3. 4. 4 強震動予測のためのモデルの高精度化に関する研究

第1期(平成14年度~平成16年度)においては、項目名「強震動予測高精度化のための震源モデル・堆積盆地構造モデルの構築に関する研究」において研究を遂行してきたが、 第2期(平成17年度~平成18年度)においての研究成果の取り纏めにあたり、近畿圏の地 下構造モデルの構築を目途とした研究項目として、「強震動予測のためのモデルの高精度化 に関する研究」なる研究項目として研究を進める。

サブ研究項目として第1期に行ってきていた、「動力学的断層モデルに関する研究」「短 周期強震動のスケーリングに関する研究」「表層地質とサイト特性に関する研究」から、第 2期のサブ研究項目としては、これまでの3サブ研究項目を、新サブ研究項目「強震動予測 を高精度化する要素の分析に関する研究」としてまとめ、「表層地質とサイト特性に関する研 究」の一部と近畿圏の地下構造モデル構築を主たる研究とする、「近畿圏における地下構造 モデルの構築に関する研究」なるサブ研究項目を作成し、業務を遂行している。

3.4.4.1 強震動予測を高精度化する要素の分析に関する研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目: 強震動予測を高精度化する要素の分析に関する研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学防災研究所	教授	岩田知孝	iwata@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp
神戸大学理学部	助手	筧楽麿	kakehi@kobe-u.ac.jp
信州大学工学部	教授	泉谷恭男	tdp0000@gipwc.shinshu-u.ac.jp
九州大学大学院	助手	亀伸樹	kame@geo.kyushu-u.ac.jp
理学研究院			
九州大学大学院	大学院	内田浩二	uchida@geo.kyushu-u.ac.jp
理学研究院	博士課程		
北海道大学大学院	助教授	笹谷努	sasatani@ares.sci.hokudai.ac.jp
理学研究科			
北海道大学大学院	大学院	野口科子	noguchi@ares.sci.hokudai.ac.jp
理学研究科	博士課程		
京都大学防災研究所	教授	Mori, James,	mori@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp
		J.	
京都大学防災研究所	産学官連	Bogdan	benescu@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp
	携研究員	Enescu	
九州大学大学院	教授	川瀬博	kawase@arch.kyushu-u.ac.jp
人間環境学研究院			

(c) 業務の目的

強震動予測を高精度化する要素の分析に関し、震源モデルと地下構造モデルの高度化を目途と した震源及び伝播経路・サイト特性に関する分析を進める。震源モデルの高度化については、 実強震記録などに基づいた震源インバージョンによるすべりの時空間分布の推定等にもと づく動力学的パラメータの推定、及び動力学モデルによる分岐断層上の破壊伝播に関する 研究である。これらは、これまで運動学的な枠組みによって議論されてきた断層モデルを、 動力学的な条件、即ち物理的に整合するモデルに基づく震源像を構築し、より広帯域の震 源モデル構築をめざすことを目的としている。

- (d) 5ヵ年の年次実施計画
 - 1) 平成14年度:運動学的震源モデルに基づく動力学的パラメータの推定方法の構築 と実地震記録への適用を行った。また動力学モデルによる分岐断層上 の破壊伝播シミュレーションを行った。実記録に基づく短周期地震波 特性の地震規模依存性の研究として、放射エネルギーのスケーリング 則及び震源スペクトルの高精度スケーリング則に関する研究を行った。 また、スラブ内地震の震源モデルに関する研究を1994年北海道東方 沖地震や2001年芸予地震などを対象として行った。強震観測データ を用いたサイト増幅特性の評価、堆積盆地モデル高精度化を目的とし た堆積層内長周期(<1Hz)のQ値の評価を行った。</p>
 - 2) 平成15年度:巨大地震の運動学的震源モデルの構築と強震動シミュレーションを行った。長大断層の破壊では、破壊進展方向にディレクティビティ効果による大きな地震動の領域が、前方に広がることを示した。また複雑な断層面形状が破壊進展に及ぼす影響評価、動的破壊モデルに基づく震源インバージョン手法の開発のための基礎的研究を行った。地震スペクトルモデル構築のための分析、短周期地震波レベルのスケーリング則、震源の短周期生成過程に関する研究及びそれに基づく広帯域強震動予測用震源モデルに関する研究を行った。盆地内減衰構造、地震波伝播散乱構造に関する研究を行った。各種の強震データベースの構築をすすめた。
 - 3) 平成16年度:すべり分布及び動的な破壊による断層面分岐に関する研究をより具体 的な地震について適用し、その方法論を検証した。また動的破壊モデ ルに基づいて、動的パラメータの推定を平成15年度に引き続き行な った。地震発生環境による地震スペクトルモデルの構築に関する研究、 短周期地震波レベルのスケーリング則の高精度化に関する研究、震源 の短周期生成過程に関する研究を行った。統計的グリーン関数法の高 度化に関する研究を行った。
 - 4) 平成17年度:動力学的パラメータと運動学的モデルの比較を行った。断層面形状 を考慮した不均質破壊過程における震源近傍強震動の特徴についての モデルシミュレーションと考察を行った。地殻内地震、プレート境界 地震、スラブ内地震の震源モデル構築方法についての研究をすすめた。

震源域がやや遠い震源に対する伝播経路及びサイト特性の影響評価を 強震記録から行う方法を構築した。

- 5) 平成18年度:震源の動力学的パラメータについて整理するとともに、地震発生環境 に関係した震源モデル構築手法を考察し、強震動予測のための震源の モデルパラメータの与え方についての枠組みに資する情報を提供する。
- (e) 平成18年度業務目的

強震動予測を高精度化するための震源及び地下構造モデルの各要素パラメータを、強震観測網 データやモデルシミュレーションによる分析を基礎として、強震動予測のための要素パラメータ 設定方法を提案することを目的とする。

(2) 平成 18 年度の成果

(2-1) 内陸地殻内地震の応力パラメータに関する研究

岩田知孝(京都大学防災研究所)
iwata@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp
浅野公之(京都大学防災研究所)
k-asano@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp
筧楽麿(神戸大学理学部)
kakehi@kobe-u.ac.jp
泉谷恭男(信州大学)

tdp0000@gipwc.shinshu-u.ac.jp

(a) 業務の要約

運動学的震源インバージョン結果より断層破壊の動的パラメータを推定し、強震動予測 のための特性化震源モデルの高度化に資する。これまでに整理されてきた応力パラメータ と同様に、内陸地殻内地震のアスペリティの応力降下量は深さ依存性を持つように見られ、 その実験式を提案した。

(b) 業務の実施方法

これまでに Iwata *et al.*(2005)¹⁾によって整理されてきた震源の動的パラメータの推定と 同様、最近起きた内陸地殻内地震の動的震源パラメータのうち、応力降下量分布を Ripperger and Mai(2004)²⁾の方法に基づいて推定し、アスペリティにおける応力降下量の 深さによる違いを検討する。

(c) 業務の成果

Bouchon(1997)³によって提案された、断層食い違いの時刻歴を与えることによって断層 面上の応力の時空間変化を推定する方法に従い、これまで強震記録を用いた波形インバー ジョンによって求められた食い違いを与えて、応力変化の推定を行ってきた(例えば Zhang *et al.*, 2003⁴⁾, 2006⁵⁾)。これらの分析から、断層面上の動力学に関するパラメータ、 例えば Dc などの空間分布を求め、それらの特徴を議論した。Iwata *et al.*(2005)¹⁾は、こ の応力パラメータに着目して、応力パラメータの空間分布と特性化震源モデルと比較する ために、Somerville *et al.*(1999)⁶⁾で提案されているアスペリティ抽出方法に従い、抽出さ れたアスペリティ、非アスペリティ領域での応力パラメータの特徴を求め、応力パラメー タのアスペリティ深さ依存性についての知見を得た。ここでは、2004 年新潟県中越地震、 2005 年福岡県西方沖の地震(本震及び最大余震)について同様の分析を行い、内陸地殻内 地震の特性化震源モデルのアスペリティにおける応力パラメータを与える際の条件につい て検討することを目的とする。

2004年新潟県中越地震の震源モデルは Asano and Iwata(2007)⁷⁾を、2005年福岡県西方 沖の地震の震源モデルは Asano and Iwata(2006)⁸⁾を参照している。どちらも波形インバ ージョンには震源域近傍の強震記録を用い、各種物理探査結果を収集した上で余震波形の モデリングに基づいてチェックと改良を行った地下構造モデルによって構築したグリーン 関数を用いており、震源モデルの信頼度は高いと考えられる。2004 年新潟県中越地震で は破壊開始点近くにすべりの大きな領域(アスペリティ)が、2005 年福岡県西方沖の地震 の本震は破壊開始点から福岡市寄りの、やや浅いところにアスペリティが推定された。

強震記録をもちいた運動学的震源インバージョンから求められた食い違い量の最終空間分布から、Ripperger and Mai(2004)²⁾の方法により応力降下量の空間分布を得る。Iwata et al.(2005)¹⁾では Bouchon(1997)³⁾の方法に基づいて応力変化時刻履歴を推定し、それから応力降下量を見積もったが、その評価結果は同じであることは確認されている。求められた応力降下量の空間分布を、すべり特性化(Somerville et al., 1999⁶⁾)によって得られたアスペリティ・非アスペリティ領域に対比して、平均値を求めた。図1にはアスペリティにおける応力降下量の深さ分布を示している。



図1 アスペリティにおける応力降下量の深さ分布

ここには8つの内陸地殻内地震のアスペリティの応力降下量が、そのアスペリティ中心 の深さにプロットしてある。このうち、地表地震断層が現れたアスペリティを地表出現ア スペリティとし、伏在アスペリティと区別した。ばらつきは大きいものの、全体の傾向と しては深いアスペリティほど、その応力降下量が大きいことが言え、応力降下量の深さ依 存性が見られる。また、浅いアスペリティのうち、地表に地震断層が現れたものとそうで ないものはわずかながらに後者の応力降下量が小さいことがわかった。アスペリティ全体 の応力降下量の深さ依存性を単純に1次式とすると、以下のような形が最適となる。

$\Delta \sigma$ (Mpa) = 0.92h (km) + 5.4

現在のところのデータは8地震に限られているが、横ずれ断層タイプ、逆断層タイプが 混在しているにもかかわらず、系統的にこのように整理されることがわかる。

(d) 結論ならびに今後の課題

運動学的震源インバージョン結果を使って、断層破壊の動的パラメータを推定し、強震 動予測のための特性化震源モデルの構築に利用することを考えた。内陸地殻内地震のアス ペリティの応力降下量は深さ依存性を持っている。ここでの解析結果はまだ十分な数があ るわけではないが、今後精度のある震源インバージョン結果が蓄積されることにより、経 験式が洗練されていくことが期待されるとともに、断層タイプ(横ずれ、逆断層等)によ る違いが見えてくる可能性もある。地表に近い(浅い)アスペリティと深いアスペリティ では応力降下量の設定を考慮する必要があることを示唆している。

- (e) 引用文献
- Iwata, T., H. Sekiguchi, H. Miyake, W. Zhang, and K. Miyakoshi: Dynamic source parameters for characterized source model for strong motion prediction, *Proc. International Symposium on Earthquake Engineering Commemorating Tenth Anniversary of the 1995 Kobe earthquake*, A159-165, 2005.
- Ripperger, J. and P.M. Mai: Fast computation of static stress changes on 2D faults from final slip distributions, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L18610, doi:10.1029/2004GL020594, 2004.
- Bouchon, M.: The state of stress on some faults of the San Andreas system as inferred from nearfield strong motions data, *J. Geophys. Res.*, 102, pp.11731-11744, 1997.
- 4) Zhang, W., T. Iwata, K. Irikura, H. Sekiguhi, and M. Bouchon: Heterogeneous distribution of the dynamic source parameters of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, J. Geophys. Res., 108, 2232, doi:10.1029/2002JB001889, 2003.
- 5) Zhang, W., T. Iwata, and K. Irikura: Dynamic Simulation of a Dipping Fault Using a 3D Finite Difference Method with Nonuniform Grid Spacing, *J. Geophys. Res.*, 111, B05301, doi:10.1029/2005JB003725, 2006.
- 6) Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T.Kagawa, N. Smith, and A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, **70**, pp. 59-80, 1999.
- 7) Asano, K. and T. Iwata: Source rupture process of the 2004 Chuetsu, mid Niigata prefecture, Japan, earthquake inferred from the waveform inversion with dense strong motion data, *submitted to Bull. Seism. Soc. Am.*, 2007
- 8) Asano, K. and T. Iwata: Source process and near-source ground motions of the 2005
 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth Planets Space*, 58, pp. 93–98, 2006.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Asano, K.	Source Rupture Process	Submitted to Bull. Seism.	2006年11月
and T. Iwata	of the 2004 Chuetsu, Mid	Soc. Am.	
	Niigata Prefecture,		
	Japan, Earthquake		
	Inferred from Waveform		
	Inversion with Dense		
	Strong Motion Data		
Asano, K.	Characterization of static	Submitted to Geophys.	2007年1月
and T. Iwata	stress drops on asperities of inland crustal earthquakes from	Res. Lett.	
	kinematic source inversion results		

(g)特許出願,ソフトウエア開発,仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-2) 亀裂合体モデルの地震波放射 -短周期地震波放射機構の考察-

亀伸樹(九州大学大学院理学研究院)

kame@geo.kyushu-u.ac.jp

内田浩二 (九州大学大学院理学研究院)

uchida@geo.kyushu-u.ac.jp

(a) 業務の要約

モード II 型亀裂が平面断層上で合体する亀裂合体動力学モデルを用いて、破壊面結合過 程から放射される地震波の特徴について調べた。まず、境界積分方程式法を用いて動的破 壊成長シミュレーションを行い、その生じる滑り速度履歴の特徴について把握する。次に 放射地震波を合成し、地震波動伝播スナップショットと近地・遠地地震波形に現れる合体 フェーズの特徴について調べた。破壊シミュレーションの結果、動的結合により局所的高 速滑り速度が発生する。波形合成の結果、これより短周期に富む地震波(合体フェーズ) が放射されることが示される。短周期地震波としてよく知られる破壊停止フェーズとの比 較において、この合体フェーズは、同じ放射パターンと波形の特徴を持つことがわかった。 これは平成 17 年度の研究成果:合体過程と等価な不均質破壊パラメタは特異性のある応 力降下量に相当し、そこから停止フェーズと同等の短周期特性を持つ地震波が放射される

(b) 業務の実施方法

平成 17 年度に引き続き亀裂合体動力学モデルを用いる。本年度の主な目的は、亀裂合 体モデルの地震波放射であり、平成 17 年度の亀裂合体動力学モデルにおいて得られた滑 り速度履歴から、今度は境界積分式を用いて加速度地震波形を考える領域全体において合 成する。結合フェーズの短周期地震波放射特性の解明のために、地震波動伝播のスナップ ショットと近地・遠地地震波形を作成し、従来その特性がよく知られている停止フェーズ・ 破壊伝播フェーズとの比較を行いその特徴を抽出する。

(c) 業務の成果

はじめに

断層幾何形状や破壊フロントの拡大様式により生じる破壊過程の複雑さが明らかになっ てきた現在(Harris and Day, 1999¹); Kame and Yamashita, 1999²); Kame and Yamashita, 2003³); Kame et al., 2003⁴); Kame and Yamashita, 1997⁵); Fukuyama and Madariaga, 2000⁶)、その地震波放射の特性を明らかにすることは強震動の定量的予測の観点からも重 要である。また、これらの複雑な破壊過程による地震波放射が、平面断層上を単調拡大す る破壊過程を仮定する従来の波形逆解析(Ide and Takeo, 1997⁷)においてどのような震源 パラメタの「見かけの不均質」として推定され得るのかを示すことは、これまでの波形逆 解析から推定されてきた不均質の「物理的実体」を解明する手がかりとなろう。ひいては、 断層構造・地殻応力に関する地震発生帯の学際的な情報とそこで発生する地震の地震波放 射を結びつけることが可能になる。

本研究の目的は、近年発展したこれら非平面断層や非単調拡大破壊の動力学モデリング

の研究成果をふまえ、破壊に影響を与えるこれらの要素が、地震断層の破壊過程にどのような複雑さ生み出し、結果としてどのような地震波を放射するのか?また単調拡大する平 面断層を過程した断層モデルを用いた逆解析においてどのような見かけの不均質性となっ て現れているか明らかにすることである。本研究では、平成 17 年度に引き続き亀裂合体 動力学モデルを用いる。平成 17 年度において合体過程が見かけの破壊パラメタ不均質と してどのように現れるか、等価動力学モデルの再構築方法の開発を行った。本年度は、こ の再構築法の改良を行うとともに、亀裂合体モデルの地震波放射に注目する。平成 17 年 度の亀裂合体動力学モデルにおいて得られた滑り速度履歴から、今度は境界積分式を用い て加速度地震波形を考える領域全体において合成する。地震波動伝播のスナップショット と近地・遠地地震波形を作成し、結合フェーズの短周期地震波放射について詳細に調べる。

亀裂合体モデルの破壊過程

亀裂合体モデルにおいて、プレスリップをおこした主亀裂と副亀裂を考える。載荷せん 断応力 σ_{xy}^{0} の下、プレスリップ分布 D_{0} が生じてこれにより応力変化 $\Delta \tau_{0}$ が生じ、断層面 上に初期せん断応力の分布 $\tau_{0} = \sigma_{xy}^{0} + \Delta \tau_{0}$ が形成されているとする (図 1(a),(b))。破壊 面の合体による破壊の複雑さを抽出するために、載荷応力 σ_{xy}^{0} は空間一様とし、摩擦則構 成則は副亀裂上を除き断層面上で変化しないとする。以下の計算においては $\sigma_{xy}^{0} = 0.24$ 、 $\tau_{p} = 0.60$ 、 $\tau_{r} = 0.24$ 、臨界滑り量 $D_{c} = 0.98$ とした。このとき応力降下量は空間一定値 $\Delta \sigma =$ $\sigma_{xy}^{0} - \tau_{r} = 0.12$ となる。副亀裂面上でプレスリップ解が存在できるように副亀裂面上での み破壊強度 $\tau_{p} = 0.30$ とした。副亀裂主亀裂と副亀裂の初期位置はそれぞれ -60 < x < 0, 15 < x < 30とし、破壊停止のために無限大の強度を持つバリアー領域 (/x / > 75)を置いた。

時間ステップ *t* = 0 の動的破壊開始後の亀裂成長のシミュレーションを行った。主亀裂 の破壊フロントが破壊速度を増加させながらバイラテラル(双方向)に拡がりレイリー波 速度に漸近していく。破壊フロント付近に大きなすべり速度が局在化しており(破壊フロ ントパルス)(図1(e))、その最大速度は亀裂長が大きくなるにつれ増していく(図1(e)上 の白抜き線)。主亀裂の左端は t =164 にバリア領域に達しそこで伝播を停止する。亀裂か らの放射弾性波との応力相互作用により副亀裂上の滑り速度が正に転じ、これにより副亀 裂両端の応力集中が次第に増した結果、副亀裂の左端は t=253に、右端は遅れて t=284 に 破壊伝播を開始し、副亀裂左端は *t=298*に x=11 にて合体する。この時、合体スリップパ ルス(合体地点 x=11 付近の局所的な高速滑り速度領域)が形成される。合体後、合体情 報が副亀裂の内側を P 波速度で伝播していくのが見える。この間、滑り速度は小さくなる が、これはそこで既に歪みエネルギーが解放されているからである。これにより主亀裂右 端起源の破壊フロントパルスと副亀裂右端の破壊フロントパルスは分裂し、破壊面を界面 波としてレイリー波速度で伝播しはじめる(レイリー波スリップパルス)。こうして、副亀 裂右端の破壊フロントパルスをレイリー波スリップパルスが追いかける形で伝播していく。 その後、破壊フロントは t = 541 に x=75のバリア領域に達し破壊伝播を停止する(図1は 正確には再構築された単亀裂モデル図1(d)に対するすべり速度履歴であるが、亀裂合体モ デルとほぼ同じである)。



図1 (a) 亀裂合体モデル。主亀裂と副亀裂上のプレスリップ分布と臨界滑り量(=0.98)。
 (b)初期応力場(実線)、強度(=0.6)、載荷応力(=0.24)、残留応力(=0.12)の分布。(c)増分構成則の代表的な空間位置における3例。(d)再構築された等価単亀裂モデルの構成則パラメタの分布。増分破壊強度(上)、増分臨界変位量(中)、増分残留強度(下)。(e)等価モデルのすべり速度履歴(全体)。上部は最大値の空間分布(自抜き線:亀裂合体モデル、黒線:等価単亀裂モデル、点線:平成17年度の等価モデル)。

地震波放射に関して等価な単亀裂モデルの再構築

平成 17 年度、亀裂合体モデルとすべり速度履歴が同じとなる(即ち放射地震波が同じ となる)単亀裂モデルの構築法を開発した。平成 17 年度の単亀裂モデルでは、破壊速度 の最大値の分布が、亀裂合体モデルと似た傾向を示しながらもそのピークと副亀裂内の分 布位置は若干ずれていた。ここではまずそのズレを改良する等価単亀裂モデルの構築法に ついて述べる。一般的に我々は地震波を観測した時に起震断層に作用する載荷応力値 σ_{xv}^{0} や断層面上のプレスリップ分布 D₀を知らない。地震波形の逆解析から知ることができる量 は破壊面上のすべり速度履歴である。ここでわれわれは破壊面上の滑り速度履歴を完全に 知っている理想的な状態からはじめる。「合体モデル」で得た破壊面上のすべり速度履歴が 既知の場合、すべり速度を積分することにより「すべり増分AD 履歴」を、境界積分方程 式を利用することにより「応力増分47履歴」を得ることができる。両者を組み合わせるこ とにより、各点での「増分構成則」を得る(図 1(c)·i,ii,iii)。こうして得られた $\Delta \tau_P, \Delta \tau_r, \Delta Dc$ で構築したモデルが平成17年度のものである。 我々はこれを修正する。「亀裂合体モデ ル」の滑り速度履歴のうち、合体時刻 t =298、合体地点 x=11 から P 波速度で副亀裂内を 進み副亀裂右端に追いつく時刻 *t=318、*地点 x=31 で結ばれる線分以前に生じたすべり速 度により生じる動的なスリップを副亀裂のプレスリップに加える。この加算された副亀裂 上のスリップとその応力分を総構成則から引き算した補正増分構成則を図1(d)に示す。こ の補正増分構成則に従い、単独の破壊領域が単調に拡大するという拘束条件の下で破壊成 長した場合のすべり速度履歴を図 1(e)である。また、その各地点でのすべり速度の最大値 を図 1(e)上黒線にて示す。この「等価単亀裂モデル」のすべり速度履歴は、「亀裂合体モデ ル」のすべり速度とほぼ同じになることが分かる。すなわち「地震波放射の観点において 等価な単亀裂動力学モデル」を再構築することができたことになる。以上、「不均質単亀裂 モデル」における破壊パラメタの分布は、「合体モデル」における破壊直前の副亀裂上の滑 りが作り出す応力の増分を反映させることにより得ることができた。

「等価破壊パラメタ不均質」の観点から破壊過程をとらえてみると、破壊伝播の開始地 点(x = -61, -29、また x=32も広い意味で破壊開始点である)の破壊強度増分に関しては、 破壊開始点に対応して最も小さく、破壊進展方向に沿って急激に増している。また応力降 下量 $\Delta \sigma$ = - $\Delta \tau$, については開始点で最大値をとり急激に減少する。これは、破壊促進効果が 破壊開始直後に急激に小さくなることを意味し、緩やかな破壊成長の原因となる。x=11 の合体領域に近づくにつれ、破壊強度増分と応力降下量に変化が訪れる。今度は、破壊強 度増分は急激に減少し応力降下量は急激に増す。両者は共に破壊を促進する効果を持ち、 その結果、高速パルスが生じると考えることができる。応力降下量、破壊強度共に0の領 域(自由界面)内を合体の情報がP波速度で伝わる一方、破壊フロントのスリップパルス の伝播速度はこれより遅い。x < 32から応力降下量が正になり破壊フロントのパルスが再 び発生する。この過程で、新しい破壊フロントと元の破壊フロントは分裂し、元の破壊フ ロントのスリップパルスは破壊面上をレイリー波速度で伝播するようになる。

亀裂合体モデルの放射地震波:スナップショット

動的合体過程による地震波放射特性について調べるために、合体モデルの地震波放射合成を行った。図2に加速度波動場のスナップショットを示す。最終的な破壊面の範囲-75 < x < 75, y=0に対して、表示領域を-150 < x < 150、0 < y < 75 とした。参照のため、合体地点 x=11 とバリア地点 x=+-75 の位置を図に示した。最初に、t=120,160 に双方向伝播する破壊フロントから放射される地震波が FP (断層平行方向)、FN (断層直交方向)両成分に見える。次に、 t=164 に生じる破壊左端の x = -75 における停止による地震波放射



図2 地震波動加速度成分伝播のスナップショットとその最終的な最大分布。断層平衡成分(FP)と断層直交成分(FN)。

(停止フェーズ)が同心円状に拡がっていくのが両成分に見える(*t=200, 240*)。*t=298* に *x=11* にて破壊フロントの合体が生じ、同心円状に「合体フェーズ」が拡がっていくの が両成分に見える(*t=320, 360*)。破壊フロントのスリップパルス伝播に伴う「フロントフ ェーズ」は、移動方向にフェーズが重なり振幅が大きくなる破壊の指向性効果により特に FN 成分において大加速度をもたらしている。レイリー波スリップパルスのフェーズにつ いては、*x=11*における合体を経て *x=30*を越えるころから、副亀裂右端のフロントフェー

ズと主亀裂右端起源のレイリー波スリップパルスからのフェーズが FN 成分において正負 正負のパターンで分裂して放射されているのが識別できるようになる(*t=360,400*)。最後 に x=75, t=541における破壊停止フェーズが t= 560,600に同心円状に拡がっていくのが両 成分に見える。FP 成分では破壊停止により振幅が負に振れている(*t=560*)。フロントフ ェーズとレイリー波フェーズは、特に FN 成分においてその強さを保ったまま、x 軸正の 方向へ伝播し続ける。図 2 下に加速度振幅絶対値の最大値分布を示す。FP 成分には合体 フェーズと停止フェーズが卓越する。破壊開始して間もなく停止する x=-75 に較べて、破 壊が十分に高速成長してから停止する x=75 の停止フェーズの方が大きくなる。停止フェ ーズと合体フェーズの最大値分布様式は FP 成分においてよく似ている。いずれも合体・ 停止地点から y 方向に拡がる分布である。一方、FN 成分においてはフロントフェーズと レイリー波フェーズが破壊伝播方向に重なり振幅が大きくなる破壊の指向性効果により、 破壊進行方向に大加速度を生み出す。合体モデルでは 15 < x < 30 の副亀裂領域で動的破 壊に先立ち歪みエネルギーが解放されており、フロントフェーズの重なり合いはそこで一 旦とぎれレイリー波フェーズとなり、新たなフロントフェーズと分裂してしまう。これが 原因で波形振幅の最大値が小さくなると考えられる。以上まとめると、合体フェーズは FP 成分において停止フェーズと同様のy方向への距離減衰の小さい特徴的な分布を形成する が、その最大値は FN 成分よりも小さい。一般に最大加速度は FN 成分に現れ、破壊の指 向性効果により破壊伝播方向に向かって大きくy方向に距離減衰する分布となる。レイリ ー波フェーズが生じた場合、波動のエネルギーが分配され FN 成分に現れる最大加速度が 小さくなる方向に働く。

亀裂合体モデルの放射地震波:加速度波形にみる各フェーズ

合体過程からの地震波放射の特徴をさらに詳しく加速度波形で見る。図3に y=2に並ぶ 近地観測点と y=75 に並ぶやや遠い観測点での波形を示す。観測点は x= -100 から 100 ま で等間隔に分布する 41点に配置している。まず、破壊開始から合体前までの x= -30から x=5の間には、破壊フロントパルスの移動に対応するフェーズが FP・FN 両成分の初動に 見える。この間、フロントフェーズの振幅はフロントパルスのすべり速度の増大とともに 増す。フロントパルスのフェーズは明瞭な FN 成分に対して FP 成分では立ち上がりがは っきりしない。これに対して、x=11での合体パルスによるフェーズは FP 成分にはっきり と見え(x=10 - 35)、振幅が大きくなるのが見える。合体フェーズは FN 成分にはほとん ど現れないが、これは合体フェーズの放射パターンがちょうど FP に関して腹、FN に関 して節になっているからであろう(図2)。レイリー波スリップパルスに対応するフェーズ は、x < 35 の範囲でフロントフェーズの後続波として FN 成分に明瞭にみえるが、FP 成 分でははっきりしない。フロントフェーズとレイリー波フェーズに共通の特徴として、FP 成分にはスリップパルスが伝播する範囲の外側の観測点 /x/ > 75 で急激に振幅を減ずる のに対して、FN 成分では振幅をあまり減らすことなく伝播し続けることである。x=+-75 での各停止フェーズは、合体フェーズと同様に FP 成分によく現れている。停止フェーズ の FP 成分も振幅が大きく負に転じる。

次に、*y=75 の*観測点における加速度波形を見る。全体として *x=-75* での停止フェーズの P・S 波、*x=11* での合体フェーズの P・S 波、*x=75* での停止 P・S 波が同定できる。



図 3 加速度波形。観測点は左右それぞれ y=2 上と y=75 上にならぶ。断層平衡成分(FP) と断層直交成分 (FN)。

x < 30の観測点の初動は x=-75の停止 P 波フェーズのようであり、30 < x の範囲の初動は 合体 P 波フェーズのようである。これらの観測点では、破壊フロントフェーズとレイリー 波フェーズはほとんど見えないのに対して、停止フェーズと結合フェーズが卓越すること が分かる。これらの観測点での振幅は FP 成分において卓越し、大きい順に合体 S 波、x=75 の停止 S 波、x=-75の停止 S 波フェーズとなっている。破壊の停止フェーズは、ω-2 の高 周波数特性をもつ短周期に富む地震波の放射源としてよく知られているが、合体フェーズ も放射パターン・波形共に停止フェーズと同じであり、停止フェーズと同等の短周期地震 波の放射源となっていることがわかる。

Madariaga(1983)⁸は2次元面外型の半無限亀裂の記述された破壊速度に対する動的成 長の解析解から、破壊速度の不連続が最も短周期成分に富む(高周波数帯でのω-2の特性 を持つ)地震波放射源となることを示した。同時に、同等の短周期地震波放射能を持つ破 壊過程の可能性についても言及し、「-1/2乗の特異性を持つ応力降下量」を挙げている。本 研究で考えた「合体モデル」の地震波放射において合体フェーズもまた短周期成分に富む 地震波源となることが明らかになった。その「不均質単亀裂モデル」を再構築した際に、 破壊パラメタの「みかけの不均質」として「応力降下量の特異的な増大」が現れたことは、 理論解析の観点からも合体フェーズがω-2の特性を持つ短周期地震波源となっていること を支持する。再構築された「不均質単亀裂モデル(図 1(d))」においては、破壊開始地点 (*x=-61,-29と x=31*)においても「応力降下量の特異的な増大」が存在し短周期地震波源 となっていることが期待されるが、そこでは同時に破壊強度増分も増大しているので地震 波振幅は小さくそこから同心円状に拡がる「開始フェーズ」は見えていない。

(d) 結論ならびに今後の課題

われわれは、破壊フロントが動的合体を起こす「合体動力学モデル」における破壊過程 を考え、動的合体過程から生じるすべり速度の複雑さと地震波放射の特徴について調べた。 第一に、境界積分方程式法を用いて、動的合体する破壊成長のシミュレーションをおこな った。シミュレーションの結果、合体過程で局所的な高速滑り速度(合体パルス)が発生 し、続いて起きる破壊フロントの分裂によりレイリー波スリップパルスが発生することが わかった。第二に、放射地震波の観点から等価な「不均質単亀裂モデル」を再構築した。 結果、動的合体は破壊パラメタの不均質として「応力降下量の特異的な増大領域」と「破 壊強度増分の急激な減少領域」として現れることがわかった。これらの不均質の分布形状 は、合体の直前に形成される破壊フロント近傍の応力場に由来する。第三に、合体モデル で得たすべり速度履歴を用いて変位加速度場を合成した。波動場のスナップショット、最 大加速度分布、加速度波形を詳細に検討して動的合体過程の地震波放射の特徴について調 査した。その結果、合体パルスによるフェーズは、高周波成分に富み合体地点から同心状 に遠方に伝播していき FP 成分に明瞭に現れるのに対し (停止フェーズと類似)、レイリー 波スリップパルスによるフェーズは、スリップ伝播方向に重なる指向性効果により断層近 地で FN 成分に大振幅で現れる(破壊フロントのスリップパルスによるフェーズと類似) ことがわかった。断層面周辺の地震動における最大加速度の分布から、合体過程は短周期 成分に富む地震波放射をもたらす一方、強震動には寄与しないことが分かった。

従来の観測された地震波形の逆解析から推定された断層面上の破壊パラメタの不均質分

布のなかに、今回われわれが考えたような合体過程に対応するものが見えるであろうか? 合体に対応する応力降下量の特異的な増大領域のサイズは破壊フロントのスリップもしく はブレイクダウンゾーンの空間サイズと同程度であることが明らかになった(図 1(d))。 はじめに述べたように観測波形の逆解析において破壊フロントの解像度は十分でなく、逆 解析から推定される不均質分布の空間分解能も同様である。このことから合体であると断 定可能な不均質分布のパターンを見つけるのは難しいことがわかる。

合体でω-2の高周波数特性を持つ短周期地震波が放射されることが示された。「合体モデ ル」では合体は一度しかおきないが、実際の断層面においては多数の合体が起こる可能性 がある。前回の大地震の後、次の本震が発生するまでには多数の小地震が断層面上で発生 している。この時生じる、多数の小地震による滑りが停止した後には特異的な応力集中域 が形成される。本震の主破壊フロントがこれらの小地震による生じた応力場の中を進展す るときに、各々の応力集中域が破壊する毎にω-2の短周期地震波を放射することができる。 このような短周期地震波を破壊フロントが通過する先々で放射する地震発生モデルは、停 止フェーズのみに短周期地震波放射を依存するモデルよりも、地震波形の時系列に短周期 成分が常に含まれることになる点において、観測された地震波の高周波スペクトルのω-2 特性をより自然に説明できる妥当なモデルであろう。

本研究でわれわれは破壊フロントが相互作用する地震破壊過程のなかで最も単純な場合 である合体モデルを取り上げた。はじめに述べた通り、破壊過程の複雑さの実体は破壊面 の合体のみならず、セグメント構造、および飛び・屈曲・分岐構造である可能性がある。 これら断層面の幾何がどのような地震波放射の特徴を持ち、どのような「見かけの」不均 質として平面断層モデルに現れるのかは興味深い問題である。断層面幾何を取り入れた動 力学モデルの解析を行い、地震破壊の複雑さの物理的実体の解明につながる新たな手がか りを見つけることが今後の課題である。

(e) 引用文献

- 1) Harris, R. A. and Day, S. M.: Dynamic 3D simulations of earthquakes on en echelon faults, Geopys. Res. Lett., 26, pp.2089-2092, 1999.
- Kame, N. and Yamashita, T.: Simulation of the spontaneous growth of a dynamic crack without constraints on the crack tip path, Geophys. J. Int., 139, pp.345-358, 1999.
- Kame, N. and Yamashita, T.: Dynamic branching, arresting of rupture and the seismic wave radiation in a self-chosen crack path modelling, Geophys. J. Int., 155, pp.1042-1050, 2003.
- Kame, N., Rice, J.R. and Dmowska, R.: Effects of pre-stress state and rupture velocity on dynamic fault branching, J. Geophys. Res., 108(B5), 2265, doi:10.1029/2002JB002189, 2003.
- 5) Kame, N. and Yamashita, T.: Dynamic nucleation process of shallow earthquake faulting in a fault zone, Geophys. J. Int., pp.128, 204-216, 1997.
- 6) Fukuyama, E. and Madariaga, R.: Dynamic propagation and interaction of a rupture front on a planar fault, Pure and Applied Geophysics, 157, pp.1959-1979, 2000.

- 7) Ide, S. and Takeo, M.: Determination of constitutive relation of fault slip based on seismic wave analysis, J. Geophys. Res., 102, pp.27239-27391, 1997.
- 8) Madariaga, R.: High frequency radiation from dynamic earthquake fault models. Ann. Geophys., 1, pp.17-23, 1983.

著者	題名	発表先	発表年月日
亀伸樹,	破壊面結合動力学モデルの地震	日本地震学会 2006 年秋季	平成 18 年
内田浩二	波放射 ・等価破壊パラメタ不	大会	11月2日
	均質による短周期地震波発生の		
	考察 -		
Kame, N.	Seismic Radiation of Crack	American Geophysical	平成 18 年
and K.	Coalescence Model and	Union 2006 Fall Meeting	12月13日
Uchida	Reconstruction of Seismically		
	Equivalent Single Crack		
	Model		
Ando, R.,	An Efficient Boundary	Earth, Planets and Space	平成 19 年
N. Kame	Integral Equation Method		(掲載決定)
and T.	Applicable to the Analysis of		
Yamashita	Non-planar Fault Dynamics		

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

(g) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

笹谷努(北海道大学大学院理学研究院)

sasatani@ares.sci.hokudai.ac.jp

野口科子(北海道大学大学院理学研究院)

noguchi@ares.sci.hokudai.ac.jp

(a) 業務の要約

内陸地殻内で発生する地震には、その深さに上限及び下限のあることが知られている (例えば、Ito, 1999¹⁾)。この地震発生層の存在は、地殻内部で温度の上昇によって岩石 の物性が脆性から延性に変化するためと考えられている。この考えは、活断層で発生する 地震による強震動評価のレシピにおいて、震源断層の幅を推定する際に採用されている(地 震調査委員会, 2004²⁾)。ここでは、北海道付近と東北地方で発生した 8 個(M7 以上)の スラブ内地震によるそのメカニズム解と余震分布を基にして断層面を同定し、スラブ内地 震の地震発生層について検討する。この地域のスラブ内地震は二重地震面を有することが 知られている。検討の結果、上面の地震は鉛直で下方に拡大する断層面を、下面の地震は 水平で上面に向かって拡大する断層面を有していることがわかった。これから、スラブ内 地震の地震発生層は、二重地震面の上面と下面の間の領域と考えられる。

(b) 業務の成果

図1に解析した8地震の震央とそのメカニズム解を、表1に地震の情報を示す。以下に おいては、これらの地震を3つのグループに分類する。第1グループは、二重地震面の下 面で発生し、Down-dip extensionのメカニズム解を示す4つの地震である。第2グルー プは、二重地震面の上面で発生し、Down-dip compressionのメカニズムを有する地震で ある。第3グループは、単純なDown-dip extensionやDown-dip compressionのメカニ ズム解ではない北海道の東方沖で発生した大地震である。

グループ	年/月/日	地震名	深さ	地震モーメント
	1981/01/23	日高西部	130km	$2.2 \mathrm{x} 10^{19} \mathrm{Nm}$
第1グループ	1987/01/14	日高山脈	119km	1.3x10 ¹⁹ Nm
	1993/01/15	釧路沖	107km	$2.6 \mathrm{x} 10^{20} \mathrm{Nm}$
	2001/12/02	岩手県南部	118km	$5.2 \mathrm{x} 10^{18} \mathrm{Nm}$
第2グループ	2003/05/26	宮城県沖	72km	$3.5 \mathrm{x} 10^{19} \mathrm{Nm}$
	1958/11/06	エトロフ	70-80km(F&F)*	$4.4 \mathrm{x} 10^{21} \mathrm{Nm}$
第3グループ	1978/12/06	国後水道	118km(ISC)	$4.0 \mathrm{x} 10^{20} \mathrm{Nm}$
	1994/10/04	北海道東方沖	28km(ISC)	$3.0 \mathrm{x} 10^{21} \mathrm{Nm}$

表1 解析に用いた8つのスラブ内地震

*: Fukao and Furumoto (1979) 15)



図1 解析に用いた8つのスラブ内地震の震央(☆)とメカニズム解

1) 第1グループ

Suzuki and Kasahara (1996)³⁰は、1981年日高西部と1987年日高山脈スラブ内地震の 本震と余震の震源をマスターイベント法によって決定した。また、1993年釧路沖地震に対 しては、共通観測点を用いる方法 (homogeneous station method) で本震と余震の震源を 決定した。Okada et al. (2004)⁴⁾ は homogeneous station method により、2001年岩手県 南部地震の本震と余震の震源を決定した。これらの結果を図 2 に示す。これらの余震は、 ほぼ水平に分布していることがわかる。これは、二重地震面の下面で発生するスラブ内地 震の断層が水平であることを示している。M7 クラスの地震の余震域は、高々10x10km² で、二重地震面の下面での微小地震の活動域内にあるが、Mw7.6 の 1993年釧路沖地震の 余震分布は、下面から水平に拡大し、ほぼ上面近くに達している。これは、二重地震面の 上面と下面の間も地震を起こす能力を有することを明示している。近地強震動記録を用い た波形インバージョンや経験的グリーン関数法による 1993年釧路沖地震の断層モデルは、 破壊が主に東から西に伝播したことを示している (Takeo et al., 1993⁵⁾, Morikawa and Sasatani, 2004⁶⁾)。また、アスペリティ領域 (300~800km²) は、余震面積 (40x60km²) よりもはるかに小さい。

2) 第2グループ

二重地震面の上面で発生し、Down-dip compression 解を有する 2003 年宮城県沖地震 の余震分布を図 3 に示す。東西の鉛直断面で見ると、その分布の傾きは約 70 度である。 これは、断層面がほぼ鉛直であったことを示している。Double-Difference 法による詳細 な震源決定結果によると、本震は海洋プレートのモホ近くに位置し、余震はその地殻とマ ントルの両方に拡がっている(迫田・他, 2004⁷))。経験的グリーン関数法で推定されたこ の地震の断層モデルは、断層が下方及び北方に伝播している。また、この地震のアスペリ ティ領域は余震域よりもかなり小さい(浅野・他, 2004⁸))



図 2 第1グループのスラブ内地震の余震分布。上左:1981年日高西部地震、上右:1978 年日高山脈地震、下左:1993年釧路沖地震(以上、Suzuki and Kasahara, 1996³⁾) 下右:2001年岩手県南部地震(Okada et al., 2004⁴⁾)。



図 3 第 2 グループ 2003 年宮城県沖地震の 余震分布 (浅野・他, 2004⁸⁾) 3) 第3グループ

図1に示すように、このグループの地震のメカニズム解は、単純な Down-dip extension や Down-dip compression ではない。しかも、Mw が8以上の大地震である。しかし、残 念ながら、第3グループの地震は、北海道のはるか東方で発生しており、上記2つのグル ープに比べると、その震源決定精度に問題を有している。

Katsumata et al. (1995)⁹⁾ は、北海道東部の観測点だけを用いた homogeneous station method 法により、1994 年北海道東方沖地震の本震と余震の震源決定を行った。図4は、本震発生から26時間以内に発生した余震の分布を示す。これから、海溝軸に平行な北東に走向を有するほぼ垂直な節面が断層面と考えられる(図1参照)。P 波及びS 波の走時 データから決められた本震の深さは、28km (ISC)、23km (JMA)、30km (USGS)、25km

(Katsumata et al., 1995⁹⁾) と浅い。しかし、波形モデリングから推定されたセントロイ ド深さは、いずれも深い:56km (Kikuchi and Kanamori, 1995¹⁰⁾)、68km (Dziewonski et al., 1995¹¹⁾)、60km (Sasatani, 1997¹²⁾)、67km (Morikawa and Sasatani, 2000¹³⁾)。この 深さの差異は、破壊が約 25km から始まり、より深い方向に拡大したことを暗示している。 震央付近での海洋プレートの深さが約 30km であるので、この地震は、スラブを深さ方向 に約 40km 破壊した大地震と考えられる。この領域のやや深発地震が二重地震面を有する かどうかは不明であるが、二重地震面の上面から破壊が始まった第 2 グループの地震とは 異なったメカニズム解を有していることに注意する必要がある。なお、遠地実体波のイン バージョン (Kikuchi and Kanamori, 1995¹⁰⁾)及び経験的グリーン関数法による震源のモ デル化 (Morikawa and Sasatani, 2004⁶⁾) は、破壊が北東から南西に伝播したことを示し ている。



図 4 1994 年北海道東方沖地震の 本震発生後 26 時間以内の余 震分布 (Katsumata et al., 1995⁹⁾)。□は本震を表す。

1958年エトロフ地震は、発生した当初から、北海道東部で発生した地震としては有感域 が異常に大きい地震として注目されていた(Hirono, 1959¹⁴⁾)。Fukao and Furumoto (1979)¹⁵⁾は、図 1 に示すこの地震のメカニズム解を再決定した。この地域に発生する Down-dip extension 解とは異なり、T 軸がスラブのもぐり込み角度よりも鉛直に近い。 ISS による震源の深さは 32km であるが、JMA や USGS によるそれは 70-80km である。 また、マグニチュードに比べて、余震域の小さいこと及び大きな応力降下量(78bar)も この地震の特徴である。Fukao and Furumoto (1979)¹⁵⁾は、この地震をプレート間地震と 考え、1958年地震とそれ以前の地震との異常に長い繰り返し間隔が上に記した特長の要因 であるとした。しかし、図5に示す1958年エトロフ地震と1994年北海道東方沖地震の震 度分布を比べると、両者がよく似ていることに気づく。Morikawa and Sasatani (2000)¹³⁾ は、この類似性と上に記した特長を考慮して、1958年エトロフ地震は、1994年北海道東 方沖地震と同じスラブ内地震と結論した。この場合、図1に示すメカニズム解の南東方向 に大きな角度で傾く節面を断層面とするのが妥当である。



図5 1958年エトロフ地震と1994年北海道東方沖地震による震度分布の比較

図 1 に示すように、1978 年国後水道地震は、これまでの地震とは異なったメカニズム 解を有している。また、この地震の余震は、図 6 に示すように、北西方向に走向を有し、 深さ 150km から 200km にわたって分布している(Kasahara and Sasatani, 1985¹⁶⁾)。こ の走向は、メカニズム解の傾きの大きい節面とほぼ一致している(図 1 参照)。長周期表 面波のインバージョンによるセントロイド深さは、176km (Giardini, 1984¹⁷⁾)、170km

(Romanowicz and Guillemant, 1984¹⁸⁾)で、ISC によるそれ(118km)よりもはるかに深い。これは、破壊が約 100km から 200km まで伝播したことを示している。実際に、WWSSN 長周期 P 波(4 観測点)を用いた Deconvolution によると、深さ 120km、165km、210km に 3 つのサブイベントが検出されている(Lundgren et al., 1988¹⁹⁾)。最後に、余震分布の走向を海溝側へ延長した太平洋プレート上に断裂帯(既存の弱線?)が存在することを注意しておく(図 7)。これから、この地震は沈み込んだこの断裂帯に沿ったスラブの裂け(tearing)によると考えられている(Kasahara and Sasatani, 1985¹⁶⁾)。
4) 地震発生層とスラブの構造

スラブ内地震のメカニズム解と余震分布を基にして、その地震発生層について検討して きた。その結果をまとめたのが図8である。現時点では、二重地震面の上層と下面の間が スラブ内地震の地震発生層に相当すると考えられる。これは、スラブ内地震が厚さ約 100kmの太平洋プレートの上面約40kmで発生することを意味している。

最後に、これと関係すると考えられるスラブ構造について言及する。Maeda and Sasatani(2006)²⁰⁾は、南千島の海溝近くの海底地震計データを用いたスラブ内の Qs 値の



図 6 1978 国後水道地震の余震分布 (Kasahara and Sasatani, 1985¹⁶⁾)



図 7 1978 年国後水道地震の余震分布と太平洋プレート上の断裂帯(太い破線) (Kasahara and Sasatani, 1985¹⁶⁾)

推定と、北海道東部で発生したスラブ内地震による東北地方への短周期地震波の異常伝播 から、スラブの2層Qs構造を推定した(図9)。上部スラブはそれほど大きなQs値を有 していないが、約50km以下の下部スラブは極めて大きなQs値を有している。この構造 と上の検討結果から、スラブ内地震の地震発生層は、下部に比べて小さなQs値を有する 上部スラブに相当することになる。



図8 スラブ内地震の断層と二重地震面との関係(模式断面図)



- 図 9 千島弧南部におけるスラブの 2 層 Qs モデル。BAMW:背弧側マントルウエッジ、 FAMW:前弧側マントルウエッジ。Maeda and Sasatani (2006)²⁰⁾より作図。
- (c) 結論ならびに今後の課題

北海道付近及び東北地方で発生した8つのスラブ内地震のメカニズム解と余震分布を基 にして、スラブ内地震の地震発生層について検討した。その結果、二重地震面の上層と下 面の間がスラブ内地震の地震発生層に相当するという結論を得た。しかし、この結論は、 限られた地域の数少ないデータから得られたものである。二重地震面が明確に定義されて いない西日本地域におけるスラブ内地震の地震発生層に適用できるという保証はない。大 きな地震の発生頻度の低いスラブ内地震に対して、現在までに得られたデータをまとめた ものであると言わざるを得ない。今後、より多くデータの蓄積が望まれる。

- (d) 引用文献
- 1) Ito, K.: Seismogenic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland earthquakes, Tectonophysics, Vol. 306, pp. 423-433, 1999.
- 2) 地震調査委員会:活断層で発生する地震の強震動評価レシピ,砺波平野断層・呉羽山断 層帯の地震を想定した強震動評価について,付録1,2004.
- 3) Suzuki, S. and Kasahara M.: Unbending and horizontal fracture of the subducting Pacific plate, as evidenced by the 1993 Kushiro-oki and the 1981 and 1987 intermediate-depth earthquakes in Hokkaido, Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 93, pp. 91-104, 1996.
- 4) Okada, T., Umino N. and Hasegawa A.: Source process of the M6.4 intermediate -depth earthquake that occurred in the lower plane of the double seismic zone beneath northeastern Japan, J. Seismology, Vol. 8, pp. 453-466, 2004.
- 5) Takeo, M., Ide, S. and Yoshida, Y.: The 1993 Kushiro-oki, Japan, earthquake: a high stress drop event in a subducting slab, Geophys. Res. Lett., Vol. 20, pp. 2607-2610, 1993.
- 6) Morikawa, N. and Sasatani, T.: Source models of two large intraslab earthquakes from broadband strong ground motions, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 94, pp. 803-817,

2004.

- 7) 迫田浩司,岡田知己,菅ノ又淳一,長谷川昭:2003年5月26日宮城県沖地震(M7.1) と二重深発地震上面の地震活動-スラブ内大地震震源域における地震活動の特徴抽出-, 地震2, Vol. 57, pp. 187-198, 2004.
- 8) 浅野公之,岩田知孝,入倉孝次郎:2003 年 5 月 26 日に宮城沖で発生したスラブ内地 震の震源モデルと強震動シミュレーション,地震 2, Vol. 57, pp. 171-185, 2004.
- 9) Katsumata, K., Ichiyanagi, M., Miwa, M., Kasahara, M. and Miyamachi, H.: Aftershock distribution of the October 4, 1994 Mw8.3 Kurile island earthquake determined by a local seismic network in Hokkaido, Japan, Geophys. Res. Lett., Vol. 22, pp. 1321-1324, 1995.
- Kikuchi, M. and Kanamori, H.: The Shikotan earthquake of October 4, 1994: lithospheric earthquake, Geophys. Res. Lett., Vol.22, pp.1025-1028, 1995.
- Dziewonski, A. M., Ekstrom, G. and Salganik, M. P.: Centroid-moment tensor solutions for October-December 1994, Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 91, pp. 187-201, 1995.
- Sasatani, T.: Source characteristics of the 1994 Hokkaido Toho-oki earthquake deduced from wide band strong motion records, J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. VII Geophysics, Vol. 10, pp. 269-293, 1997.
- Morikawa, N. and Sasatani, T.: The 1994 Hokkaido Toho-oki earthquake sequence: the complex activity of intra-slab and plate-boundary earthquakes, Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 121, pp. 39-58, 2000.
- 14) Hirono, T.: The Etorofu-Oki earthquake of November 7, 1958, Q. J. Seism., Vol. 24, 65-90, 1959 (in Japanese).
- 15) Fukao, Y. and Furumoto, M.: Stress drops, wave spectra and recurrence intervals of great earthquakes implications of the Etorofu earthquake of 1958 November 6, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol. 57, pp. 23-40, 1979.
- 16) Kasahara, M. and Sasatani T.: Source characteristics of the Kunashiri strait earthquake of December 6, 1978 as deduced from strain seismograms, Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 37, pp. 124-134, 1985.
- 17) Giardini, D.: Systematic analysis of deep seismicity: 200 centroid-moment tensor solutions for earthquakes between 1977 and 1980, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol. 77, pp. 883-914, 1984.
- 18) Romanowicz, B. and Guillemant, P.: An experiment in the retrieval of depth and source mechanism of large earthquakes using very long-period Rayleigh-wave data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 74, pp. 417-437, 1984.
- Lundgren, P. R., Okal, E. A. and Stein, S.: Body-wave deconvolution for variable source parameters; application to the 1978 December 6 Kuriles earthquake, Geophys. J., Vol. 94, pp. 171-180, 1988.
- 20) Maeda, T. and Sasatani T.: Two-layer Qs structure on the slab near the southern Kurile trench, Earth Planets Space, Vol. 58, pp. 543-553, 2006.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
T. Sasatani,	Source characterization	Third International	平成 18 年
N. Morikawa	and strong motion	Symposium on the Effects	8月31日
and T. Maeda	prediction for intraslab	of Surface Geology on	
	earthquakes	Seismic Motion 2006,	
		Grenoble, France	
野口科子,	スラブ内地震による強震動	日本地震学会 2006 年秋季	2006 年
前田宜浩,	の予測手法の検証	大会, P063	10月31日
森川信之,			
笹谷 努			

(f) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-4) Earthquake Source Studies Related to Strong Ground Motion Estimates

James Mori (京都大学防災研究所) mori@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の概要

In our research efforts we are trying to understand the source characteristics of large earthquakes, as related to the levels of strong ground motions. We study the seismograms of large earthquakes recorded at near-field and far-field distances to observe the details of the rupture process. From these results we have been able to estimate parameters, such as the slip weakening distance and rupture velocity, which are important for understanding the physical mechanisms of the fault slip during large earthquakes.

In the first study, we continue our efforts to measure the slip-weakening distance from near-field strong motion records of the 1999 Chi-Chi, Taiwan (Mw7.6). These are probably the best recorded examples of slip from a large earthquake and provide the good opportunity to try to resolve the slip-weakening distance. As an improvement over last years work, we used a forward modeling technique that includes the effects of local structure and the rupture propagation. The results for four stations that recorded earthquake seem to show a scaling of slip weakening distance with the total amount of fault slip.

In the second study we investigated the distribution of asperities for large subduction zone earthquakes. Using teleseismic data, we studied a sequence of M7 and M8 earthquakes near the New Britain trench in Papua New Guinea, that appeared to re-rupture some of the same parts of the subduction interface. Our results indicate that asperities do not seem to be persistent features that are the same in repeaing earthquakes. Instead we think that the asperity distribution can change from earthquake to earthquake.

In the third study we use Hi-Net with an array analysis to measure the rupture velocity of the July 17, 2006 earthquake (Mw 7.7) off the coast of West Java. The high-density array in Japan can be used in a back-projection analysis to image the rupture propagation. Our results show an irregular rupture pattern that has an average velocity of about 1 km/sec.

(b) 業務の成果

1) Estimates of Slip Weakening Distance from Near-Field Records

We continued our work on estimating the slip-weakening distance from strong-motion records that were recorded very close to faults with large displacement. Last year we used the method of Mikumo et al. (2003)¹⁾ to make direct measurements on near-field velocity and displacement records from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. This year we extended the analysis by developing a forwarding modeling technique that includes the effects of local structure and the rupture velocity.

We set up a grid of points on the fault near the station where the data we are modeling were recorded. We calculate theoretical Green functions for each grid point and then sum them with an appropriate rupture velocity to model the data. In the modeling we test different values for the slip weakening distance. Figure 1 shows the configuration of the grid and the calculated waveform for various values of the slip-weakening distance. Comparison with the data on the right shows that a slip weakening distance of about 2.5 meters fits the data the best.



Figure 1 Model waveforms calculated for various values of the slip-weakening distance. The grid of points shown on the map in the upper right was used to include the effects of local structure and rupture propagation. Recorded data are shown on the bottom right.

We tested various values of the slip-weakening distance by comparing the fit of the calculated waveform with the data. For station TCU068 the best fit was obtained for a value of 2.5 meters (Figure 2). We applied this method to 4 stations that were located very close to the fault and had large displacements. For the two stations that had a fault slip of about 3 meters, we obtained slip-weakening distances of less than 1 meter. For the other two stations where there were large slips of over 6 meters, we obtained slip-weakening distances of 2 to 3 meters. These results indicate that there is a scaling of the slip-weakening distance with the total amount of slip.



Figure 2 RMS fit of the calculated waveform to the data at station TCU068, as function of the slip-weakening distance. The minimum is for a slip-weakening distance of 2.5 meters.

2) Asperity Distribution for the Large Earthquakes along the New Britain Trench, Papua New Guinea

An important aspect in modeling strong ground motions is the location and size of the asperities, or areas of large slip on the fault plane. These features are regions of high stress drop and the radiation from these areas dominate the strong ground motions produced by large earthquakes. One key issue has been whether or not asperities are persistent when the same fault slips in repeated earthquakes. Observations by Igarashi et al. (2003)²⁾ and Yamanaka and Kikuchi (2004)³⁾ in the Tohoku area indicate that the asperities are persistent features that rupture, even if the overall size of the earthquake on the fault is different. We study a sequence of large earthquakes along the New Britain trench in Papua New Guinea where M7 and M8 earthquakes have apparently ruptured the same area of the subduction interface. The table below lists the earthquakes that were studied

Event	Date (UTC)	Origin time (hh:mm:ss)	Lat.	Long.	Depth	Mag.
July 14, 1971	1971. 07. 14	06:11.28	-5.52°	153.86°	43 km	M _w 8.0
July 26, 1971	1971. 07. 26	01:23:21	-4.93°	153.18°	43 km	M _w 8.1
Aug. 16, 1995	1995. 08. 16	10:27:28	-5.80°	154.18°	37 km	Mw 7.6
Nov. 16, 2000B	2000. 11. 16	07:42:16	-5.23°	153.10°	30 km	Mw 7.3
Nov. 17, 2000	2000. 11. 17	21:01:56	-5.49°	151.78°	37 km	Mw 7.4

Table 1 Large events studied in the New Britain region of Papua New Guinea

For all of these earthquakes, teleseismic P-wave data were used to carry out waveform inversions to determine the slip distributions. To calculate the slip distributions, a grid of subfaults was set up in the source area and teleseismic Green functions were calculated using a program based on Langston and Helmberger (1975)⁴⁾. Generally 10 to 15 stations were used for each earthquake. For the M8 events in 1971, the available data are paper WWSSN records which are often off-scale for even the P wave. To analyze these two earthquakes, we digitized P-diffracted waves at distances of 90 to 120 degrees and used these data for our inversions. P-diffracted waves represent low-passed versions of the direct P waves and can be used if an appropriate correction is made for the attenuation. In this study, we found that a value for t* of 2.0 was able to model the data. For the P-diffracted analyses, we did not use the absolute amplitudes, and constrained the moment from an independent estimate.

Figure 3 shows the results of the slip inversions for all the earthquakes. The colored outlines show the rupture area for each event and the shaded areas are the asperities. Asperities are defined as areas that have slip with values over half of the maximum slip, similar to Yamanaka and Kikuchi, 2003. The rupture areas of these large earthquakes are generally consistent with normal scaling relations of source areas. The outlined rupture areas have large areas of overlap in the region and we interpret this to mean that the same portion of the subduction interface has slipped in subsequent earthquakes. On important feature of our results is that the areas of large slip (asperities) do not appear to overlap.



Figure 3 Distribution of asperities for five large earthquakes along the New Britain Trench.

Assuming that these events represent re-rupture of the same portion of the subduction zone, this means that the areas of large slip are not persistent features that always occur when a particular section of the fault has a large earthquake. This conclusion is quite different from the idea that is often put forward that asperities are characteristic features that occur in the same place in repeated earthquakes. There is some question about whether the closely located asperities for the July 26, 1971 and the November 16, 2000 B overlap. However, even if there is some spatial overlap, the sizes of the asperities are quite different and it seems difficult to interpret them as representing the same physical structure.

Figure 4 shows a cartoon that contrasts a model that has characteristic asperities with a model that that has asperities in different places for repeated earthquakes. In the characteristic asperity model, the large slip always occurs in the same region and surrounding areas slip mostly aseismically. In the model with uncharacteristic asperities, the asperities fill the fault area as repeated earthquakes occur over time.



Figure 4 Cartoon showing difference between models that have characteristic asperities, and varying asperities for repeated earthquake on the same fault.

3) Rupture Velocity Estimate for the July 17, 2006 West Java Earthquake

For understanding the dynamics of slip during large earthquake, the rupture velocity is an important parameter. Usually the rupture speed of earthquake is observed to have values of about 0.6 to 0.8 times the shear-wave velocity. However, there are a few cases of super-shear ruptures that exceed the shear wave velocity. There are also some examples of slow rupture velocities, such as for tsunami earthquakes. In this study we use an array analysis of Hi-Net data to estimate the rupture speed of the July 17, 2006 earthquake (Mw7.7) that occurred off the south coast of Java. This was a tsunami earthquake that had relatively low levels of high-frequency radiation, but produced very destructive water waves that killed over 600 people along the Java coast.

We used short-period vertical components of the Hi-Net array in Japan, operated by the National Institute for Earth Science and Disaster Prevention. Of the total 743 available stations, we chose data from 717 locations that had generally similar waveforms, in order to eliminate stations that had strong site responses or instrumental problems. The array is located at distances of 52 to 70 degrees from the earthquake and clearly records the direct P wave. Data were high-passed filter at 0.2 Hz and aligned on the first arrival using waveform cross correlations. For the back-projection calculation (Ishii et al., 2005)⁵⁾, we chose a grid of 240 points in the source area and estimated which grid points were the sources of seismic radiation for sequential time windows of the P wave

Figure 5 shows for each time window, the resulting locations of the waveform stacks that had the highest amplitude and therefore inferred be the source of the P

wave radiation. The differences in the stack amplitudes across the grid are quite small and vary by only a few percent or less, and for this reason, the stack amplitudes have been normalized in each time window in order to be able to show more clearly the locations of the maxima. The results clearly show the southeastward movement of the rupture. The average speed of the rupture for the whole earthquake is about 1 km/s.



Figure 5 Each time window shows the region of maximum correlation which corresponds to the location of the radiated energy.

Figure 6 plots the positions and times of the maximum stack amplitude for each time window, to show the propagation of the rupture. For the first 30 s we do not see much movement of the source of seismic radiation. Starting from about 30 seconds after the initiation there is a fairly continuous rupture propagation to the southeast at a speed of 1.3 to 1.4 km/s for a distance of about 100 km along strike. Then there appears to be a small pause, followed by a jump of the rupture to a location about 150 to 200 km from the epicenter. Overall the rupture does not have an smooth propagation, but an irregular pattern with jumps at faster rupture speeds..

The results suggest that even though the average rupture speeds of some previous tsunami earthquakes have been inferred to be slow, this may be due to the effect of delayed multiple events. This would mean that it is not necessary to provide special physical mechanisms to explain unusually slow rupture speeds for tsunami earthquakes. Instead, tsunami earthquakes may be explained as having a complicated pattern with irregular propagation at normal rupture speed. Since the water propagation is much slower than the rupture speed, there is very little difference in the generation of the tsunami between a continuous slow rupture and a delayed multiple rupture.



Figure 6 This figure shows the time and location for the maximum correlation in each time window, which corresponds to the source of the radiated waves. The different lines are for different length time windows. There is a irregular rupture propagation with an average value of about 1 km/sec.

(c) 結論ならびに今後の課題

We measure the slip-weakening distance from near-field strong motion records of the 1999 Chi-Chi, Taiwan (Mw7.6) earthquake. With a forward modeling technique that includes the effects of local structure and the rupture propagation., the estimated slip weakening distance is scaled the total amount of fault slip.

We also investigate the distribution of asperities for large subduction zone earthquakes near the New Britain trench in Papua New Guinea. Our results indicate that asperities do not seem to be persistent features that are the same in repeating earthquakes. We also found the slow rupture propagation during 2006 Java earthquake.

The latter results, such as variation of asperity position and rupture velocity, indicate the complexity for constructing source models for scenario earthquake. Detailed earthquake source analysis should be done continuously for future events.

- (d) 引用文献
- Mikumo, T., Olsen, K.B., Fukuyama, E., and Yagi, Y.: Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, pp. 264-282, 2003.
- Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa: Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, J. Geophys. Res., 108(B5), 2249, doi:10.1029/2002JB001920, 2003.
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi: Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, 109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683, 2004.
- 4) Langston, C. A. and D. V. Helmberger: A procedure for modeling shallow dislocation sources, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 42, pp. 117-130, 1975.
- Ishii, M, P,M, Shearer, H. Houston, J. E. Vidale, Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array, *Nature*, 435, pp. 933-936, 2005.

著者	題名	発表先	発表年月日
Miyazawa,	Recorded Maximum	Seismol. Res. Lett., 77,	2006年3-4月
M. and J.	Seismic Intensity Maps in	pp. 154-158, 2006	
Mori	Japan from 1586 to 2004		
Sato, K. and	Scaling relationship of	J. Geophys. Res. 111,	2006年5月
J. Mori	initiations for moderate to	B005306,	
	large earthquakes	10.1029/2005jb003613,	
		2006	
Sato, K. and	Relationship between	J. Geophys. Res. 111,	2006年5月
J. Mori	rupture complexity and	B005307,	
	earthquake size	10.1029/2005jb003614,	
		2006	
Kano, Y., J.	Heat Signature on the	Geophys. Res. Lett.,	2006年8月
Mori, R.	Chelungpu Fault	doi:10.1029/2006GL02673	
Fujio, H.	Associated with the 1999	3, 2006	
Ito, T.	Chi-Chi, Taiwan		
Yanagidani,	Earthquake		
S. Nakao			
and K.F. Ma			

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

Park, S. and	Are Asperity Patterns	J. Geophys. Res.,	
J. Mori	Persistent? Implication	<i>(in press),</i> 2006	
	from Large Earthquakes in		
	Papua New Guinea		
Mori, J.	Estimates of seismic	日本地球惑星科学連合	2006 年
and K-F Ma	Fracture Energy for	2006年大会, J162-003	5月16日
	Large Earthquakes		
Mori, J.	Estimates of the	SCEC-ERI Joint	2006 年
	Slip-Weakening Distance	workshop on crustal	6月1日
	and Fracture Energy	structure	
	from Near-Field Records	characterization and	
	of the 1999 Chi-Chi,	strong ground motions,	
	Taiwan Earthquake	Oxnard, USA	
Mori, J. and	2006年7月17日西ジャワ	日本地震学会 2006 年秋季	2006 年
S. Park	地震の破壊伝播過程の推定	大会, A66	11月2日
			2000 5
Mori, J. and	Rupture Propagation of	American Geophysical	2006 年
S. Park	the July 17, 2006 Java	Union 2006 Fall Meeting,	12月12日
	Earthquake from Back	S21A-0126	
	Projection of Hi-Net Data		

(f) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

なし

 3) 仕様・標準等の策定 なし (2-5) Determining the Location of the Fault Plane for the Nankai Subduction Zone Earthquakes

> Bogdan Enescu (京都大学防災研究所) benescu@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp James Mori (京都大学防災研究所) mori@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

We estimate the location of the thrust plane for large earthquakes in the Nankai subduction zone by using high quality locations of small earthquakes.

(b) 業務の成果

We assume that the small earthquakes in the depth range of 10 to 40 km are occurring close to the plate interface (or within the subducted oceanic crust a few kilometers below). We are studying the region near the Kii Peninsula (Figure 1), where seismic experiments have already produced a good starting velocity model. We have collected waveform data from 450 earthquakes, as shown in the Figure 1, for 70 stations.



Figure 1 Earthquakes ($M \ge 1.8$) in the region of the Kii Peninsula that are being relocated with cross correlation of waveforms: epicentral map (a) and cross-section (b). The velocity model obtained from seismic experiments (Ito et al., 2006¹⁾) is shown in the cross section.

Cross section of the earthquakes, as shown in Figure 1(b), shows the general configuration of the subducting Philippine Sea plate. However, with improvements in the locations, we should be able to determine with much better resolution the depth position of the plate interface. In order to recalculate the hypocenters which have been determined by JMA and NIED, we are using waveform cross correlations to obtain consistent arrival times from the data. This method can give good determinations of the high-frequency waveforms. Figure 2 shows an example of seismograms recorded at Hi-Net station KTDH for 40 earthquakes. Although the events have different locations, note that there is a good similarity between the shapes of the waveforms so that a cross correlation analysis will give consistent arrival times for all the earthquakes.



Figure 2 Example of P wave records at KTDH station. Note the similarity of the waveforms.

We are using the arrival time data derived from the cross-correlation procedure in three-dimensional velocity inversions to obtain an improved velocity structure and better locations for the earthquakes.

(c) 結論ならびに今後の課題

We compared the thrust plane boundary in the Nankai subduction zone obtained by the reflection survey result with the relocated hypocenters of small earthquakes. Small events seems to occur not on the plate boundary from the reflection survey result but in the crust in the subducting slab. We need to monitor the distribution of small event hypocenters toward to the occurrence of the next anticipated Nankai subduction earthquakes.

We used Hi-net data operated by the National Institute of Earthquake Disaster (NIED).

(d) 引用文献

- Ito,K., I. Hirose, Y. Umeda, T. Shibutani and T. Ueno: Crust and Upper Mantle Structure With Reference to Seismic Activity in the Kinki District, Japan From Seismic Surveys, Fall Meeting, American Geophys. Union, San Fransisco, 2006.
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等 なし
- (f) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定
 - 1) 特許出願

2)ソフトウエア開発

なし

 3) 仕様・標準等の策定 なし

なし

川瀬博(九州大学大学院人間環境学研究院) kawase@arch.kyushu-u.ac.jp

(a) 業務の要約

「西日本の堆積盆地構造と強震動評価」研究課題では、今年度は平成15年度の研究を発展させる形で、全国的に展開された強震観測網のデータを利用して、そのフーリエスペクトルを震源・伝播経路・サイトの各特性に分離した。その際、用いたデータとしてKiK-netのボアホール観測データも加え、直接的にボアホール観測データをスペクトル分離することにより、硬質地盤中の地中記録がどのような特性になっているかを把握した。また分離に際して取り除いた大加速度記録のスペクトルを、得られた基盤スペクトルで割り込むことにより、非線形サイト特性を抽出し、十勝沖地震と福岡県西方沖地震に対して線形の場合と比較した。その結果非線形性は生じているものの地震によるサイト特性評価のばらつきの範囲内に概ね収まることがわかった。

(b) 業務の実施方法

いうまでもなく強震動特性の評価にはサイト増幅特性の適切な分離が不可欠である。ま た震源特性の分析や理論的強震動予測にはサイト増幅特性情報に対応した地下構造情報、 特に深部地盤構造が必要となる。これまで我々はスペクトル分離手法によって分離された サイト特性に適合するような地盤構造を遺伝的アルゴリズムによって同定してきた。今回 はそのスペクトル分離手法を用いて2つの問題に対する解答を得ることを目的として研究 を実施した。

まず、これまでサイト特性を把握する方法として最も確実な方法は硬質地盤中のボアホ ール観測記録と地表面観測記録を用いて、そのスペクトル比を取ることであるとされてき た。しかし地中観測記録が硬質地盤中だからといってサイト特性がないかどうかは直接的 には確かめられていない。ボアホール観測記録が入射波とみなし得るのはどのような場合 なのかを把握することは重要である。この目的のために、これまで用いてこなかった KiK-net のボアホール観測記録を用いて同様の分離手法でサイト特性を求め、これを地表 面のサイト特性と比較する。

第二に、これまでのサイト分離手法では多数のデータを同時解析するために、サイト特性は地震動のレベルによって変わらないこと、すなわち線形性を仮定してきた。最近になって実際に大加速度記録が得られるようになってきたので、大加速度記録のサイト特性には非線形性の影響がどの程度見られるのかを明らかにする必要がある。この目的のために、これまで用いてこなかった最大加速度で200Gal以上の記録について、個別に基盤スペクトルを推定し、その推定基盤スペクトルに対する観測スペクトルの比をもって、ある地震のサイト特性と定義し、それが地震によってどの程度変動するのかを分析する。

(c) 業務の成果

まずスペクトル分離解析であるが、平成15年度の検討(川瀬・松尾,20041))と同様に、

1996 年から 2005 年までの間の Mj \geq 4.5、震源深さ \leq 60km、震源距離 \leq 200km、最大加 速度 \leq 200gal、3 地点以上でトリガーの全条件にあう K-NET 観測点(924 点)、KiK-net 観 測点(476 点)、JMA 観測点(319 点) および福岡市内の各区に設置された震度計(FKO101 ~FKO107 の 7 点)(川瀬, 2005²⁾)のいずれかの地点で観測された地震波(18,825 地点・ 地震、3 成分)を用いた。条件を満たす地震は 275 個になり、その内訳は内陸地震 61 個、 プレート内地震 81 個、プレート間地震 133 個であった。プレート間地震が多いのは 2003 年十勝沖地震とその余震を含むためである。伝播特性の地域性に関しては、これまでと同 様に日本の火山や中央構造線など考慮して全日本を 6 地域に分割した。

データはまず、日本の平均的走時を用いて、S 波到着以降を気象庁マグニチュードに応じた時間区間(Mjma ≤ 6 で 5 秒、 $6 < Mjma \leq 7$ で 10 秒、7 < Mjma で 15 秒)で切り出し、前後に 2 秒のコサインテーパをつけた。フーリエスペクトル F_{ij} を次のようにモデル化した。

$$\log F_{ij} = \log S_i - n_{l(i)} \log X_{ij} + \sum_k b_{l(i)k} X_{ijk} + \log G_j$$
(1)

$$X_{ij} = \sum_{k} X_{ijk}$$

$$i: \text{themical states}$$

$$(2)$$

j:観測点

k:地域

l(i):地震のタイプ

ここで Si は震源特性、Gj はサイト特性である。n は幾何減衰を表しており、スペクトルの 場合、理論的には実体波で1、表面波では 0.5 となるが今回の検討では震源距離 100km 以 内では実体波が卓越すると仮定して n=1 とし、100km 以遠でのみ n を同定した。b は内 部減衰+散乱減衰を表す項であり k によりその地域性を考慮した。なおフーリエスペクト ルは SN 比をチェックして 0.3 から 20Hz の範囲で行い、NS・EW 成分の rms 値を用いた。

スペクトルの分離解析では拘束条件が1つ必要となるので、平成15年度と同様に、 KiK-netのYMGH01(防府)のGL-200mのボアホール観測データを利用して地盤の影響を 剥ぎ取ってS波速度が約3,450m/sの岩盤露頭波相当の基準観測点とした。

こうして得られた震源特性や伝播経路特性は平成 15 年度のそれとほとんど同じであった。図1にプレート境界地震の伝播経路特性を過去の結果と比較して示す。

以上の準備のもとで、KiK-netのボアホール観測波を地表面観測波と置き換えて、同様 に分離解析を行った。得られたサイト特性以外の震源特性・伝播経路特性はほぼ同じであ った。サイト特性を地中と地表について比較した一例を図2に示す。この図からまず、地 中観測点でのサイト特性は決して1.0に近いわけではなく、かなり大きなピークレベルを 示すことがわかる。また、地中と地表のスペクトル比は当然地表の増幅も受けているが地 中の影響も受けており、そのピークは地表のピークと一致する場合もあるが、地中スペク トルの谷によって生じる場合もあることがわかる。これら2地点では地中に谷が明瞭に出 ている周波数があり、この周波数で上昇波と下降波が干渉しているものと推察される。こ れに対して図3に示したFKOH01からFKOH03までの地中観測点のサイト特性には見る べきシャープな谷(1.0以下となる谷)は見られず、全体にフラットな特性を示している。



図1 スペクトル分離手法で得られた 1/Q の地域別周波数特性



図 2 AOMH05 (左) と IWTH25(右)の地表サイト特性(赤)、地中サイト特性(黒)、お よび両者の比(青)



図 3 FKOH01・FKOH02・FKOH03の地中サイト特性

数の上では図3のような周波数変動の少ない比較的フラットな特性を示す地点やむしろ地 中でもピークを示す地点が多く、一次元地盤モデルから計算されるような明瞭な谷を持つ 地中サイト特性を示す地点は少ないことがわかった。また場所によっては地中においても 10倍ほどの増幅を示す地点も散見され、決して岩盤中の観測地点だからといってサイト特 性が小さいわけではないことも判明した。

っぎに非線形特性に関する検討結果を報告する。上述のように全体のスペクトル分離解 析ではサイト特性の不変性を仮定しているので、非線形性が生じているような観測波形を 含めるとサイト特性の誤差の原因となる。そこで全体解析では最大加速度が 200Gal 以下 という条件をつけて大加速度入力時のサイト特性が混入することを防止している。しかし、 大地震の場合には、200Gal 以下の多数の観測点の情報からその地震の震源特性を求める ことができるので、求めた震源特性と伝播経路特性から、200Gal 以上の観測点直下の基 盤入射波のスペクトルを推定することができる。この基盤波スペクトルと観測波スペクト ルの比はその観測波だけから求められるサイト特性の1サンプルとなる。今回はそのよう にして個々の地震波に対するサイト特性を求め、平均的なサイト特性と比較した。対象と したのは 2003 年十勝沖地震と 2005 年福岡県西方沖地震であるが、本報告では主として後 者の結果について報告する。

図4には得られた福岡市内のK-NET観測点FKO006と中央区の震度計FKO101のサイ ト特性を示す。図でピンクが振幅の小さな記録から求めた平均的サイト特性、青が本震記 録から求めたサイト特性である。最大加速度は最上部に記載されている。緑の線は比較の ために示した上下動の平均サイト特性である。この図から確かに本震の方がサイト特性の ピーク周波数が低振動数側に系統的にシフトしているように見える。しかし、観測されて いるサイト特性を個々に求めなおし、そのばらつきを求めて本震のサイト特性と比較する と、図5に示したように、本震のサイト特性は中小地震のサイト特性のばらつきの中にほ ぼ含まれてしまうことがわかる。このように、非線形性は確かに存在しているとしても、 その影響は(地震入力が非常に大きくない限り)それほど大きなものではなく、線形のサ イト特性を普遍的に利用することはそれほど大きな問題を引き起こすものではないことが わかった。



図 4 FKO006・FKO001(福岡市中央区震度計)の平均サイト特性と本震のサイト特性



図 5 FKO006・FKO001(福岡市中央区震度計)の平均および平均±1 σのサイト特性 と本震のサイト特性

(d) 結論ならびに今後の課題

スペクトル分離手法を K-NET・KiK-net・JMA 震度計ネットワーク、および福岡市内 の震度計観測波に対して適用し、震源係数・距離係数・サイト係数を求めた。今回の解析 で得られた震源特性・伝播経路特性は、平成 15 年に実施した分離解析結果と良く一致す るものであった。得られたサイト特性の発生メカニズムをさらに分析するため、KiK-net のボアホール観測波形を用いて同様に分離解析を行い、ボアホールのサイト特性を求めた。 その結果、ある周波数帯に明瞭な谷を持ち、そこで地中と地表のスペクトル比にピークを 生じているケースが確かに存在していることが確認された。しかし多くの観測点では地中 記録の周波数変動は滑らかでかつ 1.0 以上となっており、場所によっては 10 倍以上の増 幅を示すサイトも存在した。これは硬質岩盤内の地中といえどもサイト特性が無視できる ほど小さいとはいえないことを意味している。この地中記録のサイト特性が生じるメカニ ズムについては個別サイトに対するシミュレーションを実施して明らかにする必要がある。 また大加速度記録に対するサイト特性を推定した地震基盤スペクトルを用いることで求め、 中小加速度記録に対する平均的サイト特性と比較した。その結果、確かに大加速度記録に 対しては非線形性の影響が表れているように見えるが、その差は入力レベルがそれ程大き くない場合、個々の地震によるばらつきの範囲内に留まっていた。これはよほどの大加速 度記録かよほどの軟弱地盤でない限り、サイト特性にばらつきを考慮することにより、線 形性の仮定を用いても安全側の評価が可能であることを示唆している。

今後の課題として地中記録と地表記録の両者の分離サイト特性を同時に満たすような 速度構造を同定するアルゴリズムを使って地盤構造を求めることを試みる必要がある。特 に上下動も含めれば全部で4種類の拘束条件が得られるのでより詳細な構造を求められる 可能性がある。

(e) 引用文献

1) 川瀬博, 松尾秀典: 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, pp. 33-52,

2004.

2) 川瀬博: 福岡県西方沖地震で観測された震度計データとその構造物破壊能,日本地震工 学会大会 2005 年梗概集, 2005.

著者	題名	発表先	発表年月日
Kawase,	Separation of Observed	Third International	平成 18 年
H. and Y.	Ground Motion Spectra to Get	Symposium on the Effects	8月30日
Nejime	Site Amplification Factors:	of Surface Geology on	
	Linearity and Nonlinearity	Seismic Motion 2006,	
		Grenoble, France	
Kawase,	Borehole Observation for Site	Third International	平成 18 年
Н.	Effect Studies	Symposium on the Effects	8月30日
		of Surface Geology on	
		Seismic Motion 2006,	
		Grenoble, France	
祢占雄介,	全国の強震動ネットワークの観	日本建築学会大会学術講演	平成 18 年
川瀬博	測記録から抽出したサイト特性	梗概集, B-2 構造Ⅱ, pp.	9月7日
	福岡県西方沖地震の記録に着目	23-24	
	して		
川瀬博	福岡県西方沖地震で観測された	日本地震工学会論文集,	投稿中
	震度計データとその構造物破壊	2006	
	能		

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

- (g) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定
 - 1) 特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし