

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19206091  
 研究課題名（和文） 海上輸送構造体信頼性確立のためのマルチスケール評価技術の研究  
 研究課題名（英文） Study on multi-scale assessment for reliability analysis of sea-transportation structures  
 研究代表者  
 粟飯原 周二 (SHUIJ AIHARA)  
 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：

大型コンテナ船をはじめとする海上輸送構造体の信頼性を確保することは我が国の経済発展のために重要である。かかる構造体では脆性き裂伝播を抑制することが重要であり、本研究ではマルチスケール解析によりこの現象を研究した。脆性き裂伝播の金属結晶粒径、異方性に対する依存性をマイクロモデルにより定量的に解明するとともに、溶接部における力学的・材質的不均一がき裂伝播挙動に及ぼす影響をマクロモデルにより定量的に解明した。本研究の一部は実船の安全性評価基準へ適用された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	17,500,000	5,250,000	22,750,000
2008 年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
総計	25,800,000	7,740,000	33,540,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船体構造、破壊力学、き裂伝播、溶接、マルチスケール、多結晶体、へき開破壊

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の輸出入量約10億トンのうち、99.7%が船舶による海上輸送であり、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、1万個積みの超大型船も計画されている。このような船体ではこれまで経験のない70mmを超える極厚材料が使用されることが予想されており、このような部材では脆性破壊の懸念が高まる。脆性破壊は一端発生すると大規模損傷に発展する可能性が高いので、これを防止するための技術開発が必要であ

る。

## 2. 研究の目的

上記観点から、大型海上輸送構造体の信頼性の研究を早急に進めるべきである。特に、極厚材料を使用した船体における高速き裂伝播の制御については従来研究でも未解明の点が多く、早期の解明が産業界からも要請されている。本研究を我が国の学が中心となって実施し、その成果を世界に発信し、我が国のみならず世界の海上輸送の信頼性向上に大きく貢献すべきである。

なお、本分野の研究は海上輸送構造体のみならず、原子力圧力容器や、今後拡大が予想

される天然ガス・水素ガス輸送パイプラインなどの信頼性向上等にも適用できるもので、応用範囲は広い。

### 3. 研究の方法

#### (1) 多結晶体・メソスコピックき裂伝播モデルの開発

金属多結晶体におけるへき開き裂伝播挙動のマイクロモデルを開発する。マイクロき裂は結晶の特定の結晶面に沿って伝播することに着目し、結晶粒ごとのき裂面を決定するアルゴリズムを開発し、これをもとにき裂が連続的に伝播する状況を再現するものである。これを構造用材料に適用可能とするために、結晶粒間に生じるき裂面の食い違いによるき裂進展力の低下、結晶方位の異方性、き裂先端の応力場等の影響を考慮するとともに、実際の鉄鋼材料の破壊試験を実施して、破壊面の詳細観察からモデルの妥当性検証を行い、その実用化を図る。

#### (2) 溶接部材き裂伝播モデルの開発

実際の溶接構造体では、溶接金属、熱影響部、母材にかけて材料特性が不均一で、さらに、溶接残留応力のためにき裂に作用する応力も一様でない。このような材質と応力の不均一場中を伝播するき裂の経路を予測することは構造体で発生したき裂の伝播を制御するために重要である。これを可能とするモデルを開発する。企業の実験データを参照して上記モデルによるき裂伝播挙動解析を実施し、実験との整合性を図り、モデルの高精度化と実用化を図る。

#### (3) 構造体き裂伝播モデルの開発

実構造体レベルでのき裂伝播挙動解析手法の確立のための基礎研究を行う。き裂の動的伝播には構造の複雑性とそれに起因する応力波の反射が影響を与えるため、これを詳細に検討する。このために、有限要素法を用いたき裂伝播の動的解析手法の開発を行う。企業で実施される大型構造モデル試験データも利用し、実用的な評価手法の確立を図る。

### 4. 研究成果

#### (1) 多結晶体・メソスコピックき裂伝播モデルの開発

鋼は多結晶体であるが、ひとつの結晶粒には3個の{100}面がある。これらの面に作用する垂直応力が最も高い値を有する面がへき開面として選択されこの結晶粒内をき裂伝播するものと仮定する(図1)。上記の垂直応力を評価するためには、き裂先端の局所応力拡大係数の評価が必要である。本モデルでは、結晶粒ごとに{100}面方位が異なるためにき裂面が凹凸を有すること、結晶粒間で

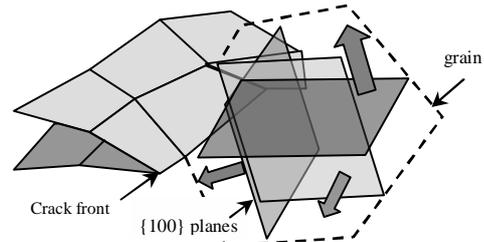


図1 多結晶体メソスコピックモデルの概念図

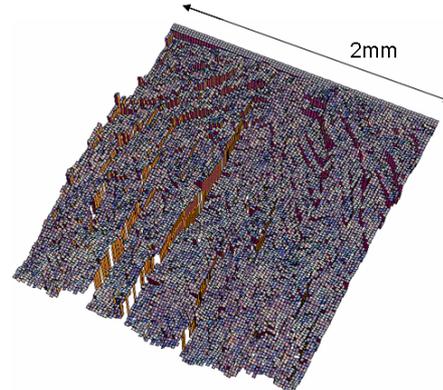
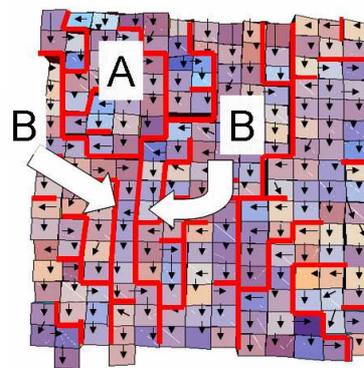
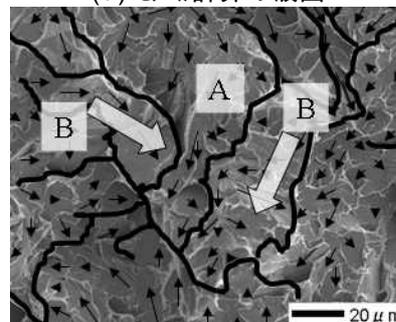


図2 へき開き裂伝播計算結果の例

裂が未破断で連続していること、き裂前縁が非直線であることを考慮して、解析解を重ね合わせることにより局所応力拡大係数を近似的に計算した。これらの仮定を基に、多結晶体・メソスコピックき裂伝播モデルを開発



(a) モデル計算の破面



(b) 鋼のへき開破面(電子顕微鏡)

図3 ミクロき裂伝播挙動のモデルと実験の比較

した。

図2に鋼のへき開き裂伝播計算結果の例を示す。実験で観察される破面形態を再現できることが確認された。計算により得られた破面をより詳細に見ると、へき開き裂は結晶粒ごとに伝播方向が変化すること、き裂伝播が不連続となる境界が存在し、そこで破面の段差が大きくなってき裂伝播吸収エネルギーが高くなること、局所的にき裂の停止と周囲からのき裂の回り込みを繰り返すことにより全体的な破面を形成すること等、実際のミクロき裂伝播の状況を再現できることが確認された(図3)。

本モデルを用いてき裂伝播に及ぼす鋼の微視組織の影響について評価を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

結晶粒径を微細化するほど、き裂伝播距離が短くなる(微細粒鋼ほどき裂伝播抵抗が高くなる)。

結晶粒間に存在する未破断部の延性破壊ミクロ延性が高いほどへき開き裂伝播抵抗が上昇する。すなわち、ミクロ延性がへき開き裂伝播抵抗に影響を与える。

へき開き裂が停止する直前において、き裂伝播方向が結晶粒レベルで顕著に変化するとともに、き裂伝播方向連続領域が小さくなる。

結晶方位に異方性を有する鋼では、き裂伝播方向によってき裂の傾斜やねじれが生じるとともに、き裂伝播抵抗の方位依存性が生じることを初めて定量的に解明した(図4)。

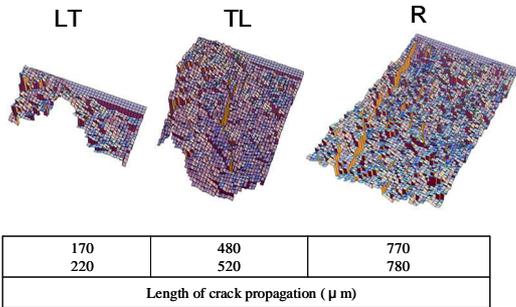


図4 結晶方位異方性を有する鋼のき裂伝播抵抗の方向依存性(計算)

本モデルは他に類を見ない初めての試みであり、鋼多結晶体におけるへき開き裂伝播の様相をミクロレベルで再現できることが実験との比較により確認できた。へき開き裂伝播・停止の挙動を初めてミクロレベルで解析することが可能となった。今後、さらに、応用面での発展が期待できる。

#### (2) 溶接部材き裂伝播モデルの開発

溶接部に存在する靱性と応力の分布を考慮した脆性き裂伝播モデルはこれまでになく、本研究で新たに開発した。本モデルでは、

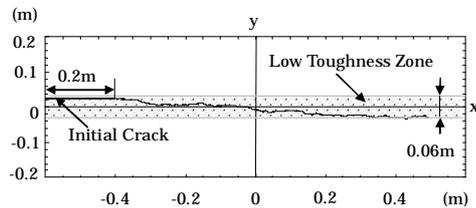
き裂伝播方向に微小な摂動を与え、き裂先端最大応力の方向からき裂進展方向を決定する。これを繰り返すことによりき裂伝播経路を推定することとした。このために非直線状き裂の応力拡大係数を算定する必要があり、近似計算式を開発した。

本モデルにより得られた主な結果は以下のとおりである。

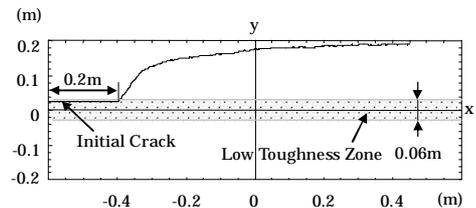
き裂の伝播経路は溶接残留応力と負荷応力の影響を強く受ける。負荷応力が高いほどき裂は溶接部に沿って伝播しやすい(図5)。

母材に較べて溶接部靱性が低いほど、き裂は溶接部に沿って伝播しやすい(図6)。母材の集合組織は溶接部のき裂伝播挙動に大きな影響を与えない。

段差を有する平行な溶接継手において、段差が小さいとき裂が段差を飛び越えて隣接する継手に伝播する場合がある(図7)。

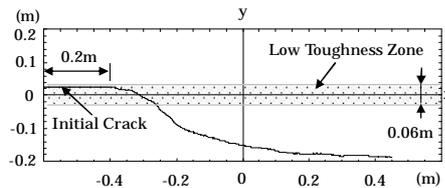


(a) 負荷応力: 0.75x 降伏応力

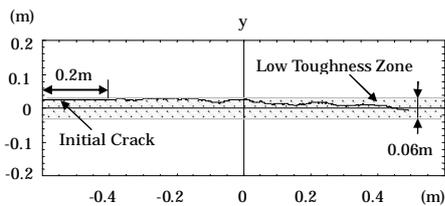


(b) 負荷応力: 0.25x 降伏応力

図5 溶接部脆性き裂伝播経路に及ぼす負荷応力の影響



(a) 溶接部 / 母材部靱性比: 0.9



(b) 溶接部 / 母材部靱性比: 0.3

図6 溶接部脆性き裂伝播経路に及ぼす靱性分布の影響

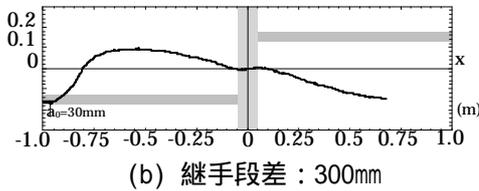
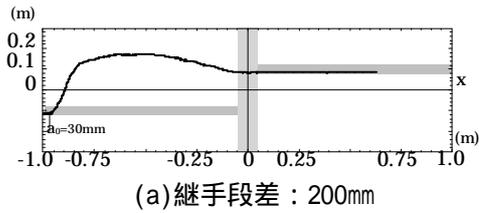


図7 段差継手におけるき裂伝播経路

以上の結果から、母材・溶接部の靱性比と負荷応力による脆性き裂の継手伝播・逸脱を初めて定量的に評価することが可能となった。さらに、コンテナ船等の船体構造において、段差を有する継手（バットシフト）によって溶接部に沿って伝播する脆性き裂を母材部に突入させてき裂を停止させる設計に対して、必要なバットシフト量を定量的に決定することができた（設計指針に反映）。

### (3) 構造体き裂伝播モデルの開発

高速で伝播する脆性き裂を解析するために、き裂先端接点力開放を逐次的に行う動的有限要素法による解析手法を開発し（図8）、動的応力拡大係数が解析解と一致することを確認した。

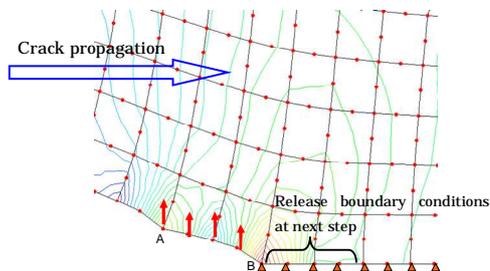


図8 動的き裂伝播のFEMモデル化

本解析手法により得られた結果は以下のとおりである。

鋼材の脆性き裂伝播抵抗を測定するために実施されるき裂伝播停止試験の解析を行なった。試験体の刃板（試験機に取り付けるための厚手部材）と試験板の異厚部における応力波の反射がき裂伝播に影響を与え、き裂停止靱性値の評価に影響する。図9に、き裂伝播中の動的応力拡大係数の計算結果を示す。異厚比が50mm/16mmの場合には応力波反射により動的応力拡大係数が顕著に低下する場合があることが明らかとなった。この結果は、異厚比が3以上になるとき裂伝播停止靱性値が過大に評価されてしまう

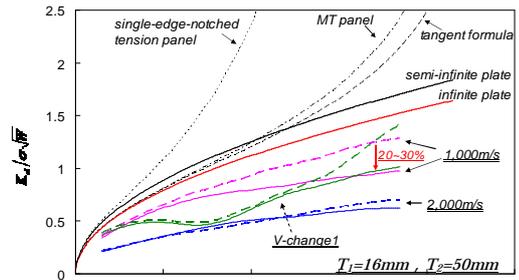


図9 異厚刃板付試験片の動的応力拡大係数計算結果

実験結果（企業）と一致し、その原因が応力波反射によるものであることを証明した。本結果をもとに、適正な試験体形状制限の提案を行った。

船体を模擬した大型構造モデル試験（企業実施）の脆性き裂伝播停止の解析を実施した（図10）。き裂が助走板で1.6m伝播後試験板に突入して数100mm伝播した後にき裂停止した場合の解析結果を図11に示す。き裂が試験板に突入した後も動的応力拡大係数は上昇を続け、応力波反射による動的応力拡大係数の低下がき裂停止の原因ではないことが明確となった。動的応力拡大係数が上昇するにもかかわらずき裂が停止する理由をき裂伝播抵抗値のき裂伝播速度依存性から説明し

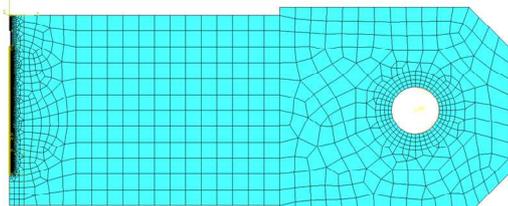


図10 構造体レベル試験体のFEMモデル化（試験体長さ10m）

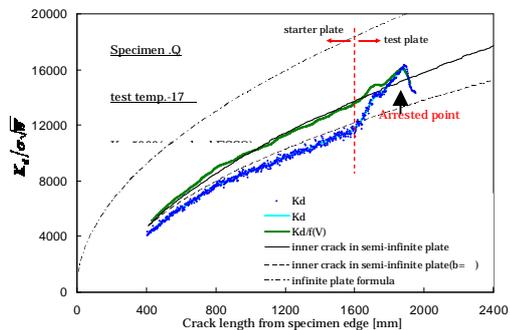


図11 構造体レベル試験体の動的応力拡大係数計算結果

た。

以上の構造体き裂伝播解析から、構造体レベルにおける脆性き裂伝播・停止の動的現象の多くを説明することができた。特に、試験

体の応力波反射の影響を定量的に評価し試験法基準に反映させることができた。一方で、構造体で発生する数メートル規模の長大き裂の伝播・停止挙動については、更なる解析が必要である。

#### (4) 研究成果の総括

へき開脆性き裂の伝播・停止挙動についてはミクロからマクロのレベルにおいて未解明な点が多く残されていた。本研究で開発したミクロき裂伝播モデルは、結晶粒レベルでへき開き裂伝播挙動を定量的に扱うことができる初めてのモデルであり、結晶粒径や結晶方位をはじめとする鋼のミクロ組織因子によるき裂伝播抵抗(靱性)の変化を定量的に解析することができるものであり、従来の経験的な研究手法から大きく発展した。今後の材料開発にも威力を発揮することが期待できる。

一方、マクロレベルにおいては、溶接部のような靱性と応力の不均一場中を伝播する脆性き裂の挙動を解析することが本研究により可能となり、船体をはじめとする溶接構造部材中のき裂伝播の制御に適用できる。今後の溶接部材設計への適用が期待される。

構造体レベルでは、部材境界等における応力波の反射がき裂伝播挙動に与える影響を定量的に評価することが可能となった。しかしながら、数メートルに及ぶ長大脆性き裂の伝播と停止の挙動については未解明な課題が残された。今後の研究が必要である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- (1) 杉本圭、粟飯原周二、田中洋一；鋼のへき開き裂伝播の結晶粒レベル3次元シミュレーション、鉄と鋼、vol.96, No.6, 2009, (掲載決定) 査読有。
- (2) 吉成仁志、粟飯原周二；バットシフト継手における脆性き裂の伝播挙動、日本船舶海洋工学会論文集、vol.9, 2009, (掲載決定) 査読有。
- (3) 吉成仁志、粟飯原周二；溶接継手脆性き裂伝播挙動に及ぼす入熱・集合組織の影響、日本船舶海洋工学会論文集、vol.7(2008)、p.251-258. 査読有。
- (4) 吉成仁志、粟飯原周二、岩田知明；溶接継手脆性き裂伝播挙動に及ぼす残留応力・靱性の影響、日本船舶海洋工学会論文集、vol.6(2007)、p.371-377. 査読有。

〔学会発表〕(計8件)

- (1) 安藤翼、粟飯原周二；厚鋼板脆性き裂アレスト特性評価法に関する基礎検討、日本鉄鋼協会第156回秋季講演大会、熊本大学、2008年9月25日、CAMP-ISIJ, vol.21(2008) -1434.
- (2) 杉本圭、粟飯原周二、田中洋一；へ

き開破面形態に及ぼすき裂伝播条件の影響、日本鉄鋼協会第156回秋季講演大会、熊本大学、2008年9月25日、CAMP-ISIJ, vol.21(2008) -1435.

- (3) 粟飯原周二；鋼のへき開破壊発生機構と課題について、日本鉄鋼協会第156回秋季講演大会 材料の組織と特性部会「構造材料の組織と破壊」フォーラムシンポジウム、熊本大学、2008年9月23日。
- (4) 杉本圭、粟飯原周二；へき開き裂の3次元シミュレーション、日本船舶海洋工学会材料溶接研究会、東京、2007年11月13日。
- (5) 杉本圭、粟飯原周二、田中洋一；鋼のへき開き裂伝播の結晶粒レベル3次元シミュレーション、鉄鋼協会第154回秋季講演大会、岐阜大学、2007年9月20日、CAMP-ISIJ, vol.20(2007) -1270.

〔その他〕

本研究の成果を応用した結果が大型コンテナ船脆性き裂アレスト設計指針(2009年)に反映される予定である。

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

粟飯原 周二 (SHUIJ AIHARA)  
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 (HITOSHI YOSHINARI)  
海上技術安全研究所・上席研究員  
研究者番号：20167737

(3) 連携研究者