

ジャワ島西部における GPS および重力測定

田中寅夫・中村佳重郎・大谷文夫・木股文昭・大久保修平
里村幹夫・J. カハール・バンバン S. P. コサシ・イルダム A.
アグン I. ケトト W. ミピ A. R. ハサヌディン

GPS AND GRAVITY MEASUREMENTS IN WEST JAVA

By Torao TANAKA, Kajuro NAKAMURA, Fumio OHYA, Fumiaki KIMATA,
Shuhei OKUBO, Mikio SATOMURA, Joenil KAHAR, Bambang SETYADJI, Kosasih PRIJATNA,
Irdam Adil M.T., Agung B., Ketut W., Mipi A. K. and Hasanuddin

Synopsis

Results from the 4th GPS campaign in October 1994 are compared with the previous campaign and a northeastward displacement of the northern block of the Lembang-Cimandiri Fault System is proposed. Surface meteorological data were used to analyze the wet delay error at three stations. Estimated wet delay corrections are in good accordance with the surface humidity, but no significant improvement can be seen on the reliability of solutions obtained by applying the surface data. Gravity measurement is also carried out in and around the same GPS observation network. The observation results are also reported.

1. まえがき

インドネシアにおける火山噴火、地震災害を軽減することを目的として、防災研究所はインドネシア科学院地質工学研究開発センター (Research and Development Center for Geotechnology, Indonesian Institute of Sciences (LIPI)) およびバンドン工科大学測地工学教室 (Institute of Technology Bandung, Department of Geodetic Engineering) と 1991 年度から共同研究を実施してきた。前報では、1991 年 11 月に基線網を設置し、1992 年 4 月および 1993 年 4 月にそれぞれ第 1 回および第 2 回の精密 GPS 測位を実施した結果について報告した¹⁾²⁾。また、同じ地域の地下構造および地下における密度変化、物質の移動を検出する目的で重力測定を行うと同時に、インドネシアにおける基準重力値を精密に決定して、重力測定結果の精度を向上させるとともに国際重力基準網 (IGSN 71) に準拠した重力値の信頼性をたかめるための国際重力結合を繰り返してきた³⁾。

それ以後、1994 年 8 月に第 3 回、同年 10 月に第 4 回の GPS 観測を実施し、また 1993 年 10 月及び 1995 年の 1 月と 9 月に重力測定も実施した。ここではとくに第 4 回 GPS 観測の結果と 1993 年 10 月と 1995 年 9 月の重力測定の結果について簡単に報告する。

2. GPS 観測

ジャワ島西部をほぼ東西に走る Lembang 断層、Cimandiri 断層の周辺に展開しているわれわれの GPS 観

測網は Fig. 1 に示す通りである。これら両断層周辺の地殻変動を観測することのほかに、この地域にある Tangkubanperahu, Guntur などの火山, それに Kamojang 地熱地帯の活動と広域の地殻変動との関連を調べることも、われわれの研究目的の一つである。この観測網ではこれまでに Trimble 4000 SD™, 4000 SST および Ashtech Z12 の 2 種類の GPS 受信機を展開して観測を行ってきた。その時期, 機種をまとめて示すと Fig. 2 のようになる。

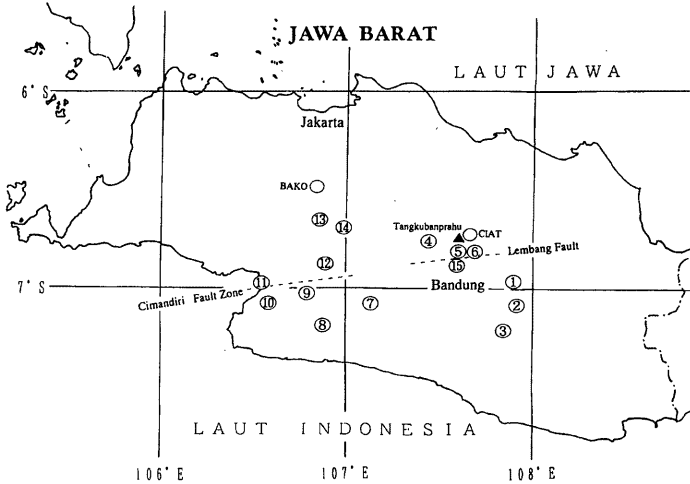


Fig. 1 Location of the network for GPS observations.

	April 1992	April 1993	August 1994	Oct. Nov. 1994
	3-6 8-11 13-16	2-5 6-8 10-14	21-23 24-26 28-30	27-29 30-1
1 Nagreg				●
2 Leles	○			●
3 Garut		○	○	
4 Cikalongwetan		○		
5 Lembang	○	○		
6 Cibodas	○		○	●
7 Sukanegara		○	○	
8 Boyonglopang		○	○	
9 Sagaranten		○	●	
10 Kiaradua (LIP1)		○	○	
11 Pelabuhanratu		○	○	
12 Cisaat		○	○	
13 Ciawi		○	○	●
14 Tugu		○		●
15 ITB1	○ ○ ○	● ● ●	● ●	● ●
CIAT Ciater (GB03)		○		●
BAKO BAKOSURTANAL	○	● ● ●	● ● ●	

Fig. 2 GPS campaigns and used receiver types. Open and solid circles represent Trimble 4000SD™ and 4000SST, and Ashtech Z12, respectively.

1994年10月の第4回観測ではITBに固定点をおいて、3台のAshtech Z12を順次移動して測位を行った。従来からの観測と同様、毎日6時間の観測をサンプリング間隔30秒で行い、1点が3日ないし2日の観測を行った。仰角が15°より低い衛星は観測しなかった。GPS観測と並行して、ITBでは気圧、気温、相対湿度の連続観測も実施した。各観測点では、携帯型の測器により、気圧、気温、相対湿度をGPS観測中に約30分間隔で読み取った。

3. 測位結果

観測結果の解析はBernese software Ver.3.4によって行った。WGS84基準系に準拠して、1993年に求めたITB1の座標⁴⁾(X: -1915926.4640, Y: 6036458.1350, Z: -759944.3870)を固定して、Tugu, Ciawi, Cibodas, Leles, Nagreg および Ciater の相対座標をLC Solution (ionospheric-free linear combination)として求めた。なお、放送暦を使用し、大気補正は地表で観測した気温、気圧、相対湿度を与えて計算した。

1日毎に決定されたそれぞれの基線長をTable 1に示す。表から明かなように、測位の再現性は、観測時間が6時間とあまり長くないこと、放送暦を使用していることなどもあって、 10^{-8} を超える誤差を生じている。熱帯という気象条件、活発な電離層など困難な問題はあるものの、観測法や解析にはさらに検討を要する結果となっている。

次に、これらの基線のうち、これまでに1993年4月に観測がなされているTuguおよびCiawi観測点についてITB1とを結ぶ基線長変化を調べてみた。その結果を1993年の値を基準にして図示すればFig. 3の

Table 1. Daily repeatability of baseline lengths from ITB1.

Baseline	Day			Length (m)	
	300	301	302	Mean	SD
Cibodas	11073.0635	.0940	.0712	11073.076	.016
Leles	40240.8484	.7723	.8265	40240.816	.040
Tugu	73388.9664	.9054	.9721	73388.948	.037

Baseline	Day			Length (m)	
	303	304	305	Mean	SD
Nagreg	35900.9388	.8979	.9793	35900.939	.041
Ciater	19568.6748	.5642	.5298	19568.590	.076
Ciawi	88002.8931	1.0809	1.2087	88003.06	.16

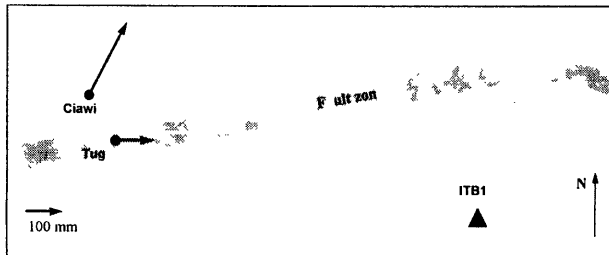


Fig. 3 Displacement of Tugu and Ciawi relative to ITB1.

Table 2. Hourly solutions and their root mean squares of the baseline length of ITB1-Ciater.

UTC	Baseline (m)	rms (m)
3:30	19568.5717	0.0068
4:30	.5867	0.0058
5:30	.6135	0.0107
6:30	.6121	0.0157
7:30	.3652	0.0103
8:30	.5393	0.0102
Mean	19568.556	0.032

ようになる。5 cm 程度の誤差は避けたいが、ITB1 に対して、Tugu は東へ、Ciawi は北東への移動傾向を示している。Lembang および Cimandiri の両断層をつなぐような断層帯が仮に存在するとすれば、これの北側が南側に対して1年当たり、10 cm 程度の割合で北東へ移動していると解釈できる。

ところで、Tugu 点は設置後金属標を盗まれ、このため、岩に掘り込んであった穴を利用して、基点の再現を行った。このため、1~2 cm の誤差を生じた可能性がある。また、Ciawi 点は周辺の整地作業がなされ、このため、標石も多少破損しており、標石本体が工事作業車によって力を受けて多少変位した可能性を否定できない。他方、Fig. 3 にみられる Ciawi の変位量は 20 cm に達する大きな値であり、これは何か別の誤差、例えば 1993 年の観測が Trimble 4000 SD™ でなされており解析には実際の気象観測値は用いられていないこと、両機種による機差の存在の可能性などもある。これらの問題については今後の検討を要する。

木股ほかは、1年当たり約1 cm の速度で、上記断層帯を境に北側が南側に対して東向きに移動しているとの結果を得ている⁵⁾。今回の結果は木股ほかの結果とは傾向は一致するものの、量的には大きな違いがある。いずれにせよ、基線長の時間的変化については、他の基線についての解析と、今後の観測にまつところが大きい。

4. 地表気象データを用いた解析

第2節で述べたように、ITB では気象の連続観測を行い、他の観測点では30分毎に気象観測を行った。一例として、Fig. 4 に ITB1, Ciawi および Ciater における GPS 観測中の結果を示す。Ciater における気温の低下と相対湿度の上昇（降雨による）が顕著である。この地表気象データを使用して、基線解析を行い、この結果を用いて1時間毎に区切って推定した天頂方向の wet zenith correction を図示すれば、Fig. 5 のようになる。図に見られるように、気温/相対湿度の変動とよく似た変動を示しているが、ITB1 と Ciater では補正量がほぼ反対の動きを示しており、気温/相対湿度の変化から期待される補正量というよりも、むしろ ITB1 と Ciater の変動が逆になって求められているというべきで、このことは、地表の気象データを単純に利用しても、誤差の減少には直接につながっていないことを示唆している。

また、この日の観測を1時間ごとの session に分割して基線長を求めた場合の wet zenith correction を求めてみると Fig. 6 のようになる。この場合、wet correction のばらつきそのものは Fig. 5 にくらべ小さくなり、またやや無秩序になったように見える。このときの1時間ごとの基線長は Table 2 のようになる。UTC 6:30 の correction が異常な値を示していると考えて、これを ITB1 と Ciater での correction が逆向きであるとみる方が適切であろう。もしそうであれば、この correction の結果もまだ改善の余地があることを示していると考えられる。

いずれにせよ、実際の気象観測による効果的な wet delay の補正法の研究はこれからの重要な課題であ

り、このためには、より多くの解析研究を必要としている。

なお、前節でも述べたが、基線長そのものについては、気象補正に default 値を使用すれば、実際の測定値を使用した場合に比べて違いを生じることに注意を払うべきであることを再度指摘しておきたい。

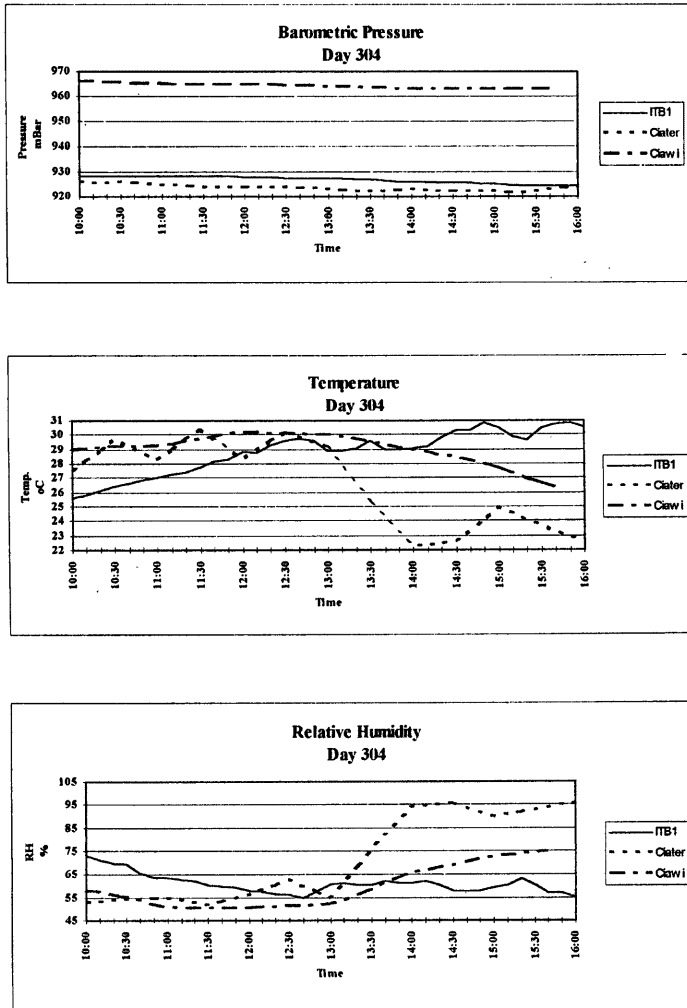


Fig. 4 Pressure, temperature and relative humidity on the ground at ITB1, Ciater and Ciawi.

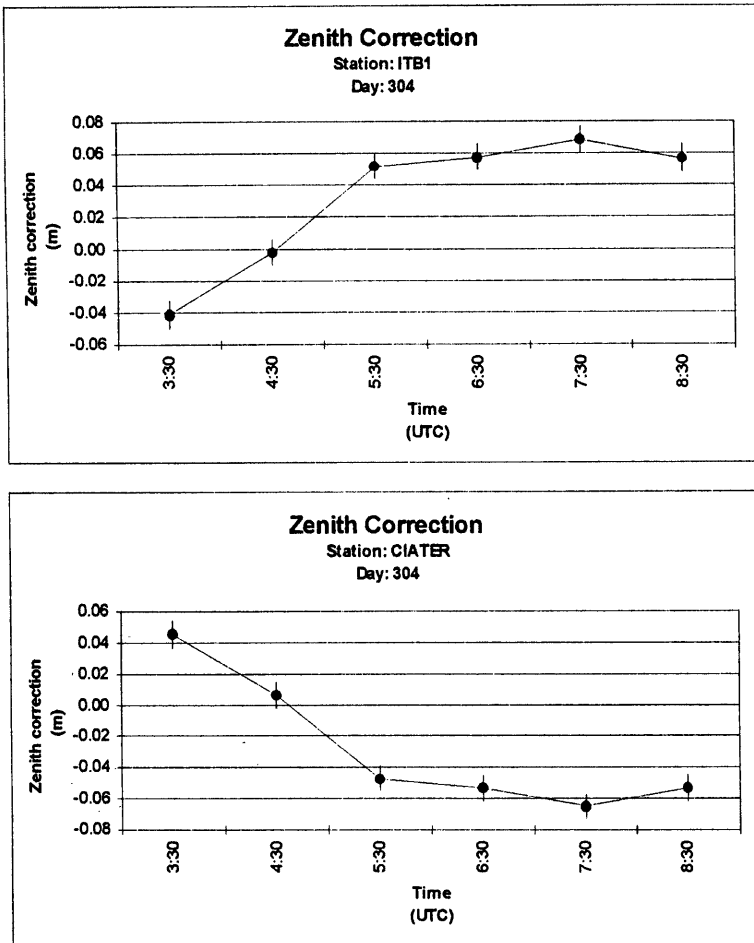


Fig. 5 Zenith wet corrections at ITB1 and Ciater.

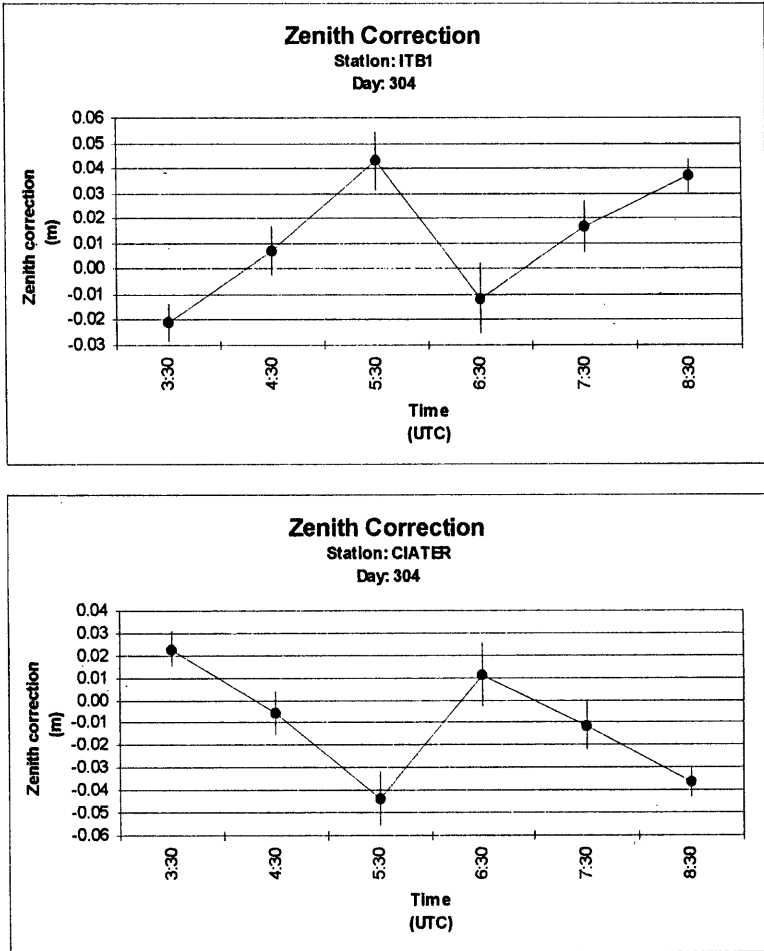


Fig. 6 Zenith wet corrections estimated from hourly solutions at ITB1 and Ciater.

5. 重力測定

1995年9月にこのGPS観測網を含む地域で重力測定を実施した。測定方法は前回(1993年10月)³⁾とほぼ一緒である。異なる点は、使用した重力計がラコスト重力計2台からシントレックス重力計1台に変わっ

たことと、重力計のスケールファクターを決定するためにシンガポールと日本の2カ所の重力基準点を使用するにあたって、日本側の基準点が成田空港から京都大学の基準点に変わったことである。IGSN 71に準拠あるいは登録されている重力値の差を真値として、2点で測定された重力差がそれに一致するようにスケールファクターを決定した。残念ながら今回は、復路にシンガポールに立ち寄ることが出来なかったのがかなり変則的な往復測定となってしまった。また、臨時の重力基準点として関西空港に基準点を設ける予定であったが、海が静かであっても周期が1-2秒から数秒の大きな振動があって基準点として機能しなかった。従って、重力計のスケールファクターやインドネシアの重力値を決定するに当たって、その信頼性が大きく低下してしまっ。不完全ながらも得られたスケールファクターを使用してインドネシアの重力原点であるバンドンのDG.0の値を決定すると前回の結果よりも $26\mu\text{gal}$ 大きな値が得られた。重力の時間変化は無いものと仮定して、通常の国際重力結合の決定精度からすると、一見良く求まった様に見える。しかし、前に述べた理由から、単に偶然よい値が得られたに過ぎないと見るべきであろう。この原点と今回測定したインドネシア国内の各測定点との間の重力差と、前回に得られた重力差とを比較すると明らかにスケールファクターの決定誤差の影響が見られた。そこで、その影響が最小になるようにスケールファクターを決め直して、更に今回のDG.0の重力値を前回のその点の重力値に一致させて各測定点の重力値を決定した。また今回使用した重力計のスケールファクターはメーカーが提供している値に対して1.00043と求まった。

インドネシアでの測定点の分布はFig. 7に示されている。また各測定点の重力値はTable 3に示してある。前述のようにSingapore Aを基準としたインドネシアの重力基準点であるバンドンのDG.0の重力値の決定には信頼性は期待できない。しかし、今回、このDG.0からバンドン(Bandung)の北方のスーバン(Subang)に伸びる重力検定線でレンバン(Lembang)やチボダス(Cibodas)のGPS観測点を通して2回、東方のグントール(Guntur)火山を取り巻くナグレグ(Nagreg), レレス(Leles), ガルト(Garut)及びカモジャン(Kamojang)の間を往復測定した。バンドンとその西南方向のスカブミ(Sukabumi)の間はそれぞれの片方向の測定日は異なるが往復測定をして、スカブミを始点としてスカネガラ

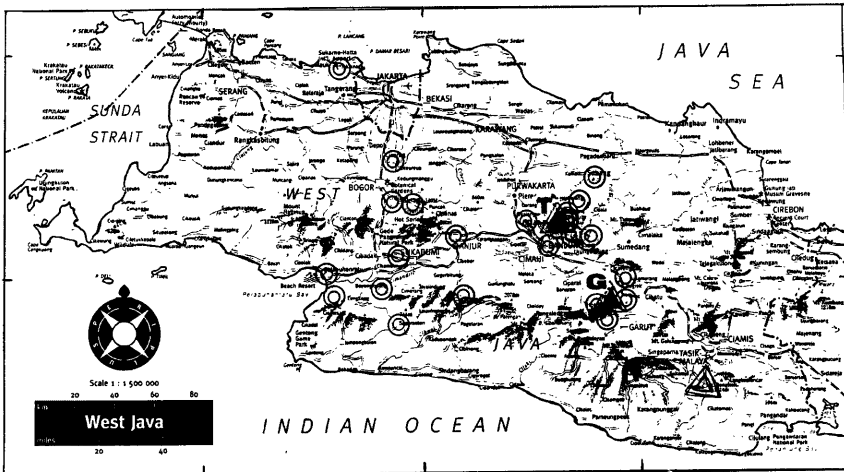


Fig. 7 Location of the gravity observation sites in West Java.
Volcano (T : Tangkubanperahu, G : Guntur)

Table 3. Gravity observation sites and gravity values.

SITE NAME	LONGITUDE			LATITUDE		ALTITUDE		1993 mgal	DIF mgal
	D	M	S	D	S	M	1995 mgal		
SINGAPORE A	103	49	5. E	1	19 10. N	19.2	978 066.684	066.684	0.0
SINGAPORE B	103	51	3.8 E	1	17 50.1N	8.2	978 066.079	066.094	-0.015
BM 805	103	51	1. E	1	17 48. N	6.619	978 066.294	066.286	+0.008
CHANGI T1-JP	103	59	27. E	1	21 38. N	5.4	978 059.700	059.674	+0.026
CHANGI T1-BK	103	59	31. E	1	21 37. N	9.	978 059.029	059.015	+0.014
CHANGI T2-EC	103	59	29. E	1	21 30. N	10.	978 055.007	***	
LADYHILL HTL	103	49	50. E	1	18 30. N	30.	978 067.460	***	
CENKA T2-E	106	42	0. E	6	8 30. S	10.	978 138.136	138.153	-0.017
CENKA T1-A	106	42	45. E	6	8 55. S	10.	978 137.865	137.886	-0.021
BAKOSURTANAL	106	50	56.1 E	6	29 27.8 S	158.504	978 114.886	115.007	-0.121
GPS CIAWI	106	50	52.3 E	6	39 19.4 S	469.900	978 055.765	055.743	+0.022
GPS TUGU	106	58	17.9 E	6	42 10.4 S	1122.364	977 934.928	***	
CIANJUR CNMA	107	8	42. E	6	48 42. S	450.	978 065.099	***	
GPS CIKLON W	107	26	42.4 E	6	45 25.1 S	665.992	977 985.447	985.438	+0.009
ROYL DAGO IN	107	37	30. E	6	53 15. S	770.	977 967.936	967.904	+0.032
DG.0 GEOLOGI	107	37	54. E	6	53 54. S	718.0	977 976.480	976.480	0.0
GB06 BKSRTNL	107	37	56. E	6	46 26. S	1600.	977 815.909	815.920	-0.011
GB05 BKSRTNL	107	38	38. E	6	45 34. S	1200.	977 882.271	882.286	-0.015
GB04 BKSRTNL	107	38	47. E	6	44 8. S	1000.	977 914.828	914.822	+0.006
GB03 BKSRTNL	107	39	38.8 E	6	42 1.5 S	590.342	977 957.278	957.282	-0.004
GB02 BKSRTNL	107	41	17. E	6	40 39. S	300.	978 008.217	008.216	+0.001
GB01 BKSRTNL	104	45	31. E	6	34 20. S	50.	978 091.730	091.730	+0.000
GPS LEMBANG	107	36	58.6 E	6	48 50.7 S	1265.048	977 871.568	871.572	-0.004
GPS CIBODAS	107	40	0. E	6	47 0. S	1000.	977 878.266	878.274	-0.008
GPS NAGREG	107	54	30. E	6	59 0. S	500.	977 976.803	976.822	-0.019
GPS LELES	107	55	0. E	7	5 0. S	700.	977 986.033	986.044	-0.011
GPS GARUT	107	51	39.3 E	7	12 34.7 S	901.342	977 950.045	950.043	+0.002
KAMOJANG MON	107	50	0. E	7	13 0. S	1300.	977 833.175	833.168	+0.007
GPS SKANEGRA	107	7	52. E	7	5 51. S	625.	978 026.513	***	
GPS SAGRANTN	106	53	0.6 E	7	13 6.1 S	391.521	978 072.280	***	
GREEN LEAF H	106	53	0. E	7	0 0. S	0.	978 072.280	***	
GPS BOYONLOP	106	48	4.5 E	7	8 15.6 S	489.878	978 130.978	130.900	+0.078
GPS KIARADUA	106	35	27.6 E	7	5 50.4 S	746.872	978 157.122	157.084	+0.038
PELABUHANRAT	106	32	35. E	6	59 20. S	3.	978 236.089	236.034	+0.005
GPS CISAAT	106	53	28.3 E	6	54 29.9 S	621.224	978 079.477	079.532	+0.055
TMP CISAAT	106	53	27. E	6	54 30. S	622.5	978 079.432	***	

(Sukanegara), サガランテン (Sagaranten), ボジョロンパン (Boyonglopang), プラフバンラト (Pelabuhanratu) およびキアラdua (Kiaradua) の往復測定を実施した, また, スカプミからチザート (Cisaat), チアウィ (Ciawi), ツーグー (Tugu) およびチアンジュール (Cianjur) からスカプミまでの環の往復測定をした。最後にバンドンとチェンカレン (Cengkareng) (ジャカルタ) 空港との間を1日で往復測定をした。途中ではチアンジュール, ツーグー及びチアウィで測定をしている。パコスルタナル (BAKOSURTANAL) やチカロンウェタン (Cikalongwetan) はバンドンとジャカルタの往復やバンドンとスカプミの往復の際に測定した。今回は測定地点を必ずしも1日以内とは限らないが往復測定で接続した。前回はスカプミから南側の地域の測定は1日ですませたが, 単に片道の環閉合をしただけだったということ, 途中の道路事情が極めて悪かったことにより, 測定精度は余り期待できない。この地域の今回の結果が前回の結果よりも数十 μgal 大きくなったのはこのあたりに原因がありそうである。今回使用したシントレックス重力計は必ずしも最高の状態ではなかったが, 前回のラコスト重力計と同程度の精度で測定でき

た。BAKOSURTANALの値が今回大きくずれているが、測定の前後で天気が急変して待機したことにより、重力計のドリフトに何らかの影響があったかもしれない。原因は不明である。

バンドンの重力基準点からの相対的な重力差は、各測定点とほぼ完全な往復測定で結合されているので、かなり信頼できる。従ってもう一度日本、シンガポールとバンドンの間を精密に重力結合をすることができらば今回の結果はより有効性を高めることができる。重力の時間変化は無いと仮定して重力値を決定したが、現段階ではこれで良いようである。タンクパンブラウやゲントール火山の周辺では今後重力変化が生じる可能性はあるが、1993から1995年にかけては有意な重力変化は見られなかった。

6. まとめ

1994年10月に実施したGPS観測の結果は、誤差について不明な部分が大いものの、LembangおよびCimandiri両断層を結ぶ断層帯があるとすれば、その北側が南側に対して東向きに変位していることを示している。これは以前から木股ほか⁵⁾によって指摘されていた傾向と一致するものであるが、確定的な結論を得るためには、さらに、詳しい解析と観測を必要とする。

地表で観測された気圧、気温、湿度を使って単純に解析した結果は、必ずしも精度の向上につながっていない。この問題の複雑さは以前から指摘されている通りであるが、さらに、資料の蓄積と解析方法の改善を試みて、一層の高精度化を実現させることが必要である。

おわりに臨み、本共同研究の実施に対してご支援ご協力を下さった多くの方に、心より感謝の意を表する次第である。なお、本研究は防災研究所の「東アジア(中国・インドネシア)における自然災害の防御と軽減に関する研究」(特別事業費)および文部省国際学術研究(共同研究)課題番号05044053によるものであり、このほかに、日本学術振興会による国際共同研究によって得られた成果も1部使用させていただいていることを付記する。

参考文献

- 1) 田中寅夫・中村佳重郎・木股文昭・村田一郎・大久保修平・三浦 哲・J. カハール・ポニミン M. S.・P. コサシ・バンバン S.・アグス S.S.: ジャワ島西部における GPS 観測, 京都大学防災研究所年報, 37B-1, 1994, 251-256.
- 2) Kahar, J., T. Tanaka, I. Murata, S. Suparka, F. Kimata, S. Okubo, K. Nakamura, K. Prijatna, P. Mentosumitro, B. Setyadjji, S. Miura, K. Villanueva, Kamutono, A. Suwandito and Sudarman : GPS Campaign for Crustal Deformation Monitoring in West Jawa, Indonesia 1992-1993, Proceedings of the CRCM'93, Kobe, December 6-11, 1993, 43-46.
- 3) 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.: 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, 京都大学防災研究所年報, 37B-1, 1994, 257-264.
- 4) Tanaka, T., J. Kahar, F. Kimata, I. Murata, S. Okubo, Kamutono, Wedyanto, K. Nakamura, M. S. Ponimin, P. Kosashi, B. Setyadjji, S. Miura, K. Villanueva, H. Edwin, A. Saewandito, S. Kurdinant, P. Augustine, J. Rais, K. Hirahara and S. Suparka : Monitoring of Crustal Movements by GPS and Gravity Change around Volcanoes and Active Fault Systems, Japan-Indonesia Joint Research on Natural Hazard Prediction and Mitigation, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, March 1994, 56-72.
- 5) 日本・インドネシア GPS 研究グループ (発表者 木股文昭): GPS によるインドネシア西ジャワ地域における地殻変動の観測 (1992-1994), 日本地震学会講演予稿集, 1994 年秋季大会, 1994, 179.