

# 精密鍛造技術の発展と今後の可能性

Development of Precision Forging Technology and Future Possibility

小坂田 宏造\*

Kozo OSAKADA

Synopsis: Cold forging technology, first developed in Germany and introduced into Japan in 1950s, expanded quickly as the automobile production increased for manufacturing simple shaped car parts. From around 1980, warm forging and enclosed die forging began to be used first in the world to produce CVJ (constant velocity joint) parts with complicated shapes. From around 2000, mechanical and hydraulic servo presses enabled to shape gears and plate products with complicated motions. Due to the increase in overseas manufacturing of automobiles, forging with highly automated small sized forging facilities and multi-axial presses were developed. It is anticipated that precision forging technologies for more value added products in terms of shape and metallic properties appear in the future.

Key words: precision forging, cold forging, warm forging, enclosed die forging, constant velocity joint, gear, servo press

## 1. はじめに

1950年代に我が国に導入された冷間鍛造技術は自動車生産増とともに急速に進歩・普及した。冷間鍛造形式の温間鍛造や熱間フォーマ鍛造も1980年頃から行われるようになり、これらを総称して精密鍛造と言う。精密鍛造は1990年頃からは等速ジョイントの異形部品に、2000年頃からは歯車やスプラインなどの高精度製品や厚板部品に適用されるようになった。最近、自動車生産の海外展開とともに精密鍛造の海外生産も急速に進んでいる。

海外生産が進展するとともに、国内では高付加価値製品の大幅な製造コストダウンが求められるようになり、精密鍛造技術にも期待が寄せられるようになった。以下では精密鍛造の発展経過を振り返りながらその方向性を概観するとともに、新技術開発のヒントとして、過去に提案されながら活用されていない精密鍛造技術も紹介する。

## 2. 冷間鍛造の始まりと経済性

### 2.1. ドイツにおける冷間鍛造の始まり

室温における押し出しは、鉛やアルミニウムについては19世紀に確立されていたが、鉄鋼材料では工具との焼付きが発生するため困難であった。この問題の解決の糸口はドイツ・ニュルンベルグのKabel und Metallwerke Neumeyer AGのDr. F. P. Singerによる、腐食防止処理用のリン酸塩皮膜を冷間押し出し用潤滑に使用する特許(1934年)であった<sup>1)</sup>。リン酸塩処理は、リン酸イオンや亜鉛イオンを含む

溶液を用いて金属の表面に化学的にリン酸亜鉛( $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ )などのリン酸塩被膜を生成させる化成処理である。1906年に英国でこの特許が取得され、1915年に米国のパーカー兄弟が特許使用権を取得して、パーカラージングの名称で防錆処理として広まっていた。リン酸塩皮膜は鉄表面と強固に結合し、素材表面積が拡大しても追従することができ、工具表面と素材表面の直接接触を防ぎ、焼付き発生を抑制する。リン酸塩処理後に金属石けん処理を行うと、良好な潤滑剤である金属石けんを生成して工具との低摩擦の働きをするため、今日でも冷間鍛造の中心的な潤滑方法である。

1935年にNeumeyer社のMr. A. Liebergeld, Dr. F. P. Singerは、葉莢(図1)の製造特許を取得した<sup>1)</sup>。これらの特許はドイツ以外では秘密にされていた。ドイツの第二次大戦敗戦後に、米国によりNeumeyer社の設備が接収され、

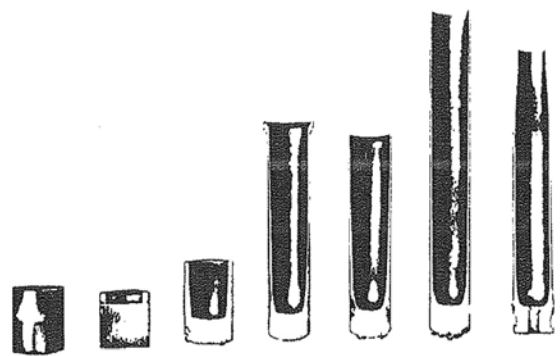


図1 1945年までにドイツで製造された葉莢の冷間鍛造工程<sup>1)</sup>

原稿受付日：平成27年3月22日

\* 大阪大学 名誉教授

冷間鍛造技術が米国にも伝わった。1945年以降Neumeyer社は葉莖に似た形状の自動車用の点火プラグ用の金属部分を製造するようになった。

戦後のドイツで注目される冷間鍛造技術の一つは、シュツットガルト工科大学のマイ (O. May) 博士により開発された冷間鍛造用のマイプレスである。冷間鍛造プレスは、大きな集中荷重による衝撃を防ぐために打撃速度が低いことと、製品精度を保つためにプレスフレームの弾性変形が小さいことが求められる。このプレスは図2のようにナックルジョイント機構を採用して下死点近傍で速度を低下させている。また、プレス下部に駆動部を配置して、剛性の高いコネクティングロッドを引張り下げてスライドを駆動する構造であり、フレームの弾性変形を大幅に減らし、高い回転数を可能にしていた<sup>2)</sup>。

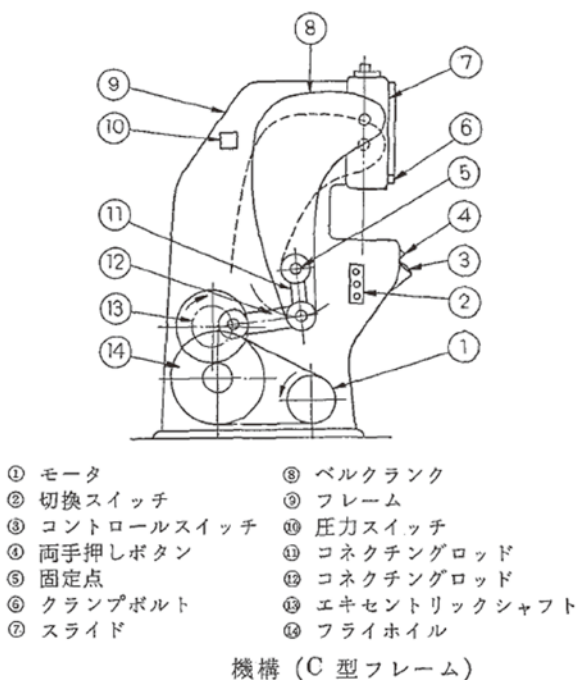


図2 マイプレス<sup>2)</sup>

## 2.2. 冷間鍛造の経済性

冷間鍛造は自動車生産の増加とともに急速に使われるようになるが、冷間鍛造は生産個数が増加すると急速に経済的になるためである。図3に図中の歯車製品を切削加工だけで生産する場合と、冷間鍛造の後に切削加工を行うときのコストと生産量の関係の例を示す<sup>3)</sup>。横軸の生産量は金型1組によって生産可能な生産個数(金型寿命)である。冷間鍛造金型は高価であるので生産量1,000個までは切削の方が低コストであるが、それ以上では冷間鍛造+切削の方が低くなる。

生産量が100,000個以上になると後切削コストの割合が大きくなり、切削の削減のためにチャッキング回数を少なくするように冷間鍛造形状を工夫したりする。ネット

シェイプ鍛造により切削の全廃も目指されたが、工作機械や切削工具の進歩により切削でもコストダウンが行われたため、全コストを最小にするように冷間鍛造品を切削で仕上げるのが普通である。

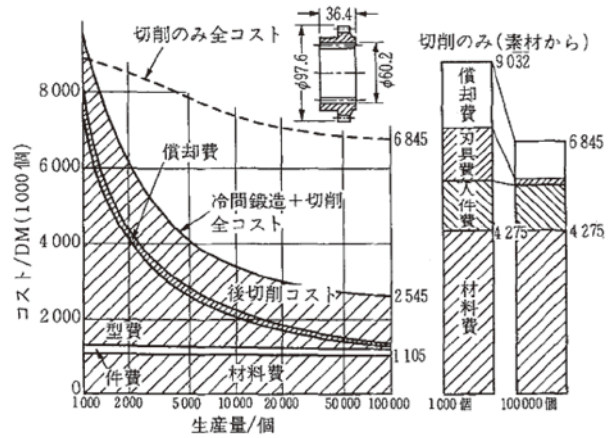


図3 冷間鍛造と切削による歯車素材の製造コスト<sup>3)</sup>

## 3. 1980年までの日本の冷間鍛造

### 3.1. 日本における冷間鍛造の始まり

日本で最初に冷間鍛造に着目したのは1950年代に大量生産を行っていた自転車業界であった。競輪事業の収益金を原資とした自転車産業振興費からの補助金が、自転車産業振興協会技術研究所と大阪府立工業奨励館(現在の大阪府立産業技術総合研究所)の冷間鍛造研究に1953年から3年間交付された<sup>4)</sup>。これにより冷間鍛造の存在が知られるようになった。

1957年の国際見本市(東京)でマイプレスが鋼部品の冷間鍛造機専用機として紹介され、冷間鍛造への関心が爆発的に高まった<sup>5)</sup>。昭和36年(1961年)の経済企画庁年次経済報告には「高性能機械の導入として特に注目されるのは、例えばマイプレス(冷間鍛造機ドイツ製3千数百万円)である。この機械によると、ある部品では従来6~7分を要していた切削作業が、わずか0.59秒(原文のまま:実際は2秒程度か)に短縮され、材料も3分の1に節約されるという画期的なものである。このマイプレスの導入は、これまでの切削加工がプレス作業化したという点で、技術的にも飛躍的な発展を画するものである。」と紹介されており、社会的にも冷間鍛造が注目されていたことが分かる。

### 3.2. 1960~1980年の精密鍛造の発展

1960年頃に乗用車の国内生産が本格的に始まり、冷間鍛造部品が自動車へ搭載されるようになった。図4の下の欄に各時期におけるトヨタ自動車における新規開発品を示す<sup>6)</sup>。1960年代に開発された製品は、1台当たりの個数の多いハブボルト、ボールスタッドなどである。製品重量の大きい

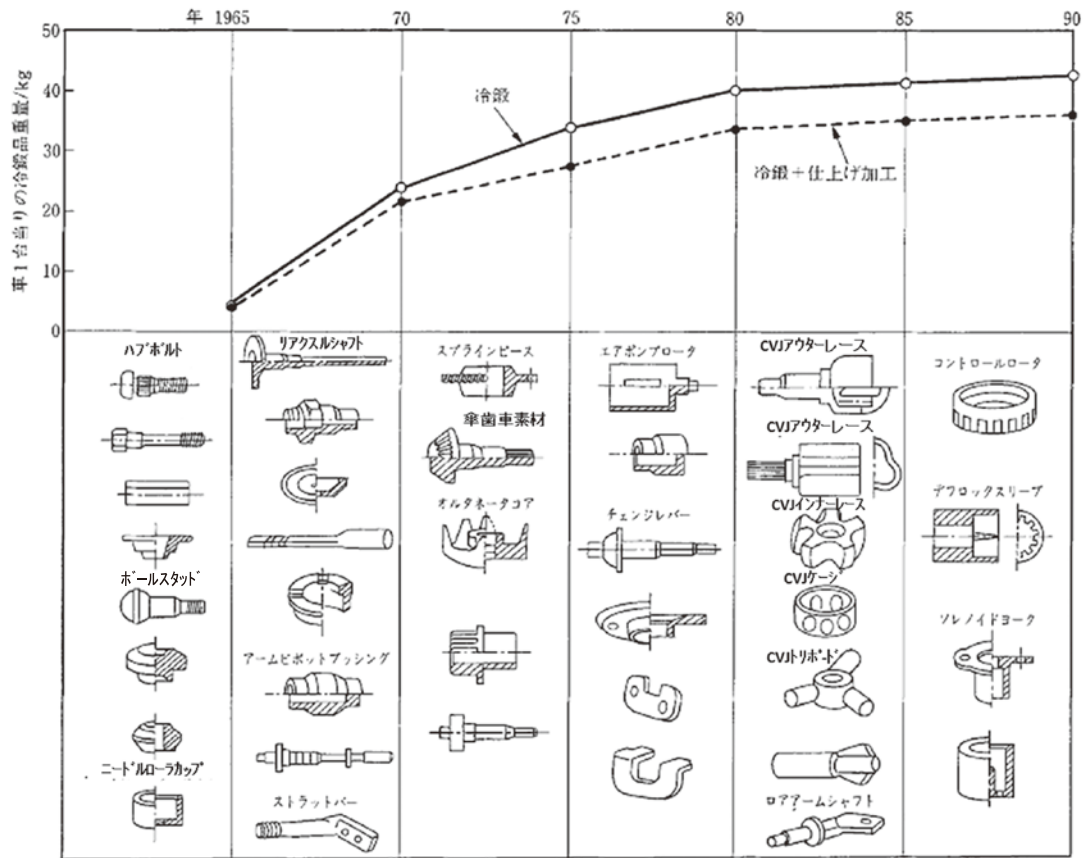


図4 中型車1台当たりの冷間鍛造品の重量と各時期の新規開発品<sup>6)</sup>

鍛造品としては、FR車の後輪に動力を伝えるリア・アクスルシャフトの段付き部に冷間鍛造が用いられている。

図4上部に、中型車1台に搭載された冷間鍛造品の重量の変化を示す。車1台当たりの冷鍛品重量は1965年から1980年にかけて急速に増加し、1980年頃には約40kg程度に落ち着いたが、この頃に日本の冷間鍛造技術は欧米に追いついた。

### 3.3. 1980年頃までの冷間鍛造関連技術の進歩<sup>5,6)</sup>

#### (1) 冷間鍛造用鋼

熱間鍛造されていた低炭素鋼が冷間鍛造に用いられたが、加工割れを生じやすく加工荷重が高く型寿命が短いため、球状化焼鈍を行っていた。このため、鋼材の品質のばらつきを抑えるように厳しい受け入れ基準が設けられ、冷間鍛造専用の低炭素鋼材が製造されるようになった。その後、冷間鍛造後の浸炭・焼入れにより表面硬化ができる肌焼鋼、焼入れ強化が可能な中炭素鋼や中炭素合金鋼、軸受鋼へと冷間鍛造可能な鋼種が広がった。

#### (2) 工具

初期には冷間鍛造工具のほとんどに冷間工具鋼 (SKD) が用いられたが、次第に強度と靱性のある高速度鋼 (SKH) が多くなった。高い圧縮応力を受ける工具には、粉末高速度鋼や超硬合金が用いられるようになった。高い内圧を受

ける金型はリングで補強されていたが、多重リングも採用されるようになりより高い内圧に耐えるようになった。

#### (3) 加工機械

1961年にマイプレスのライセンス生産が小松製作所により始まり冷間鍛造用プレスとして普及した<sup>2)</sup>。マイプレスは低速で高荷重が出せるが、ストロークが短くベッド上の作業空間が小さかったため、長いストロークで低速・高荷重の出せるリンクプレスや、連続加工のできるトランスファープレスが開発された。

横型鍛造機はボルト頭部成形用のヘッダーとして19世紀より使われていたが、この頃にコイル素材の切断機、4~6組の金型、素材送り装置、ねじ転造機を具備した高速大量生産用のパーツフォーマへと発展した。

#### (4) 潤滑

リン酸塩皮膜に金属石けん処理した化成潤滑方法が定着していたが、厳しい加工の場合には固体潤滑剤のMoS<sub>2</sub>や黒鉛を組み合わせる方法も使用されるようになった。

#### (5) 工程

冷間鍛造では一度に大きな変形を与えると、金型が破損したり、欠陥を生じたりするため、多くの工程に分けて加工が行われる。図5のプレス鍛造の工程例では、切断された素材は化成潤滑処理 (BB) の後に据込み、球状化焼鈍 (SA) および再潤滑をして大きな変形を与えている<sup>7)</sup>。パーツ



フォーマ鍛造では工程途中の焼鈍や潤滑はできないが、多くの金型を搭載できるため、図6のようにプレスより多くの工程に分けて加工を行う<sup>8)</sup>。

主工法 (冷間)組合せ押出し	成形機械 KJ-HP-CP	材質 CH4SK-R	月産量 2000
----------------	---------------	------------	----------

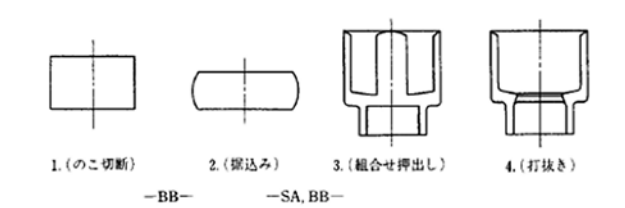


図5 プレス鍛造の工程例<sup>7)</sup>

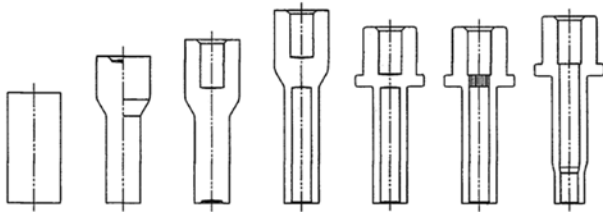


図6 フォーマ鍛造の工程例<sup>8)</sup>

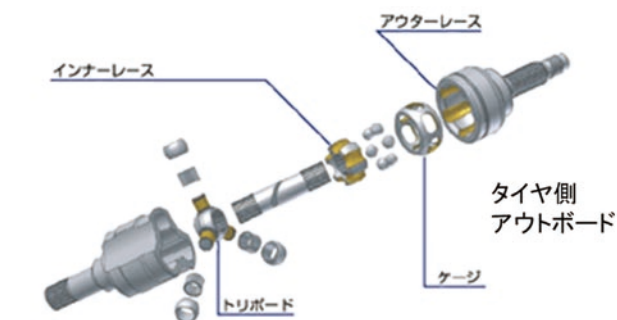
(6) 設計支援

初期には荷重や工具面圧の予測が困難で、金型の破壊を生じることが多かった。1960年代に工藤が軸対称変形に対する上界法を開発し<sup>9)</sup>、回転対称品の鍛造における加工荷重の高い精度の予測が可能になった。

4. 1980~2000年に開発された精密鍛造技術

4.1. 等速ジョイント

1970年代に起きたオイルショックによりガソリン価格が高騰し、前輪駆動のFF車が多くなった。FF車では駆動力を伝える前輪を舵取りのために車軸から傾かせるが、車輪の回転速度を一定にするため、図7に示す等速ジョイントが用いられる。1980年頃からアウターレース、インナーレース、トリポードなどの異形部品の精密鍛造方法の開発



エンジン側  
インボード

図7 等速ジョイント<sup>10)</sup>

が始まり (図4参照)、1985年頃から冷間鍛造や温間鍛造で生産できるようになり、現在まで続いている。

4.2. 温間鍛造

温間鍛造は1970年代から世界的に研究されていたが、1980年頃に小松製作所が最初に実用化した。図8に示す等速ジョイント・アウターレースは、当初、熱間鍛造で製造されていたが、冷間鍛造で量産する技術が確立された。さらに、温間鍛造で中間焼鈍や再潤滑処理を省くことができることが分かり、温間鍛造が行われるようになった。温間鍛造製品は、製品精度を上げるため冷間鍛造で仕上げ加工 (サイジング) を行うのが普通である<sup>11)</sup>。

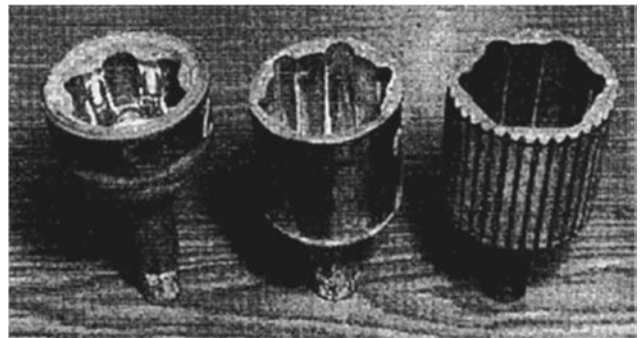
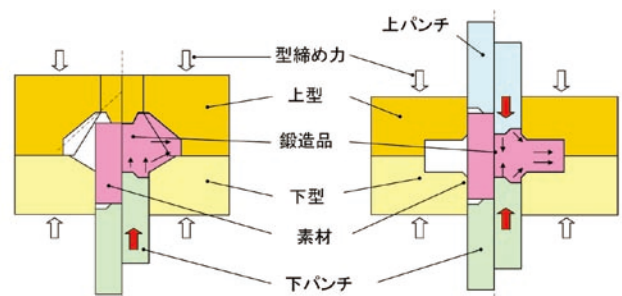


図8 温間鍛造と冷間鍛造の組み合わせによる等速ジョイント部品<sup>11)</sup>

4.3. 閉塞鍛造

閉塞鍛造は図9のように、ダイキャビティに材料を押し込んで側方に流して成形する側方押し出しである。図9 (a) の一方向からのパンチ押し込みの片側閉塞では傘歯車やインナーレースが、図9 (b) の両方向から押し込む両側閉塞ではクロスピンやトリポードが加工される。



(a) 片側閉塞

(b) 両側閉塞

図9 閉塞鍛造<sup>12)</sup>

閉塞鍛造では閉塞力を加えながら1個 (片側) または2

個（両側）のパンチを駆動する必要があるため、1970年代に三菱重工が閉塞鍛造用の油圧多軸プレスを開発した（図10）。その後、1992年に型締め力を独立の油圧機構で与え、通常の機械プレスで加工できる閉塞鍛造用のダイセットが開発された<sup>13)</sup>。両側閉塞では図9（b）のように上下から同じ速度でパンチを動かす必要がある。これに対して図11のようにパンタグラフ機構の中間ジョイントに金型を固定し、上パンチと上側ジョイントを同時に圧縮すると金型が圧縮速度の半分の速度で下降して、両側閉塞と同じ相対運動が可能になるダイセットがニチダイにより開発された。

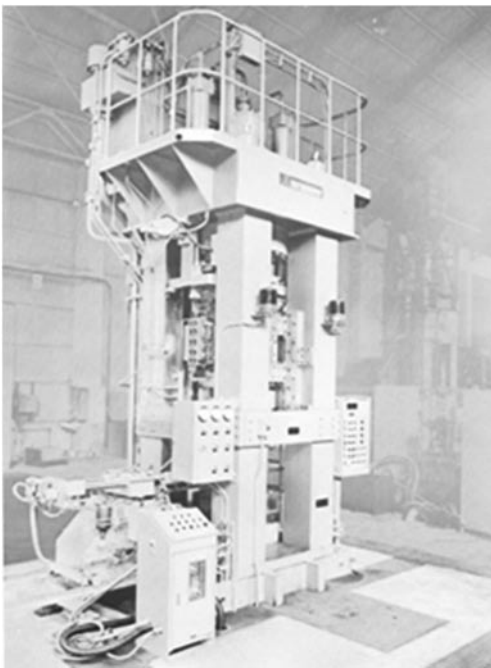


図10 閉塞鍛造用多軸プレス<sup>14)</sup>

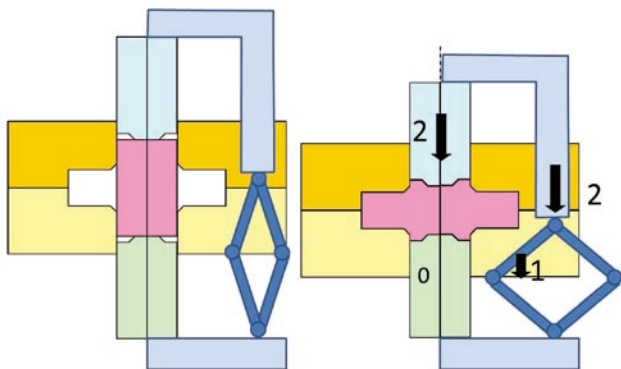
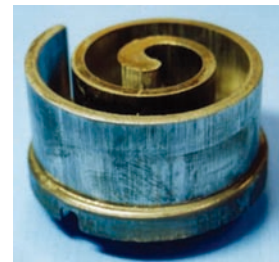
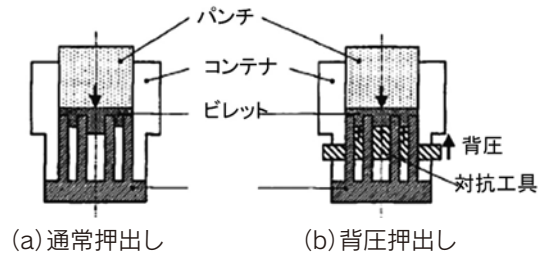


図11 両側閉塞のためのダイセットの機構<sup>13)</sup>

#### 4.4. 背圧鍛造

多数の押し出し出口がある押し出し加工の場合、図12（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が、図12（b）のように出口から背圧を加えた対抗

工具を押しつけながら押し出しを行うと、長さを同一にできる。図12（c）はこの方法で製作されたスクロールコンプレッサー部品である<sup>11)</sup>。



(c)スクロール

図12 背圧鍛造と鍛造品<sup>13)</sup>

#### 4.5. 工具コーティング

1990年代から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<sup>15)</sup>。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）は500℃程度の加熱であるので、熱処理後の工具コーティングが可能であり、多く用いられている。PVDでは、TiNまたはTiCN被膜が多く、最近では耐熱性の高いTiCrNやAlCrN、DLC被膜も見られるようになった。

#### 4.6. 工程シミュレーション

有限要素法による塑性加工シミュレーションは1970年代に開発され<sup>16)</sup>、1980年代に市販ソフトが出回るようになってまず研究用に、1990年代になると開発などに使われるようになった。初期には軸対称など2次元モデルが使用されたが、1990年代には、3次元シミュレーション（図13）も可能になった。2000年頃からはパソコンによる大容量高速計算が可能になり、工程設計の実務にもシミュレーションが使われるようになり、鍛造技術に不可欠になった。使用目的は加工荷重、欠陥発生、金型面圧の予知などである。

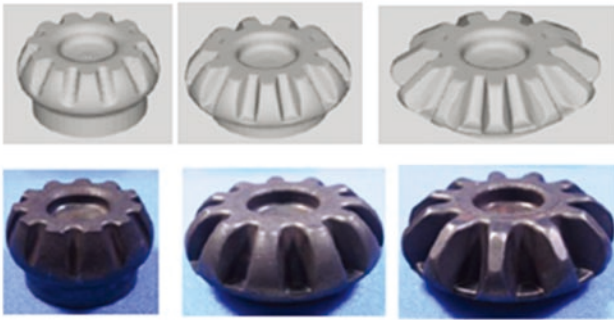


図13 閉塞鍛造のシミュレーション結果<sup>17)</sup>

## 5. 2000年以後開発された精密鍛造関連技術

### 5.1. 機械サーボプレス

2000年頃から多く市販されるようになった機械サーボプレスは、板金加工用が多い。冷間鍛造用としては図14のコマツH1C630（630トン）が開発された。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。アイダ、アマダはクランク機構と組み合わせたサーボプレスを、また、アミノはボールスクリュウ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14 630トン冷間鍛造用サーボプレス<sup>18)</sup>

図15に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し出したときの歯筋誤差を示す<sup>19)</sup>。サーボプレスで加工速度を最適化することにより、高精度な鍛造品を加工できる可能性がある。これは、鍛造中の塑性変形発熱と熱伝導のバランスにより、均一な最終温度分布にできるため、と考えられている。

機械サーボプレスは通常の機械プレスと同様に高速加工に適している。次項の油圧サーボプレスのように機械本体の駆動軸数を多くすることは少ないが、プレスベッドに設置できるサーボダイクッションを用いて多軸加工に対応できる<sup>19)</sup>。

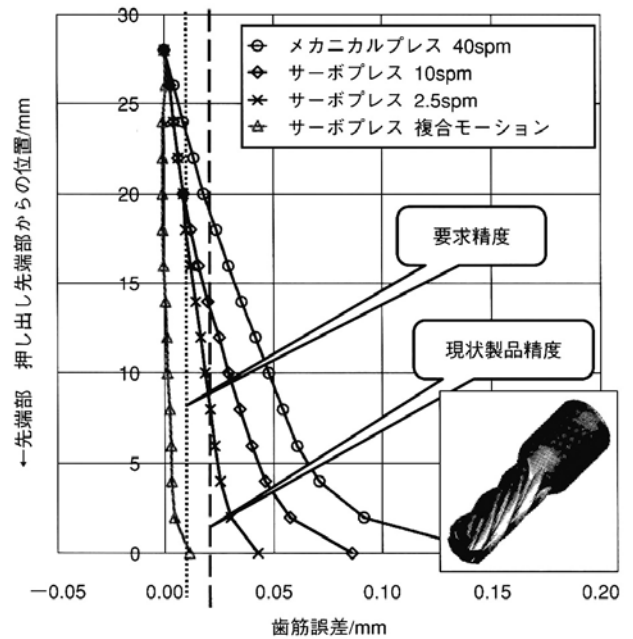


図15 サーボプレスにより 各種速度で押し出されたはずば歯車の歯筋誤差の分布<sup>19)</sup>

### 5.2. 油圧多軸サーボプレス

油圧プレスでは複数の油圧シリンダを独立に動かすことが比較的容易であり、1970年代に閉塞鍛造用のプレスとして製造された（図10）が、広く普及しなかった。当時は油圧制御の精度が高くなかったが、サーボモータの進化とともに油圧制御がサーボモータで可能になり、制御精度がよくなり油圧系の保守も簡単になった。こうしたことから、多軸サーボプレスを用いて、1台のプレスにおいて多数の工具を異なったモードで動かし、多工程で製造される製品を1工程で行う鍛造方法が2000年頃から開発されるようになった。

アイシンAWでは図16のような上部3軸（メイン2000kN、インナー 300kN、アウター 700kN）、下部2軸（ベッド1200kN、ロックアウト500kN）の5軸油圧サーボプレスで図17のクラッチハブを1台のプレスで製造している<sup>20)</sup>。

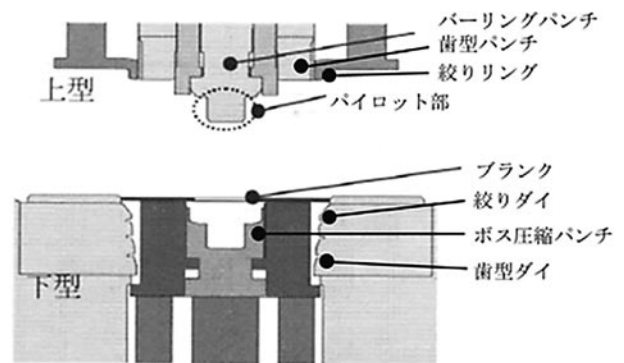


図16 5軸1ストロークプレス<sup>20)</sup>



このプレスでは各軸が順次駆動され、

- ①ボス部圧縮成形 ②絞り成形 ③コーナー成形 ④歯形成形

の工程で成形が行われる。

このプレスは高さが4m以下で、一般的な低棟工場に設置でき、組み立て工程の中（インライン）で使用できる。サイクルタイムは20秒程度と、トランスファープレスの3秒に比べて遅いが、生産数に対してフレキシブルにラインの増設が可能であるとのことである。

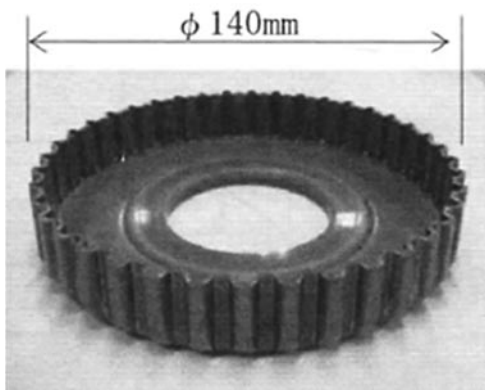


図17 クラッチハブ<sup>20)</sup>

1ストローク成形は、多工程の冷間鍛造を1台のプレスで可能にする技術であり、コストダウンやグローバル対応に適しているが、金型構造の設計には熟練を要する。

油圧サーボプレスでは3~6の駆動軸を持つプレスが製造されており、駆動軸が多い加工方法に適しているが、加工速度が低いため、大量高速生産より、切削などと同期させる生産に適している。

### 5.3. 歯車鍛造

2000年代に入り、歯車などの精度の高い製品を冷間、温間の精密鍛造や熱間、温間、冷間の鍛造を組み合わせた精密鍛造で製造することが多くなった。加工圧力を低下させることが工程削減や製品精度向上につながるため、加工圧力を下げる分流鍛造が利用されるようになった。図18に分流の原理を利用して歯車を鍛造する工程を示す<sup>21)</sup>。第1工程で歯形パンチ①で素材④を圧縮するが、歯型に充填する前に終了する。第2工程ではマンドレル③を上下に引いて内部に空間を作りパンチ①で素材を圧縮し、低い圧力で歯の未充填部と内部空間の両方に材料が流れるようにして歯形を成形する。

歯車の冷間鍛造部品は歯面強度を高めるため鍛造後に浸炭されるが、浸炭時にオーステナイト結晶粒が粗大化し疲労強度が劣化しやすい。これを防止するためTi炭化物等を増やして浸炭時のオーステナイト結晶粒粗大化を抑制した鋼が開発された<sup>22)</sup>。焼入れ焼戻しにおける変形の抑制も重要であり、熱処理ひずみの小さい鋼の成分も検討されている<sup>23)</sup>。

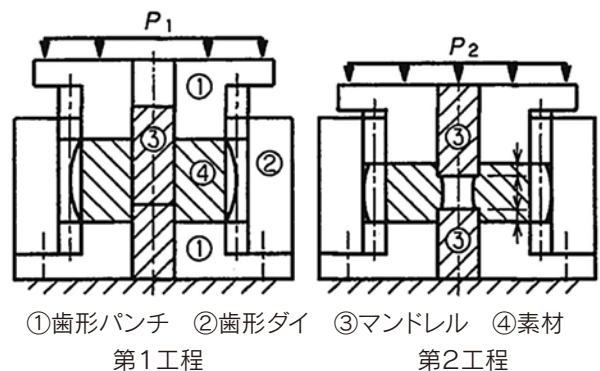


図18 分流鍛造を用いた歯車の鍛造工程<sup>21)</sup>

### 5.4. 板鍛造

厚板で部品を成形する場合、深絞りなどの板プレス加工だけでは板厚精度の高い製品にならないため、プレス成形と鍛造技術を組み合わせる板鍛造が増えている。鍛造で板厚を薄くするのは比較的容易であるが、多くの場合一部を厚肉化している。

図19に示す中央にボスを有するカップの場合、カップ底を圧縮して周辺の材料を中心に流して盛り上げる<sup>24)</sup>。このとき摩擦が低いと材料は外側に流れてボス高さが低くなり、ボスの反対面に引けを生じやすい。逆に摩擦が高くとボスは高くなるが、摩擦拘束により薄板圧縮の圧力が非常に高くなる。



図19 ボスを有するカップ<sup>24)</sup>

カップ底に半径方向の引張応力を生じさせながら圧縮すると、低い圧力で成形が可能になる。そこで、図20のようにパンチで一定の圧縮応力  $p$  を加えながら、外側で深絞りを行うと、底部に半径方向の引張り応力  $\sigma_r$  を生じて、低い圧力でボスが成形される<sup>24)</sup>。材料がボスに流れ込む板の上面は潤滑し、反対側は無潤滑にすると、かなり低い面圧でボスへの材料流入が良好になり、ボスと反対側の引けも見られなかった。

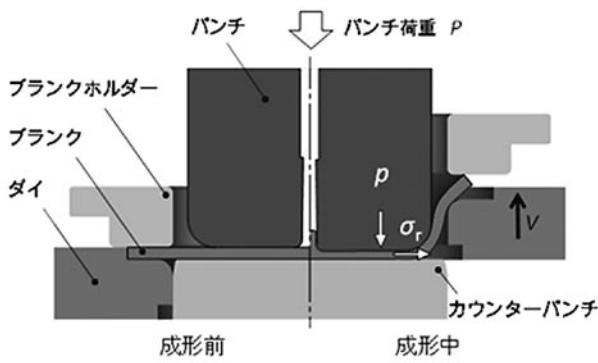


図20 圧縮-深絞りによるボス成形<sup>24)</sup>

### 5.5. 一液潤滑

冷間鍛造で長年用いられてきたリン酸塩皮膜処理は設備が大がかりで、処理時間が長く、残滓（スラッジ）や廃液が環境に有害であるため、使用が困難になってきた。このため「一液潤滑」と呼ばれる潤滑方法が数種類開発された。それらの共通点は、潤滑剤を含んだ液に短時間つけた後、乾燥させるだけで素材表面に高性能な固体潤滑膜を生成させることである。

図21はトヨタ自動車で達成した一液潤滑剤の適用範囲を概念的に示したものである<sup>25)</sup>。比較的軽い加工度では油系の潤滑剤が、厳しい加工では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。今のところ一液潤滑の表面拡大への追従性能はリン酸塩皮膜には及ばないが、摩擦は低いため、最近ではトリポードやピニオンなど強加工製品にも適用領域を広げている。

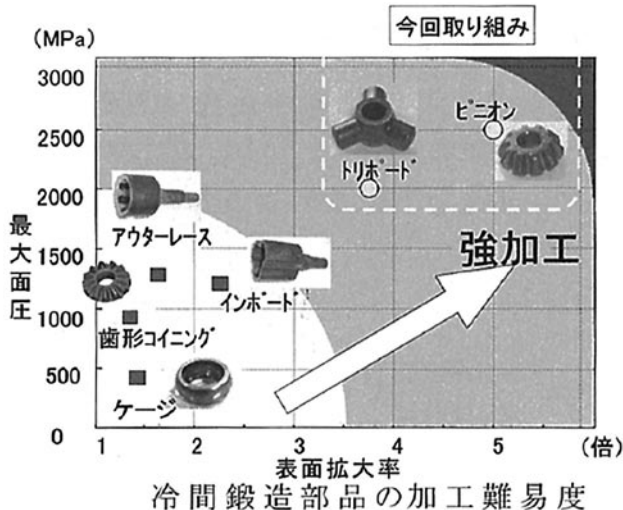


図21 一液潤滑剤の適用範囲<sup>25)</sup>

## 6. 冷間鍛造の今後の可能性

グローバル化の進む最近の日本企業では、製造コストを大幅に下げて、国際競争力を実現することが不可欠になっており、冷間鍛造もその方法の一つとして再び注目されて

いる。このためには、今まで非常識と考えられて来た技術にも挑戦が必要になる。今後必要な冷間鍛造技術として、今までの加工限界や製品精度を越える鍛造方法、加工圧力の大幅低減方法、製品材質を高める鍛造方法などが考えられる。以下では、過去に提案されて原理的に可能であるが、今まで積極的に実用化されていない有望な技術を紹介する。

### 6.1. 長軸の中空鍛造

中空鍛造品は軸の多いトランスミッションなどの軽量化に貢献するだけでなく、中空軸に他の軸を通すことによりトランスミッションの構造を変えるものと期待されている。中空軸の鍛造素材としてパイプ材を用いることもあるが、パイプの穴と外形の同軸度が必ずしも高くないため、余り多くは使用されていない。短い中空材は後方押し出されたカップ底をせん断して作成することが多い。冷間鍛造で中空製品を作る後方押し出しでは、製品の穴の細長比は、通常4程度以下に限られている。その原因は、パンチの弾性座屈により、パンチの長さが制約されるためである。パンチの座屈限界を大きくするためには、縦弾性係数の大きい超合金への変更、押し出し圧力の低減方法の採用、パンチ先端の拘束などが考えられる。

パンチに加わる荷重を低減すると、より長いパンチが使用できる。篠崎・工藤<sup>26)</sup>は押し出しにおいて図22のように圧力を低減させる加工方法を示した。図22 (a) は管の前方押し出しで、カップ底をパンチで押しして前方張力を加えながら押し出す方法である。図22 (b) は素材を押し広げながら管の前方押し出しを行い、断面減少率を小さくすることにより、加工圧力を低くしている。

図22 (c) は後方押し出しで出口から引張り力を加えてパンチ圧力を下げる方法である。この方法でパンチ圧力を30%程度低下させることができるが、フランジ部で素材を引っかけているため、引張り力が過大になると押し出し出口の破断を生じる。バックアップパンチにより適当な背圧を加えることにより破断は防ぐことができ、最近ではサーボプレスや背圧クッションを用いることで実現可能である。

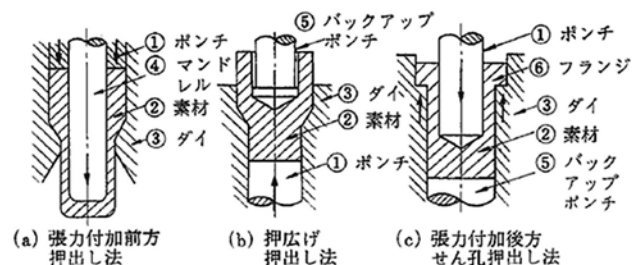


図22 押し出し圧力の低減方法<sup>26)</sup>

図23は圧力低下のため張力付加方押し出しを採用して二チダイにより試作された中空軸の製品例である<sup>27)</sup>。この場合は穴の細長比は約8であり、パンチの支持方法などを工



夫して座屈を防止していると思われる。



図23 張力付加押し出しで作成した製品<sup>27)</sup>

## 6.2. 工具の弾性変形とその制御

冷間鍛造工具には非常に高い圧力が加わるが、これにより弾性変形を生じて工具形状が変化し、それを転写する鍛造製品の形状誤差に繋がる。図24 (a) のように鋼製の長さ100mmのパンチ端に圧力1GPaが加わると480 $\mu$ m縮み、(b) のように外径90mm内径30mmのコンテナ内面に1GPaの圧力が加わると260 $\mu$ m広がる<sup>28)</sup>。

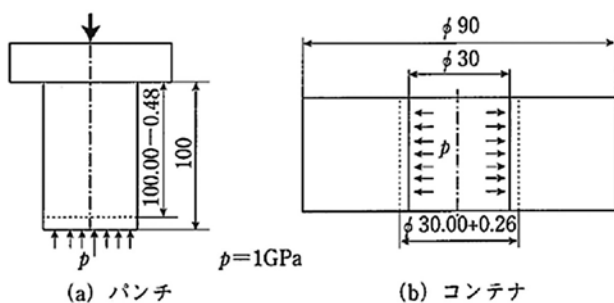


図24 冷間鍛造用鋼工具の弾性変形<sup>28)</sup>

通常、こうした弾性変形量はシミュレーションによりある程度予測でき、さらにパンチ長さの変化はプレス下死点位置の調整で対処でき、コンテナ内径やダイキャピティ形状の誤差は試打ちの製品形状を測定して工具形状を補正している。さらに、工具材質を縦弾性係数が工具鋼の2倍程度の超合金にすると、弾性変形量が半分程度になり、製品精度向上のために超合金工具を用いることも多い。

実際の鍛造では一回ごとに荷重が変動するため、これによる工具形状の変動が製品形状誤差になる。加工荷重の変動量を小さくするため、高精度製品の鍛造では素材体積の変動を無くすように素材を鋸切断し、打痕が着かないように素材の移動を丁寧に扱っている。

補強リングに挿入されたダイインサートにおいて、インサートとリングの間に図25のようにクサビ状のリングを挿入し、クサビを出し入れすることによりダイインサートの内径を制御できる。筆者らはこのメカニズムを取り入れた型構造を用いて、自由押し出しにおいて素材径の変動によ

らず製品直径を一定にできることを示した<sup>29)</sup>。デンマークStrecon社はクサビの出し入れをネジで行うVarifitを開発している<sup>30)</sup>。

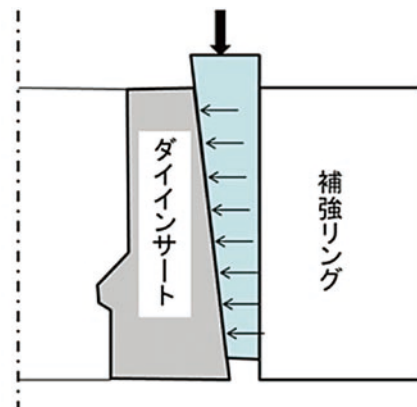


図25 リング締付け力の制御

図18で示した分流法でヘリカル歯車の冷間鍛造が可能になったが、さらに図26 (a) のように歯すじの両端で歯厚を10 $\mu$ mのオーダーで小さくして歯当たりを歯幅中央部に集中させるクラウニングをつける必要がある。クリアテックは図26 (b) のように冷間鍛造で作成されたはずば歯車を歯形ダイに挿入し、歯形ダイを中央の窪んだダイ受けに押し込み、両端で直径の弾性縮小量を大きくしてクラウニングを成形する方法を提案している<sup>31)</sup>。

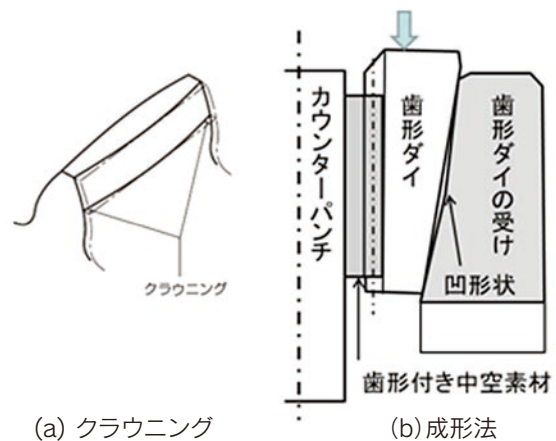


図26 歯形のクラウニング成形法<sup>31)</sup>

## 6.3. 振動鍛造

サーボプレスは各種の動きが可能であるが、板成形においてはスライドを上下運動させながら加工する方法により、潤滑を良くして、板の破損防止やしわ発生防止の実績がある。

薄板の圧縮加工では摩擦が次第に高くなり荷重が増大するが、前野ら<sup>32)</sup>はサーボプレスにより圧縮途中の除荷を数回繰り返すと図27のように摩擦係数が回復し、摩擦係数が大幅に低下することを見いだした。これは除荷時に素材外周から工具との接触が離れるために、潤滑が修復されるためである。

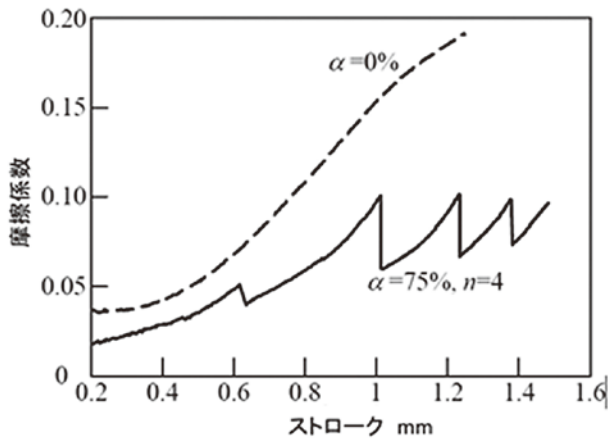


図27 薄板の振動圧縮（75%除荷）における摩擦係数の変化<sup>32)</sup>

#### 6.4. 摩擦利用鍛造

圧延では摩擦力により素材をロール間に咬み込んでおり、塑性加工において摩擦力を利用することは珍しいことではない。Owtschinikovらは、図28のように、ボス付カップの後方押し出しにおいて、コンテナとマンドレルを駆動して摩擦力によりボス高さを制御する方法を提案している<sup>33)</sup>。この方法では図22で示したように変形域出口から引張り力を加えるのでパンチ圧力低下の効果もある。

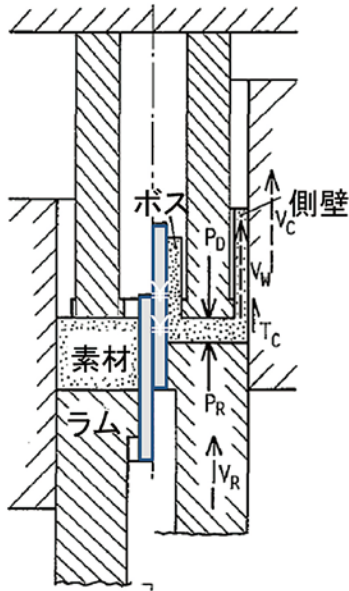


図28 摩擦支援のボス付カップの押し出し<sup>33)</sup>

筆者らはコンテナの駆動により摩擦で材料流れを変化させることを利用して、閉塞鍛造において低い荷重で充満させる方法を提案した<sup>34)</sup>。閉塞鍛造では角部の充満が難しいが、図29のようにコンテナ駆動により詰まりにくい隅角部に材料を摩擦力で流し込むことができる。図30にコンテナ駆動による荷重変化を示す。

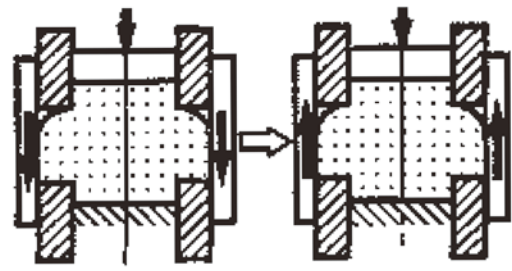


図29 コンテナ駆動閉塞鍛造<sup>34)</sup>

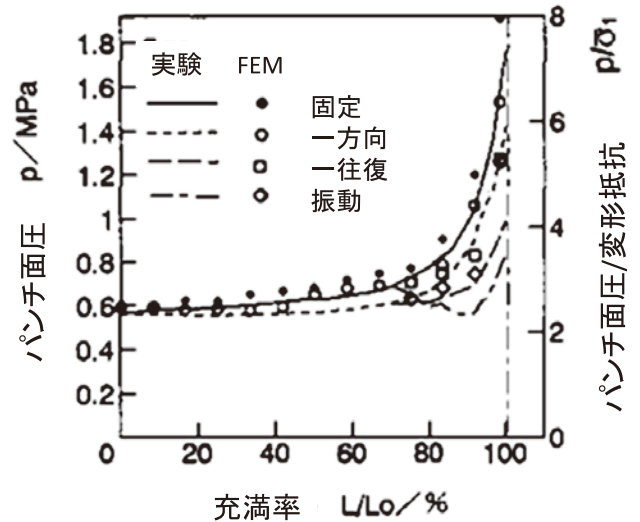


図30 閉塞鍛造におけるコンテナ駆動による荷重低減<sup>34)</sup>

#### 6.5. 温間鍛造領域での加工熱処理

部品の軽量化のためには、材料の高強度化が必要であるが、加工熱処理による強化と材質向上を図ることも考えられる。温間鍛造温度での加工熱処理が可能になると、熱処理による寸法変化や結晶粒径の変化などが小さくなることが期待される。

関口らは図31のように焼入れ材の500℃程度における焼戻し中に鍛造を行うことにより、加工中には延性があり、加工後に高強度になることを見だし「焼戻し温間鍛造」と名付けた<sup>35)</sup>。コイル素材を焼入れした状態で使用することができると通常の温間鍛造と同じように加工が可能である。

五十川らは図32のように17-4PHステンレス鋼を焼入れにおける冷却中に200~600℃の温間鍛造温度で加工すると、同じ温度まで加熱した温間鍛造に比べ大幅に低い変形抵抗になることを見いだした<sup>36)</sup>。加工後に550℃程度で焼戻すと1GPa以上の引張り強さが得られることが報告されている。

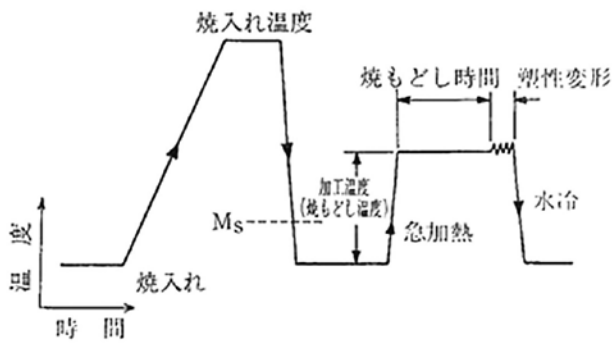


図31 焼戻し温間鍛造<sup>35)</sup>

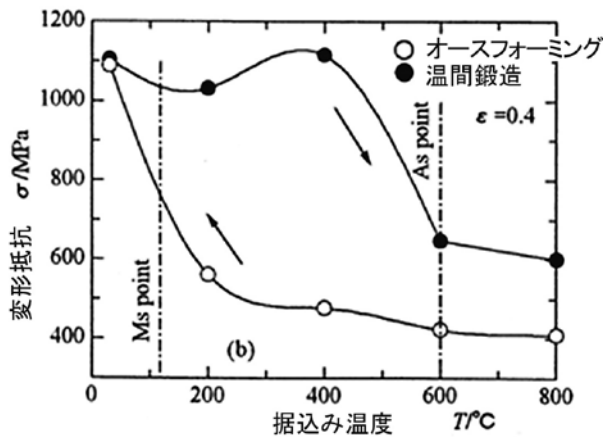


図32 17-4PH鋼のオースフォーミング（下側曲線）における変形抵抗<sup>36)</sup>

## 7. おわりに

特殊な加工法から通常の加工法に定着した精密造技術を見直して、未知の新技術への挑戦が求められている。1980年頃までの冷間鍛造の発展期と違って、世界の最先端に立ってしまっているために先行者の手本がなく、方向性を自分で決めてリスクをとって新技術の開発を推進しなければならない。それには、適切な判断をして開発を指導するリーダーや、斬新なアイデアを出して開発を進めるチームの存在が不可欠である。サーボプレスや有限要素法シミュレーションなどの情報関連の新技術の出現は、鍛造の技術開発に強力な武器を提供しているが、これらを使いこなせる高度な人材がいないと効果が得られない。これらのことから、グローバル化した製造産業の世界では、高い能力を有する人材の育成が最重要課題であると言える。

## 参考文献

- 1) A. E. Tekkaya ほか: 40th ICFG Plenary Meeting, Padua, Italy, September 17-19, 2007.
- 2) 小松製作所: 塑性と加工, 3-22 (1962), 803-804.

- 3) 村松勁・今井敏博: 塑性と加工, 30, 337 (1989), 160.
- 4) 鎌倉健: 経済論叢別冊 調査と研究 (1998), 15: 74-88.
- 5) 澤辺弘: 塑性と加工 19-212 (1978), 755-763.
- 6) 大西利美: 塑性と加工, 33-376 (1992), 501-506.
- 7) 日本塑性加工学会編: 鍛造 - 目指すはネットシェイプ -, コロナ社, (1995), 189.
- 8) 松井正廣, 王欣: 塑性と加工, 39-453 (1998), 1060-1064.
- 9) 工藤英明: 基礎機械工学全書・塑性学, 森北出版 (1968)
- 10) <http://www.tsprecision.co.jp/product/CVJ/>
- 11) 安藤弘行: 塑性と加工, 33-382 (1992), 1245-1249.
- 12) 吉村豹治・篠崎吉太郎: 塑性と加工, 41-477 (2000), 986~989.
- 13) Yoshimura, H. and Wang, C.C.: Proc. 1st JSTP Int. Seminar on Precision Forging, (1997), 15-1 - 15-7.
- 14) Osakada, K., Mori, K., Altan, T., Groche, P.: CIRP Annals, Manufacturing Technology, 60 (2011), 651-672.
- 15) 日本塑性加工学会鍛造分科会編: 分かりやすい鍛造加工, (2006), 日刊工業新聞社, 44.
- 16) K. Osakada, K. Mori, H. Kudo: Annals of the CIRP, 27-1 (1978), 135-139.
- 17) 小坂田宏造, 石川孝司, 小野宗憲, 森下弘一, 安藤弘行: 精密鍛造, 日刊工業新聞社, (2010) .
- 18) 安藤弘行: プレス技術, 47-12 (2009), 27-31.
- 19) 安藤弘行: 塑性と加工, 45-526 (2004), 877-881.
- 20) 堀智之: 日本塑性加工学会鍛造分科会, 第40回鍛造実務講座, (2013-2), 32-35.
- 21) 大賀喬一, 村越文夫, 安藤弘行, 三吉宏治, 近藤一義: 塑性と加工, 41-477 (2000), 1021-1025.
- 22) 藤松威史, 中崎盛彦, 福本信次, 山本厚之: 鉄と鋼, 95-2 (2009), 161-168.
- 23) 藤松威史, 中崎盛彦: Sanyo Technical Report, 21-1 (2014), 28-37.
- 24) Wang, Z.G., Yoshikawa, Y., Osakada, K.: CIRP Annals - Manufacturing Technology 62 (2013), 291-294.
- 25) 高橋寛和, 林直樹, 慶島浩二, 松井浩孝: MS2010 第15回資源循環型ものづくりシンポジウム (2010), 140-147.
- 26) 篠崎吉太郎, 工藤英明: 塑性と加工, 14-151 (1973), 629-636.
- 27) 村井映介: 第91回インターモールド・テクニカルセミナー, (2015) .



- 28) 小坂田宏造:精密工学会誌,80-12 (2014) ,  
1045-1048.
- 29) 小坂田宏造, 白石光信, 川崎健一: 日本機械学会論文集, C編, 55-516 (1989) , 2199-2205.
- 30) STRECON社,カタログ.
- 31) 石田均: 塑性加工学会・第308回塑性加工シンポジウム, (2014) , 59-63.
- 32) 前野智美,小坂田宏造,森謙一郎: 塑性と加工,50-585 (2010) , 951-955.
- 33) 中村保:塑性と加工,28-319 (1987) , 783-790.
- 34) 小坂田宏造,花見眞司,塑性と加工,37-426 (1996) ,  
723-728.
- 35) 関口秀夫,小畠耕二,小坂田宏造,久保勝司: 塑性と加工,24 (1983) , 873-879.
- 36) Isogawa, S., Yoshida, H., Hosoi, Y., Tozawa, T.,  
Journal of Materials Processing Technology, 74  
(1998) 298-306.