

## 鋼の結晶組織と亀裂停止特性の関係解明のための マルチスケール亀裂伝播モデルの開発

03130967 山本悠貴  
指導教員 柴沼一樹 講師

### 1. 研究背景と目的

近年、国際的な海上物流量の増加と輸送コスト低減に伴い、コンテナ船の急激な大型化が進行している。コンテナ船は積み下ろしのため倉口がコの字型に開口した構造をしており、大きな縦曲げ応力が発生するという弱点を持つ。そのため使用鋼板の極厚化が進んでいる。

極厚化によって生じる問題として、脆性破壊の発生リスクの増加が挙げられる。脆性破壊は発生した場合致命的な損傷を与える可能性があるため、確実な防止が必要とされる。

脆性破壊という現象は大きく分けると発生と伝播という2つに分けることができる。発生の防止には欠陥を完全に除去する必要があるが、実際には困難である。そのため船体構造設計では、亀裂が発生した場合に大規模な破壊とならないよう亀裂の伝播を安全に制御・アレストさせるという”Fail Safe Design”の思想が必要とされている。そのため、国際的に材料の亀裂停止特性(アレスト靱性)を設計要件にする流れが起きており、高アレスト鋼へのニーズが拡大している。

鋼は微視的には体心立方格子の結晶構造を有する多結晶体であり、各結晶粒は大きな異方性を持つ。そのため結晶方位の集積や結晶粒径といったマイクロ組織因子によって、その力学的特性に大きな違いが生じる。

アレスト靱性 $K_{ca}$ についてもこれらマイクロ組織因との関係があるとされているが、経験的にわかっているのみである。実験的にアレスト靱性を求める方法としては ESSO 試験が挙げられ、本研究では最終的に ESSO 試験を再現することで妥当性検証を行う。

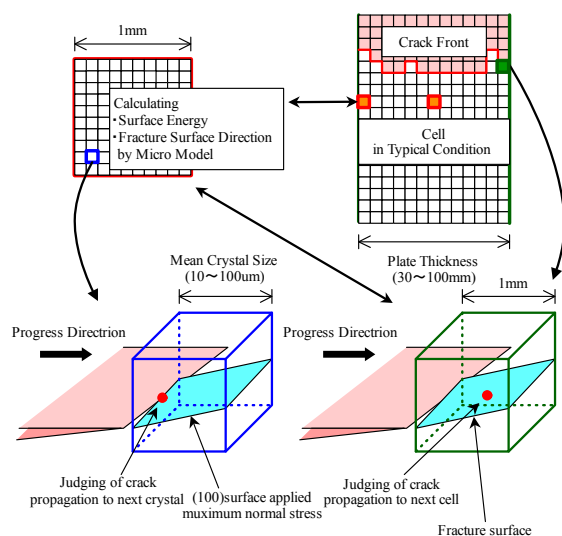


Figure.1 Schematic of multiscale simulation

本研究では上記した背景から鋼板のマイクロ組織を入力値とし、鋼板の巨視的な脆性亀裂伝播・停止挙動を再現することのできるマルチスケールモデルの開発を試みる。

以下にマルチスケールモデルの概要を述べる。

### 2. ミクロモデルの開発

マイクロモデル開発の目的は、結晶方位や結晶粒径という微視的因子が巨視的な破面形成に与える影響を評価することである。マルチスケールモデルにおける位置づけとしては、入力条件を様々に変化させシミュレーションを複数回行うことにより、各条件での破面形状と破壊抵抗値をモンテカルロ的に導出することである。マイクロモデルは栗飯原ら[1]の作成したモデルの枠組みと応力拡大係数 $K$ の算出法を基に、マクロモデルへのパラメータ算出を導入することで開発を行った。

マイクロモデルの入力条件は(1)集合組織、(2)平均結晶粒径、(3)負荷応力、(4)降伏応力、(5)局所アレスト靱性、(6)未破断部の限界ひずみ、の6つである。結果として導出するのは、マクロモデルの入力条件として用いる、破面が生じる際の表面エネルギー $\gamma$ と破面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ である。マイクロモデルでは鋼板全体の中でも、1mm四方の微小領域を対象としてモデル化を行う。

微視的に見れば鋼の破壊は結晶の特定面が分離するへき開破壊によるものである。鋼を含む体心立方格子の結晶では、 $\{100\}$ 面と呼ばれる、立方体の各面に平行な3つの面のうちのひとつが分離する。そのためマイクロモデルでは以下のようにモデル化を行った。

まず計算対象領域を平均結晶粒径サイズのユニットセルに分割し、次にそれぞれのユニットセルに(2)集合組織の分布に基づき $\{100\}$ 面を割り当てる。次に亀裂前縁に接するそれぞれのユニットセルでの応力拡大係数 $K$ と、材料固有の局所アレスト靱性 $K_{cm}$ とを比較することで破壊の判定を行う。各ユニット内に生じるへき開面は、割り当てられた $\{100\}$ 面で最も応力の高い面にて破壊が生じるとして決定した。

次に亀裂前縁のユニットセルでの応力拡大係数の算出法を述べる。本モデルでは Figure.2 に示すように、亀裂が完全に平面であり、亀裂前縁が伝播方向に垂直である場合の応力拡大係数 $K_{\alpha}^{\infty}$  ( $\alpha = I, II, III$ )を基準として、(1)亀裂全縁が非直線であることの効果、(2)テアリッジの効果、(3)亀裂表面が非平面であることの効果(凹凸および傾き)、を考慮して必要となる $K_{tip}^{\alpha}$  ( $\alpha = I, II, III$ )を算出する。また計算領域内に作用する応力は一定とし、値は有限要素法による高速亀裂伝播解析の結果での局所的な応力を用いる。

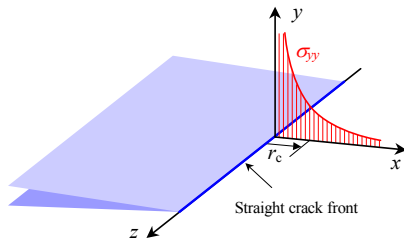


Figure.2 Schematic of crack tip

次にマイクロモデルの最終的な結果となるパラメータの表面エネルギー $\gamma$ と破面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ の導出法について述べる。マイクロモデルの結果として得られる破面の例を Figure.3 に示す。

破面が生じる際に吸収されるエネルギーは結晶粒内にてへき開面を形成することによるエネルギーと結晶粒間におけるテアリッジ形成エネルギーからなる。特に後者のエネルギーが大きいいため、本研究ではこの値を表面エネルギーとして算出した。

破面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ は Figure.3 のように平面で近似し、その法線ベクトルを取得した。

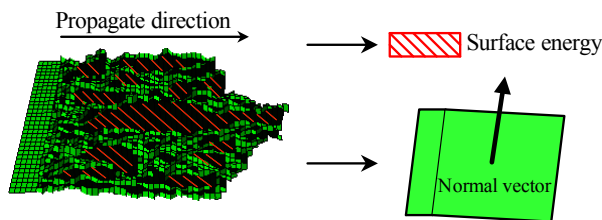


Figure.3 Derivation of surface energy and normal vector

### 3. マクロモデルの開発

マクロモデル解析は(1)有限要素解析, (2)マイクロモデル解析, (3)マクロモデル解析の3つのステップで行う。

まず(1)有限要素解析では、鋼板モデルを作成し、拘束伝播中の亀裂前縁近傍における応力分布とひずみ速度分布を連続体力学的に算出する。ここで得られたデータがマクロモデルにおける亀裂伝播の駆動力となる。(2)マイクロモデル解析では有限要素解析結果およびマイクロ組織の分布から、鋼板中の代表的な条件の要素を抽出し、複数回マイクロモデル解析を行う。そして前項にて述べた1mm四方のユニットセルでの破面と抵抗値の分布をモンテカルロ法により算出する。ここで得られたデータが主にマクロモデルにおける亀裂伝播の抵抗値となる。(3)マクロモデル解析では鋼板を1mm四方のユニットセルに離散化し、有限要素解析結果およびマイクロ解析結果を各ユニットセルに内挿によって割り当てることで、亀裂伝播・停止挙動の再現を試みる。

マクロモデルでの破壊条件について述べる。マクロモデルでは有限要素解析の結果として得られる応力を各ユニットセルに割り当て、応力拡大係数 $K_{\alpha}^{\infty}(x, z)$ を基準としマイクロモデルと同様に重ね合わせの原理によって応力拡大係数を算出する。破壊抵抗値 $K_{CM}(x, z)$ はマイクロモデル結果の $\gamma(x, z)$ から次式で算出する。

$$K_{CM}(x, z) = \sqrt{2E\gamma(x, z)} \quad (3-1)$$

### 4. ESSO 実験の再現による妥当性検証

前項までに述べたマルチスケールモデル解析を用いて ESSO 試験を再現することでモデルの妥当性検証を行った。本研究では板厚方向にマイクロ組織の分布を有する供試鋼について、マイクロ組織分布を入力としてマルチスケール解析を行った。

実験と解析の比較を示す。亀裂停止距離について実験は154mm、解析は158mmとなり誤差4mmであった。先端形状は、板表面が応力低下によって、そして板中央が集合組織によって、それぞれ亀裂が後退する現象を高精度に再現する結果となった。破面形態についてもジエブロンパターンと呼ばれる破面形態を再現した。

以上のように、開発したモデルによって、従来不可能であった脆性亀裂の伝播・停止挙動を高精度に再現した。

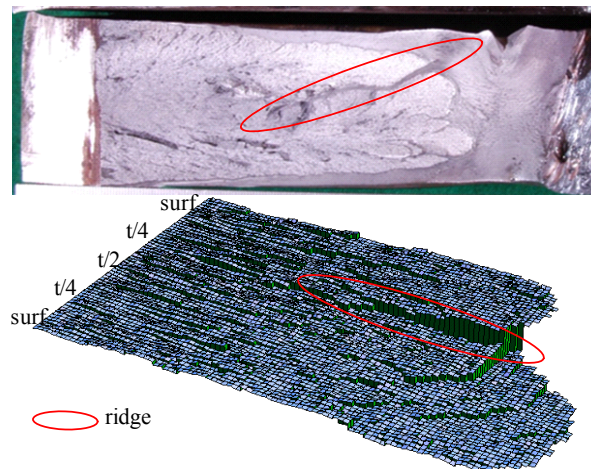


Figure.4 Comparison between simulation and experiment

### 5. 結論

鋼のマイクロ組織を入力条件として、鋼の巨視的な亀裂伝播・停止挙動を再現するモデルの開発を行い、未解明であった脆性亀裂伝播・停止挙動と鋼のマイクロ組織の関係解明を試みた。そして開発したモデルを用いて、実験での亀裂停止挙動を高精度に再現し、モデルの妥当性を示した。

本モデルは構成する個々の要素技術の修正・発展により更なる高精度化が期待される。そして最終的には、アレスト靱性とマイクロ組織との関係解明を含めた、脆性亀裂のアレスト現象解明へ向けた理論体系確立のためのフレームワーク的役割を果たすと考えられる。

### 参考文献

- 1) S., Aihara; Y., Tanaka., *Acta Materialia*, 59, pp.4641-4652. 2011.