

プレススライドモーション制御と工具熱伝導特性を活用した サーボプレス精密熱間鍛造プロセスの開発

大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻
講師 松本 良
(平成 22 年度一般研究開発助成 AF-2010010)

キーワード：サーボプレス，熱間鍛造，金型材料

1. 研究の目的と背景

熱間鍛造は主に一次加工であることから，従来，形状・寸法精度は重要視されていなかったが，近年，資源の有効活用や加工工程削減の観点から，熱間鍛造の高精度化・高品質化が求められ，バリなし精密熱間鍛造¹⁾や熱間鍛造品の材質予測システム²⁾などの研究・開発が進められている．精密熱間鍛造については，金型構成の提案^{3,4)}，機械プレスの下死点位置決め精度の向上機構の開発⁵⁾，CAE 解析による鍛造工程の改善⁶⁾等が取り組まれている．

一方，サーボモータ駆動によるプレスを活用した塑性加工プロセスの研究・開発が急速に進められている⁷⁾．サーボプレスは任意の位置でのスライド速度設定が可能であり，例えば，加工中にスライド速度の減速，加速，一旦停止，上下振動等のモーション設定が可能であり，また高精度な位置決め特性も有する．このような特性を活用して，フレキシブルな塑性加工プロセスの開発が期待されているが，冷間域での板材成形への適用が多く，温間・熱間域での塑性加工への適用は少ない．しかしながら，温間・熱間鍛造では金型による抜熱のため被加工材の温度変化が大きく，また加工中の温度履歴により材質変化が生じるため，サーボプレスの活用は鍛造品に大きな特性変化をもたらすと考えられる．筆者らはこれまでにサーボプレスを活用して，マグネシウム合金の温間鍛造における加工荷重の低減手法⁸⁾や加工限界の向上手法⁹⁾を提案している．

本研究では，サーボプレスを用いた熱間鍛造の基礎研究として，金型の熱伝導特性とスライドモーション制御に着目した鍛造法を提案する．低熱伝導特性を有するステライトを金型に使用して，熱間鍛造における加工荷重の低減効果および金型に設けた細孔内への被加工材の材料流動性に及ぼす工具熱伝導特性の効果について調べる．また高熱伝導特性の超硬合金工具を用いて，鋼材のダイ

クエンチ効果について調べる．プレススライドの下死点保持制御や金型材料の熱伝導特性を利用して，鍛造品の冷却速度を部分的に変化させて，硬さ分布を有する傾斜機能鍛造品の作製を目指す．

2. 金型，鍛造材料

金型には超硬合金 (WC-20mass%Co)，SKD61 熱間工具鋼 (Fe-5mass%Cr-1mass%Mo-1mass%V)，SKD61 熱間工具鋼の表面に厚さ 0.5～15mm のステライト 6 (Co-28mass%Cr) を TIG 溶接により肉盛り溶接したものを用意した．本研究では，いずれの金型も直径φ75mm，厚さ 32mm とし，表面は平均表面粗さを $Ra = 0.02 \sim 0.03 \mu\text{m}$ に統一し，室温で用いた．表 1 に金型材料の諸特性を示す．ステライト 6 は超硬合金と比較して，低硬度，低熱伝導率の特性を有する．

鍛造用試験片には，SCr420 クロム鋼 (Fe-0.2mass%C-1.0mass%Cr) 棒材を円柱状に旋削加工した．試験片は電気炉により所定の温度に加熱し，無潤滑で鍛造を行った．

3. ステライト表面肉盛り工具を用いた鍛造荷重の低減効果¹⁰⁾

3.1 熱間据込み鍛造条件

直径 18mm×高さ $h_0 = 27\text{mm}$ の SCr420 試験片を 1273K の無潤滑で据込み鍛造を行った．据込み鍛造には 450kN リンク式 AC サーボプレス (コマツ産機(株): H1F45) を用いた．鍛造中のスライド出力を一定として，圧縮率 $\Delta h/h_0 = 60\%$ の場合，鍛造開始速度 10～270mm/s (平均鍛造速度 $V_{\text{avg}} = 5 \sim 65\text{mm/s}$) とした．図 1 にスライド速度線図の例を示す．いずれの場合もスライド下死点で停止するため，下死点に近づくにつれてスライド速度は減速する．

表 1 本研究で使用した金型材料の室温での諸特性

	Vickers hardness /HV	Density /g·cm ⁻³	Specific heat /J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Thermal conductivity /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Cemented tungsten carbide (WC-20mass%Co)	950	14.0	500	approx. 70
Tool steel (Fe-5mass%Cr-1mass%Mo-1mass%V)	550	7.8	450	approx. 27
Stellite (Co-28mass%Cr)	580	8.5	420	approx. 15

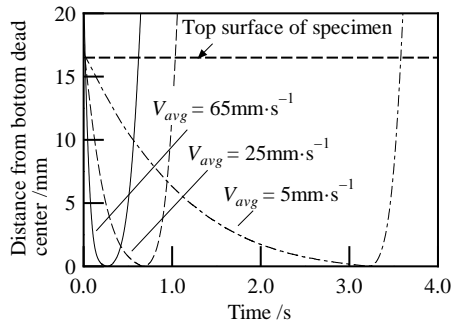


図 1 サーボプレスのスライドモーション線図 (試験片初期高さ $h_0 = 27$ mm, 圧縮率 $\Delta h/h_0 = 60\%$, V_{avg} : 平均鍛造速度)

3.2 金型熱伝導率, 鍛造速度が鍛造荷重へ及ぼす影響

$\Delta h/h_0 = 60\%$ の据込み鍛造における真圧縮応力を図 2 に示す. 金型材料, 鍛造速度によらず, 鍛造終盤で最大圧縮応力をとった. $V_{avg} = 25$ mm/s 以上では鍛造時間が 0.6 秒以下と短時間であるため, 金型材料による圧縮応力の違いはみられず, SCr420 試験片のひずみ速度依存性により高速の方が圧縮応力は高くなった. SCr420 試験片のひずみ速度依存性指数 (m 値) は 1273K で約 0.14 であるので, 速度比 2.5 に対して約 15% の応力上昇は妥当である.

一方, $V_{avg} = 25$ mm/s 以下では超硬, SKD61 金型の場合では最大圧縮応力が上昇し, $V_{avg} = 5$ mm/s では $V_{avg} = 65$ mm/s での最大圧縮応力よりも高くなった. これは $V_{avg} = 5$ mm/s では圧縮時間が約 3.2 秒と $V_{avg} = 25$ mm/s 以上の場合と比較して長時間となり, 工具, 大気への熱伝達により鍛造中に SCr420 試験片の温度が低下したためと考えられる. ステライト金型の場合では, 圧縮応力が低下から上昇へ転じる臨界速度は $V_{avg} = 10$ mm/s であり, 超硬, SKD61 金型に比べて, より低速まで低荷重での鍛造が可能であることが示唆される. これは表 1 に示したようにステライトの熱伝導率が超硬合金, SKD61 工具鋼の熱伝導率と比較して低く, 鍛造中の SCr420 試験片の金型への抜熱が抑制されたためである.

熱間鍛造では, ハンマー等を用いて高速で加工し, 被加工材の金型への抜熱を防止し, 被加工材を高温に保つことによる低加工荷重化を図ることが一般的であるが, 低熱伝導率金型の使用と被加工材のひずみ速度依存特性を組み合わせると, 低速化を実用化できる可能性がある. 精密熱間鍛造を目指すにあたり, 高速鍛造では加工中の材料流動制御が困難であるため, 低速化は有効な手段と考えられる.

3.3 ステライトの肉盛り厚さと鍛造荷重の関係

図 3 にステライトの肉盛り厚さが熱間据込み鍛造での最大真圧縮応力に及ぼす影響を示す. $V_{avg} = 5$ mm/s の場合, ステライト肉盛り厚さ 0~5mm では厚さが厚くなるにしたがい圧縮応力は低下したが, 厚さ 5mm 以上ではさらなる圧縮応力の低下はみられなかった. したがって, 金型表面にステライトを厚さ 5mm 程度肉盛り処理を施

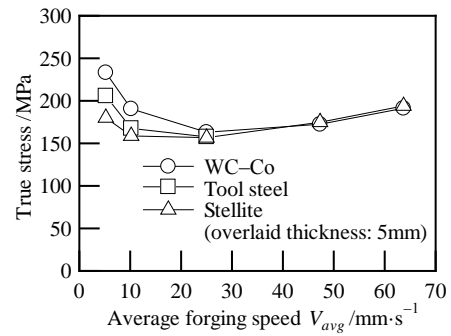


図 2 SCr420 試験片の熱間据込み鍛造における最大真圧縮応力と平均鍛造速度の関係 ($\Delta h/h_0 = 60\%$)

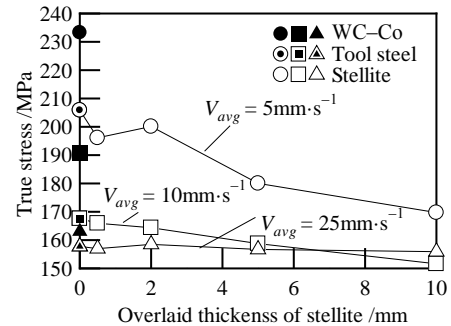


図 3 SCr420 試験片の熱間据込み鍛造における最大真圧縮応力とステライトの肉盛り厚さの関係 ($\Delta h/h_0 = 60\%$)

すことで, 鍛造荷重を超硬, SKD61 工具鋼金型に対して約 15~20% 低下させることが可能である.

3.4 繰返し据込み鍛造における金型温度の変化

$\Delta h/h_0 = 60\%$ の据込み鍛造を繰返すことを想定し, 鍛造回数と金型温度の変化の関係について考察する. ここでは 1273K の SCr420 試験片と 293K の大気が一定周期で工具表面に接触するモデルについて, 一次元非定常熱伝導解析により SCr420 試験片, 金型の温度分布を求めた. ただし, SCr420 試験片の塑性発熱, SCr420 試験片-金型間の摩擦発熱等は考慮せず, 金型初期温度を 293K, 金型母材を SKD61 工具鋼, 金型表面のステライトは厚さ 0~10mm と設定した. また鍛造サイクルを 10s/回とし, SCr420 試験片と金型の接触時間を 0.25, 3.0s (それぞれ $V_{avg} = 65, 10$ mm/s を想定) の二通りで計算した.

図 4 に SCr420 試験片との接触中 (鍛造中を想定) の金型表面最高温度の計算結果を示す. $V_{avg} = 10, 65$ mm/s のいずれの速度においても, ステライトが厚いほど金型表面温度の上昇は小さいことが分かる. 3.2 節の高速での熱間据込み鍛造においては, ステライト金型の使用による鍛造荷重の低減はみられなかったが, 図 6 の結果から金型の温度上昇の抑制効果は得られるものと考えられる. またステライトの厚さが 5mm 以上では金型表面温度の違いはほとんどみられず, 3.3 節のステライトの肉盛り厚さと鍛造荷重低減効果の結果とも合わせてステライトの肉盛り厚さは 5mm 程度以上が適当といえる. ただし, 鍛造品の体積も考慮する必要がある.

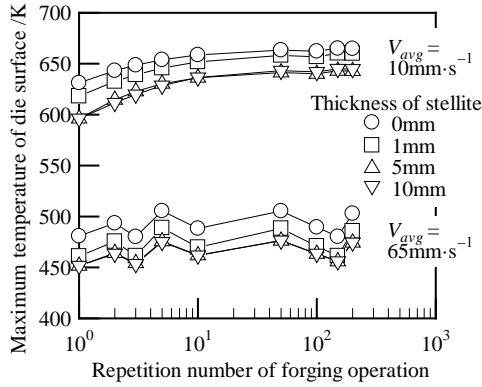
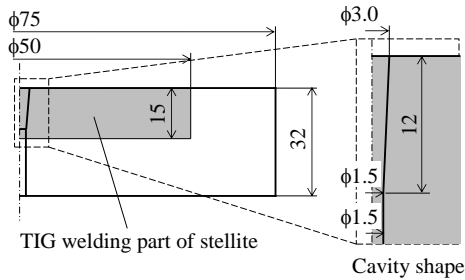


図 4 繰返し据込み鍛造における金型表面の最大温度の計算結果

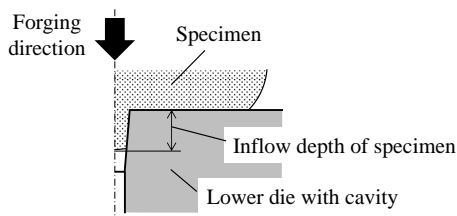
4. ステライト表面肉盛り工具を用いた細孔部への材料流動効果¹⁰⁾

4.1 熱間据込み鍛造条件

金型の熱伝導特性が被加工材の材料流動性に及ぼす影響を調べるため、金型に図 5 に示す細孔を設けて、据込み鍛造において細孔への被加工材の流入量を調べた。細孔付き金型は下側金型に用いて、上側金型には細孔のない平形状の金型を用いた。細孔付き金型には SKD61 工具鋼の表面部分の直径 50mm×厚さ 15mm の範囲にステライトを TIG 溶接により肉盛り溶接したものと超硬合金を用意した。一方、上側金型には SKD61 工具鋼の表面にステライトを厚さ 10mm で肉盛り溶接したものを使用した。ここで、SCr420 試験片の初期形状は直径 14mm× $h_0 = 10\text{mm}$ とし、1273K の無潤滑で鍛造を行った。



(a) 金型細孔部形状



(b) 金型細孔部への試験片の流入深さ

図 5 細孔付き金型の形状

4.2 有限要素解析

SCr420 試験片—金型間の熱伝達率が金型細孔部への SCr420 試験片の流動性に及ぼす影響を市販三次元有限

要素シミュレータ DEFORM-3D ver.10.1 を用いて調べた。形状の対称性を考慮して、1/4 断面 (90°分) を解析対象とし、SCr420 試験片の塑性変形と温度変化を計算した。SCr420 試験片—各金型間の熱伝達率 (h_D) は熱電対による SCr420 試験片温度変化の実測値と有限要素解析による温度計算値を比較して、ステライト (肉盛厚さ 15mm を想定)、超硬金型でそれぞれ $h_D = 5000, 12000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と決定した。SCr420 試験片の変形抵抗、ひずみ速度依存性指数は 3.2 節の熱間据込み圧縮の結果から算出し、SCr420 試験片—金型間の摩擦係数は $\mu = 0.30$ とした。

図 6 に $\Delta h/h_0 = 65\%$ での金型細孔部への SCr420 試験片の流入深さと SCr420 試験片—金型間の熱伝達率の関係を示す。 $V_{avg} = 25\text{mm/s}$ 以上では SCr420 試験片—金型間の熱伝達率による違いはみられないが、 $V_{avg} = 15\text{mm/s}$ 以下では熱伝達率の低い方が金型細孔部への流入は深く、さらに低速度ほど金型細孔部への流入が促進されることが分かる。次に金型細孔部へ据込まれた SCr420 試験片先端部の温度の計算結果を図 7 に示す。据込み速度が低速ほど加工時間が長くなるため、SCr420 試験片の温度は低下するが、熱伝達率が低いほど温度低下の度合いを小さく抑えられることが分かる。

また図 6, 7 より、超硬金型の場合は 530K 程度に加熱

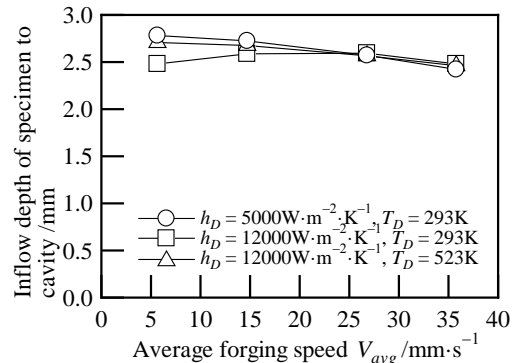


図 6 SCr420 試験片—金型間の熱伝達率 (h_D) が金型細孔部への試験片の流入深さに及ぼす影響 (T_D : 金型温度, $\Delta h/h_0 = 65\%$)

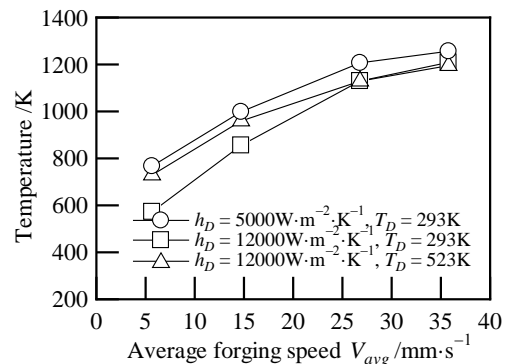


図 7 SCr420 試験片—金型間の熱伝達率 (h_D) が金型細孔部へ流入した試験片先端部の温度に及ぼす影響 ($\Delta h/h_0 = 65\%$)

することで金型細孔部への流入量は室温のステライト金型と同等の効果が得られることが分かる。しかしながら、金型の加熱に際してはヒーター等の加熱装置を金型に組み込む必要があり、さらに加熱による劣化が予想されるため、低熱伝導率金型の有用性は高いと考えられる。

4.3 実験結果

4.2 節で得られた有限要素解析結果を検証するため、細孔付き金型を作製し、熱間据込み鍛造実験を行った。図 8 に $\Delta h/h_0 = 20, 40, 65\%$ での SCr420 試験片の金型細孔部への流入深さの実験結果を示す。 $\Delta h/h_0 = 40\%$ 以下では金型細孔部への流入量は少なく、金型材料による違いもほとんど見られない。一方、 $\Delta h/h_0 = 65\%$ ではステライト金型の方が超硬金型より金型細孔部への流入量が多く、さらに高速の方が若干流入量は増加した。ステライト金型を使用することで金型細孔部への流入量が増加する点は有限要素解析結果 (図 6) と一致するが、据込み速度の影響については傾向が逆である。これは本研究での有限要素解析では熱伝達率や摩擦係数の境界条件に関して温度や圧力依存性を考慮しておらず、室温のものを使用したことが一要因と考えられるが、その要因は特定できなかった。

以上より、熱間鍛造において低熱伝導特性を有する金型材料は鍛造中の被加工材の温度低下を抑制する効果があり、金型隅部まで被加工材を充填できることから、熱間精密鍛造用金型への利用が期待できる。

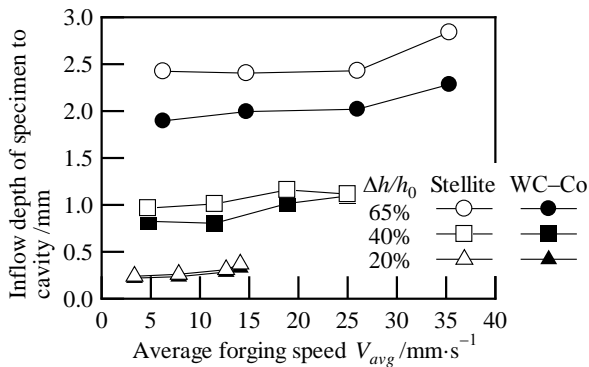


図 8 金型材料が金型細孔部への SCr420 試験片の流入深さに及ぼす影響

5. 超硬合金金型を用いた鍛造ダイクエンチ¹¹⁾

5.1 熱間鍛造条件

鍛造ダイクエンチ実験でのスライドモーションの概念線図を図 9 に示す。プレスは 450kN リンク式 AC サーボプレス (コマツ産機(株): H1F45) を用いた。鍛造終了直後のスライド下死点での停止時間を $t_{d,q} = 0 \sim 10$ 秒、また後方押し鍛造では、スライド上死点まで上昇後、ノックアウトパンチ作動までの時間を $t_e = 0 \sim 5$ 秒に設定して、鍛造品を金型内で金型との熱伝達により冷却した。

据込み鍛造では、直径 18mm $\times h_0 = 7.5 \sim 22.5$ mm の円柱状の SCr420 試験片を $\Delta h/h_0 = 0 \sim 50\%$ で無潤滑で圧縮した。

一方、後方押し鍛造では、図 10 に示すように直径 24mm $\times h_0 = 10, 13$ mm の円柱状の SCr420 試験片を内径面が超硬合金あるいはステライトのコンテナへ挿入し、直径 $\phi 8, \phi 16$ mm (押し比 1.1, 1.8) の超硬パンチで、SCr420 試験片の底厚 5mm まで鍛造を無潤滑で行った。

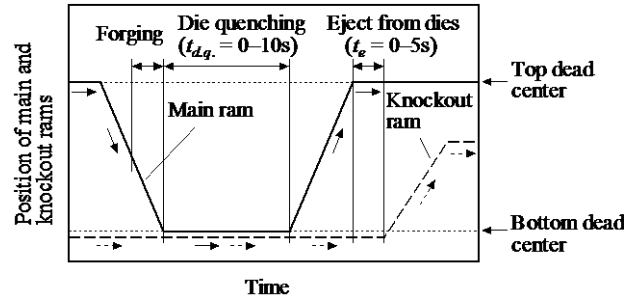


図 9 鍛造ダイクエンチにおけるスライドモーションの概念線図

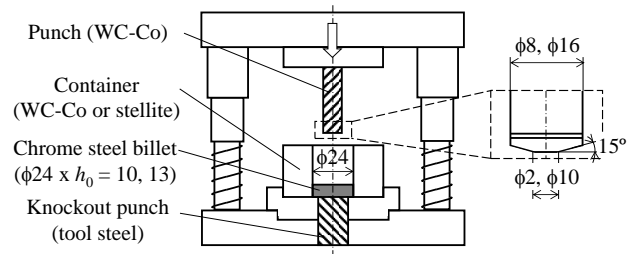


図 10 後方押し鍛造の金型構成

5.2 据込み鍛造における鍛造ダイクエンチ

SCr420 試験片を超硬金型間に 5 秒間挟込んだ場合 ($t_{d,q} = 5$ 秒) の試験片の硬さ分布と試験片高さの関係を図 11 に示す。試験片の硬さは試験片挟込み面と垂直断面で測定した。 $h_0 = 7.5$ mm では試験片全域が急冷され、水冷の場合と同程度の硬さ値 (約 500HV0.2) が得られた。一方、 $h_0 = 15$ mm 以上の場合、試験片高さが高いほど硬さ値は上昇の度合いは小さく、また工具接触面からの距離が遠くなるにつれ、硬さ値の上昇は見られなかった。

次にスライド下死点保持時間と据込み圧縮後の SCr420 試験片の硬さ分布の関係を図 12 に示す。ただし、試験片は $h_0 = 7.5$ mm であり、硬さ値は試験片高さ方向と平行断面の径方向中央部を圧縮面から 0.5mm 間隔で高さ方向中央まで測定したものの平均値である。超硬金型の場合、 $t_{d,q}$ に比例して硬さ値は上昇し、 $t_{d,q} = 5$ 秒以上では水冷した場合と同程度の硬さが得られた。一方、ステライト工具の場合、 $t_{d,q}$ に比例して硬さ値は上昇したが、超硬金型と比較して硬さ値の上昇の程度は小さかった。

試験片の高さ方向中央部に熱電対を埋込み、鍛造中の温度変化を測定したものを図 13 に示す。超硬、ステライト金型による試験片の冷却速度はそれぞれ約 300, 130K/s であった。SCr420 の焼入れにおけるマルテンサイト変態の臨界冷却速度が約 150K/s¹²⁾ であることから、超硬金型では焼入れ効果が得られることが分かる。

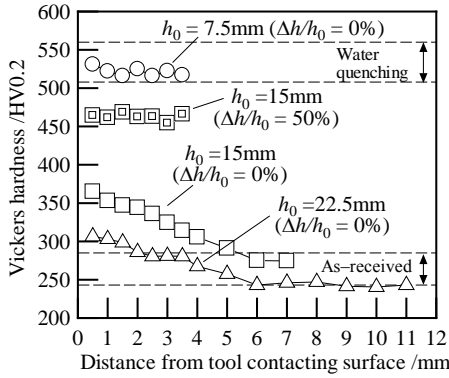


図 11 超硬金型による熱間据込み鍛造後の SCr420 試験片の硬さ分布と試験片高さの関係 ($t_{d,q} = 5$ 秒)

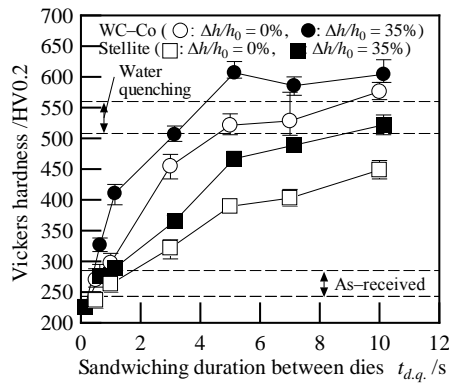


図 12 据込み鍛造における SCr420 試験片の硬さ分布とスライド下死点保持時間の関係 ($h_0 = 7.5$ mm)

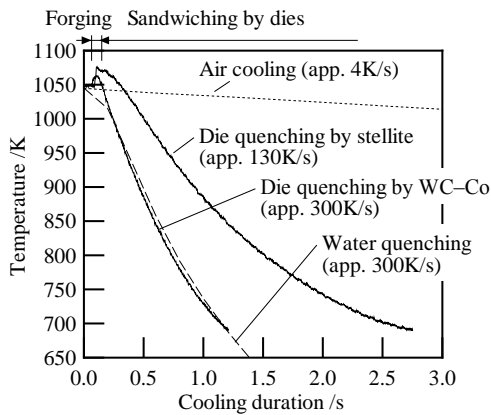


図 13 鍛造ダイクエンチ中の SCr420 試験片の温度変化の測定結果 ($h_0 = 7.5$ mm)

5.3 後方押し鍛造における鍛造ダイクエンチ

図 14 に超硬金型を用いた場合の後方押し鍛造後の SCr420 試験片の硬さ値の測定結果を示す。硬さ値は試験片高さ方向と平行断面において底面・側壁の中央部を測定した。パンチ直径 $\phi 8$ 、 $\phi 16$ mm いずれの場合も $t_{d,q} = 0$ 秒の場合、 $t_e = 5$ 秒としても焼入れ効果を得ることができなかった。 $t_{d,q} = 5$ 秒の場合、側壁厚さが 4 mm となるパンチ直径 $\phi 16$ mm の場合では、約 500HV0.2 まで硬さ値は上昇し、据込み圧縮での結果と同様の結果が得られた。

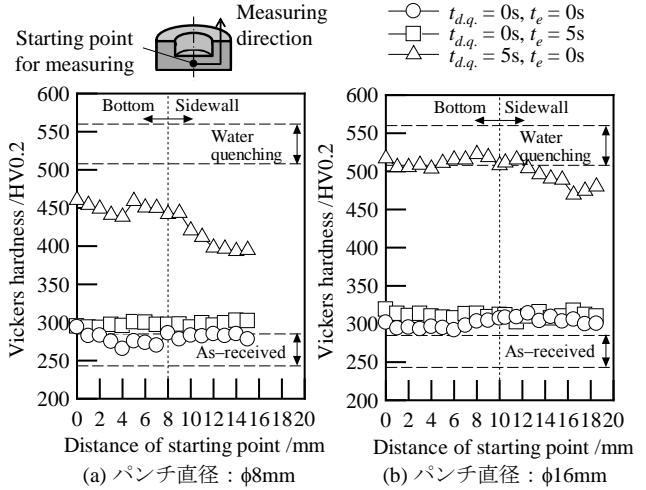


図 14 超硬パンチ、コンテナによる後方押し鍛造後の SCr420 試験片の硬さ分布 ($h_0 = 10$ mm)

5.4 後方押し鍛造における部分鍛造ダイクエンチ

鍛造品底部と側壁部で硬さ値を部分的に変化させることを検討する。まず底部のみを高硬度とすることを考え、図 15 に示すように、ステライトコンテナを使用し、側壁部肉厚が 8 mm 以上となる直径 $\phi 8$ mm の超硬合金パンチを使用して、 $t_{d,q} = 5$ 秒、 $t_e = 0$ 秒の条件で後方押し鍛造を行った。図 16 に硬さ値の測定結果を示す。鍛造品底部では 400HV0.2 以上、側壁部上方では約 300HV0.2 の硬さとなり、底部のみ焼入れ処理を施すことができた。次に側壁部のみを高硬度とすることを考え、金型は図 17 に示すように、超硬合金パンチ (直径 $\phi 16$ mm)、コン

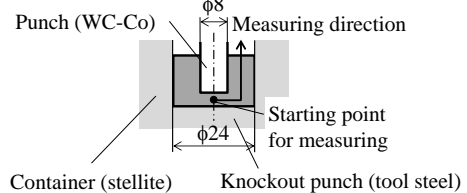


図 15 後方押し鍛造における底部鍛造ダイクエンチの金型構成

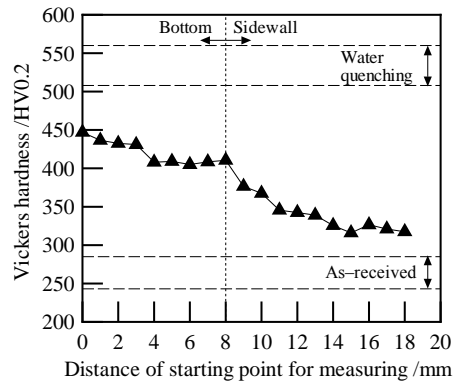


図 16 後方押し鍛造における底部鍛造ダイクエンチによる SCr420 試験片の硬さ分布 ($t_{d,q} = 5$ 秒)

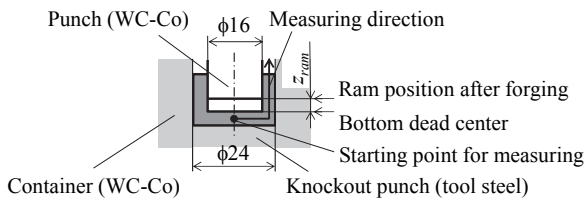


図 17 後方押し鍛造における側壁部鍛造ダイクエンチの金型構成

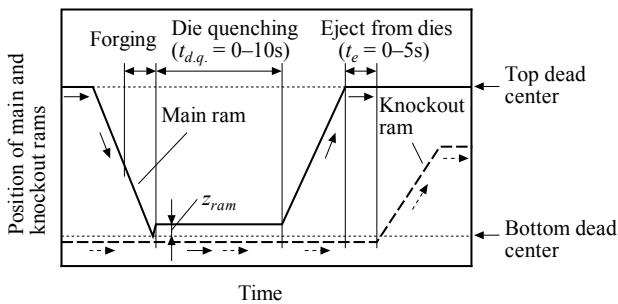


図 18 後方押し鍛造における側壁部鍛造ダイクエンチのスライドモーション概念線図

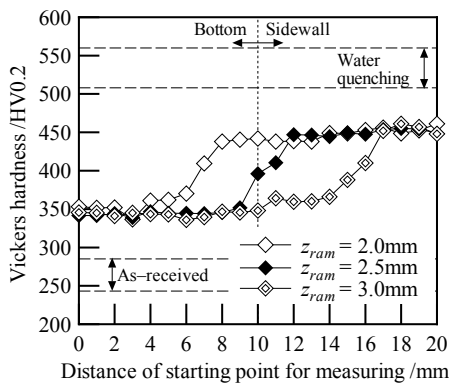


図 19 後方押し鍛造における側壁部鍛造ダイクエンチによる SCr420 試験片の硬さ分布 ($t_{d,q} = 5$ 秒)

テナを用い、スライドモーションは図 18 に示すように、鍛造直後にパンチを下死点の上方 $z_{ram} = 2.0 \sim 3.0$ mm まで上昇させた位置で $t_{d,q} = 5$ 秒間保持するよう設定した。鍛造後の SCr420 試験片の硬さ値の測定結果を図 19 に示す。鍛造品底部では約 350HV0.2、側壁部では約 450HV0.2 の硬さとなり、側壁部のみ焼入れ処理を施すことができた。

6. 結び

本研究では、サーボプレスを用いた熱間鍛造の基礎研究として、金型の熱伝導特性とスライドモーション制御に着目した鍛造法を提案した。低熱伝導特性を有する金型材料にはステライト、高熱伝導特性を有する金型材料には超硬合金を用いて、鋼材の据込み鍛造および後方押し鍛造により調べた。以下、得られた結果をまとめる。

1) ステライトを工具表面に厚さ 5mm 程度使用することで、鍛造荷重の低減（被加工材の抜熱抑制）、工具温度上昇の抑制に対して効果が得られた。低熱伝導率

金型の使用と被加工材のひずみ速度依存特性を組み合わせることで、鍛造荷重に対して最適な鍛造速度モーションを決定できる可能性がある。

- ステライト金型による熱間鍛造中の被加工材の抜熱抑制効果により、被加工材を高温に保ち、金型隅部まで被加工材を充填可能であった。低熱伝導率金型はネットシェイプ熱間鍛造の実現に際して、有効な金型材料の一つとして期待できる。
- 超硬合金金型を用いて、鍛造直後にスライド下死点で 5 秒以上停止させることで、超硬合金金型との接触部が肉厚 8mm 程度以下の鍛造品の部位では、水焼入れと同程度の硬さ値が得られた。また部分的にステライト金型を使用あるいはパンチ保持位置を変化させることで、鍛造品に対して部分的に焼入れ処理を施すことが可能であった。

謝 辞

本研究を進めるにあたり研究助成いただいた(公財)天田財団に深く感謝の意を表す。また金型材料、試験片をご提供いただいた蘇州漢金模具技術有限公司、ダイジェット工業(株)、新日本製鐵(株) (現：新日鐵住金(株))に感謝する。

参考文献

- Douglas, R. & Kuhlmann, D.: Journal of Materials Processing Technology, **98-2**(2000), 182-188.
- Yukawa, N., Ishikawa, T., Matsuo, T. & Nozaki, Y.: Steel Research International, (2011), Special Edition, 792-795.
- Doege, E. & Bohnsack, R.: Journal of Materials Processing Technology, **98-2**(2000), 165-170.
- Behrens, B.-A., Doege, E., Reinsch, S., Telkamp, K., Daehndel, H. & Specker, A.: Journal of Materials Processing Technology, **185-1-3**(2007), 139-146.
- Gladkov, Y.: Proceedings of the 4th JSTP International Seminar on Precision Forging, (2006), 105-110.
- 中崎盛彦・明珍洋之・中溝利尚: 山陽特殊製鋼技報, **12-1**(2005), 20-25.
- Osakada, K., Mori, K., Altan, T. & Groche, P.: CIRP Annals - Manufacturing Technology, **60-2**(2011), 651-672.
- Matsumoto, R. & Osakada, K.: Materials Transactions, **45-9**(2004), 2838-2844.
- Matsumoto, R. & Osakada, K.: Journal of Materials Processing Technology, **210-14**(2010), 2029-2035.
- 松本良・大住勇太・宇都宮裕: 塑性と加工, **54-627**(2013), 363-367.
- Matsumoto, R., Chida, T. & Utsunomiya, H.: Steel Research International, **82**(2011), Special Edition, 634-638.
- Ju, D.Y., Zhang, W.M. & Zhang, Y.: Materials Science and Engineering: A, **438-440** (2006), 246-250.