

学 位 論 文 題 名

Response of nitrogen cycling to climate-related  
oceanographic changes during the last  
glacial-interglacial cycle : a contrastive study between  
the eastern and western equatorial Pacific

（氷期－間氷期サイクルの海洋変動に対する窒素循環の応答：  
東西赤道太平洋の比較から）

学位論文内容の要旨

窒素は植物プランクトンに必須な栄養塩であるが、現在、窒素の枯渇によって、中－低緯度海域の多くで基礎生産が低く抑えられている。このような中－低緯度海域では、海洋窒素量の増減を左右する窒素固定（全ソースの約70%）と水柱での脱窒（全シンクの30-50%）が広域的に発生している。そのため、過去の気候－海洋変動に対して窒素固定と脱窒フラックスが大きく変わっていたとしたら、中－低緯度に存在する窒素量が大きく変化していた可能性がある。仮に、これらの海域で窒素量の変動があったならば、現在硝酸制限を受けている貧栄養海域において生産の変動が生じていた可能性もある。中－低緯度での炭素循環を考える上で、この海域における窒素循環が重要な鍵になっていると言える。しかし、どのような気候状態の際に、どの程度の窒素が海洋に供給され、そして海洋から放出されるのかという気候変化に対する窒素循環の応答や、窒素量の変動に対する基礎生産への影響はまだ未解明となっている。そこで、本研究では、上記の問題の解決のために、過去15万年間の海底堆積物を対象とし、バイオマーカー（アルケノン、アルカン）と安定同位体（ $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ）を用いて、海洋変動に対する窒素固定と脱窒変動の応答に関する研究を行った。

窒素固定海域として対象としたスーロー海の表層の懸濁物と有光層下の沈降粒子の結果は（それぞれ、1.6-3.7‰, 5.3‰）、基質として考えられる北太平洋中層水の硝酸の  $\delta^{15}\text{N}$  値（ca.5.8‰）よりも軽い値であった。同時期に採取された海洋表層水には、窒素固定を行うシアノバクテリアが確認されるため、 $\delta^{15}\text{N}$  値の軽い原因として、窒素固定による同位体的に軽い新たな窒素の付加が明らかになった。過去8.3万年間のスーロー海堆積物の  $\delta^{15}\text{N}$  変動も概ね5.7‰以下の軽い値を示し、氷期－間氷期を通して永続的に窒素固定が機能していた可能性がある。また、温暖期（MIS3; 5.4-3.3万年前）に  $\delta^{15}\text{N}$  が4.5‰まで減少することから、この時期に窒素固定が相対的に強化していた事が明らかになった。間氷期にはアラビア海や東赤道太平洋で脱窒が強化していることから、脱窒の強化によって海洋の窒素量が減少し、熱帯域の貧栄養海域で窒素固定が引き起こされるという仮説が提案されている。しかし、本研究の窒素固定変動は、脱窒域の脱窒変動と明瞭な対応関係にはなかった。そのため、ステージ2や3でみられたスーロー海の窒素固定強化は、モンスーンによる鉛直混合の強化により表層にリンが蓄積され窒素固定が強まった、とい

ようなスルー海の地域的な現象だった可能性が示唆される。

脱窒の影響を検討した東赤道太平洋の研究では、西経 95 度 8°N-8°S のトランセクトで採取された 8 本の表層堆積物ならびに 3 本のピストンコア試料を対象に、炭素・窒素安定同位体比・アルカン・アルケノン分析により解析を行った。主な結果は、以下のとおりである。

- (1) 表層堆積物の窒素同位体比の分布から、赤道で最も軽く(7‰)、南北に行くに従い徐々に値が増加することがわかった。これは、赤道湧昇によって表層に栄養塩が供給され、南北に移流する際に、植物プランクトンが同位体分別を起こし選択的に軽い硝酸を使っているためと解釈された。
- (2) 赤道サイトと北緯4度のピストンコアサイトの過去15万年間の窒素同位体比変動は、異なる変動で特徴づけられた。これは、それぞれのサイトにおける硝酸の供給源が違う事が原因だと思われる。北緯4度のサイトでは、北から(メキシコ・ガテマラ沖)の脱窒起源の硝酸の供給があり、赤道の HY06 サイトでは赤道潜流の軽い窒素同位体比を持つ硝酸と南赤道海流のペルー沖起源の硝酸が供給源となっている。
- (3) 3サイトの古水温結果と既存の古水温データから、約2万年の周期性を持つ歳差日射量変動が、東赤道太平洋 ITCZ 位置の南北変動に影響を及ぼし、東赤道太平洋の水温分布に影響を与えていることが明らかになった。
- (2) ハプト藻の生産増加が氷期に繰り返し見られ、日射量変動に対応する約2万年の周期性を持っている。
- (3) ケイ藻は4万年相当の長い周期性を持ち間氷期に増加する、しかし TOC の増加にはあまり寄与しない。
- (4) 10万年周期の最温暖期に脱窒が最も強化されている。そのような最温暖期には、生産の指標である有機炭素量・アルケノン含有量ともに大きく減少していた。一つの可能性として、脱窒が強化することによって中層の硝酸量が減少し、周辺海域の生産の低下を引き起こしていた可能性が指摘された。

東西赤道太平洋の古海洋学的研究によって、東西での脱窒と窒素固定の明瞭な対応関係は確認されなかったが、窒素固定・脱窒ともに地域的な生産に大きな影響を及ぼしうることが明らかになった。スルー海の研究で明らかになったように、窒素固定が表層の N/P 比の低下に対し活発になるのであれば、最も N/P 比が低い脱窒域とその周辺の表層においても窒素固定が起こっている可能性があり、今後、東赤道太平洋においても窒素固定の時間的・空間的変動に関するさらなる理解が必要であることが示唆される。また、大規模な東赤道太平洋の脱窒の開始は、融氷期の比較的早い時期に見られ、このタイミングは同海域の水温変動とほぼ同時に見られる。そのため、脱窒は、氷期から間氷期にかけての気候変動に対して最も鋭敏に応答する機構の一つとして位置づけられる。現時点では、仮説の域を出ないが、脱窒変動には、中層水の溶存酸素量の変動が大きく関わっていると考えられるため、今後、中層水溶存酸素量の変動を視野に入れた研究が課題となってきた。

# 学位論文審査の要旨

|    |     |    |    |
|----|-----|----|----|
| 主査 | 教授  | 南川 | 雅男 |
| 副査 | 教授  | 杉本 | 敦子 |
| 副査 | 助教授 | 長尾 | 誠也 |
| 副査 | 助教授 | 山本 | 正伸 |
| 副査 | 助教授 | 中塚 | 武  |

## 学位論文題名

### Response of nitrogen cycling to climate-related oceanographic changes during the last glacial-interglacial cycle : a contrastive study between the eastern and western equatorial Pacific

(氷期－間氷期サイクルの海洋変動に対する窒素循環の応答：  
東西赤道太平洋の比較から)

海洋窒素循環を担う窒素固定と脱窒というプロセスは、どのような気候状態の際に、どのように振る舞っていたのか？窒素固定や脱窒フラックスの変動は、海洋の窒素量を大きく変化させていたのだろうか？また、海洋の生産に本当に影響を与えていたのだろうか？本研究では、気候変動に対する窒素固定や脱窒の応答・影響についてより詳しく理解するために、窒素固定海域と脱窒海域で形成された海底堆積物に注目し、バイオマーカー（アルケノン、アルカン）と安定同位体（ $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ）による解析を行った。

窒素固定海域である西赤道太平洋スルー海の表層の懸濁物と有光層下の沈降粒子の  $\delta^{15}\text{N}$  値は（それぞれ、1.6-3.7‰, 5.1‰）、基質として考えられる北太平洋中層水の硝酸の  $\delta^{15}\text{N}$  値（ca. 5.8‰）よりも軽い値であった。同時期に採取された海洋表層水には、窒素固定を行うシアノバクテリアが確認されたため、 $\delta^{15}\text{N}$  値の軽い原因として、窒素固定による同位体的に軽い新たな窒素の付加が明らかになった。続成の影響が微少で、基質となる硝酸の窒素同位体比が現在と大きく変わっていないとすると、過去 8.3 万年間のスルー海堆積物の  $\delta^{15}\text{N}$  変動は、窒素固定の変動として見る事ができる。窒素固定変動を記録しているとする、氷期ステージ 2 と温暖期ステージ 3（5.4-3.3 万年前）に窒素固定が相対的に強化していた事が示唆される。スルー海の表層は、硝酸が枯渇しており、それに対してリンや鉄など窒素固定に不可欠な栄養塩が豊富に存在する。そのため、モンスーンによって鉛直混合が強化された場合、亜表層からもたらされる栄養塩のうち、硝

酸は比較的容易に消費されるが、リンや鉄などは表層に蓄積していったと推察される。恐らく、鉛直混合の終了した成層時期に多量に存在するリンや鉄を用いて、表層でシアノバクテリアのブルームが起こっていた可能性がある。したがって、スーロー海の窒素固定の強化は、東南アジアモンスーンの活動に対応した地域的な現象だった可能性がある。

脱窒域に隣接する東赤道太平洋西経 95 度 4°N, 0°N で採取された 2 本のピストンコア試料について、炭素・窒素安定同位体比・アルカン・アルケノン等の分析を行った。北緯 4 度 (HY04)、赤道サイト (HY06) の過去 15 万年間の  $\delta^{15}\text{N}$  変動は、氷期に値が低くなるという共通の傾向はあるものの、全体的に異なる変動で特徴づけられた。HY04 サイトでは、氷期- 間氷期の  $\delta^{15}\text{N}$  変動は鉛直混合のオン・オフに起因していた。一方、HY06 サイトでは、南赤道海流を通じて、ペルー沖の脱窒変動によって生じた硝酸の  $\delta^{15}\text{N}$  変動を記録していた。ペルーと HY06 サイトの中間に位置するサイトでは、最終氷期に  $\delta^{15}\text{N}$  が 2.5‰ という低い値となっており (Farrell et al., 1995)、利用効率が大きく低下していた。この事は、氷期にペルー沖脱窒の減少に伴い、ペルー周辺域の硝酸量が増加していたが、それを十分に利用できていなかった事を示唆する。一方、融氷期の脱窒強化直後には、東赤道太平洋の広い範囲で生産の急激な低下が認められた。この現象は、脱窒の強化が、周辺海域の硝酸量を減少させ、生産にも制限をかけていた事を示唆する。また、融氷期の大気中  $\text{pCO}_2$  濃度の増加に関与していた可能性も示唆する。

西赤道太平洋の窒素固定は、氷期- 間氷期に対し、明瞭な変動はせず、またそのフラックスも 2 割弱であった。窒素固定の変動が海洋の硝酸量に影響を与えているとすると、窒素固定海域面積の拡大・縮小が重要なかもしれない。また、脱窒は、融氷期に非常に活発になり、海洋硝酸量と生産の減少を引き起こしていた。脱窒は融氷期にのみ気候システムに能動的に影響を与えている可能性がある。脱窒変動のトリガーは、依然不明であるが、南大洋の気候変動や中層水の循環形態の変化が鍵となっている可能性があり、これらの変動と脱窒との対応関係の解明が今後の課題となってきた。