

国立環境研究所 総合研究官

野尻 幸宏

「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

海洋の炭素循環に関する研究は、地球温暖化研究として重要である。現在の海洋は、化石燃料起源 CO<sub>2</sub> の吸収源として働いているので、その現在の吸収量評価がまず必要であり、さらには、今後大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が増加してゆく時に海洋吸収がどう変化してゆくかの予測をおこなうことが、今日的な海洋炭素循環研究の使命である。現在の海洋 CO<sub>2</sub> 吸収量を正確に求めるのに必要な観測は、海洋表層観測による CO<sub>2</sub> 交換収支の測定であり、海洋断面観測による中深層に蓄積されつつある CO<sub>2</sub> 量増加量の測定である。海洋観測研究の一つの究極は、時空間的に限りなく密で正確な観測網の構築であり、その方向で、観測船に加え、漂流・係留ブイや貨物船での CO<sub>2</sub> 測定、衛星観測など、新たなプラットフォーム活用が始まっている。

しかし、観測の展開には限界があるので、限られた観測データから炭素循環を明らかにする診断型モデルの活用が必要になり、さらに、将来の気候変動に対する海洋の応答を炭素循環も含めて予測するために、物理・生物・化学過程を組み込んだ予測型モデルの構築が必須である。海洋物質循環モデルでは、海洋の諸現象をパラメータ化することが出発点であり、パラメータ化は海洋プロセス研究の成果である。この場合、現場の海洋で化学成分の分布が物理・化学・生物過程によって変化して行くさまをつぶさに観測することが最も役に立つ。特に海洋表層過程では、一時的な観測（スナップショット）では推測し得ない重要なプロセスが数多くあり、時系列観測が重要となる。外洋域の定点で繰り返し観測をおこなうことは容易でないが、海洋が季節の進行とともに刻々変化して行くさまを捕らえる時系列観測はプロセス研究の決め手である。継続中の外洋域高頻度海洋時系列観測の代表は、ハワイの HOT、バミューダの BATS であり、共に亜熱帯海域の離島周辺海域という好位置にあって、米国の WOCE (World Ocean Circulation Experiment) および JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) 観測プログラムのコアとして 1989 年以来決まった観測船による毎月の観測が継続され、海洋物質循環研究に多大の功績を上げてきた。

一方、亜寒帯海域での高頻度時系列観測には、カナダによるアラスカ湾中央部時系列点ステーション P 観測があり、1970 年代までの定点気象観測船による高頻度観測のフェーズが終了し、1980 年代以降は年 3 回の定点観測として継続されている。太平洋亜寒帯の東西では、海洋循環における位置、陸起源物質の影響、植物プランクトン種組成の相違などが原因とされる生物生産や CO<sub>2</sub> 交換季節変化の違いが観測から知られていた。このことから、太平洋の亜熱帯 HOT、東部亜寒帯 P と対比する西部亜寒帯太平洋定点の必要性がかねてより指摘されてきた。西部亜寒帯太平洋での時系列観測の必要性を認識した国内外研究者による研究グループが 1996 年の JGOFS 集会の際に発足、観測船「みらい」の運用開始で冬季の海域観測も可能になり、定点観測を可能とする条件が整った。これを踏まえて 1997 年の本 CREST 研究課題の採択があって、CREST 研究グループが中核となる国内研究機関・大学の合同による西部亜寒帯太平洋定点観測が開始された。定点の位置決定には議論があったが、繰り返し観測の実現性を重視して北緯 44 度、東経 155 度の定点 KNOT (Kyodo

North Pacific Ocean Time series) とした。定点 KNOT は、千島列島沿いを南下する親潮由来の表層海水に覆われる海域である。親潮域を含む北西太平洋亜寒帯域には、大気 CO<sub>2</sub> の吸収放出に大きな季節変化がある。定点 KNOT の南方には亜寒帯フロントがあり、黒潮続流と親潮が混合する混合域となる。混合域海水は親潮海水より高温高塩分である。このフロントの南北移動が起こると、定点 KNOT では混合域海水の影響が見られることがある。

4 隻の観測協力船によって 1998 年 6 月から 2000 年 10 月の集中観測期間中に 27 回の定点観測をおこなうことができた。ただし、3 - 4 月に観測がないという季節カバーの問題は残った。観測航海では、表層から深層までの採水、漂流系での沈降粒子捕集実験、植物プランクトンの一次生産速度の測定、長期係留系の設置回収、プランクトン試料採取、海水の光学特性測定など、多くの項目の観測をおこなった。炭酸系（全炭酸、アルカリ度、CO<sub>2</sub> 分圧）、栄養塩、溶存酸素、一次生産速度などについて、精度管理された時系列データを得ることができた。

定点 KNOT の表層海水全炭酸濃度には、秋から冬に増大して 2 月に極大となる、春から夏に減少して 8 月に極小となる、という明瞭な季節性がみられた。混合域海水影響のない結果を抽出すると、全炭酸の冬と夏の値の間に 107 μmol/kg (1999 年) の濃度差があった。これは、定点観測点で全炭酸が継続測定されている BATS, HOT, P と比較して最大振幅である。また、アルカリ度変化から、炭酸系の季節変化に対する炭酸カルシウム殻生成種の影響が小さいことがわかった。溶存無機炭酸濃度の鉛直分布は大まかには栄養塩と同様であった。これらの成分の季節振幅が定点間で最も大きいのに対し、その位相は他の観測点とほぼ等しく、減少速度が最も大きいのは 5 - 6 月、増加速度が最も大きいのは 11 - 12 月であった。

KNOT 定点表層海水の CO<sub>2</sub> 分圧は 6 月から 12 月までが大気 (約 365 μatm) より低く、大気 CO<sub>2</sub> の吸収域として働く。KNOT 定点では水温の変化も大きく、これは夏には CO<sub>2</sub> 分圧を上昇させる方向に作用するが、この温度効果を上回る生物生産があるため、6 月から 10 月まで 300-340 μatm で推移する。10 月以降は鉛直混合が活発になり下層の全炭酸が豊富な水が表層にもたらされるため CO<sub>2</sub> 分圧は上昇する。冬季には、温度低下の効果にまさって CO<sub>2</sub> 放出域に変わる。この変化過程は、貨物船による表層観測で最近知られるようになったが、現場の観測で鉛直構造を含めて確認することができた。風速の気候値から交換速度を算出し、大気海洋間の CO<sub>2</sub> 交換量を求めると、6 月から 8 月は 50 mgC/m<sup>2</sup>/day の吸収、10 月に吸収速度が最大となり 150 mgC/m<sup>2</sup>/day に達する。その後、2 月には放出に転じ、2 月後半から 4 月までが最大放出となる。

一方、海域の生物生産を、溶存成分の季節変化と一次生産速度から評価した。主要な栄養塩であるリン・窒素と全炭酸の取り込み比を CO<sub>2</sub> の大気海洋交換を補正して求めた。その結果、C/P 比は 124 から 108、C/N 比は 7.7 から 6.6 であり典型的な海洋生物の取り込み比 (レッドフィールド比) 1:16:106 に近いものであった。海水中の全炭酸変化から見積もられる新生産速度は 5 月から 6 月にかけて最も高くなり、600 mgC/m<sup>2</sup>/day に達した。6 月

から 10 月にかけては約  $250\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$  で推移した。これらの値は同期間の基礎生産速度の測定値に近い値であった。この期間に限っては表層の基礎生産に占める再生生産の割合が非常に小さいことが明らかになり、植物プランクトンに同化された炭素が効率よく下方に輸送されていることになる。また、栄養塩や全炭酸の変化について、ステーション P との比較をおこなうと、その季節振幅では定点 KNOT の方が大きいのではあるが、混合層深度を補正すると同程度の新生産であることがわかった。海域の物理の相違による浅い混合層深度が生物生産に影響があることが示された。

本研究では、これらの観測パラメータを鉛直一次元海洋生態系モデルに適用し、現場の生物化学過程を再現することを試みた。従来の窒素循環のみを考慮した海洋生態系モデルにケイ素を加え、植物プランクトンとしてケイ藻が重要となる亜寒帯海域の表現を改善することをおこなった。海域の物理パラメータとして重要な塩分について、データベースの気候値は不十分であり、定点 KNOT の実測値でモデルを駆動することで、より現実的な生物化学過程が表現された。観測の知見は、亜寒帯海洋の生態系を表現するために極めて有用であった。

本観測研究は、1998–2000 年に限定して実施され、そのデータベースが作成され、データ利用体制ができた。北西太平洋亜寒帯の時系列観測としては、最近係留系による自動観測が開始された。そして、本研究の成果を踏まえた観測船の現場観測による時系列観測再開も、同じ海域で計画されている。

## 1. 研究統括・データ解析グループ

研究代表者 国立環境研究所、総合研究官 野尻幸宏

基本的な観測項目である海洋の二酸化炭素測定と栄養塩測定の精度管理により、観測期間中の比較可能な測定の継続をおこなった。分析精度管理のために、国内・国際の相互検定をおこなった。観測データの管理とホームページ化をおこなった。

海域の生物生産を支える微量栄養塩である鉄の測定をおこない、5–6 月の植物プランクトン増殖期のあとに、枯渇する可能性があるという結果を得た。定点観測結果と、国立環境研究所による北太平洋中高緯度海域の貨物船  $\text{CO}_2$  観測結果を比較解析した。観測で得られたデータに基づく海洋生態系モデルの研究をおこない、亜寒帯海域の生物生産の表現、他の観測地点との比較研究をおこなった。

## 2. 炭酸系グループ

研究代表者 北海道大学大学院地球環境研究科 教授 角皆静男

海水中の二酸化炭素測定として重要である全炭酸とアルカリ度の測定の精度を高めるために、船上でも使用できる自動装置の開発をおこなった。その装置を用いて、観測期間中の炭酸系の測定をおこなった。

表層海水の全炭酸濃度、 $\text{CO}_2$  分圧の変化を求め、海域の  $\text{CO}_2$  吸収源としての季節変化、

生物生産と炭素除去に関する解析をおこなった。定点 KNOT は世界で継続観測されている外洋域海洋定点の中で最も全炭酸の季節変化が大きいこと、定点海域が季節により CO<sub>2</sub> 吸収域、放出域に周年変化することを明らかにした。

### 3. 生物生産グループ

研究代表者 北海道大学水産学部 教授 米田義昭、同 教授 岸道郎（2000 年から）

海域の一次生産の測定を <sup>13</sup>C 法によっておこなった。海水中に培養瓶を漂流させておこなう現場法と温度制御付き甲板培養装置でおこなう擬似現場法の両者を用いて、各定点観測時に測定を継続した。現場法、擬似現場法間には、極めてよい一致が見られた。定点 KNOT 海域の一次生産が、5月のケイ藻増殖期に最大を示し、夏・秋・冬に向かって低下してゆくという季節変化の特徴を明らかにした。

衛星画像からのこの海域の生物生産の季節変化を明らかにした。有機炭素の年間変動を測定し、亜寒帯域として初めての季節変化データを得た。植物プランクトンの種組成について継続観測を行った。中心目ケイ藻類が年間を通じて優占であること、羽状目ケイ藻類は春季ブルーム期にのみ増加することなどが明らかになり、アラスカ湾海域との顕著な相違が明らかになった。

### 4. 研究航海グループ

研究代表者 東海大学海洋学部 教授 加藤義久

東海大学「望星丸」、海洋科学技術センター「みらい」を利用した定点 KNOT 観測を行った。係留型セジメントトラップ実験をおこない、沈降する粒子による炭素の輸送フラックスを求めた。珪藻が優占種である北西部亜寒帯太平洋においては、沈降粒子の有機炭素/無機炭素が高く、大気中の CO<sub>2</sub> 吸収に大きな役割を果たしていることが検証された。海水中のバリウム濃度の精密測定をおこない、ケイ藻ブルームにおいて大きな割合でバリウムが粒子化されることを観測した。

## 2. 研究構想

21 世紀の最も大きな環境問題となるであろう地球温暖化・気候変動の問題に科学的面から取り組むアプローチとして、海洋の物質循環研究の重要性が重要視されるようになってきた。化石燃料消費による二酸化炭素放出と大気残存量との間に明瞭な差があることは、1957 年に開始されたハワイマウナロア観測所での大気 CO<sub>2</sub> 観測以後、比較的すぐに認められた。その結果を踏まえ、1980 年代に大気観測網としての定点ネットワークが米国の NOAA によって整備され、大気 CO<sub>2</sub> の基本的観測体制ができた。大気残存量を少なくしている吸収源が森林など陸域の植物と海洋であろうことは、容易に予想されたのであるが、それぞれの吸収量に関する知見を高めるには、多くの観測の蓄積と解析研究を必要として、現在でも完全なものには至っていない。

さて、21世紀からそれ以降の温暖化・気候変動の問題を人類が克服あるいは適応してゆくためには、その現象の的確な予測とそれに基づく対策の推進が必要とされる。太陽放射と地球輻射の間の平衡で支配される地球の気候システムにおいて、放射強制力に関わるCO<sub>2</sub>とその他の微量温暖化ガスの濃度を与えれば、大気大循環モデルに基づく気候モデルが、その予測をおこなうことができる。従来は、大気CO<sub>2</sub>濃度を単に増加させることで、将来の気候予測を行っていた（例えば IPCC 第1次評価報告書、1990）のであるが、現実には大気CO<sub>2</sub>濃度増加がもたらす気候変動で、陸域・海洋のCO<sub>2</sub>吸収・放出現象が変化し、逆に気候に影響を与えるというフィードバックの重要性が認識されるようになった。そのため、海洋の気候変動に対する応答を正しく予測することが、この分野の科学の命題となり、気候変動予測モデルに、陸域と海洋の物理・化学・生物的レスポンスを含むことが重要となった。

さて、海洋のCO<sub>2</sub>吸収を観測的に求めるには、表層から深層までの海洋のCO<sub>2</sub>深度分布を繰り返し測定することで長期的貯留量を求めるアプローチと、海洋表層のCO<sub>2</sub>分圧変動を広域にかつ季節をカバーするように測定し交換吸収量から求めるアプローチがあり、それぞれ重要である。この際、米国が1988年以来継続している、大西洋バミューダ定点、太平洋ハワイ定点の観測もこの目的には有用であり、この期間の海水中全炭酸増加が明瞭に認められるようになった。ただし、海洋全域での吸収量の測定としては、大洋断面観測が有効で、最近では産業革命以来を通算した海洋吸収量として102Gt (Sabine et al., 2002) というようなまとめがされた。しかし、これらで分かることは現状であって、将来の気候変動予測に必要な海洋の吸収量の予測にはモデルの進化が必要である。そのために必要な知見が、物理現象のみならず生物・化学過程を含んだ海洋物質循環モデルである。

海洋物質循環モデルでは、海洋の諸現象をパラメータ化することが出発点であり、パラメータ化は海洋のプロセス研究から得られる。この場合に、現場の海洋で化学成分の分布が物理・化学・生物過程によって変化して行くさまをつぶさに観測することが、最も役に立つ。特に海洋表層過程では、一時的な観測（スナップショット）では推測し得ない重要なプロセスが数多くあり、時系列観測が重要となる。研究観測船は、多数の研究ミッションのもとで運用されることが普通であり、外洋域にある一定点の繰り返し観測をおこなうことは、容易でない。しかしながら、海洋が季節の進行とともに刻々変化して行くさまを捕らえる海洋時系列観測は、海洋物質循環プロセス研究の決め手である。本研究は、日本に近い外洋定点でそのチャレンジをおこなうこととして構想されたものである。

## ○基本構想

生物生産の大きい北西太平洋高緯度域の物質循環を明らかにするため、主として既存航海を利用した設定定点における繰り返し観測により、海水の炭酸系、生物化学項目、ガス交換を重点計測する。データは既存時系列観測である定期貨物船観測、衛星観測と総合解析する。さらに、JGOFS 時系列観測（ハワイ、アラスカ湾）と比較して、太平洋全域の炭

素循環プロセス解明を目指す。

## ○目標

本研究では、国際共同研究である JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) の枠組みの中で、北西太平洋高緯度海域の定点時系列観測をおこなう。高緯度海域の特徴である季節的な水温変化、混合層深度変化によってもたらされる海洋構造の変化を理解した上で、物質循環の季節変化の全体把握をおこなう。特に海域の二酸化炭素の交換（吸収・放出）の規定要因として重要な生物生産の大きさを明らかにするために、炭酸系の精密観測、生物生産量と関連因子の観測に重点を置くこととした。既存時系列観測である定期貨物船観測、衛星観測で得られる海洋表層情報と、この時系列観測で得られる、鉛直プロファイルの情報を総合解析することによって、季節的に変動する現象を正確に把握する。この研究で、北太平洋海域で先行して継続されているハワイ時系列、アラスカ湾時系列との対比をおこない、北太平洋全域にわたる炭素循環を中心とした物質循環解明に新しい知見を与えることを目標とした。時系列観測データは解析をおこなうと共にデータベース化して公開し、国際的な解析研究、モデルへの応用研究に資するものとする。

## ○計画

この研究で時系列観測をおこなう定点は、北緯 44 度、東経 155 度ステーション KNOT (Kyodo Northwest Pacific Ocean Time series) とした。この点の位置は、継続観測をおこなえるという実行上の現実性で設定されたものではあるが、科学的には次のような意味を持つ。北東太平洋のカナダ定点（ステーション P）がアラスカ湾中央部（50°N, 145°W）という亜寒帯循環の中心部に近い点であるのに対し、定点 KNOT は北西太平洋亜寒帯循環の南西の縁、亜寒帯前線の北側である。亜寒帯循環中央部では、より定常的な海洋環境が予測されるのに対し循環の端の部分では、海流の変化の影響が強く現れることも予想された。

しかしながら、本研究計画のために海洋観測船を傭船して目的定点の観測をおこなうことには予算的制約があることが明白であったので、現状の海洋観測船の運用状況を詳しく検討し、既存航海だけで年数回以上の繰り返し観測が可能である点として、定点設定した。

これまでの知見によると、亜熱帯循環域にあるハワイ時系列ステーション (HOT) では年間を通して表層海水の栄養塩濃度が検出できないほど低い。このため、表層の生物生産はローカルな海水の鉛直混合で回帰する亜表層水の量で規定され、栄養塩回帰量に依存した生産が起こる。中緯度帯のバミューダ時系列ステーション (BATS) では冬季に数百 m の水深までの季節混合が起こるので、その鉛直混合の程度がその後の時期の生物生産を規定する。これに対し、亜寒帯循環の中央にあるステーション P 時系列では年間を通して栄養塩が枯渇しない。このため、生物生産を規定する要因はいわゆる栄養塩以外の必須元素である微量金属類であったり、植物プランクトンを食する動物プランクトンであったり、冬に不足する光であったりするが、その相互関係は今日的な研究課題である。

一方、北西太平洋は、太平洋の中層水生成の場であるとともに、親潮と黒潮の合流の場である。過去には、親潮はカムチャッカ海流から千島沿岸を通り、日本列島の東岸に沿って南下する海流であるようにも考えられていたが、現在ではその多くの流れが、黒潮続流と合流して北太平洋海流の一部をなすことが知られている。この海域は、中規模渦が生じ鉛直的・水平的に複雑な海洋構造を呈している。そして、年間を通して大きな生物生産が維持されて、漁場として重要な海域になっている。特に、二酸化炭素の吸収・交換の立場でいうと、ステーションPに相当するアラスカ湾亜寒帯循環域では、ほとんど季節性がなく年間を通して海水中二酸化炭素分圧は、大気よりわずかに低いだけであるのに対して、千島沖の定点 KNOT 周辺海域では、夏から秋の遅い時期まで二酸化炭素の吸収が継続するが、冬から春にかけては放出域にかわるというように、大きな振幅を示し、年間の平均で見ると、正味の放出吸収はおおむねバランスしているということがわかった。

そこで、この CREST による KNOT 時系列観測では、季節変動をもたらす機構を探るのが目的で、国内研究機関合同で研究船による時系列観測をおこなうこととした。鉛直構造、化学成分プロファイルの季節変化から、栄養塩の供給の状況、生物生産規定因子の解明、沈降粒子による炭素除去との関連、二酸化炭素などのガス交換量とその規定因子を明らかにする計画として。

また、今日進歩しつつある海洋の物質循環モデルとして、将来の予測モデルへの発展の基礎である一次元モデルを扱うこととし、観測で得られる項目のモデルへの適用から、亜寒帯海域の物質循環像を明らかにするパラメータ化の研究をおこなうこととした。

図1が研究計画初期に描いた研究スキームであったが、その多くの内容を本研究では実現できたと考えている。

## ○進め方

1998年から2000年を時系列集中観測期間として、共同利用可能研究船の航海計画を調査し、可能な限り時期の偏らない定点測定計画を組んだ。CRESTによる雇用者である中心メンバーと協力研究機関の研究者の協力で、当初から定めた必須観測項目を、管理された精度で測定できるように、測定法の統一、必要に応じてその開発改良、必要な機器の整備をおこない、1998年6月の観測開始に臨んだ。また、1999年の時系列観測では、測定項目を加えて、より現象を詳細に捉えることを進めた。

バミューダ、ハワイなどの実績のある時系列点での研究例に従って、当初から精度管理を徹底して、比較しうる時系列データセットを得る観測項目を決めた。

1. 表層水二酸化炭素分圧
2. 表層から深層（可能な限り海底 5500m）までの海水項目の鉛直プロファイル  
CTD（水温塩分深度プロファイラー）、塩分、溶存酸素、溶存炭酸系（全炭酸、アルカリ度、pH）、栄養塩類（硝酸、亜硝酸、リン酸、ケイ酸、アンモニア）

### 3. 表層（有光層をカバーする）の鉛直プロファイル

植物プランクトン色素、一次生産、動植物プランクトン組成など

また、研究開始意向に加えることで、一応の時系列データを得たものとして、溶存炭酸の炭素同位体比、溶存有機炭素、海水中の鉄などがある。

海水中の炭酸系の測定は、海洋物質循環解明のための時系列観測では極めて重要である。そこで、表層水二酸化炭素分圧測定と、海水中全炭酸・アルカリ度測定装置については、新たに装置を製作し、分圧測定装置は必ず観測船に搭載、全炭酸・アルカリ度装置も可能な限り搭載しての分析をおこなうこととした。これらの装置については、国内外の相互検定実験を期間中におこない、測定値の信頼性に関する確認をおこなった。また、その他の化学項目として、栄養塩・溶存酸素の測定装置を整備し、多くを CREST 中心メンバーで測定することとした。協力を求める観測船側に装置・人材が備わっている航海の場合は、他の定点航海と厳密に比較できるデータを取得できるように、分析値比較、持ち帰り試料分析などをおこなうこととした。

また、生物項目としては、植物色素、光合成について、既存の手法を確認し、中心メンバーで精度管理しつつ測定をおこなうこととした。

表 1 に実施することができた観測航海リストを示す。これらは、主として観測船の既存航海の協力を得て行った。毎年 10 月望星丸航海は、本研究プロジェクトの備船による航海で有り、既存観測船航海がない時期を埋めることで、定点時系列の重要な季節カバーとなった。これらの観測航海のうち多くが関係機関からの研究参加者の大いなる努力によるものである。当初、1998-2000 年度前半までを集中観測期間と定めて計画したが、2000 年 10 月にも幸いにして望星丸航海が実施でき、観測期間を延ばすことができた。

データは協力機関を含めて相互利用できるようにデータベース化し、データベース収録機関にサブミットすることとした。また、本時系列航海以外に数回の他の観測船が定点を訪れ、部分的な項目数ではあるが測定した例があった。

### ○その後の展開

観測の 1 年目である 1998 年は 6 月から 12 月にかけては、実際にはだれも経験したことがなかった外洋域定点時系列観測をおこないデータを取るという極めて基本的作業をこなすことで精一杯であった。2 年目も同様な状態が続き、前の航海の化学分析値・観測データの確定をおこないながら、次の航海の準備に追われるという苦しい状態が続いた。解析的な研究は 3 年目の 2000 年からようやく始まった。しかしながら、1998 年の観測開始から、観測船が所属する協力機関、及び、同時に乗船した協力研究者、あるいは、乗船はしないながらも特別な項目の分析に協力を申し出ていただいた研究者など、多くの方々に注目していただき、観測を継続することができた。

その間の特筆すべき状況の変化は、海洋生物生産に関する海水中の鉄に関する研究の進歩であった。故人となられた中山英一郎滋賀県立大学教授とその関係の研究者に、1999

年から 2000 年にかけての定点 KNOT 航海で測定を引き受けていただいた。また、環境省研究費による海洋鉄散布実験に参加し、同じような海域での海洋生物生産に関わる鉄の必要性の検証実験をおこなうことができ、結果の解析に有用なデータを得た。

また、植物プランクトン種組成、溶存無機炭素の炭素同位体比、溶存有機炭素濃度など CREST メンバーでは測定が困難であった成分も 1999 年以降の時系列では測定を実施することができた。また、2002 年にはカナダ海洋研究所の助けを得て植物プランクトンの一次生産に関する比較実験をおこない、観測データ検証に関する重要な情報を得た。

成果は、1999 年から 2002 年にかけてのいくつかの国際会議で報告されて注目されるようになった。2002 年 10 月印刷の国際論文誌 Deep-Sea Research 北太平洋 JGOFS 特集号に多くが出版された。

## ○役割分担

### 1. 研究統括・データ解析グループ

研究代表者 国立環境研究所、総合研究官 野尻幸宏

- ・海洋の二酸化炭素測定の精度管理、二酸化炭素分圧測定装置の国内相互検定、全炭酸・アルカリ度の国際相互検定
- ・栄養塩測定の精度管理、測定装置と標準物質の維持管理
- ・観測データの管理とホームページ化
- ・国内機関との協力による海水中の鉄濃度測定
- ・定点観測結果と北太平洋中高緯度海域の貨物船 CO<sub>2</sub> 観測結果の比較解析
- ・海洋生態系モデルへの観測データの応用

### 2. 炭酸系グループ

研究代表者 北海道大学大学院地球環境研究科 教授 角皆静男

- ・全炭酸とアルカリ度の自動装置の開発
- ・全炭酸・アルカリ度の国際相互検定への参加
- ・定点での海水中全炭酸炭素同位体比の変化測定
- ・定点での海水中メタン濃度とその同位体比の変化測定
- ・定点での海水中亜酸化窒素濃度とその同位体比の変化測定

### 3. 生物生産グループ

研究代表者 北海道大学水産学部 教授 米田義昭、同 教授 岸道郎（2000 年から）

- ・北大「北星丸」および東大「白鳳丸」による定点時系列観測実施
- ・<sup>13</sup>C 法による植物プランクトンの一次生産速度測定
- ・衛星画像による海域の生物生産季節変化とその分布の研究
- ・溶存有機炭素の鉛直分布とその変動の測定
- ・植物と動物プランクトンの種組成の変動

#### 4. 研究航海グループ

研究代表者 東海大学海洋学部 教授 加藤義久

- ・東海大学「望星丸」および海洋科学技術センター「みらい」による定点時系列観測
- ・係留型セジメントトラップ実験による沈降粒子鉛直輸送フラックスの測定
- ・漂流型セジメントトラップ実験とトリウム測定による炭素の鉛直フラックス測定
- ・海水中のバリウム濃度の精密測定

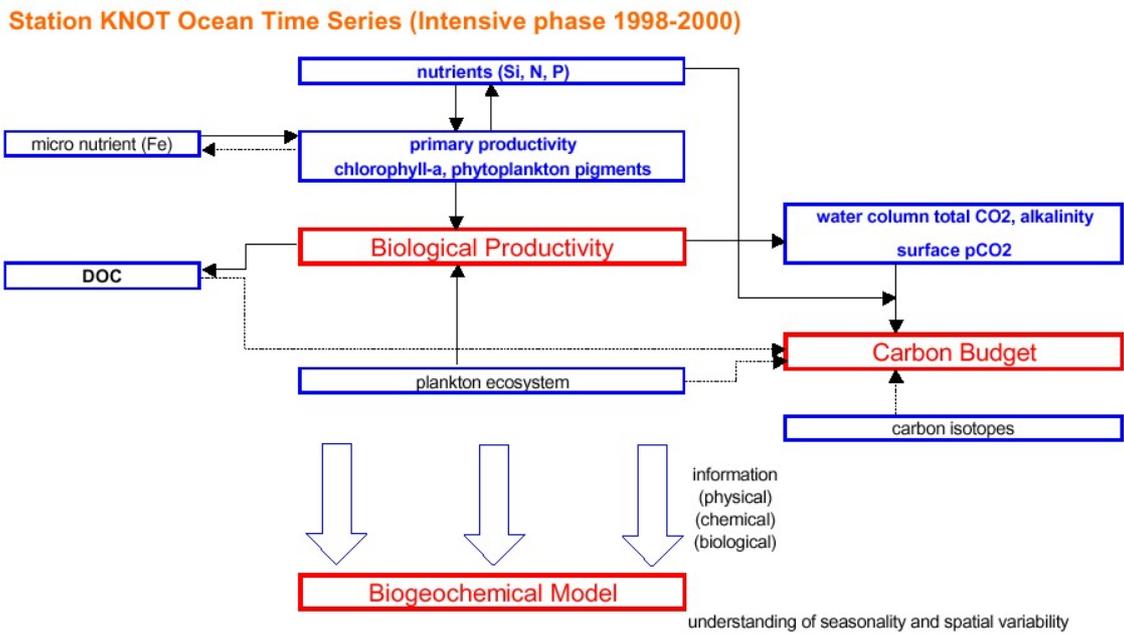


図1 研究プロジェクト開始時に立案した研究と観測の内容に関する概要計画図

**KNOT observation in the campaign period (Jun. 1998 to 2000 Oct.)**

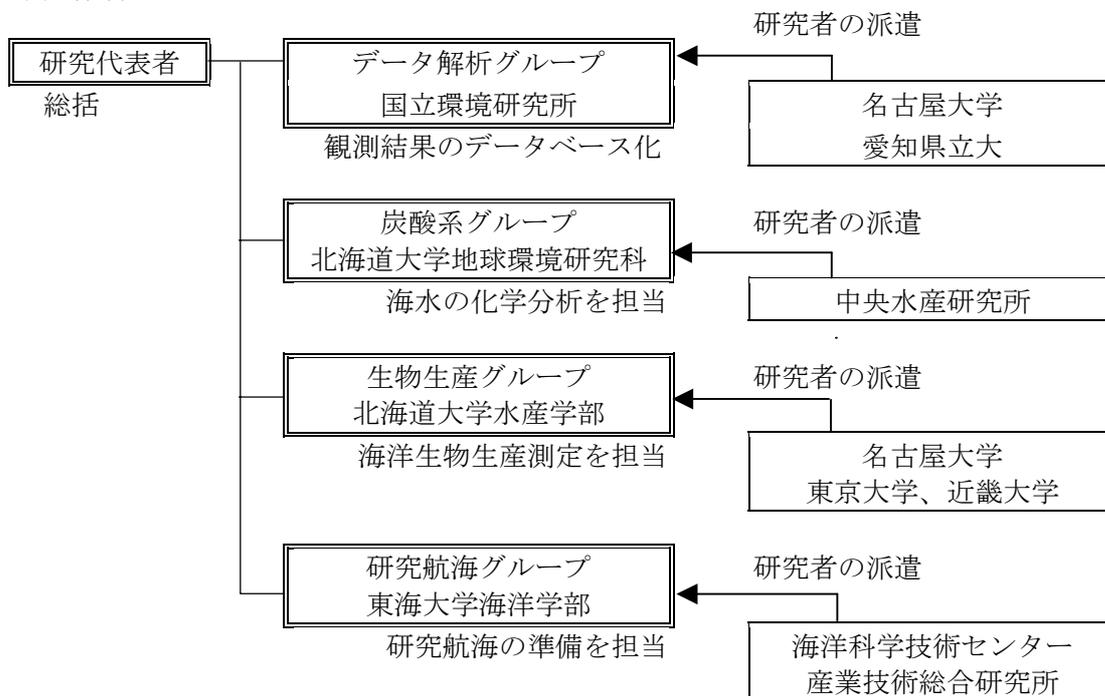
	R/V	Date	R/V	Date	R/V	Date
	1998 time series		1999 time series		2000 time series	
Jan		—		—	MIRAI	1/17
Feb		—		—	MIRAI	2/4
Mar		—		—		—
Apr		—		—		—
May		—	MIRAI	5/10, 23	MIRAI	5/11, 22
Jun	Hokusei	6/3, 26	Hokusei · Hakuho	6/3, 27, 28	MIRAI · Hokusei	6/5, 9, 25
Jul	Hokusei	7/20	Hokusei	7/22		—
Aug	Hokusei	8/13	Hokusei · Hakuho	8/14, 16		—
Sept		—		—		—
Oct	Bosei	10/8, 14	Bosei	10/13, 18	Bosei	10/13, 17
Nov	MIRAI	11/9		—		—
Dec	MIRAI	12/11		—		—

**Numbers of occupation were 8, 10 and 9 in 1998, 1999 and 2000, respectively.  
Dense coverage from May to October, Less coverage from November to April**

表 1 実現した定点観測実施（船舶名および観測日）

### 3. 研究実施体制

#### (1) 体制



#### 4. 研究期間中の主な活動

##### (1) ワークショップ・シンポジウム等

年 月 日	名 称	場 所	参加人数	概 要
H. 10. 1. 19-23	海洋表層二酸化炭素分圧測定装置相互検定実験	水産庁水産工学研究所	25名	国内6機関10種の海洋表層CO <sub>2</sub> 分圧測定装置をもちより、測定値間偏差を明らかにする実験を行い、その後の定点海洋観測での使用に備えた。
H. 10. 6. 20-6. 21	栄養塩検討分科会	北海道大学水産学部	15名	定点海洋観測における栄養塩(NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , Siなど)の測定に関する精度管理を、観測を受け持つ研究機関間で行なうための方法論の議論を行なった。
H. 11. 3. 19-3. 27	海洋表層二酸化炭素分圧測定装置相互検定実験	水産庁水産工学研究所	10名	国内2機関のほか、海外2機関の装置を用いて、前年の実験を補う実験を行った。
H. 11. 4. 20-22	PICESによる海水中の炭酸物質の測定相互検定実験結果検討会	工業技術院資源環境技術総合研究所	30名	PICES(北太平洋の海洋科学に関する政府間機構)の海水中炭酸物質(全炭酸とアルカリ度)測定相互比較を、日・米・加・韓で行い、その結果の議論をもった。
H. 12. 10. 18-10. 21	北太平洋のCO <sub>2</sub> のデータ統合化シンポジウム	国立環境研究所	50名	PICES(北太平洋の海洋科学に関する政府間機構)と連携して、北太平洋海域のCO <sub>2</sub> 観測データを統合解析するための研究集会を行なった。合わせて、海水中のアルカリ度測定相互検定の結果の議論会をもった。
H13. 3. 31	海洋学会 KNOT シンポジウム	東京大学駒場	100名	日本海洋学会春季年会のシンポジウムセッションとして、それまでに行なった定点KNOT観測の結果を、約20名の研究者が発表し、その議論を行なった。
H13. 7. 31-8. 2	太平洋の二酸化炭素データ統合に関する作業実行会合の開催について	海上保安庁水陸路部	25名	米国・カナダの研究者・データセンター担当者が集まり、時系列観測データのみならず、北太平洋の海洋CO <sub>2</sub> 観測データを統合的に利用するための、技術的側面を中心にした議論を行なった。
H13. 12. 27-12. 28	実測したKNOTデータを中心にした基礎生産とモデルによる基礎生産量に関する研究打合せ	北海道大学水産学部	15名	国内研究者で、定点KNOT観測データと衛星による海洋観測のマッチングをはかるために、生物生産推定の経験式改良を行なう議論を行なった。
H. 14. 3. 12-3. 15	北太平洋の生物生産に関するワークショップ	国立環境研究所・遠洋水産研究所	25名	カナダの研究者を加えて、定点KNOT観測データと衛星による海洋観測のマッチングをはかるための議論を進めた。
H. 14. 10. 28-10. 29	CREST 最終報告会のための集会	国立環境研究所	30名	これまでの定点KNOT観測とそのデータ解析に関する集会で、観測に関わった国内研究者を結集して議論の場を持った。

## 5. 主な研究成果

(1) 論文発表 (国内0件、海外13件)

1. Nobuo Tsurushima, Yukihiro Nojiri, Keiri Imai and Shuichi Watanabe, Seasonal variations of carbon dioxide system and nutrients in the surface mixed layer at station KNOT (44°N, 155°E) in the subarctic western North Pacific, *Deep-Sea Research II*, 49, 5377-5394 (2002).
2. Keiri Imai, Yukihiro Nojiri, Nobuo Tsurushima and Toshiro Saino, Time series of seasonal variation of primary productivity at station KNOT (44°N, 155°E) in the sub-arctic western North Pacific, *Deep-Sea Research II*, 49, 5395-5408 (2002).
3. Hongbin Liu, Keiri Imai, Koji Suzuki, Yukihiro Nojiri, Nobuo Tsurushima and Toshiro Saino, Seasonal variability of picophytoplankton and bacteria in the western subarctic Pacific Ocean at station KNOT, *Deep-Sea Research II*, 49, 5409-5420 (2002).
4. Mamiko Mochizuki, Naonobu Shiga, Masaru Saito, Keiri Imai and Yukihiro Nojiri, Seasonal changes in nutrients, chlorophyll a and the phytoplankton assemblage of the western subarctic gyre in the Pacific Ocean, *Deep-Sea Research II*, 49, 5421-5439 (2002).
5. Masahiko Fujii, Yukihiro Nojiri, Yasuhiro Yamanaka and Michio J. Kishi, A one-dimensional ecosystem model applied to time-series Station KNOT, *Deep-Sea Research II*, 49, 5441-5461 (2002).
6. Kosei Sasaoka, Sei-ichi Saitoh, Ichio Asanuma, Keiri Imai, Makio Honda, Yukihiro Nojiri and Toshiro Saino, Temporal and spatial variability of chlorophyll-a in the western subarctic Pacific determined from satellite and ship observations from 1997 to 1999, *Deep-Sea Research II*, 49, 5557-5576 (2002).
7. Makio C. Honda, Keiri Imai, Yukihiro Nojiri, Fumiko Hoshi, Toshikatsu Sugawara and Masashi Kusakabe, The biological pump in the northwestern North Pacific based on fluxes and major components of particulate matter obtained by sediment-trap experiments (1997-2000), *Deep-Sea Research II*, 49, 5595-5625 (2002).
8. Jiye Zeng, Yukihiro Nojiri, Paulette P. Murphy, C. S. Wong and Yasumi Fujinuma, A comparison of pCO<sub>2</sub> distributions in the northern North Pacific using results from a commercial vessel in 1995-1999, *Deep-Sea Research II*, 49, 5303-5315 (2002).
9. 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 during the Skaugran cruises: determination of new production and nutrient uptake ratios, *Deep-Sea Research II*, 49, 5317-5338 (2002).
10. 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, *Journal of Oceanogr.*, 58, 227-243 (2002).
11. S. Toyoda, N. Yoshida, T. Miwa, Y. Matsui, H. Yamagishi, U. Tsunogai, Y. Nojiri, and N. Tsurushima: Production mechanism and global budget of N<sub>2</sub>O inferred from its isotopomers in the western North Pacific, *Geophysical Research Letter*, 29, 7/1-4 (2002).
12. P. P. Murphy, Y. Nojiri, D. E. Harrison and N. K. Larkin, Scales of spatial variability for surface ocean pCO<sub>2</sub> in the Gulf of Alaska and Bering Sea: toward a sampling strategy, *Geophysical Research Letter*, 28, 1047-1050 (2001).
13. P. P. Murphy, Y. Nojiri, Y. Fujinuma, C. S. Wong, J. Zeng, T. Kimoto and H. Kimoto, Measurements of surface seawater fCO<sub>2</sub> from volunteer commercial ships: Techniques and experiences from Skaugran, *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 18, 1719-1734 (2001).