

強震動予測法と設計用地震動：展望と課題

武村 雅之

●鹿島小堀研究室

1. 設計用地震動

工学における地震・地震動の研究は、一言で言えば地震の科学で分かったことを耐震設計や地震防災など社会に生かすことである。地震の科学は、地震の震源を研究することから始まるので、当然、地震学ではどこで地震が発生するかをつきとめ、様々なデータから、その地震の震源となる断層の動きを予測する。さらに、地下構造の情報をモデル化し、弾性波動論を用いて地震動を計算することが一般的である。これが強震動予測の研究である。近い将来発生することが予想されている宮城県沖地震や東海・南海地震、糸魚川・静岡構造線の地震など、全てはこの流れで強震動予測が行われている。ところが、これだけでは耐震設計には十分ではない。例えば、強震動が予測されている地震、つまり震源が良く分かり特定されている地震だけが被害地震かというところではないからである。設計という極めて人間的な行為と、自然現象を認識し物理的に記述しようとする地震学的行為とは必ずしもストレートには繋がらない。地震現象に予測困難な部分が多ければ多いほど、その間の溝は大きくなる可能性がある。

おそらく現状では震源を特定できない地震に対して地震学者は一般に興味を持ってないし、答えるすべもない。なぜならそれらは認識不可能な対象で、地震学の研究対象にはならないからである。こんな時に思い出すのは、20数年前東海地震の発生が予測され、マグニチュードM=8クラスの巨大地震に対し強震動予測の必要性が生じた時のことである。当時の地震学では、断層モデルを用いてまっとうに地震動を計算できる周期帯は10秒以上で、到底地震被害と関連するような短周期領域まで地震動を計算できる状況ではなかった。当時の地震学者は皆そんな評価は無理だと思っていたし、私も駆け出しの地震学者として同じように感じた覚えがある。

そこで立ち上がったのは、地震工学者で東工大名誉教授であられた故小林啓美先生である。先生は当時工学で培われていた距離減衰式に工夫を加え、この“無理な”要求に答えて見せたのである。小林・翠川法¹⁾と呼ばれるこの方法は、決して地震現象を物理的に記述できるわけではないが、それから10年以上に渡って設

計用地震動評価に貢献し、今日でもその考え方は我々が発案した等価震源距離として受け継がれ²⁾、震源断層の複雑性を考慮できる新しい経験的予測法の一つのベースとなっている。

先にあげた問題も、地震学者だけでは前には進まない。こんな時は地震工学者が自らの役割を自覚して立ち上がるべきである。我々が中心となって行った「震源が特定できない地震の地震動レベルの評価」は正にその一部に当たる³⁾⁴⁾。この種の問題には、最新の科学的知見を総合する能力と実証主義に裏付けられた工学的直感が必要である。まさに地球科学の成果を社会に生かすという工学における地震・地震動の研究の本質がそこにある。

なお、本稿では話をわかり易くするために、強震動予測に関連する研究者をあえて地震学者(理学)と地震工学者(工学)に分けて、それぞれを対比して話を進めるが、個々の研究者が完全に2つに色分けされる訳ではない。かく言う私も自分では地震学者だと思っているが、たぶん地震工学者だと見られている方も多と思う。

2. “工学レシピ”の必要性

震源を特定できない地震の例は極端にしても、震源を特定できるとされている地震の震源は本当に“特定されている”のだろうか。小林・翠川法が生まれたころの地震学でも地震の震源は地下の岩盤が断層で食い違う現象であるということは分かっていたが、工学で必要とされる周期帯の地震動を説明するために、どのような震源のモデル化をすればいいのか、また震源から観測点まで地震波が伝播する間にどのような変質を受けるのかなどについて、物理的に評価する確たる目途が立っていなかった。

1980年代に入ると、小林・翠川法に代表される新時代の距離減衰式が強震動予測の精度を向上させ、設計用地震動評価の世界で活躍する。距離減衰式は基本的にマグニチュードMと震源距離Xで地震動が決まる仕組みであるから、震源断層の位置や広がりや深さは特定する必要がある。今も続いているがこの時代でも、一方では震源は特定できないもの(不特定多数という意味

も込めて)との前提のもとで、エルセントロやタフトに代表される観測記録の振幅を過去の経験に基づいて調節し、設計用地震動として用いることも行われていた。この時期地震学では、今日強震動予測の代名詞となったアスペリティなど震源の不均質性を記述するインバージョン解析や、複雑な地下構造の影響を波動伝播解析に考慮する計算法の開発が着々と行われ、今や遅しと出番を待っていたように思われる。

そんな時に発生したのが1995年の兵庫県南部地震である。このときの被害のすさまじさは今でも胸に焼き付いて離れないが、そのことが地震学者の社会的責任への自覚を促し、地震学者が設計用地震動評価の世界に大きく足を踏み出す契機となった⁵⁾。しかも、この地震は、地震の規模といい、アスペリティの大きさや性質といい、段差をもった明確な基盤構造など、今から思えば当時の地震学の到達点を生かすのに最適な条件がそろった地震であったように思われる⁶⁾。その後発生した地震をみても、これほど強震動現象が明解に説明された地震はないようだ。地震後に整備された世界一高密度の強震観測網にも支えられて、断層モデルを用いた強震動予測法は一躍時代の寵児となっていった。

断層モデルによる強震動予測法は、先の小林・翠川法などと異なり、もともと予測を目的としたものではない。そのことは、兵庫県南部地震による強震動現象をほぼ説明することに成功したことからも分かるように、地震現象の物理的記述を目的としたところから出発した技術である。このため本来予測を目的に開発された距離減衰式などの技術とは異なり、はるかに高度な震源断層のモデル化が可能である反面、そのことが予測法としては大きな課題を背負い込む結果となっている。つまり、予測時に決定困難なパラメータを多数含むという問題である。この問題点をできるだけ緩和し、予測法としての要件を満足させるために、特性化と呼ばれる震源モデルの単純化を行い、パラメータを決めるための手順を定めた“強震動を予測するためのレシピ”が作成された⁷⁾。この手順書は入倉孝次郎京大名誉教授を中心として作られたもので通称“入倉レシピ”と呼ばれている。これによって本来地震現象の物理的記述を目的としていた断層モデルが強震動予測法として生まれ変わり、国や地方自治体等における特定の地震に対する強震動予測に使われているのは周知の事実である。

しかしながら、断層モデルによる強震動予測法は、依然としてその生い立ちを引きずり、東海地震のように国をあげて詳細な調査研究を行っている場合⁸⁾は例

外として、断層の形状や破壊の開始点やアスペリティの位置など、たとえ“レシピ”を用いても決められないパラメータをなお多く含む場合が一般的である。小林・翠川法が出現する時とは異なり地震学が手も足も出せないという状況ではないが、予測がきわめて困難な状況には変わりがなく、そのままでは多くの計算ケース数を重ねる以外方法がないという実用上の大きな問題に直面することとなる。またそれぞれの計算ケースの評価結果間には大きな差があることが通例で、いくら計算しても安心できないという設計者の心理的な不安は相当なものにならざるを得ない。

多くの計算ケースの中には、予測の対象としている地震が将来起った時に、ほぼ近い結果を与えるケースもあれば大きく外れるケースもあるだろう。結局期待値がそこそこであるとすれば、距離減衰式を用いて経験的に地震動レベルを求め、地震規模に見合った震動継続時間を考慮して地震動波形を計算するような従来法(例えば文献⁹⁾)でも精度はそれほど変わらない。むしろ大幅に手間が省けて合理的であると考えられている人も無理はない。

それでは細かな位相の影響が評価されないという意見も出てきそうだが、いずれ震源の詳細が決まらない限り位相の精度など保障されるべくもない。例えば震源のディレクティビティ効果によって生じるパルスの幅はアスペリティの大きさや位置、さらには破壊伝播方向に依存し、それらが少しでも変われば敏感に周期も変動してしまう。

一方、不確定な部分はパラメータスタディーをやればよいと気楽にいう人もいるが、設計用地震動評価は後工程のある作業であり、当然作業効率も考える必要がある。ましてや起るか起こらないか分からないケースを可能性があるという一言で多数計算し、結局地震の専門家の判断を仰がなければ地震動のレベルが決められないとすれば、設計の現場で常に用いることはむずかしい。パラメータスタディーをやるにしても手順書が必要である。

“レシピ”には最後に予測結果の検証の項があり、そこには距離減衰式と比較をして推定値が大幅に外れていないかを確認することが書かれている。断層モデルを用いた強震動予測法が常に予測精度が高いと勘違いされている方はこの項の意味を是非考えて欲しい。予測できないパラメータを抱える問題点の認識とその方法を使う場合の慎重な態度を求める姿勢がそこにはよく表れているからである。

以上のような現状を打開し、断層モデルを用いた強震動予測法を汎用性のあるものにするためには、地震

工学者が立ち上がる必要があるように思う。地震学者の苦勞によって生み出された“レシピ”の意を汲んで、地震学者から十分な情報を得て、工学者自らが実務で常に使えるよう“工学レシピ”とでもいうものを作り、ある種のルール化を行って簡便でしかも誰がやっても同じ結果が出せるような方法を提案すべきではないだろうか。先に述べたように兵庫県南部地震後には観測記録も充実して、経験的予測法の精度も格段に上がってきた。“工学レシピ”は、断層モデルを用いた強震動予測法を設計地震動評価に直結する方法に昇華させることを目的に、対象構造物の特性も考慮し、そこそこ安心できる経験的予測法の利点も活かした内容にすべきであろう。

最近“レシピ”の改良も一段落してきたようである。工学者が地震学者によって日々進化するレシピの内容を理解し、フォローするのが精一杯という時期は過ぎようとしている。これからが地震工学者の出番であるように思う。

3. 地震学者の課題

“工学レシピ”を作り上げ、断層モデルの計算に一つのルール化を考えることは地震工学者の課題である。一方地震学者の課題はもちろん地震現象の解明にある。現状の予測法に関して一般的に解明しなければならない課題を私なりに整理すると以下ようになる。

1. アスペリティの位置ならびに活動の繰り返しの程度確からしいか？
2. いわゆる震源域の運動に対してスケーリング則は

成り立つか？

3. 破壊は断層のどこから始まるか？
4. アスペリティと短周期地震波発生域との関係は？
5. 主要動部分の上下動の生成メカニズムは？

5番目の問題は波動伝播に関わる問題で、現在考えられているような基盤での直達S波のP波変換だけでは上下動が過小評価気味になるというものであるが、1-4の問題はいずれも震源のモデル化に関するものである。“レシピ”には、未解決な問題を解決するための手がかりになるような最新の研究成果も紹介されている⁷⁾が、一般的には、予測に直結できる段階のものにはなっていない。またいずれの問題も地下構造調査をして分かるような性質のものでも無さそうで、現状では強震動予測に進むためには何らかの仮定が必要な場合が普通である。裏返して言えば、場合分けによって多くの計算ケースを生み出し強震動予測の計算を煩雑なものにしている原因である。

これらの問題に共通する点は、一つの地震を詳細に調べただけで答えが得られるものではなく、過去の地震、できれば同じ場所で繰り返し発生する地震やその痕跡を調べる以外、解決の糸口を見つけるのが難しいことである。

内陸地震のように再来間隔が長い場合には、地震そのものの直接的な解析をすることは難しい。その代わり繰り返しの痕跡として活断層が残されており、地中部分も含めた今後の活断層調査の進展が問題解決の鍵を握っているように思われる。これに対して海溝沿いのプレート境界地震については、歴史時代に繰り返しが確認されるものが殆どで、最後の発生に対してはほぼ例外なく地震計による観測記録が残されており解析が進められている¹⁰⁾。これに対して2回前、3回前となるに従って、観測記録は乏しくなるが、一方で揺れや津波に対する被害記録の利用が有効で、歴史地震研究が問題解決に大きな役割を果たす可能性が高い。

近年、神田・武村¹¹⁾は、震度データから震源での短周期地震波発生域(短周期域)を評価する方法を開発し、十勝沖地震、宮城県沖地震、関東地震、南海・東海地震など海溝沿いで数十年から数百年毎に繰り返す地震に対し数回前までの地震の震源過程を調べている。

近年、神田・武村¹¹⁾は、震度データから震源での短周期地震波発生域(短周期域)を評価する方法を開発し、十勝沖地震、宮城県沖地震、関東地震、南海・東海地震など海溝沿いで数十年から数百年毎に繰り返す地震に対し数回前までの地震の震源過程を調べている。

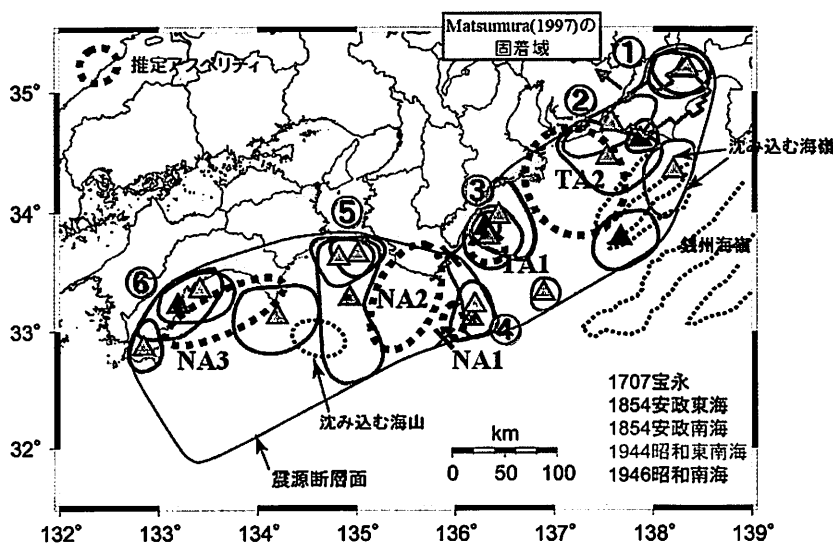


図 宝永、安政、昭和の東海・南海地震に対する短周期域 [文献12]
 三角印はそれぞれの中心。点線の楕円は昭和の地震に対して求められているアスペリティの位置。X印は破壊開始点。詳細は文献参照

図は宝永、安政、昭和の3代に渡る東海・南海地震に対し結果をまとめたものである¹²⁾。図の点線で囲まれたTA1-TA2、NA1-NA3は昭和の地震に対するアスペリティ（断層すべりの大きな部分）であり、他の地震の例も総合すると短周期域の中心（図の三角印）はアスペリティ破壊の終端部に現れる性質があることが分かってきた。

安政、宝永の場合に注目しても短周期域中心は昭和の場合とほぼ同じ位置に求められ、昭和の地震で確認されている少なくとも5箇所のアスペリティがほぼ同様の破壊伝播によって活動したと考えることができる。一方駿河湾内においては、安政、宝永の場合、来るべき東海地震に対し推定されている固着域の縁に当たる湾奥に短周期域中心が求められる。安政、宝永の際に破壊が湾口から湾奥へ進み、この固着域がアスペリティとして活動したと考えると整合する。また宝永の場合、室戸岬沖に強い短周期域が求められるが、中心は海山が潜り込んだとされる場所の北西端に当たる。安政や昭和の際にはバリアーとして働いた海山の潜り込みが、宝永の際には南東方向から進んできた破壊伝播とともにアスペリティとして活動したと考えられる。

以上のように、震度分布の情報や最近の地震観測結果、さらには海底下の地下構造調査結果などを総合すれば、破壊開始点の位置が各回でそれほど変わらないことや、アスペリティも多くは繰り返し活動していること、さらにはたまに活動するアスペリティがあることなど、震源のモデル化にとって重要な発見がある。これらの成果を活用すれば、来るべき南海・東海地震に対する強震動予測を行う場合、震源モデルの検討ケース数は、飛躍的に減少するものと思われる。全ては長年地道に続けられてきた歴史地震研究の成果ならびにデータベースのお陰である。歴史地震の調査研究が活断層に比べて、地震学者の間においても注目度が低いことが気に掛かることである。

4. 将来に向けて

耐震設計法の父ともいべき佐野利器博士は、新しい振動論の台頭によって柔剛論争が続く学会で、昭和2年に警鐘をならす意味で、有名な演説を行っている。その中に「諸君、建築技術は地震現象の説明学ではない。現象理法が明でも不明でも、之に対抗するの実技である。建築界は百年、河の清きを待つ余裕を有しない。」という一節がある¹³⁾。この考えに同調する地震工学者は多いと思う¹⁴⁾。この言葉は決して物理学を不要だと言っている訳ではなく、工学者に対して、新しい物理を理解しその限界をわきまえた上で実用に供す

る方法を考えるべきだと言っているのである。

兵庫県南部地震後、それまで出番を待っていた地震学的知見が大きく花開き、地震学者の社会的責任感が“レシビ”をつくりあげ、強震動予測法の大きな発展の芽を生み出す結果となった⁵⁾⁷⁾。そこで提案されている強震動予測法はいうまでもなく断層モデルをベースとしている。断層モデルは地震の震源のモデルとしてその物理的な妥当性は広く認められているが、それがそのまま強震動予測に際して精度を保証するものではないことに注意が必要である。そのことは未解明の課題の多さを見れば自明である。地震工学者は、佐野利器が述べたように、片方で実用を睨みその時点での強震動予測法のレベルを把握して、大鉦をふるって設計用地震動評価法に昇華させる必要がある。

一方地震学者は、決して現状を保守することなく、未解明の問題に果敢に取り組み地震の物理を進めることが重要である。両者の活動がかみ合ったときに、初めて地震の科学の成果が耐震設計に生かされる道が構築され、強震動予測の研究結果がより広く社会に役立つことになるものと確信する。

参考文献

- 1) 翠川三郎・小林啓美,1979,地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定,日本建築学会論文報告集,第282号,77-81.
- 2) 高橋克也・武村雅之・藤堂正喜・渡辺孝英・野田静男,1998,様々な岩盤上での強震動応答スペクトルの予測式,第10回日本地震工学シンポジウム,1,547-552.
- 3) 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大栄・上田圭一・壇一男,2004,震源を事前に特定出来ない内陸地殻内地震による地震動レベル,日本地震工学会論文集,4,446-86
- 4) 地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会,2001,レベル2地震動の明確化にむけて,土木学会論文集,No.675/I-55,15-25.
- 5) 山中浩明・武村雅之・岩田知孝・香川敬生・佐藤俊明,2005,地震の揺れを科学する－みえてきた強震動の姿,東大出版会(7月下旬発売予定).
- 6) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会,1998,阪神・淡路大震災調査報告 共通編－地震・地震動/地盤・地質,pp576.
- 7) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会,2005,震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシビ」),日向灘の地震の想定(付録).
<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>

- 8) 内閣府中央防災会議,2001,東海地震に関する専門調査会(第11回)資料. <http://www.bousai.go.jp/>
- 9) 武村雅之・釜田正毅・小堀鐸二,1989,地震波の発生伝播理論を考慮した模擬地震動作成法,日本建築学会構造系論文報告集,403,25-33.
- 10) Yamanaka, K., and M. Kikuchi, 2004, Asperity map along seduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, J. Geophys. Res., 109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683.
- 11) 神田克久・武村雅之・宇佐美龍夫, 2004, 震度インバージョン解析による南海トラフ巨大地震の短周期地震波発生域, 地震2, 57, 153-170.
- 12) 武村雅之・神田克久,2006,東海・南海地震の短周期地震波発生中心とアスペリティ,第12回日本地震工学シンポジウム(投稿中)
- 13) 佐野利器,1927,耐震構造上の諸説,建築雑誌,第491号(講演速記録).
- 14) 加藤研一,2002,改正建築基準法に至る地震外力の考え方-設計適用の観点から見た現状と課題,第30回地盤震動シンポジウム,13-24.