

本調査研究は、日本財団の補助金を受けて実施したものです。

研究資料No.414号

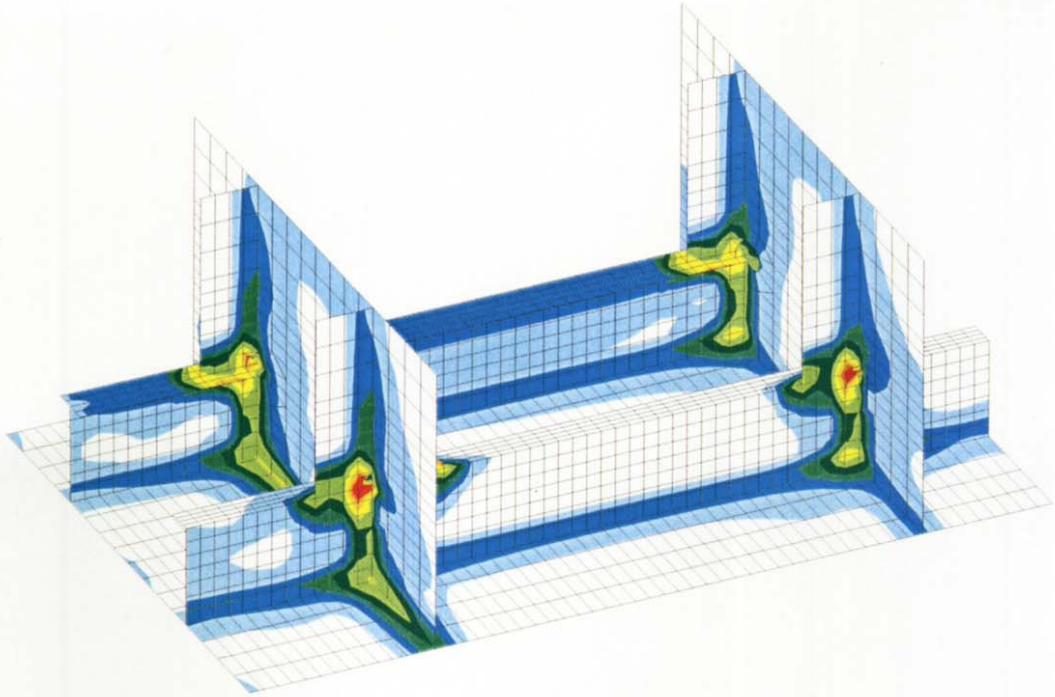
# SR 225

SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

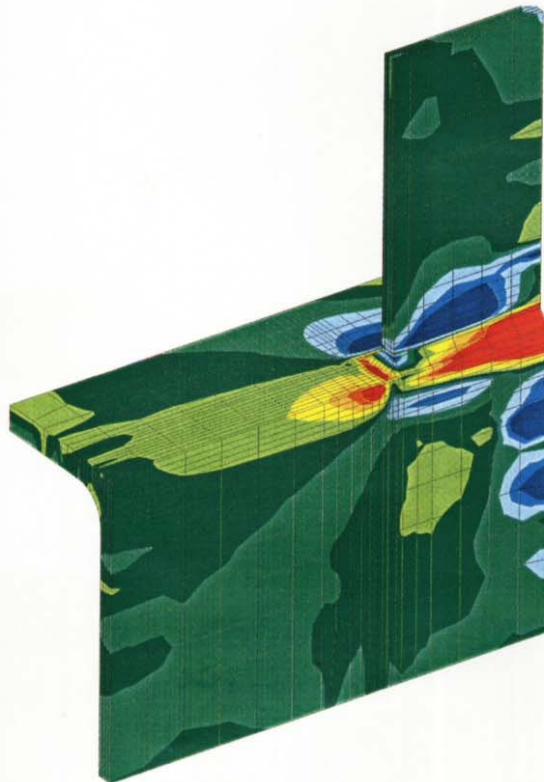
## 残留応力の計測法・推定法の研究 成果報告書

平成9年3月

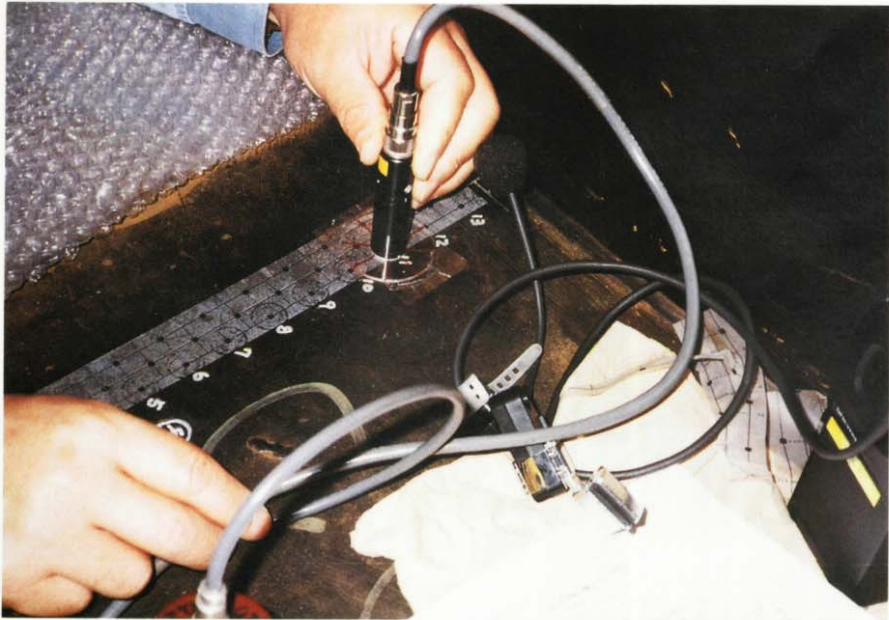
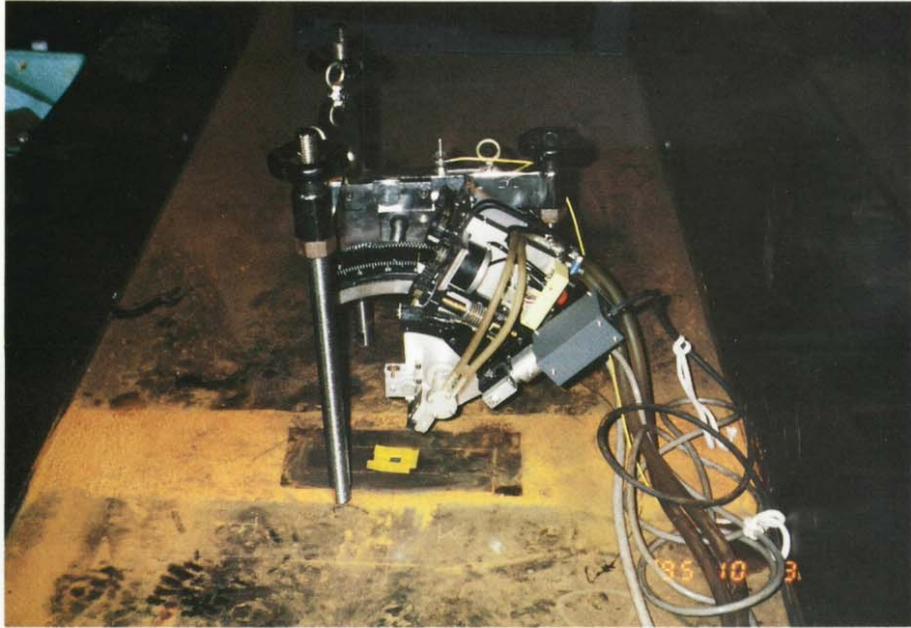
社団法人 日本造船研究協会



残留応力解析



残留応力解析 (ズームング計算)



X線及び磁気歪法による残留応力の計測  
(上：X線，下：磁気歪法)

## 要 約

### 1. 研究の目的

船体構造に発生する溶接残留応力が船体強度、すなはち疲労強度、座屈強度、脆性強度に及ぼす影響は無視出来ない事は良く知られた事実である。特に最近では、変動応力下での溶接構造物の健全性を精度良く推定するためには、残留応力を含めた溶接部の応力変動の把握が不可欠で有るという事が認識されてきている。

現在作用外力の推定精度向上に関する研究は盛んに行われているが（第228研究部会、第233研究部会等）、残留応力の実態に関しては十分に把握されていない。また、現在の計測方法では実構造物の残留応力を計測する事は難しく、計測例は殆ど無い状態である。

このような状態に有ることを認識した上で、本研究部会は溶接構造物の残留応力の実態把握に重点をおいて、その実用的な計測方法と解析法に関する研究を行い、溶接構造物の強度推定精度の向上を図る事を目的とする。

### 2. 研究の目標

溶接構造物の強度の推定精度の向上を図る為の残留応力の研究要素として、1) 残留応力の計測法、2) 残留応力の計算法、3) 実船での残留応力の大きさと分布がある。

これらの要素を満足するために本研究部会では次の研究項目を目標に上げた。

- (1) 残留応力の実用的な計測法の開発 : 実用的な計測法を選び、実船での残留応力把握に耐えうる実用的な計測法を開発する。
- (2) 残留応力の実用的な計算法の開発 : 構造設計に使用できる実用的な計算法を作成、提案する。
- (3) 実船における残留応力の実態の把握 : 建造中の実船の残留応力の大きさとその分布を(1)の計測法で計測し、その実態を把握し、合わせて(2)の計算法の精度確認を行う。

これらの研究項目を目標にすることにより、本研究部会の目標とする「残留応力の実用的計測法および計算法の確立と溶接構造物の強度推定精度の向上」を達成する事が可能となってくる。さらに残留応力の構造強度に及ぼす影響を合わせて検討し、今後の研究につなぐ足がかりとした。

### 3. 研究の内容

残留応力の実用的計測法および計算法の確立と溶接構造物の強度推定精度の向上を目指し、下記の研究を相互に関連させながら進めた。

- ①残留応力推定の現状 : ・ 残留応力の実態  
・ 計測技術と解析法の現状
- ②残留応力計測法 : ・ 各種計測法の評価  
・ 計測法選定の為の小型、大型試験体による実験
- ③残留応力解析法 : ・ 残留応力の弾性解析プログラムの開発  
・ 熱弾塑性解析法による解析の実施  
・ 固有応力に基づく残留応力解析法の開発  
・ 固有歪に基づく残留応力解析法の開発
- ④模型実験 : ・ 小型試験体、大型試験体による計測法と解析法の検証
- ⑤残留応力推定法の提案 : ・ 実船での計測と解析を有機的に組み合わせた推定システムの提案

- ⑥実船への応用 : ・ コンテナ船二重底の残留応力計測と解析による推定システムの検証と実船での残留応力の実態の把握
- ⑦残留応力の影響と低減法 : ・ 座屈、塑性崩壊強度への影響
  - ・ 疲労強度への影響
  - ・ き裂伝播寿命への影響
  - ・ 残留応力低減法の提案

## 4. 得られた成果

### 4.1 残留応力推定の現状

#### (1) 残留応力の実態

船体建造における残留応力の実状を、発生プロセス、素材、下地処理、切断、溶接、工作に分けて述べた。

#### (2) 計測法と解析法の現状

現状の計測法（X線法、磁気歪法、バルクハウゼンノイズ法、音弾性法、応力弛緩法等）と解析法（熱弾塑性FEM解析、固有応力/固有歪を用いた弾性解析等）および推定法（解析と計測を有機的に組み合わせた手法）について現状を紹介した。

### 4.2 残留応力計測法の検討と改良

#### (1) 各種計測法の評価

各種の残留応力測定法の特徴を比較し、小型試験体を用いて各種測定法で残留応力の計測結果を評価した。この結果から実際の構造物において残留応力を計測する場合は、X線法と磁気歪法を組み合わせた方法を提案した。

次に大型試験体の残留応力をX線法と磁気歪法で計測してその実用性の検討を行った。そして計測の補正に注意を払えば十分な精度で計測可能であることが分かった。

#### (2) 計測器の改良

実船計測に必要な計器の改良、主として上向き、縦向きの計測が可能な工具の開発を行った。

### 4.3 理論解析法の開発

#### (1) 理論解析による推定法の基本的構成

弾性解析に関しては本研究部会で残留応力解析の専用プログラム（RS3E）を作成し、順問題（固有応力または固有歪を与えて残留応力を計算する）および逆問題（残留応力の計測データから固有応力または固有歪を同定する）を解くことが出来るようにしてある。また、汎用プログラムNASTRANも同様に固有歪を異方性の熱歪として入力し、残留応力を計算出来るようになっている。

非弾性解析では、大阪大学で開発されたJWRIANやMARC、ADINA、ABAQUS、HEARTS等がある。

#### (2) 固有応力法による残留応力推定法

溶接残留応力を固有応力と溶接変形による二次的な応力に分けて取り扱っている。固有応力は材料と溶接入熱量から求められ、直線ビード、突き合わせ、すみ肉及び角回し溶接について計算方法が与えられている。また、溶接変形は仮想体積力と仮想外力から計算できる。この手法を応用して溶接残留応力に及ぼす寸法効果が計算できる。

#### (3) 固有歪による残留応力推定法

溶接変形と溶接残留応力を生じさせる原因として固有歪を考え、この大きさと分布が分かれば変形と残留応力が有限要素法等を用いて求まる。固有歪は逆解析で求める方法、生成機構に基づく決定方法がある。

#### 4.4 模型実験

##### (1) 実験の目的

「X線法と磁気歪法の併用」と計測治具の改良により、実船に対して広範囲な残留応力計測が可能となり、また、固有応力、固有歪を用いて小型試験体レベルでの残留応力を比較的良く計算できる事が判明した。本来ならここで直接実船を対象にこれらの検証を行うべきであるが、次の問題が残る。

- ・ 治具の改良を行ってもなお物理的に計測困難な箇所が存在し、特に疲労、座屈などを検討する上で必要となる情報を全て実船計測から得ることは困難である。
- ・ 小型試験体レベルの計算法では、大型構造物の周辺の拘束の影響が反映されていない。

そこでここでは、実船計測から得られる情報を補完する為に小型、大型試験体を用いてより詳細な情報を得るための実験を行った。

##### (2) 小型模型実験

あらたにRシリーズ（フィレット付きの試験体）、Qシリーズ（二重底とスツールを模擬した小型試験体）の残留応力計測と解析を行い良い一致を見た。

##### (3) 大型模型実験と解析

試験体はコンテナ船による実船計測部位を模擬した構造としている。材料はKA-32を使用している。大型試験体の残留応力を固有応力法と固有歪法を用いて解析した結果は比較的良い一致を示している。

#### 4.5 実船残留応力の推定システムの提案

1) 計測要領の提案 2) 残留応力解析法の提案 3) 実船への適用法についての提案を行った。

#### 4.6 実船への応用

残留応力推定システムの検証を行うためにコンテナ船の二重底で残留応力の計測と解析を行って下記の成果を得た。

- ・ 今回行ったX線法と磁気歪法の併用による残留応力計測法では迅速かつ広範囲の計測が可能であった。更にX線法に関しては下向きの計測のみであったが、前述の改良装置を用いれば、計測場所の大幅な緩和が期待できる。
- ・ 提案した固有歪法による残留応力解析結果は実船計測結果を再現しており、提案手法の妥当性が確認できた。
- ・ 角回しすみ肉溶接ビード止端部の残留応力は母材の降伏点相当である。これは試験体の結果とも一致していた。
- ・ 座屈に影響を及ぼす船底板のロンジ間中央の残留応力は船体の長手方向で平均的には $-20 \sim -40\text{Mpa}$ である。（すみ肉溶接近傍を除く）
- ・ ブロック段階から建造終了までに至る残留応力の変化は、実船計測およびシミュレーションの結果から、約 $\pm 30\text{Mpa}$ の範囲である。

#### 4.7 残留応力の影響と低減法

下記3つの項目について研究しその影響を解明した。また、応力低減のための方法を提案しその効果を示した。

- 1) 座屈、塑性崩壊強度への影響
- 2) 疲労強度への影響
- 3) き裂伝播寿命への影響
- 4) 残留応力低減法

## 5. 成果の活用

我国造船業界の抱える問題は、国際競争力の維持・強化であり、これを達成するための課題として

- 1) 構造設計のレベルアップ
- 2) 設計・開発研究の高効率化
- 3) 新技術対応と新需要創出

などがある。

何れの課題達成にも船体構造力学の果たすべき役割は大であり、疲労強度、座屈最終強度、き裂伝播等の分野で進歩が著しい現在、残留応力と構造強度の関係というテーマは避けて通れない問題であった。

本研究部会では長い間本格的に取り組まなかった残留応力のテーマに挑戦し、船体構造における残留応力の実態を調べ、実用的な推定システムを提案し、構造強度に及ぼす残留応力の影響を検討した。

残された課題は種々あるが、本研究の活用法について述べる。

### (1) 残留応力の大きさ、分布を知るツールとして：

まず第一に、船体構造の残留応力の現状をもっと知る必要がある。本研究部会ではコンテナ船二重底の残留応力の計測を行いその実状が明らかになったが、提案した残留応力の推定システム（計測法と解析法を有機的に結びつけた物）を活用してもっと多くの船の種々の構造における残留応力を調べ、船体構造における残留応力マップ、残留応力データベースを作成し、強度評価と解析のための基礎データを積み上げていく必要がある。

### (2) 構造強度解析精密化の為のツールとして：

現行の構造強度検討では静的な強度評価のみならず疲労強度、座屈最終強度、き裂伝播等の解析評価が行われて益々精密化が進んでいるが、残留応力の影響が殆ど考慮されていない。本研究部会の成果の「構造強度に及ぼす影響」の手法を今後さらに発展させ、構造強度解析の精密化を行う場合の有力なツールとして活用が期待出来る。

### (3) 合理的な構造設計を行う為のツールとして：

船体構造の設計を行う際に工作精度、溶接施行要領等を考慮して残留応力を推定する事が出来る。また、建造中の組立、搭載、水圧試験等を考慮して完成時の残留応力の推定が出来る。最近では就航後の強度評価に用いるための外力の与え方についても研究が進んできているので、今後はそれらを応用した船の一生の間の残留応力の変化を求めて合理的な船体構造強度評価に活用出来るようになるであろう。

# は し が き

本報告書は、日本財団の補助事業として、日本造船研究協会第225研究部会において、平成6年度から平成8年度の3カ年で実施した「残留応力の計測法・推定法の研究」の成果を取りまとめたものである。

## 第255研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	上田 幸雄 (大阪大学) (H.6~8)	
副部会長	野本 敏治 (東京大学) (H.6~8)	
代表幹事	笹島 洋 (石川島播磨重工業) (H.6~8)	
委員	村川 英一 (大阪大学接合科学研究所) (H.6~8)	岩田 光正 (広島大学) (H.6~8)
	矢尾 哲也 (広島大学) (H.6~8)	長岐 滋 (岡山大学) (H.6~8)
	奥本 泰久 (近畿大学) (H.6~8)	松岡 一祥 (船舶技術研究所) (H.6~8)
	的場 正明 (日本海事協会) (H.6~8)	神近 亮一 (石川島播磨重工業) (H.6~8)
	中島 喜之 (石川島播磨重工業) (H.6~8)	渡邊 孝和 (三井造船) (H.6~8)
	伏見 彬 (三菱重工業) (H.6)	末岡 英利 (三菱重工業) (H.7~8)
	斎藤 正洋 (三菱重工業) (H.6~8)	杉本 広憲 (川崎重工業) (H.6)
	木曾 孝 (川崎重工業) (H.7~8)	亀井 前人 (日立造船) (H.6~8)
	林 和男 (日本鋼管) (H.6)	萩原 俊秀 (日本鋼管) (H.7)
	池田 憲昭 (日本鋼管) (H.8)	松井 明男 (住友重機械工業) (H.6~7)
	阿部 孝三 (住友重機械工業) (H.8)	糟谷 正 (新日本製鐵) (H.6~8)

## 第255研究部会幹事会委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	笹島 洋 (石川島播磨重工業) (H.6~8)	
委員	神近 亮一 (石川島播磨重工業) (H.6~8)	渡邊 孝和 (三井造船) (H.6~8)
	斎藤 正洋 (三菱重工業) (H.6~8)	杉本 広憲 (川崎重工業) (H.6)
	木曾 孝 (川崎重工業) (H.7~8)	亀井 前人 (日立造船) (H.6~8)
	林 和男 (日本鋼管) (H.6)	萩原 俊秀 (日本鋼管) (H.7)
	池田 憲昭 (日本鋼管) (H.8)	松井 明男 (住友重機械工業) (H.6~7)
	阿部 孝三 (住友重機械工業) (H.8)	糟谷 正 (新日本製鐵) (H.6~8)

## 第255研究部会WG1委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	村川 英一 (大阪大学接合科学研究所) (H.6~8)		
幹事	神近 亮一 (石川島播磨重工業) (H.6~8)		
委員	上田 幸雄 (近畿大学生物理工学研究所) (H.6~8)	笹島 洋 (石川島播磨重工業) (H.7~8)	
	豊貞 雅宏 (九州大学) (H.7~8)	長岐 滋 (岡山大学) (H.6~8)	
	松岡 一祥 (船舶技術研究所) (H.6~8)	柳林 茂 (三井造船) (H.6~7)	
	濱中 大祐 (三井造船) (H.8)	井上 好章 (三菱重工業) (H.6~8)	
	多田 益男 (三菱重工業) (H.6~8)	長谷川壽男 (川崎重工業) (H.6~8)	
	谷川 雅之 (日立造船) (H.6~8)	(故) 山本 浩志 (日本鋼管) (H.6)	
	池田 憲昭 (日本鋼管) (H.7~8)	糟谷 正 (新日本製鐵) (H.6~8)	

## 第255研究部会WG2委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	岩田 光正 (広島大学) (H.6~8)		
幹事	杉本 広憲 (川崎重工業) (H.6)	木曾 孝 (川崎重工業) (H.7~8)	
委員	笹島 洋 (石川島播磨重工業) (H.7~8)	矢尾 哲也 (広島大学) (H.6~8)	
	奥本 泰久 (近畿大学) (H.6~8)	松岡 一祥 (船舶技術研究所) (H.6~8)	
	野村 大吉 (日本海事協会) (H.6~8)	中島 喜之 (石川島播磨重工業) (H.6~8)	
	小川潤一郎 (石川島播磨重工業) (H.6~8)	濱中 大祐 (三井造船) (H.6~8)	
	井上 好章 (三菱重工業) (H.6~8)	多田 益男 (三菱重工業) (H.6~8)	
	直井 秀明 (川崎重工業) (H.6)	東 健士郎 (川崎重工業) (H.7~8)	
	平松 秀基 (川崎重工業) (H.6~8)	池田 憲昭 (日本鋼管) (H.6)	
	境 禎明 (日本鋼管) (H.7~8)	平野 靖之 (住友重機械工業) (H.6~8)	
	糟谷 正 (新日本製鐵) (H.6~8)		

---

### 討議参加者

荒居 善雄 (埼玉大学)	福岡 哲二 (三井造船)
水上 優 (日立造船)	見上 孝一 (住友重機械工業)
外園 和也 (三菱重工業)	高倉 大典 (石川島播磨重工業)
中島 到 (九州大学)	小坂 英樹 (三菱重工業)
砂原 誠一 (日本海事協会)	

# 目 次

1. 研究の目的 .....	1
2. 研究の目標 .....	2
3. 研究の内容	
3.1 残留応力推定の現状調査.....	3
3.2 残留応力計測法の検討と改良.....	3
3.3 理論解析法の開発.....	3
3.4 模型実験.....	3
3.5 実船残留応力の推定システムの提案.....	3
3.6 実船への応用.....	4
3.7 残留応力の影響と低減法.....	4
4. 得られた成果	
4.1 残留応力推定の現状.....	5
4.2 残留応力計測法の検討と改良.....	5
4.3 理論解析法の開発.....	9
4.4 模型実験による実船計測の補完.....	10
4.5 実船残留応力の推定システムの提案.....	16
4.6 実船への応用.....	17
4.7 残留応力の影響と低減法.....	20
4.8 結論.....	21
5. 成果の活用 .....	23
6. 結 言 .....	24

## 1. 研究の目的

船体構造は切断、曲げ、溶接、歪取りなど種々の加工が施された鋼板により構成されている。これらは製鋼時の圧延を含め、建造のための加工工程の殆どが熱加工あるいは塑性加工であり、加工の結果何らかの残留応力が鋼材に付加される。従って、出来上がった船体構造には様々な原因で生じた残留応力が互いに重なり合い複雑に分布している。

これらの溶接残留応力が船体強度、すなわち疲労強度、座屈強度、脆性強度に及ぼす影響は無視出来ない事は良く知られた事実である。特に最近では、変動応力下での溶接構造物の健全性を精度良く推定するためには、残留応力を含めた溶接部の応力変動の把握が不可欠であるという事が認識されてきている。

現在作用外力の推定精度向上に関する研究は盛んに行われているが、(第228研究部会、第233研究部会等)、残留応力の実態に関しては十分に把握されていない。また、現在の計測方法では実構造物の残留応力を計測する事は難しく、計測例は殆ど無い状態である。

このような状態に有ることを認識した上で、本研究部会は溶接構造物の残留応力の実態把握に重点をおいて、その実用的な計測方法と解析法に関する研究を行い、溶接構造物の強度推定精度の向上を図る事を目的とする。

## 2. 研究の目標

溶接構造物の強度の推定精度の向上を図る為の残留応力の研究要素として、1) 残留応力の計測法、2) 残留応力の計算法、3) 実船での残留応力の大きさと分布がある。

これらの要素を満足するために本研究部会では次の研究項目を目標に上げた。

### (1) 残留応力の実用的な計測法の開発

現行の計測法で実用的なものを選び、その特徴を掴んで実船での残留応力把握に耐えうる実用的な計測法を開発する。

### (2) 残留応力の実用的な計算法の開発

現在いくつかの残留応力の解析方法が提案されているが、これらの有用性を検討して構造設計に使用できる実用的な計算法を作成、提案する。

### (3) 実船における残留応力の実態の把握

建造中の実船の残留応力の大きさとその分布は現在殆ど分かっていない状態にある。これを(1)の計測法で計測し、その実態を把握し合わせて(2)の計算法の精度確認を行う。

これらの研究項目を目標にすることにより、本研究部会の目的とする「残留応力の実用的計測法および計算法の確立と溶接構造物の強度推定精度の向上」を達成する事が可能となってくる。さらに残留応力の構造強度に及ぼす影響を合わせて検討し、今後の研究につなぐ足がかりとした。

## 3. 研究の内容

以上の研究目標を遂行するために以下の項目を互に関連させながら行った。

### 3.1 残留応力推定の現状調査

残留応力が実船でどのようなステージで発生しているのか？、また、残留応力の計測、計算法を調べてこの研究のスタート点を決めた。

- 1) 残留応力の実態：船体建造における残留応力の実状
- 2) 計測法と解析法の現状：最近の残留応力研究の文献による調査

### 3.2 残留応力計測法の検討と改良

残留応力の大きさと分布を見るためには、まず計測を行うのが第1であるが、計測法の長所短所を見極め、実船での計測にどの方法が良いか、どの様に現在の計測機器を改良すれば良いのかを総合的に評価し、「X線法と磁気歪法の併用」と計測器具の改良により実船に対して広範囲な残留応力計測が可能となる事が分かった。

- 1) 各種計測法の評価：主としてX線計測法、磁気歪計測法および応力弛緩法による計測法の評価
- 2) 計測法の選定と組み合わせ：小型試験体を用いた比較と計測法の比較および大型試験体による残留応力の計測検討
- 3) 計測器の改良：実船計測に実用的な計器の改良

### 3.3 理論解析法の開発

溶接残留応力の計算は熱弾塑性解析を行えば計算する事が出来、また、最近では市販のシステムも多い。しかし、計算に時間と手間が非常にかかることから、固有応力または固有歪を外力として通常の弾性解析による簡易計算法で行うことを検討、開発した。

- 1) 理論解析による推定法の基本的構成：弾性解析、非弾性解析の実際
- 2) 固有応力による残留応力推定法
- 3) 固有歪による残留応力推定法

### 3.4 模型実験

ここでは、実船計測から得られる情報を補う上で、小型、大型試験体を用いて、より詳細な情報を得るための実験を行った。これにより実船における残留応力の推定に際して発生するであろう問題点をクリアーにして推定法（推定システム）の組立にかかれる。

- 1) 実験の目的：小型、大型試験体による残留応力計測実験の意義
- 2) 小型模型実験：実験結果と解析、考察
- 3) 大型模型実験と解析

### 3.5 実船残留応力の推定システムの提案

実船での残留応力推定ではまず計測を行うが、計測のみでは残留応力の詳細な分布が分からないことと、計測が困難な場合があるために残留応力解析法の併用が必要になる。この計測法と解析法の組み合わせによる残留応力推定を推定法（推定システム）と称して本研究部会では推定システムを定めるのが大きな目的の1つである。

- 1) 実船での計測要領の提案

- 2) 残留応力解析方法の提案
- 3) 実船への適用法：推定システムとその精度と限界

### 3.6 実船への応用

残留応力推定システムをDW50,000トンのコンテナ船に応用して、二重底の残留応力を計測、解析してその有用性を確認した。

- 1) 残留応力計測：コンテナ船の二重底での残留応力の計測結果
- 2) 残留応力シミュレーション：建造工程順の残留応力解析結果
- 3) 実船に適用した場合の評価
- 4) 実船残留応力の実態：実船での残留応力の大きさを定量的に示す。

### 3.7 残留応力の影響と低減法

残留応力が構造強度に影響を及ぼすことは良く知られているが、定量的な研究は未だ完全なものにはなっていない。

構造強度の内、座屈、疲労、き裂伝播に関してその影響を検討した。また、合わせて残留応力の低減法についてもいくつかの提言を行った。

- 1) 座屈、塑性崩壊強度への影響
- 2) 疲労強度への影響
- 3) き裂伝播寿命への影響
- 4) 残留応力低減法

## 4. 得られた成果

本研究では残留応力の推定法と計測法の確立の為に、様々な角度とメッシュで徹底的に実験と解析を行った。その豊富なデータの検証により下記の成果が得られた。

### 4.1 残留応力推定の現状

#### (1) 残留応力の実態

船体の建造に関して加工、組立や船台工程で残留応力が発生し、船体強度に何らかの影響を及ぼすことは溶接ブロック工法を始めて以来懸念されて来たことである。船体建造における残留応力の実状を、発生プロセス、素材、下地処理、切断、溶接、工作に分類整理して残留応力研究の現状と実態を明らかにした。

#### (2) 計測法と解析法の現状

現状の計測法（X線法、磁気歪法、バルクハウゼンノイズ法、音弾性法、応力弛緩法等）と解析法（熱弾塑性FEM解析、固有応力/固有歪を用いた弾性解析等）および推定法（解析と計測を有機的に組み合わせた手法）について現状を紹介した。

#### (3) 研究目的

この研究部会の目的は、実船での残留応力の実態把握に重点をおき、それを達成するための推定システム（従って計測法と解析法）を開発提案する事である。実船での残留応力推定システムのフローを図1に示す。

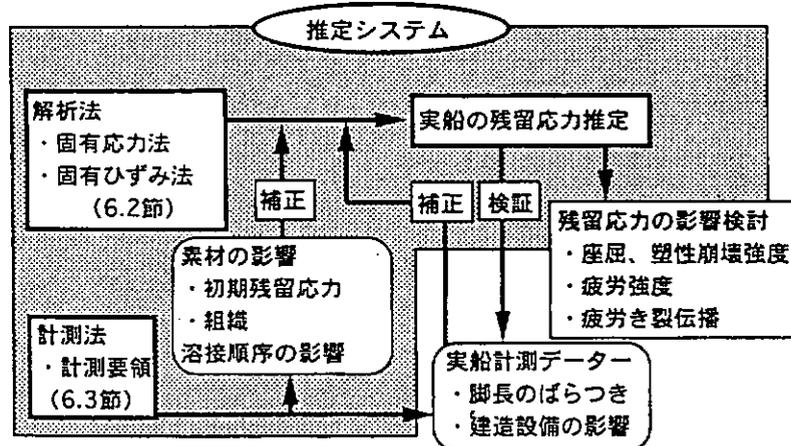


図1 実船の残留応力計測システム

### 4.2 残留応力計測法の検討と改良

#### (1) 各種計測法の評価

残留応力計測法のうち、実船で使用できる非破壊計測法の評価を行った。

各種の残留応力測定法の特徴の比較を表1に、小型模型を用いて各種測定法で残留応力の計測結果から得られた評価を表2に示す。また、計測法の比較に用いた小型試験片と計測結果の比較の一例を図2に示す。

この結果から実際の構造物において残留応力を計測する場合は、X線法と磁気歪法を組み合わせた方法が最も実用的であることを提案した。

表1 各種残留応力計測法の比較

	応力弛緩法	X線法	磁歪法	バルクハウゼンノイズ法	音弾性法
測定される値	主応力 主応力の方向	$\sin^2\Psi$ 法；一方向の 応力、 $\Phi - \sin^2\Psi$ 法；主応 力の方向	主応力差 主応力の方向	同左	主応力差/和 主応力の方向
ゲージ長 (mm)	8~10	3~10	10~15	1	10~15
測定可能な表面からの 距離 (mm)	数mm	10 $\mu$ m以下	周波数により可変 最大1mm程度	数百 $\mu$ m以下	板厚平均
測定可能なビード止端 からの距離 (mm)	5	3 ( $\Phi - \sin^2\Psi$ 法の時)	10	15	15
応力の感度	数MPa	数十MPa	同左	同左	同左
測定可能な応力の範囲	弾性域	降伏点の80%	降伏点の80%	降伏点の1/2	制限なし
応力への変換	フックの法則	フックの法則、無 ひずみ結晶の回折角	検量線 (材質の影響大)	同左	同左
前処理時間 (分)	10~20	15~30	3	3	3
測定時間 (分)	10~15	3~30	5	5	数分以内
可搬性	良	分割して 可	良	良	良

表2 各計測法の実用性評価

		応力弛緩法	X線法	磁気歪法	バルクハウゼン ノイズ法	音弾性法
①	非破壊性	×	○	○	○	○
②	可搬性	-	△	○	○	○
③	計測時間	×	△	○	○	○
④	計測精度	○	○	○	×(*1)	○
⑤	応力絶対値の計測	○	○	△(*2)	△(*2)	△(*2)
⑥	材料の影響	○	○	△(*3)	△(*3)	△(*3)
⑦	汎用性	○	○	○	○	△

実船計測への適用性

○：可能  
△：工夫すれば可能  
×：現段階では困難

(\*1) 降伏点に近い計測値の精度が悪い。

(\*2) これらの計測法では主応力差しか計測できないが、基準応力が与えられれば、せん断応力差積分法により応力の絶対値を求められることが可能である。

(\*3) これらの計測法では材料の影響を受けるが、応力とセンサー出力の関係を示す検量線によって、影響を補正することが可能である。

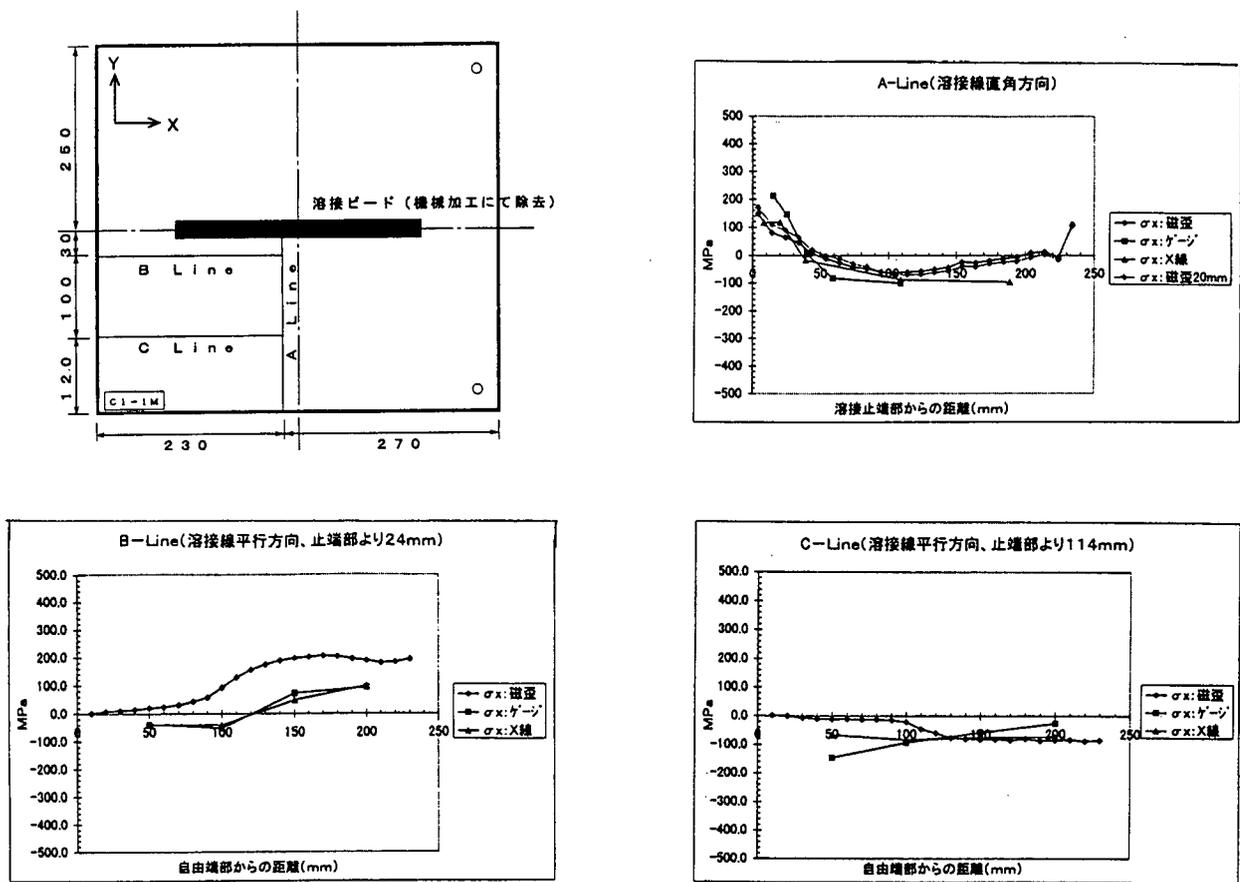
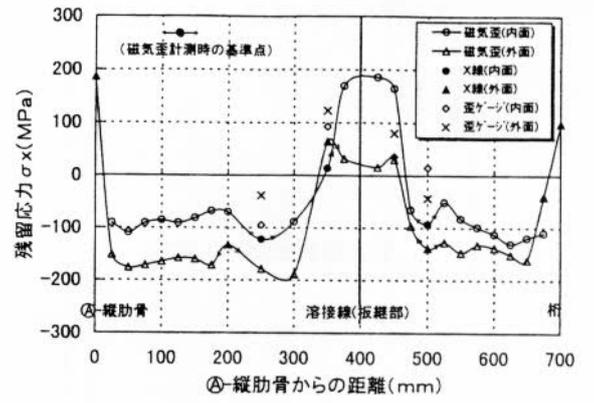
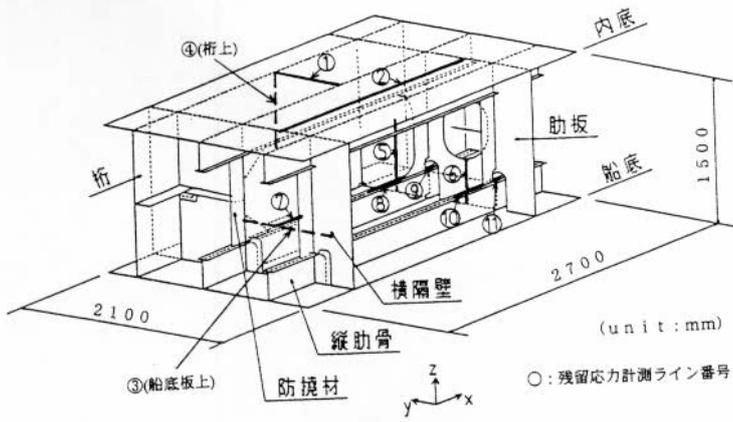


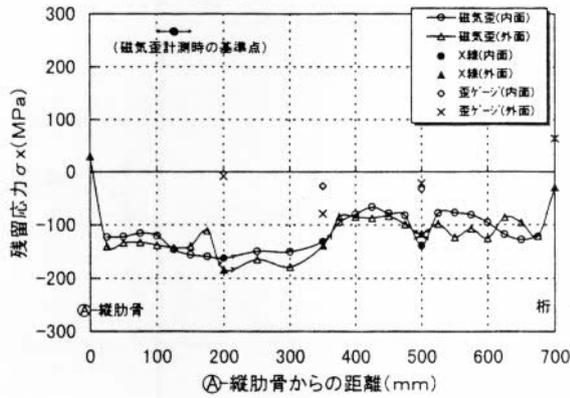
図2 小型試験片と残留応力の計測値の比較例

次に大型試験体の残留応力をX線法と磁気歪法で計測してその実用性の検討を行った。そして計測の補正に注意を払えば十分な精度で計測可能であることが分かった。

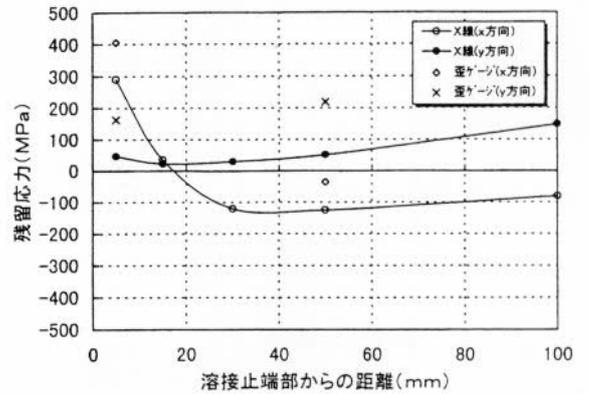
図3に大型試験体の形状と計測結果の一例を示す。



(a) 計測ライン① (内底板平面)、x方向



(c) 計測ライン③ (船底板平面)、x方向



(a) 計測ライン⑦

図3 大型試験体形状と残留応力計測結果

(2) 計測器の改良

実船計測に必要な計器の改良、主として上向き、縦向きの計測が可能な工具の開発を行い、これまで難しかった計測が可能になった。(写真1)

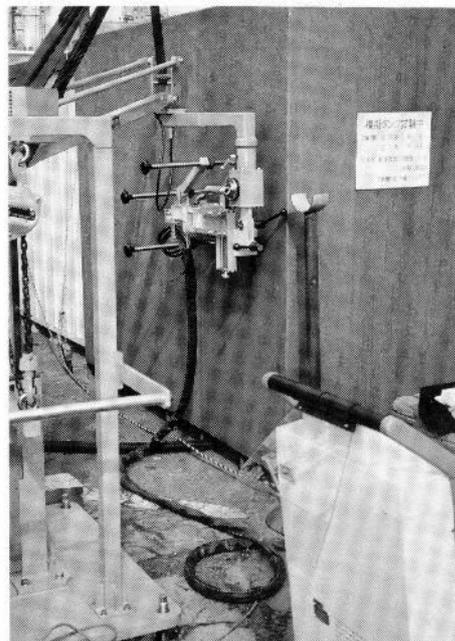
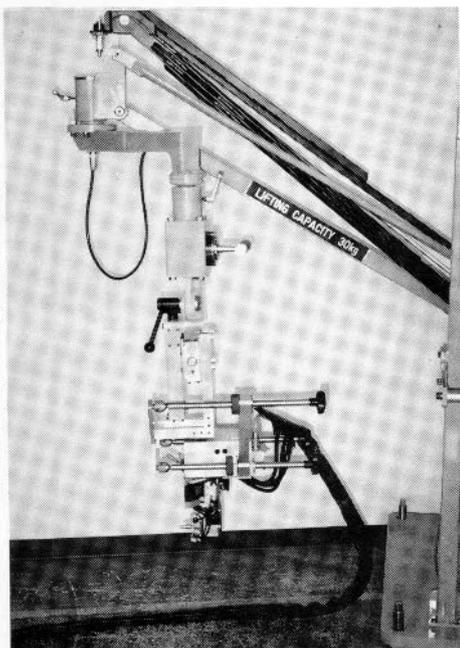


写真1 改良計測器具

### 4.3 理論解析法の開発

#### (1) 理論解析による推定法の開発

弾性解析に関しては本研究部会で残留応力解析の専用プログラム (RS3E) を作成し、順問題 (固有応力または固有歪を与えて残留応力を計算する) および逆問題 (残留応力の計測データから固有応力または固有歪を同定する) を解くことが出来るようにした。RS3Eによる解析結果を図4に示す。

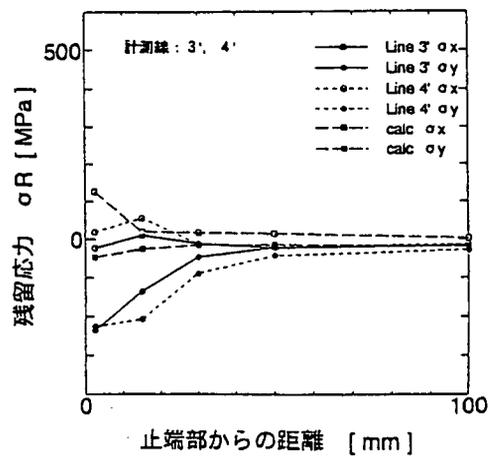
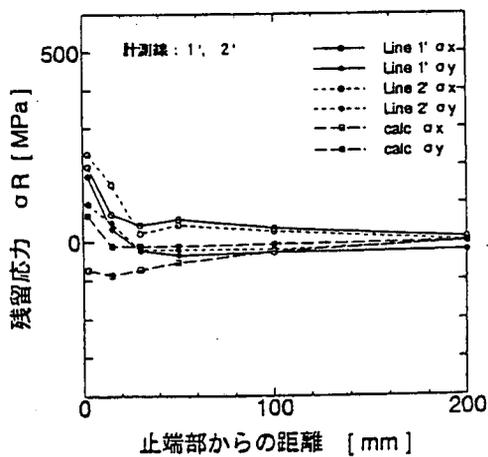
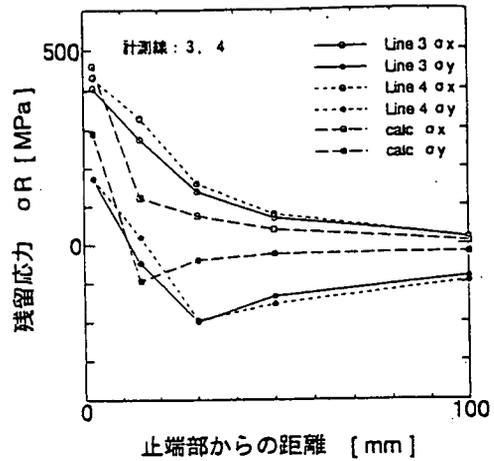
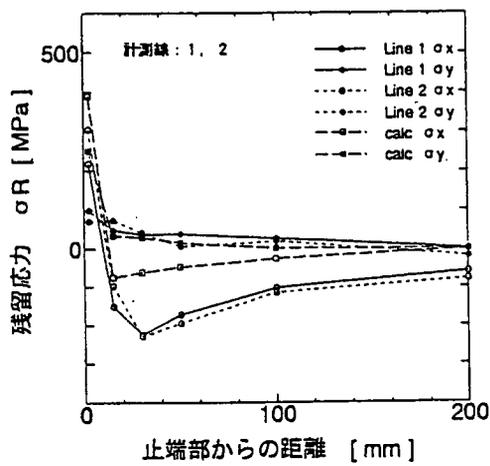
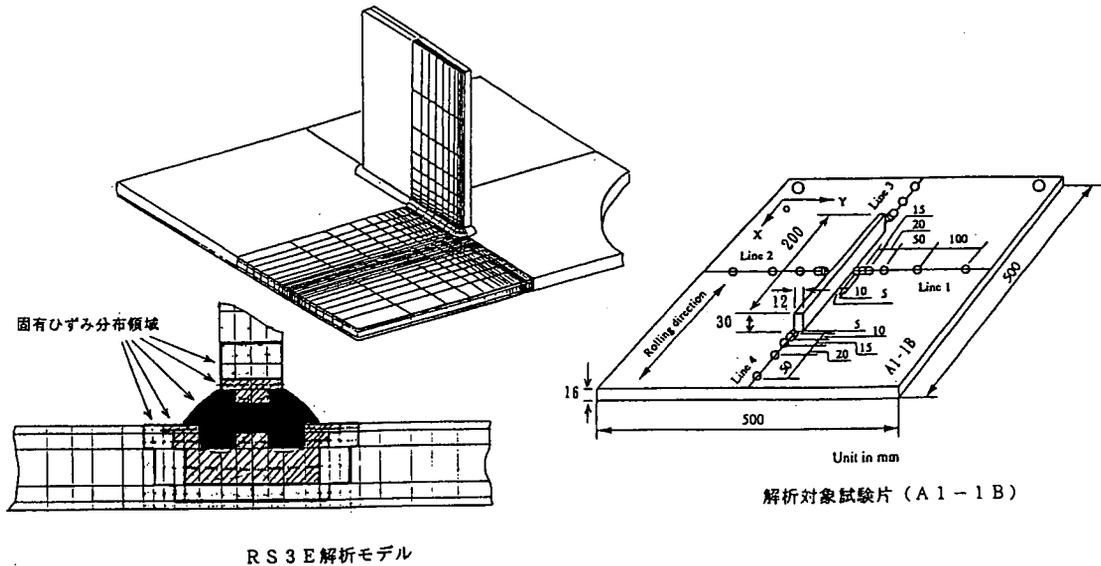


図4 RS3Eによる解析例

また、汎用プログラムNASTRANも同様に固有歪を異方性の熱歪として入力し、残留応力を計算出来るようになっている。

非弾性解析では大阪大学で開発されたJWRANやMARC、ADIAN、ABAQUS、HEARTS等があり実船計測で解析に使用した。

### (2) 固有応力法による残留応力推定法の開発

溶接残留応力を固有応力と溶接変形による二次的な応力に分けて取り扱っている。固有応力は材料と溶接入熱量から求められ、直線ビード、突き合わせ、すみ肉および角回し溶接について計算方法が与えられている。また、溶接変形は仮想体積力と仮想外力から計算できる。この手法を応用して溶接残留応力に及ぼす寸法効果が計算できる。13Cr-4Ni鋼突き合わせ溶接継手の残留応力計算結果の例を図5に示す。

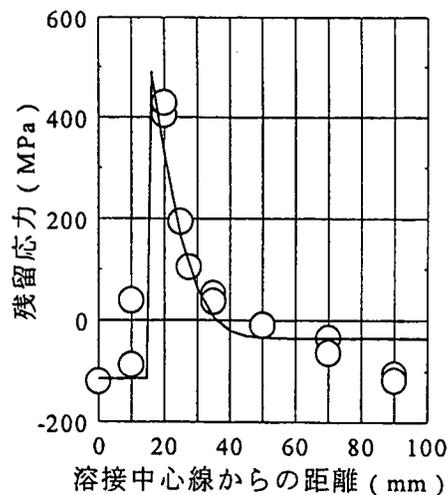


図5 13Cr-4Ni鋼突き合わせ溶接継手の残留応力

### (3) 固有歪による残留応力推定法の開発

溶接変形と溶接残留応力を生じさせる原因として固有歪を考え、この大きさと分布が分かれば変形と残留応力が有限要素法等を用いて求まる。

固有歪は逆解析で求める方法、生成機構に基づく決定方法がある。

有限板に溶接ビードを付けた場合の計算結果を図6に示す。

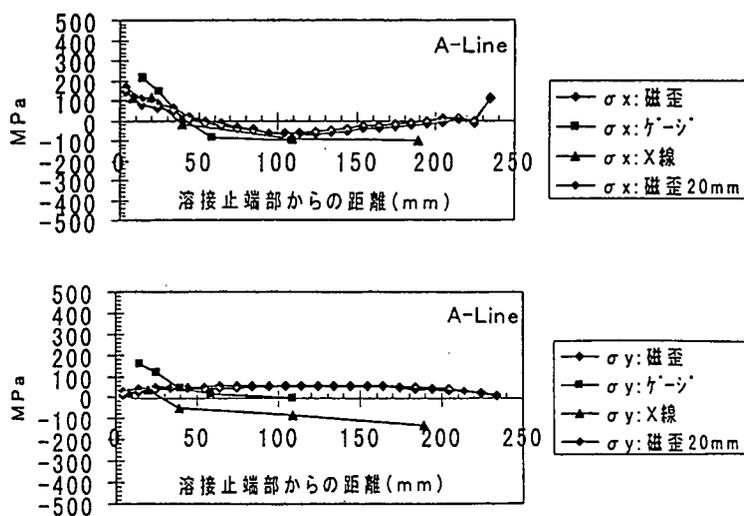


図6 止端を起点とした溶接線上の残留応力分布

## 4.4 模型実験による実船計測の補完

### (1) 実験の目的

「X線法と磁気歪法の併用」と計測治具の改良により、実船に対して広範囲な残留応力計測が可能となり、また、固有応力、固有歪を用いて小型試験体レベルでの残留応力を比較的良く計算できる事が判明した。本来ならここで直接実船を対象にこれらの検証を行うべきであるが、次の問題が残る。

・治具の改良を行っても、なお物理的に計測困難な箇所が存在し、特に疲労、座屈などを検討する上で必要となる情報を全て実船計測から得ることは困難である。

・小型試験体レベルの計算法では、大型構造物の周辺の拘束の影響が反映されていない。

そこでここでは、実船計測から得られる情報を補完する為に、小型、大型試験体を用いて詳細な情報を得るための実験を行った。

(2) 小型模型実験

あらたにRシリーズ(フィレット付きの試験体)、Qシリーズ(二重底とスツールを模擬した小型試験体)の残留応力計測と解析を行い良い一致を見た。Rシリーズの結果を図7にQシリーズの結果を図8に示す。

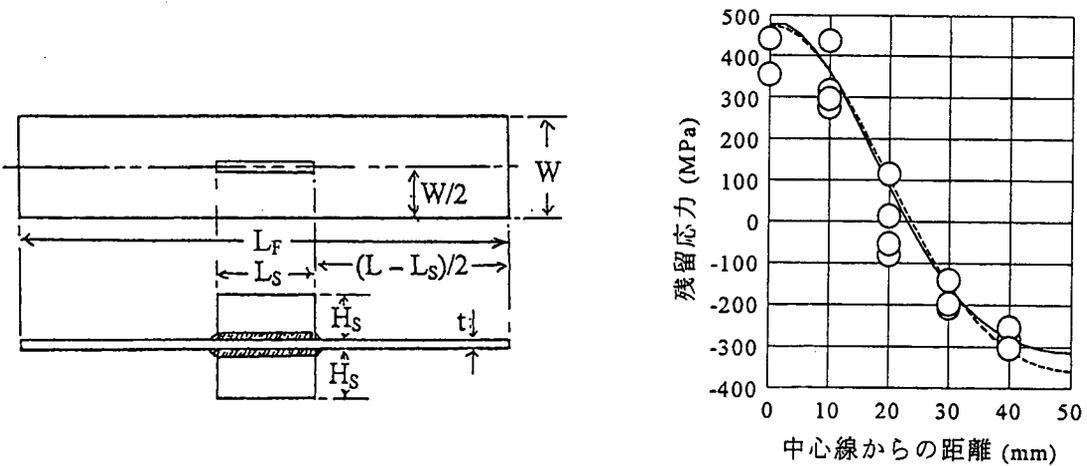


図7 Rシリーズ

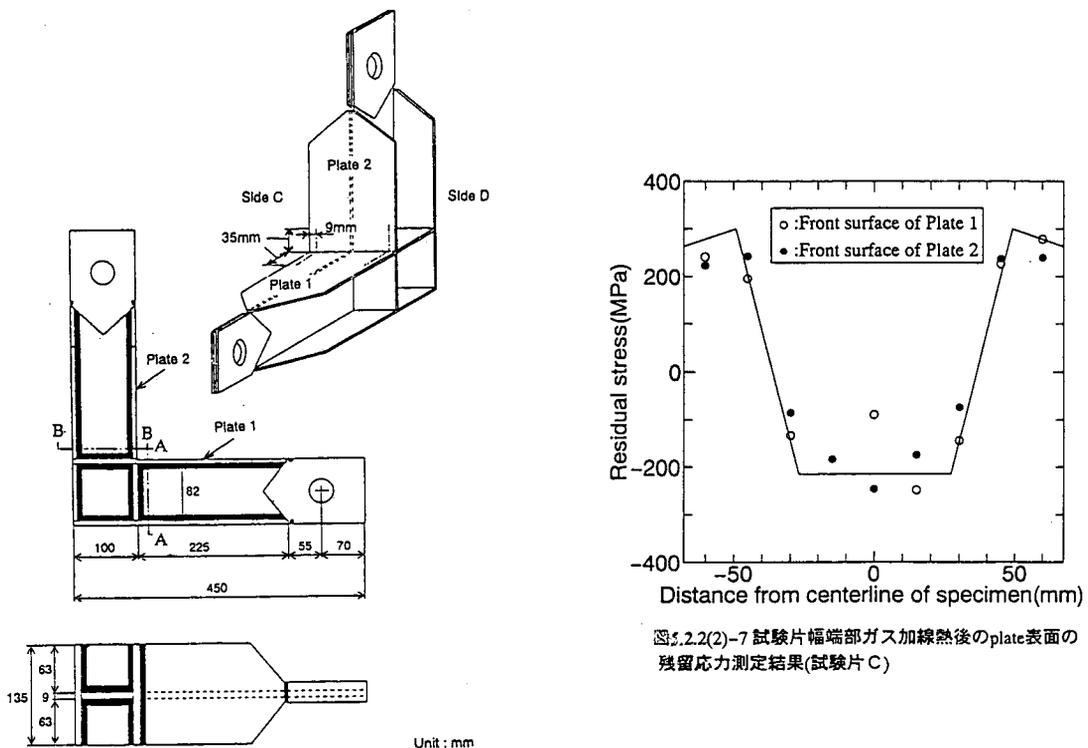
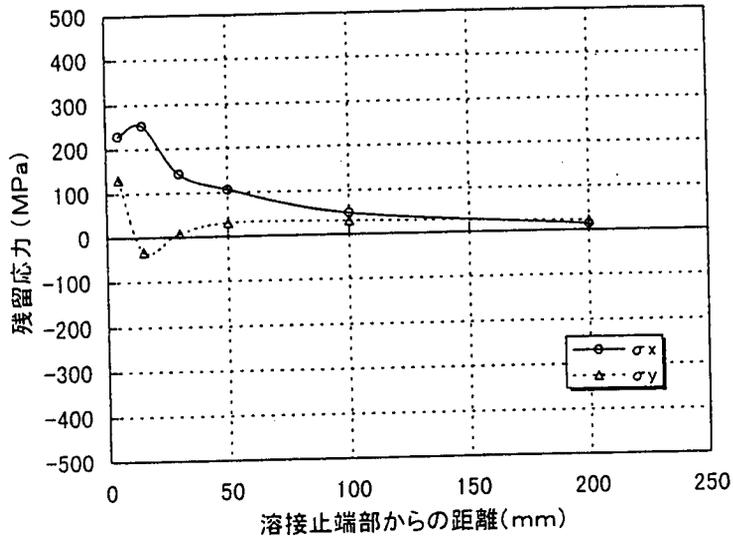


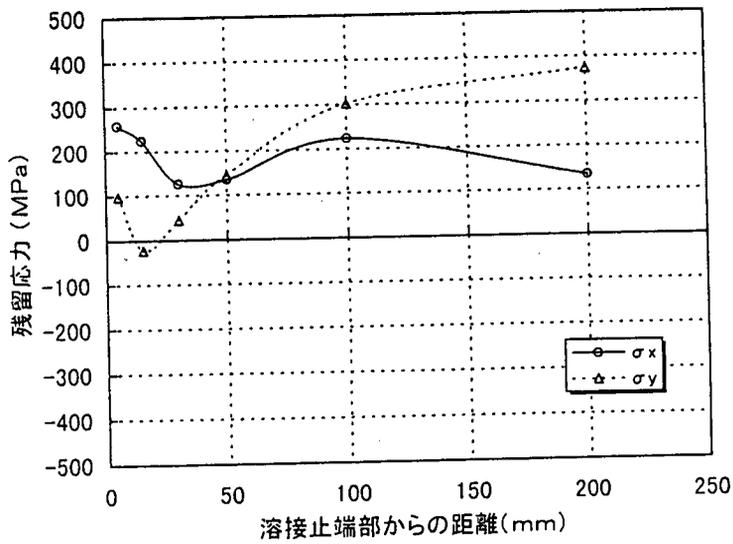
図5.2.2(2)-7 試験片幅端部ガス加線熱後のplate表面の残留応力測定結果(試験片C)

図8 Qシリーズ

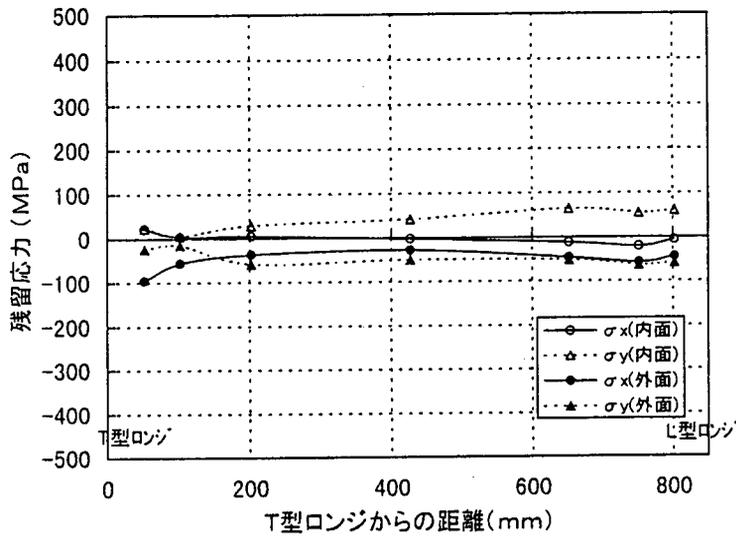




(a) 計測ライン①、ロンジ長手方向



(c) 計測ライン②、ロンジ長手方向



(k) 計測ライン①、Bottom Plate

図10 大型試験体の残留応力計測結果

大型試験体の残留応力を固有応力法と固有歪法を用いて解析した結果を図11と図12に示す。

固有応力法を用いた解析では粗いメッシュのシェル要素で実構造に近い大型模型の残留応力が計算できた。角回し溶接のように局所的な応力分布が必要な所でも十分な精度で残留応力が計算できた。

固有歪法を用いた解析では、シェル要素による全体解析とソリッド要素によるズーム解析の併用で角回し部の残留応力に関して比較的良好な精度で計算できた。

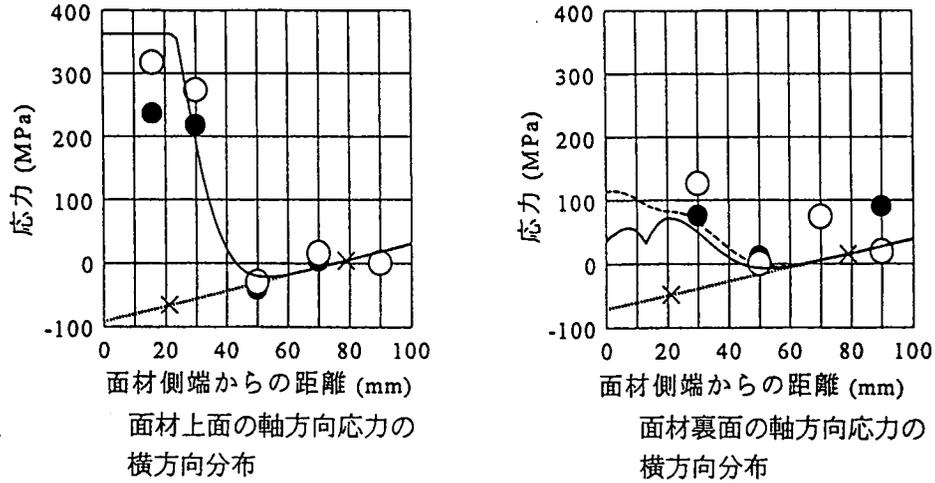
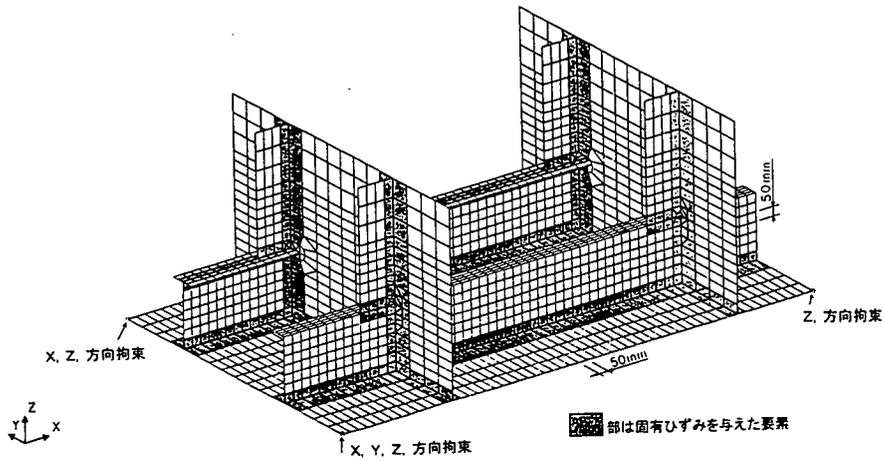
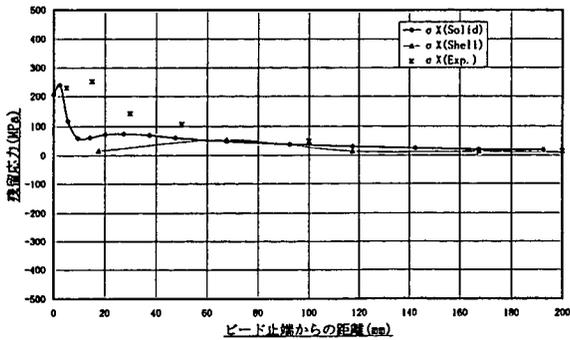


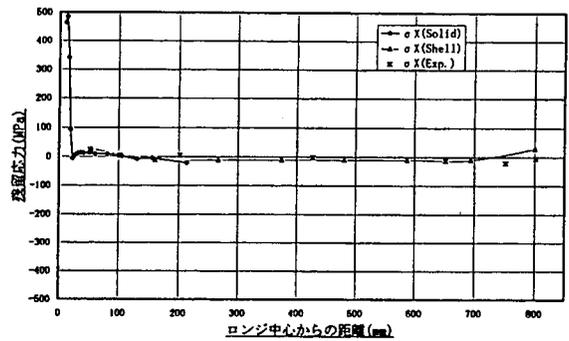
図11 固有応力法による残留応力の解析結果



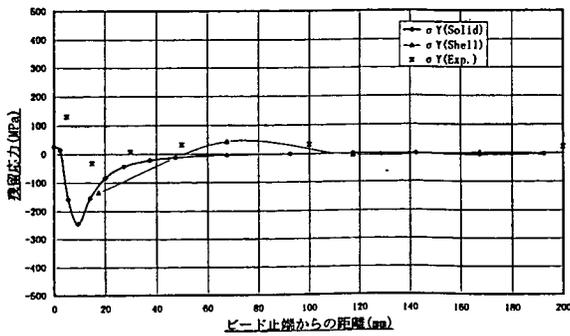
大型試験体モデル (シェルモデル)



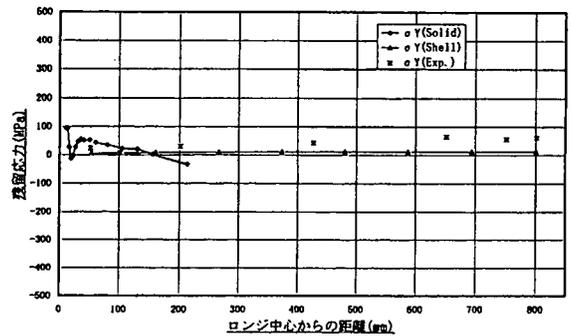
計測ライン① フェース上面  $\sigma X$



計測ライン① 船底内面  $\sigma X$



計測ライン① フェース上面  $\sigma Y$



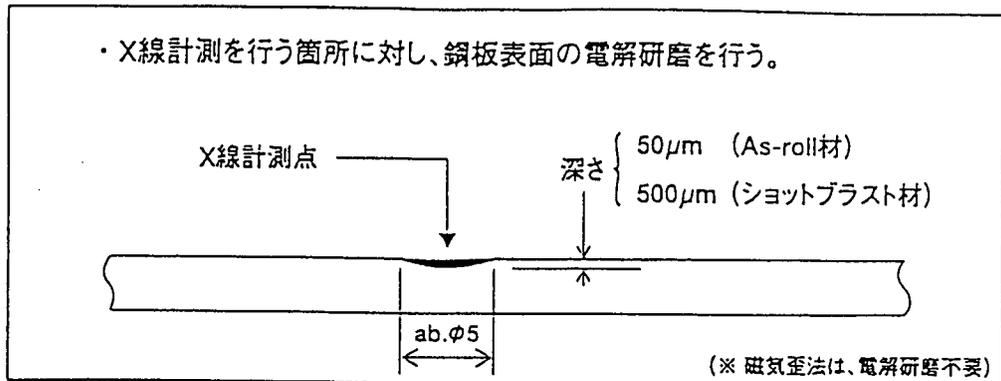
計測ライン① 船底内面  $\sigma Y$

図12 固有歪法による残留応力の解析結果

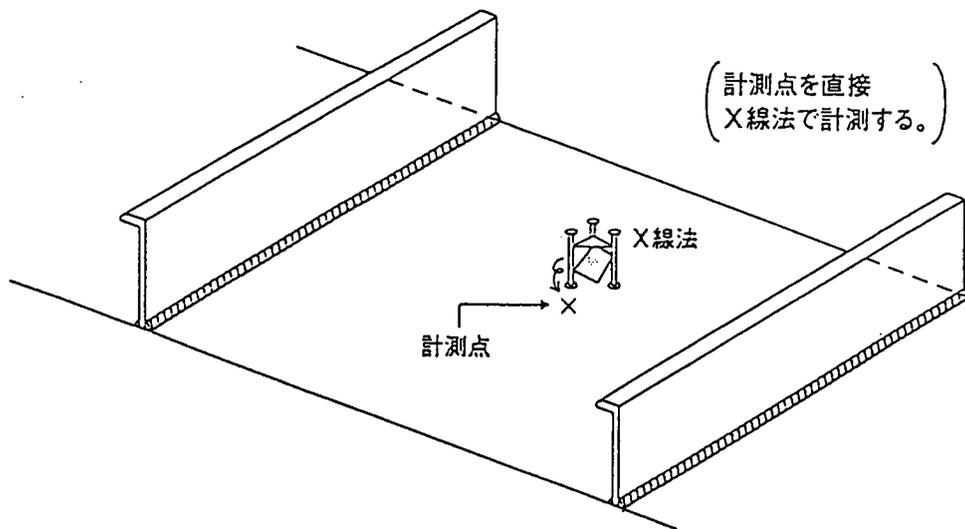
#### 4.5 実船残留応力の推定システムの提案

##### (1) 計測要領の提案

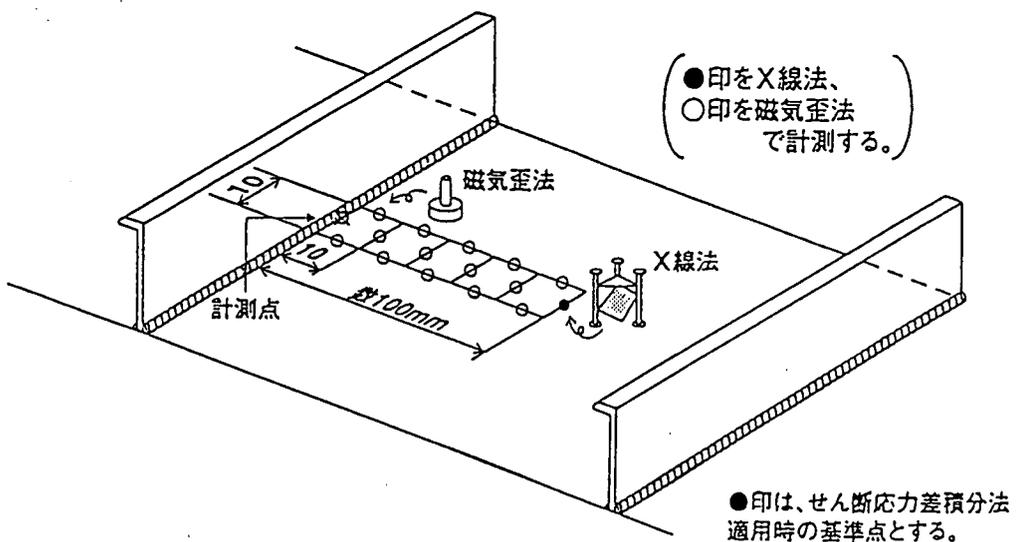
X線法と磁気歪法を併用する場合の計測要領を図13に示す。



(a) 計測の前処理



(b) パネル中央付近の計測



(c) 溶接部近傍の計測

図13 実船残留応力の計測要領

(2) 残留応力解析法の提案

非弾性解析、固有応力/固有歪を用いた弾性解析法の使用法の提案を行った。

(3) 実船への適用法

推定システム（計測法と計算法を有機的に結びつけたもの）とその限界について検討して、実船で実用的に運用できるようにした。

### 4.6 実船への応用

(1) 対象船の概要（図14）

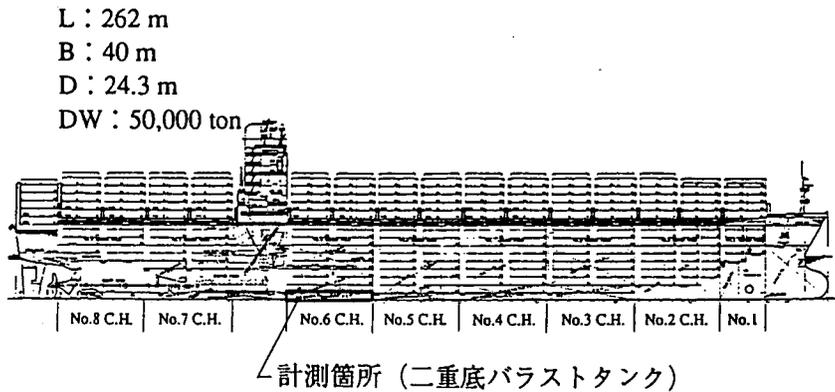


図14 計測対象船の概要

(2) 残留応力計測：計測点と計測結果

計測はX線法および磁気歪法を用いて行った。計測点を図15に示す。計測結果を図16に示す。

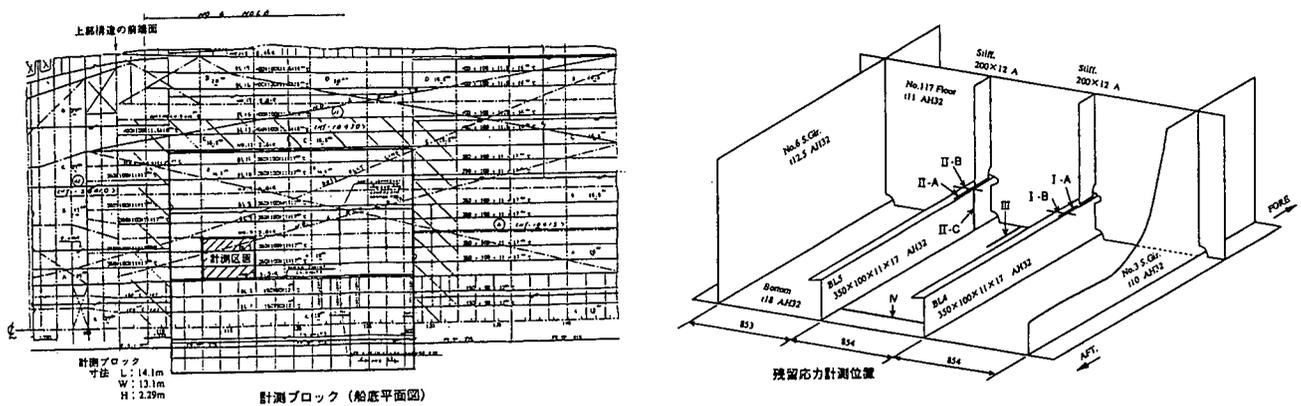


図15 計測点配置

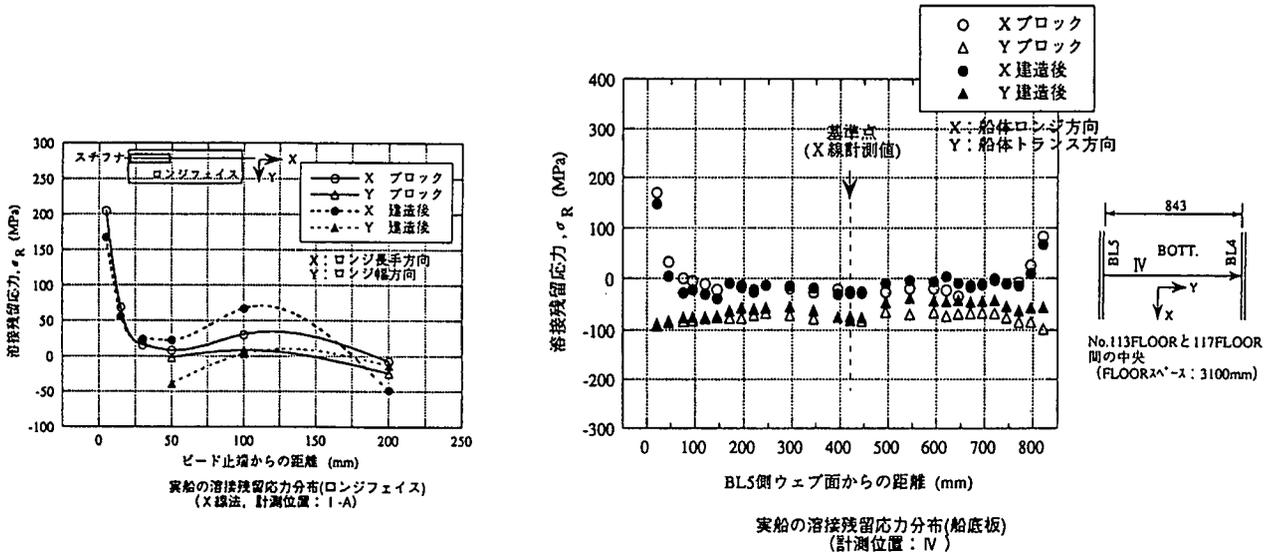


図16 計測結果

(3) 残留応力シミュレーション

解析モデルと建造工程順の解析結果を以下に示す。(図17,18)

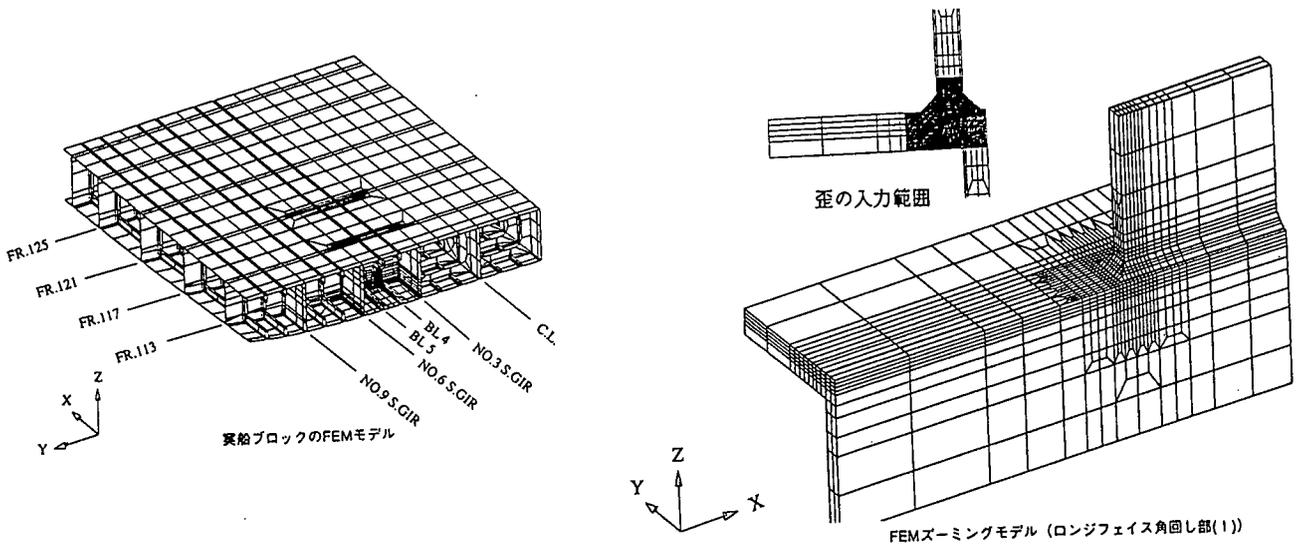
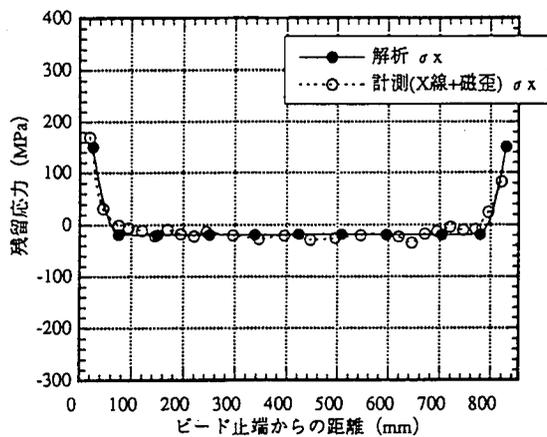
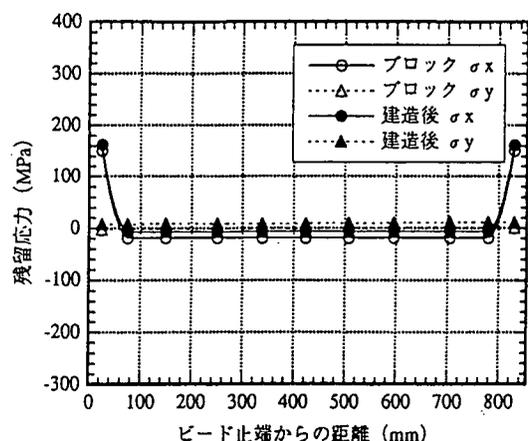


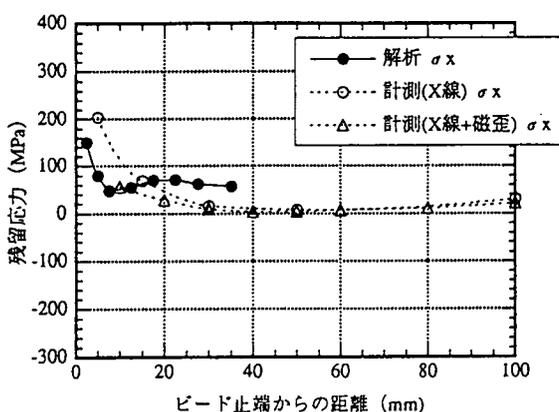
図17 実船解析モデル



ブロック残留応力の解析結果と計測結果との比較  
(シェル解析, 船底板: IV, 船体ロンジ方向応力)

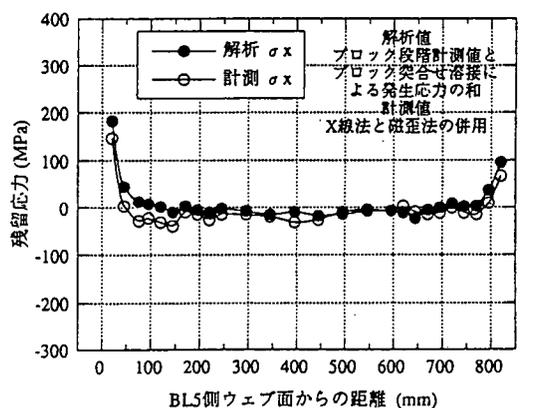


建造後の残留応力解析 (シェル解析, 船底板: IV)  
(船体ロンジ方向応力)



ブロック残留応力の解析結果と計測結果との比較  
(ソリッド解析, ロンジフェイス: I-A, II-A)

(ブロック完成時)



建造後残留応力の解析結果と計測結果の比較  
(シェル解析, 船底板: IV, 船体ロンジ方向応力)

(進水前)

図18 解析結果

#### (4) 実船実験のまとめ

- ・今回行ったX線法と磁気歪法の併用による残留応力計測法では迅速かつ広範囲の計測が可能であった。更にX線法に関しては下向きの計測のみであったが、前述の改良装置を用いれば、計測場所の大幅な緩和が期待できる。
- ・提案した固有歪法による残留応力解析結果は実船計測結果を再現しており、提案手法の妥当性が確認できた。
- ・角回しすみ肉溶接ビード止端部の残留応力は母材の降伏点相当である。これは試験体の結果とも一致していた。
- ・座屈に影響を及ぼす船底板のロンジ間中央の残留応力は船体の長手方向で平均的には $-20 \sim -40 \text{ Mpa}$ である。(すみ肉溶接近傍を除く)
- ・ブロック段階から建造終了までに至る残留応力の変化は、実船計測およびシミュレーションの結果から、約 $\pm 30 \text{ Mpa}$ の範囲である。

#### 4.7 残留応力の影響と低減法

##### (1) 座屈、塑性崩壊強度への影響

溶接により発生する残留応力や初期たわみは一般に構造部材の剛性と強度を低下させる。その為に残留応力や初期たわみが構造部材/システムの剛性・強度、特に座屈・塑性崩壊強度に及ぼす影響について、従来から数多くの研究が実施されている。本研究部会では下記の項目についてその影響を明らかにした。

- 1) 残留応力が構造応答に及ぼす影響
- 2) 残留応力がパネルの座屈強度に及ぼす影響
- 3) 残留応力が上甲板防撓パネルの圧壊強度に及ぼす影響
- 4) 残留応力が船底板防撓パネルの圧壊強度に及ぼす影響

船底板防撓パネルの圧壊強度計算例を図19に示す。

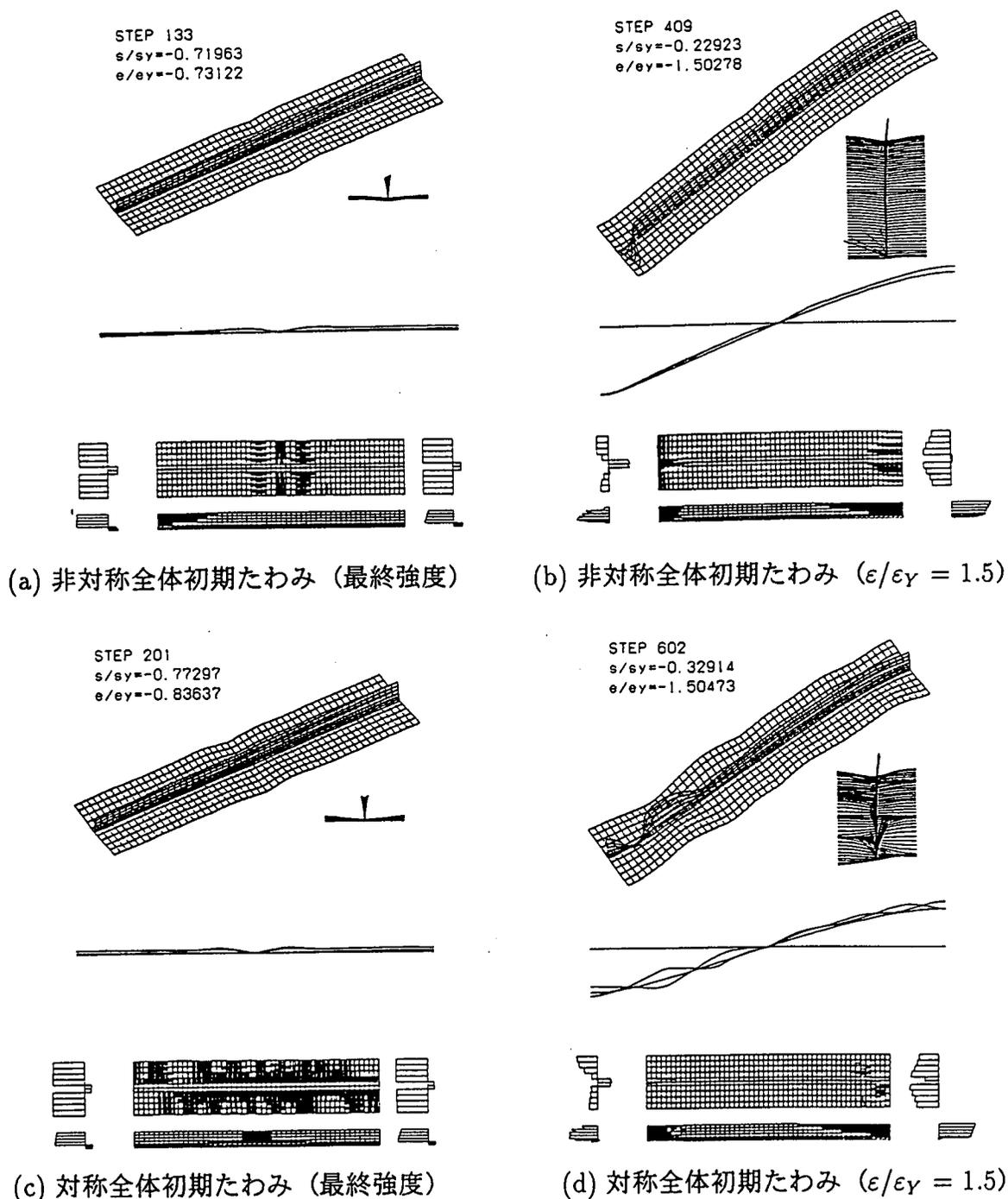


図19 変形図および降伏領域

## (2) 疲労強度への影響

溶接残留応力の疲労強度に及ぼす影響を各種溶接継手について明らかにした。

- 1) 横隅肉溶接継手：疲労強度に及ぼす板厚影響
- 2) 角回し溶接継手：応力集中部の応力比の影響
- 3) 部材交差部の疲労強度への影響
- 4) 疲労き裂発生寿命に及ぼす残留応力の影響の評価法の提案

## (3) き裂伝播寿命への影響

疲労被害を受ける領域寸法がき裂伝播速度を支配し、両者の関係は両対数グラフ上で直線関係にある。というき裂伝播則を基礎とした解法で残留応力分布下でのき裂開口シミュレーションを行い、その影響を明らかにした。

## (4) 残留応力低減法

余熱、溶接順序、加熱方法、溶接方法による残留応力低減法を述べその有用性を明らかにした。

## 4.8 結 論

平成6年から3年にわたって行ってきた「残留応力の計測法・推定法に関する研究」の目的は残留応力の実態把握に重点をおいて、その実用的な計測法と推定法に関する研究を行い、溶接構造物の強度推定精度の向上を図ることであった。

この研究を解析法を計測法の2つに分けて研究を行い、下記の成果が得られた。

### (1) 実船の残留応力の実用的計測法

計測法に関しては、主としてX線計測法、磁気歪計測法および応力弛緩法を用いて小型および大型模型での計測を実施してその精度確認を行い、実船でのこれらの計測法の適用性を開発した。そして現状および改良型の機器を用いて実船の残留応力を計測し、船体構造の残留応力の実態を把握できた。

### (2) 実船の残留応力の解析法

解析法に関してはまず文献調査を行って最近の研究の動静を調べた。

次に非弾性解析コードのベンチマークテストによる精度確認と小型模型での非弾性解析を行い、それらの結果及び実測データを固有歪/応力に基づく各種弾性解析と比較検討することにより、計測データを一部参照にして簡易的に溶接残留応力が推定出来るようにした。

さらに固有応力と固有ひずみに基づく応力推定法を開発して、実船での残留応力の検証を行った。

### (3) 実測法と解析法を融合した船体残留応力の推定法

解析法と計測法で得られた成果を基にして、実船残留応力の推定システムの提案を行って船体構造設計において算出できる形にまとめた。

### (4) 残留応力の強度に及ぼす影響と残留応力低減法

さらに構造強度に及ぼす影響を座屈、疲労、き裂伝播の分野で検討し、残留応力低減法と合わせて構造強度設計の参考に供した。

この研究により溶接残留応力の実態が明らかになったので、この研究成果を活用して設計の精度向上に役立てられる事を望むものである。

今後の課題として下記のものがある。

- 1) 就航後の残留応力の変化は大きな課題であるが、これは今後残留応力の構造強度に及ぼす影響の研究を行う上で、合わせて行うべきであろう。
- 2) 船体にかかる外力や船体構造の強度評価については第228研究部会「波浪中の船体構造の安全性評価

の研究」や第233研究部会「船舶の高度モニタリングの基礎研究」で現在研究が進められているが、残留応力の構造強度に及ぼす影響もその後の大きなテーマの一つとして研究を続ける必要がある。

- 3) 船体の工作法、工作精度の残留応力に及ぼす影響は重要なテーマの一つであるが、平成9年度から始まる予定の「高度工作精度管理技術に関する研究」(第237研究部会)につながっていく事を期待する。

## 5. 成果の活用

我国造船業界に求められている最大の課題は、国際競争力の維持・強化であり、これを達成するための課題として以下の問題がある。

- 1) 構造設計のレベルアップ
- 2) 設計・開発研究の高効率化
- 3) 新技術対応と新需要創出

何れの課題達成にも船体構造力学の果たすべき役割は大であり、疲労強度、座屈最終強度、き裂伝播等の分野で進歩が著しい現在、残留応力と構造強度の関係というテーマは避けて通れない問題であった。

本研究部会では重要ではあるがその難しさ故に長い間本格的に取り組みられなかった残留応力のテーマに挑戦し、船体構造における残留応力の実態を調べ、実用的な残留応力の推定システムを提案し、構造強度に及ぼす残留応力の影響を検討した。

残された課題は種々あるが、現時点での活用法から将来の研究への活用法について述べる。

- (1) 残留応力の大きさ、分布を知るツールとして：

まず第一に、船体構造の残留応力の現状をもっと知る必要がある。本研究部会ではコンテナ船二重底の残留応力の計測を行いその実状が明らかになったが、提案した残留応力の推定システム(計測法と解析法を有機的に結びつけた物)を活用してもっと多くの船の種々の構造における残留応力を調べ、船体構造における残留応力マップ、残留応力データベースを作成し、強度評価と解析のための基礎データを積み上げていく必要がある。

- (2) 構造強度解析精密化の為のツールとして：

現行の構造強度検討では静的な強度評価のみならず疲労強度、座屈最終強度、き裂伝播等の解析評価が行われて益々精密化が進んでいるが、残留応力の影響は殆ど考慮されていない。本研究部会の成果の「構造強度に及ぼす影響」の手法を今後さらに発展させ、構造強度解析の精密化を行う場合の有力なツールとして活用が期待出来る。

- (3) 合理的な構造設計を行う為のツールとして：

船体構造の設計を行う際に工作精度、溶接施工要領等を考慮して残留応力を推定する事が可能となる。また、建造中の組立、搭載、水圧試験等を考慮して完成時の残留応力の推定が可能となる。最近は就航後の強度評価に用いるための外力の与え方についても研究が進んできているので、今後は、それらを応用した船の一生の間の残留応力の変化を求めて合理的な船体構造強度評価に活用出来るようになるであろう。

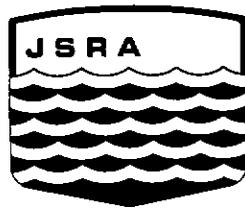
以上の様に本研究成果は今後さらに発展させる事により構造設計のレベルアップ、設計研究の高効率化、新技術対応と新需要創出へのツールとして役だっていき、我国造船界の課題である国際競争力の維持・強化に大きく貢献して行くことであろう。

## 6. 結 言

40年ぶりに行った本研究部会の残留応力の研究は、委員各位の鋭意研究と努力により、発足にあたって設定した研究目標を達成して貴重な成果を得ることが出来た。現在の最先端の理論、解析技術、計測技術を用いた3年間の研究は構造設計者に新しい武器を与えると共に今後の構造強度研究のための橋渡しの役目をつとめた。

これらの研究成果が設計の現場で有効に活用され、更に発展することを願うとともに、我国造船業界の国際競争力の増強に寄与することを期待する。

最後に本研究の実施を支援していただいた日本船舶振興会（日本財団）にお礼を申し上げますとともに、終始活発な研究と討論を行って頂いた参加委員各位に、また、研究の実施に終始努力を払われた日本造船研究協会の方々に心より感謝する次第である。



**The Shipbuilding Research Association of Japan**