

## 地殻活動観測所における光波測距による 中部日本の歪と2004年新潟県中越地震との関係

新妻信明<sup>1</sup>・藤間 俊<sup>1</sup>・伊藤広和<sup>1</sup>・吉本拓二<sup>1</sup>

### The 2004 Chuetsu Earthquake in Niigata Prefecture and strain of the central Japan detected with laser ranging of the Crustal Activity Observatory of Shizuoka University

Nobuaki NIITSUMA<sup>1</sup>, Shun TOMA<sup>1</sup>,  
Hirokazu ITOH<sup>1</sup> and Takuji YOSHIMOTO<sup>1</sup>

**Abstract** The boundaries of Pacific, Philippine Sea, North America, Amur, and South China plates locate around Japanese Island arcs. Triple junction of plate boundaries off Boso acts as a controller on the strain of the Japanese Island arcs. Chuetsu Earthquake of October 2004 in Niigata Prefecture occurred under the extraordinary circumstance of the strain.

We examine relative plate convergence and earthquakes along the plate boundaries of Kuril Northeast Japan Arc along Kuril-Japan Trench, Ryukyu Arc along Ryukyu Trench and Taiwan, Izu Arc along Izu-Ogasawara-Mariana-Yap-Palau Trench, Southwest Japan Arc along Sagami-Suruga-Nankai Trough. The earthquakes from January 1997 to January 2005, reported on *Monthly Report of Earthquakes and Volcanoes in Japan* as main earthquakes around Japan and world by Japan Meteorological Agency were used.

Convergent area in km<sup>2</sup> per year  $S_y$ , Euler latitude of ends of interval on plate boundary  $\phi_1$  and  $\phi_2$ , and rate  $R$  of relative rotation along the plate boundary around Euler Pole in degree /million years relate as follow;

$$S_y = 0.7074 (\sin\phi_1 - \sin\phi_2) R$$

and area of dislocation  $S_f$  in km<sup>2</sup> for earthquake with magnitude  $M$  is calculated as follow;

$$S_f = 10^{1.2M-9.9}$$

Cumulative convergent areas  $\Sigma S_y$  for relative plate motions and cumulative areas for dislocations  $\Sigma S_f$  with earthquakes along plate boundaries correlate well.

The earthquakes did not uniformly occur along the plate boundaries, and division into stages is defined using the behavior of occurrence of earthquakes along the plate boundaries around Japanese Island arcs.

Ryukyu Arc Advance Stage [1] is characterized by activity on Ryukyu Arc more than plate convergence and low activities on Kuril Northeast Japan Arc, Izu Arc, and Southwest Japan Arc until March 2000.

Izu Arc Eastward Stage [2] is characterized by activities on Izu Arc and Ryukyu Arc with comparable rate of plate convergence and low activities on Kuril Northeast Japan Arc and Southwest Japan Arc from March 2000 to June 2002. Izu Arc and Ryukyu Arc with earthquakes slipped as east and west margins of Philippine Sea Plate. The Euler pole for relative motion of Philippine Sea and Pacific plates locates near the Plate boundary on Pacific Plate. The Euler pole is acting as "pivot" for the rotation of the Philippine Sea Plate on Pacific Plate. The Philippine Sea Plate could rotate around the pivot, but Kuril Northeast Japan Arc without earthquake was stucked on Pacific Plate, then Izu Arc moved eastward relative to Kuril Northeast Japan Arc.

<sup>1</sup>静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市大谷 836

<sup>1</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan

E-mail: senniit@ipc.shizuoka.ac.jp (N.N.)

Kuril Northeast Japan Arc Start Stage [3] is characterized by activity on Kuril Northeast Japan Arc with similar rate of plate convergence and low activities on Izu Arc, Southwest Japan Arc and Ryukyu Arc from June 2002 to September 2003. Kuril Northeast Japan Arc with earthquake activity started to slip eastward on Pacific Plate.

Izu Arc Westward Stage [4] was initiated by 2003 off Tokachi Earthquake which consumed the cumulative dislocation on Kuril Northeast Japan arc to the cumulative plate convergence from January 1997. Activity on Kuril Northeast Japan Arc was comparable with plate convergent rate and low activities on Izu Arc and Ryukyu Arc. Izu Arc without earthquake activity was stuck on Pacific Plate and moved westward, but Kuril Northeast Japan Arc with earthquake activity slipped on Pacific Plate. Southwest Japan Arc consumed more than half of Plate convergence by Off Kii Peninsula and Off Tokaido September 2004 since 1997.

Strain condition of central Japan has been monitored with the changes in distance of the laser path with 3708.568 m between Yatsuyama Block separated with Kusanagi Fault and Crustal Activity Observatory of Shizuoka University on Udo Hills since 1995. The laser path distance reacted well to the stage division for occurrence of earthquakes on plate boundaries around Japanese Island Arcs.

The distance correlated with the balance of the earthquakes on east and west margins of Philippine Sea Plate in Stage [1].

Semi-annual cyclic changes of laser path, related with earthquakes on the margins of Philippine Sea Plate and earthquakes on the backside breakage of outer swell along Zenishu Ridge and eruption of Miyakejima of Izu Arc, appeared in Stage [2].

The distance of laser path was stable in Stage [3]. Extension of the laser path was observed in the early part of Stage [4]. Significant shortening happened after earthquakes on Southwest Japan Arc, Off Kii Peninsula and Off Tokaido September 2004, then Chuetsu Earthquake happened.

**Key words:** Chuetsu Earthquake, plate boundary, Euler latitude, plate convergent area, stick-slip process, magnitude of earthquake, accumulated area of dislocation for earthquakes, behavior of occurrence of earthquakes, laser ranging, Udo Hills, Kusanagi Fault, breakage along back crest of outer swell, Zenisu Ridge, eruption of Miyakejima

## 緒言

房総沖にある地球上唯一の海溝・海溝・海溝型プレート三重会合点の周辺におけるプレート相互作用によって日本列島は激しい変動帯となっている (Niitsuma, 1992; 2004). プレート運動は海嶺における海洋底拡大から求められた過去 300 万年間の平均とされる NUVEL1 (DeMets *et al.*, 1990) と最近 10 年余りの宇宙測距から求められた REVEL2000 (Sella *et al.*, 2002) が良い一致を示すことは、プレートが高精度等速運動していることを示唆している。海洋底の拡大は引張応力場にある海嶺に亀裂が生じマントルからマグマが埋積する過程であり、海溝に沿う沈み込みは、海溝における抵抗によって沈み込まれる島弧側が歪みを蓄積し、限界に達すると地震を起こし解消する固着・解放 (Stick Slip) 過程であり、いずれも間欠的な亀裂の発生と地震の発生に依存しているが、プレート全体として見ると極めて様な等速運動とみなせる (日置, 1997)。

日本列島における歪の蓄積は、日本列島に沈み込む太平洋プレート・フィリピン海プレート・アムールプレート・南シナプレートに支配されており (図 1), 地震が間欠的にその歪を解消している。2004 年 10 月 23 日には新潟県中越地方で M6.8 の地震が起こり多くの被害を与えた

が (図 2), 地震発生前に静岡大学地殻活動観測所における光波測距によって中部地方の歪状態の変化が捉えられており、日本列島周辺の歪状態の特殊性が指摘されている (新妻, 2005)。

本稿では、日本列島周辺の地震によって日本列島の歪がどのように変化するかを解析した結果と静岡大学地殻活動観測所における光波測距による谷津山との光路長変化および中越地震の地震計・傾斜計による観測結果について報告する。

## 地震によって解消されるプレート運動の定量化

プレート運動の枠組を日本周辺で発生している地震と定量的に対応付けるためには、地震によるプレート運動の消化を定量化する必要がある。

プレート境界におけるプレート相対運動は、オイラー極の位置 (緯度  $\phi_E$ , 経度  $\lambda_E$ ) とその回りの回転角速度  $R$  で表わされる。オイラー極から地点 (緯度  $\phi_g$ , 経度  $\lambda_g$ ) までの余角であるオイラー緯度  $\phi$  は、球面三角公式

$$\sin \phi = \sin \phi_g \sin \phi_E + \cos \phi_g \cos \phi_E \cos (\lambda_g - \lambda_E)$$
によって求められる。プレート境界上の地点におけるプレート運動速度  $r$  は、オイラー緯度  $\phi$  の余弦に比例する。

$$r = R \cos \phi$$

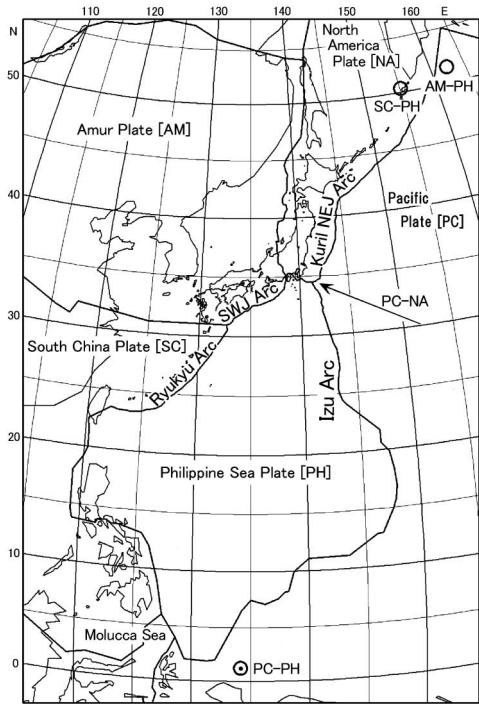


図1 日本列島とプレート境界. 丸印: プレート相対運動のオイラー極. 目玉印: プレート相対運動の「要」. 矢印: プレート相対運動のオイラー赤道.

Fig.1 Japanese Island Arcs and plate boundaries. Circle: Euler pole of relative plate motion. Dot within circle: "Pivot" of relative plate motion. Arrow: Euler equator of relative plate motion.

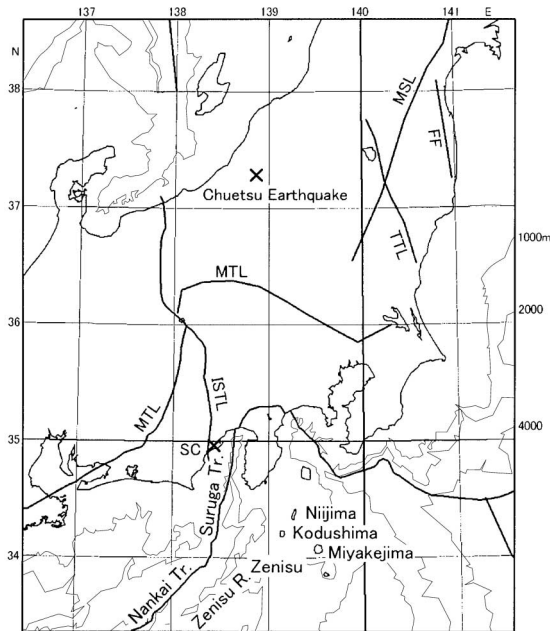


図2 2004年静岡県中越地震の震央と静岡大学地殻活動観測所. SC: 静岡大学地殻活動観測所. MTL: 中央構造線. ISTL: 糸魚川-静岡構造線. MSL: 盛岡-白河線. FF: 双葉断層. TTL: 棚倉構造線. Tr: トラフ. R: 海嶺.

Fig.2 Epicenter of Chuetsu Earthquake in Niigata Prefecture and Crustal Activity Observatory of Shizuoka University. SC: Crustal Activity Observatory of Shizuoka University. MTL: Median Tectonic Line. ISTL: Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line. MSL: Morioka-Shirakawa Line. FF: Futaba Fault. TTL: Tanakura Tectonic Line. Tr: trough. R: ridge.

プレート相対運動速度をプレート境界に沿って積分するとプレート相対運動によって収束する面積  $S$  になる. プレート相対運動速度をプレート境界の一方の端のオイラー緯度  $\phi_1$  から他端のオイラー緯度  $\phi_2$  までの積分は, 両端のオイラー緯度の正弦の差になる.

$$S = R \int_{\phi_2}^{\phi_1} \cos \phi \, d\phi = (\sin \phi_1 - \sin \phi_2) R$$

一般にプレート相対運動の回転角速度  $R$  は 100 万年当たりの角度 ( $^{\circ}/m.y.$ ) で与えられているが, 上式のオイラー緯度  $\phi$  を半周の  $90^{\circ}$  から  $-90^{\circ}$  まで積分すると  $S = 2R$  となることから, 地球の表面積  $E \text{ km}^2$  と 100 万年当たりの面積  $S_{my} \text{ km}^2$  は,

$$S_{my} = (\sin \phi_1 - \sin \phi_2) E \cdot R / 720$$

と表わされ, 地球の周は  $40,000 \text{ km}$  であるので,

$$E = 16 \cdot 10^8 / \pi$$

であり, 年当たりの面積  $S_y \text{ km}^2$  は,

$$S_y = (\sin \phi_1 - \sin \phi_2) 1600 / \pi \cdot R / 720 = 0.7074 (\sin \phi_1 - \sin \phi_2) R$$

と算出できる.

プレート境界に発生する断層変位が累積してプレート運動を消化しているが, 断層変位時の振動が地震として観測される. 断層変位量は地震の規模に関係していることから, 地震の規模から断層変位量を算出してプレート運動量と比較することができる. 断層運動の際に放出される地震動から求められるマグニチュード  $M$  と断層変位  $D \text{ m}$  と断層長  $L \text{ km}$  との関係は, 松田の式

$$D = 10^{0.6M-4}$$

$$L = 10^{0.6M-2.9}$$

として経験的に求められている (松田, 1975) ので, それらに乗じた断層変位面積  $S_f \text{ km}^2$  は,

$$S_f = 10^{1.2M-9.9}$$

と求めることができる. プレート境界で起こる地震の  $S_f$  を累積してプレート運動から予測される  $S_y$  と比較すれば定量的解析が可能になる.

気象庁による地震・火山月報 (防災編) の「日本及びその周辺で発生した主な地震」と「世界の主な地震」として収録されている地震を用い, 1997年1月から2005年1月までの8年1ヶ月間に千島海溝・日本海溝 [千島東北弧]・伊豆-マリアナ海溝 [伊豆弧]・南海トラフ [西南日本弧]・琉球海溝・台湾 [琉球弧] で起こった地震について累積変位面積を算出した (表1).

プレート運動については, NUVEL-1 および Heki *et al.* (1999) に従い, 三重会合点より北側の千島東北弧は北米プレートと太平洋プレート, 伊豆弧はフィリピン海プレートと太平洋プレート, 西南日本弧はアムールプレートとフィリピン海プレート, 琉球弧は南シナプレートとフィリピン海プレート, の相対運動から累積収束面積を算出した.

算出された累積変位面積は, プレート運動量の4年から6年分 (平均5.14年分) に当たり良く対応している (図3). 4つのプレート境界のプレート運動面積の比率と累積地震変位面積の比率が良く一致していることは, 間欠的に発生するプレート境界の地震も10年程度の期間を用いれば, 等速運動するプレート運動に対応させることがで

表 1 日本列島周辺のプレート境界における年当たりの収束面積 $S_y$ と1997年1月から2005年1月までに起こった地震のマグニチュードから算出された累積変位面積 $\Sigma S_f$ 。プレート境界は, Kuril NEJ = 千島東北弧, Izu Arc = 伊豆弧, SWJ Arc = 西南日本弧, Ryukyu Arc = 琉球弧,  $\phi_1 \lambda_1 \cdot \phi_2 \lambda_2$ はプレート境界両端の緯度・経度,  $\phi$ はプレート境界両端のオイラー緯度,  $\phi_E \lambda_E$ はプレート境界におけるプレート相対運動のオイラー極,  $R$ は100万年当たりのプレート相対運動速度。

Table 1 Convergent area  $S_y$  along Plate boundaries per year around Japanese Island Arcs and accumulated area of dislocation  $\Sigma S_f$  for earthquakes from January 1997 to January 2005. Kuril NEJ = Kuril Northeast Japan Arc, SWJ Arc = Southwest Japan Arc.  $\phi_1 \lambda_1 \cdot \phi_2 \lambda_2$  are latitudes and longitudes of ends of Plate boundary.  $\phi$  are Euler latitudes of ends of Plate boundary.  $\phi_E \lambda_E$  are latitude and longitude of Euler Pole for relative plate motion.  $R$  is rate of relative plate motion per million years.

Plate boundary	Ends of boundary $\phi_1 \lambda_1; \phi_2 \lambda_2$	Euler latitudes $\phi$	Euler pole $\phi_E \lambda_E$	$R$ °/my	$S_y$ km <sup>2</sup> /y	$\Sigma S_f$ km <sup>2</sup>
Kuril NEJ	55.0N164.0E; 34.0N142.0E	26.0; 0.1	48.7N-78.2E	0.78	0.241	1.308
Izu Arc	34.0N142.0E; 6.5N134.2E	56.4; 84.7	1.2N134.2E	1.00	0.115	0.514
SWJ Arc	34.0N142.0E; 31.0N132.7E	67.2; 60.1	51.4N162.4E	1.08	0.042	0.174
Ryukyu Arc	31.0N132.7E; 22.0N120.0E	64.5; 50.6	50.3N155.1E	1.28	0.117	0.651

たが、2000年から2002年の夏までは年間5個以上と活発な地震活動があり、その後沈静化し、15ヶ月近く経過した2003年11月に2つの地震が起こったのみで2004年8月まで地震が起こっていない。中越地震と紀伊半島沖地震はこの異常な静穏期を経て起こった。一方、日本海溝沿いの地震は、伊豆・マリアナ海溝の静穏期前には年間2から4個であったのが、2002年以後には年間10個以上と倍増している。」と指摘している。中越地震前に伊豆・マリアナ海溝沿いの地震が急減したが、日本海溝や千島海溝沿いで地震は逆に増加し、太平洋プレート境界における地震発生域が変化している。固着・解放機構に基づくと、この地震発生域の変化は、伊豆・マリアナ弧は太平洋プレートに固着して西進するのに対して東北日本弧は地震によって累積変位が解放されるために東進し、伊豆弧北部の中部日本に大きな歪の蓄積を予想させる。

これらの定性的な予想を定量的に解析するために、各プレート境界で発生した地震のマグニチュードから算出される変位面積の累積経過とプレート運動から予測される変位面積の様な増加を比較検討する。固着・解放機構では、プレート運動によって一定速度で累積する変位面積がプレート境界における歪として蓄えられ、歪が限界に達すると地震によって解放される。間欠的に発生する地震は、歪として蓄えられたプレート運動による変位面積を解放していると見做すので、地震マグニチュードに基づく累積変位面積解放曲線は階段状になる。プレートの等速運動によって一定の速度で蓄えられる収束面積は、プレート運動速度に対応する勾配を持つ直線、一様累積直線、として表わされる。階段状の累積変位面積解放曲線の左上角を一様累積直線が通過すれば、プレート運動によって蓄積された歪が地震として繰り返し解放されていることになる(図4)。

千島東北弧の8年1ヶ月間の総地震変位面積を基準にして、伊豆弧・西南日本弧・琉球弧についてプレート運動から算出される変位面積比に従って一様累積直線を描くと地震による累積変位面積解放曲線と交わることから、間欠的な地震による変位面積解放がプレート運動による収束面積を消化していることが分かる。

一様累積直線と累積変位面積解放曲線が最も外れてい

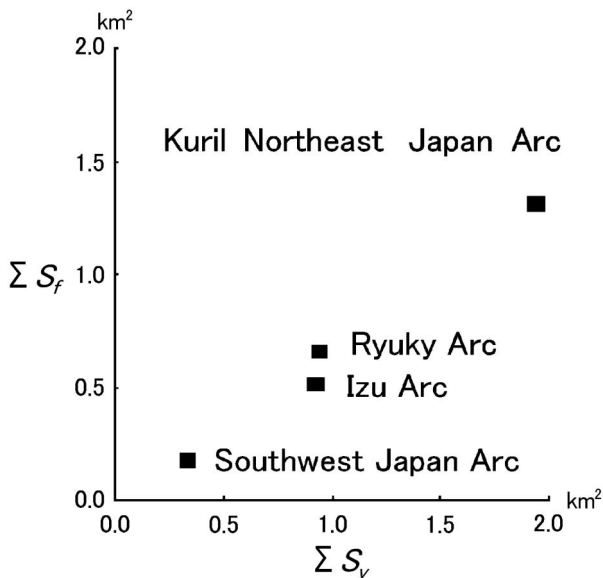


図 3 1997年1月から2005年1月の間に日本周辺のプレート境界におけるプレート収束面積 $\Sigma S_y$ と気象庁「地震・火山月報(防災編)」に日本周辺および世界の主な地震として報告されている地震によって解放された変位面積 $\Sigma S_f$ 。

Kuril Northeast Japan Arc: 千島東北弧, Izu Arc: 伊豆弧, Southwest Japan Arc: 西南日本弧, Ryukyu Arc: 琉球弧。

Fig. 3 Relation of convergent areas  $\Sigma S_y$  for relative plate motions to cumulative areas for dislocations  $\Sigma S_f$  with earthquakes along plate boundaries from January 1997 to January 2005, reported on *Monthly Report of Earthquakes and Volcanoes in Japan* as main earthquakes around Japan and world by Japan Meteorological Agency.

き、プレート運動に基づき地震の発生について定量的解析が可能であることを示している。

### 中越地震にいたる日本周辺の地震活動

中越地震発生前の日本周辺における顕著な特徴として、新妻(2005)は、「伊豆・小笠原海溝沿いの地震は1999年までは年間2-4個がほぼ半年以内の間隔で起こってい

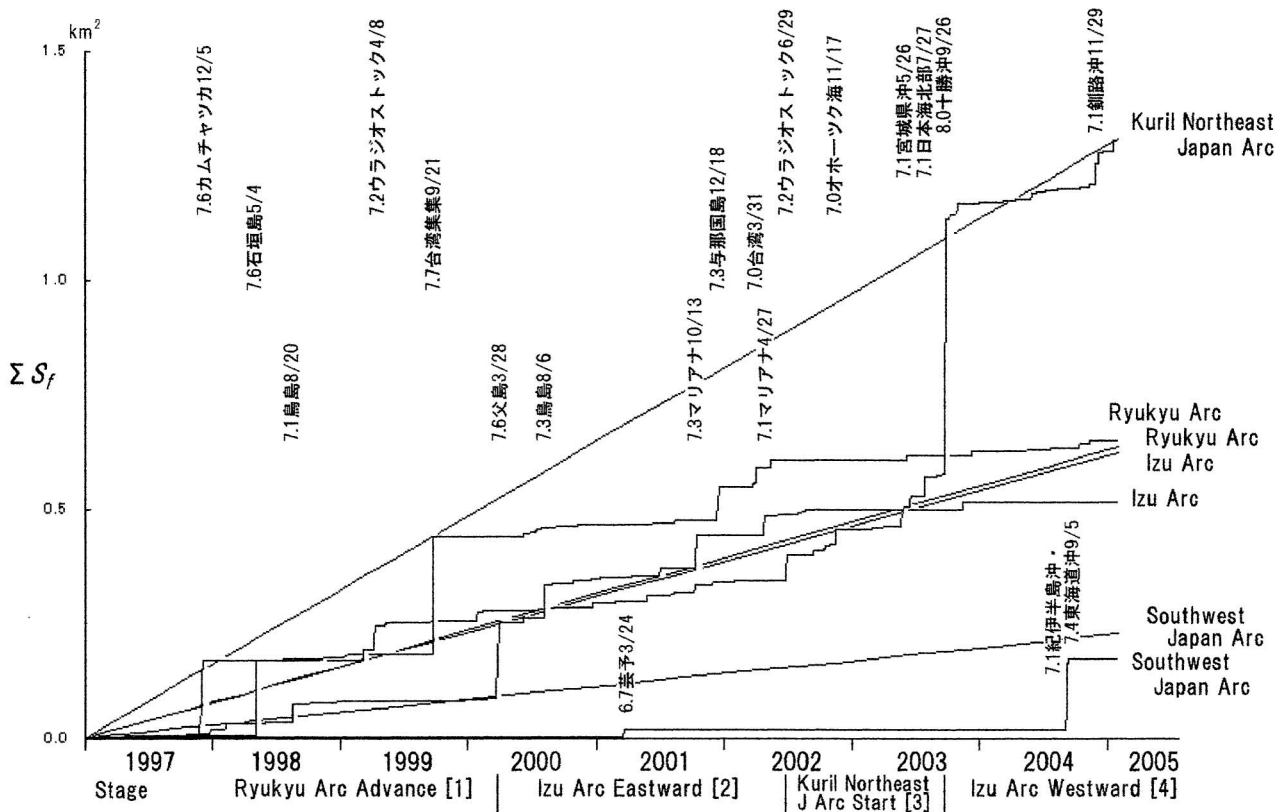


図4 日本周辺のプレート境界の地震によって解放された変位面積累積曲線 $\Sigma S_f$ と時期区分。直線は、1997年1月から2005年1月までに千島東北弧の地震で解放された変位面積累計を基準としてプレート運動から算出される琉球弧、伊豆弧、西南日本弧の一樣累積直線を示した。Stageは日本列島のプレート境界における地震発生様相に基づいた時期区分。Ryukyu Arc Advance [1]: 琉球弧先行期。Izu Arc Eastward [2]: 伊豆弧東進期。Kuril Northeast J Arc Start [3]: 千島東北弧始動期。Izu Arc Westward [4]: 伊豆弧西進期。主な地震についてはマグニチュード・震源・月/日を示した。横軸の目盛は年初。

Fig. 4 Cumulative curves of dislocated area  $\Sigma S_f$  for earthquakes along Plate boundaries around Japanese Island Arcs and stage division. Straight lines represent cumulative convergent area by the relative Plate motion along the Plate boundaries, normalized by the cumulative dislocated area for earthquakes along Kuril Northeast Japan Arc from January 1997 to January 2005. Stage division is based on the behavior of occurrence of earthquakes along the plate boundaries around Japanese Island arcs. Division on the horizontal axis is beginning of year. Remarkable earthquakes are presented with Manitude, place and month / day.

るのは千島東北弧であり、2003年9月26日十勝沖地震M8.0によって交差したが、それ以前の地震発生は極めて少ない。1997年12月5日カムチャツカ東部沿岸M7.6以後2001年までの地震による変位面積解放率は一樣累積面積増加率の3分の1以下であり、2002年から2003年に等しくなり活動期に入り、2003年9月26日十勝沖地震M8.0が発生して、累積変位面積が一樣累積面積と一致した。

伊豆弧では、2000年から2001年に累積変位面積解放曲線は一樣累積直線と一致するが、1997年から1999年までは、地震による変位面積解放率は一樣累積面積増加率の半分以下で、2002年以後は数分の1以下の静穏期になった。2002年の静穏期開始は千島東北弧における活動期開始と一致し、千島東北弧と伊豆弧の地震活動には相補性がある。伊豆弧における変位面積解放は、2000年3月28日父島近海M7.6を契機として始まり、2000年8月6日鳥島近海M7.3、2001年10月13日マリアナ諸島南方M7.3そして2002年4月27日マリアナ諸島M7.1まで続いたが、2002年6月29日ウラジオストック付近M7.2から千島東北弧にその活動を譲った。これらの転換時にはウラジオストックでM7以上の地震が起こっているが、伊豆弧活

発期にはウラジオストックでM6以下の地震も起こっていない。

琉球弧については、累積変位面積解放曲線が一樣累積直線を上回る期間が長く、地震による変位解放が先行している。プレート運動に基づく琉球弧の一樣累積直線は伊豆弧と同程度の勾配を持つが、地震による累積変位面積解放曲線は常に上回っており、解放経過も先行し、琉球弧の地震発生に触発されるように伊豆弧の地震が発生している。伊豆弧の累積変位面積解放曲線が一樣累積直線に到達した2000年3月28日の父島近海M7.6は1999年9月21日台湾の集集地震M7.7と対応し、1998年8月20日の鳥島近海M7.1は1998年5月4日の石垣島南方沖M7.6に対応する。

西南日本弧については、琉球弧で1998年5月4日石垣島南方沖M7.6、1999年9月21日台湾付近M7.7と解放されたのに対し、M6以上の地震は1999年1月24日種子島近海M6.2、2001年3月24日芸予地震M6.4のみであり、琉球弧でその後2001年12月18日与那国島近海M7.3・2002年3月31日台湾付近M7.2・2002年5月15日台湾付近M6.8と解放されて以後沈静化していたところで2004

年9月5日紀伊半島沖 M7.1・東海道沖 M7.4 によって一様累積直線の半分以上に当たる収束面積が解放された。

太平洋プレート沈み込みによる地震活動は前半には伊豆弧で活発であったが、後半には千島東北弧で活発になり、千島東北弧における累計解放変位面積は、伊豆弧を大きく上回り、西南日本弧における2004年9月5日の紀伊半島沖 M7.1・東海道沖 M7.4 の後に中越地震が発生した。

この累積変位解放様式の変化に基づき、2000年3月、2002年6月、2003年9月を境界に、琉球弧先行期 [1]、伊豆弧東進期 [2]、千島東北弧始動期 [3]、伊豆弧西進期 [4] の4つの期間に区分する (図4)。

### フィリピン海プレートの駆動

日本列島のテクトニクスにとって房総沖の三重会合点が重要な役割を果たしているが、700万年前に西南日本弧・琉球弧に沿って沈み込み、伊豆弧に沿って太平洋プレートに沈み込まれるフィリピン海プレートが形成されたために三重会合点の活動が開始された (Niitsuma, 1988)。

フィリピン海プレートと太平洋プレートの相対運動オイラー極はマリアナ海溝南方に位置する (図1)。オイラー極では両プレートの相対運動が0となることから、フィリピン海プレートはマリアナ海溝南方のオイラー極において太平洋プレートに固定されているように運動するのでこの位置を「要 (Pivot)」と呼ぶことにする。フィリピン海プレートの運動は、太平洋プレート運動する要の回りの時計回り回転によって表わすことができる。このような運動の実現には、要の載っている太平洋プレート沈み込みが保証されなければならない。太平洋プレートの自由な運動は、最も効率の良い沈み込みである鞍馬状スラブ沈み込みがモルッカ海 (図1) で起こっているからである (Candwell et al., 1980)。要の回りの回転運動は台湾における衝突と琉球海溝における沈み込みによって駆動されている。台湾における衝突は地震による変位によってのみ消化されるが、琉球海溝では地震変位によるスラブ沈み込みによって駆動力を得ることができ、定常的な沈み込みが実現されている。琉球弧の地震による要の回りの回転がなければ、伊豆弧における太平洋プレートに乗り上げも起こらないので、琉球弧の地震が伊豆弧の地震に先行する。したがって、1999年9月21日のM7.7の台湾集集地震はフィリピン海プレート運動に大きな影響を与える出来事になる。

西南日本弧に対するフィリピン海プレート沈み込みは北西方向であるが、西南日本弧では東西圧縮による構造運動があり、「太平洋の力」による運動と呼ばれていた (Huzita, 1980)。西南日本弧の東西圧縮は長期的には、フィリピン海プレートの北西進によって伊豆弧が西進するため、東北日本弧が弧状屈曲して西南日本弧を東西圧縮する (Niitsuma, 1996)。短期的には、地震による累積変位面積の解放が伊豆弧と琉球弧において行われないう場合、西南日本弧・フィリピン海プレート・太平洋プレートが全て固着状態となるため、東西方向の太平洋プレート運動による変位が西南日本弧にも蓄積する。琉球弧と伊豆弧におい

て地震が起こり、フィリピン海プレートが太平洋プレート上の要の回りを回転すれば、西南日本は北西—南東方向の圧縮応力場になることから、西南日本弧の応力場は数年単位で東西方向と北東—南西方向の応力場が繰り返すことになる。

### 地震活動と日本列島の歪状態

日本列島の中央部は伊豆弧が衝突付加しているので、伊豆弧の変動は日本列島の歪状態に大きな影響を与える。琉球弧先行期 [1] には千島東北弧と伊豆弧の地震が少なく、千島東北弧は太平洋プレートに固着して太平洋プレート運動を歪として蓄積し、伊豆弧と千島東北弧との間に差別的な動きは起こらない。

伊豆弧東進期 [2] には伊豆弧に沿ってのみ地震変位面積の解放が進行し、千島東北弧は太平洋プレート運動による歪の蓄積を継続するため、伊豆弧は東進して西南日本弧の歪を解消し、伊豆弧と東北日本弧の接合部に歪解放と歪蓄積の境界域が形成される。

千島東北弧始動期 [3] には、伊豆弧の地震活動が停止して千島東北弧の地震活動が開始し、歪を解放していた伊豆弧が歪蓄積域となり、千島東北弧は歪解放域になる。

伊豆弧西進期 [4] には、千島東北弧で蓄積した歪が一気に解放されるが、伊豆弧は太平洋プレートに固着した状態で歪を蓄積するため、伊豆弧が東北日本弧に対して西進し、東北日本弧の弧状屈曲を強化するとともに中部日本の帯状構造の屈曲も進行させる。新潟県中越地震の発生は日本列島のテクトニクスを進行させる過程中的の出来事といえる。

フィリピン海プレート運動が日本列島に影響を与えるのは、西南日本弧に沿う南海トラフへの沈み込みである。南海トラフで地震発生がなければ日本列島はフィリピン海プレートに固着して変位面積を蓄積する。1997年以後、西南日本弧では2001年3月24日芸予地震 M6.4 が最大であるが、フィリピン海プレート運動に対応する変位面積解放には程遠い状態であった。伊豆弧東進期 [2] には北西方向の変位面積が累積し、千島東北弧始動期 [3] の2002年以降は、琉球弧・伊豆弧で地震活動が低下して歪は解放されず、太平洋プレート運動の変位面積を蓄積し、伊豆弧西進期 [4] の2004年9月5日に紀伊半島沖・東海道沖の地震を起こし累積変位面積を解放した。これらの地震は西南日本弧と東北日本弧の接合部の応力状態に大きな影響を与え、2004年10月23日に中越地震を起すことになった。

### 日本列島の歪状態と光波測距による光路変動記録

静岡大学地殻活動観測所では1996年に連続光波測距が開始され (新妻, 1997)、2000年からは4光路について連続測距されたが、相次ぐ光波測距儀の故障により、2004年7月からは静岡大学—谷津山間の光路についてのみ連続観測を行っている。谷津山は、糸魚川—静岡構造線に沿って形成された麻機断層と草薙断層に挟まれた楔状の地質体である。これらの断層は、海側が上昇し陸側が沈

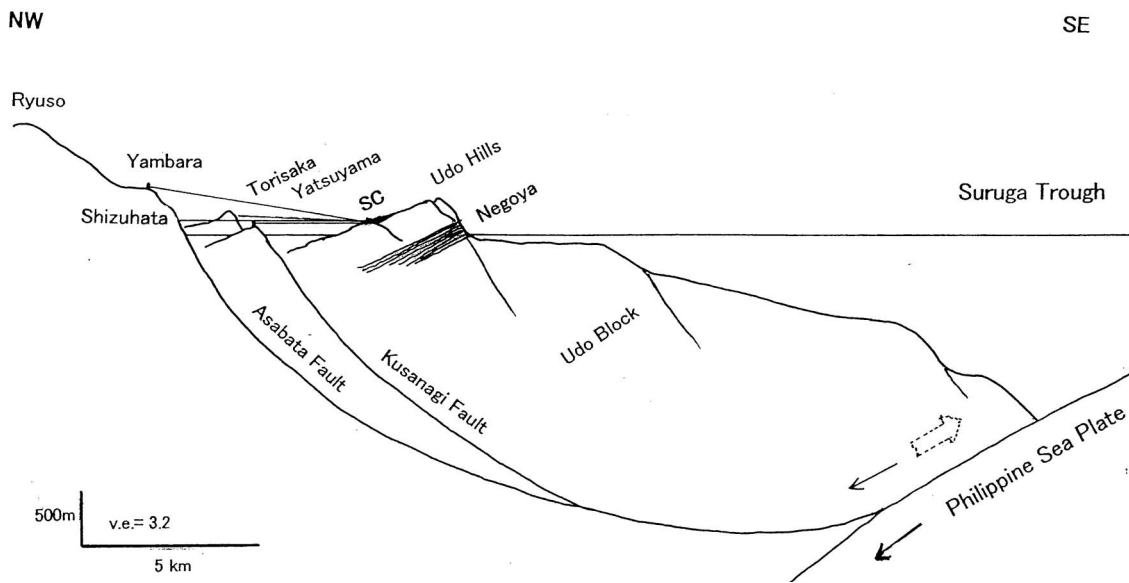


図5 駿河トラフにおけるフィリピン海プレートと草薙断層・麻機断層による円弧すべりと光波測距光路 (新妻, 2000). SC: 静岡大学地殻活動観測所.

Fig. 5 Cross-section for tectonic setting of tilting Udo Block showing a collapse along Kusanagi and Asabata faults, and subduction of the Philippine Sea Plate (Niitsuma, 2000). SC: Crustal Activity Observatory of Shizuoka University.

降する有度丘陵地塊と糸魚川-静岡構造線側との境界部にあり、断層面は円弧型でその底面は有度地塊の下を通り、駿河トラフから沈み込むフィリピン海プレートに載り上げている。有度地塊上の静岡大学地殻活動観測所と谷津山を結ぶ光路は、東西圧縮による中部日本の上昇やフィリピン海プレート運動に対し鋭敏に反応する (図5)。

光波測距は測距儀と反射プリズム間のレーザー光往復時間を測定するものであるが、光路の屈折による往復光のずれを自動追尾し、最大受光量の位置に測距儀を固定し、10回の連続測定を1観測として平均距離と標準誤差を算出している (新妻, 1998)。1観測には数分を要する。谷津山光路は3708.568 mであり、光路の光速が気象条件によって変化するために適切な補正が必要である (新妻, 1998, 1999, 2000)。気象の影響を除くために大気安定する午前0時から4時までの夜間4時間に行われた観測の中で標準誤差が0.6 mm以下の観測値を解析に用いた。気象条件は、光路下にある静岡地方気象台による1時間毎の気温・気圧・水蒸気圧を内挿して補正に用いた。

光路長変動と地震活動には密接な関係があることが報告されており、光路はフィリピン海プレートの西縁が沈み込む琉球弧の地震によって短縮し、フィリピン海プレートの東縁が沈み込む伊豆弧の地震によって伸張する。光路伸張が起こるとマグマ貫入による伊豆半島東方沖群発地震が起こることも指摘されている (新妻, 1999, 2000, 2001, 2002)。

光路長は日本列島の歪累積と解放に対応する変動を繰り返しており、光路長変動から歪状態を判定できれば、プレート運動と地震による日本列島の歪累積と解放状態を監視できる。固着・解放機構では歪は定常的に累積し、地震によって解放されることから、光路長が伸張や短縮に

転じることは、歪の解放が行われたことを示す。累積された歪が地震によって解放されても光路周辺の歪状態に影響を与えるまでに時間を要することから、光路長の変化は地震発生以後になる。光路長の変化にはプレート境界における一様累積変位に対応する定常的な短縮や伸張が進行し、この定常的な変動は地震が発生すると変化する。

連続観測が開始された1996年以降の光路長は数cmの範囲で変動しており、全体的には短縮傾向にあるが、2000年に短縮し、2002年までの11ヶ月周期の伸張・短縮の変動を繰り返した後、短縮状態を保ち、2004年から伸張に転じている (図6)。この光路長変動は、日本周辺の地震から求められたプレート運動による変位面積の累積・解放に基づく4つの期間区分に対応している。

琉球弧先行期 [1] には光路長は伸張・短縮を繰り返しながらも大局的に短縮し、伊豆弧東進期 [2] には振幅数cmの鋸歯状に周期変動を繰り返したが、千島東北弧始動期 [3] には光路が短縮したまま変動が少なく、伊豆弧西進期 [4] でも年周変化は少ないが十勝沖地震の後に光路長が伸張し、2004年9月5日の紀伊半島沖・東海道沖地震の後に光路長が突然短縮した後に中越地震が起こっている。

光路長変動が最も顕著に現れたのは、琉球弧先行期 [1] 後期の1999年9月台湾の集集地震後の短縮である。1997年8月13日宮古島近海 M6.1 で光路は短縮、9月30日鳥島東方沖 M6.2・1998年1月1日父島近海・2月7日父島近海 M6.6 と伸張を続け、1998年5月4日石垣島南方沖 M7.6 で短縮し、1998年8月20日鳥島近海 M7.1 で伸張した後、琉球弧・伊豆弧ともに地震がなく、光路長が安定したところで1999年9月集集地震 M7.7 によって著し

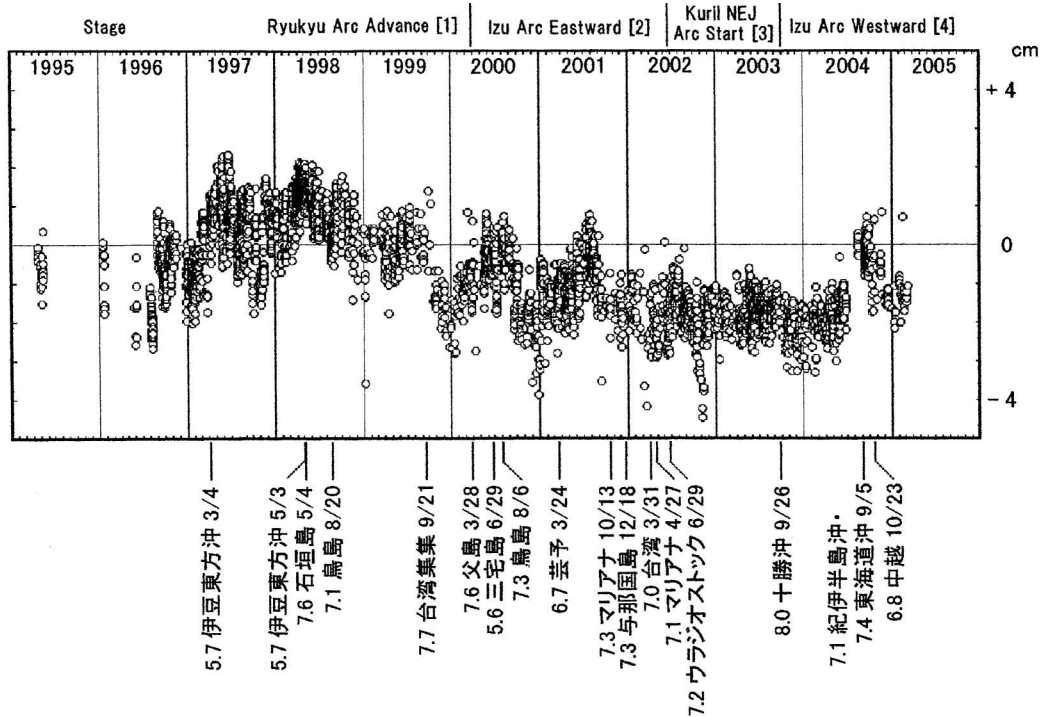


図6 谷津山測線の光路長変動。谷津山測線長は3,708.568 mであり、光路状態が安定する夜間の午前0時から4時までの4時間の観測において10回の繰り返し測定によって標準誤差が0.6 mm以内の平均値を表示してある。気象補正には光路下にある静岡地方気象台の1時間毎の気温・気圧・蒸気圧の値を内挿して用いた。横軸の目盛りは年初・月初。Stageは日本列島のプレート境界における地震発生様相に基づいた期間区分(図4)。主な地震についてはマグニチュード・震源・月/日を示した。

Fig. 6 Monitoring on the distance of Yatsuyama laser path with 3,708.568m. Upper direction for extension, lower direction for shortening, and the interval of divisions corresponds to 1 cm. The plotted distance is average of 10 measurements with less than 0.6 mm of standard error from 0:00 to 4:00.am. Meteorologic correction has been made on the calculation for the laser path distance, using interpolation of one hour data on air temperature, air pressure and vapor pressure at Shizuoka Station of Japan Meteoric Agency situated along the laser path. Divisions on the horizontal axis are beginning of year and month. Stage division is based on the behavior of occurrence of earthquakes along the plate boundaries around Japanese Island arcs (Fig. 4). Remarkable earthquakes are presented with manitude, place and month / day.

く短縮した。この期間にはフィリピン海プレート東西縁である伊豆弧と琉球弧における地震発生と対応して光路長が変動している(新妻, 2000)。

#### 伊豆弧東進期の光路長の周期的変動から伊豆弧西進期中越地震へ

伊豆弧東進期 [2] における周期的変動は、光路長変動と日本列島の歪との関係を明らかにするための鍵を握っている。光路の伸張は伊豆弧の地震による変位面積の開放に対応しているが、急激な短縮の要因が検討の対象となる。2000年9月の短縮が1999年9月の集集地震後の短縮に匹敵する量であるが、2000年には日本列島全域で多くの地震が起こり、歪の開放が行われたことから光路長短縮の要因となる候補は豊富にある(図7)。

これらの中で新島神津島近海の地震は、光路に最も近く、フィリピン海プレートが西南日本弧に沿って沈み込むテクトニクス過程で重要な役割を果たしている。フィリピン海プレートが沈み込むN10E方向の駿河トラフとN55E方向の南海トラフは215°の角度で交差している(図2)、沈み込み境界の交差角が180°以上の場合には沈み込んだスラブが地下で不足するため、トラフ交差点に

向かって裂ける離別切断(図8b)と外縁隆起帯の背面が裂ける背面亀裂(図8c)が起こらなければ沈み込みは進行しない(新妻ほか, 1992)。新島神津島近海地震は背面亀裂である銭州海嶺に沿って起こっており、背面亀裂の進行に対応している。

1999年3月14日M3.8とM4.7以後一年以上の静穏を保ってきた新島神津島近海に2000年4月14日M3.5が起こり、外縁隆起帯背面亀裂の進行が開始された。三宅島噴火とともに新島神津島近海の地震は7月1日のM6.9を最大に9月11日M5.3まで続いた。

背面亀裂は、スラブ沈み込み角を大きくし、駿河トラフと南海トラフの交差角を減少させる。逆に、離別切断は、背面亀裂によって高角に沈み込みこんでいたスラブ角を低下させ、交差角を大きくする。交差角の増大は中部日本帯状構造の屈曲を促進し、伊豆の衝突を進行させる。背面亀裂によるスラブ角の増加は草薙断層や麻機断層の円弧すべりを阻止して光路を短縮し、離別切断によるスラブ角の減少は円弧すべりを促進して光路を伸張させる。

伊豆弧東進期開始を告げる2000年3月28日父島近海M7.6によって背面亀裂は進行して2000年4月14日新島神津島近海M3.5を起こし、三宅島噴火と関係する2000



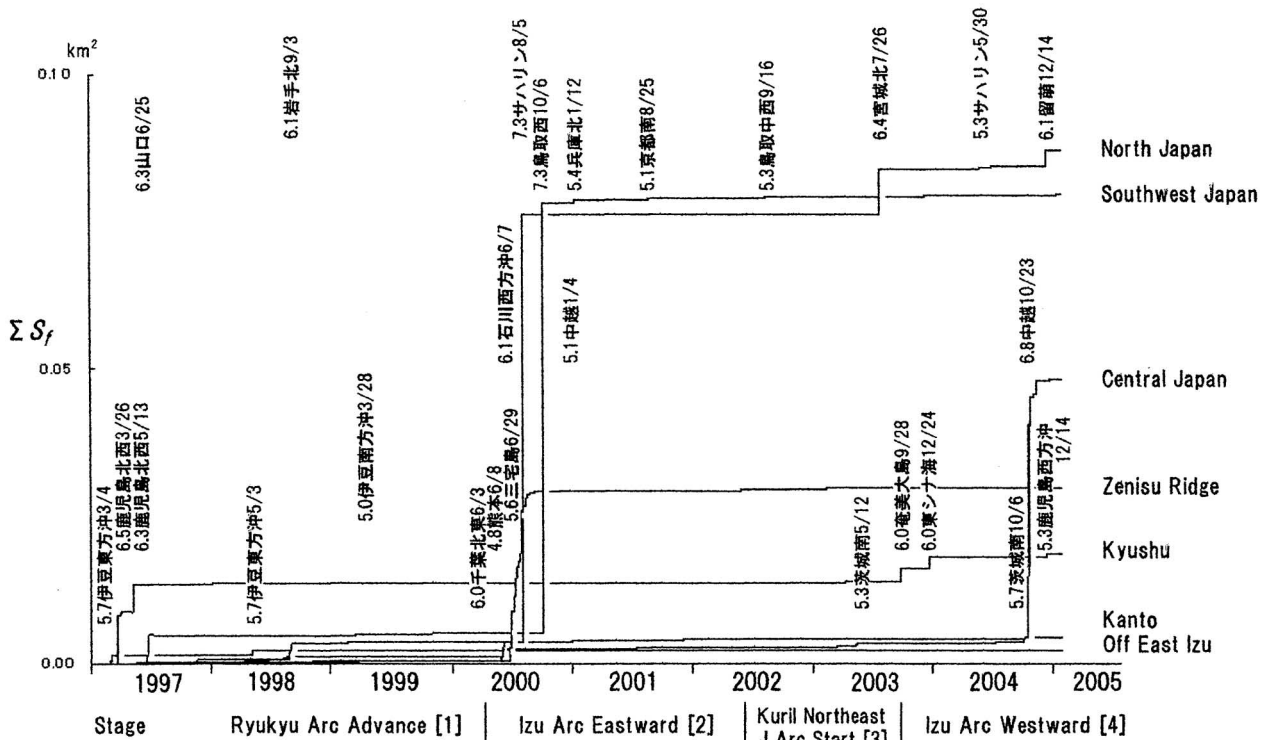


図7 日本列島における地震によって解放された変位面積累積曲線  $\Sigma S_f$ . Stage は日本列島のプレート境界における地震発生様相に基づいた期間区分 (図4). 主な地震についてはマグニチュード・震源・月/日を示した. 横軸の目盛は年初.

Fig. 7 Cumulative curves of dislocated area  $\Sigma S_f$  for earthquakes in the Japanese Island Arcs. Division on the horizontal axis is beginning of year. Stage division is based on the behavior of occurrence of earthquakes along the plate boundaries around Japanese Island arcs (Fig. 4). Remarkable earthquakes are presented with magnitude, place and month / day.

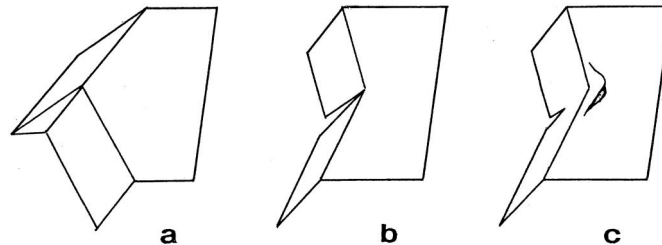


図8 交差するプレート境界に沿って沈み込むプレート (新妻ほか, 1992). a, 交差角が  $180^\circ$  以下の場合には沈み込みスラブは地下で余分になり折れ曲がる. b,  $180^\circ$  以上の場合にはスラブが地下で不足し, 交差点に向かって裂ける離別切断が起こらなければ沈み込めない. c, 離別切断が交差点まで達しない場合にはプレート沈み込み外縁隆起帯が破断する外縁隆起帯背面亀裂が生じる. 駿河トラフと南海トラフの交差域の銭州海嶺はこの亀裂に対応している.

Fig. 8 Plate subduction along an intersecting boundary (Niitsuma et al., 1992). (a). Excess of the subducting slab along the boundary with angle less than  $180^\circ$  folds. (b). Plate cannot subduct along the boundary with angle more than  $180^\circ$  without separate slit toward cross point on the slab. (c). Plate subduction induces breakage along back crest of outer swell with incomplete separate slit of the slab. The breakage is corresponds to Zenisu Ridge along the crossing Plate margin of Suruga and Nankai troughs.

年6月27日から6月29日までの三宅島近海 M5.6 に続く新島神津島近海 2000年7月1日 M6.9・7月15日 M6.3 を起こした. 北米・アムールプレート境界の収束である 2000年8月5日サハリン地震 M7.3 の後も新島神津島近海 2000年8月18日 M6.0・9月11日 M5.3 を起こし, 背面亀裂は進行し, 光路長の急激な短縮が起こっている. この間, 伊豆弧における 2000年6月10日東海道沖 M6.5, 8月6日鳥島近海 M7.3 による光路長の伸張が, 背面亀裂による短縮を上回り, 光路長は伸張していたが, 伊豆弧の地震が静穏化すると急激に短縮した後, 短縮したまま停止し, 鋸波状の変動となった.

鋸歯状変動は 2001 年にも起こっており, 2000 年に短縮

した光路長は 2001 年に入り伸張に転じ, 2001 年 8 月に急激に短縮している. 光路長の伸張が伊豆弧や背面亀裂の地震と関係なく, 1 月から開始していることから, 2000 年の伊豆弧の地震による伸張が背弧亀裂による光路長の短縮を上回り, 2001 年の伸張を支えたと考えられる. 2001 年 8 月の急激な短縮と関係するのは, 西南日本弧で 1997 年 1 月以後最大の 2001 年 3 月 24 日芸予地震 M6.4 および背面亀裂の 2001 年 6 月 3 日新島神津島近海 M4.6 が起こっている. しかし, 伊豆弧の 2001 年 4 月 15 日鳥島東方沖 M6.4, 7 月 3 日マリアナ諸島 M6.7 による光路長伸張が上回り, 8 月になって急激な短縮に転じた. この短縮は, 2001 年 10 月 13 日マリアナ諸島南方 M7.3 によって一時的に伸

張するが、2002年2月からは短縮し、2002年4月27日 M7.1 によって再び伸張した状態で千島東北弧始動期 [3] に入る。

千島東北弧始動期 [3] には、西南日本弧の2002年11月4日日向灘 M5.7 に対応して短縮するが、2002年11月17日オホーツク海 M7.0 によってただちに伸張した状態で停止していたが、2003年9月26日十勝沖 M8.0 以後伸張を開始し、伊豆弧西進期 [4] に入った。伊豆弧西進期 [4] に入り、光路長が伸張したところで西南日本弧の2004年9月5日紀伊半島沖 M7.1・東海道沖 M7.4 によって短縮した後に、中越地震が起こった。

### 新潟県中越地震の地震計と傾斜計による観測結果

2004年10月23日夕刻から起こった新潟県中越地方の地震活動は、静岡大学地殻活動観測所においても観測されている。地震計は明石製作所製の速度振幅型3成分微小地震計 ABS-3B 型で (檀原, 1981), 地震記録はペン書きオシロ記録 (新妻, 1995) から2004年8月に2台のアドバンテスト社製数値電圧計 R6452E と RATOC 社製 USB-GPIB 変換器 REX-USB220 を用い、Windows XP 制御により毎秒20回のデジタル記録を行い、半月分毎に CD 保存している。

中越地方までの距離は約250 km あり、マグニチュード4以上の地震記録が得られている (図9)。ただし、マグニチュード6以上の地震については記録範囲を越えて完全記録は得られていない (表2)。

静岡大学地殻活動観測所で観測された上下成分の最大振幅から算出されたマグニチュード (新妻・中野, 1991) と気象庁の地震・火山月報 (防災編) に掲載されている地震のマグニチュードを比較すると良く対応している (図10)。静岡大学マグニチュードを算出する式は、

$$M_{su} = \log Z_{max} + 1.85 \log r + 0.12$$

であり、 $Z_{max}$  が上下成分の最大振幅 (単位 =  $\text{mkine} = 10^{-3}\text{cm/s}$ )、 $r$  が震源距離 (km) である。1.85 は地震波の伝搬にともなう振幅の減衰を表す係数であり、0.12 は地震計の型に固有な値の係数である。また、地震計の感度は  $280\text{V/kine}$  である。

傾斜計は Applied Geomechanics 社製の水泡式傾斜計 701-2 型でアドバンテスト社製数値電圧計 R6452E とオムロン社製光 GP-IB リンク Z3GA を用い、2000年から東西および南北成分を1秒毎に MS-DOS 計算機制御し、測定結果を24時間のグラフとして印刷器出力していたが (新妻, 2000), 2004年11月から Windows 95 を用いたデジタル記録方式に変更して連続観測を継続している。傾斜計の感度は  $0.0498 \mu\text{rad/mV}$  である。地震計記録および傾斜計記録の例として、中越地方で2004年11月15日に発生した M4.7 の地震について示す (図11)。

中越地域の地震は光路が短縮している時に発生し、伸張時に発生しない (図12)。光路長は2004年9月から10月初旬にかけて変動なく伸張状態を保っていたが、10月15日に短縮し、10月23日中越地震 M6.8 が起こっている。それ以後は、光路長は短縮傾向となっているが、10月末に伸張し、11月初旬に再び短縮して11月8日 M5.9 が起

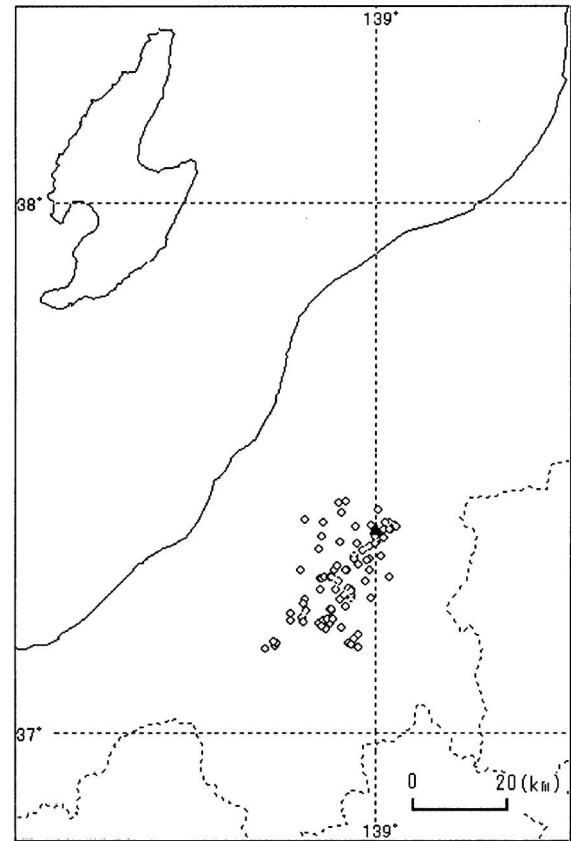


図9 静岡大学地殻活動観測所で観測された新潟県中越地震の気象庁による震央位置。▲: 図11に波形を示した2004年11月15日の震央。

Fig. 9 Japan Meteorological Agency Epicenters of earthquakes in Chuetsu district of Niigata Prefecture, observed at Crustal Activity Observatory. ▲: epicenter of earthquake of 15 November 2004, presented in Fig. 11.

こり、再び伸張して12月下旬に短縮したところで、12月23日 M4.4・12月28日 M5.0、2005年1月9日 M4.2・1月18日 M4.7 が起こり、年末前の状態に落ち着いている。

### 光路変動記録と伊豆半島東方沖群発地震・三宅島噴火・浜名湖域の東方移動

光波測距連続観測を開始した後に伊豆弧における火山活動があり、光路長変動との対応が検討されている。

伊豆半島東方沖では群発地震が1995年9月から始まり1997年には3月4日 M5.7・4月5日 M5.6・5月13日 M6.3、1998年には5月3日 M5.7 を起こしている (図7)。この時期の光路長は1997年3月と1998年4月に極大に達しており (図6)、光路の伸張と地震の発生が対応している。光路が短縮すると地震の発生も減少することから、群発地震は光路長変動の原因ではなく光路を伸張させる歪状態の結果である (新妻, 2000)。光路の伸張は伊豆弧の地震に対応していることから、伊豆弧の歪が地震によって解放されて引張応力状態に変化し、地下に存在するマグマが地表に貫入して群発地震を発生させ、1989年にはマグマが海底に達して手石海丘の噴火となった。

三宅島噴火は、駿河トラフと南海トラフが交差角  $180^\circ$



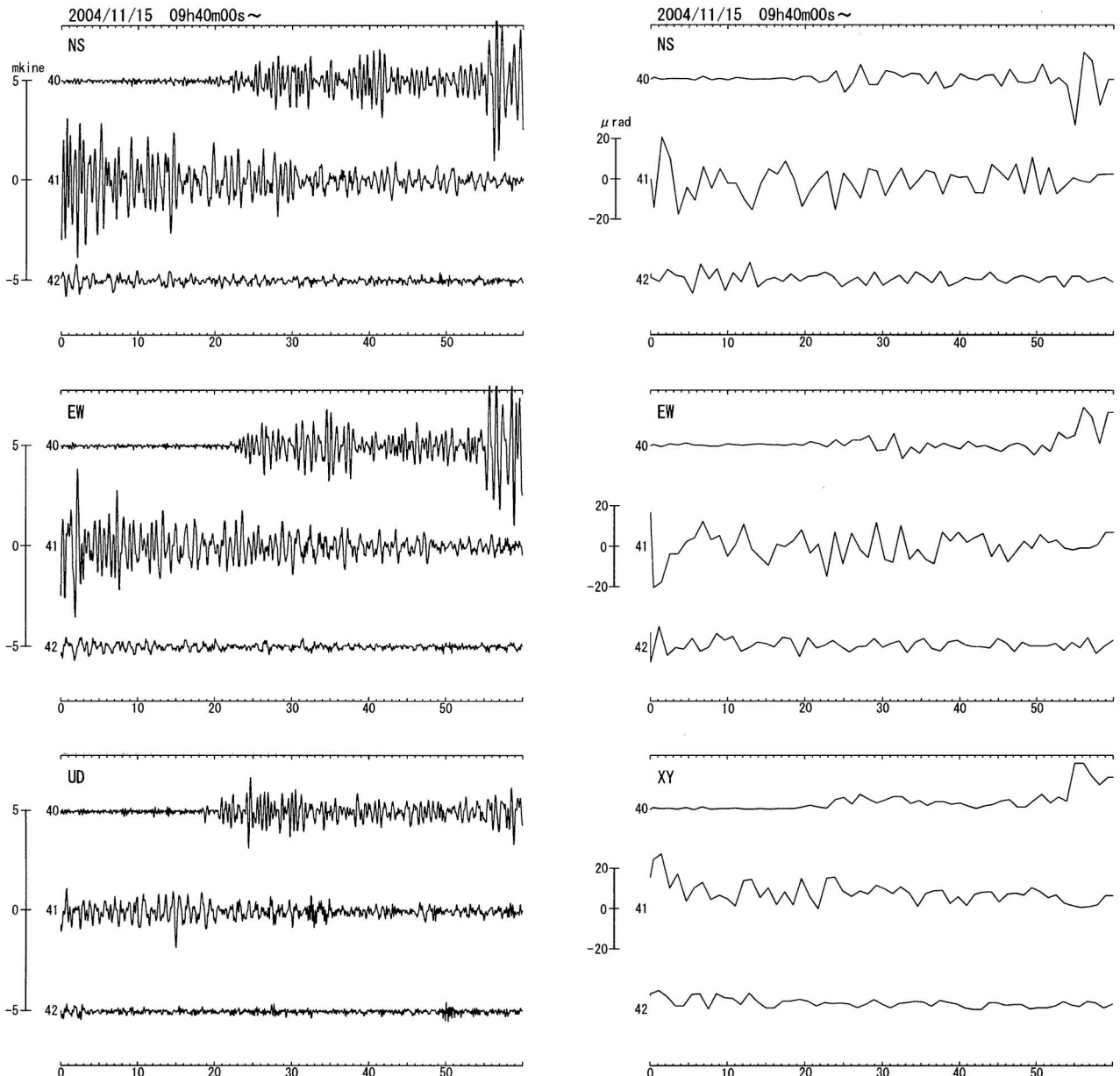


図 11 静岡大学地殻活動観測所で観測された 2004 年 11 月 15 日の新潟県中越地方の地震の地震波形と傾斜波形。震央位置は図 9 の△で示した。NS=北南成分, EW=東西成分, UD=上下成分, XY=水平成分の振幅。

Fig. 11 Example of observation on the earthquake in Chuetsu district of Niigata Prefecture with seismometer and tiltmeter in Crustal Activity Observatory of Shizuoka University, 15 November 2004. NS=north-south component, EW=east-west component, UD=up-down component, XY=amplitude of horizontal component.

ができれば地震予報の実現に近付くことができる。

プレート運動と地震による日本列島の歪累積状態が平衡状態ではなく、プレート境界域全体の固着・解放過程によって 2 年程度の期間毎に変遷していることが明らかになった。この変遷が規則的に一巡するのであれば、その周期は日本列島の歪状態変化の周期と関係するはずである。東海地震がこの周期のどの段階で発生するのか、東海地震のような大地震の前にプレート境界で起こる地震の周期が変化するのか、地震の周期と日本列島の歪の関係が変化するのか、などが分かれば、東海地震の予報は極めて現実的になる。

日本周辺で発生する地震は気象庁によって高精度で連

続的に観測されており、その結果も 1997 年 10 月から地震・火山月報 (防災編) として 1-2 ヶ月遅れで公表されている。この地震情報とプレート運動を比較することにより累積変位を定量的予測できることから、日本列島各地で実施されている歪状態の観測と対応させて解析を進めれば、これらの疑問に答えることができる。歪状態の的確な観測には、観測機器の設置が重要な鍵を握っており、設置位置を日本列島テクトニクスの上に位置付けることができれば、測定結果の解析も進展する。

8 年間の累積地震変位面積の算出は、経験式に基づいているにもかかわらず、プレート運動の 5.6 年分と一致することは驚異的である。しかし、地震から求められた累積

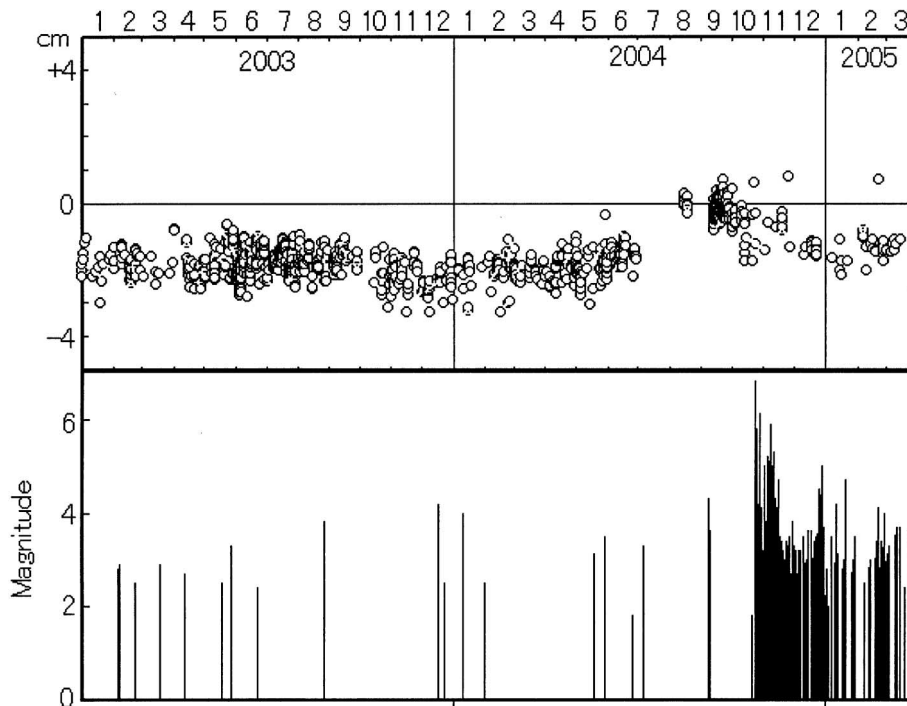


図 12 谷津山測線の光路長変動と新潟県中越地方の地震. 谷津山測線長は 3,708.683 m であり, 光路状態が安定する夜間の午前 0 時から 4 時までの 4 時間の観測において 10 回の繰り返し測定によって標準誤差が 0.6 mm 以内の平均値を表示してある. 気象補正には光路下にある静岡地方気象台の 1 時間毎の気温・気圧・蒸気圧の値を内挿して用いた. 新潟県中越地方の地震についてはマグニチュード・震源・月/日を示した. 横軸の目盛は年初および月初.

Fig. 12 Monitoring on the distance of Yatsuyama laser path with 3,708.568m and earthquakes in the Chuetsu district of Niigata Prefecture. Upper direction for extension, lower direction for shortening, and the interval of divisions corresponds to 1 cm. The plotted distance is average of 10 measurements with less than 0.6 mm of standard error from 0:00 to 4:00 am when the meteorological condition is stable for ranging. Meteorologic correction has been made on the calculation of the laser path distance, using interpolation of one hour data of air temperature, air pressure and vapor pressure at Shizuoka Station of Japan Meteoric Agency under the laser path. Divisions on the horizontal axis represent bigining of year and month. Earthquakes in the Chuetsu district of Niigata Prefecture are presented as lines with the length correlated with the manitude.

変位面積が少ないことは, 地震変位面積算出のための経験式の係数精度が不足している, 現在のプレート運動速度が算出に用いたプレート運動モデルと異なっている, プレート運動が地震を起こさない変位によっても消化されている, などの理由が考えられる. これらの理由はプレート運動の本質を知るための重要な要素であるので, 今後の検討が望まれる.

本稿執筆中に 2005 年 3 月 20 日 玄海灘 M7.0 が報じられた. 現在も琉球弧・伊豆弧における地震活動はなく, 伊豆弧西進期 [4] が続いており, 日本列島の島弧テクトニクスは進行中であるので, 中越地震を起こした東北日本弧の弧状屈曲と同様に西南日本の東西圧縮は進行している. 西南日本の東西圧縮強化は, 今回の玄界灘の地震を発生させる原動力になる.

## 謝 辞

静岡大学の里村幹夫博士・小山真人博士・Satish-Kumar 博士には内容を討論いただくとともに査読いただいた. 国立科学博物館の斎藤靖二博士, 地球深部探査センターの平朝彦博士, 神戸大学石橋克彦博士には討論いただいた.

本報告の静岡大学地殻活動観測所における光波測距観測および中越地震についての地震計および傾斜計観測結果の解析は, 静岡大学理学部生物地球環境科学科における地球物質科学実験 II において行われたものである.

## 引用文献

- Candwell R.K., Isacks B.L. & Karig D.E. (1980), The spatial distribution of earthquakes, focal mechanisms solutions, and subducted lithosphere in the Philiipine and northeastern Indonesian Islands. *Geophysical Monograph*, **23**, 1-35.
- 檀原 毅 (1981), 静岡大学地殻活動観測所の概要. 静岡大学地球科学研究報告, **6**, 25-34.
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D. & Stein S. (1990). Current plate motions. *Geophysical Journal of International*, **101**, 425-478.
- 日置幸介 (1997), プレーートの運動と変形の宇宙測地計測. 測地学会誌, **43**, 1-12.
- Heki K., Miyazaki S., Takahashi H., Kasahara M., Kimata F., Miura S., Vasilenko N.F., Iivashchenko A. & An K.-D. (1999), The Amurian Plate motion and current plate

- kinematics in eastern Asia. *Journal of Geophysical Research*, **104**, B12, 29147-29155.
- Huzita K. (1980), Role of the Median Tectonic Line in the Quaternary tectonics of the Japanese Islands. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **18**, 129-153.
- 国土地理院 (2005), 平均的な地殻変動からのずれ (最終解), 地震・火山月報 (防災編), 2004年12月, 27.
- 松田時彦 (1975), 活断層から発生する地震の規模と周期について. 地震第2輯, **28**, 269-283.
- 中田節也・長井雅史・安田 敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001), 三宅島2000年噴火の経緯—山頂陥没口と噴出物の特徴. 地学雑誌, **110**, 168-180.
- Niitsuma N. (1988), Neogene tectonic evolution of Southwest Japan. *Modern Geology*, **12**, 497-532.
- 新妻信明 (1995), 本州中部のテクトニクスと1993年の静岡の地震. 静岡大学地球科学研究報告, **22**, 11-22.
- Niitsuma N. (1996), The trench-trench-trench type triple junction and tectonic evolution of Japan. *Geoscience Reports of Shizuoka University*, **23**, 1-8.
- 新妻信明 (1998), 光波測距による大気境界層の気温連続測定と地殻変動. 静岡大学地球科学研究報告, **25**, 31-49.
- Niitsuma N. (1999), Rupture and delamination of island arc crust due to the arc-arc collision in the South Fossa Magna, central Japan. *The Island Arc*, **8**, 441-458.
- 新妻信明 (2000), 光波測距による大気境界層の日周・年周変動およびフィリピン海プレートによる有度地塊傾動機構の解明. 静岡大学地球科学研究報告, **27**, 17-35.
- 新妻信明 (2001), 光波測距による草薙断層と麻機断層の活動監視. 静岡大学地球科学研究報告, **28**, 45-55.
- 新妻信明 (2002), 光波測距による大気境界層変動と草薙断層・麻機断層の活動監視. 静岡大学地球科学研究報告, **29**, 77-93.
- Niitsuma N. (2004), Japan Trench and tectonics of the Japanese Island Arcs. *The Island Arc*, **13**, 306-317.
- 新妻信明 (2005), 2004年10月の新潟県中越地震と日本列島テクトニクス—三重離脱面の上に乗る中越地方—. 地質学会 News, **8**(1), 10-11.
- 新妻信明・中野 進 (1991), 有度丘陵における地震動振幅と地質構造. 静岡大学地球科学研究報告, **17**, 131-147.
- 新妻信明・徐 垣・Dresser D. (1992), 伊豆ゴージにおけるプレート境界の「しんかい6500」潜航調査. 海洋科学技術センター試験研究報告, 第8回「しんかい」研究シンポジウム報告書. 135-144.
- 新妻信明・西田光二・水藤 尚・武田 浩 (1996), レーザー測距儀による気温の測定. 静岡大学地球科学研究報告, **23**, 9-18.
- Sella G.F., Dixon T.H. & Mao A. (2002), REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy. *Journal of Geophysical Research*, **107**, B4, 10.1029/2000JB000033.