

バンドン盆地およびグントゥール火山周辺（インドネシア） における重力探査

中村佳重郎^{*}・伊藤 潔^{*}・浅田照行^{*}・松尾成光^{*}
テディ Y.P.^{**}・ドゥディ D.^{**}・ミピ A.K.^{**}・ハサヌディン Z.A.^{**}

^{*} 京都大学防災研究所
^{**} バンドン工科大学（インドネシア）

要 旨

インドネシアのバンドン市周辺とそこから東南東約 40 km に位置するグントゥール火山周辺の 2 つの地域で東西、南北何れも約 30 km の範囲で、バンドン市周辺ではほぼ南南西―北北東と西北西―東南東方向の 2 本の測線に沿って約 1 km の間隔で、グントゥール火山周辺では数百メートル間隔で面的に重力探査を実施した。バンドン周辺では密度が 2.2 g/cm^3 と比較的小さく、グントゥール火山周辺では 2.5 g/cm^3 であった。また、両地域での重力異常について考察する。

キーワード： GPS 測位，重力探査，重力異常，密度

1. はじめに

バンドン(Bandung)市はジャワ(Jawa)島の西ジャワ(Jawa Barat)州の州都であり、人口は 150 万人を

超える都市である。その約 10 km 北ではレンバン(Lembang)断層が東西に走り、その更に数 km 北には、船底を上向きにした様な形の平坦な山頂を持つタンクバンプラウ(Tangkuban Perahu)火山が聳えている。

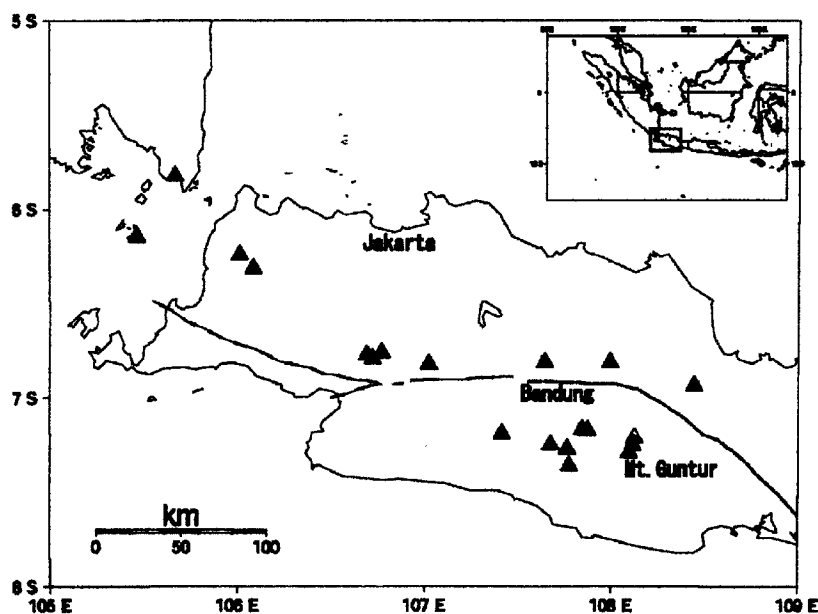


Fig. 1 Volcanoes (triangle) and tectonic line (solid line) in Jawa Barat (West Java)

バンドン市はこの火山から噴出された砂、礫、溶岩などからなる安山岩質の凝灰岩の上に発達している (Silitonga, 1973)。標高は北から南に向かって下がり、市の中心部から数 km 南で平坦になり、更に数 km 南から再び標高が上がって盆地を形成している。盆地の中心部では過去 10 年間で 3 m を超す激しい地盤沈下が進行中である。なお、レンバン断層は、スマトラ島にも連なるジャワ島の南部を走る大規模な構造線の一部であるチマンディリ (Cimandiri) 断層 (A. Soehaimi, 1998) の延長線上にある。

一方、グントゥール火山はこの構造線の南側にあり、バンドンから東南東約 40km の所にある。有史以来何回も顕著な噴火活動があったにもかかわらず、最近では 1843 年以降顕著な噴火活動は報告されていない。しかしながら、現在は火山性地震活動が比較的活発で、インドネシアではその活動が注目されている火山の 1 つである (Fig. 1)。

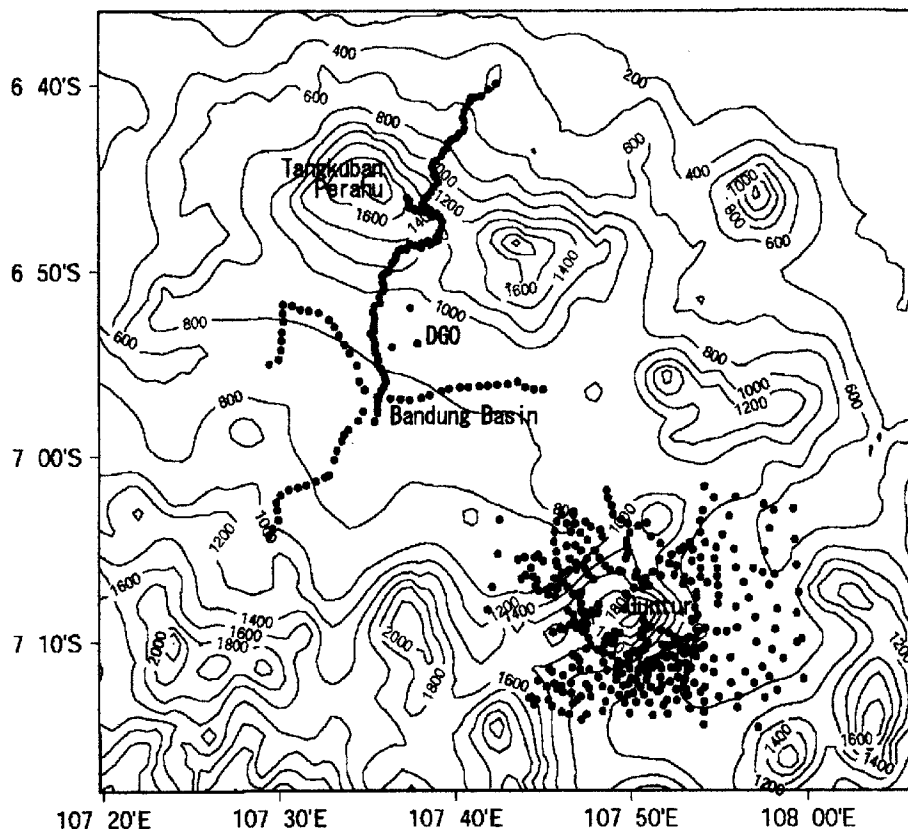
山頂部には北西から南東にかけてドームや火口が連なり、南東に行くに従って各山頂の標高が低くなると共に火山活動の時期は新しくなっている。また、山体の西側にはカモジャン (Kamojang) の、南西 10km ほど離れたところにはダラジャット (Darajat) の地熱地帯がある。詳しくは井口・他 (1996, 1998) を参照されたい。

2. 重力測定とデータ

バンドン盆地周辺の重力探査では、1997 年の「レンバン断層およびチマンディリ断層の構造調査」の際に、バンドン市から約 25km 北のジャランチャガク (Jalancagak) からバンドン市の南部地域に至る区間を約 500m 間隔で測定した (Nakamura et al., 1998) 時のデータを使用することとした。更に今回は南西方向に延びている道路を利用して基盤が出る所まで測線を延長し、安心の為に更に 5km 程進んで南北成分のデータとした。東西方向の測定では、盆地の西側の部分にまっすぐ西へ進む道路が無いために南北成分が大きく入り込む測線となっている。更にこの測線は盆地の中央付近というよりは北部を通っているが、西東の両端で盆地の境界を越えて基盤が出ていることが確信できる地点間を測定することが出来た。なお、測定は 1km 間隔で実施した。

各測定点での重力値はバンドンの地質博物館内にあるインドネシアの基本重力基準点である DG.0 との差から求めた。この基準点の重力値は、これまでに 3 回の日本—シンガポール—インドネシア間の国際重力結合で求められた (Nakamura et al., 1997) 値 977 976.500 mgal を使用した。

グントゥール火山周辺では、1999 年に重力探査が実施されている (Nakamura et al. (2000))。今回はその



時測定した 299 点の空間分布から見て、重要な山体の中央部であるにも拘わらず測定の空白域となっている地域で補充測定を実施した。また、山体の重力異常の特徴を見易くするために測定域を外辺部に拡張、重力異常図を作図する際に外挿で発散が目立つところを重点的に測定した。具体的にはグントゥール火山の山頂付近と、山頂から東と西に離れた比較的平坦な沖積地で測定した。測定点の数はそれ程増えなかったが、推定値が実測値に代わりデータの信頼性が高まった(Fig.2)。

重力の基準点としては、1999 年の測定の際と同一のインドネシア火山研究所のグントゥール観測所構内にある G P S 基準点を使用した。この点とバンドンの DG.0 とはこれまでに 4 回往復測定をしてある。

使用した重力計は SCINTREX 重力計と LaCoste & Romberg 重力計である。重力計のスケールファクターは、京都大学の基準点と重力結合してある高槻市内の基準点とシンガポール (Singapore B) 及びインドネシアの DG.0 における各重力計の測定値を比較して補正した。この地域での重力の最大と最小の差がほぼ 200 mgal なので、スケールファクターに起因する重力計間の測定誤差は、0.02 mgal 以内に納まる。また、重力測定をするに当たっては、1 日の最初と最後は必ず同一点で測定し、重力計のドリフト補正の信頼性を高めた。

重力の測定点の位置決定には 2 周波の G P S 受信機を使用した。1999 年には移動点では 2 秒サンプリングで 200 エポックを観測したが、山の中に分け入ると無人の基準点では長時間の観測をする事になるので、今回は各点において 3 秒サンプリングで 150 エポックの観測をした。G P S 観測の基準点として、バンドン地域の測定の際にはバンドン工科大学の基準点を使用し、グントゥール地域での測定の際にはグントゥール観測所の基準点を使用した。

3. バンドン周辺でのデータ

ブーゲー補正や地形補正をするための密度の推定をするに当たって、まず、バンドン周辺での測定点の標高と、そこでの正規重力からのずれとの関係をグラフにした (Fig.3)。Fig.3 において標高が 1200m を超えた辺り (Fig. 2 ではバンドンの北側で測定点の列が向きを急に東に変える直前の辺り) がレンバン断層に相当し、それより高いところの値はタンクバンブラウ火山での値である。また、標高 1200m 辺りの図中の直線の上側から、この直線と交叉してそ

の下側に移り標高 500m を切る辺りまで達している点の列はレンバン断層よりも北側での値である。レンバン断層よりも南側での点の値は、標高 1200m を超えた辺りの直線の下側から直線と交叉して、その上側に移り標高 700m を切る辺りまで並んでいる。これらのデータは 1997 年の結果 (Nakamura et al., 1998) である。タンクバンブラウ火山を除くと、レンバン断層から数百メートル北でこの測線の標高は最高となり、地形は南と北に傾斜している。標高 700m から 800m にかけての塊と、その最上部から直線の上側を列を為して 1000m を超える辺りまで連なっている点の並びが今回バンドン盆地周辺で得られた測定値の並びである。

今回得られたデータとタンクバンブラウ火山でのデータを除いて地区ごとに直線で近似すると、断層の北側での直線の勾配は、南側のそれよりも明らかに緩やかになっている。地質図によると断層の南北はタンクバンブラウ火山と同じ岩質の層で覆われている。このことから勾配の違いを説明するには、断層の南側には密度が 1.8g/cm^3 位の層があり、北側には密度が 3.4g/cm^3 の層が存在すると考えるよりは、表層よりも密度の大きな基盤が北向きに傾斜していることによると考える方が理解しやすい。また今回測定した盆地南部境界の外側でのデータは、実線より上側に大きく離れて列をなしている。このことは盆地の南側境界の外には密度の大きな物質が存在している可能性を示している。現在手許にあるデータは 2 測線分だけのなので、詳しく構造について議論するには自ずと限界があるが、地区ごとにこれだけ明瞭に異なる配列をしているデータから議論するのであれば、その信頼性はそれなりに高いものと考えられる。

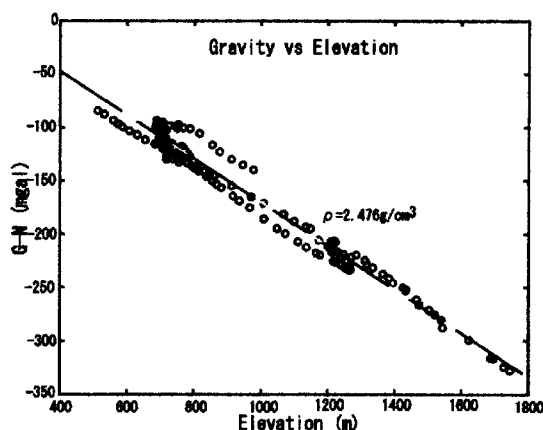


Fig.3 G-H relation in the Bandung area

4. バンドン周辺における重力異常分布

そこで、密度をパラメータとしてブーゲー重力異常（今後重力異常とする）を求め、標高の断面図や地質図などを参考にして検討する。なお、地形補正

には GTOPO30 を利用した。重力異常や標高の断面図をつくるために使用した測点の空間分布を、Fig.4-1 に示す WNW-ESE 方向と SSW-NNE 方向の2つの長方形の断面を見ることとする。Fig.4-1 の原点はバンドン駅付近($6^{\circ} 55'S$, $107^{\circ} 35'E$)にして

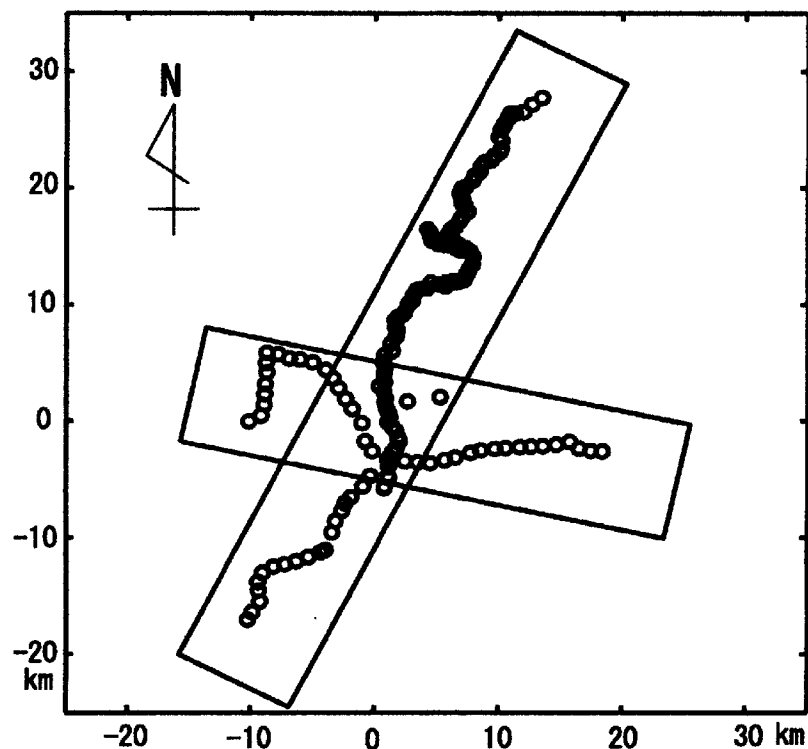


Fig.4-1 Data sampling areas to show profiles of Bouguer anomaly in Figs. 4-2 and 4-3

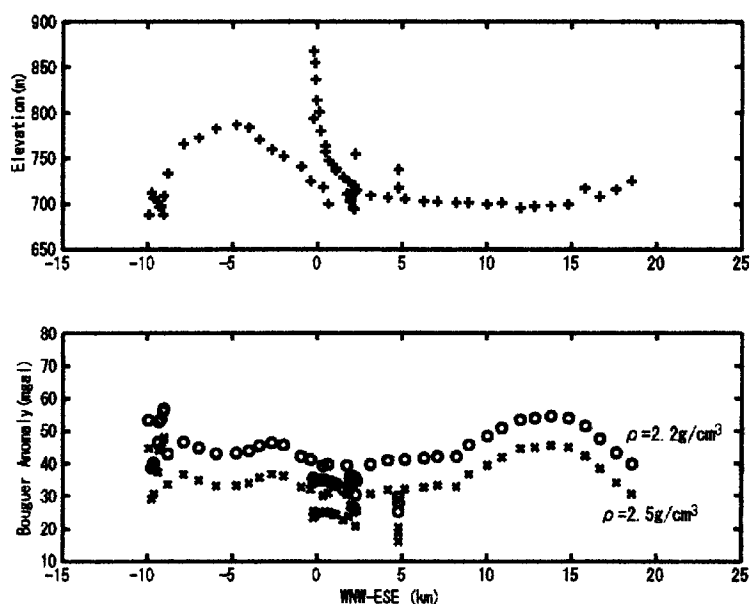


Fig.4-2 Profile of Bouguer anomaly in WNW-ESE direction (lower figure) and elevation of gravity stations (upper figure). Area of data is shown in Fig.4-1.

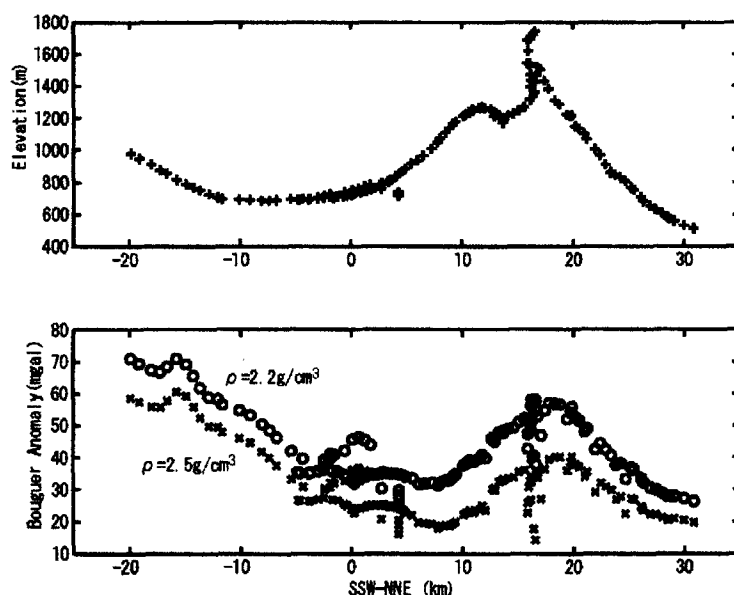


Fig.4-3 Profile of Bouguer anomaly in SSW-NNE direction (lower figure) and elevation of gravity stations (upper figure). Area of data is shown in Fig.4-1.

ある。

WNW-ESE 方向の断面図を Fig.4-2 に示す。この図の中で、上の図は標高を表し、下の図は重力異常を表している。仮定密度は 2.2 g/cm^3 である。参考までに仮定密度 2.5 g/cm^3 の場合も示してある（下側）。距離が 0 km 附近で標高だけが大きく変化している部分があるのは、もう一方の測線の標高がプロットされているからである。その部分の重力異常は東西成分の異常に対して、そろって数 mgal 程小さくなっているのは、もう一方の測線の重力異常が盆地の中で最小の値を示している付近の値である。また、盆地の東の方では密度の大きな基盤の盛り上がりを示唆する重力異常の盛り上がりが見られる。

Fig.4-3 はバンドン盆地の南西境界の南外側からバンドン市内を通過してタンクバンプラフ火山の中腹を通り抜ける測線（SSW-NNE 方向）の標高（上図）と重力異常（下図）の断面図である。重力異常が最小となっている地点は盆地の中央付近から大きく北にずれている。地表が平坦な盆地の中央部付近では、重力異常は既に大きく南上がりの変化を見せて、基盤構造が表層とは大きく異なっている。レンバン断層付近（Fig.4-3 の 12 km 付近）では、南側の重力異常が北側のそれより少々小さくなっているが、ギャップは全体から見てそれ程目立つ大きさではない。

10km を切る辺りから 30km にかけては全体的な重力異常の形はおおむね地形と似ているが、これはタ

ンクバンプラフ火山の影響そのものであると考えられる。タンクバンプラフ火山の密度を推定するために、山頂付近まで登山道に沿って測定した結果は、密度が 2.2 g/cm^3 でも 2.5 g/cm^3 でも大きく山の形から下に落ち込んでいる。これは仮定した密度が大き過ぎることをいみしている。登山道付近の測定結果が付近の値と調和する密度は 2.0 g/cm^3 より僅かに小さい位で、この火山の密度は比較的小さいものと思われる。

また、盆地の南西側には、密度の大きな基盤の存在を示唆する重力異常の盛り上がりが見える。我々は盆地の沖積地と山地の境界付近において、標高が上がっているにも拘わらず、重力の測定値が大きくなるという急激な重力異常の変化を体験した。これだけの重力異常の変化がある場合は、大きな縦ずれ断層の存在が推測されるが、地質図によると、この辺りには盆地の南側の火山に関係する高密度の基盤がある、今後それが密度変化によるものかあるいは構造の違いによるものか検討すべき課題である。

この重力異常の断面図から、タンクバンプラフ火山の中心付近では重力異常の盛り上がりはあるものの、全体的には、重力異常は北下がりになっていることもわかる。これは前に述べた基盤の傾斜説を支持する資料となり得る。

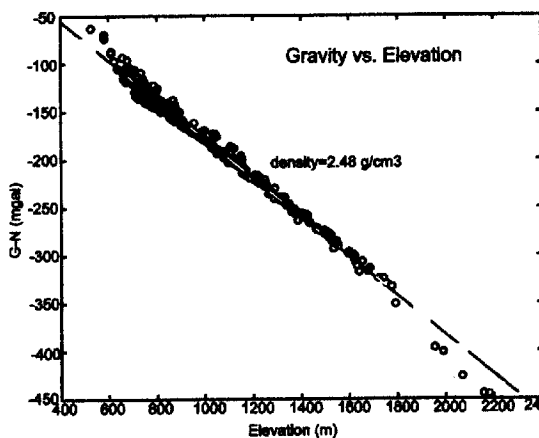


Fig. 5 G-H relation around the Guntur volcano

5. グントゥール火山周辺での結果

グントゥール火山周辺では Fig.5 からわかる様に、バンドン周辺の場合と異なり、地域ごとに明瞭で特徴的な G-H 関係はみられない。今回の補充観測で得られたデータは Fig.5 の両端にあるデータである。この研究の全体的な観点からは重要な地域のデータではあるが、特殊な局所的なデータである。そ

れ故に共にこの地域の平均的な密度からはずれているようである。そこで、地域全体を代表する密度としては前回使用した 2.45g/cm^3 を使って重力異常について考察する。

グントゥール地域での測定点の分布は Fig.6-1 の通りである。特徴的な方向の断面図を見るために、この地域に卓越して見られる地質学的な南西—北東方向の断層、あるいはそれらしき線 (M. Alzwar et al, 1992) と平行な長辺を持つ長方形と、火山の山頂が連なっている北西—南東方向と平行な長辺を持つ長方形に含まれる測定点のデータについてそれぞれ検討した。なお、この図での原点はグントゥール火山の最高峰付近である。

前にも述べたが、この地域で重点的に補充観測がなされた地域は、東と西の端で比較的確らに測定点が分布している地域以外では、火山本体の山頂部、即ち Fig.6-1 では長方形が交叉してできる正方形の内部である。カモジャン地熱地帯はまさにその正方形の西端の頂点のすぐ外側で、点が塊って分布している辺りである。

まず、北西—南東方向の重力異常の断面 (Fig.6-2) を見てみる。前回、余り目立たなかった南東方向へ

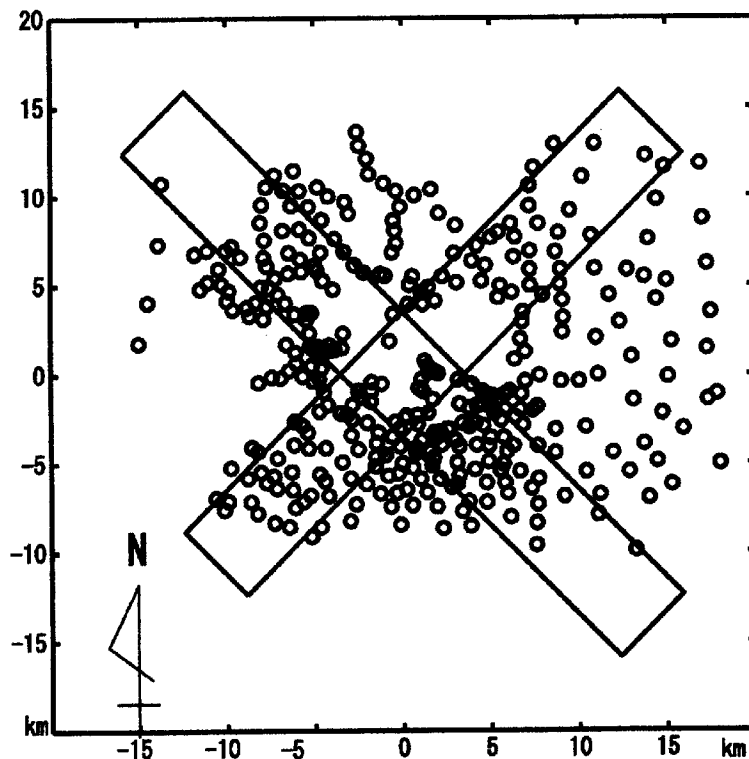


Fig. 6 -1 Data sampling areas to show profiles of Bouguer anomaly

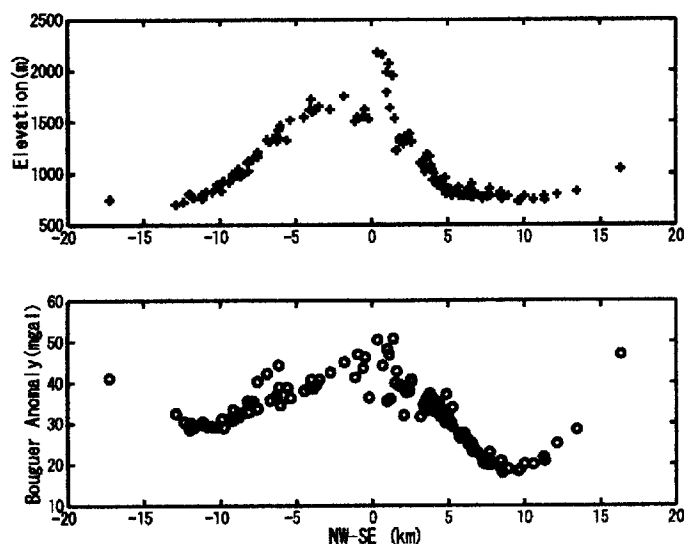


Fig.6-2 Profile of Bouguer anomaly in NW-SE direction (lower figure) and elevation of gravity station (upper figure). Area of data is shown in Fig.6-1.

の傾斜が測定域を東側に拡張したことによって明瞭になってきた。更に南東に進むとその前方の火山活動の影響を受けている地域となり、再び重力異常が大きくなる。グントゥール火山の東側の沖積地では、標高はさほど変化していないにも拘わらず、重力異常はこの辺りの盆地の中心で小さくなっている。沖積層の厚さは300~400m位と見積もられる。

Fig.6-2 でグントゥール火山の山頂付近の重力

異常と中腹部のそれを比較しても、標高の変化と重力異常の変化との間には明瞭な相関が見られるわけではない。ということは仮定密度がそれなりに適切な値であると思われる。全体的に見渡すと火山本体の中心では重力異常が大きくなっている。

次に、南西—北東方向の断面 (Fig.6-3) を見てみる。全体的には火山の中心部付近では重力異常が何となく大きくなっているようには見えるが、北西—

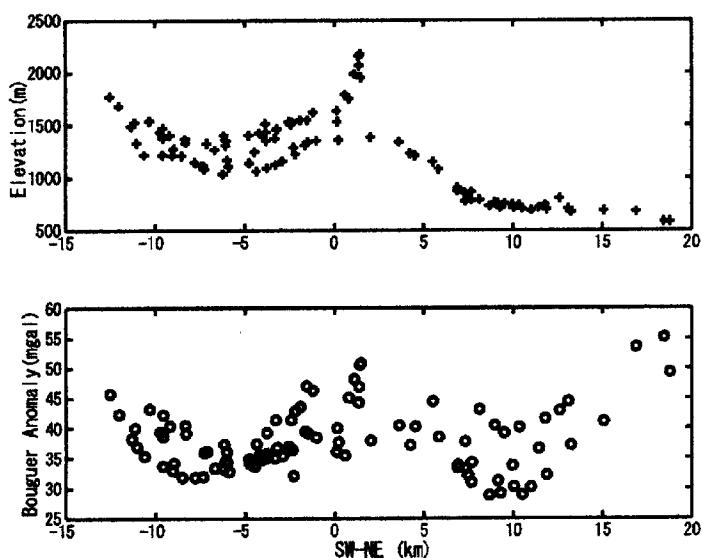


Fig. 6-3 Profile of Bouguere anomaly in of SW-NE direction (lower figure) and elevation of gravity stations (upper figure). Area of data is shown in Fig.6-1.

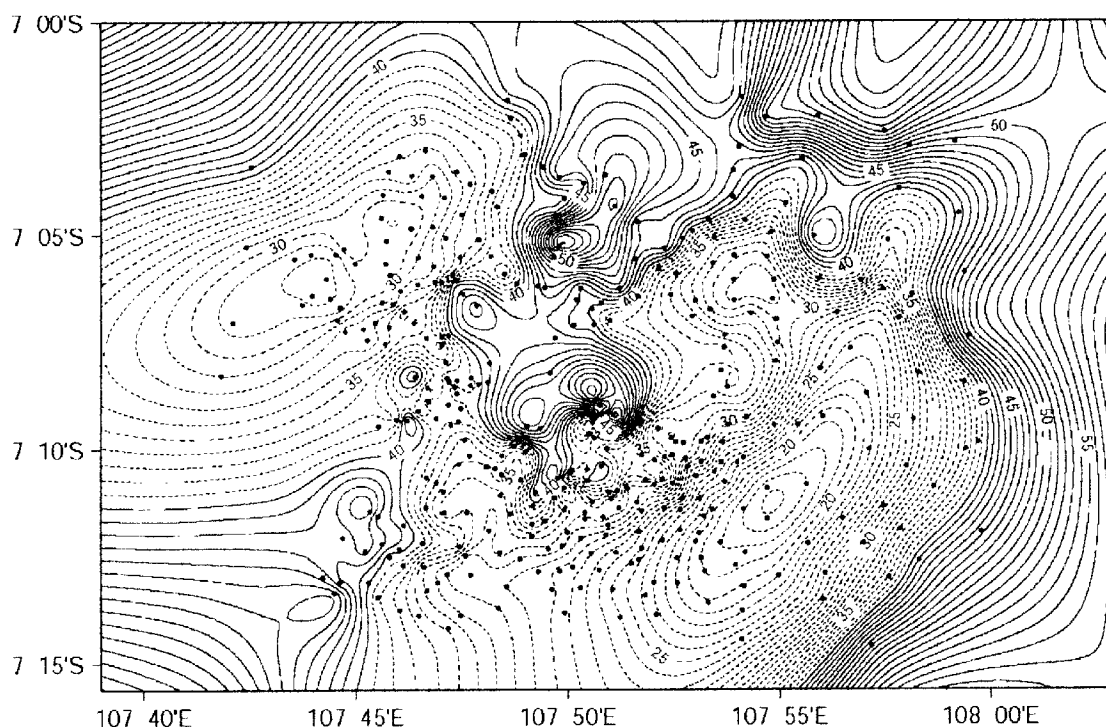


Fig.7-1 Bouguer anomaly map around the Guntur volcano (assumed density= 2.45g/cm^3)

南東方向の場合ほどきれいにまとまらないで、ばらついている。特に東北の地域では標高は平坦であるにも拘わらず、重力異常は大きくなっている。これは古い火山活動で生成された岩石の影響を受けていると考えられている。南西方向の重力異常の高まりは、その更に南西に控えているダラジャツ地熱地帯に関連するものと思われる。このダラジャツ地熱地帯は、その南方にあるパパンダヤン（Papandayan）火山の活動に関連しているという。カモジャン地熱地帯は、このダラジャツ地熱地帯とグントゥール火山の共に重力異常が高いところの間にある。

6. グントゥール火山周辺のブーゲー異常図

重力異常の全体的な様子を見るために重力異常を平面図（Fig.7-1）で見ることにする。コンターの間隔は 1 mgal である。見易くするために、重力異常が 40 mgal 以上のところでは実線で、それより小さいところは波線で表してある。小さな黒丸は測定点を表している。

この図より南西—北東方向の構造が目につくが、これは前にも触れたが、この辺りに卓越している断層の走行方向と一致している。この図の南東部分では重力異常が大きく落ち込んでいる。その落ち込み

方もやはり南西—北東方向の帯状に底が伸びている。グントゥール火山の北西側でも同様な落ち込みが見える。重力異常の盛り上がり部分もやはり南西—北東方向に連なり、尾根状を呈している。グントゥール火山はその尾根からほぼ垂直に南東方向に飛び出している。火山の山頂はちょうどこの向きに並び、北西から南東に向かって火山活動の時期は新しくなるとともに、各山頂の標高は低くなっている。この辺りを局所的に見ると北西—南東方向の連なりもあるように見えるが、この図からはそれ程明瞭には見えない。重力測定を山頂上付近で実施するのはあまり容易ではないが、そのような議論を確信を持って進めるためには、山頂付近であと数点の補充観測が必要である。地熱発電所があるカモジャン地熱地帯は、南西—北東方向の重力異常の尾根上にあるが、その南西側（ダラジャツ）と北東側（グントゥール）では、重力異常が盛り上がっていて、その辺りの鞍部に当たるところとなる。

ところで、グントゥール火山の周囲の重力異常は一旦重力異常は相対的に小さくなって、その外側で大きくなっている。山頂付近は湖に浮かぶ島のように異常が大きくなっている。一方、パンドン周辺の議論のところでふれたが、タンクパンプラフ火山では仮定密度によっては山頂（山体の中心）に近づく

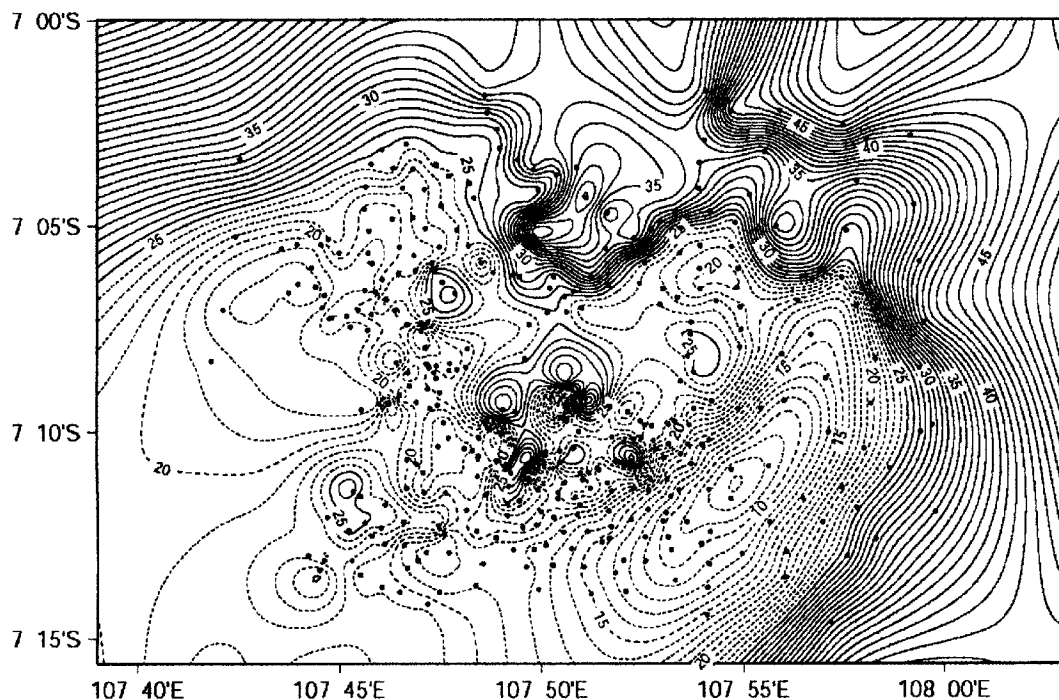


Fig.7-2 Bouguer anomaly map Around the Guntur volcano (assumed density= 2.75 g/cm^3)

と重力異常は小さくなる可能性がある。念のために、グントゥール周辺での密度を推定するために計算の途中で得られた 2.75 g/cm^3 を用いて作図したのが Fig.7-2 である。全体的に異常の値は小さくなってなめらかになるものの全体的な分布の傾向には変わりはなく、この仮定密度でも山頂附近に近づくほど重力異常が大きくなっていることには変わりはない。

7. まとめ

バンドン盆地とグントゥール火山周辺で、重力測定を実施した。バンドン盆地では地表面が南下がりの途中で重力異常は最低になり、更に南に行くと地表が平坦な沖積地で重力異常は大きくなり始める。バンドン盆地の南端では、あたかも断層があるかのごとく重力異常が急激に大きくなっている。また、北のタンクパンプラフ火山周辺の密度は 2.2 g/cm^3 位で、山頂に近づくに従って重力異常が小さくなる可能性がある。また、バンドン周辺の重力異常分布から基盤は北向きに傾いていて、密度の推定をする際には注意が必要である。

グントゥール火山周辺では重力異常の分布の仕方が回り一帯の断層線と同じ方向を向いている。火山近傍では重力異常と山頂の列びが同じ方向にあるようにも見える。このことを明確にするにはあと数点の補充測定を適切な分布で実施することにより解

決できると思われる。いずれにせよ、この重力異常の分布の仕方は、この地域のテクトニクスと密接な関係がある。

また、グントゥール火山周辺では密度が 2.45 g/cm^3 とバンドン付近よりも大きくて、山体の中心に近づくほど重力異常は大きくなる。

カモジャンの地熱地帯は地形的にも重力異常の面からも前後にグントゥール火山とダラジャツ地熱地帯の高まりのある鞍部に相当するところに位置している。

謝 辞

この研究を進めるにあたり、インドネシア火山研究所および ITB の皆様には観測に当たって、いろいろとお世話になりました。とりわけグントゥール観測所は、その地域での GPS 観測と重力測定の基準点として、また観測基地として使用させて頂きました。更に、宿泊や測定点へのガイドなど観測に極めて重要な部分でもお世話になりました。観測が順調に遂行できたことに対してお礼を申し上げます。

参考文献

- M. Alzwar, N. Akbar and S. Bachri (1992):
Geological Map of the Garut and Pameungpeuk

- Quadrangle, Jawa, Geological Research and Development Centre Ministry of Mines
- 井口正人・石原和弘・高山鉄朗・グデ スァンティカ・ウィンピー チェチェップ・ラデン スクヒャール・イガン スタウィジャヤ・オニー スガンダ(1996) : インドネシア・グントール火山における地震活動, 京都大学防災研究所年報, 第 39 号 B-1, pp. 161-171.
- 井口正人・石原和弘・江藤庸夫・山本圭吾・イガン スタウィジャヤ・グデ スァンティカ・オニー スガンダ・ムハマド ヘンドラスト(1998) : インドネシア・グントール火山における最近の火山活動の評価, 京都大学防災研究所年報, 第 41 号 B-1, pp. 161-170.
- Nakamura K., Ito K., Wada, H., Asada T., Tanaka T., Bambang S., Wedyanto K. and J. Kahar (1998): Gravity Survey Crossing the Lembang Fault and the Cimandiri Fault, Proceed. of Sympo. on Japan-Indonesia IDNDR Project Volcanology, Tectonics, Floodand Sediment zards,1998, Bandung,Indonesia pp.215-222.
- Nakamura K. and Okubo S. (1997): Gravity Measurements around the Lembang and Cimandiri Faults, Proceed. of International Symposium on Natural Disaster Prediction and Mitigation, 1997, Kyoto, Japan
- Nakamura K., Ony K.S., M. Gamal, Tedy Y.P., Widhie I.S., Mipi A.K., Hasanuddin Z.A. (2000): Gravity Survey Around Guntur Volcano, Abstract of IAVCEI General Assembly 2000 in Bali, Indonesia, p.61
- Silitonga, P.H. (1973): Geologic Map of The Bandung Quadrangle, Jawa, Geological Survey of Indonesia,
- Soehaimi, A., M.T. Zen, I.Effendi, S.Hutabessy (1998):: Seismotectonic Zonation as a Basic Analysis of Earthquake Hazard in West Java, Proceed. of Sympo. on Japan-Indonesia IDNDR Project Volcanology, Tectonics, Floodand Sediment Hazards,1998, Bandung,Indonesia pp.199-214.

Gravity Surveys Around the Bandung Basin and the Guntur Volcano, Jawa Barat, Indonesia

Kajuro NAKAMURA*, Kiyoshi ITO*, Teruyuki ASADA*, Shigemitsu MATSUO* Tedy Y.PUSUDIANO**,
Dudy DARMAWAN**, Mipi Aanataa KUSUMA**, Hasanuddin Z.ABIDIN**

* DPRI., Kyoto University

** Institute of Technology Bandung

Synopsis

Gravity surveys are carried out around the Bandung basin and the Guntur volcano in West Java(Jawa Barat), Indonesia. The active volcano, Mt. Guntur is located at 40 km ESE from the city of Bandung. We measured gravity at 1 km intervals along two survey lines in the directions of NNE-SSW and WNW-ESE crossing the Bandung Basin, and at about 500m in the 30km x 30km extent with the Guntur volcano at the middle of the area. The results show that density of the subsurface layer is around 2.2 g/cm^3 in the Bandung area and 2.5 g/cm^3 in the Guntur area. Furthermore, High gravity anomaly is found in the central part of the Guntur volcano.

Keywords: gravity measurement, GPS positioning, gravity anomaly, density