

## 1. 研究背景

海洋に存在する硝酸態窒素は、植物プランクトンの成長に欠かすことができない栄養塩の1つである。現在、海洋の多くは貧栄養塩海域となっており、硝酸の供給不足によって基礎生産が抑えられている。そのため、海洋表層の硝酸態窒素量が生物ポンプの容量を左右する因子の1つだと考えられている。海洋における硝酸態窒素量は、窒素固定や河川からの流入と脱窒によるシンクによっておおまかに支配されているが、過去これらのフラックスは大きく変化し、海洋の硝酸態窒素量の変化に伴い生物ポンプも大きく変動していた可能性がある。

特に、酸素極小層が発達する脱窒域のアラビア海や東赤道太平洋では、堆積物中の窒素同位体比から数千年スケールで脱窒フラックスが大きく変化していた事が明らかにされている。これは、全海洋の窒素量が数千年規模で大きく変化していた可能性を示唆する。しかし、海洋の硝酸収支に関与する窒素固定のフラックスについては、いつどこでどの程度増減していたのか十分に理解されていない。そこで本研究では、現在窒素固定海域として認識されているスルー海を対象として、堆積物中の窒素同位体比に基づき過去の窒素固定の変遷を明らかにし、海洋窒素循環における窒素固定海域の役割と炭素循環への影響について考察した。

## 2. 方法

白鳳丸 KH02-4 次航海で採取されたスルー海中央部のピストンコア試料 (8° 50' N, 121° 05' E, 水深約 3800m, 全長 13.5m) を対象として、10-20cm 間隔で全有機炭素量 (TOC)、全窒素量 (TN) とそれらの安定同位体比 ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) の分析を行った。また乾燥堆積物から可溶性脂質を抽出し、ガスクロマトグラフィーによりアルカン、アルケノンの定量もおこなった。

## 3. 結果・考察

対象とした柱状堆積物は、産出する浮遊性有孔虫殻 (*G.Sacculifer*) の  $^{18}\text{O}$  年代層序に基づき、過去 8.3 万年間に形成された堆積物であった。TOC 含有量は 0.11-0.46% の範囲で変化し、隣接する他の縁辺海堆積物と比較して低い有機物含有量であった。氷期の TOC 量は、7 万年 ~ 1.2 万年前の間に間氷期と比べ最大 3 倍まで増加していた。また、氷期の TOC の増加と同調するように  $^{13}\text{C}$  値も間氷期に比べ 2-4‰ 重くなっていた。さらに、ハプト藻のバイオマーカーであるアルケノン含有量と TOC 量との高い正の相関関係から、氷期に基礎生産が増加していたと解釈された (図 1)。 $^{15}\text{N}$  は、3.2-6.1‰ の範囲で変化していたが、氷期-間氷期サイクルに対応する明瞭な傾向は見られなかった。過去 8.3 万年における  $^{15}\text{N}$  の平均は 4.8‰ であり、これは太平洋中層水の硝酸の  $^{15}\text{N}$  (5.5-6.1‰) よりも軽い値であった (Higginson et al., 2003)。3 点の移動平均で示される  $^{15}\text{N}$  変動は、最終氷期の酸素同位体比ステージ 2 よりもステージ 3 の 5.4-3.3 万年前に全体的に軽くなる傾向を示していた (図 2)。

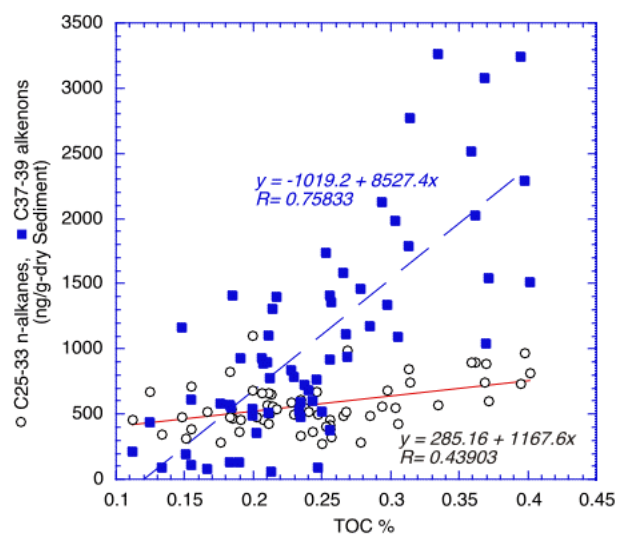
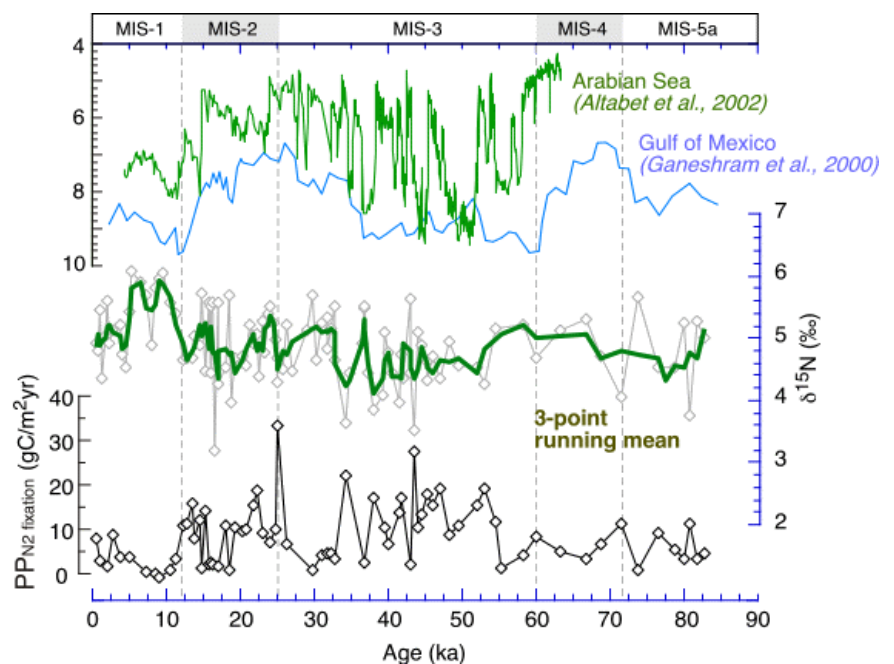


図 1. アルケノン含有量ならびに奇数長鎖 n-アルカンと TOC 量との相関

現在のスーラー海は、南シナ海起源の低塩分表層水の流入によって表層が成層化し、活発な鉛直混合が発達しないことによって表層の硝酸が慢性的に欠乏している。一般に、表層に供給された硝酸が植物プランクトンの生産にほぼ完全に利用される場合、有光層から沈降してくる粒子状有機物の  $^{15}\text{N}$  は中深層の硝酸の  $^{15}\text{N}$  と等しくなると考えられている (Altabet, 1988)。スーラー海の場合、水深 50,150m に係留されたセジメントトラップ中の粒子状有機物の  $^{15}\text{N}$  は、4.3-5.9‰であった。スーラー海中深層の硝酸の  $^{15}\text{N}$  は、5.5-6.1‰の範囲内にあると推定されるため、沈降粒子の値は硝酸の  $^{15}\text{N}$  とほぼ同じかそれよりも低い値となる。セジメントトラップ直上の表層水や周囲の表層水には、窒素固定を行うシアノバクテリアが見られたことから、沈降粒子の低い  $^{15}\text{N}$  は窒素固定の影響を反映していると解釈される。

スーラー海におけるこれまでの研究から、氷期においても湧昇の影響はなく、現在と同様、表層の硝酸は一年を通して慢性的に欠乏していたと考えられている。そのため、現在スーラー海で見られるような窒素固定が過去のスーラー海でも起こっていたとすると、 $^{15}\text{N}$  が 4.5‰まで低下するステージ 3 は、窒素固定の影響が相対的に強かった時代と推察する事ができる (図 2)。同時期、脱窒域では脱窒フラックスがほぼ同調して大きく増加しており、海洋の硝酸態窒素量は減少傾向にあったと考えられる。そのため、スーラー海における窒素固定の強化は海洋の硝酸量の減少に対応しているものと解釈される。これまで、窒素固定の分布やその効率は、ダスト起源の鉄の量に律速されていると考えられていたが、スーラー海ではダスト量が最も多かったと思われる最終氷期よりもステージ 3 の方が窒素固定の影響が強かったようである。この事は、鉄の供給よりも脱窒域で調整される硝酸やリン酸の存在量が、地理的に離れた窒素固定海域の窒素固定速度に強い影響を及ぼしていた可能性を示唆する。

図 2. スーラー海 SUP-8 コアの過去 8.3 万年間における窒素同位体比の変動、窒素固定に起因する基礎生産の変動、ならびにアラビア海・メキシコ沖の窒素同位体比の変動。



これまで、東アジア縁辺海の基礎生産は、モンスーンの影響を強く受けていると考えられてきたが、本研究で明らかにした堆積物や沈降粒子の窒素同位体比や現場海域のシアノバクテリアの分布などから、光合成系への硝酸の供給が、モンスーンによる鉛直混合だけでなく、窒素固定による新たな窒素の付加によっても賄われている事が明らかになった。そこで、窒素同位体比のマスマランスと TOC より復元された古基礎生産を用いて、窒素固定に由来する基礎生産を推定した。それによると、過去 8.3 万年間で 0-35gC/m<sup>2</sup>yr, 平均 8.5gC/m<sup>2</sup>yr であった。仮に、この推定値が妥当な値であるとすると、スーラー海は他の窒素固定海域と比べ、窒素固定によって比較的効率的に炭素固定を行っている海域と位置づける事ができる (表 1)。窒素固定に由来する基礎生産の変動を復元した研究はこれまで例がないため、今後このような視点で他の窒素固定海域で過去の窒素固定フラックスとそれに関連する窒素固定に由来する基礎生産の変動を復元していく必要がある。それによって、窒素固定フラックスの時間的空間的変

化と脱窒フラックスとの対応関係や炭素固定への影響をより鮮明に描く事ができると期待される。

Table 1. Summary of primary production driven by N<sub>2</sub> fixation in oligotrophic regions

Location	Mean rate (gC/m <sup>2</sup> yr)	Method	Reference
Sulu Sea over the 83ky	8.5	<sup>15</sup> N mass balance and PP reconstructed from TOC	<i>This study</i>
East China Sea, 10-25°N	3.9	Acetylene reduction	<i>Saino, 1977</i>
HOT/ALOHA	4.1	<sup>15</sup> N mass balance	<i>Dore et al., 2002</i>
Eastern North Pacific gyre	15.9	<sup>15</sup> N <sub>2</sub> uptake integrated through the mixed layer	<i>Montoya et al., 2004</i>
North Atlantic	6.0	N* distribution	<i>Gruber and Sarmiento, 1997</i>
Caribbean, 12-22°N	4.9	Acetylene reduction	<i>Carpenter and Price, 1977</i>
SW North Atlantic, 7-27°N	95.4	Acetylene reduction	<i>Carpenter et al., 1999</i>

#### 4. 参考文献

- Altabet, M. A. (1988), Variations in nitrogen isotopic composition between sinking and suspended particles: Implications for nitrogen cycling and particle transformation in the open ocean, *Deep Sea Res., Part I*, 35, 535-554.
- Altabet, M. A., M. J. Higinson, and D. W. Murray (2002), The effect of millennial-scale changes in Arabian Sea denitrification on atmospheric CO<sub>2</sub>, *Nature*, 415, 159-162.
- Carpenter, E. J., and C. C. Price (1977), Nitrogen fixation, distribution and production of *Oscillatoria* (*Trichodesmium*) spp. in the western Sargasso and Caribbean Seas, *Limnol. Oceanogr.*, 22, 60-72.
- Carpenter, E. J., et al (1999), Extensive bloom of a N<sub>2</sub>-fixing diatom/cyanobacterial association in the tropical Atlantic Ocean, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 185, 273-283.
- Dore, J. E., J. R. Brum, L. Tupas, and D. M. Karl (2002), Seasonal and interannual variability in sources of nitrogen supporting export in the oligotrophic subtropical North Pacific Ocean, *Limnol. Oceanogr.*, 47, 1595-1607.
- Ganeshram, R. S., T. F. Pedersen, S. E. Calvert, G. W. McNeill, and M. R. Fontugne (2000), Glacial-interglacial variability in denitrification in the world's oceans: Causes and consequences, *Paleoceanography*, 15, 361-376.
- Gruber, N., and J. L. Sarmiento (1997), Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification, *Global Biogeochem. Cycles*, 11, 235-266.
- Higinson, M. J., J. R. Maxwell, and M. A. Altabet (2003), Nitrogen isotope and chlorine paleoproductivity records from the Northern South China Sea: remote vs. local forcing of millennial- and orbital-scale variability, *Mar. Geol.*, 201, 223-250.
- Montoya, J. P., C. M. Holl, J. P. Zehr, A. Hansen, T. A. Villareal, and D. G. Capone (2004), High rates of N<sub>2</sub> fixation by unicellular diazotrophs in the oligotrophic Pacific Ocean, *Nature*, 430, 1027-1031.
- Saino, T. (1977), *Biological Nitrogen Fixation in the Ocean with Emphasis on the Nitrogen Fixing Blue-Green Alga, Trichodesmium, and its Significance in the Nitrogen Cycle in the Low Latitude Sea Areas*, Univ. of Tokyo, Tokyo.

#### 5. 本年度学会発表

- Horikawa K, Nagao S, Murayama M, Miura Y, and Minagawa M, Glacial-interglacial change in paleoproductivity associated with N<sub>2</sub> fixation in the Sulu Sea, western equatorial Pacific, 8th International Conference on Paleocenography, Biarritz, France. 5-12 September, 2004.