

—金沢大学サテライト・プラザ ミニ講演—

会場 金沢大学サテライト・プラザ

日時 平成13年4月25日(木)午後5:30~6:30

テーマ 「海洋にプルトニウムの動きを追う」

講師 中西 孝(金沢大学理学部教授)

はじめに

お忙しいところ、また、お疲れのところ、おいでいただきましてありがとうございます。また、今ほどは鈴木( )先生から過分のご紹介をいただきました。今回の受賞(海洋化学研究所の第16回海洋化学学術賞(通称、石橋賞))も、今まで受賞された方々の顔ぶれを拝見していると、私のようなものがもらえるはずもないもので、本当に光栄に思っている次第です。



このサテライト・プラザ(石川県立社会教育センターから金沢市西町教育研修館へ移転)は先々週の土曜日、4月14日に内輪だけで本当にひっそりと仮オープンしました。そのように内輪だけでするセレモニーも結構いい味があるという感じでいましたが、まさかこんなにすぐにミニ講座を担当するなどとは思っていませんでした。このようにアレンジしていただきましてありがとうございます。今週の土曜日には京都で話(受賞講演)をしなければなりません、まだ準備の最中で、今日はその途中のところを簡単にお話しさせていただけたらと思います。

実は私がこのミニ講座で話すのは今日が2回目で、去年の9月30日にも話をしています。この日は忘れられない日で、JCOの事故が2年前の1999年に起こり、ちょうど去年の9月30日がその1周年でしたから、東海村臨界事故の話でもしようかと思っていました。しかし、こちらにおられる坂本先生から教えていただいた元素の起源の話の方が化学屋として適しているかと考えまして、そういう話(「僕らはみんな星のかけら」)をさせていただきました。そのときは、講義録も作っていただきました。またそのときに、大学の外でどのような話をできるかというメニューもこのOHPのように示させていただきましたが、ネタとしてはせいぜい5つ~6つほどしか持っていません。5~6つに分けてみましたが、元を正せば全部放射能とか放射線に関するもので、根っこは同じです。ですから、そんなにたくさん話のネタを持っているわけではありません。しかし、世の中にはすごい人がいるものです。この写真は三遊亭圓生、といっても六代目の圓生ですが、ここに書いてある

ように 1979 年に亡くなっておられます。非常にかっちりした話をする噺家ででした。この方は落語の名人といわれていますが、なぜ名人なのかというと、話の筋をきちんと覚えていて、いつでも話せる話が 300 ほどあったというのです。これはすごいことです。これは圓生の落語を文庫本に収録したものでありますが、この上・下 2 冊に入っている噺の数が 25 です。300 も話せるということは、この 10 倍以上で、驚きというほかありません。名人と言われるためにはそれだけでなければいけないのです。20 年・30 年かかってたたき上げた真打ちで話せる話の数が大体 100、駆け出しだと片手で数えられるぐらいですから、私はまだ駆け出しです。そのようなことで、あまり話をしているとネタがだんだん尽きてきます。今日はこれでまた 1 つネタが減ります。

さて、このたび石橋賞をいただくことになりましたが、さきほどのご紹介にありましたように、石橋先生というのは金沢大学の第 2 代の学長です。私が大学に入ったときに石橋先生が学長で、観光会館で先生のお話（告辞）を聞きました。「君たち若い人たちは、これから成長していくときに偉い人を見かけたら、その人に話しかけて何か話を聞きなさい」と言われたのを今でも覚えています。それで早速、石橋先生の学長室へ大学 1 年生ながらノコノコと出かけていった記憶がありますが、そのときもお話を伺うことができました。ご専門が分析化学で、私も化学をやっている関係上化学科の中の雑誌会にも来ていただいてお話を伺ったりと、石橋先生には教えていただいたことがたくさんあります。

金沢大学の現在の学長は 9 代目で、その前の 8 代目までの学長の写真が学長室隣の特別室に飾ってあります。私は初代学長の戸田先生は存じ上げておりません。戸田先生は 12 年間学長をされていましたが、お辞めになってまもなく亡くなられました。しかも、戸田先生が学長をされていたときは私はまだ高校生でした。したがって戸田先生は存じ上げていませんが、次の石橋学長から岡田学長そして現在の林学長まで、一応すべての方々と少しずつですがお話しさせていただいたことがあります。それくらいずっと私は学生のころから金沢大学におります。

石橋先生が金沢大学の学長をされていたことは、この写真のほかに、以前は城内キャンパスの石川門の前にこのような標石が建っていて現在は角間の大学本部の前に置いてありますが、この標石にも示されています。この「金沢大学」の字は石橋先生がお書きになったものです。石川門前に置かせてもらえなくて、今は角間の大学本部の前に移されています。あまりこれをしげしげと見ておられる方はおられないと思いますが、昭和 42 年 9 月にこれをお書きになっています。ですから、これは石橋先生が金沢大学の学長をお辞めになるときに書かれたものということになります。

## 1. 環境の放射能研究を始めたきっかけ

今、石橋先生と私の関係を少しお話ししましたが、この表は自分の年齢を軸にして金沢大学のことと主な出来事を年表形式でまとめてみたものです。私が生まれたその次の年、1945 年に広島と長崎の原爆があり、昭和 24 (1949) 年に金沢大学が設置されました。私は

現在、環境の放射能を扱っていますが、その中で広島・長崎のことを今もやっています。もう 20 年近く広島・長崎をやっていることになります。そしてビキニ事件がありました。これは私がまだ小学生のころの話です。大学に入ったのは、大気圏内核実験が盛んに行われていた頃でした。ビキニ事件があったあとで、放射化学講座が金沢大学にできましたが、その阪上（さかのうえ）先生のもとに入り、そこで教えていただいてから、環境の放射能のことを始めたわけです。石橋先生が金沢大学の学長をされていた期間と私が学生であった期間がこれだけ重なっていますが、大学院の修士課程を出てそのまま助手になって、以後ずっと金沢大学におります。そして、今日お話をする機会を与えていただくに至りました。

しかし、いきなり環境のことを始めたわけではなく、学部のあるところ、あるいは大学院のあるところは全然環境とは関係のないことをしていました。ドイツへ 2 年間ほど行き、帰ってきてから、科学技術庁でプルトニウム分析法をつくるという作業があり、阪上先生がその班長をされていた関係から、そのお手伝いをさせていただいたのです。プルトニウムは大気圏内の核実験で地球環境にばらまかれましたが、この頃それがどのように環境に分布しているのかを調べるための分析法をつくったのです。つまり、どのくらい汚染されているのか、何をもって正常といい、何をもって異常というかというバックグラウンドを押さえる必要があるということで、その一環として 1978 年に初めて船に乗って海のプルトニウムの分析を始めました。それは私が 34 歳のときで、もう歳をとってしまっていました。若い人は 20 代から船に乗っていますが、私が乗った頃はすでに私は老人の口だったのです。

その他いろいろと放射化学の研究を行っています。それは、おおざっぱな言い方をすると、放射性元素をとおして物質や地球環境を観るということです。海洋の研究はその一部という位置づけになります。そのほかにもいろいろ放射性元素の定量法の研究をしていますが、海洋プルトニウムもその 1 つの応用という感じです。

## 2. 海洋プルトニウムの研究に着手

今までどれくらい船に乗ってきたかを少しまとめてみましたところ、このようになりました。全部で 14 回乗っていますが、乗船日数は 400 日をようやく超える程度です。本当に海洋を研究している人はこのような桁ではなく、何千日というすごい人がこの世界にはおられますから、私などは本当に片手間でやっているようなものでしかありません。

海を研究するためには船に乗らないといけないわけですが、これまでずっと乗っている船は東京大学海洋研究所の白鳳丸という船です。この写真は 2 代目の白鳳丸で、初代の白鳳丸があって、これが新しい白鳳丸ですが、名前は同じです。大きさが 3987 トンですから約 4000 トン、これは税金の関係でこのような端数にしてあるそうです。車でも 2000cc といいいますが、1900 いくつで 2000cc と言っているのと同じことです。それでずいぶん税金が安くなるらしいのです。長さは大体 100 メートル、幅が一番広いところで約 16 メートルです。これに乗り陸から離れてしまったら、この船の中の空間の中で生活と研究のすべて

を行わなければいけません。乗組員が現在は 30 人くらいですが、昔は 50 人くらいいました。こんなところにまで定割がきています。研究者が 30 人くらい乗りますから、全員で 60 人くらい乗ることになります。主に太平洋が研究の中心です。

過去約 20 年間くらいこのように海の研究をしてきていますが、このリストはそのようにして採ってきた試料を分析してくれた学生たちです。学部の卒業研究、あるいは修士課程の研究、博士課程も 1 人いますが、全部で 14 人います。女子学生に丸をつけていますが、名簿でも点をつけて男女を区別するとセクハラになると今は言われます。女子学生が 9 人、男子学生が 5 人で、圧倒的に女子学生のお世話になっている研究です。

### 3. なぜプルトニウムなのか

先ほども少し触れましたが、プルトニウムが我々の地球の上に現れたのが 1945 年です。これは長崎原爆というかたちで我々の目の前に現れたこととなります。それまではほんの微量が自然環境にもあることはわかっていましたが、大量に我々の目の前に現れたのは 1945 年です。それから大気圏内核実験が 1980 年まで続いています。広島原爆はウランを使っているのだから広島だけは別で、あとの原爆・水爆は全部プルトニウムを使っています。

ところで爆弾のプルトニウムが全部燃えているかという点、ほんの数%しか燃えていないのです。あとの燃えなかったものは全部環境に散らばっているわけで、約 3.6 トンがこの環境にばらまかれたという推定がなされています。この半減期が大体 2 万 4000 年ですから、2 万 4000 年たってやっと半分になるわけで、なかなか我々の環境から消えて無くなってくれません。これが自然に無くなっていくのを待っているしかないのか、あるいは汚染したものがうまく環境から消えてくれる仕掛けが何かあるのかが問題です。海洋は地球表面の約 70% を占めていますから、環境に放出されたプルトニウムのほとんどが海に入っているわけです。おおまかに言いますと、70% が海に入っています。それが海水の中からどのように除かれていくか、その生物地球化学的な性質や挙動を理解したいと思って研究してきました。

もう 1 つの背景は、今、原子力発電でプルトニウムをどんどん作り出していますから、この貯蔵量が増えています。そういう状況の中で、海というのはどれくらいプルトニウムの負荷に耐えられるシステムなのか、その辺を明らかにしたいということもあって、この研究をやってきました。

### 4. 海と船について

海は今言ったように地球表面の 70% 近くを占めています。深さは一番深いところで大体 10 キロ～11 キロ、1 万メートル強です。平均すると、大体 4000 メートルくらいです。海拔で一番高いところはエベレストの約 8.8 キロですから、それがすっぽり入ってしまうくらい深いところがあるということです。海水の量を計算してみても、すごいボリュームがこの地球上にあるわけで、これが「水惑星」といわれるゆえんでもあります。

海へ出ると位置の目安になるものが何もありません。周りを見ても水平線しかありませんし、雲しか見えません。海では海里やマイルという単位で距離を表しますが、子午線上の1分の距離が1海里と定義されています。我々が普通に使っているキロメートルで表すと約1.85キロメートルですが、このマイルを使うと船の場合は都合がいいのです。船の位置は常に緯度・経度でしか出てきませんから、目的地の緯度・経度がわかっていると、距離は全部子午線上の何度何分で出てきます。一方、船で1時間あたり1海里（1マイル）進むスピードを1ノットといい、次の測点へ行くまでに時間がどれくらい必要かということがマイル（距離）とノット（速度）からすぐに計算できてしまいます。慣れてしまえば、これは非常に便利な距離の単位です。

先程の写真の船（白鳳丸）は大体12ノットで走りますから、時速に直すと約22キロ、ちょうど自転車で走るくらいのゆっくりしたスピードです。しかし、24時間ひた走りまわすと500キロくらい走ります。1日に500キロしか走れないというか、500キロも走るというか、そのような乗りものです。東京港から出航するのですが、いつも出るのはお昼すぎ、午後2時と決まっています。なぜ、午後2時にしているかという、東京湾は深い湾なので、東京港を出て観音崎を過ぎるまでに夕暮れ（夕食）になるようにするためです。東京湾の外へ出ると黒潮が流れていてすごく波打っていて船がゆれるので、ご飯を食べてベッドに入る頃にここを突っ切るように船の出航時刻が決められています。突っ切るときには風が吹いていなくても結構揺れます。冬の季節風が吹いていればなおさらです。東京湾から富士山が見えたら強風が吹いていることはまちがいありませんから、みんな真っ青になります。

海のイメージは分かっている人には分かっていますが、実は海の底はこの図のようにでこぼこしています。真っ平らなイメージを持っている人がいますが、海底は結構でこぼこしています。ですから、こういうところで水を採ることは大変難しいのです。水面下の山に装置をぶつけないようにして水を採らなければいけないので、相当高度な設備を使わなくてはなりません。

## 5. 海洋を研究する意義

大ざっぱに言うと、現在海水はこのように循環していると考えられています（図1）。グリーンランド沖で冷やされて沈んで、ずっと大西洋を南下して南極のところに来て、1つはインド洋に行くのと、1つは太平洋に行くのと分かれる。そして、インド洋と北部北太平洋でわき上がって、インド洋から大西洋へと戻っていくということです。大体2000年で1周するというものです。それくらい気長な循環の中の現象を追いかけているのです。

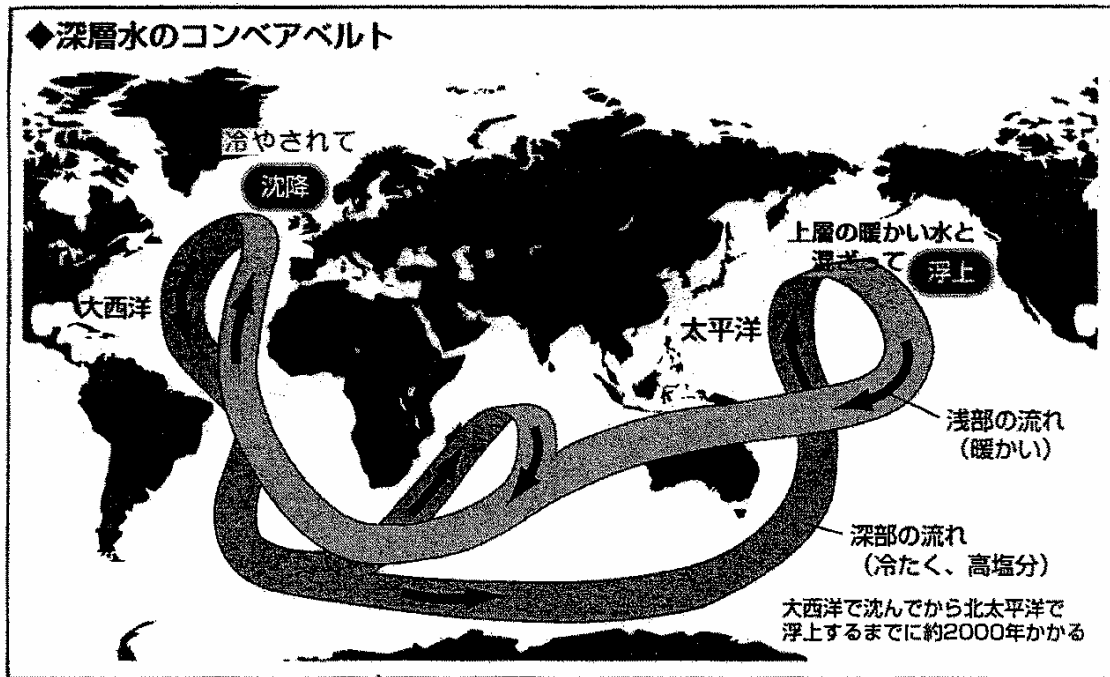


図1 深層海水の大循環（東京大学海洋研究所編「海洋のしくみ」、日本実業出版社（1997）から転載）

しかし、この海水循環像は非常に荒っぽいイメージであって、実際の細かいところはどうなっているのか、その辺が大事です。先程、海水の体積の値は出しませんでした。海水にはたくさんの熱が蓄えられています。地球の気候を住みやすい穏やかな環境にしているのは海のおかげであって、地球から水がなくなったら、ものすごく寒暖の差の激しい、過酷な環境になります。それを和らげてくれているのは海です。また、熱を運んでくれているわけでも、地球全体として一番低温のところと高温のところでは相当な差はありますが、 $100^{\circ}\text{C}$  くらいの範囲に収まっています。これは全く海のおかげです。今、気候変動が議論されていますが、そのためには、海水の循環をよく理解しなければいけません。

天気予報がなぜ当たらないかという、天気予報は大体が空気の流れの予測であって、空気は流体です。海水も流体です。お互いにどちらも非常に動きが複雑な代物です。そういうものの動きを正確に予想することは非常に難しいのです。固いものがどのように動くかは比較的精密に計算できます。例えば次の皆既日食はいつかというのはかなり正確に計算で予報できます。しかし、10年後の4月25日の天気はどうかという予想はまったくできません。1週間後でもあやしいし、1か月後ではさらにあやしいのです。結局、空気や海水の動きがまだよくわかっていなくて、予想できないから、そういう流体が関与する現象の予報はまだ困難なわけです。

## 6. 海の表面のプルトニウム汚染の状況

海水循環のようすを少しでもくわしく知ろうということで、いろいろな元素の分布が調べられています。これは周期表のかたちで表していますが、それぞれの元素のマス目の横軸に海水中の元素濃度、縦軸は深さで、深さによってそれぞれの元素濃度がどのように分布しているかを表しています。こういう絵が描けるようになったのはつい最近のことです。このようにしていろいろな元素を追いかけていって、海水がどのように循環しているかをたくさんの海洋科学者が調べているのです。私がやっているのはこの赤で囲んだプルトニウムとアメリカシウムと書いた、この辺だけです。一人で全部の元素をやることはとても大変だし、調べる意味のあるものとそうでないものいろいろありますから、このようにしていろいろと元素を手分けして研究しているのです。

私が海洋プルトニウムをやり始めて、最初に手がけたのは表面海水がどのように汚染されているかという実態を明らかにすることでした。この黒印で書いてあるのが1976～1984年です。1980年で大気圏内の核実験が終わっていますから、そこで区切りを入れています。これだけの海域（太平洋および隣接海）の汚染状況を今まで調べてきていますが、それをまとめてみますと、1980年代の前半までは汚染の高いところと低いところとで非常に大きな差がありました。ところが、1986年以降になると、表面の汚染は全体としてかなり平均化されてきています。そういうことが1つわかってきたわけです。

さらに、同じ場所で測定を続けることもしてきています。この北緯30度、東経147度というのは日本が放射性廃棄物を捨てようとして計画していた場所です。今は海へものを捨てることは一切禁止されていますからそれはできませんが、そういうことでこの海域ではたくさんの観測が行われています。我々もそこへ行ってたくさんの観測を行い、表面のプルトニウム濃度が経年的にどのように減っていくかをずっと追いかけることができました。

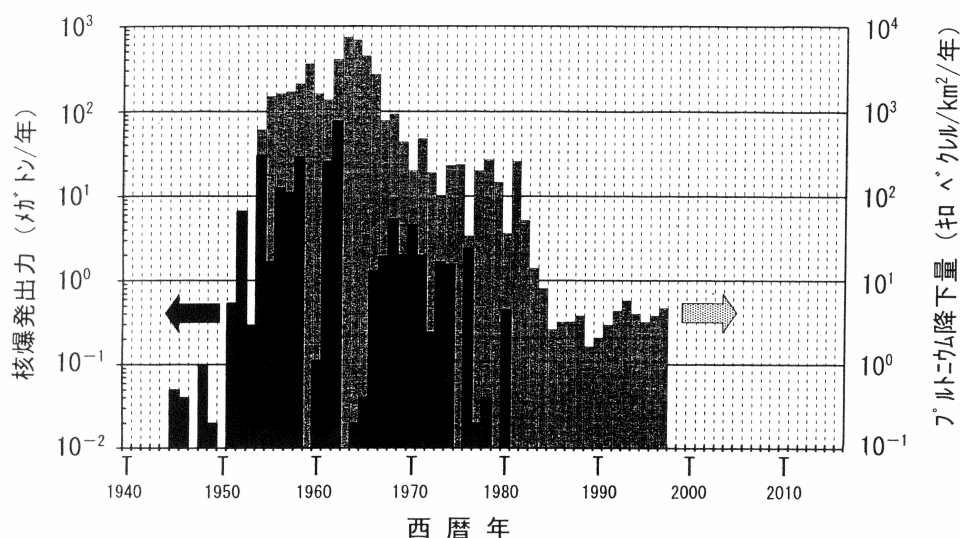


図2 大気圏内核実験の規模（国連科学委員会報告）と東京（および筑波）へのプルトニウム降下量（気象研究所報告）の経年変化

表層海水中のプルトニウム濃度は1985年くらいまではずっと減って行って、あとは変わらなくなっています。空から降ってくるプルトニウム量の変化がこれですが(図2)、この黒く塗ってあるのは核実験の規模を表しています。先程言ったように、核実験にはプルトニウムを使っていますから、結局これはプルトニウムをどれだけ出したかにほぼ比例しているわけです。この灰色で塗ってあるところが、年間でプルトニウムが1平方キロあたりどれだけ降ってきたかについて気象研究所で営々と測定されてきた結果の値です。空からの降り方の減り方、それから表面海水中の濃度の減り方をモデルに入れて解析すると、表面から100メートルくらいの深さまでのところにプルトニウムが存在している時間は大体4年くらいだという解析ができました。

1980年で大気圏内の核実験が終わって、その数年後から空から降ってくるプルトニウムは少なくなりましたが、なかなかゼロになってくれません(図2)。これはなぜだろうかというのが、その次の疑問です。現在、大気中からこれくらいはいつもプルトニウムが降ってきているわけです。核実験が終わってからすでに20年たちますが、いまだに降ってきています。すごいときはこの10倍、100倍、1000倍くらい降っていたことがあるので、ともするとラジオアイソトープ取扱施設の中よりも外の方が怖いという時代があったわけです。

## 7. 深いところの海水の採取と分析

表面のことはそのようにしてわかってきましたが、表面が変化している間に海の深いところではどうなっているのかが次の疑問になってきます。表面の水は船に乗ればどれだけでも好きなだけ汲めますが、深いところの海水を採るのは大変でした。深いところの水を大量に採ることができるようになったのは、日本では1980年くらいからです。それも初めは相当失敗の確率が高かったのです。深いところに水を採る入れ物を沈めて、そこでフタを閉めて持ち上げることは単純なように思えますが、その技術が難しいのです。

最近はこの写真のようになんかなり装置が進歩してきています。これは1つで約270リットルくらい採れる筒が4つ付いているので、1回沈めれば約1トンの水が採れます。我々の分析にはそれくらいの水が必要ですから、このような大きな採水器を沈めています。フタを開いたまま所定の深度まで沈めて行って、そこでフタを閉めて持ち上げてきます。たったそれだけのことですが、それが満足にできるようになったのは今から10年ほど前のことです。それまでは失敗の連続で、水が採れないことがずいぶんありました。

そして、こんなにたくさんの水を金沢まで持ってくるわけにはいきませんから、このように大きなバケツを金沢から日通で運んでいき、船の上で化学分離の処理をして持ち帰って金沢で分析をします。このように悪戦苦闘して採った海水は非常に貴重です。値段を計算して、ボリュームあたりに直すと上等なウイスキーよりもずっと高価な水ということになります。1航海に何億円というお金を使っていますから、経費を採った水全部の体積で割るとウイスキーよりも高価ということになってしまいます。

このように海水は非常に貴重な試料で、そう減多に採れるわけではありません。採水器



を下ろすスピード、上げてくるスピードは大体1秒間に1メートルしかありません。あまりスピードを速くすると、この装置は非常にデリケートですから壊れてしまいます。つまり1万メートル沈めるときには片道約1万秒、下げ上げで約6時間くらいボーッと待っているしかないのです。しかし、うまくフタが閉まって、きちんと上がってくるかドキドキ・ハラハラしながら待っている。海水が上がってくればこのような大きなバケツに入れて分析します。さらに、深いところの海水は貴重な試料ですから、採ったものからなるべくたくさんの成分を分析しなければいけません。ですから、船上では共同で採水作業をしています。この写真の中でここに立っているのは私です。水を採るときはみんなで協力してやらないと絶対に採れません。しかし、研究の上では、みんなライバルどうしなのです。ですから、呉越同舟というのはこのことであって、水を採る作業のときは敵・味方入り乱れて、みんな仲よくやって、分析が始まったらみんなはお互いにどんな知恵を働かせてデータを解析するか、分析の腕を競ったりします。これは実際に採った水からどれだけの成分を分離するかという一例ですが、とにかくできるだけたくさんのものを1つの水から順番にどんどん分離していくわけです。

このような逐次分離法を開発することも化学屋はやらなければいけません。また、海水をそのまま分析できませんから成分を濃縮しないといけないわけです。その濃縮法も科学技術庁マニュアルに書きましたが、鉄イオンを加えて沈殿させて集めて持って帰るということをするのですが、その入れる鉄イオンの量もそれまでの文献を見て決めていました。しかし、それでは分析値がおかしいということが分かり、少し鉄を余計に入れないといけないということが実際に何年もかかって分かってきました。

プルトニウムの化学というのは、海水の中でいろいろな化学状態をとるので非常にややこしいのです。ですから、プルトニウムは一筋縄でいかないわけで、海水の中から集めてくるためには、そういうことをきちんと念頭に置いてしなければいけません。プルトニウムは鉄共沈法という方法で集めてくるのですが、鉄の濃度が低いとプルトニウムの化学形（酸化状態）によって結果が違ってくるので、誤った結果が出ることになります。ですから、十分に鉄を入れてやらなければいけないということです。そのような分析法もこれまでの研究の過程で工夫してきたことです。

## 8. 深い海でのプルトニウム濃度の変化

そのようにして苦心して採ってきた深いところの海水を分析して得られた結果がこの図に示してあります。これからお見せするのは伊豆・小笠原海溝と日本海溝についてのデータで、10年間にどれくらいこの深いところのプルトニウム濃度が変化してきたかということを示しますが、最近やっと分かりました。

これは伊豆・小笠原海溝の例です。これが1984年の深度分布で、表面から数百メートルに非常に高い濃度のところがあって、さらに深いところでは低濃度になっていきます。そういうことが1984年の段階でわかってきましたが、10年後の1994年にもう一度同じ場所

で調べてみますと数百メートルの深さのところの濃度が減っています。ところがさらに深いところで増えているということで、海水の中をプルトニウムがどのように沈んでいくかという変化を解析できる見込みになってきました。重要な点は、一度プルトニウムで海水を汚染してしまうと、なかなか汚染が抜けないということです。以前はプルトニウムで海水を汚染しても、すぐにそんなものは取り除かれてしまうと思われていましたが、そうではないことがこれで分かってきました。

プルトニウムの沈降の仕方は、これも場所によっても違います。三陸沖の日本海溝では、この線のような1984年の濃度の深度分布が1994年になると、深度数百メートルのところの濃度がガクンと減っています。ここは表面でプランクトンがたくさん繁殖して、沈降粒子がたくさん生産されている場所です。そういうところではプルトニウムはどんどん取り除かれています。ですから、海水の汚染を取り除くためには、何かプルトニウムをどんどん沈めてくれるものがあればいいのだということです。

しかし、陸地の近くでのみプランクトンが多くて、太平洋の真ん中ではほとんど生き物がいません。船に乗るという話をすると、「いつもたくさん魚が捕れて、新鮮なお刺身が食べられるのでしょね」とよく言われますが、とんでもありません。私たちは魚のいないところにしか連れていってもらえないのです。太平洋の真ん中は海の砂漠のようなところで、生き物はほとんどいません。たまに魚はいますが、魚を十分に養う栄養がそこに無いのです。太平洋の真ん中はそのような栄養の少ない海ですから、魚を捕って毎日新鮮なお刺身が食べられるというわけではなく、船の中では東京で積んできた冷凍の魚のまぜいお刺身しか食べることができません。

ところで、先程お話した濃度の高いところのプルトニウムについては、それが本当に溶けている状態かどうかを確かめる実験も行いました。特殊なろ過をやりますと、ほとんどプルトニウムは溶けた状態であることが分かりました。なかなか海水中から沈降してくれないというやっかいなことになるわけです。

先程の伊豆・小笠原海溝域のプルトニウム濃度の深度分布をもう一度見てみます。海溝というのは1万メートルまでの深さがあるのですが、海溝の外の平坦なところが大体6000メートルぐらいです。平坦なところから、海溝の底へと4000メートルぐらい深くなっていますが、海溝内の海水はいったいどのように循環しているのか。いろいろ放射性元素を調べてみると、そんなに変わったことがこの深い溝のようなところで起こっているのではなく、海溝の中と外で結構海水が入れ替わっているということも分かってきました。海溝というと地図を見るとものすごく深い溝のように見えますが、大体30キロほど水平に行くと約3000メートル深くなるというスロープです。ですから、スロープは約10%、角間の県道は最大5%のスロープだそうですから、あれの2倍ぐらいのスロープでだらだらと深くなっていくような感じです。そこには閉ざされた水があるのではないかと考えられていましたが、海溝の外と結構海水の循環があり、水が活発に入れ替わっていることがこういうデータから分かってきました。

## 9. 海底堆積物中のプルトニウム同位体

そのようにして海水のことを調べてきましたが、そのうちに深海底の堆積物も採れるようになってきました。深海底の堆積物を採ることにおいても、まともな試料が採れるまでに年月がかかってしまいましたが、これもやっと 10 年ほど前からまともな試料があちこちで採れるようになりました。そして、海底にいったいどれくらいのプルトニウムがたまっているのだろうかという疑問がその次に起こってきますが、その前に分析法をきちんと確立しなければいけません。単に濃硝酸でグツグツ煮ただけでは、完全には溶出してきません。堆積物を完全に分解してしまわないと、海底堆積物の中に含まれているプルトニウムは正確に定量できません。これはドクターコースの学生が行ってくれた仕事ですが、その結果もそれまでいわれていたこととは違いました。

また、海底堆積物を調べることによって、海水の中をプルトニウムを海底まで運んでくれている物質が何かということ調べてみようということになりました。有機物に含まれているプルトニウムの全部のプルトニウムに対する割合を解析して、有機物がプルトニウムを運んでいるのではないかとということが少しずつ分かってきました。また、海水の中をプルトニウムがどれくらいのスピードで落ちているのかということについては、海水の中の深度分布と海底堆積物にどれだけあるかということ解析して、数千メートルの海水の中をプルトニウムがどのようなスピードで落ちてきたかということが分かってきました。

いくつかの場所で解析した結果、1 年間で早いところで約 250 メートル、モデルによって少し違いますが、遅いところになると、百数十メートルです。ですから 1 年間に 100 メートルから二百数十メートルというスピードでプルトニウムは沈降しているのです。

また、先程からお話ししている核実験でできたプルトニウム（プルトニウム-239, 240）以外に、もう 1 つプルトニウムの別の同位体が深海堆積物中に見えているということが分かりました。これは 1964 年、私が大学に入った次の年に、半減期が約 88 年のプルトニウム-238 を積んでいた衛星が軌道に乗り損ねて、インド洋上空の約 50 キロメートルで自爆するという事件がありました。地球の形を図に描くと 50 キロメートルは線の太さにもならないくらいの高さです。地上すれすれのところでプルトニウム-238 が大気圏に放出されたのです。これをトレーサー（目印）にして、プルトニウムがどのように海水の中を動いたのだろうかということを知ることができると考え、海底堆積物中のプルトニウムの同位体を調べていきました。そうすると、ほとんどの海底堆積物中のプルトニウム同位体組成は同緯度の地表での値と同じですが、ベーリング海のあたり、あるいはアリューシャン列島の少し南のあたりにプルトニウム-238/プルトニウム-239, 240 比の高いところがあることが分かりました。インド洋の上空でばらまかれたものが、どのようにして北部北太平洋に集まってしまうのかという疑問が、新たな疑問として出てきました。今はこれをどのように解釈していいのかを次の新しい課題としています。

## 10. 陸から外洋に輸送されている土壌粒子塵のトレーサとしてのプルトニウム

先程、大気から地表へのプルトニウム降下率は最近はあまり変化しなくなったと言いましたが（図2）、なぜ一定なのか。さらに、これをうまく使う手がないかということを考えました。結局、地上に一旦降ったプルトニウムは土壌粒子などにくっついて土壌粒子と一緒に再浮遊しているからであり、このプルトニウムを追っかけていけば、今度は陸地から土壌粒子塵がどのように海に運ばれているかという解析ができるのではないかと考えました。

核実験が行われなくなってしまって、新たに大気に付け加わるプルトニウムがありませんから、このプルトニウム降下率一定の部分ではたぶん地表に一度降ったものが、風で舞い上がって運ばれてきたのだらうと考えました（図2）。先程、太平洋の真ん中はほとんど生き物がないと言いましたが、このようなところにいる生き物にとってこの土壌粒子というのはものすごい栄養源になるのです。土壌はいろいろなミネラルを含んでいますから、そういうものがたくさんあるとプランクトンが繁殖して、魚がたくさん生息します。要するに、太平洋の真ん中にこういうものが運ばれていく量が少ないので、生き物が十分にそこで生きることができない、十分な数の生き物をそこで養うことができないということです。

プルトニウムを追いかけていくことによって、太平洋にどれだけ陸地から土壌粒子が運ばれているかという解析をやった結果がこれです。ほかの方法と大体同じような値が出たと言えるのではないのでしょうか。1年間に1平方センチメートルあたり数ミリグラムという量の埃が運ばれて太平洋におけるプランクトンの栄養源になっているわけです。そして、たくさんプランクトンが繁殖してくれれば、二酸化炭素を吸収してくれるわけです。今、二酸化炭素の増加が問題になっていますが、太平洋はどれくらいの二酸化炭素を吸収する能力があるのだらうかということが、よくわからないのです。それがわかれば、二酸化炭素問題の解決に果たす太平洋の役割がかなり明確になってくるのだらうということで、そういう評価もプルトニウムを使ってできるようになりました。

つい最近、インターネットを見ていたら、今年は黄砂がたくさん飛んできているそうです。車に乗っておられる方は車の汚れがひどいと感じていると思います。衛星からはこのように黄砂が飛んでいる様子が見えるそうです。これは先週の新聞の記事ですが、世界中にこの黄砂が循環しているそうです。こういうものが太平洋などに落下した場合、海の生き物がどのようになっているのか、非常に興味深いところです。本当は、今すぐにも太平洋の真ん中に行って調べたいところですが、なかなかそういう時間が私にありませんから、だれかがやってくれるのを待っています。

## 11. 太陽系外から来たプルトニウム同位体の探索

最後は、こちらにおられます坂本先生のアイデアで行った仕事ですが、1971年に地球の特殊な岩石からプルトニウム-244が発見されました。分かっている方にはものすごいニ

ユースでした。新聞でも大きなニュースになりました。このプルトニウム-244の半減期は約0.8億年です。太陽系（地球）の年齢は大体46億年ですから、プルトニウム-244が地球上に見つかるということは、地球誕生時に地球に取り込まれたプルトニウム-244がその岩石に相当に濃縮されたことになります。46億年がたちますと、半減期0.8億年のものは相当減ってしまいますから、このプルトニウム-244は今も地球上に降ってきているものではないかと坂本先生が考えられて、それを確かめる実験をしました。このように太陽系は銀河系の中を動いていますが、このような銀河系の中でときどき超新星の爆発があります。プルトニウム-244はそういうときでないとできない同位体ですが、超新星爆発のあとを通ったときに地球上にプルトニウム-244が入ってきて、それがたまたま濃縮されて地球の岩石から見つかったのではないかという仮説を立てられました。

そうであれば、現在の海底堆積物表層を調べてもプルトニウム-244が見つかるのではないかということで、数年前から分析を始めています。ハワイ沖で採ってきた堆積物約80キログラム（湿）、一人ではとても持てませんが、それを分析しました。実際に分析したのは1キログラム（乾）で、しかも、回収率が悪くて正味では400グラムくらいしか分析していないことになりましたが、それからプルトニウムを分離して、延々と2年間かかってこのアルファ線測定をしました。しかし、目指すプルトニウム-244は我々の測定器では見つかりませんでした。上限値しか出せませんでした。そういうことで2年間測定して、測定をストップして、その試料をイスラエルへ送りました。

イスラエルで最新の質量分析器を使って調べてみると、2時間半ほどかけてやっと1個信号が出て、プルトニウム-244があったということになり喜んだのですが、これは核実験でできたものとして説明ができることになりました。核実験でできたものがこの青丸で書いてあり、実際の我々の堆積物から分離したプルトニウムをイスラエルで分析した結果がこの赤い三角ですが、ほとんど核実験の影響で説明できてしまうということになりました。今のところ太陽系の外からプルトニウム-244が入ってきているということに関しては、上限値しか押さえられていませんが、この研究はイスラエルで科研費を申請しています。私も今年申請しましたが、外れてしまいました。これはこれからまだまだ続けていけるおもしろい研究課題だと思います。

以上、この20年間やってきたことをザッとお話しさせていただきました。非常に雑ぱくで、何を話しているのか分かりにくかったかもしれませんが、質問をしていただいでお答えすることにして、ここで一応終わりにさせていただきたいと思います。ありがとうございました。