

日本—インドネシア国際重力結合と ジャワ島西部における重力測定

村田 一郎・中村佳重郎・田中 寅夫・ポニミン M.S.・エドウィン H.

JAPAN-INDONESIA INTERNATIONAL GRAVIMETRIC CONNECTION AND GRAVITY MEASUREMENT IN WEST JAWA

By *Ichiro MURATA, Kajuro NAKAMURA, Torao TANAKA, PONIMIN M.S. and EDWIN H.*

Synopsis

International gravimetric connection between Japan, Singapore and Indonesia was carried out with two LaCoste & Romberg gravimeters (model G) during the period from October 11 to November 2, 1993. In Singapore, gravity measurements were performed at three gravity stations registered on IGSN 71 (International Gravity Standardization Net 1971) and at another seven stations in this investigation. In Indonesia domestic gravimetric connection was carried out along the route of Jakarta-Bogor-Bandung by measuring gravity at nine gravity stations: Three stations belong to BAKOSURTANAL (National Agency for Surveys and Mapping of Indonesia), gravity values at two stations which belong to Geological Survey of Indonesia had been linked to IGSN 71, one station is GPS observation site which belongs to GPS survey network established in November 1991 by DPRI and ITB (Bandung Technological Institutes) in order to monitor crustal movements associated with active volcanoes and with active faults in West Jawa, and the other three are temporal stations for the convenience in the present study.

Precise gravity measurements were performed along the base (or calibration) line which had been arranged by BAKOSURTANAL from Bandung to Subang at about 40 km north-north-eastward from Bandung, in the range of gravity difference of 276 mgal. In this investigation, three GPS observation sites, which belong to the same GPS network mentioned above, along or near the route were connected gravimetrically to the base line. And another gravity measurements were performed at the other eight GPS observation sites which belong to also the same GPS network mentioned above. Obtained results will contribute to improve the accuracy of gravity measurements in Indonesia.

1. はじめに

インドネシアのジャワ島西部地域における火山活動あるいは断層運動を地殻変動の面から観測する目的で1991年の10月から11月にかけてGPS観測網が設置された。この観測網では1992年3月から4月にかけてと1993年4月にGPS観測が2回実施されている。1993年10月にはインドネシア測量地図局(BAKOSURTANAL)がバンドン郊外に設置してある重力検定線において、バンドン工科大学と共同で精

密な重力測定を実施した。これらの観測は京都大学防災研究所とインドネシアエネルギー鉱業省の火山研究所との間で交わされた『インドネシアの火山物理学とテクトニクスの研究』に係わる協定の一環として実施されている。本稿ではそのうちの重力測定について報告する。測定には2台の LaCoste & Romberg 重力計が使用された。検定線においては往復測定を繰り返し実施したので従来よりも信頼性の高い重力値が得られた。測定点の重力の絶対値を決定するためにシンガポールを経由して日本—インドネシアの国際重力結合を実施した。基準点として国際重力基準網 (International Gravity Standardization Net 1971, (IGSN 71)) に登録されている Singapore A の点を採用した。この基準点とインドネシア国内のそれぞれの基準点との重力差を求めて重力値を決定した。

また、前述の GPS 観測網の各観測台上においても重力測定を実施したのでその結果も併せて報告する。

2. 重力計の定数

新東京国際空港 (成田空港) の一等重力基準点 (NARITA GS) の重力値は IGSN 71 にこそ登録されていないが環太平洋国際重力結合(1)の際に国内の他の基準点と多数の重力計によって何回も繰り返し重力結合して得られた結果であり、日中国際重力結合(2)の際にも重力結合を繰り返しているため、十分に信頼できる重力値と考えてよい。また環太平洋国際重力結合(1)の際にはシンガポールの IGSN 71 に登録されている重力基準点 Singapore A の重力値も再決定している。そこで Singapore A と NARITA GS の重力値はその後変化していないものと仮定して、今回使用した2台の重力計 (G605, G876) の定数を決定した。しかしながら測定の際にギアを回転することに起因するいわゆる重力計のペリオディックエラーに関してはそれぞれの重力計の従来の処理方法に従った。なぜならば補正要素を再決定するための基準点の重力分布が適切でなかったためである。具体的な処理方法としては G605 に関しては日中国際重力結合や東海地方で繰り返し実施してきた重力の時間変化の観測の解析から得られた定数を使用して良好な結果が得られているのでその値をそのまま使用し、G876 の場合はペリオディックエラーの補正はしなかった。従って、僅かではあるが定数にその影響が含まれている可能性は否めない。バンドンから北北東約 40km 先のスーバンに至る重力検定線は重力差が 276mgal もあるので、今後適当に測定点を補充していくならば、ペリオディックエラーの補正係数をも求めることが可能な検定線になるものと思われる。ただし検定線がその中腹を走るタンクバンプラフ火山の活動によって大きな重力変化はないものと仮定する。また、この検定線では測定点の高低差を利用して重力計の目盛りの読み取り範囲を広げている。高低差が大きい場合には重力計によっては気圧変化の影響を受け易い器械³⁾もあるのでその点に関する注意が必要である。

3. 測定点および測定

国際重力測定局 (IGB) から取り寄せた資料によると IGSN 71 に登録されているシンガポールの基準点は現在4点ある。その内の1点はノイズが大きくて測定の環境がよくないことがわかっていたので残りの3点で重力測定をする予定であった (Fig. 1)。ところがその内の国立博物館 (Singapore B) では屋内の改装工事が行われ、南洋大学 (Singapore F) では改築があったりして、基準点の正確な位置 (特に高さ) を決定することが困難になった。幸運にも現在の教育研究所 (旧シンガポール国立大学) (Singapore A) では環太平洋国際重力結合当時の環境がそのまま保存されていた。今後のことを考慮して、またシンガポール測量局の勧めによりチャンギ国際空港付近の精密水準点 (PL BM 4) と Singapore B の建物の外側にある水準点 (BM 805) においても重力を測定した。また重力の絶対測定が行われたシンガポール国立大学理学部の建物の中の点は小さいながらも金属のマークがあり測定点 (S12 (ABS G)) の位置は容易に判別可能なのでそこでも重力測定を行った。絶対測定の資料が得られると貴重な重力基準点となる。

IGSN 71 に登録されてはいなくても、空港において出国直前と入国直後に重力計の点検を兼ねて測定に使

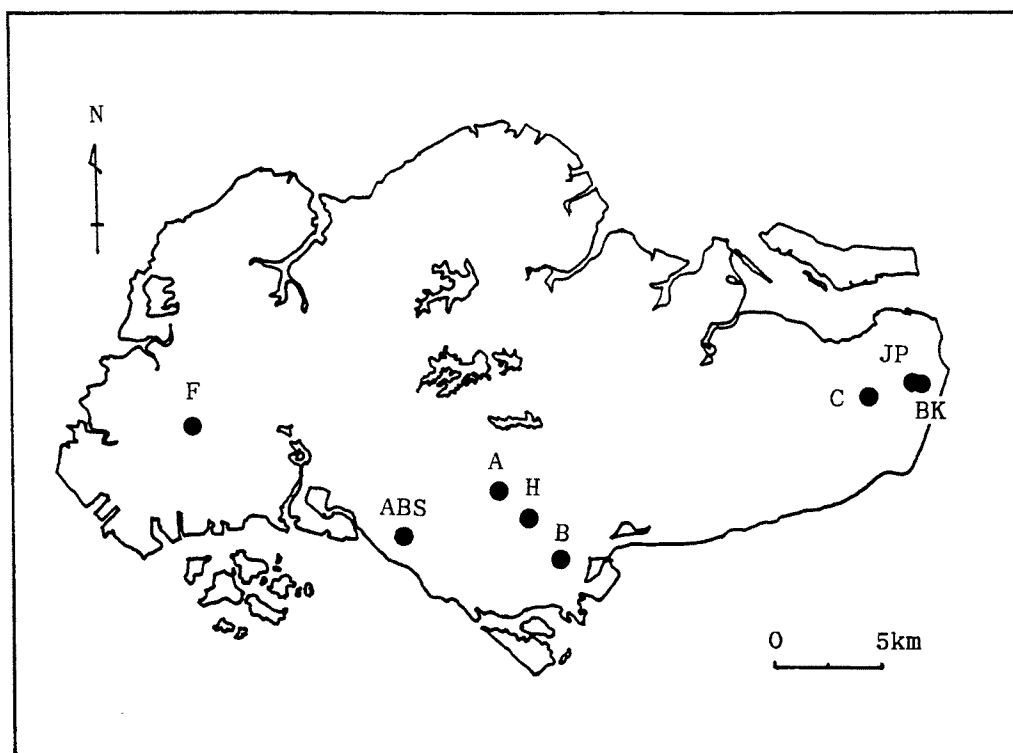


Fig. 1 Gravity Stations in Singapore.

(A: Singapore A, B: Singapore B and BM 805, F: Singapore F, ABS: S12 (ABS G), C: PL BM 4, JP: CHANGI JPN, BK: CHANGI BKS, H: HILTON HT)

利な場所を決めて重力測定をする事は重要なことである。シンガポールのチャンギ空港に臨時的点 (CHANGI JPN) を定め、日本から到着したとき、インドネシアに出発するとき、またその逆にインドネシアから到着したとき、そして日本に帰国するときにその点で重力を測定した。インドネシアで BAKOSURTANAL もそのような点 (CHANGI BKS) を設けてあるという情報を得た。皮肉なことに我々が今回定めた点とは互いに建物の反対の端であった。これはこの空港では利用する航空会社によって使用するターミナルが指定されていることによる。これらの点は滞在したホテル (HILTON HTL) に定めた点も含めてインドネシアへの往路、あるいは復路の際に各 1 日かけて IGSN 71 の基準点およびその他の重力点と重力結合した。シンガポールでの測定点の水平位置はシンガポール国防省が発行している 5 万分の 1 の地図から読み取った。標高は場所によっては地図からの読み取りが困難なので IGSN 71 に登録されている点の場合はその高さを採用し、そうでない場合は地図と現地の様子を参考にして概数で表すことにした。

ジャカルタのスカルノハッタ国際空港でもチャンギ国際空港の場合と同様に BAKOSURTANAL の基準点 (CENKA T1-A) はターミナル 1 にあり、我々が新しく設定した基準点 (CENKA T2-E) はターミナル 2 になるという食い違いが生じた。この空港は最近大きく改造されているので、かつてはターミナル 1 が国際結合に便利であったことや、現在は国内の重力結合に便利であることは容易に理解できた。ジャカルタからボゴール経由でブンチャック峠を越えてバンドンまでの間を重力結合した。ボゴールには BAKOSURTANAL の本部がある。構内の基準点 (BAKOSRTNAL) もジャカルターバンドン間の重力結合の測定点に含まれている。ボゴールからバンドンへ行く途中で前述の GPS 観測網の 2 つの観測点 (CIAWI GPS, TUGU GPS) で重力を測定した。TUGU GPS ではマークが自然石に埋め込まれていて重力計をセットする

ための適当な場所がなかったので、数十メートル離れたところにあった既設の BAKOSURTANAL の水準点 (GB. 16 TUGU) を利用した。バンドンの地学博物館にはインドネシアの重力原点 DG.0 がある。Singapore A からの国際重力結合でこの DG.0 の重力値を再決定してその値を基準にインドネシア国内の各測定点の重力値を求めた。従って今回の重力測定では測定当日の最初と最後は必ずこの点で環を閉じるようにした (Fig. 2)。

重力検定線はインドネシア地質調査所が設置した地学博物館からタンクバンプラフの山頂に至る測線 (DG.0 ~ DG.6) (4)と BAKOSURTANAL が設置した同山腹からスーバンに至る測線 (GB.06 ~ GB.01) とがある。今回は交通事情、ノイズが大きい等の理由で前半の測線では地学博物館構内の DG.0 と DG.1 の2点と後半の測線 GB.06 ~ GB.01 で測定した。DG.1 と GB.01 では自動車あるいは原因不明のノイズが大きくてよい結果が得られなかった。バンドンからタンクバンプラフ中腹の GB.06 まで行く途中にレンバンという町がある。町の南側を東北東—西西南方向にレンバン断層が走っている。この断層近傍には前述の GPS 観測網に属する観測点が2点 (LEMBANG GPS, CIBODAS GPS) ある (Fig. 3)。測定点の空間分布あるいは測定時間間隔からみてこの2点も重力検定線に組み込むことにした。この検定線に沿って往復重力測定を4回繰り返した。

バンドンの北西方向にある GPS 観測点 (CIKALON GPS) は DG.0 と直接重力結合した。またバンドンから南東方向と南西方向の地域に分布している GPS 観測点は前述の GPS 観測網を構成しているが、そこでも重力測定をした。南東部の測定点は NAGREG GPS, LELES GPS, GARUT GPS と KAMOJANG の4点で

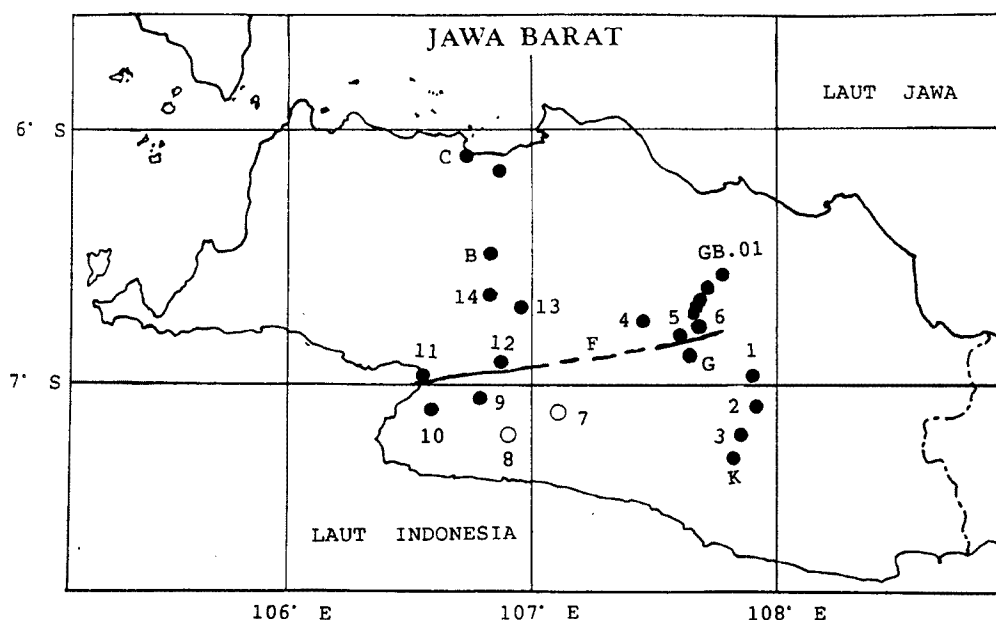


Fig. 2 Gravity Stations in West Jawa.

(C: CENKA T1-A and CENKA T2-E, B: BAKOSRTNAL, 2: LELES GPS, 3: GARUT GPS, K: KAMOJANG, 4: CIKALON GPS, 5: LEMBANG GPS, 6: CIBODAS GPS, 9: BOJONG GPS, 10: KIARDUA GPS, 11: PELABUHAN, 12: CISAAT GPS, 13: GB. 16TUGU, 14: CIAWI GPS, F:Lembang Fault and Cimandiri Fault, and 7, 8: These Stations Belong to the GPS Network but at the Sites Gravity Measurements Were Not Carried Out in the Study.)

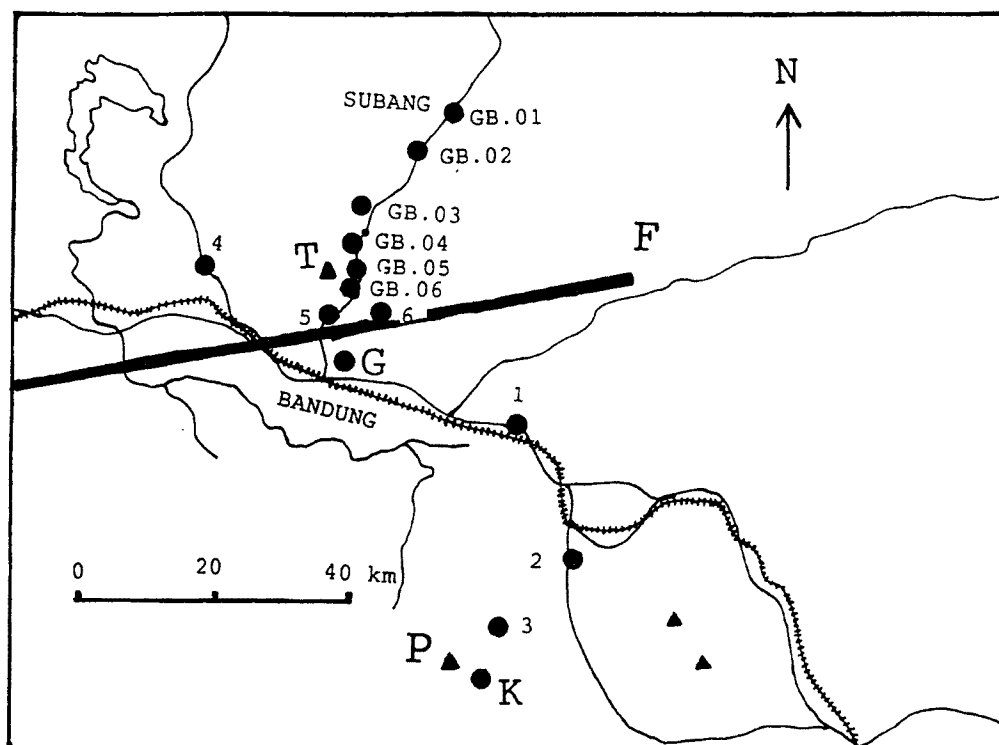


Fig. 3 Gravity Stations around Bandung and near the Lembang Fault. The Codes (1-6 and G) are the Same in Fig.2 and the Others are F: Lembang Fault, T: Tangkubanprahu, P: Papandayan and GB. 01-GB. 06: Gravity Base Line Arranged by BAKOSURTANAL.

ある。KAMOJANG は地熱地帯として有名であり地熱発電所の記念碑の前で重力を測定した。この測線では道路事情もよく往復測定をする事が出来た (Fig. 3)。南西部地域では CISAAT GPS, PELABUHAN, KIARDUA GPS と BOJONG GPS で重力測定をした。この地域では道路事情がよくなかったので CISAAT GPS で環を閉じて DG.0 と結合した (Fig. 2)。

インドネシアの重力測定点の位置は既に BAKOSURTANAL あるいは地質学研究所によって求められている場合はその値をそのまま使用した。ただし、水平の位置データだけが求められている場合は、できるだけ地図などを参考にして高さを概数で表した。GPS 観測点の場合は GPS 観測から求められた値を用いた。

4. 議 論

重力計の定数決定に際しては、環太平洋国際重力結合(1)によって求められている NARITA GS と Singapore A の重力値を絶対的な値として G605 や G876 から求められた同じ 2 点間のそれぞれの重力差が異なる原因はすべて重力計の定数が適切でないと仮定して、各重力差が互いに等しくなるように定数を決定した。たった 1 回の往復測定から、しかも 2 点間だけの重力差から重力計の定数の補正値を求めることは少々強引な気もするが、その結果を Table 1 に示す。G605 は現在使用している定数に 10 万分の 2.3 を G876 の場合は 10 万分の 17.6 を加えて変換すると第一近似は満足する。本稿ではこの値を補正値として使用することにする。G876 はこれまでにこのように大きな重力差 (1790mgal) のある基準点間の重力結合をして適切な補正値を求める機会に恵まれず、G605 と比較すると補正値は少し大きい。G605 は既に日中国際重力結合(2)の

Table 1. Scale Factor Correction Used in This Study
(Unit: mgal except the bottom line)

	Circum P	G 605	G 876
NARITA GS	979857.332	979857.290	979857.017
Singapore A	978066.684	978066.684	978066.684
Difference	1790.648	1790.606	1790.333
Scale Factor	1.000000	1.000023	1.000176

際に通常の観測の場合と比べて大きな重力差 (1608mgal) を利用して定数を得ていたので補正値は小さい。これらの値を使用して各基準点の重力値を求めた。得られた結果を **Table 2** に示す。

G605 は今回の調査中に、測定を終了してクランプをセットした後すぐ開放して読み直しをしたときに、直前の読み取り値とひどいときには 0.2mgal 程度も異なる値を示すというアクシデントに見舞われた。この現象が顕著だったのはバンドンより南側、特に南西方向の地域の調査中であつた。ダイヤルをゼロ付近まで回して元に戻すとそれから後はそのような現象は現れなくなった。従って **Table 2** の内で NAGREG GPS より下の段の G605 によって求められた重力値は余り精度はよくない。しかし、測定回数を多くして観測値の分布から適当な処理をしたので 0.03mgal 程度の精度はありそうである。検定線においては各重力計だけに絞って結果を見ると測定精度は数 μ gal から 10 μ gal 程度である。ところが 2 台の重力計の結果を比較すると大きな差が見られるところがある。これは重力計の定数の決定の仕方が少々乱暴だったというよりはペリオディックエラーの補正が充分でないことによると考えられる。全体としては 20 μ gal 程度の精度でインドネシアの重力基準点の重力値が求められた。参考のために BAKOSURTANAL やインドネシア・オーストラリアチーム(4)によって求められた値と比較して **Table 3** に示してある。インドネシア・オーストラリアチームの Singapore A の値が IGSN 71 に登録されている値 978066.68mgal より 0.02mgal 小さい理由はオーストラリアの重力値を基準としたためと考えられる。各組織が求めた重力値は互いに 0.2mgal 以内に分布している。IGSN 71 に準拠するならば Singapore A でのホンカサロの補正値は 0.037 μ gal でこの値を加えて 978066.72mgal を基準にすべきである。しかし、現時点では環太平洋国際重力結合(1)による値の方が信頼性が高いと思われるので **Table 2** の様にまとめた。

Singapore B での内装工事に伴う件については、基準点として用いられていた台座が取り払われて同時に床面の工事もされたという。しかし床の高さは以前とほとんど変わらないという。IGB からの資料の中に台座の高さが 0.15m と解釈できる書き込みがあった。工事前後で床の高さに変化がないならば、床を基準とした重力値は台座を基準にした場合よりも 46 μ gal 大きくなる。**Table 2** に示されている G605 と G876 によって求められている重力値は Singapore B の場合は床を基準にしている。Singapore A では重力値は変化していないと仮定しているので Singapore B の見かけの重力値は 978066.075mgal から 978066.094mgal に 19 μ gal 増加している。増加量は予測値の半分となるがその理由として測定精度、実際の床面の高さの変化、メモの解釈の仕方などに問題が残されている。当の台座は博物館の別の場所に保管されているという。機会があれば解決しておきたい。なお IGSN 71 に登録されている二つの重力基準点の値から求められる重力差は 0.64mgal である。今回の結果から求められる 2 点間の重力差は 0.590mgal である。このことは Singapore B の見かけの重力値が 50 μ gal 大きくなったことを示している。

5. 結 論

LaCoste & Lomberg 重力計 2 台を使って日本—シンガポール—インドネシアの国際重力結合を行った。成田とシンガポール間の重力結合によって重力計の定数の補正係数の修正が可能になった。シンガポールで

Table 2. Gravity Values at the Stations

SITE	LONGITUDE			LATITUDE			HIGHT	GRAVITY VALUE		MEAN	GRV. DIF. G605-G876
								G605	G876		
ERI B18	139	46	0. E	35	43	0. N	10.	979788.311	788.252	979788.282	+59
NARITA GS	140	23	18. E	35	45	42. N	30.	979857.332	857.332	979857.332	0*
CHANGI JPN	103	59	27. E	1	21	38. N	5.4	978059.672	059.676	978059.674	- 4
CHANGI BKS	103	59	31. E	1	21	37. N	9.	978059.019	059.011	978059.015	+ 8
PL BM 4	103	58	18. E	1	21	28. N	27.494	978054.791	054.759	978054.775	+32
SINGAPORE A	103	49	5. E	1	19	11. N	19.2	978066.684	066.684	978066.684	0*
SINGAPORE B	103	51	2. E	1	17	49. N	8.2	978066.089	066.100	978066.094	-11
BM 805	103	51	1. E	1	17	48. N	6.619	978066.283	066.288	978066.286	- 5
S12 (ABS G)	103	46	52. E	1	17	49. N	20.	978064.449	064.426	978064.438	+23
HILTON HT	103	49	53. E	1	18	24. N	15.	978068.934	068.0908	978068.921	+26
SINGAPORE F	103	41	10. E	1	20	39. N	30.	978061.815	061.783	978061.799	+32
NANYAN ENTR	103	41	10. E	1	20	39. N	30.	978061.849	061.931	978061.840	+18
CENKA T1-A	106	44	0. E	6	7	0. S	10.	978137.908	137.864	978137.886	+44
CENKA T2-E	106	44	0. E	6	7	0. S	10.	978138.168	138.138	978138.153	+30
BAKOSRTNAL	106	50	56.1E	6	29	27.8S	158.504	978115.017	114.997	978115.007	+20
CIAWI GPS	106	50	52.3E	6	39	19.4S	469.900	978055.753	055.733	978055.743	+20
GB.16 TUGU	106	58	18. E	6	42	12. S	1120.	977934.427	934.422	977934.424	+ 5
GB.25 ITB	107	36	32.6E	6	53	17.1S	813.397	97970.092	970.143	977970.118	-51
ROYAL GAGO	107	37	30. E	6	53	15. S	770.	977967.906	967.901	977967.904	+ 5
DG.0 GEOLG	107	37	54. E	6	53	54. S	718.0	977976.487	976.472	977976.480	+15
DG.1 GEOLG	107	37	54. E	6	54	0. S	717.3	977976.729	976.729	977976.729	+ 0
GB.06 TANK	107	37	56. E	6	46	26. S	1600.	977815.920	815.919	977815.920	+ 1
GB.05	107	38	38. E	6	45	34. S	1200.	977882.296	882.276	977882.286	+20
GB.04	107	38	47. E	6	44	8. S	1000.	977914.825	914.820	977914.822	+ 5
GB.03 CIATR	107	39	38.8E	6	42	1.5S	590.342	977957.303	957.262	977957.282	+41
GB.02	107	41	17. E	6	40	39. S	300.	978008.238	008.193	978008.216	+45
GB.01	107	45	31. E	6	34	20. S	50.	978091.766	091.693	978091.730	+73
LEMBANG GPS	107	36	58.6E	6	48	50.7S	1265.048	977781.563	871.582	977871.572	-19
CIBODAS GPS	107	40	. E	6	47	. S	1000.	977878.270	878.279	977878.274	- 9
CIKALON GPS	107	26	42.4E	6	45	25.1S	665.992	97785.441	985.434	977985.438	+ 7
NAGREG GPS	107	54	30. E	6	59	. S	500.	977976.836	976.809	977976.822	+27
LELES GPS	107	55	. E	7	5	. S	700.	977986.069	986.020	977986.044	+49
GARUT GPS	107	51	39.3E	7	12	34.7S	901.342	977950.052	950.034	977950.043	+18
KAMOJANG	107	50	. E	7	13	. S	1300.	977833.149	833.187	977833.168	-38
GISAAT GPS	106	53	28.3E	6	54	29.9S	621.224	978079.538	079.527	978079.532	+11
PELABUHAN	106	32	36.0E	6	59	22.7S	23.953	97836.043	236.026	978126.034	+17
KIARDUN	106	35	27.6E	7	5	50.4S	746.872	978157.095	157.074	978157.084	+21
BOJONG GPS	106	48	4.5E	7	3	15.6S	489.872	978130.869	130.930	978130.900	-61
	D	M	S	D	M	S	M	mgal	mgal	mgal	μ gal

は IGSN 71 の基準点の環境の維持には厳しいものがあったが、Singapore A とインドネシアの重力基準点とを重力結合することによってインドネシア国内の重力基準点の重力値を精度よく決定することが出来た。特にバンドンからスーバンに至る重力検定線では重力の往復測定が繰り返され基準点の重力値が精度よく得られた。**Table 2** に示されている値に $33 \mu\text{gal}$ を加えると IGSN 71 に準拠した値となる。測定精度は $20 \mu\text{gal}$ 程度である。今後の重力測定の際にはこの結果が有効に利用されることが期待できる。また、火山活動や断層運動をモニターするためにジャワ島西部に展開されている GPS 観測網の観測台でも重力測定をした。GPS 観測の結果と重力測定の結果を比較検討するための基礎的資料が得られた。

Table 3. Gravity Values Obtained by the Study, BAKOSURTANAL and Indonesia-Australia Party

	DETERMIND	BAKOSURTANAL	IND・AUS
Singapore A	978066.684	978066.68	978066.66
DG.0	977976.480		977976.38
DG.1	977976.729		977976.55
GB.06	977815.920	977815.992	
GB.05	977882.286	977882.303	
GB.04	977914.822	977914.823	
GB.03.	977957.282	977957.221	
GB.02	978008.216	978008.178	
GB.01	978091.730	978091.631	
CENKA T1-A	978137.886	978137.753	UNIT: mgal

今回の重力測定の結果が今後のインドネシア国内の重力値の決定、重力探査、重力の時間変化あるいはジオイドに関する研究等の一助となれば幸いである。

謝 辞

この研究ではシンガポールでも重力測定をする事によって、重力計の定数の補正が可能になり、またインドネシアでの重力値が精度よく決定されることが可能になった。我々の測定を快く受け入れて下さいました重力基準点を管理されている機関の皆様、およびそのために、それぞれの関係機関への折衝の労をとって下さり基準点を案内して下さいましたシンガポール法務省測量局の皆様にご感謝の意を捧げます。また、インドネシアにおいては重力測定に必要な自動車の手配等いろいろな雑用を快く引き受けて下さいましたバンドン工科大学の皆様にご感謝いたします。更に、重力基準点の資料や貴重な情報を提供して下さいましたBGIおよびBAKOSURTANALの皆様にご感謝いたします。

参考文献

- 1) 中川一郎・中井新二・志知龍一・田島広一・井筒屋貞勝・河野芳輝・東敏博・藤本博巳・村上亮・太島和雄・船木實：環太平洋地域における国際重力結合（I）—ラコスト重力計（G型）定数の精密検定と国際重力基準網1971の精度，測地学会誌，29，1983，pp.48-63.
- 2) 中川一郎・志知龍一・中井新二・中村佳重郎・東敏博・李瑞浩・陳益恵・王東初：日中国際重力結合（I）—ラコスト重力計（G型）による重力値の精密決定—，測地学会誌，33，1987，pp.185-204.
- 3) 藤田尚美：水準・検潮・重力，測地学会誌，16，1970，pp.68-75.
- 4) J.Adkins, S.Sukardi, H.Said and M.Untung: A Regional Gravity Base Station Network For Indonesia, Publikasi Teknik-Seri Geofisika No.6, 1978, pp.1-11.