

衛星高度計から得られる重力・地形データと船舶データとの比較

沖野郷子：海洋研究室

Comparison between satellite-derived gravity/predicted bathymetry and shipboard data

Kyoko Okino : Ocean Research Laboratory

1. はじめに

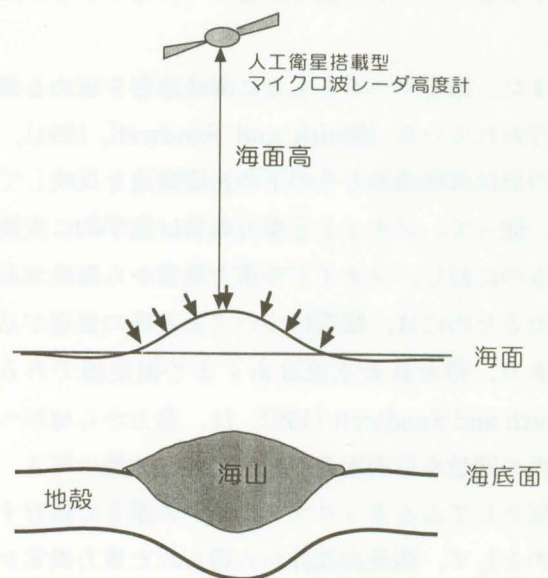
水路部ではこれまで観測船に装備したマルチビーム測深機や船上重力計を使って海底地形や重力の調査を行ってきた。観測船による調査は、比較的高い精度のデータが得られるものの膨大な時間と労力がかかるため、実際に精密な調査が行われているのは世界的にはごく一部の海域にすぎない。一方、80年代以降、人工衛星に搭載した海面高度計によって得られる海面高度（アルチメトリ）データから海域の重力異常分布を求める研究が進んだ。また、衛星重力異常値から水深を推定する研究も行われており、これらの重力異常・推定水深の全球グリッドデータセットは公開され、いまやインターネット経由で簡単に入手することができる。衛星高度計は全球規模で均質なデータが得られる点で観測船に対して有利であるが、それではそれは船舶データに完全に代わるものとして扱ってよいのだろうか？本稿では、現在公表されている衛星高度計による重力異常と推定水深を水路部の船舶データとの比較を行った結果を報告する。

2. 衛星アルチメトリデータの概要

海面高度計はマイクロ波レーダを人工衛星に搭載して、衛星から海面までの距離を測る装置である(第1図)。海面の高度を測った結果は、固体地球物理の分野では海域重力場の情報として、海洋学の分野では海洋変動の情報として扱われている。今、流れはないものとする、海面の形はひとつの等ポテンシャル面（ジオイド）となる。等ポテンシャル面は平らではなく、海底に質量の不均質があればそれに

対応した起伏が生じる。例えば、海底に海山があったとすると、その分は余剰に質量があるので海面はもりあがる。従って、海面の形（場所毎の高さ）は重力異常に対応する。

海域の重力場の研究を主たる目的とした実質的に最初の衛星は、1975年から3年以上にわたって観測を続けた GEOS-3である (Rapp, 1979)。その後、1978年に SEASAT が打ち上げられた。SEASAT は観測は短かったものの、高度計そのものの精度が 10cm と向上し、また衛星軌道の条件からより高緯度のデータが得られたことが意義深い。特に、高緯度のデータ（南極大陸付近）は、海象状況から観測船の調査が難しい海域のデータとして貴重であり、衛星高度計の有効性を実証した。GEOSAT は1985年に打ち上げられた衛星で、打ち上げ後の最初1年半



第1図 衛星高度計による海面高測定概念図 (福田 (1996) に加筆)

の間が Geodetic Mission (GEOSAT/GM) と呼ばれる高密度の海域重力場の決定を主目的とした観測が行われた (Cheney et al., 1986). これは, 周期18カ月の軌道が選ばれ, 地球上をできるだけ均質にカバーするような計画であった. このデータは, 南半球高緯度域が最初に, その後1995年にはすべてのデータが公開され, 現在に至るまでさまざまな研究が行われている. GEOSAT はその後は海面変動の研究を目的としたより周期の短い繰り返し観測の軌道に入ったが, このデータも重力場決定のさらなる精度の向上に貢献している. 1991年には ERS-1が GEOSAT のあとを引継ぎ, 再び周期の長い観測フェイズ (178日, ERS-1/Geodetic Phase) が実施され, 2号機 ERS-2も1996年から観測をはじめている. ERS では, 極域の観測エリアが広がるような軌道が選ばれた. GEOSAT/GM の軌道の間隔は地表で約6 km, ERS-1/GP は約8 kmで, この2つのミッションでは, これまでにない密度でデータが得られている. また, 海面高度の測定精度は, 現在では数cmにも達している.

これらの (特に GEOSAT と ERS-1の) データにより, グローバルな海域重力異常のマッピングが近年急速に進歩した. Sandwell and Smith (1997) は, GEOSAT/GM と ERS-1/GP を主に, その他の周期の短いデータをスタッキングし, 72°N/72°S 度の範囲で2分グリッドの重力異常データセットを作成した.

また, 衛星データをもとに海底地形を求める研究も行われている (Smith and Sandwell, 1994). 海面の形は海底地形とその下の密度構造を反映している. 従って, ジオイドと重力異常は数学的に変換できるのに対し, ジオイドや重力異常から海底地形を決めるためには, 構造についてある種の仮定が必要であり, 得られる水深はあくまで推定値である. Smith and Sandwell (1997) は, 重力から地形への変換の関数を平均水深や地殻密度, 地殻の厚さ, 弾性体としてふるまうリソスフェアの厚さに依存するものとして, 衛星高度計から得られた重力異常から世界中の水深を推定した. 彼らは波長によって変換の関数を変えたほか, 既存の船舶データのある部分

はその点での重力/地形比をもとに関数を調整し, 最終的に船舶データと衛星データをあわせた全球の水深データセットを作成した. これも2分グリッドで全球をカバーしており, 重力異常のグリッドデータともども, インターネットを通じて公開されている. また, 彼らは, 1999年には1分グリッドのデータセットを公開することを予告している.

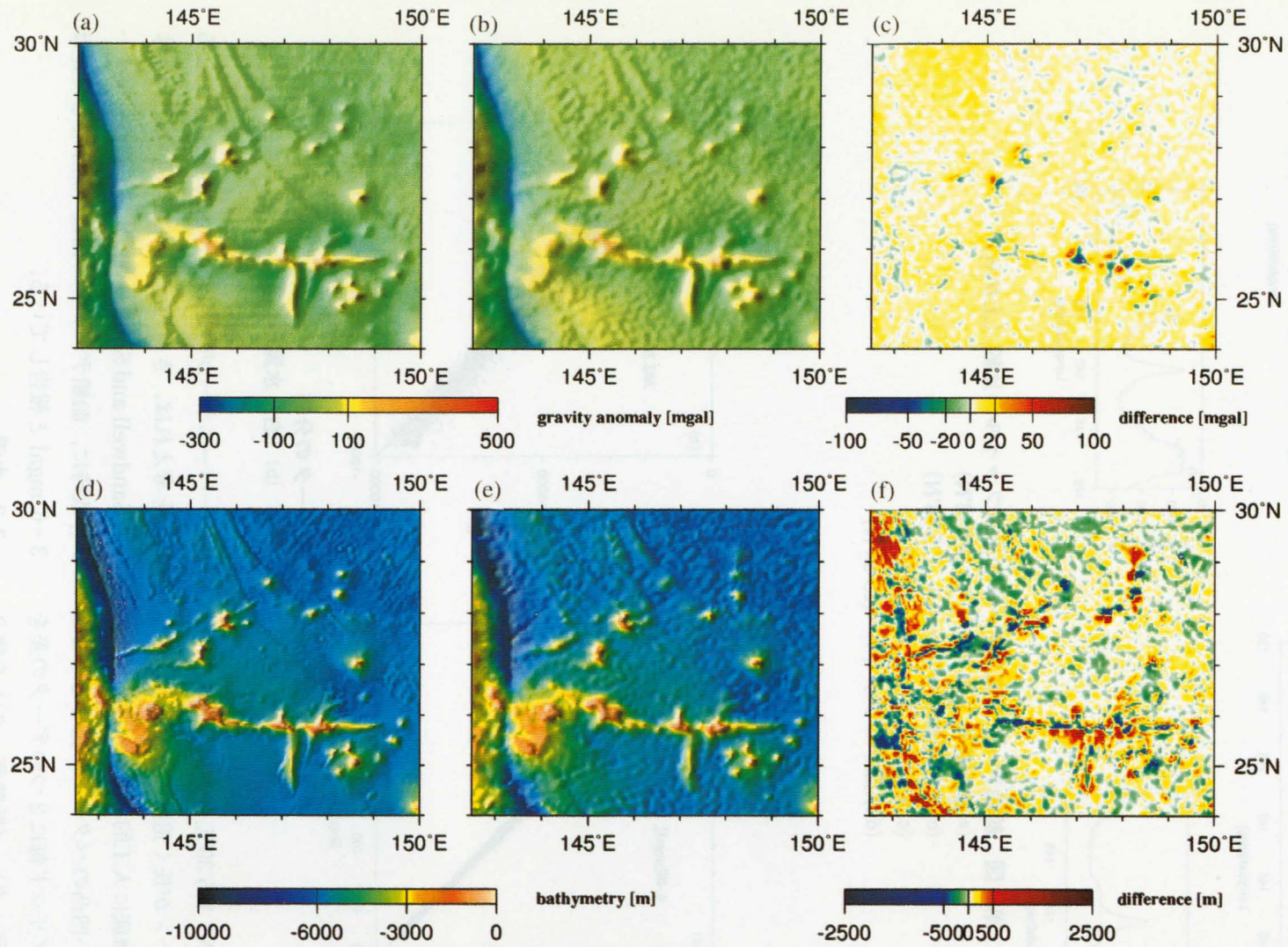
3. 船舶データとの比較

3.1 重力異常

まず, 水路部の調査によって得られたフリーエア重力異常と Sandwell and Smith (1997) の world grav.img.7.2を比較した. テストフィールドとしたのは, 小笠原海台付近 (142°30'E-150°E, 24°N-30°N) で, 海溝, 巨大な海台, 海山, 平坦な深海底などの要素を見ることができる (第2図). 船舶データは水路部大陸棚調査によるもので, 測量船「拓洋」の船上重力計 KSS-31で得られた. 通常の資料整理で行われるドリフト, エトベス補正が施されている. 測線間隔は5-6マイル, 小笠原海台の比較的水深の浅いところでは2-3マイルである.

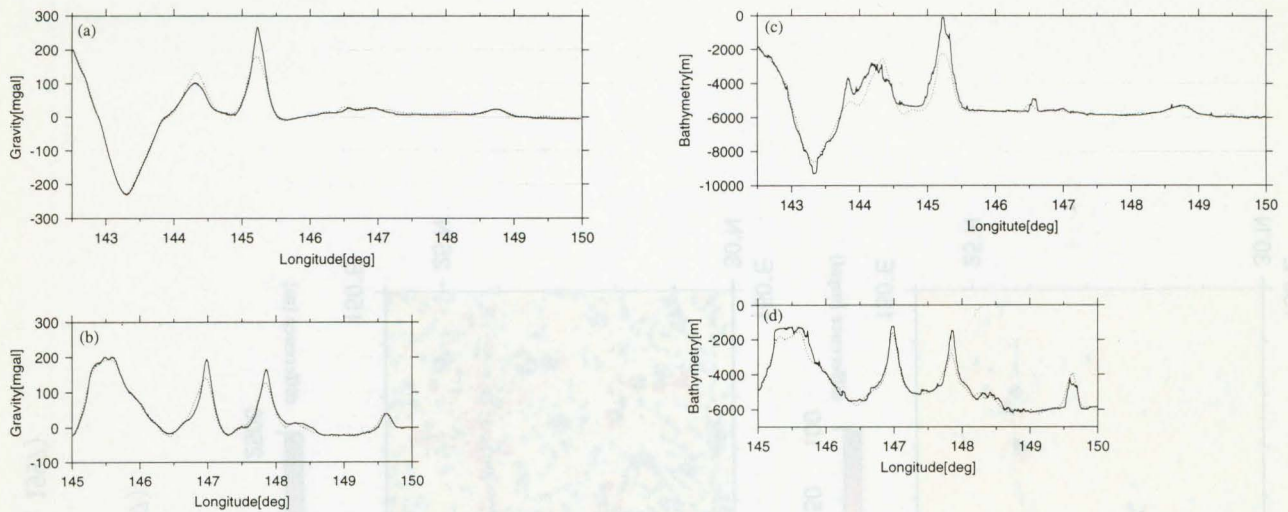
最初に, 測線に沿ったプロファイルの比較例を第3図(a)(b)に示す. ここでは, 実線が船舶データ, 点線が衛星データである. 衛星データプロファイルは world_grav.img.7.2のグリッドデータから測線に沿った位置のデータを抽出したもので, 衛星軌道とは当然一致していない. 第3図(a)は27°18'N に沿った測線で, 伊豆・小笠原海溝と太平洋プレート上の海山 (上田海嶺) を横切る. 第3図(b)は25°54'N に沿った測線で, 小笠原海台を横切る測線である. 深海底や海溝では, 2つのデータはきわめてよく一致している. 一方, 海山などのピーク, 特に波長の短いピークでは50mgal を越える差が生じている. 例外もあるが, 船舶データが衛星データより大きな値をとることが多い.

次に, テストフィールド全体での比較を行った. 船舶データは, world_grav.img.7.2のグリッド幅にあわせ, 2分グリッドのデータセットを作成した (第2図(a)). 従って測線間隔が広いところでは, 補間を行っている. 衛星データ (第2図(b)) と比較すると,



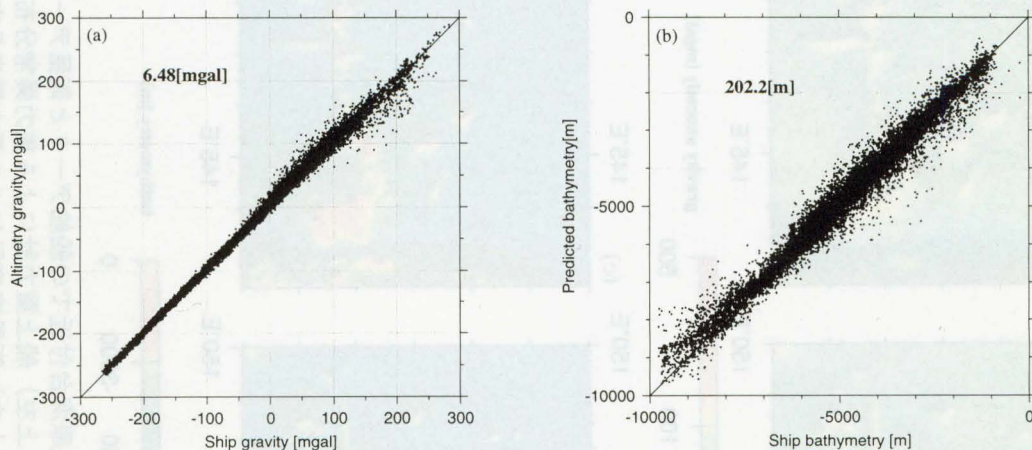
第2図 小笠原海台付近での船舶データと衛星データの比較

- (a) (上左) 船上重力計による重力異常分布
- (b) (上中) 衛星高度計による重力異常分布 (Sandwell and Smith, 1997)
- (c) (上右) 船舶重力データと衛星重力データの差の分布 (衛星－船舶)
- (d) (下左) シービームによる海底地形
- (e) (下中) 衛星高度計データから推定した地形 (Smith and Sandwell, 1997)
- (f) (下右) 船舶水深データと衛星水深データの差の分布 (衛星－船舶)



第3図 船舶データと衛星データのプロファイルの比較 (上から)

- (a)重力異常プロファイル (27°18'N)
- (b)重力異常プロファイル (25°54'N)
- (c)水深プロファイル (27°18'N)
- (d)水深プロファイル (25°54'N)



第4図 船舶データと衛星データの分布

- (a) (左) 重力異常値
- (b) (右) 水深値

船舶データでは30°N, 145°30'E 付近から南東にのびるフラクチャーゾーンが長く追跡できること, 衛星データは平坦な深海底に人工的なものと思われる短波長で方向性のない凹凸のパターンが出ることなどが特徴である. 各グリッド毎に2つのデータの差をとった結果 ((衛星データ) - (船舶データ)) を第2図(c)と第4図(a)に示す. 重力異常が正の場合にデータの差がばらつきはじめ, プロファイルで見られたように海山のピーク付近での不一致が大きい. しかし, 差の2乗平均は6.48mgalで, 船舶データのクロ

スオーバーエラーが時として5 mgal 近くまでなることを考えれば, きわめてよくあっているといえよう. Sandwell and Smith (1997) は, グリッドデータ作成時に, 船舶データとの比較の結果として差は3-6 mgal と報告している.

3.2 水深

次に, 地形データの比較を行った. 重力異常から水深を推定するには構造の情報が必要であり, 堆積層の厚さなどの諸要素が介在するため, 推定された水深と実測 (船舶からの音響測深) とどの程度一致

するかは海域毎に異なると考えられる。ここでは、前節同様に小笠原海台付近をテストフィールドとして、船舶データと衛星データを比較した結果を示す。船舶データは、シービームによるものでカバー率は50%以上である。衛星データは Smith and Sandwell (1997) の topo_6.2.img を利用した。このデータセットには船舶で得られた水深と衛星データから推定した水深が両方入っているが、このテストフィールドでは船舶の水深は全グリッドの3割程度である。第3図(c)(d)は重力異常で示したものと同一測線に沿ったプロファイルの比較である。深海底の平坦面や海溝陸側はよく合っているが、海山や海溝底、海山間の凹地などでは、1000mを越す不一致が見られる。第3図(d)の147°E付近のピークが比較的良好に合っているのは、ここを横切る測線の船舶データが入っていて、周囲の衛星データがよくコントロールされているためである。2分グリッドデータを比較すると(第2図(d)(e))、当然のことながら衛星データでは短波長成分が落ちていることがわかる。また、2つのデータセットの差に注目すると(第2図(f))、海山、海溝ともに大きな差が生じていることがわかる。第4図(b)で、水深毎のデータのばらつきをみると、重力異常の場合と異なり深い方でも差が大きく、浅い方では衛星データが深く、深い方では衛星データが浅く出る傾向が見られる。差の2乗平均は202.2mとかなり大きい。

4. まとめ

公開されている衛星高度計を利用した重力異常と推定水深のデータセットを、水路部の観測船で得られた値と比較した。その結果、重力異常は海山の一部をのぞけば、きわめてよく一致する(これは、衛星データの軌道の間隔が6km以上なので、鋭いピークがとらえられずに補間されたことが一因と考えられる)。重力異常の分布パターンだけでなく、異常値としても、海山のピークに注意すれば広域のマッピングにおいて船舶データに代わるものとして利用できる可能性が高い。一方、推定水深はこれまで調査の及ばなかった海域の地形を知る上では非常に有効であるが、推定した個々の水深値については船舶

データとのばらつきが大きく、そのまま水深値を船舶データの代用として利用するには不十分である。

これは構造に起因する差が大半なので、代表的な地形を横切る測線での船舶データがあれば、重力から地形への変換関数をより適切に調整することができ、さらに精度をあげていくことが可能であろう。また、今回のテストフィールドは遠洋であり、沿岸部については別途検証を行う必要がある。

参 考 文 献

- Cheney, R.E., B.C. Douglas, R.W. Agreen, L. Miller, D. Milbert and D.L. Porter: The GEOSAT Altimeter Mission: A Milestone in Satellite Oceanography, EOS, 67, 1354-1355, (1986).
- 福田洋一, 海面高度計データの利用について, 東京大学地震研究所「広報」, 17, 13-16, (1996).
- Rapp, R.H., Geos 3 data processing for the recovery of geoid undulations and gravity anomalies, J. Geophys. Res., 84, 3784-3792, (1979).
- Sandwell, D.T., W.H.F. Smith, Marine gravity anomaly from Geosat and ERS1 satellite altimetry, J. Geophys. Res., 102, 10, 039-10, 054, (1997).
- Smith, W.H.F., D.T. Sandwell, Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry, J. Geophys. Res., 99, 21, 803-21, 824, (1994).
- Smith, W.H.F., D.T. Sandwell, Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, Science, 277, 1956-1962, (1997).