

脆性き裂分岐・マイクロブランチの脆性破壊抵抗の数値解析および 詳細観察による考察



特 集
接合科学研究所
産学連携シンポジウム

東京大学大学院工学系研究科 准教授 川 畑 友 弥 氏
大阪大学接合科学研究所 南 二 三 吉 氏, 高 嶋 康 人 氏

1. はじめに

鉄鋼材料は現在、エネルギーの運搬や貯蔵、建築や土木用の大型構造物に広く用いられている。近年、建設コスト等の観点から構造物の大型化が顕著になっており、使用される鋼板の高強度化・極厚化が進んでいる。一般に、同一のミクロ組織を持つ鋼材は板厚の増加に伴い靱性が低下し、脆性破壊の危険性が増加する [1]。脆性破壊はき裂が非常に高速で伝播する不安定な破壊であり、構造物の致命的な破壊につながる事が多い。そのため、材料特性や構造設計の観点から、破壊の防止対策を厳密に行う必要がある。

脆性破壊のプロセスは、き裂の発生とき裂の伝播・停止に大別できる。き裂の発生そのものを防止するには靱性の弱い溶接部における溶接欠陥や疲労き裂の防止、溶接部靱性の確保が重要であるが、溶接欠陥を完全に取り除くことは非常に困難であり、き裂の発生を防ぐことは原理的に不可能である。そこで、構造設計において、き裂が発生して伝播する場合を想定し、それが致命的な事故につながらないようにき裂伝播を適切な箇所で停止（アレスト）することで構造物の信頼性を高めることができる。このような安全性の実現のためには、材料に対して脆性き裂伝播停止特性が要求される。き裂が材料中を伝播するとき、き裂の分岐や屈曲が発生する場合がある。自動車のフロントガラスの破壊のように、き裂進展とともに分岐が多く発生し本数が顕著に増加することでエネルギー吸収に役立てられている例のように、き裂の分岐は伝播停止効果があると考えられる。このため、き裂分岐現象を理解し、積極的に活用することは構造物の破壊安全性の改善に有益である。

本研究では、高速き裂伝播中のき裂分岐現象においてその発生機構を明らかにするため、き裂先端の応力状態に着目するとともに、き裂分岐が発生した場合の散逸エネルギーの上昇について考察を行う。

2. き裂分岐に関する過去の知見

古典的な動的破壊力学の理論において、き裂伝播速度がある限界値を超えるとときにき裂の分岐が生じるとされている。Yoffe [2] はき裂長さが一定のときのき裂先端の応力場の解析解を求めた最初の人物である。解析結果によると、き裂伝播速度が $0.7c_T$ を超えるときに最大周方向応力がき裂進展方向から逸れ、理論的にき裂の分岐が予測できるとしている。しかし、先行研究における分岐発生時の伝播速度は理論値よりも低い場合が多い。

Hahn ら [3] は実験値と理論値の乖離をき裂分岐生成機構の違いによるものだと考え、分岐条件の正しい理解のためには、連続体力学的視点だけでなく多結晶体としての鋼のミクロ組織を考慮に入れる必要があることを指摘した。

Kobayashi ら [4] はき裂の分岐のためにはき裂先端の応力拡大係数が限界値を超える必要があるとし、また、西岡ら [5] はき裂分岐の限界条件として、き裂先端に流入するエネルギー流入束を定義し、実験における妥当性を示した。

以上のように、き裂の分岐限界条件を考えるにあたり、き裂先端の応力場とエネルギー論によるものがあり、双方の視点に立って検討を行うことが肝要である。

3. 軟質継手を用いた ESSO 試験

き裂分岐の条件として考えられている高速のき裂伝播速度を実現することを狙い、軟質継手を利用して工夫した ESSO 試験を実施した。狭い軟質層内にき裂を伝播させることでひずみ分布成長が制約され、試験には一般的な溶接構造用焼きならし鋼である N30 材と、LNG タンク内槽用鋼材として利用される高強度高靱性の高 Ni 鋼を利用している。表 1 に試験条件を示す。

加工した試験片の寸法を図 1 に示す。試験片はき裂進展周辺 A 部、き裂進展領域 B 部、A 部・B 部か

表 1 試験条件

#	Homogenous/ Soft welded joint	Part A	Part B		Experimental Condition (applied stress/temperature)
			material	w [mm]	
#2	Soft welded joint	7% Ni steel	N30	30	100MPa/-100°C
#3	Soft welded joint	7% Ni steel	N30	20	300MPa/-100°C
#5	Homogenous		N30		300MPa/-100°C

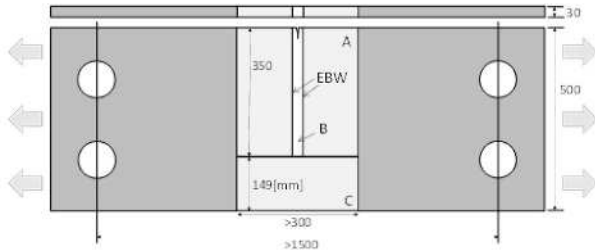


図 1 試験片全体図

ら縁切りされたC部とタブ板部からなり、ピンを通じて両端から引張応力が負荷される。A部には高Ni鋼を使用し、その他の部材にはN30材を使用した。

き裂伝播周辺部にはクラックゲージとひずみゲージ及び熱電対を計装した。ひずみゲージの電圧出力における局所的なピーク位置をき裂の通過時刻として、き裂伝播速度を計算した。当初の狙い通り、軟質材料を用いたものの方が伝播速度が高速で推移しており、最高速度は1800m/s程度であった。

試験後、破面の観察を行ったところ、き裂が直進する状態から分岐・湾曲して進む状態へ変化する点が確認された。このときのき裂長さ、き裂伝播速度推移・伝播様相を図2、3に示す。き裂分岐時の伝播速度は800m/s程度であり、弾性破壊力学の理論値（約1800m/s）と比較するとはるかに低い値である。

き裂分岐の限界条件を連続体的視点から検討するため、FEM解析を行った。モデルの概観及びき裂伝播部のユニットを図4に示す。試験片の対称性を

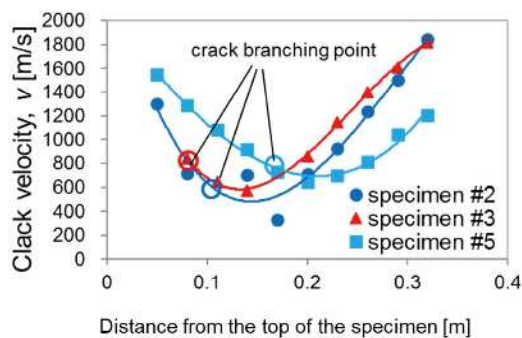


図 2 き裂伝播速度と分岐位置

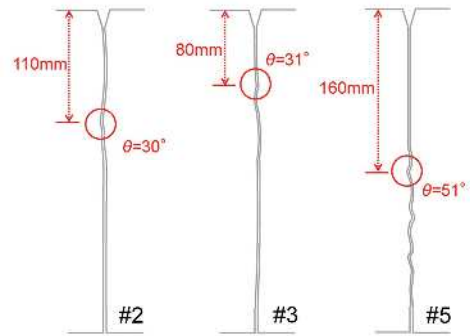


図 3 き裂伝播経路模式図

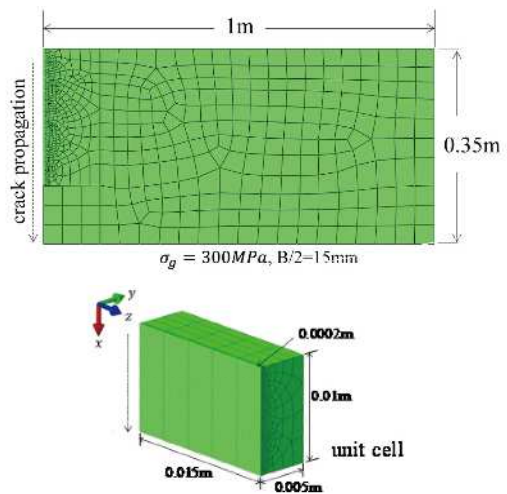


図 4 有限要素法モデルとき裂伝播部近傍の要素分割

考慮して、実際の試験片の1/4サイズとしている。また、解析の際に入力する材料構成式取得のため、硬さ試験と引張試験を行った。溶接熱影響部は硬度が著しく高くなっており、この部分の材料構成式は母材における構成式を硬度分比例増化させて求めた。解析の結果から、き裂先端の各節点における応力の値を得た。本解析では、き裂先端近傍の20個の要素から応力値を抽出し、き裂先端の弾性変形している領域における応力を用いて動的弾性応力拡大係数 K_d を以下の式から算出した。

$$K_d = \sigma \sqrt{\pi r}$$

試験片各板厚位置における K_d 値を比較したところ、差異が見られた。き裂伝播中、 K_d は材料靱性値に等しいと考えられるため、 K_d は各板厚位置において等しく推移するはずであるが、本モデルによる計算結果はその仮定に反するものである。これはモデルで仮定したき裂先端形状が実現現象と乖離していることに起因していると考えられる。このため、き裂

前縁形状を変化させたモデルを構築し、各板厚位置における K_d から計算した変動係数が最も低く推移している前縁形状で考察を行った。

き裂分岐条件は、先行研究を参考にき裂先端の主応力と応力多軸度 η を用いることとした。計算結果を図5に示す。実験におけるき裂分岐位置を勘案すると、き裂分岐条件としての限界条件は主応力 $\sigma > 1500 \text{ MPa}$ 、応力多軸度 $\eta > 1.4$ 程度であると考えられる。

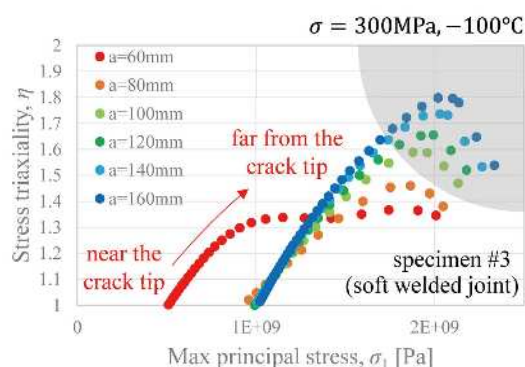


図5 応力多軸度と最大主応力座標におけるき裂伝播中の変化

4. 小型 SENT 試験の開発と破面粗さと駆動力の関係の考察

前章で示したき裂分岐に関する応力多軸度と主応力における限界条件記述の妥当性を脆性き裂伝播試験による検証する。仮説検証のためには簡便かつ正確な評価試験を、条件を変えて多数実施することが必要であるが、既存の試験は外部不整因子を解析モデルに組み込むことが困難であることなどから、解析を行うにあたり不都合である。本章では、より正確な簡易試験法の確立を目的とし、学内の引張試験機で実施可能なサイズの片側ノッチ引張型 (Single Edge-Notched Tension, SENT) 試験を新規に開発し、検討の題材とする。

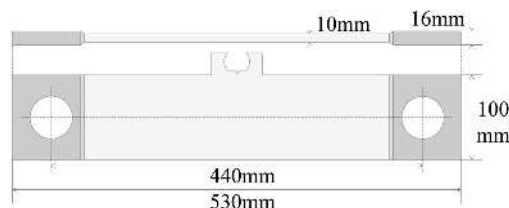


図6 SENT 試験片

図6に試験片の概要を示す。-100℃条件下で2体の試験片破断に成功しており、1体目については

ESSO 試験同様、ひずみゲージを計装しき裂伝播速度の計算を行った。

試験後の破面を観察したところ、マクロなき裂分岐は発生していなかったが破面粗さは変化していることが確認されたが、レーザー変位計によって粗さ変化の傾向を明確に定量化することは不可能であったため、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy, 以下 SEM) で撮影した写真を用いて高さプロファイルを取得した。それらにより求めた破面粗さを図7に示す。き裂伝播速度と破面粗さに正の相関関係があることが確認された。これはき裂伝播が高速化し先端の応力拡大係数が大きくなることによってき裂先端の高応力域が広域化した結果、領域に含まれる低靱性部からマイクロクラックが発生し成長したことによるものであると考えられる。

第3章同様、本試験においても FEM 解析を実施した。主応力はき裂先端において限界値に達しているが、応力多軸度は最高で 1.2 程度であり、3章で提案した本鋼の分岐き裂生成限界条件と符合する結果となった。

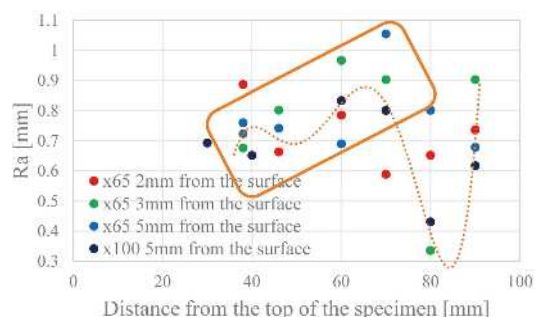


図7 ステレオ SEM 写真法による破面粗さ測定結果

5. マイクロクラック／ブランチ生成マイクロメカニズムとそれによる超過塑性散逸エネルギー定量化に関する検討

第3章および4章において、鋼の脆性き裂分岐現象には先端応力の多軸度が寄与している可能性を指摘した。ここまでは連続体的視点から検討を行ったが、ミクروسケールに着目すれば、鋼材は極めて大きな不均質性を示す。鋼のき裂分岐に関する観察例のうちミクロ組織的性状が判別できる代表的なものとして、未破断リガメントやテアリッジが挙げられる。

脆性破壊が結晶粒に対してどのように進行するのかについて観察を行うため、ダブルノッチ3点曲げ

試験を行った。材料は第3章で使用した N30 材であり、この材料を昇温し、パーライト領域を γ 変態させその後水冷することで MA 組織を多く生成させた。試験後、疲労荷重を与えて露出させた非破断側ノッチ底の SEM 写真を図 8, 9 に示す。いずれの条件でも多くのへき開ファセットが観察された。多くのファセットはき裂が伝播し粒界に到着した場合にその到着点から隣接結晶粒の伝播が始まっているが、中には図 9 における赤丸位置のファセットのように、疲労破面で囲まれ孤立したファセットが存在する。これらの観察から、マイクロクラック生成メカニズムとして、応力および応力多軸度の上昇と脆化第二相またはマトリクス方位差に起因するき裂の非連続伝播メカニズムを提案した (図 10)。

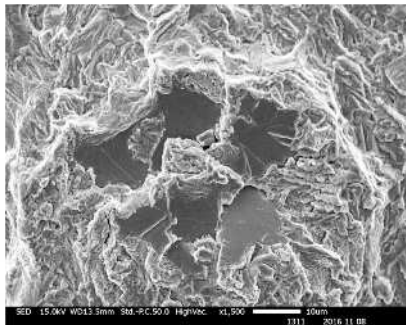


図 8 へき開ファセット群

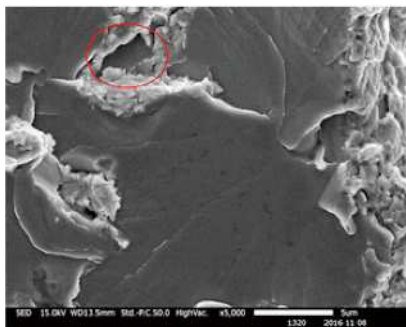


図 9 へき開ファセット群中の孤立ファセット

High triaxiality:
Increase of probability of microbranching

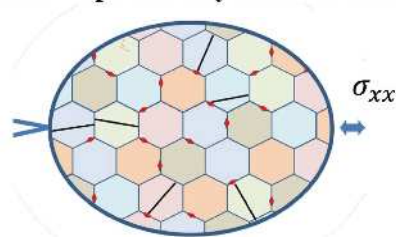


図 10 高応力領域内におけるマイクロクラック発生メカニズム仮説

また、過去に実施した温度勾配型 ESSO 試験においてマイクロクラックの数を計測したところ、低温条件であるほどマイクロクラックが数多く生成していることがわかり、材料の靱性に対して駆動力が上昇する環境下においてマイクロクラックが数多く存在していることを確認した。鋼の伝播速度の上限値は理論上限値である Rayleigh 波よりも顕著に低いことが知られているが、その理由は本研究で明らかにしたようなマイクロブランチ条件に早期に到達することが原因であると推定できる (図 11)。

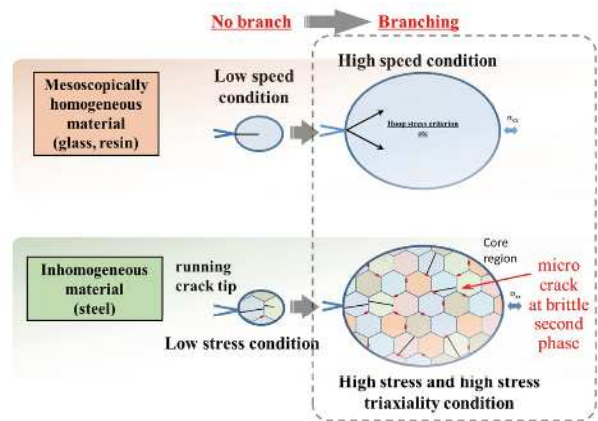


図 11 脆化相を含む不均質材の最高伝播速度と均質素材との比較

動的なき裂伝播に関する理論はエネルギー平衡条件に基づくものが多いが、研究モデルの多くは理想化された単一き裂によるものである。過去の研究を見ると、鋼材におけるき裂分岐時の速度は理論値と比較しても、また他材料の実験値と比較してもかなり低い値である。本実験で確認された微視的なき裂分岐はき裂の伝播に対する抵抗力として機能している可能性があり、き裂の伝播速度と分岐限界条件に大きな影響を及ぼしていると考えられる。き裂が複層化した場合のエネルギー変化がどのようなものであるか、図 12 にモデルを示す二次元動的弾塑性 FEM 解析を行い考察した (例; 図 13)。き裂速度、負荷応力、複層き裂間長さをパラメータとして、複数条件で解析を実施し、まず、単一き裂について解析を行った結果、高応力・低速度であるほど単位面積当たりのエネルギー散逸量が大きいことが確認できた。続いて、複層き裂についての解析から単位面積当たりエネルギー散逸量を計算したところき裂間距離が大きくなるほど散逸量が大きく、複層き裂の干渉効果に

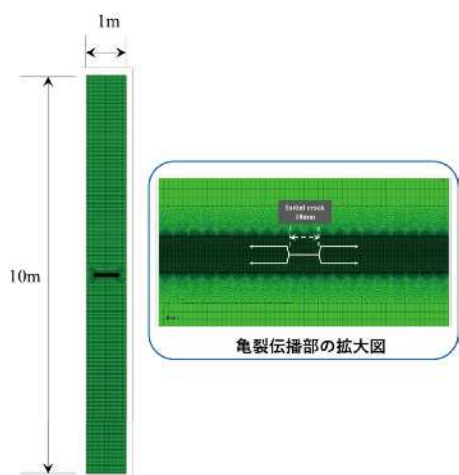


図12 分岐き裂モデル (二次元)

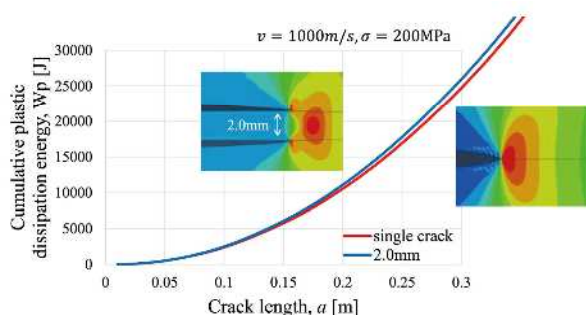


図13 分岐き裂存在時の塑性散逸増加量

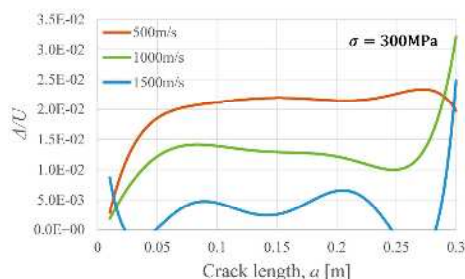


図14 弾性ひずみエネルギーで無次元化した塑性散逸エネルギーの諸量による変化

よってき裂間微小領域に変形が集中していると思われる。複層き裂における散逸量と単一き裂における散逸量の差 Δ をとり、負荷応力による弾性ひずみエネルギーで無次元化したものを図14に示す。高応力・高速度であるほど Δ/U_0 が小さくなっていることが確認できる。この値は単一き裂から複層き裂への移行しやすさを示していると考えられ、先行研究における過去の知見と一致している。また、多くの解析結果を整理し、付加的な散逸エネルギーを負荷応力、き裂間距離、き裂伝播速度の関数として次式を得た。

$$\Delta = \alpha(v^m \sigma^n + \beta) \cdot d + \gamma$$

$$\alpha = -0.4268, \beta = -16975$$

$$\gamma = 342.163, m = -0.463436$$

$$n = 1.66038$$

6. 結論

- ・工夫した形状による ESSO 試験を行い、高速のき裂伝播およびき裂の分岐を観察した。き裂分岐時の伝播速度は 800m/s 程度であった。
- ・有限要素解析によるき裂分岐条件について検討したところ、き裂先端の多軸度と最大主応力双方が限界値を上回ることが必要である可能性を示した。
- ・簡便で正確な脆性き裂伝播試験法確立のため、片側ノッチ引張型試験法を検討・実施した。
- ・微視的な破面粗さの定量化を行い、き裂伝播速度との相関性を指摘した。
- ・小型試験における応力多軸度は3章で示した限界値を超えておらず、本鋼における限界条件の妥当性を支持する結果となった。
- ・ダブルノッチ試験片を用いた3点曲げ試験を行い破面観察を実施した。連結していないへき開ファセットの存在から、ファセット間でき裂が不連続な状態で伝播している可能性を示した。
- ・鋼材の脆性き裂分岐がき裂先端の高応力・応力多軸度場における非連続マイクロクラック生成に起因していると考えた。これはミクロ組織との関連性が極めて強い考えであり、従来の理論値より顕著に低い速度でのき裂分岐発生を説明できる。
- ・単一き裂モデルと複層き裂モデルにおける数値解析の結果を比較することにより、き裂分岐による付加的な散逸エネルギーの定量化を行った。

参考文献

- [1] 廣田ら, 三菱重工技報 Vol. 4 No. 3, 2007
- [2] Yoffe, E. H., Philosophical Magazine, 42, 739, 1951
- [3] G. T. Hahn et al, International Conference on Fracture Vol. 2, 1977
- [4] A. Kobayashi et al, International Journal of Fracture Vol. 27, Issue 3-4, pp. 187-201, 1985
- [5] 西岡ら, 日本機械学会論文集 (A 編) 65 巻 633, 1999
- [6] Y. Takashima et al, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 92 (2017), pp. 178-184.