寄 書

GPS 観測による沖縄先島諸島における水平変動 (1994-1995)

名古屋大学理学部*

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

東京大学地震研究所**

加藤 照之

Horizontal Displacements by GPS Measurements
at the Okinawa-Sakishima Islands (1994-1995)

Masafumi IMANISHI, Fumiaki KIMATA,
Nobuyuki INAMORI, Rikio MIYAJIMA,
Takashi OKUDA, Kaori TAKAI
and Kazuro HIRAHARA

School of Science, Nagoya University, Furo-Cho,
Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan

Teruyuki KATO

Earthquake Research Institute, University of
Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

(Received July 4, 1996;

Accepted October 16, 1996)

§1. はじめに

南西諸島の背弧側に広がる沖縄トラフはフィリピン海プレート (PHS) の沈み込みに伴う拡大運動により形成されたと考えられる [TAYLOR and KARNER (1983)]. とりわけ、深度 2,000 m を超す南部沖縄トラフは、明瞭な正断層や地震活動が認識・観測され、同トラフで最も活発な地域と考えられる [例えば, JDRGBB (1991)]. そして、その拡大運動は地質学や古地磁気学から検討され [LETOUZEY and KIMURA (1986), SIBUET *et al.* (1987), MIKI *et al.* (1990)], 南東方向へ 10~4 Ma に進行したと示唆される。しかし、同トラフには海洋性地殻が認められず [NAGUMO *et al.* (1986), FURUKAWA *et al.* (1991)], 拡大速度の地質学的な推定は困難である。

一方、GPS 観測により PHS の収束運動が、HIRAHARA

et al. (1994) により沖縄諸島中部において議論され、彼らは 1990-1991 年の観測から西北西へ 8.7 ± 3.1 cm/yr のプレート収束運動を報告している。また、加藤・他 (1995) は沖縄諸島南部、石垣島における GPS 連続観測から南へ 6 cm/yr の速度ベクトルを報告している。これらの成果は概略ながら沖縄トラフ拡大を示唆する。そこで、筆者らは南部沖縄トラフにおける拡大運動に関し空間的検討を試みる目的で、沖縄先島諸島において GPS 観測を実施した。

§2. GPS 観測と解析

沖縄先島諸島における GPS 観測は 1994 年 11 月と 1995 年 11 月に、Fig. 1 に示す与那国島 (YONA)、波照間島 (HATE)、石垣島 (ISHI)、宮古島 (MIYA) の 4 点で実施した。なお、石垣島は東京大学地震研究所による常時観測点である。台湾東岸では活発な地殻変動が GPS 観測などから報告されている [例えば, YU and CHEN (1994)]. 台湾東岸と石垣島の中間に位置する与那国島は南部沖縄トラフ拡大を議論する上で重要な観測点である。

観測は Trimble 4000SSE 受信機により、1994 年 11 月 15-18 日 (4 日間) と 1995 年 11 月 7-10 日 (4 日間) に、30 秒サンプリングで 1 日当たり、それぞれ、22 時間

Fig. 1. Tectonic setting modified after KIMURA *et al.* (1988) and GPS stations around the Okinawa Trough. 1, central rift; 2, fault scarp; 3, historically active volcanoes; 4, probably active volcanoes; 5, GPS stations.

* 〒464-01 名古屋市千種区不老町

** 〒113 東京都文京区弥生 1-1-1

(1994 年) と 24 時間 (1995 年) 実施した。

解析では IGS (International GPS Service for Geodesy) 観測点である筑波 (TSKB), 臼田 (USUD), 台北 (TAIP) を基準点として, その座標値に強い拘束条件を与え, 沖縄先島諸島における 4 観測点の座標値を決定した。IGS 観測点ではその座標値が地心座標系, ITRF (IERS Terrestrial Reference Frame) 上で高精度に決定されている。

筆者らは解析ソフトウェア GAMIT (Ver. 9.41) を使い, 観測点座標値と共に衛星軌道パラメータも強く拘束してパラメータとし最小二乗解を得る orbit relaxation 法で解析した。この解析手法は衛星軌道誤差から生じる基線解誤差をより減少することができる [KING and Bock (1995)]. スクリプス海洋研究所作成の衛星軌道暦を初期値とした。

各観測点の年間速度ベクトルは GAMIT による基線解析から GLOBK (Ver. 4.01) により推定した。GLOBK はカルマンフィルターにより観測点の座標値, 速度ベクトル等のパラメータ推定を行う。座標値と速度ベクトルの初期値として, IGS 観測点の筑波, 臼田, 台北では ITRF94 [IERS (1995)] 成果を利用した。

§3. 解析結果

3.1 NNR-NUVEL-1A に対応する水平変動

各観測点の速度ベクトルは ITRF94 座標系に準拠し, NNR-NUVEL-1A [DeMETS *et al.* (1994)] に対応する動きとして得られる。その結果を Fig. 2 と Table 1 に示す。速度ベクトルは宮古島, 石垣島, 波照間島, 与那国島で南東-南南東方向にそれぞれ 4.4 ± 0.5 cm/yr, 5.6 ± 0.4 cm/yr, 5.8 ± 0.4 cm/yr, 6.5 ± 0.4 cm/yr を示す。西方に位置する観測点ほど, その速度ベクトルは系統的に大きくなる。石垣島における速度ベクトルは加藤・他 (1995)

が求めた 1993-1995 年間の結果, 南南東方向へ 6.7 cm/yr とほぼ一致する。

3.2 ユーラシアプレート (EUR) 内部に対する水平変動

解析した観測点のうち, 筑波と臼田は北米プレート (NAM) 上に, 他は EUR 上に位置する。ARGUS and GORDON (1991) により NNR-NUVEL-1 に対する EUR の回転運動が, そして, HEKI (1996) により EUR に対する筑波の変動が明確になっている。そこで, 以下の (1) 式により, 台北, 与那国島, 波照間島, 石垣島, 宮古島における EUR 内部に対する速度ベクトル, ΔV_{saki} を見積った。

Fig. 2. Horizontal displacement of USUD and TSKB (A), and the Sakishima islands (B). These velocities refer the ITRF 94 coordinates. Error ellipses are 1σ .

Table 1. Horizontal displacement velocity and uncertainty estimated from GPS measurements. These velocities refer the ITRF coordinates and respect to the inner part of the Eurasian plate. The displacement at SHAN was determined by HEKI (1996).

Station	Velocities referred to ITRF94 (cm/yr)		Velocities referred to Eurasian plate (cm/yr)	
	N-S	E-W	N-S	E-W
MIYA	-3.1 ± 0.4	3.1 ± 0.5	-1.5 ± 0.5	1.3 ± 0.6
ISHI	-4.2 ± 0.4	3.6 ± 0.4	-2.6 ± 0.5	1.3 ± 0.5
HATE	-4.2 ± 0.4	4.0 ± 0.4	-2.5 ± 0.5	2.2 ± 0.5
YONA	-6.0 ± 0.3	2.4 ± 0.4	-4.4 ± 0.4	0.7 ± 0.5
TAIP	0.2 ± 0.3	2.8 ± 0.4	1.9 ± 0.4	1.0 ± 0.5
SHAN	-0.4 ± 0.1	1.0 ± 0.1	-0.4 ± 0.1	1.0 ± 0.1
TSKB	-1.2 ± 0.2	0.0 ± 0.3	0.3 ± 0.2	-2.1 ± 0.3
USUD	-0.9 ± 0.3	0.1 ± 0.3	0.6 ± 0.3	-2.0 ± 0.3

Fig. 3. Horizontal displacement velocities at each site with respect to the stable interior of the Eurasian plate. Error ellipses are 1 σ s.

$$V_{\text{obs}} - V_{\text{obs}(\text{tskb})} = (V + \Delta V)_{\text{saki}} - (V + \Delta V)_{\text{tskb}} \quad (1)$$

(1) 式で、 V_{obs} は GPS 解析により得た ITRF 系準拠の速度ベクトル、 $V_{\text{obs}(\text{tskb})}$ は筑波において解析された ITRF 系準拠の速度ベクトル、 V は NNR-NUVEL-1 として求められた EUR オイラー極から計算した速度ベクトルである。筑波と先島諸島では EUR オイラー極に対する位置が異なるが、一例として計算した V_{tskb} と V_{ishi} は東西成分で 3 mm、南北成分で 2 mm の差しか生じず、今回の議論では

$$V_{\text{tskb}} \approx V_{\text{saki}} \quad (2)$$

と解釈して議論を進める。また、 ΔV は EUR に対する各観測点における速度ベクトルであり、筑波における ΔV_{tskb} は HEKI (1996) による。そこで、各観測点における ΔV_{saki} を求め、Fig. 3 と Table 1 に示す。

速度ベクトル ΔV はプレート剛体運動からのずれと考えられる。まず、台北では北北東に 2.1 ± 0.5 cm/yr を示す。先島諸島では NNR-NUVEL-1A と比較し、より南方向を示す。与那国島で南に 4.4 ± 0.5 cm/yr、波照間島と石垣島、宮古島で南東方向にそれぞれ 3.3 ± 0.5 cm/yr、 2.8 ± 0.5 cm/yr、 2.0 ± 0.5 cm/yr となる。図示した上海 (SHAN) の結果は HEKI (1996) による VLBI 成果である。

3.3 フィリピン海プレート沈み込みに伴う弾性変形 プレートの弾性的性質から、PHS の琉球トレンチで

Fig. 4. The elastic deformations expected from the subduction of the PHS plate under the EUR plate in the Ryukyu trench. The solid arrows show expected displacements and broken arrows show the subduction rates and directions of PHS.

の沈み込みに伴う EUR 内の弾性変形も生じていると考える。そこで、EUR 内の弾性変位量をプレート境界におけるバックスリップモデル [SAVAGE (1983)] に基づき、次の条件で断層モデル [OKADA (1985)] から推定した。沈み込む PHS を Fig. 4 に示す 3 個のセグメントで近似し、沈み込み角度が 27 度 [SHIONO *et al.* (1980)]、深さ 30 km までは完全なカップリング、さらに、各セグメントの沈み込みが 6.2~7.1 cm/yr で、N53~51°W 方向にトレンチ軸に斜交する [SENO *et al.* (1993)] とした。

計算結果を Fig. 4 に示す。各観測点での速度ベクトルは PHS の沈み込み方向と同一の北西ながら 3~5 mm/yr である。しかも、琉球トレンチでは巨大地震の発生頻度が低いことから、カップリングは一般に弱いと考えられる。ゆえに、PHS 沈み込みに伴う弾性変形の影響は今回の議論でほとんど無視できると考える。

§4. 議論とまとめ

HEKI (1996) は、上海では速度ベクトルが EUR に対し 1.1 ± 0.1 cm/yr、東南東方向となることから、インドプレートの EUR への衝突によると解釈している。一方、今回の結果は沖縄先島諸島での速度ベクトルは、EUR に対し南~南南東方向に 2~4 cm/yr、上海に対し南方向へ 1~3 cm/yr を示す。ゆえに、沖縄先島諸島の背弧に広がる南部沖縄トラフは 1~3 cm/yr で拡大していると筆者らは考える。

すでに平原・他 (1996) は、本論と同様な解析手法で 1995 年 6 月~1996 年 3 月の GPS 観測から沖縄諸島中部における EUR に対する速度ベクトルを求め、奄美大島・沖縄で東南東~南東方向へ 2.3 cm/yr、南大東島で

北西へ 8.4 cm/yr の結果を得た。今回の結果は彼らの結果とよく一致する。そして、ベクトル方位が、沖縄諸島北部・中部の奄美大島や沖縄では東南東-南東、より南西に位置する沖縄先島諸島では南東-南南東と、南西域ほど南方向を示すことが明瞭である。また、ベクトル速度も一般に、沖縄諸島南西部の観測点ほど大きな値を示す。もっとも、先島諸島でも東部に位置する宮古島では 2.0 ± 0.5 cm/yr、石垣島でも 2.8 ± 0.5 cm/yr と沖縄諸島中部との速度の違いがまだ有意でない。

しかし、与那国島で観測した速度ベクトルは、他観測点結果と比較し、速度も大きく、かつ方位もほぼ南方向と異なることが明確である。石垣島南方と北方で琉球トレンチと沖縄トラフが共に北東-南西方向から東西方向へ屈曲し、与那国島北方の沖縄トラフでは正断層も観測されている [SIBUET *et al.* (1987)]。与那国島で観測した速度ベクトルは沖縄トラフにおける正断層にともなう地殻変動としても説明可能である。

すでに BEVIS *et al.* (1996) は Tonga 島弧における GPS 観測から 24 cm/yr に及ぶ Lau 海盆の back arc spreading を報告している。Tonga 島弧と比較すれば今回の南部沖縄トラフでの back arc spreading は小規模である。沈み込むプレートの収束速度や拡大開始時期の違いなどが考えられるが、今後の研究課題である。

謝 辞

費用の一部は平成 6-7 年度東京大学地震研究所一般共同研究による。宮古高校、三協コラル、波照間中学校、与那国中学校の協力により観測点が実施できた。GPS データの解析など、防災科学技術研究所の島田誠一博士から助言を頂いた。これらの機関と方々に厚く感謝する。

参考文献

- ARGUS, D. F. and R. G. GORDON, 1991, No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 2039-2042.
- BEVIS, M., F. W. TAYLOR, B. E. SCHUTZ, J. RECY, B. L. ISACKS, S. HELU, R. SINGH, E. KENDRICK, J. STOWELL, B. TAYLOR and S. CALMANT, 1995, Geodetic observations of very rapid convergence and back-arc extension at the Tonga arc, *Nature*, **374**, 249-251.
- DEMETIS, C., R. G. GORDON, D. F. ARGUS and S. STEIN, 1994, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2191-2194.
- FURUKAWA, M., H. TOKUYAMA, S. ABE, A. NISHIZAWA and H. KINOSHITA, 1991, Report on DELP cruises in the Okinawa trough part 2. Seismic reflection studies in the southwestern part of the Okinawa trough, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **66**, 17-36.
- HEKI, K., 1996, Horizontal and vertical crustal movements from three-dimensional very long baseline interferometry kinematic reference frame: Implication for the reversal timescale revision, *J. Geophys. Res.*, **101**, 3187-3198.
- 平原和朗, 細 義信, 松島 健, 加藤照之, 中野健秀, 加藤祐三, 1996, GPS で観測された 1995 年奄美大島近海地震に伴う地震時および地震後の変動, 平成 7 年度文部省科学研究費 (総合研究 A) 「1995 年奄美大島近海の地震とその被害に関する調査研究」調査研究報告書, 55-63.
- HIRAHARA, K., T. TANAKA, Y. KATO, T. TABEI, K. NAKAMURA, M. OHBA, Y. HOSO, T. KATO and I. MURATA, 1994, The motion of the Philippine Sea plate detected with GPS observation in the Nansei-Shotou region, Southwest Japan, *Proceedings of CRCM '93*, 343.
- International Earth Rotation Service, 1995, Technical Note, No. 20.
- Japan DELP Research Group on Back-Arc Basins (JDRGBB), 1991, Report on DELP 1988 Cruises in the Okinawa trough part 1. General outline, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **66**, 1-15.
- 加藤照之・青木陽介・木股文昭, 1995, 拡大する沖縄トラフ-GPS 観測からの証拠, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, p. 27.
- KIMURA, M., S. UYEDA, Y. KATO, T. TANAKA, M. YAMANO, T. GAMO, M. SAHAI, S. KATO, E. IZAWA and T. OOMORI, 1988, Active hydro-thermal mounds in the Okinawa Trough backarc basin, Japan, *Tectonophysics*, **145**, 319-324.
- KING, R. W. and Y. BOCK, 1995, Documentation for the GAMIT GPS analysis software, Mass. Inst. of Technol., Scripps. Inst. Oceano.
- LETOUZEY, J. and M. KIMURA, 1986, The Okinawa trough: genesis of a back-arc basin developing along a continental margin, *Tectonophysics*, **125**, 209-230.
- MIKI, M., T. MATSUDA and Y. OTOFUJI, 1990, Opening model of the Okinawa Trough: paleomagnetic evidence from the South Ryukyu arc, *Tectonophysics*, **175**, 335-347.
- NAGUMO, S., H. KINOSHITA, J. KASAHARA, T. OUCHI, H. TOKUYAMA, T. ASANUMA, S. KORESAWA and H. AKIYOSHI, 1986, Report on DELP 1984 cruises in the middle Okinawa Trough. II. Seismic structural studies, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **61**, 167-202.
- OKADA, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1135-1154.
- SAVAGE, J. C., 1983, A dislocation model of strain accumulation and release at subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **88**, 4984-4996.
- SENO, T., S. STEIN and A. E. GRIPP, 1993, A Model for the motion of the Philippine sea plate consistent

- with NUVEL-1 and Geological data, *J. Geophys. Res.*, **98**, 17941–17948.
- SHIONO, K., T. MIKUMO and Y. ISHIKAWA, 1980, Tectonics of the Kyushu-Ryukyu arc as evidenced from seismicity and focal mechanism of shallow to intermediate earthquakes, *J. Phys. Earth*, **28**, 17–43.
- SIBUET, J. C., J. LETOUZEY, F. BARBIER, J. CHARVET, J. P. FOUCHER, T. W. C. HILDE, M. KIMURA, L. Y. CHIAO, B. MARSET, C. MULLER and J. F. STEPHAN, 1987, Back arc extension in the Okinawa trough, *J. Geophys. Res.*, **92**, 14041–14063.
- TAYLOR, B. and G. D. KARNER, 1983, On the basis of marginal basin, *Rev. Geophys. Spacephys.*, **21**, 1727–1741.
- YU, S. B. and H. Y. CHEN, 1994, Global positioning system measurements of crustal deformation in the Taiwan arc-continental collision zone, *Tee. Atmos. Ocean. Sci.*, **TAO**, **5**, 477–498.