

地震動予測研究の到達点と次世代型への脱皮
PRESENT STAGE OF STRONG MOTION PREDICTION RESEARCH
AND ITS BREAKTHROUGH FOR NEXT GENERATION

入倉孝次郎*1
Kojiro IRIKURA

1. はじめに

今にして思えば、私にとって金井先生との出会いそのものがこれまでの研究の方向付けたと言っても過言ではない。私は物理学の勉強をしたくて京都大学に入ったが、大学3年から4年にかけて陰気な暗室でひたすら時間をかけて行う分光実験で早くも挫折感を味わった。時期を一にして病を得て長期の休学生活を送ったのを契機として、もっと人間と関わりのある物理学を学びたいと思い大学院からは地球物理学を専攻し、地震学の勉強を一から始めた。地震学の中でも社会に役立つと実感できる研究をしてみたいと思っていたとき、“Engineering Seismology”というまさに社会のための地震学があることを知り、種々の文献を読みあさるとどの論文でも金井清の名前が登場した。この時が私の金井先生との出会いであった。

私が地震学を学び始めた1960年代はすでに金井先生はEngineering Seismologyの世界では伝説的な人であった。構造物の耐震設計や原子力施設の耐震安全性では、金井の距離減衰式に始まり、金井微動で地盤分類し、設計用入力レベルが決められた。Engineering Seismologyに関する研究をやろうとすると、何をやっても金井先生に行きついてしまい、その存在は乗り越えることのできない大きな壁のようにも感じたものだ。

金井先生は地震学の基礎である弾性波動論の研究からスタートして実践的な耐震工学の研究まで幅広い分野を視野に入れた研究を行っており、理学の地震学や工学の耐震工学の両方から尊敬された研究者であった。社会に役立つ地震学に実践的に取り組むには、狭い分野の研究にとどまることなく、他の分野からみても納得の得られる研究成果を出さなければならない、これが当たり前ではあるが私が金井先生の研究から学んだことである。強震動予測レシピの考えは、若いころに金井先生のEngineering Seismologyの著作から学んだことを、私なりに必死に実践に結びつけようともがいた末のたど

り着いたものである。

2. 強震動予測レシピの考え方

強震動の予測のために震源モデルを運動学的手法で先見的に与え、地震動をシミュレーションを行う方法は、断層震源モデルに基づく地震動計算手法が開発され、コンピュータ環境が整ってきた1980年代以来、多く研究および実践的試みがなされてきた。この方法で与えられる断層面のすべり分布や破壊速度は物理的条件から検証されたものにはなっていない。そのため、予測結果の有効性は物理的には保証されないことになる。強震動観測ネットワークの充実に伴い、強震動記録を用いた波形インバージョンにより、精度の高い断層破壊過程が推定されるようになった(例えば、Wald *et al.* 1991; Sekiguchi *et al.*, 2000)。さらに運動学的インバージョンで得られた断層すべり分布から震源断層における破壊強度や臨界すべり量などの動力学的パラメータの推定が可能となってきた(例えば、Ide and Takeo, 1997; Bouchon *et al.*, 1998; Day *et al.*, 1998)。それにより断層面に動力学的パラメータを与えて破壊の自発的な生成・伝播の動的シミュレーションも可能となった。しかしながら、強震動予測として重要な短周期成分を含む広帯域の強震動をシミュレーションするに十分な動力学的震源パラメータの推定は未だ困難である。そこで動力学的震源モデルを近似する運動学的震源モデルを用いた強震動シミュレーションが試みられるようになった。

強震動記録を用いた震源インバージョンの解析結果に基づいて、震源断層面の中ですべりの大きい領域からアスペリティの抽出がなされた(Somerville *et al.*, 1999)。すべりの大きいところを一定基準で切り出すことで、アスペリティ領域を定義し、アスペリティの総面積 S_a が地震モーメント M_0 に対して一定の相似則に従っていることを、明らかになってきた。ここでのアスペリティ抽出の有効性はDalguer *et al.*(2004)により動力学震源モデルで確かめられている。

*1 愛知工業大学

このことは、震源断層パラメータが地震モーメントに関して2つのスケーリング則によって支配されていることを意味している。スケーリング則の1つは震源断層の全破壊域の面積と地震モーメントの関係を与えるもので、これらのパラメータを巨視的断層パラメータと呼ぶ。もう1つは震源断層内のアスペリティの総面積を地震モーメントの関数として与えるもので、この関係から震源断層内のアスペリティの分布およびそこの応力降下（あるいは実効応力）が与えられる（Das and Kostrov, 1986）。これらのパラメータを微視的震源パラメータと呼ぶ。これらの2つのスケーリング則に基づいて、強震動の計算に必要とされる震源断層の面積、地震モーメント、さらに震源断層内の不均質な応力やすべり分布のモデル化が可能となる。上記の考えを整理して、震源断層のモデル化の手続きがレシピとしてまとめられた（入倉・三宅, 2001）。

「強震動予測レシピ」は、活断層に発生する地震や海溝域に発生する地震による強震動予測を目的として、地形・地質調査データ、歴史地震、地球物理学的調査に基づき震源断層を想定したとき断層パラメータを推定する手続きを系統的にまとめたものである。この「レシピ」は同一の情報を得られれば誰がやっても同じ答えが得られる強震動予測の標準的な方法論を目指したものである。現状ではいまだ開発途上であり今後の地震関連データの蓄積と動力学的断層破壊過程に関する理論および実験的研究の発展により、修正を加え、改訂されていくことを前提としている。

地震調査委員会は、壇・他（2001）による地震モーメントと短周期レベルの関係も用いたアスペリティ面積やそのでの応力降下量の推定、動力学破壊伝播モデルによるすべり速度時間関数などの考え（中村・宮武, 2000）をレシピに導入し、よりロバストな強震動予測を行っている。信頼ある強震動予測のためには、震源断層のモデル化のみならず震源で生成された波動の伝播特性や対象地点の地盤によるサイト特性を支配する地下構造モデル化が重要となる。震源モデル化のレシピに加えて、地下構造のモデルの標準的なモデル化手法が提案され（Koketsu et al., 2008）、地震調査委員会で「震源を特定した地震動」を評価するときに活用されている。

3. 次世代型強震動予測への脱皮

次世代型強震動予測は、強震動予測手法をより精度が高く、信頼性あるものに発展させると同時

に、緊急地震速報などリアルタイム地震情報システムとの統合や確率論とシナリオ型を融合したハザード評価、さらにリスク評価などに対応した総合的視点から情報提供が可能なものでなければならない。このような次世代型的前提となるのが強震動予測手法そのものの信頼性の向上にあることは論を待たない。ここではそのためにどのような研究が必要かを論じる。

強震動予測の精度は我々が自然をどの程度理解できているかで決まる。したがって信頼性の向上は常に自然から学ぶという原点に戻って考える必要がある。現在の強震動予測レシピは限られた強震動データおよび必ずしも精度が高くない震源インバージョン解析結果を集め、それらの制約の中で震源の物理に関する考察を拘束条件として取りまとめられたものである。そのため、今後解決すべき種々の問題が内包されている。現在地震調査委員会が試験的に進めている長周期地震動の予測マップの評価（Koketsu et al., 2008; Miyake et al., 2008）で、これまでのレシピのもつ問題が顕在化している。長周期地震動の予測精度の向上を通じてレシピも飛躍的な精度向上につながると考える。

レシピに基づく強震動評価は、アスペリティ・モデルに基づく特性化震源モデルが広帯域で有効な地震動生成を表現できることを前提としている。この前提の有効性は、内陸については M7 クラスの地震（例えば 2005 年福岡西方沖地震など）、海溝型について M8 クラスのやや沖合の地震（例えば 2003 年十勝沖地震）でレシピに基づく再現波形や震度分布と観測事実との比較で検証されている。逆にいえば、内陸地震について M7 よりも大きな長大断層について適用性は保障されておらず、また海溝型では M8 よりも規模が大きい地震については検証されておらず、さらに震源域に近いところでの有効性は確かめられていない。

特性化震源モデルに基づく震源モデルの問題点は以下に挙げられる。すなわち、特性化震源モデルは短周期で加速度スペクトルが平坦になり（変位スペクトルは短周期側で周期の 2 乗に比例して落ちる）、長周期側で変位スペクトルは平坦（加速度スペクトルは長周期側で周期の逆数で落ちる）で拘束されている。加速度フラットと変位フラットの間位置する中間的な周期域では、モデルからは拘束されていないため計算された地震動は必ずしも安定したスペクトル特性をもたない可能性がある。

長周期建造物の耐震性に影響する地震動の周期帯域は 2 秒から 20 秒の範囲である。東南海地震や

南海地震のような規模の大きな地震に対する長周期地震動予測ではこの周期帯域が上記の中間的な周期帯域に相当する。したがって、現在のレシビを用いた計算は先に述べた問題を持っている。この問題の解決の道は自然から学ぶ震源の物理に基づいていかにモデル化するかを考える以外にない。

長周期地震動の予測精度を改良する上でアメリカの経験に学ぶことは重要であろう。アメリカのカリフォルニア地域で USGS と SCEC が共同で進めているシェイクプロジェクトは同じような周期帯域について理論的なシミュレーションで地震動の評価を目指している(Shakeout, 2009)。このプロジェクトは、サンアンドレアス断層を構成する南カリフォルニアからメキシコ北部にかけた断層セグメント部分(長さ 300km、幅 16km)で M 7.8 の地震が発生する可能性があるとして、多くの研究者が参加して、震源および地下構造に関して調査結果をもとにコミュニティ・モデルを作り(Jones, 2008)、多数(3 つ程度)の研究グループがそれぞれのコードで地震動の評価を行っている(Olsen, 2009)。このプロジェクトの狙いは、震源に関して専門家が集めてコミュニティ・モデルをつくることと、計算手法については種々のグループのもつコードの信頼性の確認、などが中心で、計算結果そのものの有効性についての検証は必ずしも一義的なものとしていない。ただし、計算結果を公表することで地域防災対策に活かしていくことは可能となる。

シェイクプロジェクトで、震源モデルは 2 つのスケールでデザインされた。1 つは静的変位量の分布で、これは地質学的調査で得られた地表での数点の断層すべりを拘束条件に入れる。2 つ目はキネマティックな意味での破壊伝播は平均すべり量の中心としてランダムに分布させる。断層すべり分布のランダム性は 1906 年のサンフランシスコの大地震に対する断層すべり分布を参考に与えたとして、必ずしも詳細は発表されていない。このモデルはランダム波を生成して作るものなので、自由度が高いという利点がある。一方で、このモデルの有効性の科学的に厳密な検証は極めて困難であろう。

計算結果の有効性を議論するために、キネマティック・モデルと動力学的モデルの比較が行われている(Dalguer et al., 2008)。与えられたすべり分布を基に、動力学震源モデルのパラメータである応力降下量、強度(Se: strength excess)、臨界変位量(Critical Displacement: D_c)を評価し、この動力学破壊モデルと地下構造モデルを用いて、自発的破壊

をシミュレーションを行い、地震動分布の計算を実施する。

両者の計算結果を比較することにより、キネマティック・モデルによる地震動評価の問題を明らかにしている。両者の主要な違いは、キネマティック・モデルはディレクティビティ効果が強く出すぎること、動力学モデルで断層形状によりスーパー・シェアの破壊が生じるがキネマティック・モデルでは考慮されていない、などが挙げられる。物理モデルに基づく強震動予測としては動力学的モデルによる地震動分布を真値と考えて議論することは差し支えない。

強震動予測モデルに基づく震源断層のモデル化はこれまでキネマティック・モデルで行われてきたが、強震動の計算結果の有効性の吟味の 1 つとして、動力学モデルに基づいた計算結果の比較を行い、さらに両者の違いを参考にキネマティック・モデルの改良を行っていくことが重要と考える。

謝辞

本稿をまとめるにあたって、三宅弘恵氏には長周期地震動予測の関連資料を送っていただきました。

参考文献

- Bouchon, M., Sekiguchi, H., Irikura, K., and Iwata, T. (1998). Some characteristics of the stress field of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake, *J. Geophys. Res.*, **103**, 24271-24282.
- Das, S. and B. V. Kostrov (1986). Fracture of a single asperity on a finite fault: A model for weak earthquakes?, In Das, S., J. Boatwright, and C.H. Scholz, eds.: *Earthquake Source Mechanics*, AGU., Washington D.C., 91-96.
- Dalguer, L. A., H. Miyake, and K. Irikura (2004): Characterization of dynamic asperity source models for simulating strong ground motion, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, No. 3286.
- Dalguer, L. A., S. M. Day, K. Olsen, V. Cruz-Atienza (2008): Rupture Models and Ground Motion for ShakeOut and other Southern San Andreas Fault Scenarios, *Proceedings of The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China, CD-ROM.
- 壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透 (2001): 断層非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと

- 半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 545, pp. 51-62.
- Day, S. M., Y. Guang, D. J. Wald (1998). Dynamic Stress Changes During Earthquake Rupture, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 512-522.
- Hiroe Miyake, Kazuki Koketsu, and Takashi Furumura (2008): Source modeling of subduction-zone earthquakes and long-period ground motion validation in the Tokyo metropolitan area, Proceedings of The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China, CD-ROM.
- Ide, S. and M. Takeo, Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis, *J. Geophys. Res.*, *102*, 27379-27391, 1997.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵 (2001): シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, Vol. 110, pp. 849-875.
- 入倉孝次郎 (2004): 強震動予測レシピ —大地震による強震動の予測手法—, 京都大学防災研究所年報, Vol. 47 A, pp.25-45.
- Jones, L. M., Bernknopf, R., Cox, D., Goltz, J., Hudnut, K., Mileti, D., Perry, S., Ponti, D., Porter, K., Reichle, M., Seligson, H., Shoaf, K., Treiman, J., & Wein, A. (2008): The ShakeOut scenario, Tech. Rep. USGS-R1150, CGS-P25, U.S. Geological Survey and California Geological Survey.
- Koketsu, K., H. Miyake, Afnimar, and Y. Tanaka (2008): A proposal for a standard procedure of modeling 3-D velocity structures and its application to the Tokyo metropolitan area. Japan, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2008.05.037, in press.
- Koketsu1, K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto (2008): Progress towards a Japan Integrated Velocity Structure Model and Long-Period Ground Motion Hazard Map, Proceedings of The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China, CD-ROM.
- 中村洋光・宮武 隆(2000): 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, 地震 2 , 53, 1-9.
- Olsen, K. B., Day, S. M., Dalager, L. A., Mayhew, J., Cui, Y., Zhu, J., Cruz-Atienza, V. M., Roten, D., Maechling, P., Jordan, T. H., Okaya, D., & Chourasia, A. (2009): Shakeout-d: Ground motion estimates using an ensemble of large earthquakes on the southern san andreas fault with spontaneous rupture propagation, *Geophysical Research Letters*, In Press.
- Sekiguchi, H., Irikura, K., and Iwata, T. (2000). Fault geometry at the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 974-1002.
- Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A. (1999). Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, **70**, 59-80.
- Shakeout (2009): Shakeout earthquake scenario, <http://www.shakeout.org/scenario/>.
- Wald, D.J., Helmburger, D.V., and Heaton, T.H. (1991). Rupture model of the 1989 Loma Prieta earthquake from the inversion of strong motion and broadband teleseismic data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 1540-1572.

