

GPS/Leveling法による赤石山脈周辺のジオイド高の決定

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 鈴木, 洋, 里村, 幹夫, 益永, 雅博 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000333

GPS/Leveling 法による赤石山脈周辺の ジオイド高の決定

鈴木 洋¹・里村幹夫²・益永雅博³

Determination of Geoidal Heights by Comparing Orthometric Heights with Ellipsoidal Heights Obtained by GPS in the Akaishi Mountains Area, Central Japan

Hiroshi SUZUKI¹, Mikio SATOMURA² and Masahiro MASUNAGA³

Abstract GPS surveys have been carried out at 12 stations near benchmarks in the Akaishi mountains area, central Japan. We compared the ellipsoidal heights obtained through GPS surveys with the orthometric heights obtained through leveling surveys. We also investigated crustal movements between the time of the leveling surveys and the GPS surveys. The geoid undulation differences were determined by subtracting the ellipsoidal heights from the orthometric heights after correcting the crustal movements.

The results show that the geoid undulation obtained is significantly steeper than that of the ORI-89 Geoid Model, which is thought to be the most reliable geoid model for Japan and its vicinity.

Key words: geoid, GPS, Akaishi Mountains

はじめに

ジオイドの形を決めるには、古くは、天文測量と測地測量の結果の比較による垂直線偏差が用いられていたが、最近では、人工衛星の軌道解析から求める方法、重力データからストークス積分を行ったり F F T 法や最小二乗コロケーション法により求める方法、海上については、人工衛星アルチメトリーのデータを使用して近似的に求める方法などが使われている。アルチメトリーのデータ以外は、ジオイドそのものを測定しているわけではなく、間接的なデータからジオイドを決めていることになる。

一方、近年、測地測量に V L B I, S L R, G P S といった宇宙技術が導入されるようになった。これらは従来の測地測量とは異なり、純粋に幾何学的な測量

であり、従来の等ポテンシャル面を基準とした水準測量等の結果と比較することにより、平均海面と一致した等ポテンシャル面であるジオイド面を決めることができる。この種の研究は、西日本においては京都大学 (Yabuta 1993; 藤森ほか 1994; Yamamoto *et al.* 1994) や高知大学 (Tabei *et al.* 1994) により行われているが、中部以東の東日本については国土地理院 (西ほか 1992) により北海道渡島半島で行われている以外は局地的に行われている程度で、中部地方ではまだ広域的には行われていない。我々は赤石山脈周辺を中心とする中部地方南部地域において水準点近傍で G P S 測量を行い、水準点の標高と G P S 測量による楕円体高の比較からジオイドの形を決めたので、その結果を報告する。

¹静岡大学教養部地学教室 (現在 日本基礎技術株式会社)

Present address: Nihon Kiso-Gijutsu Co. Ltd., Japan

²静岡大学教養部地学教室 〒422 静岡市大谷836

Institute of Geosciences, Faculty of Liberal Arts, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka 422, Japan

³静岡大学教養部地学教室 (現在 神戸市須磨区)

Present address: Suma-ku, Kobe City, Japan

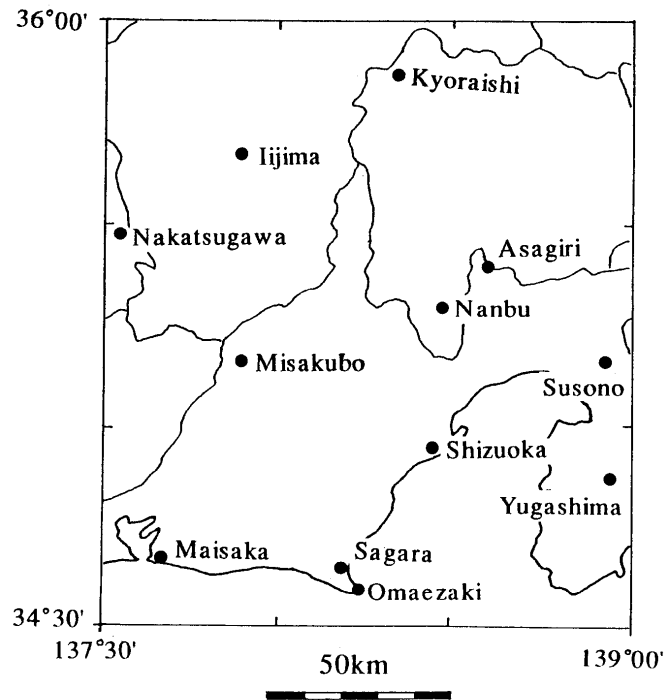


Fig.1 Distribution of the stations of GPS survey.

Table 1 Coordinates of the observation sites (WGS84) and distances from the reference station.

Station name	Latitude(N)	Longitude(E)	Ellipsoidal height	Distance from the reference station	Referred benchmark number
	° ' "	° ' "	m	km	
Shizuoka	34 57 56	138 25 52	77.50	0.3	II BM 16164
Omaezaki	34 36 20	138 13 30	42.25	44.0	Tidal Station
Sagara	34 40 30	138 11 00	149.39	39.2	II BM 2591
Misakubo	35 10 06	137 52 08	303.96	55.7	II BM 5298
Yugashima	34 54 11	138 55 32	966.78	45.8	II BM 48-008-012
Maisaka	34 41 10	137 36 39	203.64	81.1	II BM 2685
Asagiri	35 25 23	138 36 34	41.38	52.8	II BM 10361
Susono	35 11 48	138 54 46	220.25	50.8	II BM 10069
Nanbu	35 18 13	138 27 01	198.18	37.5	BM 80
Kyoraishi	35 51 18	138 17 28	729.17	99.5	BM 597
Iijima	35 39 59	137 55 06	740.51	90.7	BM 5333
Nakatsugawa	35 29 16	137 30 21	381.30	102.9	BM 019-081

観 測

GPS観測を実施するにあたり、基準点として静岡大学教養部C棟屋上のGPS点を用いた。この点は、そのWGS84楕円体上の座標が高精度で決まっている下里SLR基準点とGPS観測で結合され、WGS84楕円体上の位置が精度よく求められている(里村ほか1991)。その値は $34^{\circ}57'59.069''\text{N}$, $138^{\circ}25'50.314''\text{E}$, 107.96mである。

今回実施した観測点の分布をFig. 1に、その位置の座標値および基準点からの距離をTable 1に示す。基準

点からの距離は、いずれもほぼ100km以下である。GPS観測で用いた受信機は、Trimble社の4000SDである。観測は水準点の真上で行うのが最も簡単であるが、今回実施した地点は、いずれも樹木や家屋等がすぐ近くにあつて、真上でGPS観測を行うことはできなかった。そのため、水準点の近くで視野の開けた場所に観測点を選び、水準点と観測点の間を水準測量(御前崎については光波測距測角測量も用いた)によってつなぎ、観測点の標高を求めた。GPSデータの解析には、Trimble社のTrimvec (Version 92.030)を用い、電離層の影響はL1, L2の2周波で、対流圏の

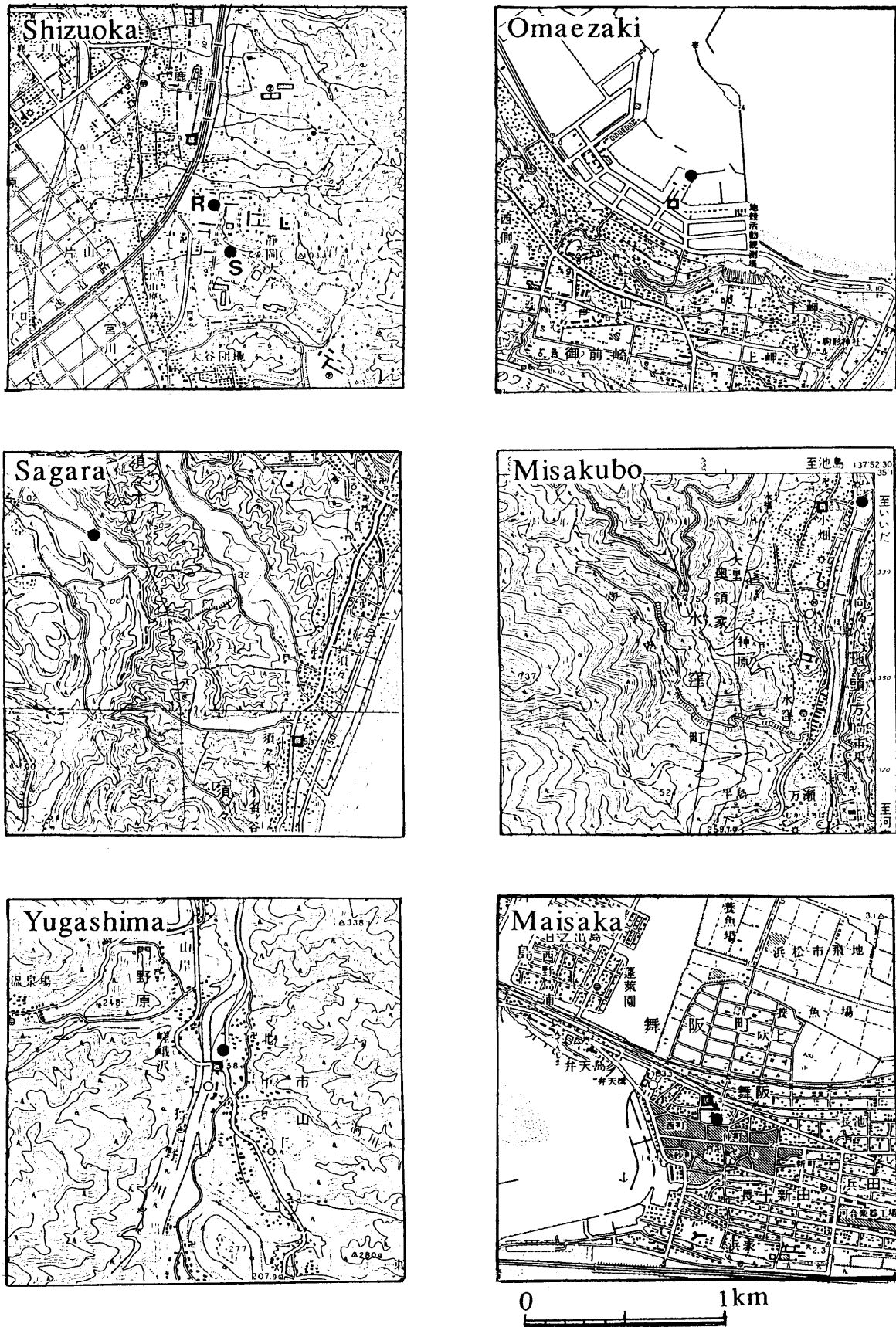


Fig. 2 Location map of GPS stations. Closed circle shows GPS station and open quadrangle shows benchmark which is referred to obtain orthometric height. Circle R shows the reference station and circle S shows Shizuoka station in the Shizuoka map. The length of each side is 2 km.

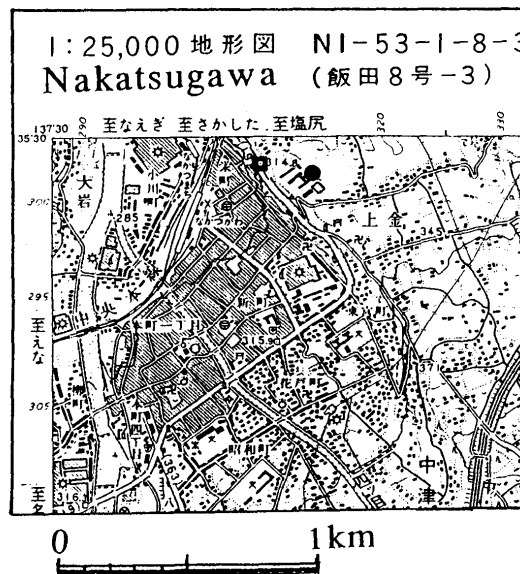
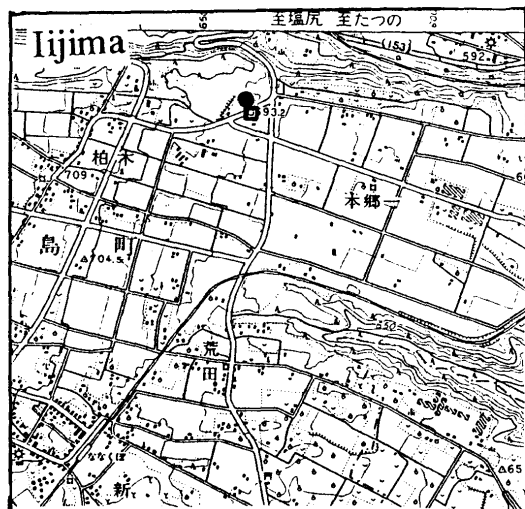
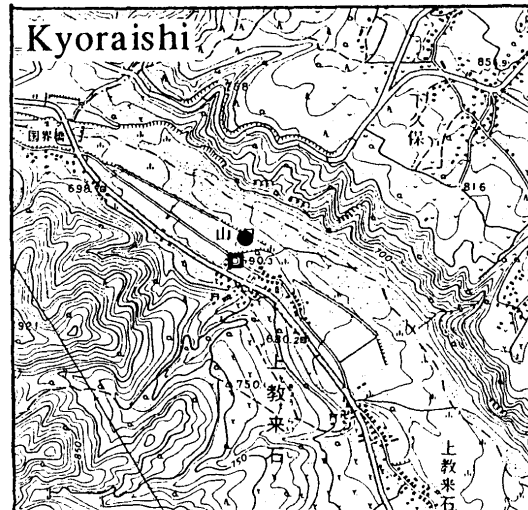
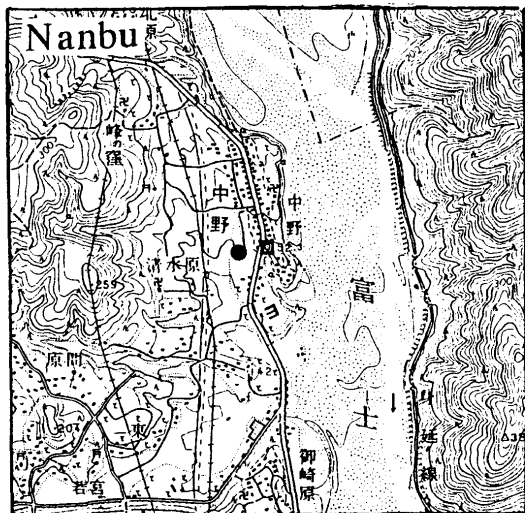
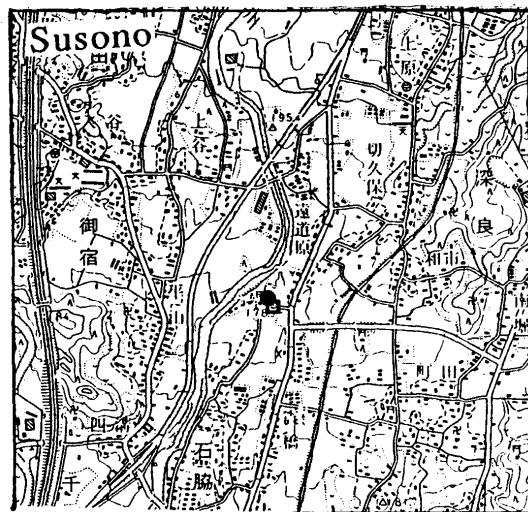
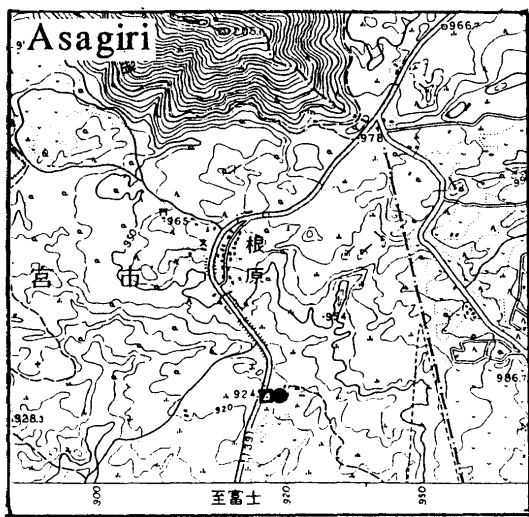


Fig. 2 (Continued)

影響はデフォルト値（地表の気温20℃，気圧1013hPa，湿度50%）を用いて補正した。

各観測点の2万5千分の1地形図をFig.2に示す。それぞれのGPS観測について以下に個別に説明する。

1. **静岡**：観測点は静岡市大谷。静岡大学構内本部駐車場横に選り、標高は2等水準点16164（標高29.31m）と水準測量により結合し求めた。結果は37.56mであった。GPS観測は1990年7月20日に2時間53分、1992年6月12日に3時間8分と3時間10分の2つのセッションで実施した。合計わずか9時間程度の観測しかしていないが、基準点からの距離はわずか260mなのでデータ量が少なくても精度の問題はない。

2. **御前崎**：静岡県榛原郡御前崎町。御前崎検潮所の屋上で観測した。標高は検潮所付設の水準点（標高2.48m）から近傍まで水準測量を行い、地表と屋上の標高差は光波測距測角測量により求めた。屋上の標高は5.86mであった。GPS観測は1990年7月31日から8月8日まで8月5日を除いて毎日2時間52分ずつ観測した。

3. **相良**：静岡県榛原郡相良町。相良地殻変動観測施設A点屋上で観測した。標高は2等水準点2591（標高5.85m）から近傍まで水準測量を行い、地表と屋上の標高差は光波測距測角測量により求めた。屋上の標高は109.84mであった。GPS観測は1990年10月11日から20日まで連日6時間26分ずつ観測した。

4. **水窪**：静岡県磐田郡水窪町。水窪川と翁川の分岐点の河原で観測した。標高は1等水準点5298（標高263.41m）から水準測量で結合し求め、261.31mであった。GPS観測は1991年3月27日と28日の2日間に渡り、15時間を5つのセッションに分けて実施した。

5. **湯ヶ島**：静岡県田方郡天城湯ヶ島町。明徳寺駐車場横の路上で観測した。標高は2等水準点48-006-012（標高158.60m）から水準測量で結合し求め、162.96mであった。GPS観測は1991年4月8日と9日の2日間に渡り、15時間を5つのセッションに分けて実施した。

6. **舞阪**：静岡県浜名郡舞阪町。舞阪小学校運動場にて観測。標高は2等水準点2685（標高1.34m）から水準測量で結合し求め、1.91mであった。GPS観測は1991年8月19日と20日の2日間に渡り、14時間44分を5つのセッションに分けて実施した。この観測のみ、使用した受信機は舞阪がTrimble 4000SST、基準点の静岡がTrimble 4000SDと異種の受信機を使用した。そのためか、結果は芳しくなく、約40cmの差を持つ2グループの値に分れ、どちらのグループの値が真の値に近いのか判断できなかった。そこで1992年3月28日に他の観測点と同じく両点ともTrimble 4000SDを用い、5時間18分を2セッションに分け、再測を実施した。結果は約40cm高い方の値と一致したので、その値が正しいものと判断した。

7. **朝霧**：静岡県富士宮市。2等水準点10361（標高924.04m）近くの野原で観測。水準測量で結合し、標高は924.24m。GPS観測は1991年10月4日と5日の2日間に渡り、14時間を5つのセッションに分けて実施し

た。

8. **裾野**：静岡県裾野市。裾野市営プールで観測。標高は2等水準点10069（標高178.31m）から水準測量で結合して求め、179.59mであった。GPS観測は、1991年12月20日と21日の2日間に渡り、15時間12分を6つのセッションに分けて実施した。

9. **南部**：山梨県南巨摩郡南部町。1等水準点80（標高152.29m）近くの野原で観測。水準測量で結合し、標高は156.28m。GPS観測は1992年7月15日と16日の2日間に渡り、18時間20分を3つのセッションに分けて実施した。

10. **教来石**：山梨県北巨摩郡白州町。1等水準点597（標高690.25m）近くの田のあぜ道で観測。水準測量で結合し、標高は685.62m。GPS観測は、1993年4月1日から3日までの3日間に渡り、33時間36分を7つのセッションに分けて実施した。

11. **飯島**：長野県上伊那郡飯島町。1等水準点5333（標高692.71m）近くの田のあぜ道で観測。水準測量で結合し、標高は697.14m。GPS観測は、1993年5月21日から23日までの3日間に渡り、23時間を6つのセッションに分けて実施した。

12. **中津川**：岐阜県中津川市。中津川高校校庭にて観測。標高は1等水準点091-081（標高314.80m）から水準測量で結合して求め、339.84mであった。GPS観測は、1993年9月30日から10月2日までの3日間に渡り、37時間28分を6つのセッションに分けて実施した。

以上の説明のように、観測は、基準点からの距離が離れるにしたがい、長時間実施した。この観測時間を3～7のセッションに分け、観測結果の誤差を検討できるようにした。

結 果

GPS観測により得られた基準点との楕円体比高、基準点の静岡の楕円体高を107.96mとしたときの各観測点のWGS84楕円体からの楕円体高をTable 2に示す。この楕円体高と水準点の標高を比較すればジオイド高が求まるが、利用できる水準点の標高は1969年に網平均されたものであり、地殻変動が大きいところは網平均以後の地殻変動量を見積る必要がある。

そこで、各観測点における地殻変動の量を、Xia & Fujii(1992)による中部日本の地殻変動の図から見積った。各水準点の標高は、何時測られた値なのかが分からないため、一等水準点の網平均が行なわれた1969年からGPS観測を行なった時までの変動量を各観測点の地殻変動量とした。御前崎と相良は、掛川を基準としてそれぞれ1981年と1965年ころに行なわれた水準測量の値がもたれているので、掛川の変動量に東京大学地震研究所(1989)による御前崎周辺の地殻変動量を加えた。なお、相良の値は1969年に測られたものと仮定した。さらに、観測点がその周辺と異なる変動を示す水準点を標高の基準として選んでないかどうかを、国土地理院の一等水準点検測結果報告により調べた。

Table 2 Results of the geoidal height.

Station name	Ellipsoidal height difference	Ellipsoidal height	Orthometric height before correction of crustal movements	Crustal movements between leveling and GPS surveys	Geoidal height obtained by the present study	ORI-89 Geoidal height	Difference between two geoidal heights
	m	m	m	m	m	m	m
Shizuoka	-30.463 ± 0.020	77.50	37.54	-0.02	39.96	39.64	0.32
Omaezaki	-62.715 ± 0.048	45.25	5.84	-0.06	39.41	39.26	0.15
Sagara	41.429 ± 0.048	149.39	109.88	-0.07	39.51	39.37	0.14
Misakubo	196.002 ± 0.033	303.96	261.40	0.09	42.56	41.43	1.13
Yugashima	95.682 ± 0.034	203.64	162.96	0.12	40.68	40.39	0.29
Maisaka	-66.577 ± 0.050	41.38	2.03	0.12	39.35	39.25	0.10
Asagiri	858.822 ± 0.013	966.78	924.21	-0.03	42.57	41.28	1.29
Susono	112.292 ± 0.067	220.25	179.51	-0.07	40.74	40.14	0.60
Nanbu	90.220 ± 0.026	198.18	156.28	-0.04	41.90	40.47	1.43
Kyoraishi	621.207 ± 0.044	729.17	685.62	0.01	43.55	42.01	1.54
Iijima	632.550 ± 0.058	740.51	697.14	0.03	43.37	41.51	1.86
Nakatsugawa	273.429 ± 0.047	381.30	339.84	0.00	41.55	40.15	1.40

Table 3 Estimation of the errors of the obtained geoidal heights.

Station name	GPS	Orthmetric height at benchmark	Survey between BM and GPS site	Total(RSS)
	cm	cm	cm	cm
Shizuoka	2.0	0.0	0.2	2.0
Omaezaki	4.8	0.9	0.2	4.9
Sagara	4.8	0.8	0.3	4.9
Misakubo	3.3	1.5	0.1	3.6
Yugashima	3.4	1.2	0.1	3.6
Maisaka	5.0	1.3	0.1	5.2
Asagiri	1.3	1.1	0.0	1.7
Susono	6.7	1.0	0.5	6.8
Nanbu	2.6	0.9	0.1	2.8
Kyoraishi	4.4	1.4	0.1	4.6
Iijima	5.8	1.9	0.1	6.1
Nakatsugawa	4.7	2.2	0.2	5.2

湯ヶ島の地殻変動量についてはXia & Fujii(1992)から見積もることが出来ないため、国土地理院(1992)の報告をもとに変動量を見積った。

各観測点での地殻変動の見積り量、およびこの変動量を補正した後のジオイド高も、Table 2 に示されている。また、ジオイド高の結果をFig. 3 に示す。

誤 差

GPS観測の誤差は、各観測を3～7個のセッションに分けて観測しているので、これらの平均値の標準偏差を観測の誤差と考える。

標高に関する誤差は、水準点の値の誤差と水準点と観測点をつなぐ測定の誤差の両者を考えた。水準点は1等水準点と2等水準点の両者を使用した、距離的

には1等水準測量で結合しているのが大部分であるので、静岡と各観測点間の水準路線の距離を地図から読み取り、1等水準測量の許容誤差 $2.5\sqrt{S}$ (Sは水準路線長で単位はkm)の半分の値を標高の決定の誤差と考えた。水準点と観測点をつなぐ水準測量に対しても同様に求めた。御前崎、相良と裾野観測点では、光波測距測角測量も併用したので、その測量方法に応じて誤差を見積った。これらの値はTable 3に示してある。

ほかに、地殻変動の見積りの誤差が考えられるが、この見積りはできなかった。

これらの観測の誤差のrss (root sum square) を各観測点の全誤差と考える。この誤差をFig.3に示す。見積った誤差は、2 cmから7 cm程度である。ただし、この誤差には基準点の楕円体高および標高の決定誤差は含まれていないので、ジオイド高の誤差ではなく、静岡に対するジオイド比高の誤差である。この誤差の見

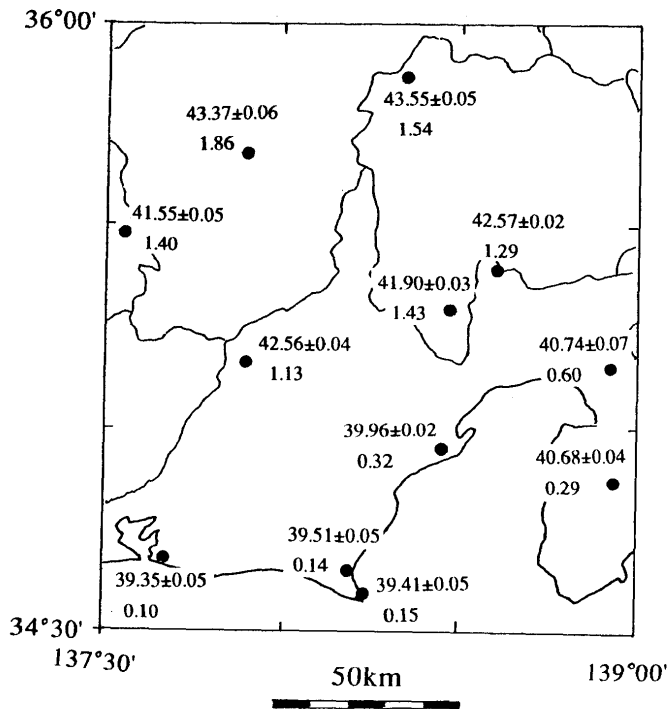


Fig.3. Geoidal heights obtained through the present study (upper) and the difference between the present results and the ORI-89 Geoid Model (lower). The errors with the geoidal heights are those of geoidal height differences from the reference station (Circle R in Fig.2). Unit in meters.

積りが正しいとすると、今回用いたGPS/Leveling法の誤差は、主にGPS観測の誤差に依存していることがわかる。また、10cm以下の精度でジオイド比高を決定できたことになる。この誤差には地殻変動見積りの誤差は含まれていないが、地殻変動の誤差は、大きくても2~3cm程度と考えられるので、その誤差を考慮しても今回のジオイド高の決定誤差は10cm程度にしかならないと思われる。

他のジオイドモデルとの比較

日本周辺の信頼できるジオイドモデルとして公表されているものに、Fukuda(1990)によるORI-89ジオイドがある。このジオイドモデルは、5'×5'メッシュのOSU-86Fジオイドに、海は主として人工衛星アルティメトリー、陸は重力データをもとに求められた短波長成分を加えたもので、日本列島内での精度はほぼ10cm以内とされている。今回我々がジオイド高を求めた点でのORI-89ジオイドの値とおおよび今回の求めたジオイド高との差をTable 2の右欄およびFig. 3の下欄に示す。この両者の絶対値は、基準点の楕円体高の誤差を含んでいるため、全体に一定量の下駄をはいている可能性があるが、太平洋岸では10~30cm程度の差で一致している。しかし内陸の赤石山脈近傍では1mを越える差があり、とくに飯島ではその差は2m近い。

Yabuta(1993)による近畿地方のジオイドにも、紀伊半島では内陸部が海岸部に比べ、GPS/Leveling法で求めたジオイドがORI-89ジオイドの値より大きくなる傾向が見られるが、赤石山脈周辺ほど顕著ではない、今回の差は、検討した誤差の範囲を大きく越えており、何等かの系統誤差が、どちらかのジオイドに含まれていることになる。

最近、Kuroishi & Milbert(1993)は、OSU-91A全球重力ポテンシャルモデルと日本周辺の48万点余りの重力測定データをもとに、日本のジオイドを求めた。その結果も、中部山岳地域ではORI-89ジオイドの値よりも有為に高くなっており、今回の結果と調和的である。

ま と め

赤石山脈周辺を中心とする中部地方南部地域において、水準点近傍の12点でGPS測量を行い、水準点の標高とGPS測量による楕円体高の比較からジオイドの形を決めた。その結果は、今回求めたジオイドは、Fukuda(1990)によるORI-89ジオイドに比べ、山岳部で1m以上高くなった。これは、単なる測定誤差では説明できず、今回求めたジオイドかORI-89ジオイドのいずれかに系統的な誤差が含まれていることを意味する。

謝 辞

今回の観測にあたり、静岡大学理学部地球科学科の多くの学生にお世話になった。また、京都大学理学部の福田洋一博士にはORI-89ジオイドのメッシュデータをいただいた。標高は国土地理院の水準成果を利用させていただいた。GPS受信機は、名古屋大学、東京大学、海洋科学技術センターからお借りした。静岡大学理学部の新妻信明とR. Rossの両博士、京都大学理学部の福田洋一博士には、本稿作成にあたって助言をいただいた。関係の方々に厚くお礼を申し上げる。

引 用 文 献

- 藤森邦夫・山本剛靖・東 敏博・竹本修三・中川一郎・田部井隆雄・渡部重雄(1994), 西南日本におけるGPSを用いたジオイド比高の測定. 京都大学防災研究所年報, 36B-1, 339-344.
- FUKUDA Y. (1990), Precise determination of local gravity field using both the satellite altimeter data and the surface gravity data. *Bulletin of the Ocean Research Institute, University of Tokyo*, 28, 1-133.
- 国土地理院(1992), 伊豆半島及びその周辺の地殻変動. 地震予知連絡会会報, 47, 212-230.
- KUROISHI Y. & MILBERT D. G. (1993), Gravimetric geoid of Japan. *Abstract of the 80th Meeting of the Geodetic Society of Japan*, 51-52.
- 西 修二郎・今給黎哲郎・阿部 馨(1992), 精密測地網の観測とその成果. 月刊地球, 14, 402-408.

- 里村幹夫・臼井和平・佐々木祐治・大場英司・木股文昭・大見士郎・関口渉次・島田誠一・矢吹哲一朗・加藤照之・村田一郎 (1991), 駿河湾周辺のGPS測量. GPS研究会 (GPSシンポジウム1991) 集録, 179-183.
- TABEI T., WATANABE S. & SATAKE T. (1994), Geoid undulation differences in Shikoku Region, Southwest Japan, determined by GPS measurement and leveling. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **40**, 33-44.
- 東京大学地震研究所 (1989), 御前崎の上下変動について. 地震予知連絡会会報, **41**, 373-376.
- YABUTA Y. (1993), Geoid undulation differences obtained by GPS measurements in Kinki District, Japan. *Journal the Geodetic Society of Japan*, **39**, 151-166.
- YAMAMOTO T., FUJIMORI K., HIGASHI T., TAKEMOTO S. & NAKAGAWA I. (1994), Determination of GPS/leveling geoid undulation differences in southwestern Japan. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **40**, 143-154.
- XIA S. H. & FUJII Y. (1992), Contemporary vertical movement in the Tokai District and its neighbourhood, central Japan. *Journal of Physics of the Earth*, **40**, 657-676.