

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20310010
 研究課題名（和文） 海洋中深層における炭素循環を駆動する有機物—微生物相互作用系の動的構造解析
 研究課題名（英文） Analyses of the dynamic structure of organic matter-bacteria interactions that mediate carbon cycling in meso- and bathypelagic oceans
 研究代表者
 永田 俊 (NAGATA TOSHI)
 東京大学・大気海洋研究所・教授
 研究者番号：40183892

研究成果の概要（和文）：

海洋炭素循環の理解の上で鍵になる、中深層での有機物の変質・分解過程とそれに関わる微生物群集の動態を新たな切り口から追及した。北極海において、微生物諸量の全深度分布を世界で初めて解明するとともに、西部北太平洋での時系列観測を先駆的に展開し、微生物活性の分布構造の海域間での違いと季節変動を明らかにした。また、懸濁態有機物のアミノ酸素安定同位体比から、有機物の変質過程を解析する新たな手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

In order to contribute to a better understanding of oceanic carbon cycling, this study examined organic matter transformation and degradation mediated by microbes in the meso- and bathypelagic layers of the oceans. Data collected on full-depth distribution patterns of microbes in the Arctic and the western North Pacific Oceans were used to compare the magnitude of and spatiotemporal patterns in organic matter fluxes in widely different oceanic regions. In addition, using compound-specific nitrogen stable isotope ratios of amino acids, we developed a novel approach to examine the processes involved in organic transformations in deep waters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

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：海洋、微生物、有機物、炭素循環、中深層、安定同位体、生物地球化学、原核生物

1. 研究開始当初の背景

海洋の表層から中・深層への有機物の大規模な鉛直輸送（生物ポンプ）は、大気中の二酸化炭素濃度の調節に関わる重要な炭素循環過程である。外洋域において海洋表層から中深層へと鉛直輸送される有機物の95%

以上は、水中の微生物群集の作用により無機物へと変換される。従来の生物地球化学的な研究では、この水中での有機物の変質・無機化プロセスは「ブラックボックス」として扱われており、有機物の分解や変質に関わる微生物群集の活性の変動やその制御機構につ

いては不明の部分が多く残されてきた。また、有機物の変質や分解に、どのような生物群集が関与しているのかについても、十分に明らかにされていなかった。これらのことが、中・深層のプロセスを明示的に組み込んだ全球生態系モデルや炭素循環モデルの構築を阻むひとつの大きな要因となってきた。

2. 研究の目的

本研究では、以下の課題を追及することを目的とした。

①海洋中深層における微生物群集の生産活性を指標として、海域間での微生物活性の分布構造の特徴と季節変動を明らかにするとともに、炭素循環に関わる微生物間の相互作用の素過程についての解析を行う。

②懸濁態有機物のアミノ酸窒素安定同位体比から、有機物の変質に対する原核生物群集の寄与を見積もる新たな手法の検討を行う。

③以上の研究の成果を統合し、中深層における微生物群集の動態と有機物の変質・無機化過程の制御要因に関する理解を深化させる。

3. 研究の方法

①北極海および西部北大西洋において微生物パラメータの全深度分布の観測を行った。原核生物細胞数とウイルス数は、フローサイトメトリー法を用いて計数した。原核生物群集の生産活性を放射性同位元素を用いたトレーサー法（ ^3H -ロイシン法）により推定した。得られたデータから、中・深層における微生物パラメータの海域間および季節的変動を解析した。また、深層においてウイルス数と原核生物細胞数の比が上昇する傾向が見出されたため、その機構を追及する目的で、長期培養実験を行い、中・深層におけるウイルスの消滅速度の推定を行った。

②中・深層における有機物の変質過程の新たな解析手法として、懸濁態有機物のアミノ酸別窒素安定同位体比を用いるアプローチを検討した。海洋細菌 (*Vibrio harveyi*) を用いた培養実験を実施するとともに、相模湾の中層から採取した懸濁態有機物のアミノ酸窒素安定同位体比の測定を行った。得られた結果をもとに、有機物の分解に伴うアミノ酸窒素安定同位体比の変動パターンを解析し、モデル化した。

4. 研究成果

①北極海および西部北太平洋における微生物諸量の全深度分布の観測

海洋地球研究船みらい MR09-03 次航海（平成 21 年 9 月 7 日～10 月 15 日）において、北極海カナダ海盆での観測を実施し、合計 8 地点において、微生物諸量（原核生物細胞数、

ウイルス数、原核生物生産速度）の全深度分布を明らかにすることに成功した（図 1）。北極海の主要海盆において、原核生物生産速度やウイルス数の全深度分布を観測したのは、本研究が世界で初めてである。得られた結果を解析したところ、興味ぶかいことに、中層において、原核生物生産速度の鉛直分布が顕著な亜表層極大を示すことが明らかになった。このことから、北極海西部の陸棚からカナダ海盆にかけて、有機物の水平輸送が活発に起きていることが示唆された。また、中深層における原核生物生産速度の積算値が、北太平洋亜熱帯海域における積算値に近いことを見出した。以上の結果は、北極海における有機物鉛直輸送の特性を解明するうえで重要な知見である。

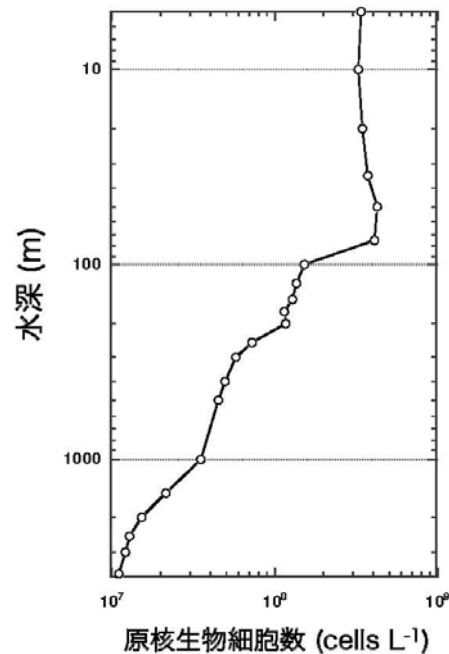


図 1 北極海カナダ海盆における原核生物細胞数の全深度分布の例 (Uchimiya M. et al. 出版準備中)

学術研究船白鳳丸 KH-10-01 次航海（平成 22 年 5 月 18 日～6 月 4 日）及び海洋地球研究船みらい MR10-06 次航海（平成 22 年 10 月 18 日～11 月 16 日）において、西部北太平洋における微生物諸量の全深度分布と、関連する環境パラメータの観測を行った。その結果、北部北太平洋の原核生物生産速度の鉛直分布パターンが亜寒帯海域と亜熱帯海域で大きく異なるということが明らかになった。すなわち、亜寒帯海域では、有光層直下から海底までの原核生物生産速度の減衰が、両対数軸上でほぼ直線であったのに対し、亜熱帯海域では、1,000m 以深の水柱において、深度

方向での生産速度の減衰指数が著しく低減する傾向がみられた。このような現象は先行研究では見られていないことから、本研究で調査を行った亜熱帯海域では、深層の有機物循環が、他の海域と異なる特性を持つものと推察した。一方、中層の原核生物生産速度が、夏季において、冬季よりも数倍高くなるという現象が見出された。このことから、表層の一次生産の季節変動が、中層の原核生物生産速度に比較的短い時間スケールで伝わるということが示唆された。

以上の研究を進める過程で、深層においては、一般的に、ウイルス数と原核生物細胞数の比（V/P比）が、表層にくらべて著しく高くなるという興味ぶかい現象が見出された。このことは、深層における微生物の相互作用系の構造が、表層とは大きく異なることを示唆している。この原因を探る目的で、亜熱帯中深層水を用いた長期培養実験を行い、ウイルスの減衰速度の測定を行った。その結果、深層のウイルス集団の中に、1週間以内の回転時間を持つ易分解性の亜集団と、数か月以上の回転時間を持つ難分解性の亜集団が存在することが明らかになった。この難分解性のウイルス亜集団が深層において長期間にわたり残留する結果、深層のV/P比が上昇するものと推察された。以上の結果は、中深層における微生物群集が駆動する炭素循環をモデル化するうえで重要な知見である

②アミノ酸別窒素安定同位体比に基づく有機物の変質プロセスの解析

相模湾で実施された、学術研究船淡青丸KT-09-04次航海（平成21年4月21日～4月27日）において、懸濁態有機物と微生物数の全深度分布の観測を行い、有機物に含まれる窒素安定同位体比およびアミノ酸の化合物別窒素安定同位体比の分析を行った。また、海洋細菌を用いた培養実験を実施し、有機物の分解に伴うアミノ酸窒素安定同位体比の変動パターンの解析を行った。その結果、表層から中層にかけて、窒素安定同位体比が深度とともに顕著に上昇することが示された。これに伴い、アミノ酸の窒素安定同位体比の上昇も見られたが、その程度はアミノ酸の種類により異なった。アミノ酸のタイプ別の窒素同位体比の変動パターンの解析から、相模湾の中層に懸濁する粒子状有機窒素の少なくとも10～30%は細菌の菌体由来であることが示された。以上から細菌が中層における有機物変質の中で重要な役割を果たしていることが明らかになった。また、アミノ酸の化合物別窒素安定同位体比の変動を説明する新たなモデルを構築した。

③中・深層における微生物—有機物相互作用系についての知見の総括

本研究で得られた成果を踏まえ、海洋の中・深層における微生物プロセスと有機物の動態に関する最新の知見を総説にまとめるとともに、微生物—有機物相互作用系の動的構造に関する概念モデルを提案した（図2）。従来、中・深層においては、低水温と高静水圧により微生物活性が強く抑制されており、水柱中の細菌群集が有機物供給に対して示す応答は限定的であると信じられてきた。ところが、本研究では、このような常識を大きくくつがえす知見が得られた。すなわち、中・深層の微生物群集は、有機物のパルス的な供給フラックスに対して敏感に応答している可能性が示唆された。さらに、本研究では、アミノ酸の化合物別窒素安定同位体比を用いた、中・深層の有機物動態解析のためのモデルも新たに構築することに成功した。今後、本研究が構築したモデルや手法を駆逐することで、微生物群集が有機物負荷に対して応答する機構を詳細に解明する必要がある。

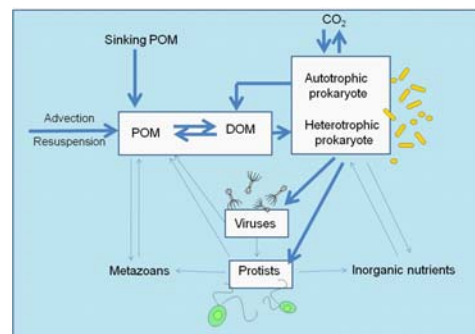


図2. 海洋深層における有機物と微生物の相互作用系に関する概念モデル

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8件）

①Kawasaki N., Sohrin, R., Ogawa, H., Nagata, T., and Benner, R. (2011) Bacterial carbon content and the living and detrital bacterial contributions to suspended particulate organic carbon in the North Pacific Ocean. *Aquatic Microbial Ecology*. 62: 165-176. 査読有

②Yang Y., Motegi C., Yokokawa T., Nagata T. (2010) Large-scale distribution patterns of virioplankton in the upper ocean. *Aquatic Microbial Ecology*. 60: 233-246 査読有

③Nagata, T., Tamburini, C., Ari' stegui, J., Baltar, F., Bochdansky, A., Fonda-Umani, S., Fukuda, H., Gogou, A., Hansell, D.A., Hansman R.L., Herndl G.J., Panagiotopoulos, C., Reinthaler T., Sohrin, R., Verdugo, P., Yamada, N., Yamashita,

Y., Yokokawa, T. and Bartlett, D.H. (2010) Emerging concepts on microbial processes in the bathypelagic ocean – ecology, biogeochemistry, and genomics. *Deep-Sea Research II*, 57: 1519-1536. 査読有

④Burd, A.B., Hansell, D.A., Steinberg, D.K., Anderson, T.R., Arístegui, J., Baltar, F., Beaufort, S.R., Buesseler, K.O., DeHairs, F., Jackson, G.A., Kadko, D.C., Koppelman, R., Lampitt, R.S., Nagata, T., Reinthaler, T., Robinson, C., Robison, B.H., Tamburini, C. and Tanaka, T. (2010) Assessing the apparent imbalance between geochemical and biochemical indicators of meso- and bathypelagic biological activity: What the @#\$! Is wrong with present calculations of carbon budgets? *Deep-Sea Research II*. 57: 1557-1571 査読有

⑤Yokokawa, T. and Nagata, T. (2010) Linking bacterial community structure to carbon fluxes in marine environments. *Journal of Oceanography* 66:1-12. 査読有

⑥Miki, T., Giuggioli, L., Kobayashi, Y., Nagata, T. and Levin, S.A. (2009) Vertically structured prokaryotic community can control the efficiency of the biological pump in the oceans. *Theoretical Ecology* 2: 199-216. 査読有

⑦Motegi, C., Nagata, T., Miki, T., Weinbauer, M. G., Legendre, L. and Rassoulzadegan, F. (2009) Viral control of bacterial growth efficiency in marine pelagic environments. *Limnology and Oceanography* 54: 1901-1910. 査読有

⑧Motegi, C. and Nagata, T. (2009) Addition of monomeric and polymeric organic substrates alleviates viral lytic pressure on bacterial communities in coastal seawaters. *Aquatic Microbial Ecology* 57: 343-350 査読有

[学会発表] (計8件)

①内宮 万里央・福田 秀樹・小川 浩史・永田 俊「西部北極海における原核微生物生産速度の全深度分布 —中深層への有機炭素供給機構とその強度の評価—」、*Blue Earth* '11、東京海洋大(東京)、2011年3月7日 査読無

②永田俊、楊燕輝、茂手木千晶、横川太一 “Regional variability in viral distribution patterns in the upper ocean” IMBER-IMBIZO meeting, 2010年10月12日、Crete, Greece 査読有

③内宮 万里央・福田 秀樹・小川 浩史・

永田 俊・西野 茂
人・菊地 隆、「西部北極海における原核微生物生産速度 —カナダ海盆域における全深度分布の特徴—」、2010年度日本海洋学会春季大会、東京海洋大学(東京)、2010年3月29日 査読無

④内宮 万里央・福田 秀樹・小川 浩史・永田 俊「西部北極海における原核微生物の生物量および生産速度 —陸棚から海盆域にかけての全深度分布特性—」、*Blue Earth* '10、東京海洋大(東京)、2010年3月2日 査読無

⑤M. Uchimiya, H. Fukuda, H. Ogawa, T. Nagata “Prokaryote production in the mesopelagic layer of the western Arctic Ocean” American Society for Limnology and Oceanography 2011 Aquatic Science Meeting, San Juan, Puerto Rico, 2010年2月17日 査読無

⑥M. Uchimiya, H. Ogawa and T. Nagata “Microbes in the twilight zone: Regional variability in responses to the addition of dissolved organic carbon” The 11th Symposium on Aquatic Microbial Ecology, Piran, Slovenia, 2009年8月31日 査読無

⑦T. Miki, L. Giuggioli, Y. Kobayashi, T. Nagata, S. A. Levin “Potential roles of water mixing in the spatio-temporal dynamics of prokaryotic community and the functioning of the biological pump” ASLO Aquatic Sciences Meeting, 2009年1月30日、Nice, France 査読無

⑧永田俊、横川太一 “Large-scale variations in full depth distribution of prokaryotic production in the central Pacific” IMBER-IMBIZO meeting, 2008年11月10日、Florida, U.S.A. 査読有

[図書] (計1件)

①永田俊 (2009) 第21章 海のなかのミクロな環。 In: 海と生命-「海の生命観」を求めて-(ed. by 塚本勝巳) pp. 306-322 東海大学出版会

[その他]

ホームページ等
<http://co.ori.u-tokyo.ac.jp/mbcg/j/members/nagata/index.html>

6. 研究組織
(1) 研究代表者

永田 俊 (NAGATA TOSHI)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号：40183892

(2) 研究分担者

浜崎 恒二 (HAMASAKI KOJI)
東京大学・大気海洋研究所・准教授
研究者番号：80277871
(H20, H21)