

## 12-2 リアルタイムモニタリングシステムの構築 — 地象監視予測システムの過去・現在・未来 —

### Construction of a real-time monitoring system for terrestrial phenomena

#### — The past, present, and future —

気象庁地震火山部管理課  
地震津波監視システム企画調整官  
東田進也  
Shin'ya TSUKADA

Senior Coordinator for Earthquake and Tsunami Observation Systems  
Administration Division  
Seismology and Volcanology Department  
Japan Meteorological Agency

#### 1. はじめに

私が本稿で取り扱うのは、「固体地球科学に関わるなんらかの数量を時々刻々観測、監視、解析し、予報、警報と呼ばれる予測情報、及び現況に関する情報を作成して社会に報知する」概念や、その概念を寸時の切れ目も無く実行するために組み合わせられたソフトウェア群、そしてそれらが搭載されたハードウェア群についてである。ところが、これらを表現する適切な日本語は残念ながら存在しない。従来、上記の概念や事物は「リアルタイムモニタリングシステム」という語で呼ばれることが多く、本稿でもこの語を用いることとするが、この複合語を構成する「リアルタイム」や「モニタリング」、「システム」という語は、使用する人の主観によってさまざまな意味を持つことに注意しなければならない。

例えば、コンピュータの能力が飛躍的に向上しつつあった1990年代、地震学分野では「リアルタイム」地震学という語が盛んに用いられるようになったが、この語には、「従来、年単位の時間をかけて行われてきた解析が、今や数分で実施される」という解析上の時間概念や、「震源決定等の処理を即時に行い、災害が生じる前に予測情報を発表する」という科学技術を社会へ適用する仕組み等、さまざまな意味が含まれていた。また「モニタリング」という語は監視を行うことであるが、監視をして何をするかまでは明示的に表現するものではない。監視をした結果を早く知らせることと将来の予測を知らせること、つまり「でした」と「でしょう」は情報の価値として雲泥の差がある。「システム」という語もまた同様で、ソフトウェア群やハードウェア群を指すこともあれば、組織や社会の仕組みを指すこともある。

些細なことかもしれないが、なぜ私がまず語義定義に触れたかと言うと、概念が曖昧であることは、議論する際に関係者間ですら意外な面倒を招くからである。例えば、リアルタイムシステムが相対的に「短時間」で解析を行う仕組みを指す場合と、分秒の間も中断が許されない実時間処理を想定する仕組みを指す場合では、その構成や設計思想などに大きな隔たりが生じてしまう。前者をイメージする人が、「原理は出来たから、誰でもシステムは作れるよ」と言えば、後者をイメージする人は絶句するだろうし、逆に、後者をイメージする人が「開発や年間の運用、保守にかかる費用は数億円を下らない」と言えば、前者をイメージする人は仰天するに違いない。あるいは我が国では、津波警報や震源、震度情報がテレビ等で伝達される仕組みは1960年代には気象庁と日本放送協

会（NHK）とが構築をはじめ、その迅速化を図ってきたが、不思議なことにこの仕組みは「リアルタイム地震学」の範疇の中で語られることはさほど多くはなかった<sup>a</sup>。これらは“たかが語、されど語”の好例である。

本稿では、これらの曖昧さに留意しながら「リアルタイムモニタリングシステム」の歴史と現状、その特質、将来に関して述べることにする。

## 2. リアルタイムモニタリングシステムの歴史

リアルタイムモニタリングシステムのアイディアは、近代科学の萌芽期以後だけ見ても実に古くから存在する。1880年（明治13年）、ジョン=ミルンは日本地震学会（第1期）の創設にあたり、地震学の知見と電信<sup>b</sup>（有線通信）の技術を用いた遠地津波警報と緊急地震速報<sup>c</sup>についての萌芽的なアイディアを述べるとともに、「日本國ノ如キハ、其地震火山ニ富ムコト世界中屈指ノ國ナルノミナラズ、理學ニ熱心ナル人モ亦少カラズ。而シテ余輩幸ニ此國ニ住スレバ、桔据黽勉地震ヲ研究シ以テ地震學ノ蘊奥ヲ究極セント欲ス。若シ之ヲ究極スルニ至ラバ、竟ニ此人類ヲシテ彼ノ不測ノ災厄ヨリ救済シ、遂ニ其安居ヲ得セシメンコト決シテ難キニ非ザルナリ。是レ余ガ諸君ニ向テ最モ希望スル所ナリ。」とその発意を結んでいる<sup>1)</sup>。そもそも地震学、あるいは地震学会を創設すべく集った人々は、科学的な観測結果から揺れや津波を予測して人々を救う夢を初心として持っていた、と言えよう。

その後、津波警報については、明治三陸津波（1896年）や昭和三陸津波（1933年）の甚大な被害に鑑み、1941年（昭和16年）、三陸沿岸に対する津波警報組織が設立された<sup>2)</sup>。この仕組みは、津波警報を数分で住民に伝達できるような、現在の技術水準で言うところのリアルタイムモニタリングシステムではない。しかし、地震波を科学的に観測し、その解析結果から津波の襲来を予測し、警報を出来る限り迅速に発表し、冗長化されたさまざまな手段を使って住民に伝達する、というアイディアを具現化したと言う意味においては意義深いものだった。この組織の設立に当たり、当時の仙台地方気象台長であった森田稔は「将来も過去に於けると同様、津浪の襲来に逢ふて唯其の為すがままに任せ、過去に於けると同様の浪害を甘受するのは科學の恥辱である。」と述べているが、これは科学を社会に適用する際の気概を示したものであると言えよう。この仕組みはその後、気象庁で実施される業務の根幹となり、コンピュータの導入や観測の自動化等による迅速化を経て、リアルタイムモニタリングシステムの代表的な事例に発展し、現在に至っている<sup>3)</sup>。

<sup>a</sup> 例えば、

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/KOHO/backnumber/17/17-3.html>

[http://www.hinet.bosai.go.jp/about\\_earthquake/sec8.1.html](http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec8.1.html)

等。「新たな学問」と「既存の業務の迅速化」は異なる範疇で語られてきたのだろう。

<sup>b</sup> 地震学の知見と言っても、その頃は地震波速度も精度よく測られていなかったし、電信技術と言っても有線通信のことであり、無線通信の発明はさらに後年である。相当、最先端の科学技術を駆使したアイディアであったと言える。

<sup>c</sup> 遠地津波警報のアイディアを前例して述べた後、「今、前例ニ據テ之ヲ考フレハ、陸地ノ震災ヲ避クルモ亦タ難カラズ。如何トナレハ、地震波動ノ速度ハ東京横濱間ノ如キ距離十五英里ヲ一分時半ヲ以テ経過スル者トセハ、東京周圍廿英里乃至六十英里ノ所在電信分局ヨリ震動ノ發起を報センニ、其波動ノ東京ニ達スルマテ二分時乃至六分時ノ間隙アルベシ。故ニ、此警報ノ達スルヤ否ヤ大砲ヲ放ツテ之ヲ人民ニ報告セハ、地震災害ヲ避クルニ違アルベシ。尤モ、其號砲タルヤ通常ノ者ト區別セサルベカラズ、且、其報知ハ強烈ノ地震ニ限ルヲ要ス。畢竟、此等ノ考説ハ其實地ノ舉行如何ハ暫ク措キ、従来地震ハ決シテ之ヲ前知シ得ヘカラスト斷定スル輩ノ迷夢ヲ破ラント欲スル者ナリ。」と述べている。現在の緊急地震速報のチャイム音の作成や震度5弱以上を警報とすることなどと類似の議論が既に行われていること、また地震の“前知”（予知）という語句が“震源でのずれ始めの予測”ではなく“揺れの予測”を指していることが興味深い。

揺れ（地震動）の予報及び警報については地震波伝播速度が極めて速いことから、地震波の観測や伝送、震源計算、震度予測処理の自動化、迅速化が行われるまでは“アイディアの時代”が長く続いた<sup>4), 5)</sup>。つまり、これから揺れる「予測」情報を知らせたいが、処理に時間がかかって知らせる前に地震波が届いてしまうため、揺れた「結果」を震度情報<sup>d</sup>として知らせることに留まらざるを得ない時代が長かったとも言えよう。1980年代に入り、コンピュータの小型化や高機能化が進むと、P波初動付近の解析を行って、大きな地震の発生を検知し、相対的に遠方の地域に対し、「これからあなたのいる場所が強く揺れる」ことを予測し、事前に報知するシステムが研究開発されるようになった。これはその後、高速で走行する新幹線の減速や停止を目的としたユレダス（1990年）や、一般市民に警報を伝達することを目的としたメキシコにおけるSASシステム（1991年）として相次いで実用化される<sup>6), 7)</sup>。一方、ほぼ同時期に、予測システムとしてではないものの、全国の大学及び研究機関において微小地震を観測、解析処理するための研究開発が盛んに行われた。これらの研究開発は測器や伝送手法、時系列データ解析処理など多岐の分野にわたるもので、リアルタイムモニタリングシステム構築の技術向上や発展の基礎となるものであった<sup>8), 9)</sup>。

さらに2000年代になると、全国にほぼ均質に設置された津波地震早期検知網（気象庁）や高感度地震観測網Hi-net（防災科学技術研究所）を利用し、国土全体に対する揺れの予測情報を提供する具体的なシステム開発が気象庁や鉄道総合技術研究所、防災科学技術研究所で競って進められた。これらの成果をもとに揺れの予測情報は緊急地震速報と名づけられて気象庁から発表されることとなり、2006年8月から高度利用者向けに先行的な運用が、2007年10月からは一般向けに運用が開始された。その後、2007年12月に緊急地震速報は気象業務法上の予報、警報と位置づけられ現在に至っている<sup>10)</sup>。2011年の東北地方太平洋沖地震以降、特に東日本地域ではそのメリット、デメリットを含め、緊急地震速報は社会からは概ね理解が得られつつあると言えよう。

現在、緊急地震速報と津波警報は、揺れと津波の予報及び警報として気象庁のリアルタイムモニタリングシステムである「地震活動等総合監視システム（EPOS）」により作成、発表されている。EPOS（初代）の運用開始（1987年）以来、コンピュータの高性能化や解析手法の改善、観測点の増加、あるいは緊急地震速報に見られるような新たな情報の発表開始などにより、さまざまな改修を重ねて現在4世代目のシステムが運用されている。なお、EPOSの中で行われている、

- ・ 現地観測点から伝送された地震、潮位、地殻変動の観測データ、及び処理結果を収集し、
- ・ ノイズ識別の上、地震の発生、あるいは何らかの変化を検出し、
- ・ 個々の地震を識別し、
- ・ 震源やマグニチュードを算出し、
- ・ 揺れの予測計算、データベース化された津波予測シミュレーション結果の検索等を行い、
- ・ 予測値があらかじめ決められた閾値を越えた場合に情報を作成し、社会に提供する。

と言う処理の根幹は現在でもほとんど変わっていない。固体地球科学や計算機科学、測器及び通信技術の成果、そして科学者と技術者、あるいは放送・通信メディアとの協力によって、我が国は日々発生する地震による揺れや津波の予測情報が即時に個人に届けられると言う、世界でも類を見ない仕組みが日常的に存在するようになった。ミルンたちの夢はほぼ100年余りかけて実現したと言ってよいだろう。

---

<sup>d</sup> 従来体感で求めていた震度観測の自動化は1990年代に行われ、震度観測の客観化、迅速化に貢献した。算出には地震波の検出から約1分かかる。

2011年東北地方太平洋沖地震の際、気象庁は第4世代のEPOSによって地震波検出の5.4秒後に緊急地震速報（予報）を、同8.6秒後に岩手県と宮城県、及び福島県、山形県、秋田県の一部に対して緊急地震速報（警報）を、そして同3分後に岩手県、宮城県、福島県に対して大津波警報<sup>e</sup>を発表した。その後同4分後に、予想される津波の高さに関する情報（岩手県3m、宮城県6m、福島県3m）を発表し、同28分後には大津波警報を青森県から千葉県まで拡大するとともに、岩手県6m、宮城県10m以上、福島県6mと津波の高さを切り上げるなど津波警報の更新を行った。このような更新（切り上げ、切り下げ、解除）はあわせて11回行われ、地震発生約51時間後に警報は全面解除された<sup>11)</sup>。

このように気象庁は当時有する技術あるいは知見から可能な限りの範囲において情報を発表した。しかし、緊急地震速報については、本震時に関東地方に対して続報を発表しなかったこと、また、その後発生した通信回線の途絶や活発な余震活動等によって精度が低下したこと、津波警報については、地震波検出後3分弱の波形を用いて算出したマグニチュードが7.9に留まり、最初の警報において津波の高さを過小に予測したことが避難行動を鈍らせた可能性がある等の指摘がなされた<sup>12)</sup>。現在、これらの問題点を改善するための研究開発が続けられている。このような成果、指摘も含め、これが現状のリアルタイムモニタリングシステムの実力となっている。

### 3. リアルタイムモニタリングシステムに関する特記事項

何らかの異常な現象を捉え、災害を予測して報知することに関する基礎的な研究を行う際、我々はその原理や手法の良し悪し、あるいはその仕組みが「うまく動いたとき」に何をするか？に興味が集中しがちである。しかし、言うまでもないことだが、リアルタイムモニタリングシステムは実際の社会に適用するものである。私はここで、(1) 処理をリアルタイム化することの本質、(2) 原理の開発以外の手間がかかる部分、(3) 技術の進歩により、我々は好むと好まざるに関わらず、既に短期地震予知にも関わる課題に対して答えを要求されつつある点、(4) リアルタイムモニタリングシステムの運用、という事項について、リアルタイムモニタリングシステムを取り扱う上で留意すべき点として特記しておきたい。

#### (1) 処理をリアルタイム化することの本質

本稿の冒頭で私はリアルタイムという語にこだわったが、これは「従来30分かかった処理が処理速度を上げた結果1秒で実施できる」ことがリアルタイム化と必ずしも等価ではないことを言いたかったからである。例えば、データ長があらかじめ決まっている時系列データに適用するフィルタと入力された時系列データに逐次的に適用するフィルタはプログラムが異なるし、地震のP波からコーダ部に至るまでの波形全体が存在するときに適用するマグニチュード式と、冒頭の数秒分しかない波形に適用するマグニチュード式も異なる。すなわち、「解析に必要な全てのデータを、時間をかけて集めて非リアルタイム的に処理する」場合と「限られたデータから、社会が要求する時間内に、リアルタイム的に自動処理する」場合とでは、処理したい内容がたとえ同じであったとしてもアルゴリズムは別途開発する必要があるのである<sup>f</sup>。

#### (2) 原理の開発以外の手間がかかる部分

ある原理や手法をリアルタイムで動作させる処理を作ることに成功したとしても、それだけ

<sup>e</sup> 同時に他予報区に対して津波警報、津波注意報も発表しているが、ここでは省略した。

<sup>f</sup> ある楽曲をフルコーラス入力して曲名を当てるプログラムと、騒音の中で歌われたイントロからお手つきなく瞬間的に曲目を当てるプログラムではそのアルゴリズムは全く異なるだろう。

ではリアルタイムモニタリングシステムは動作しない。処理がリアルタイム化された途端、生データに必ず存在するさまざまなノイズの自動的な除去や回避、突発的な異常値（不正データ入力、ゼロ割り、桁落ちによる誤差等）によって発生するエラー処理が動作に関わる主要課題となる。また、現在進行中の現象を担当者が監視をしたり、観測データの受信や解析、情報発表等の処理が正常動作しているか否かを監視したりする画面、あるいは機器障害の検出、セキュリティ、事業継続計画（BCP）をも考慮したシステムダウン回避のための処理等々、も作成したりしなければならない。これらの個別の要素技術を組み合わせ、一部に不具合が生じても全体としては24時間、365日休みなく動作し続けるリアルタイムモニタリングシステムを構築することが求められる。

(3) 技術の進歩により、既に短期地震予知にも関わる課題に対して答えを要求されつつある点

従来、災害時に不幸にして犠牲者が生じた際に、事前に警報が出なかった、あるいは発表が遅かったことにその原因が帰せられる場合があった。そのため津波警報はその迅速な発表に対して永年多大な努力が払われてきた。その結果、2011年の東北地方太平洋沖地震では津波警報は地震波到達から3分後に発表できたことは既に述べたが、この地震は、処理の迅速化によって、実際の現象が終了する前に情報を発表しなければならなくなった、という点で象徴的なイベントとなった。

断層のずれる面積が広がり、破壊継続時間が長くなってくると、「避難のために猶予時間を稼ぐこと」と「破壊終了を見極め、最大値をもって避難を呼びかけること」は相反する要件になる。断層破壊の終了を待たずに警報を発表すれば、警報の発表後も断層のずれは広がり、当初の警報に用いる揺れや津波の予測に関して過小評価（それを見越すとすると過大評価）が必ず発生する。一方、社会的要請によって、科学的な確定値を出すために警報発表を遅らせることができない以上、現象の終了を待つことなくある閾値を越えた時点で迅速に第一報を発表し、その後に入手する観測データによって内容を更新するという仕組みは今後も続けざるを得ない。ゆえに今後は、第一報は精度が不十分である可能性をより明示的に示さなければならなくなったのである。

この仕組みは短期地震予知や火山噴火予知、あるいは豪雨予測等と本質的には同様のものである。リアルタイムモニタリングシステムはその処理の迅速化によって「予測の不確定性」の世界について足を踏み入れたことになる<sup>8</sup>。今後は、「警報は早く、精度も高く」という牧歌的なスローガンではなく、最初に発表する警報は、「どのくらいの災害になるかまだわからないが、警報発表基準に達した」という意味であることを社会のコンセンサスとしなければならなくなったと同時に、その後の断層破壊のリアルタイムモニタリングとそれを反映した情報の逐次更新が欠かせなくなったのだ。

(4) リアルタイムモニタリングシステムの運用についての本質

リアルタイムモニタリングシステムの運用については、開発や構築とは別に精神論に属するともいえるべき本質がある。先にも述べたとおり、リアルタイムモニタリングシステムの適用先は実社会である。新たな発見や独創性について賞賛されればそれで良い、あるいは決定的な予測情報を出せばおしまい、というものではない。アイデアをシステムに導入して毎日動かすための詰めの作業や、個々に異なるニーズへの対応、既存の社会システム上の規格との調整、

<sup>8</sup> これまでは、震度の大小や津波の高低等、予測値の誤差を議論していた。

情報に関する啓発活動等、に膨大な時間を費やさなければならないし、しかも、間違いなく運用されるのが当たり前で、例え予測情報が手順どおり発表されていても、ましてシステムダウンが発生したり誤った予測情報が出たりすればなおさら、批判されることを甘受<sup>h</sup>しなければならない。

リアルタイムモニタリングシステムを構築かつ運用するということは、上記のような足回りとも言うべき処理や予測情報の持つ本質的な不確定性への対応がその努力の大半を占めるといっても過言ではない。データの監視や処理を通じて新たな地球科学上の発見がなされ、新たな解析手法の提案が続いている現状を考えると、リアルタイムモニタリングシステム設計時には地球科学分野やシステム工学、情報工学分野他、幅広い分野の協力、あるいは試行実験や検証が出来る環境が今後も欠かせないだろう。

#### 4. 地象監視予測システムへの夢

以上、リアルタイムモニタリングシステムの定義や歴史と現状、その特質を見てきた。冒頭で私は「固体地球科学に関わるなんらかの数量を時々刻々観測、監視、解析し、予報、警報と呼ばれる予測情報、及び現況に関する情報を作成して社会に報知する」概念を表現する適切な日本語は存在しないと述べた。私は今、「リアルタイムモニタリングシステム」という語に代わるものとして、地下で発生するさまざまな現象を監視、予測するシステムであることを明示した「地象監視予測システム」という語を提案したいと考えている。これを取り扱う「地象監視予測システム科学」と呼ばれるべき分野をさらに発展させるために行うべきこと、また次代への夢を述べて、本稿を締めくくりたい。

まず当たり前のことであるが、現状のシステムの課題を一つ一つ解決していくことが重要である。繰り返し述べてきたが、地象監視予測システム科学分野は、例えば、数値天気予報やロボット工学に見られるような分野の体系化が十分なされていない現状がある。従来、研究開発は主として個人の発想力や開発力に頼ってきたといっても過言ではない。しかし、要素技術の数、管理しなければならないパラメータ数、足回りの技術、情報発表の際の社会との閾値調整、通信回線の維持と費用、人材育成、研修...、どれをとっても、もはや地象監視予測システムは個人で開発、維持できる規模ではなくなっている。これまでの技術開発の成果を継承発展させるためにも、システムに生じた課題解決を日々取り組むことができる仕組みを体系化する時期に来ていると私は考えている。

次に、特に東北地方太平洋沖地震後に起こった、もはや恒例ともなってしまった地震予知に関する論争からの脱却は必須である。地震学は社会の関心と非常に近接した学問分野であるがゆえに、大規模な被害地震が発生するたびに学問分野内部、そして社会からも地震予知への過剰な期待と過剰な批判が繰り返されてきたわけだが、もはや地震予知が可能か不可能か、あるいは地震予知を推進すべきか否か、という観念的な二元論を闘わせて満足するのではなく、地象の監視、予測が可能な部分からシステム化を行う研究開発を進展させるべきと私は考える。少なくとも現在、伊豆半島東方沖など一部の群発地震活動の消長や房総半島等で見られるスロースリップと地震活動の関連は、最終的にどこまで大規模になるかは言えなくとも、観測値の変化が閾値を超えればどのような現象が発生してきたか、を経験則として示すことは可能になりつつある。現象の進行が監視出来ていた

<sup>h</sup> 社会からの批判によってリアルタイムモニタリングシステムの構築、運用をやめればよい、というのは暴論である。

<sup>i</sup> 地象監視予測システム科学に関わる職務に従事する人数、あるいはこれを学ぶ学科の数を見れば一目瞭然である。

のにもかかわらず、被害の発生まで何の対策も打てなかった、では、地象監視予測システム科学分野が担う目的を達成できなかったことになる。科学的に得られた知見をどのように地象監視予測システムに取り込み、そして社会に適用していくかの議論を続けていく必要があるだろう。

ここで重要なのは「異なる目的を持って行われた多くの科学技術的成果を集めたら、いつかは地象監視予測システムが出来る日が来る」ではなく、「地象監視予測システムを作るために多くの科学技術的成果を集めていく」という思考や行動の方向性である、と私は信じている。1989年に発生した手石海丘の噴火の際、現場では体感されるほどの微動が発生し、住民を避難させるか否かで情勢は緊迫していたようだ。当時の担当者は「数日たってから現象の解説をどれだけ丁寧にされても現場には必要ない。現在科学的に見てどういう状況で、これからどうなるかを知りたいだけなのだ」と思ったという(岩田孝仁私信, 2014)。このような願い、そしてミルンたちから託された夢に応えていくために、地象監視予測システム科学を発展させなければならないのだ、と本稿を読み終えた方が感じて頂ければ、私としては大変幸せである。

#### 参考文献

- 1) ジョン・ミルン：地震学総論，日本地震学会報告第一冊，1884，1-30
- 2) 森田 稔：三陸沿岸に対する津浪警報，測候時報，1942，37-43
- 3) 草野富二雄，横田 崇：津波予報業務の変遷，験震時報，2011，35-91
- 4) 今村明恒：地学叢書第4巻地震学，大日本図書株式会社，1905，pp.356
- 5) 伯野元彦，高橋 博：10秒前大地震警報システム，自然，1972，74-79
- 6) 中村 豊：総合地震防災システムの研究，土木学会論文集，1996，1-33
- 7) 菊地正幸：リアルタイム地震学，東京大学出版会，2003，pp.222
- 8) 松村正三：コンピュータによる地震観測のシステム化とその変遷，地震，1989，371-390
- 9) 卜部 卓，鷹野 澄，平田 直：大学の衛星テレメータシステムにおける次の10年，地震学会予稿集，2001，69
- 10) 東田進也：揺れの予測情報－緊急地震速報の現状と今後－，日本地震工学会誌，2011，30-33
- 11) 気象庁：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査報告，気象庁技術報告，2012，pp.477
- 12) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告，2011，pp.44