

# 混合モード下における延性き裂進展方向予測式の評価

## Evaluation of Prediction equation for Direction of Ductile Crack Propagation under Mixed Modes

○学 肥田野 海斗<sup>1)</sup>, 正 和田 義孝<sup>1)</sup>

Kaito Hidano, Yoshitaka Wada

1) 近畿大学 Kindai University

In the ductile crack propagation, structures is sometimes largely deformed and mixed mode loadings appears due to the deformation. The stress singularity around a crack tip doesn't agree with HRR singularity filed. The direction of ductile crack propagation with large deformation needs further discussion. In a previous study, prediction equation for crack propagation angle, which is one of the crack propagation behaviors, were proposed under mixed-mode loading. In this study, distributions of equivalent plastic strain and stress triaxiality around a crack tip are evaluated under three-point bending to improve the equation for a propagated long crack and proposed a new equation. To generalize the equation, we evaluated it with the other model. As a result, it was found that the equation can be used for mixed-mode ratio up to 0.1.

**Key Words :** mixed-mode, crack propagation angle, equivalent plastic strain, stress triaxiality

### 1. 緒言

弾塑性き裂を評価するための破壊力学パラメータの一つとしてJ積分がある。しかし大変形を伴う場合、き裂先端の応力場はHRR解と一致しないことが多く、J積分での評価はできない。また、実際の構造物にはき裂面と垂直方向に荷重が作用するモードI負荷のみでなく、複数方向に荷重が作用する混合モード負荷を受ける場合が多く、混合モード下でのき裂進展方向を評価する方法はいまだ議論が続いている。そこで、延性破壊に有効とされているパラメータとして、応力三軸度 $\sigma_{tri}$ と相当塑性ひずみ $\varepsilon_{eq}$ がある。板厚中央面では $\sigma_{tri}$ が、板厚端面では $\varepsilon_{eq}$ がそれぞれ高い値になる方向にき裂が進展することから、これらのパラメータはき裂進展に関与していることが示されている[1]。

先行研究では、混合モード負荷が与えるき裂進展挙動の一つであるき裂進展角度 $\theta_F$ に注目し、有効とされるパラメータが $\theta_F$ にどのような影響を及ぼしているのかが検討された。その結果、 $\theta_F$ の以下の式(1)が提案された[2]。

$$\theta_F = -148.5 \times \frac{\delta_{II}^{a^5+0.285}}{\delta_I} + \frac{90b^{7.5}}{100} \times \frac{\delta_{II}}{\delta_I} \quad (1)$$

$\delta_I$ ,  $\delta_{II}$  はそれぞれモードI, モードIIのき裂開口変位、 $a$ はき裂進展増分量とリガメント長さの比、 $b$ は初期き裂と現在のき裂長さの比を示している。

本研究では、大規模降伏範囲でモードIとモードIIの混合モード荷重下での三点曲げ解析を行い先行研究にて検証しきれなかった十分に発達した長いき裂での応力三軸度、相当塑性ひずみを取得する。そしてその結果を基に、提案式の適用範囲を検証する。

### 2. 手法

本研究では、電力中央研究所[3]が行った材料STPT410の破壊試験に基づき、モードI, モードIIの混合モード下での三点曲げき裂進展解析を行う。モデル①の節点数、要素数、材料特性、最小要素サイズを表1に示す。

Table1 モデルの詳細および材料特性

モデル	要素数	節点数	E GPa	$\nu$	$\sigma_y$ MPa	最小要素サイズ mm
①	22,572	92,378	203	0.306	273	0.25
②	103,584	20,052	206	0.3	599	0.15

ここで、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はボアソン比、 $\sigma_y$  は降伏応力を示す。汎用有限要素法プログラム ANSYS を用いて有限要素モデルを作成する。図1にモデルの簡略図を示す。解析モデルは解析時間の短縮、メモリ不足を避けるため、モデルの対称性を考慮し、1/2 モデル (41mm × 100mm × 8mm) を使用する。このモデルには16mm の予き裂が入っている。正確に物理量を取得するため、図2に示すようにき裂進展方向に半円状の細かいメッシュを作成している。要素は六面体二次要素を使用した。図1に示すように強制変位を与える位置を $X$ とし、これを変化させることで混合モード比の変更を行った。本研究で用いた混合モード比 $K_{II}/K_I$ を以下の表2に示す。

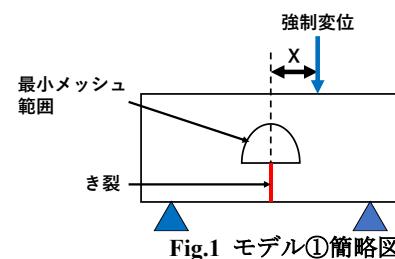


Fig.1 モデル①簡略図

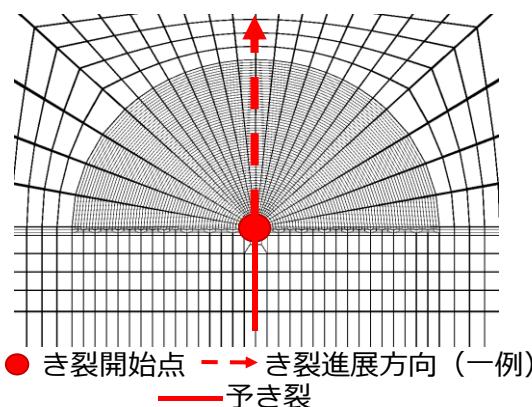


Fig.2 メッシュ形状

Table2 使用する混合モード比

X [mm]	0	5	10
$K_{II}/K_I$	0	0.058	0.1

き裂進展条件として使用する、き裂進展量  $\Delta a$  と J 積分の関係を示す  $J - R$  曲線を図3に示す。強制変位量を増やす毎に J 積分を計算し、 $J - R$  曲線を上回るとき、き裂先端の節点のカップリング拘束を解放することによってき裂進展を表現する。

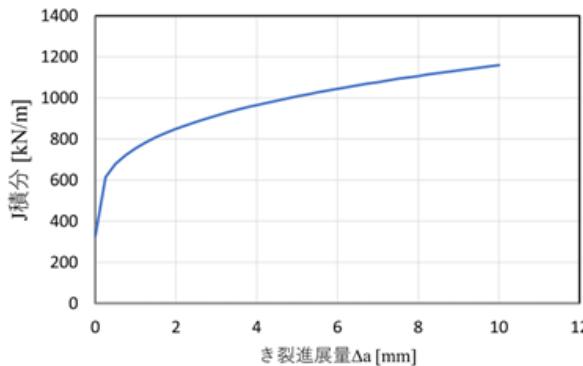
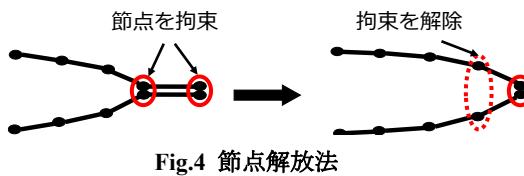
Fig.3 STPT410 の  $J - R$ 曲線

図5に示すように、き裂先端部を中心として半径3mmの円上の節点から  $\sigma_{tri}$ ,  $\varepsilon_{eq}$  を取得する。よって、き裂が進展すると、き裂先端部の位置が変わるので、取得する円が移動する。

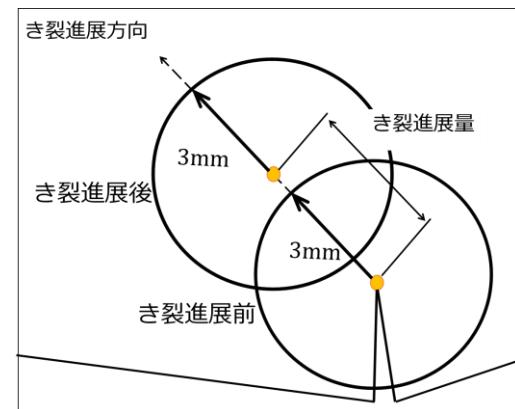


Fig.5 物性値の取得距離

また角度の定義は、図6に示すようにき裂先端から荷重位置の中心位置を結ぶ直線を基準軸とする。その軸から時計回りを負、反時計回りを正とする。

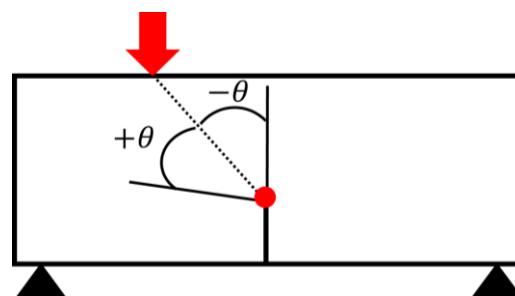
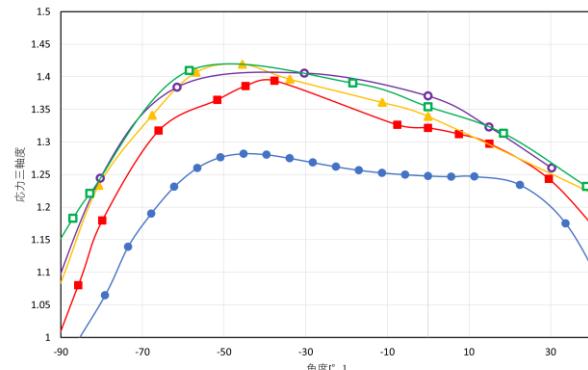


Fig.6 角度の定義

### 3. 結果

き裂を10mmまで進展させ、き裂が1mm進展するごとに  $\sigma_{tri}$ ,  $\varepsilon_{eq}$  を取得した。解析結果から得られた  $K_{II}/K_I = 0.1$  での物性値と角度の関係を表すグラフを図7, 図8に示す。

Fig.7 応力三軸度  $\sigma_{tri}$

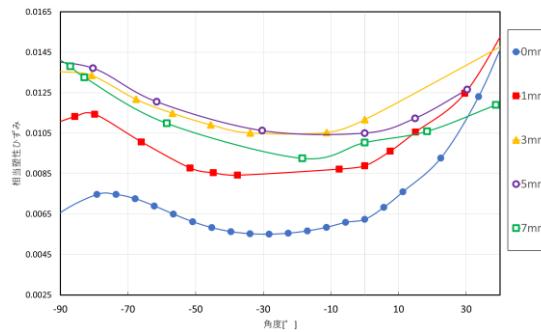
Fig.8 相当塑性ひずみ  $\varepsilon_{eq}$ 

図7, 図8よりき裂が進展するにつれ  $\sigma_{tri}$  は増加する. それに対し  $\varepsilon_{eq}$  も  $\sigma_{tri}$  と同様に増加するが, き裂進展量5mmを超えた後, 減少していく傾向がみられた. また  $\sigma_{tri}$ ,  $\varepsilon_{eq}$  は相反関係にあることが分かり, 混合モード比0, 0.058でも同様の傾向が得られた.  $\varepsilon_{eq}$  が最小極小値をとる角度を  $\theta$  とし, 式(1)の  $\theta_F$  と比較した. 結果を図9に示す.

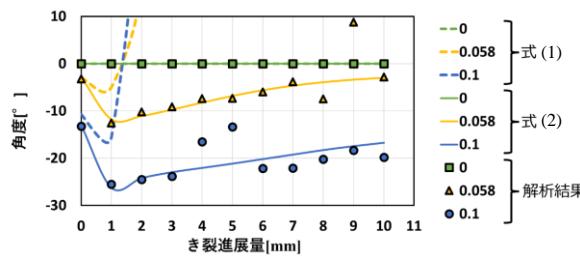


Fig.9 解析結果と提案式の比較

解析結果による  $\theta$  は混合モード比が0の時, き裂進展量が増加しても常に  $0^\circ$  であった. 混合モード比が 0.058, 0.1 の時, き裂進展量 1 mmまでは角度は負の方向に移項するが, その後は  $0^\circ$  に収束していく傾向がみられた. 提案式では混合モード比が 0 の時, 解析結果と同じく角度は常に  $0^\circ$  であった. だが, 混合モード比が 0.058, 0.1 の時, き裂進展量が 1 mmを超えた後角度が発散し, 十分に発達した長いき裂でのき裂進展角度の傾向を表現できなかつた.

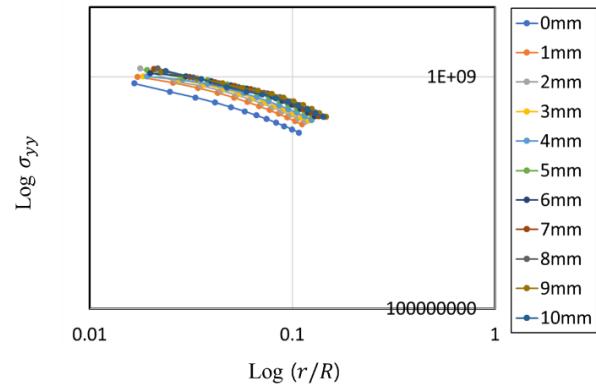
そこで, 本研究での解析結果を踏まえ, 式(1)を基に新たに  $\theta_F$  の式を提案する.

$$\theta_F[\text{rad}] = 4.5C^{b^{3.5}} - 7.6Ca^{7a} - 2bC^{2.1} \quad (2)$$

式(2)より, 混合モード比が 0 の時, き裂進展量が増加しても常に  $0^\circ$  であり, 混合モード比が 0.058, 0.1 の時, き裂進展量が増加するにつれ角度が  $0^\circ$  に収束していく, 解析結果と傾向が一致した.

物理量取得距離  $r = 3[\text{mm}]$  の妥当性を評価するため,  $K_{II}/K_I = 0.1$  での, 10mmまでのき裂進展量に対し, 横軸にき裂先端からの距離  $r$  をリガメント長さ  $R$  で割った値, 縦軸に応力  $\sigma_{yy}$  をとり, logスケールで表したもの

を図10に示す.  $\sigma_{yy}$  は  $r = 0.5\text{mm}$  から  $3.25\text{mm}$  まで  $0.25\text{mm}$  間隔で取得する.

Fig.10 物理量取得距離  $r$  の評価

結果を見ると, き裂進展量が増加すると  $\sigma_{yy}$  は増加するが, すべてのき裂進展量において傾きが  $-0.2$  となり, HRR解とは異なる特異性を表現できた. 他の混合モード比でも同様の傾向を確認できたことから, 本研究のモデルでは, 物理量取得距離  $r = 3\text{mm}$  は妥当であったと考えられる. だが, 異なるき裂進展量とJ積分の関係, すなわち異なる  $J - R$  曲線となる場合, 特異性が変化する可能性がある. 本研究で提案した式(2)は  $J - R$  曲線と物理量取得距離  $r$  の関数であるため, 式を一般化するにはこれらが異なるモデルで解析を行い, 式を評価する必要がある.

#### 4. 提案式の評価手法

そこで本解析では, 高延性, 高韌性材料であるA533B鋼を用いた常温における三点曲げ延性破壊試験結果[4]に基づき作成したモデル②を使用し, 提案式を検証するためのき裂進展解析を行う. 以後この解析を検証解析と称する. モデル②の節点数, 要素数, 材料特性, 最小要素サイズを表1に示す.

モデル①同様に汎用コードANCYSを用いて有限要素モデルを作成し, 図11に示すような1/2 モデル( $20\text{mm} \times 70\text{mm} \times 8\text{mm}$ )を用いる. 混合モード比は0.25とし, 要素は上下左右方向だけでなく, 斜め方向にもき裂進展が行えるよう四面体一次要素を使用する.

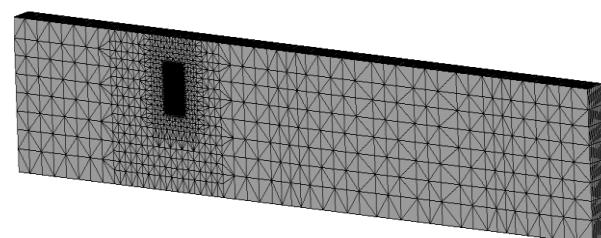


Fig.11 モデル②

き裂進展条件は, 中村らが行った破壊試験の結果[4]よ

り得られた図12に示す $J - R$ 曲線を使用する。

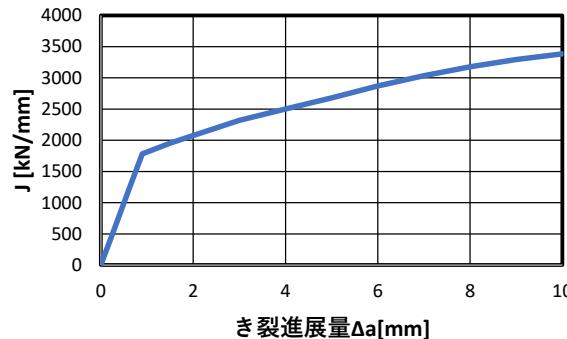


Fig.12 A533B の  $J - R$ 曲線

## 5. 提案式の評価結果

き裂先端部を中心として半径1.2mmの円上の節点から $\sigma_{tri}$ ,  $\varepsilon_{eq}$ を取得する。モデル①と同様、検証解析により得られた $\varepsilon_{eq}$ が最小極小値をとる角度を $\theta$ とし、提案式(2)の $\theta_F$ と比較した。結果を図13に示す。

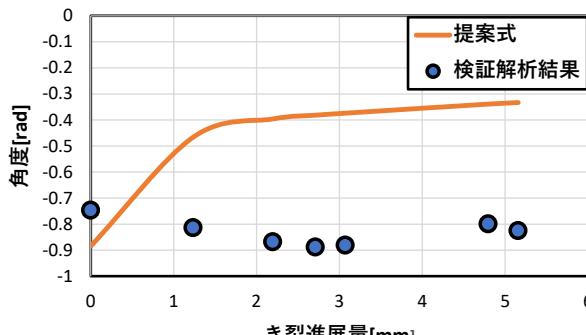


Fig.13 解析結果と提案式の比較

検証解析結果による $\theta$ はき裂進展量が増加した際もほぼ一定の大きさであった。提案式ではき裂進展が進むにつれ $0^\circ$ に収束していく傾向がみられた。提案式は混合モード比が小さく、き裂が荷重の作用する位置まで達する場合での解析結果でのフィッティングを行った。よって、混合モード比が大きく、き裂が荷重の作用する位置に達しない際には提案式(2)は適用できないと考えられる。

## 6. 結言

モデル①では先行研究で提案されたき裂進展角度式の評価を行うため、混合モード下における延性材料でのき裂進展解析を行った。十分に発達した長いき裂でのき裂進展角度の傾向を表現できなかったため、新たに式(2)を提案した。

モデル②では、式の一般化のため、検証解析を行った。その結果を基に式(2)の評価を行った。混合モード比が大きくなりき裂が荷重の作用する位置に達しない際には解析結果と異なる傾向を示した。

## 参考文献

- [1] 菊池正紀, 山王丸将吾. 混合モード荷重下における延性破壊機構の研究, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.74, No.745 (2008), Page.1235-1242
- [2] 光増夕佳, 混合モード荷重を受ける大規模降伏状態にあるき裂近傍の力学的評価, 修士論文, (2020)
- [3] 財団法人電力中央研究所. 軽水炉クラス2,3配管の欠陥評価法の開発. 総合報告T75(2003)
- [4] 中村春夫, 高島典生, 小林英男, 中沢一, A533B-1鋼の弾塑性破壊靭性および破壊抵抗の評価, 材料, Vol.32, No.363(1983), pp.286-291.