

特集 生産加工CAE技術

研究報告

鍛造CAE - 鍛造変形解析の製品内質予測への応用

中西広吉, 岩田徳利, 近藤小有里, 高田 修

Development of Forging Analysis System - Applications to Prediction of Material Properties

Koukichi Nakanishi, Noritoshi Iwata, Sayuri Kondo, Osamu Takata

要 旨

鍛造加工によって成形された製品は、構造部品の強度特性としての機能の他、最近では付加価値として、磁気特性などの機能を付与する場合もある。このような特性の多くは、塑性ひずみと温度履歴に依存することが知られており、期待する特性を得るためには、工程設計や加工条件を事前評価して、適切に設定する必要がある。

本研究では、既開発の鍛造加工用の変形解析・熱-変形連成解析ソフトをベースに、製品の内質を予測する二つの機能を開発した。一つは、型接触部での離散

精度を向上させた材料流れの新たな追跡手法を導入することにより、鍛造製品内部の詳細な鍛造ファイバフローを予測する。もう一つは、加工誘起マルテンサイト生成の変態速度式を実験的に作成して解析に導入することにより、鍛造加工による加工誘起変態に伴う磁気特性を予測する。いずれも解析結果は実部品の特性と概ね一致し、従来、試作品でしか評価できなかった工程・加工条件の良否が事前に評価できるようになり、開発期間の大幅な短縮を達成する見通しを得た。

キーワード

鍛造, 数値解析, ファイバフロー, 加工誘起マルテンサイト変態, 磁気特性

Abstract

Not only the prediction of deformation but also the prediction of the material properties of forging products are important in the numerical analysis of forging problems. In this study, two functions were developed that estimate the material properties of forging products which were added to the thermocoupled rigid-plastic analysis program that has been already developed in our laboratory.

One is the prediction of the fiber flow in the forging product that has provided forging process engineers with a large amount of design information. The calculation results for some automobile parts qualitatively agree with the experimental results.

The other one is the prediction of the incidence of deformation-induced martensite in a forging process. In a fixed-temperature compression test, the incidence of deformation-induced martensite (V_m) is investigated, and V_m , the temperature and strain that are measured in the test are fitted as a sigmoid function. The sigmoid function is added to the thermocoupled rigid-plastic analysis program. This method is then applied to the coupled analysis of the ironing process. V_m obtained by the numerical analysis shows good agreement with that from the experiment.

Keyword

Forging, Numerical analysis, Fiber flow, Deformation-induced martensitic transformation, Ferromagnetic property

1. はじめに

加工の各種分野において1980年代から数値解析に関する多くの研究がなされ、最近では、工程設計時での事前評価などへの実用が試行され始めている。鍛造加工の分野においても、加工中の現象を実験的に把握することは技術面、コスト面で制約が多いため、開発期間の短縮・開発コスト低減を担う一つの方法としてCAE (Computer Aided Engineering) が活用され始めている。

鍛造加工の数値解析では、その変形量の大きさから、剛塑性有限要素法¹⁾が代表的な計算手法であり、充満過程やひずみ分布、型面圧分布など変形解析による力学的な情報が設計で活用²⁾されるようになってきている。

当所ではこのような恒温変形としての取扱いに加え、変形抵抗の温度依存性が変形形状に及ぼす影響や、ひずみ・温度履歴の違いによる材質の不均一さ、型寿命要因である金型熱負荷など熱に関わる問題の多さに着目し、熱 - 変形連成解析技術の開発に取り組んできた。これまでに、鍛造加工時の熱現象を含む変形解析プログラムを開発し、併せて、解析への導入をねらった界面熱伝達特性の考え方と測定方法を提示した^{3,4)}。

本研究では、既開発の鍛造熱 - 変形連成解析の利用範囲拡大を目的に、鍛造製品内部の品質に着目して、(1) 型接触部の離散精度向上による鍛造ファイバーフローの予測、および、(2) 加工誘起マルテンサイト変態の関係式導入による磁気特性の予測を可能とした。これにより、(1)では、従来、試作品の内部観察でしか評価できなかった工程良否の事前評価、(2)では、製品の機能設計と工程設計の両立の事前評価がそれぞれ可能となった。

2. 数値解析方法の概要

2.1 変形解析

被加工材の変形速度場は、塑性仕事と外力（主として摩擦力）のなす仕事の和で表される汎関数を最小化することによって求められる⁵⁾。汎関数を最小化する際には、体積一定則を満たす必要がある。その手法として圧縮性材料特性法⁶⁾を用いた。これは、Table 1に示すように、ミーゼスの降伏応力にわずかな静水圧依存（圧縮性パラメータg）を許すことにより、応力値をひずみ速度から直接求めるものである。

2.2 熱 - 変形連成解析

温度解析での離散式は、伝熱面を介して隣合う有限要素間の熱収支式から直接導出した有限差分式により定式化した。変形と熱の連成化は、ある時刻の状態量による変形解析と、そこで得られたひずみ速度等を用

いて塑性発熱や摩擦発熱を考慮する温度解析を微小ステップごとに交互に繰り返すことによって行った。被加工材の塑性発熱、被加工材と型の界面での摩擦発熱、自然対流は考慮されているが、輻射伝熱はこれらに比べて小さいと考え、考慮していない。

3. 鍛造ファイバーフロー予測への応用

3.1 鍛造ファイバーフローと製品品質

鍛造ファイバーフローは、鍛造素材が造られる際、引抜きや押し出し加工により結晶組織が加工方向に延ばされて、結晶粒界が機械的集合組織となり繊維状に観察されるものである。ファイバーフローは、鍛造加工時の材料流動状態を把握するためだけでなく、鍛造製品の欠陥や不良の原因を探るためにも広く用いられている⁷⁾。鍛造工程設計者は、経験的にファイバーフローの表面近傍の流れや密度、分断状況から、鍛造工程上の各種の鍛造欠陥、デッドメタルの有無の他、Fig. 1に示すように、潤滑状態や熱処理ひずみ、製品強度等の見積もりを行うことができる。

しかし、ファイバーフローはこれまで実型打ち後、製品を半割にして切断面の研磨によってはじめて観測できるものであり、試行錯誤期間が数週間～3ヶ月程

Table 1 Basic equation.

Von Mises criterion	Pressure sensitive yield criterion
$\bar{\sigma}^2 = \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}$	$\bar{\sigma}^2 = \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} + g \sigma_m^2$
$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \right) \sigma'_{ij}$	$\dot{\sigma}_{ij} = \left(\frac{\dot{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) \left[\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} + \delta_{ij} \left(\frac{1}{g} - \frac{2}{9} \right) \dot{\epsilon}_v \right]$
$\dot{\epsilon}_v^2 = \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$	$\dot{\epsilon}_v^2 = \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} + \left(\frac{1}{g} \dot{\epsilon}_v^2 - \dot{\epsilon}'_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} - \delta_{ij} \frac{\dot{\epsilon}_v}{3} \right)$

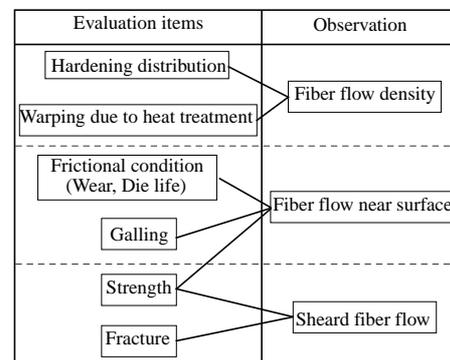


Fig. 1 Evaluated items by observed fiber flow.

度費やされてきた。また従来、解析で算出された情報は製品内部の塑性ひずみや応力分布であり、工程設計者がこれらの情報から工程の良否を評価するにはノウハウが少なく、考察に時間が費やされたり、解析結果を有効に活用できない場合があった。

ファイバーフローを解析情報として算出できれば、工程設計者が型打ちによって評価してきたノウハウで解析結果から工程案の良否の事前評価が可能となり、開発期間の大幅な短縮が期待できる。

3.2 鍛造ファイバーフローの予測方法

Fig. 2(a)に示すように、被加工材の内部にトレースポイントと呼ぶ点群を設定し、それらを直線で結ぶことでファイバーフローを表現させた。そして、その各点の変形に伴って移動する過程を算出することで変形に伴うファイバーフローを表現する。このような表現により、要素構成節点をファイバーフローラインと見なす場合より細密な結果が得られる。また、表面積拡大の大きい部分にはポイントを追加することにより、厳しい変形に追従した表現が可能となる。

ファイバーフローラインは解析初期に自動設定される。変形に伴うトレースポイントの移動は、各トレースポイントを内包する要素を探索し、形状関数を用いた節点速度ベクトルの内挿により変位を累積して求めている。

Fig. 2(b)のように、金型断面形状における円弧部や凸部は有限要素に離散化して表現しているため、厳密

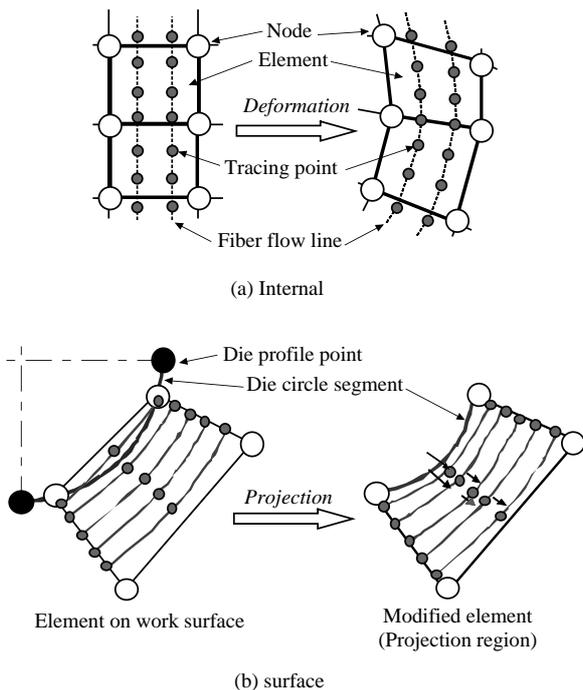


Fig. 2 Fiber flow expression technique.

には被加工材が金型内部に入り込んだ状態で表現される。その場合、鍛造変形解析に不可欠な再要素分割により、金型内にトレースポイントが置き去りになる場合があり、観察上、重要な被加工材表層部でのファイバーフロー表現の精度の低下が問題となる。そこで、Fig. 2(b)のような新要素内部にトレースポイントが内包される処理を考案した。これは、計算要素の1辺を型形状線に置き換え、その四辺形状へ計算要素形状を写像変換して内挿するものである。この写像変換は、隣接するファイバーフローラインが交叉することも回避し、型接触面での精度向上が図られた。

3.3 実測との比較による評価

本手法を用いたファイバーフローの検証を実ワーク（フロントハブ）との比較により行った。Fig. 3にファイバーフローの算出結果と実ワークとの比較を示す。計算では、つぶしから仕上げまでの多工程解析を行っている。(d)の仕上げ工程の前に中心部の穴抜き工程があるが、解析では、要素を取り除くことで穴抜きを施している。この穴抜き工程の簡略化のため、型当たり部や穴抜き加工部にファイバーフローのわずかな違いが見られるが、楕円部で示した各領域の特徴的なフロー形状や密度から、全般に細部まで再現できていることがわかる。

また、Fig. 4に、後方せん孔加工の解析を行った結果を示す。(a)が摩擦係数の大きい場合、(b)は摩擦係数の小さい場合の結果である。それぞれ右半分はファ

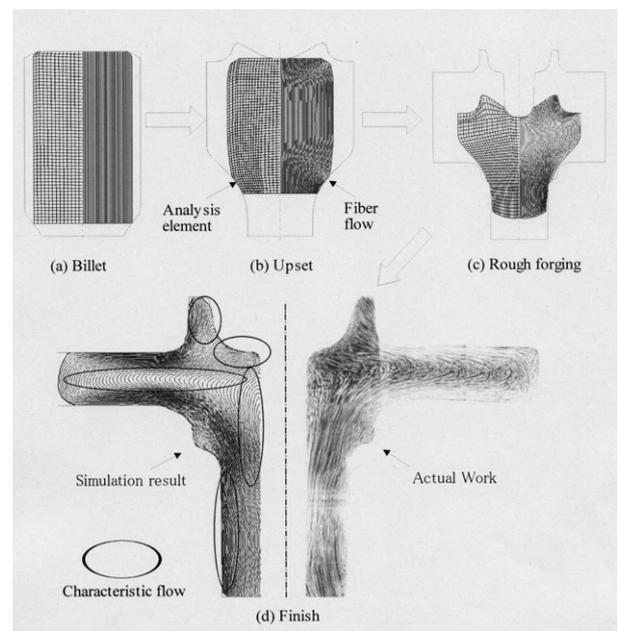


Fig. 3 Verification results.

オーバーフロー，左は計算要素を表示している。パンチ角部においてもファイバーフローは工具に入り込むことなく計算されている。また，摩擦係数によるファイバーフローの違いが明確に出ており，摩擦係数が小さい（潤滑状態が良い）場合はパンチ側面でファイバーフローが滑らかになっているのに対し，摩擦係数が大きい（潤滑状態の悪い）場合は巻込みが大きい様子が観察でき，潤滑状態の良否判断に関する経験的知見と一致している。このような摩擦状態の相違がわかるような型接触表層部の詳細な表現も可能となった。

既開発の変形解析プログラムにファイバーフロー算出機能を追加しても，計算時間は数%程度増加したのみであり，ファイバーフローの予測が十分実用可能である。

4. 加工誘起マルテンサイト生成予測への応用

4.1 加工誘起マルテンサイト生成と磁気特性

Fig. 5に示すように，非磁性のオーステナイト系ス

テンレス鋼に低コストな塑性加工で加工誘起マルテンサイト変態させ全体を強磁性化した後，一部を高周波熱処理で非磁性に戻し，非磁性部と強磁性部が共存する複合磁性部品の工程が提案されている⁸⁾。塑性加工により，加工誘起マルテンサイト変態を起こさせる際，大きなひずみを低温加工により付与すれば良いことが知られているが，材料内部に発生する塑性発熱と材料表面に発生する摩擦発熱によって，被加工材温度は上昇し，加工誘起マルテンサイト生成率は激減する。熱の拡散を狙った低加工速度では生産性の面で不利である。そのため，有用な強磁性レベルを達成できるマルテンサイト生成率の確保と生産性を両立する工程設計が重要である。

そこで，ひずみ・温度履歴が算出可能な熱 - 変形連成解析に，マルテンサイト生成率とひずみ・温度との関係式を導入して，磁気特性の事前評価を可能とした。

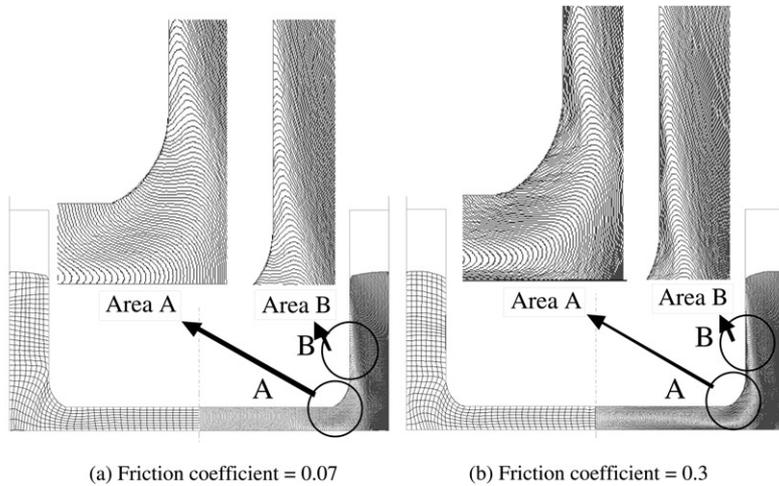


Fig. 4 Simulation of back-forward extrusion.

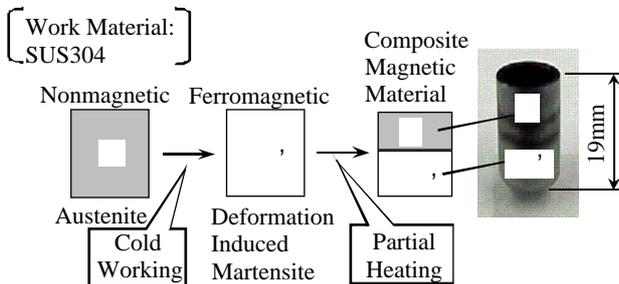


Fig. 5 Composite magnetic material.

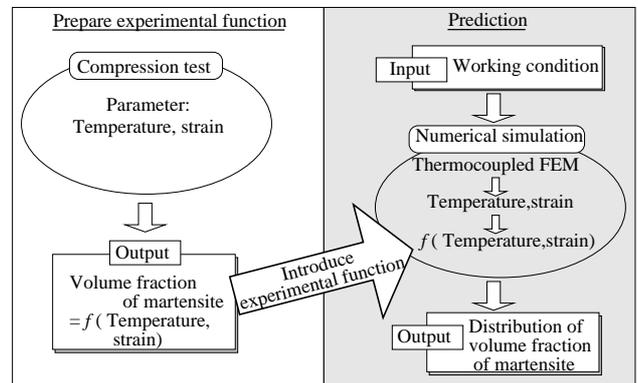


Fig. 6 Flow for the prediction of volume fraction of martensite.

4.2 加工誘起マルテンサイト生成率の予測方法

Fig. 6に、マルテンサイト生成率予測の流れを示す。ステンレス鋼の恒温圧縮試験を行い、マルテンサイト生成率と温度・相当ひずみとの関係式を求め、これを熱-変形連成解析に導入して、解析から求められるひずみと温度から各加工条件での製品内部のマルテンサイト生成率分布を求める。

Fig. 7に示すように、恒温圧縮試験から求められたデータを、あるひずみにおける変態速度として表し、変態の初期と終期はその速度が低いことからシグモイド関数形として近似した⁹⁾。図中の a_i, b_i, c_i は、ある鋼種において非線形最小自乗法により求めた定数の一例である。

4.3 実測との比較による評価

しごき加工を取り上げて、実測と比較した。解析モデルをFig. 8に示す。しごき前の内径は $\phi 7\text{mm}$ 一定、側壁の板厚はカップ底側を 1.07mm 、開放側端部を 1.49mm とし、開放側に近いほど板厚が厚くなる形状とした。しごき型のクリアランスは 0.8mm で設定し、しごきの加工速度は 44.6mm/s 一定とした。摩擦条件はクーロン摩擦則を採用し、その係数は摩擦試験での測定結果から 0.1 で設定した。被加工材と金型間の界面熱伝達係数はしごきに伴う高面圧を想定して $100\text{kW/m}^2\text{K}$ とした³⁾。変形抵抗は圧縮試験で求めた測定値を各試験温度ごとの n 乗硬化式で近似して用いた。雰囲気温度は 295K で設定し、仕事の熱変換効率は 0.9

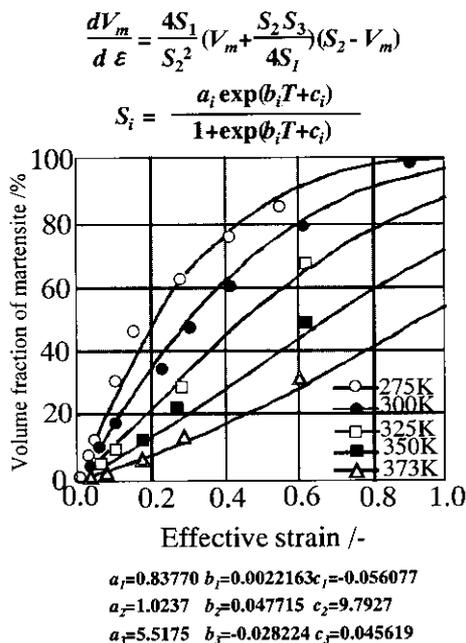


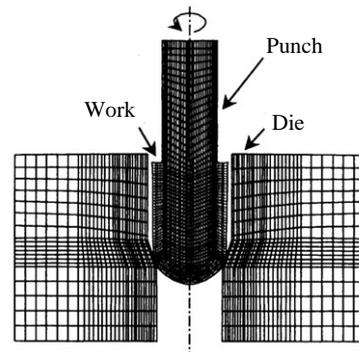
Fig. 7 Effect of strain and temperature on volume fraction of martensite and fitting parameters in equation.

とした。熱物性値は温度依存性を考慮した。

磁界の強さ $H=400\text{A/m}$ の時の磁束密度 $B_{4K}(\text{T})$ を強磁性レベルの尺度とした。B-Hトレーサーで測定した B_{4K} 測定値と加工誘起マルテンサイト生成率測定値の校正曲線をもとに、マルテンサイト生成率を磁束密度 B_{4K} へ変換し強磁性レベルを予測した。

Fig. 7で求めた関数を熱-変形連成解析に導入し、しごき加工中のひずみ分布、温度分布、加工誘起マルテンサイト生成率を求めた結果をFig. 9に示す。

ひずみ分布は、板厚方向のせん断変形により、パンチ側よりダイ側の方がひずみが大きい。温度分布は、塑性発熱によってひずみに対応して温度も上昇し、摩擦発熱も加わってダイと接触する表面が著しく温度上昇する。



Initial thickness of cup wall:
 Bottom side : 1.07mm
 Opening side: 1.49mm
 Ironing die clearance: 0.80mm
 Coefficient of friction: 0.110
 Punch head speed: 44.6mm/s
 Heat transfer coefficient:
 $100\text{kW/m}^2\text{K}$ (Work - Die)
 Atmospheric temperature: 295K
 Energy conversion coefficient: 0.9

Fig. 8 Analysis model for ironing.

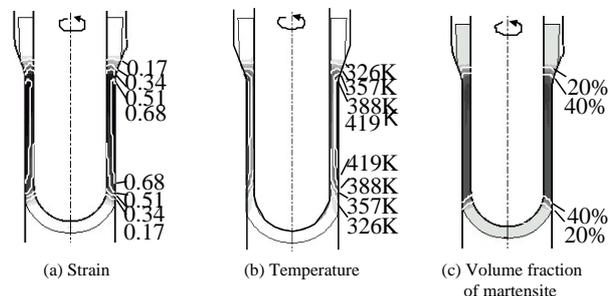


Fig. 9 Distribution of strain, temperature and volume fraction of martensite in ironing. (Calculated result).

圧縮試験ではFig. 7のようにマルテンサイト生成率はひずみに対応して増加するが、しごき加工でのマルテンサイト生成率は、Fig. 9(c)のように全域に40%から50%で平均して分布する。これは、温度上昇によって生成に寄与しないひずみが多いため、生成率が低くなったと考えられる。

Fig. 10に、同加工条件にて実験を行って、解析の検証をした結果を示す。しごき加工中の表面温度は解析値が450Kに対し、実験値は410Kとやや低めであるが、これは、実験では加工直後に熱電対で温度を測定したことにより温度が低下したためであり、ほぼ妥当と考える。解析で求めたマルテンサイト生成率を校正曲線をもとに磁束密度B4Kを求めたところ、0.29Tの強磁性レベルを示した。実験で加工したサンプルの値は0.25Tであり、事前評価には十分活用できる精度を得ることが確認できた。

5. まとめ

既開発の鍛造熱 - 変形連成解析の利用範囲拡大を目的に、鍛造製品内部の品質に対する次の解析技術を開発し、検証した。

- (1) 型接触部の離散化精度の向上により、鍛造製品内部のファイバフローの予測を可能とした。
- (2) ファイバフロー算出結果は、大きな流れ、表層細部の流れともほぼ一致した。これにより試打ちと同等の精度で設計者が工程案を評価できるようになった。
- (3) 加工誘起マルテンサイト変態の関係式を熱 - 変形連成解析に導入にすることにより、磁気特性予測を可能とした。
- (4) しごき加工におけるマルテンサイト生成率は実測値と概ね一致した。

上記の技術はいずれも実際の設計現場で利用され始めており、事前評価による期間短縮を達成している。

なお、本研究にあたり、ご協力いただいたトヨタ自動車(株)、(株)デンソーの皆様に深く感謝する。

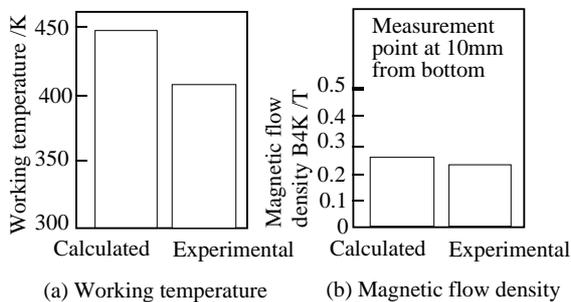


Fig. 10 Comparison of temperature and magnetic flow density in ironing between measurement and FEM analysis.

参考文献

- 1) 森謙一郎, 島進, 小坂田宏造: 日本機械学会論文集(A編), 45-396(1979), 955
- 2) 矢野裕司, 林稔: 第4回日中精密鍛造シンポジウム, (1992), 39
- 3) 中西広吉, 野々山史男, 澤村政敏, 団野敦: 塑性と加工, 37-421 (1996), 207
- 4) 中西広吉, 高田修, 堀之内成明, 矢野裕司, 明石忠雄, 松田直樹: 豊田中央研究所R&Dレビュー, 33-3(1998), 93
- 5) 日本塑性加工学会: 非線形有限要素法, (1994), コロナ社
- 6) Osakada, K., Mori, K.: Int. J. Mech. Sci., 24-8(1982), 459
- 7) Sabroff, A. M.: 第6回国際鍛造会議報告書, (1968), 143
- 8) 杉山聡, 石川孝司, 中西広吉: 塑性と加工, 41-469(2000), 141
- 9) 品川一成, 西川裕之, 石川孝司, 細井祐三: 鉄と鋼, 76-3(1990), 462

(2001年1月9日原稿受付)

著者紹介



中西広吉 Koukichi Nakanishi

生年: 1960年。

所属: 金属加工研究室。

分野: 塑性加工, 特にコンピュータ支援技術に関する研究。

学会等: 日本塑性加工学会学会会員。

1994年度日本塑性加工学会会田技術奨励賞受賞。

1996年IEA/AIE-96 Best Paper Award受賞。

2000年日本塑性加工学会東海支部賞技術賞受賞。

工学博士。



岩田徳利 Noritoshi Iwata

生年: 1957年。

所属: 金属加工研究室。

分野: 塑性加工の研究。

学会等: 日本塑性加工学会学会会員。

1998年日本塑性加工学会東海支部賞研究賞受賞。

工学博士。



近藤小有里 Sayuri Kondo

生年: 1976年。

所属: 金属加工研究室。

分野: 塑性加工のコンピュータ支援技術。



高田 修 Osamu Takata

生年: 1958年。

所属: ソフトウェア研究室。

分野: 設計・生産分野における知識処理の応用に関する研究。

学会等: 情報処理学会, 人工知能学会, 精密工学会, システム制御情報学会会員。

1994年度日本塑性加工学会会田技術奨励賞受賞。

1996年度IEA/AIE-96 Best Paper Award受賞。

工学博士。