

# 鋼の結晶粒径と亀裂停止特性との関係解明のための実験と数値解析

03140957 逸見拓弘

指導教員 柴沼一樹 講師

## 1. 研究背景と目的

近年、コンテナ船の大型化に伴い使用鋼板の極厚化しており、脆性破壊の危険性が懸念されている。脆性破壊によるコンテナ船を防ぐには、脆性破壊の発生だけではなく、脆性亀裂の伝播を制御・停止する二重安全性が必要である。したがって、たとえ亀裂が発生しても亀裂伝播を制御して安全に停止させるアレスト設計を行うことが必要である。

亀裂伝播制御には、鋼板の持つ脆性破壊による亀裂伝播停止特性であるアレスト靱性を高めることが最も基本的で有効な手段である。しかし、脆性破壊のアレスト現象は未解明な点が多い。特に、鋼板の巨視的特性である「アレスト靱性」と、鋼の微視的な「マイクロ組織」との間には相関があることが経験的に知られているのみである[1][2]。これらの関係を理論的に解明することは飛躍的に高性能なアレスト鋼を合理的に開発するにあたり、極めて有用であると考えられる。

Yamamoto *et al.*によって、結晶組織の粒径分布と結晶方位という鋼の微視的な組織情報を入力条件とした巨視的な鋼板の脆性亀裂伝播・停止挙動を再現可能なマルチスケールモデルの開発が行われた[3][4]。しかし、例えば、結晶粒径が小さいほど亀裂が進展しやすいというモデルの結果は従来の経験的知見と反しており、このモデルの妥当性検証は十分ではない。

そこで本研究では、まず、結晶粒径の異なる三鋼種を用いて系統的なアレスト靱性試験を行い結晶粒径と亀裂停止挙動の関係を測定してこれらの関係を定量的に評価した。これにより現状のマルチスケールモデルには修正が必要かを検討する。修正が必要な場合にはその原因をモデルの入力値から見直し特定し、実験とモデルで亀裂伝播及び停止の挙動が一致する条件を考察する。

## 2. マルチスケールモデル概要

マルチスケールモデルの概要を図1に示す。モデルは結晶粒の劈開破壊を対象としたマイクロモデルと鋼板全体の脆性亀裂伝播を対象としたマクロモデルから構成される。モデルの基本的な枠組みはAiharaらのモデル[5]を基礎とし、領域をユニットセルに離散化し、亀裂前縁となったセルに対し、亀裂伝播判定を逐次行うことで亀裂伝播を模擬する。領域分割は、マイクロモデルでは計算対象領域を1mm四方セルとして平均結晶サイズで分割し、マクロモデルでは鋼板をマイクロモデル計算対象領域に対応する1mm四方セルに離散化する。

亀裂伝播判定は、亀裂前縁セルにて応力拡大係数

を用いて伝播の駆動力と抵抗値の大小比較で行う。このとき駆動力は有限要素法による高速亀裂伝播解析の結果の応力を用い、重ね合わせにより近似的に算出する。抵抗値はマイクロモデルでは材料定数、マクロモデルではマイクロモデルの結果より算出する。

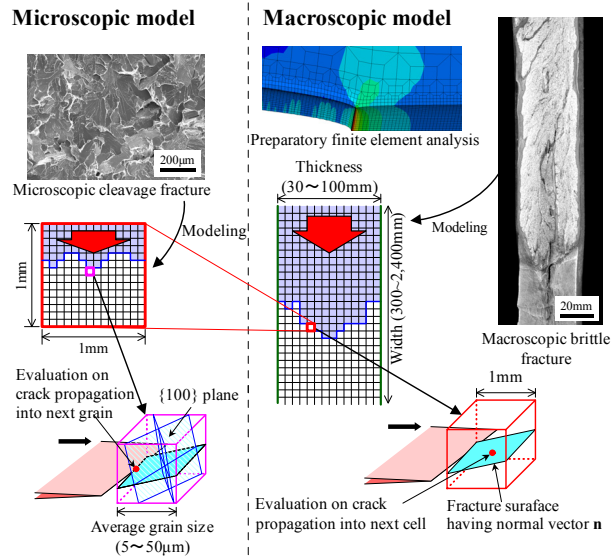


図1.マルチスケールモデル概要

## 3. 三点曲げ試験

マルチスケールモデルの粒径依存性の傾向の実験に基づく定量的な評価は必ずしも十分ではない。本研究では結晶粒径の異なる3鋼種SA1, SA2, SA3に対して三点曲げ試験を行い、発生条件と亀裂停止位置を測定することでアレスト靱性を評価し、結晶粒径と亀裂停止特性の関係を実験的に検討した。三点曲げ試験の概略図を図2に示す。

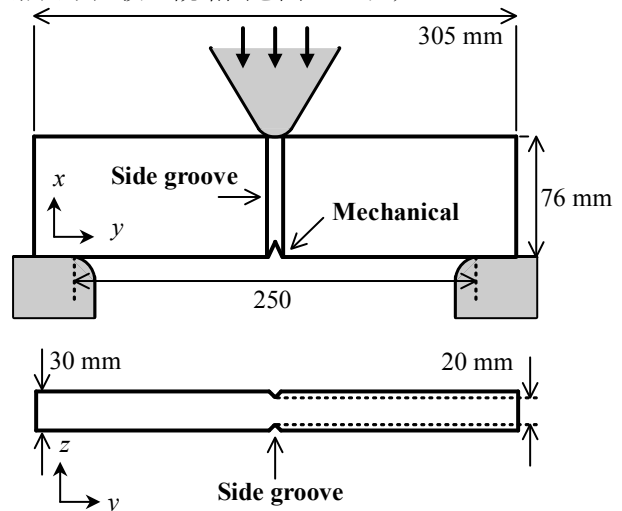


図2.三点曲げ試験

有効とされた試験について、アレスト靱性値 $K_{IC}$ を算出し、その結果をアレニウスプロット上に整理した図を以下に示す。ただし、結晶粒径の小さい鋼種から順にSA3, SA1, SA2である。この図から結晶粒径が小さい鋼種ほどアレスト靱性値が高く、大きい鋼種ほどアレスト靱性値が小さくなる傾向を確認でき、結晶粒径が小さいほど亀裂が停止しやすく結晶粒径が大きいほど亀裂が進展しやすいという従来知見が確認でき、現状のマルチスケールモデルには修正が必要なことが明らかになった。

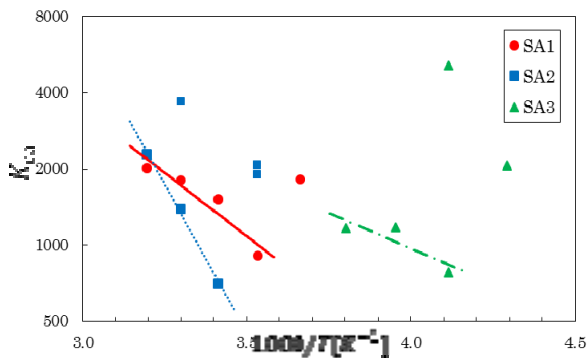


図 3.  $K_{IC}$ Plot

#### 4.実験の再現解析

マクロモデルの検討を行うにあたり、実験結果と比較する必要がある。そこで有限要素解析で三点曲げ試験の再現解析を行うことにより、マクロモデルで用いる入力値(1)応力分布, (2)ひずみ速度分布, (3)破面法線ベクトル, (4)有効表面エネルギーのうち(1)(2)を算出する。この結果をマクロモデルの入力値として用いることで実験とモデルの比較を行う事ができる。

なお, (3)(4)はマイクロモデルの実行結果から取得でき、これについては、「5.マクロモデルの検討」にて述べる。

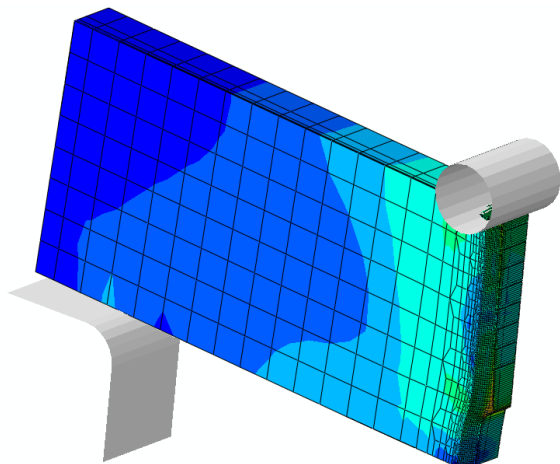


図 4.有限要素解析中の応力分布図

#### 5.マクロモデルの検討

マクロモデルの入力値は「4.実験の再現解析」で述べた種類の因子であり、本研究ではマイクロモデル

結果として取得する(3)(4)のうち、有効表面エネルギーに注目し、マイクロモデルの入力条件として考えられる温度、結晶粒径、負荷応力、降伏応力といった諸因子のうち1因子のみを変化させて有効表面エネルギーの値を算出することで諸因子と亀裂停止特性の関係を考察した。その結果、有効表面エネルギーの値の比較は概ね従来知見と整合したが、結晶粒径に関しては従来知見及び本研究の試験結果と整合せず、図5に示すように結晶粒径が大きいほど有効表面エネルギーが大きく、亀裂が停止しやすくなる傾向となっておりこれがマルチスケールモデル結果と実現章との乖離の原因であることが明らかとなった。

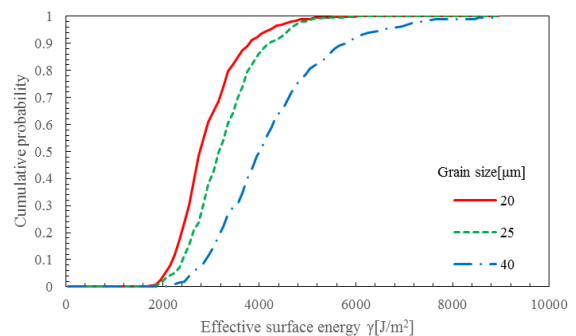


図 5.結晶粒径と有効表面エネルギーの累積確率分布

そこで、本研究では、結晶粒径と本来入力値として与えるべき有効表面エネルギーの値との関係を定量的に考察することにした。

有効表面エネルギーの累積確率分布は、値を全て等倍することで諸因子を変化させた条件を再現できるものと考えた。そこでこれを利用し、基準となる有効表面エネルギーの累積確率分布に対し、実験での亀裂停止位置とマクロモデルの亀裂停止位置が一致するような有効表面エネルギーの係数を求め、この係数と結晶粒径の相関関係式を算出し、粒径と有効表面エネルギーの関係を明らかにした。

この関係式で示される結晶粒径とアレスト靱性の関係の傾向は従来知見における定性的傾向と一致しており、今後この関係式を用いることで先行のマルチスケールモデルの亀裂伝播及び停止の挙動が実現章と整合するように修正可能なものであると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 大森靖也, 岩永寛, 川口喜昭, 寺崎富久長, 鉄と鋼, Vol.62, No.8, pp.1017-1024, 1976
- [2] 半田恒久, 田川哲哉, 南二三吉, 鉄と鋼, Vol.96, No.1, 2012.
- [3] K. Shibamura, Y. Yamamoto, F. Yanagimoto, K. Suzuki, S. Aihara, H. Shirahata, ISIJ International, Vol.56, No.2, in press, 2016
- [4] Y. Yamamoto, K. Shibamura, F. Yanagimoto, K. Suzuki, S. Aihara, H. Shirahata, ISIJ International, Vol.56, No.2, in press, 2016
- [5] S. Aihara, Y. Tanaka, Acta Materialia, Vol. 59, pp.4641-4652, 2011