

地震調査研究推進本部政策委員会
第1回新たな科学技術を活用した地震調査研究に関する専門委員会
議事要旨

1. 日時 令和2年3月24日(火) 13時00分～15時01分

2. 場所 文部科学省(合同庁舎第7号館東館) 15F特別会議室
東京都千代田区霞が関3-2-2

3. 議題

- (1) 新たな科学技術を活用した地震調査研究について
- (2) その他

4. 配付資料

- 資料 新1-(1) 地震調査研究推進本部政策委員会新たな科学技術を活用した地震調査研究に関する専門委員会構成員
- 資料 新1-(2) 新たな科学技術を活用した地震調査研究に関する専門委員会の設置について
- 資料 新1-(3) 地震調査研究における観測データ等の現状と新たな科学技術を活用した地震調査研究の推進について
- 資料 新1-(4) 次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析(iSeisBayes)の取り組み
- 参考 新1-(1) 地震調査研究の推進についてー地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策(第3期)ー

5. 構成員

(主査)

北川 源四郎 国立大学法人東京大学数理・情報教育研究センター特任教授

(委員)

長谷川 昭 国立大学法人東北大学名誉教授

平田 直 国立大学法人東京大学地震研究所教授
(地震調査委員会委員長)

平原 和朗 国立大学法人京都大学名誉教授/国立研究開発法人理化学研究所
革新知能統合研究センター非常勤研究員

堀 宗朗 国立研究開発法人海洋研究開発機構付加価値情報創生部門長

三宅 弘恵 国立大学法人東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター准教授

(専門家)

長尾 大道 東京大学地震研究所 計算地球科学研究センター
東京大学大学院情報理工学系研究科 数理情報学専攻准教授

(事務局)

生川 浩史 文部科学省研究開発局長

岡村 直子 大臣官房審議官(研究開発局担当)

工藤 雄之 研究開発局地震・防災研究課長

齋藤 憲一郎 研究開発局地震・防災研究課防災科学技術推進室長

林 豊 研究開発局地震・防災研究課地震調査管理官

水藤 尚 研究開発局地震・防災研究課地震調査研究企画官

中 出 雅 大 研究開発局地震・防災研究課課長補佐
三 浦 哲 文部科学省科学官
望 月 公 廣 文部科学省学術調査官

6. 議事概要

(1) 新たな科学技術を活用した地震調査研究について

○資料 新1-(3)に基づき、新たな科学技術を活用した地震調査研究について、事務局より説明。続けて、資料 新1-(4)に基づき、iSeisBayes の取り組みについて、長尾専門家より紹介。主な意見は次の通り。

- 【堀委員】** どれぐらいの密度で地震計があると完璧な再現やイメージができるのか。
- 【長尾専門家】** 観測点密度に関しては、要するに何を知りたいか、どの波長スケールのものを知りたいかにかなり依存する。
- 【堀委員】** 防災を考えたら 10 ヘルツの波長というところか。与えられたデータで手法を作るのも一つの方法であるが、逆に考えると、こういうデータ網を作ればこのような防災ができるという、提案もできると思う。
- 【長尾専門家】** もともと地震波動場再構成は、堀委員の言われたようなことを想定して、建物が揺れる計算を作ることであったが、MeSO-net の今の観測点密度では 1 ヘルツ位までならできると言うことが分かってきた。それは例えば建物の揺れに置き直すと多分 10 メートル位の結構高い建物となる。勿論、もっと短い波長スケール、短周期のものを知りたいが、今の MeSO-net の観測点密度では当然足りなく、もっと 10 倍位に本当は増やす必要があるが、従来の地震観測点を増やしていくことは、難しい。インフラ系の地震観測点とか、スマホは使えるかどうか、すぐには分からないが、そういったものを利活用していくことも大事なことと思っている。
- 【堀委員】** 具体的にどれぐらいの密度が必要かは、必要な空間分解能と時間分解能による。与えられた観測網で解析をするというのも一つの方法である。その一方で、新しい分野を創出するには、「長尾専門家の方向で創出する場合には、本来あるべき観測網はこうである」という逆の提案もできると思う。
- 【長尾専門家】** 数理の立場から言うと、今観測点の最適選択という言い方をしたが、勿論データ同化は不確実性評価みたいなことをしている。その情報に基づけば、観測点配置の最適化というのは可能ですが現実的でない。「観測実験デザイン」としているが、提案は勿論できるので手法にはなっていると思う。データ同化が割と積極的に使われている航空系の分野では、観測センサーを最適配置させるために手法を作ることを行っており、実際にできるかどうかは別問題として、地震の分野においても観測点の最適配置とかの手法の提案は勿論できると思う。
- 【平原委員】** 資料 新1-(4)P.17 の地震動イメージですが、一種のトモグラフィーなのか。
- 【長尾専門家】** トモグラフィーと手法の原理自体は同じ。トモグラフィーというと、計算コストは、ほぼ厭わないと思うが、これは取り扱っているモデルも単純で水平成層構造なので、ある一定の計算時間の範囲内で計算アルゴリズムを最適化させて、いかにして早く計算するところに、かなり注力した手法になっている。
- 【平原委員】** 地下構造を精密にどこまで行うかは問題ではあるが、これを継続的にスタックし

て、データが膨大になれば、益々情報量が増えて、日本列島全体を行うことも、将来は可能になるのか。

【長尾専門家】 原理的には、勿論可能。地震が起こるたびに構造は、自動的かつ機械学習的にブラッシュアップされていくので、十分可能だと思う。

【平原委員】 機械学習でトモグラフィというの、世界では結構使用されているのか。

【長尾専門家】 機械学習というのは、大変大きな非常に広い範囲をカバーした言葉なので、沢山のイベントを使っていれば、機械学習っていうことは一応できるので、イエスというのが回答。

【平原委員】 データを自動的にスタックして、改善していくようなやり方は、沢山あるというのは承知しているので今後そういう方向に向かっていくと思っている。

【長尾専門家】 ただし、単純にスタックしていくと、先程ご紹介したローカルメニューが使われた問題が必ず起きる。この手法のポイントは、それを避ける方法としてレプリカ交換モンテカルロ法を使い、強みとして多峰性を持つ目的関数の中で、原理的にグローバルな最適化ができること。

【平田委員】 補足ですが、この研究の重要なところは、この波動場を再現すること。波動場を再現するという意味は、ディスクリット（離散的）にある観測点から連続の波動場を再現するのが目標。一番ナイーブな、簡単な方法は、観測点の間の幾何学的なデータの内挿。この研究では、内挿するときに波動場が伝播するという物理モデルを入れてデータ同化をするということが重要。単に観測点の振動だけで間を内挿するのではなく、弾性体を波が伝播するという物理モデルのパラメーターを最適化しつつ波動場を再現しているということが重要。ここでは一番簡単な一次元の多層構造を用いている。将来は、境界の凸凹を3次元にすることができ自由度がものすごく増えるので、パラメータの推定にレプリカ交換モンテカルロ法など新しい統計的な手法を使っている。

【長谷川委員】 地震学では、大きな地震が起こるとい現象はそう頻繁にはないので、過去に戻ることができるかというのは非常にクリティカルになるが、先程ご紹介いただいたドラム記録を使った説明は、どういうアプローチなのか非常に興味があり、支障のない範囲で説明いただきたい。

【長尾専門家】 方法のディテールは割愛するが、趣旨として過去の記録について、観測点数は少ないが眠っているドラムの記録、画像データが沢山あり、その中から昔の特にスロー地震のような頻繁に起こらないイベントの痕跡を見付けることは、地震学においては当然大事な目的。画像データの中からスロー地震のようなイベントを取るために、機械学習のデータを作る必要があり、学習データは現在のデータから作る。現在のデータから学習データを大量に作れるので、それを深層学習させ、画像データの中から目的のイベントを検出するというを行っている。今まで地震学を勉強してこなかった数学が得意な学生たちが興味を持ってくれるので、こういったテーマを作っている。ポイントは、今現在のデータから学習データを作って、深層学習のネットワークを作って、それを用いて昔のデータからイベントを検出している。

【長谷川委員】 具体的に昔の微動とか、そういうのもかなり検出できているのか。

【長尾専門家】まだ簡単ではない。学習機を作るときに深層学習としてどういった層を構成するかをハンドチューニングでやるしかない。現在の低周波微動のイベントがどういった特徴を持つかが分からない。私が目で見てもこれは低周波微動って分からないので、まずラベルを付けていく。そのラベルを付けたデータを学習させるが、デジタル化されてからスロー地震自体がそう何百回も起こっているわけではないので、それを適切にその数十回に限られたイベントを定義しつつ、学習するような学習機を作ること苦勞している。それ以上に、クリティカルな問題があり、画像データは、実際 2 日分あり、ドラムのデータ自体は 1 枚で大体 1 日。その 1 日分の画像データはサイズが結構大きく、現在の計算機パワーを使っても、1 日分のデータをそのまま学習させることには無理がある。分割して学習させる必要があり、そこが一番苦勞している。原理としては、昔の微動とかを見つけることは可能ではあるが、現在の計算機資源、計算機の限界を考えながら学習機を作るところに苦勞していて、逆に言うとそういったところにチャレンジしていくのは非常に面白いテーマであると思っている。

【望月学術調査官】Kaggle の話でコンペティションをして、ネットワークの学習機として骨格ができたときに、別の各所でコンペティションをしたとき、同じ学習機としてそのネットワーク自体は、流用という形にはならないものなのか。

【長尾専門家】原理的には、違う学習ができるはずであるが、実際に Los Alamos ではなく Caltech が作った学習機。カリフォルニアの地震を使って学習させたネットワークがあるが、それを MeSO-net のデータに適用させると、基本的な P 波・S 波は抽出できる。ただし、確率は非常に悪くせいぜい 75% 止まり。基本的な性質は抽出できるが、もっとチューンアップしていこうと思うと、さすがにネットワークは変えていく必要がある。御質問への回答としては、必ず対象とする場所やデータによって違う学習ができてくるだろうと思っている。

【北川主査】以前、経産省と文科省のデータサイエンスコンペの審査委員長として、データを公開しチェック用のデータは非公開にして、目標を予測精度などに設定してコンペを行うと、優秀な学生が参入して日々改良していく。その結果だけを公表すると日々新しいモデルを提案してくれて、その分野が非常に活性化したので、地震の分野でも行っていただきたい。ご紹介いただいた 3 つの研究テーマの内、自動検測について、自動検測は従来の CNN とか地震研の自動処理に比べて良い結果が出ているが、それは成田アレイをフィックスしている場合とのこと。このことについて質問ですが、MeSO-net の中で探索して良いものを選択したら、継続して学習すると良くなる見通しがあるのか。また、選択した観測点を固定して検測するだけではなく、本来は地震ごとに、選択しなおすべきではないかと思っているが、それは余りにも非現実的なのか。

【長尾専門家】最初に計算コストとの兼ね合いの問題が出ると思う。300 点をいきなり壊すというのは、現実的ではなく、また学習だけでも膨大な時間が掛かるのと、どうしてもエリアが広がると見えてくる違う性質のものも入ってくるので、本当に上手くいくかどうか、分からない。同じエリアに観測点を増やせば必ず沢山入れた方が良いが、MeSO-net の場合は、成田アレイから全体にするとエリアが広がってしまうので、違う性質のものも検出するようになってくると思う。必ずしも的中率や、正解率が上がっていくかというところ、私も分からないところがある。

【北川主査】固定点での精度が上がるということは結構なことではあるが、本来の目的は全部

使ったときの精度が良くなればいいわけで、そのうちの一部を使って、将来的には地震に対して観測点を選べるようになっていくべきと思う。だからこういう研究開発は現在ベストの方法と、10年後、20年後に良さそうな方法を狙った研究と両方行っていく必要があると思う。

【平田委員】 成田アレイの話について補足するが、最終的には、使えるデータは全部使って、その最適な組み合わせを自動的に行うということは、将来やった方が良いと思う。一番重要なのは、従来の CNN 法などでも 1 つの観測点で処理をしている。この研究では、複数の観測点を使って処理をする方が、随分と良くなるということ、まずここで行ってみせて実証をしたというところ。確かに北川主査が言われたように、成田アレイという固定したもので行くと、成田の近くの地震は良いが、違うところは、当然余り性能が良くなることがあるので、自動的に観測点を選定するということが次の課題になると思う。先程のコンペの話について、重要なのは機械学習の研究で、画像の処理をしたときに非常に進歩したのは、標準的なデータベースがあって、このデータベースを皆で様々なアルゴリズムで行うと良いアルゴリズムが開発された。比較するときには標準的な、誰もが使えるデータベースがあることが非常に重要。このプロジェクトでは、標準的なデータベースを作ることを重視している。これはパイプロダクトですが。今この論文ができれば、論文とともにデータベースも公開して別な考えに基づいた新しいアルゴリズムを開発した方は、このデータベースを使って研究してください、ということ、是非やろうと思っている。新しい手法を開発する時には、標準データベースの整備は非常に重要だと思っている。日本はものすごく大量なデータがあるが、なかなかそれを皆が使いやすい形になっていないところに問題があるので、そこは同時に解決する必要があると思っている。

【北川主査】 機械学習が画期的・飛躍的に進んだ理由として、画像のデータベースが整備されたことがあるが、その他にも幾つかあって、標準的なソフトが公開されたこと。コンペをやって日々切磋琢磨していったこと。論文のパブリッシングが非常に速くなったことなど。是非そのデータの公開というのも取り組んでいただければと思います。

【平原委員】 先程、トモグラフィーと言ったのは、将来的にはそういう構造の時間変化、精度の向上とかを狙えないかというのがあった。今は難しいだろうと思っている。将来的には、可能になりそうか。

【長尾専門家】 原理的には勿論、数理的には可能。それをできるだけデータが確保できるかどうか結局掛かってくると思う。大事なことは、不確実性評価をきちんとすることである。データ同化は、不確実性評価をするための手法ですと台風の予報円を描くような手法なので、そういった不確実性評価をすることによって、時間変化が本当にあるかどうかを判定することができるのではと思っている。取り敢えず今のデータから不確実性評価をして、時間変化の有無をジャッジできるかを行ってみること、先程、堀委員が言われた本当に見出すためにどういった観測をすれば良いかという、観測デザインを逆提案することが大事と思った。データ同化は、ポテンシャルはあると思っている。

【北川主査】 事務局の説明について、観測点の数が急激に増えた後、平成 23 年頃から微妙に減少しているが、理由は何か。

【中出補佐】 何か一つの理由だけで減少した訳ではないが、例えば地方自治体や大学等におい

で一時期沢山保持していたものの維持管理が困難になって減っていることや、今海底、海域での地震観測網の整備に注力していることもあり、観測点がやや微減しているのかなと思う。ただし、過去に比べてかなり多くの観測点の数は維持できていると考えている。

【北川主査】 以前、南海トラフの海底地震網について、何か計画があると聞いたが、いかがか。

【中出補佐】 今現在まさに進めているところ。室戸岬から宮崎県のところにかけて空白域になっている。こちらに N-net という名称で、今後構築に向けて、今年度は海洋調査などを行い、どういうところに敷設したら良いのかというところを検討している。

【北川主査】 ここからは全体の一般的な議論に移りたい。事務局から補足があれば。

【中出補佐】 議論の取っ掛かりとして、地震調査研究に機械学習等の新たな科学技術を用いてどのようにやっていくのかということを観点に考えると、先程事務局からご説明した内容や長尾先生からのプレゼンを踏まえると、例えば、先程ご説明した天文学 Kepler 望遠鏡を使った場合、人では見分けのつかないようなものという、先程の長尾専門家のプレゼンでも「自動検出」というような話があり、こういったものの研究成果を生み出していくことができるのではないかと、つまり、人には発見することが困難な新たな相関関係の発見による科学的知見の獲得というような話。また、関係機関が強震・地殻変動や様々な観測等を行っている。例えば、そういったものを統合して科学的な知見を求めていく、つまり、人には処理しきることは困難な複数・多種のデータ統合による新たな科学的知見の獲得というのがあるのではないかと。さらに、今申し上げたデータ、知見により、新たな知見を踏まえた観測すべき事象の探索、最適な観測点配置の提案を生み出していくというのがあるのではないかと、このような観点もあると思うので、議論の参考としていただけると幸い。

【平田委員】 調査委員会としての立場から申し上げますと、一般的な新たな科学的知見を目指すのではなく、我々はやはりミッションがあるので、それに基づいたことに関連して重要な科学的発見が必要。新しい科学的な手法、統計学を使ったものでできれば、今は我々が知っている現象じゃない新しいものが発見できる。それは科学的に非常に魅力的なテーマでもあるし、同時に地震活動というかプレートの沈み込みをモニターするという地震本部の重要なミッションに合致しているので、そういうことに役に立つような手法を、機械学習というか従来の地震学ではない知見を入れて手法を開発するということは非常に意味があると思っています。

【北川主査】 会議を始めるに当たって大事な御指摘で、本当に地球物理というか地震学として何をやりたいとかを縦糸にして、縦横で考えていく必要もある。

【長谷川委員】 基本的に情報が不足しているから地震の予測もなかなか手の届くところまで進んで来ない。得られる観測データの全て、あるもの全てを動員して研究するというのが基本だと思う。最初に複数の種類のデータ統合による理解の深化というか、現象の理解を深め、その先に新たな科学的知見の獲得というようなことがあるのではと思う。情報科学の活用により、いかに関連する情報を統合して、新たな情報を獲得し理解を格段に進展させることができるかを期待したい。

【北川主査】 ビッグデータ解析のイメージというのは、従来のサイエンスには目的があって、それによくデザインしたデータを取って解析するという。これに対してピッ

グデータというのは、他の目的のために計測したもの、あるいはモニタリングなど無目的に集めたデータまでも利用すること。基本的には、それを目指していくのが良いと思う。もちろん実際の場面では、計算の限界や場合によっては、却って悪くなるということも起きますが、基本的にはそういう方向が良いのではないかと考えている。

【平原委員】 機械学習を用いて地震活動と地殻変動データから確率的に地震発生予測を行うというのがどの程度まで可能になるか。一番問題になるのは、大きな地震というときにはやっぱり数が少ないこと。しかし、大きな地震から小さな地震まで全部使えばすごいビッグデータになる。その関連を機械学習は、学ぶ必要があると思っている。文献を調査するとまだ地震学になっていない。機械学習と地震学がどうも何かまだ乖離している感じがあり、現状はやはり地震波の読み取りとかそういうところで、まだ時系列解析にはなっていない空間・画像解析が多い。RNNとかLSTMとかまだ余り使っていないので、そういうところもこれから考えていただきたい。将来、必ず何かができると思っている。

【堀委員】 最初に概念を整理した方が良いので、東京の10キロ四方の面積で見たときに、何バイトのデータがどれぐらいの時間間隔で計測されるかということを考えてみる。このデータの量は、もしかしたらAIを使う研究で行われているデータの量と比べると、桁が落ちる程、少ないかもしれない。勿論、全地球で観測されるような大地震に絞って、しかも地震の発生する地域を一切無視すれば、相応の量のデータが観測されているであろうが、地域性を無視することは地震学が目指すものではないものかもしれない。ともかく、データの量という点では、観測点の数が足りていない気がする。先程、長尾専門家に話をしたが、機械学習等の新たなデータ科学系の技術を使うとすると、どういう観測をすべきだということも考えるべきである。繰り返しであるが、地球全体で1個の大地震を観測するという事ならば、相当の量のデータが計測されるようになっている。しかし、東京でどのような地震が起こっているかを見るには、データ量そのものが足りないかもしれない。本委員会は、社会の期待を踏まえた成果の創出のために新たな科学技術を活用しようということと理解している。とすると、南海トラフに絞って考えてもよく、地震学の研究者が科学的に信頼できる情報を発信するということが大切であり、南海トラフの発生前後に科学的に信頼できる情報を発信することにつながるような新たな科学技術を考えるべきと思う。もう一つ、新たな科学技術の活用を考える際には、是非、初期設計をしっかりと考えるべきと思う。社会の期待を明確にした上で、新しい科学技術の活用を考える、必ず成功することは約束できないものの、最も可能性が高い活用を考える、ということが必要である。最後に、点で観測すると、所詮データの量は足りないかもしれない。先程の長谷川委員のご指摘を私になり咀嚼すると、地下空間は3次元、地震の時間変化を考えたら4次元、点で観測してはせいぜい時間1次元のデータだけ。点のデータを集めて4次元の現象を理解することは難しい。新しい科学技術やその活用を考える方、点の観測を超えることは考えるべきと思う。

【北川主査】 データが少ないということで、確かに画像等は億単位のデータを使っていると言われていて、それに対して実際のサイエンスの分は、ほとんどスモールデータ。例えばCRESTさきがけにJAMSTECの方が衛星画像から台風を予測するプロジェクトを行っていて、実際の独立な画像はせいぜい数万です。ただ、画像数が少ないものでも、回転したり平行移動したり時間が経過したり、シミュレーションで時間が経過したものを億単位作って、それで学習させると上手くいく。同様に、地震でもある方向から来たものと別な方向、回転させるなどを普通に行っていて、

非常に懐疑的でしたが実際上手くいく。そういう意味で、少ないからといっても無理ではないという思いを持っている。別な話になりますが、地震の場合何か怪しいところを見付ければ非常に役立つこともあるかもしれないが、本当にサイエンティフィックな意味では、因果関係の発見や外挿が大事だと思う。機械学習は、基本的に内挿で、そこが難しいところ。先程、物質・材料研究機構の紹介がありましたが、物質探索というのは今までデータがないところで新しいものを見付けるから大事なことです。それはデータ解析からいうと外挿である。従来の機械学習を超えるところを上手く行うのが肝心で、そこはモデルを使ってシミュレーションとデータを上手く融合する必要がある。だから、地震の方でも恐らくそのモデルのところと観測データをうまく統合していかないと、データだけで行うという限界があるのではないか。

【堀委員】 今、モデルとしてあるのは、物理シミュレーションというイメージでよろしいか。

【北川主査】 そのとおり。かなり確度があるものである。

【堀委員】 長谷川委員の話に戻るが、物理シミュレーションを行うための地下構造が分かっていないという、最初の根源に戻ってしまい物質科学よりは、もしかしたら格段に難しい問題で、皆さんが苦勞しているところと理解している。

【北川主査】 従来のデータ同化では物理モデルがかなり確実にあるところでデータを使って上手くいっているが、地震の場合はもう一段難しい問題になると思う。しかし、チャレンジングで非常にサイエンティフィックにも面白い、情報の方から見ても面白い課題と思う。

【長谷川委員】 基本的に観測点が足りないのは事実。そこは一旦先に置いておいて、勿論ゴールではあるが、その少し手前の理解の進展という点、先ほど申し上げた理解の深化という点でも実は格段の進展が期待できる。例えば、スロースリップイベントが、実はいろいろなところで起こっていると思われる。プレート境界では最近多数見付かってきており、それをどんどん見付けられるようになると、大きい地震が起こる前には確実に周囲でスロースリップイベントが起こっていることが分かるようになると思っている。これは内陸にしる、多分そうであると思っている。それを今よりもずっと沢山見付けられるというだけでも実は格段の進展。だから、一步一步階段を上がっていくその一步でも二歩でも上がっただけでも実はすごい進展になる。そのくらい地球の内部のことは分かってないのが現状であると思っている。だから観測点が本質的に足りないという議論を先にやるのではなく、観測の仕方、例えば光ケーブルを使って線的にやるとか、あるいは、InSAR は面的な情報であるが、そのサンプリングの時間がもう少し短くなるとかなり面的な情報が得られるわけで、この種の情報を全て活用して、それらのデータを全て統合して行うことだけでも格段の進展になると思う。それは地球内部で起こっている現象の全てを完全に理解するということには至らないにしても、今よりも格段の進展が得られるという意味で重要であると思う。そういう意味では理解の深化と、あるいは進展でも良いですが、理解を進めるという意味合いだけでも、この種のテクニックを使って行うことは非常に重要であると思っている。

【工藤課長】 北川主査が言われた外挿がやっぱり必要であるというのは仰るとおりで、そこを目指していきたい。他方、長谷川委員のご指摘のように、現状はその外挿を作る前までの段階の話として、相関の方がまだ分かってないことが余りに多いという理解になっている。これは調査委員会の場で、この資料にも提出させていただ

ておりますが、地殻変動データと地震動データとの関係性というのが分からない。この辺を見ることから外挿でどういうものを取っていったらいいのかというモデルを考えるという段階にまだあるのではないかなという理解をしている。

【堀委員】 InSAR は筋が良いと思う。私が関わっている SIP 国家レジリエンスでも、日本の衛星技術は高いものがある。もし新たな科学技術を作るなら、衛星技術を使って面的に地震を観測する、ということは投資の価値があると思われる。衛星技術は高い基礎能力を持っているので、対応は可能であろう。衛星に限定せず、面の観測は航空測量技術にも応用が利くかもしれない。

【平田委員】 堀委員が目的をはっきりさせると言って幾つか南海トラフのお話をされたが、目的は皆さんの手元にある「地震調査研究の推進について（第3期総合基本施策）」去年の5月に策定。ここには当面10年間に取り組むべき地震調査ということが議論され、基本的には当面10年間にやるべきことが、新しい手法で目標とすべき課題。そこでは南海トラフの発生の予測の高度化は、もちろん重要なターゲットなので、それが例えば9ページ目のところに書いてある海域を中心とした地震調査研究。丸のところに海溝型地震の発生予測手法の高度化というところに、どうやったら高度化ができるかということも実はこの中に具体的に書いてある。従来の調査委員会の海溝型地震の評価手法は、過去にこの地域で何回地震が起きたというデータから、ポアソンモデルとかBPTモデルとかの統計モデルを作り、それで30年確率何%ってそういう方法だった。これを高度化するということは、基本的には今あるリアルタイムのあらゆるデータをモデルに同化して予測をするという気象学が行っていることをまさにやらなければいけない。これはもう王道なので絶対に行くことですが、20年前にやろうと言ったらそんなものできるかと散々言われたものの、ここにはそれをやろうということを書いた。これは画期的なこと。この総合基本施策は10年に1回策定しており、当面10年間にやるべきことは何かを、最初の10年、次の10年で今3回目の10年間でやるということ。だからこれは非常に重要です。しかし10年掛けて本当にできるかどうかは分からない。分からないが、今からやらないと次の10年後にもできないので絶対にやらなければいなくて、そこでは堀委員と平原委員が作っている巨大なシミュレーションモデルが必要で、そこに使うデータがなるべく稠密にあるということは大前提です。これは従来の地震学では到底できないから、情報科学と計算科学を地震学に統合するということが非常に大きな柱です。しかし、これだけでは到底成果が出ないかもしれないので、その他にも幾つか書いてある。第1期のSIPで行った「津波即時予測手法の高度化」、これは防災科研のS-netで津波を沖合で観測し遡上予測までやるというところで、計算機の能力がなかったら到底出来なかったことを行った。だが、モデルができたのは小湊の周辺だけ。千葉県のある場所1点でしかできなかった。本来は日本全国を行わなければならない。今はDONETを使ったり、S-netがなくても、ケーブル3本位あったら何とかするという極めて簡易的な方法で行っていますが、正しいやり方は、観測点を増やして、計算機の能力を増やしてシミュレーションすれば必ずできることが分かっているわけで、それは物理が分かっているからです。しかし、「地震の発生予測」の方は、実は大まかな物理は分かっているが、実際にモデルを作ったときに、地下の3次元の構造を50メートル空間分解能で作ることは相当難しい。だからそれをいかに簡略化するかということがプラクティカルには必要なところですが、要のところは本当に細かくする必要があると思います。今の議論は、海域の地震についてです。海域では100年に1回起きる地震をターゲットにしていますが、しかし、陸の方はもっと難しく、1,000年とか1万年に1回しか起きない。やっぱり陸で発生する長期予測というのも必要ですが、到底データ同化はできない。つまり現象がゆっ

くりゆっくり進行するので、データ同化してもずっと変わらない。結局は内陸の地震をデータ同化というやり方で行うのは非常に難しいです。しかし、内陸の地震は大きな地震が起きた後、内陸じゃなくて海でもそうですが、必ずいわゆる余震が起きるので、この予測はしなければいけない、あるいは前震・本震・余震というようなもの。今は ETAS モデルとか大森・宇津モデルで行っているが、これは極めて、地震学固有のやり方なので、もう少しきちんと統計学の本体で行っていただければずっと進歩することがある。さらに、ETAS は基本的に時間の ETAS です。空間は入っていない。尾形先生の ETAS は空間が入っていますが、空間に関してモデルを進化させる余地が沢山ある。つまり学派が沢山あって、研究者によって全部違うような時空間 ETAS。だからこれは時空間の正しい ETAS みたいなものを、ETAS と言わなくても良いけれども、統計学を使ってモデル化する価値があって、実用的に大変意義があるし、やれば必ずできると思う。そのときのデータは何かというと、小さな地震です。中小の地震をどれほど正しくデータとして取り込めるかといって、この中小のデータを「中小の地震のカタログ」と地震学では言っていますが、カタログを作るのもボトルネックがまだあって、基本的には時系列の波形のデータから人が P と S を読み取って作り出している。1 年間に気象庁が 20 万回とか 30 万回の地震を全部人の目で、検出しているところがボトルネックになっている。ここを完全に AI を使って自動化できれば、大きな地震が起きたときに、あるいは前震と思われるものが起きたときに、その後の地域の地震活動がどう変化するかをある種の確率モデルで統計的に予測することができると思っている。だから、これは 10 年の目標を立てて、最初の 3 年位で成果がきちんと出て、5 年位には実用化できると思う。もう一つ難しいのは、普通の地震とゆっくり地震のようなもので、いわゆる地震学が今まで相手にしなかった周波数帯域の現象を地震計のデータとか傾斜計のデータとか計測した原データから抽出する手法というのがまだプリミティブです。つまり、地震学者が知っているものはすぐにできますが、中途半端な帯域の現象は、従来の地震学者の勘と経験で検出することはできないので、ここで情報科学の出番があると思っている。これは最初に、新たな科学的知見というのはそういう意味で、長谷川委員が言われるような意味ではもっと難しく、地震のデータだけではなく、地殻変動のデータと全部合わせた形で地下のスリップを検出する手法を開発するところがある。これも非常にチャレンジングであるが、10 年掛けて行うに値することと思っている。やはりターゲットを何にするかというところで、従来の手法で頑張るところと、圧倒的な新しい手法を入れないと進まないものというのをきちんと仕分けする必要がある。一応、地震本部としてはこの総合基本施策というのは憲法のようなものなので、10 年で何をどこまでやらなければいけないかということは長い議論の末、定義したのでここで、新しい機械学習や AI の技術を使うと進歩する部分について、うまく定式化するのが良いと思う。

- 【北川主査】 会議の進め方に関する重要な御提案であるが、ターゲットは割とこの中に入っていて、その中で従来の方法に、どの部分について情報科学あるいは統計学を入れることによってできるところを抽出するということか。
- 【平田委員】 私の立場は現状の調査委員会として必要なものとして 10 年間でこれを行ってほしいということで、ずっと意見を申し上げていたが、それ以外にもやっぱり足りないところがあるという御指摘は多分あると思っており、地震学ではない分野の先生の御意見を参考にしたい。
- 【工藤課長】 頂いた御意見については事務局としても当然この「地震調査研究の推進について」をベースにして、この上にどれだけのものをまた積み上げていけるかなどの観点

で、この会議を始めさせていただいているので、その点を踏まえ、次回以降の御議論を頂ければと考えている。

【北川主査】 本日、フリーディスカッション的に進めたが、最後に何かいかがか。

【三浦科学官】 先程の平田委員の「余震カタログ」の話に少し関連するが、火山研究の方から見ると、例えば非常に大きな地震が起きた後に、具体的に言うと 3・11 が起きた直後の火山性地震あるいは火山性微動のディテクタビリティが非常に落ちた。そういう意味で大きな地震の後のローカルな火山周辺の地震の地震活動動に対して何かバイアスが掛かってしまっているというのが現状。「余震のカタログ」の均質化と同時に、火山とかあるいは内陸地震もそうであろうと思うが、そういったローカルな「地震のカタログ」の均質化というのも一つ、こういうテクノロジーを使えば進歩できるのではないかと考えているので、そういう視点も一つ加えていただければと思う。

—了—