



超大型コンテナ船の構造安全対策の検討に係る調査研究  
報告書

2009年3月

財団法人 日本船舶技術研究協会



## はしがき

本報告書は、極厚鋼板を使用した超大型コンテナ船の溶接継手部の不具合に起因する脆性破壊に対する総合的な構造安全対策を立案することを目的として実施した調査研究結果を取りまとめたものである。

調査研究は 2007 及び 2008 年度の 2 年間に亘り、超大型コンテナ船の構造安全対策検討委員会の下に設置された、WG 1（脆性亀裂の伝播防止）、WG2（脆性破壊の発生防止）及び WG3（溶接継手部の欠陥検知技術）により実施され、これらの調査研究結果を基に新造船及び現存船に対する構造安全対策案を提言としてとりまとめた。

尚、本報告書は、第 1 部と第 2 部及び別冊より成り、第 1 部ではプロジェクトの概要、また、第 2 部では上記 WG の調査研究報告を示す。さらに、超大型コンテナ船の構造安全対策の提言については、別冊とした。



委員名簿  
(敬称略・順不同)

○超大型コンテナ船構造安全対策検討委員会

委員長	板垣 浩 (横浜国立大学 名誉教授)	
委員	矢島 浩 (長崎総合科学大学)	角 洋一 (横浜国立大学)
	豊貞 雅宏 (九州大学 名誉教授)	吉川 孝男 (九州大学)
	松岡 一祥 ((独) 海上技術安全研究所)	北田 博重 ((財) 日本海事協会)
	松原 知之 (日本郵船 (株))	横田 健二 ((株) 商船三井)
	堤 則夫 (川崎汽船 (株))	水野 博介 (三菱重工業 (株))
	村上 彰男 ((株) 川崎造船)	
	道田 亮二 ((株) アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド)	
	内田 純司 (新日本製鐵 (株))	関田 貴司 (JFE スチール (株))
関係者	秋田 務 (海事局安全基準課)	森 雅人 (海事局検査測度課)

○ 幹事会

主 査	角 洋一 (横浜国立大学)	
委員	松岡 一祥 ((独) 海上技術安全研究所)	北村 欧 (三菱重工業 (株))
	岡田 哲男 ((株) アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド)	
	西山 五郎 ((株) 川崎造船)	松本 俊之 ((財) 日本海事協会)
	船津 裕二 (新日本製鐵 (株))	潮海 弘資 (JFE スチール (株))
関係者	植村 忠之 (海事局安全基準課)	高松 正徳 (海事局検査測度課)

○安全対策提言検討グループ

主 査	角 洋一 (横浜国立大学)	
委員	松本 俊之 ((財) 日本海事協会)	山口 欣弥 ((財) 日本海事協会)
	北村 欧 (三菱重工業 (株))	廣田 一博 (三菱重工業 (株))
	岡田 哲男 ((株) アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド)	
	豊田 昌信 ((株) アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド)	
	西山 五郎 ((株) 川崎造船)	孝岡 祐吉 ((株) 川崎造船)
	船津 裕二 (新日本製鐵 (株))	潮海 弘資 (JFE スチール (株))

○脆性き裂アレスト設計研究委員会 (WG1)

委員長	矢島 浩 (長崎総合科学大学)	
副委員長	栗飯原周二 (東京大学)	
委員	吉成 仁志 ((独) 海上技術安全研究所)	平松 秀基 (川崎重工業 (株))
	岩田 知明 ((独) 海上技術安全研究所)	西山 五郎 ((株) 川崎造船)
	多田 益男 (三菱重工業 (株))	廣田 一博 (三菱重工業 (株))
	岡部 拓 (ユニバーサル造船 (株))	田中 茂 (三井造船 (株))
	岡田 哲男 ((株) アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド)	

中西 保正 ((株) IHI)	蔭山 康 (幸陽船渠 (株))
船津 裕二 (新日本製鐵 (株))	井上 健裕 (新日本製鐵 (株))
潮海 弘資 (JFE スチール (株))	半田 恒久 (JFE スチール (株))
稲見 彰則 (住友金属工業 (株))	川畑 友弥 (住友金属工業 (株))
谷 徳孝 ((株) 神戸製鋼所)	池田 英次 ((株) 神戸製鋼所)
細川 学 ((財) 日本海事協会)	重見 利幸 ((財) 日本海事協会)
松本 俊之 ((財) 日本海事協会)	河関 良則 ((財) 日本海事協会)
山口 欣弥 ((財) 日本海事協会)	

○脆性き裂アレスト設計研究委員会 試験計画作業グループ (SWG1)

主 査	粟飯原周二 (東京大学)	
委 員	渡邊 栄一 (長崎総合科学大学)	
	半田 恒久 (JFE スチール (株))	猪瀬幸太郎 ((株) IHI)
	井上 健裕 (新日本製鐵 (株))	松田 博和 (川崎重工業 (株))
	川畑 友弥 (住友金属工業 (株))	紙田 健二 (今治造船 (株))
	吉成 仁志 ((独) 海上技術安全研究所)	多田 益男 (三菱重工業 (株))
	山口 欣弥 ((財) 日本海事協会)	谷 徳孝 ((株) 神戸製鋼所)

○脆性き裂アレスト設計研究委員会 シナリオ検討作業グループ (SWG2)

主 査	松本 俊之 ((財) 日本海事協会)	
委 員	清末 孝昭 ((株) 川崎造船)	廣田 一博 (三菱重工業 (株))
	岡田 哲男 ((株) アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド)	
	岡部 拓 (ユニバーサル造船 (株))	田中 茂 (三井造船 (株))
	村上 睦尚 ((独) 海上技術安全研究所)	榎本 竜司 (幸陽船渠 (株))
	船津 裕二 (新日本製鐵 (株))	潮海 弘資 (JFE スチール (株))
	稲見 彰則 (住友金属工業 (株))	池田 英次 ((株) 神戸製鋼所)
	重見 利幸 ((財) 日本海事協会)	細川 学 ((財) 日本海事協会)

○脆性き裂発生防止研究ワーキンググループ (WG2)

主 査	豊貞 雅宏 (九州大学 名誉教授)	
委 員	角 洋一 (横浜国立大学)	萩原 行人 (上智大学)
	後藤 浩二 (九州大学)	古川 直宏 ((株) 神戸製鋼所)
	船津 裕二 (新日本製鐵 (株))	潮海 弘資 (JFE スチール (株))
	稲見 彰則 (住友金属工業 (株))	村社 伸行 (川崎汽船 (株))
	岩田 知明 ((独) 海上技術安全研究所)	松本 俊之 ((財) 日本海事協会)
	北村 欧 (三菱重工業 (株))	廣田 一博 (三菱重工業 (株))
	杉村 忠士 (三菱重工業 (株))	猪瀬幸太郎 ((株) IHI)
	豊田 昌信 ((株) アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド)	
	孝岡 祐吉 ((株) 川崎造船)	倉嶋 寛貴 (川崎重工業 (株))
	福岡 哲二 (三井造船 (株))	竹藪 直紀 (三井造船 (株))
	松木 誠悟 (今治造船 (株))	畠山 理 (幸陽船渠 (株))

万 順一 ((株) 大島造船所)  
オブザーバー 吉川 孝男 (九州大学) 武田 和彦 (ロイド船級協会)  
平山 俊次 (ゲルマニッシェルロイド・ジャパン (株))  
並川俊一郎 (デッド ノルスケ ベリタス)  
阿部 孝三 (アメリカン・ビューロー・オブ・シッピング)  
今井 嗣郎 (アメリカン・ビューロー・オブ・シッピング)  
関係者 山口 祐二 ((社) 日本造船工業会)  
植村 忠之 (海事局安全基準課) 高松 正徳 (海事局検査測度課)

○ WG2 幹事会

主 査 豊貞 雅宏 (九州大学 名誉教授)  
委 員 角 洋一 (横浜国立大学) 松本 俊之 ((財) 日本海事協会)  
岩田 知明 ((独) 海上技術安全研究所) 北村 欧 (三菱重工業 (株))  
豊田 昌信 ((株) アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド)  
船津 裕二 (新日本製鐵 (株)) 潮海 弘資 (JFE スチール (株))  
関係者 植村 忠之 (海事局安全基準課) 高松 正徳 (海事局検査測度課)

○ 非破壊検査技術ワーキンググループ (WG3)

主 査 吉川 孝男 (九州大学)  
委 員 島田 道男 ((独) 海上技術安全研究所) 山本 規雄 ((財) 日本海事協会)  
田上 稔 ((株) IHI) 平澤 英幸 (川崎重工業 (株))  
浅田 拓蔵 ((株) アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド)  
西山 五郎 ((株) 川崎造船) 孝岡 祐吉 ((株) 川崎造船)  
青木 清隆 (三菱重工業 (株)) 中山 伸 (三菱重工業 (株))  
神永 肇 (三井造船 (株)) 田村 浩也 (幸陽船渠 (株))  
岡崎 博司 (今治造船 (株))  
オブザーバー 山口 祐二 ((社) 日本造船工業会) 武田 和彦 (ロイド船級協会)  
平山 俊次 (ゲルマニッシェルロイド・ジャパン (株))  
松本 整 (アメリカン・ビューロー・オブ・シッピング)

事務局 田中 圭 ((財) 日本船舶技術研究協会)  
加戸 正治 ((財) 日本船舶技術研究協会)  
岩本 泉 ((財) 日本船舶技術研究協会)  
村上 好男 ((財) 日本船舶技術研究協会)  
宮本 武 ((財) 日本船舶技術研究協会)

## 委員会等開催状況

### ○ 超大型コンテナ船構造安全検討委員会

(2007年度)

- 第1回委員会 2007年6月19日
- 第2回委員会 2007年12月4日
- 第3回委員会 2008年3月13日

(2008年度)

- 第1回委員会 2008年6月11日
- 第2回委員会 2009年3月30日

### ○ 幹事会

(2007年度)

- 第1回幹事会 2007年6月8日
- 第2回幹事会 2007年6月19日
- 第3回幹事会 2007年9月12日
- 第4回幹事会 2007年11月28日
- 第5回幹事会 2008年2月28日

(2008年度)

- 第1回幹事会 2008年5月9日
- 第2回幹事会 2009年3月13日

### ○ 安全対策提言検討グループ

(2007年度)

(2008年度)

- 第1回検討委員会 2008年8月20日
- 第2回検討委員会 2008年9月30日
- 第3回検討委員会 2008年12月11日
- 第4回検討委員会 2009年2月5日
- 第5回検討委員会 2009年2月24日

### ○ WG1 脆性亀裂アレスト設計

(2007年度)

- 第1回WG1 2007年2月9日
- 第2回WG1 2007年4月13日
- 第3回WG1 2007年6月13日
- 第4回WG1 2007年10月24日
- 第5回WG1 2007年12月19日

(2008年度)

- 第6回WG1 2008年3月25日
- 第7回WG1 2008年4月16日
- 第8回WG1 2008年7月28日
- 第9回WG1 2008年9月12日
- 第10回WG1 2008年11月11日

### ○ WG1-SWG1

(2007年度)

- 第1回SWG1 2007年3月12日
- 第2回SWG1 2007年4月3日
- 第3回SWG1 2007年5月11日
- 第4回SWG1 2007年7月18日 (SWG2と合同開催)
- 第4回SWG1 2007年9月4日
- 第5回SWG1 2007年12月19日

(2008年度)

- 第6回SWG1 2008年3月25日
- 第7回SWG1 2008年5月7日

### ○ SWG1 幹事会

(2007年度)

- 第1回SWG1幹事会 2007年4月3日
- 第2回SWG1幹事会 2007年4月13日
- 第3回SWG1幹事会 2007年5月11日



- 第4回 SWG1 幹事会 2007年6月13日
- 第5回 SWG1 幹事会 2007年6月20日
- 第6回 SWG1 幹事会 2007年10月24日

○ WG1-SWG2

(2007年度)

- 第1回 SWG2 2007年3月27日
- 第2回 SWG2 2007年4月20日
- 第3回 SWG2 2007年7月18日 (SWG1と合同開催)

(2008年度)

- 第3回 SWG2 2008年10月6日
- 第4回 SWG2 2008年11月28日

○ WG2 脆性亀裂の発生と防止

(2007年度)

- 第1回 WG2 2007年7月4日
- 第2回 WG2 2007年9月4日
- 第3回 WG2 2007年11月22日
- 第4回 WG2 2008年2月1日

(2008年度)

- 第1回 WG2 2008年6月6日
- 第2回 WG2 2008年8月5日
- 第3回 WG2 2008年9月17日
- 第4回 WG2 2008年11月4日
- 第5回 WG2 2008年12月10日
- 第6回 WG2 2009年1月30日
- 第7回 WG2 2009年3月4日

○ WG2 幹事会

(2007年度)

- 第1回 WG2 幹事会 2007年7月19日
- 第2回 WG2 幹事会 2007年8月24日
- 第3回 WG2 幹事会 2007年11月20日
- 第4回 WG2 幹事会 2008年1月25日

(2008年度)

- 第1回 WG2 幹事会 2008年4月28日
- 第2回 WG2 幹事会 2008年6月24日
- 第3回 WG2 幹事会 2008年7月23日
- 第4回 WG2 幹事会 2008年8月21日
- 第5回 WG2 幹事会 2008年10月14日

日

- 第6回 WG2 幹事会 2009年2月25日

○ 非破壊検査技術ワーキンググループ (WG3)

(2007年度)

- 第1回 WG3 2007年8月10日
- 第2回 WG3 2007年10月15日
- 第3回 WG3 2008年2月18日

(2008年度)

- 第1回 WG3 2008年4月30日
- 第2回 WG3 2008年7月11日
- 第3回 WG3 2008年8月29日
- 第4回 WG3 2008年10月3日
- 第5回 WG3 2008年11月27日
- 第6回 WG3 2008年12月22日
- 第7回 WG3 2009年1月28日
- 第8回 WG3 2009年2月23日



第 1 部  
超大型コンテナ船の構造安全対策の検討に係る調査研究  
目 次

1. 調査研究の目的と背景	-----	1
2. コンテナ船の厚板化と設計応力の推移	-----	2
2. 1 コンテナ船の厚板化	-----	2
2. 2 コンテナ船の設計応力の推移	-----	6
2. 3 コンテナ船の就航動向	-----	8
3. プロジェクトの概要	-----	10
3. 1 調査研究体制	-----	10
3. 2 調査研究期間	-----	10
3. 3 調査研究の概要	-----	10
3. 4 調査研究スケジュール	-----	13
3. 5 調査研究結果概要	-----	14



第 2 部  
超大型コンテナ船の構造安全対策の検討に係る調査研究  
目 次

1. 溶接部の脆性き裂の発生と防止に関する調査研究	1
1. 1 はじめに	1
1. 2 埋没欠陥の疲労き裂成長に伴うアスペクト比把握のための疲労試験	4
1. 2. 1 埋没欠陥付き試験片の製作	4
1. 2. 2 超音波探傷による埋没欠陥の検査	7
1. 2. 3 疲労試験	15
1. 2. 4 まとめ	39
1. 3 厚板溶接継手部の破壊靱性値 (Kc 値) 把握のためのディープノッチ試験	40
1. 3. 1 試験項目と試験方法並びに試験体溶接方法	40
1. 3. 2 継手基礎試験結果	43
1. 3. 3 ディープノッチ試験結果	43
1. 3. 4 シャルピー値とディープノッチ試験結果の相関	44
1. 3. 5 まとめ	47
付属資料 ディープノッチ試験結果	49
1. 4 突合せ溶接継手部の初期埋没欠陥の疲労き裂成長計算	87
1. 4. 1 対象コンテナ船	88
1. 4. 2 荷重条件	89
1. 4. 3 計算方法	108
1. 4. 4 作用応力長期予測におけるワイブル形状パラメタの影響	123
1. 4. 5 疲労き裂成長における荷重遭遇履歴の影響	129
1. 4. 6 埋没初期欠陥の偏心の影響	139
1. 4. 7 疲労き裂成長解析	144
1. 4. 8 計算結果とまとめ	147
付属資料 FLARP による疲労き裂成長計算	152
1. 5 脆性き裂発生防止のための許容欠陥寸法の検討	157
1. 5. 1 板厚貫通に至る初期欠陥寸法の検討	157
1. 5. 2 極厚鋼板溶接継手部の許容欠陥サイズの検討	159
1. 5. 3 短期航海での疲労き裂成長について	162
1. 6 調査研究結果	167
1. 6. 1 就航船の限界寿命の検討結果	167
1. 6. 2 新造船の限界寿命の検討結果	170
1. 6. 3 新造船に対する溶接継手管理	171
1. 6. 4 現存船に対する溶接継手管理	172

2. 脆性亀裂に係る溶接部の非破壊検査技術に関する調査研究	174
2. 1 はじめに	174
2. 2 非破壊検査技術に関する現状調査	175
2. 2. 1 極厚板溶接法の現状	175
2. 2. 2 造船各社の超音波探傷法の現状	175
2. 2. 3 各船級協会の非破壊検査の現状	179
2. 2. 4 まとめ	183
2. 3 超音波探傷 (UT) 能力の向上に関する調査	184
2. 3. 1 新しい探傷技術 (TOFD 法、Phased Array 法) について	184
(1) 検査手法の概要	184
(2) 造船現場への適用性について	184
(3) まとめ	187
2. 3. 2 数値計算を用いた超音波探傷の可視化などについて	188
(1) 超音波の伝播シミュレーション解析について	188
(2) マイグレーション手法を用いた欠陥の可視化について	198
(3) まとめ	202
2. 4 非破壊検査能力及び実際の調査	203
2. 4. 1 既存 UT の問題点	203
2. 4. 2 埋没欠陥探傷試験	204
(1) 人工欠陥試験体の製作	204
(2) 現状の超音波探傷による試験	214
(3) TOFD 法、フェーズドアレイ UT 法による試験	265
(4) 欠陥の検知能力計測精度	274
2. 4. 3 疲労亀裂の超音波探傷検知に関する調査	276
(1) 目的	276
(2) 試験方法	276
(3) 板厚 60mm 相当試験片における探傷試験	277
(4) 板厚 80mm 相当試験片における探傷試験	290
(5) まとめ	301
2. 4. 4 実船における超音波探傷試験に関する調査	302
(1) 塗膜の影響	302
(2) 実船計測	307
2. 5 調査研究結果	311
2. 5. 1 UT (斜角探傷) による埋没欠陥の寸法計測精度について	311
(1) 溶接初期欠陥の寸法計測精度	311
(2) 疲労亀裂の寸法計測精度	311
2. 5. 2 新 UT を用いた場合の計測精度	313
(1) TOFD 法	313
(2) フェーズドアレイ UT 法	314
2. 6 あとがき	315
付属資料 超音波探傷試験による極厚鋼板溶接継手部内在欠陥の推奨計測手法について	316

3. 脆性亀裂アレスト設計に関する調査研究	322
3. 1 はじめに	322
3. 1. 1 研究の背景	322
3. 1. 2 研究体制	322
3. 1. 3 検討課題	323
3. 2 船舶における脆性亀裂伝播・停止に関する考え方	325
3. 2. 1 はじめに	325
3. 2. 2 コンテナ船に必要とされるアレスト設計	326
3. 2. 2. 1 従来船舶のアレスト性能	326
3. 2. 2. 2 コンテナ船の大型化と厚板化	329
3. 2. 2. 3 極厚鋼板のアレスト性能	332
3. 2. 2. 4 極厚鋼板溶接継手部での脆性亀裂直進伝播事例	333
3. 2. 2. 5 アレスト設計の機能要件	334
3. 2. 2. 6 アレスト設計で想定するシナリオ	334
3. 2. 3 まとめ	337
3. 3 脆性亀裂伝播・停止に関する過去の研究成果	339
3. 3. 1 初期の脆性亀裂伝播・停止研究	339
3. 3. 2 亀裂伝播についての破壊力学の基礎	339
3. 3. 2. 1 亀裂伝播・停止に関する基本的な考え方	339
3. 3. 3 脆性亀裂伝播停止靱性 $K_{Ic}$ に関する基礎的知見	342
3. 3. 4 長大亀裂に関する研究	344
3. 3. 5 最近の長大脆性亀裂伝播停止に関する研究	348
3. 3. 6 脆性亀裂伝播・停止のモデル化に関する研究	349
3. 3. 6. 1 シアリップ効果	349
3. 3. 6. 2 局所破壊応力モデル	349
3. 3. 7 大型試験装置の概要	352
3. 4 脆性亀裂伝播停止破壊靱性評価試験方法の標準化	353
3. 4. 1 はじめに	353
3. 4. 2 試験方法と試験結果	353
3. 4. 2. 1 タブ板厚, タブ板幅の影響	353
3. 4. 2. 2. ピン間距離の影響	356
3. 4. 2. 3 温度勾配の影響	358
3. 4. 2. 4 温度分布計測結果	362
3. 4. 3 脆性亀裂伝播停止破壊靱性評価に関する標準試験方法の提案	365
3. 4. 4 まとめ	369
3. 5 脆性亀裂伝播・停止挙動に関する大型構造モデルによる調査研究	370
3. 5. 1 はじめに	370
3. 5. 1. 1 中型混成 ESSO 試験	371
3. 5. 1. 2 中型棚板構造モデル試験	372
3. 5. 1. 3 超広幅混成 ESSO 試験	373
3. 5. 1. 4 超大型棚板構造モデル試験	375

3. 5. 2	中型混成 ESSO 試験	376
3. 5. 2. 1	はじめに	376
3. 5. 2. 2	供試材	376
3. 5. 2. 3	試験方法	377
3. 5. 2. 4	試験結果(試験進捗状況)	378
3. 5. 2. 5	まとめ	378
3. 5. 3	中型棚板構造モデル試験	379
3. 5. 3. 1	はじめに	379
3. 5. 3. 2	板厚 60mm ノルマ鋼を用いた中型棚板構造モデル試験	380
3. 5. 3. 3	板厚 60mm(TMCP)	385
3. 5. 3. 4	板厚 75mm(TMCP)	389
3. 5. 3. 5	まとめ	391
3. 5. 4	超広幅混成 ESSO 試験	391
3. 5. 4. 1	はじめに	391
3. 5. 4. 2	板厚 60mm	393
3. 5. 4. 3	板厚 75mm	398
3. 5. 4. 4	まとめ	401
3. 5. 5	超大型棚板構造モデル試験	401
3. 5. 5. 1	はじめに	401
3. 5. 5. 2	板厚 60mm	401
3. 5. 5. 3	板厚 75mm	407
3. 5. 5. 4	まとめ	408
3. 5. 6	まとめ	409
3. 6	脆性亀裂伝播・停止挙動の数値解析	412
3. 6. 1	長大脆性亀裂の伝播・停止挙動解析	412
3. 6. 1. 1	はじめに	412
3. 6. 1. 2	有限要素法による解析	412
3. 6. 1. 3	まとめ	421
3. 6. 2	溶接継手部の脆性亀裂伝播挙動	422
3. 6. 2. 1	はじめに	422
3. 6. 2. 2	溶接継手脆性亀裂伝播挙動に及ぼす残留応力・靱性の影響	423
3. 6. 2. 3	溶接継手脆性亀裂伝播挙動に及ぼす入熱・集合組織の影響	432
3. 6. 2. 4	バットシフト継手における脆性亀裂の伝播挙動	440
3. 6. 2. 5	おわりに	447
3. 7	極厚鋼板を用いた超大型コンテナ船の脆性亀裂アレスト設計	449
3. 7. 1	はじめに	449
3. 7. 2	極厚鋼板の脆性亀裂伝播・停止挙動	449
3. 7. 3	脆性亀裂伝播停止特性に必要な設計要件	449
3. 7. 3. 1	バットシフト	449
3. 7. 3. 2	材料によるアレスト	450
3. 7. 3. 3	構造不連続によるアレスト	450



3. 7. 3. 4 組合せによるアレスト	.....	450
3. 8 まとめ	.....	452
3. 8. 1 総括	.....	452
3. 8. 2 今後の課題	.....	454

別冊

超大型コンテナ船の極厚鋼板溶接継手部の脆性破壊防止に関する提言  
目次

はじめに	-----	1
1. 一般	-----	2
1. 1 対象	-----	2
1. 2 想定条件	-----	2
1. 3 適用分類（新造船、現存船）	-----	2
2. 極厚鋼板溶接継手部の脆性破壊防止	-----	2
2. 1 脆性き裂の発生防止	-----	2
2. 1. 1 全般	-----	2
2. 1. 2 新造船	-----	3
- 1 建造時の対策	-----	3
- 2 就航後の対策	-----	4
2. 1. 3 現存船	-----	5
2. 1. 4 就航形態が「1.2 想定条件」と著しく異なる船舶の例	-----	6
2. 2 脆性き裂の伝播防止（脆性き裂アレスト設計）	-----	6
2. 2. 1 全般	-----	6
2. 2. 2 脆性き裂アレスト設計指針	-----	6
3. バットシフトおよび構造詳細	-----	6
3. 1 バットシフト	-----	6
3. 2 構造詳細	-----	6

## 1. 調査研究の目的と背景

近年のコンテナ船の大型化は著しく、最近では 10,000TEU を超える超大型船が建造されるようになってきている。それに伴い、船体上甲板構造に用いられる高張力鋼板は 50mm を超えるような厚手化の傾向にある。

一般に鋼材は、板厚が厚くなると靱性が低下する傾向にあり、脆性き裂が発生しやすくなるため、高応力部での厚板の使用にあたってはその破壊靱性 (Kc) をしっかり評価し、脆性き裂の発生を防止することが重要である。従って従来、船体構造は脆性き裂発生防止を念頭に設計されてきた。一方、脆性破壊防止を担保する設計思想として、脆性き裂を発生させない考えに加え、溶接不具合等の存在により万一溶接部から脆性き裂が発生した場合においても、その伝播を停止させて脆性き裂の大きな進展を防止するという考え方がある。すなわち、脆性破壊防止に対する冗長性の確保の思想である。この考え方は現在の船級規則等において明確に規則化されている訳ではないが、現在の規則で要求されている鋼種鋼材の配置を満足することで、この冗長性はある程度確保できるであろうと言う前提にたっていた。

鋼材の脆性き裂伝播停止性能に関しては、過去に多くの調査がなされており、1m を超える長大脆性き裂を停止させるには  $4000\sim 6000\text{N}/\text{mm}^{1.5}$  程度の脆性き裂伝播停止靱性 (Kca) が必要であることが知られている。溶接部についても、概ね板厚 50mm 未満の造船用鋼板に関しては、溶接部の破壊靱性がある程度確保されていれば、溶接残留応力の影響により殆どの脆性き裂は溶接部から鋼板側に逸れ、鋼板母材の伝播停止靱性で停止できることが確認されている。しかしながら、最近実施された厚さ 65mm $\sim$ 70mm の高張力極厚鋼板の大入熱継手に対する大型 ESSO 試験の報告によると、溶接部から発生させた脆性き裂はその溶接部を逸れることなく直進し、また、鋼板母材にき裂を進展させた試験でも脆性き裂を停止できなかつた上、直交するスティフナを配して伝播停止を助長した場所であっても、脆性き裂は停止することなく伝播したことが報告されている。このことは、極厚板を採用し、少なくともその継手に大入熱溶接を適用している大型コンテナ船においては、万が一溶接不具合等により脆性き裂が発生した場合、そのき裂は大きく進展し船体の安全性に大きな影響を与える可能性があることを示唆している。

この示唆を考慮し、日本船舶海洋工学会はこの問題のフィジビリティスタディを行なうために「極厚板大入熱溶接部強度検討 FS 委員会」(以後、FS 委員会と称する) を平成 17 年 10 月に発足させ約 1 年間検討を行なった。その結果、溶接継手内部に埋没した不具合の大きさが少なくとも板厚の 10% 以上である場合は、就航期間中にき裂が成長し、最終的には脆性き裂の発生につながる可能性があることが示された。また、このような大きさのき裂を非破壊検査で 100% 確実に検知することに対して、再検証が必要であることもあわせて提言された。

この FS 委員会の報告・提言に関し、日本船舶技術研究協会の船舶技術戦略委員会において議論した結果、大型コンテナ船の脆性破壊問題を解明し懸念を払拭するためには「脆性き裂の伝播防止」のみならず、「脆性き裂の発生防止」、「非破壊検査による溶接部不具合の検知能力」も含めた詳細な検討を実施し、大型コンテナ船の構造安全性を総合的に確保する必要があるとの結論に到り、財団法人日本船舶技術研究協会にコンテナ船建造造船所、鉄鋼メーカー、船主協会、大学、船級協会、研究所の参加の下に本委員会を設置することとした。

## 2. コンテナ船の厚板化と設計応力の推移

### 2. 1 コンテナ船の厚板化

#### 2. 1. 1 調査目的

本調査研究を開始するにあたって、脆性破壊に対する構造安全性の検討対象及び検討条件を絞り込む目的で、現在就航中及び近々就航予定のコンテナ船の上甲板部構造に採用される鋼板の厚板化の動向を把握した(2007年時点)。

#### 2. 1. 2 調査方法

調査は、本調査研究に正メンバーとして参加する船級協会(日本海事協会：NK)及びオブザーバーとして参加する船級協会(米国：ABS、ノルウェー：DNV、ドイツ：GL、英国：LR)に、各登録船(就航予定船の就航年限は、任意とした)に、情報提供を要請して行った。調査情報は、上甲板部構造のいずれかに 50mm 以上の厚板を採用するフルコンテナ船の引き渡し年と垂線間長と同型船隻数及び、上甲板サイドの縦強度設計上の YP 並びに、ハッチサイドコーミング(H.S.C.)・上甲板・舷側厚板・縦通隔壁最上厚板の板厚とし、守秘義務に差し障る可能性のある船名と TEU 数などの情報は除いた。

#### 2. 1. 3 調査結果及び考察

前記の 5 船級協会のコンテナ船合計登録シェアは概ね 90%程度に達するので、ほぼ全容を表すと考えられる。一方で、同型・姉妹船が複数の船級に登録されるケースもあるので、別途 LR 船級協会が発行する船種別船隊データ(2007年1月版)を参照して、重複の排除を極力行った。その結果、得られた情報は約 80 種 428 隻に亘るものと考えられる。

図 2.1.3-1 に、引き渡し年と垂線間長さの関係を示す。過去に比較して近年は最大垂線間長即ち、最大船型が大型化する傾向がみられる。但し、近年でも中・大型のコンテナ船の発注・建造が継続されている点に留意する必要がある。

図 2.1.3-2 は、引き渡し年と上甲板サイドの縦強度設計上の YP を示す。1994 年から YP390 級の採用が開始されている。但し、近年でも YP355 級の採用が継続している点に留意する必要がある。過去の同型船の建造の影響だけではなく、超大型/大型コンテナ船以外では、高強度鋼板の供給や溶接資格の問題などから、敢えて YP390 を採用しないケースがあるものと推察される。

図 2.1.3-3 から図 2.1.3-8 に、引き渡し年と各部の板厚の関係を示す。年代と共に、最大採用板厚が増大している傾向が明らかである。今回調査した範囲では、最大板厚は約 90mm であった。但し、前記同様に近年の建造船でも、50mm 内外の板厚を採用するケースがある点には留意が必要である。

2008 年末時点では、50mm 板厚の採用が開始されてから約 15 年、65mm 板厚以上の採用が開始されてから約 10 年にあたる。なお、本調査研究に参加する国内造船会社のデー

タによれば、国内建造コンテナ船での最大採用板厚は 70mm 未満であり、ごく一部を除けば 65mm である。国内建造コンテナ船で極厚板の採用が無かったのは、国内船主向けに建造するコンテナ船の船型が、最大でも 8000TEU 級であった事が、一因と考えられる。

図 2.1.3-9 に、垂線間長と積載 TEU の関係を示す。この関係は LR 船級協会が発行する船種別船隊データ(2007 年 1 月版)に基づいている。概ね垂線間長に比例して積載 TEU も大きくなっているが、同じ垂線間長でも少ない積載 TEU の一群も見られる。少ない積載 TEU 船の上限は、パナマ運河通過船の最大長に対応しており、所謂パナマックス船型である事が判る。より多い積載 TEU 船は、オーバーパナマックス船型である。

図 2.1.3-10 は、引き渡し年と平均的推定積載 TEU(少ない積載 TEU の一群を除いた上で、垂線間長と積載 TEU の関係から求めた平均的な推定積載 TEU)の関係を示す。年代と共に最大積載 TEU は増大しているが、近年でも 50mm 板厚以上を採用する 4000TEU 級の建造がある点に留意が必要である。

平均的推定積載 TEU と各部の板厚の関係を、図 2.1.3-11 から図 2.1.3-16 に示す。垂線間長と各部の板厚の関係よりは、まとまりが良い。一般的に積載 TEU の増加と共に、採用最大板厚は増大する傾向にある。但し、最大船型で最大板厚が採用されるとは限らない点に留意が必要である。主として倉内のコンテナ段数や二重船側幅などの設計条件によって、所用板厚が増減するのが要因であると考えられる。

なお、以下の図では示していないが、一般的に、ハッチサイドコーミング(H.S.C.)の頂板とウェブ板の板厚は同一で最大、上甲板の板厚は独立的、舷側厚板と縦通隔壁最上厚板の板厚も同一だが相対的に薄め、の傾向がみられる。即ち、縦強度設計上の効率の影響が見られる。

また、上甲板サイドの縦強度設計上の YP はハッチサイドコーミング(H.S.C.)の頂板とウェブ板の YP にあたるが、一般的に上甲板と舷側厚板及び縦通隔壁最上厚板の YP は、1 ランク下がる。即ち、YP390 に対して YP355、YP355 に対して YP315 となる。

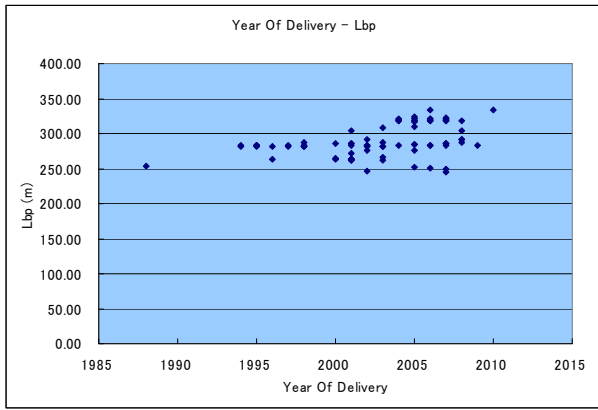


図 2.1.3-1 引き渡し年と垂線間長

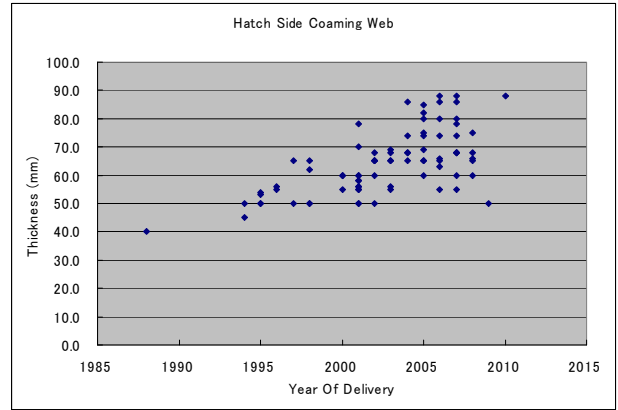


図 2.1.3-5 引き渡し年と H.S.C.ウェブ厚

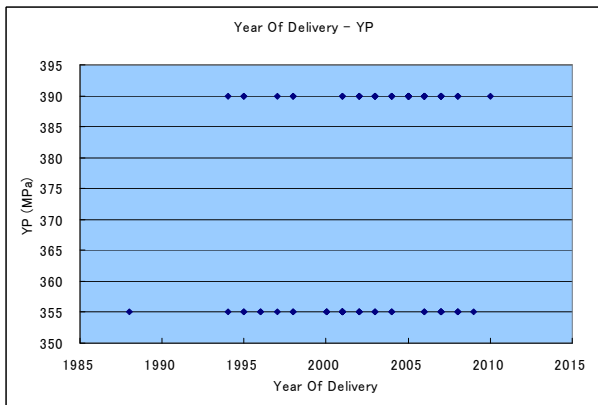


図 2.1.3-2 引き渡し年と縦強度設計 YP

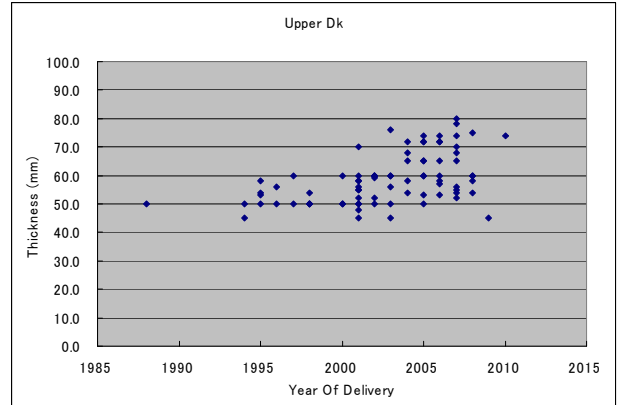


図 2.1.3-6 引き渡し年と上甲板厚

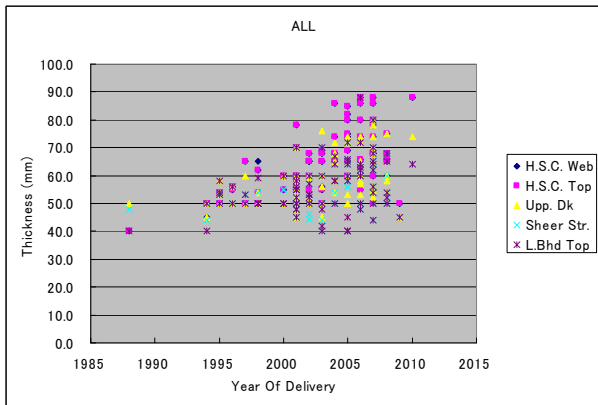


図 2.1.3-3 引き渡し年と各部板厚

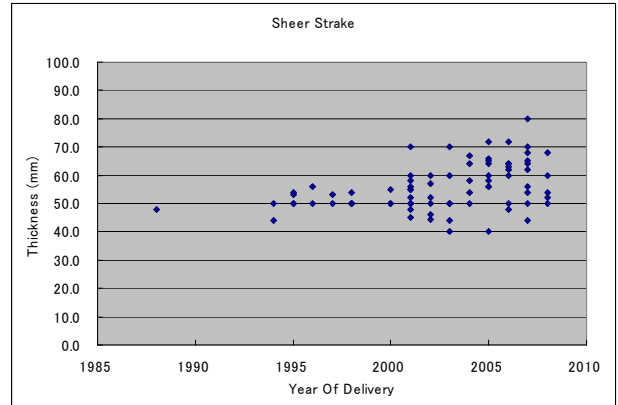


図 2.1.3-7 引き渡し年と舷側厚板厚

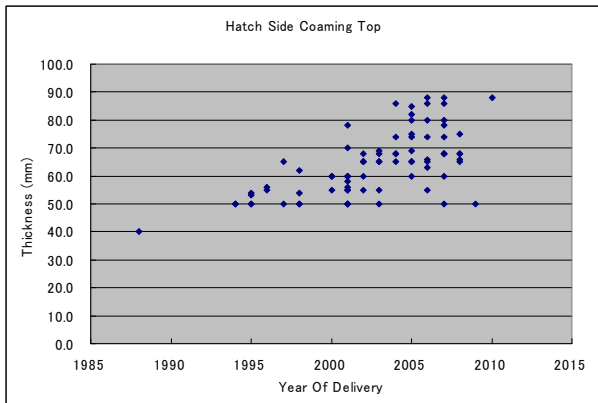


図 2.1.3-4 引き渡し年と H.S.C.頂板厚

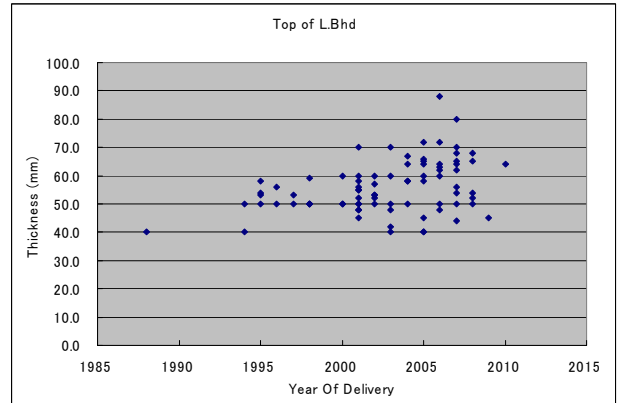


図 2.1.3-8 引き渡し年と縦通隔壁最上厚板厚

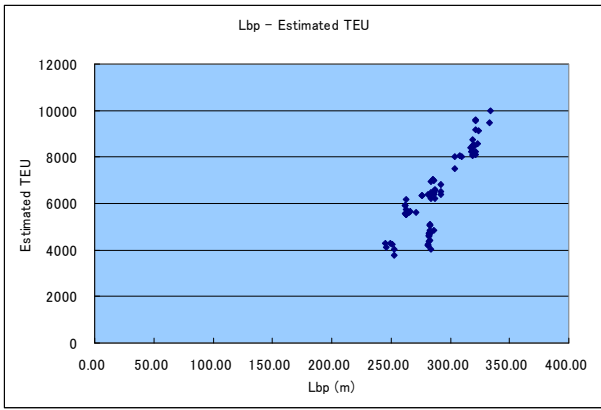


図 2.1.3-9 垂線間長と推定 TEU

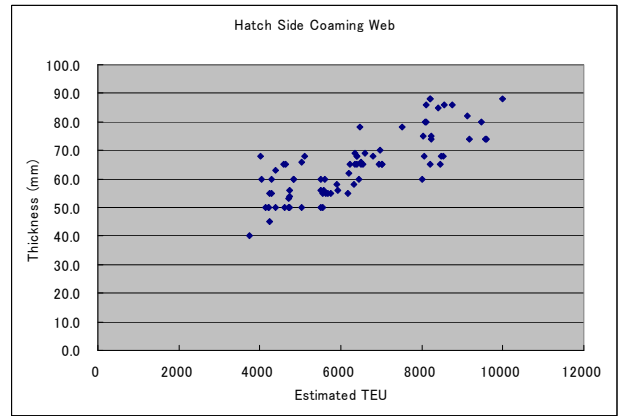


図 2.1.3-13 推定 TEU と H.S.C.ウェブ厚

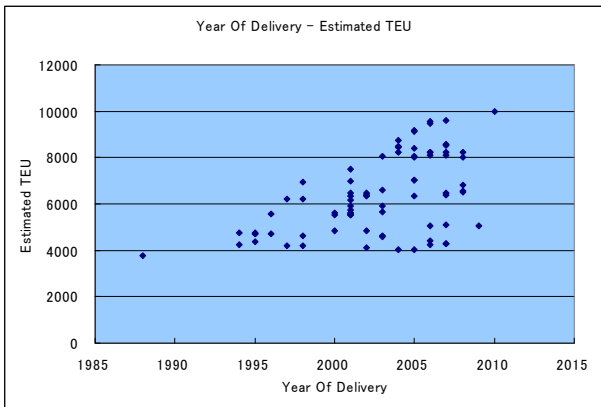


図 2.1.3-10 引き渡し年と推定 TEU

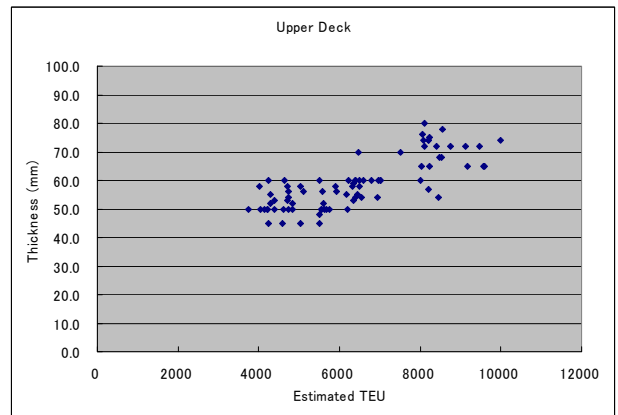


図 2.1.3-14 推定 TEU と上甲板厚

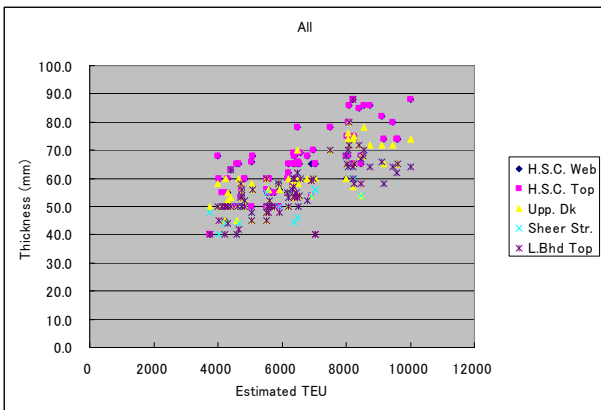


図 2.1.3-11 推定 TEU と各部板厚

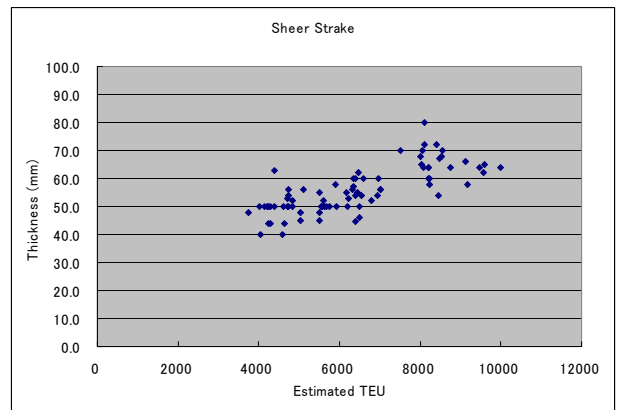


図 2.1.3-15 推定 TEU と舷側厚板厚

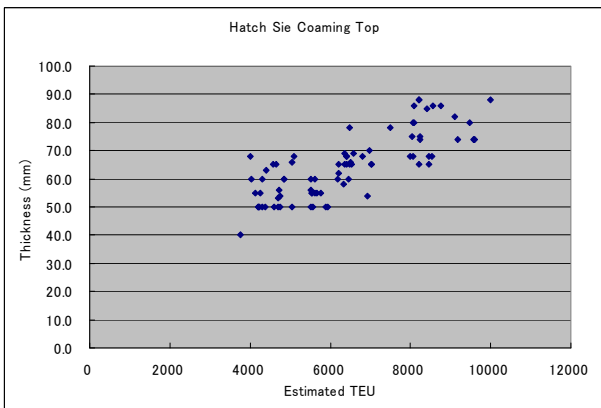


図 2.1.3-12 推定 TEU と H.S.C.頂板厚

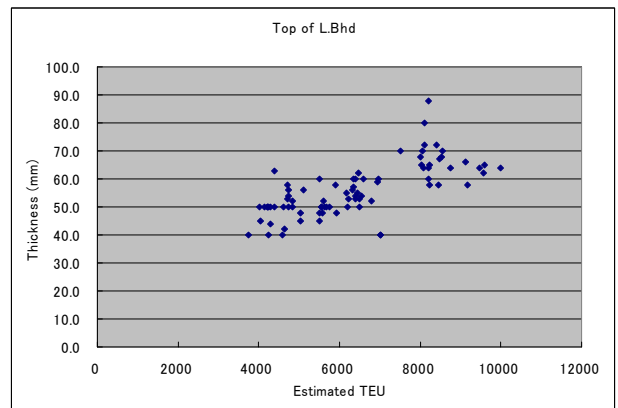


図 2.1.3-16 推定 TEU と縦通隔壁厚板厚

## 2. 2 コンテナ船の設計応力の推移

### 2. 2. 1 調査目的

第2部1.4で実施する疲労き裂の成長計算結果の解釈及び、極厚鋼板溶接継手部の脆性破壊防止に関する提言の位置づけを明らかにする目的で、50mm以上の板厚を採用するコンテナ船の上甲板部構造に作用する主船体梁縦曲げ応力の年代別推移を調査した。

### 2. 2. 2 調査方法

第2部1.4で疲労き裂成長の計算対象として選定した、12隻の本調査研究に参加する国内造船会社が実際に設計したコンテナ船の、代表的積み付け状態に於ける静水中縦曲げ応力と船級が規定する(設計)最大波浪縦曲げモーメント下で発生する波浪縦曲げ応力を調査した。また、疲労き裂成長の計算対象ではないが、最新のYP460級高強度鋼板を採用した実設計船の応力も1件追加した。なお、12隻のコンテナ船は、国内造船会社が提供した各種船型のコンテナ船の中で、最高の波浪縦曲げ応力発生船を全てカバーしている。

### 2. 2. 3 調査結果と考察

図2.3.3-1は、ハッチサイドコーミング(H.S.C.)頂板に作用する各種最大応力の、引き渡し年別推移を一括して示す。下限値は最大のサギング波浪モーメント作用時の応力で、僅かに圧縮サイドとなっている。上限値は、最大のホギング波浪モーメント作用時の応力で、引張りサイドとなっている。概ね中央の値は静水中の発生応力で、引張りサイドとなっている。上限値と下限値の差が、設計最大波浪変動応力レンジ(両振幅)を表わしている。

図2.2.3-2から図2.2.3-5は、推移を個別に表したものである。図2.2.3-2は、主船体梁縦曲げ強度設計に際して、1995年からYP390級鋼板が上甲板部構造に採用された事を示す。最新では、YP460級鋼板が採用されている。1997年にYP355級鋼板の採用に戻っている様に見えるが、個船設計での前後発生事例であり、主たる採用傾向とは無関係である。

図2.3.3-3は、上甲板サイドの縦強度設計上のYPと、代表的積み付け状態での静水中の縦曲げ応力の関係を示す。YPの増加と共に、応力が上昇する傾向が見られる。同じYPでも応力がばらつくのは、考慮する積み付けパターンなどの各社設計仕様差が主因である。

図2.2.3-4は、設計最大波浪変動応力レンジの年代別推移を示す。大まかには、1994年頃から最新の設計まで、顕著な増減傾向は見られない。なお短期間で増減変動が見られるのは、静水中縦曲げモーメントの各社設計仕様差に応じて主体梁の断面係数が増減するため、波浪縦曲げモーメントを除いて得られる波浪変動応力レンジが増減するからである。一般的に、近年は船主が高い自由度の積み付けパターンを求める傾向にあり、静水中縦曲げモーメントの設計値が高まっている。その結果は、波浪変動応力レンジの相対的な低下をもたらす。一方で図2.2.3-2に示した様に、近年は採用鋼板のYPが徐々に高まる傾向にもある。双方の傾向の重畳した結果として、波浪変動応力レンジは、年代によらずほぼ一定となっていると考えられる。図2.2.3-5から判る様に、最新のYP460級鋼板採用船でも、波浪変動応力レンジはYP355及びYP390採用船並みの値となっている。



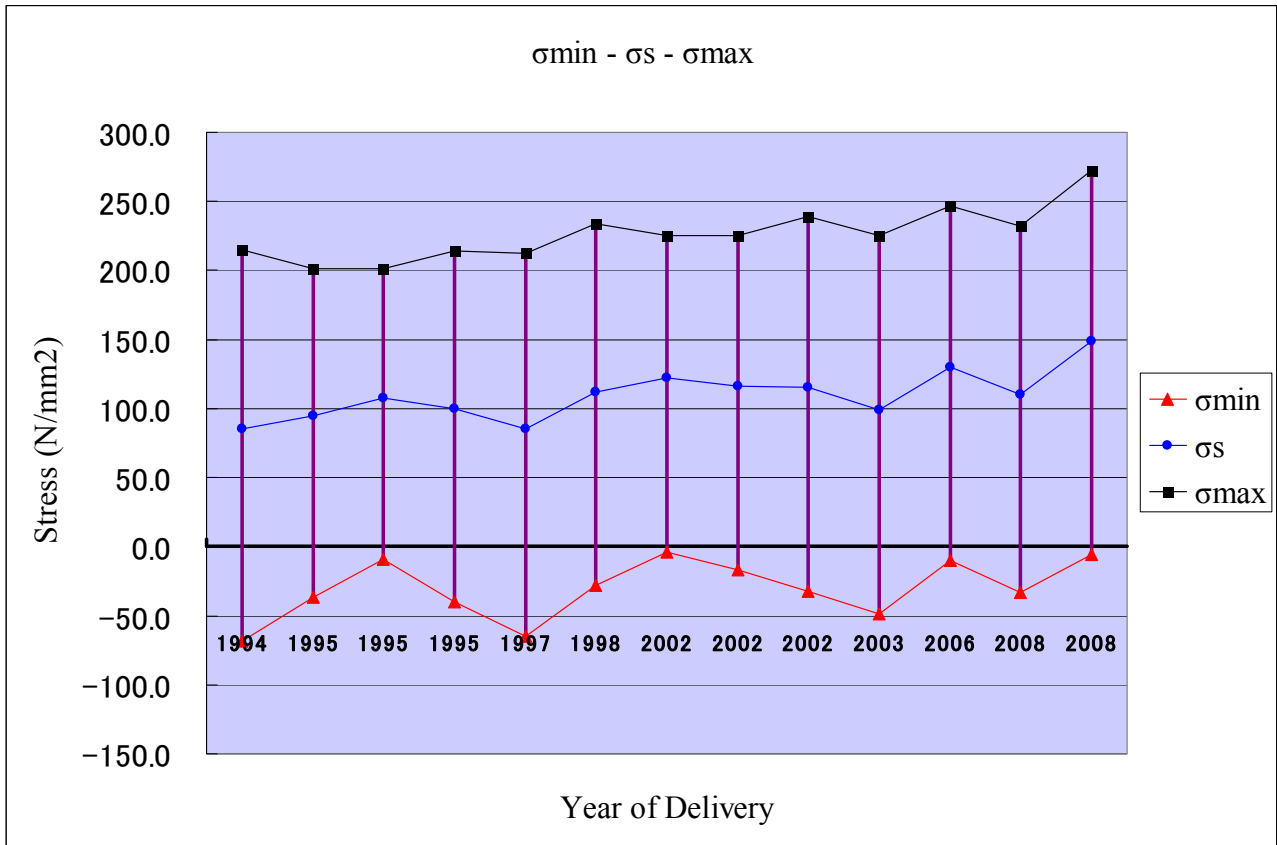


図 2.2.3-1 就航年と、代表的積載状態での静水中応力／波浪を含む最大・最小設計応力

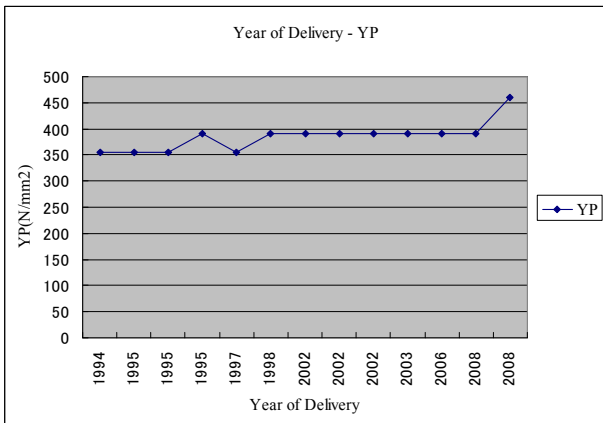


図 2.2.3-2 就航年と縦強度上の YP

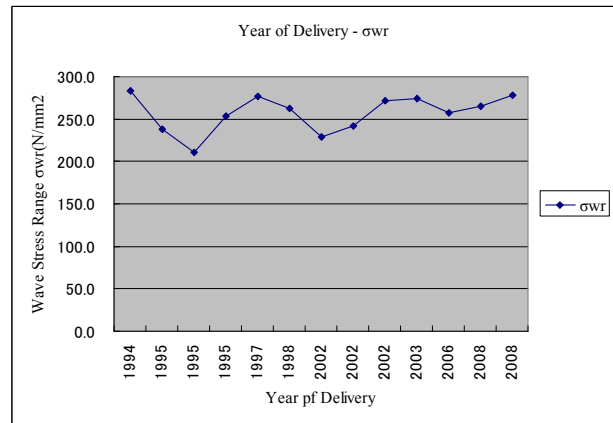


図 2.2.3-4 就航年と設計最大波浪応力レンジ

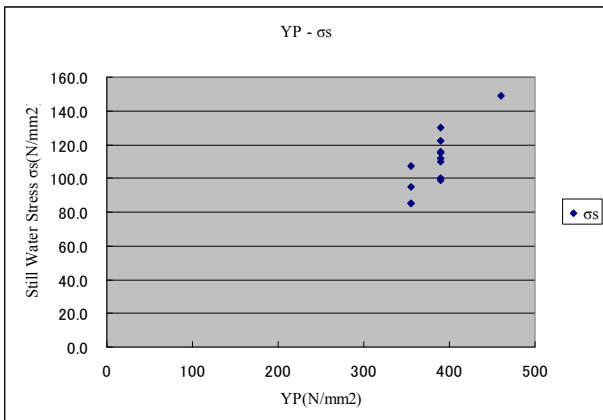


図 2.2.3-3 YP と代表的積載状態での静水中応力

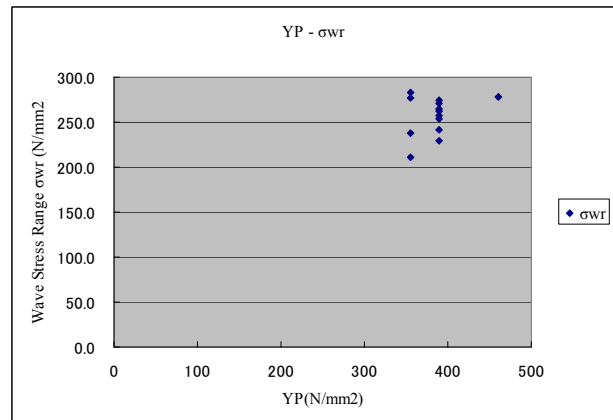


図 2.2.3-5 YP と設計最大波浪応力レンジ

## 2. 3 コンテナ船の就航動向

### 2. 3. 1 調査目的

2. 1 でコンテナ船の厚板化を調査した結果、一定の積載 TEU 以上のコンテナ船で 50mm 以上の板厚の鋼板を採用している事が判明した。そこで、各種積載 TEU のコンテナ船が、何隻程度就航しているのかを把握する為の追加調査を行った。また、2. 2 で設計応力の推移を調査した結果、年代乃至採用鋼板の YP に依らず設計応力が概ね一定になっている事が判明した。但し、2. 2 での設計波浪縦曲げ応力は、船級が規定する(設計)最大波浪縦曲げモーメントが作用する事を前提としており、想定海域は最も厳しい北大西洋に対応する。実際のコンテナ船で発生する波浪応力レンジは実就航海域に依存して増減する。そこで、各種積載 TEU のコンテナ船の就航海域の追加調査も行った。

### 2. 3. 2 調査方法

LR 船級協会が発行する船種別船隊データ(2008 年 7 月版)及び、(社)日本海運集会所発行で日本郵船調査グループ編の「世界のコンテナ船体および就航状況 2008 版」から関連情報を得て、作図作表した。

### 2. 3. 3 調査結果及び考察

図 2.3.3-1 は、LR 船級協会が発行する船種別船隊(2008/07 版で、100TEU 以下を含む僅かな情報不備船を除く 5913 隻)データから求めた、引き渡し年別の積載 TEU の推移を表わす。図 2.1.3-10 とは異なり、全船級協会登録で 50mm 以上の厚板採用に限らない全就航船/近々就航予定船での実設計積載 TEU を表す。年代と共に、最大積載 TEU は増大しているが、2006 年頃に 12000TEU 級が出現して後の大幅な増加は直近では見られない。

図 2.3.3-2 は、TEU 別の就航/近々就航予定船の隻数を示す。数的に多いのは 3000TEU 級未満である事が判る。図 2.1.3-11 などから、50mm 以上の厚板の採用の可能性のあるコンテナ船を 4000TEU 以上と仮定すれば、該当する就航/近々就航予定船の総数は約、1750 隻である。

表 2.3.3-1 は、(社)日本海運集会所発行で日本郵船調査グループ編の「世界のコンテナ船体および就航状況 2008 版」の情報から再整理した、航路別の各種実設計 TEU 積載コンテナ船就航隻数を示す。総数は 4619 隻と LR 船級協会のデータより少ないが、その主因は「近々就航予定船」を含まないためと考えられる。

5000TEU 級以上の大型コンテナ船の大多数は、アジア～欧州航路或いはアジア～北米航路に就航している。また、相対的にはアジア～欧州航路就航船の方が、アジア～北米航路就航船よりも、より大型の傾向にある。一方で、最も厳しい航路である北大西洋を航海する欧州～北米航路就航船では、5000TEU 以上級が 20 隻弱しかなく、多くが 5000TEU 又は 4000TEU 級未満である事も判る。即ち、50mm 以上の厚板の採用の可能性のあるコンテナ船の大多数は、アジア～欧州(東・南シナ海/インド洋/地中海航路)或いはアジア～北米(北太平洋航路)就航であり、北大西洋航路就航船は少ない(略、5%)と判断される。

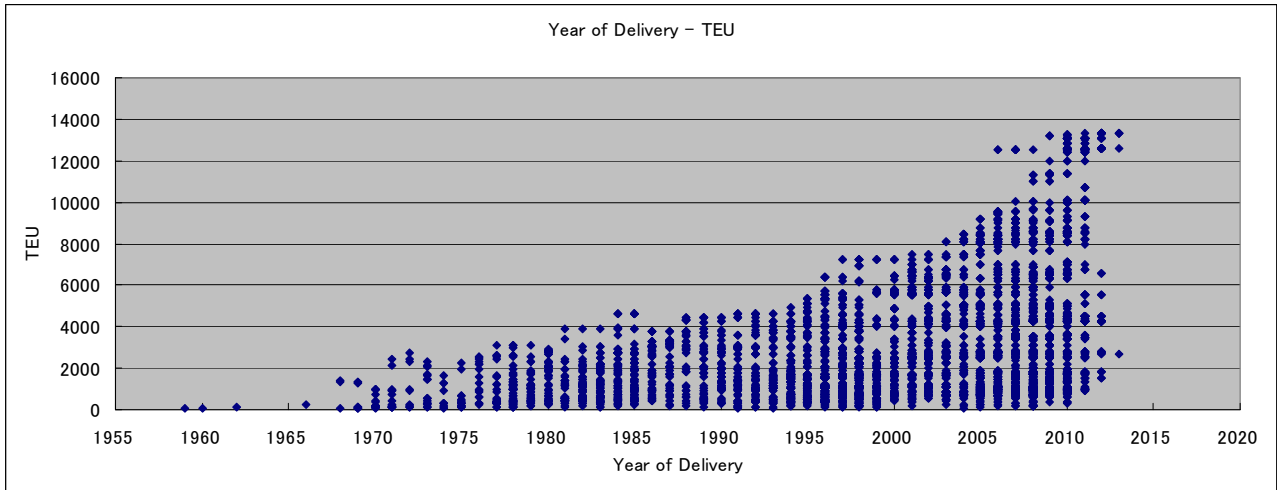


図 2.3.3-1 引き渡し年と実設計 TEU の推移

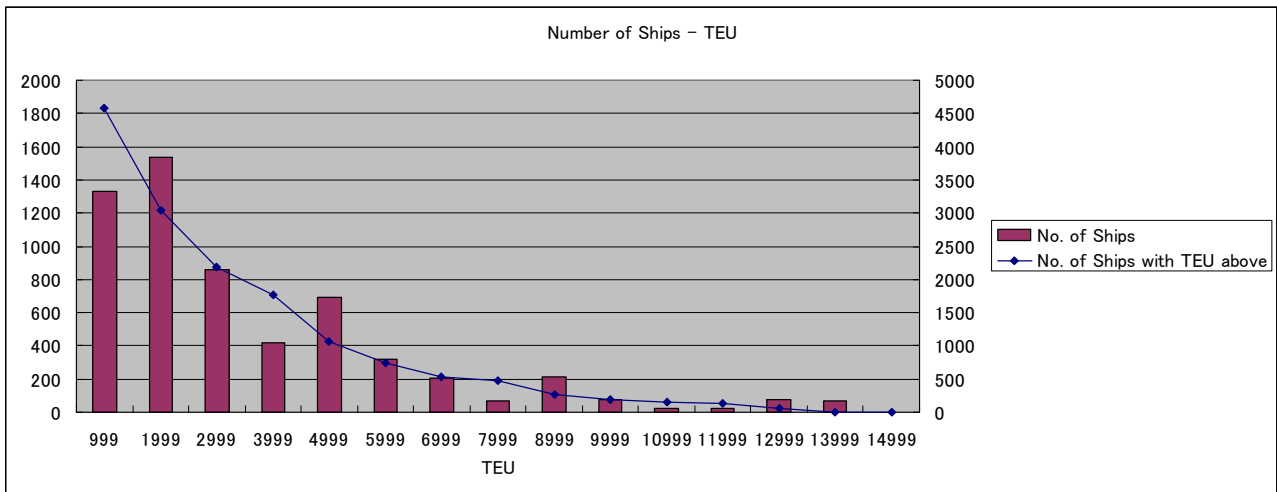


図 2.3.3-2 実設計 TEU 別のコンテナ船就航／近々就航予定船隻数

表 2.3.3-1 航路別の各種実設計 TEU 積載コンテナ船就航隻数

2008年末のフルコンテナ船

航路	海域	TEU						平均船型 TEU	全隻数	5000TEU 以上の 隻数
		< 1000	< 3000	< 5000	< 8000	< 10000	< 15000			
アジア～欧州	東・南シナ海／インド洋／地中海	0	42	107	216	143	14	6286	522	373
アジア～北米	北太平洋	0	37	210	165	25	0	4851	437	190
欧州～北米	北大西洋	1	86	93	19	0	0	3443	199	19
欧州～中東／南アジア	地中海／インド洋	0	15	23	12	0	0	4001	50	12
アジア～中南米	太平洋	0	103	53	10	0	0	3048	166	10
アジア～オセアニア	太平洋	4	69	40	0	0	0	2677	113	0
アジア～アフリカ	東・南シナ海／インド洋	2	163	41	4	0	0	2323	210	4
欧州～中南米	大西洋	0	80	34	7	0	0	2861	121	7
欧州～アフリカ	大西洋	20	103	21	4	0	0	2079	148	4
北米～中南米	大西洋／太平洋	35	85	17	0	0	0	1784	137	0
その他南北航路	—	0	43	3	0	0	0	2357	46	0
南南航路	—	2	10	0	0	0	0	1846	12	0
東アジア域内	東・南シナ海	387	348	14	0	0	0	1039	749	0
極東～中東／南アジア	東・南シナ海／インド洋	18	202	62	16	0	0	2446	298	16
欧州～地中海域内	地中海／インド洋	280	158	7	4	0	0	1081	449	4
その他域内航路	—	77	202	1	0	0	0	1259	280	0
その他	—	390	246	37	9	0	0	1211	682	9
		1216	1992	763	466	168	14	2550	4619	648

### 3. プロジェクトの概要

#### 3. 1 調査研究体制

本プロジェクトの実施に当たっては、大学・研究機関・船級・造船・海運及び国交省海事局の専門家及び関係者で構成される「超大型コンテナ船構造安全対策検討委員会」を設置し、この委員会のステアリングの下に、①脆性亀裂のアレスト設計に関する調査研究（WG1）、②溶接部の脆性亀裂の発生と防止に関する調査研究（WG2）、及び③脆性亀裂に係る溶接部の非破壊検査技術に関する調査研究（WG3）をそれぞれに設置されたワーキンググループにより実施した。（図-3.1 参照）

安全対策検討委員会は、計画、方針の審議、最終報告の取りまとめを主な役割とし、3つのWG間の調整、各WGへのアドバイスをを行い調査研究の円滑な進捗を図るために幹事会を設置した。

また、幹事会の下に各WGの代表者による構造安全対策提言検討グループを設置し提言案の取り纏めを行った。

WG1は、日本海事協会が中心となり大学、研究所、鉄鋼メーカー及び造船所が参加して、日本海事協会の研究資金の負担により調査研究を実施した。

WG2及びWG3は、研究参加者の資金負担により、大学、研究所、造船工業会、鉄鋼メーカー、船主協会（WG3は除く）、及び、外国船級はオブザーバーとして、各機関の専門家により調査研究を実施した。

また、国土交通省は、本プロジェクトが国際的な問題ともなり得る船舶の安全に関連する重要事案であるため、アドバイザーの立場で調査研究に参加した。

#### 3. 2 調査研究期間

コンテナ船の急激な大型化に伴う上部構造部材の極厚化の傾向が顕著であり、安全対策は緊急を要するため、2007年度～2008年度の2年間で大型コンテナ船の構造安全対策案をとりまとめることとした。2年間の調査研究スケジュールは3.4に示す。

#### 3. 3 調査研究の概要

急激に極厚化した超大型コンテナ船の上甲板構造部材の突合せ溶接継手部の欠陥を起点として脆性破壊に至る可能性について検討を行い、現存船及び建造船に対する構造安全対策を立案し、関係機関へ提言することを目標とする。

この目標を達成するために、上記3つのWGにおいて、以下の調査研究を実施した。

##### （1）溶接部の脆性き裂の発生と防止に関する調査研究

脆性破壊問題の潜在的対象船を絞り込み、それらの脆性破壊発生の確度を把握すると共に、新造船及び就航船への脆性破壊発生防止対策を提案する。また、脆性破壊発生防止対策の確実度を判定し、脆性破壊停止（アレスト）対策の必要度判断に供する。

主な検討項目を以下に示す。

- ①日本船舶海洋工学会の「極厚板大入熱溶接部強度検討 FS 委員会」報告書レビューと検討課題確認。
- ②厚板／極厚鋼板採用のコンテナ船の実態調査と検討すべき対象船の抽出



# 超大型コンテナ船構造安全対策検討の枠組み

## 超大型コンテナ船構造安全対策検討委員会

### 【目的】

近年のコンテナ船の著しい大型化に伴い、上甲板構造に用いる高張力鋼は50mmを超える極厚板化の傾向にあるが、これらの極厚板は、脆性亀裂伝播と停止性能に関して従来の知見と異なる特性を有することが最近の研究において報告されている。本検討においては、極厚板を使用した船体構造の安全性確保に資する調査研究を推進し、就航船、新造船をカバーする総合的な安全対策を策定することを目的とする。

### 【役割】

- 調査研究の実施計画及びとりまとめ方針等に係る審議
- 構造安全対策の策定
- 関係機関への対応・提言
- 各種調整事項に対する対処方針の決定

委員長 板垣 浩（横浜国大名誉教）  
 参加機関  
 大学（横浜国立大学、長崎総科大学、九州大学）  
 日本海事協会  
 海上技術安全研究所  
 国土交通省海事局  
 造船工業会（三菱重工、IHI-MU）  
 日本鉄鋼連盟（新日本製鐵、JFEスチール）  
 日本船主協会（日本郵船、商船三井、川崎汽船）

## 幹事会

### 【役割】

- 審議資料作成等委員会の補佐
- WGの調査研究進捗状況の把握及びWG間の各種調整
- IACS等外部機関への対応の窓口

大学  
 日本造船工業会  
 日本鉄鋼連盟  
 日本海事協会  
 国土交通省海事局

構造安全対策提言  
 検討グループ

## WG1

### 脆性亀裂アレスト設計に関する調査研究

#### 【実施概要】

高降伏応力・極厚鋼板の溶接部について、ES SO試験を実施し、材料に要求される要件を明確にする。

#### 【推進体制】

主査 矢島長崎総科大教授  
 参加者 大学、造船、鉄鋼メーカー、NK、海技研

【研究費用】 NK

## WG2

### 溶接部の脆性亀裂の発生と防止に関する調査研究

#### 【実施概要】

船舶海洋工学会のFS委員会の検討結果を踏まえ、厚板の脆性亀裂発生メカニズムの究明と防止策の検討を実施。

#### 【推進体制】

主査 豊貞九大教授  
 参加者 大学、造工、鉄連、船協、NK、海技研、外国船級（オブザーバー）

【研究費用】 参加者の費用負担による

## WG3

### 脆性亀裂に係る溶接部の非破壊検査技術に関する調査研究

#### 【実施概要】

高降伏応力・極厚鋼板の溶接部の欠陥を検知し得る非破壊検査技術を確立する。

#### 【推進体制】

主査 吉川九大教授  
 参加者 大学、造工、NK、海技研、外国船級（オブザーバー）

【研究費用】 参加者の費用負担による

- ・船級登録コンテナ船調査・コンテナ船就航航路実績調査
- ③疲労亀裂成長計算手法「FLARP」の精度把握と精度向上のための疲労試験
  - ・溶接継手内在欠陥試験片による疲労亀裂進展速度、亀裂進展形状等の把握
- ④36HT 及び 40HT の厚板採用のコンテナ船の疲労亀裂成長計算
- ⑤各種溶接法による厚板バット溶接部の実破壊靱性(K<sub>c</sub> 値)調査のためのディープノッチ試験、シャルピー衝撃試験、硬度比計測。
- ⑥対象船(36HT/40HT 船)の許容埋没初期欠陥サイズ/脆性亀裂発生限界埋没欠陥サイズ把握
  - ・標準想定航路別、YP 別、溶接部 K<sub>c</sub> 値別、板厚別
- ⑦対象船(36HT/40HT 船)の脆性亀裂発生限界寿命把握
  - ・初期埋没欠陥サイズ別、標準想定航路別、YP 別、溶接部 K<sub>c</sub> 値別、板厚別
- ⑧要管理とすべき初期埋没欠陥サイズ及び、形状の検討
- ⑨検査対象就航船の絞り込み(板厚、YP、溶接法、航路、等)
- ⑩新造船検査要領(方法)・就航船検査要領(タイミングと方法)・欠陥補修要領の提案。
- ⑩溶接部 K<sub>c</sub> 値とシャルピー値との相関検討。
- ⑪構造設計を含む、新造船での脆性破壊発生防止対策の検討。
- ⑫新造船への脆性破壊発生防止対策の確実性判定。

## (2) 脆性き裂に係る溶接部の非破壊検査技術に関する調査研究

現状の UT の検知限界と検知精度を把握し、要すればそれらの性能向上、或いは新 UT 適用により(極)厚板検査要領を確立し、就航船及び新造船の脆性破壊発生防止対策の一助とする。

主な検討項目を以下に示す。

- ①現状 UT の検知精度の把握
- ②鋼板表面状態(塗装)の欠陥検知精度への影響把握
- ③埋没欠陥試験体の欠陥寸法/位置確認
- ④疲労き裂進展時のき裂検知精度把握
- ⑤現状及び新 UT の能力/精度評価
- ⑥就航船の超音波探傷による検知能力/精度の確認
- ⑦超音波探傷試験による溶接継手部内在欠陥の推奨計測手法案

## (3) 脆性き裂アレスト設計に関する調査研究

大型コンテナ船に使用される極厚鋼板の脆性き裂伝播挙動について検討を行い、構造安全性確保の観点から、脆性き裂アレスト設計に関する合理的な指針案を策定する。

主な検討項目を以下に示す。

- ①従来知見のレビュー
- ②標準 ESSO 試験の試験方法の標準化
- ③中型模型及び大型模型試験
- ④脆性亀裂伝播・停止挙動の数値解析
- ⑤脆性亀裂アレスト設計の技術基準策定

3. 4 調査研究スケジュール

研究項目	2007 年度	2008 年度
大型コンテナ船の構造安全対策案の作成		<p style="text-align: center;">提言案作成</p> <p style="text-align: center;">←————→</p>
溶接部の脆性亀裂の発生と防止に関する調査研究	<p style="text-align: center;">← 調 査 →</p> <p style="text-align: center;">解 析 (疲労亀裂</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">実 験 (疲労試験</p> <p style="text-align: center;">←————→</p>	<p style="text-align: center;">成長計算)</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">ディープノッチ試験)</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">まとめ</p> <p style="text-align: center;">←————→</p>
脆性亀裂に係る溶接部の非破壊検査技術に関する調査研究	<p style="text-align: center;">← 調 査 →</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">UT 試験</p> <p style="text-align: center;">←————→</p>	<p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">実船調査</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">まとめ</p> <p style="text-align: center;">←————→</p>
脆性亀裂アレスト設計に関する調査研究	<p style="text-align: center;">← 調 査 →</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">Kca 標準試験法</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">混成 ESSO 試験計画</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">中型棚板</p> <p style="text-align: center;">←————→</p>	<p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">実 験</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">試験計画</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">実 験</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">大型模型計画</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">実 験</p> <p style="text-align: center;">←————→</p> <p style="text-align: center;">アレスト設計指針案</p> <p style="text-align: center;">←————→</p>

### 3. 5 調査研究結果の概要

各 WG の調査研究結果を以下に述べる。

#### 3. 5. 1 溶接部の脆性亀裂の発生と防止に関する調査研究 (WG2)

極厚板溶接部の埋没欠陥を起点とする脆性破壊の発生を防止するために、内部欠陥から発生して板表面にき裂が現れ、裏面にも達して板厚貫通き裂になる問題に対しての、代表き裂長さ  $K$  値関係の与え方を検討し、実験結果との比較検討を行うと同時に、これを用いた実船での疲労き裂成長曲線をシミュレーション計算プログラム「FLARP」により推定した。さらに、コンテナ船建造造船所の厚板溶接施工法による極厚板突合溶接継手がどの程度の破壊靱性値を有しているかを検討した。疲労き裂成長計算及び突合溶接継手の破壊靱性値より、超音波探傷の検知精度を考慮した新造船及び就航船の限界寿命を検討し、溶接継手部の管理について取りまとめた。以下、主要な調査研究結果の概要を示す。

##### (1) 疲労亀裂成長計算手法「FLARP」の精度把握／向上のための疲労実験

埋没初期欠陥を有する試験片による疲労試験を行い、亀裂成長に伴うアスペクト比の変化を追跡し、計算プログラムで採用した仮定とよく一致することが分かった。

##### (2) 各種溶接法による厚板突合溶接部の実破壊靱性( $K_c$ 値)調査

厚板溶接継手を各造船所の施工法により製作し、突合溶接継手部の破壊靱性値  $K_c$  をディープノッチ試験により把握した。また、 $K_c$  の温度依存性を確認するためにシャルピー衝撃試験から推定し、シーブノッチ試験結果と比較した。

板厚 50mm～80mm の TMCP 鋼、EH36 及び EH40 材について、大入熱溶接 (EGW,SAW) 及び多層盛溶接 (CO<sub>2</sub> 溶接) により突合せ溶接継手を製作し、中央切欠け試験片 (幅 480mm、中央切欠け 240mm) のディープノッチ試験を行った結果、破壊靱性値  $K_c$  は疲労ノッチ換算で 2,800～5700N/mm<sup>1.5</sup> であった。また、シャルピー衝撃力からの推定では、厚板の場合でも従来の推定式による方法を適用できることが確認された。

##### (3) コンテナ船(36HT/40HT 採用)の疲労き裂成長計算

新造船を対象とした場合には、設計寿命 25 年に亘って脆性き裂の発生を予防可能とする「許容埋没初期欠陥の寸法」の把握、また、就航中の船の場合には、定期的な検査期間に亘って脆性亀裂の発生を予防可能とする「許容埋没疲労欠陥寸法」を把握するために、FLARP による疲労き裂成長計算を実施した。

板厚、欠陥の寸法・形状・位置、航路、荷重履歴等の諸影響を考慮した計算により疲労き裂成長の状況を把握し、安全対策案の基礎となる計算結果を得た。これら計算パラメタの影響の詳細については、本文を参照されたい。

##### (a) 新造船の許容埋没初期欠陥寸法

国内で建造された 12 隻のコンテナ船の中から、設計応力レンジが最大の 4700TEU の板厚 50mm (実船は 45mm) のコンテナ船を対象として、板厚貫通に至る限界初期欠陥寸法を算定した。その結果、北太平洋航路において、25 年間で板厚貫通に至る初期欠陥寸法は、深さ 8.5mm、アスペクト比 0.2 とすると欠陥長さは 42.5mm であった。

##### (b) 就航船の許容埋没疲労欠陥寸法

バルクキャリアー、油タンカー等 板厚 30mm 程度以下の船舶 (ハルガーダー応力は YP32～YP40 レベル) で、溶接継手の埋没欠陥が疲労成長して板厚貫通に至った事故例はほとんど報告されていない。このことは、現行の溶接継手管理スキームで、少なくとも就航 10 年程



度の間、埋没初期欠陥深さ(2b)が30mmを越えるまでに成長することは防止できていると考えることができる。大型コンテナ船に対しても、少なくとも就航後10年程度の間は、埋没初期欠陥は30mm程度を超えるまでに成長することは防止できていると考えることができ、これをベースに就航中のコンテナ船の許容埋没疲労欠陥寸法を算定した。

擬似4200TEU船(板厚50mm)、4,600TEU船(板厚65mm)、10,000TEU船(板厚80mm)について、埋没初期欠陥30mmφとした欠陥成長計算を実施し、板厚貫通に至る欠陥寸法を就航航路毎に算定し、その結果を基に限界Kc値(本文中でKc\*)になるまでの期間を算定した。

#### (4) 就航船及び新造船の限界寿命、溶接継手の破壊管理

上記(3)のき裂成長計算を基に、就航船の限界寿命については1.6.1に、また、新造船の限界寿命については、1.6.2に検討結果をまとめたので、それぞれ参照されたい。

#### (5) 新造船及び就航船の溶接継手管理

新造船の溶接継手管理及び就航船の溶接継手管理については、1.6.3及び1.6.4に取りまとめたので、それぞれを参照されたい。

以上の調査研究結果は、非破壊検査技術に関する調査研究の結果と共に、提言案の基礎資料として活用された。

今後は、実際に提言案が適用された場合に欠陥を管理する上での問題、特に、現存船に対する非破壊検査において提言案で提案した精度で欠陥管理が可能であるか、提言が過度な安全要求となっていないか等、検証していく必要がある。

### 3. 5. 2 脆性亀裂に係る溶接部の非破壊検査技術に関する調査研究(WG3)

種々の内在欠陥を模擬した試験体を製作し、現在造船各社で実施されている超音波探傷法、ならびにき裂長さを精度良く検査するに有効と考えられる種々の超音波探傷法を用いて、探傷試験を行い、欠陥検知限界と欠陥検知精度を調査した。また、その結果に基づいて、新造船において、脆性破壊の発生を防止するために許容される欠陥サイズ以上の欠陥が、どの程度の精度で検知できるか調べた。また、就航船において定期的に内部欠陥検査を行なう場合を想定し、塗膜がある場合の内在欠陥の探傷精度について調査するとともに、実船での計測試験を行ない、計測に際しての問題点、課題を明らかにした。さらに、最新の探傷技術の調査を行い、その探傷精度ならびに、造船現場での適用性について検討した。また、これらの結果をもとに、厚板の溶接部に存在する内部欠陥、ならびにそれを起点として成長した疲労き裂のき裂長さを調べるための、超音波探傷検査法ならびに検査要領の提案を行なった。

しかしながら、今回の検討で実施した超音波探傷試験の数や、計測に参加した人数は限られており、この結果から脆性破壊の発生を防止するために許容される欠陥サイズ以上の欠陥を検知できるかの確率を論ずることには無理があるものと考えられる。今後、さらに計測精度に関するデータを蓄積してゆく必要があるものとする。特に、今回の計測では、特に板厚に垂直な欠陥の場合には、斜角探傷の入射角との差のため、探傷精度が低下する傾向があり、注意を要することもわかっている。また、今回の試験では人工欠陥を対象とした試験が多く、初期欠陥の探傷についてのデータはある程度得られたと考えるが、就航船で検査すべき疲労き裂については、欠陥高さに関する計測のみで、欠陥長さに関する計測が少なく、さらに試験を実施し

て、データを蓄積する必要があると考える。塗膜の影響に関しても、裏面塗膜の影響など貴重な知見を得ることが出来たが、実船での塗膜の状況観察は1船のみであり、さらに情報を収集する必要がある。

また、ハッチサイドコーミングのトッププレートと垂直板の交差部や、上甲板とハッチサイドコーミングの垂直板の交差部、さらには上甲板と舷側厚板の交差部など、探傷の難しい部分については今回は検討対象としておらず、これらの部材交差部の探傷方法の構築についても、今後の検討課題である。

さらに、TOFD法を除き、どのようなデータよりそのような判断を行なったかは、データの形では残らず、現場で計測画面をみて判断した結果が記録されているだけである。計測した際に得られる欠陥からの反射エコー画面の記録方法について、規準を作成するなど今後の検討課題と考える。

### 3. 5. 3 脆性亀裂アレスト設計に関する調査研究 (WG1)

#### (1) 脆性亀裂伝播停止靱性評価試験方法の標準化

脆性亀裂アレスト設計を行うために必要不可欠である脆性亀裂伝播停止靱性  $K_{ca}$  を評価する方法の標準化を目的とし、タブ板の板厚・板幅、ピン間距離、温度勾配が結果に与える影響として下記を明らかにした。

- (a) タブ板厚は試験片板厚よりも厚くなると定性的に評価は危険側となるが、試験片厚の1.5倍までは結果に殆ど影響を与えない。
- (b) タブ板幅は2倍以内であれば、評価結果に影響を与えない。
- (c) ピン間距離については1500mm以上であれば一定した評価が可能である。
- (d) 温度勾配が大きくなるほど定性的に  $K_{ca}$  を過小に評価する。0.25°C/mm程度であれば混成型で得られる  $K_{ca}$  とほぼ等しくなる。

また、これら得られた結果は「脆性亀裂伝播停止靱性  $K_{ca}$  試験方法」としてまとめ、試験機関による評価値の変動を最小化するためのガイドラインとした。

#### (2) 脆性亀裂伝播・停止挙動に関する大型構造モデルによる調査研究

ハッチサイドコーミングあるいは強力甲板に発止した脆性亀裂の伝播を停止させるために必要な強力甲板あるいはハッチサイドコーミングに使用される鋼板のアレスト靱性値を評価するため、中型混成 ESSO 試験、中型棚板構造モデル試験、超広幅混成 ESSO 試験及び超大型棚板構造モデル試験を実施した。実船においては、特に、ハッチサイドコーミングから強力甲板に突入する亀裂の伝播経路や駆動力は継手形状による荷重伝達のしかたにより影響を受けることが推定されるため、継手形状による脆性亀裂の伝播・停止挙動の変化についても検討を加えた。結果、以下が明らかになった。

- (a) ノルマ材を用いた中型棚板構造モデル試験において、負荷応力 257N/mm<sup>2</sup> の条件で、デッキ溶込がある場合には、試験板の  $K_{ca}$  値が 5,000N/mm<sup>3/2</sup> 以上であれば、亀裂を停止できることが確認された。
- (b) ノルマ材を用いた中型棚板構造モデル試験において、デッキ溶込がある場合には、助走板と試験板の溶接方法の違いは亀裂停止に必要な  $K_{ca}$  値に対して顕著な影響は及ぼさなかった。

- (c) 板厚 60mm の TMCP 材を用いた中型棚板構造モデル試験において、負荷応力  $257\text{N}/\text{mm}^2$  の条件で、デッキ溶込がある場合には、試験板の  $K_{ca}$  値が  $5,000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$  以上であれば、亀裂を停止できることが確認された。超大型棚板構造モデル試験においても、同一の結果が得られた。
- (d) 板厚が 60mm と 75mm の TMCP 材を用いた超広幅混成 ESSO 試験において、負荷応力  $257\text{N}/\text{mm}^2$  の条件で、試験板の  $K_{ca}$  値が  $6,000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$  以上であれば、亀裂を停止できることが確認された。

### (3) 脆性亀裂伝播・停止挙動の数値解析

超広幅試験の妥当性を確認するために、試験片形状と実際の速度履歴を考慮した二次元弾性動的亀裂伝播 FEM 解析を実施し、タブ板およびピン周りの板厚の厚い部分での応力波反射による荷重低下の影響を評価した。結果、タブ板およびピン周りの厚い板が亀裂先端の動的応力拡大係数  $K_d$  に与える影響は比較的小さいことが分かった。

また、溶接継手部の脆性亀裂伝播挙動を把握するため、吉成、栗飯原の開発したモデルにより数値解析的な検討を行い、下記の結果を得た。

- (a) 溶接継手部の脆性亀裂伝播挙動に及ぼす残留応力、靱性、負荷応力の影響について、日本造船研究協会 SR147 研究部会の実験結果を詳細に説明できる。
- (b) 溶接継手部脆性亀裂伝播挙動に及ぼす入熱と母材集合組織の影響について、入熱の影響は大きく、一方、集合組織の影響は少ない。
- (c) バットシフト継手における脆性亀裂の伝播挙動について検討を加え、バットシフト継手において、伝播亀裂を必ず母材に突入させるためには、継手間隔はおよそ 300mm 以上とおけば十分である。

### (4) 極厚鋼板を用いた超大型コンテナ船の脆性亀裂アレスト設計

大型コンテナ船の脆性亀裂アレスト設計を作成するにあたり、その方法と条件・課題について検討を行った。本研究では、特に、鋼材に高い脆性亀裂伝播停止靱性値を持たせる方法（材料アレスト）と、それと構造的な不連続により停止させる方法（構造アレスト）との組み合わせによる方法について検討を行い、下記についての技術指針を作成した。

- (a) ハッチサイドコーミング、強力甲板、舷側厚板、縦通隔壁最上板板厚 50mm を超える場合を対象とする。
- (b) 作用応力は、脆性亀裂停止箇所  $257\text{N}/\text{mm}^2$  とする。
- (c) ハッチサイドコーミングで発生した脆性亀裂が強力甲板でアレストする場合、及び強力甲板で発生した脆性亀裂がハッチサイドコーミングでアレストする場合の必要脆性亀裂伝播停止靱性値  $K_{ca}$  を規定する。