

「高温下における破壊挙動高精度解析法の構築」

神戸大学海事科学研究科 藤本 岳洋

1 研究の背景と目的

各種タービンや熱交換器等、高温下での使用が前提の機器は過酷な温度変化に晒されることが多い。これらの機器の破壊事故では、事故検証の結果、その原因が熱応力作用にあると結論付けられているものが少なくない。高熱環境下での構造物では素材の機械的性質自体が変化するとともに、高温クリープや熱疲労といった複雑なプロセスの連成が避けられないことが多い。そのため常温環境とは異なる破壊挙動が生じる可能性がある。これまでの高温環境下での使用機器の健全性評価の多くは、寿命予測もしくは応力集中部位からの破壊発生までの評価を対象としている。これは破壊事故前の機器の消耗を検出し補強や交換、廃棄を目的としたアプローチであり、機器を安全に使い続ける上で非常に重要な取り組みである。その一方で、ぜい性破壊発生後のき裂進展挙動についてはあまり注目されていない。しかし、今日、発電プラントなどでも省エネルギーの観点から DSS（長期間連続運転を実施するのではなく 1 日もしくは数日ごとに機器の始動と停止を行う）に基づく操業がなされており、熱疲労事故が発生する懸念は高まっている。また、東日本大震災によって主たる電力エネルギー供給源は火力発電に戻り、いくらかの休眠発電所の再稼働が余儀なくされている。そのため、万が一の高温下破壊事故における破壊挙動を予測し、被害の推定、損害の軽減化を図ることが今後、重要になると考えられる。そこで本研究では熱応力破壊の観察実験および温度分布場中のき裂進展シミュレーションを通じて、熱応力破壊挙動の解明と破壊条件の評価を試みた。

2 研究方法・研究内容

まず引張熱応力作用下の破壊実験を行い、その破壊挙動の変形場・温度場観察を行った。実験室レベルで実施できる比較的単純な熱応力作用下の破壊実験を行うことで、熱応力破壊に対する基礎的な知見を得ることならびに数値シミュレーションと比較するための基礎データを得ることを本実験の目的とした。

本実験の試験片材料は鋳鉄材 FC200 である。弾性変形等に関する材料定数はヤング率 74 GPa、ポアソン比 0.42、線膨張係数 $11.9 \times 10^{-6} / K$ である。本材料は船用機関の溶接応急処置等にも用いられるが、脆性的な性質を持っており破壊時の危険性が危惧される。本研究では、混合モード熱応力作用下のき裂先端近傍変形場を観察するため、荷重線法線方向と初期き裂線のなす角度 ϕ を $0, \pi/12, \pi/6, \pi/4$ に設定した 4 種の試験片に対して実験を行った。

試験片固定ならびに引張熱応力を作用させるための実験手順を図 1 に示す。①において加熱膨張した試験片を②の上下ジグで拘束した後、試験片の除熱（自然冷却）によって引張熱応力を作用させた。平均熱応力は上部に取り付けたロードセルから計測することが出来る。破壊はこの熱応力の発生過程（除熱過程）で生じる。実験時、破壊が生じるまでのき裂先端近傍の様相を高分解能 CCD カメラで撮影した。そして試験片表面のランダムパターンを利用したデジタル画像相関法によって変位分布を得る。この変位分布を基に、最小自乗法によって応力拡大係

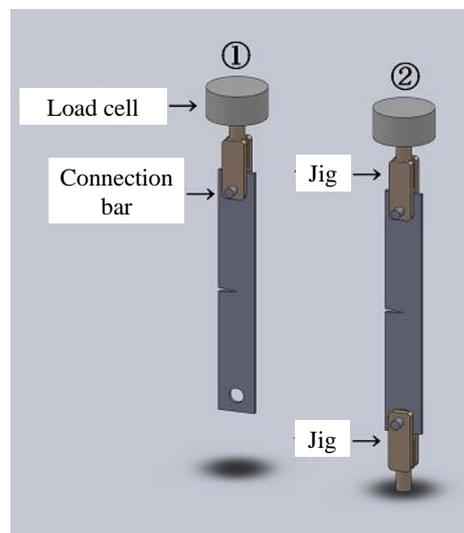


図 1 ジグとロードセルの配置

数 K_I , K_{II} を評価し、混合モード比を明らかにした。以後、この実験を実験 A とよぶ。

続いて、破壊開始後のき裂進展挙動を観察するために超高速カメラを用いた撮影を行った。このような高速撮影実験ではき裂進展に合わせて撮影タイミングをとる必要がある。そこで図 2 に示すように、初期き裂先端を取り囲む閉回路を設定した。試験片材料である鋳鉄材 FC200 が導電性を有すること、また金属素面に対しては非接触温度計では精度のよい温度計測が行いにくいことから、試験片表面に絶縁黒色塗料を塗布した。さらにその上に導電性塗料による初期き裂先端を取り囲む閉回路を設定している。き裂進展によって、この閉回路が切断されることを利用して、超高速カメラに撮影信号を送り、き裂進展挙動を捉えた。撮影速度は 31250 frame/s (32 μ s 間隔) として通常照明下で撮影を行っている。以後、この実験を実験 B とよぶ。

一般的に弾性域、比較的低温域の熱応力変形問題では温度場の効果を直接等価熱応力に換えるか、等価外力を用いて解くことが多い。しかし、熱応力破壊問題では、熱伝導の所要時間とき裂進展時間が拮抗し得ることから、将来的には、き裂進展に基づく境界条件の変化と熱伝導過程を支配方程式に基づいて厳密に解くことが望ましいと考えられる。ここでは、まず比較的単純な熱応力変形場中を進展するき裂進展挙動を評価するため、ガラス材中の定常温度場の効果を考慮した移動有限要素解析によってき裂進展方向を予測する混合形破壊経路予測シミュレーションを行った。

デローニ自動要素分割に基礎をおく移動有限要素法では図 3 に示すように進展するき裂先端とともに再分割要素群が移動・更新される。細分割要素群が常にき裂先端近傍をモデル化するため、き裂面の形状・境界条件を高精度で再現することができる。またき裂先端近傍特異変形場が細分割要素群によって評価されるため、良好な数値解析解が得られる。要素分割の更新に際して場のパラメータ（変位場、速度場、温度等）は全て新要素分割モデル上にマッピングされ、時間積分を可能とし解の精度を確保する。

本シミュレーションではガラス材のぜい性破壊を想定しているため、き裂進展が熱伝導、温度場の変化より非常に早い時間で完結する。そのため、局所断熱を仮定した簡単な形式で仮想仕事の原理式より有限要素法の釣合い式(1)を導出することができる。

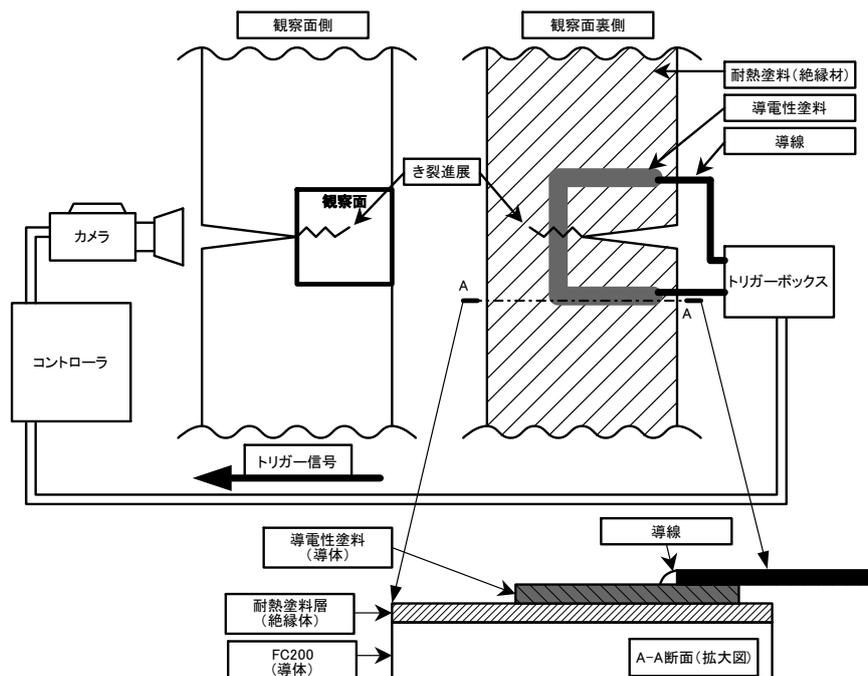


図 2 超高速撮影トリガー回路の概念

$$[K]\{u\} = \{F\} + \{f\} \quad (1)$$

ここで $[K]$ は一般的な要素剛性マトリックス, $\{u\}$ は変位成分ベクトル, $\{F\}$ は機械的境界条件に基づく節点力成分ベクトル, $\{f\}$ は熱膨張効果による節点力ベクトルである. $\{f\}$ は節点温度と基準温度との差 ΔT から次式に基づき計算することができる

$$\{f\} = \int_V [B]^T [D][\alpha] dv \{\Delta T\} \quad (2)$$

ここで $[D]$ は応力-ひずみマトリックス, $[B]$ はひずみ-変位マトリックスを意味する.

本報では典型的な加熱ぜい性破壊が生じる材料としてガラス材 (ヤング率 69 GPa, ポアソン比 0.23, 密度 2320 kg/m³, 線膨張係数 8.5×10⁻⁶ /K) をモデル材料としている. 図 4 に示す 2 次元モデルを対象とし, 強制変位 (単純引張, 45° 方向引張), 温度場 (一定温度場, 線形温度場) の下, き裂進展方向の予測を局所対称理論に基づいて行った.

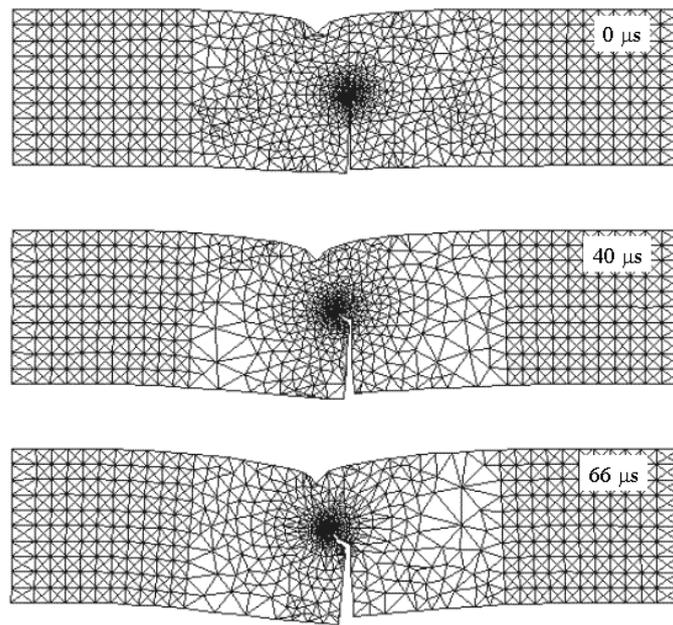


図 3 移動有限要素法の概念

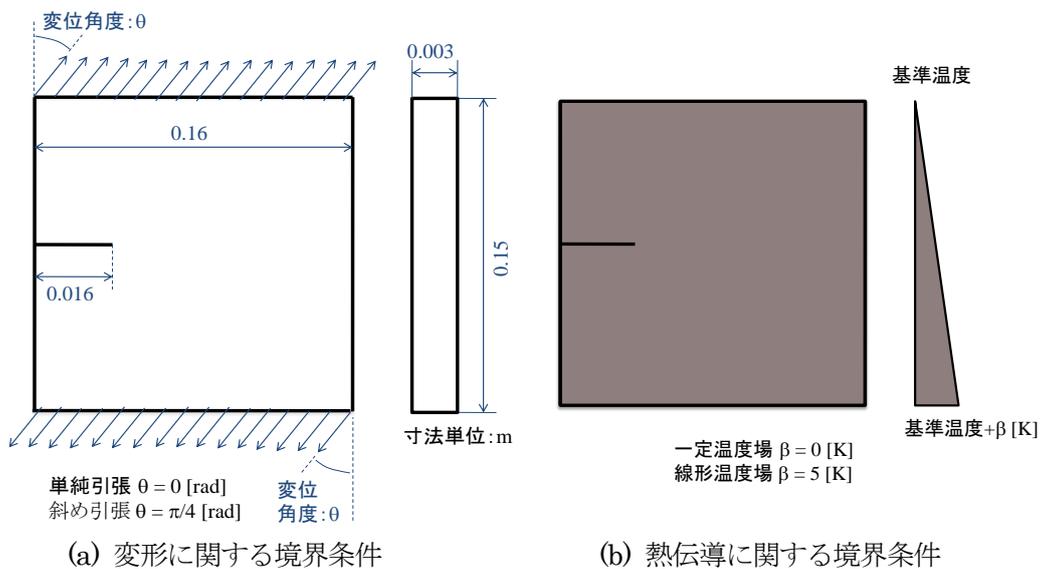


図 4 シミュレーションモデル図

3 研究成果

実験 A では初期き裂角度 ϕ を系統的に変化させた各試験片について行った。破壊発生後の各試験片におけるき裂進展方向は全て引張熱応力作用の法線方向(図 5 参照)となっており、き裂進展挙動全体がモード I 支配型であることが認められる。

図 6(a)にデジタル画像相関法によって評価した変位分布の結果を示す。図では y 方向変位成分のみを示しているが同様に x 方向変位成分も得ている。この相関画像は実験誤差を多く含んでいるので、最小自乗法によって応力拡大係数 K_I , K_{II} を求めた。その評価結果を表 1 に示す。図 6(b)にはこの応力拡大係数から逆算した変位分布を示している。図 5(a), (b) の変位分布の比較から最小自乗法によって評価した応力拡大係数がき裂先端近傍の変位分布を大局的に表すものであることがわかる。応力拡大係数の値は初期き裂方向の違いによらず K_I 値が $10 \text{ MPa m}^{1/2}$ 付近となっており、モード I 支配型で破壊が生じていることが判明した。

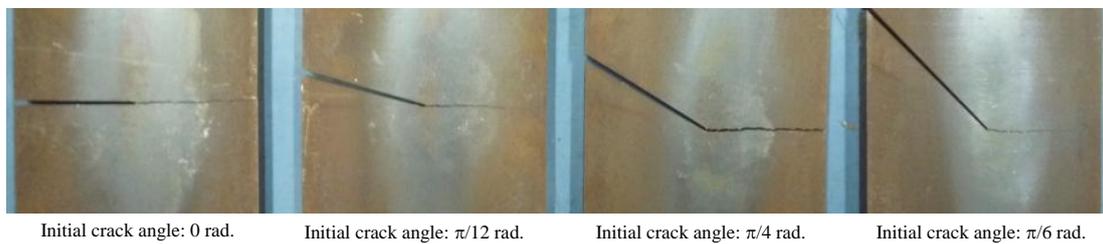
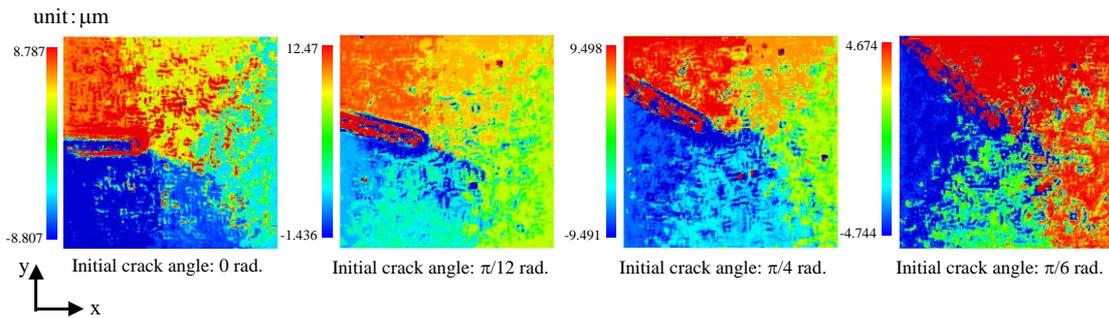
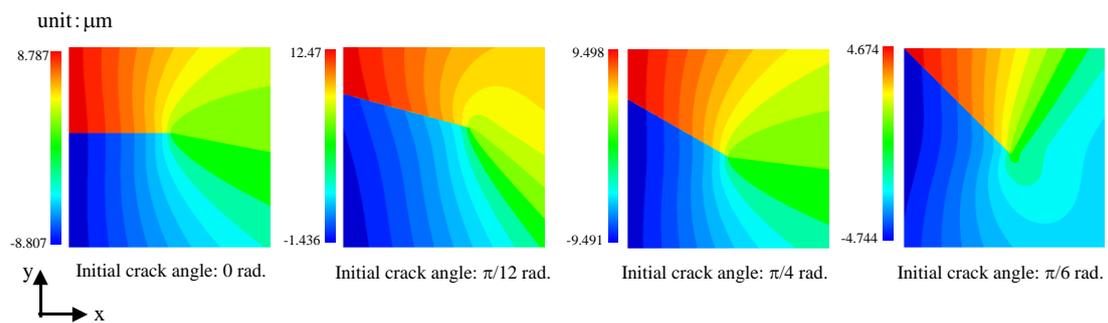


図 5 各試験片のき裂進展結果



(a) デジタル画像相関によって得られた変位分布



(b) 最小自乗法によって求めた応力拡大係数から逆算した変位分布

図 6 実験観察・画像処理で得たき裂先端近傍 y 方向変位分布

表 1 応力拡大係数評価結果

Initial crack angle	$K_I (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K_{II} (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$
0 rad. (0 deg.)	11.12	-0.109
$\pi/9$ rad. (15 deg.)	10.86	-1.370
$\pi/6$ rad. (30 deg.)	10.04	-3.650
$\pi/4$ rad. (45 deg.)	8.520	-1.595

実験 B において得た高速撮影結果を図 6 に示す。各画像において確認されたき裂先端位置は白矢印で示している。材料素面の反射等の影響で、き裂先端が鮮明に読み取れなかった画像も存在した。このような画像をなくし、連続的な記録画像を確認できる条件を定めるのが今後の課題の一つである。試験片材料が铸铁材であり、グラファイトが析出していることから、図 7 にみられるき裂進展経路には微視組織の影響と思われる若干の凹凸が認められる。しかし、大局的にはき裂は直進していることがわかる。これらのき裂進展履歴を計測し、グラフ化したものを図 8 に示す。図ではき裂先端座標値の差分によってき裂進展速度を近似評価している。き裂進展挙動には撮影開始後 1500 μs 辺りから加速傾向が認められ、最高速度は 60 m/s 程度にまで達している。铸铁材 FC200 のせん断波速度が 3477 m/s であることから、このき裂進展速度は妥当であると考えられる。1700 μs 以降の進展速度の減少については、き裂進展量が大きくなりリガメント部にヒンジ効果が及んだためではないかと考えられるが、その妥当性については、今後、数値シミュレーション等を交えて検証していく必要がある。

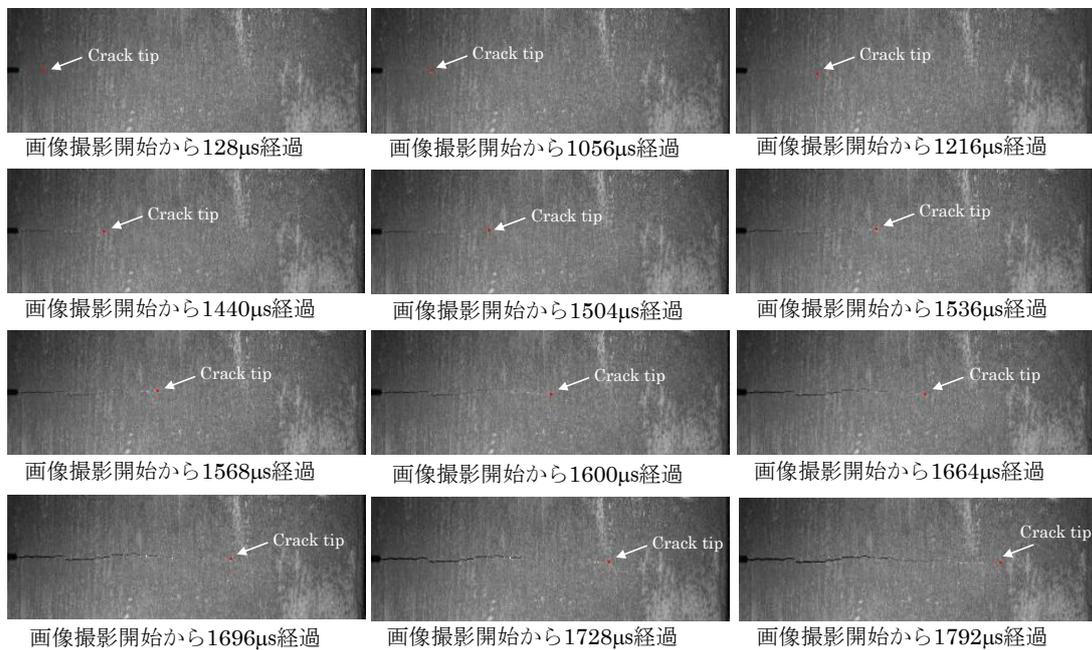


図 7 熱応力破壊時のき裂進展挙動の高速度撮影結果

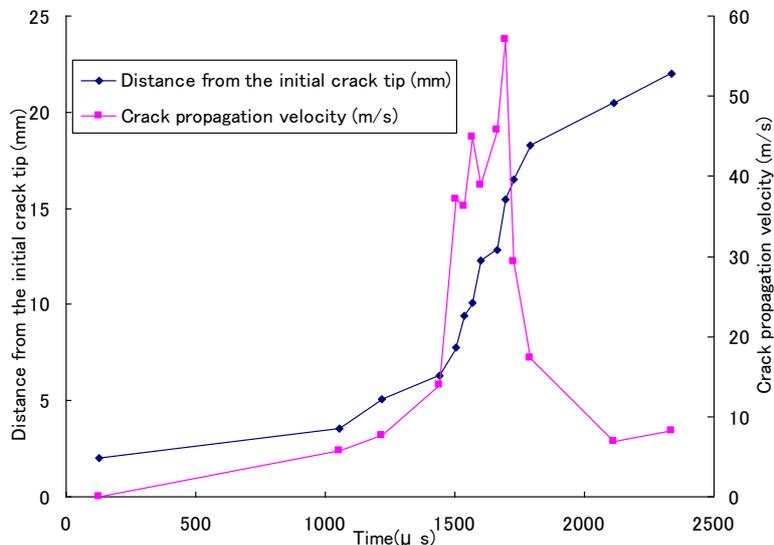


図 8 き裂先端位置履歴とき裂進展速度履歴

次にガラス材の線形分布温度場中のき裂進展シミュレーション結果について説明する。図9は単純引張 ($\theta = 0$ [rad]), 線形分布温度場 ($\beta = 5$ [K]) の下でシミュレーションにより予測した破壊経路 (図中赤線) を示している。この結果は、機械的には単純引張が作用しているにもかかわらず、構造中の温度分布によって容易にき裂が曲進し得ることを示している。

図10は斜め引張 ($\theta = \pi/4$ [rad]) の下で、一様温度場 ($\beta = 0$ [K]) と線形分布温度場 ($\beta = 5$ [K]) 中に生じた破壊経路を比較したものである。(a) $\theta = \pi/4$ [rad], $\beta = 0$ [K] の条件下では、機械的な外力 (強制変位) の作用によって破壊経路は右下向きに進展している。このケースでは温度場は一様であるため、き裂進展にはほとんど影響を及ぼしていない。一方、線形分布温度場 (図10(b) $\theta = \pi/4$ [rad], $\beta = 5$ [K]) では、機械的応力だけでなく熱応力も作用する。そのため、進展き裂が局所対称性を保持する方向も熱応力の作用によって変化する。本条件では構造下部にはより高い圧縮熱応力が作用する。進展き裂先端近傍は局所対称理論に基づく開口型破壊を維持しようとするため、このような高圧縮応力領域を避けるようにき裂が進展する。そのため、徐々に方向を変えながら進展した結果が図10(b)の破壊経路に表れていると考えられる。

このように破壊経路は機械的応力と熱応力 (変形場と温度場) に強く依存して変化する。そのため、高温機器のぜい性破壊事故の対策・検討等では高精度解析法の確立が重要となる。

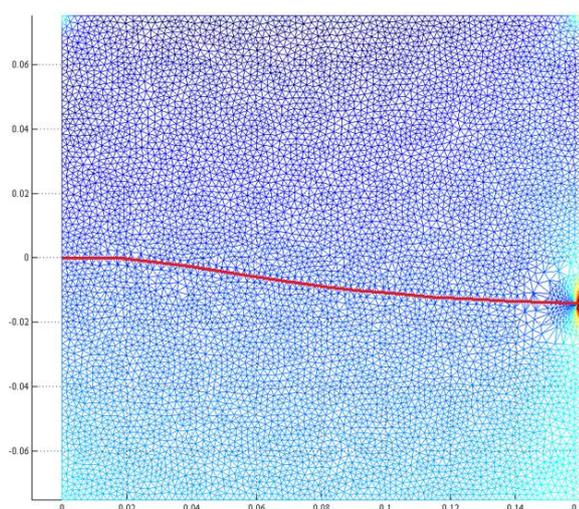
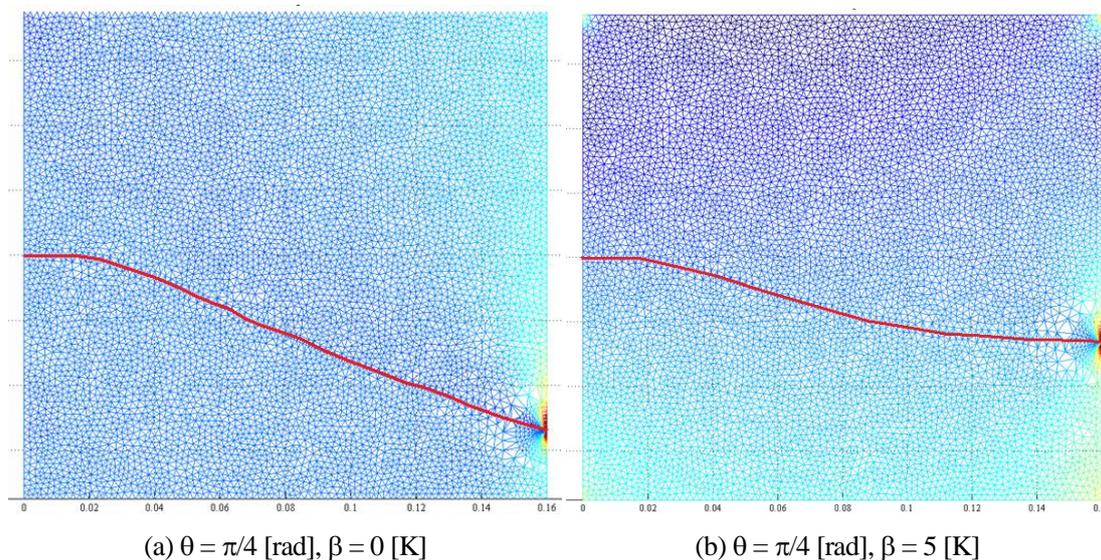


図9 熱応力場の影響を受けて曲進した破壊経路 ($\theta = 0$ [rad], $\beta = 5$ [K])



(a) $\theta = \pi/4$ [rad], $\beta = 0$ [K]

(b) $\theta = \pi/4$ [rad], $\beta = 5$ [K]

図10 複雑な熱変形場中の破壊経路の比較

4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究の成果を発展させることによって、高温化で破壊した機器の破壊挙動の数値予測が可能となる。今後、より普遍的な熱応力破壊評価手法が開発されると破壊事故発生時の被害低減に大きく寄与できると考えられる。