

西南日本における GPS を用いたジオイド比高の測定

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

MEASUREMENTS OF GEOID UNDULATION DIFFERENCES BY GPS IN SOUTHWESTERN JAPAN

By Kunio FUJIMORI, Takeyasu YAMAMOTO, Toshihiro HIGASHI,
Shuzo TAKEMOTO, Ichiro NAKAGAWA,
Takao Tabei and Shigeo WATANABE

Synopsis

GPS/levelling geoid undulation differences were determined at 37 stations in Chugoku, Shikoku and northern Kyushu districts of southwestern Japan. Since the measurement area was widely extended, five reference stations, coordinates of which were accurately determined, were used in GPS measurements. The geoid differences determined by the present study were approximately consistent with the preceding geoids, such as the JHD geoid and the ORI-89 geoid.

1. は じ め に

GPS (汎地球測位システム) 測定の結果を局所直交座標で表現して得られる「高さ」は、橢円体から地表面までの高さ、すなわち橢円体高であり、一方、水準測量から得られる「高さ」は、ジオイドから地表面までの高さである標高を示す。したがって、この2つの「高さ」の間には、ジオイド高に相当する差が存在する。実際には、「高さ」はいずれも相対測定されるものであるので、求められるのは2点間の比高である。この関係を利用して、ジオイド比高を求める手法は、GPS の登場以後、精密なローカル・ジオイドを決定するための有用な方法の1つとなり、得られるジオイド比高は、GPS/水準ジオイド比高と呼ばれる。この方法は、これまで日本においても、近畿地方などで適用され、10 cm より良い精度でジオイド比高が決定されている¹⁾。

われわれは、西南日本の詳細なジオイド比高を求めるために、このGPS/水準法によってジオイド比高決定を行った。本稿では、その測定の実施概要と得られた結果について報告する。

2. 測定および解析

今回、ジオイド比高が決定された測定点の位置を Fig. 1 に示す。総点数は37点である。このうち27点は、新たに設置され GPS 測定および水準測量が行われた測定点である。標高データとして1等水準測量成果を利用するため、測定点は1等水準点の近傍に設置された。GPS 測定を水準点の直上で行えば、橢円体高と

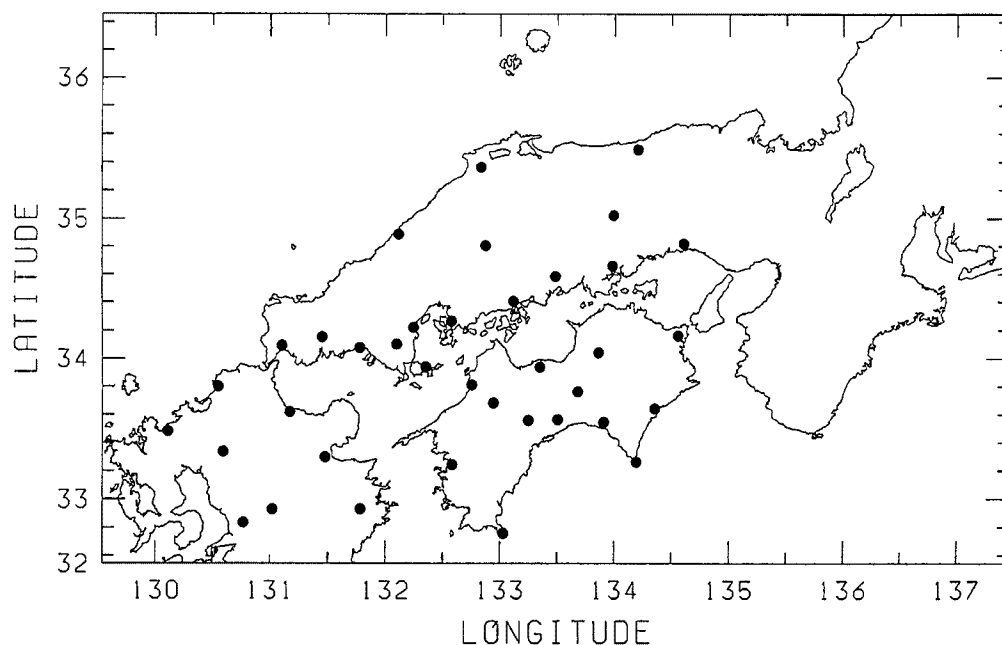


Fig. 1. Arrangement of GPS/levelling stations.

標高差を直接比較することができるが、ほとんどの水準点では GPS 測定に必要な上空の視通が確保できないため、水準点近傍の建造物の屋上に測定点が設置された。そして、水準点と GPS 測定点との間の比高は、地上部分は水準測量により、地上から屋上の間は金属尺によって測定された。

残りの10点は、地殻変動の監視を目的とした GPS 測定がすでに行われている測定点を利用し、最寄りの水準点からの水準測量のみが行われた。ただし、1等水準路線がその近傍を通っていない測定点については、2等水準点や公共水準点が利用された。

GPS による高い精度の相対測定が行われるためには、基準となる測定点の座標が正確に得られていることと、その基準点と測定点との基線長がなるべく短いことが重要である。今回の測定範囲は東西約 500 km におよぶため、既設の GPS 測定点の中から測定点分布を考慮して複数の基準点選ばれた。それらの点は、京都（京都大学理学部地球物理学教室）、高知（高知大学理学部）、阿蘇（京都大学理学部火山研究施設）、鳥取（京都大学防災研究所地震予知研究センター鳥取観測所）および呉（海上保安大学校）である。これらの点は、西南日本における GPS の連日測定²⁾、四国地方における GPS 測定および GPS-JAPAN^{3),4)} で測量が行われており、その座標が正確に得られている。また、測定点を最寄りの基準点と結合することによって、基線長を 50~150 km と比較的短くすることができる。

測定は、1992年1月20日から2月2日までに瀬戸内海周辺および北部九州地域、同年8月24日から9月6日までに中国地方および九州地方、そして、同年11月24日から12月2日までに四国地方で行われた。GPS 測定は、1セッションあたり6時間40分~7時間の測定が、1測定点につき3セッションずつ行われた。GPS 測定には WM102 が使用された。また、解析にはおもに PoPS が用いられたが、11月から12月にかけて四国地方で行われた測定については、取得されたデータがよくなく、PoPS では解析できなかったため、Bernese GPS Software が用いられた。GPS 測定および解析の履歴が Table 1 に示されている。この表で、○は予定どおりの測定が行われ解が得られたことを、△は解が得られたが測定時間または解析に用いられたデータ時間が予定より短いことを、そして、×は欠測または解が得られなかったことをそれぞれ示している。津山は鳥取を基準に決定される予定であったが、同時にデータの取得された日がないため、呉を基準に解析された。そのため、基線長が今回の測定の中で最も長い 159 km となった。また、新居浜、津山および安芸

Table 1. History of GPS measurements

	1/22	23	24
■ Kyoto	○	○	○
Himeji	○	○	○
■ Kochi	○	○	○
Okayama	○	○	○
Ibara	×	△	△
Naruto	△	△	×
Niihama	×	×	○
Iyo	○	○	○

	1/29	30	31
■ Kochi	○	○	○
Mihara	△	○	○
Iwakuni	×	○	○
■ Aso	○	○	○
Yamaguchi	○	○	○
Shimonoseki	○	○	○
Fukuma	○	○	○
Karatsu	○	○	○

	8/25	26	27
■ Tottori	○	○	×
Tsuyama	×	×	○
■ Kure	○	○	○
Miyoshi	○	○	○
Izumo	○	○	○
Hamada	○	○	×
Otake	×	○	△

	9/ 1	2	3
■ Kure	○	○	○
Yashiro I.	○	○	○
Shinnanyo	○	△	△
■ Aso	○	○	○
Kurume	○	○	○
Buzen	○	○	○
Kumamoto	△	○	○
Naokawa	×	○	○

	11/24	25	26	27
■ Kochi	○	○	○	○
Aki	×	×	×	○
Otoyo	×	○	○	

	12/ 1	2	3
■ Kochi	○	○	×
Ochi	○	○	×
Kuma	○	○	×

の3点は、いずれも1日しか解が得られず、再現性の評価ができなかったが、得られたデータの質や同じ日の他測定点の解の求まり方から、妥当な解が得られていると考えられる。

3. ジオイド比高

得られたジオイド比高が、近畿地方の結果¹⁾と合わせ、すべての測定点の平均に対する比高で、Fig. 2に示されている。ほぼ東高西低の傾向にあり、紀伊半島および四国東部にジオイド起状の高みが見られる。また、豊後水道から広島湾にかけてジオイド起状の谷が見られる。ジオイド起状の傾きが最も大きいのは、四国北西部である。これらの特徴は、これまでに重力データなどを用いて求められているジオイド形状^{5),6)}とほぼ一致している。

GPS／水準ジオイド比高の決定精度は、標高の精度が楕円体高の精度より数倍良いために、ほぼ、GPS測定の精度で決まる。近畿地方における測定結果から、100 km離れた2点について、GPS測定の精度は6.4 cm、全体として約8 cmの精度であると思積もられている¹⁾。本研究における一連のGPS測定の精度は、5.9

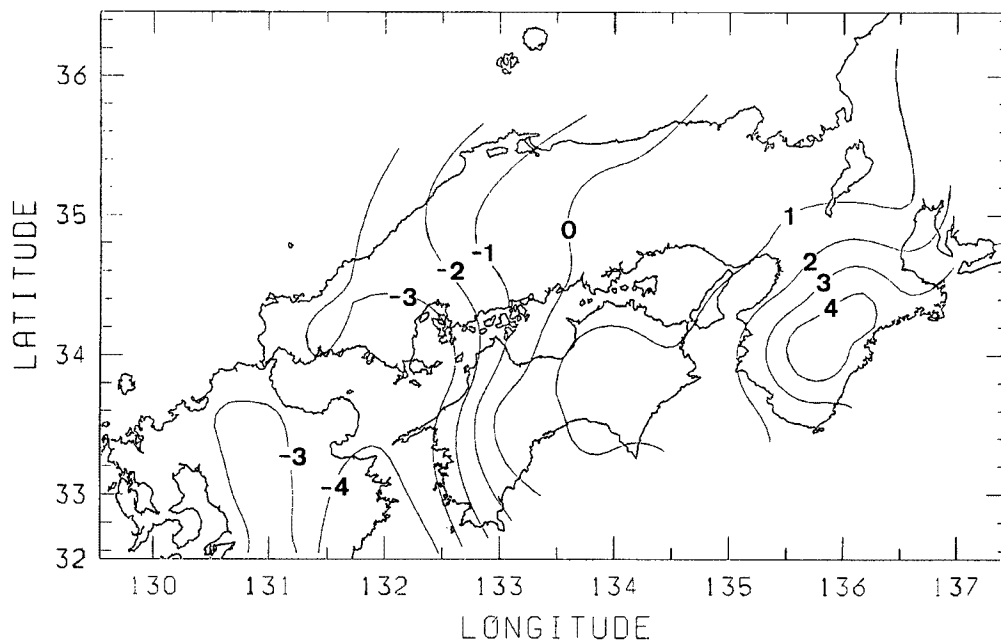


Fig. 2. GPS/levelling geoid undulation differences refer to the mean of those of all stations. Unit is in meters. Contour interval is 1 m.

cm と見積もられるので⁷⁾, 近畿地方における結果と同等の精度である。

4. ま と め

GPS/水準法を用いて、西南日本におけるジオイド比高が求められた、ある1点におけるジオイド比高を決定するような場合には、重力や鉛直線偏差データに基づく方法に比べ、GPS/水準法は、容易に高精度で測定を行うことができる。一方、ジオイド形状を面的に把握するためには、かなり高密度に測定点を配置せねばならず、既存の標高データがない場所では水準測量を行う必要があり、それが長距離におよぶ場合には現実的ではない。これらのことから、GPS/水準法だけでジオイド比高を求めるのではなく、これを基準として用い、重力異常など他の重力場データと組み合わせることによって精密なジオイド比高を示すことができるであろう。

謝 辞

GPS 測定点の設置、測定および水準測量の実施にあたっては、Table 2 に示す小、中学校および町村役場の方々にご協力、ご配慮いただきました。GPS 基準点における測定には、本文中に掲げた各機関の方々にご協力いただきました。お礼申し上げます。

なお、本研究には、平成3,4年度文部省科学研究費補助金一般研究 B 課題番号03452057 (代表者、中川一郎) が使用された。

参 考 文 献

- 1) Yabuta, Y.: Geoid undulation differences in Kinki district, Japan, Jour. Geod. Soc. Japan. 39, 1993,

Table 2. List of GPS/levelling stations

Station name	Address	Institution	Coordinate (WGS84)			Elevation		BM No.			
			°	'	"	°	'	"	m	m	
Kuwana	三重県桑名市	大和小学校	35	4	51	136	40	10	73.183	35.901	1969-1
Ueno	三重県上野市	(1421)	34	46	37	136	8	23	182.927	144.111	1421
Ise	三重県伊勢市	(F40)	34	28	42	136	34	20	90.417	51.294	F40
Owase	三重県尾鷲市	矢浜小学校	34	3	53	136	11	52	61.544	21.444	4778
Iitaka	三重県飯南郡飯高町	飯高町総合開発センター	34	24	33	136	13	26	258.096	217.584	1528
Mikuni	福井県坂井郡三国町	(II-3245)	36	10	41	136	8	45	42.662	5.968	II-3245
Imazu	滋賀県高島郡今津町	(1328)	35	24	22	136	0	9	163.407	126.713	1328
Gojo	奈良県五條市	宇智小学校	34	21	42	135	42	33	214.750	174.812	F56
Sarutani dam	奈良県吉野郡十津川村	猿谷ダム	34	10	46	135	44	31	480.245	439.102	4863
Totsukawa	奈良県吉野郡十津川村	十津川村役場	33	59	18	135	47	33	232.005	190.761	4840-1
Uenoji	奈良県吉野郡十津川村	上野地小学校	34	5	57	135	45	37	371.860	330.608	4856
Kii-Kainan	和歌山県海南市	海南験潮場	34	8	36	135	11	30	40.988	2.767	A14
Hongu	和歌山県東牟婁郡本宮町	(4826)	33	49	18	135	47	19	95.006	54.419	4826
Shimosato	和歌山県東牟婁郡那智勝浦町	下里水路観測所	33	26	48	135	56	13	97.020	58.090	4978
Shionomisaki	和歌山県西牟婁郡串本町	京都大学防災研究所潮岬風力実験所	33	26	48	135	45	23	109.513	70.872	042-168
Shirahama	和歌山県西牟婁郡白浜町	白浜検潮所	33	41	1	135	22	31	41.856	3.235	※1
Kyoto	京都市左京区	京都大学理学部地球物理学教室	35	1	51	135	46	59	124.893	87.519	241
Maizuru	京都府舞鶴市	(1365)	35	26	40	135	20	8	44.060	7.025	1365
Suminoe	大阪府住之江区	安立小学校	34	36	16	135	29	18	50.659	12.779	245
Akashi	神戸市西区	神戸学院大学	34	39	52	135	1	45	132.938	95.856	Kobe 952
Himeji	兵庫県揖保郡太子町	太田小学校	34	50	3	134	35	49	65.758	28.761	417
Okayama	岡山県岡山市	幡多小学校	34	40	29	133	57	57	56.373	19.782	382
Ibara	岡山県井原市	出部中学校	34	35	35	133	27	34	83.279	47.190	1606
Tsuyama	岡山県津山市	佐良山小学校	35	2	40	133	58	10	147.170	110.386	SF1754
Tottori	鳥取県鳥取市	鳥取大学教養部	35	30	55	134	10	28	71.264	35.195	009-213
Mihara	広島県三原市	三原小学校	34	24	13	133	4	59	61.114	25.876	F55
Kure	広島県呉市	海上保安大学校	34	14	42	132	31	43	52.912	19.620	Kure 10
Otake	広島県大竹市	大竹小学校	34	12	34	132	12	58	47.457	14.648	1687
Miyoshi	広島県三次市	三次小学校	34	48	42	132	50	40	205.419	170.070	054-069
Izumo	島根県簸川郡斐川町	西野小学校	35	22	42	132	48	0	56.840	22.072	2970
Hamada	島根県浜田市	島根県浜田総合庁舎	34	53	53	132	4	18	51.173	17.451	009-457
Yashiro I.	山口県大島郡橋町	島中小学校	33	55	3	132	18	12	46.853	14.449	3496
Iwakuni	山口県玖珂郡玖珂町	玖珂中学校	34	5	54	132	4	35	109.553	76.692	SF1878
Shinnanyo	山口県新南陽市	富田中学校	34	4	24	131	45	44	46.302	13.215	SF1717
Yamaguchi	山口県山口市	鴻南中学校	34	9	16	131	26	6	56.915	23.529	1739
Shimonoseki	山口県下関市	王喜小学校	34	3	47	131	3	17	51.232	18.343	SF1763
Naruto	徳島県鳴門市	堀江北小学校	34	9	36	134	32	28	58.939	21.933	305
Ikeda	徳島県三好郡池田町	京都大学防災研究所徳島地すべり観測所	34	2	19	133	50	40	184.356	146.581	032-063

Table 2. (continued)

Station name	Address	Institution	Coordinate (WGS84)						Elevation	BM No.
			°	'	"	°	'	"		
Awa-Kainan	徳島県海部郡海南町	海南町役場	33	36	7	134	21	8	55.239	17.528 5115
Kochi	高知県高知市	高知大学理学部	33	32	58	133	29	9	70.363	33.568 5000
Aki	高知県安芸市	安芸高等学校	33	29	59	133	54	2	61.848	223.805 5164
Muroto	高知県室戸市	室戸岬測候所	33	15	8	134	10	39	222.962	186.096 5141
Ashizuri	高知県土佐清水市	清水測候所足摺分室	32	43	24	133	0	37	65.460	30.684 ※2
Otoyo	高知県長岡郡大豊町	大豊町役場	33	45	52	133	39	51	299.480	261.383 5021
Ochi	高知県高岡郡越知町	越知町役場	33	31	58	133	15	8	112.381	75.233 4686
Niihama	愛媛県新居浜市	船木小学校	33	56	14	133	19	47	117.858	81.311 3417
Iyo	愛媛県伊予郡松前町	岡田小学校	33	48	16	132	43	18	55.658	21.739 4538
Uwajima	愛媛県宇和島市	明倫小学校	33	12	54	132	33	34	52.607	18.767 4589
Kuma	愛媛県上浮穴郡久万町	久万町役場	33	39	20	132	54	7	531.250	495.382 4719
Fukuma	福岡県宗像郡福岡町	福岡中学校	33	45	31	130	28	42	58.526	25.370 1805
Kurume	福岡県久留米市	上津小学校	33	16	48	130	32	5	70.714	37.519 1838
Buzen	福岡県築上郡吉富町	吉富中学校	33	36	33	131	9	54	51.268	18.106 1976
Karatsu	佐賀県東松浦郡浜玉町	浜玉町中央公民館	33	27	0	130	2	21	46.775	13.868 3215
Kumamoto	熊本県熊本市田迎町	田迎小学校	32	46	5	130	43	13	52.469	19.285 2706
Aso	熊本県阿蘇郡長陽村	京都大学理学部 火山研究施設	32	53	10	131	0	23	600.948	567.252 II-10400
Beppu	大分県別府市	京都大学理学部 地球物理学研究 施設	33	17	2	131	29	9	106.845	74.384 1941
Naokawa	大分県南海部郡直川村	直川村役場	32	53	47	131	46	43	107.754	76.045 2605

※1 Fixed point of tide station.

※2 Bench mark of observation field.

pp. 94-106.

- 2) 藤森邦夫・山本剛靖・鈎卯三郎・田部井隆雄・音崎岳広・小野博尉・迫 幹雄・外 輝明・山田年広・小泉尚嗣・矢部 征・中尾節郎：GPS 連日測定——京都・高知・阿蘇・鳥取——，京都大学防災研究所年報，35, B-1, 1992, pp. 413-419.
- 3) 田部井隆雄・音崎岳広・平原和朗・中村佳重郎・末峯 章・藪田 豊・山本剛靖・金沢輝雄：四国地方における GPS 干渉測位 [1990~1991]，地震 2，44, 1991, pp. 315-324.
- 4) Kanazawa, T: GPS observations in Kure, Proceedings of the Japanese Symposium on GPS (1991), pp. 235-240.
- 5) Ganeko, Y.: A 10'×10' detailed gravimetric geoid around Japan, Marine Geodesy, 7, 1983, pp. 291-314.
- 6) Fukuda, Y.: Precise determination of the local gravity field using both the satellite altimeter data and the surface gravity data, Bull. Ocean Res. Inst., Univ. of Tokyo, 28, 1990. pp. 1-133.
- 7) Yamamoto, T., K. Fujimori, T. Higashi, Y. Yabuta, T. Tabei and S. Watanabe: Precision of the height measurements by GPS, Proceedings of the Japanese Symposium on GPS (1993), pp. 91-95.