

能登半島北部沖における空中重力調査

Airborne gravity survey of offshore area of Northern Noto Peninsula

駒澤正夫¹・大熊茂雄¹・瀬川爾朗²
Masao Komazawa¹, Shigeo Okuma¹ and Jiro Segawa²

Abstract : An airborne gravity survey using a helicopter was carried out in October, 2008 along the northern offshore of Noto peninsula in order to understand a shallow and whole underground structure. Ten measurement tracks including two cross over tracks were arranged within 20km offshore at every 2km spacing and the length of total measurement tracks became about 700km. It has turned out that the Bouguer anomalies by airborne gravity is consistent to the results of the Bouguer anomalies by land and shipborne gravimetry, which gradually decrease toward the offing from a land side, so the accuracy of the system is secured. A local structure with the low gravity of the Wajima bay, which already became clear by sea floor gravity, is also found out, so it turned out that the system has about 2km structural resolution.

Keywords : sea floor gravity survey, Noto peninsula, Bouguer anomalies, graben structure

要旨

能登半島北部沖で浅部地下構造を広域的に把握するため 2008 年 10 月にヘリコプターを使った空中重力調査を行った。測定測線は海岸線に沿った東北東-西南西方向に 8 本、交差測線を 3 本取り、ほぼ 2km 間隔で沖合 20km までに配置した。総測線長は約 700km である。調査結果は、陸側から沖合に向かって重力異常が減るなど陸上及び船上重力データとも整合するもので精度が確保されていることが判った。また、海底重力調査から判明した輪島湾の低重力異常などの局所的な構造も見出され 2km 程度の構造分解能を持つことも判った。

1 はじめに

本調査は、2007 年 3 月に発生した 2007 年能登半島地震の震源域周辺における浅部地下構造を広域的に把握することを目的として、能登半島北部の海陸接合域の重力構造把握するために実施されたヘリコプターを空中重力調査である。空中重力測定は、船上重力測定に比べ測定効率が格段に良く、広範な領域を短

期間で重力図を作成するのに適した方法である。陸上重力計や海底重力計を用いた測定に対してフィルター処理など誤差要因を軽減する処理の必要があるが、最近の測定技術の進歩で得られる重力異常も船上重力に匹敵するまでになってきた。測定には、ヘリコプターに搭載した空中重力計を用い、動的状態で重力を測定する方法である。測定点は、約 2km の測線間隔で沖合 20km までに配置され、総測線長は約 700km である。現地調査は、2008 年 10 月 7 日より 10 月 9 日にかけての 3 日間で実施した。

当該地域での陸上・船上重力調査によれば、海岸線に沿うようなコンターパターンが卓越し、沖合数 km のところに重力勾配の最も大きい構造があることが判っているが、今回の空中重力調査は重力異常図の精度と構造把握がどの程度可能であるかの検証を目指して実施されたものである。

2 調査地域

空中重力の調査範囲は、能登半島沖の海岸線に沿った約 60km × 沖合約 20km (約 1,200 km²) の主として海域部分で、ヘリコプターに搭載した空中重力計

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門(AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

² 東京海洋大学 (Tokyo University of Marine Science and Technology)

を用いて重力調査を実施した。陸部としては、半島北部の沿岸域と沖合いの七ツ島を含んでいる。測定線図を第 1 図に示す。

3 空中重力測定

空中重力の測定システムについては、瀬川ほか(2000)による。以下に本調査に関する事項を中心にその概要を述べる。

3.1 使用したヘリコプター

米国製 Bell412 ヘリコプター（機体番号 JA9616）を使用した。このヘリコプターは 2 基のエンジンを持ち、回転翼は 4 枚、最大 13 人の乗客を乗せることが出来る。測定時にはパイロット 2 名、観測員 2 名、ナビゲイター 1 名、計 5 名が搭乗する。さらにもう 1 名の添乗員を搭乗させることも可能である。連続飛行時間は 2 時間以内をメドとした。巡航速度は対気 60—110 ノットである。

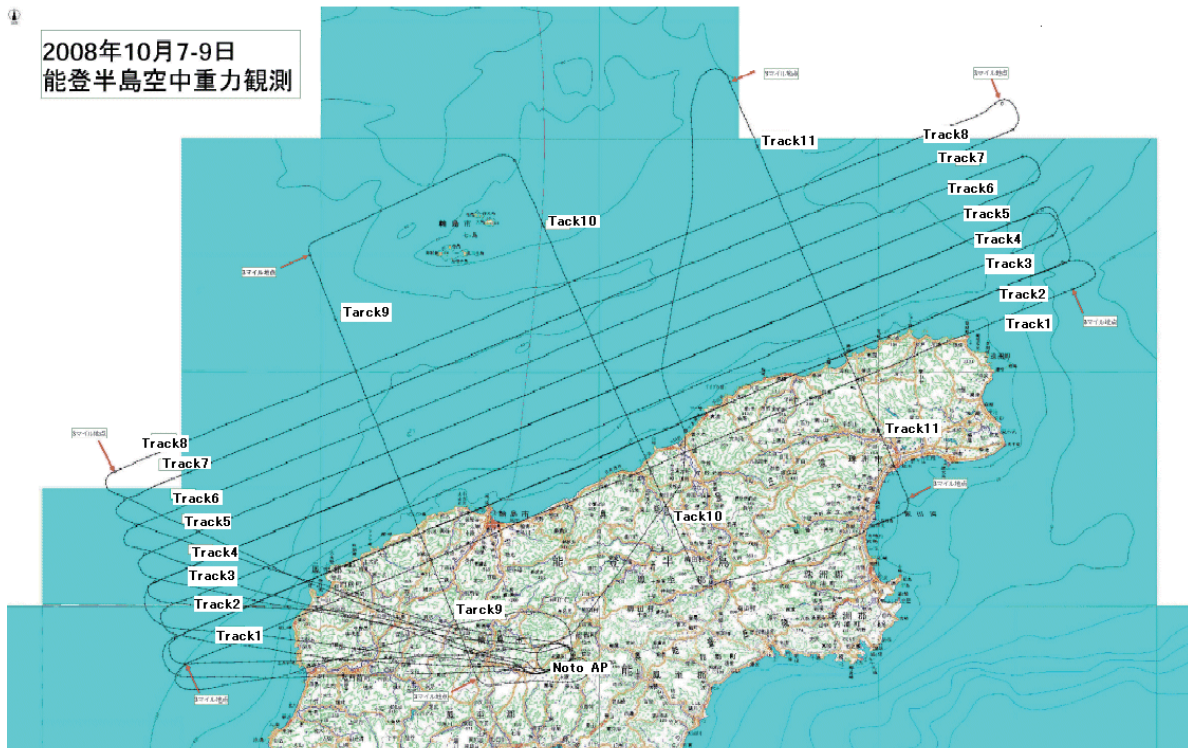
ヘリコプターの選択の際には飛行の安定性と、低振動を考慮する。また GPS による測位を行うので、電波伝搬の特性を十分に考慮する。

3.2 使用した重力計、重力計システム、データ処理法の概要

ヘリコプター搭載型重力計（Airborne Gravimeter Segawa-Tokimec Model FGA-1 型）（第 2 図）を使用した。重力計は第 2 図に見える部分にさらに全体として防振処置が施され、GPS 測位システムが付け加わる。第 3 図は重力センサーとその鉛直を保持するジンバルシステムを示す。

重力測定システムを第 4 図に示す。鉛直、水平加速度計による重力センサー装置（左側ブロック）とその制御、記録装置（中央と右側のブロック）、およびヘリコプターの位置と速度を測る GPS システム（下段のブロック）よりなる。重力変化とヘリコプターの動揺が起す加速度変化、および地球の自転との相互作用で起こるエトベス効果の合力が測定値となるが、その中から重力変化だけを取り出すことが測定のポイントである。

重力加速度計は 100Hz の繰り返しで機上の加速度を測定している。これは高周波の振動の影響を出来るだけ押さえるためである。ジャイロや GPS は 1 秒ごとの測定である。擾乱加速度は 100gal に達する。測



第 1 図 測定線図.

定精度は 1mgal を目標としているのでこの場合の信号／ノイズ比は 1/100,000 ということになり、1km の距離を 1cm の精度で測ることに似ている。ノイズの除去はデジタルフィルターによって行う。通常、時定数 150 秒の Hamming Window を使用する。このフィルターによる重力半波長分解能はヘリコプターの速度を 60 ノットとするとほぼ 1.5 km である。フィルターによって短周期のノイズが除去できてもヘリコプターの飛行高度は緩やかに変化している。飛行高度が 1000m 前後までは地球の正規重力の鉛直勾配は 0.3086mgal/m である。GPS で得られる高さは海水準を基準にした標高でなく楕円体高 (ellipsoidal height) で、鉛直勾配を使ってフリーエア補正を行うと空中の重力が準拠楕円体面上の値に化成されて重力

乱れが得られる。更に、ジオイド高の補正を行えばフリーエア重力異常が得られる。なお、重力の短波長変化は高さと共に調和関数的に減衰することはポテンシャル場として明らかである。従ってジオイド面のフリーエア重力異常値はヘリコプターの飛行高度から下方接続して求めることになるが、その方式は未だ一般化されていない上に、下方接続法はノイズを拡大するという欠陥を持つので、今回はジオイド面 (海拔 0m) への適用はしなかった。第 5 図はデータ処理のフローチャートである。

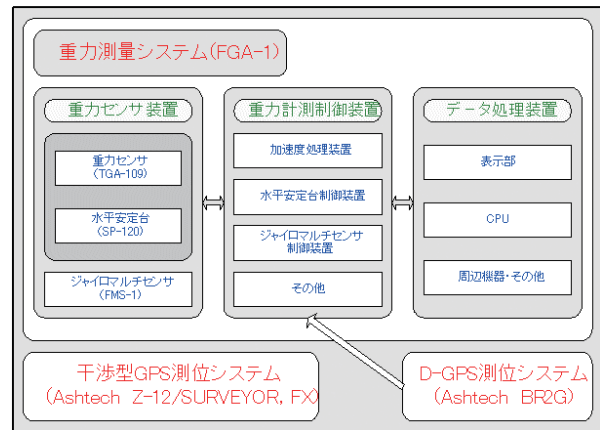
3.3 使用したヘリポート

石川県輪島市にある日本航空大学校 (Japan Aviation College of Japan Aviation Academy) の Apron

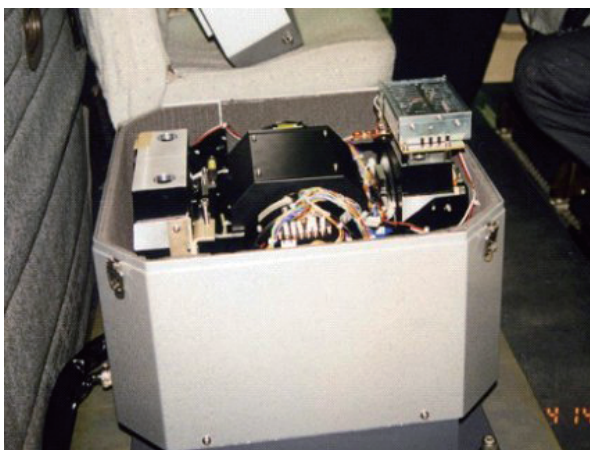


第 2 図 ヘリコプター搭載型重力計 (Airborne Gravimeter Segawa-Tokimec Model FGA-1)。中央が水平安定台と重力センサーの入ったボックス。左が光ファイバージャイロ。右は制御およびデータ記録装置。総重量は 250kg 程度。

システム構成

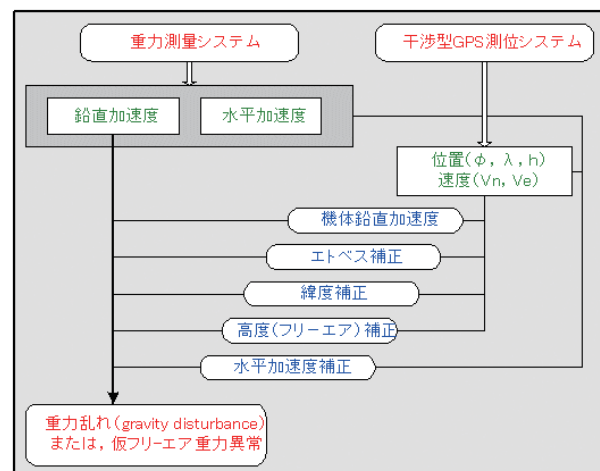


第 4 図 重力測定システム構成。



第 3 図 重力センサーとジンバルシステム。中央の黒いボックスの中に 3 重恒温槽に包まれた重力センサーがある。黒いボックスがジンバルメカニズムに支えられて鉛直を保持する。

データ処理法



第 5 図 データ処理フローチャート。

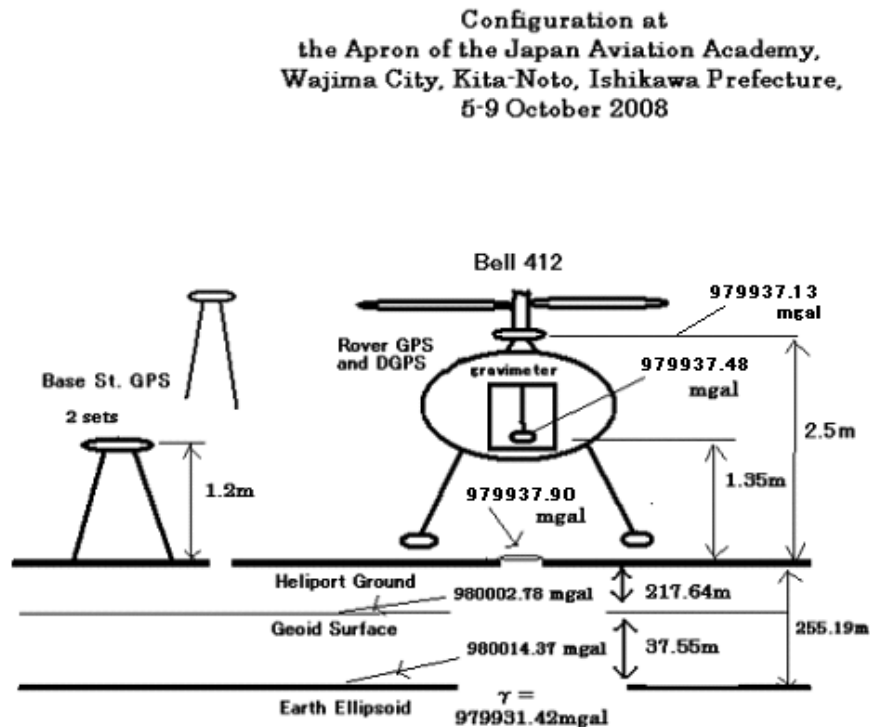
をヘリポートとして使用した。この大学校は能登空港に隣接し空港の航空管制を受けていたため、離着陸は大学構内で行い、その前後は能登空港の滑走路を使った。管制および燃料補給は能登空港の施設に協力して頂いた。

第 6 図にヘリポートの測地学的基本定数（高度と重力）を示す。ヘリポートの格納庫の近傍に固定点を設け離着陸点とし、全てのフライトの際にこの点を基点とした。この点を Spot.1 と名づける。Spot.1 の標高は 217.64m である。またこの点のジオイド高は国土地理院によれば 37.55m である。従って楕円体高は 255.19m ということになる。Spot.1 の地表面での重力値は 979937.90mgal であるので、地面から 1.35m の高さにあるヘリコプターに搭載された重力センサーにおける重力値は 979937.48mgal ということになる。重力計は常に通电されヘリポート内でも常時重力を測定している。したがって Spot.1 で重力計が示す読み（数値）は 979937.48mgal と換算される。この方法で重力計は常時 Calibration され、ドリフトの評価がされている。更に、ヘリコプターの屋根に置かれた GPS 受信機のアンテナの位置の重力値は、979937.13mgal ということになる。

GPS 干渉測位はヘリポートに置かれた固定 GPS 受信機とヘリコプターの屋根に置かれたアンテナによる移動 GPS 受信機によって楕円体面からの高さが測定される。測定には Ashtech 社が開発した PNAV というソフトウェアを使用する。この際、初期条件として PNAV Software に対して固定 GPS 受信機のアンテナの楕円体高が与えられる。ヘリポートの楕円体高が 255.19m、基準 GPS の三脚の高さが 1.2m であるので 256.39m という数値をセットする。これらは国土地理院の GPS 基準点との結合によって求められたものである。なお、通常の陸上重力及び船上重力のフリーエア異常やブーゲー異常を計算するためには高さとして楕円体高ではなくジオイド補正がなされた標高が必要であるが、現在、国土地理院で得られている本地域のジオイドは、陸域のみに限られており、今回は、GPS 処理などで全世界的に使われているジオイドモデル EGM96 を利用することにした。それについては別途重力処理計算で述べる。

3.4 重力測定の詳細

重力測定は平成 20 年 10 月 1 日より 10 月 5 日までの準備期を経て、10 月 6 日から 10 月 9 日にかけて



第 6 図 日本航空大学校 Apron の測地学的基本定数.

て行われた。その経過は次の通りである。

- ・平成 20 年 10 月 5 日 重力計を搭載したヘリコプター Bell 412 型 JA9616 が東京ヘリポート離陸 (12 時 49 分)。富山空港 (14 時 33 分) を経て能登空港 / 日本航空大学校に着陸 (16 時 29 分)。
- ・平成 20 年 10 月 6 日 雨のため飛行中止。
- ・平成 20 年 10 月 7 日 昼前に Flight 1, 午後 Flight2。
- ・平成 20 年 10 月 8 日 朝 Flight3, 昼 Flight4, 午後 Flight5。
- ・平成 20 年 10 月 9 日 朝 Flight6, 全測定終了 午後 東京ヘリポートに向け離陸。

3.5 飛行実績 (航跡の詳細)

Flight (フライト) 1 より 6 までの飛行航跡図および航跡数値データを与える。各フライトの重力プロフィールに添えて示す。測位はすべて WGS84 測地系になっている。

3.5.1 航跡図

能登半島北部域の Flight 毎の飛行航跡図と、11 本のトラックを全て一つのマップにプロットした飛行航跡図のを第 1 図に示す。飛行高度については重力加速度に直接影響を与えるため一定高度で飛行する必要があり、Flight 毎に地形と天候を勘案して 1,000ft から 3,000ft の間で固定して飛行した。飛行高度の詳細は、Track1, Track2, Track9, Track10 及び

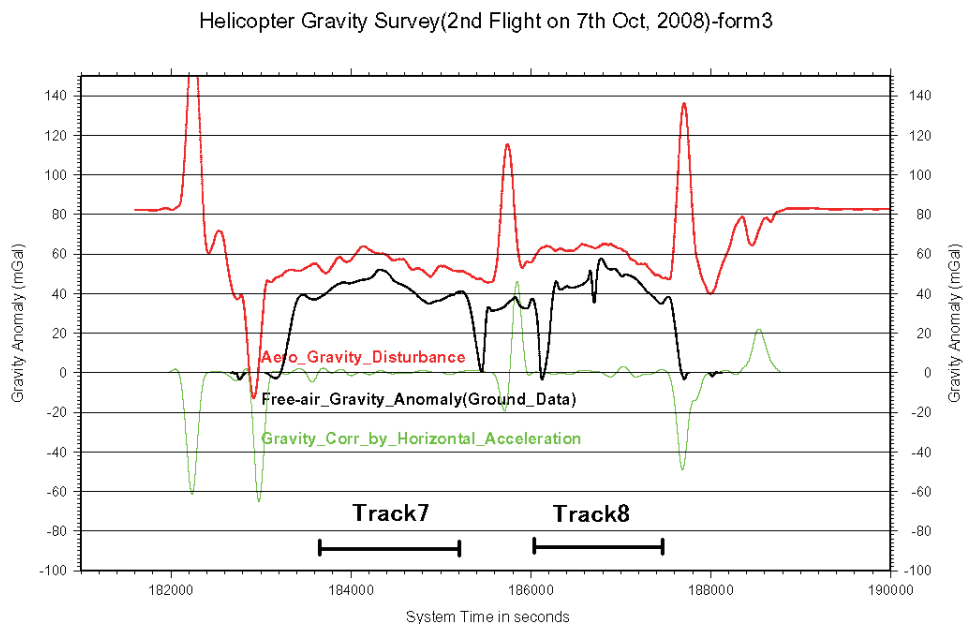
Track11 が、陸域に懸かるため 2000ft とし、Track3, Track4, Track5, Track6, Track7 及び Track8 は海域であり、より微細構造の抽出を目的に 1000ft とした。なお、Track2 と Track4 は 3,000ft でも測定を行い再現性のチェックと高度差による上方接続の検証を行った。

3.5.2 航跡データ

航跡の時刻と緯度、経度の数値を与える。時刻は GPS タイムコードによる時刻で、0.5 秒間隔である。位置は GPS 単独測位によるもので、精度は ± 3m である。緯度、経度は「度」の 10 進法と 60 進法で示される。緯度は小数点以下 7 桁、経度は小数点以下 6 桁である。以上のデータを一括したものが最終的に収録された。

4 調査データ

本調査のデータを船上重力データと比較してデータの精度を検証した。ここでは、東西測線のうち船上重力データが密にある一番北側の 2 測線 (Track) のデータを示す。すなわち、第 7 図に 2 回目のフライトで得られた Track7 と Track8 の結果を示す。第 7 図では空中重力データの高さは楕円体高を用いているため重力乱れ (gravity disturbance) となっているが、この場所でのジオイド高は EGM96 によれば 37.1 ~ 37.8m となっておりフリーエア異常に対し約 11.5mgal 大きくなっている。このことを考慮すれば、



第 7 図 2 回目のフライト (Track7 及び Track8) の結果。

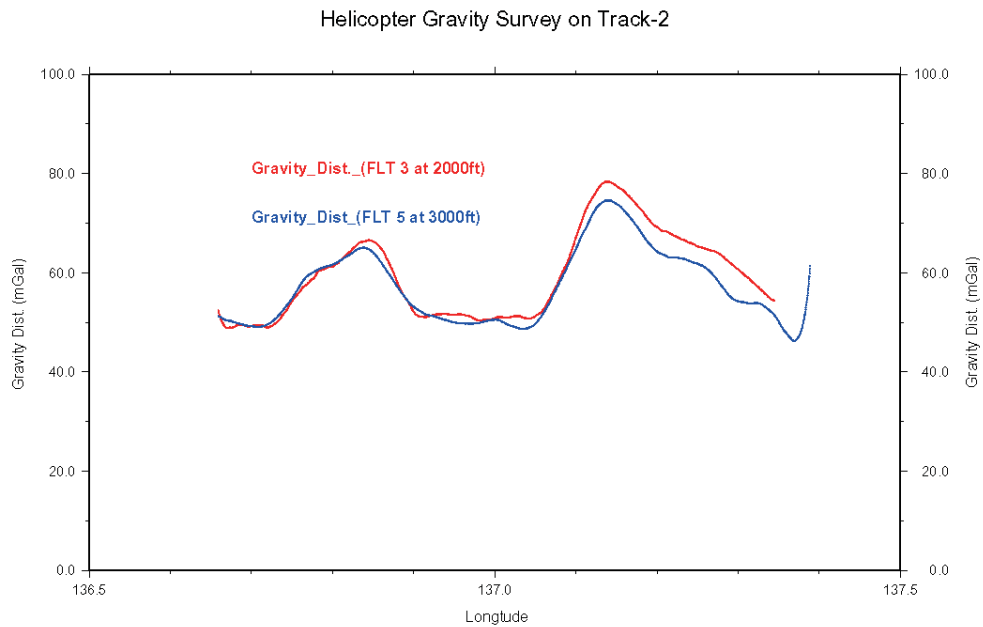
船上重力データと近い値を示していることが判る。

Track2 と Track4 について高度を変えて測定を実施しており、データの再現性から本空中重力測定システムの精度の評価を行った。第 8 図については、高度が 2000ft と 3000ft との比較で高度差が小さいため短波長パターンの違いが小さく全体的に整合しているのが判るが、東側で 2000ft の方で値が大きくなっている。これは、Track2 の南側にある高重力域が比較的小規模で高度を増すにつれ減衰したためである。第

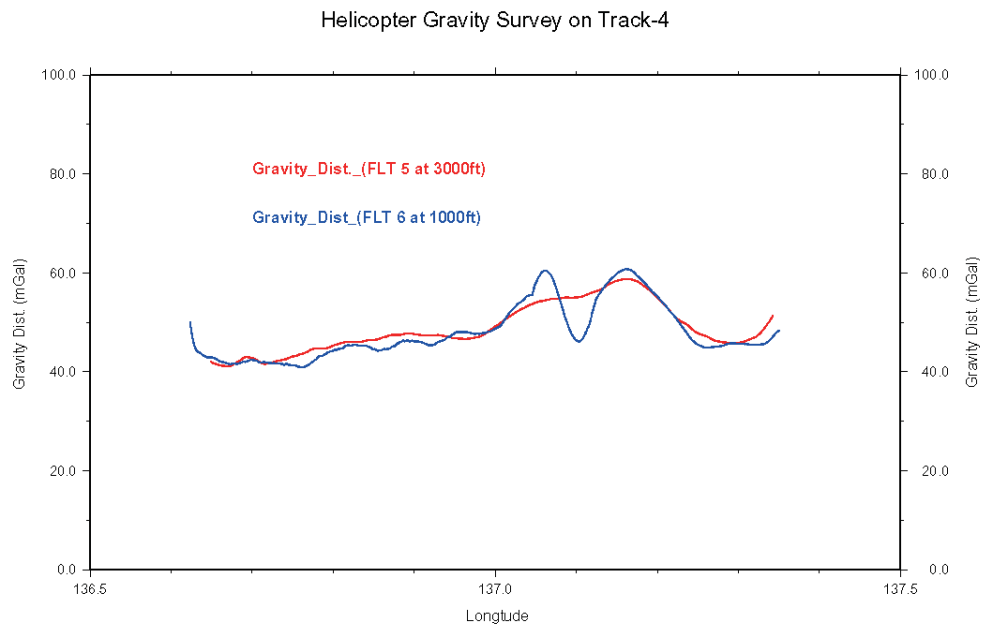
9 図については、高度が 1000ft と 3000ft であり高度差が大きいため短波長パターンが 3000ft では減衰してスムーズになっているのが判る。

5 重力データの処理手法と結果

陸上重力データや船上重力データと比較するためには空中重力データから暫定的に得られた重力乱れ (gravity disturbance) をブーゲー異常 (Bouguer anomalies) に変換する必要がある。それには、観測



第 8 図 高度の違いによる重力乱れ (Track2).



第 9 図 高度の違いによる重力乱れ (Track4).

点の高さを楕円体高から標高に変換すれば良い。また、地形補正も標高でなければならない。通常日本国内でのジオイドは国土地理院で作成されたものを使うのが一般的だが、本調査海域ではジオイドが同院より提供されていないため、別の方法を選ばねばならない。ここではGPSなどで汎用的に使用されているEGM96 (<http://cddisa.gsfc.nasa.gov/926/egm96/getit.html>) を用いた。ちなみにジオイドモデルの違いを能登空港でチェックしてみると、国土地理院のGSIGEO2000で37.55m、EGM96で37.40mとなり15cm程度の差しかなくブーゲー異常の算出には問題ないと考えられる。

ブーゲー異常 $\Delta g_0''$ の算出式は、

$$\Delta g_0'' = g - \gamma + (\beta - 2\pi G\rho)h + T(\rho) + C_A$$

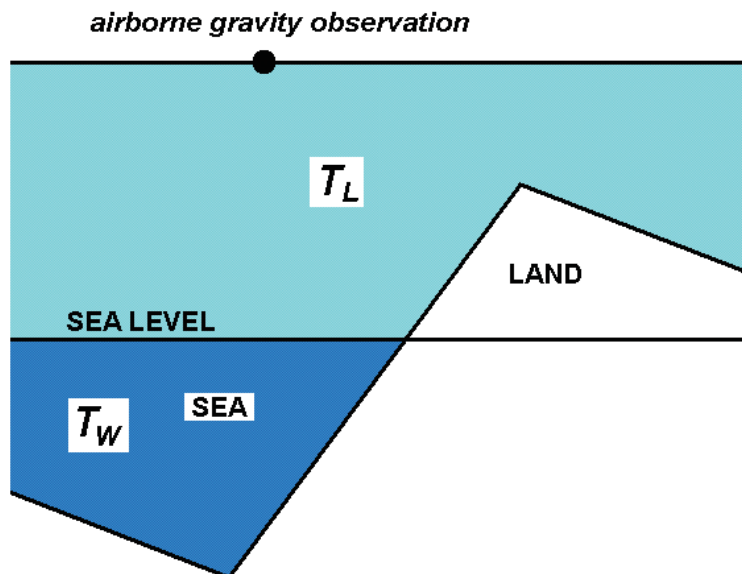
$$T(\rho) = \rho \cdot T_L(\rho - \rho_w) \cdot T_W$$

与えられる。ただし、 g は観測重力値、 γ は正規重力、 β は鉛直勾配、 ρ は仮定密度、 $G(6.6730 \times 10^{-3} \text{ mGal} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$ は万有引力定数、 C_A は大気補正值、 h は高さで標高値である。

陸域と海域の地形を合わせた全地形補正值 $T(\rho)$ は、地殻の密度を ρ 、水の密度を ρ_w としている。 T_L (単位密度換算) は測定面と地殻上面もしくは水面で挟まれた部分の地形補正值、 T_W (単位密度換算) は水域部分による地形補正值である (第10図)。陸域と海域とも地球の曲率による球面効果を考慮した仮想扇形の集合体で近似する方法で地形補正を実施した (駒澤, 1988)。地形補正に用いた標高 (水深) データに

ついては、陸域は国土地理院作成の50mメッシュを用い、海域については、日本海洋データセンターによる沿岸域数値化原図水深値 (J-BIRD フォーマット) と JEGG500 (メッシュデータ) から地形補正に使用するDEM (200mメッシュ) を作成した。ブーゲー補正については、無限平板 ($2\pi G\rho h$) ではなく地形補正と同じ範囲の有限の球殻 (球帽) による方法によった。測定重力値は、日本重力基準網1996 (JGSN96) に準拠させ、地球規模の広域トレンド除去 (緯度補正) には正規重力式による値 (測地基準系1985) を用いた。なお、これらの処理にはフリーエア補正も含まれているが、厳密にはポテンシャル論的なりダクションでないためブーゲー異常値を海水準での値と考えるのは誤りで、あくまで空中での測定点の値と考えるべきものである。

第11図に空中重力データをブーゲー異常図に編集したものを示す。但し、Track2とTrack4では高度を変えて重複して測定しているが、同一測線 (もしくは、同一点) で2個の値を持つと編集ができなくなるため Flight5 の高度3000ftでの測定データは編集から除外した。また、第12図に陸上重力データと船上重力データを編集したブーゲー異常図を比較のため示した。第11図を見ると空中重力による結果が、波長2km程度の微細構造も明瞭に抽出しているのが判る。特に、北部沿岸西半の沖合2~4kmのところにと東北東-西南西に伸びた幅4km程度の低重力帯が検出された。同じように船上重力でも低重力帯が見られるが、調査船 (白嶺丸) が陸から3km以上離れて測定がさ

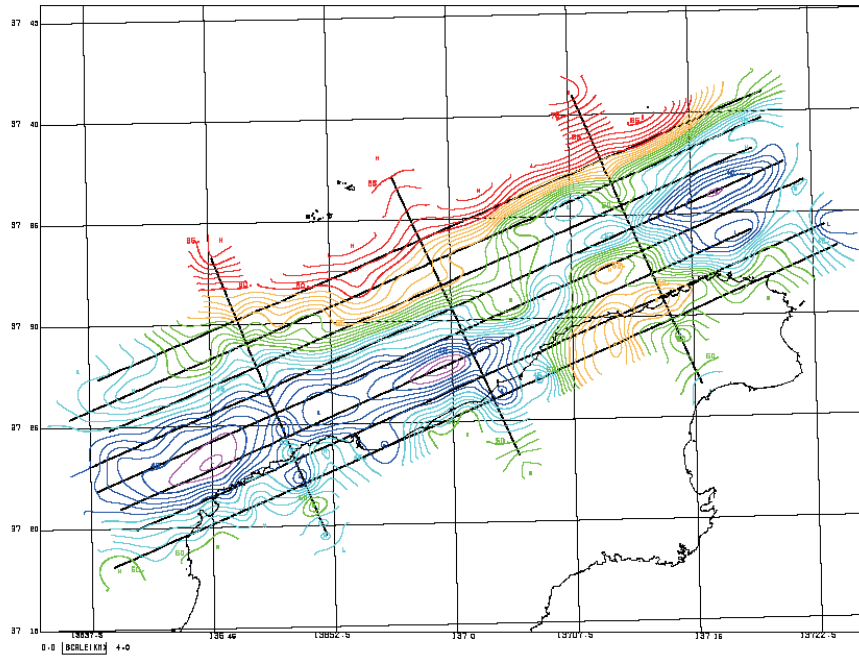


第10図 空中重力の地形補正.

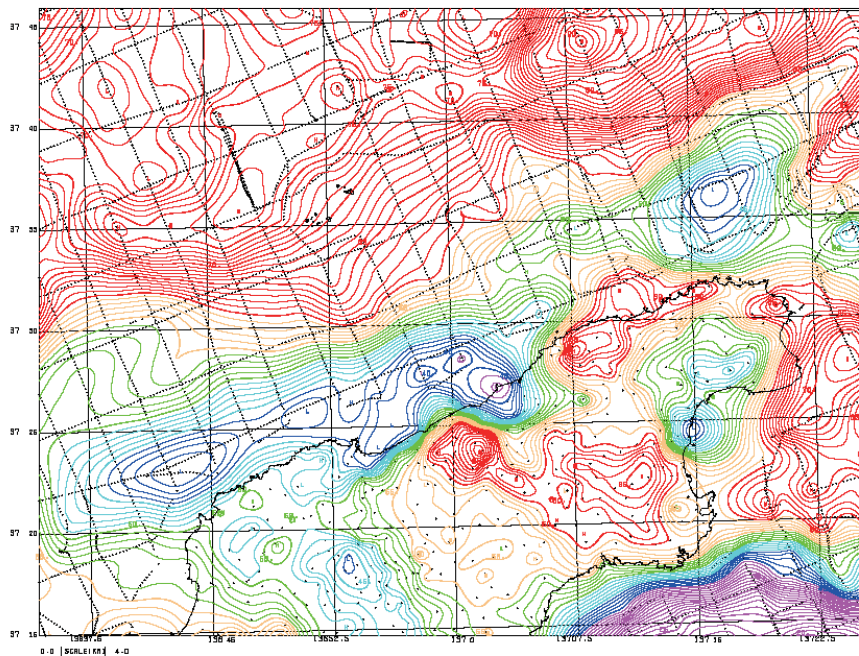
れているため低重力帯の底（極小部）がやや北側にシフトしていることが判る。また、空中重力では沿岸部に測線を取ることができたため海岸から 1km 程度沖合にシャープな勾配構造も見えている。輪島湾とその東 10km 程のところに各々直径 2km 程の低重力域が存在し、第 12 図とも整合している。Track1 に沿った陸上には高重力異常が 2箇所（輪島の東方 8km と

25km）見られるが、第 12 図に比べると 5mgal 程度小さく上方接続効果が顕著に表れているのが判る。

あと、第 11 図と第 12 図を全体的に見比べて気付くこととしてコンターパターンは整合するが、ところによって重力異常値に数 mgal の違いが見られることである。以上のことをから、現時点では船上重力データや陸上重力データとの安易な編集は困難



第 11 図 空中重力データによるブーゲー異常。仮定密度は $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ 。コンター間隔は 1mgal。ドット（線状に見える）は測点。



第 12 図 陸上及び船上重力データによるブーゲー異常。仮定密度は $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ 。コンター間隔は 1mgal。ドット（線状に見える）は測点。

であることが判る。空中重力データと陸上・船上重力データとの重力値の違いの原因としては、前述のように上方接続効果のほか、場所によって実際の鉛直勾配が正規重力の鉛直勾配 (0.3086mgal/m) からずれている (鉛直勾配のゆらぎ) ことが考えられる。今回の調査では鉛直勾配のゆらぎが明瞭に検出された訳ではないが、地下構造の解明の手段として有効であることを指摘しておく。

6 おわりに

海域での重力測定は船上重力計で実施されるケースが殆どであるが、船上重力計は大型の調査船に搭載されるため陸に接近した測線を取りづらく、回頭によるエトベスも大きくなり微細な重力変化を抽出するためには問題がある。一方、空中重力は、地形的な制約のほかは測線を自由に設定できるなど沿岸部の調査も可能であることが判った。また、調査期間も船上重力調査は短い場合でも数日に及びドリフトも大きくなるのに対し、空中重力の調査時間は数時間でドリフトが小さく精度を落とさずに済むことになるなど長所がある。短所として、空中重力は速度が大きいためエトベス効果が大きくなってしまふことであるが、従来 90 ノットで実施していたものを今回は 60 ノットで実施し、エトベス効果の軽減に努め、ある程度効果があったと考えられる。測線間隔については、従来の半分以下の 2km としたが、ノイズに乱されることもなく短波長の構造を捉えることができた。

結果の概略を以下に述べる。ブーゲー異常から能登半島北部の沖合数 km のところに急勾配の断層状構造が明瞭に抽出された。その構造は船上重力データからも判っていたが、調査船が陸に隣接した測線を取れないため空中重力調査に比べ沖合いにシフトしていることが判った。輪島湾にも海底重力調査で把握された直径 2km 程度の低重力異常が空中重力調査でも見出され陥没状の構造を持つことも判った。

謝辞：本調査は、日本航空大学校、輪島空港事務所、航空自衛隊等、多数の関係機関の協力により実施することができた。以上、上記の方々に謝意を表します。

文献

- 駒澤正夫 (1988) : 仮想扇形地形による重力地形補正法, 測地学会誌, 34, 11-23.
- 瀬川爾朗・楠本茂寿・E. ジョンジョセフ・長谷川博・関崎征一・高田和典・中山英二・鈴木始・石原丈実・駒澤正夫・山本貫志・佐久間貞臣 (2000) : ヘリコプターを用いた航空重力測定システム, 測地学会誌, 46, 223-229.
- NASA and NIMA : EGM96/The NASA GSFS and NIMA Joint Geopotential Model,
<http://cddisa.gsfc.nasa.gov/926/egm96/getit.html>