

14. 温暖化解明に向けた人工衛星の活用

— マイクロ波高度計TOPEX/POSEIDON による海洋循環の解析 —

UTILIZATION OF SATELLITE OBSERVATION DATA TO STUDY OF GLOBAL WARMING
: A STUDY OF OCEAN CIRCULATION WITH TOPEX/POSEIDON ALTIMETRY

坂井 伸一* ・ 丸山 康樹* ・ 柴田 彰** ・ 倉賀野 連**
Shin'ichi SAKAI, Kohki MARUYAMA, Akira SHIBATA, Tsurane KURAGANO

ABSTRACT ; Precise representation of oceanic behavior, especially ocean circulation, is required to simulation of climate change. Lately, satellite remote sensed data have been intensively applied to ocean circulation observation. Satellite altimeter measures the distance from the satellite to the sea surface which, when combined with the satellite orbit data and the earth's gravity field data(the geoid), can be used to infer the sea surface geostrophic velocity field. However the present geoid data, which has geographical variations much larger than those of the oceans, is not well known on length scales significant to ocean currents. In this study, the new method is proposed to derive the sea surface geostrophic velocity field in the region of the Kuroshio and its Extension from the TOPEX/POSEIDON altimetry data without using geoid data on the basis of some dynamic characteristics of the Kuroshio and its Extension. The estimated geostrophic velocity fields represent the behavior of simultaneously observed drifting buoys.

KEY WORDS ; satellite altimeter, ocean circulation, the Kuroshio and its Extension, TOPEX/POSEIDON, sea surface dynamic height

1 はじめに

地球温暖化をはじめとする気候変動の予測において、海洋循環現象の解明は重要な課題の一つである。しかし、海洋循環は時空間的に大規模な現象であるため、従来の船舶やブイなどによる海上観測では、現象を解明することが極めて困難であり、未だ海洋循環については解明されていない点が多い。

このような状況の中で、広域を定期的にかつ瞬時に観測できる衛星リモートセンシングによる海洋観測は、海洋循環現象解明への大きな寄与が期待されている。現在、衛星リモートセンシングによって海洋循環を直接観測するセンサーはないが、マイクロ波高度計により海面力学高度場(海面勾配)を観測できるため、海面における地衡流や中規模渦などの大規模な現象を捉えることができる。マイクロ波高度計より海面勾配を求めることが出来れば、水温・塩分から求められた海洋の密度データ(例えば、Levitus(1982))を用いて、これまでのような無流面の仮定を用いることなく、深度方向の地衡流分布を計算できることになる。

* (財)電力中央研究所 我孫子研究所

Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

** 気象研究所

Meteorological Research Institute

高度計の観測データは、ジオイドと海面力学高度の和として表されるが(図-1)、地衡流を算出するには、海面力学高度成分のみを取り出す必要がある。しかし、現状ではジオイドデータの精度が悪いため、地衡流計算できる精度の海面力学高度は得られていない(例えば、柴田(1989), 今脇(1989))。

本研究では、現在稼働中の高性能マイクロ波高度計 TOPEX/POSEIDON のデータを用いて、黒潮および黒潮続流域を対象に、黒潮(続流)の力学特性を考慮することにより、ジオイドデータを用いずに海面力学高度を推定する新たな手法を提案する。これにより、海面力学高度成分の海面トポグラフィーが連続して得られるため、長期間にわたって地衡流分布を求めることが可能となる。得られた解析結果を、同時期の漂流ブイデータと比較し、本手法の適用性について検討する。

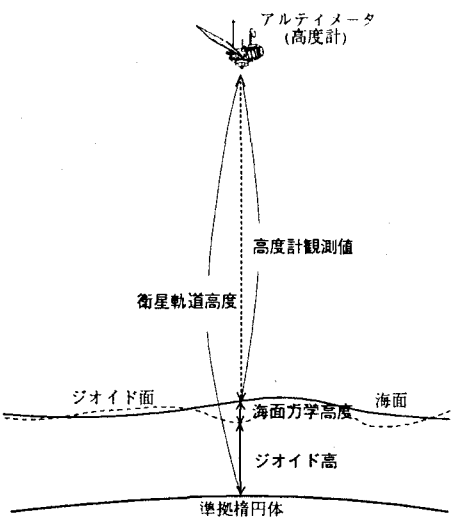


図-1 海面高度の観測原理

2 衛星高度計TOPEX/POSEIDON

1992年8月に打ち上げられたTOPEX/POSEIDONは、米国のNASA(航空宇宙局)と仏国のCNES(宇宙研究センター)が共同開発した海面高度測定専用の高性能衛星で、高度1,336kmの上空を1サイクル約10日で地球を127周する繰り返し軌道により、66° S~66° Nの範囲を観測している。TOPEX/POSEIDONは、1992年9月より6ヶ月間の実証実験を終え、1993年4月より本格的な観測を開始し、その観測データはGDR(Geophysical Data Record)としてCD-ROMで各研究機関に配布されている。これまでの検証実験により、高度計の観測精度は、高度計自身の測定精度が3.2cm、衛星の軌道高度の精度が3.5cm、トータルの精度が4.7cmと報告されており(今脇(1994))、過去の衛星高度計GEOSATなどに比べてほぼ倍の精度となっている。

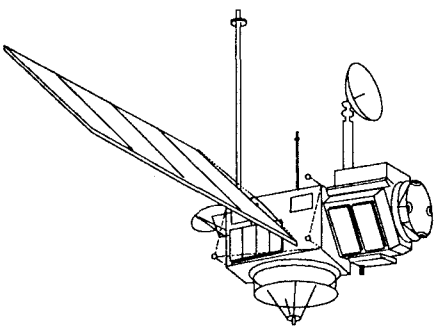


図-2 TOPEX/POSEIDONの概略

図-2にTOPEX/POSEIDONの概略を示す。

TOPEX/POSEIDONには、NASAのTOPEXとCNESのPOSEIDONの二つの高度計が搭載されており、レーダ・アンテナを共有しているために両者を同時に作動させることが出来ない。両高度計とも測定精度は同程度であるが、POSEIDONが単一周波を採用しているのに対して、TOPEXは二周波レーダを用いており、電離層での自由電子による光速補正という点で、TOPEXの方が優れている。現在は、概ね10サイクル中9回がTOPEX、残りの1回をPOSEIDONの測定という運用が行われており、3ヶ年の稼働予定で、電池の寿命により最大で5ヶ年の稼働が可能となっている。

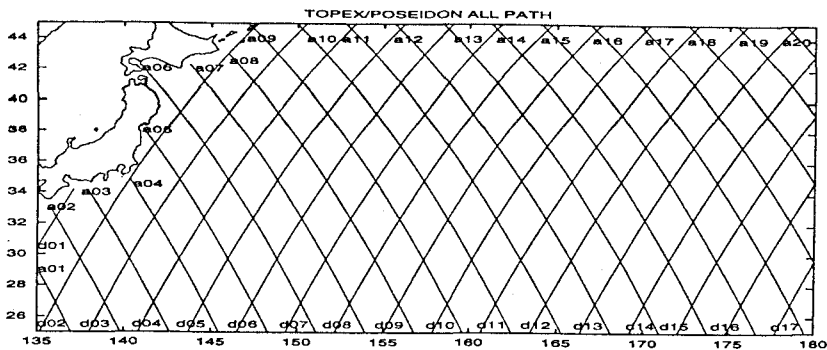


図-3 解析対象海域

3 解析手法の概要

3.1 TOPEX高度計データ

本研究で用いた高度計データは、図-3に示す日本海を除く海域における、1993年の1年間(サイクル11~47)のTOPEXのGDRデータである。サイクル20、31、41、42はPOSEIDONの観測期間となっており、本研究ではこの間のデータは解析しなかった。図-3に示すように、TOPEX/POSEIDONは、日本周辺を南東から北西へと通過する軌道(ascending)と、北東から南西へと通過する軌道(descending)をとる。本海域では、1サイクル10日でascending20本、descending17本で、隣り合う軌道間の距離は約200km程度である。

TOPEXのデータは、まず以下の各補正を行う。

$$S(r,t) = H - \text{Solid Tide} - \text{Ocean Tide} - \text{Wet} - \text{Dry} - \text{Ionosphere} \quad (1)$$

ただし、

$S(r,t)$	； 海面高度
H	； 高度計観測値
Solid Tide	； 固体地球の潮汐による高度補正
Ocean Tide	； 海洋潮汐による高度補正
Wet	； 対流圏における湿潤大気的光速補正
Dry	； 対流圏における乾燥大気的光速補正
Ionosphere	； 電離層における自由電子量的光速補正

GDRのデータにはこれら各補正値も収録されており、本研究でもGDRデータにより補正を行った。以上の補正後、海面高度は次式のように表される。

$$S(r,t) = G(r) + \bar{\zeta}(r) + \zeta'(r,t) + \varepsilon_s(r) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_m(t) \quad (2)$$

ただし、

$G(r)$	； ジオイド高
$\bar{\zeta}(r)$	； 平均海面力学高度
$\zeta'(r,t)$	； 海面力学高度の時間変動成分
$\varepsilon_s(r)$	； 系統的な軌道誤差
$\varepsilon_r(t)$	； ランダムな軌道誤差
$\varepsilon_m(t)$	； 任意の測定誤差
r, t	； 距離と時間のパラメータ

Ganeko(1983)によれば、日本周辺におけるジオイド高は、最大50m程度の高低差がある。一方、海面力学高度は、全球でrms(root mean square)が50cm程度、黒潮などの最も大きいところで1m~2m程度である。よって、海面高度から海面力学高度の絶対値 $\bar{\zeta} + \zeta'$ を求める場合、ジオイド G 、および各種誤差を数cmの精度で取り除く必要がある。

しかし、現在得られるジオイドデータには、誤差のrmsが数10cm程度あるため(Ganeko(1983))、ジオイドデータを用いて地衡流計算できる精度の海面力学高度を直接求めることが出来ない。また、上記誤差成分の中で、最も大きいランダムな軌道誤差の取り扱いも問題となる。Cheneyら(1983)によれば、このランダムな軌道誤差は、衛星の1周期が1波長となるような非常に長い波長であるため、それに比べて短い波長の海洋現象を対象とする場合には、低次の多項式などにより比較的容易に分離することができる」と報告されている。本研究では、3次の多項式により、この軌道誤差を除去した。

3.2 高度計データの解析手順

本研究では、これまでの黒潮(統流)に関する海上観測等の研究成果に基づき、黒潮(統流)の力学特性として、以下のような仮定を行う。

仮定

- (1) 黒潮(統流)は、海面力学高度の高低差が時間的にほとんど変動しない。
- (2) 黒潮(統流)の流軸位置は、流れの横断幅に比べて、時間的に大きく変動する(図-4)。
- (3) 解析対象海域において、最も海面力学高度が高くなるのは、黒潮(統流)の流下方向に対して、黒潮(統流)の右端部分、逆に最も海面力学高度が低くなるのは黒潮(統流)の左端部分である。

解析手順の詳細は、坂井ら(1994)に述べてあるので、ここでは簡単に紹介する。まず各軌道毎に1年間の平均海面高度を計算する。これは時間に不変な成分であるジオイドと平均海面力学高度の和となる。次に、各軌道の海面高度より平均海面高度を引き、軌道誤差を補正することにより、軌道毎の海面力学高度の時間変動成分を求める。ただし、任意の測定誤差は、値が小さいとして無視した。これら全サイクルの海面力学高度の時間変動分布(図-5)から、各位置での最大値と最小値の包絡線を求め、先の仮定を導入することにより、平均海面力学高度を推定することが出来る(図-6)。求めた平均海面力学高度と海面力学高度の時間変動成分を足すことにより、海面力学高度の絶対高を求める。

3.3 漂流ブイデータ

本研究では、TOPEXの解析結果の検証データとして、JODC(日本海洋データセンター)がCD-ROMで提供しているカナダMEDSの漂流ブイデータを用いた。収録されている漂流ブイの位置データには、時折異常と思われるデータが含まれている。CD-ROMには、受信状態を示すパラメータが収録されていないため、本研究では、適当なフィルター処理により、異常データを除去した。

4 解析結果

4.1 海面力学高度

各軌道の海面力学高度の時間変動成分より求めた平均海面力学高度の平面分布を図-7に示す。コンターの間隔は5cmである。ほぼ全海域にわたり、黒潮(統流)の平均流路がはっきりと現れている。しかし、紀伊半島から房総半島における黒潮流域では、平均海面力学高度がやや南北に幅広く伸び、黒潮の流路が明瞭ではない。これは図-4に示すように、九州から四国沖にかけての海域では、黒潮の流軸が接岸してあまり変動しない(前述の仮定(2)が成り立たない)ため、この影響が房総半島以西の結果に表れているものと考えられる。また、 $160^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ の黒潮統流域においても、平均流路が不明瞭である。

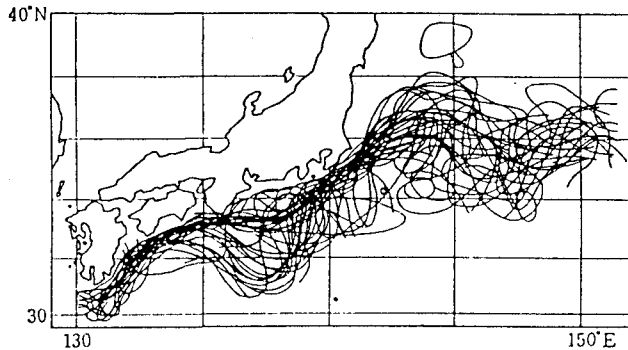


図-4 黒潮(統流)の流路変動(増沢, 1963)

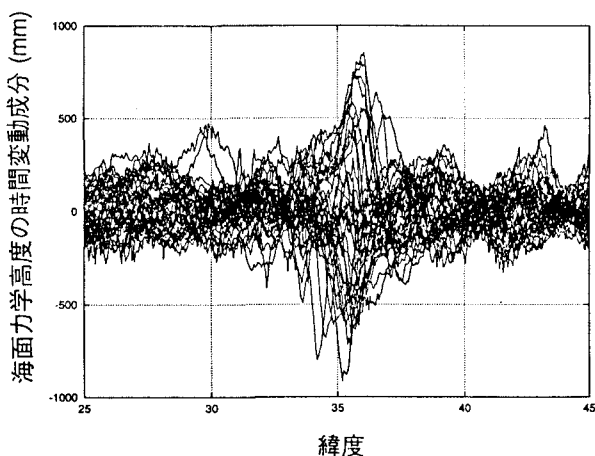


図-5 海面力学高度の時間変動成分

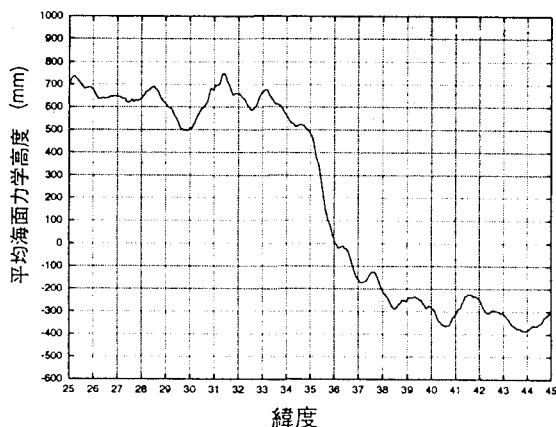


図-6 平均海面力学高度

倉賀野(1994)らによれば、 $155^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 付近に黒潮続流から分岐した強流帯が存在すると報告されており、本研究では、この分岐流の存在を考慮していないことが原因となって、この付近の流路が明瞭に現れていない可能性がある。

次に、解析した海面力学高度の絶対高の分布と漂流ブイデータとの軌跡を比較し、本手法の適用性を定性的に検討する。図-8～図-10に、サイクル43～サイクル45の海面力学高度の絶対値の平面分布と同期間の漂流ブイデータの軌跡を示す。海面力学高度の平面分布は、軌道データをもとに、 $15'\times 15'$ 格子に内挿した。時間に対しては補間をしていないため、各サイクルの値は10日間の平均的な高度場として捉えることが出来る。コンター間隔は5cmで、漂流ブイの軌跡は始点を他より大きい黒塗りのシンボルで示してある。

図-8～図-10より、房総半島沖から 160°E にかけての黒潮続流の主流軸付近に存在するブイの動きは、ほぼ等値線に沿って移動しており、本解析結果が黒潮(続流)の流路変動を定性的に再現できているものと考えられる。

一方、 160°E 以东の黒潮続流域や 140°E 以西の黒潮流域では、ブイの動きと等値線との整合はあまりよくない。これは、前述の平均海面力学高度場の解析結果の影響と考えられる。また、 30°N 以南、 150°E 以西のブイの動きで見られる黒潮反流域、および黒潮(続流)の主流軸から離れた弱流域においても、ブイの動きと等値線との整合がとれていない箇所が見られる。これらの海域は、ブイの移動速度から判断すると、流れが遅く、海面力学高度場の時間的定常性も弱いと考えられ、各軌道データの時間的なずれが解析結果に大きく影響することが予想される。

以上で述べた傾向は、他のサイクルについても同様に見られた。

4.2 地衡流速

海面力学高度から地衡流を計算する場合、どの範囲で勾配を計算するかによって、値が大きく変わってしまう。先の $15'$

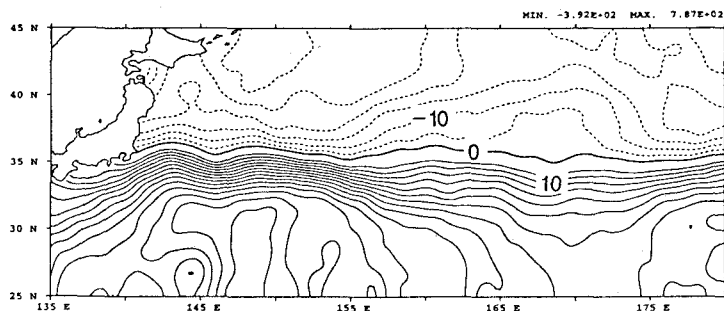


図-7 平均海面力学高度の水平分布

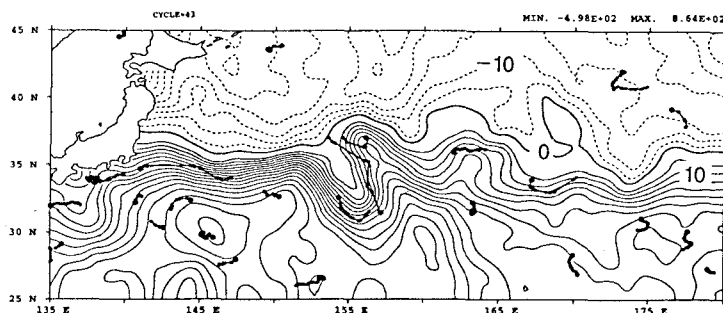


図-8 海面力学高度と漂流ブイの軌跡(サイクル43)

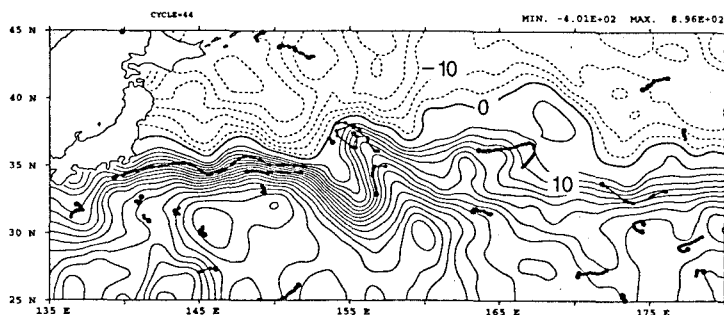


図-9 海面力学高度と漂流ブイの軌跡(サイクル44)

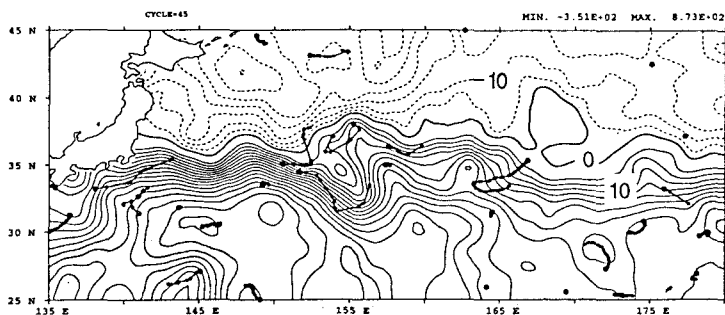


図-10 海面力学高度と漂流ブイの軌跡(サイクル45)

×15'の格子データより地衡流分布を計算し、漂流ブイの移動速度と比較した結果、海面力学高度より求めた地衡流速は最大で50cm/s程度であったのに対し、ブイの移動速度の最大値は200cm/s程度となり、全体的に解析結果の値がかなり小さくなった。これは、格子データ生成の空間補間の過程で海面力学高度の値が丸められる影響が、海面勾配としては大きく表れるためと考えられる。以上の結果を踏まえ、現在は、軌道データをもとに、時間方向の補間を行い、各軌道交点における地衡流速を解析中である。

5 おわりに

1970年代初頭に打ち上げられた有人衛星SKYLABに搭載された初の高度計は約±50cmの測定精度であったが、GEOS-3、SEASAT、GEOSAT、EERS-1という歴史を経て、現在のTOPEX/POSEIDONでは±3cm程度まで性能が向上した。一方、海面力学高度の計算に必要な軌道高度や、ジオイド、潮汐などの精度も、計算モデルの高度化や観測データの蓄積などにより、徐々に向上している。これにより、今までは水温・塩分の気候値から平均場を逆算することしかできなかった海面力学高度場を、±5cm程度の精度で直接観測することが可能となった。現在は、地衡流計算できる精度の海面力学高度場を全域で得られるには至っていないが、海面力学高度の定性的な力学構造は、海洋循環現象の解明へ大きく寄与してきている。近年では、高度計の観測データを海洋循環モデルに同化し、モデルの改良を行うアシミレーションに関する研究も盛んに行われている(例えば、De Mey and Robinson(1987), Holland and Malanotte-Rizzoli(1989), Haines(1991), Verron(1992), Ikeda(1993), Ezer and Mellor(1994))

また、現在米国を中心にヨーロッパ宇宙開発機構(ESA)や日本等が参加して、地球観測システム(EOS)計画などの国際プロジェクトが進行中である。EOSは、各機関が担当する大型の地球観測プラットフォームとデータシステムからなる包括的な計画で、次世代の衛星観測システムとして注目されている。今世紀末には、米国航空宇宙局(NASA)とESAがそれぞれEOS-AM1とPOEM-1を、日本ではADEOS-2aを打ち上げ予定である。EOS-AM1では、日本提唱の可視から熱赤外までに計14バンドを持つASTER、米国提唱のMODIS、MISR、CERS、カナダ提唱のMOPITTの計5つのセンサーが搭載される予定で、これらの観測システムにより、温室効果ガス、エアロゾルなどの大気環境から、火山活動、植生分布、地表面温度、雪、氷といった地上環境までを総合的に観測できる体制が整うことになる。

このように人工衛星データの地球環境解明に向けての活用が、今後ますます期待される。

参考文献

- Cheney, R. E., J. G. Marsh and B. D. Beckley (1983): Global mesoscale variability from collinear tracks of Seasat altimeter data, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, No.C7, pp.4,343-4,354
- De Mey, P. and A. R. Robinson (1987): Assimilation of altimeter eddy field in a limited-area quasi-geostrophic model, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.17, pp.2280-2293
- Ezer T. and G. L. Mellor (1994): Continuous assimilation of Geosat altimeter data into a three-dimensional primitive equation Gulf Stream model, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.24, No.4
- Ganeko, Y. (1983): A 10'×10' detailed gravimetric geoid around Japan, *Marine Geodesy*, Vol.7, pp.291-314
- Haines, K. (1991): A direct method for assimilating sea surface height data into ocean models with adjustments to the deep circulation, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.21, pp.843-868
- Holland, W. R. and P. Malanotte-Rizzoli (1989): Assimilation of altimeter data into an ocean circulation model: Space versus time resolution studies, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.19, pp.1507-1534
- Ikeda, M. (1993): Sequential updating assimilation of simulated geosat data from mesoscale features into a two-layer quasi-geostrophic model, *J. oceanogr.*, Vol.49, pp.697-718
- Levitus, S. (1982): Climatological atlas of the world ocean, NOAA Professional Paper 13, Geophys. Fluid Dynamic Lab., NOAA, Princeton, Dec.
- Verron, J. (1992): Nudging satellite altimeter data into quasi-geostrophic ocean models, *J. Geophys. Res.*, Vol.97, No.C5, pp.7479-7491
- 今脇資郎, 西垣肇, 市川香 (1989): アルティメータ・データの処理:最適内挿法による軌道誤差の補正, *航水研ノート, 空と海*, Vol.11, pp.25-37
- 今脇資郎 (1994): TOPEX/POSEIDON観測の現状, *月刊地球*, Vol.16, No.10, pp.571-574
- 倉賀野連, 柴田彰, 網野正明, 坂井伸一 (1994): TOPEX/Poseidon高度計データによる海面力学高度解析, *日本海洋学会春季大会講演要旨集*, pp.189-190
- 坂井伸一, 水鳥雅文, 柴田彰 (1994): GEOSAT高度計による黒潮および黒潮続流域の広域流動観測, *海岸工学論文集*, Vol.41, pp.276-280
- 柴田彰 (1989): GEOSAT高度計で観測された日本周辺における相対的海面水位の変動について, *海と空*, Vol.65, No.1, pp.1-15
- 増沢譲太郎 (1965): 黒潮の蛇行一本州南方の冷水塊一, *科学*, Vol.35, No.11, pp.588-593