

糸魚川-静岡構造線の重力調査 (IV)

—GPS 支援下での松本盆地東縁断層延長部の重力測定—

地震研究所 { 大久保 修平
長 沢 工
村 田 一 郎
安 藤 潤

(平成 2 年 12 月 12 日受理)

要 旨

松本盆地東縁断層の周辺で 123 点の重力測定を実施した。観測点の水平位置、標高の決定にトランスロケーション GPS 法が使えることを試験観測を通じて検証した。また実際にこの GPS 技術を重力測量の支援に用い、3 次元座標未知の重力測定点の位置を決定することに成功した。同断層近傍ですでに重力値の得られている測定点をあわせて約 600 点での高密度重力測定から、より精確なブーゲー異常図を作成した。得られたブーゲー異常データから、松本盆地東縁断層の活動様式が逆断層/右横ずれ型であることが推定された。

1. はじめに

糸魚川-静岡構造線の重力調査の第 1 報 (萩原ほか, 1986) において松本盆地東縁断層が逆断層である可能性が示された。続く第 3 報 (大久保ほか, 1990) では逆断層運動のパラメータ (長さ, 幅, 走向, ディップ, 累積変位ベクトル) などを重力異常データから推定することに成功している。

本研究では GPS トランスロケーション法という新しい測量技術を用いて、松本盆地東縁断層の重力異常の研究をさらに推し進めた。その目的とするところは以下の 2 点である。

- ・萩原ほか (1986) および大久保ほか (1990) で未調査の松本盆地東縁断層の南北延長部について重力測定をすすめ、断層周辺でのより均質な測定点分布の実現をめざす。
- ・とくに測量成果の乏しい山岳部においても、測定点の座標を 2m 程度の精度で自力で決定し、重力異常測定点の空白域を狭める。

このような努力の結果、ほぼ均等な分布で測定点が断層をおおうようになり、より信頼できる重力異常図が作成できた。

2. 重力調査の概要

ブーゲー異常の解析範囲は $36^{\circ}10' \sim 36^{\circ}35' \text{N}$, $137^{\circ}45' \sim 138^{\circ}00' \text{E}$ とした。今回の調査ではこの解析範囲よりもやや広い範囲 $36^{\circ}05' \sim 36^{\circ}40' \text{N}$, $137^{\circ}40' \sim 138^{\circ}05' \text{E}$ をとっ

て、この領域内の 123 点で実際に重力測定をおこなった。この範囲内には名古屋大学理学部 (YAMAMOTO *et al.*, 1982) によって 165 点, 萩原ほか (1986) によって 181 点, 大久保ほか (1990) によって 189 点の重力測定点がすでにある。解析範囲よりも測定範囲を広くとったために最終的なブーゲー異常図は境界近傍で生じやすい数値的な歪から免れることができた。重力測定点には主として 2 万 5 千分の 1 地形図及び 1 万分の 1 の市町村図に記入されている独標点を採用した。その他, 国土地理院の水準点および三角点においても測定した。また後述するように, いくつかの測定点で GPS 測位技術を用いて自力で位置決定をしたことは特筆に値する。

Fig. 1 に今回測定した重力点および大久保ほか (1990) の測定点分布を示す。図中には名古屋大学による測定点および萩原ほか (1986) の測定点も含まれている。また Fig. 1 には

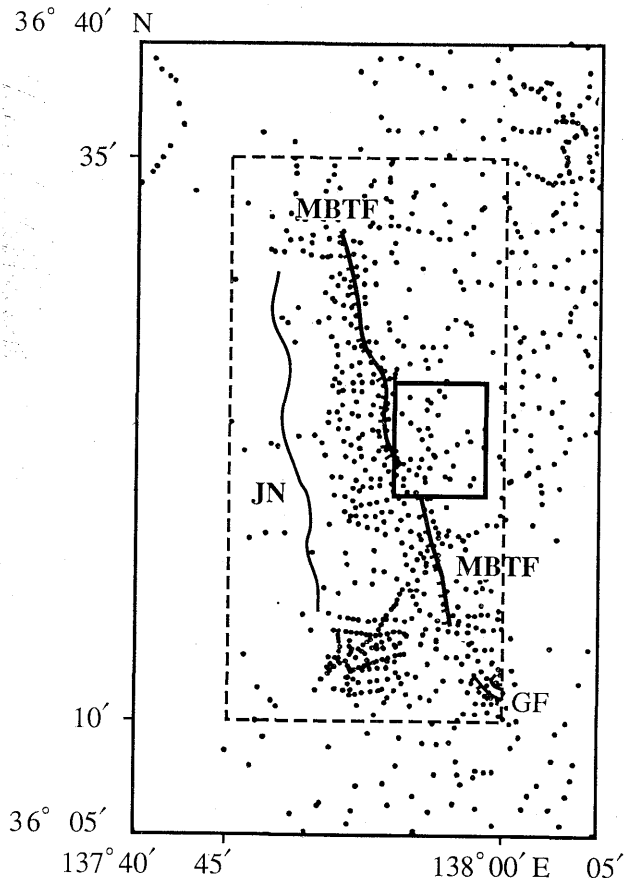


Fig. 1. Location of gravity points with active faults. MBTF, JN and GF stand for Matsumoto Bonchi Toen Fault, Jonen Fault and Gofukuji Fault, respectively. Dotted rectangle indicates the area for analysis. The innermost rectangle shows the translocation GPS test field.

活断層研究会(1980)による確実度 (I) および (II) の断層が記入されている。名称はすべて活断層研究会による。

測定は2班に分かれて、1990年9月に同時に実施した。第一班は南部を担当し(測定点 SF097~SF146)、第二班は北部を担当した(測定点 NF095~NF171)。測定の都合上、重力基準点として第一班は穂高町にある国土地理院一等水準点 BM2882 (標高 534.37 m, 重力値 979659.81 mgal) を選んだ。第二班は松川村細野神社にある BM2885 (標高 573.90 m, 重力値 979659.62 mgal) を選んだ。異なる重力基準点に準拠していても、二つの班の測定結果には 0.1 mgal をこえるような不整合を生じないことは大久保ほか(1990)で確認済みである。

使用重力計は第一班はラコステ G875, 第二班はラコステ G581 である。毎日の測定は各班の基準点から出発し、その基準点に戻るよう実施された。一日のドリフト量は 0.04 mgal をこえることはなかった。

名古屋大学の重力データと本測定データとを比較する意味で、再測定を実施した5点について重力値を Table 1 に列挙する。両測定値の差は最大でも 0.26 mgal であり、良く一致している。

Table 2 に重力点番号, 重力点の緯度, 経度, 標高, 重力値, 地形補正值およびブーゲー異常値を与える。名古屋大学の165点の重力測定のうち、今回再測定を実施しなかった160点については、地形補正のみ再計算した。しかし Table 2 には収録していない。なお Table 2 において、SF113, SF114, SF118 および NF139 は欠番となっている。

Table 1. Comparison between gravity values observed by Nagoya University (NG) and the Earthquake Research Institute (ERI).

Benchmark		Gravity		Difference
ERI	NG	g(ERI) (mgal)	g(NG)(mgal)	g(ERI)-g(NG) (mgal)
SF107	2081	979684.48	979684.51	-0.03
SF110	1865	979635.04	979635.16	-0.12
SF112	1867	979629.50	979629.63	-0.13
NF112	2167	979665.11	979665.24	-0.13
NF171	2154	979650.60	979650.86	-0.26

3. GPS 測位技術の支援下の重力測定

3.1. GPS 技術を利用する必要性

いうまでもないことであるが、重力異常を算出するためには、重力測定点において標高および水平位置があらかじめ求められていなければならない。したがって標高既知点で重力を測定し、重力異常を算出することが多い。しかしながら、標高既知点が近傍に存在しなかったり、たとえ存在してもその点の到達が困難な場合がある。とくに山岳域においては、独標点が道路から大きくはずれていたりするために3次元座標のわかった場所に到達することがきわめて困難な場合が多い。その結果、解析対象地域内に重力測定の空白域が生じることがあった。

Table 2. Gravity data.

Point No.	Lat (deg min)	Long (deg min)	H (m)	G (mgal)	TC (mgal)	DG (mgal)	Note
SF097	36 24.09	137 55.92	537.4	979684.19	4.38	-57.97	TP
SF098	36 22.93	137 58.88	687.1	979666.51	4.25	-44.46	
SF099	36 24.62	137 56.37	498.0	979695.18	5.62	-54.30	
SF100	36 24.23	137 55.74	515.0	979688.50	3.67	-59.00	
SF101	36 21.30	137 57.18	762.0	979637.29	3.94	-56.82	GPS
SF102	36 09.98	137 57.52	635.8	979637.35	2.31	-67.11	
SF103	36 11.24	137 58.05	609.5	979642.46	2.53	-68.79	
SF104	36 10.26	137 58.47	634.7	979636.11	2.71	-68.57	
SF105	36 10.34	137 59.15	670.4	979631.21	3.01	-66.21	
SF106	36 24.37	137 56.65	515.0	979691.32	7.60	-52.45	
SF107	36 23.56	137 56.33	529.0	979684.48	6.55	-66.40	
SF108	36 20.45	137 58.10	602.0	979671.39	2.91	-54.20	GPS
SF109	36 09.66	137 57.37	644.1	979636.40	2.24	-66.02	
SF110	36 09.00	137 57.06	659.2	979635.04	2.19	-63.50	BM-2869
SF111	36 08.97	137 55.62	679.1	979631.56	2.19	-62.99	
SF112	36 09.20	137 54.35	691.0	979629.50	2.41	-62.81	
SF115	36 14.63	137 58.06	614.5	979651.19	2.54	-63.93	
SF116	36 15.03	137 57.48	743.0	979621.27	5.79	-65.74	TP
SF117	36 14.11	137 58.48	592.2	979655.96	2.65	-62.73	BM-3702
SF119	36 12.16	137 58.77	604.0	979647.39	3.04	-65.77	
SF120	36 11.87	137 59.09	617.0	979645.59	3.72	-63.89	
SF121	36 12.57	137 59.39	638.2	979647.09	3.70	-59.22	TP
SF122	36 12.51	137 59.35	606.8	979652.92	3.98	-59.25	
SF123	36 12.26	137 59.72	621.1	979650.83	4.92	-57.20	
SF124	36 12.01	137 59.82	651.2	979643.74	5.11	-57.78	
SF125	36 11.70	137 59.63	836.0	979602.74	6.57	-60.29	TP
SF126	36 11.08	137 58.95	636.2	979637.77	2.97	-67.53	
SF127	36 11.26	137 58.66	620.0	979640.34	2.83	-68.57	
SF128	36 11.55	137 59.09	625.0	979642.47	3.53	-65.17	
SF129	36 10.90	137 59.72	668.4	979634.82	3.83	-62.98	
SF130	36 10.99	137 59.35	651.0	979636.98	3.32	-64.92	
SF131	36 11.22	137 59.98	721.7	979627.89	4.04	-59.61	
SF132	36 11.25	137 59.21	634.4	979639.18	3.44	-66.25	
SF133	36 08.16	137 57.43	676.7	979632.32	2.25	-61.49	
SF134	36 07.59	137 57.52	697.0	979630.00	2.16	-59.07	
SF135	36 07.48	137 58.39	687.9	979631.04	2.59	-59.24	
SF136	36 07.76	137 58.50	692.8	979629.43	2.59	-60.28	
SF137	36 07.69	137 58.96	723.5	979623.70	2.82	-59.60	
SF138	36 07.71	137 59.41	774.2	979613.61	3.08	-59.42	
SF139	36 10.72	137 58.93	646.4	979635.23	2.91	-67.60	
SF140	36 10.73	137 59.38	666.3	979633.26	3.23	-65.32	
SF141	36 10.17	137 59.78	724.8	979623.38	3.49	-62.55	
SF142	36 10.05	138 00.00	751.4	979617.42	3.79	-62.78	
SF143	36 09.83	138 00.34	822.7	979603.79	4.22	-61.54	
SF144	36 09.96	138 00.74	846.0	979602.12	4.92	-58.08	
SF145	36 10.87	138 00.46	756.7	979621.77	4.64	-57.71	
SF146	36 10.55	138 00.21	745.0	979621.14	4.25	-60.58	
NF095	36 25.06	137 56.77	499.0	979697.88	6.43	-51.22	
NF096	36 25.63	137 55.75	500.2	979696.06	4.01	-56.05	
NF097	36 26.57	137 56.69	506.7	979702.08	4.64	-49.46	BM-5118

(to be continued)

Table 2. (continued)

Point No.	Lat (deg min)	Long (deg min)	H (m)	G (mgal)	TC (mgal)	DG (mgal)	Note
NF098	36 27.74	137 57.21	480.8	979708.14	7.27	-47.58	
NF099	36 27.61	137 57.79	478.9	979710.15	6.13	-46.90	
NF100	36 27.14	137 58.07	486.3	979708.47	6.25	-46.32	
NF101	36 29.42	137 58.41	716.0	979668.32	4.36	-46.16	
NF102	36 29.30	137 59.11	937.0	979621.53	5.73	-47.66	
NF103	36 29.10	137 57.60	465.0	979716.75	7.13	-44.20	
NF104	36 29.41	137 57.45	494.0	979712.86	5.38	-44.54	
NF105	36 29.89	137 57.13	461.0	979717.58	9.57	-42.86	
NF106	36 30.66	137 58.12	464.0	979721.44	6.24	-42.84	
NF107	36 32.77	137 58.71	443.1	979733.67	5.68	-38.35	
NF108	36 34.27	137 58.59	547.0	979713.98	6.18	-39.13	
NF109	36 31.59	137 57.72	452.8	979726.38	6.80	-40.91	
NF110	36 32.90	137 56.56	607.0	979694.21	5.63	-45.60	
NF111	36 31.32	137 56.25	757.7	979662.15	3.80	-47.38	
NF112	36 31.68	137 55.13	728.3	979665.11	5.78	-48.78	BM-4310
NF113	36 31.91	137 54.03	769.5	979652.22	4.34	-55.28	
NF114	36 31.13	137 53.89	968.8	979609.39	3.74	-58.13	
NF115	36 30.26	137 53.94	923.0	979611.65	4.18	-63.24	
NF116	36 32.49	137 54.76	910.0	979631.33	4.05	-49.48	
NF117	36 33.43	137 54.98	704.0	979675.93	5.46	-45.61	
NF118	36 32.32	137 53.65	795.7	979645.95	2.98	-58.32	
NF119	36 31.84	137 52.98	841.9	979630.22	3.16	-64.03	
NF120	36 32.05	137 52.62	898.0	979619.06	2.57	-64.98	
NF121	36 31.89	137 52.49	896.4	979617.53	2.61	-66.55	
NF122	36 33.01	137 53.62	813.6	979644.73	3.21	-56.75	
NF123	36 33.88	137 53.58	849.3	979640.59	4.02	-54.27	
NF124	36 34.68	137 53.65	926.9	979629.70	3.00	-51.97	
NF125	36 33.71	137 52.55	882.0	979628.00	2.85	-61.32	
NF126	36 33.25	137 52.18	896.0	979624.62	2.84	-61.27	
NF127	36 32.65	137 51.98	879.0	979626.17	2.98	-62.08	
NF128	36 30.51	137 52.17	743.0	979645.40	4.59	-65.08	
NF129	36 31.15	137 50.83	759.2	979650.86	3.50	-58.43	
NF130	36 31.65	137 51.05	755.9	979651.06	3.62	-59.48	BM-2893
NF131	36 32.18	137 50.72	765.0	979652.17	5.03	-55.92	
NF132	36 32.71	137 50.71	767.1	979653.32	5.08	-55.07	BM-2894
NF133	36 33.93	137 50.20	765.0	979664.18	8.53	-42.94	
NF134	36 32.66	137 50.34	765.0	979657.83	7.01	-48.98	
NF135	36 32.92	137 49.58	1042.3	979606.37	6.23	-46.69	
NF136	36 32.22	137 49.93	1078.9	979587.64	13.32	-50.07	TP
NF137	36 31.85	137 50.06	795.0	979649.15	6.20	-51.36	
NF138	36 32.22	137 48.51	861.4	979636.74	6.34	-51.02	
NF140	36 33.32	137 48.42	922.0	979627.89	8.63	-47.17	
NF141	36 34.23	137 48.49	956.0	979623.72	10.81	-43.73	
NF142	36 31.28	137 48.69	816.0	979643.64	5.75	-52.34	
NF143	36 30.69	137 47.82	817.7	979639.01	9.63	-51.91	
NF144	36 28.26	137 51.53	688.0	979653.65	3.46	-65.61	
NF145	36 28.35	137 51.09	695.7	979653.92	3.72	-63.69	
NF146	36 28.65	137 50.46	708.4	979655.39	4.43	-59.43	
NF147	36 28.90	137 50.07	721.2	979654.71	6.08	-56.28	
NF148	36 29.58	137 50.41	734.1	979653.56	4.20	-57.74	

(to be continued)

Table 2. (continued)

Point No.	Lat (deg min)	Long (deg min)	H (m)	G (mgal)	TC (mgal)	DG (mgal)	Note
NF149	36 29.23	137 50.75	721.7	979653.77	3.86	-59.81	TP
NF150	36 29.74	137 50.84	733.2	979652.38	3.65	-59.87	
NF151	36 29.50	137 51.10	719.0	979652.95	3.53	-61.89	
NF152	36 29.17	137 51.42	712.7	979651.74	3.36	-64.04	TP
NF153	36 28.44	137 52.26	684.1	979652.29	4.04	-67.42	
NF154	36 28.72	137 52.23	692.0	979652.41	3.72	-66.46	
NF155	36 29.30	137 52.20	717.0	979649.41	3.36	-65.70	
NF156	36 29.90	137 52.25	721.0	979648.77	4.06	-65.72	
NF157	36 30.04	137 51.77	719.0	979652.02	3.34	-63.78	
NF158	36 30.63	137 51.61	729.9	979651.54	3.38	-62.92	
NF159	36 30.53	137 50.87	747.1	979651.24	3.49	-59.56	
NF160	36 30.58	137 49.28	779.3	979648.43	5.48	-54.08	
NF161	36 30.50	137 50.16	764.0	979650.41	4.03	-56.46	
NF162	36 31.30	137 50.25	782.9	979649.32	3.85	-55.14	TP
NF163	36 31.47	137 49.36	815.0	979644.82	4.65	-52.73	
NF164	36 34.90	137 48.37	987.0	979617.86	13.42	-41.81	
NF165	36 34.56	137 48.46	972.0	979621.22	11.28	-43.07	
NF166	36 32.43	137 48.18	869.0	979633.18	7.97	-51.74	
NF167	36 30.79	137 47.10	907.0	979620.13	10.63	-52.24	
NF168	36 34.20	137 50.51	774.6	979662.33	7.12	-44.68	
NF169	36 33.15	137 53.37	816.0	979641.75	3.12	-59.55	
NF170	36 31.79	137 54.57	748.1	979660.22	3.93	-51.76	
NF171	36 30.30	137 59.53	817.0	979650.60	4.08	-45.43	

Lat: latitude **Long:** longitude
H: height above sealevel **G:** gravity
TC: terrain correction **DG:** Bouguer anomaly
BM: bench mark **TP:** triangulation point
GPS: positioning with translocation GPS

測定の空白域をなくし、より均質な測点分布を実現しようとする、どうしても標高ならびに水平位置を自力で決定する必要に迫られる。これに従来の測量技術で対応しようとする、と多大の費用、時間、人的資源が必要であった。幸い、最近になって GPS という宇宙技術をもちいて、簡便かつ短時間に 3 次元位置決定ができようになってきた。実際に駒沢・杉原 (1990) は GPS による支援 (重力測定点の位置決定) をうけつつ重力測定をおこなっている。以下では、GPS 技術が重力異常研究に必要な精度およびその他の要件を満たしうるかどうか試験観測を通じて検証する。

3.2. トランスロケーション GPS 測位の概念

GPS (Global Positioning System) は高度 20000 km の上空を運動する約 20 個の人工衛星から発射される 2 周波の電波 (1.5 GHz および 1.2 GHz) を受信して、電波の伝搬時間及び位相から、受信点の位置を求めるシステムである。現在、GPS 技術にはいくつかのヴァリエーションがあり、その各々に特徴がある (Table 3)。1 mgal の精度の重力異常を求めることを目的として GPS で重力点の位置を決定する場合には、次の 4 条件を満たす技法を選択しなければならない。

1. 衛星電波の受信が 10 分間程度の短時間でも結果がだせること、

Table 3. Characteristics of various GPS techniques. T_{\min} , N_{rec} stand for minimum observation time and number of GPS receivers required, respectively.

GPS technique	T_{\min}	Accuracy	N_{rec}	Special Requirements
Single point GPS	<1sec	10-30m	1	
Translocation GPS	<10min	1-3m	≥ 2	Separation of receivers <50km
Kinematic GPS	<1min	1ppm or better	≥ 2	No cycle slip allowed during transportation
Static Interferometry	>1hour	1ppm or better	≥ 2	
Rapid Static GPS	<10min	1ppm or better	≥ 2	Number of Satellites ≥ 6 for single occupation. Same site must be reoccupied in 1-2 hours when only 4 satellites are observable.

2. 測定精度は鉛直方向に 2 m, 水平方向に 10 m 以内であること,
3. 観測点間を移動中には電波の受信が途絶えてもかまわないこと,
4. 観測すべき GPS 衛星の数として 5 個以上を要求しないこと.

重力測定自体の所要時間が 5 ないし 10 分であることを考慮すると, 作業を効率よく進めるために上述の条件 (1) が要請される. またブーゲー勾配は通常 0.2 mgal/m であるので重力異常図に 1 mgal のコンターを引くために条件 (2) が課せられる. さらに山岳地域では立木, 急斜面など衛星電波受信上, 障害が多いので, 条件 (3) をクリアーすることが必要となる. また将来 GPS 衛星が計画どおりに完全に配備されたとしても, 高度角 15° 以上に 5 衛星が見える時間帯は限られたものである. しかも山岳地域での観測では障害物が多いということを勘案すると 5 衛星以上の観測を要求する方法は実用的とはいえない. このような事情から条件 (4) が必要となる.

前述の駒沢・杉原 (1990) は一点測位 GPS で重力測定点の水平位置を数十 m 程度の精度で決定し, 標高は地形図の等高線から読み取った値と気圧測高値を勘案して決定している. この方法の難点は標高の精度がどうしても粗くなることであり, 勾配の急な山岳域ではこうして得られた標高値に 5 ないし 10 m の誤差が含まれると考えられる. したがって, われわれの目的とする精度 1 mgal の重力異常の研究には一点測位 GPS では位置精度が不十分である.

ここであらためて Table 3 を検討すると, 前述の 3 条件をすべて満たすのはトランスロケーション GPS しかないことがわかる. 条件 (4) を緩めれば Rapid Static GPS も有力な方法といえるけれど (FREI and BEUTLER, 1990), 日本国内での Rapid Static GPS の実験結果をみると基線長が 800 m の 2 点間の測位で, 誤差が数 m になる場合もある (日立造船, 私信). 現時点ではまだ, Rapid Static GPS は実用段階というよりは研究開発段階というべきであろう. このようなわけで, 以下ではわれわれはもっぱらトランスロケーション GPS についてのみ考察をすすめることにする.

さてトランスロケーション法自体にも細かいヴァリエーションがあるが, 本研究では 3 次元トランスロケーション法を採用した. 詳しい説明は解説テキスト (日本測量協会編著, 1986) にゆずることとし, 以下では簡単にトランスロケーション GPS 測位の概念を説明

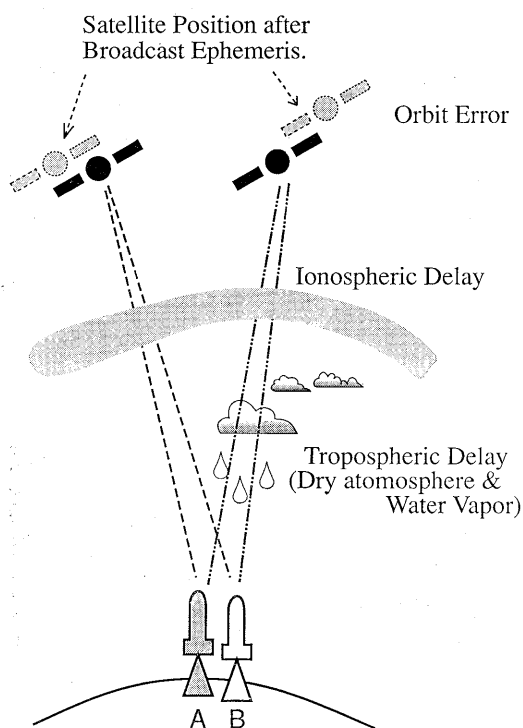


Fig. 2. Principle of the translocation GPS positioning.

する。

この方法では2台の受信機を使用し、そのうちの1台を座標の既知点A(例えば三角点)に、残りの1台を未知点Bに配置する。2台のGPS受信機は同一時間帯に、同一衛星群を観測するものとする(Fig. 2)。衛星軌道は既知であるので4衛星以上が観測されれば、電波伝搬遅延時間から各観測点の3次元座標と受信機の時計のオフセットがもとめられる。こうして一点測位で求めた点A、Bの座標は、観測時間帯の選び方によって100m程度ばらつくのが常である。このばらつきはさまざまな誤差要因によってもたらされるものであり、それらには

- ・伝搬媒質(電離層、対流圏)屈折率の時間的、空間的な揺らぎ、
- ・衛星軌道の誤差

などがある。

ここで未知点Bと既知点Aが近接しているとしよう(数十km程度以内)。衛星高度が約20000kmと高いので、点A、Bで同時に観測される衛星から各点への電波伝搬経路がほとんど同じであることに注意しよう(Fig. 2)。このとき上述の要因は点A、Bの一点測位座標にほとんど“共通”の系統誤差をもたらすはずである。したがってA、B2点の座標値の差をとって、A点に対するB点の相対位置を考えると、前述の系統誤差の相当部分が相殺しあうことになる。かくして高精度のA-B間の相対座標値が得られる。一方、

従来の三角測量などから A 点の絶対座標は既知なので、最終的に B 点の 3 次元絶対座標が求められることになる。

3.3. トランスロケーション GPS 法の測位精度の検証

トランスロケーション法を実際に適用して未知点の座標を決定する前に、その測位精度を十分に検討しておく必要がある。

理論的考察から、従来より C/A コードを使用したトランスロケーション法の測位精度は水平方向 1~2m、鉛直方向 3~4m と見積られてきた (日本測量協会 1986)。また、木股ほか (1990) は定常的に GPS 観測を続けている複数の固定点にトランスロケーション法を繰り返し適用して、得られた相対座標値の再現性を調べている。その結果は前述の測位精度の見積りを裏付けるものであった。

本研究では、より“直接的な”精度の見積りをおこなうために国土地理院の三角点間について GPS 測量を実施し、その結果を国土地理院の従来測量の成果と比較することとした。使用した GPS 受信機は Wild-Magnavox 社製の WM-102 である。また擬似距離 (電波伝搬遅延時間×光速) は C/A コードによって得られたものを用い、解析ソフトウェアにはメーカー提供の Pops (Ver. 3.0) によることとした。

GPS 観測は日本時間 1990 年 9 月 18 日、19 日の 2 日間の 12 時から 14 時の 2 時間にわたっておこなった。9 月中旬の日本付近では、同時に 4 衛星が観測できる昼間の時間帯が 3 時間ほどしかなく、しかも天球上での衛星の幾何学配置が良好な (PDOP<5) 時間は上述の 2 時間に限定されていた。合衆国政府が軌道情報、タイムコードを意図的に劣化させる Selective Availability については、この時期には幸運にも解除されていた。

その間、三角点に設置した固定局では無人で自動観測を続け、移動局側は各観測点で 20 分程度の GPS 受信をおこなっては、新たな点へ移動するという方式をとった。このようにして、4 対の三角点ペアについて結果を得た。Fig. 3 にそれらの位置関係を、また

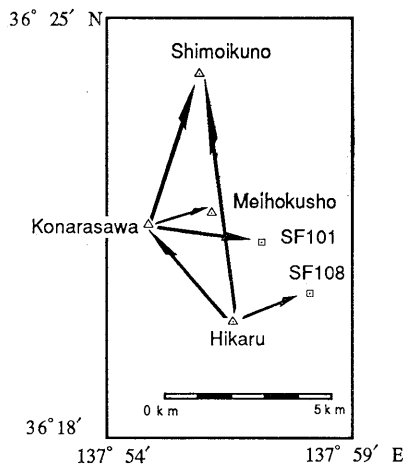


Fig. 3. Location of the translocation GPS points.

Table 4. Coordinates of triangulation points determined with GPS. Results after Geographical Survey Institute, Japan with conventional surveying techniques are shown in the parentheses for comparison. Arrows in the leftmost column are drawn from the fixed reference points to the mobile GPS points. Baseline length is shown to the right of each arrow.

Point	Positioning results.	Difference
Shimoikuno 4T	36° 24' 05.09"(05.11")N	-0.6m
↑ 4.9 km	137° 55' 55.15"(55.13")E	+0.5m
Konarasawa 3T	538.39(537.39)m	+1.0m
Meihokusho 4T	36° 21' 41.85"(41.88")N	-0.9m
→ 2.0 km	137° 56' 10.57"(10.58")E	-0.3m
Konarasawa 3T	520.61(521.61)m	-1.0m
Shimoikuno 4T	36° 24' 05.10"(05.11")N	-0.3m
↑ 7.7 km	137° 55' 55.20"(55.13")E	+1.7m
Hikaru 3T	537.45(537.39)m	+0.1m
Konarasawa 3T	36° 21' 34.59"(34.61")N	+0.6m
↖ 4.0 km	137° 54' 50.68"(50.70")E	-0.5m
Hikaru 3T	694.72(695.00)m	-0.3m

Table 4 に GPS 測量と従来測量成果との比較を示す。この表から明らかなように、トランスロケーション GPS 法と従来測量によるくいちがいは緯度方向に 0.03" (0.9 m) 以内、経度方向に 0.07" (1.7 m) 以内、鉛直方向に 1.0 m 以内におさまっている。したがってトランスロケーション GPS 法は水平方向、鉛直方向ともに 2 m より良い精度 (Accuracy) を持っていることが検証された。

3.4. トランスロケーション GPS 法による未知観測点の位置決定

前述の精度検証実験の間、GPS 移動局は座標未知点でも観測を行った。測点番号 SF101 および SF108 の 2 点がそれである。この 2 点は山岳域にあり、付近には容易に到達できる標高既知点が存在しない。その結果、解析対象地域に重力測定 of 空白域が生じていた。今回、この 2 点で GPS によって位置決定をおこない、同時に重力測定も実施した結果、より均質な測点分布を実現することができた。

トランスロケーション GPS 法で決定した水平位置と、現地付近の地形を 1/10000 地形図と対照して推定した水平位置とは誤差の範囲 (5 m) で一致していた。また GPS で求めた標高値は、10 m おきにひかれた等高線から読みとった標高値と 5 m 以内で一致してい

た. このくいちがいとは主として 1/10000 地形図の読み取り誤差 (0.5 mm 程度) によるものである。

3.5. トランスロケーション GPS 法の運用上の若干のコメント

3.5.1. 偏心観測

今回のトランスロケーション GPS の精度検証実験では固定局を三角点に配置した。ところで一般に三角点は建物の近傍や林の中などにあることもあり, 人工衛星電波の受信上, 都合のよい点にあるとは限らない。むしろ不適当な場所に置かれていることが多い。しかし三角点から数m~数十m程度離れば衛星電波の受信に好都合な場所がしばしば見つかる。その場合には, 三角点から離れた場所 (偏心点) で GPS 観測を行い, 偏心点と三角点との間は地上測量で接続するのが実際的である。よほどの傾斜地でないかぎり, 基線長を 50 m の巻尺で ± 10 cm, 方位を精密磁石で $\pm 5^\circ$ の精度で決定すれば所要の精度 (水平方向 10 m, 鉛直方向 2 m) で GPS 点と三角点間の座標結合ができる。しかもこの方法は, GPS 受信機が衛星電波を受信している間にすませてしまうことができ, 簡便でありながら, 一方で必要精度は確保している。

3.5.2. 三脚・アンテナ設定

要求される位置決定精度が水平方向に 10 m, 鉛直方向に 2 m であるから, 移動局側は三脚の設定に神経質になる必要はない。衛星電波受信中にアンテナがしっかりと固定されていればそれでよいのである。したがって, 観測点に到着して数分以内に, アンテナの設定を完了することはきわめてたやすい。その際, アンテナの地表からの高さは記録しておく方が望ましいだろう。一方, 固定局側は基準点標石上に三脚とアンテナを正しく設定しておくべきであろう。

4. ブーゲー異常

測定された重力値に地形補正をほどこして, ブーゲー異常を求めた。地形データとしては国土地理院作成の国土数値情報 KS110-1 を使用し, 球面地形補正のアルゴリズムを使った。大略, HAGIWARA (1967) および野崎 (1981) に準じている。地形補正の範囲は観測点の近傍, 東西 80 km, 南北 80 km 以内の矩形領域である。仮定密度は 2.64 g/cc とした。

重力点の分布は等間隔ではない。不等間隔に分布するブーゲー異常値を緯度と経度による格子点上の値に計算し直すために, BRIGGS (1974) の方法を採用する。格子点の間隔は緯度方向, 経度方向にそれぞれ 0.2' とし, ブーゲー異常図 Fig. 4 を得た。

Fig. 4 には以下の特徴が明瞭にみとれる。

1. 松本盆地東縁断層の東側と西側のコンターのパターンの顕著な差異。

断層線を境にして, 東側では断層に平行なブーゲー異常コンターの間隔が著しく密である。この事実は萩原ほか (1986) が $36^\circ 17' N$ 以南で見いだしていたものであり, 同じ重力異常パターンがさらに北側の $36^\circ 35' N$ くらいまで追跡できることが本研究から再確認された。

2. $36^\circ 20' N$, $137^\circ 54' E$ 付近を中心とする舟状の低重力帯の存在。

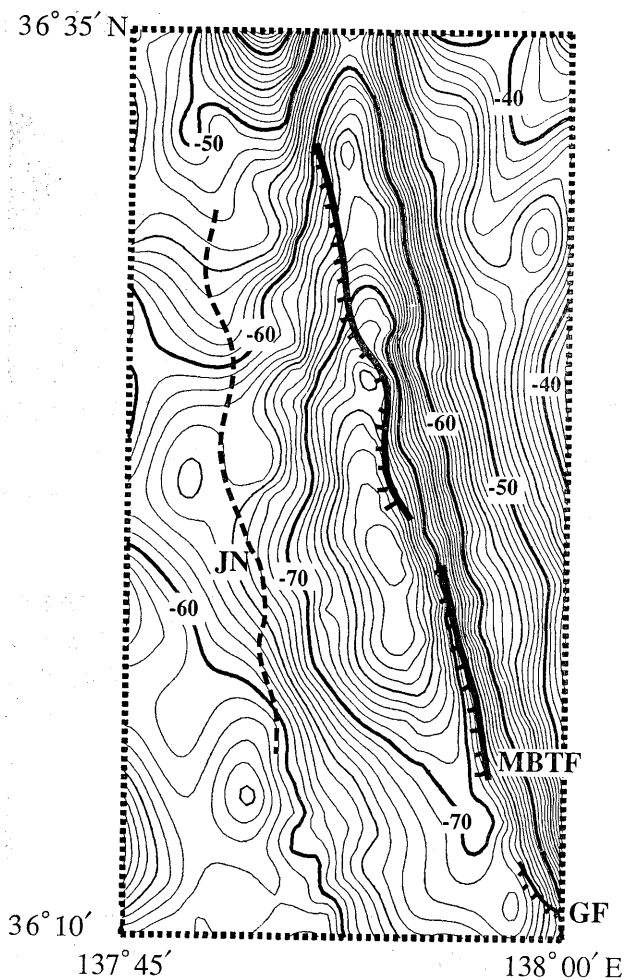


Fig. 4. Bouguer anomaly in mgal, with faults discovered by geological surveys.

約 20 mgal の低重力帯が松本盆地東縁断層の西側にあらわれている。

3. 断層の北東側 36°30'N, 137°58'E にみられるコンターの屈曲。

特徴の (1) と (2) はすでに大久保ほか (1990) が指摘しているところである。特徴 (3) は大久保ほか (1990) の重力異常図にもみとめられているが、測定点の分布が疎な地域であったために不確実なものであった。今回の調査で測定点分布が改良されたために、この特徴は確実なものとして認識されるに至った。以下で述べるように、この特徴は断層運動の水平成分を論ずる際に重要になってくる。

5. ブーゲー異常の解釈

前報 (大久保ほか, 1990) の解析のベースとなった重力異常図と、今回改訂された重力

異常図との間には大きくいちはない。したがって、前報で提出した逆断層モデルは、重力異常を説明する上でそのまま有効であると考え。そこでモデルの詳細の説明については前報にゆずり、以下では結論のみを再掲するにとどめる。

大久保ほか(1990)は松本盆地東縁断層周辺のブーゲー異常を、同断層の過去の断層活動にともなう累積した密度擾乱が反映したものとして解釈している。その根拠は次の事実である。

- ・ 東向きに傾き下がる低密度のスラブによって、断層線を境とする重力異常パターンの急変が説明できる。
- ・ スラブにそっておこる逆断層運動で周囲の密度場への擾乱が累積したと考えると、断層沿いにみられる舟状の負の重力異常が定量的によく説明できる。
- ・ 断層北東側のコンターの屈曲(前章の特徴(3))は、断層運動に右横ずれ成分が含まれているために生じたと解釈される。

このように幾何構造および断層運動の両者の寄与を加えることにより、現実の重力異常がもつさまざまな特徴が、体系的にかつ定量的にもきわめてよく再現できる。

6. おわりに

松本盆地東縁断層の活動様式を解析することを目的として、同断層北側延長部周辺であらたに123点で重力測定を実施した。その過程でトランスロケーションGPS法という新しい測量技術を援用した。実用に供する前におこなった精度検証試験観測によって、1 mgalの精度で重力異常値を求める際に、トランスロケーションGPSがきわめて有力な支援技術となることが確認された。

前報で推定した松本盆地東縁断層の断層パラメータを改訂する必要は生じなかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、建設省国土地理院測地一課重力係の方には重力基準値を提供していただいた。また同院関東地方測量部調査課成果係の方には資料閲覧等に格別の便宜を図っていただいた。金沢大学理学部河野芳輝教授には、周辺地域の重力資料の参照を許可していただいた。GPS受信機のハードウェア、ソフトウェアについては東京大学地震研究所、竹田豊太郎氏ならびに平田安広氏から暖かいご支援をいただいた。科学技術庁防災科学技術研究所、萩原幸男氏には有益なコメントをいただいた。以上の方々にあわせて厚くお礼申し上げる。本研究は文部省科学研究費補助金(一般研究C, 課題番号01540328)によって実施された。

参 考 文 献

- BRIGGS, I. C., 1974, Machine contouring using minimum curvature, *Geophysics*, **39**, 39-48.
 FREL, E. and G. BEUTLER, 1990, Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach "FARA": theory and first results, *manuscripta geodetica*, **15**, 325-356.

- HAGIWARA, Y., 1967, Analyses of gravity values in Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **45**, 1091-1228.
- 萩原幸男・山下 昇・小坂共栄・矢野賢治・安井敏夫, 1986, 糸魚川—静岡構造線の重力調査 (I)—松本盆地中央部のブーゲー異常と構造解析—, 地震研究所集報, **61**, 537-550.
- 活断層研究会, 1980, 日本の活断層—分布図と資料, 東京大学出版会, 363p.
- 木股文昭・中村 勝・奥田正隆, 1990, ディファレンシャル GPS による一点測位の精度, 測地学会誌, **36**, 115-117.
- 駒沢正夫・杉原光彦, 1990, 重力調査における GPS の利用可能性, 地質ニュース, **428**号, 32-37.
- 日本測量協会, 1986, GPS—人工衛星による精密測位システム—, 日本測量協会, 263p.
- 野崎京三, 1981, 球面地形補正の計算プログラム, 測地学会誌, **27**, 23-32.
- 大久保修平・長沢 工・村田一郎・許 華 杞, 1990, 糸魚川—静岡構造線の重力調査 (III)—松本盆地東縁断層北側延長部の追跡—, 地震研究所集報, **65**, 649-663.
- YAMAMOTO, A., K. NOZAKI, Y. FUKAO, M. FURUMOTO, R. SHICHI and T. EZAKA, 1982, Gravity survey in the central ranges, Honshu, Japan, *J. Phys. Earth*, **30**, 201-243.

*Gravity Observations along the Itoigawa-Shizuoka
Geotectonic Line (IV)*

*—Determination of Bouguer Anomaly around the Matsumoto
Bonchi Toen Fault with the aid of GPS
translocation technique—*

Shuhei OKUBO, Ko NAGASAWA, Ichiro MURATA and Jun ANDO
Earthquake Research Institute

The Matsumoto Bonchi Toen Fault (MBTF) is located in the middle part of the Itoigawa-Shizuoka geotectonic line. We carried out gravity surveying around the MBTF at 123 points to make a detailed Bouguer anomaly map. Translocation GPS (Global Positioning System) proved to be quite useful in determining 3-dimensional coordinates of gravity points.

Improved Bouguer anomaly data reconfirm (1) the existence of a dipping slab along the MBTF and (2) thrusting fault motion on it.