

今日までの研究歴を振り返って
— 15年間の準備, 3年間の栄光, 20年間の挫折,
そして最近の3年間で見た新しい地平—

History of My Research Carrier
15 Years for Preparation, 3 Years of Glory, 20 Years of Failure, and 3 Years for a New Horizon

川瀬 博

Hiroshi KAWASE

Synopsis

This manuscript describes my history of research on quantitative prediction of the site amplification and strong ground motions, as well as subsequent structural damage, from the beginning of my carrier to the most recent achievements. The history can be divided into four eras, namely, the first 15 years for preparation, the second three years of significant progress after the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, the third 20 years of painful experience of no reward for dissemination in seismic design in Japan, and the last three years of finding a new horizon for the quantum leap in near future. In conclusion, the most important points for the success of research are to keep motivated, keep positive, and keep trusting yourself.

キーワード: サイト増幅, 盆地応答, エッジ効果, 強震動予測

Keywords: site amplification, basin response, edge effect, strong motion prediction

1. はじめに

第一次オイルショックの年1974年に京都大学工学部建築系学科に入学した私は、耐震工学の研究をされておられた小堀鐸二教授の研究室を選び（その理由については川瀬, 2013aを参照）、枚方にできたばかりの階層式浄水場の起震機実験のシミュレーション解析を題材に卒業論文を書いて無事1978年に卒業した。しかし実はこの4年次の研究室配属までグライダー部活動に明け暮れて碌に勉強していなかった私はこのまま社会に出ることに急に不安に駆られて院試の勉強を始め、無事修士課程に進学、1980年に工学研究科建築学第二専攻を修了して恩師の小堀鐸二教授が薦めてくださるままに清水建設（株）原子力部に入社した。入社後は半年間の銀座のど真ん中の工事現場での実習を終えた後、当時江東区越中島の技術研究所の敷地の片隅にあった原子力部分室で原子力発電施設の地震応答解析には欠かせない動的相

互作用の解析プログラムを習熟することから仕事をスタートした。2階建プレハブ小屋の分室は大型トラックが通るたびに大きく揺れて、それを初めて体験したときには「あ、地震だ！」と一人騒いでしまって恥ずかしい思いをした。原子力部時代は多士済々の顔ぶれの先輩に、一から社会人としての心得と飲み過ぎるまで飲むと人はどうなるかを繰り返し教育していただいた。その後、1982年に大崎順彦博士が東大を退官されて清水建設に副社長として来られて、副社長直轄の大崎研究室と（株）大崎総合研究所を作られ、そこに我々原子力部分室の約半分ほどの人間がチームのまま移籍することとなった。表題の15年間の準備期間はすべてこの原子力部時代の約2年間と大崎研究室（後半は和泉研究室に名称変更）時代の約13年間で、その間チームリーダーの小柳義雄さん・直属の先輩だった中井正一博士（現千葉大学名誉教授）・直属の後輩だった佐藤俊明博士（現大崎総研社長）には公私にわたり大変お世話になった。

小堀先生が私に清水建設の原子力部に行けと言われてしたのは理由があって、当時の清水建設は原子力発電施設の受注実績が乏しく、他社に大きく水を開けられている状態であったので、清水建設は社を挙げて技術力を強化しようとしていたからである。特に地盤—基礎—建物の動的相互作用解析は、岩盤上に建設される大規模構造物の耐震安全性の確保に欠かすことのできない重要な技術で、各社はその高度化にしのぎを削っていた。大崎研究室になってからは「半分の時間はお金を稼ぐ業務、残りの半分は自由な研究をしてよい」という50:50の原則で自由に研究できる雰囲気で大崎副社長とその番頭役をされていた山原浩部長は作り出してくれたので、我々は受託研究をこなしつつも、当時最先端の解析コードの開発とその応用研究に精を出す日々であった。

しかし、当時学会でも他社でも大崎研究室内部でも多くの研究者が動的相互作用解析に関する研究に参入してきて、解析コードの開発も次々と進められており、早晚この分野は過当競争に陥る可能性が予見できた。そのため私は動的相互作用解析の分野から不整形地盤解析の分野に自分の研究のメインテーマを移すことを決め、それまで小堀研究室で不整形地盤解析をされていた篠崎祐三助手（当時、その後京大講師を経て最後は東京理科大教授で退職）のご指導を仰ぎ、佐藤俊明博士・吉田一博博士（現大崎総研）とともに当時流行し始めた境界要素法（BEM）を用いて様々な不整形地盤の動的応答の解析を始めた。この研究テーマのシフトが後々の兵庫県南部地震の「震災の帯」の解明につながるのである。

動的相互作用解析も不整形地盤解析もいずれも弾性媒体中の波動伝播問題の解を求めるもので、基本的には共通の解析コードを用いることが可能である。従って、大きな違いは何に着眼して媒体をモデル化し何を出力するかに尽きる。不整形地盤解析では、想定する複雑な境界を持つ地盤をモデル化し、その地盤が与える入射地震動に対する影響を評価することに主眼がある。

現在の状況とは全く異なり、当時、1980年代前半では考慮すべき地盤の不整形性とはどのようなものか、そしてそれが影響する周波数範囲はどの程度か、について共通認識は全くなかった。というよりもそもそも不整形地盤以前に、一次元的な平行成層地盤の応答ですら、十分に理解され解明されているとは言い難かった。地盤調査は非常に不十分で地震観測データも不足しており、正に象の足を手探りで触ってはあでもないこうでもないと言っているという状態であった。

そんな中1986年に米国に留学しないかという話が出て（実はこれには大崎研究室の伊藤哲次博士の応

援があったのだが）留学先について当時MITのKausel教授のところへ留学中だった篠崎祐三助手に相談したところ、ここは環境が悪いから、入倉考次郎防災研助教授（当時、その後教授、副学長を経て現在は愛知工大客員教授）をお願いして南カリフォルニア大学地質学部に異動されたばかりの安芸敬一教授のところに行け、と言われて、厚かましくも入倉先生をお願いしたら、最初は理学的研究に耐えられるかどうか不安に思われたようで、それまでの5年間の研究論文（と言っても構造工学シンポの共著論文と日本地震工学シンポの論文程度しかなかった）をお送りして安芸先生にご推薦いただき、無事研究員として受け入れてもらえることになった。この米国留学中の成果(Kawase, 1988; Kawase and Aki, 1989a, 1989b; Kawase and Aki, 1990)を南井良一郎防災研教授（当時、故人）のご指導のもとで帰国後に博士論文にまとめて1990年に工学博士の学位を授与して頂くことができた。この安芸先生との共同研究と彼の弟子たちとの2年半の濃密な交流は、非常に有意義で、狭い世界に囚われていた私の世界をずっと幅広い強震動地震学および地球物理学の世界まで広げてくれたという意味で、その後の研究者としての履歴において欠かすことのできない重要な経験であった。

博士号取得後にはポストドク的な意味でJICAの長期派遣専門家としてMexico Cityの国立防災センターCENAPREDに1991年から1992年の1年間派遣された。これもまた研究の幅を広げることに役立った。些か長くなったが、ここまでの最初の15年間の準備期間である。その後、私の研究者人生を一変させる兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）が1995年1月17日に発生する。それ以降が栄光の3年間とそれに続く挫折（研究的な意味ではなく政治的な）の20年間である。

ではまず15年の準備期間と栄光の3年間、および挫折の20年間について、積み上げてきた学術的な成果とその意義を整理してみよう。ただし、私や私のチームが取り組んできた多くのテーマについてすべてを整理し出したら、いくらあっても到底ページ数が足りないので、ここでは私の主たる研究フィールドである地盤構造同定とそれによる地盤増幅特性の評価、およびそれを考慮した強震動予測・被害予測に関連する話に絞らせていただく。

言うまでもないことであるが、これらはすべて、私一人で成し遂げたものではなく、多くの指導者・共同研究者・研究協力者・研究支援者、そして優秀な学生諸君とともに成し遂げたものである。また研究上の社内のライバルや同業他社の研究者、そして受託業務の発注者の方々からも様々な刺激や示唆、批判をいただいたことが大いに役に立っている。ここに記してあらかじめ感謝の意を表しておきたい。

2. 準備の15年：不整形地盤解析と分離解析

先に述べたように、不整形地盤解析と呼ぶ研究分野は我が国では1977年の篠崎祐三博士の論文（小堀・篠崎, 1977）が先駆的論文として高く評価されるべきものと考えている。そこでは地形の不整形性（いわゆるTopographic effect）だけではなく、半無限地盤に埋め込まれた不整形な盆地内の波動伝播についても解が提示されている。この手の地形の影響や堆積盆地の影響については1971年のSan Fernando地震の際のPacoima Damで得られた $1g$ を超える強震観測記録を説明するために、円形キャニオンの上端部の応答を求めたTrifunac(1973)の級数展開解が既に提示され、その後Wong and Jennings (1975)の境界積分方程式法(BIEM)による解もほぼ同時期に提示されていたが、そこで扱われているのは任意形状のキャニオンの場合だけで、盆地構造の解析事例は含まれていない。BIEMによる盆地構造解析は海外ではSánchez-Sesma and Esquivel (1979)が最初である。

我々は篠崎祐三博士の指導を得て、BEMにより盆地端部に埋め込まれた基礎(Fig. 1)の応答を計算して1982年の構造工学シンポにて公表している（川瀬・中井, 1982）。これはなんと全編手書きの論文であり、自分の字のきれいさに驚く。引用文献に年号がないものが散見されるのはご愛敬としてご容赦願いたい。

そんな数値解析手法を開発しているうちに1985年のMichoacan, Mexico地震が起こる。それ以前に我が国では1968年十勝沖地震の際に八戸で継続時間の長

いやや長周期（八戸では2.5秒）地震動が観測され、それが盆地内で増幅された地震動であることが指摘されていた（地盤震動小委員会, 1976）。また関東平野(Kudo, 1980)や大阪平野（鳥海, 1975）でも同様の後続動が観測されていたので（現在ではそれはS波が盆地端部で表面波になる盆地生成表面波 basin-induced surface wave, あるいは表面波が盆地端部でモード変換された盆地転換表面波 basin-transduced surface waveであることがわかっている）、Michoacan地震でのMexico Cityの長い継続時間の観測波を見たとき、直ちにこれは盆地生成あるいは転換表面波だと我々は確信したのである。それで翌年の日本建築学会の地盤震動シンポでは、このBEMによる大規模盆地構造の継続時間延伸効果について報告している（川瀬, 1986）。

その自分たちで開発したBEMは渡米後の苦労の末のIBM→DECへの移植作業により、波数積分法と結合されてDWBEMとなり、さらに大規模な多層の盆地構造へと拡張された。Kawase and Aki (1989)のSH波入射の解析例をFig. 2に掲載しておく。この図は鉛直入射したS波が盆地端部で回折波を生成し、表面波となって盆地内を往復することで継続時間が長くなることを明瞭に示したもので、それまでもその存在は理解されていたが(例えばBard and Bouchon, 1980)、地表面上の多数地点で盆地生成表面波の伝播性状を明らかにしたという点でエポックメイキングな論文であったと自負している。

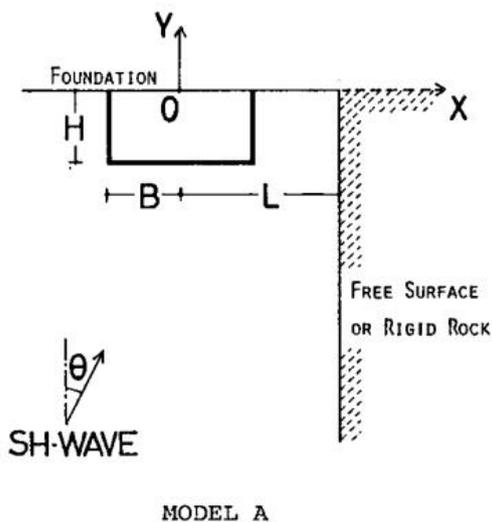


図3 モデル図

Fig. 1 An irregular ground model used in the BEM analysis for an incident SH wave (after Kawase and Nakai, 1982).

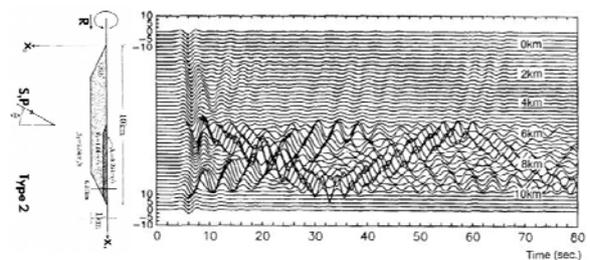


Fig. 2 Time-domain responses on the surface of a double trapezoidal basin (on the left) for a vertically incident SH wave with the predominant period of 4 s, which corresponds to the fundamental resonant period of the basin (after Kawase and Aki, 1989).

波動伝播の様相を図化することの重要性はKawase (1988)で既に指摘しており、先に述べた円形キャニオンの応答特性も、それまでの研究のように周波数領域で表示していたのでは、回折波が直達波と干渉するというとても美しい波動伝播現象は何も把握できなかった。しかし、この後1995年兵庫県南部地震の際にクローズアップされる盆地端部での増幅的干渉による「エッジ効果」はこのKawase and Aki (1989)

の台形盆地構造に対する応答結果に既に明瞭に表れているにも関わらず、それには全く気づいておらず、何も指摘していない。これは当時盆地中央部での継続時間延伸効果ばかりが我々の関心の的であり、盆地端部近傍での最大振幅には眼が行ってなかったからである。「心ここに在らざれば...」の典型例である。

なお不整形地盤の実地盤での観測シミュレーションとしてはIASPEI/IAEE Joint Working Group on Effects of Surface Geology on Seismic Motions (JWG/ESG) のブラインド・プレディクション実験の一環として、地震研の工藤一嘉助教授(当時)が尽力され実施されたアレー地震観測の結果、参加者に配布された足柄平野での観測波を用いたKawase and Sato (1992), 佐藤・他(1993), 佐藤・他(1995)の検討事例がある。このうち佐藤・他(1993)ではポアホール観測で後続動部では地表と地中の観測波の位相が一致していることを使えば表面波だと証明できるとして、それ以前にはそういう解析はされておらず、この方法では水平面内アレーが不要なのでこれはよい方法だと思ったのだが、その後あまり活用された形跡はないのが残念である。

さて、本章のタイトルにある、不整形地盤解析と並んでこの後の研究の柱の一つとなる分離解析とは、多数の地震記録のスペクトルを用いて、それを震源と伝播経路とサイト増幅の3つの要素に分離する解析方法のことを言う。いわゆる距離減衰式や地震動予測式(Ground Motion Prediction Equation, GMPE)も広義には分離解析であるが、狭義の分離解析ではターゲットはフーリエ・スペクトルである。これは理論的に時刻歴では合積(convolution)されている3者がフーリエ・スペクトルでは単なる積になるからで、その場合スペクトル・インバージョンとも呼ばれる。

私が分離解析の面白さを知ったのは1993年釧路沖地震の気象庁87型強震計のデータを解析した時からである(川瀬, 1994)。解析の結果、釧路地点では地形効果があって特定の周波数で大きなサイト増幅があること(Fig. 3)、苫小牧では驚くほど大きな長周期側の増幅があることを報告している。苫小牧の大きな長周期増幅は(これも勇払平野の盆地生成表面波による)その後2003年十勝沖地震での石油タンク火災の原因となった。

その後分離解析は、佐藤智美博士(現清水建設技研)の博士論文のメインとなった仙台アレーを用いた一連の共著論文(佐藤・他, 1994a, 1994b, 1994c)において多角的に試みられ、工学的基盤波と地震基盤波は異なること、地中観測記録には地表反射の影響が含まれていること、減衰には強い周波数依存性があること、非線形性の抽出には弱震動でまず構造

同定が必要なこと、震源スペクトルは地震ごとに大きく異なること、しかし ω^{-2} の周波数特性は普遍的なこと、など我々が今日では当然のこととして考慮しているモデル特性を全て観測事実に基づいて明らかにした。これら一連の研究は我々にとってはその後のモデル構築における基本立脚点となったのであるが、その広報活動が足りず、この時点で明らかにした情報の共有がコミュニティ内で十分されなかったために、未だにこれらの基本的なモデル拘束を前提としない解析をしておかした結果が報告される事例が後を絶たないのは非常に残念である。

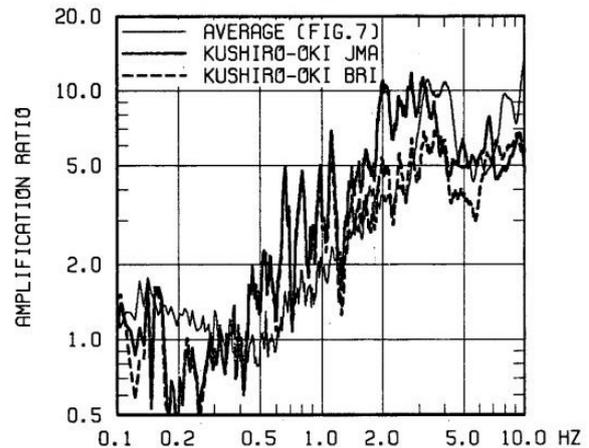


Fig. 3 Site amplification factors separated at the Kushiro site by the two different sensors (after Kawase, 1994).

3. 栄光の3年：兵庫県南部地震の「震災の帯」

こうして「準備」を着々と進めていたところで1995年兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)が発生した。もちろんその時点まで我々は兵庫県南部地震の空前絶後の大被害の原因究明に向けた準備を着々と進めてきたとは全く思っていない。それならまるで予言者である。この意味はあくまで、振り返ってみればそれまでの15年間は兵庫県南部地震の被害の原因を解明するための準備に過ぎなかった、ということである。しかし、もしその準備が当時の我々になかったらその原因の解明は3年間では不可能だっただろう。この我々とは私とそのグループという意味ではなく、研究者コミュニティとしての意味である。実際、地震波の特異な増幅=エッジ効果という点に限って言えば、複数のチームがほぼ同時に正解にたどり着いたのである。しかしこの特別寄稿はレビュー論文ではないので専ら著者中心のチームで得た成果のみを取り上げていることをご了解いただきたい。

兵庫県南部地震の際に最大の謎となったのは、何故総数で全壊家屋約10万棟という大被害が生じたのか(Photos 1, 2), という事と、何故それが神戸市内



Photo 1 A collapsed wooden house (originally 2-storied) in Higashinada-Ward 11 days after the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake (Photo by H. Kawase).



Photo 2 Total road blockage by collapsed wooden houses in Higashinada-Ward 3 weeks after the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake (Photo by H. Kawase).

において幅1km, 長さ20kmの帯状に分布したのか, すなわち何故「震災の帯」は生じたのか, ということであった. 当初は中間層崩壊や象の足座屈などの特異な現象や, 被災者の「地面に叩きつけられる感じがした」などの証言に着目して, 極めて大きな上下動が原因で大きな被害が生じたとする仮説もまことしやかに唱えられたり, 震災の帯の直下に伏在活断層が存在してその直上に被害が生じたとする説が唱えられたりした. しかし震源域の強震観測記録にはそのような大振幅の上下動は一切観測されていなかったし, 多額の費用をかけた大規模な反射法探査にも拘わらず結局震災の帯の直下にそれらしい断層は一切見つからなかった. 実際には, その生成原因は以下の3つの要因が複合的に作用したことによるもので, 個々の要素については複数のチームがほぼ同時期に同じ結論を見出しているが, これら3要素を全て一連の解析により定量的にそれが原因であることを明らかにしたのは我々のチームだけである.

3.1 エッジ効果

まず帯状の被害集中域, すなわち「震災の帯」が

生じた最も直接的な原因は, 六甲断層系の数百万年に渡る継続的な活動で大阪平野の北端部分には急峻な段差構造ができており, そこでの不整形地盤応答の結果, 鉛直に近い盆地端部で生じた盆地生成回折波+表面波と下方からの直達S波が増幅的干渉を起こす, 我々が名付けた「エッジ効果」によって, 盆地端部から1kmほど離れた場所で大きな振幅の速度パルスが生じたことである. Fig. 4にはKawase (1996) に示されている三宮駅を含む北北西-南南東の二次元断面の工学的基盤上の最大加速度と最大速度の空間分布を震災の帯の位置とともに示す.

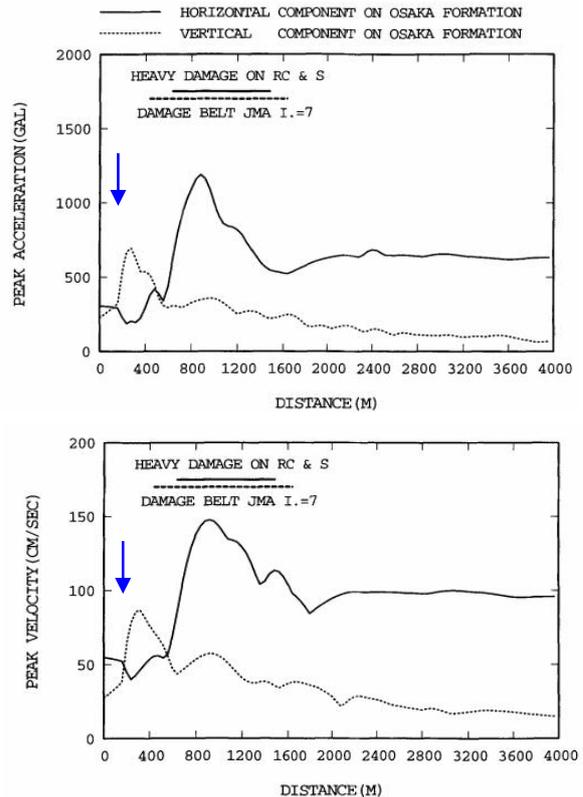


Fig. 4 Peak ground acceleration (top) and peak ground velocity (bottom) distribution along the fault-normal direction across the Sannomiya JR station based on the two-dimensional FEM and the input motion derived from the JMA Kobe records (after Kawase, 1996). Allows indicate the location of the basin boundary.

エッジ効果の生成原因については, その後川瀬・他 (1998) の3次元FDMを用いた数値解析によってその波源が平面波か点震源か面震源かによらず, 盆地端部で岩盤側から盆地内部に射出された回折波+表面波が盆地内部をゆっくりと上昇してくる直達S波と増幅的干渉を起こすことによって生じていることを明らかにした. その波動場の同一性を示したスナップショットをFig. 5に再録しておく. このエッジ効果が波動の干渉によって生じることは, 今となって

は当たり前のこととして理解されているが、当時地震学分野の研究者からエッジ効果の成因について間違った解釈が流布されていたことから、正しい波動論的解釈を明確に示したものである。この解析に際しては当時米国のCalifornia州のPasadenaに事務所を構えていたWoodward Clyde社のRobert Graves博士とPaul Somerville博士の協力を得ているが、これも米国留学で作った人脈が役立った一つの事例である。

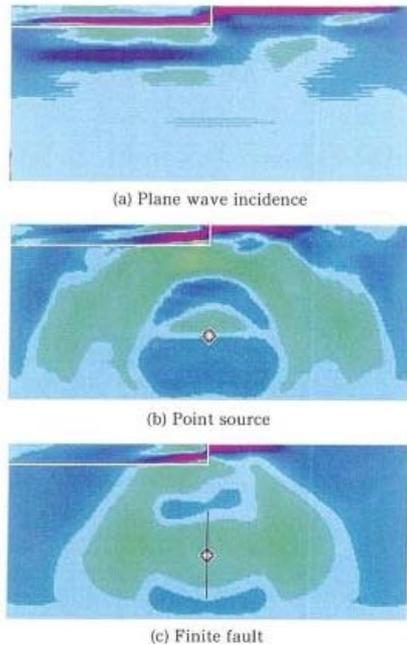


Fig. 5 Comparison of snapshots of incident S-wave (fault-normal component) impinging to the 2D rectangular basin structure (after Kawase et al., 1998).

3.2 アスペリティ・パルス

エッジ効果は波動干渉によるもので、そのレベルと生成場所は入射波動の性状、特にその卓越周期に大きく影響を受ける。従って入射波の特性を把握し、その成因を明らかにすることが極めて重要である。その点について我々は早い段階で震災の帯の中の波動は決して短周期波動が多く含まれた複雑な波形ではなく周期1~1.5秒が卓越する「やや短周期」パルスの波群で構成されたものであることを掴んでいた。その証拠は、一つには震災の帯の中で観測した余震記録を使って各観測点直下の地下構造を同定し、その構造を使って神戸大学で関西地震観測協議会(CEORKA)が観測したKBU波を入力として使ってシミュレーションをしたところ、Fig. 6に示すような大振幅速度パルス群で構成された波形が得られたこと(川瀬・他, 1995b)、および神戸海洋気象台周りの地震基盤までの盆地構造をモデル化し、デコンボリューション(地盤増幅特性をはぎ取る逆算解析)によって地震基盤波を求めたところ、神戸海洋気象台

と同レベルで同じように周期1~1.5秒が卓越したやや短周期のパルス波群が得られたこと(川瀬・林, 1996)による。

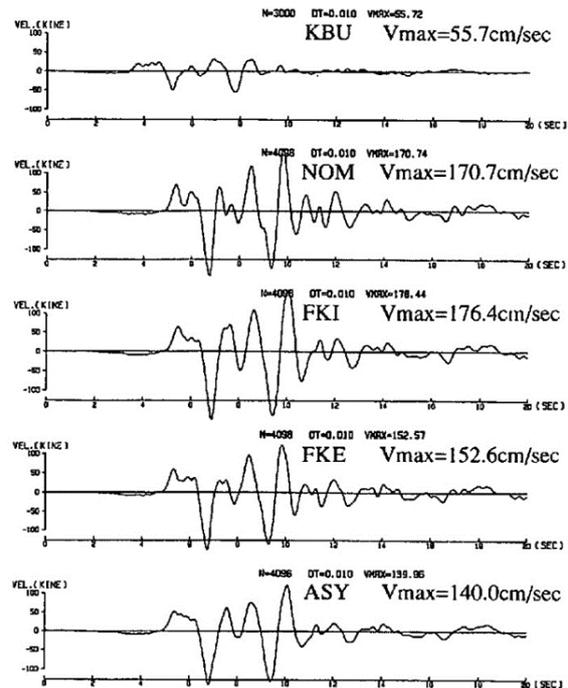


Fig. 6 The observed velocity waveform at the KBU site used as an input (top) and simulated velocity waveforms at four aftershock observation sites in the damage belt (after Kawase et al., 1995b).

震源近傍での波動がこのように短周期成分が少なく、非常に整ったコヒーレントな波動であることは俄かには信じがたいことであったが、後にそれは不均質な断層破壊過程の特徴と震源から放射される波動の基本的性状に起因するものであることが広く理解されるようになった。前者はいわゆる破壊伝播に伴う進行方向指向性 (forward rupture directivity)の効果であり、後者は放射パターン(radiation pattern)の影響である。いずれも古典的地震学の教科書には必ず記載されているもので、震源からの放射波動の把握と解釈には欠かすことのできない波動生成メカニズムであるが、特に重要なことはこの震源からの破壊進行方向の放射パルスの卓越周期が、コヒーレントな破壊をする領域、それを当時はアスペリティと呼んでいたのでここでもそれを踏襲するが(最近では内陸地震の場合にはそれは強震動生成域strong motion generation area, SMGAとほぼ同じであるとされている)、そのアスペリティのサイズに依存して決まるということである。やや短周期パルスが観測されるのは破壊進行方向に限られるため、このパルスをディレクティブ・パルスと呼ぶ研究者もいる

が、パルスの卓越周期を決めるのはアスペリティ・サイズであることから、これはアスペリティ・パルスと呼ぶべきである。

アスペリティ・パルスの生成については、後述する我々の検討に先行して震源インバージョン解析の専門家による震源破壊過程の逆算結果から、その生成にはそれに対応したアスペリティが必要であることが明らかにされていた（例えばKamae and Irikura, 1995; Sekiguchi et al., 1996）。しかし、経験的グリーン関数法を用いたシミュレーションではアスペリティ内の滑り速度関数を直接求めることができない。一方、断層面を小要素に分割し、同一要素での破壊の継続を表現するために、時間をずらしつつ複数回の破壊を発生させるマルチタイムウィンドウ型の震源インバージョンでは、必ずしも特定の場所の相干的な破壊が1パルスを生成するとは限らず、別々の場所が1パルスの生成に寄与するという、物理的には起こり難い解が得られることがある。

そこで我々は予めアスペリティのサイズと個数を、先行研究を参考にして設定し、フォワード・モデリングにより、その位置と内部の滑り速度関数を同定するという震源破壊過程のモデル化を試みた（川瀬・松島, 1998; 松島・川瀬, 2000）。その結果、Fig. 7に示したような4アスペリティ・モデルとその滑り速度関数が得られ、その結果ターゲットとした震源域の観測記録をよく再現することができた。

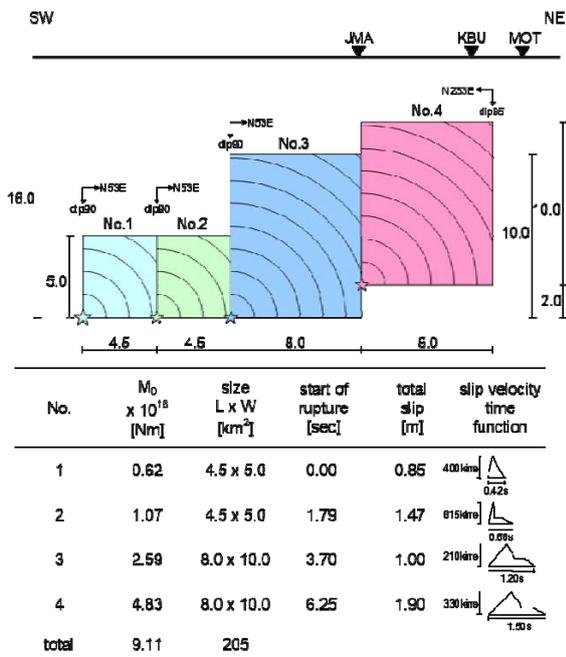


Fig. 7 The derived four asperity model and each slip velocity function, together with the source specifications (after Matsushima and Kawase, 2000).

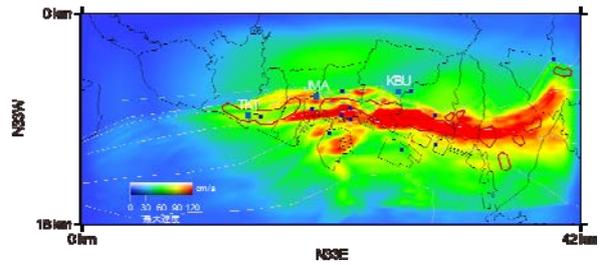


Fig. 8 The simulated peak ground velocity distribution on the fault-normal component derived from the four asperity model (after Matsushima and Kawase, 2000).

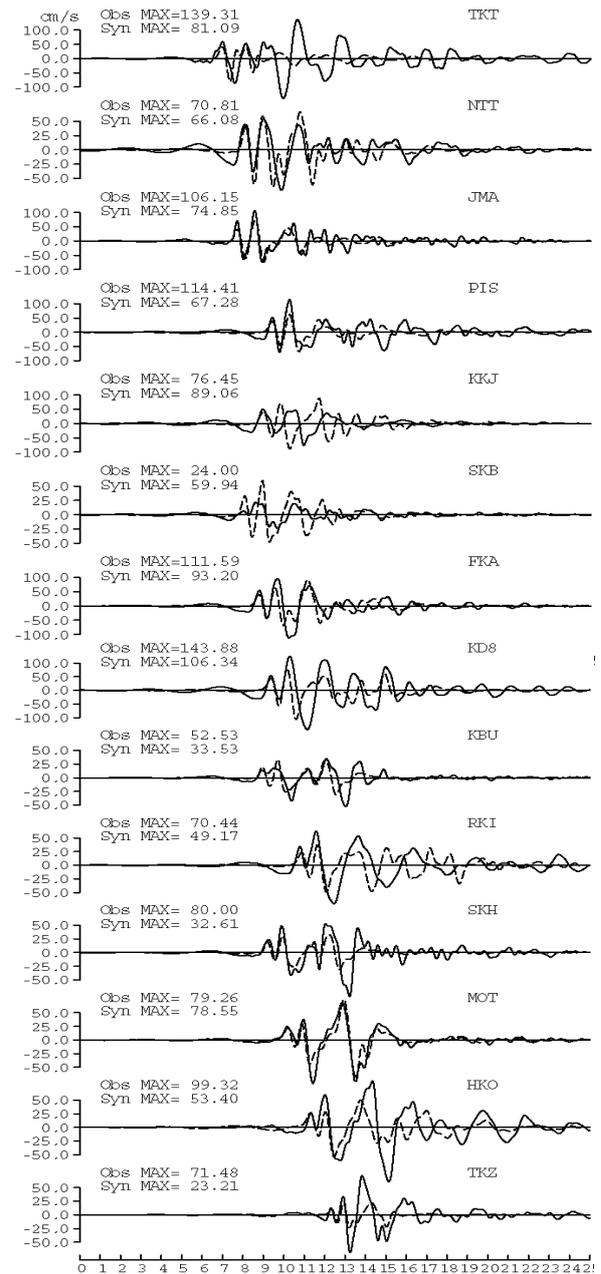


Fig. 9 Comparison of observed (solid) and synthetic (broken) velocity waveforms derived from the four asperity model in the near-fault region (after Matsushima and Kawase, 2000).

さらにその4アスペリティ・モデルと三次元盆地構造を組み合わせることで、Fig. 8に示したように、盆地端部から少し内側に震災の帯を再現することができた。Fig. 9には再現波形と観測波形の比較を示す。震源から地表までを理論的方法により表現して約2Hzまでの波形を再現できたのは当時としては画期的であった。この後さらに我々は改良を加えて鷹取(TKT)観測点での一致度の向上を目指して5アスペリティ・モデルを提案し、Fig. 8で最大速度値が過小評価気味となっている三宮以西の再現性の向上を図った(松島・川瀬, 2009)。なおFig. 9において、神戸港事務所(KKJ)、神戸港第八突堤(KD8)や六甲アイランド(RKI)、東神戸大橋(HKO)での観測波形(実線)の後半部で再現波形(破線)よりも位相が遅れているのは表層地盤の液状化によるものである。

なお、松島・川瀬(2000)では、フォワード・モデリングに先立ち、アスペリティのサイズや滑り速度関数が破壊進行方向のアスペリティ・パルスに与える影響についてパラメトリック解析を行い、アスペリティ・パルスの周期にはアスペリティ・サイズが支配的な影響を及ぼすこと、そのピーク振幅にはサイズ以上に滑り速度関数のピーク値が影響すること、しかし最終滑り量はアスペリティ・パルスの特性にはほとんど影響しないことを報告している。これはアスペリティ・モデルを運動学的震源モデルとして構築してきた我々からすれば当然のことなのであるが、その後の展開で様々な研究者が様々なアプローチでアスペリティ・モデル(SMGAモデル)の妥当性を検証し、我が国独自の震源近傍地震動の予測用モデルとして構築された震源モデル、いわゆる入倉レシピ(入倉, 2004)において、アスペリティあるいはSMGAは最終滑り量の大きな領域として抽出されており(例えば内陸地震について宮腰・他, 2015の整理を参照)、その表層的結果として単純に「アスペリティ・パルスは滑り量の大きな領域から生じている」との誤解が広がっていることはいささか嘆かわしい。アスペリティあるいはSMGAから震源近傍での被害に直結する地表でのアスペリティ・パルスが生成されるのは、アスペリティあるいはSMGA内でのピーク滑り速度が大きいからであり、入倉レシピではそれを含めてモデル化することを指定しているわけで、それなくして震源域の大被害は生じえないこと、逆に滑り量は大きいですがピーク滑り速度は小さいアスペリティが存在しても被害には直結しないことをもう一度確認しておきたい。

最後に、アスペリティ・パルスが内陸地震の震源近傍で共通の脅威であることを松島(2020)が分かりやすく解説しているので、そこで示されている兵庫県南部地震とその後の代表的な内陸地震の震源域

での速度波形をFig. 10に紹介しておく。

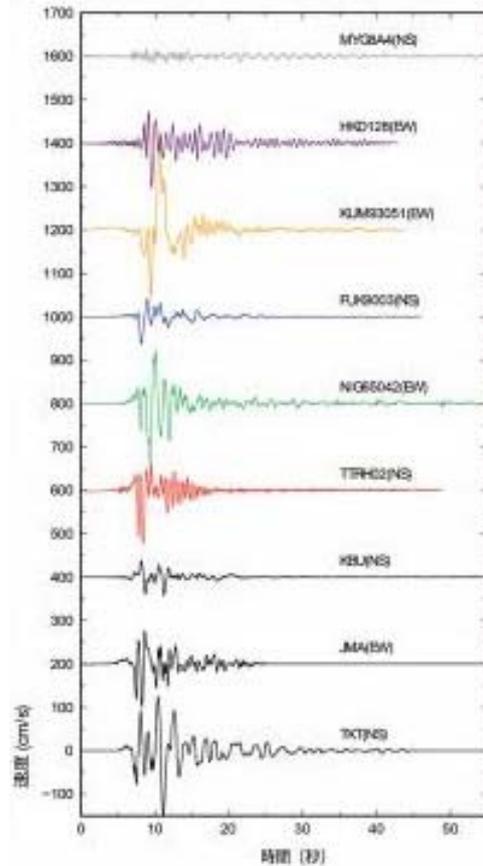


Fig. 10 Velocity waveforms observed in the vicinity of inland earthquakes of M7 class, except for the top one for the subduction zone event (after Matsushima, 2020).

3.3 やや短周期パルスの構造物破壊能

以上のように、震災の帯の中を含めて兵庫県南部地震の震源域での観測地震動の最大の特徴は、周期1秒前後の「やや短周期パルス」群から構成されていたことであり、それが震災の帯をもたらしたと考える以外に選択の余地はないのであるが、残された課題は、果たして2Hz以上の短周期成分を多く含まない「やや短周期パルス」が、共振周期が0.1~0.25秒に分布している一般木造構造物や0.2~0.5秒に分布している低層RC造構造物に対して、あれ程多大な被害をもたらすことができるのかを証明することである。

その建物の共振振動数に依らず、我々が初期の段階で推定した強震動が短周期構造物に対しても十分な破壊能を持っていることは林・川瀬(1996)において簡便な1自由度系の非線形応答解析によって示されていた。また勅使河原・他(1998)は特定の建物に対する非線形応答解析により再現波が十分な破壊能を有していることを証明した。これらの解析結果を元に川瀬(1998)では、やや短周期パルスだけが特に大きな構造物被害を引き起こせる地震動であ

ることを、耐力と変形性能、エネルギー吸収の観点から解き明かした。それを示したのがFig. 11に示した卓越周波数—最大加速度ダイアグラムである。

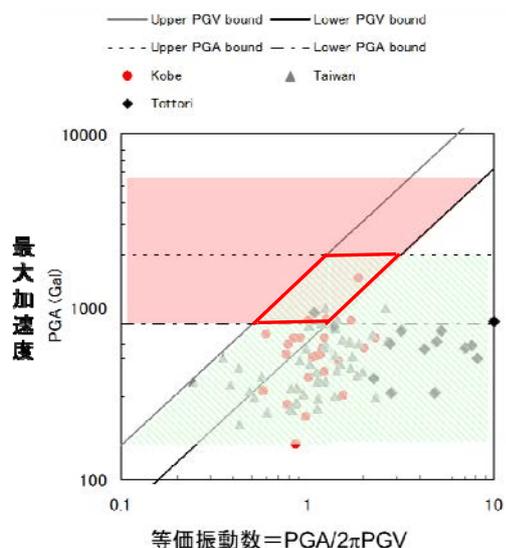


Fig. 11 Equivalent predominant frequency versus peak ground acceleration to show the dangerous frequency zone (0.5~2 Hz) for structures (after Kawase, 1998).

この図で横軸は水平入力地震動の最大加速度PGVを最大速度PGVで割ってさらに 2π で割った等価卓越振動数(Hz)である。最大加速度と最大速度が同じパルスで生じている場合にはパルスの卓越振動数に等しい。縦軸は最大加速度PGAそのものである。図中のシンボルは1995年兵庫県南部地震、1999年台湾集集地震、および2000年鳥取地震の観測データをプロットしたものである。この図において、ピンクでハッチした部分はPGAで 800cm/s^2 、PGVで 100cm/s の等加速度・等速度ラインより上の部分で、これより大きいと震度7レベルの大被害が発生すると考えられる範囲に相当する。その範囲を実現するための卓越振動数上の上限も下限もないので、一見どのような地震波であれその両方を同時に大きくすることが可能のように見える。しかし卓越振動数が0.1Hzで 800cm/s^2 を実現するためには $1,274\text{cm/s}$ のPGVが必要となる。同様に10HzでPGV=100 cm/sを実現するためには $6,280\text{cm/s}^2$ のPGAが必要となる。これらのPGA・PGVは物理的に実現できそうにない。物理的な上限としてPGAで2g、PGVで 250cm/s を想定すると実現可能な範囲は緑のハッチの下側となる。このことから、実現可能かつ危険な周波数範囲は両者に囲まれた平行四辺形の領域となり、その卓越振動数は0.5Hz~2Hzとなる。これが「やや短周期パルス」が構造物に

とって危険な理由である。要は速度も加速度も大きなパルスを生じようとするればそれは必然的に「やや短周期パルス」になるということである。

なお、境(2009)も一連の調査結果をもとに、同じように大被害の生成にはやや短周期域の速度応答が重要だと指摘しているが、その理由として、弾性周期が短周期の構造物でも、大破レベルの被害が生じる大変形時には構造物是非線形化するため結果としてやや短周期域の速度応答と被害の相関が高くなるとしている。これはもちろん構造物の応答に関しては現象論的に正しい解釈ではあるのだが、ここに示したように、その仮定のように構造物是非線形化するためにはまず層のせん断力が構造物の耐えられる限界=降伏耐力を超えることが必要であり、そのためにはPGAが大きくなければならない。さらに非線形性が進んで限界変形を超える大変形を生じるためには多くのエネルギーが必要であり、PGVが大きくなければならない。よって建物が非線形化するためにはFig. 11に示した平行四辺形の領域に入る「やや短周期パルス」でなければならないのである。

しかし、震災の帯を含むより広い範囲の再現強震動が様々な種類の構造物に対して甚大な被害を引き起こすことを証明し、それを将来の耐震設計や耐震補強、あるいは防災対策に活かしていくためには、より定量的な構造物の実耐力評価が必要であった。それに際しては観測データのコンパイルだけではなく、理論解析手法の整備も必要で、それなりの時間が必要だった。結局我々が中低層RC造・低層鉄骨造・木造の被害予測モデルの構築を報告した3部作が完成したのは私が九州大学に着任した後の2002年であった(長戸・川瀬, 2001; 2002a; 2002b)。いずれも建物の非線形応答解析用の入力地震動としては松島・川瀬(2000)の再現地震動を用いている。この被害予測手法の特徴は以下のようにまとめられる。

1. 非線形応答解析モデルは当時確立していた最新の手法に準じて作成する。
2. その特性には新耐震以降の特性を仮定する。
3. 大破以上の被害を出す判定を最大層間変形角で行い、クライテリア(非木造 $1/30\text{rad}$ 、木造 $1/10\text{rad}$)を事前に仮定する。
4. 耐力モデルの異なる複数のモデルを設定し、棟数分布には対数正規分布を仮定し、 $160\text{m} \times 80\text{m}$ のメッシュごとに計算波形を入力してクライテリアを超えた建物比率をカウントする。
5. 被害率にメッシュごとの建物棟数を掛けて被害棟数を求めそれを総計した計算被害棟数が観測被害棟数に合うように、種類別に平均耐力レベルを同定する。

この方法により、現実的な建物耐力のばらつきを

考慮しつつ、建物種別・階数・建設年代ごとの平均的な耐力の違いを定量的に考慮することができる。ここでは木造構造物を例に、Fig. 12には仮定したスリップ+トリニア型の非線形特性を、Fig. 13には仮定した12個のモデルの耐力分布を、Fig. 14には解析の結果得られた平均耐力1.95（壁倍率が新耐震で規定されているだけ備わった建物が1.0の耐力を保有すると仮定）を有する被害予測モデルから求めた被害率分布と観測被害率分布を比較して示す。

長戸・川瀬(2002b)では、参照情報として用いた建築学会近畿支部が実施し建築研究所が取りまとめた調査結果には木造家屋の年代区分が含まれていなかったため、建築年代別の平均耐力を求めることができなかった。その後、年代区分のある地方自治体を実施した被災度判定情報を元に、その全壊区分に対応する層間変形角を1/30 radとして年代区分を有する木造被害予測モデルを再構築した(吉田・他, 2004)。得られた年代区別の平均耐力をFig.15に示す。

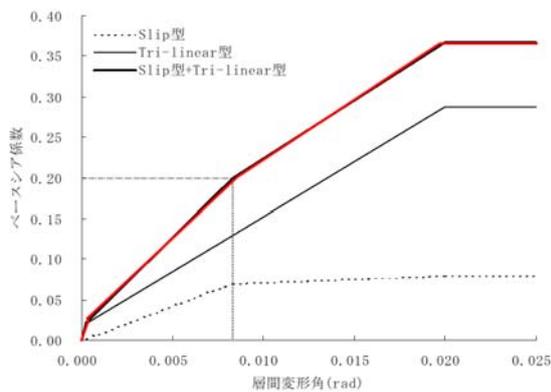


Fig. 12 Assumed nonlinear characteristics for a wooden house (after Nagato and Kawase, 2002b). The horizontal axis is the drift angle while the vertical axis is the base-shear coefficient, which is assumed to be 0.2 at the drift angle of 1/120 based on the current building code.

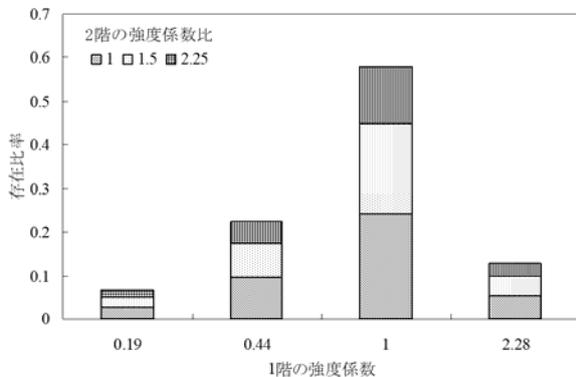


Fig. 13 Assumed yield coefficients for 1st and 2nd floors for a wooden house (after Nagato and Kawase, 2002b).

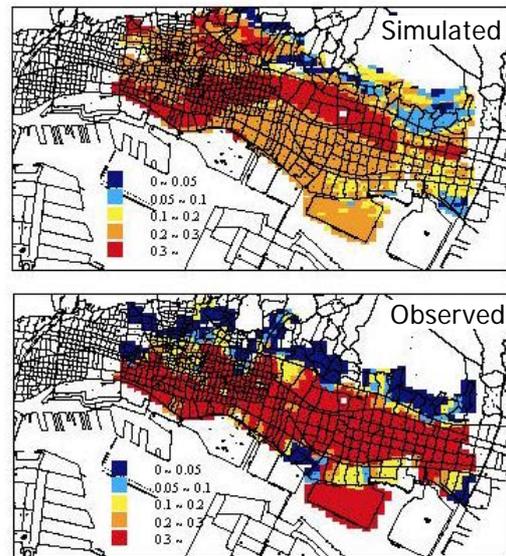


Fig. 14 Comparison of simulated and predicted damage ratio distributions of a wooden house in Higashinada-Ward, Kobe, during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake (after Nagato and Kawase, 2002b).

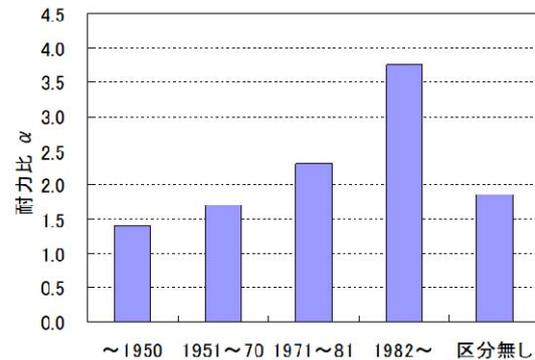


Fig. 15 Average yield strength ratios of wooden houses with different construction ages derived from the damage survey by local governments after the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake (after Yoshida et al., 2004).

3.4 表層地盤の非線形応答

我々は表層地盤の非線形応答についても定量的なシミュレーションを行い、その影響を明らかにしている。先にも述べた神戸市内の余震観測点のシミュレーション(川瀬・他, 1995b)では、Fig. 6に示した等価線形化法によるシミュレーションに加え、有効応力解析法による液状化を考慮した表層地盤応答解析も実施しており、液状化を考慮しても同様に大きな最大速度が得られることを明らかにしている。またポアホール観測記録のあったポートアイランドでは、他の専門家に先駆けて定量的なシミュレーション解析結果を提示し、適切なモデル化により液状化を含む地盤の非線形応答をよく再現できることを示すことができた(川瀬・他, 1995a)。

3.5 余談その1：翌日の余震観測

私は1995年1月17日の朝、NHKのニュースで放映された阪神だったか阪急だったか忘れたが客車が横転している映像を見てこれは直ちに余震観測に行かねばならないと決意して、入社と同時に山原浩大崎研究室研究部長（当時）に直談判して許可をもらい、入社後間もない松島信一研究員（当時、現防災研教授）とともにその足でレンタカー（忘れもしないスバルレガシィツーリングワゴン）を借りて、さらに東京駅前のレンタル会社で携帯電話を借りて、技研に行って地震計を2台荷台に積み込んで用賀から東名高速に乗り込んだ時にはもう夕方近かった。しかしこの即断即決が功を奏し、清水建設からは唯一我々だけが現地調査に入ることができた。何故なら我々が出発した直後に状況を把握した本社から「一切被害調査はまかりならん。顧客支援を最優先にせよ」との指令が出されたからである。それから応援に向かっている東京消防庁のキャラバンを追い抜きつつ彦根まできたら名神は封鎖されており、1号線は高速から降りてきた車で大渋滞だった。土地勘のあった私はすぐさま湖岸道路に出て、瀬田から京滋バイパスに入ろうと思ったが、京滋バイパスも閉鎖、仕方がないので石山からグルッと天ヶ瀬ダムを廻って京大防災研に着いたのは夜中の11時を回っていた。そこで司令塔となっていた入倉先生（当時教授）・松波先生（当時助教授）・岩田先生（当時助手）と打ち合わせて、松波先生率いる防災研部隊（超いかついランドクルーザー）に同行し、深江の阪神高速の転倒箇所を南北に挟んで海側と山側にそれぞれ2点ずつ余震観測点の設置を分担することになった。

翌朝朝5時に起きて、大阪からのアクセスは封鎖されているとのことだったので亀岡廻りで六甲山ドライブウェイを使って三宮経由で現地入りする計画だった。三宮に入るまでは比較的順調だった。ありがたいことに六甲山ドライブウェイは封鎖されておらず、おまけに係員もいなかったのがフリーパスだった。しかし中山手通りに入ったらピタリと動かなくなった。私が経験した中で間違いなく最悪の渋滞であった。ほとんどの車は避難する方々の車であった。そしてあちこちで救助活動はまだ続いていて、目の前で遺体が戸板で運ばれていった。ひっきりなしに救急車のサイレンが聞こえるがその姿を見ることはほとんどなかった。海寄りの、被害の甚大な地区を走行したかったが、当時海岸のコンビナートから可燃性のガスが漏れているとの通報があって、中山手通より南側の地区は封鎖されていた。私は設置を予定していた神戸商船大学から5 kmほどの地点で現地の状況を事前に把握する必要があると判断し、運転を松島研究員に任せて徒歩で大学に向かった。

その急ぎ足で向かう道すがら、一階も二階も完全に崩壊した木造家屋の瓦屋根の真上に学生服を着た中学生の男の子と小学生の女の子が二人並んで体育座りをしているのが目に入った。二人ともただ茫然と虚空を見つめていた。声を掛けるべきか、掛けるのであれば何といえよいか、しばらく考えたが何も思いつかなかった。少なくとも物理的な助けを必要としているようには見えなかった。大丈夫か？と聞けば大丈夫じゃなくても大丈夫だ、というだろう。観測に必要な機材以外に食料も毛布も何も持たずに出てきてしまった我々には被災者に差し伸べられるものは何もなかった。だから私は自分にこう言い聞かせるしかなかった。今の私のミッションは彼らに何か助けを申し出ることではない。我々のミッションは今ここでしか観測できない貴重な記録を採ることだ。記録を採って原因を解明して再発を防ぐことだ。一刻も早く設置しなければ余震を取り逃がしてしまうかもしれない。冷たいから無視するのではない。それが自分に課せられた義務だから仕方なく見て見ぬふりをするしかないのだ。しかし、いくらそう自分に言い聞かせても納得していないもう一人の自分がいた。何故ならそれは自己欺瞞だと知っていたから。この時の私はこの震災の原因を解明してその名を売ろうと功を焦っている自己中の若造に過ぎなかった。今の私ならきっと彼らに駆け寄って手を握って、大変だったねつらいねでも負けないでね頑張ろうね、と言うだろう。それは今の私があこの時の私よりも優しいからではない。今の私は知っているので、そうしなければ、たとえ後でどれだけ言い訳しようとも、一生そうしなかったことを後悔するというのを。

1時間ほどして大学について大方の建物が健全なことを確認して現地の責任者に設置許可をいただき、また1時間かけて車に戻ったとき、車はわずか200mほどしか動いていなかった。一瞬迷ったが最早決断するしかなかった。このペースでは絶対に今日中に大学にたどり着けないことは明らかだった。それで中山手通を離れて封鎖されていた海側の地区に入った。どこにも漏洩したというガスの痕跡などはなかった。ただ被害は甚大で低層RC造建物が転がって道路を塞いでいた。左右の電信柱が根元からポッキリと折れて十文字になっていた。そのたびに通る道を変えて人子一人いない無人の廃墟を商船大学までジグザグに進んだ。時間にして20分もかかったであろうか。そうやってやっとの思いで大学にたどり着き、その中破した講堂のトイレに地震計を無事設置した時点でもう外は真っ暗であった。

そんなにまでして観測した結果は川瀬・他(1995b)とIwata et al. (1996)、Pitarka et al. (1996)に結実した。

しかし振り返ってみれば、それはただそれだけのことでしかない。確かに原因の解明はできた。しかし、あの日、あの二人を見捨てた時に二人に秘かに誓ったことは未だ全く達成されてはいない。

3.6 余談その2：危うく首になりかかった話

この震災の帯の解明については一部の人しか知らない余談がある。我々はエッジ効果で震災の帯ができたという話を1995年の秋の地震学会大会で発表しようとしていた。それで予稿集を見た朝日新聞科学部の記者から取材の依頼があった。それまで清水建設では今村社長（当時）の方針で、兵庫県南部地震に関しては対外的に一切のコメントを発表しておらず、貝のように口を閉ざしていた。それでいささか躊躇したが、これは学会発表への取材であって清水建設への取材ではない、学会発表の許可は得ているのでそれについて取材されることは私の責任ではない、と勝手に理屈を作って取材を受けた。そしてたまたまそれが地震学会大会前日の夕刊の一面トップに掲載してしまった。今村社長は東京に戻る新幹線の中でその新聞を手にして驚愕した。取材を許可していないのにこいつは何を勝手に発表しているのだと。それで山原浩大崎研究室部長にその場で電話をされた。電話に出た山原部長は、それは地震学会に発表する成果を取材されたものでこちらから記事にしてくれと頼んだものではありません、と社長に説明をして事なきを得た。私が前日に山原部長にはこのことをお伝えしておいた方がいいと思って取材は止めようがなかったことを説明しておいたからである。もしもそれをしていなかったら社長から雷が落ちて責任を取らされていたかも知れなかった。幸いにして今村社長はこれをきっかけに清水建設として対外的にコメントを出すことを決断されたと聞いている。

4. 挫折の20年：予測強震動の設計への実装

ここからは少し後ろ向きのお話になる。誤解のないように申し上げておくが挫折したのは研究そのものではない。震災から3年経って上記の「震災の帯」の生成原因の解明があらかた片付きつつあった頃、私は現行の強度に頼った耐震設計＝剛構造設計では阪神・淡路大震災の再来を防ぐことはできないと考え、純粋に耐震工学上の観点から建築基準法の改正は不可避だと考えるに至っていた。誤解されている向きもあるようなので、ここで明確に示しておきたいが、壊れたのは旧耐震建物だけで新耐震建物（1981年以降の耐震設計基準の改正後に建てられた建物のこと）は大丈夫だったかのように（専ら既得権益を守ることを目的としている方々によって）喧伝され

ているが、実際はそうではない。建築学会の報告書はもとより、長戸・川瀬(2001; 2002a)や勅使河原・他(1998)にも示されているように、新耐震建物も多数被災したのである。また新耐震設計法で導入された変形性能にも配慮された保有耐力設計法が有効に機能して新耐震建物は守られたと根拠なく信じている研究者・実務者も多いが、実際には保有耐力設計を要求されそれを満たしていた新耐震建物の割合は全体の10%以下と推測され、多くの新耐震建物は1981年改正時の様々な仕様規定の変更により守られたのである。これはつまり剛構造設計のまま機能したということの意味している。

その何が問題かという点、Fig.12に示したように、震災の帯の中の地震動を受けた構造物は、被害の発生に向かう過程の中で、その大きな入力加速度によって生じる層せん断力によっていずれは強度の限界を超え、非線形化するわけであるから、変形量の小さい（通常1/100）段階での性能である強度だけを大きくする剛構造設計では、やや短周期パルスの震源近傍地震動に対して最終的に持ちこたえられるのか大破するのかについて、何も制御できていないとは言えず、経験的に「まあこの強度を与えておけば大概は大丈夫だろう」と判断するしかないということである。Fig. 11でいうと、右上がりの等速度線が重要で、保有耐力として建物が耐えられる最大速度が入力の最大速度以上あれば応答は限界以下に抑えることができるわけであるが、前述のように現状90%の建物は許容応力度設計で設計されており、その点について何も担保されておらず、強度、すなわち耐えられる等加速度ライン（水平線）だけが守られているのである。

というわけで、1998年の時点で問題は既に明確となっており、私の研究方針も確定していた。しかし建設会社に居ながら建築基準法に欠陥ありと声高に主張することは自己矛盾だった。何故なら建設会社は現行の基準法を遵守した建物を作って録を食んでいるからで、その基準法に問題があるとわかっているのにそれを守っただけの構造物を顧客に売っているのでは二重の裏切り行為である。

そんな折、1998年4月に急遽九州大学から助教授として赴任しないかというお誘いを受けた。明日までに返事をしろ、と言われて待遇も何も一切聞かず、家族の反対も押し切って赴任することにした。言論の自由が保障されているアカデミーの世界から「現行の剛構造設計に未来なし」故に「場所と震源を特定した予測強震動に基づく動的設計を全ての建物に」をスローガンに、阪神・淡路大震災の再来を防ぐ新しいパラダイムの確立に向けて世間を説得したかったのである。その時の私は愚かと言った方がいい

いほどナイーブだった。あるいは傲慢だったと言ってもいい。「真実を言い続けていれば必ずいつかはそれを人々は受け入れてくれるはずだ」と根拠なく信じていたのだ。その甘い見通しが結局徒労に終わった20年間の研究成果の普及・展開活動に結実した。

4.1 分離手法と強震動予測手法の開発

九大に1998年10月に赴任して最初に取り組んだのは1996年以降の全国に敷設された強震観測ネットワークによる強震記録を活用した統計的グリーン関数による強震動予測手法の開発であった。その基本は観測スペクトル特性を震源・伝播経路・サイトの3特性に分離するいわゆる一般化スペクトル分離解析 (Generalized Spectral Inversion Technique, GIT) である。着任した時既にM1だった伊藤茂郎君は非常に優秀で、伊藤・川瀬 (2001) と伊藤・他 (2001) の2編の論文をわずか1年半の指導で修士論文の成果として書き上げてくれた。彼の研究の流れを受けてその後中道・川瀬 (2002) においてはアレー微動観測で基準地点での速度構造を求めそれを重力探査結果と組み合わせる三次元速度構造を構築、ハイブリッド法で警固断層による福岡市内の予測地震動を求め、それを川瀬・他 (2003) で被害予測モデルに適用し震源域での被害率を推定した。同じように川瀬・増田 (2004) では八代平野で微動計測し地下構造を同定して日奈久断層による八代平野の地震動予測と被害予測を行った。この2つの予測の対象震源は、想定破壊セグメントとしては都市に最も近い既知の活断層上に想定したので完全に同じだったわけではないが、2005年福岡県西方沖地震と2016年熊本地震としてその後発生した。

分離手法に関しては第二世代になる松尾秀典君が極めて優秀で、2002年に卒論内容で松尾・川瀬(2002)の論文を仕上げると、修論ではYMGH01を基準点にしたK-NETとKiK-netを使った当時としてはおそらく最大規模のスペクトル分離解析を行い、それを素材に川瀬・松尾(2004a; 2004b)では現在でも通用する震源スペクトル・伝播経路特性、およびサイト特性に関する多くの有用な知見を提供した。彼の分離解析コードは、その後私が京大異動後に川瀬研究室に来てくれた仲野健一君に引き継がれ、仲野・他(2014, 2015)の2大作として結実した。その後も仲野君とは共同研究を継続し、仲野・他(2019)や仲野・川瀬(2021)のような成果を上げている。

分離解析のボトムラインとして、基準観測点として地震基盤を選択し、ターゲットとしてS波部分のみを切り出してそのフーリエ・スペクトルを用い、伝播経路特性として地域性を考慮すれば、予測のばらつきは1.5倍/1.5分の1にまで減らせることを示せた

ことは大きな成果である。通常、全継続時間を用いて、工学的基盤を基準にし、伝播経路の地域性を考慮せずに応答スペクトルを予測すると2.5倍/2.5分の1以下にばらつきを減らすことは困難である。

4.2 建築学会への展開 (あるいは展開未遂)

建築の世界では超高層建物の設計に動的応答解析手法が当初から導入されてきており、若い研究者には信じられないことであろうが、米国で1940年に観測されたEl Centro波と1952年に観測されたTaft波が、最大速度振幅を50cm/sに規準化されたうえで、兵庫県南部地震以降も設計用の標準波として使用されていた (そして今も使用されている)。その際、地域固有の地震動特性を反映させるという意味で地域波 (今はサイト波) も設計に用いるべしという指導があり、関東では東京205などの名称の小規模地震の波形などが用いられたりした時期もある。しかし曲がりなりにも民間の通常の構造物に対して地震波形を用いた設計が行われていたわけで、動的解析への道はそこを突破口にするしかないと思っていた。それで私の建築学会での主な活動の場であった地盤震動小委員会の幹事として、2002年から地盤震動シンポジウムのテーマに「地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか」という副題を付けて5年間継続的に取り組むことを提案し、2002年からその企画を組んだ。2003年に同小委員会の主査になってから4年間その企画を続け、2006年の地盤震動シンポジウムでこれを総括した。是非2003年の主旨説明 (川瀬, 2003) と2006年の主旨説明 (川瀬, 2006) を読み比べていただきたい。この周到な準備を経て多くの方々のご協力により我々は満を持して「設計用入力地震動作成指針」を取りまとめ、これを世に出そうとした。2008年のことである。出版の承認に必要なすべての手続きは通常通りの手順で全部完了していた。しかしいざこれを指針として出版しようとしたところ、El Centro波・Taft波でもって長年超高層建物の耐震設計を監修してきた大御所からの理不尽な横槍が入って、結局この指針の原稿は2009年3月になって「最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法」という、設計の「せ」の字もない意味のわからないタイトルの一般専門書籍に変更することを強制され、当初の企画の意図が捻じ曲げられた形で出版された。そのような恵まれない出自にも拘わらず幸いにしてこの本は (極めて珍しいことに) 数年前に初版が売り切れて第二版が印刷されており、長きに渡り多くの方々に活用されているようで大変うれしく思っている。しかしこの事件のおかげで建築学会の委員会には言論の自由がないことが明らかになり、それ以上人生を無駄遣いせず済んだことは幸いである。

4.3 地震本部：強震動予測地図

1995年兵庫県南部地震以降の日本の強震動地震学の発展の社会への出口として、地震調査研究推進本部が全国を対象に展開している強震動予測地図の作成に向けた研究・開発と地図の発行は、社会への貢献として非常に高く評価されるべきものであり、その基盤となっている防災科技研の強震観測網の整備とデータ公開は世界の研究者にとっても宝の山となっていて、強震動地震学の発展に計り知れない寄与と国際貢献を果たしてきた。しかし、上記の建築学会の場合と同じように、強震動予測地図をつくってシナリオ型強震動予測で予測波形を誰でも自由に使えるようにこれを配布してきている（J-SHIS：<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>）にもかかわらず、工学者は頑としてその利用を拒絶し続けている。そして今日もまたEl Centro波・Taft波でもって超高層RC造住宅が設計され、建てられているのである。

3年ほど前に米国地震学会のwebsiteの記事にするというので(<https://www.seismosoc.org/news/at-work-hiroshi-kawase/>)記者にインタビューされたことがある。記者は「日本の工学と理学の間の連携は米国よりもうまくいっているんでしょう？だって被害が少ないもの。」と言うので、「いやいや、そんなことはありません。日本の建物が丈夫なのは過剰なほど丈夫にしておかないと実際に被害が出るから。経験的に強くしているだけで学理的発見を工学屋が取り入れてくれているからというわけでは全くないのです。」と言ったら驚いていた。記事ではその辺りは上手く表現されているが。

4.4 2011年東北地方太平洋沖地震

2011年の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）では、津波被害は非常に顕著であったが、地震動による被害、いわゆる震害は極めて軽微であった。これについては川瀬・他(2011)に示したように、Fig.12の等価振動数—PGAダイアグラムで説明できる。つまるところ、東北地方太平洋沖地震ではこの図の危険領域に入る速度も加速度も大きいやや短周期パルスを含んだ地震動は見当たらなかったのである。それについては兵庫県南部地震との比較として川瀬(2013b)にもまとめてあるので参照されたい。このように東北地方太平洋沖地震は地震災害管理学的な意味では挫折の地震ではなかった。しかし「東北地方は雪が多いので耐震性が高いから被害が少なかった」などという言説を未だに耳にすることがあるのには罪悪感を感じざるを得ない。我々の努力が未だ不十分であることを示しているからである。

4.5 2016年熊本地震

2016年熊本地震では熊本県益城町の町役場を中心にしてその南側に幅100m以下、長さ1km以下の小さな震災の帯が形成された。その生成要因は兵庫県南部地震のそれとは異なっている。しかし被害の甚大だった地域において「やや短周期パルス」が卓越した地震動が入力していたことは事実であり、我々は微動調査で得た地下構造の非線形応答特性と上述の木造建物被害予測モデルを用いてその被害分布とレベルを再現している(Sun et al., 2021)。従って、地表面に断層運動に伴う地変が存在していたことは事実かもしれないが、それが益城町の被害の集中に寄与していたとは考えられない。

この熊本地震では新耐震の建物に被害が出て、兵庫県南部地震でさえ作られなかった検討会が国交省の元に作られて基準法の改定の必要性について検討したが、当然予想されたように、結論は改定の必要なしであった。それは新耐震の被災建物棟数が限られていたことが大きいと思われるが、あれが神戸市規模の都市直下であれば母数が100倍くらいなので新耐震の全壊棟数も100倍=数千棟は出たはずで、それでもまた「新耐震はOK」という結論を出したのであろうか。

4.6 壁柱工法

上述の構造物に大変形をもたらす「やや短周期パルス」に対応できる新しい耐震補強工法として、間伐材の角柱を9本並べて半間の耐震壁にして構造物を倒壊から守る「吸震工法 壁柱」を2009年から大阪府木材連合会と共同で開発した(川瀬・他, 2009)。Photo 3には前面と背面に半間の壁柱補強壁を両側に入れた振動実験用の1層6畳間の試験体例を示す。

この写真のような振動台を用いた実大の振動実験を繰り返す、その大きな変形性能を確認し、認証機



Photo 3 A specimen for a shaking table test of a one-room wooden house model with “Wall-of-Columns” reinforcements.

関（日本建築総合試験所）に依頼して壁倍率の認定も取り、さらに2階建の実大構造物を防災研の敷地に建設してその引き倒し実験も行った(Kawase et al., 2017). この工法は1室の四隅に入れることによりシェルターとしても機能し、従来型の「新耐震並みに全体を剛にする」耐震補強工法に比較して1/2~1/3の工費で補強することができる (<http://www.mokuzai.or.jp/2-enlightenment-kabehashira.html>). しかし、ここでも既存抵抗勢力の見えない壁は極めて強固で、役所に補助金支給をお願いしても要件のハードルを次から次へと繰り出し、それをクリアするために多大な時間と労力と費用を掛けたものの、結局工法が完成してから計60件ほどの施工事例を得ることはできなかった. つまるところより儲けの大きい既存工法を普及することで共存共栄している世界に新興勢力が低価格を武器に乱入したところで、多勢に無勢でこの国では太刀打ちできないということである.

5. 最近の3年：見えてきた新しい地平

以上、3年前に定員ポジションから早期退職して寄附講座の特定教授に異動するまでの九州大学での10年間と京大防災研での10年間の活動経緯はいささか暗い話になってしまったが、2018年から同じ防災研社会防災研究部門内に作っていただいた寄附講座「地震リスク評価高度化（阪神コンサツタンツ）研究分野」に移ってからは、それまでの桎梏を離れて、より学術的な観点から、熊本地震をはじめとする過去の大地震に謙虚に学び、新しい強震動予測・地震リスク評価の枠組みを作るべく、動き出している. 以下ではその最新成果の一端を紹介したい.

5.1 動的破壊シミュレーション

断層破壊は動的な現象であり、我々がこれまでの強震動予測で用いてきたように、断層面上の滑り量と滑り速度を直接規定する運動学的モデルでは、断層面上で時々刻々変化する応力状態を常に釣り合った状態で表現できているわけではない. 従って運動学的断層モデルが確立したのとほとんど時を同じくして動的破壊モデルは提案されたのであるが、これまでの動的破壊モデルは断層面上の不均一性を十分に反映したものではなかった. その中でPitarka et al. (2009)は応力降下量分布に運動学的震源インバージョン結果から抽出した統計的性質を導入し、複雑な空間分布を有する応力降下量が断層の動的破壊過程に与える影響について検討した. 我々はそのPitarka博士らの提案したランダム変動モデルに、さらに我が国で考案され妥当性が検証されてきた矩形のアス

ペリティあるいは強震動生成域(SMGA)を断層面上に複数個配置する、いわゆる特性化震源モデル(入倉, 2004)の考えを断層面上の応力降下量分布に導入し、その影響をパラメトリック解析により明らかにした. これはPitarka博士との共同研究である.

現時点では熊本地震クラスの想定断層による動的破壊シミュレーションまでしか実施できていないが、現時点で我々が見出した最も重要な発見は、応力降下量がほぼ一様に大きいアスペリティあるいはSMGAを置いて破壊させると、アスペリティ内および周辺の滑り量の空間的変動は比較的小さいのに対して、ピーク滑り速度の変動は非常に大きいことである. Fig. 16には一例として長さ25 km, 幅15 kmの断層面上に2つのアスペリティをセットした事例(破壊後の滑り量分布と仮定した応力降下量分布)を示したが、滑り量は確かにアスペリティで大きくなってはいるが周辺はなだらかな分布をしており、震源インバージョン結果のようなくっきりとした滑り量分布とはなっていない. 破線で示したアスペリティ中央を通る断層を縦断する直線上の滑り量分布(左)とピーク滑り速度分布(右)をFig. 17に示すが、滑り量分布が滑らかな形状をしているのに対し、ピーク滑り速度分布は破壊進行方向に急激に増大する強い空間変動特性を示しており、これが震源近傍で観測されている「やや短周期パルス」の原因である可能性が指摘できる.

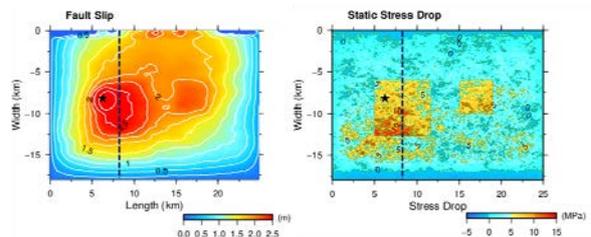


Fig. 16 Slip distribution as a result of dynamic rupture simulation on the left with two distinctive asperities on the right (after Manpo et al., 2018). Dark blue broken lines are the measurement line for Fig.17.

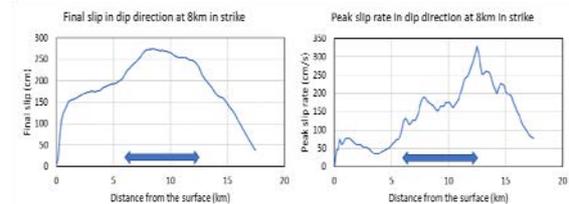


Fig. 17 The slip distribution as a result of dynamic rupture simulation along the vertical line shown in Fig.16 on the left and the peak slip velocity distribution along the same line (after Manpo et al., 2018). Arrows at the bottom of each panel show the location of the asperity.

5.2 バックプロジェクション解析

これはギリシャ・アテネ観測所のEvangelidis博士との共同研究である。バックプロジェクション解析とは、ローカット・フィルターを作用させた高振動数域のみの観測波形を小パケットに分解し、それを伝播時間を考慮して色々な場所で重合させ、最も大きな振幅を得た場所をその時刻に対応した高振動数波動を放出した場所（ブライツ・スポット）であるとする手法である。通常のバックプロジェクション解析では各観測地震波の振幅情報は使えないので、重合前に正規化する必要がある。

我々はスペクトル・インバージョンで求めた熊本地震の震源スペクトルと各地点の位相情報から、各地点におけるサイトおよび伝播経路特性を補正した震源波を求め、それを正規化して求めたブライツ・スポット位置に重合することにより、各ブライツ・スポット位置における速度エネルギー放出量を求めた（川瀬・他, 2021）。Fig. 18に得られたブライツ・スポットの平均速度パワーの分布を示す。横軸は経度で左が西側に対応する。この図から、発震点より西側の日奈久セグメントの発震点近傍のエネルギー放出量が多いこと、東側の布田川セグメントでは東に行くほど小さくなっていることがわかる。これを深さ方向で見ると、日奈久断層側のエネルギー放出量が多いブライツ・スポットは浅い場所にありながら大きな放出量を示しているが、東側のブライツ・スポットでは明瞭な深さ依存性を示した。これは東へ行くほどブライツ・スポットが浅くなっていることを意味している。実際、布田川断層中央部の地表面に断層変位が20kmに渡って表出した区間では浅い部分にはブライツ・スポットは存在せず、その区間に結像しているどのブライツ・スポットもその深さは5km以上と深い。

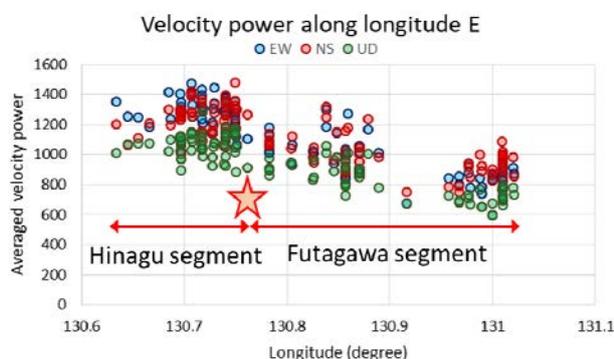


Fig. 18 The averaged velocity power distribution along the longitude direction at the bright spots based on the back-projection analysis.

5.3 HV比の新しい使い道1：速度構造逆算

地表面の観測地動の水平と上下のスペクトル比（horizontal to vertical spectral ratio, HVSR）に関し、当初鉄道総研（当時）の中村豊博士がNakamura (1989) で提案したのは、このHVSRはS波の増幅率に等しいという仮説である。この場合、広い周波数にわたって、地震基盤で水平と上下の比が1であること、および地震基盤から地表面までの上下動の応答で増幅は無視できるほど小さいことが必要である。その後この地動のHVSRを求める方法が広く普及していく中で「中村の方法」としてHVSRを求めること自体を指す研究者が多くなっていくが、Nakamura (2019) が主張するように、元々の「中村の方法」とはHVSRを計算すること自体を指すものではなく、それがS波の増幅率に等しいことを主張したものである。よってその仮説を採用している場合にはそれを「中村の方法」ではなく「中村の仮説」と呼ぶべきである。

ともあれ、中村の提案は当初は微動（地盤の常時生じている微小な揺れ）に対するものであったが、地震動についても言及されており、両者のHVSRについて数多くの事例研究が実施・報告された。当初の中村の記述が曖昧だったためその後の事例研究でも地震動のHVSRと微動のHVSRを峻別しない事例が多く、それが不用な混乱を招いた。それはともかく、HVSRは1点の地表面の観測記録から求められるので、もしもそれが本当にS波増幅率に等しいのであれば便利なことこの上ない。そのためNakamura (1989)以降、多くの研究者がその有効性の証明あるいは信頼性の無さの証明に取り組んできた。しかし有効性があるという論文の方が多かったものの、両者是对応しないというネガティブな報告も多かった。そもそもHVSRに対する理論解が存在しなかったためにこの論争は20年以上に渡り決着がつかなかった。

2011年にSánchez-Sesma et al. (2011)が微動のHVSRの理論解を発表、続いてKawase et al. (2011)が地震動のHVSRの理論解を提示して長年の論争に終止符を打った。HVSRはS波の増幅率に似てはいるが一致はしていないこと、微動と地震動のHVSRも似てはいるが一致はしていないこと、の2大事実が理論的に示されたのである。特に地震動のHVSRは地震基盤からの水平増幅率を上下増幅率で割り、地震基盤での水平入射波に対する上下入射波の比率を掛けたものになることが示された。

この地震動のHVSRを用いた地震基盤から上の地下構造の逆算は、以下に示すように、厳密にはここ最近の3年間に始めたものではないが、ここに来て幅広い応用事例が次々と積み上げられつつあるので敢えてここで取り上げておきたい。Kawase et al. (2011)のS波部分の理論解を用いた速度構造のインバージョン

ョンはDucellier et al. (2013)に始まるが、ハイブリッドヒューリスティック探索を用いたより強力なインバージョン手法が長嶋史明特定助教により提案され(Nagashima et al., 2014), その後吹原・他(2015)や森・他(2016), 萬保・他(2018)においてこの長嶋の方法が活用されてその有効性が検証されてきた。さらに長嶋・他(2018)では地表・地中比との同時インバージョンで地中観測点から上の層の平均減衰率も同時に求める方法を提示している。また長嶋・川瀬(2018)では拡散波動場理論に基づいて地表での観測上下動から地震基盤での水平動を求める方法を提案しており、それは熊本地震での益城町における本震シミュレーションのための地震基盤入射波を求める際にも用いられた(Sun et al., 2020)。その他にも、現在進行形のプロジェクトとして、カリフォルニア南部のUSGS観測点網への適用研究(Yong et al., 2021)やスイスの強震観測網への適用研究(Chiappa et al., 2018)が進んでいる。また長嶋・川瀬(2019)では、HVSРのインバージョンでS波の方がP波よりも拘束力が強いためにS波速度の従属変数としてP波速度を設定することが多く、そのためK-NET・KiK-netのボーリング調査で得られた地盤情報を分析して水の飽和状態を考慮したS波とP波の変換式を提案している。

この拡散波動場コンセプトに基づく地盤速度構造推定法が優れているのは、必ず地震基盤からの増幅特性あるいは速度構造が得られるという点にあり、それによって参照とする基盤のS波速度は3~3.5 km/sでどのサイトも一定となる。またスペクトルのピーク振動数だけでなくその対象振動数範囲の振幅情報も拘束条件として用いているので、いわゆる速度と層厚のトレードオフが問題となることが少ない(全く無いわけではない)。Fig. 19にはMYG006を例として、14層を用いた同定で得られた構造によるHVSРを基準にして、下層から順に2層ずつ取り除いていった場合のHVSРを比較して示す。灰色破線が観測のHVSРである。この図から、高振動数のピーク振動数については確かに浅部構造のみでも対応するピークが見出されているが、浅部構造のみの振幅特性は地震基盤から上の全層の振幅特性とは明らかに異なっており、高振動数域に限って浅部構造だけをHVSРから同定しようとしても正しい構造が得られないことがわかる。

5.4 HV比の新しい使い道2 : VACF補正法

微動のHVSРの場合、それは地表面を水平と上下に加振した場合のグリーン関数の虚部の比となるが、地震動のHVSРの場合、鉛直下方より入射する水平動の増幅特性を上下動の増幅特性で割ったものとなる(加えて地震基盤での上下水平比が一定値の係数と

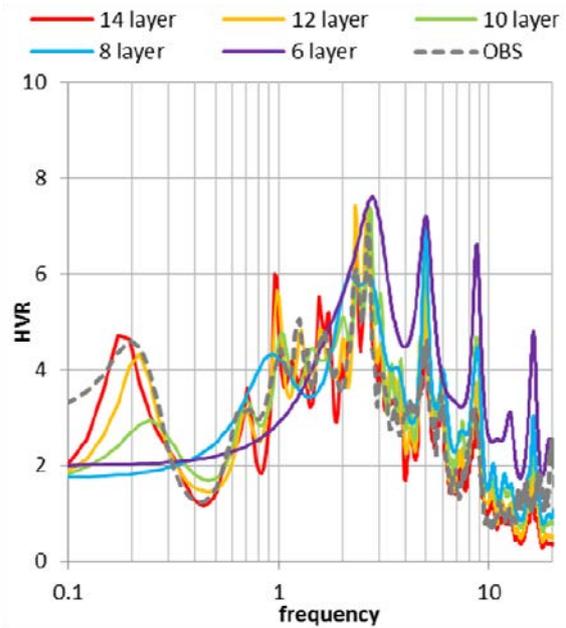


Fig. 19 Comparison of 1D theoretical earthquake HVSРs for the velocity model identified at MYG006 with different numbers of layers from the top as a parametric study. A broken line shows the observed HVSР. The original inverted structure has 14 layers down to the seismological bedrock (after Kawase et al., 2018).

して掛る)。そのことから、上下動の増幅特性が分かればそれをHVSРに掛けることで水平動の増幅特性が得られることがわかる。

仲野・他(2019)がGITで分離した、地震基盤上での入射水平動に対する地表の上下動の増幅特性を求めると、驚くほど地点間の違いが少なかった。そこで我々はM>4.5の観測地震数が10個以上あった1,678地点について平均上下動増幅特性を求め、これをvertical amplification correction function VACFと名付け(Fig. 20), それをHVSРに掛けることによって第一次近似として上下動の増幅を補正し等価な水平増幅率を得るという、いわば「中村の方法」の改良版を提案した(Ito et al., 2020)。適用事例をFig. 21に示す。

実はこの地震動のHVSРに対するVACF補正法を提案する前に、我々は次節で示す微動のHVSРを補正して得られる擬似地震動HVSРを用いたVACF補正法を提案している(Kawase et al., 2018)。地震動のHVSРを用いたVACF補正法の方がストレートに思いつくはずなのに報告の順序が入れ替わったのは、当初は地震動のHVSРに上下動増幅率を補正することによって水平動の増幅特性が得られるのはある意味自明であって、地盤増幅率の推定方法としては邪道だという思いがあったからである。微動のHVSРを用いるのであればそれは観測値としては地震動のものではなく、その観測も簡便で実用性が高い。

しかしKawase et al. (2018)を読んだChuanbin Zhu博士から情報提供の依頼があり、仲野・他(2019)の上下動増幅率を提供したところ、彼らはHVSRから得た補正増幅率を地表地中比と比較するというので(Zhu et al., 2020), それは適切ではないと思い、伊藤恵理研究員に依頼して分離した地表での水平増幅率がVACF補正法によって再現できることを改めて示してもらったというわけである。このVACF法はHVSRの非線形性を評価したWang et al. (2021)でも利用されている。

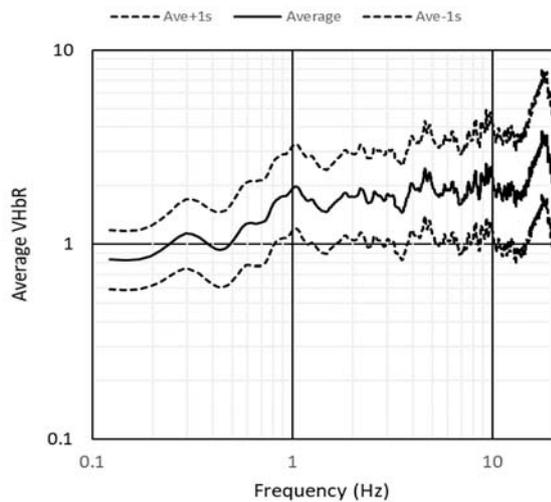


Fig. 20 The average and +/- one standard deviation of VACF without any category for 1,678 sites with 10 or more observed events. It is flat with 1.0 until 0.5 Hz, increases to 2.0 at 1 Hz and keep 2.0 to 2.5 until 15 Hz (after Ito et al., 2021).

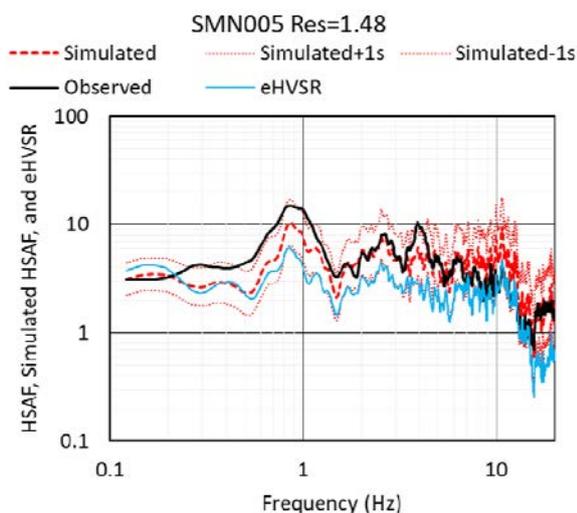


Fig. 21 Application of the VACF correction method to SMN005. A black line shows observed earthquake horizontal site amplification factor (HSAF) from GIT, while a red broken line shows simulated HSAF by the VACF method from earthquake HVSR shown in blue.

5.5 HV比の新しい使い道3 : EMR補正法

前節で述べたように、Sánchez-Sesma et al. (2011)の微動HVSRの理論解とKawase et al. (2011)の地震動HVSRの理論解が式上も数値上も異なることから、微動と地震動のHVSRは同じでないことが明らかとなった。微動HVSRの理論解を用いたインバージョンも提案され、高速のグリーン関数虚部の計算方法が導入されて実用に供されているが(García-Jerez, 2016), 微動HVSRのインバージョンでは表面波が主体で一次ピーク振動数以降の変動が地震動ほど明瞭でなく、浅部の構造同定には適しているが地震基盤までの構造同定には拘束力が不足するという課題がある。

そこで我々は微動をK-NET・KiK-net観測点で計測し、両者の比を経験的に得ることによりこれを補正することを考え、これをearthquake-to-microtremor ratio (EMR)と名付け、EMRによって微動HVSRを擬似地震動HVSRに変換する方法を提案した。森・他(2016)がその最初の論文である。彼らは100地点の結果を整理し、地震動HVSRをターゲットに用いたインバージョン結果と同等の速度構造がEMR法を用いて変換した擬似地震動HVSRをターゲットに用いたインバージョンで得られることを明らかにした。このEMR補正法は非常に有用で、益城町の全体の地盤応答シミュレーションのための地下構造推定でも利用されており(Sun et al., 2020), またESG6で行われたブラインド・プレディクションでも用いられ、よい結果を得ている(Nagashima et al., 2021). Fig. 22には観測地震動HVSR(obs)とそれをターゲットにした理論HVSR(EHVR), および擬似地震動HVSRをターゲットにした理論HVSR(pEHVR)を比較して示す。これら3者はよく一致している。ここでpreferとはボーリングデータに基づく推奨速度構造の理論HVSRである。

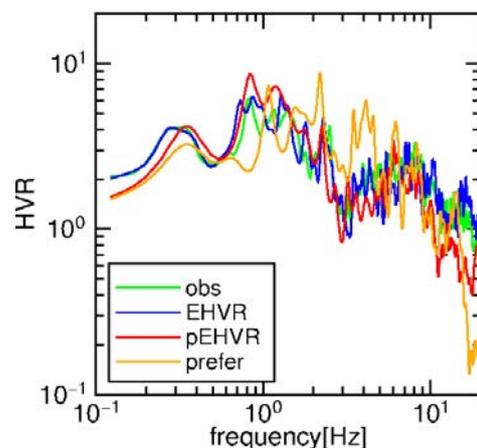


Fig. 22 Comparison of theoretical HVSRs by the inverted structures from observed HVSR (blue) and pseudo HVSR from microtremors (red), together with the observed HVSR (green). Orange is the theoretical HVSR by the preferred model provided by the organizers.

さらに、このEMR法のより広い応用を目指して、Ito et al. (2021)では、フランスのグルノーブル盆地にこれを適用し、我が国の堆積盆地と同様にHVSrの0.3Hz近辺に大きな一次ピークが存在する構造でありながら高振動数域の振幅レベルが日本のそれに比べてずっと小さいことから、グルノーブル盆地専用のEMR、すなわちEMR_Gを提案し、それをを用いてグルノーブル盆地の広域の速度構造を得た。Ito et al. (2021)の最も大きな成果は、それまでグルノーブル盆地では地質境界で直ちに地震基盤が現れるものと特に拘束力のある調査結果によらず仮定されてきたが、地震動HVSrおよび擬似地震動HVSrを用いた検討により、地質境界の下にはさらに速度が漸増する深部層構造があり、地質境界はS波速度1.3km/s以上の層に対応すること、地震基盤は地質境界の2.5倍の深度に存在することを明らかにしたことである。Fig. 23にはグルノーブル盆地を横断する断面上で擬似地震動HVSrから逆算した速度構造断面を示す。

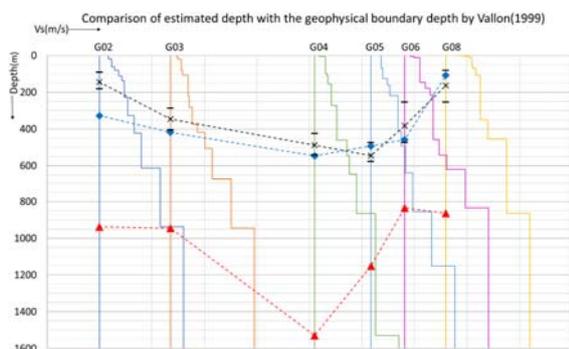


Fig. 23 A sectional view of the inverted velocity structures along a perpendicular line of the northeastern part of the Grenoble Basin. Black crosses with dotted lines are those of the geological boundary from gravity measurements.

6. おわりに

以上、駆け足で私の41年間ちょっとした歴史の一端を紹介させていただいた。こうして読み返してみると、今回カバーされていない分野や成果がたくさんあって折角、一緒に研究をし、よい論文を書いて、それを世に出してくださった方々には、今回のこの寄稿ではカバーできなかったことを大変申し訳なく思う。ましてや、フィールドに行き、額に汗して観測をして、貴重なデータを得たにも拘わらず、私の怠慢で何ら成果らしい成果にまとめ上げられず、朽ち果てた死骸となって累々と溜まっていったデータ

達の無念さを思うと忸怩たるものがある。特に小田原で100台近い微動計を全国から集めて基盤の目のアレー微動観測をした成果をモノにできなかったことは慚愧の念に堪えない。工藤一嘉先生を始めとする多くのご協力いただいた皆様には大変申し訳なかったと伏してご容赦をお願いしたい。

私は若いころは、今にして思えば噴飯ものの生意気なクソガキで、自分は正しいことしか言っていないと確信していて、なので言いたいことを言ってきたように思う。そのツケは後年ずっと払わされ続けているのであるが、じゃあ他に方法はあったのかと言われるれば、漱石ではないがたとえ損はするとわかっていてもそうするしかなかったのだと今は思っている。こうして定年の歳になって振り返ってもしも若い人にアドバイスできることがあるとすれば、たぶん人生を楽しむためには、やりたいことをやることで自分のやる気を持続して、何事にも前向きに取り組んで困難な事態自体を楽しみ、自分の疑問を大切にその解決に努力している自分を信頼し続けることだ、と大きな声で申し上げたい。成功を祈る。

謝 辞

本稿は、専ら著者が中心となって、あるいは協力して行ってきた研究をレビューしたものではあるが著者の個人的見解が含まれている。本稿に引用させていただいた研究および引用できなかった研究の共同研究者および研究室の学生メンバーの方々に深く感謝の意を表す。彼らの協力なしには栄光も挫折も味わうことはできなかった。特に準備の研究フェーズでは山原浩大崎研究室研究部長（当時）、横田治彦清水建設技研主席研究員（当時）、中井正一千葉大名誉教授、吉田一博大崎総合研究所主席研究員、佐藤俊明大崎総合研究所社長、佐藤智美清水建設技研フェローには大変お世話になった。また1995年以降の研究フェーズでは松島信一・岩田知孝両防災研教授に様々な面で大変お世話になった。現在の研究室のメンバーである長嶋史明特定助教・伊藤恵理特定研究員・孫ジカイ特定研究員、および特別研究員の仲野健一博士（安藤ハザマ技研）には最近の成果の積み上げに大いに貢献いただいている。いつも励ましのお言葉をいただいている入倉孝次郎京大名誉教授にも篤く感謝の意を表したい。さらに阪神コンサルタンツ殿からの篤志により寄附講座が維持できていることに深く感謝したい。最後にここに紹介した研究成果には防災科学技術研究所のK-NET・KiK-net、気象庁の震度計ネットワークの強震観測情報が大きく貢献している。記して感謝したい。

参考文献

- 伊藤茂郎・川瀬博 (2001) : 統計的グリーン関数法による強震動予測法の検証と仮想福岡地震への適用, 日本建築学会構造系論文集, 540, 57-64.
- 伊藤茂郎・久原寛之・川瀬博 (2001) : K-netデータから抽出した地震動の統計的性質とそれを用いた波形合成用グリーン関数の生成, 日本建築学会構造系論文集, 543, 37-44.
- 入倉孝次郎 (2004) : 強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一, 京都大学防災研究所年報, 47A.
- 川瀬博・中井正一 (1982) : 境界要素法による不整形地盤上の構造物の動的解析, 構造工学シンポジウム, Vol.28, 191-200.
- 川瀬博 (1986) : 強震地動の時間変動特性に着目した不整形地盤解析, 第14回地盤震動シンポジウム, 地盤震動小委員会, 日本建築学会, 55-62.
- 川瀬博 (1994) : 北海道内の各地気象台における強震動特性-, 1993年釧路沖地震での釧路気象台の記録に着目して-, 日本建築学会構造系論文報告集, 459, 57-64.
- 川瀬博・佐藤智美・武毅芳・入倉孝次郎 (1995a) : 兵庫県南部地震による神戸市ポートアイランドでのボアホール観測記録とそのシミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 475, 83-92.
- 川瀬博・佐藤智美・松島信一・入倉孝次郎 (1995b) : 余震観測記録に基づく兵庫県南部地震時の神戸市東灘区における本震地動の推定, 日本建築学会構造系論文集, 476, 103-112.
- 川瀬博・林康裕 (1996) : 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 480, 67-76.
- 川瀬博・松島信一・R.W. Graves・P.G. Somerville (1998) : 「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動場解析一兵庫県南部地震の際の震災帯の成因一, 地震, 第2輯, 50, 431-449.
- 川瀬博・松島信一 (1998) : 三次元盆地構造を考慮した1995年兵庫県南部地震の神戸地域における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 514, 111-118.
- 川瀬博 (1998) : 震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能, 一1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ一, 第10回日本地震工学シンポジウム, パネルディスカッション資料集, 29-34.
- 川瀬博・長戸健一郎・中道聡 (2003) : ハイブリッド法強震動予測結果に基づいた福岡市におけるシナリオ地震の被害予測, 構造工学論文集, Vol.49B, 7-16.
- 川瀬博 (2003) : 第31回地盤震動シンポジウム(2003)開催にあたって, 主旨説明, 第33回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会地盤震動小委員会, http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s4/past/archive_pdf/31_2003.pdf
- 川瀬博・松尾秀典 (2004a) : K-NET, KiK-Net, JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第1号, 33-52.
- 川瀬博・松尾秀典 (2004b) : K-NET, KiK-Net, JMA震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性とS波速度構造との対応, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 126-145.
- 川瀬博・増田有周 (2004) : 八代市およびその周辺地域の日奈久断層系による地震被害想定, 日本建築学会構造系論文集, 581, 39-46.
- 川瀬博 (2006) : 第34回地盤震動シンポジウム(2006)開催にあたって, 主旨説明, 第34回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会地盤震動小委員会, http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s4/past/archive_pdf/34_2006.pdf
- 川瀬博・三宅英隆・山口秋生・新田祐平 (2009) : 変形性能と施工性を考慮した新しい木造家屋の耐震補強工法の提案 その3 壁柱方式を用いた1層1スパン試験体の振動台実験, 日本建築学会学術講演梗概集C-1, 構造III, 361-362.
- 川瀬博・松島信一・宝音図 (2011) : 地震・地震動, 2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2章 (分担執筆), 日本建築学会, 2011.
- 川瀬博 (2013a) : わが青春の蹉跎, なぜ私は建築を選んだか, 建築雑誌, Vo. 128. No. 1649, pp.074, 日本建築学会
- 川瀬博 (2013b) : 地震防災の中長期的課題と戦略一都市空間安全制御の観点から一, 防災研究所年報, 第56号A, 1-11.
- 小堀鐸二・篠崎祐三 (1977) : 不整形地盤の振動特性, 地震2, Vol. 30, 127-142.
- 境有紀 (2009) : 地震動の性質と建物被害の関係, 日本地震工学会誌, No.9, 12-19.
- 佐藤智美・佐藤俊明・川瀬博 (1993) : 堆積盆地におけるS波伝播の識別と土の非線形性の同定, 足柄平野久野地区の鉛直アレーで観測された弱震動と強震動の分析, 日本建築学会構造系論文報告集, 449, 55-68.
- 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明 (1994a) : ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, 日本建築

- 学会構造系論文報告集, 461, 19-28.
- 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明 (1994b) : 表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性, 仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 462, 79-89.
- 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明 (1994c) : 観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の非線形性を考慮した強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 463, 27-37, 1994.
- 佐藤智美・川瀬博 (1995) : 地盤の2次元性と非線形性を考慮したボアホール地震観測記録に基づく地盤の増幅特性のシミュレーション, 足柄平野久野地区の鉛直アレーで観測された弱震動と強震動の分析, 日本建築学会構造系論文集, 468, 39-49.
- 地盤震動小委員会 (1976) : 「強震動におけるやや長周期成分について一耐震解析用地震動の再検討」第4回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会 (http://news-sv.aij.or.jp/ouzou/s4/past/archive_pdf/04_1976.pdf).
- 勅使川原正臣・北川良和・川瀬博・宇佐美祐人 (1998) : 兵庫県南部地震における被災地域での強震動特性と建築物の被害解析, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 第一分冊, 315-320.
- 鳥海勲 (1975) : 平野の地震動特性について, 第4回日本地震工学シンポジウム, 129-136.
- 長嶋史明・川瀬博・松島信一 (2018) : 地震動水平上下スペクトル比及び地表地中スペクトル比を用いた地盤構造同定, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.64B.
- 長嶋史明・川瀬博 (2018) : 拡散波動場理論に基づく地表上下動から地震基盤に入射する水平スペクトルの推定, 第15回日本地震工学シンポジウム, 2018年12月.
- 長嶋史明・川瀬博 (2019) : K-NET・KiK-netのPS検層記録に基づく V_s ・ V_p および深さの関係, 物理探査, Vol.72, 78-100.
- 長戸健一郎・川瀬博 (2001) : 建物被害データと再現強震動によるRC造構造物群の被害予測モデル, 日本建築学会構造系論文集, 544, 31-37.
- 長戸健一郎・川瀬博 (2002a) : 鉄骨造建物群の被害予測モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, 559, 101-106.
- 長戸健一郎・川瀬博 (2002b) : 観測被害統計と非線形応答解析に基づく木造建物被害予測モデルの構築と観測強震動への適用, 第11回日本地震工学シンポジウム.
- 仲野健一・川瀬博・松島信一 (2014) : スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究, その1 フーリエスペクトル・応答スペクトルから分離した平均特性, 日本地震工学会論文集, 第14巻, No. 2, 67-83.
- 仲野健一・川瀬博・松島信一 (2015) : スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 その2 分離した特性に対する詳細分析, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第1号, 38-59.
- 仲野健一・川瀬博・松島信一 (2019) : 1988年から2016年までに観測された強震記録から分離したサイト特性に関する研究, 日本地震工学会論文集, 19巻, 2号, 2_1-2_24.
- 仲野健一・川瀬博 (2021) : 経験的に得られたフーリエ振幅・経時特性モデルに基づく統計的グリーン関数を用いた強震動予測手法の提案と適用性の検証, 日本地震工学会論文集, 第21巻, 第2号, 130-153.
- 中道聡・川瀬博 (2002) : 福岡市における三次元地下構造を考慮したハイブリッド法による広周期帯域強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 560, 83-91.
- 林康裕・川瀬博 (1996) : 1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 481, 37-46.
- 吹原慧・松島信一・川瀬博 (2015) : 強震動予測のための地震動と微動を用いた京都盆地速度構造モデルの拡散波動場理論による同定に関する研究, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第6号, 60-76.
- 松尾秀典・川瀬博 (2002) : K-NETデータによるサイト特性と理論増幅特性の比較に基づいたS波速度構造の推定とそれを用いた強震動シミュレーション, 第11回日本地震工学シンポジウム.
- 松島信一・川瀬博 (2000) : 1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 534, 33-40.
- 松島信一・川瀬博 (2009) : 1995年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動木造建物被害の再評価, 構造工学論文集B, Vol.55, 537-543.
- 松島信一 (2020) : 震災をもたらす揺れー平成7年(1995年)兵庫県南部地震から四半世紀の間に観測された震源断層近傍強震動の共通点, なみふる No.121, 日本地震学会, 2-3, <https://www.zisin.jp/publications/pdf/nf-vol121.pdf>
- 宮腰研・入倉考次郎・釜江克宏 (2015) : 強震動記録を用いた震源インバージョンに基づく国内の内陸地殻内地震の震源パラメータのスケーリング則の再検討, 日本地震工学会論文集, Vol.15, No.7, 141-156.

- 森勇太・川瀬博・松島信一・長嶋史明 (2016) : 微動と地震動の観測水平上下スペクトル比の相違とそれに着目した地盤構造同定手法, 日本地震工学会論文集, 第16巻, 第9号, 13-32.
- 吉田研史・久田嘉章・川瀬博 (2004) : 建設年代を考慮した木造建物群被害予測モデルの構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造, 1059-1060.
- Bard, P.-Y. and M. Bouchon (1980): Seismic response of sediment-filled valleys, Part I: The case of incident SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 70, 1263-1286.
- Chieppa, D., Hobiger, M., Fäh D., and Nagashima, F. (2018): Characterization of Swiss strong motion sites by inverting HVR curves from earthquake recordings, 36th General Assembly of the European Seismological Commission, 2-7 September 2018.
- Ducellier, A., H. Kawase, and S. Matsushima (2013): Validation of a New Velocity Structure Inversion Method Based on Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectral Ratios of Earthquake Motions in the Tohoku Area, Japan, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol. 103, 958-970.
- García-Jerez, A., J. Piña-Flores, F.J. Sánchez-Sesma, F. Luzón, and M. Perton (2016) : A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption, *Computers & Geosciences*, 97: 67-78, doi:10.1016/j.cageo.2016.06.016.
- Ito, Eri, Kenichi Nakano, Fumiaki Nagashima, and Hiroshi Kawase (2020): A Method to Directly Estimate S-Wave Site Amplification Factor from Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Earthquakes (eHVSRS), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 110 (6): 2892–2911, doi: 10.1785/0120190315, 2020.
- Ito, Eri, Cécile Cornou, Fumiaki Nagashima, and Hiroshi Kawase (2021): Estimation of velocity structures in the Grenoble Basin using pseudo earthquake horizontal-to-vertical spectral ratio from microtremors, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 111 (2): 627–653, 2021; doi: <https://doi.org/10.1785/0120200211>.
- Iwata, T., K. Hatayama, H. Kawase, and K. Irikura (1996): Site amplification of ground motions during aftershocks of the 1995 Hyogoken-nambu earthquake in severely damaged zone - Array observation of ground motions at Higashinada Ward, Kobe city, Japan -, *J. Phys. Earth*, 44, 553-561.
- Kamae, K. and K. Irikura (1995): A fault rupture model of the 1995 Hyogoken Nambu earthquake (MJMA = 7.2) estimated by the empirical Green's function method, *J. Natural Disas. Sci.*, 16(2), 31-40.
- Kawase, H. (1988): Time-domain response of a semi-circular canyon for incident SV, P, and Rayleigh waves calculated by the discrete wavenumber boundary element method, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol. 78, 1415-1437.
- Kawase, H. and K. Aki (1989) : A study on the response of a soft basin for incident S, P, and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol. 79, 1361-1382.
- Kawase, H. and K. Aki (1989): Economical seismogram synthesis using causality with FFT, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol. 79, 1294-1299.
- Kawase, H. and K. Aki (1989): Topography effect at critical SV-wave incidence: possible explanation of damage pattern by the Whittier Narrows, California, earthquake of 1 October 1987, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol. 80, 1-22, 1990.
- Kawase, H. and T. Sato (1992): Simulation analysis of strong motions in Ashigara Valley considering one- and two-dimensional geological structures, *Journal of Physics of the Earth*, 40, 27-56.
- Kawase, H. (1996): The cause of the damage belt in Kobe: "The basin-edge effect", Constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, *Seismological Research Letters*, 67, 25-34.
- Kawase, H., R. Yamamoto, T. Yagi, H. Miyake, and H. Hashimoto (2017): Quasi-Static Pull-Down Experiment of A Real-Size Wooden Structure, With/Without "Wall-Of-Columns" Seismic Retrofit Implementation, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago Chile, January 9th to 13th 2017, Paper N°3470.
- Kawase, Hiroshi, Fumiaki Nagashima, Kenichi Nakano, and Yuta Mori (2018): Direct evaluation of S-wave amplification factors from microtremor H/V ratios: Double empirical corrections to "Nakamura" method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Open Access, Vol. 126, doi:10.1016/j.soildyn.2018.01.049.
- Kudo, K. (1980): A study on the contribution of surface waves to strong ground motions, *Proc. 7th World Conf. on Earthq. Eng.*, Istanbul, Turkey, 2, 499-506.
- Manpo, A., Pitarka, A. and Kawase, H. (2018): Parametric study of the slip distribution on the vertical strike-slip fault for different source parameters based on the dynamic rupture simulation, *Best Practices in Physics-based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of Nuclear Installations (BestSHANI): Issues and Challenges towards Full*

- Seismic Risk Analysis, Cadarache, France, 14-16 May 2018.
- Nagashima, F., S. Matsushima, H. Kawase, F.J. Sánchez-Sesma, T. Hayakawa, T. Satoh, and M. Oshima (2014): Application of Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectral Ratios of Earthquake Ground Motions to Identify Subsurface Structures at and around the K-NET Site in Tohoku, Japan, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol. 104, No. 5, 2288–2302, doi: 10.1785/0120130219.
- Nagashima, Fumiaki, Hiroshi Kawase, Kenichi Nakano, and Eri Ito (2021): Subsurface structure identification based on EMR method and diffuse field concept for earthquake, *Proc. of 6th International Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motions (ESG6)*, [SS1-BP1-P05], August 30-September 1, Kyoto, Japan, JAEE/DPRI.
- Nakamura, Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Railway Tech. Res. Inst., Q. Rep.* 30(1): 25-30.
- Nakamura, Y. (2019). What is the Nakamura Method, *Seism. Res. Lett.* Vol.90, No.4, 1437-1443.
- Pitarka, A., K. Irikura, T. Iwata, and T. Kagawa (1996): Basin structure effects in the Kobe area inferred from the modeling of ground motions from two aftershocks of the January 17, 1995, Hyogoken-nanbu earthquake, *J. Phys. Earth*, 44, 563-576.
- Sánchez-Sesma, F. J. and Esquivel, J. A. (1979): Ground motion of alluvial valleys under the incident plane SH waves, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol. 69, 1107-1120.
- Sekiguchi, H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi, and M. Hoshiba (1996): Minute locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion records, *J. Phys. Earth*, 44, 473-487.
- Sun, Jikai, Fumiaki Nagashima, Hiroshi Kawase, Shinichi Matsushima, and Baoyintu (2021): Simulation of Building Damage Distribution in Downtown Mashiki, Kumamoto, Japan Caused by the 2016 Kumamoto Earthquake Based on Site-specific Ground Motions and Nonlinear Structural Analyses, *Bull. Earthq. Eng.* (published online), 2021, doi:10.1007/s10518-021-01119-8.
- Wang, Ziqian, Fumiaki Nagashima, and Hiroshi Kawase (2021): A new empirical method for obtaining horizontal site amplification factors with soil nonlinearity, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 2021 (published online), doi: 10.1002/eqe.3471.
- Wong, H. S. and Jennings, P. C. (1975): Effect of canyon topography on strong ground motion, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol. 65, 1239-1257.
- Yong, Alan (2021): Measure with a micrometer, mark with a chalk, and cut with a hacksaw; Perspectives on seismic site characterization intended for site response analysis through COSMOS activities (2015–2021), *Proc. of 6th International Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motions (ESG6)*, [GS2-K01], August 30-September 1, Kyoto, Japan, JAEE/DPRI.
- Zhu, Chuanbin, Pilz, Mrcó, and Cotton, Fabrice (2020): Evaluation of a novel application of earthquake HVSR in site-specific amplification estimation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 139: 106301.

(論文受理日 : 2021年9月21日)