

全球重力ポテンシャルモデルEGM 2008から算出した地衡流とADCP海流データとの比較

笹原 昇：航法測地室

田中友規：第三管区海上保安本部

Comparison between geostrophic current calculated from EGM 2008 and ADCP data

Noboru SASAHARA : Geodesy and Geophysics Office

Tomonori TANAKA : Hydrographic and Oceanographic Department, 3rd R. C. G. Hqs.

1 はじめに

海流は遭難船・漂流者などの漂流位置や漁場の海域を推定するために役立つ情報であり、日本列島のまわりにはさまざまな海水の流れが存在し、中には複雑な動きを示すものがある。例えば、本州南岸を流れる黒潮は流速（最大約4ノット、7.4 km/h）が速く、時折、大蛇行を起こすため、海運・救難・漁業などへ大きな影響を与える。海洋情報部では海洋速報などで海流情報を提供しており日本周辺の海流を全般的に把握することが必要になるが、船舶・海流観測ブイなどによる局所的な観測方法では限界がある。広域に海流を把握するための方法として、ジオイドモデルとアルティメータ海面高から算出するものがあり、これによる海流は地衡流と呼ばれる。

笹原・他（2008b）は、海域ジオイドモデルとアルティメータ海面高から算出した地衡流をADCP搭載船が観測した海流（以下、ADCPデータ）と比較し、海域を全般的にみた場合には両者にやや強めの相関があることを確認している。その一方で、海域を局所的に見た場合には両者の違いが大きい海域があることを指摘しており、その要因の1つとして海域ジオイドモデルの精度をあげている。

本稿では、最新のGGM（Global Gravity potential Model：全球重力ポテンシャルモデル）であるEGM 2008（Pavlis, 2008）を使用して算出した地衡流と

ADCPデータとの比較を行った。EGM 2008はNGA（National Geospatial-Intelligence Agency：アメリカ国家地球空間情報局）が作成したGGMで球面調和関数の次数は2160次であり、その空間波長は約20 km、海域ジオイドモデルに準じる分解能を有する。EGM 2008による地衡流の評価は、EGM 2008の活用法（例えば、海域ジオイドモデルの精度改善）を検討する上で重要である。

2 地衡流とは

地衡流とは実海面の高低差から生じる力（水平圧力勾配）と地球自転によるコリオリの力が釣り合った流れであり、ジオイド高とアルティメータの海面高から得られる力学的海面高の勾配から計算できる。

ジオイド高とは準楕円体（地球形状を回転楕円体で近似したもの）からのジオイド面の高さであり、ジオイド面とは地球表面を全て海水で満たした時の形状、重力的に安定な面（等ポテンシャル面）の一つである。

アルティメータとは衛星海面高度計のことであり、これは衛星軌道にある衛星から電波を海面に発射し反射波を受信することにより海面までの距離を測定する装置である。この海面距離を衛星高度から差し引けば海面の高さを求めることができる。

力学的海面高とは実海面とジオイド高との差であ

り、実海面とジオイド高はほぼ一致するが、風浪・潮汐等の影響により局所的・一時的な高まりが生じるため完全には一致しない。この高まりは重力によって低いところへ流れようとする力を生じさせ、海流の駆動力の一つとなっている。この実海面はアルティメータの海面高（以後、海面高とする）にあたるため、力学的海面高すなわち地衡流を求めるためには、ジオイド高と海面高が必要となる。

3 EGM 2008を使用した地衡流の算出

本稿では地衡流を計算するため、GGMであるEGM 2008によるジオイド高とAVISO (Archiving Validating and Interpretation of Satellite Oceanographic data) によるアルティメータ海面高を使用した。以下、それぞれについて説明する。なお、ジオイドモデルのジオイド高とアルティメータの海面高による地衡流の算出については笹原・他(2007)を参照されたい。

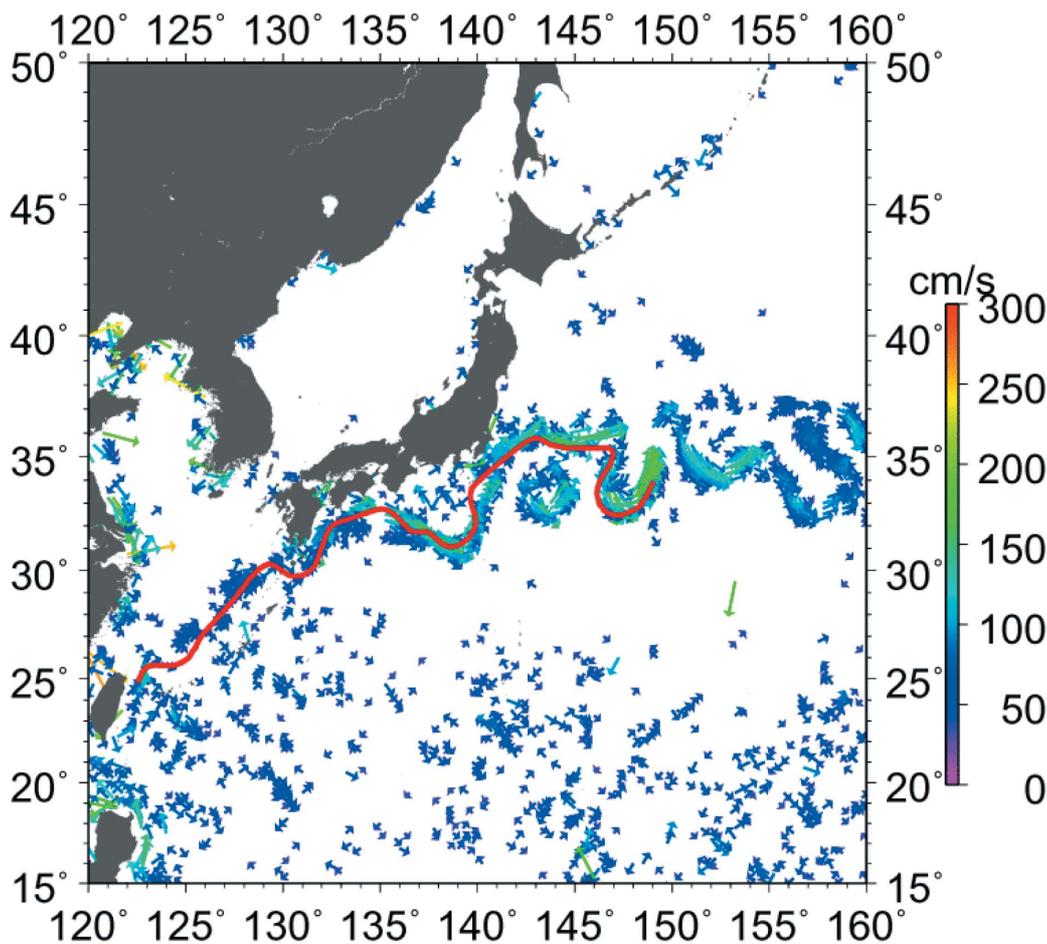
EGM 2008はNGAが中心となり作成した球面調和関数の次数2160次（空間波長約20 km）のGGMである。EGM 2008にはITG-GRACE 03 S (Mayer-Gurr, 2007)が使われており、ITG-GRACE 03 Sはドイツのボン大学が重力観測衛星GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) を使って作成した次数180次のGGMであり、静止モデルだけではなく時間変動モデルも提供していることが特徴である。また、作成に使用されたデータはGRACE分と地球表面観測分を最小二乗法によって結合させている(Pavlis, 2008)。この地球表面観測データは5分×5分の重力異常データセットとしてNGAがまとめたものであり、陸上については各国から重力観測データを収集している。海上については沿岸の一部に船上重力データ（日本周辺では黒潮流域にも存在）もあるが、主にアルティメータ (TOPEX/Poseidon, JASON-1, ERS-1/2, ENVISATなど) から作成した重力異常データである (Kenyon et al., 2007)。本稿ではWebからダウンロードしたWGS 84バージョンの係数を用いている (NGA, 2008)。

AVISOはCNES (Centre National d'Etudes Spatiales: フランス国立宇宙研究センター) を中心として

運用されているアルティメータデータサーバーであり、使用した海面高データは複数の衛星データ (TOPEX/Poseidon, JASON-1, ERS-1/2, ENVISATなど) を用い、時間・空間的な内挿により得られた格子データである。このデータは毎日Webサーバにアップロードされダウンロードすることが可能である。

このEGM 2008のジオイド高とAVISOの海面高から計算した地衡流（以後、地衡流とする）は定性的ではあるが黒潮蛇行部において良い整合性を示している。この一例として、第1図に海洋情報部が定期的（2006年8月から平日は毎日）に作成している海洋速報による黒潮流軸（赤線）と地衡流の流速分布を示す（黒潮が大蛇行した2005年5月11日の流況）。第1図をみると、地衡流（流速の速い海域）と海洋速報（赤線）による黒潮流軸がよく整合していることがわかる。

本稿ではさらに定量的な評価を行うため、ADCP搭載船が観測した海流と地衡流との比較を行った。



第1図 2005年5月11日の海洋速報による黒潮流軸（赤線）と地衡流の流速分布

Fig. 1 A red line shows the axes of Kuroshio current with Quick Bulletin of Ocean Conditions. Vector of geostrophic current with SSDH of EGM 2008 and altimeter SSH (AVISO) on May 11, 2005.

4 地衡流とADCPデータとの比較

2006年10月から2007年9月までを対象期間，日本近海（第2図）を対象海域として，ADCP搭載船が観測した水面下10 m層の海流（以下，ADCPデータ）を地衡流との比較に使用した．ADCPとは Acoustic Doppler Current Profiler，超音波ドップラー流速計のことであり，その測定原理は以下のようである．

- ・船底にある送受波器から超音波（数百kHz）を送信し，海水中を移動する浮遊物（プランクトン等）に当て反射波を受信する．
- ・受信波のドップラーシフトによる周波数変化から対水船速（海水に対する船舶の速さ）を解析する．
- ・対水船速とGPS等から得られる対地船速（海底に

対する船舶の速さ）とのベクトル計算により海流の流速・流向を求める．

観測日時と位置が明確に決まるADCPデータに対して，地衡流はその算出に必要な海面高データ（一日毎に作成）が時間・空間的に内挿されているために明確に決まらない．観測点ごとの比較ではこの違いによる差が生じてしまうため，対象期間における地衡流とADCPデータを海域ブロックごと（10′×10′）に平均し比較を行った．

地衡流と ADCP データの流速成分を南北、東西成分に分け相関をとった (第3図)。グラフの横軸は ADCP データ (kt), 縦軸は地衡流 (kt) をあらわしている。左図は南北成分で相関係数が0.3, 右図は東西成分で相関係数は0.5である。図をみると南北・東西成分両方とも ADCP データ (横軸) の 0 kt 付近にエラーデータが存在している。

エラーデータが存在する海域を調べたところ, 距岸から20マイル以内に集中することが分かった。

第4図は第2図の対象海域から距岸20マイル以内にある測線を除去したものであり, 同様に第5図は第3図のデータから距岸20マイル以内のものを除去したものである。第5図では南北成分の相関係数が0.5, 東西成分の相関係数が0.7と第3図より相関が良くなっている。これは距岸20マイルより沖の海域では地衡流と ADCP データが全体的に合っていることを示している。海域ジオイドモデルによる地衡流と ADCP データとの相関は, 距岸20マイル以内のデータを除去した場合, 南北成分が0.4, 東西成分が0.7であった (笹原・他, 2008 b)

距岸20マイル以内のエラーデータを除去したもので, 海域ごとの ADCP データと地衡流の平均の差を第6図に示す。南北成分, 東西成分ともに海域ブロック (10' × 10') ごとにその平均の差が異なることが分かる。第7図の海域ジオイドモデルを使用して算出した地衡流と ADCP データとのものと比較すると, 南北成分においては, 日本海側, 三陸沖, 北海道南岸で平均の差が小さくなっている。一方で南西諸島海域, 四国沖, 北海道北岸では平均の差が大きくなっている。東西成分においては三陸沖, 日本海側, 北海道南岸・北岸で差の平均が小さくなっている。その一方で, 関東周辺海域, 四国沖では平均の差が大きくなっている。

これらの原因は次項で考察する。

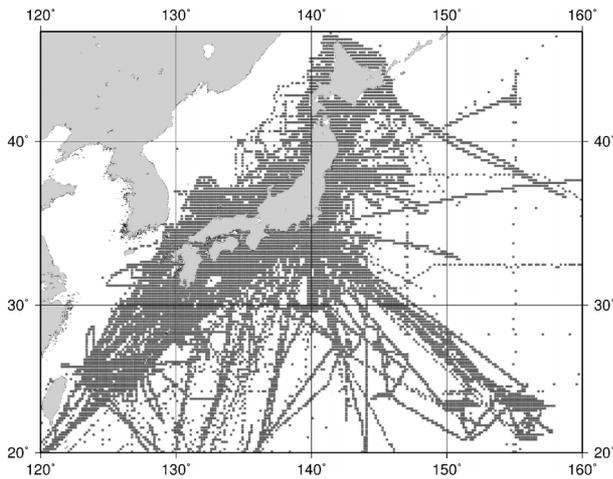
5 考察

これまでに明らかになった (1) 距岸20マイル以内でエラーデータが集中する, (2) 東西成分より南北成分の相関が低い, (3) EGM 2008と海域ジオイドモデルそれぞれから算出した地衡流と ADCP データとの海域ブロックごとの差の分布が異なる原因について考察する。(1)と(2)については笹原・他 (2008 b) で述べたとおりである。

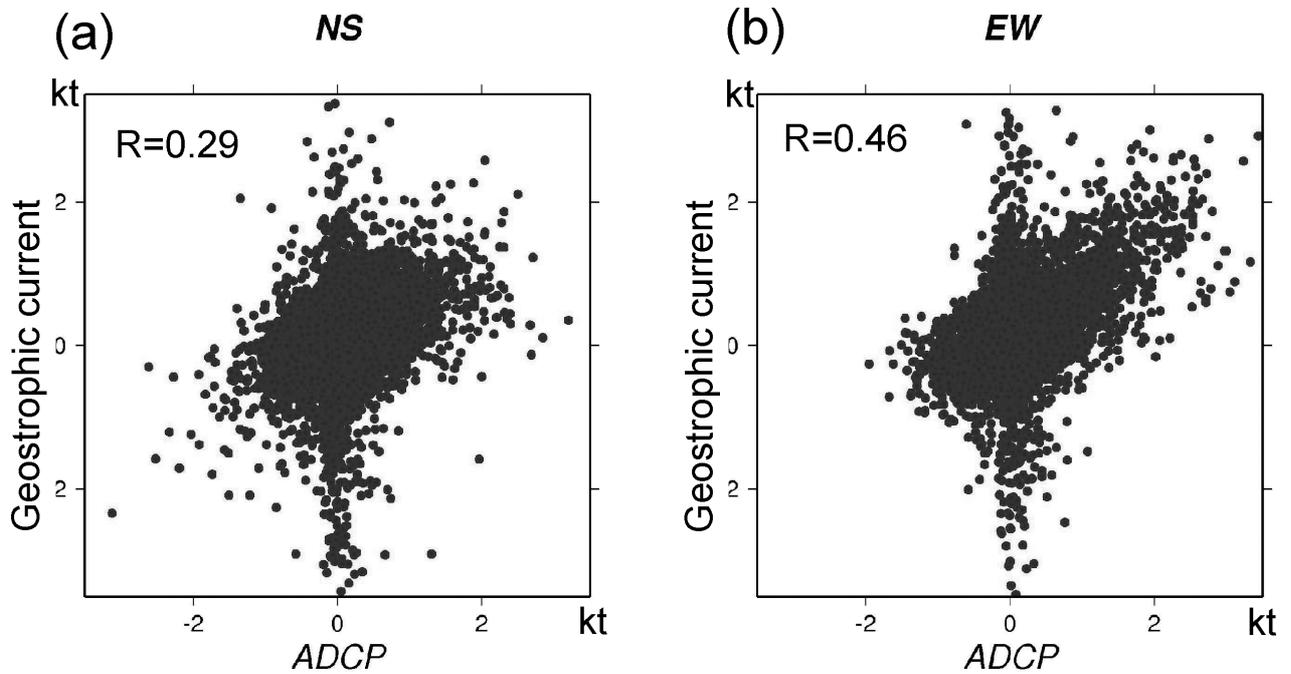
(1) 距岸20マイル以内にあるデータがエラーとなる原因として, アルティメータの特性が考えられる。これはアルティメータから送信される電波が海面から反射される時, 陸上近傍の場合, 地表の物体による電波の乱反射の影響を受け測距精度が劣化することによる。Deng, et al. (2002) が行ったオーストラリア大陸周辺におけるアルティメータデータの信号波形についての研究によると, 海岸の状況 (岩場・砂浜など) によって異なるが最大で距岸20 km 程度までのアルティメータデータに陸上からの影響が確認されている。

(2) 東西成分より南北成分の相関が悪い原因としては, アルティメータの衛星軌道が関係していると考えられる。アルティメータは南北軌道で周回ごとに経度方向へずれていき, また, 元の軌道に戻るといった準回帰軌道をとっており, 測距データの東西成分は南北成分よりデータ密度が低くなっている。ここで地衡流について考えると, 水平圧力勾配とコリオリの力が釣り合った流れであるため, 地衡流は水平圧力勾配の方向より90度右側へ流れていく。このことはアルティメータの密度が高い南北方向の測距データは東西方向の地衡流に反映されるということであり, 東西成分より南北成分の相関が悪い原因と考えられる。

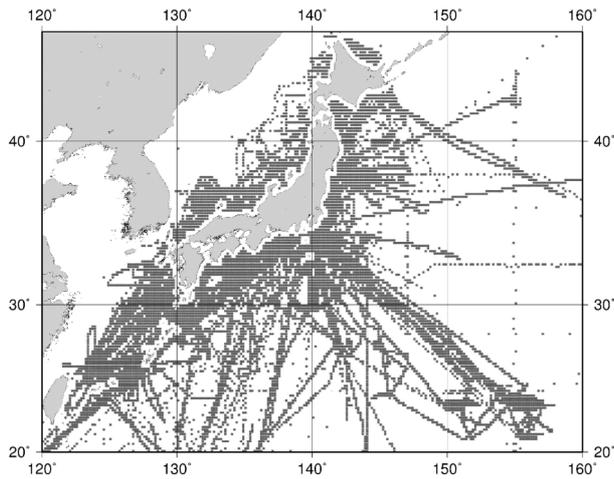
(3) EGM 2008と海域ジオイドモデルそれぞれから算出した地衡流と ADCP データとの海域ブロックごとの差の分布が異なる原因を考察するため, EGM 2008による地衡流と海域ブロックごとの ADCP データとの差の平均 (第5図) と海域ジオイドモデルによるもの (第7図) との比較から, 対称海域を次のパターンに分けた。



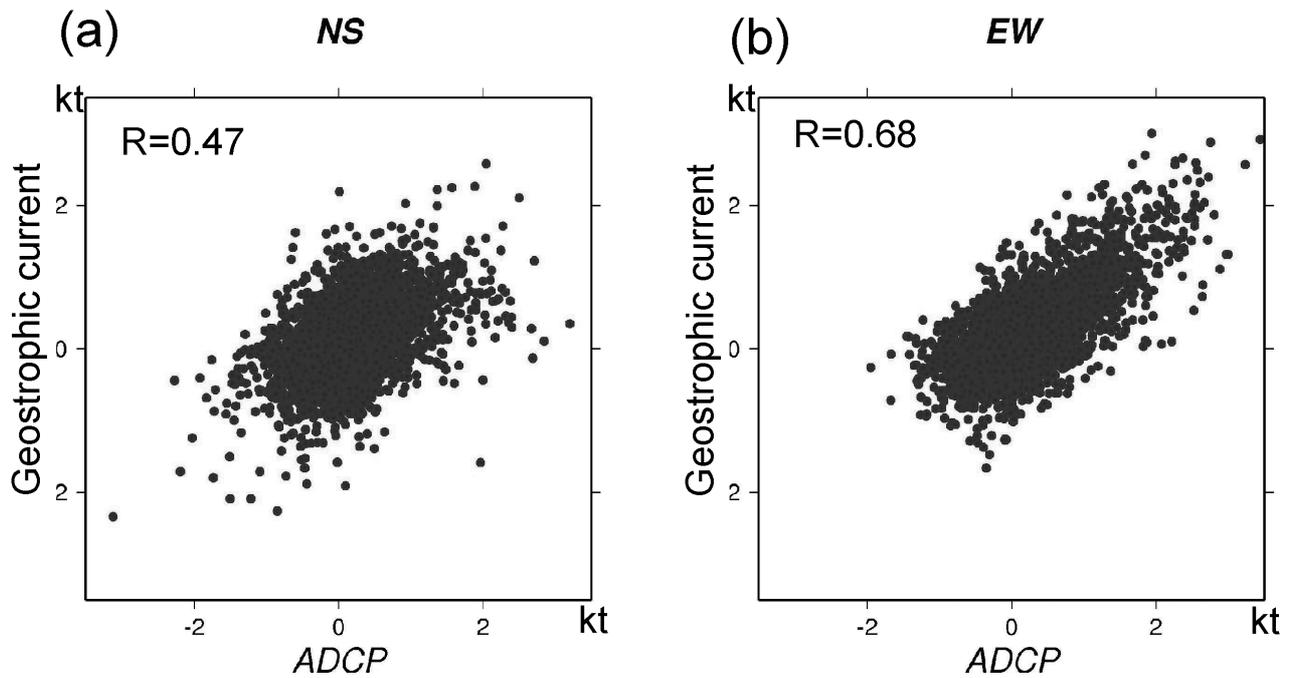
第2図 対象海域 (灰色線は ADCP 観測の航跡)
 Fig. 2 The area of evaluation (a brown line shows the tracks of ADCP observation).



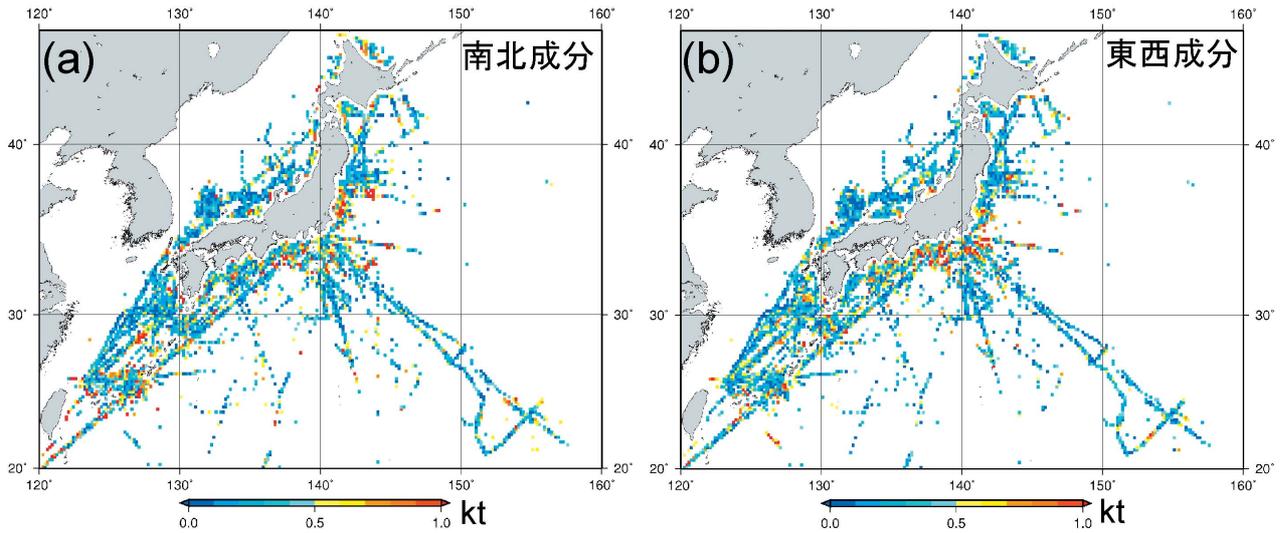
第3図 地衡流と ADCP データとの相関
 Fig. 3 The correlation between the geostrophic current (calculated with SSDH of EGM 2008 and SSH (AVISO)) and ADCP data.



第4図 対象海域（距岸20マイル以内の航跡を除去）
 Fig. 4 The area of evaluation (eliminate the track lines to a distance of 20 nautical mile from the shoreline).

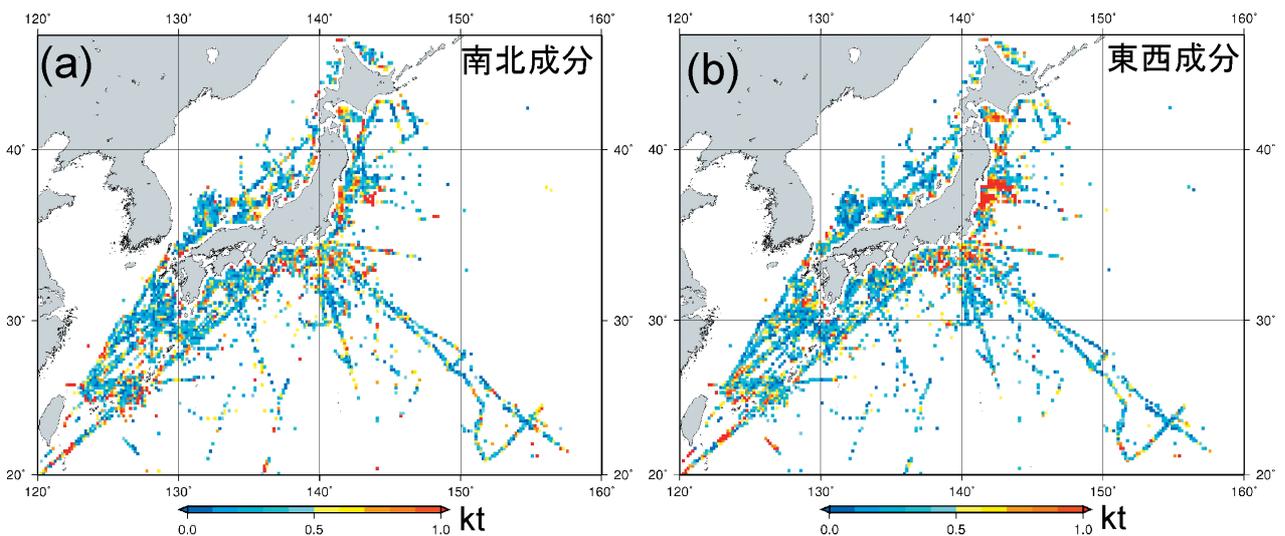


第5図 地衡流とADCPデータとの相関（距岸20マイル以内を除去）
 Fig. 5 The correlation between the geostrophic current (calculated with SSDH of EGM 2008 and SSH (AVISO) and ADCP data (eliminate the data to a distance of 20 nautical mile from the shoreline).



第6図 ADCPデータと地衡流との流速の差分布（距岸20マイル以内のデータを除去）

Fig. 6 The distribution of the difference of velocity between the ADCP data and the geostrophic current (eliminate the data to a distance of 20 nautical mile from the shoreline).

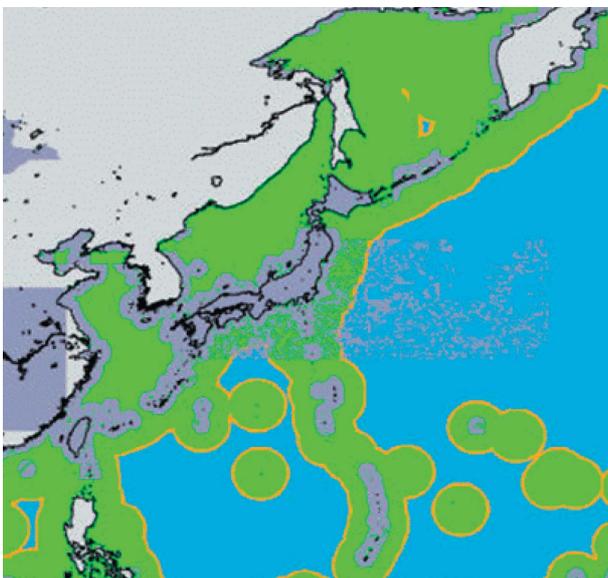


第7図 ADCPデータと地衡流（海域ジオイドモデルによる）との流速の差分布（距岸20マイル以内のデータを除去）

Fig. 7 The distribution of the difference of velocity between the ADCP data and the geostrophic current (calculated with SSDH of Marine Geoid Model (Sasahara et al., 2008) and ADCP data, eliminate the data to a distance of 20 nautical mile from the shoreline).

- (a) 両者ともに差が小さい.
- (b) 両者ともに差が大きい.
- (c) EGM 2000を使用しての地衡流の方が, 海域ジオイドモデルを使用しての地衡流に比べて ADCPデータとの差が小さい.
- (d) EGM 2000を使用しての地衡流の方が, 海域ジオイドモデルを使用しての地衡流に比べて ADCPデータとの差が大きい.

ADCPデータが正しいという前提のもとで, (a), (b) の原因として, 両者を使用しての地衡流計算に共通して使用するアルティメータ海面高の誤差が考えられる. また, 海域ジオイドモデルと EGM 2008 の精度の悪さも考えられる. (c), (d) の原因としては, 海域ジオイドモデルと EGM 2008 の精度の優劣が大きく関係していると考えられる. モデル精度の検証については, 第8図のように使用された重力データや作成手法について比較しなければならない.



第8図 EGM 2008の作成に使用された重力異常データ (Pavlis, 2008). 灰色の領域は表面観測, 緑と青色の領域はアルティメータによるデータを示す.

Fig.8 The data sources of gravity anomaly for calculation of EGM 2008 (Pavlis, 2008). A gray area shows the terrestrial data, green and blue areas show the data by altimeter

6 まとめ・課題

本稿では, EGM 2008と AVISO の海面高データから計算した地衡流と ADCPデータとの比較を行った.

結果, 海岸付近 (距岸20マイル以内, アルティメータが地物の影響を受けるため) を除いて両者にはやや強めの相関が見られた. また, この地衡流と ADCPデータとの差の大きさは海域ごとに異なることを確認した.

EGM 2008と海域ジオイドモデルから算出した地衡流と ADCPデータとの差のパターンを比較すると, 多くの海域ではよく似ている. その一方で, 日本海側や三陸沖など EGM 2008による地衡流の方が, 海域ジオイドモデルによる地衡流よりも, ADCPデータとの差が小さくなっている海域があった.

EGM 2008は海域ジオイドモデル作成 (笹原・他, 2008) に用いられた GGM 02よりデータの空間分解能が上がっており, 今後は, EGM 2008を使用した海域ジオイドモデル作成手法を検討し, 海域ジオイドモデルによる地衡流の精度向上を試みていきたい.

謝辞

作図等には GMT v 4.2 (Wessel and Smith, 1998) を使用した.

参考文献

Deng, X., W. E. Featherstone, C. Hwang, P. A. M. Berry: Estimation of Contamination of ERS-2 and POSEIDON Satellite Radar Altimetry Close to the Coasts of Australia, *Marine Geodesy*, 25 (4) 249-271, (2002).

Kenyon, S., J. Factor, N. Pavlis, S. Holmes: TOWARDS THE NEXT EARTH GRAVITATIONAL MODEL, *Society of Exploration Geophysicists 77th Annual Meeting 2007*, (2007).

<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/>

gravitymod/new_egm/EGM 08_papers/EGM
-2007-final. pdf

Mayer-Gurr, T. : ITG-Grace 03 S : The latest GRACE
gravity field solution computed in Bonn, Joint
International GSTM and DFG SPP Sympo-
sium 15. October 2007, Potsdam, (2007).

NGA : Earth Gravitational Model 2008 (EGM 2008)
-WGS 84 Version, (2008), Retrieved Novem-
ber, 2008 from [http://earth-info.nga.mil/
GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.
html](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html)

Pavlis, N. K., S. A. Holmes, S. C. Kenyon, J. K. Fac-
tor : An Earth Gravitational Model to Degree
2160 : EGM 2008, EGU General Assembly
2008 Vienna, Austria, April 13-18, 2008,
(2008).

笹原昇, 工藤宏之, 藤田雅之 : 日本周辺における海
域ジオイドモデルの精度検証, 海洋情報部研
究報告, 第44号, 43-54, (2008 a).

笹原昇, 田中友規, 工藤宏之 : 海域ジオイドモデル
から算出した地衡流とADCPデータとの比
較, 水路新技術講演集, 第22巻, 7-11, (2008
b).

Sasahara, N., T. Tanaka, H. Kudo : Comparison be-
tween the geostrophic current calculated
from Marine Geoid Model and ADCP data,
Proceedings of Oceanographic New Technol-
ogy, No.22, 7-11, (2008).

笹原昇, 工藤宏之, 平岩恒廣, 矢沼隆 : 海域ジオイ
ドモデルによる地衡流の算出, 海洋情報部技
報, 第25号, 112-115, (2007).

Wessel. P. and W. H. F. Smith : New improved ver-
sion of the Generic Mapping Tools released,
EOS Trans. AGU, **79**, 579, (1998).