

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540470

研究課題名（和文） 富栄養湖堆積物の二酸化炭素吸収能力：中海・宍道湖の過去約四百年間の復元

研究課題名（英文） Carbon sink potential of eutrophic lake sediments: a reconstruction of the potential in lakes Nakaumi and Shinji during the last about four hundred years

研究代表者

三瓶 良和 (SAMPEI YOSHIKAZU)

島根大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号：00226086

研究成果の概要（和文）：汽水域の基礎生産によるCO₂吸収能力の定量的評価およびその気候変化による変化特性について、日本の代表的汽水域である中海・宍道湖において、現環境および過去数百年間の関係を考察した。

表層堆積物の全有機炭素（TOC）濃度は、中海南端～湖心では3.6～4.0%のsapropelicな高い値を示し1997年以降変化はなかった。宍道湖表層TOC濃度は、東部と西部を除き3.5～4.3%のsapropelicな高い値を示して2005年以降変化はなかったが、東部では約0.5%増加した。有機物の起源は、C/N比（7～9）と熱分解GC-MSのn-アルカン組成から判断して大部分が植物プランクトンに由来する。コア試料のTOC濃度は、中海・宍道湖ともに1800年以前は1%程度の低い一定の値を示し、1800年から1900年にかけてさらに0.数%低くなり、その後現在に向かって急激に増加して4%程度になる。

中海においては、表層TOC濃度が3.5%を超えると湖底水中に硫化水素が溶出されはじめ、両者に比例関係があり、 H_2S (ppm) = 13.9 * TOC (%) - 52.1 (TOC > 3.5%) で表されることが分かった。中海中央北東部における大気CO₂濃度は、2013年4月～5月の平均値は約360ppmであり、春季の植物プランクトンブルームによって湖上の大気CO₂濃度が低くなった影響が考えられた。また、最大80ppm程度の大きな昼夜差が見られた。carbon sinkについては、金井ほか（1998, 2002）の堆積速度を用いれば有機炭素埋積速度OCARは中海が7.0 mgC/cm²/y、宍道湖が4.0 mgC/cm²/y、全域では中海で約6,000トン/年、宍道湖で約3,200トン/年と見積もられた。コア試料については、中海では、50～25cm（1770-1890年：世界的な寒冷期のLittle Ice Age期間）はTOC濃度が約1%と過去最も低く約2,000トン/年となり、これは現在の約1/3である。宍道湖コアでは、30～20cm（1830-1890年）で約0.7%と過去最も低くなり、約1,300トン/年となる。汽水域は半閉鎖水域で有機物の分解が遅く、かつ、水深が浅いため有機物の堆積が速やかに起こるので、気候変化に対しては非常にレスポンスの速いcarbon sinkとして特徴づけられた。

研究成果の概要（英文）： Carbon sink potential of eutrophic lake sediments from lakes Nakaumi and Shinji was studied for recent and several hundred years environments using surface sediments and sediment cores.

TOC (total organic carbon) contents of southern and central L. Nakaumi showed high sapropelic about 3.6～4.0% in the 1cm surface sediments. These values are constant from AD1997. TOC contents of all samples from L. Shinji showed also sapropelic and high about 3.5～4.3% except for eastern part. These TOC values in L. Shinji are not changed during the last 5 years. According to the result of C/N ratio (7-9) and py-GC-MS, origin of organic matter in both lakes is supposed to be predominant phyto-plankton. Sediment cores showed low TOC contents about 1% between AD1800 and 1900 in both L. Nakaumi and Shinji and TOC contents drastically increased from 1% to 4% after AD1900.

Analysis of AD2003 data by our preliminary research indicates that TOC contents over 3.5% of surface sediments have a good positive correlation with H₂S (ppm), showing an equation: H_2S (ppm) = 13.9 * TOC (%) - 52.1 (TOC > 3.5%). Atmospheric CO₂ concentration

on the northeastern Nakaumi was low about 360 ppm in average (April to May, 2013), which could depend on spring blooming of phyto-plankton. Impressive difference of the CO₂ concentration between daytime and nighttime was up to 80 ppm. Average OCARs in the surface sediments of L. Nakaumi and Shinji are 7.0 mgC/cm²/y and 4.0 mgC/cm²/y, respectively based on the sedimentation rate reported by Kanai et al., (1998, 2002). As a result, L. Nakaumi and Shinji have a potential carbon sink of about 6,000 tonC/y and 3,200 tonC/y, respectively. Low OCARs of the cored sediments with low TOC about 1% in L. Nakaumi during 50–25 cm (1770–1890) and TOC about 0.7% in L. Shinji during 30–20cm (1830–1890), i. e. Little Ice Age, suggested 2,000 tonC/y and 1,300 tonC/y, respectively. These low values during cool climate are about one-third of the present potential. These brackish lakes are characterized as a quick response carbon sink for climate change.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：汽水域・有機物濃度・有機炭素埋積速度・二酸化炭素・硫化水素・カーボンシンク・中海・宍道湖

1. 研究開始当初の背景

温暖化の影響把握のために、人間活動に密着した水域の CO₂ 収支とその特性を明らかにすることは重要である。地球最大の CO₂ 吸収域である海洋の能力については、北太平洋海域で能力が高いことが明らかにされている。一方、身近な人間活動に密接に関わる汽水域に関するそれらの性質は必ずしも明らかではない。世界全体で面積 320,000km² を有する汽水域(Nichols and Boon, 1994)は、海洋よりも大きい有機炭素埋積速度(堆積物単位面積あたり)をもつため、無視できない CO₂ 吸収能力を持つと考えられている(Sampeï et al., 1997)。

2. 研究の目的

(1) 汽水域水環境の CO₂ 吸収特性を明らかにするために、湖水直上の大気 CO₂ 濃度を明らかにする。

(2) 大気 CO₂ の固体化埋積能力は、有機物の沈降堆積速度(有機炭素埋積速度: organic carbon accumulation rate, OCAR)によって表されるため、この OCAR を表層堆積物試料を用いて求める。

(3) 過去 400 年間には、寒冷期と温暖期の両方が存在し、かつ中海・宍道湖は汽水域としては日本の代表で平均的な湖底環境を有している(倉門ほか, 1998)ため、その OCAR の変化を見積もる。

3. 研究の方法

(1) 現在の底泥環境の CO₂ 吸収特性

主に表層 1cm の堆積物試料を宍道湖・中海で横断的に複数地点で採取し、既に公表されている堆積速度から有機炭素埋積速度 OCAR の地域変化を読み取った。表層 1cm 試料は中海の 9 地点および宍道湖の 12 地点において 2011 年に採取した(図 1, 2)。また、宍道湖においては西側湖岸に葦密集地域があるため、西岸の 7 地点において表層堆積物を採取し、アオコの大量発生も見られたため、宍道湖南岸でアオコ堆積物も採取した。

(2) 過去 400 年間の底泥環境の CO₂ 吸収特性

柱状泥試料については、採取後、2mm 毎に輪切りにして乾燥し、炭素、窒素、水素、イオウ濃度測定を行った。さらに、CO₂ の固定速度の寒冷期と温暖期の差を見積もった。

コア試料は中海の 2 地点および宍道湖の 1 地点において採取した(図 1 および図 2 の S4 地点)。これらの地点では、コア試料の表層の乱れを補うため、ほぼ同地点でエックマンバージグラフを用いて乱れに注意しながら 10cm のボックス試料を採取し、上窓から約 10cm アクリルパイプを突き刺してショートコアを採取した。

(3) 現在の水環境の CO₂ 吸収特性(湖水直上の大気 CO₂ 濃度観測): 湖水直上の大気 CO₂ 濃度を明らかにするために、赤外線式 CO₂ 濃度測定機を導入し、中海湖心北東部付近(江島汽水域研究センター分室)に設置し連続観測を行った。

4. 研究成果

(1) 試料記載

「中海表層」中海の南北測線上の9地点において、南端から湖心までは黒色でH₂S臭があった。湖心から北端までは臭いはなく、暗灰色~暗褐色まで変化して酸化層を有していた。中海底質表層1cmをとり、混合して均質化した泥試料の色は、南から北へ「黒色」「暗灰色」「暗褐色」へと変化し、北ほど酸化的な傾向を示した(図1)。この色の変化は北部の撤去された中浦水門を通して溶存酸素に富む底層水が流入してくることが要因と考えられる。

「宍道湖表層」：東端から湖心は暗灰色~黒色、湖心から西端は黒色~明褐色(2mm程度の酸化層有り)を呈した(図2)。

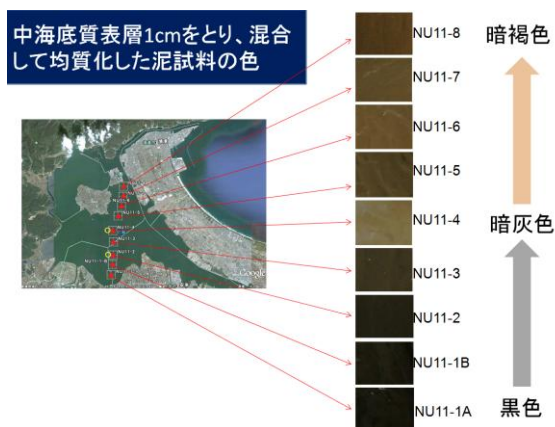


図1 中海表層 1cm の色調

「宍道湖コア」：0~8 cmは黒色、8~18cmは暗灰色、18~80cmは灰色であった。

「中海コア」湖心南側のNU11-2コアは0~4cmは黒色、4~8cmは暗黒灰色、8~13cmは暗灰色、14~81cmは暗緑灰色であり、各境界は漸移的であった。貝片が多数含まれており、17cm下と28cm下と50cm下にサルボウガイがみられた。

湖心北川のNU11-4コアは0~3cmは黒褐色、3~10cmは暗灰色、10~70cmは灰色であった。

宍道湖表層泥の外観 (2011.9.13採取)

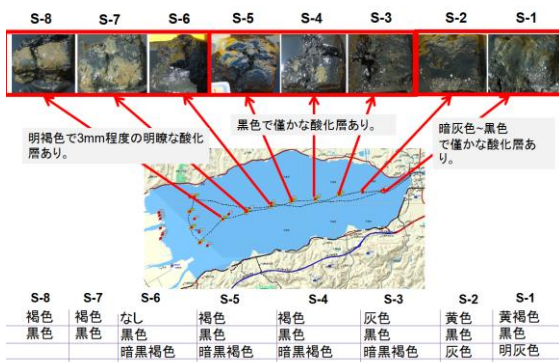


図2 上から撮影した宍道湖表層泥

中海TOC濃度の1997(倉門ほか)・2007(徳田MS)との比較

2005-2009年には、中浦水門撤去によって新鮮な海水の流入が多くなった。

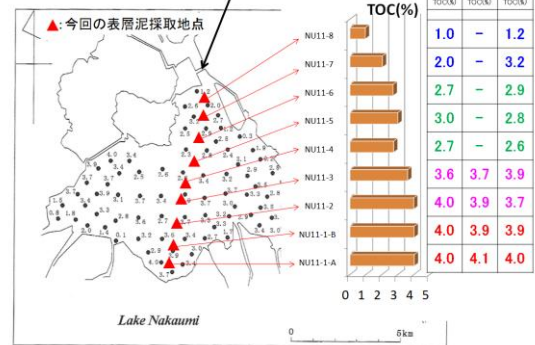


図3 中海表層 TOC 濃度

宍道湖TOC濃度の2005(高森MS)との比較

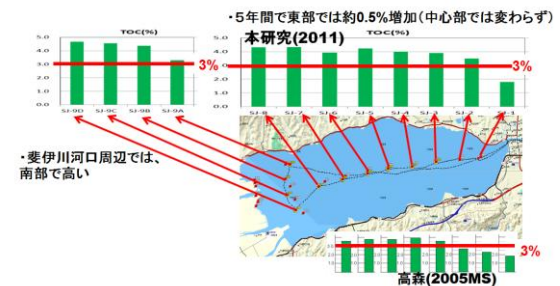


図4 宍道湖表層の TOC 濃度

(2) TOC濃度

「中海表層」：南端~湖心では、3.6~4.0%のsapropelicな高い値を示し、1997年以降、変化はなかった(図3)。湖心~北端では、2.7~1.0%で北に向かって減少し、1997年よりも北部で減少していた。これは、中浦水門撤去(2005-2009年)によって新鮮な海水の流入が多くなったことが理由と考えられる。

「宍道湖表層」：東部と西部を除き、3.5~4.3%のsapropelicな高い値を示したが、東端では1.8%の低い値を示し、斐伊川河口周辺の南部で最高値4.6%を示した。この値は、中海よりも高い。高森(2005MS)と比較すると、東部では5年間で約0.5%増加したことを示す。湖心では変化はなかった(図4)。

「中海コア」：
 中海北部コアNU11-4のTOC濃度は、70cm~30cmまでは約1.7%でほぼ一定、25~15cmは約1.4%とやや低くなり、15~0cmでは1.5%~3.2%

に増加する（図5：C/N比は約9で変化しないので、植物プランクトン起源優勢であり、TOC濃度変化に伴う有機物起源の変化はほとんどないと推察される）。

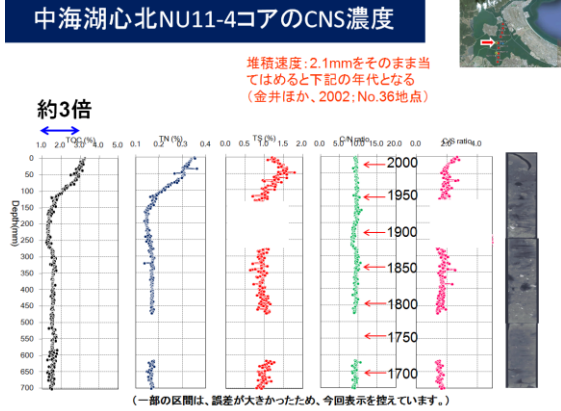


図5 中海湖心北の TOC 濃度等の深度変化

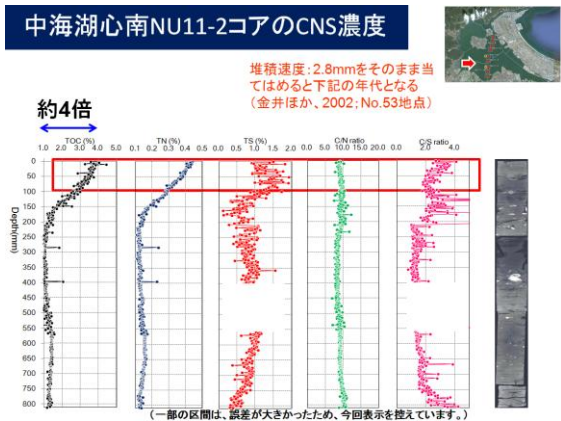


図6 中海湖心南の TOC 濃度等の深度変化

中海中央南コアNU11-2では、80cm～55cmまでは約1.4%でほぼ一定、50～25cmは約1%とやや低くなり、20～0cmでは1.5%～4.0%に増加する（図6：C/N比は約11-8で大きくは変化しない）。

湖心南NU11-2の0-10cm（過去約40年）ショートコアでは、3～4%間で細かな変化が認められ、4回の周期的な減少傾向で特徴づけられた（図7）。金井ほか(2002)堆積速度2.8mmをあてはめるとその4回の年代は、2006年、1995年、1986年、1977年となった（約十年周期）。これらは主に洪水によるTOC濃度の希釈を示しているものと考えられる。実際、島根県の記録によれば昭和47年(1972)、昭和58-63年(1983-1988)、平成18年(2006)に豪雨災害が発生しており、コア年代の誤差を考慮すれば、それらに対応する可能性が高い。

「宍道湖コア」：

宍道湖中央（東寄り）コアでは、60～30cmまでは約0.8%でほぼ一定、30～20cmは約0.7%とやや低くなり、20～0cmでは0.9%～4.0%に増加する（図8：C/N比は約6-8で大きくは変化しない。中海よりもさらに植物プランクトン優勢である。）。TOC濃度は細かな変化をしながら、1900年以後、下位の0.7%から上位の4.1%まで大きく増加した。宍道湖80cmコアの軟X線写真では、貝は18cmにあるのみで、ほとんど含まれず、僅かながら横方向のラミネーションが見られる。

湖心0-9cm（過去約40年分）ショートコアでは、2.5～4.5%間で変化が認められた（図9）。²¹⁰Pbによる堆積速度：2.0mm/y（三梨・徳岡、1988；SJ85-1地点）を当てはめれば、1970以降1987年まで増加した後、1995年に向かって一旦減少し、その後増加に転じている。中海で見られた約10年周期のTOC濃度の減少は、見られなかった。C/S比をみると、1990年に一度湖底の溶存酸素が増加したことを示している。

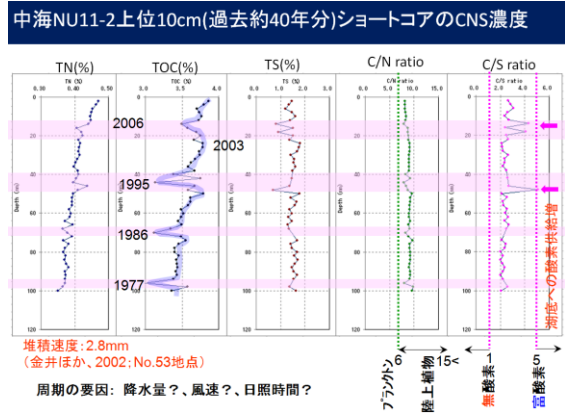


図7 中海湖心南の過去約40年間の変化

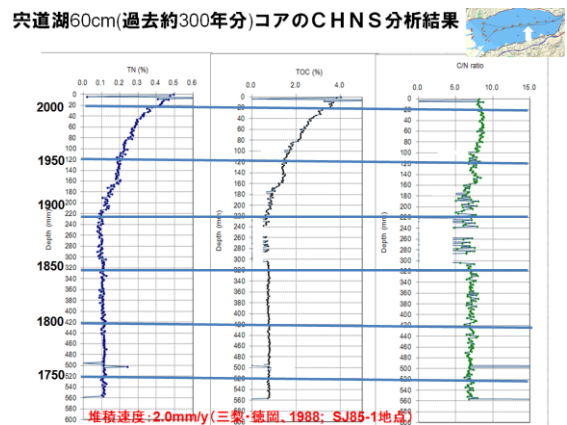


図8 宍道湖湖心 TOC 濃度等の深度変化

(3) 有機物の起源

「中海表層」C/N比は全体で8～9程度である。この値は、植物プランクトンが主な有機物の起源であって、そこに陸上植物片が加わっていることを示唆する。

「中海コア」：

熱分解GC-MSの結果は、植物プランクトン起源である nC_{15} , C_{17} アルカンが、陸上植物ワックスを示す nC_{29} アルカンより高い値を示し、C/N比の傾向と調和的であった。

宍道湖9cm(過去約40年分)ショートコアのCNS濃度

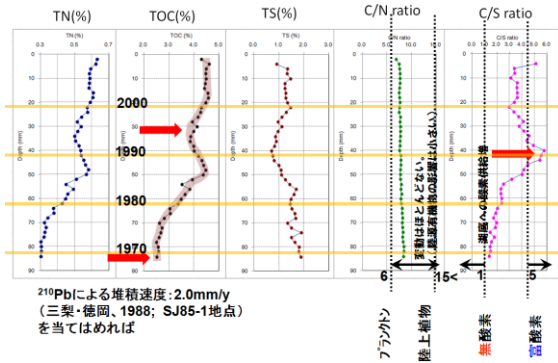


図9 宍道湖湖心の過去約40年間の変化

「宍道湖表層」:

C/N比は、西端から東端までで6.8~7.5の値を示し、ほとんどがプランクトン有機物からなることを示している。斐伊川河口周辺では、北部で高く(9~10.5)、陸源有機物の影響が大きかった。宍道湖西部の堆積物には、宍道湖西部湖岸に多量に打ち寄せられている枯れた葦片の影響が含まれているものと考えられる。

「宍道湖コア」:

C/N比は全般に6~9であり、大きな変化はない。熱分解GC-MSの結果は、アオコそのものは、 nC_{16} にピークをもち、 nC_{18} , C_{16} アがそれに次ぐピークを示したが、表層堆積物では、 nC_{10} , nC_{12} , nC_{14} アルカンが高い値を示した。このことは堆積物中の主な有機物起源はアオコではなくその他のプランクトンが多くを占めることを示唆している。

表層堆積物有機物(ケロジェン)のラマン分光を測定したところ、約1350カイザー(cm^{-1})および約1600 cm^{-1} に大きなピークを有することが分かった。両者のピーク高の比は変化し、起源有機物の違いを反映するものと推察されたが、レーザー照射時に発熱で試料が部分的に炭化してしまうため、装置の改良が必要である。

(4) 酸化還元環境

「中海表層」: C/S比は全般に1.7~3.5であり、北部の中浦水門付近で高く酸化的な値を示しているが、湖心から南部では2.2程度の貧酸素的な値を示す。

「中海コア」TOC減少の深度ではC/S比(全体では1~3程度であり、1.5~2の深度が多い)は高くなっており(図5, 6)、やや酸化的環境になったことを示唆した。

「宍道湖表層」: C/S比は、2.5~18.8と場

所により大きく異なる。斐伊川河口付近では値が高くなっており5以上の値(Barner, 1984)を示すので次のいずれかの環境を示唆する。①斐伊川の影響により塩分が低くなり易く、貧酸素的ではあるが硫酸還元が進み難い、②かなり酸化的環境である、③陸源有機物が多いので硫酸還元が進み難い。

「宍道湖コア」: C/S比は22mm(1990年頃)に高くなっており(図9)、湖底への酸素供給量が増えたことを示唆しているが、80mm以深では1程度の低い値を示し貧酸素環境であったことを示唆する。軟X線写真解析の結果で貝片が約18cmに確認されたが、その他の深度ではほとんど含まれず、C/S比と共に全般に貧酸素的環境であったことを示唆した。

(5) 硫化水素

中海において2003年に取得していた硫化水素のデータとTOC濃度の関係を今回詳しく検討したところ、中海において表層TOC濃度が3.5%を超えると湖底水中に硫化水素が検出されはじめ、両者に比例関係があり、 $H_2S(ppm)=13.9*TOC(\%)-52.1(TOC>3.5\%)$ で表されることが分かった。

(6) 大気CO₂濃度

人為的な影響を受けず、かつ連続的に無人観測が可能な場所をいくつか検討した結果、最終的に中海中央北東部の江島を選定し、地上約3mの地点に二酸化炭素濃度計を長期間設置した。中海の大気CO₂濃度は、平均四百ppm程度であったが、2013年4月~5月の平均値は約360ppmであり(図10)、春季の植物プランクトンブルームによって湖上の大気CO₂濃度が低くなった影響が考えられる。また昼夜の濃度差が大きいことが分かり、最大80ppm程度の昼夜差が見られた(2013年4-5月)。高ピークは明け方であり昼間は低く夕方から増加する。これらの変化傾向は湖表層の植物プランクトンによる光合成活動の結果を反映しているものと考えられる。なお、夜間の高ピーク値は気温と似た変化を示し関係があるように見え(図10: ややタイムラグがある)、昼間の湖表層の光合成と夜間の有機物分解の差などを併せたCO₂吸収放出特性を表わしているように見える。

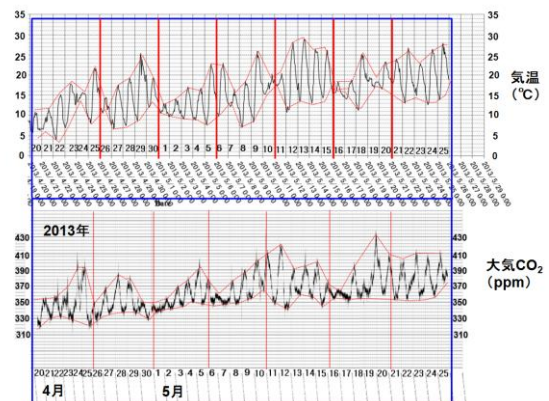


図10 中海の大気CO₂濃度変化

(7) カーボンシンク

三梨・徳岡(1988)および金井ほか(1997, 2002)は、中海・宍道湖の堆積速度を²¹⁰Pb・¹³⁷Cs法によって詳細に見積もっている。中海・宍道湖の堆積速度は全域の平均では、それぞれ[中海, 宍道湖] = ① [0.056, 0.108 (g/cm²/y)]・[1.6, 3.6 mm/y] (三梨・徳岡, 1988), および② [0.23, 0.12 (g/cm²/y)]・[5.7, 2.2 mm/y] (金井ほか, 1998, 2002)であり、中海の値が異なっている(表1, 2)。本研究による中海・宍道湖の表層TOC濃度の平均値[中海, 宍道湖] = [3.4, 3.9%]を用い、金井ほか(1998, 2002)の堆積速度を用いれば有機炭素埋積速度OCARはそれぞれ[7.0, 4.0 mgC/cm²/y]となる。この値に、中海・宍道湖の面積, 86および79km²を掛けると年間のOCARは、中海で約6,000トン/年, 宍道湖で約3,200トン/年となる。

コア試料について、堆積速度が変わらず上記同様と仮定して計算した。中海中央南コアNU11-2では、50~25cmは約1%と過去最も低くなる。この深度に2.1mm/yをあてはめると1770-1890yとなり、世界的な寒冷期のLittle Ice Age期間にあたる。このときの年間OCARは、中海で約2,000トン/年となり、これは現在の約1/3である。

宍道湖コアでは、30~20cmで約0.7%と過去最も低くなる。この深度に1.7mm/y(中央部の平均値)をあてはめると1830-1890yとなり、世界的な寒冷期のLittle Ice Age期間内に入り中海と調和的である。このときの年間OCARは、宍道湖で約1,300トン/年となり、これは中海と同様に現在の約1/3強である。

なお、本研究の堆積物採取・分析は、島根大学総合理工学部地球資源環境学科浦岡慎一氏および小野貴洋氏の協力により行われた。記して謝意を表す。

文 献

- Berner, R.A. (1984) Sedimentary pyrite formation: An up-date. *Geochim. Cosmohim. Acta* 48, 605-615.
- 金井豊・井内美郎・山室真澄・徳岡隆夫(1998) 島根県宍道湖の底質における堆積速度と堆積環境. *地球化学* 32, 71-85.
- 金井豊・山室真澄・井内美郎・徳岡隆夫(2002) 島根・鳥取県中海における堆積速度と堆積環境. *地球化学* 36, 161-178.
- Knoppers, B. (1994) Aquatic primary production in coastal lagoons. In: *Coastal Lagoon Processes* (Kjerfve B. ed.). Elsevier, Amsterdam, pp. 243-286.

倉門由紀子・三瓶良和・高安克己・徳岡隆夫・井内美郎(1998) 中海および浜名湖表層堆積物の有機炭素・窒素・イオン濃度分布 LAGUNA(汽水域研究) 5, 123~135.

三梨昂・徳岡隆夫(1988) 中海・宍道湖 地形・底質・自然史アトラス. 島根大学山陰地域研究総合センター, p 77-80.

Nichols, M.M. and Boon, J.D. III (1994) Sediment transport processes in coastal lagoons. In: *Coastal Lagoon Processes* (Kjerfve B. ed.). Elsevier, Amsterdam, pp.157-219.

Sampei, Y., Matsumoto, E., Kamei, T. and Tokuoka, T. (1997) Sulfur and organic carbon relationship in sediments from coastal brackish lakes in the Shimane peninsula district, southwest Japan. *Geochem. Jour.*, 31, 245-262.

Sampei, Y., Matsumoto, Tokuoka, T. and Inoue, D. (1997) Changes in accumulation rate of organic carbon during the last 8,000 years in sediments of Nakaumi Lagoon, Japan. *Marine Chem.*, 58, 39-50.

高森絵美(2005MS) 宍道湖・中海後背地の陸源有機物の特徴と河川懸濁物有機物. 島根大学卒業論文.

徳田涼平(2008MS) 中海におけるサプロペル("ヘドロ")の分布とその有機地球化学的特徴. 島根大学修士論文.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

① Sakai, S., Nakaya, M., Sampei, Y., Dettman, D.L. and Takayasu, K., Hydrogen sulfide and organic carbon at the sediment-water interface in coastal brackish Lake Nakaumi, SW Japan. *Environmental Earth Sciences*, 査読有, Vol. 68, 2013, 1999-2006

DOI 10.1007/s12665-012-1887-5

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三瓶 良和 (SAMPEI YOSHIKAZU)
島根大学・総合理工学研究科・教授
研究者番号: 00226086

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし