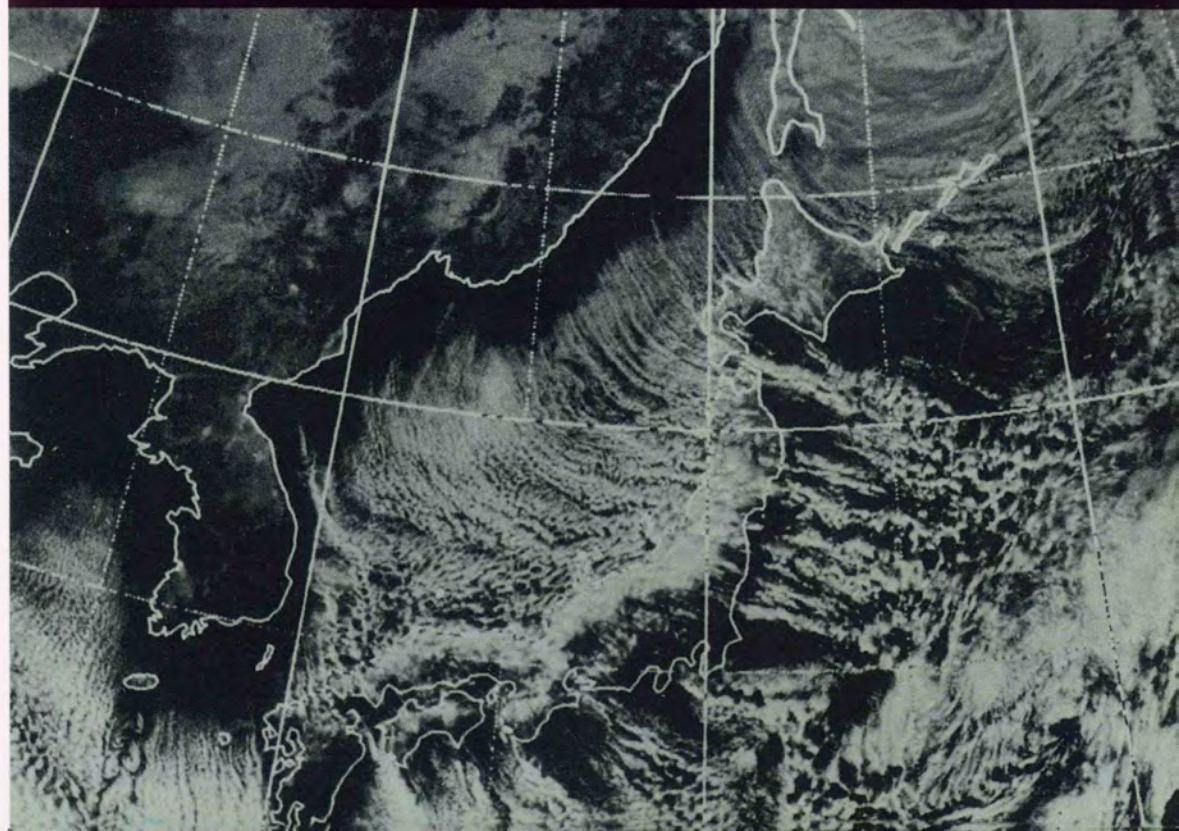
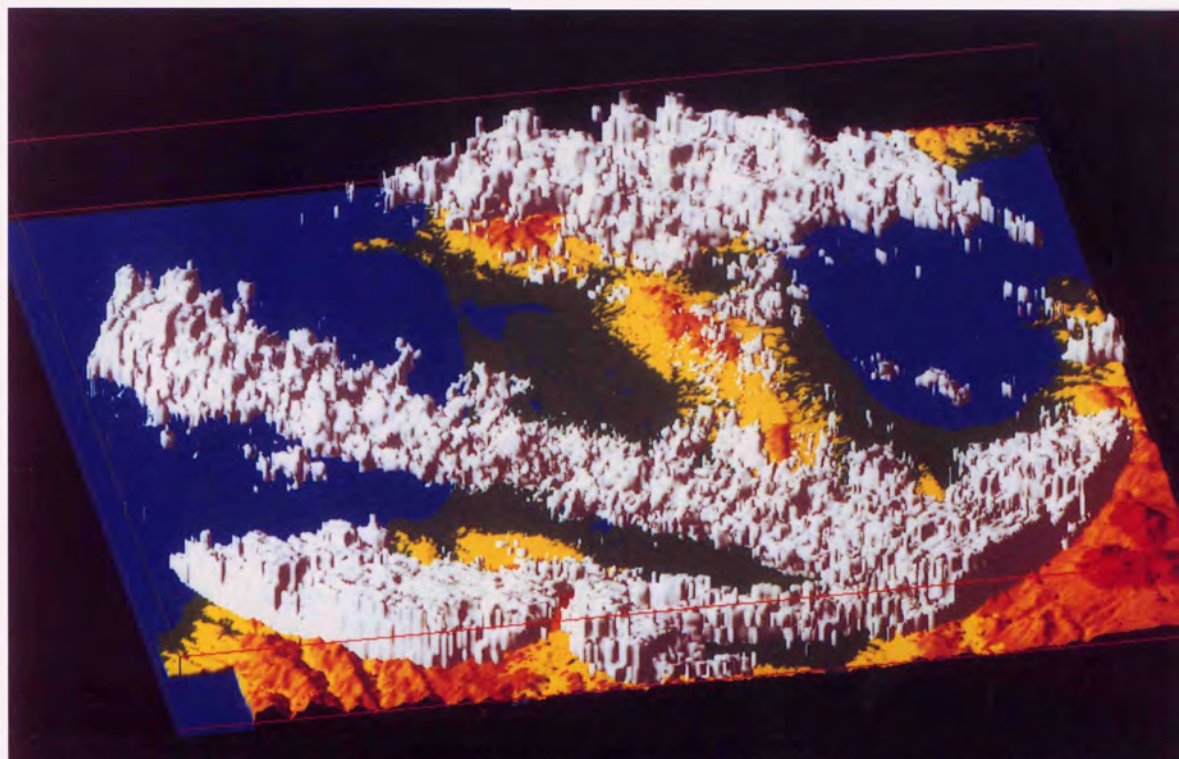


ISSN 0454-1871

防災科学技術 No.69 1992 March

科学技術庁 防災科学技術研究所



も く じ

国際防災の十年の進捗状況	木下 武雄・1
海洋熱塩循環と気候変動	松浦 知徳・6
連繫しあう自然災害	大八木規夫・16
震源ポーリング	塚原 弘昭・20
広帯域地震観測の現状	堀 貞喜・28
ネットワーク MT 法の紹介	上嶋 誠・31
雪氷コアによる地球規模酸性化の解明	東 久美子・41
1991 年の災害をふりかえって	小見波正隆・47
表紙につなんで	編 集 部・50

表 紙 説 明

3次元表示されたレーダーエコー〔1989年1月28日16時10分、13 dBZ（中程度の降雪強度に相当する単位）〕

吹雪や豪雪をもたらす降雪雲について、ドップラーレーダー等を用いた研究を行っています。

写真は、青森県津軽平野で観測された降雪雲を、3次元CG（コンピューターグラフィック）を用いて表示したものである。降雪雲の下では吹雪となっている。

（地形の表示には、国土地理院の高度数値情報を使用）

国際防災の十年の進捗状況

木下 武雄

1. はじめに

国際防災の十年(International Decade for Natural Disaster Reduction IDNDRと略す)は米国のF. プレス博士の提唱で議論が始まったが、国連が総会で決議したことで正式に開始したものである。1990年代を自然災害軽減のための国際的な協力の十年としようというのがその趣旨である。

2. 防災とは

IDNDRに関する国連の文書(1989年12月22日第85会総会 決議44/236)によれば、防災とはdisaster preventionではなく「自然災害の軽減」が元のコトバである。災害現象を止めることはできない。しかし災害を減らすことはできるといのが、基本的な考え方である。

災害とは何か? 同文書によれば人命の損失、資産の損害、社会・経済の崩壊の3つである。人命の損失には死者・行方不明者に加えて、負傷者も含めて考えるべきだし、遺族の悲しみの慰めと生活再建、さらにはコミュニティの再建を考えなくてはならないだろう。資産の損害には個人・公共の資産が共に考慮されるべきであるし、目に見える資産から目に見えない社会の資産-例えば伝統・文化までを含めるべきと思う。社会・経済の崩壊には多言を要しないであろう。それらを軽減することが目的とされる。

それらの災害を起こす原因現象として、地震・暴風・津波・洪水・地すべり・火山噴火・自然火災・バツタイナゴの来襲・干ばつ・砂漠化・その他自然原因による異変が挙げられている。暴風の中には竜巻・台風が含まれているし、高波・高潮も考えるべきである。他方、火災については人為的火災は含まれない。内乱・戦争を原因現象にはとり上げていないし、化学工場からの有毒物質の放出なども挙げていない。別途UNDROや赤十

字は人道的立場から、これら人為的災害の救援も行っているが。

3. 目標をどこにおくか

防災というコトバの内容の広さは前節で理解されたい。では目標をどこにおくか。

- (1) 各国、特に発展途上国で自然災害の影響を軽減する能力をつけること。具体的には災害の可能性を前もって明らかにすること、早期警報システム、災害に強い構造物を作ることである。
- (2) 現在ある科学・技術を有効に利用して、防災の指針や戦略を作成する。それぞれの国の文化、経済の違いには配慮せねばならない。
- (3) 防災のために、今不足している知識を補うため科学・工学の分野での努力を守り育てる。
- (4) 防災対策の技術情報を現存するものから最新のものまでを一般に普及させる。
- (5) 技術援助・技術移転のプログラム、例示プロジェクト、教育訓練を通して、自然災害を事前に知り、予知し、防ぎ、軽減する手法を開発する。それらのプログラムの進行が効果的であったかを評価する。

4. 各国レベルですべきこと

- (1) 国の防災計画を作成する。国の経済・土地利用・保険などの政策を立て国の開発計画の中へ総合して組み込む。
- (2) IDNDRの国際活動に参画し、科学・技術や他の分野を併せて、国内委員会を創立する。
- (3) 地方自治体を力づけて公的・私的の分野からの必要な支援をすすめる。
- (4) それぞれの国の計画を国連事務総長に報告する。国連は情報交換や国際活動の調整の中心となるであろう。
- (5) 危険の確率・防災の意義・短期復旧について

一般人の関心を高める方策を作る。ニュース報道機関の特別の役割を考慮して教育・訓練を通してコミュニティの準備態勢を整える。

- (6) 健康に及ぼす災害の影響に注目する。特に病院・保健所の危険性を減らす。食糧貯蔵所・非難所その他社会施設への影響に注目する。
- (7) 非常用品の貯蔵と用途指定をしておいて、国際的に素早い対応をできるようにする。

5. 国連の組織

国連の中には次の3つの組織がある。

(1) 特別上級理事会

事務総長の依頼により作る。現在、10人であるが、国際的に傑出した少数の人によって構成される。事務総長に IDNDR についての全体的な助言を与え、一般の人々の関心を高めるように適切な行動をし公的・私的な分野からの支援をうるように務めるのが役割である。日本からは福田赳夫元総理が出ておられる。米国からはクェール副大統領夫人が出ておられる。

(2) 科学技術委員会

事務総長の依頼により作る。現在24人であるが、地理的代表性と防災分野の多様化とを考慮して、各国の了解の下に決められた科学技術の専門家によって構成される。役割は IDNDR の全体計画を作ること、活動を評価すること、事務総長へ年次報告において全体計画についての勧告を作成することである。日本からは筆者が参加している。これまで2回の会議を開き、第3回が今年3月16日から一週間ジュネーブで開かれる。

(3) 事務局

事務総長の依頼により小さい事務局を作る。経常外予算でまかなわれる。事務局はジュネーブの国連事務所の中に置き、国連災害救援活動調整官事務所 (UNDRO) と密接に連絡をとることとする。事務局は活動に関する日々の調整を行う責任があり、特別上級理事会・科学技術委員会への事務局としての支援を行う。

6. 日本の国内態勢

国際的な活動の様相の概略は述べたが、国内で

はどうなっているか。

- (1) 国際防災の10年推進本部が次のようにできている。

本部長 内閣総理大臣

副本部長 科学技術庁長官 運輸大臣

国土庁長官 建設大臣

外務大臣 自治大臣

本部長 22名の事務次官等により構成される

- (2) 国際防災の十年国民会議

上記の推進本部・地方公共団体・民間等よりなる幅広い IDNDR 活動母体である。平成2年8月27日発足した。

- (3) この他にも各組織が陰に陽にこの活動の支援をして下さっているのは喜ばしいことである。例えば、各省庁は IDNDR に関する推進室を設けて、IDNDR ニュースには積極的に報告記事を載せている。東京・横浜・鹿児島など多くの自治体では国際会議を開くなどの活動、住民に対する防災活動の重要性の普及・啓発を行っている。

大学関係でも、すでに防災を冠した組織のある所、さらに新組織を作った所いろいろの歩調で国際的な防災の研究と教育を推進している。

日本学術会議は学術に関する総合的な推進・諮問機関であって、災害工学研究連絡委員会及び他の委員会の協同の下に IDNDR に貢献している。

7. 科学技術委員会 (STC) の活動

STC は24名の専門家によって構成されている。5(2)で地理的代表性と述べたのは、委員がヨーロッパに片寄るとかアジアが多いとかがないようにすることを指す。分野の多様性と述べたのは地震・洪水などの分野が片寄らないようにすることを指す。具体的には日本から洪水、中国:地震、フィリピン:気象災害、米国:地震…といった具合である。

これまでの会合は

準備会がイタリアで 1990年11月

第1回 ドイツ 1991年3月

第2回 グアテマラ 1991年9月

次回第3回 スイス 1992年3月

というスケジュールである。

日本が有力な資金提供国と思われているので、会議中にそのような発言もあるが、お金を出しただけで災害が減るのであれば、そんな有難いことはない。筆者の趣旨は、それぞれの国がそれぞれの文化、経済の基盤の上に、科学技術を有効に駆使して防災対策を作ることが大切だと言うものである。具体的な議論の内容を紹介しよう。

- ① 国内委員会を作り、各国の国内の防災活動を活性化する。4. で述べたことである。日本はうまく行っている代表例と言えるかも。
- ② 防災科学技術の交流をはかる。第2回委員会では、日本・フィリピンからは雲仙・ピナトッポ火山噴火の話が、中国からは洪水の話が会議で紹介されて討論された。日本は災害のデパートだから何でも経験があるし、いつでもノウハウを提供できる用意があると表明している。
- ③ 「STOP DISASTER」という雑誌をイタリアの努力で出版している。これの配布希望者は筆者まで言っていただければ申し込むことができる。
- ④ 例示プロジェクトとしては、これまで国連などで行って来たプロジェクトのうち有意義なものを選んだ。国際学術連合会議の提案の「Decade Volcano (IDNDR 火山) も含まれているが、これらプロジェクトに今の段階では事務局から多額の研究費が出るというようなことは望めない。
- ⑤ IDNDR 世界会議を開こうという案も出されている。筆者は各国の IDNDR 代表を招待した小さい会議を提案したのだが、いつのまにか大きな話になってしまった。まだ決まったわけではないが。
- ⑥ IDNDR の旗印のついた何かを行うとよいが、ちょっと思いつく案は帯に短かし、襷に長しで困っている。各国が自国の科学者・技術者を動員して、各国でリスクマップの例を作成するのはどうだろうか。これに対し、反対意見もあり、読者から別のよい案を戴ければ、提案したい。

8. まとめ

ここまで書くと、「まだ何も決まっていないのですね」という質問が寄せられるであろう。半分はその通りである。しかし読者に5.(3)を読み返

してもらいたい。経常外の予算しか与えられていない。即ち事務局には「お金がない」のである。と言うことは IDNDR というプロジェクトを国連が樹てたからと言って、国連が莫大な資金を注ぎ込んで行うわけではなく大部分は、言うなれば「自分の金」で行うのである。イタリアその他の国は金ではなくて、自分のできることで大きな貢献をしていることを見逃してはならない。そして科学技術委員会では世界から24人の専門家が集まって良い方法を求めて議論をしているのである。

日本人はえてして、はじめは「まだ決めてない」ことには発言できないと引き籠って見過ごし、決まってからでは「決まったから今さら仕方がない」と何もしないで頼かぶりしようとする。決まってないからこそ、ここに紙面を戴いて、IDNDR の基本方針と進捗状況を紹介し、日本国内からの多くの貢献をいただきたいと考えているのである。

災害予知の現状

木下 武雄

1. はじめに

一寸先は闇である。今、予知の現状を論じている最中に大地震が起こるかも知れない。では、災害予知の現状は「無」か。そうではない。我々は多くの手段を持っている。その手段の現状と限界を知っていれば安心して暮らすことは容易である。

予知は科学的に行われるべきである。しかし、科学的判断といえども主観的、あるいは経験的でないとは言えない。科学とは自然界の動きに法則性を見つけることである。法則がわかれば、次の段階がわかるから予知ができる。科学というとコンピュータがつきものだが、コンピュータより人の頭脳の方が優れているから科学的に法則性がわからない分野でも、主観や経験であっさり片附くことがある。廊下の足音で、担任の先生か他の先生かが「予知」される等の例が多い。

2. 近づきつつある現象

火災の延焼速度は現在のような建物だと、あまり速くはない。全くの木造で防火用の水も乏しかった昔は大変速かったが不燃化が進んだこと、消防化が強化された今は、風向・距離を十分考えて延焼を素人でもある程度予知できる。勿論、この分野でも科学的研究は大いに進んでいるので、延焼しつつある火災を科学的に予知できる。

台風は突然襲うとして古来恐れられて来た。しかし、今は気象衛星からの画像等により一週間も前から「来るぞ来るぞ」とテレビ・新聞等で騒がれる(?)ので用心ができる。この用心をする時間と予知時間とは深い関係がある。用心時間が1秒ですむなら、大地震がある程度の距離で発震して直ちに警報を出せば、地震波が伝播するには時間がかかるから立派な地震予知ができる。

火砕流は大変速く火山の斜面を走り下るから、通常の方法で逃げたのでは逃げ切れない。巨大な煙が見えて、来ることが「予知」できても災害となる。

東京都の水害予知システムは筆者が座長として委員会で作成したが、近づきつつある集中豪雨をレーダ等によりいかに予知するか、降雨から水位を推算するときに係数の修正等も含めていかに素早く行うかに重点をおいて、むずかしい数字は排除した。筆者は十分の精度があると確信しているが、なるべく早く予知をして、対策に要する時間に十分余裕をとりたかったからである。

予知とは用心つまり対応策に要する時間との相対関係で決まる。

3. 突発する現象

雷雲は条件が整えば20～30分で発生・発達する。ちょっと買物に行っている間に夕立に会うという例は多い。近づきつつある現象と異なって、突発発生する現象は予知が難しい。しかし、雷雲が発生しそうな条件というのは予めわかる。風船に測器をつけて飛ばし、各高度ごとの気温・湿度などを無線で送らせる。それを解析することにより、雷雲が発生する条件を判断することができる。但し、9月6日15時35分に晴海貿易センターホールに雷雨が降るかどうかの予知は難しい

し、さらに、その時落雷するか否かを予知するのは困難と言えよう。

過去の大地震を調べると、精しいメカニズムの解釈とは別に、大地震の予知を行えそうな前兆現象があることに気づく。例えば割箸を折るとき、ペリペリと音をたててからボキッといくが、大地震の前に小地震が数多く発生するのであろう。地盤の系統的な隆起・沈降、従って傾斜の変化などがある筈である。地下水位の変化・ラドン濃度の変化の可能性も指摘されている。動物の異常行動を主張する人もいる。大地震は突発的であってもそれを発生させる周囲条件の変化がわかれば予知が可能である。現在、南関東・東海で発生するM8級の地震についての予知の可能性が明らかにされつつある。

4. 楽観的な誤解-ここでは起こらない!

伊勢湾台風の高潮が名古屋地区を襲うまで、名古屋地区は台風に対して安全だという人がいた。推測するに、その数年前、愛知県南部を大台風が襲ったが、名古屋地区では災害が小さかったからであろう。しかし、台風の風向をちょっと考えてみたら、南側を通った台風では高潮が起こりにくいことは容易にわかる。人は、自分のいる所が安全だと思いたがる。

日本海中部地震の津波により大きな災害があったときに、「日本海には津波はない」と言われていたのに不意打ちだったという報告がある。しかし、20年ほど前の新潟地震による津波被害があったし、多くの写真も残っている。

地理・地質からみて絶対にここでは起こらないという災害もあるが、人はどうも楽観的な誤解をするようである。火砕流の上に形成された集落などは要注意である。

5. 予知の正しい理解

大地震の予知の実例がないので、大地震についてはまだ経験されてはいるが、発生すると情報が出た時と出なかった時と、実際に発生した時と発生しなかった時とで4通りの組合せがある。その中で情報が出たのに発生しなかった場合は狼少年と言われるし、情報が出なかったのに発生した場

合は予知行政にクレームがつくであろう。しかし、赤信号でも突進してくる居眠り運転があるわけだから、青で横断のときにもちょっと左右に配慮するように、予知の情報がないことが絶対に現象が発生しないことを意味しているわけではないことを理解し、ちょっとした配慮-キッチン-のガスをつけ放しにはしないとかが平素から必要である。

予知された情報の内容の理解も必要である。30%雨量確率と予報されれば、示された時間(6時間)内に1mm以上の雨域が当該県の面積の30%に及ぶことを示している。傘を持って外出するか否かは正しい理解の上でなされる。

2mの高潮とは、天体潮(潮汐表・潮位表に示されている太陽・月の引力による潮)からの偏差で、波浪は含まないで、台風などによる高潮成分が2mであることを意味する。満潮でAP2mに

なり、高潮が2mで、波浪が3mなら、APで7mの堤防を海が越えてくるわけである。(TPは別の基準面:東京湾中等潮位である。)

6. 国際的な協力を

1990年からの10年を国際防災の十年(IDNDR)と呼ぶ。国連では科学技術委員会(STC)を設けて、このような防災科学技術の推進と防災知識の国際的な普及を目指している。筆者は日本からのSTC委員として国連の場で災害予知など多くのテーマを議論しているが、日本の国際的な協力が強く求められている。ここに皆様方の積極的なご支援をえて、災害予知など、IDNDR-世界の防災-に役立ちたいと考えている。

(きのした たけお: 総括地球科学技術研究官)

国際地震サミット

会期: 平成3年10月8日(火)~11日(金)

自然災害の克服は人類にとって共通の課題であります。

21世紀を間近に控えた今日でも、世界の各国、各都市では地震や風水害などにより、多くの人命と財産が失われております。

また、大規模な自然災害は、国境を越えて周辺の国や地域に被害をもたらしています。

このような状況の中、国際連合は1990年代を「国際防災の10年」(International Decade for Natural Disaster Reduction; IDNDR)とし、世界各国が協調して、自然災害による被害の軽減に取り組むことを、1987年の第42回総会で全会一致で決議しました。

この「国際防災の10年」にちなみ、今年の10月に東京で「国際地震サミット」を開催いたします。

この会議の目的は、世界の各国及び各都市が相互に地震などの自然災害と防災に関する経験や知識の交流を図り、もって災害対策の新たな発展の契機とすることにあります。

平成3年8月

国際防災の10年推進本部
国際防災の10年国民会議
東京都

「国際防災の10年」を推進するため、我が国では、内閣総理大臣を本部長とする政府の推進本部が設置されています。



IDNDRは、「国際防災の10年」(International Decade for Natural Disaster Reduction)の略称です。



SCENDCは、「国際地震サミット」(Summit Conference on Earthquake and Natural Disaster Countermeasures)の略称です。

海洋熱塩循環と気候変動

松浦 知徳

1. はじめに

海洋大循環は風応力によって駆動される風成循環 (wind-driven circulation) と浮力フラックス (熱・塩分) によって駆動される熱塩循環 (thermohaline-circulation) に分けられる。現実の海洋大循環系は風成循環と熱塩循環が複雑に絡まったものと考えられる。しかし、一般的には黒潮・親潮等の強流域が循環の一部をなしている亜熱帯循環・亜寒帯循環等は風成循環と見なされる。この循環の運動は 1000 m 以浅の半永久的な密度躍層内にはほとんど閉じこめられている。それに対し、気候変動と深い関わりを持つ深層循環系は、浮力フラックスにより引き起こされるので、熱塩循環と見なされる。

熱塩循環の研究は 1950 年代の終わりの Stommel や Welander の理論的研究以来地道に続いているが、最近の地球環境問題による気候変動予

測の要求にともなって研究の推進の緊急性が高まっている。本研究所でも特別研究「全球水文過程における災害予測に関する研究」が平成 3 年度より地球環境問題の研究の一つとして始まった。そこで、その研究の一部として全球水文過程と海洋循環系との関連について概観してみる。

2. 現在の全球的熱塩循環

まず、我々の生活と短期的な時間スケールで直接関連のある風成循環を熱塩循環と比較する意味で簡単に紹介する。風成循環は太平洋と大西洋で流れのパターンに相似性があり、大洋内に複数の循環が存在する (図 1)。

このパターンを見ているだけでは大洋間の水塊移動及び表層と深層のつながりはわからない。Gordon (1986) は断片的な観測結果と理論に基づいて全球つながった熱塩循環系を示した (図

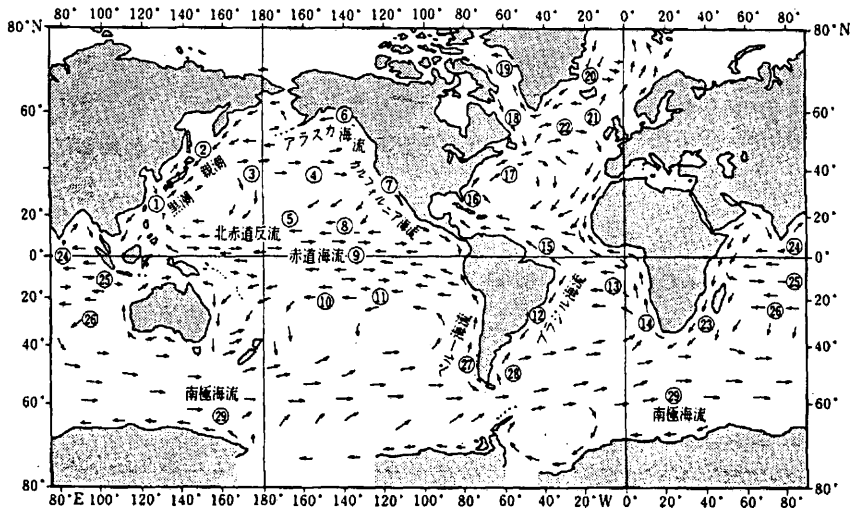


図 1 表層の海洋大循環パターン (友田・高野, 1983 から引用)

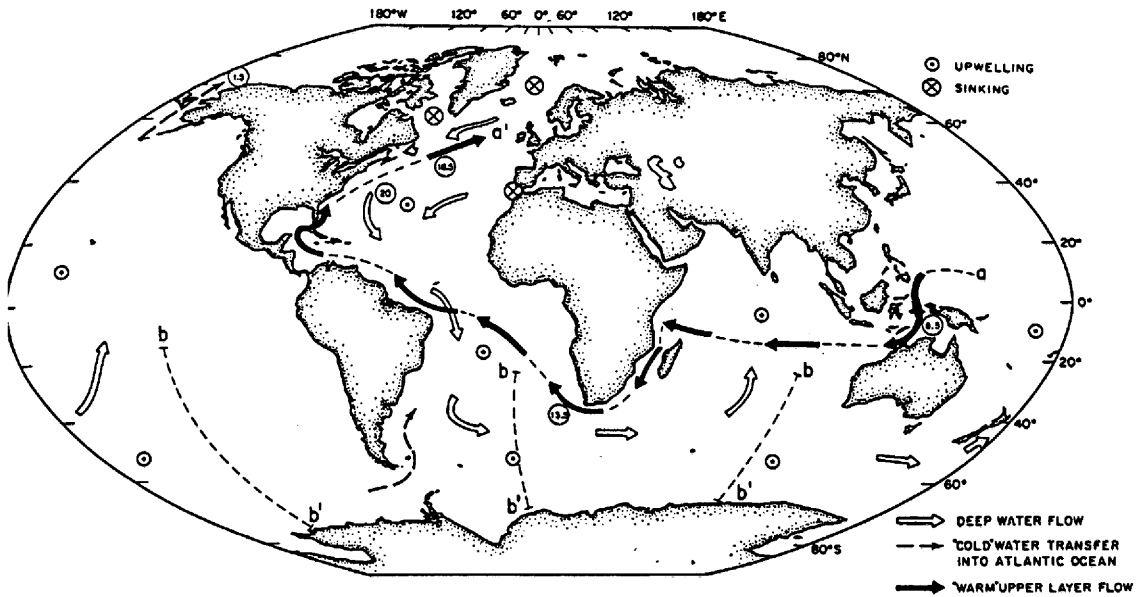


図2 北大西洋深層水に伴う熱塩循環の全球的構造。

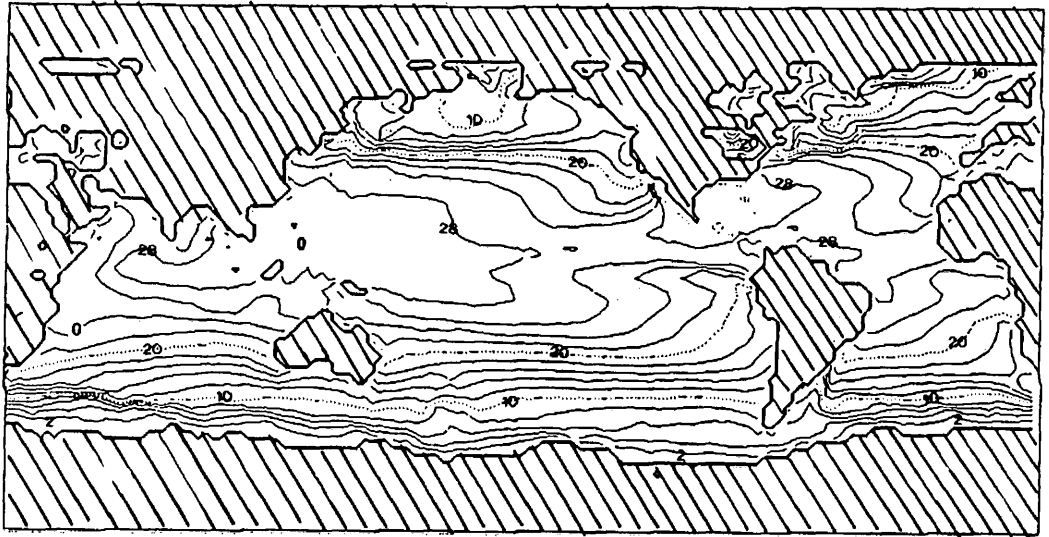
白抜き矢印が深層の循環で、黒の太い矢印が表層の循環を示す。また、⊗が沈み込み、⊙が湧き出しを示している。(Gordon, 1986 から引用)

2)。それは、北大西洋ラブラドル及びグリーンランド沖で沈み込んだ水塊が南下し南極周極流域にまで達し、時計回りの循環系に乗り、インド洋と太平洋に流入していく。その後、水塊は上層へ湧き上がり太平洋からインド洋に入り希望峰近くを経由し、さらに大西洋に入り、赤道を通過して北大西洋へと北上する経路をとる。このベルト状の水塊の移動経路は「コンベヤーベルト」と名付けられており、 $15-20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量があると見積られている (Gordon, 1986)。図2を見てみると、何故上記のような循環系が定常的に存在しているのか、また水塊の沈み込みがどうして起こり、更に深層水の形成がどのように行われているのか、疑問が湧いてくる。

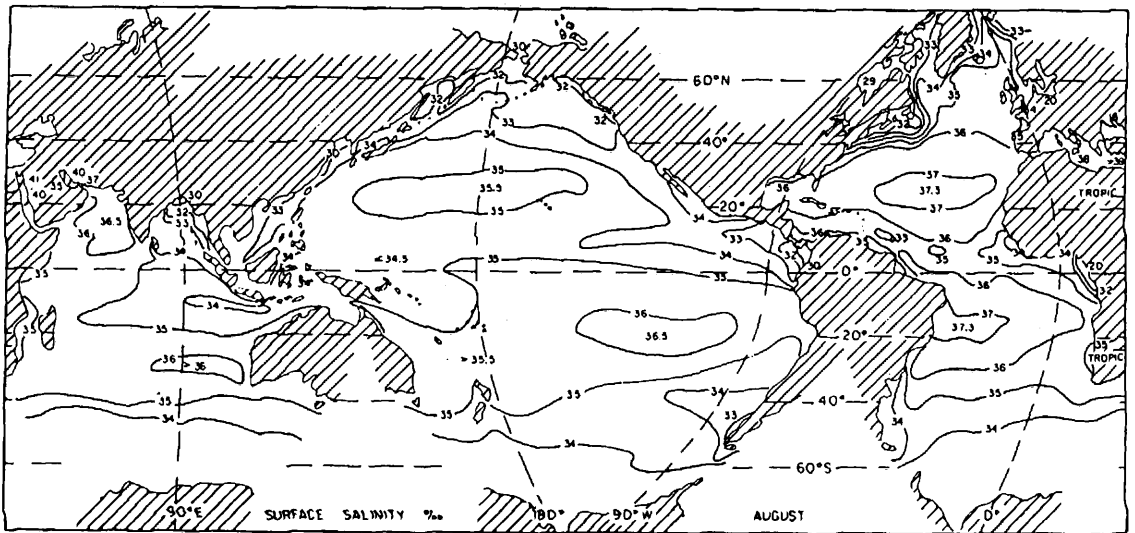
現在の全球規模の熱塩循環がコンベヤーベルトの状態をとることに対する一つの見解が提出されている (Gordon, 1986; Broecker, 1987)。これは大気と海洋の相互作用が引き金となる。観測結果によると、北太平洋と北大西洋の高緯度での海表面温度 (SST) 分布は同緯度で比較すると大西洋の SST のほうが高い (図3a)。したがって、高緯度では大西洋からの水蒸気の蒸発量の方が太平洋のものより多くなる。大西洋で蒸発した水蒸気

は太平洋に移動し、降水量として太平洋上に補給される。この結果高緯度において、表層での塩分濃度は大西洋の方が太平洋より高くなる (図3b)。このような海表面での塩分濃度分布で、冬に大気による冷却が起きるとその場の密度が高くなり、大西洋では表層水塊の下層への沈み込みが可能となる。それに対し、太平洋では塩分濃度が低いため、海水が冷やされても表層の水塊は沈み込むまでには至らない。北大西洋での沈み込みと北太平洋の広域での湧き出しを関連づけるとコンベヤーベルトの姿が浮かび上がってくる。北大西洋の高緯度で SST が北太平洋より高いのは、コンベヤーベルトのつながりからわかるように、表層において南の暖かい水塊が北上してくるためである。北大西洋で SST が高いことと塩分濃度が高いことの間には「卵が先か鶏が先か」の関係があり、どちらが原因でどちらが結果かは結論づけられない。以上の筋書きは、全球水文過程がいかに熱塩循環系に重大な影響を及ぼしているかというこの証拠であり、それを解明するためには海洋上での蒸発量と降水量の差の分布データが必要であることを示している。

図2の熱塩循環系は大西洋で形成される北大西



(a)



(b)

図3 (a) 全球海表面温度 (SST) 分布。1979 年から 1990 年までの NOAA NESDIS 赤外線画像データ ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 月毎のデータ) から求めた 8 月の平均値。単位 $^\circ\text{C}$ でコンター間隔は 2°C 。

(b) 全球海表面塩分濃度分布 (8 月) 単位は ‰ 。(Picard and Emery, 1982 から引用)

洋深層水 (NADW) の循環経路に着目しているので、太平洋内の循環系が明確でない。また、鉛直方向には表層と深層の二層としているが、実際の水塊解析によると上層、中層、深層、底層の四層にわけるのが適切であるという見方もある。さらに、大西洋内にはコンベヤーベルトとは別に南

極周極流域の冷たい水塊が、ウェデル海で形成された深層水と合流して南大西洋に流入し、熱塩循環系に多大な影響を与えている可能性がある。

1986年～1987年の2年間、Texas A & M大学のNowlin教授とWhitworth博士のグループはエウイングバンクの北側斜面から300 km程度北

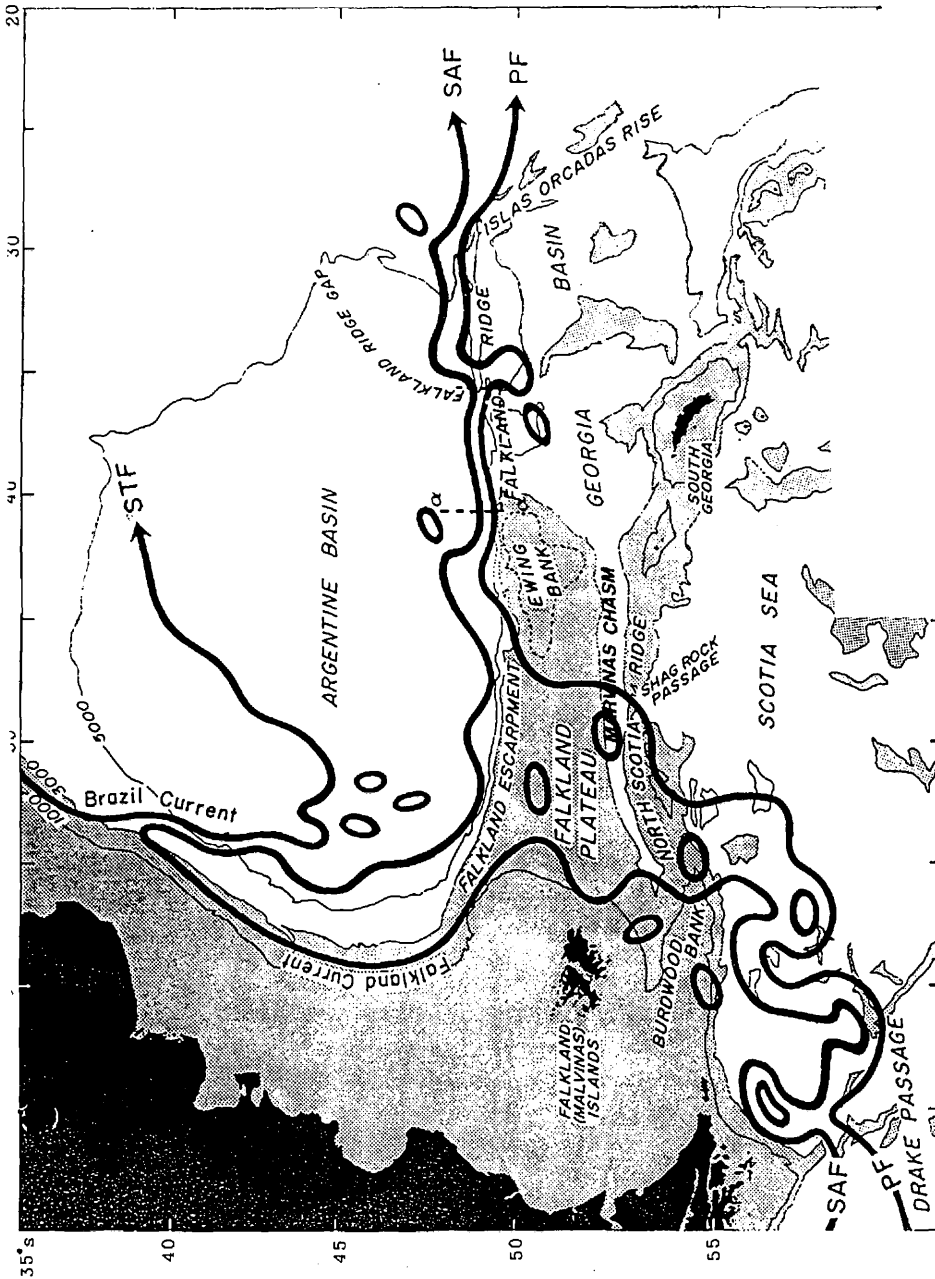


図4 ドレーク海峡、スコティア海、フォークランド海台、アルゼンチン海盆 (60° S-35° S, 70° W-20° W) の海域における地形と表層の流路の概略図。
 PF (Polar Front): 極フロント
 SAF (Sub-Antarctic Front): 亜極フロント
 STF (Sub-tropical Front): 亜熱帯フロント
 観測の測線は波線で示されている ($\alpha-\alpha'$)
 (Peterson and Whitworth, 1989 から引用)

に向けて深層流解明のための係留観測を行った (図4参照)。その結果, 1000 m以深に海底斜面に沿った表層流 (東向き) とは逆向き (西向き) の平均流速 40 cm/s 程度の深い強い流れがあることを明らかにした。この流れの水塊は南極深層水 (CDW) であり, 南極周極流の極フロントが

フォークランド海台を越えてアルゼンチン海盆に流入してきている可能性を示唆している。

上記の観測結果に基づき, 2層 β 面プリミティブ方程式を使った局所数値モデルでシャグロック海峡から流入した流れがどのような流路をたどるのかを調べたのでその結果を示す (Matsuura

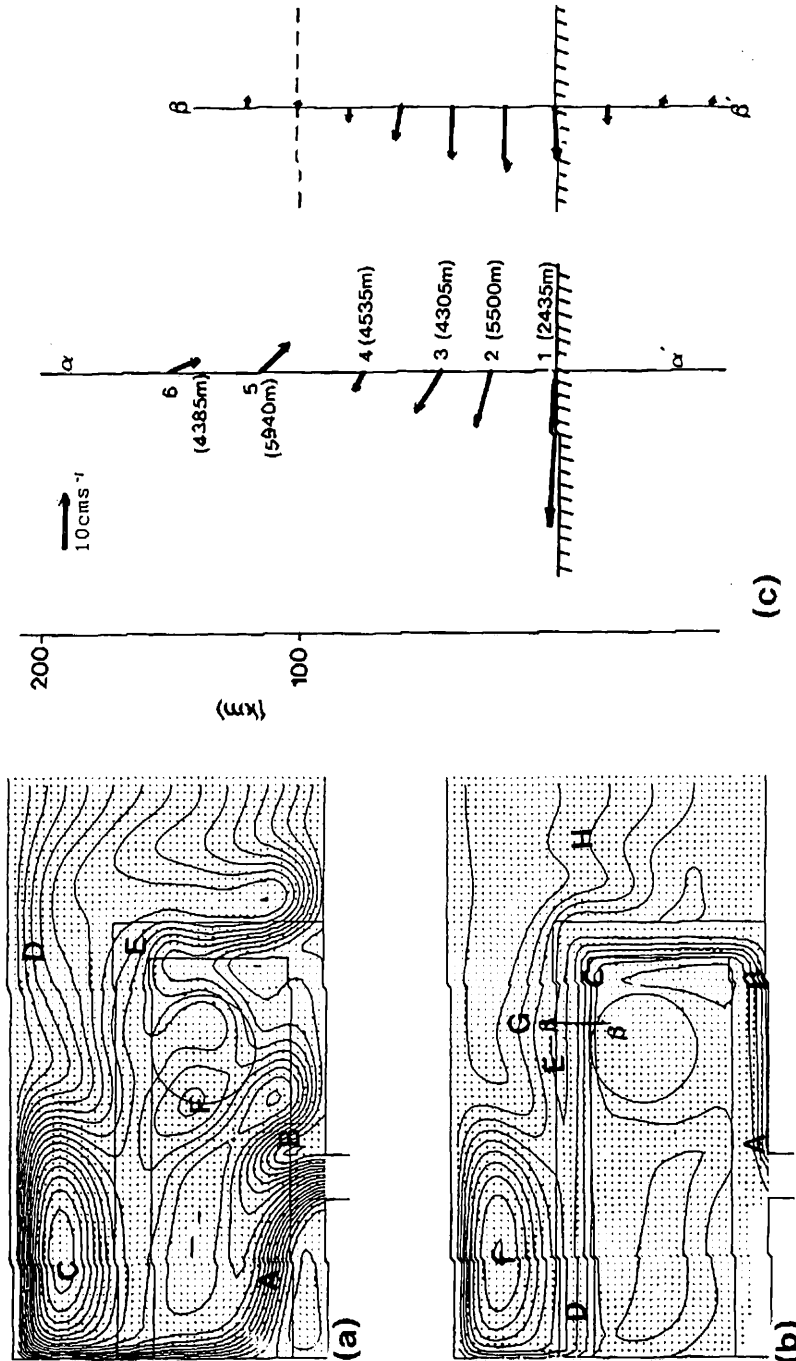


図5 二層 β 面プリミティブ方程式を使った数値モデルの結果。流入口がシャグロック海峡, 流出口が 36° Wで開境界を仮定している。海底地形としてフォークランド海台とエウイングバンクが入っている。(a) 上層(0-1000 m)の360日目の圧力分布, (b) 下層(1000-5000 m)の360日目の圧力分布。(c) エウイングバンクの北側150 kmの下層の流速の観測値(左)とモデルの結果(右)の比較。(Matsuura et al., 1991から引用)

et al., 1991)。図 5 a は上層の圧力分布（ほぼ定常な 360 日目の結果）である。この規模の流れではほぼ地衡流バランスをしているので、流れは等圧線に沿って流れていると考えて良い。上層は西岸強化流 A と海台上を蛇行する B とに分岐する。A は図 4 の SAF（亜南極フロント）に対応し、B は PF（極フロント）に対応する。観測と同様にエウイングバンクの北側は東向流になっている。図 5 b は下層の等圧線分布を示しており、シャグロック海峡から流入した流れは海底地形の影響のため上層とは分離してフォークランド海台の斜面に沿って反時計回りに循環を描いている。エウイングバンクの北側斜面では西向きの流れがあり、観測結果と定性的に一致している（図 5 c）。数値モデルの結果からも南極周極流域の 1000 m–3000 m の水塊（CDW）はシャグロック海峡から流入しフォークランド海台に沿って反時計回りに流れて行き、アンゼルチン海盆に注ぎ込んでいることが示された。熱塩循環系の大きな描像は Gordon (1986) が提唱したコンベイヤーベルトでよいのだろうが、観測・理論的研究の発展とともに新たな姿に修正されていくだろう。

3. 古気候における全球的熱塩循環

氷河期・間氷期のような大きな気候変動と熱塩循環の関係を調べることは、将来の気候変動予測を理論的に考察するとき非常に有意義である。Broecker et al. (1985) は氷床コアや海底コア $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ の割合から最後の氷河期が終わりを告げた 10800 年頃にヨーロッパとカナダに局所的な小氷期が起こったことを明らかにした。この小氷期は 100 年ぐらいの短期間のうちに急速に発生し、ヤングドライアイスと名付けられている。ヤングドライアイスは氷河期の終えんの時期に起きているので、その時期には陸の氷が融けて海に流れ込んだ冷たい淡水が大西洋の海面を覆っていた。したがって、Broecker (1987) はその時期の熱塩循環は現在のものより弱かったと推測した。同時に、彼は現在のコンベイヤーベルトとは逆の循環である太平洋で沈み込み大西洋で湧き上がる様な循環が過去に存在しただろうと考えている。

理論的に熱塩循環には多重平衡解が存在することが明らかとなっている。Marozke (1990) は、

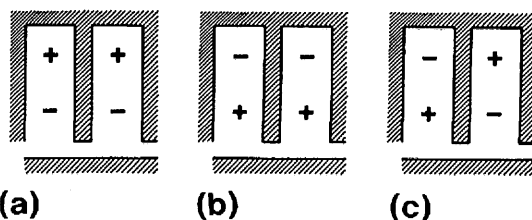


図 6 全球 GFDL 海洋モデルの 3 種類の異なる定常熱塩循環系の概略図。左の海盆が太平洋で右が大西洋を模擬しており、南のチャンネルが南極周極流域を示す。+ が水塊の沈み込みで、それぞれの大洋での深層水形成を意味する。- が沈み込みのないことを意味する。(C) がコンベイヤーベルトのパターンに対応する。(Marozke, 1990 から引用)

GFDL (Princeton Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) の Bryan and Cox モデルを使って太平洋と大西洋を南極周極流でつないだ単純化した海の間には三種類の平衡解が存在することを示した（図 6）。具体的な実験は、現実に近い大気条件を与えて一つの定常状態を作っておき、それに擾乱として海面での塩分濃度の変化（蒸発量と降水量の差）を与えてやる。すると、擾乱を与える位置によって定常的な熱塩循環パターンは図 6 の異なる三種類に落ち着く。図 6 a は、両大洋とも北半球で沈み込んで南半球で湧き上がっており、各々の大洋で南北循環が閉じている。図 6 b は a とは逆に南半球で沈み込み北半球で湧き上がって、やはり各々の大洋で南北循環を形成している。図 6 c は大西洋の北半球で沈み込み、太平洋の南半球側で同様に弱く沈み込んでいる。したがって、この解がコンベイヤーベルトに対応する。図 6 c とは逆向きの循環が存在するが、この実験では太平洋と大西洋を対象にしているので平衡解としては同一のものである。以上の結果から引き出される興味深い結論は、わずかの塩分フラックスの変化が熱塩循環のパターンを大きく変えてしまうということである。したがって、蒸発量-降水量、海水、河川水等の淡水の海への供給量の変化が気候変動に大きく影響を与えることを意味している。Marozke (1990) は海洋だけのモデルで熱塩循環系の解の多重性を調べたが、大気海洋結合系における熱塩循環系の解の多重性を詳しく調べるのが気候変動の問題を解明するための鍵を握ると考えられる。

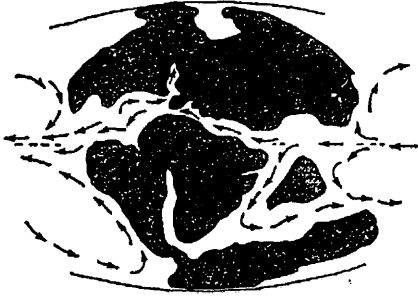


図7 白亜期前期(1億2500万年前)の大陸と海の位置関係。同時に表層循環が大まかに描かれている。(Andel, 1985)

さらに、もっと長期な気候変動との関連で、海洋の形の違いにより海洋大循環系が大きく代わり、現在とは非常に異なった気候を示していた例がある。図7に示すように白亜紀には海の形が現在と異なり赤道の部分が全球で循環しており、現在の南極周極流の部分は閉ざされていた。このような状態だと、水塊の沈み込みの場所は海水の蒸発に伴う塩分の増加による地中海の出口(ジブラ



図8 深層水形成に関連した深層対流を起こしている近似的な場所。大陸境界近傍; 1: 西ウェデル海, 2: ロス海, 3: ウィルクス半島, 4: アデリエ海岸, 5: エンダービー半島, 6: 北極海, 7: グリーンランド沿岸, 8: アイスランド沿岸, 9: ジブラルタル海峡, 10: アドリア海, 11: 紅海, オープンな海; a: リオン湾, b: ラブラドル海, c: ブランズフィールド海峡, d: ウェデル海(チムニイ), e: ウェデル海(ポリニア), f: グリーンランド。(Killworth, 1983より引用)

ルタル)が支配的となる。暖水の沈み込みのため、上層から海底の部分まではほぼ一定水温(15°C)となり、地球全体が非常に暖かであった。この証拠も海底コアの分析から明らかとなっている。

以上のように熱塩循環においては、水塊がどこで沈み込むのかということが気候変動を決定するのに重要であるので、それに伴う水塊の形成を明らかにする必要がある。そこで、つぎの章では水塊形成について議論する。

4. 深層水の形成

現在の海洋は、上層で水温が高く半永久的な温度躍層以深では数度C程度の冷たい水塊で構成されている。このような水温構成が準定常的に保たれているので、鉛直混合のメカニズムから判断すると、どこかで冷たい水塊が補給されなければならない。海洋は熱帯から中緯度にかけて大気から熱をもらっており、両極の回りの狭い領域で熱を大気に返している。これらの極近傍では深層まで達するような対流が起きている(図8)。

Killworth (1983) は、対流に伴う深層水形成に対して、二種類のメカニズムを提案した (near boundary convection と open boundary convection)。ここでは、将来予定している研究と関連の深い大陸境界近くでの対流に伴う深層水の形成について紹介する。

この場合、五つの要素が満たされたときに深層水形成が達成される。まず第一に、大気と海洋（海水）との相互作用によってできた密度の高い（塩分濃度が高い）水塊を貯蔵しておく陸棚が必要である。第二に冬の海水の生成に伴う塩分のはきだしが必要である。第三に陸棚から斜面をゆっくりくだっていくための水平方向の循環が必要である。（この水平循環は水塊の浮力とコリオリ力のバランスをつくる）。第四として、斜面をくだっていく間の複数の水塊間の混合が必要となる。最後に混合した水塊が海底へと沈み込んでいくことが必要である。これらの五つの要素のもとに深層水が形成されていく。以上の深層水形成過程を数値モデル化する場合、サブグリッドスケールの鉛直混合過程をいかにモデル化するかが解決すべき重要な問題となる。今回、単純な三次元東西チャンネルをつかって、南半球において北半分を常時加熱し南半分を冷却することによって、五種の異なったケースの実験をおこなったのでその結果を示す。図9aとbは、鉛直拡散係数を決めるのに、Mellor and Yamada (1982) のレベル2.5乱流クロージャーマデルを使った。ケースaとbの違いとして、aには音波による圧縮の効果を導入し、bは現場密度をそのまま使っている。c、dとeは、一般によく

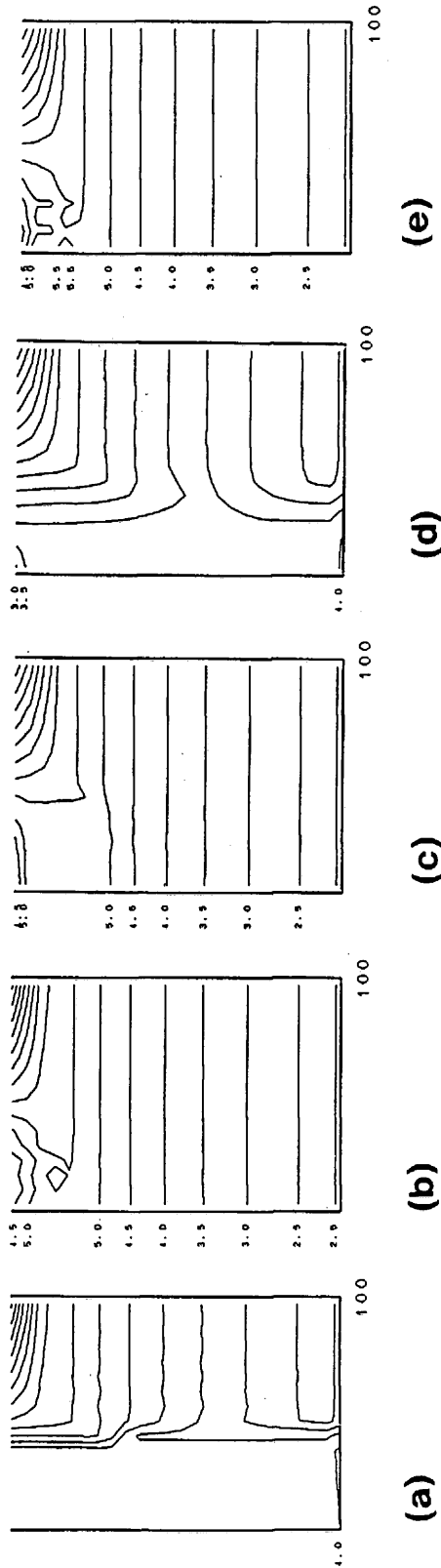


図9 五種類の異なった混合過程のモデルによる100日目の温度。チャネルの左半分を冷却し右半分を加熱している。(a) 乱流クロージャーマデルで音波による圧縮の効果を加味、(b) 乱流クロージャーマデルで音波による圧縮の効果を無視、(c) 鉛直拡散係数一定 ($7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) で対流調節をポテンシャル密度で評価、(d) 対流調節を音波の効果を加味して評価している以外は(c)と同様、(e) 対流調節を現場密度で評価している以外は(c)と同様。

使われている拡散係数を一定値にし、対流調節の判断としてcはポテンシャル密度で、dは音波による圧縮効果を加味したもので、eは現場密度で行った。この実験から得られる顕著な結果は、冷却されて鉛直混合を起し易い所では、モデル化の仕方で非常に敏感に混合過程が変わるということである。特に本実験では、音波による水塊の圧縮の効果が入った場合100日で2000mの底まで表面での冷却の影響が達しているのに対し、その効

果をいれないとある水深までに冷却の影響が閉じ込められてしまう。つぎにaとdの比較をするために、冷却のもっとも強い左壁の近傍での等温位層の発展の様子を図10に示す。クロージャーモデルaでは冷却に伴う等温位線の勾配がシャープであり、混合層とそれ以深が明確に区別される。それに対し、ケースdではすべての時間経過の段階で底まで冷却の影響が及んでおり、混合層内でも弱い温位勾配をもっている。現実の混合層

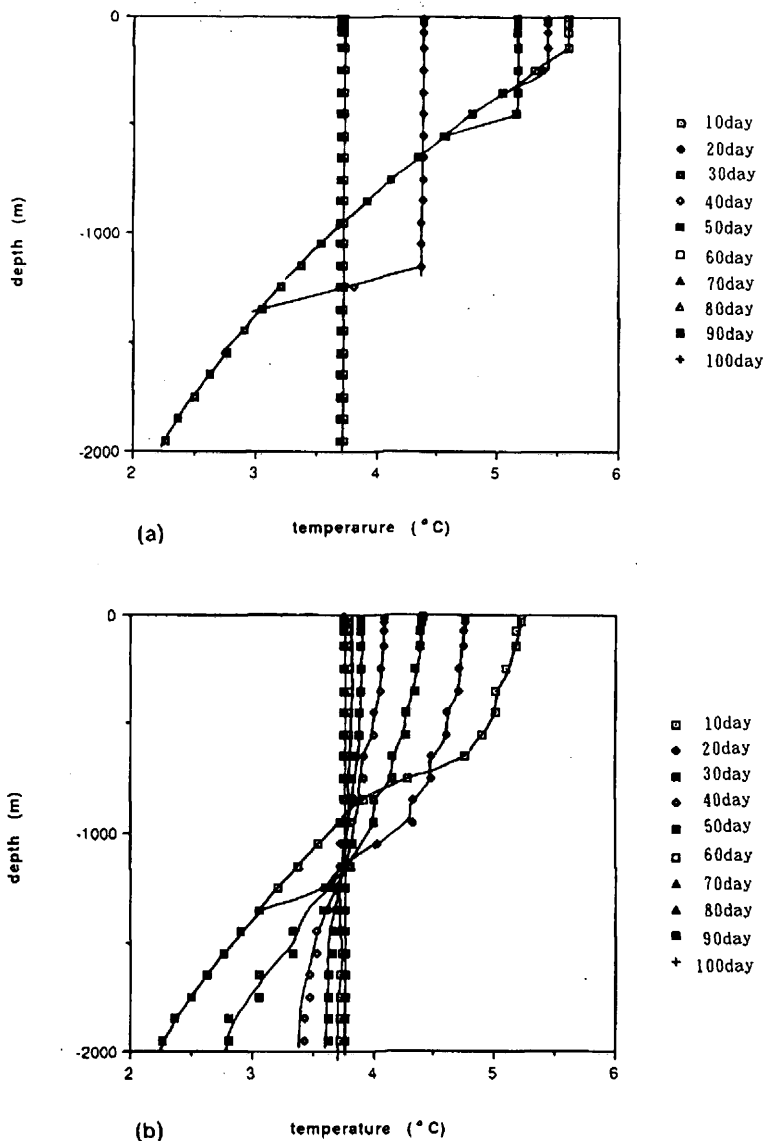


図10 冷却による等温位層の発達。
(a) 図9(a)の場合、(b) 図9(d)の場合

の発達過程とモデル結果とを比較すると、冷却によって上層の密度が高くなり静的不安定で混合層が発展して行くサブグリッド現象を大循環モデルの中に組み込むためには、ケース a が最も優れていると考えられる。

現在、現実的なウェデル海での深層水形成過程のモデル化を三次元海洋大循環モデルで再現できるか準備している。

5. おわりに

海洋熱塩循環系との関連でいままでやってきた研究とこれから目指す研究の位置づけを気候変動という大きな枠組みの中で考察してみた。地球規模の現象の研究は観測、数値モデル、理論の三者が有機的に結び付いて初めて発展する。しかし、

全球水文過程に関連した研究では、全球規模のデータの不足、モデルの不完全性等克服して行かなければならない問題点が多く残っている。世界的には、地球環境問題と関連した国際共同研究として、熱帯域の大気海洋相互作用をテーマにした TOGA、海洋大循環の解明を目指した WOCE が既に走っている。さらに、1995 年からは、我々の特別研究「全球水文過程における災害予測に関する研究」と最も関連の深い、全球エネルギー・水循環実験計画 (GEWEX) が動き出す。幸いにも本研究所にもスーパーコンピュータが三月から導入された。豊富なコンピュータ資源を活用してこれからやって行く研究を少しでも地球環境問題解決のために役立てて行きたい。

(まつうら ともりの：気圏・水圏地球科学技術
研究部)

参考文献

1. アンデル (1985): さまよえる大陸と海の系譜。築地書房, PP 325。
2. Broecker, W. S. (1987): Unpleasant surprises in the greenhouse? , NATURE, Vol. 328, 123-126.
3. Broecker, W. S., D. M. Peteet, and D. Rind. (1985): Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? NATURE, Vol. 315, 21-26.
4. Gordon, A. L. (1986): Inter-ocean exchange of Thermohaline water., J. Geophys. Res. Vol. 91, 5037-5046.
5. Killworth, P. D. (1983): Deep convection in the world ocean., Review of Geophys. and Space Phys. Vol. 21, 1-26.
6. Marozke, J. (1990): Instability and multiple equilibria of the thermohaline circulation. Ph. D thesis in University Kiel.
7. Matsuura, T., W. D. Nowlin, and T. Whitworth (1991): Modeling the flow of Antarctic circumpolar current past the Falkland Plateau., submitted to J. Phys. Oceanogr.
8. Peterson, R. G. and T. Whitworth III. (1989): The Subantarctic and polar front in relation to deep water mass through the Southwestern Atlantic., J. Geophys. Res., Vol. 94, 10817-10838.
9. Pikard, G. L. and W. J. Emery. (1982): Descriptive physical oceanography. Pergamon Press. pp 249
10. 友田・高野 (1983): 海洋, 共立出版, pp 325。

連繫しあう自然災害

大八木 規 夫

国際防災10年 IDNDR (International Decade for Natural Disaster Reduction) は今年ですでに3年目に入っている。IDNDRは21世紀を迎える我々の子孫に自然災害の脅威の少ない世界を残そうという理念に基づいて、1987年国連総会により決議された国際協力活動である。自然災害は、あたかもこのIDNDRの活動に挑戦するかのごとく、昨1991年には4月29日～30日バングラディッシュ付近のサイクロンによる高波・高潮の大災害、6月3日の雲仙普賢岳の火砕流災害、6月15日フィリピン・ルソン島のピナツポ火山の大噴火による災害、7月の中国長江中下流域の大水害と大災害が世界各地で続発した。これは、我々人類の自然災害への備えが著しく不十分であることを露呈するものであった。日本では、昭和34年(1959)年の伊勢湾台風で死者・行方不明5101名の大被害を受けて以来、年々犠牲者は減少し、最近2・3年間は年間、100人を越えないところまでに押えられ、自然災害は十分に“制御”されてきたという錯覚を人々に与えてきたかも知れない。たしかに、日本における防災施設は世界中で群を抜いており、自然の猛威に有効に働いた場合も少なくない。その一方で、伊勢湾台風級や安政の東海地震級の巨大な災害を起こす自然現象が最近では日本列島を襲っていないことも事実で、最近の日本における自然災害による被害を考える時、このことを割り引いて考えねばならない。また、防災施設は、その設計外力までの自然現象の規模には耐えられるが、設計範囲を超えた現象には無力であり、このため、より強力な現象に襲われたときには、より大きな災害を誘起することもありうる。このように考えると、昨年、海外で発生した各種の大災害は、遙か遠くの出来事として見過ごせないものである。

自然災害は小規模なものなら一集落にあるいは一市町村に打撃を与えるだけであるが、極めて大規模なものは、一国全体の市民生活に影響を及ぼ

すこともあり得るであろう。しかし、遠く大洋を隔てた外国の災害が日本にまで影響を与えることはないであろう、という距離からくる漠然とした安心感の存在あるいは無関心は否定しがたい。ところで、最近のマスメディアの発達、とりわけ、衛星通信による活画像の茶の間への伝達、旅行者の増加によって海外の災害といえども身近に感じるようになりつつあると思われる。さらに、ここ3～4年来、急激に世界的関心を高めてきた地球環境の変化の問題、およびこれと自然災害との関係を考える時、地球上の諸々で起こっている、あるいは起こり得る自然災害に無関心ではおられなくなるはずである。自然災害をグローバルな視野から見直すための資料はまだいたって不足している。しかし、国際的情報化と国際協調の最も必要になってきた現在と近未来にあって、自然災害への対応は、Think Globally and Act Locally (地球全体を考え、足元から行動しよう) で、かつ Think Locally and Act Globally (足元の問題から考え、地球規模で行動しよう) の両面が必要になってきている。IDNDRの活動は、まさに、これら両方向の活動を含んでいると言えよう。以上のことを念頭におき、自然災害の全体像を概観し、我々防災研究に携わる者は何をなすべきかを考え直してみる必要があると考えられる。

自然災害を発生させる自然現象は次の3つの場合が考えられる。

- 1) 短い時間(期間)に急激に作用する現象(短期急激作用)、
 - 2) 長い期間にわたり緩やかに作用する現象(長期緩作用)、
 - 3) これらの相互作用。
- 1) 短期急激作用は地震、火山噴火、地すべり・崩壊・土石流、台風(ハリケーン・サイクロン)、竜巻、大雨、降雹、洪水・氾濫、津波、雪崩、積雪、山火事、イナゴ・バッタなどの大量発生・襲来などの災害を発生させる現象であ

る。これらの現象の発生は時間的にも空間的にも程度の差はあれ特定しやすい。

- 2) 長期緩作用は3種類あり、①地盤そのものの動き、変形によるもの。これは一般に地盤内部の変化であって、場所を明確に特定できるものであり、活断層のクリープ、活褶曲や膨潤性粘土、凍土の融解等による地盤変形、地盤沈下及び隆起、地すべり活動前のクリープ変形等が含まれる。陸水の減少や汚染、塩水化。②地盤そのものではないが作用域を大まかに特定できる気体・液体の作用によるもの、およびそれらと地盤との相互作用によるもの。大気汚染、酸性雨（による森林破壊・土壌の変化）、干ばつ、砂漠化。③作用域が広大で、発生源も不特定な場所。大気中のCO₂の増加、大気温暖化、海水準の上昇、オゾンホール発生拡大（による皮膚ガン発生増加）などが上げられる。この③は②の酸性雨や砂漠化を含め、地球環境問題として注目されているものである。
- 3) 相互作用。災害は1) 短期急作用、及び2) 長期緩作用の分類の中のどれかの現象が、独立に作用することによって発生するだけとは限らない。1)の中の現象間、2)の中の現象間、さらに1)の現象と2)の現象間の相互作用、あるいは競合作用によって発生、拡大することも稀ではない。1)の中の相互作用は複合災害と呼ぶのが相応しい。1例を挙げると、大地震は地盤の強震によって住宅、建築、土木構造物を破壊させるだけでなく、ある種の砂質地盤を強震動によって液状化させることにより、この上に立つ建築、構造物に被害を与える。住宅や引火性物質を扱う場所からの出火から住宅街や工場地帯で延焼したり、路上の自動車への引火・拡大による大火災が懸念される。山地や崖斜面では大小無数の崩壊とこれらによる土石流など土砂災害の発生、さらにはフィルダムが破壊あるいは貯水池内の地すべりによる津波の越流による下流域での洪水災害など、大地震は各種の災害を広い範囲に複合発生させる危険性を持っている。台風による災害、梅雨前線による集中豪雨なども誘発する二次災害の種類は異なるが、災害を複数に拡大させる。2)の現象の中の相互作用では、例えば、酸性雨は化石燃料の燃焼によるNO_xやSO_xの大気中の放出に

起因すると考えられているが、同時に発生するCO₂が地球大気温暖化をもたらす温室作用の主要な物質と考えられているわけであり、酸性雨と大気温暖化は必ずしも切り離しては考えられない問題であろう。砂漠の拡大は自然条件としては干ばつが考えられるが、これを助長する条件として大気温暖化や過度の森林伐採、粗放な開墾や放牧の拡大も想起される。

1)の現象と2)の現象との相互作用には1)から2)への作用と、2)から1)への作用がある。前者の例として、火山の大噴火により大気中に放出された火山噴出物が太陽エネルギーを一部遮断することによる地球大気の一時的寒冷化がある。1815年インドネシアのタンボラ火山の大噴火（噴出量14 Km³）の時には2年間にわたり、北米やヨーロッパで冷夏に見舞われ、農業は大打撃を受けた。今年（2001年）のフィリピン・ピナツボ火山噴火はタンボラ火山の例に匹敵する規模と言われており、2～3年間の世界的気温低下が予想され、農業などへの影響も考えられる。2)から1)への作用の例については、次のような例が考えられる。酸性雨が長期間続き山地斜面の土壌の酸性化、森林植生の衰退が進行すれば、斜面崩壊・土壌侵食が進み土砂災害が発生しやすくなる。これは、河川への土砂供給量を増大させ、河川を氾濫しやすくする。また、地球大気温暖化は気圧配置や広大な地域での降水量に変化を与え、これまでの降水量の少ない地域に大量の降水を与えることもあり得る。一般に、降水量の少ない地域とくに集中豪雨の少ない地域では、土砂災害の発生する連続雨量や1時間雨量のレベルが低い。したがって、地域の降水量の増加によって、山地斜面は著しい削削作用を受けることになり、土砂災害、洪水災害が連続することが懸念される。

逆の場合には降水量の減少による植生の変化、斜面の荒廃も考えられる。

ここに提示した自然災害の枠組みを基にして、災害に内在する現在と未来の問題を考えてみたい。

従来、自然災害の研究及び災害への対策、防災工学の研究は主として、1)の個々の種類の現象に対して大きなエネルギーが注入されてきたと思われる。この路線に沿って、自然災害を引き起こ

す自然現象の発生、運動、作用、分布などの性質・実態が解明されつつあり、種々の予測手法が開発されてきた。対策技術は経験的方法から、次第に脱却して現状で理解しえた自然現象の機構に基づくモデル化によって設計・施工するテクノロジーに発展した。その結果、設計基準以内の単一種類の災害に対して効果を発揮してきた。しかし、別の種類の災害や複合災害に対しては無力な場合も少なくない。雲仙普賢岳の火砕流災害の場合には、土石流のための施設は火砕流底部の岩層に対してはある程度の機能を示したが、上部の熱雲に対しては無力であった。これは、本来火砕流を想定した施設ではないので、当然のことであった。このような事例から我々が学ぶべき事は、一つの地域の災害と防災を研究するにあたって、一つの災害のみでなく、異種の災害や複合災害に対しても考えねばならないことである。この問題に対しては後でもう一度考えたい。

2) の長期緩作用では①のなかの膨潤粘土や凍土、あるいは公害と呼ばれた地盤沈下や地下水の汚染、塩水化、②のなかの大気汚染などには何らかの対策が講じられてきたが、他は、ほとんど手付かずに近い。長期緩作用のなかで最近地球環境の問題とされている“自然”現象は、二三を除き人為作用が主な原因になっていると考えられておりながら、その原因をなかなか止められないのが現状である。これは不思議な事ではなからうか。これらの人為作用を生み出している根源的要因は、人間の欲望に他ならない。この欲望は人類の技術進歩の原動力であった。発展途上国の人々の立場からすれば、今日の地球環境悪化の原因は先進国の責任であるということになる。この指摘は量的には間違いではないであろう。先進工業国は、人間の欲望をより一層大量に具現する技術を発展させ、欲望にかなうものを大量に生産し、大量に消費しているのは事実である。この過程で、長期緩作用の原因を大量に生じているのは先進工業国に他ならない。

今日までの事態の進行を見るに、技術は欲望に従属してきたと思われ、また、科学も結果的には欲望に利用されてきたと思われてならない。人類が欲望にのみに突っ走るなら、我々の子孫に明日はない。これまで、科学・技術の歴史において、欲望は制御されなかったのであろうか。アイン

シュタインをはじめ著名な科学者で年を経て、科学・技術が欲望の最たる大量殺戮兵器の生産や戦争に利用されることに反対した人は少なくない。国連も平和維持には、かなりの機態を發揮してきたが、ここで問題にしている長期緩作用に対しては、議論は始まっているが、日暮れて道遠しの感がする。ところで、ビル・マッキベンの新しい生き方は大きな問題提起であろう。彼ら夫妻は自然環境を破壊しないために、欲望を最大限に抑制し、つましい生活を実践している。確かに世界中の人が彼らのような生き方を実践すれば地球環境の悪化は純化するであろう。“進歩”とは何かを考えさせられる生き方である。我々が携わっている防災科学技術とそのための地球科学技術は欲望に従属したものでなく、自由な倫理の立場からの科学技術であることを望むものである。

さて、長期緩作用の話が思わぬ方向へ脱線したが、次に、諸自然現象の相互作用あるいは相互作用による複合災害と防災研究の将来を透視してみたい。

2) の長期緩作用から1) の短期急作用への影響を知るためには長期的な一種の“観測”が必要である。また、如何なる“観測”をするべきかを知るためにはその“観測”に先立って現在の知識で考えられる長期緩作用に関するモデルに基づいて、短期急作用に表れる効果を予測するのが一つの方法であろう。日米科学技術協力による雪崩・地すべり・土石流ワークショップ(1991年10月)で合意された内容のなかに、地球環境変化に伴う降水・積雪の変動、森林生態系、土壌、土砂移動への影響の研究が予定されており、米国では米国林野庁のオレゴン州にある実験林で“観測”を行う計画があり、日本側でも対応する“観測”を検討する必要がある。

最後に最も激甚な災害に対処する問題として、1) のなかの複合災害を考えて見たい。先に大地震の例を述べたように、複合災害は個々の災害の種類(単種災害)の重ね合わせ現象ではない。一つの一次災害(を起す自然現象)はある特定の条件を備えた場所(一般的には複数)に二次災害(複種類の)を発生させ、それは、さらに他の条件を備えた場所に三次災害という系列で高次の災害を発生しつつ、(防災活動とも相まって)災害発展のエネルギーを消耗しておさまると考えられる。

複合災害がある種の進行的変化を呈するとすれば、複合災害に対する、以下のような科学研究と対策技術のアプローチが可能である。

1) 第1段階は、対象地域にとって深刻な複合災害となる重要な一次災害種を判定する。この一次災害は一種類の場合もあるが、一般的に複数の種類である可能性が高いであろう。

2) それぞれの一次災害により誘因される複合災害の発生・発展・消滅の筋道を解明し、その結果に基づいて、複合災害の総合像・全体像のモデル化を行う。筋道の解明には緻密な事例研究の積み上げが必要である。各種の一次災害を発端とする複合災害であって、かつ、自然条件、社会条件の異なる種々の事例を比較分析した上で、複合災害の発展の筋道を再構成する。この作業には相当の困難が伴うであろう。同一地域において、同一種類の災害が作用しても同一の複合災害が再現されるとは限らない。時代が変われば、地域社会条件のみならず、自然条件も変化し、そのため、次の災害は程度の差こそあれ異なった複合災害として発現することも考えられるからである。しかし、これらの困難は克服できるにちがいない。

3) 次に、複合災害の取る種々の筋道を決定す

る因子の抽出とその因子の定量化を進める。これらの因子に基づく、複合災害の定量的モデル化を行う。

4) 定量的モデルに基づく、対象地域の複合災害に対する二次元的・三次元的・四次元的 Hazard 状態の変遷の表示を行う。現在の時間断面による二次元的（平面的）表示がいわゆる Hazard map である。これを地域の過去から未来への長・中期的条件変化をふまえた、複合災害の経時的变化を表示しうるのが、将来の広い意味での防災技術には必要になると考えられる。これは21世紀の防災のための四次元ハザードシミュレーターとでも言うべきものとなるだろう。

最後は夢のような事になったが、これは夢“のような”ことではあっても、単なる夢ではないと考えている。その理由は、各パーツである個々の災害種については、夫々に相当の蓄積が存在するからである。私の見るところでは、それらの相互関係が捉えられていないところに複合災害の防災上の問題点があると考えられ、その糸口は緻密な事例解析で捉えられると考えるからである。

（おおよぎ のりお：防災総合研究部長）

震源ボーリング — 深さ 2000 m (足尾) —

塚原 弘 昭

微小地震が群発している震源域までボーリングし、その状態を直接調査することによって、地震の発生メカニズムを知ろうとする研究が、当研究所で昭和 63 年度から始まっている。今年度(平成 3 年度)で当初の目標深度 2000m までのボーリングが終了し、さまざまな測定や観測が行われた。

源の微小地震が活発に起きていることで良く知られた地域だ。微小地震の観測が開始された 1960 年代後半以来非常に浅い微小地震の活動が継続して観測されている。ここ 5 年ほどは特に活発である。しかし、大きな規模の地震は発生しておらず、1984 年 12 月マグニチュード 4.5, 4.3 各 1 回及び 1988 年 10 月 20 日のマグニチュード 4.3 の地震がこの間で最大級のものある。有感地震の頻度は 1 年に数個といったところだ。

なぜ足尾で?

栃木県足尾町(図 1 参照)、ここは非常に浅い震

源の微小地震が活発に起きていることで良く知られた地域だ。微小地震の観測が開始された 1960 年代後半以来非常に浅い微小地震の活動が継続して観測されている。ここ 5 年ほどは特に活発である。しかし、大きな規模の地震は発生しておらず、1984 年 12 月マグニチュード 4.5, 4.3 各 1 回及び 1988 年 10 月 20 日のマグニチュード 4.3 の地震がこの間で最大級のものある。有感地震の頻度は 1 年に数個といったところだ。

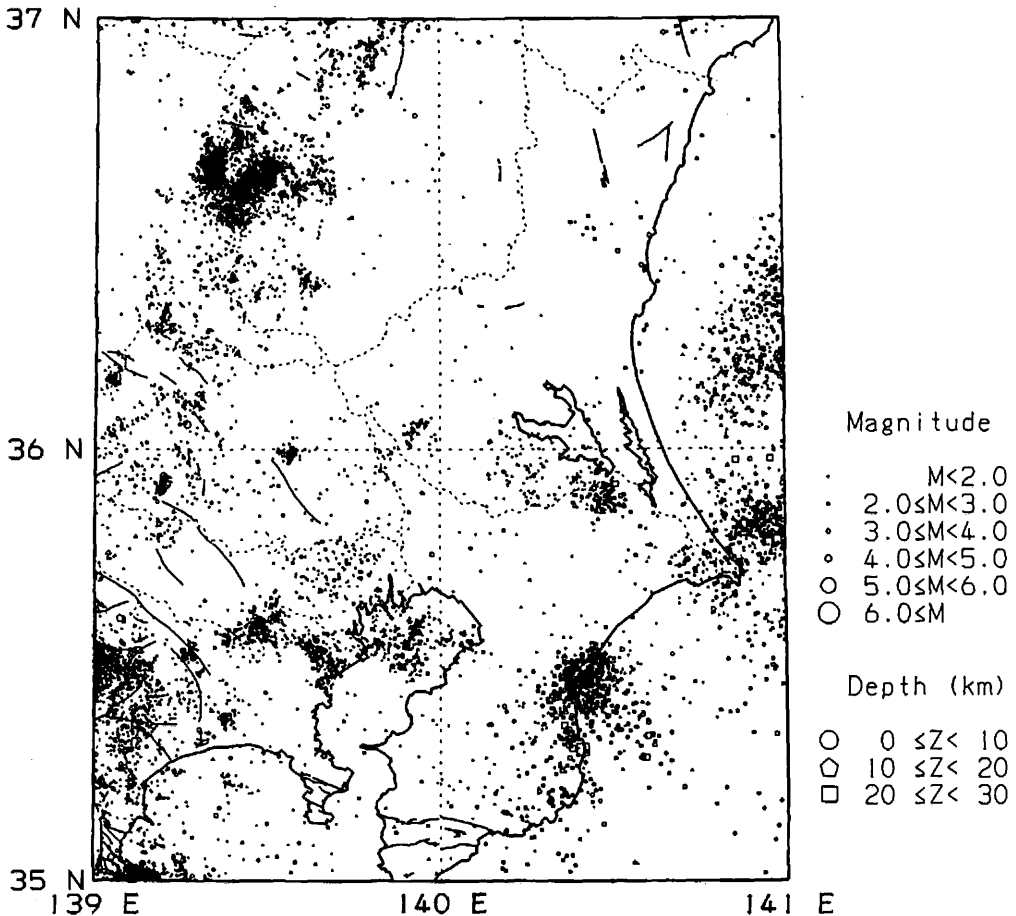


図 1 足尾の群発地震域(丸印)。震源深度が 32 km より浅い地震を示す(期間 1980 年 1 月 ~ 1991 年 12 月)。線分は活断層。左上の群発域(黒点の集中域)が足尾地域。(データは石田瑞穂さんによる)

で、起きる地震が非常に浅いというところにある。ボーリングによって調査するには、1メートルでも浅い方が、測定の間でも、ボーリング工事の間でも有利だからである。関東やその周辺で浅い群発地震発生地としては足尾のほかに、伊豆半島から伊豆大島にかけての地域や、山梨県東部地域なども知られているが、それらの中でも足尾地域は浅いものが多いのが特徴だ。ほとんどの地震が2～15 kmの深度で発生している。足尾の地震は、この地域が火山帯の中にあることから、震源よりもさらに深部にはマグマが存在する可能性もあり、このマグマの活動と何らかの関係があるのではないかと推定されるが、現在、付近の火山が活動していないこともあって、火山活動と明らかな関連を示す観測データは得られていない。

4年間で2000mを掘削

前述のように、ここで起きている大部分の地震は、深さ2～15 kmである。しかし、深度2 kmに満たない地震も数は少ないが発生している。当研究所の地震観測データにも、地表の観測点から1 km以内のところでも発生したと推定されるP-S時間（P波が到着してからS波が到着するまでの時間）の非常に短い地震が時どき記録されている。2 kmボーリングすれば、なんとか地震発生域まで届きそうだ。そこで、調査用のボーリング孔の深度は2 kmとなった。

2000 mを4年もかけて掘るのはなぜか。1年間で500 mづつボーリングし、ボーリング孔内で各種の測定を行いながら先に進むのである。前の年の測定を参考にしながらボーリング・測定計画を作り、測定装置も改良を加えたい。そのため、ボーリングおよび測定を4年に分けて行うことにした。また、これは予算編成上も、経費が平均化され無理がない。孔の直径は約15 cmである。

花崗岩体にボーリング

この地域には、関東地方では最も古い地層である三畳・ジュラ系（およそ2億年前）の足尾層群が分布しているが、一部に花崗岩類（花崗閃緑岩）が何回か貫入している（古第三紀～白亜紀、6千万～1億2千万年前）。足尾層群は粘板岩・砂

岩・チャート・石灰岩などで構成されており不均質でボーリングによる調査には不向きだ。ボーリングそのものが困難を伴うことが予想されるばかりでなく、得られたデータの解釈にあたっては、地質の変化による影響を常に考慮に入れなければならないことになる。地表から孔底まで地質が変化しないと予想される花崗岩体にボーリングすることにした。なお、群発地震発生地域と地表地質とは関連がないようで、花崗岩体の地表分布地域と、地震発生域とは一致しない。



写真1 ボーリング用ヤグラ。

写真1にボーリング現場を示す。旧石切場で、地表に花崗閃緑岩（9千万年前に貫入したとされる）が露出している。予想通り、2 kmのボーリング孔内で地質の変化は見られず、孔底まで花崗閃緑岩であった。コアは約100 m毎に、一カ所ですれぞれ3 mほどを採取した。写真2に1913 m付近で採取したコアを示す。

何を測定したのか

地震は、地下の岩盤の破壊現象であることは良く知られている。この破壊は、岩盤に破壊強度を越える力が加えられたとき発生する。したがって岩盤の強度とそこにかかっている力の大きさと



写真2 1913 m 付近で採取された岩石コア。直径 10 cm, 箱の長さは 1 m。亀裂はすべて採取時にできたものである。

が、地震発生を左右する二大因子だ。震源域に達する深いボーリング孔を使ってまず知りたいのは、震源域にかかっている力の大きさ（これを地殻応力といっている）と岩盤の強度である。

地殻応力は地表からの探査などでは知ることは不可能で、なんとしても測定しようとする深さまで計測器を降ろさなければならない。ボーリング孔を使って地下深部まで測定器を降ろして測定するのである。一方、破壊強度は、岩石種がわかればおよその推定はつくのだが、考慮に入れなければならない大きな問題が一つある。それは、「地震は岩盤の破壊だ」とはいつでも、まったくキズのない岩盤が破壊するのではなく、すでにある亀裂（大部分今までに何回も地震を発生させた地震跡）を利用して再び「ずり破壊」が発生する。したがって、亀裂の影響を無視した強度のデータはそのままでは使えないことになる。亀裂の影響の中で、最も大きなものは、亀裂の間にある流体の圧力だ。極端な場合、亀裂を閉ざそうとして働く地殻応力（亀裂に垂直な地殻応力成分）よりも流体圧が高ければ、亀裂は開いたままの状態になり、この亀裂面の摩擦抵抗はゼロになる。つまり、ずり破壊強度としてはゼロということになる。この亀裂中の流体圧（地下水圧といっても良い）の測

定が岩盤の強度を見積るのに欠かせない。岩盤の実際の強度はこの流体圧の大小で決められる、といっても良い。

そのほか、ボーリング孔を使って測定する項目は、亀裂の形状・方向や数、岩盤の弾性的性質（地震波の伝搬速度や減衰の程度）・電気抵抗・密度・温度・間隙率などである。これらは、地震発生場の状態がどうなっているのか、を知る上で大変有用なデータだ。また、地殻応力・岩盤強度を考察する上でも重要なデータとなる。

地殻応力と亀裂中の水圧の測定法

以上のことからわかるように、われわれが最も力を入れて測定したのは地殻応力と亀裂中の水圧だ。

深いボーリング孔を使って地殻応力を測定する唯一の方法は水圧破壊法だ。測定深度の上下を2つの栓（バッカー、写真3参照）で密封し、ドリルパイプを通して2つの栓の間に水を圧入し孔壁に亀裂ができるまで水圧をかける。この時の亀裂の方位と亀裂の開閉圧を測定して（写真4参照）、これらの値から地殻応力の値を算出する。写真5は深度 417 m 付近で行った水圧破壊前後の孔壁



写真3 バッカー（栓）を孔内に降ろそうとしているところ。孔口（写真中央）にバッカーの一部がすでに入っている。右上に多数のドリルパイプが立て掛けてあるのが見える。



写真4 水圧破壊時の測定室内（人物は筆者）。背景の壁に、孔内状態を測定したさまざまな検層図が貼ってある。

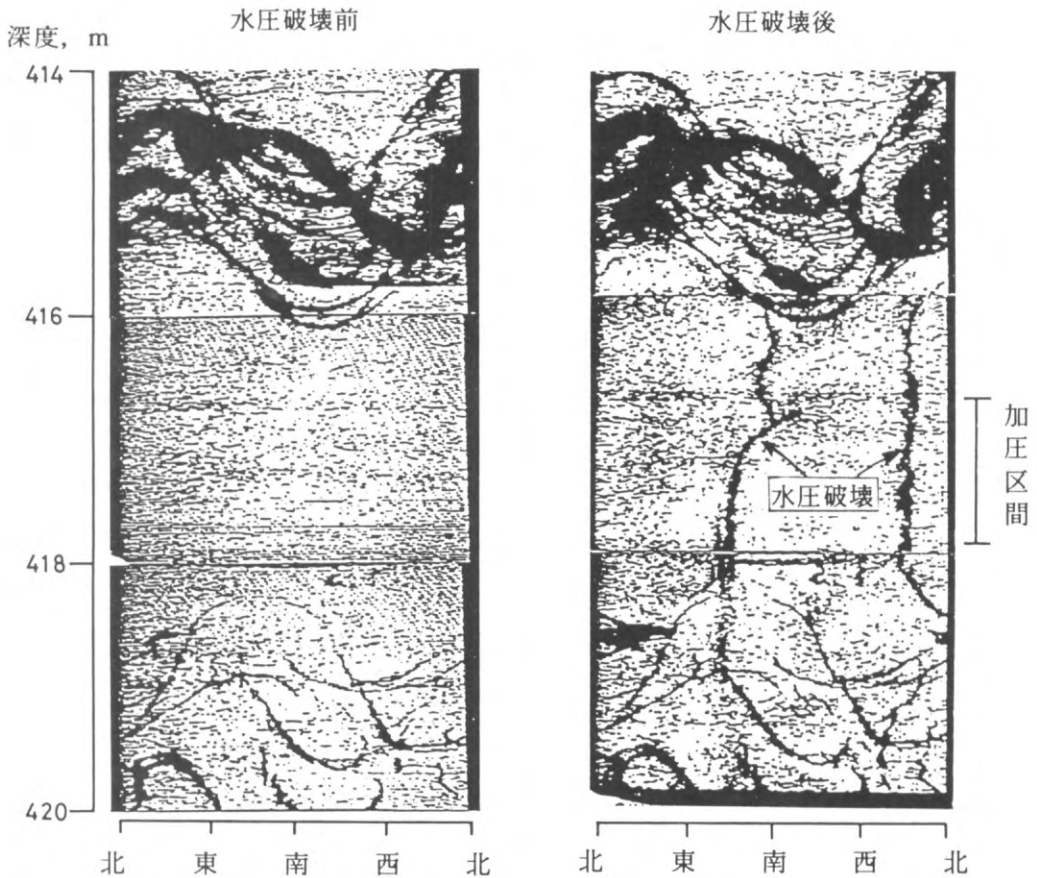


写真5 水圧破壊の前と後で、超音波テレビアで観測した孔壁の状態。水圧破壊によって作られた鉛直の亀裂（北西方向と南東方向）が見える。

の様子を、超音波テレビアで得た写真である。水圧破壊によって生じた鉛直の亀裂が見える。この亀裂を使って、この深度の地殻応力の測定をしたのである。

一方、岩盤強度を見積るための（既存の）亀裂中の水圧は、地殻応力測定に用いた2つの栓を使って測定区間を区切ることによって測定する。測定区間の孔壁に顔を出している亀裂中の水圧と、2つの栓の間の水圧とを、長時間かけて平衡にさせ、その水圧を測定し亀裂中の水圧とする。

圧縮力の向きは北西—南東で地震データと一致

さまざまな深度で水圧破壊によって作られた鉛直な亀裂を検出し、その走向方位を測定した。これは、そこにかかっている地殻応力のうちで最大圧縮力が働いている方位を示す。結果は、北西—南東であった。平均的には北から反時計回転に45°の方向（N45°W）であり、±20°の範囲で変動があったが、深度による系統的変化は見えなかった。

この地域の地下2～15 kmに発生している地震の発震機構解から推定される起震応力、即ち地殻応力の圧縮軸方位は、N45°Wの付近のものが多く（±30°の範囲でばらついてはいるが）、今回の測定値と一致している。つまりこの地域では、地震の発生している地下深部と、ボーリング孔を利用して測定した地表から2000 mまでとが、同じ方位の圧縮力に支配されていることがわかった。

予想と異なった地殻応力の値と亀裂中の水圧

前述のように、地殻応力の大きさは地震の発生にかかわる最も重要な因子の一つである。では、従来の研究結果では、地殻応力の値についてどのような予測がされていたのだろうか。

岩盤中の一点に、周囲から加えられている地殻応力の大きさは方向によって異なる。その中で、最大の応力（足尾の場合、前述のように、その方位はN45°W）と最小の応力との差を「差応力」といっている。岩盤の破壊は、岩盤に加わっている地殻応力の差応力成分の大小に左右される。以下では、地殻応力のうちで差応力成分を取り上げ

て話を進めたい。

「地震は、岩盤中の差応力が岩盤強度を越えたとき発生するのだから、震源域の差応力は非常に高いだろう」と思われがちだ。しかし、そうは考えていない地震研究者も多い。地震波形の解析によれば、地震時に解放される差応力（応力降下量）は意外に小さい、ということを知っているからだ。例えば、マグニチュード4程度の地震（足尾地域で発生する地震の中では最大規模のものに相当する）の場合、応力降下量は10分の1気圧から大きくても10気圧程度である。実験室で、地下数kmの圧力状態を再現して、その下で岩石を破壊させるには、数千気圧以上の差応力を必要とすることから考えると、この応力降下量は異常に小さいことがわかる。このことから、震源域の差応力は意外に小さいとする考えが生まれる。一方、高差応力の存在を支持する研究者もいる。差応力の全量が破壊時に解放される（応力降下する）とは限らないので、応力降下量は差応力のほんの一部だ、と考えるのである。しかし、これは、そのメカニズムの説明にまだ成功していない。

低差応力説では、そのメカニズムについて次のように考えている。つまり、地震としての岩盤の破壊は、既存の亀裂がずれるずり破壊だと予想されるので、この亀裂が異常にすべり易いためだ、とするのである。通常の岩石では、亀裂のすべり摩擦係数は0.3～0.9程度のものなので、例えば、深さ10 kmの岩盤中の平均的圧力2500気圧のもとでは750～2250気圧程度のずり応力（差応力）に換算すると約2倍になるので1500～4500気圧の差応力を必要とすることになる。これを10気圧以下の差応力でずらすことができる亀裂は、まさに「異常」にすべり易くしなければならない。ここで重要な役割を果たすのが亀裂中の水圧だとされている。前述のように亀裂中の水圧が高ければ、この亀裂に沿ってずらすための力は小さくてすむはずだ。亀裂中の水圧はどのくらい高くないといけないのだろうか。例えば深度2000 mでは、岩盤の重量による岩圧が500気圧になるので、これと同程度の水圧ということになる。2000 m下で500気圧の水圧を地表に湧水させると、地表での湧水圧は300気圧にも達する。これを仮に鉛直な水柱にすると、高さ3000 mにもなる。このような高圧水が存在すれば必ず計測できるはずだ。

測定された結果は低差応力説に反して高差応力説を支持し、非常に高い差応力と低い水圧であった。例えば、深度 2000 m での差応力は 800 気圧であり、それに対して、この深度での水圧は 200 気圧以下、地表での湧水圧に換算するとマイナスである。地震波形の解析から予測された低差応力モデルと大きく違ってしまった。写真 6 には 1810

m と 1910 m とで採取した岩石コアを示す。1910 m のコアは、円盤状に細かく割れているのが見える。これは平均応力が高く、かつ差応力が非常に高いために、コアが岩盤から切り離される時に細かく水平に割れてしまうためである。また、ボーリング孔も高い差応力のために壊され、図 2 に示すような鉛直な 2 本の溝（ブレイクアウトといわ

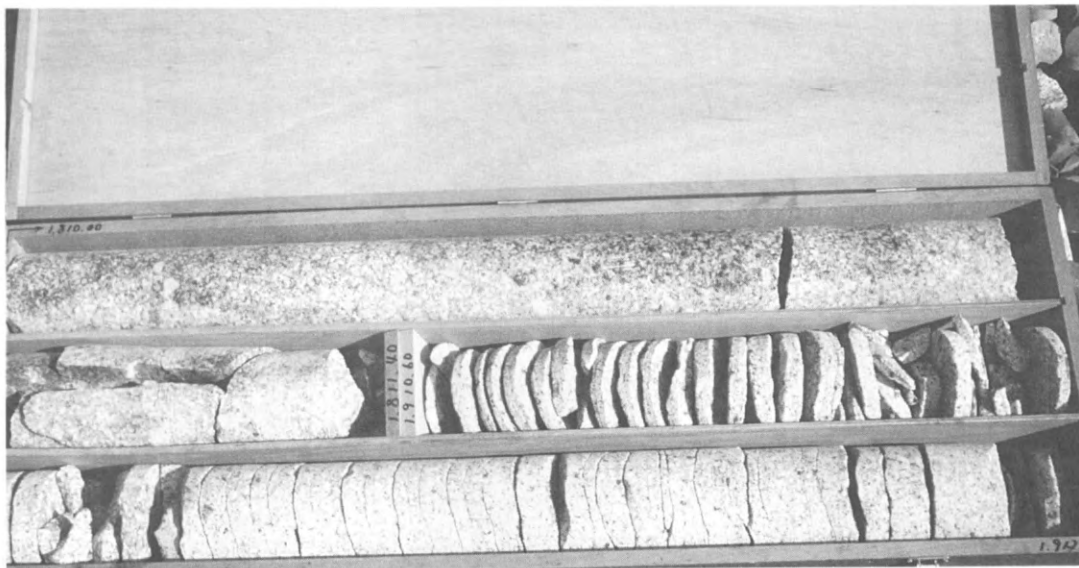


写真 6 非常に高い地殻応力のために、採取時に円盤状に割れた岩石コア。中段の右半分と下段は 1911 m 付近のコア。上段と中段の左半分は 1811 m 付近のコアであるが、こちらの方は円盤状に割れていない。

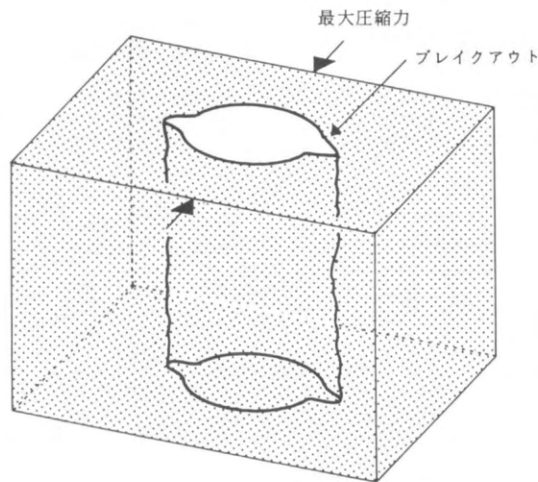


図 2 非常に大きな地殻応力（特に差応力）が存在すると、ボーリング孔の一部が壊されて溝ができる（ブレイクアウトという）。矢印は最大圧縮応力の方向である。溝はこれに対して垂直な方向に 2 本できる。足尾では、溝の深さは最大 8 cm にも達した。

れる)が、最大圧縮力と垂直な方向にできている。その深さは数 cm である。

今後、高差応力下での地震発生モデルを構築しなければならないのだろうか。足尾の測定は重要な問題を提起した。地震波形から推定された応力降下量と地震発生直前に実際に存在した差応力とが大きく異なる物理的メカニズムは何か。これは、岩盤の破壊に関する理論的・実験的研究の進展を待たなければ解決できないだろう。なお、足尾のこの地点での 2000 m ボーリングが震源域に本当に達していたのだろうか、という心配もないわけではない。震源データから見れば、震源域の、少なくとも上端部に達していたと考えられるが、さらに深いボーリングによってこれを確認することは将来必要であろう。

そのほかの孔内計測

さまざまな測定器を信号ケーブルの先端につけて孔内に降ろし(写真7参照)、地層の状況を調査した。これによって地震の発生と関連の深い亀裂の形状・亀裂の分布・亀裂中の水の化学組成などに関する情報を得る。次のような調査を行った。

(a)電気検層：地層の比抵抗の測定。地表との電位差も測定する。(b)音波検層：地層中を伝わるP波・S波速度、それらの振巾、受信波形の測定。(c)温度検層：孔内温度測定。(d)密度検層：地層の密度をガンマ線を地層に照射させることにより測定する。(e)孔隙率検層：地層の孔隙率を高速中性子を地層に照射させることにより測定する。(f)ガンマ線スペクトル検層：孔壁から放射されている

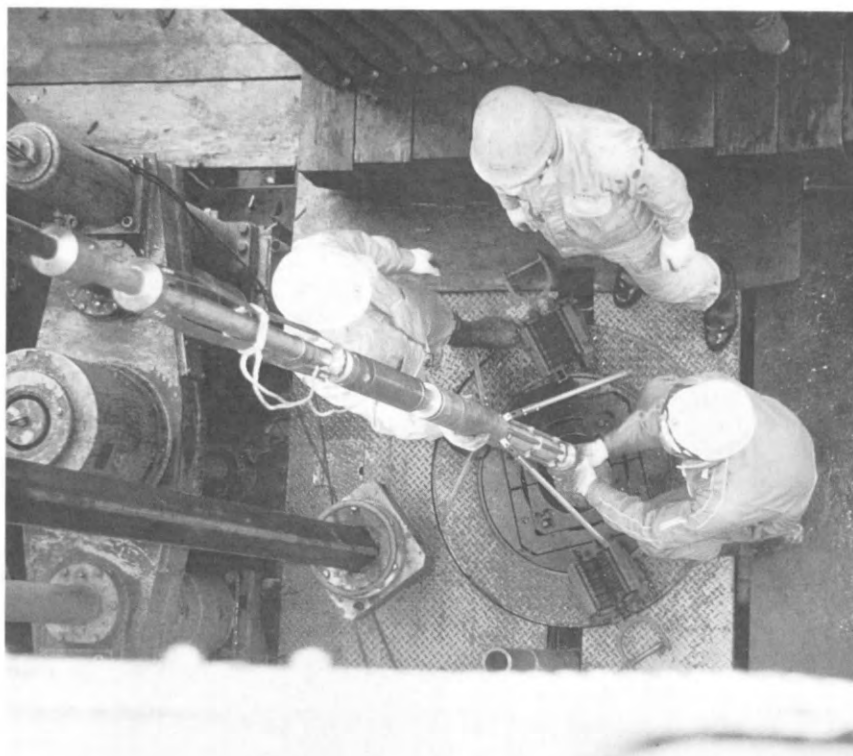


写真7 直交する2方向の孔径を測定する装置を孔内へ降ろそうとしている。孔径を測定する4本の足が見える。この装置を信号ケーブルの先につけ、孔底まで降ろし、深度による孔径変化を測定する。図2に示す溝の有無と深さはこれで測定できる。

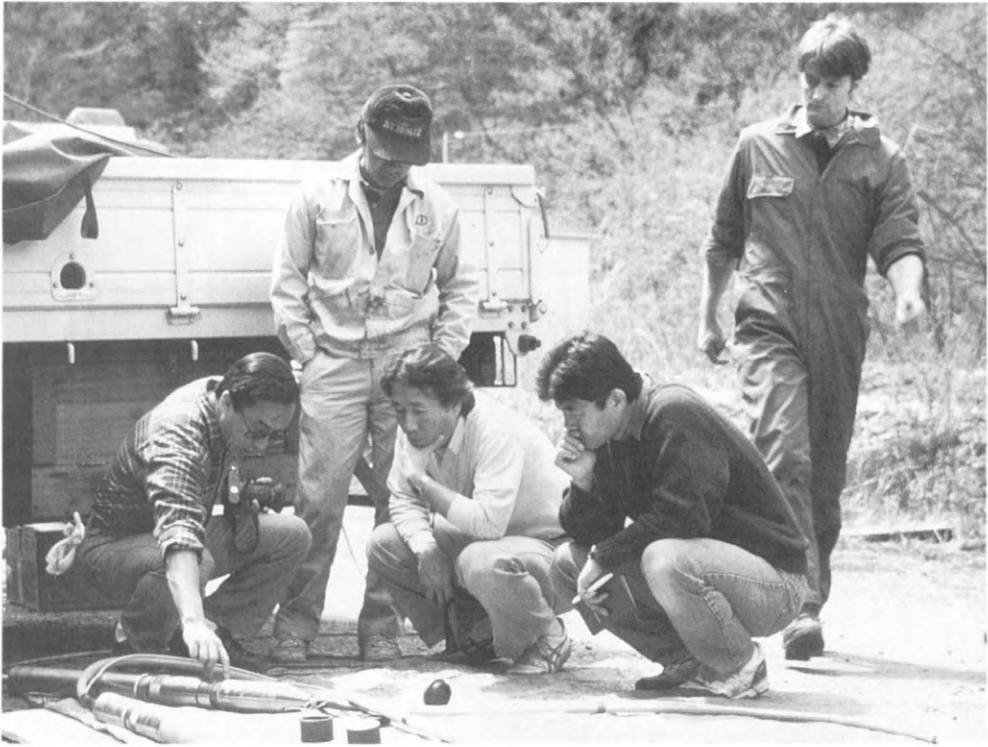


写真8 孔内レーダー検層器の性能について議論し、考え込む池田隆司さん(写真中央)。右端を歩いているのは、ボアホールレーダーを開発しているアベム社(スウェーデン)の技術者。

自然ガンマ線をスペクトルに分解し、K, U, Thの含有量を推定する。(g)超音波テレビュア検層: 超音波を孔内で発射させ、孔壁面からの反射強度分布から亀裂の影像を得る。(写真5参照)。(h)孔内レーダ検層(写真8参照): 電磁波(数十~数百MHz)を発射し、地層中の亀裂で反射される電磁波を受信して亀裂の形状を知る。

深さによる地層の変化はないので、検層データ

の深さによる変動の要因は主として亀裂の存在と、その中の水の化学組成の違いにある。結果は、震源域に近づいて系統的に亀裂が増えるなどといった変化は見られなかった。温度は直線的に増加し、2000 mで93°Cであった。検層結果について詳しくは別の機会にゆずりたい。

(つかはら ひろあき: 地圏地球科学技術研究部)

広帯域地震観測の現状

堀 貞 喜

1. はじめに

1970年代後半以降のグローバル地震学は、デジタル地震観測網が整備されるのに伴って飛躍的に発展した。中でも、米国のスクリプス海洋研究所が推進したIDA (International Deployment of Accelerometers) 計画によって展開された超長周期グローバル地震観測網は、表面波や地球自由振動に関する研究等長周期地震学の分野に多大な貢献をしてきた。この観測網で採用された地震計はラコステロンバーク重力計で、その長周期帯域でのS/N比の良さは定評があった。しかし、センサーが重力計であるため3成分ある地動のうち上下動成分しか計測できないこと、帯域が長周期側に偏っているため実体波の様な短周期の地震波を記録することができないこと、更にダイナミックレンジが狭いため、地震後最初に到達するレーリー波(R_1)の様な大振幅の地動に対しては飽和し易いなどという難点があったため、地震学者の間では新しいデジタル地震観測網の構築が待たれていた。フランスの地球物理学研究所(IPG)によって進められているGEOSCOPE計画では、こうした要請に応える形で、センサーとして新しい地震計を採用した。この地震計は、スイスのストレックアイゼン社が開発した(超)広帯域・広ダイナミックレンジのフィードバック型地震計(STS地震計)で、0.1秒から360秒までの広い周期範囲で平坦な速度出力の特性と、140dBという広いダイナミックレンジを持つという画期的な特徴を備えたものである。

筆者は、特別研究「関東・東海地域の地殻活動に関する研究」の中の「地殻活動観測網の能力維持および性能向上に関する研究」の一環として、これと同一機種 of 広帯域地震計の設置に携わってきた。さらに科学技術庁の長期在外研究員派遣制度によって、この分野での先進国であるアメリカ合衆国のカリフォルニア工科大学(Caltech)地

震学研究室(Seismo Lab.)へ出張する機会にも恵まれたため、ここでは日本と米国における広帯域地震観測の現状と問題点について報告する。

2. 米国における広帯域地震観測

前述したように、STS地震計は周期0.1秒から360秒の範囲ではほぼ平坦な速度出力の特性を持っている。つまり、IDAに匹敵する長周期地震計としての機能と、震源決定に必要な位相の読み取りを目的として用いられている通常の短周期微小地震計の機能も合わせ持っていることになる。更にダイナミックレンジが広いこと、強震計としての機能もある程度備えた、いわば万能地震計といったものとなっている。こうしたことから、米国では早くからこの地震計を採用したグローバル地震観測網の展開を手がけるとともに、ローカルな地震観測網にもこの地震計を採用するようになった。前者としてはIRIS計画が、後者としてはTERRAScope計画が有名である。IRIS計画では、米国本土にこの地震計の観測施設を展開するだけでなく、それまでのグローバル地震観測網である、SROやIDAの観測施設を発展的に吸収し、旧センサーをSTS地震計に置き換えつつある。また、主としてカリフォルニア工科大学によって推進されているTERRAScope計画では、広帯域地震計だけでなく、汎地球測位システム(GPS)の観測網も、巨大な地震の巣であるサンアンドレアス断層の存在する南カリフォルニア地域に展開し、地震防災にも役立てようとしている。

米国における広帯域地震観測の特徴は、その収録システムにあると言って良い。STS地震計のダイナミックレンジは140dBもあるため、アナログ信号をデジタル信号に変換するときのビット数は24以上が望まれる。フランスのGEOSCOPE計画では、IDAと同じ16ビットでアナログ・デジタル変換が行われていたが、米国のIRIS

計画や TERRAScope 計画では、同国のクエンテラ社がこの地震計のために開発した、24 ビットのアナログ-デジタル変換器を含むデータプロセッサが採用されている。更に公衆電回線を利用して観測点に電話をかけ、現地に蓄えられた地震波形データを読み込むダイアルアップ方式を採ったため、データへのアクセスが誰にでも非常に手軽にできる様になっている。データの種類も、主として実体波用である 20 Hz サンプリングの VBB チャンネル、表面波の解析に用いられる 1 Hz サンプリングの LP チャンネル、更に地球自由振動等、超長周期地震波を解析するための 0.1 Hz サンプリングの VLP チャンネル等があって、地震学における要求のほぼ全部を満たすものとなっている。

筆者は、実際に滞米中に IRIS や TERRAScope のデータを何度も利用したが、操作性はなかなかのものである。データの読み込み方には、研究者の持っているパーソナルコンピュータやワークステーションから観測点に直接電話をかける方法と、IRIS のデータマネージセンター (DMC) のコンピュータにリモートログインし、そこに蓄えられたイベントデータをファイル転送 (ftp) するという 2 通りがある。前者の場合、地震発生直後にデータを読み込んで解析できるというメリットがある。このことは、例えば震源決定に加えて、強震動を被った地域の推定も地震発生直後に可能となるわけで、地震災害の初期救助活動の上でも、非常に有用なことである。筆者が滞米中の 1991 年 6 月 28 日に、マグニチュード 6 クラスの浅い地震がロサンゼルス近郊を襲ったが (ちなみにこの時の揺れは、筆者がこれまで経験した地震の中で最も大きなもので、実際に恐怖を感じる程であった)、この時も、各観測点ではまだデータを収録途中であるにもかかわらず、全国からデータにアクセスするための電話がかかりっぱなしであった。カリフォルニア工科大学でも地震発生直後から迅速な解析を実施し、数時間後に同大学で行われた記者会見では、まだ、有感の余震がひっきりなしに起きていた中で、地震についての (テクニク的な意味も含んだ) 詳しい解説がなされた。こうしたことが可能であるのも、このダイアルアップ方式の収録システムならではのものである。

前述した地震波形データを読み込むもう 1 つの方法は、ゴーファ (gopher、「もぐら」の意) と呼ばれている。簡単に言うと、各研究者が勝手に行っている、観測点に電話をかけるという作業を、IRIS の DMC にあるコンピュータが自動で行うと言うものである。普通地震が起こると、米国地質調査所 (USGS) が、即座に発震時刻、震源の位置、およびマグニチュードを決定し、電子メールを発送する。IRIS の DMC では QED (Quick Earthquake Determination) と呼ばれるその電子メールを受け取ると、直ちに各観測点毎に、震央距離等に応じてデータを抽出すべき範囲を計算し、電話をかけてデータを読み込んだ後、イベントデータとして、コンピュータのディスクに蓄積する。研究者は DMC のコンピュータにリモートログインし、ftp を行って、自分のコンピュータ上にそのイベントデータを展開する。DMC には、この他データを解析する上で欠かせない、センサーの位置や特性、更に欠測期間等のトラブル状況に関する情報や、利用者から寄せられた電子メールにもアクセスすることができるようになっている。

こうした、データ収録・配布方式における最大の特徴は、ダイアルアップ式にしる、リモートログインする方式にしる、誰でもアクセスできるユーザ ID とそのパスワードが公開されているということである。つまり、データは完全にオープンとなっているのである。データの収集機関が、そのデータを事実上独占していれば、例えばデータの特異性に依存しているだけで、余りアカデミックとは言えないような内容の研究をしても、ある程度研究者としての命脈は保てるかも知れないが、こうした、データ完全公開の状況下では、同一のデータを複数の研究者がほぼ同時に解析できるため、自然と研究者間の競争は激しいものとなっている。特に米国においては、日本の様な終身雇用の慣習が存在しないため、「研究能力」の劣る研究者は、容赦なくドロップアウトさせられていく傾向に拍車がかかることになる。これは、ある意味では研究者にとって非常に辛いことであるが、研究活動全体の活性化にはある程度機能していると言えるであろう。勿論、こうした体制を可能としているのは、「研究」機関と「データ収集」機関との分離や、「研究」者と「技術」者と

の分離が明瞭な米国ならではの事情であろう。

3. 日本における広帯域地震観測

日本では、GEOSCOPEが名古屋大学の犬山地殻活動観測施設に広帯域地震計を設置したのを契機に徐々にこの地震計を設置する機関が増え始めた。その動きと並行して、主として大学が中心となってPOSEIDON (Pacific Orient SEismological Digital Observation Network) 計画が提唱された。この計画は、海底を含む西太平洋及び東アジア地域に広帯域・高精度地震計の観測網を構築しようと言うものである。海底に設置する地震計については、まだ機種は決まっていない様であるが、島を含む陸上の観測点に設置する地震計は、IRISやTERRAscopeと同様、STS地震計を採用する動きである。世界でも有数の沈み込み帯であり、地震帯でもあるこの地域に構築される高精度地震観測網のデータを解析することによって、多くの研究成果が期待されるが、残念なことにこのPOSEIDON計画は、まだ正式な予算上の裏付けを持った形では始動していない。

そこで、大学を始めとして各研究機関は独自の研究予算で広帯域地震計の設置を始めている。防災科学技術研究所も既に5台のSTS地震計を所有し、3台が観測点に設置されて実際にデータを収集している。ところが、折角このようにして設置された広帯域地震観測施設も、米国のIRIS計画の様に、中核となる機関が統一した枠組みの中で展開したネットワークではないため、各機関が所有するデータ間の「風通し」は必ずしも良好ではない。最大の問題は、データ収集のための方式が各機関でバラバラなことである。例えば、北海道大学では通常の微小地震及び地殻変動観測網のテレメータにそのままデータを乗せているだけであるし、東京大学の地震研究所では、独自のデータ圧縮形式を利用したダイヤルアップ方式を採用している。こうしたデータ収集方式における不統一は、限られた予算の中で、各機関が取り合えずデータの入口部分であるセンサーだけでも導入しようという、精一杯の努力をした結果によるものではあるが、データを使う立場から見ると、非常に不便である。アナログ-デジタル変換のビット数がまちまちであるのはともかく、地震波形

データのサンプリング周波数ですら、各機関毎に異なったものを採用している場合が多い。

こうした問題に対し、データの外部機関との相互利用に対する利便を図ろうとする動きも、少しずつではあるが始まっている。東京大学の地震研究所では内部的に「ポセイドン準備室 (pre-POSEIDON Data Center)」を設置し、既設の広帯域地震観測施設の維持と、各機関のデータ収集及び配布を行っている。データの収集に関しては、実際の各機関の協力体制に依存しており、データの配布が行われるのは約1~2年後と、まだまだ「データセンター」としての機能は不十分と言わざるを得ない。しかし、従来諸事情から、地震波形のデジタルデータを外部に提供することに極端に消極的であった日本の大学や国立研究機関の間で、相互利用を前提としたデータ公開に、ともかく取り組み始めたということは意義が大きいと言えるであろう。

4. 広帯域地震観測における問題点

こうして広帯域地震観測の日米の現状を述べていると、日本の遅れが際立っているように見える。特に、日本におけるデータ公開の遅れは、米国の研究者の間で「日本は米国のデータを利用するだけで、自らのデータを公開することに消極的である」と言う、余り好ましくない風評が定着しつつあると聞く。日本には日本の特殊事情があることも事実であるが、世界に冠たる「経済大国」としては、その他の国際協力の問題と同様、このまま、放置できることではあるまい。

地震学は他の自然科学と同様、地球から発せられるデータである自然現象を如何に精度良く測定するかと言うことに、研究活動の最重点を置いている。その意味では、データ入力部である地震計として、その時点における最良のものを用いるということは、極めて意義があることである。勿論、微小地震や地殻変動の観測体制が充分であるとは言えない現時点では、それらの拡充と併せて広帯域地震観測を推進していく必要もある。更に、こうした質・量におけるデータの向上に見合う解析技術や、アイデアを生み出す努力も続けて行かなければならないであろう。

(ほり さだき: 地圏地球科学技術研究部)

ネットワーク MT 法の紹介

上 嶋 誠

1. はじめに

電気伝導度は、物質の電気の流れやすさを示す量であり、地震波速度や Q (クオリティファクター) 等と並び、地下の状態を知る上で重要な物理量の一つである。一般的に、物質は、温度を上げたり、融解したり、または、水を含むと電気を通しやすくなるので、電気伝導度は、温度分布や溶融体、間隙水等の存在に敏感となる。

地殻下部やマントル等の地下深部での電気伝導度構造を求めるため、我々は磁気圏や電離圏起源の地球電磁場変動を用いる。これらの地球外部に起源をもつ電磁場変動が、有限の電気伝導度をもつ地球内部に浸透していく際、電流が誘導される。物質中を電流が流れると、その際のジュール発熱によってエネルギーが散逸するため、地中に透入した電磁場は深度と共に次第に減衰していく。電気伝導度が高い (即ち電気が流れやすい) 程この減衰も大きくなるので、地中における電磁場の減衰の様子を知ることができれば、地下の電気伝導度分布を知ることができる。実際には、直接地下における電磁場を測定することはできないので、地表において観測された電磁場の周期特性から、地下の電気伝導度を推定する。この方法は、電磁場変動の周期が短い程地中における減衰が急速であるという性質を用いている。

地球を電気伝導度 10^{-2} s/m の均質導体とすると、電磁場の浸透する深さは、周期を 1 時間として 300 km, 1 日として 1500 km 程度となる。従って、地殻や上部マントルの構造は、数時間までの周期をもつ電磁場変動を解析することによって推定し得ることになる。ちなみに、全地球的な磁場変動の解析¹⁾から、地下 400 ~ 500 km 以深でかなり電気伝導度が高くなる (1 s/m 以下) と推定されているので、下部マントルや核の構造を調べるためには、10 年程度の周期を用いなければならない。

2. ネットワーク MT 法の特徴

地磁気地電流法 (MT 法) において、我々は、地表において観測される電場磁場水平成分間の比 (インピーダンス: 振幅比と位相差をみるので複素数となる) の周期依存性を用いる。測定された電場は、地球外部起源の電磁場変動によって誘導された電場の地表での値である。一方磁場の方は、アンペールの法則に従って地中に誘導された電流を深さ方向に積分したものとなる。従って、その比をとることによって、地中での電気の流れやすさを知ることができるのである。

初期の MT 法においては、1 次元層構造を仮定し、電磁場は水平方向に無限の波長をもち垂直方向に伝播すると仮定していた。この仮定をおくと、地中に誘導される電流は水平成分のみとなり、電磁場は水平成分しか持たず、1 点の電磁場観測からその直下の電気伝導度構造が得られる。また、比較的解析も容易である。しかし、2 次元以上の構造が存在するときは、電気伝導度構造が水平方向に不均一であるために誘導電流の集中や屈曲がおこる。また、表層付近の複雑な電気伝導度分布を反映して、異なる電気伝導度を有する物質境界を横切るときには電場が不連続になる効果も現れる (スタティック効果)。これらの効果を正確に見積らなければ正しい電気伝導度構造は得られない。このため、従来の点、あるいは線的観測から、面的観測を行う必要が生じる。

ネットワーク MT 法は、以上の点を解決すべく森等によって開発された電話通信網を用いた地電位差観測法²⁾を拡張発展させたものであり、電話回線をケーブルとして用いることによって通信用アース間や自作電極間の電位差を測定する (図 1)。

その特徴として以下の点が挙げられる。

- (1) 電場の観測の基線長が 10 km 程度と従来の MT 観測の約 100 倍あるので、電位差シグナル

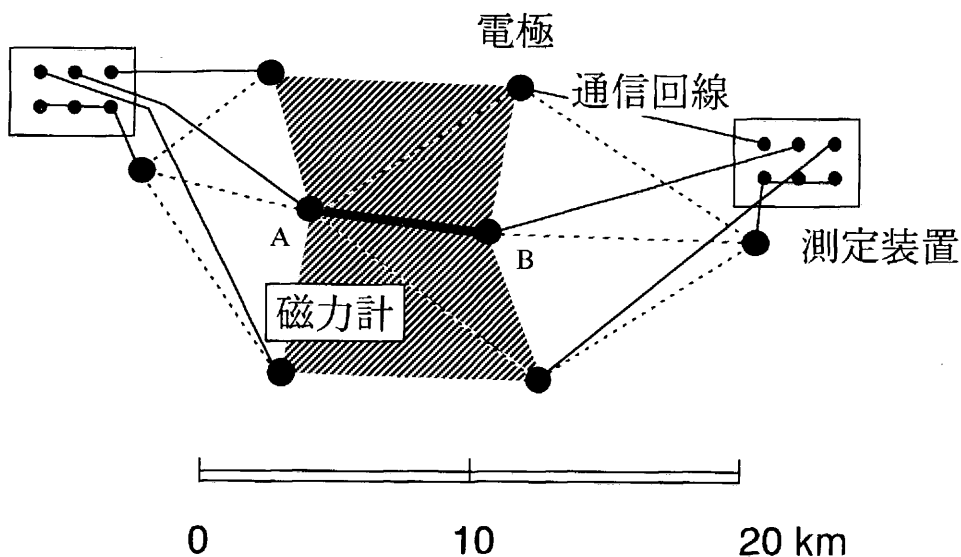


図1 ネットワーク MT 法観測の概念図。測線 AB の観測を追加するだけで、斜線の地域でのインピーダンスを得ることができる。

もそれだけ振幅が大きくなり、信号/雑音比が大きくなる。また、水平波長が短いと考えられる人工雑音についても、基線長を長くとることによって平均化され、相対的にその寄与が小さくなる。このことは、日本におけるように電場雑音レベルが高いところでは、非常に重要な意味をもつ。

- (2) さらに、基線長を長くとることによって、表層付近の複雑な電気伝導度分布を反映したスタティック効果を除去しうる。
- (3) NTTの通信回線網が十分密に分布しているため、後で示すように(図2~5)、通常では得ることが困難な山間部も含めて、調査地域を面的におおうインピーダンスの分布を、非常に効率よく得ることが可能である。特に、定点地球磁場観測点(例えば気象庁の各地磁気観測所)のデータを参照することにより、探査領域の拡張が容易に行える。

最後の(3)は、ネットワーク MT 法の解析法と密接に関連しているので、ここで簡単に解析法を述べておく。まず、定点観測の磁場変動に対する各測線の電位差の応答関数 (VH, VD) を各データのフーリエ交換を求めたあと、自動的異常除去アルゴリズム³⁾を用いスタッキングを行うことに

よって求める。ここで VH, VD は、定点観測点で南北及び東西方向の単位磁場変動が起きた時の各測線の電位差変動を表す。従って、観測領域を3点の電極ポイントから成る小三角領域に分割したとして(図1)、定点観測点で単位磁場変動があった時の各小三角領域内の電場は VH, VD の線形重ね合わせによって求めることができる。そしてそれは、各領域についての電場変動の定点観測点での磁場変動に対する比、即ち、インピーダンスを求めたことに他ならない。こうした分析を行うことにより、例えば、図1の場合、新たに1測線 AB (太線) の観測を追加するだけで、斜線の領域について観測域を飛躍的に拡大させることができる。

3. フィールドでの応用例—北海道中東部に於ける観測—

北海道中東部は、千島弧の西端にあたり、島弧の一部であり、また、過去において日高山脈の形成をもたらしたプレートの衝突や、太平洋プレートの斜め方向の沈み込みによる千島弧の西進など、地学的に興味深い様々な現象が起っている地域である。そういった地域で面的にインピーダン

スを求め、3次元的な電気伝導度構造モデルを構築することによって、過去そして現在起っているそれらの地学現象を電磁気学的側面から理解しようという目的で、最初のネットワーク MT 法の観

測が北海道中東部において行われた。

図2に、女満別において東西方向に単位磁場変動が起きたときの各地での電場変動の様子を示す(長さは[mV/km]に比例、周期は64分)。電気

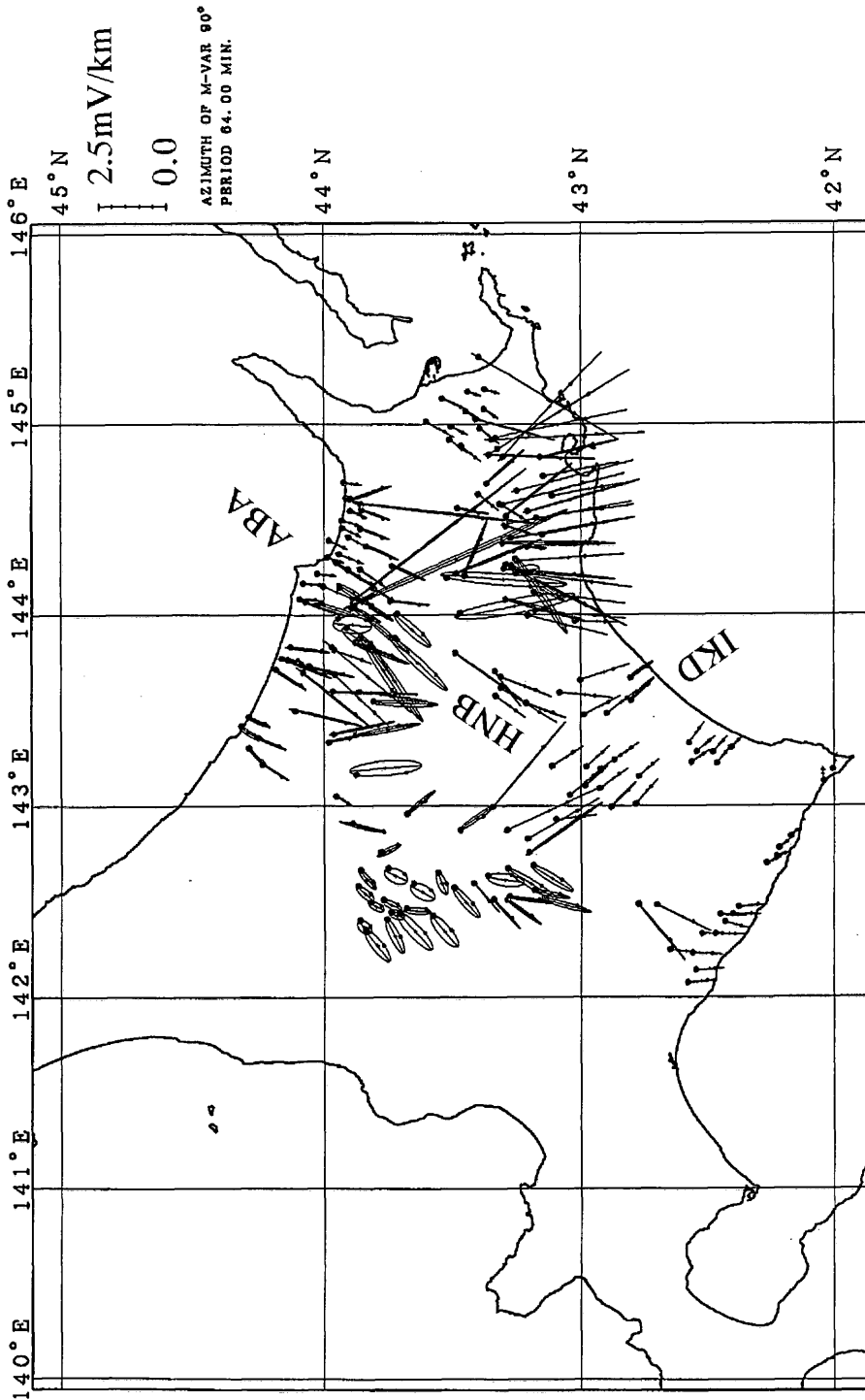


図2 女満別において東西方向に周期64分の単位磁場変動が起きたときの、電場変化楕円の分布。

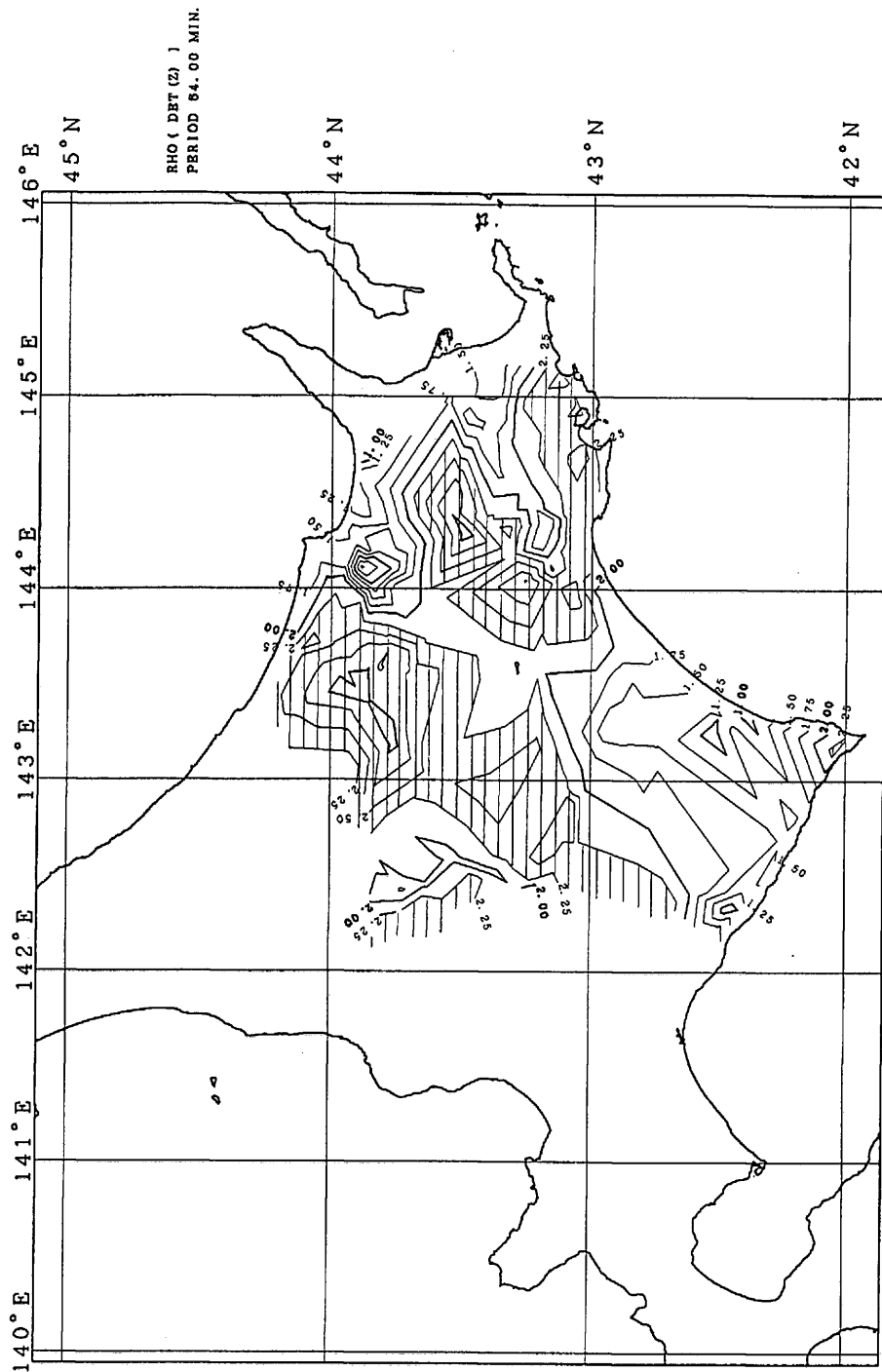


図3 周期64分の平均化したインビンダンス (det (Z)) の絶対値の分布。

伝導度の不均一な分布のため電場変動は単純に南北方向のみとはならない。網走 (ABA) から本別 (HNB) を通り池田 (IKD) に抜ける西に屈曲した線上に電流の集中帯が認められる。図3は、周期

64分の平均的見かけ比抵抗のコンター (単位は $\log(\Omega m)$) 図であり、相対的に見かけ比抵抗の高い ($180 \Omega m$ 以上) 領域に斜線を施してある。東部地域において、南から北にかけて、高-低-高-低比

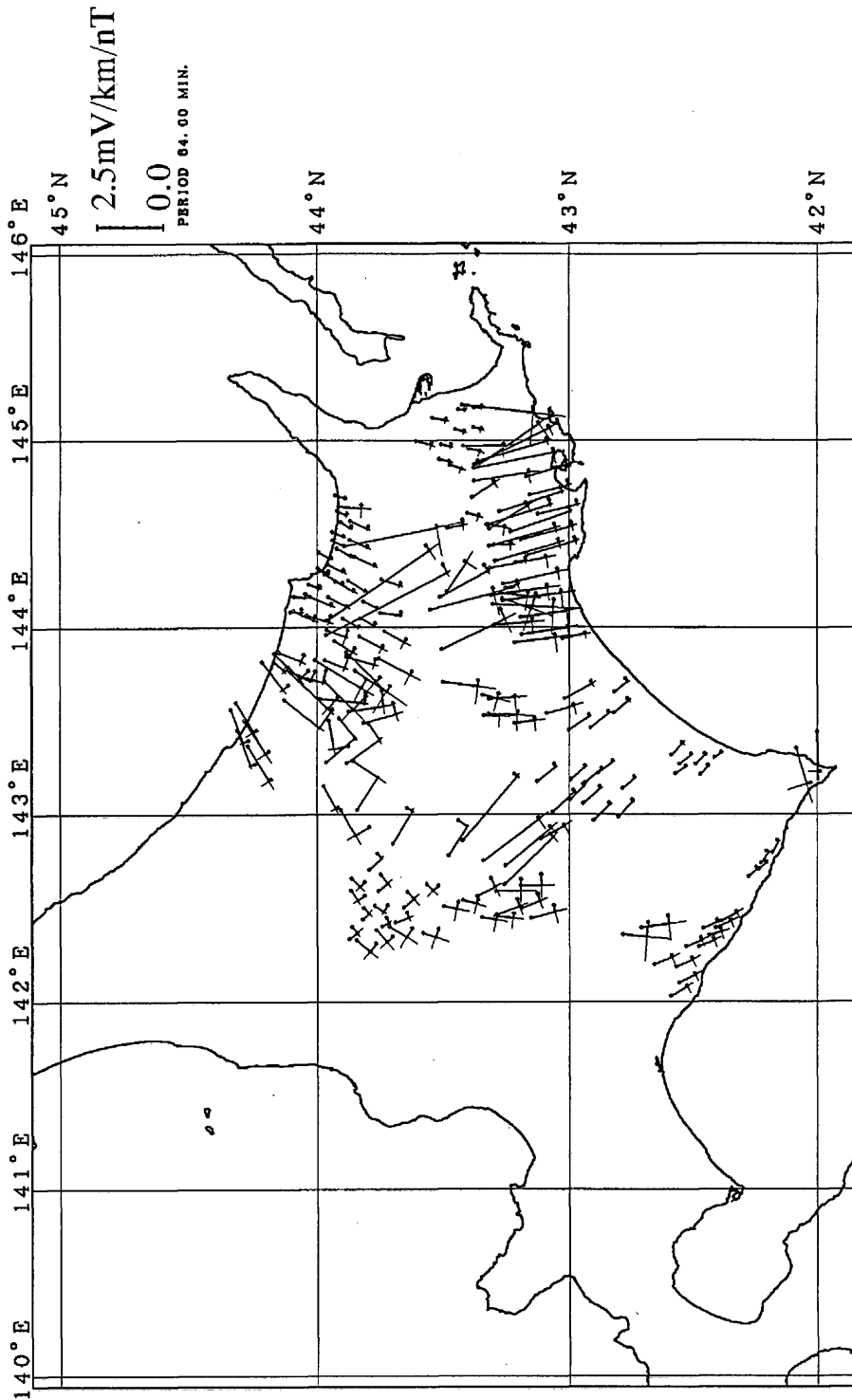


図4 周期64分のインピーダンス主軸方向と、主軸方向に回転した時のインピーダンスの絶対値の分布。

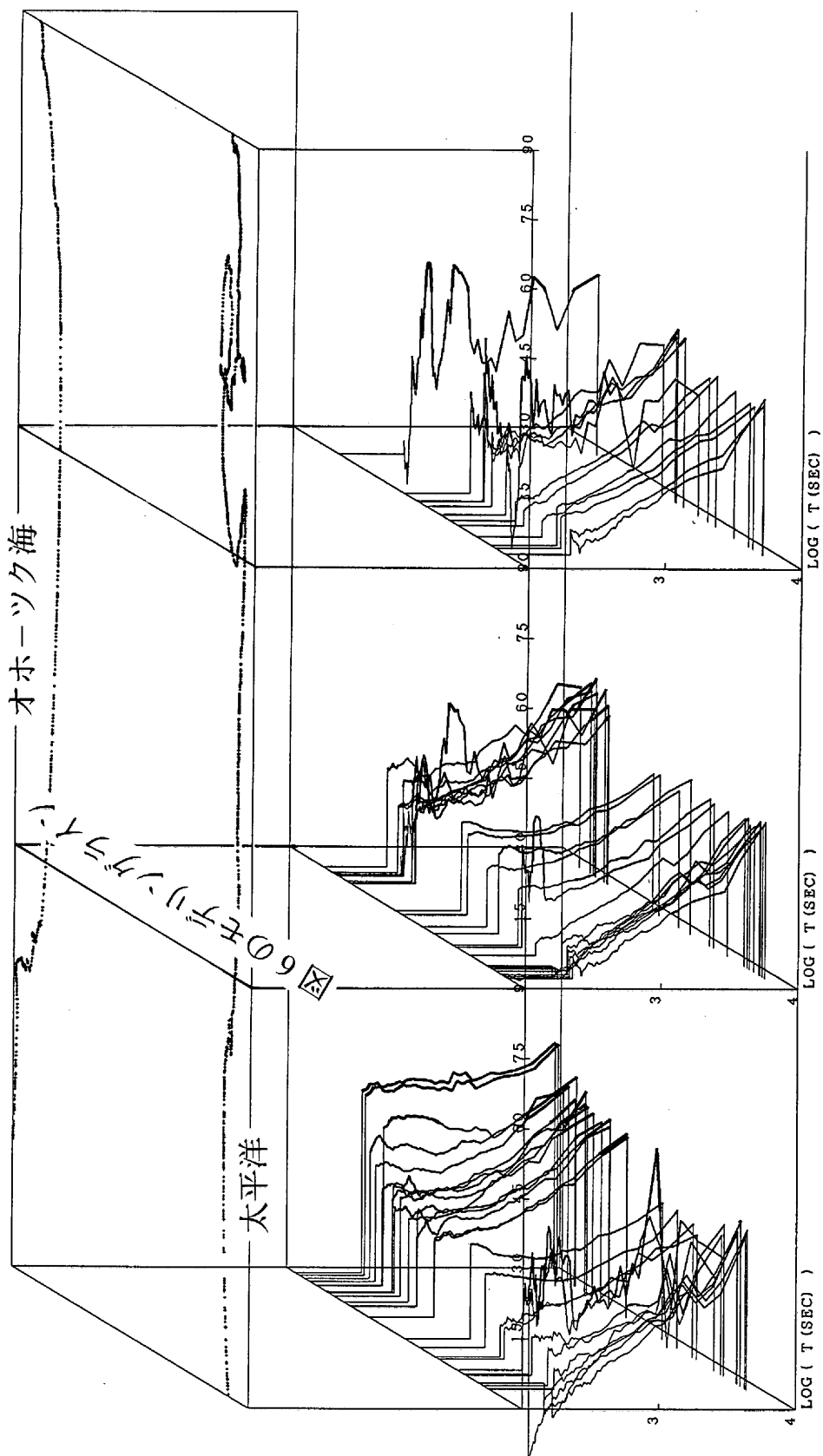


図5 北海道東部地域における、主軸方向に回転したインピーダンステンソル非対角成分を開いた擬位相立体図。TMモードの方を示してある。

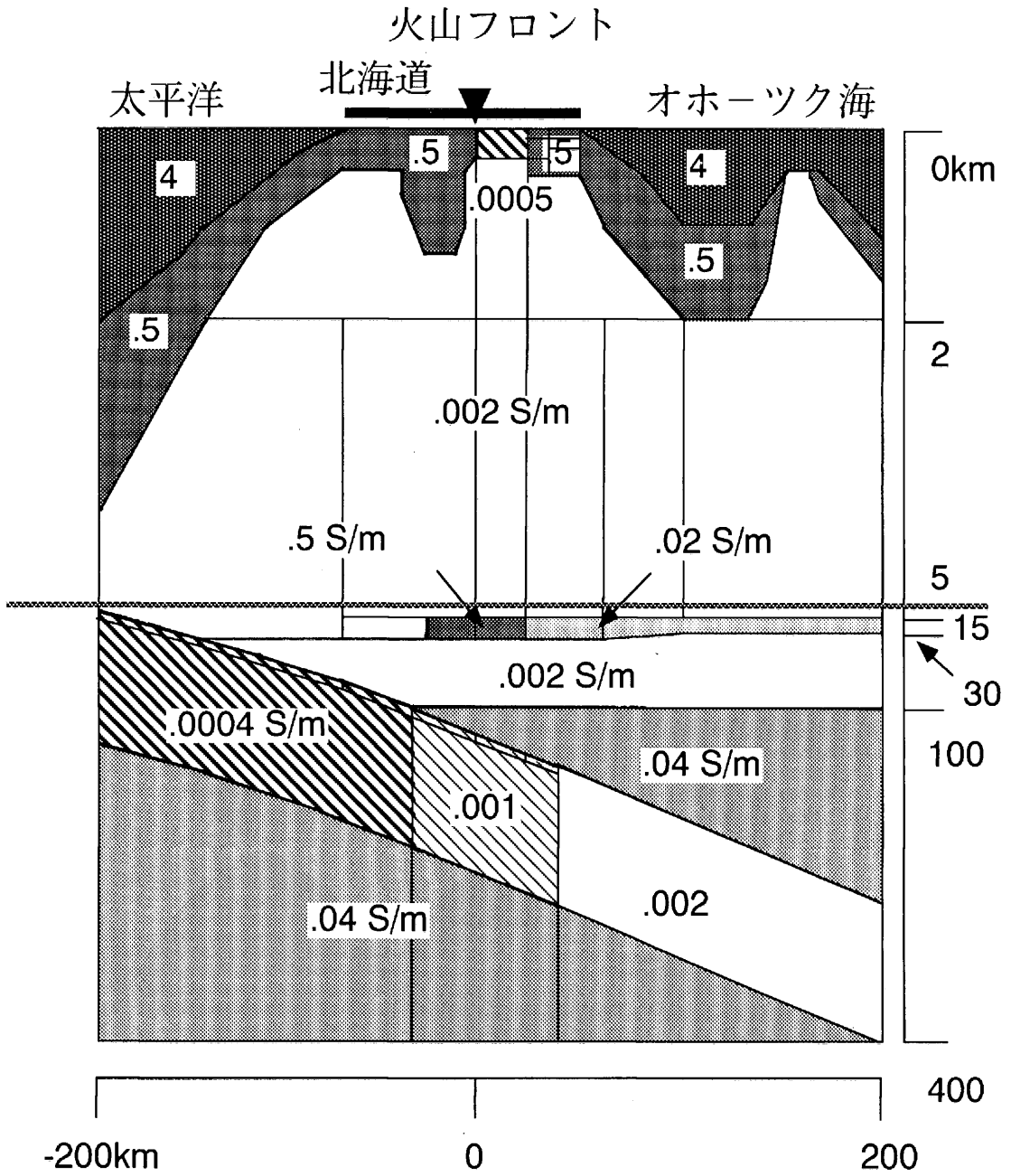


図6 有限要素法を用いた2次元解析結果。浅部5kmの構造を拡大して描いてある。

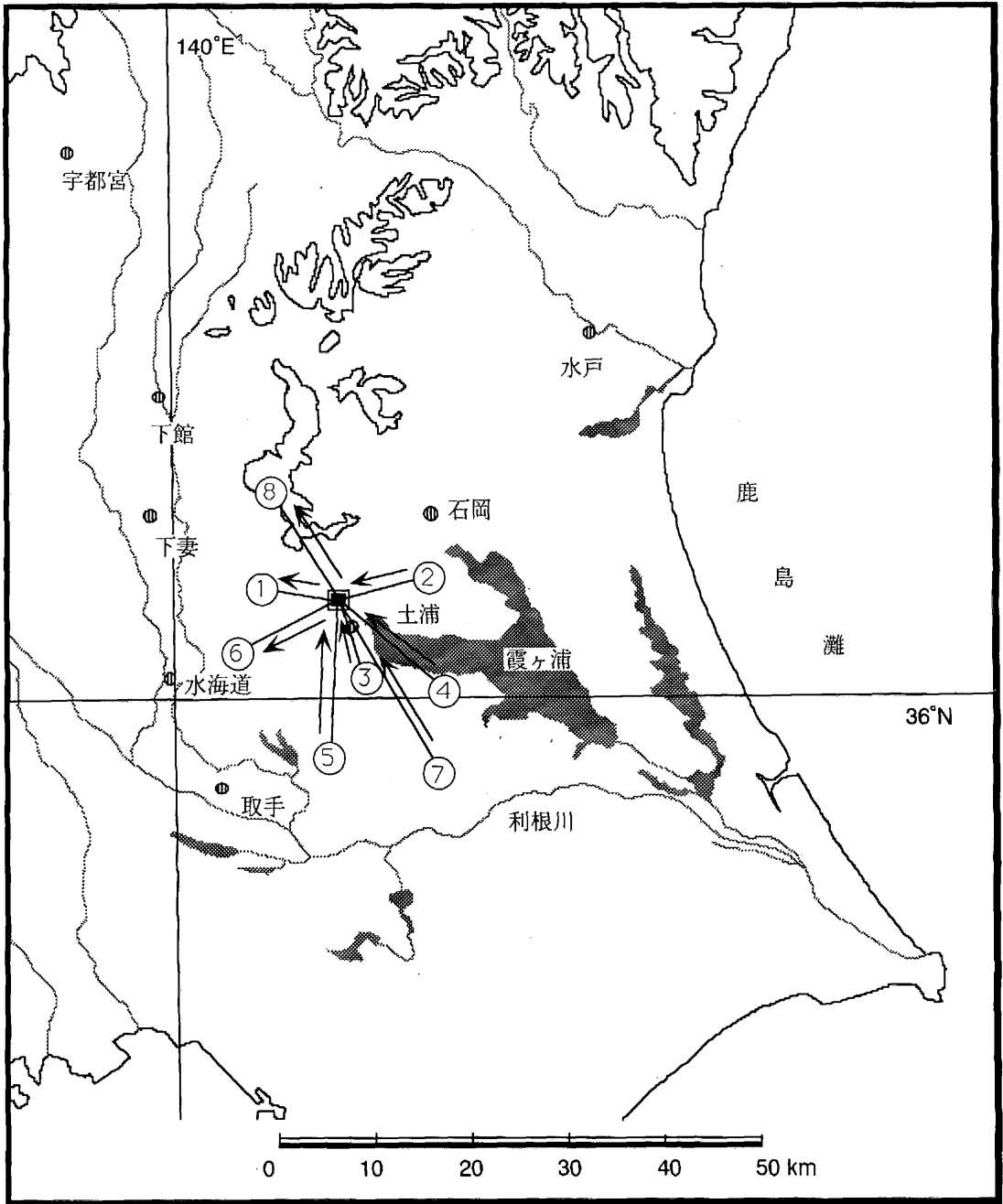
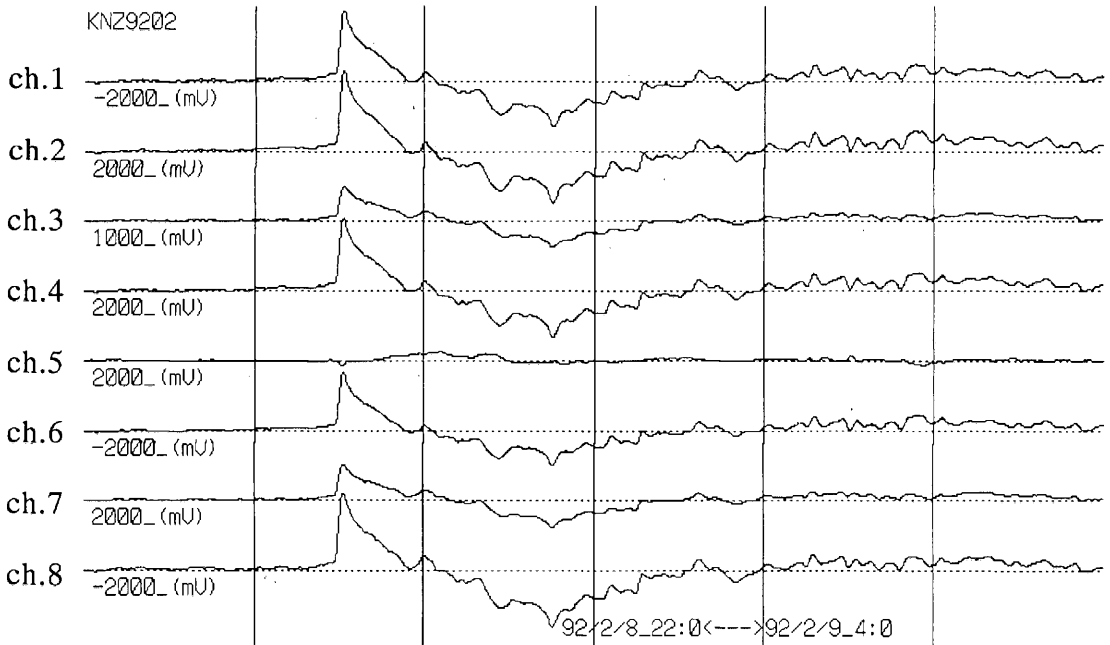


図7 茨城県土浦市周辺におけるネットワーク MT 法観測点配置と得られた電位差変動データ例。1992年2月8日22時～2月9日4時の6時間の変動を示してある。



抵抗の縞模様が認められ、西方（東経 144° 付近）でその高比抗が互いにつながって横倒しの右に開いた U 字型をしていること、その西にはまた低比抵抗帯があって前述の電流集中帯と対応している事等が認められる。図 4 にやはり周期 64 分のインピーダンステンソルの主軸方向の分布とその方向に座標軸を回転した時のインピーダンスの絶対値の分布（棒の長さが [mV/km/nT] に比例）を示す。この主軸方向の分布は、地域の電氣的な構造の走向を示す。海岸線効果、即ち、海岸線に直交する方向のインピーダンスが大きくなる効果が顕著であり、北海道中部から東部にかけての全域に、前述の電流集中帯の存在を整合性のあるトレンドとしてその存在が認められる。

以上で述べてきた構造は、この地域のブーゲ重力異常分布や表層地質図との対応が極めて良い。根釧台地や帯広平野等において、ブーゲ重力異常が一次的には表層付近の堆積層の厚さによって決められていることが、いくつかの研究により明らかにされているが、上述のインピーダンス主軸方向や絶対値の分布も表層構造との間に密接な関連があることが示唆される。たびたび登場してきた、電流集中帯には、地質学的には網走構造線 (ATL) が位置している。電磁気学的に見て、この

ATL に沿って高電気伝導度物質が連なっている可能性も指摘される。

図 5 には、インピーダンスの位相を用いた東部地域の擬似立体図が示してある。各点での位相の値が、変動の周期に対して示されており、下方向に周期が長く（即ち深く）なっている。手前が太平洋側で、奥がオホーツク側である。位相の分布は、図 2-4 の主軸方向や絶対値の分布とは異なっており、有限要素法を用いた 2 次元モデリングより、位相は下部地殻や上部マントルなどの深部構造をよく反映していることが確かめられた。モデリングは、図 4 を見て最も 2 次元性が成立している、東部地域をほぼ南北に切る測線で行われた。得られたモデルを図 6 に示す。図 6 は、浅部 5 km を上下に拡大して示してある。火山フロント付近より背弧側の下部地殻や、背弧側ウェッジマントルに存在する高電気伝導度層が特徴的であるが、それらは、図 5 において背弧側の地域での短周期及び長周期における電磁場間の大きな位相のずれを説明するために必要である。下部地殻の高電気伝導度層からは、この位の深さではあまり温度が高くないことから水の存在が推測され、一方上部マントルの高電気伝導度層では部分熔融の可能性が指摘される。図 5 から、上述の構造が島

弧の走行方向に連続していることが想像される。しかし高電気伝導度の強度変化、さらに北海道中部地域の深部構造は、3次元性を考慮した解析によらなければならない、現在もモデリング手法を検討している段階である。

4. おわりに

以上で述べてきたように、ネットワーク MT 法は、大局的な深部地下電気伝導度構造を把握する上で強力かつ効率的な観測手段である。北海道やここでは述べられていないが青森県における観測の成果を踏まえて、茨城県南部域でネットワーク MT 法観測を1991年12月より開始した。同地域は、フィリピン海プレートと太平洋プレートの二

重の沈み込みや、顕著な地震の巣があり、地学的にも非常に興味深い地域である。同観測においては、新しく、鉛塩化鉛電極を自作して NTT 通信回線に接続するという方法をとった。このことによって、より自由に電極を中継局以外の場所に配置することができるようになった。現時点では、土浦市周辺の8測線でデータが得られている。図7に、測線分布と得られた電位差変動データの例を示す。2月8日23時30分頃から磁気嵐が起っている。図7に見られるように、土浦市周辺という比較的都市に近い環境であるにもかかわらず、全体として人工ノイズの影響の少ない良質なデータが得られており、今後の成果が期待される。

(うえしま まこと：特別研究員)

〈引用文献〉

- 1) T. Rikitake (1973), Global electrical conductivity of the Earth, *Phys Earth Planet. Inter.*, 7: 245-250 など。
- 2) 森 俊雄 (1985), 長基線地電位試験観測, *気象研究所研究報告*, 36: 149-155。
H. Takayama and T. Mori (1990), The character of the geoelectric field observed with a long electrode span. *Tectonophys.*, 185: 141-151.
- 3) 上嶋 誠 (1990), 電磁気観測データの Robust stacking 法について。CA 研究会 1990 年論文集。243-254。

雪氷コアによる地球規模酸性化の解明

東 久美子

1. はじめに

南極や北極のような極地や、標高の高い山岳地域にある氷床や氷河では、降り積った雪は夏でも融けること無く残る。このため、新しく降る雪はそれ以前の積雪層の上に次々と堆積していくことになる。このとき、積雪層の中には、周囲の大気を取り込まれていく。このようにして、氷床や氷河の雪や氷には過去から現在までの雪や大気が時代の流れに従って保存されているのである。従って、氷床や氷河でボーリングをして、掘り出した雪や氷（雪氷コア）を深さ毎に分析すれば過去の気候や環境の時代変化を知ることがきである。今までに掘削された雪氷コアの中で1000 m程度、あるいはそれ以上の深さまで達した深層の雪氷コアは、世界的にもまだ数本であるが、氷期を含む古い年代をカバーしていることが分かっている。これらの深層コアは、1988年の防災科学技術 No. 63で中尾が述べているように、氷期・間氷期といった長い時間スケールの中での気候・環境変動の解明に大きく貢献している。

1000 mを越えるような深層のボーリングは、過去1万年～数十万年の間の気候・環境変動をとらえることを目的として行われるが、一方、過去100年～1000年といった短い期間の情報を得るには数10 m～数100 m程度の浅層のボーリングを行えば良い。人間活動による地球環境の破壊が重大な社会問題となっている今日、人間活動の活発化の時間スケールを持つ浅層の雪氷コアを詳細に分析すれば、その進行の歴史を詳しく解明することができる筈である。実際、雪氷コア中のガスの分析によって、初めて大気中の二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素といった温室効果ガスの濃度が産業革命以来急激に増加してきた過程が明らかにされた。他の様々な人為起源物質についても同様の成果が得られているが、ここでは、最近問題になっている地球規模の降水の酸性化の歴史が、雪

氷コアの解析によってどのように解明されてきたかということに焦点をあてて話を進めていこう。

2. 雪氷コアに見られる酸性物質濃度の近年の増加

雪氷コア中に含まれる主要な酸性物質は硫酸(H_2SO_4)と硝酸(HNO_3)である。通常、雪氷コア中の酸性物質濃度を調べるためには、雪氷コアを融かした水のPHや水素イオン濃度、電気伝導度などを測定する。このうちPHは水素イオン濃度の指標であり、酸性度を直接表すものであるが、PHの測定だけでは、酸の種類が分からない。イオン分析をすれば硫酸イオン(SO_4^{2-})と硝酸イオン(NO_3^-)の濃度をそれぞれ求めることができる。ここで、 SO_4^{2-} や NO_3^- は、硫酸や硝酸だけでなく塩に起因するものもあるが、塩の成分が無視できるほど少ない場合や、計算によって塩の成分を差し引くことができる場合には、 SO_4^{2-} や NO_3^- 濃度の測定から硫酸や硝酸の濃度を求めることができる。また、電気伝導度は SO_4^{2-} や NO_3^- だけでなく、様々なイオンの濃度の和のようなものに対応するので、電気伝導度測定から直接特定イオンの濃度を求めることはできないが、 SO_4^{2-} や NO_3^- が増加すれば当然電気伝導度も増加するので、このことを利用して酸性物質濃度の増減を推定することができる。図1にこれまで世界各地の氷床や氷河でこのような化学分析が試みられた地点のうち、代表的なものを図示する（ただし、南極は除く）。北極圏の氷床や氷河で掘削された雪氷コアの化学分析により、人間活動から遠く離れた極地でも近年の積雪層の中で人為起源の酸性物質の濃度が増加していることが分かり、降水の酸性化が地球規模で進行してきたことが明らかになってきた。

図2に示したのは、2037 mの深層ボーリングが行われた地点として有名な、グリーンランドの

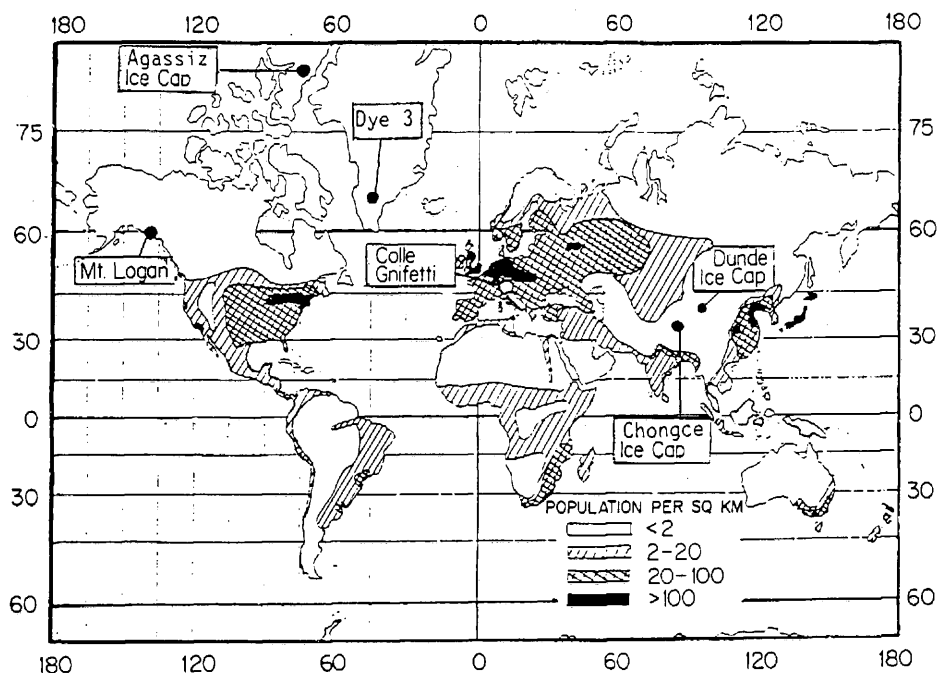


図1 雪氷コアの化学分析が行われた地点

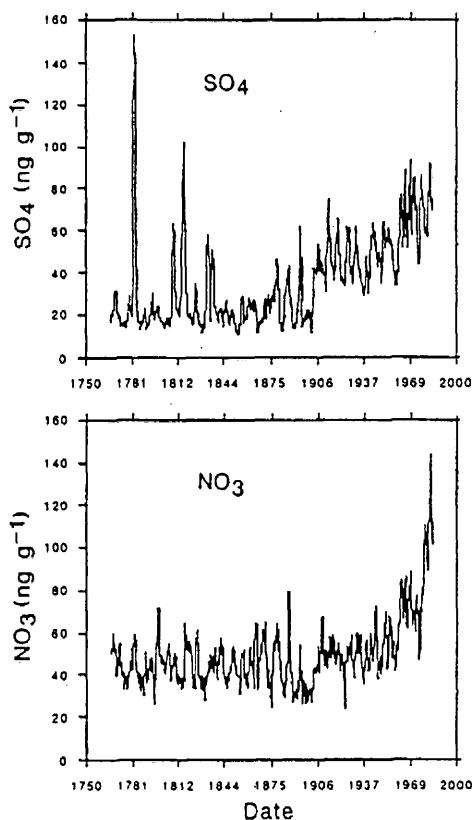


図2 グリーンランド・Dye 3 地域の浅層雪氷コアの SO_4^{2-} と NO_3^- の濃度プロファイル

Dye 3 ($65^{\circ}11' \text{ N}$, $43^{\circ}49' \text{ W}$, 標高 2486 m) から 40 km 離れた地点で掘削された 115 m の浅層雪氷コアを解析した、アメリカのニューハンプシャー大学のグループの結果である。この雪氷コアは非常に正確に年代が決定されている。図2はコアの全長にわたる解析結果であり、1767年～1984年の期間をカバーしている。Dye 3 地域では塩に起因する NO_3^- はごくわずかであり、また、 SO_4^{2-} については海塩成分を差し引いた酸の成分だけを示している。つまり、図2の結果は、酸性物質としての NO_3^- と SO_4^{2-} を示していると考えて良い。この結果を出したニューハンプシャー大学のグループは、スパイク状に大きくとび出した火山噴火によるピークを除くと、 SO_4^{2-} と NO_3^- は、ともに1900年頃から人間活動の影響によって増加し始めたと主張している。彼らは図2の結果を発表する少し前に、このコアの解析が途中まで進んだ時点で1870年～1984年の期間のデータを発表しているが、その時は NO_3^- の増加が始まった時期について異なった見解を示していた。 SO_4^{2-} と NO_3^- がともに1900年頃から増加し始めたと主張する新しい方の論文で、彼らは、 SO_4^{2-} と NO_3^- の増加が始まったのはそれぞれ1900年頃と1950年頃であるとした前の論文の主

張を訂正している。しかし、新しい方の論文に示されている図2の結果も、見方によっては彼らの最初の論文の主張を支持しているように思われる。一方、ニューヨーク州立大学とコペンハーゲン大学のグループは、やはり Dye 3 付近の別の雪氷コアを、1770 年代、1820 年代、1920 年代、そして 1950 年代という 10 年毎の 4 つの時代について解析した断片的データから、 NO_3^- は SO_4^{2-} より遅れて増加しはじめたと主張している。彼らのデータは断片的なので濃度増加の開始時期は詳しくは分からないが、 SO_4^{2-} が 1920 年代にはすでに増加しているのに対して、 NO_3^- は 1950 年代のデータで初めて増加がとらえられている。筆者らが Dye 3 から 32 km 離れた地点の浅層雪氷コアを詳細に解析した結果も、ニューヨーク州立大学とコペンハーゲン大学グループの主張を支持している。

何故、上に述べたようなくい違いが生じるのであろうか。上で述べた Dye 3 付近の雪氷コアはどれも正確に年代決定が行われているが、測定する

サンプルの切り出し間隔とデータ処理の際の平均化の方法がそれぞれ異っている。 SO_4^{2-} と NO_3^- の濃度は季節変動が大きいし、年平均濃度の年々変動も大きいので、いい加減なサンプルの切り出し間隔で測定した結果をいい加減な時間間隔で平均化してしまうと、 SO_4^{2-} や NO_3^- の濃度に変動が見られた時、それが年々変動の範囲のものなのか、それとも本質的なものなのか見誤ってしまう危険性がある。このため、同じ場所のコアの測定結果でも年代範囲を広げたり、平均化のしかたを変えると、違う結果に見えてしまうことにもなる。従って、酸性化の歴史を正確に復元するためには、できるだけ長い期間にわたる、詳細な連続データが必要なのである。

グリーンランド以外の北極圏のコア・データとしては、カナダ北極群島の 1 つであるエルズミア島の Agassiz ice cap (81° N, 73° W, 標高 1630 m) の 20 m コアの電気伝導度プロファイル (図 3) やスピッツベルゲン島の Høghetta ice dome (79° 17' N, 16° 50' E, 標高 1200 m) で掘削され

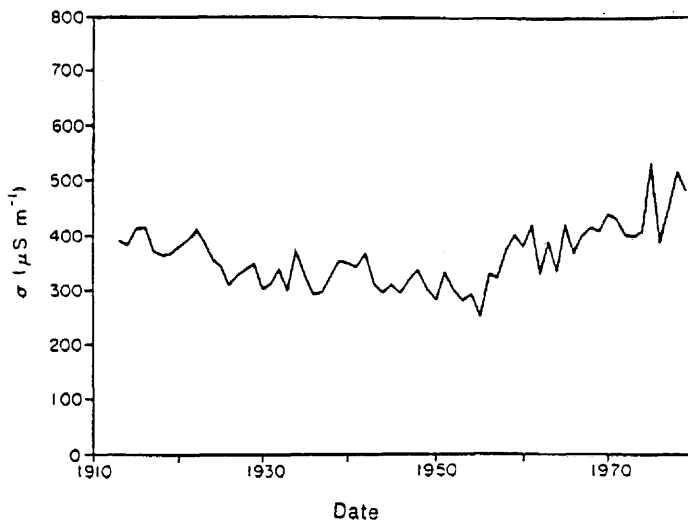


図3 カナダ北極群島の雪氷コアの電気伝導度プロファイル

た 85 m コアの PH プロファイル (図 4) などがある。カナダのグループによって発表された Agassiz ice cap の電気伝導度プロファイルは、グリーンランド・Dye 3 地域の雪氷コア中の SO_4^{2-} 濃度のプロファイル (図 2) と形が似ているように見える。しかし、この雪氷コアは残念ながらイオン分析が行われていない上に、1911 年以

前のデータがないので詳しく比較することができない。一方、国立極地研究所の藤井らによって発表された Høghetta ice dome のデータは、グリーンランドの Dye 3 地域よりもかなり前に酸性度の増加が始まっていることを示唆している。ただし、このコアは精度良く年代決定することが困難であったため、時間のずれがかなりあるかも

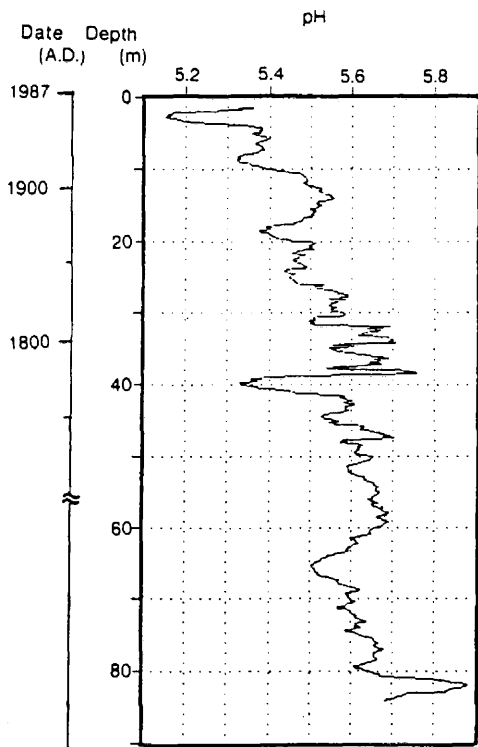


図4 スピッツベルゲン島の雪氷コアのPHプロファイル

しれず、詳しい議論ができない。

北極圏の氷床や氷河では、上に述べたように硫酸や硝酸の濃度が人間活動によって著しく増加してきているようだ。これに対して、南極氷床では、人為起源の硫酸や硝酸は殆んど検出されていない。

極域以外の氷河で掘削された雪氷コアについて見ると、スイス、アルプスのColle Gnifetti (標高4450 m) では図5に示すドイツとスイスのグループのデータから分かるように、今世紀に入って硫酸イオンと硝酸イオンの濃度が著しく増加している。その増加傾向は北極域よりもはるかに大きい。これに対して、我々日本と中国のグループの分析結果によれば、中国・西崑崙山域のChongce ice cap (35° N, 81° E, 標高6100 m) では過去100年間に硫酸イオンや硝酸イオン濃度の増加傾向は殆んど見られない。また、アメリカと中国のグループによると、中国の祁連山脈のDunde ice cap (38°06' N, 96°24' E, 標高5325 m) のデータにおいても硫酸イオンや硝酸イオン濃度の増加は見られない。さらに、時間的に連続した

データではないが、カナダのYukon TerritoryにあるMt. Logan (60°35' N, 140°30' W, 標高5951 m) のコアにおいて、過去100年間に硫酸イオンや硝酸イオンの濃度増加はないとカナダの研究者らは主張している。

3. 人為起源の酸性物質の長距離輸送

前節で述べたように、降雪中の酸性物質濃度は地球上各地で一様に増加しているのではない。多分、発生地域からの距離や輸送経路によって差異があるのではなかろうか。工業地帯の大部分が北半球にあることを考えると、化石燃料の燃焼によって生じる硫酸イオンや硝酸イオンが南極では殆んど検出されないのも納得がいく。一方、スイス・アルプスで北極圏よりも両イオンの濃度増加が著しいのは、スイス・アルプスがヨーロッパの工業地帯に隣接しており、産業活動によって生成された物質が、スイス・アルプスの降雪に直接的な影響を与えるためであろう。ところが、発生地域からの水平距離だけから考えると人間活動の影響による硫酸イオンや硝酸イオンの濃度増加があっても良さそうに思われる中国のChongce ice capやカナダのMt. Loganでは過去100年間に両イオンの濃度が増加しているようには見えない。また、中国のDunde ice capでも産業革命以来、両イオンの濃度が増加している様子はない。これは、汚染源が上記の地域の風下にあって、汚染された大気がこれらの地域へ流入しないからなのだろうか。あるいは、これらの雪氷コアが採取されたのがすべて標高の高い山の上であり、低層の汚れた大気の影響を受けていないためなのだろうか。これらの氷河で本当に酸性物質濃度が人為的増加を示していないのかどうかは、さらに長期間の、また詳細なデータによって確かめる必要がある。過去100年程度のデータでは、それ以前に増加が起きている可能性を排除できないし、断片的なデータでは、増加傾向を見逃してしまうこともあり得るからである。また、中国の雪氷コアの場合には、もともとの SO_4^{2-} や NO_3^- の濃度が高いうえに、塩として含まれている SO_4^{2-} や NO_3^- の比率が大きいので、たとえ酸の SO_4^{2-} や NO_3^- が多少増加していたとしても、全体の濃度に対する変化が小さく、増加を検知できなかっただけか

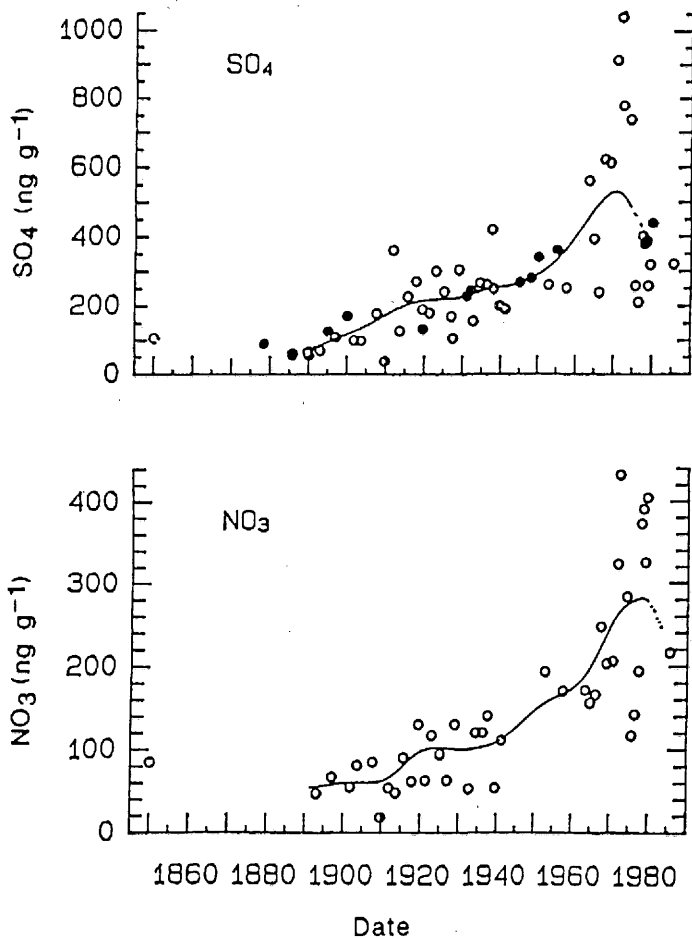


図5 スイス・アルプスの雪氷コアの SO_4^{2-} と NO_3^- の濃度プロファイル

もしれない。イオン分析に加えて、PH測定を行うことが望まれる。このように、人為起源の酸性物質がどのように長距離輸送され、過去に地球上をどのように広がっていったかを解明するためには、更に多くのコア解析による情報が必要なのである。

4. まとめ

浅層雪氷コアの解析により、世界各地の酸性物質濃度の歴史が次第に明らかになりつつある。また、酸性物質の濃度増加の傾向が、場所によってかなり異なっていることも分かってきた。酸性物質だけでなく、他の人為起源物質についても雪氷コアは貴重な情報を提供してきた。しかし、酸性物質をはじめとする人為起源物質の増加が、いつ頃

からどのように生じ、また、どのように世界各地に拡散してきたかを調べるには、まだまだ雪氷コアの数が少なすぎる。雪氷コアがすでに掘削されているところでも、年代の決定が正確でなかったり、200年以上にわたる詳細な連続データがなかったり、あるいは分析項目が限られていたり、分析項目が異っていたりで、詳細な比較が困難な場合が多い。将来、多地点で200年以上にわたる詳細なコア・データが得られて各地のデータを細かく比較することができるようになれば、汚染物質の長距離輸送の歴史が解明されることが充分期待できるし、そのことがわかることによって初めて規制等の対策を有効に立てることが可能になるのである。

より古い時代の情報や、異なる場所での情報を得るために、現在、各国が南極とグリーンランドで

大規模な深層ボーリングの計画を進めている。しかし、深層ボーリングは莫大な費用と労力を必要とするため、国家的あるいは国際的なプロジェクトとしてでなければ実施できない。これに比べて、数10 m～数100 mの浅層ボーリングははるかに容易である。浅層雪氷コアがカバーする数100年という期間は、数千年前、数万年前という古い時代に比べて、雪氷コアの年代決定精度が格段に高い上に、昔の文献の記録や気象データと対比することが可能な場合があるに多いというメ

リットがある。従って、人間活動による環境破壊という問題だけにとどまらず、浅層雪氷コアを丁寧に解析することによって、人間活動とは無関係に生じる天然の気候・環境変化についても、深層雪氷コアに負けない程の情報を得ることができるのである。このような訳で、要所要所での深層ボーリングに加えて、世界各地の氷床や氷河で、数多くの浅層ボーリングを行い、その解析を進めることが特に重要であると考えている。

(あずま くみこ：特別研究員)

1991年の災害をふりかえって

小見波 正 隆

はじめに

1991年に発生した自然災害をふりかえってみると、今世紀最大とか史上まれにみる、といった形容詞のつく災害の多かったことが目についた。

世界では、5月にバングラデシュの洪水、5月から7月にかけての中国長江の水害、フィリピンでは6月にピナトゥポ火山の噴火、11月にレイテ島の洪水・高潮などがある。一方、我が国では、6月に始まった雲仙岳の活動、8月から10月にかけて、毎週のように被害をもたらした12号から21号までの台風などが、形容詞のついた災害としてあげられる。これらの災害について、その特徴を自然現象の面と社会現象の面からとに分けて見てみよう。

自然現象から

4月29日、ベンガル湾からバングラデシュに上陸したサイクロンは、国土の約半分が海拔7m以下という国土に約6mの高潮が押し寄せ、高潮災害としては近年にない大きな災害となった。また中国でも、5月から7月にかけて華北と華中で、平年の2～4倍の降水量があり、長江の中・下流域を中心に、国内で今世紀最悪といわれる水害が発生した。11月5日に発生した台風では、フィリピン・レイテ島のオルモック市で、6時間に400ミリの局地的豪雨が観測された。また火山活動では、6月9日に噴火を始めたフィリピンのピナトゥポ火山は、今世紀最大の火山噴火といわれ、成層圏に達したエアロゾルの影響は、今後数年間にわたり、異常気象の発生などで地球環境に影響を与えるのではないかと心配されている。

我が国では、6月に始まった雲仙岳の火山活動は、一年以上たった現在も、衰えることなく活動を続けている。一方、東北及び北陸地方の梅雨は、6月11日に始まり8月14日に明けたが、その間

65日という観測史上最長記録を更新した。また、8月から9月にかけて、本土に接近した台風は7個あり、各地に大雨を降らせた。中でも台風19号は、長崎県佐世保市に上陸した時の中心気圧が940mbという、上陸時史上第4位タイという低い気圧で、強い勢力のまま日本列島を縦断したため、南から北まで広い範囲の測候所で、開設以来という強風が吹き荒れた。これらの台風と秋雨前線の影響で、東京では、9月の降水量が1978.5ミリで9月としては観測史上最高、10月の降水量533ミリは10月の観測史上第2位の記録となった。

社会現象から

4月29日にバングラデシュを襲った高潮では、約13万人の死者が出た。この国は、これまでも、度々サイクロンによる高潮に見舞われ、1985年には死者約2万人、1988年には死者2600人の被害があったが、1991年の災害は、それらに比べて桁違いに大きなものであった。また、中国長江の洪水では死者約2100人を出し、この水害による災害復旧の支援を、中国政府は世界各国に対して要請している。フィリピンでは、6月のピナトゥポ火山噴火により、アンヘレス市など3市とその周辺地域の約50万人に避難命令が出され、現在も約10万人の住民が避難生活を送っており、避難場所では医薬品などの不足が叫ばれている。また、11月に同国のレイテ、ネグロス両島を襲った台風は、洪水と高潮及び山津波により、死者・行方不明合わせて約6千人と約75万人の被災住民を出す大きな災害となった。

我が国では、台風19号による九州のスギ・檜の山林や東北地方の防雪林、青森県のりんご樹木など、倒木による被害が多く出たため、損害保険の保険支払額が、5千億円を越えることが明らかになった。これまでの風水害による、我が国の保

年月日 [1991.01.01 ~ 1991.12.31]

災害分類 OR 検索による [] [] [] [] [] []

番号	年月日	災害分類	災害種類	主な被災地域	災害番号
1	1991.02.01	地震防災	M6.8	パキスタン, アフガニスタン	1991020101F
2	1991.04.29	地震防災	M6.5	ソ連, グルジア	1991042901F
3	1991.04.29	気象災害, 海洋災害	サイクロン, 高潮	バングラデシュ	1991050901F
4	1991.05.03	地震防災	M7	ソ連, グルジア	1991050301F
5	1991.05.18	気象災害, 水災害	水害	中国, 華中	1991051801F
6	1991.06.03	火山災害	火砕流	長崎県, 雲仙岳	1991060301J
7	1991.06.10	気象災害, 水災害, 地す・崩	梅雨前線, 水害, 土砂くずれ	福岡県, 福岡市	1991061001J
8	1991.06.11	気象災害	熱波	パキスタン	1991061101F
9	1991.06.15	火山災害	爆発, 土石流	フィリピン, ピナトゥボ山	1991061501F
10	1991.06.15	地震防災	M6.3	ソ連, グルジア	1991061502F
11	1991.06.18	気象災害, 水災害	水害	チリ, アントファガスタ市	1991061801F
12	1991.06.20	地震防災	M7.3	インドネシア, スラウェシ島	1991062001F
13	1991.06.27	風害	突風, ダウンバースト	岡山県, 岡山市	1991062701J
14	1991.06.28	地震防災	M6.0, ロサンゼルス地震	アメリカ, カリフォルニア州	1991062801F
15	1991.07.05	地す・崩, 気象災害	梅雨前線, 土石流	愛媛県	1991070501J
16	1991.07.15	気象災害	長雨, 低温	北海道, 東北	1991071501J
17	1991.07.22	水災害, 気象災害	水害	韓国	1991072201F
18	1991.07.27	地震防災	M5.6	イラク, アルビル州	1991072701F
19	1991.07.29	気象災害, 水災害	モンスーン, 水害	インド, ワンダー州	1991072901F
20	1991.07.29	水災害, 気象災害	水害	ルーマニア, モルダヴィア	1991072902F
21	1991.08.08	火山災害		チリ, ハドソン火山	1991081101F
22	1991.08.09	火山災害	火山ガス	コロンビア, ガレラス火山	1991080901F
23	1991.08.13	気象災害, 水災害	大雨, 水害	茨城県, 勝田市	1991081301J
24	1991.08.16	火山災害		チリ, ハドソン火山	1991081601F
25	1991.08.21	気象災害, 水災害, 地す・崩	台風12号	関東, 山梨県	1991082101J
26	1991.08.23	気象災害, 水災害, 地す・崩	台風12号	韓国	1991082301F
27	1991.08.30	水災害	洪水	カンボジア, メコン川	1991083001F
28	1991.08.31	気象災害, 水災害	台風14号	東日本	1991083101J
29	1991.09.09	地震防災	M6.5	ニュージーランド	1991090901F
30	1991.09.09	水災害	台風15号	宮崎, 関東	1991090901J
31	1991.09.13	気象災害, 風害	台風17号	西日本	1991091301J
32	1991.09.17	地震防災	M5.2	グアテマラ	1991091701F
33	1991.09.18	地震防災	M5.8	グアテマラ	1991091801F
34	1991.09.19	気象災害, 水災害, 地す・崩	台風18号	関東, 愛知, 三重	1991091901J
35	1991.09.27	気象災害, 風害	台風19号	九州, 中国, 東北	1991092701J
36	1991.10.10	気象災害, 水災害, 地す・崩	台風21号	関東, 山梨	1991101001J
37	1991.10.14	地震防災, 海洋災害	M7.3 津波	ソロモン諸島	1991101401F
38	1991.10.20	地震防災	M6.1	インド	1991102001F
39	1991.11.04	地震防災	M6.0, 4.2, 4.8	イラン	1991110401F
40	1991.11.05	気象災害, 水害, 地す・崩	台風, 洪水, 高潮, 地すべり	フィリピン, レイテ島	1991110501F
41	1991.11.13	地震防災, 海洋災害	M6.2 津波	フィリピン, ミンダナオ島	1991111301F
42	1991.12.06	気象災害	台風	西サモア	1991120601F

情報解析室が「防災科学技術情報システム」に内容を収録している1991年に発生した災害一覧

1 / 1

険金支払額の最高は、1990年台風19号による約440億円、世界的にも1990年1月にイギリスなど欧州5ヶ国を襲った、暴風雨「ダリア」の約6200億円が最高で、今回の被害はそれに次ぐ史上2番目の規模となった。

また、雲仙岳の災害は、6月7日の島原市長による警戒区域の設定以来、約8,100人住民の避難生活は6ヵ月を越した。過去に避難生活が長期間にわたった例として、1985年に発生した長野県の地附山地すべりで240人が14ヵ月、1985年の伊豆大島噴火のとき、全島民が1ヵ月島外避難したことなどがあるが、2市町にまたがる多数の住民が、長期間にわたる避難生活を経験した例は過去にない。

1961年に制定された災害対策基本法は、台風のような一過性の災害を想定するとともに、個人の受けた被害は自ら回復することとし、国等は利子補給という形で、被災者の手助けを行うというのが原則になっている。また、同法では、人命尊重が最優先という考えから、住民を避難させるために、避難の指示や警戒区域の設定などを、市町村長の権限で行うことが出来る。避難には避難勧告、避難指示、退去命令の3段階がある。このうち、避難勧告と避難指示は文字どおり指示であるが、退去命令は警戒区域に指定された区域への立ち入りが禁止され、命令に従わないときには罰則が課せられるようになっている。

今回の雲仙岳の災害では、6月7日に島原市長によって警戒区域が設定されて以来、すでに6ヵ月が過ぎた。このような長期間に及ぶ避難生活や

広範囲に及ぶ警戒区域の設定は、前例が無いだけに、被災地やその住民から種々の問題が提起されている。

防災科学技術情報システム

前頁の表は、当所の情報解析室が構築している「防災科学技術情報システム」に内容が収録されている1991年に発生した災害の一覧表である。

このシステムは、発生した月日、場所及び内容の明記されている自然災害、あるいは特異な自然現象を対象にしたデータベースを総称したものである。現在、このシステムは「災害別ファイル」、「図書・文献データベース」、「新聞情報データベース」及び「空中写真データベース」の各データベースで構成されている。

「災害別ファイル」は、「図書・文献データベース」等の各データベースにどんな災害あるいは、特異な自然現象が収録してあるかを示す索引の役目を果たしており、このファイルの中の特定の災害名を指定すると、収録されているデータベースの内容にアクセスすることができるようになっている。

また、これらの各データベースには、災害あるいは自然現象に直接関係ないが、当研究所の研究にとって重要と思われる内容のものが収録してあるため、それぞれのデータベースは独立して使用できるようになっている。

(こみなみ まさたか：先端解析技術研究部)

表紙につなんで

地吹雪現象による視程悪化及び急速な吹き溜りの形成が、冬期間の交通障害の原因として大きな問題となってきました。現在、地吹雪によってしばしば大規模な交通の停滞・停止が起こり、多雪地域における社会機能を阻害していることもしばしばです。加えて、視界不良による交通事故の発生や立往生を生じ、その際の救急救護活動の不能により、人命の損失や危険も生じるに至っています。

このような現状から、地吹雪対策技術の研究の推進が多雪地域住民や自治体行政を始めとして強く望まれていました。

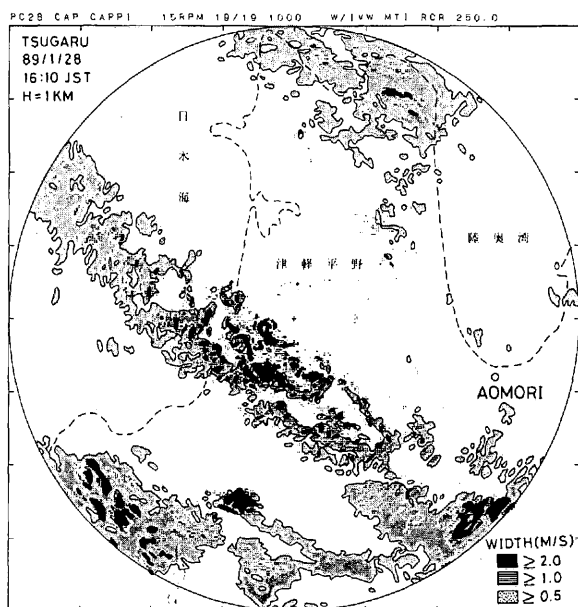
これを受けて、当研究所ではドップラーレーダーを用いた、地吹雪の観測研究を昭和62年度から実施しております。

一度地表面に積もった雪粒子が強風のために舞上げられる現象を地吹雪と呼ぶ。風速がある臨界値より大きくなると舞上げられた雪粒子は連続的に空気中を漂うようになり視界が悪化します。これに上空の降雪が加わるとますます視界が悪化し雪国の日常生活に重大な支障をきたすことになります。これが吹雪の発生である。極端な場合には

数メートル先さえ見えなくなり、回りを白い闇で閉ざされるホワイトアウトと呼ばれる状況に陥る。当研究所では地上観測やドップラーレーダーを用いた観測を行って吹雪の発生機構の研究を行っていますが、これまで良くわからなかった吹雪の実態が“見える”ようになってきました。

図はレーダー観測から得られたライン状の降雪雲のレーダー反射強度とドップラースペクトル幅である。幅約10kmの降雪雲が日本海から青森県の津軽地方に進入している。色を付けた領域は1時間あたり1mm以上の降雪がある領域で、この下では吹雪となっています。ドップラースペクトル幅の大きい領域はライン状降雪雲の北東側にあるが、現在のところこれは降雪雲からの下降流がある場所に対応していると考えられます。下降流は吹雪や地吹雪を引き起こす地上の強風やガストフロント（突風前線）の原因であるため、もしこのことが確認できれば将来の吹雪・地吹雪予測に有効な情報を与えることになるかとされています。

(編集部担当 藤原)



防災科学技術

No.69 1992 March

平成4年3月19日 印刷

平成4年3月26日 発行

編集兼 防災科学技術研究所
発行人 茨城県つくば市天王台3-1
TEL. (0298) 51-1611(代)

印刷 アサヒビジネス株式会社
