

# 溶接ならびに機械加工時の残留応力分布 およびき裂進展挙動の評価

Evaluation of Residual Stress Distribution due to Welding and Surface Machining and Crack Growth Behavior

大阪大学大学院工学研究科	伊原 涼平	Ryohei IHARA	Student Member
大阪大学大学院工学研究科	橋本 匡史	Tadafumi HASHIMOTO	
大阪大学大学院工学研究科	三上 欣希	Yoshiki MIKAMI	
日本原子力研究開発機構	勝山 仁哉	Jinya KATSUYAMA	
日本原子力研究開発機構	鬼沢 邦雄	Kunio ONIZAWA	Member
大阪大学大学院工学研究科	望月 正人	Masahito MOCHIZUKI	Member

In nuclear power plants, stress corrosion cracking has been observed near the weld zone of the primary loop recirculation pipes made of low-carbon austenitic stainless steel Type 316L. Residual stress is important factor in the occurrence and propagation of SCC. The joining process of pipes usually includes surface machining and welding, and both processes induce residual stresses. In this study, FEM was used to estimate residual stress distributions generated by butt welding and surface machining. In addition, a crack growth analysis based on the stress intensity factor (SIF) calculation was performed using the calculated residual stress distributions that are generated by welding and surface machining. As a result, the crack growth analysis showed that the crack depth is affected by both surface machining and welding, and the crack length is more affected by surface machining than by welding.

Keywords: Residual stress, SCC, Welding, Surface Machining, Crack Growth

## 1. 緒言

BWRプラントのSUS316Lに代表される低炭素オーステナイト系ステンレス鋼製の再循環系配管や炉心シュラウド等の溶接部近傍において、応力腐食割れ(SCC)の顕在化が複数の事例として報告されている<sup>1)</sup>。また、最近では、PWRプラントの異材溶接継手においても、セーフエンド側のき裂が国内でも顕在化している。SCCは材料的要因、環境的要因、力学的要因の重畳により発生するとされているが、低炭素オーステナイト系ステンレス鋼においては、材料学的要因とされてきた溶接による熱影響部の鋭敏化はほとんど確認されなかった。このことから、力学的要因としての引張残留応力に注目が集まっている。

配管の施工過程においては、内径調整のための機械加工、突合せ溶接が施され、これらの機械加工および溶接により残留応力が発生する。ここで、き裂形態に注目してみると、機械加工層において粒内型応力腐食割れとして発生した後、粒界型応力腐食割れとして進展する形態を示すとされている。粒内型応力腐食割れ

は、機械加工により生じる引張残留応力が、その発生に影響を及ぼしていると考えられる<sup>2)</sup>。このことから、SCCの発生・進展についてより高精度に評価、さらには予測するためには、従来の溶接による残留応力だけでなく、機械加工により発生する残留応力を把握することが重要である。

本研究では、配管の施工過程において発生する残留応力について、溶接による残留応力を数値解析により評価するとともに、機械加工による残留応力分布を実験および数値解析により評価した。数値解析により得られた残留応力分布を用いてき裂進展解析を行うことにより、より詳細に配管の施工過程を考慮した残留応力分布のき裂進展挙動に及ぼす影響を評価した。

## 2. 溶接・機械加工による残留応力分布

### 2.1 突合せ溶接の数値解析

配管突合せ溶接の数値解析モデルを Fig. 1 に示す。解析には汎用有限要素解析コード ABAQUS を用い、500A 配管を対象とした軸対称モデルに対して、4 層 4 パスの多層溶接を模擬した熱弾塑性解析を行った。材料特性は SUS316L 鋼のものをを用いた。

### 2.2 機械加工の実験

機械加工時の残留応力分布を把握するため、Fig. 2

連絡先:伊原涼平

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

E-mail:ihara@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

に示すような SUS316L 製の試験体を作成した。この試験体に対して、Fig. 3 に示すように、試験体上面にシェーパー加工機を用いた機械加工を施した。ここで、工具は超硬バイトを用い、切込み深さを 0.1 mm、切削速度は 30 m/min (0.5 m/s) とした。機械加工を施した試験体に対して、X 線回折法を用いた残留応力測定を行った。測定は、残留応力の深さ分布を取得するため、電解研磨により表面を除去しながら行った。

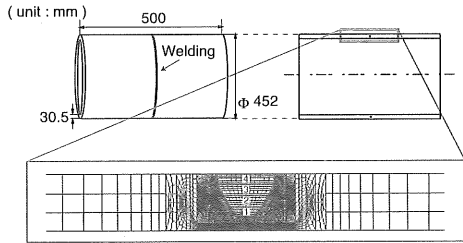


Fig. 1 Analysis model for butt welding.

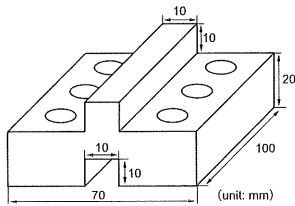


Fig. 2 Geometry of test specimen for surface machining.

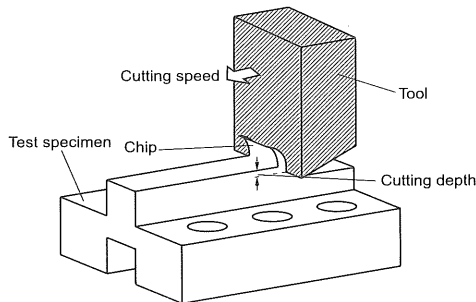


Fig. 3 Configuration of surface machining.

### 2.3 機械加工の数値解析

加工硬化層のように表面から 100  $\mu\text{m}$  深さ程度の範囲の深さ方向の残留応力分布を測定する手段として、X 線回折法は有効であるものの、電解研磨による応力解放を考慮することは難しく、定量的な残留応力分布を求めることは困難である。そこで、機械加工時の残留応力分布の評価が可能な数値解析手法を構築した。その数値解析に用いた解析モデルを Fig. 4 に示す。本解析は汎用有限要素解析ソフト MSC. Marc2008r1 を用いて行った。Fig. 4 に示すように、解析は 2 次元平面ひずみ問題として扱い、境界条件として、被削材下端部の  $x, y$  方向、左端部の  $x$  方向の変位を固定した。切削速度、切込み深さはそれぞれ、30 m/min、0.1 mm とした。また、工具は剛体として扱い、加工中に生じる熱の工具への熱伝達は考慮していない。本報では、流動応力モデルとして、以下の(1)式で表される、塑性ひずみ、塑性ひずみ速度、温度を関数として扱う Johnson-Cook モデル<sup>3)</sup>を用いた。

$$\bar{\sigma} = \left( A + B\bar{\epsilon}_p^n \right) \left\{ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right\} \left\{ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\epsilon}_p$  : 相当塑性ひずみ、 $\dot{\bar{\epsilon}}_p$  : 相当塑性ひずみ速度 ( $\text{s}^{-1}$ )、 $\dot{\epsilon}_0$  : 参照ひずみ速度 ( $\text{s}^{-1}$ )、 $T$  : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $T_r$  : 雰囲気温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $T_m$  : 融点 ( $^{\circ}\text{C}$ ) である。また、 $A, B, C, n, m$  は材料定数であり、それぞれ 305, 1161, 0.01, 0.61, 0.517 とし、 $\dot{\epsilon}_0 = 1$ ,  $T_r = 20$ ,  $T_m = 1400$  とした<sup>4)</sup>。解析に用いた材料特性は、温度依存性を考慮した SUS316L 鋼のものを用いた。

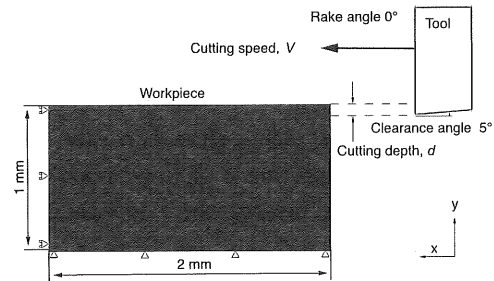


Fig. 4 Analysis model for surface machining.

加工中に発生する切りくずの形成は、MSC. Marc の全体リメッシュ機能<sup>5)</sup>を用いた。剛体である工具が変形体である被削材に接触することで、被削材の要素は大きくゆがみ変形する。全体リメッシュのしきい値は、任意の要素の 0.08 の相当塑性ひずみ変化により判断され、リメッシュ後のメッシュは工具の形状等に基づき工具への貫通が生じないように生成される。

機械加工中に発生する熱として、工具と切りくずの摩擦による発熱、塑性変形による発熱を考慮した。摩擦はせん断摩擦モデルを用い、塑性変形による発熱は、塑性仕事に用いられるエネルギーの 90% を熱に変換することで行った。これらの熱伝導解析と上述の応力解析を連成させることにより、本解析を行った。

### 2.4 配管機械加工の数値解析

本研究では配管に顕在化している SCC を対象としているため、配管に機械加工を施した場合の残留応力分布を把握する必要がある。そのため、Fig. 5 に示すように、実機において用いられている 500A 配管内面に機械加工を施し、X 線回折による残留応力測定を行った。ここで、機械加工条件は実際の条件を想定して、切削速度は 45 m/min、切込み深さは 0.1 mm とした。

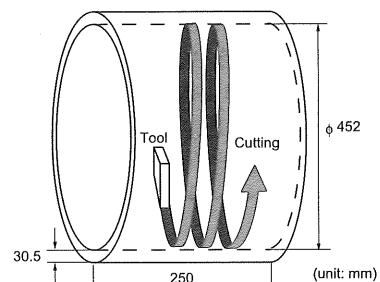


Fig. 5 Geometry of pipe test specimen and configuration of surface machining for pipe test specimen.

## 2.5 き裂進展解析

数値解析により得られた残留応力分布を用いて、日本機械学会の維持規格で定められている手法に則り、SCCのき裂進展解析を行った<sup>6)</sup>。本研究で用いたき裂進展解析は、配管内表面において、半楕円き裂を想定した二次元き裂が発生したと仮定し、さらにその配管に様々な加工履歴（溶接または機械加工、およびその両方）に伴う残留応力分布が存在するとし、き裂先端部での応力拡大係数を影響関数法により算出することで、き裂進展量を求めることが可能な解析手法である。Fig. 6にき裂進展解析における初期き裂形状の模式図を示す。このき裂は、き裂最深部から配管板厚内部方向へ、き裂表面部から配管円周方向へとそれぞれ独立に進展していく。すなわち、き裂最深部およびき裂表面部における応力拡大係数を算出することで、き裂進展解析は行われる。この応力拡大係数は、以下の(2)～(4)式に示すような影響関数法により算出される。

$$K = [A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 + A_4 G_4] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (2)$$

$$\sigma = A_0 + A_1 \frac{x}{a} + A_2 \left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a}\right)^3 + A_4 \left(\frac{x}{a}\right)^4 \quad (3)$$

$$Q = 1 + 4.593 \left(\frac{a}{l}\right)^{1.62} \quad (4)$$

ここで、 $a$ ：き裂深さ (mm)、 $l$ ：き裂長さ (mm)、 $x$ ：内表面からき裂先端までの距離 ( $0 \leq x/a \leq 1$ )、 $\sigma$ ：残留応力分布 (MPa)、 $G_n$ ：影響係数である。このき裂進展解析を用いることにより、応力拡大係数およびき裂深さ、き裂長さの算出において、溶接や機械加工などの様々な条件や、加工履歴そのものを、板厚内部方向における残留応力分布として表現することが可能であることから、き裂の進展に及ぼす残留応力分布の影響を十分に評価することが可能である。また、き裂進展解析にて用いた、低炭素オーステナイト系ステンレス鋼における応力拡大係数とき裂進展速度の関係をFig. 7に示す<sup>6)</sup>。本報において用いたき裂進展解析は、応力拡大係数が  $6.7 \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$  以下の場合においても、き裂が進展するといった仮定がなされている。これは、上述のように、この解析が維持規格として定められたものであり、き裂の進展量を安全側に評価するためである。さらに、プラントの供用状態においては、配管に内圧が付与される。この内圧の効果を考慮するため、本研究では設計応力に相当する  $98 \text{ MPa}$  を、

(3) 式の  $A_0$  に  $98 \text{ MPa}$  を足すことにより、プラント稼働時の内圧とした。以上で述べたき裂進展解析手法を用いることにより、深さ方向および長さ方向のSCC進展挙動について、溶接や機械加工などの施工プロセスを経て生じる板厚内の残留応力分布を考慮した評価が可能であり、き裂の進展に及ぼす残留応力分布の影響を評価することが可能である。

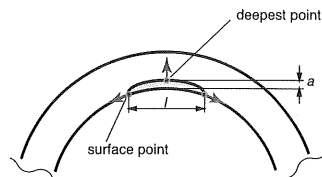


Fig. 6 Shape and modeling of crack.

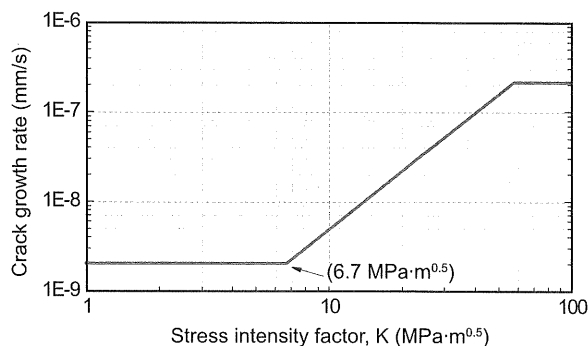


Fig. 7 Crack growth rate as a function of the stress intensity factor.

## 3. 実験および解析結果

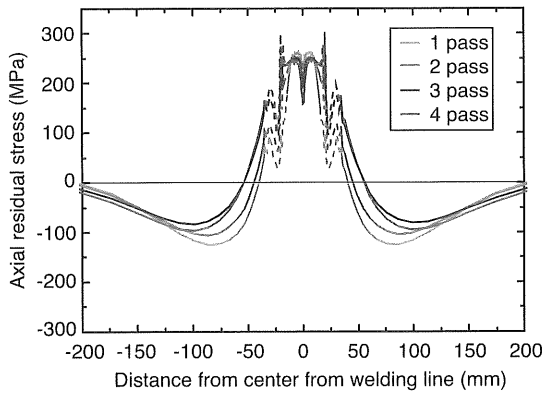
### 3.1 突合せ溶接時の残留応力分布

Fig. 8に各パスにおける突合せ溶接時の配管内表面における残留応力分布の解析結果を示す。軸方向、周方向の残留応力分布とともに、中央付近において引張残留応力を示した。そして、中央から配管の端へと進行するとともに減少し、中央から  $70 \sim 100 \text{ mm}$  付近において最大圧縮残留応力を示し、配管の端において無応力状態を示す。溶接時の典型的な残留応力分布を示した。また、配管中央においては、配管溶接時の軸収縮の影響により軸方向残留応力が減少、周方向残留応力が増加する結果が得られている。

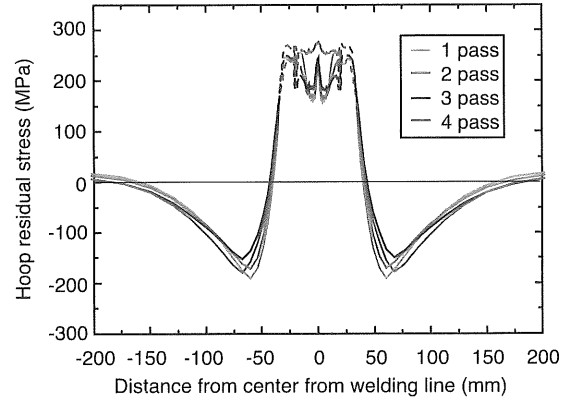
次に各パスにおける配管中央部の内表面から外表面における残留応力分布をFig. 9に示す。周方向残留応力はほぼ常に引張残留応力を示しているのに対し、軸方向残留応力は、板厚のちょうど中央あたりにおいて引張残留応力から圧縮残留応力に変化する。この変化も軸収縮の影響である。

### 3.2 機械加工時の残留応力分布

Fig. 2に示した試験体に対して残留応力分布の測定を行った結果を、同様の機械加工条件で行った数値解析結果と合わせてFig. 10に示す。実験結果と数値解析結果はよく一致しており、本研究において構築した機械加工の数値解析手法は、機械加工による残留応力分布を評価する上で、十分な精度があると考えられる。実験結果および数値解析結果とも、残留応力は表面において  $800 \text{ MPa}$  程度と最も高く、被削表面から  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$  付近において引張残留応力から圧縮応力に転じる急峻な分布を示した。さらに深い領域では、解析結果から、被削表面から  $0.6 \text{ mm}$  付近において  $0 \text{ MPa}$  になることから、機械加工時残留応力は極表層部にのみ存在すると考えられる。

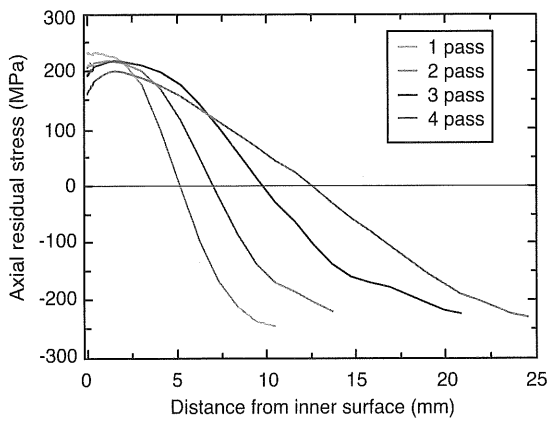


(a) axial

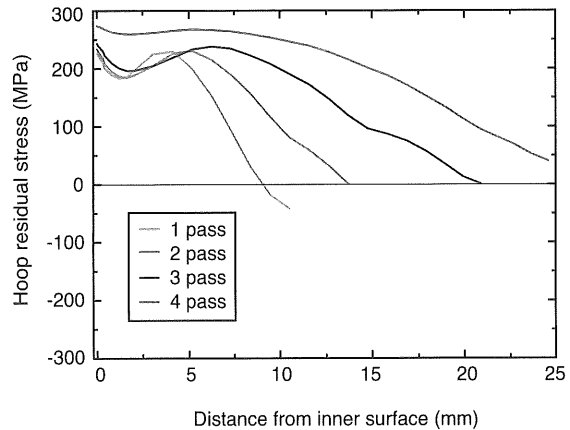


(b) hoop

Fig. 8 Residual stress distribution due to butt welding in inner surface of pipe.



(a) axial



(b) hoop

Fig. 9 Residual stress distribution due to butt welding from inner surface.

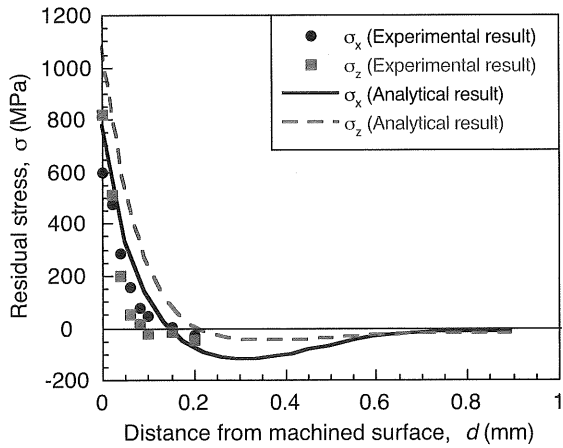


Fig. 10 Comparison of experimental and analytical residual stress distribution due to surface machining.

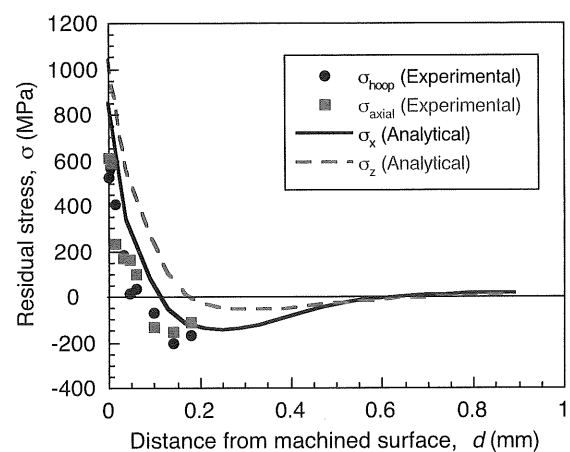


Fig. 11 Residual stress distribution due to surface machining in pipe test specimen.

次に、500A 配管の試験体に対して機械加工を行った実験結果と、その加工条件における数値解析結果の比較を Fig. 11 に示す。配管の残留応力分布の測定結果は、解析結果と比較して少し小さな値を示した。この原因として、配管を切断することにより測定を行ったことが挙げられる。その切断により、配管内部の残留応力分布の再分布が生じ、残留応力が減少したと考

えられる。しかしながら、残留応力値およびその傾向ともに比較的良く一致しており、本研究において構築した解析手法は、配管の機械加工に対しても十分に適用が可能であることを示した。

### 3.3 き裂進展解析結果

得られた残留応力分布を用いてき裂進展解析を行

った。き裂進展解析に用いた残留応力分布は、Fig. 9 に示した 4 パス後の突合せ溶接時の軸方向残留応力、Fig. 11 に示した機械加工時の  $x$  方向の残留応力分布を用い、比較のため機械加工のみ、溶接のみ、溶接後の機械加工を想定した残留応力分布を用いた。溶接後の機械加工を想定した残留応力分布を Fig. 12 に示す。Fig. 12 (a) は 500A 配管 (板厚 : 30 mm) 全体に存在する残留応力分布であり、Fig. 12 (b) は配管内表面から 1.5 mm までの残留応力分布を示している。Fig. 12 から分かるように、機械加工を施す内表面は機械加工時

の残留応力が存在しており、被削表面から 1 mm 以降は突合せ溶接時の残留応力とした。ここで、き裂進展解析は残留応力分布を (3) 式の 4 次式でフィッティングすることで行うが、Fig. 12 の残留応力分布を 4 次式でフィッティングすることは困難であるため、Fig. 13 に示すように、残留応力分布を機械加工時の残留応力分布と溶接時の残留応力分布に分割し、それぞれの応力拡大係数に対して重ね合わせの原理<sup>7)</sup>を適用することにより、本解析を行った。

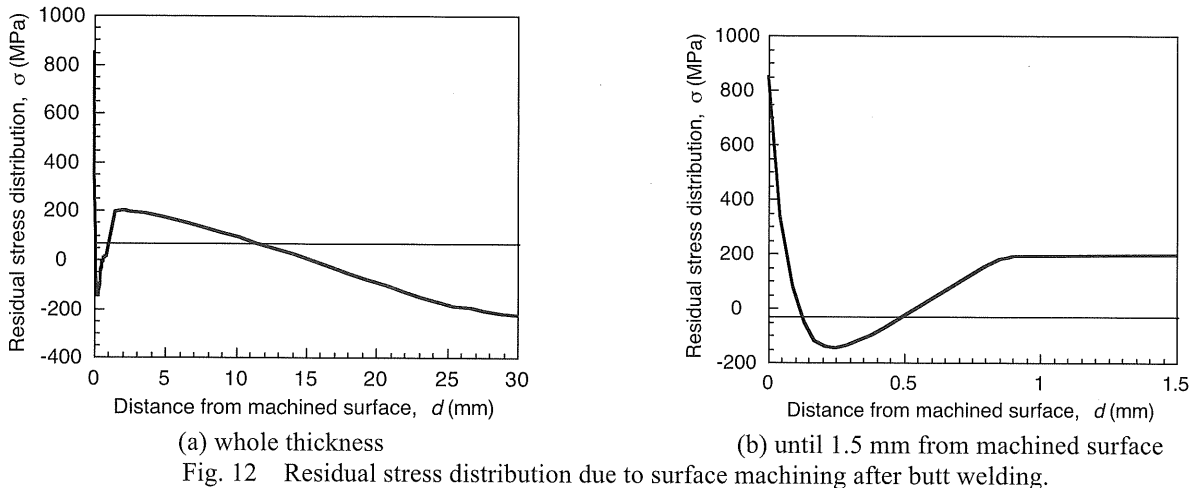


Fig. 12 Residual stress distribution due to surface machining after butt welding.

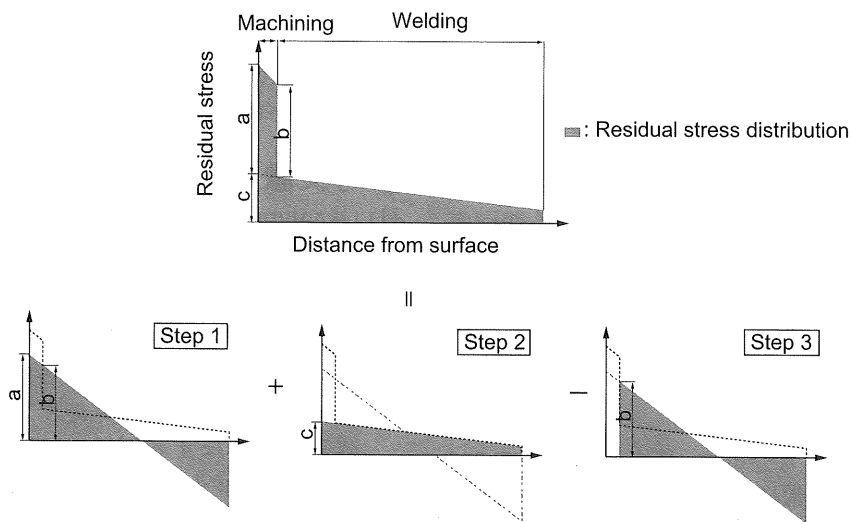


Fig. 13 Conceptual diagram of superposition of stress intensity factor.

Fig. 14 にき裂進展解析結果を示す。き裂深さに関して、機械加工のみと溶接後の機械加工を考慮した結果は、経過年数 1 年といったき裂発生直後においてはほぼ同じ進展量を示した。しかしながら、その後は溶接残留応力の影響により急激にそれらの差は開く結果を示した。それは最深部の SIF を見ても明らかであり、両者はき裂発生直後に急激に増加する。また、溶接のみと機械加工のみを比較すると、溶接のみに比べて機械加工のみの結果のほうがき裂進展量は大きい結果が得られた。き裂長さに関しては、本解析は残留応力

分布が配管全体にわたり存在するといった過程のものと行っているため、き裂深さと比較して、機械加工のみの結果と溶接および機械加工の結果にはそれほど大きな違いは見られない。しかしながら、溶接のみの結果と比べると、それらの差は非常に大きいことが分かる。本解析では、残留応力のみ注目しており、一般的に SCC 進展速度に寄与する、機械加工により生じる材料の硬化は考慮していないが、き裂進展を考える上で、機械加工の影響は大きく、重要な要因であることが言える。

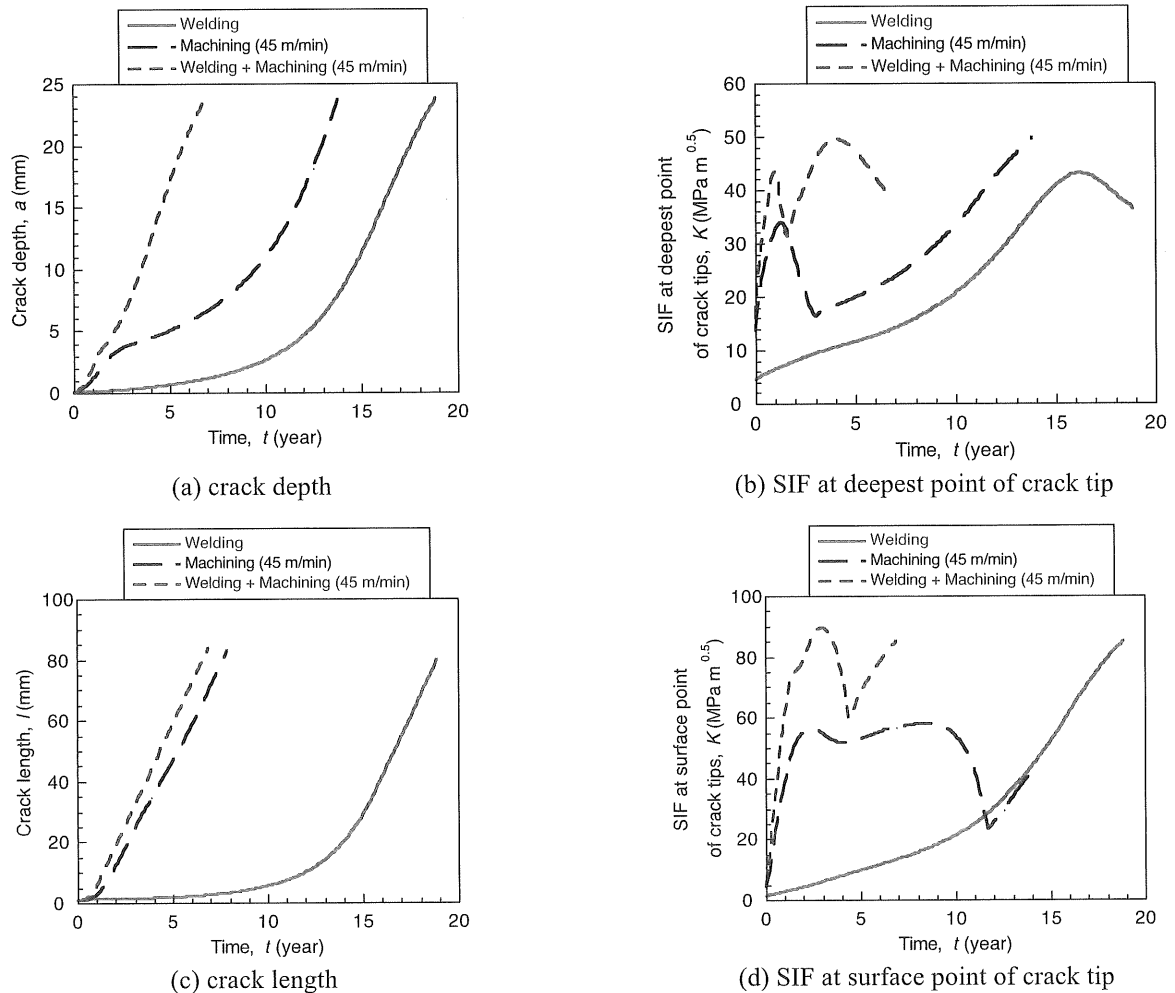


Fig. 14 Comparison of crack growth analysis under residual stress distributions.

#### 4. 結言

本研究は、SCCの発生の一要因とされている残留応力に注目し、配管の施工過程としての機械加工、溶接時の残留応力の把握を行い、得られた残留応力分布に対してき裂進展解析を行うことにより、き裂進展に及ぼす残留応力分布の影響を評価した。以下に得られた主な結果を示す。

- 1) 機械加工時の残留応力分布は、最表面において800~1000 MPaといった非常に大きな値を示すが、板厚内部への進行とともに急激に減少するため、引張残留応力は0.1~0.2 mmの極表層部のみにしか存在しないことを示した。
- 2) 配管の突合せ溶接時の残留応力は、内表面において中央部付近のみで引張残留応力を示した。また、軸方向における板厚内部の残留応力は、軸収縮の影響により板厚中央付近において引張残留応力から圧縮残留応力に変化することを示した。
- 3) き裂進展解析結果より、き裂深さ、き裂長さの進展に及ぼす機械加工時の残留応力分布の影響は大きく、SCCを検討する上で機械加工は重要な因子になり得ることを示した。

#### 参考文献

- [1] Okamura, Y., Sakashita, A., Fukuda, T., Yamashita, H., Futami, T., 2003. Latest SCC Issue of Core Shroud and Recirculation Piping in Japanese BWRs. Trans. of SMiRT 17, No. WG01-1.
- [2] 高守謙郎, 鈴木俊一, 大木俊, 山下裕宣, 二見常夫, 安斎英哉, 加藤隆彦, 斉藤善章, 坪田基司, “高温純水中における低炭素ステンレス鋼のSCC発生感受性に及ぼす表面加工の影響評価”, 圧力技術, 第44巻, 第4号(2004) p.130-142.
- [3] G. R. Johnson, W. H. Cook, “Fracture characteristics of three metals subjected to various strain, strain-rate, temperature and pressure”, Engineering and Fracture Mechanics, 21 (1985) p.31-48.
- [4] D. Umbrello, R. M'Saoubi, J. C. Outeiro, “The influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel”, International Journal of Machine of Tools & Manufacture 47 (2007) p.462-470.
- [5] MSC.Marc2008r1, User's guide.
- [6] 日本機械学会 “発電用原子力設備規格維持規格”, JSME S NA1-2008 (2008)
- [7] 小林英男, “破壊力学”, 共立出版株式会社, 1993, pp. 73-77.