

配管エルボのクリープき裂解析

(財)電力中央研究所 金属材料部 高橋 由紀夫
川崎重工業(株) 原子力本部開発部 島川 貴司
(株)ラティス 解析技術部 井垣 和明

1. はじめに

高速炉プラントの高温構造設計では、クリープ疲労損傷などによるき裂の発生を防止することに主眼が置かれている。しかしながら、より一層の安全性を確保するためには、構造材中に想定したき裂の進展挙動を評価し、過大荷重負荷時にも構造としての破壊を生じないことを確認しておくことが重要であり、種々の実験と解析評価を行っている。今回、実構造の評価において重要となる3次元の表面き裂の1つとして、表面き裂付き配管エルボの高温クリープ疲労試験及びそのFEM解析を実施した。ここでは、ABAQUSを用いて破壊力学解析をおこなう場合の1例として、FEM解析の実施上の技法・問題点からみた解析の実際を報告する。

解析は、3次元大変形弾塑性クリープ解析として実施し、破壊力学パラメータを求めている。き裂形状は外表面未貫通半楕円であり、き裂配置(周・軸)・き裂深さをパラメータとしている。エルボの閉荷重を与えた状態でクリープ保持し、J、Ct 積分の分布・時間変化を得ている。

2. 解析モデル

2.1 解析対象

解析対象となる実験は、表面き裂付き配管エルボの高温クリープ疲労試験である。図2-1に試験装置概略図を示す。エルボ部は電気炉中にセットされて600℃を保持され、その状態で、30tonf容量サーボパルサー疲労試験機により繰り返し閉荷重を受ける。

試験体は、中心部外表面に未貫通半楕円き裂を有する配管エルボである。図2-2に試験体概略図を示す。試験体の切欠きき裂は軸方向き裂(E1)および周方向き裂(E2)の2種類あり、軸方向き裂は背側から97.5°の位置に、周方向き裂は75°の位置に設定している。

2.2 解析ケース

解析ケースは、き裂なしモデル1ケース、軸方向き裂および周方向き裂は、各々き裂サイズの異なる3ケースである。表2-1に解析ケースを示す。

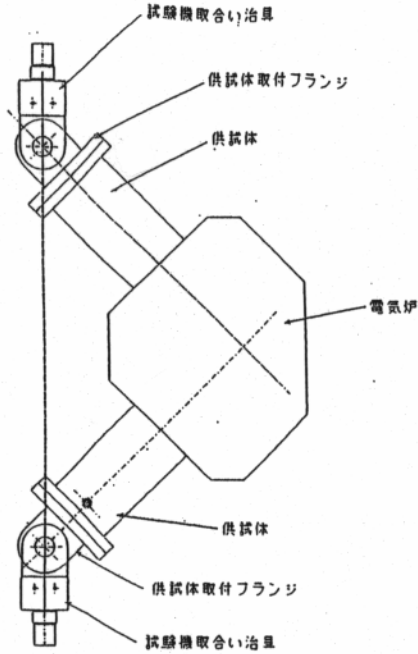
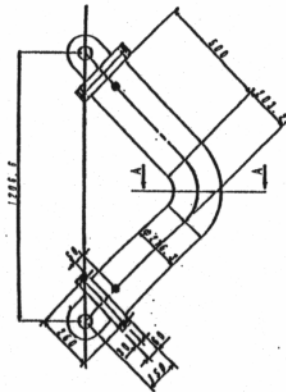
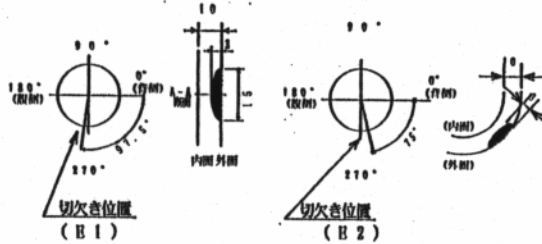


図 2-1 試験装置概略図



(a) 試験体寸法図 (E1, E2共通)



(b) 切欠き形状 (E1, E2)

図 2-2 試験体概略図

表 2-1 解析ケース

解析モデル		き裂サイズ [表面長さ×深さ]	要素分割	モデルサイズ
き裂なしモデル		—	[エルボ一般部] 周方向 15°、軸方向 7.5°、板厚方向 5 分割	要素数: 720 節点数: 3792
軸 方 向 き 裂	CASE A1	15.0mm×3.0mm	[エルボ一般部] 周方向 15°、軸方向 7.5°、板厚方向 5 分割 [き裂] き裂面に垂直な面内 22.5°、き裂面内 10°	要素数: 2647 節点数: 13058
	CASE A2	19.0mm×4.0mm	[エルボ一般部] 周方向 15°、軸方向 7.5°、板厚方向 5 分割 [き裂] き裂面に垂直な面内 22.5°、き裂面内 10°	要素数: 2647 節点数: 13058
	CASE A3	23.5mm×5.0mm	[エルボ一般部] 周方向 15°、軸方向 7.5°、板厚方向 5 分割 [き裂] き裂面に垂直な面内 22.5°、き裂面内 10°	要素数: 2647 節点数: 13058
周 方 向 き 裂	CASE C1	15.0mm×3.0mm	[エルボ一般部] 周方向 15°、軸方向 7.5°、板厚方向 5 分割 [き裂] き裂面に垂直な面内 22.5°、き裂面内 10°	要素数: 3096 節点数: 15100
	CASE C2	22.0mm×5.0mm	[エルボ一般部] 周方向 15°、軸方向 7.5°、板厚方向 5 分割 [き裂] き裂面に垂直な面内 22.5°、き裂面内 10°	要素数: 3096 節点数: 15100
	CASE C3	28.5mm×7.0mm	[エルボ一般部] 周方向 15°、軸方向 7.5°、板厚方向 5 分割 [き裂] き裂面に垂直な面内 22.5°、き裂面内 10°	要素数: 3096 節点数: 15100

2.3 有限要素モデル

有限要素モデルは、配管軸方向及び周方向の対称性より1/4モデルとした。尚、試験体のき裂は単独であり厳密には周方向の対称性は保たれていないが、き裂は相対的に小さく、対称面から離れているため、180°モデルとした。直管端面は荷重載荷ピン位置へ剛結している。

有限要素は、中間節点を有する3次元連続体2次要素 (ABAQUS 要素タイプ: C3D20R) とした。き裂部分の有限要素メッシュは、平板表面の半楕円き裂メッシュをエルボ形状にマッピングして作成した。き裂先端の特異場のモデル化について、予備検討解析の結果、1/4節点特異要素は用いず通常要素とした。また、大ひずみが発生し先端は鈍化すると予期されるため、き裂先端自由度は結合せずフリーとしている。

有限要素モデルを図2-3に示す。

2.4 材料モデル

材料温度は600℃均一とし、等方弾塑性クリープ材料とした。

塑性モデルはひずみ増分形式のミーゼス型等方硬化モデルである。応力ひずみ関係として繰り返し応力ひずみ関係を与えている。

クリープ則は以下のNorton則をひずみ硬化型として用いている。

$$\epsilon_c = 2.992 \times 10^{-11} \cdot \sigma^{5.245} \cdot t$$

ϵ_c : クリープひずみ (mm/mm)

σ : 応力 (kgf/mm²)

t : クリープ時間 (hr)

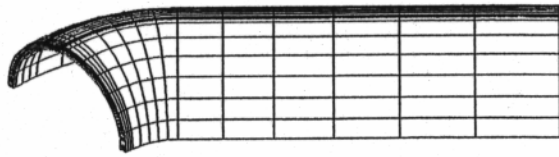
2.5 荷重条件

荷重は直管端ピン位置へのエルボ閉荷重である。試験では、ストローク0~21.2mmの片側(閉側)繰り返し荷重であり、各荷重サイクルの最大閉位置で600℃クリープ保持し、総保持時間計4時間としている。

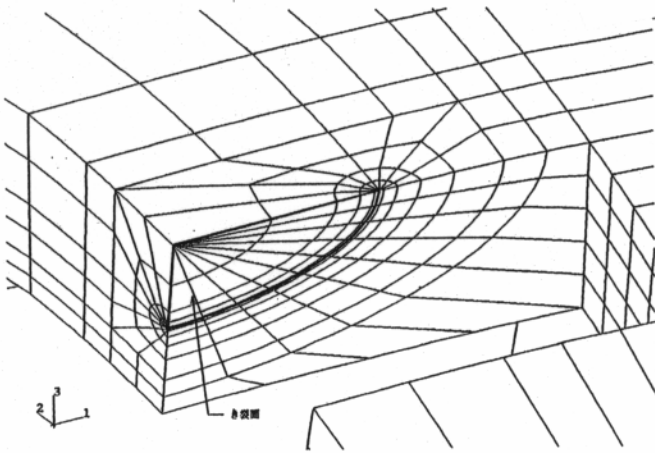
解析上、この繰り返し荷重をそのまま模擬するのは、材料構成則及び計算規模の上から困難なため、以下の簡略化を行った。

- (1) ストローク0~21.2mmの片側(閉側)繰り返し荷重は、十分な繰り返し後を想定し-10.6mm ~ +10.6mmの両側繰り返し荷重に同等と考える。
- (2) さらに、応力ひずみ関係として繰り返し応力ひずみ関係を与えることにより、-10.6mm ~ +10.6mmの両側繰り返し荷重を、その片側のストローク0~10.6mmの片側(閉側)単調荷重で置き換え、引き続いてクリープ保持時間4時間を与える。
- (3) 解析モデルはエルボの片側だけのモデルであるため、直管端ピン位置への強制変位は0~5.3mmとする。

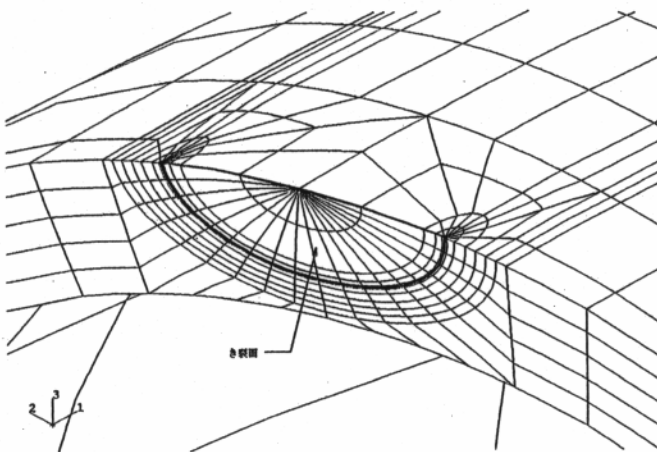
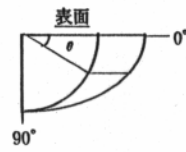
※解析結果図中では、試験に合わせて、例えば強制変位5.3mmを‘Disp.21.2mm’と表記した。



全体図



軸方向き裂



周方向き裂

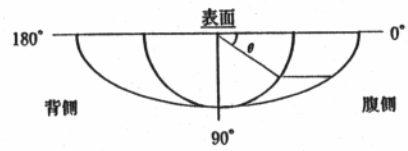


図 2-3 有限要素モデル

2.6 破壊力学パラメータ

算出する破壊力学パラメータはJ積分（弾塑性解析終了後、クリープ保持前）および C_I 積分の時間履歴とした。計算法は、ABAQUSの標準機能（*contour integral；仮想き裂進展法）を用い、積分経路は最内経路（経路1）より5経路分計算した。

2.7 解析プログラム

ABAQUS Ver-5.6を用いた。

3. 予備検討解析とその結果

3.1 き裂部の有限要素分割の妥当性確認

き裂部の有限要素分割の妥当性を確認するため、Raju-Newmanの解析解とK値の比較を行った。（図3-1）

有限要素モデルは配管エルボ周方向き裂 [22mm×5mm] モデルを平板にしたモデルを対象とし、荷重ケースは引張荷重 $F=1000\text{kgf}$ (CASE 1) と曲げ荷重 $M=1000\text{kgf}\cdot\text{mm}$ (CASE 2) の2ケースとした。材料モデルは等方弾性材料とし、縦弾性係数 15185 kgf/mm^2 、ポアソン比 0.31 を与えた。

き裂前縁に沿うJ積分の分布を図3-2に、K値分布についてRaju-Newmanの解析解との比較を図3-3に示す。ここで、ABAQUSによる応力拡大係数KはJ積分値から平面ひずみを仮定して以下の換算により算出した。この際、J積分値は経路2～4の平均値を採用している。

$$J = K^2 (1 - \nu^2) / E$$

両者の相違は、引張荷重ケースで最大2%、曲げ荷重ケースで最大8%である。J積分の経路独立性が良く保たれていることと併せ、本解析のき裂部有限要素分割は妥当であると判断した。

3.2 1/4節点特異要素の検討

き裂部先端の有限要素モデル化において、き裂先端の特異場を表現するために1/4節点特異要素 (Barsoumの特異要素) を用いることが考えられる。ここでは、1/4節点特異要素の使用の有無による相違を検討した。

検討対象ケースは軸方向き裂 CASE A1 [15mm×3mm] とし、エルボ閉荷重載荷後、クリープ保持前のき裂前縁に沿うJ積分の分布を比較した。（図3-4）

両ケースは、経路1（最内経路）を除いてほぼ一致し、顕著な差異は見られない。経路1については、1/4節点特異要素を用いないケースではやや低めの値を示すものの妥当な結果であるのに対し、1/4節点特異要素によるケースでは大きな振動が発生している。以上の結果より、本解析では1/4節点特異要素は用いないものとした。

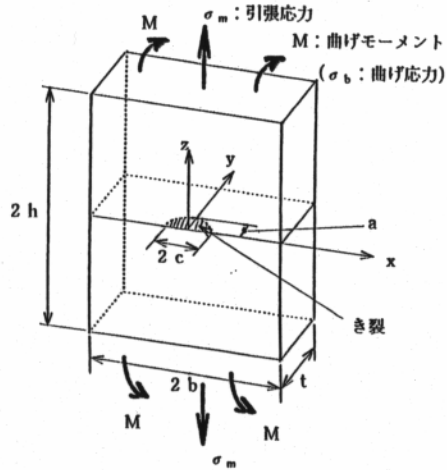


図3-1 半楕円表面き裂付き平板 <Raju-Newman との比較解析モデル>

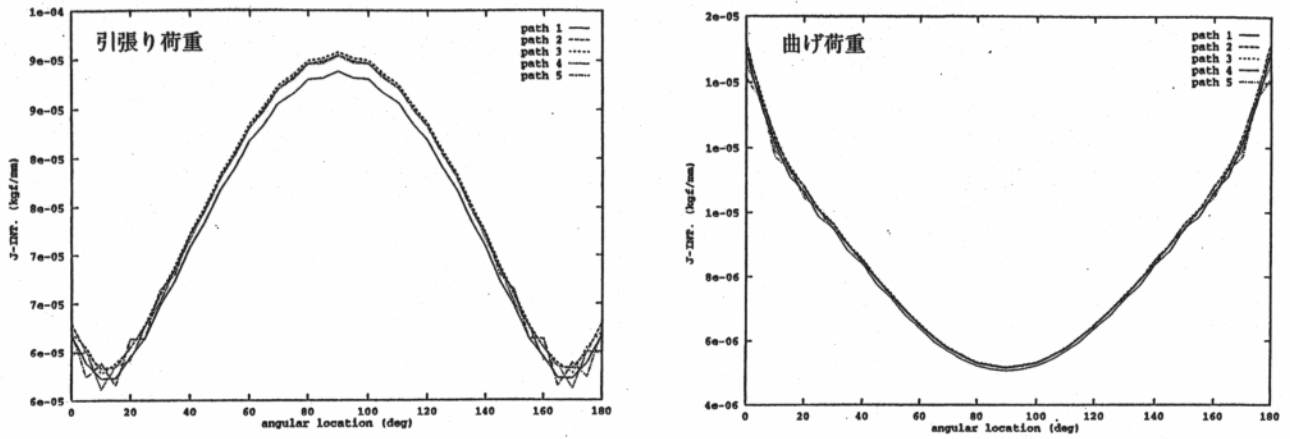


図3-2 き裂前縁に沿うJ値分布

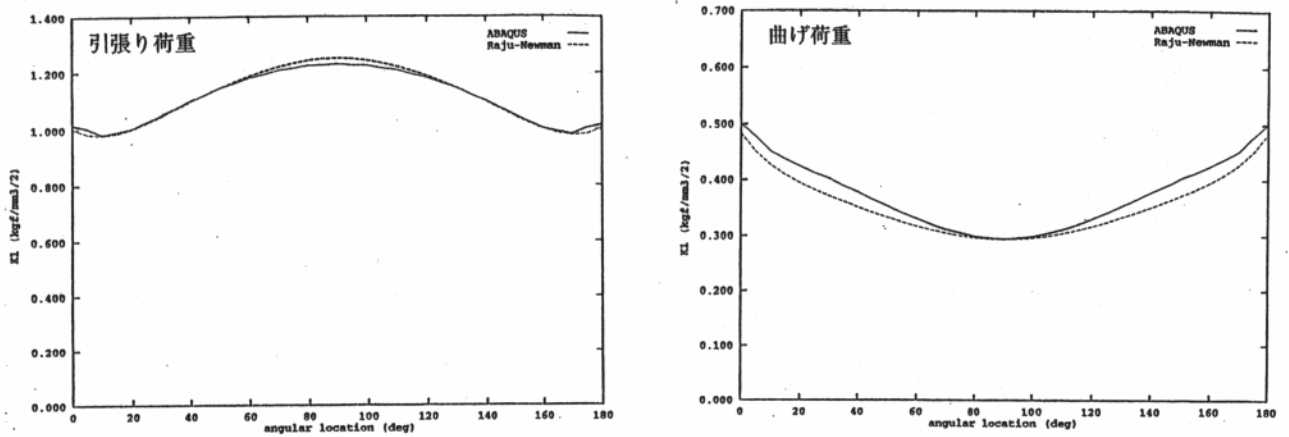


図3-3 き裂前縁に沿うK値分布 <Raju-Newman との比較>

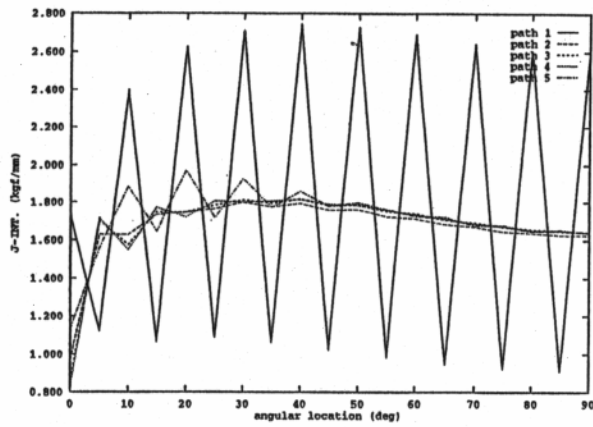
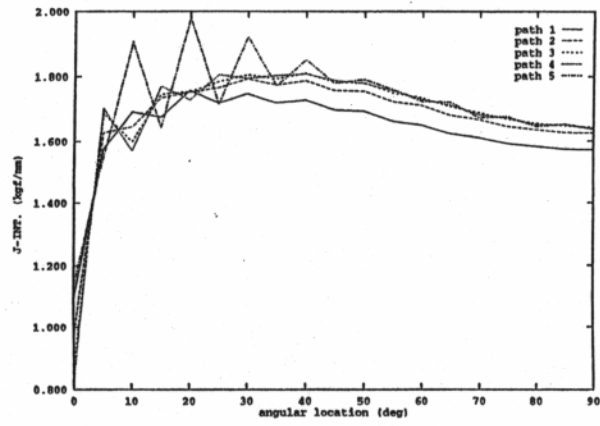


図 3-4 き裂前縁に沿う J 値分布 <CASE A1>

(上) 1/4 節点特異要素無し (下) 1/4 節点特異要素有り

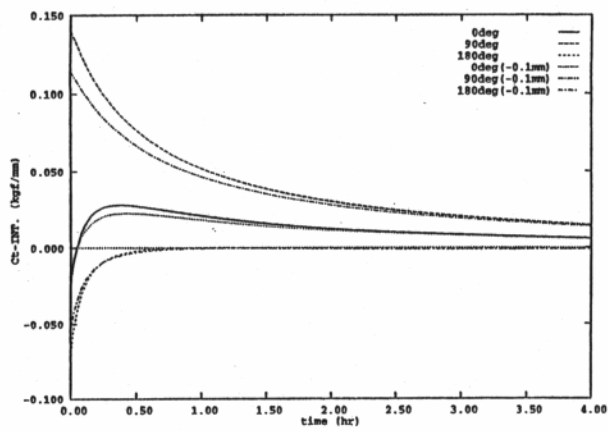


図 4-1 き裂前縁の各位置の Ct 値時刻歴 <CASE C2>

一部荷重除荷 (-0.1mm) による影響

4. 解析状況及び解析結果

4.1 解析状況

解析ケースのうち、軸方向き裂 [CASE A1] および周方向き裂 [CASE C3] はクリープ解析について収束解が得られなかった。軸方向き裂 [CASE A1] を対象に検討した結果、強制変位を 5.3mm から 0.01mm 除荷することによりクリープ解析が実行されるようになった。しかし、解析は時間増分が小さいままにとどまり、クリープ保持 4.0hr まで解析を実施するには計算時間がかかり過ぎると予想されたため 0.4hr 時点で解析を打ち切った。そこで、強制変位を 5.3mm から 0.1mm 除荷しクリープ解析を実施したところ、時間増分は順調に増加し、クリープ保持 4.0hr まで終了した。周方向き裂 [CASE C3] についても同様に、強制変位を 5.3mm から 0.1mm 除荷しクリープ解析を実施し、クリープ保持 4.0hr まで終了した。

上述の一部除荷は解析技術上の対策として実施したものであるため、その解析結果への影響を検討するため、除荷なしで収束解が得られている周方向き裂 [CASE C2] について、除荷なしと除荷 0.1mm の比較をおこなった。一例として、図 4-1 に Ct 積分の時刻歴を示す。検討の結果、両ケースの差異は大きくないと判断し、軸方向き裂 [CASE A1] および周方向き裂 [CASE C3] については一部除荷による結果を採用した。

4.2 解析結果

解析結果の一例として、き裂前縁に沿う J 積分、Ct 積分の分布及び Ct 積分時刻歴の幾つかを示す。(図 4-2~4)

解析結果より以下が観察された。

(1) J 積分の経路独立性、振動について、

- ・経路 1 は、ほぼ一貫してやや低めの値を示している。
- ・経路 5 は、き裂前縁に沿った形で相当に大きな振動を示す。すなわち、中間節点とコーナー節点で異なった値を示す。(経路 5 のメッシュ形状が悪いためと考えられる)
- ・経路 2~4 は、ほぼ良い一致(経路独立性)を示し、振動も小さい。
- ・上記の状況は、閉荷重の小さい段階からみられ、荷重が増大しても大きな変化はない。(悪化しない)
- ・尚、別途実施した弾性解析においては、J 積分値は良い経路独立性を示し、振動もほとんど観られない。

(2) J 積分のき裂前縁に沿う分布について、

- ・閉荷重の小さい段階においては分布は平坦に近い。
- ・閉荷重が増大するに従い、端部に近い側(10°~30°程度)が大きく、中央部(90°側)が凹んだ分布となる。(周方向き裂 [CASE C1] 以外)
その程度は、軸方向き裂が周方向き裂に比べて大きく、また、き裂が大きい(深い)ほど顕著である。中央部の実効リガメントが小さいためと考えられる。
- ・但し、表面近傍(0°側)は閉荷重が増大しても J 積分値が余り増大せず、結果的とし

て、載荷時には表面近傍が顕著に落込んだ J 積分分布を示す。(弾性解析では見られない特徴)

(3) Ct 積分の経路独立性、振動について、

- ・クリープ保持 4 hr 経過後であっても、Ct 積分分布は全ての経路が一致せず、十分な経路独立性はみられない。時刻歴と併せ、定常状態に達していないためと考えられる。
- ・J 積分と比べ、き裂前縁に沿った形の振動は小さい。

(4) Ct 積分のき裂前縁に沿う分布について、

- ・クリープ保持初期時点においては分布は平坦に近い。
- ・クリープ保持時間が経過するに従い、端部に近い側が大きく、中央部 (90° 側) が凹んだ分布となる。(周方向き裂 [CASE C1] 以外)
その程度は、軸方向き裂が周方向き裂に比べて大きく、また、き裂が大きい (深い) ほど顕著である。中央部の実効リガメントが小さいためと考えられる。
- ・但し、表面近傍 (0° 側) はクリープ保持時間が経過しても Ct 積分値が余り増大せず、結果として、クリープ保持後には表面近傍が顕著に落込んだ Ct 積分分布を示す。

(5) Ct 積分の時間変化について、

- ・Ct 積分は、表面近傍を除き、時間とともに単調に減少して一定値に漸近していく傾向にある。但し、クリープ保持 4 hr ではまだ充分には定常状態に達していない。
- ・表面近傍では、Ct 積分は始め小さな値 (ケースによっては負値) を示し、初期段階で急速に増大してピークを示した後に徐々に減少して一定値に漸近していく様子を示す。

5. まとめ

表面き裂付き配管エルボの 3 次元大変形弾塑性クリープ解析を実施し、破壊力学パラメータ J、Ct を求め、定性的な傾向を把握することができた。尚、試験との対応については、別の機会に発表の予定である。

解析上の問題点として、クリープ段階における収束の困難が挙げられる。これは、クリープき裂解析 (特に大変形を含む場合) にしばしば遭遇する問題であり、今後の課題である。また、今回は繰り返し荷重を単調荷重に簡略化して扱ったが、構成則の見直しもおこない繰り返し荷重をそのまま扱うことを課題としたい。

6. 謝辞

本研究は、通産省資源エネルギー庁の委託の下に電力中央研究所において実施された発電用新型炉技術確証試験 (高速増殖炉技術確証試験) の一環として得られた成果をまとめたものである。本研究の遂行にあたり御指導・御助言を賜った高速増殖炉技術確証試験高温構造委員会 (主査矢川元基東大教授) の各位に感謝の意を表します。

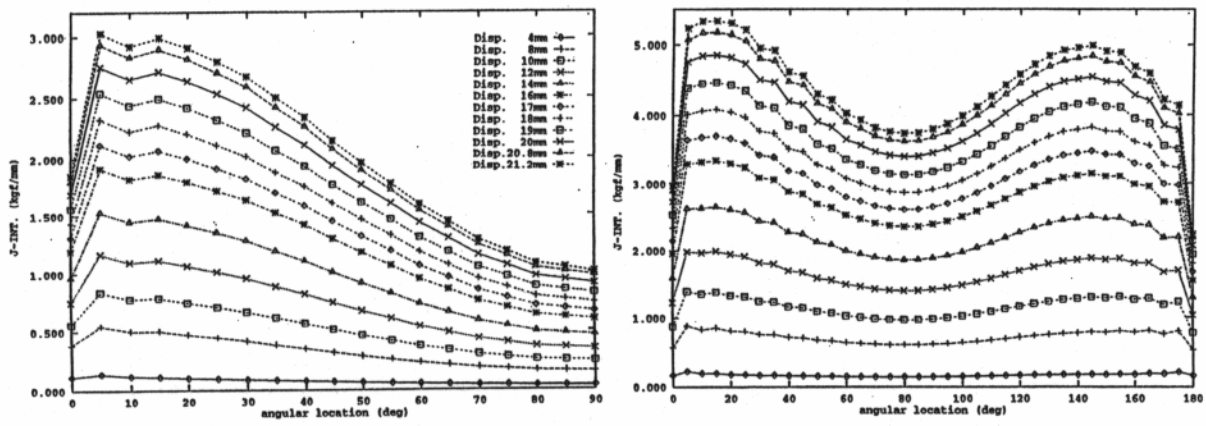


図4-2 き裂前縁に沿うJ値分布 < (左) CASE A3 (右) CASE C3 >

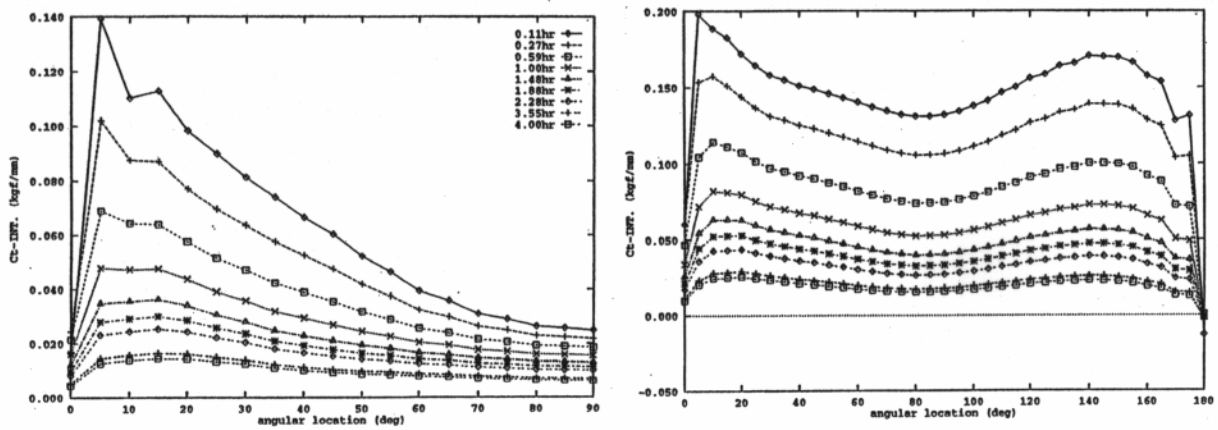


図4-3 き裂前縁に沿うCt値分布 < (左) CASE A3 (右) CASE C3 >

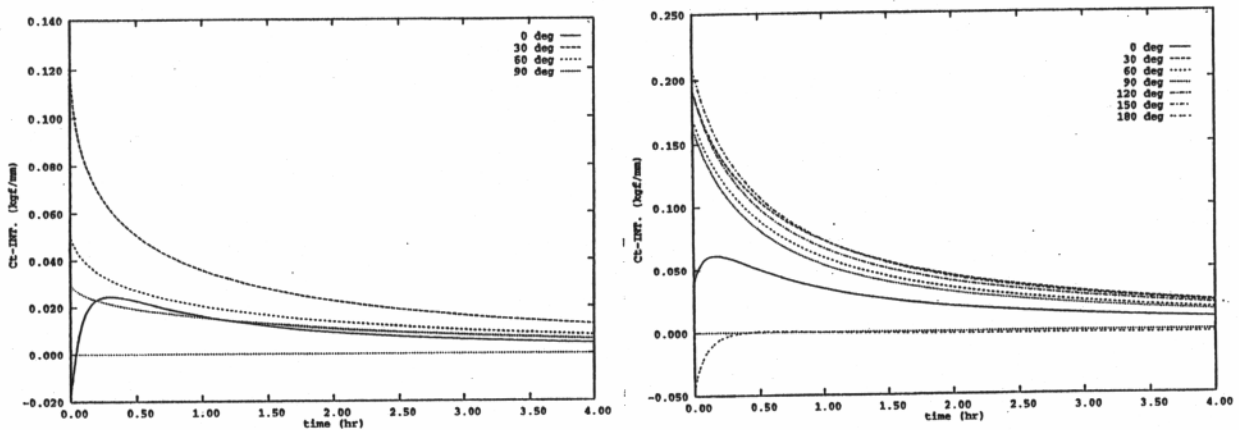


図4-4 き裂前縁の各位置のCt値時刻歴 < (左) CASE A3 (右) CASE C3 >