

NOPACCSプログラム - 白嶺丸で行った海洋環境研究 -

川 幡 穂 高¹⁾

1. はじめに

NOPACCS (Northwest Pacific Carbon Cycle Study) は地質調査所, 資源環境技術総合研究所, 大学, 民間研究所などが協力して1990-1996年度に行われた大型環境研究プログラムである。これは太平洋の炭素循環を研究する目的で実施されたが, 国際的にはJGOFS (Joint Global Ocean Flux Study: 合同全球海洋フラックス研究) 関連プログラムとして, 外国にもデータを報告する等国際的にも高く評価されている。ここでは, 私達が行った現代の外洋やサンゴ礁の炭素循環, 環境変遷の研究について概要を整理する。さらに詳しい内容については引用文献を参照されたい。

2. 現代外洋環境 (セジメントトラップ観測)

海洋の生物地球化学プロセスは大気中の二酸化炭素濃度に影響を与えている。すなわち, 海洋表層で有機物が生産されると二酸化炭素が吸収され, 沈降粒子となって鉛直下方にもたらされ, これらの炭素はもはや大気と接しない。逆に, 海洋表層で炭酸カルシウム生物殻が形成されると二酸化炭素が放出される。沈降粒子の性質と粒子束が海洋環境とどのような関係があるのかを明らかにするために, 太平洋の南北両半球でセジメントトラップ観測を行った(第1図)。

地質調査所のセジメントトラップ観測は西太平洋赤道域の西カロリン海盆で始まった。測点1 (3° N, 135° E) は低緯度地域で年間を通じた気温の変化はほとんどないが, 顕著な季節変動が認められた。すなわち, 夏季と冬季に粒子束は大きくな

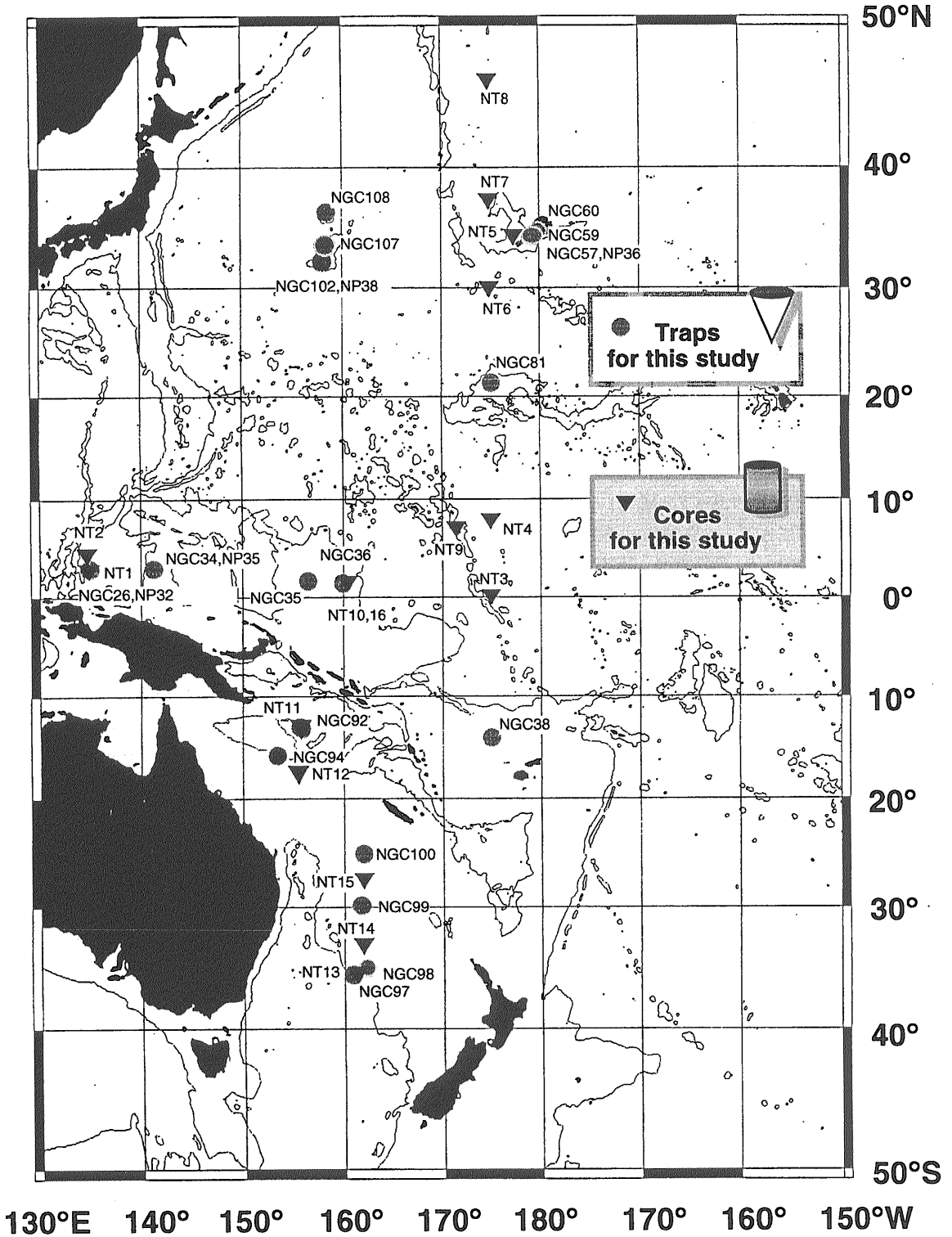
り, 有機炭素粒子束が増加し, 有機炭素/炭酸カルシウム比も上昇する傾向が認められ, この時期二酸化炭素が効果的に吸収されていることがわかった。これらの高い有機炭素生産は, 風速の増大によって表層水の混合または湧昇によってもたらされたものと考えられた。(Kawahata *et al.*, 1998c)。但し, 粒子束の低い時期には, 粒子の $\Delta^{14}\text{C}$ 値も低い傾向があることから, 降雨によって陸から河川を通じて低い $\Delta^{14}\text{C}$ 物質がもたらされたと解釈された(Kawahata and Murayama, 2000)。

次に, 赤道沿い(135-175° E)の経度方向の変化では, 西端で最も二酸化炭素を吸収する効果が高いことがわかった。また, El Niño / Southern Oscillation (エルニーニョ・南方振動)との関連では, 175° Eの赤道では, El Niño時に粒子束が減少し, 生物活動によって吸収される効果が下がることがわかった(Kawahata *et al.*, 2000c)。また, このサイトで生体物質として重要なアミノ酸の分析を行った結果, 粒子束が増大する時期には, Asp/Balaモル比, Glu/Gabaモル比, Bala+Gabaモル比, THAA-C%, THAA-N%が増大し, 栄養塩の供給が活発であったこと, また, 粒子事態では炭酸カルシウム粒子が卓越するもののAsp/Glyモル比やSer+Thrモル%が増大することから有機物は珪藻に由来することが示された(Gupta and Kawahata, 2000)。

さらに, 緯度方向の変化を調べるために, 北半球では175° E, 南半球では160° Eラインにそってセジメントトラップを繫留した。北半球では, 全粒子束, 有機炭素粒子束, 生物起源オパール粒子束は黒潮続流域以北で顕著に増加することがわかった。一方, 炭酸塩粒子束は赤道から46° Nまでは

1) 地質調査所 海洋地質部 / 東北大学大学院理学研究科(連携講座)

キーワード: NOPACCS (Northwest Pacific Carbon Cycle Study), 炭素循環, セジメントトラップ観測, 古環境, サンゴ礁, 気候変動, 白嶺丸



第1図 NOPACCSで研究したセジメントトラップ観測点 (▼) と堆積物採取地点 (●).

とんど変化がなかった。そして、黒潮続流域では春季に生物生産が活発になって、二酸化炭素分圧が非常に下がることが観察された(Kawahata *et al.*, 1998b)。また、セジメントトラップに捕集された有孔虫殻の詳細な分析結果からは、亜寒帯のサイトでは、冬期には低温と餌の不足で有孔虫の全フラックスは小さかったが、夏期から秋期にかけては粒子束は高く、有機炭素粒子束も高いことから餌の供給が十分であったためと示唆された(Eguchi *et al.*, 1999)。これらの値を基に、西太平洋(0-48° N, 150-180° E)の水深100mの有機炭素除去流量を計算すると0.23 GtC yr⁻¹であった(Kawahata and Ohta, 1997)。

南半球の沈降粒子の有機炭素粒子束の緯度方向での変化は、SeaWiFS衛星画像から得られた色素量の分布、すなわち赤道域からサンゴ海まででは濃度が低く、それより南下すると急速に増加するという結果と整合的であったが、北半球の同じ緯度と比較すると粒子束が低く、炭酸カルシウムに富み、生物起源オパールに乏しいという特徴が観察された(Kawahata and Ohta, 2000)。

今後は、新世代センサーを搭載した衛星があがったので、衛星データとセジメントトラップ繫留観測を組み合わせることで海洋表面を上と下から観測することにより、面的データ、時系列データを駆使して、新たな物質循環研究を展開できると期待される。

3. 現代外洋環境(表層堆積物)

175° Eラインの表層堆積物の有機物の分析からは、陸上の高等植物に由来するC₂₅-C₃₆ n-アルカン濃度は高緯度の地点(48° N)で最も高く、低緯度方向に減少していった。逆に、C₂₃-C₃₄ 脂肪酸の量は低緯度域で相対的に高かった。これらの事実は、ダスト由来の有機物の分布が偏西風、貿易風などの異なった風系によって大きな影響を受けていることを示唆している(Ohkouchi *et al.*, 1997)。また、3-7環ポリ核酸アロマティック炭化水素については、低緯度(15° S -24° N)で低く、中緯度以北(27-48° N)では顕著に高く、外洋であっても人類起源の炭化水素の影響がエアロゾルを通じて顕著なことを示していた(Ohkouchi *et al.*, 1999)。

また、深海底にはバクテリアが作ったマグネタイ

トが堆積しているが、これと有機炭素粒子束との関係を解析すると、等方結晶のタイプは相対的に酸化的な堆積物で優勢であるが、非等方結晶のタイプはより還元的な状態下で優勢であった。これらの事実は、バクテリアが作ったマグネタイトを解析することにより、過去の環境、特に有機炭素粒子束と関係した酸化/還元状態を復元する際に役立つ可能性が高い(Yamazaki and Kawahata, 1998)。

4. 現代沿岸環境(サンゴ礁)

二酸化炭素を吸収する光合成と放出する石灰化(炭酸カルシウムの生産)が活発に進行するサンゴ礁生態系が、全体として大気中の二酸化炭素の吸収源となっているか、あるいは放出源なのか、について多くの議論がなされてきた。この問いに答えるためには、珊瑚礁の内側(ラグーン水)と外側(源水としての外洋水)の海水中の二酸化炭素分圧の差を調べる事が最も有効である。もし、内側が高ければ放出、低ければ吸収となる。白嶺丸による二酸化炭素の精密測定によればパラオ堡礁、マジロ環礁では、礁内の海水はそれぞれ48 μ atm, 14 μ atm高く、サンゴ礁は二酸化炭素が海水から大気へ放出される場であることを示していた(Kawahata *et al.*, 1997b)。その原因を探るために、アルカリ度-全炭酸の図上にサンゴ礁内の海水組成をプロットすると、外洋水を源水として石灰化によってアルカリ度と全炭酸が2:1の割合で減少していることがわかった。このことは、サンゴ礁では有機物の生産も活発であるものの、生産された有機物は即座に分解して再び二酸化炭素に戻ってしまい、サンゴ礁生態系の炭素循環では石灰化による二酸化炭素分圧の上昇が支配的であることがわかった(Suzuki *et al.*, 1997; Kawahata *et al.*, 1999b)。この結果は、オーストラリアのグレート・バリアリーフ(Kawahata *et al.*, 2000b)、モルジブの南マレ環礁にもあてはまる。特に、後者では、多くの海峡によって環礁の水の交換が活発なために差が小さくなっている。以上の事実は、環礁や堡礁は、潜在的に大気中への二酸化炭素の放出源となっている事を示している(Suzuki and Kawahata, 1999)。

一方、沿岸から栄養塩が流入する据礁については、陸の影響があるためはっきりした結論が得られ

ていなかった。石垣島白保サンゴ礁(据礁)で調査を行った結果、陸水には多量の二酸化炭素が含まれており、陸水のC:P比は3,600-35,000で栄養塩で固定できる炭素量(サンゴ礁では、C:P = 約500)の約10-100倍以上の炭素が陸水に含まれていた。これらの事実から、サンゴ礁はすべてのタイプ(据礁、環礁、堡礁)で二酸化炭素の放出として働く、との一般化した概念に至った(Kawahata *et al.*, 2000d)。

5. 環境変遷

西太平洋暖水塊(WPWP)は地球上で最も水温の高い水塊で、その変動はアジアモンスーンにも大きな影響を与えてきたと考えられている。WPWPの西域では現在の基礎生産が高い海域である。ここでは、氷期-間氷期の変動にもかかわらず水温の変動はたった $< 2^{\circ}\text{C}$ と小さかったが、有機炭素の沈積流量は明らかに気候変動に呼応して、一般に氷期に大きく、間氷期に小さく変動してきた。但し、その位相は東赤道太平洋等と比較すると数千年ずれていた(Kawahata *et al.*, 1998a)。アジアモンスーンが発達した氷期には、風に起因する表層水の混合または湧昇によって基礎生産が増大したものと考えられる。また、海水準の低下時には概して石質成分の沈積流量が増大した。WPWPの西部では、このような陸源物質の供給も生物生産の増大に寄与した可能性が高い。一方、WPWPの中央部では貿易風の変動に伴う生物生産の変動が観察された(Kawahata and Eguchi, 1996)。WPWPの東部では、北フィジー海盆のように貧栄養海域なので、氷期に風速が強くなっても水温躍層が深いため生物生産が顕著に増大するという事はなかった(Kawahata and Eguchi, 1997)。また、同海域の深層循環に関しては炭酸カルシウムの保存性は4.1万年という周期を有しており、酸素同位体との位相のずれもほとんどないことから、北大西洋の深層水の形成変動がこの海域にも大きな影響を及ぼしていることがわかった(Kawahata *et al.*, 1997a)。WPWPはインドネシア通過流の源流域で、この変動は全球の海洋大循環にも大きな役割を果たしてきたらしい(Kawahata, 1999)。

次に、中緯度海域については、この海域が大

気・海洋ともに低緯度と高緯度の境界なので、気候変動に敏感なため重要視されている。基礎生産、生物起源オパール沈積流量、有孔虫の群集解析の結果を基に、南北両半球でほぼ同位相で緯度方向に前線が移動していたことが示唆された(Kawahata *et al.*, 1999a)。特に、北半球の中緯度では、表層での基礎生産力の変動が、深海底に棲む底生有孔虫である *Uvigerina peregrina* の増減に支配的な役割を果たしていた(Ohkushi *et al.*, 2000)。また、中緯度に位置するヘスライズのコアを調べた結果は、アジア大陸からの風送塵のフラックスの大きな極大は、酸素同位体ステージ4-5後半、6の中期、中程度の極大は、1初期-2, 3後期、3中期に認められた。これらの極大は、夏期モンスーン中の降雨量の減少、冬期モンスーン中の風速の増大に起因していた。風送塵による海洋表層への炭酸カルシウムの供給に関しては、炭酸カルシウムの溶解により海洋表層の二酸化炭素分圧を下げる効果は小さいことがわかった。一方、風送塵によって運搬されたシリカの海洋表層への供給は、生物起源シリカの沈積に潜在的な力を有していることが推定された(Kawahata *et al.*, 2000a)。

今後は、これらの結果を発展させ、陸環境-海洋環境の相互作用の研究を、風送塵-海洋、河川-海洋の観点から研究することが重要であろう。

謝辞：本プロジェクトを実行するにあたって、新エネルギー・産業技術総合開発機構、白嶺丸、関西総合環境センターの関係者にお世話になった。また、観測あるいは室内分析に関して工業技術院特別研究、科学技術振興調整費、地球環境総合研究推進費の研究費を使用した。

引用文献

- Eguchi, N., Kawahata, H. and Taira, A. (1999) : Seasonal response of planktonic foraminifera to the ocean surface condition : Sediment trap results from the northcentral Pacific Ocean. *J. Oceanography*, 55, p.681-691.
- Gupta, L.P. and Kawahata, H. (2000) : Amino acid and hexosamine compositions and flux of sinking particulate matter into the equatorial Pacific at 175°E longitude. *Deep Sea Res.*, in press.
- Kawahata, H. (1999) : Fluctuations in the ocean environment within the Western Pacific Warm Pool during Late Pleistocene. *Paleoceanography*, 14, p.639-652.
- Kawahata, H. and Eguchi, N. (1996) : Biogenic sediments in the Eauripik Rise of the equatorial western Pacific during the last

- 265kyr. *Geochem. J.*, 30, p.201-215.
- Kawahata, H. and Eguchi, N. (1997) : Paleoproductivity in the North Fiji Basin during the late Pleistocene. *J. Oceanography*, 53, p.355-364.
- Kawahata, H. and Murayama, M. (2000) : Radiocarbon of settling particles from the hemipelagic region. *Nuclear Instruments and Methods B*, in press.
- Kawahata, H. and Ohta, H. (1997) : Carbon removal rate with sinking particles along 175° E in the Western Pacific. *Proceeding of the Third International Conference on Asian Marine Geology*, Cheju, October, p.17-21.
- Kawahata, H. and Ohta, H. (2000) : Sinking and suspended particles in the Southwest Pacific. *Marine Fresh. Res.*, 51, p.113-126.
- Kawahata, H. Ahagon, N. and Eguchi, N. (1997a) : The fluctuation of carbonate preservation in the deep sea of the Caroline Basin during the last 300kyr. *Geochem. J.*, 31, p.85-103.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Goto, K. (1997b) : High PCO_2 in the lagoonal surface water of Palau Barrier Reef and Majuro Atoll - Coral reef ecosystem works as a source of atmospheric CO_2 -. *Coral Reefs*, 16, p.261-266.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Ahagon, N. (1998a) : Biogenic sediments in the West Caroline Basin, the western equatorial Pacific during the last 330 kyr. *Mar. Geology*, 149, p.155-176.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Ohta, H. (1998b) : Sinking particles between the Equatorial and Subarctic regions (0-46° N) in the Central Pacific. *Geochem. J.*, 32, p.125-133.
- Kawahata, H., Yamamuro, M. and Ohta, H. (1998c) : Seasonal and vertical variations of sinking particle fluxes in the West Caroline Basin. *Oceanologica Acta*, 21, p.521-532.
- Kawahata, H., Ohkushi, K. and Hatakeyama, Y. (1999a) : Comparative Late Pleistocene paleoceanographic changes in the mid latitude boreal and austral western Pacific. *J. Oceanography*, 55, p.747-761.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Goto, K. (1999b) : PCO_2 spatial distribution in coral reefs of Majuro Atoll, Marshall Islands. *Geochem. J.*, 33, p.295-303.
- Kawahata, H., Okamoto, T., Matsumoto, E. and Ujiie, H. (2000a) : Fluctuations of eolian flux and ocean productivity in the mid-latitude north Pacific during the last 200 kyr. *Quaternary Science and Reviews*, in press.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Goto, K. (2000b) : Distribution of the fugacity of carbon dioxide in the surface seawater of the Great Barrier Reef. *Mar. Chem.*, in press.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Ohta, H. (2000c) : Export Fluxes in the Western Pacific Warm Pool. *Deep-Sea Res. I*, in press.
- Kawahata, H., Yukino, I. and Suzuki, A. (2000d) : Terrestrial influence on the Shiraho fringing reef, Ishigaki Island, Japan : high carbon input relative to phosphate. *Coral Reefs.*, in press.
- Ohkouchi, N., Kawamura, K., Kawahata, H. and Taira, A. (1997) : The distribution of lipid class compounds in the seep sea surface sediments : A latitudinal transect at 175° E. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, p.1911-1918.
- Ohkouchi, N., Kawamura, K. and Kawahata, H. (1999) : Distribution of three- to seven-ring polynuclear aromatic hydrocarbons on the deep sea floor in the central Pacific. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 3086-3090.
- Ohkushi, K., Thomas, E. and Kawahata, H. (2000) : Abyssal benthic foraminifera from the Northwestern Pacific (Shatsky Rise) during the last 298 kyr. *Marine Micropaleontology*, 38, p.119-147.
- Suzuki, A., Kawahata, H., and Goto, K. (1997) : Reef Water CO_2 system and carbon cycle in Majuro Atoll, the Marshall Islands in the Central Pacific. *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium*, p.971-976.
- Suzuki, A. and Kawahata, H. (1999) : Partial pressure of carbon dioxide in coral reef lagoon waters : comparative study of atolls and barrier reefs in the Indo-Pacific Oceans. *J. Oceanography*, 55, p.731-745.
- Yamazaki, T. and Kawahata, H. (1998) : Organic carbon flux controls the morphology of magnetofossils in marine sediments. *Geology*, 26, p.1064-1066.

KAWAHATA Hodaka (2000) : NOPACCS program
- Ocean environmental study using R.V. Hakurei-maru -

<受付 : 2000年1月5日>