

新しい日本重力基準網の構築

Establishment of New Japan Gravity Standardization Net

測 地 部

Geodetic Department

要旨

国土地理院では、基準重力点における絶対重力測定や、全国をカバーする様々なレベルの相対重力測定を実施しており、これまでに大量のデータが得られている。そこで、これらの絶対重力測定、および相対重力測定のデータを統一的に解析し、重力の時間変化の追求、重力異常の解析の基準等に十分な精度で利用できる新しい重力基準網1996 (JGSN96) を構築した。これは、従来の日本重力基準網 (JGSN75) より 1 桁高い精度 (0.01 mGal^{*1}) の重力基準網となる。

1. はじめに

1976年、国土地理院は、1971年の国際測地学地球物理学連合 (IUGG) 総会で採択された、国際重力基準網 1971 (IGSN71) の (国内重力点の内、10都市16点) 重力値を基準とした110都市122点の日本重力基準網1975 (JGSN75) を設定した (国土地理院、1976)。

各重力点は、主に気象台、測候所、大学実験室などの公共機関の基台上に設置されている。

公称精度は、IGSN71と同精度の 0.1 mGal であり、これは、絶対重力測定との比較により確かめられている (Kuroishi and Murakami, 1991)。

JGSN75は、現在も日本の重力基準として機能している。しかし設定から20年が過ぎ、

- 1) 絶対重力計の導入により、高精度の重力絶対測定値が得られるようになった。
- 2) 測量方式の改善等により、高精度で信頼のおける重力結合データが蓄積された。
- 3) 重力の時間変化の追求には、JGSN75より一桁高い精度の重力値が必要であるとの認識が高まった。

- 4) 新設重力点や、使用不能な重力点が増えてきた。

等、JGSN75は、時代の要請に応じ、更新されるべき時期がきた。そのため、絶対重力測定に基づく新しい重力基準網の構築を行う。

2. 国土地理院の精密重力測量

重力の測定には、大きく分け絶対測定と相対測定のとおりの方法がある。

絶対測定とは、ある場所の重力値をその場所だけの測定で求める方法であり、絶対重力計により測定を行う。一方相対測定は、複数の地点の重力値の差を測定する方法で、ある地点の重力値を求めるためには、相対重力計により重力値が既知の地点からの重力値の差を測定する。

新しい重力基準網は、基準となる絶対重力測定と各重力点 (基準および一等重力点) 間の重力値の差を測定する相対重力測定 (重力結合) による観測点から成る。

2.1 絶対重力測定

1980年、佐久間式絶対重力計が導入された。この絶対重力計は、投げ上げ式絶対重力計で、真空中で物体を投げ上げ、その物体の時間に対する位置の変化を観測し重力加速度を求めるものである。調整・改良を加え、1985年から国内の移動観測を行い1993年まで、全国13箇所の基準重力点において16回 (3箇所の繰り返し測定を含む) の絶対重力測定を行った。その測定精度は、地盤の振動状況などの影響を受けるものの数 $\mu \text{ Gal}$ を達成した (Kuroishi and Murakami, 1991) が、次に出現する精度、安定性ともに優るFG 5 絶対重力計にその座を譲ることになった。

1993年、FG 5 絶対重力計 (米国: Micro-g社、写真-1) が導入された。この絶対重力計は、自由落下式の絶対重力計で、真空中で物体を自由落下させ、その物体の時間に対する位置の変化を観測し、重力加速度を求める。

FG 5 は、調整が終了すれば、ほとんど自動測定で、最短10秒間に1回の測定を連続的に行うことが出来る。測定精度も高く、国際比較等により重力値の再現性も非常に良いことが確認されている。また、高精度な連続測定が可能であるため、南極昭和基地 (山本, 1995) ・オーストラリア 3 箇所 (新田他, 1996) での測定では、数 $\mu \text{ Gal}$ の微少な海洋潮汐による重力の時間変化 (図-1) を検出している。

*1 $1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$ $1 \mu \text{ Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$

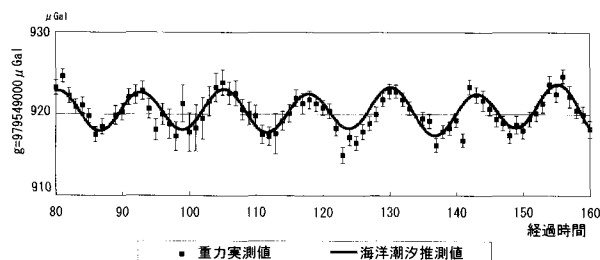


図-1 重力実測値と海洋潮汐推測値の比較図
オーストラリア Mt. Stromlo

国内測定においても、海洋潮汐の影響と思われる重力の時間変化を見ることが出来る。しかし国内では地盤振動に起因する測定誤差が大きいため、その対策が必要になっている。これらの重力変化の検出は、地球物理学の研究に貢献することが期待される。

国土地理院は、国際絶対重力基準網の構築に参加している。その際には、全世界で約20台が稼働しているFG 5の測定値が主流になることは必至である。

以上のようなFG 5の高精度性、汎用性等を考慮し、今回の新しい重力基準網の基準値には、FG 5絶対重力計による測定値(図-2)を採用することとした。

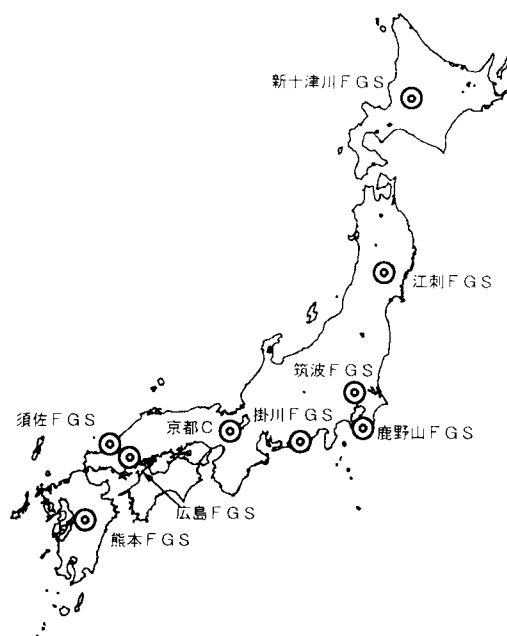


図-2 新しい日本重力基準網の基準となるFG 5による絶対測定が行われた基準重力点

2.2 相対重力測定(重力結合)

複数の測定点間の重力差を測定する作業で、相対重力計(スプリング重力計:主にラコスト・ロンバーク重力計)により測定する。

スプリング重力計とは、バネの弾性力を重力とつりあわせて測定する装置である。バネにおもりをつると、バネの弾性力と重力がつりあったところで静止する。重力値の違いによりバネの伸びが異なるため、その違いを測定する事により重力差を求める。

スプリング重力計には、ドリフトとテアという現象がある。ドリフトとは、バネの材料の経年変化のため重力値に変化がないのに読み値が変化していく状態である。また、テアとは、衝撃などにより急激に読み値が変化する状態を言う。そのため、解析は、ドリフト等を考慮する必要がある。

国土地理院で行っている相対測定には、

- 1) 相対重力計の定数決定のための検定測量
- 2) 重力点間を測量する一等重力測量(繰返し)
- 3) 重力点を基準に、水準・三角点の重力値を決定する二等重力測量

等がある。

今回の解析の骨格は、主に1), 2)の測定である。

1983年以前の、一等重力測量では、複数の重力点を数日間で往復する(往と復の測定日が異なる)方式を採用していた。1984年からはそれまでの測量方式の見直しを行い、水準網に準じた重力網(図-3)を構成し、観測方式も往復観測を同一日に行う方式に変更した。これにより高精度な重力結合データの取得が可能になった。

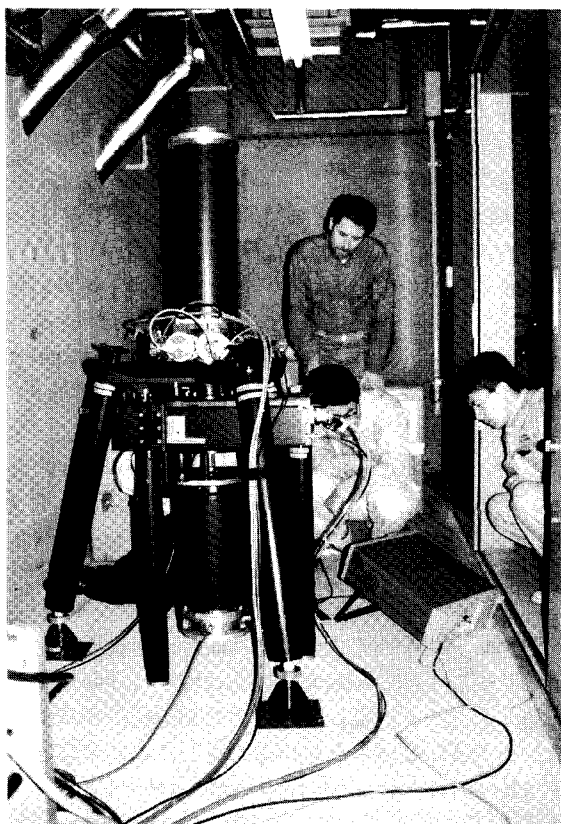


写真-1 FG 5による絶対重力測定
東海機動観測基地(掛川FGS)

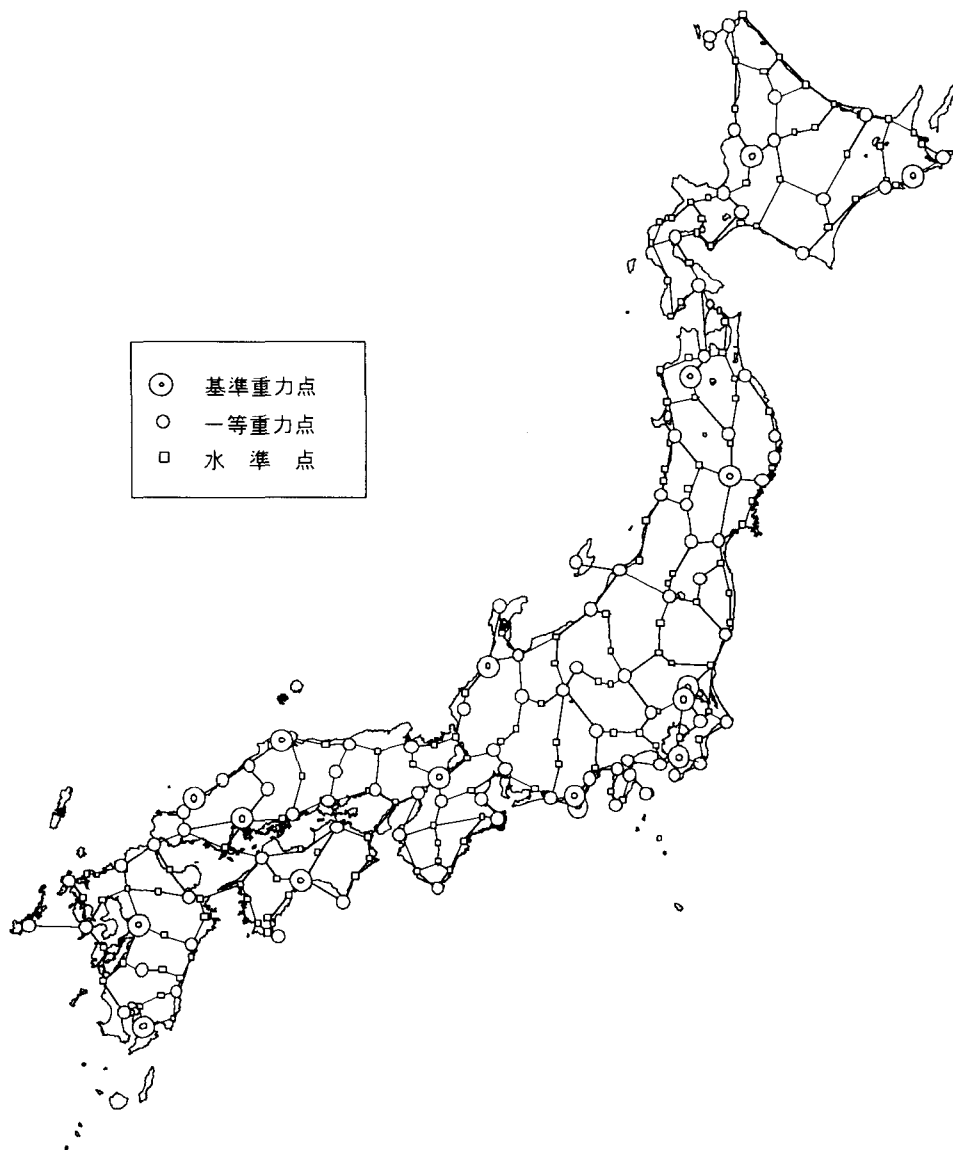


図-3 構築の骨格となった、一等重力測量網図

3. データ解析

解析は、国立天文台、名古屋大学、北海道大学と共同で行った。

解析に使用したデータは、

- 1995, 1996年に行われたFG 5 による絶対重力測定により得られ絶対重力データ（基準値）
- 重力計検定等のための長距離の重力結合データおよび絶対重力測定時に実施された、筑波FG S との結合データ（図-4）
- 東京～柿岡および筑波GS～筑波山での検定データ
- 1977年以降行われた、一等重力測量および絶対重力測定時に実施された周辺の重力点との結合データ
- 重力点移転作業時の重力結合データ

である。

解析には、上記のデータから、各重力点の重力値を見

積もるほかに、重力結合に関わった相対重力計の定数を見積もることが必要になる。

そのため、

a) 各相対重力計の定数を求めた後、各重力点の重力値を求める。

b) 各重力計の定数と重力値を同時に求める。

という2通りの処理手順がある。

a) による解析は、ドリフトやテアをきめ細かく評価することができ、過去に適用の実績がある。b) による解析はこの種の解析に一般に用いられる方法で、ドリフト等は誤差と見なされる。

重力計の定数の補正には、日本国内の重力差程度なら適用すべき一定の補正ファクターを求めればよいことが経験的にわかっている。そのため k 番目の重力計による測定点 i と j の間の重力結合について、それぞれ仮の重

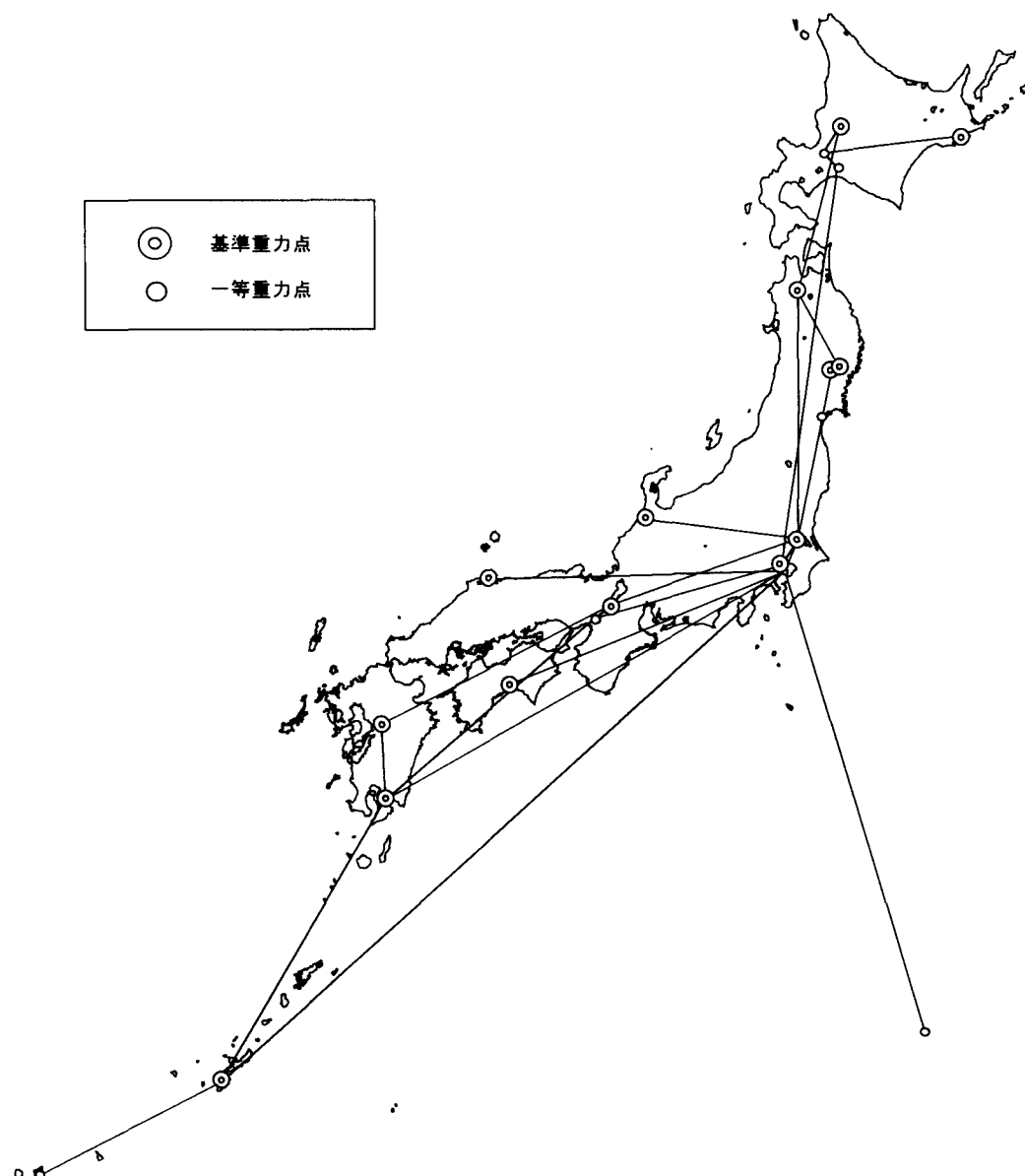


図-4 重力計の定数決定のための検定測量、および絶対重力測量時に行った筑波FGSとの重力結合

力値を設定すると、つぎの観測方程式が得られる。

$$f_k \cdot \Delta d_{i,j,k} - y_{i,j,k} - (\Delta g_i - \Delta g_j) = 0$$

ここで、 f は、重力計定数の補正ファクター、 Δd は、測定間の重力計のダイヤル値の差、 y は、与えられた定数表から求めた重力差と仮の重力値から求めた重力差との違い、 Δg は、仮の重力値の誤差である。

Δg に適切な条件を与えると、 f および Δg は最小二乗法で求めることができる。これらから、重力計の正しい定数と各測定点の重力値が求められる。

a)においては、重力差が100mGal以上の重力結合データだけを用いて重力計の定数の改定を行い、その後、ドリフトとテアもパラメータとして含む式を使って重力値を求めた。

一方、b)では、上記の観測方程式をそのまま用いた。

上記の2通りの解析手順によって求められた結果は、良い整合性を示し、最終的に手順b)の解析結果を新しい日本の重力基準網として採用した。

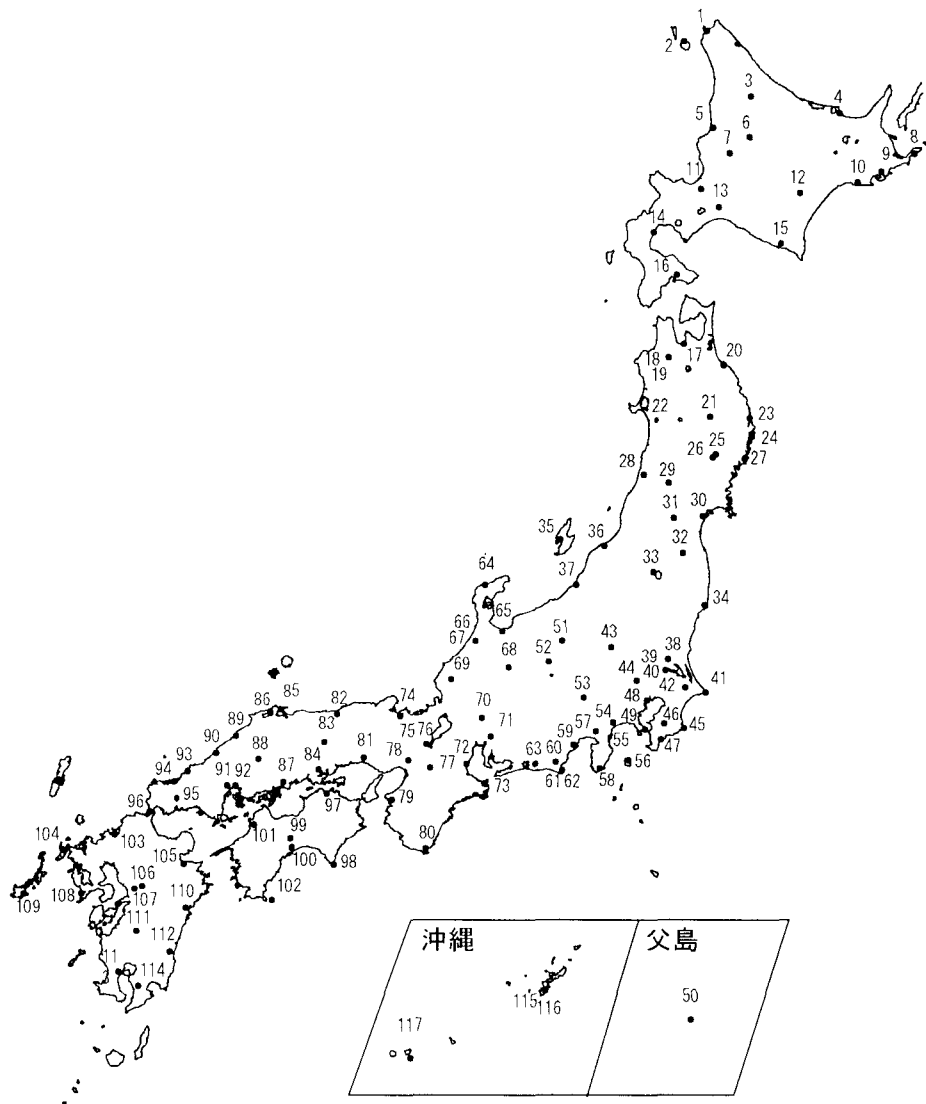
4. 日本重力基準網1996 (JGSN96)

日本重力基準網1996 (JGSN96)は、基準重力点 (FGS)、一等重力点 (GS) 合わせて117点の重力点からなる。

FGSは、今までに絶対重力測定を行った重力点である。GSは、重力結合により測定を行った重力点である。

重力基準網の精度は、約10 μ Galで、JGSN75より1桁高い精度であり、1 μ Galまでの重力値が与えられている。

図-5は、日本重力基準網1996 (JGSN96)の重力点



図－5 日本の重力基準網1996の重力点分布図

の分布図である。

表－1に、その位置と重力値を示した。図－5の黒点脇の数字は、表－1の番号と一致する。

表－1の末列にJGSN75と比較できる測点について、その重力値の差を載せた。両者の差は小さく、今まで利用されてきたJGSN75は、設定時に国内に信頼できる絶対重力値がなかったにもかかわらず精度良く構築された重力基準であったことを意味する。

おわりに

今回、JGSN75に含まれ、JGSN96には含まれない重

力点が離島部において何点かできた。今後はそれらの点についても対処していきたい。現在、国土地理院では全国50箇所までを目標に絶対重力測量を実施中である。それにより、さらに高精度な絶対重力基準網を構築して行く予定である。

謝辞

新しい重力基準網の構築には、国立天文台水沢中井新二助教授、名古屋大学理学部志知龍一助教授、北海道大学理学部山本明彦助手にご指導、ご協力を頂いた。三名の先生方に感謝する。

表-1

No.	重力点	緯 度 (N)			経 度 (E)			標 高 m	重 力 値 mGal	(新) - (旧) mGal
		d	m	s	d	m	s			
1	稚内 GS	45	24	47	141	40	55	96.153	980,622.712	-0.02
2	利尻 GS	45	14	40	141	14	6	15	980,669.698	-0.03
3	名寄 GS	44	21	44	142	27	54	96	980,574.083	-0.02
4	網走 GS	44	0	56	144	17	2	37.825	980,589.121	-0.02
5	留萌 GS	43	56	38	141	38	10	23.811	980,560.865	-0.03
6	旭川 GS	43	46	10	142	22	20	112.635	980,532.416	0.00
7	新十津川 FGS*	43	31	35	141	50	54	82.901	980,495.570	-0.02
8	根室 GS	43	19	43	145	35	22	20	980,683.193	-0.04
9	釧路 FGS	43	2	6	144	51	7	3	980,634.764	
10	釧路 GS	42	58	33	144	23	31	32.651	980,596.537	0.03
11	札幌 GS	43	4	15	141	20	40	15	980,477.549	-0.02
12	帯広 GS	42	55	12	143	13	0	39.306	980,418.149	0.03
13	千歳 GS	42	46	59	141	41	4	22	980,421.559	-0.01
14	長万部 GS	42	30	21	140	22	37	5.719	980,421.919	0.02
15	浦河 GS	42	9	35	142	46	52	28.856	980,324.778	0.00
16	函館 GS	41	48	51	140	45	26	35	980,400.510	-0.04
17	青森 GS	40	49	8	140	46	22	2.44	980,311.073	0.01
18	弘前 FGS	40	35	8	140	28	37	51	980,261.227	
19	弘前 GS	40	35	8	140	28	37	51.053	980,261.223	-0.03
20	八戸 GS	40	31	29	141	31	32	27	980,361.248	-0.05
21	盛岡 GS	39	41	45	141	10	10	153.699	980,189.669	-0.04
22	秋田 GS	39	43	36	140	8	24	27.935	980,175.759	-0.04
23	宮古 GS	39	38	39	141	58	8	45.827	980,270.332	0.00
24	大槌 GS	39	20	55	141	56	17	3.638	980,251.497	-0.03
25	江刺 FGS*	39	8	54	141	20	7	391.12	980,121.746	
26	水沢 GS	39	6	30	141	12	24	123.5	980,168.753	
27	大船渡 GS	39	3	45	141	43	6	37.115	980,210.610	-0.01
28	酒田 GS	38	54	21	139	50	49	3.463	980,071.528	-0.01
29	新庄 GS	38	45	15	140	18	52	97	980,060.114	-0.03
30	仙台 GS	38	14	54	140	50	53	140	980,065.819	-0.01
31	山形 GS	38	14	35	140	21	12	168.335	980,014.855	-0.06
32	福島 GS	37	45	19	140	28	26	67.868	980,007.916	-0.04
33	会津若松 GS	37	29	7	139	54	50	211.775	979,912.914	-0.03
34	いわき GS	36	56	41	140	54	23	4	980,008.450	-0.06
35	相川 GS	38	1	34	138	14	36	4.8	980,076.683	-0.10
36	新潟 GS	37	54	34	139	3	6	2.67	979,975.446	-0.02
37	柏崎 GS	37	21	14	138	30	44	3.335	979,961.022	-0.08
38	柿岡 FGS	36	13	46	140	11	26	32.17	979,965.943	-0.07
39	筑波 FGS*	36	6	2	140	5	25	21.273	979,951.239	
40	筑波 GS	36	6	2	140	5	25	21.89	979,951.037	-0.05
41	銚子 GS	35	44	12	140	51	42	20	979,866.877	-0.06
42	成田 GS	35	45	40	140	23	17	40	979,857.284	
43	前橋 GS	36	24	8	139	3	50	111.214	979,829.645	-0.05
44	川越 GS	35	53	2	139	31	40	7.81	979,844.939	0.03
45	勝浦 GS	35	8	52	140	18	55	12	979,815.392	-0.07
46	鹿野山 FGS*	35	15	7	139	57	33	350.78	979,690.837	

No.	重力点	緯 度 (N)			経 度 (E)			標 高 m	重 力 値 mGal	(新) - (旧) mGal
		d	m	s	d	m	s			
47	館山 GS	34	59	1	139	52	6	5.92	979,786.404	-0.04
48	羽田 GS	35	32	44	139	47	14	-2	979,759.580	-0.04
49	油壺 GS	35	9	22	139	37	7	4.771	979,774.624	-0.03
50	父島 GS	27	5	22	142	11	17	2	979,439.575	-0.09
51	松代 GS	36	32	26	138	12	26	408	979,774.085	-0.06
52	松本 GS	36	14	37	137	58	25	610.96	979,654.032	-0.03
53	甲府 GS	35	39	51	138	33	26	273	979,705.902	-0.02
54	箱根 GS	35	14	28	139	3	46	426.9	979,709.245	-0.05
55	網代 GS	35	2	36	139	5	43	67.2	979,795.508	-0.09
56	大島 GS	34	44	48	139	21	58	76	979,829.839	-0.02
57	三島 GS	35	6	39	138	55	43	21	979,786.522	-0.08
58	石廊崎 GS	34	36	2	138	50	44	40	979,774.339	-0.06
59	静岡 GS	34	58	22	138	24	24	10	979,741.402	-0.04
60	掛川 FGS*	34	45	24	138	1	55	60.259	979,725.540	
61	御前崎 GS	34	36	5	138	12	59	45.85	979,742.260	-0.04
62	御前崎 FGS	34	36	2	138	13	44	6	979,741.041	
63	浜松 GS	34	42	25	137	43	21	33.06	979,734.514	-0.07
64	輪島 GS	37	24	11	136	53	2	2.9	979,982.217	-0.04
65	富山 GS	36	42	22	137	12	20	9.41	979,867.448	-0.06
66	金沢 FGS	36	32	32	136	42	41	106	979,841.609	
67	金沢 GS	36	32	34	136	42	40	106	979,841.633	-0.08
68	高山 GS	36	9	9	137	15	22	560.281	979,685.012	-0.07
69	福井 GS	36	3	8	136	13	32	9.7	979,838.135	-0.05
70	岐阜 GS	35	23	50	136	45	56	12.114	979,745.793	-0.05
71	名古屋 GS	35	9	6	136	58	19	46.194	979,732.464	-0.08
72	津 GS	34	43	48	136	31	20	0.1	979,714.997	-0.08
73	鳥羽 GS	34	27	44	136	51	2	15	979,730.555	-0.03
74	舞鶴 GS	35	26	53	135	19	16	2.73	979,794.898	-0.08
75	京都 C*	35	1	33	135	47	11	59.78	979,707.671	-0.08
76	京都 FGS	35	1	33	135	47	11	59.78	979,707.671	
77	奈良 GS	34	41	28	135	49	53	104.873	979,704.669	-0.05
78	伊丹 GS	34	47	19	135	26	33	13.433	979,703.431	-0.05
79	和歌山 GS	34	13	34	135	10	0	13.915	979,689.155	-0.05
80	潮岬 GS	33	26	52	135	45	49	74.161	979,726.825	-0.08
81	姫路 GS	34	50	11	134	40	25	38.966	979,730.074	-0.09
82	鳥取 GS	35	29	5	134	14	27	7.921	979,790.386	-0.06
83	津山 GS	35	3	41	134	0	44	146.396	979,719.714	-0.09
84	岡山 GS	34	39	27	133	55	8	-0.7	979,711.454	-0.09
85	境港 GS	35	32	29	133	14	15	2	979,807.980	-0.09
86	松江 FGS	35	29	2	133	4	9	10	979,794.854	
87	福山 GS	34	26	37	133	15	1	1.921	979,689.339	-0.06
88	三次 GS	34	48	9	132	51	15	156	979,676.876	-0.10
89	大田 GS	35	7	9	132	27	11	110.19	979,744.717	-0.06
90	浜田 GS	34	53	36	132	4	24	19.568	979,747.654	-0.06
91	広島 FGS*	34	28	43	132	23	55	230.69	979,619.111	
92	広島 GS	34	22	9	132	28	9	0.976	979,658.589	-0.07
93	須佐 FGS*	34	37	28	131	36	26	3.021	979,729.499	

No.	重 力 点	緯 度 (N)			経 度 (E)			標 高 m	重 力 値 mGal	(新) - (旧) mGal
		d	m	s	d	m	s			
94	萩 GS	34	24	46	131	23	37	6.05	979,687.387	-0.03
95	山口 GS	34	9	26	131	27	25	16.939	979,658.816	-0.06
96	下関 GS	33	56	43	130	55	44	0.055	979,675.295	-0.06
97	高松 GS	34	18	54	134	3	25	9.276	979,698.776	0.01
98	室戸 GS	33	14	55	134	10	47	186.173	979,629.440	-0.07
99	高知 FGS	33	40	24	133	31	10	82	979,470.579	
100	高知 GS	33	33	14	133	32	11	-0.92	979,625.623	-0.10
101	松山 GS	33	50	26	132	46	49	33.563	979,595.323	-0.05
102	足摺 GS	32	43	15	133	0	42	70	979,609.449	-0.06
103	福岡 GS	33	35	41	130	22	40	31.3	979,628.559	-0.03
104	平戸 GS	33	21	27	129	33	14	50	979,605.755	0.01
105	大分 GS	33	13	59	131	37	19	5.478	979,541.698	0.03
106	熊本 FGS*	32	49	55	130	51	25	172.07	979,511.671	
107	熊本 GS	32	48	50	130	43	49	22.76	979,551.624	0.00
108	長崎 GS	32	43	53	129	52	14	25	979,588.018	-0.01
109	福江 GS	32	41	30	128	49	46	26	979,574.135	-0.03
110	延岡 GS	32	34	41	131	39	37	20.288	979,496.256	0.00
111	人吉 GS	32	12	54	130	45	27	146.47	979,457.834	0.01
112	宮崎 GS	31	55	9	131	25	4	6.429	979,428.050	-0.03
113	鹿児島 GS	31	33	6	130	33	2	5	979,471.200	0.02
114	鹿屋 FGS	31	25	19	130	52	51	101.084	979,443.617	0.01
115	那覇 FGS	26	12	13	127	41	19	25	979,095.891	
116	那覇 GS	26	12	13	127	41	19	25	979,095.925	0.01
117	石垣島 GS	24	19	52	124	9	49	10	979,006.084	0.02

※ 右肩に *のあるFGSは、FG5による絶対重力測定が行われた点である。

参 考 文 献

- 1) 国土地理院 (1975): 国際重力基準網の完成と日本の重力値, 国土地理院時報, 47, 1-11
- 2) 国土地理院 (1976): 日本重力基準網1975の設定, 測地学会誌, 22 (2), 65-76
- 3) 黒石裕樹 (1995): わが国の基準重力網, 月刊 地球/号外No.11, 69-74
- 4) 国土地理院 (1996): 可搬型絶対重力計FG 5による南極における重力測定, 国土地理院時報, 85, 18-22
- 5) 国土地理院 (1996): 南西太平洋における海面変動と重力変化に関する研究, 国土地理院技術資料, A・1-No. 183, 11-14
- 6) Hiromichi Suzuki (1974), Establishment of Gravimetric Network in Japan, Bulletin of The Geographical Survey Institute, 20, 1-150
- 7) Y. Kuroishi, M. Murakami and M. Kaidzu (1992): Improvement of the Gravity Network with Absolute Gravity Measurements, J. Geod. Soc. Japan, 38, 63-74
- 8) S. Nakai, K. Yamaguchi, K. Nitta, H. Yamamoto, K. Matsuo, M. Machida, M. Murakami, M. Ishihara, R. Shichi and A. Yamamoto (1997): Data Processing for the Japan Gravity Standardization Net 1996, submitted to proceedings of the GraGeoMar96
- 9) K. Yamaguchi, K. Nitta, H. Yamamoto, K. Matsuo, M. Machida, M. Murakami, M. Ishihara, S. Nakai, R. Shichi and A. Yamamoto (1997): Establishment of the Japan Gravity Standardization Net 1996, submitted to proceedings of the GraGeoMar96