

# 海洋肥沃化装置「拓海」に係わる実海域計測

大川 豊\*、田村 兼吉\*、矢後 清和\*、前田 克弥\*、  
高井 隆三\*、安藤 祐友\*、國分健太郎\*、伊藤 和彰\*、  
新富 恭子\*

Field Measurements on Ocean Nutrient Enhancer “TAKUMI”

by

Yutaka OHKAWA、Kenkichi TAMURA、Kiyokazu YAGO、Katsuya MAEDA、  
Ryuzo TAKAI、Hirotomo ANDO、Kentaro KOKUBUN、Kazuaki ITOH  
and Kyoko SHINTOMI

## Abstract

TAKUMI project is one of the development researches of the Marino-Forum21. National Maritime Research Institute is taking charge of acquisition and analysis of field data. We report the outline of measurement and some results of data analysis.

The Ocean Nutrient Enhancer “TAKUMI” is a SPAR type floating structure with a riser pipe. By pumping up the Deep Ocean Water (DOW) containing rich nutrient, and sprinkling near the sea surface, plankton is made to increase and it aims to form a good fishing ground. TAKUMI was installed in the Sagami Bay in May 2003 and is still working now. TAKUMI has several measuring equipments, for example, wave height meters, wind sensors, DGPS, gyroscope, accelerometers and strain gauges on the riser pipe. In this report, we explain the way to measure and storage the data on the sea, at first. Secondly, we show typical preliminary analyzed data. Then, we present some detailed analysis data, i.e. the movement of TAKUMI, strain of riser pipe, wave and wind condition. For detailed analysis, we have developed some new analysis methods. The motion of the center of gravity can be calculated from the data of accelerometers and gyroscope. The mean wave period of wind-wave and swell can be obtained by using a simplified estimation method based on nonlinear programming method. As a result, some new findings are obtained as follows. 1) The position of TAKUMI strongly depends on the current change. 2) The strain of riser pipe strongly depends on roll and pitch motion, though there is little correlation between the strain and the current. 3) The wind speed at TAKUMI is twice as high as that along the shore, and the turbulence of wind is very small. These data and analysis are useful not only for the improvement of TAKUMI but also for development of the new ocean engineering apparatus, such as wind-farm on the sea.

---

\* 海洋開発研究領域

原稿受付 平成17年11月30日  
審査済 平成18年 2月 6日

## 目 次

1. 緒言	2
2. 実験の全体概要	3
2. 1 概要	3
2. 2 浮体の概要及び設置位置	3
3. 計測装置と計測方法	4
3. 1 計測装置	4
3. 2 データ収録装置	7
3. 3 データ変換と解析の流れ	7
4. データの取得状況	7
5. 一次解析とその結果	8
6. 二次解析	37
6. 1 6自由度の運動と任意点の変位	37
6. 2 移動状況と範囲	38
6. 3 ライザー管の歪み	39
6.3.1 出現頻度	39
6.3.2 長期予測	39
6.3.3 浮体動搖影響	39
6.3.4 海象影響	40
6. 4 波浪場	41
6.4.1 推定方法	41
6.4.2 統計データとの比較	42
6. 5 風場	44
6.5.1 風向の修正と付近の観測地との比較	44
6.5.2 風速の変動性	45
6.5.3 出現頻度分布	46
6.5.4 ヤング風速計との比較	46
7. まとめ	47
謝辞	48
参考文献	48
付録 研究発表リスト	49

### 1. 緒言

近年、世界の漁獲量は頭打ち状態か減少傾向にあり、我が国の漁獲量も 1988 年の 1,200 万トン台をピークに 2002 年には 588 万トンまで落ち込んでいる。この主たる原因是、獲りすぎによる資源枯渇と漁業環境の劣化による生産機能の低下と考えられており、漁場の修復や新たな漁場の開拓が求められている。

世界の魚類生産を見てみると、大規模な沿岸湧昇流が発生する海域が 0.1% 程度あり、そこでの生産が約半分、残りの半分は沿岸域で生産されると推定されている。湧昇流は低温で栄養塩豊富な深層の海水を表層の有光層にもたらし、食物連鎖の出発点となる植物プランクトンを増加させるため、良い漁場をもたらすと考えられている。

漁場の造成や改善のために、人工的に湧昇流を発

生させる工夫がいくつかなされている。人工の海底山脈の造成<sup>1)</sup>や、大型廃船を海底に沈める<sup>2)</sup>などして湧昇流を励起させようとするものである。これらは大陸棚以浅の海域に適用できる方法と考えられる。他の方法として、大陸棚以深の海域で直接的に海洋深層水を汲み上げ、有光層に撒いて海域全体を肥沃化しようということが考えられた。これが「拓海」での試みである<sup>3)</sup>。

同様の試みは 1989 年に富山湾において行われている。しかしその実験では、単に深層水を汲み上げて表層に撒いただけであり、実海域計測においても有意な効果を見いだせなかった。「拓海」では深層水と表層水を混ぜ、海面下約 20m に密度流として拡散させる方法を探った。このことにより、深層水の栄養塩類が有光層に長時間滞留することを期待したものである。



図 1.1.1 海洋肥沃化装置「拓海」概念図

「拓海」は図 1.1.1 に示すように、スパー型と呼ばれるブイに約 175m の鋼製取水管(ライザー管)を垂下した浮体構造物である。このようなハンギングオフ状態のライザー管は浮体の運動や流れによって VIV (Vortex Induced Vibration、渦励振)を誘発する可能性がある。今後、海洋資源利用や深海掘削等を行う上で、このようなライザー管の挙動解明は必須であり、特別研究「大水深ライザーシステムの安全性に関する研究」を実施中である。

「拓海」のライザーパイプはやや短いとはいえるが、実海域における実機の応力計測が出来るまたとない機会である。そこで、元々計測の計画がなかった「拓海」のプロジェクトに、ライザーパイプの歪みと吊り荷重を計測することを提案した。応力計測だけでは外力条件がわからぬので、浮体の運動、波、風、流れなどの計測も必要となる。流れの計測はプロジェクトの計画にあったが、その他のものは、海上技術安全研究所(以下、海技研)の手持ちの計測機器を持ち込んで計測することを提案した。これにより、「ポセイドン」やメガフロート等で培ってきた海技研の実海域計測技術を活かし、更に保持・発展させることができると考えた。

一方、近年、海洋でのエネルギー利用の一つとして、洋上風力発電の研究が盛んになってきている。日本近海における風況の予測には、現状ではSSM/I衛星からの推定値と沿岸での観測値を組み合わせたマップ<sup>4)</sup>や、NEDOが公開している気象予測の数値計算モデルによる局所風況マップなどがあるが、洋上の定点に於いて長期間実測されたデータは極めて少ない。したがって「拓海」での風観測は、洋上風の特性を把握する上で極めて貴重なデータとなりうる。また、衛星からのリモートセンシングにおいて陸域の影響を受けにくい相模湾中央という位置におけるデータは、衛星による風況推定の検証データにもなりうる性質を持つと考えられる。

以上のように、「拓海」での実海域計測には多くの意義とメリットがあり、今後の研究に活かすことが出来ると思われたので、積極的に参加し、計測を受け持つことにした。

## 2. 実験の全体概要

### 2.1 概要

拓海のプロジェクトは、農林水産省所管の社団法人マリノフォーラム21(以下MF21)の補助事業の枠組みで、2000年度より「深層水活用型漁場造成技術開発」として開始された。この事業は、拓海の製作・設置・運用等を行う機器開発WGと、運用の効果を水産および海洋学の面から調査検討する情報・効果調査WGで構成されている。海技研は機器開発WGに2002年度よりオブザーバーという形で参加し、拓海の水槽模型試験やライザーパイプの応力計測を担当した。また、機器開発WGからの要請に応えて実験海域の気象・海象や拓海自身の動搖およびライザーパイプの歪みデータ等を計測することになり、MF21と共に共同研究契約を結んだ。この共同研究はMF21を介した研究コンソーシアムであり、参加メンバーは海技研の他、(株)大内海洋コンサルタント、(株)IHI マリンユナイテッド、東亜建設工業(株)、

JFEエンジニアリング(株)である。

拓海は常時無人で運転されるため、拓海自身の健全性や深層水の汲み上げ状況などを示すデータが、1時間毎に神奈川県水産技術センターに無線通報され、関係者にメール配信されている。これらの一般的なデータについては機器開発WGのメンバーで共有を図っているが、海技研の計測したデータは、概要的なデータはプロジェクトメンバーに公開するものの、詳細なライザーパイプ歪みデータ及び気象・海象データ等については、研究コンソーシアム参加メンバーのみで共有することとした。

拓海は2003年5月に相模湾中央部の水深約1,000mの地点の海上に設置され、5月23日より水深約200mから約10万m<sup>3</sup>/dayの深層水を汲み上げ、20万m<sup>3</sup>/dayの表層水と混ぜて水深約20mの有光層に30万m<sup>3</sup>/dayを放出している。汲み上げポンプの電力は、計画当初は海洋温度差発電が検討されたが、発電用ディーゼルエンジンによっている。そのため、1ヶ月に1回の通船によるエンジン等の点検と、3ヶ月に1回の燃料油の補給を受けて運用された。第1タームの実験は2005年1月18日にエンジンを停止して終了した。この間、情報・効果調査WGによる観測船を利用した海洋調査が数回行われ、深層水を含む水塊が有光層に滞留していることなどを確認した。

なお、2005年4月より3年間の予定で「海洋肥沃化システム技術確立事業」という第2タームの事業が開始されており、海技研は直接MF21からの研究受託という形でこれに参加している。

### 2.2 浮体の概要及び設置位置

図2.2.1に浮体の概略図を示す。また、表2.2.1に主要目を示す。

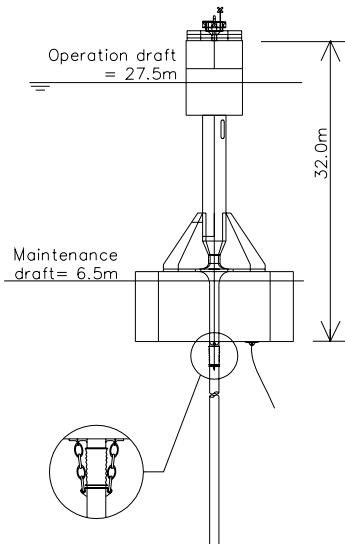


図2.2.1 拓海概略図

表 2.2.1 主要目

Total Height	Abt. 210 m
Maximum Breadth	16.8 m
Height of Float	32.0 m
Draft of Float	27.5 m
Length of Riser	175.0 m
Displacement	Abt. 1,700 t
Diameter of Top deck	6.0 m
Diameter of Column	2.5 m

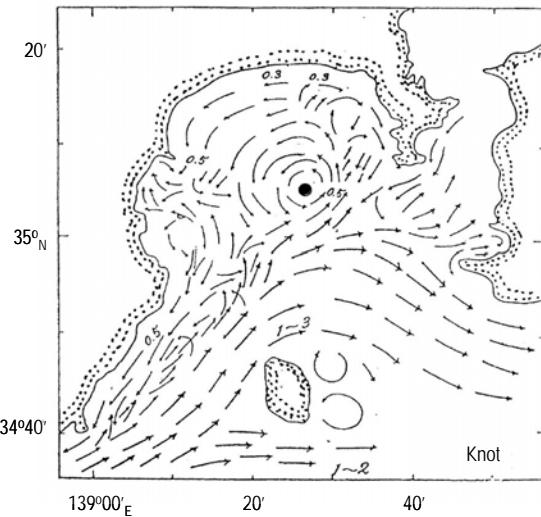


図 2.2.2 設置海域

深層水取水用のライザーパイプは図 2.2.1 の○中に詳しが示されているように、2 本のチェーンで浮体本体から吊られている。深層水が通る部分はフレキシブルジョイントで本体と繋がれている。これは浮体の動搖がライザーパイプに、またライザーパイプの動搖が浮体にできるだけ伝達しないようにするための構造である。

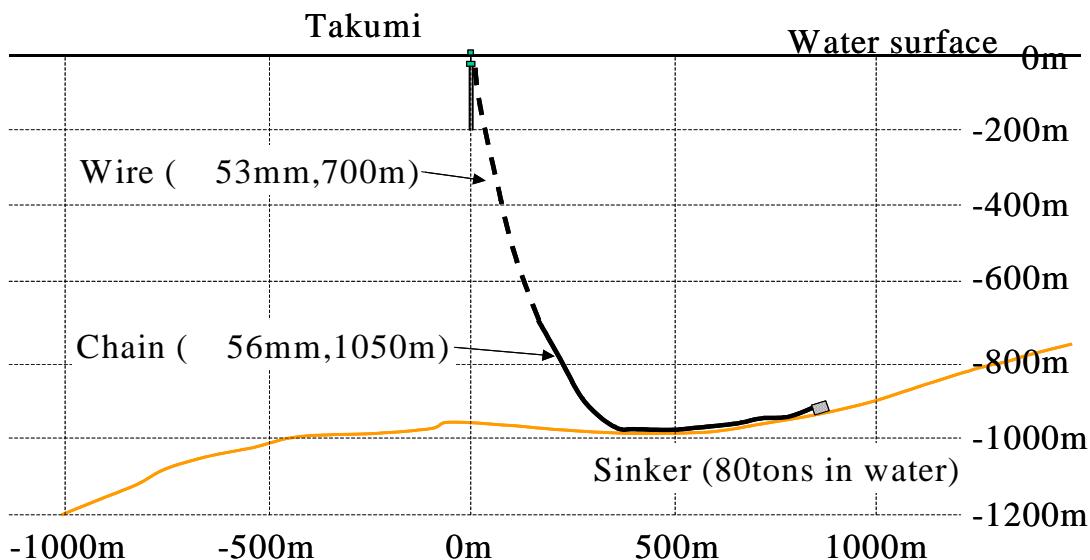


図 2.2.3 係留レイアウト

拓海は図 2.2.2 に示す相模湾中央部に 1 点係留により係留されている。図中、●印はアンカーワンを示しており、また、矢印は相模湾内の平均的な潮流方向を示している。図から分かるように、拓海は汲み上げた深層水の拡散・希釈ができるだけ防ぐように、相模湾内の還流のほぼ中心部に設置している。係留は図 2.2.3 に示すような水中重量 80 トンのシンカーにチェーン及びワイヤーで構成された係留索を用いている。なお、設置海域の水深は約 1,000m である。

### 3. 計測装置と計測方法

#### 3.1 計測装置

海上技術安全研究所が拓海に搭載した計測センサーおよび計測装置は以下の装置であり、図 3.1.1 に示す位置に配置した。左図は計測室内の配置図で右図はデッキ上のものである。以下にそれぞれの計測機器について記載する。

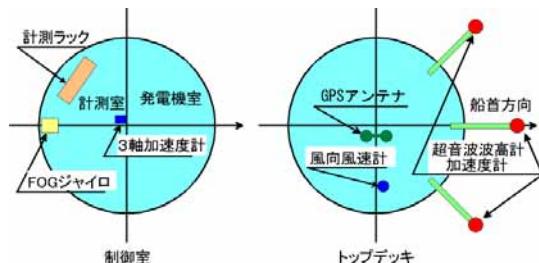


図 3.1.1 計測装置の配置

(1) 空中発射型超音波式波高計 3 台 US-500

(株式会社カイジョーソニック)

図 3.1.1 右図および写真 3.1.1 に示す様に、拓海の外側に約 1.5m の腕を出し、船首およびそれより 45° 左右に振った方向の腕の先に波高計センサー各 1 台を設置した。

計測範囲 : 0m ~ 10m

応答速度 : 0.125 秒

測定精度 : 2.5mm



写真 3.1.1 波高計

(2) 波高計用サーボ式加速度計 3 台

ASQ-CB2CB (株式会社共和電業)

相対波高から絶対波高を出すときに使う物であり、波高計センサーに各 1 台を設置した。

定格容量 : ±2G

非直線性 : ±0.03%RO 以内

ヒステリシス : ±0.05%RO 以内



写真 3.1.2 加速度計

(3) 超音波式風向風速計 (2 軸)

MA-131 (英弘精機株式会社)

甲板上に標準喫水時の海面から 10m の高さとなるように測風ポールを立て、その上に風速計の北が船首方向と一致するよう設置した。

測定範囲 : 0 ~ 56.3m/s

応答速度 : 0.35 秒

測定精度 風速 : 0.135m/s 又は読みとり値の ±3%

50m/s 以上では ±5%

風向 : ±2°



写真 3.1.3 超音波式風向風速計

(4) ヤング風向風速計 No.7270-00 (2004 年 9 月搭載)

設置高さ及び方法は超音波式風向風速計と同様である。

測定範囲 : 0 ~ 50m/s

測定精度 風速 : 10m/s 以下で 0.5m/s 以下。10m/s を超えた時、指示値の 5% 以下

風向 : ±5°



写真 3.1.4 ヤング風向風速計

(5) FOG 姿勢計測装置 JCS7401A (日本航空電子工業株式会社)

浮体の横揺及び縦揺計測用に計測室内に設置。

計測範囲

ロール・ピッチ角 : ±45°

相対方位角 : ±180°

最大角速度入力 : ±100° /s

最大加速度入力 : ±19.6 m/s<sup>2</sup> (2[G])

分解能 角度 : 0.2° max(Analog)

角速度 : 0.2° /s max

加速度 : 0.098 m/s<sup>2</sup> max

(0.01[G])



写真 3.1.5 FOG 姿勢計測装置

(6) 3 軸 サー ボ 式 加 速 度 計 MA200-02  
MA101-02、(日本航空電子工業株式会社)

浮体の前後・左右・上下方向の変位を求めるため、浮体中央部に 3 軸方向の加速度を計測。

MA200-02(JA5) (前後・左右方向加速度 (surge, sway) 用)

測定範囲 :  $\pm 2G$

直線性(F.S.) :  $\pm 0.01\%$

周波数応答( $\pm 3\text{dB}$ ) : DC ~ 500Hz 以上

分解能(DC) :  $1 \times 10^{-6}G$  以下

MA101-02 (上下方向加速度 (heave) 用)

測定範囲 :  $\pm 2G$

直線性(F.S.) :  $\pm 0.15\%$

周波数応答( $\pm 0.5\text{dB}$ ) : DC ~ 100Hz

分解能(DC) :  $1 \times 10^{-4}G$  以下



写真 3.1.6 3 軸 サー ボ 式 加 速 度 計

(7) 歪み計アンプ

(8) シグナルコンディショナー

機器開発 WG が搭載し、データ解析上利用させてもらった計測センサーおよび装置は以下の機器である。

(1) 方位・位置計測機 (DGPS コンパス)

世界測地系の緯度、経度および拓海船首の方針が得られる。

ディファレンシャル補正は三浦の計測値で求めている。



写真 3.1.7 方位・位置計測機

(2) 流向流速計(ADCP)

通常は鉛直方向のプロファイルを求めるために使用するものであるが、本実験では水平方向に超音波を発射し、拓海の取付点から水平に 10m、30m、50m 離れた点の流向、流速を計測している。



写真 3.1.8 流向流速計

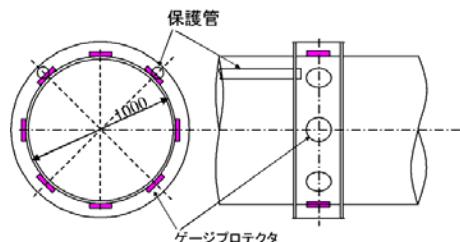


図 3.1.2 歪みゲージ取付位置

(3) 歪み計(ライザー管中央部)8 セット  
AWC-8B (株式会社東京測器研究所)

図 3.1.2 に示す位置にスポット溶接で取り付けられている。1ヶ所に 4 個のゲージを取り付け、4 ゲージ法で曲げひずみを計測している。歪み計取り付け位置の深度は約 110m である。

### 3.2 データ収録装置

データ収録は 32 チャンネルの AD 変換ボードを搭載した Factorial 仕様の PC で行った。サンプリング周波数 100Hz で毎正時-15 分から +15 分の 30 分間のデータを収録し、ハードディスクに保存した。GPS データは同計測時間となるよう同期をとり、別ファイルに保存した。これらのデータはほぼ 1 ヶ月ごとに行われる拓海の定期点検時や補油作業時に、ハードディスク交換という形で回収した。

### 3.3 データ変換と解析の流れ

収録されたデータは AD 変換されたバイナリーデータである。以後のデータアクセスを容易にするために、10Hz サンプリングの物理量データに変換し、DVD に保存した。これを用いて全てのチャンネルに対して 1 次解析（統計解析およびスペクトル解析）を行い、必要統計諸量を求めた。風向・風速については気象庁の観測値と比較する必要から、正時前 10 分間の平均値も求めた。風向と波向については船首方向を基準に得られるので、GPS の方位データにより補正した。

2 次解析は当面興味あるものとして以下の項目について行った。

- (1) 6 自由度の運動解析から、任意点の動搖量を求める解析
- (2) GPS データから拓海の移動状況と流れや風との相関を解析
- (3) ライザー管の歪みと海象および動搖との相関
- (4) 波浪場の特性の推定(特にうねりと風浪の分離)
- (5) 風場の特性調査と陸上風との相関

図 3.3.1 は計測結果から挙動・海象を得るためにブロック図を示している

## 4. データの取得状況

拓海は 2003 年 5 月 19 日に最終艤装を行った IHIMU 横浜工場より曳航され、相模湾中央部に世界でも例を見ない、アッセンディング工法に

よるライザー管の設置及び係留索の繋ぎ込みを行い、5 月 23 日より連続運転に入った。

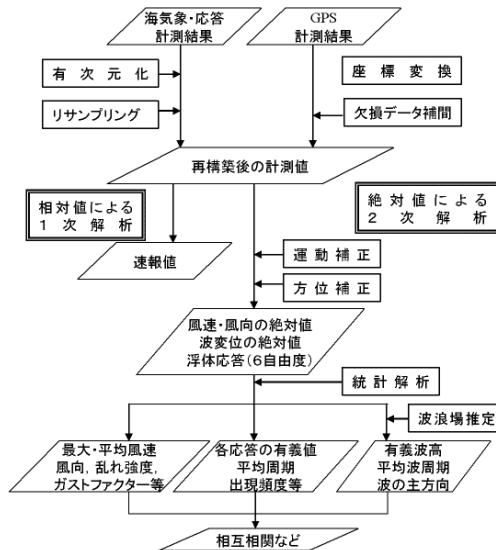


図 3.3.1 データ解析の流れ

定時データ計測は 6 月 10 日から開始し、第 1 ターム終了時の 2005 年 1 月 18 日まで行った。

計測期間中、種々の問題によりデータが取得出来ていない期間がある。表 4.1.1 に欠損データ時期とその原因を示す。なお、歪みゲージ 8 点のうち、No.8 に関しては、艤装時のケーブル損傷のため、当初よりデータ計測が出来ていない。

初年度、2003 年 9 月から翌年 3 月にかけて、PC 側の不調によりデータ計測が半年ほど出来ていない時期がある。この間、陸上に同様のシステムを組み上げて原因究明を行ったが、拓海で起きていた障害を再現することができず、また、AD ボード等の交換なども行ったが原因を特定するまでに至らなかった。最終的にデバイスドライバを 3 月に最新版の物に入れ替えたところ正常に動作するようになった。

また、2004 年 5 月 27 日にはエンジンの温度が異常上昇するトラブルが発生した。目視点検を行った際には目立ったケーブルの外傷が無かったが、エンジン運転再開後、内部ケーブルが溶解・短絡していたことが判明したため、ケーブルの交換を行っている。

いずれのケースにおいても、過去の実海域試験にはない常時無人であることから、データ異常の発見が遅れてしまうことや、容易に拓海に乗船できないことなどもあり、修復に時間がかかっている。

また、PC や各種計測機器は、その性能・精度は向上しているが、耐久性や耐候性の面では古いものに劣っている感もある。特に拓海のような塩害の被害を避けられない状況下での計測の場合には、計測機器の選定のみならず、計測環境を重要視する必要がある。

表 4.1.1 欠損データ一覧

欠損時期	データ名
原因	
2003/7/15 - 2003/8/19	波高計
アンプ異常	
2003/6/30 - 2003/8/7	風向風速計
計測データ異常	
2003/9/6 - 2003/9/19	風向風速計
計測データ異常	
2003/9/19 - 2004/3/25	全データ (期間内中、PC再起動後、2日程度は計測)
1) A/Dボードのデバイスドライバの不安定?	
2) PC自身の不安定?	
2004/5/27 - 2004/7/15	全データ
エンジン緊急停止(温度上昇)	
2004/7/15 - 2004/9/17	波高計
温度上昇によるケーブル損傷	
2004/10/9 - 2004/10/12	全データ
エンジン停止	
2004/10/11 - 2004/10/15	風向風速計
計測データ異常	
2004/10/21 - 2004/10/26	歪み4-8
アンプ異常	
2004/10/26 - 2004/11/18	全データ
エンジン停止	
2004/12/5 - 2005/1/8	風向風速計
計測データ異常	
2004/12/5 - H2005/1/8	歪み4-8
アンプ異常	

## 5. 一次解析とその結果

第 1 タームで取得したデータの 1 次解析結果として、図 5.1.1、5.1.2 に拓海の南北及び東西方向の移動量、図 5.1.3 及び 5.1.4 に船首方位及び拓海とアンカ一点との距離を示す。気象・海象計測値として、図 5.1.5、5.1.6 に潮流速度及び流向を、図 5.1.7、5.1.8 に平均風速、風向を、図 5.1.9、5.1.10 に相対有義波高及び波周期をそれぞれ示す。また、動搖計測結果として

図 5.1.11～5.1.14 に横搖及び縦搖の有義値と平均周期を、図 5.1.15～5.1.20 に前後・左右・上下方向加速度の有義値と平均周期を、図 5.1.21～5.1.28 に歪みを応力に換算した有義値と平均周期を示す。歪みは図 3.1.2 に示したとおり 8 箇所で計測を行っているが、No.5～8 については No.1～4 の対角線上での計測値であるため、計測データは正負が逆になっているだけである。そのため、ここでは No.1～4 の計測結果についてのみ示している。また、図 5.1.1 から図 5.1.5 は機器開発 WG で別途計測したデータである。

図 5.1.9 の相対波高以降の結果は、BT 法により算出したスペクトルから得られる有義値及びスペクトルモーメントから算出されるゼロアップクロスの平均周期である。

各図の横軸は日付であり、縦軸は各物理量を示している。また、図中灰掛けの箇所は拓海付近を台風が通過した日を表しており、「T0415」の記号は「2004 年の台風 15 号」の意味である。2004 年 5 月から 10 月にかけては 11 個の台風に遭遇している。

拓海の移動量に関しては東西方向に約 1km、南北方向に約 800m 程度移動している。また、船首方位に関しては、一定方向を向いているわけではなく、潮流や潮汐流の方向に立つ方向に向いていると考えられる。潮流速度は、平均 0.5m/s 程度であるが、希に「急潮」と呼ばれる 2.0m/s 程度の早い流れを観測している。平均風速は 8m/s 程度であるが、台風時においては 20m/s を越えるものも計測された。風向では概ね北東と南西からが卓越している。波高については夏季は 1m 前後、冬季は 2.0～2.5m 程度が平均的な値であるが、台風時や大きな低気圧の影響を受けた場合では有義波高で 10m 近くの値も計測されている。波周期については、5 秒前後の場合が多く、うねりよりも風浪による波が卓越していることが推測される。浮体動搖は横搖、縦搖とともに常時 2 度程度であるが、荒天時では 10 度以上の有義値を示している場合もある。一方、加速度については台風時で 0.3G 程度、通常時は 0.1G 程度であった。歪みの値に関しては、応力に換算して 100N/mm<sup>2</sup> を越えるデータも観測されており、予想よりも大きな値を示している印象を受けている。

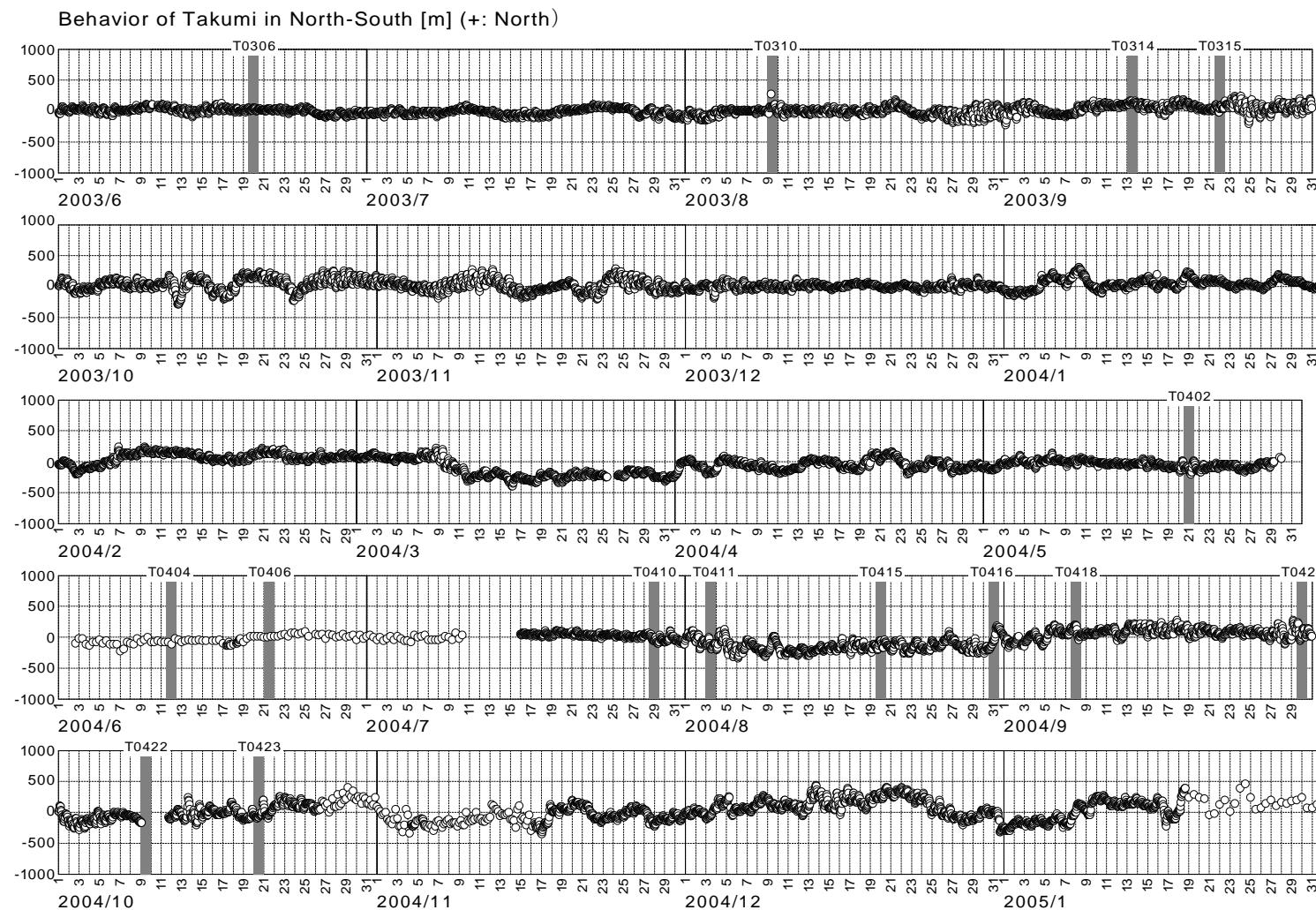


図 5.1.1 南北移動量

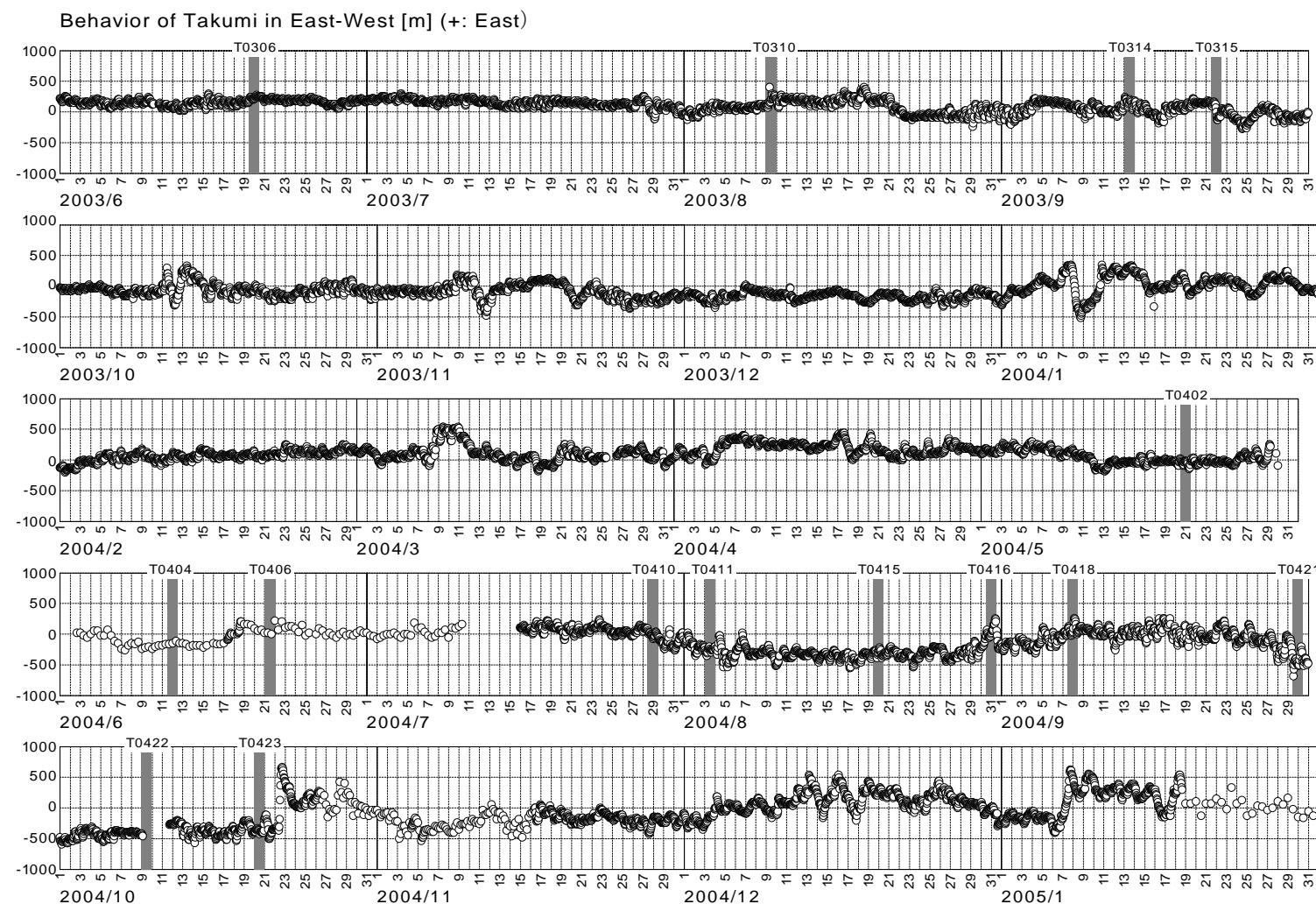


図 5.1.2 東西移動量

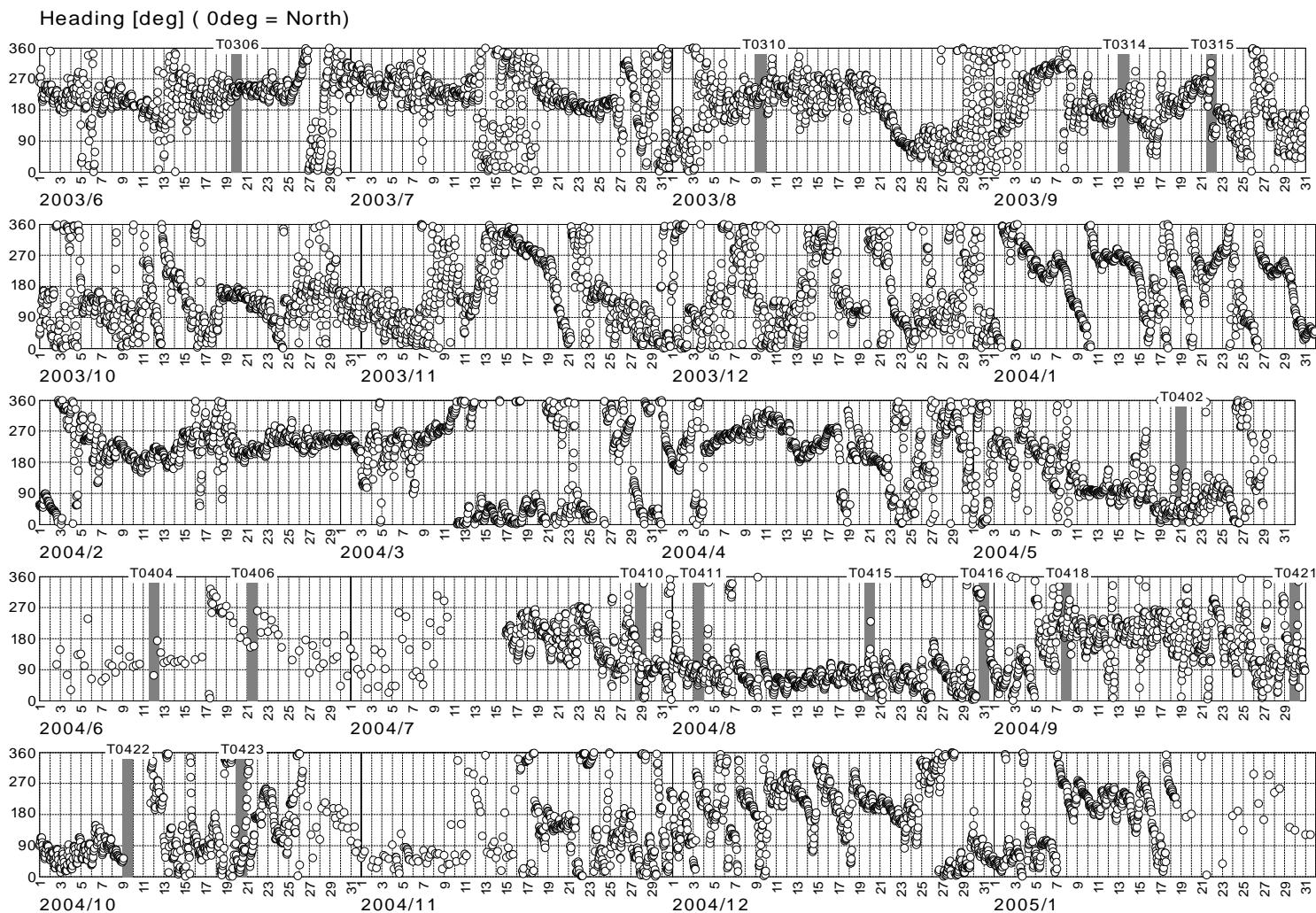


図 5.1.3 船首方位

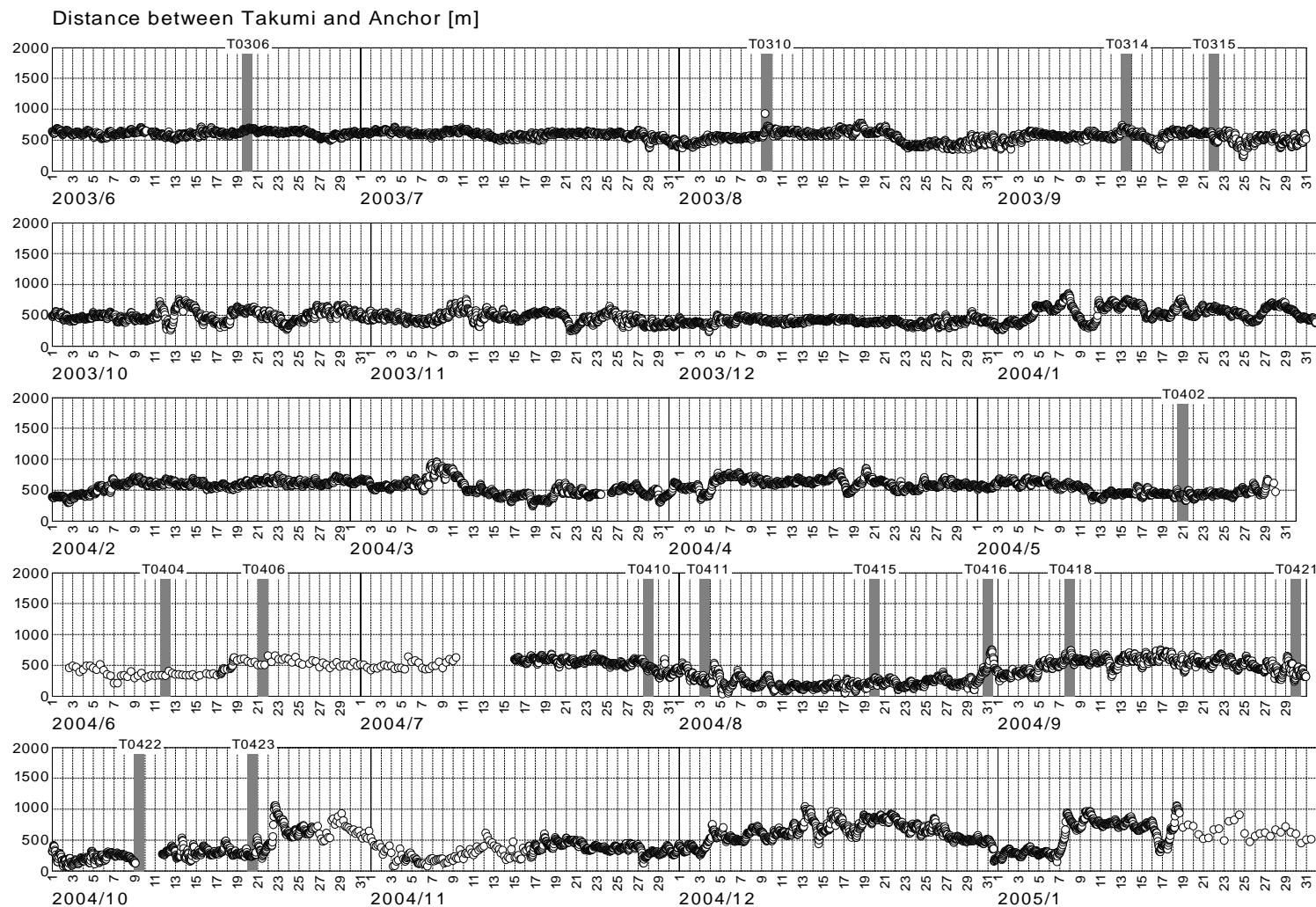


図 5.1.4 浮体とアンカー点との距離

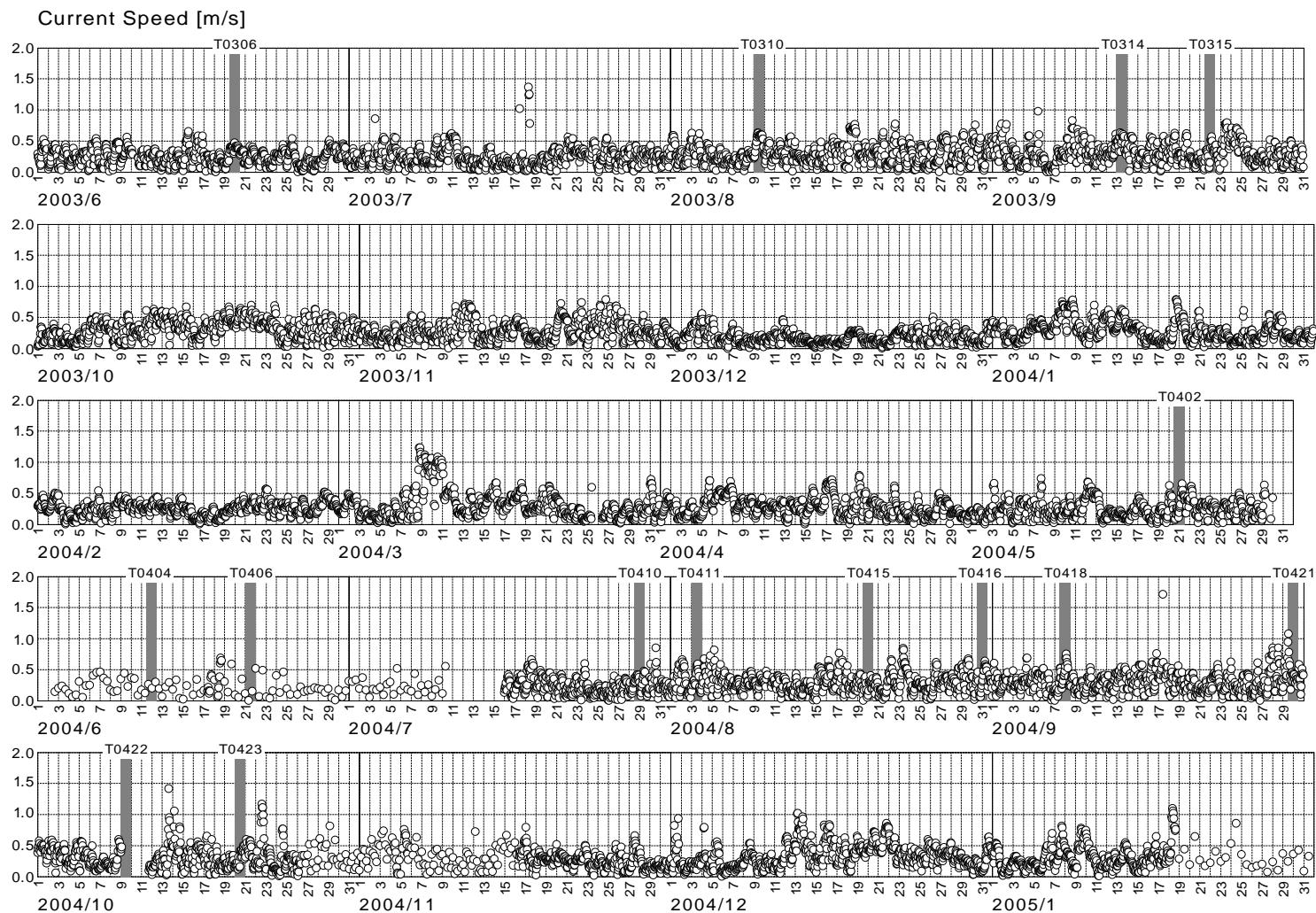


図 5.1.5 潮流速度(拓海から水平距離 10m の位置)

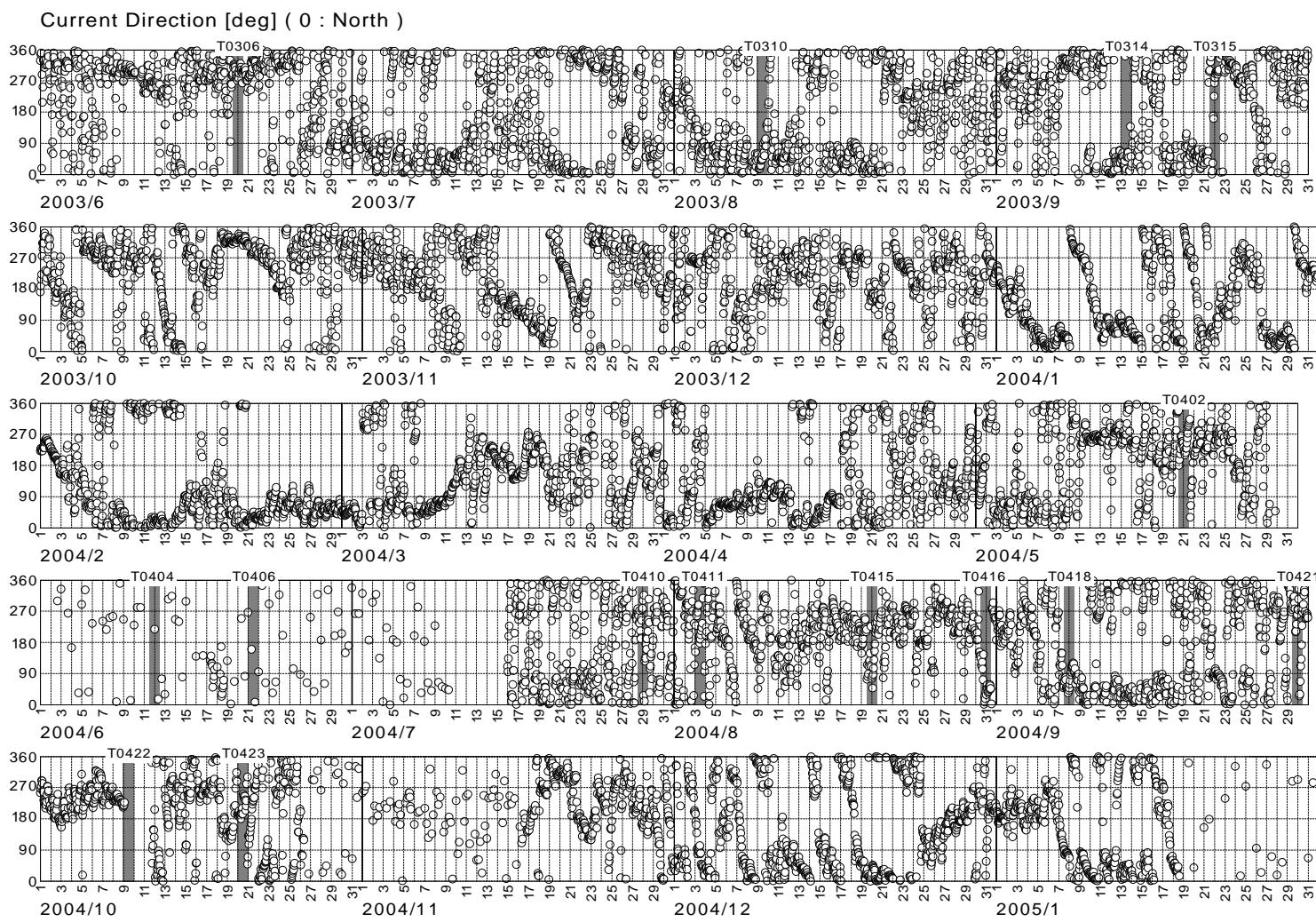


図 5.1.6 潮流方向(拓海から水平距離 10m の位置)

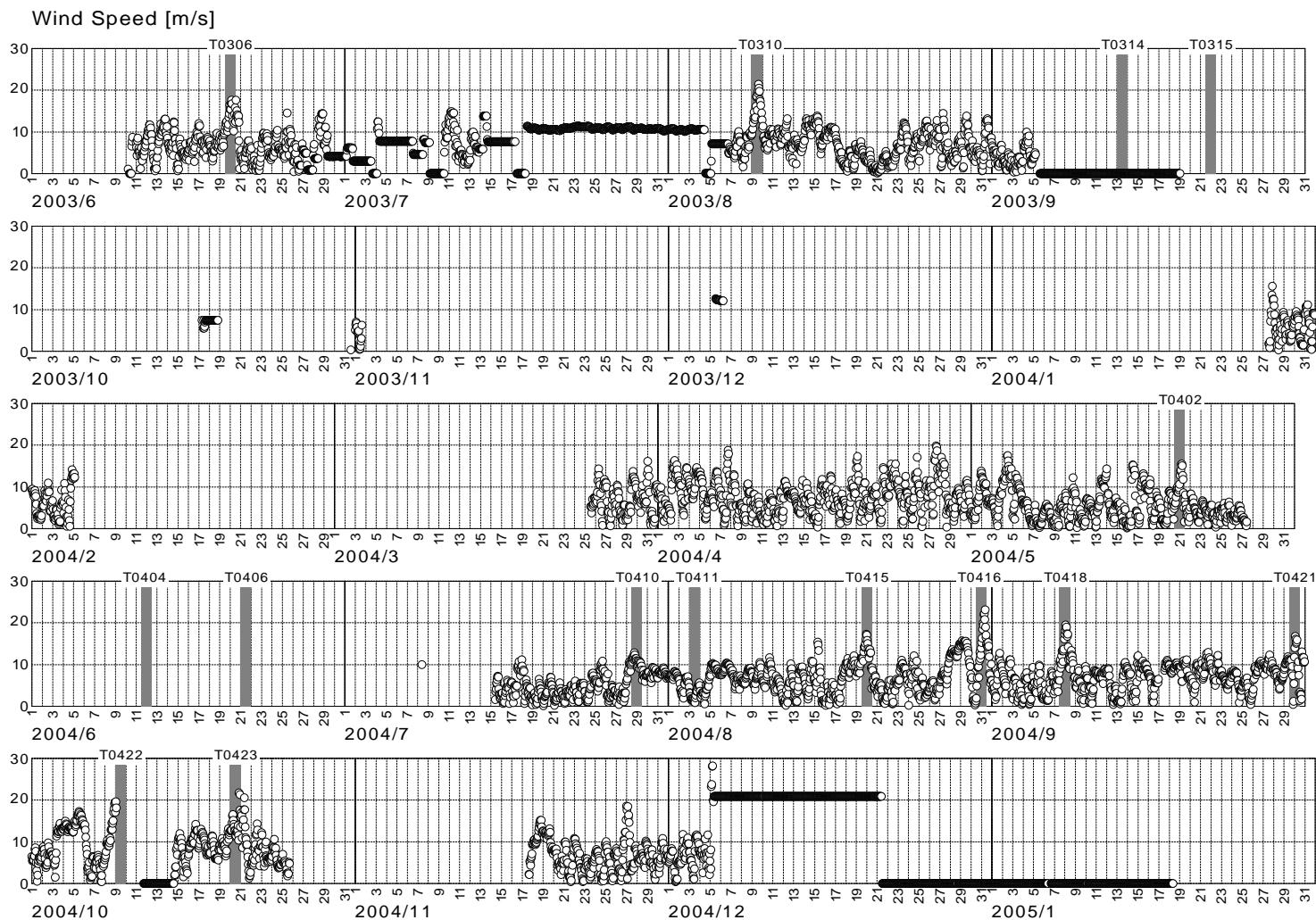


図 5.1.7 平均風速(海面より高さ 10m の位置)

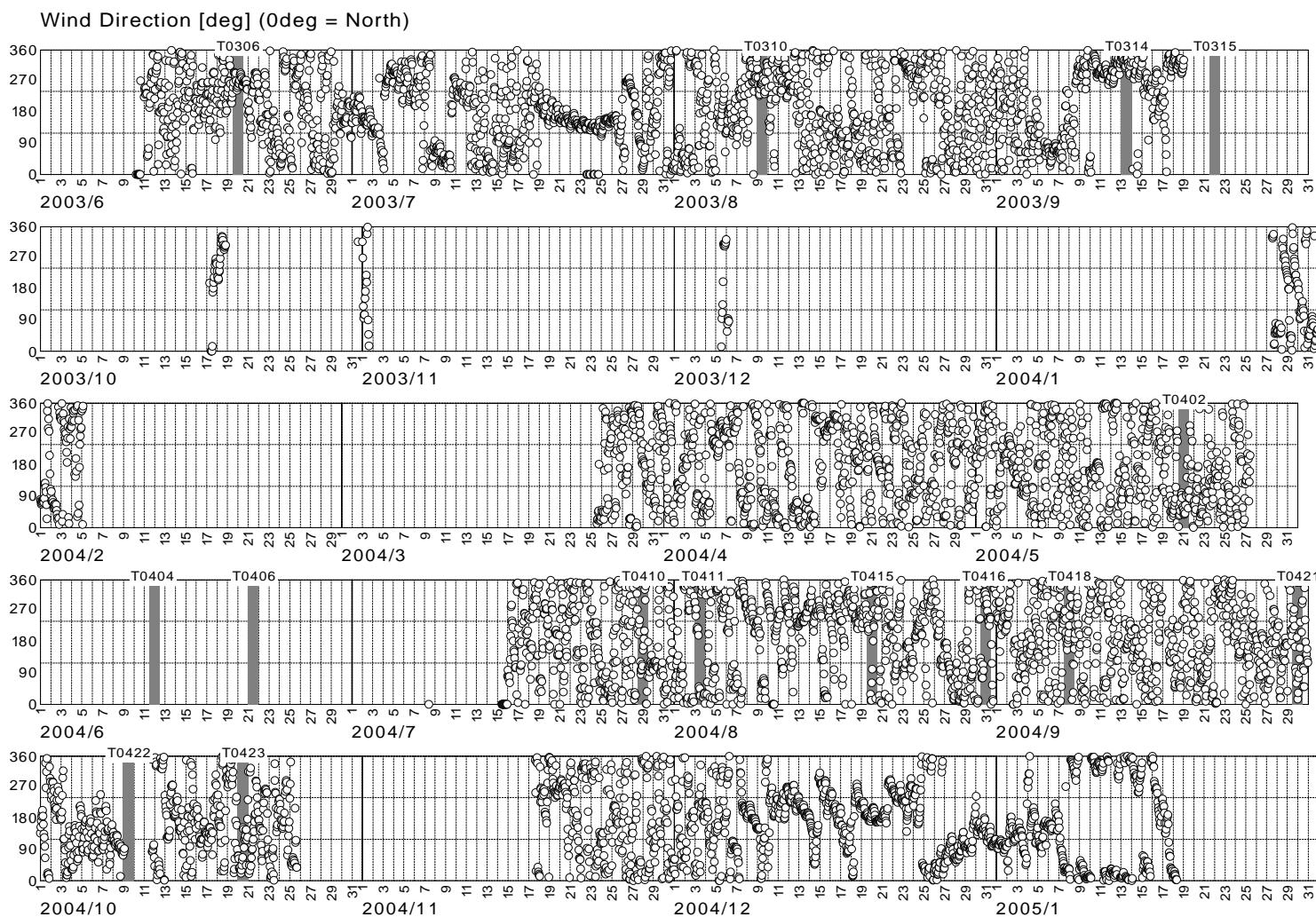


図 5.1.8 平均風向(海面より高さ 10m の位置)

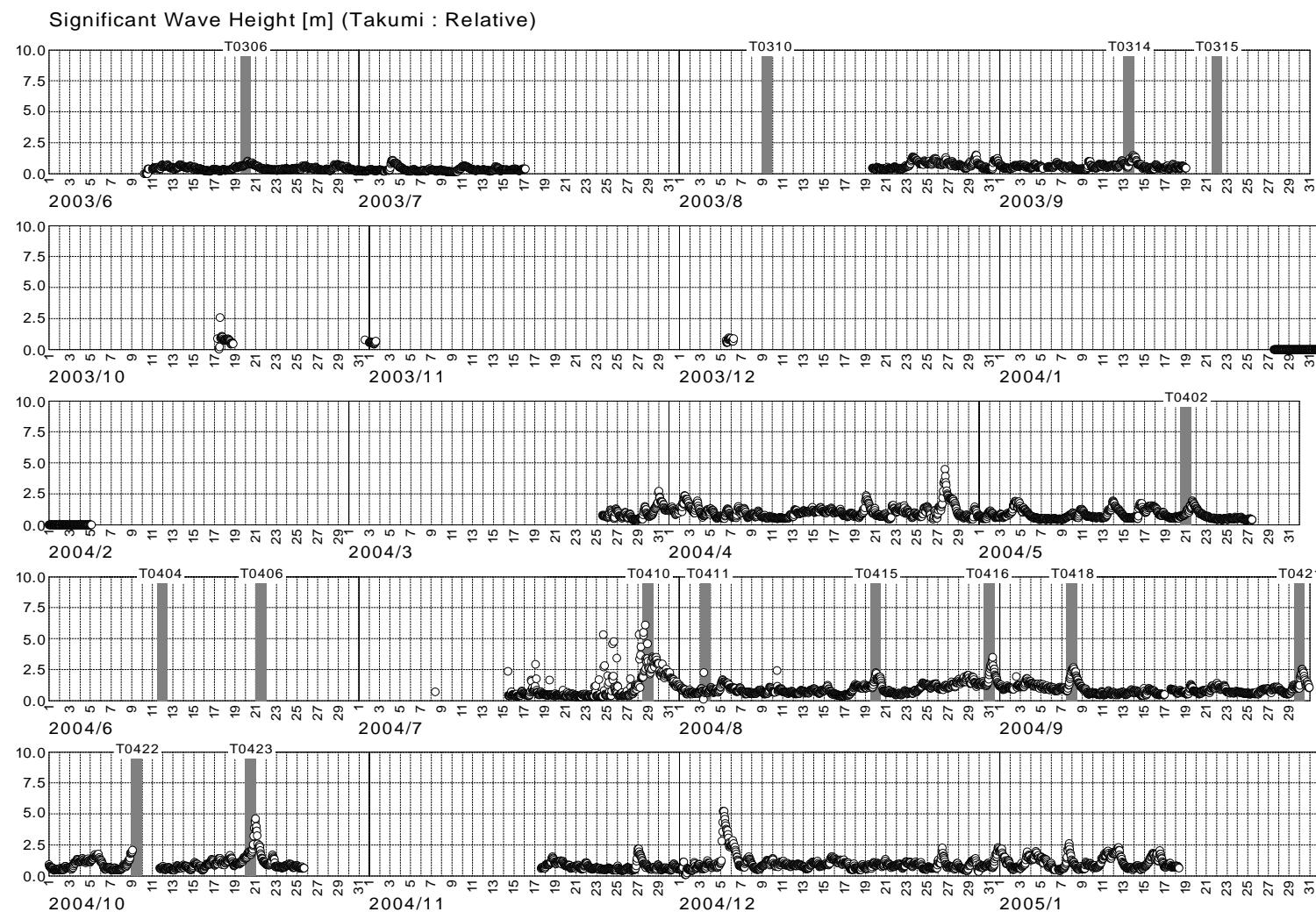


図 5.1.9 相対波高の有義値

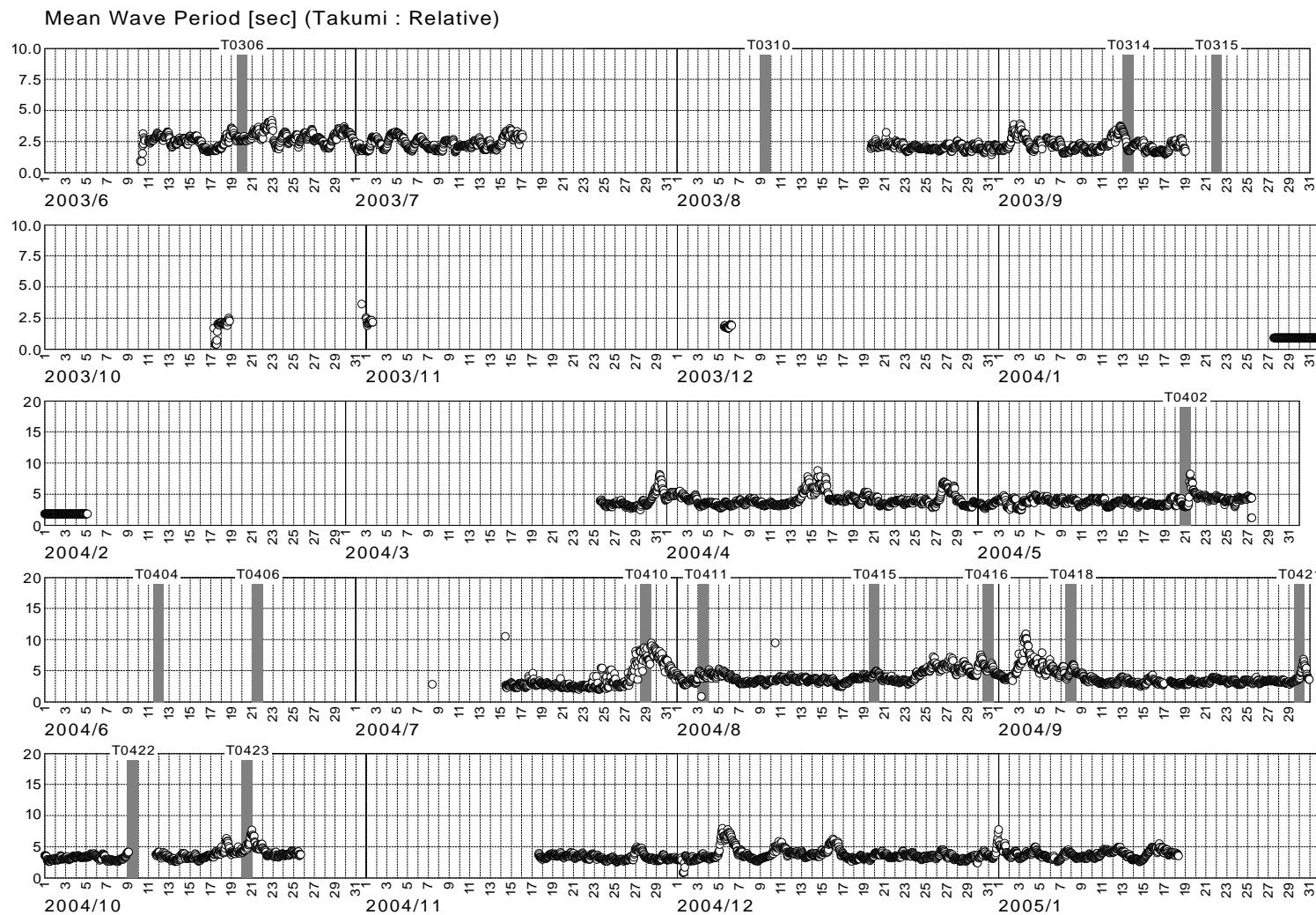


図 5.1.10 相対波高の平均波周期

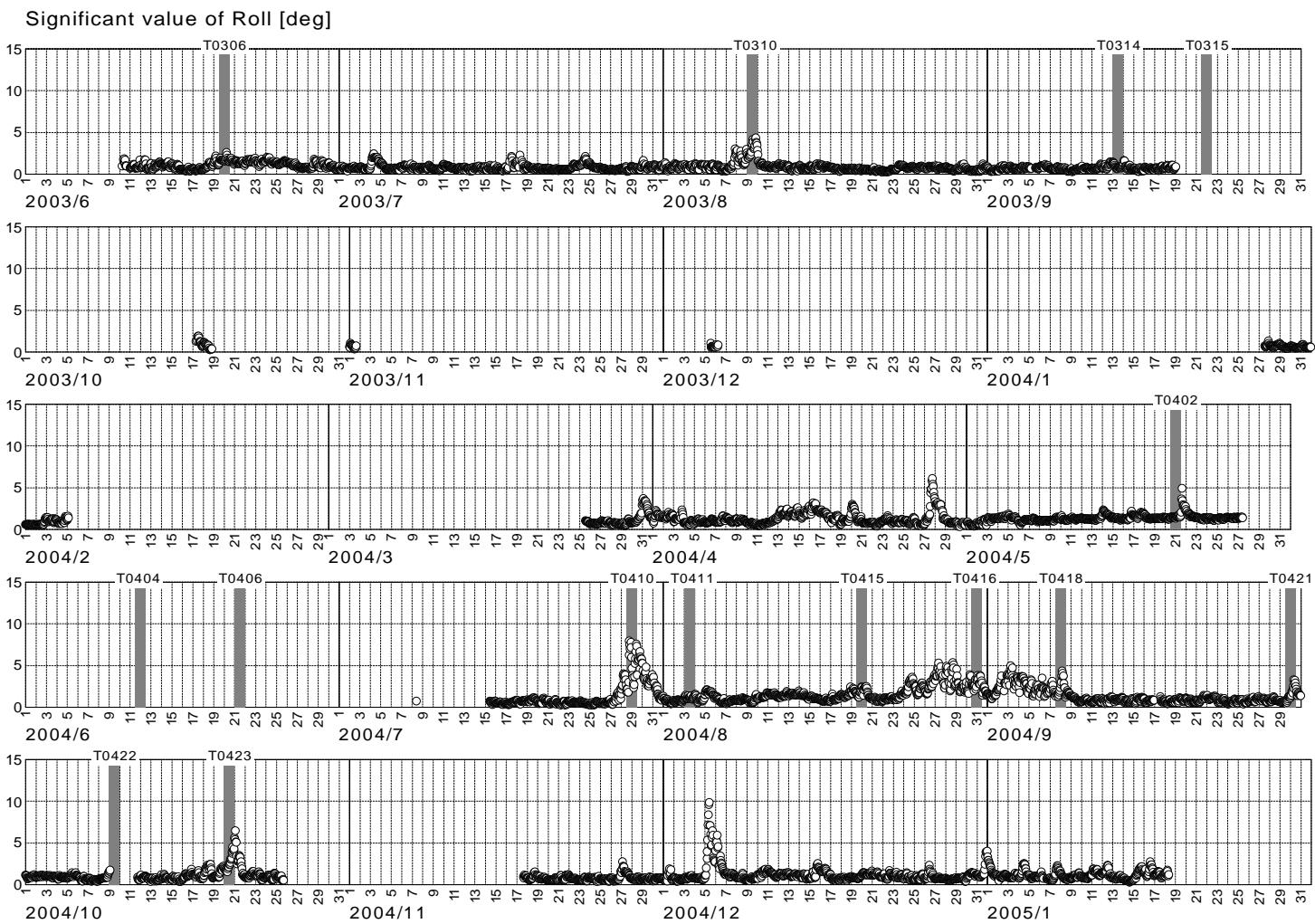


図 5.1.11 横揺の有義値

Significant value of Pitch [deg]

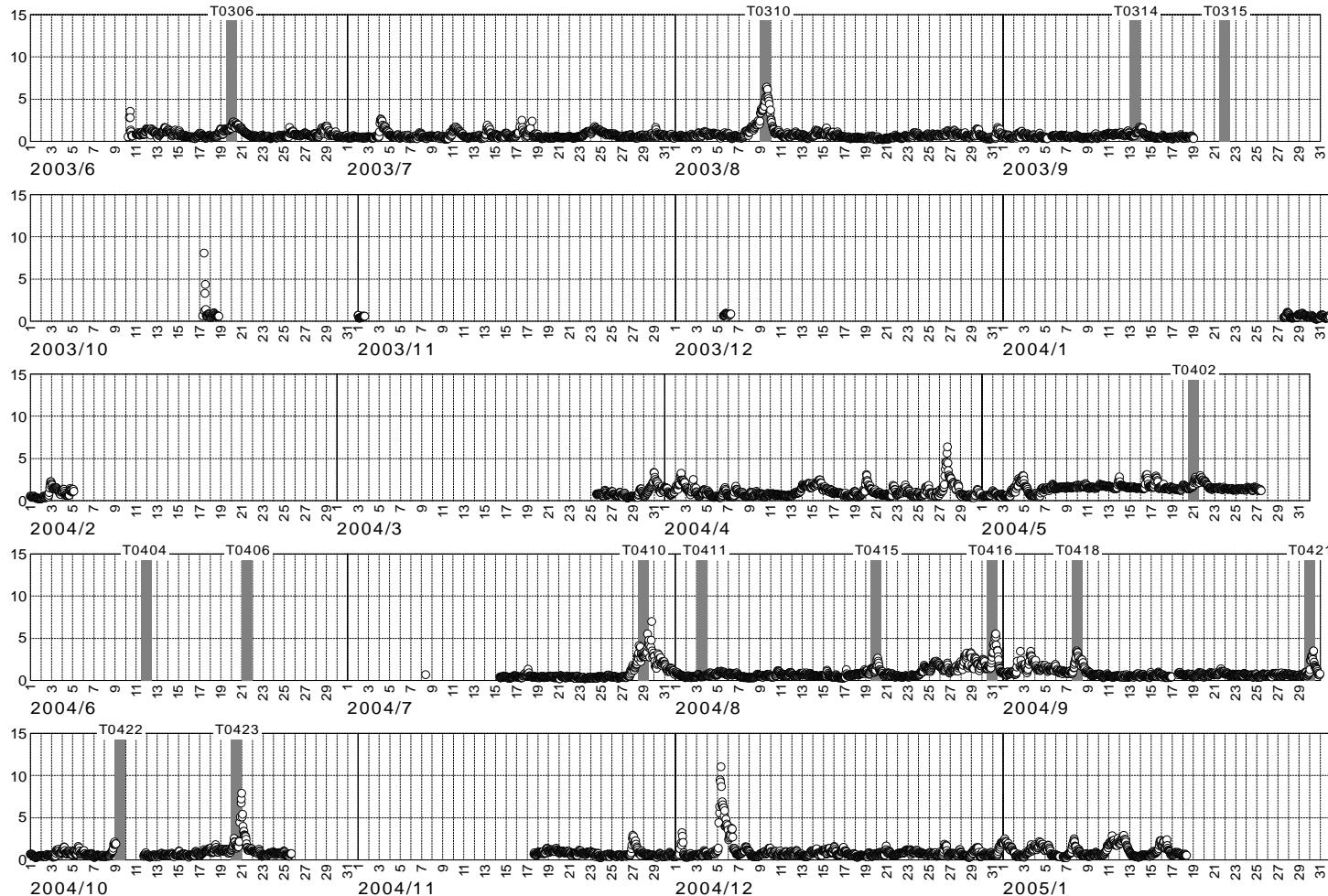


図 5.1.12 縦搖の有義値

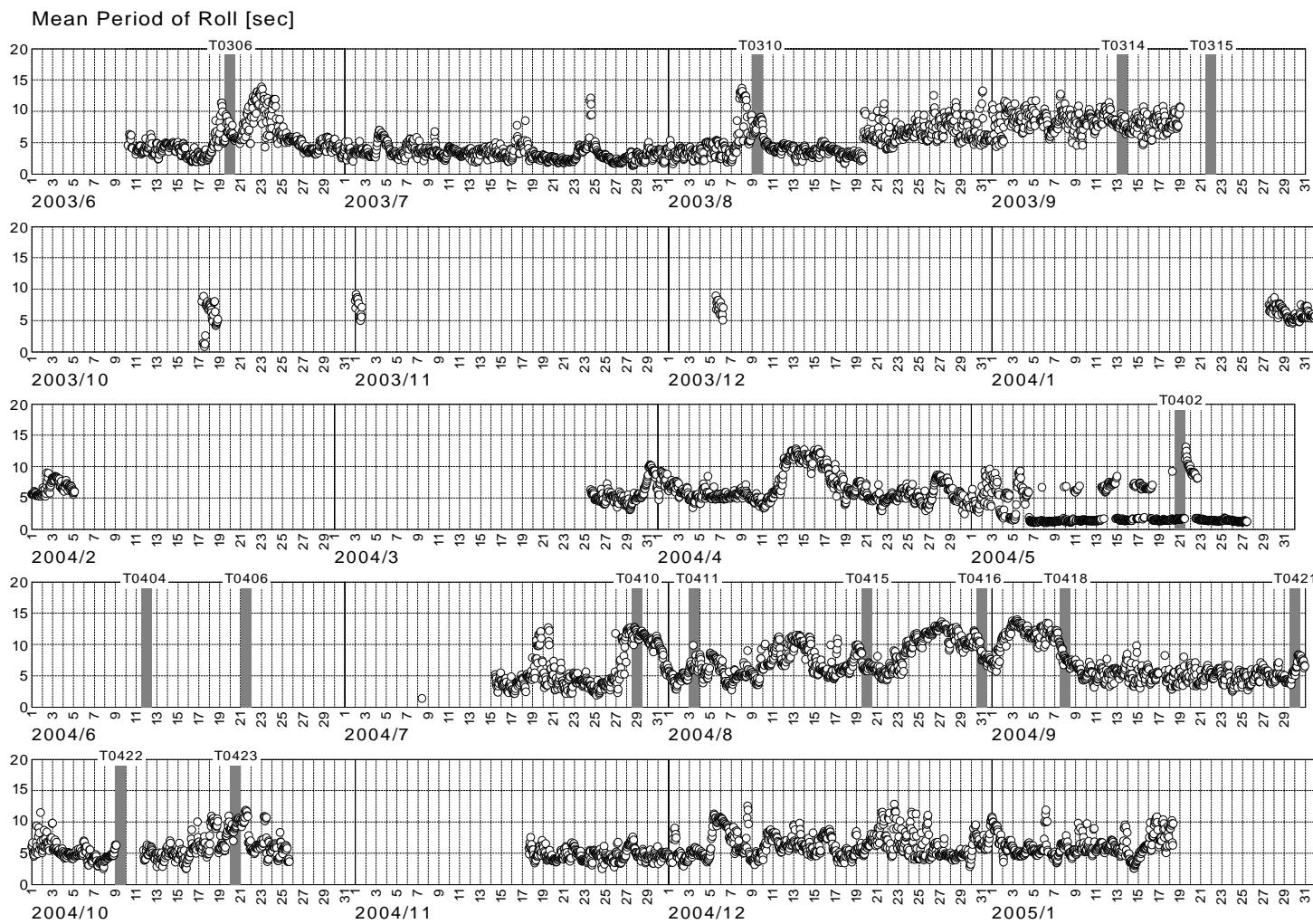


図 5.1.13 横揺の平均周期

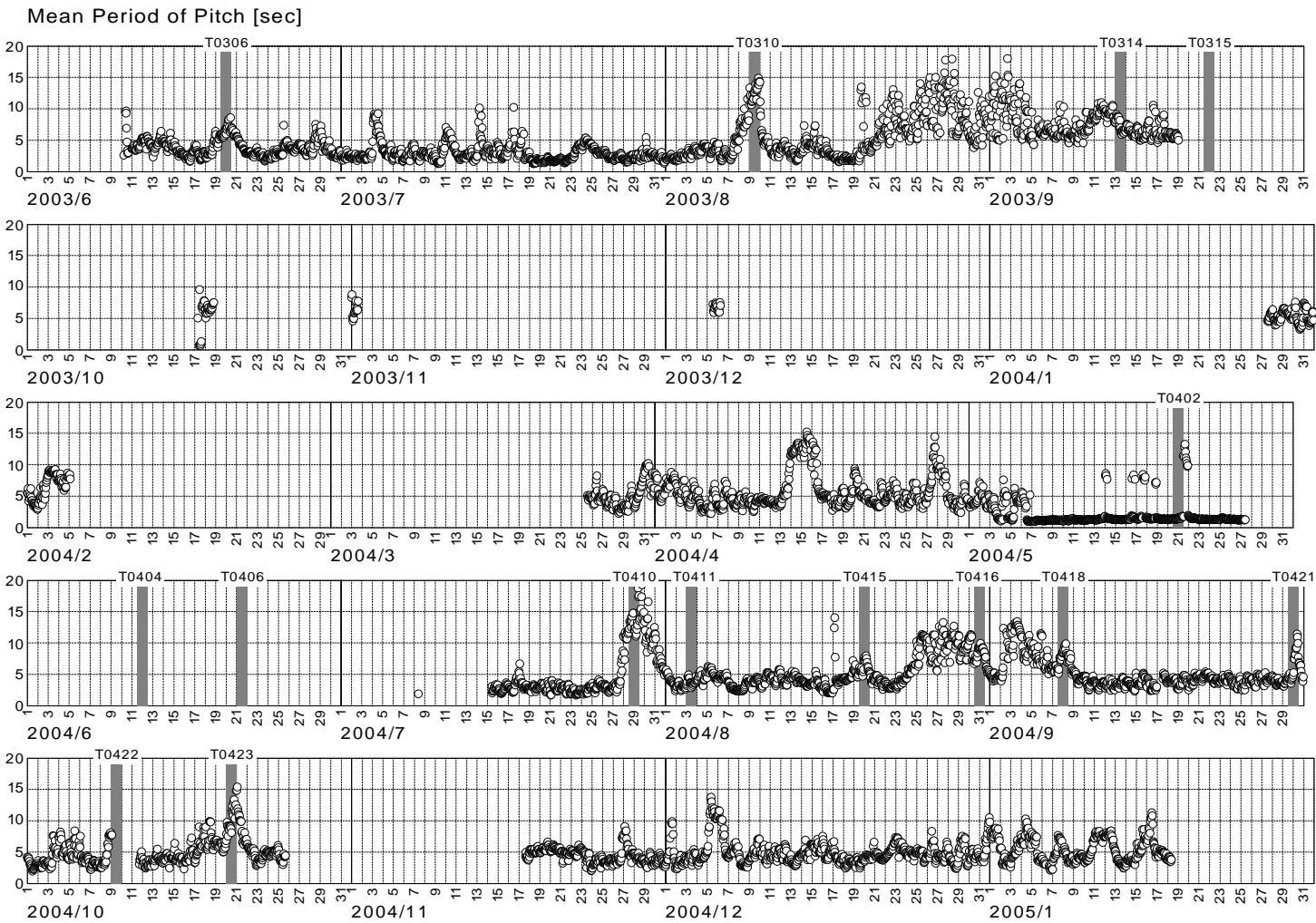


図 5.1.14 縦搖の平均周期

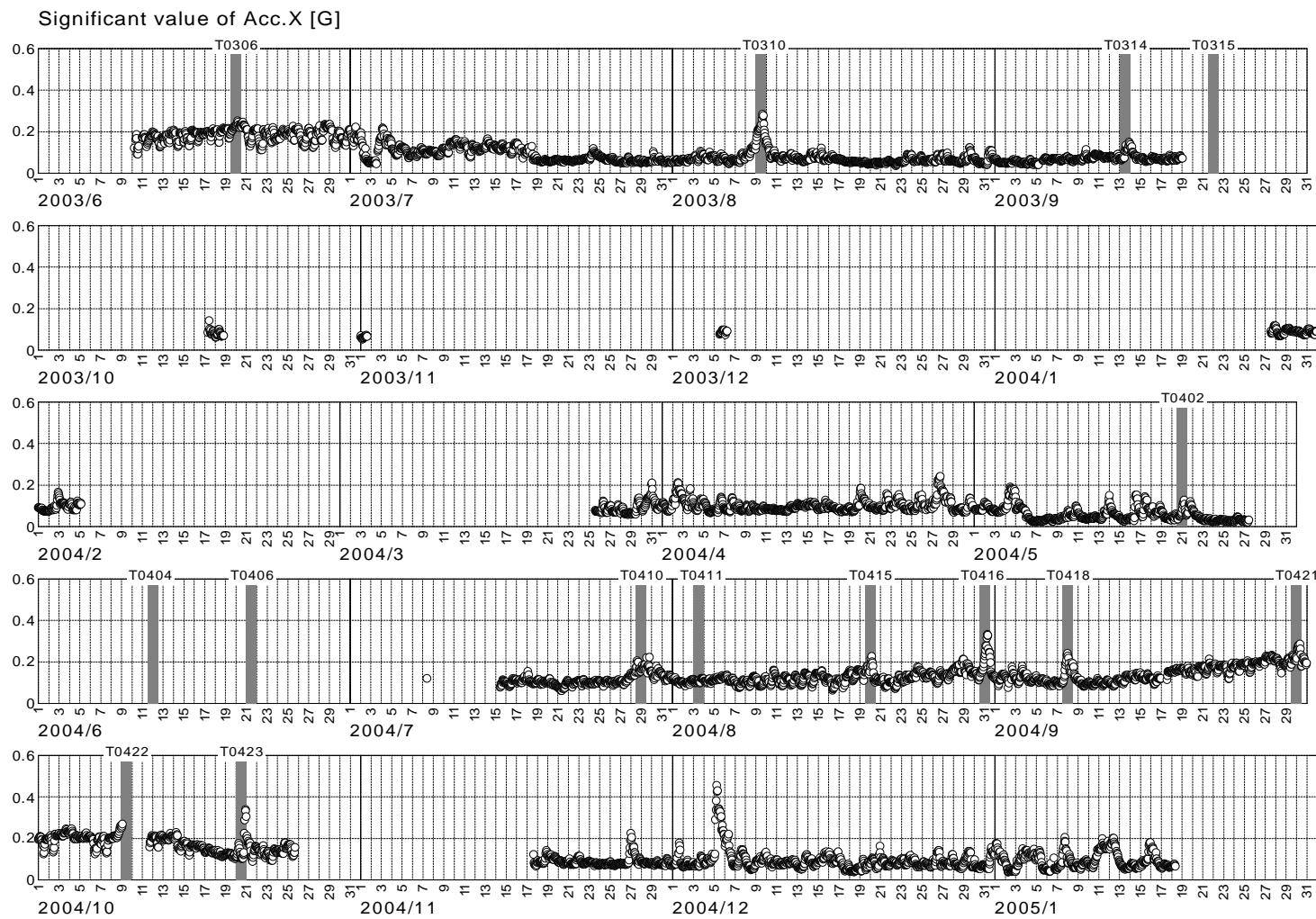


図 5.1.15 前後方向加速度の有義値

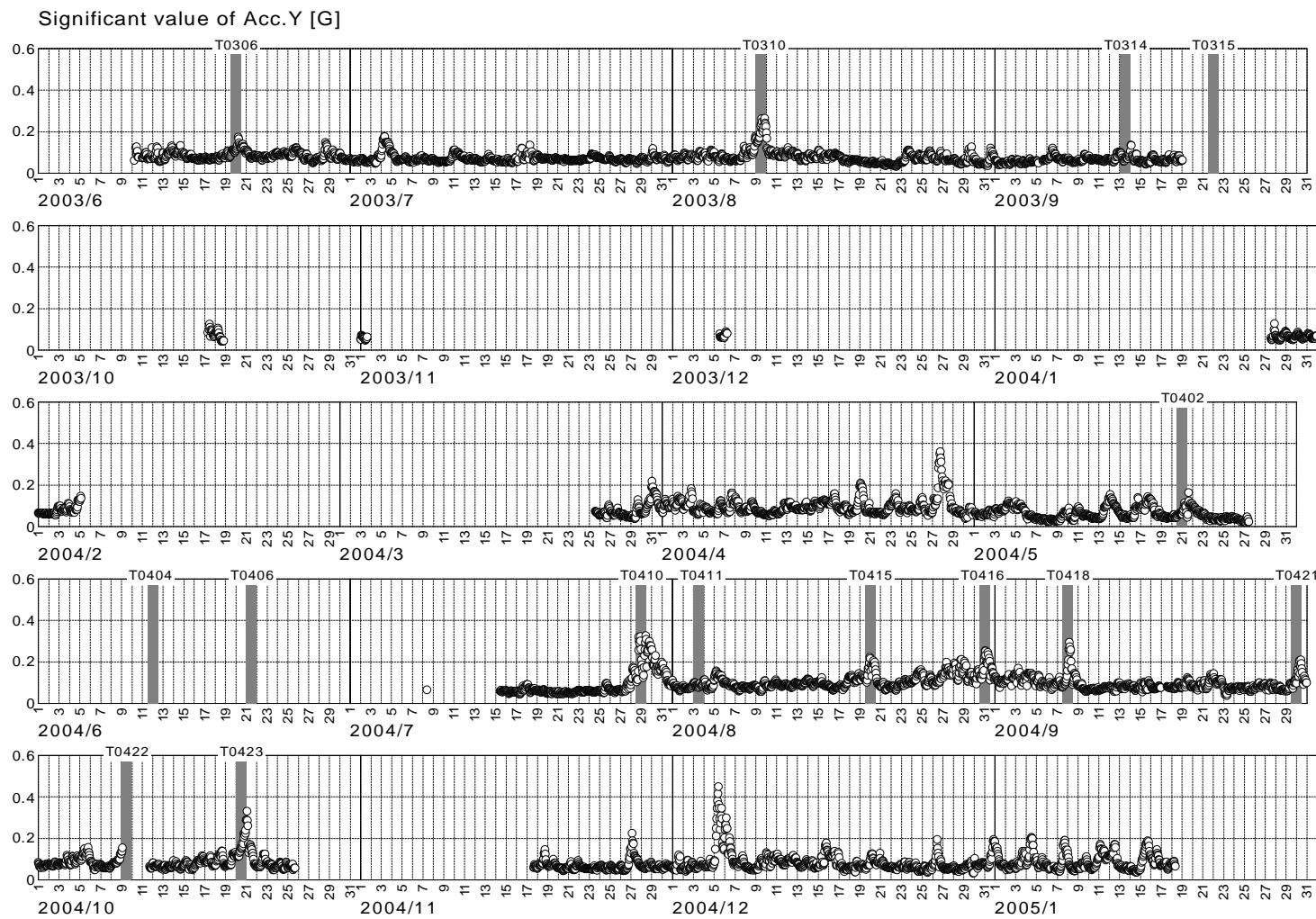


図 5.1.16 左右方向加速度の有義値

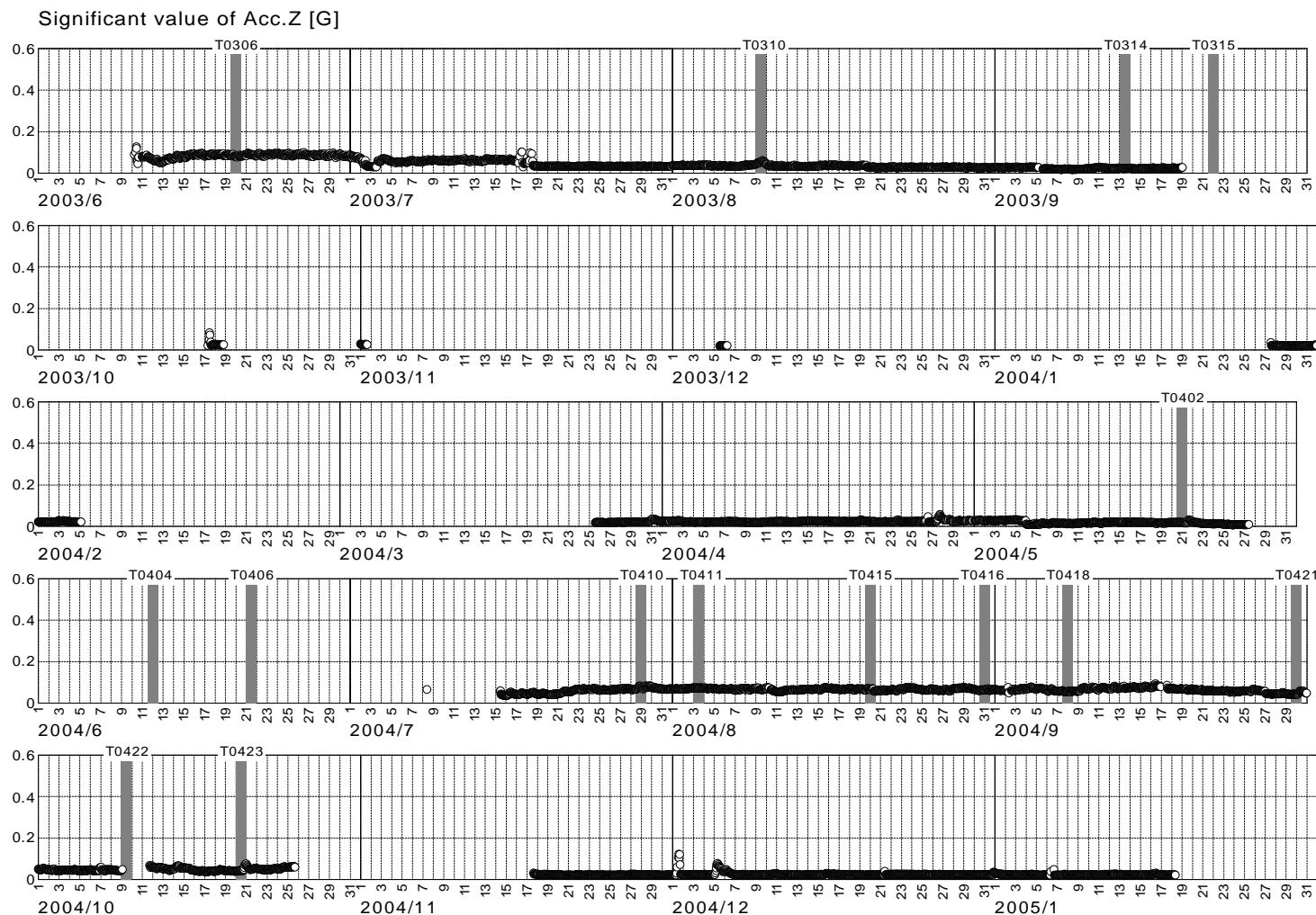


図 5.1.17 上下方向加速度の有義値

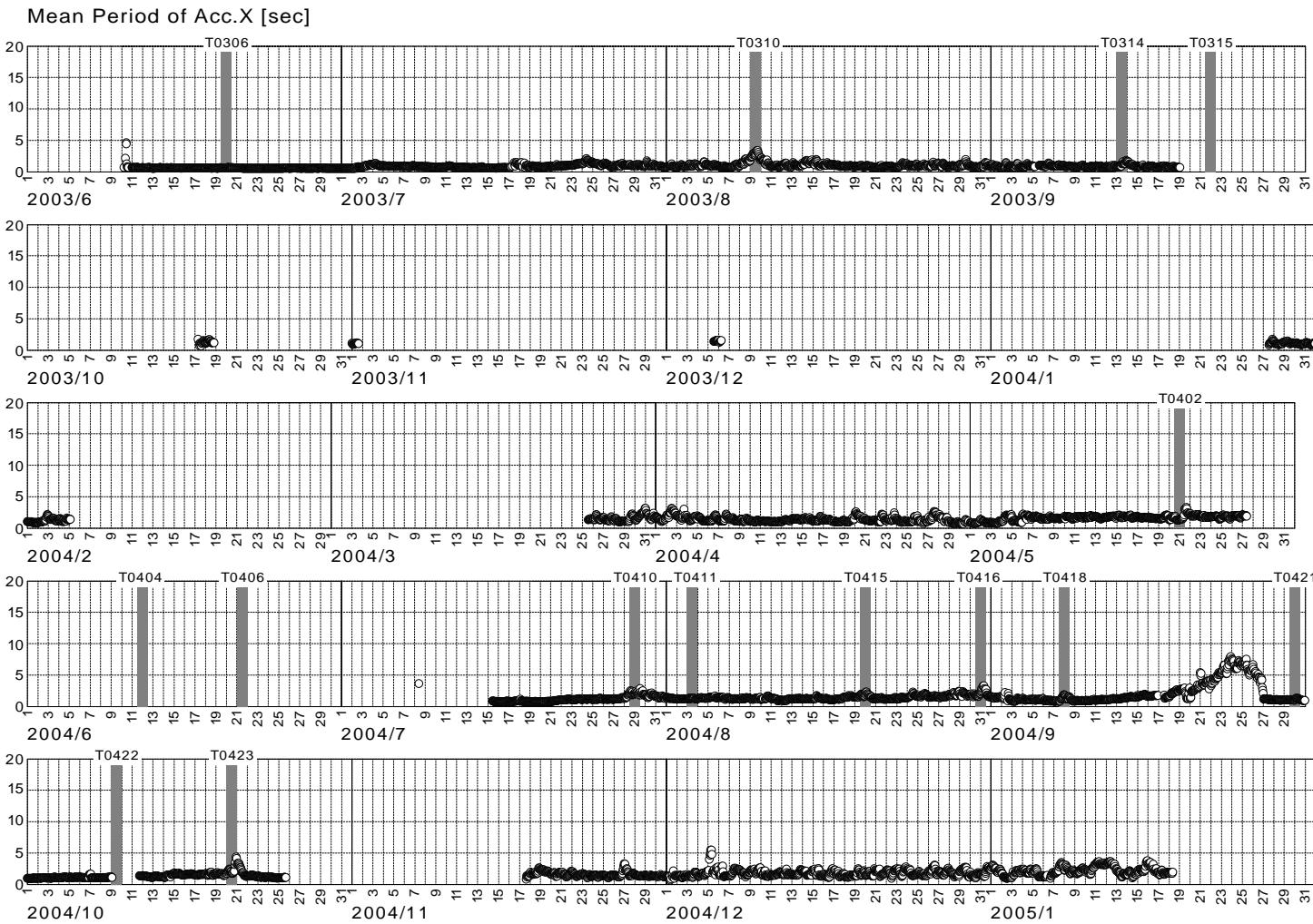


図 5.1.18 前後方向加速度の平均周期

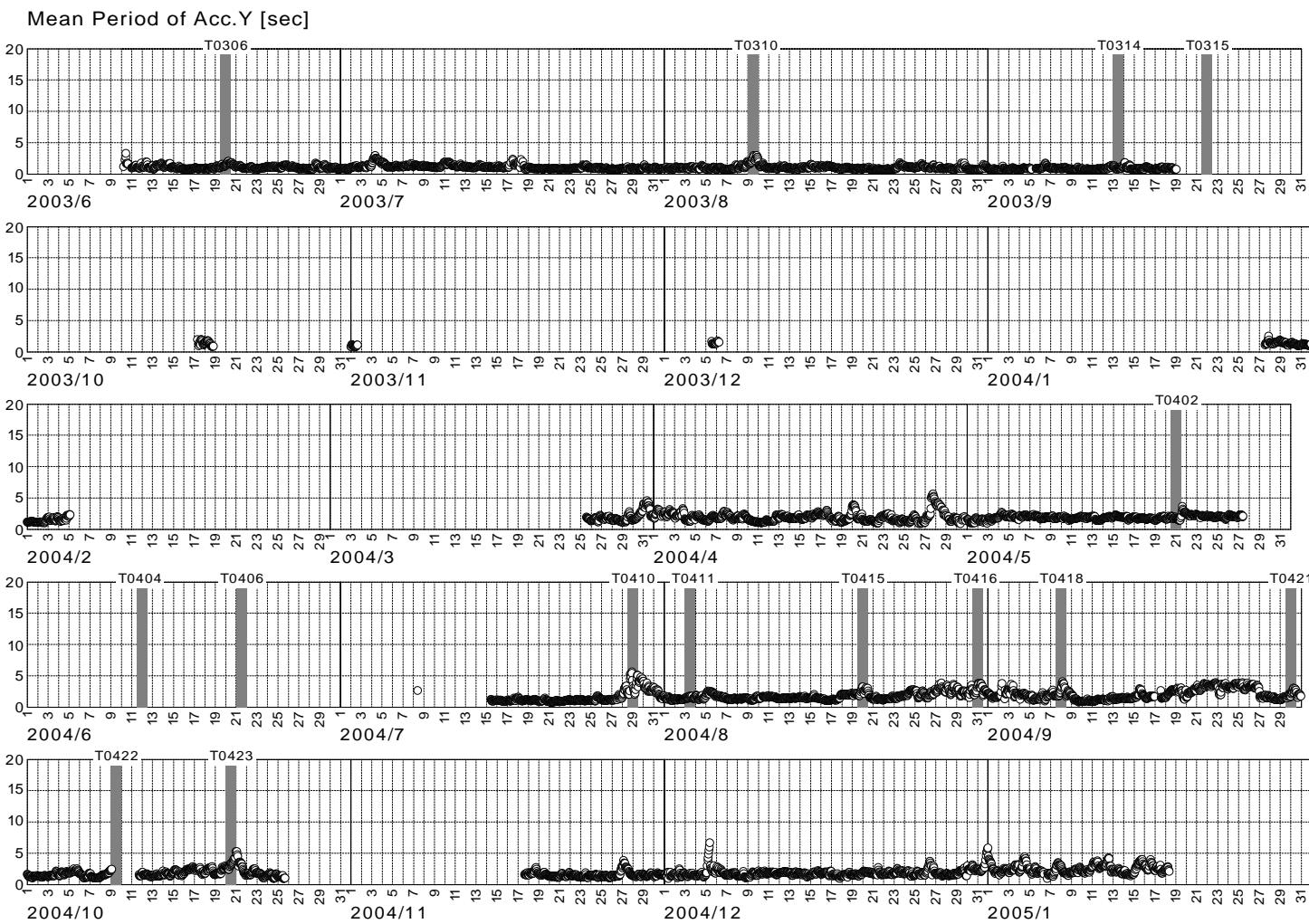


図 5.1.19 左右方向加速度の平均周期

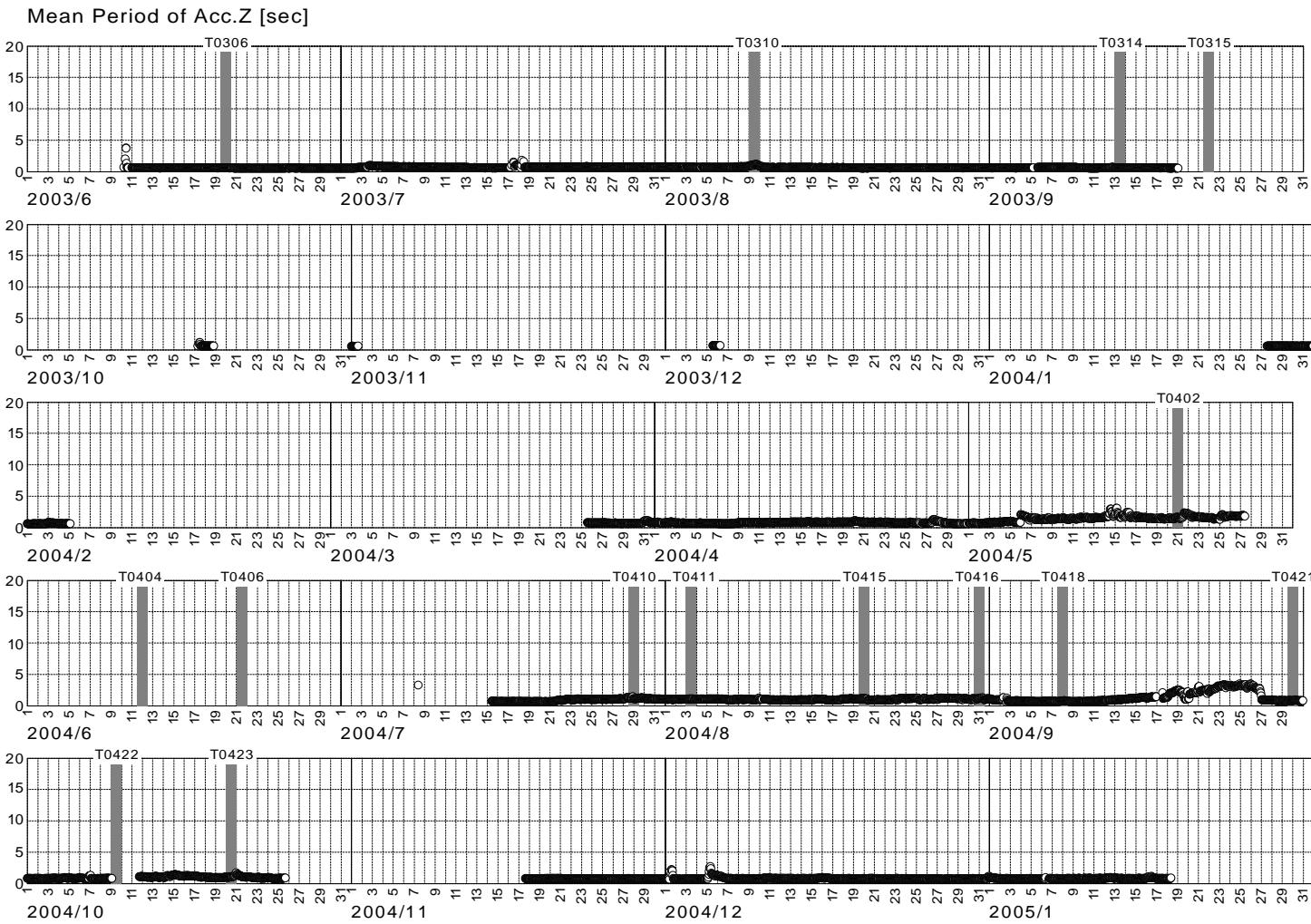


図 5.1.20 上下方向加速度の平均周期

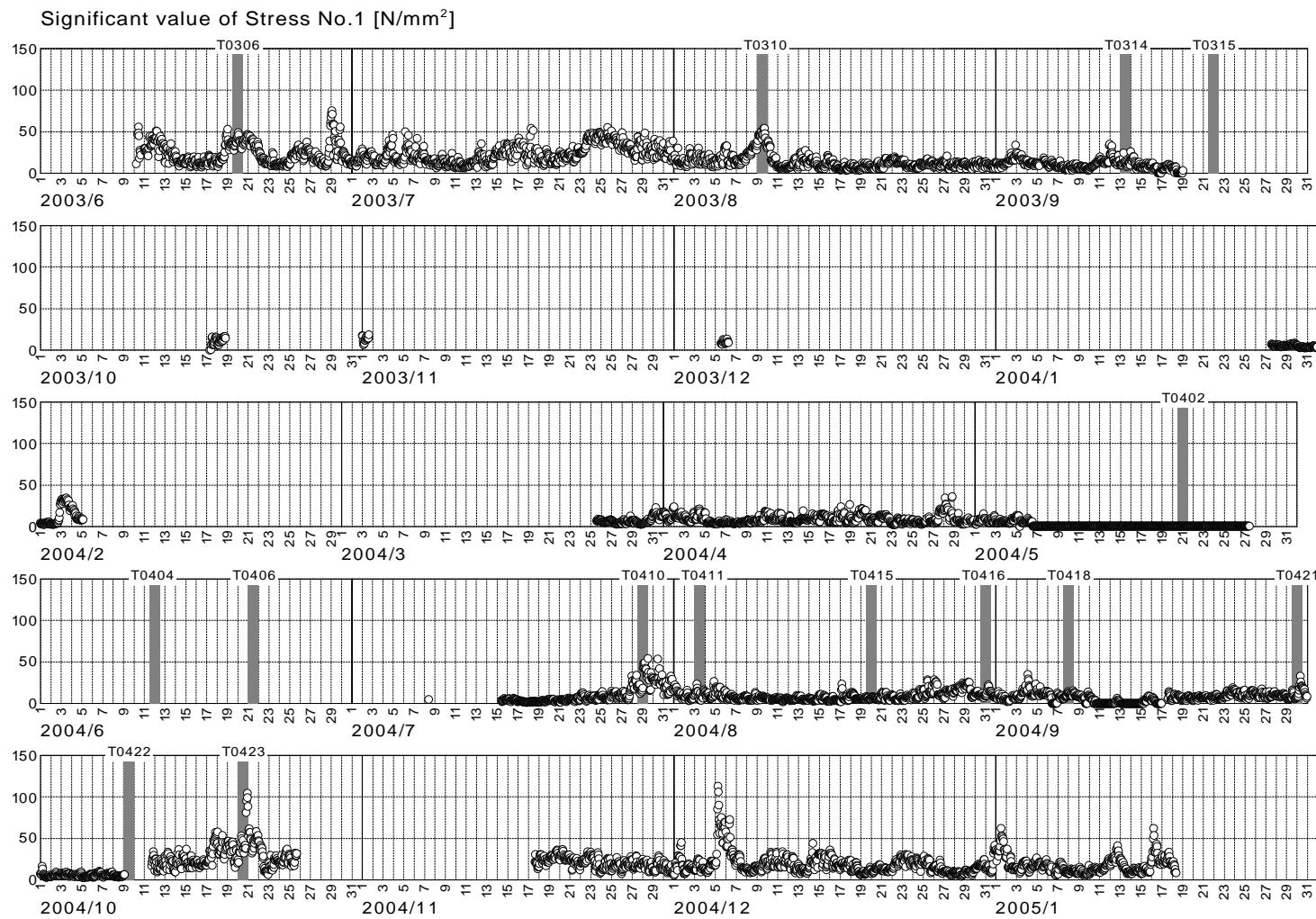


図 5.1.21 応力(No.1) 有義値

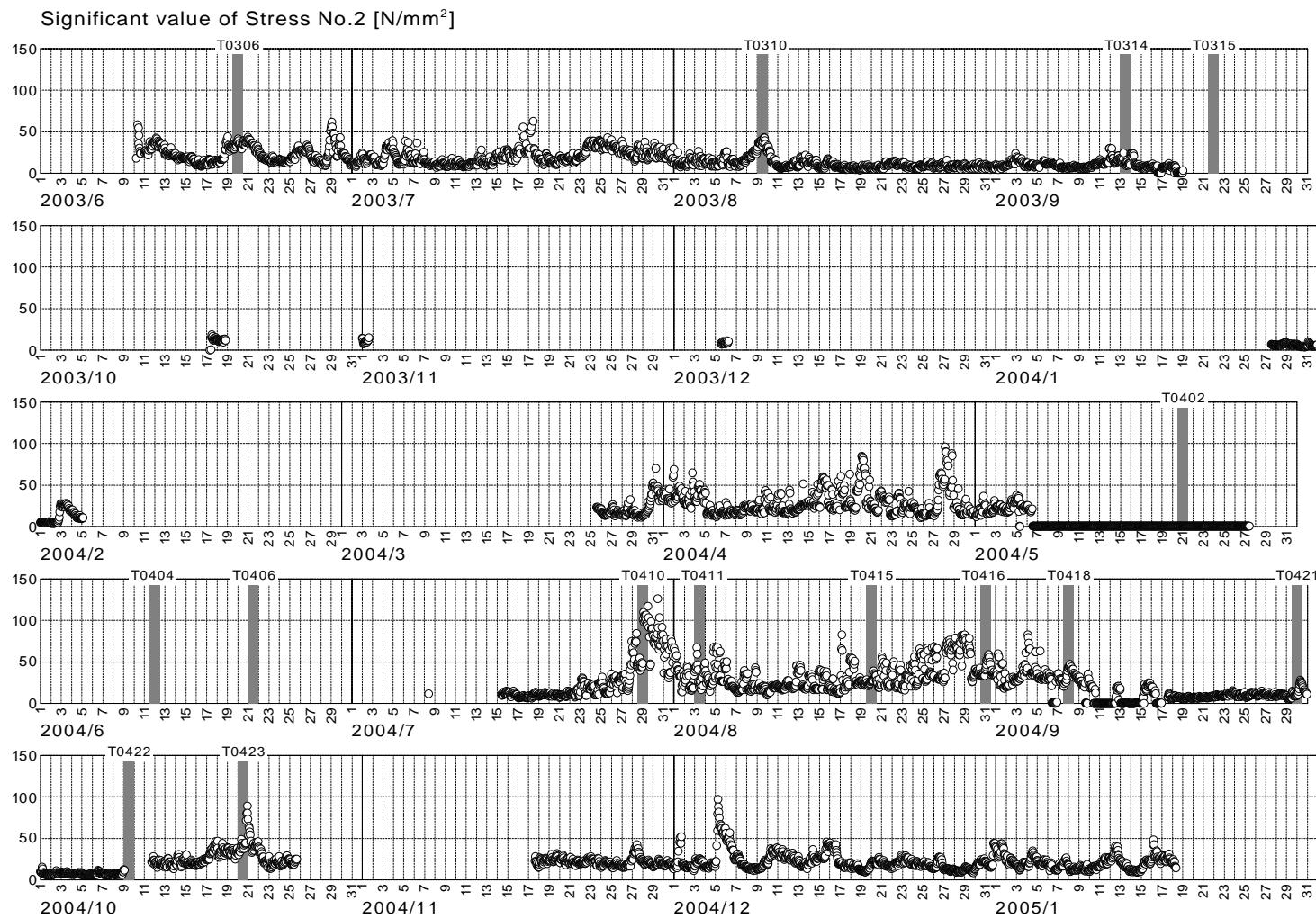


図 5.1.22 応力(No.2) 有義値

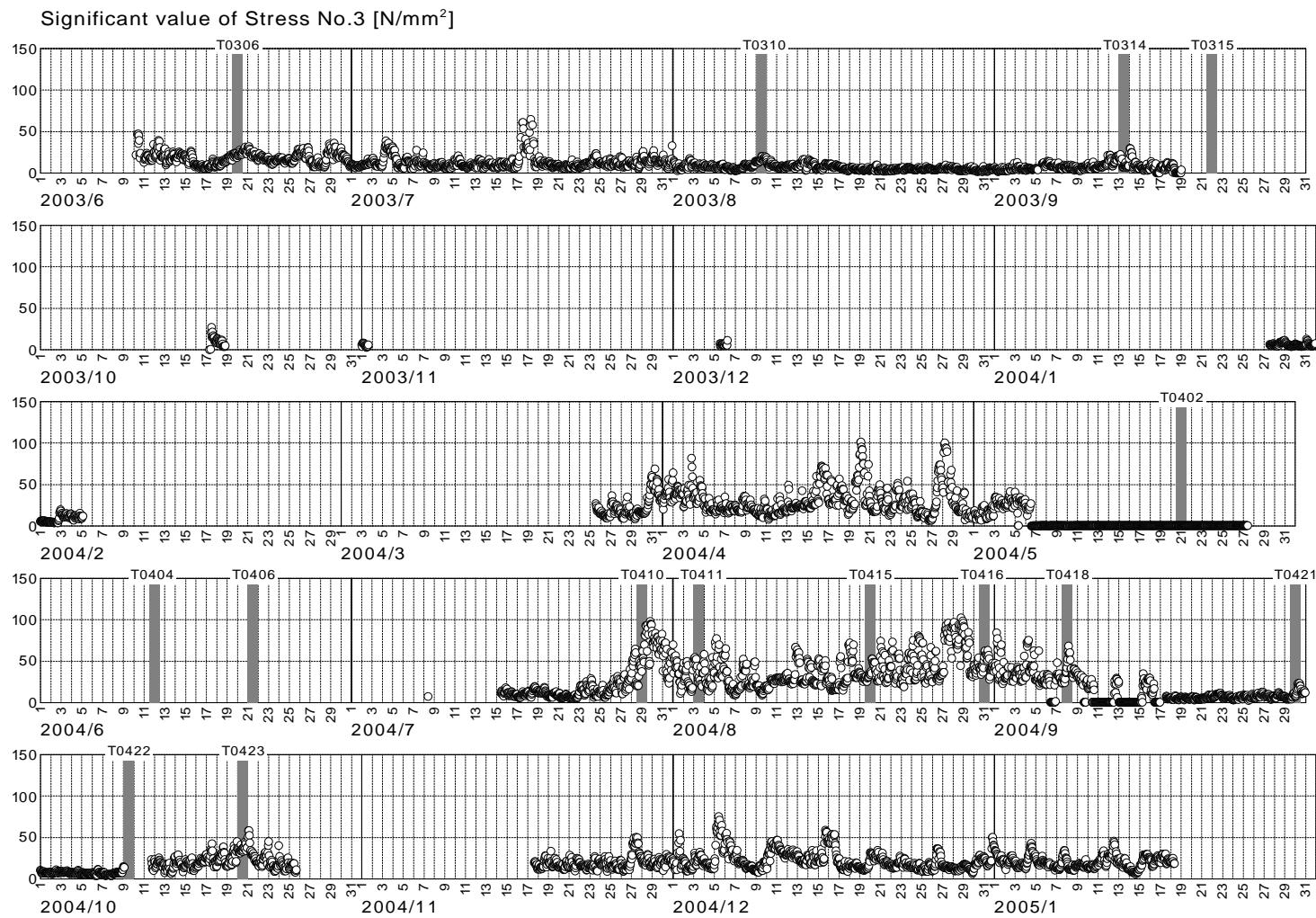


図 5.1.23 応力(No.3) 有義値

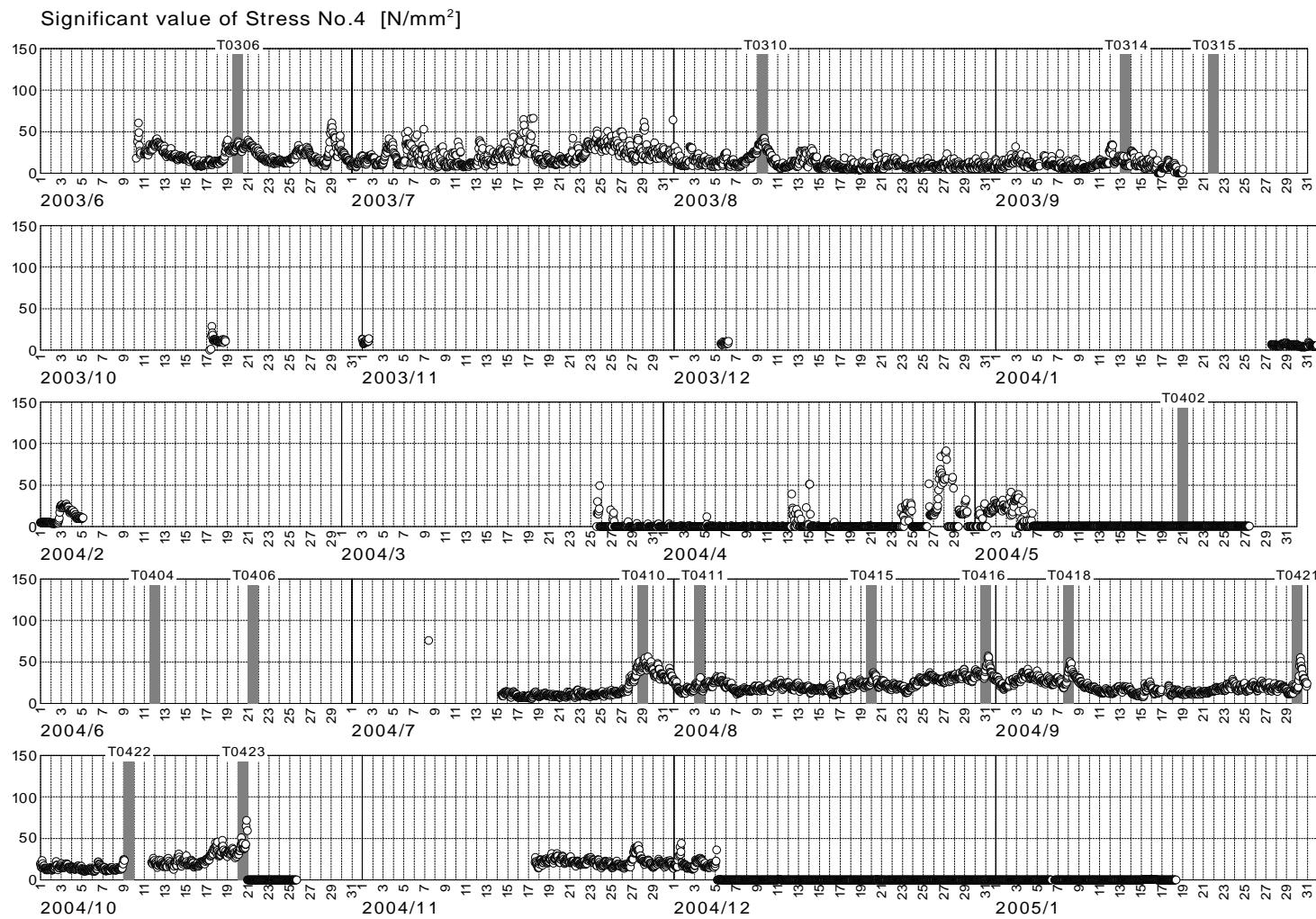


図 5.1.24 応力(No.4) 有義値

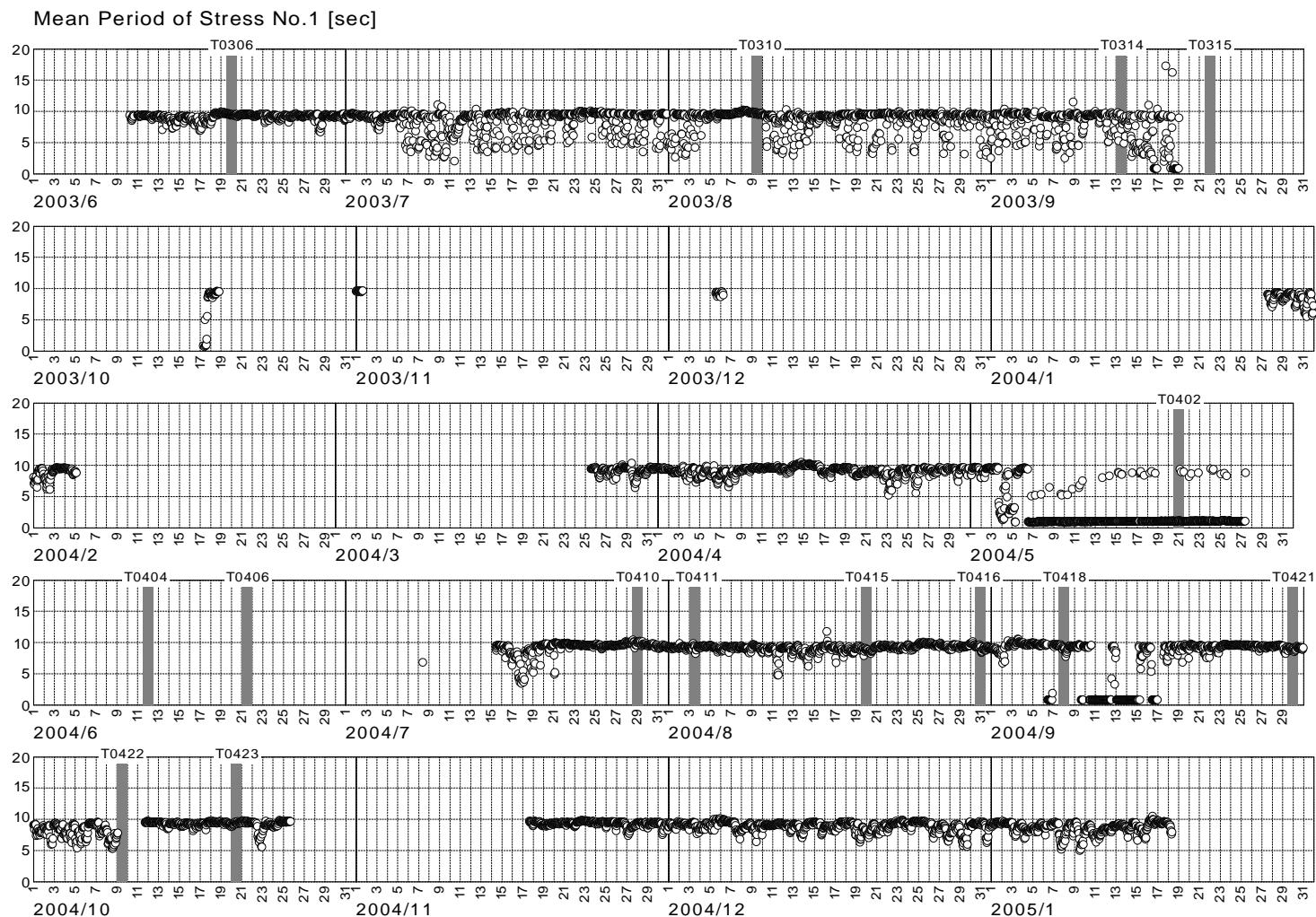


図 5.1.25 応力(No.1) 平均周期

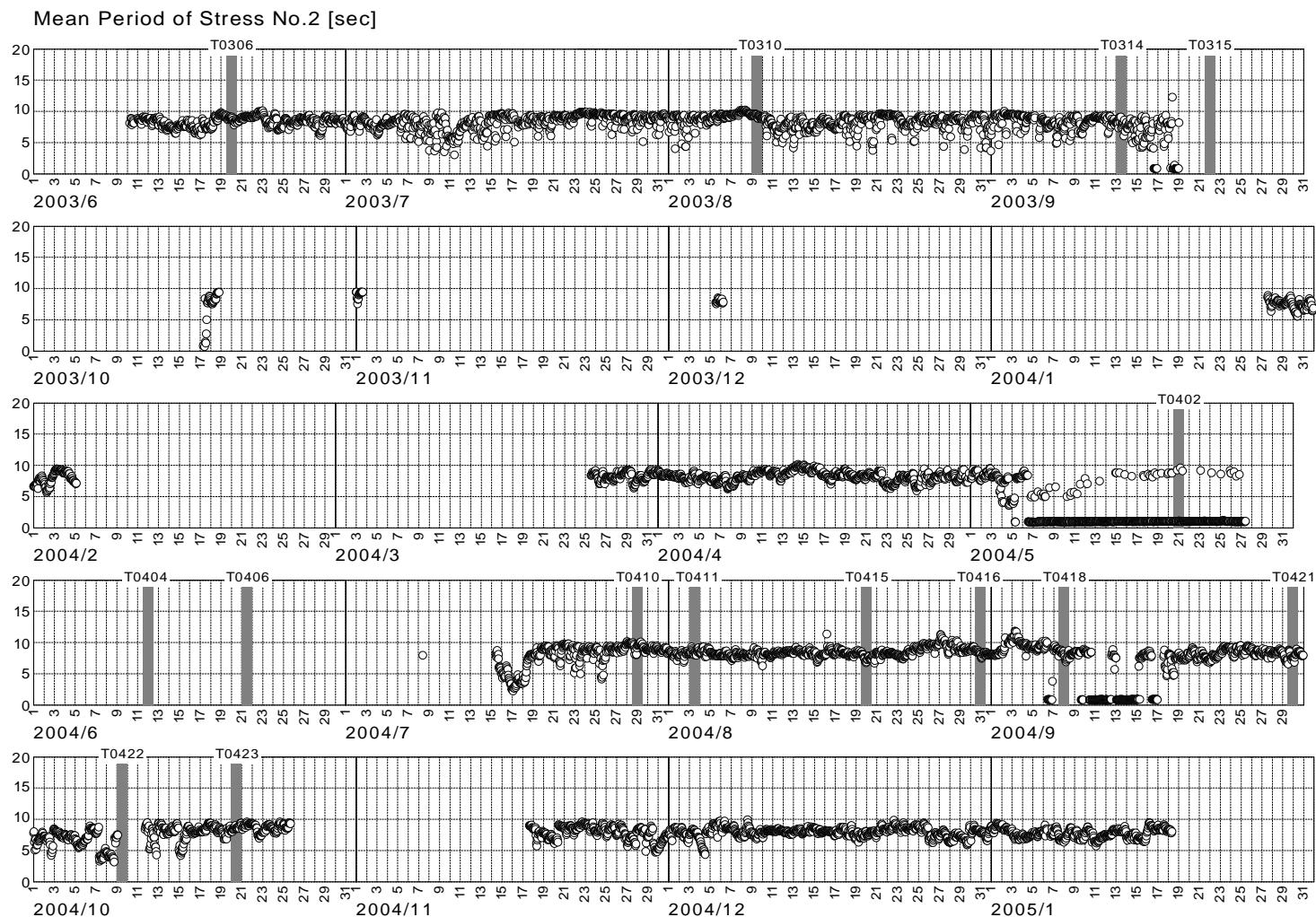


図 5.1.26 応力(No.2) 平均周期

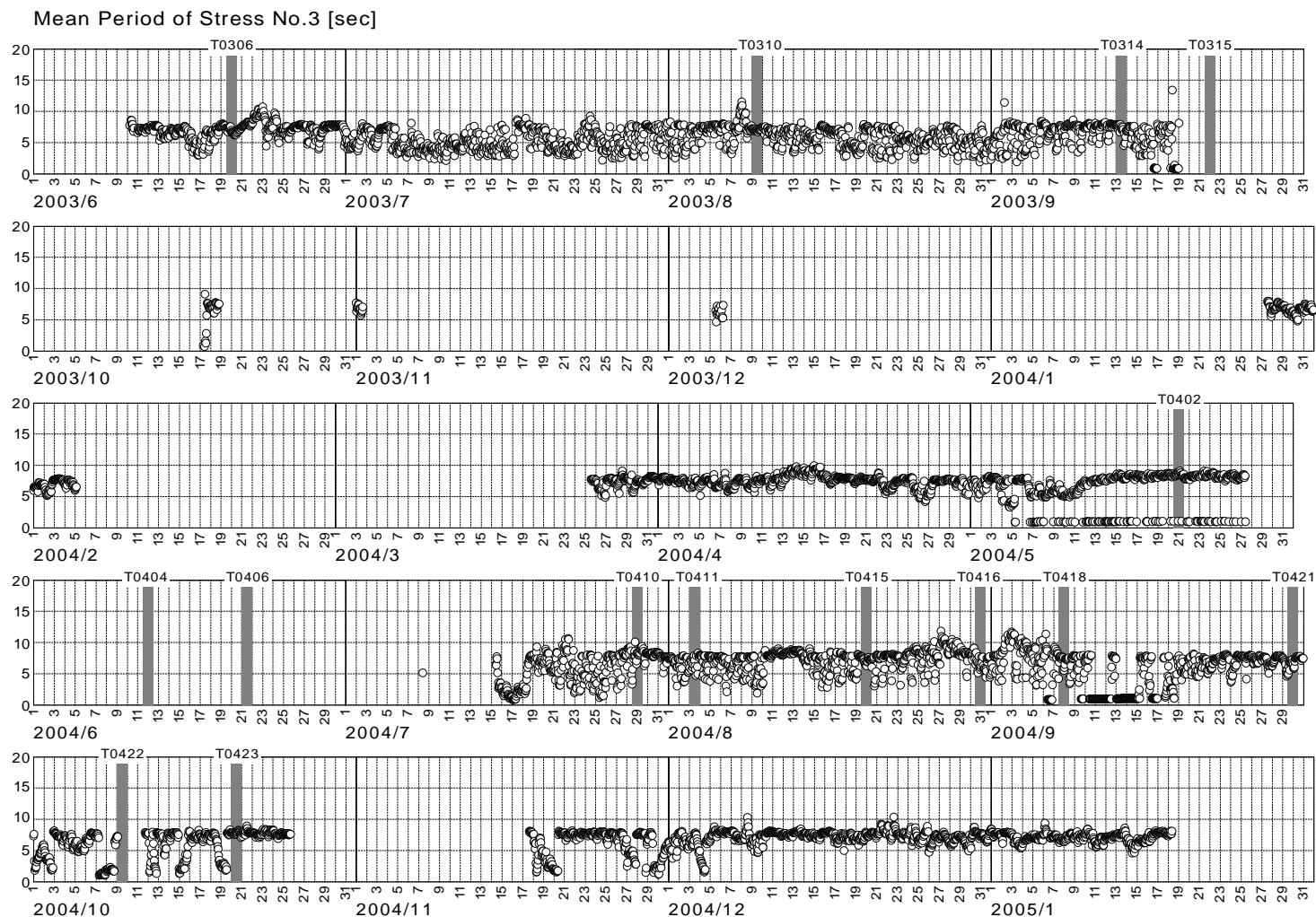


図 5.1.27 応力(No.3) 平均周期

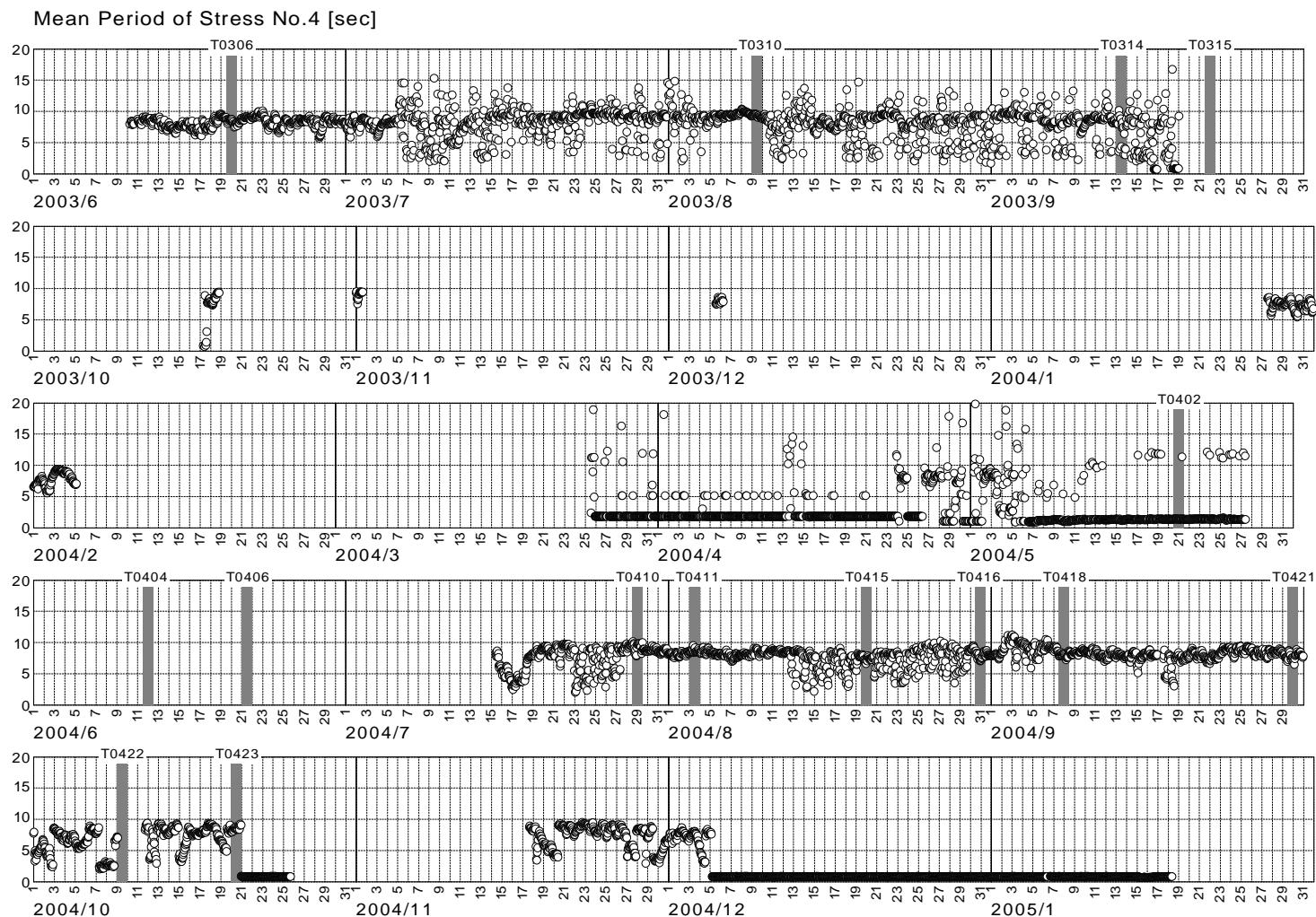


図 5.1.28 応力(No.4) 平均周

## 6. 二次解析

### 6.1 6自由度の運動と任意点の変位

拓海は175mの鋼製ライザー管を垂下したスパー型ブイであり、その重心は計測室からだいぶ下の方にある。したがって、計測室に置いた加速度計は回転運動の影響を受けた加速度を計測しており、剛体としての並進運動の加速度ではない。相対波高から絶対波高を求める場合や、風速計に対する動搖影響を除く場合には、任意点の運動を求める必要がある。そのためには、重心の並進運動を求めておく必要がある。なお、浮体全体の排水量が約1,700tfに対して、ライザー管の水中重量は約120tfであるので、多少の影響を与える可能性はあるが、ここでは浮体は重心を中心として回転すると仮定する。

動搖の関係では以下の計測値が得られる。

- (1) FOGから、roll( $\phi$ )、pitch( $\theta$ )、roll角速度( $d\phi/dt$ )、pitch角速度( $d\theta/dt$ )、yaw角速度( $d\psi/dt$ )
- (2) 3軸加速度計から、計測位置でのsurge、sway、heave加速度( $d^2x''/dt^2$ 、 $d^2y''/dt^2$ 、 $d^2z''/dt^2$ )
- (3) 波高計用上下加速度2( $d^2z_2/dt^2$ )および3( $d^2z_3/dt^2$ )  
(波高計用上下加速度1は計測開始間もなく故障して計測されていない)

これらの計測値から、図6.1.1に示す手順で重心位置の変位および絶対波高を得るための波高計位置での上下変位を求める。

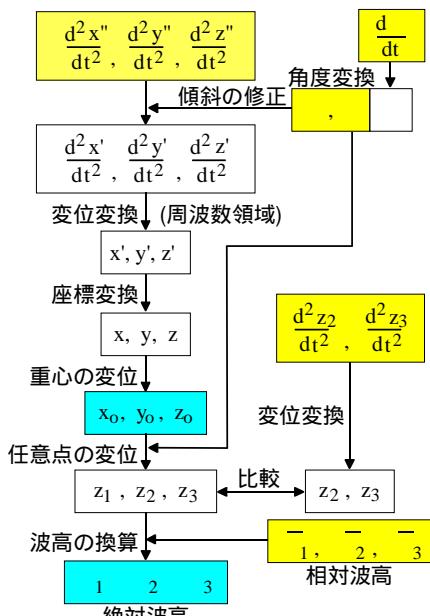


図6.1.1 重心変位と絶対波高算出のプロセス

具体的な手順を以下に示す。

- ① 加速度計が水平から角度 $\phi$ 傾いている時、水平方向の真の加速度を $a$ 、計測された水平加速度を $a'$ とすると、重力影響が加わるため、

$$a' = a \cos(\phi) + g \sin(\phi) \quad (6.1.1)$$

であるので、次式が得られる。

$$a = (a' - g \sin(\phi)) / \cos(\phi) \quad (6.1.2)$$

鉛直加速度については計測範囲内では傾斜影響は無視できるほど小さいので、そのままの値を用いることとする。

- ② 直接2回の数値積分を行うとトレンドが大きくなりうまく求まらないので、周波数領域で積分を行う。すなわち、加速度の時系列をフーリエ変換し、得られた各係数に $-1/\omega^2$ を掛けて逆変換すれば、変位の時系列が得られる。ただし、 $\omega$ の小さいところでは誤差が拡大されるので、次のようなlow-cut filterを掛けている。

$$F(\omega) = \sin^n(0.5 \cdot \pi \cdot \omega / \omega_{co}) \quad (6.1.3)$$

$\omega_{co}$ はcut-off周波数、nは低周波数側を落とす強さの指標となる。これらは現象によってチューニングする必要がある。

- ③ 浮体上の固定座標 $(x_i, y_i, z_i)$ は、浮体重心 $(x_0, y_0, z_0)$ を中心とした $(\phi, \theta, \psi)$ なる回転運動をすると仮定すれば、空間固定座標から見ると、近似的に次の座標変換で表される<sup>5)</sup>。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\psi & \theta \\ \psi & 1 & -\phi \\ -\theta & \phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (6.1.4)$$

- ④ これに重心の並進運動が加わっているので、計測されている変位は

$$\begin{aligned} x &= x_0 + x' - y'\psi + z'\theta \\ y &= y_0 + x'\psi + y' - z'\phi \\ z &= z_0 - x'\theta + y'\phi + z' \end{aligned} \quad (6.1.5)$$

したがって、重心の運動は

$$\begin{aligned} x_0 &= x - (x' - y'\psi + z'\theta) \\ y_0 &= y - (x'\psi + y' - z'\phi) \\ z_0 &= z - (-x'\theta + y'\phi + z') \end{aligned} \quad (6.1.6)$$

- ⑤ 波高計設置点の浮体固定座標を $(x_i, y_i, z_i)$ とすると、その点の絶対上下変位は

$$z_i = z_0 - x_i' \theta + y_i' \phi + z_i' \quad (6.1.7)$$

⑥ ②と同様に周波数領域で積分を行う。

⑦相対波高を  $\bar{\zeta}_i$  とすると、絶対波高は

$$\zeta_i = z_i - \bar{\zeta}_i \quad (6.1.8)$$

6.4 の波浪場の推定は、このようにして算出した絶対波高を用いて行った。

なお、yaw 角速度( $d\phi/dt$ )から求めた  $\phi$  は無視できるほど小さかった。

## 6.2 拓海の移動状況と範囲

DGPS の計測値からは拓海の緯度・経度と船首方位が得られる。位置を知るのに緯度・経度では扱いにくいので、国土地理院の算式<sup>6)</sup>によって IX 系の平面直角座標(世界測地系)に変換した。ただし、IX 系の原点はかなり離れており、数値が大きくなりすぎるので、試算した数ケースの平均を仮の原点として表示する。

図 6.2.1 は、計測開始の 2003 年 6 月から第 1 期計測終了時の 2005 年 1 月 18 日までの拓海の移動した点を、計測時間 30 分の平均位置として直角座標上に示したものである。1 点だけ左下にあるのはシンカー設置位置である。全移動範囲は東西約 1km、南北約 800m に及んでいる。仮原点はシンカー設置位置から東に 475m、北に 233m(64° の方向)離れている。拓海はシンカーを中心に動いているわけではなく、仮原点付近の点を中心に動いているようである。

拓海の係留はシンカーから下部チェーンが 1,050m、その上に 680m のワイヤーロープが繋がり、更に上部チェーン 20m で浮体底部の係留点に繋がっている。シンカーから仮原点までは 529m である。この付近の徘徊中心までチェーンは海底を這い、それからほぼ垂直に立ち上がっているものとしても、まだかなりの余分なチェーンがあり、アンカーの役割をしていると考えられるため、徘徊中心はあまり移動していないものと推測される。

1 日毎の動きを追ってみると、いろいろなパターンがあるが、時として直径 250m 位の円を描いて右回りに 2 回転弱移動することがある。2003 年 8 月 29 日の例を図 6.2.2 に示す。拓海の位置を示す丸印には船首方向(head)、潮流の強さと方向および風の強さと方向が標されている。徘徊中心と思われる付近を除いて、head と潮流の方向は反対方向である。即ち、潮流で流されるのを係留が支えている状態である。また、移動する方向はほとんど右回りである。この日の潮汐(大島・岡田)、拓海で測られた流向・

流速および head を図 6.2.3 に示す。M2 分潮が大きく出ており、流向変化も増大(右回り)しながら 2 回転弱変化している。

もちろんこのように潮汐ときれいに同調したような場合ばかりでなく、流向があまり変わらず、狭い範囲で停滞状態になっている場合や、直線状に動くこともある。いずれにせよ、拓海の挙動は流向の変化に大きく支配されている様である。

一方、風の力は拓海の移動にはあまり寄与していない。

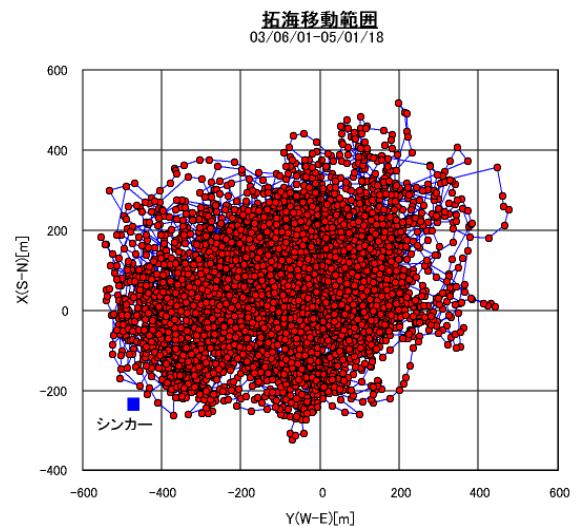


図 6.2.1 拓海の全移動範囲

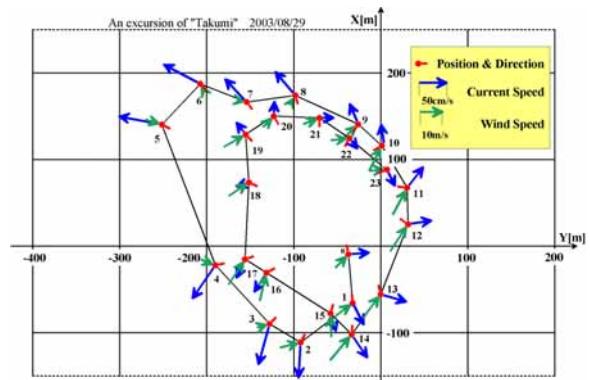


図 6.2.2 拓海の 1 日の移動例

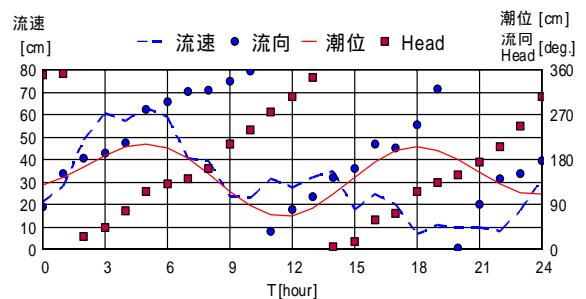


図 6.2.3 船首方向と流向・流速および潮位(岡田)

### 6.3 ライザー管の歪み

深層水汲み上げ用のライザー管は長さ 175m、内径 1m の鋼製長大管である。このライザー管の上端部より 80m の位置に歪みゲージが取り付けられており、歪みの計測が行われている。ここでは、歪み計測値から得られたライザー管に作用している応力について示す。なお、ライザー管には歪みゲージが 8ヶ所に設置されているが、ここでは、No.1 から 4 の計測結果についてのみ示す。

#### 6.3.1 出現頻度

図 6.3.1 及び図 6.3.2 に応力の有義値及び平均周期の出現頻度を示す。

図中、横軸は応力もしくは周期、縦軸は頻度を示している。

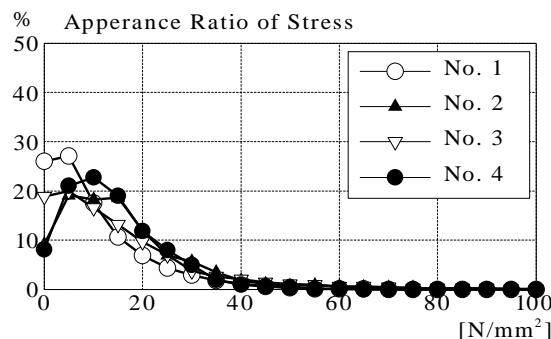


図 6.3.1 応力有義値の出現頻度

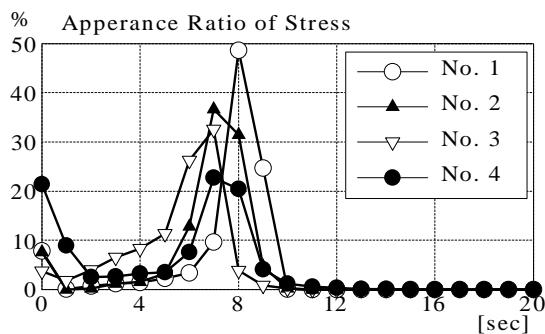


図 6.3.2 応力平均周期の出現頻度

図 6.3.1 から、有義値は応力の計測位置に関わらず、概ね一致している。一方、図 6.3.2 より、平均周期に関しては No.1 から 3 にかけて短周期側に推移し、No.4 は No.2 とほぼ同様の周期が卓越している。これは、ライザー管を浮体へ取り付けている方法が影響していると推測される。

ライザー管は図 6.3.3 に示すように、浮体から 2 本のチェーンによって吊り下げられている。この吊りチェーンはライザー管の右舷および左舷側に取り付けられている。従って、前後方向の動揺、すなわち No.1 へは吊りチェーンの影響をほぼ受けず自由に揺れ、No.3 の方向、すなわち、左右方向の動揺についてはライザー

管の上端部において、吊りチェーンの拘束を受けるために、周期が短くなっていると考えられる。

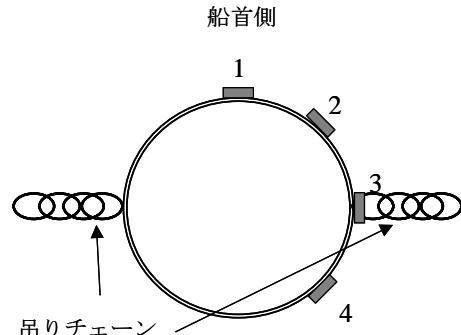


図 6.3.3 計測位置と吊りチェーン位置  
(ライザー管上面図)

#### 6.3.2 長期予測

次に、これまでに計測した約 1 年間のデータから長期にわたる推定計算を行った。推定は、計測した時系列の極値を求め、その値から長期間内に発生する最大極大値の発生確率を求める方法を取っている<sup>7, 8)</sup>。

まず、応力の平均周期は図 6.3.2 から約 8 秒であることから、ライザー管の 1 年間の揺れ数は、おおよそ 365 日 × 24 時 × 60 分 × 60 秒 / 周期 8 秒 ≈ 4.0 × 10<sup>6</sup> 回となる。つまり、1 年間での最大極大値の発生確率は (4.0 × 10<sup>6</sup>)<sup>-1</sup>、2 年間では (8.0 × 10<sup>6</sup>)<sup>-1</sup>、5 年間では (2.0 × 10<sup>7</sup>)<sup>-1</sup>、10 年間では (4.0 × 10<sup>7</sup>)<sup>-1</sup> となる。

一方、全計測データから得られた極値数は約 1.3 × 10<sup>7</sup> 個であり、計測結果を図 6.3.4 に示す。図中、横軸は長期発生確率 Q の常用対数であり、縦軸は応力の片振幅を示している。

図より、各計測点とともに極大値は長期発生確率が 1.0 × 10<sup>-6</sup> よりも大きい範囲では直線的に変化している。発生確率が小さくなるにつれ、やや指数関数的な動きも見せている。

また、本結果から、20 年間の稼動日数に対する最大極大値（片振幅）は約 200N/mm<sup>2</sup> であると推測される。

#### 6.3.3 浮体動揺影響

ライザー管の動揺に与える浮体の動揺影響について考える。図 6.3.3 のようにライザー管はチェーンにより浮体から吊り下げられていることから、縦揺の影響を受けにくい反面、横揺の影響を受けやすいものと予測される。そこで、横揺及び縦揺と応力との相関係数を有義値の値を元に求めた。本結果を図 6.3.5 に示す。なお、ここでは応力の全計測点を対象に解析を行った。

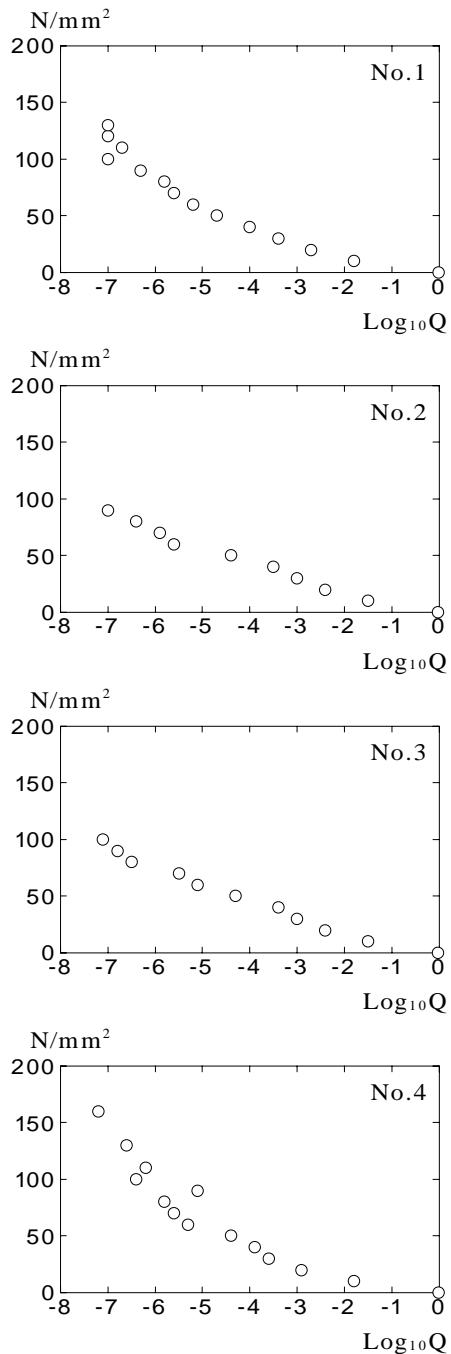


図 6.3.4 応力極値の発生確率

図 6.3.5 の横軸は歪みの計測点の番号を示しており、縦軸は相関係数である。また、○印は横揺との相関係数、●印は縦揺とのものである。図中、No.1 及び 5 の点線は船首船尾方向を表しており、No.3 及び 7 の縦実線は左右方向を示している。

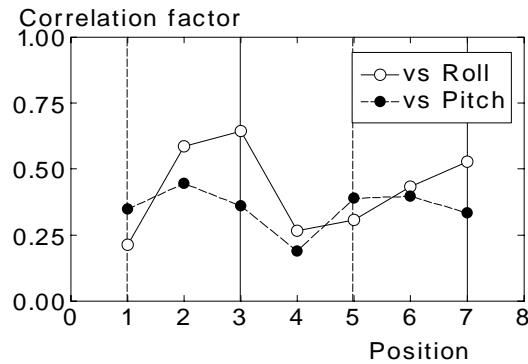


図 6.3.5 浮体動揺と応力の相関係数

この結果から、全体的に縦揺よりも横揺との相関が強く、特に No.3 及び 7 に関しては横揺との相関が非常に強いことがわかる。また、No.1 及び 5 に関しては、横揺よりも縦揺のほうが応力との相関が強い。これらは、図 6.3.3 に示したように、ライザー管を吊っているチェーンの取付位置に起因するものである。

#### 6.3.4 海象影響

海象として、有義波高及び潮流速度を考え、6.3.3 と同様に応力との相関係数を求めたものを図 6.3.6 に示す。

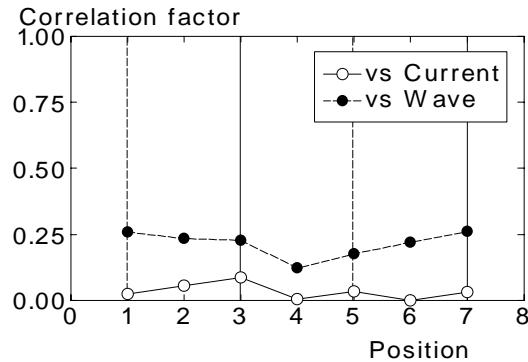


図 6.3.6 海象と応力の相関係数

図中○印は潮流速度との相関係数、●印は有義波高との相関係数である。解析結果から、潮流との相関はほとんど無いことが分かる。一方、有義波高との相関は潮流よりも大きいが、図 6.3.5 に示したように浮体動揺との相関よりも小さいことがわかる。

すなわち、海象—浮体動揺—応力の系に関して、波浪と浮体動揺との相関は浮体形状がスパー型であることから小さく、そのため、波浪と応力との相関も小さくなっていると考えられる。

## 6.4 波浪場

ここでは、3台の波高計により計測されたデータを元に、拓海が遭遇している波浪場の推定方法および推定結果について検討を行った結果を述べる。特に、相模湾における風浪及びうねりの状態を推定することに主目的を置いた。

波浪場の推定とは通常、計測結果から方向波スペクトルを推定することを意味する。方向波スペクトルの推定については、平山らによる最尤法<sup>9)</sup>や井関らによるベイズ法<sup>10)</sup>、吉元らによるパラメトリック法<sup>11)</sup>、前田らによる非線形計画法<sup>12)</sup>などの推定法が提案されているが、それぞれ、パラメータの選定が煩雑であったり、推定計算が収束しない場合があるなどの問題点を抱えている。また、直接方向波スペクトルを求めた場合は、推定したスペクトルから更に風浪とうねりのスペクトルを推定する必要がある。そこで、より簡易に、より確実に波浪場を推定する「簡易推定法」を提案することにする。

### 6.4.1 推定方法

実海域計測から得られる1次元波スペクトルは図6.4.1に示すような2つのピークを持つ場合が多い。

この2つのピークのうち、周期が長い方はうねりによるスペクトルピークであり、短い方は風浪スペクトルのピークであることは容易に推測がつく。すなわち、図6.4.2に示すように、「ある計測された波スペクトルはうねりおよび風浪の波スペクトルで表現できる」はずである。ここでは簡単のために1次元波スペクトルで表現しているが、方向波スペクトルであっても同様である。

この考え方を元に、推定方法を考える。まず、実海域での方向波スペクトルを  $S(\omega, \chi)$  とし、うねりおよび風浪の方向波スペクトルをそれぞれ  $S^s(\omega, \chi)$  および  $S^w(\omega, \chi)$  とすると、 $S(\omega, \chi)$  は

$$S(\omega, \chi) = S^s(\omega, \chi) + S^w(\omega, \chi) \quad (6.4.1)$$

と表現できる。ここで、 $\omega$  は円周波数であり、 $\chi$  は波向きである。また、方向波スペクトルはパワースペクトルと方向分布関数の積で表現できることから、(6.4.1)式は

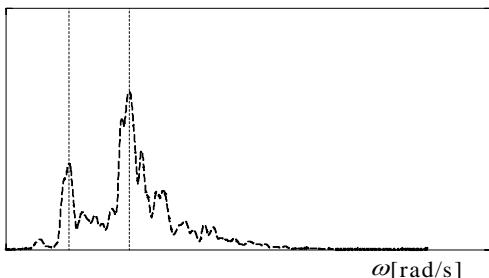


図 6.4.1 1次元波スペクトル計測例

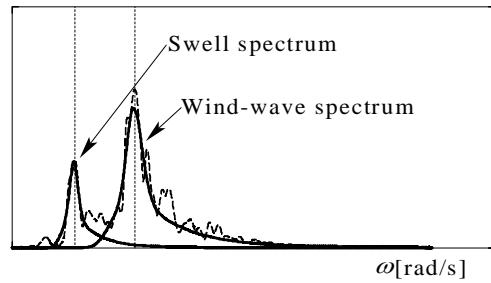


図 6.4.2 計測例と推定例

$$S(\omega, \chi) = S^s(\omega) \cdot G^s(\chi) + S^w(\omega) \cdot G^w(\chi) \quad (6.4.2)$$

となる。ここで、 $S(\omega)$  はパワースペクトルを意味し、 $G(\chi)$  は方向分布関数である。

次に波高データ同士のクロススペクトルと入力値である海域の方向波スペクトルとの関係を考える。 $i$ 番目と  $j$  番目の波高計により計測されたデータのクロススペクトル  $S_{ij}(\omega)$  は各々の応答関数

$$H_i(\omega, \chi) \text{ 及び } H_j(\omega, \chi) \text{ を用いて、}$$

$$S_{ij}(\omega) = \int H_i(\omega, \chi) \cdot H_j^*(\omega, \chi) \cdot S(\omega, \chi) d\chi \quad (6.4.3)$$

で表される。ここで、 $H_j^*$  は  $H_j$  の共役複素である。(6.4.2)式を用いると、(6.4.3)式は

$$H(\omega, \chi) = H_i(\omega, \chi) \cdot H_j^*(\omega, \chi) \quad (6.4.4)$$

として、

$$S_{ij}(\omega) = \int H(\omega, \chi) \{ S^s(\omega) \cdot G^s(\chi) + S^w(\omega) \cdot G^w(\chi) \} d\chi \quad (6.4.5)$$

となる。

ここで、(6.4.5)式を扱うにあたり、推定計算を簡単にするために、以下の仮定を施す。

- 1) うねりに関しては、1方向波とする。すなわち、うねりの主方向は考慮するが、方向分布は考えない。
- 2) 風浪については多方向波とするが、主方向まわりに分布しているとする。また、分布形状は  $\cos^{2n} \theta$  で表すことができることとし、 $n=2$  と仮定する。
- 3) うねりおよび風浪のパワースペクトルについては、それぞれ(6.4.6)式で示す JONSWAP 型のスペクトル形状で表現できるとする。

$$S_{JON}(\omega) = 155 \frac{H^{1/3}}{T^4 \omega^5} \exp\left(\frac{-944}{T^4 \omega^4}\right) (3.3)^Y$$

where  $Y = \exp\left\{-\left(\frac{0.191\omega T - 1.0}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right\}$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{for } \omega \leq 5.24/T \\ 0.09 & \text{for } \omega > 5.24/T \end{cases} \quad (6.4.6)$$

これらの仮定の下に、(6.4.5)式は

$$\begin{aligned}
S_{ij}(\omega) = & H(\omega, \chi^S) \cdot S_{JON}^S(\omega; H_{1/3}^S, T_{mean}^S) \\
& + \int_{-\pi/2}^{\pi/2} H(\omega, \chi^W + \theta) \cdot S_{JON}^W(\omega; H_{1/3}^W, T_{mean}^W) \\
& \times \cos^{2n}(\chi^W + \theta) d\theta
\end{aligned} \quad (6.4.7)$$

となる。ここで、 $\theta$ は波の主方向周りの角度を意味している。

(6.4.7)式において、左辺  $S_{ij}(\omega)$  は計測結果から、応答関数は数値計算から求められるので、簡単のために  $n=2$  とすると、未知数はうねりおよび風浪それぞれの有義波高  $H_{1/3}$ 、平均波周期  $T_{mean}$ 、および波の主方向  $\chi$  の 6 つである。

式を簡略化するために、うねりおよび風浪の方向波スペクトルと応答関数から推定したクロススペクトルをそれぞれ、 $S_{JON}^S(\omega)$  および  $S_{JON}^W(\omega)$  とし、計測値であるクロススペクトルを  $S_{mea}(\omega)$  とする。また、目的関数  $F$  を

$$F = \int |S_{mea}(\omega) - S_{JON}^S(\omega; H_{1/3}^S, T_{mean}^S, \chi^S) - S_{JON}^W(\omega; H_{1/3}^W, T_{mean}^W, \chi^W)| d\omega \quad (6.4.8)$$

とし、この  $F$  が最小となるような 6 つの未知数の組み合わせを探索すればよい。なお、等号および不等号の制約条件は

$$\int_0^\infty S_{mea}(\omega) d\omega = \int_0^\infty (S_{JON}^S(\omega) + S_{JON}^W(\omega)) d\omega \quad (6.4.9)$$

$$S_{JON}^S(\omega) \geq 0.0, S_{JON}^W(\omega) \geq 0.0 \quad (6.4.10)$$

である。

本推定法により推定したうねりと風浪のパワースペクトル及びクロススペクトルと計測値との比較結果の一例を図 6.4.3 に示す。

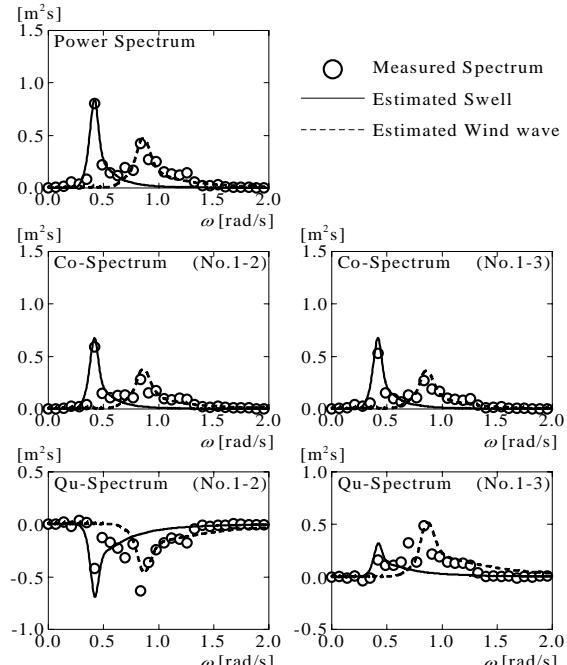


図 6.4.3 推定結果と計測結果の比較

図中、○印は計測値であり、実線はうねり、点線は風浪の推定結果を示している。また、上段の図はパワースペクトルの比較であり、中段および下段はクロススペクトルの比較である。

図より、推定結果は計測値とよく一致していることから、提案している推定方法で、拓海の遭遇している波浪場の推定が可能であることが分かる。

#### 6.4.2 統計データとの比較

相模湾中央部付近において、常時観測を行っているデータが入手出来ていないため、ここでは推定結果と統計データとの比較を行った。

使用する統計データは辻本らによりまとめられた「日本近海の波と風データベース」(WW.Japan)<sup>13)</sup>および気象庁が公表している船舶通報データ(Logbook)<sup>14)</sup>である。日本近海の波と風データベースは 1 日 2 回、気象庁から 6 分格子間隔で配信される日本沿岸波浪 GPV(Grid Point Value)を元に、(財)日本気象協会が地形による遮蔽と局所的な風波を加味し、緯度・経度 2 分格子間隔に内挿した波浪推算値の過去 10 年分のデータベースである。なお、本データベースにはうねりと風浪の区別がないため、ここでは便宜的に波周期 8 秒以上をうねりとし、それ以下を風浪として比較を行った。

##### (1) 有義波高と平均波周期

まず、うねりと風浪とを区別せず、混在した波浪の有義波高と平均波周期の出現頻度を比較した結果を図 6.4.4 及び 6.4.5 に示す。

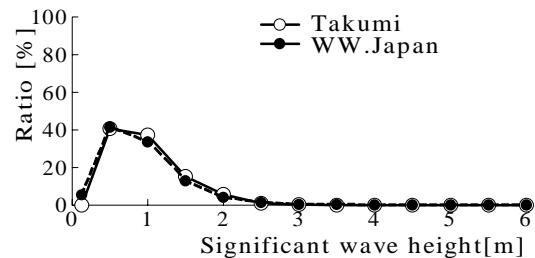


図 6.4.4 有義波高の出現頻度

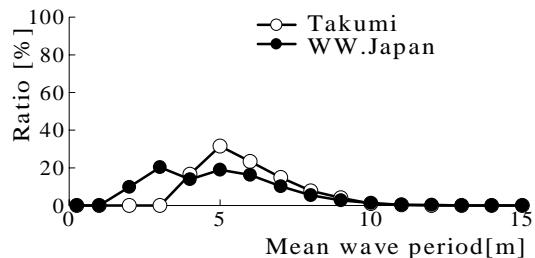


図 6.4.5 平均波周期の出現頻度

図中、○印は拓海での推定値であり、●印は統計値である。また、横軸は有義波高もしくは平均波周期であり、縦軸は出現頻度である。

これらの結果から、有義波高については非常に

良い一致を示しているが、平均波周期に関しては、短周期側でやや差が見られる結果となった。しかしながら、差が出ている点は波周期が2.5秒程度と実海域において非常に短い周期であることを考えると、波浪推算値が短周期側をやや過大評価しているのではないかと思われる。

また、うねりと風浪の有義波高についての出現頻度を比較したものを図6.4.6及び図6.4.7に示す。これらの結果は図6.4.4と同様によく一致しており、推定方法の有用性が確認できる。

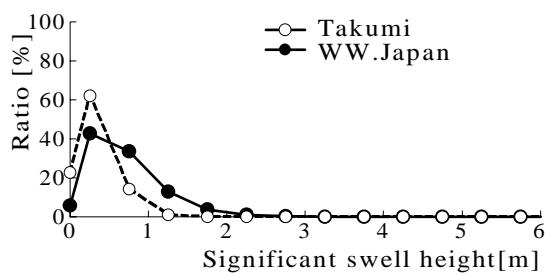


図 6.4.6 うねりの有義波高出現頻度

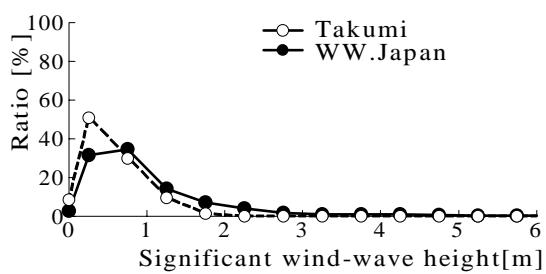


図 6.4.7 風浪の有義波高出現頻度

図6.4.8及び6.4.9にうねり及び風浪の主方向の頻度分布を示す。図中、○印は推定値、●印（灰掛け）はデータベース、実線はログブックの値である。

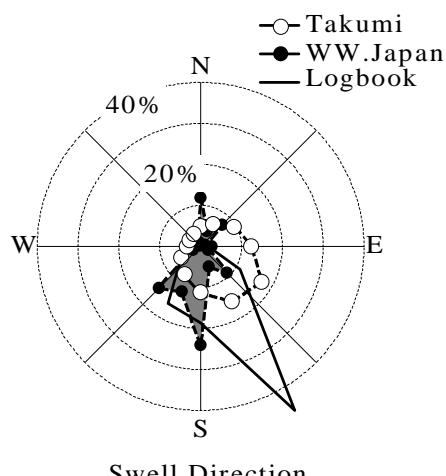


図 6.4.8 うねり主方向の頻度分布

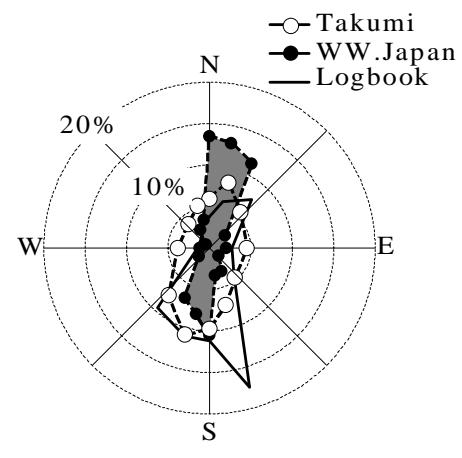


図 6.4.9 風浪主方向の頻度分布

図6.4.9から、風浪の主方向に関してはいずれも同様の傾向を示しており、これらの結果は後述の風の主方向とも一致していることから、推定が出来ていると考えられる。一方、図6.4.8に示すように、うねりの主方向に関しては推定値とログブックの傾向は一致しているが、データベースの値とはやや異なる結果となっている。これは、データベースではうねりと風浪が分けられていないことに起因するものと考えられる。図6.4.10にうねりの主方向に地形図を合わせた物を示す。この図から、推定値およびログブックの主方向が妥当であることがわかる。

以上の結果から、拓海の実海域計測値を用いた簡易推定法は、拓海の遭遇しているうねりおよび風浪の推定が可能であることが分かる。

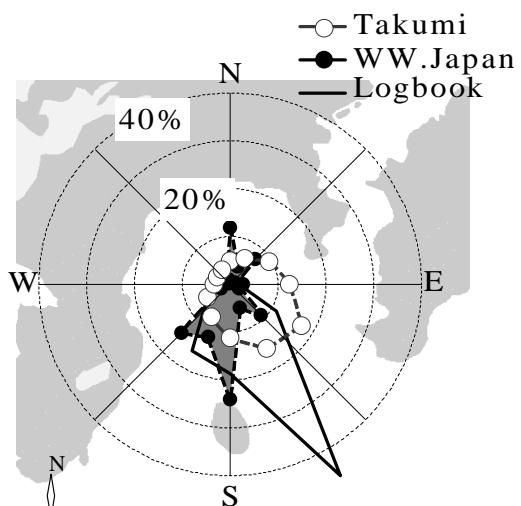


図 6.4.10 うねりの主方向と地形図

## 6.5 風場

### 6.5.1 風向の修正と付近の観測地との比較

風速計の出力は  $x$ 、 $y$  方向の速度成分とそれから求められる 3 秒平均の風速と風向である。1 次データ処理としては、1 計測の全時間 30 分平均と、他地点の平均風速等と比較するために、気象庁と同じ正時前 10 分間の平均を算出している。



図 6.5.2 相模湾周辺の風観測地点

風向の計測値は船首方向を  $0^\circ$  として右回り角度  $\theta$  で得られる。GPS による船首方位も北を  $0^\circ$  として右回り角度  $\phi$  で与えられる。したがって、真の風向は  $(\theta + \phi)$  で得られる。まずこの方位補正で妥当な結果が得られるものかどうかを確かめるために、神奈川県水産技術センター（旧水産総合研究所）が城ヶ島沖浮魚礁ブイで計測している風データ及び三浦、辻堂のアメダスの風データと比較した。なお、浮き魚礁ブイでは海面上 8m の位置で計測している。風速及び風向についての一例を図 6.5.1 に示す。これら地点の位置関係を図 6.5.2 に示す。

浮魚礁ブイは城ヶ島より約 8km 沖であり、拓海とは 10km ほど離れているが、風向・風速とも非常によく似た傾向を示している。風向の方針補正も妥当であると思われる。陸上の三浦、辻堂のデータとは変動の傾向と方位はほぼ似たような結果であるが、風速は海上の拓海、浮魚礁ブイが平均で約 2 倍程度大きい。このことは海上の風が陸上よりも強いと言わわれていることを立証している。

これらを統計的に確かめるため、4 地点について、2004 年の月毎の平均値および地点間の相関係数を求めた。表 6.5.1 に平均値を、表 6.5.2 に相関係数を示す。相関係数の定義は(6.5.1)式で示されるものである。

表 6.5.1 月毎の風速の平均値(単位:m/s)

	Takumi	Buoy	Miura	Tsujido
1月	—	7.20	2.57	2.70
2月	—	7.06	2.86	3.20
3月	6.78	7.73	3.24	3.67
4月	7.74	7.80	3.51	3.67
5月	5.69	6.67	3.58	3.23
6月	—	6.35	3.26	3.82
7月	5.18	5.77	2.86	3.08
8月	6.99	6.79	3.11	4.04
9月	7.12	7.27	2.99	3.91
10月	8.98	7.62	2.10	3.20
11月	6.81	5.52	1.66	2.58
12月	7.20	7.03	2.49	3.09
年平均	6.94	6.90	2.85	3.35

(空欄は拓海の計測値が欠測のためである)

$$r_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \left( \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right)$$

(6.5.1)

( $\bar{x}, \bar{y}$  は  $x, y$  の平均)

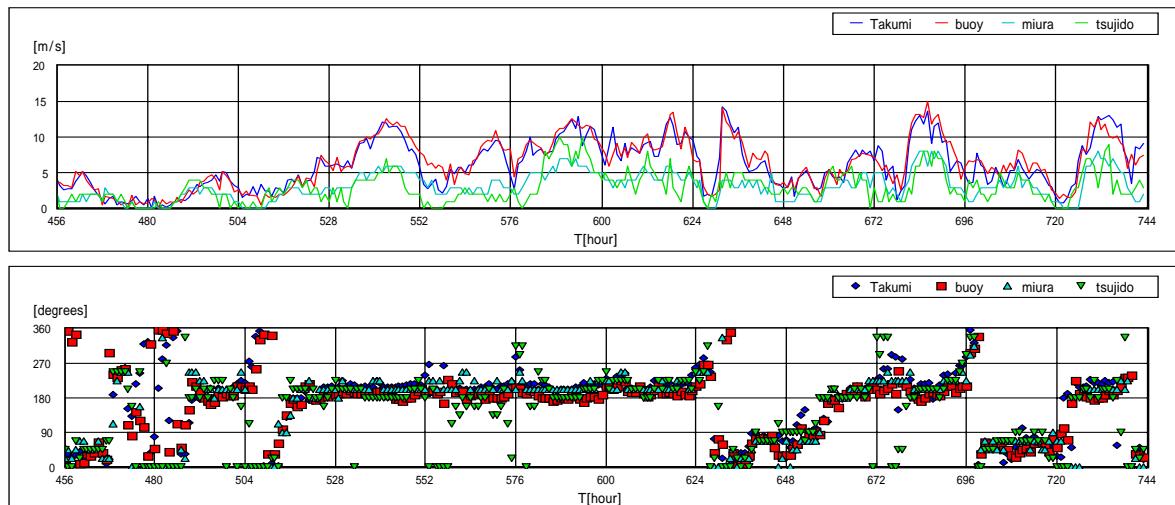


図 6.5.1 洋上風と陸上風の比較

年平均値では拓海と浮き魚礁ブイはほぼ同程度であり、三浦、辻堂の2倍以上であることが示された。また、年相関係数は拓海と浮き魚礁ブイは非常に相関が高く、三浦、辻堂ともかなり相関があると言える。浮き魚礁ブイと三浦は地理的に近い為か比較的相関が高く、浮き魚礁ブイと辻堂は拓海ー辻堂と同程度である。

なお、他地点の風のデータはweb上<sup>15)、16)</sup>で公開されているものであることを付記する。

表 6.5.2 風速の相関係数

	Takumi			Buoy		三浦
	ブイ	三浦	辻堂	三浦	辻堂	辻堂
1月	—	—	—	0.80	0.63	0.64
2月	—	—	—	0.81	0.59	0.70
3月	0.91	0.60	0.58	0.78	0.71	0.78
4月	0.89	0.73	0.65	0.78	0.63	0.68
5月	0.92	0.76	0.70	0.84	0.73	0.78
6月	—	—	—	0.82	0.70	0.75
7月	0.98	0.64	0.58	0.74	0.58	0.70
8月	0.93	0.70	0.75	0.77	0.73	0.73
9月	0.89	0.69	0.67	0.81	0.73	0.75
10月	0.92	0.50	0.70	0.72	0.77	0.65
11月	0.92	0.58	0.66	0.70	0.63	0.63
12月	0.91	0.67	0.71	0.75	0.72	0.67
年平均	0.91	0.67	0.68	0.78	0.68	0.70

(空欄は拓海の計測値が欠測のためである)

### 6.5.2 風速の変動性

風力エネルギーの利用や構造物の設計をする上では、風の乱れ強度や突風率が問題となるので、得られた風データからそれらを求めた。

乱れ強度の定義は定時計測10分間における標準偏差を平均値で割ったものである。2004年3月から2004年12月までの超音波式風速計による全ての有効計測データ(3,535)の乱れ強度を図6.5.3に示す。

図中のclassA、classBの曲線は、IEC(The International Electrotechnical Commission)が定めた風の乱れ強度に関する基準で、風車を設置するサイトの風速の乱れ強度はこの曲線を下回る範囲を推奨している。ちなみに、日本の陸上風車は山の上に立てられることが多いが、鈴鹿山系の三重県野登山で計測された乱れ強度の例<sup>17)</sup>を図6.5.4に示す。この図におけるCategoryはClassと同じ意味で使われている。拓海での計測値の99%はclassA以下にあり、陸上でのデータに比べ、海上での乱れ強度は非常に小さい事がわかる。参考までに、デンマークの洋上ウインドファームHorns revでの計測例(乱れ強度は%で表している)を図6.5.5に示す。拓海に比べても更に乱れ強度が小さいこと

が見て取れるが、これは計測高度が風車のプロペラ中心に相当する50mで計測されていることによるものと考えられる。

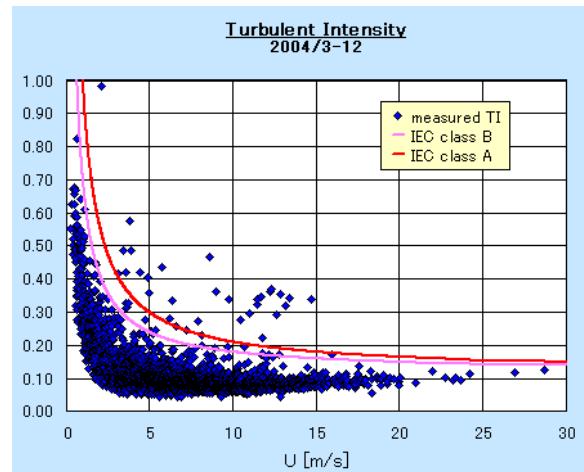


図 6.5.3 拓海で計測された乱れ強度

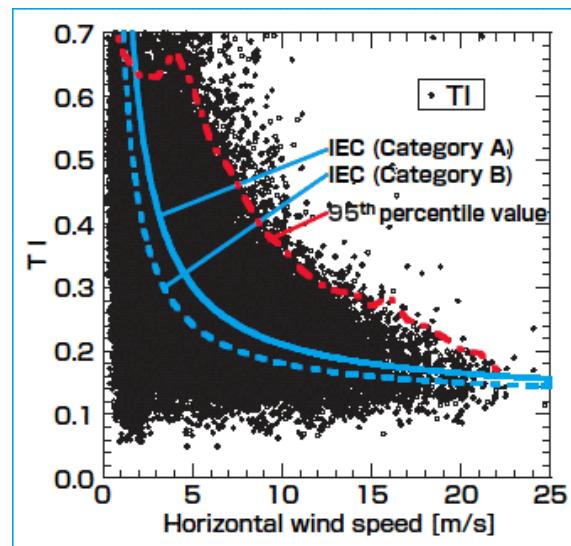


図 6.5.4 野登山で計測された乱れ強度<sup>17)</sup>

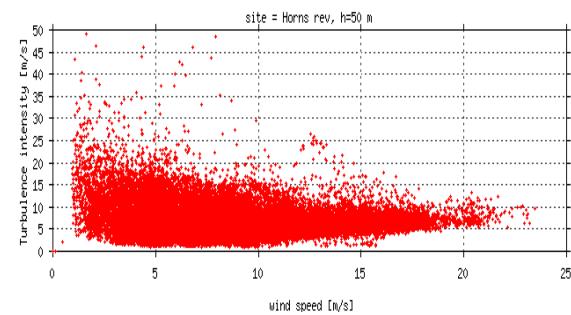


図 6.5.5 Horns rev における乱れ強度<sup>18)</sup>

突風率(ガストファクター)は気象庁の定義では”1日のうちの最大の瞬間風速/毎時の平

均値のうち 1 日の最大のもの”となっている。この定義だと、異なる計測単位の算出値を比べる場合も出てきて設計などに使うには違和感が残る。工学的には”最大瞬間風速と平均風速の比”という定義もあり、ここではそれを採用して 1 計測単位内(30 分)での最大瞬間風速と平均値の比として求めることにした。図 6.5.6 にその結果を示す。性質としては乱れ強度とよく似ており、微風で大きく強風になると小さくなる。工学的に用いる突風率としては、風速 10m/s 以上の強風時は 1.4~1.6 程度で良さそうである。

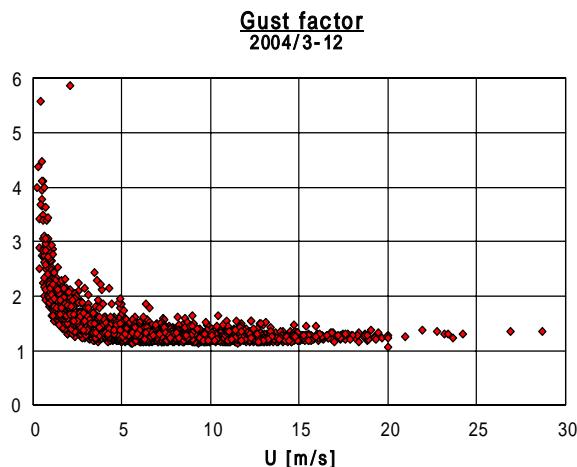


図 6.5.6 拓海で計測された突風率

### 6.5.3 出現頻度分布

次に、前項と同様の 2004 年の有効計測データについて毎時 10 分間の平均風速の出現頻度分布を調べた。図 6.5.7 にその結果を示す。分布モデルとして(6.5.2)式の Rayleigh 分布と(6.5.3)式の Weibull 分布を当てはめてみたが、ほとんど同じであった。ちなみに Weibull 分布の係数を最小自乗法で求めた結果は、 $k=1.90$ 、 $c=8.20$  であった。

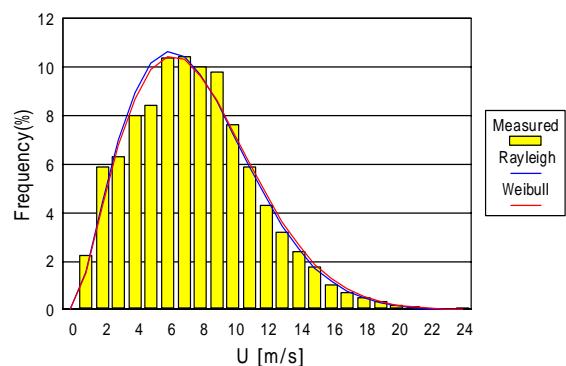


図 6.5.7 風速出現頻度分布

$$F(U) = \frac{\pi}{2} \frac{U}{\bar{U}^2} \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (6.5.2)$$

$$F(U) = \frac{k}{c} \left( \frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ -\left( \frac{U}{c} \right)^k \right] \quad (6.5.3)$$

拓海で計測された風向別の分布(風配図)を図 6.5.8 に示す。冬季のデータが欠損しているが、NNE~NE、SSW~SW に強い卓越方向を持つ細長い分布になっている。参考までに浮き魚礁ブイの 2004 年の全ての有効データ(8,772)を使用した風配図を図 6.5.9 に示す。拓海と同様、南北に強い卓越方向を持つ分布になっている。

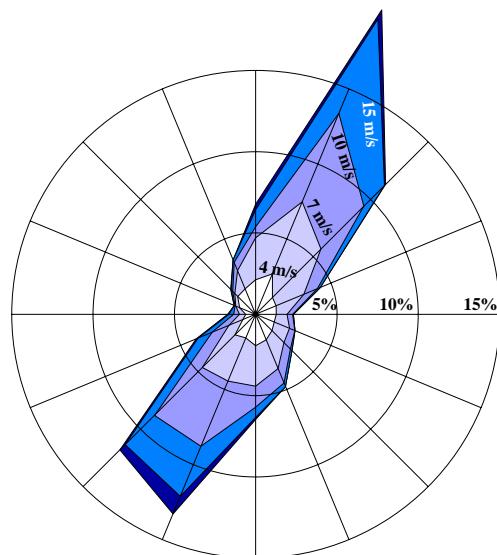


図 6.5.8 拓海での風向別頻度分布

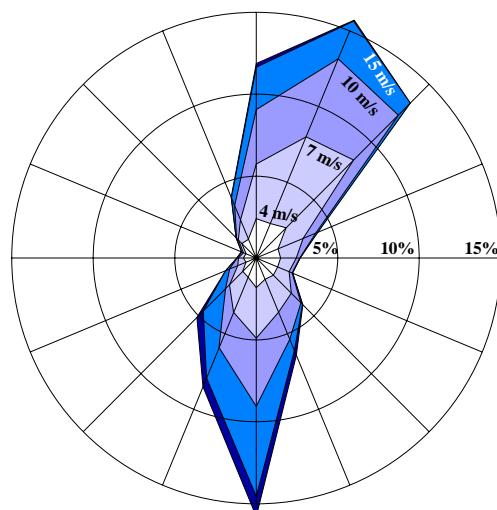


図 6.5.9 浮き魚礁ブイでの風向別頻度分布

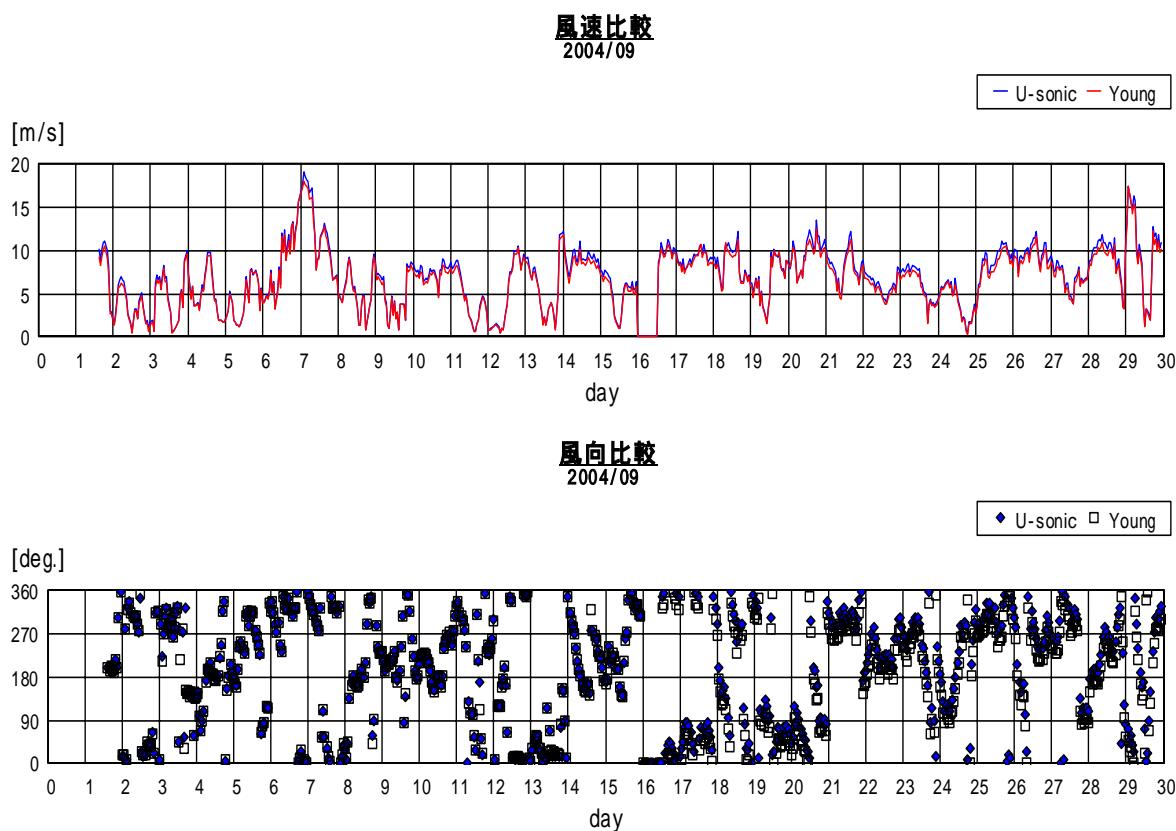


図 6.5.10 ヤング風速計と超音波式風速計との比較

#### 6.5.4 ヤング風速計との比較

2004年9月2日に超音波式風速計のバックアップの意味も兼ねて、プロペラ式風速計(通称ヤング風速計)を搭載した。2004年9月の両風速計の計測結果の比較を図6.5.10に示す。

風速はほぼ一致しているが、厳密に見るとヤング風速計の方が約5%程小さい値を示した。両者の相関を図6.5.11に示す。横軸は超音波式

風速計の風速、縦軸はヤング風速計の風速であり、直線は回帰式を表している。

風向は搭載当初は偏差1°以内でほぼ一致していたが、9月17日以降約24°のずれが生じている。これは9月17日に風速計の高度調整をした際、ポールの軸方向を動かしてしまったためである。

その後、2005年1月5日以降、超音波式風速計は電源故障のため欠測となってしまったので、このバックアップ搭載は非常に当を得た結果となった。

以上が拓海で得られた海上風の特性であるが、1年間の連続した計測が出来なかったことが非常に残念であった。第2タームの実験に於いても計測を継続し、出来る限りデータを補っていきたい。また、衛星リモートセンシングの検証データとしての利用も考えていきたい。

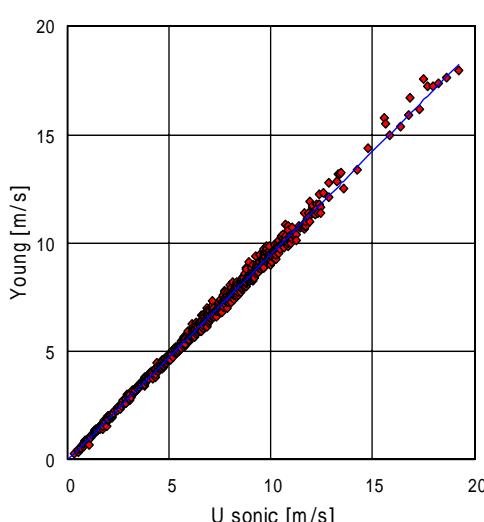


図 6.5.11 ヤング風速計と超音波式風速計の相関

#### 7.まとめ

- ・得られた結果のまとめ

相模湾中央部の水深約 1,000m の海域に一点係留された海洋肥沃化装置「拓海」に於いて、2003年6月から2005年1月まで、浮体の動搖、ライザー管に生ずる歪みおよび周囲の気象・海象の計測を行った。計測機器や拓海本体のエンジントラブルなどが頻発し、必ずしも満足のいくデータが取得できたとは言えないが、1次解析および2次解析を行った結果、以下のような結果と知見を得た。

- (1) 計測室で得られた3軸加速度計およびFOGからの計測値を用い、浮体の重心の運動および任意点の運動を求める手法を示した。
- (2) 拓海はシンカーポイントより 500m 以上離れた点を中心に東西 1km、南北 800m 程度の範囲を移動している。移動する方向は流れの変化する方向に強く依存している。
- (3) ライザー管の歪み応答は縦揺れ方向と横揺れ方向とで、取付方法に起因すると思われる固有周期の差がある。動搖の有義値との相関は、縦揺れと横揺れとでそれぞれの方向に対応する位置では強い。潮流との相関はほとんどなく、有義波高との相関は潮流よりも大きいが、動搖との相関よりも小さい。
- (4) 3 台の波高計による計測値をもとに、うねり及び風浪のスペクトル及び波向きに対し、線形計画法に基づく簡易推定法による推定を試みた。推定結果を公表されている波浪の統計データと比較したところ、概ね良好な推定が得られ、拓海の遭遇している海象が推定可能であることがわかった。
- (5) 風向風速計の計測値をもとに、風エネルギー利用の観点から、本海域の風の特性を明らかにした。洋上の風速は相模湾沿岸部の風速と比べて約 2 倍以上であり、乱れ強度も陸上に比べて非常に小さいことが示された。

#### ・今後の活用の仕方

実海域計測に入る準備期間が短かったことと、これまでにない計測プラットフォームへのアプローチの不便さにより、計測および収録機器のトラブルが生じたことはあったが、得られたデータはいずれもフィールドデータならではの貴重な内容を含んでいる。今後も計測プラットフォームが提供される機会があれば、種々の実海域実験に積極的に参加していくべきと考える。そのためには、汎用性のある計測・収録機器の整備とともに、データ通信関係の技術も取り入れる必要がある。

相模湾中央部という位置は、衛星からのリモートセンシングにおいて陸域の影響を受けに

くいので、本計測で得られた波、風のデータは衛星リモートセンシングの検証データとして活用できるものと思われる。また、風力発電の世界では気象モデルを用いた風況予測シミュレーションが行われるが、その検証データとしての活用も考えられる。今後、その方面的研究者との連携もとつて活用していきたい。

ライザー管の歪みデータは、今後同種のライザー管を設計する上で貴重な参考データとなるはずである。また、動搖関係のデータは、スパー型浮体設計の際に活用できるものと思われる。

#### ・今後の研究の発展性

2005 年 4 月より 3 年間の予定で「海洋肥沃化システム技術確立事業」という形で第 2 タームの事業が開始され、これに参加することになった。引き続き本計測で使用した機器での計測を続行すると共に、新たな計測機器を搭載して計測を実行している。

2 次解析はとりあえず興味のあるものについて行ったのみであり、別の項目や観点からの解析もあり得る。今後取得されるデータも含めて、新たな知見が得られるような 2 次解析を実施していきたい。

#### 謝辞

本計測は、社団法人マリノフォーラム 21 との共同研究契約を介して結成された研究コンソーシアムの元で行われたものである。マリノフォーラム 21 の関係者および研究コンソーシアムのメンバーである、(株)大内海洋コンサルタント、(株)IHI マリンユナイテッド、東亜建設工業(株)、JFE エンジニアリング(株)の関係者に御礼申し上げる。

GPSデータについては(株)日本無線の協力を得た。関係者に御礼申し上げる。

また、拓海渡船時に指揮を執っていただいた商船三井テクノトレード(株)および通船・佐円丸の関係者にも大変お世話になった。厚く御礼申し上げる次第である。

#### 参考文献

- 1) 鈴木達雄:「人工海底山脈による海洋での食糧増産の可能性」、第 30 回海洋工学パネル、日本海洋工学会、2004.7、pp.59-66
- 2) 濑戸雅文、藤田恒美、川原幹雄:「大型廃船をリサイクルした人工湧昇流発生礁の開発に關

- する基礎的研究」、第 16 回海洋工学シンポジウム、日本造船学会、2001.7. pp.159-164
- 3)大内一之：「海洋肥沃化装置「拓海」」、第 30 回海洋工学パネル、日本海洋工学会、2004.7. pp.49-58
- 4)長井浩、牛山泉、藤本聰：「SSM/I 衛星と沿岸データの風況解析による海上風力発電の賦存量」、太陽／風力エネルギー講演論文集、2002、pp.573-576
- 5)高木又男、新井信一：「船舶・海洋構造物の耐波理論」、成山堂、初版、1996. p795
- 6) 国 土 地 球 测 地 部 ホ ー ム ペ ー ジ 、  
[http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/algori\\_thm/](http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/algori_thm/)
- 7)福田淳一：「船体応答の統計的予測」、耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、1969.7. pp.99-119
- 8)竹沢誠二他：「実船試験と予測値の対応」、第 2 回耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、1977.12. pp.181-198
- 9)平山次清：「航走中の船体運動による海洋波スペクトルのリアルタイム推定（その 2）」、関西造船協会誌、第 198 号、1985. pp.17-29
- 10)井関俊夫他：「船体運動データを用いた方向波スペクトルの Bayes 推定（第 2 報）」、日本造船学会論文集、第 176 号、1994. pp.99-105
- 11)吉元文博他：「航走する船舶が遭遇する方向波スペクトルの推定法について」、日本造船学会論文集、第 176 号、1994. pp.107-116
- 12)前田克弥他：「非線形計画法を用いた方向波スペクトルの推定」、西部造船会会報、第 98 号、1999. pp.97-104
- 13)辻本勝他：「日本近海の風と波データベースの構築」、第 5 回海上技術安全研究所研究発表会講演集、2005.6. pp.177-180
- 14)日本海洋データセンター | 日本近海波浪統計図集  
<http://www.jodc.go.jp/harotokei/index.html>
- 15)神奈川県水産技術センターホームページ  
<http://www.agri.pref.kanagawa.jp/suisoken/top.asp>
- 16)気象庁 気象観測（電子閲覧室）ホームページ  
<http://www.data.kishou.go.jp/>
- 17)小垣哲也、松宮輝、小川晋：「J クラス風モデル開発構想」、第 25 回風力エネルギー利用シンポジウム、日本風力エネルギー協会、2003.11.

pp.221-224  
 18)Database on wind characteristics  
<http://www.winddata.com/>

#### 付録 研究発表リスト

- (1) Katsuya MAEDA, Kenkichi TAMURA, Kentaroh KOKUBUN, Yutaka OHKAWA, Ryuzo TAKAI and Kyoko SHINTOMI: Model Tests of Ocean Nutrient Enhancer "TAKUMI" in Deep-sea Basin, ISOPE, 2004, 5
- (2) Katsuya MAEDA, Kenkichi TAMURA, Kentaroh KOKUBUN, Yutaka OHKAWA, Ryuzo TAKAI and Kyoko SHINTOMI: Model Tests of Ocean Nutrient Enhancer "TAKUMI" in Deep-sea Basin, Oceans 2004, 11
- (3) 前田克弥、田村兼吉、大川豊、高井隆三、國分健太郎、新富恭子：深海水槽における海洋肥沃化装置「拓海」の模型実験について、造船学会講演会論文集第 4 号 pp. 37-38、2004. 11
- (4) 大川豊、田村兼吉、矢後清和、前田克弥、高井隆三、伊藤和彰、返町秀治、宮部宏彰：「拓海」の挙動と設置海域の海象について、第 18 回海洋工学シンポジウム、2005. 1.
- (5) 前田克弥、宮部宏彰、田村兼吉：海洋肥沃化装置「拓海」のライザー挙動特性について、第 73 回マリンエンジニアリング学術講演会、2005. 5
- (6) 大川豊、田村兼吉、矢後清和、前田克弥、伊藤和彰、高井隆三、新富恭子、大内一之：「拓海」の挙動とライザー管の歪み応答、平成 17 年度（第 5 回）海上技術安全研究所研究発表会講演集 pp. 57-62、2005. 6.
- (7) Yutaka OHKAWA, Kiyokazu YAGO, Kenkichi TAMURA and Katsuya MAEDA: Measured Results of Oceanographic Observation by using "TAKUMI" --- About Offshore Wind ---, 2005 ISOPE OMS, 2005, 10.
- (8) Katsuya MAEDA, Yutaka OHKAWA and Kenkichi TAMURA: Measured Results of Oceanographic Observation by using "TAKUMI" --- About Wave Condition ---, 2005 ISOPE OMS, 2005, 10.