

3. 2. 4 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、委託業務を包括する個別研究テーマ「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20年度業務目的

データ班（D班）は、房総半島東岸に沿って音波探査を行い、最近100万年間の地殻変動についての資料を収集する。シミュレーション班（S班）は、既存の地殻変動データ、ならびに南関東の地震探査データの集積整理を行い、現在の地殻変動モデル実験の拘束条件を決める。同時に本研究のためのプログラム開発を開始する。

(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	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	助教	津村紀子	
同	特任教員	橋間昭徳	

(2) 平成20年度の成果

(a) 業務の要約

D班は、当初、房総半島東岸（外房）の浅海域において音波探査（反射法地震探査）を行う予定であったが、同地域における既存データの活用が可能となったことから、対象を内房地域に変更した。探査においては、新期斜面堆積物に潜む地殻変動データを解明することが十分期待できる良質の記録を獲得している。今年度は、来年度における本格的処理の前処理まで終了させた。一方、S班は、水準測量のデータと2005年に千葉大が行った房総沖の観測から得られたプレート形状を収集した。また、フィリピン海プレート、太平洋プレートの定常的な沈み込み運動による関東地方の長期地殻変動の計算プログラムを開発した。プレート境界面上に分布する力源の離散化をすすめ、十分な精度でかつ効率的な関東地方の上下変動計算が可能となった。

(b) 業務の成果

1) 過去300万年間の地殻上部変動経過の復元（D班）

長期間に亘る地殻変動の経過を解明するには堆積物に保存されている時代の特定できる構造を把握することが不可欠である。そのため、房総半島南部付加体を覆う斜面堆積物 [千倉層群 (およそ 300 万年前～130 万年前)、豊房層群主部 (100 万年前～70 万年前)、東長田層 (70 万年前～) の海域相当層に対する反射法地震探査を行った。

a) 探査の概要

当初、測線は房総半島東方 (外房) に設定する予定であったが、同地域の良好な反射法データの使用が可能であることが判明したため、内房に切り替えた (BOSO2008)。このことによって房総半島南部が西側浅海域 (内房) ～陸域～東側浅海域 (外房) と東西約 80km にわたって長期間の地殻変動データが取得できる展望が生まれる。具体的な測線は図 1 に示すが、金谷沖から館山湾沖に至る南北約 20km の測線 1 と、館山湾沖から湾内に至る東西約 6km の測線 2 の 2 本である。地質構造的には、測線 1 の北端部は前弧海盆堆積物としての三浦層群分布域に属し、南に向かって嶺岡帯を横断し、付加体としての保田層群、三浦層群分布域に至る。測線南部の館山湾付近では斜面態勢物としての豊房層群・東長田層が陸上に広く分布していることから、浅海域においてもいっそう広く追跡できることは期待される。探査は 2008 年 (平成 20 年) 9 月 4 日に実行されたが、その仕様概略は、表 1 にまとめられている。なお、本探査に随伴してチャープソナーによる海底面反射特性調査も行われた。

b) 取得された記録

総発震点数は 2100 を越え、CDP 数も 4300 を上回るデータが取得された。来年度における本格的処理に先立ち、本年度は各種前処理を行った。その一つとして各ショットのデータを整理したものの一部を図 2 に示す。ノイズレベルは非常に低く、往復走時 1 秒以浅に多数の反射波が確認される。このため、ターゲットである斜面堆積物について非常に良好な構造解析ができるものと期待される。

2) 粘弾性モデルによる関東地方の長期地殻変動の数値実験 (S 班)

関東地方は、4 つのプレートが相互作用しあう複雑なテクトニクスのある場にある。フィリピン海プレートがユーラシア、北アメリカプレートの下に沈み込み、さらに太平洋プレートが北アメリカ、フィリピン海プレートに沈み込んでいる。その結果、房総半島南部においては急激な隆起が起き、一方で東京湾周辺では沈降が起きている。このような関東地方の基本的な変形パターンを説明するために、本研究では、変位の食い違い理論によるプレート沈み込みモデルを構築し、計算を行った。これと並行して、モデルの拘束条件を求めするために必要な、水準測量のデータと 2005 年に千葉大が行った房総沖の観測から得られたプレート形状 (Tsumura et al., 2008) ¹⁾ のデータも収集した。

a) 長時間地殻変動モデルの構築

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することができる (Matsu'ura and Sato, 1989) ²⁾。本研究では、この基本的な考えにもとづき、長期地殻変動モデルを構築した。リソス

フェア-アセノスフェアを弾性-粘弾性二層構造媒質（表 2）であらわし、プレート境界面を Σ とする。プレート沈み込み運動は Σ 上にすべり速度分布 $w_i(\xi)$ を与えることによって表現できる。この定常的なプレート沈み込み運動に対する地殻変形運動 $v_i(\mathbf{x})$ の一般的な表現は

$$v_i(\mathbf{x}) = \int_{\Sigma(\xi)} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_q} G_{ip}(\mathbf{x}, t = \infty; \xi, 0) \right\} M_{pq}^s(\xi) d\Sigma(\xi) \quad (1)$$

と表すことができる（Sato and Matsu'ura, 1988）³⁾。ただし、 M_{pq}^s は断層すべりに対応するモーメント・テンソルで、すべり速度 $w_i(\xi)$ と断層面の法線ベクトル $n_i(\xi)$ を用いて

$$M_{pq}^s(\xi) = n_p(\xi)w_q(\xi) + n_q(\xi)w_p(\xi) \quad (2)$$

と表される。また、 $\frac{\partial}{\partial \xi_q} G_{ip}$ はグリーン・テンソルの力源座標 ξ_q による微分であるが、モーメント・テンソル（ここでは断層すべり）による変形場の表現でもある。モーメント・テンソルによる弾性-粘弾性多層構造媒質の変形場の一般的な表現式は Hashima et al. (2008)⁴⁾ によって得られている。

式(1)の積分は、実際のプレート境界面形状とすべり速度分布を与えて、数値的に行う必要がある。本研究では、プレート境界面形状として、CAMP スタンダードモデル（日本列島域の 3 次元プレート境界面形状モデル）（Hashimoto et al., 2004）⁵⁾ を用いた（図 3）。プレート境界面上のすべり速度ベクトル $w_i(\xi)$ は、NUVEL-1A プレート運動モデル（DeMets et al., 1994）⁶⁾ によって計算される地表面上でのプレート間相対速度を、プレート境界面上に投影することによって得ることができる（Hashimoto et al., 2004）⁵⁾。得られたすべり速度分布を図 4 に示した。

b) 関東地方の長期地殻変動計算

a) の定式化にもとづいて、関東地方の上下変動の計算プログラムを開発した。式(1)の積分を十分な精度でかつ効率的に行うために、被積分関数 $\frac{\partial}{\partial \xi_q} G_{ip}$ の性質を考慮しながらプレート境界面上に分布する力源（断層すべり）の離散化をすすめた。まず、計算対象領域から遠方の力源の寄与に関しては、弾性的なリソスフェアを重力的平衡状態に保とうとする効果が勝るので、上下変動は力源から遠方では 0 に減衰する。このことから、変動計算に必要な力源の範囲を定めることができる。また、計算対象領域にごく近い力源に関しては、断層面形状による効果を表現するために細かい離散化が必要である。これらを考慮した結果、計算の遂行には以下のような離散化が最適であることがわかった。

- ・ 計算対象領域である関東地方から 500km 離れた点（岩手、広島、鳥島付近）までは、関東地方の上下変動に影響を与える。
 - ・ 変位の計算点がプレート境界に非常に近い伊豆半島～房総半島直下においては力源を 1 km 間隔とする。関東地方から十分離れていれば 20km 間隔でも十分である。
- 以上のように離散化した場合、計算に要した時間は Xeon X5272 3.40 GHz の計算機で 200

時間弱であった。得られた結果を図 5 に示した。図では、安定点は○、不安定点は△で表しているが、プレート境界面にごく近い計算点においても安定した解が得られていることが示されている。伊豆半島の付け根での不安定点はプレート境界の曲率が急であるため、房総沖の東南方の不安定点は、計算対象領域の外側のプレート境界面形状が複雑であるためであると考えられる。

(c) 結論ならびに今後の課題

D 班は、房総半島南部東京湾側（内房）浅海域で反射法地震探査（BOSO2008）を実施し、良好な記録を取得した。今後、この記録から特に斜面堆積層にターゲットをあてたイメージングを行い、同層中に記録されている過去 100 万年程度の地殻変動データを読み取り、地表地質・地形データとあわせて、D 班に提供する。

S 班は、フィリピン海プレート、太平洋プレートの定常的な沈み込み運動による関東地方の長期地殻変動の計算プログラムを開発した。プレート境界面上に分布する力源の離散化をすすめ、十分な精度でなおかつ効率的な関東地方の上下変動計算が可能となった。今後は、上記のプログラムに、関東地方の地殻変動に大きな影響を与えていると考えられる伊豆小笠原弧の衝突の効果を取り入れる予定である。

(d) 引用文献

- 1) Tsumura, N., Komada, N., Sano, J., Kikuchi, S., Yamamoto, S., Ito, T., Sato, T., Miyauchi, T., Kawamura, T., Shishikura, M., Abe, S., Sato, H., Kawanaka, T., Suda, S., Higashinaka, M. and Ikawa, T.: A bump on the upper surface of the Philippine Sea plate beneath the Boso Peninsula, Japan inferred from seismic reflection surveys: A possible asperity of the 1703 Genroku earthquake, *Tectonophysics*, 2008 (in press).
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.

8) 産業技術総合研究所：20 万分の 1 数値地質図幅集「関東甲信越及び伊豆小笠原諸島」, 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
Simulation of long-term deformation in the Kanto region with a kinematic subduction model	橋間昭徳	第4回「関東アスペリティ・プロジェクト」に関する国際ワークショップ（筑波）	平成21年1月7日	国際
長期間地殻変動を用いた地形形成モデルの構築	佐藤利典	IODP Domestic INVEST: Geohazard、東京	平成20年12月1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

(3) 平成21年度業務計画案

D 班は、平成 20 年度実施の BOSO2008 の本格処理を進め、斜面堆積層の速度・構造解析を経て同層のイメージングを行う。その結果と地表地質ならびに地形データを結合して、房総半島南部ならびに周辺海域の過去 100 万年間の地殻変動データを数ステップに分けて提示する。さらにリアルタイムキネマティクス GPS 測量によって、隆起海岸地形の高精度高度測定を行う。これらから 100 年スケールの最新隆起イベントの垂直変動、1000 年～

10 万年スケールの累積変動を明らかにし、地震性変動と非地震性変動の蓄積過程解明に資するデータを提供する。

S 班の本年度業務により、フィリピン海、太平洋両プレートの沈み込み運動による関東地方の長期的地殻変動を見積もることが可能となった。しかし、関東地方の地殻変動に関しては、相模トラフから駿河トラフにわたるプレート境界が陸側に大きく食い込む形状をしている（ $\sim 100\text{km}$ ）ことから推察されるように、フィリピン海プレート上の伊豆小笠原弧の衝突も大きな影響を及ぼしていると考えるのが自然である。平成 21 年度業務においては、本年度業務で作成した地殻変動計算プログラムに、伊豆小笠原弧の衝突の効果を取り入れる。衝突計算のプログラムは、衝突域にすべり欠損を与えることによって表現する。この衝突モデルの性質は、衝突域の大きさ（すべり欠損を与える範囲）と、衝突率（プレート収束運動に対する衝突の割合）に依存する。これらのパラメーターは容易に観測できるものではないが、D 班が得た上下変動データによって拘束することが可能であり、計算結果と比較検討することによって、現在の伊豆小笠原弧の最適な衝突モデルを作成する予定である。

表 1. BOSO2008 探査仕様の概要

測線名	Boso2008	
<測線長>	Line1:約 20km	Line2:約 6km
<発震系>		
震源	エアガン 40cbi	
仕様	発震周波数: 1~100Hz(卓越 20~50Hz) 発震圧力: 2,000psi ガン深度: 5m	
発震回数/発震点	1 回	1 回
発震間隔	12.5m	12.5m
総発震点数	1642 点	530 点
<受振系>		
受振器	ハイドロフォン	ハイドロフォン
受振点間隔	12.5m	12.5m
<記録系>		
探鉱機	GEODE	GEODE
サンプリング間隔	1msec	1msec
記録長	3sec	3sec
チャンネル数	24ch	24ch
CDP 間隔	6.25m	6.25m
総 CDP 数	3306	1082

表 2. 地殻変動計算に用いた弾性-粘弾性二層構造媒質のパラメーター

	h [km]	ρ [kg/m ³]	λ [GPa]	μ [GPa]	η [Pa s]
Lithosphere	40	3000	40	40	∞
Asthenosphere	∞	3400	90	60	5×10^{18}

h : 各層の厚さ、 ρ : 密度、 λ : ラメ定数、 μ : 剛性率、 η : 粘性率

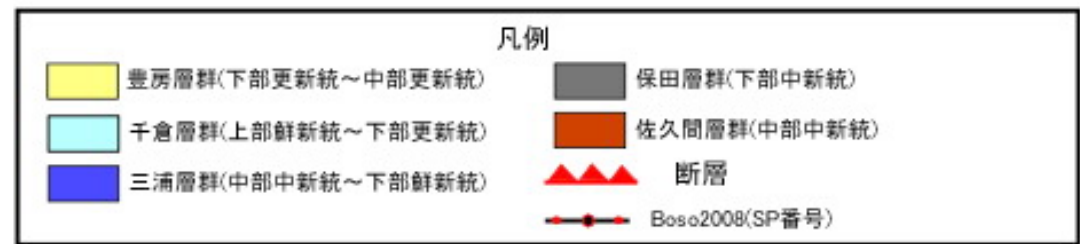
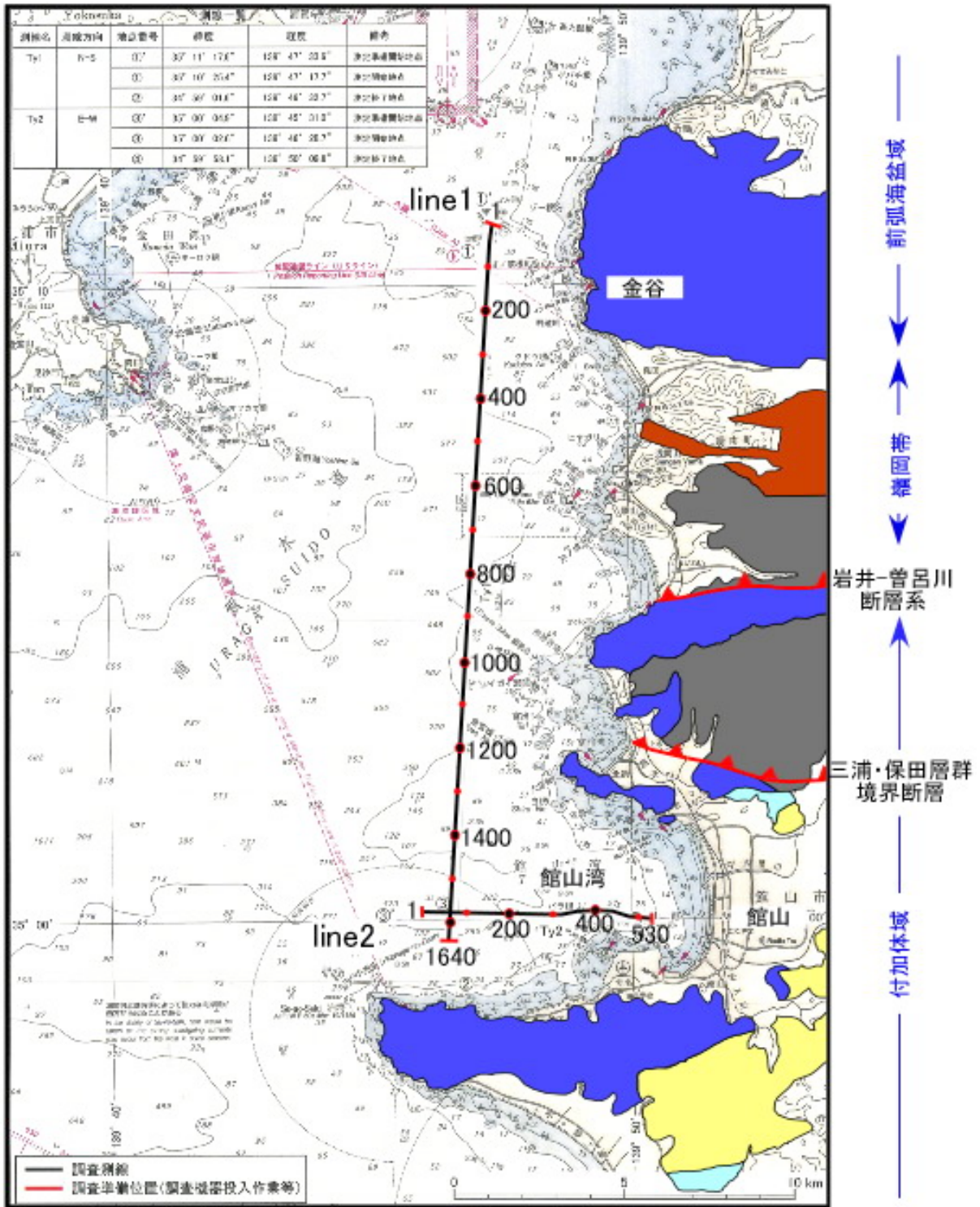


図 1. BOSO2008 測線図ならびに周辺陸域地質図。海上保安庁発行海図 W90『東京湾』を使用。陸域地質に関しては産業技術総合研究所(2004)⁷⁾ 並びに山本(2008)⁸⁾ を使用。

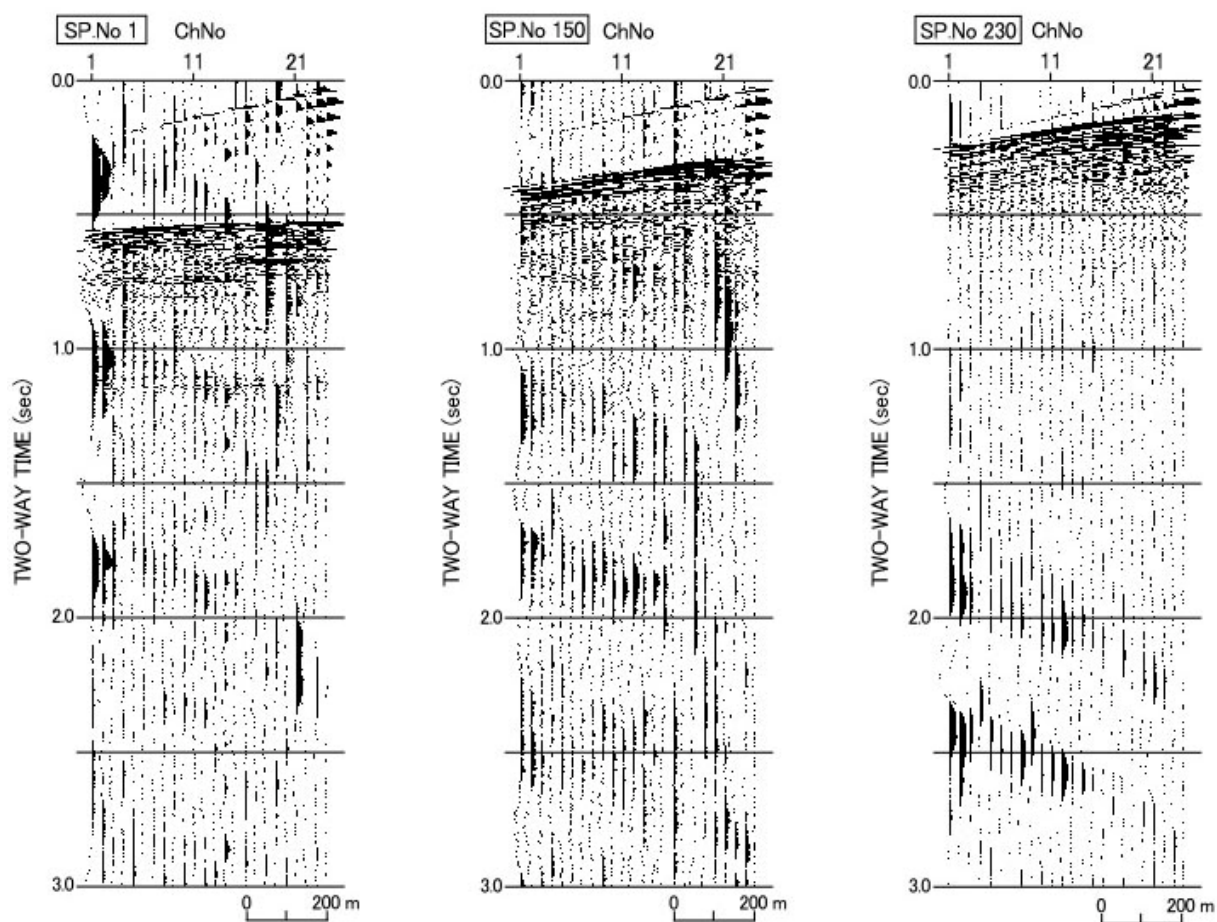


図 2. 各ショット点における受振データの例 (Line2)

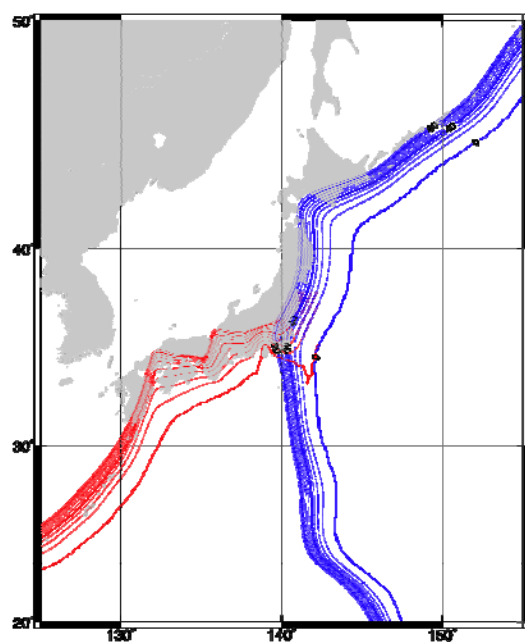


図 3. CAMP スタンダードモデル (日本列島域の 3 次元プレート境界面形状モデル) (Hashimoto et al., 2004) ⁵⁾

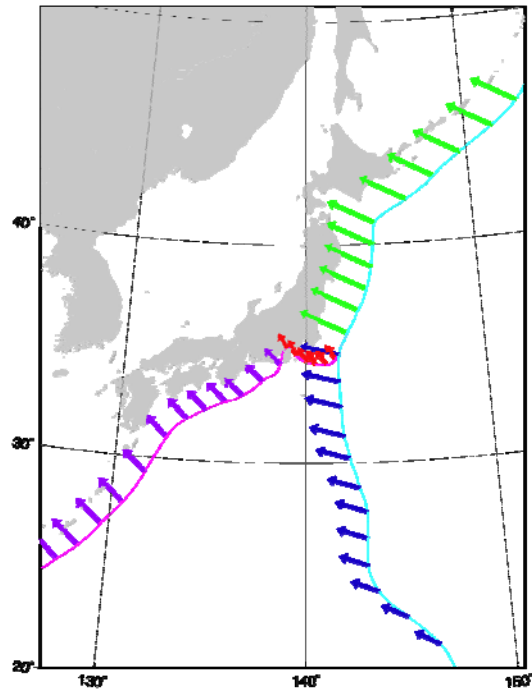


図 4. NUVEL-1A モデル (DeMets et al., 1994) ⁶⁾ によるプレート境界面上のすべり速度分布

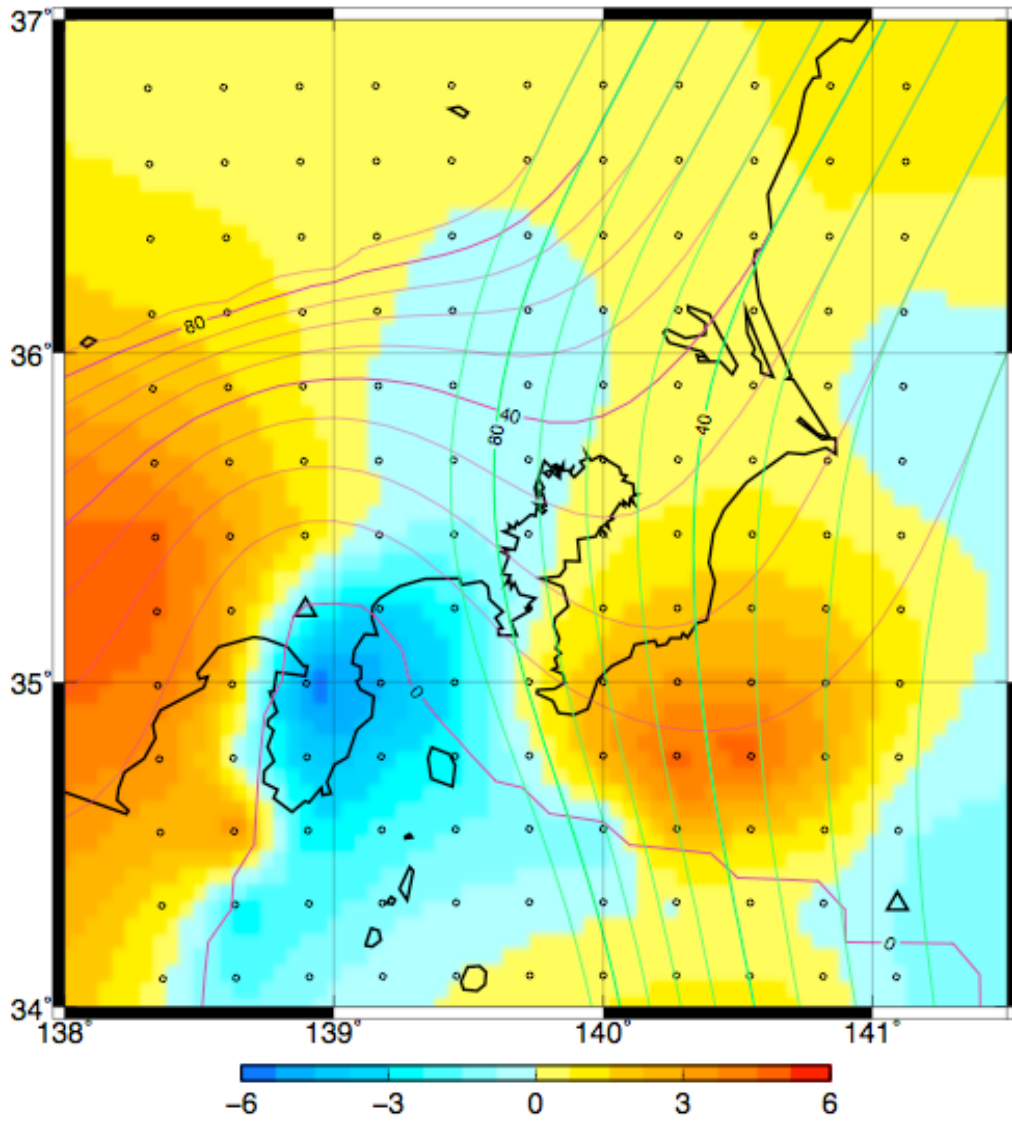


図 5. 関東地方の上下変動計算 (mm/yr)。○点は安定解、△点は不安定解。赤線はフィリピン海-北アメリカプレート境界面、緑線は太平洋-北アメリカ・フィリピン海プレート境界面を表す。