

「地球変動のメカニズム」

平成9年度採択研究代表者

野尻 幸宏

(国立環境研究所 総合研究官)

## 「北西太平洋の海洋生物化学過程の時系列観測」

### 1. 研究実施の概要

高緯度海域での CO<sub>2</sub> 吸収・放出の規定要因を明らかにするためには、海水中の炭酸系を精密に測定しつつ、生物生産量と関連する環境要因を解析する必要があるが、「定点時系列観測」はその有力な観測手法である。本課題では、観測船による時系列観測で得られる化学成分の鉛直プロファイルと生物関連データから、季節的に変動する CO<sub>2</sub> 吸収・放出と物質循環現象を把握する観測と解析を行った。定点は、西部亜寒帯太平洋に位置する点(北緯 44° 東経 155°、KNOT: Kyodo North pacific Ocean Time series)とし、1998-2000 年の期間に 27 回の本格観測を行った。本年は、そのデータの解析から炭素循環プロセスを正確に記述する研究を行った。さらに、生態系モデルをあてはめ、炭素循環プロセスを明らかにする研究を行った。また、時系列観測定点に近い海域で行われた海洋鉄散布実験に参加し、微量栄養塩と海洋生物生産の関連を明らかにする研究を行った。

観測定点 KNOT の表層混合層平均溶存無機炭酸濃度(DIC)の年間振幅は 107  $\mu$  mol/kg に達した。これは、世界の主要海洋時系列観測点の中で最も大きい振幅であった。水深 100 m の温度極小層の海水が持つ栄養塩および DIC 濃度を冬季の初期値とする栄養塩および DIC の減少から期間の新生産量を見積もることが出来る。栄養塩の減少分にレッドフィールド比(海洋生物が固定する C:N:P のモル比)をかけて炭素換算とした。DIC から見積もった新生産量は夏から秋にかけて栄養塩から見積もった新生産量を下回るが、これは海域が大気から CO<sub>2</sub> を吸収するため、見かけ上減り分が少ないためである。5 月から 6 月にかけての新生産速度は最も高く、600 mgC/m<sup>2</sup>/day に達した。6 月から 10 月にかけては 1998、1999 年ともに約 250 mgC/m<sup>2</sup>/day で推移した。これらの値は基礎生産速度に非常に近い値であった。これは、この期間に限っては表層の基礎生産に占める再生産の割合が非常に小さいことを示し、植物プランクトンに同化された炭素の効率よい下方への輸送を意味する。

植物プランクトン基礎生産速度の季節変化には、特定の季節あるいは季節の移行時に、特徴的なくつかわりの変化が確認でき、その一つの原因として、この海域における微量金属元素、特に鉄の欠乏が考えられた。参加した 2000 年 7 月の西部北太平洋における鉄散布実験では、海洋に可溶性の鉄を供給することで植物プランクトンの現存量が約 20 倍、有光層積算基礎生産速度が約 5

倍に増加し、海域の夏季の鉄欠乏状態が証明された。

気候変動に対する海洋生態系の応答、また生態系に連動した物質循環のメカニズムを定量的に把握する目的で海洋生態系モデルの研究を、定点 KNOT の観測データを利用して行った。観測年度である、1998、1999 年両年のシミュレーションを行い、観測データがない3-4月の鉛直混合がその後の表層の生物生産に与える効果を中心に検討を行った。これによると、1998 年と 1999 年では、春季の植物プランクトン生産が高まる時期が異なり、表層水の成層化の時期との関係があることが示唆された。また、年々の気象データとモデルの組み合わせから、風速の強化、混合層深度の発達、海面水温や日射量の低下などを引き起こす低気圧の通過が生態系変動を強く引き起こすことが示唆された。

## 2. 研究実施内容

1998年から2000年の3年間を集中観測期間として、北緯44度、東経155度の観測定点 KNOT (Kyodo North Pacific Ocean Time series)において海洋生物化学の精密なデータを得た。本年は、そのデータの解析から、海洋生物生産と関連する炭素循環プロセスを正確に記述する研究を行った。さらに、生態系モデルすなわち物理・化学・生物現象を結合したモデルを、この観測定点を含む北太平洋海域にあてはめ、海域によって起こる炭素循環プロセスの違いを明らかにする研究を行った。また、時系列観測定点に近い海域で行われた海洋鉄散布実験に参加し、鉄のような微量栄養塩と海洋生物生産の関連を明らかにする研究を行った。

観測定点 KNOT での水温・塩分変化は主に 100 m 以浅で起こる。水温は 8 月に 15°C に達し表層混合層深度が 10m 程度となり、外洋域として著しく浅くなる。10 月からは表面水温が低下し、混合層深度が増し始める。2 月には水温は 2°C、混合層深度は 100 m に達する。水深 100 m には水温 1-2°C の水温極小(中冷水)が存在する。これは冬季の冷却・鉛直混合の名残である。表層混合層平均の溶存無機炭酸濃度(DIC)は 2000 年 2 月に極大を示し、1998 年および 1999 年の 3 月に極小を示した。1999 年の年間振幅は 107  $\mu\text{mol/kg}$  に達した。これは、世界の主要海洋時系列観測点の中で最も大きい振幅であり、西部北太平洋の新生産の大きさを示す。一方アルカリ度は、春季から夏季にかけてわずかに増加、その後減少するが、硝酸で補正した変動は 5  $\mu\text{mol/kg}$  以下であった。このことは、アルカリ度変化のほとんどが有機物の生成・分解によるもので、炭酸カルシウムの生成・分解の寄与が少ないことを示している。

KNOT 表面海水の  $\text{CO}_2$  分圧( $f\text{CO}_2$ )は 6 月から 12 月まで大気より低く、この間は  $\text{CO}_2$  の吸収域となっていた。KNOT では水温の変化も大きく、夏に  $f\text{CO}_2$  を上昇させる方向に作用するが、この温度効果を上回る DIC 減少があるため、 $f\text{CO}_2$  は 6 月から 10 月まで 300-340  $\mu\text{atm}$  で推移する。10 月以降は鉛直混合が活発になり、下層の DIC 濃度の高い海水が表層にもたらされ、温度低下の効果を上回って  $f\text{CO}_2$  が上昇し、冬季は放出域となる。風速の気候値とガス交換速度から大気海洋間の  $\text{CO}_2$  交換量を求めると、6 月から 8 月は風速が比較的小さいため約 50  $\text{mgC/m}^2/\text{day}$  の吸収速度であったが、10 月には風速が強くなり始めることから吸収速度が増大し、150  $\text{mgC/m}^2/\text{day}$  に達した。その後風速は強くなるが  $f\text{CO}_2$  も大気に近づくため吸収量は減少、2 月には放出に転じる。

水深 100 m の温度極小層の海水が持つ栄養塩および DIC 濃度を冬季の初期値とする栄養塩および全炭酸の減少から期間の新生産量を見積もることが出来る。栄養塩の減少分にレッドフィールド比(海洋生物が固定する C:N:P のモル比)をかけて炭素換算とした。DIC から見積もった新生産量は夏から秋にかけて栄養塩から見積もった新生産量を下回るが、これは海域が大気から CO<sub>2</sub> を吸収するため、見かけ上減り分が少ないためである。5 月から 6 月にかけての新生産速度は最も高く、600 mgC/m<sup>2</sup>/day に達した。6 月から 10 月にかけては 1998、1999 年ともに約 250 mgC/m<sup>2</sup>/day で推移した。これらの値は基礎生産速度に非常に近い値であった。これは、この期間に限っては表層の基礎生産に占める再生産の割合が非常に小さいことを示し、植物プランクトンに同化された炭素の効率よい下方への輸送を意味する。

定点 KNOT の生物活動の季節的变化に関するデータの解析と関連データとの比較から、動物プランクトン現存量、植物プランクトンによる基礎生産速度および植物プランクトン種組成の季節変化について、全体像が明らかとなった。植物プランクトンの生物量の指標であるクロロフィル a 量の鉛直分布は、春から秋にかけては表層から水深 40m 層の深度(有光層)に集中して存在していた(1.0-0.5 mgChl-a/m<sup>3</sup> 程度)。しかし、冬季には混合層全体に均一な分布となり、2 月には 80m 深度まで 0.5 mgChl-a/m<sup>3</sup> を上回る値となった。有光層内の積算クロロフィル a 量は、5 月から 6 月初旬に他の時期よりも若干高くなることを除くと、20-40 mgChl-a/m<sup>2</sup> 程度の一定値を示し、生産速度が小さい冬季にも減少しないことが新しい知見であった。

植物プランクトン群集による基礎生産速度の鉛直積算量は、5 月に最高値を示した後急激に減少し、8 月あるいは 10 月にわずかながら上昇することがあるにしても、一般的には冬に向かって減少する傾向を示した。基礎生産速度の実測値は春季(5 月)、夏季(6-8 月)、秋季(10-11 月)および冬季(12-2 月)のそれぞれの季節においてそれぞれ 517-535、153-304、101-307、23-95 mgC/m<sup>2</sup>/day の範囲であった。季節平均値はそれぞれ 526、227、173 および 48 mgC/m<sup>2</sup>/day であり、年間の植物プランクトン群集による炭素固定量として、89 gC/m<sup>2</sup>/y が算出された。また、鉛直的な基礎生産速度分布を見ると、表層から水深 20-30m 層でその水柱全体の基礎生産速度の 70-80% を占めており、他の海洋時系列観測点と比べて浅い深度に植物プランクトン群集生産が限られていることがわかった。

5 月には、細胞サイズ 10 μm 以上の画分の植物プランクトンがクロロフィル a 量に占める割合が増加し、顕微鏡観察および細胞数計数でも大型珪藻類の寄与(優占種として *Chaetoceros concavicornis*, *Corethon criophilum*)が大きくなること示された。一方、ノルパックネットによって水深 150m から鉛直採取された大型動物プランクトン群集は、夏季あるいは秋季に比べて冬季に減少することがわかり、それらの植物プランクトン群集に対する摂餌圧が減少する。

植物プランクトン基礎生産速度の季節変化の大まかな変化は日照時間の季節変化とよく似ており、季節変化に光量変化が重要であることが示唆された。一方、海水温との関係は整合的でなく、冬季の低い生産速度を説明できても、低水温期である春季の高い水柱積算基礎生産速度を説明できない。また、8 月には、表層の体積あたりの基礎生産速度は最高値となるにもかかわらず、混合層が極めて浅くなり、植物プランクトン群集の生産層が同時に浅くなって、水柱積算量は大きく

ならない。また、特定の季節あるいは季節の移行時には、特徴的ないくつかの変化が確認できた。第一は春から夏に向かって急激に生物量および基礎生産速度が減少する点、第二は晩夏および秋季に基礎生産速度が上昇する点、第三は冬季に基礎生産速度が極めて低くなるにもかかわらず生物量が保持される点である。第一の点に関しては微量金属元素、特に鉄の欠乏がその原因として考えられる。2001年7月の西部北太平洋における鉄散布実験では、海洋に可溶態の鉄を供給することで植物プランクトンの現存量が約20倍、有光層積算基礎生産速度が約5倍に増加した。このことは、海域が夏季に鉄欠乏状態にあることの証明でもあった。春季の生物生産の高まりの後、主要栄養塩類は枯渇に至らないながらも微量金属が欠乏することで植物プランクトン基礎生産速度が急激に減少し、現存量が低下すると考えられる。第二の点では、10月頃に始まる冷却と海洋鉛直混合によって下層から供給される栄養塩類の効果が示唆される。第三の点では、希釈培養法の結果から植物プランクトンの活性が冬に小さくなる一方で微小動物プランクトン群集の活動も同様に停止していることがわかり、摂餌圧をうけなくなった植物プランクトンがわずかながらの生長ではあっても水柱に保存されるということが考えられた。

気候変動に対する海洋生態系の応答、また生態系に連動した物質循環のメカニズムを定量的に把握する目的で海洋生態系モデルの研究を、定点 KNOT の観測データを利用して行った。本研究では15コンパートメント海洋生態系モデルを用いて KNOT での物質循環の再現を目指した。このモデルでは植物プランクトンは珪藻、非珪藻小型植物プランクトンの2種、動物プランクトンは小型動物プランクトン、カイアシ類、オキアミ類の3種に分類される。風速、日射量、表層水温、表層塩分を与え、十分なスピナップ後、1982年から1999年までの18年間の結果を解析した。モデルは当該海域における物理過程および生物化学過程の大きな季節振幅をおおむね現実的に再現した。また、季節変動に対する年々変動幅は年間最大混合層深度では45%、表層栄養塩濃度やカラム積算クロロフィル量の年間最大値では25から35%に相当した。混合層深度の年間最大値、表層栄養塩濃度の年間最大値と年平均基礎生産量の間には正の相関が見られた。このことは、混合層深度の年間最大値の年々変動が分かれば、観測が比較的困難である生物化学過程の年々変動を大まかに推定することが可能であることを示唆している。

さらに、観測年度である、1998、1999年両年のシミュレーションを行い、観測データがない3-4月の鉛直混合がその後の表層の生物生産に与える効果を中心に検討を行った。これによると、1998年と1999年では、春季の植物プランクトン生産が高まる時期が異なり、表層水の成層化の時期との関係があることが示唆された。また、年々の気象データとモデルの組み合わせから、風速の強化、混合層深度の発達、海面水温や日射量の低下などを引き起こす低気圧の通過が生態系変動を強く引き起こすことが示唆された。

### 3. 研究実施体制

#### (1) データ解析グループ

野尻幸宏      国立環境研究所      総合研究官

#### (2) 炭酸系グループ

角皆静男      北海道大学大学院地球環境研究科      教授

(3) 生物生産グループ

岸 道郎          北海道大学水産学部          教授

(4) 研究航海グループ

加藤義久          東海大学海洋学部          教授

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- P. P. Murphy, Y. Nojiri, Y. Fujinuma, C. S. Wong, J. Zeng, T. Kimoto and H. Kimoto, Measurements of surface seawater  $f\text{CO}_2$  from volunteer commercial ships: Techniques and experiences from Skaugran, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 18, 1719–1734 (2001).
- C. S. Wong, N. A. D. Waser, Y. Nojiri, F. A. Whitney, J. S. Page and J. Zeng, Seasonal cycles of nutrients and dissolved inorganic carbon at high and mid latitudes in the North Pacific Ocean: determination of new production and nutrient uptake ratios, *J. Oceanogr.*, 58, 227–243 (2002).
- N. Tsurushima, K. Imai, Y. Nojiri, and P. P. Murphy, KNOT: Ocean time-series program in western North Pacific completes first phase, *US JGOFS News*, 11, 11–13 (2002).
- Toyoda, S., N. Yoshida, T. Miwa, Y. Matsui, H. Yamagishi, U. Tsunogai, Y. Nojiri, and N. Tsurushima: Production mechanism and global budget of  $\text{N}_2\text{O}$  inferred from its isotopomers in the western North Pacific, *Geophysical Research Letters*, 29, 7/1–4 (2002).