

# ハイアレスト鋼：高アレスト鋼による船舶の安全性向上

## Improvement in Safety of Ships by Use of Steel with High Crack Arrestability (HIAREST Steel)

石川 忠<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 井上 健裕<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 萩原 行人<sup>\*<sup>(3)</sup></sup> 今井 嗣 郎<sup>\*<sup>(4)</sup></sup>  
 Tadashi ISHIKAWA Takehiro INOUE Yukito HAGIWARA Shiro IMAI

### 抄 録

船体破壊に起因する人命損失や海洋汚染事故を最小限に抑制できる安全性、及び信頼性のより高い船舶の実現が要望されている。そこで、極めて優れたアレスト性能を有するHIAREST鋼を船体構造へ適用した場合の安全性向上効果を検討した。その結果、衝突や座礁等の非常事態下において、鋼板が塑性損傷を受けるために従来鋼板では万一発生した脆性き裂の伝播を阻止できない状況においても、HIAREST鋼を船体の重要部材に適用することにより、万一発生した脆性き裂の拡大を阻止することが期待できることを大型破壊試験等の実験により検証した。また、日本海事協会より制定された高アレスト鋼板適用船の安全性向上を示すNotation制度についても概説した。

### Abstract

Ships are required to have safety and reliability high enough to minimize the loss of lives and the occurrence of marine pollution accidents resulting from their hull fractures. A plate steel with extremely good crack arrestability, designated HIAREST steel, was investigated for its effectiveness in enhancing the safety of ship hull structures. In such emergency situations that a ship collides with another or runs aground, conventional steel plates are plastically damaged and are unable to arrest the propagation of any brittle cracks that may occur. The ability of the HIAREST steel to arrest the extension of brittle cracks when applied to the important hull members of ships was verified by experiments, including large-size fracture tests. The notation system established by Nihon Kaiji Kyokai to indicate the improved safety of ships built of HIAREST steel plates is also described.

### 1. 緒 言

大型タンカーの衝突、座礁等による海洋汚染事故や老朽船沈没による多数の人命損失事故等、船舶の重大事故は依然皆無になっただけではなく、ナホトカ号沈没によって引き起こされた日本海の大規模な海洋汚染事故による環境破壊は未だ記憶に新しい。このような現状に鑑み、船体破壊に起因する人的被害や環境破壊を防止しうる安全性、信頼性の高い船舶の実現が要望されている。

現在、船体構造を二重殻とすることで衝突、座礁の際に内殻が損傷せず、タンク内の貨油が船外に流出する危険性の低減が期待されている。しかしながら、衝突部近傍では船殻鋼材が大きな塑性歪を受けて耐破壊特性が劣化し、衝突後に衝突部近傍から発生した脆性破壊などによって破壊の二次的な破局的拡大が生じる危険性も想定されている。このような破壊の破局的拡大を阻止する方法として、脆性き裂伝播停止性能(アレスト性能)が極めて優れた鋼板を適切に配置することが有効であると考えられる。

本報では、アレスト性能の飛躍的向上を狙って開発した表層超細粒鋼板(HIAREST鋼)<sup>1-3)</sup>の特徴を概説するとともに、衝突や座礁等の非常事態を想定した場合の船殻鋼材の安全性に関する検討結果<sup>4,5)</sup>、及び高アレスト鋼板を適用した船舶に対する安全性の認定制度<sup>6)</sup>、

等について紹介する。

### 2. HIAREST鋼

#### 2.1 HIAREST鋼の特徴

HIAREST鋼は、鋼板表層部の耐脆性破壊(アレスト)性能を著しく向上させたハイブリッド(板厚方向に複層構造化)型鋼板である。鋼板表層部の金属組織は1~3μmの工業的規模では世界初のレベルの超細粒である。写真1にHIAREST鋼の鋼板断面におけるマクロ組織とミクロ組織を示す。鋼板表裏層部において板厚の1/6程度の厚みで色調の違う領域が表層超細粒組織部(SUF部と称す)である。

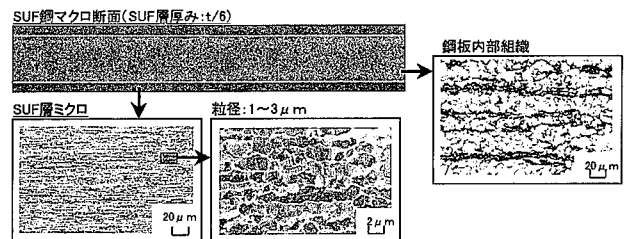


写真1 HIAREST鋼のマクロ組織及びミクロ組織

\*<sup>(1)</sup> 大分製鐵所 生産管理部 グループリーダー Ph.D.  
 大分県大分市大字西ノ洲1 ☎870-8566 ☎(0975)53-2122

\*<sup>(2)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員

\*<sup>(3)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 部長 主幹研究員 工博

\*<sup>(4)</sup> 厚板営業部 マネジャー

本鋼板は従来鋼と同様の化学成分を有しており、複層構造化や超細粒化のため特別な元素を添加していないので、従来鋼と同様の溶接性、加工性の利便さを確保しつつ、表層超細粒化による種々の特性向上効果を発揮することができる。

2.2 表層部と板厚内部の低温靱性の比較

SUF部と板厚内部からサブサイズシャルビー試験片(試験片厚3mm)を切り出し採取し、破面の脆性延性遷移挙動を調査した結果を図1に示す。SUF部は板厚内部に比較して極めて脆性破壊しにくいことがわかる。

2.3 シリアップ形成によるアレスト性能の向上

HIAREST鋼の大きな特徴は、脆性破壊の伝播や拡大を阻止するアレスト性能が従来鋼に比べて極めて優れている点である。写真2にアレスト性能を評価する試験である温度勾配型ESSO試験を実施したHIAREST鋼の破面を示す。板厚内部は脆性破壊しているが、板厚表層部は脆性破壊せずに延性破壊を呈している。この表層部がシリアップと呼ばれる塑性変形を伴った領域となっており、脆性き裂伝

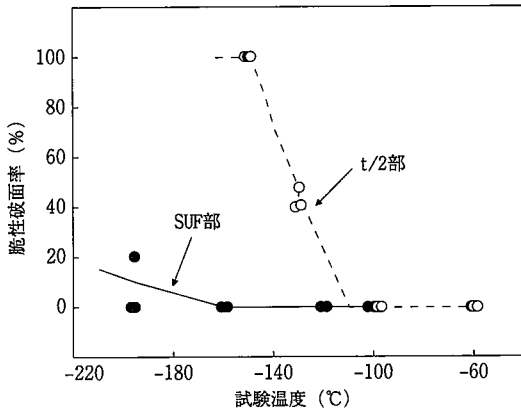


図1 HIAREST鋼の表層部と板厚内部の低温靱性比較

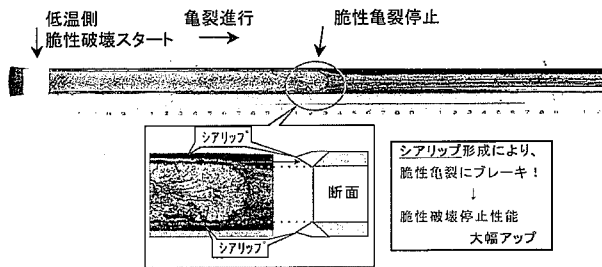


写真2 HIAREST鋼のESSO試験後の破面の特徴

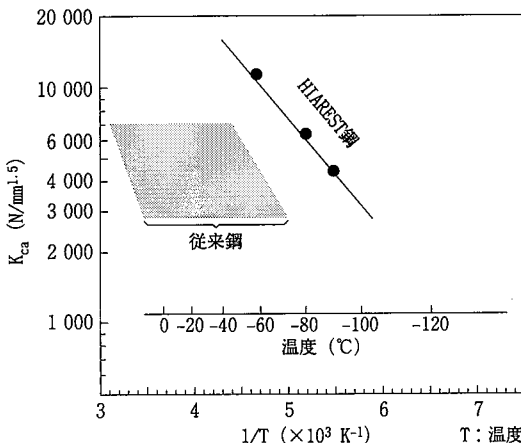


図2 HIAREST鋼と従来鋼のアレスト性能比較

播時に大きなブレーキをかける役目をするため、鋼板のアレスト性能が飛躍的に向上する<sup>7)</sup>。図2は、HIAREST鋼と従来鋼のアレスト性能を比較した結果であり、HIAREST鋼が極めて優れたアレスト性能を有することがわかる。

3. 船舶の安全性評価に関する検討

3.1 船舶の安全性評価に関する考え方

一般に、通常の運航状態での船舶の安全性は充分考慮されて設計されている。しかしながら、衝突や座礁等による事故に遭遇したような非常事態下では、船舶の安全性は必ずしも充分考慮されていないのが現状である。衝突や座礁等によって船殻鋼材が損傷を受けた場合には、脆性破壊が発生することも想定される。損傷を受けた鋼材では、脆性き裂が伝播、拡大し、一瞬のうちに重大事故に至る可能性も高い。そこで、大型タンカー(VLCC)同士が衝突する際の鋼板損傷レベルの解析及び損傷を受けた鋼材のアレスト性能評価を行った。

3.2 衝突による船体構造の破壊シミュレーション<sup>4)</sup>

非線形有限要素法プログラムLS-DYNA3Dを用いて解析したVLCC同士の衝突による船体構造の破壊シミュレーション結果を図3に示す。非衝突船(300kDWT、二重船殻構造)は満載状態で、衝突船(280kDWT)はバラスト状態とし、衝突船が非衝突船の貨油タンク中央に直角に衝突すると想定した。衝突船が非衝突船にくい込んでいく距離を貫入量として図中に記入した。貫入量が3.86mの時、船体外殻が破断し、貫入量が7.71mの時、内殻が破断しはじめた。船体構造の最重要部材であるシアストレーキ部での塑性歪は、内殻が破断するまでに5~10%程度に達していることがわかる。

すなわち、VLCC同士の衝突時には、非衝突船のシアストレーキ部に5~10%の塑性歪を受けることがあるため、非常時の安全性検討には、鋼材特性に対する塑性歪の影響を考慮しなければならないことが判る。

3.3 アレスト性能に及ぼす塑性歪付与の影響

3.3.1 標準ESSO試験結果

板厚25mmのHIAREST鋼と、比較鋼としてKE36鋼(日本海事協会(NK)規格材)を供試鋼とした。化学成分はほぼ同等である。両供試鋼に引張荷重を付与し、5%レベル、10%レベルの塑性歪を付与し、塑性歪なし鋼との比較を行った。アレスト性能の評価には板幅500mmの温度勾配型ESSO試験を行い、脆性き裂伝播停止時の応力拡大係数を求めて図4に示す。塑性歪の付与によりアレスト性能が大きく劣化し、KE36鋼の場合、塑性

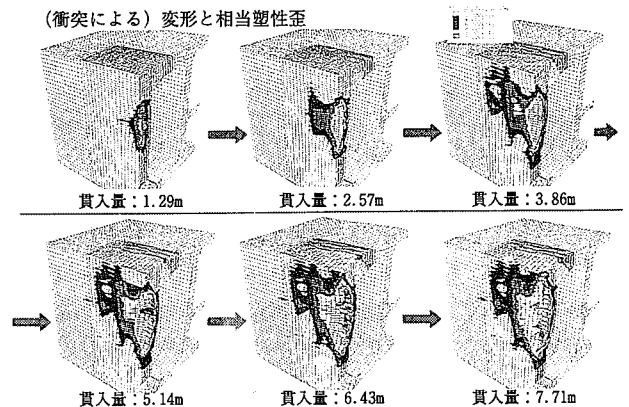


図3 VLCC同士の衝突時における被衝突船の塑性歪分布

歪なし材では $K_{ca}=4\,000\text{N/mm}^{1.5}$ を示す温度が $-40^\circ\text{C}$ 程度であったものが、10%塑性歪を付与されると $0^\circ\text{C}$ 以上に劣化することが判明した。HIAREST鋼も塑性歪による劣化現象は確認されたものの、KE36鋼の塑性歪なし材より優れたアレスト性能を有していることがわかる。

### 3.3.2 超広幅混成ESSO試験結果

図5(a)に船体構造の一部をモデル化した超広幅混成ESSO試験片を示す。き裂伝播部にはKE36鋼を用い、試験板にHIAREST鋼を適用した場合の試験結果の一例を写真3に示す。KE36鋼を伝播した脆性き裂がHIAREST鋼に突入すると、シリアップを形成しながら脆性き裂を停止させることが観察される。

更にシアストレーキモデル試験(図5(b))も実施し、それらの大型破壊モデル試験結果を図6に示す。図中、ソリッドマークは脆性き裂を停止できなかった結果、オープンマークは脆性き裂を停止させた結果を示している。更に濃い網掛け領域の温度域は、温度勾配型

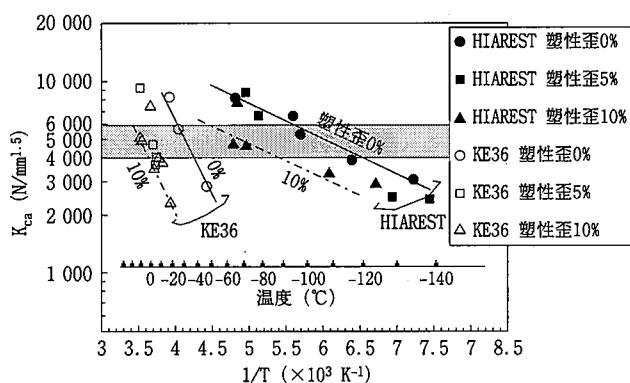
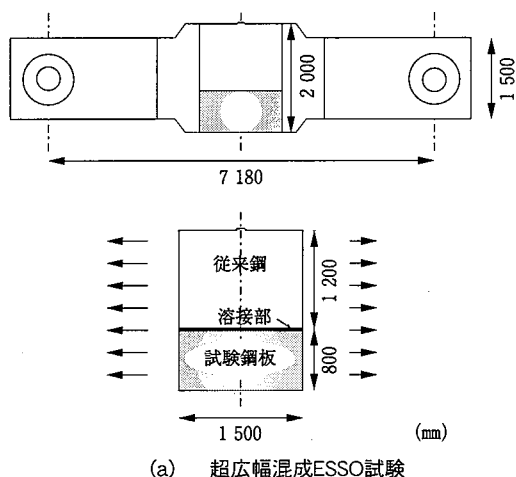
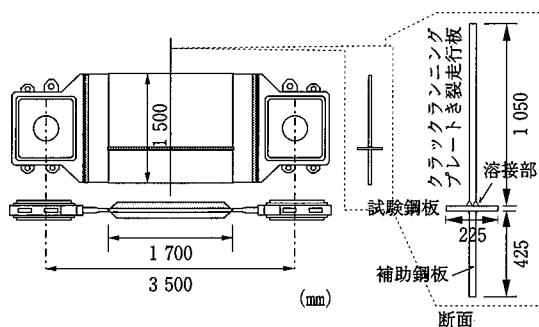


図4 アレスト性能に及ぼす塑性歪の影響



(a) 超広幅混成ESSO試験



(b) シアストレーキモデル試験

図5 大型破壊モデル試験

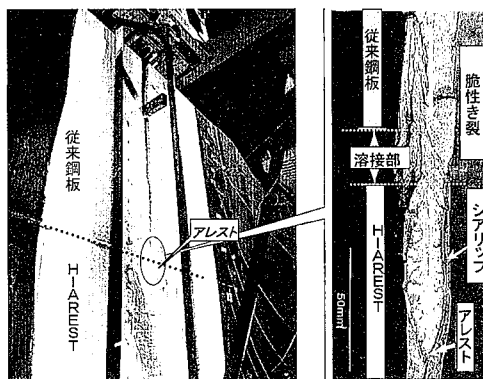


写真3 超広幅混成ESSO試験によるHIAREST鋼のアレスト性能検証 ( $-70^\circ\text{C}$ にてアレスト)

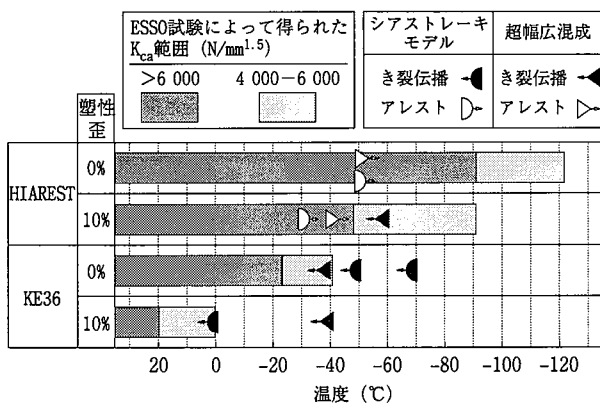


図6 大型破壊モデル試験によるアレスト性能評価結果

ESSO試験で求めた $K_{ca}$ 値が $6\,000\text{N/mm}^{1.5}$ 以上を示す領域、薄い網掛け部は $K_{ca}$ が $4\,000\sim 6\,000\text{N/mm}^{1.5}$ を示す領域である。KE36鋼は、10%の塑性歪を受けた場合、 $0^\circ\text{C}$ でもこれら大型破壊モデル試験において脆性き裂を停止させることはできなかった。すなわち、E級鋼としての規格を満足する従来鋼は、塑性歪を受けない状態では十分なアレスト性能を有しているが、塑性歪を受けるとアレスト性能は期待できない。一方、HIAREST鋼は塑性歪を受けた場合でも十分なアレスト性能を示しており、非常時でも脆性き裂の伝播、拡大を阻止することが期待できる。

## 4. HIAREST鋼の実船への適用

### 4.1 高アレスト鋼板適用による安全性向上の考え方

衝突や座礁等による事故に遭遇したような非常事態においては、船殻鋼板の材質が塑性歪によって劣化するため、脆性き裂が発生した場合停止できずに伝播、拡大し、一瞬にして重大事故に至る可能性が高い。しかし図7に示すように、塑性歪を受けても十分に高いアレスト性能を有する鋼板を重要部材に配置すれば、脆性破壊の伝播、拡大を阻止し、重大事故を防止することができると考えられる。

### 4.2 NK船級協会のClass-Notationについて

日本海事協会では、HIAREST鋼あるいはそれに匹敵する塑性歪を10%付与した条件下でも十分なアレスト性能を有する鋼板(設計温度で $K_{ca}\geq 6\,000\text{N/mm}^{1.5}$ )を高アレスト鋼板と認定し、更に高アレスト鋼板を船体の重要部材に適用した船舶の安全性を認定するためのClass-Notationを設定した。このNotationは、数あるNotationの中で安全性に関する世界初のNotationであり、アメリカ船級協

会 (ABS) 等, 他の船級協会も同様のNotation制度を準備中である。

図 8 (a)はClass-Notationの付記記号例である。図 8 (b)は適用部位であり, 船種に応じて, Cargo-part全長, 船中央部0.6L (L :

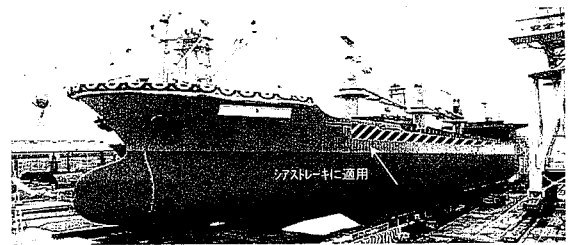


写真4 HIAREST鋼適用船

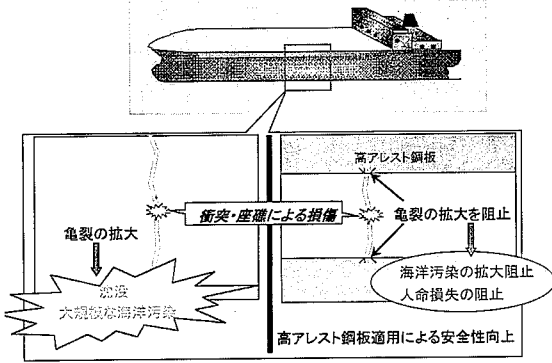
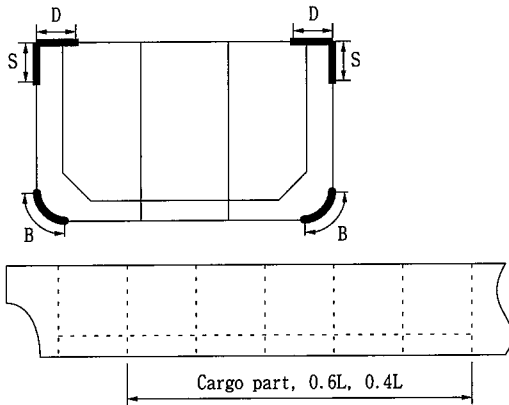


図7 高アレスト鋼板による船体の安全性向上の考え方

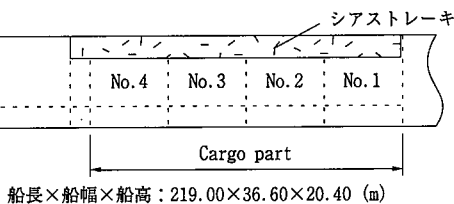
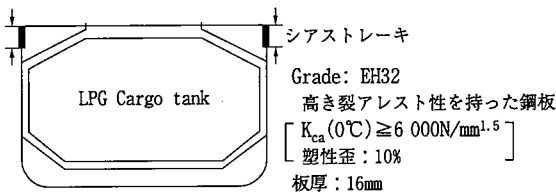
ハル構造 Class-Notation	適用範囲		
	デッキ ストリンガー (D)	シヤストレーキ (S)	ビルグストレーキ (B)
H-ARST/D	○	—	—
H-ARST/S	—	○	—
H-ARST/B	—	—	○
H-ARST/D&S	○	○	—
H-ARST/D&B	○	—	○
H-ARST/S&B	—	○	○
H-ARST/D, S&B	○	○	○

○：高アレスト鋼板を適用

(a) 付記記号の例



(b) 適用部位



(c) LPGタンカーへの適用例

図8 NK-Class Notationの概要と適用例<sup>6)</sup>

船長), 0.4L等の規定がある。LPG (液化プロパンガス)タンカーに適用された例を図 8 (c)に示す。

### 4.3 実船適用の例

1995年にLPG船に適用されたのを皮切りに, 翌1996年にはバルクキャリアー(一般貨物船, 写真4参照), 1997年にはチップ船と鉱石運搬船など相次いで適用され, 着実に適用実績をあげており, 既に約1 500トンの実船適用実績を有している。また, 海洋構造物や老朽船の安全性確保の観点からも適用が検討されている。

## 5. 結 言

船体破壊に起因する人命損失や海洋汚染事故を最小限に抑制できる安全性及び信頼性のより高い船舶の実現が要望されている。そこで, 極めて優れたアレスト性能を有するHIAREST鋼を船体構造へ適用した場合の安全性向上効果を検討するため, 衝突の破壊シミュレーション及び従来鋼板とのアレスト性能比較評価を実施した。その結果,

- (1) VLCC同士の衝突事故において, 二重船殻の内殻鋼板が破断する直前までに, シヤストレーキでは約5~10%の塑性歪が発生する可能性がある。
- (2) 10%程度の塑性歪を受けた鋼材のアレスト性能は大きく劣化し, 造船E級鋼規格鋼材でも0℃においてアレスト性能を期待することはできない。
- (3) HIAREST鋼は, 10%の塑性歪が付与された場合でも十分なアレスト性能を有する。

ことを確認した。

HIAREST鋼を船体の重要部材に適用することにより, 衝突・座礁事故等の非常事態下でも, 万一発生した脆性き裂の拡大を阻止することが期待でき, 本鋼材を所定の重要部材に適用した船舶に対して安全性向上を示すNotationが付与される制度も発足されている。

HIAREST鋼は, 地球環境保護, 尊い人命の損失防止の観点から, 構造物の安全性, 信頼性を高める鋼材として, 造船分野のみならず広い分野で適用が検討されている新鋼板である。

## 謝 辞

HIAREST鋼の実船適用論理構築にあたり, 有益な討論, 協力をいただいた広島大学工学部 矢島浩教授, 三菱重工業長崎造船所 橋本州史氏, 渡辺栄一氏, 同長崎研究所 多田益男氏, 及びVLCCの衝突解析に尽力いただいた三菱重工業長崎研究所 黒岩隆夫氏, PAL構造 楠葉貞治氏, HIAREST鋼の材料認定からNotation制定に至る材料規格, 認定面で尽力いただいた日本海事協会 北田博氏はじめ, 各方面の関係者の皆様に心から謝意を表します。

参照文献

- 1) 野見山裕治, 石川忠, 長谷川俊永, 土師利昭: 材料とプロセス, 7, 1834 (1994)
- 2) 石川忠, 野見山裕治, 吉川宏, 萩原行人, 間瀬秀里: 日本溶接学会論文集, 15, 148(1997)
- 3) 石川忠, 野見山裕治, 吉川宏, 今井嗣郎, 井上健裕: 新日鉄技報, (365), 26 (1997)
- 4) 石川忠, 井上健裕, 萩原行人, 大下滋, 黒岩隆夫, 橋本州史, 多田益男, 矢島浩: 日本造船学会論文集, 178, 555(1994)
- 5) Ishikawa, T., Hagiwara, Y., Oshita, S., Inoe, T., Hashimoto, K., Kuroiwa, T., Tada, M., Yajima, H.: Proc. 15th Int. Conf. on OMAE, 3, 1996 p.183
- 6) Nishimura, M., Matsumoto, T., Kitada, H., Akiyama, H., Nomura, D.: Proc. 16th Int. Conf. on OMAE, 3, 1997 p.283
- 7) 石川忠, 野見山裕治, 萩原行人, 栗飯原周二: 日本造船学会論文集, 177, 259 (1994)