

【2019 年度瑞宝中綬章記念講演】

## 巨大地震による大災害を軽減するための強震動の研究

### — 強震動研究 50 年を振り返って —

Strong Motion Studies for Reducing Catastrophic Damage from Giant Earthquakes

(2021 年 2 月 20 日発表, 4 月 16 日一部修正)

#### 入倉孝次郎

(愛知工業大学客員教授, もと京都大学防災研究所長)

私は、長年にわたる教育研究への功労として、2019 年の春の叙勲で瑞宝中綬章を受章しました。叙勲を受けるにあたっては、京都大学在職中の業績など、いろいろな資料の収集が必要でした。そのため、申請書の作成には、多くの作業を要し、本当にたくさんの方々の協力で、ようやく申請書を提出できたものと思います。私の叙勲受賞は、私個人の力量よりも、私の研究室の卒業生を含めた多くの共同研究者の協力による成果が認められたもの、と思っています。

私自身、受章の理由を必ずしも正しく理解しているわけではありませんが、京都大学防災研究所における研究と教育に対する貢献だけでなく、卒業生諸君が社会のいろいろな場で活躍されていることも、功績として認められたものと理解し、大変うれしく思っています。

そこで、皆様への感謝の意を込めてこの機会に私のこれまでの研究生活を振り返ってみたいと思い、拙稿を纏めてみました。

#### 修士論文の研究として強震動研究を始める

私は、1963 年に京都大学理学部物理学科を卒業し、同年に京都大学大学院理学研究科地球物理学専攻に入学した。大学院では、主として京都大学防災研究所の先生の指導で、防災のための地震学の発展を課題として研究を行うことになった。当時、指導教授から「研究テーマは自分で考えて決めろ」言われたが、何をすべきか全くなにも思いつかず、途方にくれるような状態になった。

私が地球物理学科の修士課程に入学したのは、1963 年だが、大学院入学時の身体検査で、肺結核の疑いがあると診断され、病院で精密検査を受けることが入学の条件となった。京大病院で精密検査を受けた結果、かなり進行した結核に罹っていることがわかり、至急入院しなければならなくなった。結核の症状として空洞影が肺右房の心臓に近いところにあり、手術が困難な症状ということがわかり、薬物療法で治療することになった。その当時でも結核は手術なら 3 か月ほどで完治すると言われていたが、薬物治療だと長期の療養が必要だった。京都から山科へ行く途中にある風光明媚な九条山の峰にある東山高原サナトリウムで療養生活を送り、結核が完治するのに正味で 2 年もかかってしまった。最初の 1 年は普通

に休学していたが、もう1年は、伝染の心配はない症状ということで、病院から研究室に通うことにして、曲がりなりにも研究をスタートすることができた。

大学院の指導教授は吉川宗治先生で、専門は爆破探査実験など物理探査研究だったが、防災研の教授になってから、地震時の地盤の震動特性の評価手法の研究を始めていた。しかし、その当時の京大の大学院の指導方針は徹底した放任主義だったので、吉川先生からなにか指導してもらうことはなく、自由に研究テーマを考え、勝手に実験や理論的手法の研究をやるしかなかった。それでも、研究室には、地下探査のための地震波探査装置や振動実験のための加振機装置などの機器が揃っており、それらの機器は自由に使えたわけだから、決して研究環境が悪いというわけではなかった。

病院を退院したときは修士課程に入ってからすでに2年が経っていたので、指導教授からあと1年で論文を仕上げろと言われ切羽詰まる思いだったが、周囲にいた大学院生や若手研究者の協力を得て、急遽、防災研の構内で板たたき法による小規模な地震探査実験や加振機による振動実験を行った。修士論文は、これらの実験結果をまとめて、「自然地震と人為加振による地盤の振動特性について」と題する論文を書きあげることができた。修士論文の時の収穫は、研究内容よりも、実験の面白さを学ぶことができたことにある、と思っている。

修士課程を修了するとき、指導教授から進路をどうするか聞かれたが、修士課程での研究は消化不良だったので、博士課程で勉強をやりなおしたいと申し出て、1966年博士課程への進学が許可された。

### 学位論文のテーマ -Simulation of ground motions from large earthquakes using empirical Green's function method-

大学院博士課程では、当然のことながら、修士課程で行った地盤の震動特性の研究を発展させることから始めることにした。地盤の震動特性の研究目的は、板たたきなどで人為的にS波を生成して地盤構造を決めたり、加振機を用いて表層地盤の震動特性を求めることで、地震時の地盤による振動増幅を推定することにある。しかし、手打ちの板たたき実験だと測定深度は高々10 mが限界で、地表に設置した正弦波加振機実験でも極表層で生成される表面波のみが測定され、評価できる深度はやはり10 m以下で、このような手法で評価できる地盤特性は構造物の耐震設計で必要とされる周期範囲をカバーできない。実用的な調査法とするには、工学的基盤の深度まで少なくとも10 m~100 m程度を精度よく推定できて、震動特性として、0.2 ~ 1 秒の周期範囲が評価できることが期待されるが、我々の方法では不可能だった。修士論文の延長の震動実験と並行して、学位論文としての新たなテーマを探すために関連論文を読み漁ったが、実用的な地盤特性を評価するための手法の手掛かりは得られなかった。商業ベースの大規模探査をやればもう少し深いところの地盤構造が得られるが、そのための予算獲得は容易ではないことがわかった。なにもかも1人でやらねばならず、地盤の震動特性の研究をどのように発展させるべきかについてはすぐに行き詰っ

てしまった。何もまとまった仕事をしないうちに2年がたってしまっていたが、たまたま研究室の助手のポストが空いたということで、博士課程を2年で中退して、防災研の助手に応募し、採用された。

防災研の教員になったので、自分の研究を地震災害の軽減・防災につなげるにはどうすべきか、真剣に模索してみたが、必ずしも明確な方向を出せずにいた。いろいろの思考実験の末、建造物の耐震設計に必要な地盤の震動特性を推定するには、当たり前ではあるが、実際の地震の地震動を観測するしかない、結局、強震動を観測する研究から始める必要があるという結論に行きつかざるを得なかった。そこで、手始めに強震動の観測機器の予算要求から始めることにした。

そのころ、防災研で理学系（地震学）の先輩と話をしているとき、強震動の研究をしたいと思っているという話をしたら、「それは地震が起こった後にしかわからないから『後の祭り』のような研究で、防災には役立たない、言われてしまった。当時は、地震予知研究に関して、1963年にブループリントが出された後、それに基づいて種々の「地震予知計画」が作られ、大型の予算要求がなされるようになっていた。防災研でも、「予知研究が地震防災の重要な柱」として位置づけられ、地震予知関連の研究室に予算措置がなされていた。

一方、防災研で土木工学や建築学など工学的に地震防災の研究をしている研究者は、地震予知による防災には懐疑的であった。なぜなら、地震予知ができて、建造物の耐震性を高められない限り、大地震が実際に起こったときに建造物の被害を防げないと考えていたからだ。

日本では、地震国だということで、建物の耐震性の関心は高く、建物に筋交いを入れるなど独自の工法が取り入れられていた。建築物の高さについては、1919年市街地建築物法で百尺に制限されていた。これは耐震性の高い剛構造の建物は百尺以上は無理という考えが支配的だったためである。しかし、柔構造の耐震性の研究が進み、耐震性は高さだけでなく容積率を考えればよいとされ、1960年代以降高さ制限が徐々に緩められるようになった。霞が関ビル（1965年着工、1968年竣工）が建設され、1970年の建築基準法の法改正によって絶対高さ制限が撤廃され、70年代には多くの超高層ビルが建設されるようになっていた。超高層ビルの設計では設計用入力地震動をいかに決めるかが主要課題の1つになっていた。

工学の耐震の研究者は耐震設計のためには大地震のときの強震動がどんなものか知りたがっていたが、当時の地震学研究者はそれにこたえる知識も経験も持っていなかった。防災研の耐震構造の研究者は、地震災害の軽減には地震予知よりも大地震の時の揺れがどんなものか、設計用入力地震動を精度よく評価することのほうが重要、と言っていたが、同時に彼らは、地震学者は長周期の地震波にのみ興味を示し、構造設計に必要な短周期の周期帯域の地震動は全くわかってないので、地震学は期待できない、とし、入力地震動の推定は自分らで決めるしかない、と考えていたようだ。

私は、防災研での理学系の地震学研究者と工学系研究者の地震防災に対する意見の乖離を知っていたので、学位論文のテーマとして、強震動の評価方法をなんとかまとめたという考えを強く持つようになった。そのためには、地震学の基礎ともいえる「断層震源モデル」

と耐震工学で重要な「地盤の震動特性」を結びつけた研究が必要と考えた。実際には、震源過程の研究や地盤中の波動伝播の研究は結構厄介な計算が必要で、当時の計算機の能力を考えても、そのころの私の能力ではどうしたらいいか、全く五里霧中の状態で行き詰ってしまった。

いろいろな文献を漁ったり、地震学や地震工学の研究者の講演を聞いてまわって、1つだけ重要な情報を得た。それが、アメリカの地震学会で発表された”Earthquake aftershocks as Green’s functions” by Steven H. Hartzell だ。この方法がうまくいくのなら、頻度が高い小地震の記録を用いて、頻度が極めて低い大地震の地震動を評価することが可能になる。大地震の記録を観測するのはたいへんだが、小地震の記録なら観測できる可能性は高い。しかし、その前に、この方法の検証が必要だ。そのためには、同じ地点で本震と余震の両方の記録の入手が不可欠である。残念ながら、そんな記録はそれまで一般的に公表されていない。たとえあったとしても私のような無名の研究者が手に入れられるものではない。その当時、強震動記録は実際に観測を行っている研究機関の研究者しか解析に使えなかった。強震動記録が個人の所有物的扱いがなされていたためである。結局、自分で観測する以外にはない！という結論に達した。

そのころ、速度型強震計の開発研究をされていた岐阜大の村松郁英先生に会う機会を得たので、速度型強震計で強震動の観測をしたいと申し出たら、幸いなことに、村松先生が代表者になって科研費を申請するところで、観測を手伝ってくれる人を探していたがなかなかいないので困っていたという話をされた。そこで、先生の科研費の研究グループの分担研究者にしてもらうことができた。

この科研費は1978年から3年間のプロジェクトだった。その中で研究課題の1つとして、東海地震が起こる可能性高いと考えられていた東海地域に村松式の強震計を設置して、強震動記録を収集することが挙げられていた。3年間で強震動を観測する、というのは、どう考えても無謀な計画だったが、藁をもつかむ気持ちで始めることにした。研究がスタートしたのは夏も終わりのころで、すぐに強震計を発注して、年末までに、静岡（地方气象台）、清水（東海大学）、御前崎（測候所）などに強震計を設置し、直ちに観測を開始した。

この村松式速度計は、振子型で、広帯域の精度のいい記録が取れる利点をもつが、減衰常数を大きくするのにオイルダンパーを用いているため、振子が外気温に敏感でゼロ点が移動してしまい、調整が困難という難点をもっていた。そのため地震計を設置してから毎週のように計器の調整のため、観測点巡りをやらなければならなかった。幸い、地元の東海大学の学生も協力してくれたので、なんとか観測を維持することができた。3年のプロジェクトなので、その間になんとかして強震動を記録しないと、私が期待する成果はゼロになってしまう可能性もあった。短期決戦のような気持ちで観測を続けた結果、最終年度（1980年）の6月に伊豆半島の東方沖にM6.7の地震が発生し、その本震と余震（前震）の記録を比較的近距离で得ることができた。この記録を用いて、余震記録をグリーン関数として、本震の地震動を合成する計算法の研究を行うことができた。

Hartzell 論文では、余震記録を適当に足し合わせると本震の記録の再現ができることは書かれているが、余震記録を何個足すのか、破壊伝播の効果をどのように入れるのかなど、足し合わせの具体的な中身は示されてなかった。私は、Aki and Richard (1980)に示された Representation theory に立ち返って断層をモデル化し、Kanamori and Anderson (1975)の断層パラメータのスケーリングを考慮して、小地震記録の足し合わせの個数を推定し、断層面上の破壊伝播による時間遅れを考慮して重ね合わせる方法を定式化した。私が開発したプログラムで、1980年伊豆半島東方沖地震について本震の震源モデルを設定して、余震記録から本震の記録の再現ができることを確かめることができた。

この「経験的グリーン関数法を用いた大地震の強震動を推定する方法」を基にして、1983年に学位論文をまとめ、同年の9月に学位を取得できた。私は、1963年に大学院修士課程で強震動の研究を始め、1983年に学位取得まで、20年かけてやっと論文を仕上げる事ができたが、そのときすでに43歳になっていた。

### 強震動地震学を学ぶ

私が、ようやく学位論文を書き上げた1983年に、三雲先生の招聘で、当時MITにいたKei Aki教授が防災研に3か月間滞在された。そのとき、Aki先生は、地震の震源メカニズムや地震波トモグラフィーなどシリーズの講演をされたり、若手研究者を1人1人呼んでDiscussionをしたり、防災研の大学院生や若手研究者との交流を楽しんでおられた。私も自分の研究についてAki先生に説明する機会を得た。先生は私の研究にも大変興味を持たれ、私の研究も取り入れたプロポーザルを共同で書きたい、プロポーザルが通ったら、MITに招聘したいというようなことを言われた。ただし、プロポーザルの結果がわかるのに、多少時間がかかるかもしれないので、日本側で渡航費が用意できれば、すぐにでも招聘可能だ、と言われた。

そこで、私は国内で海外派遣の公募研究を探して、予算申請をしたら、幸い1984年度の海外派遣研究者に採択された。Aki先生に伝えると、ご自分は1984年の8月からロスアンジェルスにUSCに移ることになったが、MITでもUSCでも受け入れ可能なので、私自身がどちらに来たいのか選んでほしい、との返事もらった。私としてはAki先生のもとで仕事がしたかったので、USCに行くことを決め、1984年の8月から1年間の予定で海外研修を行うことを決めた。USCでは、客員准教授として処遇を得て、結局、1984年の8月から1986年の1月まで、Aki先生の下で研究する機会を得た。

そのころ、Aki先生は、USCとMITの両方の教授をされ、両大学の大学院の講義はもちろん、PhD学生の指導もされていたので、西部のロスアンジェルスと東部のボストンの往復に加え、NSF(米国科学技術財団)やUSGS(米国地質調査所)の仕事でワシントンやサンフランシスコにもよく行かれ、超多忙であった。USCの大学院生はAki先生に指導をしてもらうためのAppointを取るのが大変だと言っていた。私はAki先生の学生の指導の手伝いなどもしていたので、Aki先生がUSCにいる時は結構頻りに議論をする機会を得ることが

できた。

私との議論の中で、次のような話をされたことがある。Aki 先生は、1980 年に *Seismological Society of America* (米国地震学会)の会長に選ばれたが、そのときの *Presidential Address* で、「社会のための地震学の必要性」を提唱し、”Our goal is to compute seismic motion expected at a specific site of an engineering structure when the fault mapped by geologists breaks.”

(我々の研究の目標は、地質学者によってマッピングされた断層がブレイクする時、個々の構造物の建っている特定の場所で期待される地震動を事前に計算することである)という話をした。これは、”strong motion seismology”の研究目標そのもので、社会のための地震学の目標の1つとして重要と考えて講演の中に入れたものだ、と言われた。それを具体化するには、地震学者が集まっただけではだめで、地質学者や耐震工学者と一緒に、地質調査により活断層マップを作成し、将来断層に発生する地震のモデル化と震源からサイトまでの地下構造のモデル化を行って地震動を計算し、それに耐震構造や都市計画の研究者が被害軽減のための方策を検討するというような地震防災のための共同作業が必要である。このような考えは 1980 年代の終わりまでに実現可能と思っていたが、実際には米国でもまだできていない、と言われた。

1980 年代の初頭に Aki 先生が語っていた上の考えは、その時点では、我々には、それにこたえるだけの知識もデータもなかった。2000 年以降になって、ようやく強震動予測地図として、日本でも部分的に実現できるようになった。もちろん、このような Aki 先生の考えは、米国でも実現できるようになったのは 1995 年以降になってからである。

私は、USC に滞在中、世界中の著名な地震学者が Kei Aki を訪ねてきて、彼らの講演を聞いたり、一緒に食事をする機会を得た。その中には、ロシアからの Vladimir Keilis-Borok、メキシコからの Emilio Rosenbluth、フランスからの Raul Madariaga、もちろん米国内からの Hiroo Kanamori (Caltec) や Jim Rise (Harverd)なども含まれる。私と同じ時期に USC に滞在していたのは、メキシコの Francisco Sanchez-Sesma やフランスからの Michel Bouchon などである。私の後も、日本から川瀬 博 (京大)、久田嘉昭 (工学院大学)、加藤 研 (鹿島建設) など、中国から Xiaofei Chen など、多くの優秀な若手研究者が研修や留学の形で USC に来られた。これらの研究者とも研究交流や議論をする機会を得たことは、私の研究の財産となった。

1986 年に日本に戻ってから、私は、Aki 先生と議論したことを、目標の1つとして研究を行うつもりだったが、その当時 (1980 年代の後半から 90 年のはじめ)、日本における強震動記録は極めて限られたデータしか公開されておらず、その多くは紙上のアナログ記録で、解析を行うためには、まずはじめに紙上の記録の数値化を行わねばならず、研究は遅々として進まなかった。気象庁は 1987 年に強震計を機械式からデジタル型に代えて、取れたデジタル記録は公開するようになっていた。しかしながら、87 型地震計は各都道府県に 1~2 点しか設置されてなかったため、それだけでは、波形インバージョンによる震源過程の研究は困難であった。

## 1995 年阪神・淡路大震災と強震動予測レシピの構築

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震は淡路島北部から兵庫県南部の神戸、芦屋、西宮にかけて地域に揺れによる大きな被害を引き起こした。この地震による大災害は阪神・淡路大震災と名付けられた。この地震のとき、震度は気象庁の職員の体感の報告で決めていたため、被災地の震度情報の収集に時間がかかり、政府の初動対応が遅れるなどの社会的問題が生じた。震度 7 に相当する被害の集中した「震災の帯」やその周辺では、公的機関による強震動データはわずか数点でしか得られなかったため、地震を引き起こした断層運動の詳細と被害の全容の関係はすぐには明らかにならず県や市町村が震災対応の判断に手間取るなど悪影響が出た。

米国、とくにカルフォルニアでは 1970 年代の後半から高密度強震動観測網が作られ、Mw 6 以上の中規模～大規模地震が起こると、波形インバージョンにより断層面でのすべり分布の推定を即座に行う研究が始まっていた。日本には高密度観測網がなかったため、強震動記録を用いた震源インバージョンの系統的な研究はほとんど行われてなかった。そのため、兵庫県南部地震の時も、地震直後に公表されたのは神戸海洋気象台の強震計記録のみで、震源の詳細が明らかになるのは数か月を要した。地震後しばらく経ってから、研究者の地道な努力で、気象庁、港湾技研、JR、関震協などの公的機関や民間会社で個別に得られていた記録が収集され、研究者向けにデータが公開され、震源インバージョン解析がなされるようになった（例えば、Sekiguchi et al., 2000）。

この大震災を契機として、地震防災対策特別措置法が制定され（1996 年）、同法に基づいて総合的な地震防災対策を推進するため、地震調査研究推進本部が設置され、高感度地震観測網 Hi-net、地殻変動連続観測網など基盤的調査観測の整備、主要活断層の調査などが推進されるようになった。強震動に関しても、全国を約 20km 間隔で均質に覆う 1000 個以上観測点の K-NET が整備され、さらに高感度地震観測網 Hi-net に併設して、地表と地中の 2 箇所強震観測センサーをもつ KiK-net が構築された。地中地震計は一般的には深さ 100m に置かれているが、場所によっては 2000m 以上、最も深いのはさいたま市岩槻の深層観測施設で深さ 3510m に設置されるなど、きわめて興味深いデータが国際的に提供されるようになった。

阪神・淡路大震災以後、K-NET や KiK-net で中規模・大規模地震の強震動が高密度で得られるようになり、波形インバージョンによる断層すべり分布や経験的グリーン関数法による強震動生成域モデルなど、強震動記録を用いて震源モデルについて多くの研究が行われるようになった。我々は、これらの研究成果の集積により分かってきた震源像として、特性化震源モデルを考案した（図 1 参照）。さらに、この特性化震源モデルの基となる巨視的および微視的断層パラメータに関するスケージング則の検証を行った。これらの考えを整理して、我々は、強震動予測レシピの提案を行った（例えば、入倉・三宅, 2001; Irikura and Miyake, 2011）。

この「レシピ」は同一の情報が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。

強震動予測レシピの考えに基づいた広帯域地震動評価の実装および利活用の問題点は、地震調査研究推進本部の関連委員会や防災科研の研究者による種々の検討がなされてきた。地震調査研究推進本部から公表されている全国地震動予測地図のうち、震源断層を特定した地震動予測地図で使用された強震動予測レシピの詳細は、地震調査委員会の強震動評価手法分科会、強震動評価部会、地震調査委員会の討議を経て定められたものである。また、内閣府防災担当の関連委員会においても、強震動予測レシピに関して様々な検討や改良が行われている。特性化震源モデルの検証は内陸地殻地震については、スケーリング則と合わせていろいろな地震で行われており、実務的な強震動予測にも有効なことが示されている。2016年熊本地震（Mw 7.0）の強震動記録について特性化震源モデルに基づくシミュレーションと観測記録との比較が図2に示される。

2016年熊本地震（Mw 7.0）では、既存の活断層沿いに地表破壊が引き起こされ、断層の極近傍の観測点で永久変位と長周期パルスをもつ強震動が観測された。このような断層極近傍における永久変位や長周期パルスを有する強震動はこれまでの特性化震源モデルでは再現できないが、地震発生層の上部にある表層（2-3 kmの厚さ）に長周期地震動生成域（LMGA）を設定することで、再現可能なことも新たにわかってきた（Irikura et al., 2019）。強震動予測レシピはこのような新たな研究成果を取り入れて常に高度化される必要がある。

強震動予測レシピの開発の着想となった地震の震源モデルは、国内および海外の被害地震の震源近傍の強震記録を用いた震源インバージョンのすべり分布と強震動生成域の推定に基づいている。震源インバージョンによるアスペリティとフォーワード・シミュレーションで推定される強震動生成域がほぼ一致するというのは、日本周辺に発生する地殻地震には有効であるが、必ずしも一般化できない。2011年東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）の破壊域は、岩手沖から茨城県沖にかけて南北に約500km、東西に約200kmの広大な領域であった。アスペリティと定義される大すべり域は震源断層内東部域の南北に広がる領域にあるのに対し、強震動生成域は破壊域の西端に近いダウンディップに位置し、異なる場所に推定された（Kurahashi and Irikura, 2013）。ただし、この地震の強震動は局地的に大きな応力降下を生じた小さなアスペリティ、すなわち強震動生成域から生成されるという考えは支持された。

プレート境界地震については、観測データが比較的多いM7~8クラスについては、個別の検討がなされてきた。地震モーメントと破壊域の関係や破壊域と強震動生成の関係、などのスケーリングは限られたデータしかないため一般化が困難である。M9クラスの超巨大地震について、強震観測記録が得られているのは、2010年チリ・マウレ地震と2011年東北地方太平洋沖地震のみである。震源モデルの一般化は難しく、当面は事例反映に留まると思わ

れる。アスペリティ（大すべり域）と強震動生成域の不一致に加え、破壊形態やすべり速度時間関数の多様性に鑑み、断層走向方向および断層傾斜方向について、丁寧な震源モデル化が必要である。また、観測地震動の大きさに関してマグニチュードの飽和など新たな課題に対して説明可能な震源モデルの構築が望まれる。

### 強震動予測手法の国際的検証

強震動予測の方法論の信頼性を高めるには、今後さらなる国際的な評価や批判を受ける必要がある。米国南カリフォルニア地震センターSCECに構築されている広帯域地震動プラットフォームは、ユーザー自身が Verification と Validation（手法検証と結果の妥当性確認）が行えるシステムづくりを目指している（三宅・他, 2019）。現在プラットフォームには8つの代替計算手法(alternative computational methods)が実装され、カリフォルニア、東北アメリカ、日本における過去の地震やシナリオ地震に対して0 - 20 Hz 地震波形を生成することができる。強震動予測レシピもプラットフォームの検証対象に選ばれており、他の手法との比較検討でさらなる高度化が期待される。Mw6.7の地震を想定して、我々の開発したレシピと米国で開発されたGP法(Graves and Pitarka, 2010)<sup>16)</sup>に基づいて、それぞれ震源のモデル化を行い、シミュレーション結果が図3で比較される。GP法は、すべり分布が $k^2$ の形状を有するランダム震源モデルで、破壊速度やライズタイムも一定のバラツキをもつ方法である。この結果では、2つの方法は、震源モデルは大きく異なる(図3左)が、シミュレーション波形(図3右)はよく似ており、さらに図3左の最下図に示される2つの手法のシミュレーション結果のgoodness of fit (GP法による合成とレシピによる合成の比)は $1\sigma$ の範囲内でよく一致している(Pitarka et al., 2015)。SCEC BBPにおける強震動予測手法の問題点は三宅・他(2019)で議論されており、今後の展開が期待される。

### 参考文献

- Aki, K., Richards, P.G. (1980). Quantitative Seismology: theory and methods, Vol. and II, Freeman and Co., New York Backus.
- Hartzell, S. H. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions, Geophys. Res. Let., 5, 1 - 4.
- Irikura, K. (1983). Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 33, 63-104.
- Irikura, K. (1986). Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., Tokyo, 151-156.
- 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, 特集号「地震災害を考える—予測と対策」, 110, 849-875.
- Irikura, K., and Miyake H. (2010). Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, Pure Appl. Geophys., doi:10.1007/s00024-010-0150-9.
- Irikura, K., Kurahashi S., Matsumoto Y. (2019). Extension of Characterized Source Model for Long-

Period Ground Motions in Near-Fault Area, Pure Appl. Geophys., EOPH; DOI:10.1007/s00024-019-02283-4.

地震予知計画研究グループ (1963). 「地震予知—現状とその推進計画」 (ブループリント)。

Kanamori, H. and Anderson, D.L. (1975) Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology. BSSA, 65, 1073-1095.

Kurahashi, S. and Irikura, K. (2013). Short-Period Source Model of the 2011 Mw 9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 103, 1373—1393.

三宅弘恵・岩城麻子・森川信之・前田宜浩・藤原広行 (2019). SCEC Broadband Platform における強震動予測レシピ, 日本地震学会 2019 年秋季大会予稿集, S15-10.

Pitarka, A, Graves, R., Irikura, K., Miyake, H., et al. (2015). Performance of an asperity-based kinematic rupture model in ground motion, Best Practice in Physics-based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of Nuclear Installtion, Vienna, Austria, Nov. 18-20.

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, pp. 117–133, 2000.

## 特性化震源モデルの実例

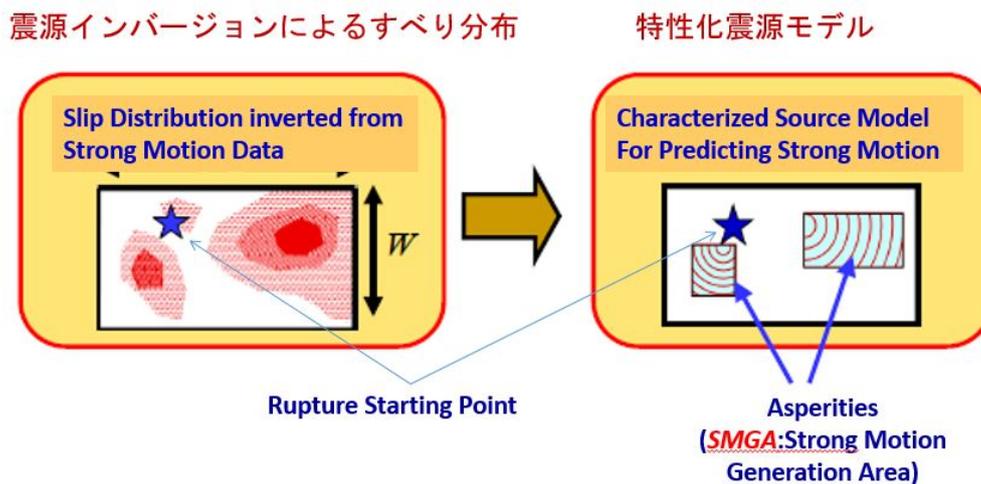


図1. 強震動予測のための震源断層モデルの特性化。強震記録を用いた震源インバージョン結果のすべり分布に基づいて震源断層を特性化する。

## 手法の検証: 観測(黒)とシミュレーション(赤)の比較-波形記録

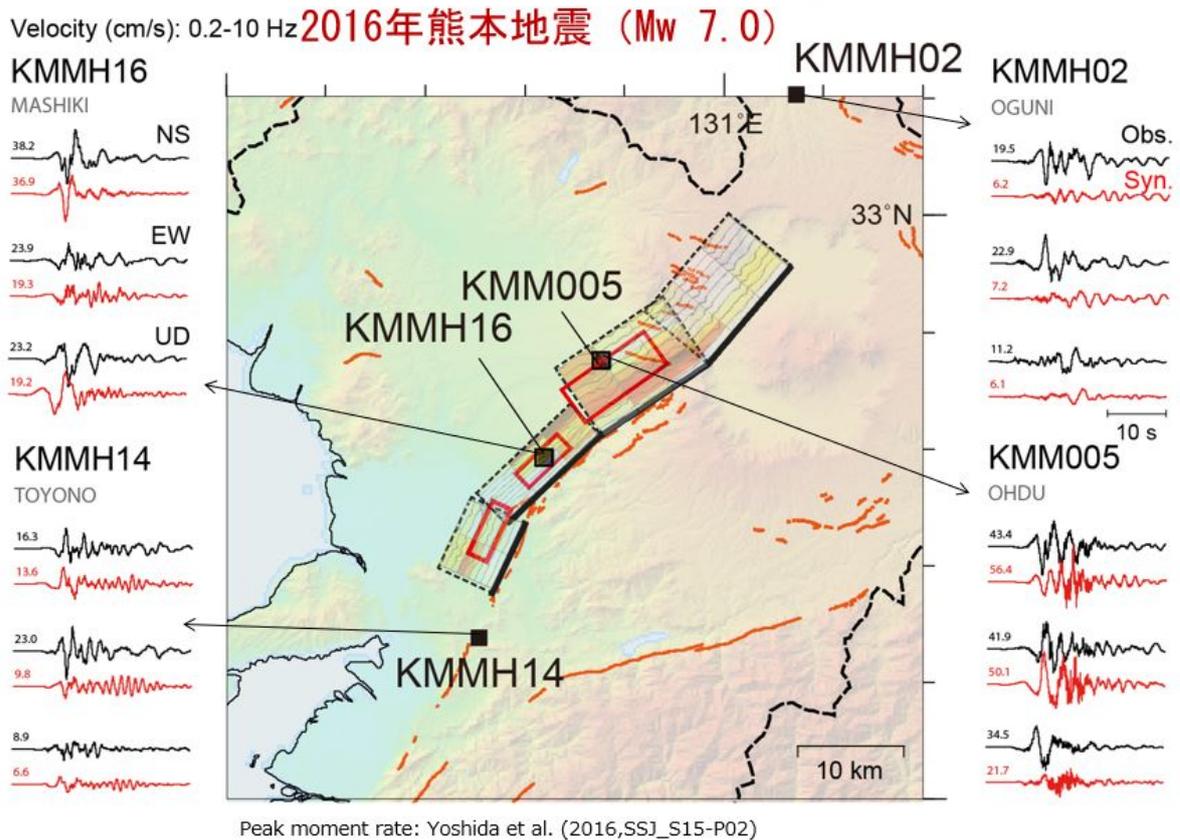


図 2. 2016 年熊本地震 (Mw 7.0) の強震動評価のための特性化震源モデル。観測記録 (黒線) とシミュレーション記録 (赤線) がよく一致している。

# レシピ vs. Graves and Pitarka

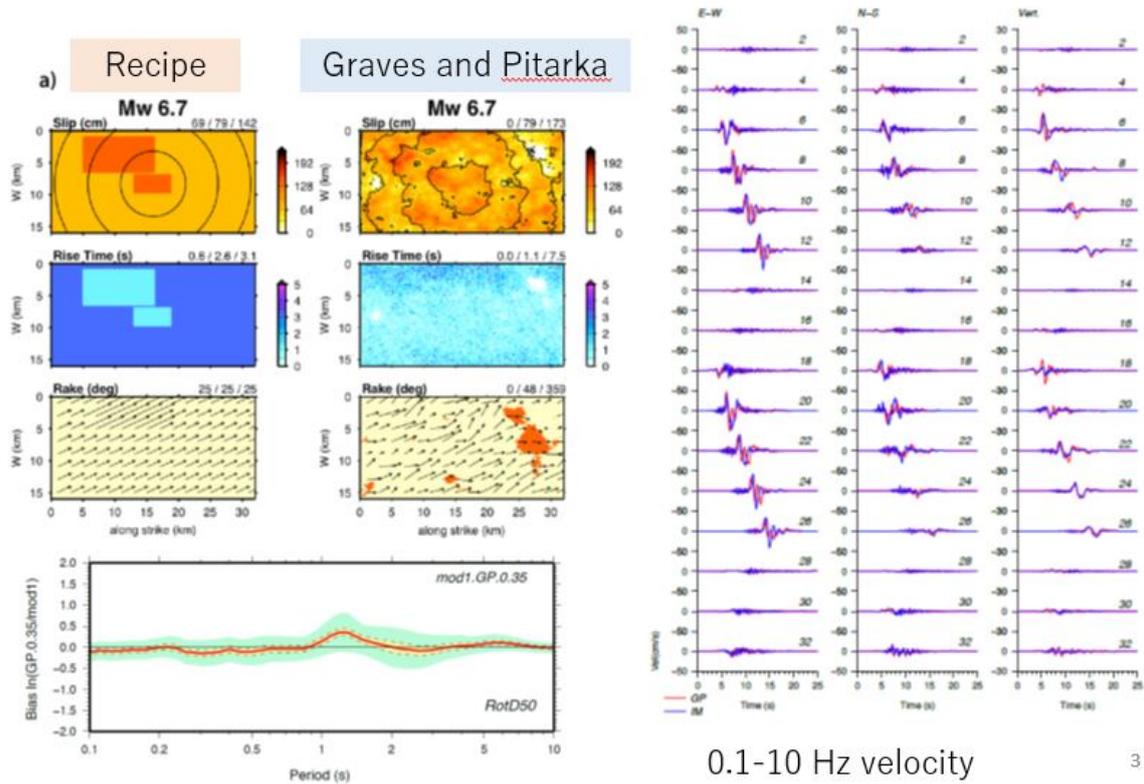


図3. 強震動予測レシピと GP 法との比較 (Pitarka et al., 2015)。左：両方法のパラメータ比較（上から slip, rise time, rake angle）。最下図は両方法の Goodness of fit (GP 法による合成とレシピによる合成の比) の比較。 右：両方法のシミュレーション波形の比較。