

巻頭言 高齢化した成熟社会における災害の予知・予測技術

京都大学防災研究所所長・教授

阪神・淡路大震災記念 人と防災未来センター長

河田恵昭 1

小特集 予知・予測技術最前線

予知・予測技術を考える 六川修一 2

地球観測衛星による地球水循環の予測技術最前線 小池俊雄 7

GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測 藤本博巳 10

火山ガスから読むマグマの動き 篠原宏志 14

光ファイバセンサによる斜面表層崩壊
モニタリングと崩壊予測 加藤俊二 21
小橋秀俊

核磁気共鳴を用いた物理探査装置の開発
—岩盤, コンクリートの水理学的パラメーターの
原位置計測にむけて— 中島善人 27
宇津澤慎

高齢化した成熟社会における災害の 予知・予測技術

京都大学防災研究所 所長・教授

阪神・淡路大震災記念 人と防災未来センター長 河田 恵昭

2004年に発生した集中豪雨を含めた風水害で我が国では231人も犠牲になったが、その60%は高齢者であった。この人的被害の特徴は、男性の犠牲者数は女性の約2倍であり、屋外での犠牲者数は屋内の約2倍ということだ。犠牲者の絶対数を減らすには、男性は暴風雨警報や大雨洪水警報の発令中に不用意に屋外で行動しないことであり、女性は早く安全な避難所に避難することである。そのために近隣の人と一緒に避難するという共助効果が期待される。これらによって犠牲者は間違いなく半減するだろう。

新潟集中豪雨災害では死者15名中12名が高齢者であり、三条市の市街地では、9名犠牲になった。そして、信越線の西側の嵐南地区では、亡くなった4名全員が後期高齢者(75歳以上)であった。しかも、彼らは要介護者であった。避難勧告は五十嵐川の破堤前に発令されているが、豪雨の最中、多くの住民には伝わっていなかった。嵐南地区では信越線の線路が二線堤の機能を果たしたために、堤防破堤から浸水開始まで2時間余裕があったにもかかわらず、家屋の中にいた要介護者のところへ近所の人たちが駆けつける時間がなかったのである。この地区はよく床下浸水が起こっていたから、住民も高を括っていたふしがある。浸水が始まって深さが床上1mから1.2mに達し、全員溺死したのである。浸水してからの救助がいかに難しいかわかる。

一方、信越線の東側では五十嵐川の破堤箇所近く、浸水が西より早かったが、破堤箇所から400m以上も離れており、氾濫水の流速は大きくなかった。そこでは1.5m程度の浸水深で避難所に逃げる途中の住民やたまたま居合わせた人の計5名が全員屋外で亡くなっている。浸水が始まってからでは避難は大変危険である。

近年、洪水や津波を対象としたハザードマップが市町村で整備され始めている。そのほとんどのものは浸水深さを示す地図が中心となっている。新潟集中豪雨災害では、犠牲者の出方に3つのパターンがあることを示している。それらは次のとおりである。1) 堤防の破堤点近くの木造住宅：堤防の近くに立地し、破堤した場合、浸水深さが2、3mを超える場合は家が流失する。危険水位を突破したり避難準備情報が出れば浸水開始前に避難しなければならない。2) 浸水深が腰の付近、すなわち1m以上になると避難所へ避難することは危険である。3) 要介護者は床上浸

水になると犠牲になる危険がある。

これらのことから、ハザードマップは氾濫によって家が流失するかどうかを表すものでなければならないことがわかる。すでに、木造住宅の被害は、流速と浸水深の関係で与えられることがわかっている。家が流失する危険性がある地域の住民は避難所に避難し、想定浸水深が2m以下で、しかも家が流失しない場合には在宅のままで2階に逃げればよいだろう。また、堤防から遠く離れて氾濫流速が遅いけれども浸水深が1mを超えると予想される場合には浸水が始まってからは屋外避難しないことも重要であろう。

ここで紹介した事実は、防災・減災を実現するための予知・予測技術の開発の進め方を示唆している。すなわち、人的被害の発生過程の詳細な解析によって、従来のハザードマップが表示してきた内容に問題があることが明らかになったことだ。これは現場からしか出てこない情報である。住民が洪水や津波のハザードマップを何故活用しないのかという疑問がこれまであった。住民の大半は、避難勧告が出れば2階に避難すればよいと考えている。果たしてそうであろうか。洪水や津波のハザードマップが住民と災害のとの距離を短くするものであると住民に受け取られてこなかったことは確かである。そこには『災害を自分自身に関係した身近な問題』と受け止めてもらう自治体の努力が足りなかったのである。また、住民の避難の遅れを改善するために今春から「避難準備情報」が発令できることになった。しかし、避難勧告の前に出す情報であるから、当然空振りになる割合が高くなると考えられる。しかし、問題は「空振り」になった結果ではなくて、『なぜ空振りになったか』という理由説明が後日自治体から明らかにされないことにある。

予知・予測技術というのは現代流に言えばハイテク技術を駆使した高度のシステムというイメージがあるが、これが活用できる環境とはどのようなものであるかについての検討が遅れている。予知・予測技術開発でたとえ精度を上げて、それだけで人的被害が軽減できる単純な社会ではないことを改めて認識することが重要であろう。技術開発すると同時に、その成果の使われ方、成果の評価をフィードバックしてさらなる開発に向かう循環型の開発過程が求められている。

予知・予測技術を考える

ろく がわ しゅういち
六川 修一*

1. はじめに

本号は“予知・予測技術最前線”と題する小特集であるが、その総論をまとめるにあたり、技術そのもののあり方をやや広めに考えてみよう。折しも筆者は、従来、大学において物理探査工学分野の教育/研究に携わってきたが、さらに人間社会における技術の本質に対する理解を進め、今後の技術の普遍的方向性を探求するための技術経営戦略学と呼ぶべき学問大系の構築に携わるようになったのでその視点からも予知・予測技術を考えてみたい。

1.1 インドネシア—アングマン諸島大地震の教訓

予知・予測と聞けば、探査技術を専門にしてきた地球科学分野の研究者の一人として2004年末に発生したインドネシア—アングマン諸島の大地震を忘れることはできない。未曾有の被害を引き起こした大災害であり、今でもさまざまな復興の活動がなされている。これに関するさまざまな議論の中で大矢暁氏（元応用地質（株）社長、元（社）物理探査学会会長）が、ある書簡の中で地球科学に携わるすべての者が心に刻むべき意見を述べておられる。氏の同意を得てその抜粋を以下に掲げる。

『科学と言うのは何のためにあるのか？どうも日本では社会を豊かにするために科学が使われていないように思います。昨年暮れのインドネシア—アングマン諸島大地震については、15万人の人が亡くなるという大被害になりましたが、このような地震・津波が起こることが現在の地球物理学、構造地質学、地震学などの知識をもってすれば予見できなかったとは考えられません。インド—オーストラリアプレートとユーラシアプレートの境界であるスマトラ沖のサブダクション帯ではこれまでも多く津波を伴う地震がありました。しかもこの境界に沿って地震は東南側から西北側に移動しているように思えます。私は地質構造に関心を持っていますが、それでも、1000 kmに及ぶ今回のような地殻破断が起こる可能性については予見できる能力を持っておりませんでした。それでも、スマトラ沖のサブダ

クションは明らかにニコバル諸島、アングマン諸島の西側を通り、ミャンマー西部国境沿いに北上する大地質構造であることをまとめ、ミャンマーの地震防災にボランティアで関係してきたものですから、昨年2月のワークショップでは、アングマン諸島付近を震源とするM:8クラスの地震が起こる可能性は高いと考え、その場合ミャンマーに影響を与える津波が発生する可能性があること、その検討をする必要があることを訴えてきました。そこまでの知識がありながら、また、津波のシミュレーションが出来ることも知っていながら、具体的な津波被害の予想をしたり、検討を進めてパブリックアウェアネスを広げたり、ワーニングシステムを作ることを積極的に進めてこなかったことを大変恥じています。地震が起こり、津波被害が出た後では、素晴らしい津波シミュレーションがすすめられアニメーションとしてインターネットで見ることが出来ます。僅か地震発生後2~3日でこのようなことが出来る力がありながら、地震の起こるまえに、大きな地震が起こる可能性があることや、その場合の津波シミュレーションを行って被害予測をし、インド洋の津波ワーニングシステムにつなげなかったことは科学者・技術者の敗北と言ってもよい、あるいはこれだけの人を殺した一端の責任が地球科学者にもあるのだという認識が全く感じられないのに驚きます。現象が起きてからの数字合わせが科学者の仕事ではないはず。先を読み、社会に役立つ予測をするのとは根本的に異なるものと思います。科学の最も重要なことは妥当な予測が出来ることではないかと思えます。』

津波の場合、その被害を最小限に止めるためには、科学技術のみならず、社会学的観点からの防災システムが必要であるが、氏の悔恨には、地震予知、防災をはじめとする科学のあり方、技術のあり方が如実に示されているように思う。氏が述べておられることは、およそ「社会のための科学」、「科学者の罪」、「予知・予測の困難さ」、「社会に訴える勇気」、「科学と倫理」そして「システムの発想」の6項目にまとめられるが、これらがここで述べるべき総論の真髓を語り尽くしているといっても過言ではない。

* 東京大学大学院教授 工学系研究科

1.2 技術の本質的理解

本小特集号では、GPS、光ファイバー、核磁気共鳴などの最新鋭技術が紹介されているが、これらの技術そのものは当たり前であるが、意思を持っていない。これらをどのように活用すべきかは当然人によるのであるから、技術開発とともにそれを使う人間の育成も大事である。筆者は技術を扱うあるいはそれを利用するものが理解すべき事柄は、1) 技術の哲学、2) 技術の論理、そして 3) 技術の倫理、に集約できると考えている。これらは一見いかめしい表現であるが、素直な技術者であれば、自然に醸成されるものである。しかしながらさまざまな局面の中でこれらが歪められずに保持され続けることはことのほか難しい。技術そのものは何ら意思をもつものではないのでこれらの「技術の」は、「技術に関わる人の」と記すのが正確な表現かもしれない。

それではまず、防災における技術の哲学について考えてみたい。哲学とは、その人の生き様そのものである。予知・予測技術や防災に携わる大部分の人たちは、地球科学のマクロなサイエンスに憧れ、その知的興味を押し進めて、知識を深め、それとともにこれらの知識を社会に役立てたいと考えてきたのではないだろうか。その究極の一つの姿が冒頭の大矢氏の悔恨の言葉ににじんでいるように思う。私自身も「たとえば技術によって人々が安全な社会生活を送ることに役立ちたい。」という素朴な気持ちを大切にしたいと思う。

次に技術の論理とは何を言うのであろうか。我が国の技術者は、一般に高校時代に文系、理系に分かれ、それを契機に技術者の道を歩みはじめることが一般的である。このため、生活の中心に常に技術があるため、改めて技術の論理といわれると戸惑うかもしれない。しかし、ここで言う技術の論理とは、技術を扱う際に通常考えるモデル化や計測の実際に活用されている手法などをさしている。一般にある目的のために技術を適用する場合、まず、モデル化を行う。たとえば、我々は地下をどのようにとらえているのか考えてみよう。地質学とは Geology = Geo + logic すなわち地下の論理学である。断層、破砕帯、不整合などの地質用語も人間が地下の現象を理解するために編み出した一種の地質学的モデルと言え。一方、物理学的手段による調査・探査では、主に物性値の違いにより地下の構造を検出する。P波速度、S波速度、ポアソン比、密度、応力、比抵抗などである。実はよく考えるとこの物理学モデルと地質学的モデルは、必ずしも一致するとは限らないし、この種のモデルがある目的（たとえば、防災等）のために最も適しているという保証もないのである。予知・予測技術というからには、当然、通常状態と異常状態のモデルがあり、それをもとに計測技術というのは成立する。ところがこのモデル化には多くの曖昧性が伴うのが一般的である。また、調査時の計測自体にも誤差や不確実性がある。さらには解釈時においてもユニークな解はないことの方が一般的である。技術の論理とは、ある目的に達するための一連の論理プロセスを明確にすること、また各々のプロセスにおいてわかることとわからないことを明確にすることであるとい

える。

技術の倫理については、JCOの事故、自動車会社の欠陥隠し等、世の中で問題になっている例が多い。技術の倫理問題では、技術者個人の倫理性を問題にする場合と、組織の倫理に対する考え方やその施策を問題にする場合がある。防災分野の意思決定においては、三宅島の火山噴火による全島避難のように社会的に大きな影響を及ぼす場合が多い。したがって意思決定を担う側からはその判断が妥当であるといえるための論理的証拠を調査・探査の結果に求めることが多い。このため、技術者側に必要以上のプレッシャーがかけられ、判断の論拠を無理強いされることもままある。この点は、技術の効用と限界を明確に認識し、対処するための倫理感が求められる。もうひとつの例は、いわゆる悪魔の囁きといわれるもので、先の地震災害の例では、一旦災害が起これるとその後の対応が強化される。つまり予算的にも一時的に潤うため、意に反して、対岸の火事的な限定的災害であれば、それを望むような気持ちが生まれることである。いわば災害のアンチテーゼが存在する。もちろんこのようなことはあってはならないし、むしろ予知・予測技術もあまりもてはやされない状況が理想であるともいえる。逆の言い方をすれば、基本的に役立つ実感が感じられにくい予知・予測を実施し続けるには、防災に対する根本的な哲学が必要である。

2. 予知・予測のための調査・探査技術

2.1 調査・探査技術とその役割の転換点

物理探査に代表されるこれまでの調査・探査技術は、主に石油・天然ガス等の「資源の発見」を目的に発展してきた調査プロセスである。したがって最終結果は実体としての資源の発見に成功したか失敗したかのどちらかであり、成否はきわめて明快である。一方、地震防災、火山災害、土砂災害などの防災分野では、その目的は災害の予知・予測ならびに災害の迅速な復旧支援のための情報提供手段である。とりわけ、本小特集で取り上げている予知・予測技術は、災害の及びそうな地域ならびに災害の程度予測、すなわち「危険域、危険度の推定」を目的とするプロセスであると言える。しかし、予測段階では、危険域、危険度なるものの「実体」はきわめて曖昧である。断層、崩落箇所といった断片的現象は認識できるが、それが危険域、危険度の実体であるとはいいがたい。さらに危険の認識自体が大きな幅を持ち、警報などの社会的意思決定につながる基準の策定にも多くの困難を伴う。数学的には資源探査にはユニークな解が存在するのに対し、防災にはこれが存在しない。換言すれば、解がない、あるいは無限に解があるとみることでもできる。このように「資源の発見」と「危険域、危険度の推定」を命題とする2種類の調査では、両者における調査の技術体系、解釈の論理等には自ずから違いがある。防災の最大の目的の一つである避難勧告、避難命令等の発動は、社会的にきわめて大きな影響があるため、その根拠となる予知・予測技術にも格段の論理性が求められる。

2.2 予防医学と調査・探査技術

防災における予知予測を目的とする調査・探査技術に求められるのは、「危険域、危険度の推定」につながる適切なデータを提供することにある。すなわち、「疑わしきは見逃さず」がその基本姿勢であり、問題があると考えられる箇所があれば事前の対策が施される。しかしこれが必要かどうかは、当該地域の地質環境や防災の考え方によって異なってくる。このような防災における一連のプロセスは医学における予防医学と似ている。予防医学では、さまざまな検査を行い、その結果を一定の手順で判断し、その後の診断に結びつける。治療が必要かどうかは人によって異なる。たとえば、血圧の高い人でも、食事に注意し、しかるべきケアをしていれば、「健康」でいられる。このように健康であるという状態の定義（診断）はきわめて幅広い。

人間ドックに代表される予防医学では、長年の経験の積み重ねを経て、その理念、検査項目、判断の論理、およびその後の処理プロセス等が明確に定まっている。翻って防災における「危険域、危険度の推定」のための調査・探査はどうか。調査・探査そのものが防災の中でどのように位置付けられ、結果である最終メッセージには何を求められ、それがどのような判断に使われるのか。また調査項目は適切か、さらには首尾一貫した調査・探査の理念、戦略を持っているであろうか。当該の技術レベルの向上のみならず、幅広い視野で予知・予測をもう一度考えてみる必要があるのではないだろうか。

2.3 調査・探査データが満たすべき要件

一般にわれわれが直接見たり触れたりできない地下の様子を遠隔に探査できる点が探査技術の最大の利点であるが、その反面、導き出した結果に常に曖昧さがつきまとうことも事実である。まず、基本に戻って調査・探査データが科学的に信頼され、次のプロセスで活用されるために必要な要件を整理してみよう。以下にそれを4項目にまとめて示す。

- 1) 計測データは校正され、単位のついた定量データであること。
- 2) データ処理手法が規格化されていること。
- 3) データ処理の履歴が明確であること。
- 4) データ品質の保証が明示されていること。

1)は、すでに述べたようにデータは科学的裏付けのあるものでなければならないことを意味している。地震探査データのようにある基準をもとに無次元化されている場合も1)を満たしているとして良い。2)は恣意的な調査方法のいる余地を排除し、常に客観的データが得られることをめざしている。3)はデータに疑問がある場合は、その上位処理にもどれることを保証することを意味している。ある主題に対する結論が、人間にとって厳しいものであれば、当然、その基になったデータの客観性、信頼性、再現性等が問題になる。とりわけ地層処分のように、環境の安全性に対し責任を明確にすることが求められる事業になれば、このデータ処理の履歴がきわめて大切である。データの履歴、いわばデータの血統書は、データの付属情報ではなく、デ

ータの価値を左右する本質的な情報の一部として捉えられなければならない。4)は、当該データの品質に関する情報である。この情報は、意思決定者にとってデータの利用可能性、妥当性等を判断する上できわめて有用である。

2.4 技術マネジメントからみた調査・探査業務

調査・探査業務は、極力シンプルにとらえれば、当該課題に対する探査・調査を行い、「データ」から「情報」を抽出し、人間の判断を経て「メッセージ」を次の工程に引き渡すことである。従来の「資源の発見」を目的とする探査では、仮に結果が不調に終わった場合、その過程においてどこに問題があったかを分析することはきわめて困難である。このため、上で述べたデータ処理の履歴に注意が払われることはそれほどなかったと思われる。これに対し、防災は、影響の大きい社会的意思決定につながるため、「危険域、危険度の推定」結果を行政ならびに住民に納得してもらう必要があり、このためには、データ取得、処理プロセスさらには判断の論理プロセス等のすべてにおいて透明であるように努めなければならない。

近年、地層処分事業におけるパブリックアクセプタンスの観点から“スーツケース”という考え方が登場している。これは、ある意思決定をしたとき、その根拠となる関連の判断理由や根拠データ等をまとめてひとくくりしておく、すなわち「スーツケース」に納めておく、という考え方である。これは地層処分のみならず防災における調査・探査業務においても今最も求められていることではなからうか。この「調査・探査スーツケース」には、上記のデータ要件に、処理プロセス、さらには判断の論理プロセス（たとえば、演繹論、統計論あるいは経験論）などが詰め込まれているものが求められる。

3. 社会システムとしての地球診断学の確立に向けて

ここで取り上げている予知・予測技術は、環境、防災、地層処分事業等さまざまな分野で活躍できるポテンシャルを持っていると考えられる。このため、地質学、探査工学等地球科学全体に目を向け、予防医学を模範に一刻も早く「地球診断学」を確立していかなければならない。

3.1 事前予測と事後の減災

予知・予測技術が活用される場面は、事前の災害予知・予測（以下、事前予測）と事後の迅速な復旧支援（以下、事後の減災）に大別される。一般に災害の最大の特徴は、「起こることはきわめて稀であるが、一旦起こるとその被害は甚大である」という点にある。したがって防災の基本はすでに述べたように「疑わしきは見逃さず」にある。このため、防災には準恒久的かつ連続的計測のプロセスが必要であり、自動化が進みつつあるとはいえ、投資額や人間の負担も大変なものである。いざというときのために一見無駄なデータを膨大に観測、解析し続けることを人間はどこまで許容できるであろうか。その困難さを思うとき、まさ

に防災の考え方を明確にし、社会に理解を求めることが重要である。

一方、事後の減災では、被害状況の迅速な把握が急務であり、衛星や航空機による遠隔計測技術は威力を発揮する。これによって効果的な復興計画立案および実施が可能となる。また、事後の被害状況データは、事前予知のきわめて貴重な検証データでもあり、不幸にして起きてしまった災害の教訓を未来に生かす手段をわれわれに与えてくれる。このように事後の対応においても社会の理解と社会システムの構築がきわめて重要である。

3.2 プロジェクト的発想

調査・探査技術を実際に防災分野に適用する場合、それらのデータにもさまざまな選択がある。たとえば、概査手段であるリモートセンシングを例にとれば、光学リモートセンシングデータと合成開口レーダの選択、中分解の衛星データと高分解能衛星データの選択、あるいは高スペクトルデータの選択、さらには入手の容易性、コストなど実際の作業に当たってはさまざまな考慮すべき要因がある。そこで防災分野へのリモートセンシングデータの提供を一つのプロジェクトと見てその主要要件を考えてみよう。表1は、プロジェクトを進めるための基本フレームワークを示している。これは、先の大戦の敗因を冷徹に分析した例（戸部ほか、1984）を一部改変したもので元々はプロジェクトAが日本軍、プロジェクトBが米軍を示していた。これを用いたわけは、プロジェクト発想法を端的に強調して示すには、戦争といういわば究極の“プロジェクト”の基本フレームワークが好都合と考えたからである。ここではこれに準じて仮想防災プロジェクトを考えてみる。

第一は目的の設定である。防災をマクロな目的で分類すれば、災害等の事前予測と災害発生後の復興支援に大別できる。事前予測では、ある限定された地域が対象である場合には、高分解能衛星がきわめて有効であるが、夜間の観測が必要な場合は熱赤外面像や合成開口レーダが必要とされる。ただし、熱赤外面像では対象物からの放射エネルギーが相対的に小さいので一般に高分解能画像の取得は難しい。これに対し、比較的広範囲な不特定地域が観測対象な場合には、中分解能の汎用衛星の利用が適当で、かつ異常

表1 プロジェクトの戦略・組織特性比較（戸部ほか、1984を一部改変）

分類	項目	プロジェクトA	プロジェクトB
戦略	1 目的	不明確	明確
	2 戦略志向	短期決戦	長期決戦
	3 戦略策定	帰納的 (インクリメンタル)	演繹的 (グランド・デザイン)
	4 戦略オプション	狭い —統合戦略の欠如—	広い
	5 技術体系	一点豪華主義	標準的
組織	6 構造	集団主義(人的ネットワーク・プロセス)	構造主義(システム)
	7 統合	属人的統合(人間関係)	システムによる統合(タスクフォース)
	8 学習	シングル・ループ	ダブル・ループ
	9 評価	動機・プロセス	結果

域を抽出するモニタリングの仕組みが必要である。しかも無人化、自動化、警告システム等が望ましい。このため、利用衛星の選択、データ処理の標準化等かなり詰めたシステム設計を要する。通常はさらにより詳細なレベルでの目的設定があり、それに応じたさまざまな観測のデザインが求められる。

2番目は戦略志向の決定である。たとえば復興支援では、一刻も早い短期的対応が必須であり、利用可能な衛星リソースを最大限利用することが望まれる。一方、植生の減少などは長期間にわたって観測データを積み上げることによって意義を持つてくるであろうし、近年の新しい技術で固定点の微細な位置変動をインターフェロメトリの手法で解析するPSInSARなども長期間にわたる観測データの蓄積を経て、本質的な価値を生み出すものである。

次は戦略策定であり、表のインクリメンタルというのは極論すれば、場当たりの、ということであり、一般には本質的価値を生みにくい。これに対し、たとえば火山防災のように地上の地震計、変位計、GPS、熱画像等さまざまなデータをどの局面でどのような用途に用いて最終的にどのようなメッセージを生み出すのかを幅広くデザインしていくことによって効果的な観測が行える。このように衛星観測は幅広い観測・調査の一部であって他との有機的連携が大切であるという意識が大切である。

4番目は戦略オプションである。たとえば、調査の網羅性を求めすぎたために重要な調査が十分に行えずに不十分なメッセージのみしか得られない場合などが考えられる。また縦割り組織によって状況に応じたオプションがとれない例などはよくあることである。

5の技術体系には注意がいる。一般に防災における調査では、資源探査のようにターゲットが明確でない場合が普通で、決め手になる調査データが必ずしも存在しない例が多い。したがってリモートセンシングデータでも標準的な可視近赤外データから岩石の変質をみる短波長赤外データ、珪酸塩鉱物の性質や表面温度をみる熱赤外データ等多種のデータが使われる。一般には多種類の調査を標準化したうえで適用することを考えなければならない。

次の4項目は、プロジェクトを推進する際の組織に関する項目である。これらは一般的なプロジェクト運営に当てはまることなのでここでの説明は割愛する。

4. おわりに

技術には、社会に利便性を提供するタイプのものと社会の調和を図るタイプのものがある。前者は主として個人の創造力によって生み出されるが、後者はさまざまな分野の協調によって生み出される。予知・予測技術は、要素技術そのものは個人の能力に依存するが、最終的な価値は、システム技術として当該目的に対して最適化されてはじめて生み出されるものである。防災は、基礎となる地球科学、地質学、探査工学、社会学、行政など多岐にわたる分野の共同作業によって成り立っている。したがって予知・予測技術によって得られたメッセージがその効用や限界を含め

的確に伝達され、恣意的な判断に利用されたり、過大あるいは過小評価されないようにしなければならない。これは、本来メッセージを受け取る側の倫理や姿勢の問題であるが、現在の社会システムではこれらを未然に防ぐような仕組みも当該システムに組み込まなければならないと考えられている。また、予知・予測技術には常に不確実性が伴うため、最終的な意思決定においては、いわゆるリスクマネジメントの考え方も必要である。総じて我が国の場合、これらの技術マネジメント力が諸外国に比べて劣ると言われている。今後は要素技術のみならず、この種のマネジメ

ント力の向上も大切である。

「災害は忘れたころにやってくる」とは、災害、防災に対するわれわれの姿勢に警鐘を鳴らしていることわざである。改めて冒頭にかかげた、「社会のための科学」、「科学者の罪」、「予知・予測の困難さ」、「社会に訴える勇氣」、「科学と倫理」そして「システムの発想」を噛み締めて総論の締めくくりとしたい。

参考文献

- 1) 戸部良一他：失敗の本質，ダイヤモンド社，p. 239, 1984.

地球観測衛星による地球水循環の 予測技術最前線

こいけ としお*
小池 俊雄*

1. はじめに

21世紀は水危機の時代といわれる。水不足、豪雨災害、水質汚染、生態系の破壊など、水に関わる問題が世界各地で広がってきており、地球温暖化の影響も懸念される。最近の30年程度を考えると、全世界で発生した全自然災害による死者数の5分の4、経済的被害の3分の2は渇水と洪

水によってもたらされており、科学技術が進歩した今日にあっても水災害は人類にとって依然として脅威である。このように水循環の大きな変動をもたらす災害に対して、水循環の変動のメカニズムを理解し、予測精度を向上させ、情報を国際的に共有する体制を築くことは、水危機回避の有力な解決策の一つといえよう。

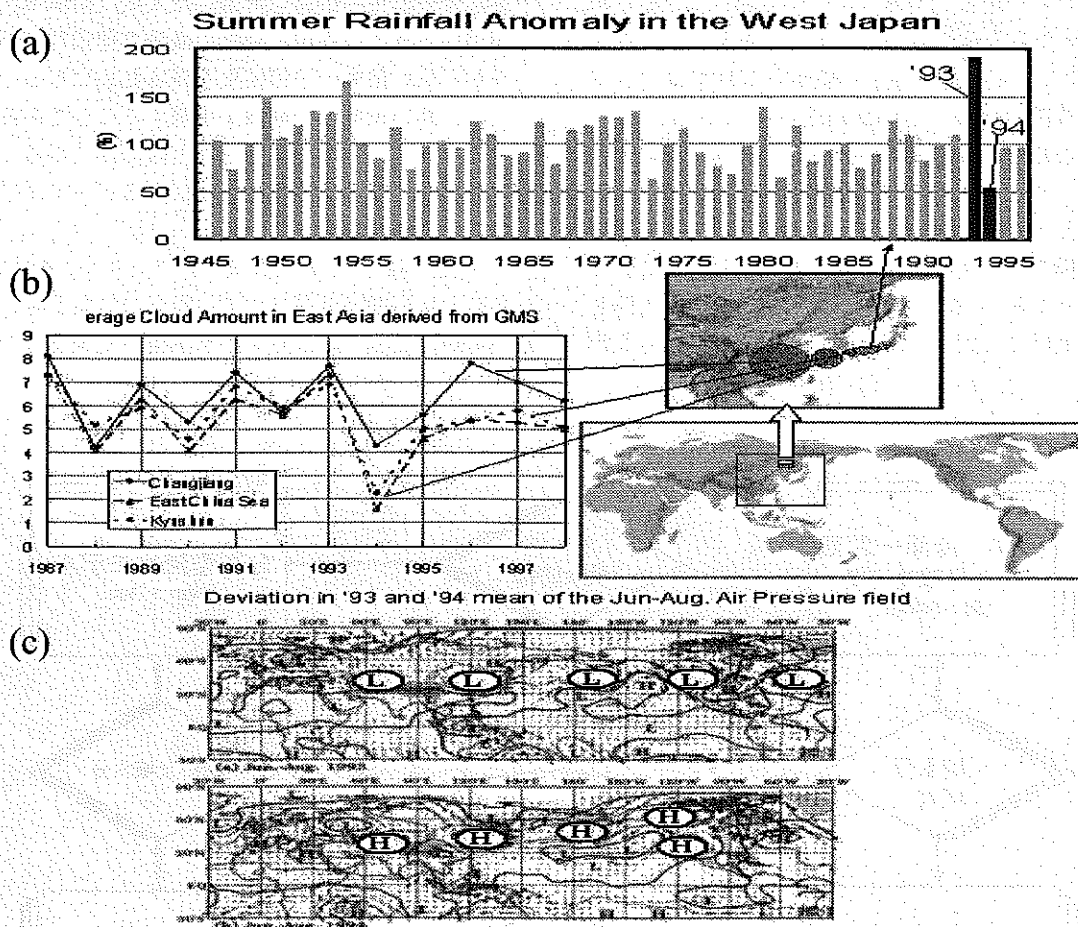


図1 (a)わが国の西日本太平洋側の50年間の6月～8月の総降水量の変化, (b)気象衛星「ひまわり」から得られる東アジアの各領域(九州, 東シナ海, 長江流域)7月の平均雲量の年々変化, (c)1993年(上)と1994年(下)の6～8月の平均気圧の平年値からの偏差

* 東京大学大学院教授 工学系研究科

2. 地球規模変動の視点の重要性

『水惑星』地球の表層には莫大な量の水が存在し、水がもつ物質としての特殊性が地球の環境形成に深く関わっている。地球の気候を形成する水循環が、ときとして人間社会に破局的な被害をもたらす要因のひとつはその大きな変動性にある。人口増加による水資源逼迫度が深刻となり、洪水氾濫原への資産の集中化が進む状況の中で、人間活動に対する甚大な被害が実際に発生するのは、水循環の変動の振幅が大きくなったときである。

図1(a)は我が国の西日本太平洋側の6月～8月の総降水量のデータであり、記録的な冷夏であった93年は全国的に多雨で、西日本では平年の倍近い降水があったことがわかる。ところが、その翌年の94年は非常に暑い夏で、降水量は平年の半分となり、佐賀県を中心に各地で深刻な渇水被害が発生している。このように、水資源や河川の管理を考えるうえで基礎となる降水は、その年々変動が非常に大きい。つぎに、図1(b)は気象衛星「ひまわり」から得られる東アジアの各領域の夏の平均雲量の年々変化であり、東アジア共通の年々変動パターンが見られ、それは93年と94年の西日本の極端な変動とも一致している。つまり、93年は各地域とも雲量が多く、94年は雲量が極端に少なくなっている。これらの現象を地球スケールで調べてみるために、長期間にわたる全球の夏の平均気圧分布を求め、93年と94年の夏期の気圧が長期の平年値からどれだけずれているかを地球規模で計算したものが図1(c)であり、93年には日本を含む北半球中緯度帯に低圧性の非常に強い偏差が表れており、一方94年には同じ領域に高圧性の偏差が表れている。つまり、93年、94年の日本の夏の雨の大きな変動は、地球規模の気圧場の大きな偏差と関連して起こったということがわかる。ちなみに93年には北アメリカ大陸ミシシッピ川流域にて大洪水が発生しており、これも北半

球中緯度帯全体に現れた明瞭な気圧の偏差と関連性が深い。つまりある地域の変動には、地球規模の変動性が深く関連していることが示されている。

従来の利水および治水計画では、長年にわたって当該地域で蓄積された降水量データをもとに極値の発生確率を推定して、計画に必要な基準値を推定していた。しかしながら、たとえある地域の利水や治水管理を行う場合でも、大きな変動をもたらす水循環システムの広域性に着目し、その構造を地域から地球規模で監視しうるシステムを構築し、変動に介在する物理機構を明らかにして、予測手法を確立し、その精度を向上させていくことが重要である。

3. 地球規模から流域規模の変動をつなぐ手法の開発

水循環変動のメカニズムを理解し、その予測精度を向上させる科学的基盤を形成することは、水危機回避の有力な解決策の一つと言える。そのためには、全球規模の水循環変動様相の予測精度の向上を図り、さらにその情報を効果的に取り込んで流域スケールの降雨-流出の予測精度を向上させることが重要である。

全球規模の現業の気象予報では、海面温度や陸域での土壌水分や植生の影響を考慮した大気大循環モデル(GCM)が用いられているが、時間の微分方程式群である予報モデルから高い精度の予報結果を得るためにもっとも重要なことは、高い精度の初期値を用意することである。全球規模で3次元の均一な初期値を地上観測から得ることは不可能であり、ここで地球観測衛星によるデータが効果的に利用される必要がある。

現在、海洋上の大気温度プロファイル、水蒸気の積算値、あるいは海面温度等はすでに現業の気象予報に用いられているが、陸域での大気中の水蒸気や土壌水分などの情報を

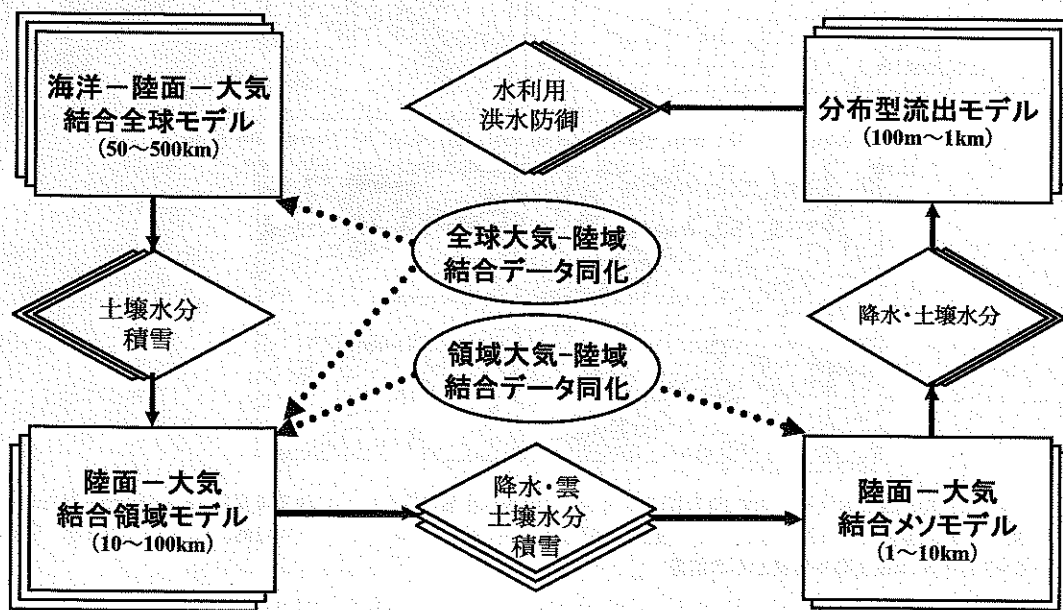


図2 衛星によるデータ同化とダウンスケーリング

GCMに取り込む手法は研究途上である。とくに2002年に打ち上げられた米国の衛星 Aqua に搭載されている改良型赤外サウンダー (AIRS) や我が国が開発した改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) は、それぞれ陸域で大気中の気温や水蒸気分布や土壌水分を計測する世界でももっとも高性能な衛星センサであり、それらの情報の効果的な利用研究の成果が期待されている。

全球規模の予測情報を利用して流域スケールの予測精度を向上する手法はダウンスケーリングと呼ばれ、降雨の広域スケールの性質と局所的なスケールの性質の統計的な関係を用いる手法や、粗いグリッドの全球予測情報を細かなグリッドの領域数値気象モデルに内外挿するネスティングと呼ばれる手法が用いられてきた。最近、大気、陸面、海洋現象の変動を記述する予測モデルと、衛星の観測値を記述する放射伝達モデルの両方を同時に用いたダウンスケー

リング手法の開発研究が進められている。これは「衛星データ同化手法」と呼ばれ、まず GCM の予測値を、対象は狭領域ながら個々の雲の発達を記述できる高い空間分解能を有する数値気象予報モデルに初期値の第一推定値として代入して予報する。つぎに、その予報結果から得られる大気、陸面、海洋の状態量を、今度は放射伝達モデルに代入して衛星で観測される電磁波エネルギーの強さを計算する。その計算結果と衛星観測値を比較し、誤差が最小になるように高分解能数値気象予報モデルの初期値を繰り返し計算で改良していくという手法である。図2は衛星によるデータ同化とダウンスケーリングシステムの概要を表わしており、実験的には2004年の福井豪雨の予測実験やチベット高原での水循環の再現実験などに適用されて優れた性能を発揮しており、近い将来現業の水循環予報に用いられることになる。

GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測

ふじもと ひろみ*
藤本 博巳*

1. はじめに

カーナビなどにも使われているGPSの観測網は、陸上の地殻変動観測に革命的な進歩をもたらし、長周期の変動から地震動まで、広域の変動を高精度で観測できるようになってきている¹⁾。しかし地球上で最も活動度の高い地殻変動帯であり、大地震の発生域でもある海底のプレート境界近傍は電波の届かない海底にあり、観測の空白域となっている。プレート境界のうちでも地殻変動観測が特に重要

なのは、沈み込み帯である。日本列島の下には複数の海洋プレートが沈み込んでおり、大きな被害をもたらすプレート境界型大地震が繰り返し起こっている。グローバルな規模では各プレート運動の速度は一定であることが明らかになっているが、海洋プレートの沈み込みに伴う地震は間歇的に起きている。海溝付近で海洋プレートが実際にどのように沈み込んでおり、それに伴ってプレート境界ではどのようにして地震が起きるのかということは地球科学の大きな問題の一つでもある。

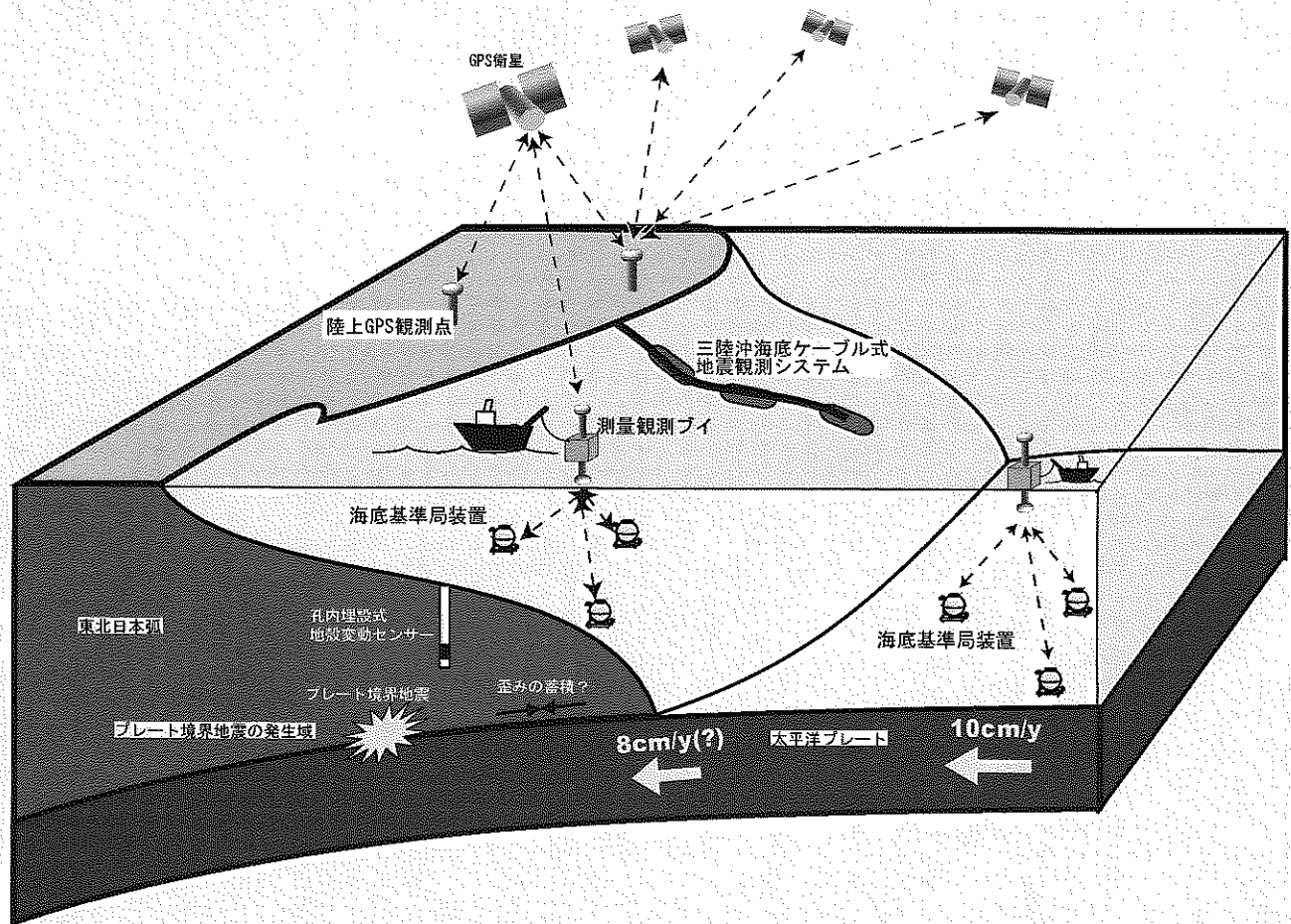


図1 GPS/音響測距結合方式の海底精密測位観測の概念図。船の音響雑音を避けるために曳航ブイを用いて観測を行う。3台の海底局を1セットとして、そのアレイの中心付近における測位観測により、海中の音速構造変化の影響を受けない海底測位が可能となる。

* 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター 教授

近年、陸上 GPS 連続観測網に基づく地殻変動観測により、プレート境界面上には、非地震時に固着している部分と地震を起こすことなく安定に滑っている部分があるというアスペリティモデルを示唆する結果が得られている²⁾。プレート境界面の滑り量分布は、自然地震観測により、小さな固着域の繰り返し破壊と考えられる相似地震を観測することからも推定されている³⁾。

しかしこのような陸上観測の進展により懸案の問題が解決したかというところではない。日本海溝は陸から 200 km ほど離れているが、陸上の GPS 観測からプレート境界の滑り分布を推定できるのは、陸からおよそ 100 km 程度の範囲である。その海側約 100 km は津波地震を引き起こす場所であり、特に観測が重要な場所であるが、陸上の観測だけでは滑り分布の推定は難しい。陸に近い部分についても、陸上 GPS 観測に基づく解析は単純化したモデル計算に基づくものであり、今後の研究の進展には、推定を裏付ける現場の観測データを得ることが重要である。また沈み込み運動の基礎となる海洋プレートの運動速度は一定であると仮定しているが、観測による裏付けはまだない。相似地震によるすべりの推定は地震活動が活発な場所でのみ有効であり、固着して地震が起きないのか、非地震性の滑りで応力が解放されているのかという区別もできない。

陸上における地震や地殻変動の観測網を地震発生帯である海底に伸ばすことが重要である。重要であることがわかっていながら観測が進んでいないのには理由がある。その最大の要因は、銀河の果てまで届く電波が、海水の中では数 10 m も届かないということである。陸上の地殻変動観測に革命をもたらしたのは、GPS に代表されるように、人工衛星や電波星からの電波を用いた宇宙測地技術であるが、その技術を直接海底に適用することはできないのである。

そこで近年、電波の代わりに音波を用いて海底における地殻変動を観測する試みが進んでいる。沈み込み帯では変動帯が 100 km 以上の広範囲にわたっており、そのような広域の海底地殻変動を観測する方法として最も期待されているのは、図 1 の概念図に示すような、海上のキネマティック GPS 測位(以後 KGPS と表記)と海上海底間の音響測距を結合して海底の精密測位を行う方法である⁴⁾⁵⁾。このような観測を繰り返すことにより、海洋プレートの沈み込みに伴う海底の水平変動を現場でモニターすることも現実的な課題となってきている。

2. 海底測位観測における技術的課題

海底の年間水平変動はセンチメートルのオーダーであるので、それを捉えるためには、悪くても 2~3 cm の繰り返し測位精度が求められる。そのくらいの精度があれば、何年かにわたる繰り返し観測により、海底の水平変動を検出することができる。この海底精密測位のために必要となる基本的な技術的課題は、1) 陸から 100 km 以上離れた海上における KGPS 測位、2) 海上海底間の精密音響測距、

3) KGPS 測位と音響測距の結合の 3 つである。そのほか、4) 堆積物で覆われた海底に設置した測器の姿勢の長期安定性、などの問題もある。このうち、最も重要なのは第二の課題である。この課題は、計測の面では、海上海底間を音波が往復する時間の精密測定と海上海底間の平均音速が変化する影響の補正という二つの課題となる。

2.1 海上 KGPS 測位

海底の精密測位が可能になったのは、揺れる船などに取付けた GPS アンテナの位置を、毎秒、1 cm 程度の精度で求めることができるようになったからである。手法としては、陸上の基準局で観測されたデータを用いた後処理の干渉測位法を用いるが、時々刻々の GPS 衛星の位置を推定することにより、移動体の測位を行うことができる⁶⁾。観測の約 2 週間後に GPS 衛星の精密な位置や時計の情報を示した精密暦が発表されるので、それを利用し、専用の処理ソフトを用いて、陸上局と観測点を結んだ基線の解析を行う。主たる問題は、基線が長くなると陸上局と観測点の大気の状態が変わることであり、大気遅延量の推定に誤差が生じるとされている。KGPS 測位において今のところ最もよい成果を出しているのは、NASA のジェット推進研究所で開発された GIPSY-OASIS II という GPS 基線解析ソフトウェア⁷⁾であろう。カリフォルニア大学のスクリプス海洋研究所 (SIO) のグループや東北大学・東京大学地震研究所のグループがこれを用いている。海上保安庁では別の長基線用の解析ソフトを用いており⁸⁾、名古屋大学では Real Time Dynamics (RTD) という解析ソフトウェアを使って難儀していたが、最近では GrafNav というソフトウェアを使ってよい結果を得ているとのことである。

2.2 海上海底間の音響測距

GPS 測位の基礎が距離測定であるように、海底測位の基礎も距離測定である。KGPS 測位で海上の位置を 1 cm 以下の分解能で求め、その位置から海底まで音波が往復する時間を $10\mu\text{s}$ の分解能で計測することによりその間の距離

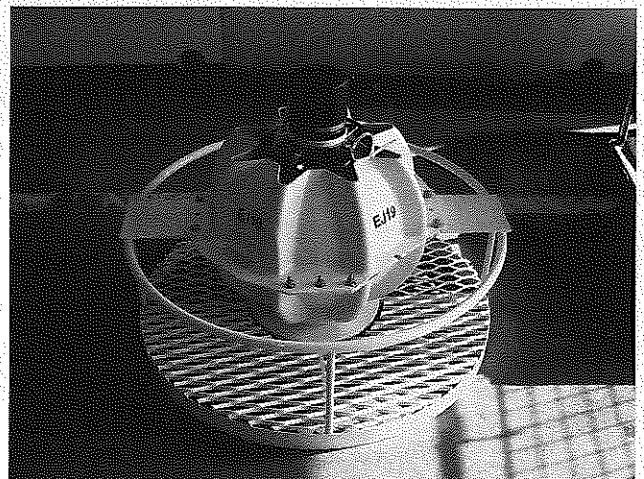


写真 1 東北大学で用いている音響測距用の海底局。数年間の観測を行うことができる電池や電子回路が耐圧ガラス球の中に収納されている。最上部の黒い部分が音響送受波器である。

を求める。平均音速が一定であれば、そのような観測を数点で行えば、海底の位置は1 cmほどの精度で決まる。そのために、音響トランスポンダーと呼ばれる装置（以下、海底局と表記）を海底に設置する。海底局の一例を写真1に示す。数 km 以上にわたる海中音響測距に用いられる音波の周波数は10 kHz前後であり、波長は15 cmほどである。GPSで用いられている電波の波長は19~24 cmであるから、波長はそれほど変わらない。計測の分解能は一般に波長に比例する傾向があるので、距離計測の分解能は電波も音波もそれほど変わらない。技術的には、レーダー技術として開発された位相変調方式や周波数変調方式などのパルス圧縮技術が利用できる。

ただしGPSなどに用いられている電波に比べると周波数は5桁以上低く、伝播速度も5桁以上遅い。計測できる距離も、電波はほぼ無限大であるのに対して、音波は一般的には10 kmのオーダーである。つまり音波を用いた距離測定は、電波を用いた観測に比べて計測の間隔や距離など観測効率は大幅に劣る。また距離測定の分解能は電波も音波も同程度であると述べたが、精度は大きく異なる。後述のように海中の音速の変化が大きいためである。

SIOのグループは当初位相変調方式のアナログシステムを用いた水深3000 m海域用の音響測距装置を開発し、北米西岸沖において、海洋プレートの沈み込み運動の測定に用いた。海上保安庁でも位相変調方式の音響測距装置を米国から導入し、日本周辺海溝域に沿って水深2000 m付近の海底で地殻変動観測を開始している。

東北大学・東京大学地震研究所のグループは、日本周辺の海溝域のほぼ任意の場所で海底地殻変動観測を可能にするために、大水深(9000 m)用の超深海音響測距装置を米国のSIOと共同開発した。この装置により15 km以上の距離で精密測距ができることが確認できた。実際の観測は、比較的海底が平坦な水深2000 mから3000 mの範囲が多く、出力を下げて用いている。その程度の水深であれば、もっと簡便な音響測距装置でも1 cm程度の分解能は得られるという見込みがあった。そこで10 kHz帯の音波を用いて、位相変調方式により音波の到達時間の計測分解能を向上させた音響測距装置を国産のメーカーと開発し、宮城県沖および岩手県沖に設置し、測位観測も行っている。

海中の音速は、表層の500 mほどが特に変化が大きく、海上海底間の音響測距ではその音速変化の補正が最も重要な問題である。海洋の音速構造は、近似的には水平成層構造であるので、いずれのグループも1観測サイトに3~4台の海底局を設置して、水平の位置測定に対する音速変化の影響を打ち消す方法を用いている。SIOおよび我々東北大学のグループは、まず各海底局の周りを回って精密な位置を求めた後に、海底局アレイの中心付近で測位観測を1~3日継続する方式を採用している。そのような観測を繰り返すことにより、海底局アレイの水平変位を検出することを目指している。この方法の利点は、海中の音速変化が大きい表層で波線が狭い範囲に集中するという点にある。音速変化は全ての海底局との測距にほぼ等しい影響を与えるので、海底局アレイの測位は音速変化の影響をほとんど受け

ない。海上保安庁および名大のグループは、船の位置を変えて観測し、海底局の位置と音速を求める方式を採用している。

2.3 KGPS 測位と海中音響測距の結合

KGPS 測位と海中の音響測距を結合するために、普通は船を用いる。しかし海中音響計測に特別に配慮した船でない限り、音響送受波器をどのように保持し、GPS アンテナとの位置を精密に測定するかという問題がある。さらに深刻なのは、船の推進機を回すと水中音響雑音が発生するので、船位を保持して音響測距を行うことができないという問題である。

そこで我々東北大学のグループは、船の発する海中音響雑音に妨げられることなく、海上測位と海中測位を結合するために、1.5 m 四方の曳航ブイを用いている(写真2)。ブイの上部には3~4台のGPS アンテナを取り付け、最下部に音響送受波器を取り付け、GPS 受信機や音響測距装置

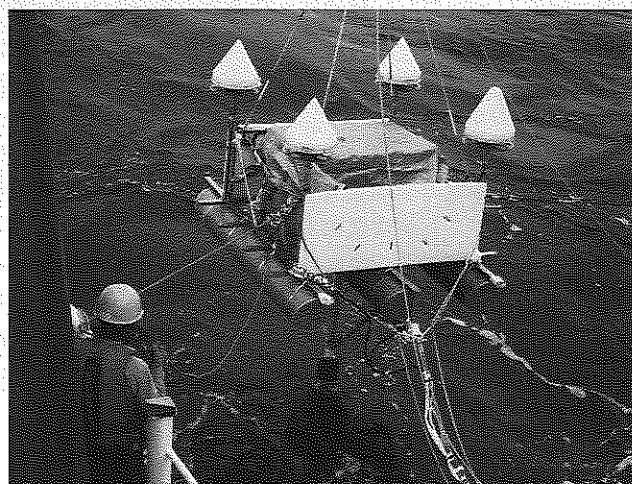


写真2 東北大学でGPS/音響測距結合方式の海底精密測位観測に用いている曳航ブイシステム。上部に4台のGPSアンテナ、支柱の先に音響送受波器がある。

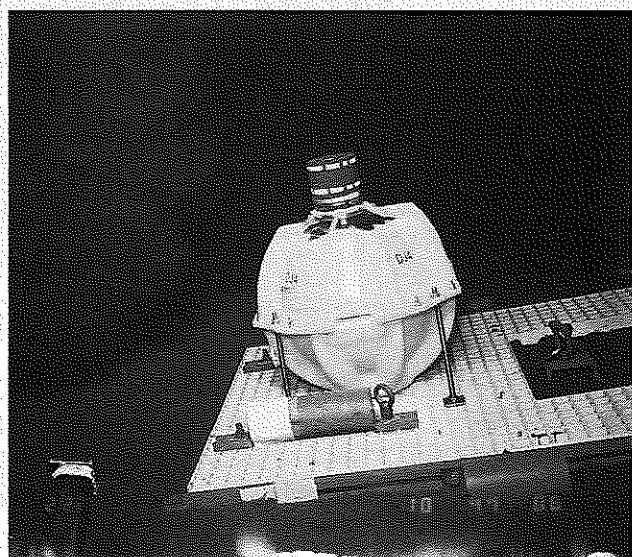


写真3 厚い堆積層の上に設置された音響測距用海底局。海洋研究開発機構の無人探査機「かいこう」で観察した(KR 02-09 航海)。

をアルミ製の箱に収納し、電源は船からケーブルで供給している。GPS アンテナと音響送受波器の相対位置は、各航海の前後に光学測量を行い精密に決定できる。このブイを船から数 10 m 離して曳航することにより、任意の場所で測位観測を行うことが可能になり、海中の音速構造の変化を補正する効果的な観測方法が可能になった。また、ブイを投入・揚収できるクレーンや A フレームがあれば、どの船でも観測することが可能であるという点も観測を進めるうえでは重要である。

2.4 海底局の姿勢の長期安定性

沈み込み帯は、ごく一部の急崖を除いて、厚い堆積層で覆われている。そのため、田植えの前の水田のような軟弱なところに海底局を設置すれば、その装置が泥の中に沈むとともに姿勢が変わり、音響送受波器の位置は簡単に 2~3 cm は変わるのではないかと、などという質問をよく受ける。しかしこれはほとんど杞憂であることが確かめられている。2002 年に、海洋研究開発機構の無人探査機「かいこう」により、厚い堆積層の上に設置した海底局を観察した時の写真を写真 3 に示す。ガラス球耐圧容器入りの海底局の架台として用いた厚さ 4 cm の白い FRP 製のフレームは、平坦な砂浜に設置したかのようにほとんど沈まず、海底局の位置も姿勢も極めて安定していることが確認できた。このほかにも、設置済みの海底局を観察した例はいくつかあるが、いずれも問題ないことが確認されている。

3. 海底測位観測の現状

SIO のグループは、米国西海岸から 500 km 近く離れたファンデフカ海嶺の近傍で約 3 年間の間に 3 回の観測（毎回数日間）を行い、繰り返し海底測位精度は 1~2 cm であると推定している。彼らは南米西岸沖にあるペルー・チリ海溝の陸側（陸から 100 km 以内、水深約 3000 m）でも海底測位観測を行っており、80 時間の観測結果をまとめることにより、 ± 1 cm の繰り返し測位精度が得られると報告している⁹⁾。3 年間に 2 回の観測を行い、プレート境界における固着は海溝軸の陸側 2 km 付近から始まり、深さ 40 km まで延びているという興味深い結果を得ている。

我が国でも、海上保安庁をはじめ、東北大学、名古屋大学などが GPS/音響精密測位観測を進めている。海上保安庁は太平洋側の海溝沿いに GPS 音響結合方式の海底精密測位観測を展開しており、測位再現性を数 cm 程度と見積もっている。宮城県沖（水深約 2000 m）の観測サイトでは、2002 年から 4 年間で 7 回の測位観測を行っており、西北西に約 8 cm の海底地殻変動を検出したと報告している⁹⁾。名古屋大学も熊野灘等で測位観測を進めており、繰り返し測位精度は数 cm 程度であると推定している。

東北大学では宮城県沖および熊野灘中央部で海底測位観

測を進めている。宮城県沖の水深約 2000 m の観測サイトでは、2004 年に 1 日前後の観測を 2 回行い、それぞれ 3~4 cm の推定測位誤差を得ている。熊野灘中央部の観測では、2004 年 9 月の紀伊半島南東沖地震の前後に名古屋大学および東北大学が観測を行い、地震に伴う南南東への海底変動を捉えている^{10),11)}。

東北大学では、海中の音速変化の補正に関して新しい試みを開始している。その一つは、3 台の倒立音響測深機 (Inverted Echo Sounder : IES) による海上海底間の平均音速の 4 次元的なモニターである。海底の測位観測では、海上海底間を音波が斜めに往復する時間を計測し、IES は海底から送信された音波が海面で反射され海底に戻るまでの時間を計測する。両方とも同様な観測を行っているので、適切な場所に IES を設置しておけば、海上海底間の平均音速の時間変化をモニターできる。3 台の IES を設置すれば、ブイから 3 台の海底局までの平均音速の時間変化をほぼモニターできると期待している。

本研究の一部は、文部科学省の「東南海・南海地震に関する調査研究—予測精度向上のための観測研究—」および宮城県沖地震に関するパイロット的な重点的調査観測の下で実施したものである。

参考文献

- 1) 今給黎哲郎：GEONET がとらえた日本列島の地殻変動、地質と調査、通巻第 96 号、2003。
- 2) 例えば、諏訪諤子・三浦 哲・長谷川昭・他：東北日本沈み込み帯におけるプレート境界の固着状況、地震 2, 56 巻、2004。
- 3) 例えば、Uchida, N., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A., et al.: Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquake, 2003, Geophys. Res. Lett, 30, 2003。
- 4) 三浦 哲・浅田 昭：海洋測位技術、海洋調査技術、16 巻、2004。
- 5) 藤本博巳：海底地殻変動観測、測地学テキスト WEB 版、日本測地学会、<http://www.soc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/part3/fujimoto/fujimoto-1.html>, 2004。
- 6) Zumberge, J. F., Heflin, M. B. and Fefferson, D. C., et al.: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., 102, 5005-5017, 1997。
- 7) 浅田 昭・矢吹哲一郎：海底音響基準ネット、生産研究、52 巻、2000。
- 8) Gagnon, K., Chadwell, C. D. and Norabuena, E.: Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measuring, Nature, 434, 2005。
- 9) 藤田雅之・石川直史・佐藤まりこ・他：海溝陸側における海底地殻変動観測—宮城県沖海底基準点の観測結果—、日本地震学会 2004 年秋季大会, C23, 2004。
- 10) 田所敬一・生田領野・安藤雅孝・他：熊野海盆における繰り返し海底地殻変動観測 (2)、2005 年地球惑星関連学会合同大会, J062-007, 2005。
- 11) 木戸元之・藤本博巳・長田幸仁・他：海底地殻変動観測の誤差要因の見積りと精度評価、2005 年地球惑星関連学会合同大会, J062-002, 2005。

火山ガスから読むマグマの動き

しの はら ひろ し*
篠原 宏志*

はじめに

火山から立ち上る噴煙は火山活動の象徴でもある。桜島(写真1)は数十年の間継続的に噴煙活動(火山ガス放出)を続けている火山であり、最近是最盛期と比べ火山ガス放出量が低下しているとはいえ、今でも一日あたり1000tものSO₂(二酸化硫黄)を放出している。火山ガスの90~99%を占める主成分はH₂Oであるため、火山ガス放出量としては日量1~10万tが放出されている。2004年9月噴火を繰り返した浅間山からも昨年以來、日量1000~2000t程度のSO₂が継続的に放出されており、火山ガスの総量としては日量3~6万tの放出と見積もられている。それに対し2004年9月の浅間山の噴火で放出された噴出物(火山灰など)の量は最大規模の噴火でも数万t程度である。つまり、継続的な噴煙活動では小~中規模の噴火で放出されるマグマと同程度の量の火山ガスが毎日放出されていることがわかる。このような大量の火山ガスの放出が意味する物は何であろうか?火山ガスは地下のマグマから供給されている。そのため、大量の火山ガスの放出のためには、それに見合う大量のマグマが必要である。本稿では、近年急激に進歩している火山ガス観測の紹介とそこから推定されるマグマの動き(火山活動の実態)について紹介させていただきたい。

1. 噴煙活動と噴火前兆現象

火山噴火予知のためには、地下でのマグマの動きを明らかにすることが不可欠である。近年、高精度の地震観測や地殻変動観測が多点・高密度に実施されることにより、噴火前にマグマが貫入してくるようすが詳細に明らかにされるようになってきた。2000年に相次いで生じた、有珠山・三宅島の噴火はその好例であり、マグマの形状・深さ・体積などの時々刻々の変化が推定されている¹⁾。地表まで達する通路がない状況下でマグマが深部から供給・上昇する場合、マグマが周囲の岩盤を破壊することにより地震が生じ、またマグマ供給によるマグマ溜まりや岩脈の体積膨張により地殻変動が生ずるため、地震や地殻変動観測により直接的にマグマの動きを検知することができる(図1a)。このような場合は火山活動前兆現象を考えるうえでの古典的な状況・考え方と言えよう。このような場合、貫入してくるマグマの上部から漏れ出てきた火山ガスが、マグマに先行して地表に放出されることがある。また、上昇するマグマが地下水を加熱することにより水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発を生ずることもある²⁾。しかし、放出される火山ガスの量は少なく、地表近傍での地下水との相互作用の影響も受け火山ガスの温度は低い。

それに対し、活発な噴煙活動を行っている火山では、マ



写真1 噴煙を上げる桜島(2003年10月)

* (独)産業技術総合研究所 地質情報研究部門マグマ活動研究グループ

グマと地表の間に火山ガスの通路が存在している(図1b)。そのため、深部からのマグマの供給・圧力増加は、地殻変動や地震をあまり引き起こさずに、火道中のマグマを押し上げる結果となる。ただし、地震や地殻変動に顕著に表れないとしても、地下でマグマの活動が不活発であるわけではない。火山ガスはマグマから供給されており、その火山ガスの放出量が多いことは、供給元であるマグマの供給量も多いことを意味する。たとえば、浅間山からの日量2000tのSO₂放出量を供給に必要なマグマの量は、日量約60万tである。噴煙活動が既に300日以上継続していることを考えると、必要な総マグマ量は2億t(～0.1km³)にのぼる。このような大量のマグマが全て、火山ガスを放出できるだけの低圧下(浅部)に存在しているとは考えにくい。そのため、火山ガスを供給しているマグマは単に上昇貫入しているだけではなく、深部との間でマグマの循環が起こり火山ガスを放出していると考えられている(火道内マグマ対流脱ガス)⁹⁾。マグマ対流脱ガスの詳細については次章以降で紹介するが、このようなマグマ対流が火山の地下の浅部で生じている場合には、地殻変動の意味も変わってくる。火山浅部のマグマ供給系が疑似閉鎖系(深部からの供給のみがある)の場合、地殻変動は深部からの供給の指標となる。しかし、マグマ対流によりマグマの流入・流出が起きている場合には、変動量はあくまでマグマ移動量の差分を意味することになるため、単純にマグマの移動量の指標とはならない。そのため、継続的な噴煙活動を行っている火山では、その火山ガス供給過程を理解することが、地震活動や地殻変動などを理解するためにも不可欠である。

2. 継続的噴煙活動

活発な噴煙活動をしている火山は日本にどれくらいあるのだろうか？最近の火山噴火予知連絡資料などから、継続的に噴煙活動を行っている火山を拾い上げたのが図2である。世界でもまれに見る大規模な噴煙活動を続けている三宅島(後述)以外にも、浅間山、阿蘇、桜島、薩摩硫黄島、諏訪之瀬島と多くの火山で継続的な噴煙活動が生じている。世界的にも、イタリアのエトナ火山、ストロンボリ火山、チリのピジャリカ火山など同様の活動をしている火山は多い。これらの活動には、1) 大量の火山ガス放出、2) 長期間安定性、3) 地表近傍でマグマからガスが放出、という共通の特徴があり、同一の火山活動の形態であると解釈される。

(1) 大量の火山ガス放出

継続的噴煙活動の最大の特徴は、大規模な噴火を伴わず

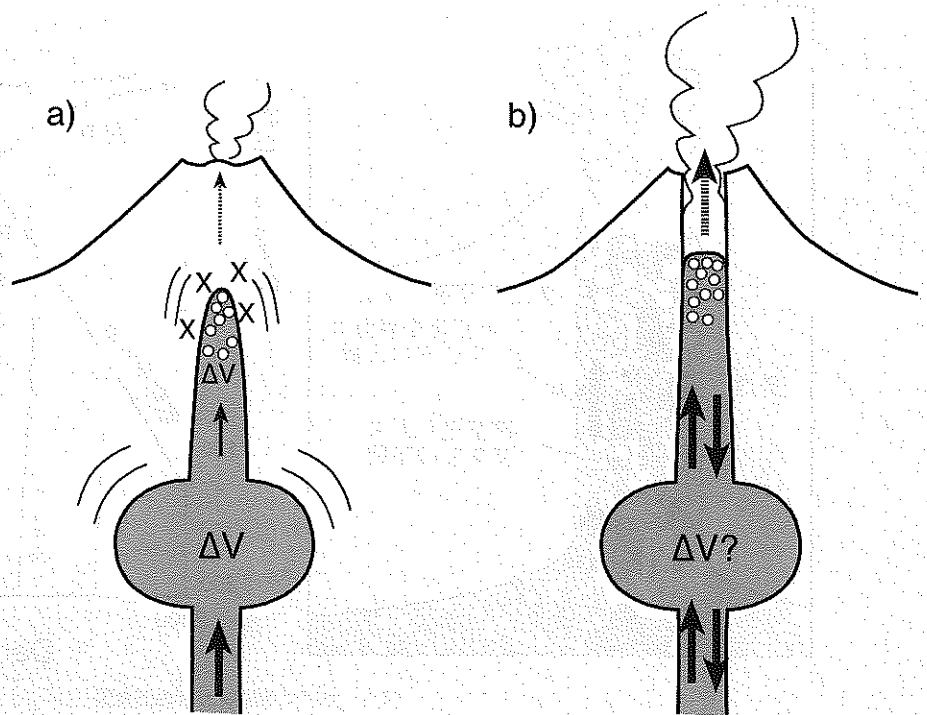


図1 火山活動に伴う変動。a) 新たなマグマの上昇貫入、b) 継続的噴煙活動を伴う場合

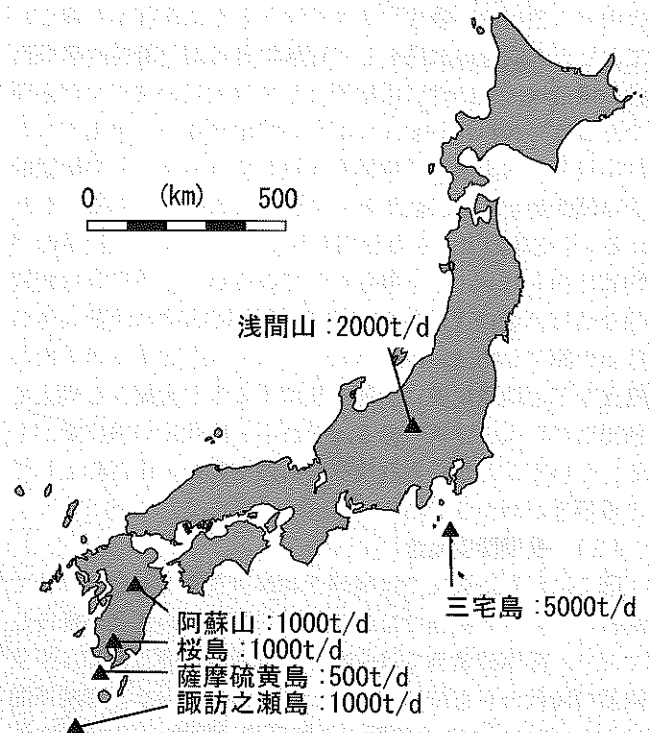


図2 大規模な噴煙活動を伴う火山。数字はSO₂放出量(t/d)の概算値(気象庁火山噴火予知連絡会資料などによる)。

に大量の火山ガスが放出されていることである。図2に示した火山はいずれもSO₂放出量で数百t/dを越える火山ガス放出が観測されている火山である。興味深いことは、SO₂放出量で10t/d以下の小規模の噴煙活動を行っている火山は数多く存在するが、10～100t/dの噴煙活動を行っている火山はほとんどない。つまり、火山ガス放出はここで注目している大規模な噴煙活動か、ごく小規模の噴煙活動に大別される。継続的な噴煙活動を行っている火山では、小規模な火山灰放出がたびたび起きているが、火山灰放出

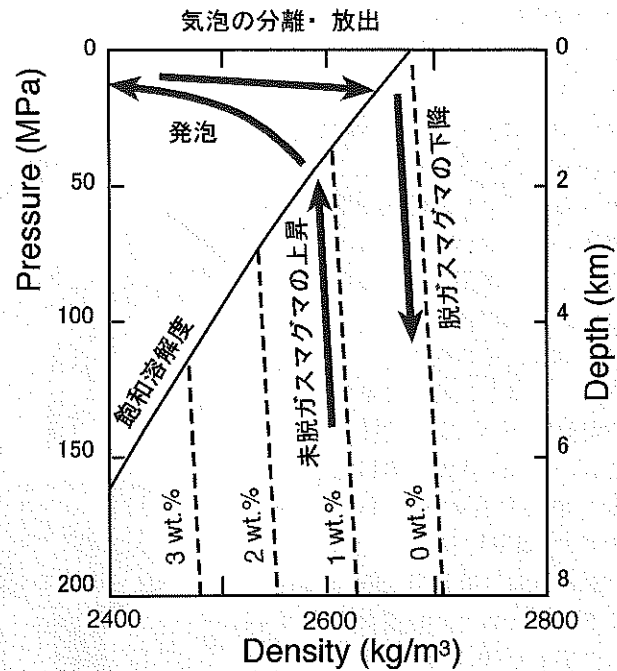
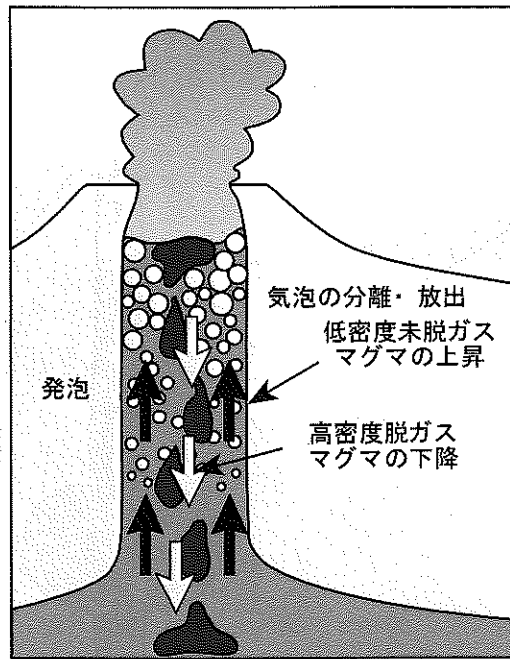


図3 マグマ対流脱ガスの概念図

量は少なく、火山ガス放出量が圧倒的に多い。噴火に伴う火山ガス放出は、噴火するマグマとともに深部から運ばれてきたガス成分の放出として理解できるが、継続的噴煙活動の場合は、火山ガス供給源としては大量のマグマが必要であるにもかかわらず、マグマの噴出がない。火山ガスの放出量で、火山活動の規模を比較してみると、この継続的な噴煙活動が、火山活動として非常に重要であることがわかる。全地球の火山から放出されている SO_2 の放出量の平均値は約5万 t/d と見積もられているが、その半分は継続的な噴煙活動による放出である⁴⁾。継続的噴煙活動以外の放出の顕著な物は、1991年のフィリピン、ピナツボ火山の噴火などの地球規模に影響を及ぼすような大規模な噴火で放出された火山ガスである。それらと同程度の放出量がある、ということからも継続的な噴煙活動の火山活動としての重要性がわかるであろう。

(2) 長期間安定性

図2に示した火山では噴煙活動が少なくとも数年単位で継続している。桜島では最近数十年間同様の活動が継続しており、薩摩硫黄島では少なくとも活発な噴煙活動は平家物語の時代から継続していると考えられており、継続期間は1000年にわたる。浅間山や阿蘇では噴火・火山活動の消長とともに放出量は100~1000 t/dの間で変動しているが、全体としては数十年以上活動が継続していると考えられる。また、活動期も通常年単位での継続時間がある。長期間・大量の火山ガスが放出されていることは、火山ガス供給のためには大量のマグマが必要であることを意味する。先に、2004年9月からの浅間山の火山ガス放出を担うためには、 0.1 km^3 のマグマが必要であることを述べた。しかし、桜島では同様の規模の噴煙活動が数十年（浅間山の約100倍）の期間継続しているため、必要なマグマ量は 10 km^3 に達する。このような大量のマグマは地下深部のマグマ溜まりにその起源を求めるしかなく、継続的噴煙活動と

は、マグマ溜まりの効率的なガス放出により生じていると結論される。長期間安定で噴煙活動が継続することのもう一つの意味は、火山ガス放出を起こしている機構が安定な過程である（一種の定常状態として生じ得る）ことを意味している。これは、ガス放出のメカニズムを考えるうえでの重要な制約条件である。

(3) 地表近傍でマグマからガスが放出

第三の特徴は、火山ガスがマグマから地表近傍で放出されていることを示す例が多いことである。桜島・諏訪之瀬島などでは火山灰の放出がたびたびあり、赤熱した岩塊の放出も見られるなどマグマが浅部まで上昇していることを示している。顕著な例は、イタリアのエトナ、ストロンボリ、チリのピジャリカなどの火山である。これらの火山では溶融したマグマから火山ガスが放出されていることが観察できる場合がある。直接マグマを検知することができない場合でも高温の火山ガスがマグマの存在を示唆している場合が多い。たとえば、薩摩硫黄島の流紋岩質マグマの温度は 950°C 程度と推定されているのに対し、火山ガスの最高温度は 900°C であり、地表のごく近傍でマグマから放出されたガスであることを示している。マグマが地表近傍で火山ガスを放出しているため、図1b)のように地表に開放されたマグマシステムを考える必要がある。

3. 火道内マグマ対流脱ガス

継続的噴煙活動の特徴を説明すべく考案されたモデルが、火道内マグマ対流脱ガスモデルである³⁾ (図3)。このモデルでは、深部のマグマ溜まりから上昇したマグマが、地表近傍で脱ガスした後に深部マグマ溜まりに環流する火道内でのマグマ対流により、大量の火山ガスが定常的に供給される機構を説明している。マグマの対流の原動力は、マグマ中のガス成分濃度の差によるマグマの密度差である。

マグマの密度はガス成分(特に H_2O) の低下により増大するため、未脱ガスマグマで満たされた火道の最上部で脱ガスが生ずると、密度の増大した脱ガス後のマグマは未脱ガスマグマの中を沈降することになる。この入れ替えは、深部マグマ溜まりに未脱ガスマグマが存在する限り継続的に起こることができる定常的な過程である。しかし、果たして太さの限られている火道の中でマグマの入れ替え(対向流)が十分速い速度で生ずるであろうか? 火道中のマグマの入れ替え速度は二重管ボアズイユ流などの簡単な流体力学モデルを用い推定することが可能である。マグマの流れの速度は粘性、マグマの密度差および火道の径により規制される。粘性、マグマの密度差はマグマの組成・温度・ガス成分濃度に依存する。たとえば玄武岩質マグマのマグマ対流を考えると、 SO_2 放出量 1000 t/d を生ずるために必要な火道の直径はわずか数 m である。流紋岩質マグマは粘性が大きいため、より大きな火道径を必要とするが、それでも数十 m の直径の火道があれば SO_2 放出量 1000 t/d を生ずるに必要な量のマグマの輸送は可能であると推定されている。

このように、火道内マグマ対流脱ガスは継続的な噴煙活動を生ずるに十分な過程であるが、果たして他の過程で継続的な噴煙活動を説明すること可能ではないだろうか? 一般的に想定される主な反論として、1) マグマ以外の物質が火山ガスの起源であるモデル、2) 深部マグマ溜まりから気泡のみが上昇するモデルが考えられる。マグマ以外 SO_2 の放出源としては、火山直下の熱水系やマグマ中や火山体に分布する硬石膏などの分解が考えられる。しかし、これらが SO_2 放出量 1000 t/d を数年間以上も継続的に供給するに足る量が存在していることを想像することは困難である。それに対し、深部マグマ溜まりには大量のマグマや気泡が存在することはあり得るため、気泡の上昇により SO_2 を供給することは不可能ではない。しかし、気泡の上昇で輸送可能なガス成分は、あくまで深部マグマ溜まり内で過飽和になった成分のみであり、その輸送効率はマグマそのものの移動による輸送と比べると効率が遙かに小さい。それに加え、気泡により移動するガス成分の組成は高圧下でマグマと平衡になる組成であり、 H_2O に乏しく CO_2 に富んだ組成である。ところが、継続的な噴煙活動により放出されている火山ガス組成の測定例は未だ限られているが、薩摩硫黄島、三宅島、ピジャリカ(チリ)などで測定された火山ガス組成は H_2O に富んだ組成であり、火山ガスが地表近くの低圧下でマグマから放出されたことを示している。つまり、火山ガス組成からも、マグマ対流によるガス成分の輸送モデルが支持される。

火道内マグマ対流脱ガスモデルは、火山ガスの放出機構を説明したモデルであるが、火山活動を考えるうえでの新しい基本的なイメージを提唱しているものでもある。先に述べたように、火山噴火予知を考えるうえでの古典的なイメージは図 1 a) のようなものであるが、継続的な噴煙活動を行っている火山では、火道内マグマ対流を考慮した図 1 b) のようなイメージを基礎に現象の解釈を行う必要がある。火道内マグマ対流脱ガスが生じている場合、対流する

マグマ柱の頂部の高さが、地表での現象の違いを引き起こしている。マグマ柱の頂部が地表に達している(地表から観察できる)場合、それは噴火として認識される。溶岩湖の活動はまさにその典型である。エトナ火山(イタリア)やピジャリカ火山(チリ)で頻繁に起きている比較的静穏なストロンボリ式噴火も、放出されるマグマ量を遙かに超える火山ガスが放出されており、火道マグマ対流脱ガスのマグマ柱が地表に達している例と考えられる。それに対し、桜島、浅間山、三宅島などでは、マグマ柱の頂部が地下にあり、ガスだけが地表に放出されている場合である。2004年の浅間山の噴火では、噴煙活動は夏以降継続しており、その中で9月に爆発的な噴火および山頂火口内に溶岩が流出しているが、これも対流しているマグマ柱の頂部の高さの変動の結果として解釈されるべきであろう。マグマ柱の頂部の高さは、マグマ柱の自重と深部マグマ溜まり内の圧力のバランスで規制されている。そのため、マグマ溜まり内の圧力変動を反映してマグマ柱が上昇・下降する場合や、マグマ溜まりからガス成分に富むマグマが供給されたためにマグマ柱の密度が低下し、マグマ柱が上昇するなどの変動要因が考えられる。

4. 火山噴煙観測方法

前章で述べた火道内マグマ対流脱ガスモデルは、近年の各種観測・測定技術の進歩による定量的な噴煙活動の把握により可能となった。噴煙活動の定量的解釈のためには、1) 火山ガス放出量、2) 火山ガス組成、3) マグマ中の火山ガス濃度、の観測・測定が必要である。本章ではこれらの測定法について紹介する。

火山ガスは通常 H_2O を主成分(90~99%)とし、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、 HCl など酸性ガスが%内外含まれている。そのため、火山ガス放出量を測定するためには、厳密には全ての成分の測定が必要であるが、現実的には困難であり、通常は遠隔測定により放出量の測定が可能である SO_2 の放出量が、火山ガス放出量の指標として用いられている。 SO_2 は紫外域に吸収があるため、太陽の散乱光を光源として、紫外線吸収量を測定することにより遠隔測定により大気中の存在量を測定することができる。測定は、噴煙の流れに対して直交方向で、測器を車や航空機などに積み噴煙の下を平行移動(トラバース法)するか、もしくは噴煙の側方から測器を首振り(パンニング法)させることにより行い、噴煙断面中の SO_2 存在量(g/m)を測定する。その値に噴煙の移動速度(m/s)を乗ずることにより、 SO_2 放出量を推定することができる(図4)。1970年代にCOSPEC(相関スペクトロメータ)と呼ばれる測器が開発され用いられてきたが、最近では小型軽量化した mini-DOAS と呼ばれるシステムにより、より簡便かつ高精度での測定が行われるようになってきている。 SO_2 放出量の測定は最近では火山活動監視の基本的な観測項目の一つとして考えられており、多くの火山での測定が行われている。

先に述べたように、 SO_2 は火山ガスの中の高々数%を占める一成分にしかすぎない。そのため、火山ガス総放出量

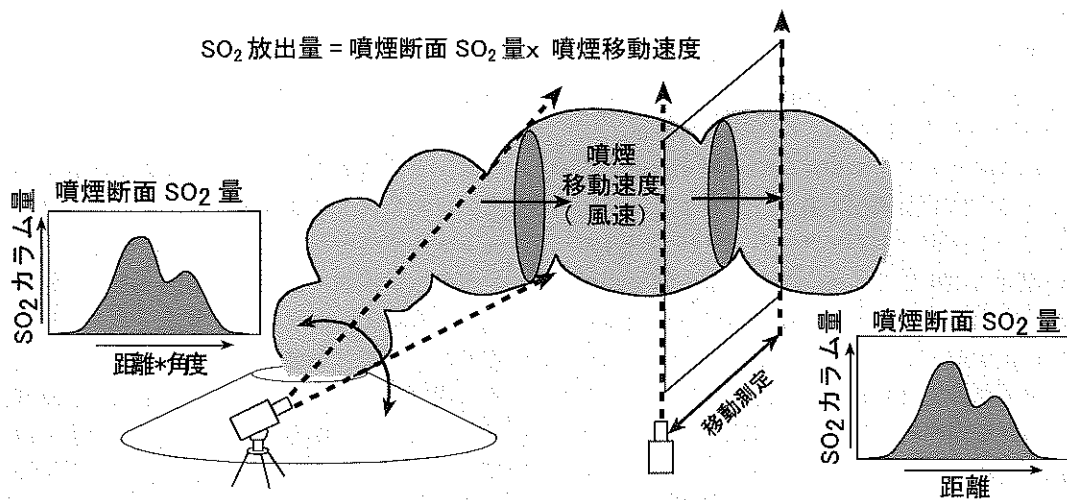


図4 火山噴煙による SO_2 放出量測定法

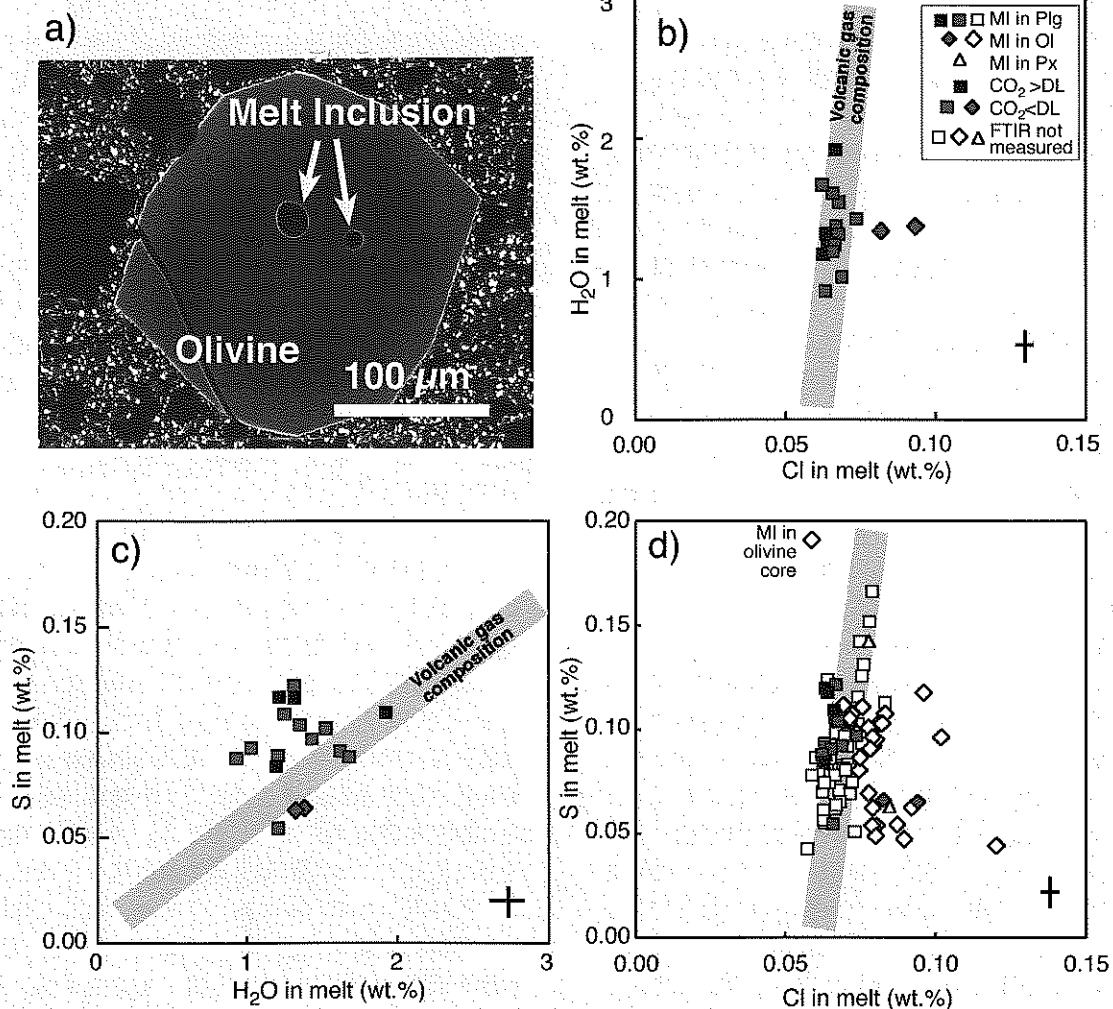


図5 三宅島のメルト包有物と分析結果 (Shinohara et al., 2003, 写真は斎藤元治撮影)

を推定するためには、 SO_2 放出量のデータに加え火山ガス組成が必要となる。火山ガス組成の研究は、古典的には噴気ガスの採取分析により行われてきた。しかし、噴気ガス採取のためには人間が噴気孔に近寄らなければいけないため、活動期の観測や地形的に接近が困難である山頂の火口内での観測などは行うことができない。そのため、継続的噴煙活動により放出された火山ガスの組成の知見は非常に限られていた。近年、噴気孔から直接ガス試料を採取する

のではなく、噴煙を測定することにより火山ガス組成を推定する方法がいくつか開発・応用され、いくつかの火山の噴煙組成が測定されるようになってきた。その一つは FT-IR (赤外分光法) により、噴煙中の H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 HCl などの濃度を測定する方法である。エトナ火山 (イタリア) では噴泉噴火の溶岩を赤外光源として用いることにより、噴火中に放出される噴煙 (火山ガス) の組成の変化を測定することに成功している⁹⁾。もう一つの方法は、我々が開発

した大気中の火山ガス成分濃度を携帯型のマルチセンサーシステムを用い噴煙内外で測定し、大気中バックグラウンド濃度との差分を火山ガス起源として組成を推定する手法であり⁹⁾、現在では H₂O, CO₂, SO₂, H₂S, H₂ の測定が可能となっている。これらの手法は未だ応用例が少ない。しかし、火山ガス組成はマグマから火山ガスが放出される条件(主に圧力)により変動するため、火山ガス組成の変化を観測することにより、マグマ対流脱ガスのマグマ柱頂部の圧力変動の推定することなども可能となると期待される。

火山ガス(噴煙)は、深部では元々マグマ中に溶存していたガス成分が、マグマの上昇に伴う減圧によって、マグマから発泡・分離・放出されたものである。そのため、火山ガス放出量や組成の観測結果からマグマの動きを推定するためには、マグマ中のガス成分濃度を知ることが必要である。マグマ中のガス成分濃度は斑晶中のメルト包有物を分析することによって推定されている。メルト包有物とは、マグマ中で斑晶が成長する際に、周囲のメルト部分を取り込んだ物であり、深部でのメルト組成を代表すると考えられる。特にガス成分は、マグマが地表に噴出すると減圧によりほとんど抜けてしまうため、深部でマグマ中に存在していたガス成分の濃度を推定するためにはメルト包有物の分析が不可欠である。図5には2000年の三宅島噴火噴出物のメルト包有物の分析結果を示している。メルト包有物の大きさは数~数百 μm と微小であり、その分析には微小分析の手法が必要である。主成分や S, Cl などは EPMA で分析可能であるが、火山ガス主成分である H₂O, CO₂ の分析には顕微 FT-IR や SIMS (二次イオン質量分析計) の応用が必要である。これらの分析の困難さ故、メルト包有物中のガス成分の分析の例は未だ限られている。しかし、噴煙活動の定量的な解釈を行うためには、マグマ中ガス成分濃度の測定は不可欠である。マグマ中の S 濃度のデータがなくては、SO₂ 放出量から脱ガスに必要なマグマ量を推定することはできない。また、図5に示す例では、メルト包有物中のガス成分濃

度の分布が、灰色で示す火山ガス組成と同様の分布を示していることにより、火山ガスがこのマグマから低圧下で放出されていたことが推定されている。このように、火山ガス放出量・組成・マグマ中ガス成分濃度は、それぞれ重要なデータであるが、これらを組み合わせることにより噴煙活動を起こしているマグマ活動の実態を明らかにすることができる。その一例として最後に三宅島における噴煙観測結果を紹介する。

5. 三宅島での観測例

三宅島では2000年7~8月に水蒸気爆発・マグマ水蒸気爆発を繰り返しながら山頂部に陥没が生じ、その後大量の火山ガス放出が始まった。この火山ガス放出は、2000年末の最盛期には SO₂ 放出量で数万 t/d に達する巨大な物であった。先に紹介したように、地球上の全ての火山からの噴煙活動による SO₂ 放出量の総和は3万 t/d であるから、

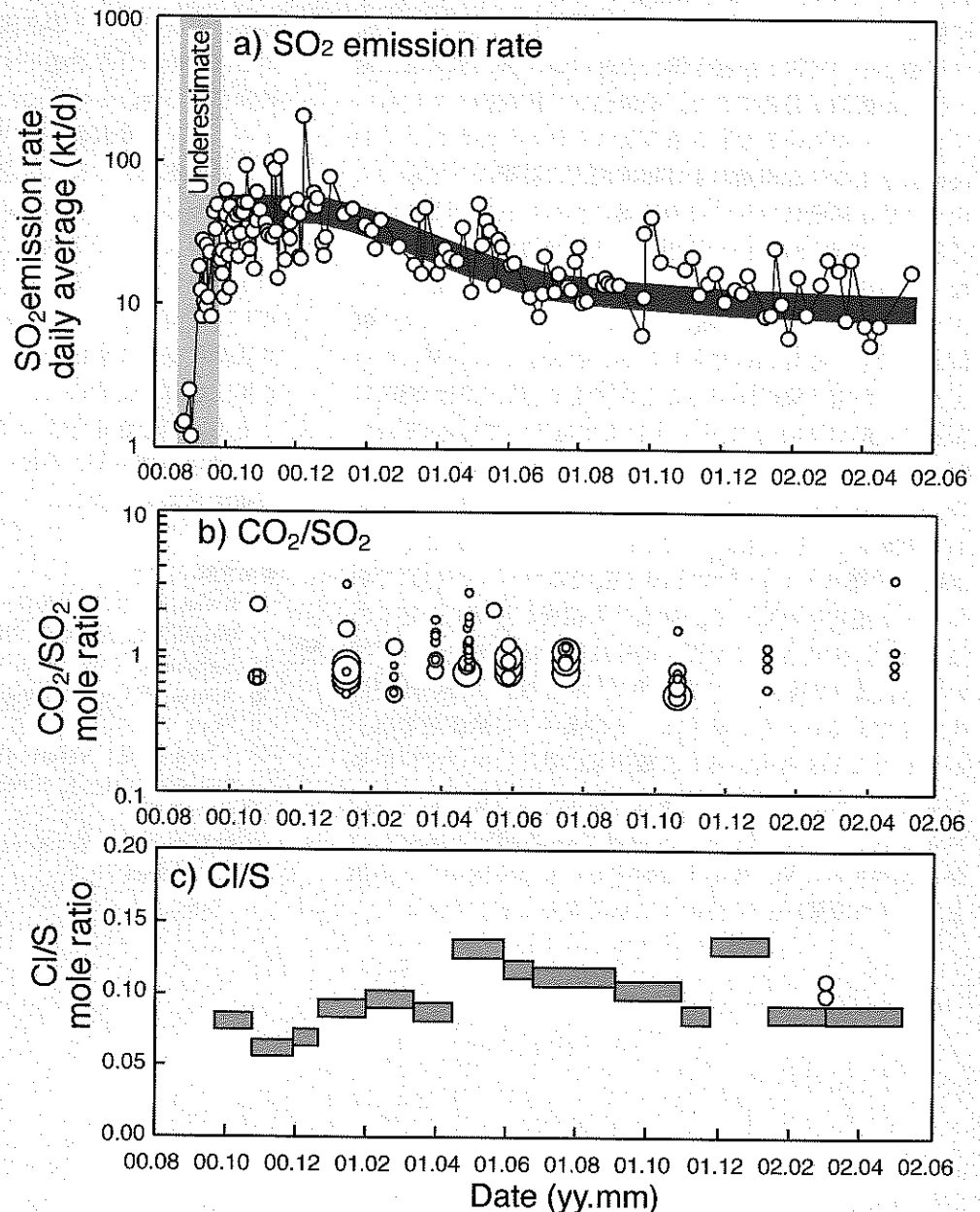


図6 三宅島における火山噴煙観測結果 (Shinohara et al., 2003)

最盛期には三宅島だけで地球上の他の火山全ての2倍の放出量があったことになる。このようにSO₂の放出量があまりに大きく、通常行われる火山近傍での観測では噴煙中のSO₂濃度が大きすぎるため、ヘリコプターを用いた海上でのトラバース観測が必要であった。その後SO₂放出量は次第に減少し、現在では数千t/dまで低下しているが、噴煙活動そのものは数年間継続している(図6)7)。それに対し、噴火は火山ガスの継続的放出の安定化に伴い減り、2000年10月以降は時折微量の火山灰の放出が観測されるだけとなった。このように三宅島の噴煙活動は典型的な継続的噴煙活動と考えられる。三宅島では、2000年8月末に噴火の危険のため住民の島外避難が行われた。その後噴火の危険性は低下したが、大量に放出される火山ガスが居住地に流れ込むため、住民の避難は継続された。そのため、噴煙活動の監視と火山ガス放出の推移予測は、噴火予知の観点のみならず重要な問題であった。幸い、火山ガス放出量は次第に低下したこと、および火山ガスへの対策が講じられたことにより、一部の地区を除き三宅島の避難指示は2005年2月に解除された。

噴煙活動の監視と推移予測のためには、火山ガス放出量と組成の観測が必要であり、噴煙組成の観測のためにもヘリコプターを用いるなどさまざまな手法が行われた。この詳細な火山ガス放出量および組成観測の結果、三宅島の火山ガス放出活動は世界で最も詳細に調べられた例となった(図6)。三宅島の火山ガス放出は、放出量の大きさだけでなく、放出量の長期的に減少しながら、火山ガス組成が一定であることも大きな特徴である。SO₂放出量は日々の観測値には大きな変動は見られるが、長期的には非常にゆっくりとした低下傾向が見ることができる。放出量は2003年末までに最盛期の約10分の1にまで低下している。それに対し、火山ガスのCO₂/SO₂比は約1、Cl/S比は約0.1で全期間を通じほぼ一定であった。先に述べたようにメルト包有物柱のガス成分濃度との比較により、この火山ガスは2000年に噴火したマグマと同じ組成のマグマが起源であることが推定されている。火山ガス組成が長期間一定であることは、供給されるマグマの組成が一定であり、マグマから火山ガスが放出される条件(マグマ柱の頂部の圧力)も一定であることを意味する。その条件下で放出量の低下が生じたことを考慮すると、放出量の低下はマグマ供給系の深部での変化ではなく、火道の狭窄により生じたことが推定された7)。火道内のマグマの流量は、火道の半径の3~4乗に比例するため、火道半径が半分になると火山ガス放出量(マグマ流量)を10分の1に低下することになる。元々

三宅島のマグマ対流の通路は、2000年7~8月の山頂陥没に伴い生じた割れ目系にマグマが侵入することにより形成されたため、圧密に伴う割れ目の閉塞などにより実効的な火道径が低下したと考えられる。このように詳細な火山ガス観測およびメルト包有物分析に基づき、三宅島での大量の火山ガス放出のメカニズムとその変化の原因を明らかにすることができた。マグマ対流脱ガスによる火山ガス放出は定常的な過程であり、深部から供給されるマグマに変化がないと推定されたことから、火山ガス放出は長期化する可能性が推定されている。しかし、マグマ対流脱ガスが停止した例が観測された例はなく、停止の条件なども必ずしも明らかではない。そのため、残念ながら三宅島における火山ガス放出が停止に至る過程などの予測は現状では明らかではなく、今後の研究が必要である。

6. おわりに

本稿で紹介してきたことは、いわゆる予知・予測技術そのものではない。その前段階の噴火予知の基礎となる、火山とはどのような活動をするか、火山の地下ではマグマが挙動をするか、といったことに関する理解の進歩の一端である。近年の観測網の充実により、火山噴火に先立って何らかの前兆現象はまず間違いなく捕らえることができるようになってきた。しかし、噴火のタイプや活動継続期間、活動推移などを予測することは未だ容易ではない。これらの予測を可能とするためには、火山で何が起きているかを正しく理解することが必要である。本稿で紹介した火山ガス観測に基づく火山活動のモデルは、地球物理観測のみから推定された従来の火山活動のイメージとは異なったものである。このさまざまなイメージをいかに融合させ、統一的な火山活動モデルを作ることが、予知・予測の実現への近道であると考えられる。

参考文献

- 1) Irwan, M. 他: 月刊地球, 号外 39, 108-114, 2002.
- 2) 鎌山恒臣他: 月刊地球, 号外 15, 140-144, 1996.
- 3) Kazahaya, K. 他: Bull. Volcanol., 56, 207-216, 1994.
- 4) Andres, R. J. and Kasgnoc, A. D.: J. Geophys. Res., 103, 25251-25261, 1998.
- 5) Allard, P. 他: Nature, 433, 407-410, 2005.
- 6) Shinohara, H.: J. Volcanol. Geotherm. Res., 143, 319-333, 2005.
- 7) Shinohara, H. 他: Advances in Volcanology 4, 147-161, Elsevier, 2003.

光ファイバセンサによる 斜面表層崩壊モニタリングと崩壊予測

加藤 俊二*
小橋 秀俊**

1. はじめに

日本の国土は約70%が山地部で、多くの集落や道路が斜面に隣接している。記憶に新しいところでは昨年10月の台風23号のように、6~10月にかけての梅雨・秋雨前線および台風による長雨や集中豪雨があり、斜面が崩壊して集落や道路に土砂災害をもたらしている。土砂災害を低減する(無くしていく)ために、斜面の調査・点検を行い、適宜防災対策を実施しているが、防災対策を一気にまた全斜面に施すことは困難であり、モニタリングを併用しながら住民や道路利用者の安全を確保していく必要がある。災害では安全の確保のために、「いつ」、「どこで」、「どのくらいのもの」が発生するのかを予知することが求められている。しかし、データをいくら蓄積しても正確に予知することは現実的には困難であり、災害のモニタリングにおいて重要なのは、いかに適切に予測できるかであり、斜面災害においても同様である。

斜面モニタリングは、主に降雨時の崩壊を捉えることが目的であり、伸縮計や地盤変位計などのセンサを用いて地盤の変状状態を計測している。山間部の降雨は落雷を伴うことが多く、従来のセンサは電気式で、近年ずいぶん改善はされてきてはいるものの落雷による電磁誘導でセンサが故障することがある。これは、メンテナンスの面で問題となるうえ、肝心な時に計測できない可能性もある。また、斜面崩壊は、起こりそうな範囲は現地調査である程度はわかるが、そのどこが、いつ、どのくらい崩壊するのかわからない。このため、従来のような点的な設置方法では崩壊を的確に捉えることができない可能性が高い。特に土砂斜面の表層崩壊は、斜面の不特定域で発生すること、崩壊の速度が速いことが大きな特徴であり、崩壊を捉えるためには線的あるいは面的な計測が必要である。

一方、光ファイバセンサは、光ファイバ自体がセンサと伝送の2つの機能を有すること、線的・面的に計測が可能であること、落雷による電磁誘導を受けないといった特徴があり、表層崩壊のモニタリングに適した技術と考えられ

る。このため、独立行政法人土木研究所では、民間14社と「光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリングに関する共同研究」(平成12~17年度)を実施し、その適用性について検討を行っている。本報ではその成果を交えながら光ファイバセンサによる斜面崩壊予測の可能性や課題について考察することとする。

2. 計測原理と斜面計測への適用性

一般的に光ファイバは、図1に示すように、屈折率が異なるコア部とクラッド部の2層構造からなるガラス繊維であり、屈折率の違いにより光が外部に漏れることなくコア部を進行する。光ファイバセンサは、ガラスの屈折率や密度の微小なゆらぎにより散乱光が発生し、この一部が反射光として後方に戻ってくる後方散乱光や、ファイバ自体に何らかの加工をして反射点などを設けて発生させた反射光等を利用している。光ファイバに曲げやひずみ等が生じると、散乱光や反射光あるいは透過光の波長や光強度などが何らかの変化をする。この変化状態を、ひずみや変位等に換算している。計測分野で用いられている主な計測原理としては、B-OTDR、OTDR、FBG、MDM、干渉方式、光学ストランド方式(OSMOS)等が挙げられる。これらの原理を利用してさまざまなセンサが開発されており、それぞれの計測精度については、もともとが構造物等のひずみを検出できる精度を持っているものがほとんどで、以下斜面計測用としては精度を十分に有しているものであることを前提として述べる。計測原理や精度等の詳細については、カタログや他の技術文献等で紹介されているのでここでは

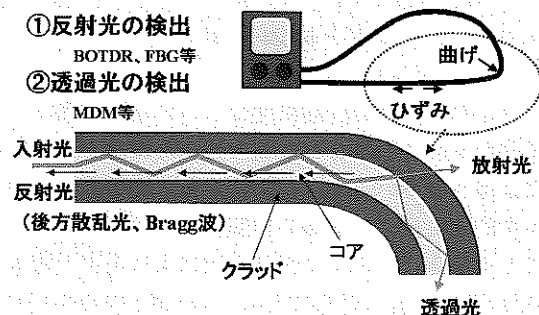


図1 光ファイバセンサの計測原理の概念図

* (独)土木研究所材料地盤研究グループ土質チーム 研究員
** 同 上席研究員

表1 各種計測原理の適用性

		B-OTDR	FBG	MDM
計測エリア	広	○	△1	△1
	狭	△2	○	○
変状の程度	大	○	○	○
	小	○	○	○
変状位置		○	△3	△3
リアルタイム性		△4	○	○

割愛する。

計測原理とは別に、計測の方式としてラインセンサとポイントセンサ(従来の伸縮計と同様)の2つに大別できる。従来型と同じポイントセンサとして用いられている代表的な計測原理は、FBG、MDM、干渉方式、光学ストランド方式(OSMOS)などがある。線的、面的な計測が期待されるラインセンサの代表的な計測原理はB-OTDR、OTDRなどがある。

筆者らが実施している共同研究では、ラインセンサの代表としてB-OTDR、ポイントセンサの代表としてFBG、MDMによる検討を行っており、表1にそれぞれの適用性を示す。表に○が付いているところは特段問題はなく、△が付いているところは何らかの検討が必要となるところである。△1:ポイントセンサは、基本的に1ライン1個あるいは数個程度のセンサで、広範囲になると結線量が膨大になるため導入にあたっては、何らかの工夫や検討が必要である。△2:センサ自体が安価ではあるが現状では計測器が比較的高く、計測範囲が狭い所では初期投資が割高となる可能性が高い。導入にあたっては計測の目的を再確認するとともに、計測範囲の拡大の有無など計測計画を考え、ポイントセンサの導入も含めた検討が必要である。

△3:点的な計測であり、不特定域で発生する崩壊に対して見逃す可能性があり、また適切な位置に設置されていない限り現象の判断が難しく、設置位置には十分な検討が必要である。

△4:リアルタイム性をどこまで求めるかによるが、1ラインの計測に解析時間を含めて5~10分程度必要である。ただし、斜面計測の分野ではあまり問題にならない程度であると考えている。

若干の違いはあるものの、他の原理でもほぼ同様である。これらはいくまでも現状のレベルであり、今後の技術開発による改善を期待するところである。

3. モニタリングと崩壊予測

光ファイバセンサの計測精度については、斜面計測において十分なものであることは前に述べたが、光ファイバセンサに期待されているのは、不特定域で発生する斜面崩壊の変状を的確に捉え、崩壊の検知さらには予知・予測ができることである。このため土砂崩壊による災害を防止するためには、「いつ」、「どこで」、「どの程度」の崩壊が発生するのかを、効率的に予測していくことが重要である。

3.1 「いつ」の予測

「いつ」は、土砂崩壊に限らず予測の世界では最も難しい課題であるが、これができれば「どこで、どの程度」も予測することができると考えられる。「いつ」については防災上の体制にあわせて、何日前、何時間前…といった時間が要求される。土砂崩壊についても同様であり、例えば、道路管理では、連続雨量による事前通行規制を実施しているが、当然のことながら変状のモニタリングにより崩壊が予測された場合には通行規制を実施することになる。通行規制を実施するためには体制の準備および道路交通状況の確認が必要であり、道路管理者が規制を実施する個所までの移動時間および規制の準備や安全確認等の作業時間を考慮すると、最低1~2時間くらい前には崩壊を予測できなければならない。これよりも崩壊の速度が速いのであれば、変位やひずみによる「いつ」の予測は不可能である。これまでに実際に表層崩壊を適切なセンサ配置で計測した事例はなく、およそ○時間後とは明確にできなかったが、筆者らが平成13年度から実施しているフィールド試験において、いくつかの小崩壊を捉えているので³⁾、まずはその事例を紹介したうえで、予測の可能性について述べる。

(1) MDM方式の事例

写真1に現地の全景を示す。対象斜面の概要は、幅100m×高さ50m程度で砂泥互層の流れ盤の斜面で勾配は約40度である。また、植生は笹竹が群生している。また、斜面には落石防護柵が設置されており、小規模な崩壊であれば、十分に防護できる状況にある。図2に光ファイバセンサの配置図を示す。現地の地形は、尾根と谷が連続しているこ



写真1 現地全景

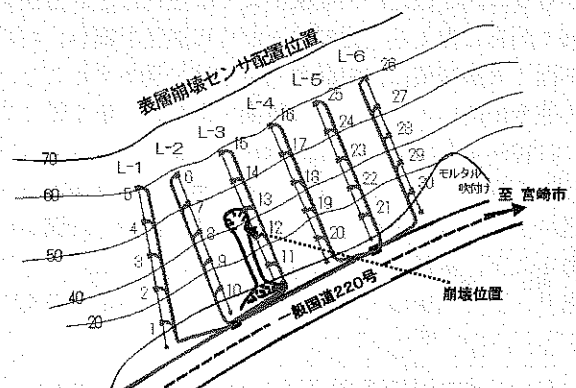


図2 光ファイバセンサの配置図

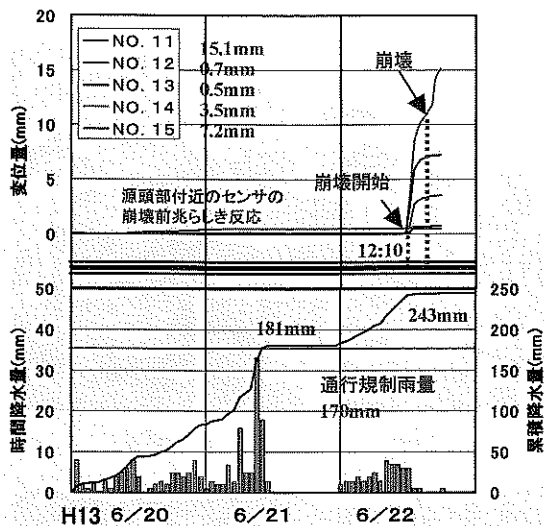


図3 計測結果

とから、センサの設置位置を谷に沿って6測線とし、1測線当たり10mピッチで5点設置し、計測は平成13年4月より開始した。崩壊は梅雨前線の影響で、平成13年6月22日に発生した。崩壊の規模は20m³程度で、3測線目の中央部側方で発生した。なお、現地は連続雨量170mmで事前通行規制を行っている区間である。図3に、崩壊箇所近傍の3測線目における計測結果および当時の降雨状況を示す。降雨は、6月20日の未明から降り始め、6月21日の昼過ぎには、連続雨量で170mmを超えたため事前通行規制を行ったが、数時間後に降雨がやんだため、解除を行った。しかしながら翌22日の未明から再び雨が降り出し、連続雨量が60mm程度であったが崩壊が発生している。顕著な変位現象が12:10頃から現れはじめ変形の状況からおよそ2時間後に崩壊があったものと推定される。

(2) FBG方式の事例

写真2に現地の全景を示す。対象斜面の概要は、幅50m×斜面高さ60m程度の斜面で、泥岩を主体としており、風化が著しい急崖部と一部抜け落ちが見られる崩壊地に分類できる。植生は生育の十分でない杉の植林で、大雪によって全体の1/3が倒れたり、折れたりしている。

図4に光ファイバセンサ配置図を示す。急崖部の変状(緑ライン)および崩壊地の変動量(赤ライン)を計測できるように光ファイバセンサを設置している。崩壊は平成14年8月に、図4中に示すように、急崖部の光ファイバセンサを設置している3~12m上方で発生し、光ファイバセンサを破壊または断線して流下し斜面内で停止した。

図5に変位状況を図6に降雨状況を示す。当時は台風の影響で8月21日の午前8時から、雨が降り始め、午後5時頃の時間降雨量が53.5mm(累積降雨量131mm)の時に崩壊が発生している。光ファイバセンサの計測状況は、センサ4において、15時過ぎからひずみが発生し、約1時間後にはひずみの変動が小康状態となっている。そして斜面上部からの崩壊により17時頃に光ファイバが断線したことを示している。

(3) B-OTDR方式の事例

写真3に現地の全景を示す。対象斜面の概要は、幅1000

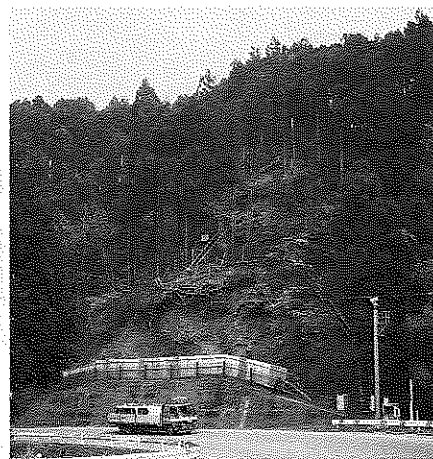


写真2 現地全景

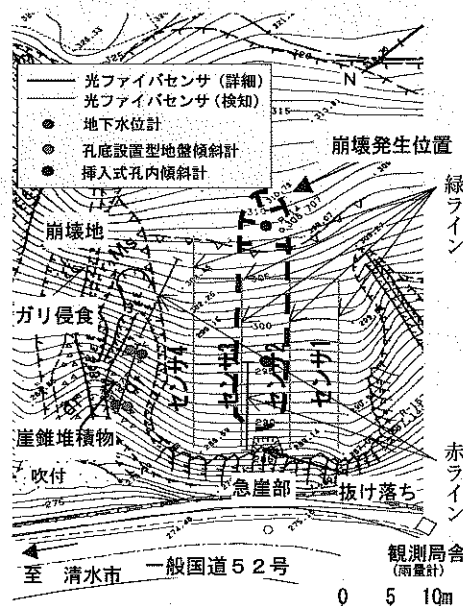


図4 光ファイバセンサ配置図

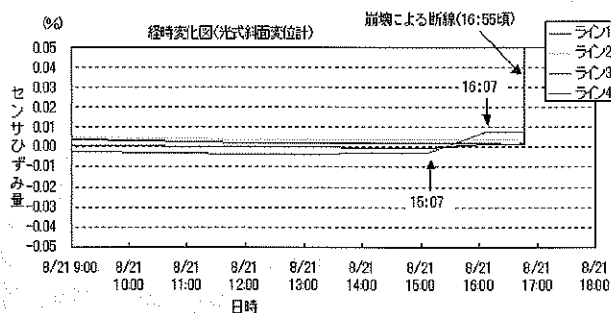


図5 変位状況

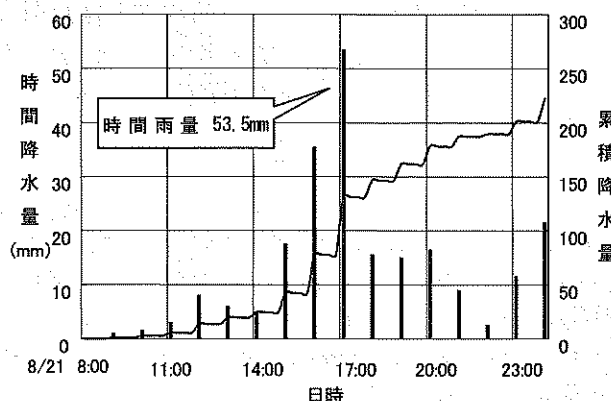


図6 降雨状況

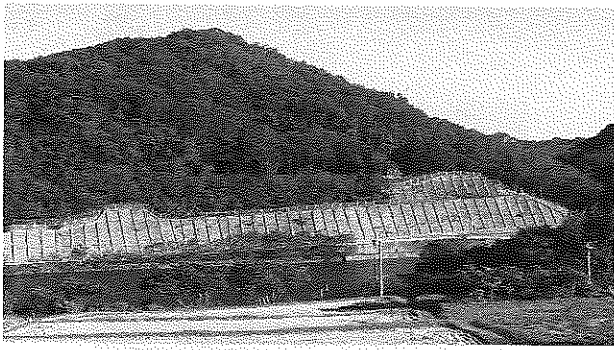


写真3 現地全景

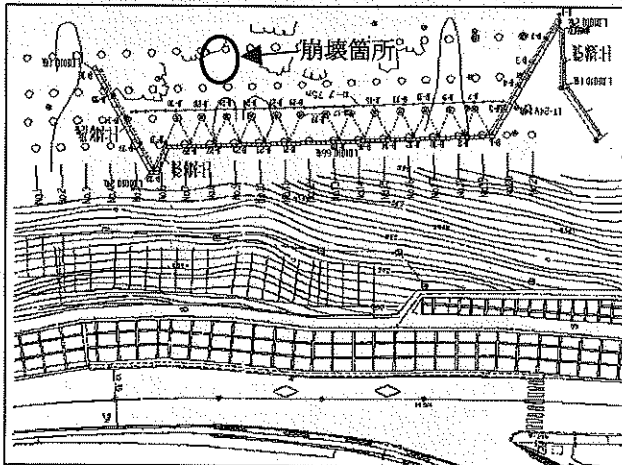


図7 光ファイバセンサの配置図

m×斜面高さ 300 m 程度の斜面で、緩い尾根と谷が連続している傾斜が 30 度程度の雑木林である。図7に光ファイバセンサの配置図を示す。斜面内部には小規模な滑落崖が点在していること、また樹木の根曲がりが見られ、植生に杉と檜の植生境があり、そこには過去の崩壊の崖錐が堆積しており、簡易貫入試験の結果を踏まえて、植生境に沿うような形で、道路延長方向約 100 m の区間に光ファイバセンサを W 字に設置している。崩壊は図7に示すように、センサ設置位置から上方約 20 m の付近で発生した。写真4に示すように本来は写真奥に向かって連続してセンサが設置してあったが、崩壊によってセンサが流されてなくなっている。計測は、平成 16 年 9 月末より開始したが、直後の 10 月 9 日に台風 22 号、10 月 20 日に台風 23 号と立て続けに大きな雨を受けた。写真5に計測画面の状況を示す。写真中の縦軸はひずみで、横軸は時間を示している。斜面は台風 22 号の影響で既にかかなり変形しており、台風 23 号の影響で累積ひずみが 0.1% を越えたところで破断した。台風 23 号による急激な変位はセンサ位置によって若干異なるが約 3~4 時間前から確認された。

3つの計測原理によるモニタリング事例を示したが、崩壊の規模、土質、植生等の条件により若干の変動はあるものの約 2 時間前には崩壊前兆が現れており、温度等による日常的な微小変形量からはずれようような急激な時間変位が 1 時間以上も継続し、降雨も続いているようであれば少なくとも約 1 時間後には土砂崩壊が起こる可能性があると予測することができる。

図3においては、約 1 日前から降雨に伴いセンサ No. 12



写真4 崩壊箇所のセンサの状況

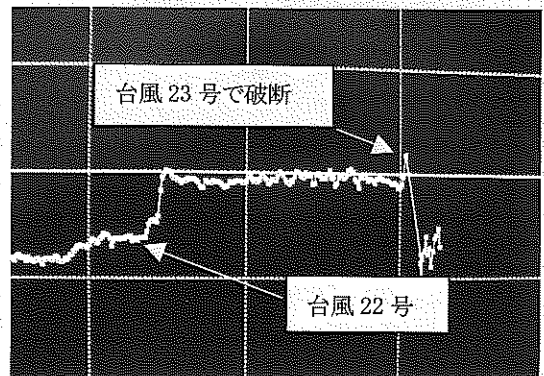


写真5 計測画面の状況

に微小な変位が発生しているが、この段階で崩壊を予測するには情報としては不十分である。

また、斜面崩壊をモニタリングする場合、崩壊予測のために管理者よりしきい値の設定が求められるが、地すべりのように源頭部を跨ぐようにセンサを設置できればしきい値を設定した管理もしやすいが、崩壊の源頭部が特定しにくい表層崩壊の場合には容易ではない。

計測事例で見られるように、表層崩壊しやすい斜面では、崩壊地点の上部や下部でも変位が発生しているのがわかる。このため、ピンポイントで源頭部に設置できない表層崩壊の場合には、当面はしきい値を設けず各センサの日常の計測データから日常変動範囲および時間当たりの変位の勾配を把握し、まずはそれをはずれるような変位が認められ、かつ降雨が続くようであれば崩壊の危険性があると判断するのが適当と考える。

3.2 「どこで」、「どの程度」の予測

以下に、3.1で述べた成果を踏まえて設置した事例を紹介しながら、「どこで」「どの程度」の予測について述べる。

現地は、MDMの事例と同じ場所である。光ファイバセンサは B-OTDR 方式で、図8に示すように W 字に設置し、計測区間を 39 区間設けて、向かって左側からナンバリングした。センサの設置位置は、現地は斜面下部に落石防護柵がありかつ吹付コンクリートにより保護されているため、下方での崩壊は小規模崩壊で回避可能であると判断されることから、センサ位置より上方に源頭部があるような中規模以上の崩壊を捕捉できるように考慮して設置してい

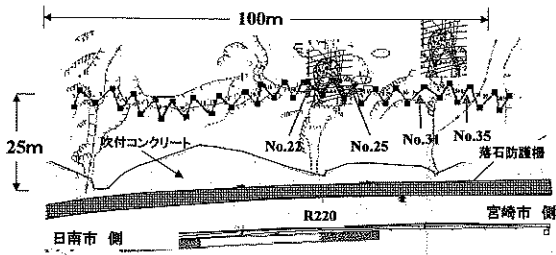


図8 光ファイバセンサの配置図および崩壊箇所

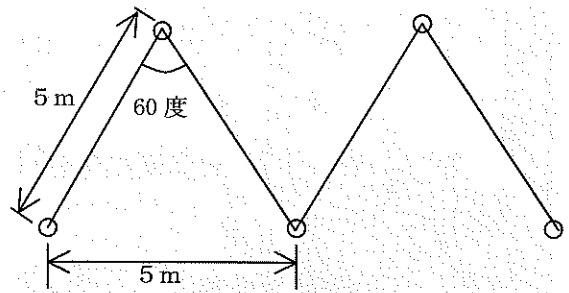


図9 センサの設置パターン

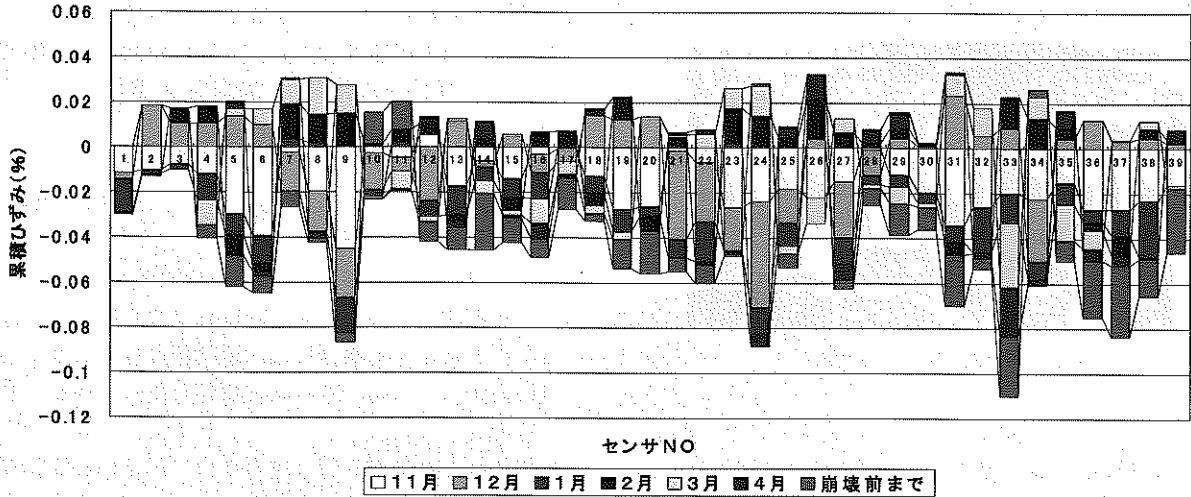


図10 累積ひずみの分布

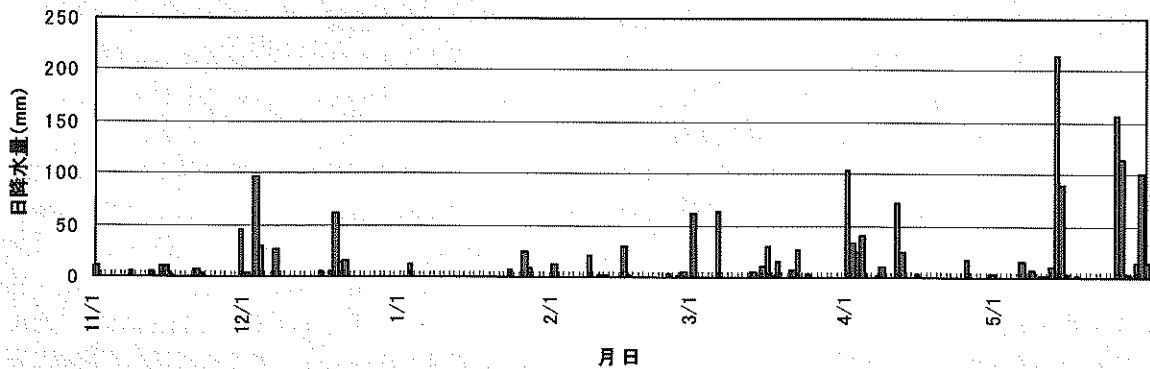


図11 現地の降水状況

る。また、図9に示すように、センサ長は5mで開口部は60度を基本とした。

崩壊は2カ所で発生しており、1カ所目はNo.22とNo.25の間で発生し、約25m³程度の小規模な表層崩壊である。このポイントでは前述の小崩壊が発生しており、遷移的に再度小規模の崩壊が発生することを予想していた箇所である。もう1カ所はセンサNo.31~35の上方で発生しており、崩壊規模は同様に約25m³程度であった。

図10に計測開始から崩壊直前までのひずみの累積状況を示す。マイナスは圧縮ひずみである。また、図11に現地の降水状況を示す。ひずみ分布を見ると、まず毎月の降雨の大小に関わらず、この斜面は全体的に変状しているのが確認できる。また、全体的に圧縮ひずみの累計が大きいため、センサ部上方からの崩壊の可能性が高いことが予想される。さらに、ひずみ分布には明確に凹凸が見られ、これは計測開始から約2カ月程度の累積でほぼ現状の傾向が表れている。この凹凸の分布では、① No.3-6、② No.

7-10、③ No.11-16、④ No.19-26、⑤ No.30-35、⑥ No.36-39と圧縮累積で凸なおよそ6つのブロックが抽出できる。そして想定される崩壊規模の最大値は、このブロックの持つ幅で推定することができる。さらに細かく見れば、各センサは頂点を共有するので上下端のどちらかを移動点として、移動ベクトルが算出できる（考え方は次節3.3の図12を参照）。ここで注目すべき点は、崩壊した2地点では圧縮方向のみではなく、引張方向のひずみも累積しており、上下の圧縮引張の累積により崩壊が発生していると考えられる。これを基にさらに分析をすると、この斜面では今後、No.7-10のポイントで崩壊が起こる可能性が高いと予測される。このように、センサを連続的に設置することで、地形とひずみ分布を基に「どこで」「どの程度」を予測することが可能であると考えられる。

3.3 日常管理と異常監視

対策工により崩壊を防止する場合、まずは現地調査によ

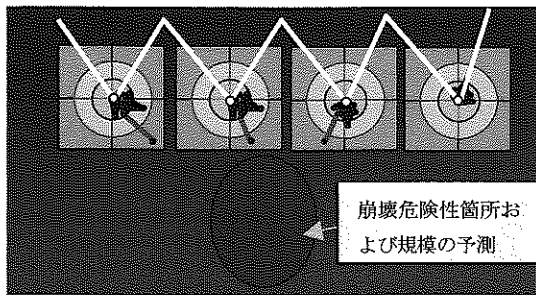


図12 日常管理における予測

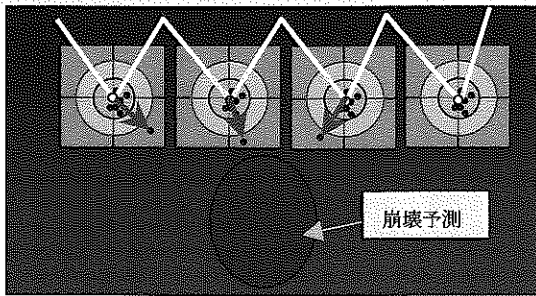


図13 異常監視における予測

り、崩壊しやすいと考えられる斜面を推定することになる。ただしこれは概略の最大値で、本当に崩壊する可能性のある箇所を効率的に対策しているとは限らない。一方で、崩壊しやすいような箇所で斜面モニタリングを実施し、「どこで」「どの程度」の崩壊が発生する方向に向かっていているのかあるいは安定しているかを予測することで、効率的に対策を行うことも考えられる。安定していれば当面は対策せず、モニタリングで日常点検を補完すればよい。崩壊規模が大きく、大規模災害につながると判断されるものであれば早急に対策工を検討する。小規模で例えば既設の防護柵で止まるような許容できると判断されるものや対策工を実施する際の準備期間については監視を続け、「いつ」の予測を行えばよい。どちらが経済的か効率的かはさまざまな要因が関わっているため筆者らがここで判断できるところではないが、上記の内容を踏まえて、モニタリングを活用した斜面の日常管理と異常監視での予測の考え方を再整理すると以下のとおりである。

(1) 日常管理（累積変状の崩壊危険位置の事前抽出）

移動点の仮想軌跡等の日常の変状履歴による危険域の予測を行う。例えば図12に示すような、2測線ごとの上方の変状による圧縮ひずみと下方の変状による引張ひずみからの移動点の座標表示により変状箇所を事前抽出する。

(2) 異常監視（崩壊の事前予測）

ひずみ速度（ベクトル）により管理基準値を設定した判定を行う。例えば図13に示すような、管理円（通常域、注意域、異常域など）を設定し、向きと大きさ（上記軌跡の1回ごとの移動ベクトルの終点）から、崩壊を予測する。

4. 運用上の課題

表層崩壊の予測において、光ファイバセンサが有効であることは、多くの研究成果からわかってきている。一方で、

光ファイバ等のセンサを用いた斜面崩壊の予測を、実際の斜面管理で運用する場合、その効率性を考慮すると解決すべき課題が多々残されている。

(1) 設置個所の選定

斜面崩壊をモニタリングするに当たり、一番問題となるのがこの斜面に設置するかである。線的・面的にセンサを設置する場合、どこまでの調査が必要かである。事例で示した斜面の規模であれば、前述したように連続的に設置すればおそらく厳密な調査は不要と考える。一方で、崩土を待受けられるポケットがないところでは、小さな崩壊でも土砂流出の可能性は高い。さらに斜面が高い場合には、さらに上方からの崩壊の可能性も考慮しなければならない。このため、表層崩壊の場合には「どこから」の「どの程度」の規模の崩壊を対象としてモニタリングするのかを考えて設置する必要があり、技術者にその判断が求められる。

(2) 運用・判断方法

斜面管理者は、どの状態であれば対策するのか、モニタリングを継続するのか判断しなければならない。また、モニタリングを継続する場合には、道路管理であれば事前通行規制の雨量のように、変状状況に応じた管理体制とリンクしたものとしなければならない。とくに、事前通行規制区間でモニタリングを行う場合には、雨量の判断指標がないため、変状の状況のみから何らかの判断をすることが必要となる。このため、適切な運用方法を構築する必要がある。

(3) コスト低減

さまざまなモニタリングシステムが開発されており、計測する対象に応じて、いろいろなシステムを選択できるようになっているが、モニタリングは対策と異なり崩壊というリスクが残存しており、将来対策を行う可能性も考慮して、できる限り低コストが望まれる。また、斜面崩壊モニタリングにおける計測対象は、変位、傾斜、温度、雨量、水位、土壌水分量、間隙水圧等、状況に応じて複数選択することになる。新たな計測対象を追加することで、別途システム構築が必要となるのであれば、不経済である。原理上難しいものもあるが、同一システムで管理できるような技術開発も望まれる。

参考文献

- 1) 「光ファイバセンサを活用した斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運用マニュアル（案）」、土木研究所共同研究報告書、第292号、2004.6.
- 2) 加藤俊二・三木博史・恒岡伸幸・田中 衛・小川鉄平：光ファイバセンサを活用した表層崩壊モニタリングシステムの構築に関する取り組み、豪雨時の斜面崩壊のメカニズムと予測に関する論文集、地盤工学会四国支部、2001.
- 3) 小川鉄平・恒岡伸幸・加藤俊二・田中 衛：光ファイバセンサによる表層崩壊検知結果及びその考察、第57回土木学会年次学術講演会・第III部門、2002.
- 4) 加藤俊二・恒岡伸幸・室山拓生：B-OTDRによる道路斜面崩壊危険箇所のスクリーニング技術の検討、第58回土木学会年次学術講演会・第III部門、2003.
- 5) 加藤俊二・小橋秀俊・古谷充史：光ファイバセンサによる斜面表層崩壊モニタリング技術に関する検討、第2回土砂災害に関するシンポジウム論文集、2004.8.

核磁気共鳴を用いた物理探査装置の開発

岩盤、コンクリートの水理学的パラメーターの原位置計測にむけて

なかしま よしと
中島 善人*
宇津 澤 慎**

1. はじめに

核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance ; NMR) とは、磁場中での原子核の磁気モーメントの Zeeman 準位間の共鳴遷移を、共鳴周波数の電磁波 (ラジオ波程度の周波数) を用いて計測する分光学である。本研究では、地下水で満たされた多孔質岩盤やコンクリート中の間隙水の水分子の ^1H 核 (プロトン) がターゲットである。多孔質岩盤やコンクリートの水理学的パラメーターである空隙率、空隙サイズ、透水係数は、岩盤付近の地下水流動環境の把握やトンネルの安全管理に必須のものであるが、サイスミックや電気探査など従来の物理探査手法¹⁾では必ずしも容易に計測できる量ではなかった。これに対してプロトン NMR は、水分子から直接シグナルを取得できるので、水の定量能力で群を抜いている。この長所をふまえて、NMR で岩盤

やコンクリート中の間隙水を定量計測することによって、空隙率などを計測しようという研究開発のトレンドがある。それが、NMR 物理探査である^{2),3)}。

NMR 表面スキャンのイメージを図 1 に示す。地下水で飽和した多孔質岩盤の表面を原位置でスキャンして、岩盤表面付近の水理学的パラメーターを非破壊で計測するという内容である。磁石とコイルの材質と形状を工夫することによって、我々は岩盤表面から 1.5 cm 内部の間隙水を計測できるプロトタイプを開発した⁴⁾⁻¹⁰⁾。現在、システムの組み上げは完了して屋外での試運転を開始したところである。また、並行して、水理学的パラメーターの計測精度をチェックする室内実験も実施中である。この小論では、室内実験の一例を紹介しながら、装置開発の現状とその地盤工学・土木工学への応用可能性について論じる。

2. 核磁気共鳴の原理

ここでは、核磁気共鳴による水の計測原理の概略のみを述べる (図 2)。詳細は、他の資料¹¹⁾を参照されたい。古典論的モデルによれば、 ^1H 原子核は、角運動量と磁気モーメントをもっているため、自転している小さな棒磁石とみなせる。NMR 表面スキャナーのセンサー部分の主要構成ハードウェアは、静磁場を作る永久磁石、核スピン励起用コイル (NMR シグナルの検出も兼ねている) の 2 つである。 ^1H を含む試料 (例えば水) を永久磁石がつくり出す静磁場中に置くと、ローレンツ力によるトルクを受けて歳差運動 (首振り運動) を始める。ちなみに、磁場を重力場に置き換えれば、静磁場中のこのプロトン棒磁石の歳差運動は、重力場中のコマの歳差運動と同じように記述される (自身のもつ角運動量と外場のトルクとの釣り合いで歳差運動が起こるという意味で)。歳差運動の周波数はラジオ波程度であるが、静磁場の磁束密度に比例し、共鳴周波数または Larmor 周波数とよばれている (我々の計測システムでは、3.5 MHz)。試料に隣接して置いたコイルから放射される Larmor 周波数のラジオ波によって、この棒磁石の歳差運動の回転位相や回転軸方向を思いどおりに操作できる。このように操られた (励起された) 歳差運動を、同じコイルを用いてファラデーの電磁誘導の法則に基づいて誘導起電



図 1 NMR 表面スキャナーによる岩盤検査の概念図。永久磁石を近づけて多孔質岩盤の間隙水の水分子中の水素原子核を歳差運動させ、その歳差運動をコイルで検出する。

* (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 物理探査研究グループ

** 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 巨瀬研究室 (株)エム・アール・テクノロジー

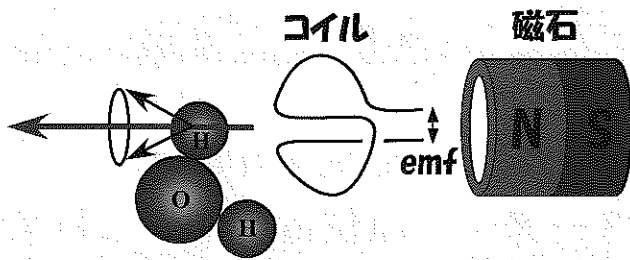


図2 図1の状況における、NMRシグナル発生原理。見やすくするため、あえてダブルD型コイルは1重巻きにして、磁石から離して描いてある。円筒形磁石から伸びる磁力線を軸にして、水分子中の水素原子核の磁気モーメントは、3.5 MHzの歳差運動を行う。この歳差運動は、試料に近接したコイルを貫く磁束を時間変化させ、ファラデーの誘導法則にしたがってコイル端子間に誘導起電力(emf)が生じる。これが、NMRシグナルである。

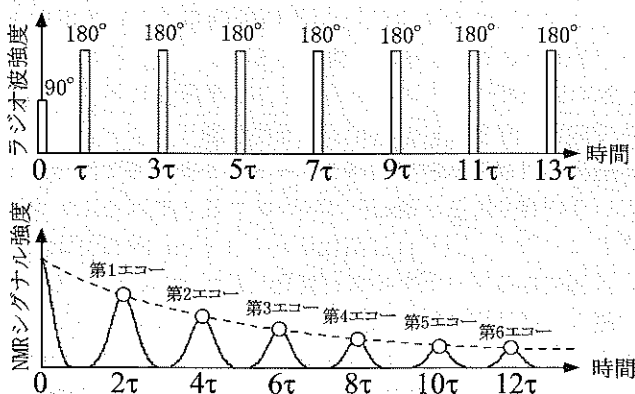


図3 CPMGデータの取得。上段は、スピンを励起(90°パルス)およびリフォーカス(180°パルス)させるためのパルス系列。下段は、位相検波の処理をしたあとのCPMGトレインデータ。 τ は90°と180°パルスの間隔。時定数 $T2^*$ で早く成長・減衰する $t=2\tau, 4\tau, 6\tau, 8\tau, \dots$ でのエコー波形自体は、あまり有益な情報を持っていない。しかし、エコーの頂点(○印)をつなぐ点線は、時定数 $T2$ でゆっくり減衰し、空隙率、空隙サイズなどの重要な水理学的情報を持っている。

力として検出するのがNMR分光法である。

NMR物理探査で用いられている、Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG)法とよばれる代表的なデータ取得方法をのべる(図3)。コイルからラジオ波パルスを一定間隔($t=0, \tau, 3\tau, 5\tau, 7\tau, \dots$)でうちこむと、エコーとよばれる一連のNMRシグナルが同じコイルで検出される(t は時間、 τ は90°と180°パルスの間隔)。 $t=2\tau, 4\tau, 6\tau, 8\tau, \dots$ におけるエコー強度をサンプリングすれば、プロトンの横緩和($T2$ 緩和)とよばれる指数関数的に減衰する時系列データを得ることができる。均一な試料でプロトンが置かれた環境が1種類ならば減衰成分も1種類であり、その時系列データを式(1)でフィッティングできる。

$$c_1 \exp\left(-\frac{t}{T2}\right) + c_2 \quad (1)$$

c_1 はプロトンの量に関する定数、 c_2 はノイズの直流成分、 $T2$ は横緩和時間である。

この横緩和現象は、ラジオ波パルスの照射によって励起されたスピンの系が熱平衡に回帰する過渡的な過程であり、そこから次のような重要な情報を取り出すことができる。

まず、振幅 c_1 は、試料中のプロトンの数に比例するので、例えば水で飽和した多孔質岩盤・コンクリートをスキャンすれば、空隙率を求めることができる。また、水で満たされた亀裂をスキャンした場合、 c_1 を亀裂幅に換算することができる⁷⁻¹⁰。さらに岩盤の化学組成が既知ならば、サンプリング間隔 2τ を十分小さくすれば、 $T2$ 値から空隙サイズを推定できる。この空隙サイズデータにカルマン・コゼニーモデルを導入すれば、多孔質岩盤・コンクリートの透水係数も推定可能である^{2,9}。

Larmor周波数は、磁束密度が固定されていれば、核種に固有な数値である。したがって、プロトンのLarmor周波数帯域にチューニングしたコイル系(LC共鳴回路)を作れば、含水した岩盤をまるごとCPMG計測したとしても、珪素や酸素など¹H以外の原子からのシグナルを遮断できる。この核種選択性は、NMR物理探査の長所である。また、鉱物中の結晶水など、固体につよく結合した¹Hは、横緩和時間が桁違いに短いので液体の水と明確に識別できる。したがって、結晶水と液体の水の両方を含んだ岩盤をまるごとCPMG計測したとしても、液体の水(地下水流の担い手である間隙水)と結晶水(担い手にはなり得ない)を区別できる。このように、NMR物理探査は地下水理学上・土木工学上重要な液体状態の水を選択的に計測できるという長所がある。

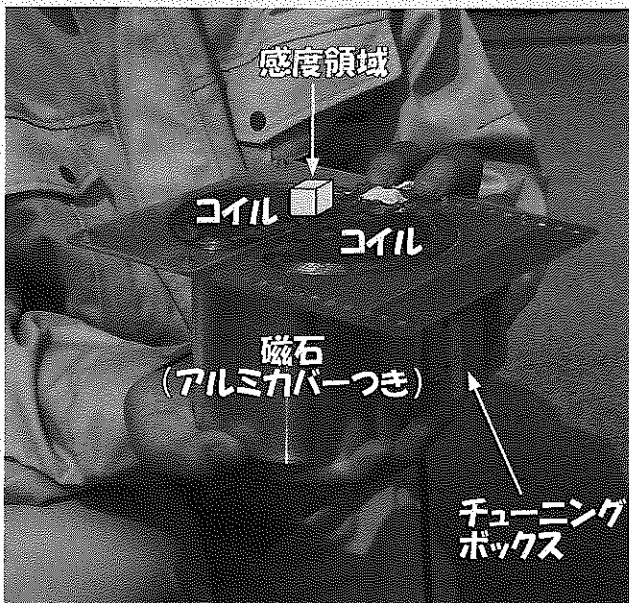
3. NMR表面スキャナーシステム

図4が、我々が開発したNMR表面スキャナーである。現在、基本的なシステム構築作業は完了し、屋外での試運転を開始したところである。図4(a)の分光器本体は、キャスター付きのラックにプリアンプ・4分の1波長回路・高周波電力増幅器・変調および検波ユニット・制御用パソコン等を搭載したものである。高周波電力増幅器の出力が500Wとやや大きいので、3相の200V交流電源を必要としている。エレクトロニクスの発達によって、このようなコンパクトな計測システムがリーズナブルな価格で製作可能になったこと¹²が、ポータブルNMR表面スキャナー実現の背景にある。

センサー部分は、ラジオ波コイルと永久磁石(ネオジウム磁石)からなる。希土類元素をもちいた最新の磁石技術は、強力な永久磁石の開発に成功しており、図4(b)の円筒形磁石は、長さ8.2cm、内径6.4cm、外径10.2cm、重量は3.0kgという小型軽量を達成している。Barrel(円筒)型と呼ばれるこの磁石から出る磁力線の放射パターンは非常に複雑であるが^{9,13}、かいつまんでいえば磁石端面から3cm離れた空間に磁束密度820ガウスの均一な磁場をつくりだす。この均一空間は、空間的な広がりとしては1.5cm程度であるが、センサーの感度領域となる。コイルは、この感度領域に分布しているプロトンをできるだけ効率よく励起・検出できるように形状を工夫し、「背中合わせ状態」のダブルD型^{4,9}と呼ばれるものにした。磁石端面の上に、コイル・磁石のカップリングを抑制するための厚さ1cmのスペーサーを置き、さらにその上に厚さ0.5cmのD型



(a)



(b)

図4 NMR 表面スキャナーの屋外での試運転風景。(a)センサー部分をコンクリートに押し当てて、表面から1.5cm奥にある水を計測中。右隣のラックは分光器本体。(b)(a)のセンサー部分(コイルとアルミカバーのついた磁石からなる)のズーム。感度領域の概形を立方体で表示した。センサー部分の総重量は、約4kgであり、一人の力で楽に持ち上げることができる。

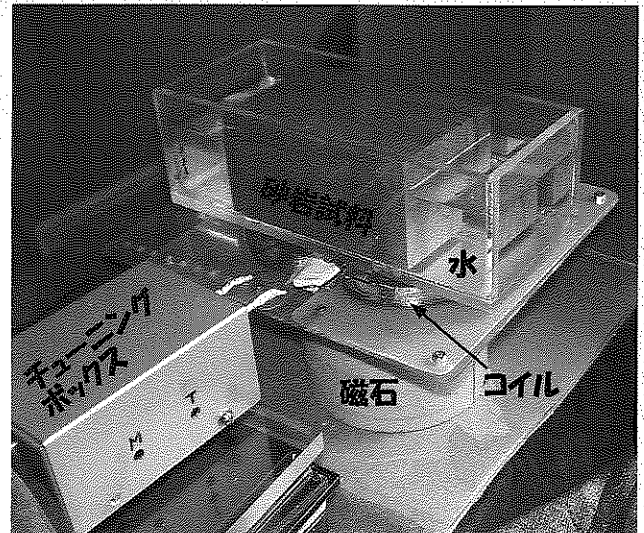
コイル板が載せてある(図4(b))。したがって、このD型コイル表面から $3-1-0.5=1.5$ cm離れた空間がセンサーの感度領域であり、探査深度は1.5cmということになる。

計測手順としては、まず、バルク水試料および現場の岩石試料に対して、共鳴周波数の探索とコイル感度の微調整をチューニングボックス(図4(b))を用いて行う。この前準備作業は、磁束密度とコイル系のキャパシタンスがそれぞれ磁石温度と試料の組成に多少ではあるが依存するために必要である。次に、センサーをコンクリートに押し当てて(図4(a))、コイルから ^1H 核の共鳴周波数に相当する3.5MHzのラジオ波パルス(図3)を照射する。パルスの

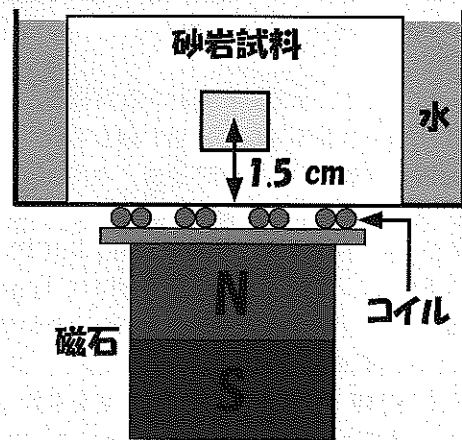
照射によって励起されたスピンの緩和過程を、同じコイルを用いてリアルタイム計測する。ちなみに、計測中はコイルに電流は流れるが機械的に動く部分はないので、騒音はほとんど発生しない。緩和過程のタイムスケールは、たかだか2~3秒であるが、CPMG時系列データのS/N比が低ければシグナルの積算を多数回行うので、場合によっては計測時間が数分から10数分になることがある。このCPMG時系列データを式(1)で解析して得た振幅 a_1 は、水の体積分率、すなわち水で飽和した多孔質媒体の空隙率に定量的に換算できる。

4. 空隙率の計測例

我々は、図4の装置をトンネルや坑道で作動させて、多孔質岩盤の空隙率・透水係数計測、あるいはコンクリート中の亀裂幅計測に応用したいと考えている。その準備として、屋外での試運転(図4)と併行して、亀裂幅 $^{\sim}10$ や空隙率の定量能力を確認するための室内実験も行っている。こ



(a)



(b)

図5 NMR 表面スキャナーをもちいた多胡砂岩試料の空隙率計測の室内実験(a)砂岩試料とNMRセンサー部分との位置関係の写真。コイルに発生したNMRシグナルは、チューニングボックスを経由して分光器本体に送り込まれる。(b)(a)の図解。砂岩試料の内部に感度領域(灰色の四角形)が設定されている。

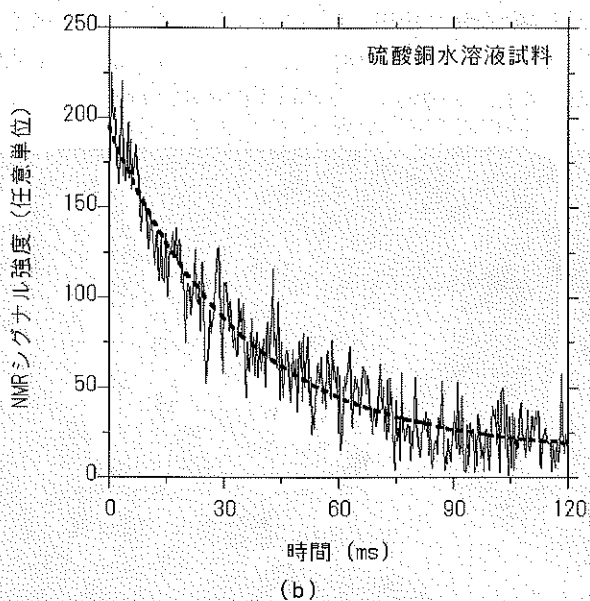
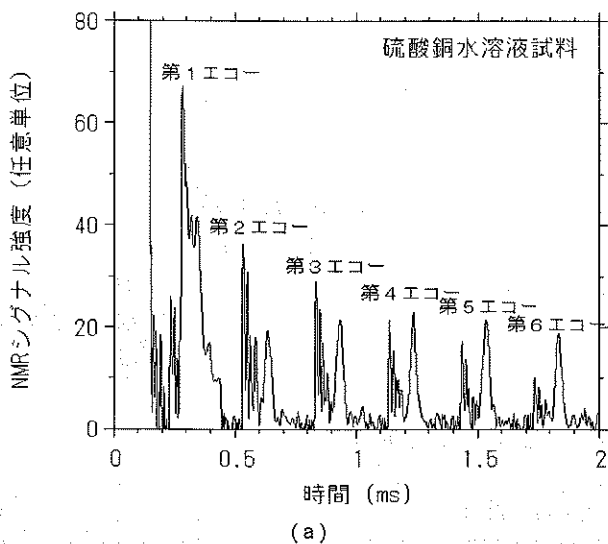


図6 硫酸銅水溶液のCPMG計測結果。エコー間隔 2τ は、0.3ms。
(a)コイルで検出した生データ。6個のエコーが識別できる。
(b)各エコーのピーク強度を拾って、全長400エコー=120msの時系列データにしたもの。ただし、単位を変えてあるので縦軸の値は(a)とは異なる。点線は、式(1)による指数関数フィッティング ($T_2=34$ ms, $c_1=180.6$)。

ここでは、一例として、水で飽和した多孔質岩石、コンクリートの空隙率の室内計測実験の結果を紹介する。

水道水に浸した群馬県多胡産の砂岩ブロック ($7 \times 5.5 \times 11$ cm³)を、透明プラスチック容器に入れてセンサー部分に載せた(図5)。水で飽和したこの多孔質砂岩のCPMG時系列データを取得し、式(1)で解析して空隙率(正確には、有効空隙率, effective porosity)を求めた。その値と、従来の方法による値(乾燥重量と湿潤重量の差から計算した)を比較して、NMRによる空隙率計測精度を考察した。

多胡砂岩の計測条件は、次のとおり。総エコー数300, エコー間隔 $2\tau=0.3$ ms, 90° および 180° パルス幅30 μ s, CPMGパルス系列の繰り返し間隔900ms, 積算回数1024回。したがって、計測所要時間は 900 ms \times $1024=15$ minである。 90° パルス幅も 180° パルス幅も30 μ sであるが、後者は強度を2倍にしてある(図3)。式(1)の c_1 を空隙率に換

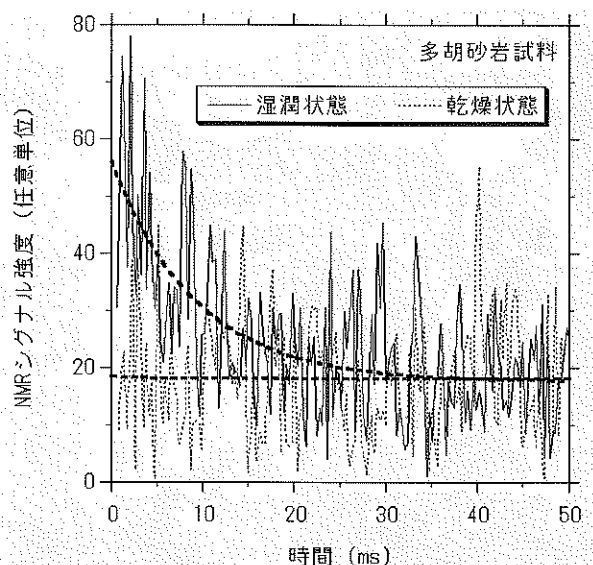


図7 多胡砂岩試料のCPMG計測結果。2本の太い点線は、式(1)によるフィッティング。乾燥状態では、NMRシグナルは見えない。いっぽう湿潤状態では、ノイズレベルは高いものの、明らかに間隙水由来のシグナルが取得できている($T_2=9$ ms, $c_1=38.5$)。

表1 異なる手法で求めた有効空隙率(vol%)の比較。良好な一致を確認できる。

試料	NMRで求めた有効空隙率	重量差で求めた有効空隙率
多胡砂岩	21.3	22.6
白浜砂岩	9.0	10.5
コンクリート	9.2	9.9

算するためには、キャリブレーション用として空隙率100vol%の標準試料が必要であるが、我々は0.21wt%硫酸銅水溶液をそれに用いた。硫酸銅を少量溶解させたのは、銅イオンの不対電子によって緩和を促進し、計測時間を短縮させるのが目的である。また、多胡砂岩以外の多孔質試料(白浜砂岩とコンクリート)の空隙率の計測も試みた。

硫酸銅水溶液標準試料のCPMGデータを図6に示す。図3のような理想的な波形ではないが、6個のエコートレインがはっきり見える(図6(a))。400個のエコートレインを式(1)で解析すると $c_1=180.6$ となり、この振幅値が空隙率100vol%に換算される(図6(b))。多胡砂岩試料の結果を図7に示す。乾燥状態ではシグナルは見えないが、湿潤させて空隙を水で満たすと $T_2=9$ ms, $c_1=38.5$ のシグナルが確認できた。したがって、図7はNMRシグナルが間隙水に由来していることの例証である。このことは、地下水位より上にある乾燥した岩盤の空隙率を計測する場合は、あらかじめ放水して空隙を水で充填しておく必要があることを意味している。多胡砂岩の空隙率は、図6の結果を援用すると、 $38.5/180.6=21.3$ vol%になった。ほかの多孔質試料の結果とともに、空隙率の比較を表1にまとめた。表1は良好な一致をみせており、したがってこの室内実験によってシステムが期待通りに動作していることを確認できた。

5. おわりに

表1の室内実験結果により、探査深度が1.5 cmしかないプロトタイプながらも、地下水で飽和した多孔質岩盤・コンクリートの空隙率を定量的にスキャンできそうであることがわかった。今後は、トンネル等での原位置試験を計画している。また、岩盤表面には現れない深部の含水空洞または含水亀裂の検出を可能とするよう、探査深度5 cm以上のNMR表面スキャナーも別途開発中である。

核磁気は常磁性でありしかも電子の磁気より桁違いに小さいので、一般にNMRシグナルはS/N比が低い(図7)。S/N比が低いと積算に時間がかかり、また空隙率の計測限界も悪くなる。我々は、NMR表面スキャナーをコンクリート中の含水亀裂の検出にも使う予定であるが^{7,10)}、その場合、開口幅が約300ミクロンの亀裂を検出する必要がある¹⁴⁾。開口幅300ミクロンは、空隙率に換算して2 vol%に相当し、現行システムの計測限界に近い値であり、短時間での計測は困難である。したがって、S/N比を静磁場の強度および均一度の向上などで改善することは、計測時間の短縮や空隙率の計測精度向上のために避けて通れない開発課題である。

本論文では、空隙率の計測、すなわち式(1)の c_i データの解析しか行なわなかった。一方、式(1)の T_2 も空隙サイズという重要な情報をもっている。この空隙サイズデータにカルマン・コゼニーモデルを導入すれば、多孔質岩盤・コンクリートの透水係数も推定可能である^{21,3)}。透水係数は、多孔質地盤の重要な水理学パラメーターであるが、透水係数を計測できる物理探査法は非常に限られている。NMR物理探査は、空隙率の計測だけでなく透水係数の計測もできる数少ない物理探査法のひとつであることをアピールしたい。NMR物理探査は、静止している間隙水の水分子の熱運動による自己拡散を横緩和現象として計測して岩石の空隙構造(空隙率や空隙サイズ)に関する情報を拾い、それをもとに透水係数を算出している。このように水を流す必要がないので、従来の原位置透水試験のような時間・費用がかかる注水・揚水作業や大がかりな装置(ポンプ等)は必要としない。NMR物理探査は、低コストで迅速に透水係数を原位置計測できる技術といえる。さらに、傾斜磁場コイルをNMR表面スキャナーシステムに追加搭載すれ

ば、水分子の拡散移動やダルシー流れを直接計測できる¹¹⁾。したがって、岩盤中の間隙水の自己拡散係数、空隙構造の屈曲度、地下水流れベクトルも非破壊スキャンできるであろう。我々は、これらの方面への研究展開も計画中であり、企業との共同研究を視野に入れながら、NMR物理探査技術の社会への提供を今後も進めていく予定である。

参考文献

- 1) 魚本健人(監修):コンクリート構造物の検査・診断, 理工図書, 2003.
- 2) K.-J. Dunn, D. J. Bergman, G. A. Latorraca: *Nuclear Magnetic Resonance Petrophysical and Logging Applications*, Pergamon, Amsterdam, 2002.
- 3) 中島善人: NMR物理探査の原理, 物理探査, 55, 105-126, 2002.
- 4) 宇津澤慎・中島善人・拝師智之: Unilateral (片側開放型) NMRの開発, 第9回NMRマイクロイメージング研究会講演要旨集, pp. 78-82, 2004.
- 5) 中島善人: 核磁気共鳴を用いた物理探査, 産総研 Today, 4, 15, 2004. http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol04_08/vol04_08_p15.pdf でフルテキストの無料ダウンロード可能.
- 6) 中島善人・宇津澤慎: 核磁気共鳴を用いた物理探査装置の開発: トンネル・ダムの表面亀裂検出にむけて, 検査技術, 10, 30-37, 2005.
- 7) 中島善人: NMR表面スキャナー: コンクリートの新しいメンテナンス技術の提案, 産総研 Today, 2005. (印刷中) http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/at_research_main.html でフルテキストの無料ダウンロード可能.
- 8) S. Utsuzawa, R. Kemmer, Y. Nakashima, K. Kose: Unilateral NMR apparatus using a novel barrel magnet, Abstract of the 46th ENC (Experimental Nuclear Magnetic Resonance Conference), Rhode Island, 2005.
- 9) S. Utsuzawa, R. Kemmer, Y. Nakashima: Unilateral NMR system by using a novel barrel shaped magnet, Abstract of the 8th ICMRM (International Conference on Magnetic Resonance Microscopy), Utsunomiya, 2005.
- 10) S. Utsuzawa, Y. Nakashima, R. Kemmer: Unilateral NMR device using a novel barrel shaped magnet, J. Magn. Reson. (投稿中).
- 11) D. M. Grant, R. K. Harris (編集): *Encyclopedia of Nuclear Magnetic Resonance*, John Wiley & Sons, 1996.
- 12) 巨瀬勝美(編著): コンパクトMRI, 共立出版, 2004.
- 13) E. Fukushima, J. A. Jackson: United States Patent, No. 6489872, 2002.
- 14) (社)日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2003-, (社)日本コンクリート工学協会, 2003.