

# 窒化処理を施した熱間鍛造金型の熱軟化予測に関する研究

有明工業高等専門学校 機械工学科

助教授 南 明宏

(平成8年度研究開発助成 AF-96004)

## 1. 緒言

歯形鍛造や複雑形状の精密熱間型鍛造では、厳しい熱負荷にさらされるため型寿命の改善が重要である。型寿命を向上させるためには、型と高温素材との接触時間や摩擦滑りを可能な限り少なくして、型冷却を効果的に達成できるような工程設計、作業条件を最適化することが大事である。また、選択される工具材質および表面被膜構造条件によって熱負荷限界が異なるので、これを最適設計することも必要になる。特に、表面被膜については耐摩耗性や耐焼き付き性を改善させる目的で浸炭、窒化、軟窒化、CVD および PVD あるいはレーザーアロイング等の数多くの表面改質技術が導入されている。これまで、作業条件を変更した場合に型表面が到達する温度や熱軟化状態を見積もる方法を明らかにしてきた<sup>1)~6)</sup>。本研究では、温度上昇あるいは熱負荷によって型角部の熱軟化および塑性変形抵抗や塑性変形がどの程度影響されるかを明らかにしていく。そのために、温・熱間鍛造金型材に硬質被膜処理の中でも最も頻りに利用されているイオン窒化処理を施してモデル鍛造試験を行い、金型および鍛造材料の温度履歴に関するデータを掴むと共に試験終了後の熱軟化の状態も調べていく。また、金型材について静的な焼き戻し軟化実験をも実施し、焼き戻しパラメータを利用して熱軟化式を作成する。また、塑性変形抵抗や塑性変形が表面被膜構造によってどう影響するかを把握し、型寿命改善のために望ましい条件を検討するために金型母材+軟化層+硬質被膜層との3層構造のモデルを考え、鍛造試験によって得られた温度履歴や焼き戻し軟化式等の情報をも考慮した FE 解析をも試みる。

## 2. 熱負荷鍛造試験

### 2.1 モデル鍛造試験

モデル鍛造試験<sup>6)</sup>には金型材質としてマトリックス高速度工具鋼の1種である YXR33 材 [日立金属 (株)] を使用した。この金型に表 1 に示すように真空焼入れ (1150℃で 13min 保持後 N<sub>2</sub> ガスで強制空冷) および焼き戻し (560℃で 90min, 550℃で 90min そして 550℃で 2hr 保持後空冷) の計 3 回の熱処理を施した。熱処理

後の平均硬度は 720HV である。また、イオン窒化処理は表 2 のような条件で行った。窒化処理後の窒化型の平均硬度は 1230HV であり、このときの窒化層の膜厚は約 0.2mm である。鍛造材料は S45C 母材先端表面にステンレス肉盛り溶接を行ったものを用いた。モデル鍛造試験用金型の形状は図 1 に示すように割型にしてその片側に放電加工により溝を作り、そこに温度計測用の直径 0.1mm の熱電対を 4 組スポット溶接した。金型の熱負荷試験は鍛造材料初期温度: T<sub>mo</sub>=1150℃, 接触面圧: P=44.7MPa と 55.2MPa, サイクル時間: t<sub>cy</sub>=2.0sec (型と材料の接触時間: t<sub>c</sub>=0.40, 0.50sec, 0.52sec, 冷却時間: t<sub>cool</sub>=1.60sec, 1.50sec, 1.48sec) で 5000 回, 20000, 30000 回鍛造した。試験終了後、型表面の形状および硬度測定にて劣化や軟化の度合いを調べた。

表 1 金型および焼き戻し軟化試験片熱処理条件

Heat treatment (Quenching + Tempering)		
	Heat treatment	Hardness
Model forging tool	1150℃ N <sub>2</sub> gas quenching and	680HV (average) HRC 59 ~ 60
Tempering specimen and N-Chip	560℃ + twice 550℃ tempering	680HV (average) HRC 59 ~ 60

表 2 イオン窒化処理条件

Ion Nitriding								
	A.C (A)	A.V (V)	T.P (Torr)	T.T (°C)	U.G	G.R	T.Ti (hr)	V.H.N (HV)
Model forging tool	40	200	4~6	520	N <sub>2</sub> and H <sub>2</sub>	3:2	18	1230
Tempering specimen, N-Chip	20	460	4~6	520	N <sub>2</sub> and H <sub>2</sub>	3:2	28	1158

A.C: Arc Current, A.V: Arc Voltage, T.P: Treatment Pressure, T.T: Treatment temperature, U.G: Used Gas, G.R: Gas Ratio, T.Ti: Treatment Time, V.H.N: Vickers Hardness Number

Thickness of nitrated surface layer: Th=0.2mm

### 2.2 焼き戻し軟化実験

焼き戻し軟化実験に使用した試験片材質はいずれも YXR33 材であり、これらにモデル鍛造試験用の金型と同じ条件で真空焼入れおよび焼き戻しを行った。イオ

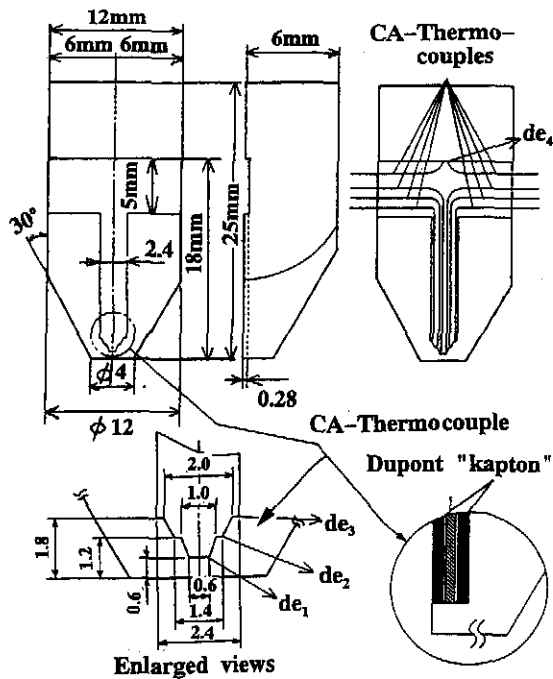


図1 工具試験片形状および熱電対装着位置

窒化処理条件は表2のとおりである。試験片の寸法は5mm×10mm×5mmである。熱処理および窒化処理後の平均硬度はそれぞれ680HV、1158HVである。また、窒化層の膜厚は約0.2mmである。軟化実験のやり方はセラミック炉(内径φ32×外径φ89×長さ305mm)の片方より中央部までCA熱電対を挿入し、炉内雰囲気温度が設定温度になった後、もう片方から試験片(熱電対を試験片に直接スポット溶接)を入れる。試験片温度が設定値に到達してから所定時間焼き戻す。各所定時間経過後、炉から試験片を取り出し、常温まで油冷する。その後表面はアルミナ研磨剤を用いてラッピングし後硬度測定する。今回の軟化実験では焼き戻し温度は600℃、650℃、680℃、700℃の4種類とし、焼き戻し時間は20分、40分、60分、100分、200分、400分および800分までの累積時間とした。

### 2.3 モデル鍛造試験結果と考察

窒化処理を施した金型の鍛造サイクル中の温度履歴を一例として図2に示す。サイクル回数: N=1800(1hr経過後)後における1サイクル温度を見てみると工具と材料の接触終了時における最高到達温度: Tmaxは表面に最も近い測温点で500℃を越えている。自然冷却(空冷)終了時における最低温度: Tminは金型表面近傍で300℃となっている。これより、金型の温度振幅:  $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ は約200℃であり、約0.24%の熱ひずみ振幅が生じていることになる。また、金型基準温度は約120℃でほぼ一定となっている。実験後の金型の硬度は割型表面中心軸線上を測定した(図3)。金型先

端から約0.35mmの深さまで熱軟化の影響が見られ、型表面近傍で初期硬度より約130HV低い1100HV程度まで軟化している。

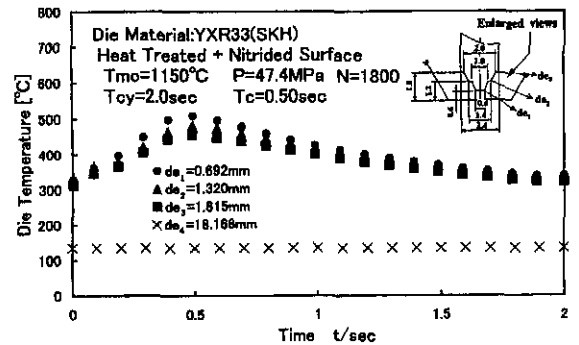


図2(a) 1サイクル金型温度

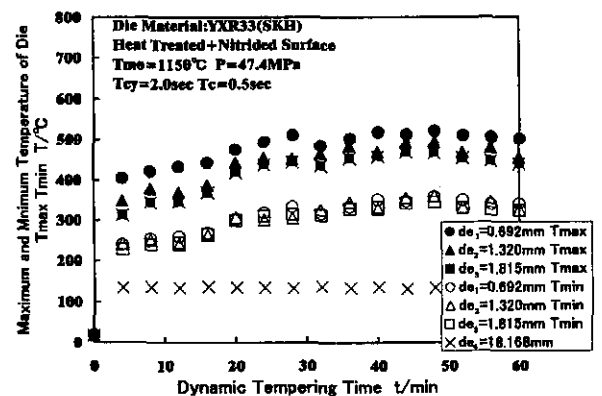


図2(b) Tmax および Tmin 温度軌跡

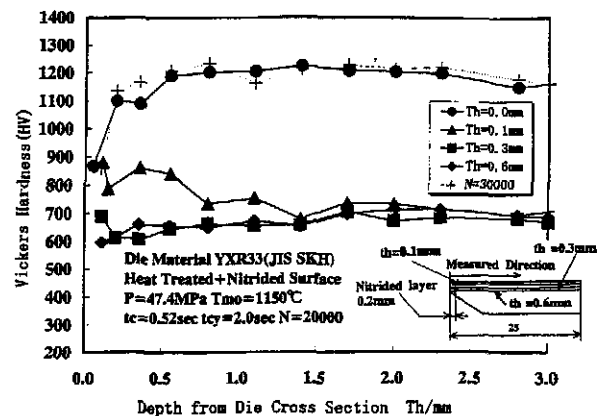


図3 窒化型硬度分布(N=20000)

### 2.4 焼き戻し軟化実験結果と考察

焼き戻し軟化実験により得られた窒化試験片の焼き戻し硬さをそれぞれ図4に、また、硬さを基にして本研究室で従来から用いている焼き戻しパラメータRで整理した母曲線を図5に示す。ここで、図5における実線および破線はそれぞれYXR33とSKD61のRパラメータを含む軟化式である。この図より実測硬度値と軟化式による硬度値との最大誤差はどちらも約20HV以内で、比較的良好な精度で一致していることが分か

る。また、窒化試験片の場合、YXR33の母曲線はSKD61のそれを全体的に約50HV増加する方向に平行移動した形となっている。このことから工具材の窒化層の初期硬度が分かれば大体の熱軟化式を求めることが期待できそうである。

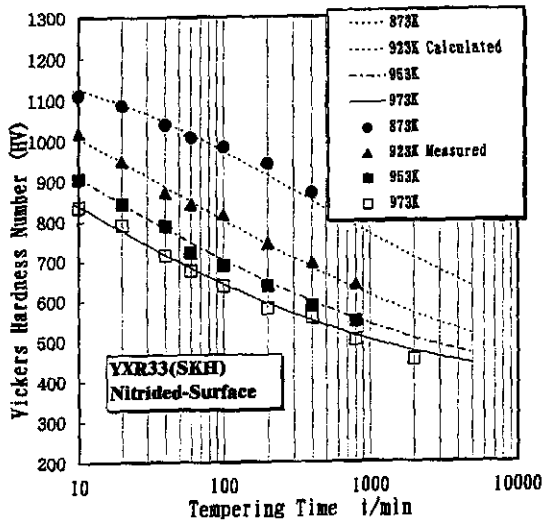


図4 焼き戻し条件と硬さ

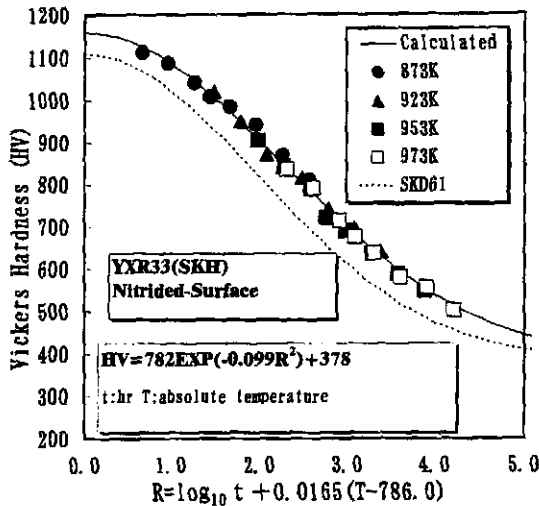


図5 Rパラメータによる焼き戻し母曲線

### 3. 熱解析および変形モデル

型鍛造で型寿命に影響する部位は、接触時間が長くなって熱負荷が大きく掛かる型のコーナー部である。特に、コーナー部が摩擦すべり負荷も受ける場合には条件はより厳しくなる。勿論、型角は塑性変形しないように設計しなければならない。しかしながら、熱負荷の予測が十分でない温度上昇と鍛造圧によって鍛造ごとに僅かな塑性変形が重なり大きな塑性変形に至る危険性がある。最適な型設計をするためには熱負荷による熱軟化の影響を明らかにしなければならない。ここでは、熱負荷によって軟化した型コーナー部の変

形抵抗を剛塑性有限要素法を用いて評価し、工具表面構造の最適化を図る手法を検討している。

#### 3.1 型の熱軟化解析

寿命対象となる型部の典型として図6に示すような後方押し出しポンチのコーナー部を取り上げ、摩擦すべりと圧力（押し潰しの変位）を作用した場合の工具角部が示す塑性変形抵抗特性を典型モデルとして評価してみる。

解析を簡単にするためと塑性変形を評価しやすくするため角部は図9（左図）に示すように面取りで置き換えている。型コーナー部は温度上昇が著しく、そのために型材の変形抵抗が低下する。工具表面には窒化層や硬質被膜層が通常存在しているものと仮定し、被膜厚さや被膜下の型の変形抵抗をどのような基準で設定していくかを考える。熱解析の結果を図6～図7に示している。熱解析では鍛造サイクルを6つの段階に分けて行っている、すなわち、下型への鍛造材料投入後接触、鍛造中、エジェクト、自然空冷、強制空冷そして準強制空冷である。熱軟化層の厚さは熱負荷によって変化する。図6は、接触時間0.13s、1サイクル時間3.5s、型と加工材料との接触熱コンダクタンス： $K_c = 41.7 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 、強制冷却熱伝達係数： $\alpha_c = 1.5 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 、そして冷却時間1.8sの条件における温度分布を示している。図7(a)、(b)は熱解析を行ったときの温度分布である。そしてこの温度分布を基にして硬度を評価した結果が図8の硬度分布である。この結果よりパンチコーナー部の硬度は初期硬度537HVから250HV(型の焼き鈍し状態硬度)まで減少しているのが明確に分かる。

#### 3.2 型の変形解析

パンチコーナー部において、温度上昇があると変形抵抗はかなり低下するので、通常は型表面を硬化させるために窒化層もしくは硬質被膜層が施される。型設

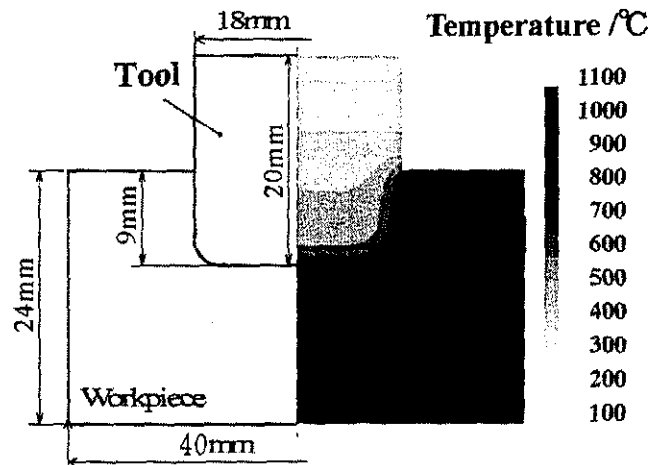


図6 ポンチおよび加工材料の形状と温度分布

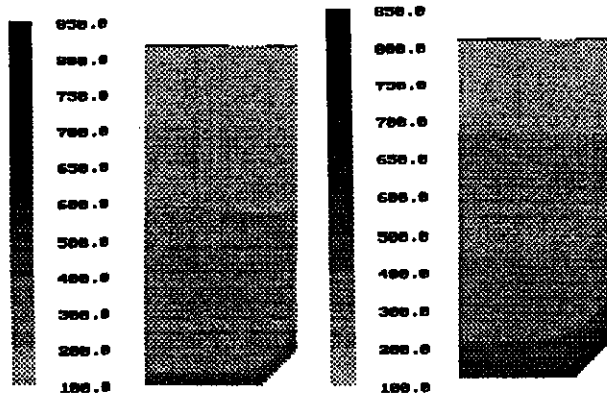


図7 ポンチ温度分布

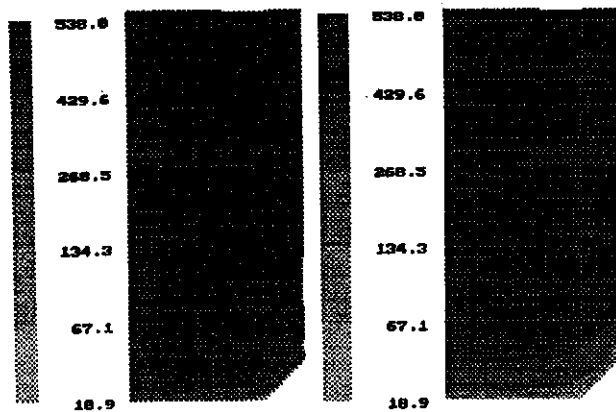


図8 ポンチ硬度分布

計の段階において、この硬化層の厚さと硬化層下の母材の変形抵抗を決定するための規準を定義することは極めて重要である。以下に述べる解析はこれらの規準を確立するために行うものである。ここでは、図9の左図に示すような3層モデルを考える。

このモデルでは、100℃における型材料(JIS SKD61)母材、熱軟化影響層および硬質被膜層の変形抵抗を

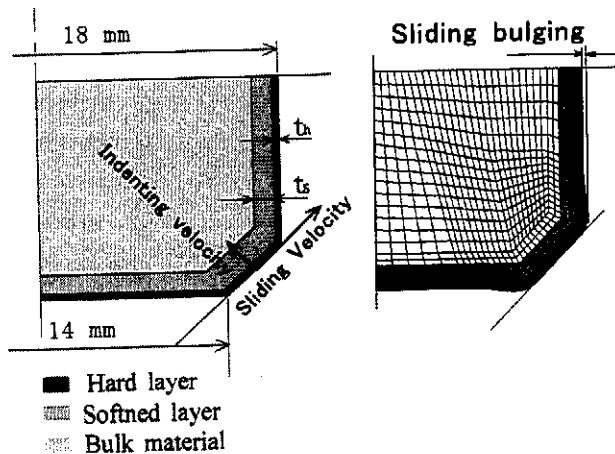


図9 数値シミュレーションモデルとバルジ変形例

それぞれ  $Y$ ,  $aY$ ,  $2Y$  とした。摩擦剪断因子, 滑り速度および軟化層と硬質層との相対厚さ比:  $\delta = l_s/l_h$  を主な変数として選り解析した。変形抵抗や塑性ひずみ(相当塑性ひずみ)はこれらの変数を変更して計算した。図9に示すように押し込み速度1に対して滑り速度3の比の条件で解析を行った。

図10~図12は面取り2mm, 硬質被膜厚さ0.2mm, 熱軟化層の変形抵抗が  $0.5Y$  の場合の計算結果を表している。図10は軟化層の相対厚さと最大相当ひずみとの関係を示している。図11は軟化層の相対厚さ比と図9(右図)に定義されているようなバルジ変形との関係を表している。図12は軟化層の相対厚さ比が4の場合の中間層(軟化層と強化層, 例えば  $a=0.5\sim 1.5$ )と最大相当ひずみとの関係を示している。図13は軟化層の相対厚さと軟化層の変形抵抗との関係を表している。

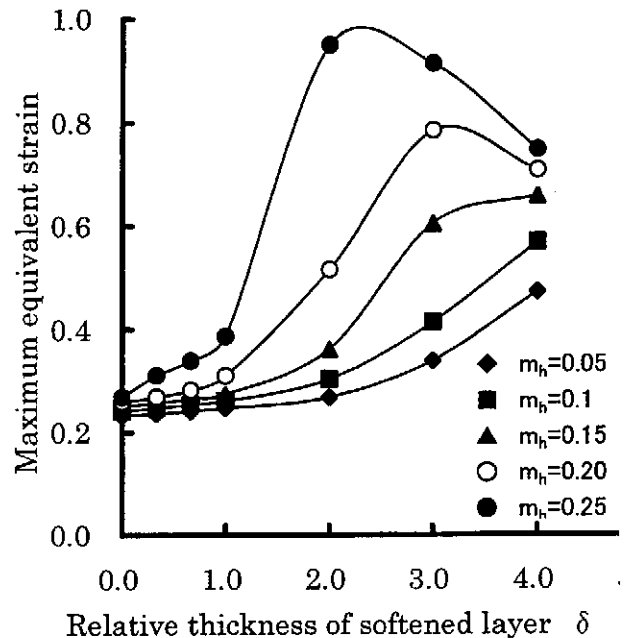


図10 熱軟化層の厚さと最大相当ひずみとの関係

### 3.2.1 熱軟化層厚さの影響

図10に見られるように、最大相当ひずみは  $\delta$  の値が1までは摩擦剪断因子:  $m_h$  のいずれの値の場合も変化が見られないが、それ以上の値になると  $m_h$  が大きくなるほど高くなっていく。最大相当ひずみのピーク値は  $m_h$  が大きくなるほど  $\delta$  は小さいところに現れ、 $m_h$  が小さくなるにつれてピーク値は  $\delta$  が大きくなる方向に移動していく。図11において、それぞれの  $m_h$  に対するバルジ変形は  $\delta$  が1までは緩やかに上昇し、1~3に掛けて急激に増加し、3でほぼ一定となる。

一般に最大相当ひずみの位置は硬化層と軟化層の間の領域から母材と軟化層の間のそれへと移動していく傾向にある。

図13によると、パンチ全コーナーに渡って相対変形

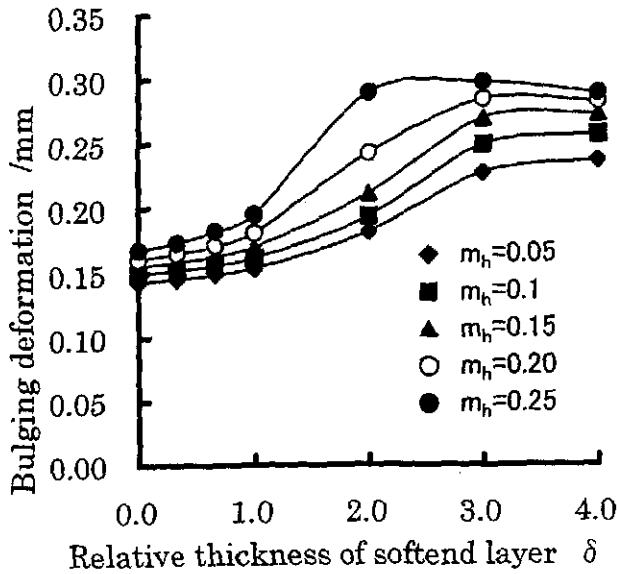


図 11 熱軟化層の厚さがバルジングに及ぼす影響

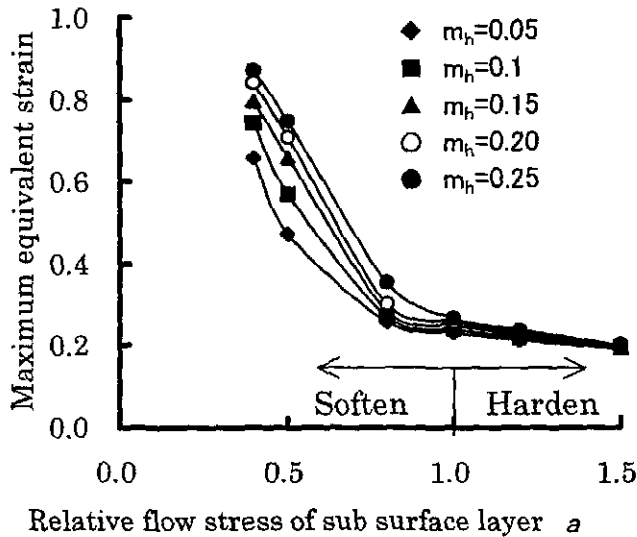


図 12 中間層の変形抵抗が最大相当ひずみに及ぼす影響

抵抗は約 24% 減少している。図 10 および 11 から、相当ひずみやバルジ変形は軟化層の相対厚さが臨界値： $\delta_{cr}$  の値が 1~2 となるとかなり増加することが明白である。

### 3.2.2 滑り摩擦の影響

摩擦剪断応力  $\tau_f$  は被加工材料の剪断降伏応力  $k_f$  に対応して用いられる。図 10~13 において、型表面の硬質層の剪断降伏応力  $k_h$  に対して摩擦剪断係数  $m_h$  をパラメータとして採用されている。実際の摩擦剪断応力  $\tau_f$  は被加工材の剪断降伏応力  $k_f$  に対して考えるべきであるので硬質被膜の摩擦剪断係数  $m_h$  は、 $m_h < m_f/4$  として対応させる。ここでは、 $m_h$  が 0.25

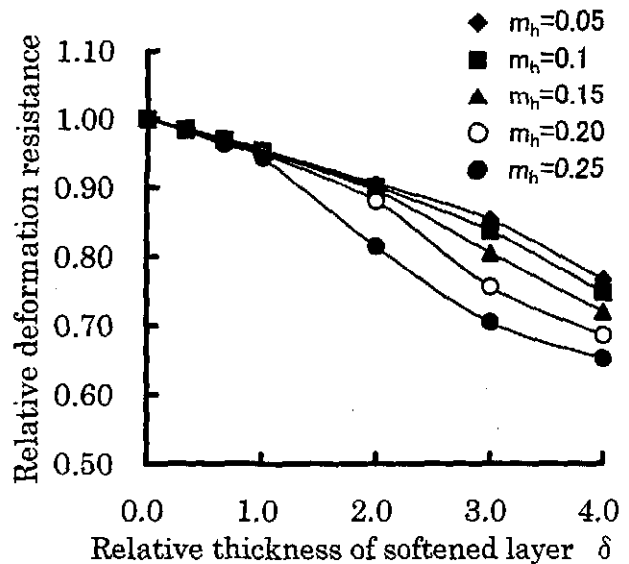


図 13 軟化層の厚さと変形抵抗との関係

以下の場合の結果を示している。軟化層の影響が顕著に現れる臨界値  $\delta_{cr}$  は、摩擦が大きいほど小さくなる。したがって、摩擦が大きいほど熱負荷を小さく押さえる必要がある。

### 3.2.3 強化された軟化層(中間層)の影響

今までに述べた結果は、軟化層の変形抵抗を 0.5Y ( $a=0.5$ ) とした場合に限られた。実際の型製造においては、軟化した領域はレーザーアロイング法を含む様々な手法を利用して硬化させられるので、この  $a$  を変更した結果が図 12 であり、中間軟化層とひずみと分布を示したのが図 14 である。これらより変形抵抗は  $a$  の値が 0.8 以下になると急激に塑性変形が増加することが分かる

## 4. 結言

モデル鍛造試験、静的焼き戻し軟化試験および鍛造中の型の塑性変形抵抗や塑性変形等を FE 解析により求めた結果より以下のような結論が得られた。

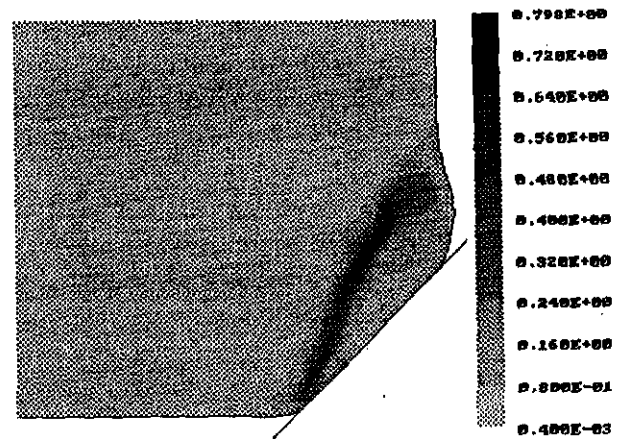


図 14(a) 中間軟化層とひずみ分布 (変形抵抗: 0.4Y)

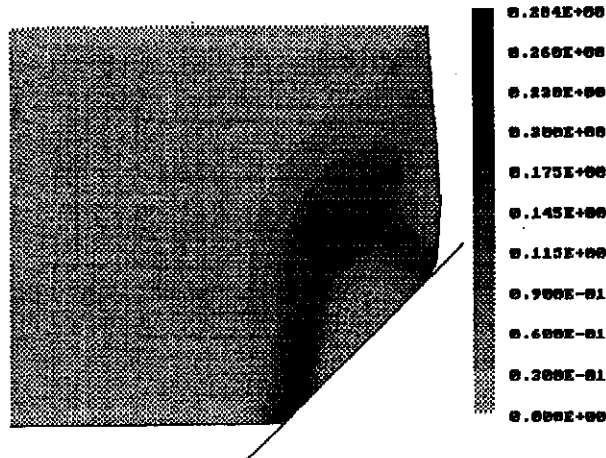


図 14 (b) 中間軟化層とひずみ分布  
(変形抵抗: 0.8)

(1) 温・熱間鍛造用合金工具鋼の代表格である SKD61 材のときと同様に YXR33 (マトリックス高速度工具鋼) の場合にも同一条件の熱負荷を型に与えた場合には窒化型の方が熱処理型よりも表面の劣化および熱軟化の度合いが小さく、また後者の方が鍛造サイクル中の温度上昇が低いことが分かった。

(2) 熱処理のみとそれに窒化処理を施した場合の焼き戻し軟化を従来用いている焼き戻しパラメータ  $R$  を含む以下の式でそれぞれ表示することができた。

$$HV = 460 \exp[-0.099R^2] + 220 \quad (\text{HV})$$

ここで、 $R = \log_{10} t + 0.0217(T - 831.0)$  (熱処理のみ)

$$HV = 782 \exp[-0.099R^2] + 378 \quad (\text{HV})$$

ここで、 $R = \log_{10} t + 0.0165(T - 786.0)$  (窒化層部有り)

(3) 型表面を塑性変形から守るためには、硬質被膜層下に生じる熱軟化層厚さを硬質被膜層と同じ程度にすることが必要である。

(4) 型表層から 1mm 程度の熱影響層が発達する場合には、その範囲の熱軟化層の抵抗が母材変形抵抗の

80% 程度の軟化に押さえることが大事である。

(5) 滑りが大きくなる速度条件では、摩擦剪断応力による影響が特に見られるので、材料各部での潤滑条件をよくするか、または被膜の厚さを大きくする必要がある。

最後に本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を戴いて実施したものであることを明記し、ここに甚大なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 南・済木他：温・熱間鍛造における型の熱的接触・冷却条件の評価法，塑性と加工，30-336 (1989)，51-56，1989. 1.
- 2) 南・済木他：温・熱間鍛造における熱的接触問題と金型の熱負荷，鍛造技報，14-39，1-18，1989-10.
- 3) 南・済木他：熱間鍛造型の熱負荷シミュレーションの効率化，日本機械学会地方講演論文集，No. 968-2，58-60，1996. 7.
- 4) 南・済木他：表面窒化処理を施した温・熱間鍛造型の熱負荷解析，第 46 回塑性加工連合講演会，249-250，1995. 9.
- 5) 南・済木他：表面窒化処理を施した熱間鍛造型の熱軟化予測，塑性加工春季講演会，210-211，1996. 5.
- 6) A. MINAMI, H. SAIKI, Effect of Surface Hardening by Nitriding on Thermal Softening and Deterioration of dies in Warm and Hot Forging, Proceeding of the 5th International Conference on Technology of Plasticity, vol. 1, 389-392, 1996. 10.
- 7) 南：温・熱間鍛造用金型の熱軟化に関する研究，有明工業高等専門学校紀要第 31 号 (1995)，107-111.
- 8) 南・済木他：表面窒化処理を施した熱間鍛造用マトリックス高速度工具鋼の熱軟化予測，第 50 回塑性加工連合講演会，111-112，1999. 10