

劈開亀裂伝播におけるエネルギー吸収機構解明のための実験および数値解析

37-166344 逸見拓弘

指導教員 柴沼一樹 准教授

1. 研究背景と目的

鋼板の劈開破壊は突発的かつ高速で発生するために構造物に対して致命的な損傷を与える可能性があり、確実に防止しなければならない現象である。劈開破壊には結晶粒径や結晶方位といった微視組織が強く影響していることは容易に推測できるが、劈開破壊は高速かつ複雑な形態で進展するがゆえにまだにその挙動メカニズムは解明できていない。課題解決のためには、破壊の素過程に基づいたモデル開発が最も有効であり、例えば近年では Aihara and Tanaka は結晶粒スケールの劈開亀裂伝播モデルを開発して定性的に破壊現象を再現することに成功している。一方でその再現モデルは低精度の近似を多く用いている上に妥当性検証も十分であるとはいえない。

そこで、本研究ではまず破面形成におけるエネルギー吸収量を Aihara and Tanaka のモデルをもとに評価し、その妥当性を検証することで現状の劈開亀裂伝播モデルの抱える課題を明確にする。その上で巨視的なアレスト靱性試験と微視組織レベルの破壊試験といった2種類の実験結果をもとに巨視的な劈開亀裂伝播と微視的な鋼の結晶組織との関係解明を図る。さらに、本研究室で新しく開発した劈開亀裂伝播モデルに対して実験から取得したティアリッジの吸収量の導出式を適用し、モデルと実験的事実の整合性について考察する。

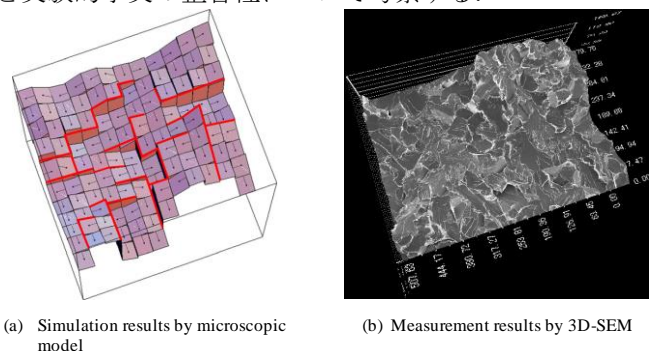


Fig.1 Aihara and Tanaka model result [1]

2. エネルギー吸収量と諸因子の関係

Aihara and Tanaka の劈開亀裂伝播モデルの入力条件としては温度、結晶粒径、負荷応力、降伏応力といった諸因子が挙げられる。このうちの1因子のみを変化させて劈開亀裂伝播モデルを実行し、その破面のエネルギー吸収量を算出することで4種類の諸因子が亀裂停止特性に与える影響を考察した。

結果として諸因子とエネルギー吸収量の関係は概ね経験的知見と一致したが、結晶粒径とエネルギー吸収量の関係のみ従来知見と逆転し、粗大粒ほどエネルギー吸収量も大きくなる傾向が顕著であった。しかし、そもそも化学組成を変化させずに結晶粒径のみを変化させる

ことは高度な技術を必要とするため、化学組成を変化させずに結晶粒径のみを変更した鋼材に対してアレスト靱性を測定して直接的に結晶粒径とアレスト靱性の関係解明を図るような試みはこれまでなされてきておらず、経験的知見が正しいという確固たる証拠もなく、経験的知見を確かめるようなアレスト靱性試験の実施が必要であると言える。

また、劈開亀裂伝播における吸収エネルギーの導出では{100}面の劈開面形成の際に生じるエネルギーは無視できるほど小さく、Fig.2に示すような結晶粒界のティアリッジの形成エネルギーが支配的であるとみなしている。そして、エネルギー吸収量は以下の導出式

$$\gamma = \frac{1}{2A} \int_s ch^2 \tau_Y \gamma_{cm} ds$$

に基づいて算出しているが、この導出式は一部の破面観察によって推定された式であり不確かな項が多く含まれており、実験的事実による裏付けはなされていない。

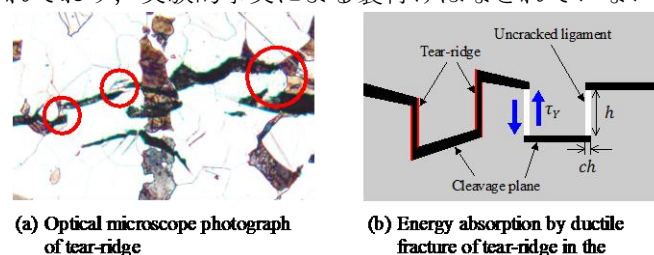


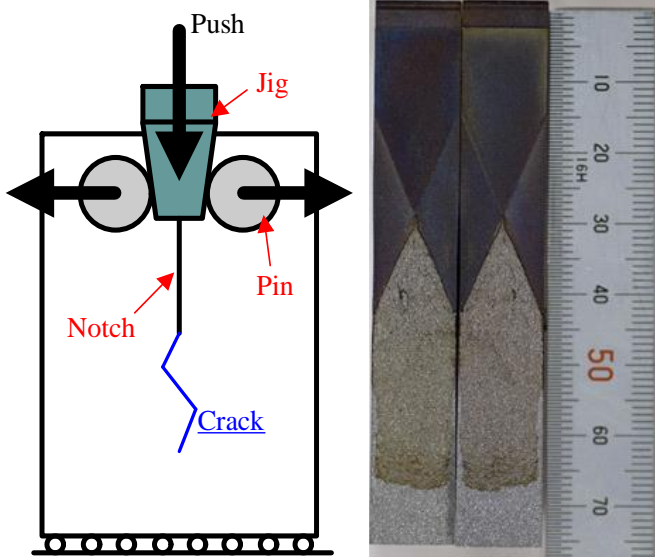
Fig.2 Tear-ridge

さらに、このモデルは亀裂前縁の応力拡大係数の算出に低精度の重ね合わせの近似を用いている点や結晶粒がすべて単一の矩形ユニットセルで表現されている点でも実際の劈開亀裂伝播を再現できているとは言い難い。一方でこれら2つの課題に関しては2017年、本研究室にて高精度な3次元解析による応力拡大係数の算出法を適用しかつ実際の形状に近い結晶粒形状を導入することで、より高精度に劈開亀裂伝播現象を再現するモデルの開発がされている。

そこで、本研究では、最初に述べた2つの課題に着目をして2種類の実験を行なった。まず、平均結晶粒径のみ異なるが化学組成はほぼ同条件の複数鋼種に対して系統的なアレスト靱性試験を実施して平均結晶粒径と亀裂伝播抵抗の関係を明らかにした。さらに、結晶組織レベルでの破壊条件とその破壊の際の吸収エネルギーの関係を実験的に測定することで、微視組織の状態とエネルギー吸収量の関係の解明を図った。最後に、実験から算出され微視組織とエネルギー吸収量の関係式を新たに開発したモデルに適用することで劈開亀裂伝播におけるエネルギー吸収量を算出し、実験的事実とモデルから取得されるエネルギー吸収量の値の整合性について検討をする。

3. アレスト特性と結晶粒径の関係の実験的評価

従来、鋼材の結晶粒径が小さいほどアレスト靱性値 K_{ca} が大きいこと、すなわち亀裂が停止しやすいことが経験的に知られてきたが、結晶粒径とアレスト靱性値の相関は必ずしも系統的な実験による定量的な整理は行われていない。本研究では、結晶粒径とアレスト靱性への影響の定量的検討を行うため、化学組成は同条件で結晶粒径の異なる 4 種類の鋼材 SA1, SA2, SA3, SA4 を用いて系統的なアレスト靱性試験である DCB 試験を実施した。亀裂を試験片面内で停止させて亀裂長さを取得する必要があるため、温度条件と亀裂発生部のシェブロン角度を変更した試験片計 24 本に試験を実施することで対応した。DCB 試験の概略図と亀裂が停止し成功した試験の試験片の破面写真を以下に示す。



(a) DCB test image (b) Fracture surface
Fig.3 DCB test image and a test result

成功した試験の再現解析を有限要素解析で実施した。有限要素解析はジグを押し込む静的解析と、亀裂発生後に伝播速度 300m/s で亀裂が進展していく挙動を順次節点を解放していく節点力解放法を用いた動的解析の 2 ステップで行った。なお、対称性を考慮して 1/2 モデルにて解析を実行した。

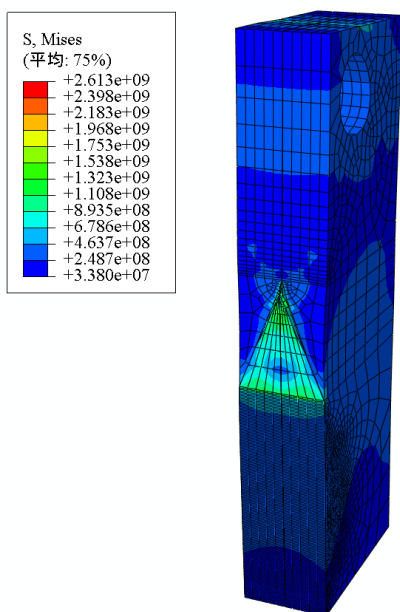


Fig. 4 FEM analysis

各試験の再現解析において、亀裂停止時の亀裂先端近傍応力を評価することで局所破壊応力を推定し、Fig.3 に温度との関係を鋼種ごとに整理した。結果として温度によらず各鋼種で概ね等しい応力値が算出され、鋼種ごとに応力値を比較すると平均粒径の大きい鋼種ほど局所応力が大きいという結果が導出された。したがって、亀裂停止位置近傍の局所応力評価では結晶粒径の大きい鋼材ほど亀裂伝播抵抗が大きいことが実験的事実として示され、従来知見として認識されていた結晶粒径の大きい鋼材ほど亀裂伝播抵抗が小さいという見解が誤った認識であることが示唆された。

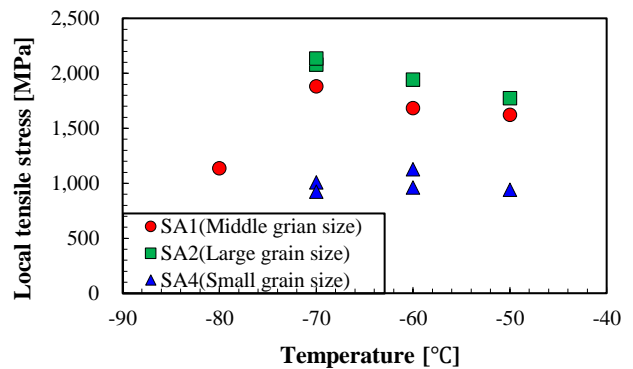


Fig.5 Local tensile stress at the crack arrest position

4. 結晶粒スケールのエネルギー吸収量評価

Aihara and Tanaka のモデルにおけるエネルギー吸収量の導出式は鋼材の一部の破面観察を元に推定された推定式であり、実験的事実による裏付けはされていない。特に、エネルギー吸収量の支配因子であるとされるティアリッジ形成のエネルギー吸収量の実験的評価は、劈開亀裂におけるエネルギー吸収機構の解明において不可欠であると言える。そこで、本研究ではそこで、Fig.6 に示すように、フェライト単相の供試鋼よりミクロスケールの微小試験片に対して、隣接する 2 個の結晶粒内に粒界へ到達する鋭いスリット状の切欠きを FIB で加工することで劈開面を模擬する方法を考案した。

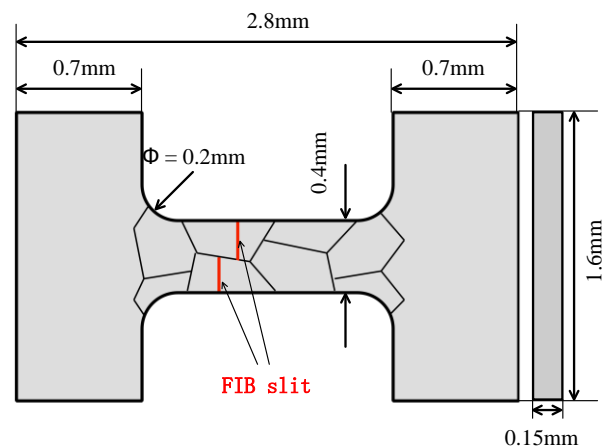


Fig.6 A specimen of the microscopic tensile test

この劈開亀裂を模擬した切欠き付き試験片を用いて引張試験を実施し、荷重-変位関係から得られる塑性仕事をもってティアリッジ形成による吸収エネルギーを推定することができる。ティアリッジ形成に伴う吸収エネルギーの支配因子として、(1)劈開面間距離、(2)温度、(3)結晶方位差、(4)劈開面角度差、などが考えられるが、本試験では、特に重要と考えられる(1)劈開面間距離を対象と

して試験を実施した。

本研究では、結晶粒界へ到達するようにスリット加工を施した試験片6本と1結晶粒内にスリット加工を施した試験片4本の計10本の試験片に対してFig.6に示すような微小引張試験機を用いて引張試験を実施した。なお、事前に有限要素解析により10μmというFIBスリット幅が十分に小さい幅であり試験片の変形挙動に大きく影響を与えない幅であることを確認した。引張試験は空調を用いて室温25℃を保ち、引張速度1μm/secの条件で実施し、荷重-ストローク関係と試験の動画データを取得した。

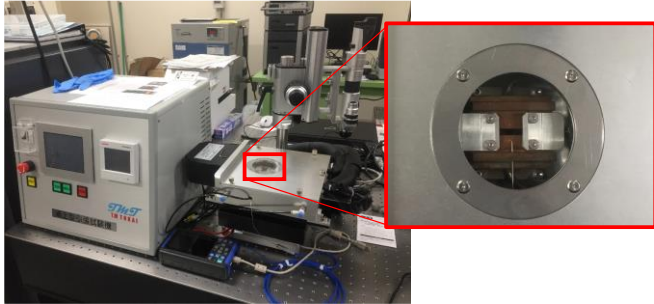


Fig.7 Microscopic tensile machine

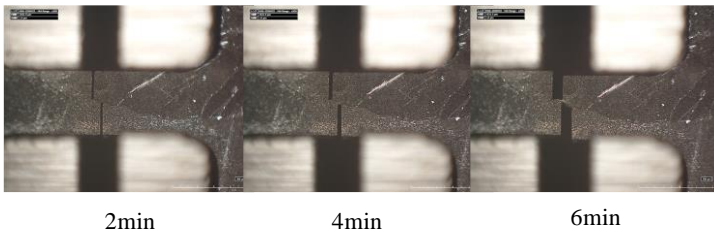


Fig.8 Microscopic tensile test

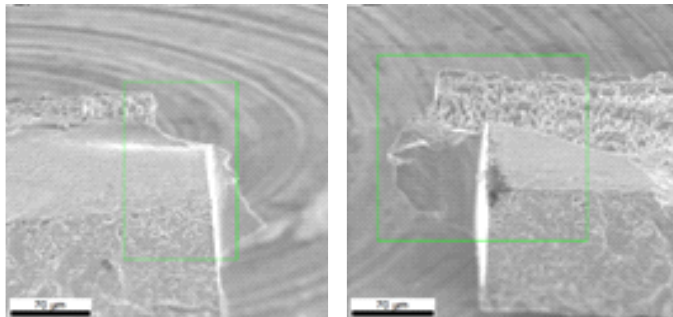


Fig.9 Fracture surface of a specimen (from SEM×300)

取得した荷重変位関係のグラフの面積を亀裂面生成の際に生じる吸収エネルギーとして見積もることができ、各試験片のスリット幅と吸収エネルギーの関係を図に整理してまとめた図をFig.10に示す。

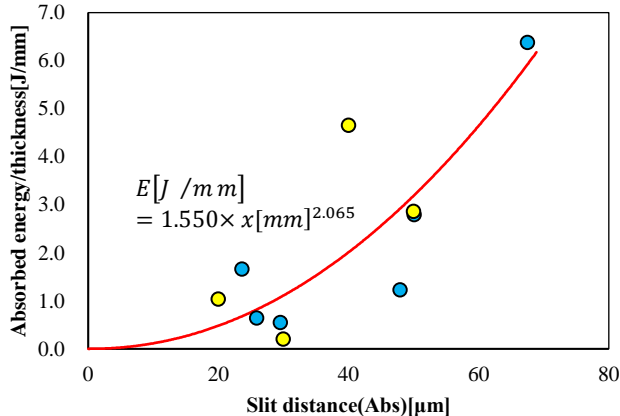


Fig.10 Absorbed energy and FIB slit distance

このプロットから、1結晶粒内における粒内破壊と結晶粒界に沿った粒界破壊の際のエネルギー吸収量には有意な差は存在しないことを確認し、エネルギー吸収量はFIBスリット間の幅のほぼ2乗に比例するという近似式

$$E [J / m m] = 1.550 \times x [m m]^2.065$$

を実験的に導出した。これらの結果から、ティアリッジ形成におけるエネルギー吸収量の導出式はティアリッジの高さの2乗に比例することが実験的に確認され、破面観察で推定されていたエネルギー吸収量の推定式

$$\gamma = \frac{1}{2A} \int_s ch^2 \tau_y \gamma_{cm} ds$$

の妥当性が証明された。

また、結晶粒界に沿って破面形成がされる際のエネルギー吸収量と1結晶粒内で破面形成がされる際のエネルギー吸収量に優位な差がないということから、結晶粒界に沿ったティアリッジ形成のみがエネルギー吸収量に支配的なのではなく、1結晶粒内での延性破面形成や結晶粒をまたいだ延性破面形成におけるエネルギー吸収量といった{100}面の劈開破壊以外の破面形成におけるエネルギー吸収量も劈開亀裂伝播におけるエネルギー機構に大きく影響を与えている可能性が示唆された。

5. 新劈開亀裂伝播モデルの開発

本節では、本研究室で開発された新劈開亀裂伝播モデルについて述べる。Aihara and Tanakaのモデルでは単一形状の矩形ユニットセルによる結晶の表現や亀裂前縁の応力拡大係数の際の低精度の近似といった問題を抱えていた。これら2つの課題を解決する手法として2017年、本研究室ではより高精度な3次元解析により応力拡大係数の算出をして実際の形状に近い結晶粒形状を導入することで実際の劈開亀裂伝播現象をより高い精度に再現する新劈開亀裂伝播モデルの開発を行なった。

このモデルでは、まず平均粒径や分散などを入力条件として多結晶体の3次元分布を再現することにより、実際の結晶粒分布に近い結晶粒分布を再現することに成功しており、矩形セルよりも遥かに高精度に結晶組織を再現している。

さらに、エンリッチ関数を導入することで亀裂面の不連続性や亀裂先端近傍場をより正確に表現可能とする拡張有限要素法XFEMを用いて応力拡大係数の算出にすることで、従来のモデルでの応力拡大係数の低精度の重ね合わせによる近似の問題を解消した[2]。これら2つの課題を解決して劈開亀裂伝播現象をより高精度な形状と計算で再現した新劈開亀裂伝播モデルでは、下図のように3次元形状や亀裂進展挙動といった観点でも従来よりも遥かに高精度な劈開亀裂伝播の再現に成功している。

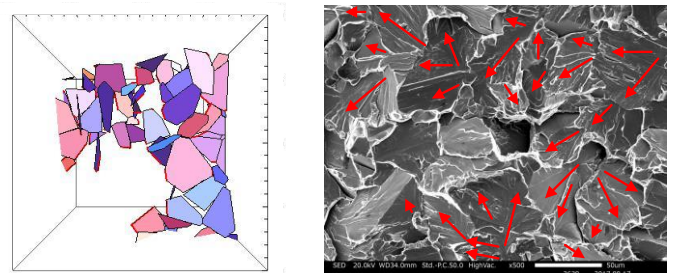


Fig.10 Observation by SEM and a new simulation model

6. ティアリッジの再現とエネルギー吸収量の定量的評価

一般に、巨視的な脆性亀裂現象を考えるとエネルギー吸収量に支配的な因子は、劈開破壊での{100}面の破面形成エネルギーではなく、劈開面同士が延性的に破断して生じるティアリッジの形成エネルギーであると考えられている。したがって、新劈開亀裂伝播モデルにおいてティアリッジ部分を再現して破面のエネルギー吸収量を推定することは、巨視的鋼板な亀裂伝播・停止挙動を予測するにあたり不可欠である。一方で前節の図で示したような空間内に散りばめられた複数の多角形で表現されている劈開面同士をつなぎ合わせ、完全に2つに分離されるような破面を再現するのは解が無数に存在し非常に困難である。したがって、ティアリッジをモデルで再現するためにはある程度の制約条件が必要といえる。

本研究では劈開面の各辺とそこから最短距離にある頂点を繋いで三角形を構築し、その面積合計が最小となる条件がティアリッジの形成破面であるとみなすことで定性的にティアリッジの再現を行なった。この手法により、ティアリッジを再現した破面を Top view から見た図を Fig. 11 に示す。この図から、ティアリッジ再現前に存在していた空隙の大部分をティアリッジとしてつなぐことに成功しており、より定性的に実際の破面形態に近づくことに成功していることを確認できる

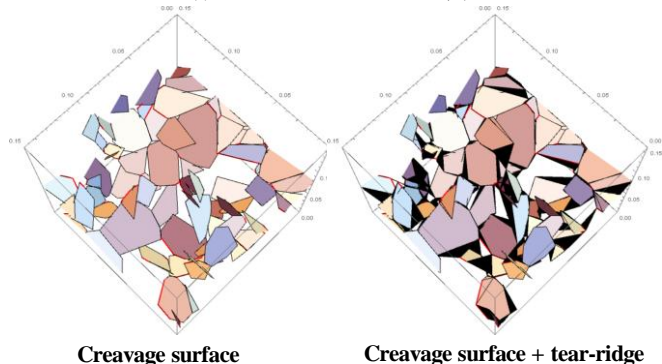


Fig. 11 The result of simulating tear-ridge

このティアリッジ再現手法によりされる際に吸収されるエネルギーが新たに形成することに成功した破面を延性的に破断したティアリッジ部分とみなしてエネルギー吸収量を算出する。比較として、まず、DCB 試験で用いた結晶粒径の異なる 3 鋼種 SA1, SA2, SA4 に対して新劈開亀裂伝播モデルを用いて劈開破面およびティアリッジを再現し、本研究で実験的に導出したエネルギー吸収量算出式を用いて定量的にエネルギー吸収量を導出した。なお、結晶粒やエネルギー吸収量のばらつきを鑑み、各鋼種に対して複数の破面の再現を行った。

エネルギー吸収量の算出式は、微小引張試験の結果から粒界に沿って、ティアリッジの高さの 2 乗を線積分した値に比例することが示されている。また、比例定数として本研究では Fig. 8 に示した近似式のパラメータを使用して

$$\gamma [J] = \frac{1}{A} \int_s 1.550 \times h^2 ds$$

の算出式から単位面積あたりの吸収エネルギーを導出した。

まず、算出した単位面積あたりのエネルギー吸収量は $0.01 \sim 0.1 [J/mm^2]$ のオーダーであることが確認できるが、

このオーダーの妥当性について議論する。本研究では、SA1, SA2, SA4 それぞれについて一般的に鋼材の破壊靱性を測定する際に用いられるシャルピー衝撃試験を実施している。各鋼種のシャルピー衝撃試験において破壊発生から脆性破面を形成するまでの単位面積あたりのエネルギー吸収量は $0.02 \sim 0.2 [J/mm^2]$ 程度であると算出できる。この値は、破壊発生に際するエネルギー吸収量も含んでいるため、ティアリッジによる単位面積あたりのエネルギー吸収量はこの値よりも小さい値になることが推定でき、値の妥当性が確認できた。また、平均結晶粒径とエネルギー吸収量の関係についても、DCB 試験の試験結果から平均結晶粒径が粗大なほど巨視的な亀裂伝播抵抗は大きいという実験的事実が得られており、結晶粒径が大きいほどティアリッジによるエネルギー吸収量も増加していく傾向はこの実験的事実と整合していることも確認できた。

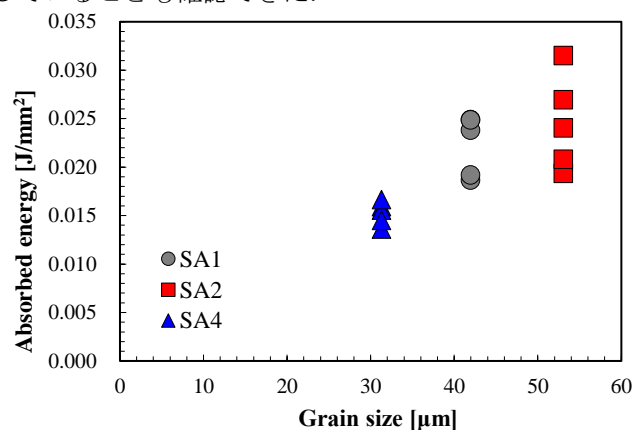


Fig. 12 Grain size and estimated absorbed energy

7. 結論

本研究では、Aihara and Tanaka により開発されたモデルにの抱える課題を明確にし、実験によりモデルの妥当性を検証した。巨視的なアレスト靱性試験からは、結晶粒径が大きい鋼材ほど亀裂伝播抵抗が大きくなる傾向が得られ従来知見が否定された。また、微視的な破壊試験から、一部の破面観察から推定されたのみであったエネルギー吸収量の推定式の実験的事実に基づく裏付けに成功した。さらに本研究で開発された新劈開亀裂伝播モデルでティアリッジに相当する破面を再現した上で、実験結果に基づいたエネルギー吸収量の導出式から定量的にエネルギー吸収量を導出し、その値の妥当性を確認した。また、結晶粒径の異なる複数の鋼種におけるエネルギー吸収量を比較することで実験に基づく事実を再現できていることを確認した。

参考文献

- 1) Aihara, S., Tanaka, Y., A simulation model for cleavage crack propagation in bcc polycrystalline solids. *Acta Mater.* Vol.59, pp.4641–4652, 2011.
- 2) Vicente F. Gonzalez-Albuixech, Eugenio Giner, Jose E. Tarancon, F. Javier Fuenmayor, Anthony Gravouil, Domain integral formulation for 3-D curved and non-planar cracks with the extended finite element method, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.264, pp.129-144, 2013.