

---

巻頭言	何故、現場計測を行うのか	(財)建設工学研究所理事長	櫻井春輔	1
小特集	最近の地盤計測・探査技術にみるコア技術の革新			
	地盤計測センサとしての光ファイバ技術の革新		藤川富夫 赤木知之	3
	地下化学情報と地下環境モニタリング手法の 現状と展望		馬原保典	9
	インターネット技術を活用したモニタリング システムの現状と展望		荘司泰敬	19
	地震動モニタリングネットワークの利活用の現状		藤縄幸雄	25
	人工衛星による地表面変動モニタリング技術の 現状		葛岡成樹 水野敏美	32

## 何故、現場計測を行うのか？

(財)建設工学研究所理事長 櫻井 春輔

地盤に関わる構造物の設計施工において最も重要であり、かつ困難な作業は地盤に関する種々の情報をいかにして事前に的確に把握するかである。断層・破碎帯を含む地質構造、そこに作用する初期地圧、地盤を構成する土質・岩質材料の力学的、物理的、ならびに化学的特性、地下水や地熱の分布、さらに最近は地盤環境に関する情報なども的確に把握しなければならない。また、最近では放射性廃棄物の地層処理などを視野に入れた地下深部の岩盤調査の重要性も増している。

このような地盤の情報を得るために各種の地盤調査ならびに計測が行われる。その調査計測の目的は多岐にわたる。すなわち、① 地盤構造物の設計に必要な地質構造を含む地盤のモデル化、ならびに力学定数等の決定、② 設計に用いた力学モデル、ならびに設計パラメータの妥当性の施工中における確認、③ 地盤の安定性、ならびに工事の安全性確認のための施工中のモニタリング、④ 研究開発のため、ならびに将来のデータベース作成のためのデータ収集などである。しかし、一般的にはこれらがそれぞれ独立ではなく重複する場合が多い。

精度の良い、かつ信頼性に優れた地盤調査の要求に応えるため、最先端科学技術に基づく各種の計測機器ならびに地盤調査技術の絶え間ない開発が進められており、すでに多くの成果が得られている。たとえば光ファイバーセンサー、各種の非接触型の計測機器ならびに計測技術、GPSを含みリモートセンシング、大深度における各種の孔内試験、弾性波および電気探査に伴うジオトモグラフィ、応力測定における磁歪法等々の調査計測技術は絶え間ない技術開発の賜物である。今後さらに計測機器ならびに調査計測技術は進歩発展することが期待される。

このような優れた計測機器ならびに調査技術によって、設計に必要な地盤に関する定量的な情報が得られると、FEM等の数値解析手法によって地盤構造物の合理的な設計は可能である。最近では、さらに高度な理論や複雑なアルゴリズムに基づく解析手法ならびにその計算機プログラムが開発され、すでにその多くは市販されている。しかし、数値解析において重要なことは、地盤の適正な力学モデル化と、そこに用いるインプットデータの定量的評価である。当然のことであるが、たとえ高度な数値解析手法が開発されても、地盤のモデル化、ならびに、そこに用いるインプ

トデータの信頼性が低ければ、結果もまた信頼性の低いものとなる。したがって、適正なモデル化を可能にし、信頼性の高いインプットデータを得るためには、信頼性の高い地盤の調査計測技術が要求される。

人工的に管理できる盛土等においては、地盤は比較的均質であるため、そのモデル化、ならびにそこに用いるインプットデータは室内および原位置試験等によって求めることは可能である。しかし、自然地盤の場合は、断層・破碎帯を含む不連続面の位置や規模、地下水の状況、大小の割れ目を有する岩盤のマスとしての力学的特性、不連続面に挟在する材料の有無、およびその力学的特性など、非常に多くの情報を求めなければならない。また、自然地盤は本質的に不均質であるため、たとえ高度な地盤調査技術を用いても、すべてを精度良く求めることは技術的および経済的な面から自ずと限界がある。

この困難を克服するために、設計時に用いた地盤の力学モデル、ならびにその力学定数などの設計パラメータを、施工時の現場計測によって見直しを行う方法が用いられるようになってきた。この方法は、基本的には1940年代後半にテルツァギーとベックによって提案され、観測化施工(情報化施工と呼ぶ場合もある)と名づけられた方法である。この方法は、我が国においてもトンネルにおけるNATMの普及とともにトンネル現場ではもちろん、明かり工事における土留めや斜面などにおいても広く用いられ、地盤に係わる複雑な建設工事が合理的かつ安全に行われるようになった。もちろん、この観測化施工は、ベック(2000)も述べているように、従来の設計施工法に取って代わる特別な設計施工法ではなく、むしろ、地盤に係わる構造物を合理的かつ安全に建設するために、従来の設計施工法を的確に実施するための必要不可欠な手法である。

観測化施工において最も重要な要素技術の一つは計測である。したがって、観測化施工が普及するにつれて、地盤の計測技術もますます進歩することは言うまでもない。特に、最近では計測は自動計測が普通であり、膨大な量のデータを自動的に瞬時に記録することが可能になった。しかし、その一方で、膨大なデータから必要な情報を取り出すことは、その量が多いだけに大変な作業になる。もちろん、そのデータをグラフ化することはコンピュータによって自動的に行える。しかし、そのグラフや表からどのような情

報を取り出すかが問題である。

計測結果から必要な情報を取り出すためには、まず、そのデータを理論的に解釈しなければならない。その場合も設計におけると同様、数値解析が強力な道具となる。なお、計測結果の解釈のための数値解析においては、入力の変位、ひずみ、応力などであり、出力は力学定数や外力など通常の解析では入力となるものである。すなわち、この解析は通常の解析とは逆であることから一般的に逆解析と呼ばれる。すなわち、計測結果の解釈ならびに評価には逆解析が欠かせない道具である。さらに、逆解析によって設計パラメータはもちろん、設計に用いた地盤の力学モデル、ならびに構成式の妥当性をも検証することが可能となる。

各種の地盤調査ならびに観測化施工において、計測には多くの労力と経費が使われる。計測が十分にその威力を発揮するためには、それによって何を明らかにしようとするのか、まず、計測の目的を明確にし、さらに、計測結果をどのように解釈し利用するかについての具体的な方法を、計測に先だって明確にしておくことが重要である。たとえば、斜面の観測化施工においては、一般に伸縮計や傾斜計等による変位計測が主である。一方、斜面の安定性は一般にすべり面の粘着力や内部摩擦角等の強度定数に基づく安全率によって評価する。したがって、観測化施工において当初設計の妥当性を見直すのであれば、計測変位から安全率を求めなければならない。すなわち、計測によって強度定数を求めることが必要となる。しかし、計測変位から強度定数を求めることは容易でない。なぜなら、変位は弾性係数と直接的に関係しているが、強度定数との関連は薄い。ましてや、計測変位がすべて弾性変位の場合は、理論的に強度定数を求めることはできない。

しかし、このような状況にもかかわらず、斜面において現場計測（変位計測）はよく実施される。もちろん、過去の経験によって計測変位から斜面の安定性を評価することも可能である。しかし、多くの場合、加速クリープが発生して初めてその安定性の評価が可能になる。ペック(2003)も述べているように、計測はできるだけ早期から実施し、変位がまだ小さい時点で対処することが重要である。これを実行するためには、計測結果に対する理論的解釈が重要であることは言うまでもない。特に、斜面の観測化施工をより合理的なものとして活用するためには、計測変位から

安全率を評価する方法論をあらかじめ検討しておくことが重要である。

最先端科学技術を用いた計測機器の開発に比べて、計測結果の解釈のための解析技術の開発は遅れているように思われる。現場計測関係のシンポジウム等においても、計測機器の開発、ならびにそれを用いた事例に関する発表は活発であるが、その計測結果をどのようにプロジェクトに役立たせたかについては、あまり議論がない。計測の目的が構造物を安全かつ合理的に、さらに経済的に建設することにあるなら、計測結果がどのように利用されたかは重要であり、大いに議論するべきである。そこでは、計測機器の分解能や精度なども重要であるが、計測によってプロジェクトにおけるトータルな費用がどれほど削減でき、安全性がどれほど担保されたかについて議論されるべきであろう。

地盤調査および観測化施工において、計測技術者は計測結果のデータを提供するだけでなく、その計測結果の解釈、評価、さらには計測結果に基づくプロジェクト全体の評価にまで立ち入ることが期待される。さもなければ、計測の費用対効果によって、いずれ計測は魅力のないものになり、廃れることはあっても発展することはないように思う。地盤調査および観測化施工がますます有効に機能するためには、計測機器の開発ならびに現場計測に従事する技術者と、計測結果の評価のための解析技術の開発ならびに解析を実施する技術者が互いに情報交換を行うことはもちろん、発注者および設計・施工会社の技術者をも含め、互いに協力することが重要である。

最後に重ねて強調しておきたい。地盤に関わるプロジェクトにおいては種々の目的をもって調査計測が行われる。調査計測に従事する現場技術者はその目的を十分に理解し、得られた調査計測結果をどのように定量的に解釈し、評価し、さらに利用するかについて、その方法論をあらかじめ具体的に検討しておくことが必要である。これは、観測化施工において特に重要である。そして、さらに重要なことは、プロジェクト全体における調査計測の占める位置づけを明確に理解し、調査計測がプロジェクト全体の合理性、安全性ならびに経済性の向上に繋がるシナリオを常に準備しておくことである。

# 地盤計測センサとしての光ファイバ技術の革新

ふじかわ とみ お  
藤川 富夫\*  
あかぎ とも ゆき\*\*  
赤木 知之\*\*

## 1. はじめに

高速大容量の情報通信システムの確立に必要な不可欠な光ファイバに関する研究の過程で、ファイバ通信網の保守・監視手段として損傷破断箇所を検出するために光ファイバをセンサとして利用する技術の開発が進められてきた。その技術の特徴が広く認知されるにしたがい、地盤・岩盤の計測モニタリングへの適用が注目を浴びている。

光ファイバの一端に入射されたレーザーパルスは、光路のガラス分子に作用して散乱光を生じる。散乱光には、レイリー散乱光、ラマン散乱光およびブリルアン散乱光等がある。光ファイバのある部分が損傷、ひずみ等の負荷を受けるとこれらの散乱光の特性が変化する。それをとらえることにより光ファイバをセンサとして利用することができる。パルスレーザーの入射から散乱光が観測されるまでの時間から、その位置が特定される。

散乱光のどのような特性変化を捕らえるかによって種々の計測システムが提案されている。本稿ではそれらを簡単に解説し、各種の適用事例について述べる。

## 2. 光ファイバを用いた各種計測システム

光ファイバを利用した計測手法としては、後方散乱光を利用するものと反射光を利用するものとに大別される。光ファイバは、光を伝送するための伝送路であり、中心部(コア)の屈折率が周縁部(クラッド)より大きいので、コアに入射した光は屈折率の違いでコア/クラッド境界面で全反射を繰り返し、光ファイバ内に閉じ込められて前方へ進む。

光計測で用いるファイバには、コアの直径が約10 $\mu\text{m}$ の単一モード光ファイバと、数10 $\mu\text{m}$ のマルチモード光ファイバがあり、材質は石英ガラスを主成分とするものが多い。光ファイバを利用した計測の手法として、現在実用化になっているものには、光ファイバ線自体をセンサとするものとしてBOTDR方式とROTDR方式、ファイバを加工し

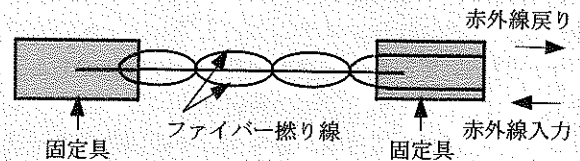


図1 OSMOSの概要図

た部分をセンサとして用いるものとしてFBG方式、SOFO方式やファブリ・ペロー方式がある。

また原理から分類すると、ファイバ内の散乱光を利用するBOTDR方式とROTDR方式、ファイバ内の光損失を利用するOSMOS方式、センサ部からの反射光を利用するFBG方式、センサ部における光干渉を利用するSOFO方式とファブリ・ペロー方式に分けられる。

### (1) OSMOS (Optical Strand Monitoring System)

OSMOSは、複数の光ファイバケーブルの撚り線で構成される光ファイバセンサ(光学ストランド)を用いて2点間の相対変位を計測するシステムである。このシステムは図1に示すように、光ファイバ内に赤外線を通し、2つの固定具間の光学ストランドが伸縮すると撚り線となっている光ファイバの曲率が変化することでストランド部のファイバから赤外線が漏洩するマイクロベンディング現象を利用している。光の漏洩量とストランドの伸縮量が比例することが原理となっている。本手法はエッフェル塔の計測など欧州で多く利用されており、我が国には1998年頃に導入されている。計測範囲は計測センサ長の05%で、精度は $\pm 20\mu\text{m}$ (スモールレンジ)、サンプリングタイムが0.05秒である。また、温度の影響はほとんど受けない。

### (2) SOFO (Surveillance d' Ouvrages par Fibres Optiques)

SOFOは光ファイバによる構造物モニタリングのフランス語の略称で、スイスのSMARTEC社(ローザンヌ工科大学の土木工学科が母体)が開発したもので我が国には1999年頃に技術導入された。センサは2本の光ファイバで構成されていて、1本は構造物の変位に追随し、他の1本は長さを変化しない構造になっている。この2本の光ファイバの長さの差をマイケルソン干渉計と呼ばれる方法で計測

\* NTTインフラネット(株) 新技術担当部長 工博

\*\* 琉球大学工学部 教授(元豊田高専教授) 工博

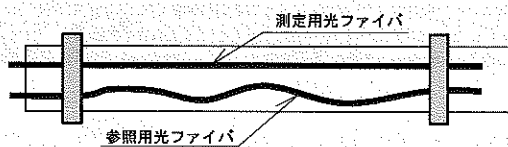


図2 SOFOの概要図

する。計測原理がシンプルで高精度（分解能は $2\mu\text{m}$ ）であり、測定時間は（7秒/1センサ）程度である。また、長期安定性に優れているのが特徴で、センサ長さは $0.2\text{m}\sim 10\text{m}$ まで必要に応じた長さを選定できるようになっている。

### (3) FBG (Fiber Bragg Grating)

FBGは、光ファイバ本体を計測センサとして利用する方法で、計測センサと信号伝送ケーブルをそれぞれ接続する従来の電気方式の計測システム方法と違い、1本の光ファイバで計測センサと信号伝送を同時に行う方式である。この方式では、光ファイバ途中の特定部分のコア部にグレーティングと呼ばれる屈折率が違う部分を間隔 $\Lambda$ で格子状に並べ、この部分をセンサ（FBGセンサ）として利用するものである。格子は $10\text{mm}$ 長に対し20000枚という高密度で作成されている。

一端から入射された光は、光ファイバを通り、FBGセンサ部に到達すると特定の波長（Bragg波長）のみが反射されて戻って来る。FBGセンサ格子間隔が変化するとBragg波長も変化する性質を持っており、格子部に $1\mu\text{strain}$ のひずみ変化が生じるとBragg波長は $1.2\text{pm}$ 変化する<sup>9)</sup>。この原理を用いてひずみ計測を行うものがFBG方式である。

ファイバ自体は、 $30\text{km}$ 程度の長距離まで対応可能である。またこの方式の特長として、引張りひずみと圧縮ひずみの両方が把握できることがある。

FBG方式の特徴のひとつはサンプリングタイムが短いことである。我が国では2000年頃から落石検知に適用され始め、その後さまざまな計測センサの開発が進められている。最近では $250\text{Hz}$ のアナライザも用いられるようになっているが、近い将来 $1\text{kHz}$ の機種が供給される可能性があり、振動センサへの活用も期待されている。

### (4) OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)方式

光ファイバに入射した光パルスの波長と同じ波長の光が入射端側で後方散乱光として観測される現象をレイリー散乱と呼び、種々ある散乱光の中で最も強い。しかし、その強度はファイバに損傷があると光損失が発生して変化する。その特性を利用するものである。この方式は光ファイバの敷設工事において、接続箇所における伝送損失の発生や光ファイバの長さを測定するのに開発されたものである。入射光パルスから後方散乱光の受光までの時間は光ファイバ内部を伝播する速度と距離で決まるため、入射光パルスから受光波までの時間差より光ファイバの長さが求まる。したがって、光ファイバに破断や局部曲げなどによる伝送損失が発生すればその位置と曲げ状態が求められる。

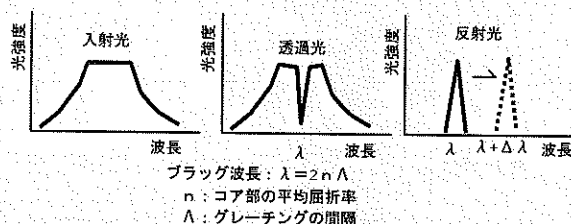
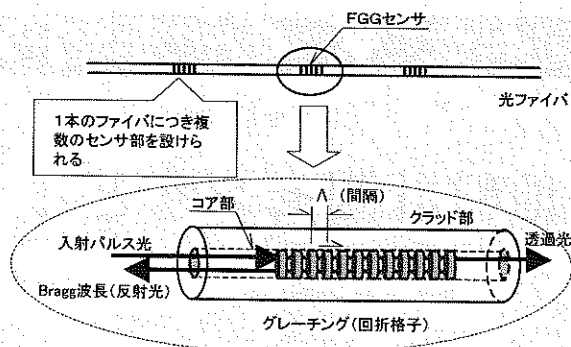


図3 FBGの概要図

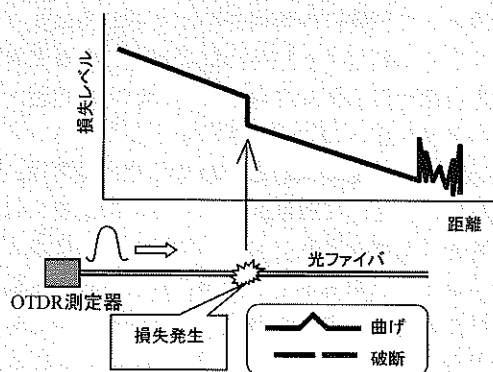


図4 OTDRの概要図

### (5) B-OTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)

光ファイバ連続歪み計測技術（B-OTDR）は、光ファイバ中に光パルスを入射し、光ファイバ中で入射端側に帰ってくる後方散乱光のうちブリルアン散乱光が光ファイバ中に発生した歪みにより周波数が変化することを応用した計測方法である。ブリルアン後方散乱光は後方散乱が発生している場所のひずみに比例して周波数がずれる性質が分っており、1%のひずみ量に対して500MHzの周波数シフトが発生する。歪みと周波数シフトは直線的に比例するので、後方散乱光が戻って来る時間とその時のブリルアン後方散乱光の周波数シフト量を求めることで光ファイバが受けるのひずみ量が線的に求められる。

ひずみセンサに使用される光ファイバは、通常の通信に使用されるシングルモード（SM）ファイバである。また、計測可能なひずみは $\pm 2\%$ 程度である<sup>9)</sup>。BOTDRの技術は、NTTによって国産技術とし1997年に開発され、アナライザも国産機である。

B-OTDR方式の大きな特長は、光ファイバに特殊な加工をすることなくファイバ全長に亘って任意の位置のファイバ線の軸方向ひずみ量が求められることにある。したがって、光ファイバをセンサとして適切に配線することによ

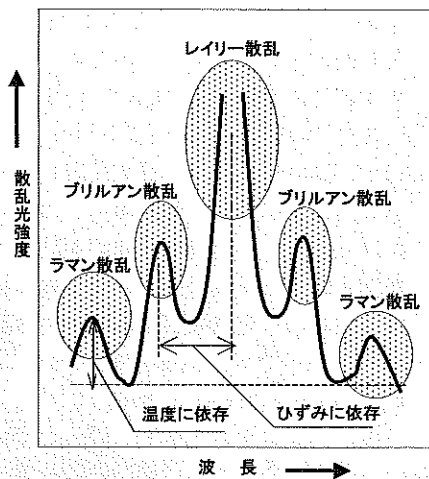


図5 光ファイバ後方散乱光の波長分布

り、被対象物の線的小および面的なひずみ分布が得られることにある。

B-OTDR による計測の利点を以下にまとめる。

- ・光ファイバ長手方向に発生した歪みを連続的(歪み分布)に計測可能である。
- ・光ファイバ自体が伝送路とセンサ(歪み検知部)を兼ねるため配線も省スペースで済み、多数、長区間の観測が可能である。
- ・光信号を用いるため、雷や誘導雷等の影響を受けず、電気的な絶縁対策の必要がない。
- ・配線をループ状にすることにより、万一の断線時の復旧が簡便に可能である。

### (6) R-OTDR (Raman Optical Time Domain Reflection)

光ファイバの一端からレーザー光のパルスを入射すると、

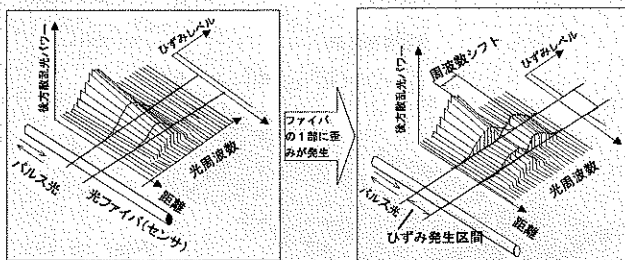


図6 BOTDR の原理

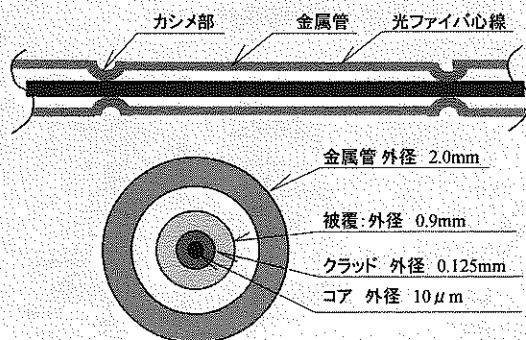


図7 BOTDR 用光ファイバセンサ (1心金属管型)

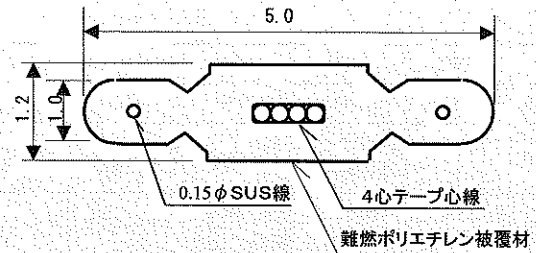


図8 BOTDR 用光ファイバセンサ (4心テープ型)

レーザー光はファイバの中を通過する間に各場所で後方散乱光を発生させる。この後方散乱光には温度に依存するラマン散乱光である反ストークス光とストークス光の2成分が含まれている。反ストークス光とストークス光の強度比を測定すると、光ファイバセンサに沿って温度分布を線的に捉えることができる。この原理を利用し、ファイバ線の任意位置の温度を測定する方法が ROTDR である。

### (7) ヘテロ・コア方式

ヘテロ・コア光ファイバセンサは、光ファイバ線の任意の位置に母線と異なるコア径の部分であるヘテロコア部を挿入したものである。ヘテロコア部の長さは数mmから数cmであり、その構造により、9-5-9型曲げ損失検出モードと50-3-50型環境検出モードの2つのタイプがある。9-5-9型はコア径9μmのSMファイバにコア径5μmのヘテロコア部を融着挿入したものである。ファイバ内を通過する光はコア径が小さくなるのでその一部がクラッド部へ漏洩する。この漏洩量はヘテロコア部の変形に大きく依存するのでOTDRアナライザで損失変化を測ることで曲げ変形の度合いを知ることが可能となる。この特性を利用し、ヘテロコア部を中心に長さ20mm程度の領域を円弧とすれば弦の変位を曲率の変化に変換する機構が可能となり、数100μmから数mmに対応できる伸縮センサを作ることができる。

### (8) ファブリ・ペロー (Fabry-Perot) 方式

レーザー光を入射し、半ミラーとミラー部でそれぞれ反射した光を干渉させる方式で、半ミラーとミラーの間がゲージ部となる。単純な干渉では、出力は光の縞模様であり、縞数を数えることでひずみを計測することができる。さらに複雑な装置(ヘテロダイン法など)を用いることにより、ひずみを連続的に測定することが可能となる。ただし、1本

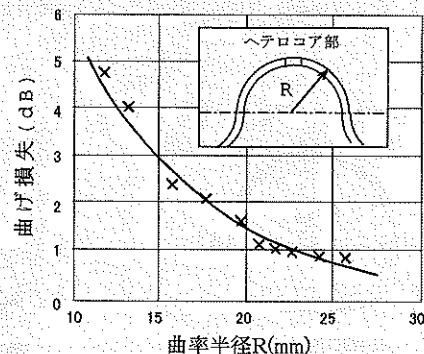


図9 9-5-9型曲げ損失検出ヘテロコアセンサの曲げ特性

表1 各方式の比較

	OSMOS	SOFO	FBG	フアブリ・ペロー	OTDR	BOTDR	ROTDR
測定現象	変位	変位	歪み	歪み	光損失	歪み分布	温度分布
原理	マイクロベンディング	光干渉(マイケルソン干渉計)	ブラッグ格子	光干渉(フアブリ・ペロー間隙)	光曲げ損失	後方散乱光(ブリルアン光)	後方散乱光(ラム光)
センサ	光ファイバ(2.5, 10m)	光学ゲージ(25cm~10m)	光ファイバ新心線(長さ1cm)	φ12.7×7mm	光ファイバ線	光ファイバ線	光ファイバ線
測定範囲	センサ長の0.5%	センサ長に対して最大50mm	5000 μ・ε	5000 μ・ε	6デシベル	±6%・ε	-50~150°C
精度	±0.02mm	測定値の0.2%	±4 μ・ε	±5 μ・ε	機種による	±100 μ・ε	±1°C
測定時間	20 Hz	7sec	250 Hz	500 Hz	10sec	約10分	約1分

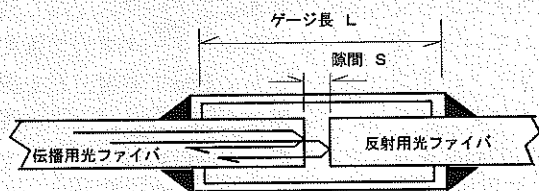


図10 ファブリ・ペロー方式の概要図

のファイバに1個のセンサしか作れないので、多数点の測定は容易にはできない。センサ内部はレーザ光線伝播用と反射用の光ファイバが隙間Sで作製されており、隙間Sとゲージ長Lはセンサ固有の値として事前に測定されている<sup>7)</sup>。

表1に各方式の簡単な比較を示す。

### 3. 適用事例

光ファイバを各種の計測や観測に利用する試みとして、比較的早い時期に行われたのは、ファイバ内を通過する光の漏洩を後方散乱光から検知し、ファイバ線に局部的曲げが発生しているかどうかを知るマイクロベンディングの方法である。OTDR測定器でファイバの曲げ半径と伝送損失を測定すると曲率半径が小さいほど伝送損失が大きくなり、5mm以下の曲率半径で損失が最大に近くなることが確認されている<sup>4)</sup>。このことを利用して斜面の崩壊や落石の検知あるいは漏水の検知などの各手法が実験、または施工されている。

BOTDRによる計測の事例としては、コンクリート単純梁の変形を測定したものが1997年に発表されている<sup>5)</sup>。モデル実験は、コンクリート単純梁(横0.4m×高さ0.5m長さ10m)の表面の長さ方向に光ファイバを貼付し、単純

梁の中央に重さ5tfの荷重を加えることにより曲げを発生させ、そのときに単純梁に発生する歪みを単純梁に貼付した光ファイバで歪みをBOTDRを用いて測定するというもので、同時に歪みゲージも設置し、光ファイバを用いて測定した歪みの値との比較を行った。光ファイバの長さ方向の連続的な歪み分布測定結果と歪みゲージによる各ポイントごとの歪みの測定結果が、BOTDRの測定精度 $\pm 30 \times 10^{-6}$ でほぼ同様な値を示すことが確認された。NTTは通信用トンネルの

BOTDRモニタリングシステムを開発し導入している<sup>11)</sup>。また河川情報センタが中心となって堤防監視システムの実証実験が行われている<sup>14)</sup>。

トンネル建設工事における光ファイバセンシングの事例として、AGF鋼管、鋼製支保工、吹付けコンクリートの応力や変形を計測したものが報告されている。この事例においては従来型センサも併設して計測結果の比較がなされ、比較的良い対応が示されており光ファイバセンシングの有効性、特に従来、離散的しか得られなかった情報が線的連続情報として得られるBOTDR方式の特長が活かされている<sup>10)</sup>。

国土交通省中部地方整備局では平成10年から12年度にかけて、「光ファイバを用いた計測システム検討委員会(委員長:赤木知之)」の助言を得てBOTDR方式を用いて斜面の浮石や転石および岩盤の挙動監視の実証実験を行った<sup>15)</sup>。ここでは2カ所の実証フィールドにおいて、落石および岩盤崩落の防災監視手法の可能性を確認することが目的

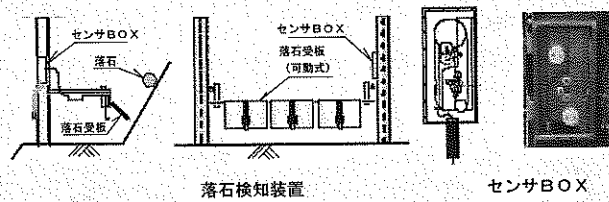


図11 OTDR落石検知システム<sup>13)</sup>

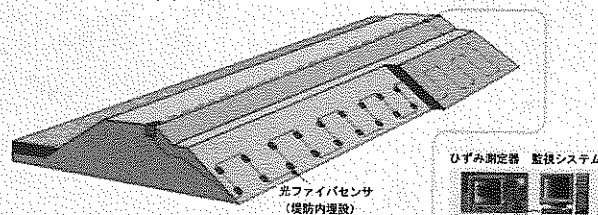


図12 河川堤防監視システム

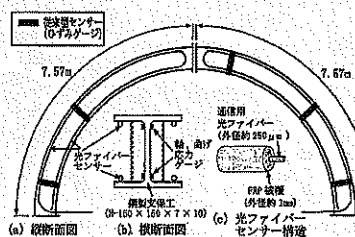
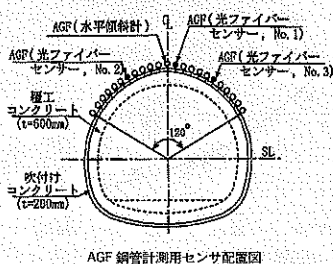
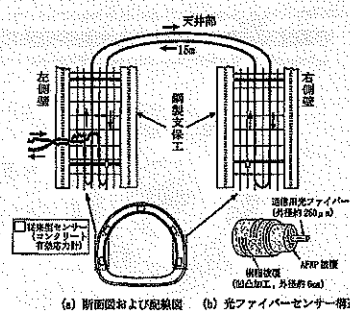


図13 BOTDRによるトンネル計測事例<sup>10)</sup>



とされた。写真1は落石センサ取付け状況で、図14はそのデータである。

その結果、従来の電気式センサと比べるとポイントでの計測精度は劣るが転石や岩盤などのマクロな挙動を連続無人監視する手法として一定の性能があることが確認されている。

ROTDRは道路面の凍結監視や地中あるいは地表面の温度分布の測定に使用されている。

FBG方式は、センサの多様性から多方面での応用が試みされている。落石ネットのワイヤ線の張力変化から落石の兆候や検知を行うシステムがある。また、コンクリートの内部変位や内部温度の計測が報告されている<sup>9)</sup>。特殊な事例としては鉄道基盤の陥没検知システム等がある<sup>8)</sup>。

独立行政法人土木研究所は民間との共同研究として平成11年度から全国6カ所において光計測による斜面表層崩壊検知のフィールド試験を実施しており、今後の運用に向けてデータの収集と検証を行っている<sup>12)</sup>。

#### 4. 光ファイバ技術の特徴と問題点

光ファイバを利用した計測、監視の技術は、基礎的な研



写真1 ケーブルセンサ取付け状況

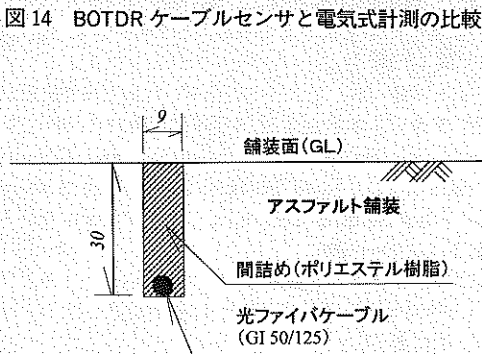
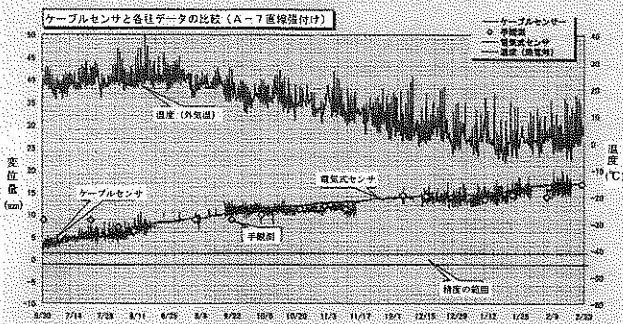


図15 ROTDRによる路面温度検知システム

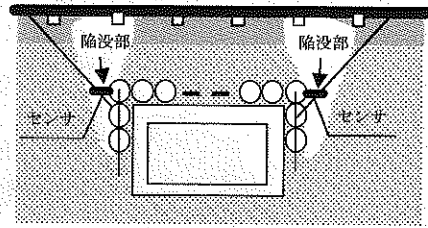


図16 FBGによる軌道陥没検知システム

究が行われてから未だ年月が浅く、国内での現場適用もここ数年である。したがって、現状では従来の電気式の計測に較べて、その適用範囲やセンサの種類も限られている。

光ファイバセンシングの技術的要素としては、センサとして用いる光ファイバ線、FBGセンサのような光ファイバ2次加工部分、光信号を解析するアナライザ、適確な設置方法、そして、監視用表示ソフトなどが挙げられる。光計測では、アナライザより先は全て光信号でセンシングを行うので、従来の計測手法に較べて次のような特長を有する。

- ・落雷や誘導雷などの電気ノイズの影響を受けない。
- ・錆びなどに対する腐食耐性が大きい。
- ・万一水がセンサ部に水が浸入してもセンサの基本的性能は維持される。
- ・多心のファイバ線を使用することで信号伝送用の線の数が少なくてすむ。
- ・センサ本体を小型化できる。
- ・センサ本体からアナライザまでの距離が数十キロ離れていても使用可能である。

しかしながら、将来の実用化が本格化するには残された問題点もある。その中で現場採用という面では、費用の低減が大きな課題であろう。たとえばFBGセンサを組み込んだ光センサの場合一般に用いられている電気式のセンサと比較してもその価格はおおむね2~3倍である。その大きな要因は歪ゲージの価格が千円程度であるのに対しFBGセンサが数万円と高額なためである。これは、FBGセンサが未だ大量生産の状態となっておらずメーカーに対する注文数が少ないためである。しかしながら各メーカーは将来の需要が伸びれば大幅なコストダウンが可能であると考えている。

一方、BOTDRやROTDRの場合、その特徴からいってファイバ線そのものがセンサとして機能するため、センサ部に関しては従来の方式と同様な計測を行うよりはかなり低価格で計測や監視が可能である。因みに延長1kmの道路沿いの斜面を電気式の伸縮計と光ファイバセンサで監視した場合を試算してみると、センサ部に関してはBOTDRの方が約1/3程度であった。ただし、アナライザに関して



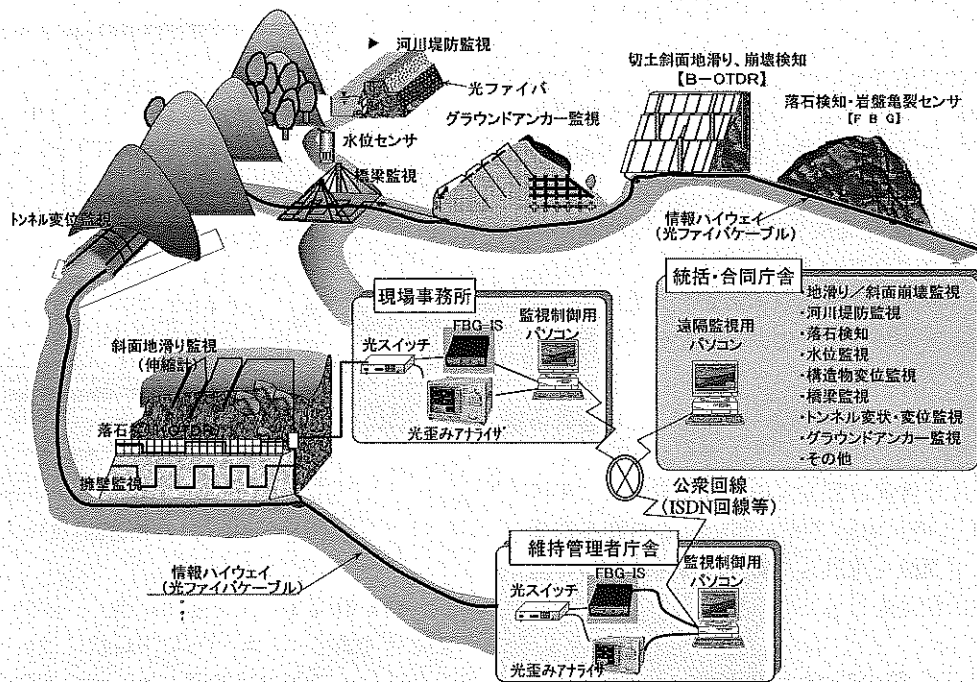


図17 広域光監視システムのイメージ

はBOTDRはまだまだ高価であるという問題が残されている。この点はROTDRも同様である。

## 5. まとめ

光ファイバ自体、あるいは光ファイバを加工することで温度、歪み、振動などの物理現象を測定する技術が実用化されて来てから未だ数年しか経過していない。測定から更に目的をもって計画的に測定、評価を行う地盤計測の分野に適用するには、今後も更なる試験施工や現場実験の段階を経なければ本格的な普及にまでは到らないであろう。

しかしながら、光ファイバセンシング・モニタリングには、従来の技術と違い利点があり各方面から大きな興味と期待が寄せられている。くりかえすまでもないが、土木分野における計測には、地盤やコンクリートなどの土木材料や施工方法に関する知識や経験が不可欠である。また、我が国の建設産業が、造る時代から維持管理の時代へ変化しつつあることから、構造物保全技術の基礎ともなる計測評価技術は重要であると思われる。光ファイバセンシングの技術がこのような時代の要請に十分に答えられる日が来ることを願って本稿を締めくくりたい。本稿を執筆するにあたって引用させて頂いた論文を発表された貴頭の努力に敬意を表します。

### 参考文献

- 1) Sumitro, S., Okada, Y. & Saoh, K.: Long-gage optical fiber sensors monitoring on deteriorated structure deformational properties.
- 2) 渡辺一弘: ヘテロ・コア型光ファイバセンサのネットワークセンシングへの応用, 光アライアンス, pp. 5-9, 2002.1.
- 3) 斉藤浩之・楠見晴重・藤枝敬之・向瀬光雄: 光ひずみセンサによ

る岩盤斜面の動態観測手法に関する研究, 第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1999.1.

- 4) 石川芳治・草野慎一・安江朝光: 光ファイバを用いたのり面・斜面変状検知システム, 土木技術資料, 34-12, 1992.
- 5) 倉嶋利雄・薄知規・田中郁昭・佐藤昌志・加賀屋芳之: 光ファイバセンサを用いたコンクリート構造物の歪み分布測定, Proceedings of 19th Meeting on Lightwave Sensing Technology, Mai, 1997.
- 6) 三田彰: 光ファイバセンサによる建築物の性能保証, 第25回光波センシング技術協会, 2000. 6.6.
- 7) 大島俊之・山崎智之・三上修一・今野政則・村田陽一: 光ファイバセンサによる鉄筋コンクリート構造のモニタリングに関する研究, 土木学会第53回年次学術講演会, 平成10年10月.
- 8) 小笠原登喜雄・倉橋渡・藤川富夫・初貝隆一・伊藤武志・古山章一: 光歪みセンサによる埋設式陥没監視システムの現場適用, 土木学会第57回年次学術講演会, 平成14年9月.
- 9) 垂水祐二・一久保和幸・佐藤壽夫・前田泰男・田辺忠願: 光計測によるマスコンクリート内部伸縮の計測, 土木学会第58回年次学術講演会, 平成15年9月.
- 10) 若林成木・渡辺浩平・熊谷仁志: 光ファイバを用いたトンネル支保の計測, 地盤工学会, 「土と基礎」, No. 533, 2002.6.
- 11) 成瀬 央: 光ファイバひずみ計測システムの開発と実用化, 日本機化学会誌, 2003, Vol. 106 No. 1016.
- 12) 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, 土木学会第57回年次学術講演会, 平成14年9月.
- 13) 奥村一郎・川野 勝: 光ファイバを用いた落石検知計測システム (OTDR方式), 土木学会第57回年次学術講演会, 平成14年9月.
- 14) Fujihashi, K., Uehara, H., Okutsu, M. and Komatsu, K.: Development of a Road Disaster Monitoring System Using Optical Fiber Sensing Technology, NTT Technical Review, Vol. 1, No. 9, Dec. 2003.
- 15) 太田富夫・鈴木康芳・本藤隆幸: 光ファイバをひずみセンサとして用いた斜面防災監視技術, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, 2002.

# 地下化学情報と地下環境モニタリング手法の 現状と展望

まはら やすのり  
馬原 保典\*

## 1. はじめに

地下化学の特性（周辺岩盤・地下水）について情報を得て、その変動を観測・予測することは、大規模な地下構造物の建設と開発に伴う地下環境の保全においてはきわめて重要である。そのためには、① 不動態成分としての周辺岩盤・割れ目充填物、② 動態成分としての地下水・間隙水、について調査を行い、地下環境が長年にわたって受けてきた変遷の経過と現状について情報を得る必要がある。

岩盤・地盤および割れ目充填物は、不動成分である岩盤・地盤が置かれた環境条件について形成初期から今日までの地下化学的な変遷の履歴を一次鉱物・二次鉱物・充填物として非常に長い時間の地下化学情報として包蔵している。また、地下水・間隙水は、動態成分として地下化学条件に関する履歴を2つの側面（a. 岩盤・地盤との相互作用 water-rock interaction の結果、b. 岩盤内部の流体成分の付加）についての動的な情報を内蔵していると考えられる。このように見ると、岩盤・地盤・地下水は、今日までの形成と地下化学環境変遷のプロセスを追跡可能とする天然のトレーサーと考えられる。

したがって、大規模な地下開発に伴う地下環境モニタリング調査のための地化学特性調査は、① 岩盤・地盤・割れ目充填物の地下化学特性調査、② 地下水・間隙水の地下化学特性調査、を平衡して行う必要がある。

## 2. 地下環境モニタリングのための地下化学情報

地下水や岩盤の地下化学情報を基に、現状での地下化学環境についてある程度の推定は、可能である。地圏を構成している固相部分である岩盤・地盤の基盤材料と液相部分である地下水・間隙水、さらに固相と液相の相互作用によって形成され、間隙や割れ目部分に沈殿あるいは析出充填・溶解する2次鉱物に関する情報が得られれば、鉱物相とpH-Ehの関係をダイアグラムに描くことができる。このようなダイアグラムを描くためには、鉱物種ごとの熱力

学データの完備が必要となるが、我々が必要とする全ての環境条件を網羅するほどの情報は完備されていない。しかし、我々が地圏環境中で良く観測できる鉄やマンガンを含む鉱物では、これらの情報が比較的良く整備されているので、これらの鉱物種とpH-Ehダイアグラムを比較することによって、現在の地下化学環境についてはおおむね推定が可能となる。

ここに例示した鉄のようにその鉱物種の安定性がpH-Ehの関係で、明らかとなっている指標に関し、その鉄イオン量と鉱物の存在量の情報が、各種測定・分析により得られれば、複数の鉄鉱物の共存状態から、現状での地下の化学的な条件が推定できることになる。さらに、鉄だけではなく、その他元素の鉱物種に関する存在情報と地下水・間隙水のpH-Ehあるいは溶存酸素やメタン・硫化水素量に関する情報が得られれば、Gerrels and Christ (1965) が描いた図1のような共生鉱物の安定度に関する情報を得ることが可能となり、存在する鉱物の共存量から、さらに詳細にその場の地下化学的な状態を推定できる。ただ、ここで推定できる状態は、現在の状態であってその状態の安定性に関する時間を含んだ情報は得られない。そこで、各鉱物の生成時期に関する時間のファクターが加われば、現在の地下化学条件の安定性に関する推定が可能となり、より有効な地下環境モニタリングとなる。しかし残念ながら、現状では、2次鉱物や間隙を埋める充填物生成の年代については十分に情報が得られる段階に至っていない。かわりに、間隙水や2次鉱物と直接接している地下水に関しては、その時間的な情報を得ることは可能であるので、それから間接的に推定することが現実的な手法になる。

地下化学環境情報を得るためには、以下の項目について測定・分析を行う必要がある。

（固相部分：母岩盤・沈殿充填物）

- ・母岩盤の鉱物組成
- ・間隙や割れ目に介在する充填物としての2次鉱物の種類と量等

（液相部分：間隙水・地下水）

- ・pH, Eh, 温度, 溶存酸素量, 硫化水素量, メタン量, 有機物濃度等
- ・地下水・間隙水の起源を知るために環境同位体・溶存

\* 京都大学 原子炉実験所

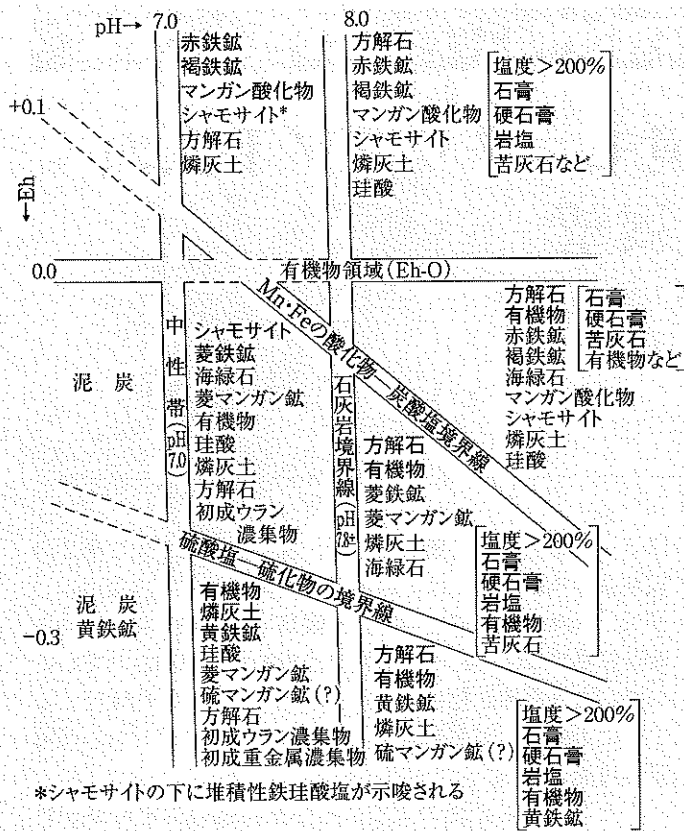


図1 化学堆積物層の中での最終共生鉱物の種類と Eh-pH の関係 (ゴシック：優勢な鉱物種を表す，[ ]内の共生関係は高塩濃度の場合を表す，シヤモサイト：堆積珪酸鉄鉱物を意味する) Garrels and Christ (1965) より引用

イオン濃度等

- ・地下水・間隙水の時間に関する情報を得るために放射性同位体と溶存希ガス濃度等

以上の情報を得るために、以下の章で、原位置での試料採取方法と原位置測定用センサーやその分析方法を通じて地下化学情報収集の現状を述べる。

### 3. 地下化学情報取得の手段

#### 3.1 岩盤・地盤の地下化学特性調査

特に、地下化学特性の調査においては、サイトを含む入れ物としての地質構成の履歴についての情報は、最も重要である。したがって、ここでは、サイトを構成している地質情報については、その構成と生成のプロセスの調査については、すでに、別途調査によって明らかにされていることを前提に以下では、地下化学情報のモニタリングの観点から述べる。

##### 3.1.1 岩盤・割れ目充填物採取

- ① ボーリングによる採取では、原位置条件を維持したままでの掘削による試料の採取は、困難である。乱された状態での試料採取においても清水掘りを基本とするのが望ましい。しかしながら、軟質岩盤の場合には、孔壁保護のために、泥水掘削は、避けられない。その場合には、泥水のコア内部への侵入範

囲をあらかじめトレーサー等を用いて予測を行い、採取コアから泥水等の侵入影響を受けていない試料部分の取り出しの必要がある。

- ② 原位置条件未攪乱試料の採取のためには、試掘孔の掘削あるいは、浅部試料の採取にあたっては、トレンチの掘削による試料採取が好ましい。ただしこの場合、掘削後孔壁の酸化によって、試料の変質が考えられるので、試掘孔の孔壁からのボーリングによって採取したコアの内から、原位置環境の変化が及んでいない範囲から分析試料の採取を行う必要がある。
- ③ 採取試料の保存にあつたては、試料の乾燥および酸化を防ぐために、鱧付けの後、不活性ガスを満たした容器に封入し、反応の促進を押さえるため低温での管理が望ましい。

##### 3.1.2 岩盤・地盤・割れ目充填物の分析

- ① 岩盤・地盤の基本構成物については、a) 造岩盤・鉱物 (構成母体の化学環境条件を既定する基本情報を与える)、b) 構成元素 (water-rock interactionにおいて地下水・間隙水の生成を既定する情報を与える)、c) 微量元素 (rare earth metal) (岩盤が置かれた化学環境条件・起源についての情報を与える)、d) 天然放射性元素 (岩盤ならびに間隙水の年代に関する情報を与える) の分析が必要である。それぞれの分析は以下の方法による。

- a) 造岩盤・鉱物：X線マイクロアナライザー (EPMA) 分析, X線回折分析, 走査型電子顕微鏡 (SEM) 分析, 透過型電子顕微鏡分析
- b) 構成元素：蛍光X線分析, 走査型電子顕微鏡 (SEM) 分析, 溶液として ICP あるいは ICP-MS 分析
- c) 微量元素：岩石試料を弗酸処理し溶液としたうえで ICP-MS 分析
- d) 天然放射性元素：U, Th の分析は、岩石試料を弗酸処理し溶液としたうえで ICP-MS 分析,  $^{40}\text{K}$  については、Ge 半導体検出器による  $\gamma$  測定,  $^{14}\text{C}$ ・ $^{36}\text{Cl}$  等微量放射能は、岩石処理を行いグラフアイトあるいは AgCl (銀沈殿物) として分離精製した後、加速器質量分析 (AMS), U・Th の鉱物周辺での分布を調べるには、フィッシュトラック・オートラジオグラフィ法を用いる。

- ② 割れ目・間隙充填物については、割れ目の種類 (a. 新鮮でかつ一様でない表面を有するもの、b. 開口あるいは閉塞しているもの、c. 小規模なせん断ゾーン、d. 風化に伴い母岩盤・マトリクスの角レキ化あるいは粒状化、e. 石英等の鉱脈) ごとに検討する必要がある。この中で、a. 新鮮な割れ目については、充填物の存在は、まだ少ないものと考えられるのでここでは、考慮しない。その他の割れ目については、割れ目の表面を覆う鉱物の存在に種類によって分類される。充填物については、a) 色、b) 硬さ、

c) 炭酸鉱物の有無、によって一般的には、分類される。さらに、鉱物種の同定には、X線回折分析が用いられる。最近の分析技術の向上に伴い、ウェットSEMによる分析も考えられる。

### 3.2 地下水・間隙水の地化学特性調査

地下水は、岩石とは異なり動態であるので、ダイナミックな環境条件の変遷についての情報を与える。したがって、非常に古い地下水や間隙水が残されていれば、それは、逆に対象サイト周辺の地化学条件の安定性が大きいと判断できる。このような観点から、間隙水・地下水の水質は、周辺岩盤とその中を移動する流体の相互作用についての情報を内蔵した動的なトレーサーと考えられる。

#### 3.2.1 地下水の採取

地下水・間隙水の水質から各種の情報を得るためには、分析測定を行ってデータを得るに価値ある地下水の採取を行う必要がある。そのためには、原位置条件の乱れをなるべく小さくできるよう工夫を行いながら採水を行う必要がある。試料の採取方法については、大きく分けて① ボーリング孔、② 試掘孔と③ 岩石コアからの抽出採水が、考えられる。

##### ① ボーリング孔からの採水

ボーリング孔からの採水は、大別して2通りの方法がある。

- a) 井戸構造を原位置条件を維持したままで採水ができるように仕上げる方法で、カナダのウェストベイ社の multi packer system がある。この方法では、原位置採水と地下水水質の連続モニタリングが可能である。ただし、採水・測定区間は、システムを設置する以前に決めておかなければならない点と内部の井戸と裸孔部分との間が十分にパッカー等によって遮断されていることが確認されている必要がある。
- b) プローブタイプのサンプラーによる採水。この方法は、パッカーによって採水区間を区切りパッカー区間内の地下水を pH、酸化還元電位、溶存酸素濃度、電気伝導度等をモニターしながら内蔵したポンプによって排除する。pH、酸化還元電位、溶存酸素濃度、電気伝導度等の収斂を待って原位置地下水と区間地下水の交換が完了したものとして試料地下水の採水を行う。この方法の利点は、採水区間を事前に決定しておかなくても良い点で、採水裕度が大きい。一方、結晶質岩のように割れ目が発達している場合には、パッカーによって遮断された区間と遮断されていない区間が割れ目によって連結される場合もある。また、ボーリングの井戸径の仕上がりが均一でない場合には、パッカーによって遮断が十分できない場合も生じる。採水に際しては、採水区間の地層の透水性状に合わせた採水速度でのポンピングを行わなければ、孔壁の崩壊等の恐れがある。さらに、岩盤・地盤の透水係数が  $10^{-11}$  m/s 以下と

なると実質的には採水はできない。この種の採水器には、1000 m まで採水可能な採水器がある。

ボーリングからの採水の場合に、特に注意を払わなければならない点は、ボーリングを掘削したことによって井戸周辺の岩盤・および地下水の流れはすでに乱されている可能性があり、掘削前の原位置条件下では、連結されていなかった割れ目同士が連結されている可能性もある。また、遮断区間のみを強制的に排水する可能性があるために、原位置条件下では、存在しない地下水の流れが生じる可能性もある。採水された地下水が、地下水の循環とは直接関連のない地層水である可能性もあり、流動水と地層水の区別をどのように行うのか指標を考えておく必要がある。

##### ② 試掘孔からの採水

試掘孔を掘削しその孔壁から採水を行う場合は、①のボーリング孔からの採水に比べ、サイトの特性が比較的良く把握される。そのために、a) 掘削作業中における非定常状態における採水、b) 掘削後の定常後の採水、に分けて考えることが必要である。

###### a) 掘削中の採水

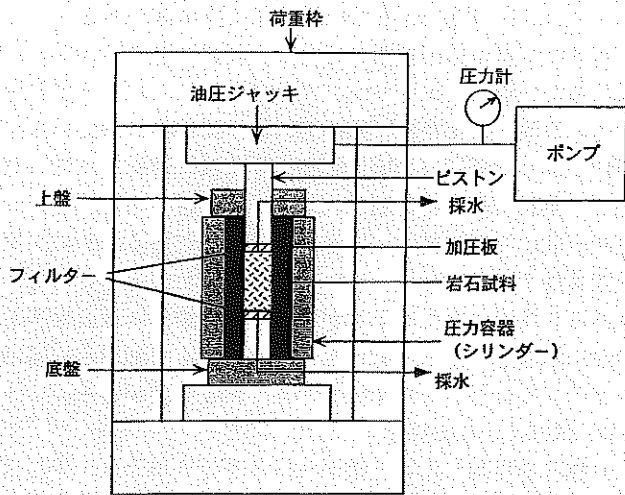
この段階では、きめ細かい採水作業を行うことは、困難である。しかしながら、乱される直前の初期状態に近い地下水の情報を得ることが出来る可能性が高いことは、否定できない。この時期の採水は、掘削深度と排出地下水量、水質項目としては、pH、電気伝導度、Eh(酸化還元電位)、水温、間隙水圧、可能ならば DO(溶存酸素濃度)について連続的に計測を行いつつ地層が変わるごと、一定深度ごとに水質分析用の試料の採取を行う。また、破碎帯等大規模な出水があった個所では、連続観測を行うと同時に分析用の採水を行う必要がある。この段階での採水および連続測定は、次の詳細調査へ向けた暫定的な採水・調査の位置付けである。

###### b) 詳細調査のための採水

掘削中に測定をおよび採水を開始した個所を含め、主要な割れ目帯ならびに主要な地質構成要素ごとの代表ポイントを選定したうえで、孔壁からボーリングを行い、マルチ・パッカーシステムを設置し、区間採水と、区間ごとに原位置での pH、電気伝導度、Eh(酸化還元電位)、水温、間隙水圧、DO(溶存酸素濃度)について連続観測を行う。このような採水システムとしては、SKB の Äspö 地下実験施設のマルチ・パッカーシステムが、参考となる。また、パッカーについては、溶存希ガスを含めた溶存ガス濃度の観測を行う場合には、水パッカーシステムとする必要がある。さらには、詳細観測期間が、長期にわたることを考えると原位置観測用のセンサー類のメンテナンスと信頼性については、データ品質管理の観点からセンサー校正基準とセンサー自体の耐久性と交換用の機器の開発を含め検討しておく必要がある。

##### ③ 岩石コアからの間隙水の採取

ボーリング孔あるいは、掘削・開削された坑壁からの採取に比べ、乱される前の地下環境情報を得られる可能性が高い。特に透水係数が小さな岩盤・地盤からの地下水や間隙水の抽出には有効である。



〔仕様〕

耐圧容器 (シリンダー)

材質	容器内部: Kモネルメタル (高耐食性) 容器本体: SNCM8
圧力	500MPa (約4900kg/cm <sup>2</sup> )
試料容器	φ40、φ45、φ50×H50~100mm
採水装置	上下に採水口を有する
荷重枠、油圧ジャッキ、ポンプ	
荷重	100 t
圧力計付き	

図2 岩石コアから間隙水を抽出するための間隙水抽出装置 (木方・大山・馬原: 1999 より引用)

透水係数が非常に小さな堆積岩の間隙水の抽出には、図2に示すような500 Mpaまで載荷できる間隙水抽出装置が、木方等(1999)によって試作活用されている。この装置は、一軸方向に岩石を圧縮し間隙水を抽出するものである。岩石の間隙率とコア長にもよるが通常は、一回の抽出で5~10 ml程度の分析試料を得るのが限界である。したがって、化学分析によって得られる情報にも限りがある。主に、少量の分析で測定できる溶存イオン濃度や放射性・安定同位体から、間隙水・地下水の起源や年代情報が得られる。現状の抽出装置は、大気開放系で抽出されるため酸化によって変化する項目(たとえば、パイライトの酸化によって生成される硫酸イオン)については、分析結果の取り扱いには注意が必要となる。また、この方法は、機械的に岩石や土壌構造を破壊するので本来間隙水や地下水に含まれない固相部分にあった結晶水なども抽出される可能性もあり、非常に大きな圧力での抽出には注意を要する。

岩石コアを直接用いて間隙水に溶存している希ガス濃度の測定から間隙水の年代測定や(馬原; 2001)、間隙水の起源に関する同位体測定 (Abu Zayed; 1999) も可能である。こちらのほうは、間隙水の拡散作用や同位体交換を活用する方法で、岩盤・地盤材料の構造を破壊する必要もなく、有効間隙水を対象とした測定が可能となる。

### 3.2.2 地下水・間隙水水質の分析

#### (1) センサー類による原位置測定

##### ① 水温

水の起源(河川水や温泉水の混入)、流動状況(地温は深

度によって年較差があるがそこを流れる地下水の流動状況の違いによっても地温勾配に変化が生じる)を把握するうえで、簡単に測定できることから重要な項目である。測定は、原位置測定が原則で、そのための機器としては非常にコンパクトで電極部が保護され、電源も交流・直流・太陽電池の切り替えが可能なデジタル式のサーミスター温度計がある。分解能は、0.1°Cのものが一般的であるが、高分解能のものには0.01°C程度のものである。

##### ② 電気伝導度

電気伝導度は、水のイオン強度と密接に関連しているので、イオン強度を概略的に把握するためには有効である。すでに、イオン強度が測定されている場合には、電気伝導度を連続的にモニターすることにより外乱等による水質の変動を把握することができる。これにより、地下水流動系の攪乱等を掴むことが可能となる。電気伝導度は、温度によって変化するもので、通常は、水温計と一体となった伝導度計によって測定され、測定値は、温度補正がされたデジタル値で表示される。

##### ③ pH

pHは、地下水の水素イオン強度を電気的に計測しているものである。地下水・間隙水の多くの場合、炭酸塩(多くは炭酸カルシウム)によって支配されている。pH計もガラス電極・比較電極・温度補正電極を一体化してコンパクトになっており、衝撃にも強いものも開発されている。通常は、pHの正確な測定は、pH標準液によって校正しなければならないが、自動校正機構を有する物もある。

##### ④ 酸化還元電位

地下水と周辺岩盤との相互反応の結果としての地下水の酸化あるいは還元を白金電極(ORP電極)の電位として計測した電位をゾーベル溶液によって校正換算したmV単位で表示するものである。地下水の酸化還元電位に大きな影響を与える元素としては、その酸化数が変化するS、Fe、Mnがある。また、有機物は、還元剤として大きな影響を持ち、微生物は、地下水や岩盤中に存在する有機物や無機物を基にエネルギー代謝を行い周辺の酸化・還元雰囲気に影響を与える。ただし、酸化還元反応の中には、非常に時間がかかるものも含まれているので、電極反応で測定できる範囲には、限界があるので、測定値は、あくまで、酸化還元の目安を与えるに過ぎないことには、留意が必要である。酸化還元状態の把握には、次に述べる溶存酸素濃度測定の併用あるいは、Fe<sup>2+</sup>/<sup>3+</sup>のように酸化数変動する元素の形態別分析とあわせて議論する必要がある。

##### ⑤ 溶存酸素

酸化還元電位と同様に、地下水の酸化還元雰囲気を把握する指標として有効である。地下水が流れてくる途中に有機物のように酸素を多く消費する物があれば、酸素量は低下する。溶存酸素量をポーリング孔内で測定すれば、地下水の流動区間の推定や、地上からの地下水の混入等について情報を得ることができる。電極法では、拡散膜をもちいて溶存酸素を電気信号として測定するものである。現状では、下限値としては、0.1 mg/l程度で飽和溶存量に対して測定精度は1%前後である。精密な測定を行うには、大気に

触れないように採水した地下水試料中の溶存酸素を化学的に固定して滴定法によって求める。下限値としては、0.01 mg/l である。

以上①～⑤までの指標の原位置測定には、深度 5000 メートルまでの深海測定用に開発され、それをボーリングでの原位置測定用に改良し一体化された測定用ゾンデ（たとえば、水落(1996)）がある。この場合には、深度と水圧も含めた 7 項目を 1 地点 10 sec 程度で任意の間隔深度ごとに同時計測が可能である。

## (2) 地下水・間隙水採取による分析

### ① 一般水質項目（イオン濃度）

陽イオン： $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+3+}$  等が主なものである。

陰イオン： $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、等が主なものである。

分析は、陰イオンは、液体クロマトグラフが陽イオンは、ICP 発光分析または、原子吸光分析が一般的である。このほかに、現場で簡易に測定をする簡易滴定法やイオンメーターを用いる方法もある。

### ② 微量元素分析

溶存微量元素であるランタノイド元素およびウラン・トリウムを系統的に分析し、代表的な頁岩盤の値で規格化することにより、地下水の起源や進化および地下水の酸化・還元傾向について情報を得ることができる可能性がある。しかし、まだ十分に実用化される段階にはない。分析は、ICP-MS 法による。

### ③ 有機物

採水した地下水試料は、迅速に分析する必要があるが、すぐに分析ができない場合は、1 N の HCl による酸固定の必要がある。地下水試料は、ガラス容器に入れ冷暗所で保存する。分析は、溶存炭素計にて総炭素量と窒素パーセントにより無機炭素成分を除去した炭素濃度より、差し引きし溶存炭素濃度を求める。分析下限値は、0.1 ppm 程度である。

### ④ 安定同位体分析

D,  $^{18}\text{O}$  は SMOW からの変動を基に地下水の起源や水の循環に関する情報を与える。また、 $^{15}\text{N}$  や  $^{32}\text{S}$  の変動より人為的な汚染や生物サイクルの関与についての情報を与える。特に、水の起源・循環については、D,  $^{18}\text{O}$  の変動は、基本的には温度と気圧によって分離が生じる事に起因しており、一方で、海水の D,  $^{18}\text{O}$  が、一定で変動しない事を基本としている。 $\delta\text{D}$  の分析は、1 ないし 2 ml の試料水を 600°C に加熱した金属ウランで還元し水素ガスとする。昨今では、金属ウランの入手が困難であるので金属亜鉛による還元法が用いられている。 $\delta^{18}\text{O}$  は、試料水と  $\text{CO}_2$  ガスとの同位体交換を行わせる。 $\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta\text{D}$  の分析は、質量分析器により行い、その精度は  $\delta^{18}\text{O}$  で 0.1‰、 $\delta\text{D}$  で 1‰ である。

### ⑤ 放射能分析

ここでは、地下水・間隙水の年代測定の対象となる核種について述べる。

$^3\text{H}$ ：半減期が 12.3 年であることから、比較的若い地下

水の年代測定に用いられる。分析は、1 l の地下水を 40 ml 程度にまで Fe-Ni 電極を用いて電解濃縮した後、この試料水をテフロンバイアルに移し 60 ml 程度のアクワゾール II 等の液体シンチレータ・カクテルを加え、低バックグラウンド液体シンチレーション・カウンターで  $\beta$  線の計測を行う。分析の下限値は、0.5 TR 程度である。現状では、質量分析によって  $^3\text{He}$  を測定すれば 0.1 TR 程度の精度で分析は、可能であるが、バックグラウンドの評価の点でまだ問題点も残されている。

$^{14}\text{C}$ ：半減期が 5700 年と比較的長く、生物代謝と深く関わっていることから、化石の年代測定同様に地下水の年代測定にも活用される。測定は、炭酸ストロンチウム沈殿より分離した炭素を基にベンゼン合成を行い気体計数管あるいは、液体シンチレーションカウンターによって  $\beta$  線の計測を行う。ただし、この場合には、地下水試料は、重炭酸イオンの濃度にもよるが、200 l 程度が必要となる。最近では、試料量が、1~3 l 程度で分析用炭素量が数 mg 程度あれば分析可能な AMS (加速器質量分析) 技術の普及によって分析精度も向上している。

$^{36}\text{Cl}$ ：半減期が 30 万年と長く、100 万年オーダーの地下水年代測定に活用できる。塩素イオンを AgCl の沈殿として回収し、AMS にて分析する。AgCl 沈殿は、 $^{36}\text{Cl}$  の同重体である  $^{36}\text{S}$  をなるべく除去できるよう  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  を加え  $\text{BaSO}_4$  として S を分離精製する。分析下限値としては、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  比で、 $10^{-15}$  程度である。

$^{129}\text{I}$ ：半減期が 1600 万年と非常に長いために非常に古い地下水の年代測定に活用が期待されている。分析は、I を AgI として 1 mg 以上沈殿として回収精製し、AMS にて測定する。I イオン濃度が低い地下水の場合、陰イオン交換樹脂で事前に濃縮しておく必要がある。さらに、天水のように I 濃度が (500 ppt~30 ppb) と著しく低い浅層地下水の場合には、事前に  $^{129}\text{I}/\text{I}$  ( $20 \times 10^{-15}$ ) 程度の低同位体比を有する NaI をキャリアーとして加え回収する必要がある (Snyder, 2001)。

$^{222}\text{Rn}$  分析：ラドン濃度の測定は、ラドンが水に比べてトルエンに 40 倍選択的に溶解することを利用してトルエンに抽出し、それにシンチレータを加えて液体シンチレーションカウンターで  $\alpha$  カウンティングを行う。しかし、地下水の検層のように同時に多点で採水し、同時に液体シンチレーションカウンターで迅速に  $\alpha$  カウンティングを行い濃度を決定することは、きわめて困難である。そのために、水中  $\alpha$  トラック法が、Mahara (1998) によって開発され、迅速な放射能測定をすることなく容易に地下水流動区間の特定が可能となった。

### ⑥ 溶存ガス測定

分析は、a) ガスクロマトグラフ、b) 質量分析器、による分析が主である。比較的溶存量の多いものは、キャリアーガスを適切に選べばガスクロによって比較的簡便に分析できる。また、高感度の分析を必要とするものは、質量分析を行うことにより同位体比の変動についても情報を得ることができる。特に、希ガスについては、同位体比の変動を知ることが、地下水の起源や年代を議論する場合には

表 1 地下水年代測定法の要件、適応範囲、精度と課題

		測定法の要件										適応範囲 (年)	技術開発項目 (適用性)
地下水年代測定法の要件	解析式	半減期 (年)	起源	地下での生成	測定原理	分析器	分析限界	単位	試料	地表面・自然存在量	適応範囲 (年)	技術開発項目 (適用性)	
	数値解析	物質	宇宙線、水爆、原子力産業	少	モダンカーボンを規準に減衰特性から算定	AMS	$5 \times 10^{-15}$	$^{14}\text{C}/\text{C}$	5 mgC	100%			
天然核種	$^{14}\text{C}$	5730	宇宙線、水爆、原子力産業	少	モダンカーボンを規準に減衰特性から算定	AMS	$5 \times 10^{-15}$	$^{14}\text{C}/\text{C}$	5 mgC	100%	$500 - 5 \times 10^4$	deadカーボン量の評価	
	$^{36}\text{Cl}$	$3.01 \times 10^5$	宇宙線、水爆、原子力産業、U・Thの衰変に伴う中性子	大	地下生成量(岩種に依存)と減衰特性を考慮する必要がある。地下生成を考慮した	AMS	$1 \times 10^{-15}$	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	1-10 mgCl	$2 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^4 - 2 \times 10^6$	地下生成量、地下での賦存状況を調査する必要がある	
	$^{81}\text{Kr}$	$2.1 \times 10^5$	宇宙線、 $^{238}\text{U}$ の自発核分裂	非常少	同上	RIS	$2 \times 10^{-10}$	$^{81}\text{Kr}/\text{Kr}$	10 L	$7 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^4 - 1 \times 10^6$	分析法と採取方法の開発必要候補としてはサイクロトロン	
	$^{129}\text{I}$	$1.6 \times 10^7$	宇宙線、 $^{238}\text{U}$ の自発核分裂、原子力産業	少	同上	AMS	$5 \times 10^{-14}$	$^{129}\text{I}/\text{I}$	2-10 mgI	$1.5 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^6 - 5 \times 10^8$	地中生成量、岩石から地下水への放出量を把握する必要性	
	$^3\text{He}$	—	大気、放射線変換、マントル	少	$^3\text{H}$ と合せて使用	GC	$8 \times 10^{-6}$	ccSTP/g	15 ml	$1.0 \times 10^{-14}$	1-120	適用性なし	
	$^4\text{He}$	—	大気、放射線変換、マントル	大	地中生成による蓄積で評価	希ガス用MS	$2 \times 10^{-8}$	ccSTP/g	15 ml	$1.0 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^7$	地下生成量、フラックスの把握	
	$^{21}\text{Ne}$	—	大気、放射線変換	少	地中生成による蓄積で評価	希ガス用MS	$2 \times 10^{-8}$	ccSTP/g		$1.0 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^7$	$^3\text{He}$ のサンプリング時のロスを減らす必要性	
	$^{40}\text{Ar}$	—	大気	条件により	地中生成による蓄積で評価	希ガス用MS	$2 \times 10^{-8}$	ccSTP/g		$1.0 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^7$	評価法および岩からの溶出率	
	$^{234}\text{U}$	$2.46 \times 10^5$	$^{238}\text{U}$ の自発核分裂	少	地中生成による蓄積で評価	アルファ線計測	1	count/hr	1-5 $\mu\text{gu}$	1	$1 \times 10^5 - 1 \times 10^6$	適用性なし	
	$^{238}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$		天然に依存			1	count/hr	<1 $\mu\text{gu}$	1	$1 \times 10^5 - 1 \times 10^6$	適用性なし	
化学的非平衡による推定	ラセミ法	—	アミノ酸の立体構造が生体と生体の死によって無機物化していく際に異性体の存在比が変化することを利用する方法	—	—	—	—	—	—	—	$10^3 - 10^6$	適用性なし	
人為起源物質による推定	水和法	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$10^3 - 10^6$	適用性なし	
	$^3\text{H}$ , $^{36}\text{Cl}$ , $^{85}\text{Kr}$ , $^{129}\text{I}$	12	宇宙線、水爆、原子力産業	重要でない	1. 大気中の変化曲線 2. $^3\text{H}$ と合せて使用	LSC	$1 \times 10^{-14}$	$^3\text{H}/\text{H}$	250 mL	$3.6 \times 10^9$	1-60	適用性なし	
	CFC, SF <sub>6</sub>	$3.01 \times 10^5$	宇宙線、水爆、原子力産業、U・Thの環境に伴う中性子	条件により	大気中の経時変化から推定	AMS	$1 \times 10^{-15}$	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	1-10 mgCl	$5 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-4}$	1-60	適用性なし	
	$^2\text{H}$	—	大気	少	V-SMOW 温度同位体として	IRMS	1	%	10 mL	-50	$0 - 3 \times 10^5$	活用できる情報の整理	
	$^{18}\text{O}$	—	大気	少	V-SMOW 温度同位体として	IRMS	0.1	%	10 mL	-10	$0 - 3 \times 10^5$	活用できる情報の整理	
	Ne, Ar	—	大気	少	温度から	希ガス用MS	$2 \times 10^{-9}$	ccSTP/g		$5.0 \times 10^{-1}$	$0 - 3 \times 10^5$	活用できる情報の整理	
	Kr, Xe	—	大気	少	温度から	希ガス用MS	$2 \times 10^{-8}$	ccSTP/g		$5.0 \times 10^{-10}$	$0 - 3 \times 10^5$	活用できる情報の整理	
	地質気候	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$1 \times 10^4 - 1 \times 10^7$	活用できる情報の整理
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$0 - 5 \times 10^5$	活用できる情報の整理

LSC: 液体シンチレーションカウンタ, AMS: 加速器質量分析器, GC: ガスクロ, MS: 質量分析, IRMS: 同位体質量分析器

特に有効である。分析において重要な点は、分析機器に導入する前に個々のガスごとに分離を行う必要がある。分離技術は、水分の除去技術と個々のガス成分の分離技術からなる。特にガスの分離にはガスの凝固温度・化学反応性・吸着性の違いによる化学特性を考慮して行う。

#### 4. データ解析と地下化学情報

##### 4.1 地下水年代

地下化学データを天然のトレーサーとして活用した地下水年代測定法は種々提案されている。その原理と測定法・適用限界・問題点とその現状については表1に整理した。この中で、今後とも有望と考えられる手法について以下にデータ解釈とそこから推定される地下学的な考察を以下に述べる。

##### 4.1.1 溶存希ガス法

地下水・間隙水に溶存している希ガスは、天然トレーサーとして滞留時間の推定に留まらず多くの調査に適用・発展する可能性を秘めている。地下水の年代測定の面では、この手法は、放射能の壊変とその壊変生成物の蓄積速度を組み合わせた方法である。対象となる希ガス成分としては、He, Ne, Ar, Kr, Xeがあげられる。これらのうちで、実際に活用できるものは、HeとKrが考えられる。

溶存ヘリウムを地下水の年代測定に活用する最大のメリットは、非常に年代の若い地下水から非常に古い地下水まで同一測定手法で評価ができる点にある(評価対象He同位体は、若い地下水では、He-3、古い地下水では、He-4である)。

さらに、溶存希ガスを活用した地下水年代測定法の最大のメリットは、同一地下水試料から、複数の情報を得ることができる点にある。つまり、He, Ne, Ar, Kr, Xeの各希ガス同位体比の違いを活用すれば、地下水の年代だけでなく、地下水の起源、地下水の涵養状況について推定が可能となり、地下水の履歴・変遷について推定する有効な手段になる。

##### ① ヘリウム-3とトリチウム年代測定法

比較的若い地下水の滞留時間の推定を行う技術で、トリチウムとその $\beta$ 壊変によって地下水中に蓄積するヘリウム-3( $^3\text{He}$ )を同時に測定し、トリチウムの半減期12.3年を基に地下水の年代を推定する方法である。その際、地下水の年代 $\tau$ は、次式

$$\tau(\text{Years}) = 17.69 \ln \{ 4.01 \times (^3\text{He}_{\text{tm}}) / (\text{HTO}) \times 10^{14} + 1.0 \} \quad (1)$$

ここに、( $^3\text{He}_{\text{tm}}$ ): トリチウムの $\beta$ 壊変によって生じた $^3\text{He}$  (ccSTP/g)

(HTO): 地下水のトリチウム濃度 (TU)

で与えられる。これは、地下水年代測定の基本条件を満たした地下水環境であれば、地下に浸透した降水のトリチウム濃度が地下水のトリチウムとヘリウム-3濃度によって一義的に決まることによって放射壊変の原理から経過時間が決定できる。この方法では、初期の降水のトリチウム濃

度にもよるが、トリチウムの測定限界レベルから判断すると6~7半減期(80~90年)程度と考えられる。多くの詳細な解析結果との比較も行われ、溶存ヘリウム-3の拡散影響も評価され、100年程度の若い地下水年代測定では最も信頼のおける測定法である。

##### ② ヘリウム蓄積法

ヘリウム蓄積法は、土壌や岩盤に含まれるウラン、トリウム系列の $\alpha$ 壊変によって放出されるヘリウムの地下水への蓄積フラックス、および地下深部から拡散し地下水中に蓄積する拡散ヘリウム・フラックスを基に滞留時間を推定するものである。原位置でのヘリウム発生フラックスが $1 \times 10^{-9}$  ccSTP/g $\cdot$ y $^{-1}$ までであれば、地下深部からのヘリウム拡散フラックスの影響のほうが大きいと推測される(馬原, 1998)。ちなみに、原位置でのヘリウムの発生量は、堆積岩で $10^{-13}$ ~ $10^{-11}$  (ccSTP/g $\cdot$ y $^{-1}$ )、火成岩(結晶質岩)で $10^{-12}$ ~ $10^{-9}$  (ccSTP/g $\cdot$ y $^{-1}$ )程度である。

地下水の年代評価においては、このヘリウムの脱ガスフラックスを基にした推定法が、Mahara and Igarashi (2003)によって提案されている。それによれば、地下水年代 $\tau(\text{year})$ は、次式

$$\tau(\text{year}) = (\text{He})_{\text{EXE}} / \{ J / (\phi \cdot h \cdot \rho) + A \} \quad (2)$$

ここに、( $\text{He})_{\text{EXE}}$ : 過剰な $^4\text{He}$ 量 (cc STP/g),

$J$ : He脱ガスフラックス (cm $^3$ STP/cm $^2$  $\cdot$ y $^{-1}$ )

$$J = -D_{\text{app}} \cdot \rho \cdot \frac{\partial \text{He}_{\text{exc}}}{\partial h}$$

$\phi, h, \rho$ : それぞれ地層の空隙率, 採水深度(cm), 水の密度 (g/cm $^3$ )

$D_{\text{app}}$ : 間隙水中でのHeの見かけの拡散係数

A(原位置でのHe発生量):

$$(11.9 \times 10^{-13} \cdot \text{U} + 2.28 \times 10^{-14} \cdot \text{Th}) \times (1 - \rho) \times \rho_R$$

$\rho$ : 岩石の空隙率,

U, Th: 岩石中のウラン, トリウムの含有量 (ppm),

$\rho_R$ : 岩石の密度 (g/cm $^3$ ),

で与えられる。測定される年代は、 $10^2$ ~ $10^7$ 年程度まで測定可能である(誤差評価についてはまだ確立していない)。現在、ヘリウム単独ではなく、他の $^{14}\text{C}$ や $^{36}\text{Cl}$ など環境放射能測定と組み合わせたヘリウム時計法が馬原(2003)によって新たに提案されている。

##### ③ $^{81}\text{Kr}$ 法

大気上層で宇宙線によって生成され降水に溶けて地下水に含まれる $^{81}\text{Kr}$ の半減期( $T_{1/2}$ )は $2.1 \times 10^5$ 年と長く、測定可能な地下水年代としては $10^4$ ~ $10^6$ 年の範囲にある。此处で測定対象とする $^{81}\text{Kr}$ は、宇宙線の核破砕によって生成される成分で、地下で $^{238}\text{U}$ の自己核分裂によって生成される成分は、通常非常に小さいために無視できる。起源が唯一大気起源であることから、単純な放射能減衰に伴う年代測定が可能である。Lehmann等(2003)によれば、オーストラリア大鑽井盆地の西部Eromangga盆で他手法のキャリアレーションに $^{81}\text{Kr}$ で測定した $2 \times 10^5$ ~ $4 \times 10^5$ 年の地下水年代を活用している。



#### 4.1.2 $^{14}\text{C}$ 法

生物活動起源の  $^{14}\text{C}$  の炭素循環として、地下水に取り込まれた  $^{14}\text{C}$  が半減期 5730 年で  $\beta$  崩壊しながら減少するという放射壊変を基礎としている。地下水年代 ( $t$ ) は、地下水中に含まれる  $^{14}\text{C}$  の濃度を測定することにより、次式

$$t = 8270 \ln \left( \frac{C_0}{C_t} \right) \quad (3)$$

ここに、 $C_0$ :  $^{14}\text{C}$  の初期濃度

$C_t$ : 試料水中の  $^{14}\text{C}$  濃度

で決定できる。便宜上は、 $C_0$  としては、一般に大気起源の  $\text{CO}_2$  に含まれる  $^{14}\text{C}$  濃度で代用し、最近の新しい  $^{14}\text{C}$  を含んでいる modern carbon 100% として、 $C_t$  は modern carbon を含むパーセントで表すことにより

$$t = 8270 \ln \left( \frac{100}{C_t} \right) \quad (4)$$

と表される。ただし  $C_t$  は、試料中の全炭素量に対する相対値として測定されるので、試料中の  $^{14}\text{C}$  ならびに安定炭素の起源を考慮して年代を評価しなければ、結果に大きな誤差を含むこととなる。したがって  $^{14}\text{C}$  法の最大の欠点となっている  $^{14}\text{C}$  が放射壊変し  $^{14}\text{C}$  を含まない dead carbon 量の評価が是非とも必要となる。この "dead carbon" の評価においては、次の点に注意を払う必要がある。地下水と溶解平衡の関係にある炭酸塩鉱物 (たとえば  $\text{CaCO}_3$  等) は、pH、水温、圧力、ならびに地下水の化学組成の微小な変動によっても溶解が促進されたり、炭酸イオンの沈着が生じたりする。その間に、水に溶解する modern carbon 量が変動したり炭素の同位体分別が生じたりする。炭素の同位体の交換は、これら反応の度合と地下水中に共存するその他の炭素化学種の量によって異なり、同位体交換反応がそれぞれ平衡に達していない可能性が十分に考えられる。このことから、Tarmers (1967), Pearson (1965), Mook (1976), Fontes と Garnier (1979) 等によって種々提案されてきた dead carbon 評価モデル (生物起源の  $\text{CO}_2$  と海生起源石灰石の持つ安定炭素同位体比  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  の違いと溶存しているイオン量の収支を用いて、無機炭素量の評価を行う) を用いた dead carbon 評価が常に十分満足のいくものとはいえない場合もある。

しかしながら、現時点では最も完成度の高い地下水年代測定法の一つであり、 $5 \times 10^4$  年までの比較的長い滞留時間の測定においては、他の手法によって測定された結果に対する比較データとして活用される例が多い。

#### 4.1.3 $^{36}\text{Cl}$ 法

$\text{Cl}^-$  は、従来から地下水のトレーサーとして地下水調査に用いられてきた実績を有している。それは  $\text{Cl}^-$  が低 pH を除き、土壌や岩盤に吸着されにくく、かつ土壌・岩盤のマトリックス中にほとんど含まれていない点で、地下水が移動する間に、これらマトリックスから溶出してこないからである。ただし、海岸部や岩盤・塩層が存在する場合には、この限りではない。地下水トレーサーとして非常にポピュラーな  $\text{Cl}$  の中に自然界で恒常的に生産される非常に長い半減期  $3 \times 10^5$  年を有する  $^{36}\text{Cl}$  が存在する。地下水年

代測定に活用される  $^{36}\text{Cl}$  の起源としては、大気上層で宇宙線による  $^{39}\text{Ar}$  と  $^{40}\text{Ca}$  の核破砕 (Cosmic-ray Spallation) により生成され、降水に含まれ地下水に供給されるものが主である。

Bently 等 (1986) がオーストラリアの大鑽井盆地の地下水調査において、地下水年代としては  $10^5 \sim 10^6$  年と推定し、ダルシー則を基本とした解析結果とも年代にして、2~3 倍の範囲で一致したと報告している。ただし、 $^{36}\text{Cl}$  法の場合、データの解釈においてヘリウム同様に塩素イオンの拡散についても考慮しなければならない問題点を含んでいる。さらに  $^{36}\text{Cl}$  は、非常に長い時間のうちに、地下で宇宙線や周辺岩盤より供給される中性子による核反応により生成される  $^{36}\text{Cl}$  量についての正確な評価が必要となる。逆に、地下深部 (100 m 以深) では、岩盤中で  $^{35}\text{Cl}$  熱中性子捕獲により生成される  $^{36}\text{Cl}$  を活用した He 時計 (馬原; 2003) で地下水年代測定が可能となる。この方法で、スウェーデン Åspö のサイトでは 200 万年以上の古い地下水の存在を確認している。

### 4.2 地下水起源と地下水流動評価

#### 4.2.1 安定同位体

世界中の降水について  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  の変動を調査した Craig (1961) の研究により、一般に降水およびその降水を起源とする地表水ならびに地下水の  $\delta\text{D}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  の間にはいわゆる天水線 (Meteoric Water Line)

$$\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (5)$$

の関係が認められる。通常、河川水・沢水や地下水では、地下での混合のために、降水が持つ同位体の季節変動は打ち消され、その変動は一般に非常に小さく、 $\delta\text{D}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  は降水の年平均値を示すことが認められている。そこで地下水調査において、地下水の  $\delta\text{D}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  を測定し、プロットすることにより、そのプロットが天水線上に乗るか否かを見極めることによって、その地下水が、降水を直接起源としたものか、地下で熱の影響を受けたものか、海水起源であるか等の判断が可能となる。

一方、地下水中で季節変動が、均一化されるのとは対照的に、不飽和土壌中では土壌水の鉛直プロファイル中に季節変動の記録が残されており、この変動サイクルから土中水の浸透速度や浸透過程の推定にも活用されている。たとえば、Saxena と Dressie (1984) は、スウェーデンのウプサラにおいて、不飽和土壌中の浸透降雨・降雪による  $\delta^{18}\text{O}$  の変動プロフィールと人為的に注入した  $^3\text{H}$  の濃度プロフィールとを追跡比較することにより、蒸発散量と地下水への涵養量を評価し、別途流出解析より得られた結果と比較し、両者が比較的良好な整合性を示すことを確認した。

以上のように、地下水・土中水のトレーサーとして活用される降水の同位体比を変動させる要因としては、(1) 温度 (または緯度) 効果、(2) 高度効果、(3) 内陸効果、および (4) 雨量効果があげられる。これらの内で我が国では、特に温度 (緯度) 効果と高度効果が重要である。我が国の主要河川のように山岳地帯に源を発する河川水によって下流の平野部の地下水が涵養される場合、地下水涵養源

となる河川水ごとの  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  が高度効果によって変動することを活用し、涵養区分をした事例の報告が多い。一般に標高が 100 m 増すごとに  $^{18}\text{O}$  含有量が約 0.3‰, D の含有量が 2.5‰ 減少する。このことは標高の異なる地域で別々に涵養された地下水では同位体に差異が生じることを意味しており、地下水の涵養源、あるいは流域区分が可能となることを示唆している。具体的に黒部川流域、栃波平野の庄川、神通川流域、ならびに富士山周辺での地下水涵養ならびに流域区分に活用された(水谷・小田 1983; 水谷・桜井 1988; 嶋田 1991; 吉岡, 等 1993)。

降水を起源とした地下水と地下で岩石が高温で相互作用した結果、地下水の同位体組成に変動が生じることが予想される。その変動の割合は  $\delta^{18}\text{O}$  で大きく  $\delta\text{D}$  では小さい。それは、岩石中では、酸素原子が多量(重量にして 45~50%)に含まれており、その同位体比  $\delta^{18}\text{O}$  は、海水(SMOW)に比べて火成岩、堆積岩、変成岩ではいずれも +5‰ 以上と高い(Mason and Moore 1983)こと、一方、水素原子は非常に少量しか含まれていないことと、岩石中の  $\delta\text{D}$  は淡水のそれとあまり差がないことのためである。地下で岩石との間で同位体交換が進行した地下水は、その地域の天水線上の降水よりも  $\delta^{18}\text{O}$  がシフトし、 $\delta\text{D}$  はほとんど変化しないこととなる。その場合、天水線からのずれは反応時の温度と接触時間とによって異なる。逆に、低温風化条件では、粘土鉱物と地下水・間隙水が相互作用し、 $\delta\text{D}$  が増加し、 $\delta^{18}\text{O}$  が減少する方向にシフトする。つまり、これらのことは地下水の地下での周辺岩石との反応履歴等に関する情報を与えることとなる。

さらに、地下水の  $\delta\text{D}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  変動を調べることによって古気候情報を知る手掛かりにも活用されている。そこでは、 $\delta\text{D}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  の変動だけでなく希ガス成分(Ne, Ar, Kr, Xe)の濃度変動と組み合わせ、さらに正確な気候変動の記録の保存が、世界各地の大規模な地下水盆地の地下水に残されていることが明らかになりつつある(Stute, 1992, 1995)。このような地球規模でのグローバルな気候変動を推定する温度計の尺度としても活用される。

#### 4.2.2 溶存イオン量

地下水に含まれる溶存成分(主要イオンといわれる  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ )は、地表面から供給された地表水が土壌や岩石と接触し、溶解、沈殿、イオン交換、酸化還元反応を起こした結果であり、同じ流路の水はその化学組成が類似していることから、イオン濃度を用いて、間接的に地下水流動系、地下水起源を知ることができる(塩崎, 等, 1997)。また、地下水の滞留時間や通過する岩石の風化度によってもイオン濃度が変化することから、相対的な滞留時間の差に関する情報や岩石の風化度についての情報を得ることができる(杉崎:1963, 鶴巻:1993)。

(1) イオン濃度の表示方法としては、ヘキサダイアグラム(シュティフダイアグラム(Stiff diagram)), トリリニアダイアグラム(trilinear diagram), トリリニアダイアグラムの菱形座標図だけを取り出したキーダイアグラムが

用いられる。トリリニアダイアグラム, キーダイアグラムは、主要イオン濃度の相対的な関係を示すのに便利であるが、濃度の絶対値を表現することはできない。これに対し、ヘキサダイアグラムはイオン濃度の相対的な濃度差だけでなくその濃度の絶対値も表現でき、流動場の変化を追跡するには適した表現方法である。

(2) 統計的な水質データの評価手法としては、複数の試料間でイオン濃度組成の類似性を比較する濃度比マッチング法(たとえば、斎藤, 1986), 多変量解析手法である主成分分析, クラスタ分析を利用して水質データを分類する方法(廣崎, 1985; 乙間・中杉, 1989; 中島ほか, 1989; 森田ほか, 1991; 尾方ほか, 1995; Rhén *et al.*, 1997), さらに、主成分分析, 重回帰分析手法を使って地下水の混合比を計算する方法(安池, 1994)がある。これらの手法は、その手順さえ統一すれば、機械的に水質データのグルーピングや水質データの類似性を比較することが可能になることから、水質データの分類や解釈を容易にするための補助的な技法として有効である。これらの手法により、多数のデータが、短時間に機械的に処理ができることから評価が簡便になった。しかし、これらの活用にあたっては、解析され得られた評価結果と地下で発生している事象、地下水を包蔵している入れ物としての水理地質情報との間に十分に整合性が取れているか判断することが、是非とも必要である。

#### 4.2.3 ヘリウム同位体

溶存ヘリウム量とその同位体比を整理すると地下水の起源と流動区分を行うことができる。適用例としては、熊本

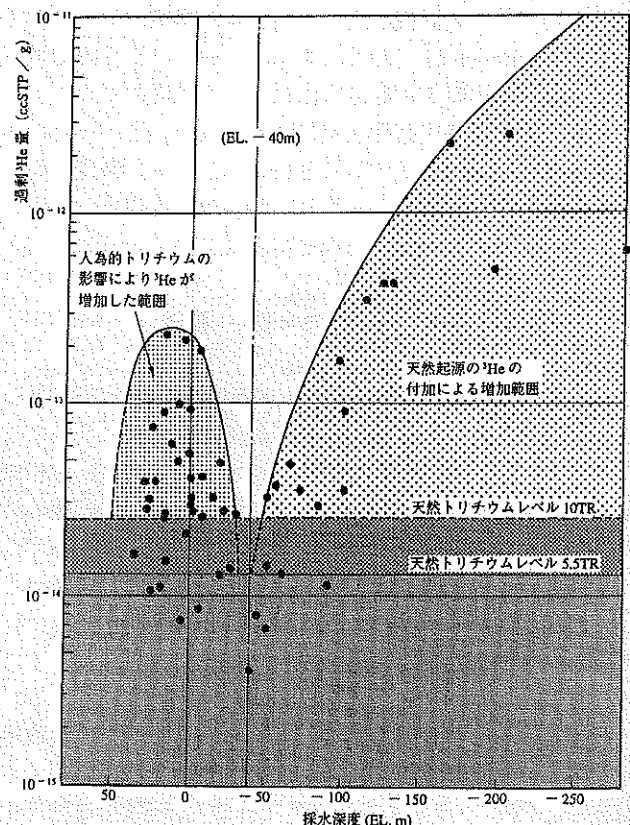


図3 溶存 He-3 濃度を基に最近の降水を起源とする若い地下水と滞留時間が長い古い地下水の境界を分離した例(馬原, 1997)

平野の地下水と阿蘇カルデラ内(垂玉温泉, 内牧温泉)とカルデラ外(植木温泉, 菊池温泉, 菊南温泉)の温泉水のヘリウム同位体比と溶存ヘリウム量を測定し(Mahara, 1995), 熊本平野の平面2次元地下水流動区分を作成した(馬原, 1998)。熊本平野の地下水は, 地下深部のマグマから放出される同位体比の高いマントルヘリウム成分の混入量の違いを反映し, 溶存ヘリウム同位体比が地域ごとに異なること活用した。

比較的狭い台地状の地域で, 鉛直方向にヘリウム濃度とヘリウム同位体比を測定することにより, 涵養時期のトリチウム濃度を推定し, それを基に最近の降水によって涵養された地下水の鉛直浸入深度を推定した。図3では, 核実験の結果降水のトリチウム濃度が上昇し, 浅層地下水中に核実験のために上昇してできた $^3\text{He}$ のピークが観測され, 最近40年の降水の涵養による地下水の浸入深度を海拔下40mと推定できた(馬原; 1995, Mahara and Igarashi; 2003)。

#### 4.2.4 溶存ラドン

ラドン $^{222}\text{Rn}$  ( $_{86}^{222}\text{Rn}$ ) は,  $_{92}^{238}\text{U}$  ウラン壊変系列の中で $_{88}^{226}\text{Ra}$ の娘核種であり, 半減期が3.8日と比較的短く, 不活性放射性ガスである点が系列内の他核種とは際だって異なる。ラドンが不活性ガスで, 比較的良く水に溶解する点から, 他の不活性ガス(He, Ne, Ar, Kr, Xe)同様, 地下水の流れを追跡し, 地質調査の観点からは破碎帯や断層クラック開口部の特定等に活用できる可能性を持っている。

特に地下水調査では, 河川への地下水の流出, 逆に河川からの地下水への涵養調査に活用された事例が報告されている(Hoehn et al. 1989)。また, ボーリング孔内で地下水の流出区間の特定に鉛直方向にラドン濃度のプロファイルを求め地下水湧出区間決定に活用されている。また, 透水係数測定結果と対比することにより, ラドン濃度の高い部分では透水係数も大きくなり, 溶存ガスの流出しやすい部分は水も流れ易いとの結果も得られている。

### 5. 環境センサー活用の今後の展望

地下化学情報を収集するための測定項目, 測定方法とそのデータ解析とそれから得られる地下化学事象について述べてきた。データの解釈においては, 現時点では, 液相側から見た解釈が主で, 固相側からの情報はほとんど組み込まれていないのが現状である。それには, 固相側からのデータ取得が中々容易ではないと言う現状がある。現時点では, 液相側からの原位置データを主として, 解釈された地下化学情報を固相側から得られたデータで確認していくことが現実的な地下化学モニタリングの流れと考えられる。

将来的には, 原位置での固相側の鉱物分析データの取得をはかり, 2章でも述べたような複数の2次鉱物に関するpH-Ehダイアグラムを3次元的に作成し, 現状での地下化学状態の把握とその安定性を推定する。現在の地下化学状態が, 今後どの方向に変化するか, その方向を推定できる

ような手法の開発が望まれる。そのためには, 迅速に固相側の地下化学条件を計測できる測定システムの構築と, 得られたデータを基に地球化学モデリング手法を用いたデータ解析システムとの統合化を図る必要が求められる。

#### 参考文献

- 1) 尾方伸久・若松尚則・梅田浩司・柳澤孝一: 河川水の流量および水質による表層部の地下水流動の推定—岐阜県東濃地域におけるケーススタディー, 応用地質, 36(1), 2~13, 1995.
- 2) 乙間末広・中杉修身: 観測井水質の多変量解析による地下水汚染の状況把握, 水質汚濁研究, 12(2), 105~111, 1989.
- 3) 木方建造・大山隆弘・馬原保典: 圧密型岩石抽出装置の作製と深部堆積岩盤への適用, 応用地質, 第40巻, 第5号, 260~269, 1999.
- 4) 斎藤正明: 地下水の水質類似性から水脈, 流速および流向をさぐる(濃度比マッチング法による地下水の調査), 地下水と井戸とポンプ, 28(8), 13~21, 1986.
- 5) 塩崎功・村上晃生・谷口博幸・川上康博・今井久・稲葉秀雄: 水質・同位体を利用した川浦ダム・川浦鞍部ダム初期湛水時地下水流動調査, 土木学会論文集, No. 579/II-41, 163~176, 1997.
- 6) 嶋田純: 安定同位体による地下水流動解析 実例による新しい地下水調査法 榎根勇(編), (山海堂, 東京), 115~121, 1991.
- 7) 杉崎隆一: 地下水の起源と由来—その化学的考察—, 用水と廃水, 5(11), 1~13, 1963.
- 8) 鶴巻道二: 地下水の水質変化とその解釈, 地下水技術, 35(12), 39~53, 1993.
- 9) 中島重旗・下津昌司・塩崎功・北村孝海・向上拓美: 水質の多変量解析によるロックフィルダム漏水経路の診断—(その2) 第3回湛水時における調査結果について—, 地下水学会誌, 31(1), 19~30, 1989.
- 10) 崎崎昭太: 多変量解析法の水質評価への応用, 工業用水, No. 319, 33~45, 1985.
- 11) 馬原保典: 溶存希ガスをを用いた地下水年代測定法の開発—溶存希ガス地下水調査法の体系化—, 電中研研究報告: U 97052, 1998.
- 12) 馬原保典: 岩石コアを用いた地下水年代測定の試み(その1)—間隙水溶存希ガス測定のための岩石コア採取法の確立—電中研研究報告: U 01035, 2001.
- 13) 馬原保典・長谷川琢磨: スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究(その7)—溶存He濃度と放射性塩素同位体比( $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ )を組み合わせた地下水年代測定法の新たな提案—, 電中研研究報告: U 02040, 2003.
- 14) 水落幸広・窪田亮: 鉱山立坑における坑道水没後の深部地下水環境, 地下水学会(岡山)秋季講演会講演要旨集, pp. 100~105, 1996.
- 15) 水谷義彦・小田松尚: 安定同位体比による富山県庄川扇状地地下水の涵養源および流動状況の研究, 地球化学, 17, 1~9, 1983.
- 16) 水谷義彦・桜井和浩: 安定同位体および化学データによる富山県常願寺川扇状地地下水の涵養源の同定, 京都大学防災研究所年報, 31, B-2, 317~324, 1988.
- 17) 安池慎治: 多変量解析を用いた地下水の混合状況の推定方法の開発—結晶質岩体内の地下水水質データへの適用—, 地下水学会誌, 36(4), 405~422, 1994.
- 18) 吉岡龍馬・北岡豪一・小泉尚嗣: 同位体組成から推定される地下水の流動系について—三島市及びその周辺地域を例にして—, 日本地下水学会誌, 35(4), 271~285, 1993.
- 19) Abu Zayed M.: Bestimmung der stabilen Isotope D und  $^{18}\text{O}$  sowie des effektiven Porewassergehalts von Opalinus-Ton mit der Isotopen-Austauschmethode, *Diplomarbeit, Universität Hiedelberg*, 1999.

(49頁へつづく)

## インターネット技術を活用した モニタリングシステムの現状と展望

しょうじ やすのり  
庄司 泰敬\*

### 1. はじめに

IT技術の発展に伴う世界の変化は著しい。とりわけ、インターネットを手軽に利用できる環境が整ったことから、今や誰でもが情報発信者となり得る。マスメディアが発信する情報の流れとは異なる情報流通経路ができたのである。このような状況は、メリット・デメリットの両方をもたらす。メリットは、マスメディアがカバーできないローカルな情報もその流通経路上に現われてくるということである。一方、デメリットは情報管理が難しくなることである。その情報に誰が責任をもつかが不明瞭になる。風評による損害の発生も起こるかもしれない。いずれの場合にも、情報の受信者側にはその情報を受けてさまざまな判断を行うことに対して、ますます自己責任が求められることには違いない。個人の権利と自由を享受するために、何もかも行政に頼りきりでは限界があることは、数々の新聞紙上で賑わしている事例でも明らかである。どの時代においても、社会は人と人との協力で構成され発展してきたのであり、行政は個人レベルでは解決できない大局的な問題を解決する役を担ってきたからである。しかし、近年のように人と人とのつながりが薄くなると、行政がカバーできない部分でいろいろな問題が起きてくる。これに対して、ある地域では犯罪を減少させるために、地域住民と警察とが協力して防犯体制を組んで相応の効果をあげている例を聞くことがある。このように人間一人一人の力は弱い、互いに協力することによって一人一人の権利と自由を守ることの重要性があらためてクローズアップされている。

技術は、このように人間一人一人の弱い部分を補うために活用されなければならない。その意味でIT技術は、その目的のためにふさわしい技術の一つである。すなわち、IT技術によって受発信される情報が、ばらばらの人間を一つにして諸問題に立ち向かう力を与えてくれる可能性をもっているということである。このことは国民も感覚的に認識している。情報管理が難しいというデメリットを差し引いても、情報の受発信機会を増やすことのメリットの方が大きいという国民の意識が醸成されてきた結果、今日のIT

技術の発展が促進されていると言っても言い過ぎではないだろう。

本邦においては、国家施策によりe-Japan重点計画が打ち出されている。そこでは、「すべての国民がITのメリットを享受できる社会」を目指すことが打ち出されている。情報通信技術が急速に進歩し、インターネットや携帯電話回線等の通信網の整備、端末装置の小型・高機能化がすすみ、誰もが、何時でも、何処からでも、インターネットにアクセスできる環境が整いつつあることは間違いのないところである。

日本はその地質的条件により、世界にもまれな特異な「災害大国」である。いくら自然科学が発展しても地震災害や斜面災害の発生を完全になくすことができない。そこで、対策としては、できるだけ早く起こり得る不安事態を察知して、その情報を伝えることによって被害をできるだけ小さくする対策を講ずることである。近年、具体的な施策として土砂災害防止法や土壌汚染対策法などが相次いで施行された。これからは、国のレベルから、より地域に密接した市町村レベルで地域において発生している（あるいは発生し得る）不安事項を的確かつ迅速に予測・把握し、その情報を関係機関が共有して被害の拡大を未然に防ぐ対策をとることが求められる。

地盤に関わる防災や環境保全においては、地盤をモニタリングする技術とそれを情報として受発信するシステムを構築することが重要になってくる。ここで求められる要求事項は、現場の状況をできるだけ正確に測定し、それを迅速に現場管理者へ伝達し、現場管理者が的確な対応を決定できるように支援することである。

本稿では、インターネットを中心として発展している情報通信技術を、防災および環境保全のためのモニタリング技術に活用することで、経済性・機能性・迅速性を向上させた取り組みについて紹介する。

### 2. 従来技術の抱える問題点とインターネット技術に対する期待

斜面災害を予測・把握するための地盤変状等をモニタリングするシステム（以下、防災モニタリングシステム）や

\* 応用地質(株)つくば技術開発センター所長

水質などの地盤環境をモニタリングするシステム(以下、環境モニタリングシステム)に求められる要件は、現場の異常を検知して、いち早く現場管理者にその事実を連絡することである。次に、その事実をいかにわかりやすく管理者や地域住民に公開することも重要な要件となる。

そのためには、何をもって異常とするのかを判断して、次に、異常事態を検出したら迅速に管理者に通報する即時性が求められる。センサ技術および通信技術の発達により、これまでさまざまな手法が検討されてきた。従来までは、図1(a)に示すように、現場と遠隔地にある監視所の間を専用線で結んでいたが、一度恒久的な観測システムが構築されると観測条件の変化が生じたとしても、

- ① システムの増設・撤収・移設に対する融通性が少ない
- ② 専用回線の維持管理のための費用負担が大きい
- ③ 固定された遠隔監視所以外では状況を見ることができない

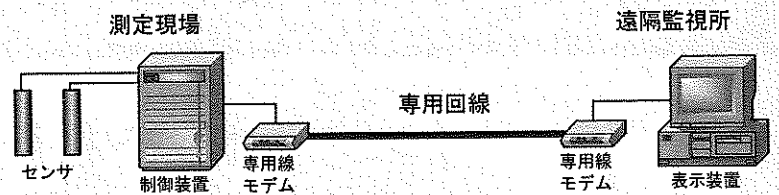
などの理由により、観測システムの変更が必ずしも容易ではない場合があった。

これに対し、若干のリアルタイム性は犠牲になるが、専用回線の持つ問題点を克服したシステムとして、オフライン計測とオンライン計測を融合した方式(図1(b))が実用化されている。この方式では、測定値を記録するデータロガーを現場に配置し、あらかじめ設定された時間間隔で測定値を収録する。ある程度データが蓄積されると、一般公衆電話回線を通じて遠隔監視所にデータを伝送する。

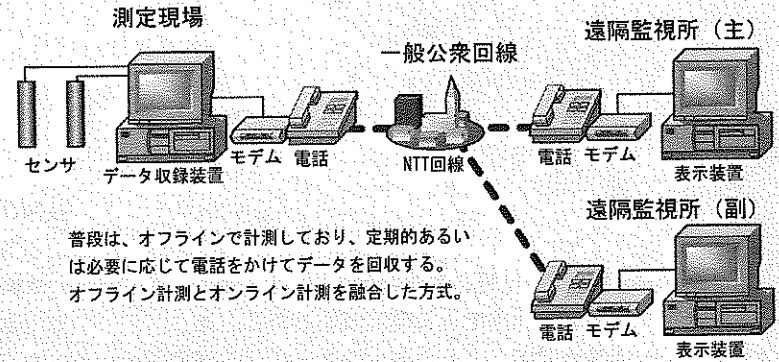
たとえば、10分ごとに測定し、1時間間隔でデータを遠隔監視所に伝送するといったことを行う。また、機能を拡張して、あらかじめ定めた判別値を設けておき、測定値がこれを越えた場合に異常事態と認識して、現場管理者に電話連絡を入れるアラーム機能を付加したシステムもある。このようにさまざまな工夫を凝らし、利便性を高めながら利用されてきたが、遠隔地への接続に電話回線を利用するため、距離や通信頻度(リアルタイム性を向上させるためには究極的には電話回線を常時接続するしかない)の向上に比例して通信コストがかさむなど、「通信」の部分に大きな制約を受けていた。

一方、日本では1993年にインターネットの商業利用が開始され、以降、急速に利用者が増加していった。インターネットは、ホストコンピューターを持たずに、世界各地のコンピューターのネットワークを利用するものであり、効率的な通信経路を選択しながら情報をリレー伝達する。

インターネットを利用して電子メールを使用された方は経験があると思うが、送りたい情報をパーソナルコンピューターで作成して、「ENTER」キーを押して電子メールとして送っても、すぐに相手側のパーソナルコンピューターに届くわけではない。接続のためのいろいろな手順を経て、相手側のメールサーバに電子メールが届く。さらに、情報受信者がパーソナルコンピューターを立ち上げて、メール



(a) 専用回線を利用したオンライン計測システム



(b) 一般公衆回線を利用したオンライン計測システム

図1 従来型オンライン計測のシステム概念図

サーバにメールを読みに行くという行為をしなければ、いつまでたっても電子メールに載せた情報は伝わらない。そのため、専用回線を構築したシステムに比べて、(本当の意味での)リアルタイムで情報を伝達できるという保証がない。

しかし、コストパフォーマンスに優れたネットワークであることは事実であり、その利便性が活かされて、インターネットはその後、JAVAをはじめとするWeb対応型のプログラミング言語の出現、光ファイバー網の整備などによって、高度化、高速化されていった。今では誰でもがインターネットの利用価値を認め、e-Japan戦略の元で、xDSL技術の普及、FTTH (Fiber To The Home) による光ファイバー網の普及、さらには、携帯電話やi-modeに見られるような移動体通信回線網の普及が急速に進み、さらなる高速化、高信頼性の元で、「誰でも、いつでも、どこでも」インターネットを活用できる環境(ユビキタス化)が整った。

防災・環境モニタリングにおいても、これまで制約の大きかった公衆電話回線による通信の部分に、このインターネット技術を活用することで飛躍的に利活用の幅が広がる。元々インターネットは、分散型のネットワークであり、ネットワークの一部が破壊されても有効な経路を探して目的地にたどり着く非常に堅牢なネットワークである。このことは、災害時にも通信手段が確保しやすいなど、モニタリングシステムに合致した通信手段の一つといえる。

防災・環境モニタリングシステムにおけるインターネットの利用目的として、大きく次の2通りの手法が挙げられる。

- ① 情報伝達手段としての利用(図2(a))
- ② 情報配信・情報共有手段としての利用(図2(b))

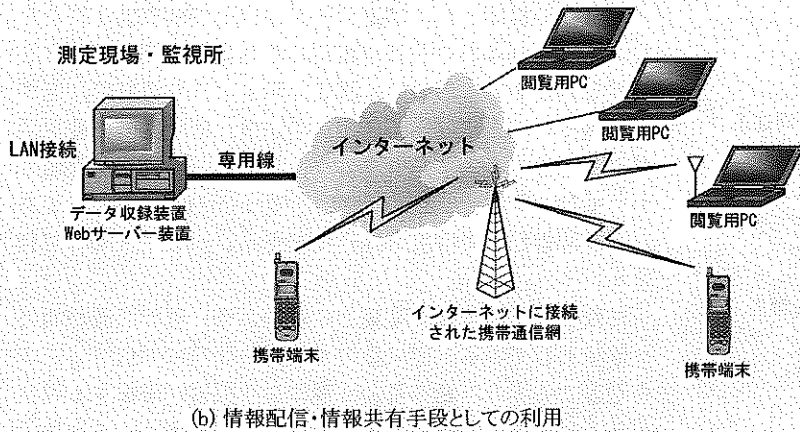
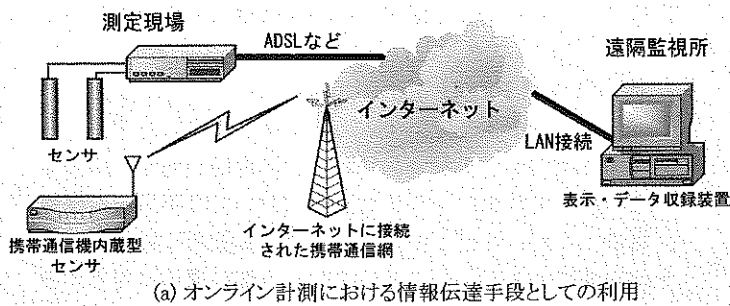


図2 モニタリングシステムにおけるインターネットの活用方法

①は、従来の公衆電話回線利用に代わる利用方法で、測定現場と遠隔監視所を結ぶものである。インターネットを利用する場合、一つの現場に対して複数の遠隔監視所を設けて、一つの監視所で複数の現場を監視することも容易に実施できる。現場測定機器をインターネットに接続する手法としては、ADSLなどの常時接続回線を利用して、携帯パケット通信網(たとえば、NTT-DoCoMo社が運営するDoPa網など)を利用することで容易に実現できる。また、あるしきい値を越えて異常が発生したときに、その内容を携帯電話に宛てたメールでPUSH送信(強制的に情報を端末に送信して表示すること)をすれば、インターネットの弱点であるパーソナルコンピュータを立ち上げてメールサーバーまでアクセスしないと情報を取り込むことができないという問題は解決される。このことにより、現場管理者が監視所にいなくても異常を検知することが可能となる。

②は、全世界に接続されているインターネットを活用することで初めて可能となったもので、測定したデータをどこからでも随時閲覧することが可能となった。日本から離れた外国の地でも、日本で観測しているデータを確認できる。測定したデータは、いったん計測サーバーに蓄積され、図化された後にWebサーバーからホームページ形式で配信する。ホームページにセキュリティを設けて、情報の重要性のレベルに応じて、管理者だけが情報を得られるようにすることも可能であるし、地域住民などを対象に一般公開することも可能である。

ただし、留意しなければならないことは、測定値の一般公開にあたっては、データの示す意味をわかりやすく伝える必要があることである。一般市民は必ずしもセンサーが

感知した物理量の意味はわからない。斜面の動きが〇〇mmであるという情報が、危険な状態なのか否かを判断する術がないのである。

したがって、この類の情報は生のままで外に発信することは危険である。それ故に、情報が外に出るまでの間に、その情報を分析できる行政機関やその委託を受けたコンサルタント会社等が介入する必要がある。介入する機関は、情報の精度を高めるためにたとえば、

- ① センサーが受ける周囲環境の影響を除去し、正確に校正された物理量で真の地盤の状況を表示する
- ② 人為的要因などで生じた異常値を取り除き誤解のないデータに加工する
- ③ 示された値が何を意味しているのか(危険な状態なのか、平常状態なのか)を明確にする

ことは、最低限実施して情報を発信するべきである。

### 3. 防災・環境モニタリングシステムの一例

写真1に示したものはDoPa網を活用した防災モニタリングシステムの一例である。システムは、センサー、ロガー、通信機が一体化されたもので、バッテリーを接続するだけで測定およびデータの送信が開始される。現在、世の中にはカメラ付携帯電話なるものが出回っているが、本モニタリングシステムは、センサー付携帯電話と言えるかもしれない。これは、携帯メールでも使用されている携帯パケット通信網(DoPa網)を利用し、測定データを電子メールで現場管理者に送信する機能を内蔵している。DoPa網を利用することで、一般の公衆電話回線網や携帯電話回線網を利用する場合に比べ、次に示すような利点がある。

- ① 通信料は、通信距離や通話時間に関係なく送信データ量(パケット単位)に応じて課金されるので、一般公衆電話回線や携帯電話を利用するより安価となる。
- ② DoPa網はデータ通信専用回線網であるため、携

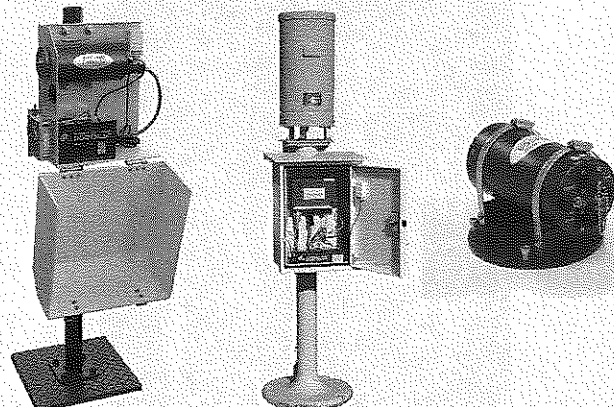


写真1 防災モニタリングシステムの一例(左から、伸縮計、雨量計、地盤傾斜計)

帯電話回線のように回線が集中して輻輳することが少ない。

- ③ 災害時においても回線不通の可能性が低い。
- ④ 通信プロトコルがTCP/IPであるため、インターネット経由のデータ通信に適している。
- ⑤ ワイヤレスでデータを伝送するので、通信回線を設置する労力が省力化されてモニタリングシステムの設置、撤収が容易になる。

本装置の送信データは測定値、測定日時、バッテリー電圧、

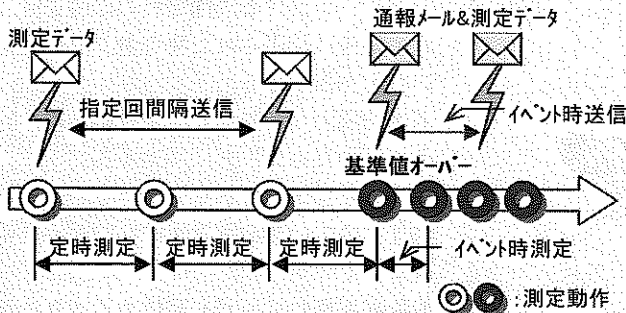


図3 測定と送信の流れ (任意設定可能)

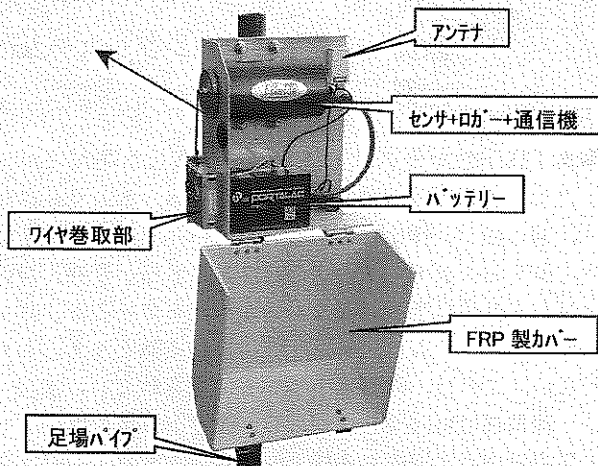


写真2 伸縮計の構成

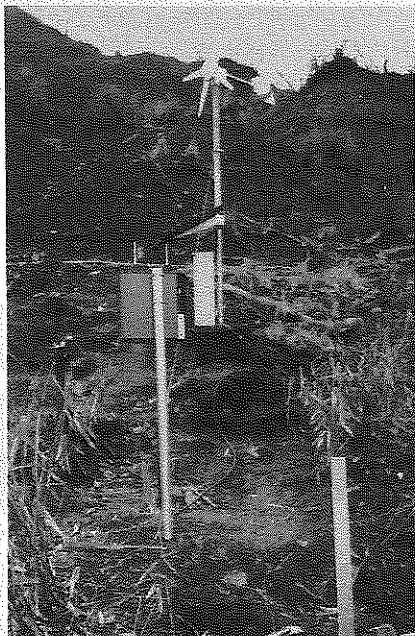


写真3 現場設置状況 (長期観測を行うために伸縮計に風力発電機と太陽電池を組み合わせた実施例)

温度データからなり、電子メール形式による送信を行っている。電子メールによるデータ送信が有効である点として、前述のようにPUSH送信が可能であることがあげられる。能動的に情報を配信するので、ユーザ側よりデータを回収する手間がいらぬ。何時不測の事態が起きるかわからない防災モニタリングシステムにおいては不可欠な機能である。また、測定データは同時に複数箇所に送信することが可能である。このことにより、不測の事態に対応する協力体制がとれやすい。

本装置の機能として測定データの自己判断機能を持たせている。これはあらかじめ設定した基準値と測定データを比較し判断を行うもので、図3に示すような流れで、基準値を越えた場合には通報メールの送信、測定間隔の変更、接点出力などの動作を行うようにしている。判定基準値については、伸縮計であれば移動速度(mm/日)、雨量計であれば時間当たりの雨量(mm)などをインデックスとして判断を行う。

外観形状としては、写真2に示すように現地設置が簡便な構造としている。従来型のように斜面等に通信ケーブルを敷設する場合、誘導雷の影響により機器が破損するケースが多く耐雷器の設置が不可欠であるが、測定データを無線通信で送信することにより耐雷性も増す。現在、測定項目として地盤の伸縮量、傾斜角度、雨量、水位、導電率、pHなどを測定できるセンサが用意されている。

通常このようなモニタリングシステムは、一般の商用電源を使用できない場所に設置することが多いことを考えると、バッテリー駆動で長時間稼働できるように低消費電力設計が施されていることが望ましい。本システムは、DC12V、7.2AH相当の容量をもつバッテリーを使用すると約3か月程度の連続測定が可能であるが、写真3に示すように設置場所へのアクセスが悪く、頻りにバッテリー交換が困難な場所における測定においては太陽電池と風力発電装置を組み合わせて、長期間の連続計測に対応する措置がとられる。

#### 4. データ伝送経路としてインターネット技術を利用するときの留意点

前述したように、インターネットはベストエフォート型のネットワークであり、送った情報が(本当の意味での)リアルタイムに到着するという保証がない。そのため、これをデータ伝送経路として活用するためには、いくつかのフェールセーフ機能を付加させる必要がある。たとえば、インターネットで電子メールを送った場合には、ごくまれにメールが届かない場合がある。このような場合に備えて、

- ① 測定値がしきい値を越えた場合に発信される警報メールは複数回繰り返して発信する。
- ② 定時測定のデータ送信でメール送信エラーが発生した場合、次の送信時に、そのデータも併せて送信する(時系列的に抜けた情報の送信はしないようにする)。
- ③ 本体内部に1か月程度の測定データを保存するメモリを内蔵し、万一の通信障害等でデータを長期

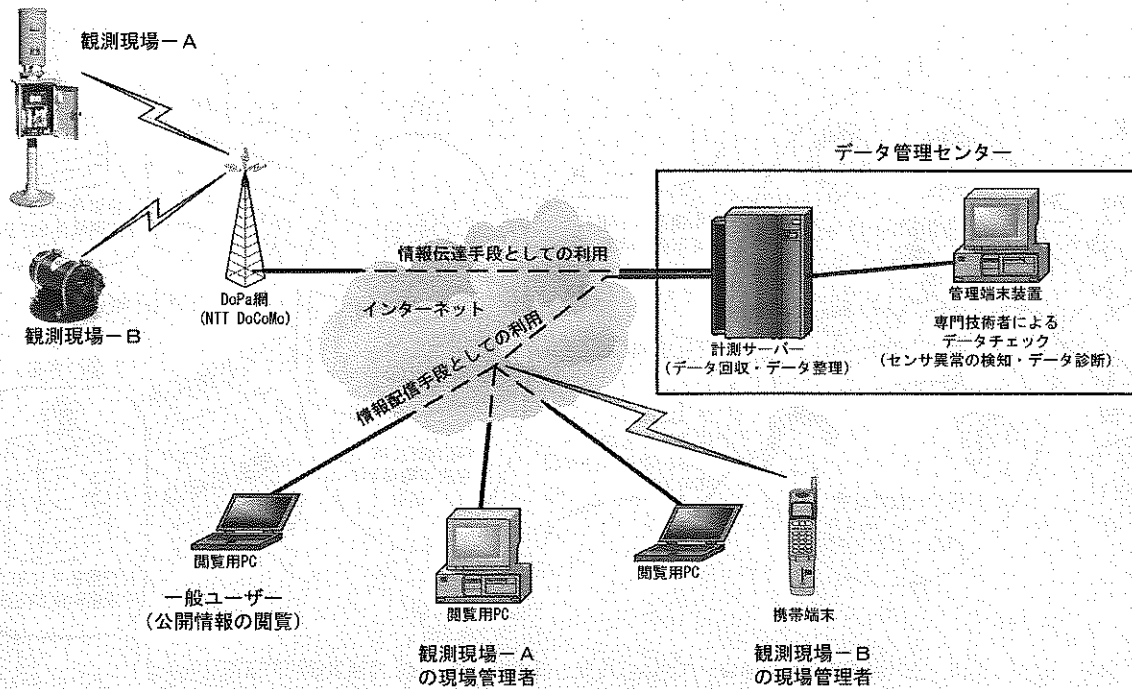


図4 開発したセンサを活用したデータ管理・配信システムの概念図

間送信ができなかった場合にも、欠測を防止する機構を設ける。

- ④ メールの送信先は複数先を設定できるものとし、ある受信側メールサーバーの障害が発生しても、サブのメールサーバーにより受信を行うことができるようにする。

図4は、このシステムの概念図である。これは、インターネットを介して測定データをホームページから確認できる機能を付加した実施例である。ここでは、現場に取り付けられた計測器が取得したデータをいったん計測サーバーに集約する。測定値は、専門技術者によって確認され、経時変化図に情報加工して専用のホームページ上に表示をする。ホームページは、現場ごとに認証レベルを設け、各現場管理者が自分の管理する現場のデータのみ閲覧できるようになっている。現場に設置したセンサーの動作状態の把握と、しきい値を越えるなど危険が予想される状態になったときの最終判断は、管理者が一括実施することでシステム管理を一元的に行う。一方、現場管理の面では、現場責任者が復旧対策などに専念できる。

## 5. 情報公開ツールとしてのWeb利用技術

伝送された情報を公開するためには、わかりやすい形で表現する必要がある。無味乾燥な数値情報の羅列では、その数値の意味するところを読み取るのが困難である。これでは、その情報を公開する意味がない。できるだけイメージとして視覚化することも必要である。インターネットは、

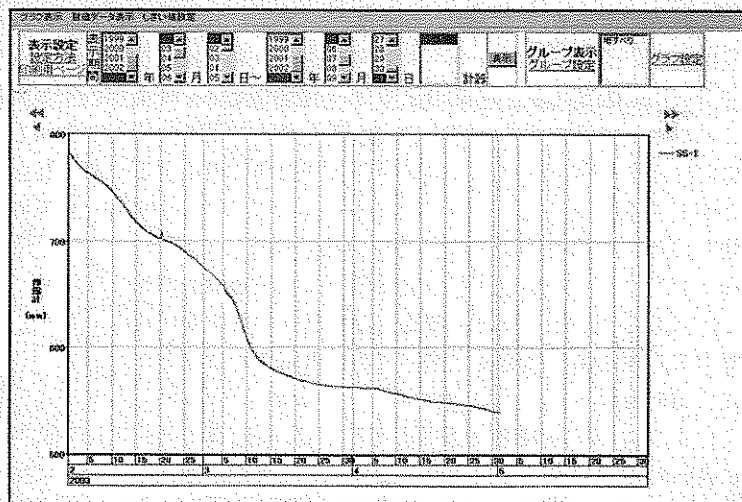


図5 計測データ例 (Web画面からのデータ閲覧状況)

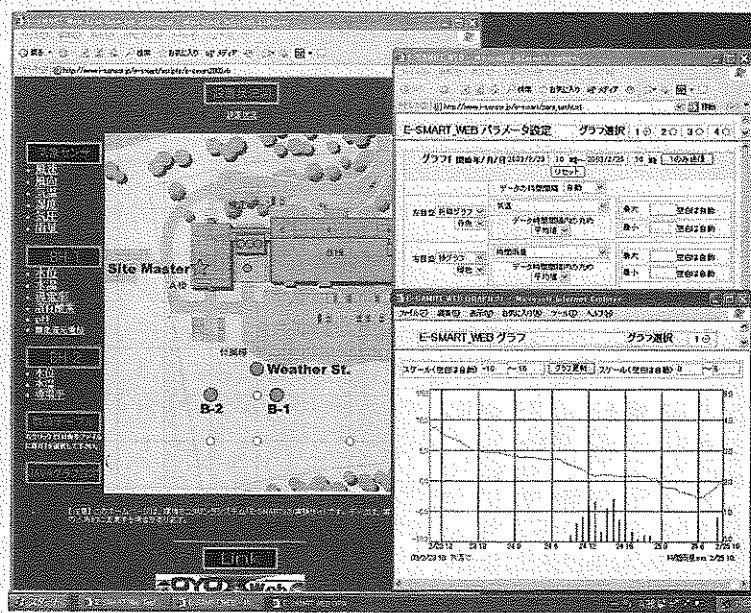


図6 インターネット閲覧用ホームページ例



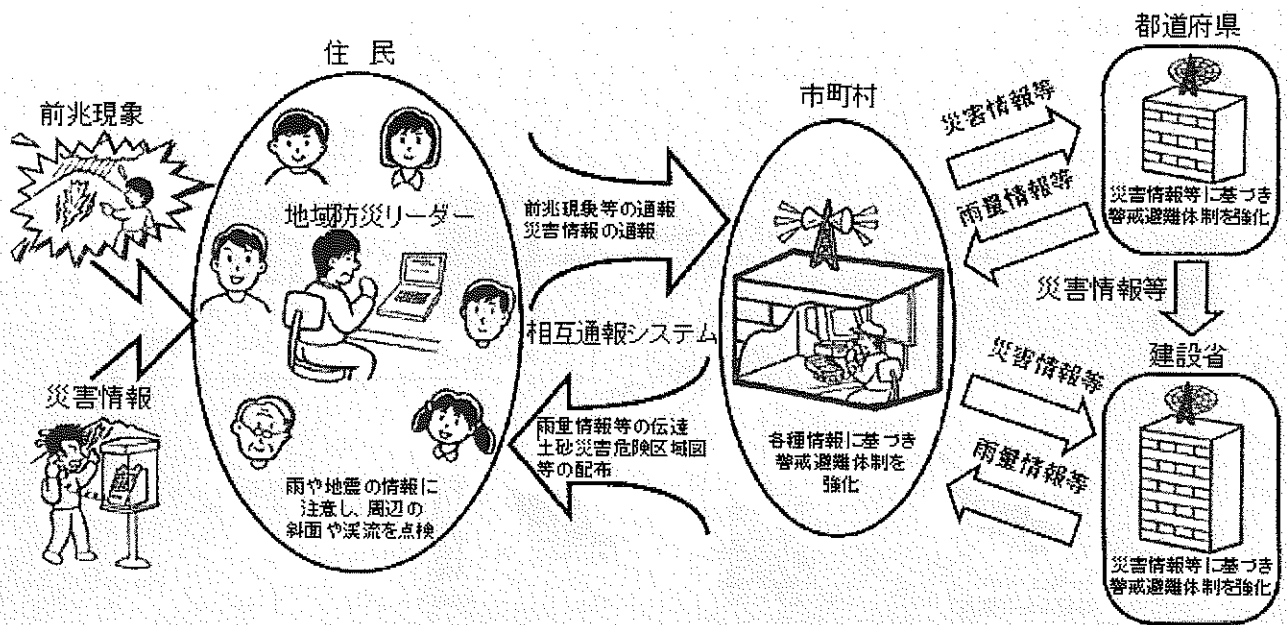


図7 土砂災害情報相互通報システム (出展：日本の砂防 国土交通省砂防部監修)

JAVAをはじめとする Web 対応型のプログラミング言語の出現により、比較的容易にイメージに変換して表示することが可能である。

測定データをインターネットによる Web 形式で表示した場合の例を図5に示す。この例では、地盤の変状を時系列データとして図化すると同時に、任意の期間の累積変位量や変位速度をプルダウンメニューにより簡単に表示することができる。

図6に別の閲覧用ホームページの一例を示す。ここでは、地図とリンクさせて測定箇所の地盤環境の状況を地図情報として表示している。また、閲覧したい箇所のセンサーを選択すると測定値の経時変化図がグラフ表示されるなどが自在に可能となる。

このように、Web 技術を活用することで、受信者のニーズに合った情報の表示の仕方が可能である。実際、観測条件やそれに関係している各機関のおかれている立場の違いで情報の表示の仕方は千差万別であり、標準形が存在しないのが現状である。そして、いろいろな工夫が凝らされている。このような多様なニーズに対応できるという意味でも Web 技術の効能は大きく、これを使った情報公開方法の利点が大きいといえるだろう。

## 6. 情報の相互通報化

インターネットの普及により、従来の行政機関やマスメディアから発信される一方通行の情報伝達から、一般市民がインターネットを通して情報発信者にもなりうる環境が整った。たとえば、国土交通省が進めている土砂災害情報相互通報システム(図7)などにおいて、災害危険地域に生活する人からの身近な情報や些細な状況変化をネットワークで収集することができる。そして、それを活かして防災に役立てることが可能になる。

しかし、留意する点として情報源が多様になればなるほ

ど、発信される情報の質はばらつくということである。行政機関や専門のコンサルタント会社等から発信される情報の質と差異を生じるリスクが存在することを前提にしなければならない。そこで、可能な限り恣意性がある主観情報が情報経路に乗ってくることは避けるために、客観的な情報を送ることができるような制度の構築やルールの設定が必要である。具体的には発信側に、ある認証を受けた防災・環境モニタリングシステムを使用するなどの最低限のインフラ整備を行うことは必要であろう。

## 7. おわりに

今後の課題としては、いわゆる情報弱者と呼ばれる住民に対して、いかにしてこれらの情報を伝達して、また、逆に地域からの情報を発信させるかという仕組み作りである。誰もが簡単に使えるようなユーザーインターフェースをもつ機器を開発して、一般個人でも購入できる程度の安価なシステムを供給していくことも重要である。これは製造メーカー側として努力しなければならない事項である。しかし、それでも補えない部分については、行政からの支援も必要である。官民一体となった社会的取り組みが必要と考える。

そのようにしてはじめて、IT 技術を仲立ちした人と人との新たな協力関係が生まれてくるものと確信をしている。

### 参考文献

- 1) (社)全国地質調査業協会連合会：日本の地形・地質—安全な国土のマネジメントのために—, 2001.
- 2) 野村俊之：Web システム活用の3形態, 日経デジタルエンジニアリング, 2001.4月号, 2001.
- 3) 国土交通省砂防部監修, (社)全国治水砂防協会：日本の砂防—安全で緑豊かな地域づくりをめざして—, 2001.
- 4) 西條雅博・荘司泰敬・佐野康：農業環境保全のための新しいモニタリング技術の提案, 第20回農業土木新技術検討報告会講演集, 2003.

# 地震動モニタリングネットワーク の利活用の現状

ふじ なわ ゆき お  
藤 縄 幸 雄\*

## 1. はじめに

昨年2003年は、5月26日の宮城県沖の地震、7月26日の宮城県北部の地震、9月26日の十勝沖地震と、大規模な地震が頻発した特異な年であった。特に十勝沖地震は、マグニチュード8.0という海溝型の巨大地震であった。幸い地震の大きさに比較して、被害が少なかったものの、精油所火災の発生、特急列車の脱線、ライフラインの寸断など、さまざまな被害が起きた。

来年は阪神・淡路大震災の10周年となる節目の時である。この災害を契機に、日本における地震防災の取組みが抜本的に変化した。その最大のものは、地震に関する調査・研究が法律で定められ、長期的・組織的に行われるようになったことである。基盤的観測網が世界でも例を見ない規模・密度で整備され、そのデータが研究技術開発に公開されるようになったことは、地震防災科学技術の発展のうえで画期的なことであり、地震防災の発展の基盤を提供し、今後ますます有益な成果を生むことは疑いない。

これらの観測網が主として地震の調査・研究という観点から整備されたにもかかわらず、その高性能・高機能性の故に、直接的な防災対応を含め多方面な利活用にも使用できる可能性を有している。近年リアルタイム地震情報による利活用が急速に発達しており、新しい地震防災のツールとして注目を集めている。本稿では、地震防災上の利活用に係わる地震動観測網とそれによる利活用、なかんづく研究開発の枠を超え広く国民レベルでの利用に焦点をあてて、その現状につき略説する。

## 2. 地震動観測網

地震観測網は、鉄道、電力、ガスなどの企業、自治体などが、地震防災のために整備している。しかし、国民レベルの利用は、国で整備された観測網からのデータによっている。すなわち、気象庁によるものと、地震調査推進本部によるものである。ここでは、それらに限定して、その概要を述べる。

### 2.1 気象庁強震波形観測網

気象庁では、防災関係機関、国民の地震・津波防災に有効な情報の提供を行う目的で、地震観測網を整備運用している。その一環としてのデジタル強震波形観測網は、ほぼ20kmを基本とした全国メッシュのうち約600カ所（気象官署約150カ所、都市部約130カ所、郡部約140カ所、津波地震早期検知網の観測点約160カ所、機動観測点約20カ所）の観測点からなる。地震計は、95型震度計が使われている。

95型震度計の諸元は、以下のとおり。

- ・観測成分：NS, EW, UD
- ・観測成分：NS, EW, UD
- ・測定範囲：±2048 gal (DC~41 Hz)
- ・データ：100 Hz, 24 bit
- ・観測成分：NS, EW, UD

波形データは、気象庁本庁、管区气象台、沖縄气象台のいずれかに集められ、さらに気象庁本庁へ集約される。ほとんどの震度計は、専用線で結ばれており、リアルタイム情報の活用に適している。また、動作確認が毎日行われ、メンテナンスが定期的になされ震度計の基本性能の維持が図られるなど、利活用の運用条件を高いレベルで満たしている数少ない観測網と言える。

1995年の阪神・淡路大震災以後、それまでに整備された震度計の機能強化が図られるとともに、都市部などでは新設がなされた。それらの震度計は、同一仕様の波形観測・収録機能を有している。

### 2.2 基盤的観測網

阪神・淡路大震災の後成立した地震防災対策特別措置法によって、地震調査研究推進本部が地震についての総合的な調査観測計画を策定した。その一環として、基盤的調査観測が整備されている。地震の発生を理解すること、地震防災に役立ちうる情報を得ることを目的としたものである。調査観測の推進にあたっての設定された課題は以下のとおりである。

- ① 地殻活動：
  - ・地殻活動の現状把握と評価
  - ・地震発生域の地殻構造の理解

\* 特定非営利活動法人リアルタイム地震情報利用協議会

- ・地震の発生過程の理解
- ・長期的な地震発生ポテンシャルの評価

② 強震・津波

- ・強震動の即時把握
- ・地盤構造の理解
- ・強震動の予測
- ・津波の即時的な把握

その目的を達成するため、以下の観測網が整備されている：

- ① 陸域での高感度地震観測（微小地震観測）、
- ② 陸域での広帯域地震観測、
- ③ 地震動（強震）観測、
- ④ ケーブル式海底地震観測、

以下、その概要を示す。

(1) 陸域での高感度地震観測

高感度地震観測網の目的は以下のとおり、

- ・内陸地震の震源・発震機構決定精度の向上
- ・地震断層の把握

これにより、地殻活動の総合的な評価を行い、プレート・地殻構造の解明、地殻応力の変化などの知見を蓄積としている。内陸地震が、地殻上部の15~20 kmより浅いところに発生することから、観測点間隔はその深さ程度と決定された。現在の観測点数は、約800カ所で、文部科学省・防災科学技術研究所が整備し、気象庁と協同して運営している（図1参照）。

地震計はノイズを避けるため、深さ約100 m~2000 mの観測井の孔底、地下の基盤に設置され、掘削井ボーリング時に地震波速度などの地盤データ調査がなされている。地震計は3成分（上下、東西、南北）で、27ビット100 Hzのデータが取得されている<sup>2)</sup>。信号は、増幅後テレメータ送信装置に送られ、中央局にフレームリレー方式で伝送される。現在約2秒の遅延時間というほぼリアルタイムで伝送されている。高感度・高密度であるため、防災対応の利活用にも十分答えられる性能を有している。

(2) 陸域での広帯域地震観測

広い範囲の周波数の地震波を計測できる観測網で、小地震（マグニチュード3クラス）以上の地震の発震機構や震源過程の解明を目的としている。観測データの解析により、断層運動の把握、プレートや地殻構造の解明を行うとしている。応用面では、断層の破壊方向を即時に把握して被害予測に用いること、津波地震の検知と解明に使うことが期待される。観測網は、断層の破壊過程把握を行うため、震源を取り囲み地震の直達波を検知するように、水平距離で約100 km間隔を目安として整備されている。観測点数が約70点である。

地震計はほとんどが奥行きは数十mから百数十mの横穴に設置されている。地震計は、

STS 1, STS 2が使われている。地震の高周波震動から、非常にゆっくりとした振動まで、広い周波数範囲の記録ができる。すなわち、見かけ上数100秒の固有周期を持つ地震計で、最大測定範囲が200 kine、ダイナミックレンジが146 db、周波数特性は0.012~70 Hzとなっている。

(3) 地震動（強震）観測（KiK-Net）

強震計は、防災科学技術研究所、気象庁、国土交通省、地方自治体等により、全国に数千箇所設置されており、さらに鉄道、ガス、電気、建設会社等の民間においても多数の強震計が設置されている。しかし、大多数の強震計は、地表設置であり地下の基盤での観測網が整備されていなかった。地下の基盤での観測を行う強震計による観測網（KiK-Net）は、地震動の強さ、周期および継続時間と空間分布の把握、震源域の詳細な破壊過程の解明することを目的としている。また、地盤の応答特性、地下の不均質構造の把握を行い、地震動の予測にも活用するとしている。KiK-Netは、Hi-Net地震計に併設され、地表および地下の基盤に設置されている。最大計測範囲2000 gal、固有周期は30 Hzとなっている。測点数は、現在ほぼ800点。Hi-Net同様のデータ伝送ができるようになれば、リアルタイム

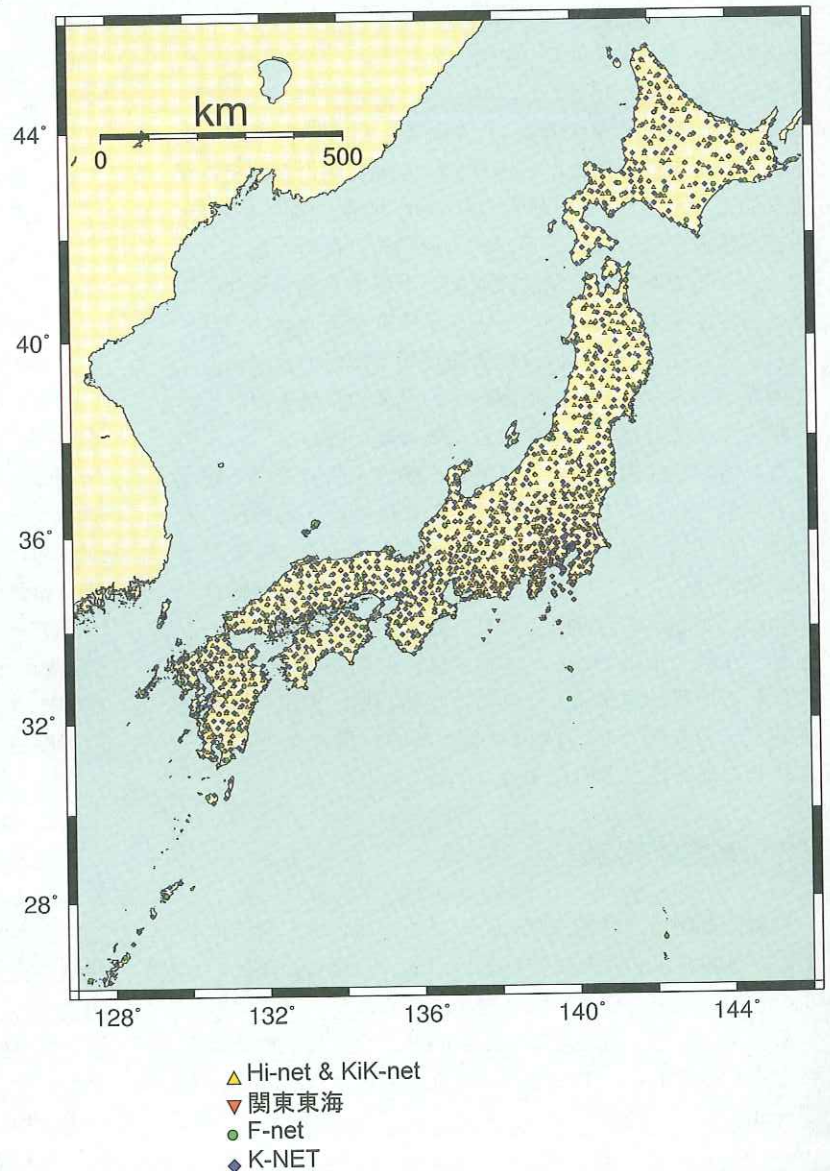


図1 高感度地震測定網（岡田，2001）

ムでの利活用に幅広く使える。

#### (4) ケーブル式海底地震観測網

日本における被害地震の多くは、海域のプレート境界付近に発生している。海域の地震活動を把握するため、海底に地震計を敷設し、また、津波現象の解明・予測の高度化を図るため、津波計を併設したケーブル式海底地震計を設置することとしている。

ケーブル式海底地震計は、現在のところ気象庁、防災科学技術研究所、大学、海洋科学技術センターにより整備されている。気象庁が御前崎沖(4点)・勝浦沖(4点)、大学が伊東沖(3点)・三陸沖(3点)・伊豆小笠原(1点)、防災科学技術研究所が相模湾内(6点)、海洋科学技術センターが室戸沖(2点)・釧路沖(3点)と、合計8システムが展開されている。防災科学技術研究所が整備した相模湾等のケーブルシステムでは、固有周期4秒の速度型高感度地震計とともに各測点に強震計も設置され、さらに3点では津波計も取り付けられている。

最近の例では先の2003年十勝沖地震(マグニチュード8.0)の際に震源地の近くで、海洋科学技術センターが整備した海底地震計で見事な地震波形をとらえることに成功している。陸上と同様に、20 km程度の間隔、広帯域、広ダイナミックレンジの観測システムを配置することが望ましいが、整備は順調とは言い難く抜本的な取り組みの必要がある。

#### (5) 強震ネット(K-NET)

阪神・淡路大震災で十分な地震記録を得られなかったことに鑑み、全国を平均25 km間隔で均質に覆う強震観測網が建設され、Kyoshin Net(K-NET)と呼ばれている。平成8年6月から観測が開始され、データは全国1,034カ所の地表に設置された地震計によっている。

地震計は、広ダイナミック・レンジの加速度型デジタル強震計で、収集・編集されたデータはインターネットで内外の地震研究者・自治体などに公開されている。気象庁発表の速報震源を強震記録のファイルに付加して発信している。

現在更新中で、新型地震計では、観測点での自動送信機能によって迅速化を図り、計測震度計算機能を有するなど、従来課題とされていた点の改善が図られるものと期待されている。さらに、計測最大加速度を4000 galに引き上げ、長周期成分取得を目的にダイナミックレンジを132 デシベル(db)に向上すると期待されている。

#### (6) その他のネットワーク

このほか、国レベルでは港湾地域強震観測網など、自治体レベルでは北海道・横浜市・広島市など、地域コンソーシアムでは関西地震観測研究協議会(CEORKA)ネットなど、がある。さらに企業の防災対策・耐震設計高度化を目的とした地震観測網と共に、JR各社のユレダス地震計網、東京ガスのSIGNAL、SUPREMEの為のネットワークが整備・運用されている。

### 3. 観測網データの利活用

#### 3.1 地震情報、津波予報・情報

津波地震早期検知網、震度観測網データは、全国6カ所

の津波予報中枢にリアルタイム伝送され、震度速報、津波予報、津波情報、地震情報などの発表・把握に使われる。防災関係機関の地震防災の初動体制は、気象庁から発表される震度情報を基に決められることになっており、地震防災、津波防災上、最も基本的な情報のもととなるデータを、これらの観測網が支えている。

#### 3.2 即時的地震情報

いわゆるリアルタイム地震情報伝達に関する研究は、地震発生直後から数時間あるいは一日位までの時間帯において、地震情報を極力早く提供することにより、自治体や企業の防災に役立てることを目的として、1990年代から活発に行われるようになり、阪神淡路大震災の教訓も手伝って一部の地方自治体や企業体でも導入の試みがなされてきている。実用化されているのは、主として、大地震発生後の強震計データに基づく、被害予測に限定されている。JR各社で実用化されているような、地震波到達前情報を使うような活用は、実用化されていない。

これまで地震では多くの被害に見舞われてきたが、それらの中には、即時地震情報が適切に使われておれば、被害を防ぐあるいは減少させることができたものもあると推測される。この部分では、即時的情報活用に係わる開発の現状を述べる。

##### (1) ナウキャスト地震情報

気象庁では、ユレダスで採用されている1観測点のデータから震源を推定する方法を発展させた手法によって、即時的震源情報を配信する計画が進行している<sup>3)</sup>。その観測データは、全国180カ所の気象庁津波地震早期検知網の観測点に設置されるナウキャスト対応型地震計によっている。平成14年度補正予算による80地点(主に東海地域、東南海・南海地域を対象)で整備が行われ、引き続き、東北・北海道など残りの地点に設置される予定となっている<sup>4)</sup>。

1観測点のデータから震源を推定する方法<sup>5)</sup>では、震源の位置を絞り込むために、ある観測点には地震波が到着しているが、他の観測点には到達していないという観測事実も併用され、観測点が1あるいは2観測点にのみの場合には、2つの方法を組み合わせて震源が推定されている。

地震波が到着した観測点が3点になると、震央は、0.1度ごとにグリッドサーチで探索する。また、深さ方向については過去に地震が発生した深さと仮定し、震源の候補を探す。ナウキャスト地震情報における震源推定は、観測点数が5になるまで続ける(図2)。マグニチュードは観測された地震波のP波振幅(地動変位)によって算出する。

##### ナウキャスト地震情報の内容

ナウキャスト地震情報は、震源やマグニチュード、予想される震度を含んだ「予測報」と、実測値「実況報」からなる。実況報は、10秒間の計測震度(10秒震度)である。直下型地震では、揺れた事実だけが報じられることもある。その後、地震波検知観測点が増えるごとに震源再計算を行い、新たに求められた震源やマグニチュードの変化量が決められた数値以上の場合に、更新報が発信される。

津波に関する情報提供について、現行3分程度かかって

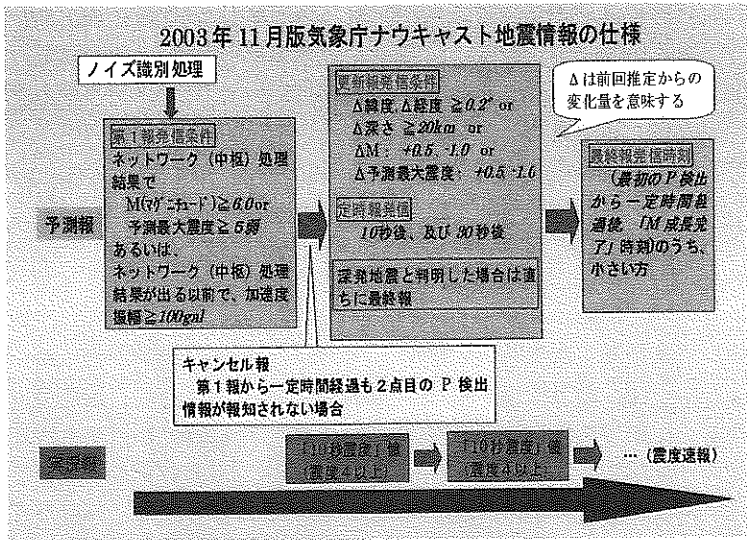


図2 気象庁ナウキャスト地震情報の概要

さまざまな分野の専門家に検討を踏まえ、ナウキャスト地震情報の実用化と全国展開を図っていくこととしている。

## (2) リアルタイム地震情報

防災科学技術研究所では、1995年の阪神・淡路大震災以降、地震調査研究推進本部の計画に基づき、防災科研が全国規模で地震観測網のデータを多角的に活用する一環として、2001年よりリアルタイム地震情報の伝達・活用の研究プロジェクトが実施されている。全国規模の地震観測網によるデータを地震災害軽減のためにリアルタイム地震情報活用システム(REIS)の開発を行い、その実証的研究を行っている。

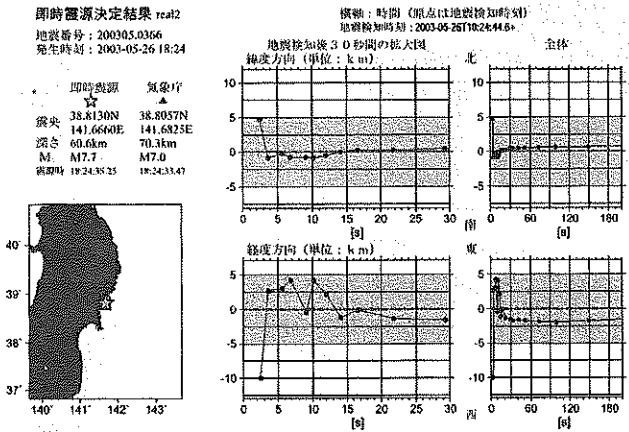
リアルタイム地震情報としてまず活用しようとしているのは、高感度地震観測網(Hi-Net)<sup>2)</sup>を使った震源情報である。地震波が最初の観測点に到達してからできるだけ速くかつ正確に決定し、民間の協力を得てユーザーに伝達し、必要とする機関・個人それぞれの防災活動に利用してもらうためである。解析・伝送・活用システムのプロトタイプを平成13年度および14年度当初で開発し、中規模自治体である藤沢市において産学官コンソーシアムにより、実証的研究が行われている。

また、多様な防災対応活用システムについては、リアルタイム地震情報利用協議会も協力して、その分野別に検討が行われている。解析システムに関しては発震機構解、断層モデルなども順次追加して、幅広い活用方法の開発・試験を行う計画となっている。即時的に震源決定するための新しいアルゴリズムでは、従来地震波が検知された時刻データのみを用いていたのを、それ以外の観測点に未だ到達していないと言うことを積極的に利用されている<sup>5,6)</sup>(着未着法)。これは、新たに開発されたアルゴリズムの出現とともに、観測点密度が20~25 km間隔という高密度であるからこそ実用化されたことであり、量から質への転換が図られた顕著な例と言える。

解析アルゴリズムは、震源決定結果の評価に基づき、段階的に改良されている。シミュレーションにより予想されたとおり、最初の観測点で地震波が検知されてから、2秒ぐらいから震源が決まりはじめる。一般に時間とともに、逐次検測する観測点が増え、そのたびに震源の再決定がなされ、ほとんどの場合時間とともに精度の向上した結果が出力される。

図3は2003年5月26日に発生した宮城県沖で発生した地震(M7.0)の即時的決定の様子である。最初の観測点にデータが到達した時刻を時刻のゼロとしている。図からわかるように、約2.5秒後から震源が決定され始めている。気象庁で決定されれば3日後に発表される震源情報との差が示されている。一応定めた許容範囲を $\pm 5\text{ km}$ としているが、緯度方向は最初からこの幅に入っている。また、約1秒後の2度目の解では、1 km以内の差となっている。経度方向は、若干誤差が大きいですが、それでも、2番目の解から許容範囲に入っている。深さ、マグニチュードは、精度の確保の難しい量であるが、図からわかるようにそれなりに

### 宮城県沖の震源決定状況(1)



### 宮城県沖の震源決定状況(2)

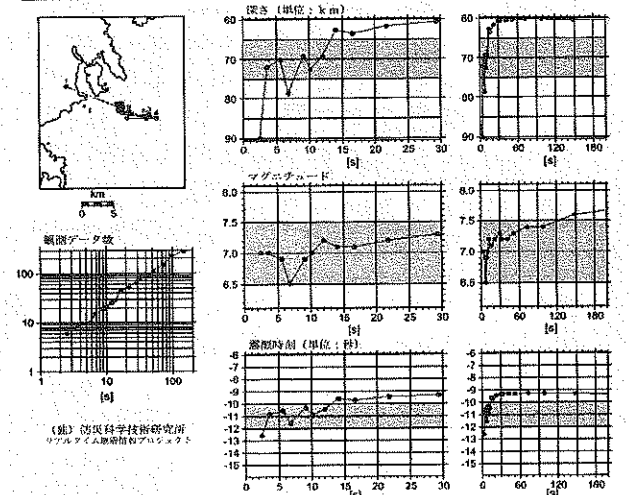


図3 リアルタイム震源決定の例

いるものがナウキャスト地震情報を活用することで30秒程度に短縮される可能性はある。

具体的な活用方策の検討を各ユーザーの実相実験を参考にして行うとされ、ナウキャスト地震情報が活用されるものとするため、広報・情報名称・配信形態等について、さ

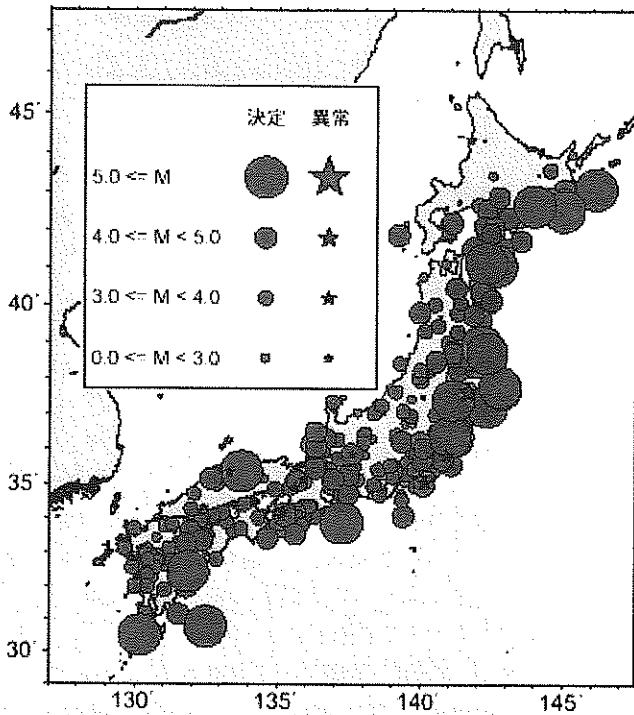


図4 即時震源決定結果。評価期間は2002年7月から2003年2月まで。評価対象は、気象庁で有感地震とされたもの。検知率は、 $496/508=0.976$

良い精度が得られている。ただ、観測点数の時間経過の図からわかるように、このケースでは、やや深発であったことから、最初の解から6点のデータが用いられていたため、浅発地震の場合より良い結果となったものである。

即時的に決定した震源情報では、① ノイズを地震と誤認したり、② 地震の見逃し、③ 決定パラメーターが正解から大幅に異なる、などの不具合のケースが少ないながらある(図3参照)。研究・研究開発によって、順次精度を高める努力は、継続的に行っている。一方で、不具合は観測網からくる内在的原因によるものが多く、その改善は海底地震観測網などの整備によって図られるべきものである(図4)。

1秒フレームごとに地震波が到着しているかをチェックし、あらたなデータがあれば、震源の計算を直すようになっている。逐次的に求まる解の精度の変化を図5に示す。気象庁発表の解との差の平均(白丸)とばらつき(バー)を表す標準偏差値を示している。上から、震源時、緯度、経度、深さ、マグニチュードを示す。横軸が計算回数で、点線は、暫定的に定めた許容限界である。平均値は、第一回目の解からすでに許容範囲に入っている。ばらつきは、ほとんどの場合、回数とともに小さくなり、精度は当然ながら向上する。このような、データを参考にして、防災対応システムの設計・運用を行うことになる。

地震の規模を表す量として、マグニチュードがある。その定義としては、モーメントマグニチュードを採用している。断層面の破壊は、ほぼS波速度で進行するため、マグニチュードの決定は、破壊が終了してからになる。マグニチュード6程度の場合には破壊終了までほぼ3秒なので、第一回目の解の時点ではほぼ最終マグニチュードとなっているが、たとえば昨年(2003年)の十勝沖の巨大地震では、M=

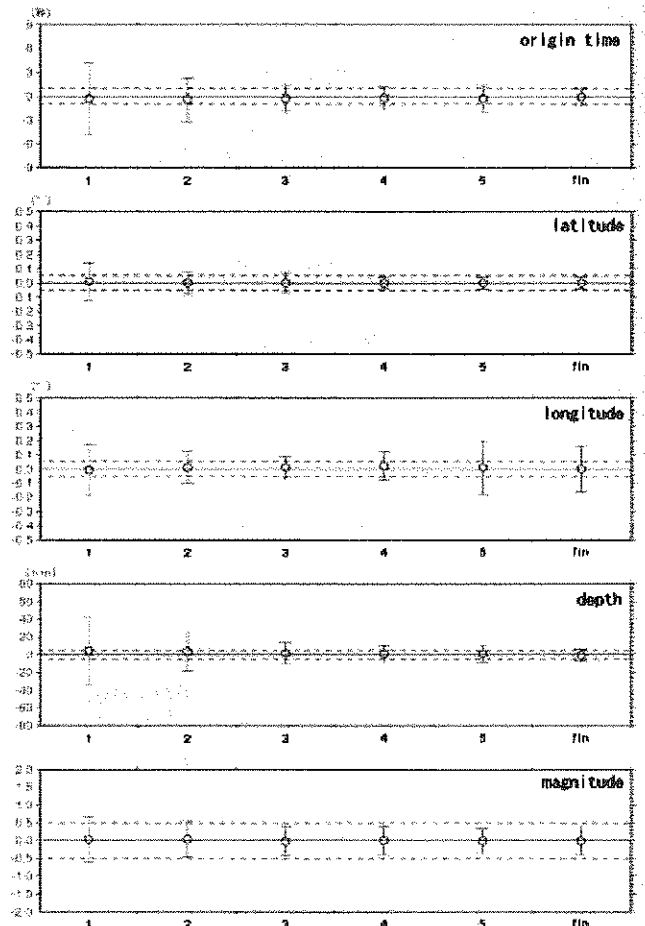


図5 即時的震源決定の継続的統計誤差。気象庁のオフライン発表結果との差の平均値と標準偏差。

0.0 (6秒後), M=1.5 (7秒後), M=5.0 (8秒後), M=6.5 (10秒後), M=7.0 (11秒後), M=7.5 (13秒後), とほとんど単調に増加した<sup>9)</sup>。このような特性を考慮すると、マグニチュードの時間的推移を把握して、活用することが望ましいようである。

### (3) 統合化即時情報

前2項に見たように即時的地震情報の開発が、気象庁、文部科学省・防災科学技術研究所で平行して行われていた。試験的な配信によって、実用化の見通しがかなりあること、さらに東海・東南海・南海道・宮城県沖などの地震の切迫性が指摘されている現在、少しでも早く即時的地震情報を活用して、防災力を強化する必要が認識されてきた。そのため、文部科学省、気象庁、防災科学技術研究所では平成15年度より「高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト(以下{LP}と略称)が開始された。以下その概要を紹介する。

高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクトでは、防災科学技術研究所はじめ気象庁、各大学が整備してきた地震観測網を活用される。防災科学技術研究所が開発した震源情報決定システムをもとにして高度化し、これらの情報をユーザーに試験的に配信して、実証実験を行い、実用化を図ることを目的としている(図6)。この研究においては当面即時的情報、すなわち主要地震動到着前情報の活用が主体になるが、実利用の段階では主要地震動到着後の情報についても積極的に活用することとなっている。

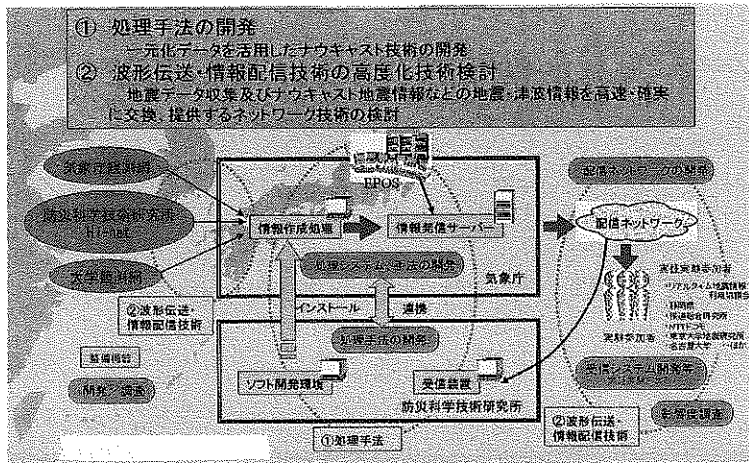


図6 統合化システム開発およびデータ流通の概要。防災科研は観測網から得られるデータから即時的地震情報を導き出す手法の研究開発を行い、それを気象庁と連携して配信システムを開発し、気象庁から当分試験的に情報を発信して実証実験等に用いる。

表1 分野別プロトタイプの開発一覧

		システム通信	
(0)	0	即時的地震情報のデータベース化の研究	
(1)	1	消防防災職員に対する消防初動体制支援システムの開発・研究	○
(2)	2	防災現場関係者に専用防災無線を用いて安全確実に伝達するシステムの開発・研究	○
(3)	3	医療関係者向け災害時広域医療救護活動支援システムの開発・研究	○
(4)	4a	家庭内制御ネットワーク向け自動防災システム(情報家電)の開発・研究	○
	4b	家庭内制御ネットワーク向け自動防災システム(IP電話)の開発・研究	○
(5)	5	発電所・工場プラント向け防災システムの開発・研究	○
(6)	6a	特定利用者向け公衆移動通信を活用したリアルタイム地震情報の通信システムの開発・研究	○
	6b	屋外作業者および屋外レジャー用リアルタイム地震情報提供携帯端末の開発・研究	○
(7)	7	学童および学校職員のためのリアルタイム地震情報を用いた防災教育支援システムの開発・研究	○
(8)	8	既設ダムの即時地震被害予測と2次災害防止のための警報システムの開発・研究	○
(9)	9	リアルタイム地震情報活用のためのFM文字多重チューナーの開発・研究	○
(10)	10	リアルタイム地震情報と連動させた2次災害防止のための家庭内LPG自動遮断システムの開発・研究	○
(11)	11a	リアルタイム地震情報と連動させた災害防止のためのエレベータ制御装置の開発・研究	○
	11b	リアルタイム地震情報と連動させた災害防止のためのビル設備の中央集中監視装置の開発・研究	○

このプロジェクトは大きく分けて「地震波波形処理と提供の研究」、「受信側の基礎データシステム開発」、「利活用に関する実験・調査」の3つに分けられる。

a) 地震波波形処理と提供の研究

- 地震波波形処理迅速化の研究：観測網などから集められる地震波形データをもとに即時処理し、震源位置、地震の規模（マグニチュード）等の正確な情報を短時間の間に提供することを目的とする。また破壊過程、断層の位置や長さなどを短時間の内に決定する技術の開発も進める。
- 地震情報収集・処理・提供システムの開発：観測データを短時間にしかも低コストでデータを収集し、解析・処理情報をユーザーに短時間でしかも高信頼度、低コストで配信するシステムを開発する。
- 地震情報解析システムおよび地震動作確認システムの開発研究：業務として即時的地震情報を気象庁から迅速かつ高信頼度で配信するシステムの開発。

b) 受信側の基礎データシステムの開発

地震動の正確な予測のため、詳細な地盤データが必要。過去に集められた地盤データに基づくデータベースを構築。

c) 分野別利活用の研究・開発

利活用研究では、即時的地震情報を受信してさまざまなニーズを持つユーザーに対する緊急防災対応システムのプロトタイプ開発を、文字通り産学官連携の体制で実証的に行われている。必要なタイミングで必要な情報を伝達する環境整備に資する開発も併せてとりくまれている。

この実証的調査・研究開発では、11分野の14テーマを対象とし、分野別に調査・研究を行うこととなっている(表1参照)。開発課題は、期待される成果、全体システムの構築への貢献などを勘案して選択された。また、初期の目的を達成するために、利用分野別ごとに大学・研究所・行政機関・関連業界などの学識経験者をメンバーとしたワーキンググループ(WG)を設置し、技術的課題の選定、システム開発の仕様検討、開発されたプロトタイプの検証評価、普及促進に向けての標準化などにつき調査・検討されている。

協議会としては、委託業務に係わる開発の他、会員企業・機関自体の研究開発も推進しており、意欲有る企業などと連携して新たなリアルタイム地震情報の利活用の開発・普及にも努めている。

研究開発の概要は以下の通り。

1) データベース

利活用の研究、特に分野別利活用の研究・開発は揺籃期にあり、今後継続して研究成果、技術情報を蓄積する必要がある。研究・開発者間でこれら技術情報を共有すれば、研究・開発の効率化が図られると共に、相互に有効利用して、重複開発などが避けられると期待される。また、分野に共通する部分の開発を行って、利活用方法の普及に役立てる。

## 2) 地震防災対応システムの開発

地震防災対応システムとしては、以下に記す10テーマを実施する(表1参照)。

- |               |             |
|---------------|-------------|
| ① 消防署対応システム   | ② 医療対応システム  |
| ③ 情報家電対応システム  | ④ 学校対応システム  |
| ⑤ プラント等対応システム | ⑥ LPG対応システム |
| ⑦ 屋外活動者対応システム | ⑧ ビル設備対応    |
| ⑨ エレベータ対応システム | ⑩ ダム対応システム  |

たとえば医療対応システムでは、リアルタイム地震情報を即時的に得ることにより、医療従事者の安全確保、手術時の不測事態の回避、広域医療救援のための初動体制の早期確立を図る。また、通信が輻輳する前の安否確認および呼集が、より確実に行えるようになる。

## 3) データ伝送方式の開発

データ伝送方式の開発としては、次の4テーマを対象とする。

- ① 防災無線対応システム
- ② IP電話対応システム
- ③ 公衆移動通信対応システム
- ④ FM文字放送対応システム

なお、新たなデータ伝送方式の開発を行うのではなく、既存のデータ伝送方式にリアルタイム地震情報を乗せるために必要な開発を行う。FM文字放送対応システムでは、既存のFM放送により配信し、多数の特定ユーザーに情報伝達ができることを目指している。

## 3.3 その他の活用

本研究においては即時的、すなわち主要地震動到着前情報の活用が主体になるが、破壊過程や断層の位置、長さなど、現在解析等に時間がかかりすぎて活用しにくい情報についても解析時間の短縮を図るなど、幅広い利活用に向けて一層の進展を図るものとされている。これにより、被害推定、津波予測の高速化が図られるとされている。また、波形のリアルタイム活用のニーズがあることから、その実証実験・データ配信の検討も期待されている。

## 3.4 実用化への課題

リアルタイム地震情報の開発に携わって、丸3年が過ぎようとしている。情報解析、データ配信、観測体制など、実用化にあたっての問題点が明確になると共に社会のニーズにつき、防災関係機関、一般企業、個人の各層にわたって、生の声を聞くことができた。生命にかかわる情報だから軽々しく出すべきではない。少しでも誤りがあるような情報を出すこと自体が問題であるなど、考え方が多様であることは、事実である。それをどうとらえるかであるが、私は問題のない範囲、すなわち、情報の限界を承知して、それでも活用したいというユーザーにはすみやかに利用できるよすべきであると考えている。並行して、利用希望者の危惧を解消するべく、それぞれの機関が努めるべきである。すなわち、次のような課題の早急な解決がなされる必要がある。

1. 海底地震観測網の全国海域整備
2. 観測網の運用・保守でのリアルタイム活用対応化
3. データ伝送遅延時間の短縮
4. 情報配信の高信頼度化
5. 実運用の規準決定
6. 多様な通信媒体の整備

一定の範囲で実用化すると共に、上に挙げた課題を解決して、情報の確度を向上させ、地震国日本において現実的かつ有効な新たな防災システムが普及するよう関係者のご理解・ご支援を願いたい。

## 4. 結語

リアルタイム地震情報のニーズの調査の過程で、地震波到達までの余裕時間がせいぜい10秒数であることに、失望される方が多かった。それでも、使い方によって大きな減災効果があることが、概ね理解されたことは事実である。観測網などによって決まる制限をできるだけ早く除去しあるべき効能が発揮できるよう努めるべきであることは言うまでもない。一方で余裕時間をより長くする、すなわち、地震予知の実現に向かって、真剣な努力をしなければならぬことも事実である。

東海地震の予知に関する情報の発信が昨年改訂され、観測情報が出されるということになった。その情報の確度については、議論があるかもしれないが、いったんこのようにいわば白黒でなく「グレイ」情報が出されたときに、どのように対処すべきかということが、新たな課題となる。注意情報の根拠となったデータを注意深く、収集・解析することはもちろんであるが、その他、次の手段、すなわち何時地震がきても良いような準備をとることが、最も現実的な方法である。リアルタイム地震情報が使えなかった以前には、じっと息を潜めて何時来るか知れない地震を待つ、一定の時間のあと解除されるまで待つと、いうことしかできなかつたが、今や、リアルタイム地震情報を頼りにして、一定の社会活動を維持するというマニュアルが考えられるのではないかと。

なお、本稿を書くにあたって、地震調査推進本部、気象庁、防災科学技術研究所のホームページなどを基にした部分があります。

## 参考文献

- 1) 川上徹人：気象庁における強震波形観測・収録と提供地震学会ニュースレター、9号、No.6、7-9、1998。
- 2) 笠原敬司他：Hi-Net(2)：地震観測施設の整備、地震学会講演予稿集、p.5、2000。
- 3) 宇平幸一：気象庁のナウキャスト地震情報について、第3回国土セイフティシンポジウム、1-3、2004。
- 4) 東田進也他：P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法、地震、2004。(印刷中)
- 5) 堀内茂木：リアルタイム地震情報の高度化に向けて、第3回国土セイフティシンポジウム、15-19、2004。
- 6) Horiuchi, S., Negishi, H., Abe, K., Kamimura, A. and Fujinawa, Y.: Development of an Automatic Processing System for the Earthquake Alarm Broadcasting, BSSA, 2004。



# 人工衛星による地表面変動モニタリング技術の現状

くず おか しげ き  
葛 岡 の 成 樹  
みず 野 と し み  
水 野 敏 実\*\*

## 1. はじめに

宇宙から地球を観測するリモートセンシング技術が近年いよいよ実用化され、幅広く利用されるようになってきた。リモートセンシング、とくに人工衛星を用いたリモートセンシングには「広域を一度に観測できる」、また「同一箇所を繰り返し観測できる」という2つの利点がある。

リモートセンシングのこの2つの特徴を活かして、地盤の変動がモニタできれば土木・防災など各分野に有効な情報が提供できる。たとえば大規模な地すべりが発生した場合、地すべり前の人工衛星画像と地すべり後の画像を比べることにより、被災範囲の推定が可能である。人工衛星の場合はどこが被災したかがまだはっきりしないとき、広範な撮影範囲全域をチェックして被災箇所を特定してその後航空機調査または現地調査を行うなど、第一次調査として有効である。

さらにリモートセンシングでは、宇宙という高いところから地表面を一望するというだけではなく、人間の目では見えないデータを取得し、有効な情報を抽出することができる。とくにマイクロ波を用いた能動センサである合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) は人間が目で見るとは全く異なったデータを収集できる。

## 2. 合成開口レーダ

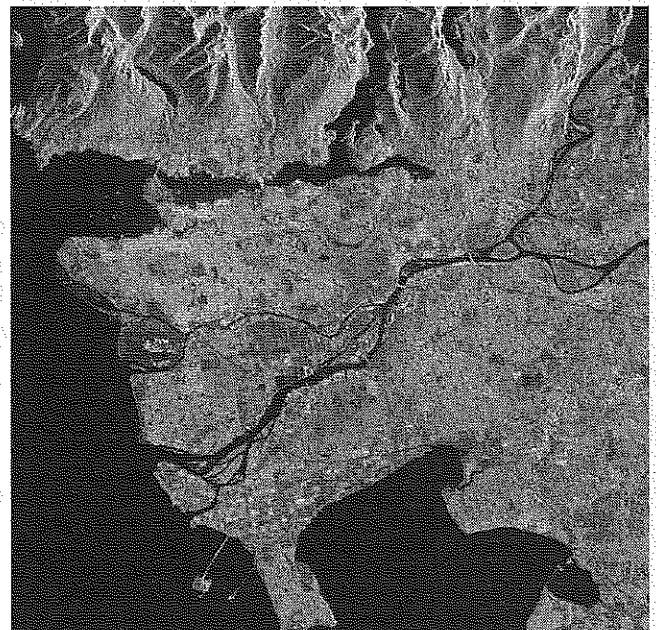
SARは衛星からマイクロ波を照射して、地表面からの反射波を衛星で受信して画像化するセンサである。マイクロ波は雲を透過するので、SARは雲があってもまた夜間でも画像データの取得が可能である。

SARではたとえばCバンド(周波数5.3GHz、波長5.6cm程度)やLバンド(周波数1.275GHz、波長23.6cm程度)のマイクロ波を使用する。太陽光の反射を見ている通常の光学センサと異なり、SARではこのマイクロ波の反射特性を画像化している。すなわちSARの画像は衛星から照射したマイクロ波が再度衛星に向かって反射する強さの

比率(後方散乱係数)を表現しており、直感的な地球表面の画像とは異なっている(図1)。SAR画像で明るい箇所はマイクロ波としての後方散乱係数が高いところである。たとえば山地においてSARマイクロ波の入射方向に対向している斜面は、同じ表面特性であったとしても衛星方向に反射する比率が水平面に比べて大きいいため、明るく見える。逆に地表面のラフネス(細かな凹凸)や水分含有量によって後方散乱特性は異なるので、この性質を利用して対象物を判読することが可能である。

## 3. SARインタフェロメトリ

SARの反射波の強さ(明るさ)ではなく反射波の位相の変化に着目した技術がSARインタフェロメトリ(SAR Interferometry: InSAR)である。SARは衛星上から位相の整ったマイクロ波を放射するので、地表で反射して後に受信したマイクロ波の位相を正確に計測することにより地



RADARSAT-1 © Canadian Space Agency/Agence spatiale canadienne, 2002

Processed and Distributed by RADARSAT International.

図1 SAR画像の例(カナダ バンクーバ)

\* (株)イメージワン

\*\* 応用地質(株)

表面の変動情報が取得できる。

InSAR では地表面の変動を波長 (Cバンドでは 5.6 cm) の 1/10 以上の精度で計測できるので、地表の mm オーダの変動をモニタすることができる。精密に地表面の変動を二次元的に観測できるため、InSAR は地震前後における地表面変動、火山活動による地表面変動などの観測に使用されている。

InSAR による地表面変動計測の原理を以下に示す。まず図 2 に示すように第一回目の観測では衛星とターゲットとの往復距離が  $L$  であったとする。同じ箇所を次に観測するときに、地表面の沈下のためこの往復距離が  $L+d$  に微小変化したものとする。この 2 回の観測で得られた反射波を図 3 に示す。いま 2 回の観測の間にターゲットが全く変動しなかった、すなわち  $d=0$  とする。この場合 2 回の反射波の位相は全く同一で波形の山と山、谷と谷がかさなる。このとき 2 つの反射波を干渉させて得られる干渉波の振幅は最大となる。2 回の観測の間にターゲット位置が変動し、 $d$  が大きくなると、2 回の反射波の位相が徐々にずれ、干渉波の振幅が次第に小さくなっていく。2 回の観測の間に  $d$  がちょうど SAR の半波長分だけずれたとする。この場合反射波の山と谷、谷と山が重なり、干渉波の振幅はゼロになってしまう。このように 2 回の SAR 観測の間に衛星-ターゲット間の距離がどれだけ変化したかにより、干渉させた波形の振幅が大きく変動する。たとえば Cバンド SAR の場合波長は 5.6 cm であるから、2 回の観測の間に 2.8 cm の変動を最大検知可能である。逆にこの干渉波の振幅を精密に計測することにより、2 回の位相差すなわち mm オーダのターゲット位置変動を計測できる。

このように精密に地表面変動を計測できることを利用して、InSAR はたとえば地震前後の地表面変動をモニタするのに用いられている。図 4 に InSAR を用いて地震前後の地表面変動をモニタした例を示す。この例では 1995 年 10 月 1 日に発生したトルコ南部のディナール市の地震 (マグニチュード 6.1) 前後 (1995 年 8 月 13 日と 1996 年 1 月 1 日の 4.5 カ月の間) に取得した 2 枚の SAR 画像を InSAR 処理した干渉波画像を図左下に示している。干渉波画像が縞模様となっているのは、地表面の変動が半波長 (2.8 cm) 変動するごとに干渉波の振幅が最大・最小を繰り返しているからである。この縞は同じ変動量を示している等変動線であるから、この縞から 2.8 cm ごとの等変動線を抽出して見やすいように光学センサ (LANDSAT) 画像の上に重ねた図が図 4 の右上画像である。この図を見ると地震のために生じた地表面変動を 2 次的にモニタできており、この等変動線が円形ではなく東西方向に発達した形であること、すなわちその方向への断層によるズレが生じていたことが分かる。

しかし InSAR 技術を用いて地表面変動を計測しようとすると以下の課題のため、成功すれば精密な計測ができるものの必ずしも計測に成功するとは限らない。

- a) 用いるシーンの組み合わせ
- b) 大気による位相変動
- c) 植生などターゲットのゆらぎによる位相変動

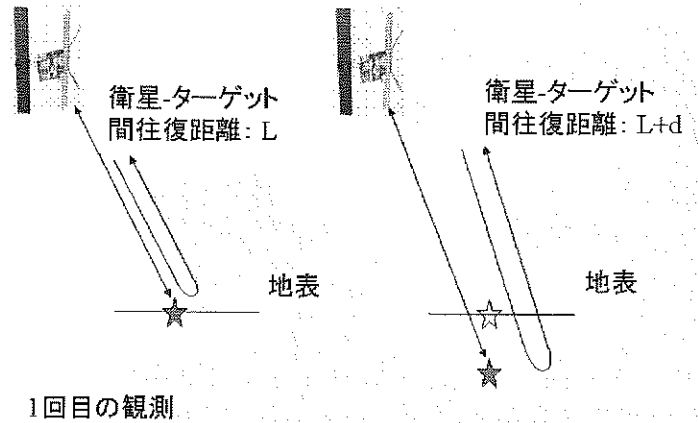


図 2 InSAR による地表面変動計測原理

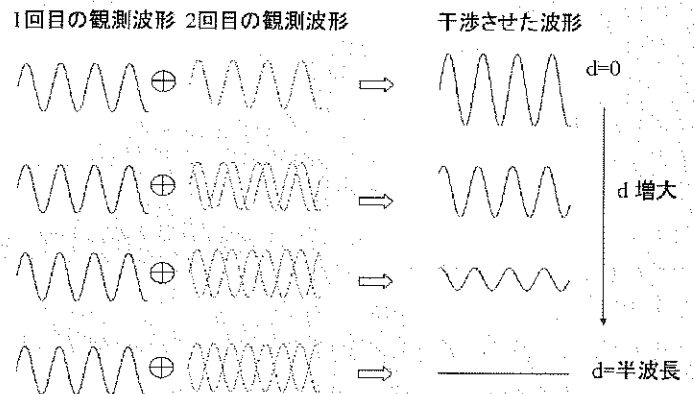


図 3 地表面変動によって得られる干渉波形

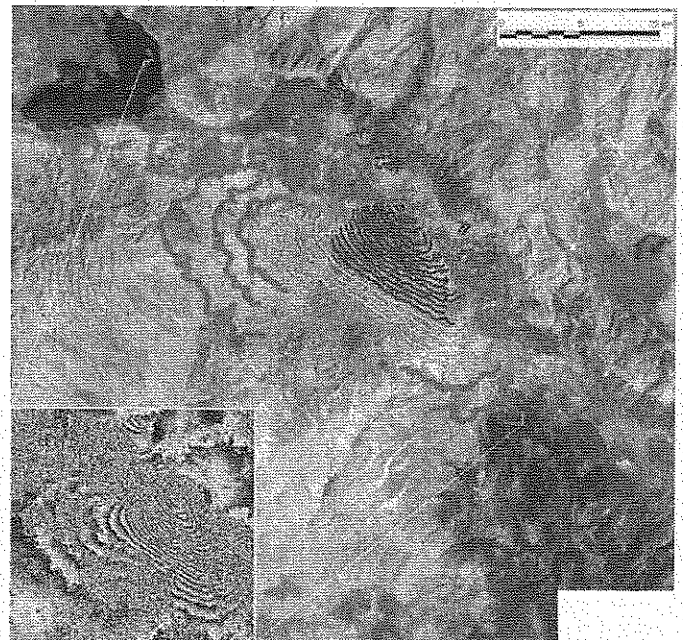


図 4 InSAR による地震前後の地表面変動計測

課題 a) は、SAR 画像を干渉させるための 2 回のデータ取得時の衛星軌道間距離にある制約があり、その制約内でない SAR データが干渉しないことによる。課題 b) は、大気中の水蒸気が SAR 電波の位相を変化させてしまいノイズとなることによる。また最後の課題 c) は 2 回の SAR データ取得において計測すべき対象が変動してしまうことによる。とくに SAR 電波が地表面の植生によって反射・吸

取られて実際に計測したい植生下の地表面まで到達しない場合、植生の形状のゆらぎがそのままノイズとなり、実際に計測したい地表面変動を捉えられない。日本は大気が湿潤で植生に覆われている地域が多く、乾燥して植生の乏しい海外の砂漠地帯などで成功した InSAR による計測手法をそのまま適用しようとしても困難なことが多かった。

#### 4. PSInSAR

PSInSAR (Permanent Scatterers InSAR) は上記の InSAR の課題のうち a), b) を解決して正確な地表面変動を安定して計測する技術であり、Permanent Scatterers InSAR の名前が示すように恒久的な散乱点 (PS) にのみ着目して InSAR 処理を行う。PSInSAR は、特に都市部において面的に地表面変動を求めることができ、かつ各地点での地表面変動の時間変化を計測することができるという特徴を持つ。

PSInSAR では恒久的な散乱点すなわち数年間にわたって散乱特性が安定している点 (PS) にのみ着目する。具体的には PS としてはビルのように SAR の電波を強力にかつ安定して散乱する点を選択される。このような PS では数年間にわたって反射波の位相を安定して精密に計測でき、地表面変動を精密に計測できる。都市部においてはこのような PS が 200~300 点/km<sup>2</sup> 以上の密度で取得でき、これらの点における地表面変動を求めると実際的には面的に変動の分布を求めたこととほぼ同様の結果が得られる。また PSInSAR では PS における地表面変動を (時系列として) 求めることができる。たとえば過去 10 年にわたって蓄積されている SAR データを用いて PSInSAR 解析すると、PS における過去 10 年にわたる地表面変動時系列が得られる。新規に水準測量や GPS 計測を開始する以前の変動も、蓄積されている SAR データがあれば、過去に遡って地表面変動を計測することができるので、変動が始まった時点・変動速度の変化した時点などを知ることができる。

PSInSAR の概念的な原理を図 5 および以下に示す。

PSInSAR では、同一箇所を異なった時刻に観測した同一モードの SAR 画像を多数準備する。これらのシーンを精密に位置合わせした後、全シーンにわたって安定して強力に散乱している点を PS 候補 (PSC) として選定する。各 PSC における衛星-地表面間視線方向距離 (LOS 距離) 変動の時間関数 (PSC ごとに 1 次元関数) や大気による位相変動の面的 (2 次元的) 大気モデル (シーンごと)、使用した DEM からの誤差 (時間に対して一定、2 次元) といったモデルを多数構築し、各 PSC 上で計測した干渉ペア分の位相データの挙動を最もよく説明するように、逆問題として各モデルのパラメータを推定する。このモデルを計測データに再度適用し、PSC としてできるだけ多くの点を抽出するように最終的な PS、および各 PS 点における LOS 距離の時間変動を求める。

PSInSAR を用いて都市部地盤沈下を計測した事例を図 6 に示す。計測対象地域は神奈川県横浜市新横浜駅周辺であり、図中左の真中に黒く流れているのが鶴見川である。

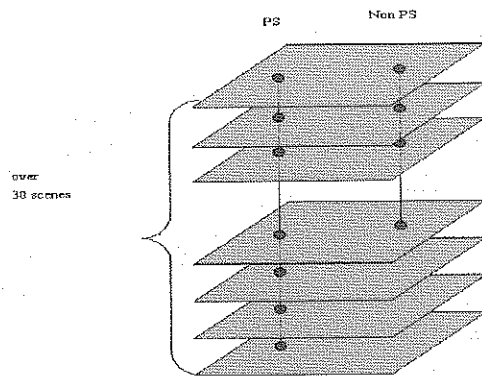


図5 PSInSAR の原理

この解析にはヨーロッパ宇宙庁 (ESA) が打ち上げた人工衛星 ERS-1/2 の 1995 年~2000 年の SAR 画像を 29 シーン使用している。図中白丸の箇所は横浜市が水準測量により地盤沈下計測を毎年実施している新横浜計測点であり、この点において PSInSAR の結果と水準測量の結果を比較したものが図中右のグラフである。この 6 年間の地盤沈下は時間に関してほぼ直線的に進行しており、PSInSAR では 1.71 mm/year、水準測量では 1.80 mm/year と 1 mm/year 以内の精度で沈下速度が求められた。この他の計測事例を総合すれば、都市部における PSInSAR による地表面変動計測では 1 mm/year 程度以上の精度が十分達成できているものと考えられる。

#### 5. 東海地震リスクアセスメントへの適用

PSInSAR 技術を用いて都市部地盤沈下だけではなく、プレート運動や火山活動によって生ずる地表面変動を精密に計測したいという要望が高まってきた。図 4 で地震によって生じた地表面変動を計測したように、従来 InSAR による地表面変動計測では地震等による大規模な地表面変動の前後における変動量が計測されてきた。しかし防災および地震工学の観点からは大規模な地震に伴う変動だけではなく、地震以前にどのような地表面変動が生じるのかを精密にかつ面的に計測したいという要求がある。とくにプレート運動や火山活動による地表面変動を定期的に計測しておけば、地殻構造のモデル構築において重要な情報となり、防災・リスク管理に有用である。このような要望を実現するには、広域かつ面的に、精密に、また時系列として変動を計測できる PSInSAR 技術が有効と考えられる。たとえばプレート運動を面的にモニタすればプレートの引き込み状況の面的分布がわかり、各地で蓄積されているエネルギーを推定することができる。プレート型地震ではこの蓄積されたエネルギーの開放が生じるので、蓄積されたエネルギーを面的に把握しておくことがリスク管理に重要である。またプレートの沈み込みを時系列的にモニタすることにより、沈み込みの状況変化すなわちプレート運動状況の変化を早期に検知することも可能である。

このリスクアセスメントの例として、ヨーロッパ宇宙庁 (European Space Agency: ESA) に対して筆者らが実施

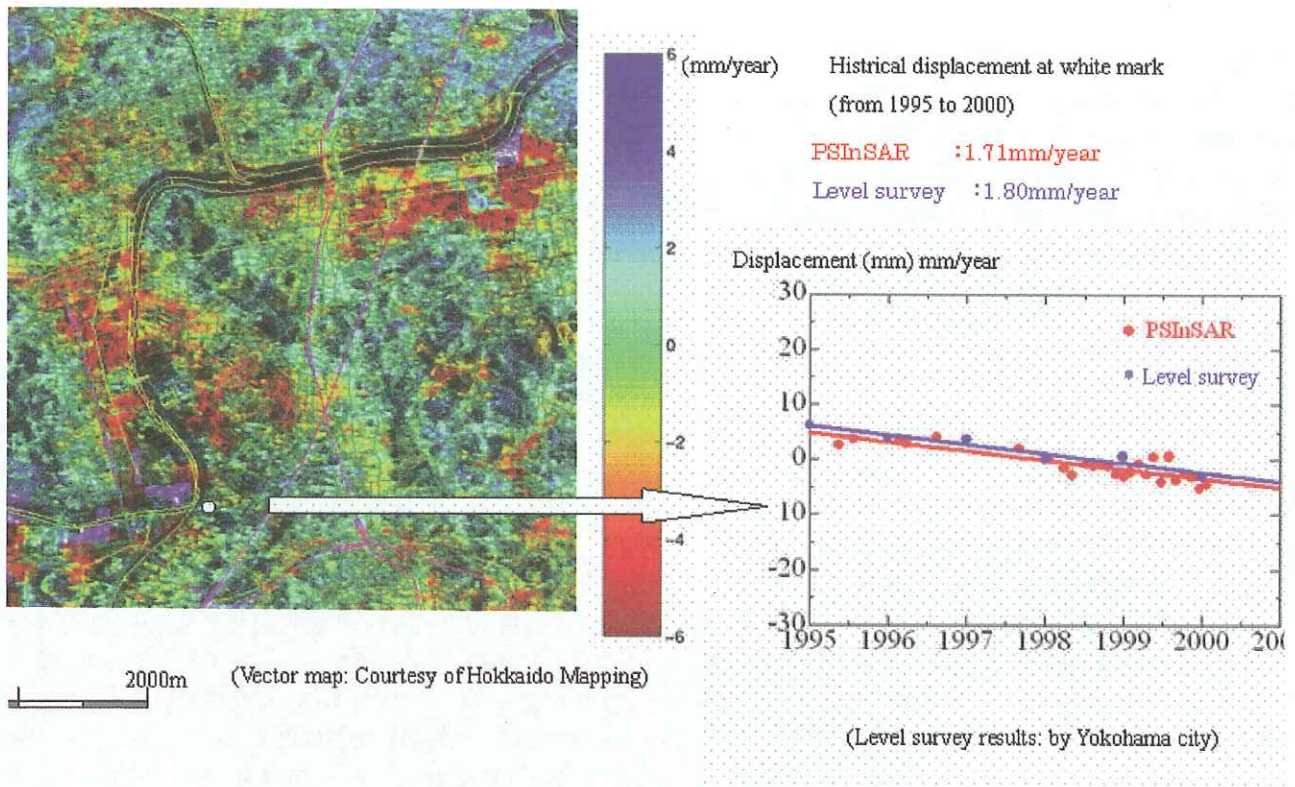


図6 新横浜周辺 PSInSAR 計測例

した東海地震リスクアセスメントのための研究成果を示す。ESA は「民間市場向け地表面変動精密モニタ技術開発計画」の一環として、「地球観測に基づく地表面変動解析の地震リスクアセスメント市場開発」なる研究 (略称: PSIGN) を 2001 年から開始した。この研究は ESA と民間企業が研究費用を出し合って進める共同研究である。共同研究者としては PSInSAR の開発元であるイタリア Tele-Rilevamento Europe (略称: TRE) と英国 Nigel Press Associates 社 (略称: NPA), 結果の地質の評価のために英国地質調査所とインペリアルカレッジ, 民間マーケット開発の観点から英国の保険会社 Willis が参加し, 日本からは (株) イメージワンが参加した。

研究開始後 1 年間で, 東海地方を中心とした PSInSAR 計測結果を得, 地表面変動の分布および水準測量成果と比較した結果を図 7 に示す。この図の上部は PSInSAR により計測した地表面変動の面的分布であり, 1992 年から 2000 年までの 9 年間の地表面変動 (LOS 距離変化) が一定速度であるとして平均的な変動速度を求めたものである。なおこの計測の場合, PSInSAR の基準点として図中の星印の箇所を不動点として設定し, 全ての計測結果はこの点に対する相対的な変動として示されている。この不動点は静岡県三方原台地であり, 第四紀洪積世の礫質赤・黄土土を主体としている。ここは地表面変動の絶対値が小さく, プレート引き込みが著しい御前崎などからできるだけ離れて PS が取得できる点として選定した。御前崎を中心とする地域が赤くなっているのは, この地域で衛星-地表面間の距離が大きく伸びていることを示している。この地域で地表面変動がすべて鉛直方向と仮定すれば, この御前崎の動きは地表面の沈降に対応する。また図 7 の下部には浜岡町

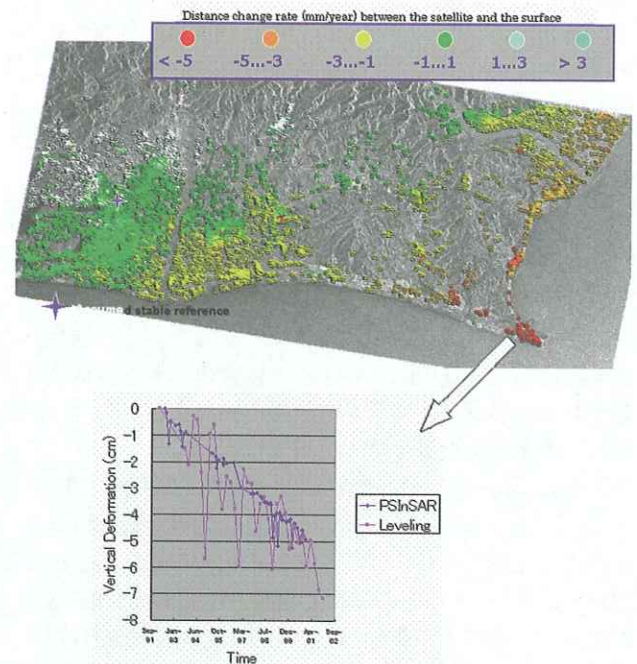


図7 PSInSAR による東海地方計測例

(国土地理院水準点番号 2595) における国土地理院の水準測量結果と PSInSAR による計測結果を時系列として比較したものである。なおこのグラフでは地表面変動はすべて鉛直方向であると仮定している。これらの上下変動が一定の速度で進行すると仮定して直線で近似すると, PSInSAR の計測結果は 5.5 mm/year となり, 直線との近似度は  $R^2 = 0.95$  であり, また水準測量は 5.9 mm/year の変化で,  $R^2 = 0.63$  となった。この浜岡町の水準点での上下変動には年

周変動が認められており、これを考慮せず直線で単純に近似したために水準測量結果の直線への近似度が低く、また一方この PSInSAR の解析では PS の変動を元々全て時間について線形であるとして解析したので直線への近似度が高くなっている。この研究はさらに今後2年間継続し、PSInSAR 結果のさらなる検証とリスクアセスメント市場への適用性の検討を行っている。

伊豆半島周辺のテクトニクスは伊豆半島を乗せたフィリピン海プレートが駿河トラフと相模トラフからユーラシアプレートの下に沈み込んでいる (subduction zone) とされている。このフィリピン海プレートの沈み込みに伴い、上部のユーラシアプレートが共に引きずられて変形している。この両プレートは固着域と言われる部分で接合しているが、沈み込みによる変形が極限に達すると固着域がはがれてユーラシアプレートが跳ね上がり東海地震となる。こうした PSInSAR による地表面変動計測結果は、このユーラシアプレートの変形速度分布を示しており、御前崎先端の浜岡町など各 PS 点における沈降の時間的な変化とともに、この地域におけるテクトニクスを検討するため、既存の水準測量や GPS 測量を補完する有効な情報であると考えられる。

## 6. 岩手山周辺への PSInSAR の適用

1998年9月3日に発生した岩手県内陸北部地震 (マグニチュード 6.1) に伴い、岩手県葛根田川周辺に活断層による地表面変動を PSInSAR 技術で計測した。まず各 PS における LOS 距離の変動を時間について線形と考えて求めた変動の大きさを色分けして示した図を図 8 に示す。

このとき図中の星印を不動点とした。ここは岩手山の溶岩流出地域であり、「焼走り」と呼ばれている。この地域の溶岩は 1732 年の噴火時に流れたものであり、流出後十分な時間が経過して地質的に安定している箇所と考えられるために選定した。この図 8 によると盛岡市近傍ではほぼ地表面変動はないが、盛岡市から岩手山山麓を通っている国道沿い、雫石近傍の御所ダム付近では赤くなっており、これは 5 mm/year 以上の速度で衛星-地表面間距離 (LOS) が伸びている (水平移動がないとすれば地表面が沈降している) ことを示している。さらに葛根田川右岸、岩手山北方では 5 mm/year 以上の速度で衛星-地表面間距離 (LOS) が縮んでいる (水平移動がないとすれば地表面が隆起している) ことを示している。

次に図 8 中に赤枠で示した葛根田川近傍の 6 点の PS における変動に対して、時間的に非線形なモデルを適用して解析した。このとき、PS の LOS 距離の変動を時間について 4 次の多項式としたモデルを採用した。この時間変化モデルからの乖離が小さいような挙動を示す点を PS として採用した。得られた 6 つの PS における LOS 距離の時間的な変動を図 9 に示す (軸の正方向を、衛星と地表面間距離が近づく、すなわち地表が隆起している方向とする)。

このグラフにおいて赤十字印が実際の地表面変動を示しており、白丸印は位相の計算に 1 周期分の誤差が乗った

場合の誤った解 (アンビグイティ解) を示している。今回得られた結果の場合はノイズが小さくて、地表面変動の時間変化を追うときに誤った解を選択してしまう可能性がほとんどないことを示している。この 6 つの時系列グラフを見ると、葛根田川に沿った 4 つの PS (No.1, 4, 5, 6) において 1998 年 9 月の地震の時期に合致して PS が衛星に近づいたこと、すなわち地表面が隆起したことがわかる (図中の楕円で囲んだ部分)。1998 年 9 月 3 日の地震発生以前から幾分隆起し出し、地震発生以降約半年で隆起はほとんどピークに達するがその後もしばらく振動的に変化していることがわかる。また 2 つの PS (No.2, 3) は地震の時期に変動はしたものの、顕著な隆起は示しておらず地震発生時点においてはむしろ沈降したのちに約 1 年半をかけてやや隆起したようにも見える。図 10 に PS 5 を例にとって、地震の発生と同時に地表面が隆起した状況を拡大して示す。

この葛根田川周辺は岩手県内陸北部地震時に地変が確認され、吾妻等による地震断層トレンチ調査でも累積変位の痕跡が認められた位置である。また活断層マップによれば西根断層群 (活断層) が葛根田川を渡河する地点に一致している。図 10 の時系列グラフでも地震発生に生じた変動であることは明瞭であり、PSInSAR によって西根断層群の活動による地表面変動を捉えていると考えられる。

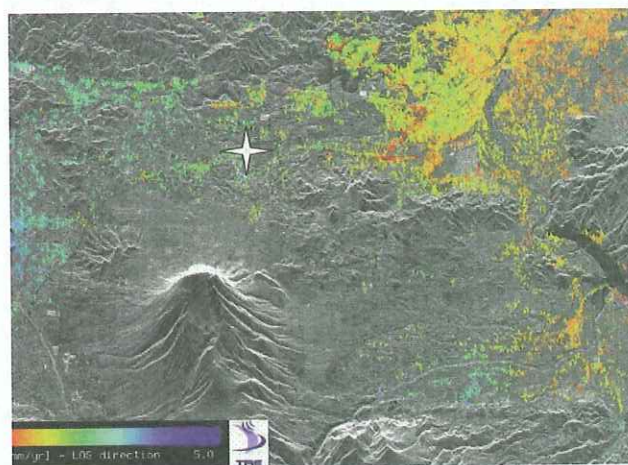


図 8 PSInSAR による岩手山周辺計測例

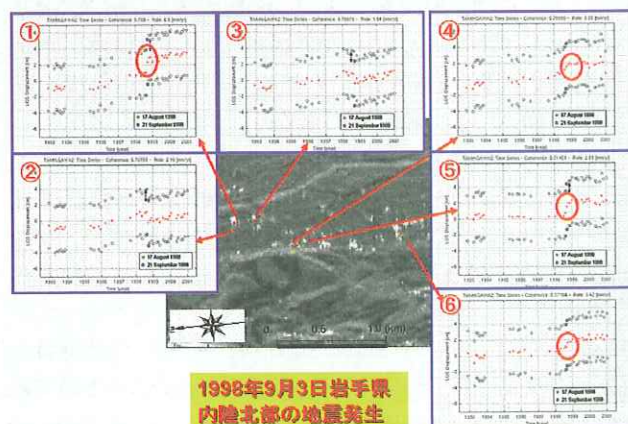


図 9 葛根田周辺の PS 時間変動

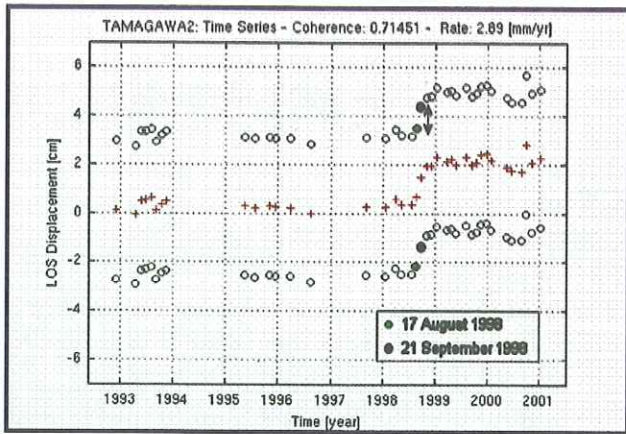


図10 PS 5の地表面変動時系列計測結果

この部分を詳細に検討するため、航空写真を用いてPSの挙動について評価した。図11に葛根田川周辺の航空写真およびその上に活断層位置および取得されたPSを示した。航空写真において葛根田川に沿っての赤い長い破線は、従来の活断層マップ等にて知られた活断層を写真判読して描いたものである。この活断層が扇状地(図11 緑色にて図示)において地表に露出している箇所を赤い細かい破線で示した。この赤い細かい破線に沿って現地および航空写真で地表面の変動が目視で確認できる。ただし活断層がこのように地表面に明瞭に現れた部分は短く、その南北両側の延長部では地表面での断層変位は現地でも目視では確認されていない。このような背景の元、取得したPS 6点を航空写真上にプロットするとPS 1, 2, 3が上記赤い細かい破線の南方への延長上にあることが分かる。PS 1と2はほぼ同じ地点であるので判別は困難だが、航空写真で見ると何らかの建屋が確認できる。PSInSAR処理のなかでこれらの建屋のいずれかの部分をPS 1または2として認識している。このように考えると、細かい破線を南方向に延長していくとPS 1, 4, 5, 6が破線の左側(西側)で隆起、PS 2, 3が破線の右側(東側)で沈降というように明瞭に区分できる。地震に伴って、雫石盆地西縁の北部で、長さ約1 kmの地震断層(地表地震断層)が出現した。断層の走向は、おおむね北北東-南南西であり、断層の西側が約20 cm隆起した。この場所は、雫石盆地西縁の西根断層群北端部付近にあたり、地震断層(地表地震断層)の走向・変位の向きは、西根断層群のそれと調和的である(<http://www.jishin.go.jp/main/chousa/98oct/>)。PSInSARで検出した、西側隆起東側沈降の挙動は上記地質的説明によく合致する。このようにPSの挙動を詳細に検討することにより、現地での地表調査(目視)だけでははっきりしない活断層の通過位置を推定することができた。

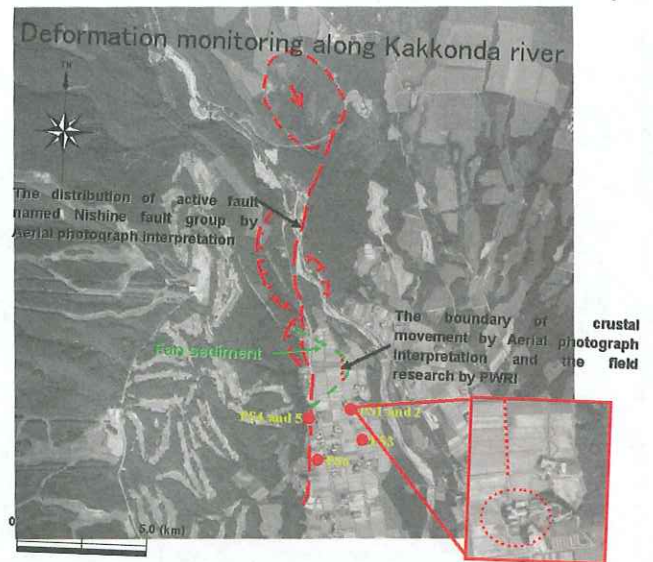


図11 PS取得位置と活断層

## 7. おわりに

地表面の微小な変動を人工衛星からモニタするPSInSAR技術が実用化されてきた。このPSInSAR技術を用いれば、従来水準測量またはGPS測量により特定地点でのみ捉えられていた地表面変動を広域・2次元で、またその時系列変動をmm/年程度の精度で計測することが可能となる。この技術は都市部地盤沈下をモニタすることを目的として開発されたものであるが、プレート移動や地震の際の活断層の変動など地震・防災面での利用も可能となってきた。さらにこの技術を用いると従来水準測量など計測の対象となっていなかったような、たとえば地下鉄建設に伴う地盤沈下など局所的な地盤沈下を把握することができる。

従来水準測量・GPS測量などと合わせてPSInSAR技術により地盤変動を計測し、各種の手段で得られた情報を地理情報システム(GIS)上で統合することにより、国土総合地表面変動計測システムを構築することが期待される。このようなシステムは将来起こりうるプレートすべりによる地震のリスクアセスメントなど、国土インフラストラクチャの基本情報を与える有効なものとなろう。

### 参考文献

- 1) Ferretti A., Prati C., and Rocca F.: Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, IEEE GE & RS, Vol. 38, pp. 2202-2212, 2000.