

熱間加工プロセスCAEにおける 熱間加工割れ予測モジュールの開発

Development of Crack Prediction Module for Hot Working Process CAE

石田 俊樹*
Toshiki Ishida

佐藤 順*
Jun Sato

山口 基*
Motoi Yamaguchi

渡辺 昌征*
Masayuki Watanabe

向瀬 レミ**
Remi Mukouse

*
株式会社プロテリアル
金属材料事業本部
Advanced Metals Division,
Proterial, Ltd.

**
株式会社日立製作所
研究開発グループ
Research & Development Group,
Hitachi, Ltd

当社は、航空機用大型鍛造部品の製造および市場参入のため、航空機用部材事業の強化・拡大を図ってきた。航空機用大型鍛造部品の製造において、熱間加工は重要な製造プロセスである。本研究では、熱間加工で発生しうるリスクのひとつである熱間加工割れについて、CAEによるプロセス設計の段階で事前に発生リスクを予測し、高効率な設計技術の開発を試みた。

まず、小型引張試験から得られる伸びや絞りのデータから延性を評価し、また試験片の破断面を電子顕微鏡で観察することにより、熱間加工割れの形態を評価した。そして、それらの材料的な基礎評価をもとにして、熱間加工プロセス中の熱間加工割れリスクを評価する、当社独自の予測技術を開発した。この予測技術は、延性の温度依存性を考慮した熱間加工割れ発生リスクと、熱間加工割れ発生後の割れ部分付近のマクロな応力状態から、割れの進展リスクを評価する機能の2つを含む。

We are focusing on the aircraft and energy business with the aim of manufacturing large forging parts for aircraft. Hot forging is an important manufacturing process for such large parts. However, during hot working, there is a risk of crack formation. Therefore, we developed a highly efficient computer aided engineering (CAE) based design method to predict the risk of crack formation in advance.

First, we examined the formation of cracks during hot working, by measuring the ductility based on the elongation and area reduction of test pieces in small tensile tests, and observing the fracture surface using scanning electron microscopy. We then developed a module to evaluate the risk of cracking during hot working. This module can evaluate the crack initiation risk based on the temperature dependence of the ductility, and also the crack growth risk associated with the macroscopic stress near cracks after initiation occurs.

■ Key Words : 熱間加工プロセス, CAE, 熱間加工割れ予測

■ R&D Stage : Research

1. 緒言

当社は、航空機用大型鍛造部品の製造および市場に参入するため、2011年に他社との共同出資により日本エアロフォージ株式会社*を設立し、国内で初めてとなる5万トン級の大型鍛造プレスの操業を開始した。また、大径耐熱リング部品の需要拡大に対応するため、840トン大型リングミルを主体とする設備投資を行い、航空機用部材事業の強化・拡大を図ってきた。2021年現在、航空機産業はCOVID-19による混乱のために、旅客需要や機材需要が大幅に減少している状況にある。しかし、市場予測¹⁾によれば、2040年までの世界の航空機旅客需要の年平均成長率は3.6%であると思込まれている。

航空機用ジェットエンジンやエネルギー産業で使用されるガスタービンエンジンの後方部に用いられる製品は、700°C近くの環境下でも耐用できることが要求される²⁾。図1のタービンケースは、当社の航空機向け製品の主力製品の1つであり、エンジン後方部で用いられる部品であるため、高温強度などの機械的特性が重要である。これらの機械的特性を満たすために、タービンケース材では析出強化型のNi基鍛造合金Waspaloyが用いられている。WaspaloyはNi基合金で代表的な718合金とは異なりNbを含まず、Al, Tiの添加により形成される安定な γ' 相による析出強化を利用しており、700°C近くまで高い強度が維持できる³⁾。よって、718合金の部材よりも厳しい環境下では、Waspaloy合金の部材が使用される。また、耐高温腐食性、耐硫化性にも優れた合金である。

タービンケースの製造工程には、鍛造とリング圧延の熱間加工プロセスが含まれる。このような加工プロセス中には、加工中に表面で熱間加工割れが発生し、プロセス設計の見直しが必要となる場合がありうる。本研究では、こういった熱間加工プロセスにおける熱間加

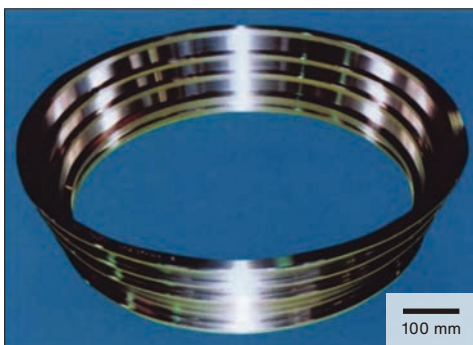


図1 航空機エンジン用のタービンケース

Fig.1 Turbine case for aircraft engine

工割れの抑制を図るために、CAE(Computer Aided Engineering)を用いて、熱間加工割れのリスクの事前予測に取り組んだ。

*当社、神戸製鋼所他4社出資により2011年に設立

CAEを使って熱間加工割れのリスクを可視化するには、リスクを定量的に評価するための基準が必要となる。開発した熱間加工割れ予測技術では、2種類の評価基準を設定した。1つめは、熱間加工割れの発生有無を判定するための評価基準であり、「2.2節」にて概要を説明する。2つめは熱間加工割れが発生した後に、その割れがどの程度、進展するかのリスクを示すための評価基準であり、「2.3節」において概要を説明する。

2. 熱間加工割れリスクの評価方法

2.1 Waspaloyの破壊形態の調査

はじめに、Waspaloyの供試材から、小型試験片を複数個採取した。次に、それらの試験片を、それぞれ異なる試験温度まで加熱して引張試験を行った。試験実施温度は、熱間加工割れの予測対象としている熱間加工プロセスの温度条件を勘案して設定した。引張試験から得られた伸び、絞りの温度依存性を図2に示す。この

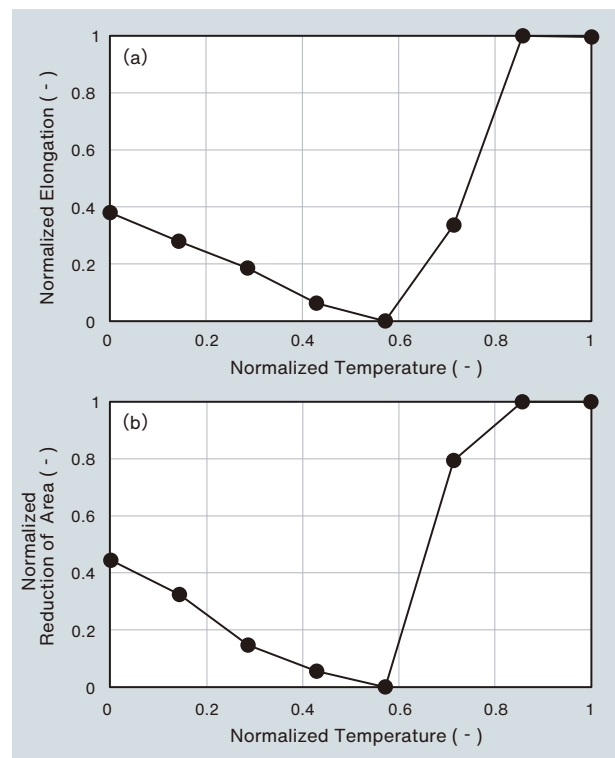


図2 Waspaloyの伸び、絞りの温度依存性 (a) 伸び (b) 絞り

Fig.2 Temperature dependence of elongation and area reduction in Waspaloy (a) normalized elongation, (b) reduction of area

結果から、材料の延性は、特定の温度範囲において著しく低下することが解った。また、延性の低下する温度で引張試験をした後の試験片の破断面の一例を、**図3**に示す。破断面中央部にはディンプルが形成されていることから、本テーマで対象とする熱間加工割れは、延性破壊が主要因であると判断した。

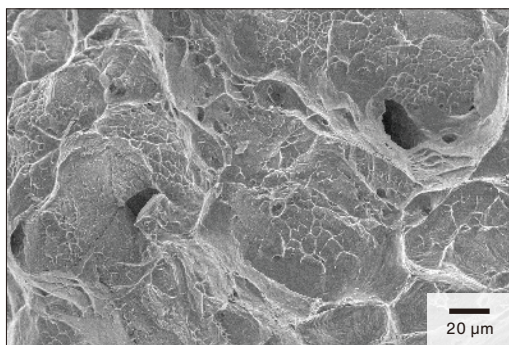


図3 Waspaloy 引張試験後の破断面

Fig.3 Fracture surface after tensile test on Waspaloy

2.2 熱間加工割れの発生有無に関する判定方法

2.2.1 熱間加工割れの発生する臨界ダメージ値の定義

熱間加工割れの発生有無を予測するための評価基準として、臨界ダメージ値を設定した。以後、この臨界ダメージ値を C_0 と表記する。本項では、 C_0 の具体的な定義と導出方法について、概要を説明する。2.1の結果から、本テーマの対象とする熱間加工割れは延性破壊であると判断した。そこで、 C_0 の導出には延性破壊条件式として知られている、以下(1)式のCockcroft and Lathamの延性破壊式を用いた。式中の σ_1 は最大主応力、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 ε は相当ひずみ、 $H(x)$ は $x < 0$ で0、 $x \geq 0$ で1となる階段関数である。

$$C_0 \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^t \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} H(\sigma_1) d\varepsilon \quad (1)$$

C_0 の導出にあたっては、まず先述の引張試験を再現するCAE解析を実施し、引張試験で得られた破断伸びに達するまで、CAE上で試験片を変形させた。そして、CAE解析の最終ステップ、すなわち引張試験での破断時に相当するステップで、試験片中央部におけるCockcroft and Lathamの延性ダメージ値を C_0 とした。なお、2.1の結果から、Waspaloyは延性に関して大きな温度依存性を持つことが事前に明らかであったため、 C_0 は各温度の引張試験の再現CAE解析によって、温度の関数として求めた。得られた C_0 の温度依存性を、**図4**

に示す。**図2**に示した引張試験の伸びと同様、延性が著しく低下する温度範囲において、 C_0 も同様に極小値をとることが確認できる。

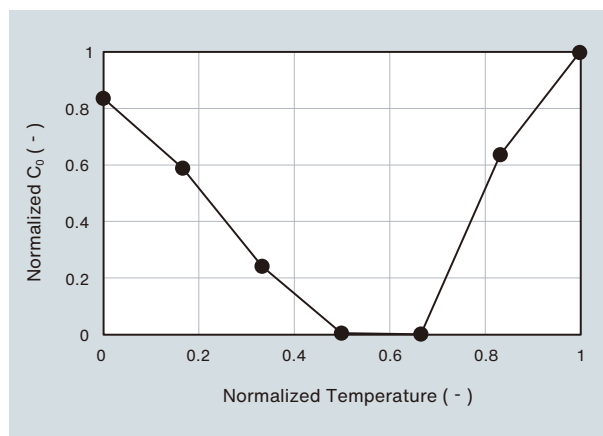


図4 C_0 の温度依存性

Fig.4 Temperature dependence of C_0

なお、本報ではCockcroft and Lathamの延性破壊式を採用したが、本項の判定手法は、その他の延性破壊式である大矢根の式⁴⁾など、加工素材や加工プロセスに応じて、最適なものを選択すればよい。また、加工素材によっては C_0 が複数のプロセス条件に依存する場合もあり得るが、その場合は C_0 を、それらのプロセス条件A, B, C...の関数 $C_0 = C_0(A, B, C...)$ として求めればよい。

2.2.2 C_0 の温度依存性を用いた熱間加工割れの発生判定

2.2.1で述べた C_0 は、温度が一定に制御された引張試験の結果から導出したものである。一方、熱間加工における素材表面の温度は、外気や金型への抜熱、素材内部から発生する加工発熱などによって、時間変化する。よって、温度制御された引張試験の結果をもとにして求められた C_0 を使って、任意の温度履歴を持つ部位の熱間加工割れ発生を予測するには、両者を結びつける何らかの手法が必要となる。そこで本研究では、2.1の引張試験から得られた材料特性を勘案し、任意の温度履歴を持つ部位において、熱間加工割れの発生有無を予測するための手法を検討した。その手法の概要は、以下のとおりである。まず、加工中の2点の時刻 $t - \Delta t$ と時刻 t の間に、素材中の任意の位置において、以下(2)式で定義される $\Delta c(t - \Delta t)$ の微小ダメージが発生すると考える。この $\Delta c(t - \Delta t)$ は、前述の(1)式のCockcroft and Lathamの延性破壊式と同様、最大主応力 σ_1 と相当ひずみ ε 、階段関数 H を分子に、相当応力 $\bar{\sigma}$ を分母に持つ値である。また、

T は温度、 \vec{X}_i は加工素材中の任意の点を表す。

$$\Delta c(\vec{X}_i, t) = \frac{\sigma_1(\vec{X}_i, t)}{\bar{\sigma}(\vec{X}_i, t)} \Delta \varepsilon(\vec{X}_i, t) \times H(\sigma_1(\vec{X}_i, t)) \quad (2)$$

そして、微小時間 Δt の間に、熱間加工割れ発生有無に関わるダメージが、(2)式を C_0 で割った、以下(3)式の $\Delta C(t)$ だけ蓄積すると仮定する。加工開始から時刻 t における $\Delta C(t)$ の時間積分を、以後C値と表記する。本予測技術では、(4)式のようにC値がある時刻 t_0 で1以上に達した場合に、熱間加工割れが発生すると判定する。

$$\Delta C(\vec{X}_i, t) = \frac{\Delta c(\vec{X}_i, t)}{C_0(T)} \quad (3)$$

$$C(\vec{X}_i) = \int_0^{t_0} \frac{dc(\vec{X}_i, t)}{C_0(T(t))} = 1 \quad (4)$$

この際、時刻 t_0 で発生する加工割れ発生時の亀裂面は、最大主応力の方向に垂直な面に一致すると仮定する。最大主応力の方向は、コーシーの応力テンソルから計算する。

2.3 加工後の割れ進展リスクに関する評価方法

2.2の方法で熱間加工割れが発生した箇所については、その後の割れ進展リスクを予測する。一般的に、そのような割れ進展リスクを厳密に予測するには、亀裂先端近傍の応力分布を、数～数百 μm オーダーの解像度で計算した上で、破壊力学を利用した解析が必要となる。しかし、一般的なプロセス設計CAEで使われるメッシュサイズは、計算負荷の都合上、最小でも数mm程度にしか設定できない。よって、この程度の応力分布解像度では破壊力学を使って、亀裂先端近傍のミクロな挙動を予測評価することは不可能である。そこで、プロセス設計CAE解析で得られる数mmレベルの解像度の応力分布をもとに、熱間加工割れ発生後の割れ進展リスクを推量することとした。割れ進展リスクの推量基準は、以下のように、力学的に直感的な仮定をもとにした。

仮定①:熱間加工割れ部分に大きな引張応力は作用していても、亀裂面の垂直応力成分が小さければ、割れ進展のリスクは少ない。つまり、割れ進展に直接的に関わる応力は、亀裂面の垂直応力成分である。

仮定②:亀裂面に作用する応力が引張応力である場合、応力値が大きいほど、割れ進展のリスク

が高く、圧縮応力の場合は割れ進展のリスクがない。

仮定③:亀裂面に作用する垂直応力成分が同じである場合は、熱間加工割れ部位が軟らかい方が、割れ進展のリスクが高い。

仮定④:亀裂面の垂直応力が作用する時間が長いほど、割れ進展のリスクは高い。

以上の直感的な仮定をすべて内包する割れ進展リスクを評価値として、以下(5)式を定義した。以後、この(5)式をD値と表記する。

$$D(\vec{X}_i, t) \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^t \frac{\sigma_n(\vec{X}_\tau, \tau)}{\bar{\sigma}(\vec{X}_\tau, \tau)} H(\sigma_n(\vec{X}_\tau, \tau)) d\tau \quad (5)$$

ここで、 t は時刻、 \vec{X}_i は加工素材中の任意の点、 σ_n は亀裂面に作用する垂直応力成分、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $H(x)$ は $x < 0$ で0、 $x \geq 0$ で1となる階段関数である。

D値の中に含まれる σ_n を計算する際には、以下(6)式のように、コーシーの応力テンソル $[\sigma]$ と、亀裂面の単位法線ベクトル $\{\vec{n}\}$ の情報が必要である。

$$\sigma^n = \{\vec{n}\}^T [\sigma] \{\vec{n}\} \quad (6)$$

一般的な加工プロセスでは、加工中に素材の変形や回転が発生するため、それに伴い $\{\vec{n}\}$ は時間変化する。よって、 σ_n を計算するには、各時刻における $\{\vec{n}\}$ を計算しなければならない。この変形と回転による $\{\vec{n}\}$ の変化は、有限変形論で定義される変形勾配テンソルを用いて計算することができる。有限変形論によれば、時刻 t における素材内の位置 \vec{X}_t での亀裂面の単位法線ベクトル $\{\vec{n}(\vec{X}_t, t)\}$ と、 $t + \Delta t$ での時刻 t における素材内の位置 $\vec{X}_{t+\Delta t}$ (\vec{X}_t が変形と回転によって変化した位置ベクトル)での亀裂面の単位法線ベクトル $\{\vec{n}(\vec{X}_{t+\Delta t}, t + \Delta t)\}$ は、変形勾配テンソル $[F]$ によって、以下(7)式のように関連付けられる。

$$\{\vec{n} = \vec{X}_{t+\Delta t}, t + \Delta t\} // [F]^{-T} \{\vec{n}(\vec{X}_t, t)\} \quad (7)$$

($[F]^{-T}$ は $[F]$ を転置した後の逆行列)

各タイムステップでの $[F]$ の分布を求めれば、(7)式を使って $\{\vec{n}(t)\}$ の時間変化を計算することが可能となる。各タイムステップの $[F]$ の分布は、節点変位とCAE解析に使用する要素タイプの情報をもとに計算する。

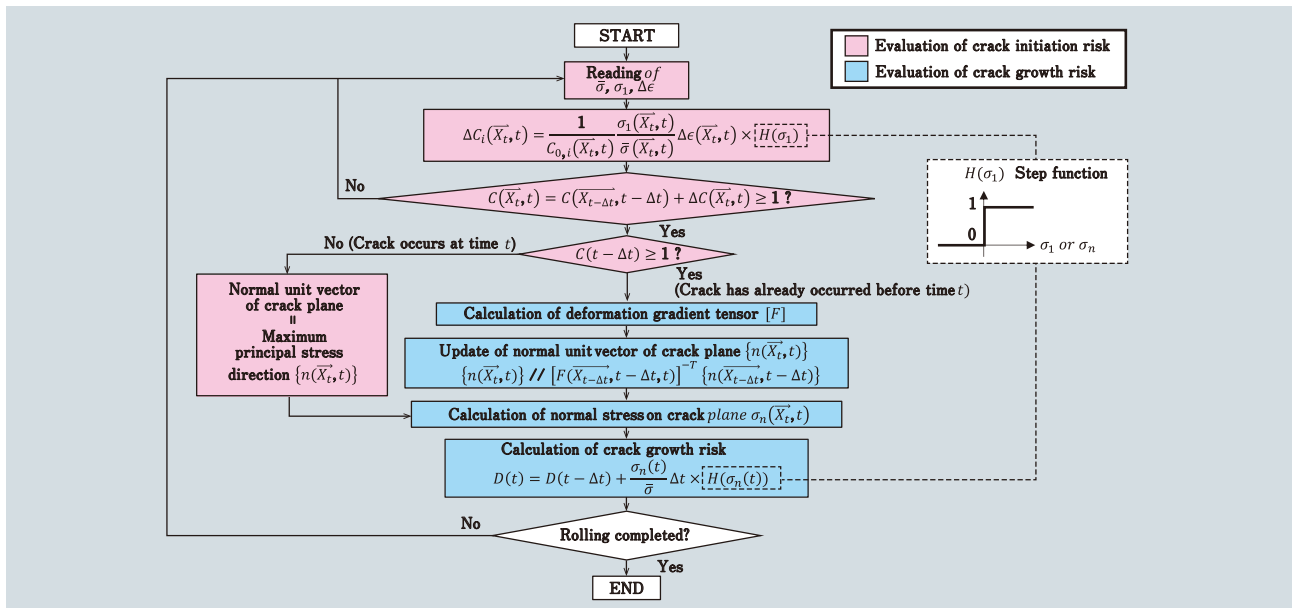


図5 熱間加工割れ予測のフローチャート

Fig.5 Flow chart for crack prediction during hot working

3. リング圧延プロセス試作による予測技術検証

2.2および2.3にて述べた熱間加工割れ予測技術を、市販の塑性加工CAEソフトウェアの拡張機能を用いてモジュール化した。実装した熱間加工割れ予測では、素材中のC値、D値、および熱間加工割れが発生した箇所の亀裂面の法線ベクトルを、CAEのポスト処理上で、分布として確認できるようにした。予測の全体的な流れを、図5に示す。

次に、組み込んだ予測モジュールの精度検証(Validation)を行った。検証にあたり、Waspaloyの矩形リング材を用いたリング圧延⁵⁾を実施した。圧延条件は実製品での製造条件とは異なり、意図的に熱間加工割れが発生する条件下で行い、試作中は温度と荷重履歴の実測データを取得した。図6のように、試作後のリング内周の上端部において、周方向に垂直な亀裂面を持つ、縦方向の熱間加工割れが発生した。

上述のリング圧延を模擬するために、炉から圧延機への搬送時間、圧延条件などのプロセス条件を反映したCAEモデルを作成し、再現解析を行った。一般的なリング形状では、内周側で発生する熱放射(電磁波)の一部が、内周部で反射を繰り返しながら熱交換する。よって、リング形状が外気によって冷却される際には、リング内周面はその他の面よりも放熱量が少ない傾向にある。そこで、再現解析ではリング素材の熱境界条件に適切な分布を設定し、上記のリング面における放熱量の差を再現することで、リング内外周部の温度履歴が合致するようにし

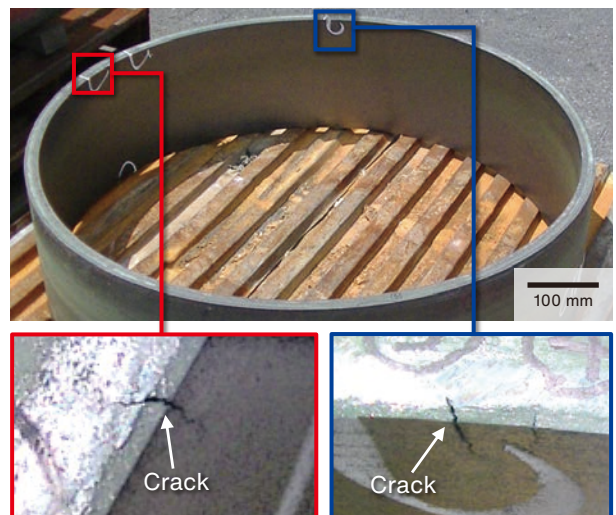


図6 リング圧延後に確認された内周上端部における加工割れ

Fig.6 Cracks observed after hot ring rolling trial on upper end of inner surface

た。また、リング圧延試作での実測荷重と再現CAEでの荷重も、最大荷重において誤差6%の範囲で一致させた。

再現解析後のC値、D値、亀裂面の単位法線ベクトルの分布を、それぞれ図7、図8、図9に示す。図7のC値が素材上端面で1以上となっていることから、熱間加工割れは上端面の内周側で発生することが解る。さらに、図8のD値が高い箇所ほど、割れ進展リスクが高いと推定されることから、素材上端面の内周側で、特に割れ進展リスクが高いことが解る。最後に、図9の亀裂面の単位法線ベクトルが周方向を向いていることから、亀裂面は周方向に垂直、つまり縦方向に発生することが予測され

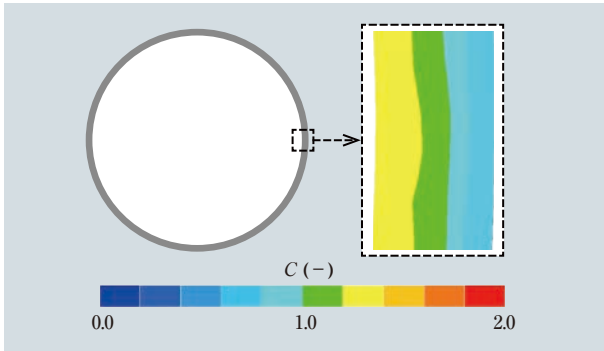


図7 リング圧延解析後のC値分布

Fig.7 C value distribution after hot ring rolling simulation

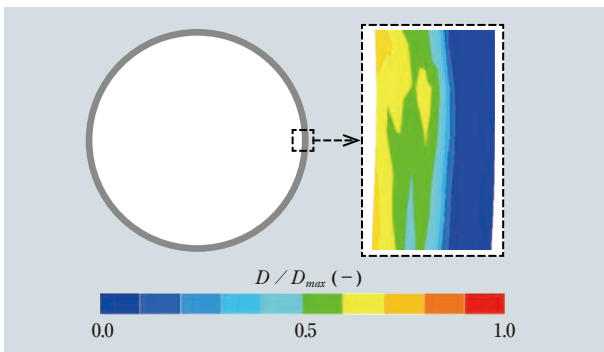


図8 リング圧延解析後のD値分布

Fig.8 D value distribution after hot ring rolling simulation

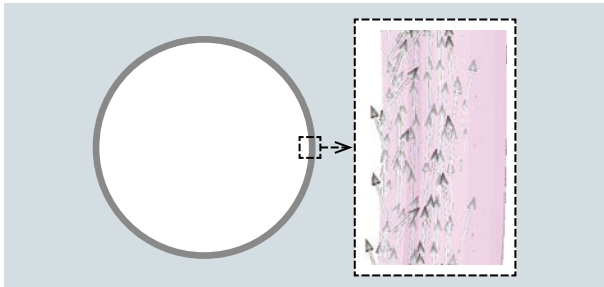


図9 リング圧延解析後の亀裂面の単位法線ベクトル分布

Fig.9 Normal unit vector distribution on crack plane after hot ring rolling simulation

ていることが確認できる。これらの結果は、リング圧延試作での結果と同様の予測結果を示している。以上の精度検証から、本熱間加工割れ予測技術は、一定の妥当性を持つものと考えられる。

4. 結言

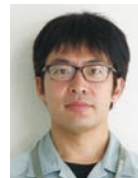
本報では、熱間加工における熱間加工割れを事前予測するために開発した、当社独自の予測技術について紹介した。この予測技術は、材料の引張試験から得られた各種データに基づくものであり、延性の温度依存性を考慮した熱間加工割れ発生リスクと、熱間加工割れ発生後の亀裂付近のマクロな応力状態から、熱間加工割れの進

展リスクを評価する機能の2つを含んでいる。本技術を塑性加工CAEソフトウェアの中にモジュール化し、リング圧延試作を元にした予測技術の精度検証を行った。その結果、CAE解析で予測される熱間加工割れの発生位置と亀裂面の方向は、実試作の結果とよく一致した。

この予測手法は、さまざまな材質や加工プロセスにおいて適用可能な、汎用性の高いものである。今後は、本報とは異なる加工方案においても、水平展開を試みる予定である。

引用文献

- 1) 一般財団法人 日本航空機開発協会, “民間航空機に関する市場予測 2020-2040”, 2021年3月
- 2) 高橋 良二, “航空エンジン -生産技術の進歩-”, 実教出版, 工業教育資料 第294号, p.9-12
- 3) Ernesto Benini, "Process in Turbine Performance", Intechopen, p. 241
- 4) M. Oyane, “Criteria of Ductile Fracture Strain”, Bulletin of JSME, vol 15, p.1507-1513 (1972)
- 5) L. Giorleo et al: Validation of hot ring rolling industrial process 3D simulation, International Journal of Material Forming , vol 6, p.145-152 (2013)



石田 俊樹
Toshiki Ishida
株式会社プロテリアル
金属材料事業本部
冶金研究所



佐藤 順
Jun Sato
株式会社プロテリアル
金属材料事業本部
冶金研究所
博士(工学)



山口 基
Motoi Yamaguchi
株式会社プロテリアル
金属材料事業本部
桶川工場
技術士(金属)



渡辺 昌征
Masayuki Watanabe
株式会社プロテリアル
金属材料事業本部
桶川工場



向瀬 レミ
Remi Mukouse
株式会社日立製作所
研究開発グループ
生産・モノづくりイノベーションセンター