

ジャワ島西部における GPS 観測

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.

GPS OBSERVATIONS FOR CRUSTAL MOVEMENT MONITORING IN WEST JAWA, INDONESIA

By Torao TANAKA, Kajuro NAKAMURA, Fumiaki KIMATA, Ichiro MURATA,
Shuhei OKUBO, Satoshi MIURA, Joenil KAHAR・Ponimin Mento SUMITRO
Kosasih PRIATNA・Bambang SETYADJI・Agoes Soewandito SOEDOMO

Synopsis

A network for precise GPS positioning has been established in western Jawa in order to monitor the crustal movements associated with Lembang fault and Cimandri fault system and the activity of the volcano Tangkubanperahu and the Kamojang geothermal area which are located close to Bandung City. The results from GPS campaigns carried out in April 1992 and in April 1993 show that the long-term and short-term repeatabilities of these campaign solutions are of the order of 10^{-7} , but they are not so good as repeatabilities observed in Japan or in Europe and North America where the climate is rather temperate or frigid and the ionospheric activity is not so high as in the tropical zone. It is essential for precision improvement to fix cycle slips and to correct the propagation delay in the lower troposphere in case of tropical GPS campaigns.

1. はじめに

防災研究所は「国際防災の十年 (IDNDR: International Decade for Natural Disaster Reduction)」への貢献を目指して、1991 年度から国際共同研究「東アジア (インドネシア・中国) における自然災害の予測とその防御に関する研究」に着手した。われわれはその中の課題の一つ、「火成過程と噴火活動に関する研究」において「安山岩質火山活動周期に関する研究」を分担し、インドネシア国立科学院 (LIPI: Indonesian Institute of Sciences) の地質工学研究開発センター (RDCG: Research and Development Centre for Geotechnology) およびバンドン工科大学 (ITB: Institute of Technology Bandung) との共同研究を行ってきた。火山活動・地熱活動・活断層の断層運動に関連するジャワ島西部地域の地殻変動を GPS (Global Positioning System: 全世界測位システム) によって観測し、これによってこの地域の地殻変動を明らかにして、テクトニクスと火山活動周期に関する研究を進めるのが主な目的である。とくに熱帯地域における GPS による広域地殻変動の観測は大気中での電波伝播遅延および活発な電離層の活動に起因する測位誤差が大きく関係するものと予想されるため、電波伝播誤差とその補正に関する研究も行なうこととした。

本稿では 1991 年から 1993 年までの 3 年間に行なった研究と得られた成果について報告する。

2. GPS 観測基線網の設置

GPS 基線網の標石埋設作業は 1991 年 11 月に実施したが、これに先立ち、地質工学研究開発センターおよびバンドン工科大学のインドネシア側 2 機関のスタッフによる選点のための現地調査および土地使用許可申請など交渉作業が行なわれた。バンドン市の北部をほぼ東西に走る地質学的・地形的に顕著なレンバン (Lembang) 断層の断層運動、さらにその北にそびえるタンクバンペラウ (Tangkubanperahu) 火山の活動、バンドン市の南にあるカモジャン (Kamo-jiang) 地熱地帯の活動、レンバン断層のはるか西方向への延長上にある地質学的なチマンデリ (Cimandiri) 断層系の運動、このチマンデリ断層がレンバン断層とつながるものなのかあるいは北へ方向を転じてボゴール (Bogor) 市周辺で南北に分布している微小地震を起こしている、例えば潜在断層などの活動につながるのか、を明らかにすることなど、この地域の広域地殻変動観測に基づくジャワ島西部の広域テクトニクスの把握を目標として、

Fig. 1 にしめすように 14 地点 (No.1~14) に GPS 観測のための標石を設置した¹⁾。

われわれの標石は、インドネシア測量地図局 (BAKOSURTANAL) が定めている標石の構造に準ずるものとして、鉄筋入りのコンクリート製とし (**Photo 1**)、地中部分は深さ 70~100cm、その底部は 70cm 程度の広がりをもたせる (**Photo 2**)、地表上



Fig. 1 GPS network in west Jawa. CIAT and BAKO are GPS stations at Ciatiri and BAKOSURTANAL in Cibinong, respectively. 1: Nagreg, 2: Leles, 3: Garut, 4: Cikalongwetan (TTG, 95), 5: Lembang, 6: Cibodas, 7: Sukanegara, 8: Sagaranten, 9: Bojonglopang, 10: Kiaradua (LIPI), 11: Pelabuhanratu, 12: Cisaat, 13: Ciawi, 14: Tugu, 15: ITB1.

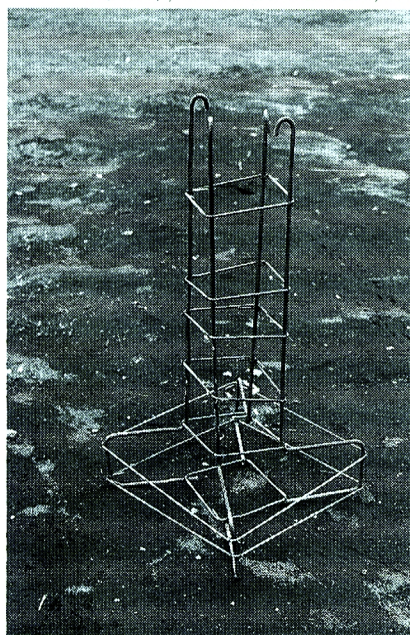


Photo 1. Iron frame of GPS mark pillar.

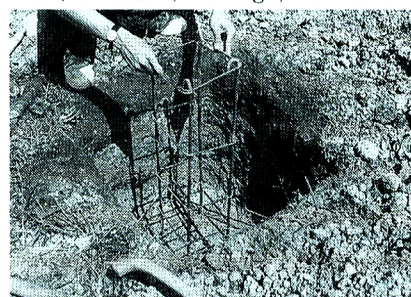


Photo 2. Setting up the GPS mark pillar at Bojonglopang.

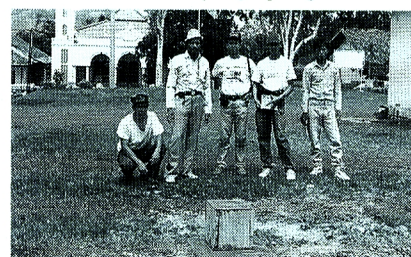


Photo 3. GPS mark pillar at Bojonglopang and the group members participated in the work.

に約 30cm 頭部を出すこと (Photo 3) にしてその頂部 25×25cm の中心にステンレス製のマーク (Photo 4) を埋め込むことにした。

設置後のコンクリートの固化など安定化のための期間をおいた後、1992 年 4 月にこれらの観測点から構成される基線網において第 1 回の GPS 観測が実施された。なお、この時にバンドン工科大学構内の建物の屋上に GPS 観測点 (ITB1, No.15) が設置された。この屋上点は BAKOSURTANAL における GPS 点との結合およびわれわれの GPS 基線網における観測の際の基準点としての観測を行なう重要な点となっている。

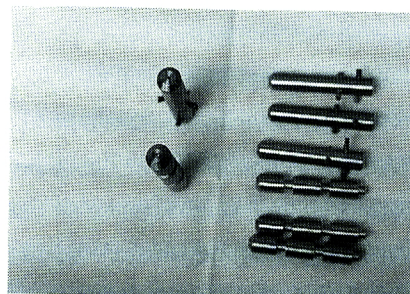


Photo 4. Stainless steel marks buried at the top of GPS pillars.

3. GPS 観測と結果

1992 年 4 月および 1993 年 4 月に GPS 基線網における GPS 観測を実施した。第 1 回目の 1992 年 4 月には 3 台の GPS 受信機 Trimble4000SD™ が使用された。まず測量地図局の GPS 点 (BAKO) とバンドン工科大学の基準点 (NO.15) を結んで相対観測が実施された。これにより、測量地図局の点を既知としてバンドン工科大学点 (No.15) の座標値が決定された。次に、この No.15 点を基準として、バンドン市を中心に主としてその周辺および基線網の東部の観測点において GPS 観測が実施された。原則として 1 観測点において 1 日 6 時間のセッションを 3 日間実施するとの方針で、順次観測点を移動して行く方式で進められた。

1993 年 4 月に実施された第 2 回目のキャンペーンでは、バンドン工科大学点 (No.15) と測量地図局 (BAKO) で全期間を通して Ashtech の GPS 受信機による連続観測が実施され、4 台の GPS 受信機すなわち 3 台の Trimble4000SD™ および Ashtech 受信機 1 台を順次基線網の観測点を移動して観測を実施した。第 2 回目においても、1 日 6 時間のセッションを 3 日実施するとの方針で観測を進めた。これらの結果のうち、第 1 回目と 2 回目の観測が実施され基線解が求められた Garut (No.3)-ITB1 (No.15), Lembang (No.5)-ITB1 (No.15) および Garut (No.3)-Lembang (No.5) の 3 基線について、その基線長およびその成分値をまとめて Table 1 に

Table 1. Baseline lengths and their components in mm observed by the campaigns in April 1992 and April 1993.

0003(Garut)→ITB1		Line length	E-W	N-S	UP
	Day	45,162m	27,840m	35,559m	-248m
1993	101	086±11	373	328	704
	102	051±11	376	281	649
	Mean	069±18	375±2	305±24	677±28
1992	(Apr)	108±11			
0005(Lembang)→ITB1		Line length	E-W	N-S	UP
	Day	8,234m	-799m	-8,182m	-457m
1993	101	337±1	104	708	194
	102	340±2	080	714	186
	Mean	339±2	092±12	711±3	190±4
1992	(Apr)	341±4			
0003→0005		Line length	E-W	N-S	UP
	Day	51,431m	-270,047m	43,745m	155m
1993	100	951±8	347	428	445
	101	957±8	375	417	381
	102	910±12	384	357	431
	103	882±8	249	407	338
	Mean	925±31	339±54	402±27	441±27
1992	(Apr)	941±8			

示した。解析は Trimvec ソフトウェアによって、放送暦を使用して、20km より長い基線については三重差、20km より短い基線については二重差をとり解を求めた²⁾。この結果における日毎の再現性 (短期) および 1 年を隔てた再現性 (長期) をみると、いずれも再現性は 10^{-6} を上回り、 10^{-7} の桁にあることが分かる。しかしながら、わが国などのように温帯地域とか比較的寒冷な地域における観測に較べて観測精度は悪い。その原因としては、衛星配置、電離層の高い

活動度、大気中に水蒸気量が多いこと、などがあげられる。

4. 気象観測と結果

熱帯地域では気温が高いため、対流圏下部の水蒸気による電波の伝播遅延による誤差が大きくなり、これがGPS 相対測位の精度を低下させていることが予想された。このため、移動型連続観測用の気圧計・温度計および相対湿度計を導入して、これによる試験観測を実施してきた。電源の問題、運送の問題、雨中における観測のための準備などの関係上全期間にわたって観測を実施できなかったが、一例として基線網西部に位置する Sukabumi

市で期間中観測した結果を Fig. 2 に示す。なお、同図には比較のため、わが国における梅雨期の観測結果を、インドネシアの雨季の状況に近いものとしてならべて示した。

一見して明らかなように、Sukabumi での記録では日々の気温変化とそれに伴う大きな湿度変化が特徴的であり、これがGPS 観測の誤差の一部となることを予想させる。ついであるが、気圧に見られる半日周期の規則的な変動 (S_2 潮) が非常に印象的である。

屋外での湿度観測については、センサー部分への結露など観測中の換気に十分注意する必要があることを改めて認識するところとなった。

5. 議 論

地殻変動を正確に捉えるためには、標石は岩盤にしっかり固定されていなければならないのは当然である。これに対して本研究における標石は、2. で述べたように鉄筋入りのコンクリート柱を比較的柔らかい土中へ埋設したものとなっている。上空の開けた視界が将来にわたりできるだけ長期間確保できること、観測に要する時間を節約するため自動車による接近が可能であること、標石の破損など損害を受けにくいこと、などを条件に選定された結果、さしあたり町村役場の敷地内とか学校のグラウンド、サッカー場などに標石

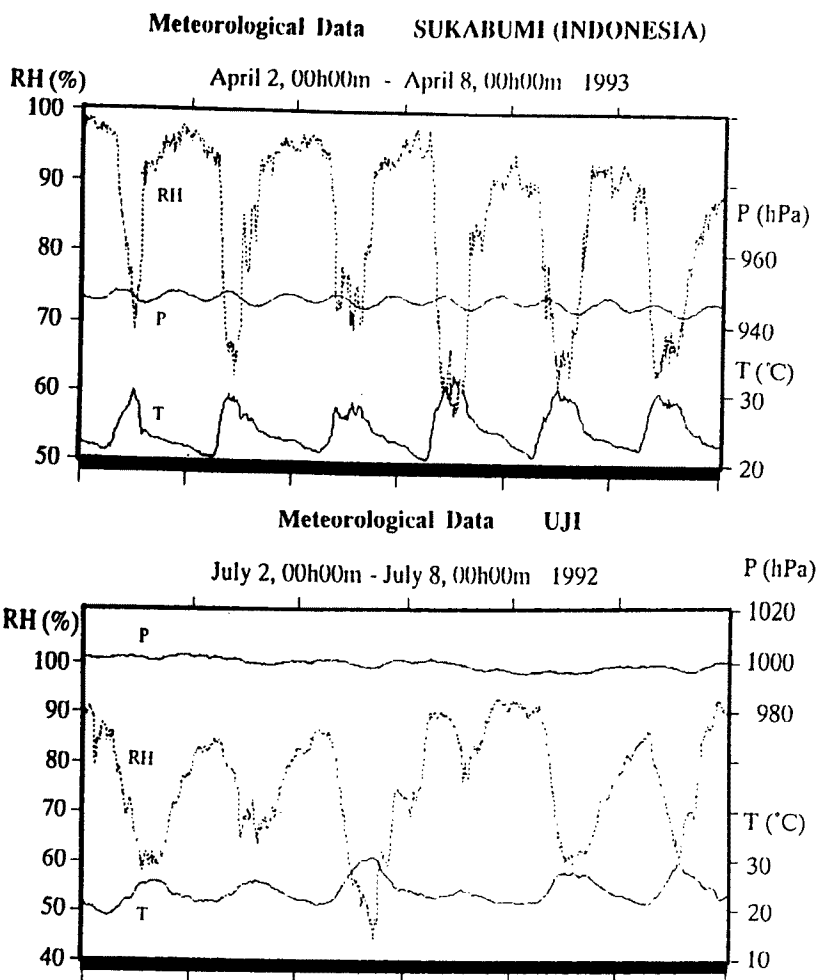


Fig. 2 Meteorological data observed at Sukabumi in Indonesia and at Uji in Japan. P: Pressure, T: Temperature, RH: Relative humidity.

を埋設せざるを得なかった。このような設置状況に対する答えはいずれ明らかになるが、筆者らのこれまでの光波測量における経験からみて、土中に埋設した標石でも水平方向の移動はほとんど無視できるものと考えている。ただし、地震時の振動の影響であるとか、地すべりが起こっている場所などでは別問題である。このような場所はまた防災的な面から新たな資料を提起するところとなるであろう。

いずれにしても、基盤に固定された GPS 観測点を設置することが望ましいのは当然であり、インドネシア側研究者によって、より良い基線網のための選点調査が今後も継続されることになっている。

GPS 観測結果には、活発な電離層の活動に起因する電波伝播擾乱によると考えられるサイクルスリップが頻発しており、これが解の再現性の低下の一因となっている²⁾。

電離層の比較的静穏な夜間の観測は治安上の問題から現在は不可能であり、サンプリング間隔を短くすること、これによって可能な限り短時間に解を得ることが最も有効な対策であると考えられる。この点からみて、防災研究所が 1994 年に導入した Ashtech Z-12 受信機は数分間のデータに基づいて解が得られるという現在では最良の性能を有しており、本研究で使用してきた旧世代の受信機 Trimble4000SD に較べてサイクルスリップの少ないデータが得られ、今後は測位精度がかなり向上することになると予想される。

大気中の水蒸気分布は空間的によく混合されていないために一様ではなく、このため、水蒸気が引き起こすマイクロ波の伝播遅延も一様ではない。インドネシアなど熱帯地域でも最大 40cm 程度とそれほど大きな値ではないものの³⁾、1~2 cm の精度を要求する場合には誤差の原因となり、しかもその補正はきわめて困難であるとされている。前節で示した解析結果では、実測値に基づいた伝播遅延補正は行っていないので、水蒸気による誤差もかなり含まれているはずである。GPS 観測を実施した 4 月は雨季の終わり頃に当たっており、雨中での観測データもかなり含まれている。長時間の観測を平均することによって水蒸気の不均一な分布の影響もある程度消去できる可能性はあるが、地表での気象観測に基づく補正とともに、水蒸気ラジオメータによる同時観測もインドネシアのような熱帯地方での GPS 測位の精度向上には有効であると考えられる。大場⁴⁾は、わが国における GPS と水蒸気ラジオメータの平行観測結果から、水蒸気ラジオメータの利用が梅雨期など高温多湿期における GPS 測位精度の向上にとくに有効であることを示した。

水蒸気ラジオメータによる観測を含め、熱帯地域での GPS 測位精度向上のための伝播遅延誤差の補正に関する研究を今後推進していく必要がある。

6. 結 論

基線長などの再現性は短期、長期ともに再現性は 10^{-6} を上回り、 10^{-7} の桁にあることが分かったが、温帯地域とか比較的寒冷な地域における観測に較べて観測精度は悪い。この原因は活発な電離層と高い気温による大気中水蒸気量の多さに起因するものと考えられる。今後 GPS 観測を反復することにより、この地域の広域地殻変動とか、もし実際に起こっているとすれば断層運動などが把握できる筈である。この場合、GPS 観測が高精度であればあるほど、短期間の内に変動を把握することが可能となる。従って、気象要素とくに水蒸気量の変動による伝播遅延誤差補正に関する研究を進めること、サンプリング間隔を短くしてサイクルスリップを少なくするように観測を行なうなど、観測・解析に関する調査研究を進めて行く必要がある。これらの課題は引き続き実施される予定である次期の共同研究においても取り組まれる計画である。

謝 辞

この研究は文部省の特別事業費「国際共同研究」によって、国際防災の十年に貢献するべく実施されたものである。同じく文部省科学研究費補助金（国際学術研究（共同研究）研究課題「東アジア（インドネシア・中国）における自然災害の予測とその防御に関する研究（研究代表者：土屋義人京都大学教授）」により、現地観測などの補強がなされた。さらに、日本学術振興会による研究グループ（研究代表者：村田一郎

東京大学教授) との共同観測なども本研究推進上極めて有効であった。また、現地調査観測などに際してはインドネシア国立科学院地質工学研究開発センター、バンドン工科大学およびインドネシア国立測量地図局の各機関および関係スタッフ、さらに GPS 観測点標石の設置については許可を頂いた諸官庁など、多くの方々に大変お世話になった。ここに謹んで感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Kamutono: Deskripsi lokasi titik pemantauan posisi berdasarkan teknik pengamatan satelit GPS daerah Jawa Barat, Pusat Penelitian Pengembangan Geoteknologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, 1991, pp.1-7.
- 2) 日本・インドネシア GPS 研究グループ (発表者 名古屋大学 木股文昭) : インドネシア西ジャワにおける GPS 観測 (1992-1993), 日本測地学会第 80 回講演会要旨, 1993, pp.89-90.
- 3) 田中寅夫: 冬季における大気中の水蒸気の地域的分布とマイクロ波の伝播遅延, 測地学会誌, 第 32 巻, 第 3 号, 1986, pp.167-173.
- 4) Ohba, M.: On Improvement of GPS Surveying Precision Using Water Vapor Radiometers, 平成 5 年度科学研究費補助金 (一般研究 A) 研究成果報告書 (課題番号 03402014), 1994, pp.49-98.