

表層超細粒化による超高アレスト鋼板HIAREST

Ultra-high Arresting Steel Plate (HIAREST) with Super-refined Grains in Surface Layer

石川 忠⁽¹⁾ 野見山 裕治⁽²⁾ 吉川 宏⁽³⁾ 今井 嗣 郎⁽⁴⁾
Tadashi Yuuji Hiroshi Shiro IMAI
 ISHIKAWA NOMIYAMA YOSHIKAWA
 井上 健 裕⁽⁵⁾
Takehiro INOUE

抄 録

大型溶接構造物の脆性破壊に対する安全性確保のため、万一脆性破壊が発生した場合を想定して脆性き裂の伝播を阻止しうる性能(脆性き裂伝播停止特性、以下アレスト性能と称する)が求められている。脆性き裂の伝播停止機構においてシアリップ形成が重要な役割を果たしていることに着目し、シアリップ形成を促進するためフェライト組織を昇温中に加工して、鋼板の表裏層に超細粒組織を保有する鋼板を開発した。表層超細粒鋼板(HIAREST)が脆性き裂伝播時にシアリップを確実に形成することにより、従来工程で製造した鋼板より極めて優れたアレスト性能を確保できること、更に、本鋼材を船殻等の溶接構造物へ適用するにあたり、実用上確認すべき疲労特性、現場加工性等も従来品と同様以上の性能を有することを確認した。

Abstract

In order to ensure the safety against brittle fractures in large scale weld structures, a performance to be able to check the brittle crack propagation, that is, brittle crack propagation arresting characteristics in case of the brittle crack happening (hereinafter referred to as arresting performance), is required to the steel materials for weld structure. Turning our attention to the formation of shear-lip which plays an important role in the mechanism of arresting the brittle crack propagation, a steel plate material has been developed which has a super-refined grain structure in its both upper and under surface layers through the ferrite structure being processed during the temperature rising to accelerate the shear-lip formation. This paper reports, that the steel plate having super-refined grain structure in its surface layer (HIAREST) forms the shear-lip for certain when the brittle crack propagates and this results in making it possible to insure an eminently superior arresting performance comparing with those steel materials manufactured by traditional processes, and further that the developed steel material has satisfactory characteristics of fatigue, field working and so which are equal to or higher than traditional steel, that are to be confirmed for its practical use to hull or any other weld structures.

1. 緒 言

大型溶接構造物の脆性破壊に対する安全性確保は極めて重要である。造船^{1,2)}や低温貯槽^{3,4)}の分野等では、万一脆性破壊が発生した場合を想定して、脆性き裂の伝播を阻止しうる性能(脆性き裂伝播停止特性、以下アレスト性能と称する)が既に検討されており、二重の安全性を確保する設計概念⁵⁾として実用化されている分野もある。優れたアレスト性能を備えた鋼材の出現により、建築、橋梁、海洋構造物等の分野でも万一発生した脆性破壊の拡大を阻止しよう

という新たな概念が安全性設計に導入されることも考えられる。

そこで、脆性き裂の伝播停止機構においてシアリップ形成(3.1で詳細説明)が重要な役割を果たしていること^{6,7)}に着目し、フェライト組織を昇温中に加工することにより超細粒化しうる新たな冶金原理^{8,9)}を適用して、鋼板の表層に超細粒組織を保有する鋼板¹⁰⁻¹²⁾(HIAREST: High Crack-Arrestability Endowed Steel)を開発した。

⁽¹⁾ 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 ☎ (0975)53-2122

⁽²⁾ 厚板営業部 マネジャー

⁽³⁾ 中国支店 マネジャー

⁽⁴⁾ 厚板営業部 マネジャー

⁽⁵⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員

2. HIARESTの特徴

2.1 HIARESTの基本特性

フェライト組織を昇温中に加工することにより超細粒化しうるとの新たな冶金現象^{8,9)}を実ラインに導入し、表1に示す成分の板厚18mm、25mmのEH36鋼級のHIARESTを製造した。供試鋼板の全厚での引張試験結果を表2に示す。板厚18mm及び25mmのHIARESTの鋼板断面マクロ組織写真を図1(a)(b)に示す。板厚25mm材の表層部、及び板内部の微視組織写真をそれぞれ図1(c)(d)に示す。表層部は結晶粒が極めて細かく(SUF部: Surface layer with Ultra Fine grained microstructure)光学顕微鏡ではその粒径の識別が困難である。そこで、SUF部のSEM組織写真を図2(a)に示す。平均円相当粒径が2 μ m以下であることが分かる。また、HIARESTの板厚方向の粒径分布の一例として、板厚方向位置毎に平均円相当粒径を求めた結果を図2(b)に示す。SUF部の粒径はほぼ均一であり、SUF部と板内部での境界域で急激に粒径が変化しており、SUF部と板内部の粒径の遷移領域の存在がほとんど認められないことが分かる。

2.2 SUF部の機械的特性

SUF部の特性例として、板厚25mmのHIARESTを用いて表層部から引張試験片及びサブサイズVノッチシャルピー衝撃試験片を供試し、板内部との特性比較を行った。

HIARESTの表層部と板内部の引張試験結果を表3に示す。表層部は板内部より細粒化しているため降伏点、引張強度とも高い値を

表1 HIARESTの化学成分の一例 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ceq
0.13	0.20	1.27	0.007	0.002	0.34

表2 HIARESTの引張特性の一例 (全厚試験片)

Thickness	Yield point	Tensile strength	Elongation
18mm	451MPa	503MPa	18%
25mm	431MPa	526MPa	23%

Test piece size: 200mmGL \times 25mm width \times thickness

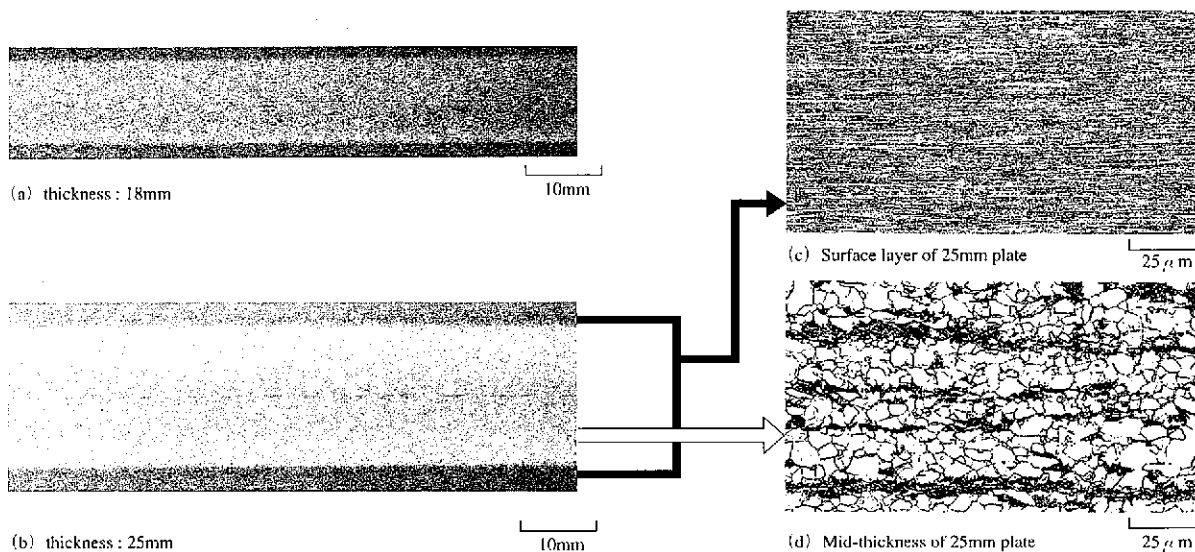
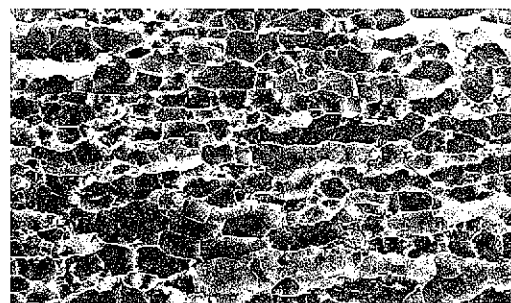
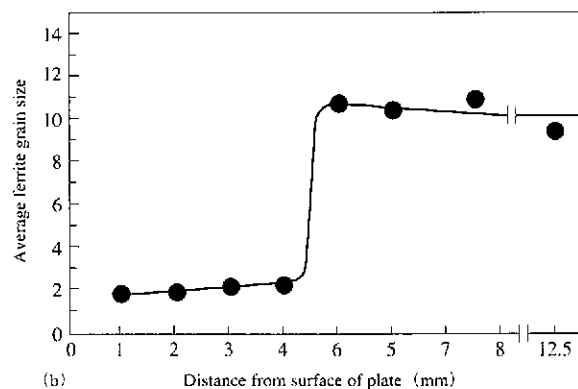


図1 “HIAREST”のマクロ組織(a)、(b)と板厚25mm材の表層部(c)及び内部(d)のミクロ組織

示している。サブサイズVノッチシャルピー衝撃試験結果を図3に示す。本試験に用いた試験片の厚みが3mmと薄いので、板内部でも比較的低温の破面遷移温度を示しているが、SUF部の破面遷移温度は更に低温側である-196 $^{\circ}$ C以下の値を示している。これらの結



(a)



(b)

図2 SUF部のSEM組織

表3 SUF部及び内部の引張特性

	Position	Yield point	Tensile strength	Elongation
HIAREST	SUF	536MPa	577MPa	28%
	1/2t	450MPa	548MPa	27%

Test piece size: 30mmGL \times 12.5mm width \times 2.5mm thickness

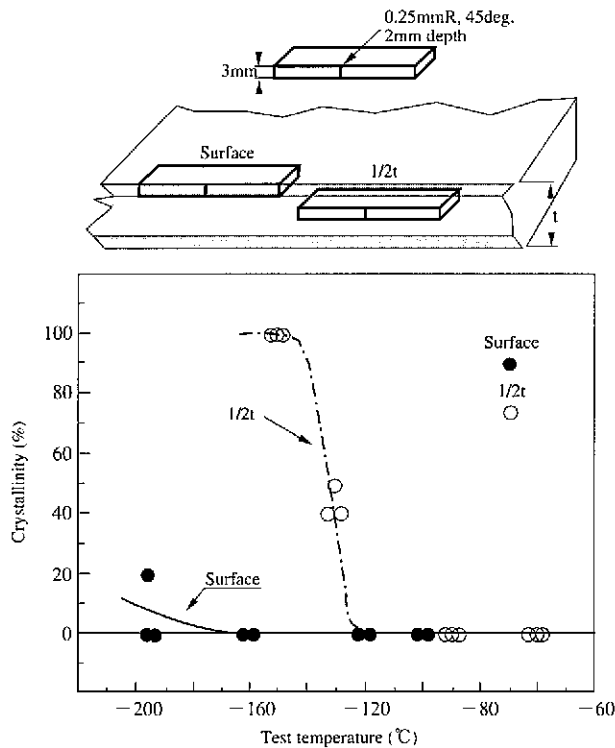


図3 SUF(Surface)部及び内層部(1/2t)のシャルピー特性

果より、SUF部は板内部より強度が高く、かつ耐脆性破壊特性が板内部より極めて優れていることがわかる。

3. 脆性き裂伝播停止性能

3.1 HIAREST素材の K_{ca} (脆性き裂伝播停止靱性)

HIARESTの温度勾配型ESSO試験(鋼板のアレスト性能を評価する標準的な試験法)結果を図4に示す。HIARESTは、同一成分系の従来工程で製造された鋼板と比較すると、同一試験温度において高い K_{ca} 値を示し、また K_{ca} 値が6000N/mm^{1.5}となる温度も大幅に低温側に移行している。

ESSO試験後の破面の一例を図5(a)に示す。HIARESTの表層部の破面にはシアリップの形成が確認でき、-120°C程度でき裂が伝播した部位においてさえもシアリップを形成していた。この破面の板厚方向断面をナイタール腐食し、破面と微視組織の同時観察を行った結果、図5(b)に示すようにシアリップ形成部がSUF部と一致していることが確認できる。ESSO試験片のき裂伝播部の試験温度とその位置におけるシアリップ厚み(表裏層の平均値)の関係を図6に示す。SUF部は板内部に比べ80°C以上も脆性延性遷移温度が低温側に移行しており、き裂伝播開始後直ちにシアリップの形成が認められる。

3.2 シアリップによるアレスト性能の向上効果

3.2.1 SUF部研削材の K_{ca} 特性との比較

SUF部に形成されるシアリップによるアレスト性能向上効果を実験的に確認するため、HIARESTの両面のSUF部を機械研削し、板内部の組織のみを有する試験片を作製し、温度勾配型ESSO試験を実施した。SUF削除鋼板の K_{ca} 値は、板厚を研削前の元厚に補正した場合の K_{ca} 値をWESの板厚換算式を用いて算定し、図7(a)、(b)に○印で示す。

3.2.2 Kraftモデルによる K_{ca} 向上効果の定量化

シアリップによる K_{ca} 値向上効果は、Kraftのモデル¹³⁾を用いて説明可能である^{11,12)}。図8にKraftモデルを用いた K_{ca} 値向上効果の考え方について示す。シアリップ形成部の塑性仕事率はシアリップが

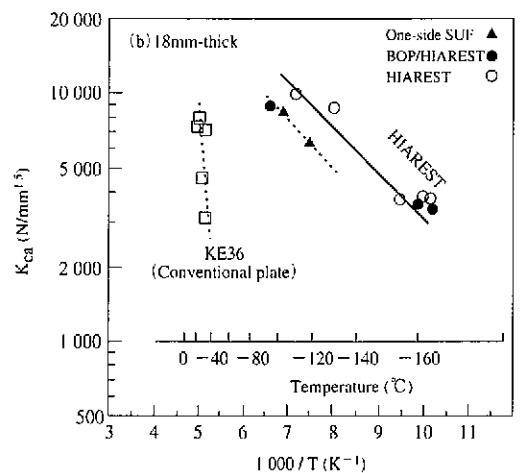
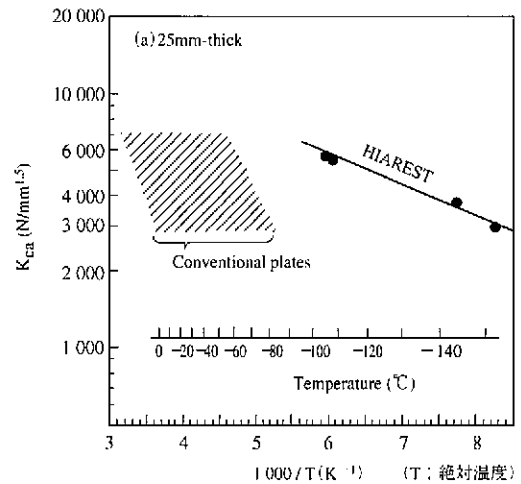


図4 “HIAREST”のESSO特性(板厚25mm材(a)、及び18mm材(b))

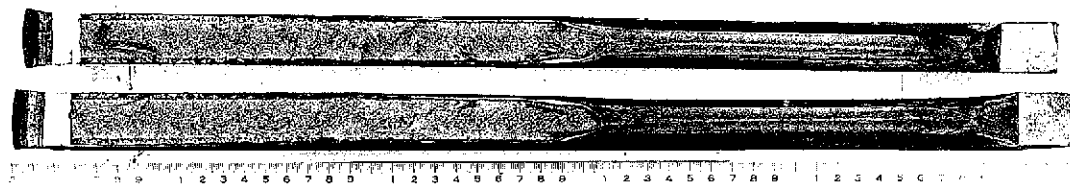


図5(a) 板厚25mm材の破面、断面の写真例

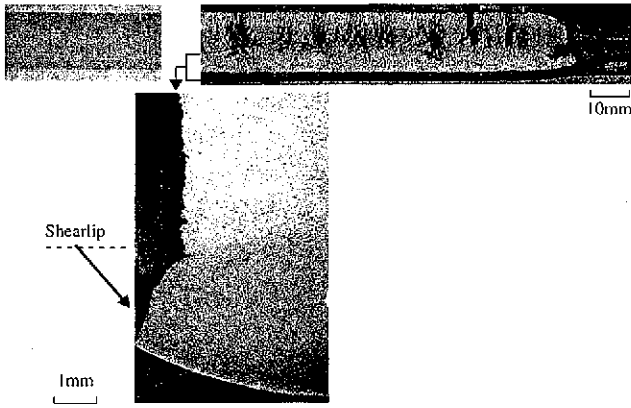


図5 (b) 板厚18mm材の破面、断面の写真例

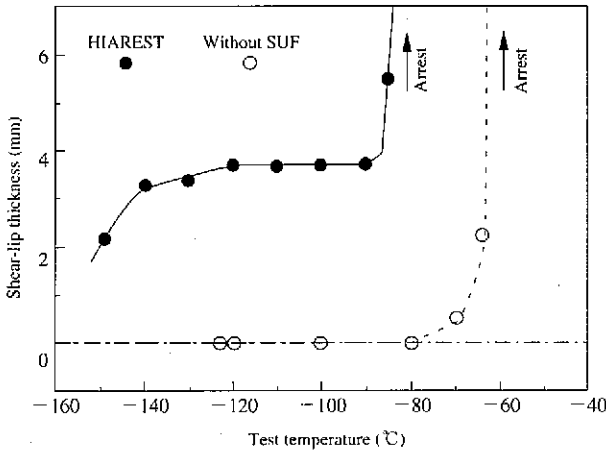


図6 ESSO試験片におけるシアリップ生成過程(板厚25mm材)

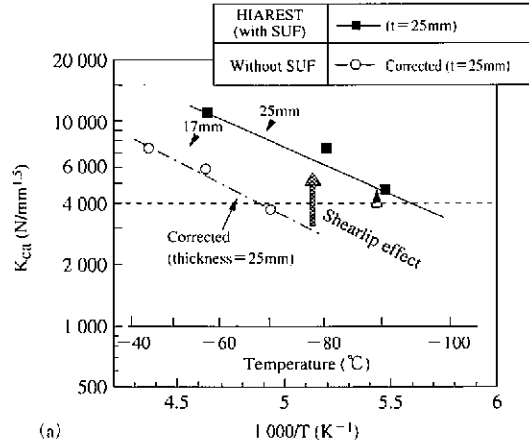
形成する温度で変化すると考えられるが、ここでは温度によらず $200\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ と仮定して解析した。板厚18mmのHIAREST及び両面共SUF部を削除した鋼板(両面SUF部削除鋼板)と片面のみSUF部を削除した鋼板(片面SUF部削除鋼板: with one-side SUF)のESSO試験(アレスト性能評価試験)結果をプロットマークで図7 (b)に示す。両面SUF部削除鋼板の K_{ca} 値にKraftのモデルにより推定されるシアリップによる K_{ca} 値向上効果を加えて算出したHIARESTの推定 K_{ca} 値及び片面SUF部削除鋼板の推定 K_{ca} 値を図7 (b)に一点鎖線及び点線で示す。粗い近似にもかかわらずSUF部でのシアリップの効果がよく説明できている。

このことは、SUF部厚みより、 K_{ca} 値向上の推定が可能であり、腐食環境等によりSUF部厚みの減少が予測される場合でも、その厚み減少量を想定し、当初素材段階での必要なアレスト性能に対応するHIARESTの選定も可能であることを示唆している。

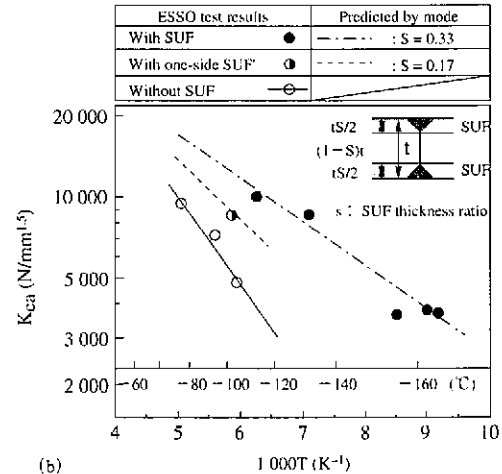
3.3 大型破壊試験による長大き裂停止性能の検証

3.3.1 超広幅混成ESSO試験 [Type I]

船舶どうしの衝突事故等の非常時に、船側外板で脆性き裂が発生した場合を想定し、そのき裂がシアストレーキ部に伝播・突入する現象をモデル化して、図9に示す超広幅混成ESSO試験(標準タイプの温度勾配型試験より大型な試験片を用い、助走板と試験板を溶接で接合し、強制的に助走板内を伝播させた脆性き裂を試験板に突入させ、試験板でアレストできるか否かを判定する試験法)を実施した。負荷応力レベルは、鋼材が変形を開始する荷重に相当する応力

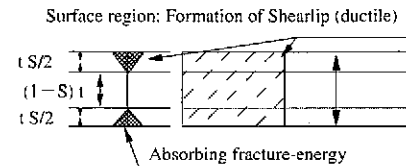


(a)



(b)

図7 SUF研削材とHIARESTの K_{ca} データの比較(板厚25mm材)



Total volume of plastic deformation in shearlips:
 $2 \times (tS/2 \times tS/2) da = (t^2 S^2 / 2) da$

plastic works:
 $(dWp/dV)(t^2 S^2 / 2) da$

$dW = (dWs/dA) t(1-S)da + (dWp/dV)(t^2 S^2 / 2) da$

$G = dW/da = (dWs/dA)(1-S) + (dWp/dV)(t^2 S^2 / 2)$

$G = K^2(1 - \nu^2)E$

図8 Kraftモデル

に対応する355MPa(公称降伏強度)とした。助走板内を伝播させた脆性き裂を試験板に突入させて、試験板がそのき裂進展を停止できるか否かを判定することで長大き裂に対するアレスト性能を評価した。

比較するために、355MPaの引張応力下で、目標温度 -50°C で脆性き裂を突入させた結果、表4に示すようにKE36鋼板では脆性き裂が停止させることはできなかったが、HIARESTでは脆性き裂が

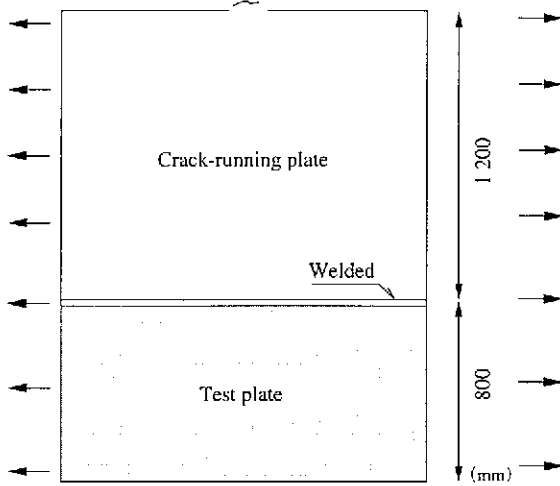


図9 超広幅混成ESSO試験片 [Type I]

表4 超広幅混成ESSO試験 [Type I] 結果

Test plate	Test temperature	Result
HIAREST	-53℃	Arrest
EH36	-52℃	Go

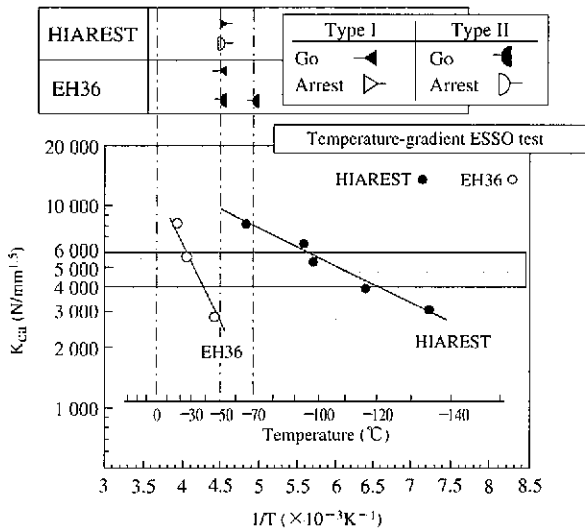


図10 超広幅混成ESSO試験 [Type I及び II] 結果

停止可能であることが明らかになった。図10に超広幅混成ESSO試験 [Type I] 結果を温度勾配型ESSO試験の試験温度に合わせて表示する。それぞれの鋼板の-50℃程度での K_{ca} 値には、大きな差異があり、HIARESTのアレスト性能が優れていることが分かる。超広幅混成ESSO試験 [Type I] 結果の破面写真の例を図11に示す。HIARESTでは、助走板との突合せ溶接部からHIAREST側においては著しいシアリップが形成され、き裂停止に至っていることが観察される。

3.3.2 超広幅混成ESSO試験 [Type II]

上甲板部から脆性き裂が発生し、シアストレーキ部へと伝播する現象も想定される。この場合HIARESTでは、鋼板表層部の組織が超細粒組織であるため、鋼板表面から突入してくる脆性き裂に対する抵抗は、板厚貫通き裂の場合よりも大きいと想定される。そこ

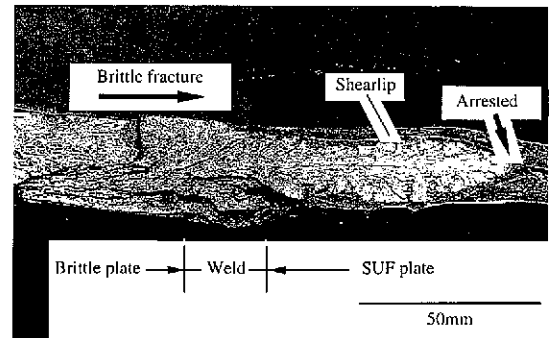
で、脆性き裂がデッキ部から発生し、シアストレーキ部へ伝播突入する現象をモデル化した構造体試験を実施した。この超広幅混成ESSO試験片 [Type II] の形状を図12に示す。助走板と試験板を直交させるように完全とけ込み溶接し、更に試験板と助走板の応力分布が均一になるように、試験板の下側に補助板を隅肉溶接で取り付け付けた。実際のシアストレーキでは補助板は存在しないので、脆性き裂が供試鋼板を貫通後補助板で停止しても試験板のアレスト性能は不十分であるとの評価を行う。

超広幅混成ESSO試験 [Type II] 結果の概要を表5及び図10に示す。図13に-50℃の試験板に突入させたき裂の破面を示す。助走板と試験板の溶接部を伝播してきた脆性き裂がKE36鋼板に突入する場合には、突入部から試験板内を脆性き裂が伝播して破断に至った。HIARESTの場合には、き裂が突入する表層部で脆性き裂が直ちに停止した。

3.4 塑性歪を受けた鋼材の脆性き裂伝播停止性能

3.4.1 塑性歪を受けた鋼材の特性評価の意義

船体のシアストレーキ部等の船体構造上最も重要な部位に



(a)



(b)

図11 超広幅混成ESSO試験片 [Type I] の破面例

HIARESTの適用を想定した場合、衝突や座礁等の非常時こそ優れたアレスト性能の重要性が期待される。これまでに、VLCC(Very Large Crude-oil Carrier：大型タンカー)同士の衝突をシミュレーションした解析結果¹⁰⁾では、シアストレーキ部での衝突により5～10%程度の塑性歪を受ける可能性が明らかにされている。また、阪神大震災等の大規模地震でも、構造物の大変形に伴い鋼材が塑性歪

を受ける場合が想定されている。そこで、HIARESTとKE36鋼板における5%及び10%程度の塑性歪を受けた場合のアレスト性能について検討した。

3.4.2 塑性歪付与鋼材の K_{ca} 特性

供試鋼板に引張により約5%と約10%の2水準の塑性歪を付与した。5%及び10%の塑性歪を付与した鋼板の標準ESSO試験結果を歪なし(塑性歪付与なし)材の試験結果と比較して図14に示す。塑性歪10%の付与によりKE36鋼板、HIARESTともアレスト性能が約30℃程度高温側に移行しており、 K_{ca} が6 000N/mm^{1.5}を示す温度は、HIARESTで-50℃、KE36鋼板で約+15℃となっている。また、10%の塑性歪を付与したHIARESTの K_{ca} 値は、KE36鋼板の歪なし材の K_{ca} 値より十分に高い値を示した。

3.4.3 塑性歪付与鋼材の大型破壊試験結果

10%塑性歪を付与した鋼板の超広幅混成ESSO試験[Type I]を-40℃で実施した結果を図14上段及び表6に示す。KE36鋼板では長大き裂を停止させることはできなかったが、HIARESTは長大き裂を停止でき、塑性歪を付与した場合でもHIARESTは十分なアレスト性能が確保できることが実証された。

10%塑性歪を付与したKE36鋼板の超広幅混成ESSO試験[Type II]を0℃で実施した結果、試験板部で脆性き裂を停止させることはできず、完全に破断に至った。一方、HIARESTは10%塑性歪を付与した場合でも、-30℃で実施した超広幅混成ESSO試験[Type II]の結果、脆性き裂を停止できることを確認した。図15にそれらの破面を示す。

3.5 まとめ

板厚25mmのHIARESTとKE36鋼板のアレスト性能が確保できる温度域を図16に示す。温度勾配型 ESSO 試験で求めた K_{ca} 値が 6 000N/mm^{1.5}以上を示す試験温度範囲、4 000～6 000N/mm^{1.5}の試験温度範囲をそれぞれ濃い網掛け領域、薄い網掛け領域で示し、更に、超広幅混成ESSO試験結果を試験温度毎にGo(き裂進展) Arrest(停止)に対応するマークで表示する。

これらの結果より、 K_{ca} が6 000N/mm^{1.5}以上を示す温度域であれば、超広幅混成ESSO試験及びシアストレーキモデル試験で脆性き

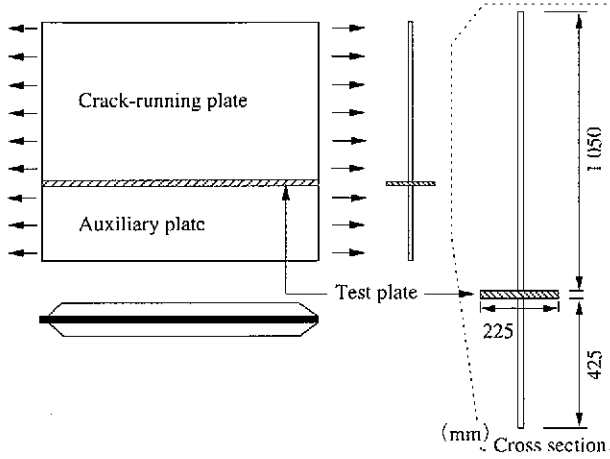
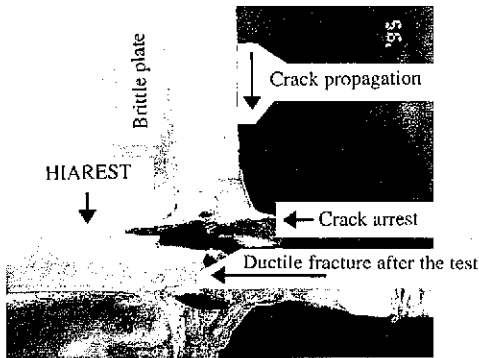
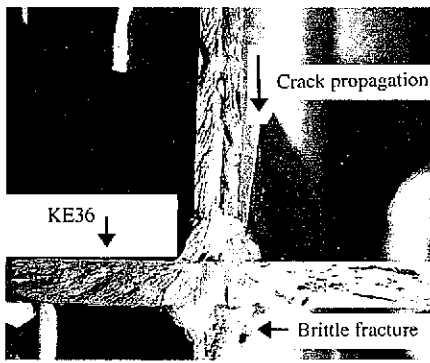


図12 超広幅混成ESSO試験 [Type II]



(a) HIAREST (virgin) tested at -50℃



(b) KE36 plate (virgin) tested at -50℃

図13 超広幅混成ESSO試験片 [Type II]の破面例

表5 超広幅混成ESSO試験 [Type II] 結果

Test plate	Test temperature	Result
HIAREST	-50℃	Arrest
EH36	-50℃	Go

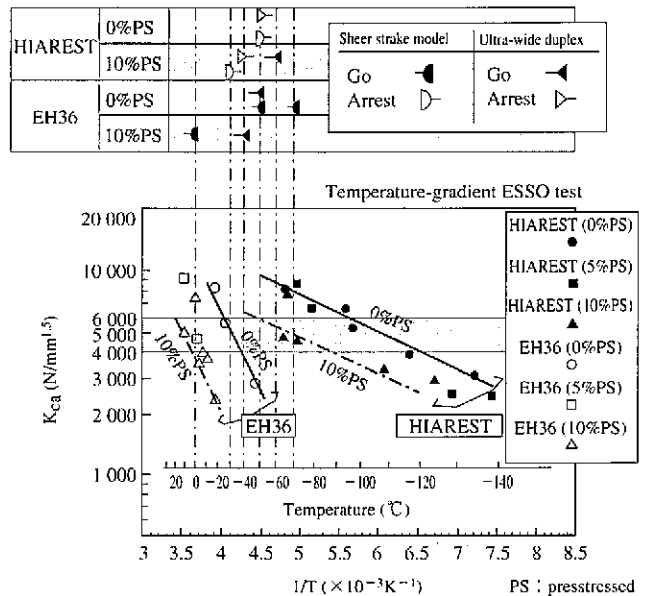


図14 塑性歪付与材の標準ESSO試験及び超広幅混成ESSO試験結果

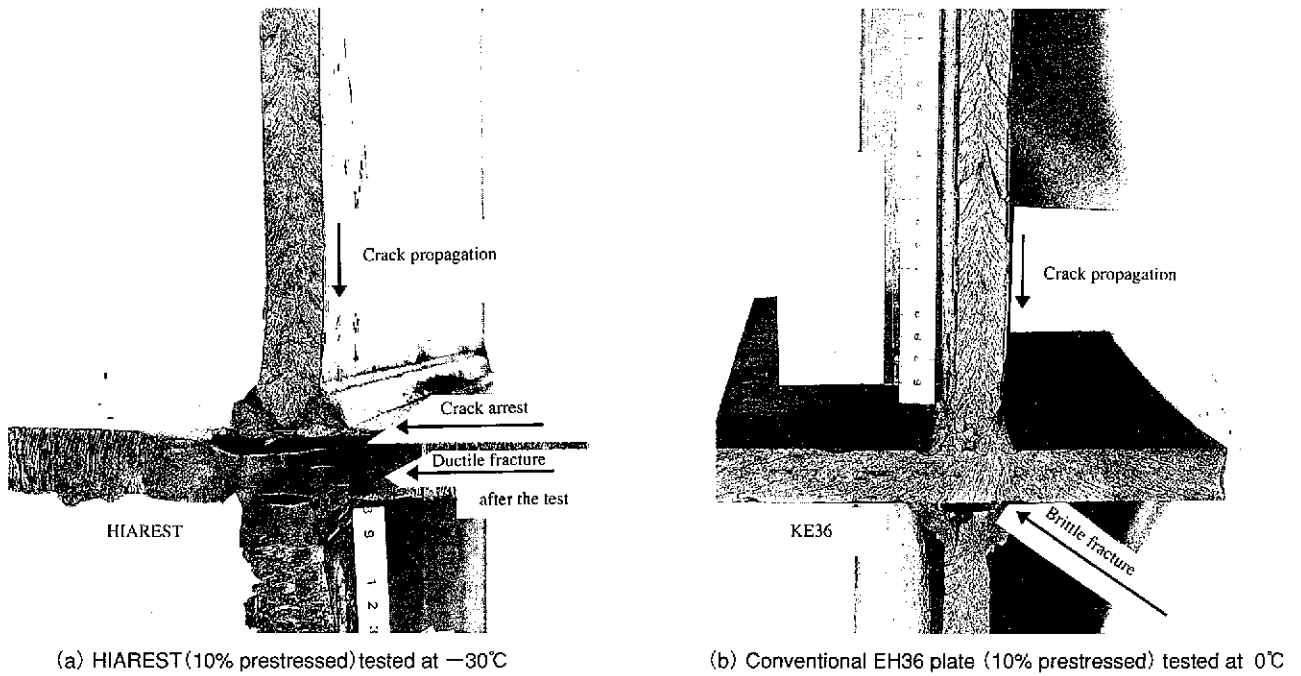


図15 塑性歪付与材の超広幅混成ESSO試験片 [Type II] の破面例

表6 塑性歪付与材の超広幅混成ESSO試験結果

Method	Test plate	PS%	Test temperature	Results
Type I	HIAREST	10	-42°C	Arrest
		10	-60°C	Go
	EH36	10	-40°C	Go
Type II	HIAREST	10	-30°C	Arrest
	EH36	10	0°C	Go

裂を停止させることができると考えられ、標準温度勾配型ESSO試験で $K_{ca} \geq 6,000 \text{ N/mm}^{1.5}$ を示す温度域では、公称降伏応力レベルの高負荷応力下でも長大き裂を停止しうる十分なアレスト性能を有していると考えられる。

通常のEH36鋼板では、塑性歪を受けない状態では $K_{ca} = 6,000 \text{ N/mm}^{1.5}$ を示す温度が -10°C 程度であり、通常船舶の設計温度である 0°C では十分なアレスト性能を有している。しかし、塑性歪を10%程度受けるともはや 0°C での十分なアレスト性能は期待できなくなることが分かる。一方、HIARESTは塑性歪を10%程度受けても、 -40°C でも長大き裂を停止することができ、最低使用環境が 0°C を想定する一般船体に適用した場合、十分なアレスト性能を期待できる。

4. 溶接継手部の耐脆性破壊特性

HIARESTは、脆性き裂伝播時に表層部にシアリップを形成させることによりアレスト性能を飛躍的に向上させた鋼板である。本鋼板を溶接構造物に適用するためには、化学成分が基本となって決定される溶接熱影響部(HAZ)組織により支配される溶接部の破壊発生特性の把握も重要である。そこで、一般造船用化学成分を有する供試鋼の大人熱溶接継手における脆性、脆性き裂発生に対する破壊靱性を確性した。また、溶接継手における耐脆性き裂伝播挙動についても、大型破壊試験により確性した。

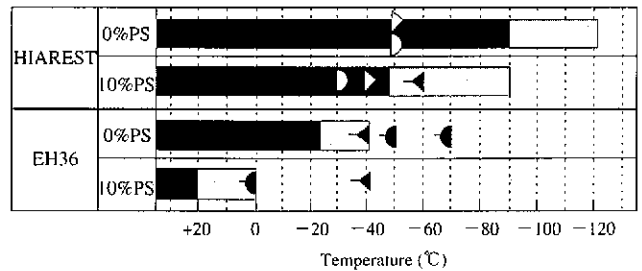
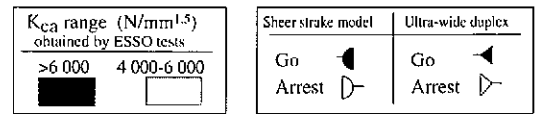


図16 HIAREST及びEH36鋼板の K_{ca} 特性に及ぼす10%塑性歪の影響

4.1 溶接継手靱性

供試したHIARESTの溶接継手部の断面マクロ写真の一例を図17に示す。溶接の熱影響により溶接フェュージョンライン部(溶接金属と鋼板の境界線)では超細粒組織が消滅し、通常の熱影響部組織を呈している。

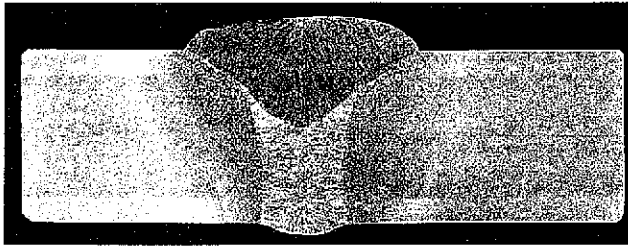
この溶接継手部のVノッチシャルピー衝撃試験結果を図18に示す。また、中央切欠付き広幅引張試験(脆性破壊の耐発生性能を評価するための試験)結果を図19に示す。本鋼板は、造船用E級鋼と同一の化学成分を有しており、造船用鋼板として船級規則を十分に満足する継手靱性を有していることが確認された。

4.2 溶接継手における脆性き裂伝播挙動

4.2.1 突き合わせ継手部の脆性き裂伝播挙動

図17に示した片面一層大人熱(FCB)溶接継手を用いて、楔を介した衝撃荷重により溶接ボンド部で脆性き裂を発生させ、図20に示す大型継手伝播試験を用いて脆性き裂の伝播経路を調査した。

溶接継手部脆性き裂伝播試験片における温度分布と伝播経路の模



Heat input : 14.6kJ/mm

図17 FCB継手のマクロ写真

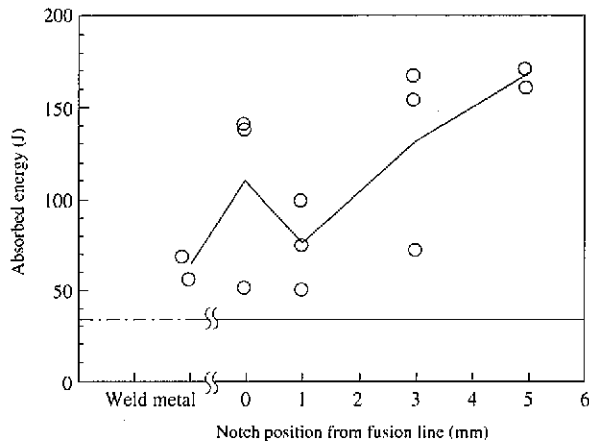


図18 FCB継手のシャルピー試験結果

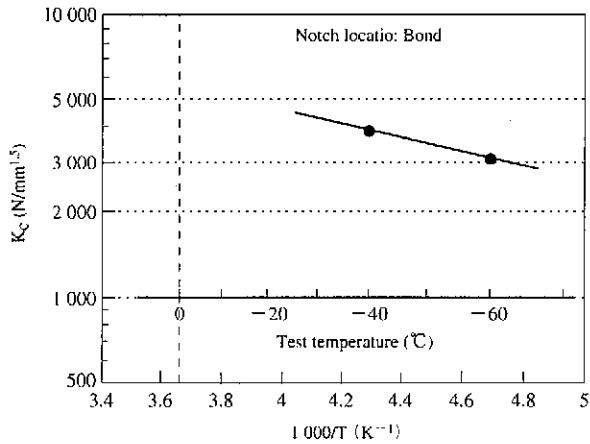


図19 FCB溶接継手のディープノッチ試験結果

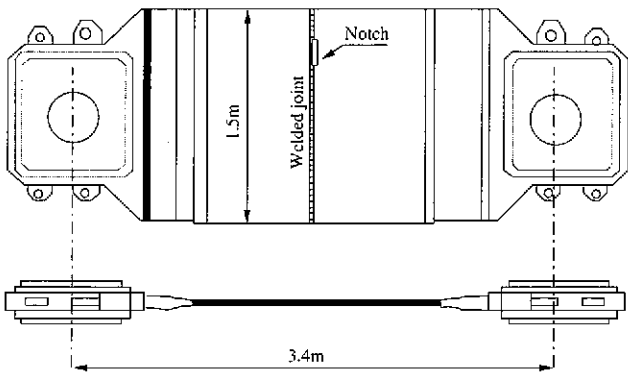


図20 継手部の脆性き裂伝播試験方法

式図を図21に示す。き裂発生部近傍の試験温度より低温に冷却された領域では境目沿ってき裂が伝播したが、試験温度である0℃の領域に達する前に、き裂は母材側に逸れて直ちに停止した。

脆性き裂停止部近傍の試験片外観例を図22に示す。試験後のき裂伝播部の鋼板断面を観察できるように切断加工して、き裂伝播経路と溶接継手部の位置関係を調査した結果を図23に示す。き裂が母材に逸れるとSUF部ではシアリップが形成され、直ちに停止することがわかる。

ボンド伝播挙動に及ぼす継手部最脆化域と母材靱性の比、及び負荷応力の関係を図24に示す。図中、従来知見(SR147委員会で作られているデータ¹⁶⁾)を併せて示す。母材靱性の高い鋼板ほど母材とHAZ部との靱性差は大きくなる傾向にある。しかしながら、母材靱性が極めて高い表層部を有するHIARESTでは、降伏応力の75%~100%の高応力下でさえもボンド伝播することなく、母材に逸れて停止することを確認した。

本実験結果は、ボンド伝播挙動が母材靱性の高さよりもHAZ部最低靱性に大きく支配されることを示唆しており、HIARESTでも従来鋼板(Thermo-mechanical Control Process)と同様、脆性き裂がボンド部を伝播しにくいことを確認した。

4.2.2 ビードオンプレート施工した鋼板特性

隅肉溶接等により鋼板表層部に存在するSUF部のどちらか一方が熱的影響を受けた場合を想定し、ビードオンプレート試験片を作製した。片側切欠タイプのESSO試験の場合、一本のビードのみでは切欠部近傍に圧縮残留応力が作用するためにき裂が直進しない可能性がある。そこで、試験ビード部の圧縮残留応力を低減させるため、試験ビードの両側に100mmピッチで更に同様のビードオンプレート溶接を行った試験片(BOP/HIAREST)の温度勾配型ESSO試験を実施した。試験結果を図4(b)中に▲印で示す。

この試験では、3本のビードを施工し、その中央の切欠部より脆性き裂を強制的に発生させたにもかかわらず、き裂が溶接部に沿って伝播せず、脆性き裂が伝播しにくいことが確認された。また、図

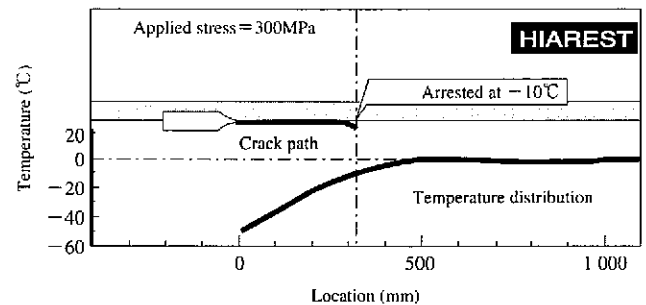


図21 歪なし溶接継手部の脆性き裂伝播試験結果(模式図)

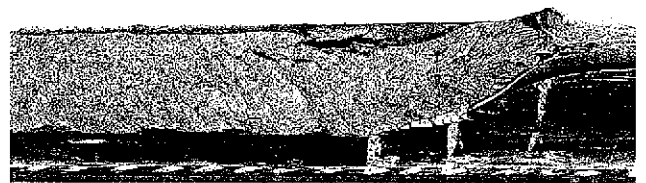


図22 継手部の脆性き裂伝播試験片のき裂停止部近傍の破面、外観の例

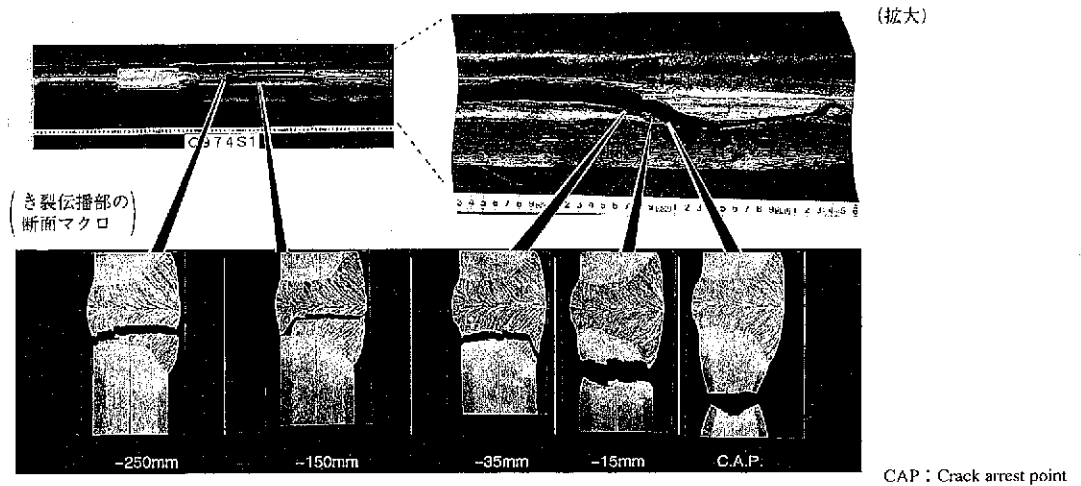


図23 継手部の脆性き裂伝播試験片における伝播部のマクロ切断写真

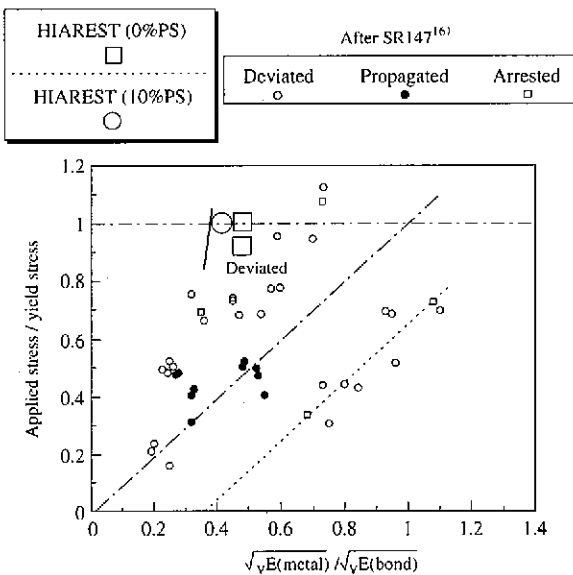


図24 ボンド伝播挙動に及ぼす継手脆化域靱性と母材靱性の比及び負荷応力の関係

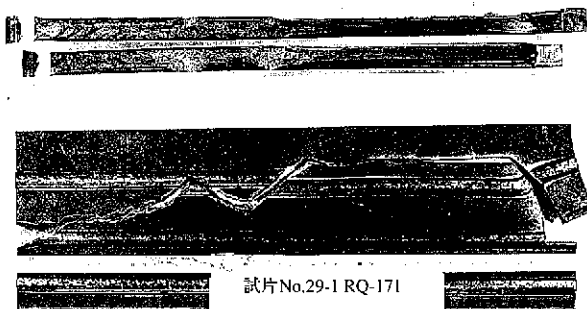


図25 18mm材のボードオンプレート材の外観写真

25に示す試験片は試験ビードから大きく逸脱した後、圧縮残留応力低減ビードに対しジグザグに伝播した例であり、溶接ビード部を横断した部分ではシアリップが消失していることが観察された。

4.3 まとめ

HIARESTの溶接継手靱性は鋼板の化学成分により支配されるので、同一化学成分を有する従来工程で製造された鋼板と同等の特性

を有することを確認した。また、溶接部で十分な靱性を有しているため、脆性き裂が継手に沿って伝播せずに母材側に逃れると考えられる。したがって、溶接部でもHIARESTの優れた母材アレスト特性が発揮されると期待される。

5. その他の諸特性

溶接構造物等へのHIAREST適用の際に重要な耐疲労特性や現場工作性について確性試験を実施した。

5.1 耐疲労特性

廻し溶接継手軸力疲労試験(縦通材に隅肉溶接された付加部材の溶接止端部から発生・伝播する疲労き裂に対する寿命をシミュレートして評価する試験)結果を図26に示す。通常の36kgf/mm²級鋼のSN線図(繰り返し負荷応力と疲労破断までの繰り返し数との関係)よりHIAREST溶接継手が長寿命側にあることが分かる。また、荷重非伝達十字継手軸力疲労試験(溶接継手部の疲労特性を評価する典型的な試験法)結果を図27に示す。HIAREST継手は、日本海事協会より公表されているHT36破断確率95%の線図(図中F.P.95の線)よりも長寿命側にあることが分かる。したがって、HIARESTを実船の実構造物に適用する上では、従来の36kgf/mm²級鋼と同等の疲労強度上の配慮を行えばよいといえる。

5.2 現場工作性

5.2.1 溶接性

溶接性は化学成分により決定される。溶接性の一例として最高硬さ試験(溶接施工により影響される鋼板表面の硬さの上昇度を評価する試験)結果を図28に示す。表層部は超細粒組織を有するため従来TMCP鋼板の表層部より硬さが高くなっているが、溶接による最高硬さは化学成分により決定されるので従来TMCP鋼板と同等である。

5.2.2 線状加熱特性

HIARESTの線状加熱試験結果(鋼板を变形するために線状に加熱する時の材質への影響をシミュレートする試験)を図29に示す。線状加熱されてオーステナイト化された部分の組織は、化学成分により決定される組織へと変化しているため、線状加熱を付加していないSUP部に比べ硬さは低くなっている。そのため、硬さ分布(鋼板表面下より1mmの位置で測定)は従来TMCP鋼板の分布と異なり、熱影響部の方が母材部より硬さが低い特徴を有している。しか

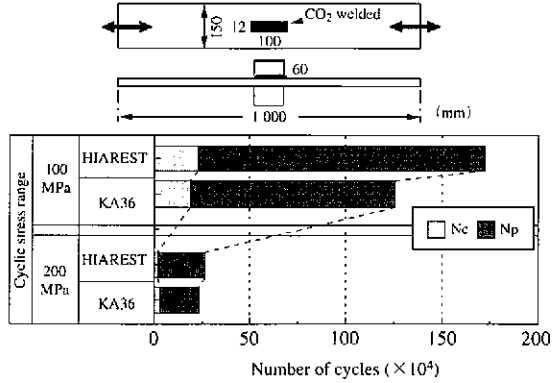


図26 廻し溶接継手軸力疲労試験片及び試験結果

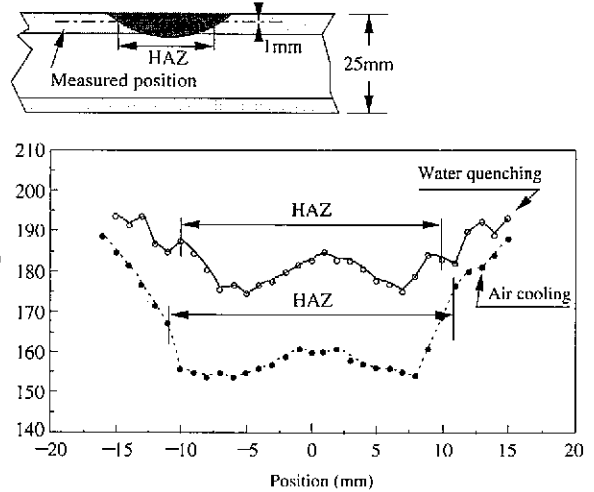


図29 線状加熱部の硬さ分布

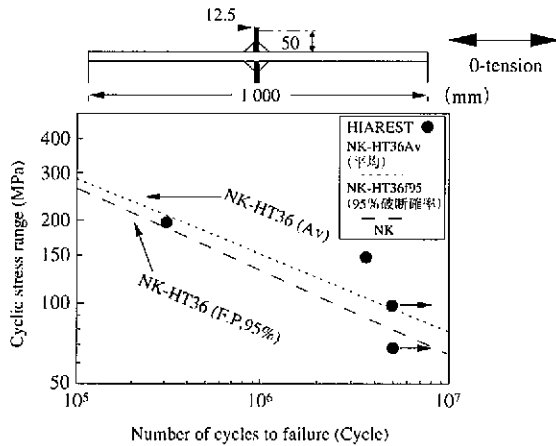


図27 荷重非伝達十字継手疲労試験片及び試験結果

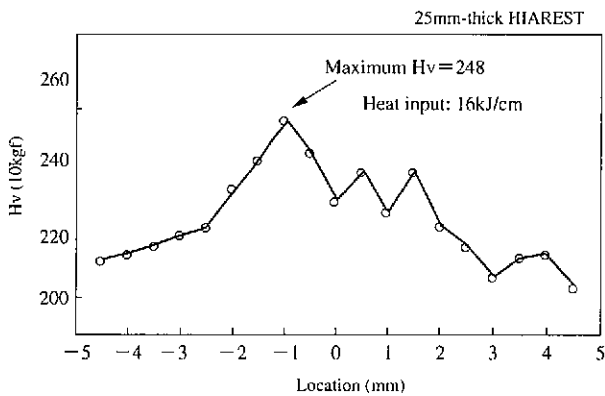


図28 最高硬さ試験結果

し、線状加熱による熱影響部のVノッチシャルピー衝撃試験結果でもほとんど脆化は認められず、十分に高い靱性を有していることが確認されている。

5.2.3 歪時効特性

5%歪を付与後250℃ 1時間時効処理したHIAREST(板厚18mm材)のVノッチシャルピー衝撃試験では-112℃の vT_{rs} 値を示した。歪なし材の vT_{rs} である-120℃以下の値と比較すると若干の靱性低下が認められる。しかしながら、この低下代は小さく(例えば、従来の低温用鋼板や船体用HT50鋼板での靱性低下範囲が vT_{rs} で最大30℃程度¹⁷⁾である)、HIARESTの冷間加工性は従来TMCP鋼と同

等以上の性能を有しているといえる。

5.3 まとめ

HIARESTの溶接継手部の疲労特性は、通常TMCP鋼板と同等、あるいは同等以上の性能を有しており、実用上の問題は認められない。HIARESTの溶接性は、鋼板の化学成分により支配されるので、HIARESTは同一化学成分を有する従来TMCPで製造された鋼板と同等の特性を有する。また、線状加熱部や歪時効処理材の靱性は、母材組織の影響を受けるため、HIARESTは従来工程で製造された鋼板より優れた特性を示している。

6. おわりに

鋼板表層部を超細粒化する(SUF部形成)ことにより、脆性き裂伝播時にシアリップ形成を確実にし、アレスト性能を飛躍的に向上させた鋼板を完成した。アレスト性能及びHIARESTの実適用の際その靱性が必要となる使用性能について検討し、次の知見を確認した。

- (1) HIARESTは、極めて高いアレスト性能を有する。
- (2) 片側のSUF部が消滅した場合でも、従来TMCPで製造した鋼板に比べ極めて高いアレスト性能を有する。
- (3) ビードオンプレート溶接を施したHIARESTにおいて、き裂伝播に影響を与える残留応力の影響を低減する試験法を採用したにもかかわらず、脆性き裂が溶接部に沿って伝播せず、素材とほぼ同等のアレスト性能を示した。
- (4) シアリップ形成によるアレスト性能向上効果は定量化できるので、腐食環境等によりSUF部厚みの減少が予測される場合でも、その厚み減少量を考慮した必要なアレスト性能に対応するHIARESTの選定が可能である。
- (5) 溶接継手靱性、溶接性は、鋼板の化学成分により支配されるため、HIARESTのそれらは同一化学成分を有する従来工程で製造されたTMCP鋼板と同等の特性を有する。
- (6) HIARESTの線状加熱部及び歪時効処理材の靱性は、脆性破壊発生という厳密な意味では、従来工程(TMCP)鋼板と同様の組織を有する領域が存在するため、従来工程(TMCP)鋼板と同等である。しかしながら、HIARESTは脆性き裂が発生しても短いき裂の段階で停止させることができることから、実用上は従来工程(TMCP)鋼板と同等以上の性能を有する。

また、HIARESTとEH36鋼板に10%の塑性歪を付与した後、アレスト性能比較評価を行った結果、

- (1)10%の塑性歪を受けた場合に、EH36鋼板では0℃での長大き裂に対するアレスト性能の確保が難しくなる。
- (2)HIARESTは、10%程度の塑性歪が付与された場合でも、EH36鋼板の塑性歪なし材よりも優れたアレスト性能を有することが確認された。

このことより、大型船舶の衝突事故や大規模な地震等により塑性歪を受けて、通常の鋼板では脆性き裂の伝播が阻止できない場合でも、HIARESTを適用することにより、十分なアレスト性能が確保できるので安全性の向上が期待できる。

参考文献

- 1) 矢島 浩, 多田益男, 阪井大輔, 片上幹史, 土師利昭, 石川 忠, 勝田順一: 日本造船学会論文集, (168), 561(1990)
- 2) 石川 忠, 大下 滋, 益永英勝, 間瀬秀里, 土師利昭: 新日鉄技報, (348), 3 (1993)
- 3) 田中謙, 佐藤光雄, 石川忠: 製鉄研究, (318), 79(1985)
- 4) Ishikura,N., Kohno,T., Maeda,H., Arimochi,K., Tanaka,K.: Proceedings of International Conference on Transport and Storage of LPG and LNG. Brugges, 2. 1984, p.9.
- 5) Cuperus,N.: 10th World Petroleum Congress. Pancl Discussion 17. Paper No.3, London Heyden & Son Ltd.,1979
- 6) 小倉信和: 造船協会論文集, 110, 443(1961)
- 7) 町田 進, 吉成仁志, 安田 真, 栗飯原周二, 間瀬秀里: 日本造船学会論文集, (177), 243 (1995)
- 8) 野見山裕治, 石川 忠, 土師利昭: CAMP-ISIJ, 7,1834 (1994)
- 9) 長谷川俊永, 野見山裕治, 石川忠: 鉄と鋼, CAMP-ISIJ, 8,692 (1995)
- 10) 野見山裕治, 長谷川俊永, 石川忠, 吉川宏, CAMP-ISIJ, 8,691 (1995)
- 11) 石川忠, 野見山裕治, 長谷川俊永, 萩原行人, CAMP-ISIJ, 8,693 (1995)
- 12) 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), 259-267 (1994)
- 13) Krafft,J.M., Sullivan, A.M., Boyle,R.W.: Proc. Symp. Crack Propagation. Cranfield, 1961, p.8
- 14) Knott, J.F.: Fundamentals of Fracture Mechanics. A halsted Press Book, 1973
- 15) 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),555-563 (1994)
- 16) 造船研究協会第147研究部会: 造船研究協会報告書第75号
- 17) 日本圧力容器研究会議(JPVRC)材料部会圧力容器用鋼材専門委員会: 調査報告, 1981