

平成22年 5月 14日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19310012

研究課題名(和文) 湖底堆積物と海底堆積物の対比による高時間分解能の気候変動解析

研究課題名(英文) High resolution environmental variability during the last glaciation using results from lake sediment core and marine sediment core.

研究代表者

成田 尚史(NARITA HISASHI)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号：50250501

研究成果の概要(和文)：青森県下北半島に位置する小河原湖において、過去16,000年におよぶ年縞堆積物を採取した。小河原湖への海水進入は少なくとも10,000年前に始まっており、6,000年前の縄文海進最盛期には現在よりも暖かい海水が進入し内湾を形成していた。その後、一旦は淡水化した。今日の汽水環境は100～200年前以降で起こったものである。6,000年前の暖かな海水は、日本海を経由した対島暖流水が起源と考えられ、この海流の北上は、日本海や北西部北太平洋への塩分の供給を増加させ、北西部北太平洋での中層循環の強化を引き起こした可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：The annually laminated sediment cores were collected from the bottom of a coastal brackish lake, Lake Ogawara, Japan. The 20-m cores represent a continuous archive of palaeoenvironmental information covering approximately the last 16,000 years. The inflow of seawater into Lake Ogawara since the last glaciation started from at least 10,000 yr BP. The lake was filled with warm seawater around about 6,000 yr BP, which is called the Jomon Transgression of Japan, corresponding to the global sea-level rise. Although the lake water changed to fresh after 6,000 yr BP, the lake became brackish from 100 ~ 200 yr BP until the present. The warm seawater, which filled Lake Ogawara around 6,000 y BP, originated with the Tsushima Warm Current, the northward migration of this current increased the formation of intermediate water in the western North Pacific, comparison with the results of the marine sediment core collected off Shimikita in the western North Pacific.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	16,000,000	4,800,000	20,800,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：気候変動、湖底堆積物、温暖化、縄文海進、海水準変動、生物生産

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 産業革命以降の人類活動は、我々の住む地球環境に対して、過去 10~20 ka の完新世や第四紀に地球上に起こった環境変化に匹敵する変化や変動を与えている。このような認識のもとに、過去地球上に起こった環境や気候の変化変動を解き明かし、顕在化しつつある地球の気候変化に対して確実な予測を与える必要がある。

(2) 第四紀特に過去 20 ka に地球上に起こった気候変動を明らかにするために、海底堆積物や氷床コアを用いた古環境解析が行われてきた。海底堆積物は、堆積速度~10 cm/kyr 程度の海域を中心に試料採取が行われ、古海洋環境の変動が議論されてきた。この堆積速度では、仮に 1 cm の間隔で分析したとしても、1 層準のもつ時間分解能は、良くても平均 100 年程度であり、主に  $10^4 \sim 10^6$  年スケールでの変動に焦点が注がれ、過去 2 万年の短周期 (10~100 年スケール) の気候変動の情報に乏しいのが現状である。また、氷床コアの時間分解能は、海底堆積物に比べれば良い傾向にあるものの、採取可能な地域は極域や標高の高い山岳域に限られ、また山岳氷河の氷床コアでは、融解による情報の乱れ等の問題を含むことも指摘されている。一方、湖底堆積物は、海底堆積物に比べ堆積速度が速く、高分解能の解析に適しているとされているが、湖の地理的な特徴によっては、全球的な気候変動よりも、地域的な気候変動に支配されやすい欠点もある。しかし、沿岸域に近い今日汽水湖とされている湖では、最終氷期の最寒期から海進期、海退期、現在と大規模な海水準の変動に伴い、湖水の物理的・化学的環境と湖の一次生産の大きな変動により、年縞堆積物が堆積しやすいことが知られている。このような年縞堆積物は、放射性炭素などの年代測定法に頼らずとも、縞の枚数がそのまま絶対年代となり、“天然の時計”であることから (ただし堆積間隙がないと仮定)、近年多くの注目を集めている。日本では、福井県三方五湖の水月湖で初めて年縞堆積物が発見され、過去 1 万 5 千年にさかのぼる詳細な気候変動の解析がなされて以来、秋田県目潟、鳥取県東郷池、青森県小河原湖なので、過去数千年から十数万年にさかのぼる年縞堆積物が採取され、気候変動研究にとどまらず、地質学的変化と人類史上の歴史的な事件との関連でも研究がなされつつある。

(3) 近年では、過去 2 万年の気候変動に加え、人類の影響が確実に現れている過去 2000 年間の気候変動の解析が注目され、時間分解能の古環境記録である年輪や湖底堆積物が注目されている。

## 2. 研究の目的

(1) 青森県小河原湖は、面積 65.58 km<sup>2</sup>、平均水深 11 m (最大水深 25 m) の湖である。流入河川としては、七戸川、花切川、砂土路川などがあり、流出河川としては高瀬川がある。海面水位が、湖面水位より高くなる時期には、海水が高瀬川を逆流し、湖に注ぎ込むため、汽水環境にあることが知られている。歴史的には、入り江の一部が、海水準の低下と湾口での砂丘の発達でせき止められて形成した湖とされている。これまで、都立大学の福澤仁之教授によって、湖底堆積物の採取が行われ、小川原湖には年縞堆積物が堆積していることが確認されているが、過去 2 万年にさかのぼる試料採取および解析は行われていない。そこで、小川原湖において、少なくとも過去 2 万年にさかのぼる連続的な湖底年縞堆積物を採取することを第一の目的とする。

(2) 採取した柱状試料に関しては、岩相記載を行なう他、古環境介在するテフラ (火山灰) の同定や貝片などの放射性炭素年代の測定によって年代決定を行なう。

(3) 柱状試料から間隙水を抽出し、塩化物イオンなど主要イオンの測定によって、小川原湖に海水が流入した時代の特定を行なう。

(4) 柱状試料の化学成分の測定にもとづいて、陸起源物質の供給源と供給量の変動、特に中国内陸部の湿潤変動や冬季モンスーン強度の指標となる黄砂フラックスの変動を明らかにする。

(5) 柱状試料の生物起源オパールや安定同位体比の測定にもとづいて、湖内の一次生産量の変動や小川原湖周辺の植生変動を明らかにする。

(6) 柱状試料のバイオマーカーの測定にもとづいて、小川原湖周辺の植生変動や降水量変動を明らかにする。

(7) 小川原湖湖底堆積物で得られた化学成分の測定結果や古環境解析結果は、過去に下北半島東方海域に陸棚斜面で得られた海底堆積物試料の分析結果および古環境解析結果や先行研究である福井県水月湖での古環境解析結果と対比を行ない、過去 2 万年に及ぶ日本列島周辺での古環境変動を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 湖底堆積物の採取に先立ち、小川原湖において、現地で漁船を備船し測深調査と 4～8 kHz の音波探査を行った。この結果から連続性のある音響反射パターンを抽出し、その反射面の上面深度を読み取り、各側線での地層断面図を作成した。この解析結果をもとに、堆積物採取に適した地点を選定した。

(2) 選定した地点において、スパット台船を係留して、水圧式の固定ピストン式シンウォールサンプラーによって湖底堆積物の採取を行なった。試料の連続性を確保するため、数 m 離れた 2 点でコアリングを行った。また、現在の小川原湖の現況と淡水収支を明らかにすることを目的に、コアリング時に湖水の鉛直的な採取および流入流出河川水の採取も行なった。

(3) 得られた湖底堆積物は、押し出し半裁後、岩相記載を行なった。軟 X 線スラブ、現場密度測定用のキューブ試料他、化学分析用の試料のサブサンプリングを行なった。記載データや軟 X 線撮影結果を統合し、コンポジット深度セクションを構築した。

(4) 介在するテフラの同定や放射性炭素年代の測定によって、年代決定を行なった。また、一部の深度セクションで年縞の計数を行なった。

(5) 間隙水や固相の各種化学分析を行ないこれらの結果をもとに、小川原湖の過去 16,000 年の海水準変動を明らかにした。また、下北半島東方海域で行なった海底堆積物試料の古環境解析結果や先行研究である福井県水月湖での古環境解析結果と対比を行ない、日本列島周辺での古海洋環境変動についても考えた。

### 4. 研究成果

(1) 2007 年 10 月に、小川原湖において測深及び音響調査を行い、試料採取地点を決定した。2008 年 3 月末から 4 月初めには採取地点にスパット台船を係留し数 m 離れた 2 地点から、水圧式の固定ピストン式シンウォール

サンプラーによって湖底堆積物の採取を行なった。試料採取点の位置は、それぞれ  $40^{\circ} 47' 12.6'' N$ ,  $141^{\circ} 20' 12.6'' W$  (St. 1) と  $40^{\circ} 47' 12.3'' N$ ,  $141^{\circ} 20' 12.7'' W$  (St. 2), 水深 25 m である。各点で 22 m に及ぶ柱状試料の採取に成功した。また、湖水の鉛直的な採取および流入流出河川水の採取も行なった。図 1 と 2 には、試料採取地点とスパット台船溪流による試料採取の様子を示す。



図 1：試料採取地点



図 2：小川原湖に係留したスパット台船

(2) 小川原湖湖底堆積物の 251～256 cm, 258～260 cm, 937～946 cm, 1,760～1,761 cm および 2,004～2,211 cm には、明瞭な火山灰層が確認できた。これらに関して電子プローブマイクロアナライザー（日本電子 JXA-8900R 以下 EPMA）を使用して走査型電子顕微鏡 (SEM) で形態観察を行い、同時にエネルギー分散型 X 線分光器 (EDS) で主成分分析を行った結果、251～256 cm と 258～260 cm に介在する二対の火山灰層は、それぞれ白頭山苫小牧 (B-Tm; AD937 年) と十和田 a (To-a; AD915 年) に対応することがわかった。これらは、福澤ら (1998) による小川原湖湖底堆積物での両火山灰の産状とも矛盾しない。また、937～946 cm と 2,004～2,211 cm の軽石層は、十和田中撤 (To-Cu; 6230 年) と十和田八戸 (To-H; 15,700 BP) に対応するものと考えられた。一方、1,760～1,761 cm の火山灰に関しては、現在のところ同定はできていない。この結果に基づき堆積速度を算出すると、表層から 251 cm の間は

0.24 cm/yr, 251 cmから937 cmの間は0.13 cm/yr, 937 cm から 2,004 cm の間は 0.12 cm/yr となった. これら火山灰の同定結果は, 15 層準で測定した貝片の放射性炭素年代の結果と調和的であり, 放射性炭素年代から算出される堆積速度は, 火山灰の同定結果から見積もった堆積速度とほぼ一致した結果となった.

小川原湖の柱状試料の最下部付近 (2,004 ~2,211 cm) には, 200 cmに及ぶ十和田八戸の軽石層が存在していた. この軽石層の下部 5 cm には, 炭化木が存在すること, 軽石層基底には級化構造が見られること, また軽石層内にも珪藻化石が確認できたことを考えあわせると, この軽石層は十和田八戸の火砕流堆積物の豪雨等による二次堆積物である可能性が考えられる.

(3) 後氷期の海水準変動と連動した小川原湖への海水進入と海退の時期を特定するため, 堆積物中の間隙水には, 海進と海退の時期の記録が残っていると考え, 間隙水中の塩化物イオン濃度をイオンクロマトグラフィーで分析した. 間隙水中の塩化物イオン濃度は, 図3のように底泥直上の塩化物イオン濃度(6.8 g/l)に等しく, 表層で高く深さと共に指数関数的になめらかに減少しており, 6,400年以前の層準では0.26 g/l以下であった. この塩化物イオンの分布を, 加藤ら(1996)の湖水塩素量の突発的增加モデルを用い以下の数式を用い計算したところ,  $T=100\sim 200$  kyrの範囲で実測した塩化物イオンの分布を説明できることがわかった. このことは, 淡水環境だった小川原湖に突発

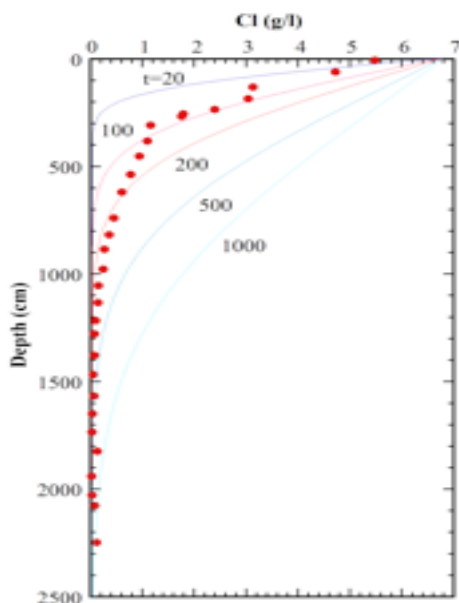


図3: 間隙水の塩化物濃度の鉛直分布

的な海水の浸入が過去 100~200 年前以降に起こったことを示している.

一方, スメアスライドや堆積物粒子の電子顕微鏡観察の結果からは, ほぼ全層において, フランボイダルパイライト (野苺状黄鉄鉱) が確認できた. 図4には, 深さ 1,296 cmと 1,826 cm (堆積年代でそれぞれ 9147 年前と 13,555 年前に対応) のフランボイダルパイライトの電子顕微鏡写真を示す. パイライトの

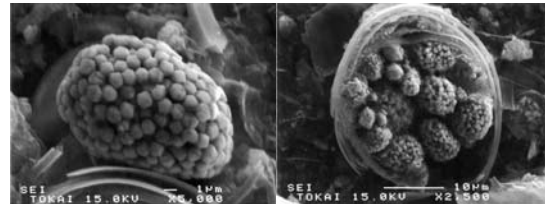


図4: 深さ 1,296 cm (9,147 年前; 左) と 1,826 cm (13,555 年前; 右) のフランボイダルパイライト

存在は, 硫酸還元の結果を示しており, パイライトの存在する層準は少なからず小川原湖への海水の浸入の結果と考えられる. しかし, 硫酸イオンは間隙水中を拡散することを考えると, パイライトの存在から海水進入の時代を特定することには至らない. そこで, 生物化石の情報も含め海水に進入時期を特定することを考えた. 図5には, 存在したナノあるいはマイクロサイズの植物プランクトン化石の電子顕微鏡写真を示す. 図中の a~f の植物プランクトンは, いず

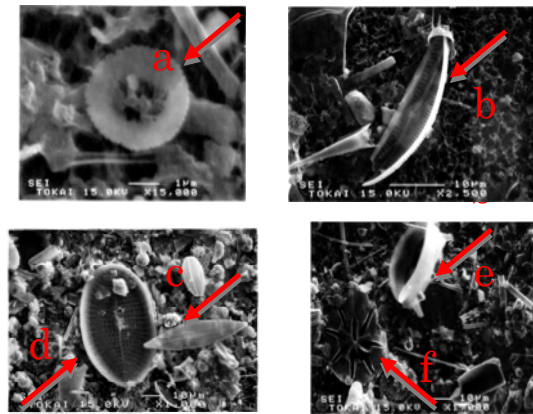


図5: 深さ 931 cm (6,000 年前; 左上), 1,223 cm (8,518 年前; 右上), 1,297 cm (9,147 年前; 左下) および 1,465 cm (10,553 年前; 右下) の植物プランクトン化石

れも海産性のケイ藻や円石藻類であり, 渦鞭毛藻類も確認された. このことは, 小川原湖には今から 10,000 年前には海水が浸入していたことを示していると考えられる. さらに, 931 cm (6,000 年前) の層準は, 円石藻の暖水種である *Gephyrocapsa oceanica* が確認できたことは, 6000 年前の縄文海進最盛期には現在よりも暖かい海水が小川原湖に流入していたと考えられる. この暖かい海

水の流入は日本海の対馬海流の勢力が増したためと考えられ、このことは、小川原湖周辺の縄文早期前期の貝塚から熱帯性のハイガイなどが確認されていることと矛盾しない。

(4) 間隙水の塩化物イオン濃度の分析結果と顕微鏡観察の結果から、過去 16,000 年の小川原湖の海水準変動に関して、以下のようなシナリオが考えられる。

- ① プレボリア期の全球的な温暖化と海水準変動により、狭い溺れ谷(小川原湖の原型)に少なくとも 10,000 年前頃には海水流入が起こった。
- ② 縄文海進の最盛期である 6,000 年前頃には、現在の小川原湖は内湾となり、おそらく日本海の対馬暖流の勢力が増大し、暖かな海水流入が起こった。
- ③ 縄文海進後の海退期に、湾口に砂州が形成し、内湾が閉鎖性を増し小川原湖が形成する。七戸川などの上流河川から淡水が供給され、次第に淡水化が進行する。
- ④ その後、汽水化と淡水化を繰り返した可能性はあるが、100~200 年前までには一旦は淡水化したが、小氷期以降の温暖化に転ずるに伴い、小川原湖に再び海水流入が起こり、現在の汽水環境が成立した。

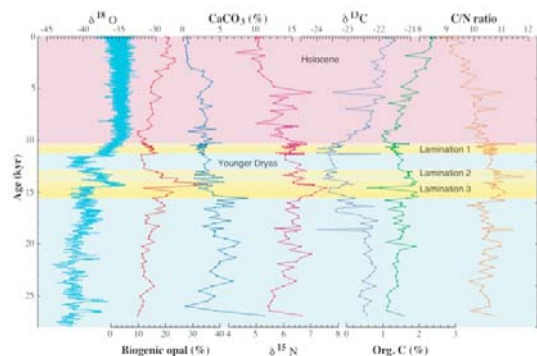


図 6：下北沖海底堆積物の分析結果

(5) 下北半島東方の陸棚斜面の海底堆積物の過去 27 千年の結果を図 6 に示す。この堆積物には、太平洋に位置する堆積物であるにも関わらず、湖底堆積物の年縞を連想させる葉理構造(図中黄色のハッチ部)が3つのシーケンスで確認されている。これら葉理構造の形成年代は、15.6~13.7 kyr, 13.5~13.0 kyr 及び 11.3~10.4 kyr であり、全球的な気候の温暖期に対応していた。葉理の形成には、海底付近の溶存酸素量の低下が起因している。酸素量の低下は、海洋表層の成層構造の強化が、深く関与している。つまり、葉理の形成期の北西部北太平洋の表層塩分は、最終氷期最寒期やヤンガードリアス期以上に低かった可能性がある。葉理構造の形成は、グリーンランドの気温の上

昇に比べ少なくとも 600 yr 早く起こっている。これは水月湖の年縞コアと同様の東アジアのモンスーン変動の先行を示すイベントと考えられ、モンスーン変動に北太平洋の成層構造、つまり中層循環が応答していたことを示している。現時点で、小川原湖湖底堆積物では、16,000 年からヤンガードリアス期の明瞭な気候変動に関わるパルスは捉えられていない。今後の研究の展開に期待したい。

先に小川原湖への海水進入は、少なくとも 10,000 年前であることを述べた。また、6,000 年前には、小川原湖に対馬暖流の流入が起こっていた。対馬暖流の勢力は、6,000 年前を境に衰退したことが知られており、下北沖の海底堆積物で観測された $\delta^{15}\text{N}$ とC/N比の減少がこれに対応した変化と考えられる。 $\delta^{15}\text{N}$ の減少は、北西部北太平洋や日本海における脱窒量の減少を示している可能性があり、これは、対馬暖流の勢力の拡大に伴い、日本海や北太平洋の高緯度海域、さらにはオホーツク海に供給される塩分が増加したことによる中層循環の活発化とも考えられ、今後研究を進めていくことによって明らかになると確信している。本研究によって採取された小川原湖湖底堆積物は、今後様々なプロキシの分析や解析を進め、下北沖の海底堆積物との対比を行なうことで、気候システムの変動における北太平洋の海洋循環の重要性が明らかになると考えられる。

## 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 11 件)

- ① Horikawa, K., Murayama, M., Minagawa, M., Kato, Y. and Sagawa, T. (2010): Latitudinal and downcore (0-750 ka) changes in n-alkane chain lengths in the eastern equatorial Pacific. 査読有, *Quaternary Research* 73, 573-582.
- ② Shigemitsu, M., Watanabe, Y.W. and Narita, H. (2009): Sedimentary inorganic nitrogen and its isotope ratio in the western subarctic Pacific over the last 145 kyr. 査読有, *Journal of Oceanography* 65, 541-548.
- ③ 張 勁, 袁薇, 王式功 (2009): 黄砂と海洋微生物の一次生産, 黄砂, 古今書院, 査読無, 309-313.
- ④ 榎田和彦, 佐藤義夫, 成田尚史, 加藤義久 (2009): 明神海丘カルデラにおけるマンガンと鉄の挙動. *海水学会誌* 63(1), 29-38.
- ⑤ Shigemitsu, M., Watanabe, Y.W. and Narita, H. (2008): Time variations of

<sup>15</sup>N of organic nitrogen in deep western subarctic Pacific sediment over the last 145 ka. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 9, 査読有 10012, doi:10.1029/2008GC001999.

⑥ Zhang, J., Gamo, T., Dai, M., Chen, C.-T. A. and Sohrin, Y. (eds.) (2008): GEOTRACES in Asia-1 from regional to international networks: The studies of marine biogeochemical cycles of trace elements and isotopes. 査読有, *Journal of Oceanography* 64, 229-337.

⑦ Peng, T.-R., Chen, C.-T. A., Wang, C.-H., Zhang, J. and Lin, Y.-J. (2008): Assessment of terrestrial factors controlling the submarine groundwater discharge in water shortage and highly deformed island of Taiwan, western Pacific Ocean, Special Section: GEOTRACES in AISA-1, Eds., J. Zhang et al., 査読有, *Journal of Oceanography* 64, 323-337.

⑧ Konno, S., Harada, N., Narita, H. and Jordan, R.W. (2007): Living Braarudosphaera bigelowii (Gran & Braarud) deflandre in the Bering Sea, 査読有, *Journal of Nanoplankton* 29(2), 78-87.

⑨ Maeda, N., Noriki, S. and Narita, H. (2007): Grain size, La/Yb and Th/Sc of settling particles in the western North Pacific: Evidence for lateral transport of small Asian loess, 査読有, *Journal of Oceanography* 63, 803-812.

⑩ Shigemitsu, M., Narita, H., Watanabe, Y. W., Harada, N. and Tsunogai, S. (2007): Ba, Si, U, Al, Sc, La, Th, C and <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C in a sediment core in the western subarctic Pacific as proxies of past biological production. 査読有, *Marine Chemistry* 106, 442-455.

⑪ 張勁 (2007): 陸と海がつながる自然の循環系, 日本海学の世紀 総集編, 角川学芸出版, 査読有, 234-258.

[学会発表] (計 8 件)

① 角皆 静男, 成田 尚史 (2009): W.S. Broeckerのコンペアベルトはいいかげんだ. 日本海洋学会春季大会. 2009年4月5日~4月9日, 東京大学

② Nakamura T., Zhang J., Nishitani H., Narita H. 他 5 名 (2008): The linkage between nutrient flux and distribution of coccolithophorids: fraction and mixing of the varied water masses in the southeastern Bering Sea. *Blue Earth'09*. 2009年3月12日, 立教大学.

③ 成田尚史 (2008): 小川原湖より採取されたコアの解析 (予報), 高知大学海洋コア総合研究センター全国共同利用研究成果報告会. 2009年1月27日, 東京大学.

④ 高原啓弘, 丹下佑美子, 成田尚史 (2008): 小川原湖湖底堆積物から見た海水準変動. 東京大学海洋研究所共同利用研究集会 「微量元素海洋学」 事始: 海洋の微量元素・同位体研究の動向と今後の展望 (GEOTRACES計画). 2009年1月22日, 東京大学

⑤ 角皆 静男, 成田尚史, 中野善之, 杉浦 糊塗 (2007): 放射性炭素年代におよぼす海洋成層化の影響. 日本海洋学会春季大会. 2008年3月22日~26日, 東京海洋大学

⑥ Kishi Y., Narita H. and Zhang J. (2007): Particulate nutrients and calcium carbonate in the subarctic Pacific Ocean. 2008 Ocean Sciences Meeting. 2008年3月2~7日, Orlando, Florida

⑦ Tange Y., Minami H., Narita H. and Ikehara K. (2007): Paleoproductivity of biogenic opal and carbonate in the northern Japan Sea over the last 20 kyr. 9th International Conference on Paleoceanography. 2007年9月3日~7日, Shanghai, China.

⑧ Kishi Y., Narita H. and Zhang J. (2007): The chlorophyll biomass, particulate nutrients and calcium carbonate in the subarctic Pacific Ocean. 9th International Conference on Paleoceanography. 2007年9月3日~9日, Shanghai, China.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

成田 尚史 (NARITA HISASHI)  
東海大学・海洋学部・教授  
研究者番号: 50250501

### (2) 研究分担者

張 勁 (ZHANG JING)  
富山大学大学院・理工学研究科・教授  
研究者番号: 20301822

### (3) 連携研究者

南川 雅男 (MINAGAWA MASAO)  
北海道大学大学院・地球環境科学研究所・教授

研究者番号: 10250507

加藤 義久 (KATO YOSHIHISA)  
東海大学・海洋学部・教授

研究者番号: 00152752

西村 弥垂 (NISHIMURA MITSUGU)  
東海大学・海洋学部・教授

研究者番号: 70167568

ジョルダン リチャード (JORDAN RICHARD)  
山形大学・理学部・准教授

研究者番号: 90260455