

**SAR 233**  
SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

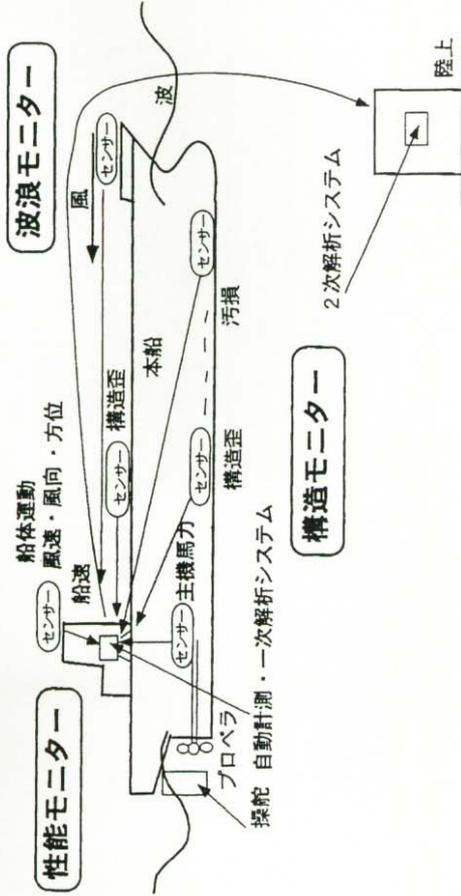
船舶の高度モニタリングの基礎研究  
成果報告書

平成 11 年 3 月

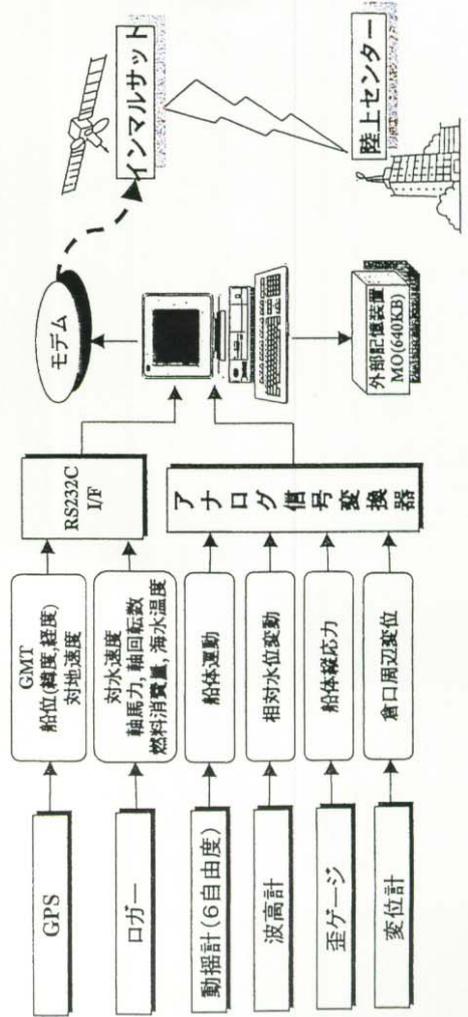
社団法人 **日本造船研究協会**

# 『船舶の高度モニタリング』提案コンセプト Proposal of Concept : SR233 AMS (Advanced Monitoring System of Ship)

1. 波浪中の船体状態を総合的にモニター  
: 遭遇波浪/性能/構造/性能/構造に亘って!



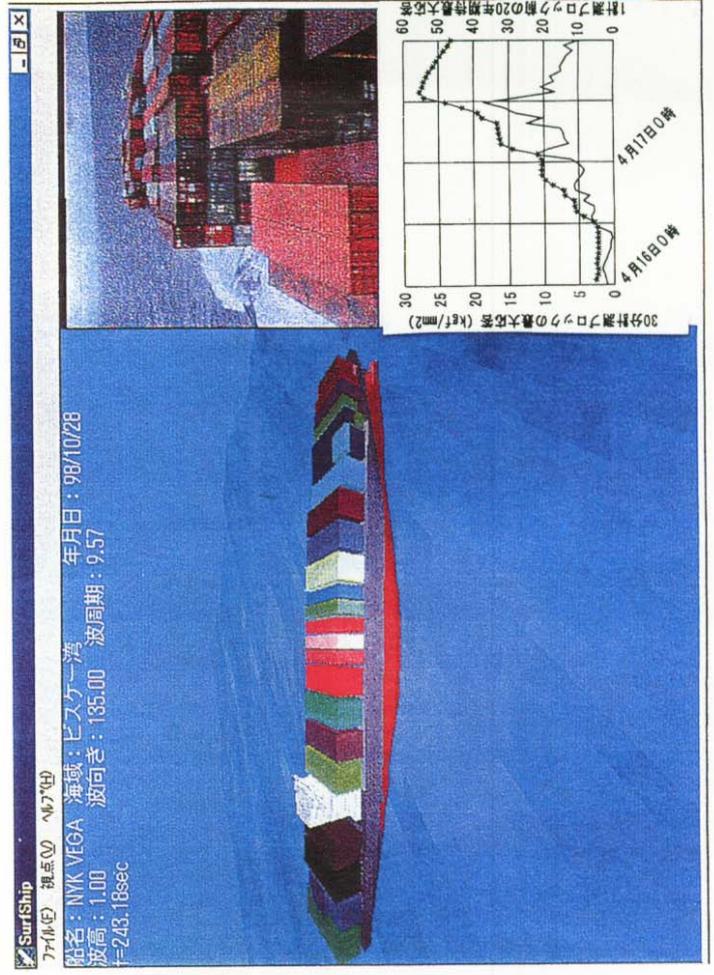
2. 船上パソコンによる自動計測・自動解析  
: 同時計測によるデータ相互の相関取得



3. 船上だけでなく陸でもモニター共有  
: デジタルデータベースの船陸通信で!



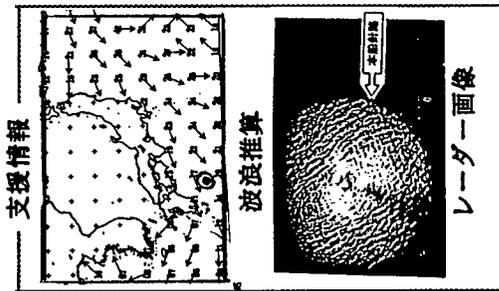
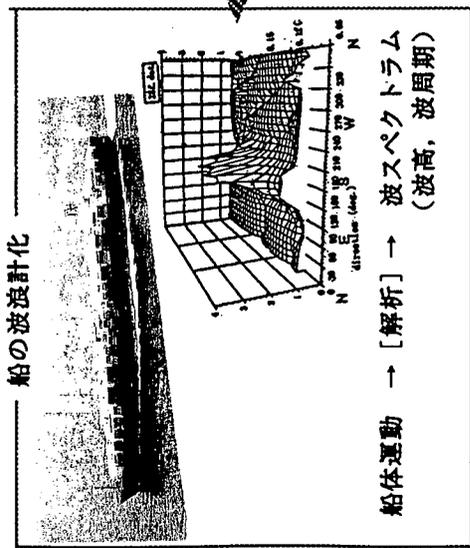
4. 荒天時航海支援/運航計画/保守計画に活用  
: モニター表示例 (解析アニメ/画像/トレンド予測)



# 「船舶の高度モニタリング」を構成する基礎技術 ～ 研究の成果から

## 1. 波浪モニター；

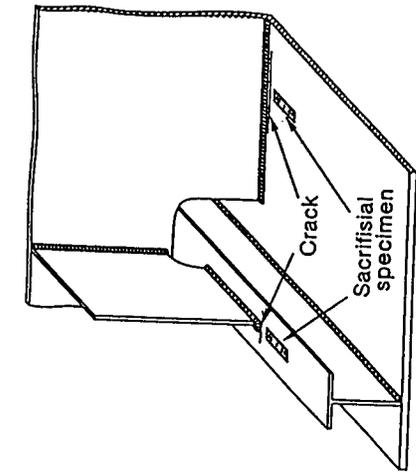
- ・ 船体運動から遭遇波浪を特定する方法を開発



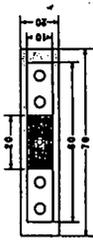
## 3. 構造モニター (1)

- ・ 新しいセンシング法を開発；例) 構造の疲れ具合検出 → 犠牲試験片

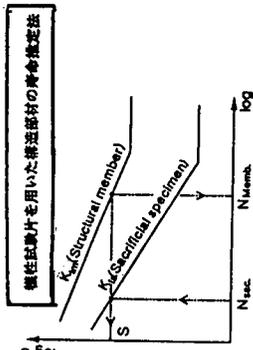
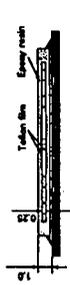
[取付位置例]



[犠牲試験片概形]

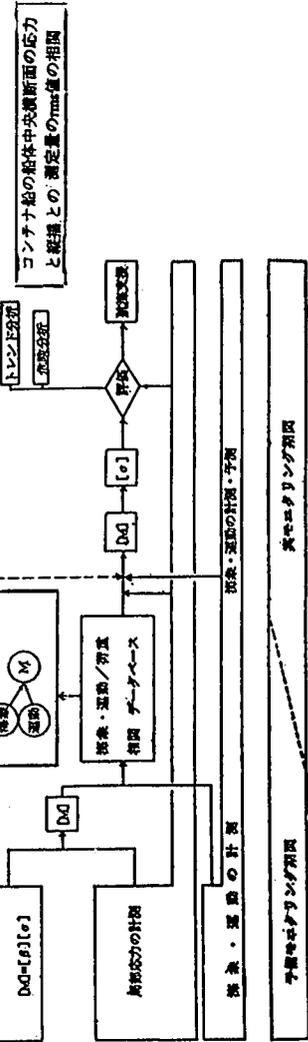
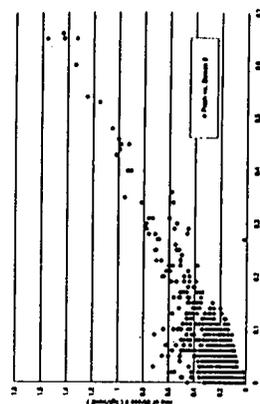
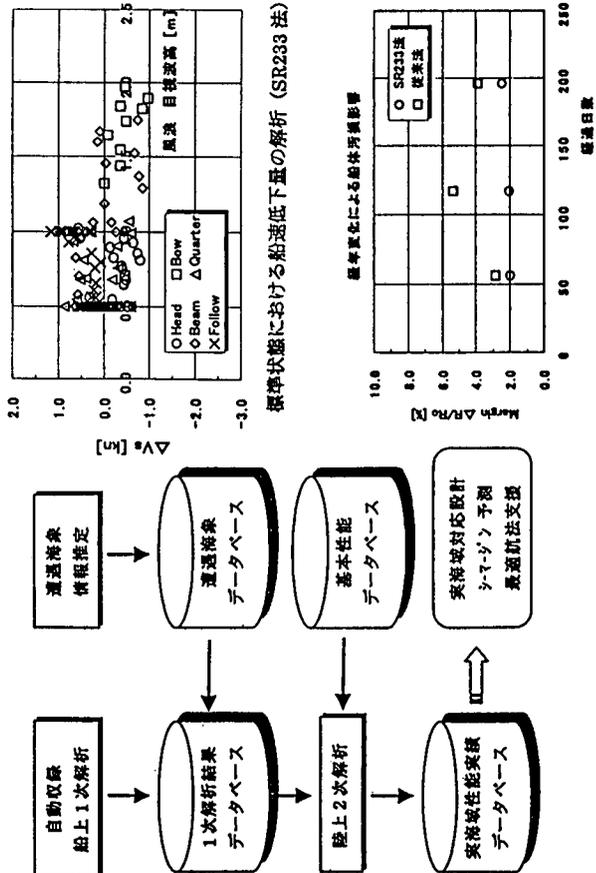


(Unit: mm)



## 4. 構造モニター (2)

- ・ 構造解析/ニューラルネットワークによる推定技術開発
- [ニューラルネットワークの流れ]



## SR233 「船舶の高度モニタリングの基礎研究」

### 要 約

Ship Reseach Panel 233 「Study on Advanced Monitorring of Ship」

How to manage the economical performance and the hull safety on navigation through the ship's service life - this is the recent key interest for shipowners, shipoperators, shipbuilders and other maritime party concerned. The management will need technically the information of the ship's present condition on navigation such as speed, motions and ship strength under the sea environment for judging and predicting the ship's behavior. The monitoring is one of the useful way for that.

This research is the 3-year basic study (1996FY to 1998FY) on the advanced method to monitor ship responses together with the encountered wave conditions.

Differnt from the conventional full scale measurement, the advanced monitoring system may be requested 'simple sensinng system, quick data analysis and long-time support' and 'proper communication between onboard and land-control center with digital data basis'

The study was carried out on the following items;

1. Research and development of the sensors such as fiber optic sensor for strain monitoring, sacrificial specimen for fatigue damage monitoring, wave measuring device deduced from ship motions itself for wave monitoring, and so on.

2. Research and development of the onboard data analysis system for the ship's performance and response data obtained at proper intervals (five minutes or one hour) and also the estimation system in land for the analized data.

3. Study and proposition of the concept design on the advanced monitoring system based on 1&2 research and development.

4. Almost one-year field test by a container ship and a bulk carrier with the propped monitoring system fully or partialy including trial of digital data communication via satellite.

Through the study, this research can give the skeleton of the advanced monitoring system (SR233 AMS) with the nessesary technology for sensing and analysis, which will be expected to apply for the shipping fields in near future.

## 1. 社会の変化の中での本研究の役割

本研究の目的は、『船舶のトータルライフを通しての経済性／安全性を確かなものにする為に、波浪中の推進性能や構造応答を定量的に短期／長期に亘り把握する基礎技術を得、さらにはこうした技術基盤のもとに高度モニタリングのコンセプトを提案する』ことにある。かかる観点での経済性／安全性面での社会変化として下記のようなことが挙げられる。

- ・経済性…海運の競争激化の中で実海域での船舶性能の向上や気象・海象を取り入れた航海計画の緻密さが求められるようになってきた。
- ・安全性…IMO/ISMコードにみられるように安全に対し、船陸での管理システムの装備・履行責任が明確に求められるようになってきた。船体について言えば、荒天時安全航法・適切な保守が従来以上に重要になる。

本研究はこうした社会変化の中での要請に対し、設計／運航／保守の船舶の一生を通じて応えていく為に船舶の状態を把握監視していくモニタリングに焦点を充てその技術的手法について研究を実施したものである。

## 2. 高度モニタリングを実現する上での必要な技術

提案するモニタリングシステムが社会に受け入れられる為には、  
「できるだけ簡単なセンシングシステム／データの多頻度自動収録と船上での迅速なデータ解析／状態判断と予測のシステム（陸装備）／デジタルデータベースでの船陸間通信」といったことが必要と考えられる。こうした高度な機能を要するモニタリングシステムを実現する為に下記に示すような必要技術の調査研究を実施した。

### (1) 船舶が遭遇する波浪の特定法の研究

船舶の波浪計化法・波浪追算／推算法・レーダ画面活用法・人工衛星情報取り込み法等について研究を実施した。船体3運動をもとにした簡単な波浪のモニター法（SR233 Simple Wave Monitor）の目処を得た。波向についてはレーダ画面情報の援用により適用範囲・精度向上が見込める。

波浪追算／推算是当該船舶の波浪遭遇履歴の整理・分析や航海計画時の波浪遭遇予測に活用でき、その適用法を示した。

### (2) 実海域性能データの自動計測・解析システムの開発

船舶の推進性能は波浪のみならず風・潮流・操縦運動等実海域で諸影響を受ける。データの取得・解析を効率良く行う為に、航行中の船舶の運動／運動加速度・船速・舵角・軸馬力／回転数・風向／風速・波浪を対象に5分間ないし1時間間隔でデータを自動収録し船上で自動的にデータを処理する（1次解析）とともに、これらのデータから陸上で風・波浪影響等の解析を行う（2次解析）システムの開発を行った。従来は1日1回程度のアブログ情報程度であるが、本システムによれば各種データの同時計測による相関や多量のデータをもとにした解析の精度向上が見込める。

### (3) 構造応答の先端的センシング法の研究

実船計測では電気式の歪ゲージが使われているが、耐久性や防爆性に難がある。そこで光ファイバーによるセンシングや犠牲試験片によるセンシングについて研究を行った。光ファイバーについてはブラグ格子センサーによる多点歪計測が船体構造応答センシングに適用しうる、犠牲試験片（オフラインセンサー）は構造の疲労強度をモニターする上で実用域のレベルで適用しうるといった成果を得た。

#### (4) 構造応答モニター手法の研究

直接センシングする箇所を極小とし構造解析情報を援用しながら構造応答状態をモニターする手法や、これまでモニターされた構造応答履歴や船体運動と構造応答の相関を分析し構造応答を予測していくニューラルネットワーク法の研究を実施した。船体強度面からの荒天時航海支援や船体の経年（疲労被害履歴）に対する保守支援の各々での構造モニターの要件を明らかにした。さらに船種別（コンテナ船／タンカー／バルクキャリア）に構造モニタリングの姿を提案した。

### 3. フィールドテストによる試み

机上／実験室レベルの研究と平行して、就航船によるフィールドテストを実施した。コンテナ船／バルクキャリア各1隻を対象に初年度は計画、2年度にテスト用モニタリングの準備・搭載・調整、3年度に試行を実施した。コンテナ船は波浪／性能／構造の全範囲を対象とし提案する高度モニタリングシステムに近いもの（プロトタイプ）で試行したが、バルクキャリアは性能主体での試行となっている。

コンテナ船での計測項目・センサー装備・船上システムは以下のようにになっている。基本的には無人で自動的に処理されるシステムである。

- ・ 船速／船位／風向／風速／舵角／軸馬力／喫水等      ～ 本船機器からの信号貰い受け
- ・ 船体運動／船体加速度／相対波高                      ～ ジャイロ／加速度計／船首部波高計設置
- ・ 船体梁縦応力（2断面，4点／1断面）                  ～ 歪ゲージ設置
- ・ 局部構造疲労履歴（10点）                              ～ 犠牲試験片（オフラインセンサー）設置
- ・ 状態監視：操舵室からの眺望／船首部の波浪衝撃音    ～ ビデオカメラ／マイクロフォン設置
- ・ 船上データ処理・解析システム                         ～ パソコン設置
- ・ 陸へのデジタルデータ通信                             ～ 通信用パソコン設置（本船インマル利用）

試行により机上では気付かないような知見／課題も多く得るとともに、モニタリングの有用性を実際に検証できた。

### 4. SR233方式高度モニタリングシステム（SR233 AMS）の提案

高度モニタリングシステムを構成する波浪／性能／構造に亘る要素技術の研究成果とフィールドテストでの試行研究成果を基礎としてそのコンセプト・仕様を提案した（SR233方式高度モニタリングシステム～SR233Advanced Monitoring System, SR233 AMSと呼ぶことにする）。

システムの構成や機能は口絵に示す通りであるが、そのポイントを以下にまとめる。

- ・ 波浪中の船舶の船体状態を波浪／性能／構造応答に亘り総合的にモニターする。
- ・ モニター頻度を密としデータ収録・解析は船上パソコンで自動的に行う。
- ・ モニターは船上と同時に陸のコントロールセンターでも見ることができる。

本システムにより波浪／性能／構造応答の諸データの同時計測や多量のデータの統計解析ができるので、それぞれの相関やトレンドをこれまでになく高精度に把握できる。また予測にも有用である。これらにより、

- ・ モニターデータは保管・解析により荒天時航海支援／運航計画／保守計画に反映できる。

## 5. 今後への期待

提案した高度モニタリングシステムが社会に役に立つにはこうした技術が経済性や安全性を確保していく為に有用な方法であるという社会的認知が必要である。また3年間の研究は基礎研究なので高度モニタリングシステムの完成度をあげるにはさらなる課題も残されている。例えば性能面では評価の為にもう少したくさんの船のモニターを実施しデータを集積・解析するとともに推定・評価が可能な設計システムへと展開していく必要がある。また構造面ではタンカーのフィールドテストも実施し、タンク内環境でのセンシング技術を検証し、防爆性や耐久性にすぐれたシステムを開発する必要がある。

本研究の流れも踏まえ今後の研究として下記テーマが計画されている。それぞれの中で本研究の成果が活用されるとともに本研究で実施されていない範囲の研究がさらに展開されるように期待したい。

- ・新しいフリートサポートシステムの開発      ～ SR233AMSの評価・適用研究
- ・実海域対応の船舶性能設計システムの研究      ～ 推定・評価が可能な設計システム開発
- ・二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究      ～ タンカーバージョンの試行

現在、様々の分野でモニタリングが行われるようになってきている。本研究で提案したモニタリングシステムを叩台に海運・造船界に於いてもその必要性／有用性等が十分議論され本研究が安全性／経済性に寄与できることを期待したい。

## は し が き

本成果報告書は日本財団の補助事業として、日本造船研究協会第233研究部会において、平成8年度から平成10年度の3カ年計画で実施した「船舶の高度モニタリングの基礎研究」の成果を取りまとめたものである。

### 第233研究部会 委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	伏見 彬 (東京大学)		
代表幹事	末岡 英利 (三菱重工業)		
副代表幹事	山野 惟夫 (兵庫教育大学)		
委員	影山 和郎 (東京大学)	吉成 仁志 (東京大学)	
	大津 皓平 (東京商船大学)	井関 俊夫 (東京商船大学)	
	角 洋一 (横浜国立大学)	平山 次清 (横浜国立大学)	
	内藤 林 (大阪大学)	河邊 寛 (防衛大学校)	
	香川 洸二 (九州大学)	藤本由紀夫 (広島大学)	
	松岡 一祥 (船舶技術研究所)	石田 茂資 (船舶技術研究所)	
	太田 昭彦 (金属材料技術研究所)	湯浅 通史 (日本海事協会)	
	鈴木 靖 (日本気象協会)	仲井 圭二 (日本気象協会)	
	古澤 博司 (日本郵船)	岩野 淳一 (日本郵船)	
	山崎 正敏 (大阪商船三井船舶)	平塚 惣一 (大阪商船三井船舶)	
	三橋 孝司 (日本郵船)	土岐 直二 (三菱重工業)	
	川野 始 (三菱重工業)	和田洋二郎 (三菱重工業)	
	村上 彰男 (川崎重工業)	後川 理 (石川島播磨重工業)	
	荻原 誠功 (石川島播磨重工業)	藤井 昭彦 (三井造船)	
	渡邊 孝和 (三井造船)	門松 浩司 (住友重機械工業)	
	阿部 孝三 (住友重機械工業)	広田 和義 (日本鋼管)	
	山本 聡 (日本鋼管)	三宅成司郎 (日立造船)	
	亀井 前人 (日立造船)		

### 第233研究部会幹事会 委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	末岡 英利 (三菱重工業)		
委員	伏見 彬 (東京大学)	影山 和郎 (東京大学)	
	山野 惟夫 (兵庫教育大学)	古澤 博司 (日本郵船)	
	岩野 淳一 (日本郵船)	三橋 孝司 (日本郵船)	
	山崎 正敏 (大阪商船三井船舶)	平塚 惣一 (大阪商船三井船舶)	
	川野 始 (三菱重工業)	村上 彰男 (川崎重工業)	
	後川 理 (石川島播磨重工業)	荻原 誠功 (石川島播磨重工業)	
	渡邊 孝和 (三井造船)	阿部 孝三 (住友重機械工業)	
	亀井 前人 (日立造船)	山本 聡 (日本鋼管)	

### 第233研究部会WG 1 委員名簿

(敬称略, 順不同)

主 幹 委 員	査	伏見 彬 (東京大学)			
	事	後川 理 (石川島播磨重工業)			
	員	影山 和郎 (東京大学)	大津 皓平 (東京商船大学)		
		平山 次清 (横浜国立大学)	河邊 寛 (防衛大学校)		
		内藤 林 (大阪大学)	香川 洸二 (九州大学)		
		山野 惟夫 (兵庫教育大学)	松岡 一祥 (船舶技術研究所)		
		湯浅 通史 (日本海事協会)	古澤 博司 (日本郵船)		
		岩野 淳一 (日本郵船)	三橋 孝司 (日本郵船)		
		山崎 正敏 (大阪商船三井船舶)	平塚 惣一 (大阪商船三井船舶)		
		末岡 英利 (三菱重工業)	川野 始 (三菱重工業)		
		渡邊 孝和 (三井造船)	阿部 孝三 (住友重機械工業)		
		亀井 前人 (日立造船)	山本 聡 (日本鋼管)		

### 第233研究部会WG 2 委員名簿

(敬称略, 順不同)

主 副 幹 委 員	査	内藤 林 (大阪大学)			
	主	査	平山 次清 (横浜国立大学)		
	幹	事	山野 惟夫 (兵庫教育大学)		
	委	員	伏見 彬 (東京大学)	井関 俊夫 (東京商船大学)	
			河邊 寛 (防衛大学校)	石田 茂資 (船舶技術研究所)	
			吉元 博文 (船舶技術研究所)	鈴木 靖 (日本気象協会)	
			仲井 圭二 (日本気象協会)	山本 浩之 (日本気象協会)	
			坂本 宗彦 (NYK輸送技術研究所)	末岡 英利 (三菱重工業)	
			和田洋二郎 (三菱重工業)	上田 直樹 (三菱重工業)	
			斎藤 泰夫 (川崎重工業)	池淵 哲朗 (川崎重工業)	
			荻原 誠功 (石川島播磨重工業)	真鍋 英男 (石川島播磨重工業)	
			山本 剛二 (石川島播磨重工業)	渡邊 孝和 (三井造船)	
			藤井 昭彦 (三井造船)	門松 浩司 (住友重機械工業)	
			広田 和義 (日本鋼管)	三宅成司郎 (日立造船)	

### 第233研究部会WG 3 委員名簿

(敬称略, 順不同)

主 幹 委 員	査	香川 洸二 (九州大学)			
	事	川野 始 (三菱重工業)			
	員	伏見 彬 (東京大学)	影山 和郎 (東京大学)		
		吉成 仁志 (東京大学)	角 洋一 (横浜国立大学)		
		河邊 寛 (防衛大学校)	藤本由紀夫 (広島大学)		
		松岡 一祥 (船舶技術研究所)	小林 佑規 (船舶技術研究所)		
		太田 昭彦 (金属材料技術研究所)	山本 規雄 (日本海事協会)		

向上登志夫 (三菱重工業)	中川 隆 (三菱重工業)
末岡 英利 (三菱重工業)	村上 彰男 (川崎重工業)
濱本 篤 (川崎重工業)	西山 五郎 (川崎重工業)
後川 理 (石川島播磨重工業)	真鍋 英男 (石川島播磨重工業)
伊藤 護 (石川島播磨重工業)	富士 彰夫 (石川島播磨重工業)
高梨 正祐 (石川島播磨重工業)	小川 幸男 (三井造船)
阿部 孝三 (住友重機械工業)	岩井 潮 (住友重機械工業)
根ヶ山 博 (住友重機械工業)	伊藤 久 (日本鋼管)
芦田 吏史 (日立造船)	

---

### 討 議 参 加 者

(敬称略, 順不同)

井上 幸一 (日本郵船)	広岡 秀昭 (日本郵船)
市川 雅史 (日本気象協会)	村山 貴彦 (日本気象協会)
鈴木 善光 (日本気象協会)	白石卓士郎 (東京大学)
松永 昌樹 (日本海事協会)	松本 一郎 (大阪商船三井船舶)
加藤 雅徳 (大阪商船三井船舶)	村田 雅文 (大阪商船三井船舶)
吉識 恒夫 (三井造船)	福岡 哲二 (三井造船)
境 禎明 (日本鋼管)	井上 克明 (三菱重工業)
中島 光明 (三菱重工業)	浅尾 元秀 (川崎重工業)
新宅 英司 (広島大学)	安藤 孝弘 (船舶技術研究所)

事 務 局 (日本造船研究協会) 山内 康勝・村上 好男・武田 晴雄

# 目 次

1. 研究の目的	1
2. 研究の目標	2
3. 研究の内容	3
3.1  新しい高度モニタリングシステム	3
3.1.1  新しいモニタリングシステム (SR233AMS) の提案	3
3.1.2  フィールドテストによるモニタリング試行	5
3.2  新しいモニタリングシステムのための要素技術	6
3.2.1  船体運動から波浪現況を求める方法	6
3.2.2  波浪予測法	8
3.2.3  実海域性能データの解析法の開発	9
3.2.4  新しい構造応答センサーの開発と応用	11
3.2.5  構造モニターの目的と手法の開発	12
4. 得られた成果	14
5. 成果の活用等	15
6. 最後に	15

# 1. 研究の目的

本研究は、平成8年度から平成10年度までの3カ年に亘り実施したものであるが、研究の企画・計画は平成7年度に検討・審議された。

当時、平水中の推進性能のみならず実海域の推進性能も含めた経済船型開発の必要性や船体構造の疲労損傷撲滅の為、波浪中に於ける船体構造状態の監視や構造寿命評価の必要性が論議された。これらはトータルライフに亘ってその経済性や安全性に優れた船舶を市場に投入したいという考えに基づく。

一方、安全という観点からIMOにおいて船舶運航と船舶管理の在り方が議論され船長責任のみならず陸側の運航管理責任も問う新しい管理体制の法制化(I S Mコード)の動きもあった。

こうした背景の中で中長期的に、船体部を対象にどのような技術的アプローチをしていくか検討された。図1は当時検討されたものである。

第一の課題は「船舶が航行中にどんな状態にあり、どのような履歴を有しているのかきちんと把握すること」であることから、「船体状態を遭遇波浪/推進性能/構造応答に亘って総合的に把握する高度なモニタリングの骨格とその技術要素を提供する」ことを目的として本研究がスタートした。

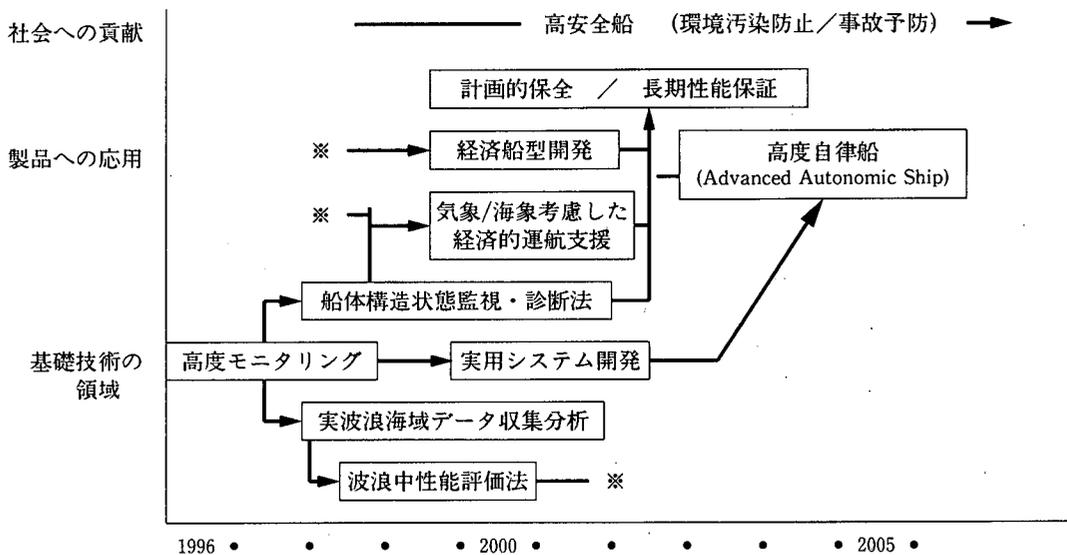


図1. 高度モニタリング技術を核にした今後の展開について  
 (平成7年度研究計画時点での検討図, 高度モニタリング研究の位置付け/派生技術課題/期待効果を示す)

## 2. 研究の目標

高度モニタリングの世界をどのように描くかによって研究の目標も異なってくる。図2に平成7年度の計画時点で検討されたものを示す。議論の結果、どのようなコンセプトを描くかも研究の目標となると判断された。

一方、本研究で対象とする高度モニタリングは実船計測と異なり「できるだけ簡単なセンシングシステム／データの多頻度自動収録と船上での迅速なデータ解析／状態判断と予測のシステム（陸装備）／デジタルデータベースでの船陸間通信」といった機能を併せもつことが望まれる。こうした機能に技術的にどう応えるかが研究目標となる。

要素研究は波浪/性能/構造の各分野にまたがるので、それぞれの分野の目標を下記においた。

1. 波浪～船舶の波浪計化法を主として船舶の遭遇する波浪を特定する方法を提案する。
2. 性能～実海域で推進性能に影響を与える諸要素を含めてデータの船上収録が自動的に且つ迅速にできるシステムを開発する。さらに影響解析のできるシステムを開発する（陸装備）。
3. 構造～従来型センシング（歪ゲージ）では耐久性等に限界があるので新しい先端的なセンシング法について提案する。さらに直接センシングの箇所を極小とし解析を援用した構造応答把握法を提案する。これらをおりこんだ船上データ自動収録・解析システムを開発する。

机上／実験室レベルだけの研究では評価に限界があるので、就航中の船舶にプロトタイプシステムを搭載しフィールドテストを実施することも計画された。その目標は、

4. フィールドテスト～諸機能の総合的な検証と船陸通信のトライによるモニタリングシステムのブラッシュアップに反映させる。

以上の技術基盤と、それらをもとに「新しい船体高度モニタリングシステムを提案する」ことが本研究の目標となった。

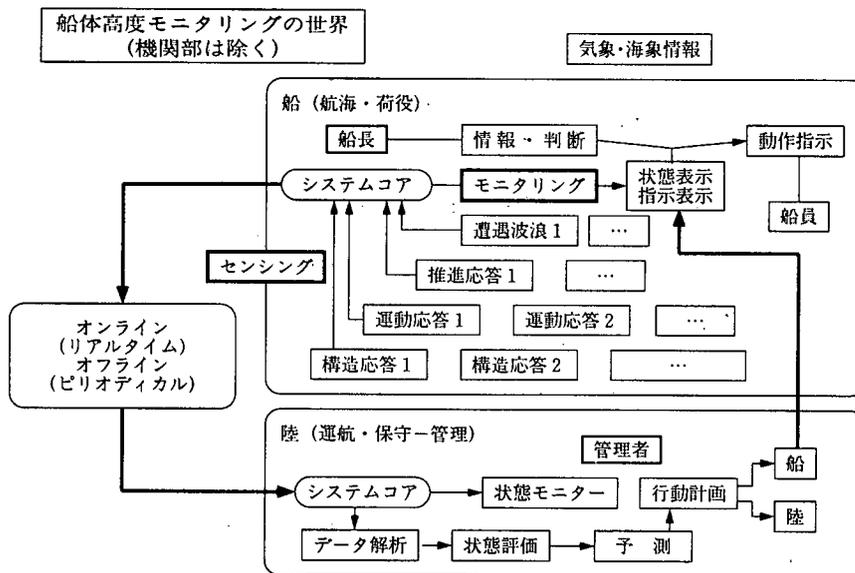


図2. 高度モニタリングの世界  
(平成7年度研究計画時点での検討図)

### 3. 研究の内容

#### 3.1 新しい高度モニタリングシステム

##### 3.1.1 新しいモニタリングシステム (SR233AMS) の提案

提案する新しいモニタリングシステム (SR233 Advanced Monitoring System-SR233AMSと称す) のコンセプトは口絵の示す通りである。

SR233AMSは、以下の基本機能を持っている。

- ・ 波浪中の船体状態を波浪／性能／構造応答について総合的にモニターする。
- ・ 船上パソコンにより密なモニター頻度でデータ収録と自動解析を行う。
- ・ 船上および陸のコントロールセンターで同時にモニター可能である。
- ・ 保管・解析されたモニターデータを運航計画／荒天時航海支援／保守支援へ反映させる。

従来方式モニタリングシステムとの特徴比較を表3.1.1.1に示す。

表3.1.1.1 SR233AMSの特徴

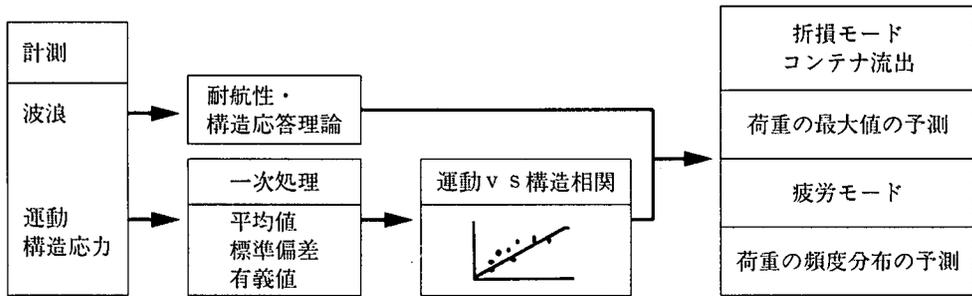
項目	SR233AMS方式	従来方式
(前提条件) 運航業務の分担 運航管理方式 運航管理責任 操船判断	船陸一体で分掌 陸上の判断・支援機能が中心 (多数隻管理) 会社責任 本船側とエキスパートを含めた 陸上で分掌	本船側が主体 本船側の判断が主体 (自己完結型) 船長責任 本船側 (船長)
(システムの特徴) 船陸通信システム モニターの構成 参照データ	双方向多数隻通信 (モニターデータ、技術情報等) 性能モニター、波浪モニター および構造モニター モニターデータおよび広範囲の 技術情報	一方向通信 (気象予報等) 構造モニターが主体 主にモニターデータ

性能モニターは自動計測／自動解析機能があり、運用方法も明確であるが、構造モニターの運用時には、従来にない判断方法が必要となるので、1例として、以下のような検討を行った。

- ・ コンテナ船の航行安全性を判定するために関連する項目 (表3.1.1.2)
- ・ 波浪および運動の計測データなどから構造安全性を予測する (図3.1.1.1)
- ・ 運動の計測量との相関により構造応答を推定する (図3.1.1.2)
- ・ 運動・加速度と構造応答から操船信号 (危険度) を判断する (図3.1.1.3)

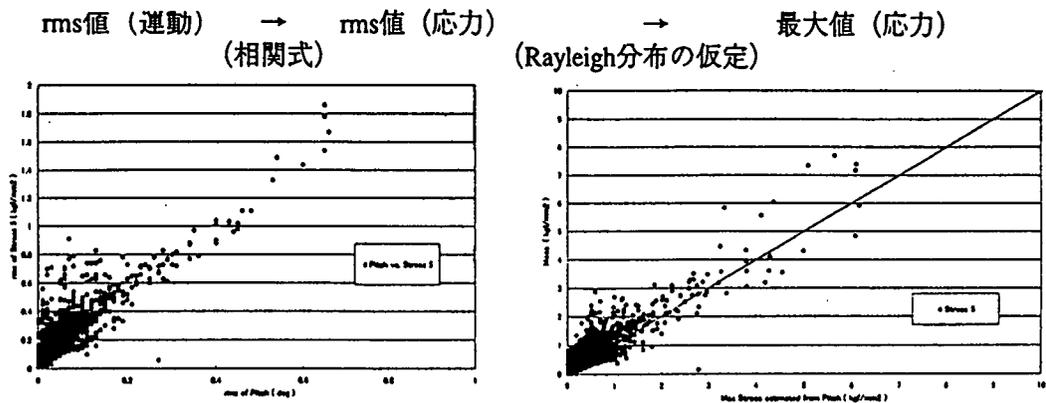
表3.1.1.2 コンテナ船の航行安全性判定の基準

判定対象項目	キーマード	対応する測定量	関連する項目
船体の折損	座屈、崩壊、 大変形、疲労	海象（遭遇波浪） 甲板応力 亀裂	上下加速度 音響（スラミング） 応力（水圧計の変わり） 機関出力
コンテナ損傷、 流出	復原性 スラミング 甲板冠水、青波	海象（遭遇波浪） ジャイロ（縦、横揺れ） 加速度（上下、左右） 音響（スラミング） 応力（水圧計の変わり）	甲板応力



- (a) 波浪計測 → 耐航性・構造応管理論 → 構造応答予測
- (b) 運動計測 → 運動 v s 構造相関 → 構造応答予測

図3.1.1.1 構造モニターデータと予測

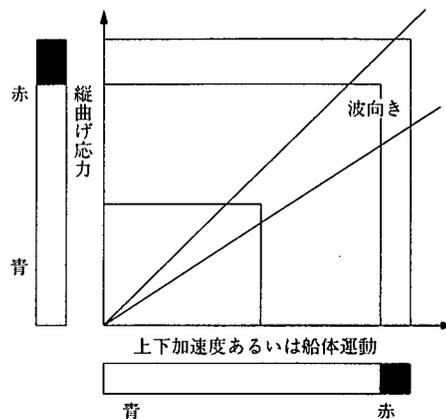


コンテナ船の船体中央横断面の応力と縦揺との測定量のrms値の相関

縦揺れのrms値から船体中央横断面の応力の最大値の予測

図3.1.1.2 運動計測値より構造応答の推定

図3.1.1.3 運動による構造応答の危険度判断



### 3.1.2 フィールドテストによるモニタリング試行

実海域性能データの自動計測・解析システムの開発・搭載、構造データ（加速度・応力など）の計測・解析（コンテナ船）、衛星通信による船陸通信（コンテナ船）、犠牲試験片などの先端センサーの試行、波浪特定システムの搭載が主な実施項目である。表3.1.2にフィールドテスト条件を、図3.1.2.1および図3.1.2.2にコンテナ船とバルクキャリアについてのセンサー配置を示す。

表3.1.2 フィールドテスト条件

	コンテナ船	バルクキャリア
航路	欧州航路, 北太平洋航路	豪州航路, インド航路, 太平洋航路
テスト期間	約1年半	約1年間
モニター項目	船速, 風速・風向, 方位, 舵角, 主機馬力, プロペラ回転数, 船体運動, 加速度, 相対波高, 船体縦応力, ハッチコーミング変形量, ビデオ画像, 音声, 犠牲試験片	船速, 風速・風向, 方位, 舵角, 主機馬力, プロペラ回転数, 船体運動, 加速度, レーダー画像, 犠牲試験片
本船上解析	平均値, rmsなど1次解析, レインフロー法頻度解析	平均値, rmsなど1次解析
船陸間通信	インマルサットA	なし

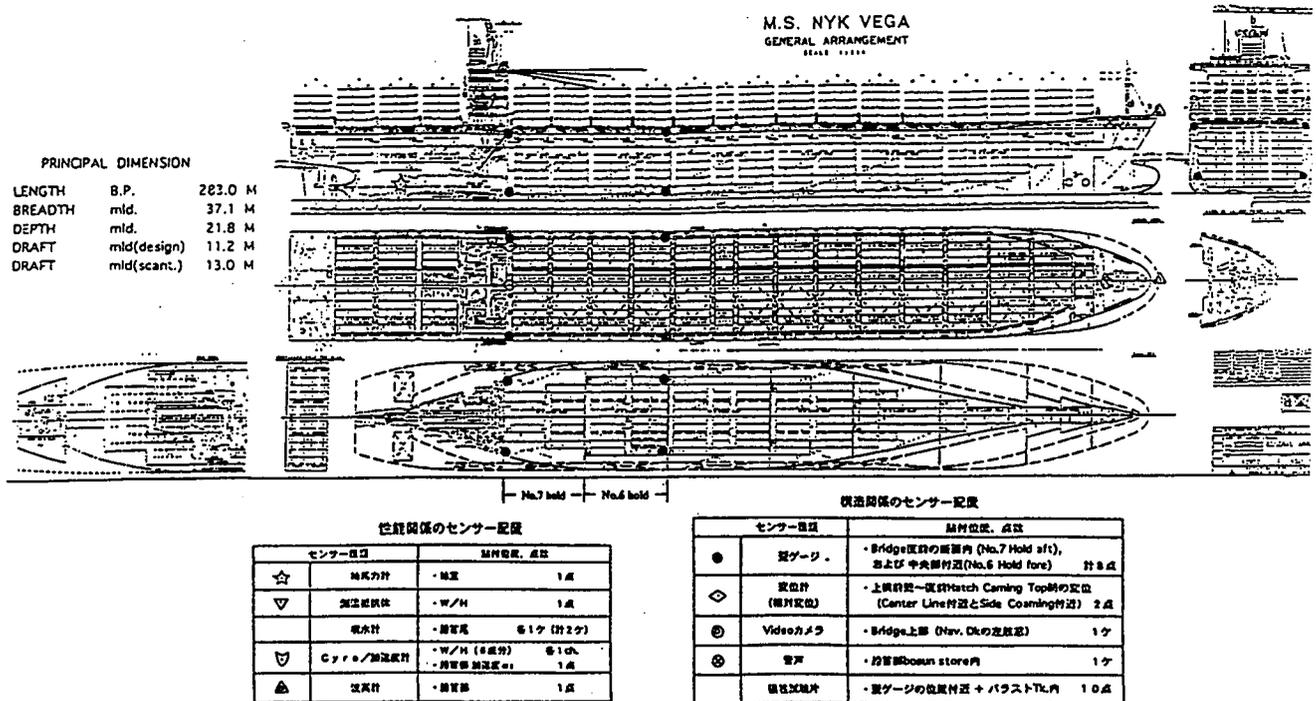
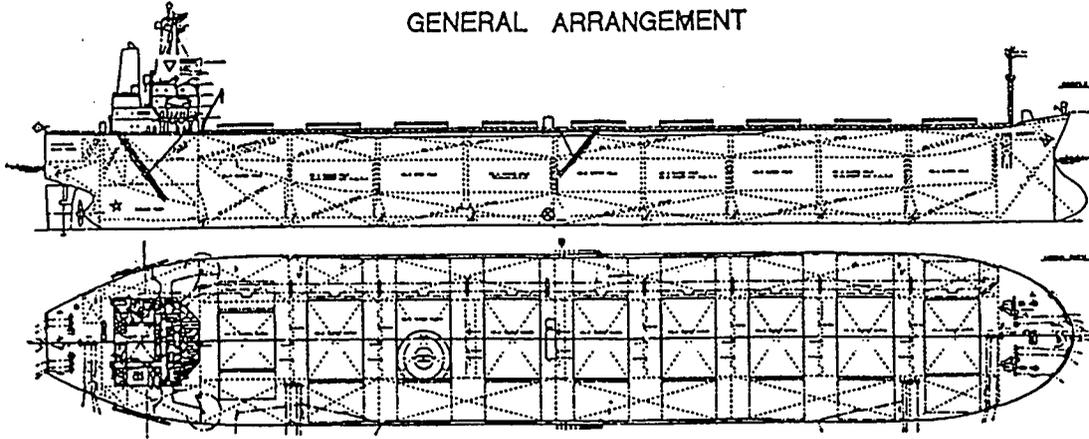


図3.1.2.1 コンテナ船フィールドテストにおけるセンサー配置

## GENERAL ARRANGEMENT



PRINCIPAL DIMENSION	
LENGTH B.P.	260.0 M
BREADTH MLD	43.0 M
DEPTH MLD	23.9 M
DRAFT DESIGN	16.5 M
DRAFT SCANT	17.4 M
DEADWEIGHT at ds	151,000 MT

性能関係のセンサー配置 (本船設備以外の持ち込みのみ)				構造関係のセンサー配置			
センサー種類		設置場所	点数	センサー種類		設置場所	点数
☆	傾度力計	艙室	1	○	傾性試験片	Lower Stool	15
▽	Gyro/加速感計	W/H	1				

図3.1.2.2 バルクキャリアフィールドテストにおけるセンサ配置

### 3. 2 新しいモニタリングのための要素技術

#### 3.2.1 船体運動から波浪現況を求める方法

航行中の船舶で波浪情報をモニタリングする技術は、SR233AMSにおいても重要であり、船体を波浪計化する方法などについて研究した。

##### (1) 波浪モニタリングシステムの提案

- ・船体に搭載するモニタリングシステムセンサーを使用する。
- ・波高の特定精度としては±10%、波向きについては±10%を目標とする。
- ・簡易型と詳細型（表3.2.1参照）の両方を提案する。
- ・波長が短い場合でも、長い場合でも対応可能である。
- ・レーダによる波浪情報も活用する。

上記の仕様を満足する波浪モニタリングシステムを提案した（表3.2.1）。

この波浪モニタリングシステムの提案のために、船体を波浪計化する方法（運動応答→船体の周波数応答→遭遇波浪の順に推定する）を検討し、汐路丸、コンテナ船、バルクキャリアの実船計測データを使って、その推定精度を確認し（図3.2.1.1にその1例を示す）、さらに、本システムを実船に搭載して船上で解析することで、その実用性を検証した（図3.2.1.2）。

表3.2.1 提案の波浪モニタリングシステム

内 容	簡易型		詳細型	
	波高 + 出会い周期		波高 + 波方向 + 出会い周期 + 絶対周期	
波長 (λm) 範囲	$\lambda \leq L$	$L \leq \lambda$	$\lambda \leq L$	$L \leq \lambda$
切り替え周波数 f c (Hz) *	$F \leq f c$ 短波長	$f c \leq f$ 長波長	$f \leq f c$ 短波長	$f c \leq f$ 長波長
使用センサー				
船首相対波高	○		○	
左舷相対波高			○	
右舷相対波高			○	
船首上下加速度	○	○		○
横揺れ		○		○
縦揺れ		○		○
小 計	2	3	3	3
合 計	4		6	

注) Lは船長, λは波長, fは波の絶対周波数

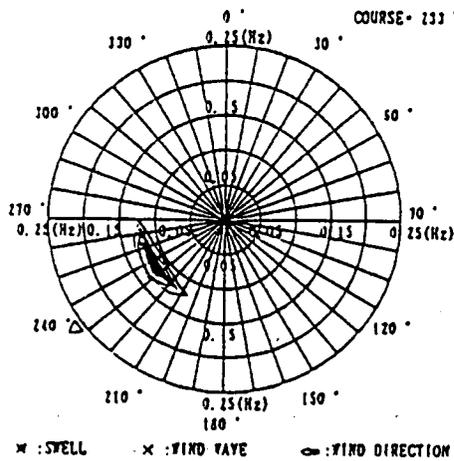


図3.2.1.1 波浪解析の計算例 (ベイズ法)

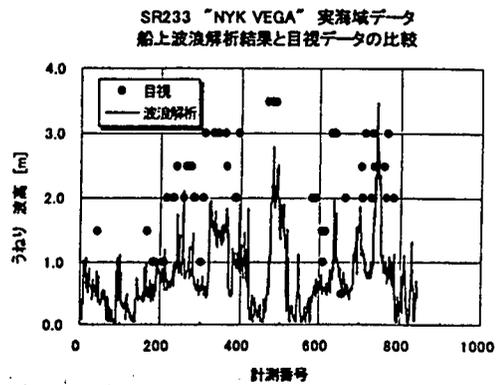
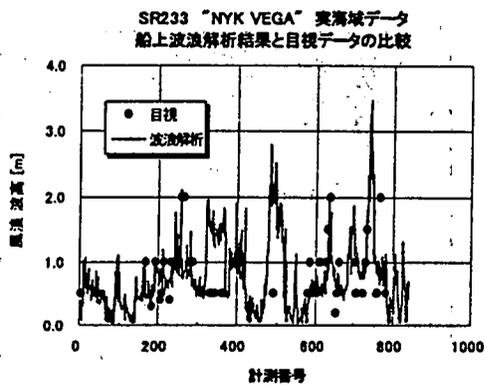


図3.2.1.2 船上波浪解析結果と目視データの比較

### 3.2.2 波浪予測法

波浪予測は安全、経済運航にとって重要であり、フィールドテストでは船体の波浪計化の解析に合わせて波浪追算も実施し相互に比較した。

#### (1) 波浪追算

この方法は計算時点までの気象データ（特に海面風速）の既知の計測値を使用するため、比較的精度の高い波浪予測が可能である（図3.2.2.1）。

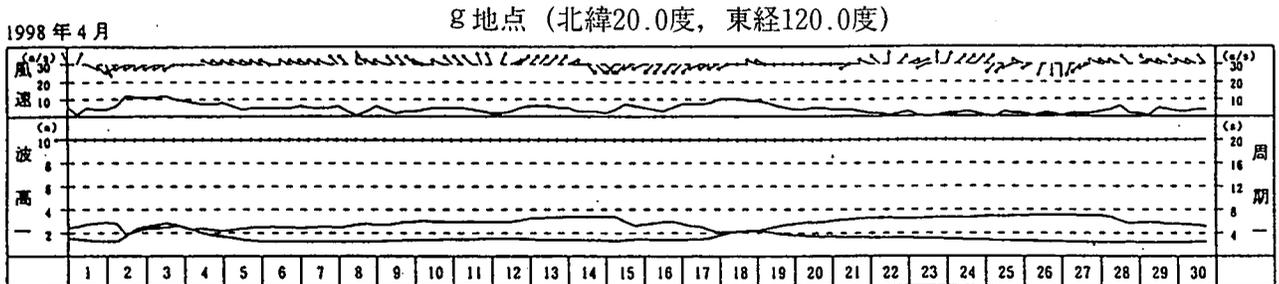


図3.2.2.1 波浪追算例

#### (2) 波浪予測法の例

計測した現況波浪を基に波浪予測を修正する方法を検討した。図3.2.2.2の例では実測値の効果が24時間後まで影響を及ぼすことを示している。

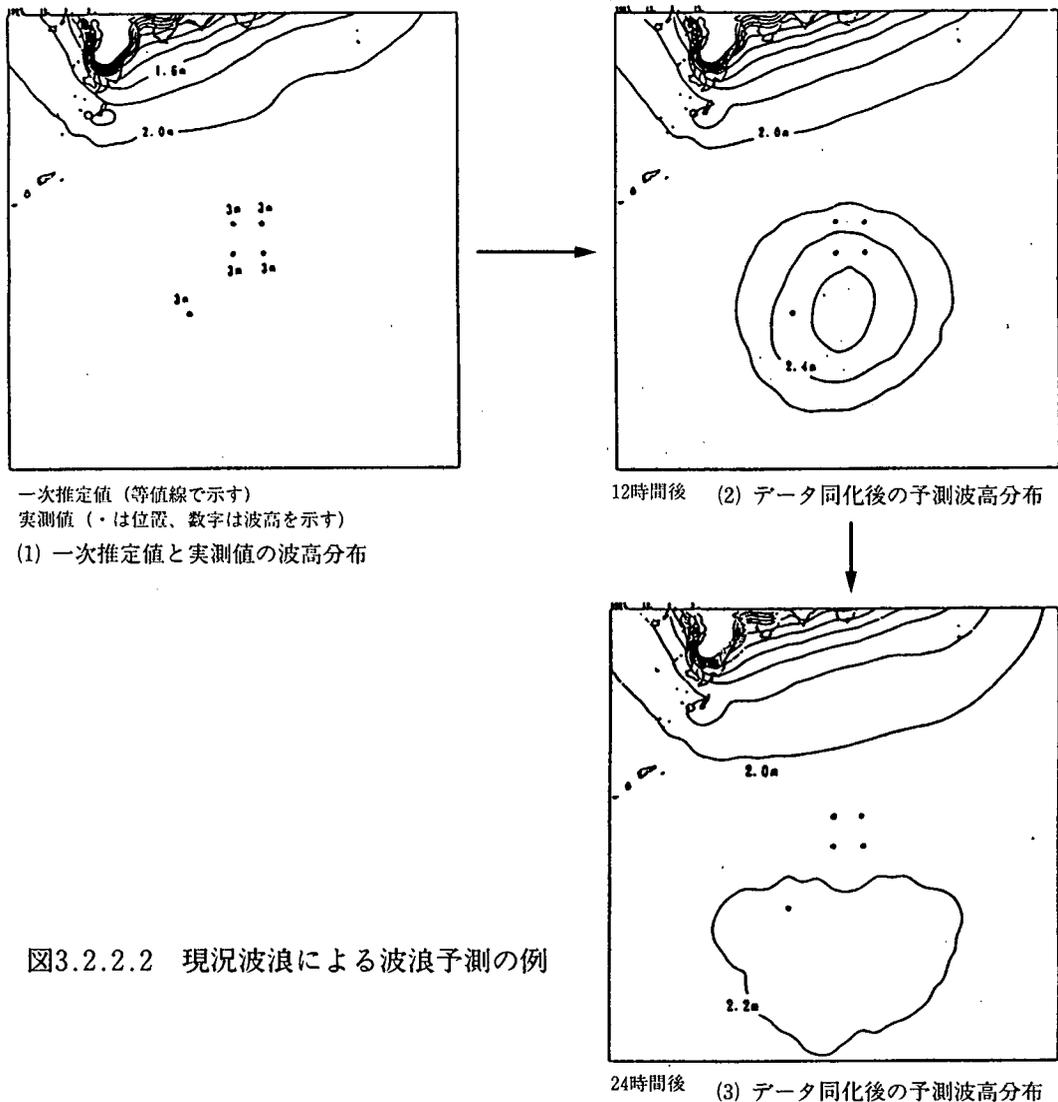


図3.2.2.2 現況波浪による波浪予測の例

### 3.2.3 実海域性能データの解析法の開発

#### (1) 新しい解析法の特徴

- ・実海域性能に影響すると考えられるすべての要素、すなわち風圧抵抗・風浪抵抗・うねり抵抗・当て舵抵抗・yawing抵抗・横流抵抗・潮流影響・水温差抵抗・船体汚損抵抗・プロペラ汚損によるプロペラ効率低下を考慮
- ・従来法ではできなかった、風浪抵抗およびうねり抵抗の推定および把握・操舵による抵抗の推定・プロペラ汚損によるプロペラ効率の低下の把握をも含む新解析法の採用

#### (2) 解析法の有効性の確認

・約1年間2隻で実船試験した結果、種類・量・質ともに格段に改善された計測データを基に、新しい解析法で解析することにより、短期間のデータからでも、各要素の実海域性能への影響を従来法と比較して格段に明確に把握できることを確認した。

その効果を示す例として、図3.2.3.1～図3.2.3.4に波浪影響と船体汚損影響の新しい解析法による結果と従来法による結果との比較例を示す。

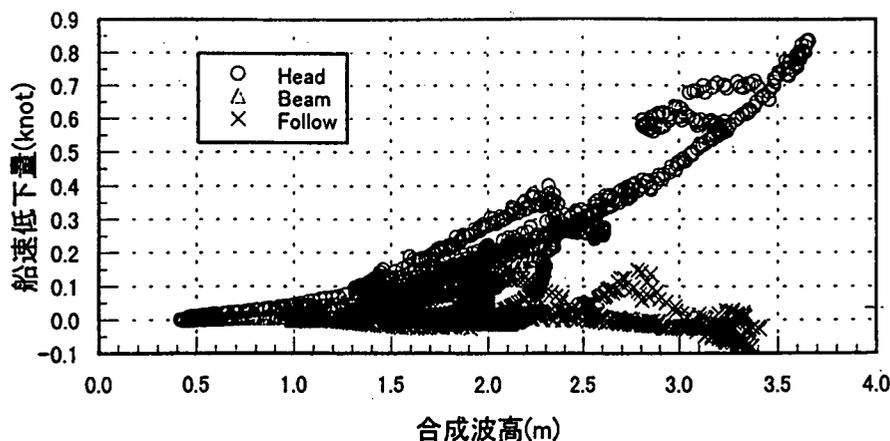


図3.2.3.1 船速低下の波浪影響 (SR233方式)

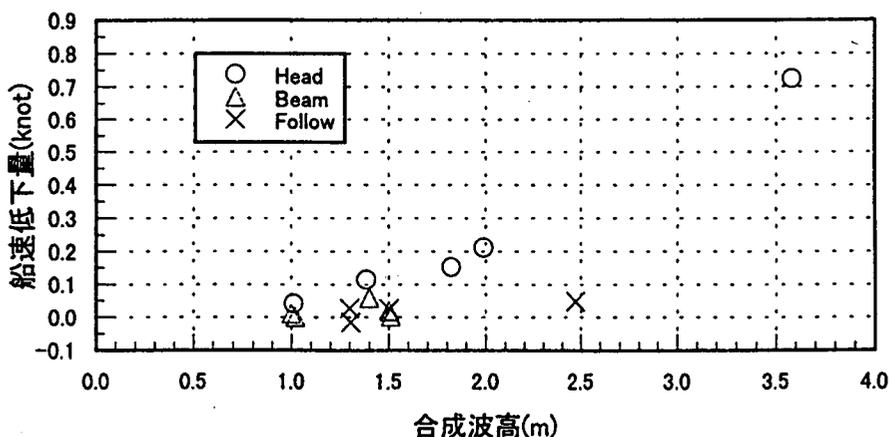


図3.2.3.2 船速低下の波浪影響 (従来方式)

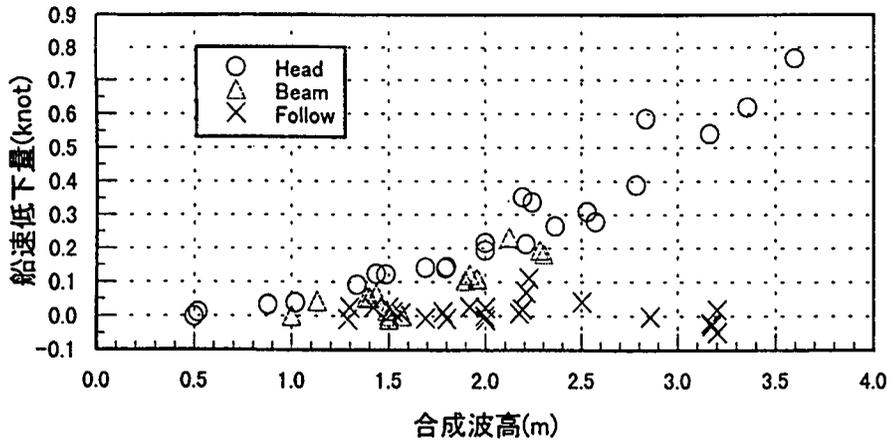


図3.2.3.3 船速低下の波浪影響 (目視計測点のSR233方式)

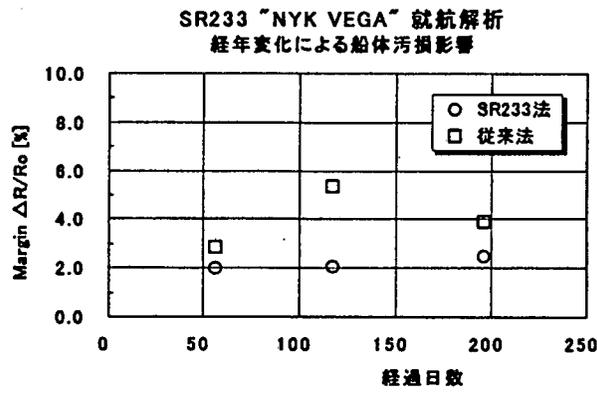


図3.2.3.4 経年変化による船体汚損影響の解析

### 3.2.4 新しい構造応答センサーの開発と応用

これまでの実船計画では主として電気式の歪ゲージが用いられているが防爆性や耐久性に難がある。こうした問題を解決する新しいセンシング法について調査研究した。研究成果の中から光ファイバーと犠牲試験片について記す。

#### (1) 光ファイバーセンサー

- 光ファイバーセンサーを調査し構造モニターに適用できそうな方式をまとめた（表3.2.4.1）。

適用部位	センサー方式	特徴
船の縦曲げ変形	光ファイバーLDV (レーザドップラ速度計)	ゲージ長の制約がない 光ファイバーの敷設が容易 あまり遅い変形は測定しにくい (0.01Hzまで)
船体の荷重応答の指標となる構造部位	ブラッグ格子センサー ファブリペロー型干渉計 光ファイバーLDV	耐水性、耐食性 経年劣化少ない ひずみゲージより長い使用期間をめぐす 最大ひずみの制約
船首波浪衝撃荷重	光ファイバーLDV	動的特性に優れる
油槽内の部位のひずみ	ブラッグ格子センサー ファブリペロー型干渉計	防爆性 耐食性に期待
クロスデッキの変形	光ファイバーLDV ブラッグ格子センサー	長ゲージ長 温度補償性
船体の経年的変化	BOTDR	ひずみ分布が測定できる 計測に時間がかかる 光格子ファイバーの耐食性・安定性

- 下記2方式を取り上げ東京商船大学の練習船「汐路丸」で実船計測を実施した（図3.2.4.1）。

ブラッグ格子 (FBG) センサー方式 : 船体構造の歪検出

レーザドップラ (FIDV) センサー方式: スラミングなどによる衝撃振動検出

- ブラッグ格子センサー方式は適用性大と判断し実験室で多点歪計測実験を行った（図3.2.4.2）。

1本の光ファイバーの配線で多点の計測ができる、伝送光のエネルギーレベルから安全防爆である等これまでにない特徴を有する。

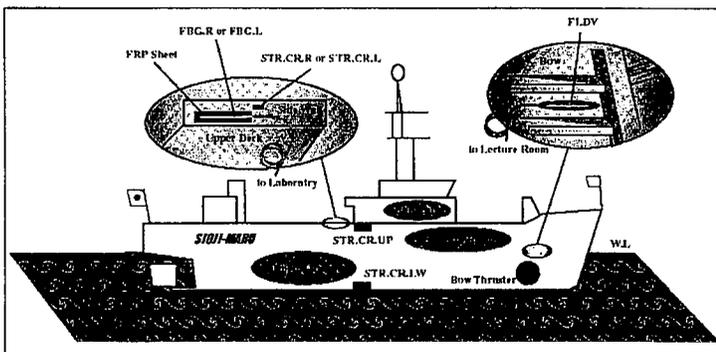


図3.2.4.1 汐路丸における光ファイバーセンサー計測実験センサ配置図

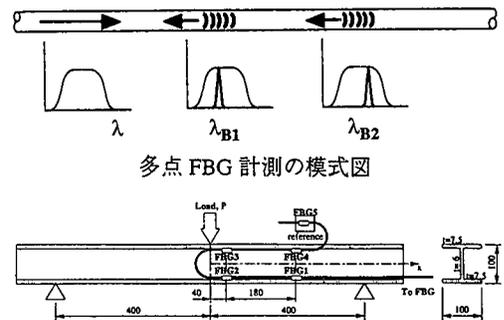


図3.2.4.2 FBGセンサーによる多点計測実験

(2) 犠牲試験片

- ・犠牲試験片は船体構造部材の疲労亀裂予知に適用する。取付例や試験片形状は口絵に示した。
- ・犠牲試験片はカットバンのように疲労強度を検出したい箇所に貼付しておき、定期的な受感部を観察するオフラインセンサーである。簡単に取り付けられるといった特徴を有する。
- ・バルクキャリアのスツール内部の貼付例を示す(図3.2.4.3)。

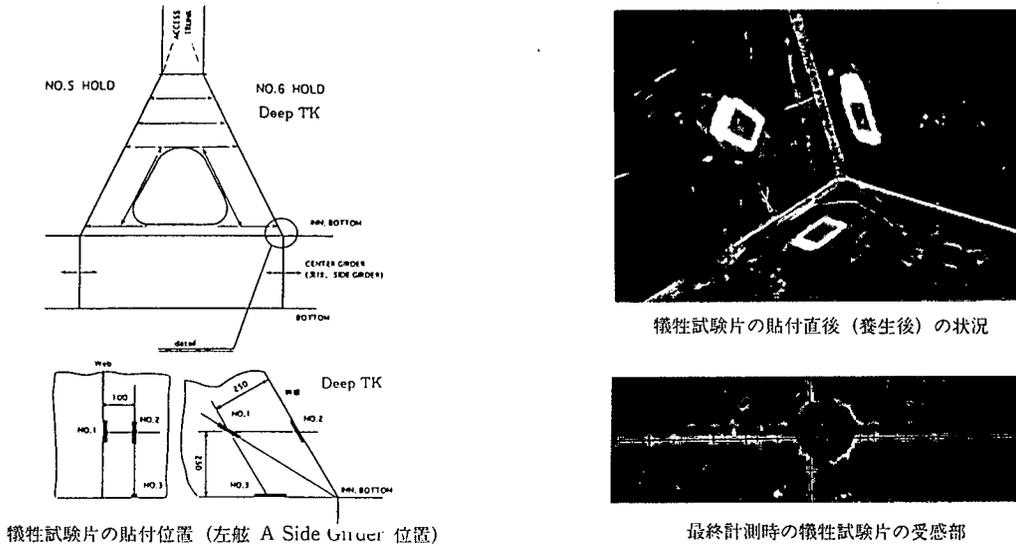


図3.2.4.3 バルクキャリアスツール内の貼付例

- ・高感度型の開発、ランダム荷重下での犠牲試験片疲労強度特性調査を行い、犠牲試験片による実構造の寿命推定法開発を行い実用化に備えた。

3.2.5 構造モニターの目的と手法の開発

構造モニターの目的には、船体構造の強度面からの航海時の安全確保と計画的な保守による船体構造の健全性確保という2面がある。こういった目的を勘案し役割や判断の為のモニター手法の研究を行った。

(1) 構造モニターの役割

- ・航海支援と保守支援の二つの役割があり各々に適したモニター法につき整理した(表3.2.5.1)。また構造モニターの判断対象項目を整理した。コンテナ船の例を示す(図3.2.5.1)。

構造モニタリング		
目標	航海支援モニタリング	保守支援モニタリング
評価要領	オン・ライン即時評価	オフ・ライン長期評価
主対象構造	主構造/局部構造	局部構造
検知対象物理量	縦水平曲げモーメント(応力) 振りモーメント(応力)、 ホールド変形、衝撃、音響、 画像(海象)、航海情報	疲労度、 損傷、変形、 腐食量(衰耗)
センシングの主体	常時センシング、 船上データ処理	定期、臨時検査、 陸上データ処理
解析	統計モデル 最大荷重(応力、変位) 相関解析(海象、運動) " (主構造、局部)	解析シミュレーション・ モデル 疲労寿命(発生、伝播)
判定基準	危険度ランク(A、B、 C、階級、回帰年) 管理基準	部材評価マニュアル 保守補強効果 管理基準
判定者	船/陸	陸

表3.2.5.1 構造モニタリングが有する二つの役割

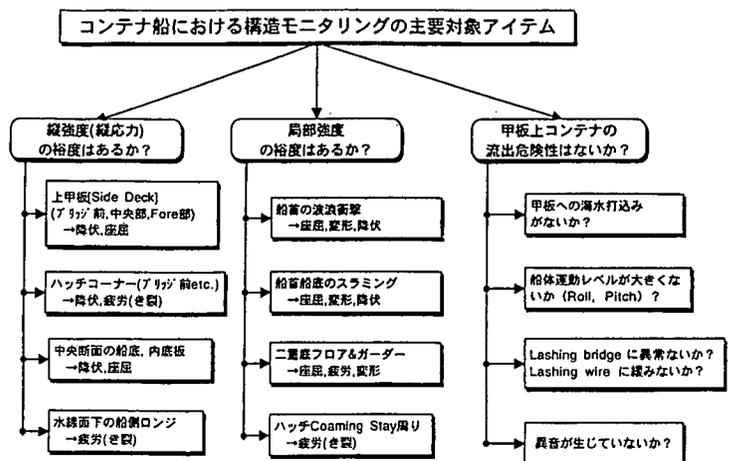
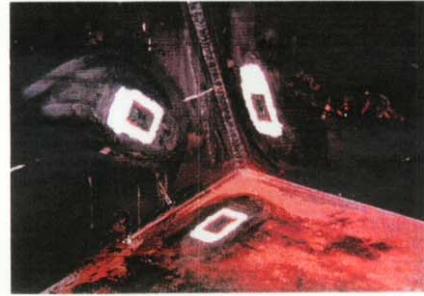
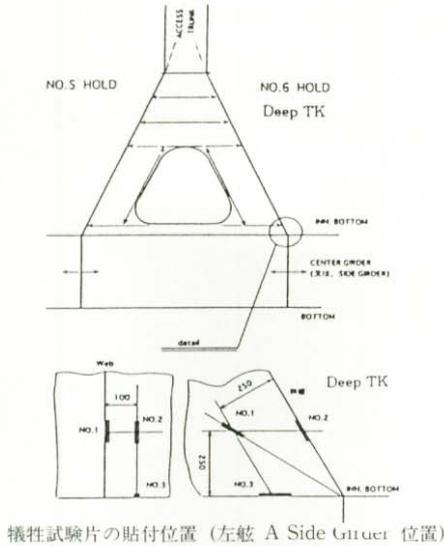


図3.2.5.1 コンテナ船における構造モニタリングの課題

(2) 犠牲試験片

- ・犠牲試験片は船体構造部材の疲労亀裂予知に適用する。取付例や試験片形状は口絵に示した。
- ・犠牲試験片はカットバンのように疲労強度を検出したい箇所に貼付しておき、定期的な受感部を観察するオフラインセンサーである。簡単に取り付けられるといった特徴を有する。
- ・バルクキャリアのスツール内部の貼付例を示す（図3.2.4.3）。



犠牲試験片の貼付直後（養生後）の状況



最終計測時の犠牲試験片の受感部

図3.2.4.3 バルクキャリアスツール内の貼付例

- ・高感度型の開発、ランダム荷重下での犠牲試験片疲労強度特性調査を行い、犠牲試験片による実構造の寿命推定法開発を行い実用化に備えた。

3.2.5 構造モニターの目的と手法の開発

構造モニターの目的には、船体構造の強度面からの航海時の安全確保と計画的な保守による船体構造の健全性確保という2面がある。こういった目的を勘案し役割や判断の為のモニター手法の研究を行った。

(1) 構造モニターの役割

- ・航海支援と保守支援の二つの役割があり各々に適したモニター法につき整理した（表3.2.5.1）。また構造モニターの判断対象項目を整理した。コンテナ船の例を示す（図3.2.5.1）。

構造モニタリング		
目標	航海支援モニタリング	保守支援モニタリング
評価要領	オン・ライン即時評価	オフ・ライン長期評価
主対象構造	主構造/局部構造	局部構造
検知対象物理量	縦・水平曲げモーメント(応力) 振りモーメント(応力)、 ホールド変形、衝撃、音響、画像(海象)、航海情報	疲労度、 損傷、変形、 腐食量(劣化)
センシングの主体	常時センシング、 船上データ処理	定期、臨時検査、 陸上データ処理
解析	統計モデル 最大荷重(応力、変位) 相関解析(海象、運動) 〃(主構造、局部)	解析シミュレーション・ モデル 疲労寿命(発生、伝播)
判定基準	危険度ランク(A、B、 C、階級、回帰年) 管理基準	部材評価マニュアル 保守補強効果 管理基準
判定者	船/陸	陸

表3.2.5.1 構造モニタリングが有する二つの役割

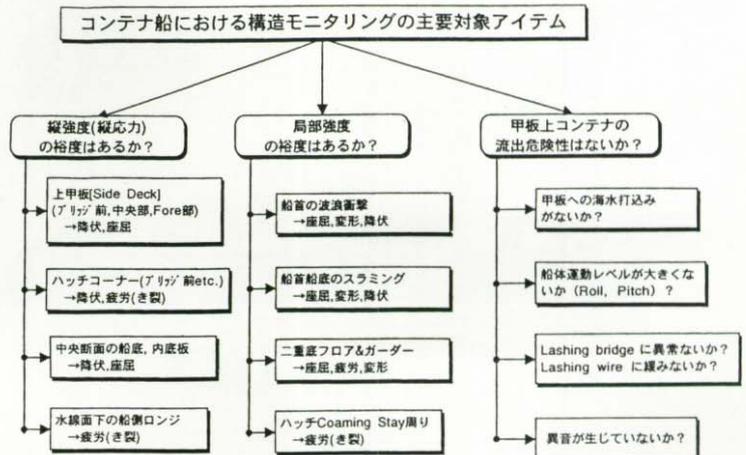


図3.2.5.1 コンテナ船における構造モニタリングの課題

(2) 構造モニター的手法 (成果の幾つかを記す)

- ・トレンドを見る：航海支援では荒天遭遇時の船体状態をできるだけ人の五感に近い状態で監視し、構造応答の予測をたてることが重要となる。かかる観点で下記手法を開発した。
- 船体運動や構造歪の定量的モニターだけでなく画像 (Wheel Houseから見た時々刻々の状況変化) や音 (船首部の衝撃音) もモニターする (口絵参照)。
- 短時間の応答履歴のデータを統計処理し警戒レベルを予測する (図3.2.5.2)。

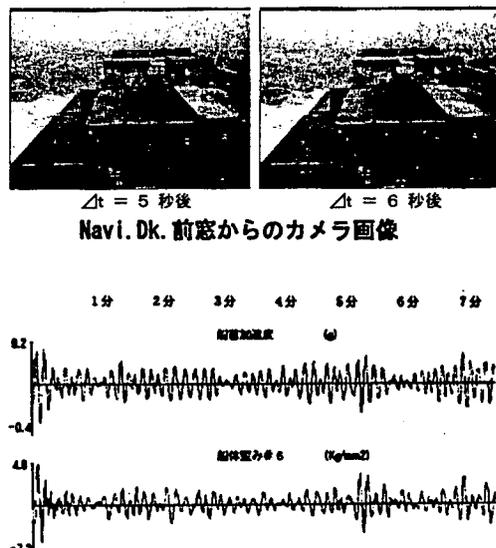


図3.2.5.2 構造応答履歴の統計処理と時々刻々のモニター情報例

- ・相関を見る：船体運動や構造応答の同時計測データをもとにそれらの相関を見ることが出来る。  
相関を利用して少ないセンシング項目で船体状態の監視と予測をする手法について研究し、ニューラルネットワーク手法が有効であることがわかった (口絵参照)。
- ・疲労履歴を監視する：モニターデータから疲労度パラメータの累積トレンドを見る手法を得た。  
航海毎に構造に疲労がどのくらいたまっていくかがわかる (図3.2.5.3)。

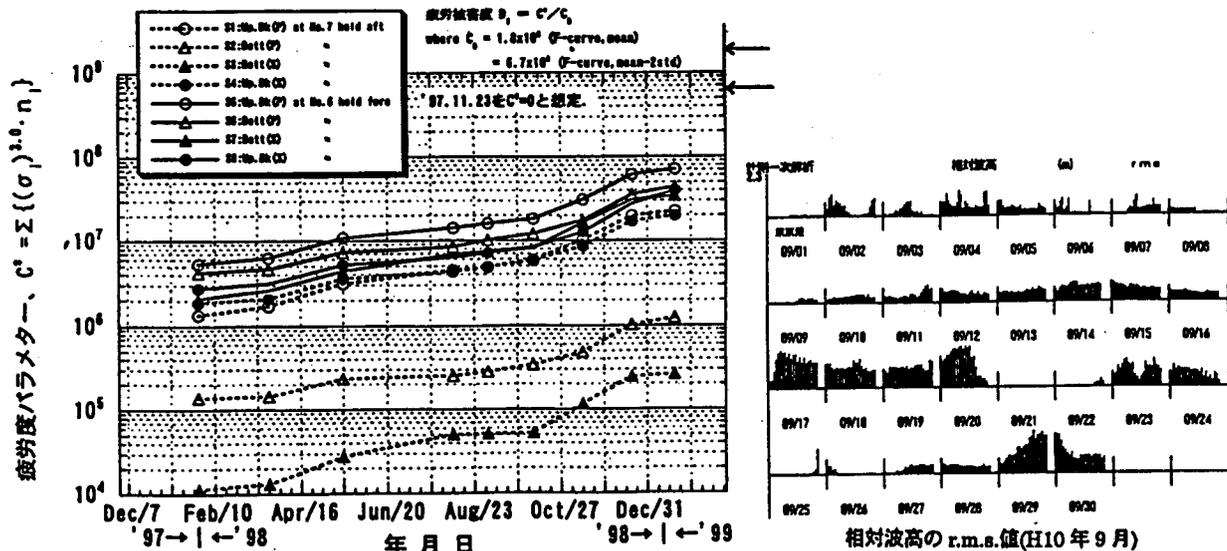


図3.2.5.3 疲労度パラメータの累積トレンド (歪ゲージ貼付位置での縦応力)

計測データのトレンド表示例

## 4. 得られた成果

本研究は高度モニタリングを実現する上での必要な要素技術の確立とこれらによって構成される新しいモニタリングのコンセプトを提案することに研究主題がある。以下に本研究で得られた成果をとりまとめ示す。

### 1. 船体の「高度モニタリングシステム」のコンセプト・仕様 (SR233 AMS) の提案ができた。

基本機能を下記としている。波浪/性能/構造を総合的にモニターする提案は初めてである。

- ・波浪中の船舶の船体状態を波浪/性能/構造応答に亘り総合的にモニターする。
- ・モニター頻度を密としデータ収録・解析は船上パソコンで自動的に行う。
- ・モニターは船上と同時に陸のコントロールセンターでも見ることができる。
- ・モニターデータは保管・解析された運航計画/荒天時航海支援/保守支援に反映する。

### 2. 高度モニタリングを構成する基礎技術を構築した。

基礎技術として波浪/性能/構造の分野に亘りセンシング/データ処理/データ通信/データ解析等の新しい技術を得た。以下にポイントを記す。

#### 2.1 船舶の波浪計化による波浪モニター法の実用化の目処を得た。

- ・波浪中での船体運動及び相対波高データを解析して波浪を特定する方法〔船体波浪計化法〕を取り上げ3つの解析法 (MLM法、Bayes法、Parametric法) の特徴を明らかにした。
- ・解析時間の短いMLM法を主にし船上で解析できる波浪モニターを考案した。精度を考えると船首/左右舷の3箇所相対波高計測を行うのがもっとも望ましいが、船体運動の大きい領域では船体3運動だけでもモニターしうる簡易法 (SR233 Simple Wave Monitor) も使える目処を得た。

#### 2.2 実海域性能データの自動計測・解析システムを開発した。

- ・船上で実海域性能データを自動的に収録処理するシステム (船上1次解析) とさらにこれらのデータから波・風・潮流等の影響を解析するシステム (陸上2次解析) を一貫したものとして開発した。
- ・従来のアブログ情報からの推定・評価に比べればデータの同時性から各種データの相関が明確となり1日のデータも分・時間刻みで多量に解析できるので推定に対する精度が著しく向上する。

#### 2.3 構造応答の新しいセンシング手段の開発及び船舶への適用の目処を得た。

- ・オフラインで構造の疲労被害レベルをセンシングする手段として犠牲試験片の開発を行った。実構造との疲労強度の相関を明らかにするとともに高感度型も開発した。
- ・オンラインであるが構造の多点歪同時計測法として光ファイバーによるブラグ格子センサー法が船舶に向いている方法であることを明らかにした。
- ・現在実船計測等で使用されている電気式の歪ゲージによるセンシングに比べ、これらはいずれも耐久性/防爆性に優れる。犠牲試験片は安価で容易に取り付けられる利点も有する。

#### 2.4 構造応答モニター手法を提案した。

- ・直接センシングする箇所を極小とし構造解析情報を援用しながら波浪中での構造応答状態を監視・予測する構造応答モニター手法を提案した。
- ・モニターの目的には荒天時の船体強度という面からの航海支援や船体の経年（疲労被害履歴）に対する安全性という面からの保守支援がある。役割に応じたモニター法を示した。
- ・航海支援では船体運動と構造応答の相関からの予測、保守支援では疲労被害の逐次累積予測と犠牲試験片による定期的確認が疲労強度の判断に有効であることを示した。

3. 「高度モニタリングシステム」の実船での試行検証によりその成果がより確かなものになった。各分野の基礎／要素技術とコンセプトが融合して初めて「高度モニタリングシステム」の姿が見えてくる。プロトタイプの一部ないしは一部を搭載した実船でのフィールドテストにより机上ではわからないような課題・知見を得た。

## 5. 成果の活用等

本研究の波浪／性能／構造分野で得られた基礎技術の成果は設計・運航・保守のそれぞれの分野で単独の技術として活用できる。

しかしながら「高度モニタリング」として成果を活用していく為には社会基盤・技術基盤としてまだまだ解決しなければならない課題が多くある。

例えば社会基盤面ではこうした「高度モニタリング」の必要性をどこまで認識し、仕組みの中に組み込むかということがある。IMO/SOLAS/IMSコードの採択と発効は船舶の安全運航を船上の責任だけでなく陸の船舶運航管理会社も含めた管理システムとして備えその履行責任を求めたものであるが、本研究の「高度モニタリング」はその一助となる技術であると言える。

本研究の「高度モニタリング」はデジタルデータベースの衛星による船陸通信を前提としたコンセプトである。まだまだ通信費が高価であるといった現状もあるが衛星通信技術の発展／商用化は目覚ましいものがあり安価で高速な通信は夢ではない。「高度モニタリング」の実現を加速しうる技術基盤と考えられる。

モニタリングは「安全性確保／スケジュール維持／性能把握／保守管理」等の目的で様々の分野で広範囲に行われるようになってきた。船舶分野では機関関係は別として荷役・航海中の状態を船体分野で総合的にモニターしようというものはまだ無い。本研究の「高度モニタリング」の成果が船舶分野のモニタリング定着化に寄与することを期待する。

本研究は3年間ということから基礎研究と位置づけ「高度モニタリング」の骨格構築とそれを構成する主要技術開発に研究の主眼を置いたが実用という面ではまだまだ解決すべき多くの課題がある。海運・造船関係者がこうした技術を基盤として今後とも実用化に向けて取り組んでいかれることを期待する。

## 6. 最後に

本研究の内容が波浪／性能／構造の広範囲な技術分野に亘ること、また本研究が船の設計から運航・保守に至るまでのトータルライフを対象とすることから研究には海運・造船の産官学の関係各位の参加を頂いた。またフィールドテストの実施にあたっては船主および本船関係各位の協力を頂いた。

最後に多くの研究成果が得られたことに鑑み関係の皆様には厚くお礼申し上げます。



The Shipbuilding Research Association of Japan