

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21年度業務目的

房総半島周辺の地質データを収集し、取得した浅海地震探査データの解釈を高度化し、長期間の垂直地殻変動を求める（データ班（D班））。

また、長期間地殻変動をシミュレートするプログラムを完成させ、伊豆半島の衝突に伴う地殻変動の数値実験を行う（シミュレーション班（S班））。

(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	伊藤谷生	
同	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21年度の成果

(a) 業務の要約

1)a)昨年度（平成20年度）に行った内房沿岸部海上反射法探査のデータの処理とプロフィールの作成は今年度（平成21年度）前半に終了した。その結果、浅海域には予想以上に広範囲に新期（100万年前以降）海溝斜面堆積物（豊房層群）が堆積しており、その構造ならびに現深度から100万年前以降の垂直変動量が房総半島南部ならびに周辺海域でどのように変化しているかを面的に明らかにした。

1)b)最近1万年スケールの隆起変形データ取得には効率的かつ高精度の高度測量が可能なリアルタイムキネマティック（RTK）GPSシステム（Leica GPS900）を導入し、これを用いた高精度測量を房総半島南部周辺で行った。これに基づき、とくに縄文海進期（約7000年前）以降の変位分布図が更新された。特筆すべき成果は、最近7000年間の累積隆起量は房総南端で30mを超え（従来は25m前後）、北へ顕著に傾動すること、下総／上総の地形・地質境界は非地震性／地震性地殻変動の境界にほぼ一致することである。合理的な上盤プレートの変形モデル構築のためにこれらの成果をS班へ提示した。

2)昨年度開発した、日本列島周辺のプレート間の力学的相互作用による長期地殻変動の

計算プログラムに、関東地方の地殻変動に多大な影響を及ぼしていると考えられる、伊豆・小笠原島弧の衝突の効果を取り入れた。島弧衝突の効果は、衝突域のプレート境界上に定常的なすべり速度の欠損を与えることにより表現した。計算の結果、房総半島南部と関東山地～赤石山地の隆起、関東平野中央部の沈降（関東造盆地運動）という、関東地方の長期地殻変動の基本パターンが再現された。

(b) 業務の成果

1) 関東地方の過去 300 万年間の地殻上部変動経過の復元

a) 房総半島南部東京湾側浅海域における反射法地震探査（BOS02008）

昨年度（平成 20 年度）に行った内房沿岸部海上反射法探査によって得られた反射法断面には付加体を覆う海溝斜面堆積層が明瞭にイメージされている。現段階では海溝斜面堆積層を直接掘削したデータが存在しないため、陸域で観察される海溝斜面堆積層（千倉層群（300～130 万年前）、豊房層群下部（100～70 万年前）、豊房層群上部（70～30 万年前）の P 波速度と対比させて、反射断面の解釈を行った。千倉層群については海域での分布が広がらないので垂直変動データを獲得するのは難しい。しかし、豊房層群下部については浅海域で広く追跡される。同層群下部底面はおよそ 100 万年前なので、陸域における同底面高度と比較すると、およそその垂直変動量を推定できることになるであろう。今後は海水準変動評価も行いつつ、豊房層群下部底面 = 100 万年前、同層群上部底面 = 70 万年前、同層群上部上面 = 30 万年前を基準面とする垂直変動量マップを陸域と浅海域をつなげて製作する。このマップは S 班に送られることになる。

b) リアルタイムキネマティック GPS システムによる 7000 年前の旧汀線高度分布の測量

隆起速度の早い南関東地域の海岸部では、10 万年スケールの海成段丘地形が侵食により消失していることが多いため、別の地形指標を用いて地殻の上下変動量に関する情報を補足する必要がある。南房総海岸部では、結果として早い隆起速度を生み出すプレート間地震による完新世離水海岸地形や完新世海成段丘の発達が顕著である。氷河性海面変動による完新世海進は約 7000 年前にピークを迎え、現在の海面とほぼ同じ高度に達したことが知られているので、それぞれの旧汀線高度を現在までの累積隆起量として利用することができる。1980～1990 年代の完新世海成段丘群の分類・高度測定に関する成果は、Ota et al.(1987)¹⁾、小池・町田(2001)²⁾に集約されたが、その後最高位海成段丘（旧汀線）の位置と高度に関する新知見（石田，2001³⁾；宍倉・宮内，2001⁴⁾）については更新がなされていない。最近の知見によれば、断片的であるが約 7000 年前の旧汀線は従来より高位にあり、かつ内房と外房における段丘対比に誤りがあるらしい（宇野ほか，2007）⁵⁾。これらに基づき、今回は約 7000 年前の最高位旧汀線の位置を現地において再認定し、その高度について RTM-GPS を用いた高精度測量を行った。その結果、房総半島南端部において外房地域（平磯地区）ならびに内房地域（館山加賀名地区）において、最高位旧汀線はそれぞれ標高 34m 前後，31m 前後にあることがわかり、従説（25m）を大きく超えることが明らかとなった（図 1）。これにより 1 万年スケールでの地殻上下変位量が更新され、房総半島側の方が相模湾岸の大磯丘陵よりも隆起が大きく累積していることがはっきりした（図 2）。よって、相模トラフで起こるプレート間地震による地殻変動累積過程についても再検討する必要がある。

2) 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

a) 島弧の衝突による長期地殻変動モデルの構築

現在、プレート境界形状とプレート相対運動は、地震学的、測地学的観測によって正確に求められている。このため、一般的にプレート内変形は、プレート境界におけるプレート間の力学的相互作用を与えれば、連続体力学の境界値問題として解くことができる。プレート間の力学的相互作用は、プレート境界面における接線方向の変位の食い違い運動(断層すべり運動)によって合理的に表現される(Matsu'ura and Sato, 1989)⁶⁾。地質学的な時間スケールにわたるプレート間相互作用による変形速度場は、プレート境界面上のステップ的なすべりに対する応答関数の粘性緩和(時間無限大の解)により得られる(Sato and Matsu'ura, 1988)⁷⁾。

上記の考え方にもとづき、昨年度業務においては、日本列島周辺の四つのプレート間のプレート沈み込み運動による関東地方の長期地殻変動を計算するプログラムを開発した。リソスフェア・アセノスフェア構造として弾性・粘弾性二層構造媒質を考え、CAMP 標準モデル(Hashimoto et al., 2004)⁸⁾によるプレート境界形状を用いた(図3)。また、プレート境界面上のすべり速度分布は、プレート運動ベクトルをプレート境界面上に投影することによって得られる(Hashimoto et al., 2004)⁸⁾。プレート運動モデルとしては、NUVEL-1A モデル(DeMets et al., 1994)⁹⁾を用いた(図4(a))。プレート境界面上の微小面におけるすべりに対する応答関数として、内部力源の一般的な表現であるモーメント・テンソルによる弾性/粘弾性層構造媒質の内部変形場の表現式(Hashima et al., 2008)¹⁰⁾を用い、これをプレート境界面上にわたって数値積分した。

本年度業務においては、この計算プログラムに伊豆小笠原弧の衝突の効果を取り入れた。大陸あるいは島弧の衝突は、大陸性地殻の浮力により深部に沈み込めないということである。上に述べた境界値問題的なアプローチにおいては、衝突が起きている地域では、プレート運動モデルによるすべり速度に欠損が生じている(図4(b))という事実を単に与えればよい(Takada and Matsu'ura, 2004¹¹⁾; Hashimoto and Matsu'ura, 2006¹²⁾)。

長期的なすべり速度欠損分布を知るためには、少なくとも1回の地震繰り返し間隔期間の観測が必要であり、もちろん現在までの観測では得られていない。そこで、いくつかの衝突条件を考え、それぞれの場合について得られた上下変動の計算結果を1)における観測で得られた変動データと比較することにより、最適な衝突条件を推定する。衝突を規定するパラメータとして、衝突領域の幅と方向および衝突率があげられる。本年度は、まず伊豆小笠原弧の衝突が引き起こす変動パターンの基本的な性質を調べるため、衝突領域の幅と方向の影響について検討した。変形運動の計算にあたって必要となるすべり速度分布の離散化については、昨年度業務で検討したプレート沈み込み運動のみによる変形運動の計算の場合と同様の条件で安定的に計算できることを確認した。

b) 島弧衝突による変形運動パターン

図5に衝突が全く起きていない場合の垂直変動パターンを示した。この図からは、定常的な沈み込み運動によって赤石山地、房総半島南部で隆起が起きていることが分かる。一方、沈み込むフィリピン海プレート側は沈降し、その沈降域は東京湾付近にまで及んでい

る。

図 6 には、衝突の方向が同じ場合の衝突領域の幅の違いによる変動パターンの違いを示した。衝突が起きているときに共通して見られる特徴は、赤石山地に形成される隆起域が衝突域の陸側に広がり（関東山地）、房総半島南部の隆起域も強くなることである。衝突が起っていない場合（図 5）では、平野部の沈降域は沈み込むプレート側の沈降域の延長として現れていたが、衝突が起きている場合は、平野部の沈降運動が強められて、平野部に中心を持つようになる（関東造盆地運動）。そして、衝突領域の幅が大きくなると、赤石山地、房総半島南部の隆起域はそれぞれ西と東に追いやられる。この図からは、衝突は、伊豆半島地塊のみにとどまらず、島弧地殻の見られる広い範囲にわたって起きている可能性を示唆している。Hashimoto and Matsu'ura (2006)¹²⁾によれば、衝突によりプレート境界におけるすべり運動として解消されないプレート収束運動は、プレート内部での変形により解消される。したがって、首都圏下の地震活動という観点から見た場合、衝突領域が伊豆半島域にとどまらず、隣接する関東地震、東海地震の震源域にまで及んでいるということは重要な意味を持っている。

図 6 では、衝突が北米・フィリピン海プレート相対運動の方向に沿った領域で起きている場合を示している。しかし、衝突はプレート境界域の物性に依存するために、衝突は、特に関東のような複雑なプレート間相互作用が起きているところでは、必ずしもプレート相対運動に沿って起きているとは限らない。しかも、本州島弧内で起きている内部変形はプレート間の相互作用自体に影響を与えうる。この影響を簡単に見積もるために、衝突領域の方向を変化させて、その影響を検討した。

図 7 では衝突領域の方向の違いによる変動パターンの違いを示した。図 7 (a)は伊豆小笠原弧の配列に沿った方向、図 5(b)は北米・フィリピン海プレートの運動方向（図 6 (b)と同じ）、図 7 (c)はユーラシア・フィリピン海プレートの運動方向の場合のそれぞれの上下変動パターンである。衝突方向が北よりの場合（図 7 (a)）赤石山地の隆起は強まるが、沈降域の中心は相模湾に位置する。衝突方向が北西の場合（図 7 (b), (c)）に沈降の中心が平野部に位置し、関東造盆地運動が再現されることがわかる。また、房総半島南部の隆起域は、衝突域のすぐ外側で衝突領域の方向に沿うように形成されている。衝突方向が北西よりの場合、房総半島だけでなく三浦半島も隆起域となることがわかる。

(c) 結論ならびに今後の課題

D 班は取得した浅海地震探査データの解釈を試み、浅海域における 100 万年前、70 万年前、30 万年前の 3 基準面における海溝斜面堆積層の深度分布を得た。今後は陸域データの再検討を行い、海水準変動も考慮しながら、陸域—浅海域での垂直変動マップ作成へと向かう。また、最近 1 万年スケールの隆起変形データ取得には効率的かつ高精度の高度測量が可能なりアルタイムキネマティック（RTK）GPS システム（Leica GPS900）を導入し、これを用いた高精度測量を房総半島南部周辺で行った。これに基づき、とくに縄文海進期（約 7000 年前）以降の変位分布図が更新された。

S 班は、日本列島周辺のプレートの沈み込み運動と伊豆小笠原弧の衝突による関東地方の長期的地殻変動を計算するプログラムを完成させた。伊豆小笠原弧の衝突にともなう地殻変動の数値実験を行い、房総半島南部と関東山地～赤石山地の隆起、関東平野中央部の

沈降（関東造盆地運動）という、関東地方の基本的な変動パターンを再現した。

今後はD班が得た関東地方の長期地殻変動データとS班による衝突シミュレーションの結果を比較することにより、伊豆小笠原弧の最適な衝突条件を求め、最近100万年間における関東地方の垂直変動量変遷のシミュレーションを行う。

(d) 引用文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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モテクトニクス，第四紀研究，40，pp.235-242, 2001.
- 5) 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.
- 6) Matsu'ura, M. and Sato, T.: A dislocation model for the earthquake cycle at convergent plate boundaries, *Geophys. J. Int.*, Vol. 96, No.1, pp. 23-32, 1989.
- 7) Sato, T. and Matsu'ura, M.: A kinematic model for deformation of the lithosphere at subduction zones, *J. Geophys. Res.*, Vol. 93, No.B6, pp.6410-6418, 1988.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Hashima, A., Takada, Y., Fukahata, Y. and Matsu'ura, M.: General expressions for internal deformation due to a moment tensor in an elastic/viscoelastic multilayered half-space, *Geophys. J. Int.*, Vol. 175, No.3, pp.992-1012, 2008.
- 11) 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.
- 12) 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

(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
内房海上反射法探査によって新たに得られた房総半島南部最近約100万年間地殻変動上の基礎データ（ポスター）	古屋裕・橋間昭徳・津村紀子・佐藤利典・宮内崇裕・亀尾浩司・伊藤慎・伊藤谷生・平田直・佐藤比呂志・荒井良祐・山本修治・阿部信太郎	日本地球惑星科学連合2009年大会	平成21年5月18日	国内
関東地方の長期地殻変動に対する伊豆・小笠原弧の衝突の効果（口頭）	橋間昭徳・佐藤利典・伊藤谷生・宮内崇裕	日本地球惑星科学連合2009年大会	平成21年5月19日	国内
付加体を覆う新期斜面堆積物中に残されている地殻変動の記録：内房沖海上地震探査結果（口頭）	古屋裕・伊藤谷生	関東アスペリティ・プロジェクト2009ワークショップ	平成21年11月29日	国内
The Effect of the Collision of the Izu-Bonin Arc on Long-Term Deformation in the Kanto Region, Japan（ポスター）	Hashima, A., T. Sato, T. Ito, T. Miyauchi, H. Furuya, N. Tsumura, K. Kameo, S. Yamamoto	American Geophysical Union 2009 Fall Meeting	平成21年12月16日	国際
変位の食い違い理論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地殻変動シミュレーション（口頭）	橋間昭徳・佐藤利典・伊藤谷生・宮内崇裕・津村紀子	東京大学地震研究所特定共同研究（B）「首都圏における地震テクトニクス」研究集会	平成22年3月18日	国内

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

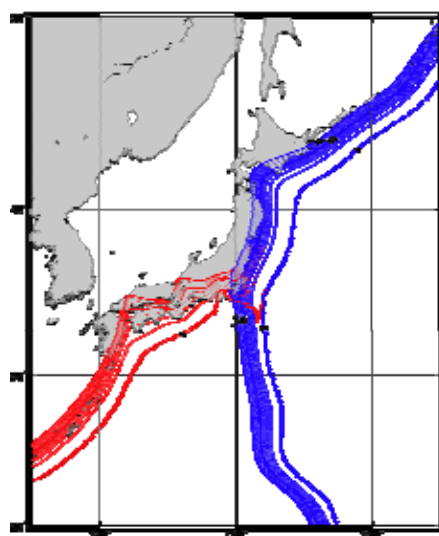
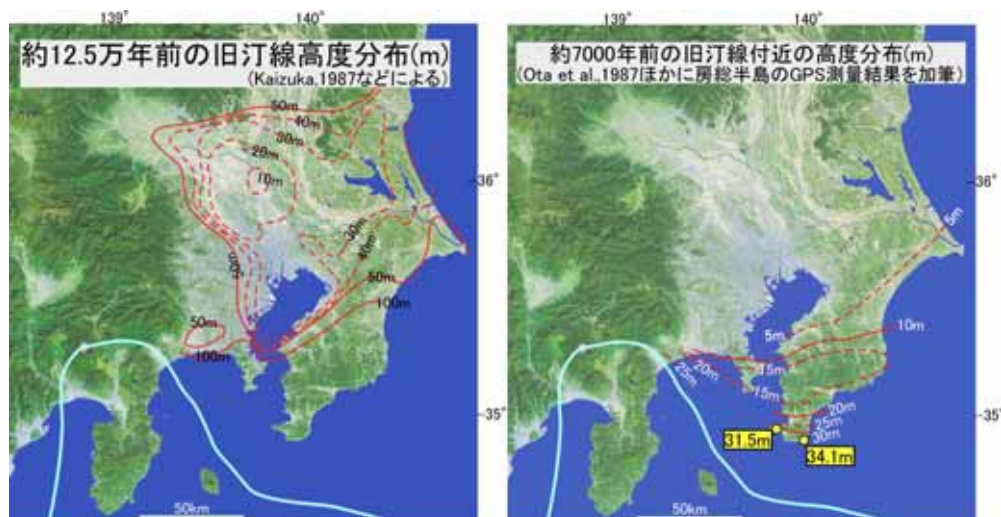
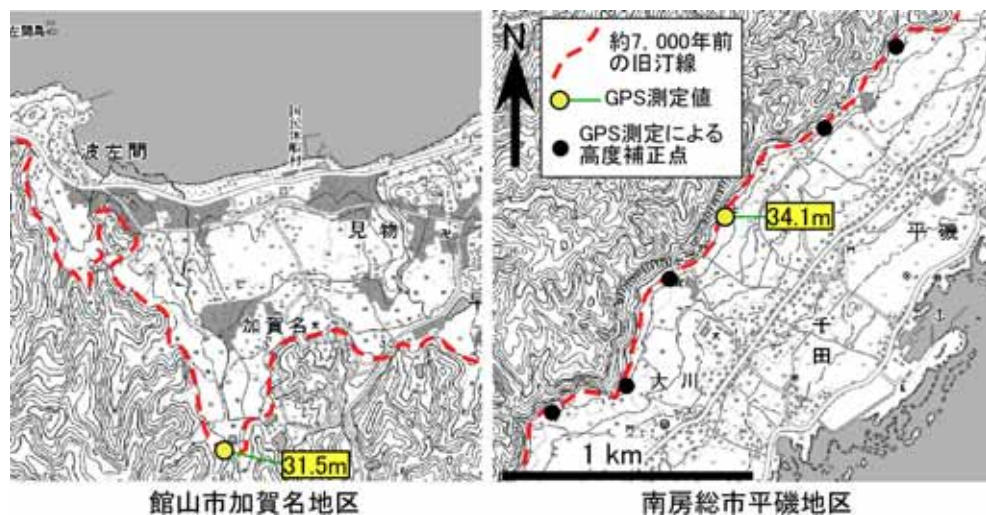
3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 22 年度業務計画案

D 班は豊房層群下部底面 = 100 万年前、同層群上部底面 = 70 万年前、同層群上部上面 = 30 万年前を基準面とする垂直変動量マップを陸域と浅海域をつなげて製作する。同時に、最新期堆積作用と現地形形成との接合をはかり、最新地殻変動様式がいつまで遡れるかについての詳細な検討を行う。さらに、長期間の垂直地殻変動に関する地質学的データ・変動地形データ・測地的データから知られる変形様式や変位速度について検討を S 班とともに行う。

本年度業務により、日本列島周辺のプレート沈み込みと伊豆小笠原弧の衝突による関東地方の長期地殻変動の計算が可能となり、衝突領域の幅と方向の違いによる関東地方の変動パターンについての検討から、伊豆小笠原弧の衝突が関東地方の地殻変動に与える影響についての基本的な理解が得られた。この知見をもとに、平成 22 年度は、D 班が得た地質学的、変動地形学的観測による関東地方の垂直変動データと比較し、まずは衝突領域の幅と方向を拘束する。さらに、プレート境界域の地震活動、測地学的データを検討することにより、衝突率分布を決定し、現実的な伊豆小笠原弧の衝突モデルを提示する。以上で得られたモデルをもとに、最近 100 万年間における関東地方の垂直変動量変遷のシミュレーション計算を開始する。



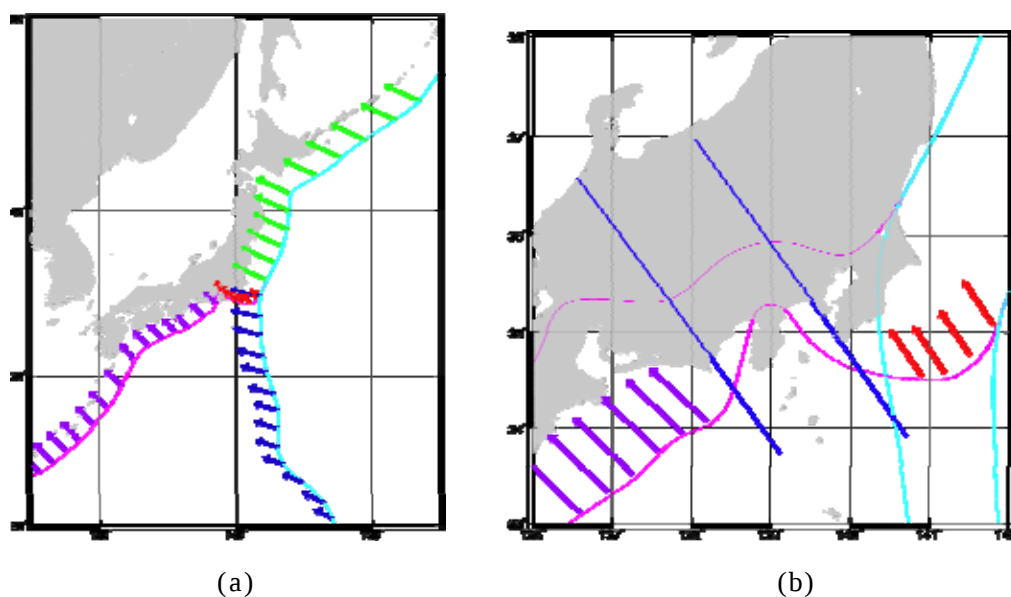


図 4. (a) NUVEL-1A モデル (DeMets et al., 1994) によるプレート境界面上のすべり速度分布 (b) 関東地方におけるすべり速度分布。衝突領域 (青線の間) の外側は NUVEL-1A モデルから求められるすべり速度を与える。衝突領域の内側はすべり速度が欠損している。

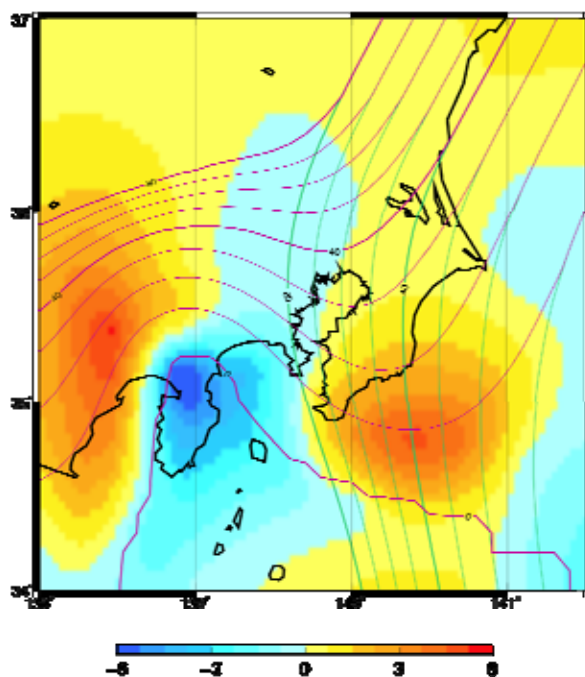


図 5. 関東地方周辺のプレート沈み込み運動による垂直変動分布 (mm/yr)。伊豆小笠原弧の衝突の効果は含まれていない。赤線は北米・フィリピン海プレート境界面、緑線は太平洋・北米プレート境界面を表す。

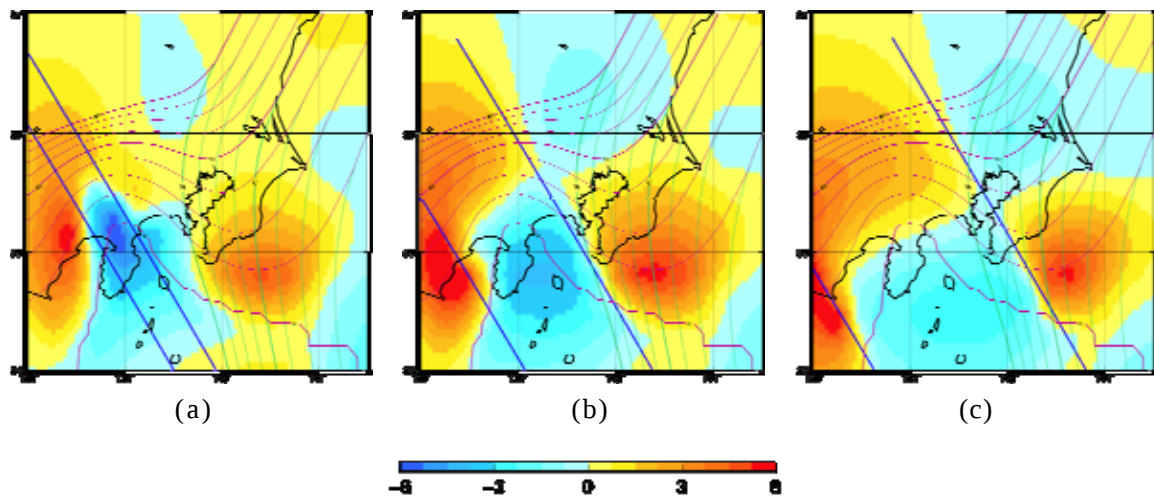


図 6. 関東地方周辺のプレート沈み込み運動と伊豆小笠原弧の衝突による垂直変動分布 (mm/yr) の衝突領域の幅による違い。それぞれ衝突の方向は北米・フィリピン海プレート
の相対運動に沿っている。2本の青線の内側で衝突が起こっている。赤線は北米・フィリ
ピン海プレート境界面、緑線は太平洋・北米プレート境界面を表す。

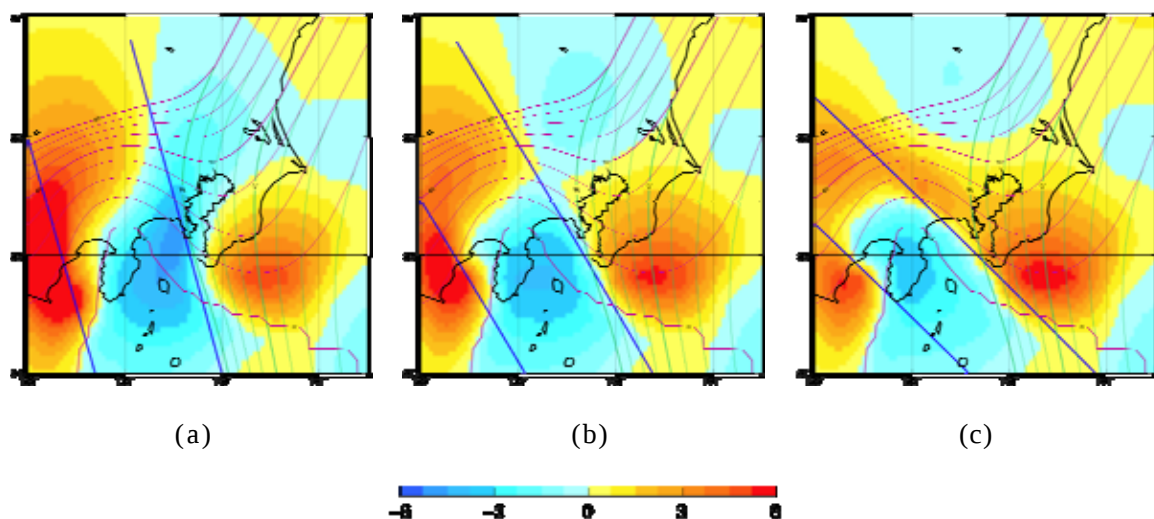


図 7. 関東地方周辺のプレート沈み込み運動と伊豆小笠原弧の衝突による垂直変動分布 (mm/yr) の衝突領域の方向による違い。それぞれ衝突領域の方向は、(a) 伊豆小笠原弧
の配列に沿った方向、(b) 北米・フィリピン海プレートの相対運動に沿った方向、(c) ユー
ラシア・フィリピン海プレートの相対運動に沿った方向。2本の青線の内側で衝突が起こっ
ている。赤線は北米・フィリピン海プレート境界面、緑線は太平洋・北米プレート境界面を
表す。