

---

巻頭言	リアルタイムといっても、事前準備が肝心だ		
		防災科学技術研究所所長	片山恒雄 1
小特集	防災におけるリアルタイムモニタリング技術		
	防災に活用されるリアルタイムモニタリング の現状と展望	河田恵昭	2
	直前・直後対応のための早期地震情報	菊地正幸	9
	阿蘇火山中岳におけるリアルタイム モニタリングシステム	池辺伸一郎	15
	岩盤斜面崩壊対策としてのリアルタイム モニタリング技術	大西有三 西山 啓	22

# リアルタイムといっても、事前準備が肝心だ

科学技術庁・防災科学技術研究所

所長 片山 恒雄

多くの場合、片仮名言葉は口当たりが良い。リアルタイムとかリアルタイム・モニタリングも例外ではなく、内容よりも言葉が先走っている感じである。

リアルタイムということのを頭に置きながら、この原稿を書きはじめて思い付くことが三つある。

一つ目は、先月うかがった安芸敬一先生（南カリフォルニア大学教授）のお話、二つ目は、先月末以来の北海道の有珠山の22年ぶりの噴火、そして三つ目は、今月初めの小淵前首相の脳硬塞による緊急入院と退陣である。

安芸先生は地震学の大家だが、ここ数年はインド洋のレユニオン島で火山活動の研究をしている。測るだけでは何にも分からないことが多い、きつとこうなるはずだという理論を持っていて、はじめて観測が役にたつという話だった。

有珠山はいまも噴火を続けている。日本で初めて噴火前に地域住民の避難が完了し、噴火予知の成功と報道された。毎日のように報道される有珠山の噴煙とは違って、テレビを見ているだけでは分からないのが、火山噴火予知連絡会有珠山部会の岡田弘部会長（北海道大学教授）が普段から周辺市町村や室蘭地方気象台と緊密なコミュニケーションを取り続けてきたことの重要さである。「有珠山ひとすじ」の研究者がこれまで積み重ねてきた知識があつてこそ、観測が予知に結びついたといえる。

4月3日未明に小淵前首相が脳硬塞で倒れてから森内閣が成立するまでの政権交代劇は、自然災害とは無関係である。前首相の病状は分単位でモニターされていたに違いない。しかし、その結果が見えてこなかったために、22時間の空白とか34時間の空白とかメディアで騒がれることになった。

これらの3つの話に共通していることは何だろうか。

リアルタイム・モニタリングが役にたつ情報となるためには、周到的な事前の準備が必要だということである。防災について考える場合、単にリアルタイムで観測するだけではなく、対象とする自然現象や地域をどの程度熟知しているかが問われるのであり、モニタリングした情報をどのように咀嚼して発表するかが重要なのである。危機管理とい

う大きな枠組みのなかで、それらの情報を災害軽減のためにどう活かすかに、すべてが収斂して行かなければならぬ。

有珠山の周辺に小さな地震が起きはじめ、その数が1日数百回を超えたある時点で、住民の避難が必要と判断できて、はじめてモニタリングに意味があつたと言えるのである。

最近、リアルタイム・モニタリングが自然災害の軽減に関連して語られる場面を見ていると、「リアルタイム」の部分に力点が置かれすぎているという印象を受ける。

我が国の気象庁が発表する地震発生情報は、世界中でもっとも早く、正確で、密度も高いと言える。地震が起きてから数分で地震の規模、震源の位置、各地の震度がテレビ画面に写し出される。気象庁の発表では、地震発生から2分、5分という2つの時刻がきわめて重要視されており、実際、これらの時間内に地震の全体像を得られるだけの情報を提供している。

しかし、地震発生から10分後に得られる情報にも違った意味での大切さがあり、30分後の情報、1時間後の情報には、また違った意味での重要性があることを忘れてはいけない。

たとえば自治体の地震防災対策では、想定地震の規模と場所を仮定し、揺れの強さの地域的分布を取り入れ、昼とか夕方とかいった発生の時間帯も仮定して被害を想定している場合が多い。このようなシナリオをいろいろな場合についてつくっておき、観測された揺れの分布にもっとも近い想定被害に対して応急対策を立ち上げるといった目的を考えると、1時間、2時間後の情報であっても、情報量の多さが決め手なることがありうる。

このような意味では、私たちの防災科学技術研究所（科学技術庁）が阪神・淡路大震災の翌年から運用を始めたK-net（日本全国を1,000台の強震計でカバーするネットワーク）の情報のもっと有効な利用が考えられても良いだろう。

最後は我田引水になってしまったが、興味のある人は、

<http://www.k-net.bosai.go.jp/>

をぜひ開いていただきたい。

# 防災に活用されるリアルタイムモニタリングの現状と展望

かわた よしあき  
河田 恵昭\*

## 1. まえがき

阪神・淡路大震災の後、情報が被害の軽減にきわめて重要な役割を果たすことが認識された。情報といっても多岐にわたるが、まず何よりも情報を取得する手だてがなければならない。しかも、大規模な災害ほど低頻度であるから、日ごろのメンテナンスが重要であり、往々にして肝心の時に計測できないことがしばしば起こる。ここでは、地震に関して別の章が設けられているので、それ以外の主要な災害に関して、予測とそのモニタリングの現状を示し、その後、いくつかのトピックスに触れることにしたい。

## 2. リアルタイムモニタリングを活用した防災・減災の基本

時々刻々変化する外力条件を情報化して、モニタリングしながら防災・減災を実現するには、基本となるつぎの枠組を理解する必要がある。まず、防災の基本は3つの知る(knowing)から構成される。それらは、災害を知る、弱いところを知る、対策を知る、である。これらに関係してモニタリングがどのように活用できるのかを、つぎに示してみよう。

(1) 災害を知る：自然外力がどのような状況にあるかを知ることはまず最初に大事なことである。この場合、往々にして数字のみの出力、あるいは映像のみの出力になりがちである。前者では現行の防災施設で守れるかどうかの判断が困難であるし、後者では、夜間や降雨時、台風時に映像から判読できない恐れがある。必要なことは、防災対策を進めるうえで必要な情報がリアルタイムに送れることである。この場合忘れてならないのは、データの送受信の過程で浸水や火災などのために中断してしまうことであり、できればリダンダンシーを考えて、複数経路を通るようにしておくことであろう。

(2) 弱いところを知る：一般に災害に対してねばり強いまちづくりや地域づくりを進める場合、もっとも大事なことは、真っ先に被災する危険性の高い脆弱な地域を特定して、ここでの被害を評価し、これを少なくする施策を講ずることである。たとえば、阪神・淡路大震災の後、地方自治体の多くは「地域防災計画」見直す作業を行い、その過程で、被害の同定のために、地震後に登庁する職員に途上でのできごとを詳しく観察し、報告することを業務として挙げているところが多い。しかし、あらかじめ被害想定作業を実施しておれば、どの地域が被害を被りやすいかがわかるので、そこをモニタリングできるようにしておけばよいのである。地震直後に被災可能地域内を面的にしらみつぶしに調査することなど不可能であるし、自治体にとってやらなければならないことは山積みのはずである。これらのモニタリング地点の被害状況と事前の想定結果を付き合わせて、どの程度の修正をかければよいかを判断すれば、概括被害状況はかなりの精度で把握できるはずである。

(3) 対策を知る(立てる)：対策は構造物を主体としたハード対策と情報によるソフト対策に大別される。図1はその適用概念図を示したものである。1923年の関東大震災以降、我が国の地震防災は、地震によって壊れないものを作ることを主眼としてやってきた。それは、度重なる耐震基準の改定に表れている。しかし、確率的に発生する異常外

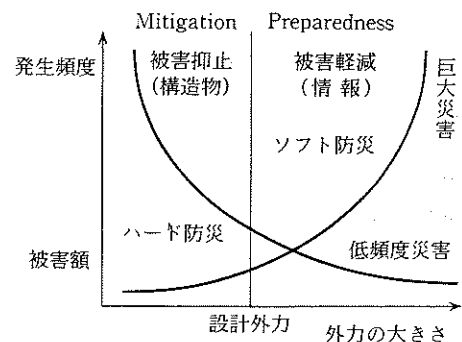


図1 防災の仕組み

\* 京都大学防災研究所巨大災害研究センター センター長・教授

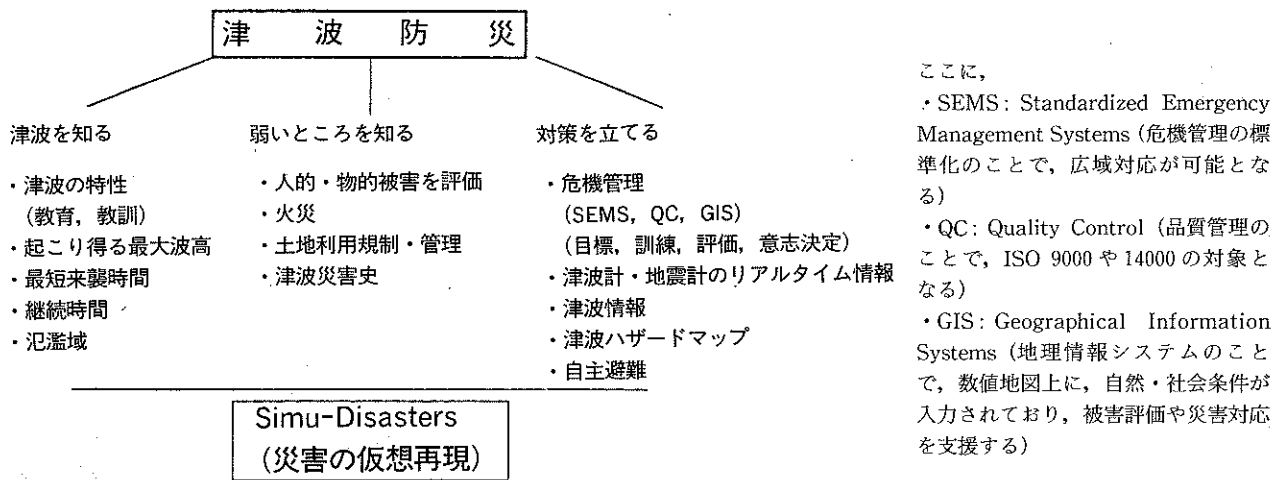


図2 津波防災の例

力に対して、防災構造物や耐震建築物で被害を皆無に押さえ込むことは、コストから考えても実際不可能であるし、仮に原子力発電所のようなものであっても、炉心の安全性はともかくも、システム全体の安全性はやはり問題があるというのが常識であろう。そのため、ハード対策とソフト対策をどのように組み合わせればよいかは、すぐれて国民の合意を必要としている。ただし、忘れてならないのはソフト対策は、人命の安全確保には有効であっても、物的被害の軽減とはなじまないことである。やはり、防災の基本はハード対策であることを忘れてはいけない。ここでのモニタリングは、これらの施設が地震時などの災害時に当初の機能を発揮しているかどうかということであろう。たとえば、建設省は近年、河川堤防の堤体に光ファイバー網を埋設する作業を急いでいる。これは、洪水時の堤体の安全性をリアルタイムにモニタリングするためであり、万一破堤氾濫した場合には、その位置を特定できることを目指している。

図2は津波防災にこの3つの「知る」を適用した例である。

### 3. 各種災害の予測とモニタリングの現状と問題点

#### 3.1 津波

津波のモニタリングについては、現在、試行的に三陸沿岸の釜石沖(東北大学と気象庁)と室戸岬沖(科学技術庁)で、水深が2000から3000mの深海で行われている。これは、地震計と津波計をカップルにして海底に設置したものである。その設置の理由は、海底地震が発生すれば、前者では早ければ20分で、後者では5分で津波が沿岸部に達することから、早期に津波発生を捕捉することが、被害軽減に寄与するからである。問題は、2点あると言われている。1点は、津波の圧力センサーが地震発生とともに振動して、

津波が発生したかどうかわからないことである。近地震(震源位置が沿岸からおおよそ100km以内で第1波の到達時間がおおよそ1時間以内のもの)についてはこのようなミスが起こり得る。2点目は、チリ地震のような遠地震では、地震動を観測点でキャッチしないためにきわめて良好な結果が得られる反面、水塊の温度変化による水圧の急変を津波と誤解する恐れがあることである。津波と地震では振動特性が異なることや、ほかの観測点の結果を比較することを実施すれば、早晩にこの欠点が解消されるものと期待される。なお、釜石からデータは通信衛星を介して発信され、全国で利用できるようになっている。

なお、米国の大気海洋庁(NOAA)では、遠地津波の警報システムとして、ベーリング海とアラスカ沖、およびメキシコ沖に複数の海洋観測ブイを用いている。これによって海面変動をリアルタイムにモニタリングし、米国本土を津波来襲から守るシステムが完成している。

ほかには、沿岸各地の防災関係機関がもっている潮位計をネットワーク化したものがある。これは、ほかの地域にどのような高さの津波がいつ来襲したかを知ることによって、その後襲われる地域の防災対策をより有効なものにしようとするものである。三陸沿岸各地で部分的に構築されつつあるが、この情報をどのように具体的に活用するかについては、これから議論しなければならない。

#### 3.2 風水害

台風や大雨に起因する高潮、高波、洪水、土砂災害を総称して風水害という。共通的なモニタリングについて、まとめて示すと次のようになる。

- (1) 静止気象衛星「ひまわり(GM-4,5)」: 静止気象衛星GM-5によって可視と赤外(6.5, 11, 12 $\mu$ m)の画像が、少なくとも1時間に1回得られる。とくに、赤外11, 12 $\mu$ mの画像からは、地表面(海面)または雲頂の温度を知ることができる。これは雲の高さに換算することができる。GMSの最大の特徴は台風の観測(勢力範囲、降雨、移動状況など)ができることである。また赤外線によるモニタリングによって、雲のタイプや大気下層の

水蒸気量を算出可能なことが、米国大気海洋庁の極軌道衛星の解析から判明している。したがって、次期気象衛星 (MTSAT) ではこれが可能であるので、期待されている。また、GM-5の通称水蒸気バンド (6.5  $\mu\text{m}$ ) では、主に対流圏の中層から上層にある水蒸気からの赤外放射をとらえることができ、対流圏上部の大気の流れがわかる。さらに、前線 (雲域) に隣接して現われる水蒸気画像の暗域 (対流圏中上層の乾燥域) が、集中豪雨に関連しているらしいことがわかってきている。GM-5の画像がカバーしている東南アジア各国でも、天気予報のために非公式ながらこれを活用しているのが実態である。

- (2) 気象レーダ：気象レーダは、雨粒を捕捉する。雨粒からの反射強度を測定し、電磁波の距離的減衰と雨粒による散乱に起因した減衰の補正を加えた後、半経験式により反射強度と降水強度を関連づける。気象庁のレーダ観測は、ほぼ日本全国をカバーし、7分30秒に1回の割合で観測が行われる。この情報の一部は気象サービス会社のwebページで見ることが可能である。また、レーダ観測とアメダスの降水観測を合わせて解析したレーダ・アメダス合成図も作成され、3時間先までの降水予想を実施している。
- (3) 地上観測：集中豪雨や猛暑、寒冷などの地上気象を知るうえで重要である。最近ではアメダスのデータが図化されてwebでリアルタイムで公開されるようになり、どこからでもアクセスできるようになってきた。しかし、前線や巨大積乱雲に伴う集中豪雨や局地的強風を捉えるためには、観測点の間隔がおおよそ17km、1時間に1回の観測は必ずしも十分とはいえない。気象庁以外の官署による気象観測や各自治体で行っている気象観測の結果をネットワーク化し、地域内で活用する試み

が必要となっている。

そこで、つぎに風水害に含まれる各災害でのモニタリングの必要性和現状を示してみよう。

### (1) 高潮

現状では、高潮計は設置されていない。しかし、沿岸に設置されている潮位計によって観測することは可能である。ただし、高潮注意報や警報の発令は、台風の接近に先んじて行われることが決まっております (たとえば、大阪湾では防潮水門の閉鎖に約6時間を要することから、6時間以上前に出されることになっている)、モニタリングの結果をリアルタイムに使う必要は今のところ見出されていない。ただし、台風の通過後、揺れ戻しがあり、海面が低下し、再び上昇することがあることがあまり理解されていない。そのため、第2のピークの水位の方が大きくなる可能性があり、このような挙動が防潮施設の現場で必ずしも理解されていないらしいがある。

1999年9月には八代海で台風18号によって通常よりも約4.5mも高い高潮が発生し、図3のように低地が浸水した。その住民は潮位の上昇と護岸の高さの関係についてのどのような情報も事前にもっていなかった。また、不知火町役場にもそのような情報が提供されていなかった。これは、テレメータを使った潮位計が設置されていなかったことに原因があるが、大事なことはこのような施設がきわめて大切であるという認識が、災害発生前に理解されていないことにある。この松合地区で犠牲になった11名はすべて平屋の屋内で溺死しており、そのうち9名が高齢者であったことを考えると、高齢社会でのリアルタイムモニタリングシステムの活用方法をさらに考えて、早急な施設整備が期待される。

### (2) 高波

波高計は、沿岸海洋については気象庁と運輸省による観測ブイが運用されており、通信衛星を通してモニタリングされている。また、沿岸各地については、そのほかに建設省、水産庁、農水省や都道府県によって観測され、多くはテレメータによってデータの取得が行われている。したがって、リアルタイムにデータが取得されているわけであるが、それを同時的に活用して海岸防災に生かす手順は一般化されていない。むしろ、台風や冬期季節風による波浪の発達から減衰までを、数値計算によって予測する方法の確立のために用いられる方が多い。

また、船舶や漁船の港外避泊のために、高波浪になるかなり以前から波浪に関する情報入手が重要であり、そのために波浪予報の高い精度が求められている。

### (3) 洪水氾濫

外力となる雨の降り方、降った後の洪水の出方に関するモニタリングがある。まず、雨の降り方については、レ

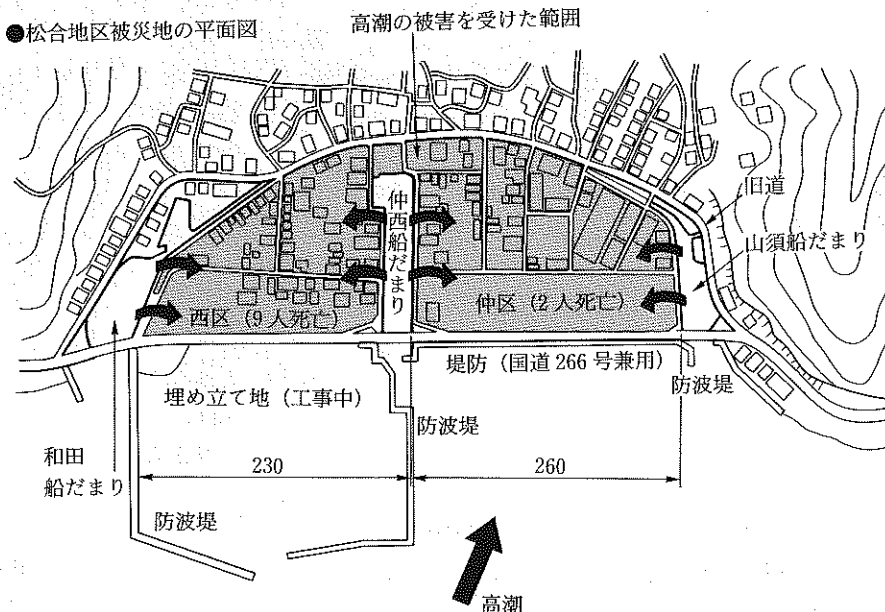


図3 台風9918号による熊本県不知火町松合地区の被災

ーダール量計による観測と数値モデルの組み合わせによって、雨量予測が行われるようになってきている。とくに1998年と99年の両年にわたって、我が国の各地で集中豪雨が発生している。1990年代の前半では、1時間雨量強度が100mmを超える地点はわずかに1あるかないかであったが、98年にはそれが4に、99年には13と急増している。そのため、建設大臣が管理している109ある一級河川のうち、警戒水位を突破した河川数は98年に96、99年には80に達するほどであった。しかも、水位上昇が早すぎるために、避難勧告発令の遅れた、あるいは出しそびれた市町村が続出した。

このようなことから、避難勧告の発令基準は、降雨を対象にすべきであって、それを予測し、精度を上げるためにリアルタイムモニタリングシステムが必要となる。雨量については、リアルタイムに出力できるテレメータ化された気象庁のアメダス、ダム管理事務所や建設省、河川情報センターなどの雨量計があるが、異なる機関間のデータ共有はまだ進んでいないのが実情である。

一方、水位についてはフロートや空中発射式の超音波、電気容量の変化による計測器が開発されている。これらもテレメータや光ファイバーなどによって自動送信されている。現在問題となっていることは、これらのデータが取得者のところでほとんど留まっており、住民に利用できる形になっていないことである。これらのデータをイントラネットで利用できる仕組みができてはいるが、早晚、インターネットのwebを利用して画像情報の形で住民に情報提供できるシステムを確立すべきであると考えられる。

#### (4) 強風災害

1998年の台風7号による奈良県の室生寺の五重塔の損壊など、文化財被害や豊橋の竜巻災害のように、強風に起因した局所的な被害が後を断たない。米国では次世代ドップラーレーダが200基以上配備され、トルネードの挙動や空港近辺のダウンバーストの発生などの局地気象現象を常時監視している。このレーダによれば、受信波のドップラーシフトを解析することにより、ビーム方向の雨粒の移動速度が算出でき、同時に風速のビーム方向成分を知ることができる。得られた風速から、発散成分やシアラインを検出し、奥行きのある解析、すなわち異常気象場の立体構造が解明できる。しかし、我が国では成田空港と関西空港に設置されているだけで、従来の風速計による観測が継続されている状態が続いている。

#### (5) 土砂災害

この災害では、降り始めからの累積雨量と1時間雨量強度が発生の目安を与えている。とくに我が国に存在している17万カ所以上の土砂災害危険指定地(地すべり、土石流、崖崩れ)では、累積雨量が100mmを超えると要注意であり、200mmに達すると確実に発生することがわかっている。なお、現在対策の進捗よりも開発が先行しており、この数がさらに増えつつあることを知っている必要がある。しかし、気象庁のアメダスでは観測網が荒すぎるので、我が家の近くでどのような降雨があったかを知る必要がある。簡単にはバケツや空き缶で雨の量を測定する方法がある。土砂災害の危険地域に住む住民は、少なくともこのよ

うな努力を継続しない限り、何時かは災害に遭遇することになる。仮に山肌が樹齢100年程度のおなや松でおおわれていても、根は深さ2m程度にしか達していないことを知る必要がある。土砂災害に対して、山肌の状態はほとんど関係しないことがわかっている。とくに、風化花崗岩であるマサ土が広く分布する広島県や岐阜県では、風化が50から60年進むと土砂災害を繰り返すという歴史的事実があり、このような風土情報をよく理解することが災害に遭遇しない知恵となる。

### 3.3 海岸侵食

海岸侵食には時間単位で変化する波浪による短期的な変化と流入河川からの漂砂源の減少に伴う年単位で変わる長期的な変化に分けられるが、通常、後者を指す。高波浪下で劇的に汀線が交替する場合があるが、これを精度よくモニタリングする方法は現状では存在しない。高波浪時には波が遡上するために、汀線の位置を決めることは困難であり、また、その必要性も低いといえる。むしろ、決められた時期に汀線測量を実施して、継続することが重要であろう。

### 3.4 火山噴火

我が国には、現在86(北方領土の10を含めて)の活火山が存在する。活火山とは、過去2千年以内に噴火した記録のある火山と定義しているが、近じかこれを過去1万年に延長し、100近い数字になる予定である。ところで、火山はそれぞれ個性をもっているといわれている。したがって、噴火につながる予測の方法と計測結果の解釈も容易ではない。たとえば、3月30日に噴火した北海道・有珠山では、過去の噴火直前にいずれも火山性地震が伴ったという事実が、今回の予知の成功につながっている。それ以前から支笏湖の樽前山の頂上ドームの表面温度が昨秋以来600度を前後しており、これも温度が連続モニタリングされてきた。これがもし噴火すればハザードマップ(噴火による被害の及ぶ範囲を図示した地図)から苫小牧市が危険となるので、要注意の状況が継続していた。

近年では、従来の傾斜計、伸縮計、地下水位、噴煙の成分分析、地下水位に関するモニタリングに比べて、衛星を用いたGPS解析が噴火予知に有効であることが証明されてきた。その皮切りとなったのは、1991年のフィリピン・ピナツボ火山の噴火予知に成功したことであった。このとき、米国の地質調査所(USGS)では、衛星による山体と地震の連続モニタリングを実施しており、これに基づく噴火直前の避難命令の発令につながり、人的被害の軽減に大いに寄与した。この手法は、近年、その動向が注目されている岩手山の山体の体積変化の計測に使われている。現在のGPS観測では、水平方向に1mm、鉛直方向には5mm程度の精度まで保証でき、山体のどの部分が膨張や収縮を継続しているのか、その変化量を含めてモニタリングされている。有珠山の場合3月30日の噴火以降、5月20日現在、およそ4000万 $m^3$ 体積が増加したことがわかっている。なお、レーザー距離計や噴火口付近の温度センサーによる連

続モニタリングも実施されている。

### 3.5 都市災害

ここでは、とくに地下街浸水災害のモニタリングの現状を紹介する。我が国では、政令市を中心に約100万m<sup>2</sup>に上る地下街とそれに接続した地下鉄網が大規模な地下空間を形成している。また、人口密集市街地での地下街には周辺のビル群の地下室や地下ガレージが通路によってつながっている。ここに地上の氾濫水（洪水、津波、高潮）が浸入すれば未曾有の被害に結びつく。すでに1998年には全国で43施設に地下浸水被害が発生したが、99年には福岡と東京・新宿区で2名の犠牲者が出た。

問題は、これだけ地下空間が利用されているにもかかわらず、その防災対策は火災を対象としたものだけであるという点にある。このため、たとえば、地下室のコンセントの床からの設置位置やドアのつけ方には何ら配慮がはられていない。地下空間では停電で暗闇になることをできるだけ避けなければならない。仮に浸水しても30cm程度の深さになるまで通電できるようにしておくべきであろう。また、幅が80cmのドアでは深さが50cmで水圧が100kgにもなり、女性の力では開けられないことになる。そうであれば、地下空間の扉はすべて内扉にするべきであろう。このようなことは行政による指導で実行できるはずであり、未だにされていない現状は、関係者の防災意識がまだまだ低いことを示していよう。

現状では、すべての地下街の

安全センターで地上の降雨の状況や河川の水位に関する情報をモニタリングする施設は皆無である。わずかに2000年4月より、大阪・梅田の地下街の安全センターに淀川下流の水位をモニターできる装置が設置されたのみである。安全センターでNHKや民放のテレビを観ているだけという状況が続いている。

## 4. 防災に関するリアルタイムモニタリングの活用事例

### 4.1 DMSP 夜間可視画像による地震被害範囲の特定

大規模な地震災害が発生した際には、その被害範囲を早急に特定することが現地の災害対策本部にとって最重要課

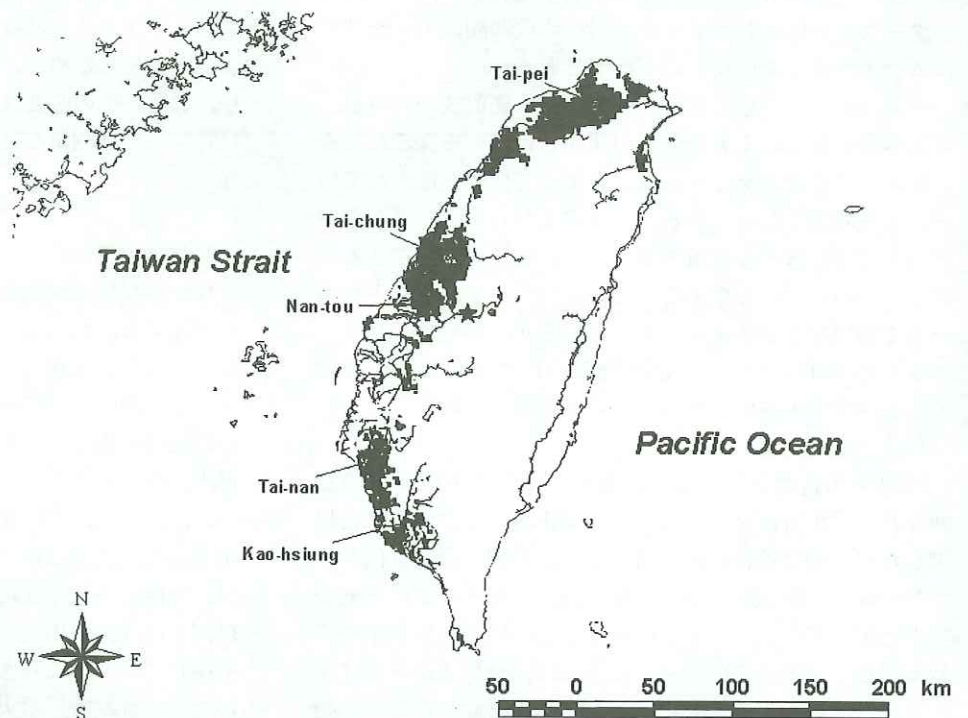


図4(a) 台湾。集集地震によって著しく夜間光量が減少した地域（黒く塗ってある）

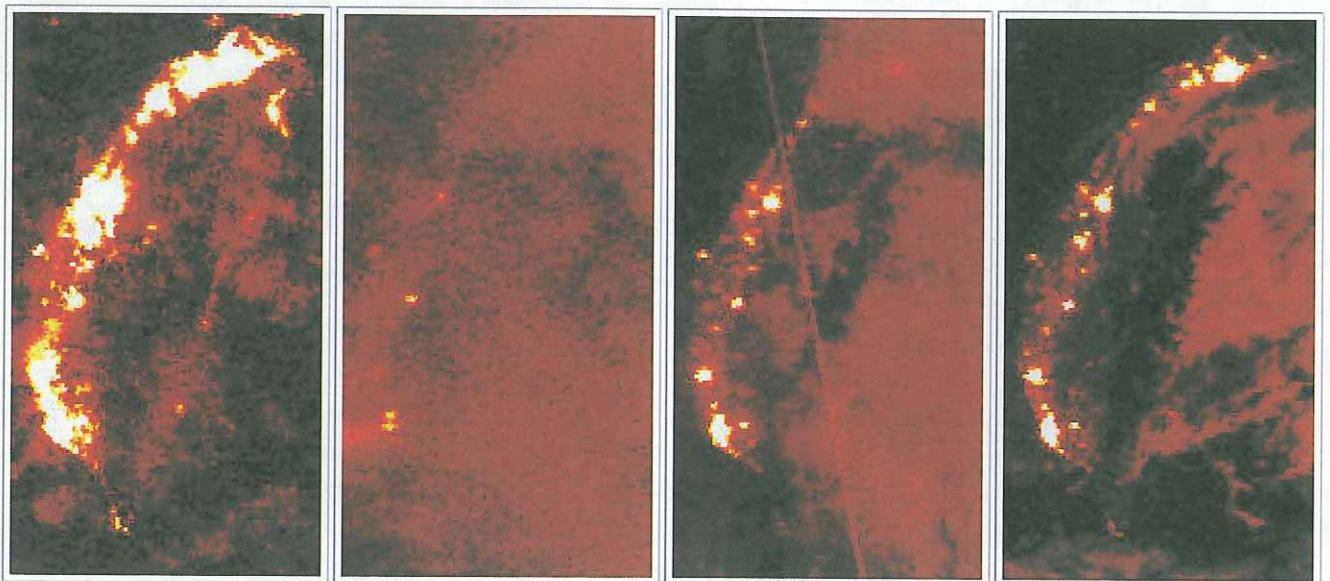


図4(b) 夜間光量の変化（左から地震前（9/17）、地震後（21, 22, 23日））

題である。しかし、阪神・淡路大震災でいみじくも露呈したように、被災地ではその全体像を把握することがきわめて困難である。そこで、被災地から離れた位置で被害の範囲や大きさを概括情報として発信できるようにすることは緊急の課題となっている。ここで示したDMSP (Defense Meteorological Satellite Program) とは、米国海軍が運用している軍事気象衛星で、1日2回、昼夜間の決められた時間帯に飛行し、その画像の管理は米国大気海洋庁が行っている。この衛星には感度の高い近赤外から可視光センサー OLS を搭載しており、都市の明かりなどの微弱な夜間可視画像を観測することができる。近年これを用いて概括被害の特定が試みられている。

都市が大規模な地震災害を被った場合、産業活動の停滞、家屋やビルの倒壊、停電、道路交通量の激減など、エネルギー消費量の減少に伴って、地域全体が暗くなることが予想される。したがって、この人工衛星のリモートセンシングを用いて平常時に比べて夜間、暗くなる地域を特定できれば、それは被災地

表1 可視～熱赤外域画像が観測可能な主な衛星

衛星	地表解像度 (m)	観測幅 (km)	回帰日数 (日)
SPOT	10, 20	60	26
IRS	10, 24	70, 141	24
Landsat	15, 30, 60, 120	185	16
NOAA	1,000	2,700	0.5
DMSP	2,700	3,000	0.25

である可能性が大きい。

図4は、1999年9月21日の台湾・集集地震による被害域の特定結果である(詳しくは、<http://www.miki.riken.go.jp/> を参照)。この地震では全土で約260万戸が停電したこ

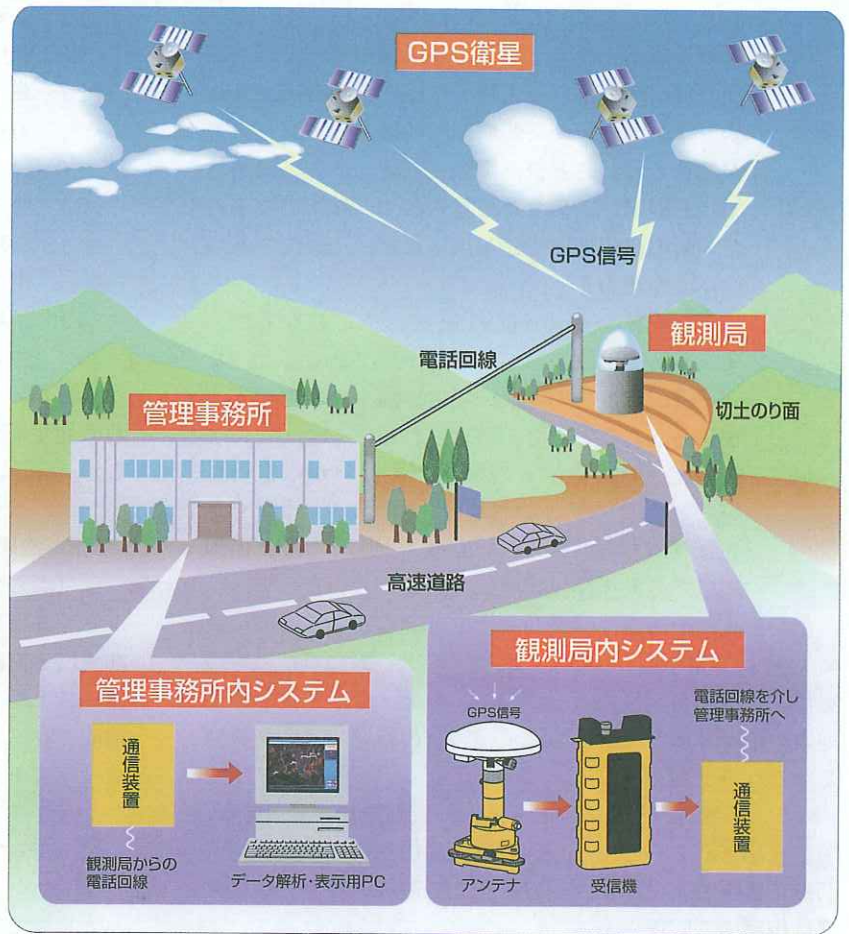


図5 GPSを用いた切り土法面連続監視システム

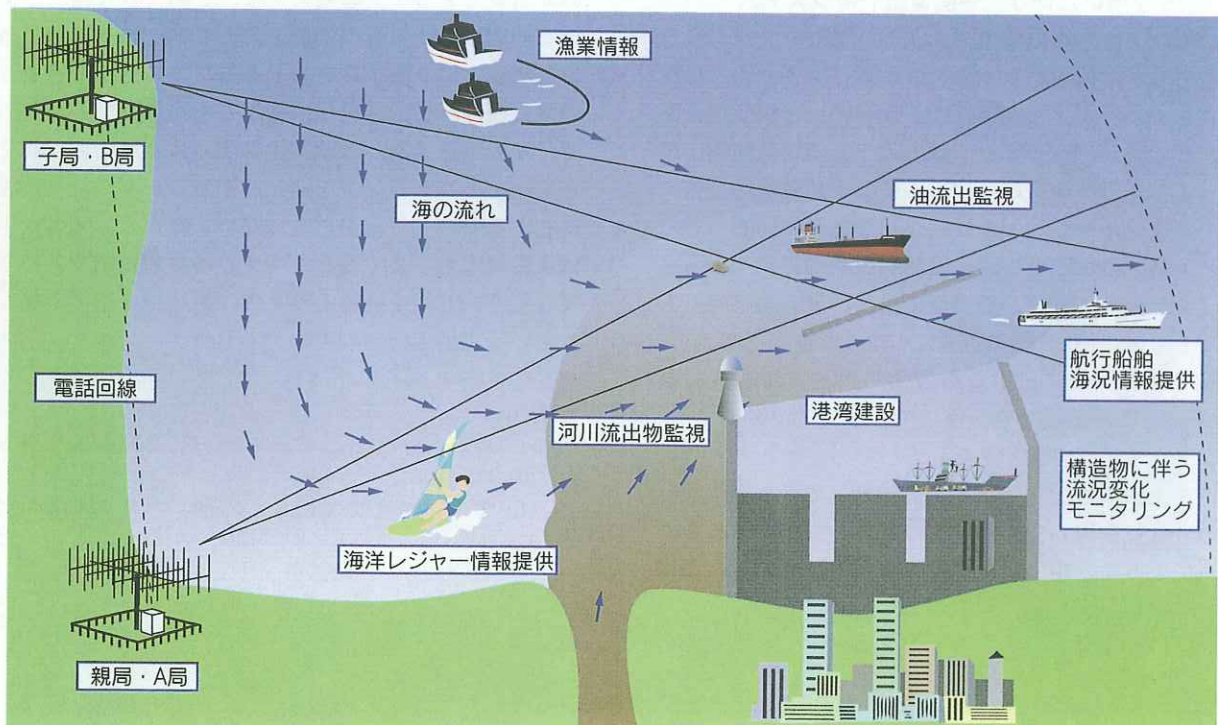


図6 沿岸海像レーダ (Sea WATCHER) の概要



とがわかっているが、明らかにその影響は画像上に出ている。同じような試みが1999年8月17日のトルコ・コジャエリ地震を対象に実施され、被害がマルマラ海沿岸のみならず、内陸部に及んでいることを早期に発見している。ただし、今後多くの改良点を残している。それらを要約すれば、以下のとおりである。

- (1) 阪神・淡路大震災では必ずしも適用できない：米  
国や我が国のように大量エネルギー消費国では、  
明るすぎてセンサーが飽和状態になっており、差  
が顕著でないことや、実際に被害のあった淡路島  
では、地震の前後で差が見られず、被害のなかつ  
た大阪の泉州地域で差が出るなど、一般的な適用  
性に問題がある。
- (2) 1つの画素は一辺が0.9 kmの正方形になるが、  
衛星写真の位置決めがかなり困難であること。た  
とえば、トルコの地震の場合、海上に被害の発生  
が見られたことなどが挙げられる。
- (3) 被害と光量の減少との関係がまだわかっていな  
い。
- (4) あまり電力を消費しない発展途上国、とくに田園  
地域での大規模災害では検出が難しい。

ただし、このような今後改良すべき諸点があるものの、  
震災後1日以内に、すなわち準リアルタイムに概括被害域  
を特定できる可能性をもっており、たとえば、将来の東海  
地震や南海地震とそれらの津波被害域の特定では力を発揮  
できるものと期待される。

なお、参考のために、可視～熱赤外域画像が観測可能な、  
現在運用されている主な地球観測衛星の解像度、観測幅、  
回帰日数を表1に示す。一般に空間分解能の高さと観測頻  
度は相反する関係にある。

#### 4.2 GPSを用いた切り土法面連続監視システム

これについては、この特集で話題として取り上げられる  
可能性もあるが、重要な試みであるから、ここでもその概  
略を紹介しよう。前述したように、我が国には居住地に関  
係するだけで、およそ17万カ所以上の土砂災害危険指定地  
がある。また、中央構造線を始め、脆弱な地質構造地帯を  
横切って高速道路や鉄道・新幹線が建設されている。とく  
に、高速道路の場合、災害時に緊急輸送路の役割を担って  
おり、これが被災すれば、災害発生直後の緊急対応時はも  
とより、その後の復旧・復興過程にも重大な影響を与える。  
ここで紹介するのは、日本道路公団四国支社が導入した  
GPSを用いた山腹斜面の安全性に関するリアルタイム・モ  
ニタリングシステムの例である。

一般に、土砂災害危険指定地や危険地帯では、土壌水分  
計や伸縮計などを用いて常時監視されているが、それらの  
センサーによって、事前に土砂災害の予知に成功した例は

皆無といってよい。そこで、日本道路公団四国支社では、  
1999年に図5にあるように、高知自動車道に沿った5箇所  
の切り土法面にGPS受信アンテナを含む観測局を設置  
し、地すべりの発生を常時監視している。これらのシステ  
ムの特徴は、次のとおりである。

- (1) 豪雨や雲の発生などの気象条件に左右されず、24  
時間連続観測が可能であること。
- (2) 事前の精度の検証結果では、水平方向1 mm、鉛直  
方向5 mmの変動をキャッチする能力をもって  
いる。すなわち、変位をベクトル表示できる。
- (3) 完成後のみならず、土砂災害に対する工事施工中  
の現場の安全確保のモニタリング施設としても使  
用できる。
- (4) 現場の観測局の構成が単純なために、トラブル発  
生の恐れがきわめて少ない。

このシステムによって、今年の梅雨や台風による集中豪  
雨の発生時に大いに機能を発揮することが期待されてい  
る。

#### 4.3 沿岸海像レーダ (Sea WATCHER)

東京湾や大阪湾などでは、海域全体の流況を面的にリア  
ルタイムに把握すれば、高波浪や津波、潮流の監視を始め、  
油流出・拡散のモニタリングにも活用できる。図6は本観  
測システムの概要を示したもので、2組のレーダ装置から  
構成され、1辺が10 kmの正方形の海域の状況を準リアル  
タイムにモニタリングできる特徴をもっている。

### 5. おわりに

大規模な災害による被害軽減では、災害前から災害後に  
かけて被災地で何が起きているかを把握することがきわ  
めて重要である。災害対応とは、このような情報があつて  
こそ適切に行えるものである。とくに、情報の収集は最初  
のステップに位置するものであつて、これがなければ、そ  
の後に続く解析、共有化、適用も不可能である。その意味  
で、リアルタイム、準リアルタイムに現場で何が起こつて  
いるかをモニタリングを通して知ることが、被害の程度を  
左右するといっても過言ではない。ただし、精度を上げれ  
ば災害対応もうまく進むと考えるのは短絡的であつて、必  
要な対応、対策を進めるうえで、最小限の精度が保証され  
るという立場の方が現実的であろう。

#### 参考文献

- 1) 河田恵昭：津波防災と地域防災計画，月刊海洋/号外 NO. 15，  
209-214，1998.
- 2) 河田恵昭：環境変化と開発による将来の災害，岩波講座「地球環  
境学」第7巻「水循環と流域環境」，161-210，1998.

## 直前・直後対応のための早期地震情報

きくち まさゆき  
菊地 正幸\*

### 1. 最近の甚大被害地震

昨年の夏、トルコ、ギリシャ、台湾、メキシコと大きな被害地震が相次いだ。そのうち2回は死者千人を超える甚大被害地震であった。しかし統計的にみれば、とくに最近活発化したというわけではない。例年マグニチュード(M)7クラスの地震は10個程度起こっている(表1)。特記すべきは甚大被害地震が必ずしもM7や8クラスの地震とは限らないことである。

台湾中部の地震では、台湾国内で約400点余の強震計記録が収集され、CD-ROMで全世界の研究者に配布された。これにより、地表に現われた地震断層(車籠埔断層)の北端付近で3m/sに及ぶ地動速度、9mに及ぶ地動変位があったことがわかった。車籠埔断層は日本の国府津・松田断層や東北日本の活断層と同じ逆断層型であり、強震動予測や被害想定を行ううえで貴重なデータとなる。

表1

	M7以上の地震	甚大被害地震
97年	15回	イラン北西部(M6.1), イラン東部(M7.3)
98年	9回	アフガン北部(M6.1), アフガン北部(M6.9), パプアニューギニア(M7.1)
99年	11回	コロンビア中西部(M6.1), トルコ北西部(M7.4), 台湾中部(M7.5)

### 2. リアルタイム地震データと震源情報

大都市の地震災害においては、的確な状況判断の下での素早い初動体制の立ち上げがとくに重要である。救援活動に必要な道路と空間の確保が時間とともに急速に困難になるからである。状況判断の拠り所は早期の地震情報・被害情報である。このような観点から、リアルタイム地震データの収集・即時解析・活用のシステム作りが国や自治体・公共企業体の各種防災対策担当の場で、あるいは、大学などで検討されている。

地震データから決められる震源情報には、

- (1) 発生時刻(震源時)・場所・大きさ
- (2) 断層のメカニズム
- (3) 破壊の伝播方向・継続時間
- (4) 不均一断層すべり分布

などがある。このうち、(1)についてはほぼ自動的・ルーチン的に得られている。実際、有感地震があると、気象庁の震源情報がマスコミを通して一般社会に報道される。(2)の情報も、今のところ内輪の研究者間だけであるが、地震発生後10分ぐらいで配信される。(3)、(4)の情報は、地震の被害範囲を推定したり、余震の推移を見るうえで重要であるが、残念ながら、まだ即時解析だけでは信頼性に乏しい。

### 3. グローバル地震計ネットワーク

1970年代後半から80年代にかけて、米国や仏国などにより高性能デジタル地震計のグローバルネットワークが整備された。当初は、磁気テープやCD-ROMによるデータ郵送が主であったが、その後インターネットの急速な普及により、大量かつ準リアルタイムの地震データ利用が可能となった。これにより地震情報の速報性が高まり、地震発生時の緊急対応に役立つ可能性が見えてきた。

米国の地震学研究連合(通称IRIS: Incorporated Research Institutions for Seismology)の広帯域地震計ネットワークは最も代表的なグローバル地震計ネットワークであり、現在、全世界に約130点余りの観測点をもつ(図

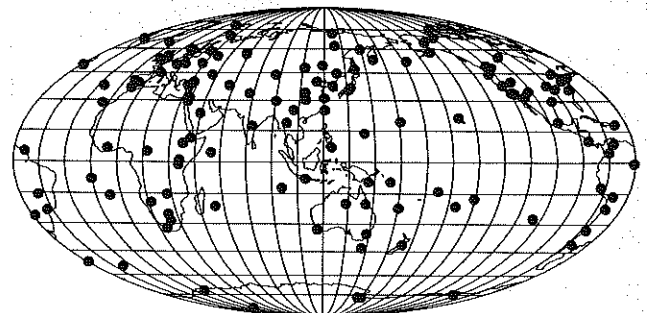


図1 IRISのグローバル広帯域地震計観測網。観測点の数は130点以上ある。

\* 東京大学地震研究所教授

1)。米国地質調査所 (USGS) の速報で M 5.5 以上の地震が起こると、約 1 時間分の地震データを電話回線などで収集し、データベースを作成する。その後利用者は IRIS のデータセンターにアクセスし、FTP で波形データを得ることができる。Web からのダウンロードサービスもある。このデータを使って震源メカニズムを調べた例を以下に示す。

#### 〈台湾中部地震の例〉

99 年 9 月 21 日未明 (現地時間)、台湾中部の集集市を震源とする M 7.6 の大地震が発生、台中市などを中心に全国で死者 2,400 人を超える大災害を引き起こした。台湾の内陸には南北方向に活断層が数本走っているが、今回の地震はこのうちの 1 つ、車籠埔断層が動いた。東京大学地震研究所ではその日のうちにこの地震の特集ホームページを開設し、全世界の地震データを用いた分析結果などを載せた。このホームページには 2 日間で約 2 万件ほどのアクセスがあった。その後データを見直すなどして最終的に得た結果を図 2 に示す。断層破壊が主に北に向かって進み、震源から約 40 km ぐらいの付近で 8 m に及ぶ断層ずれが発生したことがわかる。上段には観測波形 (太線) と理論波形 (細線) の比較例が示されている。COLA などの記号は観測点コード、その上の数値は振幅をミクロン単位で表わしたものである。得られた断層すべり分布は GPS データや地表に現われた地震断層などと良い対応をなしている。大きな

断層すべりのあった場所では、地震断層がダムを直撃し 10 m 程の段差を生じさせたり、川を横切って落差 5, 6 m の滝を出現させている。このような遠地実体波による震源情報は被害の大まかな分布や範囲を知るうえで有用である。我々は近い将来において、これを 30 分程度で発信したいと考えている。

### 3. 国内の地震計ネットワーク

平成 7 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震 (気象庁マグニチュード 7.2) の 2 年後、国の地震調査研究推進本部は、『地震に関する基盤的調査観測計画』と題する報告書をまとめ、その中で高品質の地震計記録を全国偏りなく恒常的に収集する、という地震観測計画の基本方針を打ち出した。また、配備すべき観測装置として、(1) 高感度地震計・広帯域地震計、(2) 強震計、(3) GPS をあげ、これを「基盤観測」として推進することとした。このうち高感度地震計観測網については今年度までに約 500 点余の新設観測点 (通称 Hi-net) が整備され、既存観測点と合わせて、全国およそ 1,100 の観測点 (15~20 km の三角網) から成る観測網となる。得られたデータは地震調査推進本部への地震情報提供に利用されるほか、インターネットや衛星回線を使って、ほぼリアルタイムに研究者や関連機関に提供される予定である。

このほか全国的な地震計ネットワークとして以下のようなものがある。

#### (1) K ネット

これも平成 7 年の大震災を教訓として、防災科学技術研究所によって構築されたネットワークシステムである。96 年 6 月に稼働を開始した。全国 1,000 台の強震計観測点から成り、波形データがインターネットを介して提供される。強震計は高ダイナミックレンジの加速度型デジタル地震計で、最大 2,000 gal まで観測可能、サンプリング時間は 100 Hz である。

気象庁からの地震情報を基に、各観測点でトリガーのかかった地震データを回収し、収集したデータを編集したのち、インターネット上で公開する仕組みになっている。Web 上では、観測データのダウンロードに必要なメニュー画面が提供されている (URL は <http://www.k-net.bosai.go.jp/>)。一般向けに地震データを完全に公開したものとして日本では画期的な試みであり、いろいろ波及効果を生んでいる。

#### (2) 広帯域地震計観測網

防災科学技術研究所による「地震素過程総合研究 (通称 FREESIA)」プロジェクトでは、地震動から地球潮汐までの広い周期帯域をもつ STS 広帯域地震計のほか、速度型強震計 VSE 311 も併設されている。STS 地震計は入力速度が 1 cm/s 程度で振り切れるが、速度型強震計の併用により、最大入力速度を約 400 cm/s まで拡張している。データ収録装置は Quanterra 社の Q 680 で、ダイナミックレン

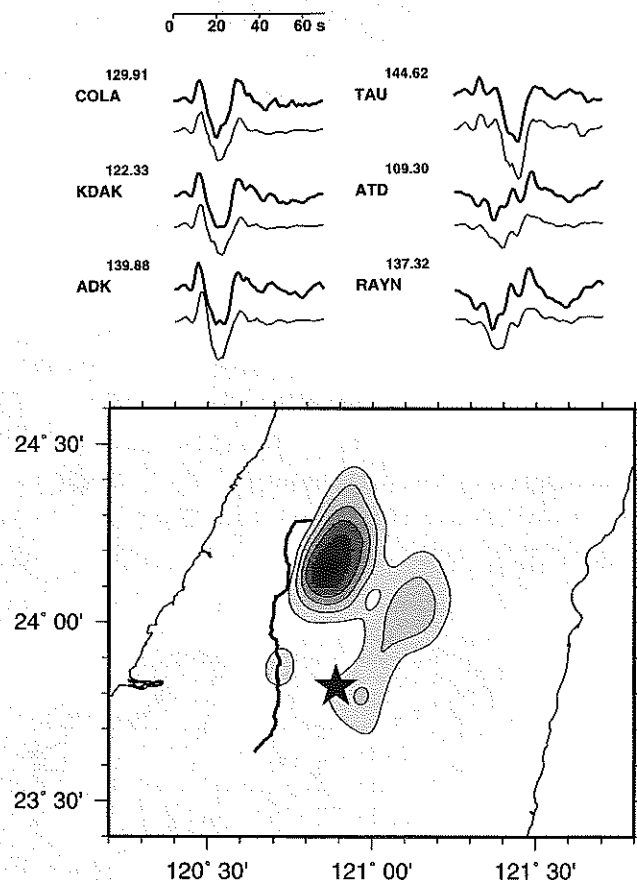


図 2 1999 年 9 月 21 日未明 (現地時間) の台湾中部集集地震 (Ms 7.6)。上段は観測波形 (太線) と理論波形 (細線) の比較、下段は地震時の断層すべり分布を示す。コンター間隔は 2 m である。震央 (★印) から約 40 km 北方で最大すべりがあった。

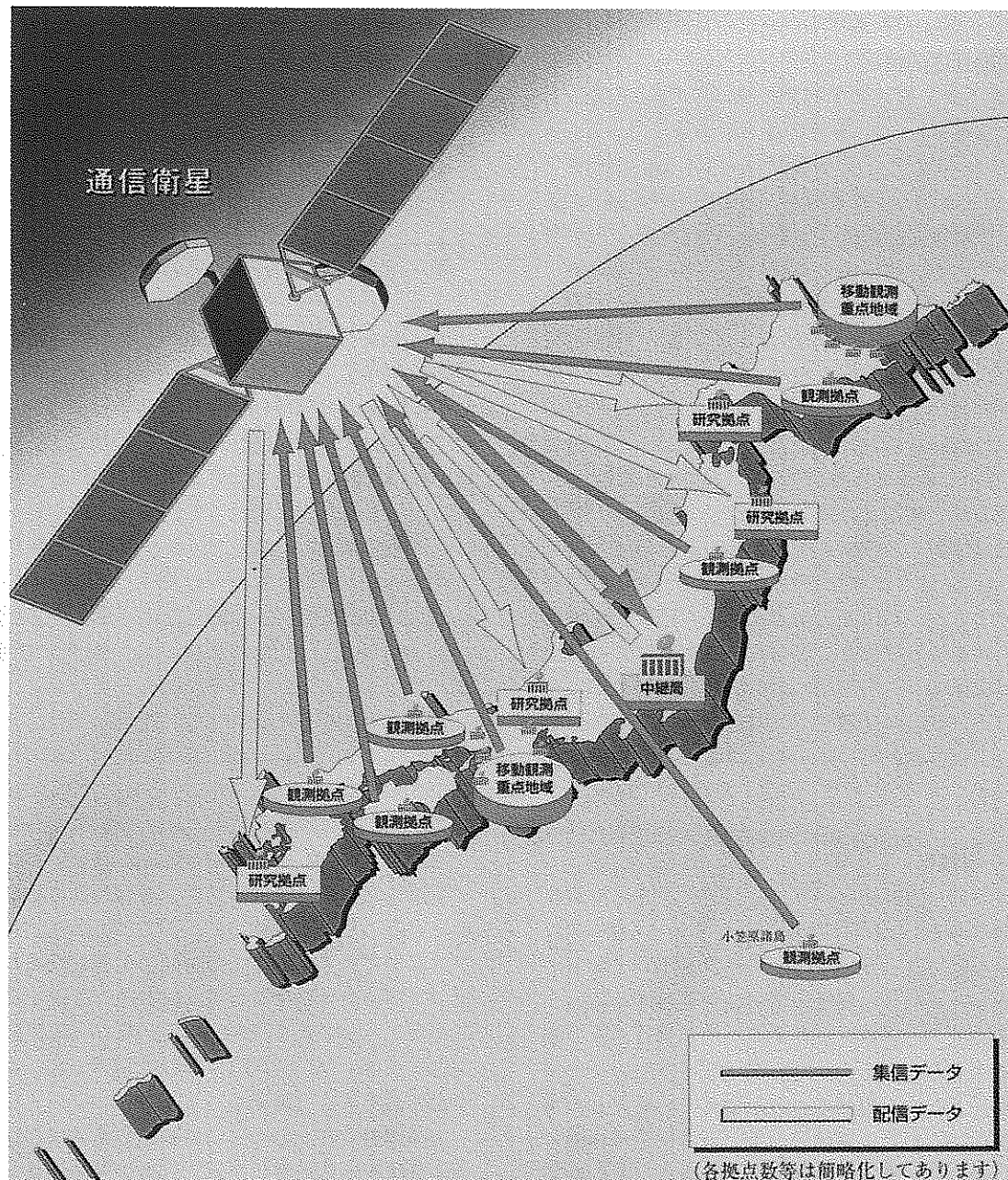


図3 衛星テレメータを利用した全国大学地震データ流通ネットワーク。「送信局→中継局→受信局」の2ホップ方式により、簡単な設備で送・受信が可能である。

ジ 24 bit (140 db), サンプル時間 80 Hz の性能を持つ。20 Hz, 1 Hz サンプルのデータも提供する。防災科学技術研究所のデータセンターには、テレメータを介してリアルタイムに地震データが集められ、データベースに格納される。利用者がデータを取り寄せるためには、特定のアドレスに電子メールでコマンドを送ればよい。するとそのコマンドが処理され、波形データベースから指定された時間範囲が自動的に切り出され、利用者に返信メールでデータが送られる。

### (3) 全国大学地震データ流通ネットワーク

93年3月に、全国の大学地震観測施設が高速専用回線で結ばれ、オンライン地震データ流通システムが実現した。その後、この流通システムは大学共同の衛星テレメタリング・システムへと引き継がれた(図3)。衛星テレメタリング・システムは、従来の地上回線では実現の難しかった、

全国地震観測点の地震波形データを全国どこでもリアルタイムで利用できるという画期的な状況をもたらした。現在、衛星テレメータでデータを収集・配信している観測点は400点を超え、全国20余りの受信地点に地震波形データを配信している。各送信局(観測点)からいったん中継局に送り、中継局で全点分を集約して配信するという「2ホップ方式」を用いているため、簡単な設備で送受信が可能である。

## 4. 早期地震情報の発信

早期地震情報は大きく2つに分けられる。1つは、主要動到達前の警報システムに代表されるような、文字通りのリアルタイム地震情報、もう1つは、一通り揺れが収まった後の被害全容情報である。以下、それぞれの具体例について述べる。

### (1) 主要動到達前情報

地震波にはP波とS波の2種類がある。地殻を通るP波の速さはおよそ6 km/s, S波の速さはおよそ3.5 km/sである。したがって、たとえば震源から100 kmの場所では、地震発生から約16秒でP波が、その約13秒後にS波が到達する。振幅は方位に依存するが、平均してS波がP波の5~10倍である。建築物の倒壊や落下物の被害の多くはほとんどこのS波の揺れが原因である。

そこでこの到達時間の違いを利用してS波の到達前に揺れを予想し、緊急地震情報を発信することができないのか、という発想が生まれてきた。実際、国内ではすでに「ユレダス」と呼ばれる新幹線の緊急警報システムが稼働しているほか、「ナウキャスト地震情報」の活用が国土庁・気象庁・消防庁の間で検討されている。

この直前地震情報システムを実現するにあたって大きく3つの課題がある。(1)どんな情報が提供できるか、(2)どのように伝達するか、(3)どのような緊急対応に利用可能か、を明確にすることである。このうち、(2)についてはデジタル衛星放送(CS)を利用したシステムが将来的に有望である。以下、(1)に関連して、現在「ナウキャスト地震情報」計画で試作されているものに筆者の考えを少し加えた内容を示す。

#### <規模のしきい値情報>

地震の発生時刻(震源時という)と位置と大きさは震源情報の3要素である。この早期情報は、いろいろな意味で、その後の緊急対応にきっかけを与える役割を果たすので、情報の速報性とともにある程度の信頼性が要求される。一般に解の信頼性はデータ数に依存する。地震発生直後の観測データは皆無であり、その後地震波が広がっていくにつれて信号をキャッチする観測点の数が増えていく。したがって、ある程度時間がたてば精度のよい震源決定は可能である。しかし、リアルタイム地震防災ではまさにこの地震波が観測点を通過していく数秒間が大きな意味をもつので、最初の1点でキャッチした段階でも何らかの情報を出す意味がある。たとえば以下のような手順が考えられる。

- 1) 最初に1点でP波を感知した段階:  
この観測点を震央、深さを10~15 kmと仮定して、地震の規模を判定し、あるしきい値を超える場合に地震が発生したことを知らせる。
- 2) 複数の観測点でP波を検出した段階:  
震源時・位置・規模を決定し、震源情報を更新する。各点の主要動の大きさ(しきい値)、到達時刻の予測情報を発信する。
- 3) 複数の観測点でS波を検出した段階:  
予測震度・計測震度に基づき被害予測情報を発信する。

日本全国にはおよそ20~30 km間隔で地震のテレメータ観測が行われている。これを使えば、日本国内の地震について、地震発生からおよそ5~7秒で震源の特定が可能である。しかし地震動の初めの部分だけでは、主要動の到達

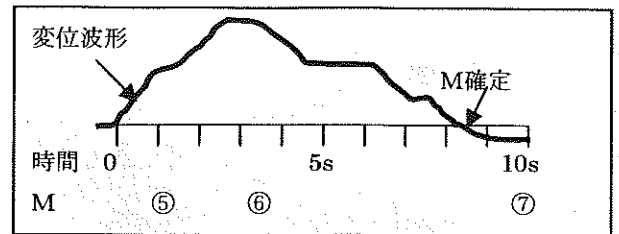


図4 地動変位波形を使ったマグニチュードのしきい値判定。

時刻は予測できても、大地震かどうかの判定が難しい。地震の規模は最終的なすべり破壊領域の広がりであり、M8の地震では破壊領域の広さはおよそ100 km、破壊に要する時間は30~60秒である。この場合、主要動の到達前に地震の規模を判定することは原理的に不可能である。

しかしそのような場合でも、M6を超えるかどうかといった「規模のしきい値予測」はP波初動の数秒間の段階で可能である。原理は以下のとおりである。

震源時間関数のパルス幅(継続時間)  $\tau$  [s] と地震モーメント  $M_0$  [Nm] との間には次のような良い相関関係がある。

$$M_0/\tau^3 = 10^{16} \text{ [Nm/s}^3\text{]} \quad \text{浅い地震}$$
$$10^{17} \text{ [Nm/s}^3\text{]} \quad \text{深めの地震 (} h > 50 \text{ km)}$$

この式から継続時間  $\tau$  とモーメントマグニチュードの間の関係式が得られる。

$$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5 = 2 \log \tau + 5 \pm 0.3$$

震源時間関数は無限媒質中で観測されるであろう変位波形に対応している。そこで、上の  $\tau$  を「P波到達のあと変位が零線をクロスするまでの時間」と置き換えれば、上の式は各時刻におけるマグニチュードの下限値を示しているとみなすことができる。たとえば1秒、3秒の段階で零クロスがなければ、“M5以上”、“M6以上”の判定を各段階で出すことができる(図4)。

直前地震情報のもう1つの課題である情報活用については、危険物からの緊急避難、列車の緊急停止、医療現場での緊急対応、コンピュータシステムのバックアップ等、アイデアとしてはいろいろあげられる。これについては今後、直前地震情報の具体的な内容を防災担当者に提示した上で活用調査をする必要がある。

#### <メキシコの例>

主要動到達前情報は震源地が離れている場合に有効である。たとえば、1985年メキシコ・ミチョアカン地震(M8.1)で大災害を被ったメキシコ市は、震源域の太平洋岸からは約350 kmも離れている。太平洋岸に設置した地震計のデータを使えば、主要動到達まで1分間以上の余裕をもって警報を発することができる。そこでメキシコ市は、1991年から地震警報システム(SAS)を試験的に運用し、沿岸で大きな地震が感知されると、ラジオ放送等で一般市民に警報を流している。実際に、93年9月14日グエレロ地震(M7.3)では主要動到達の70秒前に直前情報が出されるなど一定の成果をあげた。しかし、その後、それほど大きくない地震でも直前情報が出されるとあって、このシステムの有効性を疑問視する声もある。やはり上述のような地

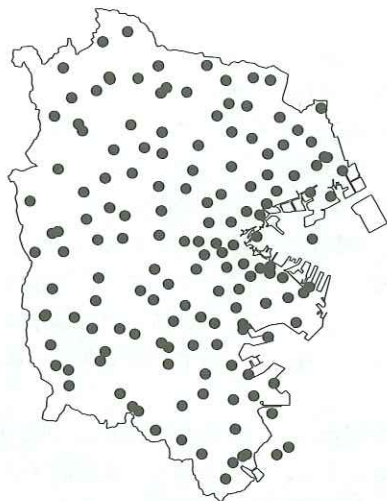


図5 横浜市の高密度強震計ネットワーク。市域400平方kmの中に150基の強震計観測点を持つ。

98/05/03 11:09 Ac=0.5Gal 0.2Hz

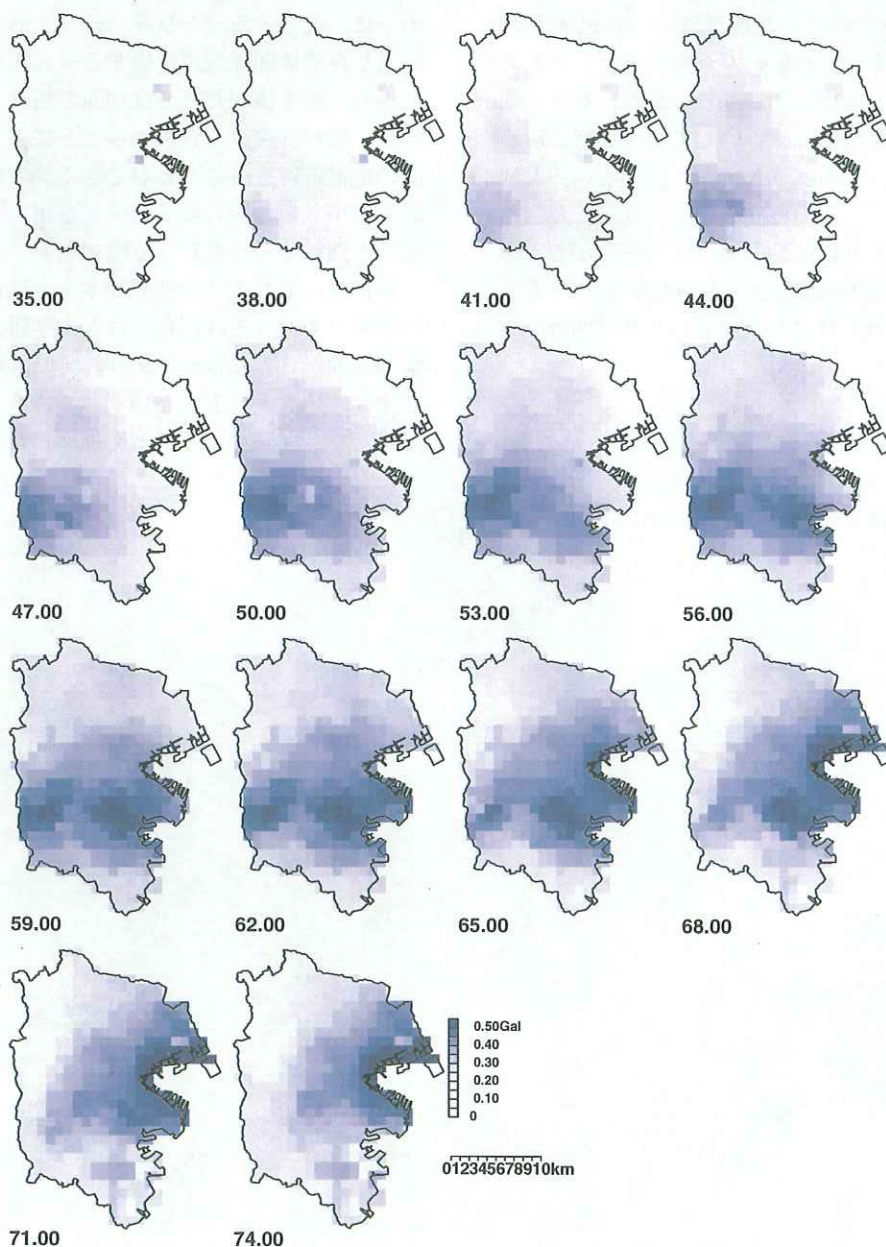


図6 平成10年5月3日の伊東沖の地震(M5.7)による横浜市域の地動。5秒より短周期成分はカット、3秒ごとの加速度振幅の分布を示す。

震規模、揺れの大きさに関する情報が不可欠である。

## (2) 被害全容の早期情報—横浜市の例

平成7年神戸市の大震災は、海港都市として似たような立地条件をもつ横浜市に大きな衝撃を与えた。震災後まもなくして、横浜市の防災関連部局と横浜市立大学の研究者から成る「地震懇話会」が発足した。当時市立大学に属していた私も参加した。そこで、地震被害状況の早期把握の重要性が話し合われ、高密度強震計ネットワークの構築が検討された。それは、強震計を市域に張り巡らし地震時の揺れを数分以内に収集して、被害程度を迅速に把握しようというものである。

このシステムは平成8年に仮運用を始め、平成9年5月より本稼働に入った。地震計は消防所を中心に全市に150基配置されている(図5)。横浜市の面積は400平方キロであるから、およそ1.5キロ四方に1基の割合である。

各地点の揺れが一定のレベル(2gal)を超えると、早期

情報(最大加速度, 卓越周波数, 計測震度, SI 値, 応答スペクトル)が観測点のマイクロプロセッサで計算され, ISDN 回線を通して, 3カ所のセンター(市庁舎, 消防署, 市立大学)に送信される。センター側では地震発生後2分ぐらいで市域の揺れ分布が画面に表示され, 約20分後には建物の倒壊や液状化などきめ細かな被害予測が行われる。この被害予測システムは READY (REal-time Assessment of earthquake Disaster in Yokohama) と名づけられ, 平成11年4月から稼働している。これにより, まずは初動体制の立ち上げを, 次に大被害の予想される場所とそうでないところを区別し, 地図情報などと結び付けて, 効果的な道路の確保に役立てることができる。

この強震計ネットワークは大地震時以外にもいろいろな用途がある。まず規模の小さい地震の記録を使って地盤の振動特性を調べることができる。また, きめ細かな震度分布を市民に公表することにより地震に対する注意や関心を喚起することができる。さらに, 活断層のような段差が地下に存在するかどうかを調べることも可能である。

図6は98年5月3日に起こった伊東沖の地震時の揺れである。3秒間ごとの最大加速度をスナップに示したものである。振動が南西から北東方向に進むにつれ, 地下の構造の不均一性を反映して振幅の大きいところが島状に現われていることがわかる。このようなデータがいろいろな地震について蓄えられれば, どの方向の地震ではどこが揺れやすいといったきめ細かな地震動のデータベースができあがる。それにより, 家屋の耐震診断を優先的に行ってもらうとか, 将来的には都市造りにも役立てることが期待される。

## 5. おわりに

地震とは固い岩盤に蓄えられたひずみエネルギーがずれ

破壊(断層)によって急激に波動エネルギーに変わる現象である。その複雑多様な破壊過程についてはかなり良くわかってきたが, 一方で, 地震の発生を事前に予測するという地震予知の難しさもわかってきた。遠い将来のことはわからないが, 今後少なくとも数十年間は実用的な直前予知は望めそうにない。しかもその間にも大地震は起こる。重要なことは, 地震の発生を抑えることも, 事前にその発生を正確に予測することができなくても, 被害を軽減することは可能であるということである。その基本は日常的な事前の備えであり, もう一つは大地震発生時の臨機応変策である。

このような観点から, 阪神淡路大震災以降, 国・自治体・公共企業体を中心に, かなり多くの強震計・計測震度計が設置された。首都圏についてみると, オンライン, オフラインを含め, 約500点の強震計・計測震度計がある。これらのシステムの主目的は, 地震発生後数分以内に震度情報を提供することであるが, 技術的には地震波形データを取り出すことも可能である。そこで我々は自治体等との協力の下に, 既存のネットワークから波形データを収集し, 研究者や自治体関係者に提供するシステムを構築しようとしている。震度情報だけでは地面の揺れ方の特徴はわからないが, 波形データを分析することによって, 広い周波数範囲の地盤応答を得ることができる。このことは, 日常的に起こる小さい地震の観測データを用いて大地震が起こった場合の揺れ分布を推定する際に重要である。

最後に, このような地震計ネットワークの構築やデータの活用にあたっては, 自治体と大学研究者の間の日常的な情報交換がとくに重要であり, また, その日常的なパイプこそが“いざ大地震”というときにネットワークが効果的にはたらく保証であることを強調したい。

# 阿蘇火山中岳における リアルタイムモニタリングシステム

いげ べ しんいちろう  
池 辺 伸 一 郎 \*

## 1. はじめに

阿蘇は九州中央部に位置し、東西 18 km, 南北 25 km の世界最大級のカルデラをもつ活火山である。およそ 9 万年前に現在のカルデラが形成された直後から中央火口丘群の活動が始まり (小野・渡辺, 1983), 現在では中岳だけが数年おきに噴火活動を繰り返している。

この中岳には、中世頃には信仰の対象として、近世以降は観光の対象として多くの人々が訪れている。特に近年では年間およそ 100 万人の観光客が火口縁まで近づいて火口見物に訪れる ((財)自然公園美化管理財団, 1995)。中岳の突然の噴火による人的被害は、昭和以降で死者 21 名, 負傷者 142 名に達している (渡辺, 1992)。また, 1980 年以降だけでも火山ガス (おもに二酸化硫黄と考えられる) による救急搬送者は 70 名以上, うち 7 名が死亡している (阿蘇町資料による)。

このような状況の下, 地元では町村や関係機関によって「阿蘇火山防災会議協議会」を設置し, 火山噴火や火山ガスによる災害防止のために「阿蘇火山防災計画」を策定し, それに基づいた安全対策を実施している。

それにもかかわらず上記のとおり少なからず人的事故も発生し続けているのが現状である。このことは火山の噴火予知の難しさや, 必ずしも火山活動に対する認識の高くない観光客が多数火山の近くまで訪れるといった特殊な条件に起因している。

阿蘇火山博物館では昭和 57 年 (1982 年) の開館以来, 活動中の中岳第 1 火口の 2 箇所に TV カメラを設置し, 活動の様子を生中継している (図 1, 2)。この映像資料は博物館への入館者に対する展示素材や啓発材料としてのほか, 火山活動に対する知見の向上とともに防災上の有効な判断資料としても活用されている。本論では

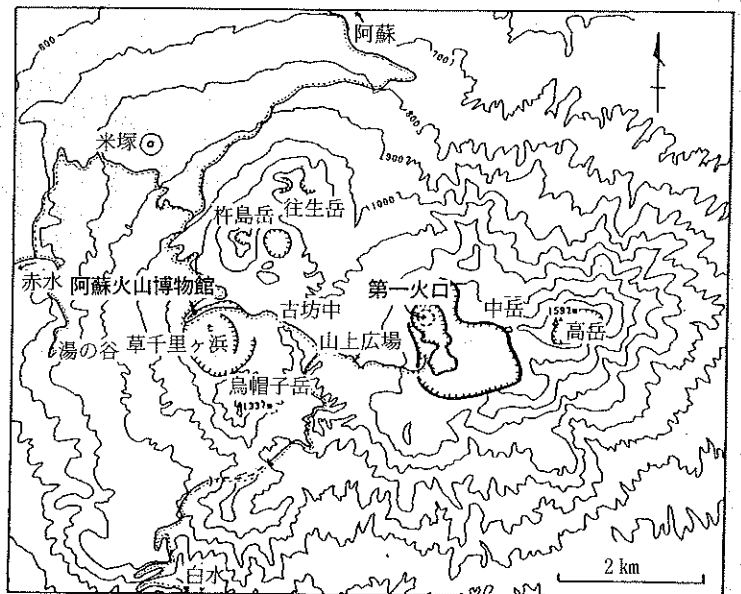


図 1 阿蘇火山中岳周辺の状況

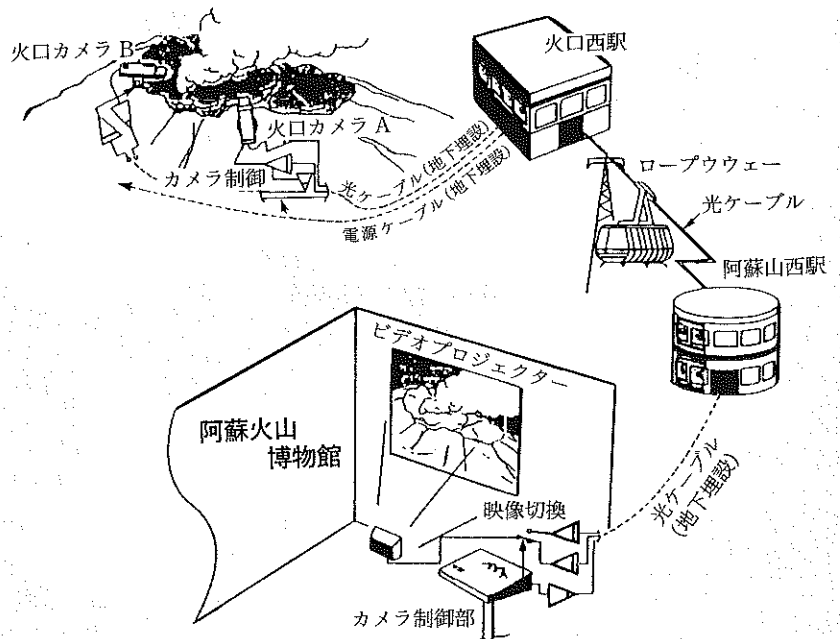


図 2 火口カメラの送信システム略図

\* 九州産業交通(株) 阿蘇火山博物館 館長 (学芸員)



このモニタリングシステムを紹介するとともに、現状での問題点や今後の課題等についても述べることにする。

## 2. 中岳の活動

中岳は、おもに玄武岩質安全岩 ( $\text{SiO}_2$ : 52%) (小野・渡辺, 1985) のマグマであることや、火口の地形などにより次のような活動の特徴が上げられる (池辺ほか, 1989)。

- ・静穏期には第1火口内に火口湖 (湯だまり) が形成される
- ・活動期には灰噴火 (小野ほか, 1995) が継続する
- ・活動の最盛期にはストロンボリ式噴火を起こす
- ・活動期にまれに水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発を起こすことがある
- ・活動期、静穏期を問わず火口底や火口壁から絶えず火山性ガスを噴出している

なお、少なくとも有史以降は溶岩の流出は確認されていない。

以上のようなことから、中岳の活動によって人的被害をもたらす危険があるのは、水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発時の噴石や火砕サージ、または火山ガスによるものである。

近年の活動の概要は次のとおりである。なお、以下の記載内容は阿蘇山測候所発表の火山情報およびモニタリングカメラの映像資料に基づくものである。

### 〈最近20年間の阿蘇中岳の活動状況〉

S. 54.	5月まで	湯だまり、活動は比較のおだやか
(1979)	6月以降	火山灰、噴石、ストロンボリ式噴火
	9月	6日 水蒸気爆発、死者3名、負傷者11名
S. 55.	1月	火山灰、ストロンボリ式噴火、水蒸気爆発
(1980)	2月以降	湯だまり、まれに土砂噴出するものの活動はおだやか
S. 59.	10月	火山灰噴出
S. 60.	1月	火山灰噴出
(1985)	5月	噴石、スコリア
	7月	中旬までに全面湯だまりを形成、活動は穏やかとなる
S. 63.	5月	土砂噴出活発化 (10~15 m)
(1988)	10月	火口底の一部に赤熱現象
H. 元	2月	湯だまり消滅、赤熱現象
(1989)	6月	火口開口、以後灰噴火活動へ移行 (火炎も伴う)
	7月以降	灰噴火活動、しだいに火山灰の噴出量が増え火炎の勢いが強まる
	10月	スコリアを火口縁上まで噴出 (ストロンボリ式噴火) 火口の拡大活動、径100 m程にまで拡大
	11月	ストロンボリ式噴火とマグマ水蒸気爆発を繰り返す

H. 2	1月	活動不安定、断続的に火山灰や噴石を噴出
(1990)	3月	火口閉塞、湯だまりからのガス突出 (大きな土砂噴出)
	4月	20日 マグマ水蒸気爆発、以降、再び活発化
	7月	大雨によって火口閉塞、湯だまり発生、活動は小康状態
	11月	赤熱現象、湯だまり消滅
	12月	空振をともなってスコリアを爆発的に噴出 (100 m 以上)
H. 3	2月	火山灰の噴出はなくなる、以後白煙、湯だまり発生
H. 4	6月	再び土砂噴出が活発化 (間欠的)
(1992)	24日	5 m, 29日 30-50 m, 30日 100-150 m (噴石も伴う)
	7月	噴石を伴う噴火 (以後、湯量減少、活動不安定、湯だまりの状態から時折噴石を伴って爆発的に土砂を噴き上げる)
	8月以降	同上
	12月	火山灰、火炎
H. 5	1月	火山灰やスコリアを噴出
(1993)	3月	活動はおだやか、火口閉塞
H. 6	9月	土砂噴出、最大で150 m 以上、噴石も伴う、地下活動不安定
(1994)	12月	再び活動不安定、土砂噴出を繰り返す、特殊微動、有感微動
H. 7	1月	有感微動 (I~II) を繰り返す、大規模な土砂噴出
(1995)	2月	有感微動、表面現象は比較のおだやか、10 m 前後の土砂噴出
	3月	有感微動が頻発、17日には噴石 (こぶし大~人頭大) を伴って“噴火”、月をとおして10~20 m の土砂噴出
	4月	数 m の土砂噴出を伴って有感微動、以後、比較のおだやか
	7月	有感微動数回、微動とは別にやや大規模な土砂噴出
H. 8以降		活動はおだやか (全面湯だまり)

## 3. 火口カメラシステム

阿蘇火山博物館は昭和57年 (1982年) に草千里ヶ浜に開設した民間の施設である。

活動中の中岳第1火口の火口壁の2カ所にTVカメラ (以下火口カメラという) を設置し (写真1)、火口から直線距離で3.2 km 離れた草千里ヶ浜まで光ファイバーケーブル (総延長はおよそ4 km) をとおして火口内の状況をリアルタイムで中継し、博物館において生中継映像として放映している。当初からこのシステムは“安全な火口観光”を



写真1 中岳におけるAカメラサイトの状況



写真2 ハウジング内の火口カメラ



写真3 音声マイクの設置状況 (Aカメラトーチカ内)

大きな目的として作られたもので、観光客を楽しませると同時に安全性を重視した考えが込められている。

設置状況の概要は、図2のとおりである。

また、システムの概要を以下に示す。

〈カメラ〉(写真2)

SONY社製のCCDカメラ(走査線数:700TV本)を使

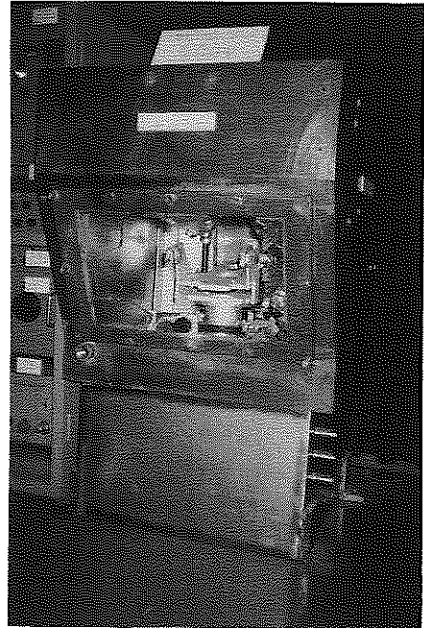


写真4 前面から見たハウジング(博物館内の展示)

用。最低照度7.5ルクス、S/N比62dBである。屋外使用のため常時NDフィルターを取り付けている。レンズは9~144mmの16倍ズームを使用。カメラの回転角度は左右各45°(計90°)、水平より下向きに60°である。カメラの写角を含めれば火口全体をカバーできる。

〈音声マイク〉

平成9年6月から火口カメラサイトに音声マイクを取り付け、噴気音や鳴動の変化をとらえている。SONY社製の鋭指向性マイクで、周波数特性は70~16000Hzである(写真3)。

〈光ファイバーケーブル〉

住友電気工業株式会社によるもので、日本の民間での使用としては最初のものであったらしい。火口から博物館までの総延長はおよそ4km、一部架空でほとんどの部分は地下埋設されている。よく知られていることではあるが、光ケーブルには次のような特徴がある。

- ・導線のような電氣的な減衰が少ない。
- ・1本のケーブルで多くの信号の送受信が可能。
- ・雷などの電気ノイズを拾いにくい。

〈トーチカ〉

噴火の際の噴石や火山灰からカメラやカメラハウジング、送信機器などを護るためのものである。また、火口周辺は環境庁による特別保護地区に指定されているため、周辺の火口壁と同系色のコンクリートにし、表面には岩石を張り付けて周辺の景観に配慮している。

コンクリートの厚みは300mmで、これまでのところ噴石による破損はない。また、設置場所が火口壁の一部で、浸食による火口壁の後退が進むことが予想されるため、水平方向にアンカーを長めに打ち込み、倒壊に対する措置を講じている。

〈カメラハウジング〉(写真4)

テレビカメラやズームレンズなどの機材を収納するものである。カメラ設置箇所は活動する火口壁という劣悪な環境にあるため、さまざまな措置が必要となる。阿蘇中岳の

場合、静穏期でも火口壁の一部からは常に火山ガスが噴出しており、そのうち阿蘇の場合はSO<sub>2</sub>（二酸化硫黄）が多いとされている（国土庁、1982）。このような中、カメラハウジングに最も重要な事柄は“耐腐食性”である。したがって、これに最も有効とされるチタニウムを主な材料としている。また、カメラがのぞく前面のガラスには冬場の凍結防止のために導電ガラスを用いている。さらに開館当初はガラスの汚れ防止のためにエアカーテンをはっていたが、効果がなかったために平成元年12月以降ワイパーを取り付け、以後改良を加えながら現在に至っている。それまでは火山灰がガラスに付着して鮮明な画像が得られなくなったことがしばしばあり、そのような場合、活動状況を見ながら実際に現地まで行って手作業で火山灰を除去していた。ワイパーの設置以降は、日常的なガラスの掃除は博物館からの遠隔操作によって安全に行っている。

#### 〈その他〉

雷に対して、火口における変換機器などは雷によるサージによって壊される危険性が大きいので、耐雷トランスを設置している。

### 4. 噴火活動のモニタリング

#### 4.1 阿蘇における従来のモニタリング

阿蘇では従来、気象庁の阿蘇山測候所を始め、京都大学火山研究センターが中心となって地震計のほか傾斜計、地磁気計などを用いて、さらには現地観測によって中岳の活動状況の把握につとめてきた。しかしながら現地観測は通常は1日に1回（数分間～数十分間）であるが、めまぐるしく変化する活動期には何度も出かけねばならず、阿蘇山測候所としても大変な作業が続いていた。また活動期における現地観測は危険を伴うため中止されることも多く、そのような時期に何かのイベントが起こった場合には観測機器によるデータ解析の結果からその内容を判断してきた。

#### 4.2 火口カメラ設置後のモニタリング

火口カメラシステムが稼働をはじめた昭和57年（1982年）以来、第1火口内の表面活動の状況が常時モニターに映し出されるようになり、これまでの観測機器のデータに加えて映像による活動状況の把握ができるようになった。このことは、表面現象の変化した時刻やその場所、状況が従来に比べて遥かに正確に、迅速に解るようになったということであり、このことが学術上だけでなく防災上も最も貢献したことであろう。

当初は博物館における確認情報を測候所に連絡し、それをうけて測候所員が現地観測、或いは博物館に来て映像を確認するといった状況であった。その後、気象庁で火口カメラによるモニタリングの有効性を認識し、当館では気象庁からの要請を受けて平成3年以降は送信経路途中で分岐し、阿蘇山測候所への映像分配を行っている（写真5）。また、音声マイクによる噴気音や鳴動などの情報も平成11年以降分配している。近年では阿蘇山測候所においても速報性を重視して現地観測で確認していない段階であってもこ



写真5 阿蘇山測候所内のモニタリング状況

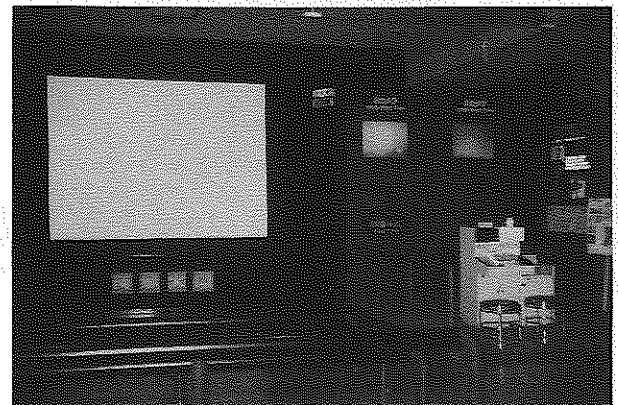


写真6 火山博物館内展示室でのモニタリング状況

の映像情報によって火山情報を流すことも多くなってきたようである。

また、当館では一般への情報提供のため、地元テレビ局各社（5社）と映像の分配協定を有償で結び、各社からの要請に応じてニュース資料としての映像を提供している。特にNHKではFPU（Field Pick Up）システムや無人リモコン制御装置によって常時博物館から熊本放送局へ電波をとばしており、いつでもニュース資料として使用できるシステムとなっている。

#### 4.3 火山博物館におけるモニタリング

##### 〈展示資料としての活用〉

当初この火口カメラは阿蘇を訪れる観光客のために安全な火口観光を提供し、さらには悪天候時や火山活動時においても常に火口をのぞくことのできるシステムを提供したいとの考えから、博物館展示の“目玉”として開発されたものである。現在では写真6にあるように、「体験コーナー」として入館客に自らカメラを操作してもらいながら火口の状況を自由に見てもらい、さらにビデオの放映によって解りやすく解説している。また、過去の映像を熊本大学教育学部渡辺一徳教授の指導のもとに編集して、学校教材や一般の方への学習素材としてビデオを販売している。

##### 〈学術資料としての活用〉

火山博物館としては現在は主に学術資料の蓄積という観点から、長時間録画（機材は熊本大学渡辺一徳教授からの貸与）とともに、原則として毎日のノーマル録画を数分間（タイムコードを組み込み）撮って保存している（写真7）。

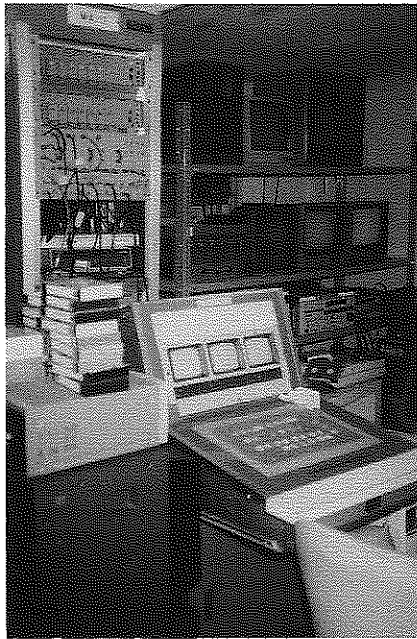


写真7 火山博物館内映像処理室

モニタリングの結果、火山活動に関して新たな知見が見いだされた段階で、火山学会での講演や記事としての発表をはじめ、さまざまな場所での講演会などで紹介を続けている。さらに、各地の大学関係者や気象庁などからも要請に応じて資料提供を行っている。

#### 〈防災上の資料としての活用〉

民間の博物館としての立場からは防災的な情報を単独で流すことはひかえており、活動の変化に気づいた時点で阿蘇山測候所に報告する、あるいは測候所やその他の行政関係機関からの要請等に応じて資料を提供するように心がけている。

### 5. モニタリング資料の活用

ここまで述べてきたように、阿蘇中岳には他の活火山にはない独特のモニタリングシステムがあり、さまざまな分野に活用されている。ここではその事例について紹介する。

#### 〈火山活動に対する新たな知見〉

火口カメラシステムが稼働をはじめた昭和57年以来、上記のとおり昭和59～60年(1984～85年)、平成元～2年(1989～90年)、平成4年(1992年)、平成6～7年(1994～95年)にそれぞれ活動期があった。そのうち、平成元～2年は本格的な活動期であり、その活動期において火口カメラによってとらえられた多くの映像情報によって、これまでの観測態勢だけではつかめなかった活動状況の新たな知見が得られた。以下にそのうちのいくつかを紹介する。

#### ・マグマ水蒸気爆発の発生(写真8)

これまでは活動の最盛期にはストロンボリ式噴火を行い、活動期に雨水などによって火口が閉塞された際に水蒸気爆発が発生することが多いと考えられていたが、活動の最盛期に火口が閉塞されなくても突然爆発的噴火を起こすことがあることがわかった。これは中岳の地形的特徴から周辺に地下水が豊富にあるためと考えられる。



写真8 マグマ水蒸気爆発の瞬間(火口カメラ映像より)

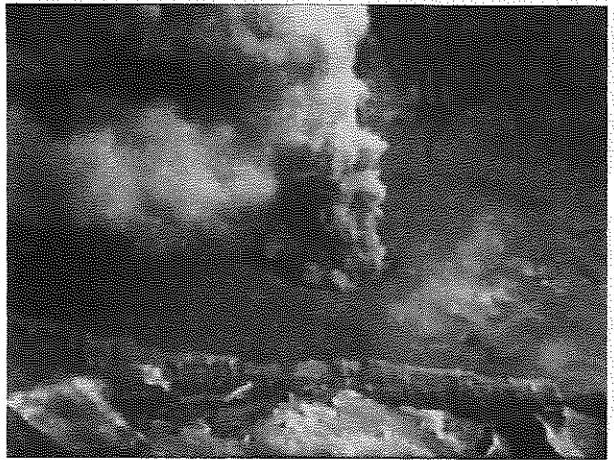


写真9 火口からの火山灰噴出(火口カメラ映像より)



写真10 火山雷の発生した瞬間(火口カメラ映像より)

#### ・火山灰の噴出状況(写真9)

多量の火山灰を噴き上げつづける阿蘇独特の“灰噴火”は火口底のわずか直径10～20mほどの火口からの噴火活動である。火口が火口底いっぱい広がった状態での活動期間は非常に短く、不安定な状態といえる。

#### ・火山雷の発生(写真10)

多量の、しかもドライな状態での火山灰が噴出するとき、火山雷が見られることがある。

#### ・大規模な土砂噴出(写真11)



写真 11 湯だまり状態からの大規模な土砂噴出(火口カメラ映像より)

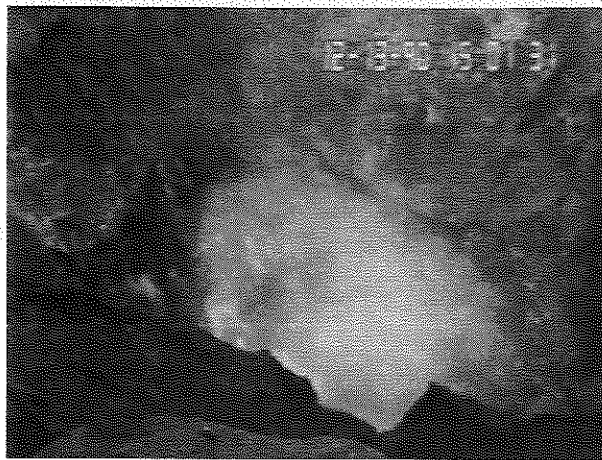


写真 12 やや爆発的な噴火の瞬間(火口カメラ映像より)

全面湯だまりの状態、突然大規模な土砂噴出を起こすことがある。これは地下活動はやや活発な状態であり、静穏期にはあり得ない。古文書による噴火記録で“中岳の火口から突然お湯があふれて土砂とともに流れ出した”といった記載がいくつか見られるが、これはこのような現象であったものと考えられる。

#### ・やや爆発的なマグマ噴火(写真12)

ストロンボリ式噴火の周期が長くなった結果と考えられるが、爆発音を伴ってマグマのしぶきを飛ばすような噴火がみられた。このときには噴出の直前に明瞭な空振もとらえられた。

#### 〈火山防災に対する新たな知見〉

上記のような噴火活動に対しての新たな知見によって、火山防災に対してもいくつか新たな見方が見いだされた。

#### ・爆発的噴火の可能性

ストロンボリ式噴火を行っているようなときは火山ガスがスムーズに抜けており、爆発を起こすことはないと考えられていたが、そのような時期にも爆発を起こす可能性が十分にある。

#### ・大規模な土砂噴出の可能性

表面上は全面湯だまりでも突然大規模な土砂噴出を起こすことがあり、地下活動の監視の重要性が再認識された。

#### ・灰噴火期の安定性

灰噴火を継続している状態は、活動期の中でも比較的安定している時期と考えられる。

#### ・火山ガスの危険性

活動が平穏な時期でも火山ガスは常に噴出しており、このような時期には観光客が無防備に火口に近づくことが多いため、発作などの人的事故につながる危険性も高い。

## 6. 今後の課題と取り組み

これまで述べてきたように、火口カメラシステムが火山学や火山防災に果たす役割はかなり大きいといえる。しかしながら今後このシステムを維持していくうえで、またさらに有用な情報として活用していくうえでは以下のようないくつかの課題を残している。

#### 〈画像の維持・管理〉

現在までに数百本のVHSテープが映像資料として残されている。ビデオテープの収納場所が狭くなりつつあるのは当然のことながら、その資料内容の整理(データベース化)が全くできていない状態である。現時点では人間の記憶に頼るのみであり、毎日確実に新たな映像資料は増えていくなかで、それにも限界があるのは明らかである。同時に、画像の劣化も大きな問題であり、早期にデジタル化する方向で考えていかねばならないと考えている。

#### 〈映像データの数値化〉

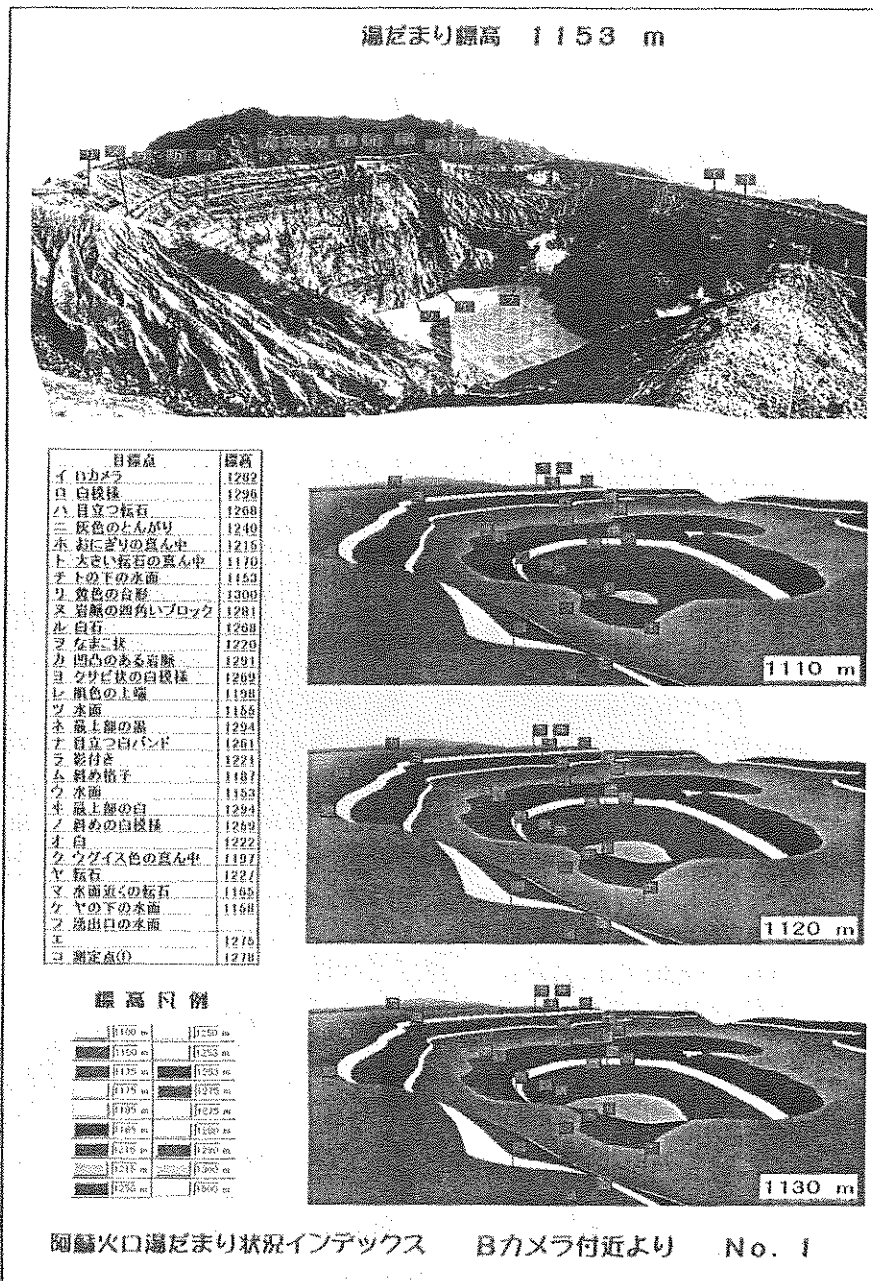
表面活動の変化をとらえることは学術上、防災上大変重要なことではあるが、さらにそれを有効に活用するためには画像データのデジタル化が必要である。たとえば、湯だまりの減少割合や、噴煙の上昇速度、火口の大きさなどはこれまで測候所などによって推定の値が用いられてきた。それをきちんとした数値に置き換えるために現在一つの試みを行っている。それは、熊本大学、渡辺一徳教授の依頼によって「陸コンサルタント株式会社」が三角測量を行い、火口壁上にいくつかの基点を定めてそれぞれの地点の標高を決めたことである(図3)。これによって火口内に一つの“物差し”が置かれたことになり、このデータを用いてさまざまな変化について数値化できるのではないかと考えている。

#### 〈可視画像カメラの限界〉

現在火口カメラは主に昼間だけの運用であり、ある程度の低照度にも使用はできるものの、夜の状態を把握するのはほとんど不可能である。学術的、防災的利用を考えれば、今後赤外線画像などの組み込みを考慮していく必要がある。

#### 〈音声データの活用〉

音声マイクによって収録された火口の噴気音や鳴動音は現在、学術的、防災的に如何にすれば有効なデータとして活用できるか模索中である。音質や音量の変化が活動の変化にどう結びつくか、また、それらをどのようにデジタル化していくかが課題である。



院コソリタフト株式会社 作成

図3 火口壁目標点の測量結果の一例 (陸コンサルタント株式会社による)

## 7. おわりに

阿蘇中岳は、世界でも有数の活火山でありながら誰もが直ぐそばまで近づいて火口をのぞくことのできる火山である。このこと自体は一般の人々が火山に対する認識を高めることや大自然の仕組みを考えるうえで大変有効なことである。しかしながら、一般の観光客のなかにはどこかの遊園地やテーマパークと同じ意識で火口見物にやってくる人も少なくない。我々は観光客に安全に見物してもらうためにも、火山活動に対するより確かなデータを集積し、理解を深めていかねばならない。さらには火山や自然に対して高い認識をもつ人を少しでも増やすために社会教育の一つ

のツールとしてもこのシステムを活用していきたい。このことは、火山防災についての一つの大きな手段でもある。

## 参考文献

- 1) (財)自然公園美化管理財団(1995):阿蘇山上(中岳)火口周辺における有毒火山ガス流動状況調査報告書, 125 p.
- 2) 渡辺一徳(1992):阿蘇火山, 日本地質学会99年学術大会見学旅行案内書, 13-32.
- 3) 池辺伸一郎・渡辺一徳(1990):阿蘇火山中岳の最近の活動—1988年3月~1989年11月—, 地質ニュース426号, 6-14.
- 4) 国土庁(1982):火山ガス等に関する調査報告書, 264 p.
- 5) 小野晃司・渡辺一徳(1985):阿蘇火山地質図(5万分の1.火山地質図4, 地質調査所).
- 6) 池辺伸一郎・長野敏郎・渡辺一徳(1989):最近の阿蘇中岳活動の推移, 日本火山学会講演予稿集(1989年秋季大会), A 69.

# 岩盤斜面崩壊対策としての リアルタイムモニタリング技術

おおにし ゆうぞう  
大西 有 三\*  
にし やま さとし\*\*  
西 山 哲\*\*

## はじめに

平成7年2月の北海道豊浜トンネル坑口岩盤斜面崩壊事故の発生以来、岩盤斜面の安定問題に社会の関心が集まるようになった。平成8年に全国で実施された道路防災点検の結果によれば、我が国において斜面の安定性が不安視され、早期に対策を図る必要のある箇所が56,700カ所、日常点検や定期点検により管理する必要のある監視強化箇所が145,500カ所という、道路に関してだけでも膨大な数の斜面崩壊の危機をかかえている。しかしながら、前述の事故後ただちに土木学会に設けられた「大規模岩盤崩壊に関する技術検討委員会」によれば、岩盤崩壊現象に対する調査・計測事例が少なく、崩壊メカニズムに関する調査研究が遅れていると指摘されているのが実情である。危険な斜面の安定性を評価し、崩壊の予知・予測を行うことで、崩壊を未然に防ぐ措置を講じたり、被害を最小限にいとどめるためには、崩壊に至る前兆現象が現われた場合、その変状をすばやくとらえ、的確な対策を検討するために有用な基礎的資料を与える計測技術の完備は欠かせないものである。

これまで岩盤斜面において適用が検討されてきた計測手法の内容の一覧を図1<sup>1)</sup>に掲げる。これらの計測は、次のような物理量の計測を対象としている。

- ・変位：地表および地中変位
- ・圧力：土圧、水圧および軸力
- ・破壊音、小規模崩落の感知
- ・その他：地温または降雨などの気象変化等

しかしながら、法面の掘削に伴う計測の場合と違って、自然斜面に対する崩壊のモニタリング実績は、すべり破壊の場合を除いてきわめて少ない。この理由としては、

- (1) 崩壊の前兆現象がとらえにくく、崩壊が突発的に生じる。
- (2) 計測器の設置が困難な場所が多く、

計測器の維持管理も困難なことが多い。

- (3) 場所ごとに崩壊形態が異なり、適切な計測機器の選択が難しい。

などが要因として挙げられる。特に岩盤崩壊のモニタリングは地すべりとは異なり、前兆となる現象が現われてから崩壊に至る時間が短いため、リアルタイムの計測技術が要求され、またその計測精度も高いものが必要となっている。その他、計測技術としての普及を図るためには、

- ・作業が危険であることが多く、遠隔からの計測が可能であること。
- ・広範囲に計測できながら、計測コストを抑えることが可能であること。

などの項目も検討されなければならない<sup>2)</sup>。

建設省土木研究所では、平成8年度に「岩盤崩壊モニタリングの調査・検討ワーキング」を組織し、全国各地において岩盤崩壊モニタリング箇所の選定を行い、各箇所への計測機器の設置を行うことで、機器開発や現場での計測技

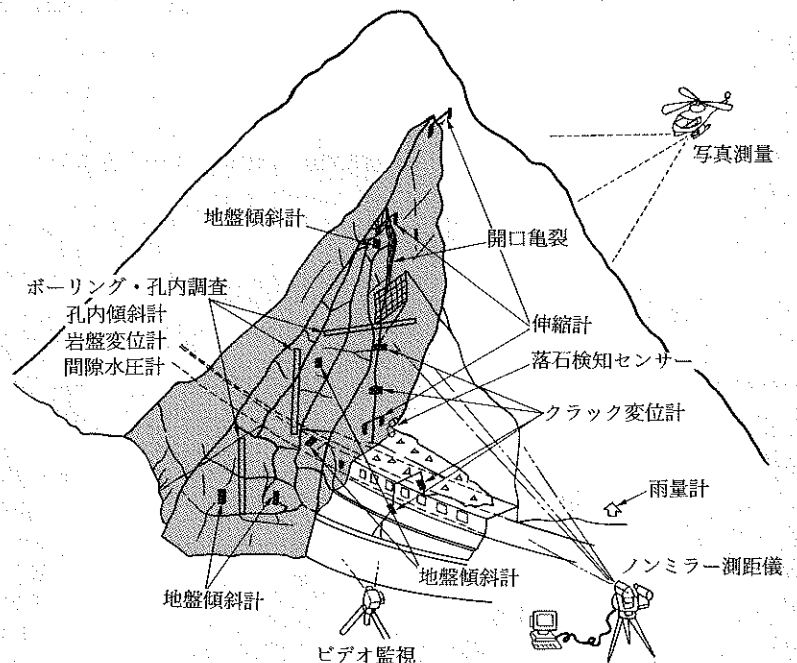


図1 既存技術による岩盤斜面の調査計測のイメージ

\* 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 教授  
\*\* 助手

術の向上を図っている<sup>3)</sup>。図2ではそのサンプル例を示す。しかし従来から使用されている計測機器の多くは局所的な観測であり、広範囲にわたる面的な観測を連続的に評価する計測手法の開発が急務となっている。その後、平成9年には第2白糸トンネル崩壊事故が発生し、道路の監視・管理強化の方策としての岩盤斜面の計測がより一層重要視されるようになってきている。ここでは、まだ開発段階ではあるものの、岩盤斜面崩壊に対する新しいリアルタイムモニタリング計測として期待される技術の概要を紹介する。いずれもまだ、現場での実績は少ないが、従来の計測技術にない特徴をもっており、具体的な応用のための実験データが収集されつつあり、その実用化が待たれているものである。

### 1. 光ファイバーセンサの利用<sup>4),5)</sup>

光ファイバーをセンサとして利用する計測の特徴は、広範囲に設置でき連続的な観測が可能なおうえに、なによりも測定データの転送が容易なことである。

光ファイバーは、高い屈折率をもつコアが中心にあり、さらに機械的強度を確保する屈折率の低いクラッドと呼ばれる部分が、コアの外側を取り囲むような構造をしている。クラッド径は0.1mm程度できわめて細く、材質はコアもクラッドもガラスである。光ファイバーの一端からパルス性の光を入射させると、その光は後方散乱しながら伝播する。この後方散乱光のなかには、レーリー散乱、ラマン散乱およびブリルアン散乱光があり、それぞれの散乱光の特徴を利用して、各種センサとして用いることができる。詳細な測定原理は本編の「やさしい知識」など他の文献を参考にしていきたい<sup>6)</sup>。

現在、光ファイバーセンサに関しては、施工性や耐久性の向上が課題となっているが、センサからの情報が光の信号で伝送されてくる利点を生かせば、光ケーブルを監視事務所などに引き込み、遠隔にて監視・管理する計測システムを構築できる可能性をもっている。光ファイバーは数km直列に接続でき、1台の処理装置で複数本の光ファイバーを光スイッチにて切り替えながら観測できる。これら光ファイバーセンサによる集中監視システムの概念図を表わしたものが図3である<sup>7)</sup>。

現在、地形・地質および植生の状況等の斜面条件やさまざまな崩壊パターンに応じたセンサの設置・施工法の確立が検討されている。実際の斜面において、従来の変位計および傾斜計と光ファイバーによる変位モニタを比較した実験結果を図4<sup>8)</sup>に示す。この実験は静的破碎剤を岩盤のクラックに注入し、意図的に岩盤崩落および岩盤変位を



図2 天鳥橋西地区観測計器設置状況

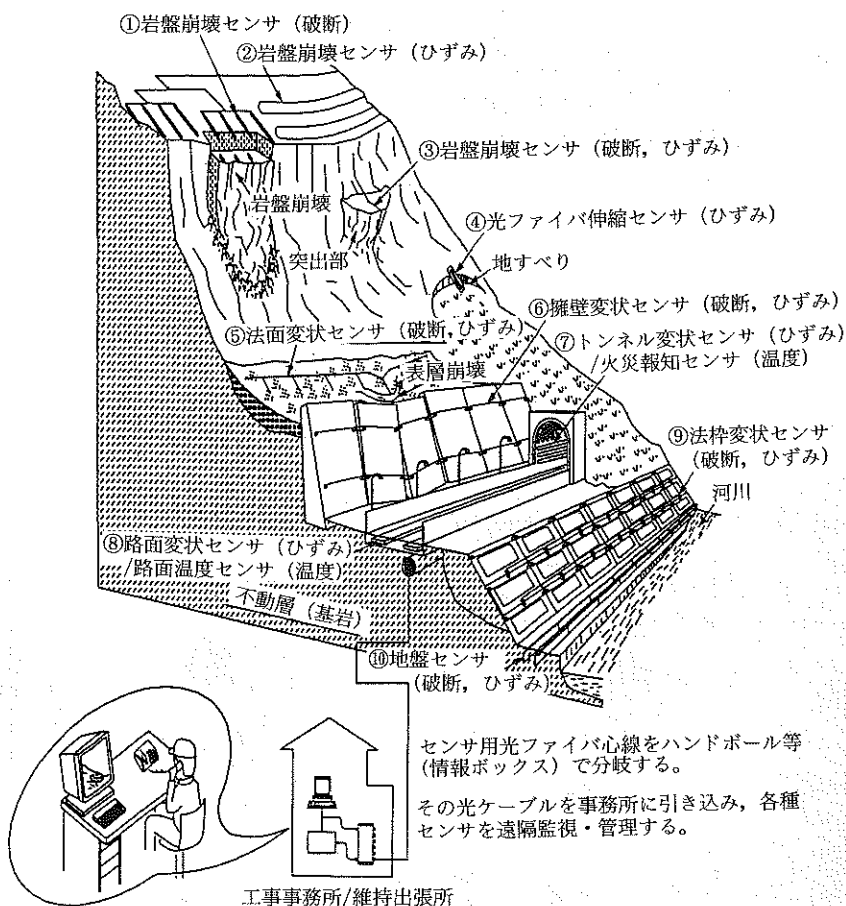


図3 光ファイバーセンサーを用いた測定の概念図



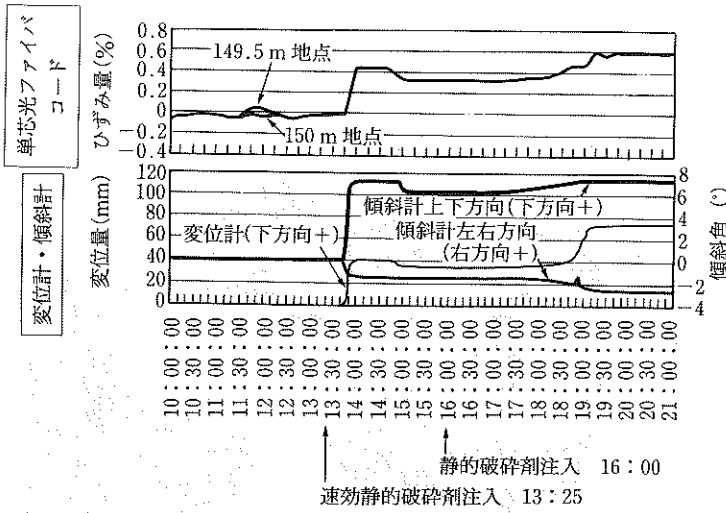


図4 光ファイバによる変位計測結果

生じさせ、光ファイバーセンサのひずみ変化量と変位計および傾斜計の変位量を比較したものである。光ファイバーセンサの計測結果は、従来型の変位計および傾斜計と良く一致したものとなっており、この光ファイバーを岩盤斜面上に張り巡らすことにより、従来の計測機器に替わるモニタリングシステムが構築できる可能性を示している。

## 2. SPT (Spot Projection Triangular Surveying) 法による遠隔変位計測<sup>9)</sup>

この手法は、岩盤面に投影したレーザースポットを、別の角度から CCD カメラで撮影することによって、空間中に三角形をつくり、測量で用いられる前方交会法を利用した三角測量により当該スポット点の 3 次元座標を求めるものである。前方交会法とは三角形の 1 辺 2 角を計測し、残りの頂点の座標を決定する手法である。この手法を英語で表記した頭文字をとって、SPT 法と称している。

SPT 法の装置構成は CCD カメラとレーザーを搭載するリモコンセオドライト 2 台からなり、それにカメラ撮影したスポット点の認識を行う画像処理装置、通信制御用のパソコン、パソコン上で稼動して装置全体を制御するソフト等から成る。セオドライト内部のステッピングモーターを使って望遠鏡の水平および鉛直方向を制御し、測角精度

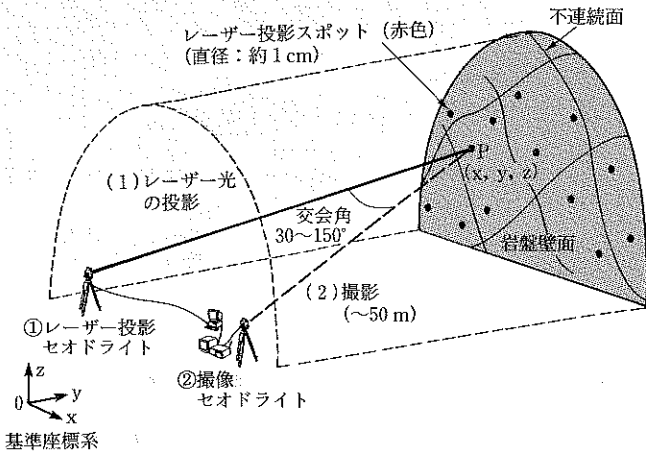


図5 SPT による地下空洞での計測概念図

は 1 秒読み、さらに角度は電子式エンコーダーにより検出する。また搭載するレーザーはクラス 2 の等級であり、計測時に管理者を必要としないものである。

計測の手順は次のとおりである。岩盤面上の計測箇所と範囲を決定し、基準座標系を設定する。装置の配置の決定と測量を行い、計測点の方向を手動で計測し、複数の計測点の記録を作成する。その後計測点のモニタリング計測を行う。

モニタリング中に変位が生じた場合は、初期に記録したセオドライトの方向には正確な三角形が形成されないことになる。そこでレーザーの投影方向を固定し、カメラの方向を微調整することにより、正確な三角形を決め直す。計測システムに装備された画像処理装置によって、カメラが撮影したスポット点の認識を行い、画像中のスポット点のずれの量を求めることができる。さらにカメラ方向の補正に必要な角度を計算し、

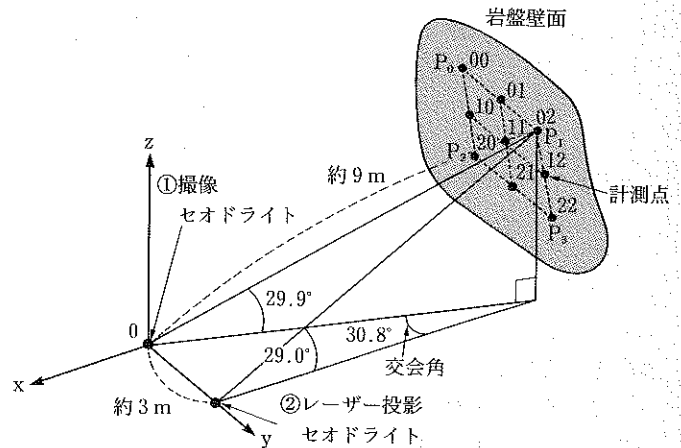


図6 トンネルでの精度試験時の計測点と装置の配置

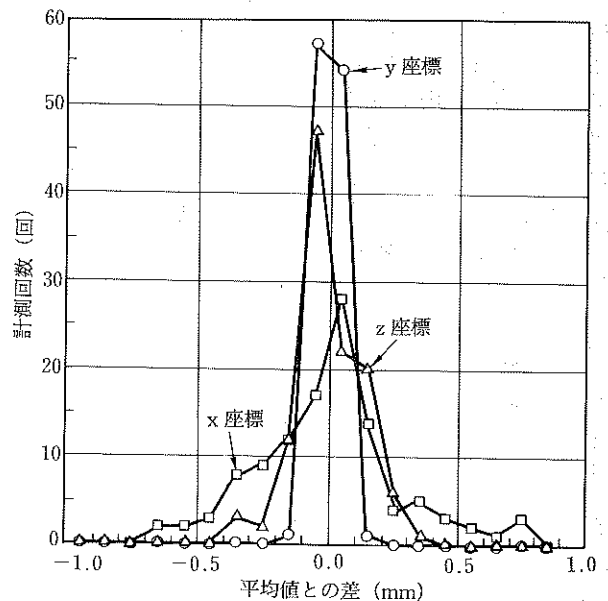


図7 地下空洞での計測結果 (計測距離 9m)

カメラ方向の微調整を繰り返すという一連のプロセスを実行することで、スポット点を高精度で自動視準した後に座標の計算を行う。このSPT法の計測の概念図を図5に示す。

本計測手法の特徴は、GPSや従来から利用されている光波測量とは異なり、対象となる岩盤壁面に計測点（GPSではアンテナおよび受信機、光波測量では反対鏡）を設置する必要がなく、1点あたり約60秒の早い速度で約1mmの精度が得られることである。

直径約4mのトンネルを利用して行われたものであるが、精度検証を行った実験例の模式図を図6に示す。計測距離は9mであり、計測点は9点である。セオドライトの中心に基準座標系の原点を設け、y軸がレーザー投影セオドライトの中心を通るようにし、セオドライトの光波測量の機能を用いて距離計測を行い、座標を決定した。

計測結果を図7に示す。動かない岩盤面上の計測点の座標を複数回求め、計測結果のばらつきから再現性を評価することで計測精度の評価を行った。横軸は平均との差で0.1mmごとに目盛りを付けている。縦軸は計測回数であり、奥行き方向に相当するX軸方向のばらつきは、標準偏差で0.28mm、左右方向に相当するY軸では0.03mm、さらに上下方向に相当するZ軸は0.12mmであった。

SPT法は作業箇所が危険な場合でも計測機器や標点を設置することなく遠隔にて計測が可能であるため、岩盤斜面でのモニタリングとして期待される計測技術である。セオドライトの設置や測量に関する熟練を必要とする面もあり、また野外でのレーザー光の屈折の影響や、交会角の関係上、計測距離をどこまで遠くにできるかなどの問題については、今後検証実験での検討が必要である。

### 3. 精密写真測量計測システム<sup>10)</sup>

本計測システムによる計測手順の模式図を図8に示す。まず計測の対象となる岩盤に標的を設置する。これは光を反射する物質が塗布された基材で構成されたもの（レトロターゲットと称する）を貼付することで作られる。写真画像に写されたこの反射ターゲットによって、変位計測の対象となる箇所を特定するのである。また、写真画像から対象物の大きさを決定するための基準尺を用意し、同時に写真画像に写しこむ。

次に岩盤を複数の方向から姿勢を変えながらデジタルカメラを使って写真撮影する。これは収束撮影と呼ばれ、解析精度を向上させるために重要な撮影方法である。この時、カメラの位置と角度はバンドル調整法という計算過程によって算出されるので、未知数のままでよい、すなわち、フリーハンドで写真撮影をすることができる。写真画像はデジタルで得られるので、その場で画像をパソコンに取り込んで解析することが可能であり、リアルタイムでのモニタリングを実行することができる。

図9には精密写真測量の原理の概念を示す。一つの標的を複数枚の写真に重複して撮影し、どの標的がどの写真に写っているかを調べ、対象空間軸上の3次元座標を、デー



図8 精密写真測量による計測手順

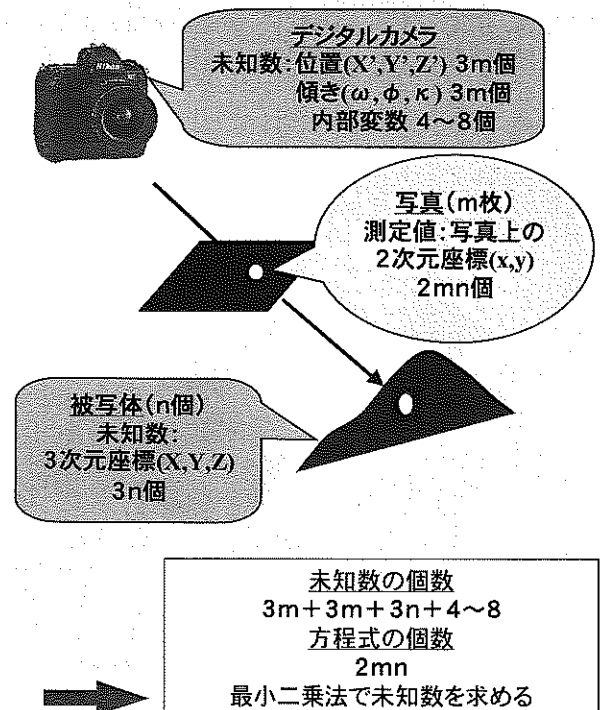


図9 精密写真測量の原理（測定値と未知数）

タとして得られる標的の画像上の2次元座標から“逆解析”して算出する。

解析の理論的背景にあるのは、岩盤に設置された標的とカメラの原点、および写真画像に写された標的の3つが一つの直線上に存在するという共線条件と呼ばれる条件式であり、これによって写真画像上の標的の2次元座標と計測の対象である岩盤上の標的の3次元座標とを関係付ける式が導かれる（共線条件式）。このとき、写真画像上の2次元

座標  $(x, y)$  それぞれの成分につき共線条件式が一つずつ存在するので、 $n$  点の標的を計測する場合、 $2n$  個の式が存在する。デジタルカメラにより、 $n$  点の標的を  $m$  枚の写真に重複して撮影したとすると、共線条件式の総数は  $2mn$  個になる。たとえば、30 点の標的を 10 枚の写真に写したとすると、 $2 \times 10 \times 30 = 300$  個の方程式が得られる。

この方程式において、未知数は図 9 に示すとおり、

- ・撮影時のカメラの位置と角度
- ・カメラの構造に起因する内部変数：レンズひずみなど
- ・標的の 3 次元座標

である。前の例で未知数の数を言うと、カメラの位置は  $(X', Y', Z')$  の 3 成分があるので  $3m$  個、カメラの角度も  $X', Y', Z'$  軸に対して分解して考えると  $3m$  個、そして標的の 3 次元成分  $(X, Y, Z)$  は  $n$  点設置しているので  $3n$  個ある。さらにカメラの構造に起因する内部変数は、焦点距離やレンズのひずみを表わす係数からなり、カメラの機種に応じて設定するが、これまでの例では 4~8 個の間で選択されている。したがって、方程式における未知数は  $3m + 3m + 3n + 4 \sim 8$  個存在することになる。標的の 3 次元座標は、この方程式を用いた最小二乗法によって求める。

### 3.1 岩盤崩落モニタリングへの精密写真測量の適用例<sup>(11),(12)</sup>

岩盤崩落を起こしている崖を、実際に精密写真測量を適用してモニタリングした例を紹介する。現場は和歌山県すさみ町天鳥地区であり、崖は高さ約 10 m、幅約 15 m で国道 42 号線を挟んで海に面している。図 10 に計測対象である崖の模式図を示す。崖の一部の大きなブロックが崩落する危険性をもっており、岩盤崩壊に関する研究の一環とし

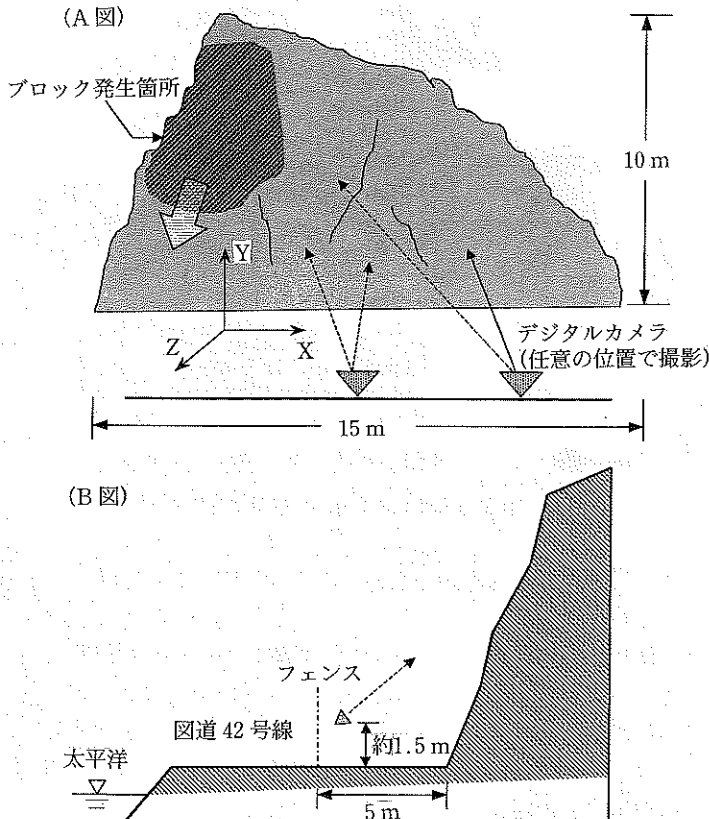


図 10 撮影概略図

て、岩盤の挙動を観測するためのモデル地区として建設省が指定した場所でもある。

計測にあたって反射ターゲットを岩盤に設置する必要があったが、作業の危険性などから設置できる数が限定された。精密写真測量の場合、写真画像内に写っている反射ターゲットの数が極端に少ないと、3次元座標の算出精度が劣ってしまう。岩盤斜面などを対象にした場合のように、反射ターゲットを多数設置することが容易でないとき、ダミーターゲットと称して撮影時だけ画像内に写しこまれるような仮の反射ターゲットを設置することで解決を図る。本計測でも測量用のスタッフに反射ターゲットを貼付したものを数本用意し、撮影時に岩盤面に立てかけ写真画像に写るようにした。ダミーターゲットは普段は設置されない

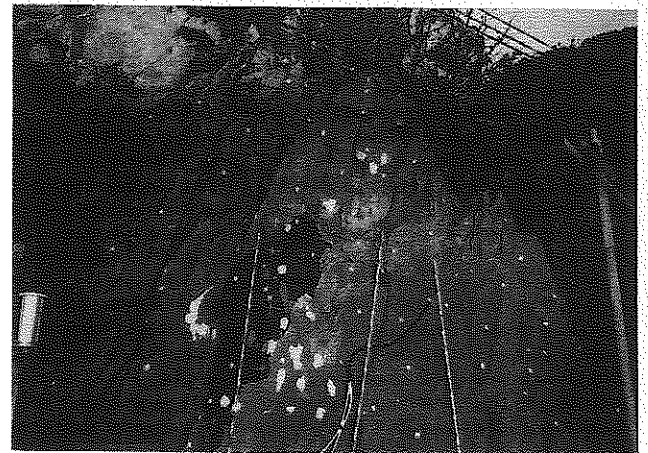


図 11 写真撮影時の現場の状況

表 1 岩盤崩落モニタリング精度

	第1回目	第2回目	第3回目	第4回目	第5回目
解析精度 (mm)	0.75	1.04	1.30	0.39	0.89

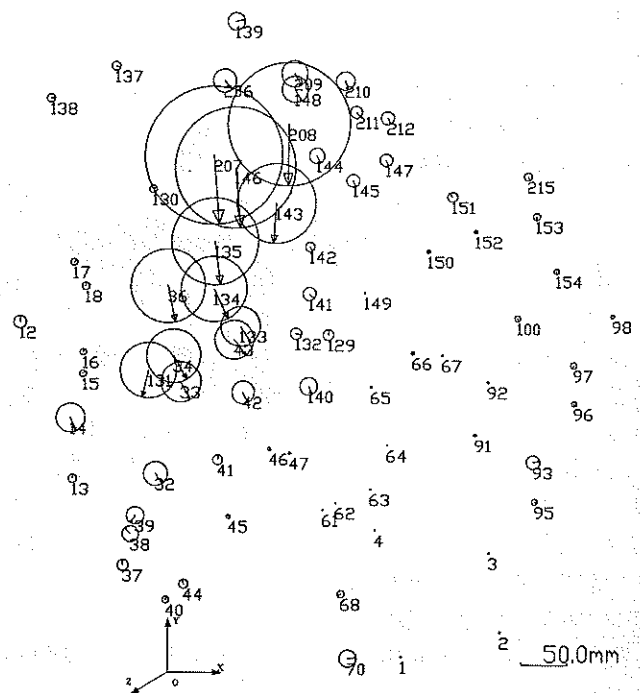


図 12 3 DV 円による各標点の動き (EPoch 2-4)

ため、現場作業にも支障をきたさず反射ターゲットの数を増やし、解析精度を向上させることができる。また、この測量用スタッフに貼付した反射ターゲットを基準尺としても利用した。図 11 に反射ターゲットおよびダミーターゲットを設置した撮影時の現場の状況を示す。

写真撮影は月 1 回のペースで 5 回行った。崖の直下に国道が通り、また海も真近に迫っているため、写真撮影できる場所が限られたものになった。そのため、1 箇所あたりの撮影枚数を増やすことにし、8 カ所の撮影地点で撮影姿勢を変えて 6 枚ずつ計 48 枚の写真を撮った。撮影はカラー 175 万画素のデジタルカメラで 28 mm のレンズを使用し、5~8 m の撮影距離から写真撮影を行った。

本実施例の計測結果を表 1 に示す。精度は他に比較できる計測機器が用意できないので、最小二乗法で 3 次元座標を算出した際に推定される精度で表現している。結果は、X, Y, Z 3 方向の推定精度の 2 乗平均で表す。

図 12 に 2 回目と 4 回目の計測結果から得られた各反射ターゲットの変位の大きさと方向を示す。円の大きさと変位量の大きさを、矢印で変位の方向を表わしている。すなわち、本計測では変位の大きさと方向、いわゆる変位ベクトルを求めることが可能であることを示している。この場合は測定点のうち、変位していない 3 点を固定点として選択し座標軸を決定した。図は左上の箇所の変位量が大きく、さらに下方に動いたことを表わしている。また、同時に設置された変位計での計測結果と比較して、その変位量はよく一致していることも確かめられており、精密写真測量を岩盤崩落のモニタリングへ適用することの有効性が実証された。

## 今後の展開について

紙面の都合上紹介しきれない技術は他にも多くあるが、それらに関しては参考文献を紹介するので、そちらを参照していただきたい<sup>13)~18)</sup>。本編では画像処理技術に関連した計測も紹介したが、近年のパソコンの処理速度の向上やデジタル化された計測の低コスト化の流れは、今後もそれらを利用した新しい計測技術を登場させるであろう。しかしながら、計測結果を有効に活用するには、データを正當に解釈できる技術とともに、災害発生に伴うリスクを効率的に評価する技術も同時に確立されなければならない。地形調査や地質調査のデータや斜面の災害履歴などのデータとも組み合わせ、効率的かつ効果的なリスクマネジメント技

術につなげていくことが今後は重要になる。合理的なリスク評価技術を開発し、GIS を利用した情報処理技術などと結びついて、最終的には高度な防災情報システムになるよう計測技術の開発がなされていくことを期待する。

## 参考文献

- 1) (社)土木学会：大規模岩盤崩壊に関する技術検討委員会報告書，1997。
- 2) (社)土木学会：岩盤斜面の調査と対策，1999。
- 3) 門間敬一・小嶋伸一：岩盤斜面挙動システム，土木技術資料，39-12，pp. 4~5，1997。
- 4) 山崎宣悦・清水光雄：光ファイバの後方散乱を用いた斜面崩壊検出システム，第 32 回地すべり学会研究発表講演集，pp. 257~260，1993。
- 5) 斎藤浩之・坂井俊介・斎藤貴典・梶見晴重・石橋悦治・向瀬光雄・森 恒夫：光ひずみセンサを用いた岩盤斜面モニタリングの現地試験，第 33 回地盤工学研究発表会，pp. 293~294，1998。
- 6) 地すべり対策技術協会：地すべり観測便覧，pp. 457~463，1996。
- 7) (財)道路保全技術センター：岩盤・斜面のリスク評価・マネジメント技術検討委員会資料，1999。
- 8) 斎藤浩之・梶見晴重・藤枝敬史・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，pp. 280~284，1999。
- 9) 池川洋二郎・伊藤 洋・大西有三：岩盤変位のモニタリング装置の開発，土木学会論文集，No. 624/III-47，183~190，1999。
- 10) 岡本 厚・大西有三・張 春：精密写真測量による岩盤変位計測方法について，第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 229~232，1998。
- 11) 大西有三・張 春・林 訓裕：岩盤変位計測における精密写真測量手法の適用，第 44 回地盤工学シンポジウム，pp. 139~144，1999。
- 12) 中井卓巳・若林良二・渡辺紀彦・大西有三：デジタル写真測量による岩盤斜面の動態観測，第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 213~217，2000 年 4 月 30 日。
- 13) 建設省土木研究所：AE による斜面動態計測システムに関する共同研究報告書，第 228 号，1999。
- 14) 佐々木靖人・大谷知生：可視近赤外分光画像撮影装置の開発と岩質・強度判定への利用，日本応用地質学会平成 11 年度研究発表会，pp. 8~11，1999。
- 15) 山本浩也：熱赤外線による岩盤斜面調査，全地連「技術フォーラム '97」名古屋，pp. 569~572，1997。
- 16) 鈴木哲也・疋田貞良・丹羽敏和・船崎好助：超音波による斜面変位監視装置，第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 275~279，1999。
- 17) 三宅克行・田中正弘・玉木 茂・市川商二郎：マイクロ波を利用した岩盤斜面危険予知システムの検証，第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 193~197，2000。
- 18) (社)日本碎石協会：情報技術と露天掘削，古今書院，1999。