

鍛造加工の熱-変形連成解析

中西広吉, 野々山史男

Rigid-Plastic Analysis Coupled with Thermal Analysis for Forging Process

Koukichi Nakanishi, Fumio Nonoyama

要 旨

鍛造加工は、冷間から熱間加工までと加工温度範囲が広く、また、加工中に塑性発熱や摩擦発熱、金型への熱伝達などの現象がみられ、被加工材や金型内部は不均一な温度分布となる。そのため、鍛造加工の数値解析で、温度の効果を考慮することは極めて重要である。本研究では、被加工材に対し、温度解析と連成されて剛塑性変形解析を行うプログラムを開発した。このプログラムは、加工時の他、連続作業時の金型温度解析も可能である。

一方、鍛造加工の数値解析の精度は解析に用いる物理的なパラメータに依存する。特に、鍛造加工の温度

解析では、金型と被加工材間の界面熱伝達係数が重要である。本研究では、定量的に界面熱伝達係数を測定する実用的な方法も示した。この方法では、界面熱伝達係数を、単純な圧縮試験の測温データと校正曲線との比較により求める。校正曲線は、差分法による温度解析から作成される。この方法により、界面熱伝達係数に及ぼす潤滑剤、初期塗布量、温度、接触圧力の影響が見積もられた。その測定値を利用して、温間前方押し加工の連成解析を行ったところ、数値解析による金型上昇温度は実測値と概ね一致した。

Abstract

The consideration of temperature effects on the numerical analysis of forging problems is very important. In this study, a program is proposed, which is based on the rigid plastic finite element method coupled with the thermal analysis for forging processes. This program can also be applied to the thermal analysis of dies under continuous operation.

On the other hand, the accuracy of the numerical simulation in forging processes depends on physical parameters used in the analysis. In particular, the interface heat transfer coefficient between a workpiece and a die is very important. A practical method is also proposed to measure the interface heat transfer coefficient

quantitatively. The interface heat transfer coefficient can be determined by comparing calibration curves with temperature measurements in simple compression tests. The calibration curves are derived from the thermal analysis by the finite difference method. The effects of lubricants, the initial weight of the lubricants, the temperature, and the contact pressure on the interface heat transfer coefficient are evaluated. The interface heat transfer coefficient obtained by this method is applied to the coupled analysis of warm forward rod extrusion. The die temperature obtained by the numerical analysis shows good agreement with that in the experiment.

キーワード

鍛造, 数値解析, 実験的解析, 剛塑性有限要素法, 差分法, 界面熱伝達係数

1. はじめに

近年、各種の分野において、数値解析に関する多くの研究がなされ、設計などへの応用が行われつつある。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、工程設計の効率化や質の向上、現象の解明を支援する一つの方法としてCAE (Computer Aided Engineering) の活用が期待されている。

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、軸対称、平面ひずみなど二次元形状については、充满過程やひずみ分布、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。三次元解析の研究³⁾も行われているが、実用化には解決すべき課題がまだ多く残されている。

一方、鍛造加工では、室温 (冷間加工) から1500K (熱間加工) 付近と加工温度範囲が広く、Fig. 1に示すような、被加工材内の塑性発熱、被加工材と金型との界面での摩擦発熱や熱伝達などの熱現象がみられる。そのため、着目している系には不均一な温度分布や熱履歴が生じる。材料特性や界面の状況などには温度依存性があるため、この不均一な温度分布により

材料の変形形状に影響がでる。また、材料や加工条件によっては、被加工材内部におけるひずみ・熱履歴の違いによる材質の不均一さが問題となったり、あるいは型寿命の原因の一つに被加工材からの熱伝達による熱負荷が考えられるなど、熱に関わる問題は多い。このように、鍛造加工時の熱現象も数値計算で解析することは、温度依存性を考慮した変形や材質変化、型の熱負荷などを捉える上で有用なデータを提供し、力学的な情報と合わせて鍛造工程の最適化や研究開発支援に有意義と考えられる。

本研究では、軸対称形状を対象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た。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、その妥当性や界面熱伝達特性を含めて検討した。

2. 方法

2.1 解析方法

2.1.1 概要

鍛造加工時について、変形解析と温度解析を微小ステップごとに交互に行う形で連成解析を行う。温度解析は、被加工材だけでなく、金型も含めて相互の熱伝達を考慮して行う。また、温間あるいは熱間鍛造では、連続作業における金型温度の推移が問題となる場合があるため、Fig. 2に示す1サイクルの鍛造作業に対して、被加工材と金型の温度解析を行う。すなわち、加工、製品保持、イジェクト、強制冷却、自然空冷とい

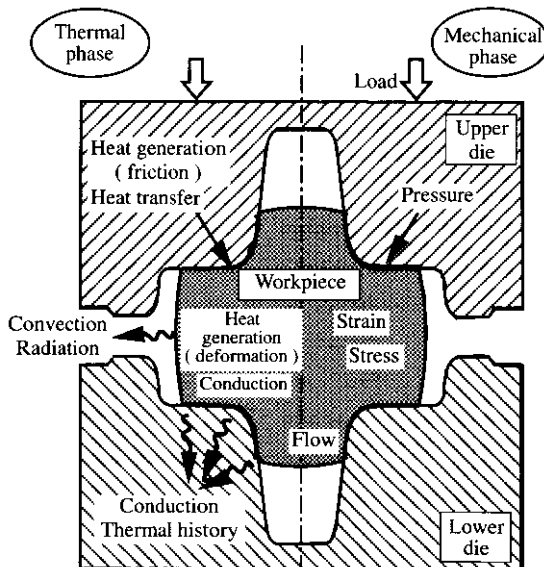


Fig. 1 Phenomena in forging process.

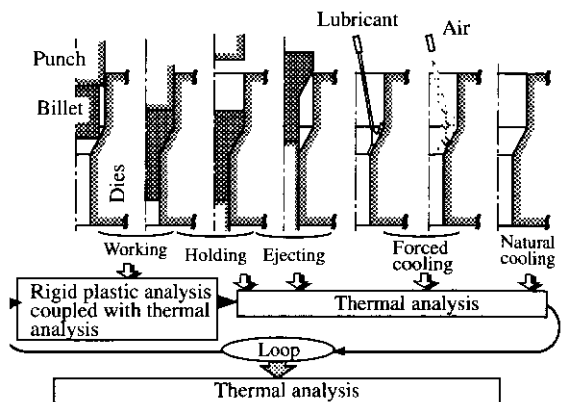


Fig. 2 Object of numerical analysis for forging operating.

う各操作に対して温度解析を行い、個々の操作の解析を連結して、1サイクル及び連続作業時の解析を行っている。

2. 1. 2 変形解析

被加工材の変形速度場は、式(1)の塑性仕事と外力(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⁴⁾。

$$\Phi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_S T_i v_i dS \quad \dots\dots\dots (1)$$

$\bar{\sigma}$: 相当応力

$\dot{\epsilon}$: 相当ひずみ速度

T_i : 外力

v_i : 外力の加わる表面の速度

汎関数を最小化するには、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⁵⁾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応力依存(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。式(1)の外力は摩擦力であり、摩擦則として、クーロン摩擦則と摩擦せん断力一定則を扱っている。

金型形状を直線と円弧のセグメントの集まりとして表現し、変形の進行とともに変化していく節点の境界条件は、幾何学的な位置関係の判定や節点力の符号による判定により行っている。

2. 1. 3 加工時の熱-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。要素形状は、変形解析と同様四角形である。2物体の接触境界での要素のずれは、伝熱面積の重みづけで処理する。時間に対して陽解法をとっている。

Table 1 Basic equation.

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

るが、解の安定性を保証するため、各時点の安定条件を算出して、適切な時間ステップ量を設定している。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。

2. 1. 4 加工時以外の温度解析及び連続作業時の温度解析

イジェクト時には、剛体移動による接触領域の変化や摩擦発熱を、型冷却時には強制対流伝熱を考慮した。加工時の連成解析には多くの計算時間がかかるため、連続作業時の解析では、連成解析を温度解析に簡略化して計算時間の短縮を図った。Fig. 3の様に、加工時の連成解析を連続作業の初期状態で一度実施して、計算ステップごとの塑性・摩擦発熱等の連成計算結果をファイルに出力する。連続作業における加工時の温度解析では、これを発熱項や対流項として利用した。

被加工材の変形状態も連続作業に伴う型温の変化の影響を受けると予想されるが、加工時間が短ければ、その影響は小さいと考えられる。

2. 1. 5 自動再要素分割処理

鍛造では大きな塑性変形が生じるため、初期分割要素で変形計算を進めると、要素の歪みや金型への入り込みが大きくなり、計算が続行できなくなる場合がある。そこで、変形計算の途中で、自動的に再要素分割を実行して、この問題を解消する機能を開発した⁶⁾。これは、変形途中の被加工材形状を抽出し、それをトランスファイナイト法で確実にメッシュ生成できる小領域に分割した後、各領域毎に要素分割するものである。リゾーニング処理はガウス積分により行っている。

2. 2 界面熱伝達係数の測定方法

2. 2. 1 解析に必要な物性値・特性値

鍛造加工における数値解析の精度は、計算手法の他に、変形抵抗、摩擦特性、熱物性値、対流熱伝達係数、界面熱伝達特性等の物性値・特性値にも依存する。変形抵抗は、ひずみ、ひずみ速度、温度の関数として、摩擦特性は、圧力と温度の関数として扱っている。変形抵抗は日本塑性加工学会推奨の端面拘束圧縮試験⁷⁾の方法により、摩擦特性はリング圧縮試験⁸⁾により測

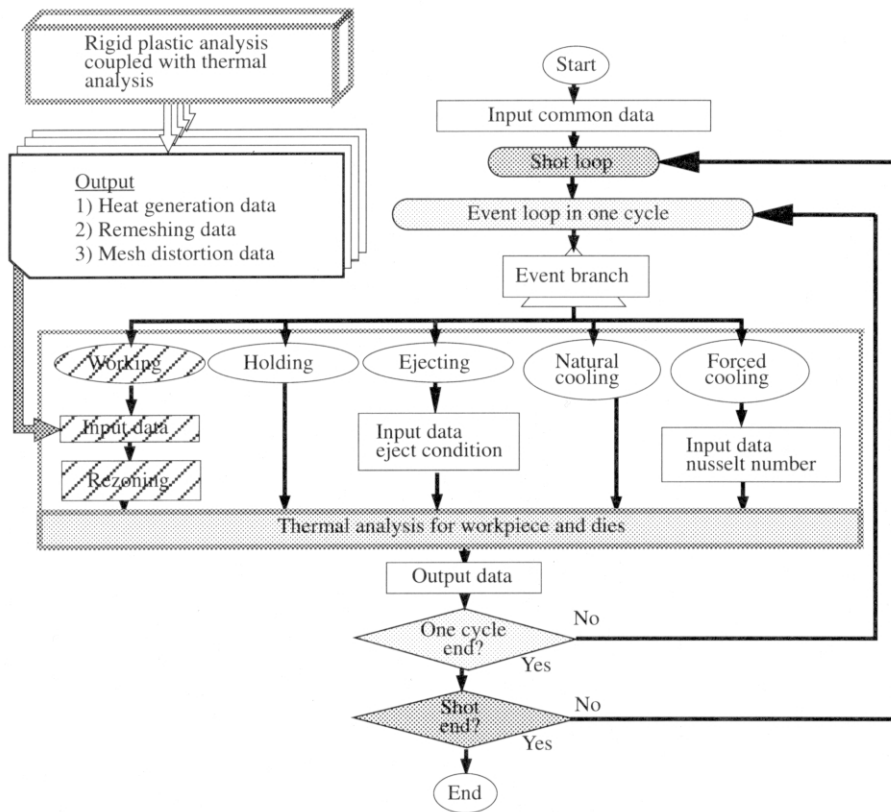


Fig. 3 Flow chart of thermal analysis under continuous operating.

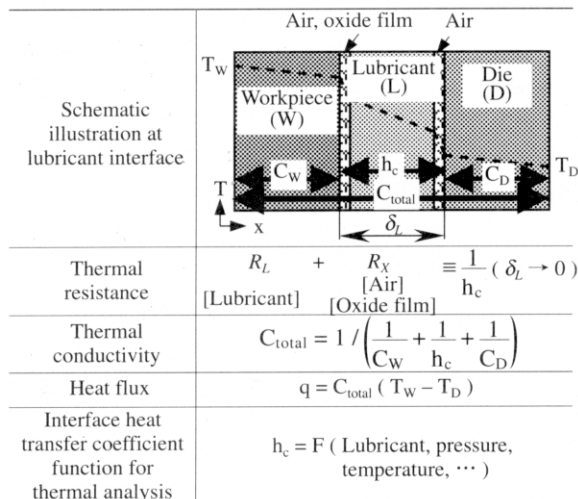


Fig. 4 Interface heat transfer coefficient h_c for thermal analysis.

定している。被加工材、金型の熱物性値として、密度、比熱、熱伝導度、熱拡散率が必要となる。これらの値は温度に対する区分データの形で扱っている。熱物性値については文献値やメーカー公表値が利用できる場合が多い。強制冷却ではヌッセルト数が必要となる。

鍛造加工の温度解析では、被加工材と金型間の界面熱伝達特性が重要である。鍛造加工を対象とする界面熱伝達特性の測定例^{9, 10)}は少なく、種々の加工条件に対応したデータを文献等から引用できる状況にない。

そこで、この熱伝達特性を、以下に述べる界面熱伝達係数として解析へ導入した。

2. 2. 2 界面熱伝達係数の取扱い

Fig. 4に示すように、被加工材と金型の界面では潤滑剤による熱抵抗 R_L の他、空気層や酸化膜による熱抵抗 R_X が存在する。 R_L や R_X が加工条件に合わせて定量化することは現状では困難なため、これ

らをすべて包括した熱抵抗の逆数を、熱伝達率と同次元の界面熱伝達係数（以下 hc ）とし、この hc を加工条件と関係づけて求めて、解析に導入することにした。実際には界面に層厚さ δ_L が存在するが、ここでは $\delta_L = 0$ という扱いになる。界面での真実接触率や潤滑剤、酸化膜の存在率などから熱伝達特性を求めるトライボロジータ的な研究¹¹⁾も行われているが、本研究では、 hc の解析への導入を意図し、使用型材・被加工材・潤滑剤という加工条件の下で温度や面圧との関係として、 hc を実験的に求めることにした。

2.2.3 測定手順

Fig. 4に示した扱いにより、被加工材及び型内の温度から hc を求めることができる。即ち、対象とする加工条件に近い状態で、高温の被加工材に型を接触させ、その時の型内部特定位置の温度上昇量 ΔT と時間 t との関係を測定する。また、この測定系に対する温度解析を行い、 hc をパラメータとして、実測に対応する位置の ΔT と時間の関係を、校正曲線として作成する。これに上記測定データを重ね合わせ、測定値に近い校正曲線の hc をその加工条件での値として求める。

この方法では、解析の対象工程と同じ潤滑剤を使用

し、所定の被加工材温度と面圧の下で測定するため、潤滑剤の種類・面圧・温度という点では、対象に近い条件の hc が求められる。しかし、塑性流動や表面積拡大等に起因する潤滑剤の介在状態の変化を充分には再現できない点が課題である。

Fig. 5に当所で用いている測定系を示す。内部に熱電対を挿入した外径12mm、内径6mmのリング状のポンチを被加工材に接触させ、加工中のポンチ内部の温度を測定した。

測定系に対応する温度解析モデルをFig. 6(a)に示す。ポンチ測温部上部の切り込みは、熱電対を挿入するためのスペースである。実測では熱電対挿入用の穴がある。この穴に相当する体積分を軸対称穴に替えてモデル化しても線分程度と全体の体積からみて非常に小さいため、影響は少ないと判断して解析ではこれを無視した。Fig. 6(b)に温度解析結果の一例を示す。

面圧が大きくて被加工材に塑性変形が生じるような場合には、塑性発熱や摩擦発熱、接触伝熱面積の拡大によるポンチへの熱流入量の増加が考えられるので、変形と温度の連成解析により校正曲線を作成しなければならない。

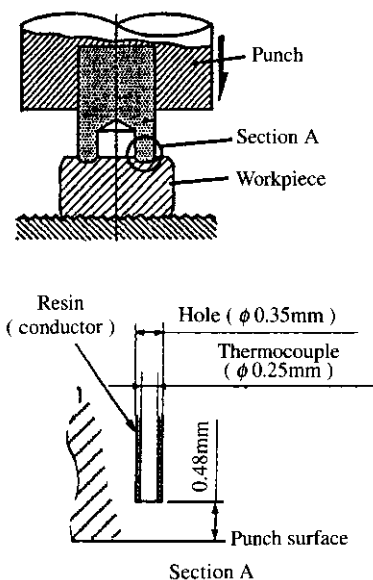


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus used to determine the interface heat transfer coefficient.

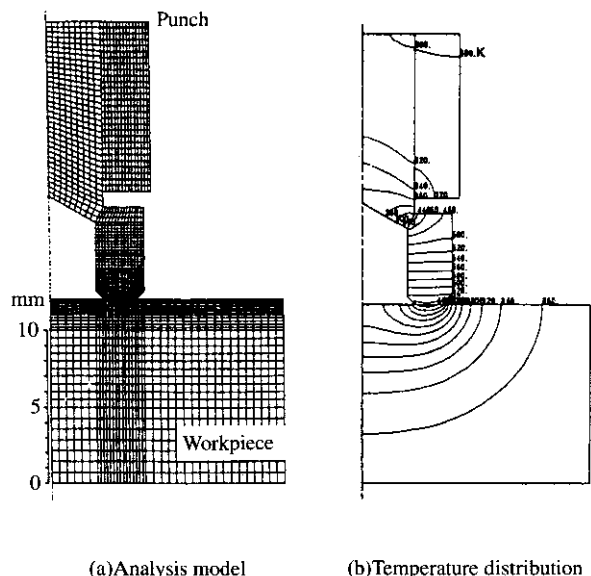


Fig. 6 Analysis model for calibration curves used to determine the interface heat transfer coefficient and an example of temperature distribution (contact time 2.0s).

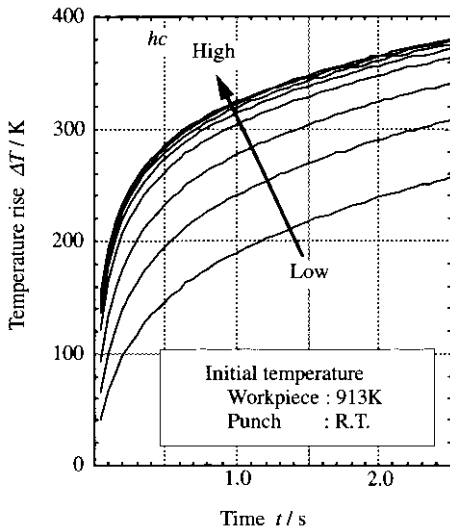


Fig. 7 Temperature rise curves calculated for various values of interface heat transfer coefficient (hc).

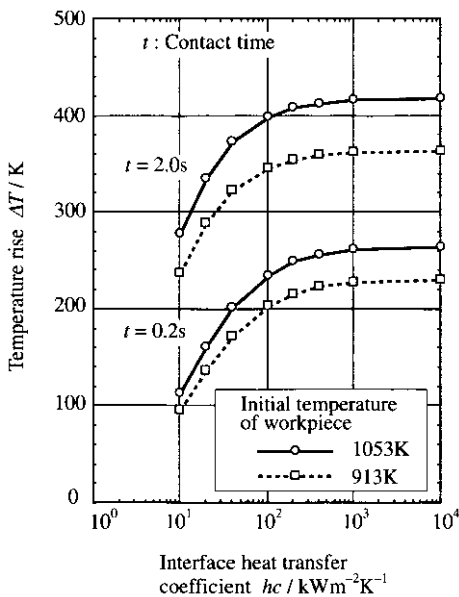


Fig. 8 Temperature rise versus interface heat transfer coefficient at contact time 0.2s and 2.0s.

2.2.4 温度解析による測定条件の検討

Fig. 7にポンチをSKD61, 被加工材をS35Cとして, hc を変化させた時の温度上昇量 ΔT を示す。接触時間とともに温度は上昇し, その ΔT は hc が高いほど大きくなる。しかし, hc が大きくなるにつれて, hc が ΔT に与える影響は少なくなる。また, hc による ΔT の差は接触時間とともに拡大しているが, 0.5s以後ではほとんど変化していない。

Fig. 8に温度上昇量 ΔT と hc の関係を示す。いずれの被加工材初期温度, 接触時間でも hc の増加に対応する ΔT の増加割合は, hc が大きくなるにつれて小さくなっている。温度測定の精度などから $\pm 5K$ 程度は同レベルと考えられることから, この実験条件の場合, hc がおよそ $100kW/m^2K$ 以下ではその絶対値の精度が必要であり, それ以上であれば, hc の絶対値精度はそれほど重要ではないと考えられる。但し, 条件が異なればこの境界値は変わる可能性があり, 確認の必要があると考えている。

型温測定位置 (接触面からの距離) によって温度上昇量は異なり, hc の測定感度に影響を及ぼす。**Fig. 9**は, 縦軸に示した hc の各範囲における上下限に対応する温度上昇量の差を, 表面から0.1, 0.5, 1.0mmの各位置及び接触時間0.2, 2.0sで示したものである。型材SKD61, 被加工材S35C, 被加工材初期温度1053Kの場

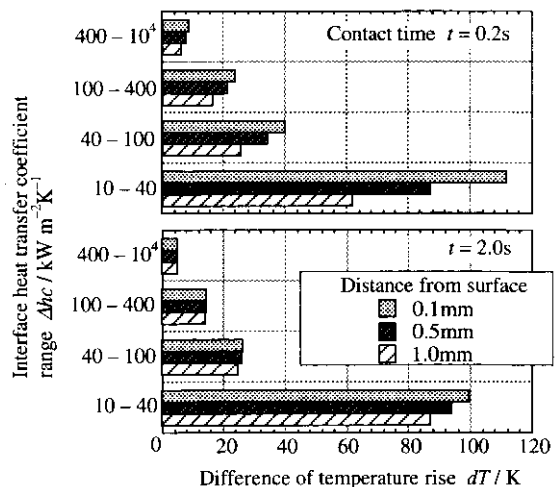


Fig. 9 Temperature rise for various values of interface heat transfer coefficient at contact time (0.2s and 2.0s).

合の例であるが、接触時間が短く、接触面からの距離が近いほど温度上昇量の差は大きく感度がよい。しかし、温度測定の精度 ($\pm 5\text{K}$) を考慮すれば、接触面からの距離が0.5mm、接触時間が2.0s程度でも、必要とする温度上昇量の差が充分測定できると考えられる。

以上の結果から、測温部をポンチ先端部にFig. 5に示すように設けた。直径0.35mmの穴を接触面から約0.5mmの位置まであけ、この穴に直径0.25mmのシース熱電対を熱硬化性導電性樹脂剤とともに挿入して、温度検出部とした。測温部は軸方向にほぼ1次的に温度分布が形成されると解析された部分である。また、極細線のシース熱電対 (90%出力の応答時間40ms) と銀をフィラーとする導電性樹脂 (熱伝導率はアルミ合金と炭素鋼の中間程度) を使用することで、応答性の確保をはかった。

3. 結果

3. 1 各種条件下での界面熱伝達係数

Fig. 10に、型材SKD61、被加工材S35C、面圧1000MPaで、無潤滑、黒鉛系潤滑剤 (日本アチソン Deltaforge 144)、低融点ガラス B_2O_3 ^{1,2)} の場合について、温度上昇量の測定結果を示す。これは校正曲線上に温度上昇量の測定値をプロットしたものである。測定値の接触初期の温

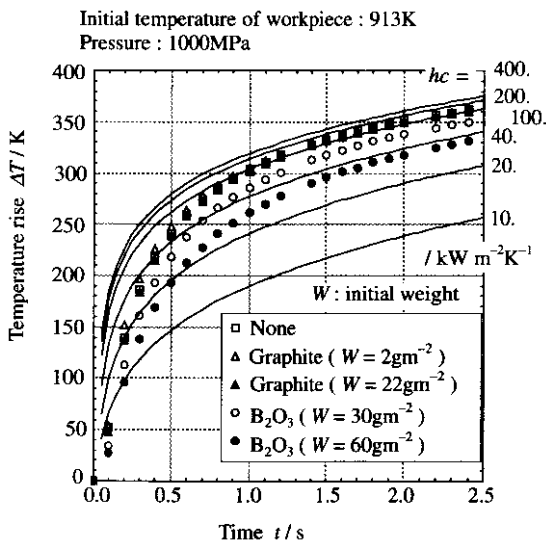


Fig. 10 Comparison of measured temperature-versus-time data with calibration curves for evaluating interface heat transfer coefficient (hc).

度上昇の立ち上がりは校正曲線のそれと比べ小さく、測定値が校正曲線と交差する傾向があった。その原因として、 hc の非定常変化や、一定荷重となるまでの過渡時間10ms、熱電対の応答性40msなどの測温の応答性などが考えられる。しかし、1s以後では、潤滑剤の種類や量により温度上昇量に違いが生じていることから、2.2.4での考察結果に基づいて、2.0s前後の値から hc を見積もることにした。

Fig. 11に各種条件での hc を示す。今回の条件では、無潤滑及び黒鉛は初期塗布量に関らず $100\text{kW/m}^2\text{K}$ 以上を、 B_2O_3 は初期塗布量 30g/m^2 で $50\sim 60\text{kW/m}^2\text{K}$ 、 60g/m^2 で $30\sim 40\text{kW/m}^2\text{K}$ を示した。 B_2O_3 は黒鉛に比べて金型への熱負荷が小さいとの実験結果^{1,2)}と対応する。

また、黒鉛系潤滑剤では、塑性変形のない条件でも hc が $100\text{kW/m}^2\text{K}$ 以上であり、Fig. 8の結果から高面圧で表面積拡大も大きい塑性変形部の hc としては $100\text{kW/m}^2\text{K}$ 程度を使用すればよいと考えられる。

Fig. 12に型材をマトリックス系ハイス、被加工材を中炭素鋼として、無潤滑及び水溶性白色潤滑剤を型潤滑剤とした場合の面圧と hc の関係を示す。被加工材の初期温度や潤滑の有無に関わらず、80MPa程度の低面圧では hc は $15\sim 20\text{kW/m}^2\text{K}$ 程度の小さな値を示し、面圧が高いほど大きくなっている。

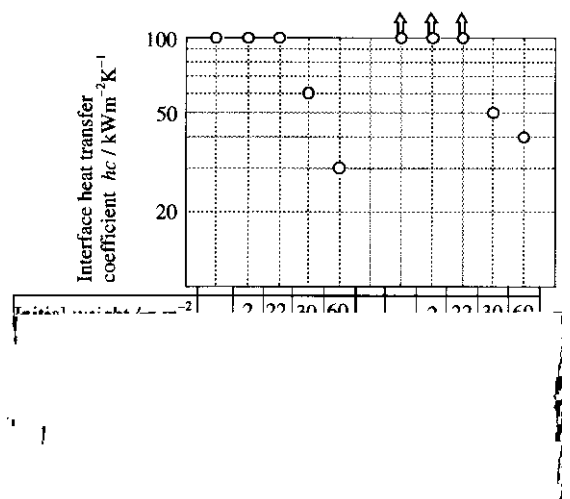


Fig. 11 Comparison of interface heat transfer coefficient.

以上の測定結果から、解析に用いる hc は、型材、被加工材、潤滑剤の種類、量だけでなく、金型と被加工材の界面における面圧 p 、温度 T を考慮した値を採用する必要があると考えられる。

3.2 温間後方せん孔加工の解析

3.2.1 解析モデルと温度分布

後方せん孔加工を例に取り上げ、連成解析結果と解析パラメータが解析結果に及ぼす影響について示す。**Fig. 13**に初期要素分割モデルを示す。加工条件は、被加工材がS30C、加工初期温度が、被加工材は1073K、

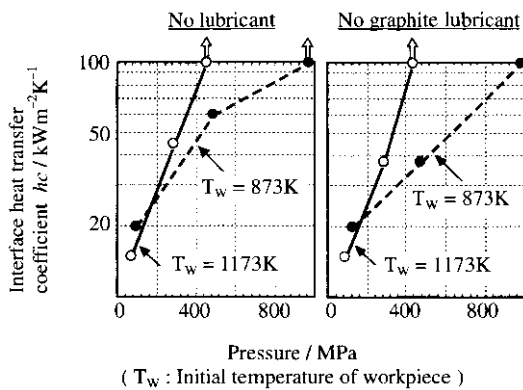


Fig. 12 Effect of pressure level on interface heat transfer coefficient.

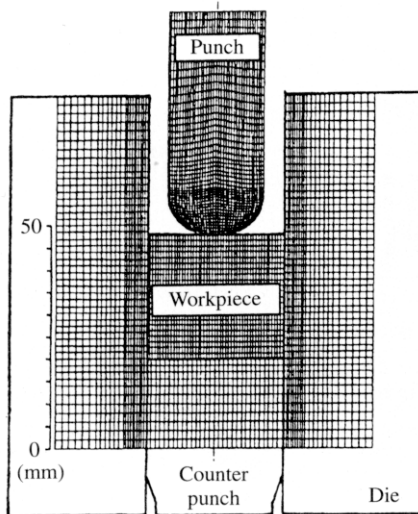


Fig. 13 Analysis model for warm backward extrusion.

ポンチは373K、それ以外のダイスは423Kである。クーロン摩擦係数 μ 、界面熱伝達係数 hc は黒鉛系潤滑剤を想定して、それぞれ0.2、 $100\text{kW/m}^2\text{K}$ とした。**Fig. 14**に温度分布を示す。左側が加工途中（加工開始から0.065s後）、右側が加工終了時（0.262s後）である。加工途中では、ポンチと被加工材が接触してからの時間が短いため、塑性変形により生じた発熱分布に対応して、ポンチ底面近傍で高温となっている。機械式プレスの特徴から、加工終了時では、変形の進行がほとんどなくなって時間が経過するため、被加工材から金型への熱の流出が進み、ポンチ底面より1.2mm程度被加工材内部で高温域が生じている。

3.2.2 型温上昇に及ぼす解析パラメータの影響

Fig. 15にポンチ各部の表層（深さ0.5mm）の温度上昇を示す。**Fig. 14**と同一の条件Aで各部の温度を比較すると、コーナー部、ランド部、ノーズ部の順に上昇量は大きくなっている。ポンチの温度上昇量に対する μ と hc の影響をコーナー部で調べたところ、条件Aを基準にして、 μ を0.07と小さくした条件Bで約20K、 hc を $20\text{kW/m}^2\text{K}$ とした条件Cで約110Kの温度上昇量が減少した。これは、それぞれ摩擦発熱、熱流入の減少によると考えられる。この様に摩擦特性と界面熱伝達特性が温度解析結果に及ぼす影響は強いと考えられる。

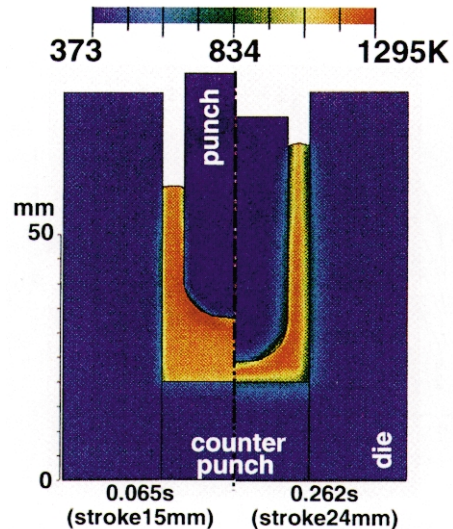


Fig. 14 Temperature distribution at various stroke.

3.3 温間前方押し出し加工における金型熱負荷解析

3.3.1 対象工程

Fig. 16に示す前方押し出し加工を対象として、金型の熱負荷解析を行い、金型温度の実測値と比較した。ビレットは中炭素鋼で、鍛造温度1193Kで成形している。加工前のダイス温度は約420Kであった。ストローク数30spmのトランスファープレスを用い、4ストロークに1回、鍛造を行っている。潤滑剤は、Fig.12の白色系潤滑剤であり、4本の円形ノズルからダイス円錐面に吹き付けている。エアブローも同じノズルで行っている。操作条件はFig.16(c)に示す様に、1サイクル8sで、加工（操作時間0.16s）、被加工材保持（同0.21s）、イジェクト（同0.17s）、自然空冷（0.38s）を経て、エアブロー（同1.11s）をはさむ2回の潤滑剤吹き付け（0.78s、1.0s）と最終のエアブローで構成されている。

被加工材の変形抵抗は、相当ひずみと温度の関数として扱い、ひずみ速度依存性は無視した。摩擦特性は温度の関数として求めた。被加工材と金型間の h_c は、面圧依存性を区分データとして導入した。但し、押し出し軸部は表面積拡大が大きく、低面圧でも熱が流入しやすいと考えられるため、図に示すものより高い値を設定した。潤滑剤及びエア吹付け時の強制熱伝達係数 h は、円形ノズルによる噴流に対するMartinの経験式¹³⁾を利用した。但し、この式では流体の跳返りの影響は考慮されていない。

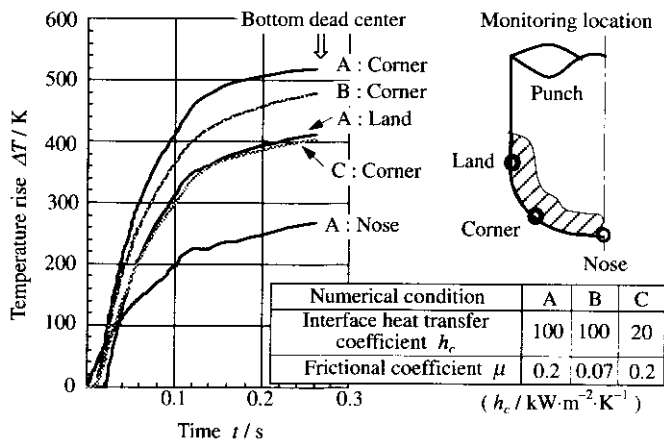


Fig. 15 Surface temperature rise under three numerical conditions.

型温の測定位置は、Fig. 16に示す押し出しアール部のP点、押し出し軸部のQ点とし、型表面からの距離 L は1.2mmである。測定方法は h_c の測定と同様である。Fig. 17に初期解析モデルを示す。金型は、急激な温度勾配となる表層を0.16mm幅に細かく分割した。

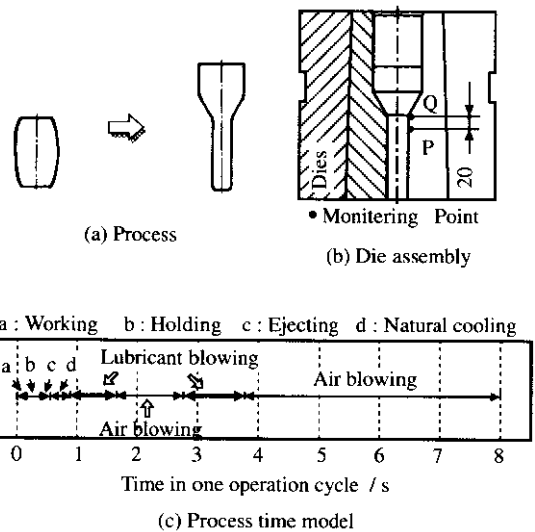


Fig. 16 Warm forward rod extrusion under actual operating.

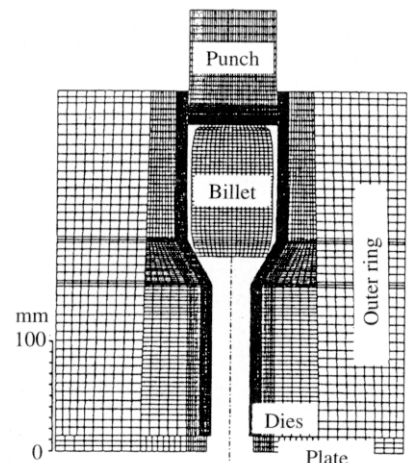


Fig. 17 Analytical model for warm forward rod extrusion.

3.3.2 熱負荷状況

1サイクル中の温度変化をFig. 18に示す。被加工材が型に接触して成形が始まると、温度は上昇を始め、イジェクト操作（0.54s）前後に最高温度を示す。1サイクル終了時に温度上昇量はゼロに戻らず、蓄熱され、

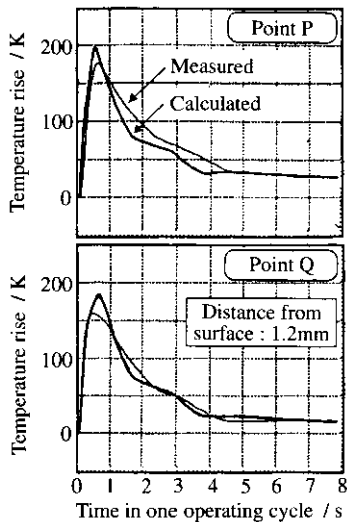


Fig. 18 Variation of temperature with time in one operation cycle.

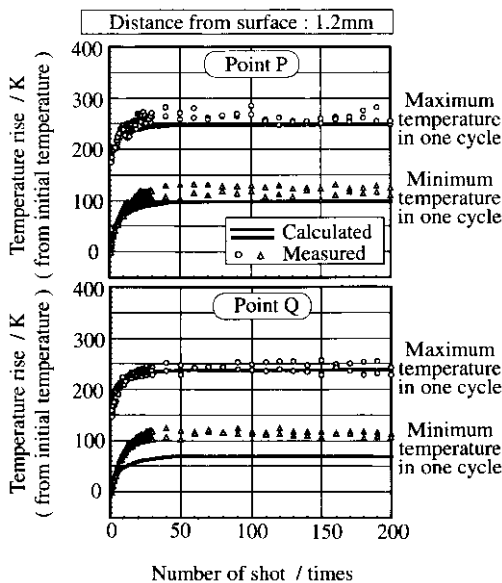


Fig. 19 Temperature rise under operating.

その量はP点の方が多い。解析による最高温度上昇量、変化パターン、1サイクル終了時温度上昇量はいずれも測定値に概ね近い値となっている。

1サイクル中の最高・最低温度の推移をFig. 19に示す。解析値より実測値が高く、特に最低温度で差が大きくなっているのがみられるが、解析値、実測値とも約30ショットで定常状態になっている。計算精度をより高めるためには、界面熱伝達係数や強制熱伝達係数の精度をさらに検討する必要があると考えている。

解析によって求めた型表層部の熱負荷をFig. 20に示す。Q点 $L = 0.1\text{mm}$ では、加工終了直後に最高温度を示す。これに対し、P点ではイジェクト終了直後に最高温度を示す。これは、P点が加工中はQ点ほど熱負荷を受けないが、イジェクト終了直前まで被加工材と接触し、かつ摩擦発熱を受ける位置にあるためと考えられる。また、 $L = 0.1\text{mm}$ ではQ点の最高温度の方がP点のそれより高いが、それより内部ではP点の方が高い。これは、Q点では短時間で大きな熱流入があるが、流入する熱の総量としてはP点の方が多いためと考えられる。P点の温度振幅は400Kを超えていた。

このように、隣接する損傷部であっても、熱負荷の受け方が明らかに異なっている点など、型内部の測温では明らかにできないような表層部の温度変化パターンを解析によって推測することができる。

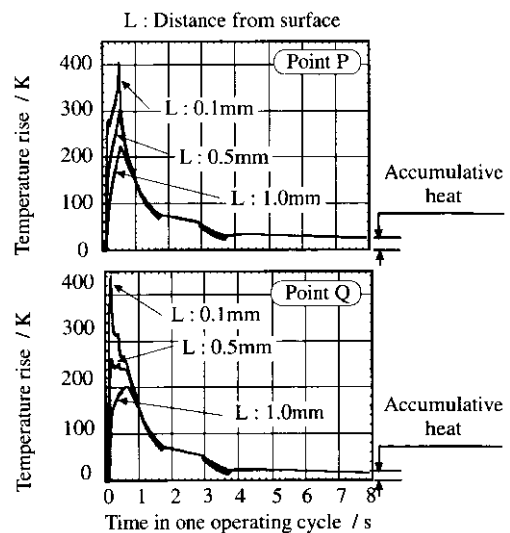


Fig. 20 Variation of temperature with time in one operation cycle.

4. まとめ

加工、製品保持、潤滑剤吹き付けなどの一連の操作からなる鍛造時の熱と被加工材の変形に関する数値解析プログラムを開発し、被加工材内のひずみ・温度履歴、金型の熱負荷などが求められるようになった。また、鍛造加工の温度解析に不可欠な被加工材と金型間の界面熱伝達係数 hc を求めるために、数値解析による校正曲線と型内部の測温を組み合わせての方法を考案した。

今後、この連成解析技術は、金型表面温度と潤滑剤と特性との関連や、製品材質、型寿命予測への展開の足がかりとなると考えている。また、 hc の測定方法については種々の条件での hc データの蓄積と、それを利用した解析と測定値との比較を積み重ねてさらに評価をする必要があると考えている。

本研究にあたり、温間前方押出しの温度測定において、多大な御協力をいただいた豊田工機(株)自動車部品生産技術部に厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 森謙一郎, ほか2名: 日本機械学会論文集(A編), **45**-396(1979), 955
- 2) 矢野祐司, 林稔: 第4回日中精密鍛造シンポジウム, (1992), 39
- 3) 小坂田宏造, ほか2名: 平成2年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1990), 241
- 4) 日本塑性加工学会: 非線形有限要素法, (1994), コロナ社
- 5) Osakada, K., et al.: Int. J. Mech. Sci., **24**-8(1982), 459
- 6) 団野敦, 中西広吉: 平成元年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1989), 587
- 7) Osakada, K., et al.: Annals of the CIRP, **30**-1(1981), 135
- 8) Kunigi, M.: J. Sci. Res. Inst., Jpn, **30**-2(1954), 15
- 9) Semiatin, S. L., et al.: Trans. ASME, J. Eng. Ind., **109**(1987), 49
- 10) 済木弘行, ほか2名: 塑性と加工, **30**-336(1989), 51
- 11) 済木弘行, ほか3名: 平成3年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1991), 521
- 12) 野々山史男, ほか3名: 塑性と加工, **34**-393(1993), 1166
- 13) 日本機械学会編: 伝熱工学資料, (1986), 317

著 者 紹 介



中西広吉 Koukichi Nakanishi

生年: 1960年。

所属: 材料加工研究室。

分野: 塑性加工, 特に鍛造加工のコンピュータ支援技術に関する研究。

学会等: 日本塑性加工学会会員。

平成6年度日本塑性加工学会 会田技術奨励賞受賞。



野々山史男 Fumio Nonoyama

生年: 1952年。

所属: 材料加工研究室。

分野: 塑性加工の研究。

学会等: 日本塑性加工学会, 軽金属学会会員。

平成7年度日本塑性加工学会 技術開発賞受賞。