



K. Osakada

鍛圧技術における最近の進化と可能性

小坂田 宏造*

1. はじめに

日本では鍛造品の70%程度が自動車に用いられており、鍛圧技術は自動車産業の動向に大きく左右される。日本の自動車メーカーは生産のグローバル化を加速しており、鍛造品を現地調達したり、世界共通の柔軟な設備、小型少量生産設備で生産したりすることが進みつつある。このため鍛造業界もグローバル化対応を迫られている。

リーマンショック以来、ハイブリッド車や電気自動車が急速に増加しているが、これによりクランクシャフトやコンロッドなどの鍛造品が減少することが懸念されている。一方、電池やモータに用いられる部品のコストダウンが求められるようになると、これらに鍛造品を用いることが期待されている。

自動車用鍛造品の国内需要の減少が予想されるため、自動車以外の鍛造品も検討されるようになった。米国では航空宇宙分野の鍛造品が多く、日本でも航空機産業が少しずつ伸びてきている。電子、情報、医療産業用部品は寸法が小さく要求精度が高いなど、自動車とは部品特性が大きく異なる。しかし、これらは鍛造によるコストダウンが十分に進んでいない分野であり、技術開発によっては将来性があるとも言える。

鍛造現場での環境対策やCO₂削減も重要な課題である。冷間鍛造の適用範囲の拡大、熱間鍛造と熱処理を組み合わせた加熱回数の低減、加熱設備の効率化などが望まれる。また、環境への負荷低減を進めるため、環境への影響の小さい潤滑剤などの動きも見られる。

以上の状況のもとで、「新技術開発による高付加価値鍛造品」が多くの関連企業の共通認識になりつつある。

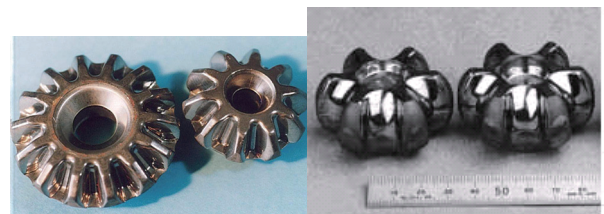
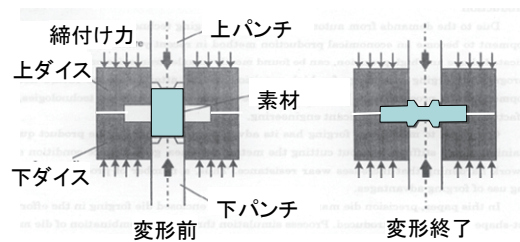
2. 冷温間鍛造

2. 1 閉塞鍛造

図1に1990年代以後に急速に増加した閉塞鍛造の考え方と製品例を示す。上下金型の間の型空間に置かれた素材を上下のパンチで圧縮する。パンチとの接触面積がほぼ一定であるので、バリを圧縮する半閉塞鍛造にくらべ加工力は低くなる。この方法では上下パンチの動きと共に金型の閉め付け力も必要である。このために、特別な設計のダイセットも開発された[1]。

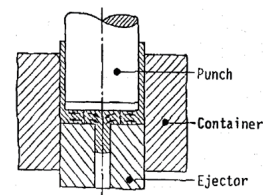
2. 2 分流法

大きな断面減少率での後方カップ押出において、図2

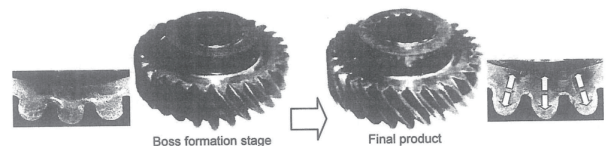


傘歯車 等速ジョイント部品

図1 閉塞鍛造方法と鍛造品



(a) 分流鍛造の原理



(b) 分流鍛造の工程例

図2 分流鍛造の原理とヘリカルギヤの鍛造工程

(a)のように押しし口を設けた対抗（下側）工具を用いることが多い。この出口によりビレットの自由表面が増加し、押しし圧力が低下するが、前方の押しし軸（捨て軸）は鍛造後に切断される。この方法の材料流れを見ると、中央で外向き流れと内向き流れに分割されている、このような流れの加工を「分流法」と呼んでいる。図2(b)のヘリカル歯車の生産において、密閉鍛造を第1工程で行い、第2工程で分流法が適用された[2]。

2. 3 背圧押し

多数の押しし出口がある押しし加工の場合、図3(a)のように各々の出口から押し出される部分の長さは一定にならない。図3(b)のように出口から背圧をかけた対抗工具を押しつけながら押ししを行うと、長さを同一にすることが可能である。

*大阪大学・名誉教授

[1,3]. 圧力を加える対抗工具は他の部分より速く出るときの速度を抑える役割をする。出口から加える平均圧力は変形抵抗の3%程度と比較的低い値である。図3(c)にこの方法で製作されているスクロールコンプレッサー用の部品を示す。

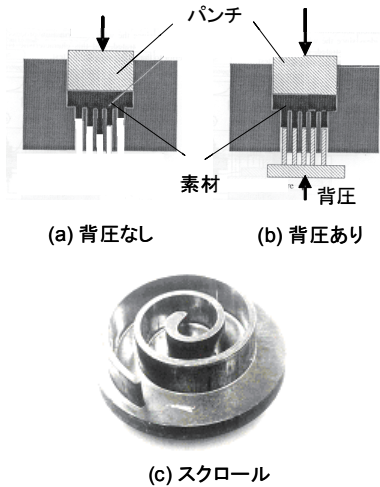


図3 背圧鍛造と鍛造品（スクロール）

2. 4 軽量化鍛造

部材の肉厚を薄くすることにより軽量化し、電機電子部品や自動車部品に用いることも検討されている。板鍛造では単に圧縮して板厚を減少するだけでなく、部分的には厚肉化する必要がある。このために板面に平行な圧縮力を加えると、板の座屈を生じやすく、座屈防止が重要な技術になる。

図4(a)は深絞りとバーリングで作ったカップの側壁を軸方向に圧縮し、板厚を増加させると共に、歯車の歯の部分に材料を流す方法である。図4(b)にこの方法により製造した歯付き部品を示す[4]。外側の壁を軸方向に圧縮して厚くし、歯の部分に半径方向押出しにより材料を流している。

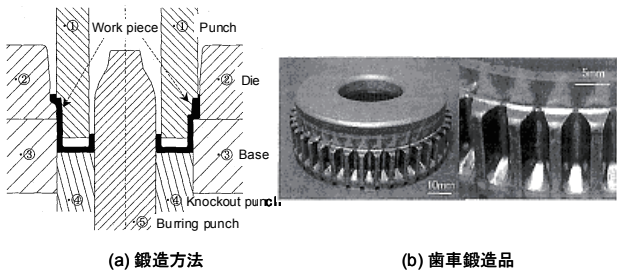


図4 板鍛造方法と鍛造品（歯車）

部材の剛性を落とさずに軽量化するためには、材料を高強度にし、鍛造品の内部を中空にすることが有効である。図5は内部を中空にした自転車用のアルミ製クランクである[5]。これは冷間鍛造で作成されているが、各種の中空化の鍛造技術が開発されることが期待される。

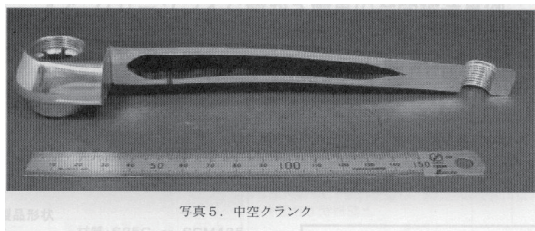
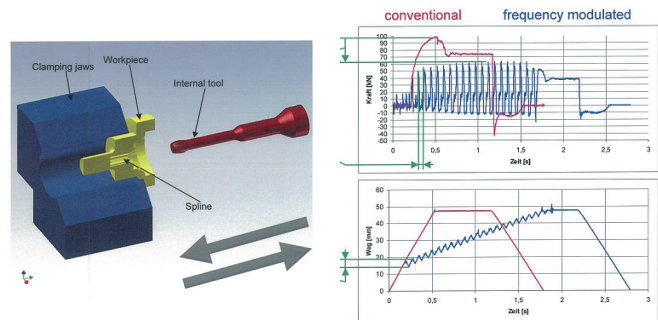


図5 冷間鍛造で作成された中空アルミクランク

2. 5 振動鍛造

塑性加工時に振動を加える方法は長い研究歴史があるが、今までほとんど実用化されていない。最近ドイツのFELSS 社が図6(a)のように工具を往復させてスプラインを作成するAXIALFORMINGを開発、販売している。これは図(b)のように2mm前進、1mm後進を一秒間に10回程度繰り返し、約5秒でスプラインが完成する。後進時に液体潤滑剤が界面に入り、最大荷重が40%程度も低下し、加工限界が大幅に向上する。今まで転造を用いていた分野で使用されるようになってきている。

このような振動モードは後で説明するサーボプレスで実現できるため、今後の応用範囲の拡大が期待される。



(a) 原理 (b) 荷重と変位の履歴
図6 振動鍛造 AXIALFORMING

筆者らは密閉鍛造において図7のようにコンテナを振動させる方法を提案している。この方法はコンテナに作用する摩擦力を角部充満の駆動源として用いて、パンチに加わる荷重を50%程度にしている。同様な方法でスプライン鍛造や前後方押出しにおける加工力の大幅低下が可能である。

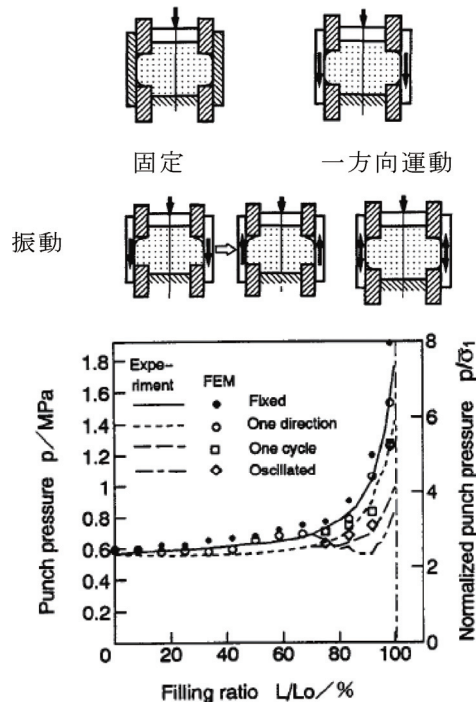


図7 コンテナ駆動密閉鍛造 3. 熱間鍛造

3. 熱間鍛造

3. 1 バリなし鍛造

熱間鍛造は小物部品がホットフォーマで加工されている以外はバリ出し鍛造がほとんどである。バリは投入材料の20~40%にもなり、コストダウンのためにバリなし熱間鍛造方法の開発が不可欠である。

図8はドイツ・ハノーバ工科大学で研究されているバリなし鍛造方法[6]の例である。密閉鍛造の問題は体積が過大のときに金型を破壊する可能性があることであるが、この場合はバネで押さえた工具を材料が押しながら逃げるようにし、充满促進と余剰材の逃げを両立させている。

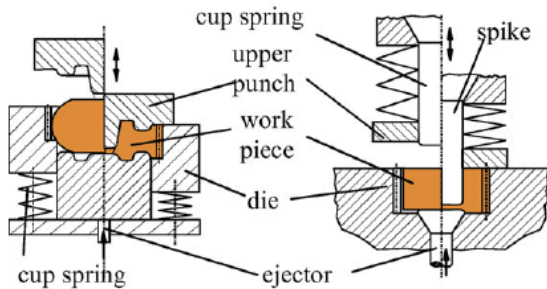


図8 歯車の密閉鍛造方法

3. 2 鍛造熱処理

鍛造焼入れなど、熱間鍛造と熱処理を組み合わせる鍛造品の材質を向上させることが以前からなされている。熱間圧延では加工温度と冷却速度を組み合わせることで高強度高靱性材料が製造されており、鍛造でも各種の新加工熱処理法の出現の可能性がある。

図9は五十川らが提案しているSUS630鋼のオースforming法[7]における変形抵抗の温度依存性である。1050℃からの冷却途中500℃前後で鍛造すると、加熱途中の半分以下の変形抵抗になると報告されている。

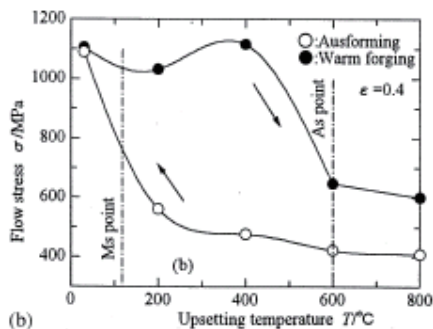


図9 SUS630H鋼の冷却途中の加工での変形抵抗

4. 鍛造用素材

4. 1 熱間鍛造用鋼材

熱間鍛造に対し微量の合金成分(V)を入れたS45C-Vのような非調質鋼が開発され広く使用されている。この鋼では熱間鍛造後に冷却速度を制御してVCを析出させて硬化する。このため、鍛造後に焼入れ処理を省くことができ、エネルギー節約に大きく役立っている。

このタイプの非調質鋼では衝撃値が低いことが問題で

ある。延性を増して衝撃値を高めるため、低C高Sにして熱間鍛造後の冷却中に結晶粒径を微細化した鋼が開発された[8]。図10に焼入れ焼戻し鋼(QT鋼:調質鋼)、今までの非調質鋼、新規開発非調質鋼の衝撃値を引張強度に対して示す。新規開発の非調質鋼の衝撃値は調質鋼にかなり近づいている。

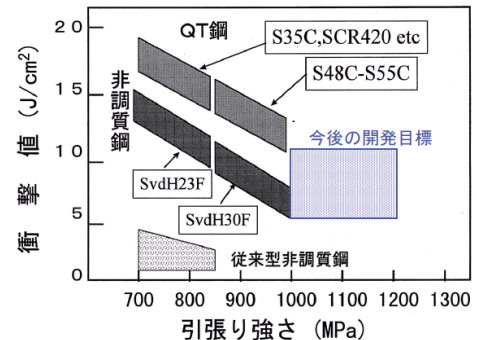


図10 非調質鋼の引張り強度と衝撃値の関係

4. 2 冷間鍛造鋼

通常の炭素鋼ではほとんどの炭素はパーライトの中の層状セメンタイトの成分として存在する。セメンタイトは非常に硬いので、製品強度を上げるために不可欠であるが、加工中の変形抵抗も高める。最近、圧延中の加工熱処理(TMCP)によって「マイルド鋼」が開発された。その基本的な考え方は圧延条件によってセメンタイトの層間距離が小さくなり、パーライトが減ってフェライトの体積割合が増加することにある[8]。

もし、炭素が黒鉛(グラファイト)の状態で存在し、加工後の熱処理によりセメンタイトに変化するのであれば、加工中の変形抵抗は低く、加工後の強度を高くすることができるはずである。こうした考え方により黒鉛鋼は開発された[8]。図11は0.5%Cの炭素鋼の金属組織である。図中の黒点が黒鉛、白い地はフェライトである。この材料はまだ市販されていないが、この考え方は冷間鍛造用鋼の将来の方向性を示しているといえる。

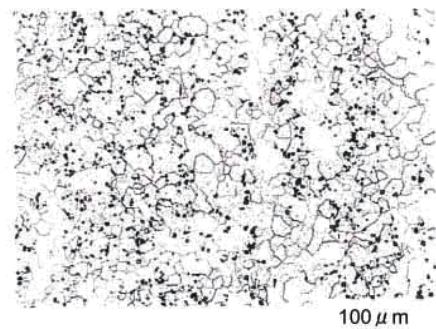


図11 黒鉛鋼の組織: 白い地(フェライト)の中の黒点がグラファイト

4. 3 軽量金属

(1) アルミニウム

軽量化のためにアルミニウムの鍛造品が増えているが、通常のアルミ合金の比強度は高強度鋼に比べてそれほど高くない。アルミ鍛造品が商品力を持つには強度の高い材料を使用する必要がある、アルミに高温強度を持たすために粉末冶金で酸化物を分散させる方法が使用される

ようになった。これらの高強度アルミの鍛造は高温でも容易でないため、恒温鍛造など加工速度と温度を組み合わせた新しい加工方法が必要になる。

鍛造用の鉄鋼材料は圧延材を使用することが前提になっているが、アルミは鍛造材を鍛造することも多くなされている。この場合、鍛造の前工程である鋳造において工夫をすることにより鍛造欠陥を少なくすることができる。また、図 12 のように鍛造において出たバリや切断部をリサイクル、再溶解して使用することにより大幅な歩留まり向上が可能になる[9]。

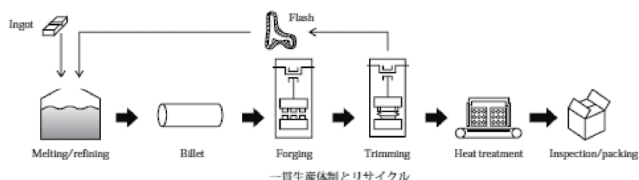


図 12 アルミ鍛造におけるリサイクリングシステム

（2）チタン

チタン合金は比強度が高く軽量化に適しているが材料が高価であるので、切り屑を出さない精密鍛造品の競争力はあると見られる。しかし、工具と焼き付きやすいため鍛造では難加工である。最近チタン合金の冷間鍛造用の潤滑方法が開発され、ボルト、ナットなどのフォーマ鍛造への展開が期待されている。

（3）マグネシウム

マグネシウムは室温では割れやすく難加工であるが、300℃程度では加工が可能になる。マグネシウムの板鍛造ではサーボプレスを用い、加熱した工具で挟んで素材を加熱し、鍛造する方法が提案されている。

鍛造用マグネシウム合金の伸展材は高価であるが、最近、中国産の鋳造用マグネシウムが伸展材より大幅に低い価格で販売されるようになり、これを鍛造するような研究も行われている。こうした材料を用いた商品力のある鍛造品も可能性があると見られる。

5. 潤滑

5. 1 温間、熱間鍛造のための非黒鉛系潤滑剤

温間および熱間鍛造における作業環境を改善するため、非黒鉛の白色潤滑剤が使用されるようになった。高分子系では乾燥した厚い潤滑膜の摩擦係数は黒鉛潤滑剤と同じ程度の低い値になる。高分子潤滑剤は 200～300℃において工具に焼き付き、密着するので打撃直後の高温の状態で潤滑剤をスプレーして焼き付ける。その後、次の打撃前に水の噴流で金型を冷却し、空気ジェットにより水を乾燥させる必要がある。図 13 は等速ジョイント部品の温間鍛造における工具表面温度と潤滑およびパンチ寿命の関係である[10]。パンチ寿命は潤滑膜の厚さが最大になる温度において最長になっていることが分かる。

5. 2 冷間鍛造用の一液潤滑剤

冷間鍛造で長年用いられてきたリン酸塩皮膜処理はスラッジや廃液が環境に有害であるため、使用が困難にな

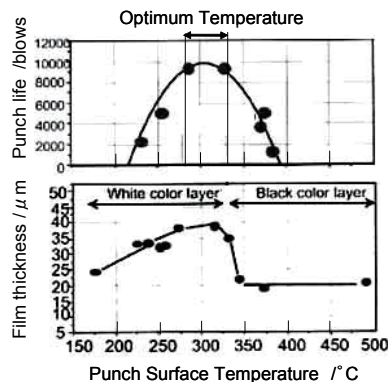


図 13 白色潤滑剤を用いた CVJ 部品の温間鍛造におけるパンチ温度とパンチ寿命

っている。また、潤滑設備が大がかりで面積をとり、処理時間が長いことも問題である。こうしたことから、「一液潤滑」と呼ばれる潤滑方法がいくつか開発された。それらの共通の特徴は、潤滑剤を含んだ液に短時間つけた後、高温の空気で乾燥させるだけで素材表面に固体潤滑膜を生成させることである。

図 14 は冷間鍛造に用いられる潤滑剤の使用範囲を概念的に示したものである[11]。加工度が比較的に軽い場合には油系の潤滑剤で使用できる。一方、厳しい加工には今までリン酸塩処理皮膜と金属石けんの組み合わせが用いられてきた。一液潤滑剤はこれらの中間領域に適用されたが、次第に適用領域を重加工側に広げている。

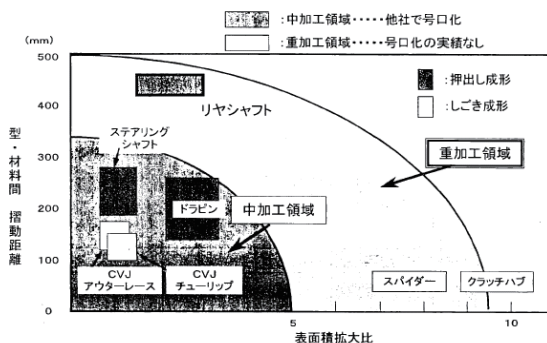


図 14 冷間鍛造用潤滑剤の適用範囲

6. 工具材料と工具表面処理

6. 1 超合金補強リング

補強リングは材料と接触する金型インサートを締付けで補強するために使用されており、リング材料には、通常、延性のある高強度鋼材が用いられている。薄板巻付けの補強リングを販売しているデンマーク STRECON 社は内側リングに超合金を使用することにより応力変動によるインサートの弾性変形量の変動を 30%程度減少させることができる方法を提案している（図 15）。

この方法の原理は、弾性係数の高い超合金を内側リングに使用するとリング内径の変動が小さくなり、このためインサートの応力変動の振幅が小さくなることである。応力振幅が 10%低減すると工具寿命は 1 桁近く延びる。外側リングが鋼の場合にも、超合金内側リングでかなりの工具寿命延長効果が得られるであろう。

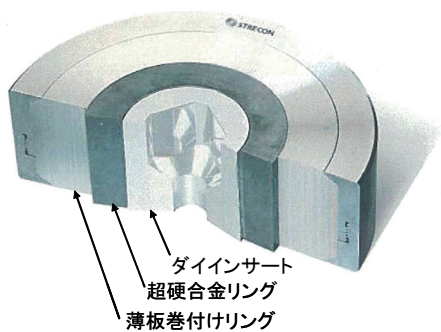


図 15 超合金を用いた補強リング

6. 2 熱間精密鍛造用工具材料

熱間鍛造には SKD61 など熱間工具鋼や高速度鋼が用いられることが多い。これらの鋼系の工具は 650℃以下で焼戻し処理をされており、焼戻し温度以上になると急速に軟化する。図 16 に超合金と高速度鋼の高温硬さを示す。超合金は鋼の焼き戻し温度を超えた 700℃でも高硬度を維持している。超合金の硬さは主成分の WC 粒子素材硬度に由来し、熱処理によって硬化させたわけではないので熱履歴により軟化することはない。

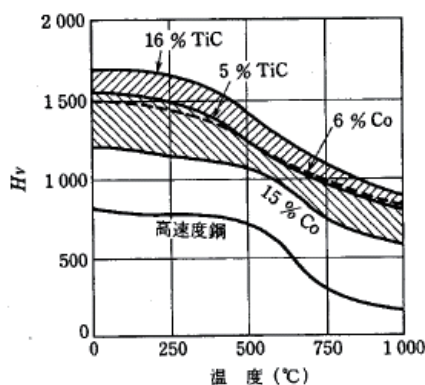


図 16 高温における高速度鋼と超合金の硬さ

しかし、WC-Co 系超合金は Co が 300℃付近から酸化され始め、700℃以上になると主成分の WC が急速に酸化されるため、長時間空气中で高温にさらされるような用途には向かない。このため、熱間フォーマのカッター、アプセットダイなど、工具が瞬間的に高温になる場合に使われている。

工具が高温になる場合には、高温強度があり、高温で酸化しないセラミックが使われる。図 17 にダイジェット製セラミックス系工具材料と 6%Co 超合金 (VM-20) の高温硬さを示す。Si₃N₄ 系セラミックスは、エンジンバルブのアプセットダイスにも使用されている。また、WC バインダレス合金は高硬度でガラスレンズ型等に適用されている。これらの材料は、高温高压で焼結する製造方法の制限から、作成できる工具寸法に限度があり広く使用するの難しい。

TiCN 系新合金は TiCN の粉末を金属バインダーで固めたものである。この合金は 900℃までの温度範囲での耐酸化性と Hv1000 以上の高硬度を保つ。また、超合金と同程度の大きさの焼結品の製造が可能であり、通電性

があって放電加工もできるので、複雑な形状の高温精密鍛造用工具への適用も期待される。

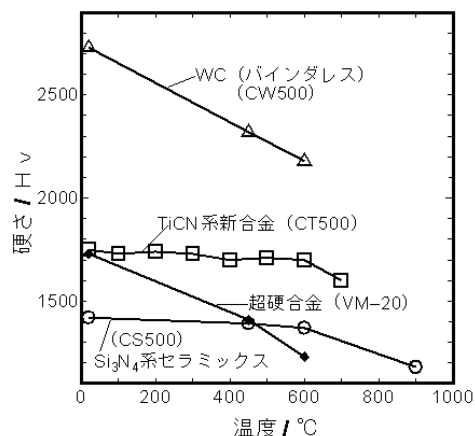


図 17 各種セラミック系材料の高温硬さ

6. 3 工具コーティング

最近冷間鍛造用の金型にも摩耗低減のために硬質被膜をコーティングすることが多くなった。鍛造工具に施されている被膜は、超合金より硬さが高く摩擦係数が低い TiC, TiN, TiCN が多く用いられている。

化学蒸着法 (CVD コーティング) では TiC 単層と TiC+TiCN+TiN の 3 層被膜が主に行われている。TiC は金属炭化物のうち最も高硬度で摩耗しにくく、また、TiN は摩擦が低いことが知られている。CVD では母材を 1000℃近辺に加熱するため、工具鋼の場合にはコーティング後に再焼入れする必要がある。

物理蒸着法 (PVD コーティング) では、TiN または TiCN 被膜が行われる場合が多く、最近では TiCrN や AlCrN 被膜も見られるようになった。

切削工具では TiAlN や DLC コーティングも使用されている。TiAlN は高温で硬度が高く、酸化されにくいので超合金に被覆されて高強度材料の高速切削に利用されており、熱間鍛造型への適用も可能性がある。DLC はアルミとの摩擦が低いため、アルミ鍛造への適用が考えられる。

7. サーボプレス

7. 1 サーボプレスの機構

AC サーボプレスはクラッチブレーキおよびフライホイールがないため、これらに関連する歯車や潤滑設備が不要になり、簡単な機構になっている。さらに、ラム/スライドの運動が自由に制御できるため、新しい加工方法や新しい機能が実現できる可能性があることである。

図 18(a) はボールねじでスライドを直接動かすタイプ (コマツ HCP3000:80 トン) で、サーボプレスの最も基本的なメカニズムである。この方式は、ラム位置によらず規定出力を出すことができるため、長い製品の押出しなどにも使用できる。しかし、ボールスクリュウだけでは大荷重を発生できないため、多くのサーボプレスは通常のプレスと同じようにクランク機構 (図 18(b)) やリンク機構を介して力を増幅している。

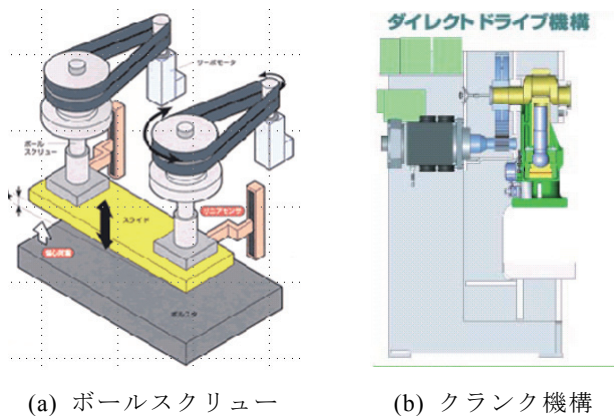


図 18 サーボプレス駆動方式

現在のサーボプレスは板金加工用がほとんどであり鍛造用は少ない。冷間鍛造用としては図 19 のコマツ H1C630 (630 トン) が開発されている。このプレスでは 2 台のモータとリンク機構を組み合わせている。

アミノはボールスクリーンと独自のリンク機構を組み合わせて 2500 トン鍛造プレスを開発した実績がある。



図 19 630 トン冷間鍛造用サーボプレス (コマツ)

7. 2 鍛造への応用

図 20 は 2500 トンサーボプレスによる傘歯車の閉塞鍛造工程例である。機械プレスに比べ金型寿命が 3 倍程度になり、エネルギー使用が 1/2 になったと報告されている。



図 20 傘歯車の冷間閉塞鍛造 (アミノ)

切削で製造されているステアリング・ピニオンを、各種の速度での冷間押出ししたときの歯筋誤差のシミュレーション結果を図 21 に示す[12]。加工速度を最適化することにより工具や素材の弾性変形、熱変形を変化させ、高精度な鍛造品を加工できる可能性がある。

高温の鍛造においては加工速度を落とすと荷重の顕著な低下が見られるため、熱間鍛造の最終工程を極低速で加圧することにより、大幅な荷重低下を実現できる可能

性がある。このためには高温の素材を冷却しないような断熱性の高い工具の開発が望まれている。

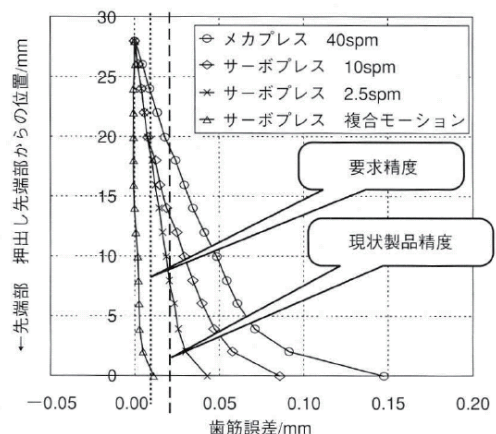


図 21 各種鍛造条件でシミュレーションされたステアリング・ピニオンの歯部の精度

8. おわりに

最近 20 年程度の技術開発動向を見ると、日本から多くの新しい鍛造技術に関する研究成果が出てきており、ここで紹介できなかった実用化の可能性のある技術も多くある。「日本発の新しい鍛造技術」を実現するには、こうした研究成果を実用化するのが早道である。

今まで日本塑性加工学会の鍛造分科会が鍛造に関する産学の情報交流の役割を果たしてきたが、産学共同で技術開発を進めるところまでは行っていない。今後、産業界が共同で出資し、大学などの研究者とともに技術開発を行うような動きを加速して行く必要があると思われる。

参考文献

- [1] Yoshimura, H and Wang, C.C.: Manufacturing of Dies for Precision Forging, Proc. 1st JSTP Int. Seminar on Precision Forging,(1997), 15-1 ? 15-7.
- [2] Kondo, K., Ikushima, K., Inoshita, H., Ogura, M. and Ono, K.: Net Shape Forging of an External Helical Gear with Boss and Internal Spline, Advanced Technology of Plasticity 2002, JSTP, (2002), 11-16.
- [3] 小坂田, 花見, 荒井: 背圧押出しにおける変形状態について—浮動工具により背圧を加えた押出し加工第 1 報—, 塑性と加工, 41-477(2000), 1026-1030.
- [4] 石田均: 金型の弾性変形を活用したクラウニング付ヘリカルギアの冷間鍛造技術, 塑性と加工, 44-505(2003), 85-88.
- [5] 龍野: 自転車部品の冷間鍛造—最近の話題, 冷鍛ファミリー会冷間鍛造技術資料集, (2007), 93-97.
- [6] Behrens, B.-A., Doege, E., Reinsch, S., Telkamp, K., Daehndel, H., Specker, A.: Precision forging processes for high-duty automotive components, Journal of Materials Processing Technology, 185 (2007), 139?146.
- [7] Isogawa, S., Yoshida, H., Hosoi, Y., Tozawa, Y.: Improvement of the forgability of 17-4 precipitation hardening stainless steel by ausforming, Journal of Materials Processing Technology, 74 (1998), 298?306.

- [8] 戸田，越智，小此木，新保：最新の鍛造用鋼材（軟質冷間鍛造用鋼材と非調質熱間鍛造用鋼），JFA，2003-5(2003-6), 15-23.
- [9] 福田，稲垣：アルミ鍛造サスペンション拡大に向けて，R&D 神戸製鋼技報，57-2(2007), 61-64.
- [10] Morishita, H.: Innovation of Automobile Parts, 18th Int. Forging Conf. ,(2005), 210-219.
- [11] 樫村，竹内，小田，河原，尾嶋，伴野：簡易設備・短時間処理可能な冷間鍛造用水溶性潤滑剤の開発，塑性と加工，41-469 (2000),109～114.
- [12] 安藤：サーボプレスを活用した鍛造加工，プレス技術，47-12(2009), 27-31.