

GPS による地殻変動研究

—今後の課題と大学の役割—

加 藤 照 之

東京大学地震研究所

(1992 年 6 月 25 日受理)

GPS の測地利用は世界的にも国内においても最近数年間に格段に進んだ。日本においては特に地殻変動の検出と監視による地震予知研究への応用が進んでいる。実際に、最近の資料の蓄積により地殻変動と考えてよい変位が求められたほか、プレート運動の検出にも成功している。今後、特に地震予知研究への応用という観点に立つと、精密暦取得のための広域の観測網の構築とデータの迅速な流通にもとづく解析効率の向上が重要な課題となろう。

1. はじめに

世界的にみて、ここ数年の GPS の測地利用に関する研究の進展は実にめざましいものがある。日本においても特に地殻変動研究への応用を中心として、GPS の研究は精力的に進められてきた。GPS の測地利用は地球回転や準拠橋円体に関する研究などの測地学・測地計測の基本にまつわる問題から、地震予知研究や海面変動の監視による環境問題への応用といった分野まで大変に幅が広い。小論では、以下にまず最近の世界的な GPS 研究の動向を概観し、次に日本における成果を述べる。そうして、GPS の測地利用における問題点と今後の課題の中から特に重要と考えられる点について触れておく。最後に、こうした内外の動向をふまえて、日本の大学の GPS 研究者グループが GPS の測地利用、特に地震予知研究にどのように取り組んで行くべきか提言する。

2. GPS 研究における世界の動向

1989 年から実用衛星が次々に打ち上げられて衛星配置が格段に向上したことや受信機の開発が進み小型で低廉な受信機が容易に入手できるようになったことから、GPS の導入が世界的に進み、それと共に測地学の基礎的な分野での研究が格段の進歩をとげた。とりわけ 1991 年 1 月から 2 月の 3 週間にわたって実施された世界キャンペーンでは、米国のグループにより地球回転パラメータの日変化が VLBI と同程度の精度で求められる (e.g., HERRING, et al., 1991) など、GPS によって 10^{-9} の桁の精度が達成で

きる可能性が示唆されるようになった (e.g., DIXON, 1991; HEFLIN, *et al.*, 1992)。VLBI や SLR などと比べて GPS 観測は極めて低廉に実施できるので、今後地球の形やその変化の研究には GPS が主流になるとさえ言う人も出てきている。

このような高精度の成果を得るには、しかしながら、世界的な観測網と高度なソフトウェア技術を持って初めて達成できる。手軽に測量の手段として用いる場合は 10^{-8} の桁が比較的容易に実現できる精度と考えられる (e.g., DONG and BOCK, 1989; DAVIS *et al.*, 1989)。

これらの目的を達成するには、まず第一に衛星の位置を 1m 以内程度と高精度に推定できなくてはいけない。このほか大気中の水蒸気や周囲の障害物による多重反射の影響も同程度に重要と思われるが、現在までのところは衛星の精密暦の改善に重点をおいた研究がすすめられている。このようなことをふまえ、国際測地学協会 (IAG) は世界観測網による精密暦の取得とユーザへのサービスを目的とする組織 (International GPS Geodynamics Service) を設立するための準備を進めている。

3. 日本における GPS 観測研究の現状と問題点

GPS 受信機の大量導入以来数年が経過し、基礎的な実験から実用的な地殻変動の監視まで幅の広い観測研究が並行して実施してきた。1989 年の伊東沖噴火活動に際しては初めて GPS による地殻変動の経過が明瞭に捕らえられ (SHIMADA *et al.*, 1990)，地下活動の推定にも貴重な資料として用いられた (OKADA and YAMAMOTO, 1991)。定常的な地殻歪の集積についても次第に信号と考えて良いような変位が捕らえられるようになつた。Fig. 1 は木股ら (1991) による相模湾周辺における観測結果の一部である。このような基線長変化から歪を算出して図化する作業も進められている (CHEN and KATO, 1992)。他の地域、例えば四国地域においては高知大を中心とするグループによってこれまでの測地測量と調和的な地殻歪が求められている (田部井他, 1992) ほか、それぞれの地域で特色のある観測網・計画による観測研究が進行中である。

さらに、プレート境界をまたぐような広域に展開した観測網においてはプレート運動に伴うと考えて良いような成果も出始めている (例えば、SHIMADA and BOCK, 1992; HIRAHARA *et al.*, 1992; KIMATA *et al.*, 1992)。Fig. 2 に HIRAHARA *et al.* (1992) による南西諸島での成果を示す。図中実線で示したのが GPS によるフィリピン海プレートのユーラシアプレートに対する相対運動ベクトルで、前者が後者に対し約 8.7cm/yr の速さでおよそ N70°W の方向に進みつつあることを示唆している。

これらの事例は、地殻歪の検出精度としておよそ $2 \sim 3 \times 10^{-7}$ 程度が得られているといってよいであろう、ということを示している。こうした成果を踏まえてさらに一段と研究を進め、例えば基線解析精度として 10^{-8} の桁を求めるようとするには以下の 2 点が重要である。

1. 衛星のより高精度の位置決定による基線解析精度の向上。
2. データ取得から解析結果公表までの作業能率の向上。

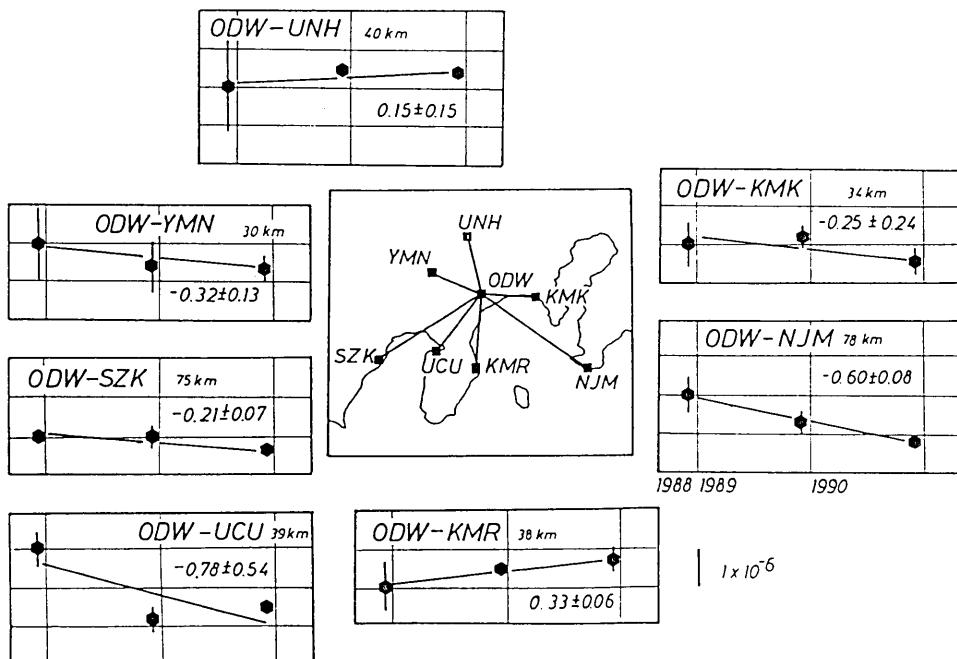


Fig. 1. Baseline length changes deduced from GPS observation around the Sagami Bay, south Kanto, Japan (after KIMATA *et al.*, 1991).

前節にも述べたように、これらの他に伝搬媒質の影響に関する研究、多重反射の影響に関する研究、観測資料の整約法特に網平均計算法や得られた結果の図化の方法、他の観測量との統合化等様々な基礎的研究課題が存在する。しかしながら、ここでは特にさしあたっての緊急課題として上述した2点をとりあげ、以下の節にこれらについて議論する。

(1) 衛星の位置の精密な推定について

ここで目標として、基線決定精度を例えば 5×10^{-8} に設定しよう。これは、100km の基線を 5mm の精度で推定しようと言う程度である。この精度を達成するには 20000km の上空にある衛星の位置を真の位置からの誤差として約 1m の精度で推定しなければならない。

衛星の精密な位置を推定するには地上の広い地域に衛星追跡局を設置して衛星を常時監視する必要があるが、この際、追跡局の(相対)位置が上記と同精度以上に求められている必要がある。例えば日本においては最大で約 2000km の間隔の追跡局網が作られるが(例えば, TSUJI *et al.*, 1991), これらの局の位置が 10cm 程度(他の誤差因を考えれば数 cm 程度)の精度で決定されていなければならない。従って、このような基準追跡局は VLBI/SLR による座標系に精度よく結合しておく必要がある。

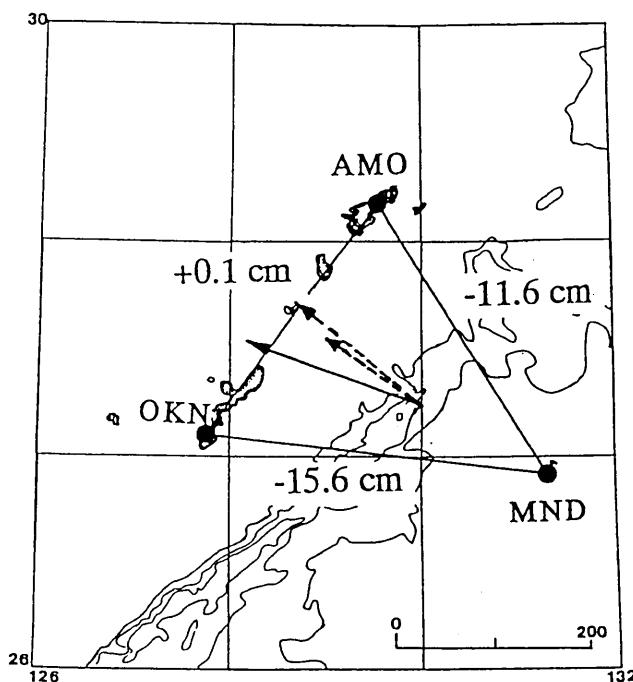


Fig. 2. Comparison of relative plate motion vector of the Philippine Sea plate and the Eurasian plate derived from GPS observations (solid line) with other estimates (dotted lines: SENO, 1977 and MINSTER and JORDAN, 1979) in the Nansei-shotou region (after HIRAHARA *et al.*, 1992).

現在、このような追跡局網は、 10^{-7} 程度の精度をめざした国土地理院の観測網があるが (TSUJI *et al.*, 1991), より高精度をめざすには、さらに観測網の増強が必要と思われる。

(2) データ解析の効率化

データ解析をすばやく実施すること自体は研究成果とはいえないかもしれないが、GPSのデータ解析に際しては前段処理に比較的時間がかかるため、このような前処理を効率的に実施することにより、厳格なデータチェックが可能となる。このことがより精度の高い解を得るために間接的な条件といえる。

GPSの観測研究では大別して野外集中観測方式とテレメータ方式が併用されている。いずれの方式をとるにせよ、現在のところデータ取得から予備的解析結果の公表まで数週間は必要とされている。さらに手動による厳密なサイクルスリップの除去や精密暦の利用などで詳細な解析を実施するとなると半年程度はかかるものと見込まれる。一方、局所的な観測から世界的なキャンペーンまで、様々なGPS観測研究が立案されており、さらに今後地震予知をめざした実用的観測までをも視野にいれると、研究者

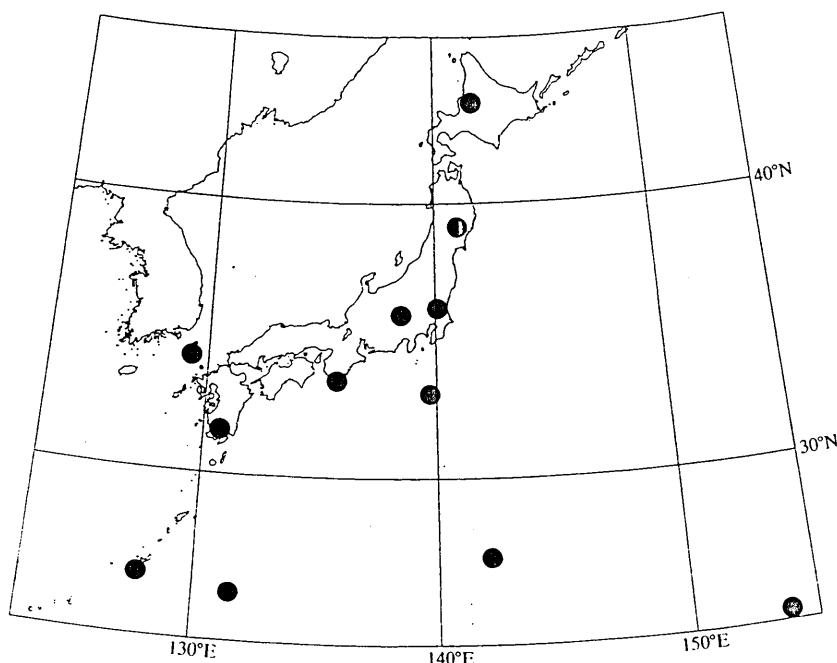


Fig. 3. A hypothetical large scale observation network in and around Japan.

は観測から成果公表までをいかに迅速に行うかが重要な課題となっているのである。

このような効率化を実施するにはソフトウェアの開発改良はもとより、データや中間結果、最終結果や観測点に関する資料などの迅速な流通をめざした関連機関の有機的なネットワークづくりが必要である。特に最近の計算機ネットワークの発達を利用したデータ流通機構の整備が早急に望まれるところである。

4. 今後の GPS 観測研究－大学からの提言－

われわれの究極的な目的は日本とそれをとりまく地域におけるプレート運動とそれに起因する様々な地殻変動の諸相を様々な時間的空間的分解能で明らかにし、そのメカニズムを解明することである。このような観点から前章の技術的課題をふまえつつ GPS を利用して行くには、次のような方法が考えられよう。

まず、プレートをまたぐような長大基線からなる広域観測網を構築する (Fig. 3)。このような観測網は日本国内だけでなく近隣諸国との協力によりさらに広域のものにすることができる (KATO, 1990)。このような広域の基線網の役割は 2 つある。ひとつは衛星の精密な位置の決定であり、ここから得られる暦は次の局所的な観測の支援資料となる。もうひとつの役割はプレートの相対運動による日本列島の歪場を大枠として捕らえることにある。東北日本の太平洋プレートに対する、あるいは西南日本のフィリピン海プレートに対する相対運動がどの程度のものか、また、それが定常的に進行

するのかそれとも間欠的に進行するのかを年単位程度の時間分解能で調査することが、このような観測網によって可能となろう。さらに近隣諸国や世界網による資料を加えることにより日本列島が地球上で全体としてどのように変位しているのかも明らかにされるだろう。

次に、地震予知研究への応用を目的とする場合は巨大地震の発生が予測されるような地域を選択して、その地域を覆うような領域において基準観測点網の周辺によりちゅう密な観測点網を設置する。南関東、伊豆・東海、南海地域等がさしあたっての候補地であろう。このような地域において複数の大学による集中共同観測方式とテレメータ方式を併用しつつ、地域的な歪の進行過程を調査する。この際、上にあげた広域観測網による精密暦を取り入れて解析精度の向上をめざすほか、プレートの大規模な変動と局所的な歪の蓄積過程の関連や地震発生との関連を明らかにする。

以上のような方法を用いることにより、GPSを日本及びその周辺の地殻変動研究にもっとも効率的に適用できると考えられる。

もうひとつの問題として、データ流通と解析の迅速化が必要であるが、このためには現在整備が進行中の各種計算機ネットワーク、例えば学術情報センターによるネットワーク(いわゆる学情ネット)や国際的な組織であるINTERNETの活用が必要となる。このような計算機ネットワークを最大限活用してデータの流通をはかることによって、GPSの資料がさらに有効に利用されることになろう。データの流通や管理にはデータベースやデータバンクの構築が必要であるが、これにはある特定の機関においてハードウェアを含めたデータセンターを構築しておくことが望ましいと思われる。現在地震研ではこのような必要性をふまえ、GPSに関するデータセンターをつくるべく作業を進めているところである。

文 献

- CHEH, G. and T. KATO, 1992, Calculation of strain field from GPS observation, *J. Geod. Soc. Japan*, (in press).
- DAVIS, J.L., W.H. PRESCOTT, J.L. SVARC and K.J. WENDT, 1989, Assessment of Global Positioning System measurements for studies of crustal deformation, *J. Geophys. Res.*, **94**, 13635–13650.
- DIXON, T.H., 1991, An introduction to the Global Positioning System and some geological applications, *Rev. Geophys.*, **29**, 249–276.
- DONG, D. and Y. BOCK, 1989, Global Positioning System network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California, *J. Geophys. Res.*, **94**, 3949–3966.
- HEFLIN, M., W. BERTIGER, G. BLEWITT, A. FREEDMAN, K. HURST, S. LICTEN, U. LINDQWISTER, Y. VIGUE, F. WEBB, T. YUNCK and J. ZUMBERGE, 1992, Global geodesy using GPS without fiducial sites, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 131–134.
- HERRING, T.A., D. DONG and R.W. KING, 1991, Sub-milliarcssecond determination of pole position using Global Positioning System data, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1893–1896.
- HIRAHARA, K., T. TANAKA, Y. KATO, T. TABEI, T. OTIZAKI, K. NAKAMURA, Y. HOSO, T. KATO and I. MURATA, 1992, GPS observation of Philippine Sea plate motion relative to Eurasian plate in the Nansei-Shotou region, southwest Japan [1990.01–1991.11] -Initial result-, in the *Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*.
- KATO, T., 1990, "GPS JAPAN '90", *GPS Bulletin*, **3**, 1–3.
- 木股文昭, 石井紘, 村田一郎, 加藤照之, 三浦哲, 矢吹哲一朗, 金沢敏彦, 里村幹夫, 白井和平, 藤井陽一郎, 1991, 相模湾合同GPS観測による地殻変動の観測(1988年12月–1990年12月, 序報), 「GPS研究会」集録, 211–215.

- MINSTER, J.B. and T. JORDAN, 1979, Rotation vectors for the Philippine and Rivera plates, *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, **60**, 958.
- OKADA, Y. and E. YAMAMOTO, 1991, Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity off Ito, Central Japan, *J. Geophys. Res.*, **96**, 10361–10376.
- SENO, T., 1977, The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea plate relative to the Eurasian plate. *Tectonophysics*, **42**, 209–226.
- SHIMADA, S., Y. FUJINAWA, S. SEKIGUCHI, S. OHMI, T. EGUCHI and Y. OKADA, 1990, Detection of a volcanic fracture opening in Japan using Global Positioning System measurements, *Nature*, **343**, 631–633.
- SHIMADA, S. and Y. BOCK, 1992, Crustal deformation measurements in Central Japan determined by a GPS fixed-point network, *J. Geophys. Res.*, in press.
- 田部井隆雄, 音崎岳広, 平原和朗, 中村佳重郎, 末峯章, 蔡田豊, 山本剛靖, 小野博尉, 金沢輝雄, 四国地方におけるGPS干渉測位 [1990–1991], 地震第2輯, **44**, 315–324.
- TSUJI, H., H. DOI and S. NISHI, An establishment of the GSI's regional GPS tracking network in Japan, in the *Proceedings of the Japanese Symposium on GPS*, 68–72.