

# 空中重力測定の精度に関わる諸要因

瀬川 爾 朗<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

空中から重力を測ろうとする試みはThompson, L.G.D. (1959)が初めてであろう。当時は船上重力測定が本格的になったばかりの時期で、航空機の利用はかなり先走ったものであった。使われた重力計はプロトタイプLaCoste & Romberg AirSea Gravimeterであった。その結果は失敗であった。その後25年を経て、GPS測位が実用化されて初めて空中重力測定も実用化を迎えたと言える。空中重力測定に対する挑戦は、二つの流れがあったと私は考える。一つは地下資源の物理探査の側の動きである。Carson Helicopter社のGumert, W.R. and Cobb, G.E. (1970)らは、旧来の電波測位やレーザー測位などを使ってかなり強引に航空機での測位を行い資源探査に応用しようとした。その方法は大変な手間とお金がかかり、見習うことは出来ないようなものであった。もう一つの動きは地球の形状(ジオイド)をさらに正確に決めようとする測地学的、地理学的動きであった。米国海軍研究所(NRL)のBrozena J.M. (1984)等は地球上の重力データのない地域(Gravity Void Zones)の測定を目的とし、グリーンランド、アラスカ、南極などの重力測定を海軍の対潜哨戒機P3C ORION機を使って広範囲に行った。彼らはGPS測位を積極的に使用し、3-5mgalの精度の測定を行ったという報告がある。P3C ORIONは250ノット以上の速度で飛ぶので、空間分解能は良くない。測定の最小波長は20-30km位であると考えられる。

日本における空中重力測定の動きは比較的鈍いものであった。第一の理由は、日本では重力は測られ尽くしている、という先入観があったことである。いまさら飛行機などで、と思う人が多かったと思う。日本

の石油開発関係の企業では航空重力測定へのニーズはあったと思うが、そのためには国外の物理探査企業に依頼することが多かったようである。

1998年に著者は国産の技術のみによって空中重力計を開発したが、その目的は日本列島の重力を新しい観点から見直そうと考えたためである。

重力計は何と言ってもセンサーが命である。世界の代表的(オリジナル)な重力センサーは、Vening Meinesz振子(1920-), Worden型(1940-), LaCoste型, Askania型, TSSG型, Bell型(以上は1960年代), Bodensee型, Cintrex型(以上は1970年代)などである(ここでは超電導型, 絶対重力計型などは省く)。一般的に、重力センサーはメーカーの特許に守られており、他人は手がつけれない。これらのいずれのセンサーも空中重力測定という新しい環境で使おうとすると、多くの問題が起こる。外国の例を見ると、既成の重力計をそのまま飛行機に積むことも多く、測定者の考えが通じないこともあると聞く。

## 2. 空中重力測定の仕組み

著者の開発した重力計はSegawa/TokyoKeiki Airborne Gravimeter Model FGA-1と名付けられており、すべてが日本製である。これにより開発の段階で色々な自由度が与えられた。第1図に国産空中重力計の構成、使用ヘリコプター、重力測定時の機器の配置を示す。

我々の空中重力測定は次のポリシーで行われる。

- 1) ヘリコプターを使うことにより低空、低速で飛行して重力変化の振幅を増やし、短波長分解能を上げる。
- 2) GPSによる2周波干渉測位を行い、ヘリコプターの

1) 東京海洋大学 海洋工学部・(株)COSMOGRAV

キーワード: 空中重力測定, 測定精度要因, 重力センサー要因, 測位精度要因, 時刻の問題, 姿勢制御要因, データ処理技術, 空間分解能の要請



第1図 国産空中重力計の構成と重力測定の仕組み。

左下部には、左より、サーボ加速度計型重力センサー、ジンバル機構、水平安定台、光ファイバージャイロ、重力計制御・記録装置、左上部は重力計が搭載されるヘリコプターBell412型、右の図はGPS干渉測位によってcmで位置と高さが決められる空中重力測定システム、ヘリポートに基準GPS装置を設置、ヘリコプターに移動(rover)GPSが設置される。

3次元位置をcmの精度で決める。

- 3) 重力計は4つのブロックに分かれる。すなわち、重力センサー部、水平安定台、光ファイバージャイロ、制御・記録部である。
- 4) 本論文の主題である空中重力測定の精度を決める要因を論じる時、重力計の各部のセッティングの自由度が欠かせない。純国産であることがその自由度を広げる点で有効であった。

### 3. 空中重力測定の実績

日本列島では他国と比べ極めて良く重力測定がなされていると言って良い。しかし、陸海境界域、山岳域はいまだしである。日本国内では資源探査のため重力測定をすることは稀であるが、同じ地下探査でも、地下断層調査という点では今後重力データに期待するところは大きい。

日本列島の長大な海岸線沿いは、幅20km位にわたって無重力データ地帯である。しかし海岸線沿いの海側は、水産業、海上交通、レジャーなどのために、船による科学調査が大変やりにくい。一方、重力異常の分布から地下の異常を推定する時、データの連続性、一様性が極めて大事である。特に陸海の連続測定のためには航空機が欠かせない。

著者らは2000年に空中重力の実用化に成功し、それ以後2010年までに国内の12の地域において実用測定を行った。測定地域名および分布図を第2図に示す。地域名を改めてここに列記する。

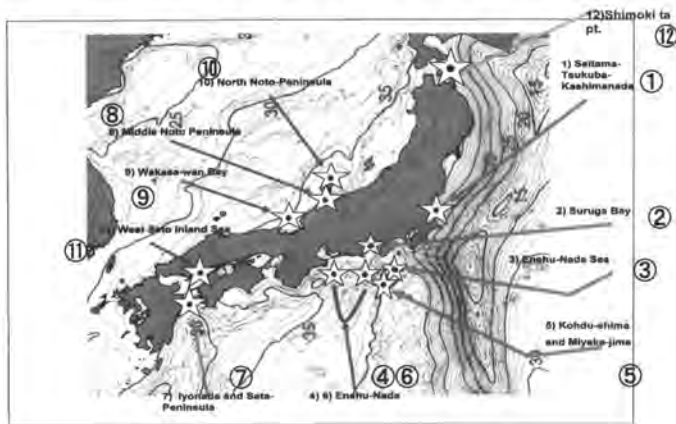
- 1) 埼玉-筑波-鹿島灘(2000年)
- 2) 駿河湾(2000年)
- 3) 遠州灘(2000年)
- 4) 遠州灘(2001年)
- 5) 神津島・三宅島(2001年)
- 6) 遠州灘(2002年)

測定地域

主に陸海境界域. 2000~2009の10年間で12地域

1. 埼玉-筑波-鹿島灘(2000)
2. 駿河湾(2000)
3. 遠州灘(2000)
4. 遠州灘(2001)
5. 神津島・三宅島(2001)
6. 遠州灘(2002)
7. 伊予灘/佐田岬(2004)
8. 中能登(2006)
9. 若狭湾(2006)
10. 北能登(2008)
11. 西瀬戸内海(2008)
12. 下北半島/津軽海峡(2009)

日本列島における空中重力測定



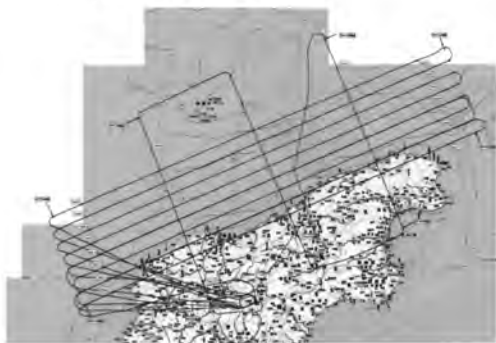
第2図

2000年以降, 今日(2010年)までの空中重力測定の実績. 国内12か所の測定を行い, 飛行距離はおよそ20,000kmに達する.

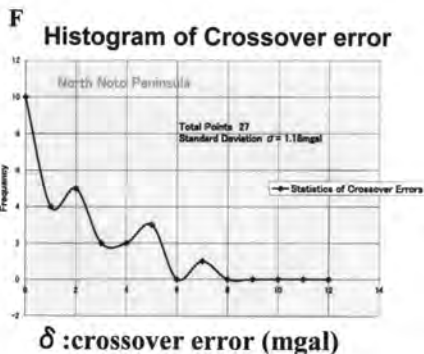
北能登の測定データ(駒澤正夫 他 2009)

Helicopter Flight Tracks

Track spacing 2km



能登半島 北部



第3図 北能登空中重力測定例 2008年10月.

産業技術総合研究所(駒沢正夫ほかによる. 文献参照)の測定である. 能登半島の北縁, 陸海境界域の詳細な測定であり, 海岸沿いの測線は2km間隔でなされた. それと直交する南北の測線も取り, 交点での値の食い違いも評価した. また, 高度を1,000ftから3,000ftまで変化させて, 同一測線を2度測り, 高さによる重力異常の減衰の様子も調べた.

下の曲線はヒストグラムで, 横軸deltaは交点での重力値の食い違い, 縦軸はFrequency(度数)である. 交点での値の食い違いの半分が誤差と考えられるが, 符号は不定なので, 標準偏差にはならない. この食い違いの平均は2mgal程度なので, 誤差評価の一応の目安とはいえる.

- 7) 伊予灘・佐田岬 (2004年)
- 8) 中能登 (2006年)
- 9) 若狭湾 (2006年)
- 10) 北能登 (2008年)
- 11) 西瀬戸内海 (2008年)
- 12) 下北半島/津軽海峡 (2009年)

これまでの測定結果の一例として第3図に2008年10月に産業技術総合研究所の依頼によって行った北能登地方の測定例 (Komazawa *et al.* 2010) を紹介する。

測定は能登半島北部沿岸から距岸約15マイルにかけて陸域と海域にまたがる形で測線を設定し、一部異なった高度で繰り返し測定も行った。この測定によって27点の測線の交点が得られ、重力値の食い違いの平均2.35mgalが得られた。ただし、この平均値は  $\delta = \text{絶対値} |g_2 - g_1| / 2$  の平均の意味なので、正しい標準偏差ではない。  $\delta = 0$  の頻度は10、  $\delta = 7$  の頻度は0である。誤差評価の一つの目安と考える。

この測定によって能登半島北部沿岸の陸海にまたがる均質な重力データが得られた。これまでの陸上データとまばらな船上データだけの場合に比べ、より信頼性の高い重力分布が得られたと思う。

#### 4. 空中重力測定精度を決める要因

##### 1) 重力センサーに起因するもの

空中重力測定は一区切りの測定が比較的短時間なのでドリフトの問題は楽である。1日5-10mgalのドリフトがあっても、線型補正で0.5mgal程度の精度は保証できる。機内の室温が常温に保たれる場合には温度特性もそれほど問題ではない。

動的特性はさまざまな影響を与える。それはまたセンサーの種類によって大きく異なる。LaCoste, Askania, Bodenseeなど、可動部分のあるセンサーでは、10mgal程度のCross Coupling Error<sup>3</sup>が起こる。一見、可動部分のなさそうなサーボ加速度計型センサー(著者の重力センサーやBellのセンサー)は機体の動揺によってセンサー内部の発熱量が異なり、重力値に温度変化を与える。これについては種々の対策が採られている。TSSG重力計は弦振動型センサーを使い、重力値が振動周波数の2乗に比例することを使って重力を測っているが、細かな外部振動が入ると、値が

シフトする、というような問題があり注意が必要である。

重力センサーの問題は、型だけではなく、データの読み取り方法も大いに関係する。近年、データ処理はほとんどデジタル的に行われるので、すべての重力センサーはDigital readoutを行う。デジタルな読み取りの際には、重力+動揺加速度+振動加速度の時間スペクトルを考慮してサンプリング間隔を決め、非線型誤差が生じないように考慮する。

##### 2) 航空機の測位精度に起因するもの

GPSによる2周波干渉測位法によって航空機のアンテナの位置をcmの精度で3次元的に決める。我々は10年以上前から使用しているAshtech PNAVソフトウェアに従って位置測定を行っている。このソフトウェアにより条件の良い時には水平位置±5cm、高さ±10cm程度で決めていると信じているが、断言はできない。いずれ、このソフトウェアは古いものなので、それよりは新しいGrafnavを使ったらという人もいるが、このソフトはどうも合わない。PNAVはGPSの信号がちょっと弱くなると、急に位置の計算精度が落ちると言われる。これに対してGrafnavはGPSのデジタル信号に加えて、Doppler信号も併用し、連続した位置データが出力できるようになっているらしい。重力測定では $10^{-6}$ の相対精度を必要としているが、Doppler Shiftを使う方法では $10^{-5}$ の数倍の誤差を含むようだというのが我々の考えである。Grafnavは航空機の自動操縦などに使われているということで、そういう目的では $10^{-5}$ で十分なのか、と考えている。

2周波干渉測位法では基準GPSと移動GPS間の距離(基線長)は100km以内が良いと言われているが、我々の経験では、50km以内だと特に楽だな、という印象である。ここ数年は太陽活動のミニマムの時期である。そのお陰か、昨年(2009年)の干渉測位は大変な悪条件のもとでも良い結果が出たことが忘れられない。

基線長と干渉測位の精度に関する模型実験を1995年に行ったので、その結果をここにメモする。1995年という年度は1998年の太陽活動ミニマムの年の3年前なので、干渉測位には都合の良い年であった。実験の方法は、半径50cmの回転台に移動局GPSをのせて一周5-10秒の速度で回転させ、基準局GPSに対して干渉測位を行う。そして回転GPSの軌



跡を測り、位置のばらつきをプロットする。10分間の測定の平均から次の結果が得られた。

| 基線長      | 位置のばらつき | 高さのばらつき |
|----------|---------|---------|
| 13.87m   | ±3mm    | ±3cm    |
| 184.78m  | ±3mm    | ±4cm    |
| 1.312km  | ±5mm    | ±6cm    |
| 9.265km  | ±10mm   | ±8cm    |
| 76.263km | ±20mm   | ±12cm   |

これから位置のばらつきは問題なく、高さのばらつきは、水平位置よりも1ケタ大きいのが、許される範囲であると考えられる。

ここに測位精度と重力測定精度とはどのようにつながるかを考えてみる。もしも航空機の高さ $h$ が

$$h = h_0 + \Delta h \cdot \cos(\omega t) \text{ とすると } (\Delta h \text{ は高さの誤差})$$

$$d^2h/dt^2 = -\Delta h \cdot \omega^2 \cos(\omega t) \text{ となる。}$$

$$\Delta h = \pm 10 \text{ cm, } \omega = 2\pi/60 \text{ sec とすると,}$$

$$\omega^2 = (2\pi/60 \text{ sec})^2 \cong 0.01 \text{ sec}^{-2}$$

$$\text{従って } d^2h/dt^2 = \pm 10 \times 0.01 \cos(\omega t) \text{ sec}^{-2}$$

$$< \pm 0.1 \text{ gal} = \pm 100 \text{ mgal}$$

これらの式の結論は、航空機の高さの測定に10cmの誤差があり、それが1分(60秒)の周期で変化しているとすると、重力データには100mgalの周期的誤差が生じるが、それはバイアスを持たない誤差であるので、データ処理の中でなされる Digital Lowpass Filtering の操作で、他の誤差要因と合わせて除去されることになる。

### 3) 時刻の問題

GPSによる位置測定は原子時(TAI)、GPS時(GPS Time)、協定世界時(UTC)が関わっている。特に空中重力測定ではUTCとGPS Timeの比較が重要である。2009年はこの差が14secであった。現在、我々の重力計では、重力変化がUTCで測られ、位置、高さがGPS Timeで測られている。これは、実は過去において、重力計の時間軸はDGPSからもらう必要があったことが主な理由であった。今後はその必要がなくなることが予想される。ただし重力計の時間軸とGPS受信機の時間軸とは機器内部の遅延の違いにより多少異なることが予想され、その点の注意は必要である。

### 4) 姿勢制御

重力測定は重力計の測定軸を重力の方向に合わせてから、力の絶対値を測定するのが伝統的なやり方である。このためには水準儀を使う。しかし、移動体上では水平加速度が働くので、単純には鉛直方向が分からない。このため鉛直ジャイロが開発された。水準儀とジャイロの才差運動を組み合わせて、移動体の前後左右の動揺にも影響されずに鉛直を維持し続ける装置である。ただし鉛直ジャイロは持続的に大きな水平加速度に対しては大きく傾くという弱点がある。この弱点は光の波長が地球の自転の向きによって変化すること(サニャック効果)を利用した光ファイバージャイロによって克服された。我々の重力計は光ファイバージャイロで鉛直が保持され、1'-3'の鉛直精度を示す。ただし光効果だけでは精度が維持できないので、水準儀も組み込み、鉛直方向を確認している。

### 5) データ処理技術

データサンプリング：機体振動を含めた振動/動揺スペクトラムを考慮してデータ読み取りの速さを決める。重力計にはある程度の機械的な防振処理が施される。

重力値バイアス：我々の重力計は相対測定用である。従って重力基地点を使って、その都度、重力のバイアス値を与える。重力計の感度は既に与えられている検定値を使う。

ノイズフィルタリング：幅が数分時のHamming Windowを使う。フィルターの幅は対象とする信号の波長によって決める。

Free-air Effect補正：航空機は上下に揺れながら飛行している。この際、揺れの加速度とは別に、地球の重力場が高さによって異なることの影響を受ける。その値は $0.3086 \text{ mgal/m} \times \Delta h \text{ (m)}$ である。これが高度補正である。

水平加速度補正：重力計の測定軸は数分角の精度で鉛直であるが、水平加速度が大きいと、その数分角の傾きが無視できない誤差を発生させる。これを補正することを水平加速度補正という。水平加速度を $a_h$ とし、傾きを $\theta$ とすると、 $a_h \cdot \sin \theta$ だけ重力値に影響を与える。そのため水平加速度計を使って $\theta$ を別に測り、補正をする。補正量は数10mgalに達することもある。

## 6) 空中重力データの空間分解能

重力測定データをどの程度細かく知りたいかが問題になる場合がある。重力測定の目的別に見ると、

- \* 地球の形の決定……ジオイドの完成  
波長 50-100km (全世界で)
- \* 資源探査の一助として 波長 1km
- \* 地殻構造, 活断層調査, 防災 波長 1km
- \* 海流, 海面変動, 海水温度場の研究  
波長 50km
- \* グローバルな水塊移動の研究 波長 100km
- \* グローバルな環境変動の研究  
波長100km…500km

空間分解能を決める要因は、

航空機のノイズの振幅と波長

ノイズフィルターの特性

飛行速度 であろう。

飛行速度を下げることは分解能を上げる最も有効な方法であるが、飛行状態が不安定になることと、飛行料金が高くなることが問題である(航空運賃はタクシーと違って、飛行時間だけで決められる)。

## 5. まとめ ~ 夢を持って

1) 空中重力測定には期待以上の精度, 分解能が潜在している。従って重力測定のこれまでの盲点をカバーできると考えられる。

2) 現今で最も期待されるものは、日本列島周辺を取り巻く陸海の活断層の追跡である。

3) 山岳地帯の重力Gradientの精密測定により山の密度の分布が推定できると考えている。日本列島の山体密度の分布の解明は新しいテクトニクスを生み出すかもしれない。

### 参 考 文 献

- Brozena, J.M. (1984) : A preliminary analysis of the NRL airborne gravimetry system. *Geophysics*, **49**, 1060-1069.
- Gumert, W.R. and Cobb, G.E. (1970) : Helicopter gravity measuring system. in *Advances in dynamic gravimetry*: W.T. Kattner, Ed., Fort Worth, 79-83.
- Komazawa, M., Okuma, S. and Segawa, J. (2009) : Airborne gravity survey of offshore area of northern Noto peninsula, Japan, Proc. 9th SEGJ Intern. Symp. Sapporo, Japan, 12-14. October.
- Segawa, J., Hasegawa, H., Ishihara, S., Sakuma, S. and Ishii, M. (2000) : A preliminary study of the development of a helicopter-mounted gravity measuring system, *Bull. Inst. Oceanic Res. and Develop., Tokai Univ.*, **21**, 1-10.
- Segawa, J., Komazawa, M., Vijay Kumar, K., Nakayama, E., John Joseph, E., Kusumoto, S., Onodera, K. and Kuroishi, Y. (2005) : Examination of consistency of marine gravity with land gravity in and around the Japanese Islands using a helicopter-borne gravimeter, *Earth, Planets Space*, **57**, 243-252.
- Thompson, L.G.D. (1959) : Airborne gravity meter test, *J. Geophys. Res.*, **64**, 488-492.

---

SEGAWA Jiro (2011) : Various Factors Related to the Accuracy of the Airborne Gravity Measurements.

< 受付 : 2010年8月2日 >