

型寿命評価システムを組み込んだ 温度制御精密型鍛造機の開発

熊本大学 工学部 機械工学科

教授 清木弘行

(昭和63年度研究開発助成 AF - 88003)

1. 研究の背景

型鍛造の分野では酸化皮膜を極力抑えることのできる条件で熱間精密鍛造を行い、冷間サイジングで仕上げるニアネット成形が主流である。鍛造型は、熱軟化による塑性変形、摩耗およびヒートチェックによって寸法変化する。従って、寸法精度を維持するためにはこれをできるだけ小さく抑えることが重要になってくる。

これまでの研究¹⁾ から型表面の到達する最高温度が型劣化を支配し、それを予測し鍛造条件を制御することが型寿命改善のために必要であることが分かった。鍛造面の到達する温度は加圧からエジェクトに至る接触時間： t_c および型面と高温素材面間の接触熱コンダクタンス： K_c 、強制冷却の強さ α_{cool} と時間によって支配されている。モデル実験では熱電対を表面近くに多数対挿入できるので温度計測結果を逆解析することで K_c を比較的精度良く評価することができる^{2)~4)}。しかし、実際の鍛造現場では同様な表面近傍の温度計測実験が難しく、型寿命の正しい評価が困難であった。

そこで、歯車素材の密閉鍛造を取り上げ鍛造現場において型表面から比較的深い位置において型温度およびダイセットのベース温度の計測を行ない、熱負荷および K_c の見積を行なう方法を検討した。⁵⁾これが可能であれば鍛造型の到達する温度履歴を予測し、型軟化を伴う鍛造型の表面劣化をプロセス中に評価し、作業条件の変更を行なって安定した高精度鍛造を行なうことができる。また、実機鍛造で見積られた K_c 値をデータベースの構築のために利用できる。

2. 実験条件

本実験では、据込み鍛造、密閉荒地鍛造、仕上げ鍛造、ばり抜ききの4工程を行なう歯車ブランクの製造を例に取り、図1に示す第二工程の閉塞鍛造型の下型インナーにCA熱電対(工具を介して熱電対を形成、線径0.32mm)を数カ所取り付け温度計測を行なった。素材加熱温度は約1160℃(素材材質SCM420Hv)、鍛造サイクル時間 t_c は約7.5sで図2に示すように行程の時間配分は、

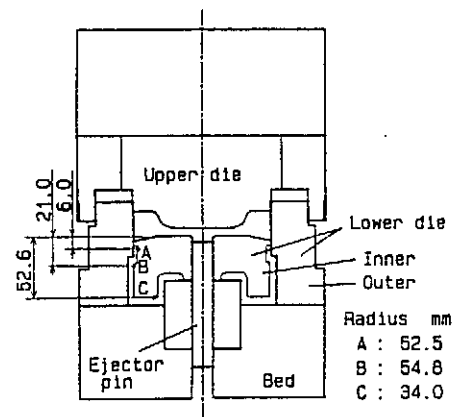


図1 閉塞鍛造模型と熱電対温度計測位置

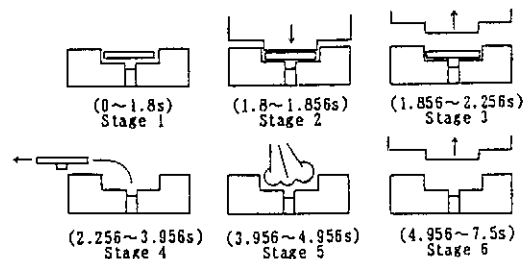


図2 鍛造1サイクル中のプロセスの連鎖

自由素材据置時間： 1.8秒 = 0.24 t_w
 加工時間： 0.056秒 = 0.0075 t_w
 エジェクト待ち時間： 0.4秒 = 0.053 t_w
 自然冷却時間： 1.7秒 = 0.227 t_w
 強制冷却時間： 1.0秒 = 0.133 t_w
 アイドル時間： 2.544秒 = 0.339 t_w

…………… (1)

であった。そして、型初期温度150°Cで2500個鍛造した。潤滑剤は油性黒鉛潤滑剤で水によるスプレー冷却を併用している。型はSKD61材を1050°Cで焼き入れ560°Cで2時間2回の焼き戻しを行なった。熱処理後の硬さはHv537であった。また、表面にイオン窒化(510°C:16時間)を施した場合の表面硬さはHv1160(深さ約0.1mm)であった。

3. 実験結果

計測された温度履歴の例を図3(a)(b)に示す。6時に型の余熱を開始6時50分から連続鍛造を行っている。図中温度が大きく低下している所では鍛造が何らかの理由で中断していることを示している。連続的に鍛造していれば約13分(約百打)で定常温度サイクルに達している。鍛造は午後1時に終了している。

2500個鍛造後の下型インナーの表面形状と斜め切断面疲労亀裂写真(子午断面の硬度分布は図10参照)を図4に示す。外周表面近傍にHv800~700の硬度の低下した窒化層が残留しているが、接触中央部は0.1mm程度摩耗している。中心穴丸み部に続く所に塑性変形に基づく約0.4mmの盛り上がりが見られる。き裂の深さは0.6mmで、

(a)

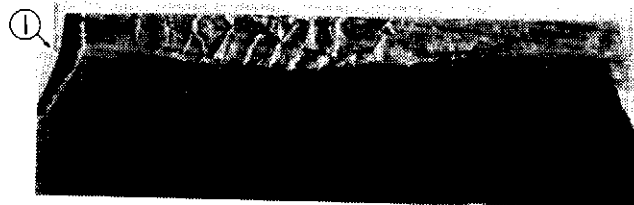


図4 鍛造数2500で、(a)図1の下型インナー鍛造型表面近傍に発生したヒートクラック(斜め切断角7度)
 (b)下型インナー鍛造型表面の摩耗プロフィール

外端末に向かって減少している。中心穴丸み部には激しい軟化で焼きもどし硬さ(Hv230)にまで低下している層がある。

4. 接触熱コンダクタンスと型軟化の評価

型表面の温度を T_s 、高温素材表面温度を T_m 、雰囲気温度を T_a 、熱伝達率を α_{cont} 、接触時間を t_c 、冷却時間 t_c 、1サイクル時間 t_w とすると鍛造1サイクル中に鍛圧面となる型表面を通して流入する熱流束 \bar{q} は

$$\bar{q} = \left(\int_0^{t_c} K_c (T_m - T_s) dt - \int_0^{t_c} \alpha_{\text{cont}} (T_s - T_a) dt \right) / t_w \quad \dots\dots\dots (2)$$

サイクル平均の熱流束 \bar{q} は定常熱サイクルに入るとほぼ一定の値となる。温度伝導率： a として

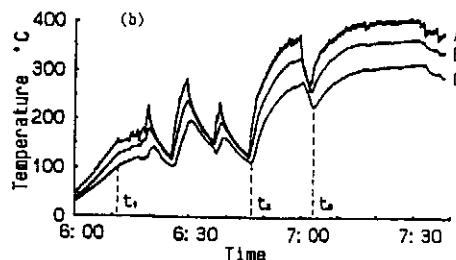
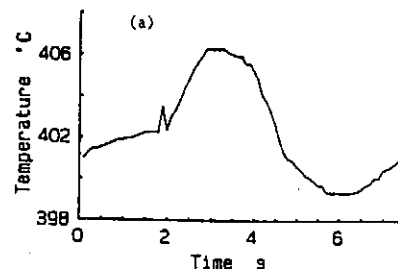
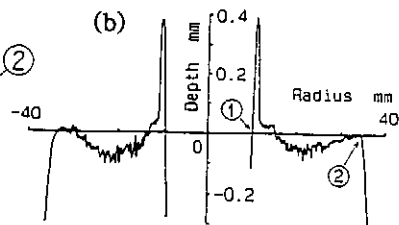


図3 (a) 鍛造1サイクルに計測点A(図1)で計測された温度(定常熱サイクル)
 (b) 計測点A,B,Cで計測された温度履歴



常熱サイクルに入ると表面近傍の深さ

$$\delta = 2(a \cdot t_w)^{0.5} = 16\text{mm}$$

の領域は温度変動するが他の領域は温度場が一定となる。型表面層と素材については後に非定常解析するものとし他の大部分を占める領域については解析領域も相当に大きくなるので定常解析で十分である。

そこで、実測した定常温度場と計算による温度場が一致するように鍛造型表面の \bar{q} を推定した。ただし、鍛圧面は場所によって接触時間や接触圧力が異なるので \bar{q} は場所の関数である。等温鍛造の剛塑性有限要素解析(摩擦せん断応力 $=0.5 \times$ せん断降伏応力)により接触時間を求め、強制冷却の程度は変わらないものとして \bar{q} を接触時間比で修正した。この様にして求められた解析結果の下型の定常温度場を図5に示す。 \bar{q} の最大推定値は $200\text{kW}/\text{m}^2$ であった。ただし、自然対流のみの表面の熱伝達率は $9.2\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ とした。

次に、非定常温度解析を図6に示す領域について行った。ただし、解析を簡単にするため次のような仮定を導入した。

- 1) 鍛圧面以外の境界は温度指定境界とする。指定温度は定常解析で得られた温度とする。
- 2) 充滿時の形状を持つ素材が型に接触するものとする。ただし、変形熱は材料が最終的に被った相当歪み量を時間平均的に与える。また、鍛圧部の接触熱コンダクタンスは接触時間に比例した補正を行う。

3) 接触熱コンダクタンスは、

$$\text{鍛造前 (1.8秒)} : 0.04K_{\infty} \quad \dots\dots (3.1)$$

$$\text{鍛造中 (0.056秒)} : K_{\infty} \quad \dots\dots (3.2)$$

$$\text{エジェクト時 (0.4秒)} : 0.23K_{\infty} \quad \dots\dots (3.3)$$

4) 強制冷却時間 (1.0秒) :

$$\alpha_{\text{conv}} = \alpha_{\infty} \quad \dots\dots (4)$$

自然対流 (4.244秒) : $\alpha_{\text{conv}} = 9.2\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$
 温度計測点の振幅と定常解析の熱流束 \bar{q} が一致するように K_{∞} と α_{∞} を変更した。

図4に示した鍛造条件に対し推定された K_{∞} と α_{∞} の値は、 $23\text{kW}/\text{m}^2/\text{K}$ と $0.63\text{kW}/\text{m}^2/\text{K}$ であった。

このときの計算された温度サイクルを図7に、型表面近傍の温度分布(鍛造加圧終了時)と硬さ分布の推定値を図8と図9に示す。図9では、型コーナー丸み部のみ接触熱コンダクタンスを K_{∞} の値の2倍の $46\text{kW}/\text{m}^2/\text{K}$ に変更した結果で

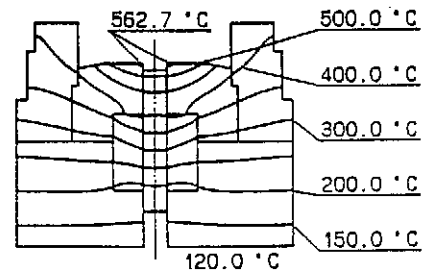


図5 下型の準定常温度分布計算例(図3の時刻7:25にほぼ対応)

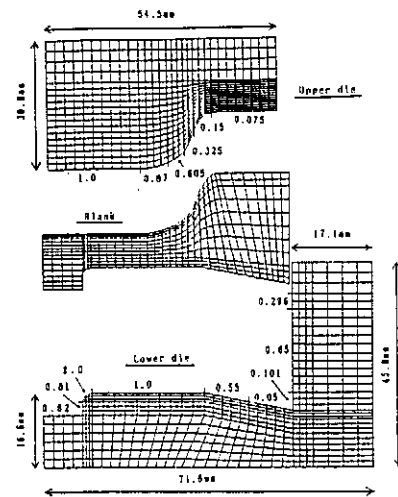


図6 非定常温度場の解析に用いられた有限要素分割例(数値は接触時間割合)

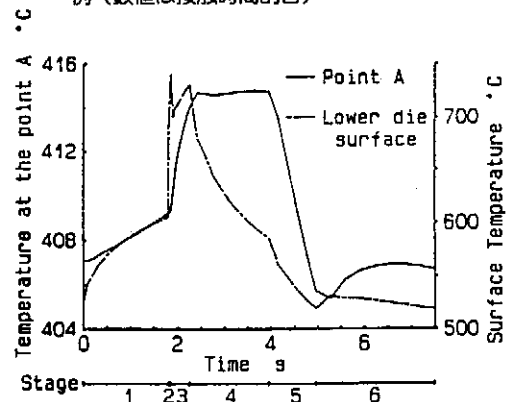


図7 下型インナー点Aおよび下型丸み部入口表面の熱サイクル評価結果(有限要素解析)

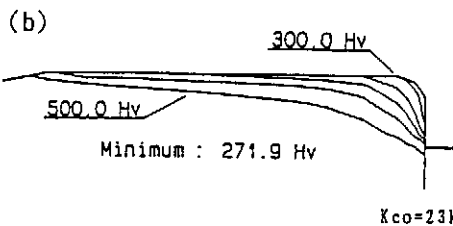
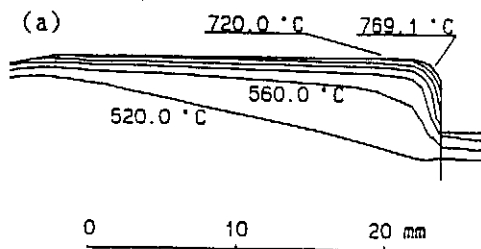


図8 下型インナー表面近傍の (a) 温度分布、
(b) 2500回鍛造後の熱軟化（硬さ分布）
の評価結果（有限要素解析）

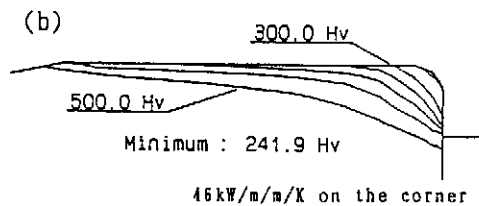
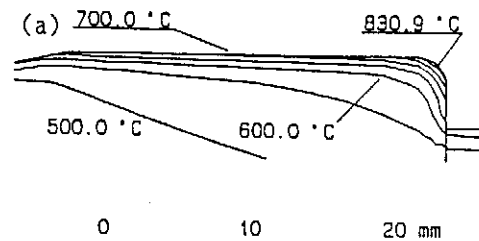


図9 下型インナー表面近傍の (a) 温度分布、
(b) 2500回鍛造後の熱軟化（硬さ分布）
の評価結果：図8でコーナー部の接触熱
コンダクタンスを2倍に評価した場合

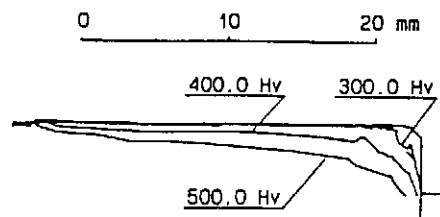


図10 2500個鍛造後の下型インナー表面近傍の実測硬さ分布

ある。また、型材の焼き戻し母曲線を既報⁹⁾にしたがって次式で見積もっている。

$$H_r = 307 \exp \{-0.106 (\log_{10} t_m)^2\} + 230 \quad \dots\dots (5)$$

$$t_m = \sum \Delta t \cdot \exp \{2.303 \cdot 0.0245 (T_r - 825)\} \quad \dots\dots (6)$$

t_m は焼き戻し相当時間 (hr)、 Δt は時間増分、 T_r は型温度の絶対温度表示である。

図10に示す実測硬さ分布と解析結果は良く対応しており、本解析法によって鍛造条件の正確な把握が可能であることが分かる。ただし、丸み部では軟化が予測値より顕著であり丸み部の接触熱コンダクタンスが推定値 (図8) よりさらに大きく、図9に近かったと推定される。

5. むすび

1) 実鍛造現場の金型に熱電対を挿入し準定常温

度場を計測した。その情報と型軟化状態から型接触表面の平均熱流束および接触熱コンダクタンスを推定する方法を提案した。実用型では金型強度および鍛造作業の関係から情報の得たい表面近傍に熱電対を挿入することができないため本手法は実用的なデータベース構築に有効であることが確かめられた。勿論、準定常温度場を押さえるに最適な位置を事前評価する必要がある。

2) 現在、型寿命評価をインプロセスで行い作業条件を制御する方法を継続して検討している。上記例より更に熱負荷が厳しくなる、図11に示す前方押しについて熱負荷の状況を検討している。型温度の制御は、上下ダイセットベースの冷却水流量、金型内の冷却水の流量、上型ポンチの冷却時間と強さの条件変更によって行なわれる。温度の計測は、型ベース温度4点、型内温度4点、冷却水出入り温度差である。本プロセスの設計は次の

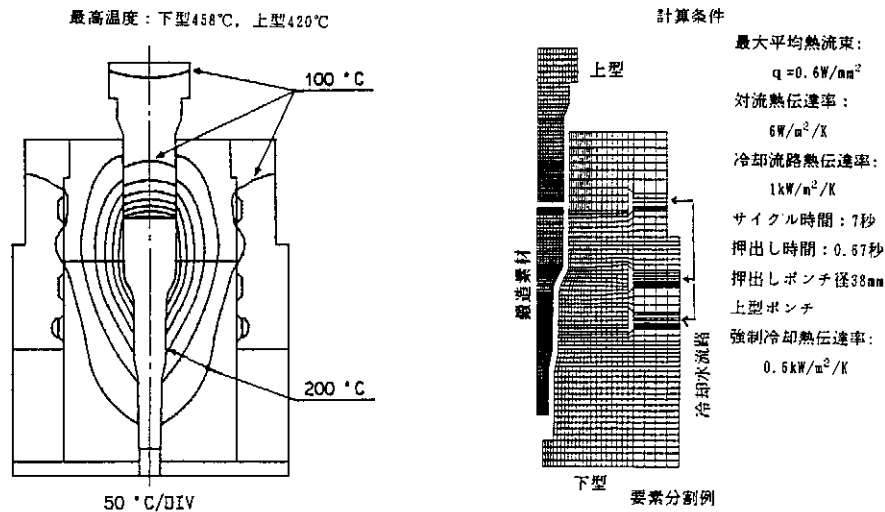


図 11 前方押し温度制御(寿命評価)用鍛造型の略図と定常温度場の評価例：ポンチおよびダイスの冷却が特に重要となる。表面からの冷却時間の確保、ダイス内部からの冷却、プレスダイセットからの冷却が制御のために必要になる。

ように行われる。

◎鍛造機と被加工材および鍛造品形状から、式(1)の時間配分比を指定する。

◎変形解析あるいは流動予測から鍛造加工中の型表面各部の接触時間配分を見積る。

◎式(3)の接触時間内における接触熱コンダクタンスの比率を指定する。

◎接触熱コンダクタンス K_c および強制冷却の熱伝達率 α_{∞} に代表的な値を指定し、1次元熱伝導問題として(2)式を用いてサイクル平均の熱流束 q の第一予測値を評価する。

以上までは要素分割と共にプロセス前に計算される。そして、温度計測時情報がプロセス中に導入されると、計測温度に適合する熱流束分布がただちに計算される。現段階では1500要素で十数秒程度(PC9801DA+トランスピュータボード付き)である。

準定常熱サイクルに達するまでに十数分かかるので、多くの場合、加工条件の変更に十分対応できる。準定常温度場に重畳される非定常熱サイクルおよび型軟化の見積には危険部位について近似として1次元の熱伝導問題に置き換えて行なう。

ただし、コーナーアールが10mm以下、特に5mmになる場合には1次元問題からの補正が必要

になる。

3) 型設計の段階では、接触熱コンダクタンス K_c および強制冷却の熱伝達率 α_{∞} に本方法で求められた値をデータベースから指定できるので、現実に近い条件で型やダイセットベースに最低必要とされる冷却箇所と冷却能力を求めることができる。また、型表面の強制冷却の条件設定、工程設計、コーナーアールなどの危険部位の型寸法の決定に利用できる。

なお本研究は、九州精鍛(株)の協力で行われた。

文献

- 1) 濟木：鍛造技法，9-17 (1984)，10.
- 2) Altan, T., Semiatin, S. L., Collings, E.W. & Wood, V.E. : Trans. ASME. J. Engng. Indust., 109-1 (1989), 49.
- 3) 濟木，南，御祓如：塑性と加工，30-336 (1989)，51.
- 4) 濟木，南，孟，渡辺：昭62春塑講論，(1987)，439.
- 5) 濟木ほか：機械学会九州支部熊本地方講演会講演論文集，918-3 (1991)，234.
- 6) 濟木，御祓如，南：第34回塑加連講論，(1983)，507.