではまれなアルカリ岩質火山灰の混入の可能性についても検討した。例えば1万2百年前の韓国鬱陵島で噴出して日本中部に降下した火山ガラス中のTh/Sc比は約25でTa/Sc比は約15であり、日本列島の堆積物とは著しく化学組成が異なる。琵琶湖の南と中央のコア中の化学組成変動から、その大陸からの火山灰降下前の数百年から数千年前の時代中に少なくとも2回のTa/Sc比の異常値が検出された。これまで報告されないほど薄い層厚で鬱陵島付近からのアルカリ岩質火山灰の降下があったと考えられる。水月湖コアでも同様なTa/Sc比の異常値が検出されて、その年代が求められた。

琵琶湖表層堆積物中のヒ素含有量と水深と強い相関関係があることから、古水深または湖水準の変動の指標と提唱されていたが、琵琶湖のピストンコアの過去四万年間のヒ素含有量の変動は、湖水準の変動では説明できない程大きい。本研究で得られたヒ素含有量の変動は過去の気候の急激な温暖化の時期とも一致するので、ヒ素含有量は温暖化による降水量の増大に伴う湖へのヒ素流入量の急増による影響も多く反映すると考察した。

これまで堆積物コアを用いた過去の環境復元の研究は数多くなされているが、本研究のように湖底堆積物コアの微量元素の含有量がどのような指標になるのか検討した研究例は世界的に見てもほとんどなく、今後の発展が期待できる。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに充分な資格を有するものと判定した。