

3. 4. 2 動的断層モデル構築と強震動シミュレーションの実施

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 動的断層モデル構築と強震動シミュレーションの実施

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人産業技術総合研究所	研究員	吉見 雅行
独立行政法人産業技術総合研究所	主任研究員	堀川 晴央
独立行政法人産業技術総合研究所	研究員	竿本 英貴
独立行政法人産業技術総合研究所	特別研究員	林田 拓己
国立大学法人京都大学防災研究所	准教授	関口 春子
国立大学法人京都大学防災研究所	教授	岩田 知孝
国立大学法人京都大学防災研究所	助教	浅野 公之

(c) 業務の目的

上町断層帯の断層形状、最新の各種探査結果、断層動的破壊計算手法、高度化された大阪堆積盆地三次元構造モデルを組み合わせ、上町断層帯の強震動評価を高度化することを業務の目的とする。

(d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 平成 22 年度：

上町断層帯固有の地震シナリオ作成のために、大阪平野周辺の大阪層群の鍵層分布の収集・デジタイズ、既往震源モデル作成に用いられた断層帯に沿った断層変位分布の資料収集・整理、および、上町断層南部での地中レーダー探査を実施した。

2) 平成 23 年度：

上町断層帯固有の地震シナリオを作成した。既往研究を基にした上町断層帯の断層面三次元形状および断層走向方向の平均変位速度分布を用いて応力場のモデルを作成し、動的断層破壊計算により地震シナリオを作成した。さらに、地震シナリオから地震動を計算した。また、平成 22 年度の収集データによる上町断層帯の断層面三次元形状の暫定モデルを地震シナリオの作成や地震動計算に導入する準備を行った。

3) 平成 24 年度：

収集データを基にした上町断層帯の断層面三次元形状および断層走向方向の平均変位速度分布を用いて新たに動的破壊計算を行い、物理的に発生しうる地震シナリオを複数作成する。さらに、地震シナリオと地下構造モデルを用いて地震動シミュレーションを行い、広帯域の地震動を評価する。調査観測のまとめを行う。

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 業務の要約

1) 上町断層帯固有の地震シナリオの作成、および、地震動の評価

本業務で得られるデータに基づき来年度に行う地震シナリオ作成に備え、既往研究に基づく上町断層帯の断層面三次元形状および断層走向に沿った平均上下変位速度分布を用いて、予察的な動的断層破壊計算を行い、予察的な地震シナリオを作成した。さらに、既往の地下構造モデルを用いて、約 1 Hz までの地震動を評価した。

2) 上町断層帯の断層面三次元形状の更新

サブテーマ 2 において平成 22 年度の収集データにより作成された上町断層帯の断層面三次元形状の暫定モデルを、地震シナリオの作成や地震動計算に導入する準備を行った。

(b) 業務の成果

1) 上町断層帯固有の地震シナリオの作成、および、地震動の評価

本業務では、地形・地質学的データに基づいて断層形状と応力場を想定し、その条件下で物理的に起こりうる破壊過程を数値計算で求めるという手順で、強震動予測のための地震シナリオを作成することを試みる。これにより、対象とする断層の個性を反映し、実現性の高い地震シナリオを用いた広帯域地震動の評価を行う。来年度に予定される平成 22、23 年度の収集データによる地震シナリオの作成および地震動の評価に先立ち、既往研究結果に基づいて、地震シナリオの作成および地震動の評価を行った。

上町断層帯の破壊過程をシミュレーションするための応力場については、以下に述べるように、まず、関口ほか (2003)、および、本業務において昨年度コンパイルした断層の変位に関するデータ (文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所, 2011) から、想定される平均的なすべり分布モデルを作成し、高周波数域の地震動を生成するために必要な短波長の不均質を付加した上で、これを応力場パラメータに変換するという流れで設定した。

初めに、反射法地震探査やボーリング調査などの結果、および、これらに基づいて作成された平野の堆積層構造モデル (堀川ほか, 2003) を用いて、上町断層帯の走向に沿った累積変位量の空間変化を求めた (図 1)。また、新淀川北岸での調査結果から、この地点での最新イベントによる地表上下変位量は 1.6~1.9 m、最大約 2.4 m と推定されている (杉山ほか, 2003)。これらのデータから、1 回の地震で生じる地表変位量の平均像を作成し、走向方向のすべり量分布とした (図 1、2 a)。

傾斜角方向のすべり量分布は、予備的な動的破壊の数値実験により作成した。この段階で、新淀川北岸での最新イベントによる地表上下変位量を再現できる広域応力場を求めた。テクトニックな応力場を考慮し、主応力は深さに比例 (Yamashita et al., 2004)、最大主応力の向きは東西方向、最小主応力の向きは鉛直方向で、大きさはかぶり圧に等しい、と仮定し、最大主応力の深さに対する比例係数と動摩擦係数を変えて数値計算をおこない、地表上下変位量が調査結果と調和する値を探索した (表 1)。更に、地震発生層下端付近で破壊が自発的に停止するように、11km 以深の摩擦係数を調節した。以上のように求めた

広域応力場と摩擦係数の深さ依存性を仮定して動的破壊過程を計算し、傾斜角方向のすべり量分布を得た（図 2 a）。

こうして得られた走向方向および傾斜角方向のすべり量分布を合成することで、長波長の不均質をもつすべり量分布の平均像を作成し、これを断層面上のすべり量分布の長波長成分とした（図 2 a）。更に、すべり量分布の短波長成分としてフラクタル的な不均質分布を作成し（図 2 b）、長波長成分と合成することで、想定されるすべり量分布を生成した（図 2 c）。

次に、断層の地表トレースから傾斜角 60 度で面を張り、曲面で形状をモデル化した断層面（関口ほか, 2005; 図 3 a）上にこのすべり量分布を与えたときの応力変化分布を Okada (1992) により求め、これを静的応力降下量分布とした（図 4 a, b）。最後に、加瀬ほか (2003) に従い、応力降下量分布の不均質は水平方向の主応力の不均質によって生じると仮定し、応力降下量の走向方向成分と傾斜角方向成分から断層面上の法線応力の不均質を求めた。これに静摩擦係数を乗じて、断層面上の強度の不均質分布とした（図 4 c）。

こうして得られた応力降下量と強度の分布を動的破壊モデルの応力場として用いて、差分法 (Kase, 2010) により動的破壊過程を計算した。このとき、断層面は地表を切る傾斜角 60° の平面とし、断層面の境界条件として、Coulomb の破壊基準とすべり弱化的摩擦構成則を仮定した。数値計算に用いたパラメータを、表 1 に示す。

初期クラックを 5 km 四方の正方形とし、その中心位置を断層北端から 6.5 km、断層上端（地表）から 12.5 km（深さ 10.8 km に相当）としたときの動的破壊過程を図 5 に示す。地震モーメントは 3.5×10^{19} Nm、Mw7.0 になった。応力場の不均質を反映して、破壊はなめらかには伝播せず、ところどころで壊れ残りも生じている（図 5 a）。主要な破壊領域での破壊伝播速度は 2.5~3 km/s 程度であるが、破壊は深さ約 5 km より浅い部分で先行し、深部へと伝播する傾向が見られる。これは、浅い部分での強度が小さいことを反映している（図 4 c）。

最終的なすべり量分布（図 5 b）は、想定したすべり分布（図 2 c）を比較的良好に再現している。断層面下端では、傾斜角方向に 15~22 km の範囲（深さ 13~19 km に相当）で破壊が自然に停止しており、地震発生層下端付近で地震性の高速すべりが生じなくなる現象も再現できている。また、動的破壊計算をしていること、および、破壊時刻とすべり量の不均質を反映して、断層面上の各点でのすべり速度の時刻歴は、パルス性の鋭いピークを持つ（図 5 c）。

図 5 に示した動的破壊計算結果を地震シナリオとして、前田・渡辺 (1984) の 1 次元地殻構造モデルと堀川ほか (2003) の大阪堆積盆地構造モデル（図 6 a）を用いて、約 1 Hz までの地震動を評価した結果を図 6 b に示す。断層周辺と盆地構造に対応して地動速度の大きい領域が広がっている。断層北部に現れる地動速度が大きい領域は、初期クラックから断層面の浅い方への破壊伝播（図 5 a）によって生じたものと考えられる。

表 1 数値計算に用いたパラメータ

最大主応力	34 z [MPa] (z は深さ [km])
中間主応力	29.25 z [MPa]
最小主応力	24.5 z [MPa]
静摩擦係数	0.45
動摩擦係数	0.172
臨界変位量	0.5 [m]
P 波速度	5.4 [km/s]
S 波速度	3.1 [km/s]
密度	2.5 [g/cm ³]
空間グリッド間隔 (断層面内)	0.1 [km]
空間グリッド間隔 (断層面外)	0.15 [km]
時間グリッド間隔	0.01 [s]

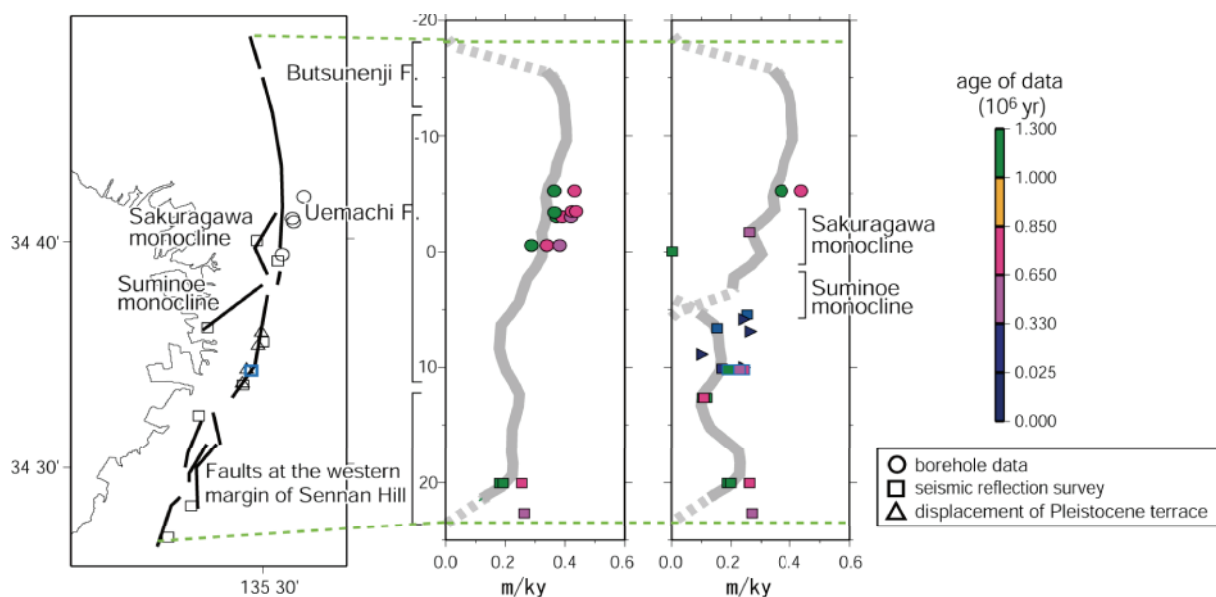
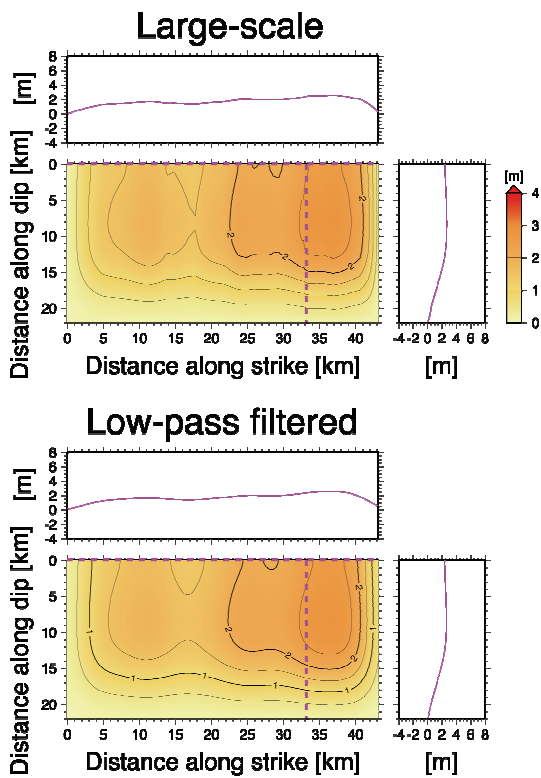
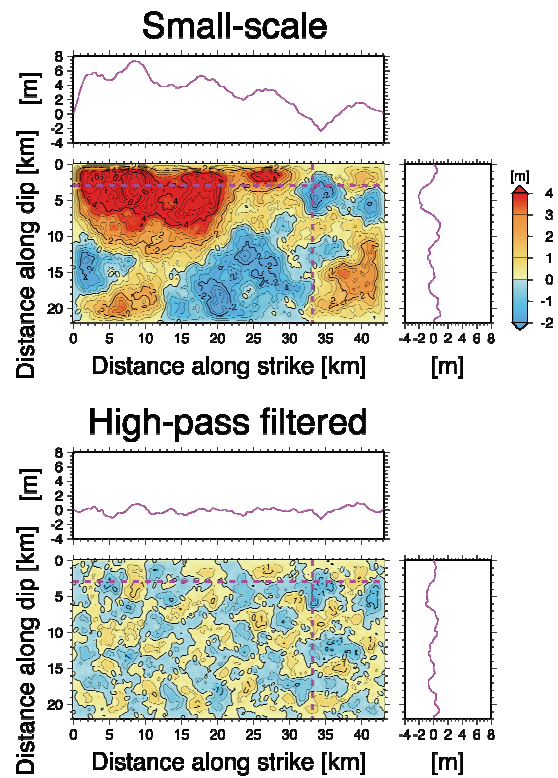


図1 関口ほか(2003)、および、本業務において平成22年度にコンパイルした断層の変位に関するデータ(文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所, 2011)。(左)上町断層帯の地表トレース(水野ほか, 2002)と、上町断層帯の累積変位に関するデータが得られたボーリング地点(○)、反射法地震探査測線と上町断層帯との交点(□)、段丘面(△)。(中)左図に示した調査地点における平均上下変位速度(記号は左図と同様。その色が累積変位の計算に用いた鍵層や段丘面の年代を示す)と大阪堆積盆地3次元地下構造モデルの堆積層中のMa3層下限の深度差(図2)から求めた平均変位速度の分布(灰色線)。後者の見積もりには、単一セグメントの場合を仮定して、断層帯に沿う変形域全体のMa3層の深度差を取っている。(右)中図と同様。ただし、断層面が2つのセグメントに分かれていると考えて、それぞれのセグメントの地表トレースに沿って、平均上下変位速度を見積もった場合。2つのセグメントが重複している部分以外でも、中図の値と異なっている部分がある(例えば、南北軸の10~17 km付近など)が、これは、断層の地表トレースから離れた部分の地層の変位の中に、中図の見積もりには含まれていて、右図の見積もりには含まれていないものがあるためである。なお、青枠の□は、大阪府(2004)による大和川南P波反射法探査によるデータである。本図は、関口ほか(2003)に青枠□のデータを加筆したものである。

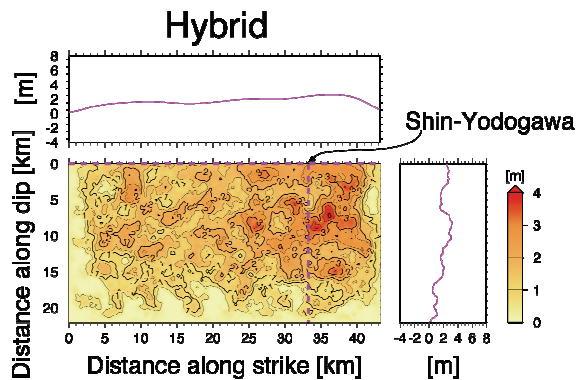
(a) 長波長のすべり分布



(b) 短波長の不均質



合成
(c) すべり分布



Spectrum

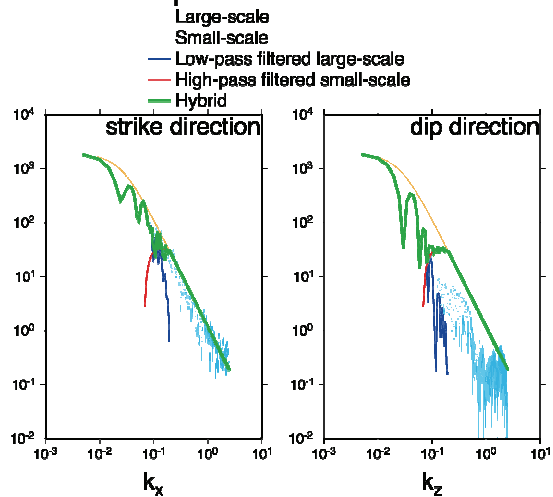


図2 想定されるすべり量分布の作成手順。(a) 地形・地質学的情報と予備的な動的破壊計算から得られた平均的なすべり量分布（上段）、および、その長波長成分（下段）。これをすべり量分布の長波長成分として用いる。(b) フラクタル的な不均質分布（上段）、および、その短波長成分（下段）。これをすべり量分布の短波長成分として用いる。(c) すべり量分布の長波長成分と短波長成分を合成して得られた、想定されるすべり量分布。波数スペクトル分布は、右図に示す緑線で表される。

(a) 応力場の計算に用いた
断層面形状モデル

(b) サブテーマ2で推定
された断層面形状モデル
(平成23年度版)

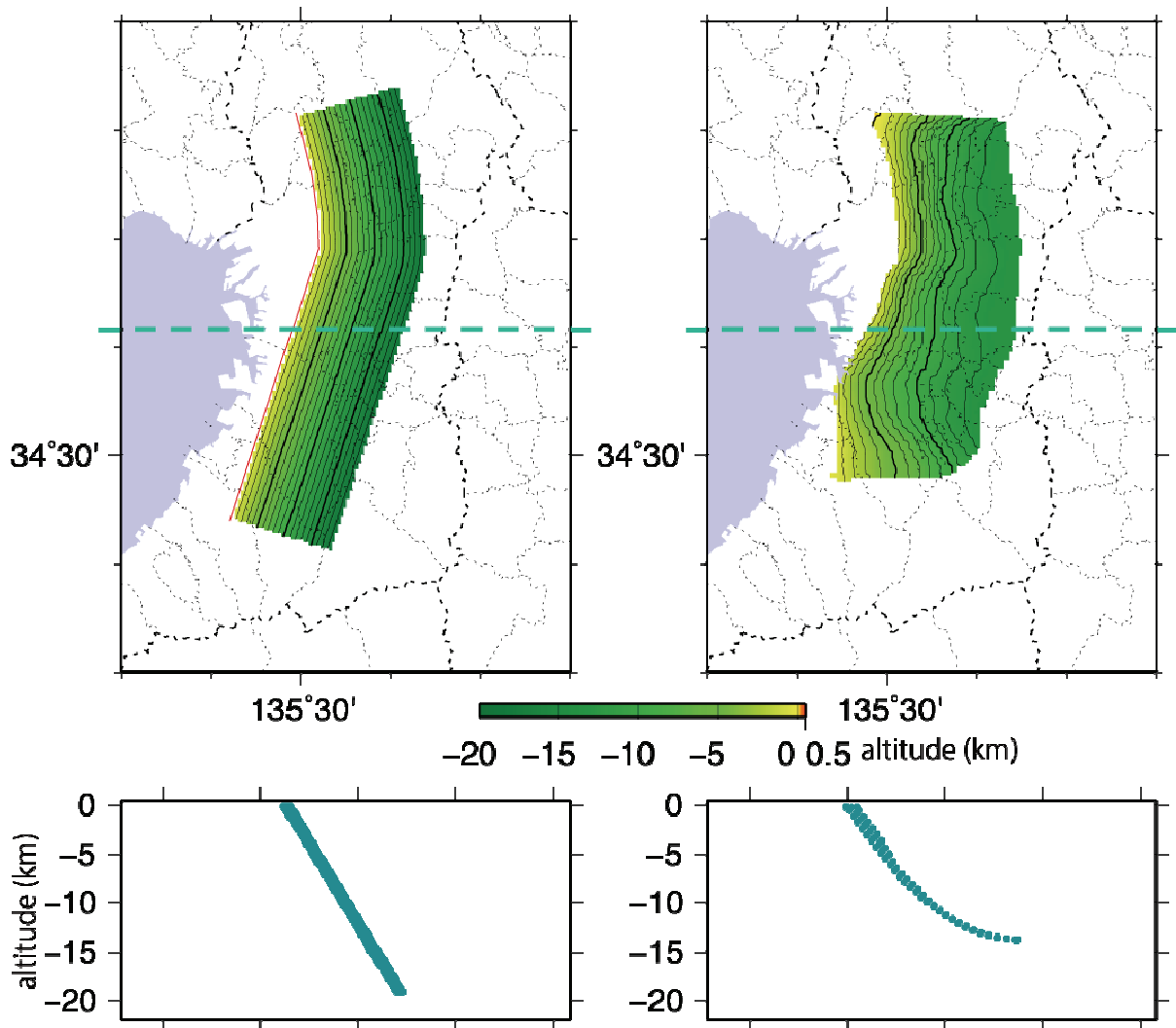


図3 断層面形状モデル。上段は、断層面の深度分布。下段は、青点線の位置での深さ断面図。(a) 今回、応力降下量分布を求める際に用いたモデル。関口ほか(2003)による。(b) 本業務において、本年度推定されたモデル。

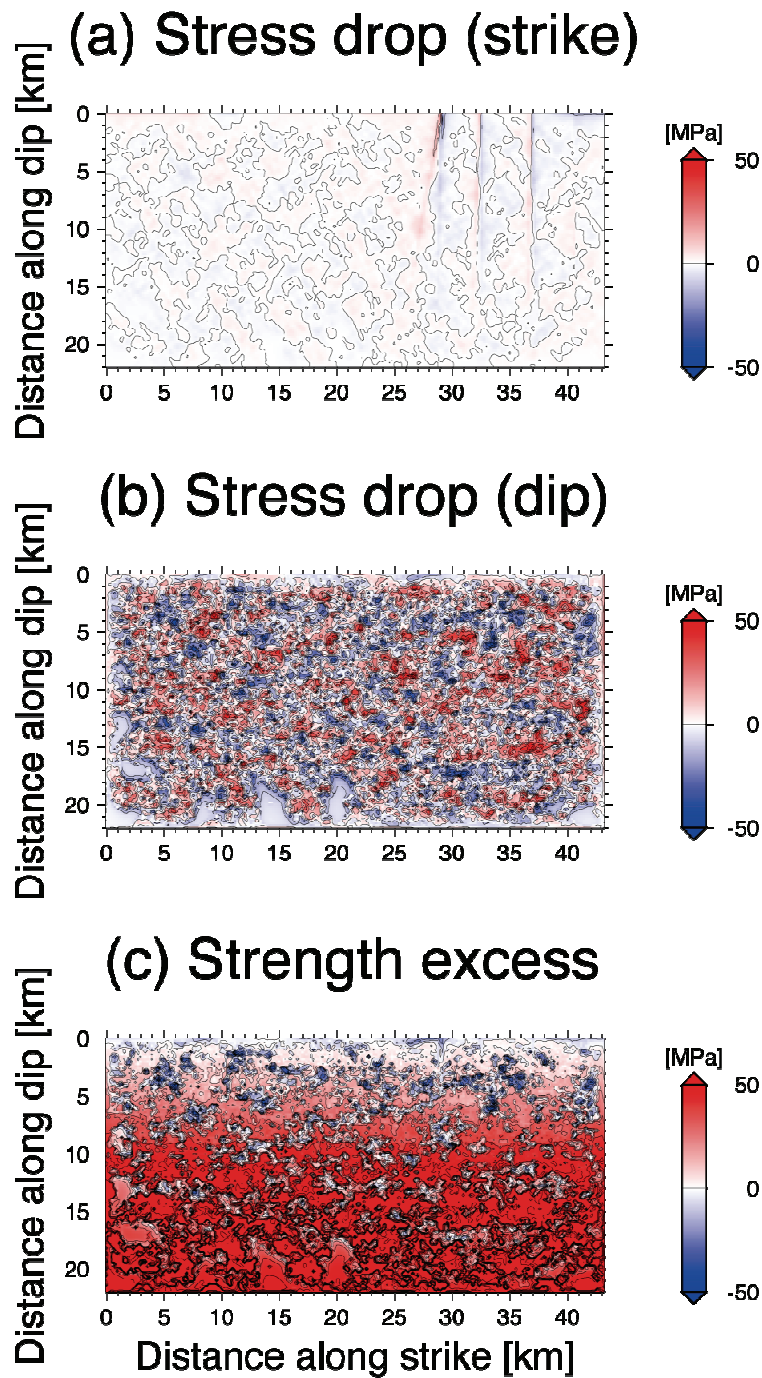


図4 応力場モデル。コンター間隔は10MPa。(a) 応力降下量の走向方向成分。正の値は、左横ずれを起こす向きを示す。(b) 応力降下量の傾斜角方向成分。正の値は、逆断層すべりを起こす向きを示す。(c) 強度。負の値は、初期状態で剪断応力が静摩擦応力を越えていることを示す。動的破壊計算においては、強度が負の領域ではすでに破壊が終了していると考え、剪断応力の初期値を動摩擦応力に置き換えている。

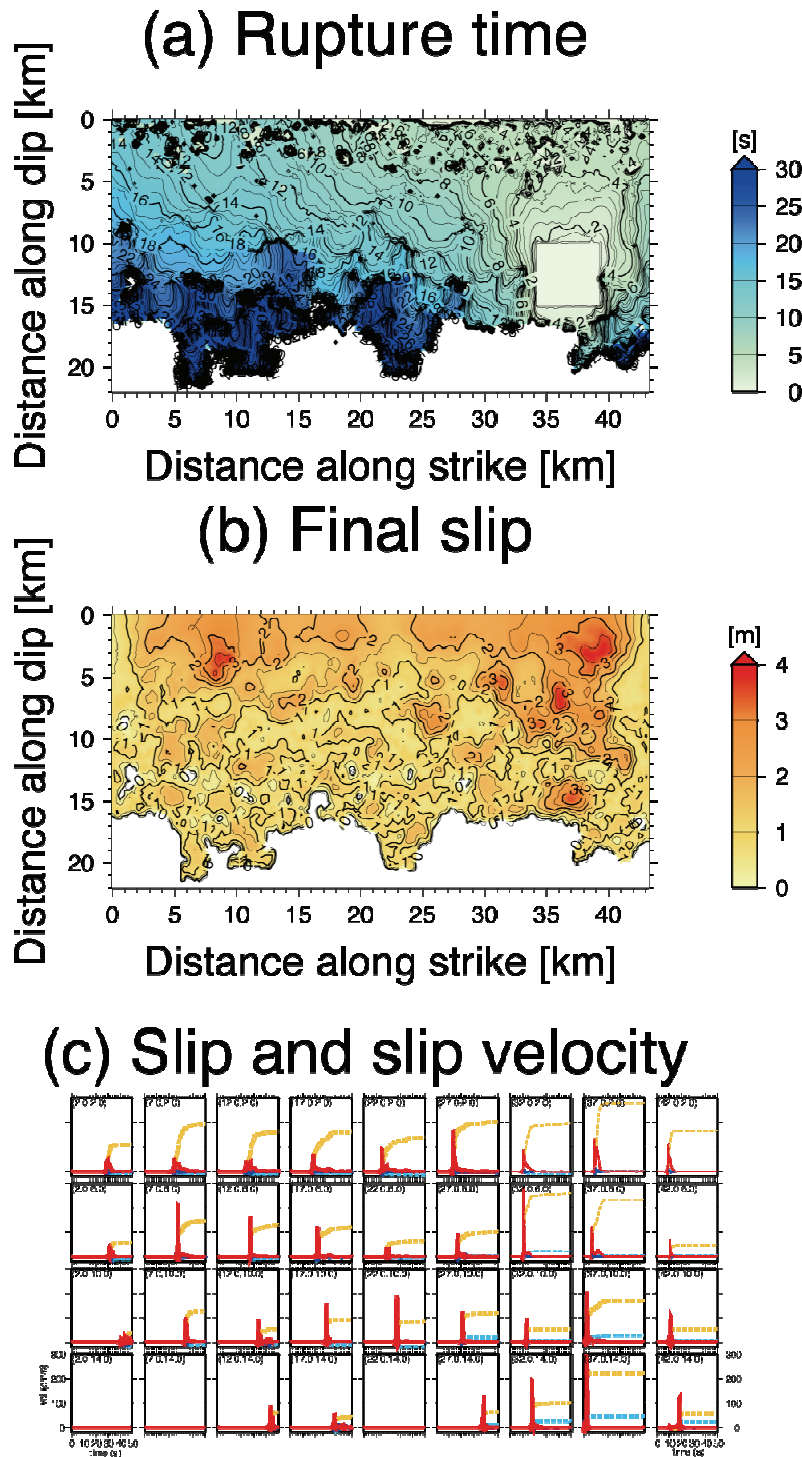
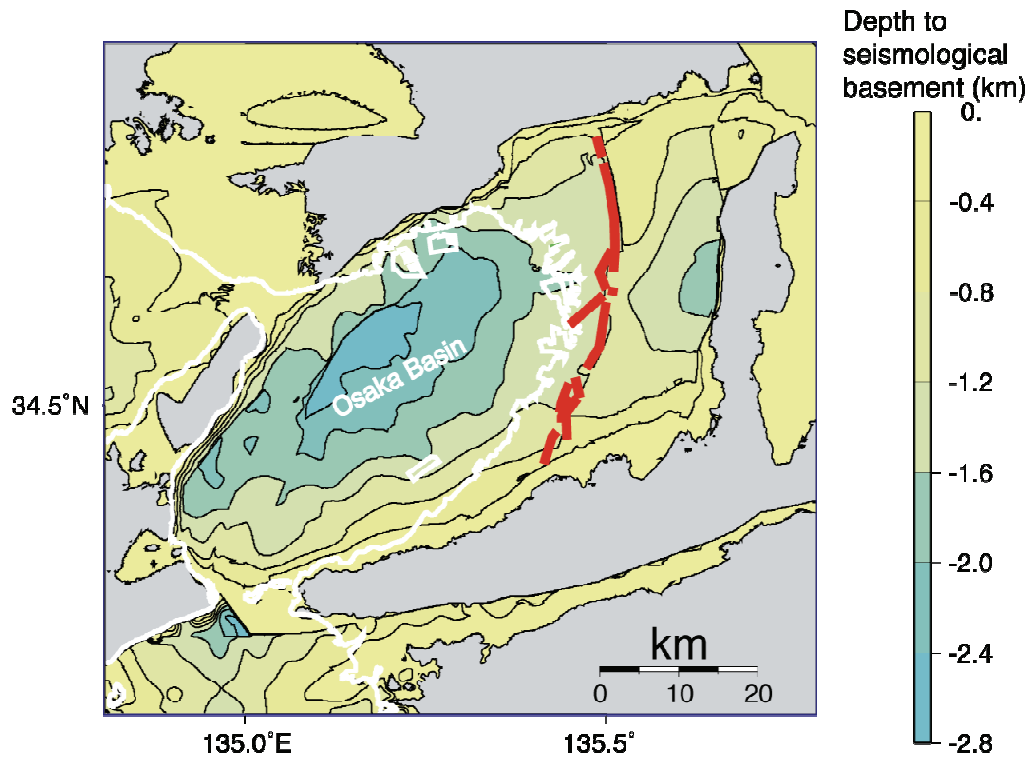


図5 図4に示した応力場モデルを用いて計算された動的破壊過程。初期クラックの中心位置を断層北端から6.5 km、断層上端（地表）から12.5 km（深さ10.8 kmに相当）としたときの結果。（a）破壊時刻。コンター間隔は0.5秒。（b）最終すべり量。コンター間隔は0.5 m。（c）断層面上の各点でのすべり量とすべり速度の時刻歴を抜粋したもの。赤実線：すべり速度の傾斜角方向成分。青実線：すべり速度の走向方向成分。橙点線：すべり量の傾斜角方向成分。水色点線：すべり量の走向方向成分。左上の数値は、各点の位置を断層面上の座標値で示したもの。

(a) Depth to seismological basement



(b) Peak ground velocity

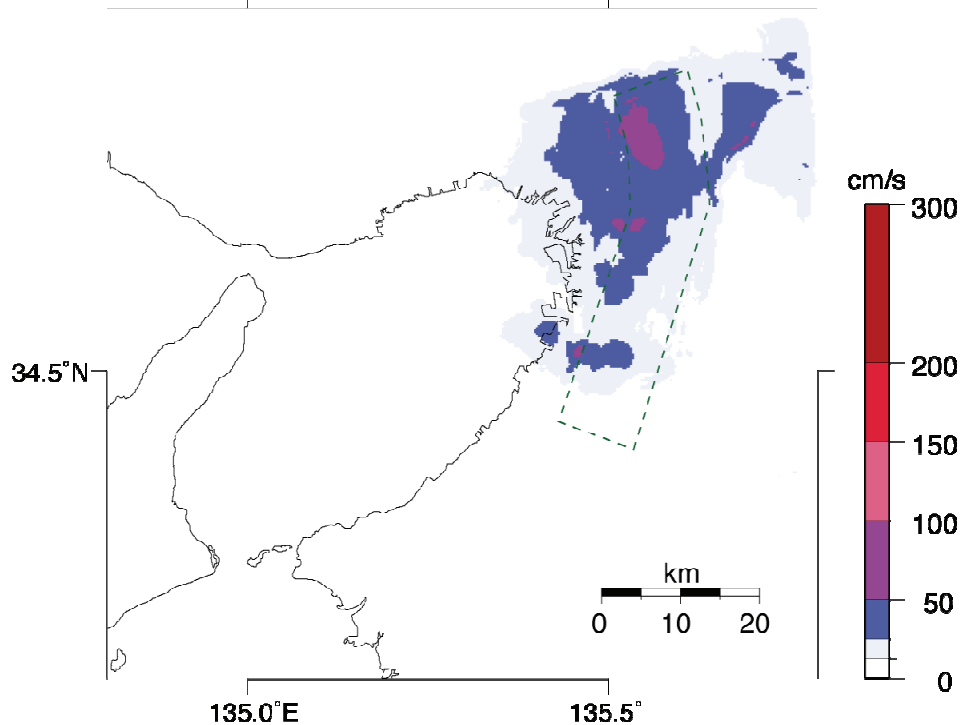


図6 (a) 地震動計算に用いた地下構造モデルの地震基盤の深さ。堀川ほか(2003)による。(b) 計算された地震動の最大地動速度分布。緑点線は、断層面の地表投影位置を示す。

2) 上町断層帯の断層面三次元形状の更新

サブテーマ2では、最終年度となる来年度に、上町断層帯の断層面三次元形状の最終モデルをまとめる予定であるが、今年度、平成22年度の収集データを用いて、暫定モデルが作成された。そこで、来年度の最終モデルを導入する準備として、この暫定モデルから、地震シナリオの作成や地震動計算に用いる断層面形状データを作成した(図3b)。これまでの断層面形状モデルに比べると、深い方で傾斜角が小さくなり、深い部分で浅めになっている。動的破壊過程に与える影響も考えると一概には言えないが、単純に断層面が浅くなることで、東大阪地域の地震動が大きくなる可能性が考えられる。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) 上町断層帯固有の地震シナリオの作成、および、地震動の評価

上町断層帯固有の地震シナリオを作成した。既往研究を基にした上町断層の断層面三次元形状および断層走向に沿った平均変位速度分布を用いて応力場のモデルを作成し、動的断層破壊計算により地震シナリオを作成した。また、その地震シナリオを用いて地震動を計算した。破壊が断層面の浅い部分で先行し、深部へ伝播する傾向があるなど、やや不自然な点については、来年度内に改善する。来年度は、サブテーマ1～3による平成22、23年度の調査結果に基づく上町断層の断層面三次元形状および断層走向に沿った平均変位速度分布を用いて応力場モデルを作成し、短波長不均質のモデルや破壊開始点の位置を変えて、複数の地震シナリオを作成する。それぞれのシナリオについて、サブテーマ4-1で探査・解析に基づいて修正された大阪堆積盆地地下構造モデルを用いて、大阪平野の地震動を評価する。

2) 上町断層帯の断層面三次元形状の更新

サブテーマ2により最終年度となる来年度に作成される上町断層帯の断層面三次元形状を地震シナリオの作成や地震動計算に導入する準備として、今年度作成された暫定モデルを数値計算のモデルに取り込んだ。来年度は、最終版の断層面三次元形状を用いて、地震シナリオの作成、および、地震動計算を行う。

(d) 引用文献

堀川晴央・水野清秀・石山達也・佐竹健治・関口春子・加瀬祐子・杉山雄一・横田 裕・末廣匡基・横倉隆伸・岩淵 洋・北田奈緒子・Arben Pitarka, 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル, 活断層・古地震研究報告, No. 3, 225-259, 2003.

加瀬祐子・関口春子・石山達也・堀川晴央・佐竹健治・杉山雄一, 活断層情報から推定した不均質応力場中の動的破壊過程のシミュレーション: 上町断層系・生駒断層系への応用, 活断層・古地震研究報告, No. 3, 261-272, 2003.

Kase, Y., Slip-length scaling law for strike-slip multiple segment earthquakes based on dynamic rupture simulations, Bull. Seism. Soc. Am., **100**, 473-481, 2010.

前田直樹・渡辺 晃, 微小地震の活動様式-近畿地方中北部の微小地震活動について-, 地震2, **37**, 579-598, 1984.

- 水野清秀・寒川 旭・関口春子・駒澤正夫・杉山雄一・吉岡敏和・佐竹健治・苅谷愛彦・栗本史雄・吾妻 崇・須貝俊彦・栗田泰夫・大井田徹・片尾 浩・中村正夫・森尻理恵・広島俊男・村田泰章・牧野雅彦・名和一成，50 万分の 1 活構造図「京都」(第 2 版)，地質調査総合センター，2002.
- 文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所，平成 22 年度上町断層帯における重点的な調査観測成果報告書，164p，2011.
- Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040, 1992.
- 大阪府，平成 15 年度地震関係基礎調査交付金「大阪平野の地下構造調査」成果報告書 [概要版]，47p，2004.
- 関口春子・加瀬祐子・堀川晴央・石山達也・佐竹健治・杉山雄一，活断層情報を用いた想定地震の不均質すべり・応力分布の推定，活断層・古地震研究報告，No. 3，273-284，2003.
- 関口春子・加瀬祐子・堀川晴央・吉田邦一・吉見雅行，内陸地殻内地震の強震動評価：上町断層系を例として，第 33 回地盤震動シンポジウム論文集，25-34，2005.
- 杉山雄一・七山 太・三浦健一郎・吉川 猛・横田 裕・末廣匡基・古谷正和・栃本泰浩・廣瀬孝太郎・横山芳春・北田奈緒子・竹村恵二，上町断層系の補足調査（その 2）-新淀川北岸における追加ボーリングと S 波反射法地震探査データの再解釈に基づく上町断層の活動性評価-，活断層・古地震研究報告，No. 3，117-143，2003.
- Yamashita, F., Fukuyama, E., and Omura, K., Estimation of fault strength: Reconstruction of stress before the 1995 Kobe earthquake, *Science*, **306**, 261-263, 2004.