



# 琉球大学学術リポジトリ

University of the Ryukyus Repository

Title	GPSデータを用いた南西諸島の水平移動
Author(s)	中村, 衛; 川嶋, 綾佳
Citation	琉球大学理学部紀要 = Bulletin of the College of Science. University of the Ryukyus(70): 63-72
Issue Date	2000-09
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/15367">http://hdl.handle.net/20.500.12000/15367</a>
Rights	

## GPS データを用いた南西諸島の水平移動

中村 衛\*・川嶋 綾佳\*

琉球大学理学部

Mamoru NAKAMURA\* and Ayaka KAWASHIMA\* : Horizontal movement of Nansei islands inferred from GPS data

### Abstract

The Global Positioning System (GPS) observations defined the velocity of Nansei islands, southwest of Japan. The data showed southward motion of the Nansei islands at a rate of 1.5-2.0 cm/yr in the vicinity of Okinawa Island and 5.7 cm/yr in the Yonaguni Island. The rate is much larger in the southwestern part of the Nansei islands. The horizontal strain rate showing southwest motion was computed using the velocity of Nansei islands. Tensional strain is dominant and its axis is perpendicular to the trench axis in the south of Kyushu, vicinity of Okinawa Island, and vicinity of Ishigaki Island. However, the compressional strain is dominant and its maximum axis is oblique to the trench in the Amami-Oshima and Ishigaki-Yonaguni region.

### はじめに

GPS (Global Positioning System) 測用の実用化により、高精度かつ連続的に地殻変動を観測することが可能になった。南西諸島では、沖縄本島、南大東島、奄美大島における GPS 観測により、沖縄本島を基準として南大東島が北西方向に年間 7.4cm 移動していることが明らかになっている (京都大学防災研究所ら、1994)。また、南西諸島南西部における GPS 観測からは、南西諸島の島々が南南東方向に年間 2 ~ 4cm 移動しているのが明らかにされている (今西ら、1996)。

上の GPS 観測は数点の観測点による結果であったが、1993 年以降、国土地理院は日本全体に約 900 点の GPS 観測局を設置して、GPS の連続観測を行っている。この観測網によって、日本列島の変形の様子が次第に明らかにされつつある。

国土地理院の観測点は、九州南部・南西諸島地域にも 59ヶ所設置されている。この研究では、九州南部・南西諸島地域の GPS 観測点で得られたデータを用い、南西諸島の島弧における水平変動速度を探る。

また、地殻の水平変形を調べるため、GPS データを用いて南西諸島における水平地殻歪を求める。

### データ

今回の解析には、国土地理院の GPS 連続観測データを使用した。データは、東西・南北・上下方向の変位記録である。観測間隔は 1 日である。位置の基準は、つくば (36.1°N、140.1°E) である。本研究では、九州南部・沖縄に設置されている 59ヶ所から得られたデータ (1997年1月1日から1999年12月1日まで) を使用した (図 1)。

受理：2000年6月30日

\* Department of Physics and Earth Sciences, Faculty of Science, University of the Ryukyus, Nishihara Okinawa 903-0213, Japan

## 解析方法

### 1 水平速度

観測された変位記録は、時間依存しない成分・移動速度成分・年周変化成分の和で表せる(鷲谷、1999)。

$$U_i = A_i + B_i \left( \frac{x}{365.24} \right) + C_i \sin \left( \frac{x}{365.24} \right) + D_i \cos \left( \frac{x}{365.24} \right) \quad (1)$$

ここで、 $x$ は基準日からの日数、 $U_i$ は $i$ 成分の変位量、 $A_i$ は時間に依存しない成分(一定値)、 $B_i$ は移動速度、 $C_i$ と $D_i$ は年周変化成分である。GPS観測における変位の年周変化は、気温・水蒸気量の変動によって生じる(土屋・辻、1998)。年周変化成分を除去するため、各観測点の水平2成分について、最小自乗法を用いて式(1)の各成分の大きさをそれぞれ計算し、水平移動速度を計算した。

次に、GPS基準点の移動をおこなう。今回使用したデータは、つくばを固定点(つくばでの水平・上下変化を0mm/年とする)としている。沖縄トラフをはさんでユーラシアプレートと南西諸島との間の変動を見るため、ユーラシアプレート内でなるべく沖縄トラフに近い点(上海)を固定点とすることにした(図1)。上海に対するつくば観測点の相対速度は、西向きに3.01cm/年、北向きに0.82cm/年である(小竹ら、1998)。この値を各観測点での速度に加えて、上海(ユーラシアプレート)に対する南西諸島の相対運動を算出した(表1、図2)。

### 2 水平歪速度

ある領域内で微小量の変形を仮定する。このとき、領域内における任意の地点(基準点からの距離が $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ )の移動速度( $V_x$ 、 $V_y$ )は、平行移動速度成分( $U_x$ 、 $U_y$ )、変形速度成分( $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yy}$ )、角速度成分( $\omega$ )の3成分の線形和で近似できる(鷲谷、1999)。

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta X & \Delta Y & 0 & \Delta Y \\ 0 & 1 & 0 & \Delta X & \Delta Y & -\Delta X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $V_x$ 、 $V_y$ はGPS観測点で観測された1年あたりの水平速度成分(東西・南北成分)、 $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ は基準点からの距離、 $U_x$ 、 $U_y$ はそれぞれ東西方向、南北方向への平行移動の大きさ、 $\tau_{xx}$ は $X$ 軸上での $X$ 方向の歪速度(伸びを正とする)、 $\tau_{xy}$ は $X$ 軸上での $Y$ 方向の歪速度(せん断歪)、 $\tau_{yy}$ は $Y$ 軸上での $Y$ 方向の歪速度、 $\omega$ は角速度を表している。この計算では、 $X$ 方向・ $Y$ 方向をそれぞれ東西・南北に選んでいる。基準点には、解析に用いた複数観測点座標の重心を使っている。

この研究では、九州南部地域で26ヶ所、奄美地域で6ヶ所、沖縄本島地域で14ヶ所、宮古-石垣地域で5ヶ所、石垣-与那国地域で5ヶ所のGPS観測点データを選び、それぞれの地域で歪速度の計算を行った(図3)。

最後に、歪速度成分( $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yy}$ )を用いて、各地域における水平歪主軸の方向と大きさを計算する(表2)。

## 結果と議論

### 1 水平速度

図2は、GPS観測データから求めた1年間あたりの南西諸島の水平ベクトルを示している。

全体的に、南西諸島は南東向き～南向きのベクトルが卓越しており、南西諸島の南西の島々では、その値がさらに大きくなる。九州南部地域、沖縄本島地域、南西諸島南西地域での移動速度はそれぞれ 0.5～1cm/年、1.5～2cm/年、3～5cm/年である。与那国島では移動速度が 6.6cm/年であり、南西諸島で最も大きな値を示す。

日本列島の海溝付近では、陸側プレートと海洋プレートとのカップリングによって、陸側プレートが内陸側へ押されているため、陸側プレート側では内陸側へ向かうベクトルが卓越している(鷺谷, 1999)。もし南西諸島でも陸側プレートと海洋プレートとがカップリングしているならば、南西諸島の陸域のベクトルは、フィリピン海プレートの北西方向への沈み込みの影響を受け、北西方向を向くはずである。しかし反対に、南西諸島では海溝側へ向かうベクトルが卓越している。また、南西諸島では海溝側のプレート境界型大地震が少ない(宇津, 1999)。このことは、南西諸島の海溝付近では、陸側プレートと海洋プレートとのカップリングがきわめて小さいことを意味している。

このように、南西諸島では海洋プレートとのカップリングが無視できるくらい小さい。つまり、南西諸島のベクトルは、ユーラシアプレートと南西諸島との間の相対運動を表していることになる。ユーラシアプレート側の東シナ海の陸棚域で変形がほとんど起こっていないとすると、南西諸島の移動速度は、東シナ海と南西諸島の間、つまり沖縄トラフで生じていることになる。言い換えると、南西諸島の移動速度は沖縄トラフの拡大速度を表している。つまり、沖縄トラフは現在でも年間 1～5cm ずつ南向きに拡大していることを意味する。これは、南西諸島付近の海底活断層データから推定されている値(年間約 3～5cm)とも一致する(Sibuet et al., 1998)。また解析結果は、南西諸島の南西の島々ほど移動速度が大きいことを示している。これは、沖縄トラフの南西部では、より拡大速度が大きいことを意味している。

北大東島と南大東島は、フィリピン海プレート上にある島である。そのため、2つの島のベクトルは、フィリピン海プレートの運動を示している。北大東島と南大東島は、上海に対し西北西方向に 7.4cm/年の速度で移動している。沖縄本島との相対ベクトルは、西北西方向に 9.0cm/年の速度になる。これは、沖縄本島～南大東島間での GPS 観測結果で得られた移動速度(北西方向に 7.4cm/年)(京都大学防災研究所ら, 1994)よりも大きい。また、これまでの研究では、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの相対速度は 6.1cm/年であると推定されていた(Seno et al., 1993)。これは、今回の結果より明らかに小さい。つまり、フィリピン海プレートの移動速度は、これまで予想されていた値よりも大きいことを示している。

## 2 歪速度

歪速度から見ると、南西諸島地域は大きく 2つに分けることができる(図 4)。

### 2-1 拡張成分が卓越する地域

ひとつは、拡張成分が卓越する地域である。九州南部地域、沖縄本島地域、そして宮古～石垣地域がこれに相当する。拡張成分の方向は、北西～南東方向であり、フィリピン海プレートの沈み込み方向と平行または海溝軸に直交する。これらの地域では、拡張成分の歪速度は 0.05～0.3ppm/年である。拡張方向の歪速度は宮古～石垣地域で最も大きく(0.3ppm/年)、九州南部地域、沖縄本島地域はほぼ同じ大きさである(0.05～0.06ppm/年)。

沖縄トラフ軸は海溝軸と平行であることから、これら 3 地域では、トラフ軸と海溝軸に直交する方向に拡張する応力場が形成されている。これらの島弧部分に働く応力には(1) マントル内上昇流による応力、(2) プレート沈み込みによる応力、の 2 種類がある(瀬野, 1999)。しかし、マントル内上昇流による力(1)が働くならば、島弧部分は圧縮場になる(瀬野, 1999)。しかし、実際の結果は拡張場を示すので、(1)のマントル内上昇流による応力は無視できる。いっぽう、数値計算結果からは、プレートの沈み込み角が急傾斜な場合には、海溝軸が海側に移動し、島弧部分が拡張場になる(Whittaker, 1992)。九州・南西諸島のプレート沈

み込み角は急傾斜であることが、地震分布の解析から報告されている (Shiono et al., 1980; 清水ら, 1995)。このように、数値計算と南西諸島のプレート沈み込み角から判断すると、(2)のプレート沈み込みによる拡張応力が、南西諸島の島弧部分で顕著に現れている可能性がある。

### 2-2 圧縮成分が卓越する地域

もう一つは、圧縮成分が卓越する地域である。奄美大島地域と石垣-与那国地域がこれに相当する。圧縮成分の方向は、海溝軸に斜行する。圧縮成分の値は、0.1ppm/年である。これら2つの地域では、奄美大島付近では奄美海台が、石垣-与那国地域では Gagua ridge がそれぞれ沈み込んでいる。海台が沈み込み、衝突域が生じると、島弧側に強い圧縮場が発生する (佐藤・松浦, 1998)。つまり、2カ所の応力場が他の南西諸島地域と異なっているのは、海台・海嶺の沈み込みによって、島弧側の応力場が局所的に乱されているためであると考えられる。

### 3. 歪速度の大きさ

南西諸島における歪速度は、九州南部で 0.06ppm/年、奄美大島地域で 0.13ppm/年、沖縄本島地域で 0.05ppm、宮古-石垣地域で 0.3ppm/年、石垣-与那国地域で 0.11ppm/年である。日本の他の地域における歪速度は平均 0.2ppm/年、最大 1.6ppm/年である (鷺谷, 1999)。それと比較すると、宮古-石垣地域を除いて、南西諸島の島弧部分における歪の大きさはやや小さい。これは、南西諸島の島弧における地殻変動が他の地域と比べてやや不活発であることを示している。

### まとめ

GPS 観測データを使って南西諸島の島弧における地殻変動を解析した結果、以下のことが明らかになった。

水平変動量の解析結果から、上海を基準とすると、九州南部から南西諸島にかけての地域は南東方向に移動しており、移動速度は南へ向かうほど大きな値を示す。この移動は、南西諸島の北西側に位置する沖縄トラフの拡大によるものと考えられる。

地殻の水平歪からは、九州南部地域、沖縄本島地域、宮古-石垣地域では、海溝軸に直交する方向に拡張する応力場になっていることがわかった。これらの地域へは、海溝側から拡張応力が働いている可能性がある。また、奄美大島地域、石垣-与那国地域は海溝軸に斜行した圧縮応力軸が卓越する応力場になっている。ここは、海台・海嶺の沈み込みによって、島弧側の応力場が局所的に乱されているためであると考えられる。

また、南西諸島の島弧における歪速度は、日本の他の地域に比べて小さい。これは、南西諸島の島弧における地殻変動が他の地域と比べてやや不活発であることを示している。

### 謝 辞

国土地理院の GPS 連続観測データを使わせて頂いた。ここに記して感謝します。また、データのプロットには GMT (Wessel and Smith, 1995) を使用した。また、原稿を読んでご助言を下さいました木村政昭教授に感謝いたします。

### 引用文献

- 今西将文・木股文昭・稲森信幸・宮島力雄・奥田隆・高井香里・平原和朗・加藤照之, 1996, GPS 観測による沖縄先島諸島における水平変動(1994-1995), 地震, 2, 49:417-421.  
 木村政昭, 1990, 沖縄トラフの発生と形成, 地質学論集, 第 34 号, 77-88.  
 小竹美子・加藤照之・宮崎真一・仙石新, 1998, GPS 観測に基づくフィリピン海プレートの相対運動と西南日本のテクトニクス, 地震, 2, 51:171-180.

- 京都大学防災研究所・琉球大学理学部・高知大学理学部・東京大学地震研究所, 1994, 南西諸島における GPS 観測成果—フィリピン海プレートの運動—, 地震予知連絡会会報, 52: 523-527.
- 鷲谷威・宮崎真一・多田亮, 1999, GPS で見た日本列島の変形, 月刊地球, vol. 21, No. 4, 236-243.
- 佐藤利典・松浦充宏, 1998, プレート境界における応力の蓄積過程と大地震の繰り返しに伴う地殻変動サイクルのモデル化について, 地震, 2, 50: 283-292.
- Seno, T., S. Stein & A. E. Gripp, 1993, A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with the NUVEL-1 and geological data, *J. Geophys. Res.*, 98:17941-17948.
- 瀬野徹三, 1999, 弧の広域応力場の地域的・時間的変化について, 月刊地球, vol.21, No.10, 680-686.
- Shiono, K., T. Mikumo, & Y. Ishikawa, 1980, Tectonics of the Kyusyu-Ryukyu Arc as Evidenced from Seismicity and Focal Mechanism of Shallow to Intermediate-Depth Earthquakes, *J. Phys. Earth*, 28:17-43.
- Sibuet, J. C., B. Deffontaines, S. K. Hsu, N. Thareau, J. P. Le Formal, C. S. Liu, & ACT party, 1998, Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution, *J. Geophys. Res.*, 103:30245-30267.
- 清水洋・馬越孝道・松尾紉道, 1995, 九州西部の微小地震活動と S 波偏光異方性, 月刊地球, 17:402-405.
- 徳山英一・海域地質構造マップ WG 一同, 1999, 日本周辺海域の地質構造マッピング, 地質ニュース, No. 541, 10 pp.
- 土屋淳・辻宏道, 1998, やさしい GPS 測量, 445 pp.
- Wessel, P., & W. H. F. Smith, 1995, New version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, vol. 76:329-329.
- Whittaker, A., M. H. P. Bott, & G. D. Waghorn, 1992, Stresses and plate boundary forces associated with Plate Margins, *J. Geophys. Res.*, 97:11933-11944.
- 宇津徳治, 1999, 地震活動総覧, 東京大学出版会, 876 pp.

表1 各観測点における、1年あたりの変位置。上海を基準としている。

観測点名	緯度 (° N)	経度 (° E)	東西速度 (cm/year)	南北速度 (cm/year)
AZUMA	32.1970	130.1796	-0.91	0.16
KAGOSHIMAOOKUCHI	32.0575	130.5978	-0.65	-1.1
AKUNE	32.0132	130.1901	-1.1	0.73
MAKIZONO	31.8555	130.7596	0.17	-0.49
KAGOSHIMAKASHIMA	31.7686	129.7954	0.26	-0.29
KUSHIKINO	31.7173	130.2781	0.44	-0.46
KAGOSHIMAKOORIYAMA	31.6751	130.4694	0.005	-0.35
SAKURAJIMA	31.6241	130.6518	0.82	0.94
KAGOSHIMAFUKUYAMA	31.6173	130.8360	1.1	-0.76
KAGOSHIMA2	31.5918	130.7085	1.7	-0.95
KAGOSHIMA3	31.5522	130.6373	0.95	-1.00
KAGOSHIMA1	31.5037	130.4664	0.19	-2.2
TARUMIZU	31.4961	130.6994	0.97	-0.99
KASASA	31.4158	130.1357	0.56	-0.34
MAKURAZAKI	31.2645	130.2994	0.011	-0.6
UCHINOURA	31.2585	131.0875	0.13	-0.77
IBUSUKI	31.2352	130.6403	0.25	-1.2
SATA	31.1062	130.7230	0.61	-0.77
KAGOSHIMAMISHIMA	30.7846	130.2749	0.16	-0.38
NISHINOOMOTE	30.7533	131.0285	0.88	-0.82
NAKATANE	30.5308	130.9642	0.75	-1.3
KUCHIERABUJIMA	30.4613	130.1982	-0.2	-0.48
MINAMITANE	30.3986	130.9032	0.43	-0.61
KAMIYAKU2	30.3957	130.4243	-0.011	-0.48
KAMIYAKU1	30.3817	130.6383	0.42	-0.57
YAKU	30.2363	130.5545	-0.097	-0.63
TOSHIMA	29.6153	129.7057	-0.15	-0.63
KASARI	28.4872	129.6935	-0.19	-0.8
NAZE	28.3990	129.4890	0.14	-1.2
KIKAI1	28.3711	130.0289	-0.068	-0.19

表1 つづき

観測点名	緯度 (° N)	経度 (° E)	東西速度 (cm/year)	南北速度 (cm/year)
KIKAI2	28.2939	129.9216	0.15	-0.21
SETOUCHI	28.1375	129.3204	0.044	-1.1
KAGOSHIMAAMAGI	27.8166	128.8944	0.53	-1.3
WADOMARI	27.4012	128.6507	0.29	-1.7
YORON	27.0321	128.4323	0.71	-1.6
IZENA	26.9444	127.945	0.18	-1.9
KUNIGAMI	26.8593	128.2483	0.9	-1.6
OOGIMI	26.7082	128.144	0.48	-1.8
MOTOBU	26.6948	127.8984	0.71	-1.9
AGUNI	26.5828	127.2316	0.17	-1.1
GINOZA	26.4827	127.9723	0.44	-1.9
OKINAWAISHIKAWA	26.4469	127.8327	1.1	-1.7
TONAKI	26.3729	127.1436	0.97	-1.9
GUSHIKAWA	26.3478	126.7391	0.52	-2.2
TOKASHIKI	26.1787	127.3452	0.69	-1.9
CHINEN	26.1686	127.8261	1.1	-1.7
TAMAGUSUKU	26.1448	127.7689	0.68	-1.8
KITADAITOU	25.9537	131.2906	-6.5	3.6
MINAMIDAITOU	25.8312	131.2278	-6.5	3.5
IRABU	24.8279	125.1709	0.16	-1.8
GUSUKUBE	24.7531	125.3737	0.68	-2.3
TARAMA	24.6416	124.6924	0.91	-2.6
ISHIGAKI1	24.5366	124.3012	0.68	-3.4
YONAGUNI	24.4541	122.9428	1.9	-6.3
IRIOMOTEJIMA	24.4262	123.792	1.2	-4.6
ISHIGAKI2	24.3388	124.1726	1.4	-3.3
HATERUMAJIMA	24.0615	123.7958	1.5	-4.4

表2 各地域における水平歪主軸の方位と大きさ。正の大きさは拡張を表し、負の大きさは圧縮を表している。

	主軸 1		主軸 2	
	大きさ (ppm/year)	方位	大きさ (ppm/year)	方位
九州南部	0.062	N50.0W	0.012	N40.0E
奄美大島	0.020	N68.7W	-0.13	N21.3W
沖縄本島	0.053	N50.5W	-0.0086	N39.5E
宮古—石垣	0.30	N33.9W	-0.048	N56.1E
石垣—与那国	0.012	N37.3E	-0.11	N52.7W

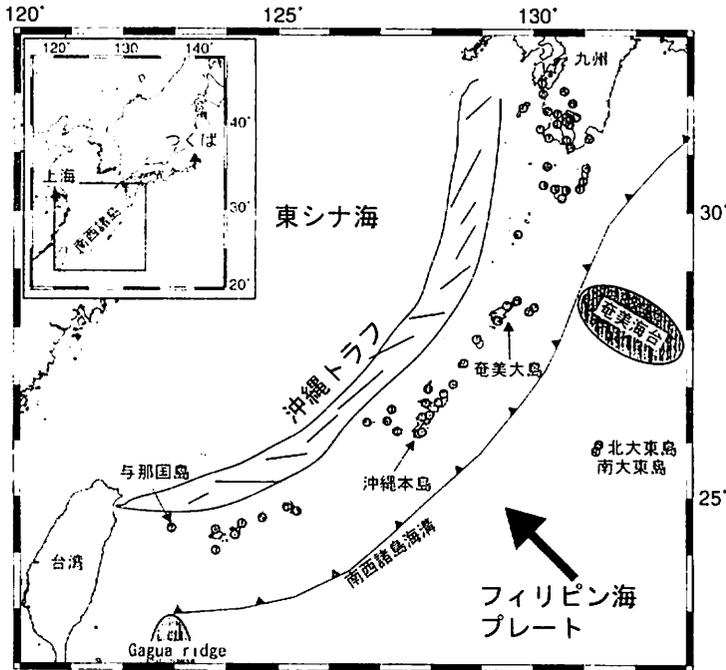


図1 九州南部から南西諸島における国土地理院のGPS観測点配置図(黒丸)。黒三角は、GPS解析の基準点(つくばと上海)である。沖縄トラフ中の直線は、沖縄トラフの中軸の位置(徳山ら、1999;木村、1990)を示している。

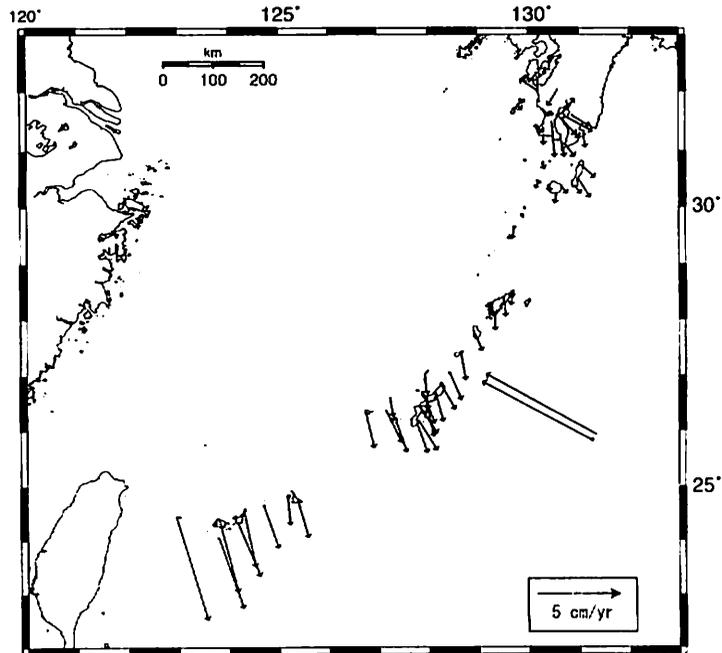


図2 GPS データによる1年あたりの南西諸島の水平速度分布(上海基準)。

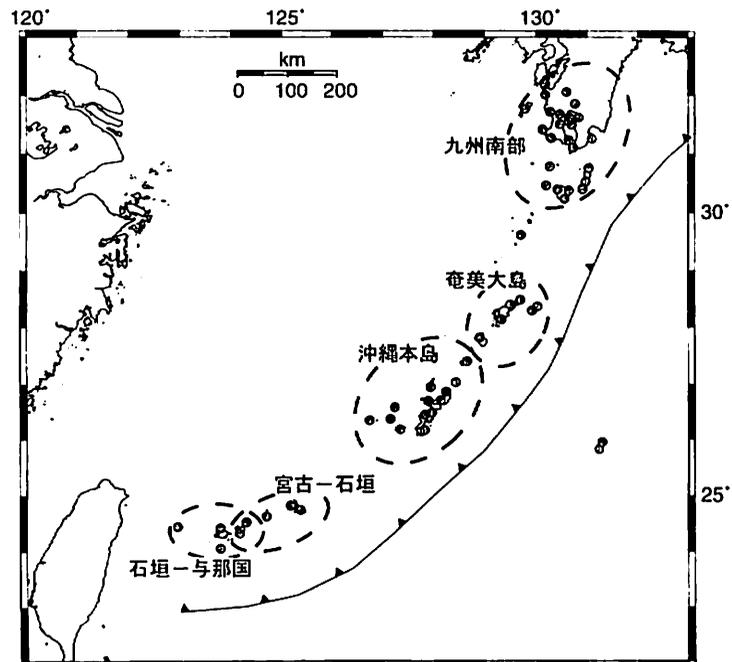


図3 歪解析に用いた観測点分布。楕円で囲った領域内の観測点データを、それぞれの地域で解析に使用した。

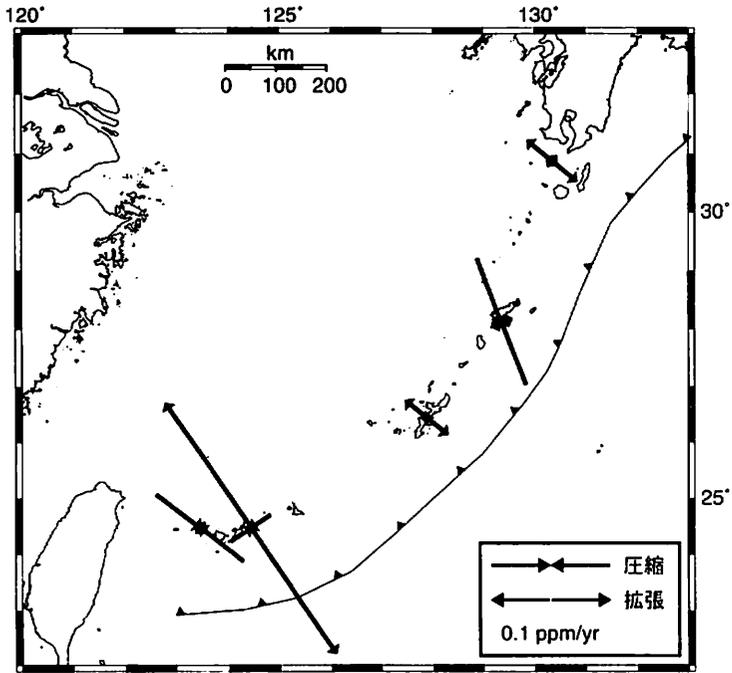


図4 GPS速度ベクトルから推定した九州南部から南西諸島地域における水平地殻歪。