

熱影響による工具軟化の逆アプローチ解析結果の検証実験研究

大阪産業大学 工学部 情報システム工学科

助教授 前川佳徳

(平成4年度研究開発助成 AF-92028)

1. 研究の背景

塑性加工中に工具が熱影響を受けて軟化し、それが工具寿命を支配することが見られる。この場合、工具寿命(工具軟化状態)を予測するために、工具表面の温度履歴状態を知りたいが、一般に知りたい工具表面位置の温度測定は困難な場合が多い。

そこで、熱伝導解析により数値解析のみで工具表面温度を予測する試み^{1), 2)}が、これまでなされてきた。ここでの問題は、成形に伴う素材の発熱や工具と素材間の摩擦発熱の正しい評価、および素材から工具への熱伝達率の正しい評価が難しいことである。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³⁾しても、その解の信頼性には疑問が残る。すなわち、数値解析のみで型表面温度を予測した場合、得られる型表面温度値の精度に問題がでてくることになる。

したがって、我々は精度のよい型表面温度予測値を得るために、実測値を用いることに拘って、測定可能箇所の温度測定結果を用い、逆アプローチ手法により知りたい箇所(型表面)の温度状態を求めることを提案し、高温間鍛造への適用を試みた。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。

この試みは、以前に成形性検討のための高温間鍛造実験で実施し、その成果を報告している⁴⁾が、その際には工具の熱影響の検討については十分な検証を行えなかった(完全な一定条件での連続成形ではなかった)。今回は、以前の実験での問題点への改良も加え、新たに熱影響検討のためだけの検証実験を行った。

2. 鍛造実験装置および実験条件

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、前方押し加工するもので、その前方押し型を測定対象とした。

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種類を採用する。

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FMX-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、温度測定対象とした前方押し型の

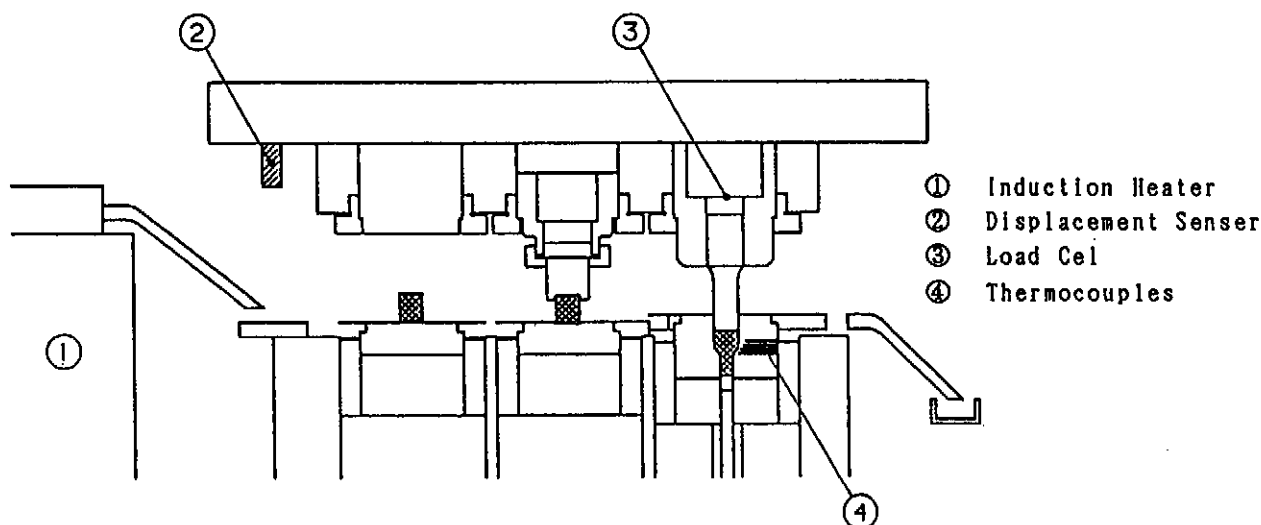


図1 実験装置概要

形状は図2に示すとおりである。押し角90°、断面減少率75%を採用している。なお、型の予熱は行わなかった。

潤滑には、デルタフォーシ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。

3. 温度測定方法

型温度の測定は、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ン（MgO）の粉末を詰める。

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。

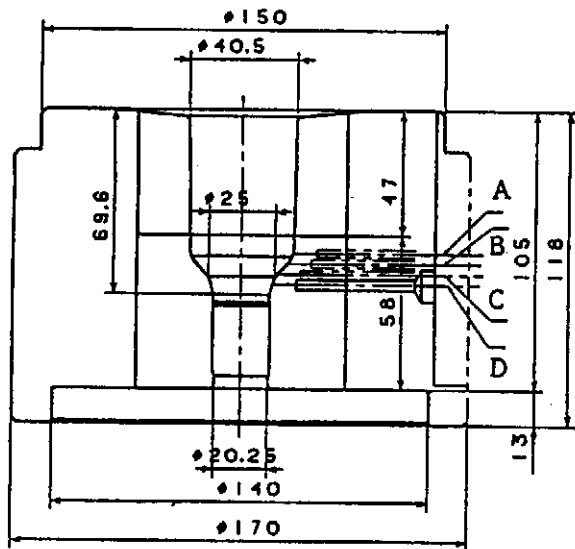


図2 型形状と温度センサ取り付け位置

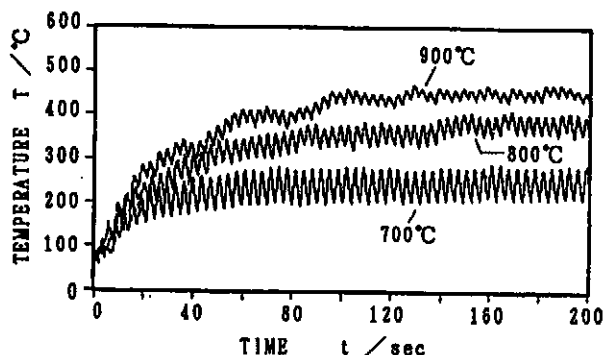


図3 素材温度別の型温度履歴（測定位置D部）

4. 型表面付近の温度履歴測定結果

連続成形加工での型表面付近（図2のD部）の温度履歴測定結果を、素材（試験片）温度別に図3に示す。1ショット目から、成形の繰り返しに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、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ことわかる。

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についてののみ）。これより、各測定位置で当然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。

5. 逆アプローチ手法による型表面温度履歴の予測

型表面付近の温度測定結果から、型表面温度を逆アプローチ手法で求める手続きについては、既報⁴⁾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、非定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

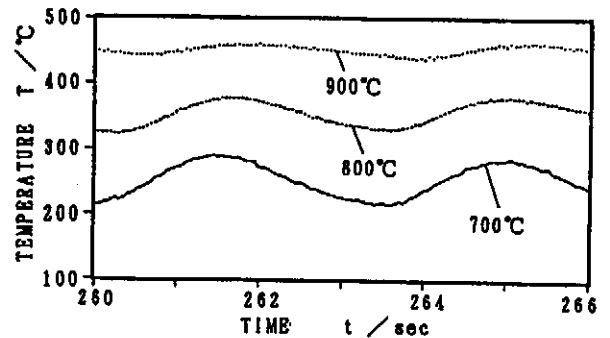


図4 素材温度別の型温度履歴定常状態での温度変化（測定位置D部）

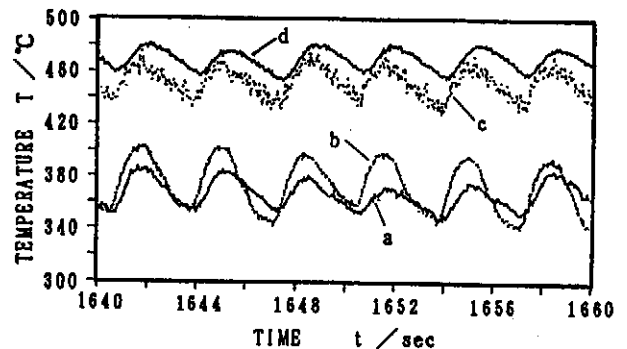


図5 各測定位置での型温度履歴定常状態での温度変化（素材温度900°）

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。(素材温度が低いほど、解析結果と実験結果の一致度は良好であった。)

図6より、型温度測定位置での温度履歴 (s1) は600℃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℃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℃、800℃の場合も同様であった。(素材温度が700℃の場合でも、1ショット目での型表面温度はほぼ600℃になっていた。) したがって、素材温度が700℃、800℃、900℃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がわかる。

6. 型表面付近の型軟化状態の測定結果

素材温度を700℃、800℃、900℃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。図7は、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示したものである。(素材温度別に整理してある。)

これらの結果から、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の各測定位置での定常温度状態の型温度変化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。

7. 型表面付近の型軟化状態の予測

本研究では、測定可能箇所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を予測する。今回の研究の主目的は、この型軟化状態予測結果と図7に示す実験での型軟化状態とを比較検証し、本研究手法の妥当性、実用の可能性を検討することである。

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²⁾を応用しているが、これ

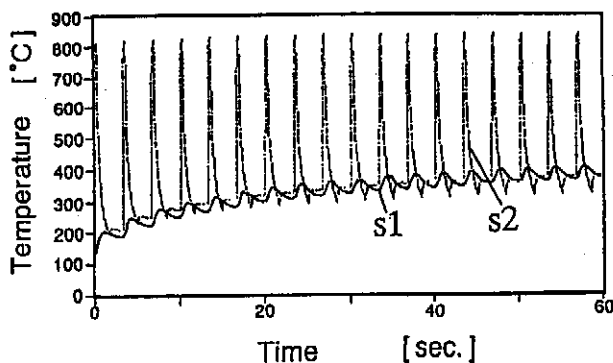


図6 定常状態に至るまでの型温度履歴の逆アプローチ解析結果 (S1: 温度測定位置、S2: 型表面)

については既報⁵⁾で報告しているので、詳細は省略する。要約すると、型温度履歴が定常状態になった1サイクルの温度変化における600℃以上の温度変化の平均温度と、1サイクルで600℃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℃を越えている時間のトータル (表1の時間×生産数で、表2に保持時間として計算例を示す)

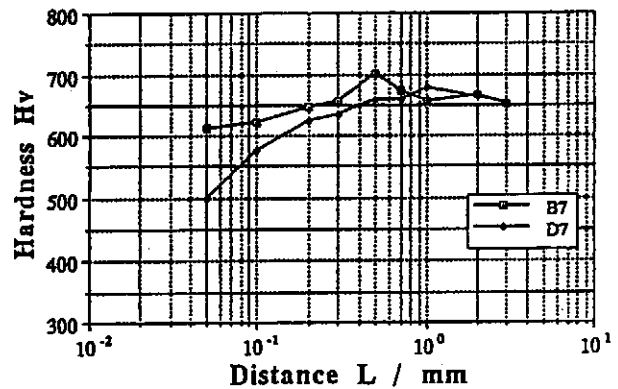


図7・1 型表面からの距離と硬度の関係 (素材温度700℃、5000ショット連続成形後)

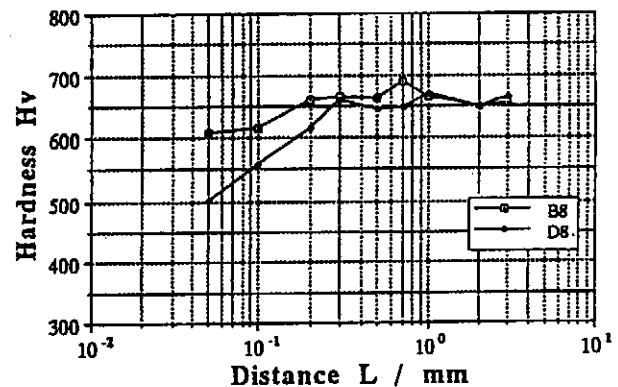


図7・2 型表面からの距離と硬度の関係 (素材温度800℃、5000ショット連続成形後)

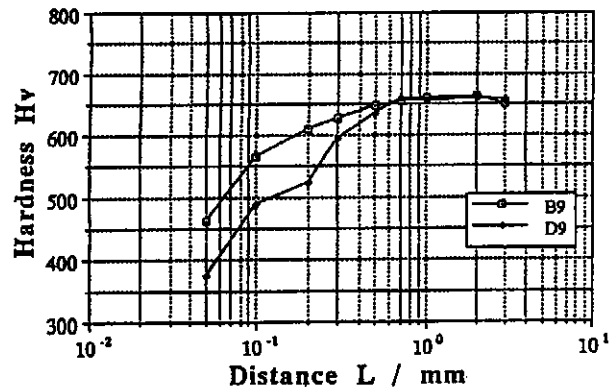


図7・3 型表面からの距離と硬度の関係 (素材温度900℃、5000ショット連続成形後)

によって、型材 (YXR33) 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図7に求められているので、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。

8. 型軟化状態の予測についての考察

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、この程度の一致度があれば、本研究の方法自体は有用であると考えられる。

解析による予測手法での問題点は、型温度履歴の定常状態での1サイクルの温度変化が、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をモニターし、それによって型表面温度変化を求めて、軟化に寄与する度合を累積していかなければならない。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

かかりすぎるので、代表的な関係をニューラルネットワークで学習させておくと、リアルタイムでのモニターが可能となる。現在、この考え方による型軟化状態のリアルタイムモニターシステムの研究を行っている。

一方、そのような厳密な予測でなく、むしろ簡易的に型設計での指針を提供するためのデータとしては、図8、図9のようなものを考えている。

図8は、実測値からの逆アプローチ手法により求めた1サイクルでの型内温度状態とその変化結果から、型表面からの各距離での600℃以上になっている温度の平均温度を求め、示したものである。また図9は、図7と図8の結果を重ね合わせたものである。

図9は、5,000ショットでの型温度と型硬度の関係を示すもので、ショット数を変えた結果を蓄積すれば、シミュレーションにより図8のようなデータを求め、図9の形式のデータを参照して、型の各部分での軟化状態を予測できる。また、シミュレーションについても、いくつかの成形条件下でのデータを蓄積すれば、実測値を用いなくても、数値解析のみで信頼性の高い予測結果が得られるようになると考えられる。

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 [個]	素材温度		
	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]

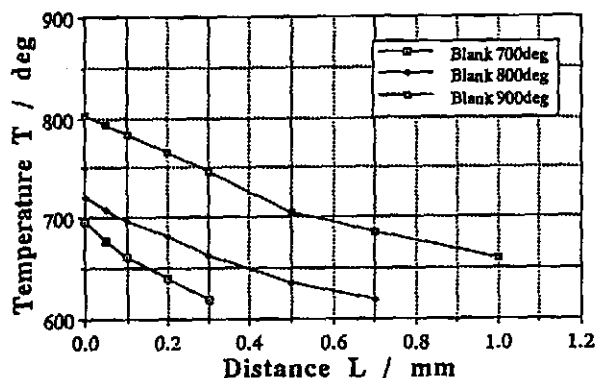


図8 型表面からの距離と定常状態での型温度変化における平均温度(解析結果)との関係

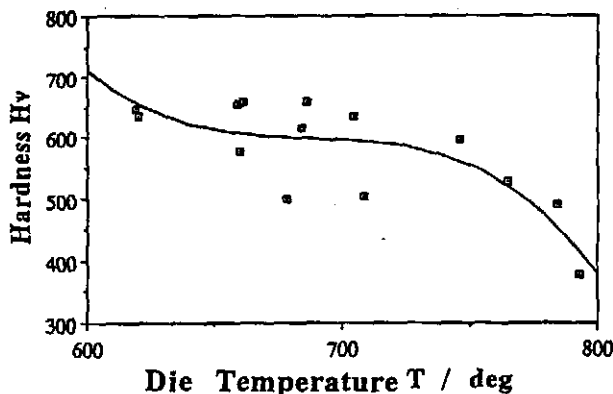


図9 定常状態での平均型温度(解析結果)と5,000ショット連続成形後の型硬度との関係

9. 結 び

熱影響による工具軟化状態を予測する手法として、測定可能箇所の温度履歴測定値を用いて、知りたい箇所の温度履歴状態を逆アプローチ手法で求め、それを用いて工具軟化状態を予測する方法を提案し、高温間鍛造型に適用した検証実験について報告した。

本手法は、鍛造型のみならず、ダイキャスト型、プラスチック成形型等にも応用可能であり、精密プレスでのパンチ工具などにも応用できるものである。

今回適用した高温間鍛造型について言えば、一般に鍛造中の型温度管理は十分に行われておらず、したがって本研究結果のように条件一定として予測した型軟化状態と現実の型軟化状態とは若干の差異が生じる。しかし、設計段階や成形条件設定段階で、あらかじめ型軟化状態を予測できる手法が提案されたことは意義あることと考える。

さらに、本手法を成形中の温度履歴状態および型軟化状態のモニターシステムとして発展させれば、有意義なものになると言える。

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) 高石和年・前田禎三：塑性と加工, 21-232 (1980), 430.
- 2) 湯浅紘二・安藤弘行：鍛造技法, 26 (1986), 11.
- 3) 済木弘行ほか：塑性と加工, 30-336 (1989), 51.
- 4) 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.
- 5) 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.

追 記

本研究の成果は、日本塑性加工学会誌「塑性と加工」に論文投稿の予定であります。