

### 3. 2. 3 長時間地殻変動からみた首都圏下の地殻構造調査研究

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

関東地域南東部の過去300万年間の地殻上部変動経過を復元し、それをもたらしたプレート運動を最近100万年間にしぼって数値実験を通じて解明する。本研究の成果は、個別研究テーマ「制御震源を用いた地殻構造探査」で目的としている地殻と沈み込むプレートの相互作用について明らかにするもので、スラブ内変形についても拘束条件を与える。

##### (b) 平成23年度業務目的

- 1) 平成22年度までに得られた長期間垂直地殻変動の変形様式や変位速度データと、プレート沈み込みおよび伊豆半島の衝突、プレート境界の時間発展を取り入れた長期地殻変動シミュレーションモデルを用いて、データを再現する現実的な地殻変動の数値実験を行い、関東地方の長期地殻変動（プレート運動）の原因を解明する。
- 2) 個別研究テーマ「制御震源を用いた地殻構造探査」に、これまでの研究成果のうち長期地殻変動の変形様式とプレート境界の状態（衝突の位置やプレート形状の時間変化）を含めた地殻変動モデルを提供し、スラブ内変形のモデル化の研究成果取りまとめに協力する。
- 3) 海外で開催される学会において長期地殻変動シミュレーションに関する本プロジェクトの研究成果を発表するとともに、各国から参加する研究者との議論を通じて、本プロジェクトの研究成果のとりまとめに反映させるため、国際測地学・地球物理学連合総会（6月、豪州）、米国地球物理学連合秋季大会（12月、米国）に出席する。

##### (c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
千葉大学大学院理学研究科	教授	佐藤利典	
同	教授	宮内崇裕	
同	准教授	亀尾浩司	
同	准教授	金田平太郎	
同	助教	津村紀子	
同	特任研究員	橋間昭徳	

#### (2) 平成23年度の成果

##### (a) 業務の要約

- 1) 平成22年度までに地質学的・変動地形学的手法によって得られた垂直地殻変動データからは、関東地方の長期地殻変動について以下のようにまとめられる。(1) 100万年前から50万年前にかけて平野部における沈降運動の中心が房総半島から東京湾へと西方移動する。(2) ここ12.5万年の変動で見ると、沈降域はほぼ消滅し、関東地方は全体的に隆起している。(3) 房総半島南部をはじめ関東平野の周縁部では急激な隆起が起きている。このような変動パターンの変遷をもたらしたのは、50～100万

年前に起きたフィリピン海プレートの日本列島に対する相対速度ベクトルの北方向から北西方向の変化であると考えられる。このことを変位の食い違い運動によるプレート沈み込みモデルで再現するために、伊豆・小笠原弧の衝突領域がプレート運動の変化後にゆっくりと北向きから北西方向に変化していったと仮定し、各時点において垂直変位速度場を計算した。得られた結果は、関東地方の変動パターンの変遷をよく再現する。また、得られた衝突モデルから関東地方下の応力蓄積パターンを計算した。これらは現在、関東地方下で起こっているプレート内部の地震のメカニズム解と調和的である。

- 2) 個別研究テーマ「制御震源を用いた地殻構造探査」に、これまでの研究成果のうち長期地殻変動の変形様式とプレート境界の状態(衝突の位置やプレート形状の時間変化)を含めた地殻変動モデルを提供し、スラブ内変形のモデル化の研究成果取りまとめに協力した。
- 3) 国際測地学・地球物理学連合総会(6月、豪州)、米国地球物理学連合秋季大会(12月、米国)に出席し、長期地殻変動シミュレーションに関する本プロジェクトの研究成果を海外で開催される学会において発表した。

#### (b) 業務の成果

平成22年度までに、反射法プロファイルと地質学的手法から過去100万年間、50万年間の垂直変動量<sup>1) 2) 3)</sup>(図1)を、変動地形学的手法から過去12.5万年間、7000年間の垂直変動量<sup>4) 5) 6) 7) 8) 9)</sup>(図2)を求めてきた。これらの結果から、関東地方の垂直変動パターンの変遷について以下のようにまとめることができる。(1)100万年前から50万年前にかけて平野部における沈降運動の中心が房総半島から東京湾へ西方移動する。(2)ここ12.5万年の変動で見ると、沈降域はほぼ消滅し、関東地方は全体的に隆起している。(3)房総半島南部をはじめ関東平野の周縁部では急激な隆起が起きている。このような関東地方の垂直変動パターンの変遷に大きな影響を与えたと考えられているのは、50~100万年前のある時期に起きたフィリピン海プレートの日本列島に対する運動方向の北方向から北西方向の変化<sup>10) 11) 12)</sup>である。しかし、フィリピン海プレートの運動方向の変化後にこれに匹敵するような広域の地質学的イベントが特に見られないにもかかわらず、関東地方の垂直変動パターンはさらに変化を続けていることが分かる。

一方、関東地方には中期中新世以降フィリピン海プレート上の伊豆・小笠原弧が衝突を続けているが、このことが関東地方の垂直変動パターンに大きな影響を及ぼしていることを、平成22年度までに構築した変位の食い違い運動によるプレート沈み込みモデルを用いた垂直変動シミュレーションによってすでに示した。このモデルでは、プレート沈み込み運動をプレート境界面上の定常的な変位の食い違い運動(すべり運動)により表現し(Matsu'ura & Sato, 1989<sup>13)</sup>)、衝突はすべり運動の欠損によって表現している(Takada & Matsu'ura, 2004<sup>14)</sup>; Hashimoto & Matsu'ura, 2006<sup>15)</sup>)。

この衝突モデルによる関東地方で見られるような垂直変動パターンの時間変化の説明としては、(i)プレート境界面におけるすべり運動欠損の分布域(衝突領域)の変化と、(ii)衝突によるプレート境界面形状自体の変形<sup>16)</sup>、の2つの可能性が挙げられる。このうち、後者については平成22年度に検討したが、100万年間でのプレート境界面形状の変形で

は垂直変動パターンには大きな影響をおよぼさないことが示された。そこで本年度は前者の可能性を検討し、関東地方の変動パターンをもたらす衝突モデルを作成した。

### 1) 伊豆・小笠原弧の衝突にともなう関東地方の長期地殻変動シミュレーション

変位の食い違い運動によるプレート沈み込みモデルは平成 22 年度までにすでに構築している。このモデルにおいて、衝突領域（プレート境界面におけるすべり運動欠損の分布域）を具体的に決定する観測量は地震サイクル以上の期間にわたる平均的すべり運動であるが、そのような長期観測を要する物理量は得られていない。そこで、以下のような仮定のもとで、関東地方の垂直変動シミュレーションを行った。

(1) フィリピン海プレートの相対速度が変化する前までは、衝突領域は長期的に安定であり、プレート運動方向に沿うように現在に比べて北向きであった。現在のユーラシアプレートに対するフィリピン海プレートの運動方向は NUVEL-1A プレート運動モデル (DeMets et al., 1994<sup>17)</sup>) によれば、北西 45° 方向である。それに対して、プレート運動方向変化以前のプレート方向は、伊豆・小笠原島弧および海溝の配列に近い北西 15° 方向とした。

(2) 特に衝突領域においては、プレート境界面上の長期的なすべり速度は、プレート境界面形状や局所的な摩擦特性などのプレート相対速度以外の要素が大きく効いていると考えられる。したがって、プレートの相対速度が変化したとしても、衝突領域はそれに合わせて即座には変化せず、その後のプレート運動の進展とともに徐々に変化するということが考えられる。本研究においては、フィリピン海プレートの運動方向変化後、衝突領域の方向がゆっくり北方向から北西方向に変化してきた、と仮定した。

(3) 衝突領域の東西方向の幅は未知であるが、時間的には一定であると仮定した。これは、100 万年間でのプレート移動量が 30 ~ 40km 程度で、そのスケールでは、衝突する伊豆・小笠原弧の島弧地殻の幅に顕著な変化が見られないことが海底地形から見て取れることによる。

以上の仮定のもと、衝突領域の幅を様々に設定した上で計算を行い、観測された垂直変動パターンを最もよく説明するものを選んだ。

### 2) 衝突による長期的垂直変動

上記の方法によって計算した上下変動速度場のうち、最適な衝突領域の幅による結果を図 3 に示す。図 3(a) はフィリピン海プレートの運動方向が変化する以前の垂直変位速度場であり、図 3(b)~(e) は、プレート運動方向が変化して以降、衝突領域の方向が現在のフィリピン海プレートの運動方向 (45°) へと変化していくまでの各段階における垂直変位速度場である。

衝突領域の方向が時間変化する間も見られる特徴としては、関東・赤石山地と房総半島南東沖における顕著な隆起域と、伊豆半島から海側へ広がる沈降域の存在が挙げられる。フィリピン海プレートの相対速度が変化する以前 (図 3(a)) では、関東・赤石山地と房総半島南東沖の隆起域の間の東京湾、房総半島に沈降域が伸びてきている。そして、プレート方向が変化して以降 (図 3(b-e)) は、衝突領域の方向の変化にあわせて沈降領域も北西に移動する。それとともに房総半島南東沖の隆起域の影響が強まり、房総半島、東京湾が

隆起に転じ（図 3(c,d)）、最終的には関東地方南部全域が隆起域となる（図 3(d,e)）。

このようにフィリピン海プレートの相対運動変化以降の衝突領域の時間変化を考慮にいたしたシミュレーションによって、地質学・地形学的手法から得られた、関東地方における沈降中心の移動とその後の全体的な隆起という垂直変動パターンの変遷を再現することができた。変動地形学による最近 12.5 万年間の垂直変動パターン（図 2(a)）と比較すると、現在の衝突領域の方向は、ほぼプレート運動方向（北西 45° 方向）と一致した段階にあると考えられる。また、衝突領域の東西方向の幅については、伊豆半島の北端部だけではなく、隣接する駿河トラフや関東地震の震源域である相模トラフにまでおよんでいる。このような広域にわたる衝突によって、関東地方においても大きなプレート内変形が生じているものと考えられる。

### 3) 伊豆・小笠原弧の衝突による関東地方下の応力場

以上の計算により、過去 100 万年間の垂直変動パターンの変遷を再現するとともに、それを引き起こした伊豆・小笠原弧の衝突の最適モデルをみちびいた。この最適衝突モデルを用いて、同様に変位の食い違い運動によるプレート沈み込みモデルからプレート内部の応力蓄積速度場を計算することができる。

図 4(a)に現在の深さ 30 km における応力蓄積パターンをメカニズム解によって示した。衝突を受けている関東・赤石山地下では北西方向に圧縮を受けている。逆に衝突域の外側の東京湾下や遠州灘～浜名湖下では北西方向に伸張的となっている。これは直感的には、衝突によって周りの地域が引きずられるために起こると考えられる。また、伊豆半島以南では横ずれ的な応力場となっている。

図 4(b)には防災科学技術研究所広帯域地震観測網（F-net）によって得られた 1997 年 3 月 1 日から 2011 年 2 月 28 日までの関東地方下深さ 25 km から 35 km で起きた地震のメカニズム解を示した。地震分布は偏っているが、プレート内の地震に関しては、おおむね関東山地における北西方向への圧縮、東京湾下の正断層的メカニズム、浜名湖下の東西伸張的な横ずれ地震、伊豆半島以南の横ずれ地震を示している。この図ではプレート内地震とプレート境界地震の区別をしていないため、図 4(a)との比較には注意が必要であるが、上記の特徴は変位の食い違い運動によるプレート沈み込みモデルによる計算結果によって再現できている。すなわち、関東地方下のプレート内地震は、プレート沈み込み運動と伊豆・小笠原弧の衝突によって長期的に蓄積されてきた応力を解放するように起きていると考えられる。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

地質学的・変動地形学的手法によって得られた垂直地殻変動データをまとめ、関東地方の 100 万年間の垂直変動を明らかにし、変位の食い違い運動によるプレート沈み込みモデルにもとづくシミュレーション計算によって、これらを再現する伊豆・小笠原弧の衝突モデルを得た。

関東地方の長期地殻変動について以下のようにまとめられる。(1) 100 万年前から 50 万年前にかけて平野部における沈降運動の中心が房総半島から東京湾へと西方移動する。(2) ここ 12.5 万年の変動で見ると、沈降域はほぼ消滅し、関東地方は全体的に隆起して

いる。(3) 房総半島南部をはじめ関東平野の周縁部では急激な隆起が起きている。

このような変動パターンの変遷をもたらしたのは、50~100 万年前に起きたフィリピン海プレートの日本列島に対する相対速度ベクトルの北方向から北西方向の変化であると考えられる。このことを変位の食い違い運動によるプレート沈み込みモデルで再現するために、伊豆・小笠原弧の衝突領域が、プレート運動の変化後にゆっくりと北向きから北西方向に変化していったと仮定し、それぞれの時点において垂直変位速度場を計算した。得られた結果は、関東地方の変動パターンの変遷をよく再現する。また、得られた衝突モデルから関東地方下の応力蓄積パターンを計算した。これらは現在、関東地方下で起こっているプレート内部の地震のメカニズム解と調和的である。

なお、本研究においては日本列島周辺のプレート境界面形状として CAMP 標準モデル<sup>18)</sup>を用いた。このモデルは日本列島域における地震分布をなめらかに補間したものであるが、首都圏地震観測網 (MeSO-net) による観測結果は反映されていない。個別研究テーマ「地震計を用いた自然地震観測によるプレート構造調査」において得られた関東地方におけるより詳細なプレート境界形状を用いれば、より現実的な衝突モデルを得ることができると期待される。

本研究による成果のうち長期地殻変動の変形様式とプレート境界の状態 (衝突の位置やプレート形状の時間変化) を含めた地殻変動モデルは、個別研究テーマ「制御震源を用いた地殻構造探査」に提供し、スラブ内変形のモデル化の研究成果取りまとめに協力した。

#### (d) 引用文献

- 1) 浅尾一巳：反射法地震探査により解明された上総一下総層群堆積盆の形成過程，千葉大学博士論文，2008.
- 2) 古屋裕，伊藤谷生，佐藤比呂志，平田直，駒田希充，津村紀子，浅尾一巳，荒井良祐，半場康弘：反射法地震探査による房総半島南西部内房沿岸の浅部地下構造．地震研究所彙報，Vol.84, pp.307-329, 2009.
- 3) 山本修治：反射法地震探査によって明らかとなった房総半島南部ならびに周辺海域の浅部地殻構造と最近 100 万年間の地殻変動．千葉大学大学院自然科学研究科修士論文，45p, 2008.
- 4) Ota,Y., Matsushima,Y., Umitsu,M. and Kawana,T.(eds.) : Middle Holocene Shoreline Map of Japan, Contribution of IGCP 200, 1/2,000,00., 1987.
- 5) 小池一之・町田 洋 (編) : 日本の海成段丘アトラス, CD-ROM3 枚・四六全版カラー付図 2 葉, 東京大学出版会, 2001.
- 6) 石田大輔：離水浸食海岸地形からみた房総半島南岸における旧汀線高度，日本地球惑星科学連合 2001 年大会，Qm-P010，千葉市，2001.
- 7) 宍倉正展・宮内崇裕：房総半島沿岸における完新世低地の形成とサイスマテクトニクス，第四紀研究，40，pp.235-242, 2001.
- 8) 宇野智樹・宮内崇裕・宍倉正展：完新世離水海岸地形からみた相模トラフ沿いのプレート間地震の再検討—内房と外房で対比されない海成段丘の存在から—，日本地球惑星科学連合 2007 年大会，S141-007，千葉市，2007.
- 9) 遠藤香織・宮内崇裕，2011，房総半島南部完新世離水海岸地形の高度と離水年代の再

検討—相模トラフ沿いの巨大地震に伴う地震性地殻変動に関連して—, 日本活断層学会 2011 年度秋季学術大会講演予稿 P-06, 52-53.

- 10) 寒川旭：紀ノ川中流域の地形発達と地殻変動, 地理学評論, 50, pp.578-595, 1978.
- 11) 岡田篤正：中央構造線活断層系の性質と形成過程, 月刊地球, 2, pp. 510-517, 1980.
- 12) 垣見俊弘：南関東における第四紀応力場の変遷—小断層解析を中心として, 垣見・鈴木編「関東地方の地震と地殻変動」, ラテイス, pp.51-70, 1974.
- 13) Matsu'ura, M. and Sato, T.: A kinematic model for deformation of the lithosphere at subduction zones, J. Geophys. Res., Vol. 93, No.B6, pp.6410-6418, 1989.
- 14) Takada, Y. and Matsu'ura, M.: A unified interpretation of vertical movement in Himalaya and horizontal deformation in Tibet on the basis of elastic and viscoelastic dislocation theory, Tectonophysics, Vol. 383, pp.105-131, 2004.
- 15) Hashimoto, C. and Matsu'ura, M.: 3-D Simulation of Tectonic Loading at Convergent Plate Boundary Zones: Internal Stress Fields in Northeast Japan, Pure Appl. Geophys., Vol. 163, pp. 1803-1817, 2006
- 16) Takada, Y. and Matsu'ura, M.: Geometric evolution of a plate interface-branch fault system: Its effects on the tectonic development of the Himalayas, J. Asian Earth Sci., Vol. 29, pp.490-503, 2007.
- 17) DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. and Stein, S.: Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, Geophys. Res. Lett., Vol. 21, No.20, pp.2191-2194, 1994.
- 18) Hashimoto, C., Fukui, K. and Matsu'ura, M.: 3-D modelling of plate interfaces and numerical simulation of long-term crustal deformation in and around Japan, Pure Appl. Geophys., Vol. 161 No.9-10, pp.2053-2068, 2004.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所 （学会等名）	発表時期	国際・国内の別
3-D Simulation of Tectonic Evolution around the Kanto Region of Japan due to the Collision of the Izu-Bonin Arc（ポスター）	Hashima, A., Sato, T., Ito, T., Miyauchi	IUGG 2011 General Assembly	平成23年7月3日	国際
房総半島中央部での反射法地震探査と地表地質（口頭）	浅尾一已・伊藤谷生	日本地質学会第118年学術・日本鉱物科学会2011年年会合同学術大会	平成23年9月9日	国内

房総半島テクトニクス 解明の新たな展望（口 頭）	伊藤谷生・浅 尾一巳・佐藤 比呂志	日本地質学会第118 年学術・日本鉱物科 学会2011年年会合 同学術大会	平成23年9月 9日	国内
日本列島域におけるプ レート間相互作用によ る関東地方の長期地殻 変動のシミュレーショ ン（口頭）	橋間昭徳・佐 藤利典・伊藤 谷生・宮内崇 裕	日本地質学会第118 年学術・日本鉱物科 学会2011年年会合 同学術大会	平成23年9月 9日	国内
変位の食い違い運動に よるプレート沈み込み モデルを用いた関東地 方の長期的地殻変動パ ターンの解明（ポスタ ー）	橋間昭徳・佐 藤利典・伊藤 谷生・宮内崇 裕	日本地震学会2011 年秋季大会	平成23年10 月12日	国内
房総半島南部完新世離 水海岸地形の高度と離 水年代の再検討－相模 トラフ沿いの巨大地震 に伴う地震性地殻変動 に関連して－（ポスタ ー）	遠藤香織・宮 内崇裕	日本活断層学会 2011年度秋季学術 大会	平成23年11 月26日	国内
3-D simulation for the tectonic evolution around the Kanto Region of Japan using the kinematic plate subduction model（ポス ター）	Hashima, A., Sato, T., Ito, T., Miyachi, T., Furuya, H., Kameo, K., Yamamoto, S.	American Geophysical Union 2011 Fall Meeting	平成23年12 月8日	国際

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

表1. 計算に用いたリソスフェア-アセノスフェア構造の物性定数

	層厚(km)	密度(kg/m <sup>3</sup> )	λ (GPa)	剛性率(GPa)	粘性率(Pa s)
リソスフェア	40	3000	40	40	∞
アセノスフェア	∞	3400	90	60	5×10 <sup>18</sup>

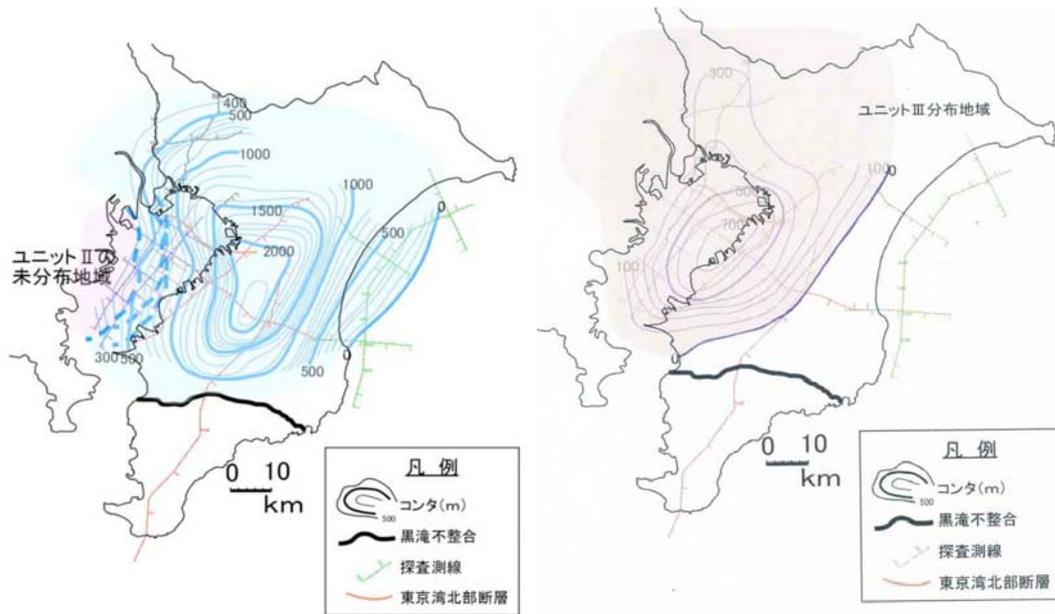
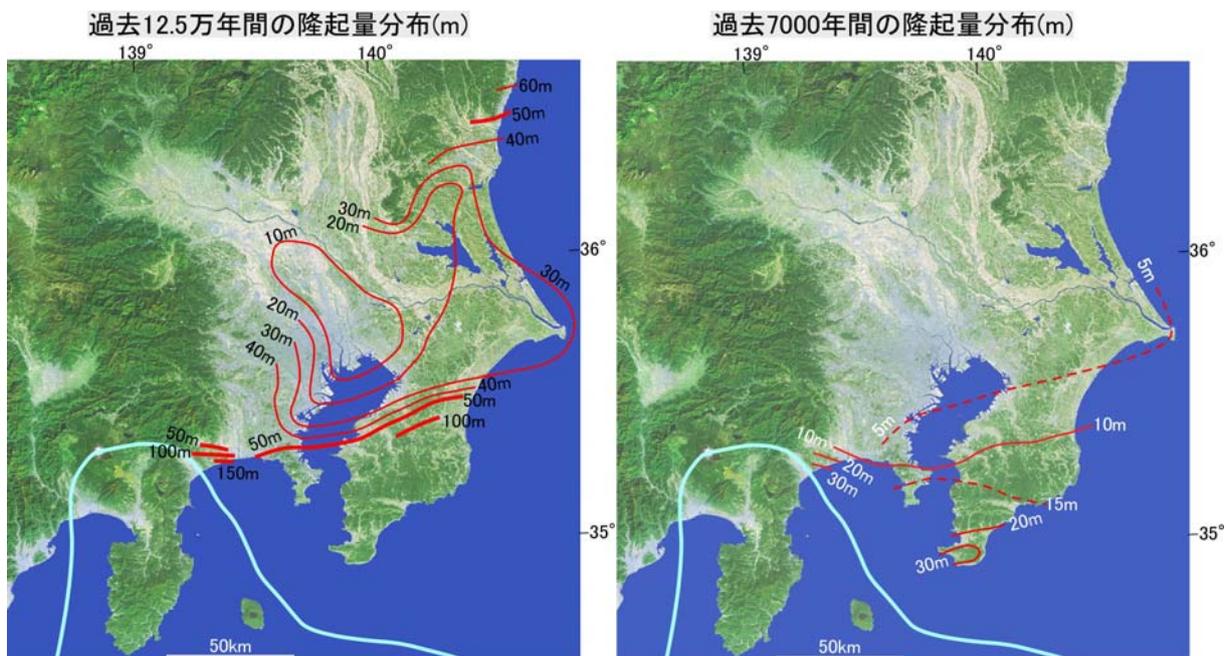


図1. (a) 約1 Maの地層の現深度(m) (b) 約0.5 Maの地層の現深度(m) (浅尾 2008)



(小池・町田(2001)などに基づき、被覆テフラ層の厚さを引き、海面変化量5mを補正して求めた)

(小池・町田(2001)に遠藤・宮内(2011)による房総半島のGPS測量結果を加筆)

図2. 変動地形学的手法によって求めた過去12.5万年、7000年間の隆起量分布

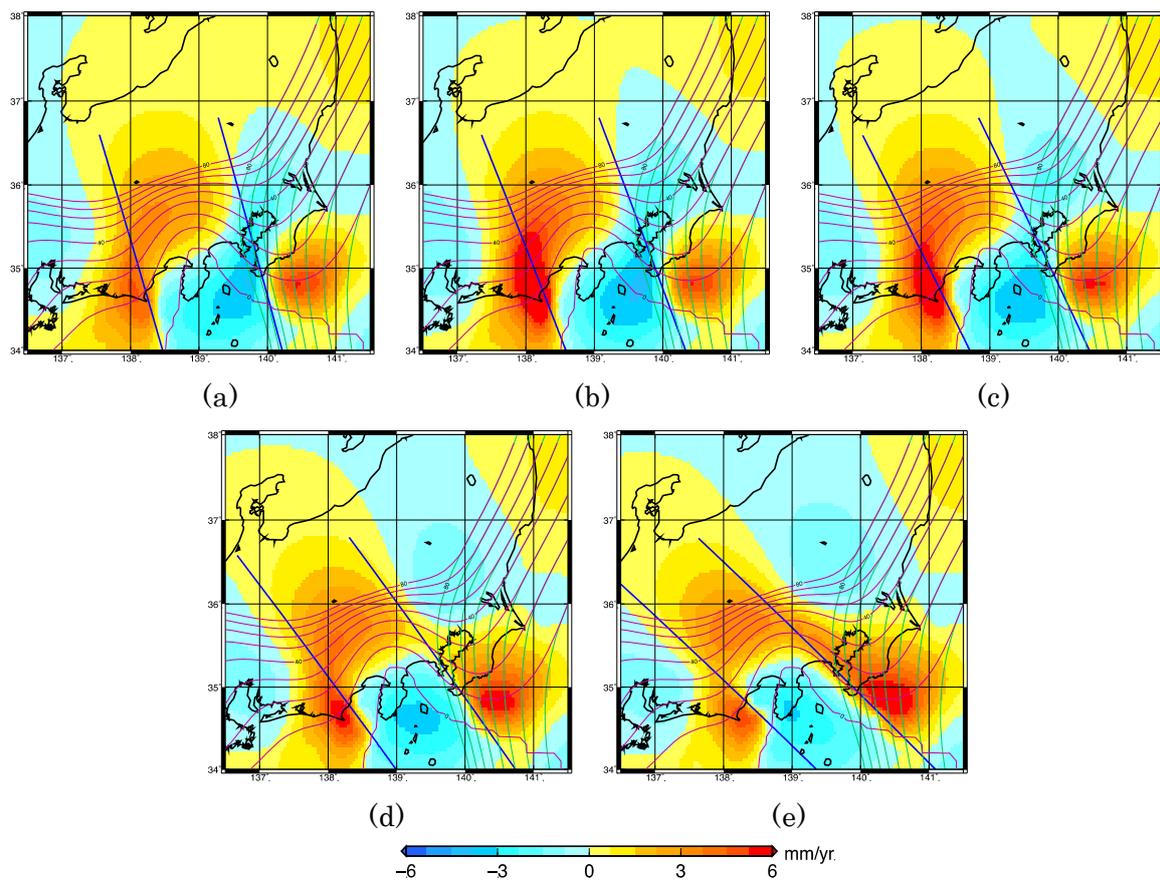


図 3. フィリピン海プレートの運動方向変化にともなう垂直変動パターン (mm/yr)。(a) 衝突領域の方向が北西 15° 方向 (フィリピン海プレートの運動方向が変化する以前)、(b) 衝突領域の方向が北西 20° 方向、(c) 衝突領域の方向が北西 25° 方向、(d) 衝突領域の方向が北西 35° 方向、(e) 衝突領域の方向が北西 45° 方向 (現在)。赤線は、フィリピン海プレートとユーラシア・北アメリカプレートの各時点におけるプレート境界面。緑線は太平洋プレートと北アメリカ・フィリピン海プレートのプレート境界面。2本の青線で挟まれた領域が衝突領域。

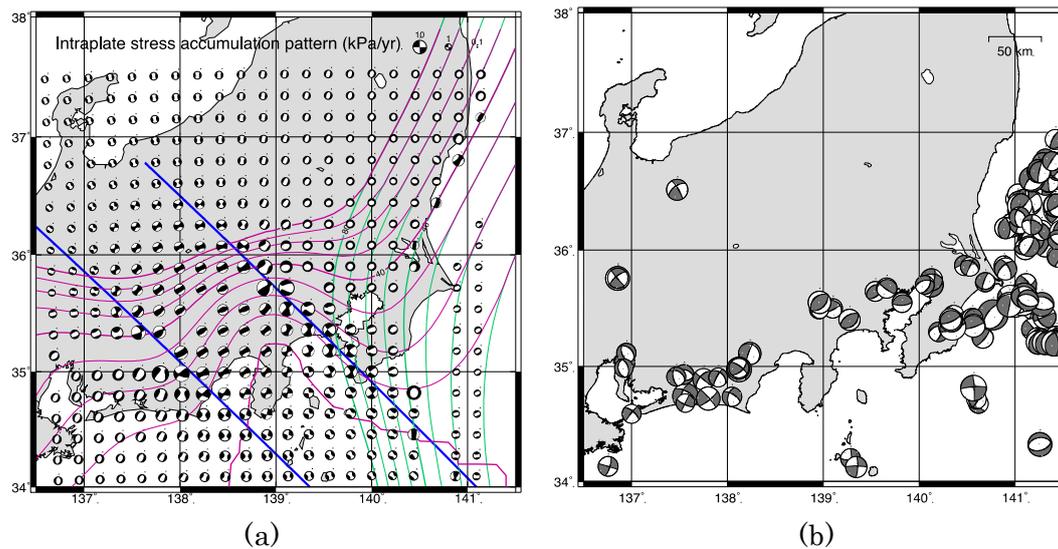


図 4. (a) 本研究で得られた衝突モデルから計算した現在のプレート内部の応力蓄積パターン。(b) 防災科学技術研究所広帯域地震観測網 (F-net) によって得られた 1997 年 3 月 1 日から 2011 年 2 月 28 日までの関東地方下深さ 25 km から 35 km で起きた地震のメカニズム解。プレート内地震とプレート境界地震は区別されていない。