#### 技術資料



## デジタル・エンジニアリングシステム DAINUS®の開発

吉田広明\*1, 岡島琢磨\*2, 八田武士\*2, 藤原正尚\*2, 伊藤樹一\*2

## Development of Digital Engineering System DAINUS®

Hiroaki Yoshida, Takuma Okajima, Takeshi Hatta, Masanao Fujiwara, and Shigekazu Ito

#### Synopsis

Recently CAE(computer aided engineering) has been spread widely in metal forming. Large model calculation and remeshing in heavy deformation by FE analysis become possible because of the improvements of hardware and software. However the obtained outputs in FE analysis are limited in shape, temperature, various stress and strain. So it is difficult to design optimal process to obtain a final target properties in quantitatively by the current FE analysis system.

We have developed digital engineering system DAINUS(<u>DAI</u>do <u>NU</u>merical process engineering <u>S</u>ystem) consists of 4 prediction module (1)DAINUS-damage, (2)DAINUS-grain, (3)DAINUS-life, (4)DAINUS-cavity. DAINUS is installed in commercial FE analysis code using user subroutine, and can predict a ductile fracture by DAINUS-damage, micro-structure and mechanical properties by DAINUS-grain, die life by DAINUS-life, cavity consolidation by DAINUS-cavity. Nearly all kind of information in metal forming can be obtained in concretely and in quantitatively by DAINUS. In this paper, the features and abilities are introduced.

## 1. 緒 言

近年、FE 解析を用いた塑性加工の工程設計などの実用的な取組が、盛んに行われるようになり、多くの実績が報告されるようになってきた。その背景に、近年のコンピューターの発達、特に汎用解析コードの進歩が挙げられる。特に、塑性加工用の汎用 FE 解析コードでは、二次元、三次元の応力熱連成解析が実用的な精度で計算できるようになり、大変形解析に必要とされる高度なリメッシュ機能も充実してきていることが、普及に大きな弾みをつけてきている。しかしながら、一般的な FE 解析で得られる情報は、変形体(ワーク)の形状と、温度、各種応力とひずみなどの一般的な情報にほぼ限定されており、工程設計技術者が直接的な判断材料と成り得る情報は限られている。特に、材質の造り込みや金型の寿命予測などを目的としたFE 解析では、市販の FE 解析コードからは、直接的に判断可能な情報は得られない。大同特殊鋼(株)では、塑性加工プ

ロセス設計において、型寿命や強度分布など目的とする設計値を定量的に得ることができる、総合的なデジタル・エンジニアリングシステムDAINUS®(DAIdo NUmerical process engineering System)の開発を行ってきた. DAINUS®は、ワークの割れ予測、材質予測、金型損傷(寿命)予測やインゴットのボイドの封孔予測を可能とする 4 つの予測モジュールを搭載したシステムで、塑性加工プロセスにおける製品の品質や特性、製造コストを定量的に算出することが可能なシステムである。本報では、DAINUS®の特徴と能力を、適用事例を混ぜて紹介する。

## 2. DAINUS®のシステム構成

DAINUS<sup>®</sup>は,(1)割れ予測:DAINUS-damage,(2)材質 予測:DAINUS-grain,(3)金型損傷予測:DAINUS-life,(4) ボイドの封孔予測:DAINUS-cavity,の4つの予測モジュー ルを搭載した,FE解析システムで,汎用FE解析コードの ユーザーサブルーチン機能を活用して,統合化したもの

<sup>\* 1</sup> 大同特殊鋼㈱研究開発本部,工博(Dr., Eng., Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

<sup>\* 2</sup> 大同特殊鋼(㈱研究開発本部(Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

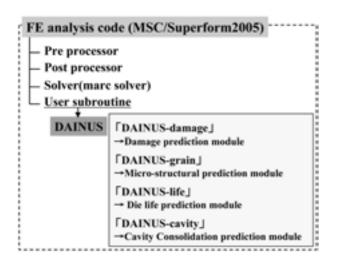


Fig.1. System construction of DAINUS®.

である (Fig.1). 各予測モジュールは、独自の実験手法によって得られた結果を、理論的な現象論に基づいて構築された予測式が用いられている。また、鍛造のような大変形、かつ急激な温度変化が生じる問題に対応するために、各種予測式、予測モジュールには、増分化手法を随所に用いており、連続的に成形、熱変化する場合においても、完全に追随することが可能となっている。DAINUS®を組み込む汎用 FE 解析コードには、MSC Software 社の Super Form 2005 を用いている。より完成度の高い汎用 FE 解析コードを活用することで、より高い予測精度と、より短い計算時間が得られる。

DAINUS®の適用対象は、冷間~熱間鍛造、圧延、板成形、リングローリング、熱処理、切削加工、ダイカストなど、広範囲にわたり、FE解析で解決が可能なプロセスは、ほぼ全てをカバーすることが可能である。

### 3. 解析用データーベース

DAINUS®による各種予測値の精度を高めるためには、システムのベースである FE 解析精度の向上が重要となる. FE 解析コードに使用される変形抵抗などの材料物性値や、摩擦係数、接触熱コンダクタンスなどの境界条件を正確に測定することが必要である. Fig.2~4に代表的な材料物性値、および境界条件値の測定方法を示す. 変形抵抗は、ひずみ速度や温度を精密に制御可能な熱間加工シミュレーターと、超低速成形が可能な、恒温油圧プレスを用いて、ひずみ速度 0.001 /s~25 /s の範囲で端面拘束試験法により測定している. 得られた応力 - ひずみ曲線は、加工中に生じる加工発熱の影響を除去し、定温・定ひずみ速度状態での変形抵抗曲線をデーターベースとして用いている. 摩擦係数は、表面積拡大比の低い領域から表面積拡

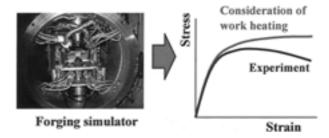


Fig.2. Measurement system of flow stress.

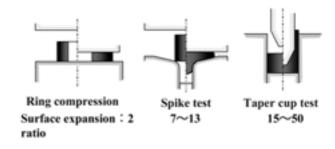


Fig.3. Measurement systems of friction coefficient.

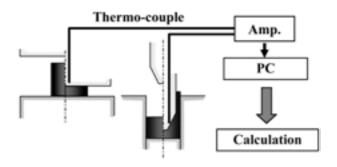


Fig.4. Measurement systems of contact thermal conductance.

大比の高い領域までを,独自に開発したスパイクテストやテーパーカップ試験<sup>1),2)</sup>などの潤滑剤評価試験を活用して測定することが可能となっている.得られた摩擦係数は,加工条件に応じて使い分けれるようにマップ化されている.応力・熱連成解析の精度を決定する境界条件である接触熱コンダクタンスも,加工モードに応じた測定を行っており,温度などに依存させたものを活用できるようにしている.

## 4. 各種予測モジュール

#### 4. 1 割れ予測モジュール: DAINUS-damage

近年では、より複雑な形状を成形するために、材料の延 性限界を超えた工程設計により、割れが多発するトラブル が増加している。また、難加工材の成形において、割れを 回避するための高い工程設計技術が要求されるように なってきている。FE 解析によって、材料の割れを正確に 予測できれば、より高い確率で、試作を必要としない迅速 な量産立ち上げが可能となる。

材料の割れ(延性破壊)は、引張応力下でひずみが加わ るとボイドが生成・成長し、材料固有の限界値まで増加す ることで発生する. この現象を予測式にしたものが. Cockcroft, Ohyane, Ayada らであり, 式(1) に示す Cockcroft の式が最も広く使用されている<sup>3)</sup>. Cockcroft の式の最大の 特徴は、シンプルな積分型の構成方程式で、取り扱いが簡 単なうえ,材料定数が割れ臨界値一つだけで済むため,最 小限の材料試験で係数を簡単に決定できることにある. Cockcroft の式は、加工発熱が問題とならない加工速度が 非常に遅い室温条件や,材料の異方性が問題にならない場 合 (評価試験と実鍛造時の材料方位が一致している場合) での予測精度は良好であるが, 高速鍛造や多段工程におけ る連続成形での加工発熱による青熱脆性の影響や,材料の 異方性が問題となる場合(評価試験と実鍛造時の材料方位 が一致していない場合)に、予測精度は大幅に低下してし まう. 実際の青熱脆性が, 限界圧縮率, Cockcroft 値に及 ぼす影響を、Fig.5 に示す. DAINUS-damage では、この青 熱脆性の影響を温度依存性の青熱脆性影響係数 β として 取り入れ、さらに材料の異方性修正係数 α を用いた、独 自の改良 Cockcroft の式(式(2)) を用いることにより、よ り高い割れ予測精度を得ることが可能となっている.

 $\alpha$ :材料異方性修正係数, $\beta$ :青熱脆性影響係数,f(T)

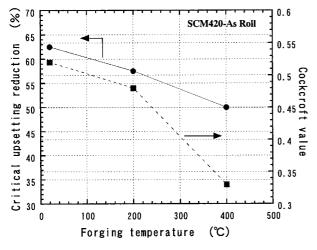


Fig.5. Effect of temperature on forginability and damage value(cockcroft).

#### 4. 2 材質予測モジュール: DAINUS-grain

材質予測技術 4)~10) は、1980年代後半に制御圧延技術の発展と共に精力的に行われてきた技術である。Fig.6 に鍛造加工中における組織の変化を示す。鍛造加工中には、動的再結晶が生じ、その後静的再結晶の進展、再結晶粒の粒成長、完全再結晶後の粒成長が生じ、次の鍛造加工を迎える。このように、鍛造加工プロセスの組織変化は極めて複雑で、温度、ひずみ、時間、初期結晶粒径などの影響を強く受け、その材質予測技術は極めて難易度の高い技術である。しかしながら、高精度な材質予測技術を実現できれば、目標とするスペックを得るための最適な鍛造プロセスや熱処理条件を確実に設計できるため、その意義は極めて高い。

これまでの圧延における材質予測手法は、横断面のひずみ分布と温度分布が一定であるとの前提で、圧延時のひずみとパス間時間のみを変化パラメータとして計算していたため、解析システムとしては適用範囲が非常に狭く、予測精度も不十分である問題があった。鍛造加工において材質予測シミュレーションを行うためには、大変形による大ひずみの導入、大きなひずみ分布、急激な温度変化やリメッシングへの対応が要求され、材質予測に対する難易度は格段に高くなる。DAINUS-grainでは、圧延だけでなく、鍛造加工やリングローリングへの適用を可能とするために、新たに以下の開発を行った。

まず,大変形と急激な温度変化に対応するための再結晶 予測式,および粒成長予測式の構築を行った.その事例と して, INCONEL alloy718 の結果を Fig.7, Fig.8, および式 (3),式(4)にそれぞれ示す.部分再結晶域と大変形時にお

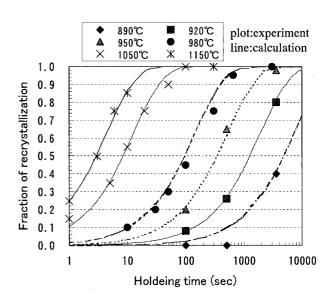


Fig.6. Micro-structural changing behavior in forging.

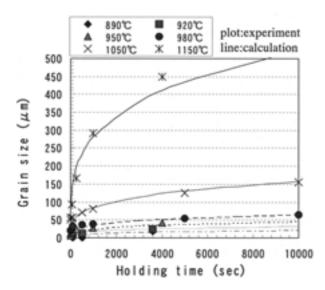


Fig.7. Recrystallization behavior of INCONEL alloy 718.

$$X_{rex} = 1 - \exp\left\{-0.693 \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{0.85}\right\}$$
 (3)  
$$t_{0.5} = C_1 \varepsilon^{C2} d_o^{C3} \exp\left(\frac{-Q_s}{RT}\right)$$

t: holding time(s),  $C_1 \sim C_3$ : material custant,

 $Q_s$ : activation energy, T: temperature( $^{\circ}\mathbb{C}$ )

 $t_{0.5}$  : time to 50 % recrystallization,  $\ \ \varepsilon$  : strain,  $\ d_{\rm o}$  : initial

 $\gamma$  grain size (  $\mu$  m)

$$d_{\gamma rex}^{4} = d_{\gamma} o^{4} + C_{4} t \exp\{-Q_{grow.} / (RT)\}$$
 ....(4)

 ${\bf C}_4$  ; material constant,  ${\it Q}_{grow}$  ; activation energy for grain growth

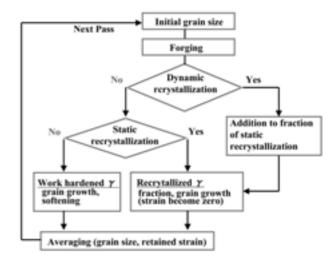


Fig.9. System flow chart of DAINUS-grain.

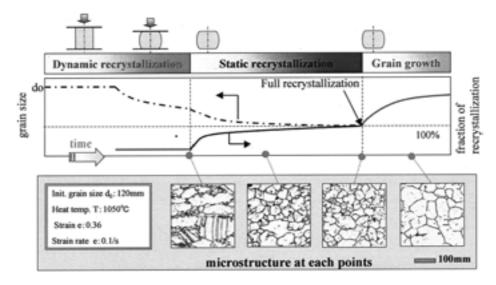


Fig.8. Grain growth behavior of INCONEL alloy 718.

#### 4.3 金型損傷予測モジュール: DAINUS-life

鍛造,板成形やダイカスト金型の金型損傷の損傷形態は複雑で,原因の同定や有効な改善方法を導き出すことは容易ではない。この解決手段として、FE 解析に大きな期待を集めてきたが $^{11)}$  ~ $^{14)}$ ,金型損傷をその形態ごとに定量的な予測をすることは非常に難易度が高いため,有効な総合予測システムは実用化されなかった。DAINUS-life は,DAINUS-grain で培った材質変化手法を応用することで,代表的な金型損傷要因である塑性流動,低サイクル疲労寿命,および大割れの定量的な金型損傷予測を実現したシステムである $^{15)}$  ~ $^{18}$ .

金型の代表的な損傷は、塑性流動 (塑性変形), 低サイ クル疲労破壊(ヒートチェックも含む)、摩耗である、ア ブレッシブ摩耗を除いて,多くの損傷は,高い応力によっ て転位が導入されることによって引き起こされている. 例 えば、割れや欠け、ヒートチェックなどの原因である低サ イクル疲労破壊は,高い応力下で導入された累積的なひず みが原因である. また, 高い温度にさらされる熱間鍛造や ダイカスト型では、熱的なダメージにより、冷間鍛造より も寿命が大幅に短くなる.これは、金型が熱によって軟化 することが原因である. DAINUS-life では、金型の変形、 すなわち金型への転位の蓄積を最も重要なパラメーター と考え、金型損傷の予測システムを構築した. Fig.10, Fig.11 に金型損傷予測に用いられる圧縮降伏強度, および 軟化挙動を示す.また、式(5)に金型の降伏条件となる塑 性流動予測値 Dc 値の予測式を示す. この式は, 単純に型 材の降伏条件を表したものであるが、金型の熱軟化、応力 による軟化の加速の影響を加味したものとなっており, DAINUS-grain の節で述べた増分化手法との組合せによっ

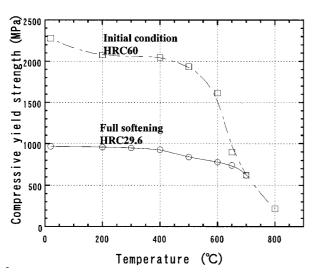


Fig.10. Compressive yield strength of matrices high speed steel MH85.

て、鍛造 1 サイクル中における温度上昇、下降過程におけるダメージを、毎計算ステップごとに累積できるようになっている。そのため、打ち始めのダメージの蓄積速度が遅い状態と、ランニング後半のダメージの蓄積速度が速い状態を正確に算出することが可能となっている。Fig.12 にDAINUS-life のフローチャートを示す。フローチャートからも分かるように、塑性流動予測値 Dc 値が最も重要なパラメーターとなっており、この値を用いて、塑性流動量と低サイクル疲労寿命を算出する仕組みとなっている。

X T: Temperature X t: Holding time

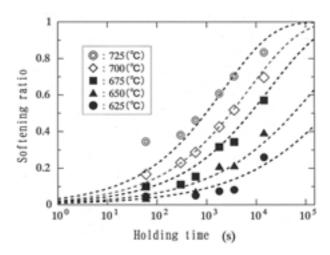


Fig.11. Softening behavior of matrices high speed steel MH85.

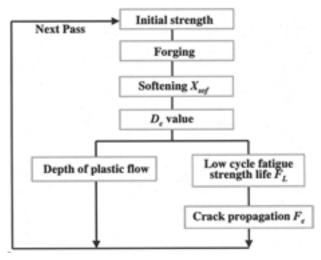


Fig.12. System flow chart of DAINUS-life.

# 4. 4 キャビティ封孔予測モジュール: DAINUS-cavity

鉄鋼材料の凝固過程において、液体から固体に変化する際に生じるインゴットキャビティは生成される。このキャビティは、展伸材では通常鍛造や圧延によって圧着され、消失するが、最終製品まで存在した場合、破壊の起点になりやすく、非常に大きな問題に発展するケースがある。DAINUS-cavityでは、インゴットの中心部分に多く存在するキャビティを、確実に圧着させるための工程設計に活用できるようにするために開発されたものである。キャビティの予測式を、式(7)に示す。この式は、延性破壊の予測式とは逆に、圧縮応力場に導入されたひずみが、キャビティの圧着に寄与するとの考えに基づいている。キャビティの圧着に必要な Q 値は、キャビティのサイズによって決まり、実験によって求められる。

 $Q = \int (-\sigma_m/\sigma_{eq}) d\varepsilon \cdots (7)$ 

#### 5. DAINUS®の活用事例

DAINUS®の活用事例として, INCONEL alloy 718 のガスタービンディスクの工程設計と, 温間鍛造における後方押出しパンチの寿命の結果を紹介する.

ガスタービンディスクの信頼性向上は重要課題となっており、一般的に、90 $\mu$ m以下の結晶粒径が要求される。ガスタービン素材として広く使用されている INCONEL alloy 718 は単相組織を有するため、熱処理による逆変態を活用した細粒化はできず、鍛造工程のみで結晶粒の微細化

を達成しなければならない。今回の対象製品は、 $\phi$ 900×160 h のタービンディスクで、ターンテーブルを用いた仕上げ逐次鍛造工程の最適化設計を試みた。Fig.13 に鍛造モデルを示す。鍛造はターンテーブルを毎工程ごとに回転させながら逐次成形を行う。Fig.14 に鍛造後と溶体化処理後のオーステナイト粒径分布を示す。鍛造後には、再結晶粒と加工硬化された未再結晶粒が混在しており、大きな粒径分布を示しているが、溶体化処理中に再結晶と粒成長が進行し、結果として均一な粒径分布が得られている。Fig.15に試作結果と予測値の比較結果を示すが、均一で良好な組織と良好な予測精度が得られている。このように、材質予測が難しいとされる大型の逐次鍛造においても、DAINUS-grain の予測精度は非常に高いと考えられる。

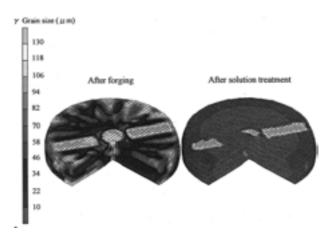


Fig.14. Distribution of  $\gamma$  grain size before and after solution treatment(  $\phi$  900  $\times$  160 h).

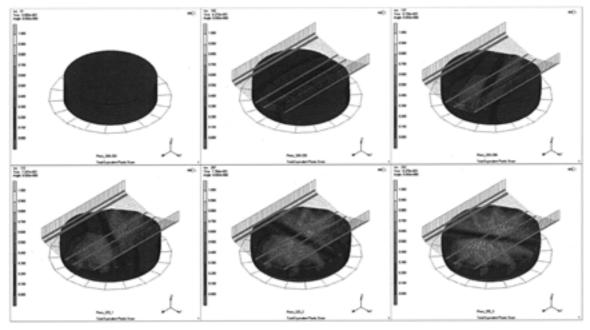


Fig.13. Forging procedure of turbine disc.

次に温間鍛造における後方押出しパンチの寿命の予測 事例について述べる.温間鍛造では、熱的なダメージに

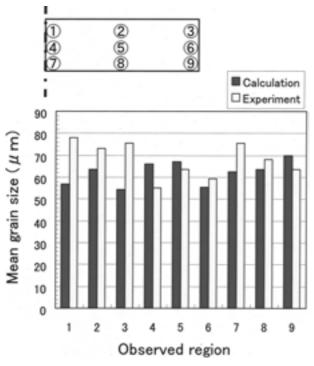


Fig.15. Comparison of experiment results to prediction results of INCONEL alloy 718 turbine disc.

よって、工具の軟化起因の損傷や、ヒートチェックなど、 冷間鍛造では見られない損傷が引き起こされる. 温間鍛 造, 熱間鍛造では, 型材の軟化による強度低下が引き金と なり, 塑性流動や摩耗, ヒートチェックが生じるケースが 多い. 特に, 摩耗量は, 塑性流動層厚さとほぼ比例関係に あることから, 塑性流動層厚さの予測が, 最も重要とな る. Table 1 の条件にて、後方押出しを行った際の損傷予 測結果を Fig.16, Fig.17 にそれぞれ示す. パンチの冷却が 不十分な, パンチ冷却 1.5 L/min. の条件では, パンチの先 端コーナーR 部の軟化は激しく、結果として塑性流動予 測値 Dc 値が 1.0 を超えた塑性流動層が多く発生すること が予測されている.一方,パンチの冷却を強化した,パン チ冷却 4.4 L/min. の条件では、軟化量を大幅に低減できる ため, 塑性流動層を大幅に減らすことが予測される. これ らの予測結果と実機における実験結果の比較を, Fig.18, Fig.19 にそれぞれ示す. パンチ冷却 1.5 L/min. における軟

Table 1. Condition of warm forging.

Punch material	Matrices high speed steel MH85
Work material	S53C
Forging temperature	820 ℃
Forging speed	85 spm
Punch cooling	(1)1.5 L/min., (2)4.4 L/min.
Lubricant	Oil

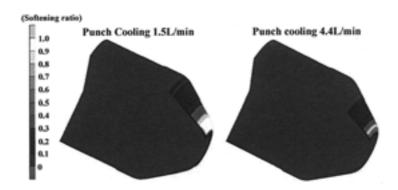
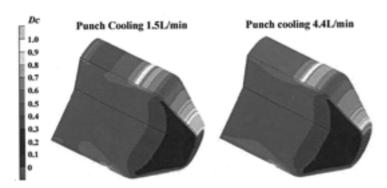


Fig.16. Distribution of softening ratio after 5000 shots at 820  $^{\circ}\text{C}\,$  .



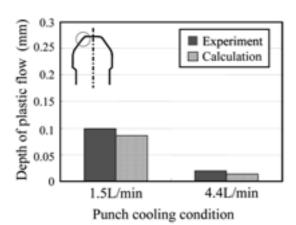


Fig.18. Comparison of experiment results to prediction results in depth of softening layer after 5000.

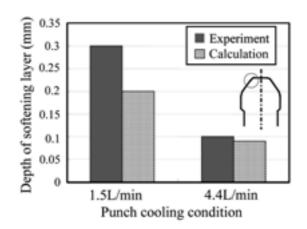


Fig.19. Comparison of experiment results to prediction results in depth of plastic flow after 5000 shots.

化層厚さの予測精度が若干出ていないものの,全体として は軟化層厚さ,塑性流動層厚さ共に良好な予測精度を確保 できているものと考えられる.

今回の事例は、これまでに実施してきた一部のものであるが、2002年に完成して以来、毎年多くの運用実績を残してきている。また、材料データベースの拡充や、予測式の改良にもとりくんでおり、より精度の高いシステムを目指している。

## 6. まとめ

得られた成果について,以下にまとめる.

- (1) デジタル・エンジニアリング DAINUS®を開発し、鍛造、板成形、ダイカストなど幅広い加工方法において、割れ予測、材質予測、金型損傷予測、キャビティ封孔予測を定量的に行いながら最適な工程設計を行うことが可能となった。
- (2) 割れ予測モジュール DAIUNS-damage では, 青熱脆性

- や、材料の異方性を考慮した割れ予測式を活用することによって、高い精度で割れを予測することが可能となった。 (3) 材質予測モジュール DAINUS-grain では、大変形、急激な温度変化に対応した増分化手法と、新しい平均化手法を導入することで、高い予測精度を得ることが可能となっ
- (4) 金型損傷予測モジュール DAINUS-life では,温度や応力によって生じる金型の軟化現象を正確な予測を可能とし,高い精度で,塑性流動予測,低サイクル疲労寿命予測,大割れ予測を可能とした.
- (5) キャビティ封孔予測モジュール DAINUS-cavity では、 鍛造や圧延中におけるインゴットキャビティの封孔挙動 の予測が可能となった.

#### (文献)

- 1) 土井善久, 伊藤樹一, 吉田広明, 五十川幸宏: 塑性加工連合講演会講演論文集, 56 (2005), 611.
- 伊藤樹一,吉田広明,五十川幸宏,土井善久,堂田邦明, 塑性と加工,48 (2007),43.
- 3) 吉田佳典,湯川伸樹,石川孝司:塑性と加工,**42** (2001), 949.
- 4) 大北智良:西山記念, 131(1989), 69.
- 5) 矢田浩:西山記念, 131(1989),149.

た.

- 6) 河野正道, 五十川幸宏:電気製鋼, 70(1999),249.
- 7) 吉田広明,五十川幸宏,石川孝司:塑性と加工,**42**(2001), 569.
- 8) 吉田広明, 五十川幸宏, 石川孝司: 塑性と加工, **43** (2002), 973.
- 9) H.Yoshida: IFM2006 Proceeding, (2006).
- 10) H.Yoshida: Numiform 2007 Proceeding, (2007).
- 11) 早川邦夫:塑性と加工,43(2002),546.
- 12) 松井宗久: 塑加春講論, (2001), 73.
- 13) 土屋能成:塑加春講論,(2001),75.
- 14) 鈴木寿之: 塑加春講論, (2001), 77.
- 15) 吉田広明:塑性加工学会春季講演会講演論文集, (2004), 359.
- 16) 酒井貴文, 伊藤樹一, 吉田広明: 塑性加工学会春季講演 会講演論文集, (2004), 361.
- 17) 酒井貴文,吉田広明:塑性加工連合講演会講演論文集, 55(2004),43.
- 18) 岡島琢磨,吉田広明:塑性加工学会春季講演会講演論 文集,(2005),61.