

# 成形中の工具温度および応力状態のモニターの試み

前川佳徳\*

## 1. 緒言

鍛造等の塑性加工で、成形中の工具の温度や応力状態を知ることは、工具寿命予測や成形精度管理に有効である。これらの温度・応力の予測に、有限要素法等の数値解析手法がよく用いられてきたが、解析に必要な境界条件である、素材から工具に負荷される熱流束・荷重分布等の評価が困難である。それらが適当に仮定され、信頼性の低いものの場合、計算そのものは高精度で行われても、得られる解の精度には疑問が残った。そこで、信頼性の高い予測値を得るために、実測値を用いることに拘って、成形中の測定可能箇所のモニター情報から逆アプローチで、知りたい箇所の情報（あるいは工具全体の情報）を求める方法を試みた。逆アプローチには、数値解析手法（CAE）を用いている。

この方法は事前予測にはならないので、工具設計段階では仮定された境界条件で得られた温度・応力状態が用いられ、本手法は実際の工具使用時に、その最適使用条件を決定したり、使用時の工具寿命管理を行うのに有効利用されることになる。ただし、逆アプローチ時に、解析に必要な境界条件が同定されるので、その後と同様な成形に対しての設計を行う場合には、事前予測に有用なデータベースを得る手法となる。

さて、上記のように、工具使用時に本手法により得られる情報を有効利用しようとする、リアルタイムでの処理が必要となる。しかし、CAEによる逆アプローチにはかなりの時間を必要とする。そこで、事前に測定可能箇所と知りたい箇所の関係をCAEによりデータベース化しておき、ニューラルネットワーク（NN）で学習させて、モニター情報からNNでリアルタイムに知りたい箇所の情報を提供するシステムの試みも行った。

本研究では、高温間鍛造における型表面温度履歴および型寿命の予測への適用をまず行い、現在冷間鍛造における型応力状態予測への適用を試みている。本報告では、高温間鍛造での工具温度モニターの試みを中心に研究成果を紹介し、工具応力状態のモニターの試みについては、その考え方を紹介する。

## 2. 高温間鍛造での工具温度モニターの試み

### 2.1 高温間鍛造実験および温度モニター方法

図1に、実験装置の概要を示す。採用した鍛造工程は、丸棒を軸方向すえ込み加工後、前方押し出し加工するもので、その前方押し出し型をモニター対象とした。

試験片（丸棒素材）には炭素鋼（S50C）を使用し、形状は直径37.0mm、高さ52.2mmとした。加熱には高周波誘導加熱装置を用い、試験片加熱温度としては700℃、800℃、900℃の3種類を採用した。

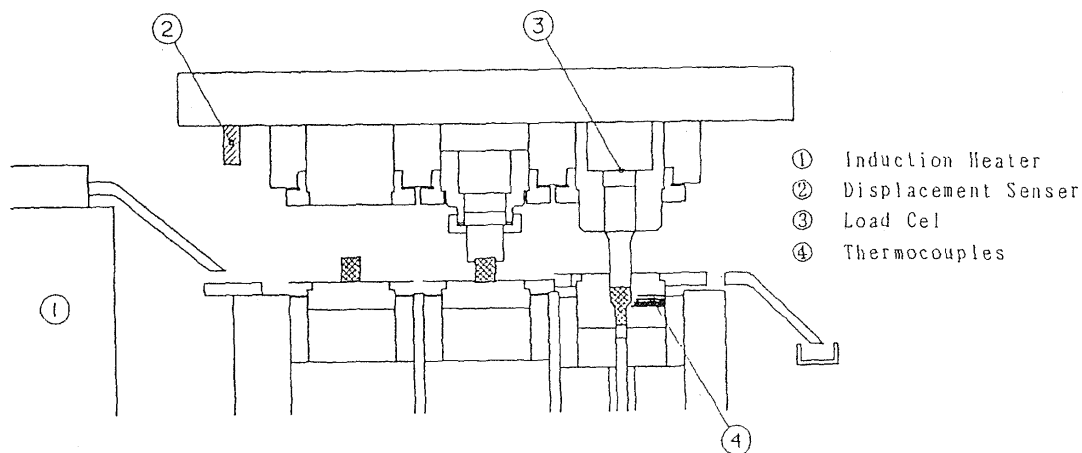


図1 実験装置概要

使用鍛造機械はナックルジョイント式機械プレス（アイダエンジニアリング製PMX-L2-1000）で、加圧能力9.8MN、ストローク長さ400mm、ストローク数17spmである。

前方押し型およびパンチには、温間鍛造用鋼（日立金属製 YXR33）を用いた。前方押し型の形状は図2に示すとおりで、押し角90°、断面減少率75%を採用した。

潤滑には、デルタフォージ 182（日本アチソン製）を使用し、水で10%に希釈した潤滑剤を、スプレーガンによりプレスサイクルにあわせ自動噴霧した。

以上の鍛造条件により、各試験片温度について、一定タクトで5,000ショットの連続成形を行った。

なお、図1に示すように、すえ込み加工の前にアイドル工程を設けているが、ここでの試験片温度を放射温度計で測定し、試験片加熱温度とした。

型温度の測定（モニター）は、図2に示すように型の半径方向に放電加工による3mmφの細穴をあけ、型表面から6mmの位置に白金-白金ロジウム熱電対（0.1mmφ）をスポット溶接して、そこでの温度を測定した。熱電対の固定と絶縁として、放電加工細穴にはマグネシアの粉末を詰めた。

温度測定結果は、A/D変換され、パーソナルコンピュータのハードディスクに記録される。

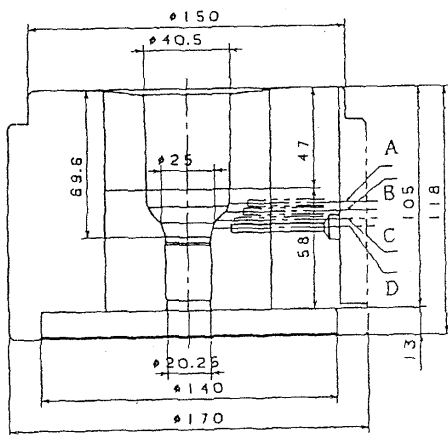


図2 型形状と温度センサ取り付け位置

## 2.2 温度モニター結果と逆アプローチ手法による型表面温度履歴の予測

連続成形加工での型表面付近（図2のD部）の温度履歴の測定（モニター）結果を、素材（試験片）温度別に図3に示す。1ショット目から、成形の繰り返しの伴い型温度は上昇し、あるショット数を超えると、いわゆる準定常温度状態になって、成形サイクル毎の型温度変化は繰り返すが、全体的な温度上昇は見られなくなる。

各素材温度別に、測定位置D部での準定常温度状態の型温度変化を図4に示す。図4の結果から、素材温度が高くなるほど測定位置での型温度は高くなるが、温度振幅は小さくなるのがわかる。

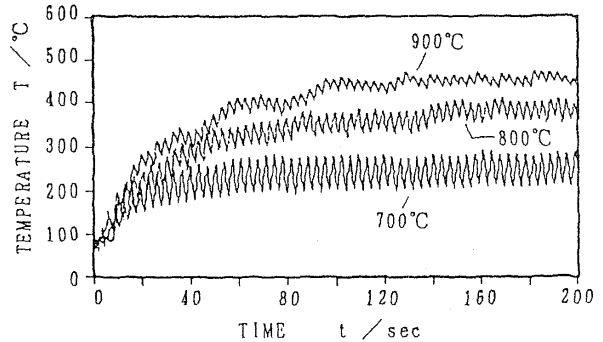


図3 素材温度別の型温度履歴（測定位置D部）

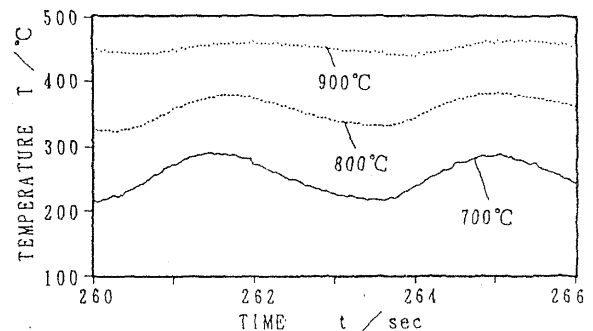


図4 素材温度別の型温度履歴定常状態での温度変化（測定位置D部）

図5には、各測定位置での定常温度状態の型温度変化を示す（ただし、素材温度900°Cについてのみ）。これより、各測定位置で温度値が異なるとともに、温度振幅値にも違いのあることがわかる。

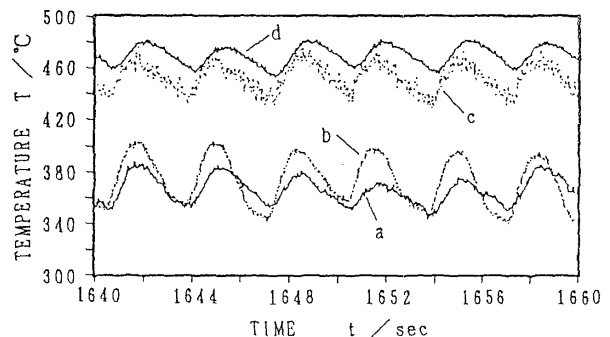


図5 各測定位置での型温度履歴定常状態での温度変化（素材温度900°C）

型表面付近の温度モニター結果から、型表面温度を逆アプローチ手法で求める手続きの詳細については、既報<sup>1)</sup>で述べているので、ここでは省略する。図3のD部での型温度履歴測定結果の1ショット目の温度変化を用いて、非常熱伝導解析での未知境界条件を同定し、それを用いて型全体の温度履歴を解析したが、図6に素材温度900°Cの場合の型表面での温度履歴解析結果(s2)と、型温度測定位置での温度履歴解析結果(s1)を示す。

s1の解析結果は、図3の実験での測定結果と比較検証するために求めたものであるが、ほぼ良好な一致を得られた。図6より、型温度測定位置での温度履歴(s1)は600°Cを越えないが、型表面での温度履歴解析結果(s2)は、1ショット目より600°Cを越える(型材が軟化される)温度状態になっていることがわかる。これは、素材温度が700°C,800°Cの場合も同様であった。素材温度が700°Cの場合でも、1ショット目での型表面温度はほぼ600°Cになっていた。したがって、素材温度が700°C,800°C,900°Cのいずれの場合でも、1ショット目より型表面付近は軟化されていくことになる。

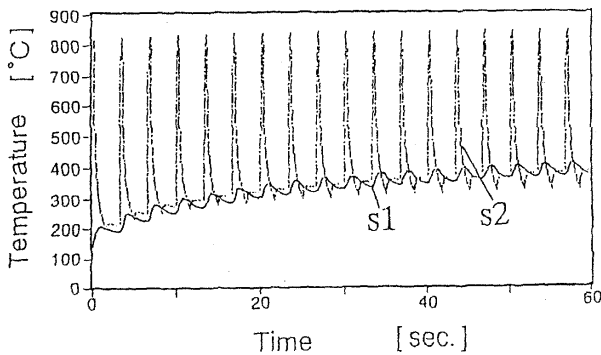


図6 定常状態に至るまでの型温度履歴の逆アプローチ解析結果  
(S1: 温度測定位置, S2: 型表面)

### 2.3 型表面付近の型軟化状態の測定結果と予測温度履歴からの型軟化推定値との比較

素材温度を700°C,800°C,900°Cとして、それぞれについて一定タクトで5,000ショットの連続成形を行い、成形後の各型を切断して、断面の硬度分布を測定した。素材温度900°Cの場合、図2に示すB部とD部について、型表面からの距離と硬度との関係を図7に示す。この結果から、B部よりD部で硬度低下(軟化)が大きいこと

(このことは、図5の各測定位置での準定常温度状態の型温度モニター結果と関連している)、および型が軟化されるのは、型表面より1mm程度までの範囲であることがわかる。(他の素材温度の場合も同様であった。)

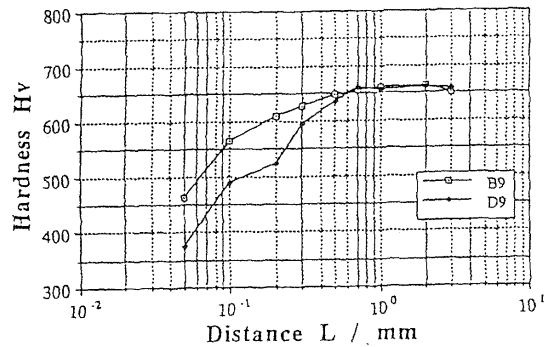


図7 型表面からの距離と硬度の関係  
(素材温度900°C, 5000ショット連続成形後)

本研究では、測定可能箇所での温度測定値を用いて、知りたい箇所である型表面での温度履歴を逆アプローチ手法で求め、さらにその結果を用いて、型表面付近での型軟化状態(型寿命)を予測することもその目的とする。

型表面での温度履歴予測結果から型軟化状態を予測する方法は、湯浅らが提案したもの<sup>2)</sup>を応用しているが、これについては既報<sup>3)</sup>で報告しているため、詳細は省略する。まず、型温度履歴が準定常状態になった1サイクルの温度変化における600°C以上の温度変化の平均温度と、1サイクルで600°C以上になっている時間を求める。今回の実験結果を用い逆アプローチ手法で得た型表面温度履歴の解析結果より、上記の平均温度と時間を求めたものが表1である(素材温度別に示してある)。これより、あるトータル・ショット数(生産数)後の型軟化は、平均温度と600°Cを越えている時間のトータル(表1の時間×生産数で、表2に保持時間として示す)によって、型材(YXR 33)の焼きもどし曲線を用いて求められる。

5,000ショット連続成形後の型軟化状態の実測値は求められているので(図7参照)、図2D部の型表面について上記手法により5,000ショットでの型軟化状態予測値(解析結果)を求め、実測値と比較したものが表3である。表3の実測値と解析結果の差異をどう評価するかということであるが、この程度の一貫性があれば、型寿命を予測するには有用であると考えられる。

表1 定常状態での型温度変化における  
600℃以上の時間と平均温度（解析結果）

| 素材温度 [°C] | 時間 [sec] | 平均温度 [°C] |
|-----------|----------|-----------|
| 700       | 0.28     | 630       |
| 800       | 0.34     | 670       |
| 900       | 0.40     | 715       |

表2 ショット数に対する600℃以上の保持時間

| 生産数<br>[個] | 型温 保時 経過 |          |          |
|------------|----------|----------|----------|
|            | 700℃ [h] | 800℃ [h] | 900℃ [h] |
| 5000       | 0.39     | 0.47     | 0.56     |
| 10000      | 0.78     | 0.94     | 1.11     |
| 20000      | 1.56     | 1.89     | 2.22     |
| 30000      | 2.33     | 2.83     | 3.33     |
| 50000      | 3.39     | 4.72     | 5.55     |

表3 5000ショット連続成形後の型硬度の実測値と解析による予測結果との比較

| 素材温度 [°C] | 実測値           |          | 解析結果          |  |
|-----------|---------------|----------|---------------|--|
|           | 硬度 [HV] [HRC] | 焼戻しパラメータ | 硬度 [HV] [HRC] |  |
| 700       | 500 [49]      | 17.7     | 577 [54]      |  |
| 800       | 505 [49]      | 18.6     | 487 [48]      |  |
| 900       | 375 [39]      | 19.5     | 346 [36]      |  |

#### 2.4 ニューラルネットワークによるリアルタイム・モニターの試み

解析による予測手法での問題点は、型温度履歴の準定常状態での1サイクルの温度変化を連続成形中で不変としていることである。実際の鍛造では、同条件一定タクトで連続成形していても、1サイクルの温度変化は種々の影響で全く同じ状態の繰り返しというわけにはいかない。そこで、より厳密に型軟化状態を把握する必要があるときは、各ショット毎の温度状態のモニター結果から型表面温度変化を求め、軟化に寄与する度合を累積していかねばならない。

この場合、各ショット毎に型表面温度を逆アプローチ手法で求めていたのでは、時間と手間がかかりすぎる。そこで、ニューラルネットワークに測定点の温度変化と型表面温度との関係をあらかじめ学習させておき、測定点での温度モニター情報からリアルタイムで型表面温度を推測するシステムを試みた。

ニューラルネットワークに学習させる、測定点における温度変化と型表面温度との関係のデータは、CAEにより作成した。今回は、型表面温度を400℃から1,000℃までの25℃おきにした場合の25ケースについて、温度測定点での温度変化パターンを求めた。図8に、型表面が500℃の時の、測定点での温度変化パターンを示す。温

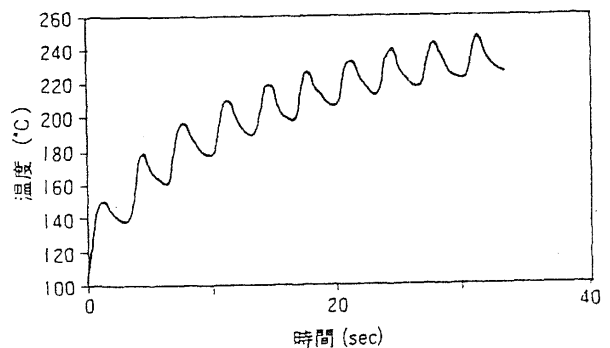


図8 準定常状態までの温度変化シミュレーション

度変化は10サイクル目で準定常状態になったとし、学習の簡略化のため、1サイクル目と10サイクル目の温度変化をニューラルネットワークに学習させた。図9に、型表面温度が500°C, 700°C, 900°Cの場合の、1サイクル目と10サイクル目の測定点での温度変化を参考として示す。

測定点での温度変化パターンの学習には、図9のような温度変化パターンを、時間軸に34、温度軸に30分割し、図10のように2値化の前処理をして用いた。

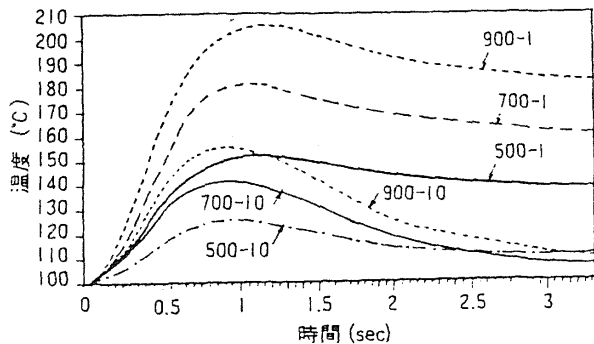


図9 各サイクルの温度変化

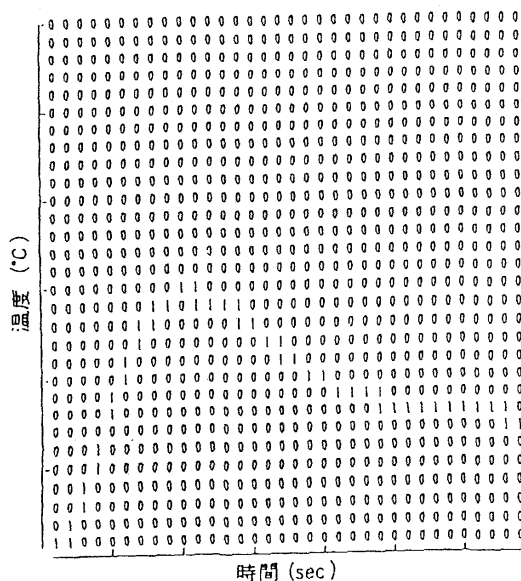


図10 前処理を施した温度変化パターン

使用したニューラルネットワークの構成は、図11に示すとおりで、入力層は30×34個、中間層は9個、出力層は6個のユニットからなる。教師信号は型表面温度で、図11に示すように6つの範囲に分割し、6個の出力層ユニットに対応させた。学習アルゴリズムには、バックプロパゲーション手法を用いた。

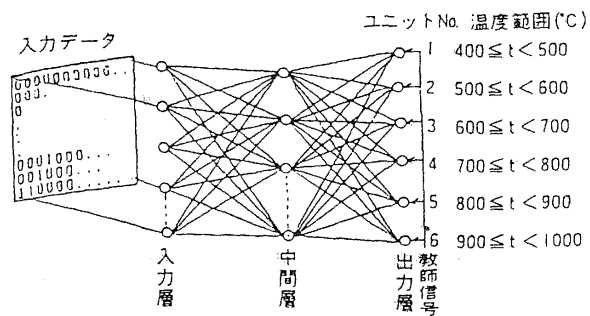


図11 階層型ニューラルネットワークの構成図

ニューラルネットワークの有効性を確かめるために、CAEで求めた540°C, 680°C, 980°Cの1サイクル目、10サイクル目の温度変化パターンを、学習後のニューラルネットワークに判断させ、得られた予測温度値との比較を行った。結果を表4に示す。表4の一番左の列は型表面温度で、2～7列目は各出力ユニット（図11参照）の出力結果を示す。もっとも右側の列は、各出力ユニットの温度範囲の中間値に出力結果をかけ、足し合わせたもので、予測温度値になる。表4より、学習範囲内にあるデータに対しては、ほぼ型表面温度を予測できると判断できる。したがって、このニューラルネットワークを用いての型表面温度のリアルタイムモニターも、利用可能と考えられる。

前述のように、型表面温度のリアルタイムモニターが可能になると、各ショット毎の温度状態のモニター結果から型軟化の度合の累積結果が直ちに求められ、より厳密な型軟化状態の把握（工具寿命管理）が、成形の進行に伴い、リアルタイムで行えるようになる。また、工具の最適使用条件を、成形時に調整する際にも、このモニターシステムは有用なものとなる。

表4 検証結果と予測温度

1サイクル目 (ただし、出力結果は100倍で示す)

| 表面温度  | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | No. 5 | No. 6 | 予測温度    | 誤差    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|
| 540°C | 0.0   | 97.7  | 0.1   | 3.3   | 1.7   | 0.3   | 579.8°C | +39.8 |
| 680°C | 1.7   | 0.0   | 99.8  | 0.2   | 1.3   | 0.1   | 670.3°C | -9.7  |
| 980°C | 0.2   | 0.9   | 0.5   | 0.2   | 2.5   | 98.8  | 970.4°C | -9.6  |

10サイクル目

| 表面温度  | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | No. 5 | No. 6 | 予測温度    | 誤差    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|
| 540°C | 0.0   | 98.0  | 0.1   | 2.7   | 1.5   | 0.3   | 575.5°C | +35.5 |
| 680°C | 0.4   | 0.1   | 93.2  | 0.0   | 0.3   | 0.4   | 613.9°C | -66.1 |
| 980°C | 0.1   | 0.2   | 1.1   | 0.4   | 3.4   | 98.7  | 978.3°C | -1.7  |

### 3. 冷間鍛造での工具応力状態のモニターの試み

高温間鍛造での工具寿命はその温度履歴に支配されるが、冷間鍛造での工具寿命は工具の応力状態の履歴に支配される。

図12は、前方押し加工で1工程中に型が受けるミーゼス応力履歴を、CAEで求めたものである。この結果から、1工程で型が受ける最大の応力振幅値を求めれば、それが型寿命と関連することになる。

ここで、解析に必要な境界条件である素材から工具に負荷される荷重分布を、図12の場合は素材側の変形過程の解析をCAEで行って求めているが、その信頼性の保証は難しい。そこで、この場合にも、信頼性の高い予測値を得るために、測定可能な箇所の応力の実測値を用いて、逆アプローチで工具全体の応力状態を求めることを試みる。

高温間鍛造の場合と違って、冷間鍛造では工具に発生する応力が高いので、応力センサーを工具内に取り付けることは困難と考え、工具表面の応力モニター値を用いて逆アプローチを試みることにした。現在研究が進行中であるので、結果は紹介できないが、可能性の確認は行えた。

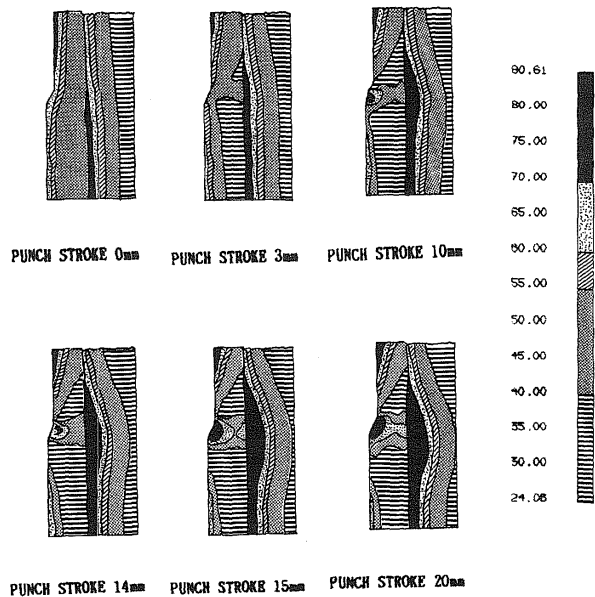


図12 前方押し出しの1工程で型が受けるミーゼス応力履歴の例

### 4. 結言

成形中の工具全体あるいは知りたい箇所の温度や応力状態を、測定可能箇所のモニター情報から逆アプローチ手法で求める方法の提案を、高温間鍛造での型表面温度

履歴予測を具体的例にとって紹介した。

数値解析のみで工具表面温度を予測する場合、成形に伴う素材の発熱、工具と素材間の摩擦発熱、素材から工具への熱伝達率などの正しい評価が難しい。とくに、素材から工具(型)への熱伝達率は、高温間鍛造などの場合、型潤滑状態および素材と型の接触面圧によっても大きく異なってくるため、モデル実験で得られた熱伝達率を用いて熱解析しても、その解の信頼性には疑問が残る。

本研究で提案する方法は、評価が困難なファクターを実測値として取り込んでいるので、精度のよい予測値を得ることができると言える。

また、得られた型表面温度履歴から工具寿命(工具軟化状態)を予測することも行った。さらに厳密に型軟化状態を把握する必要のあるときは、各ショット毎の温度状態のモニター結果から型表面温度変化を求め、軟化に寄与する度合を累積していかねばならない。そこで、ニューラルネットワークにモニター位置の温度変化と型表面温度との関係を学習させ、温度モニター情報からリアルタイムで型表面温度を推測するシステムの紹介も行った。本システムは、成形現場で成形条件選択を行う時の支援として、また使用時の工具寿命管理モニターとして有効である。

リアルタイム・モニター・システムについては、もう少しの開発検討が必要であるが、上記の手法は、鍛造型のみならず、ダイキャスト型、プラスチック成型型、あるいは精密プレスパンチ工具などにも応用できる。また、温度モニターだけでなく、考え方を紹介した応力モニターへの適用も可能である。CAEは、単に事前予測手段としての利用だけでなく、実測値の補間手段、あるいは可視化手段として活用することを考えると、より効果の多い利用ができると考える。

### 謝辞

本研究遂行にあたって、(財)天田金属加工機械技術振興財団より研究開発助成金をいただき、ご支援いただいたことに厚く感謝申し上げます。

また、実験にあたっては、(株)ニチダイにプレス機の使用等、ご協力いただきました。感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 前川佳徳・島崎定・濱家信一:平成4年度塑性加工春季講演会論文集,(1992),471.
- 2) 湯浅紘二・安藤弘行:鍛造技法,26(1986),11.
- 3) 前川佳徳・濱家信一・楊国彬:日本機械学会第3回設計工学・システム部門講演会論文集,(1993),32.

\*大阪産業大学工学部情報システム工学科助教授