

内部矛盾の少ない日本列島周辺の海上重力データセット

澤田明宏：金沢大学

笹原昇：航法測地室

本多亮：北海道大学

河野芳輝：金沢大学名誉教授

Marine gravity datasets around the Japanese Islands without noticeable inconsistency

Akihiro SAWADA : Kanazawa University

Noboru SASAHARA : Geodesy and Geophysics Office

Ryo HONDA : Hokkaido University

Yoshiteru KONO : Emeritus Professor of Kanazawa University

1 はじめに

日本周辺海域における重力値の測定は1960年代から始まり、重力計それ自体のみならず海上重力にとって重力測定の精度と不可分な測位技術においても技術的に大きな進展を遂げてきた。したがって、海上重力測定値は時代によっても、また測定機関によっても精度が異なった測定値の集合となっている。このようなデータを基本的に全て利用しなければならない理由は、広大な海域における最新の機器システムを用いての再測定が、航海に要する費用のみならず莫大な時間を要するからである。また、衛星重力が海域全域をカバーしているとはいえ、海面上で実測した海上重力データは貴重な観測値である。

測定された重力異常値には様々な要因によって生じた誤データが含まれている。誤データが生じる主な要因としては、重力計に原因するもの、測位システムに原因するもの、さらに測深システムに原因するもの（ブーゲー異常の場合）などである。これらのどれかに誤りがあれば、誤った重力異常値が生じる。特に測位システムの誤差は、船位のみならず船の速度の測定に直接影響し、結果としてエトベス補

正の精度を決定する。同一航海の測定データ中にはこれらのいずれかあるいは複合によって生じた誤データ、さらには重力計のドリフトや測位機器の系統的な誤差などによる系統的な食い違い（Internal Cross Over Error; ICOE）が存在しうる。また、異なった航海の測定データ間には、同様な理由により系統的な差（External Cross Over Error; ECOE）が存在しうる。このような事情により、これらの測定データを統合して重力異常図を作成するためにはデータの精査が不可欠である。なお、ここでは重力測定に伴う技術的問題については触れない。本報告では、これまでになされた笹原他（2006）の成果の上に立って、なお残された様々な誤データを取り除き、可能な限り多数の海上重力データを採用し、それらの間の矛盾が少ないデータセットを作成することを目的としている。

従来の観測データを用いて、10 mGalコンターでも誤データが目立たない重力異常図を描くことができる（植田，2005）。また、注意深くデータの点検を行い、誤データを取り除くことによって、海洋情報部以外のデータを含めても2 mGalコンターのフリーエア異常図を描くことが可能であることは河野・古瀬（1989）で示されているが、残念ながらこの

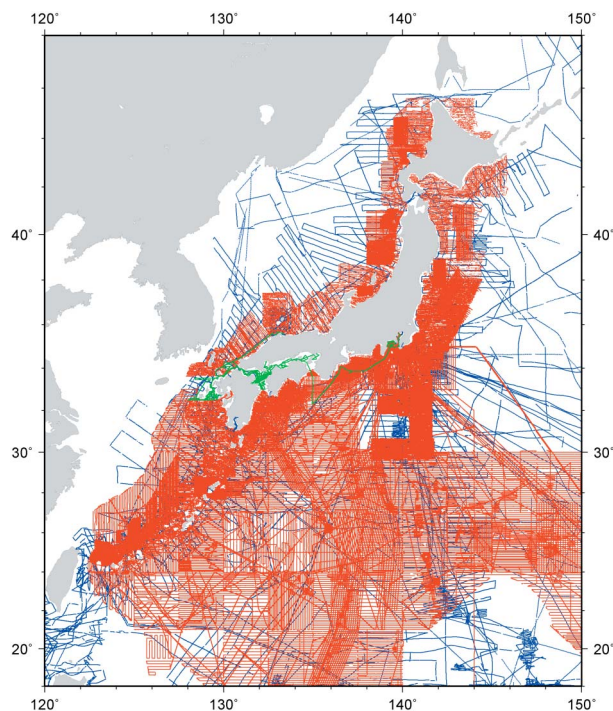
ファイルは失われている。本報告では、日本列島周辺海域全体について更に詳細なデータの精査を行うことによって、2 mGalコンターの分解能をもった重力異常図を作成することを目的に作業を進めた。

今回対象にした総データ数は約300万点である。我々は、これらのデータをできるだけ採用しながら内部矛盾が少ない重力データセットを新たに作成することを目的にして、以下3節に述べる手順で測定データの精査を行った。さらに、実測データのみでは測定値を欠く広大な海域や、測線と測線の間挟まれた無視できない空白域が残される。この問題を見かけ上解決するため、フリーエア重力異常が海底地形と強い相関を示す場合が多いことに着目して、海底地形データを用いて未測定地域のフリーエア重力異常値の推定を行った(4節)。こうして、(1)実測値のみによるフリーエア異常図と、(2)地形データを考慮に入れた補間を行うことによって日本周辺海域をほぼ全域カバーしたフリーエア異常図とを作成した。

2 海上重力データのデバッグ処理範囲と対象としたデータセット

重力データの解析範囲は北緯18～48度、東経120～150度とした。これはこの領域内で海上保安庁海洋情報部によってグリッド間隔が30秒の海底地形データセットが整備されていることを考慮したものである。この海底地形データセットに合わせ、データ処理における重力異常データのグリッド間隔を30秒として処理を行う。この範囲については、後に説明する地形を考慮した重力値の補正や補間が可能である。

分析の対象となる海上重力測定データは、海上保安庁海洋情報部が入手した総数約300万点である。解析の対象にした測定点の分布を第1図に示す。測定データは海洋情報部によるもの(第1図中の赤点)のほか、東京大学海洋研究所、地質調査所(現産業総合研究所)や海外の諸機関によるものである(第1図中の青点)。これ以外に東京大学海洋研究所淡青丸によって行われた瀬戸内海(小泉他, 1994)および五島列島周辺の測定値(未公表)28491点を追



第1図 処理範囲と全測定データの分布。赤は海洋情報部、緑(瀬戸内海及び五島列島周辺)は東京大学海洋研究所測定の追加した点、青はその他の機関による測定点を表す。

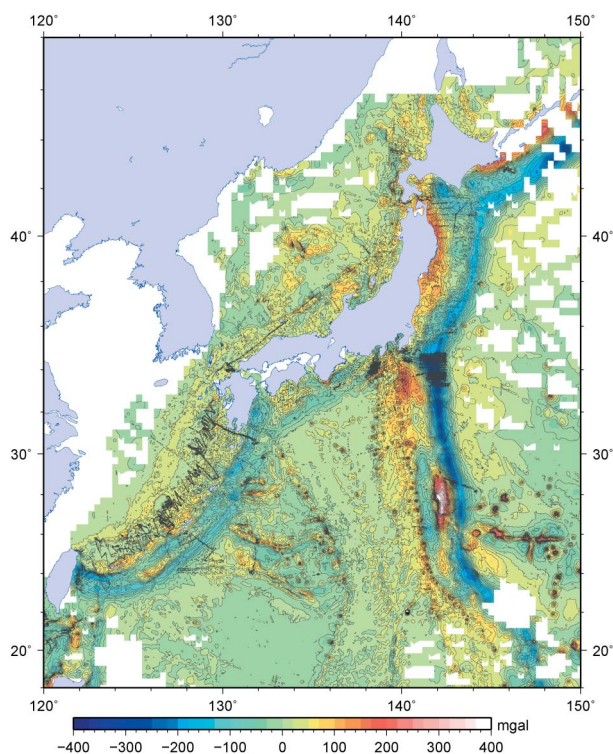
Fig. 1 Distribution of marine gravity data. Red: Japan Coast Guard; Green: Added point measured by Ocean Research Institute, University of Tokyo; Blue: Others.

加した(第1図中の緑点)。なお、第1図は正確には全観測データではなく、各クルーズをレグ単位に分割したあとの分布図である。

第1図に示した全データを用いて描いたフリーエア異常分布図が第2図である。コンター間隔は20 mGalである。先に述べたように、この図は全体としては概ね内部矛盾が少ない重力異常分布を表しているが詳細を見ると各所に周囲の分布と調和しない短波長の変化が多数箇所混在していることがわかる。より大縮尺の図にすればさらに多くの不自然な分布が目立つ。

3 海上重力データのデバッグ処理方法

測定データには先に述べたように重力計の不調や測位誤差、エトベス補正の誤りなどに起因するノイズ、COEなどが含まれている。膨大なデータからこれらを除くために、次の作業を行った。



第2図 全データを用いたフリーエア異常（本報告による処理前）。

Fig. 2 Free-air anomalies calculated by using all data as shown in Fig. 1, before debugging processes.

(A) 笹原他（2006）によって準備されたデータセット

本報告で扱う海洋情報部に収集された測定データについては、笹原ほか（2006）によって次に掲げた（A-1）から（A-4）までの処理がすでになされている。

（A-1）測地系（WGS 84）の統一：正規重力（Formula 1967）および重力基準網（IGSN 71）を統一する。

（A-2）移動平均法による測定値に含まれるスパイク状の誤データの除去。

（A-3）測定データに内包されている時間に依存した傾向の除去（COE補正）：各クルーズを何本かの直線コース（レグ）に分解し、各レグの交点における観測値の差（ICOEおよびECO）を求める。この差を主に重力計のドリフトに起因するものと捉え、回帰分析により回帰式を計算し、回帰式の勾配が最小になるように観測データを修正する。

（A-4）アルティメータ重力との比較による除

去：アルティメータデータで作られた重力異常データ（Sandwell and Smith, 1997; version 11.1）とCOE補正後のデータとを比較し、その差が50 mGal以上のデータは削除する。

（A-1）から（A-4）の処理によりアルティメータ重力異常との整合性は大幅に改善されたと報告されている。

(B) 本報告におけるデータ処理

本報告では、これらの処理が施されたデータに対して、さらに次の検討を加えた。

（B-1）進路が変化する個所（レグの末端など）で現れやすいエトベス補正值の誤りに起因する誤データの除去：観測船の進路変更箇所においては重力計の姿勢が変化することと、進路変更に伴ってエトベス効果が乱れることによる重力値の乱れを除去するため、（A-3）で分割したレグの両端において大きな観測値の変化が見られればその部分を削除する。条件として、レグの両端部において重力変化量が大きい（5 mGal/point以上）測定データは進路変更に伴うエトベス効果による重力変化とみなして削除した。

（B-2）海洋情報部による測定データのみを用いたデータセットの作成：前項の（A-3）により、クルーズ間の不連続はある程度改善されるが、完全に調整されるわけではない。クルーズが異なるとそれらのデータセット間になお系統的な差が存在するのが一般的である。異なったクルーズから得られた測定データセットを他のデータセットと整合させ、できるだけ矛盾が少ないものにするため、次のようなステップで処理を行った。

- （1）海洋情報部による測定データを用いて、内部矛盾が少ないデータセットを作成する。
- （2）その上で、海洋情報部以外の機関によるデータを海洋情報部のデータセットに調和するように調整する。

ここで、海洋情報部による測定データのみを使用して基本となるデータセットを作成した理由は、海洋情報部のデータは日本近海を広域かつ均等にカバーしているためである。

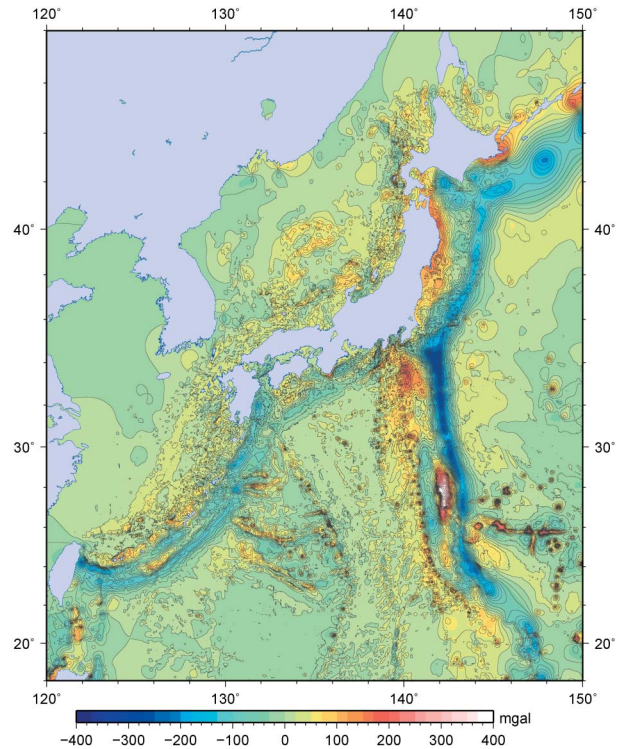
まず海洋情報部による測定データのみについて、

ECOIEの大きな測定データの調整及び除去を行った。ここで、地域的にオーバーラップする複数のクルーズデータについては、最新のクルーズは古いクルーズより信頼性が高いものと考え、最新のデータセットに調和するようにECOIEの調整を行った。ただし、測定海域が広く重複しており、かつECOIEの調整が難しいクルーズについては、古い時期に測定されたクルーズデータを除去した。海域が重複しないクルーズは基本的にそのまま採用した。この操作を全海洋情報部データに対して行った。

以上の処理を経て改善されたと考えられる海洋情報部データについて、様々な縮尺のフリーエア異常図を描かせた。これらの分布図に上で示した処理では検出できなかった極めて短波長の変化として現れる誤データや、COE補正計算では補正しきれなかったCOEによる重力値のギャップなどが不自然なコンターとなって浮かび上がってくる。こうして検出された誤データについて、COE補正の微調整による修正が可能なものについては修正を試み、修正が不可能なエラーデータについては個別に削除した。

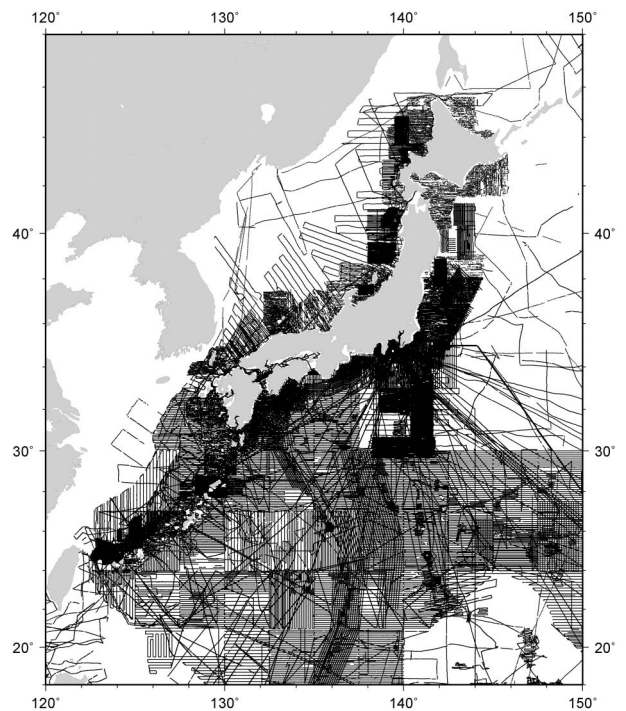
ここでの重力異常図を描いて誤データか否かを判断する作業においての基準として、海底地形の変化がフリーエア異常の変化と多くの場合非常に良い相関を示すという事実を考慮して、海底地形変化をもって局所的な重力異常値が妥当なものかどうかの判断の参考にした。

(B-3) 海洋情報部以外によって測定されたデータの追加：海洋情報部データだけではカバーできない地域についてはそれ以外の測定機関によるデータを使用し、改善した海洋情報部のデータセットと矛盾が少なくなるように調整した。すなわち、COEを調整して海洋情報部データセットに整合させられるものはそのように調整し、どうしても調整できないものは採用しなかった。このようにして追加したデータについても、海洋情報部のデータに対して行った処理と同様に重力異常図を描かせ、目視によって周囲と調和的でないデータを誤データと判断し個別に削除した。第3図に全データを対象に精査を行った結果得られたフリーエア異常図を、第4図にその元になった測定点分布図を示す。



第3図 本報告によって改良されたフリーエア異常図（実測データのみによるフリーエア異常図）。

Fig. 3 Free-air anomalies revised in the course of this study (free-air anomalies using only observed data).



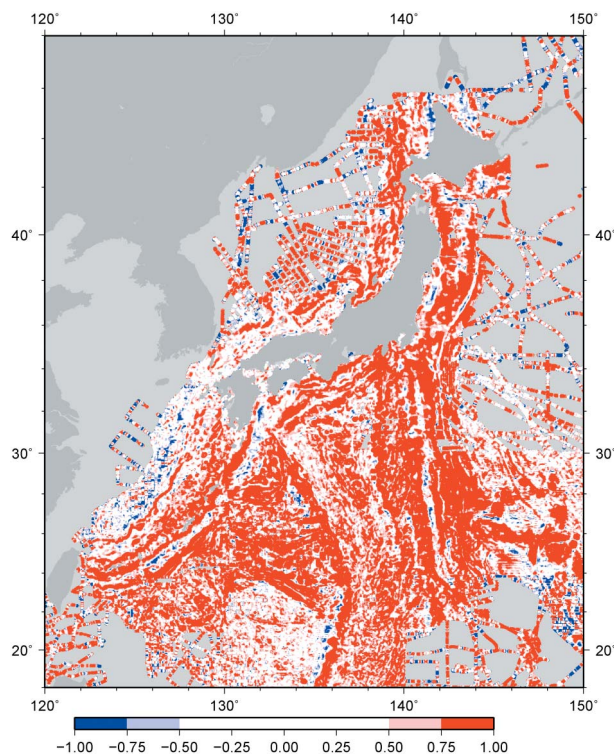
第4図 第3図に採用された測定点分布。
Fig. 4 Distribution of marine gravity data employed in Fig. 3.

(B-4) 短波長の「不自然な」変化の除去：ここまでの処置を行っても削除しきれない、もっと正確に言えば当否が判断できない不自然と思われる重力変化が残る。たとえば、隣接するクルーズ間の観測値にギャップがある場合、その境界付近に重力異常の段差の分布が現れることがある。それが真に重力場の変化を表しているのか、どちらかの測定の誤りによるものかを判断することは困難である。重力異常分布の変化に伴う地形変化があれば蓋然性は高いと言える。一方、対応する地形変化が見られない場合でも、他に利用できる根拠がなければ、重力異常変化の存在を否定することはできない。これまでの処理で採用してきた30秒間隔のグリッドデータでは、2 mGalコンターで重力異常図を描かせると比較的不自然な重力異常分布が残ることがある。この問題を見掛け上目立たなくするために、重力異常分布に不自然な変化が目立たない程度のグリッド間隔をもつグリッドデータを作成し、大局的な重力異常分布を表すことにした。ここでは、グリッド間隔を2分(約4 km)間隔と荒くすることによって短波長変化を抑制し不自然な変化が比較的目的立たないデータセットをあわせて作成した。これによって、原測定データが有する空間密度を犠牲にしても見かけ上不自然な重力変化が少ないデータセットが必要な場合の利用目的に対処することができるようにした。そのように作成したフリーエア異常図は縮尺2000万分の1レベルのスケールでは第3図と見かけ上変わらないので、ここでは省略した。

以上の諸作業によって、観測データのみに基づいた全体的に不自然な変化の少ない2種類のグリッド間隔をもつデータセットの作成を行った。

4 海底地形を考慮した重力未測定域におけるフリーエア異常値の補間

重力異常は地下の密度構造の不均質が主な原因となって生じるが、海域における重力異常を考える場合、海底地形はフリーエア異常変化の大きな原因となっている。測定重力値によるフリーエア異常値と海底地形との相関を測定値に基づいて調べると、広い範囲にわたって強い正の相関が認められる(第5



第5図 第7図によるフリーエア異常分布と海底地形との相関を調べた図。
Fig. 5 Correlation between free-air anomalies shown in Fig. 7 and sea bottom topographies.

図)。ここで、グリッド間隔30秒での各地点に対し、半径10 kmの範囲内で20点以上のフリーエア異常値のグリッドデータが存在する場合、そのフリーエア異常値と海底地形との間の相関係数を計算した。

ここでは、フリーエア異常と海底地形との間に正の相関があることを前提として、測定されたフリーエア異常値と海底地形とを用いて重力未測定域におけるフリーエア異常値を推測(補間)することを試みた。その方法を以下に示す。

一般に、海域のブーゲー異常は、フリーエア異常に比べて海底地形の影響を強く受けない。それは、海域のブーゲー異常計算に際して海水部分を海底下を構成する物質に近い密度を持った物質で埋めたとして、それによる海面上の観測点への重力効果を計算し、補正しているからである。この処理は、海水領域を岩石と海水との密度差を持った物質とみなし、それによる海面上の観測点への重力効果を計算すること、すなわち海底地形補正を計算することと同等である。この計算により、海底地形による重力

効果は第一近似として補正され、ブーゲー異常においては地域的な海底地形の影響はほぼ取り除かれる。したがって、重力未測定域における重力値の補間にはブーゲー異常値から計算することとした。つまり、単純に観測されたフリーエア異常値のみを用いて未測定域のフリーエア異常を補間しようとする、測定データのある地域における地形の重力効果のみ反映される上に未測定域に存在する海山などの地形の変化が反映されない。一方、上記の方法を用いて補間されたブーゲー異常値から地形補正項を差し引くことによってフリーエア異常値を計算すれば、測定データのある地域における地形の重力効果を受けることなく未測定域のフリーエア異常を局所的な地形を反映させながら推測（補間）することができる。以下に具体的処理方法を記す：

まず、フリーエア異常値を海底地形グリッドデータと同じ30秒間隔のグリッドデータに変換する。その時、未測定地域についてはグリッド上のフリーエア異常は空白のままとする。このための変換プログラムとしてGMT (Generic Mapping Tools, Wessel and Smith (1998)) に含まれるコマンド `blockmedian` 及び `xyz 2 grd` を使用した。

グリッド化されたフリーエア重力異常値からブーゲー異常値を求めるために、海水領域 (1030 kg/m^3) を岩石 (2670 kg/m^3) に置き換えたとして海水面上の観測点に与える海水領域の重力効果を計算し、それをフリーエア異常値に加える。この操作は海底地形の地形補正項を計算することと同等である。なお、海水領域をこのような密度構造 ($2670 - 1030 = 1640 \text{ kg/m}^3$) にする理由は、測定値にはすでに海水による重力効果が入っているからである。計算手法としては、海底地形データの各格子点において、計算すべき点から地形補正計算の範囲として十分収束すると判断した半径50 kmの範囲に存在する地形データ格子点に海水領域の形状をもつ密度 1640 kg/m^3 の角柱を仮定し、その角柱が海水面上の計算すべき点（格子点上）に及ぼす重力効果を積分した。格子点上に定義されたフリーエア異常観測値にこの地形補正項を足せばブーゲー異常が求められる。この値を用いて未測定地域におけるブーゲー異常値を補

間計算する。補間プログラムとしてGMTに含まれるコマンド `surface` を使用した。

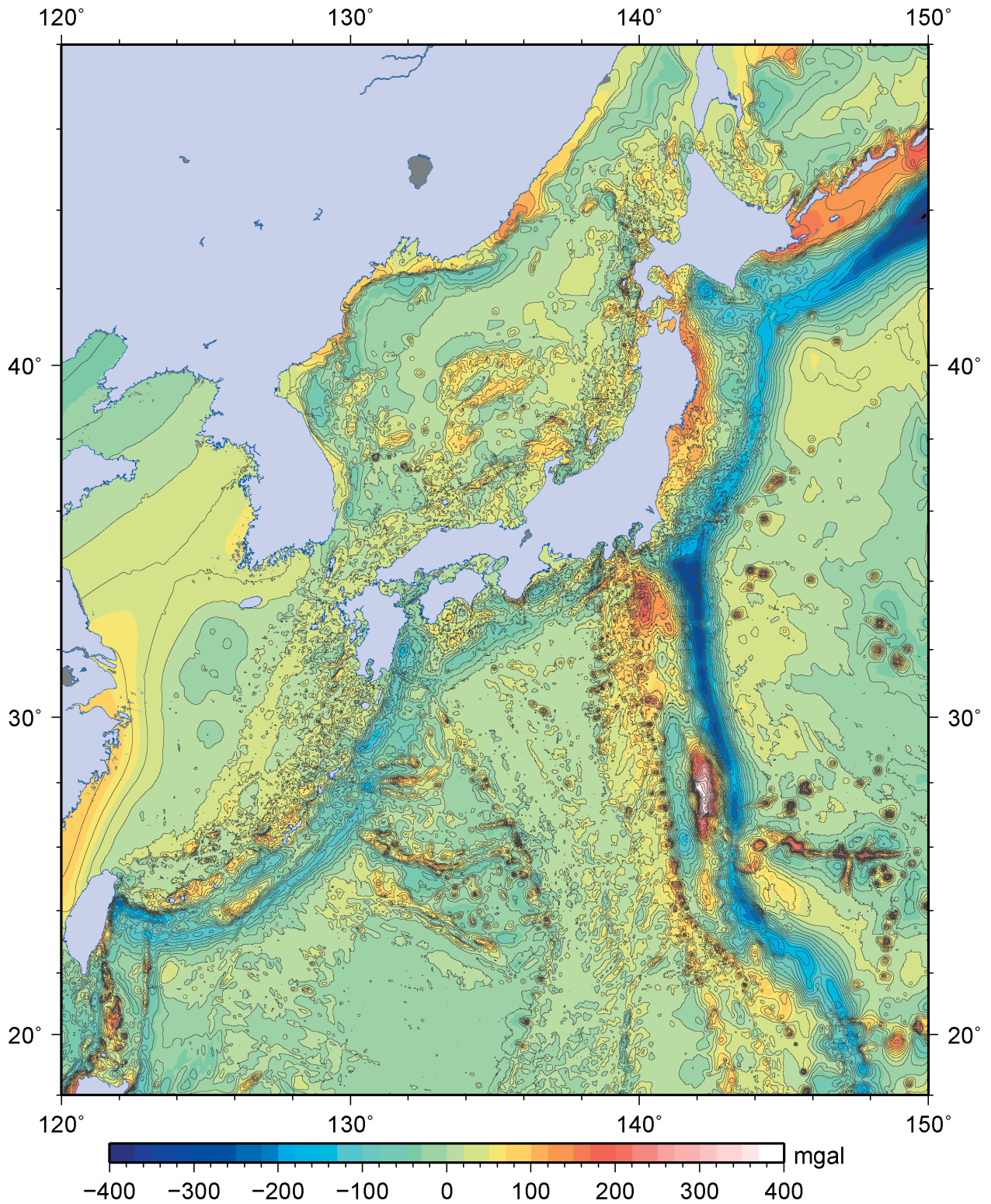
こうして補間された未測定域のブーゲー異常値をフリーエア異常値に変換する。これは、先に計算した地形補正項の値を引くことによって求めることができる。

本研究で作成された海底地形を考慮して補間されたフリーエア重力異常データセットは、これまで広域的に未測定域であった地域または測定データが密に存在しない地域においても海底地形の起伏に対応した重力異常の変化を与えることができる。一方、測定データが存在する地域については海底地形を反映した地形補正値は影響しないように処理されている。

以上の様な補間方法を採用して得られたフリーエア異常図は、観測値に付随する測定ノイズやCOEの不整合など前節で述べた処理によっても完全に除去しきれなかった問題が見られる以外は、妥当な分布が示されていると考えられる。第6図にこのようにして計算されたフリーエア異常図を示す。基礎になった測定点分布は第4図と同じである。

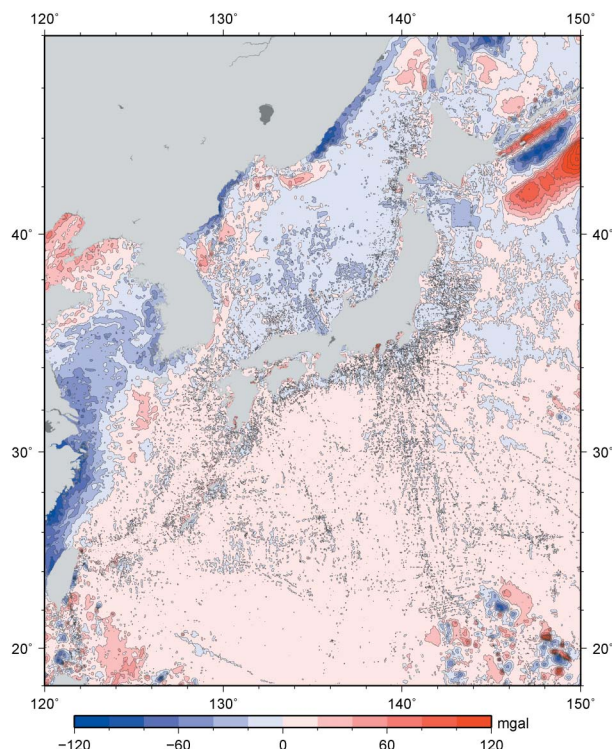
ここで試みた補間方法は、未測定域が観測値に囲まれた領域、特に、レグとレグの間のような狭い領域についてはもっともらしい分布を与える可能性がある。しかしながらそうでない領域、すなわち観測値によって囲まれていない領域についてはその妥当性はきわめて低いと考えられる。たとえば、中国大陸側の黄海、千島海溝北東部、オホーツク海北部、日本海北部などでは観測値がまったく存在しないため、上記方法で描かれたフリーエア異常に現実的意味は無い。

第6図に示した海底地形を考慮して補間されたフリーエア異常値とアルティメータ衛星重力 (Sandwell and Smith, 1997) との差を第7図に示した。この図からも明らかなように、クルーズデータで囲われていない領域における差はきわめて大きく、信頼できないことを示している。しかしながら、三陸沖など比較的狭い測定データの空白域などは海底地形を考慮して補間されたフリーエア異常値が予測値として意味を持ちうることを示している。



第6図 海底地形を考慮した補間をデータ空白域に適用した場合のフリーエア異常。

Fig. 6 Free-air anomalies interpolating gravity effect derived from ocean bottom topographies for vacant regions of observed data.



第7図 衛星重力データ (Sandwell and Smith, 1997) と第6図に示したフリーエア異常との差。

Fig. 7 Difference between satellite altimeter gravity (Sandwell and Smith, 1997) and free-air anomalies as was shown in Fig. 6.

第8図は伊豆半島沖合いの領域について、(A) 海底地形と測定点分布；(B) 測定値のみによるフリーエア異常；(C) 海底地形を考慮して補間したフリーエア異常；(D) 衛星重力によるフリーエア異常；を並べて表示している。明らかに、(C) は (B) や (D) よりもが海底地形によく対応した重力異常図になっており、見かけ上解像度が高い分布図になっている。

5 まとめ

本報告においては笹原他 (2006) の解析を基礎として、さらによりきめの細かいデバッグ操作を加えて測定値のみに基づく日本列島周辺のフリーエア異常図およびデータセットを作成した。しかしながら、それでも不自然と思われる分布が残った。その分布を目立たなくするため、2分メッシュグリッド化という一種のフィルターをかけたデータセットも作成した。

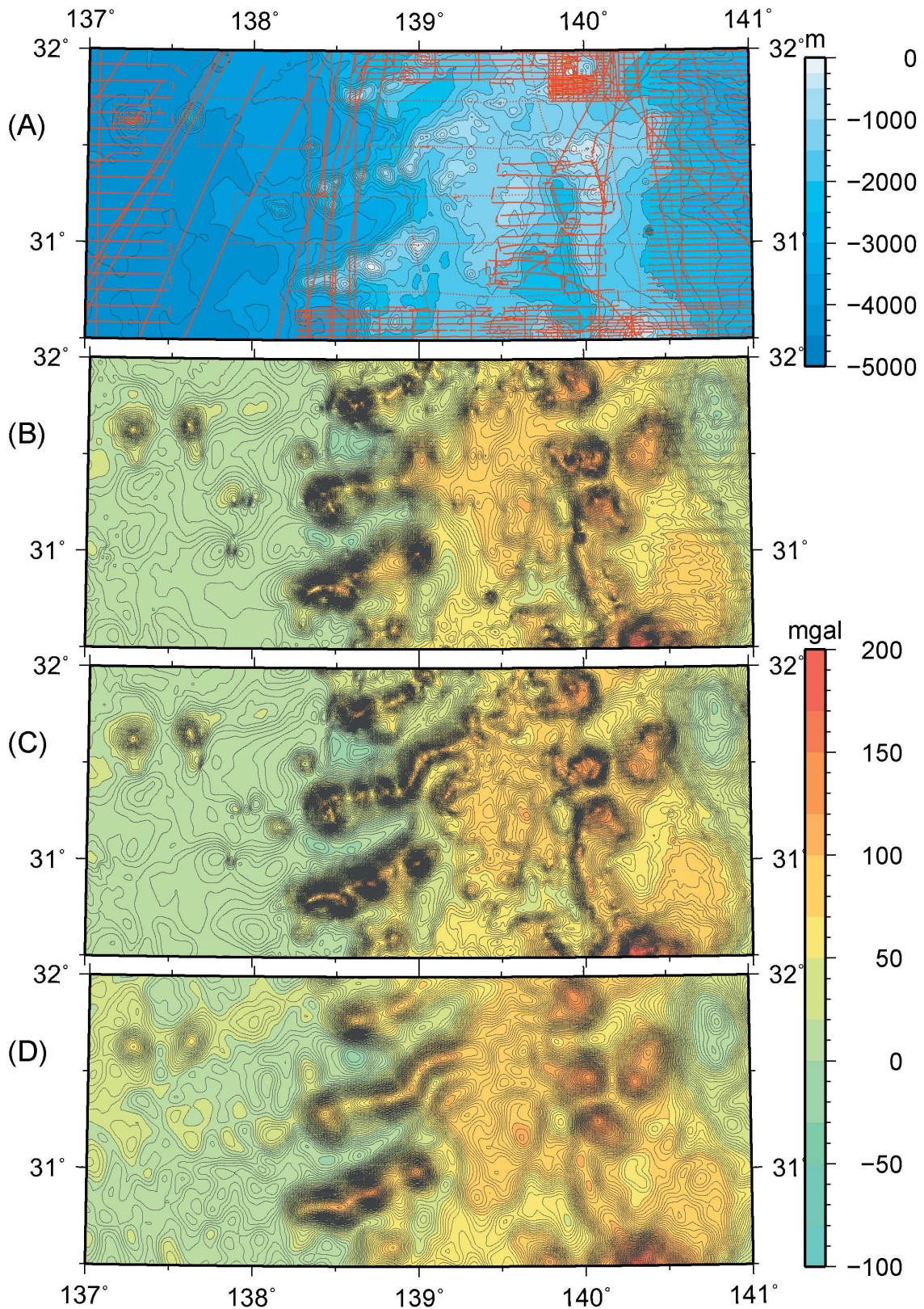
測定データのみに基づく重力異常を描くことができない領域が残る。未測定または測定データが密に存在しない地域においても重力異常を推測するために、海底地形による重力変化を考慮に入れた補間手法を考案した。この方法では、測定データの存在する地域については海底地形効果に影響されないように工夫されている。この方法を用いて作成した重力異常は見かけ上、フリーエア測定値のみによるものに比べて解像度が高い重力異常図を与える。

謝辞

本報告の図は GMT (Wessel and Smith, 1998) を用いて作成した。

引用文献

- 小泉金一郎・藤本博巳・井口博夫・内津 将・河野芳輝, 1994, 瀬戸内海における海上重力測定, 測地学会誌, 40, 333-345, 1994.
- 河野芳輝・古瀬慶博, 1989, 10万分の1日本列島重力異常図, 東京大学出版会, pp.88.
- Sandwell, D. T. and W. H. F. Smith (1997), Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry, *Journal of Geophysical Research*, 102 (B5), 10339-10554.
- 笹原昇・塩原健・矢吹哲一郎, 2006, 船上重力データの精度及び誤差補正について, 海洋情報部技報, 24, 89-93.
- 植田義夫, 2005, 日本列島とその周辺海域のブーゲー異常 (2004年版), 海洋情報部研究報告, 41, 1-26.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998), New improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.



第 8 図 伊豆半島沖合いの領域における，(A) 海底地形と測定点分布；(B) 測定値のみによるフリーエア異常；(C) 海底地形を考慮に入れたフリーエア異常；(D) 衛星アルティメータによる重力異常図．重力異常のコンター間隔 2 mGal.

Fig. 8 (A) Topography and data points ; (B) free-air anomalies based on only observed gravity data ; (C) free-air anomalies based on not only observed gravity data but ocean bottom topography ; (D) Altimeter gravity anomalies, in a region of Off Izu Peninsula. Contour interval of gravity anomalies is 2 mGal.