

学位論文題名

Changes of ocean circulations and
biological production in the mixed water region
in the northwestern Pacific during the last 27 kyr

(過去2万7千年間における北西太平洋混合水塊の海洋循環と
生物生産の変動)

学位論文内容の要旨

北西太平洋亜寒帯域は、二酸化炭素および栄養塩に富む中深層水が表層に供給される海域で特徴づけられる。この海域では、中深層より運ばれた二酸化炭素は海洋から大気に放出されるものの、豊富な栄養塩による活発な生物生産により、相当量が大气から海洋に再び吸収される。したがって、全球的な炭素収支を考える上で北西太平洋亜寒帯域の表層および深層水の循環、生物生産の変遷を把握することは大変重要である。三陸沖は、親潮と黒潮および津軽暖流に影響された混合水域に属しており、大小、多数の渦が発生する海洋構造が複雑な海域である。栄養塩に富む親潮と、渦による鉛直混合が、三陸沖の高い生物生産を支えていると考えられているが、この海域の海洋環境変遷についてはこれまでほとんど研究されてこなかった。そこで、本研究では混合水域の 40°24'N, 143°30'E (水深2,215m) でピストンコア試料を採取した。そして、浮遊性有孔虫と底生有孔虫の放射性炭素年代差 ($\Delta B-P^{14}C$ 年代) から深層水循環を解析した。また、表層環境の一つである水温をアルケノン不飽和結合数 (U^{K}_{37})、生物生産について全有機炭素量 (TOC)・オパール量・ C_{37} アルケノン量、栄養塩の状態について窒素同位体比 ($\delta^{15}N$) の高時間解像度分析を行った。近年、高時間解像度による古環境解析が全世界的に実施されているが、本海域周辺も堆積速度が非常に高くなっている。しかし、堆積が高くなる大きな要因として石質成分の寄与が指摘されているものの、その堆積プロセスについての定量的な評価はほとんどなされていない。そこで下北 (41°34'N, 141°52'E, 水深974m) および鹿島沖 (36°01'N, 141°47'E, 水深2,241m) に設置したセジメントトラップ試料を用いて、主要成分 (石質成分・オパール・炭酸塩・有機物量)、アミノ酸量、 U^{K}_{37} の分析を行い、高い堆積速度に伴う粒子の挙動について IMAGES コアと比較することで定量的な評価を行った。先に述べたように、太平洋における深層水循環は全球的な物質循環に大きな影響を与えるものの、炭酸塩の保存が悪いためにその変動についての解析は遅れている。Broecker et al. (1988) は最終氷期最寒期 (LGM) に深層水循環が弱まったとしているが、Matsumoto et al. (2002) や Broecker et al. (2004) では2000 mにおいて大きな変化はなかったと全く逆の報告をしている。また、下北沖の中層に位置するコアからは、15-11.5 cal kyr B.P.に循環が活発だったとの報告もある (Ahagon et al., 2003)。本試料における 15-7 cal kyr B.P.の間の $\Delta B-P^{14}C$ 年代は1,030-1,460年で、大きな変動は認められなかった。このことより、>2,000mにおける深層水の循環は、15-7 cal kyr B.P.には基本的に現在と変わっていないことが示唆された。

沈降粒子から堆積粒子への輸送を調べるため下北沖で実施したセジメントトラップ観測の結果では、石質成分は 10-1 月に大きなピークを示し、その量は全期間の石質総量の~54%に達していた。逆に、比較的新鮮な有機物量を表す加水分解性の全アミノ酸量は 6 月にフラックスのピークを示した。次に、非タンパク質性のアミノ酸を分解の指標として調べると、10-1 月の期間は分解が進んだアミノ酸の寄与が高く、再懸濁粒子の流入が多かったことを示していた。下北沖のサイトで、沈降粒子と表層堆積物中への石質成分のフラックスを比較すると、本来は 100%であるはずであるが、後者は前者の~510%と非常に高い値を示した。これに対して、炭酸塩と有機物の場合は、それぞれ~22%、~74%であった。これらの事実は、移流による石質成分の表層堆積物への大きな寄与を示しており、堆積物より復元する環境因子にバイアスがかかる可能性を示唆している。しかし、 U^{K}_{37} 水温に関しては、その水温はトラップサイトにおけるブルーム時期にほぼ一致していた。また下北沖表層堆積物中の U^{K}_{37} についても、現在予想されるブルームの期間内の水温を示しており、堆積物中に記録されている U^{K}_{37} は表層の環境を反映したものであった。

三陸沖の表層環境は、氷期 (27-18 cal kyr B.P.) には海水準の低下により津軽海峡は閉鎖しており、現在より親潮の影響が強かったと考えられる。この時期の水温は平均 13.6 °C と現在とほぼ同じで、生物生産量も低かった。CLIMAP の結果によれば LGM の 8 月の水温は、現在よりも~8 °C 下がったと推定されている。現在の北西太平洋では、高緯度域になるほど植物プランクトンのブルーム時期が、春から夏に遅延していく。そこで、水温低下によりブルームの時期が遅れ、結果として生産可能時期の縮小したことが、年間の生物生産量全体を減少させたと解釈した。また、ブルーム時期の移行 (6 から 8 月へ) により堆積物に記録された U^{K}_{37} は 8 月の水温を表していると考えられる。これにより、現在との水温差は 8.3 °C となり、CLIMAP の結果ともほぼ整合的であった。

融氷期 (15-9.5 cal kyr B.P.) は、GISP2 氷床コアの酸素同位体比から温暖化が開始する時期とされているが、この海域は引き続き親潮の影響下にあった。全球的な温暖化に伴い TOC および C_{37} アルケン量は増加したにもかかわらず、亜寒帯域の卓越種である珪藻由来のオパール量は低いレベルのままであった。~14 cal kyr B.P. の U^{K}_{37} は、全球的な温暖化に反して LGM よりもさらに~3.5 °C 低い水温を示していた。この時期、親潮源流域では珪藻による活発な生物生産が起っていたため (Keigwin et al., 1992; Narita et al., 2003)、親潮下流域である三陸沖では栄養塩不足が引き起こされたと考えられる。珪藻のケイ酸塩と硝酸の取り込み比は 2:1 (Takeda, 1995) であるため、硝酸よりもケイ酸塩の方が先に枯渇してしまう。この時期の高い $\delta^{15}N$ 値は、植物プランクトンが同位体比の低い硝酸から利用するため、親潮下流域では同位体比の高い硝酸が利用された結果と解釈した。したがって、ケイ酸の不足により珪藻は増殖することができなかったが、一方、ケイ酸を必要としない円石藻等は増殖できたと考えられる。また、この栄養塩不足は、円石藻の生理作用に影響を与えると、近年報告されており (Prah et al., 2003)、~14 cal kyr B.P.における水温の低下 (~3.5 °C) が U^{K}_{37} 以外の水温プロキシに見られないことから、栄養塩不足による円石藻の生理作用によるものと解釈された。

その後水温は上昇し、完新世 (9.5 cal kyr B.P.-) の始めには U^{K}_{37} は現在とほぼ同じ水温に達した。しかしながら、オパール量が増加するのは 6 cal kyr B.P.以降であった。親潮源流域での高い生物生産の終了とともに $\delta^{15}N$ 値は急激に減少し、三陸沖の栄養塩不足は解消されたと推定される。周辺海域の古海洋データをコンパイルしたところ、融氷期までは親潮の影響が強かったが、完新世に入り黒潮および津軽暖流の影響が強まり、現在の混合水域の状態になったのは~5 cal kyr B.P. 頃と推定された。三陸沖の珪藻による生物生産の増大は、栄養塩の高い親潮の影響よりも渦による栄養塩の海洋表層への供給が重要な役割を果たしているといえる。これまで、混合水域での生物生産について、親潮の重要性に注目されてきたが、今回の結果は親潮以上に渦こそが生産量を増大させた最大の要因であることが初めて明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	岡 田 尚 武
副 査	教 授	鈴 木 徳 行
副 査	助教授	西 弘 嗣
副 査	助教授	阿波根 直 一

学 位 論 文 題 名

Changes of ocean circulations and biological production in the mixed water region in the northwestern Pacific during the last 27 kyr

(過去 2 万 7 千年間における北西太平洋混合水塊の海洋循環と
生物生産の変動)

北西太平洋亜寒帯域は、中深層から豊富な栄養塩が供給されるため活発な生物生産が生じ、相当量の二酸化炭素が大気から海洋へと吸収される海域である。この海域では、栄養塩に富む親潮と渦による鉛直混合の効果が高い生物生産を支えていると考えられているが、その変遷についてはほとんど研究されてこなかった。そこで、申請者は、混合水域である三陸沖(40°N, 143°E)で採取された柱状堆積物試料を用いて、そこに記録された古海洋学的な記録を解析し、この海域の生物生産の変動を引き起こした要因を考察した。

本研究では、最初に、浮遊性・底生有孔虫の放射性炭素年代を測定し、その差分($\Delta B-P$ ^{14}C 年代)から深層水の循環に変化があったかどうかを検討した。さらに、下北(41°N, 141°E)および鹿島沖(36°N, 141°E)に設置されたセジメントトラップ試料を用いて、側方から流入する沈降粒子がどの程度影響を与えているかの評価を行い、コアを解析する際の基礎資料とした。堆積物に関しては、水温をアルケノン不飽和結合数(U'_{37})、生物生産を全有機炭素(TOC)・オパール・アルケノン量、栄養塩について窒素同位体比($d^{15}N$)を用いて高時間解像度分析を行った。

その結果、本試料における 15ー7 ka の間の $\Delta B-P$ ^{14}C 年代は、1030ー1460 年で大きな変動は認められず、コアを解析した期間(15ー7 ka)では 2000m 以浅における深層循環は現在と変わっていないことがわかった。また、下北沖のセジメントトラップ観測では、10 から 1 月に石質成分の量が大きなピークを示し、分解の進行度示す非タンパク質性のアミノ酸フラックスも高く、再懸濁粒子の流入が多かったことを示唆する。しかし、炭酸塩と有機物に関しては顕著な流入はみられず、さらにトラップおよび表層堆積物の

$U^{K'}_{37}$ の値に関しても表層の環境を反映したものであった。これらの結果から、本研究で測定する化学成分の多くは、石質成分を除きほぼ海洋表層の環境を反映していると考えてよいと結論された。このように、申請者は、コアのデータを解釈する前段階としてこれらの先行研究を行ったが、それらは深層水の循環や堆積粒子の運搬様式を理解するのに重要な成果となった。

一方、申請者は、堆積物の解析結果を氷期、融氷期、完新世の3つの時期で区分し、その変遷を詳細に議論している。氷期(27~18 ka)における三陸沖の水温は現在とほぼ同じ(平均 13.6 °C)で、生物生産量は低い。しかし、CLIMAPの結果によれば、最終氷期(LGM)の8月の水温は、現在よりも8 °C近く下がったと推定されている。この食い違いは、水温低下によりブルームの時期が春から夏に遅れ、堆積物中の $U^{K'}_{37}$ は、より高い水温の時期の値を記録したために生じたと解釈した。また、生産可能な時期が縮小したことが、年間の生物生産量全体を減少させた。

次の融氷期(15~9.5 ka)のオパール量も氷期同様に低い値を示す。ところが 14 ka までの $U^{K'}_{37}$ は、LGM よりもさらに 3.5 °C 低い水温を示し、世界的な温暖化傾向とは矛盾する結果となった。そこで、この時期には、親潮源流域では珪藻による活発な生物生産が生じていたが、逆に親潮下流域の三陸沖では栄養塩不足(特にシリカ)となり、珪藻は増殖することができず、オパール量が下がったと考えた。14 ka における $U^{K'}_{37}$ 値の低下も水温に原因があるのではなく、栄養塩不足による円石藻の生理作用に起因するものと解釈した。

$U^{K'}_{37}$ 値から推定すると、完新世(9.5 ka-)の始めは現在とほぼ同じ水温であった。一方、オパール量が増加するのは6 ka 以降で、現在のような混合水域の状態になった時期(6 から 5 ka)と一致した。この生物生産の増大は、親潮の強化に起因するのではなく、日本海側から流出した津軽暖流により三陸沖で渦構造が発生し、渦による鉛直混合の効果がこの高い生物生産を引き起こしたと推定した。また完新世後期における三陸沖の水温低下の時期が、北大西洋の Bond イベントおよびモンスーンの弱化イベントの時期に対応しており、全球的な気候変化の可能性も併せて示唆した。

申請者は、上記のように混合地域の海洋変遷を高解像度で解析した。その成果は、今までは空白であった混合水塊の生物生産がどのような原因で制御されているかを明らかにすることに成功し、大きな貢献となった。以上の成果により申請者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格を有するものと認める。