稠密 GPS 観測網により観測された東北 奥羽脊梁山地の地殻変動

東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター* 佐藤 俊也・三浦 哲
立花 憲司・佐竹 義美
長谷川 昭

Crustal Deformation around Ou Backbone Range, Northeastern Japan Observed by a Dense GPS Network

Toshiya SATO, Satoshi MIURA, Kenji TACHIBANA,
Yoshimi SATAKE and Akira HASEGAWA

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic
Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University,
Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

(Received December 25, 2001; Accepted June 21, 2002)

A dense GPS network was established in 1997 around Ou Backbone Range (OBR), northeastern Japan, by deploying 9 new continuous GPS stations so as to complement the sparse portion of GEONET (GPS Earth Observation Network) operated by Geographical Survey Institute (GSI), Japan. This new observation network is aimed to investigate the present deformation and to understand the relationship between the occurrence of intraplate earthquakes and the deformation process of an island-arc crust.

GPS data are analyzed using a precise point positioning strategy of GIPSY/OASIS-II. Coordinates of the GEONET stations in daily SINEX files have been supplied by GSI. A map of the intraplate deformation field derived by combining the two data sets and by subtracting the motion of the North American Plate demonstrates displacements toward WNW along the Pacific coast. This is caused by the interplate coupling between the Pacific and North American Plates. Displacements along the Japan Sea coast, on the other hand, are considerably small in magnitude, and directed to NW and N in the southern and northern area, respectively. OBR lies halfway between the two coasts and shows the transitional pattern of both deformation characteristics.

By producing grid data of displacement velocities and taking spatial derivatives, we obtained a map of strain rate distribution. We found that the region between 38.8°N and 39.8°N in OBR demonstrates notable concentration of EW contraction. The region coincides with the area of active seismicity and includes the focal areas of 1896 ($M7.2$), 1962 ($M6.5$), 1970 ($M6.2$), and 1998 ($M6.1$) events. The observed strain is larger than can be explained by the total moment release of earthquakes that occurred in the same period of this study. Possible sources of the strain concentration may be viscoelastic deformation due to the large earthquakes and/or aseismic slip along the deeper extension of active faults.

Key words: Crustal deformation, Dense GPS network, Ou Backbone Range.

* 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉

§1. はじめに

島弧地殻の変形過程と内陸の地震テクニクスの解明を目的として、1997年から1998年にかけて東北奥羽脊梁山地およびその周辺域で大規模な合同観測実験（「97東北脊梁山地合同地震観測」）が行われた〔長谷川・平田（1999）〕。奥羽脊梁山地は東北日本の中央部を南北に縦断する山地で、北緯39.0°～39.7°の領域では、その東縁および西縁に北上低地西縁断層帯と横手盆地東縁断層帯の断層群に境されている〔活断層研究会（1991）〕。地形学的にみれば、これらの活断層に沿う逆断層運動により、現在も隆起運動が進行していると考えられる〔今泉（1999）、佐藤・他（1999）〕。

横手盆地東縁断層帯では、1896年に陸羽地震（ M 7.2）、その南に隣接して、1970年に秋田県南部地震（ M 6.2）、さらにその南側の秋田・宮城県境付近で1996年に鬼首の地震（ M 5.9, M 5.7）〔海野・他（1998）〕が発生している。本研究対象領域北部の岩手山周辺では1998年2月以降、地震活動の活発化〔田中・他（1999）〕とともに、顕著な火山性の地殻変動が観測されている〔Miura *et al.*（2000）、佐藤・浜口（1999）、植木・他

（1999）〕。1998年9月3日には、岩手山山頂の南西約10 km 付近で岩手県内陸北部の地震（ M 6.1）が発生し〔海野・他（1998）〕、この地震に伴う地殻変動が確認される〔木股・他（1999）、Miura *et al.*（2000）、三浦（2000）〕など、奥羽脊梁山地周辺では比較的大きな内陸地震が発生している。またこの地域は定常的に微小地震活動が活発な地域でもある〔Hasegawa *et al.*（1994）〕。われわれは現在の地殻変形を直接観測するために、奥羽脊梁山地周辺を含む活断層周辺域に稠密GPS観測網を構築し、1997年よりGPS連続観測を開始した。

Fig. 1は、東北大学の微小地震観測網により震源決定された地震の震央分布である。期間は1997～2000年、震源の深さは40 km 以浅である。同図には西暦1600年以降に発生したマグニチュード6以上の地震の震央を大きな丸印、活火山を三角印、活断層を太い実線で示してある。

内陸地震の発生機構について、最近活発な議論がなされている。例えば、飯尾（1996）、飯尾・小林（2001）は断層の深部延長におけるすべりが本震発生直前に加速し、断層深部に応力集中を引き起こして大地震が発生す

Fig. 1. Epicenter distribution of earthquakes shallower than 40 km located by the seismic network of Tohoku University for the period from 1997 to 2000. Large circles, triangles, and bold lines indicate epicenters of historical earthquakes with $M \geq 6$ that occurred for the period from 1600 to 2000, active volcanoes, and active faults, respectively.

るという仮説を提案した。この仮説を検証するために、平原・他 (1998) は跡津川断層に、鷺谷・他 (2001) は、糸魚川-静岡構造線北部と長野-利府断層の周辺において、稠密 GPS 観測点を設置して地殻変動の観測を行っている。

本研究では、内陸地震の発生機構を解明するため、奥羽脊梁山地周辺に構築した稠密 GPS 観測網により観測されたデータを用いて、地表における変位場の非一様性を明らかにすることを試みる。

§ 2. GPS 観測データと解析方法

国土地理院によって構築された GPS 連続観測網 (GEONET, GPS Earth Observation Network) [Miya-zaki *et al.* (1997)] により、日本列島の地殻変動の様子が高い時空間分解能で明らかになってきた [宮崎・他 (1999), 多田・他 (1997)]。GEONET の GPS 連続観測点の平均的な観測点間隔は 25 km 程度であり、日本列島規模でテクニクな変動に関する議論を行うためには十分な観測点密度といわれている [鷺谷・他 (1999)]。しかしながら、奥羽脊梁山地周辺においては、山間部ということもあって、観測点間隔は 40~50 km 程度に達する場合もある。これは、過去に $M6\sim7$ クラスの地震を起こした活断層と現在の地殻変動の関連を調査するには十分な観測点密度とは言い難い。

そこで本研究では、既存の国土地理院および東北大学の連続観測点 [Miura *et al.* (1993)] を補間し、かつ活断層の位置を考慮した上で、主に奥羽脊梁山地を中心に 9 ヶ所の GPS 連続観測点を新設して稠密 GPS 観測網を 1997 年 10 月から構築した。Fig. 2 は本研究の対象領域と GPS 観測点配置を示したもので、白丸は国土地理院 (81 ヶ所)、黒丸と黒四角はそれぞれ東北大学の既設、新設の観測点 (28 ヶ所) である。このような観測網の構築により脊梁山地周辺の観測点間隔は 20~25 km になった。

新設の観測点では、 1 m^3 程度のコンクリート基礎上に直径 150 mm、長さ 3~5 m のステンレス管を立て、その上にアンテナを設置している。高精度の GPS 観測にはアンテナ柱の安定性が問題となるが、コンクリート基礎には金属標を埋め込み、アンテナ位相中心の水平位置を適宜確認できるようにしている [佐藤 (1999)]。

各観測点からのデータの伝送には、公衆回線により一日一回データを吸い上げるダイヤルアップ方式、地震データ伝送用衛星通信テレメータシステム [卜部・他 (1996)] の付加機能を利用し、地震データと共にリアルタイムで伝送する方式、GPS 受信機に PC を直結して 1 秒サンプリングしたデータのためこみ、通常はリサンブ

Fig. 2. Map showing GPS stations in the study area. Open and solid circles denote continuous GPS stations operated by Geographical Survey Institute of Japan (GSI) and Tohoku University (TU), respectively. Solid squares are the new sites established by TU for this study.

ルした 1 分毎のデータを ftp で伝送する方式 [三浦・他 (2000)] のいずれかを採用している。各観測点で得られた GPS データは、最終的に東北大学の地震・噴火予知研究観測センター内のデータ収録システムに RINEX (Receiver Independent Exchange format) ファイルとして収録されている。

本研究では、GPS のデータ解析ソフトウェアとして、米国航空宇宙局 (NASA) のジェット推進研究所 (JPL) で開発と公開が行われている GIPSY-OASIS-II (GPS Inferred Positioning System—Orbit Analysis and Simulation Software II) を用いた。このソフトウェアは、二重位相差をとらずに受信機の時計ドリフトなどのパラメータを確率変数として推定できることが大きな特色となっている。この特徴を利用し、JPL で予め高精度で推定した GPS 衛星の精密軌道暦とその時計誤差、地球回転などの各パラメータを用いることによって、基線を組むことなく一観測点のデータのみで、その点の座標値を推定する精密単独測位法 (Precise Point Positioning, PPP [Zumberge *et al.* (1997)]) を用いて解析を行った。得られた結果は位相の整数値バイアスを推定しないいわゆる Ambiguity free 解である。解析期間は各観測点とも 1997 年 1 月または観測開始から 2000 年 12 月までで、解析時間を節約するため 5 日ごとのデータを解析した。

Fig. 3. Time series of variations in coordinates of AKT for the period from 1997 to 2000. Longitudinal, latitudinal, and height components are shown from the top. GPS data are analyzed using the precise point positioning strategy of GIPSY/OASIS-II.

Fig. 3 には、PPP 法により得られた ITRF97 座標系における AKT 観測点の座標の時間変化を例として示してある。上から東西、南北、上下の各成分の時系列をあらわしている。リニアトレンド除去後の標準偏差はそれぞれ 4.8 mm, 4.3 mm, 10.6 mm である。従来から指摘されているように GPS 解析で得られる座標値の楕円体高成分は精度が悪く、本研究で採用した解析方法でも約 2 倍強標準偏差が大きい。この方法は基準点を設定することなく ITRF 系に準拠した各観測点の座標値が独立に求められるため、上下変動の解析にも極めて有効であると考えられるが、それについては、今後解析をすすめていく予定であり、小論では水平変動のみを議論の対象とする。GEONET の解析については国土地理院から SINEX (Software Independent Exchange Format) ファイルの提供を受け、各観測点の変位速度の推定を ITRF97 座標系で行った。GEONET の解析期間は 1997 年から 1999 年までの約 3 年間である。

§3. 奥羽脊梁山地周辺の変位速度場

本研究では、東北大学の観測点については PPP 法で得られた水平座標成分の時系列に直線近似を行い、その傾きより変位速度を推定した。一方国土地理院の SINEX データでは、つくばの国土地理院構内に設置された IGS (International GPS Service for Geodynamics) 観測点 (TSKB) の座標値をもとに、そのごく近傍に設置された観測点の座標値を固定して各観測点の座標が求められているため、両者を直接比較できない。そこでわれわれは TSKB の GPS 観測データを PPP 法で解析し、ITRF97 座標系における変位速度を推定した。

その後、SINEX で得られた GEONET 観測点の変位速度に TSKB の変位速度を補正した。

Fig. 4 は、PPP 法と GEONET の SINEX データより得られた両機関の観測点の ITRF97 座標系における変位速度をプロットしたものである。Fig. 4 で示した変位速度場から、NNR-NUVEL1A [DeMets *et al.* (1994)] で推定されている北米プレートの運動を差し引いたものを Fig. 5 に示す。したがって、この変位速度場は東北地方が北米プレート上にあると仮定すると、プレート内変形を表していると考えられる。ここで解析方法の異なる 2 つの機関ではほぼ同じ位置にある観測点、例えば TOB と 0194 (山形県飛島)、MYK と 0028 (岩手県宮古市、Fig. 2 参照) は速度差 2~3 mm/yr. の範囲内で一致していることから、小論で用いた速度場の統合方法は概ね妥当であると言える。

岩手山周辺では 1998 年 2 月以降発生した地震活動の活発化に伴い、東北大学の高密度 GPS 観測網により、顕著な地殻変動が観測された。さらに同年 9 月 3 日には、岩手山山頂の南西約 10 km 付近を震央とする岩手県内陸北部地震 ($M 6.1$) が発生した [Miura *et al.* (2000)]. 岩手火山周辺の GPS 観測点は火山性地殻変動や 9 月 3 日に発生した地震の影響を受けているため、岩手山山頂の 10 km 以内にある観測点や変位速度ベクトルの方向が周辺の観測点のそれと明らかに異なっている観測点はいじめから以後の解析対象から除外した。Fig. 4 や Fig. 5 をみると IWT 観測点 (Fig. 2 参照) でも近傍の観測点と違った変位速度の方向を示しているため、これについても除いてある。

Fig. 4. Horizontal displacement velocities in ITRF97 obtained at each station.

Fig. 5. Horizontal displacement velocity relative to the motion of the North American plate (NA) obtained at each continuous GPS station. Thick arrow shows direction and velocity of NA-PA (Pacific plate).

Fig. 5 に見られる特徴として、太平洋側においてプレートの沈み込みによる西北西方向の水平変動が見られる。特に南部の太平洋側においては西北西向きの変動が約 2~3 cm/yr. と大きく、プレート間の固着が強いことを表していると考えられる。その一方で北部ではこの変動が小さいが、これは、顕著な余効すべりが観測された 1994 年 12 月 28 日の三陸はるか沖地震 (M 7.6) のあと、プレート間の固着が完全には回復していないことを示していると考えられる [例えば、Nishimura *et al.* (2000), 西村 (2001)]. 日本海沿岸の水平変動は小さく、北部から南部にかけて変動方向は北から北西方向がほとんどである。この傾向は、Miyazaki (1999) や西村 (2001) による解析結果でも見られるもので、彼らはこれが日本海東縁の新生プレート境界の活動によるものである可能性を指摘している。内陸部は太平洋側と日本海沿岸部との中間的な傾向を示し、その方向は北部で北向き、南部で北西方向が卓越している。特に、太平洋沿岸では西北西向きであった変位速度の方向が、脊梁付近で急激に北西方向に向きを変えているように見える。

これまでも空間的に連続的な変位場や歪場を求める研究がなされている [例えば、Miura *et al.* (1989), 佐藤・他 (1993)]. 小論では Fig. 5 に示した変位速度から等間隔の格子点上の値を求めるために Smith and Wessel (1990) の方法を採用した。この方法は GMT (Generic Mapping Tools [Wessel and Smith (1995)]) に surface および blockmean コマンドとして実装され

ている。格子点は 64×64 とし、この結果格子点間隔は約 4.3 km となった。4.3 km $\times$ 4.3 km 以内にある複数の観測点の変位速度は blockmean により平均された上で補間に用いられる。surface コマンドでは平滑化パラメーター T を変えることにより変位速度場のパターンが変化する。 $T=0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ の値を用いてパターンの違いを検討した結果、 $T=0.25$ が平均観測点間隔 25 km 相当の波長を反映していると考えられるため、この値を採用した。以上のようにして求めた変位速度ベクトルの東西、南北成分のコンターをそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に変位速度ベクトルとともに示してある。これらのコンターマップを見ると変位速度場は平滑化され、速度異常値の影響をうけている地域はほとんどないと考えられる。

Fig. 6. Contour map of eastward displacement velocity. Black and red arrows are horizontal displacement velocity of continuous GPS stations obtained by Geographical Survey Institute of Japan and Tohoku University, respectively. Contours with thin broken, thin chain, and solid lines indicate plus, zero, and minus velocities, respectively. The contour interval is 2 mm/year. We produced grid data of displacement velocities from observed ones using a surface command in the GMT software package [Smith and Wessel (1990)]. The grid interval is about 4 km considering the station separation in the study area.

Fig. 7. Same as Fig. 6 but for northward displacement velocity.

§ 4. 奥羽脊梁山地周辺の歪速度場

変位速度場は基準点のとり方で異なる解釈をする可能性があり、地殻の内部変形を議論するには歪速度を用いるのが適している。本研究では前節で得られた格子点上の変位速度の差分をとることで歪速度を計算した。得られた歪速度から東西方向の線歪、南北方向の線歪、東西・南北軸に関するせん断歪、面積歪、最大せん断歪、主歪の各成分を Fig. 8～13 に示す。特に Fig. 8 に示した歪の東西成分では、奥羽脊梁山地に沿って最大 5.5×10^{-7} strain/yr. の短縮歪が卓越しているのが明瞭に見てとれる。この地域は陸羽地震 (1896, $M 7.2$)、秋田県南東部地震 (1970, $M 6.2$)、鬼首の地震 (1996, $M 5.9$, $M 5.7$, Fig. 1 参照) としばしば $M 6 \sim 7$ クラスの比較的大きな地震が発生する地域であり、同時に定常的な浅発微小地震活動の活発な地域の一つでもある。また、その南端から南東方向に枝分かれしているように見える歪速度の大きなところは宮城県北部地震 (1900, $M 7.0$; 1962, $M 6.5$) の発生した地域にも対応している。河野・他

Fig. 8. Contour map showing east-west strain rate. Contours of solid lines, thin chain, and thin broken lines indicate contraction, zero, and extension, respectively. Contour interval is 100 nano-strain/year. This map is obtained by taking spatial derivatives of displacement velocities. Dots indicate epicenters of microearthquakes which occurred for period from 1997 to 2000 with depth ≤ 40 km.

Fig. 9. Same as Fig. 8 but for north-south strain rate.

Fig. 10. Same as Fig. 8 but for shear strain rate with respect to the north and the east axes.

(1993)によると、この地域で密集して発生している微小地震は1962年に発生した $M 6.5$ の地震の余震活動であると考えられる。Fig. 8の小さな黒丸はFig. 1に示した微小地震の震央を再表示したものである。地震の密集している地域と短縮歪の卓越する地域が良く一致していることがわかる。Hasegawa *et al.* (2000)は、国土地理院の三角・三辺測量による過去約100年間の地殻水平歪の分布と微小地震活動の分布などを比較して同様のことを指摘しているが、わずか数年間のGPS観測期間に

より得られた歪分布からも、微小地震活動など他の現象とよい対応が得られたことは注目に値する。

GPSデータの解析期間(1997年~2000年)に奥羽脊梁山地周辺で発生した浅発微小地震のモーメントリリースによって、この地域の歪速度の説明が可能かどうかを簡単な計算で見積もってみた。この期間に発生した微小地震のマグニチュードから計算されるモーメントの総和は約 2.4×10^{16} Nmで、これはモーメントマグニチュード4.9に相当する。このモーメントが、長さと同幅が両方

Fig. 11. Same as Fig. 8 but for dilatational strain rate.

Fig. 12. Same as Fig. 8 but for maximum shear strain rate.

Fig. 13. Distribution of principal strain rate.

とも 4 km, 深さ 5 km, 傾斜角 45 度の一つの断層の逆断層運動で解放されたとしても、震央直上の 10 km 程度の範囲で 1.0×10^{-7} strain 程度にしかない。したがって、微小地震のモーメントリリースではこの地域の歪速度を説明することは不可能であり、観測された歪は他の現象、例えば過去の大地震の余効変動や断層の深部延長におけるすべりによる変形をあらわしている可能性が考えられる。飯尾・鷲谷 (2001), 飯尾・他 (2001) は, GEONET の解析から見出された新潟神戸歪集中帯の形成プロセスとして、プレートから脱水した水が島弧下部地殻まで達して周辺の粘性を低下させ、その結果として上部地殻でも歪速度が大きくなる可能性を指摘しているが、小論で得られた歪集中域は規模が小さいものであり、また活断層との対応もはっきりしていることから、同様のメカニズムで説明するのは困難かもしれない。

Fig. 13 は、主歪速度の分布を示したものである。多田 (1986, 1996) は国土地理院の三角・三辺測量によって得られた東北地方の地殻水平歪の分布に基づいて、東北日本弧が 4 つの地帯構造区に分けられると述べている。本研究の GPS 観測より得られた歪速度の主軸の分

布からは奥羽脊梁山地周辺から宮城県北部にかけて見られる東西圧縮歪はほぼ一致するものの、多田 (1986, 1996) により指摘されている北上山地周辺の南北伸張歪は見られない。また、本荘-松島構造帯付近の低歪速度という現象も見られない。これらの相違は三角・三辺測量と GPS 連続観測のデータの質や解析期間の違いによるものかもしれない。以上のように、歪速度の大きな領域は地震活動の活発な地域や断層の空間分布とよく対応しており、東北地方における地殻の変形過程と内陸の地震テクトニクスを解明する上で重要な観測事実と考えられる。

次に、Fig. 8 より見出された奥羽脊梁山地周辺の短縮歪集中帯の変形を、より詳細に調べるため、緯度方向を 0.8 度ごとの 3 つの領域に分け、各領域内の GPS 観測点における速度ベクトルの東西成分を、経度に対してプロットしたものを Fig. 14 に示す。各領域に示されている黒四角と白四角はそれぞれ国土地理院と東北大学の観測点の変位速度、白丸は前節で述べた方法により得られた各領域の太い実線上の変位速度である。領域毎の平均的な歪速度は A, B, C の順に約 -0.4 , -0.8 , $-1.4 \times$

Fig. 14. Longitudinal profiles of east-west displacement rates in three regions shown in the map (A, B, and C). Open and solid squares indicate observed displacement rates at stations of Tohoku University and GSI, respectively. Open circles denote interpolated rates along lines shown in each region by means of the method described in section 3.

10^{-7} strain/yr. であり、北から南にいくにしたがって歪速度が大きくなっていることがわかる。

われわれが注目している B 領域全体では、A, C 領域に比べ、歪速度のバラツキが大きくなっている傾向がある。特に横手盆地東縁断層帯と北上低地西縁断層帯（それぞれ黒の長方形で示す）で挟まれた地域で特に歪速度の大きい傾向があり、その西側と東側では相対的に歪速度が小さい。それらの値は西側、中央、東側の順に -0.6 , -3.1 , -0.2×10^{-7} strain/yr. である。このことは B の領域において歪場が顕著な非一様性を有していることを示唆している。

東北日本は典型的な沈み込み帯に位置し、プレート境界のみならずプレート内でも比較的大きな内陸地震が発

生ずる。これはプレートの沈み込みに起因する応力が島弧地殻内にある弱面（活断層）に作用した結果と考えられている。したがって、内陸地震の発生機構を理解するには活断層を含む地殻内の不均質構造を正確に把握し、地表で得られる測地学的あるいは地質学的な地殻変動と組み合わせることにより、現在進行しつつある島弧地殻の変形過程を解明することが重要である。このような観点から、奥羽脊梁山地周辺では多くの研究がなされており [例えば、浅野・他(1999)、平田・他(1999)、堀・他(1999)、岩崎・他(1999)、小菅・他(1999)、小川・他(1999)、佐藤・他(1999)]、今後、これらの研究成果と本研究で明らかになった地表における歪速度の空間分布を総合して、当該地域周辺で発生する内陸地震の発生過程

の研究を進めたいと考えている。

§5. ま と め

島弧地殻の変形過程と内陸の地震テクトニクスの解明を目的として、1997年から1998年にかけて東北奥羽脊梁山地およびその周辺域で大規模な合同観測実験(「97 東北脊梁山地合同地震観測」)が行われた。われわれは、既存の国土地理院および東北大学のGPS連続観測点を補間し、かつ活断層の位置を考慮した上で、主に奥羽脊梁山地を中心に9ヵ所のGPS連続観測点を新設し稠密GPS観測網を構築した。

得られたデータを解析した結果、以下のことが明らかになった。

1) 奥羽脊梁山地周辺や宮城県北部地震震源域周辺に顕著な東西短縮歪領域があり、これらの領域は活発な微小地震活動域とよい一致を示している。観測された歪速度は同期間に発生した微小地震のモーメントリリースで説明することは不可能であり、非地震性のプロセス、例えば、過去の大地震の余効変動や深部すべりの存在などを考慮する必要がある。

2) 横手盆地東縁断層帯と北上低地西縁断層帯に挟まれた地域が特に短縮歪速度の大きい傾向にあり、その西側と東側では相対的に歪速度が小さい。東側歪速度が小さいのは、1994年の三陸はるか沖地震の余効すべりによりプレート境界のカップリングがまだ完全に回復していないことに起因すると考えられる。

今後、本研究で明らかになった非一様な歪場を説明するモデルの構築や上下変動に関する調査も行っていく。

謝 辞

本研究には国土地理院のGPS全国連続観測網(GEONET)のデータを使わせて頂きました。防災科学技術研究所の笠原敬司博士、小原一成博士にはGPS観測機器に関して便宜をはかって頂きました。東京大学地震研究所の加藤照之教授にはGPS大学連合所有のGPS観測機器を提供して頂きました。東北奥羽脊梁山地のGPS観測には地元の多くのかたがたのご協力を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。また、査読者の平原和朗教授、宮崎真一博士には、有益なコメント、重要なお指摘を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

浅野陽一・海野徳仁・中村綾子・岡田知己・堀 修一郎・河野俊夫・仁田交市・佐藤俊也・長谷川 昭・小

- 菅正裕・長谷見晶子, 1999, DAT アレイ地震観測による奥羽脊梁山地およびその周辺域における地震波散乱体分布の推定, 地震2, 52, 379-394.
- DeMets, C., R. C. Gordon, D. F. Argus and S. Stein, 1994, Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motion, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191-2194.
- 長谷川 昭・平田 直, 1999, 総論: 東北日本トランスクトー島弧変形と地殻活動一, 月刊地球, 号外 27, 5-11.
- Hasegawa, A., S. Horiuchi and N. Umino, 1994, Seismic structure of the northeastern Japan convergent margin: A synthesis, *J. Geophys. Res.*, 99, 22295-22311.
- Hasegawa, A., A. Yamamoto, N. Umino, S. Miura, S. Horiuchi, D. Zhao and H. Sato, 2000, Seismic activity and deformation process of the overriding plate in the northeastern Japan subduction zone, *Tectonophysics*, 319, 225-239.
- 平田 直・萩原弘子・松原 誠・佐藤比呂志, 1999, 東北合同観測データによる東北日本弧地殻の3次元速度構造と地殻活動, 月刊地球, 号外 27, 22-27.
- 平原和朗・安藤雅孝・細 善信・和田安男・中野健秀, 1998, GPS 観測から断層の動きを追う, 月刊地球, 20(3), 149-153.
- 堀 修一郎・海野徳仁・長谷川 昭, 1999, 東北地方南部における自然地震のS波反射面の分布, 月刊地球, 号外 27, 155-160.
- 岩崎貴哉・加藤 巨・海野徳仁・岡田知己・関根秀太郎・武田哲也・田代勝也・長谷見晶子・松島 健・溝上智子・宮下 芳・宮町安樹・森谷武雄, 1999, 1997年東北日本横断地殻構造探査, 月刊地球, 号外 27, 48-55.
- 飯尾能久, 1996, 兵庫県南部地震の発生過程—断層の固着とディタッチメントのすべり—, 地震2, 49, 103-112.
- 飯尾能久・小林洋二, 2001, 内陸大地震の始まり, 月刊地球, 23(5), 306-312.
- 飯尾能久・鷲谷 威, 2001, 日本列島のモデリング, 月刊地球, 23(5), 360-365.
- 飯尾能久・鷲谷 威・小林洋二・塩崎一郎, 2001, 大陸プレートの内部変形—新潟神戸歪集中帯の成因—, 地震学会予稿集 2001 年度秋季大会, A38.
- 今泉俊文, 1999, 活断層の分布からみた東北地方の地形起伏—いくつかの疑問—, 月刊地球, 号外 27, 113-117.
- 活断層研究会(編), 1991, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 437 pp.
- 木股文昭・大学合同水準測量グループ, 1999, 水準測量による岩手山南山麓における上下変動, 月刊地球, 21, 5, 302-306.
- 河野俊夫・仁田交市・松本 聡・堀内茂木・岡田知己・関原貴美・長谷川 昭・堀 修一郎・海野徳仁・鈴木将之, 1993, 1962年宮城県北部地震(M6.5)震源域における微小地震活動, 地震2, 46, 85-93.
- 小菅正裕, 1999, 地殻内地震から見た東北日本の応力配置, 月刊地球, 号外 27, 107-112.

- Miura, S., H. Ishii and A. Takagi, 1989, Migration of vertical deformations and coupling of island arc plate and subducting plate, *Geophys. Monograph*, **49**/IUGG ser. 4, 125-138.
- Miura, S., K. Tachibana, K. Hashimoto, E. Murakami, T. Kono, K. Nida, T. Sato and S. Hori, 1993, GPS Observation for Regional Crustal Deformation around the Northeastern Japan Arc, *J. Geod. Soc. Japan*, **39**, 2, 167-178.
- Miura, S., S. Ueki, T. Sato, K. Tachibana and H. Hamaguchi, 2000, Crustal deformation associated with the 1998 seismo-volcanic crisis of Iwate Volcano, Northeastern Japan, as observed by a dense GPS network, *Earth Planets Space*, **52**, 1003-1008.
- 三浦 哲, 2000, GPS 連続観測による岩手火山周辺の地殻変動に関する研究, 東北大学博士論文, 126 pp.
- 三浦 哲・佐藤俊也・立花憲司, 2000, 高速サンプリング GPS 観測システム, 日本地震学会講演予講集 2000 年度秋季大会, P022.
- Miyazaki, S., T. Saito, M. Sasaki, Y. Hatanaka and Y. Iimura, 1997, Expansion of GSI's nationwide GPS array, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **43**, 23-34.
- Miyazaki, S., 1999, Interseismic crustal deformation in and around the Japan islands as deduced from GPS observations, Doctor Thesis, Tohoku University, 129 pp.
- 宮崎真一・多田 堯・鷺谷 威, 1999, GPS 連続観測から明らかになった現在の日本列島の地殻変動, 月刊地球, 号外 25, 146-151.
- 西村卓也, 2000, GPS データから推定された東北日本におけるプレート間相互作用の時空間変動, 東北大学博士論文, 123 pp.
- Nishimura, T., S. Miura, K. Tachibana, K. Hashimoto, T. Sato, S. Hori, E. Murakami, T. Kono, K. Nida, M. Mishina, T. Hirasawa and S. Miyazaki, 2000, Distribution of seismic coupling on the subducting plate boundary in northeastern Japan inferred from GPS observations, *Tectonophysics*, **323**, 217-238.
- 小川康雄・三品正明・1998 年電磁気共同観測 MT データ整理委員会, 1999, MT 法による奥羽脊梁山地の地殻構造探査, 月刊地球, 号外 27, 88-92.
- 鷺谷 威・宮崎真一・多田 堯, 1999, GPS で見た日本列島の変形, 月刊地球, **21**, 4, 236-243.
- 鷺谷 威・西村卓也・三浦 哲・飯尾能久・多田 堯, 2001, 稠密 GPS 観測アレイによる断層深部すべり過程の解明, 月刊地球, **23**(5), 321-327.
- 佐藤比呂志・平田 直・岩崎貴哉, 1999, 東北日本の地殻構造と新生代テクトニクス, 月刊地球, **21**(4), 212-219.
- 佐藤峰司・浜口博之, 1999, 1998 年 2~8 月の岩手山の火山性地殻変動の解析, 月刊地球, **21**(5), 312-317.
- 佐藤俊也・三浦 哲・立花憲司, 1993, チェビシェフ多項式を用いた地殻水平変動の連続的表示方法, 測地学会誌, **39**(3), 263-274.
- 佐藤俊也, 1999, 高精度 GPS 観測に用いる可搬型アンテナ架台の製作, 地震火山観測技術研究報告 (東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター), **29**, 12-16.
- Smith, W. H. F., and P. Wessel, 1990, Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, **55**, 293-305.
- 多田 堯, 1986, 東北日本弧における地殻水平歪とその地学的意義, 地震 **2**, **39**, 257-265.
- 多田 堯, 1996, 地殻水平歪による日本列島地帯構造区分, 月刊地球, **18**(12), 807-811.
- 多田 堯・鷺谷 威・宮崎真一, 1997, GPS でみた変動する日本列島, 科学, **67**(12), 917-927.
- 田中 聡・中道治久・浜口博之・植木貞人, 1999, 1998 年の岩手山における地震活動, 月刊地球, **21**(5), 273-279.
- 植木貞人・三浦 哲・佐藤俊也・立花憲司・浜口博之, 1999, 高密度 GPS 観測により解明された岩手火山の地殻変動, 月刊地球, **21**(5), 296-301.
- 海野徳仁・松澤 暢・堀 修一郎・中村綾子・山本明・長谷川 昭・吉田武義, 1998, 1996 年 8 月 11 日宮城県鬼首付近に発生した地震について, 地震 **2**, **51**, 253-264.
- 海野徳仁・岡田知己・中村綾子・中島淳一・佐藤俊也・堀 修一郎・河野俊夫・仁田交市・植木貞人・松沢暢・長谷川 昭・浜口博之, 1998, 1998 年 9 月 3 日岩手県雫石町に発生した地震 ($M6.1$) の余震分布, 活断層研究, **17**, 1-8.
- ト部 卓・衛星通信テレメタリンググループ, 1996, 衛星通信による地震観測テレメタリングシステムの基本設計, 日本地震学会講演予講集 1996 年度秋季大会, P 22.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith, 1995, New version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **76**, 329.
- Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb, 1997, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, **102**, 5005-5017.