

アルチメータ・データを用いた 赤道太平洋域の海面変動

米山 邦夫*¹ 松本 剛*²
中埜 岩男*¹

人工衛星GEOSATにより得られたアルチメータ・データを用いて、1986年11月から1988年3月までの赤道太平洋域の海面変動について調べた。

海面高は同一軌道法を用いて17ヶ月平均からの変位として求め、軌道に沿って得られた値を緯度・経度の水平空間上に置き換えて解析を行った。

その結果、1986年11月から12月にかけて西経160度を中心とした広い範囲で正の海面高アノマリー領域が形成され、その後位相速度3 m/sで東進していること、そのアノマリーの様子が特に東部赤道太平洋域で特異であったことが示された。これらの結果は、西・中部赤道太平洋における強い正のアノマリー域の形成がエル・ニーニョ現象の発生に深く関係していたことを示す。また、その正のアノマリー領域の形成は水平空間上で組織的な様子を見せ興味がある。

キーワード：GEOSAT, アルチメータ・データ, 赤道太平洋, 同一軌道法,
海面高アノマリー, エル・ニーニョ現象

Sea Level Variability in the Equatorial Pacific Using GEOSAT Altimeter Data

Kunio YONEYAMA*³ Takeshi MATSUMOTO*⁴
Iwao NAKANO*³

Using GEOSAT altimeter data from November 1986 through March 1988 (this period includes 1986/87 El Nino event), variability of Sea Level Anomaly (SLA) in the equatorial Pacific is studied.

In order to eliminate orbit errors, the Collinear differences method is used. Positive SLA located around 160°W with zonal length of over 3000 km moved toward eastern equatorial Pacific (100°W), where SLA is usually negligibly small. This SLA may be a manifestation of wave propagation related with 1986/87 El Nino event.

Key words: GEOSAT, Altimeter data, Equatorial Pacific, Collinear method, Sea level anomaly, El Nino event

* 1 海洋開発研究部

* 2 深海研究部

* 3 Ocean Research Department

* 4 Deep Sea Research Department

1 はじめに

人工衛星GEOSATに搭載された海面高度計(アルチメータ)により、海面高度に関する種々の情報が全球的(72°S~72°N)に得られている。海面高度はアルチメータから出されるマイクロ波で衛星と海面との間の距離を測定し、別に求めた人工衛星の軌道高度との差を求めることで得られる(図1)。

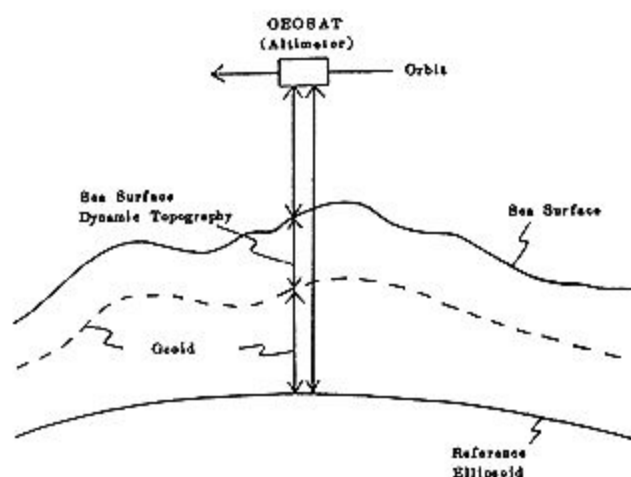


図1 海面高度の測定の模式図

Fig. 1 Schematic of Altimeter measurement

GEOSATは約17日間で地球を244回転して元の位置に戻る軌道を1986年11月8日から繰り返して行っていたが、1990年1月に観測は停止した。

海流や渦などの海洋現象はその海面高の変動が10cmのオーダーで大きくても1m程であり、アルチメータ・データを海洋物理学的に利用するためには少なくとも数cmの精度で海面高度が解らなくてはならない。しかしながら、ここで得られるデータには種々のノイズが混入していてデータをそのまま使用することはできない。このノイズの原因はアルチメータによる距離の測定誤差と衛星の軌道誤差とが主である。これらのノイズのうち特に大きいのは衛星の軌道誤差であり、GEOSATの場合rms(Root Mean Square)で3mにも達し、この軌道誤差を除くことがアルチメータ・データ解析における最初の主な仕事である。ただし、さいわいなことにこの誤差は人工衛星の地球1回転で1波長程度の空間(時間)分布を持っているため(例えばCheney et al., 1989¹⁾参照), それより波長の

短い海洋現象と区別することが可能である(この概念図を図2に示した)。また、アルチメータによる距離の測定誤差としては、固体地球及び海洋の潮汐、乾燥・湿潤大気、電離層、波などによる影響が考えられる。

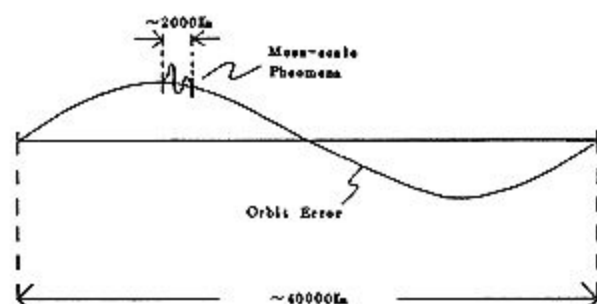


図2 軌道誤差の概念図

Fig. 2 Schematic of Orbit Error Distribution

更に、これらの誤差の他にジオイドモデルの精度不足が大きな問題として挙げられる。海洋中にまったく運動がない場合の海面がジオイド面であるので、海流など海洋物理学的にはジオイド面からの変位が重要となる。しかしこのジオイドモデルは現在精度が1m程であり、海面高度を正確に数cmのオーダーで求めることができない。しかしジオイド分布が時間的に一定であると考える限り、現象の時間変化だけを見る場合にはジオイドモデルが不要になる。

今回、解析に用いたのは1986年11月8日から1988年3月31日までの17ヶ月間、31回の繰り返し軌道分であり、その領域は南北方向に10°Nから10°S、東西方向に150°Eから90°Wで囲まれた赤道太平洋である。1サイクル目を図3に示した。

軌道誤差の除去には同一軌道法を用いて海面高の変動を調べた(後章参照)。

この時期この領域ではエル・ニーニョ現象が発生しており、アルチメータ・データを用いた海面高との関連でもいくつかの研究がされており(Delcroix et al., 1989(これ以後DEPと記す)²⁾; Picaut et al., 1989³⁾), 異常気象とも関係して非常に興味ある領域である。DEPに依れば165°E付近の海面高の正のアノマリー領域の形成が1986/87のエル・ニーニョの始まりとして特徴付けられているが、その空間分布が示されていないため追試の意味も含めて空

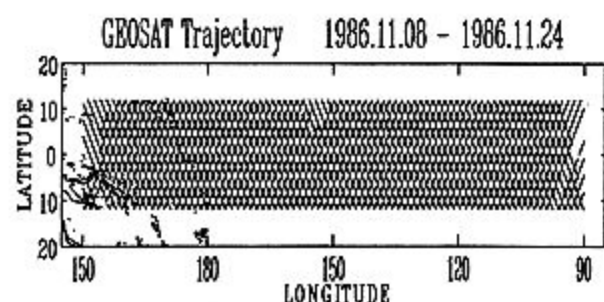


図3 解析領域のGEOSATの1サイクル目の軌跡
Fig. 3 GEOSAT ground tracks of first cycle

間分布を求めた。更には、解析期間を拡げること
でエル・ニーニョ発生時の特徴を調べた。

2 解析方法

2.1 同一軌道法

現在までのところ、衛星の軌道誤差を取り除く
方法として最適内挿法、交差法、同一軌道法など
が考えられている。尚、Milbert et al. (1989)⁴⁾
によれば交差法により得られる海面高変動と同一軌
道法によるそれとは同精度の結果となる。

最適内挿法を用いて解析した今脇ら (1989)⁵⁾も
言うように現在のジオイドモデルの精度では海洋
物理学的には不十分である。そこでジオイドモデ

ルが不要になるようにジオイド分布が空間だけに
よって時間にはよらないものとして、ある地点で
の時間変化だけを考えることにする。GEOSATは
約17日後元の軌道に戻ってくるので、同一の軌道
に対してその時間変化を追うことによりジオイド
モデルを考えなくてもよい。また、軌道誤差はだ
いたい人工衛星の1回転で1波長となるような長
周期なので、比較的低次の近似式で軌道誤差を取
り除くことができる。この考え方が同一軌道法と
呼ばれるものである。尚、ここでは水平スケール
が2000~3000km以下の現象の時間変動を対象と
することで、軌道誤差を線形のトレンドとして(Cheney
et al., 1983⁶⁾)除去した。

GEOSATは観測期間中同一の軌道を繰り返し飛
行する経路をとっていて、約17日間で地球を244回
転し、今回解析に用いた17ヶ月間では1つの軌道
につき31回の繰り返しがある。この31回の繰り返
し軌道上の海面高の一部を図4に例として示した。
横軸は軌道の緯度成分である。ここで言う海面高
とは基準楕円体からの高さであり、ジオイド高や
軌道誤差は含まれたままであるが、固体地球及び
海洋の潮汐、乾燥・湿潤大気、電離層の影響など
アルチメータによる距離の測定誤差は、Cheney et

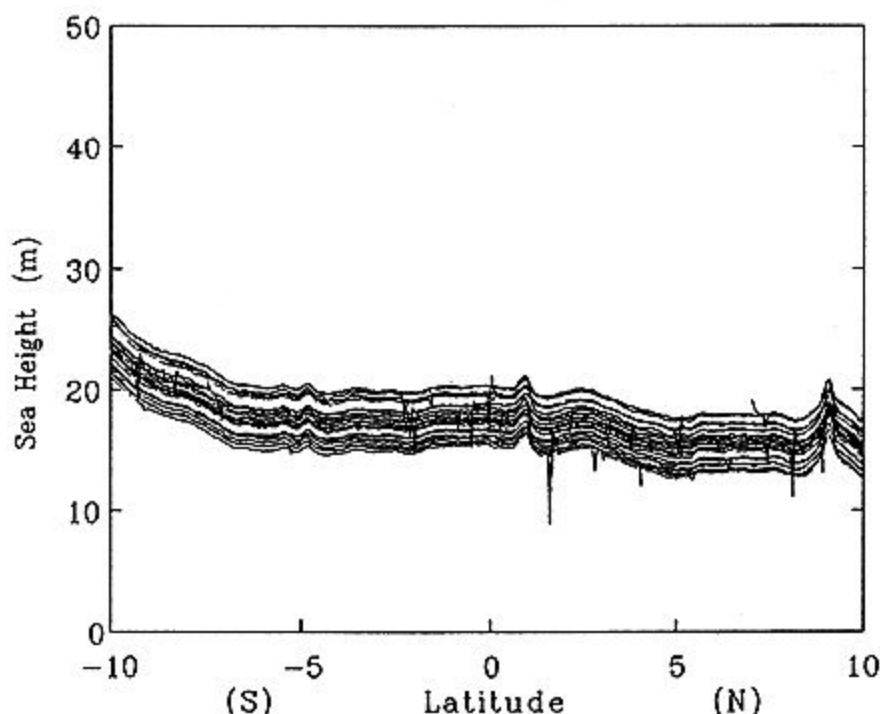


図4 同一軌道上の海面高度の例。ジオイド高や軌道誤差などを含んでいる。

Fig. 4 An example of collinear sea height profiles which include geoid and orbit error, etc.

al. (1987)⁷⁾により既に除いてあり、有義波高の取扱いについても同様に従った。図のように同一軌道

上で幅を持った分布をしているのは主に軌道誤差によるものである。

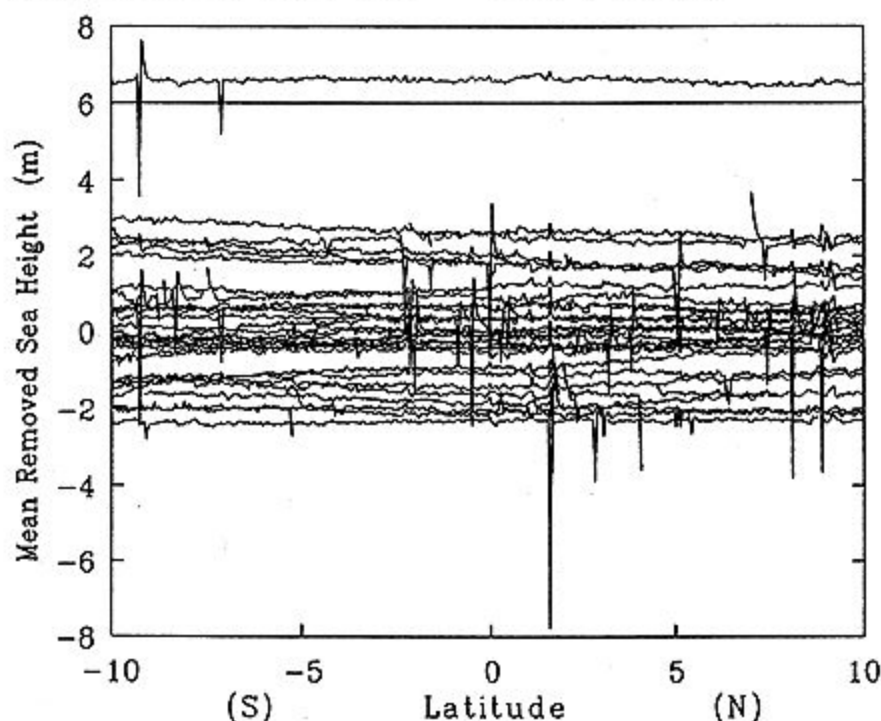


図5 全繰り返し軌道の平均からの差。上部に1つずらして示している。

Fig. 5 The mean is subtracted from Fig. 4. One profile is shifted by 6m.

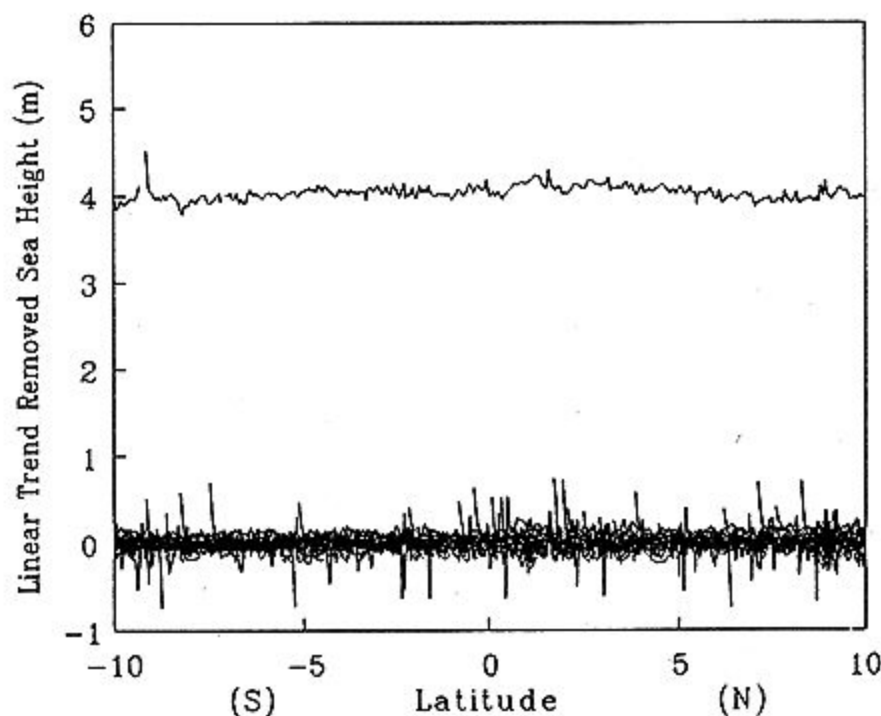


図6 線形トレンドを取り除くことにより軌道誤差の除去された海面高アノマリー

Fig. 6 The linear trend is removed from Fig. 5. One profile is shifted by 4m.

次に軌道誤差の除去の様子を図5, 6に示した。図5は図4に示された全繰り返し軌道の平均からの差を図示したものである。これによりジオイドの影響が除かれているが、それと同時に時間によらない定常流も除かれていることに注意する。尚、上部に一つずらして示してある。更に、軌道誤差を取り除くために最小二乗法を用いて、各軌道か

ら線形トレンドを除去したものが図6である。この場合も上部に一つずらして示している。

ここまでで軌道誤差の取り除かれたデータセットができたが、実際には図6に見られるように、非現実的なスパイク状の誤差やランダムな誤差が含まれている。そこで以下のようなフィルタリングを行う。その様子が図7に示されている。

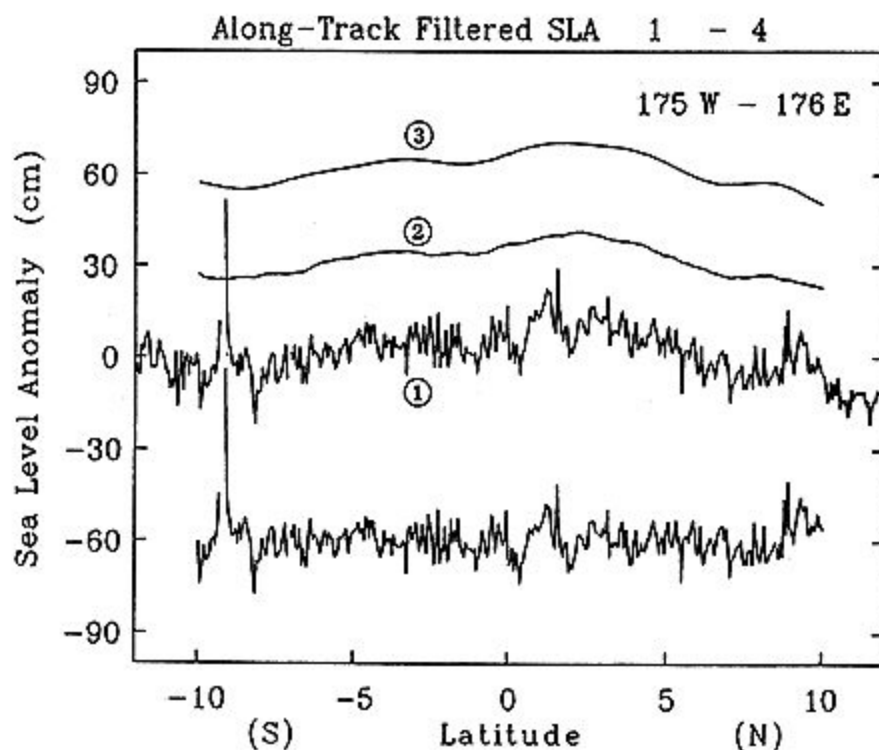


図7 軌道上の海面高アノマリー。①は元データ。②は400kmの非線形メジアンフィルターと移動平均をかけた値。③は更に400kmのローパスフィルターをかけた結果。一番下は①-③。

Fig. 7 Along track sea level anomaly, raw data ①, with 400km non-linear median filter and running mean ②, with 400km low-pass filter ③. The bottom is ① minus ③.

まずスパイク状の誤差を取り除くために、軌道に沿って400kmの非線形メジアンフィルター(Brock, 1986²⁰)をかけ、更に400kmの移動平均をとった(図7, ②)。次に、400kmのローパスフィルターをかけることによってスムージングを行った(図7, ③)。一番下に示されたものはフィルターをかけた後のデータと元のとの差を示し、フィルターにより取り除かれた値を示している。

2.2 精度の評価

最終的にできあがった軌道上のデータセットが正しく軌道誤差を除去したものであるならば、北上軌道と南下軌道との交差点上でその間の時間変化を無視すれば、両者の高さは等しくなるはずである(尚、この考え方で軌道誤差を除く方法が交差法と呼ばれるものである)。そこで今回のデータセットの精度の評価として、全交点での北上軌道

時の値 a_i と南下軌道時の値 d_j との差 $Dij (= a_i - d_j)$ のrmsを求めた。この結果 $rms = 5.6cm$ が得られた。

$$rms = \sqrt{\frac{\sum Dij^2}{(\text{number of cross-points})}}$$

図8は Dij の変動の様子を示したものであるが、縦軸はその頻度（回数）である。交差点上での差を求めるのに北上軌道と南下軌道との時間差が10日以内のものだけを用い、全解析期間中（51回）の平均を示してある。図右上の数字は平均186個の

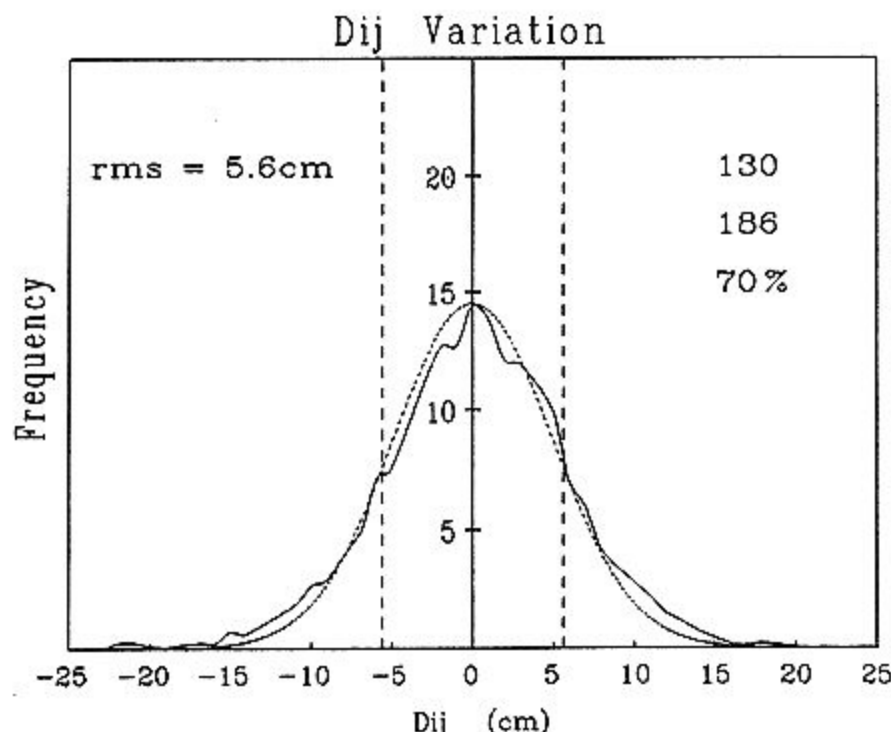


図8 交差点上における北上軌道と南下軌道の値の差の頻度分布（実線）。

破線は $y = 14.5 \exp(-x^2/7^2)$, 但し $y = \text{Frequency}$, $x = Dij$

Fig. 8 The frequency distribution of Dij (solid line). Dij is the difference between ascending data and descending one at the crossover point.

交点があり、 Dij が5.6cm以内の数が130個、70%を占めていることを表している。実際には交点の数は最初の頃は240個程だったが、後半になるとデータ欠損が多く100個程に減少している。しかしながら、どの時間帯でも5.6cm以内に含まれる割合は70%程であった。また、参考までに図中の破線は $y = 14.5 \exp(-(x/7)^2)$ のガウス分布型である。

2.3 時系列データセット

軌道上のデータセットから緯度・経度の水平断面上の時系列データセットを作ることを考える。しかしながら図3に示したような全データを使って1枚のスナップショットを作るためには海面変動が17日間一定と考えなくてはならない。空間分布を描く場合はデータが空間上に多く存在している方が望ましく、一方時系列の場合は時間上に多くデータが存在した方が望ましい。そこで、まず経度方向に2°、緯度方向に1°のボックスを考え、ある期間内（10日）にそのボックスに入ってきた全データの平均値をその地点のその時刻の値とし

た。(ここで10日としたのは全ボックスにデータが存在するようにしたためであるが、実際には存在しないところもあり、そこでは線形内挿で補った)。つまり、空間的には $2^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、時間的には10日間一

定とみなしたデータセットが解析期間17ヶ月で51組作られたことになる。

更には経度方向に 10° 、緯度方向に 1° 、時間間隔3日の上述と同様のデータセットを170組作った。

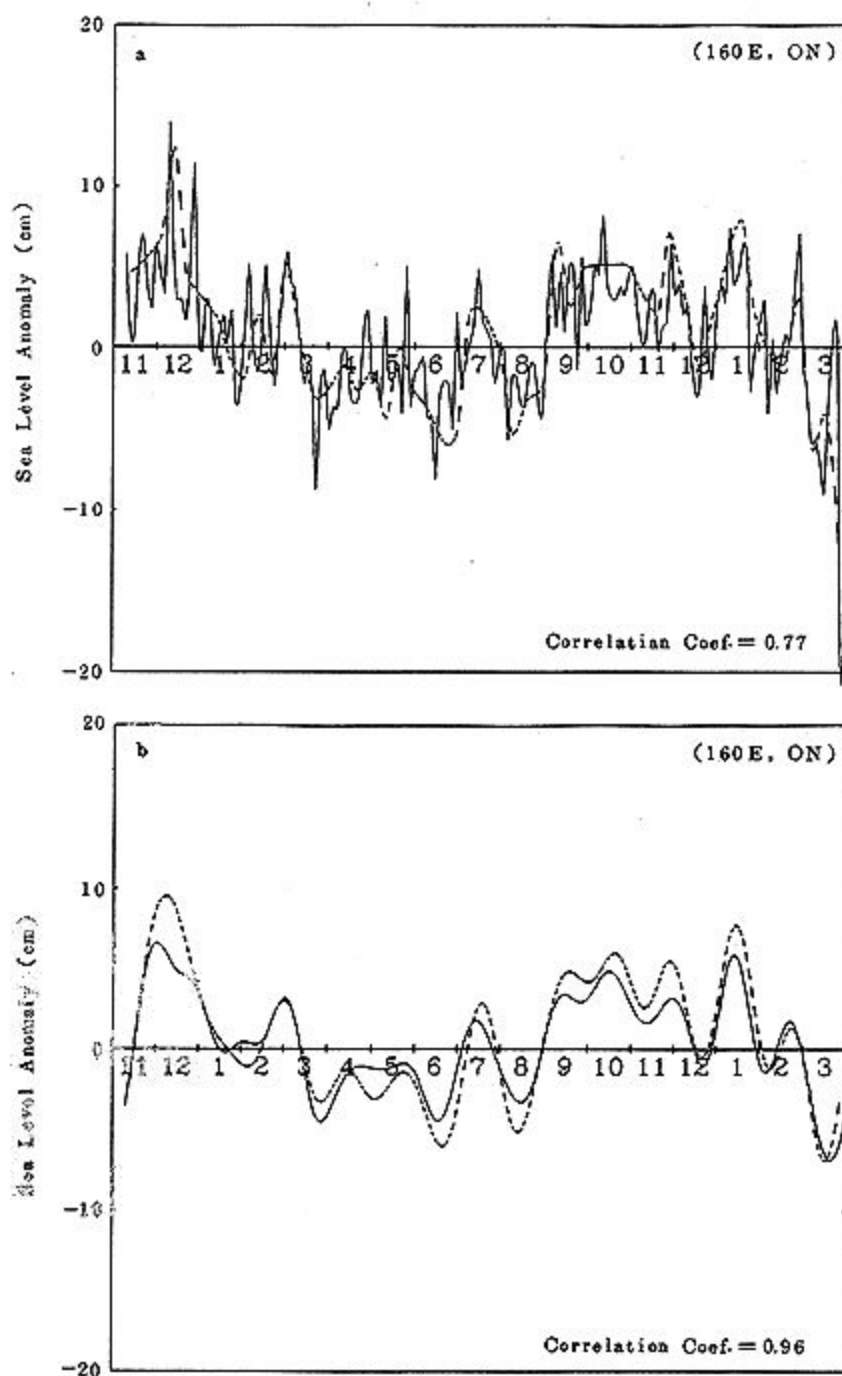


図9 海面高アノマリーの時間変化を2つのデータセットにつき示した図。実線は格子間隔 $10^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、時間間隔3日、破線は $2^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、10日。(a)は元データ、(b)は30日のローパスフィルターをかけた結果。

Fig. 9 Sea level anomaly time series by two data set types. One is 10° longitude $\times$ 1° latitude $\times$ 3 days (solid line), and the other is 2° longitude $\times$ 1° latitude $\times$ 10 days (broken line). (a) original time series, (b) time series with 30 days low-pass filtered.

図9は上述の2通りのデータセットを海面高アノマリーの時間変動の図で比較したものである。図9.aはそれぞれの元データだが、その比較で相関係数が0.77と高い。更に両者に30日のローパスフィルターをかけたところ(図9.b)相関係数が

0.96にも達し、ほぼ一致していることを示した。このことは両方で作られた図は同程度(精度)の結果であることを示している一方、時間的にも空間的にも長周期の現象を捉えているとも考えられる。

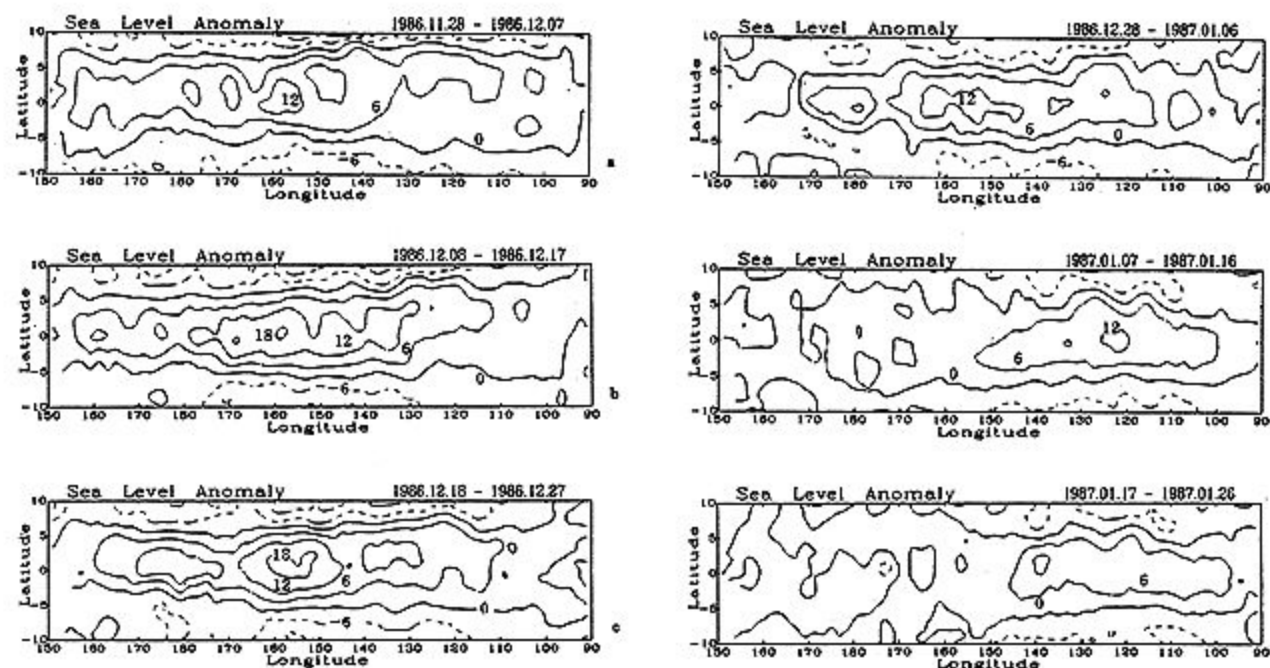


図10 海面高アノマリーの空間分布。コンターの間隔は6 cm。

Fig. 10 The time sequence of spatial patterns of sea level anomalies are displayed with contour interval of 6cm.

3 結果

図10.a-fは17ヶ月平均からの海面高アノマリーを水平空間上に図示したもので、コンターは6 cmである。各図右上に示された期間の平均の海面高アノマリーだが、1986年11月終わりから12月下旬までの1ヶ月間で赤道太平洋の西部から中部にかけて正のアノマリー領域が非常に組織的な成長をしている様子がわかる(a-c)。更にc-eを見るとその正のアノマリー領域が減衰しながら東進しているように見える。e-fではこの様子が停滞している。解析期間中でこのような組織化されたアノマリー領域の形成は他に見られず、特異であったことがうかがわれる。また、正のアノマリーがもっとも発達した図10.cにおいて、その分布が160°Wを中心に東西方向に対称になっていることも興味深い。

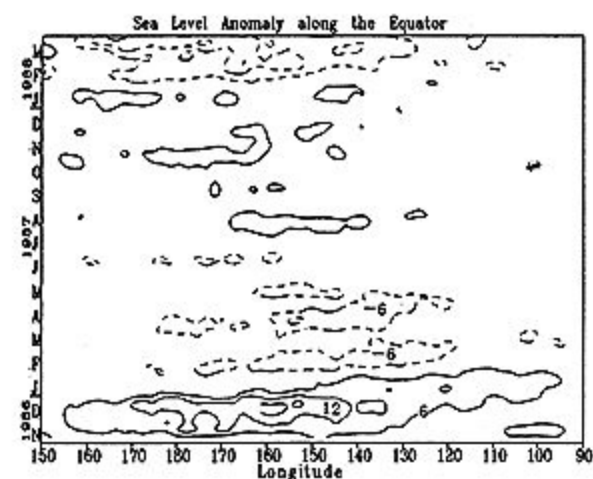


図11 赤道上の海面高アノマリー(cm)を経度と時間の関数として表した図。

Fig. 11 Sea level anomaly (cm) along the equator as a function of time and longitude.

図11は赤道に沿っての海面高アノマリーを横軸に経度、縦軸に時間をとって表したものである。実線部分が正の領域を破線部分が負の領域をそれぞれ示している。今度もコンターは6 cmだが、精度上正負が確かでない±0 cmのコンターはここでは引いていない。図10で示されたように1986年11

月から12月にかけて正のアノマリー領域が形成され、東進（図では傾斜）している様子が見える。また1987年7月頃から1988年1月にかけての正のアノマリー領域を一連の流れと考えたとき、何か階層的な構造をしているように見ることもできる。

図12.a-fは各図右上に示した位置における海面

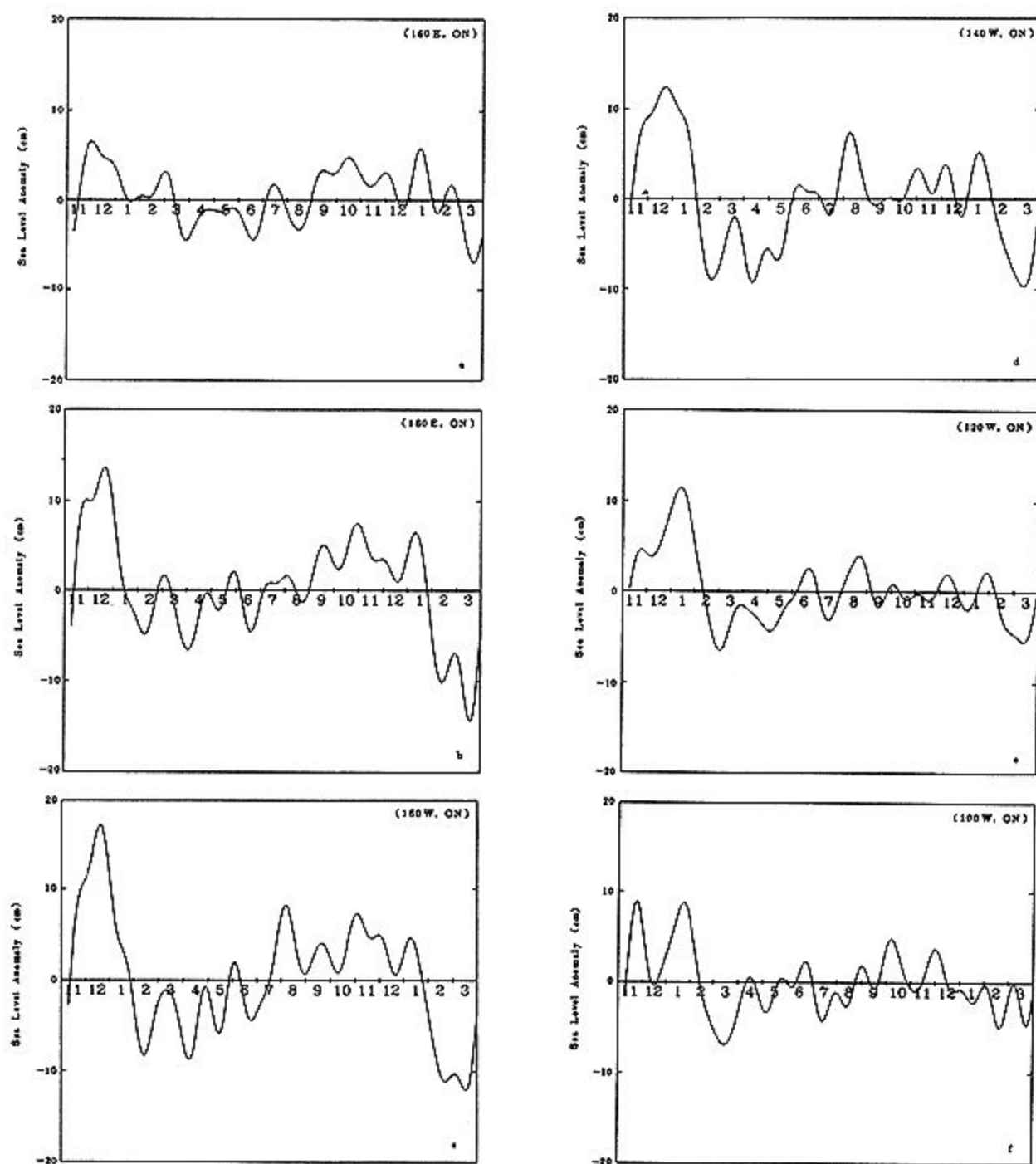


図12 海面高アノマリー (cm) の時間変化。

Fig. 12 Sea level anomaly time series.

高アノマリーを横軸に時間(月)をとって示したもので、これはちょうど図11をそれぞれの場所で縦方向に切った場合の断面に相当している。ただし、ここでは格子間隔 $10^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、時間間隔3日のデータセットを用いている(前章参照)。

1986年11月から12月にかけて 180°E から 160°W を中心に正の海面高アノマリーが成長していることが当然ここでも見られる。更に、西側(a-c)では1987年の8月頃から1988年1月まで正の領域となりその後負への変化をしており、その1月から2月への変化の様子(傾き)は1986年12月から1987年1月へのそれとよく似ている。両者の違いは正のアノマリーの大きさであると言える。一方、東側(e-f)は1987年3月以降海面変動の振幅は弱く、1986年から1987年にかけてのアノマリーの変化は特に東部赤道太平洋で特異であったことがわかる。

ここで1986年の正のアノマリーの動きについて少し詳しく調べる。例えば動きの速さを計算しようとする場合図11の傾きをどうとるかによって大きく変わってしまう。

Position	Correlation coefficient — 160°W	lag (days)	phase velocity (m/s)
160°E	0.62	-1	—
170°E	0.84	-1	—
180°E	0.93	-2	—
170°W	0.98	0	—
150°W	0.98	1	—
140°W	0.88	5	5.1
130°W	0.75	10	3.9
120°W	0.59	18	2.9
110°W	0.47	22	2.9
100°W	0.40	26	3.0

表1 赤道上における 160°W との間の相関係数、ラグ(日)、位相速度(m/s)。詳細は本文参照。
Table 1 Correlation coefficient, time lag (days), phase velocity (m/s) to 160°W on the equator. See text for explanation.

表1には赤道上における 160°W と他の場所(160°E ~ 100°W , 10° 間隔)との間で、図12に示した海面高アノマリー値を時間の関数とした場合で、両者の相関係数、タイムラグ、それにより計算される位相速度が記されている。 160°W と 170°E ~ 150°W

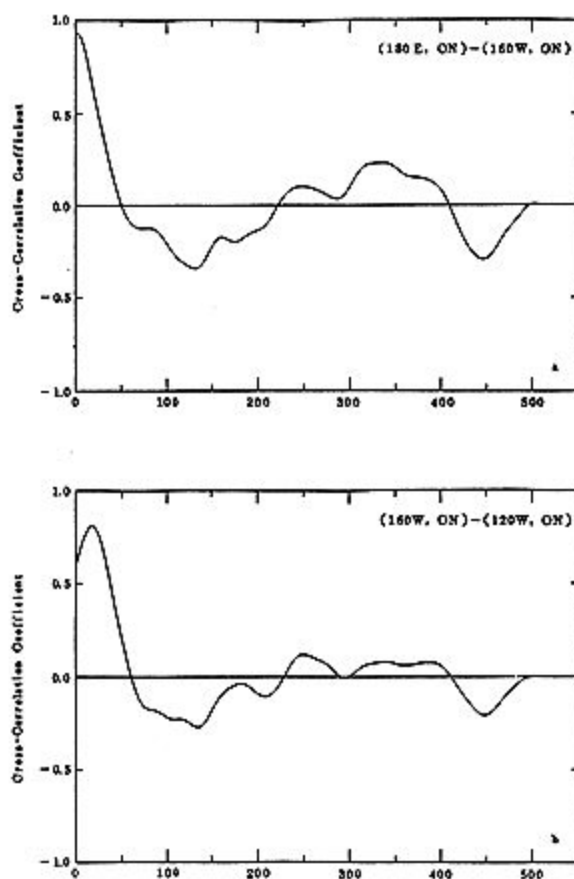


図13 赤道上における2つの点での相互相関係数
(a) 180°E と 160°W , (b) 160°W と 120°W

Fig. 13 Cross-correlation coefficient between 160°W and 180°E (a), 120°W (b).

との相関係数を見ると0.9以上と非常に高い。 160°W と 180°E の相互相関係数を求めたものが図13.aに示されている(一番最初のピークが現れるところが表1に記されたラグであり、単に相関係数と言えはラグ“0”のところでの相互相関係数に相当する)。そのピークはタイムラグが2日のところに出て、元のサンプリング間隔が3日であることを考えるとそれは有意であるとは言えない。つまり両領域はほぼ同時期に正のアノマリーが形成されたと考えられる。 160°W と 160°E との間においても相関係数はそれほど高くないがラグ値から同様のことが言える。DEPの 165°E の正のアノマリー形成の先行はここでは見られない。

それに対して、 140°W から 100°W へと東へ行くに連れて相関係数が減少していることがわかる。図13.bには 160°W と 120°W との相互相関係数が示され

ているが、今度は18日のところにピークが出ている。表1に示されたピークの位置を示すラグの値を見ると東に行くに連れて大きくなり、それにより計算される位相速度はほぼ一定(3 m/s)となっている。こうして、正のアノマリーが相速度3 m/sで東へ伝播していったことが示された。参考までに140°Wと100°Wでの値を比較すると、相関係数0.53, ラグ16日, 位相速度3.2m/sとなり, 上述と同じ結果になる。

最後に、全解析領域の17ヶ月間平均の海面高変動成分を示したのが図14である。尚、これはあくまでも平均変動であり、前章の精度rms=5.6cmがここでは適用されないことに注意する。この時期赤道から3°Nを中心に赤道に沿って強い変動領域があったことが見られる。また、10°N付近にも経度線に沿って強い変動領域が見られる。更に東部太平洋の南半球側では変動が非常に弱く力学的に安定している様子がわかる。

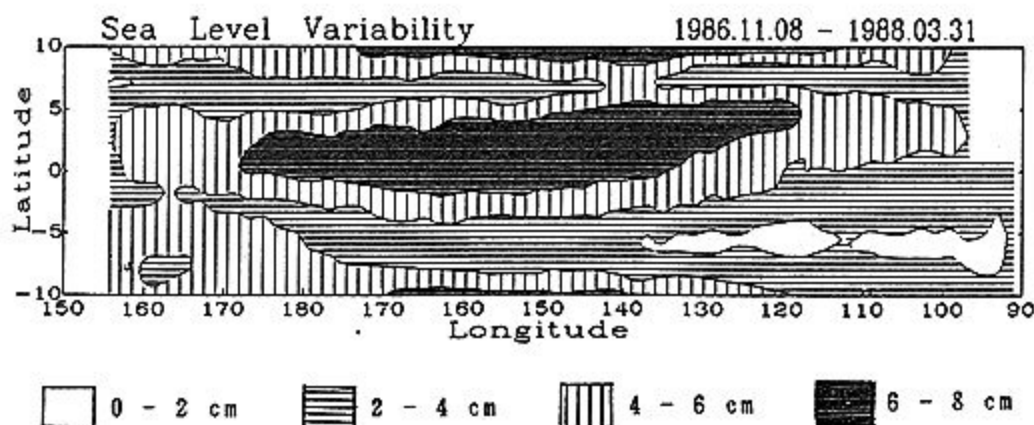


図14 17ヶ月平均の海面高変動値

Fig. 14 Sea level variability from November 1986 to March 1988.

4 結 論

1986年11月から1988年3月までの17ヶ月間で、アルチメータ・データを用いて赤道太平洋の海面高変動を調べることににより得られた結果をまとめると次のようになる。

- ① 1986年11月から12月にかけて、160°Wを中心に広い範囲で正のアノマリー領域が形成され、その後位相速度3 m/sで東で伝播した(これはDEPの結果と165°Eでの先行を除いてほぼ一致する)。
- ② 上述①のアノマリー領域の形成を水平空間上に図示することでその形成過程が空間的に組織化されたものであることが見られた。
- ③ 海面高の変動は赤道域で大きく、西・中部赤道太平洋域は東部赤道太平洋域よりも海面高変動において敏感である。1986年から1987年への正のアノマリーの存在は特に東部赤道太平洋で特異であった。

このように、強い正のアノマリーが特に東部赤道太平洋で特異であること、正のアノマリー域が東進したことを考えると、西・中部赤道太平洋域での強い正のアノマリー領域の形成がエル・ニーニョ現象の発生に深く関係していたと考えられる。また、図12.a-cを見る限り形成期間がその強い正のアノマリー域が形成されるのであれば、1ヶ月でも十分であると言える。また、その短期間に図10に示されたように組織的に形成されたわけである。

尚、これらはあくまでもアルチメータ・データだけを用いて解析を行った結果であり、実際にはこれらを例えばCTD観測データのような他の海洋観測データと比較してみなければならない。宗山ら(1990)⁹⁾のNOAAの衛星によるSST(海面水温)データの解析結果では同時期に東進するケルビン波らしきものが見つかっているが、ここでの結果

と比較すると1ヶ月のタイムラグ(海面高アノマリーが先行)が見られ、興味ある。今後、海面高の変動が大気・海洋のどのような因子と関係しているのかを中心に解析を進めていくつもりである。

謝 辞

本研究を行うにあたり、データを提供して頂いた東京大学海洋研究所の瀬川爾朗教授、福田洋一博士に御礼を申し上げます。

また、様々な助言をして頂いた宗山敬博士、中本正一郎博士、安藤健太郎氏、河野健氏そしてMTデータ処理を教えて頂いた浅沼市男氏に感謝致します。

参考文献

- 1) Cheney, R. E., B. C. Douglas, and L. Miller: Evaluation of GEOSAT Altimeter Data with Application to Tropical Pacific Sea Level Variability. *J. Geophys. Res.*, 94, 4737-4747 (1989)
- 2) Delcroix, T., G. Eldin, and J. Picaut: GEOSAT sea level anomalies in the western Pacific during the 1986-87 El Nino, elucidated as equatorial Kelvin and Rossby waves. *Proceeding of the Western Pacific International Meeting and Workshop on TOGA-COARE*, Noumea; May 24-30 (1989)
- 3) Picaut, J., B. Camus, T. Delcroix, M. J. McPhaden, and A. J. Busalacchi: Surface Equatorial Flow Anomalies in the Pacific Ocean during the 1986-87 ENSO Using GEOSAT Altimeter Data. *Proceeding of the Western Pacific International Meeting and Workshop on TOGA-COARE*, Noumea; May 24-30 (1989)
- 4) Milbert, D., B. Douglas, R. Cheney, L. Miller, and R. Agreen: Calculation of Sea Level Time Series from Noncollinear GEOSAT Altimeter Data. *Mar. Geod.*, 12, 287-302 (1989)
- 5) 今脇資郎, 西垣肇, 市川香: アルチメータ・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, 11, 25-37 (1989)
- 6) Cheney, R. E., J. G. Marsh, and B. D. Beckley: Global Mesoscale Variability from Collinear Tracks of SEASAT Altimeter Data. *J. Geophys. Res.*, 88, 4343-4354 (1983)
- 7) Cheney, R. E., B. C. Douglas, R. W. Agreen, L. Miller, and D. L. Porter: GEOSAT altimeter geophysical data record user handbook. NOAA Technical Memorandum NOS NGS-46, Rockville, Md, 29pp. (1987)
- 8) Brock, F. V.: A Nonlinear Filter to Remove Impulse Noise from Meteorological Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 3, 51-58 (1986)
- 9) 宗山敬, 黒田芳史, 安藤健太郎, 浅沼市男: 熱帯域海洋混合層における精密観測研究, 太平洋における大気・海洋変動と気候変動に関する国際共同研究報告書 (1990)

(原稿受理日: 1991年4月24日)