

宍道湖における17世紀初頭の汽水から 淡水への環境変化

— コアのCT画像解析と堆積, C·N·S元素分析による検討 —

田村嘉之¹⁾・丹後雅憲²⁾・井内美郎³⁾・徳岡隆夫²⁾

Seventeenth century environmental change from brackish to fresh water conditions in Lake Shinji — CT image photographic, sedimentologic and C·N·S elemental evidence —

Yoshiyuki Tamura¹⁾, Masanori Tango²⁾, Yoshio Inouchi³⁾
and Takao Tokuoka²⁾

Abstract: Geohistorical studies show that the environment of Lake Shinji changed from brackish to fresh water around the seventeenth century again. This environmental change is detectable by CT (computed tomography) scanning images and C·N·S elemental analyses of core samples. CT scanning images of core samples suggest that the sediments can be divided into two units, Unit I and II. The uppermost unit I is composed of fine- to very fine-sand and silt layers, with bioturbation and shell fragments. Fine- to very fine-sand layers can be distinguished clearly on CT scanning image pictures. The underlying unit II is represented by silt layers, and lacks bioturbation and shell fragments. In this unit, sedimentary structures comprising 2-3 mm thick laminations can be distinguished on CT scanning image pictures. C·N·S elemental analyses of Unit I show that sulfur and total organic carbon contents are low, suggesting a fresh and oxic water environment. Unit II exhibits higher sulfur and total organic carbon contents, which indicate brackish and anoxic water conditions. This change may have been brought about by the eastward migration of the Hii River after large floods around A.D. 1630. CT scanning images reveal the existence of laminated structures in Unit II, as shown in the color photo. These structures may represent rhythmical environmental changes. The structures are not visible with the naked eye, and were also not revealed by previous soft-X ray analysis. CT image analysis has thus proved to be a useful method for analyzing muddy soft sediments.

Key words: Lake Shinji, CT scanning image picture, laminated structure, oxic environment, anoxic environment

はじめに

-
- ¹⁾ 新潟大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Niigata
University, 8060 Ikarashi-Ninocho, Niigata, 950-21, Japan
- ²⁾ 島根大学総合理工学部地球資源環境学教室
Faculty of Science and Engineering, Shimane University,
1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane, 690, Japan
- ³⁾ 工業技術院地質調査所海洋地質部
Marine Geology Department, Geological Survey of Japan,
1-1-3 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305, Japan

宍道湖は島根県東部に位置する海跡湖である。宍道湖は西から斐伊川が流入し、東端の大橋川を経て中海へと続いている。現在の宍道湖における塩分は大橋川付近で約3‰、斐伊川付近で1‰以下、中心部の湖底付近では5~10‰である。宍道湖は後氷期以降の海面変動と大きくかわりながら、海水-淡水-汽水といった環境を経て形成されている。宍道湖

が汽水環境から淡水環境に変わったのは江戸時代初頭であるとされている(徳岡ほか, 1990). 江戸時代前後に, それまで出雲大社方向へ西流する流路を持っていた斐伊川が, 宍道湖に流れ込む流路を持つようになり, 以降宍道湖は斐伊川による埋積作用を受けるようになる. これは, 江戸時代に盛んに行われた鉄穴流しおよび人工的な川違えや新田開発と深い関係がある(建設省出雲工事事務所, 1977). この環境変化は, 宍道湖における化石珪藻群集の分析などでも確認されている(鹿島ほか, 1990). また, C・N・S元素分析による堆積環境の検討がSampei et al (1994) によっておこなわれているが, 斐伊川河口域を含めたより淡水の影響の強い地域での堆積環境変化は十分に明らかにはなっていない. 本研究では新しく柱状試料の断面記載としてCT(コンピューター撮影法)スキャナによる画像解析を取り入れた. このCTスキャナは医学用として頭部などの断

面を観察する目的で使用されている機器である. CTスキャナによる画像はその映像情報をデジタルで保存することができる. そのため, 軟X線写真とは異なり, 画像のカラー化が可能であり, 任意の角度から観察できるという利点を持つ. このCT画像による堆積物の解析は栃木県の湯ノ湖でおこなわれ, その実用性が証明されている(井内, 1993). さらに本研究では, 硫黄濃度および有機炭素濃度分析結果を加え, 宍道湖における汽水環境と淡水環境との境界深度分布を明らかにしながら, 堆積環境の変化について考察する.

II 柱状試料の採取と分析方法

柱状試料採取地点

本研究で使用した柱状試料を採取した地点についてのデータを表1および図1に示す. SJ93-A, B, Cは1993年11月に福田建設(株)所有の船を宍道湖上で固定し, 地質調査所所有のピストン式コア(全長3m)によって採取したものである. SJ9446, 48, 50, 52は1994年10月に島根県水産試験場三刀屋分場所有の船「はるかぜ」で, 地質調査所所有の「押し込み式」採泥器(全長1m)を使用して30地点で柱状試料を採取したものの一部である. SH9501, 02は1995年11月に高安克己教授(島根大学汽水域研究センター)所有の船で, 島根大学総合理工学部地球資源環境学教室所有の重力式柱状採泥器(全長2m)を使用して採取したものの1つである. なお,

表1 柱状試料を採取した地点の水深とそれぞれの試料長.
Table 1. Water depth and core length of each core sample.

Core No.	water depth(m)	Core length(m)
SJ93-A	4.3	3.10
SJ93-B	4.4	5.10
SJ93-C	4.6	5.47
SJ9446	5.5	0.87
SJ9448	5.2	0.79
SJ9450	4.8	0.71
SJ9452	4.2	0.83
SH9501	5.0	1.84

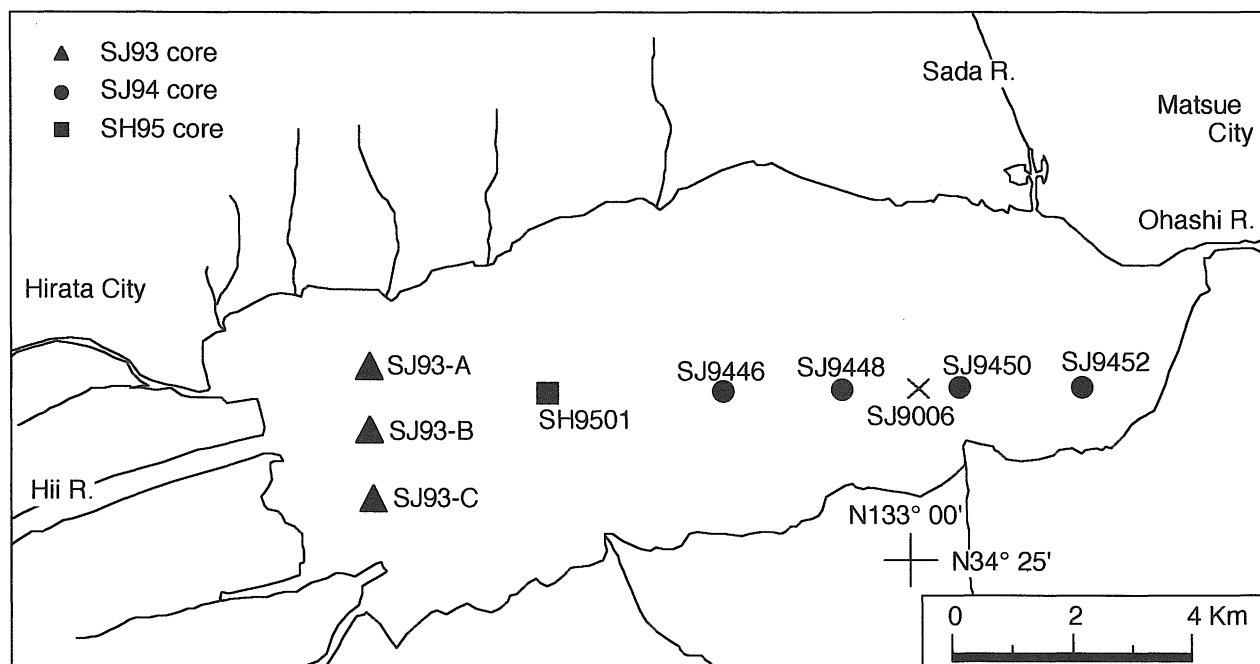


図1 本論文で使用した柱状試料採取地点. ×は三瓶ほか(1994)の柱状試料採取地点.
Fig. 1. Core sampling points analyzed in this paper. × point of core sample in Sanpei et al. (1994).

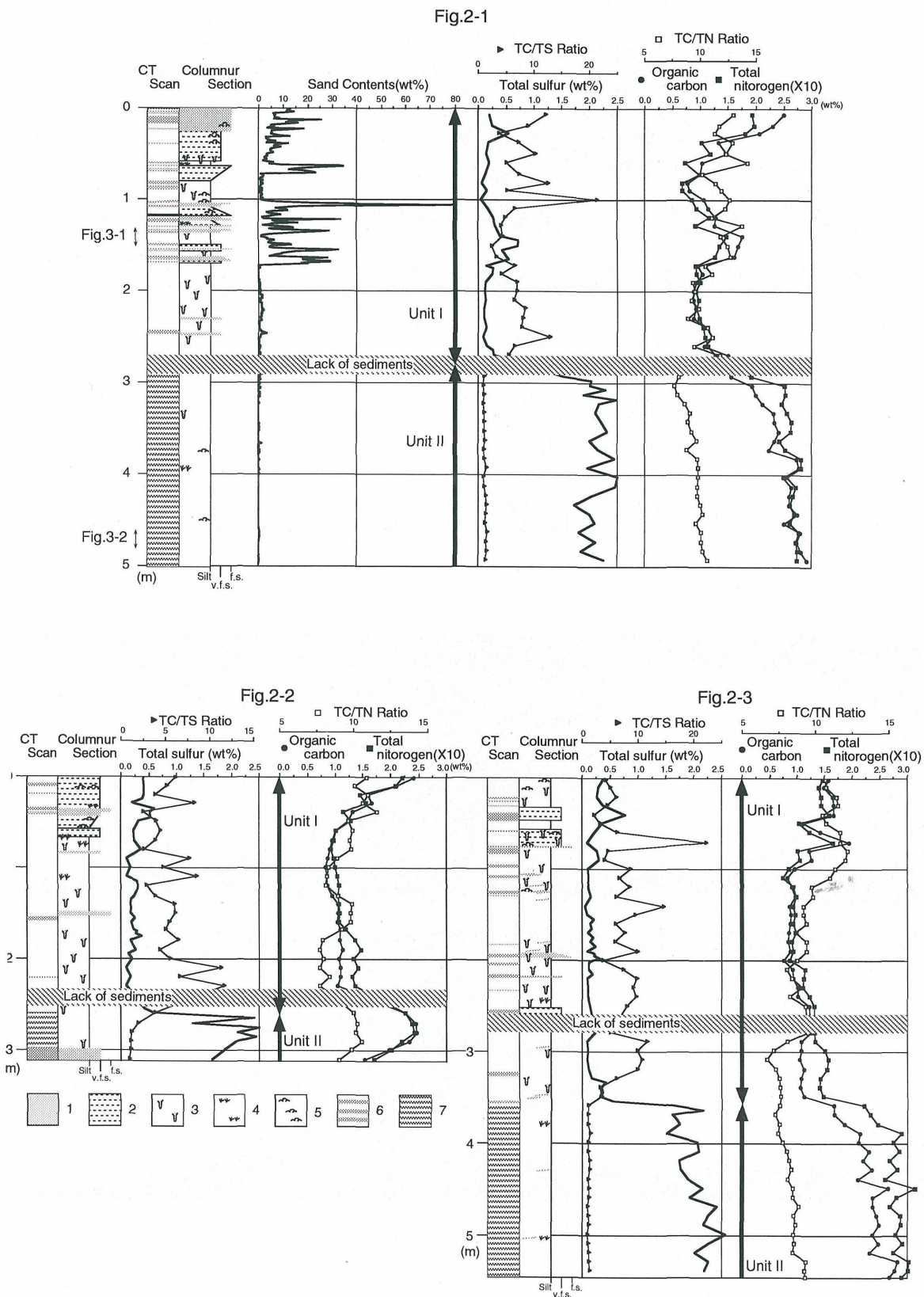


図2-2-1はJ93-B, 2-2はSJ93-A, 2-3はSJ93-Cにおける各柱状試料の記載, 含砂率および元素分析結果. 凡例について, 1は砂層, 2は砂-シルト互層, 3は生物擾乱, 4は植物片, 5は貝殻およびその破片, 6はCT画像における赤色(白色)部分, 7はCT画像における赤(白)-青色(黒)の縞状堆積物を示す.

Fig. 2. Columnar sections and vertical changes of sand content and chemical components of SJ93-A, B and C.

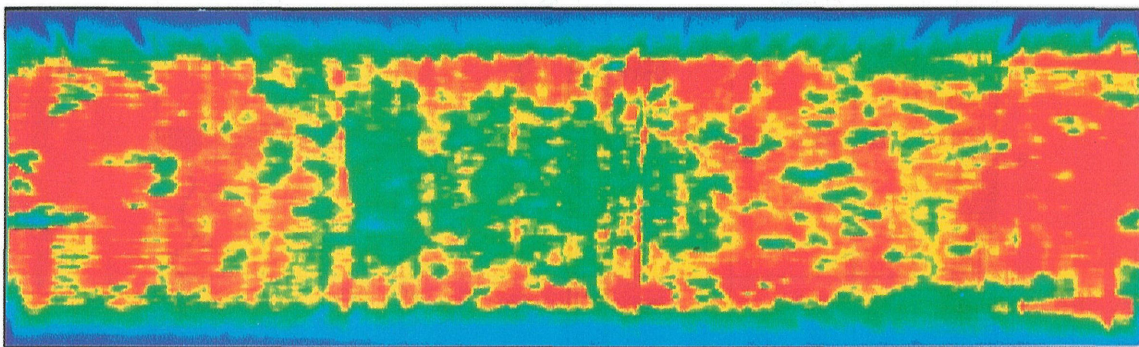
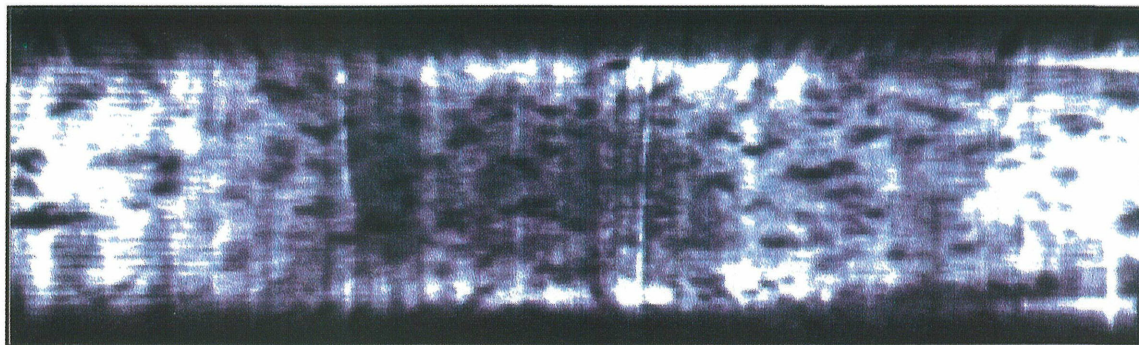


Fig.3-2

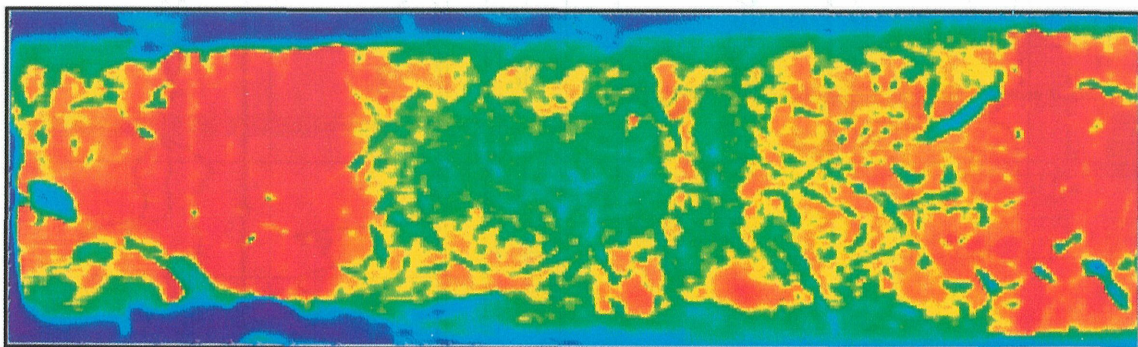
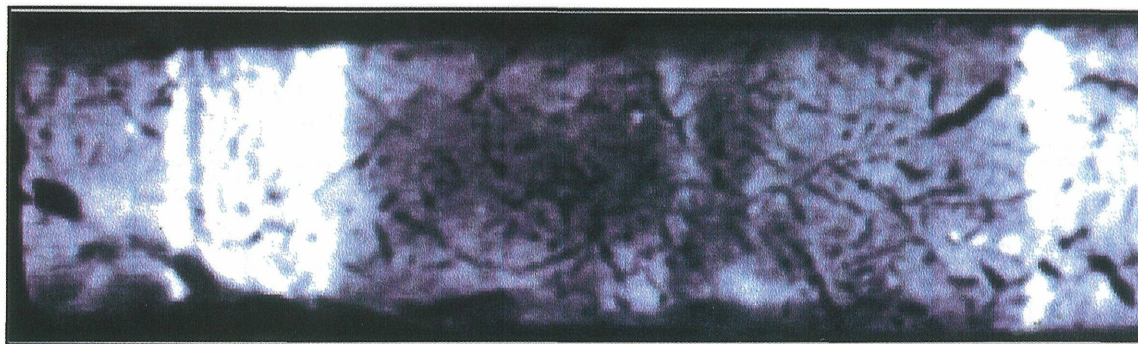


Fig.3-1

図3 シルト層中に砂層をはさむ層準(3-1)とシルト層のみの層準(3-2)のCT画像解析によるカラー画像およびモノクロ画像(縦20cm)

SJ93-Bのもので、深度については図2-1を参照。図3-1では赤または白色が砂層を、青または黒色がシルト層を示す。図3-2では赤または白色と青または黒色がシルト層内の微妙な密度差を示す。CT画像解析によって肉眼では識別困難な縞状構造が鮮明に認められる。

Fig. 3 CT scanning image pictures of SJ93-B. CT scanning images reveal the existence of laminated structures which are not visible with the naked eye.

3-1: Silty part intercalating thin sandy layers in Unit I (20cm thick)

3-2: Massive silty part in Unit II (20cm thick)

全ての柱状試料についての詳細な記載および堆積学的検討は別途報告する予定である。

柱状試料の処理と分析方法

SJ93-A, B, Cの各柱状試料はCTスキャナによる画像撮影(茨城県牛久市筑波胃腸病院撮影)後、縦に2分割し、さらに1cm間隔で分割した。分割した試料は含砂率、硫黄濃度、有機炭素濃度、全窒素濃度の分析試料とした。その他の柱状試料は、同じく縦に2分割し、半分を軟X線写真用試料とし、残りを1cm間隔で分割し粒度(含砂率含む)、微化石および硫黄濃度の分析用試料とした。硫黄濃度の分析には島根大学汽水域研究センター所有の堀場硫黄分析装置EMIA-120型(堀場製作所製)を、有機炭素濃度及全窒素濃度は島根大学総合理工学部地球資源環境学教室所有のCHNコーダMT-3(柳本製作所製)を各々使用した。元素分析では湿試料を乾燥させた後、200メッシュ程度にメノウ乳鉢で粉碎した試料を使用した。含砂率の測定では、堆積物の研究法(碎屑性堆積物研究会編, 1983)に従い、試料を10%の過酸化水素水による有機物の除去後、250メッシュの篩を使用し、水洗によるふるいをおこなった。

III SJ93-A, B, Cの堆積物の特徴とCTスキャンによる画像解析

SJ93-A, B, Cの各柱状試料について、肉眼観察、含砂率・有機炭素濃度・窒素濃度・硫黄濃度(全て乾燥堆積物重量に対するwt%)についての分析結果を図2-1, 2-2, 2-3に示す。ただし、SJ93-AとCの含砂率の結果については本論文では省略した。それぞれの柱状試料において、表層から深度2.5m(SJ93-A)、表層から深度2.8m(SJ93-B)と表層から深度3.8m(SJ93-C)までは、シルト部分に貝殻片や生物擾乱が認められる。また、SJ93-Bでは1.6mより上位では含砂率の高い砂層を主とし、図には示していないがSJ93-Aでは0.8mより上位、SJ93-Cでは2.6mより上位で含砂率の高い砂層が見られる。各柱状試料とも貝殻片や生物擾乱層を含むシルト層より下位では、同じくシルトからなり、貝殻片や生物擾乱がほとんど認められない。各柱状試料全てについて、CTスキャナによる画像処理をおこなった。その結果の一部を図3に示す。図3-1の画像はSJ93-Bの深度2.8mより上位で見られ、赤(白)色部分が含砂率の高い細粒~極細粒砂層あるいは砂質シ

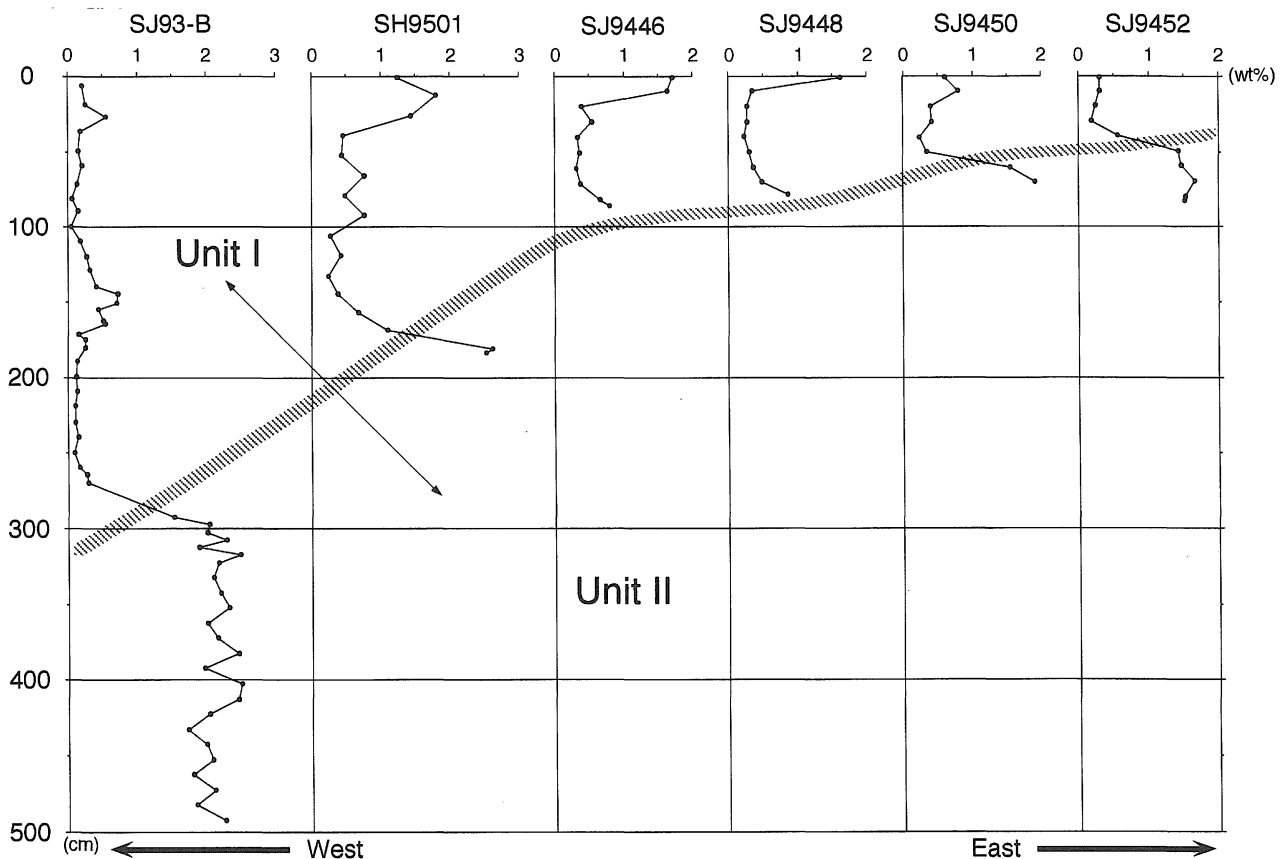
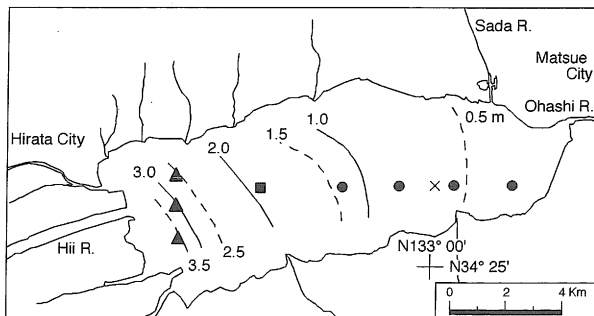


図4 東西方向にとった硫黄濃度の分析結果。採取地点は第1図を参照。

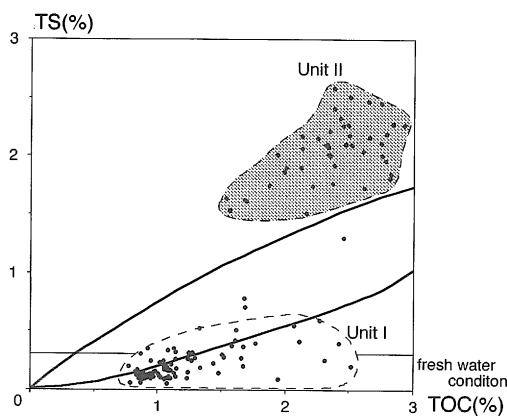
Fig. 4. Vertical changes of total sulfur content along E-W profile of the Lake Shinji. See fig. 1 for the location of each point.

ルト層とよく一致する。同様のことがSJ93-Aでは深度2.5m, SJ93-Cでは深度3.8mより上位で認められた。一方, 図3-2の画像はSJ93-Bの深度2.8mより下位で見られ, 2.0~3.0mmの厚さを持つ赤(白)色と青(黒)色の縞模様が認められる。同様のことがSJ93-Aでは深度2.5m, SJ93-Cでは深度3.8mより下位で認められた。特に, 下位の層準で認められた縞模様は肉眼観察では見られなかった。なお, このような縞模様が軟X線写真で認められるかどうかについてSJ93-Bの深度4.0~5.0mで試みたが, 軟X線写真の解像度が低いため縞模様を認めることができなかった。CT画像解析の結果, 各柱状試料は2層に区分できる。これらを上位からUnit I, Unit IIと呼ぶ。各々のUnit境界の深度は, SJ93-Aでは2.5m, SJ93-Bでは2.8m, SJ93-Cでは3.5mである。ピストン式柱状採泥器は1回に採取できる最大の長さは3mで, それ以上の採泥は1度目に取れた深度まで採泥せずに下ろした後, 再び採泥した。そのため, SJ93-Bの柱状試料ではUnit境界深度がたまたま採



第5図: 硫黄濃度の分析結果によるUnit境界面の深度分布。深度の単位はm。破線は0.5m単位を示す。

Fig. 5. Depth of the boundary between brackish and fresh water condition for analyzing total sulfur content.



第6図: SJ93-A, B, C各柱状試料における全硫黄-有機炭素濃度との関係。実線の範囲内は黒海で海成環境を示す堆積物(Berner, 1984)

Fig. 6. Weight percent organic carbon vs. weight percent sulfur of three core samples in 1993. (The area enclosed by thick line is the normal marine environment, as inferred from sediments in Black Sea by Berner (1984)).

泥時の結合部にあたり, その部分の堆積物の採取ができなかったものと考えられる。このことは, SJ93-AとC柱状試料中のUnit境界部の深度と比較しても矛盾はない。

IV 硫黄濃度および有機炭素濃度

SJ93-A, B, Cの各柱状試料については有機炭素濃度・窒素濃度・硫黄濃度, それ以外の柱状試料については硫黄濃度についてのみ分析をおこなった。図2-1, 2-2, 2-3より, SJ93-A, B, Cの各々の有機炭素濃度・窒素濃度・硫黄濃度が急激に低下する部分が見られる。この部分の深度はSJ93-Aでは深度2.5m, SJ93-Bでは深度3.0m, SJ93-Cでは深度3.5mであり, 上述のUnit IとUnit IIの境界深度と一致する。硫黄濃度の分析結果について, 宍道湖の東西方向に採取した柱状試料の分析結果を図4に示す。各柱状試料の硫黄濃度でも同様に下位から上位にその値が急激に変化する層準がある。その深度は, SH9501では1.7m, SJ9450では0.6m, SJ9452では0.4mである。SJ9446と48ではその変化をとらえることができなかったが, 硫黄濃度の変化の特徴から見て, 採泥深度の直下にUnit境界があるものと推定される。上で述べたように, 2つのUnit境界は宍道湖のほぼ全域で追跡できる。その平面分布について図5に示す。これらの結果は, Sampei et al (1994)と調和的である。SJ93-A, B, Cの各柱状試料における有機炭素濃度-硫黄濃度との関係を図6に示す。この図からもUnit IとUnit IIが明瞭に区分される。Unit Iは硫黄濃度が1.0wt%未満で, 有機炭素濃度が1.0~1.5wt%を示す。一方, Unit IIは硫黄濃度が1.5~2.5wt%で, 有機炭素濃度が2.0~3.0wt%を示す。

V 考 察

1. Unit I, IIの堆積環境とその境界面の意味

Unit Iにおける硫黄濃度は1.0wt%未満で, 大部分が0.3wt%未満の値を, 有機炭素濃度は1.0~1.5wt%の値を示す。通常、海成環境下の堆積物の硫黄濃度-有機炭素濃度との関係はほぼ図6の実線の範囲内に位置することが知られている(Berner, 1984)。この実線の範囲内より上位では黒海のような還元的な環境下の堆積物がプロットされる(Berner, 1984)。Unit Iは図中の実線の範囲内よりも下位に位置することから, 酸化的な海成環境か淡水環境を示すと考えられる。Unit Iでは, 堆積物中で多くの生物擾乱が発達していることから, 生物活動が活発であったと考えられ, 酸化的な湖底環境を示している。鹿島

ほか(1990)の化石珪藻群集分析ではUnit Iに相当する層準では淡水棲種優勢を示す。以上より、Unit Iの堆積環境は淡水でかつ酸化的环境であったものと考えられる。

Unit IIでは硫黄濃度が1.5~2.5%の値を、有機炭素濃度は1.5~2.0wt%の値を示し、各々の値はUnit Iよりも高い。図6ではUnit IIは実線の範囲内より上位に位置することから、還元的な底質環境を示すと考えられる。Unit IIではUnit Iで多く見られた生物擾乱が見られないことから、生物活動ができない環境であったと考えられ、図6から推定される還元的な底質環境とよく一致する。鹿島ほか(1990)でUnit IIに相当する層準では化石珪藻が汽水~海水棲種優勢を示す。以上より、Unit IIの堆積環境は汽水でかつ還元的な環境であったものと考えられる。Unit IIおよびUnit Iの環境解析から、宍道湖の環境が還元的な汽水環境から酸化的な淡水環境へ変化したと考えられる。

2. Unit IIからUnit Iへの環境変化の時期

現在の宍道湖では塩水が大橋川から遡上して、その上を斐伊川からの河川水が覆っている。宍道湖のような浅くそして平坦な湖では汽水化あるいは淡水化はすみやかに宍道湖全域で生ずる。このことから、Unit境界は同一時間面を表わすと考えられる。江戸時代以前の斐伊川の流路は現在の出雲大社付近を経て大社湾へと延びていた(建設省出雲工事事務所, 1977)。その後、1630年代の大洪水によって斐伊川の流路は西から東に向きを変え、現在のように宍道湖に流れ込むようになった。これ以降、宍道湖は汽水から淡水環境へと変化したと考えられている(徳岡ほか, 1990)。一方、霞ヶ浦や手賀沼などでも同じ時期に低鹹汽水化しているが、斉藤ほか(1990)では小氷期(1550-1850年:前島, 1984)に関係した降雨の増加、氷床・氷河の拡大による海水面の低下を指摘している。宍道湖は大橋川・中海を経て日本海に通じており、小氷期の海水面低下の影響を受けている可能性もある。本研究では年代のデータがなく断定できないが、図5に示したようにUnit境界面が斐伊川河口に向かって深くなることから、斐伊川の東流が関係している可能性が高い。従って、宍道湖の淡水化は17世紀初頭ごろに生じ、Unit境界面が形成されたと考えられる。ただし、この環境変化は間接的に気候変化によって引き起こされた可能性もあるので、さらに検討を要する。

3. Unit IIで見られる縞状堆積物の形成環境

Unit IIのCT画像で見られた縞状堆積物の形成環境について、硫黄濃度およびUnit境界深度から推定

される古水深より考察する。現在の深度とUnit境界深度から推定される淡水化前後の水深は斐伊川河口沖で約7.0~7.5m、現在の湖心部でその境界深度が約6.0mである。このことから、淡水化当時の最水深部が現在の斐伊川河口付近より東側に存在していたと考えられる。また、現在の宍道湖は大橋川から流入する塩水によって塩分躍層が形成されており、その躍層は湖盆内の深い地形をなすところで認められる(徳岡ほか, 1994)。このことから、Unit II堆積当時の宍道湖では大橋川から流入した塩水が湖盆内に停滞し、常に塩分躍層を形成していたと考えられる。

縞状堆積物は、当時の最水深部分で、塩分の高い還元的な環境を示すUnit IIで確認できた。湖沼堆積物で見られる縞状堆積物が形成されるには、湖盆の形状、碎屑物の運搬、堆積および保存といった要素が重要である。湖盆の形状については、水深が15mより大きな湖、波浪による影響や河川の顕著な流入がないことが年縞を形成させる最適条件であるとされている(Saarnisto, 1986)。また保存に関しては、その構造を破壊する底棲生物が活動できないような環境が必要である。この環境とは、湖水中に水温躍層等の形成により成層構造が発達すると、底層水中の溶存酸素は乏しくなることである(Boyle, 1993)。日本の海跡湖で確認されている年縞および縞状堆積物については、静岡県浜名湖(池谷ほか, 1990)や福井県の水月湖(福沢ほか, 1995)等で報告されている。これら湖の最水深は浜名湖が12m、水月湖が34m、両湖共に大きな河川による影響は少なく、年縞および縞状堆積物を形成させる条件を満たしている。その浜名湖や水月湖で見られる年縞・縞状堆積物は軟X線写真に明瞭に記録されている。一方、宍道湖で見られる縞状堆積物はその当時の最水深が約7.0mの浅い湖でその条件を満たしていないようにみえる。しかし今回CT画像で確認された縞状堆積物は、Unit IIが塩分躍層の存在を示唆していることから、湖水の微妙な性質の違いによって形成されたものと考えられる。また、肉眼観察や軟X線写真では確認できなかったことから、ラミナ毎の粒度や化学組成の差が少ない縞状堆積物を形成したと考えられる。しかし、このような場合であってもCTスキャナによる画像解析をおこなえば、縞状堆積物が識別でき、環境変化のあったことを知ることができることが明らかになった。

VIま と め

本研究において以下のことが明らかとなった。

1. SJ93-A, B, Cの柱状試料でCTスキャナによる

画像解析をした結果、堆積物を上位から Unit I と II と 2つの層に区分できた。この区分は硫黄濃度による区分と一致した。

2. CT画像、堆積物および C-N-S 元素分析データの特徴より、Unit I は生物活動の著しい酸化的な淡水環境を示すことから、湖水の成層構造が未発達で、湖水に含まれる溶存酸素量も多かったと考えられる。同様に、Unit II では生物活動のできない還元的な汽水環境で、湖水の成層構造の発達が可能であったと考えられる。さらに、Unit 境界深度から推定した Unit II 堆積時の宍道湖における最深部は現在の斐伊川河口付近の東側に存在し、塩分躍層による湖水の成層構造が発達していたと考えられる。この成層構造の発達した環境下で、縞状堆積物が形成されたと考えられる。

3. Unit 境界面は斐伊川河口から宍道湖の東部に向けて連続し、またこの境界面は同一の時間面であることが示唆された。宍道湖が汽水環境から淡水環境へ変化した時期としては、斐伊川の東流に加えて小氷期における降水量の増加あるいは海水面の低下の可能性を考えれば、17世紀初頭ごろであると推定される。

4. 今回 SJ93-A, B, C の柱状試料の断面記載において、CT画像による解析をおこなった。その結果、Unit I で見られる含砂率の高い砂層は軟 X線写真と同様に認めることができた。しかし、Unit II において軟 X線写真では確認することができなかった縞状堆積物を CT画像で確認することができた。今回確認できた縞状堆積物のラミナ毎の組成差は少ないが、そのような場合であっても CT スキャマによる画像解析で認識できるという点で、今後柱状試料分析をする上で非常に有効的な手段であるといえる。

謝 辞

本研究において、調査船の手配および操船にあたっては、島根県水産試験所三刀屋分場の中村幹雄分場長をはじめ、同分場の方々に協力していただいた。1993年および1994年の柱状試料採取は地質調査所の研究の一貫としておこなったものである。CT スキャナによる画像処理では地質調査所情報地質部の中野 司博士にその処理および解析方法について御協力、御助言をいただいた。C-N-S 分析に関しては島根大学総合理工学部の三瓶良和先生の御助言をいただき、また論文作成にあたって御指導をいただいた。同教室の瀬戸浩二博士には船の操船、柱状試料の採取および試料分割に御協力していた

だき、また御助言をいただいた。硫黄分析に関しては島根大学汽水域 研究センターの高安克己教授にお世話になった。以上の方々にお礼を申し上げます。

文 献

- Boygale, J. (1993) The Swedish varve chronology—a review. *Progress in Physical Geography*, **17**, 1-19.
- Berner, R. A. (1984) Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 605-615.
- 福沢仁之・小泉 格・岡村 真・安田喜憲(1995)水月湖細粒堆積物に認められる過去 2,000 年間の風成塵・海水準・降水変動の記録. 地学雑, **104**, 52-64.
- 池谷仙之・和田秀樹・阿久津浩・高橋 実(1990)浜名湖の起源と地史的変遷. 地質学論集, (**36**), 129-150.
- 井内美郎(1993)湖底・湖底堆積物の新しい調査法. アーバンクボタ, **32**, 30-37.
- 建設省出雲工事事務所(1977)地域社会と河川の歴史 (II), 92p.
- 鹿島 薫・中海宍道湖自然史研究会(1990)中海の自然史研究—その 14. 宍道湖から得られた柱状試料の珪藻分析—. 島根大学地質学研究報告, **9**, 159-161.
- 前島郁夫(1984)歴史時代の気候復元—特に小氷期の気候について—. 地学雑, **93**, 413-419.
- 砕屑性堆積物研究会編(1983)堆積物の研究法—礫岩・砂岩・泥岩—. 地学双書 24, 地学団体研究会, 377p.
- 齊藤文紀・井内美郎・横田節也(1990)霞ヶ浦の地史: 海水準変動に影響された沿岸 湖沼環境変遷史. 地質学論集, (**36**), 103-118.
- Sampei, Y., Yomura, H., Otsuka, M., Yoshida, K. and Suzuki, N. (1994) Decomposition of organic matter and the organic carbon content of sediments in Lake Shinji, southwest Japan. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **48**, 317-332.
- Saarnisto, M. (1986) Annually laminated sediments. *Handbook of In Holocene Paleohydrology* B.E.Berglund (ed.): 343-370, *Jhon Wiley & Sons*.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・高安克己・三梨 昂(1990)中海・宍道湖の地史と環境変化. 地質学論集, **36**, 15-34.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・瀬戸浩二・田村嘉之・高安克己・安間 恵・松田滋 夫・井内美郎・西村清和(1994)音波探査による中海・宍道湖の塩分躍層の検討とその意義. LAGUNA(汽水域研究), (**1**), 11-26.