

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～ 2012

課題番号：22246108

研究課題名（和文）

海上輸送構造体信頼性向上のための破壊力学研究

研究課題名（英文）

Fracture mechanics study on the reliability of sea transportation structures

研究代表者

粟飯原 周二 (AIHARA SHUJI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：10373599

研究成果の概要（和文）：

大型コンテナ船をはじめとする大型海上輸送体で極厚鋼板が使用されるようになり、脆性破壊を防止する技術の確立が急務であった。本研究では、高速で伝播する脆性き裂の挙動について実験と数値解析を行い、従来未解明であったき裂長さによる脆性き裂伝播停止挙動の差の原因を解明した。さらに、材質と応力の不均一を有する溶接部におけるき裂伝播挙動を予測するモデルを開発した。これらの成果は大型船体の脆性き裂伝播制御に役立つものである。

研究成果の概要（英文）：

Prevention of brittle fracture in large-scale sea transportation structures, such as mega-container ships, has been an urgent task because heavy-section steel plates are used in these structures. In the present study, experimental as well as numerical analyses were made for fast propagating brittle cracks. Reason to the discrepancy of the brittle crack propagation and arrest behaviors with crack length was clarified. Also, a numerical model was developed for analyzing crack propagation behaviors in welds with material and stress heterogeneities. These results are expected to contribute to the technology development for preventing and controlling brittle crack propagation in ship structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2011 年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2012 年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
年度			
年度			
総計	32,500,000	9,750,000	42,250,000

研究分野：破壊力学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：材料・構造力学

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の貿易量は年率約5%の伸びを示し、2004年には輸出入量は10億トンを超えた。このうち、99.7%（重量ベース）を占めるのが

船舶による海上輸送であり、エネルギー・食料など我が国の生命線を握っているのは海上物流であることは言を待たない。確固たる海上物流技術を維持・向上させることは我が

国の経済を支える基盤として重要である。

海上物流において近年は特に高速・高効率輸送が必要とされ、コンテナ船の大型化が進み、1万個積み以上の超大型船も建造されるようになった。このような船体ではこれまで経験のない70mmを超える極厚鋼板が使用される。このような鋼板を使用した超大型船体において信頼性が十分に確保されているか懸念があり、ここ数年間、国内で共同研究がなされてきたが、船体の脆性き裂伝播を防止するための技術や合理的な基準を確立するために解決すべき課題が多く残されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、長年未解明である高速で伝播する脆性破壊現象を解明し、極厚鋼板を含む溶接構造物の合理的なアレスト設計基準の確立に資するための理論的基盤を与えることである。本研究は海上輸送構造物のみならず、原子力圧力容器や、今後拡大が予想される天然ガスや水素ガス・CCS用炭酸ガス輸送パイプラインなどの信頼性向上にも適用できる。

## 3. 研究の方法

(1) 系統的な脆性き裂伝播試験：高張力鋼板について、負荷応力や温度分布を変化させた試験を行い、脆性き裂の伝播と停止（アレスト）挙動に及ぼす試験条件の影響を明確化する。

(2) 動的き裂伝播モデルの開発と解析：従来の線形弾性き裂伝播解析とは異なり、き裂先端の塑性変形を考慮したき裂伝播の数値モデルを開発する。特に、塑性域の拡大に伴う塑性拘束低下の現象を考慮する。

(3) 溶接継手き裂伝播モデルの開発と解析：溶接継手の脆性き裂伝播経路に影響を与える靱性不均一と溶接残留応力による応力不均一を考慮した3次元き裂伝播数値モデルを開発し、き裂伝播経路に及ぼす因子解析を行う。あわせて、脆性き裂伝播のマイクロ挙動を解析するモデルも開発する。

## 4. 研究成果

### (1) 系統的な脆性き裂伝播試験

鋼材のアレスト靱性（600m/s以上の高速で伝播する脆性き裂を停止させるための材料抵抗値、 $K_{ca}$ ）を評価するために温度勾配型試験が適用されてきた（図1）。破壊力学パラメータ応力拡大係数で表したアレスト靱性値  $K_{ca}$  は試験片サイズに依存しないはずであるが、実際には標準サイズ（500mm幅）と広幅（2m以上）の試験片で得られる  $K_{ca}$  に大きな乖離が存在することが長年未解決の問題であった。このため、破壊力学に基づいた船体構造のアレスト設計をすることができなかった。

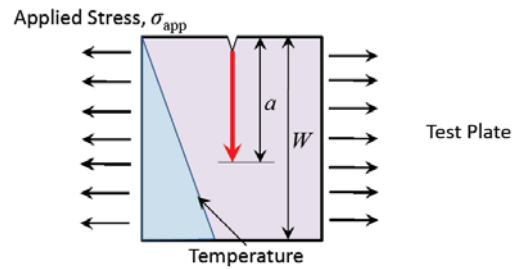


図1 温度勾配型脆性き裂アレスト試験

本研究では、き裂長さ（試験片幅に比例して変化）の変化を負荷応力に置き換えて系統的な試験を実施した。結果の一例を図2に示す（黒丸）。負荷応力が一定値以下の場合には実験点がアレニウスプロットで直線上に乗るもの、負荷応力を極端に高くすると直線から大きくかい離することが明らかとなった。すなわち、標準サイズの試験によって  $K_{ca}$  のかい離現象を再現することができた。図3はほぼ同一の温度でアレストした脆性き裂の破面を示す。高負荷応力試験のほうが  $K_{ca}$  が高いが、これに対応してシアリップ（鋼板表裏面近傍の延性破壊層）の発達もより顕著であることがわかった。

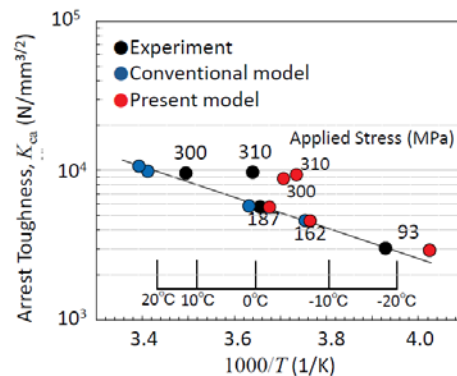


図2 アレスト靱性試験結果の例

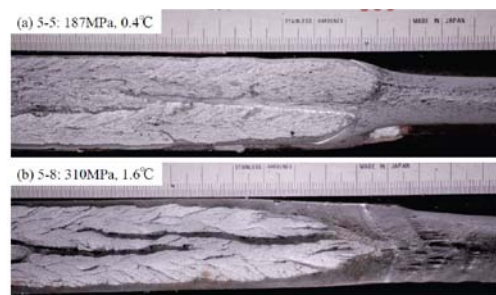


図3 アレスト靱性試験の破面

### (2) 動的き裂伝播モデルの開発と解析

本研究では、以前の科研費研究で、高速伝播する脆性き裂の数値モデルを開発した。このモデルでは、き裂先端の引張り応力が材

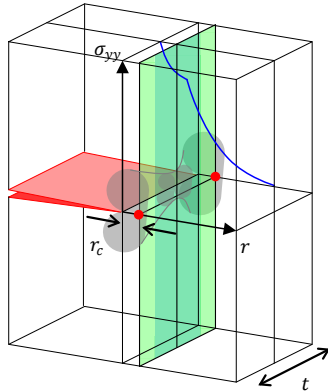


図4 き裂先端塑性域 (模式図)

料固有のへき開破壊応力とバランスした状態でき裂が伝播すると仮定するものであり、 $K_{ca}$  の温度依存性 (アレニウスプロットで直線) を説明できた。しかし、き裂長さ (試験片幅) の影響を説明することはできなかった (図2中、Conventional model)。

本研究では、既開発の数値モデルに改良を加えた。高速で伝播するき裂では歪速度が極めて高くなるために降伏応力が上昇して、き裂先端における塑性変形は抑制される。しかしながら、き裂が長くなる (あるいは負荷応力が極端に高くなる) と、応力拡大係数が上昇し、き裂先端塑性域は拡大して板厚と同程度のサイズになると、塑性拘束が低下して、き裂先端の引張り応力はむしろ低下することを着想した (図4)。既存モデルにこの効果を導入することにより、図2の実験結果を再現することができた (図2中、present model)。さらに、負荷応力が高くなるとシアリップの発達が顕著となることが本モデルで再現できた。き裂先端塑性域の拘束が低下するのがその原因である。

本モデルを広幅試験 (2.4m) に適用し、広幅試験による  $K_{ca}$  は標準幅による  $K_{ca}$  よりも過大に評価されることを計算により再現した (図5)。さらに、混成型広幅試験 (き裂は溶接部に沿って伝播後、鋼板に突入) にお

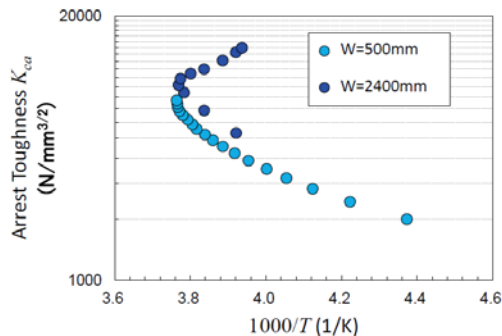


図5 アレスト靱性の試験片幅依存性

るき裂伝播/アレストの挙動も本モデルによって初めて説明することができた。

コンテナ船に使用される極厚高張力鋼板を想定して、本モデルを用いて系統的な解析を行った。その例を図6に示す。縦軸は標準サイズ試験片で得られる  $K_{ca}$ 、横軸は広幅試験で得られる  $K_{ca}$  である。図5からも類推されるように、 $K_{ca}$  のレベルに応じて広幅試験の  $K_{ca}$  のかい離が大きくなるが、その程度は板厚が大きいほど顕著となることが明らかとなった。図中黒点は実験結果 (他研究) であり、本モデルと概ね一致することがわかる。この結果から、船体構造において脆性き裂をアレストさせるために必要な  $K_{ca}$  は  $6,000\text{N/mm}^{3/2}$  であるとする試験結果 (他研究) に理論的な裏付けを与えることができた。さらに、必要アレスト靱性値は板厚が大きくなるほど高くすべきであることも明確にした。

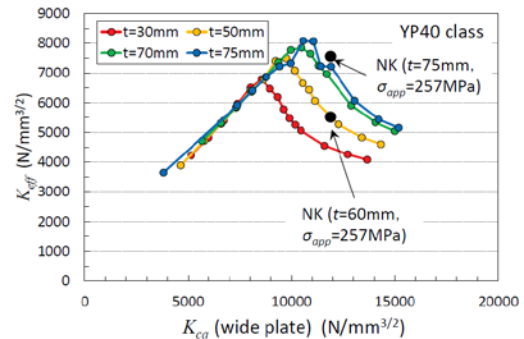


図6 アレスト靱性におよぼす試験片幅と板厚の影響 (YP40 鋼)

### (3) 溶接継手き裂伝播モデルの開発と解析

溶接構造物中を伝播する脆性き裂の経路はアレスト設計上、極めて重要であるが、これまで、その指針を与える理論はなく、少数の実験に基づいて経験的に検討されていた。本研究の基となる科研費研究において開発した2次元のき裂伝播モデルを3次元に拡張し、現実的な溶接継手形状についてき裂伝播径を予測するモデルを構築した。

図7にモデルの模式図を示す。鋼のへき開脆性き裂はミクロ的には結晶の{100}面分離によって生じる。3つの{100}面は互いに直交

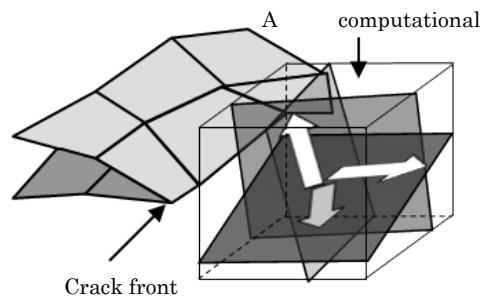


図7 3次元き裂伝播モデル (模式図)

している。これをマクロモデルに応用し、き裂先端に位置する要素を結晶粒と考えて、この要素に作用する応力テンソルから各{100}面に作用する垂直応力を評価して、その値が最大となる面をへき開面として選択することにした。その最大応力が限界応力に達しない場合はその要素ではき裂がアレストすることとした。き裂先端前方の要素に作用する応力テンソルはそのき裂先端位置における混合応力拡大係数の3成分が求めれば線形破壊力学の知識によって求めることができる。溶接継手を伝播するき裂は屈曲して複雑な形状となるので、混合応力拡大係数を正確に求めることは困難である。ここでは、凹凸を有するき裂に対する近似解等を用いて混合応力拡大係数を求めることとした。き裂の屈曲以外に溶接残留応力の分布も考慮した。一方、溶接継手には母材、熱影響部、溶接金属にかけて靱性の分布を有する。これを考慮して上記の限界応力の分布を設定した。

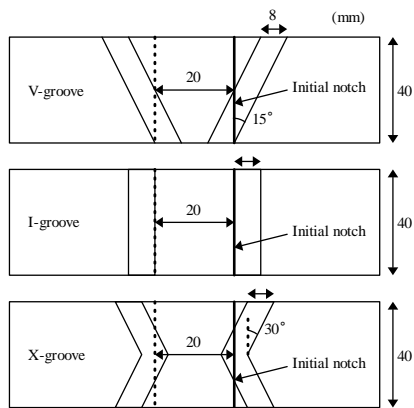
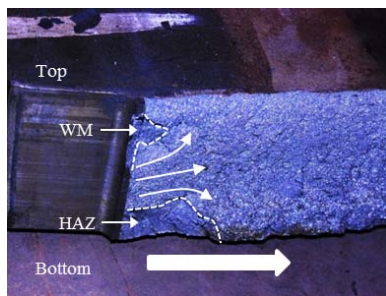
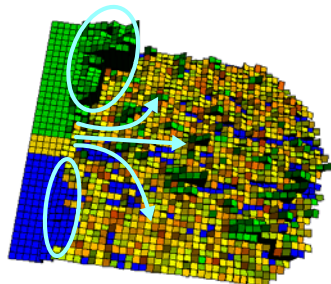


図8 仮定した溶接継手形状 (断面)



(a) 実験



(b) モデル計算

図9 溶接継手脆性き裂伝播挙動

本モデルは3次元モデルであり、溶接継手形状を図8のように仮定することができる。形状によってき裂伝播の挙動が異なることが再現できる。V開先溶接継手における脆性き裂伝播経路の実験と計算の比較を図9に示す。鋼板表面に直角の初期き裂が伝播しはじめると、ねじれて溶接ボンド部に沿って伝播する様子が再現できている。また、X開先ではき裂が早期にアレストすることも確認できた。図10はき裂伝播経路の計算例である。溶接残留応力が低く熱影響部の靱性が低い場合には、き裂は熱影響部に沿って直進するが、母材の靱性が低く熱影響部の靱性との差が小さい場合には、き裂は母材側に大きく逸脱する結果となった。この傾向は従来の一連の実験とよく対応していることが確認できた。

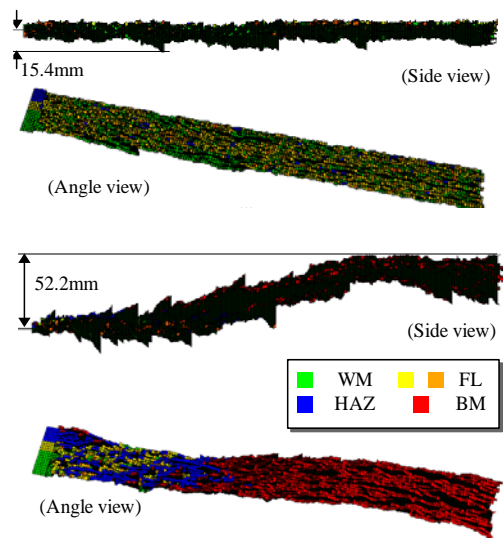


図10 溶接継手中のき裂伝播経路

このモデルによって、例えば、大型コンテナ船のブロック建造において、溶接部で発生伝播した脆性き裂を確実に母材に突入させてアレストさせるための突き合わせ継手のシフト量を決定することに適用することが可能である。

以上述べたとおり、本研究では高速で伝播する脆性き裂の挙動について実験と数値モデル解析を行い、長年未解明であった問題を解決することができた。本研究成果の一部は脆性き裂アレスト試験法基準やコンテナ船脆性き裂アレスト設計指針に適用されている。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

① 栗飯原周二、柴沼一樹、渡部良行、長大き裂の伝播停止挙動のモデル化、日本船舶海洋

工学会論文集、査読有、vol.16、2012、  
pp.109-120

②柴沼一樹、栗飯原周二、フェライト結晶粒  
内のへき開面形成シミュレーション、鉄と鋼、  
査読有、vol.98、No.5、2012、pp.190-196

③ S.Aihara, Y.Watabe, K.Shibanuma,  
T. Inoue, T.Koseki, Numerical and  
experimental analysis of brittle crack  
propagation and arrest in steels,  
Proceedings, Int. Offshore and Polar Eng.  
Conf., 2012, 査読有、 p.90-97

④ H.Nakai, S.Aihara, T.Inoe, Numerical  
simulation of cleavage crack path in a  
welded joint, Proceedings, Int. Offshore  
and Polar Eng. Conf., 2011, 査読有、  
p.222-229

⑤S.Aihara, Y.Tanaka, A simulation model  
for cleavage crack propagation in BCC  
polycrystalline solids, Acta Materialia,  
査読有、 pp.4641-4652

〔学会発表〕(計 9 件)

①柴沼一樹、栗飯原周二、フェライト鋼のへ  
き開破面単位の温度依存性とそのモデル化、  
日本鉄鋼協会シンポジウム、2012年9月、松  
山

②柴沼一樹、渡部良行、栗飯原周二、脆性き  
裂伝播停止挙動のモデル化、日本船舶海洋工  
学会秋季講演会、2011年11月、東京

③中居寛明、栗飯原周二、井上健裕、鋼溶接  
継手におけるへき開き裂伝播挙動の三次元  
シミュレーション、日本船舶海洋工学会秋季  
講演会、2010年11月、東京

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fract.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

栗飯原 周二 (AIHARA SHUJI)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：10373599

### (2) 研究分担者

吉成 仁志 (YOSHINARI HITOSHI)  
海上技術安全研究所・上席研究員  
研究者番号：20167737

柴沼 一樹 (SHIBANUMA KAZUKI)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号：30611826

### (3) 研究協力者

渡部 良行 (WATABE YOSHIYUKI)  
東京大学・大学院工学系研究科・院生

中居 寛明 (NAKAI HIROAKI)

東京大学・大学院工学系研究科・院生

滑川 哲也 (NAMEGAWA TETSUYA)

東京大学・大学院工学系研究科・院生