

解説

受賞技術 - 36

構造不連続を活用した大型コンテナ船向け脆性き裂伝播停止技術

Brittle Crack Arrest Technology for Large Container Ships Utilizing Structural Discontinuity

JFEスチール(株) スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 **半田恒久**
Tsunehisa Handa

ジャパン マリンユナイテッド(株) 商船・海洋・エンジニアリング事業本部 生産センター 生産イノベーショングループ グループ長 **木治 昇**
Noboru Kiji

JFEスチール(株) スチール研究所 接合・強度研究部 部長 **伊木 聡**
Satoshi Igi

(株)IHI 技術開発本部 技術基盤センター 主幹研究員 **猪瀬幸太郎**
Koutarou Inose

日本シップヤード(株) 営業本部 商品企画部 新技術開発グループ グループ長 **豊田昌信**
Masanobu Toyoda

日本シップヤード(株) 設計本部 基本設計部 構造グループ 専任課長 **武田 尚**
Takashi Takeda

はじめに

近年、中国・アジアの経済発展に伴い、世界の物流量が急増している。一方で、CO₂排出規制、輸送効率改善へのニーズも増している。コンテナ船の大型化は物流量増加への対応のみならず、CO₂排出量抑制にも有効であることから、コンテナ船には大型化が求められてきた。近年のコンテナ船の大型化は顕著であり、2005年に10,000 TEU (Twenty foot equivalent unit : 20 フィートコンテナの積載可能数) クラスの船が登場して以降急速に大型化が進み、最近では20,000 TEUクラスを超える超大型船が建造されている (図1)^{1,2)}。

コンテナ船は貨物倉にコンテナを積載するため、アッパーデッキに大きな開口を有する船体構造が特徴である (図2)。海上を航行する際には、船体を曲げるような波の荷重に対しての強度 (縦曲げ強度) を確保する必要があるため、アッパーデッキやハッチサイドコーミングに板厚50 mmを超える極厚の高強度厚鋼板が使用されている。船体の大型化にともない、ハッチサイドコーミングに使用される鋼板の強度グレードはYP355N/mm²級鋼からYP460N/mm²級鋼へ推移し、さらに板厚も従来の50~60mmから80mmを超える極厚鋼板が使用されるようになった。このような極厚高強度鋼板の適用により船体の軽量化が可能となった。例えば、YP390N/mm²級鋼

の代わりにYP460N/mm²級鋼を適用することにより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トータル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³⁾。

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、疲労強度や脆性き裂に対する強度レベルを向上させることが必要となる。

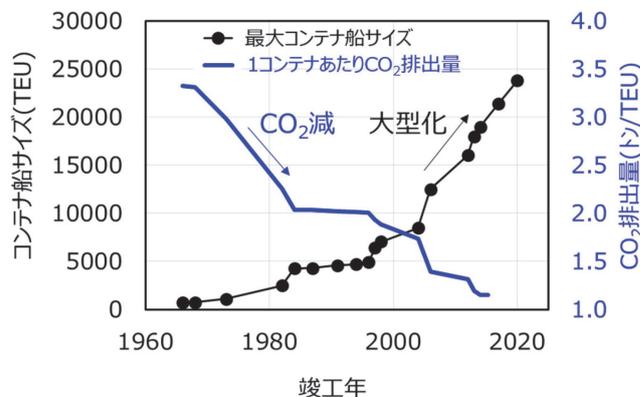


図1 コンテナ船の最大積載量と1コンテナあたりのCO₂排出量の変化^{1,2)} (Online version in color.)

*令和3年度全国発明表彰 日本経済団体連合会会長賞受賞

2 脆性き裂に対する安全性

溶接構造物での脆性き裂の発生は、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・施工を行う必要がある。特に大型コンテナ船の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き裂により脆性き裂が発生しないことはもちろん、万一発生した場合に脆性き裂の伝播を停止させるアレスト性能が求められている。脆性き裂の発生防止には、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靭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⁴⁾。

3 脆性き裂アレスト設計

大型コンテナ船に用いられる板厚50 mmを超える極厚鋼板では、板厚効果による破壊靭性の低下に加え、溶接入熱の増大が溶接部破壊靭性の低下に拍車をかける傾向にある。極厚鋼板の溶接継手で、溶接部から発生した脆性き裂が溶接部に沿って直進伝播することが実験的にも示されており⁵⁾、極厚鋼板を船体構造へ適用する上での課題となってきた。

このため、大型コンテナ船では脆性き裂の発生防止に加えて、万一、脆性き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YP460N/mm²級鋼適用船では必須の要件となっている⁶⁾。

大型コンテナ船における脆性き裂の発生・伝播については、その発生箇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しアップーデッキに伝播するシナリオ1と、逆にアップーデッキにて発生し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(図3)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わ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脆性き裂が発生、突合わせ継手部を伝播することを想定している。

極めて高い速度で伝播してくる脆性き裂を停止させるため、バットシフトなどの構造対策とともに、アレスト靭性値

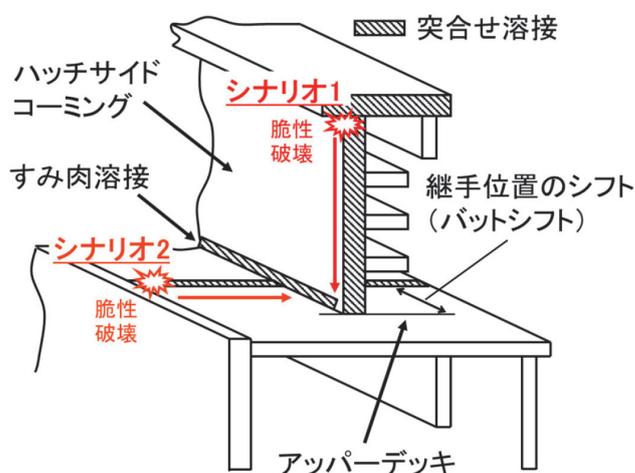


図3 想定される脆性き裂の伝播 (Online version in color.)

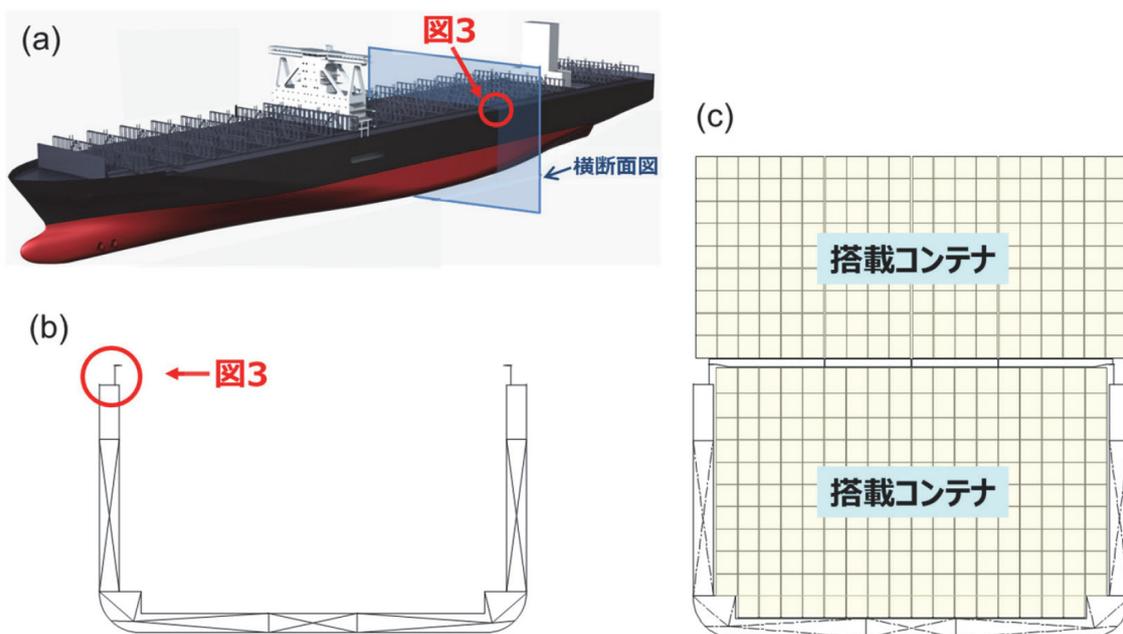


図2 大型コンテナ船の構造 (a) 全体図 (b) 断面図 (c) コンテナ搭載時の断面図 (Online version in color.)

(Kca) が $6,000 \sim 8,000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 以上の脆性き裂伝播停止性能(アレスト性能)に優れた鋼板のアップーデッキおよびハッチサイドコーミングへの使用(図4 (a)) など、脆性き裂が万一発生した場合に伝播を停止させる設計の適用が、国際船級協会連合により義務づけられている^{6,8)}。

4 構造アレスト設計

極厚鋼板を使用するハッチサイドコーミングとアップーデッキからなるT継手の溶接は、開先を取らないすみ肉溶接、または、部分溶込み溶接で施工される。構造アレスト設計(図4 (b))は、図5および図6に示すとおり、ハッチサイド

コーミングとアップーデッキのT継手部に非溶着部が存在することを利用して脆性き裂を停止させる手法である。脆性き裂が停止するのは、非溶着部により脆性き裂の伝播経路が物理的に制限され、き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⁹⁾。図5は非溶着幅によるアレスト性能の違いを示しており、非溶着部の無い完全溶込み溶接では脆化板を伝播してきた脆性き裂が試験鋼板を貫通しているのに対し、非溶着幅の広がる部分溶込み溶接では、脆性き裂は試験鋼板に突入後、停止している。さらに、非溶着幅が最も広い開先無しすみ肉溶接では、脆性き裂は試験鋼板に突入することなく停止していることがわかる。また、大型コンテナ船のハッチサイドコーミングを模擬した実

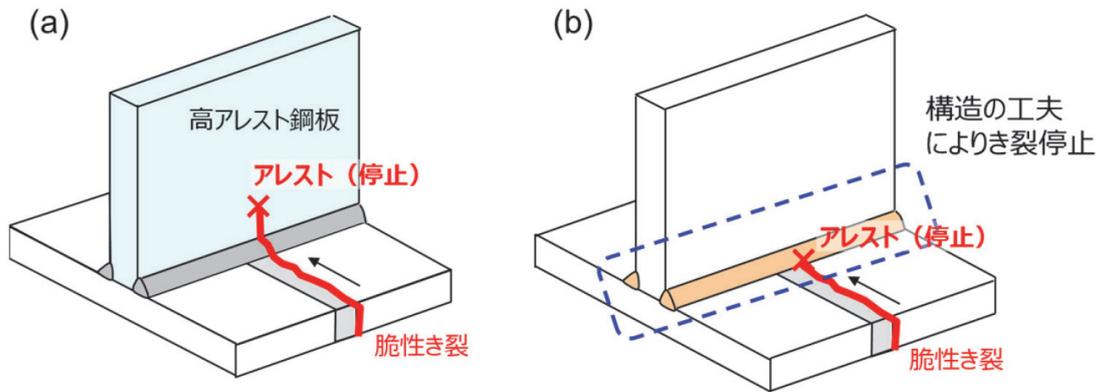
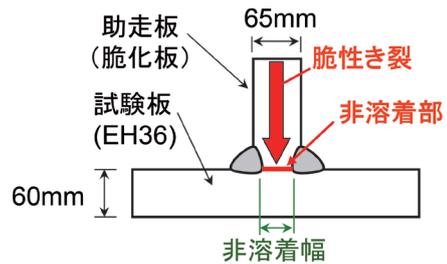


図4 脆性き裂アレスト設計の概念図 (a) 材料アレスト設計 (b) 構造アレスト設計 (Online version in color.)

試験条件

- ・試験応力: 235 N/mm^2
- ・試験温度: -10°C
- ・助走板高さ(突入き裂長さ): 150mm



T継手構造 (非溶着幅)		
完全溶込み (0mm)	部分溶込み (33mm)	すみ肉 (65mm)
伝播	停止	停止

図5 T継手部の脆性き裂伝播停止挙動に及ぼす非溶着幅の影響 (Online version in color.)

物大の超大型試験でも、この非溶着部による脆性き裂伝播停止効果が確認されている(図7, 図8, 図9)¹⁰⁾。なお、これらの試験で用いられた脆性き裂が突入する試験鋼板は、母材での高いアレスト特性を保証していない一般的な船体用鋼板である。このことから、溶接部の非溶着幅やすみ肉溶接の脚長を適切にコントロールすることにより、一般に用いられている船体用鋼板でも脆性き裂を停止できると言える。

ここに述べた、船体上部構造における溶接部ディテールの厳格な制御により脆性き裂の伝播を停止させる技術を「構造アレスト」と称する。この技術に関し、特に重要なのは、非溶

着部により伝播経路が制限された脆性き裂を停止させるために必要な溶接金属部の特性である。たとえば、図7の例では、低温靱性が極めて良好となる低温用鋼用溶接材料をすみ肉溶接に適用することにより、伝播した脆性き裂をすみ肉溶接金属で停止させることができています。

以降では、脆性き裂を停止させるに必要なすみ肉溶接金属部の靱性を大型試験により調査した結果について紹介する。アッパーデッキの突合せ継手部で発生、伝播してきた脆性き裂をハッチサイドコーミングで停止させるシナリオ2は、シナリオ1に比べ、より高い脆性き裂停止性能が必要となるこ

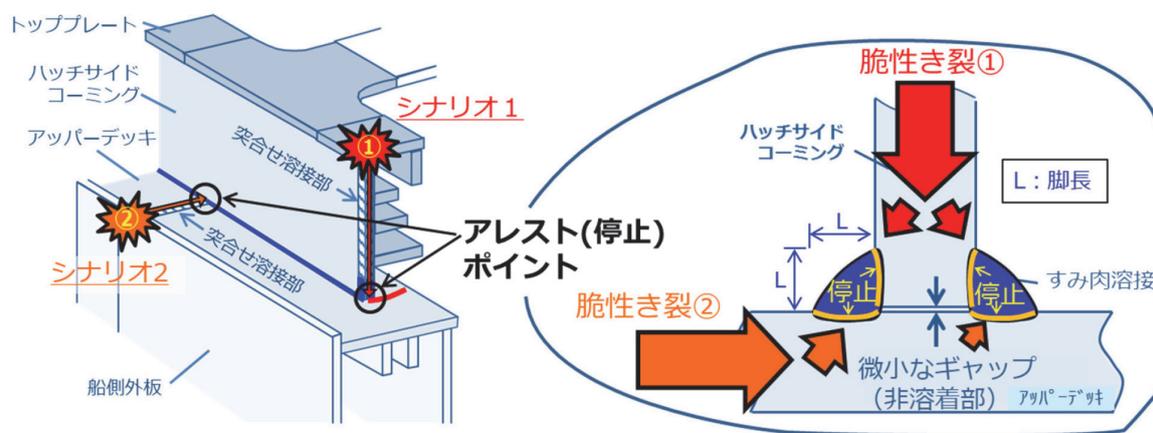


図6 構造アレスト設計による脆性き裂停止 (Online version in color.)

試験体	シナリオ1	シナリオ2
板厚[≒非溶着幅]	60mm	55mm
脚長	12mm	12mm 16mm
溶接ワイヤー	JIS Z 3313 T 49 4 T1-1 C A-U	JIS Z 3313 T 55 4 T1-1 C A-N3
試験温度	-10 °C	
作用応力	283 N/mm ²	
試験結果	アレスト(停止) [図8]	アレスト(停止) [図9]

図7 大型構造モデル試験結果 (Online version in color.)

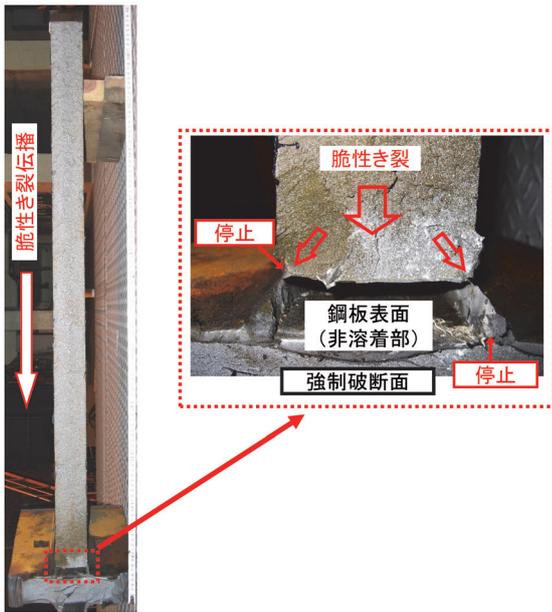


図8 シナリオ1大型構造モデル試験体破面 (Online version in color.)

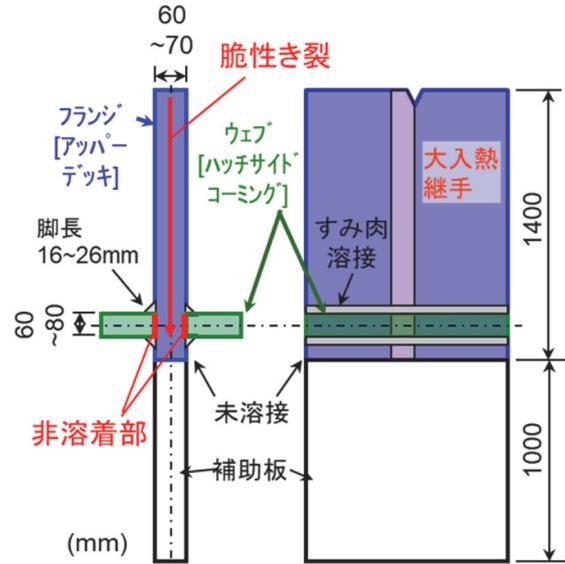


図10 大型構造モデル試験体 (Online version in color.)

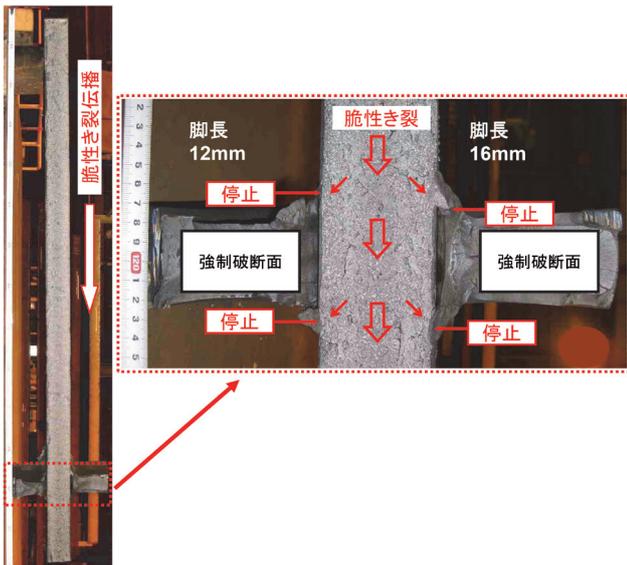


図9 シナリオ2大型構造モデル試験体破面 (Online version in color.)

とが知られている¹¹⁾。また、極厚鋼板の場合でも、シナリオ2はシナリオ1に比べより高い脆性き裂停止性能が必要となる¹²⁾。これらのことから、シナリオ2のアレスト性能の確保が重要視されている。図11¹³⁾および図12¹⁴⁾は、シナリオ2を対象として、極厚溶接継手に直交するT継手部で脆性き裂を停止させることを目的として、溶接部を直進伝播する脆性き裂がハッチサイドコーミングとアッパーデッキのT継手部に突入することを想定した大型モデル試験(図10)により、T継手のすみ肉溶接金属部における脆性き裂の伝播、停止挙動を調査した結果であ

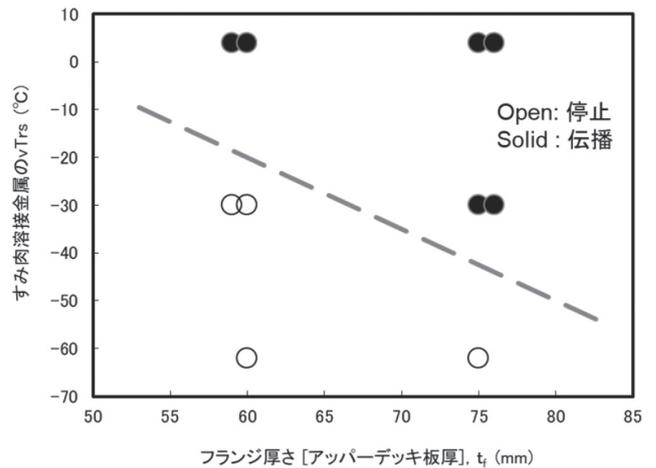


図11 すみ肉溶接金属のvTrsおよび鋼板厚さと長大脆性き裂伝播/停止の関係 [脚長: 16mm, 応力: 257N/mm², 温度: -10°C]

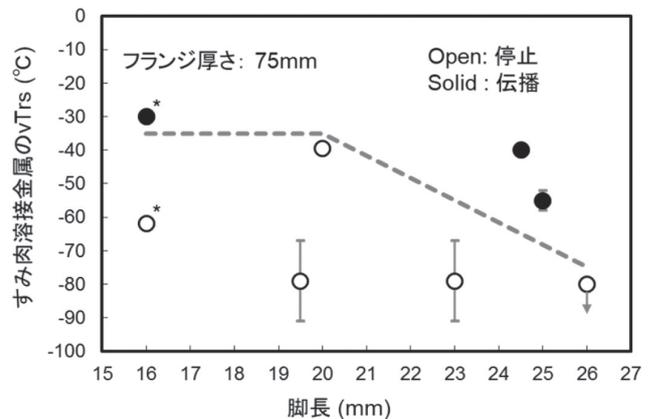


図12 すみ肉溶接金属のvTrsおよび脚長と長大脆性き裂伝播/停止の関係 [応力: 243N/mm² (*: 257N/mm²), 温度: -10°C]

る。開先の無いすみ肉溶接構造として、すみ肉溶接金属の靱性レベル、鋼板板厚およびすみ肉脚長を適切に組合せることで、長さ1m以上の長大脆性き裂をすみ肉溶接金属部でアレストさせることが可能であることが分かる。

「構造アレスト」は、船体溶接構造の持つT継手非溶着部での脆性き裂伝播の駆動力解放に着目し、通常の鋼板と適正な低温靱性を有する溶接材料を用いて脆性き裂を停止させる合理的な設計手法である。

5 まとめ

コンテナ船の大型化に伴い、その上部構造には極厚の高強度鋼板が用いられる。このような鋼構造物の安全性を確保するためには脆性き裂の発生防止ならびに万一発生した場合に備えて、き裂を停止させる機能が必要となる。

「構造アレスト」は脆性き裂の進展を防止するのに極めて合理的な方法である。本技術は、14,000TEU大型コンテナ船をはじめ、これまで20隻以上に適用されている。今後、世界最大級24,000TEUクラスの超大型コンテナ船へも適用される予定である。本技術により、ハッチサイドコーミングに溶接性に特化した高強度鋼板の適用が可能となり、高能率溶接により建造コストの削減に大きく貢献している。また、従来よりも厚い高強度極厚鋼板の適用が可能となり、船体の大型化による貨物の積載量の増加、および船全体の軽量化を通じた燃費改善にも貢献している。

参考文献

- 1) 竹内佳子, 長谷和邦, 三田尾真司, 村上喜明, 半田恒久, 植田圭治: ふえらむ, 25 (2020) 5, 289.
- 2) 張智鑫: 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 修士論文, (2020), 41.
- 3) 豊田昌信, 半田恒久: 溶接学会誌, 81 (2012) 6, 485.

- 4) M. Toyoda, N. Kiji, Y. Nakajima, T. Okada, Y. Nakanishi and K. Inose: ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (2008), OMAE2008-57375.
- 5) 山口欣弥, 北田博重, 矢島浩: KANRIN, (2005) 3, 70.
- 6) 国際船級協会 (IACS) 統一規則 UR S33 “Requirements for Use of Extremely Thick Steel Plates in Container Ships” (2013年1月制定, 2015年9月改訂, 2019年12月再改訂).
- 7) 日本海事協会: 脆性亀裂アレスト設計指針, (2009), 2.
- 8) 国際船級協会 (IACS) 統一規則 UR W31 “YP47 Steels and Brittle Crack Arrest Steels” (2013年1月制定, 2015年9月改訂, 2019年12月再改訂).
- 9) 木治昇, 中西保正, 豊田昌信, 與倉隆人, 半田恒久, 鈴木伸一: 溶接学会全国大会講演概要, (2006), 79, 164.
- 10) 半田恒久, 伊木聡, 木治昇, 豊田昌信, 武田尚, 猪瀬幸太郎, 遠藤茂, 潮海弘資: 日本船舶海洋工学会講演会論文集, (2011) 13, 61.
- 11) 日本造船研究協会第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), 118.
- 12) A. Kubo, H. Yajima, S. Aihara, H. Yoshinari, K. Hirota, M. Toyoda, T. Kiyosue, T. Inoue, T. Handa, T. Kawabata, T. Tani and Y. Yamaguchi: Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, (2012), 36.
- 13) 半田恒久, 豊田昌信, 木治昇, 猪瀬幸太郎, 渡辺盛太, 潮海弘資, 伊木聡, 大井健次: 日本船舶海洋工学会講演会論文集, (2014) 19, 459.
- 14) 半田恒久, 豊田昌信, 木治昇, 池田倫正: 日本船舶海洋工学会講演会論文集, (2018) 26, 291.

(2021年12月14日受付)