

# 白嶺丸によるセジメント・トラップ繫留系回収記

## —深さ5 kmの海底でのドレッジによる回収—

川 幡 穂 高<sup>1)</sup>

### 1. はじめに

地質調査所は新エネルギー・産業技術総合開発機構が西部太平洋で進めている「海洋中の炭素循環メカニズムの調査研究」に技術指導というかたちで参加している。研究の重点項目は二つあり、一つは、現代の地球温暖化に伴う二酸化炭素濃度の上昇に関連して、粒子状物質としてどの位の炭素が除去されているのか、またその仕組みはどのようなものなのかを調べることである。この種の研究はセジメント・トラップを繫留して行われることが一般的である。この実験の目的、方法、その研究の現状、問題点については川幡(1992, 1993a, b)を参照されたい。もう一つの研究項目は環境変遷の研究で、自然のサイクルで海洋環境がどのように変わってきたのかを研究するものである。テープレコーダーのテープのように堆積粒子が過去の環境を記録していることを利用し、過去の環境の変遷から地球表層のもっている普遍的な変動特性を解明するものである。両者の共通点は研究対象試料が基本的に固相だということである。外洋においては堆積粒子のほとんどは沈降粒子に由来していると考えられることから、沈降粒子と堆積粒子は親子のような関係にあるということもできる。

1991年5月に日本のはるか南の西カロリン海盆において関西総合環境センターと共同でセジメント・トラップを2系列繫留した。翌1992年の4月に現場に戻り、回収を試みたが1つの繫留系では超音波切り離し装置が作動せず、繫留系の回収は不可能と思われた。というのは、沿岸域を除くと、外洋で切り離し装置が作動しない場合、通常、国内・海

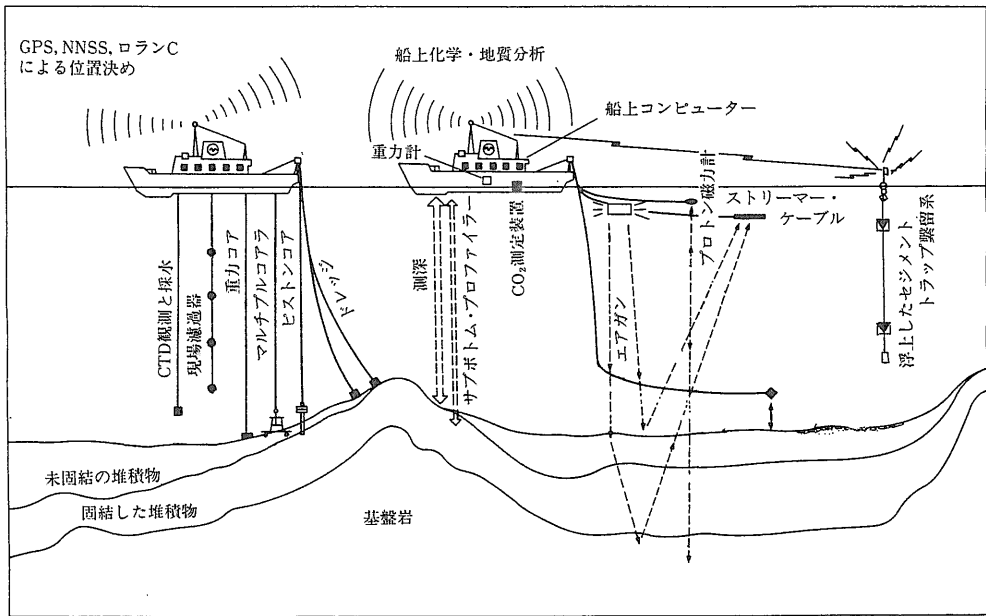
外ともに繫留系の回収作業はほとんどうまくいったためしがないからである。その理由ははっきりしないが、たぶん、海底深度が深いこと、繫留系の最終的な設置地点を決めるのが難しいこと、詳細な海底地形図等が出版されていないために後述するドレッジ作業が可能かどうか判断しにくいこと等が挙げられる。このような従来事例からすると、1992年の4月の回収ではほとんど奇跡的にシステムの大部分の回収に成功した。私達の知るかぎり、海底深度約5 kmというこの回収は今迄行われた回収作業の中で最も深いものと思われる。今後の調査・研究に役立てばと思い、ここにその経緯を回収記として書くことにした。

### 2. NOPACCS 航海における観測機器

NOPACCSとは当プログラムにつけられた名前でも北部(北半球)太平洋における炭素循環に関する研究(North Pacific Ocean Carbon Cycle Study)を簡略化したものである。このプログラムのための航海は大きく二つに分かれている。片方の60日の航海は表層から深層までの水塊、粒子状物質、海底堆積物等を対象としたもので、もう一つの60日の航海は大気、水塊、生物活動を対象としたものである。私達が参加している前者の航海では、炭素循環に関連した以下のような項目が観測されている；堆積物の採取、堆積層の分布を調べる音波探査、現場濾過器による海水中に浮遊する懸濁物の採取、沈降粒子を採取するセジメント・トラップ実験、採水器による海水試料採取、CTD(Conductivity-Temperature-Depth, 電気伝動度-水温-深度センサー)によ

1) 地質調査所 海洋地質部

キーワード：繫留系、ドレッジ、白嶺丸、超音波切り離し装置、セジメント・トラップ実験、沈降粒子、二酸化炭素



第 1 図 NOPACS 航海で行われている海洋観測の模式図。

る水温や塩分濃度の現場測定。これらを模式的に描いたのが第 1 図である。

データおよび試料の採取方法に関して幾つかのボタンに分類することができる。まず第 1 グループは、位置や海底深度の測定のように、観測船に装備された機器を用いて衛星からの電波を受信したり、海底へ音波を発信しその応答をとらえたりして観測を行うものである。概してこの種の観測は物理観測に限られる。第 2 のグループの例としては、二酸化炭素分圧の測定を挙げることができる。この分析では船底から表層海水を組み上げ、それを二酸化炭素分析装置に直接導入して分析を行なう。その他のほとんどの観測は、第 3 番目のグループに属する。堆積物試料や海水試料を採取する作業は採泥器や採水器をワイヤーに取付けて行われる。

物理観測である CTD 観測や音波探査では温度、塩分、音波のセンサー部を観測船と同軸ケーブルで結び、リアルタイムでデータを採取することができる。以上述べてきた観測では、観測機器が船上にあるか、あるいは船とワイヤーによって結ばれているかのいずれかで、これらを結びつけるているものが切れない限り観測機器を失うことはない。しかも、通常の観測にはワイヤー強度についてもかなりの余裕を持たせてあるので、以下のような事故が起こることは極めてまれである。

事故例とその状況を記すと、強風や波が高い時に CTD 観測を行ってセンサー部分を失ったり、規定以上の採水器をワイヤーに取付けてその荷重に耐えきれずワイヤーが切れたり、岩石を採取するドレッジが基盤にからまり取れなくなったり、粘性の高い堆積物にコアが突き刺さり抜けなくなったりすることがたまに起こる。

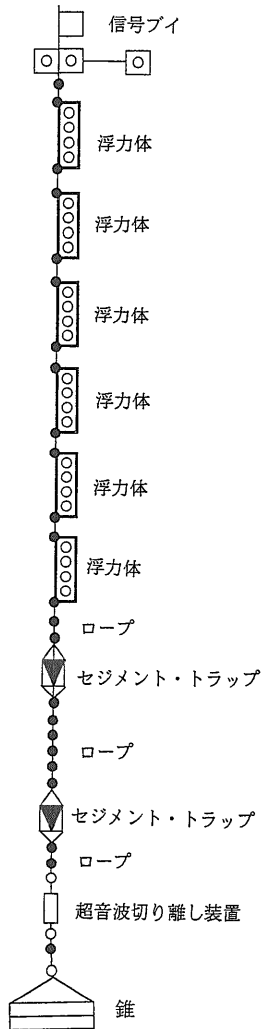
以上の海洋観測に比べると観測船から観測機器を一旦切り離す場合には紛失の可能性が高くなることは容易に想像できる。このグループとしては、流速の長期観測やセジメント・トラップ実験を行うための繫留系を挙げることができる。繫留実験が 1 年以上にも及ぶと観測機器を失うリスクは高くなる。

電波による位置決定がなんらかの都合でうまくいかない、外洋域は大海原なので同一地点に戻ってくることは難しい。また、約 1 年間にわたって繫留すると、繫留系そのものに物理的損傷を受けることもあるし、ロープ等が劣化することもあるし、切り離し装置の内部等の電池の消耗等にも問題がでてくることもある。

### 3. セジメント・トラップ実験

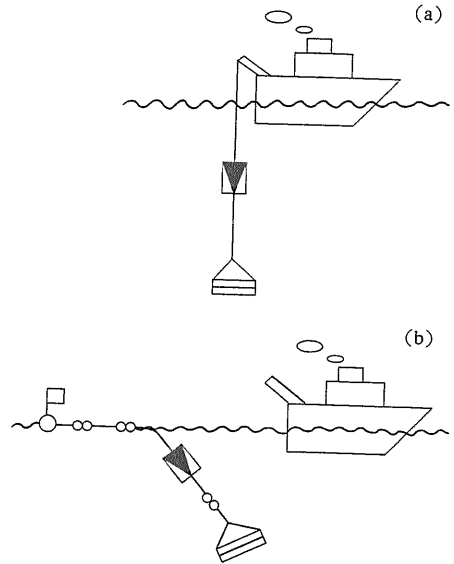
#### 3.1 セジメント・トラップ繫留系の設置

ここで、繫留系がどのようなものから構成されて



第2図 セジメント・トラップ繫留系の模式図。

いるのかと、設置をどのように行うのかについてまず見てみよう。繫留系の基本的な構造は下から錐、超音波切り離し装置、ロープ、浮力体という順序で構成されていて、これにセジメント・トラップや流速計が設置される(第2図)。1991~1992年にかけての実験では錐として1tのレールを、また25kgの浮力能力のある浮力体を27個とりつけた。このような繫留系の設置には、二つの方法がある(第3図)。一つは下の錐から降ろしていく方法である。この方法だと錐の設置まで船からつり下げているので設置点を正確に選べるという長所がある(第3図a)。一方、錐が重たいのでウインチに負担がかかるのと、最下部のロープには常にかかなりの張力が加わっているために甲板での作業も難しいものとなる。そこで、普通はブイ先方式と呼ばれる、ブイ(浮力



第3図 セジメント・トラップ繫留系方法の模式図。  
(a)は錐から海面に投入する場合、(b)はブイから投入する場合を表している。

体)を先に水面に降ろしていく方法が採用される(第3図b)。セジメント・トラップは後者の方法で1991年の5月にカロリン海盆に2繫留設置された。翌年それを回収するためにパラオ島より白嶺丸に乗船した。

### 3.2 予定ではうまくいくはずだったセジメント・トラップ繫留系の回収

1992年4月24日の午後、パラオ島のコロール港を出港と同時に調査研究が始まった。4月26日に現場に到着した(第4図)。通常、電池を消耗させないために切り離し装置は、人間で言えば仮死状態になっている。すなわち、自分を起こしに来る信号を受信する回路のみがわずかに働いていて、メインの回路は眠っている。そこで、わずかずつではあるが、受信回路の電池は消耗していく。日油技研製の1年用の切り離し装置の場合には、1年が経過しても投入時の電力の30%が残っているよう、かなりの余裕をみて設計されている。

さて、船上から切り離し装置を起こさせる信号を送った。トランスジューサーは発信と受信を行う装置で、船底以深から下に向かって信号を送る。しかし、返事はない。信号は16通りあって、切り離し装置に固有の周波数が決まっている。今回はその中の(1H)というものを使った。通常はそれに応答し

て切り離し装置が返事を送ってくる. 少なくとも昨年の投入時には元気な返答があった.

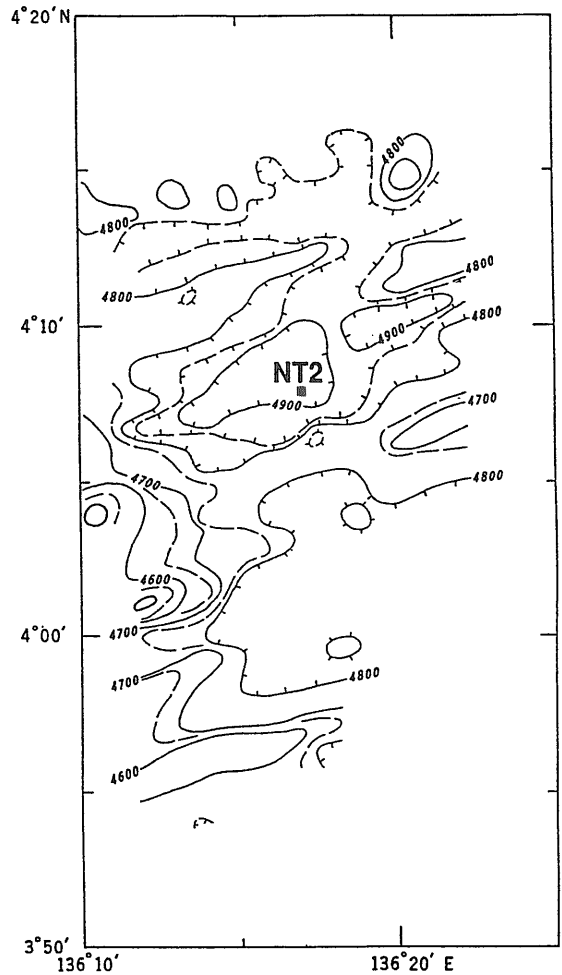
もしかすると, 切り離し装置との位置関係が悪いのかもしれない, と位置や船首方向を変えて信号を送ったり, 船からの雑音妨害しているのかもしれない, と遂に船のメインエンジンも止めて海流に流されるままに同様の発信操作を繰り返した. しかしながら応答は全然なく, トランスジューサーを通して聞こえてくるものはシーンと静まりかえった海だった.

このような時, 次の5つの状況が考えられる.

- (1)セジメント・トラップ繫留系の最下部の錐が, 予想以上に速い海流のためかなりの距離移動してしまった.
- (2)セジメント・トラップ繫留系が何らかの原因で切れ, 流されてしまった.
- (3)セジメント・トラップ繫留系は現場に存在しているものの, 浮力体が壊れてしまったため, 繫留系が横倒しになってしまい船上局からの信号を受信できなくなってしまった.
- (4)超音波切り離し装置の電池が消耗してしまい, 受信回路が働かなくなった.
- (5)超音波切り離し装置が何らかの原因で故障し, 受信回路が働かなくなった.

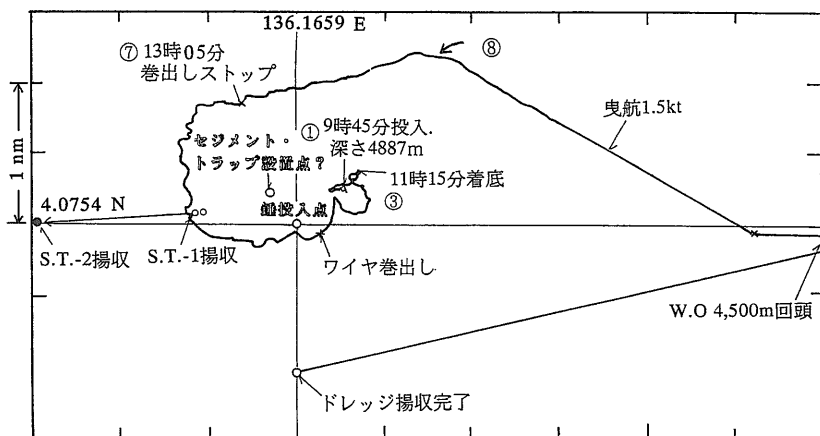
まず, 第一の可能性と思われる事故が南極海であったと聞いている. この場合には, 錐は約400 kg, 浮力が約200 kg と, 鉛直方向下向きの力が今回と比べるとかなり小さい. 東京大学海洋研究所, 名古屋大学, 北海道大学でも特殊な使用を除くと錐を約800 kg, 浮力体を約400 kg にして使っているが同じようなトラブルは起きていないらしい. また, 設置した地点の海底は半遠洋性泥で粘性も高く, 繫留系が動くことは到底考えられない.

第二の可能性については, 二つの場合が考えられる. 一つは誰かが私達の来る前に超音波切り離し装置を作動させてしまったという場合であるが, 先程も述べたように, 超音波切り離し装置はすべての超音波長に対して作動するのではなく, ある特定の周波数と信号の波形を認識して働くように設計されている. また, たとえ信号が発信できたとしても船上局からの信号のとどくのは約7 km であるので, 海底深度が約5 km であることを考慮すると海底で信号が伝わる範囲は高々半径3 km である. 白嶺丸で外洋を航海すると, 出港から入港までの1ヶ月の間に他の船と全く出会わないこともしばしばで, 外洋



第4図 1991年と1992年の航海で観測して作りあげた現場海域の海底地形図(渡辺他, 1993). 図中NT2はセジメント・トラップ測点2の繫留地点を表す.

ではよほど正確な設置点を知らない限り装置を作動させることは不可能である. もう一つは, 漁船の網により繫留系の一部が破壊された場合がある. 第三の可能性とも関係するが, 白嶺丸の航海で設置したセジメント・トラップ繫留系の浮力体の一部が実際に破損した前例がある. 日本国内で繫留用に使用される浮力体の中で最も一般的なものはベントス社製のガラス玉で, 6,000 m が使用限界深度である. これは約600気圧に相当している. 繫留系の中で浮力体がセットされている深度は約1.5 km~2 km なので, 使用時の圧力は150~200気圧にしかならなかったと思われる. ある技術者によると水中で深海用浮力体が壊れると爆発したように粉々になり, 近隣



第5図 ドレージ作業と航跡図. 縮尺は約1/40,000.

の浮力体に対して誘爆をさそう。浮力体が5 m 位しか離れていないと、一つの浮力体が壊れると次々に波及し、通常3個か4個繋いでいる浮力体がすべて壊れてしまうこともあるという。そこで、今回は3個か4個繋いだものを1セットとして、セットの間隔を50 m もあけて繫留系に設置した。

第四の可能性も一応あるが、翌日もう1繫留を引き上げに行ったところ容易に超音波切り離し装置が作動した。装置から発信された応答は昨年よりは小さくはなっていたものの、まだ十分な力は残っているように思われた。深海と同じ温度で行った電池の消耗試験からは、今回の実験期間のように、1年にわずかに満たない期間での電池の消耗は深刻でないことがわかっている。

以上のような検討の結果からは、切り離し装置が故障しただけで繫留系そのものは予定地点に存在しているものと予想された。しかし、今迄同じようなことが起こってもほとんど引き上げられた例はないので、これ以外の可能性もあるのかもしれないと思われた。

#### 4. 白嶺丸で行ったセジメント・トラップ繫留系の回収ドレージ

セジメント・トラップ繫留系回収のためにドレージを行うかどうかについて船長と調査正副団長の間で検討された。そして、ドレージをすることが決まった。4月28日(火)の天候は晴れで、毎秒6 m の東北東の風が吹いていた。海況は3, 潮は1ノット

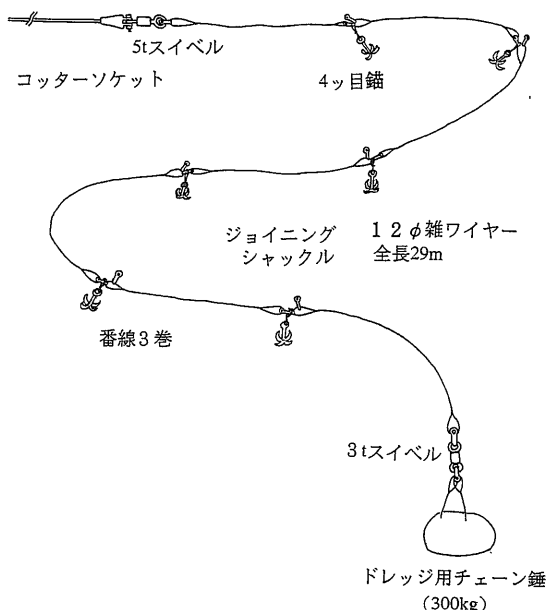
で西南西の方向に流れていた。目標地点は東経135度16.8分、北緯4度07.8分、その水深は4,905 m であった。船上記録を基にその作業状況を振り返ってみよう(第5図)。

- (1) 9時45分にワイヤーの投入を開始する。ワイヤーの先端には第6図に示すような道具を括りつけ、もし繫留系とワイヤーが接触することがあればそれを引っ掛けるような工夫をしている。
- (2) ワイヤーを繰り出すにはかなりの時間がかかることが予想されるため、作業の開始前に白嶺丸をセジメント・トラップ錐投入地点の北東側0.4海里のところまで移動させ、船首を風に立てる。ワイヤーを繰り出す速度は採泥の場合と同様に分速80 m で行い、先端が着底する少し前には分速30 m に減速する。
- (3) 1時間半かかって11時15分にやっと先端が海底に着底した。繰り出したワイヤーの長さは5,080 m、海底深度は4,905 m である。
- (4) 着底後、一旦ワイヤーの繰り出しを停止し、船を回転させ、南西方向に微速前進するよう進路をとる。その後ワイヤーを再び繰り出す。ワイヤーの先端に取付けたウェイトが海底から浮き上がって離れたり、過度に海底で引きずられたりしないか、張力計で監視しながら、船は1~1.5ノット程度の非常に遅いスピードで進む。
- (5) 12時頃、セジメント・トラップの錐投入点から西南西1マイルの点に達した所で、進路がほぼ北となるよう北北東に変針する。ワイヤー

は、以前と同様に巻出し続けている。

- (6) 北にはぼ1海里行った12時50分頃、進路が東北東になるよう変針する。この時点で繰り出したワイヤーの全長は7,000 mを少し越えた位である。ワイヤーの張力は2.0~2.3 t程度である。
- (7) 午後1時5分にワイヤー長はとうとう7,794 mになる。この時点で繰り出しをストップし、これ以降白嶺丸は約1.5ノットで東北東方向に進み始める。
- (8) 午後1時45分頃、東北東に変針して約1.3マイルきたあたりで、進路が東南東になるように進む方向を変える。船速は1.5ノット程度を保持する。
- (9) 張力計を注意深く観察しながら進行する。何度か2.7 t位まで張力が緩かに上昇したかと思うと、ずっと2.5 t位まで戻る変化が見られる。これはおそらく、先の方のワイヤーが海底の泥を巻き込んで、外れているためと想像される。
- (10) 午後2時30分、セジメント・トラップの錐投点の東約2.5マイルに達する。ワイヤーの巻き上げを開始する。白嶺丸は海底に対して静止するか、わずかに前向きに動いている。ワイヤーを分速30~40 mで巻き上げる。
- (11) 午後3時少し前、張力が2.5 tから少しづつ上昇し、2.9 tに達し、再び2.5 tに戻る。これまで何度かあった張力の変化よりも明かに大きかったため、「繫留系が切断されたのではないか」という声のでる。しかし、誰もこのような経験がないので確証はない。この時ワイヤーの全長は7,000 m弱で、船はセジメント・トラップの錐投点から約3マイルの距離にいる。
- (12) 午後3時35分、セジメント・トラップ繫留系の最上部に取付けてある信号ブイからブイの浮上を知らせる電波を受信する。夕陽の逆光と3マイル(約5.5 km)以上離れているためブイを双眼鏡で確認することはできない。
- (13) 午後5時頃信号ブイを確認し、午後5時48分にすべてのワイヤーを巻き上げを完了して、セジメント・トラップの揚収に向かう。

セジメント・トラップ繫留系の回収は、順調に進んだ。セジメント・トラップは、幸いにも、下方のセジメント・トラップと切り離し装置の間で、切り



第6図 回収ドレッジに使われた道具の模式図 (1: 12 mmφワイヤー4 mと両アイ加工したもの7本, 2: 4つ目錨を6個, 3: 5 t用と3 t用スライベル, 4: ジョイニングを連結用とストッパー用に多数, 5: 切断荷重0.8 tの番線, 6: ストッパー用ロープを2本, 7: ロープ付きスナッチ, 8: 300 kgのドレッジ用ウエイト)。

離し装置の上120 mの所が切れて、2つのセジメント・トラップと、セジメント・トラップの全試料も乱れなく回収された。そして、

- (1) ワイヤーの先に取り付けた回収ドレッジを揚収してみると、4つ目錨は2箇所で絡まっており、No. 1 ウィンチのコッターソケットの箇所のワイヤーが、少し曲がり、光っていたことから、ここが引っ掛かりケブラーロープが切れたことが判明した(第6図参照)。また、
- (2) 揚収した繫留ロープには、切断面のワイヤグリスのほか汚れがないことから、下からずり上がってきたワイヤー又はコッターが、力がロープ破断力より大きくなったところでロープを切ったと考えられた。

白嶺丸の船員と調査団でこの回収を通じて考察されたり、結論がでたことが幾つかあった。

まず第一に問題となったのは、セジメント・トラップの設置点、つまりセジメント・トラップの錐はどこに着底しているかということであった。繫留系の設置では、前にも述べたように最後に錐を投入す

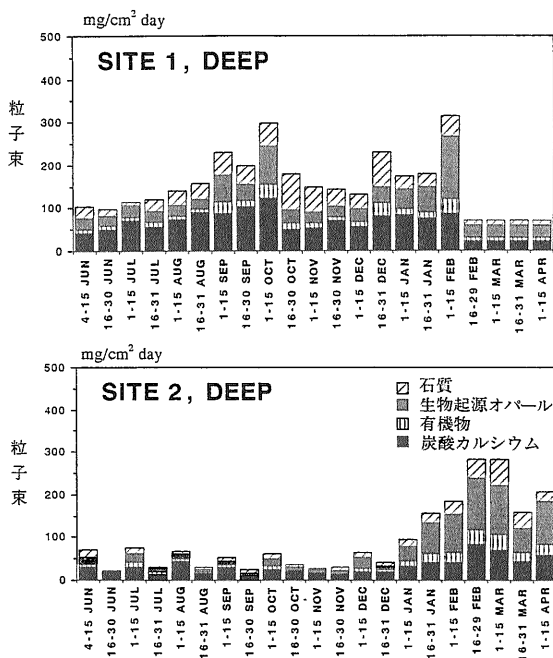
る。今回の回収に際して、回収の確度を増すために、錐投入位置のみならず、レーダーにより確認している錐投入時の最上部の信号ブイの位置をもワイヤーで囲むように操船したが、これは非常に良かったと思われる。もし、繫留系が予想範囲内に存在していれば、ワイヤーはどこかでセジメント・トラップ繫留系のロープと接触するはずであるが、最初から予想した範囲がずれていると、繫留系の上の方でワイヤーが接触し、それより下の方は海底に残してきてしまった可能性もあるからである。結果として、セジメント・トラップ繫留系は錐投入位置からそれほど離れていない所に位置していたことがわかった。

次に、投入開始地点は、東北東の風と西南西へ向かう潮の流れから決定されたが、操船に関してはどの位置よりも都合のよい地点であったと考えられた。また、ドレッジ用ワイヤーの繰り出し量に関しては、今回繰り出した水深の1.5倍以上という長さは必要だと思われた。揚収時に注意深く観察されたところでは、ワイヤーの先端から約50 m 程には海底の泥がついていたので、先端が何度か海底の上をはったのは明かである。

さて、工夫して作った4つ目錨の効果があつたかどうかわからないが、繫留系のケプラーロープがコッターに引っ掛からなければ、その先の4つ目錨のどれかには、かかったであろうし、ウェイトが移動しないためのアンカーの役目も多少したのではないかと思われた。

また、今回運がよかったことの一つには海底が泥質であったことを挙げられる。もし岩盤だったら、この方法をそのまま行うことはできないだろう。

最後になってしまったが、今後同じような問題が生じた場合に、再び回収できるか聞かれても、誰もが「神のみぞ知る」としか言いようがない。というのは、世界中で繫留系を失った例は数多いからである。しかし、この回収を通じて感じたことは、繫留システムを完璧な形で投入することがまず不可欠であるということである。投入の前に、目視と手触りで長さ3.5 km の繫留のケプラーロープ全部に傷がないことを確認したし、ロープをつなぐステンレス製の道具(コデベル)等についても電触を防止すべく細工をした。投入予定地点付近の海底地形図も描き、比較的平らな測点を選択したし、セジメント



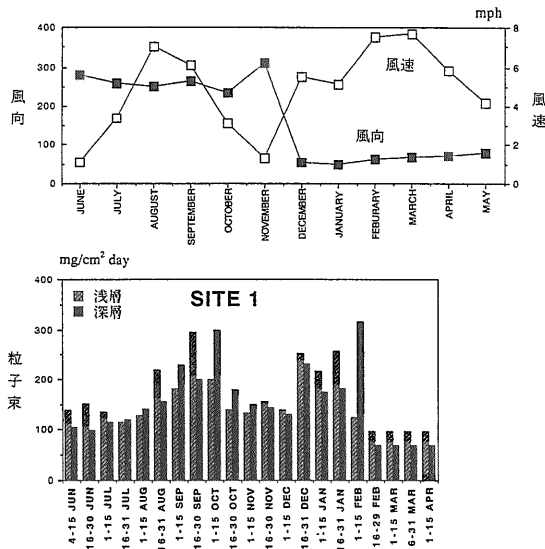
第7図 2観測点の全粒子束

・トラップ繫留系の設置点を求めるために錐の投入後に3点測量の要領で地点の確認を行った。たぶん、このような準備をしたために必ずここにセジメント・トラップ繫留系があるはずであると皆が確信できたのだらうと思う。

## 5. 回収試料から何がわかったか

このように苦勞して回収した試料は、それに値するような結果をもたらしたであろうか？ ここではその中から一部を紹介しよう。

外洋域で行われるセジメント・トラップ実験では一つの地点がかなりの範囲の代表点として扱われることが多い。今回これがいつも成り立つかどうかを調べるために、測点1と2を選んで比較検討した。両地点の距離は、たった140 kmであるにもかかわらず、異なった流量パターンが観察された。粒子束の大きさや質を基に、大きく3つに期間を分類できた；冬季(12月下旬～4月；両地点で全粒子束が大きい)、春秋期(6月～7月, 11月～12月上旬；全粒子束が小さい)、夏期(8月～10月；測点1では全粒子束が多くなるが、測点2では小さいままである)(第7図)。さて、夏場には測点1で見られる石質



第8図 測点1の粒子束とパラオで観測された風速との比較。

粒子束は測点2より大きくなるが、石質成分には西カロリン海盆でセジメント・トラップ実験を開始した6月半ばに爆発したピナツポ火山起源のガラスが含まれていた。この解析から、両測点が夏期には異なった水塊に属していたことがわかった。

次に、測点1に注目してみると、測点に最も近い陸上気象観測点であるパラオ諸島のコナールでの風速と沈降粒子の粒子束の大きさの間には正の相関が認められた(第8図)。風速は夏場と冬場に大きくなり、この時期には全粒子束も大きくなるが、春と秋には風速は小さくなり全粒子束も小さくなる。これは、湧昇流や有光層の厚さ等の変化を通じて、沈降粒子の形成に風の影響があったものと考えられる。さらに注目されるのは、粒子の組成を解析すると、夏場と冬場の粒子組成が異なることである。すなわち、夏場は春や秋と同様炭酸カルシウム殻をもつプランクトンの集団が卓越するが、冬場には生物起源オパール殻をもつプランクトンの集団が卓越していた。粒子状物質による二酸化炭素吸収について考えると、この海域は冬場には効率よく二酸化炭素を吸収していたが、他の時期には大気と海洋間で顕著な二酸化炭素の移動はなかったことがわかった。このように、二酸化炭素の問題は、海洋生物の活動と関係があり、これが気候要素と明かに関係をもつ



写真1 航海を終えて船橋基地にて白嶺丸と海老原船長(右)、工藤甲板長(左)。

ていることが明らかになったことは重要である。

謝辞：本セジメント・トラップ回収にあたっては、海老原船長と西村調査研究団長の指導の下に行われた。また、工藤甲板長をはじめ船員や調査団員にも大変お世話になった。特に、海底のドレッジに精通する方々の経験と判断は私にとって大変勉強になった。回収の作業記載に正確を記すため、白嶺丸に残された公式ログを参照した。本セジメント・トラップは科学技術振興調整費「海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究」で購入したものである。また、日油技研の笠貫 登氏には切り離し装置の仕組みについて教えて頂いた。また、本原稿を白嶺丸の海老原船長と西村調査団長に読んでいただきコメントを得た。皆様に感謝します。

引用文献

川幡穂高(1992)：外洋域における粒子状物質の挙動。地質ニュース, 452, 19-29.  
 川幡穂高(1993a)：ドイツの海洋環境研究—とくにセジメント・トラップ実験と古環境の研究について—。地質ニュース, 465, 58-68.  
 川幡穂高(1993b)：地質調査所がとりくむ粒子状物質の研究。水路協会誌, 6, 1-11.  
 渡辺和明・村上文敏・西村 昭(1993)：西カロリン海盆トラップ投入点付近の海底地形。工業技術院平成4年度研究概要報告書「物質循環に関わる海洋地質学的研究」, 145-152.

KAWAHATA Hodaka (1994): Recovery of sediment-trap mooring system from the 5 km deep seafloor by dredging

<受付：1994年1月5日>