



# 精密鍛造技術の進歩

工藤 英明\*

## Advances in Precision Forging Technology

Hideaki KUDO

### 1. 精密への動向と精密の内容

鍛造を含む塑性加工の分野において、精密化がとくに重要視されたのは必然的な理由があり、これを筆者なりにまとめてみると図1のようになる。この図の中で軽量化、高機能化、そして部品形状一体化・複雑化のルートをとる代表的量産品はFF型乗用車に用いられる等速ジョイント用鋼鍛造部品である(写真1)。鋼の歯車について、鍛造加工高精度化による歯形部無切削化を達成した例を図2によって示す<sup>1)</sup>。これら複雑曲面

の冷間鍛造面、あるいは温・熱間鍛造後冷間仕上げ鍛造後の面の寸法精度は10~100 $\mu$ mのオーダーである。

図1に示されているように、塑性加工の精密化が、高い技術的、深い人間的ニーズと、厳しい経済的ニーズとによってやむにやまれぬ動向となつてきていること、そして精密化の目的にもいろいろ違つたものがあることを心得ておくことが、精密化手段を講じる上に不可欠である。

「精密」は第一に加工品の寸法精度にかかわるものであるが、これは実は相対的な概念である。まず製品の用途によつて、必要とされる精度は大幅に異なる、大は

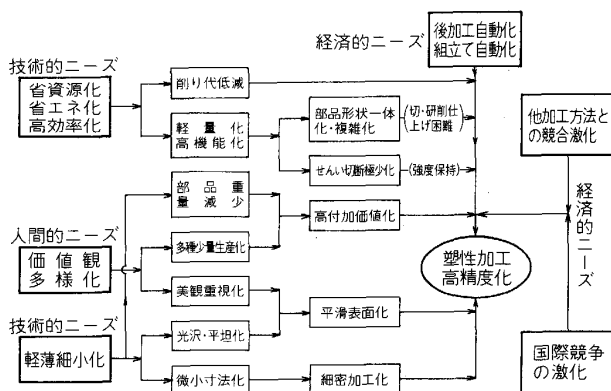


図1 鍛造精密化への必然性

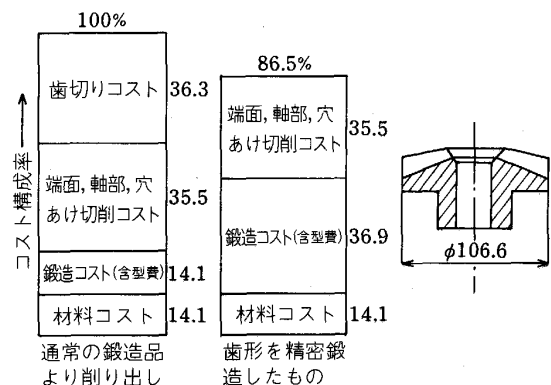


図2 傘歯車の精密鍛造による高付加価値化<sup>1)</sup>

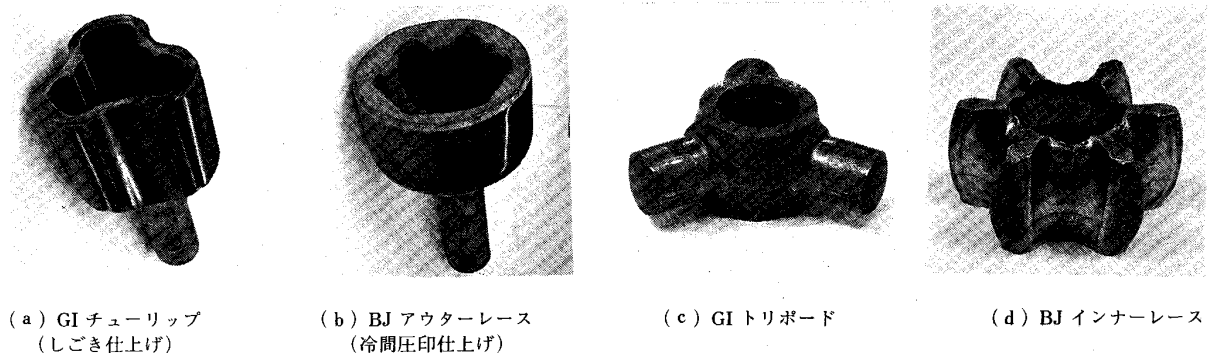


写真1 自動車等速ジョイント用鋼鍛造部品(トヨタ自動車(株)提供)

昭和62年3月17日受付 (Received Mar. 17, 1987) (依頼解説)

\* 横浜国立大学工学部教授 工博 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

Key words : precision forging ; dimensional accuracy ; work material ; forging machine ; forging tool ; lubricant ; surface quality ; plastic analysis ; process control ; quality control ; stress analysis.

mm のオーダーから小は  $\mu\text{m}$  のオーダーに広がっている。完成品の機能上必要とされる精度さえ得られれば、それは「精密鍛造」と呼ぶことができる。いわゆる“Net shape forging”である。

一方、非常に高い精度を必要とする製品であつても、途中まで塑性加工で成形して、その後、切削、研削、放電加工とか摩擦溶接、拡散接合などによって仕上げた方が経済的な場合もしばしば起こる。これはとくに耐熱合金のような難加工材料の場合にあてはまる。そこで、わずかな切削仕上げ代を残した製品を作ることが望ましい。すなわち、“Near net shape forging”である。これも、以前の、もつと大きな仕上げ代を残した製品を作るのに比べれば「精密鍛造」である。

このように「精密」は目的により、時代により変化する相対概念である。欧州の鋼熱間鍛造品規格（ユーロフォージ規格）に準じて制定された JIS B 0415 及び 0416 においては、寸法精度に「並級」と「精級」の二つがあるが、VOIGTLÄNDER<sup>2)</sup>によれば、ユーロフォージ規格 F 級と E 級（ISO の寸法精度 IT 12~16 に相当）の上に IT 10~13 に入る「正確鍛造品」（Genauschmiedestücke）があり、さらにその上に IT 8~10 またはそれ以上の「精密鍛造品」（Präzisionschmiedestücke）がある。「精密鍛造品」は冷間鍛造、冷間圧印またはしごき仕上げによつてのみ得られるという。

最近、精密の中に、材質の精密さを含める向きもある。たしかに塑性加工においては、形状・寸法の成形のさい、素材材質は必然的に変化する。しかし、材質制御は筆者の専門外であるため、ここでは話を幾何学的精密化に限ることにする。

## 2. 鍛造の精密化をはばむもの

鍛造を含む塑性加工によつて材料が、形状・寸法・表面

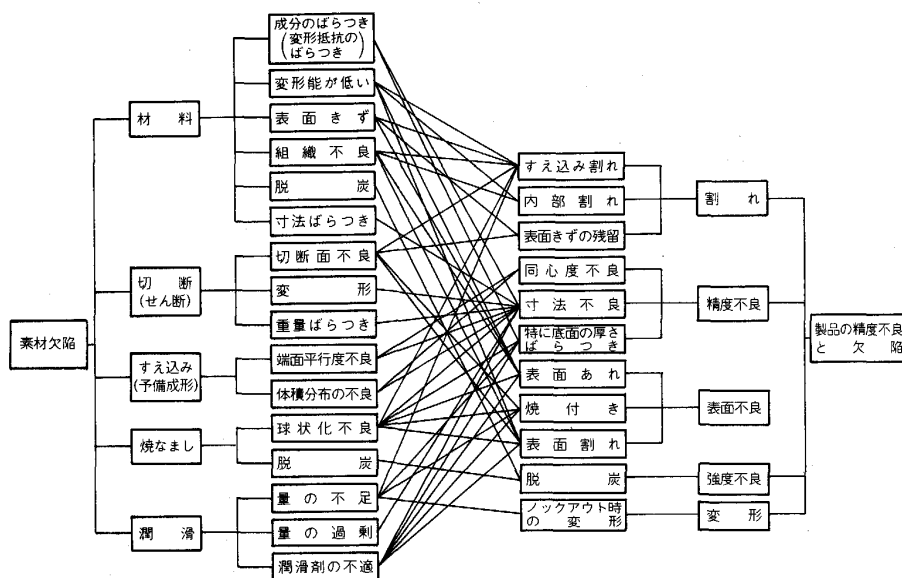


図 4 素材欠陥要因が冷鍛品の精度不良及び欠陥に及ぼす影響<sup>4)</sup>

状態・材質を与えられていくときの、ハードウェアとプロセスとの流れを図 3<sup>3)</sup>に示す。以下これを順に説明する。

### 2.1 素材性質の遺伝性

素材の体積はもちろん加工品にそのまま遺伝する（熱間鍛造の加熱酸化によるスケール損失は別として…）。素材の寸法精度も直接、間接製品に移される。とくに後

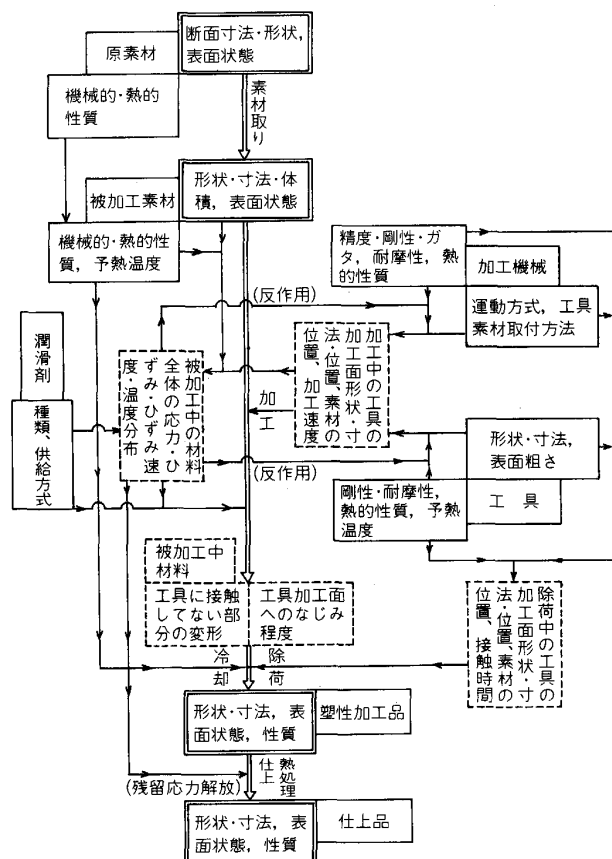


図 3 塑性加工品の形状・寸法、表面・性質を作り込む過程と諸影響因子<sup>3)</sup>

で切削, 研削仕上げを避けたい複雑形状品においては, 素材の表面粗さや熱間圧延, 焼なましなどによる脱炭層の形成に留意しなくてはならない. 間接的な遺伝の中には, 素材の変形抵抗, 素材ごと, あるいは素材内部の不均一が工具や機械に不均一たわみを生じさせ, あるいは上・下型の心ずれの原因となつて製品の寸法のばらつきに転化する, というようなものがある. 以上のように, 原素材と素材取り後の被加工素材の形状・寸法精度, 表面状態と品質の精度が, 大なり小なり製品のこれらの精度を左右する (図4)<sup>4)</sup>.

2.2 鍛造機械の精度, 剛性, 耐久性の不足

機械も生身であつて, 大荷重がかかると, 上・下型の間が, 無負荷のときに比べて大きく開く. プレスのフレームの伸び, スライドやコンロッドの縮み, クランクの曲がり, 軸受接触面のすきま閉じなどがその原因である. この大きさはかなり大きく図5<sup>5)6)</sup>に示すように, 荷重が100t以上では何mmという大きさに達する. このたわみも, 連続作業中一定ならば問題はないが, 鍛造荷重が, 素材材質, 素材体積, 潤滑状態, 作業温度などのばらつきや型摩耗のために変動すると鍛造品の厚さのばらつきとなつてしまう. 機械の精度, 横剛性や耐久性は,

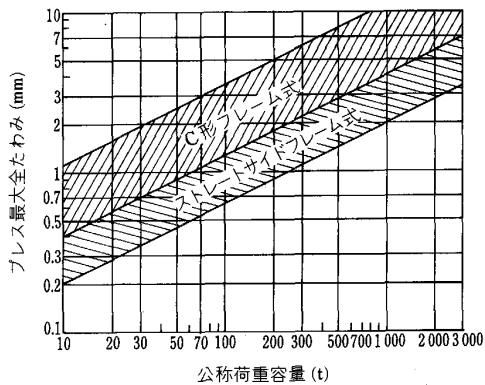
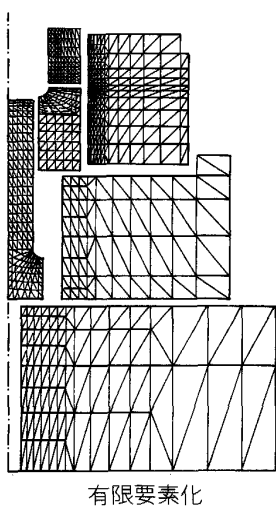


図5 機械プレスフレーム及び駆動系の荷重容量いつばいの負荷による弾性たわみ<sup>5)6)</sup>



型部品接合面せん断摩擦係数

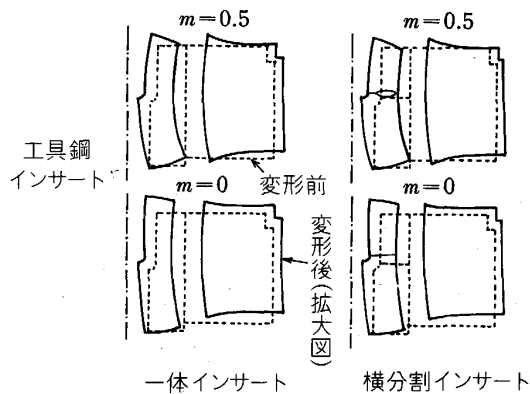


図6 軸対称型組み (ダイ側) 内面に一様内圧が作用したときの弾性たわみ<sup>7)</sup>

スライドとベッドにそれぞれ取り付けられた上と下の型の心ずれの原因となり, ときには型の面に直角方向でない運動を生じさせる. スライド案内の工作精度, 案内とスライドの間のすきま, フレームの非対称たわみなどが, これらの具体的要因である.

2.3 工具の精度, 剛性, 耐久性の不足

型鍛造においては機械によつて位置を決められた工具の加工面が, 鍛造品の形状, 寸法, 表面状態を決定する. 最近, 工具の工作技術が格段に進歩したため, 工具の製作精度は一般にきわめて良好といつてよい. しかし, 図3にも示されているように, 工具は鍛造中, 材料からの圧力を受けて弾性的たわみを生じるとともに (図6<sup>7)</sup>), 熱を受けて熱たわみを発生する. この熱は, 冷間鍛造の場合にもかなり発生し, 鋼で500~600°C<sup>8)</sup>にもものぼると報告されている. しかも, この温度上昇は, 作業開始時から進行をし始め, 数100個を打つまで定常状態に達しないので<sup>9)</sup>, とくに多種少量生産においてはきわめて厄介な代物である. ここでは圧延における板厚・形状制御の手法は通用しない.

工具の耐久性の因子は, 数10から300 kgf/mm<sup>2</sup>の範

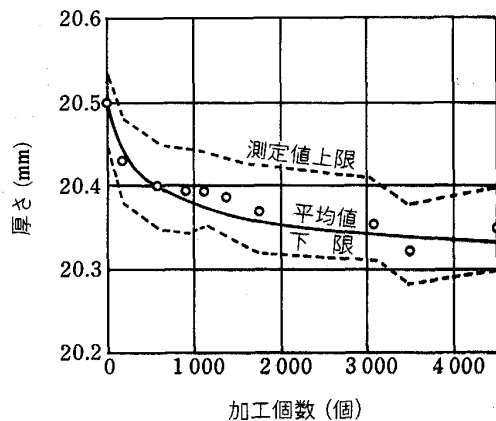


図7 鋼の熱間鍛造における型のクリープ及び摩擦による加工品厚さの変化<sup>10)</sup>

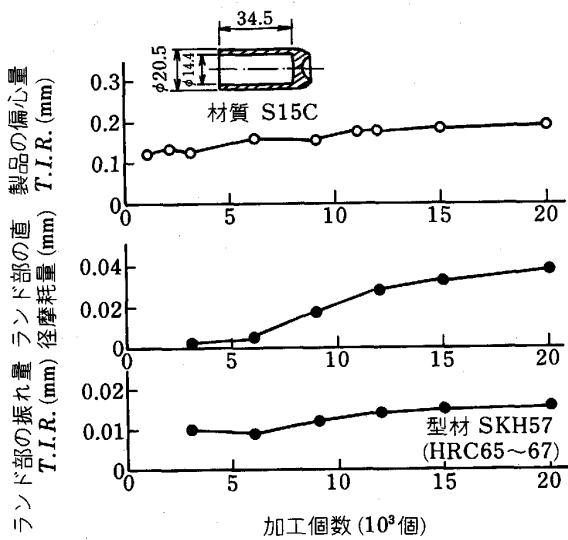


図 8 冷間後方容器押出しにおけるパンチ摩耗進行状況<sup>11)</sup>

囲の圧力下における工具の破壊、永久変形及び摩耗である。永久変形のうち、冷間加工のさいに生じる初期塑性変形は進行しないので、必要なら、熱処理した工具を仕上げる前に過荷重を加えてわずかに塑性変形させ、その後研削すれば防止できる。厄介なのは、700°C以上の温度にさらされる温・熱間鍛造用型の焼もどしとクリープ型変形である(図7<sup>10)</sup>)。これに対して、加工圧力を低くするには素材温度を高く、耐久性を増すには型の温度を低く保つという芸当を演じなくてはならない。

図8は冷間押出鍛造中のパンチ直径摩耗の進行情況<sup>11)</sup>を示すデータである。これに従って押し出された容器の内径も変化していく。一般に、鍛造においては、このような型の角部の摩耗がもつともはげしい。

一般に鍛造は不均一、非定常変形加工であり、材料の工具との接触面上における圧力、温度、表面積拡大率、すべり長さや速度が部分的に大幅に異なることが、耐久性対策を困難にする。例えば図8に示すような容器後方押出しにおいては、容器内面の表面積拡大は、上端近くではほとんど0に対し、底近くでは200倍にも達する<sup>12)</sup>ことが知られている。

工具の鍛造品精度に及ぼすもう一つの役割は、加圧終了後、鍛造品を取り出すさいにわずかな変形を生じさせたり、表面にかじりきずをつけたりすることである。これは加圧力がなくなつて型の寸法が縮まり、鍛造品を締めつけるためである<sup>13)</sup>。

#### 2.4 潤滑剤の挙動

鍛造材料と型面との間には潤滑剤が介在しなくてはならない。潤滑膜は高い圧力と温度の下でのすべりに対しても破断しないような膜強度あるいは付着性を持たなくてはならない。とくに温・熱間鍛造においては、潤滑剤は工具冷却または材料-型間の断熱も行わなくてはなら

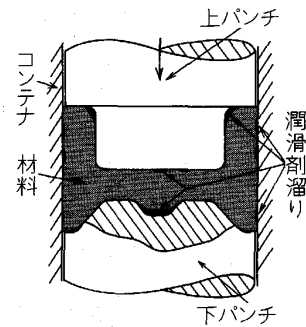


図 9 工具と材料の間の潤滑剤の巨視的、微視的介在

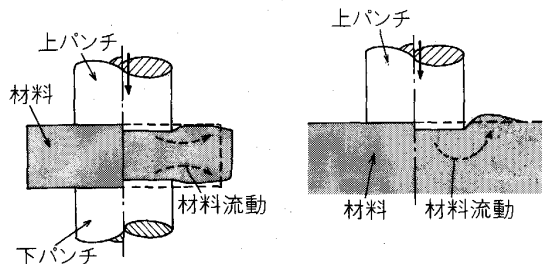


図 10 加工部から排除された材料流動による非加工部のゆがみ

ないので、分量も多くなくてはいけない。冷間鍛造においても、2・3で述べたような、材料の局所的な大きな表面広がりにはフォローするには、やはり厚い膜が必要である。

不均一・非定常変形の鍛造においては、素材の場所場所で潤滑膜の厚さを制御することはできないから、不必要に厚い膜が付着したところでは、材料の寸法や表面状態は型のそれとかなり違ってくる。また、余分な潤滑剤が型のくぼみに溜つて、材料がそこに入れなくなる(図9)。

#### 2.5 素材材料の熱-弾-塑性変形挙動

材料は機械と工具に反力を与えてたわみを生じさせ、工具には熱を与えて膨張させるとともに摩擦を加えて摩耗させるか、かじりつく。相手にこれだけ影響を与える材料の方は、果たして変形し摩耗した型の表面どおりの寸法・形状になつてくれるであろうか。答は否である。

過剰な潤滑剤の介在によつて、材料が局部的に型面と離れることは2・4で述べた。塑性変形においては、材料の体積が一定であるという法則が貫徹するので、素材の拘束されていない部分や、すでに加工を受けた部分が、加工されている部分から排除された体積に押されて塑性変形してしまうこともしばしばある(図10)。

鍛造品が型から取り出されるとき、わずかな塑性変形を受けることは2・3で述べたとおりである。その上取り出された鍛造品にはさらに2種類の寸法変化を生じる。一つはいわゆるスプリングバックである。もつともこの量は剛性の高い、短かく中実形の製品ではわずかで

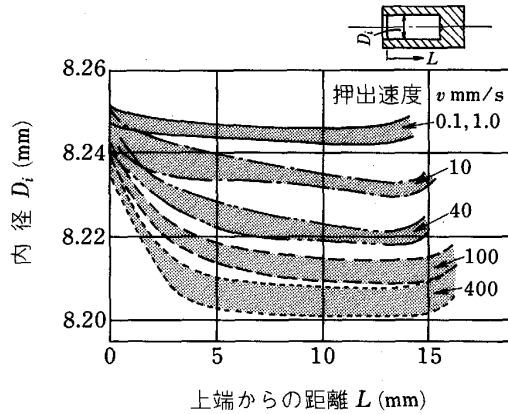


図 11 銅の冷間容器押し品の直径精度と押し速度(発熱収縮効果)<sup>14)</sup>

ある。しかし、取り出された鍛造品が室温まで冷えるときの寸法変化は冷間鍛造においてさえかなりある。図 11<sup>14)</sup>はそれを示すもので、加工速度が高いほど材料の加工途中の温度が高くなり、製品容器内径が、加工中のパンチ直径に比べて小さくなる様子がはつきり分かる。

素材の加熱による酸化、脱炭も広義の(好ましくない)熱的挙動である。鋼では、これは 700~800°C で起こりだす。

## 2.6 後処理、後加工によるひずみ

上に述べたいろいろな難関をやつと通り抜けてきた鍛造品といえどもまだ油断できない。鍛造後の熱処理や切削によって形状・寸法に狂いを生じうるからである。熱処理のさいの加熱・冷却速度のむらによって生じる熱応力あるいは変態応力が塑性変形の原因となる。たとえこれらのむらがなくても、鍛造によって生じた不均一な残留応力が解放されれば、当然大なり小なりひずみが生じる。後切削によって引き起こされる鍛造品のひずみも、残留応力の部分的解放のせいである。

## 3. 精密鍛造のための技術、システムとその応用

精密鍛造のための技術、システムというのは、求められる(あるべき)鍛造品の形状、寸法、表面状態に、もつとも経済的に近づく技術とそのシステムと解してよい。それはこのあるべき姿と現実の鍛造品との偏差を生じさせる要因もしくは要因の影響をいかに効率的に取り除くかにかかわっている。

この偏差要因は 2 章で説明した。これらは

- (1) 固定的偏差要因
- (2) 定常的偏差要因
- (3) 時系列的偏差要因
- (4) 偶然的偏差要因

の四つのカテゴリーに分けられる<sup>†</sup>。(1)は機械及び工具の製作誤差、取付け誤差など、鍛造作業開始前無負荷

<sup>†</sup> DOHMANN<sup>1)</sup>及び酒井<sup>15)</sup>の分類には(2)に当たるものが入っていない。

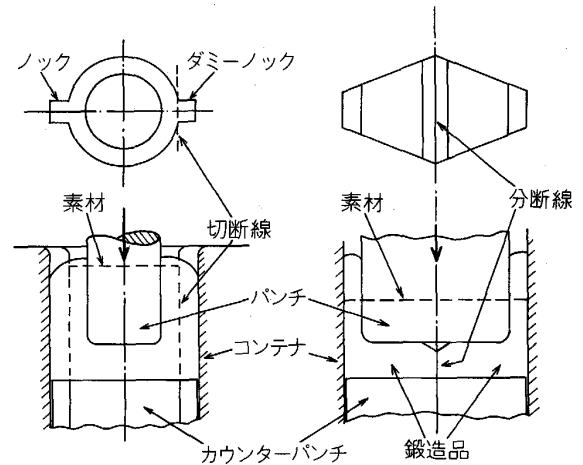


図 12 鍛造品の横断面对称設計例

時に偏差を生じさせる要因である。

(2)は 1 ロット鍛造作業中の加工荷重、トルク、温度などの平均値によって生じる偏差の要因であり、力と温度にもとづく、機械や工具のたわみが主なものである。これに対して(3)は、1 ロットの作業中だんだんと変化する荷重や温度にもとづくたわみや、徐々に進行する型のクリープ、摩耗などであつて、鍛造品の偏差を時間とともに変化させる。

さいごの要因(4)は主として被加工素材(ビレット)の材質、体積形状、寸法、加熱温度、潤滑のばらつきなど、鍛造品の 1 個 1 個にランダムな偏差を生じさせる、たいへん厄介な因子である。

これらの鍛造作業用ハード及びソフトウェアにおける偏差要因とその影響の除去ないし最小化のほかに、鍛造品の設計及び検査も精密鍛造のための重要な技術であることを忘れてはならない。鍛造された製品が到達しやすい設計、作業中の偏差要因の早期発見と管理、制御のできるような検査方法、やむをえない偶然的偏差要因による管理限界外の鍛造品の安価、確実な除去のできる手段などがそれである。

以下これらのそれぞれについてより詳しい説明と実用例を述べよう。

### 3.1 鍛造品設計

打ち上げられた鍛造品が図面との偏差が少なくなるような(公差の中に入りやすいような)設計の一般則は、次のようなものであろう。

(1)公差をできるだけゆるくする—これはたんに公差幅を広くするだけでなく、公差を指定する部分をできるだけ少なくし、上または下型内にまとめるようにする。上・下型の相対位置誤差は大きくなりやすいからである。また公差指定部分が限られていれば、そこを後で圧印仕上げするさい、余分材料を拘束せずに体積一定の法則のまま容易に流せるのである。

(2)横断面を対称にする—非対称は、上・下型の横ず

れの原因となる。このため、鍛造品に不用部分をつけて対称性をもたせ、後からこれを除去したり、2個の鍛造品を一組の型で対称的に作る例もある(図12)。

(3)アンダーカットをつけない—鍛造によつてアンダーカットをつけるには、特殊な分割組立て式工具が必要となり、型の寸法精度や剛性が低下する。

(4)発生した偏差の除去を容易にする—切削、研削をする面は回転面または平面とし、鍛造品に証となる部分をつけて、1チャックで仕上げが可能のようにする。写真1、図2の製品はこのようにして仕上げられた例である。仕上げの自動化のために鍛造品にチップブレーカーをつけることもある。

(5)鍛造あるいは切削しやすい材料を選ぶ—ボロン鋼のように冷間鍛造容易で、熱処理によつて焼の入りやすいものがその例である。ただし熱処理で強度を出すという方策は、鍛造のさいの工具への負荷は小さくするが、焼入れひずみという別の精度低下要因を発生させる。

以上のほか、鍛造品と図面との偏差を少なくするような工程と結びつけた設計も考えられる。このような工程については後で述べるが、工程まで考えに入れた設計という考え方は1986年5月に米国NSF(National Science Foundation)でオハイオ州立大学に設立されたEngineering Research Center for Net Shape Manufacturingの構想に含まれている<sup>16)</sup>。

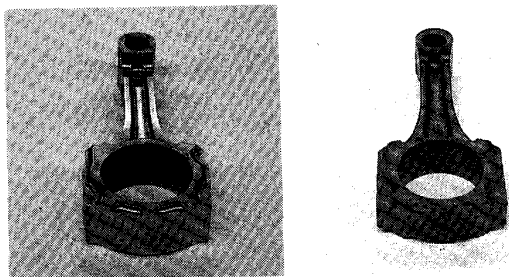
### 3.2 変形工程設計

これは工具や機械に鍛造(とくに仕上げ打ち)のさいに与える力学的、熱的負荷をできるだけ低くして、定常的、時系列的、偶然的偏差要因そのものを小さくするように行う。

(1)型による材料拘束を低くする—これはたしかに、力学的負荷は下がるが、図10に示すように無拘束部品の寸法精度は悪くなる。

(2)鍛造温度を高くする—これによつて材料の変形抵抗は低くなり力学的負荷が低下する。超塑性鍛造はその例であるが、工具に対する熱的負荷はかえつて高くなる。

(3)材料流動を少なくする—流動が大きいと型摩耗は大となる。粉末鍛造(写真2)のように、粉末圧密-焼



(a) 粉末圧密成形粗地 (b) 粉末鍛造品

写真2 粉末鍛造品(自動車エンジン・コンロッド)(トヨタ自動車(株)提供)

結で仕上形状に近い荒地を作つて鍛造するのはその例である<sup>17)</sup>。このさい、流動が少なすぎると密度上昇が不十分となる。最近、管材または厚板からブランクを作り、これを成形してから冷間鍛造することが行われている(写真3)。これも流動制限の有力な手段である。

(4)十分な潤滑剤を与える—これは型に対する摩耗負荷、熱負荷を低くして型のたわみや摩耗を少なくする。しかし一方では図9に示したように、材料面に対する型面の転写は正確でなくなる。

このように、負荷低減手段はつねに別の偏差増大要因を含んでいて問題解決は簡単でない。しかし以下に述べるような鍛造工程の複合化は上述の矛盾の解決に役立つ。

(5)多段加工化—一段の加工度合を下げることは、荷重、熱、摩擦負荷を下げることを可能にする。この典型例は多段自動ホーマーによる冷、温あるいは熱間鍛造である(図13<sup>18)</sup>)。このさいの問題は複数個の工具の製作コストと段取替え時間であり、多種少量生産では深刻である。そのため最近、ホーマーの工具交換を短時間で

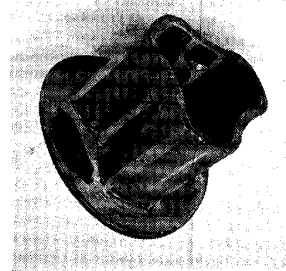


写真3 厚板または管成形後冷間鍛造された自動車用CVJのGIチューリップ(トヨタ自動車(株)提供)

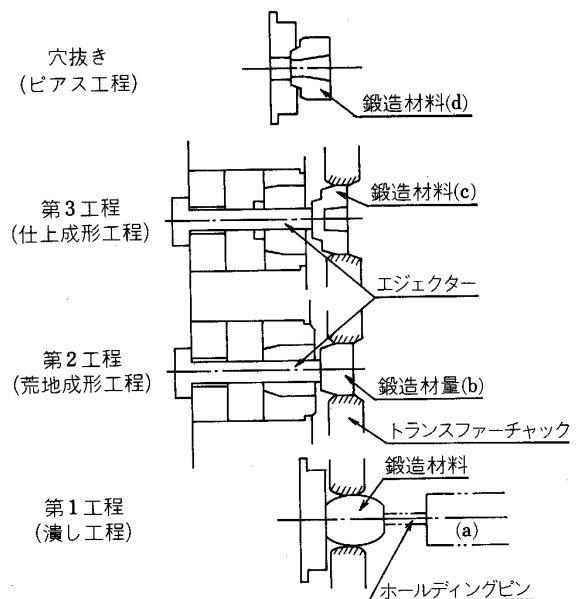
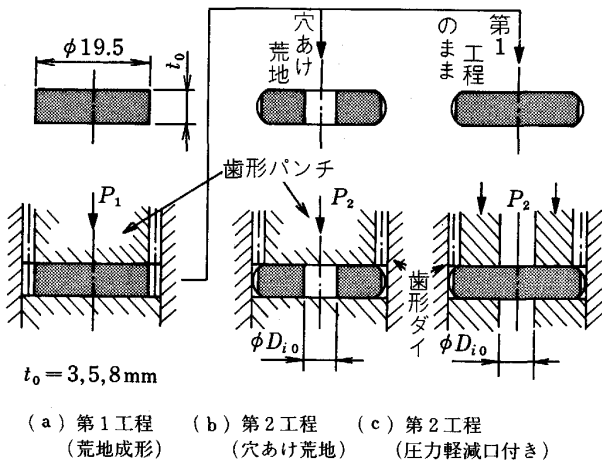


図13 自動多段熱間ホーマーによる多段鍛造<sup>18)</sup>

えるような工夫が次々となされている。近藤ら<sup>19)</sup>による分流方式歯形冷間鍛造も特別な多段加工の一つである(図14)。

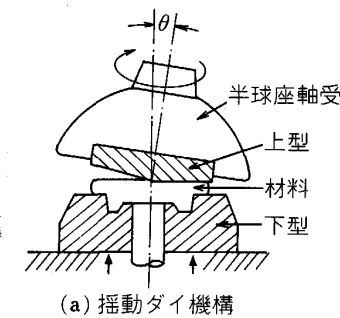
(6)熱・温・冷間組合せ鍛造—多段加工の一種であるが、はじめの2~3段の大変形を熱間または温間鍛造で行い、さいごの仕上げを冷間鍛造を行って高精度を得る方法である。写真1(a), (b)に示した部品や図2の傘歯車の生産において標準的な方法となつている。これに



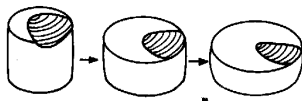
$t_0 = 3, 5, 8 \text{ mm}$

(a) 第1工程 (荒地成形) (b) 第2工程 (穴あけ荒地) (c) 第2工程 (圧力軽減口付き)

図14 分流を利用した2段冷間鍛造による平歯車の成形<sup>19)</sup>



(a) 揺動ダイ機構



(b) 上型との接触状態の推移

図15 揺動鍛造法の原理図<sup>20)</sup>

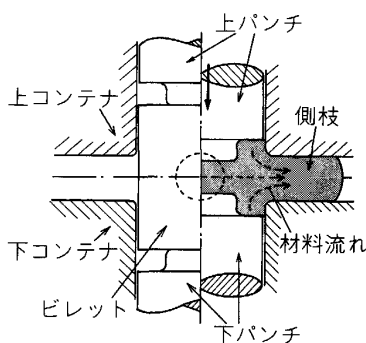


図16 閉塞鍛造の原理

よつて10~数10 μmの寸法精度が得られる。

(7)揺動鍛造—図15に示される揺動ないし回転鍛造は鍛造工程の瞬間瞬間において材料に対する工具拘束が低くなり、全面同時鍛造の力の1/10~1/5の力で済む。これで、外径150 mmの鋼温間鍛造品の厚み公差は±0.15 mm位にまで小さくできる<sup>20)</sup>。

(8)複動鍛造—図16に示すように、素材を上・下型の間に閉じこめ、別のパンチを押し込んで鍛造する、いわゆる閉塞鍛造はこの一種である。図1(c), (d)に示す等速ジョイント用トリポードヤインナレースは、このようにして作られた冷間鍛造品である。ばりを出さないで済むため、工具、機械への負荷は少なく、複雑・精密な製品を作ることができる<sup>21)</sup>。閉塞鍛造は複動、三動プレスを用いて行すが、単動プレスに補助油圧装置を取り付けて安価に実施することもできる<sup>22)</sup>。

### 3.3 機械の選択・調整ならびに工具の設計・製作

これらは工具、機械の精度にもとづく固定的偏差要因を小さくするとともに、工具、機械に加わる負荷によつて引き起こされる工具、機械のたわみを極小にするための方策である。

(1)機械の運動特性の選択(定常的、時系列的偏差要因の制限)—材料の超塑性状態を利用する場合を除けば、機械の鍛造速度はある程度高くするのがよい。これは温・熱間鍛造においては素材と型との接触時間を短くする方が、型の焼もどしやクリープ、摩耗を少なくするからである。この点、スクリュープレスの方が機械プレスより勝っている<sup>23)</sup>。

(2)機械、工具、取付部の工作精度(固定的偏差要因の制限)—これは自明のことである。機械の運動方向の不正確は工具寿命を縮める。LANGE<sup>24)</sup>によれば、型の工作精度は製品所要精度に対しIT 3級上位にするようにとのことである。

(3)機械、工具及び取付部の剛性(偏差要因の影響の制限)—一般にこれらの剛性を高めれば、鍛造荷重とその変動とによるたわみとその変動は小さくなる。剛性を高めるために、さいきん弾性有限要素法によるたわみ解析も利用されるようになったが、上・下型どうしによる

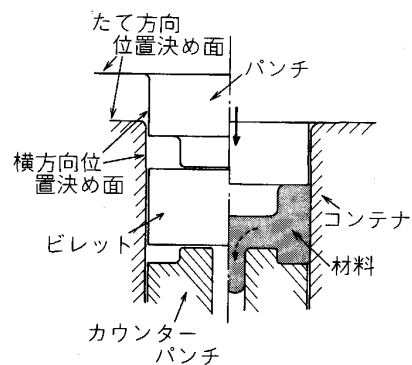


図17 工具自身による位置決め方式

直接の位置決めの方が、安価かつ効果的である(図17)。このとき、機械あるいは取付部の剛性はむしろ低くして、型による位置決めに干渉しないようにすることが必要である。工具剛性アップの手段として弾性係数が工具鋼の3倍近くもある超硬合金が用いられることがある。

(4)応力及び熱による変形と摩擦による型摩耗を考慮した型設計・製作(定期的及び時系列的の偏差要因の影響の補償)―型の応力及び熱によるたわみと、摩擦によって徐々に進行する摩耗及び、材料の鍛造後の冷却による収縮は、今日の計算機利用による有限要素法、差分法あるいは上界接近法シミュレーションや、データの蓄積によってある程度予測可能である(図18<sup>9)</sup>)。したがってこれを使つて鍛造品が所要の寸法公差内に入るように型を設計することは可能である<sup>25)</sup>。この予測ができないか、その精度が悪い場合は、まず試作型を作つて加工し、製品の寸法を測定してから、試作型の修正を行つて実生産型を作るのが普通である。このさい、試作品の形状・寸法測定結果を自動的に計算機に入れ、それを用いてNC工作機械によつて型自身、または型の放電加工用電極を作る(CAM)こともできる<sup>26)</sup>。

(5)型の耐摩性、耐クリープ性向上(系統的偏差要因の影響の制限)―冷間鍛造用型の耐摩性増大に、型材料としてWC型超硬合金が広く使われるようになった。また耐摩性表面被覆としてイオン窒化、TiC、VCなどの炭化物、TiNのような窒化物の皮膜形成が盛んに開発・利用されるようになり、成功を収める例が報告された<sup>11)27)</sup>。熱間鍛造型用材料は除々にしか進歩しな

いが、イオン窒化による耐摩性向上は広く利用されている。耐熱性Ni合金の等温鍛造のように型が1000°C以上に長時間さらされる場合に対して、実用にされている型材料はMo合金(とくにTZM)のみである<sup>28)</sup>。もちろん、型材料としてセラミックスも注目されいろいろと研究されているが、鍛造に対して実用されたものはいまだないようである。

3.4 工程管理及び検査・調整

上の3.1から3.3までの各項目を十分整えたとしても生産に当たつての工程の注意深い管理、プロセスの監視と加工品の検査にもとづく資材、設備の調整などを行わないと、コストに見合った精密鍛造を実施できない。

(1)素材材質・寸法・形状・表面状態の均一性維持(偶然的偏差要因の制限)―とくに冷間鍛造においては、素材の変形抵抗のばらつきは工具、機械の弾性たわみを変動させる。成分、組織あるいは硬度、引張強さ、圧縮試験などによる管理が必要である。鍛造品の部分で、素材のまま未変形の状態が残るときは、素材の直径や表面状態は変わらずに残るので注意が必要である。それゆえ精密なスプラインの冷間押し出し用素材はあらかじめ皮むきしたり研削したりしている。

素材のせん断による切断の場合に生じる素材ゆがみ、切断面の傾きなどは偶然的偏差要因となる<sup>29)</sup>(図19)。切断後にすえ込みを行つて形を整える方法はしばしば用いられ、素材直径のばらつきの影響を除けるが、切断体積誤差は鍛造品の寸法精度に悪い影響を与える。一般に体積許容誤差は±0.5%である。この点、焼結粉末荒地は体積をそろえやすい。原素材直径を測定しながら切断長さを自動調整するメカトロ切断機も市場に出ている。

(2)素材・工具温度の一定維持(偶然的・系統的偏差要因の制限)―素材温度は変形抵抗に大きく影響し、工具温度のばらつきは、熱膨張を変動させる。この管理のため現在、素材加熱の自動制御、鍛造工程の自動プレスによる一定タクト化が行われている。型温度の測定による温度制御はいまだ実現していないようである。

(3)潤滑の一定性維持(偶然的・系統的偏差要因の制限)―潤滑剤の成分をそろえること、予熱温度の制御、使用分量の加減などがそれである。

(4)工程の監視及び鍛造品の簡便検査―型鍛造においてこれまで述べてきた諸手段によつても、鍛造品を100%寸法公差内に収めることは不可能である。鍛造品のインライン簡易検査システムからのフィードバックによつて、プレスストローク、プレスキブクリアランス、潤滑剤温度の調整、工具の修正、交換などを素早く行えば、不合格品の数を少なくできることは当然である。

この検査法として、インラインで即座に測定できる、鍛造荷重-ストローク曲線や温度モニターからの信号を処理することによつて、どこに不都合があるかを小型計算機で判断することが可能になってきた<sup>30)</sup>。

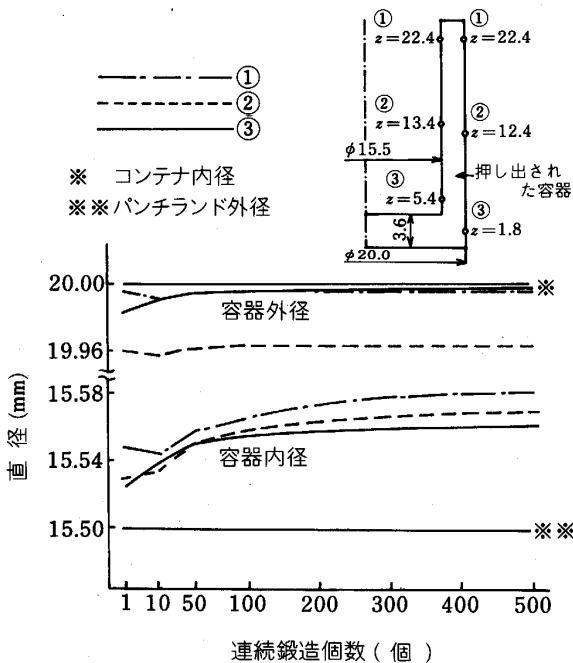
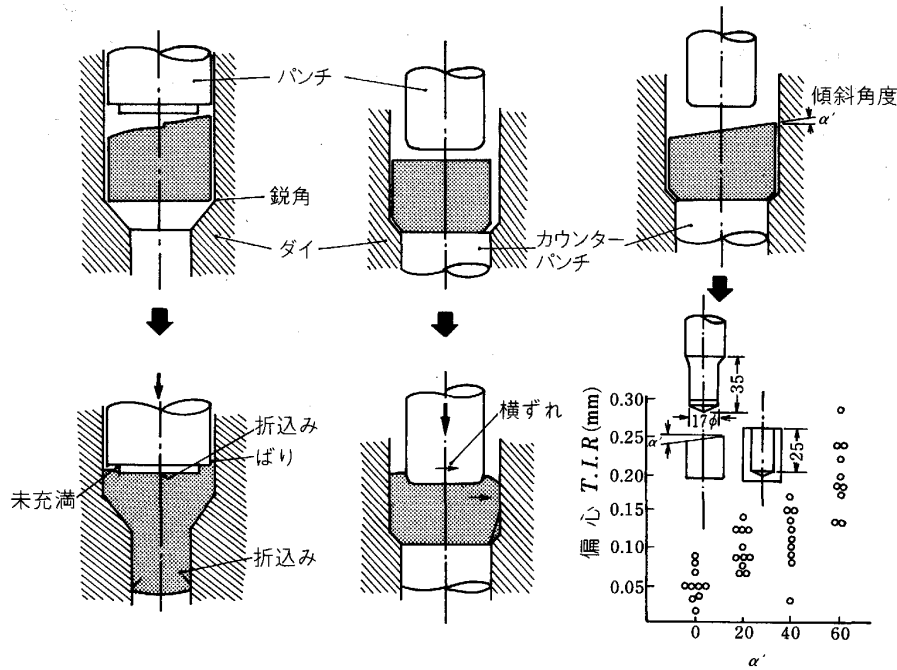


図18 軟鋼容器連続後冷間押し出しにおける製品内外径の工具寸法とのずれ<sup>9)</sup>(加工の圧力及び熱による工具鋼製工具のたわみ及び加工後の鍛造品の冷却収縮の数値シミュレーションによる)





(a) 段付傾斜上端と角付下端によって生じるトラブル  
 (b) 直径の小さすぎるピレットの生じるトラブル  
 (c) 傾斜上端面ピレットによる容器押出品の偏心<sup>29)</sup>

図 19 素材の形状誤差による鍛造品の寸法誤差

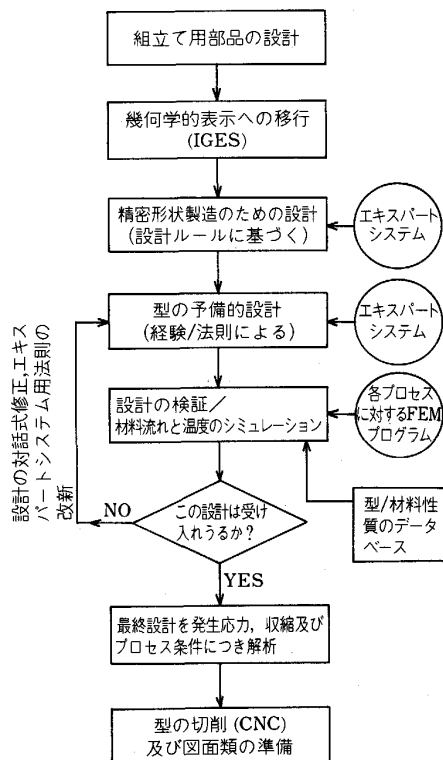


図 20 米国オハイオ州立大学精密素材センターで計画中の総合工程設計システム<sup>30)</sup>

#### 4. おわりに

精密鍛造技術の進歩という主題を頂戴したが、本稿は

それにふさわしいという自信はない。筆者の意図したことは、この主題に含まれるトピックをあれこれ並べてより、まず、鍛造の精密化が必然的動向であるにもかかわらず、本質的な困難が数多くあることを指摘しつつ、これらを克服する途を系統的に考察して、それらの実施例という形で新しい精密鍛造法を紹介した。この方が、より役立つと考えたからである。

結局、精密化への困難を克服するには、鍛造品の設計、素材材料の選択、素材の製作、工程の設計、工具の製計・製作、潤滑法の選択、加工機械の選定、加熱方法の選択、鍛造後加工・後処理その他関連するハードウェアとそれらのソフトウェア全体をシステムとして最適化を計らなくてはならないことが明らかとなった。このさい中心的な役割を果たすのは本当のエキスパートを助ける工程及び工具設計のためのエキスパートシステムと材料・工具の応力、ひずみ温度の数値シミュレーションシステムそれに当然のことながらさまざまなデータベースなど計算機利用技術であろう(図20<sup>16)</sup>)。このほか、高温・高圧・高摩擦に耐える型材料または被覆方法及び作業制御、管理用のセンサーが、精密鍛造のためのハードウェアの中心となろう。

#### 文 献

- 1) F. DOHMANN: Grundlagen der Umformtechnik, Berichte IfU, Univ. Stuttgart, 2 (1983) 75, p. 179 [Springer Verlag]
- 2) O. VOIGTLÄNDER: VDI-Berichte (1977) 277, p. 107
- 3) 工藤英明: 精密機械, 44 (1978), p. 409

- 4) 沢辺 弘, 高橋昭夫: 塑性と加工, 17 (1976), p. 644
- 5) G. OLIVO: *Maschbautech.*, 13 (1967), p. 307
- 6) W. SCHWEER and H. HOPPE: *Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung und Oberflächbearbeitung e. V.*, 19 (1968), p. 90
- 7) S. MATSUBARA and H. KUDO: *Proc. 7 Int. Cold Forging Congr., Birmingham* (1984), p. 63
- 8) T. KATO, Y. TOZAWA and T. TANAKA: 同上, p. 48
- 9) T. KATO, Y. TOZAWA, K. NAKANISHI and K. KAWABE: *Ann. CIRP*, 35 (1986), p. 177
- 10) K. LANGE: *Forschungsbereich, Nr. 98, Wirts.-und Verkehrsminist. Nordheim-Westfalen* (1954)
- 11) 岩崎 切: 塑性と加工, 23 (1982), p. 984
- 12) 団野 敦, 阿部勝司, 野々山史男: 塑性と加工, 24 (1983), p. 213
- 13) A. E. TEKKAYA: *Bereicht Inst. für Umformtech, Univ. Stuttgart* (1986) 83 [Springer Verlag]
- 14) 今井邦典: 塑性と加工, 22 (1981), p. 185
- 15) 酒井健二: *鍛造技報*, 10(1985) 23, p. 29
- 16) *Net Shape Manufacturing Newsletter* 1 (1986年8月)
- 17) 積木千明, 永礼一郎: 塑性と加工, 24 (1983), p. 809
- 18) 越丸 肇: 素形材, 27 (1986) 3, p. 1
- 19) 近藤一義: 塑性と加工, 24 (1983), p. 801
- 20) 久保勝司, 平井幸男: 同上, p. 786
- 21) 吉村豹治, 島崎 定: 同上, p. 781
- 22) 上出拓郎: *鍛造技報*, 11 (1986) 25, p. 1
- 23) *Forging Equipment, Materials and Practices* (1973), p. 11 [Metals and Ceramics Information Center]
- 24) K. LANGE: *Handbook of Metal Forming*, ed. by K. LANGE (1985), Sec. 9.1 [McGraw-Hill]
- 25) D. J. KUHLMANN, P. S. RAGHUPATHI, G. L. HORVAT and D. OSTBERG: *Gear Technol.* (1985), p. 16
- 26) A. M. SABROFF, J. R. DOUGLAS, A. BADAWY and T. ALTAN: *Ann. CIRP*, 31 (1982), p. 141
- 27) H. WESTHEIDE: *Bereicht Inst. für Umformtech, Univ. Stuttgart* (1986) 87 [Springer Verlag]
- 28) 中沢克紀: 素形材, 27 (1986) 3, p. 13
- 29) 石原康正, 楠 兼敬, 大西利美, 鈴木隆充: 塑性と加工, 5 (1964), p. 210
- 30) G. CHRYSOLOURIS and P. HOFFMANN: *Proc. 12 NAMRC* (1984), p. 32