

平成 2 1 年度  
船舶復原性能監視装置の技術開発  
成果報告書

平成 2 2 年 3 月

社団法人 日本船用工業会



## はしがき

本報告書は、競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて、平成 20 年度及び平成 21 年度に社団法人日本船用工業会が実施した「船舶復原性能監視装置の技術開発」の成果をとりまとめたものである。

本開発は、船舶の動揺を動揺センサーにより、時々刻々と変化する動揺を計測し、得られた時系列データを統計的手法により動揺の固有周期を計算し、その GM 値を連続的に推定しながら表示すると共に、将来時刻の GM 予測値を表示する監視装置の製作を試みたものである。

この監視装置により表示された GM 値から、乗組員は現在の GM 値をあらかじめ知ることにより、復原性の喪失予測を事前に知ることができ、復原性喪失以前における、あらかじめ可変に設定された警報点に達した時点で、装置より警報信号出力を送出し、ブザー・ランプを吹聴・点灯することで、大傾斜や転覆事故を未然に防止することを目的とした開発である。

開発は、平成 20 年度、21 年度の 2 年計画で株式会社宇津木計器に委託して行われ、その 2 年度分の報告書としてここにまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

平成 22 年 3 月

(社) 日本船用工業会

# 目 次

1. 事業の目的	ページ
1.1 概要	1
1.2 開発の目的	1
2. 事業の目標	2
3. 実施内容	
3.1 GMモニタリング装置の開発基本計画	2
3.1.1 高性能動揺センサーの開発	2
3.1.2 光ファイバージャイロとの比較	5
1)練習船汐路丸における比較	5
2)内航自動車運搬船における比較	8
3.2 GMモニタリング装置の試作	11
3.3 実船の動揺データによる解析ソフトの検証	12
3.3.1 練習船汐路丸のデータによる検証	12
3.3.2 外航コンテナ船のデータによる検証	14
3.3.3 自動車運搬船蓉翔丸のデータによる検証	16
3.4 工場試験及び実船実験	
3.4.1 工場試験	19
3.4.2 水槽試験	21
3.5 GMモニタリング装置の実船実験	
3.5.1 外航ばら積船	22
3.5.2 内航コンテナ船	23
3.5.3 実船搭載による解析結果	23
3.5.4 実用化にむけた試作機の完成	27
3.5.5 試作機の実船搭載	32
3.6 GMモニタリング装置の改善	33
4. まとめ	33

## 1 事業の目的

### 1.1 背景

近年世界的な船舶の建造量の増大傾向から、船員の確保難により総体的に乗組員の技量が低下してきている。この結果、船舶の安全運航に欠かせない基本的情報である船舶の復原性すら感知できず、大傾斜あるいは転覆に至る危険な事故事例は後を絶たない。

至近の事故事例として、アラスカ沖での自動車運搬船の事故がある。この自動車運搬船は船型構造から背高船型で風圧面積が広いため風を受け易く、風による圧力の増加と共に、操船が困難な船型であり、標準的に5万トンクラスの大型船で、1台平均1.6トンとしても約5000台満載で積載しても8000トン程度の積載量であり、このように満載状態であっても積載物が軽量となった状態で航海した。

この状態を、極端な表現をすると、満載であっても空気を運んでいるようなものであり、依って、船体を安定させるにも、自動車が満載状態であっても、安定しない状態であった。本船はこのような条件下で安定を保ちつつ、さらにIMOのバラスト水管理規制に適合するため、米大陸2000海里外で航行しながらバラスト水の張排水作業を開始した。複雑な手順を経て入れ替え作業を実施したが、操作手順・計算ミスから復原性を喪失し転覆寸前の大傾斜を引き起こした。

この事故は明らかに復原性を人為的に喪失させた「人為的転覆」である。

このような事例は航海中に発生しており、その主たる原因は人為的なミスと気象・海象である。船舶が危険な状態になる前には、従来、積み付け計算で船舶が係船状態の動かない静的なGM値(GoM)を計算し、そのGoM値が数十センチ以下にならないようにバラスト水と積み付けで調整していた。

しかし、船舶が航海に出ると、海流、風向き、波浪、波長などの気象・海象の変化、船速、波向きなどの運航状態の変化、積荷の変化、バンカーオイルの消費、などが時々刻々変化し、そのためにGM値が変化し、船舶が危険な状態になる。

また、バラスト水の排出規制により、航海中にバラスト水の注排水を行うときにもGM値が変化し危険な状態になる。

### 1.2 開発の目的

そこで、本開発の目的は、動揺センサーにより、時々刻々と変化する船舶の動揺を計測し、得られた時系列データから最小AIC法と呼ばれる統計的手法を用いて自己回帰モデル(動揺センサーで計測されたデータに何らかの順序関係がある場合の信号処理手法)と呼ばれる確率モデルを刻々と同定し、得られた自己回帰モデルの主な固有値から動揺の固有周期を計算し、そのGM値を連続的に推定しながら表示する(船体動揺安定性能)と共に、あわせて動揺センサーの出力信号から確からしい値をカルマンフィルタの予測機能を使って将来の時刻のGM予測値を表示することを開発の目的とする。

この開発の効果として、表示されたGM値から乗組員は現在のGM値を、あらかじめ知ることにより復原性の喪失予測を事前に知ることができる。

また、近い将来の動揺の最大値を同時に知ることが可能となると同時に、その予測に基づき前もって回避行動を起こすことが可能となり、「人為的転覆」から未然に回避行動を喚起し、安全且つ船員の負担軽減ができる装置の開発を目的とする。

## 2 事業の目標

1) 復原性喪失までの過程のGM値を表示できる装置の開発。

GMモニタリング装置には動揺センサー部及び演算・表示部の2つの構成を開発し、時々刻々の動揺周期を動揺センサーで計測し、動揺のデータを、AICの統計的手法を用いて、確率モデルを刻々と蓄積しながら、そのモデルの主な固有値より固有動揺周期を計算し、GM値を表示継続しGMの傾向を表示する。

また、このGM値からGZ（復原テコ）の演算を行いGZモニタリング装置としても使用可能なものとする。

2) GM計測値より、可視可聴の警報装置を設ける。

復原性喪失以前に、あらかじめ数段階に設定された危険サイドの警報点に達した時点で、段階的にランプ及びブザーにより、可視可聴の警報をもって知らせる。

## 3 実施内容

次の実施計画に基づき、GMモニタリング装置の開発に取り組んだ。

実施項目	平成20年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
GM装置の開発計画	←————→			
GM装置の試作			←————→	
	平成21年度			
GM装置の工場実験	←————→			
GM装置の実船実験		←————→		
GM装置の改善		←————→		
評価			←————→	
報告書の作成				←————→

### 3.1 GMモニタリング装置の開発基本計画

GMモニタリング装置は船体の動揺横揺れ周期を常時計測し、その信号を処理するソフトウェアを開発してGM値を計算、予測するものであり、装置全体の基本計画とともに、動揺センサーの開発から開始した。

現在、動揺計測にはジャイロが使用されているが、高価なものであり、モニタリング装置を商品として広く普及していくには適さない。このため新たな高性能動揺センサーを開発する必要がある。

### 3.1.1 高性能動揺センサーの開発

高性能動揺センサーは、動揺の絶対値でなく、動揺の周期を正確に検知できることが目的で、従来、(株)宇津木計器で生産している傾度計センサーでは停泊中の船舶の傾度計測に適した静的な傾斜を正確に検知する検出器であったが、静的な精度は損なわずに、しかも航行中の動揺を検知することが可能な高性能動揺センサーを開発、試作した。

開発は、(株)宇津木計器の傾度計の技術を基礎としたもので、傾度計センサーの角度レンジに対する、ばね材料の見直し、加工精度の向上を計り、高性能動揺センサーとしての応答速度改善のためダンパー油の粘性の最適化を行った。

図3-1は静的な傾斜出力のグラフで30度の検出範囲に対して2%以内の精度であった。この精度は動揺の検知に関しては十分な精度である。また応答速度は0.4秒であった。

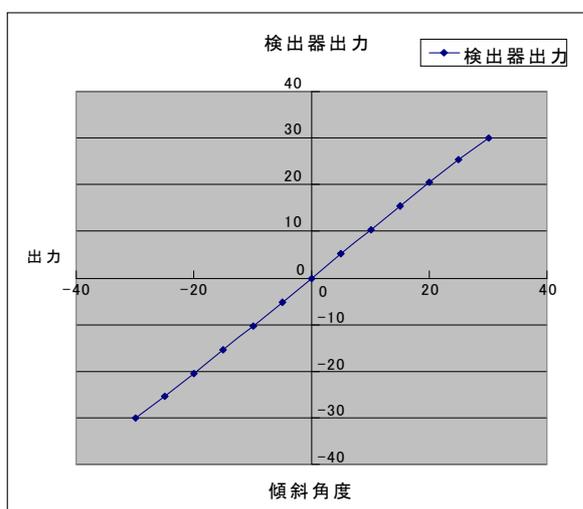


図 3-1

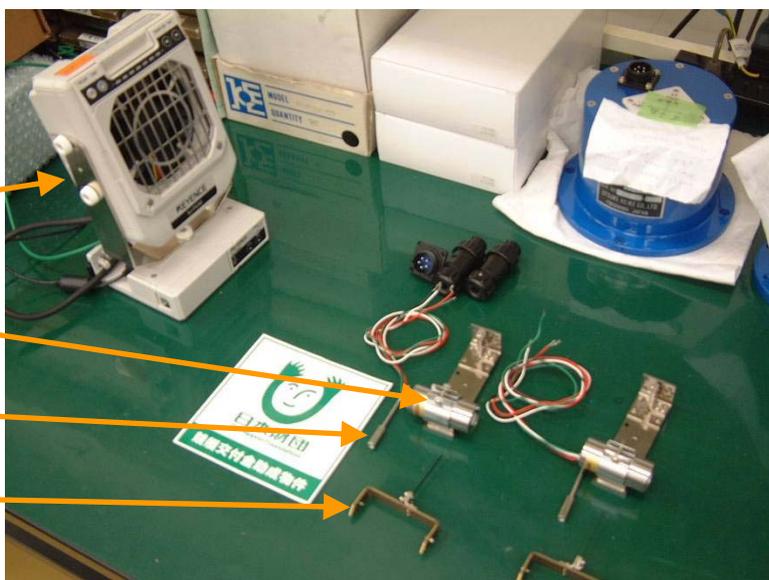
高性能性能動揺センサーの  
組立部品と組立状況

除電ブローア

差動トランス

検知コア

コア吊具



### 高性能動揺センサーの仕様

トリム : 5 度  
ヒール : 30 度  
電源 DC24 V  
出力 DC  $\pm 1$  V  
精度 2%  
追従性 0.4 秒



完成した 3 台のうちの 2 台  
2 方向高性能動揺センサー

### 3.1.2 光ファイバージャイロとの比較

船舶の動揺周期に高性能動揺センサーの精度検証を行うため、実際に動揺データ取得試作機を製作し、船舶に搭載して動揺センサーと光ファイバージャイロの両方で同時に動揺データを取得し、その比較により評価した。

この計測で使用したデータ取得用の試作機は（下記写真参照）

光ファイバージャイロ 日本航空電子工業 製 JCS7402-A01

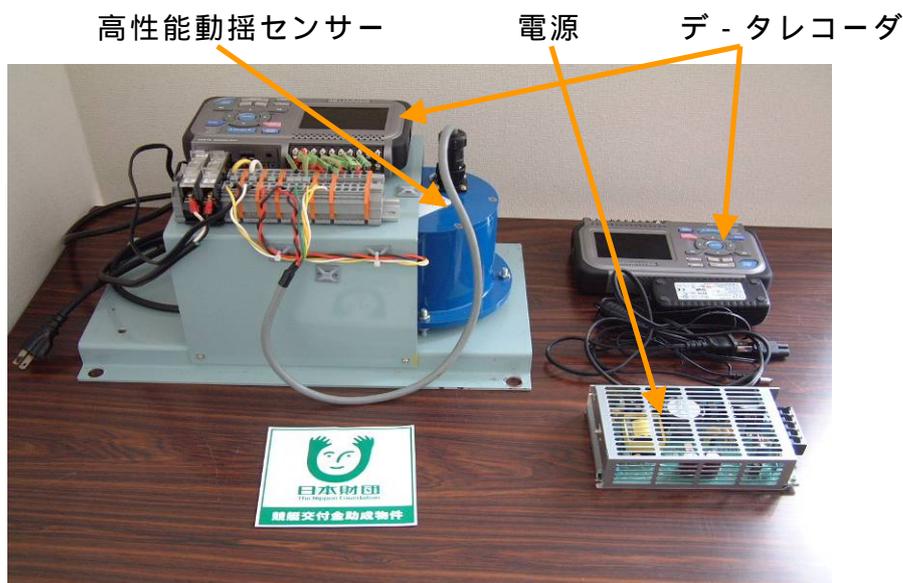
Pitch/Roll 45 度  $\pm 10$ V Yaw 180 度  $\pm 10$ V

高性能動揺センサー 宇津木計器 製 CSM-2DD

Trim 5 度 Heel 30 度  $\pm 1$ V

データレコーダ グラフテック製 GL200A

動揺データ取得用  
試作機



### 1) 練習船汐路丸における比較

このデータ取得用試作機を使用して東京海洋大学の汐路丸に搭載し、光ファイバージャイロとの比較を行った。

汐路丸の諸要は下記の通り。

LPP	49.93 m
BP	10.00 m
深さ	3.80 m
総トン数	425 T
実験時点の喫水	2.92 m
建造時の喫水	2.86mでの $G_0M$ は 1.15m
固有動揺周期	$T=7.61\text{sec}$

光ファイバージャイロ用電源

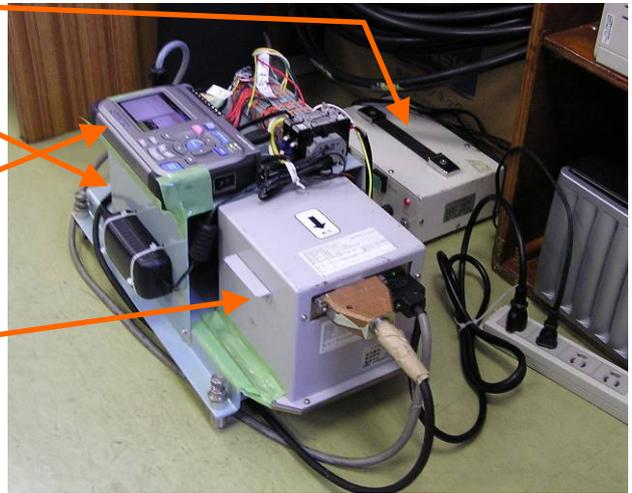
(借用機器)

高性能動揺センサー

データレコーダ

光ファイバージャイロ

(借用機器)



データ取得用試作機 + 光ファイバージャイロ

動揺データ取得用試作機は  
Super Structure Deck の  
Laboratory に設置した。

試作機



赤 : ヒール  
 マゼンダ : ロール  
 緑 : トリム  
 青 : ピッチ

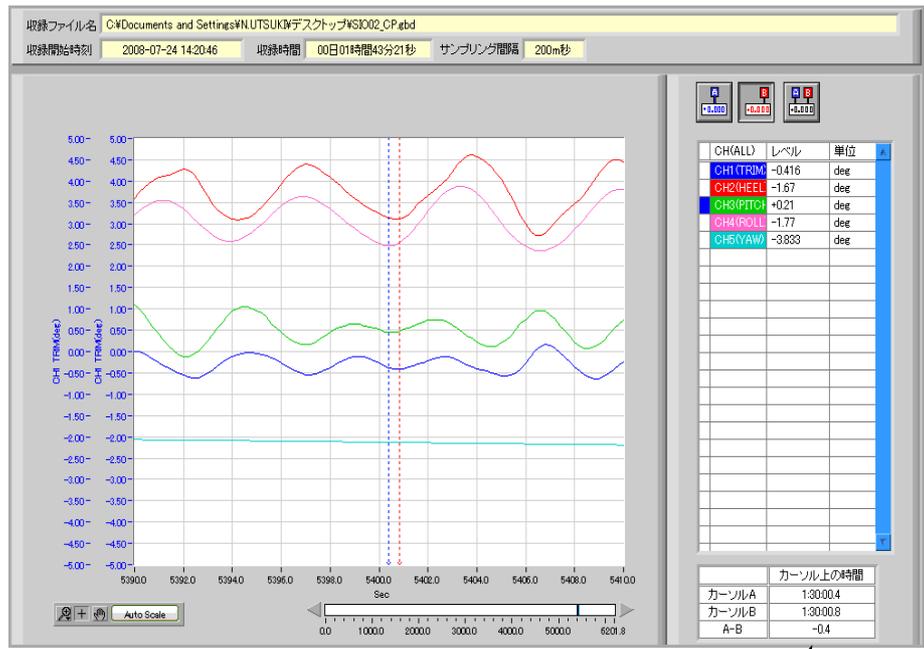


図 3-2

ロールとヒールの追従差

図 3-2 は、航海中の動揺をデータ取得用試作機と光ファイバージャイロで計測し計測遅延を計測した。高性能動揺センサー出力をヒール、トリム、光ファイバージャイロ出力をロール、ピッチと呼ぶことにする

このグラフでヒールとロールの出力に 0.4 秒の追従差があるが、本開発に必要な動揺周期計測は取得波形から、周期にはこの追従差は影響を与えないと考えてよい。

次に、高性能動揺センサーがエンジン振動によって受ける影響を計測した。  
 図 3-3-1、図 3-3-2 参照

エンジン振動の周波数は固有動揺周期と大きく異なっている。  
 固有動揺周期は 5 秒から 20 秒でエンジン振動は 0.1 秒以下であることから、固有動揺周期計測には影響されない。  
 停泊中の M/E を運転状態で、計測を行った。ヒールには回転数 550rpm のエンジン振動が重畳しているが、トリムは影響していないことがわかる。

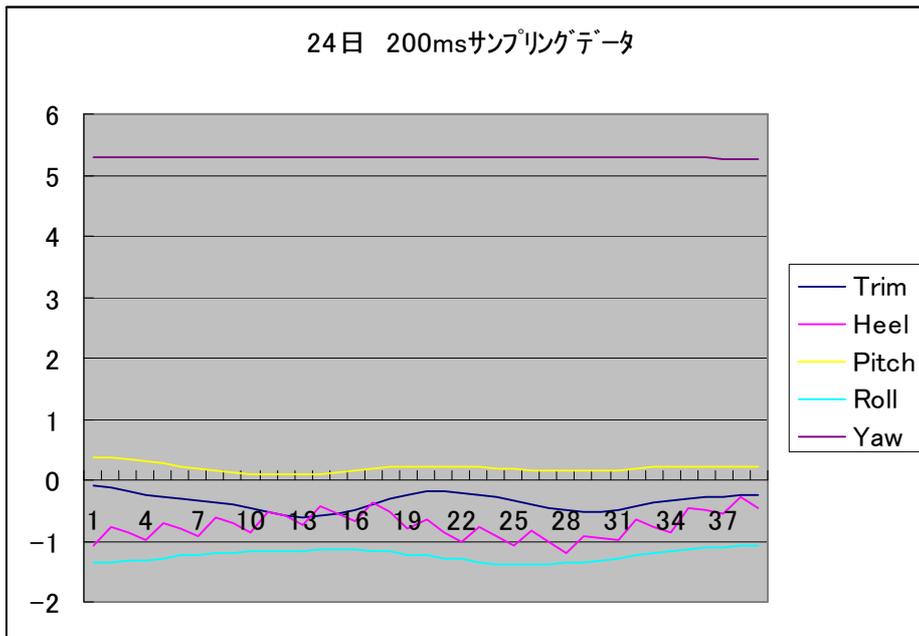


図 3-3-1

停泊中に M/E を止めた状態で、計測を行った。  
 エンジン停止しているため動揺のみで振動していない。

ヒール：青  
 ロール：マゼンダ

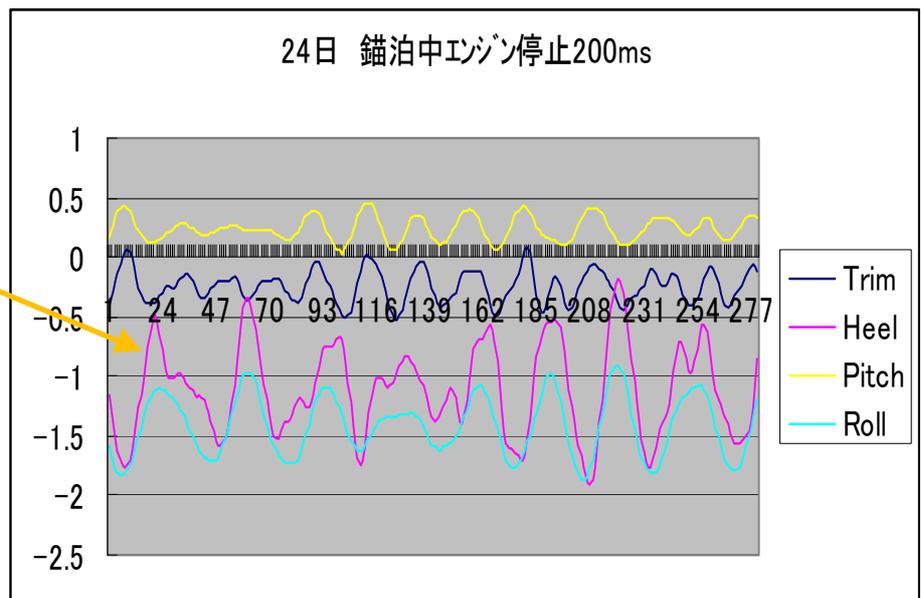


図 3-3-2

高性能動揺センサーのヒールと光ファイバージャイロのロールの波形を比較するとヒールの凹凸がロールより感度良く検知しているように見えるが、アンカーや波の影響による角加速度が検知している。しかし動揺の周期は正確に検知していることが分かる。

2008年7月の東京海洋大学  
実験航海の航路

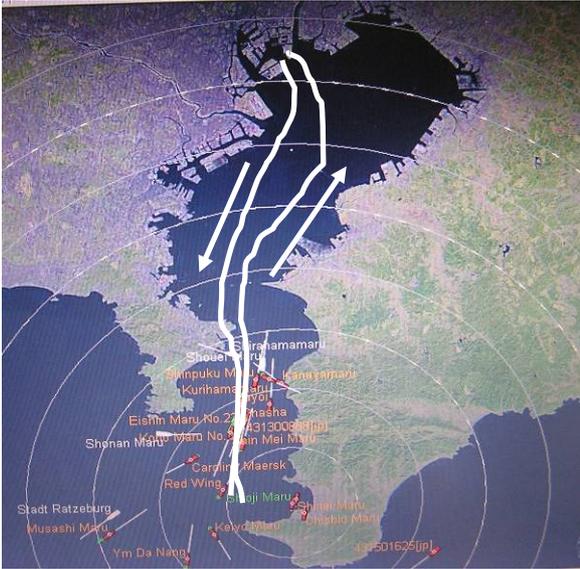


図 3-4-1 実験航海航跡

実験公開中に船舶復原性能監視装置の計測用に進路を指定して航海した。この計測は海流、波向き、風向きの影響を測定した。

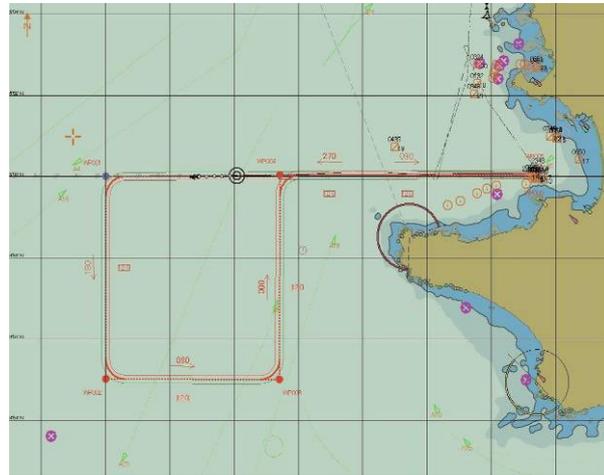


図 3-4-2 進路変更時の計測跡

2) 内航自動車運搬船における比較

自動車運搬船に、乗船はしなかったが、動揺データ取得用試作機をエンジンルームに設置し、データレコーダで高性能動揺センサーと光ファイバージャイロの動揺データを記録した。

総トン数	14,790 トン
全長	167m
幅	30.2 m
速力	23.5 ノット



図 3-5 は動揺中のデータをヒールとロールの比較を行いヒールのデータはロールのデータより 0.4 秒の遅れがあるが、汐路丸のデータ図 3-2 と同じ遅れで、船体の大きさによる差が生じていないことが分かる。

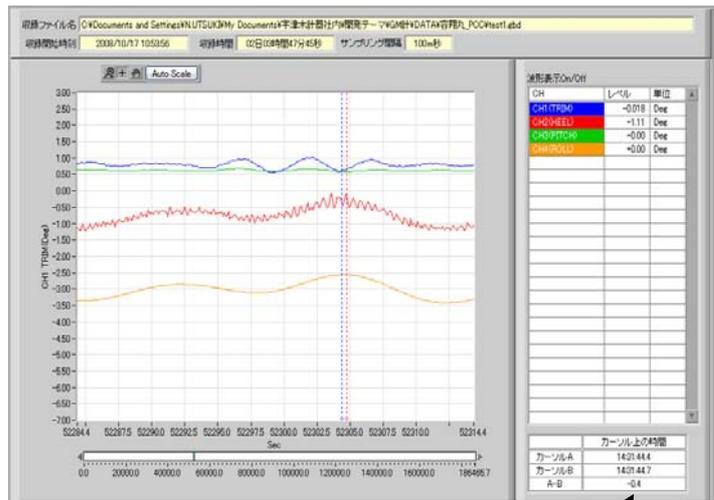


図 3-5

ロールとピッチの追従差

本開発で必要な横揺れ固有周期の推定値を推定方法から考えると必ずしも高性能動揺センサーと光ファイバージャイロの絶対値が正確に一致する必要はない。しかし、周期は合っている必要がある。

これらの図 3-2、図 3-5 を見ると高性能動揺センサーは光ファイバージャイロと比べ絶対値がやや大きいものの周期はよく合っていると見える。

絶対値が大きい理由は高性能動揺センサーの慣性力が大きいからで、今回の計測には宿命的誤差にならないと言える。

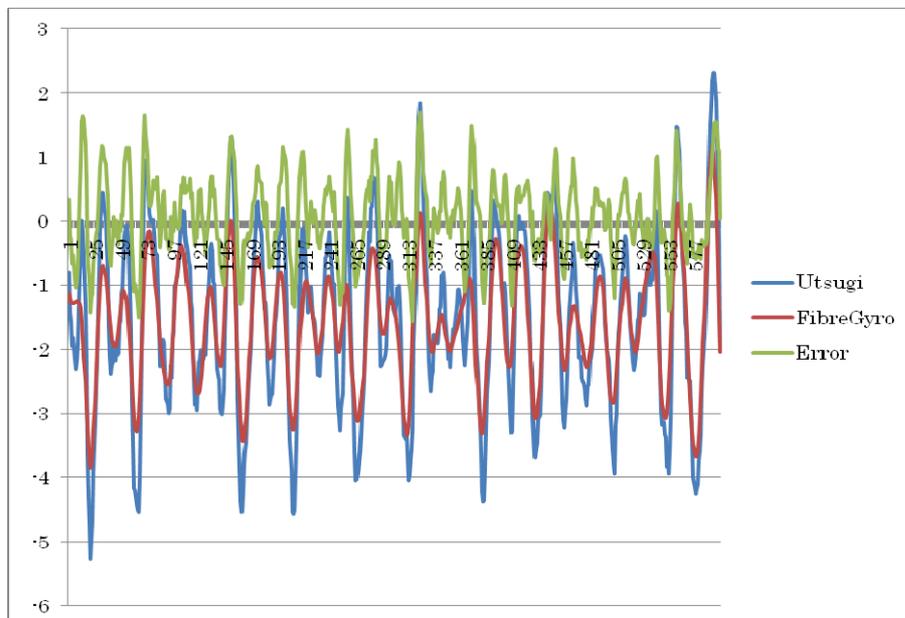


図 3-6 高性能動揺センサーと光ファイバ式の時系列の比較

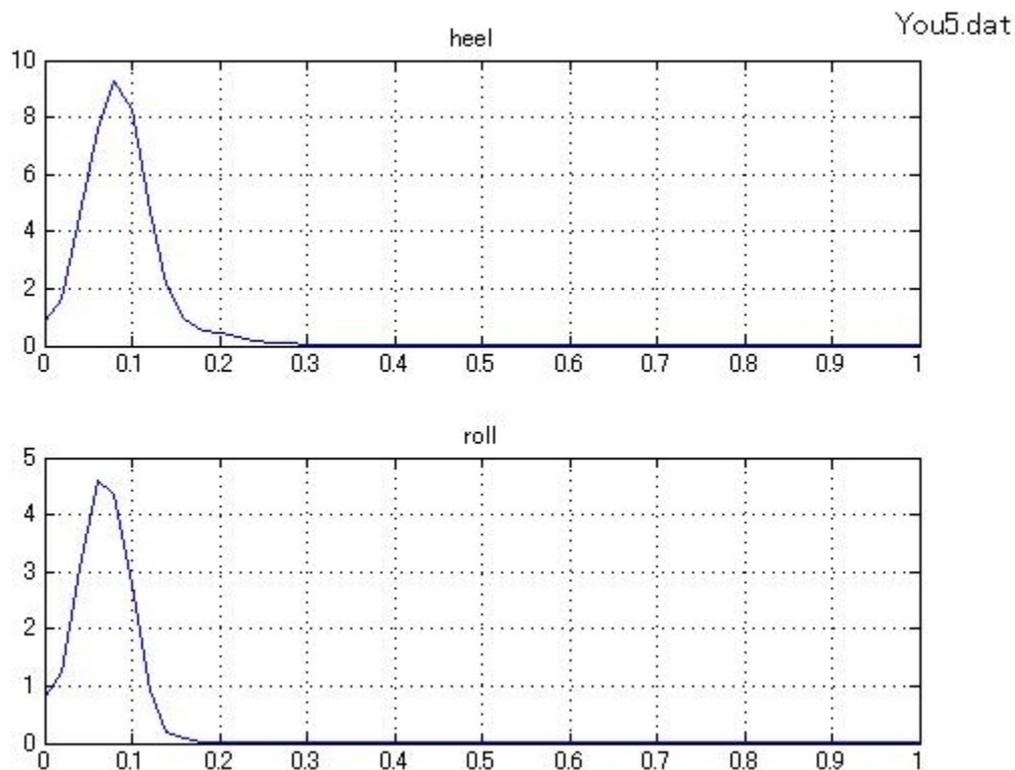


図 3-7 スペクトルの比較  
(Blackman Tukey 法、x 軸は周波数(Hz)、y 軸はスペクトル)

図 3-7 は実船実験の動揺データ取得結果からのスペクトラムの比較で、上図が高性能動揺センサー、下図が光ファイバージャイロのスペクトルである。スペクトラムは Blackman Tukey 法で計算した。

図 3-6 からわかるように絶対値はともかく、周波数特性は良く合っている。

従って高性能動揺センサーは、動揺の絶対値を平均約 10% 程度高く示しているが、周波数特性は精度が良く、今回の用途に必要な機能を備えた動揺センサーであると判断できる。

### 3.2 GMモニタリング装置の試作

モニタリング装置は、高性能動揺センサーの実船で取得したデータを解析するものであるが、その試作機として20年度はPCを使用して製作を行った。

GM解析するためのPC

高性能動揺センサー信号の入力A/Dコンバータ

解析するためのアプリケーションソフト

データレコーダ

解析中の動揺データの波形観測用スコープ



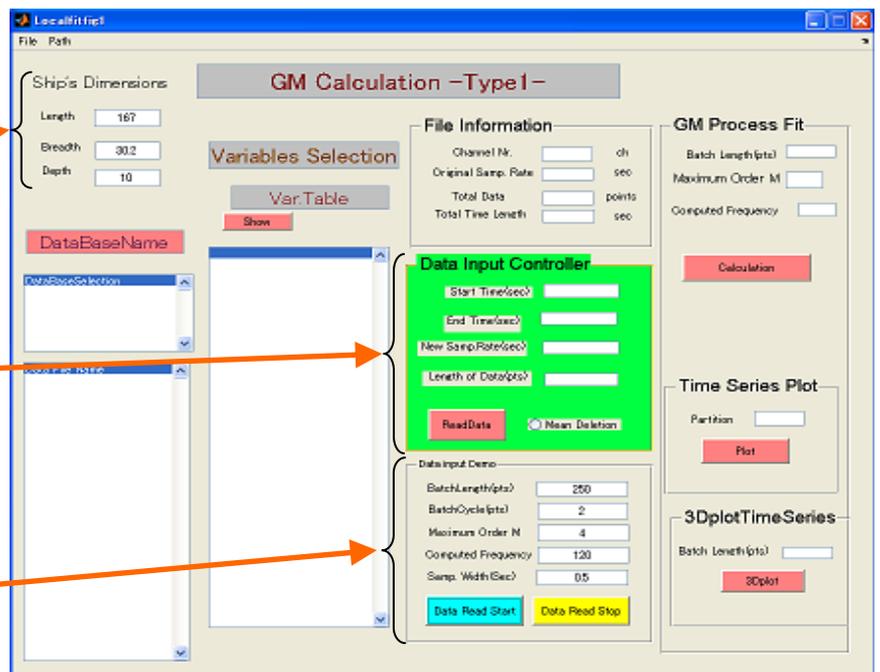
今回製作したソフトウェアを検証するため、20年度に取得したさまざまな動揺データをこの試作PCに入力し、GMを解析するために今回作成したアルゴリズムの検証を行った。

### GM解析に必要な設定画面の説明

対象船舶のデータ  
Length  
Breadth  
Depth

計算するデータの  
入力フォーマット

解析に必要なデータ  
解析データ数  
解析インターバル  
サンプリング間隔



## G M解析結果の表示画面の説明

### サンプルデータ

不安定領域

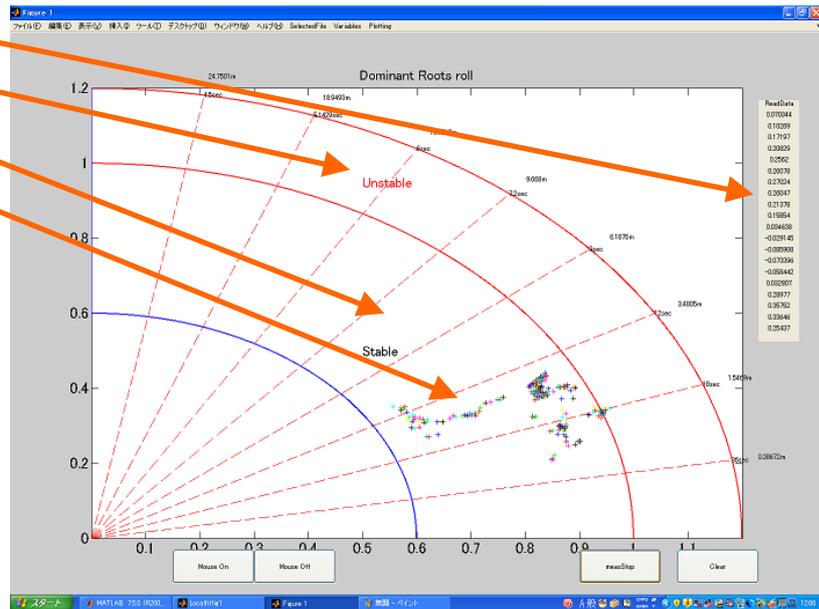
安定領域

### G Mの解析結果

+マークで表示

AIC を使用した GM 値の解析結果で、+印が時系列で表示をしたもの。

円弧の“1”が安定・不安定の境界線であり、解析結果が“1”を乗り越えると船舶の航行が危険な状態であることが視認でき、安全航海の指標になる。



### 3.3 実船の動揺データによる解析ソフトの検証

以下の3種類の船舶において動揺データを取得し、そのデータを用いてGM解析を行って、ソフトの検証を実施した。

- (1) 東京海洋大学練習船汐路丸3世において蓄積された動揺データ
- (2) 外航コンテナ船(6000TEU)において観測された動揺データ
- (3) 自動車運搬船において観測された動揺データ

#### 3.3.1 練習船汐路丸のデータによる検証

図3-9は東京海洋大学練習船汐路丸(425gtons、L=46m、B=10m、d=3.8m)を使い採取された横揺れの2sec毎のデータを200秒ごとに分割し、逐次得られたARモデルからスペクトラムを描いたものである。

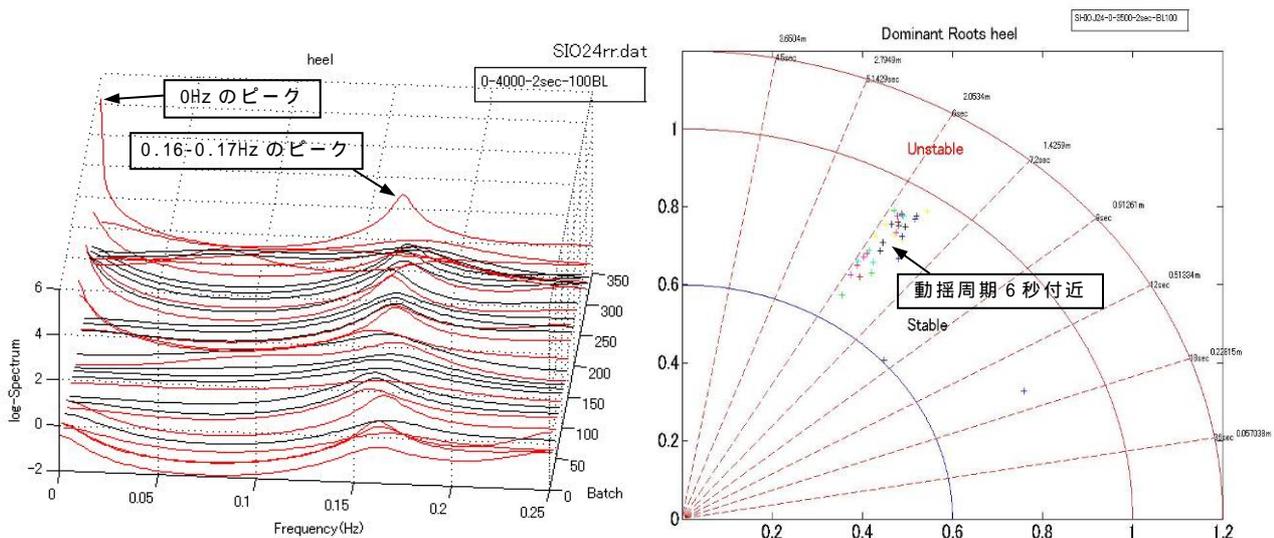


図 3-9 汐路丸の連続スペクトル(1)と汐路丸の横揺れ主要特性根(1)

図 3-9 のスペクトラムを見るとまず左側の周波数 0Hz 付近に高いピークが散見される。これはデータの最大周期成分の大きさを表わしており、対応する固有根は実軸上に存在し、したがって本報告書で対象とする固有周期成分ではなくオフセット成分である。

この点から右側の高周波数側を見ると、0.16-0.17Hz 付近に高いピークが存在している。汐路丸の固有周期は平水中の模型試験から通常 6sec から 8sec であると推定されており、この 0.16Hz-0.17Hz 付近のピークが横揺れの固有周期を表わしていると考えてよい。

これら 0.16-0.17Hz 付近のピークを表現する特性根のうち虚部が正であるものをプロットした図が、主要特性根の図である。この図から、周波数  $f$  を求めると 0.16 ~ 0.17Hz となり、図 3-9 のスペクトルの結果と一致していることがわかる。また GM を逆算すると 1.8 ~ 1.9m であることもわかる。

図 3-10 は、別の日の実験結果で、この時は図 3-9 に比べはっきりとしたピークが 2 カ所見える。

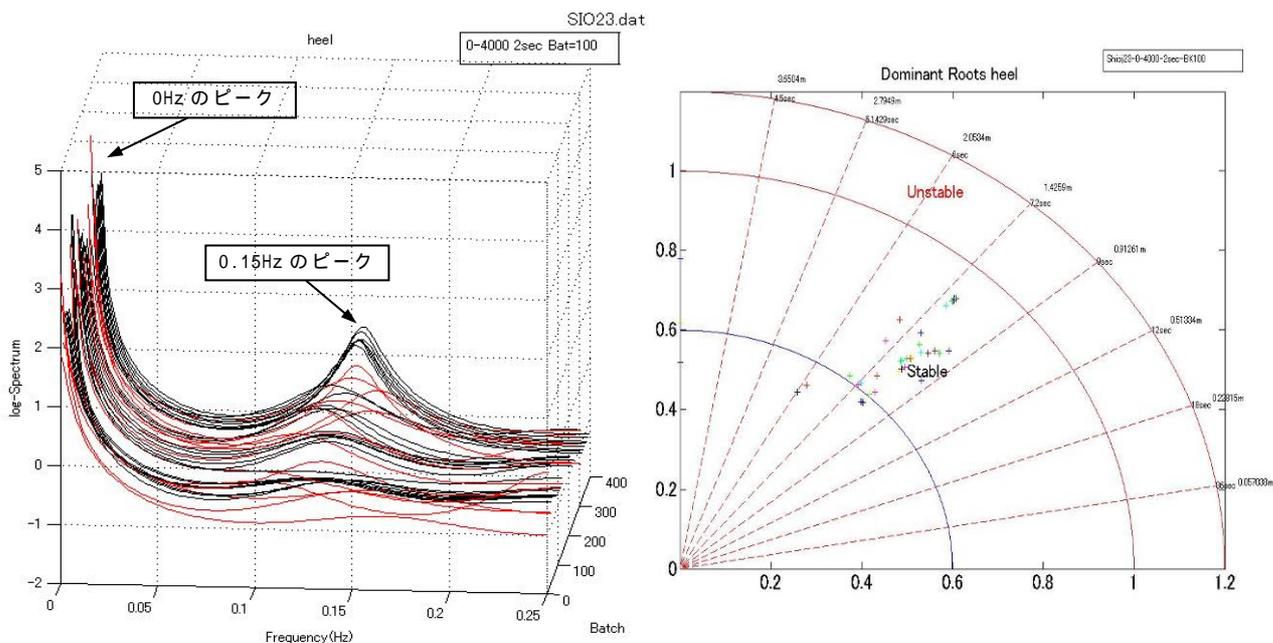


図 3-10 汐路丸の連続スペクトル(2)と汐路丸の横揺れ主要特性根(2)

ここでも長周期側のピークはトレンド成分であり、0.15Hz 付近、周期に換算すると 8sec 位になっており、図 3-9 は図 3-10 に比べその分 GM は低くなっている。

前述のように、汐路丸では平水中の固有動揺周期は 6-8 秒であることがわかっており、今回の動揺データからの GM 解析ソフトでも 6-7 秒と良く一致していると判断できる。

### 3.3.2 外航コンテナ船のデータによる検証

次に外航船の実験例として、6000TEU コンテナ船による例の中から横波中および追波中の実験結果を示す。

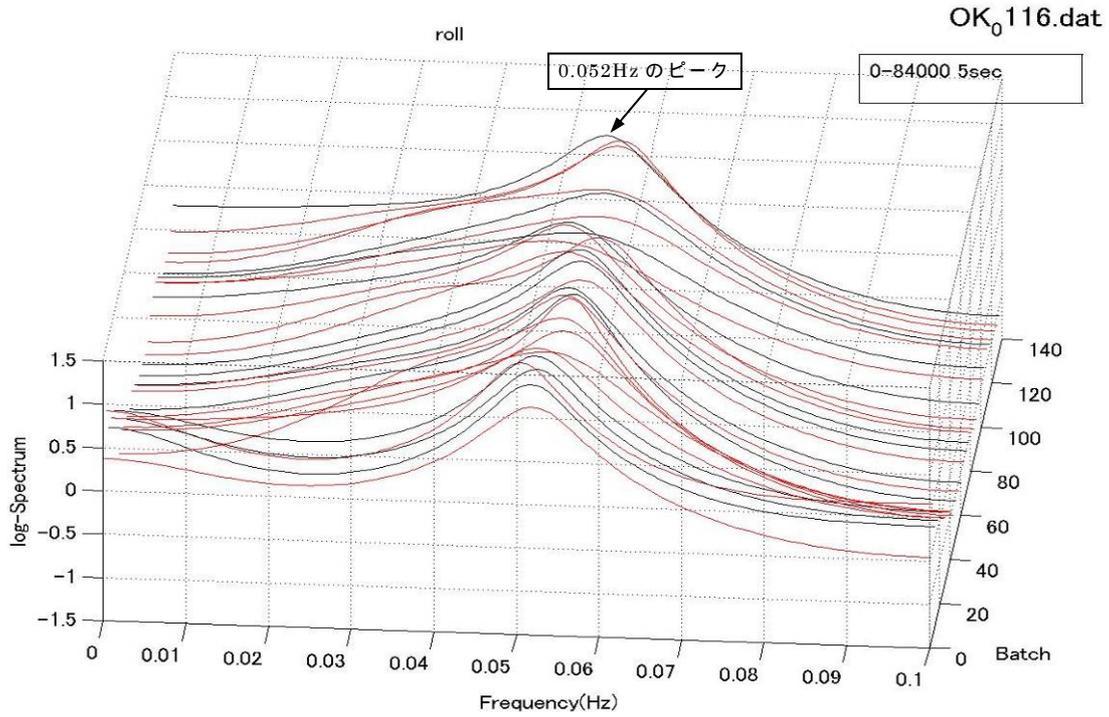


図 3-11 コンテナ船の連続スペクトル（横波）

図 3-11 は、横波を受けた状態で、全長約 300m、全幅 40.00m、喫水 14.00m、総トン数約 75,201 トンの高速コンテナ船が約 21 ノットで航行中の同船の 5sec 毎のデータ 600 点を 1 バッチとし、連続して描いたスペクトラムである。

横波中であるので 0.052Hz 付近に際立ったピークが存在する。図 3-12 は対応する主要特性根で周期 18~19sec 付近に集中していることが見て取れる。

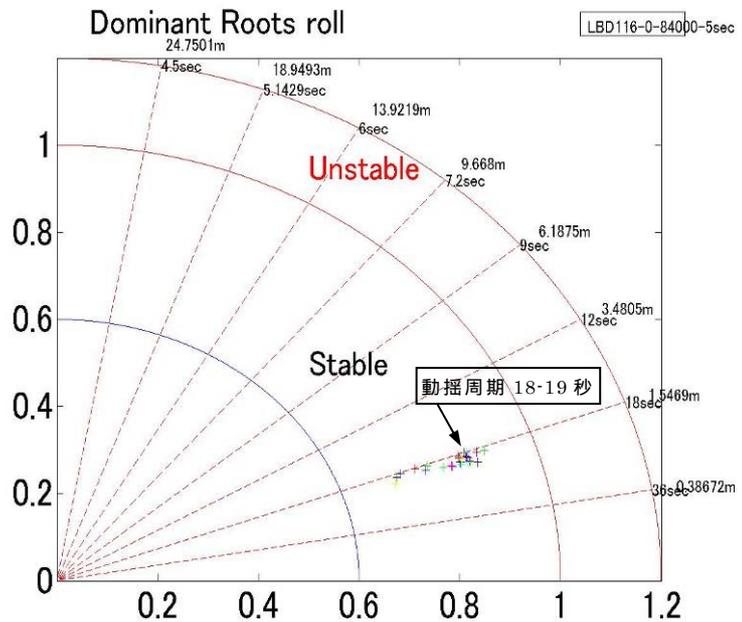


図 3-12 コンテナ船の主特性根（横波）

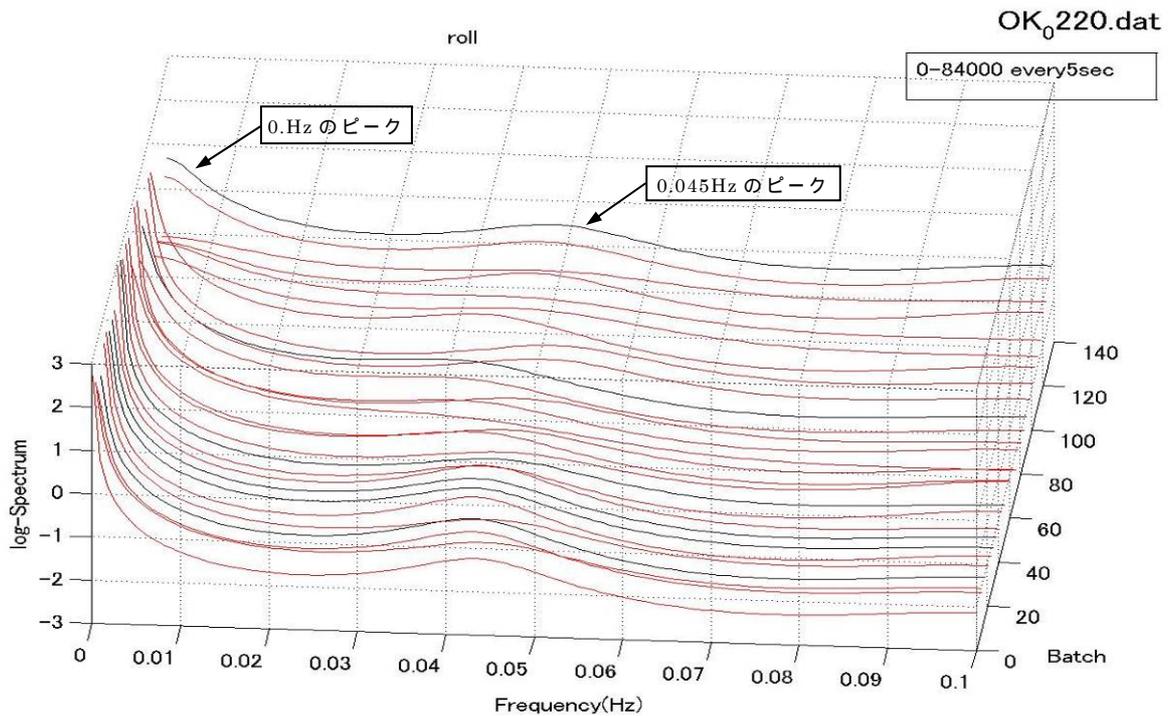


図 3-13 コンテナ船の連続スペクトル(追い波中)

図 3-13、図 3-14 は同船の追い波中のデータに対するあてはめの例である。追い波中は長周期の変動に埋もれるように固有周期の横揺れが発生する。この場合スペクトラムのピークは 0.045Hz 付近に存在しており対応する GM は図 3-13 から 1.5m 程度であると推定される。しかしながら図 3-11、図 3-12 の横波の場合に比べピークは弱いことがわかる。

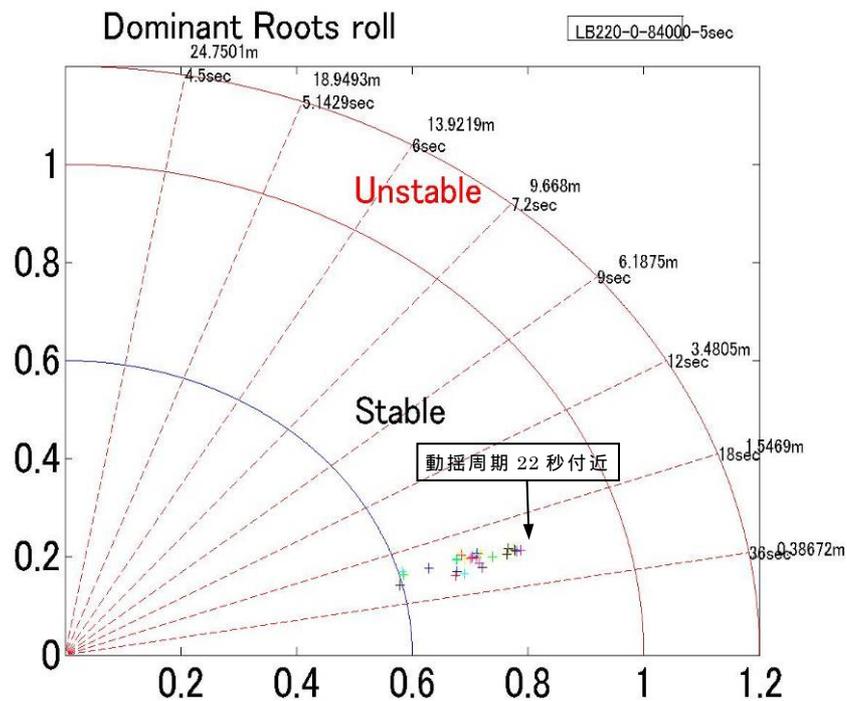


図 3-14 コンテナ船の主要特性根(追い波中)

この外航コンテナ船では喫水 14mのときの動揺周期は、重心査定試験のデータから 18.3 秒であり、動揺データから今回解析した動揺周期も 18-19 秒と良く一致している。

但し、追い波中での解析では 22 秒付近であり、横波中の周期より長くなっている。一般的に追い波中ではGMが低くなる、つまり動揺周期が長くなることが解析結果にも出ている。

### 3.3.3 自動車運搬船蓉翔丸のデータによる検証

内航の自動車運搬船の例として、蓉翔丸（長さ 167m、幅 30.2m、速力 23.5 ノット、総トン数 14,790 トン）の例を示す。自動車運搬船は一般に従来にない横揺れ現象が知られており、復原力維持に腐心している船種である。

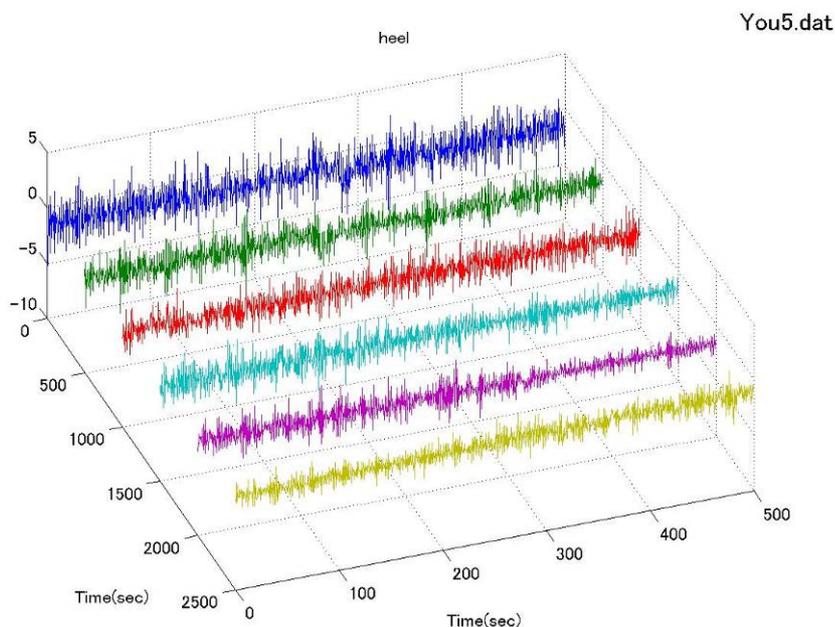


図 3-15 Sea Smooth の状態における横揺れ

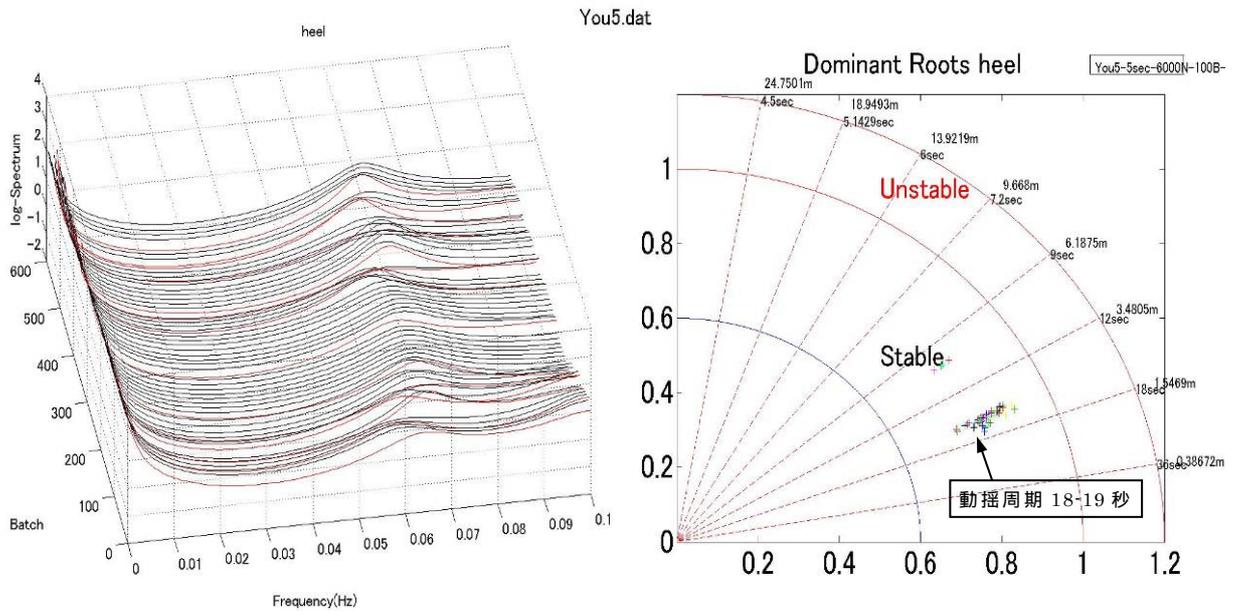


図 3-16 Sea Smooth 状態における連続スペクトルと主要根と GM

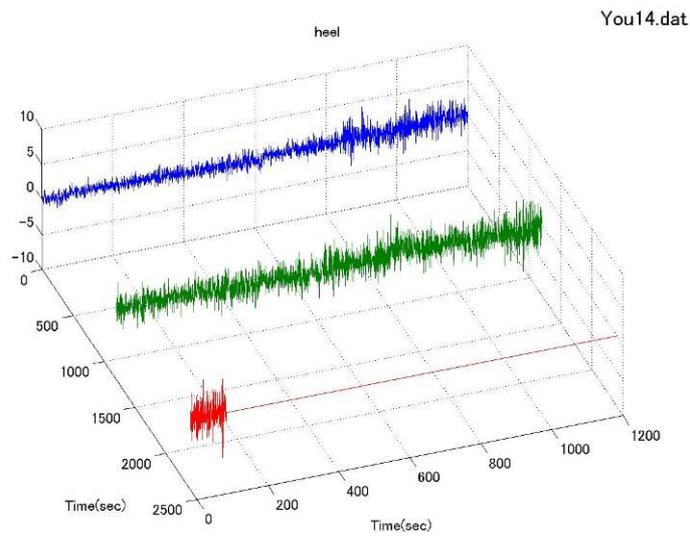


図 3-17 Sea Moderate 状態における横揺れ ( 21000sec 測定中止 )

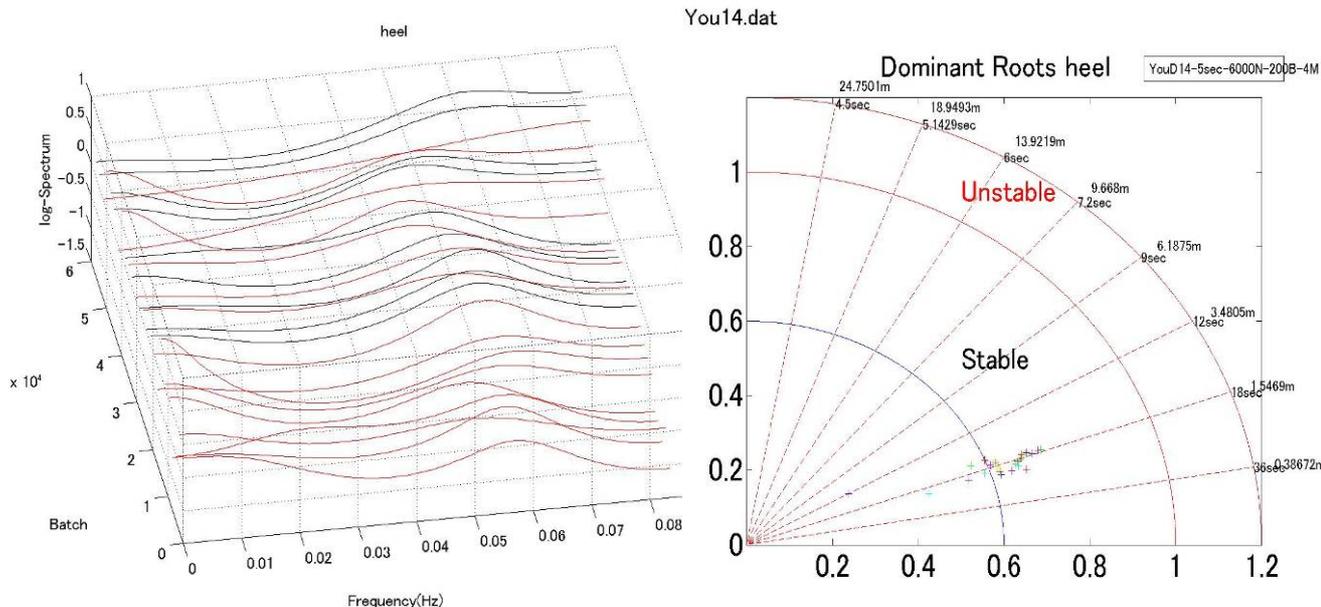


図 3-18 連続スペクトルと主要固有根と G M

図 3-15、図 3-16 は、本船が Sea State Smooth のときの横揺れの時系列、連続スペクトル、固有根と G M である。一方、図 3-17、図 3-18 は Sea state Moderate の場合の横揺れの結果である。ピーク的位置を良く捉えており、前者の方がやや早い周期が得られている。この場合、いずれもデータのサンプリング周期は 5sec である。しかし、これより短くするに従い分散して行く。サンプリング周期は、ナイキスト周波数（サンプリング周期  $t$  で観測できる最も高い周波数） $1/2 \cdot t$  の半分の周波数の位置に主要ピークの周波数が来るようにサンプリング周期  $t$  を決めるのが良い。

この自動車運搬船のケースでは、SeaSmooth と SeaModerate での G M 解析では共に 18-19 秒であるが、造船所の重心査定試験のデータでは喫水 7m での固有周期は 25.5 秒になっており、G M 解析結果と異なっている。この差が動揺のサンプリング時間の問題であるのか、重心査定試験のデータの問題であるのかは調査すべき課題である。

### 3.4 工場試験

#### 3.4.1 工場試験

初年度開発したPCベースの試作機ではデータ解析用のソフトを利用して演算プログラムを作成した。しかし、この専門ソフトではライセンス契約を必要とする等の不都合もあり、プロトタイプ機（以下本装置と呼ぶ）を製作する際に演算ソフトをC言語によるプログラムに置き換えることを同時に行った。

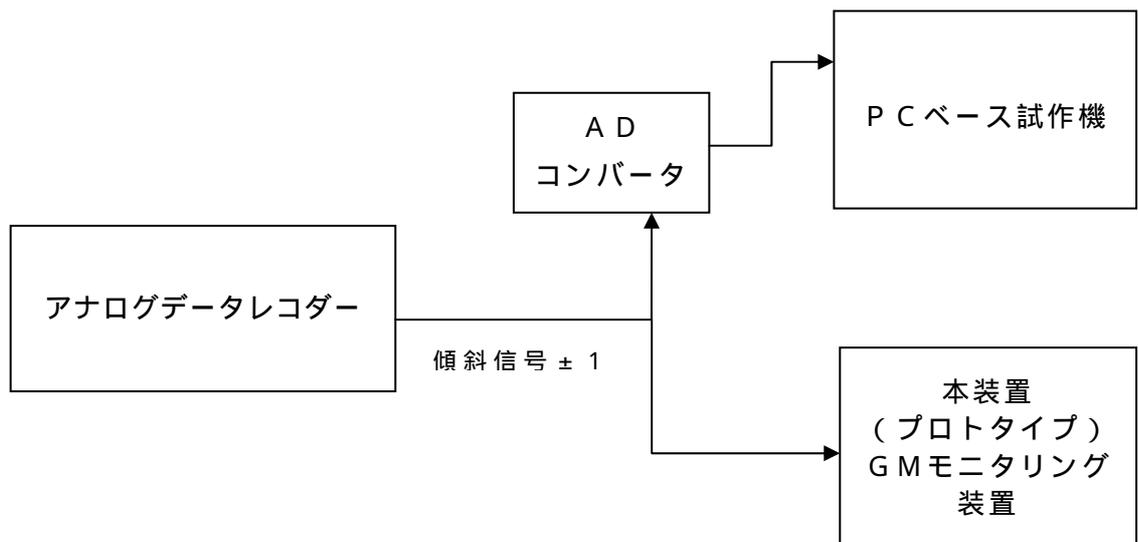
このため、実船の動揺データを用いてPCベース試作機で初年度に実施した解析を、プロトタイプ機でも実施することを工場試験として行ったものである。

工場試験の結果、C言語で解析した結果は初年度の解析結果と同一であることを確認し、C言語による解析アルゴリズムの検証を行った。

#### 本装置の機器構成

アナログデータレコーダ	…	TEAC	R60
PCベース試作機	…	PANASONIC	CF-Y8
ADコンバータ	…	CONTEC	AI-1608AY-USB

#### 分析対象PCベース試作機及びプロトタイプGMモニタリング装置



GMは船舶動揺周期から下記計算式を用いて算出されることから、算出のベースとなる動揺周期を求める統計手法を用いた解析アルゴリズムが正しく機能しているかを検証した。

$$GM = (2 \times \text{coef\_c} \times \text{Breadth})^2 \div T^2$$

$$\text{coef\_c} = 0.373 + 0.023 \times \text{Breadth} \div \text{Depth} - 0.043 \times \text{Length} \div 100$$

なお、検証の過程において、各機器が内部クロックで動作している(非同期状態)ため、入力信号をとらえるタイミングにズレが生じ、動揺周期±0.1秒の安

定性指数  $\pm 0.03$  の誤差がときおり発生する事が確認された。ただし、この誤差は電源投入時に発生するもので、計測時間が 10 分以上経過すれば誤差はなくなることが確認できており、従って、実用時には、あらかじめ電源投入を先行させておけば問題ないと考えられる。

本工場試験で動作確認を行った本装置とは図 3-19 に示すものであり、その概略仕様を以下に示す。



図 3-19 初年度試作完了の PC システムと本装置 (プロトタイプ機)

#### 本装置の仕様概要

- 1) CPU : RENESAS 製 M30620FCPGP (CLOCK 16MHz)
- 2) 外部メモリ : RENESAS 製 R1LP0408CSP-5SC (SRAM 4M)  
RENESAS 製 R1EX24256ASAS01 (EEPROM 256k)
- 3) 出力 : 4 点 1 点あたり DC24V 50 部電源使用時)
- 4) 入力 : 4 点 1 点あたり DC24V 10mA (内部電源使用時)
- 5) アナログ入力 : 分解能 16bit  $\times$  8ch (4mA  $\sim$  20mA 4ch  $\cdot$   $\pm 1V$  4ch)
- 6) シリアルポート : RS485/422  $\times$  1 ポート  $\cdot$  RS232C  $\times$  2 ポート  
(速度はプログラムのにより設定)
- 7) その他 : 8bit DIP SW (設定として使用予定)
- 8) 入出力端子 : WAGO 製 218 シリーズ
- 9) 電源電圧 : DC24V

また、本装置においては、本事業の目標として設定した可視可聴の警報を出力するようにしている。さらに、IMO規則に基づくVDRへのGMデータの信号出力も可能であり、喫水データ・風向風速データの情報を入力可能としている。

#### 3.4.2 水槽試験

東京海洋大学の試験水槽により、造波装置による波を受けて動揺センサーの耐久性能及び動作確認を行う計画としていた。しかし、動揺センサー及びデータレコーダ他構成部品などユニット一式の重量及び形状がこの試験設備には大き過ぎて使用できないことが判明したため、自社工場内にて動揺周期及び動揺角度を可変とする動揺試験台を製作し(Pitch 0~5度、Roll 0~30度)これを用いて耐久性能及び動作確認を行った。

検証方法として、動作確認には図 3-20 の動揺センサー及びデータレコーダの1体のユニットを構成し、動揺試験台(図 3-21)に搭載し、連続運転を実施した。

耐久性の検証については、100時間の連続運転終了後、動揺センサーを開放後、構成部品及び回路ユニットのすべて詳細に検証、正常である事を確認した。



図 3-20 動揺センサー及びデータレコーダ

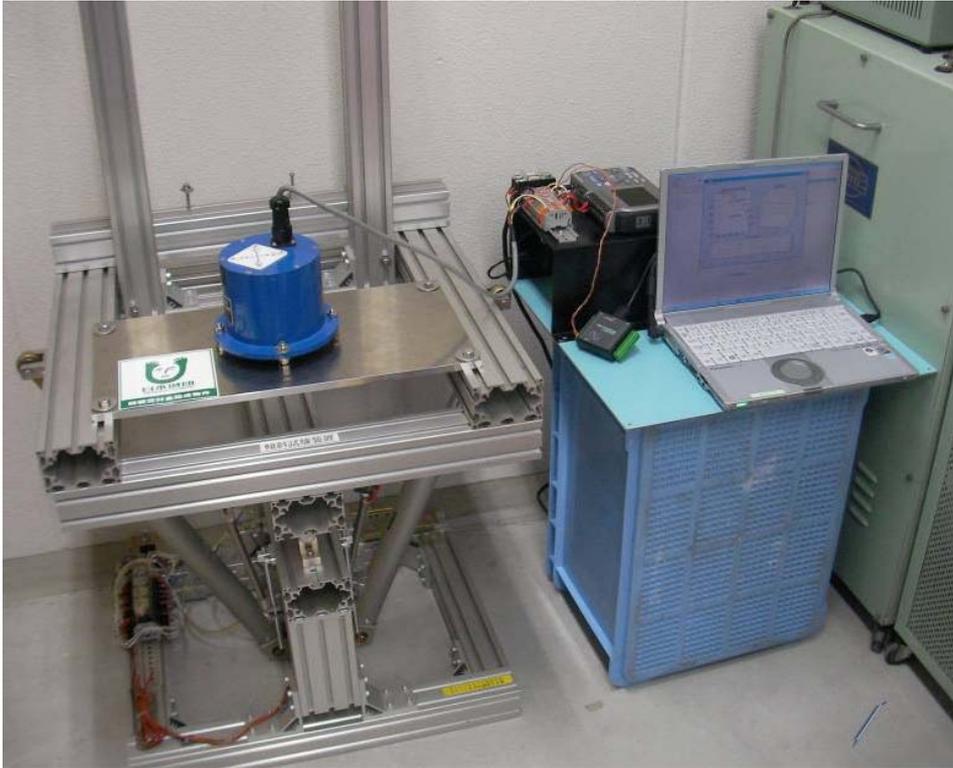


図 3-21 検証用自作動揺試験台

### 3.5 GMモニタリング装置の実船実験

3.4 の工場試験で機能確認を行った本装置を以下の 2 隻に実船搭載し、検証を行った。

#### 3.5.1 外航ばら積み船

L P P	280.00 m
B P	40.00 m
深さ	24.40 m
満載喫水 ( 型 )	17.95 m
総トン数	92,993 トン
載貨重量	185,909 トン



図 3-22 「CAPE ENTERPRISE」

### 3.5.2 内航コンテナ船

L P P	96.81 m
B P	14.00 m
深さ	8.00 m
総トン数	749 トン
積載量	250 teu



図 3-23-1 ブリッジに艤装



図 3-23-2 「まいこ」

### 3.5.3 実船搭載における解析結果

#### 3.5.3.1 外航ばら積み船の解析 (図 3-22 CAPE ENTERPRISE)

分類の原理に基づいて外航バラ積み船の時系列群を解析する。この時系列は 2009 年 7 月 19 日から同年 8 月 16 日の間採取されたデータである。

このデータは 1 秒間毎にサンプリングされており、解析ではこの連続データを、2000 点を 1 区間として区切ってバッチデータを作成し、データベース化した 1599Files から成っているこのデータセットを全て解析することは時間がかかるので、ここでは、乱数を振り 200Files を選んで解析することとした。

図 3-24 は、クラスタリング解析を行って 10 分類に階層化した結果をテンドログラムにした 1 部である。分類法としてはここでは重心法を用いている。

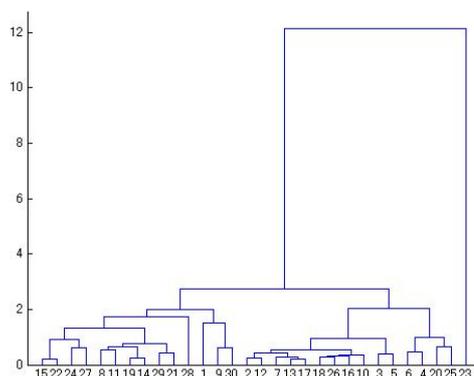
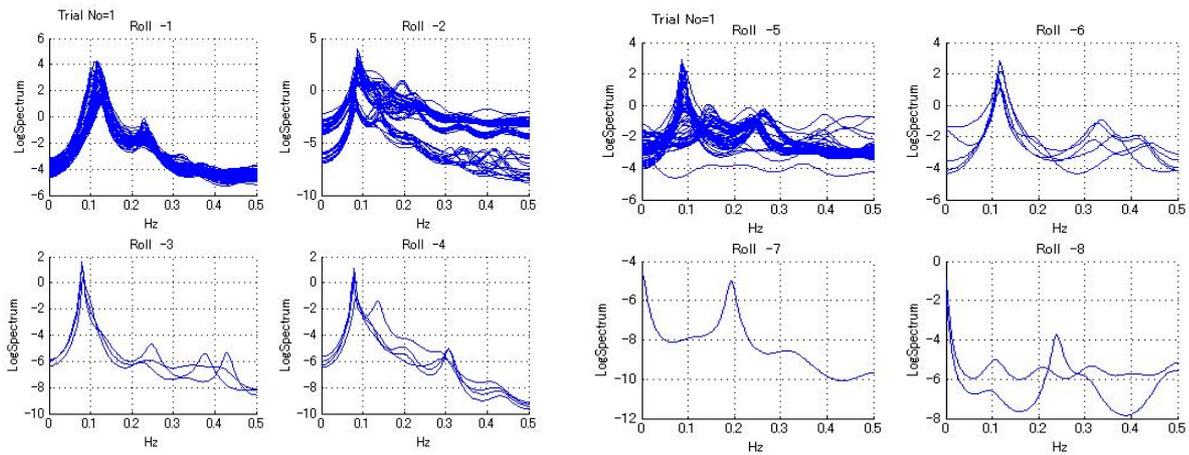


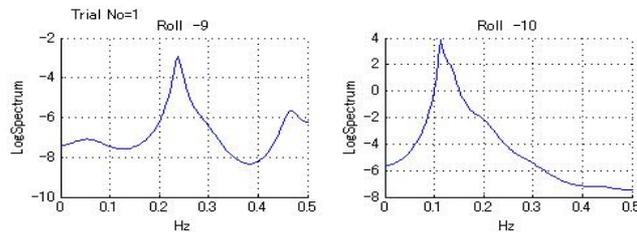
図 3-24 外航バラ積み船データベースの階層デンドログラム (樹状図)

図 3-25 はグループ化された各グループにおける対数スペクトラムを表している。第 1、第 2、第 5 グループが多く集まっているが、これらのグループはそれぞれ鋭い主ピーク (9 秒から 10 秒周期) と高周波数側 (5, 7 秒) に副ピークを持っている。グループ 7、9 のスペクトラムは岸壁係留時である。図 3-26 は対応する時系列を示している。



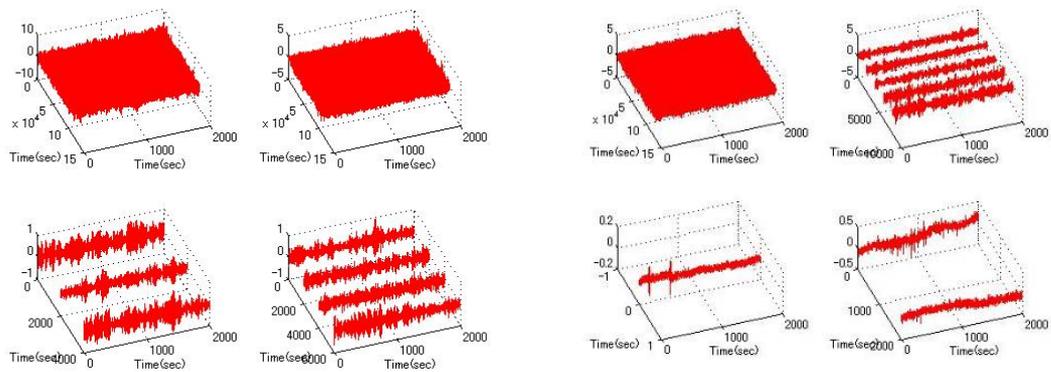
(a) グループ 1-4 のスペクトラム

(b) グループ 5-8 のスペクトラム



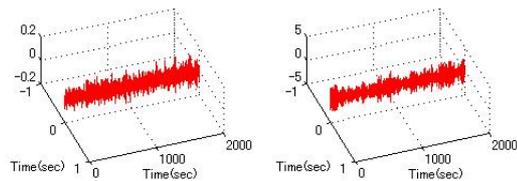
(c) グループ 9-10 のスペクトラム

図 3-25 各グループの時系列



(a) グループ 1-4 の時系列

(b) グループ 5-8 の時系列



(c) グループ 9-10 のスペクトラム

図 3-26 各グループの時系列 (外航ばら積み船)

図 3-25-1~10 のスペクトラムから見られるように、解析結果から、横揺れがその固有動揺周期付近に強い成分を持つことが確認できた。すなわち、本装置は横揺れ周波数から GM を算出するものであるが、その根拠が立証されたことになる。

### 3.5.3.2 内航コンテナ船の解析 (図 3-23 まいこ)

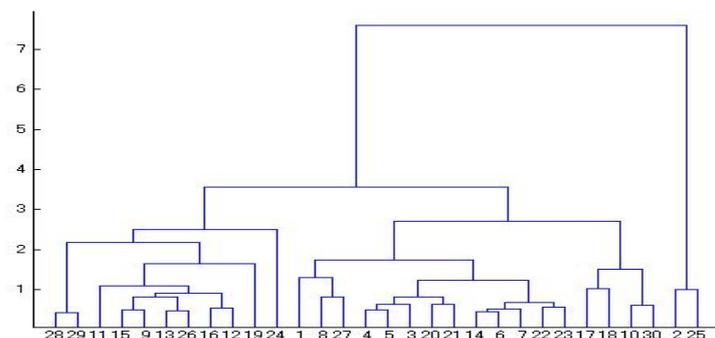
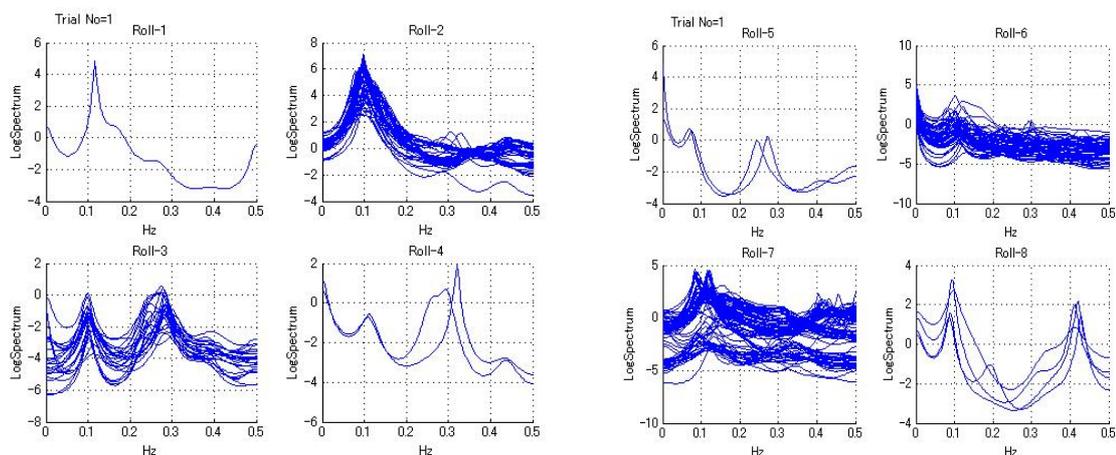
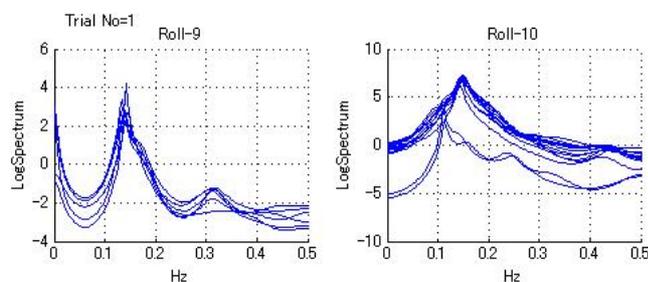


図 3-27 内航コンテナ船データベースの階層デンドログラム (樹状図)



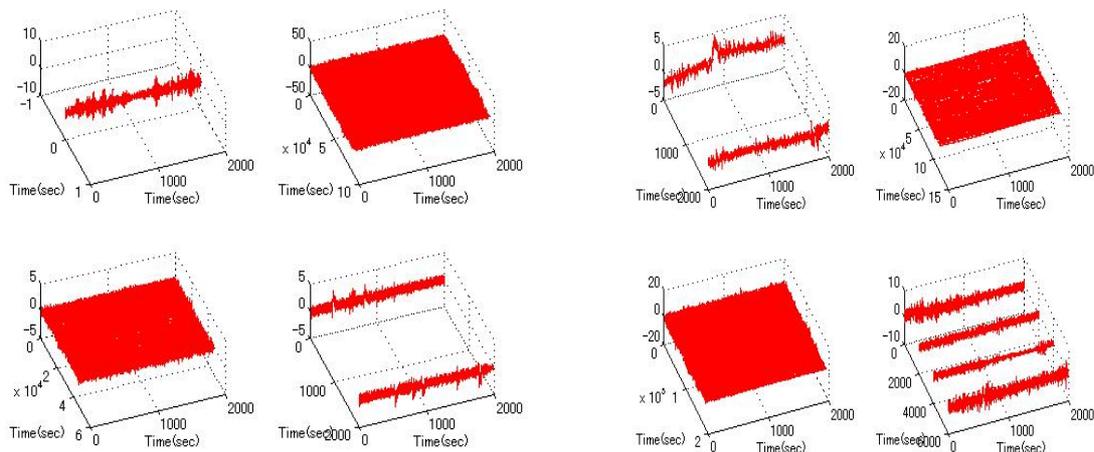
(a) グループ 1-4 のスペクトラム

(b) グループ 5-8 のスペクトラム



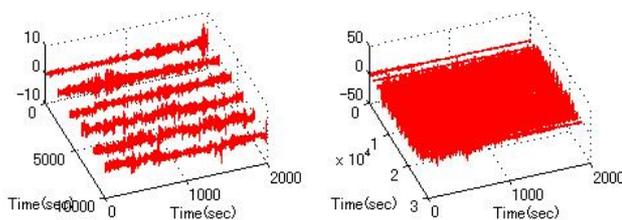
(c) グループ 9-10

図 3-28 各グループのスペクトラム



(a) グループ 1-4 の時系列

(b) グループ 5-8 の時系列



(c) グループ 9-10 のスペクトラム

図 3-29 各グループの時系列 (内航コンテナ船)

図 3-27、3-28、3-29 はそれぞれ内航コンテナ船の分類で、デンドログラム、10 分類のスペクトラムおよびそれぞれの時系列である。ここでも 200 個のデータベースをランダムに選び解析している。

各グループのスペクトラムを比較すると、主周期は 0.1Hz(10 秒)付近で必ず存在するがグループ 3、6 あたりには明確な高周波側 3 秒 ~ 4 秒程度のピークがあり、しかもグループ 3 ではそちらのピークの方が強い。

そこで、本装置の開発にあたっては本来の横揺れピークを探し出すロジックにおいては、固有動揺周期ではないこの 3 秒、4 秒付近のピークを固有周波数候補からはずすこととした。

### 3.5.4 実用化に向けた試作機の完成

以上の実船実験の結果を反映し、実用化につながる試作機として完成したものが以下のものである。

#### 3.5.4.1 外観

本装置は基本構成は2軸型傾度計と表示ユニットとなる

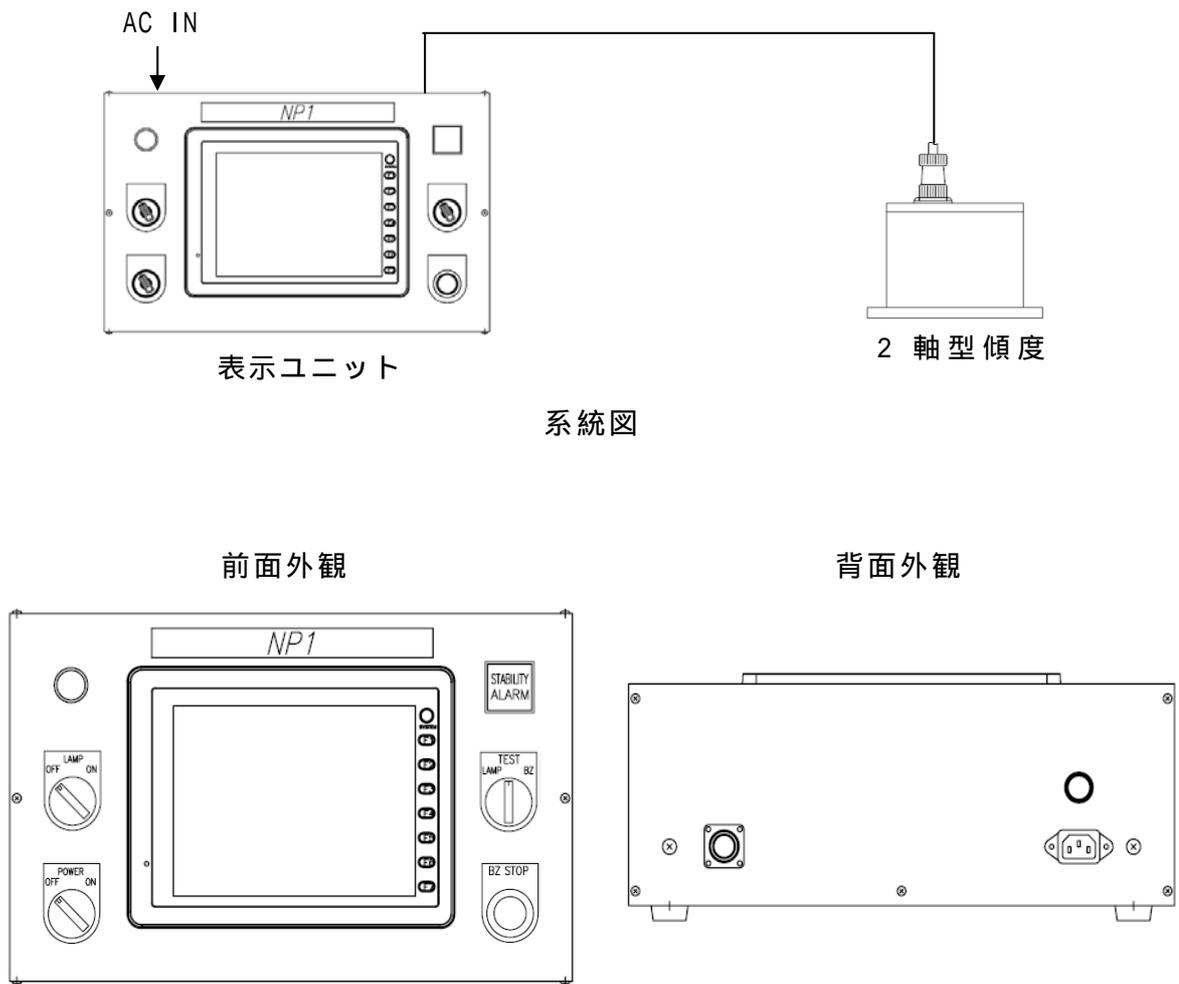


図 3-30 外観



図 3-31 工場にて表示ユニット、動揺センサー動作検証

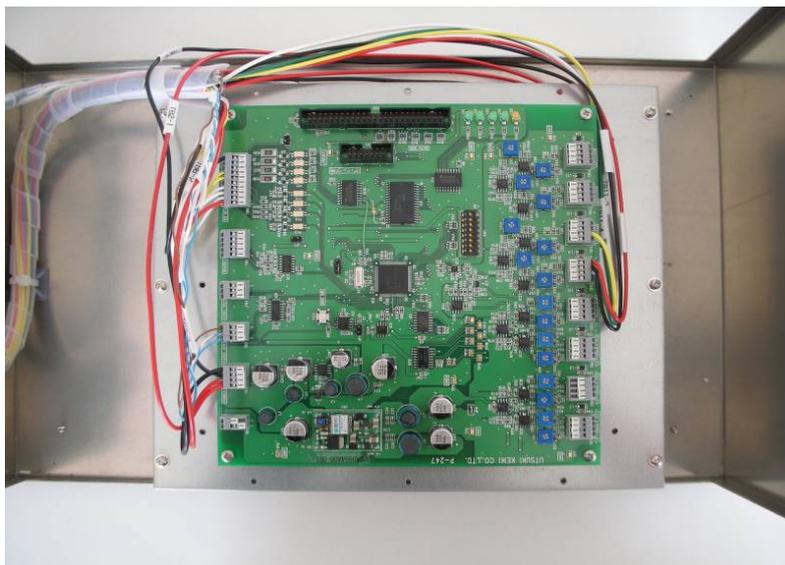


図 3-32 表示装置の内部構成 マイコン使用の新規開発基板

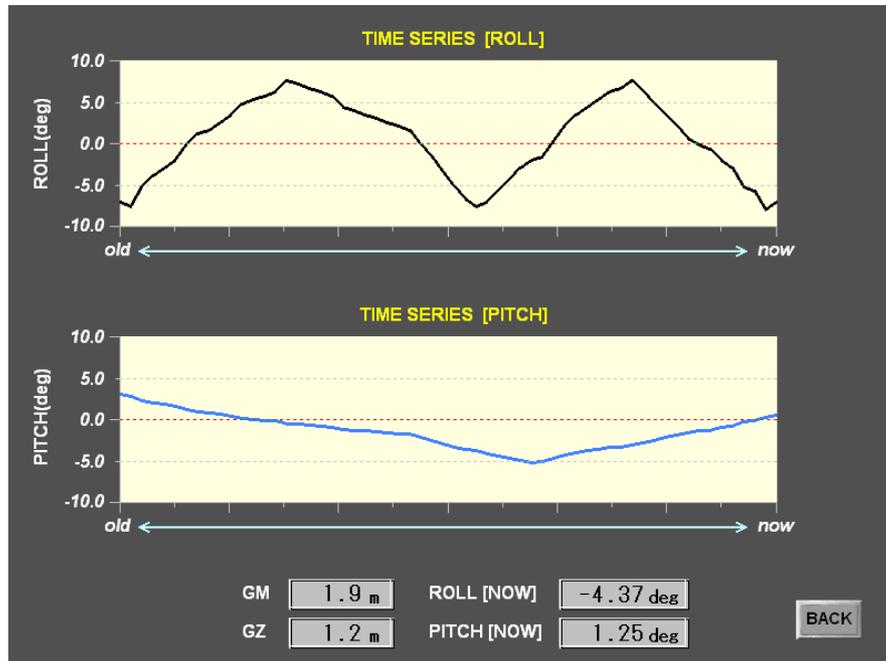
なお、本装置は将来の拡張性を持たして設計しており、デジタル通信ポート(データロガー用)、アナログ入力ポート(喫水計、風向風速計等の入力用)を持たせている。

#### 3.5.4.2 表示画面

PCベースでの試作機において、試用時に画面表示が理解しにくいという意見が多かったことから、これを改善し、時系列表現に変更した。

### TIME SERIES 画面

船体の傾斜角 1sec 間隔で 60sec 分をリアルタイムにグラフ表示する。  
又、現在の GM, GZ, 及び、現在の傾斜角を数値にて表示する

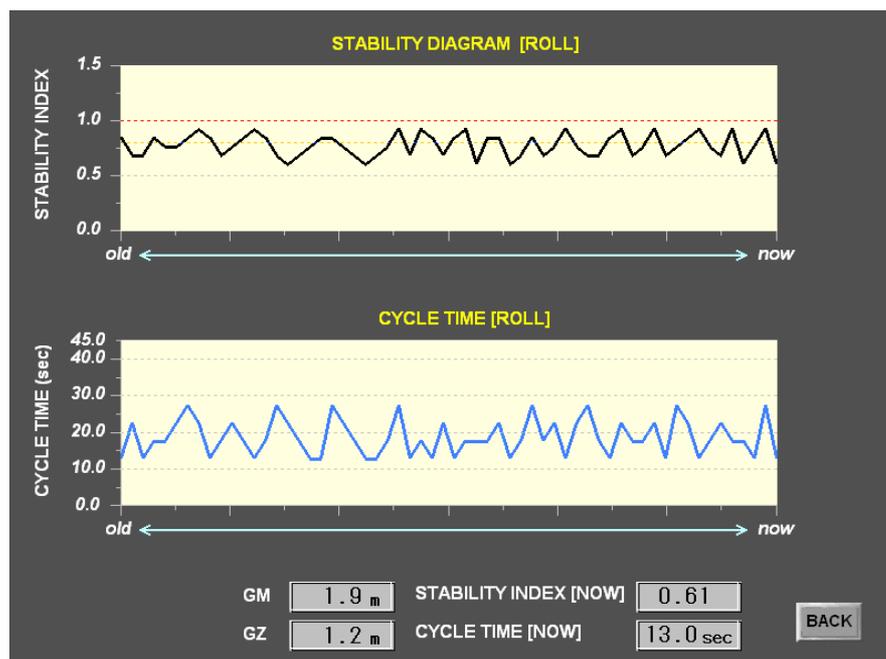


### ROLL DATA 画面

ROLL 方向の動揺周期及び、計算により求められた安定度指数を時系列にて  
60 測定ポイント分グラフにて表示する。

グラフは、UNIT SETTING 画面で設定された Sampling Rate x Length of Data  
の間隔にて更新される

又、現在の GM, GZ、動揺周期及び、安定度指数を数値にて表示する

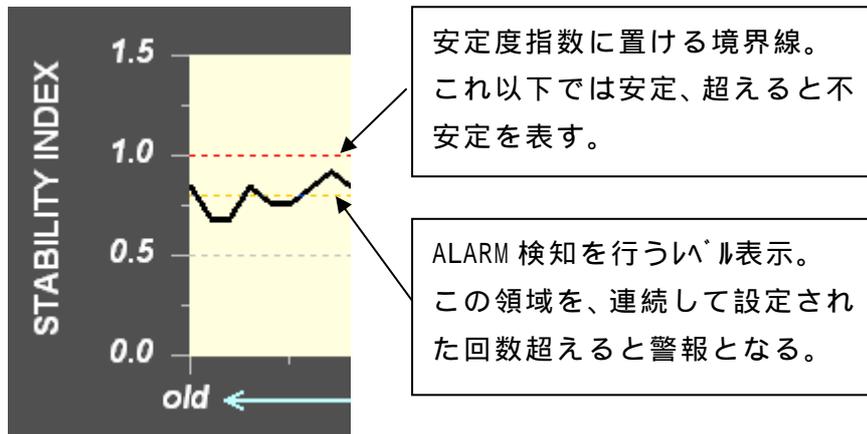


### 安定度指数グラフ補足

統計による自己回帰モデルより導き出された安定度指数は数値で表され、1.0 以下であれば安定領域とみなされる。

警報については UNIT SETTING 画面にて設定が可能。

設定されたレベルを設定回数連続して超えた場合に発報、表示する。

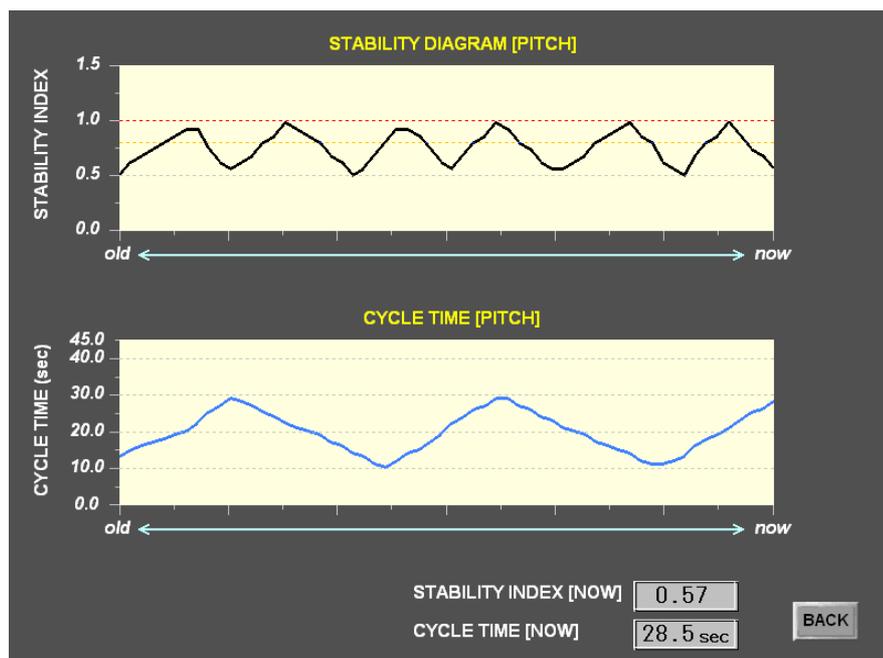


### PITCH DATA 画面

PITCH 方向の動揺周期及び、計算により求められた安定度指数を時系列にて 60 測定ポイント分グラフにて表示する

グラフは、UNIT SETTING 画面で設定された Sampling Rate x Length of Data の間隔にて更新される

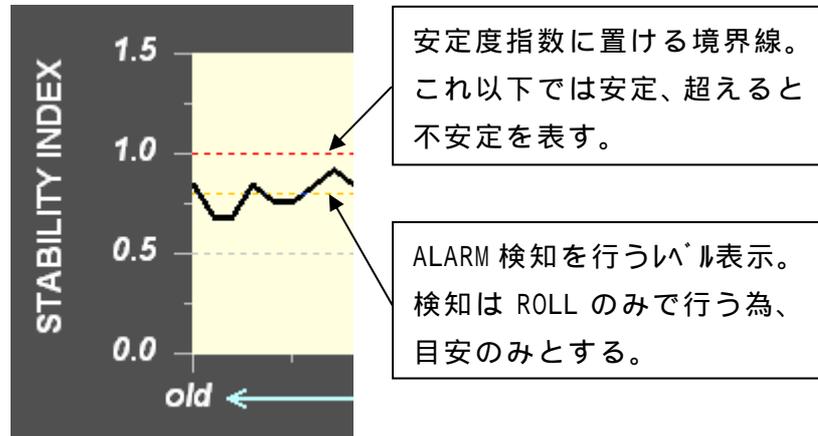
又、現在の動揺周期及び、安定度指数を数値にて表示する



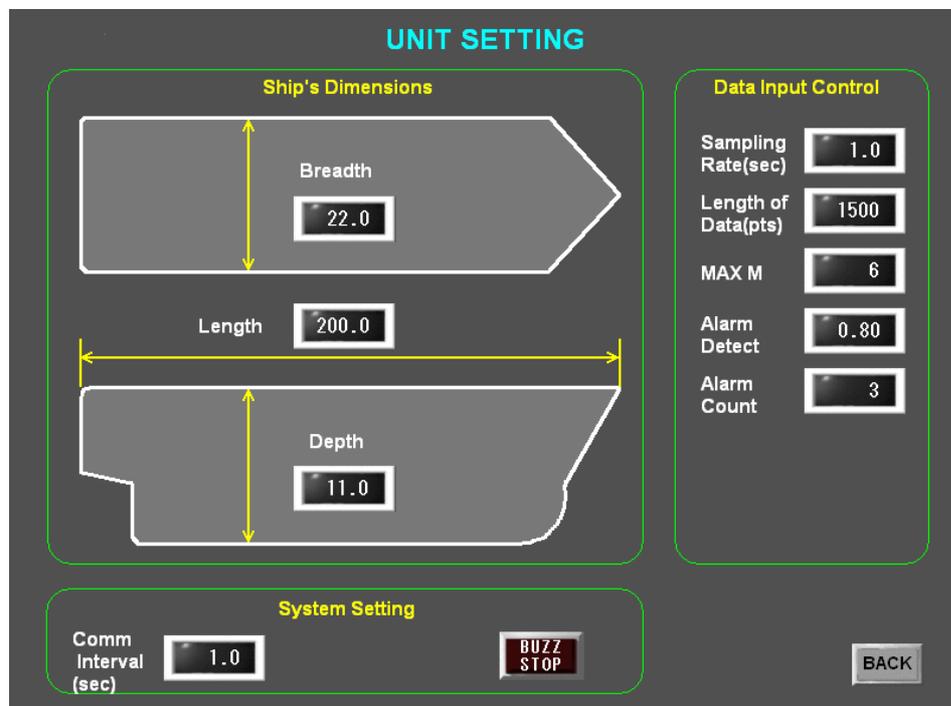
### 安定度指数グラフ補足

統計による自己回帰モデルより導き出された安定度指数は数値で表され、1.0 以下であれば安定領域とみなされる。

警報については ROLL でのデータのみで行う為 PITCH データでの検知は行わない。



画面は前記以外に各種パラメーター設定画面で構成



船舶要目初期設定画面

### 3.5.5 試作機の実船搭載

以上の完成試作機を再び実船搭載し、平成 22 年 2 月 15 日より、京浜港～仙台港間往復航海にて検証を行った。なお、搭載船は既出の内航コンテナ船「まいこ」である。

本船の船長からは、表示の見やすさ、自船の状況が把握しやすくなったとの評価を得ることができた。



横浜南本牧にて試作機器設置搭載～陸揚げする



「まいこ」ブリッジ内、表示ユニット据え付け前にコンソール全面にて記録

本装置操舵室に艤装



### 3.6 GMモニタリング装置の改善

初年度にPCベースで試作したのから、既出のように改善を随時行なっており主なものは言語の修正、表示の時系列化等である。

最終的な仕様は下記の通りとなった。

- 1)コントロール基板：GM IF BOARD (PB-247)
- 2)操作・表示部：発紘電機製 モニタッチ V808SD  
(8.4inchカラーTFT液晶タッチパネル 解像度 800×600ピクセル)
- 3)外部コネクタ：七星 NJW-205-RF (傾度計接続用)
- 4)電源電圧：AC85V～264V (単相)
- 5)外観：400mm (W)×250mm (H)×150mm (D)  
但しコネクタ・スイッチ等突出部は含まず

## 4 まとめ

平成20年度、平成21年度の2年度にわたる開発は本報告書に記載のように計画通り完了することが出来た。

開発にあたり、東京海洋大学大津名誉教授のご指導を賜り、また同時に多くの船主のご協力を得て、ここに完了することができたことを感謝する次第である。

開発にあたり2つの目標を設定した。すなわち、

- 1)復原性喪失までの過程のGM値を表示できる装置の開発。
- 2)GM計測値より、可視可聴の警報装置を設ける。

であるが、これらはいずれも達成することができた。

また、実船試験に協力いただいた船主からは、自船の復原性能を的確に計測可能となれば、環境＝省エネ＝CO<sub>2</sub>排出削減に繋がるとして次のような意見があった。

- 出港時のバラスト水の搭載量の調整が可能である。(積載量・燃費削減に繋がる)
- ピッチング計測により波高計測が可能となり、ウエザールレーティングの学術も含め、航路の選定により波向きの影響を回避して安定したガバナーの制御で運航する指標になる。(燃費削減に繋がる)

現在、平成22年4月に開催される国際海洋海事展「シージャパン」に、この度完成した本装置(プロトタイプ試作機)を出展し、多くの業界関係者より評価を頂く準備をしているところであり、今後も継続して業界関係者の協力を得ながら多くの実船検証を繰り返し実施し、船舶の安全運航に資するよう、また、船主の指摘にあるような省エネにも資すべく、実用化に向けて進めていく予定である。

さらに、製品化後における販売実績を多く踏まえた上で、ISO(国際標準化機構)へ機器標準化への働きかけを実施継続し、ISOを取得する努力をしたいと考えている。本装置が安全運航・環境対策に寄与することを目指しながら、最終的には日本発のIMO規則に活かされることも視野に入れていきたい。

最後に、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。



「この報告書は競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目15番16号(海洋船用ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>