

1923 年関東地震の広帯域強震動評価： 震度分布再現に向けたモデル化の現状

○ 瀧 一 起¹⁾, 三宅 弘 恵²⁾, 小 林 励 司³⁾, 田 中 康 久⁴⁾, 池 上 靖 史⁵⁾

- 1) 東京大学 地震研究所, koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp
- 2) 東京大学 地震研究所, hiroe@eri.u-tokyo.ac.jp
- 3) 東京大学 地震研究所, reiji@eri.u-tokyo.ac.jp
- 4) 東京大学 地震研究所, ystanaka@eri.u-tokyo.ac.jp
- 5) 東京大学 地震研究所, ikegami@eri.u-tokyo.ac.jp

1. 海溝型地震の震源モデル化

海溝型地震の中でも浅いプレート境界地震は比較的短い間隔 (100~200 年程度) で繰り返し発生しているだけでなく, その繰り返しの中で常に同じ場所がアスペリティ (断層すべりの大きかった領域) になるという「アスペリティモデル」が提唱されている^{1,2)}. このアスペリティモデルに依拠すれば, もし一回前の地震時の震源過程がわかっている場合 (東南海地震³⁾, 宮城県沖地震⁴⁾ など), それを来るべき地震の震源モデルとすることができる. ところが, プレート境界地震はその規模の大きさから, 震源過程の解析が長周期帯に限定して行われていることが多い. そのため, 前回地震の震源モデルをそのまま用いると, 予測強震動の中周期帯 (1~5 秒程度) でスペクトルが落ち込むことが予想される. この落ち込みを補うため, 震源過程モデルを基に擬似動的震源モデル⁵⁾を構築し, これを中周期帯を含んで周期 1~2 秒程度までの強震動をカバーする長周期側震源モデルとする.

一方, 深いプレート境界地震やスラブ内地震は発生間隔が長いので, 一回前の地震が詳しくわかっていない場合が多い. また, 浅いプレート境界地震でも東海地震などでは, 一回前が近代的な地震観測以前の歴史時代のため, やはり詳細がわからない. そうした場合には内陸地震と同じように特性化震源モデル⁶⁾を用いることになる. ただし, 断層面積やアスペリティ総面積などのスケールング則が, 内陸地震と海溝型地震では異なるという研究があるので (たとえば Somerville・他⁷⁾), 改めて日本付近の海溝型地震の震源過程モデルを収集し, 特性化⁸⁾とスケールングの作業をプレート境界地震に施した.

その結果⁹⁾によれば, 地震モーメント M_0 (Nm) に対して断層面積 S (km^2) とアスペリティ総面積 S_a (km^2) は

$$S = 1.49 \times 10^{-10} M_0^{2/3}, S_a = 2.90 \times 10^{-11} M_0^{2/3}$$

とスケールングされる (図 1). 上式を内陸地震に対する結果⁸⁾と比較すると, 同じ M_0 に対してプレート境界地震はやや大きい (S は 1.43 倍, S_a は 1.25 倍) が, 従来

の 2 倍以上大きいという結果⁷⁾に比べるとかなり内陸地震に近い結果となった.

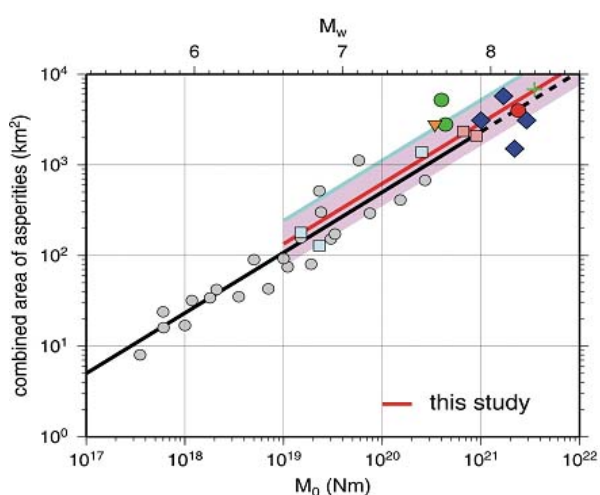


図 1: アスペリティ総面積のスケールング.

なお, 最近の地震ほど豊富なデータにより震源過程の解析精度が上がっていると考えられるので, 2003 年十勝沖地震, 1996 年 10 月および 12 月日向灘の地震, 1994 年三陸まるか沖地震のモデルだけ取り出してスケールングを行ってみた. その結果

$$S = 1.41 \times 10^{-10} M_0^{2/3}, S_a = 2.90 \times 10^{-11} M_0^{2/3}$$

は S がわずかに小さくなるだけで前式とほとんど変わらなかった. また, どちらの場合も S に対する S_a の比率は 20% 前後で, 内陸地震の 22%⁸⁾に少し小さい値となった.

内陸地震では, 短周期成分を含む強震動を生成する領域と, 地震動の長周期成分の解析から得られるアスペリティ領域 (すべりの大きい領域) がほぼ一致するとして支障がないことが知られている¹⁰⁾. ところが, 2003 年十勝沖地震¹¹⁾や 1978 年宮城県沖地震¹²⁾では, 強震動生成域がアスペリティ領域に比べかなり小さい面積でない, 短周期を中心とした強震動を説明できないという解析結果が公表されている. この点に関して, われわれのグループも解析作業を始めたところであるが¹³⁾, たとえば 2003 年十勝沖地震については, Koketsu et al.¹⁴⁾のインバ

ージョン結果から Somerville et al.⁸⁾の方法で抽出されたアスぺリティ領域 (図 2) に対して, 経験的グリーン関数法による強震動シミュレーションを行うと, 全周波数帯域において良好な一致を示している (図 3). ところが Honda et al.¹⁵⁾のインバージョン結果を用いると, Koketsu et al.のモデルとほぼ同じ地震モーメント (約 8.5×10^{20} Nm) を有するにも関わらず, 断層面全体の平均応力降下量が小さく, かつ断層面積に占めるアスぺリティ総面積の割合が大きい (19%), 応力降下量が約 1/3 となった. その結果, 短周期レベルが半分程度となり, 全観測点の全周波数帯域において過小評価となる結果を得た. これは, 2003 年十勝沖地震に関して, 震源過程インバージョンの結果によっては「アスぺリティ≒強震動生成域」が成り立たないことを示している. しかも, Honda et al.¹⁵⁾のモデルがプレート境界地震として特別というわけではなく, 室谷・他⁹⁾のスケールアップ結果によれば, Honda et al.¹⁵⁾による断層面積やアスぺリティ面積は日本付近のプレート境界地震の標準的な値に近い. こうした困難を克服してプレート境界地震の広帯域強震動予測を実現するために, たとえばアスぺリティの実効応力を内陸地震とは異なるレシピで設定するなどのアプ

ローチを現在, 検討している.

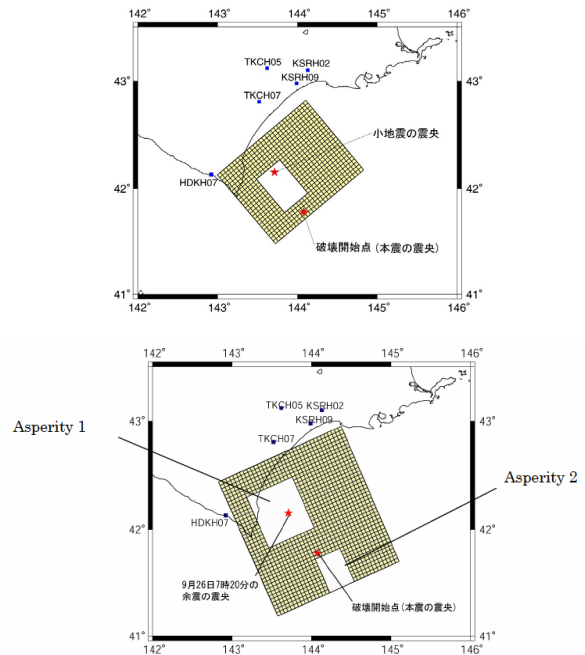


図 2: 2003 年十勝沖地震のインバージョン結果 (上: Koketsu et al., 下: Honda et al.) から抽出されたアスぺリティ¹³⁾.

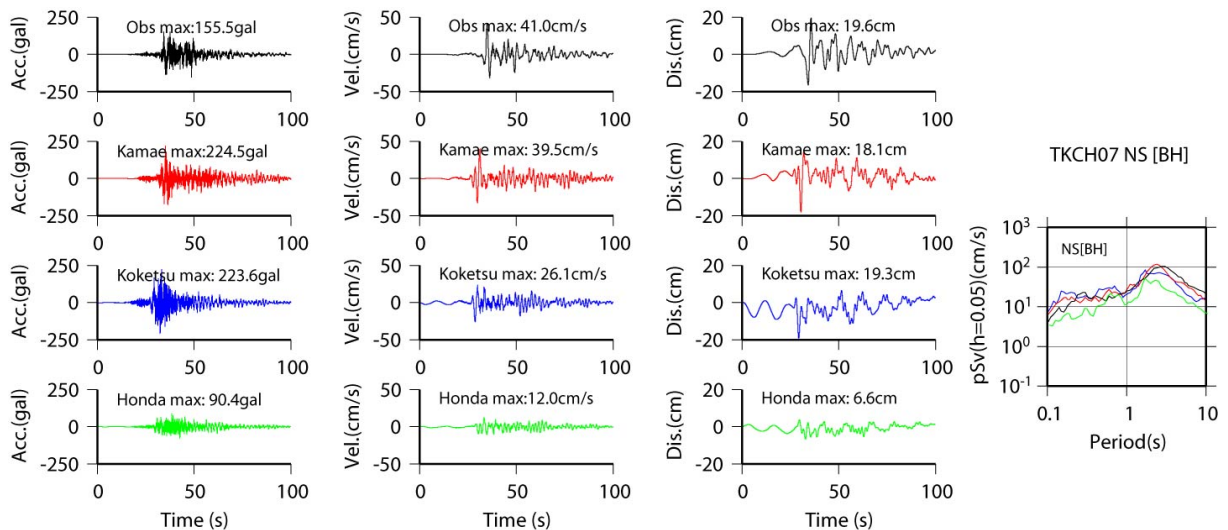


図 3: KiK-net TKCH07 の観測波形 (上から第 1 段) と経験的グリーン関数法による合成波形 (第 3 段: Koketsu et al., 第 4 段: Honda et al. から抽出されたモデルによる) の比較. 左図の左から順に加速度・速度・変位が示される. 右図は擬似速度応答スペクトル. 左図第 2 段は Kamae and Kawabe の強震動生成域モデルによる合成波形¹³⁾.

2. 1923 年関東地震の震源モデルと構造モデル

2002 年に始まった大都市大震災軽減化特別 (大大特) プロジェクトのテーマ I 「地震動 (強い揺れ) の予測」では, 図 4 に示す 4 本の測線で大規模な反射法探査を実施し, 首都圏下に沈み込むフィリピン海プレート上面の形状を直接的にイメージングすることに成功した. その結果 (同じく図 4) によれば, フィリピン海プレート上面は従来のモデルより全体的に浅くあるベ

きで, たとえば東京都下では従来のモデルがほぼ深さ 40km であるのに対して, 探査結果は深さ約 25km であることを示している¹⁶⁾.

1923 年関東地震の断層面を設定すべきフィリピン海プレート上面のジオメトリがこのように変化すると, それに基づいて定式化されている震源過程インバージョンの結果も変化せざるを得ない. 図 5 は旧ジオメトリに基づくインバージョン結果 (すべり分布, 上図)

¹⁷⁾を新ジオメトリによる結果(中・下図)と比較している。新ジオメトリでは全体的にややすべりが小さくなるとともに、アスペリティが北向きに深い方向へ移動した。この新ジオメトリによるすべり分布(中図)から、擬似的動的震源モデル(図6)は作成済みである¹⁸⁾。

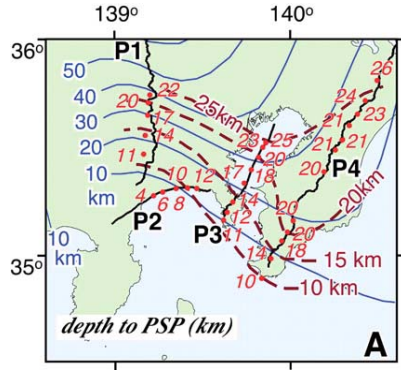


図4: フィリピン海プレート上面の従来のモデルと大大特プロジェクトによる最新モデル¹⁶⁾。

前述の反射法探査ではプレート上面だけではなく、堆積平野と地殻最上部を区切る地震基盤もイメージングされている。こうした情報や、既存の各種探査やボーリングなどのデータも併せて解析して、図7の地下構造モデルを構築した¹⁹⁾。現在は、1923年関東地震以外の海溝型地震にも適用可能なように、モデルの拡張とチューニングを行っている²⁰⁾。また、表層増幅率地図は地形地盤分類図を利用して作られる。従来は1kmメッシュの分類図が用いられていたが、同じく大大特プロジェクトで250mメッシュの分類図が作成された(図8)²¹⁾。浅層地盤に関しては現在、ボーリング情報を活用してN値50超(S波速度350m/s程度)の層や下総層の上面の設定、localityを考慮したAVS30(地表下30mの平均S波速度)の分布図などを作成中である²²⁾。

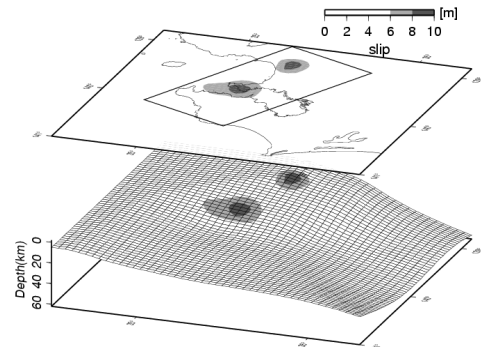
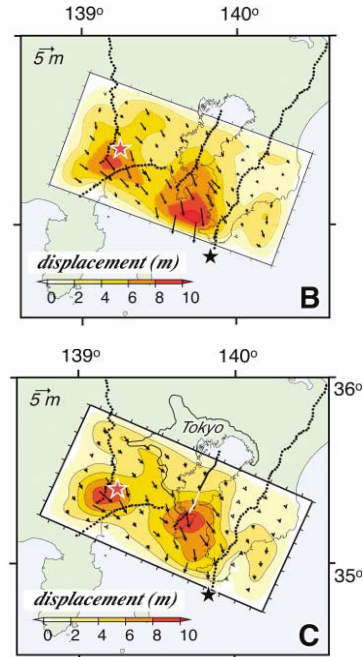


図5: プレート上面の従来モデルによる震源過程インバージョン結果(上)¹⁷⁾、大大特モデルによるインバージョン結果(中)¹⁶⁾とその三次元表示(下)。

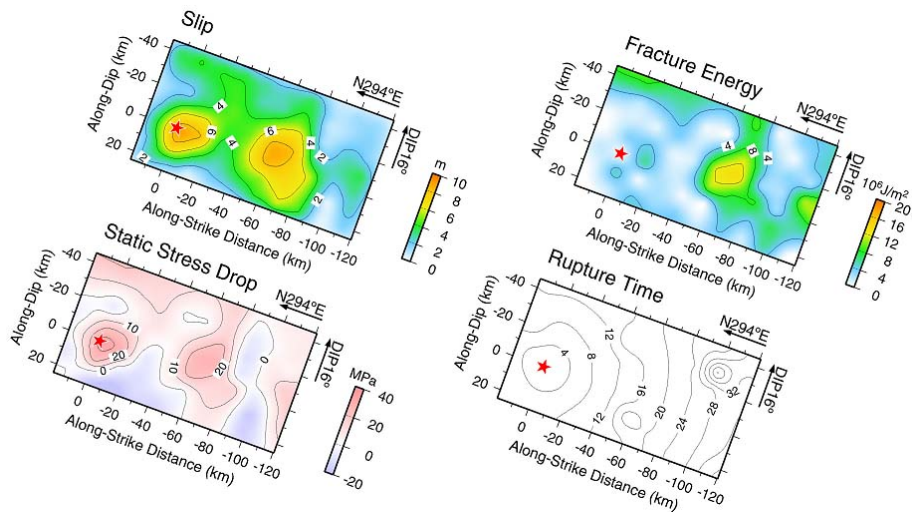


図6: 新インバージョン結果から求められた擬似的動的震源モデル¹⁸⁾。

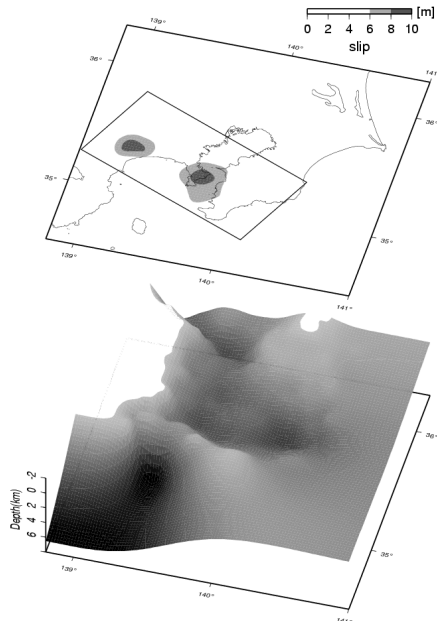


図7 : 地下構造モデル¹⁹⁾と関東地震のアスペリティ.

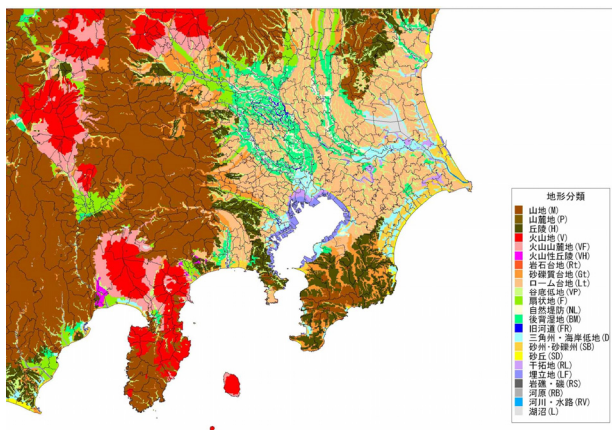


図8 : 首都圏の250mメッシュ地形地盤分類図²¹⁾.

3. 長周期シミュレーションの中間結果

図5の新震源過程モデル、図7の地下構造モデルとボクセル有限要素法を用いた長周期の強震動シミュレーションを行っている¹⁸⁾。その中間結果の一例を図9にスナップショットで示した。また、このシミュレーションにより再現された東京・本郷の強震波形を図10に示した。当地では東京帝国大学地震学教室の地震計が東西成分 (N77度E) を観測しており、その波形にシミュレーション結果はよく一致しているように見える。しかし、図11に示した応答スペクトルを見ると、周期2~4秒では観測に近いレベルにあるが、5秒以上の長周期ではパワーがやや足りない結果になっている。

4. 今後の予定

本郷の5秒以上の波形も再現されるように、シミュレーションで使った構造モデルを用いてグリーン関数を再計算して、震源過程インバージョンをやり直し、その結果を基に震源の再モデル化を行う予定である。また、最近開始した短周期側のシミュレーションも本格化させて、関東地震の再現波および、そこから計算される再現震度分布の第一版を提案したいと考えている。

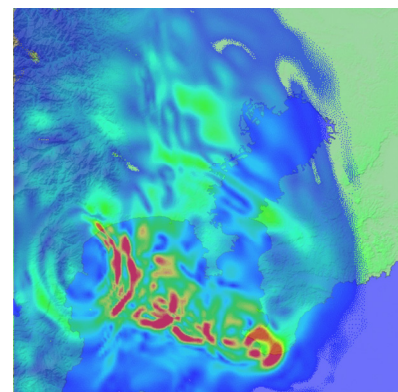
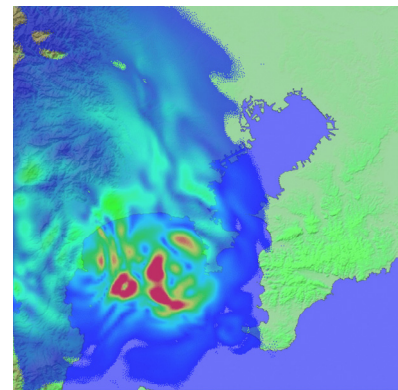
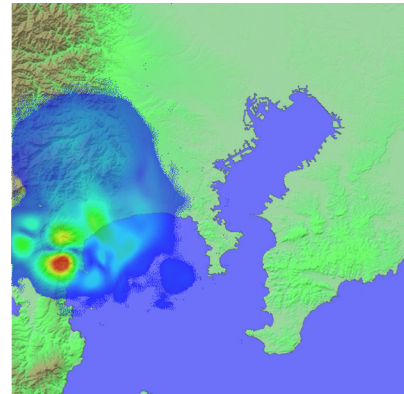


図9 : 1923年関東地震による強震動の長周期シミュレーション (地震発生後10, 20, 30秒のスナップショット)。

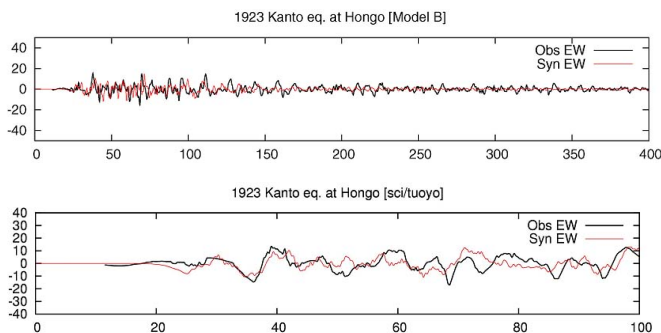


図 10：東京・本郷におけるシミュレーション波形と観測波形の比較（上：全体 400 秒間，下：初期 100 秒間）。

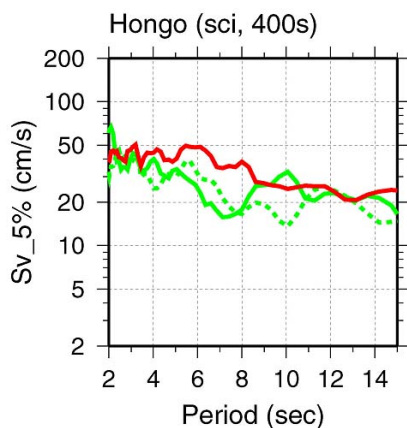


図 11：東京・本郷におけるシミュレーションと観測の比較（応答スペクトル）。点線は南北成分。

参考文献

- 1) Yamanaka, Y. and M. Kikuchi: Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, **109** (B7), Art. No. B07307, 2004.
- 2) Matsuzawa, T., T. Igarashi and A. Hasegawa: Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (11), Art. No. 1543, 2002.
- 3) Ichinose, G. A., H. K. Thio, P. G. Somerville, T. Sato and T. Ishii: Rupture process of the 1944 Tonankai earthquake (M_s 8.1) from the inversion of teleseismic and regional seismograms, *J. Geophys. Res.*, **108** (B10), Art. No. 2497, 2003.
- 4) 呉長江・瀬藤一樹: 強震波形記録による 2005 年・1978 年宮城県沖地震の震源過程, 日本地震学会講演予稿集, PM20, 2005.
- 5) Guatteri, M., P. M. Mai, and G. C. Beroza: A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 2051-2063, 2004.
- 6) 入倉孝次郎・三宅弘恵, シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, **110** (6), 849-875, 2001.
- 7) Somerville, P. G.・佐藤俊明・石井透・N. F. Collins・壇一男・藤原広行: 強震動予測のためのプレート沈み込み帯沿い地震の不均質すべりモデルの特性抽出, 第 11

- 回日本地震工学シンポジウム, 163-166, 2002.
- 8) Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada: Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismol. Res. Lett.*, **70**, 59-80, 1999.
- 9) 室谷智子・三宅弘恵・瀬藤一樹: 海溝型地震の不均質断層パラメータのスケーリング則, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会, S52-006, 2005.
- 10) Miyake, H., T. Iwata, and K. Irikura, Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93** (6), 2531-2545, 2003.
- 11) Kamae, K. and H. Kawabe: Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake $M_{JMA}=8.0$ estimated by the empirical Green's function method, *Earth Planets Space*, **56** (3), 323--327, 2004.
- 12) 地震調査委員会: 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 分冊 2, 地震調査研究推進本部, 262 頁, 2005.
- 13) 畑奈緒美・三宅弘恵・瀬藤一樹: 海溝型地震の強震動生成域とアスペリティ, 日本地球惑星連合 2006 年大会, 2006.
- 14) Koketsu, K., K. Hikima, S. Miyazaki, and S. Ide, Joint inversion of strong motion and geodetic data for the source process of the 2003 Tokachi-oki, Hokkaido, earthquake, *Earth Planets Space*, **56**, 329-334, 2004.
- 15) Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi, and H. Fujiwara, Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, *Earth Planets Space*, **56**, 317-322, 2004.
- 16) Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, . Kasahara and S. Harder, Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, **309** (5733), 462-464, 2005.
- 17) Kobayashi, R. and K. Koketsu: Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data, *Earth Planets Space*, **57** (4), 261-270, 2005.
- 18) Miyake, H., K. Koketsu, R. Kobayashi, Y. Tanaka and Y. Ikegami: Broadband ground motion validation of the Great 1923 Kanto earthquake using the new image of the Philippine Sea slab and integrated 3D velocity-structure model, *Eos Trans. AGU*, **86**(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S21A-0202, 2005.
- 19) 田中康久・瀬藤一樹・三宅弘恵・古村孝志・佐藤比呂志・平田直・鈴木晴彦・増田徹: 首都圏下の速度構造の大大特コミュニティモデル(1): 屈折法・重力・自然地震データによる第一次モデル, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会, S079P-010, 2005.
- 20) 田中康久・三宅弘恵・瀬藤一樹・古村孝志・早川俊彦・馬場俊孝・鈴木晴彦・増田徹: 首都圏下の速度構造の大大特統合モデル(2): 海溝型地震のためのモデル拡張とチューニング, 日本地球惑星連合 2006 年大会, 2006.
- 21) 若松加寿江・松岡昌志: 大都市圏を対象とした地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM, 2003.

- 22) 三宅弘恵・瀨瀬一起・古村孝志・稲垣賢亮・増田徹:
首都圏下の速度構造の大大特統合モデル(3): ボーリング
情報を活用した浅層地盤モデルの構築, 日本地球惑
星連合 2006 年大会, 2006.