

コンテナ船の大型化と溶接の取り組み

ジャパン マリンユナイテッド 株式会社 豊田昌信、木治 昇
株式会社 IHI 猪瀬幸太郎

コンテナ船は、船体内部にコンテナ貨物を積載するために、上甲板に大きな開口部があり、スペースが限定されている。コンテナ船の大型化に伴い、この上甲板周りに使用する極厚・高張力鋼を開発し続けることで、大洋を航行する中で受ける荷重に耐える構造とするとともに、コンテナ船の大型化や船体構造重量の軽量化に取り組んできた。本報では、上甲板周りの主要構造部材であるハッチサイドコーミング (hatch side coaming) に用いられる鋼材に加え、極厚・高張力鋼を使用する場合に考慮すべきアレスト性能について紹介する。

1. はじめに

コンテナ船とは、海上輸送用の海上コンテナを運ぶ専用船であり、工業製品など一般貨物輸送に用いるドライ・コンテナ、生鮮食品など冷凍・冷蔵貨物を対象とした冷凍コンテナなど貨物に応じたコンテナを用いて、多種多様な貨物を運搬している。海上コンテナの寸法は標準化されており、長さ20フィート、40フィート、45フィートのコンテナを用いることが一般的である。コンテナ船の大きさは、積載可能な20フィート (約6m) コンテナの数で表現され、その単位はTEU (twenty-foot equivalent unit) である。

コンテナ船が登場した初期の1950～60年台頃のコンテナ船の大きさは、1,000TEUにも満たない小さなものであったが、1990年頃に4,000TEU、2000年頃に8,000TEUとなり (図1)、そのサイズが急速に大型化してきた。近年では10,000TEUを超え、2013年に18,000TEUの超大型コンテナ船が就航している。

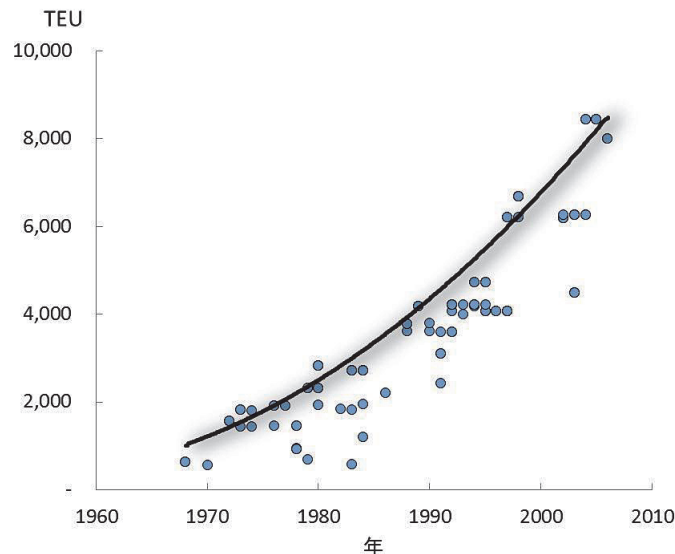


図1 コンテナ船の大型化

2. 超極厚高張力鋼板の使用

コンテナ船はその船体内部の貨物倉と甲板上的ハッチカバーにコンテナを積載しており、貨物倉内にコンテナを積載するために上甲板に大きな開口を有する特徴がある（図2、3）。さらに、海上を航行する際には、船体全体を曲げるような波の荷重に対しての強度（縦曲げ強度）を確保するためにハッチサイドコーミングおよび上甲板は重要部材であり、大型コンテナ船では、上甲板やハッチサイドコーミングに高強度極厚鋼板が使用されている（図4）。

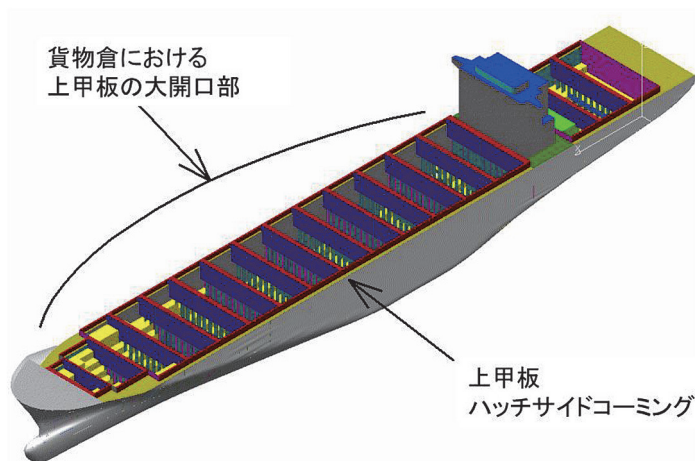


図2 大型コンテナ船の上甲板 開口部

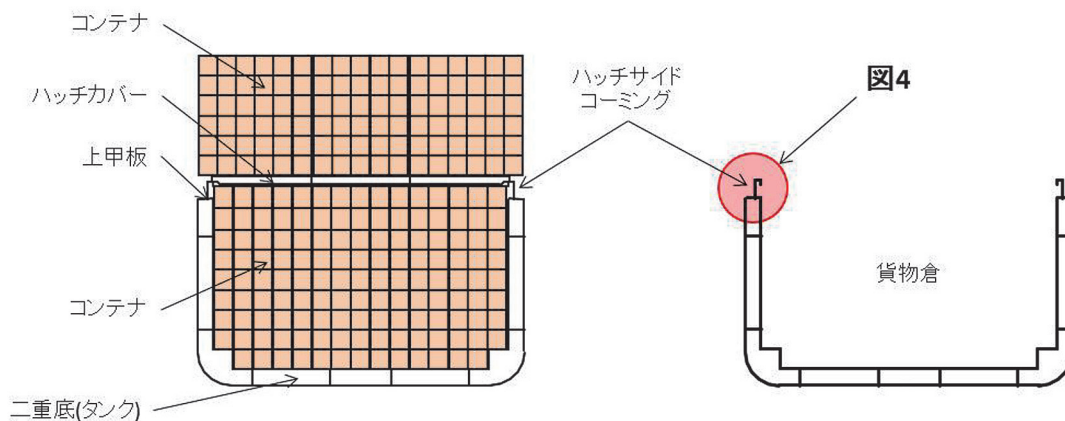


図3 大型コンテナ船の中央横断面図

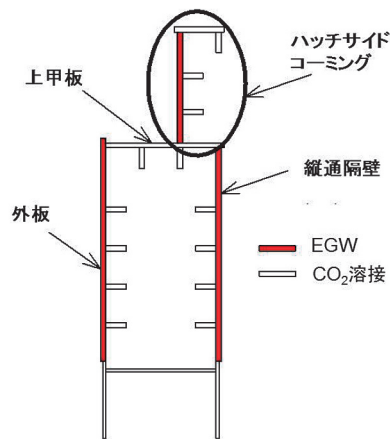


図4 コンテナ船のハッチサイドコーミング断面図と溶接方法

コンテナ船の大型化に伴いハッチサイドコーミングに用いられる鋼材も変化してきている。1980年代頃まではYP235 (MPa) 鋼やYP315鋼が用いられていたが、製鋼技術の進歩も重なり、急速に高張力化・厚板化が進み (図5)、YP355鋼、YP390鋼となった。さらに近年になって船体構造用のYP460鋼が開発され¹⁾、実船に使用されている。YP460鋼はYP390鋼に比べ、縦曲げ強度部材の設計応力が1割程度上がり、大型コンテナ船では数百トン程度の鋼材重量の削減効果があると言われている。

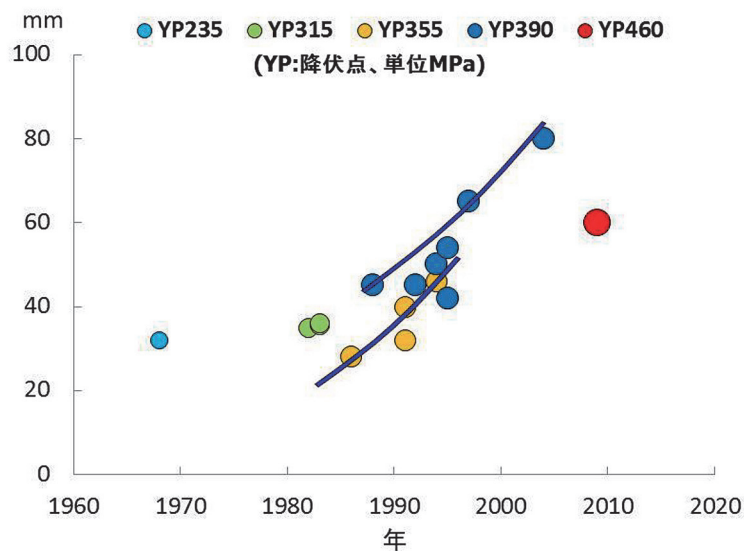
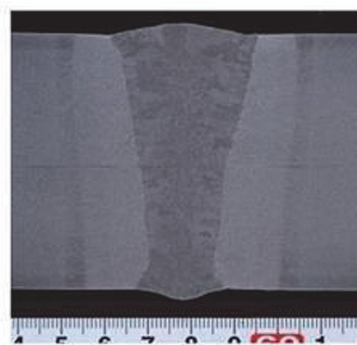


図5 ハッチサイドコーミング鋼板の強度および板厚の増加

ハッチサイドコーミングは船体の長手方向に連続しているため、厚板を突合溶接にて接合することになる。このような極厚鋼板の突合溶接では、建造期間の短縮のため、1パスによる大入熱溶接（EGW：エレクトロガス溶接）を適用している。大入熱溶接は50～60mm程度の板厚となるハッチサイドコーミングの鉛直版を対象に、立向き上進溶接を行うもので、その入熱量は30000～40000J/mmにもなる。図6は、大入熱溶接施工状況と厚板突合溶接継手の断面マクロ写真の例である。



施工状況



断面マクロ

図6 ハッチサイドコーミング大入熱溶接（EGW：エレクトロガス溶接）と断面マクロ組織

一方で、軽量化のために設計応力を高めることは、溶接継手部に内在する微小な初期欠陥に作用する応力を高めることでもあり、疲労強度やぜい性亀裂に対する強度レベルを向上させることが必要となる。溶接構造物でのぜい性亀裂の発生は、大規模な事故につながる可能性があるために、十分に注意して溶接設計・施工を行っている。特にハッチサイドコーミングは、船体中央断面の最上部に位置し、強度上もっとも重要な部材の一つであるため、溶接部の初期欠陥から波浪変動荷重により進展した疲労亀裂によりぜい性亀裂が発生しないことはもちろん、万一発生した場合にぜい性亀裂の伝播を停止させるアレスト性能が求められている²⁾。ぜい性亀裂の発生防止には、鋼材と溶接部に、初期欠陥寸法・作用応力などに対しての十分な破壊じん性値を持たせることが大切であり、破壊力学に基づく設計、施工管理が行われている¹⁾。

ジャパン マリンユナイテッド（株）（JMU）（当時、アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド（株）（IHIMU））では、YP460鋼とアレスト性能を確保する技術¹⁾を適用した大型コンテナ船を2010年に完成させているが、一般財団法人 日本海事協会（NK）からYP460鋼の使用に関する「大型コンテナ船のYP47鋼の使用に関するガイドライン（2008年10月）」⁸⁾と、アレスト設計に関しては、「脆性亀裂アレスト設計指針（2009年9月）」⁴⁾が発行されている。また、船体構造に関わる規則として、2013年1月に、国際船級協会連合（International Association of Classification Societies、IACS）に

において、YP47鋼適用の要件（UR-W31）⁵⁾ とアレスト設計の適用に係る極厚鋼板の要件(UR-S33)⁶⁾ が主要船級協会間の統一規則として採択され、NK規則⁷⁾ では2014年1月1日以降に建造契約が行われる船舶に適用されることとなった。

3. アレスト設計

大型コンテナ船では前節にて述べたぜい性亀裂の発生防止に加えて、万一、ぜい性亀裂が発生した場合を考え、バックアップ機能としてのアレスト性能が求められている。特に作用応力の高いYP460鋼適用船では、必須の要件となっている。極めて高い速度で伝播してくるぜい性亀裂を停止させるためには、ぜい性亀裂停止性能が特に優れた鋼板を用いる「材料アレスト」や、溶接構造体の特長であるT字継手部でのぜい性亀裂停止性能を活かした「構造アレスト」の2つの手法がある。

ぜい性亀裂の発生・伝播については、その発生個所と伝播する経路により、ハッチサイドコーミングから発生・上甲板に伝播するシナリオ1と、逆に上甲板にて発生・ハッチサイドコーミングに伝播するシナリオ2が考えられている³⁾ (図7)。両シナリオともに、非破壊検査での許容欠陥寸法より小さい初期欠陥が突合せ継手部に内在していることを仮定し、波との遭遇による縦曲げ変動応力により少しずつ進展することでぜい性亀裂が発生、突合せ継手部を伝播することを想定している。

IACS UR-S33では、このアレスト性能の優れた鋼板を用いたアレスト設計の例が示されており、両シナリオに加え、すみ肉溶接部やハッチサイドコーミングに取り付く艀装品金物等を取り付ける溶接部が起点となるシナリオに対する配慮も求められている。

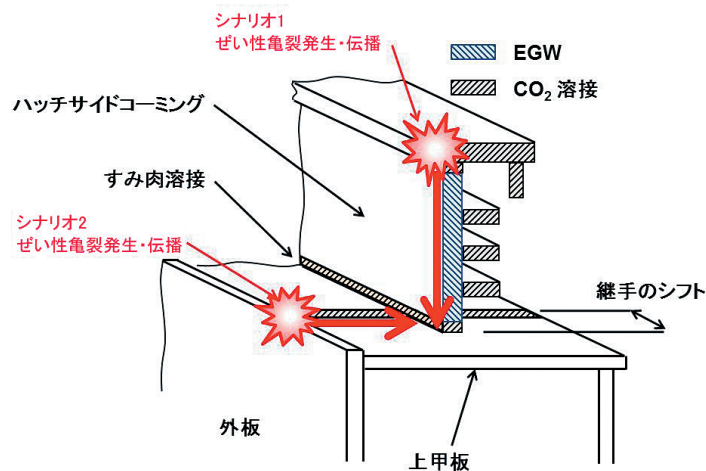


図7 ぜい性亀裂の発生シナリオ

(1) 材料アレスト設計

シナリオ1

材料アレスト設計は、ぜい性亀裂の伝播に対する抵抗力の高い材料を亀裂の伝播経路に配置してぜい性亀裂を停止させるものである。抵抗力の大きさは伝播停止性能の指標であるぜい性

亀裂伝播停止じん性Kca値で表され、ハッチサイドコーミングで発生したぜい性亀裂を上甲板で停止させる場合には、上甲板にKca値が $6,000\text{N}/\text{mm}^{15}$ を超える、特に高性能な鋼板が必要とされる。

シナリオ2

上甲板の突合せ継手部で発生、伝播してきたぜい性亀裂をハッチサイドコーミングで停止させるシナリオ2では、シナリオ1に比べ、より高いぜい性亀裂停止性能が必要となることが知られている⁸⁾。そのため、後述するハッチサイドコーミング足元の溶接による構造不連続を利用する構造アレスト設計と組み合わせることで、必要Kca値が大きくなり過ぎない工夫がされている⁹⁾。

(2) 構造アレスト設計

シナリオ1

構造アレスト設計は、**図8**に示すように、ハッチサイドコーミングと上甲板のT字継手部に溶着しない部分が存在することを利用してぜい性亀裂を停止させる手法である。JMU（当時、IHIMU）が開発したものであり、高Kcaの高性能鋼板が不要である。これは、溶着しない部分によりぜい性亀裂の伝播経路が制限され、亀裂伝播の駆動力を開放するためと考えられ、実験により効果が検証されている^{10),11)}。**図9**は、超大型アレスト試験に用いた試験体を示しており、大型コンテナ船に用いられるハッチサイドコーミング構造を模擬している。試験体の上下中央部にT字継手を設けており、試験では、T字継手部が -10°C となるように冷却し、設計応力が作用するように左右方向に引張荷重を与える。この状態で上端に衝撃荷重を与え、ぜい性亀裂を発生・伝播させ、T字継手部での停止性能を評価している。**図10**は、ハッチサイドコーミングの上部にて発生したぜい性亀裂が伝播し、T字継手の溶着しない部分にて停止した結果を示している。

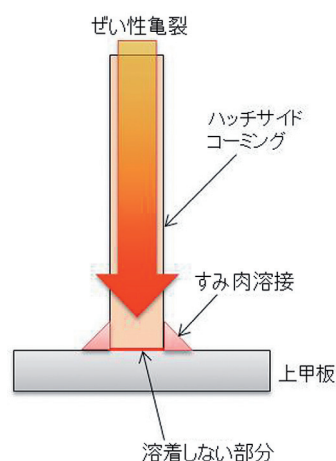
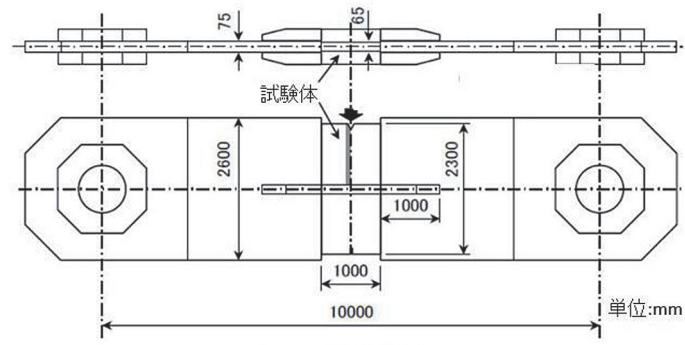
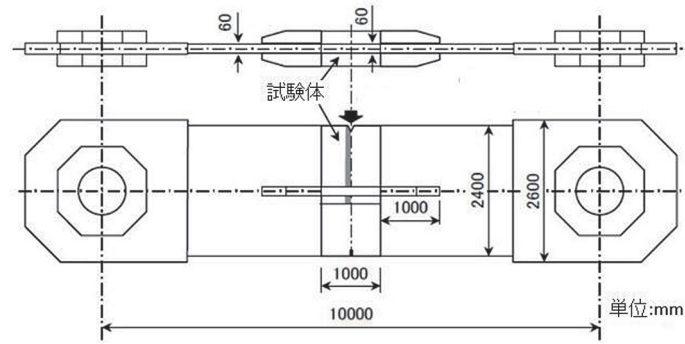


図8 構造アレスト設計によるぜい性亀裂伝播停止



(a) シナリオ1試験



(a) シナリオ2試験

図9 超大型アレスト試験

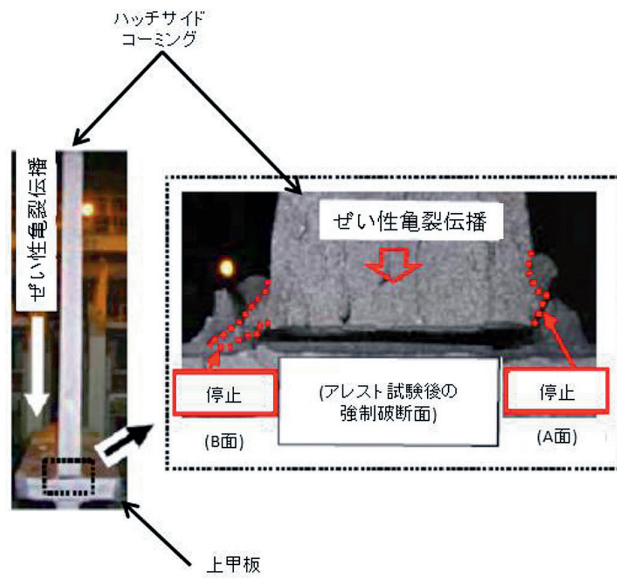


図10 シナリオ1 超大型構造アレスト試験結果

シナリオ 2

すみ肉溶接部に存在する溶着しない部分にてぜい性亀裂の伝達経路が制限されることに加え、溶接金属もしくはハッチサイドコーミングに適正なじん性を持たせることで、伝播してきたぜい性亀裂を停止させる手法である。図11に示すように、超大型試験にてこの効果が確認されている。すみ肉溶接には、安全性を向上させるために低温用鋼に用いられている低温じん性が良好な溶接材料を用いており、上甲板で発生しハッチサイドコーミングに向かうぜい性亀裂がすみ肉溶接の溶接金属部で停止している¹¹⁾。

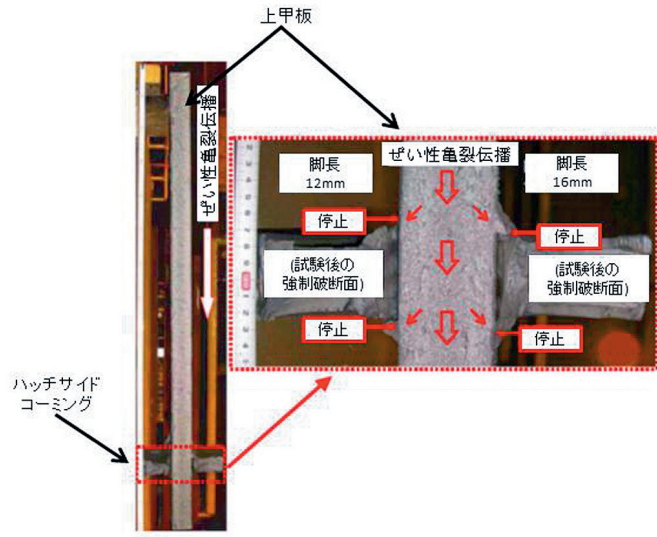


図11 シナリオ 2 超大型構造アレスト試験結果

4. まとめ

大型コンテナ船では、その船体構造の特徴から上甲板やハッチサイドコーミングに高強度の極厚板が使用されており、ハッチサイドコーミングでは超極厚大入熱YP460鋼板が実船に供されている。船舶のような大型鋼構造物では、大規模な破壊となりかねないぜい性亀裂の発生自体を防止することが何よりも重要である。そして、万一発生した場合に備えて、停止させる機能を持たせる2重の安全性を持たせる設計思想となっている。

表1および表2は、ぜい性亀裂の発生と伝播停止に至るシナリオと亀裂を停止させる手法をまとめたもので、JMU（当時、IHIMU）が開発した構造アレスト設計は、溶接構造の持つT字継手の溶着しない部分でのぜい性亀裂伝播の駆動力解放に着目し、通常の鋼板や、低温じん性の適正な溶接材料の使用により、ぜい性亀裂を停止させる合理的な手法といえる。

表1 ぜい性亀裂発生・伝播シナリオ

	シナリオ 1	シナリオ 2
発生部材 (突合せ溶接)	ハッチサイド コーミング	上甲板
停止部材	上甲板	ハッチサイド コーミング

表2 アレスト設計

アレスト設計	アレスト手法	ハッチコーミングの構造
材料 アレスト	高 Kca 材	高 Kca 材+T 字継手
構造 アレスト	T 字継手	T 字継手

参考文献

- 1) M.Toyoda, N.Kiji, Y.Nakajima, T.Okada, Y.Nakanishi, K.Inose : Safety of Mega Container Ship Focusing on Brittle Crack Initiation and Arrest Behavior of Heavy Thickness Plate, Proceedings of OMAE2008 (2008年6月).
- 2) 角洋一、北村欧、豊田昌信、松本俊之：極厚鋼板を採用した大型コンテナ船の構造安全対策について、日本船舶海洋工学会講演会論文集 (2010年6月)
- 3) 一般財団法人 日本海事協会: 大型コンテナ船のYP47鋼の使用に関するガイドライン (2008年10月)
- 4) 一般財団法人 日本海事協会: 脆性亀裂アレスト設計指針 (2009年9月)
- 5) International Association of Classification Societies: UR W31 Application of YP47 Steel Plate (2013年1月)
- 6) International Association of Classification Societies: UR S33 Requirement for Use of Extremely Thick Steel Plates (2013年1月)
- 7) 一般財団法人 日本海事協会：鋼船規則 (2014年、発行予定)
- 8) 日本造船研究協会169委員会：船体構造の破壊管理制御設計に関する研究－報告書－ (1979)
- 9) Akifumi Kubo, Hiroshi Yajima, Shuji Aihara, Hitoshi Yoshinari, Kazuhiro Hirota, Masanobu Toyoda, Takaaki Kiyosue, Takehiro Inoue, Tsunehisa Handa, Tomoya Kawabata, Tokutaka Tani, Yoshiya Yamaguchi : Experimental study on brittle crack propagation behavior with large scale structural component model tests – Brittle crack arrest design for large container ships – 5 –, ISOPE2012 (2012年6月)
- 10) 半田恒久、鈴木伸一、豊田昌信、與倉隆人、木治昇、中西保正：厚板T継手における脆性き裂伝播停止挙動、日本船舶海洋工学会講演会論文集 (2006年11月)
- 11) Tsunehisa Handa, Takahiro Sakimoto, Masanobu Toyoda, Noboru Kiji, Takashi Takeda, Koutarou Inose, Satoshi Igi, Kenji Ooi: Long Brittle Crack Arrest Behavior in Fillet Tee Joint of Large Container Ship, ISOPE2013 (2013年7月)

<略歴>

豊田昌信	1996年	九州大学 大学院 工学研究科 造船学専攻 修士課程修了
	2010年	東京大学 大学院 工学系研究科 博士（工学）取得
	1996年	石川島播磨重工業(株)（現、(株)IHI）入社 船舶海洋事業本部 配属
	2013年	ジャパンマリユナイテッド(株) 商船事業本部 基本設計部 構造グループ 主幹 現在に至る

木治昇	1994年	大阪府立大学 大学院 工学研究科 金属工学専攻 修士課程修了
	1994年	石川島播磨重工業(株)（現、(株)IHI）入社 技術開発本部 配属
	2014年	ジャパンマリユナイテッド(株) 商船事業本部 呉事業所 造船部 計画グループ 工作技術チーム チーム長 現在に至る

猪瀬幸太郎	1993年	金沢大学 大学院 機械システム工学専攻 修士課程修了
	2008年	大阪大学 大学院 工学研究科より博士（工学）取得
	1993年	石川島播磨重工業(株)（現、(株)IHI）入社 橋梁事業部配属
	2001年	(株)IHI 技術開発本部 生産技術センター 溶接技術部 主任研究員 現在に至る