

シリーズ「新・強震動地震学基礎講座」

(第20回) 地震ハザード解析から確率論的地震動予測地図へ

強震動委員会 盛川 仁 (東京工業大学 環境・社会理工学院)

最初に (数学的な厳密さにはまったく配慮しないで) 確率論のおさらいをしておく。事象 A の「発生しやすさ」を適当な写像 P を導入して区間 $[0, 1]$ の実数で表わすとき、それを確率と呼ぶ。この写像 P はいわば、事象 A の「発生しやすさ」のモノサシ (確率測度) で、値域が $[0, 1]$ である事以外はルベグ測度と同等であると考えてよい。重要な点は、確率を規定するモノサシは (我々が) 自由に決めることができ、確率論ではその決められたモノサシを使って理論展開されるということである。

確率論はモノサシの決め方には関知しないので、我々は何らかの方法でモノサシを決定しなくてはならない。大雑把に言えば理論的にモノサシを決め得る場合と、実現値を用いて統計的に決める場合がある。設定可能な全ての初期条件が完全に同じ割合で出鱈目に選ばれるという条件のもとで正確な立方体のサイコロを投げたときに「1の目が出る確率は $1/6$ である」とするのは、論理的考察に基づいて (理論的に) モノサシを決めていると言ってよいだろう。一方、天気予報の降水確率は現時点と似たような気象条件にあった過去のたくさんの事例のうちで 1 ミリ以上の雨が降った割合として決められる。これは多数の実現値から統計的にモノサシを決める例である。

多くの事象において理論的にモノサシを決定することは難しく、統計的手法によってモノサシを決定せざるを得ない。これは、写像 P の決定には統計的に安定な結果が得られるだけの膨大な実現値が必要である、ということの意味している。

1. 地震ハザード解析

地震ハザード解析とは、簡単に言ってしまうと地震 (地震動ではなく、断層のすべり現象) の発生確率を考慮して、ある特定の地点 (以下、対象地点と呼ぶ) における地震動の大きさの確率分布を推定する手法である。かつては、これを地震危険度解析と呼ぶことも少なくなかったが、「危険度」には「リスク」の概念も含まれるため純粋に地震動について検討する際はハザード解析と称するようである。対象地点について得られた地震動の大きさに関する確率密度関数を用いることで、「今後 X 年間に震度 Y 以上の地震動を経験する確率」を求めたり、「今後 X 年間に確率 $Z\%$ で経験する震度の下限値」を求めることができる。多数の

地点についてこのような計算をすることで、確率や震度値の空間分布が得られる。これを確率論的地震動予測地図 (以下、確率地図) と呼んでいる (防災科学技術研究所, 2018)。

地震ハザード解析を実際にやってみようとするとき「ある特定の地点における地震動の大きさの確率分布」を求めるためにはうんざりするほどたくさんのハードルが待ち構えていることに直ちに気づくであろう。すなわち、

- ・対象地点周辺で発生する地震をどのようにして選ぶか？
- ・地震の震源断層がどこにあるのかわからない場合にはどうすればよいのか？
- ・地震動の大きさの指標として何をを選ぶのか？
- ・対象地点における地震動はどのようにして求めるのか？
- ・地震の発生確率や規模をどのようにして決定するのか？
- ・対象地点のまわりに複数の断層がある場合、それらの影響をどのように考慮、または組み合わせるのか？

などである。本稿はこれらのとでも答えられそうにもない疑問に対して、現時点で、どのように対応可能か、あるいは、どのように対応されているのかを確率地図の作成過程 (地震調査研究推進本部, 2014) を追いながら簡単にまとめようとするものである。

2. 対象地点周辺で発生する地震

対象地点周辺で発生する地震を選ぶにあたっては、周辺の活断層の有無、プレート間地震の影響、震源を予め特定できない地震の検討が必要である。

日本国内の多くの地点では海溝部で発生するプレート間地震の影響を強くうけると考えられる。政府の地震調査研究推進本部 (以下、地震本部) は海溝型地震についての長期評価を実施している (地震調査研究推進本部, 2017a)。2011年東北地方太平洋沖地震での経験によって明らかとなった課題を解決するために海溝型地震の新しい長期評価方法の検討が進められている。統一的な見解が得られるまでには時間を要するため、防災対策等で活用されることを想定した暫定版ともいべき長期評価結果が公開されており、その結果を利用できる。データの不確実性などにより

解釈が分かれる地震発生確率などは複数の解釈について並記するなど、定説が得られていない部分はその旨を明示しつつ記載されている。

対象地点周辺の活断層は、周囲の地形的・地質的特徴から同定するのが王道であるが、一般にこの作業は誰にでもできると言う性質のものではない。そのため、確率地図では地震本部が実施した活断層の長期評価の対象となった断層について検討している。地震本部はこれまでに国内の主要な115の活断層帯（および5つの活断層ではないと判定されたもの）について詳細な長期評価を行った結果を公表している（地震調査研究推進本部、2017b）。評価結果には各断層ごとに断層の位置や形状をはじめとして、平均活動間隔、活動区間、想定される地震の規模、地震の際のずれ量、今後X年以内の地震発生確率（ $X=30, 50, 100, 300$ ）、最後の活動からの経過時間がその値のおよその信頼度とともに示されている。なお、内陸地殻内地震の長期予測については当講座で既に紹介されている（隈元、2018）。

対象地点周辺に活断層がない場合にも、地表に断層が現れない地震（震源断層を予め特定しにくい地震）が対象地点周辺で発生するものとして、少なくともM6.8の地震を想定したうえで、日本列島内陸部の地域ごとに示された最大マグニチュードに配慮することが期待されている（地震調査研究推進本部、2010）。プレート間およびプレート内で発生する震源断層を予め特定しにくい地震についても、長期評価によって海溝にそった地域ごとに地震規模と発生確率が推定されているので、これを利用することができる。

3. 対象地点における地震動の予測

地震動の指標には震度以外にも最大地表面加速度（PGA）、最大地表面速度（PGV）、SI（Spectral Intensity）値など種々の指標を用いることができる。一般市民にとっては震度を指標とすることは言葉に馴染みがあってわかりやすいと感じられるであろう。一方、構造物の設計や応答の評価等の工学的な目的には、対数スケールによる震度よりも高い分解能を有するPGAやPGVなどの指標が望ましい。構造物の周期特性の違いを考慮して応答を評価するためには、より情報量が多い地震応答スペクトル（松崎、2017）が必要となる場合もある。

これらの地震動指標値は、想定する地震の断層位置と規模が決まれば距離減衰式（近年は地震動予測式と呼ぶ）のような経験式を用いて決定することができる。また、表層地盤の影響は表層地質あるいは表層部分の平均的なせん断波速度に基づく地震動応答倍率の経験式を用いて評価される。地震動予測式については、当講座で既に解説されているのでそちらを参照されたい（司、2018）。地震の規模や

震源距離などの値を経験式に代入するだけなので計算そのものは容易であるが、経験式そのものが大きくなばつきを内包していることに注意が必要である。

確率地図では地震動予測式のばらつきが対数正規分布に従うものと仮定して、その標準偏差を震源距離の関数としてモデル化して評価に取り入れている。なお、確率論的性質を有する変数の最大値は、その変数の確率論的性質とは別に極値分布（Gumbel分布）で説明できることがよく知られている。対数正規分布は極値分布のよい近似を与えるため、このような取り扱いは簡便かつ合理的である。

4. 地震の発生確率と規模

主要な活断層による地震については、地震本部による長期評価の結果を利用することができる（地震調査研究推進本部；2017a, 2017b）。発生確率の算定には、最新の地震発生イベントからの経過時間を考慮して地震発生間隔の確率分布をモデル化したBPT（Brownian Passage Time）分布に基づく点過程が仮定されている（地震調査研究推進本部、2001）。BPT分布を決めるために必要なパラメータは歴史地震や断層のトレンチ調査から求められた平均地震発生間隔と、その変動係数 a の2つである。前者は、個々の地震ごとに当然異なるが、後者については断層によらずに一律の値（ $a=0.24$ ）が暫定的に与えられている。なお、BPT分布を適用することの妥当性については諸説があり、過去の地震発生の履歴情報の質や量によってはWeibull分布など他の分布形のほうが適合性が高く、頻度論に基づくよりもベイズ更新を組み合わせるほうがよいとする意見もあるようである。

過去の地震発生の履歴がわからない断層については、定常ポアソン過程が仮定され、その平均地震発生間隔は当該断層でのひずみの蓄積の速さをもとに求められている。

ところで、長期評価によって公開されている地震発生確率の多くが、例えば0.5%~2%と云う具合に幅を持って示されている。天気予報にたとえれば、「明日の降水確率は20%~50%である」と言っているのと同じようなものである。冒頭に述べた通り、確率とは写像 P のもとで一意的に決定されるべきものであり、実際、降水確率は一意的に決定されている。確率の値が幅を持つ、というのは純粋な数学の観点からは違和感を覚えるであろう。

トレンチによって地震の痕跡を発見したとしても（そもそも見落としがあるかもしれない）、現時点の技術では遠い過去の地震の発生時期の推定精度は良くても有効数字2桁、条件によっては有効数字1桁が精一杯であり、大きな誤差を含んでいる。つまり、極端な表現をするならば、平均地震発生間隔が1000年の断層について、その値には1000年オーダーの誤差が含まれているかもしれないので

ある。

しかも、地震発生のモデルとしてBPT分布を適用する場合のみならず、定常ポアソン過程（指数分布）以外の手法を適用する場合、最新の地震発生イベントによる応力降下を何らかの形で考慮できるという利点がある一方で、最後の地震がいつ発生したかを決めなくてはならないという難しい問題を本質的に抱えている。最後に発生した地震が歴史地震として記録に残っていればある程度の精度は期待できる。しかし、トレンチから推定するような場合は平均地震発生間隔と同様に大きな誤差を含むことになる。結果として、一意的に地震発生間隔の確率分布のパラメータを決定することができず、極端な場合のパラメータを上下限值として与えて地震発生確率を求めて並記するしかない、というのが現状である。すなわち、「平均地震発生間隔が推定範囲内でもっとも長く、最新の地震発生が考えるもっとも新しい時期に発生した場合」が地震発生確率の下限値を与え、「平均地震発生間隔が推定範囲内でもっとも短く、最新の地震発生が考えるもっとも古い時期に発生した場合」が地震発生確率の上限値を与えるとしている。確率地図では、このような事情を考慮して、地震発生確率の上下限値の中央値を用いた場合と、地震発生確率の上限値を用いた場合の2種類について解析を行っている。

活断層による地震の規模については、地表で観測される断層長さや変位などをもとに推定されている。しかし、一つの断層帯が複数のセグメントに分かれていて、それらが全てあるいは一部が同時に破壊するのかまったく個別に破壊するのか、といったシナリオを確定的に決定することは容易ではない。加えて、解決すべき課題が多く残されている（隈元，2018）。

震源断層を予め特定しにくい地震については、地震発生数と地震の規模が両対数軸上で線形関係にあるとするGutenberg-Richter (G-R) 式に基づいて定常ポアソン過程でモデル化する。G-R式においても直線を規定する2つの係数を決定しなくてはならないが、大地震は発生数が少ないため小さな地震記録に基づいて係数を決定して大地震についてはほとんど外挿のような形でモデル化せざるを得ない。精度が高いか、と問われて自信を持って肯定する人はあまり多くないであろう。

地震の発生確率と予想される規模は地震危険度の評価結果に直接影響を与える重要なパラメータであるが、その値を決定することがいかに困難であるか、また大きな制約の中でどのようにしてパラメータを決定しているか、ということを知っておくことは非常に重要である。

5. 複数地震の組み合わせ

日本のように、どこにでも断層があって、いつどこで地

震が発生しても不思議ではないような環境では、対象地点に影響を及ぼす地震が複数にわたると考えるのが適当である。上に述べた海溝型地震、(複数の)活断層における地震、震源断層を予め特定できない地震、の3種類の地震について対象地点毎に検討しなくてはならない。その際、各々の地震の性質の違いにより、発生確率や地震の規模はまったく異なる。対象地点の地震危険度を評価するにあたって、これらの地震ごとの結果に対して単純な重ねあわせを適用することはできない。

合理的に地震危険度を評価するために、確率地図では亀田ら（1997）による確率論的想定地震の考え方が用いられている。定式化等は文献（亀田ら，1997）に譲るが、対象地点において想定される個々の地震によって、今後X年間にある地震動レベル（たとえば震度Y）を超える確率を各々の地震の発生確率を重みとして重ね合わせることで、全ての起りうる地震を考慮するという考え方である。このような考え方を使うことで、その地点にとってどの地震の影響が支配的かという個々の地震の貢献度をあわせて求めることができる。「今後X年間」のXの値が小さい場合は平均地震発生間隔が短いプレート間地震の貢献が大きく、Xが大きくなるにつれて活断層による地震の貢献が大きくなっていく、と云う地震の定性的な傾向をうまく表現可能である。

6. おわりに

以上、種々のパラメータを具体的に決定して対象地点における地震動レベルの確率密度関数を求めるという所期の目標が達成されるまでを概観した。地震発生確率や地震の規模の曖昧さ、地震動評価のための経験式（地震動予測式）が本質的に抱える大きなばらつきなど、よくわからないものをよくわからないなりに積み上げて地震ハザード解析は成立していることが理解されるであろう。

ハザード解析を含む危険度解析（とその裏返しである信頼性解析）のための理論は極めて緻密で完成度が高い。しかし、このような確率論に立脚した考え方は、本来、極めて豊富な情報のもとで解析対象とする現象を構成する要素の確率論的性質、すなわちモノサシである写像Pが厳密に決定されていることを前提としている。これは、工業用材料や機械部品などのように大量の実現値に基づく統計的性質が明らかな事象に対しては極めて有効に機能する。しかし、自然現象、特に地震のように再現期間が人間の寿命に対して極めて長く、統計的に緻密な議論が可能となるだけの実現値を得ることが絶望的な現象を対象とするには大きな困難を伴う。

サイコロを3回ふって、1と3と4の目がでたので、このサイコロの目がでる確率は1と3と4がそれぞれ1/3で

ある、と言わざるを得ないような状況だと言えばイメージしやすいであろうか。今後、2や5、6の目が出るかもしれないし、そもそもそのサイコロは6面体ではなく20面体かもしれないのである。

地震PRA（確率論的リスク評価）、信頼性設計、設計用入力地震動の地域ごとの違い（地域係数）の設定、構造物の補強の優先順位の設定など、工学的あるいは防災上の観点から地震ハザード解析の必要性には疑いの余地はない。現時点での地震ハザード解析、たとえば、その産物である確率地図の作成には今現在考える最高の知恵と努力が投入されている。しかし、地震ハザード解析が依然として発展途上にある未成熟な技術であることはまぎれもない事実である。地震という現象の時間スケールを考慮すると、ごく近い将来にこれまで以上に多くの地震の実現値が得られて写像Pの統計モデルを安定して決定できるようになる見込みは低い。そのため、よりよい写像Pのモデル構築には統計的手法だけではなく、今後は強震動研究の成果を活用しながら、理論的アプローチによる写像Pのモデルの精度向上を目指すことが必須となるであろう。強震動研究のますますの発展が、地震に強い社会の実現にとって重要であると筆者が考えるゆえんである。

謝辞

本稿の執筆にあたっては、電力中央研究所の中島正人博士、鉄道総合技術研究所の坂井公俊博士、東京工業大学の

飯山かほり博士、鈴木祐輔氏に内容について有用かつ重要なご助言をいただいた。また、編集担当の岩田知孝委員、松島信一委員から本稿の改善のために有益なご意見をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 防災科学技術研究所, 2018, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 地震調査研究推進本部, 2001, 長期的な地震発生確率の評価手法について.
- 地震調査研究推進本部, 2010, 「活断層の長期評価手法」報告書, 暫定版.
- 地震調査研究推進本部, 2014, 32-67, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/14_yosokuchizu/h5.pdf
- 地震調査研究推進本部, 2017a, https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/subduction_fault/
- 地震調査研究推進本部, 2017b, https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/major_active_fault/
- 亀田・石川・奥村・中島, 1997, 土木学会論文集, 577, 75-87.
- 隈元, 2018, 日本地震学会ニュースレター, 71, NL1, 14-16.
- 松崎, 2017, 日本地震学会ニュースレター, 70, NL1, 21-23.
- 司, 2018, 日本地震学会ニュースレター, 70, NL6, 14-16.

(第21回) 地震動即時予測

強震動委員会 干場充之 (気象研究所)

1. はじめに

地震動即時予測は、迫ってくる（強い）揺れをその直前に予測する、というものである。断層がずれて地震が発生すること自体を予知することは出来ないとしても、強い揺れがやってくることは予測できる。それが、数秒からせいぜい十数秒という直前でも事前に分かれば地震災害を減じることには貢献するだろう。このように、地震動即時予測では、地震が発生した後だが、強い揺れが来る前のタイミングで予測を行う。通常、「地震動予測」というと、シナリオ地震での地震波形の予測（「新・強震動地震学基礎講座」第14回参照）や地震動予測地図（同第22回予定）など、未来に発生する地震に伴う震動の予測を意味していた。一方、このように地震動が迫ってくる直前のタイミングで予測する概念は、従来の「地震動予測」と区別するために、「地震動即時予測」と呼ばれる。地震動即時予測の研究と実社会への適用は、特に最近10年程度の間世界各地で活発

に行われるようになってきた。わが国では、1990年代からの鉄道分野での適用、2007年に気象庁の緊急地震速報の開始などがあり、また、メキシコでは1990年代から、台湾では2014年から実社会での適用が始まり、米国、中国、韓国、EU諸国、トルコなどでも適用に向けてシステム構築の研究が進んでいる。

以下には、最初に地震動即時予測の基本的なロジックについて説明し、予測手法の概要、最後に今後の研究の展望について述べる。

2. 地震動即時予測のロジック

では、どのようなロジックを用いて、地震動を即時に予測しているのか？そのロジックの基本的なものは、

- (1) 地震波が伝播していく様子を推定し、地震動を予測する。
- (2) P波を捉えることで後続のS波による地震動を予測す

る。

(3) 破壊過程の初期の段階の情報から破壊全体（地震規模（マグニチュード，M）など）を推定し，その情報に基づいて地震動の強さを予測する。

の3つに分類できる。地震動即時予測は，この3つのいずれか，あるいは組み合わせにより行われる。

ここで，(1) では，通信の速度が地震波の速度に比べて極めて速いことを用いる。震源の近くで地震波を捉え，（地震波の伝播を追い越して）より遠い地点に伝えることができれば，そこでは「まもなく地震波が到達する」ことを事前に予測することができる。この考え方では，速い通信技術が求められる。また，地震波を捉える観測点が，予測を行う地点よりも震源に近いところにある必要がある。(2) では，相対的に振幅の小さなP波は振幅の大きなS波よりも早く伝わる，という地震波の特徴を用いる。現在揺れているのがP波による震動だと判断できれば，間もなく数倍の強い揺れ（S波）が来るだろうと予測できる。この考え方は，単独の観測点でも適用でき，必ずしも通信を必要としないのが特徴である。(3) では，断層の破壊過程の初期の特徴から破壊の全体を予測する。例えば，P波の最初の3秒間の振幅や卓越周期の情報などから，地震の規模（M）を推定するものである。震源距離とMの情報があれば地震動の強さを推定できるので，破壊の初期段階でMが分かれば，破壊全体からもたらされる地震動の強さを予想することができる。地震の破壊継続時間は，M6，7，8の地震で，それぞれ，おおむね3，10，30秒程度なので，M7やM8だと推定するという事は，すなわち，初めの3秒の情報から，10秒後や30秒後まで破壊が続いていると予測することに相当する。このように，P波の最初の部分に，M6，7，8でそれぞれ波形の特徴の違いがあり，最初の3秒で破壊全体の大きさを予測できる，と主張する論文がある一方，波形の特徴の違いを否定する研究も多い。地震発生メカニズムや破壊の成長の物理の研究と相まって，破壊の未来を予測できる/できない，の議論が続いている。

地震動即時予測システムでは，上記のどのロジックを取り入れるかにより，その設計思想は大きく異なってくる。たとえば，(3) が有効ならば，破壊全体が早い段階で分かることになるので予測は1回のみで済むが，そうでない場合には破壊の成長に合わせて何度も予測を繰り返す必要がある。(3) に関しては，研究論文上の議論は多い一方，運用システムへの適用となると，このロジックを積極的に採用しているものは少ないようである（海外のシステム構築では，かつて(3)に則り実験を行っていたが，その後，このロジックを外した例がある）。ちなみに，気象庁の緊急地震速報では，(1)と(2)のロジックを取り入れてい

るが，(3)は取り入れていない。

なお，地震動即時予測の説明として(2)が強調されることが多いためか，P波部分だけを用いて予測するもの（つまり，予測にはP波部分の情報しか使ってはいけない）と誤解されることがある。しかし，(1)のロジックで，S波を観測し，その後のS波の伝播を予測することは可能である（そして，P波を観測しP波を予測することも可能）。地震動即時予測には，P波部分の情報だけでなく，震源に近い観測点でとらえたS波の情報もとても有効である。

3. 地震動即時予測の手法と高度化

2で紹介した地震動即時予測のロジックとは別の観点から，通信を使うか否かによって，オンサイト手法とネットワーク手法という分類があり，以下にそれぞれについて説明する。

オンサイト手法では，通信を使わずにその地点のみの情報で予測を行う。通信を使わないので，必然的に(2)のロジックを基に考察されたものが多い。また，その地点のみの情報なので，システム構成が比較的簡単で済む。わが国では，この方法はエレベータ業界などで用いられており，あるレベル以上の震動をP波センサーで検知することにより，エレベータを自動停止させている（P波センサー：周期帯域を考慮した上下動加速度計が多いようである）。ただし，この手法だけで必ずしも全ての場合に対処できるわけではない。たとえば，大きな地震ではP波であってもそれなりに強く揺れるので，強い揺れに間に合わないということになる。また，（P波の情報を使うので）まったく揺れていない状態で強い揺れを予測することは不可能である。さらに，地震が連発している場合には，先発の地震のS波に後発の地震のP波が重なると，後発の地震の揺れを見誤ることが起こる。また，大きな地震の場合，破壊開始点からのS波よりも，強い揺れを出した破壊からのP波の方が，遅く到達することが起こりうる。これらの場合には，(2)のロジックがうまく機能しないことが起こる。S波群中に混じっているP波を如何に検出するか，ということが課題となる。

ネットワーク手法とは多点観測点からのデータを用いるもので，(1)をもとに(2)のロジックを用いているものが多い（システムによっては，さらに(3)も加えているものもある）。P波が到着する前（まったく揺れていない状況）であっても予測できる地点も多く，広い範囲の揺れを予測することが可能である。一方，密な地震計観測網，通信回線，中央処理装置（コンピュータ）などが必要であり，システム構成が比較的複雑になる。世界中の多くのネットワーク手法では，震源位置とMを推定し，地震動予測式と地盤増幅特性を用いて地震動を予測する，という方法

をとっている。現在の緊急地震速報も基本的にはこの方法に沿ったものである。ここでは、いかに早くかつ正確に震源位置とMを推定できるかが即時予測のカギとなるが、また、同時に、正確な地震動予測式（「新・強震動地震学基礎講座」第13回参照）と精緻な地盤増幅特性（同第6回、9回参照）も、正確な予測のために重要な要素である。なお、この方法では、（震源位置という点の情報しかない）M7を超えるような「広い震源域」を持つ場合への対応、また、（震源決定が難しくなる）「地震が連発」している場合への対応が課題となる。さらに、解析の安定のため観測波形にローカットフィルター（遮断周波数として、0.075 Hzを用いている論文が多い）を施すことが多く、このため、M8以上の巨大地震になるといわれる「Mの飽和」が発生し、巨大地震のMを過小評価するという課題がある。実際、2011年の東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）と、それに伴う比較的大きな余震の際にはこれらの課題が顕著に表れた。これ以降、これらの3つの課題の解決に焦点を当てる研究が多くなった。

「Mの飽和」の課題の解決方法として、GPSなどのGNSSをリアルタイム解析する研究が盛んになっている。GNSSでは永久変位といった長周期成分まで捉えることができるので、1秒ごと（もっと、頻度が高い場合もある）の変位を測定することにより、疑似的な長周期変位計として用いることができ、Mの飽和を軽減できる。「広い震源域」の課題に関しては、震源を点ではなく領域として即時推定（震源域の即時推定）する研究が行われている（ちなみに、震源を点と捉えるものと、領域として考えるものはそれぞれ、“point source algorithm”、“finite source algorithm”と呼ばれることがある）。強い揺れの領域の広がりや、GNSSの解析から震源域の即時推定を試みる研究が多い。「地震が連発」する場合は、複数の地震からのP波とS波の相が入り乱れて現れることになるが、これらをどの地震からのものか区別することが求められる。震源位置の決定に、P波やS波の出現時間の情報だけでなく、地震波の振幅の情報も加味することで複数の地震の区別を行う研究が行われている（この考え方は、2016年12月に緊急地震速報システムに組み込まれた、IPF法）。

一方、「震源位置とM、震源域などの震源情報を即時推定する」という方法ではなく、「揺れから揺れを直接予測する」という方法に則した研究も多くなってきた。冒頭で示した「迫ってくる揺れをその直前に予測する」という目的のためには、必ずしも、震源位置やMは必要ではない。現時点での地震動の分布（波動場）を観測量から内挿や外挿を用いて面的に求め、そこから波動伝播の物理（波動伝播のシミュレーション）を用いて、未来の波動場を予測しようという考え方である。そもそも、震源位置やMを必

要としないので、広い震源域、連発地震、Mの飽和という課題を回避することができる。また、震源位置とMという“過去の状態”からではなく、“現時点での揺れの状態”という実況値から将来を予測するので、精度の高い予測が期待できる。一方、地震動の分布を正確に求めようとすると、密な地震計観測網や、大量のデータを処理できる強い中央処理装置（コンピュータ）が必要という条件がある。なお、この考え方の簡易的なもの（PLUM法）は、2018年3月から緊急地震速報システムに組み込まれている。

4. 今後に向けて

これまでは、ネットワーク手法の地震動即時予測システムのパフォーマンスの良し悪しを見る指標として、多くの論文の中では、「いかに早く震源位置とMを決められたか？」また、「それらの推定精度は？」が示されてきた。しかし、正確な震源位置とMが求められたとしても、地震動予測式や地盤増幅特性が不適切だと地震動の予測は正確ではない。さらに、上に記したように、最近では、震源位置とMを必要としない方法も提案されている。このため、今後は、（震源位置とMではなく）地震動の強さの予測の迅速性やその推定精度が良し悪しを測る指標として用いられることが多くなっていくであろう。例えば、M8以上で問題となるMの飽和の課題は、Mを求める観点からすれば、「（地震被害に関係する周期帯域での）振幅の小さな差でもMに大きな差がある」ことである（なので、より長周期までを解析に取り入れることが重要）。一方、多くの地震動予測式が示しているように、Mがある程度以上大きい場合、Mが大きくなっても地震動の振幅はそれほど大きくならない。つまり、地震動予測という観点からすると、「Mに大きな差があっても地震被害に関係する帯域では振幅差があまりない」ということであり、Mの正確性は、この周期帯の地震動強さにはあまり影響しないことになる。また、地震観測網にしても、震源位置を決めるのに最適な配置と、ある特定の場所での揺れの強さを予測するのに最適な配置は、異なっているであろう。この様に、評価の指標の観点を変えてみると結果が変わってしまうことがあり、「（強い）揺れをその直前に予測する」という目的を見据えて研究を進めていくことが重要であろう。

さて、「地震動即時予測」では、地震動予測式や地盤増幅特性など「地震動予測」を目的とした研究成果がそのまま応用できる。「地震動予測」の1つの応用形とみることもできるだろう。ただ、「地震動即時予測」の大きな特徴は、既に地震が発生し、途中まで地震動が伝播してきているという情報を使える点にある。つまり、現象の途中（前半部分）までモニターしたうえで、それ以降（後半部分）を予測するという事に相当する。このため、途中までの

状況を見て予測を柔軟に修正することができる（「地震動予測」では、途中の状況を見て修正，ということはない）．原理的には，「地震動即時予測」では，かなり精度の良い予測が可能ならずである．一方，「地震動予測」では，予測のための計算にかなりの時間をかけても構わないが，「地震動即時予測」では，どんなに遅くとも強い揺れが到達するまでには予測結果を出さないといけないという計算時間の制約がある（もちろん，強い揺れのごく直前ではなくて，もっと前の方が良い）．この計算時間の制約の上で，どこまで予測の精度を良くしていけるか，が「地震動即時予測」の特有の課題と言える．

このように，「地震動即時予測」では，迅速で正確な予測が求められる．ただし，迅速性と正確性を同時に満たすことは容易ではない．もっとも迅速なのは，観測網のどれか1点で地震波を捉えた時に，全ての予測地点に対して「強い揺れが来る」と予測することだが，これでは，ほぼ全ての予測地点でかなり過大予測となり正確性の面からは不合格である．逆に，もっとも正確なのは，観測事実そのものの値を予測値とするものであるが，これでは，強い揺れの後なので予測とは言えず迅速性の面から満足できない．また，迅速性と正確性のどちらを重視するかは，利用者の立場によって異なり，さらに，正確性についても，“過大予測（いわゆる“空振り”）はある程度許容できるが，過小

予測（見逃し）は避けるべき”とする意見もあり，過大予測と過小予測の評価が必ずしも等価ではない．この評価の視点の多様性が，「地震動即時予測」の良し悪しの評価を複雑にしている面がある．“いかに評価するか”ということに向けた研究もはじめられているところである．

5. 参考情報

地震動即時予測の研究に関しては，雑誌の特集号（*Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, Issue 5 ; *Seismological Research Letters*, 2009, Vol. 80, No. 5）や単行本（*Gasparini et al*, 2007 ; *Wenzel and Zschau*, 2014）もあるので，参考にして頂きたい．

謝辞

編集担当の松島信一委員と岩田知孝委員には原稿を丁寧に読んでいただき，有益なコメントを頂きました．

参考文献

- Gasparini, P., G. Manfredi and J. Zschau (editors), 2007, *Earthquake Early Warning Systems*, Springer.
- Wenzel, F. and J. Zschau (editors), 2014, *Early Warning for Geological Disasters*, Springer.