

海面高度計による黒潮横断水位分布の検出

今脇 資郎・内田 裕

DETECTING SEA LEVEL PROFILES ACROSS THE KUROSHIO BY A SATELLITE ALTIMETER

By Shiro IMAWAKI and Hiroshi UCHIDA

Synopsis

Along a line crossing the Kuroshio south of Shikoku, anomalies from the temporal mean of sea surface dynamic topography are derived from satellite altimeter data. At the same time, profiles of sea surface dynamic topography referred to a coastal station are estimated from combination of moored current meter data and repeated hydrographic data. Those two data sets are used to estimate the time series of profiles of absolute sea surface dynamic topography. The profiles from the altimeter data agree very well with those from the *in situ* oceanographic data.

1. は じ め に

人工衛星による地球環境の観測技術は最近めざましく発展している。なかでも衛星に搭載した海面高度計（アルティメーター）による海面水位の観測は、海水の運動に直接関係した海面付近の海中圧力分布の時間変化を直接測定できるので、海洋物理学の研究に大きなインパクトを与えつつある。特に、アメリカとフランスが共同して1992年9月に観測を開始し、6年間にわたる観測を目指している TOPEX/POSEIDON 衛星は、これまでもまして高精度の海面高度データを提供しつづき、すでに海洋大循環などに関連した多くの研究成果が得られている。ここでは、この衛星の海面高度計データを解析して得た、日本南方での黒潮を横断する方向の水位分布の変動について報告する。

黒潮のような大きなスケールの流れについては、圧力勾配力とコリオリ力とが釣り合った地衡流平衡がほぼ成立しており、つぎのような関係が近似的に成立する。

$$fv = g \frac{d\zeta}{dx} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f はコリオリ係数で地球の回転角速度と緯度の正弦に比例する量であり、 v は流れの速さ、 g は地球の重力加速度、 ζ は海面力学高度、 x は流れに直角な方向（北半球では流れを背にして右手の向き）の水平座標である。たとえば黒潮の場合、沿岸側と沖合側とで約1mの水位差があると考えられている。したがって、この海面力学高度の水平分布を観測することによって、黒潮の表層の流れの強さや流軸の位置の変化を推定することができる。

人工衛星海面高度計による海面高度の測定原理は、つぎのように極めて単純である。人工衛星に搭載されたマイクロ波レーダー高度計が、衛星からその直下の海面までの距離を測定する。一方、衛星の軌道高度を、地球の重力異常分布などを組み込んだ軌道計算モデルなどによって正確に求める。この二つのデー

タを組み合わせることにより、衛星直下の、軌道沿いの海面高度の時間的に連続な記録を得る。

人工衛星で測定した海面高度には、海洋の運動を反映した上記の海面力学高度の分布のほかに、地球の重力異常を反映したジオイド面の分布も含まれる〔ジオイドとは、海面近くに想定した等重力ポテンシャル面で、海が静止している時の海面に一致する〕。したがって、海水の動きを調べるためには、人工衛星で測定した海面高度の、ジオイド面からのずれを求め、その傾きから海面での地衡流を求めることになる。しかしながら、実際には、海面力学高度の凹凸よりもジオイド面の凹凸の方がはるかに大きいため、現在知られているジオイドの情報では精度が不十分であり、海流を正確に求めるためには使えない。つまり、現在のところ、衛星海面高度計データとジオイド・モデルの組み合わせでは、海面力学高度を絶対値として求めることはできない。

そこで現在は多くの場合、海面高度計データによって、ある観測期間にわたる海面力学高度の平均からの時間的な偏差を求め、それに他のなんらかの方法で求めた近似的な平均値を加えて、海面力学高度の絶対値を近似的に求めている¹⁾。しかしその場合、近似的な平均値が真の平均値にどの程度近いかを評価することは難しい。ここでは、四国沖の黒潮流域において、TOPEX/POSEIDON 衛星の観測期間中に特別に実施された現場海洋観測の結果を用いることによって、この問題を解決した。すなわち、現場観測によって得られた絶対的な海面力学高度に一致するように、衛星観測期間中の海面力学高度の平均値を決めた。Fig. 1 に今回解析対象とした、黒潮を横断する観測線を示す。

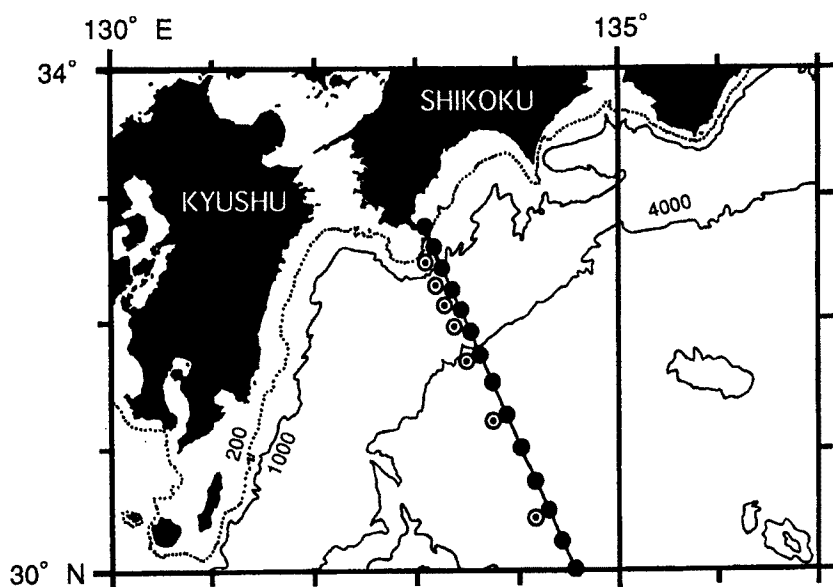


Fig. 1. Location of stations of moored current meters (circles) and hydrographic observations (dots). This ASUKA observation line was chosen to coincide with a subsatellite track of TOPEX/POSEIDON altimeter satellite.

2. データとデータ処理

海面高度計データとしては、1992年9月下旬から観測を続けている TOPEX/POSEIDON の海面高度計データ²⁾を使用した。データはアメリカのジェット推進研究所が配布している M-GDR (Merged TOPEX/POSEIDON Geophysical Data Record)³⁾ に収められている。測定値から海面高度を求めるために必要な各種の補正はすべて M-GDR に収められているものを用いた；潮汐補正には、Cartwright & Ray の潮汐モデル⁴⁾を用いた。四国沖の黒潮を横断する海洋観測測線は、TOPEX/POSEIDON の軌道に沿って

設定されている (Fig. 1)。衛星はこの軌道上を約 9.9 日に 1 回の割合で飛翔し、軌道沿いに約 6.2 km 毎に海面高度を測定する。ここで用いた海面高度計データの取扱いについてのさらに詳しい説明は別の論文⁵⁾を参照されたい。

衛星観測期間中の海洋の現場観測データとしては、ASUKA (Affiliated Surveys of the Kuroshio off Cape Ashizuri) グループによる観測結果を使用した。その内容は、深さ 700 m 層に流速計を 1 年間 (1993 年 10 月から 1994 年 9 月まで) 係留して測定した黒潮下層での実測流速と、この係留観測期間中に並行して繰り返し実施した海洋観測による水温と塩分の断面分布である。Fig. 1 に流速計の係留点と海洋観測の標準的な測点の配置を示す。また、Table 1 にこの期間中に行われた 10 回の横断観測の内容を示す。衛星海面高度計データから求めた海面力学高度の時間的な偏差から、観測期間中の平均の海面力学高度を求めるためには、原理的には 1 回の現場海洋観測データがあればよいが、推定の精度を向上させるために、ここでは 10 回の観測データを用いた。これらの現場観測データから、流れが地衡流で近似できることを仮定し、深さ 700 m 層の実測流速 (日平均値) に準拠した、海面での力学的高度の水平分布を航海毎に求めた。ただし、ここで得られるのは、最も沿岸よりの標準観測点での海面力学高度の値に相対的な他の観測点での海面力学高度の値である。

約 2 年間 (1992 年 9 月から 1994 年 11 月まで) の衛星海面高度計データから、まずこの軌道に沿っての平均の海面高度を求めた。つぎに、この平均海面高度からの、約 10 日サイクル毎の海面高度の時間的な偏差を求めた。Fig. 2 は全観測期間中の 78 サイクル分の海面高度の偏差の水平分布を重ね書きしたものである。海面力学高度の偏差は、ほぼ ± 40 cm の範囲で変動しているが、大きいときには 70 cm を越えることもある。

つぎに、この海面高度計によって得られた海面力学高度の 10 日毎の偏差の水平分布と、係留流速計観測と海洋測線観測によって得られた全部で 10 回の海面力学高度の絶対値の水平分布とから、2 年間の衛星観測期間中の平均の海面力学高度の水平分布を求める。衛星海面高度計によって得られた海面力学高度 $\zeta(x_i, t)$ は、その平均値 $\zeta_m(x_i)$ と、時間的な偏差 $\zeta'(x_i, t)$ に分けられる。すなわち、

$$\zeta(x_i, t) = \zeta_m(x_i) + \zeta'(x_i, t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。ただし、

$$\int_{i=1}^N \zeta'(x_i, t) dt = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

Table 1. List of repeated hydrographic surveys carried out along the ASUKA line when first-year moored current meters were in water, and used for comparison with TOPEX/POSEIDON altimeter data. Cruise identification labels are given in the left column. CTD stands for the conductivity-temperature-depth profiler, and XBT, expendable bathythermograph. In the right column are shown rms differences of sea surface dynamic topography between the altimetry and hydrography data.

Cruise	Date	(UTC)	Vessel	Observation	Data Source	RMS Diff. (cm)
TE 9311	1993	Nov. 19 - 20	Tenyo-maru	CTD	K. Mimoto	5.1
IY 9401	1994	Jan. 8 - 10	Kaiyo-maru	CTD	K. Okuda	2.0
YY 9401		Jan. 18 - 22	Shoyo	CTD	H. Yoritaka	5.2
KT 9401		Jan. 30 - 31	Tansei-maru	XBT	H. Ichikawa	5.8
KH 9402		Feb. 26 - 27	Hakuho-maru	XBT	H. Ichikawa	5.8
BO 9405		May 1 - 6	Bosei-maru	CTD/XBT	M. Fukasawa	3.6
SH 9405		May 12	Shumpu-maru	CTD/XBT	N. Yoshioka	3.1
YY 9405		May 10 - 14	Shoyo	CTD	H. Yoritaka	6.1
YY 9407		July 8 - 10	Shoyo	CTD	H. Yoritaka	5.5
KE 9408		Aug. 22 - 23	Keiten-maru	XBT	H. Ichikawa	3.6

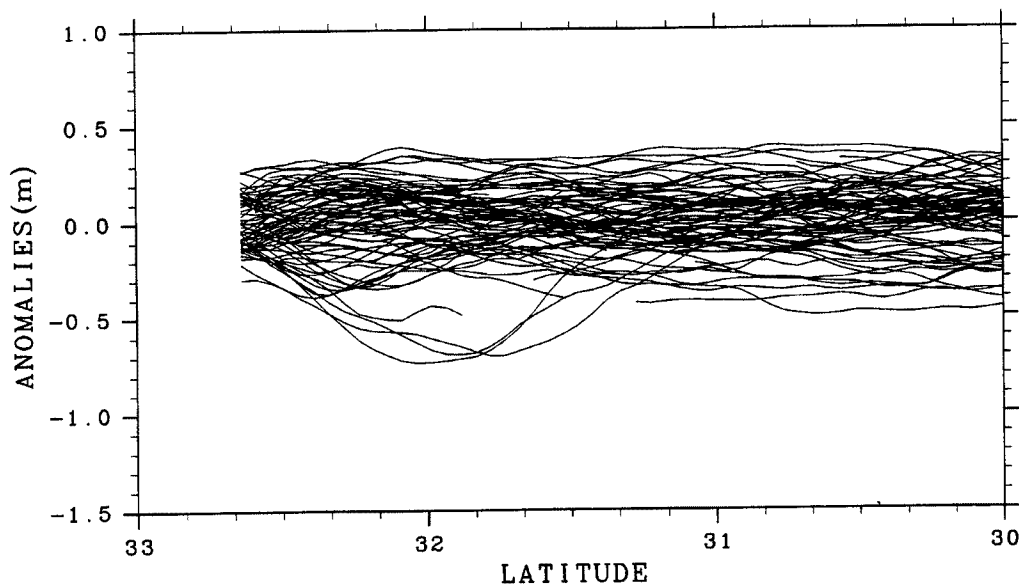


Fig. 2. Profiles of anomalies (in m) from the two-year mean of sea surface dynamic topography along the ASUKA line derived from TOPEX/POSEIDON altimeter data from September 1992 to November 1994. 78 profiles are overlaid.

で, $x_i (i=1, \dots, N)$ は測線に沿って設けられた標準観測点の座標, t は衛星の観測時刻である。一方, 現場観測によって得られた海面力学高度 $h(x_i, t_j)$ は, 時刻 $t=t_j$ における, 最も沿岸よりの標準観測点 $x=x_i$ での海面力学高度 $h_1(t_j)$ と, その値に相対的な海面力学高度の空間分布 $h'(x_i, t_j)$ の和で表現される。すなわち,

$$h(x_i, t_j) = h_1(t_j) + h'(x_i, t_j) \dots\dots\dots (4)$$

である。ただし, $t_j (j=1, \dots, M)$ は海洋測線観測の行われた時刻である。 h' が海面高度計データから, h が海洋測線観測データから得られているので, h' と h という, 二つの方法で求めた同時刻の海面力学高度の差が最小となるように, すなわち,

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \{\zeta(x_i, t_j) - h(x_i, t_j)\}^2 \dots\dots\dots (5)$$

が最小となるように, $\{\zeta_m(x_i); i=1, \dots, N\}$ と $\{h_1(t_j); j=2, \dots, M\}$ の $(N+M-1)$ 個の未知数を求める [今回の場合, $N=53, M=10$]。ここで, 第1回目の海洋測線観測における, 最も沿岸寄りの標準観測点での海面力学高度 $h_1(t_1)$ を, 今回の水位測定の原因点とした; すなわち $h_1(t_1)=0$ である。ただし, 実際のデータ処理では, 衛星観測データは一般には海洋測線観測が行われた時刻 $t=t_j$ には得られないので, その前後に得られた10日間隔の海面高度計データを線型的に内挿して, 海洋観測時刻における海面高度計データとした。

3. 黒潮横断水位分布

前節のデータ処理法に従って求めた10回の海洋観測時刻 $t=t_j$ における海面力学高度の水平分布を Fig. 3 に示す。すべてのケースについて, 現場海洋観測データから求めた海面力学高度と, 衛星海面高度

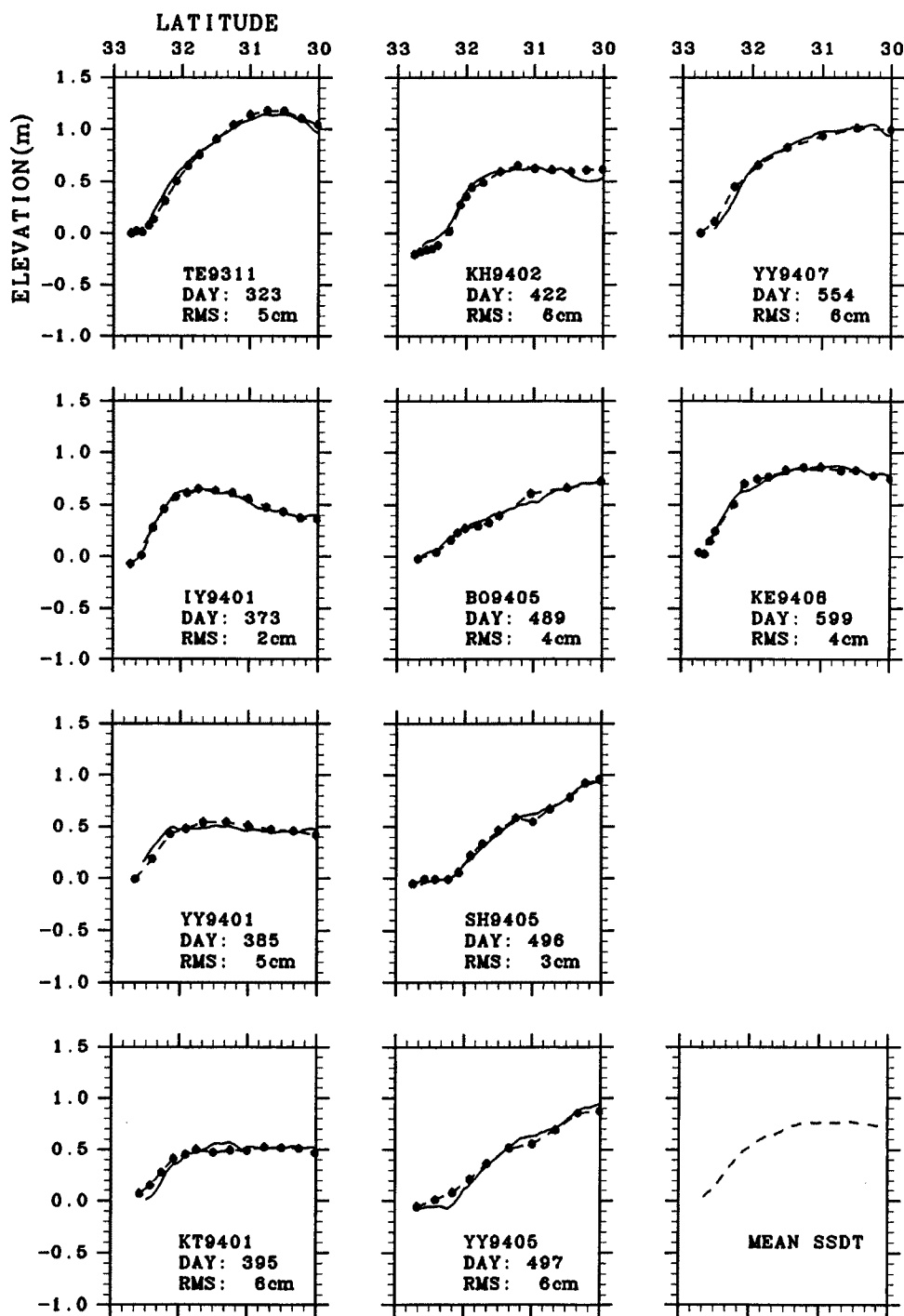


Fig. 3. Comparison of altimeter-derived sea surface dynamic topography (solid line; in m) with *in situ* absolute sea surface dynamic topography (broken line with dots) along the ASUKA line. Ten cases are shown, with cruise identification label (shown in Table 1), 1993-year day (extended if necessary), and rms difference. The two-year mean of sea surface dynamic topography is shown at the lower right corner.

計データから求めた海面力学高度が、極めてよく一致していることが分かる。**Table 1**の右端には、両者のいずれの rms (root-mean-square) が示されている。rms は 2 cm から 6 cm の範囲にあり、平均は 4.6 cm である。TOPEX/POSEIDON 海面高度計の計測精度が 3 ~ 4 cm 程度とされているので²⁾、ここで得られた両者の一致は極めてよいと言える。**Fig. 3**の右下には、衛星観測期間の2年間の平均の海面力学高度の水平分布 $\zeta_m(x_i)$ が示されている。黒潮の沿岸側と沖合側とで約 70 cm の水位差があることが分かる。

この2年間の平均の海面力学高度 $\zeta_m(x_i)$ と、衛星海面高度計データから得られた、それからの時間的な偏差 $\zeta'(x_i, t)$ とから、(2)式によって、黒潮を横断する方向の絶対的な水位分布 $\zeta(x_i, t)$ を求めて、重ね書きすると **Fig. 4** のようになる。ほぼ全期間を通じて、黒潮の強流帯(水位勾配の大きいところ)は、北緯 32 度以北にあるが、期間によっては、強流帯が北緯 31 度 30 分付近まで南下している。これは、1994 年 6 月頃、黒潮が四国沖で離岸し大きく蛇行していたことを反映している。図の下部には、参考のために2年間の平均の海面力学高度の水平分布を示した(**Fig. 3**の右下の図を拡大したもの)。

Fig. 5 に、この衛星海面高度計データと現場海洋観測データを組み合わせて求めた絶対的な海面力学高度の水平分布を時系列で示す。時間を追って海面力学高度の変化を見ると、黒潮の強流部の場所はあまり変化していないが、地衡流速に比例する水位勾配は時間的にかなり変化していることが分かる。

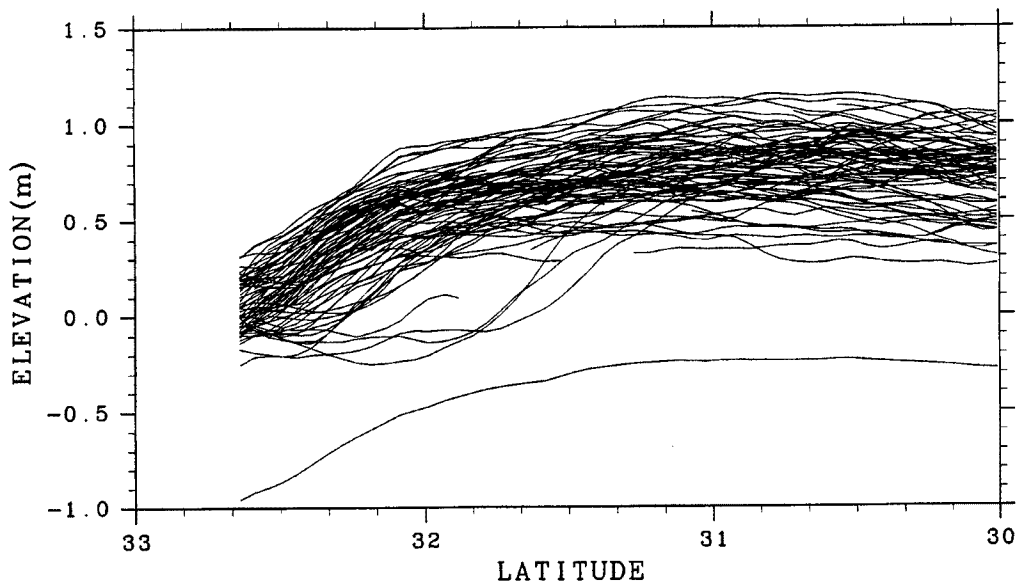


Fig. 4. Profiles of absolute sea surface dynamic topography (in m) along the ASUKA line observed by the TOPEX/POSEIDON altimeter and calibrated by *in situ* oceanographic data. 78 profiles are overlaid. The estimated two-year mean profile is also shown with 1 m offset.

4. お わ り に

以上、四国沖の黒潮を横断する測線について、衛星海面高度計データから海面力学高度の時間的な偏差を求め、同時に、係留流速計観測を含む現場海洋観測データから、最も沿岸寄りの観測点での値に相対的な他の観測点での海面力学高度の値を求め、それらを組み合わせることによって絶対的な海面力学高度の水平分布の時間変化を求めた。得られた衛星海面高度計データによる結果と、現場海洋観測データによる結果とは極めてよく一致した。

衛星海面高度計の利点の一つは、かなり細かな時間間隔で海洋の変動現象を捉えることができる点にあ

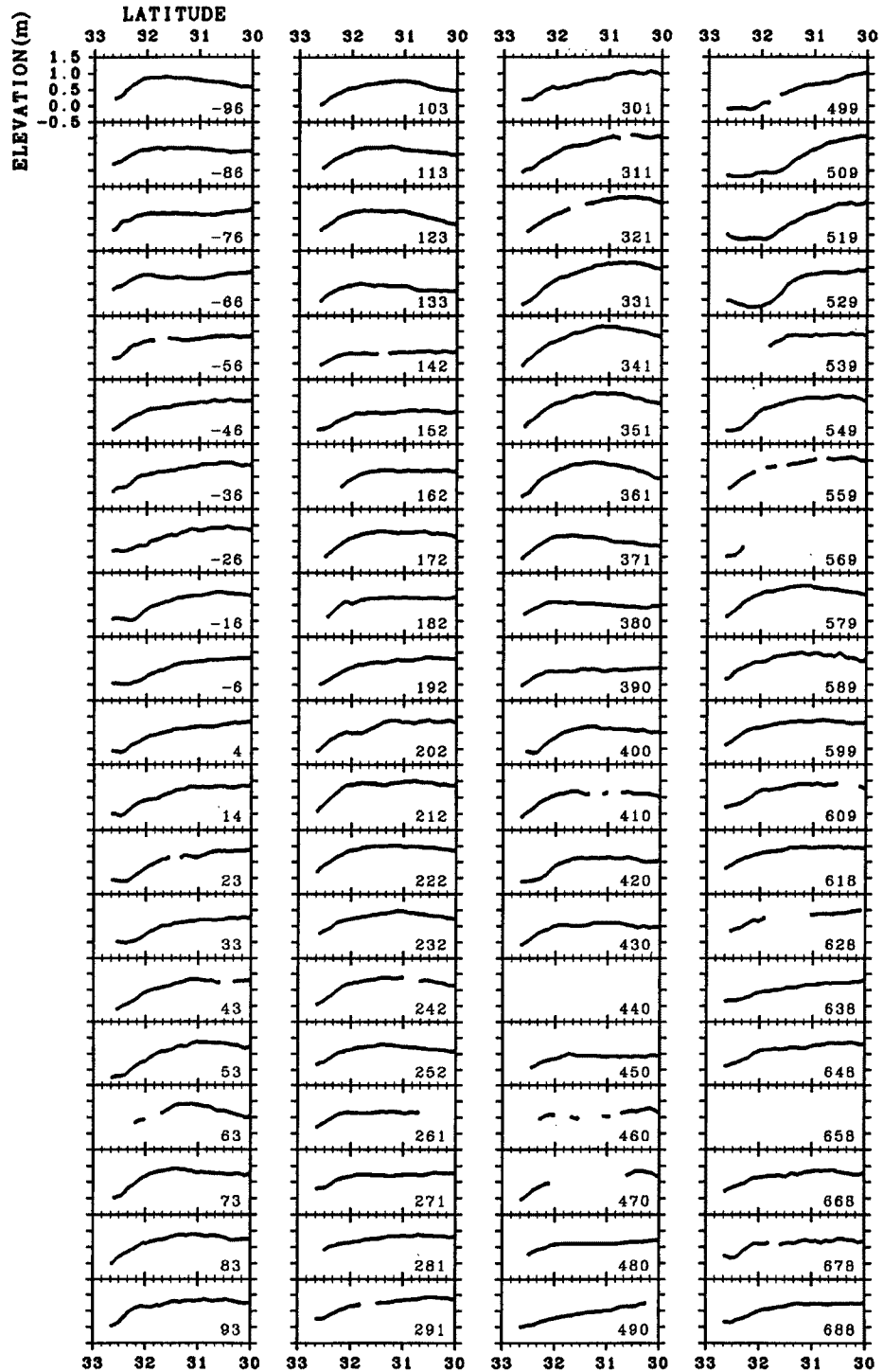


Fig. 5. Individual profiles of absolute sea surface dynamic topography (in m) along the ASUKA line observed every ten days by the TOPEX/POSEIDON altimeter and calibrated by *in situ* oceanographic data. The numeral at the lower right corner of each panel is 1993-yearday (extended if necessary).

るが、今回得られた黒潮表層の水位の変動でも、20～30日の間に大きく変動するケースが見られ、今後、これらのデータを基にした黒潮の短・中周期の変動に関する研究が進められるであろう。

このように、衛星による海面高度の測定は、全球にわたる海面水位の分布を均質な測定精度で繰り返して測定できるという、極めて画期的なものである。しかし、これによって海面高度に関係した必要な情報がすべて得られるというわけではない。この方法では、衛星の軌道に沿っての線状の水位情報しか得られず (TOPEX/POSEIDON の場合は日本近海では 200～250 km 間隔の線上)、また測定の時間間隔は 10 日間程度以上である [ただし軌道間隔を疎にすると、時間間隔を小さくすることはできる]。また、沿岸のごく近くは測れない。

謝 辞

TOPEX/POSEIDON 海面高度計データは、アメリカのジェット推進研究所の PO. DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) から提供を受けた。黒潮域の現場海洋観測データは、ASUKA グループによって得られたものである [係留流速計データは、今脇資郎、市川洋、深澤理郎、馬谷紳一郎らによる；海洋測線観測データは、見元孝一、奥田邦明、寄高博行、市川洋、深澤理郎、吉岡典哉らによる]。ここに、記して感謝の意を表する。なおこの研究は、文部省の国際協同研究「海洋観測国際協同研究計画 (GOOS)」の一環として行われた。一部は、文部省の科学研究費補助金によって行われた。

参 考 文 献

- 1) Ichikawa, K. and S. Imawaki : Life history of a cyclonic ring detached from the Kuroshio Extension as seen by the Geosat altimeter, *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, 1994, pp. 15, 953–15, 966.
- 2) Fu, L.-L., E. J. Christensen, C. A. Yamarone Jr., M. Lefebvre, Y. Menard, M. Dorrer and P. Escudier : TOPEX/POSEIDON mission overview, *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, 1994, pp. 24, 369–24, 381.
- 3) Benada, R. : PO. DAAC Merged GDR (TOPEX/Poseidon) Users Handbook, Jet Propulsion Laboratory D-11007, 1993.
- 4) Cartwright, D. E. and R. D. Ray : Energetics of global ocean tides from Geosat altimetry, *J. Geophys. Res.*, 96, 1991, pp. 16, 897–16, 912.
- 5) Imawaki, S., M. Gotoh, H. Yoritaka, N. Yoshioka and A. Misumi : Detecting fluctuations of the Kuroshio axis south of Japan using TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. Oceanogr.*, Vol. 51, 1995 (受理).