

地象監視予測システム科学分野の性質と必要となる諸条件

「原理は出来た。あとは誰でも作れるよ」という言い分へのアンチテーゼ

気象庁地震火山部地震津波監視課 東田 進也

気象研究所地震津波研究部 溜淵 功史、小寺 祐貴

1. はじめに

地球科学に関わるなんらかの現象が進行中に、科学的に観測されたデータをリアルタイムに解析して将来を予測し、重大な災害の起るおそれのある旨を警告することは、古来、社会の切実なニーズ¹であると同時に気象、地象、水象を問わず最先端の科学技術である（東田、2014）。本稿では地震、津波、火山等に関わるこれら一連の作業に携わるコンピュータシステムを地象監視予測システムと呼ぶこととする。

地象監視予測システムは、揺れや津波の予測（緊急地震速報や津波警報）、火山活動や降灰の予測（噴火警報や降灰予報）あるいは群発地震や東海地震の予知に関わる地殻変動の監視等を行うために気象庁をはじめ、さまざまな機関で開発や運用が既になされてきている（例えば横田・山本、1989、尾崎、2004、松村他、2006、東田他、2010、川元他、2016）。この分野は科学の本質の一つである予測を取り扱う以上、予測処理手法そのものの開発や精度の検証等の基礎科学的アプローチが必須²である。これと並行して通信環境や計算機資源の按配を見繕いつつ実用機を作っていくことになる。

明示的に「社会に役立つ」という目的を持たざるを得ないこの分野は、いわゆる枯れた技術をコンピュータ上で単に動かしているだけ、との誤解を受けることがあり、重要性の割には開発や技術継承についてあまり体系化されていないように我々には思える。本稿では改めて地象監視予測システム科学分野の性質と必要となる諸条件について述べる。

2. 地象監視予測システム科学分野の性質

前述したように、地象監視予測システム科学分野は明示的に「社会に役立つ」³という目的を持たざるを得ない。以下では、基礎科学と社会を直接結び付ける立ち位置にあるこの分野の性質を述べる。

(1) 「進行中の現象」に対する科学的な予測をリアルタイムに行う点

一般に、科学的解析の多くは、現象が終了した結果に対してなされることが多い。しかし、地象監視予測システムが取り扱う現象では、情報を発表しなければならない時点では現象の「全容がわからない」場合がある。好むと好まざるにかかわらず、この分野は「全容がわからない」ことに対

¹ 社会のニーズとは、「自らが自然災害に遭う“前”に、自らに適合した猶予時間をもって、ほどよく危険性を知らせて欲しい」というものである。科学者側は時代によってこのことを前知、予報、予知、予測等、幾分勝手に語義定義してきた経緯（武藤他、2013）があるが、社会のニーズは言葉の語義定義に関わらず一貫している。例えば1880年、地震学会（第1期）の発足にあたっては、遠地地震による津波警報と、地震の前知（現在の緊急地震速報にあたるもの）の実現が社会の夢の一つとして述べられている。

² 近年は検索語句等のような、人間の感覚、言い換えれば人間をセンサーとしたビッグデータを取り扱うシステムも出現しているが、これは地象監視予測システムにはギリギリ入らないかもしれない。まずは科学的な観測、解析に基づく結果を評価することが先だろう。

³ 社会では時折思い出したように「役に立つ科学」と「役に立たない科学」について教条的な議論が始まることもある。基礎科学の重要性は言を待たないし、そもそも人間の活動の一部として科学が存在する以上、それは必ず何かの役に立っているはずである。役に立つことを声高に語らなければならなくなるのは、自らの研究に必要な費用を自らが賄えないことが本質である。ただ一般に、科学を語る際、「社会に役立つ」という観点で安易な発言をすることは基礎科学分野では好まれず、「結果として社会の役に立てば幸いである」という言い方が好まれるように見える。これは、科学とは個人の興味関心に基づく探求自体が目的であって、結果の一つである「役に立つか否か」と言う観点で科学の重要度を計るのは本末転倒であるという考えが存在するからだろう。人間社会の都合に合わせて結論を性急に導くことへの危惧や、短期間で結果が出るのが分かっているテーマばかりではなく、より基礎的な、よりチャレンジングなテーマに取り組むべしという先人の科学者の戒めや智恵といったものが背景にあるかもしれない。それがわかった上での話だが、個人的には両者はなら対立概念ではなく、この議論が意味を持つとは思わない。この分野は社会に役立たなければならぬ。

する科学的な予測を避けて通ることはできない。厳密に言えば、この「全容がわからない」には二つの意味がある。一つは、地震や津波、火山に関わる現象はその発生頻度が低いために観測(経験)済みの事例数が限られており、何が起こるかわからないという意味である。そもそも現象の全過程が既知の地震や津波、火山噴火など存在しない。個々のイベントにはいわば個性があって、断層のずれや噴火現象の進行等は同じ断層や火山ですらあらかじめ想定が出来ない。もう一つは、例えば、現象の全容がある程度分かっている場合でも、制約された時間内では現象の終了まで見極められないと言う意味である。災害が生じる地球科学的現象の多くは、一旦進行し始めると社会の受容状況と比較して相対的にその進行が早く、現象の全容がわからない時点で情報を発表⁴することになる。

緊急地震速報や津波警報、噴火警報、あるいは短期的地震予知にしろ、これ以上現象が進行すると重大な災害の起るおそれのある場合、その旨を警告する。現象の最終状況まで予測できればよし、予測できなければ時々刻々現象の進行を監視して、その時点で最新の予測内容に更新を続ける。新たな経験が増えれば新たな処理を加え、コンピュータの性能が向上すればそれに応じた改善することになる。我々は限られた経験に基づく、限られた処理手法で未知の現象に立ち向かわなければならぬが、これらの対処は安易なパッチあてや辻褃合わせではなく、新たな科学的処理手法の開発やその検証が必要である。情報発表までの迅速化と予測精度の向上は今後も続くことになる。

(2) 監視を行う以上、可視化や事前のスレッシュホールド決めが必要な点

地象監視予測システムでは監視を行う以上、画面の前に監視担当者が存在する。監視担当者は、システムが正しく動作しているか否かを単に監視する要員ではなく、地震や津波、火山現象の監視をするのが本務である。このポリシーは、システムのブラックボックス化を防ぐ上でも、監視ノウハウの継承をする上でも重要であり、処理が仮に完全自動であったとしても、その監視対象の現象そのものや計算過程、予測内容は何らかの可視化が必要なのだ。この可視化は現象の進展や危険性が分かるように異常を誇張した描画や配色等がなされることもポイントである。このような描画や配色、情報発表等を行う際には、どのような現象が起きたら、あるいは現象がどこまで進展したら重大な災害の起るおそれが生じると考えるか？というスレッシュホールド設定が事前に必要となる。

実はこのスレッシュホールド設定は極めて難しい要素で、この分野が基礎科学と社会を直結するといわれる所以の一つである。設定が警報の発表基準であればシビアな議論が起きることは容易に想像できるだろう。そうでなくても、開発者にしかわからない難解な判断処理や、事後に何とでも解釈可能なような曖昧なスレッシュホールドは無意味である。また、狼少年の比喻のように、あまりに頻りに危険を呼びかけても社会は情報に慣れてしまったり、あまりに頻度が低くても、いざという時に何をすればよいかかわからないという問題もある。いずれにしても、科学的な処理手法しか関心がないという理由で、このスレッシュホールド設定を独善的に行ったり疎かにしたりすると、如何に素晴らしく見えるシステムでも実質的には社会の役には立たない⁵。

⁴ よく「緊急地震速報と短期的地震予知は異なる」という端折った説明を聞くことがあるが、これは緊急地震速報が、地震のずれが終了し、科学的な解析が行われた「結果」を情報として迅速に発表しているものと誤解されているからである。観点を変えて、ある断層がある基準以上の揺れをもたらすずれを起こしていることが分かった段階で情報を出すものと考えれば、緊急地震速報もいわゆる短期地震予知も用いるデータは地震波と地殻変動と違えど行っていることは同じである。言うまでもないことだが、「でした」と「でしょう」の情報価値の差は非常に大きい。レースで1着が分かった後は何とでも評論できるのと同じで、現象が終わってみれば全容は誰でも容易にわかるのだ。多くの場合、現象の全容が分かった後、何故最初から全てわからなかったのか？という問いかけが社会からはなされるが、初めからわかっていた部分については正常に動作した、としか言えないところがこの分野の辛いところである。

⁵ システムで言えばさらに下流側の話題になるが、津波が20cm観測されているという情報によって避難行動が鈍ったという意見があり、

(3) 多数のプログラム群の組み合わせで出来ている点

一般に科学的な解析処理についてプログラミングを行う際には、まずデータを入力し、いくつかの前処理を施してから目的となる解析を行い、結果を出力するというアルゴリズムを作るだろう。演算処理が増えれば、一時ファイルの入出力も増えるかもしれない。出力した結果は描画ツールで後ほどグラフ化するかもしれないが、リアルタイムで可視化したいとすれば描画処理も付け加わるだろう。このようにシステム中のプログラム数は容易に増加していく。

前節で地象監視予測システムはリアルタイム処理であることを述べたが、非リアルタイムで開発された処理をリアルタイムで実行する際には、プログラムは科学的な原理や処理手法の部分以外でさらに増えていく。処理が実行される際にノイズが重畳したり、受信の遅延や遠方観測点のためにシグナルが未着だったりすることは日常茶飯事である。非リアルタイムの動作環境下で開発を行う際は、入力するデータは現象の最初から最後までがそろっている上、ノイズが多い観測点や欠測した観測点はあらかじめ取り除くことができるが、リアルタイム処理ではそれらを自動で識別して取り除く処理が必要であり、しかもその処理の難易度は高い。また例えば、非リアルタイムのデータ処理に適用するフィルタとリアルタイムで適用するフィルタではプログラムが異なるので対応が必要である。完全自動処理であればなおのこと、必要となるプログラムは飛躍的に増えていくことになる。システムが大規模化すればシステム自身の動作を監視するシステムも必要になる。結局のところ、システム規模はどんどん大きくなっていく。

(4) システムが止められない点

対象とする現象の進行速度、社会の理解、設計思想等の条件に左右される問題ではあるが、基本的に地象監視予測システムは停止することが許されない⁶。開発中のシステムでは不具合があればリセットをかけたリ改修したりすることは容易だが、実用機は簡単に止めることはできないのだ。これが地象監視予測システムの設計上、もっともやっかいな性質である。システムを止めることが許されないということには障害のときに止められないということと、必要なときに止まってはいけないという二つ意味がある。

まず一般に、不適切なデータの入力やデータの欠測、誤差の蓄積、ゼロ割、ファイルのオープンエラー、ログファイルによるディスクフル、通信の無応答による待ち状態、OSの不具合等々、想定外の理由である処理が止まってしまうことは往々にしてある。その際、システム全体がダウンしてしまってはいけない。これらを防ぐためには、あらかじめさまざまな障害パターンを予測してさまざまな例外処理やエラー処理を準備するなどリカバリーを考慮する必要がある。さらに重要なシステムであれば、冗長性を確保するような設計⁷も必要である。

次に、地象監視予測システムにかなり特有の問題だが、地球科学的現象は、何事もない時にはデータの振幅や処理量がほとんど変動しないが、イベントが発生した途端、それらは何ヶタも変動することがよくある。何事もない時には惚れ惚れと動作するが、肝心の時に処理量が急激に増大し、

精度の良い観測値や予測値、美しい図等を発表すれば人の命を救えるわけでは必ずしもないことが明らかになった(中央防災会議、2011)。

⁶ 端的に言えば、お正月三が日は保守のため情報が出ませんということに社会的同意が得られるかということである。さまざまな顧客システムやATMならば保守があるという合意は社会的には存在するだろう。しかし、今日から3日間県内の交通信号はお休みです、という社会的には許されないだろう。

⁷ デュプレックスシステムやデュアルシステムと呼ばれるシステム

全体がダウンするようなシステムであってはならない。このためシステムは最大の処理能力を見積もっておくことが重要である。

(5) ゼロから作り直せない点

コンピュータシステムは出来た端から性能の陳腐化や部品の劣化が始まり、数年間というライフサイクルで更新を行わなければならない。その際には処理手法の改善や精度の向上等の開発はもちろぬ、運用期間中に生じたさまざまな要望への対応が必要である。経験者なら、システムを開発している途中、最初から作り直せばどんなに楽か、と思う瞬間は多いのではないだろうか。人の書いたプログラムであればなおさらだろう。しかし、地象監視予測システムの多くは実用機の範疇に入る以上、開発するための予算や期間が限られていることや、既に運用している際の入出力が変更しにくい⁸等の理由で、簡単にゼロから作り直すことは容易ではないという実状がある。

3. 地象監視予測システムを開発、運用するために必要となる諸条件

現在の地象監視予測システムの原型となるシステムは、非常に能力の高い個人、ある意味、超人的な開発者によって、ある処理を行う目的で作られてきた。初期の研究開発のフェーズにはあまり問題にならなかったが、実用機が数世代にわたって運用されている現在、システムを個人ベースで開発、運用することは限界を迎えている。個々の処理は高度な専門性を持ち、かつ細分化してきているため、人数さえ確保すればすぐに開発や運用が可能かと言うとそうではない。世代交代に伴う研修や技術継承も重要となってくる。

前章で述べたような性質を持つ地象監視予測システムを複数の担当者で開発、運用するためにはプログラミング技術はもとより、保守性や冗長性、拡張性、処理の単純化やスリム化等でバランスの取れた共通認識に立脚した方針が存在しなければならない。処理の無節操な乱立は経費の増大や想定外の障害に結びつく⁹、場合によっては開発が失敗することさえある。これを防ぐためには、以下のような仕組み、諸条件が必要となるだろう。

(1) システムの更新、運用保守、技術継承における全体計画と工程管理

地象監視予測システムの開発はグループによって行われることは既に述べたが、このためにはプロジェクトのマネジメント、つまり全体計画と工程管理が必須である。多数の担当者で開発を行う場合、相互の処理間で不整合が起きることは珍しいことではない。個々の処理は一つでも信頼性が低ければシステム全体の信頼性を下げてしまう。処理手法云々はともかく、細かい話に聞こえるかもしれないが、購入したサーバーラックが設置の際に扉を通過できない、床の耐加重や冷房の冷却能力、電気容量が足りない等、いわゆる足回りと呼ばれる部分で問題が発生する場合がある。折角高性能なシステムを作っても、簡単なことでシステム開発が躓いてしまうことは意外に多いのだ。また、システムの運用期間が長くなればなるほど開発者自身の異動等もあるため、担当者間の計画的な技術継承も重要となる。

⁸ データやファイル、情報のフォーマットに限らず、順序を変えることすら社会に影響を与えてしまう。

⁹ 良かれと思って、あるいはブラックボックスに手を触れないという理由によってパラメータを多重定義してしまったり、屋上屋を架す処理を適用したりすれば、システムの能力や開発費を限界まで使ってしまう。ハードディスクや冷蔵庫が良く分からないもので一杯になるのと同じである。

(2) システムの更新、運用保守、技術継承における基本的な環境

システムは運用時にさまざまな課題が見つかる。運用期間中に改修可能なものもあれば、次期システム時に処理フローそのものから見直す必要が生じる大規模なものまである。後者の場合、処理の負荷や集約に伴う副作用的な改悪がないよう課題の整理や評価を十分に行うことが必要である。ひとくちに過去の資源を利用するといっても、エンジン以外の部品の入れ替えもあれば、数年もたてば OS や開発言語のバージョンアップもあるため、単にリコンパイルすれば良いわけではなく、何らかの改修は必要である。このような改修を行うためには、

- ・ ソース、パラメータのバージョン管理などを行う開発基盤
- ・ 開発過程の議論や決定事項のドキュメント化やマニュアル整備
- ・ 試験系の使用や運用系への適用における検査、評価体制
- ・ 開発者研修

などのソフトウェア、ハードウェア、あるいは仕組みが必要になる。これらはグループによるシステム開発を行う上で、信頼性の確保や技術継承の面から必須である。黙って背中を見て学べ、では良いシステムは出来ない。より本質的には開発者相互間の積極的な情報発信、共有の仕組みづくりが重要なのだ。

(3) 試験系（試験環境）を用いた処理手法やスレッシュホルドの客観的評価

かつて個人ベースでシステム開発がなされていたころは、開発者自身が処理手法やスレッシュホルドの評価、決定を行っていた。ある処理手法を実現させるためにシステムを設計したわけである。これはある意味独善的であったかもしれないが、開発者本人がシステムの中身を全て把握できていたため可能だった。システムがグループで開発されるようになった現在、ある処理手法がリアルタイムの運用に耐えられるかどうかは、あらかじめ議論や評価を行ったうえで、さらにシステムに組み込むために開発を行う必要がある¹⁰。システムに組み込む、つまり、ある処理手法を運用系に導入するためには、運用系と同一の環境を持つ試験系において、ノイズやデータ遅延、欠測等も含む連続運転試験用データや負荷試験用データによる試験を開発者以外の第三者によって実施し、客観的な評価¹¹を行うことが欠かせない。この評価は処理の内容、動作はもちろん、入出力、パラメータの整合性チェック、スレッシュホルド、リカバリー、ドキュメントの有無等、多岐にわたるものとなる。

なお、気象庁本庁でシステム開発を行う際は全体計画と工程管理を行うこと、開発された処理を検証しながら導入するということは、検証に専用の試験系を用いることとあわせて既に行われはじめている。今後、より体系的な手順作りが望まれる。

¹⁰ 研究用システムで顕著な成果をあげて論文化された処理手法を試験機で評価をした途端、定常的なノイズや欠測で動作しないとすることは日常茶飯事である。

¹¹ 「私の手法が全てを変える」というセリフは開発者としては一度言ってみたいかもしれないが、システム規模が大規模になるに従ってそれは困難になる。利用者がいる以上、情報や新たな技術を不連続的に置き換えるわけにはいかない。できるだけ既存技術になじませながら徐々に変えるという「技」も必要である。また新しい処理を導入した際、システムに「不具合がおきない」ことをどうやって証明するかはかなり難しい問題で、善意の開発者になればなるほど処理の新新さや優秀さを説明する声が大きくなりがちである。システムの開発に時間やコストがかかる以上、周囲を客観的な評価で納得させると言うことは意外と重要である。それも科学の一面だろう。

4. 地象監視予測システム科学分野の発展に向けて

冒頭に述べたとおり、地象監視予測システム科学という分野は、予測と言う基礎科学を取り扱うことと、あたかも悲鳴のようにさえ聞こえる社会のニーズに対峙することのどちらからも逃れられないという難しい立ち位置にある。社会に役に立つことだけを焦り、背景となる手法について科学的な考察や検証が疎かになってはならないし、逆に科学的な考察や検証に熱心になるあまり、日常的な使用に耐えないシステムを作ってはならないのだ。

地象監視予測システムが研究室内で収まる規模から大規模化を始めたのは1980年代後半、そしてネットワーク技術が一般化した2000年代以降はもはやこの方向は後戻りできない状況になった。現在までの15~30年を長いと言うか、たったと言うかは人によって捉え方は異なると思うが、この分野が時代の変革にあわせて旧来の行動様式から脱皮しているとは言えない状況にあると我々は考えている。研究者側は原理や新しい処理手法を提案し続けるのだけではなく、開発した処理が現在動いているシステム上でリアルタイムに動作することを確認する。ここまでがこの分野の範疇であると自覚することが分野の発展には大切なのだ。「原理は出来た。あとは誰でも作れるよ」という時代は終わった¹²のである。

ニーズは確かに存在する。今後は地震や地殻変動、重力、温度等々、複数の観測項目を重ね合わせて地象の監視や予測を行っていく機会がより増えていくことになる。予測手法の科学的な検証と現象の可視化、適切なスレッシュホールド設定、情報発信までの仕組みを議論しつつ、より合目的なシステムを開発していくことは今後ますます重要となるであろう。

参考文献

- 東田進也：2014、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、地震予知連絡会会報、92、399-405.
- 横田崇、山本雅弘：1989、地震活動等総合監視システム、験震時報、52、47-57.
- 尾崎友亮：2004、新 EPOS(Earthquake Phenomena Observation System: 地震活動等総合監視システム)の紹介、験震時報、68、57-75.
- 松村 稔、伊藤喜宏、木村尚紀、小原一成、関口涉次、堀 貞喜、笠原敬司：2006、高精度即時震源パラメータ解析システム(AQUA)の開発、地震 2、59、167-184.
- 東田進也、堀内茂木、山本俊六：2010、揺れの予測情報と地震災害低減への活用、平成 22 年電気学会電子・情報・システム部門大会、OS7-3.
- 川元智司、檜山洋平、古屋智秋、佐藤雄大、太田雄策、西村卓也、等々力賢：2016、電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)プロトタイプの開発、国土地理院時報、128.
- 武藤大介、舟崎淳、横田崇：2013、「予知」と「予測」及び類似の語に関する調査、験震時報、76、189-217.
- 中央防災会議：2011、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、pp.44.

¹² 研究システムは期待される可能性を述べれば称賛されるものだ。一方、実用機は動いて当たり前で、期待通りの結果が出なければ批判を受けるものである。