

インドネシアにおける重力測定

防災研究所 技術室
阿武山観測所 浅田 照行

1. はじめに

インドネシアのジャワ島西部地域における地下構造、地殻変動、断層運動等に関するバンドン工科大学 (ITB) との共同研究は 1991 年に開始され、地震・火山活動や地殻変動に関する観測研究が行われてきた。¹⁾²⁾ 筆者は 1997 年に行われたレンバン断層とチマンデリ断層の構造調査に次いで 2 度目の参加で、今回の目的は バンドン盆地の構造を調査するもので、1997 年のレンバン断層構造調査の測線を延長して、バンドン盆地を南に横切り、また東西の測線を追加した。この盆地の基盤構造は、盆地と断層の関係など盆地の生成過程の調査に役立つと同意に、現在バンドンで進行中の地盤沈下の調査に役立つと考えられている。 バンドンの南東部に位置



するグントゥール火山地帯の密度構造調査が、1999 年に中村助手により行われていたが、解析精度向上のための補足測定を行った。

1997 年から重力測定を行った測線と地域を第 1 図に示す。

筆者は自動重力計での重力測定を担当した。

本稿では、重力測定で何が解かるのか、自動重力計 (シントレックス社製) の概要と保



第 1 図. ジャワ島西部での重力測定の測線及び地域.

- A, B : 1997 年の断層構造調査測線,
- : 1999 年のグントゥール火山地帯の密度構造調査地域,
- CF : チマンデリ断層, — LF : レンバン断層,
- ▲ G : グントゥール火山, ▲ T : タンクパンブラフ火山.

守・調整方法、及び測定方法・手順の know-how を記すと共に、インドネシアでの調査結果について報告する。

2 . 重力測定で何が解るのか

重力は大気中では高さと共に $-3.086 \mu\text{gal}/\text{cm}$ の割合で変化する。これをフリーエア勾配と言い、地盤の昇降が地下の物質が移動しないで起こった場合、たとえば岩盤中の割れ目の開閉により体積の膨張あるいは収縮により高さが変化した場合などは、重力の変化はほぼフリーエア勾配で変化するはずである。また、厚さ h で密度 ρ の水平の板が地下に加わったため観測点が h だけ上昇した場合を考えると、重力の変化は $\mu\text{gal}/\text{cm}$ 単位で $(-301+2 G)h$ と成る。 G は万有引力の定数、 ρ として花崗岩の平均密度 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 用いると h の係数は $-1.967 \mu\text{gal}/\text{cm}$ となる。これをブーゲ勾配と言い、岩盤の割れ目の開閉に伴い密度 ρ の流体の侵入・排出があった場合の上記 h の係数に相当する。地震に伴って、あるいは地震とは直接関係なくとも、地盤が昇降すれば、重力は変化する。その割合と上記の勾配とを比較することにより、地殻変動の原因を推察することができる。連続あるいは定期的な重力測定により、土地の昇降の急変や昇降速度の変化を知ることができる。高さ変化の測定では水準測量の精度には及ばないが、面的に観測を展開することが可能なことや、測定に要する労力と時間では重力測定が優位である。

また、重力異常の一種、ブーゲ異常（ブーゲ補正した値と正規重力の差）は、地球物理学の観点からは、もう少し直接的な意義をもっている。ブーゲ異常は、地下の物質の密度が大きい場合は正の値を、小さい場合は負の値を示す。ブーゲ異常の分布は地下構造調査をするにあたっては極めて有力な手段で、物理探査の 1 手段として広く使用される。³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾

3 . 自動重力計 : Autograv 3M (カナダ・Scintrex 社製) について

3 - 1 . 機器の概要

Autograv はマイクロプロセッサーをベースとした自動重力計で、リセットせずに 7000mgal 以上の測定レンジと 0.001mgal の読みとり分解機能を備えていて、フィールドでの極所的な精査と大規模な地域探査の両方に使用できる。センサは真空恒温室に密閉されていて周辺温度と大気圧の変化から保護されている。 -45 から $+45$ の広範囲な動作温度により大方の環境下で使用できる。センサが非磁性の溶解クォーツで作られていて、磁界の変化の影響を受けない。クォーツ弾性システムの非常に安定した動作環境によりドリフトは低く、センサの長期間のドリフトを正確に予測でき、ソフトウェアによるリアルタイム補正は $0.02\text{mgal}/\text{day}$ 未満に減らす。連続傾斜補正機能の設定により、内部傾斜センサがコンスタントに Autograv に情報を供給し、不安定な地盤上での測定においても、Autograv の動きによる誤差は自動的に除かれる。地理上の位置と時間帯の情報を入力すれば、リアルタイムで自動的に地球潮汐の補正がされる等の機能を持ち、単にキーを押すことにより正確な測定値が取れるので、LaCoste&Romberg 重力計に比べ測定が簡便である。

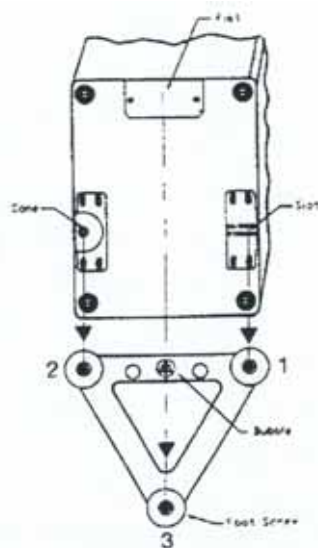


第 2 図 . Autograv の保管

また、測定データはメモリに記憶され、パソコンで回収できるので後処理も簡単である。サイクリング・モードに設定すれば、定点での連続観測ができ、地球潮汐の解析も可能である。

3 - 2 . 保守・調整方法

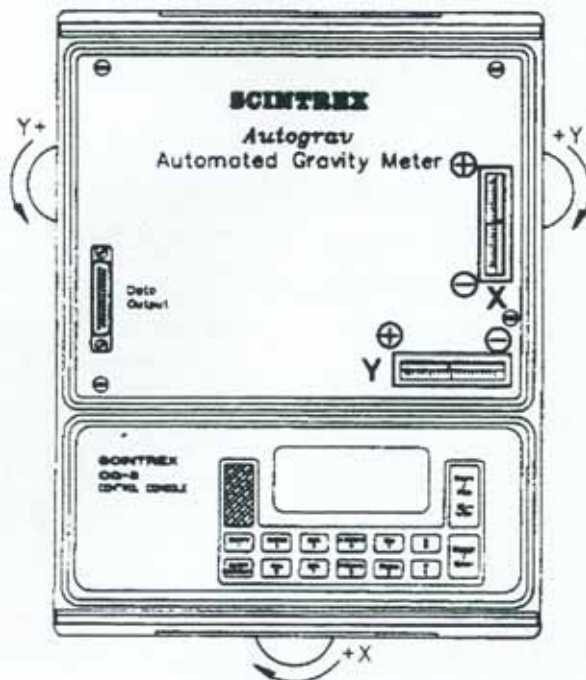
Autograv は、48 時間以上の電力ダウンで、初期化定数を含めメモリの内容が失われる。電力ダウンの期間にもよるが、電力供給時から機器の安定には2,3日を要し、高精度の測定を要するときは1週間を要する。また初期化の手順を全てやり直す事となる。従って、機器からベストの結果を得るために、第2図に示すように、使用していない時は機器をバッテリー充電器に接続した状態で保管する。保管場所は、振動や衝撃を受けない静かで安全な場所で、コンクリートのようなしっかりした床(木の床は不適)に3脚をセットしその上に置く。いくつかの機器パラメータは定期的にチェック・調整する必要がある。毎月1度行う温度補償と傾斜補償のチェックと調整の手順を以下に記す。調整は地動の影響を受けにくい無風の穏やかな日に行う。



第3図(a). Autograv の
セットアップ

3 - 2 - 1 . 3脚と Autograv のセットアップ

静かな場所で安定したベースの上に3脚を置き、第3図(a)に示すように、右後左後 前の順に Autograv をセットし、フロントパネルのYメータを見ながら3脚の後部ネジを回し、まずY軸のレベルをとる(指針がセロ位置に成るまで)。この時、第3図(b)に示すように、指針が振り切れている側の+、-の指示に従い、後部ネジの左右を反対方向に回すと効率が良い。次に、Xメータを見ながら、3脚の前ネジを回しX軸のレベルをとる。



第3図(b). Autograv レベルの調整

3 - 2 - 2 . 表面盤の取り外し

表面盤の4ヶ所のネジをはずし、表面盤を取り外す。

表面盤を外した状態を第4図に示す。通常下部のT, X, Yの FINE ADJUSTにより、以下の微調整をおこなう。

調整は温度調整、傾斜補正(傾斜センサのゼロポジション)X, Yの順に行う。

3 - 2 - 3 . 温度補償のチェックと調整

Start キーを押すとモニターに

TILTS X : * * *

ADJUST Y : * * *

のプロンプトが表示されるので、**□** キーを

押す。第 5 図にキーパッドを示す。

TEMP . X . XX

ADJUST

がモニターに表示されるので、X , XX の数値が、±1.0 より大きい場合は、モニターを見ながら FINE ADJUST の T (逆時計回りが+) で、秋~冬にかけては +0.3 程度に、春~夏にかけては -0.3 程度に調整する。安定するまで 30 分は待ち、必要ならば再度調整を繰り返す。

次に傾斜補償のチェックと調整に移る。

3 - 2 - 4 .

次のパラメータの設定によりソフトウェアを初期化する

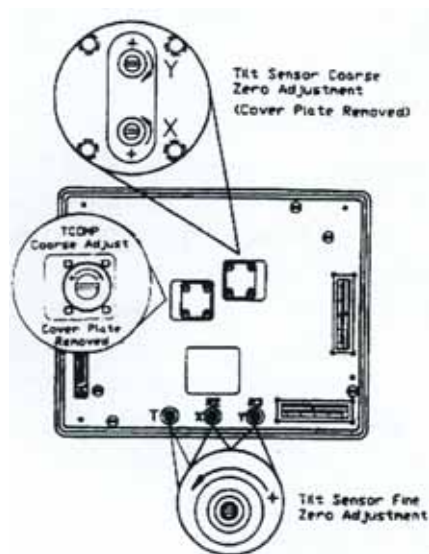
MODE=FIELD

READ TIME=120

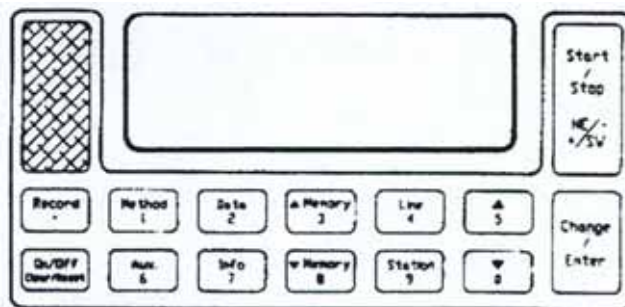
TILT CORRECTION=SELECTED

TIDE CORRECTION=SELECTED

AUTO REJECTION= SELECTED



第 4 図 . ZERO ADJUSTMENT の配置



第 5 図 . Autograv キーパッド

X のゼロ微調整:**Start** キーを押し TILTS

値 X , Y をモニター表示の状態にして、モニターを見ながら、 $X = +150 \pm 2$, $Y = 0 \pm 2$ になるまで 3 脚のスクリュウネジで調整し、5 分以上安定を待ち、表示の正確な値 X 1 を記録する。

再度 **Start** キーを押し測定する。測定値の R 1 を記録する。

次に、 $X = -150 \pm 2$, $Y = 0 \pm 2$ に調整し、前と同様に X 2 と測定値 R 2 を記録する。

ここで、 $R 2 - R 1$ の値が $\pm 7 \mu\text{gal}$ 以内であれば Y の傾斜補正に移るが、 $\pm 7 \mu\text{gal}$ を上まわる場合は、次の式により補正值 XE を計算する。

$$ZE = ((R 2 - R 1) / (X 1 - X 2)) \times 43$$

ここに、X1, X2 と XE は arc sec 単位であり、R1, R2 は μgal 単位である。

(例) X1 = +149 R1 = 3274.101mgal (読み取り値) = 3274101 μgal

X2 = +149 R2 = 3274.110mgal (読み取り値) = 3274110 μgal

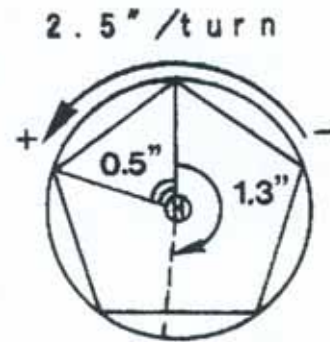
$$XE = ((3274110 - 3274101) / (149 - (-149))) \times 43 = 9/298 \times 43 = 1.293 \quad 1.3\text{arc sec}$$

1.3arc sec を FINE ADJUST , X により調整する。この時、調整ネジは 2.5arc sec / turn に相当するため、第 6 図から約 180° 調整 (逆時計方向が+) すればよい。

Yのゼロの微調整：Xの場合と同様の手順で、 $X=0\pm 2$ 、 $Y=+150$ と ± 2 と、 $X=0\pm 2$ 、 $Y=-150\pm 2$ について測定を行い、Y1、R1、Y2、R2の値から、補正值YEを計算する。第6図より補正角を概算し、FINE ADJUST、Yにより調整する。

補正後、再度X、Yについて同様の作業を行い、測定値の誤差 $R2 - R1$ が $\pm 7\mu\text{gal}$ 以内に収まっていない場合は、繰り返し調整する。

一連のT、X、Yが、微調整の範囲を超える場合、第4図上部のT及びX、Yの粗調整ネジにより粗調整から行う必要があるが、通常は微調整ですむので、その手順は本稿では省略する。



第6図．調整確度の概算

3 - 2 - 5 . X 軸、Y 軸の調整 .

前の項で述べた傾斜補正は、傾斜センサのゼロポジションのハードウェア調整であり、この項での調整は、傾斜センサの感度を調整するものでキーパッドを介して調整する。但し、センサ感度はゼロポジションより安定しているので、3ヶ月毎にチェックすれば良い。

X軸感度の調整：[Start]キーを押しTILTS値X、Yをモニター表示の状態にして、モニターを見ながら、 $X=0\pm 2$ 、 $Y=0\pm 2$ になるまで3脚の前部ネジで調整し、5分以上安定を待ち、再度Startキーを押し測定する(フィールドモード、120秒)測定値をR0として記録する。次に、 $X=-150\pm 2$ 、 $Y=0\pm 2$ に調整し、5分以上安定を待ち正確な値X1を記録する。Startキーを押し測定する測定値をR1として記録する。

$$TILTS' = \sqrt{1 + 87 \times \frac{(R0 - R1)}{X1^2}} \times TILTS$$

ここに、X1は arc sec 単位であり、R0、R1は μgal 単位である。

(例) $X1 = +155$ 、 $R0 = 4236.52\text{mgal}$ (読み取り値) = $4236520\mu\text{gal}$
 $TILTS = 195.3$ 、 $R1 = 4236.56\text{mgal}$ (読み取り値) = $4236560\mu\text{gal}$

$$TILTS' = \sqrt{1 + 87 \times \frac{-40}{24025}} \times 195.3 \text{ (旧定数)}$$

$$= 180.6 \text{ (新定数)}$$

Y軸感度の調整：X軸感度の調整同様XをYに置き換えTILTSを算出する。

X、Y軸感度の新定数は、TILTS、TILTSの定数をキーパッドにより書き換える。

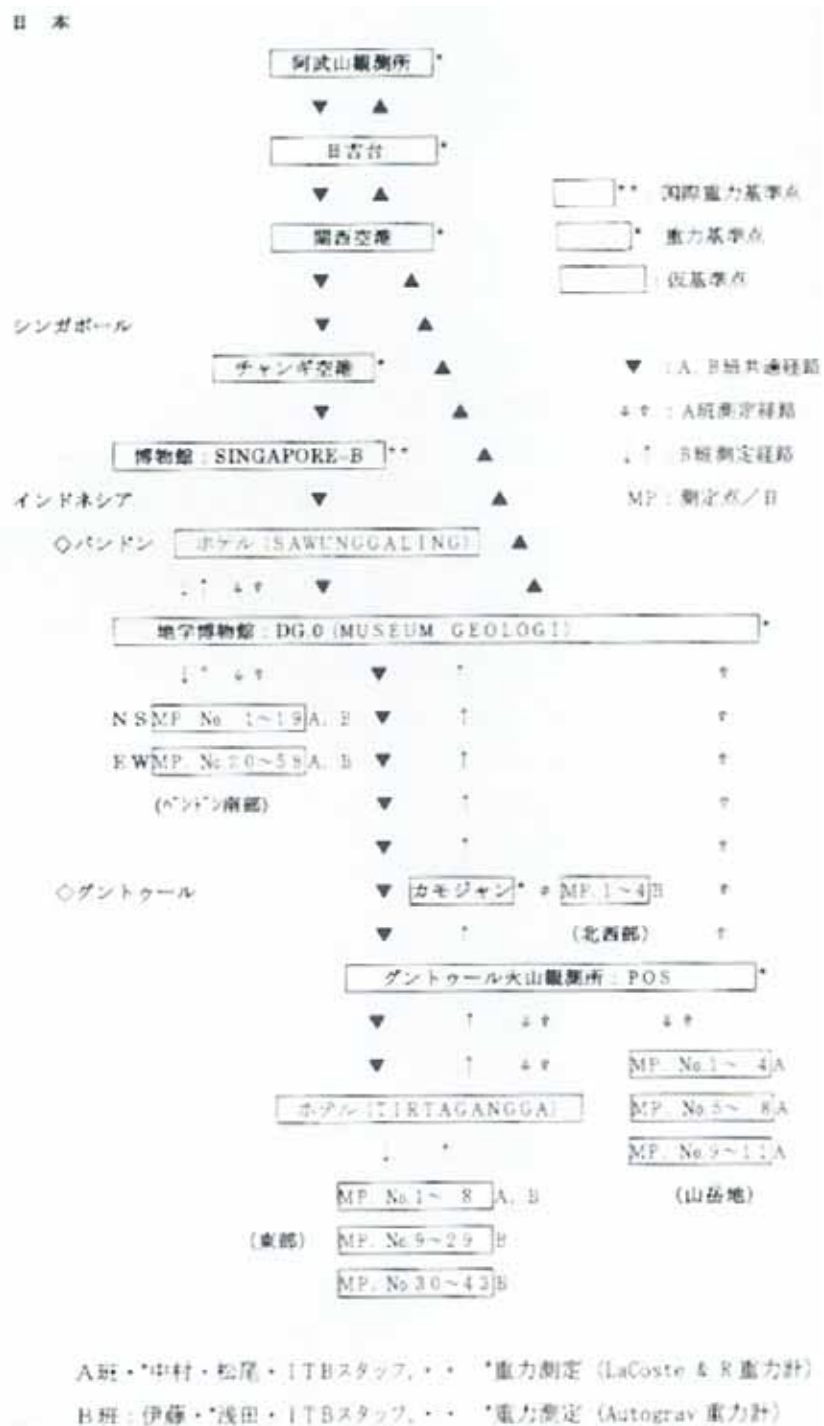
4 . 重力測定

4 - 1 . 重力測定の方法

重力値の分布状況の測定は、重力の相対測定または比較測定と言われる方法でおこなわれる。重力既知点の重力値を基準値として、未知店の重力値を求める方法である。既知点は他の地点での重力値を基準にすることなく絶対重力測定により重力値を定められた点である。

重力の相対測定の制度は約 0.001mgal 程度と見積もられているが、遠隔地点間の重力測定には種々の擾乱が混入するために、精度の検定や誤差原因の追究のためには、要所要所に既知測定点を設置し検定点として使用する必要がある。重力結合によって重力値が決定された点（基準点）と相対検定をすれば、各測定点の重力値を決定できる。地下構造探査などの局地的な物理探査の場合、各点の重力値を決定せず、仮の基準点からの重力差だけを決定し、重力異常も仮基準点との差だけ求める場合もあるが、測地学的資料としては重力値としては重力値そのものを必要とす。

又、Autograv や LaCoste & Romberg のように、スプリング型重力計の最大の短所はドリフトが存在することで、これはバネ材のクリープによる読み取り値の時間的変化であり、見かけ上、重力が変化したように見える。しかもこのドリフトは環境の変化などで不規則に変化する。そこで基準点 A を基準に測定点 B 点の重力値を求める



第7図. 2000年測定の環の設定

際には A B A の順に測定を行う。このように基準点で測定作業の両端を固定することを環

の閉塞と言う。

ドリフトの補正は、1つの環で各測定点の測定時間間隔とドリフト量がわかるので、最小2乗法でドリフト速度を求め、ドリフトを時間の経過に対して正比例するものとして各測定に配分する。更に、環を鎖状に延ばして、大きな環を結ぶ場合は、仮基準点を設け、基準点と直接結んで誤差の蓄積をチェックする必要がある。環の設定は、重力の変化を検出するなど精度を要する測定の場合は1つの環で往復測定を行う必要があるが、地下構造調査など重力異常を求める測定では、片方の環でよい。

第7図に、今回の環の設定を示す。図に見るように、一連の環の閉塞は、阿武山観測所で、関空、日吉台で往復測定を行い、更に、往路のシンガポールで国際基準点を含む2カ所の測定を行うことで、正確な重力値決定の制度を高めた。インドネシア国内の環は、バンドンの地学博物館にインドネシアの重力原点 DG0 があり、各測定の重力値は DG0 の値(977976mgal)¹⁾を基準に求められるので、測定の最初と最後は必ずこの点で環を閉じる様にした。また、構造調査の測定の環は、調査地域の基準点(POS. カモジャン)や、滞在ホテルの定めた点を仮基準点とし、環を閉じる様にした。

構造調査の測定は、第8図に示した様に、測定点の位置決定のため、GPSの観測を平行して行う。GPS基準点は、バンドンでの観測ではITBに、グントゥールでの観測ではPOSに設置した。筆者らは2班に分かれて、バンドンでは測線を約2km間隔で交互に測定し、グントゥールでは山岳部と周辺部に分かれて測定した。測定点での測定時間は7.5分であるが、機器の設置・撤収や移動を含めると1点に約30分を要する。効率よく測定をこなすには重力計のセット時間の短縮にかかっており、多少の熟れを必要とする。



第8図 . バンドンでの測定風景

4 - 2 . Autograv 重力計の操作手順

1). 3脚の設置 : 設置に際して、測定中に傾いて来ないような安定した場所を選ぶ。3

脚の足が踏み込める場所では、なるべく帯の部分まで踏み込む等、測定場所に応じた対処を必要とする。

2). Autograv の設置とゼロレベルの調整 : 3-2-1 項で記したように、レベルメータを見ながら、3脚のネジにより、Y軸・X軸の順にそれぞれ指針がゼロ位置を示す程度に調整した後、キーパッドの **Start** を押すと Adjust モードに成り、モニターに X、Y の傾きが表示されるので、モニター表示を見ながら、それぞれ ± 3 以内に収まるように微調整する。

3). 機器の高さ測定 : 30 秒程度、安定を待つ間に機器の高さ測定 (地面から Autograv の上面まで) を行い、**Info** キーを押すとモニターに INFO A と表示されるので、**Enter** キーを押して INFO A > の表示で、高さを数値入力 (mm 単位) し、**Enter** キーを押す。

4). 測定の開始と終了 : **Start** を押すとモニターに X、Y の傾きが表示されるので、傾

きの安定を確認して再度 **Start** を押すと測定が開始される。この時、重力信号が毎秒1度サンプルされ、個々のサンプルは平均されサイスミックノイズを取り除かれる。また、リジェクトの設定によりスパイクノイズは捨てられる。傾斜、センサ温度、長期ドリフトに関する補正は測定の秒毎に行われ、測定の停止は、オペレータによるか、プリセットタイム、標準偏差に達した時のいずれかによる。測定モードは2種類あり、筆者らが採用している設定の1例を示すと、フィールドモード：測定のサンプル数 120 を指定し、測定は標準偏差計算（12秒）後、サンプル数を満たした時点で計算をし、その都度停止するので **Start** キーにより測定を繰り返す。1 測定点で 3 回測定。サイクリングモード：測定時間 75 秒（標準偏差計算 12 + サンプル 60 + 休止 3）を指定、測定を自動的に繰り返すので停止する場合は、通常モニタに PAUSE が表示中に **Stop** キーを押す。1 測定点で 5 回測定。のどちらかのモードによる。いずれの場合も **Aux**、**On/Off** キーを押して測定を終了する。

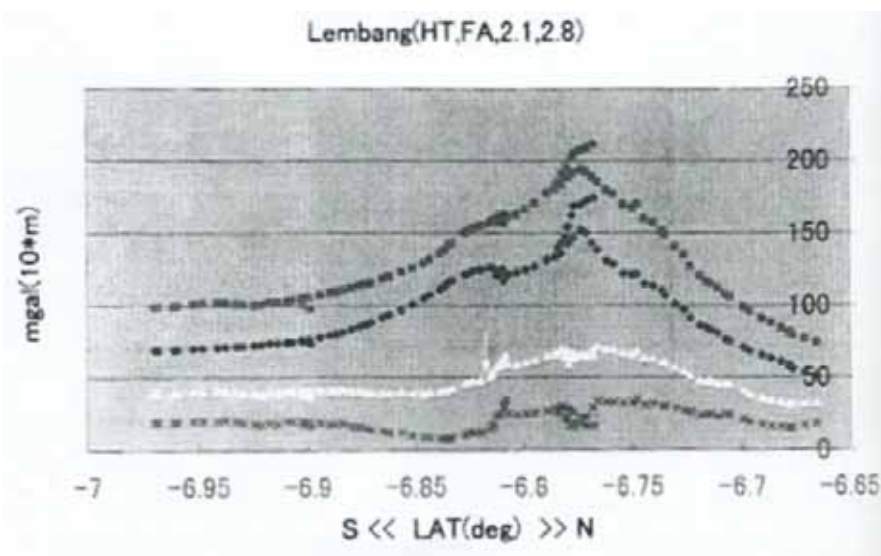
5). 記録：Autograv には、1 回の測定毎に、重力測定値は、測定番号・平均の標準偏差・傾斜 X ・傾斜 Y ・センサ温度・潮汐補正・測定継続時間・リジェクトされたサンプル数・測定開始時刻、の変数と共にメモリに収録される。

観測ノートには、測定場所または番号・測定時間（開始～終了）・機器の高さ（mm）・重力測定値と、1 日の測定開始点・終了点等でチェックする内蔵バッテリーの電圧値等、を記録している。

5 . インドネシアにおける調査結果

5 - 1 . レンバン・チマンデリ両断層調査（1997年）結果

1997 年にレンバン断層を交差する北部、南部共に 200km と、タンクバンブラフ火山の登山道 10km を、道路に沿って 500m 間隔で測定したもので、第 9 図に調査結果を示す。

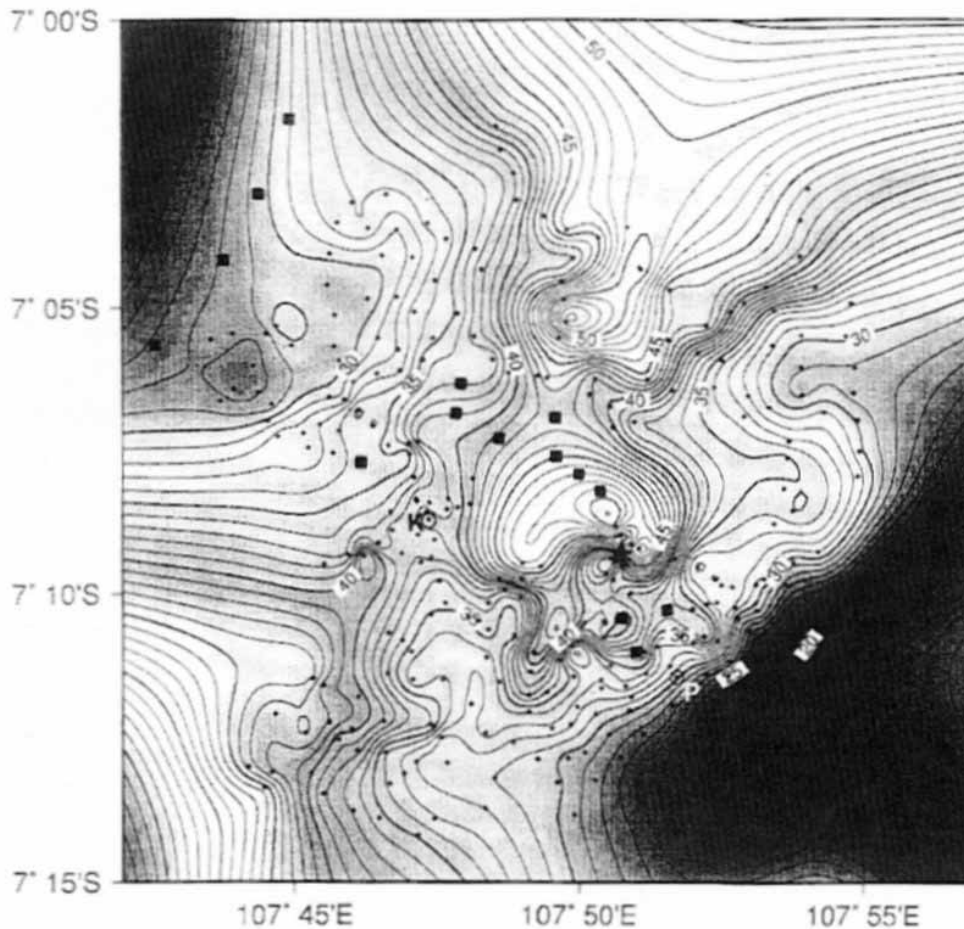


第 9 図 . レンバン断層に対応した重力異常 (K.Nakamura,1997)

上から順に、測線の標高、フリー・エア異常（密度 2.1 と 2.8 の場合）で、矢印で示した位置で、レンバン断層に対応した重力値の段差が検出された。図中標高の高い位置で突き出た部分はタンクバンブラフ火山登山道である。

また、この年、レンバン断層調査後に、スカブミに移動してチマンデリ断層で行った調査結果についても、断層に対応した重力値の段差が検出された。²⁾

5 - 2 . グントゥール火山地帯の密度構造調査 (1999 年) 結果



第 10 図 . グントゥール火山地帯のブーゲ異常 (K.Nakamura, 1997)

: 火山、 P : POS、 K : KAMOJANG .

第 10 図に、グントゥール火山地帯の密度構造 (ブーゲ異常) を示す。1999 年に中村助手と ITB スタッフにより測定された 297 点 (図中・で示す) による解析結果である。この地域は地質学の見地から、図の対角線上に、交差する構造線があるということ調査されたが、図に見るように北東 (右上) ~ 南西 (左下) にかけての構造線は認められるが、北西 (左上) ~ 南東 (右下) にかけての構造が名瞭で無い。今回、構造の解析精度向上を目的として、北西部 4 点、山岳部 11 点 (図中 で示す) の他、東部地域 43 点の、合計 58 点の補足測定を行った。この補足点を加えた構造は現在解析中であり結果を待たねばならない。

6 . インドネシアでの重力測定に関する課題と助言

- 1) 測定器の重量の問題があり、主に電源 (バッテリー) の軽量化が必要である。今回の様に重力計を国外に持参する場合、重力計が 13kg、予備のバッテリーや充電器を含めると相当の重量となる。また、山岳部での測定は機材 (重力計・GPS 機器) を担いでの登山の繰り返しではその負担は大きい (中村・松尾班実施)。
- 2) 運搬時衝撃緩和の問題があり、インドネシアにおいては幹線道路から外れると、道路

事情がかなり悪く、車での移動に際しローリング&ピッチングがひどい、重力計のドリフトに大きく影響するため、対策を必要とする。

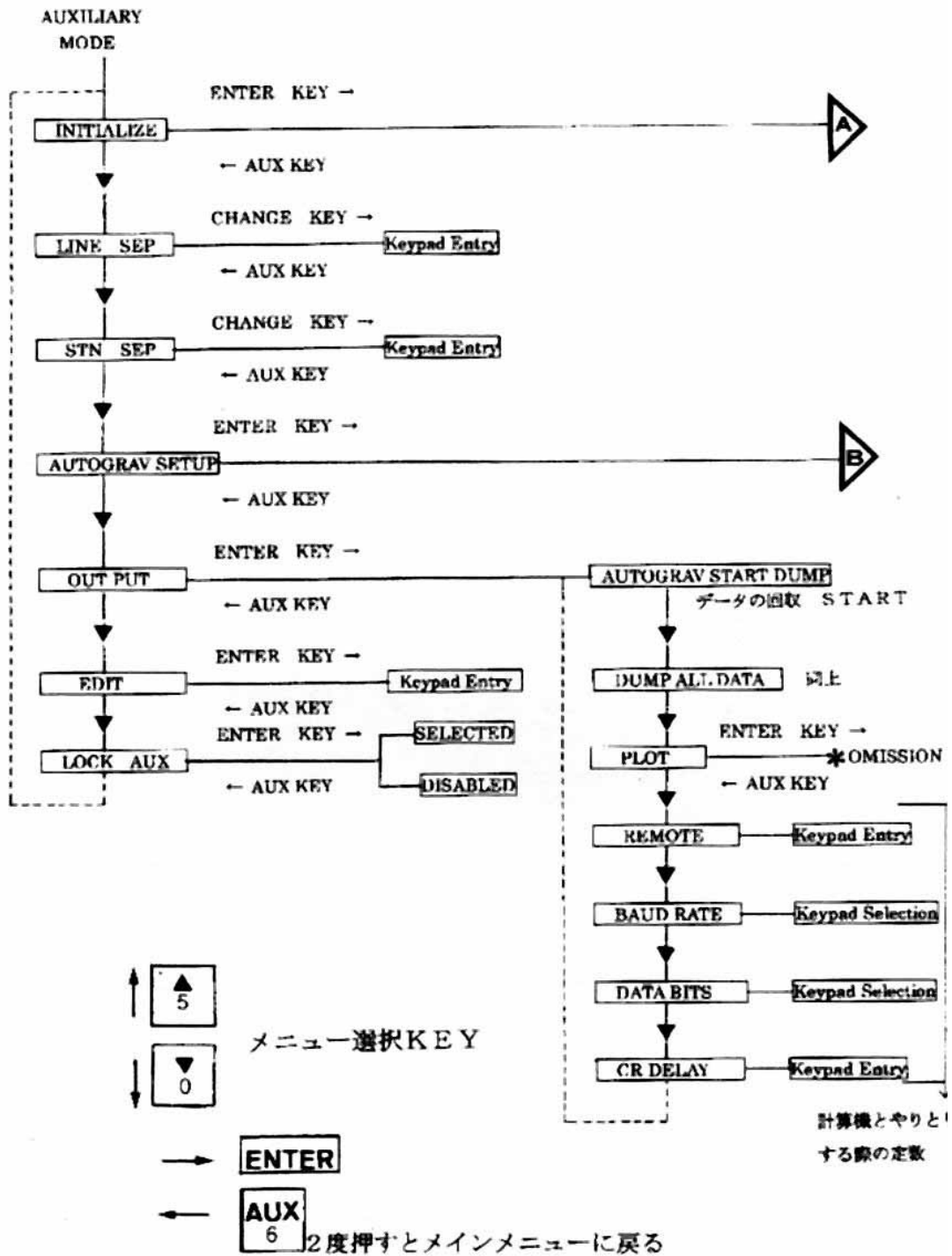
- 3) 山岳地域や山間部での測定点の移動には、ポケナビが非常に役立つので携帯することをすすめたい。今回は EMPEX 社製のポケナビ 65EZ を使用した。

7. 謝辞

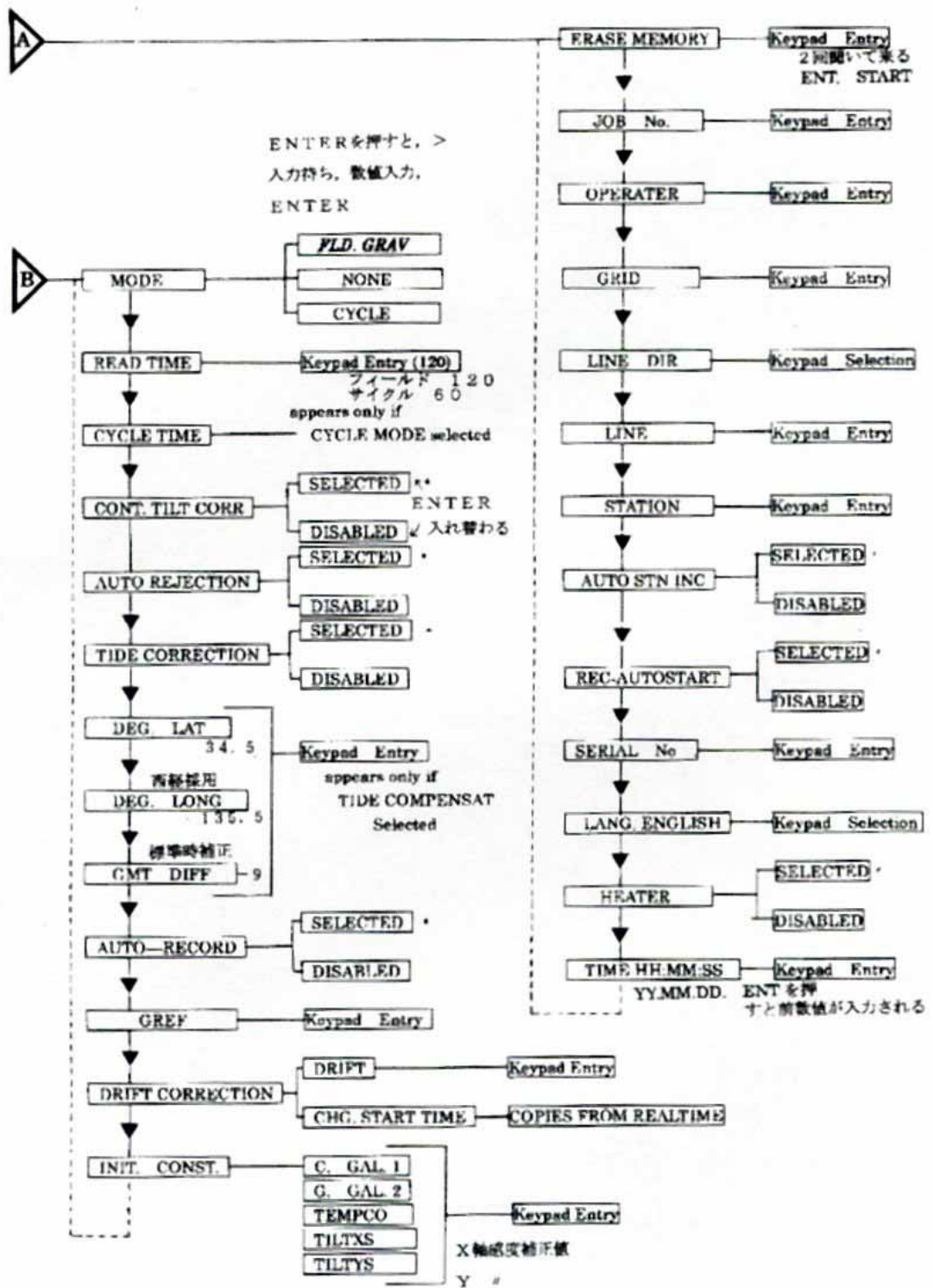
今回のインドネシアでの研修にあたり、京都大学教育研究振興財団の第1号事業助成（職員研修派遣）を受けました。お礼申し上げます。重ねて、研修を受け入れて下さった、バンドン工科大学の Hasanuddin Z. Abidin 教授及び、観測に参加いただいたバンドン項か大学スタッフ各位にお礼申し上げます。また、地震予知研究センターの伊藤潔助教授・中村佳重郎助手・松尾成光技官には、現地での観測に際して様々のご指導いただきました。お礼申し上げます。特に中村佳重郎助手には、重力計の取り扱いから、測定方法等、重力に関するご教示をいただいております。本報告書の作成においてもご指導いただきました。感謝の意を表します。

8. 参考文献

- 1) 田中寅夫: インドネシアにおける断層運度並びに火山地熱地帯における地殻変動の研究、研究成果報告書、防災研究所、1995年4月。
- 2) 田中寅夫: ジャワ島西部レンバン及チマンデリ両断層の活動度と構造の研究、研究成果報告書、防災研究所、1999年2月。
- 3) 日本測地学会: 測地学の概観、1974、第1部 第5章 重力の測定、pp. 133 - 161.
- 4) 上田誠也・水谷仁: 岩波講座地球科学1 地球、岩波書店、1978、第1章 地球の形、pp. 1 - 44.
- 5) 友田好文・檀原毅: 測地・地球物理、共立出版、第7章 重力 pp104 - 131.
- 6) Milton B. DOBRIN: INTRODUCTION TO GEOPHYSICAL PROSPECTING McGraw-HILL BOOK COMPANY, INC., 1952, CHAPTER2~7, pp. 13 - 102.
- 7) 萩原幸男・他: 活断層の重力調査(4) - 立川断層の検出 -、地震研究所彙報、Vol. 63, 1988, pp. 115 - 129.
- 8) 大久保修平・他: 1986年伊豆大島噴火前後の重力変化、地震研究所彙報、Vol. 63, 1988, pp. 131 - 144.
- 9) 宇津徳治総編集: 地震の辞典、朝倉書店、1987.
- 10) SCINTREX LIMITED: Autograv Operation Manual Ver. 4, 1992.



付図(1) 補助モードに関するソフトウェアフローチャート



付図(2) 補助モードに関するソフトウェアフローチャート