

# 精密鍛造における技術開発と研究の最近の動向

小坂田 宏造\*

Recent Research and Development in Precision Forging

Kozo Osakada

**Synopsis :** The use of cold forging technology started around 1960 in Japan, and grew in the 1960s and 70s mainly for mass-production of the automobile parts. Although the new employment of cold forged products became to be saturated around 1980, warm forging and multi-ram precision forging technologies were developed and used to forge the parts with complicated shapes for constant velocity joints of F-F cars. Computer aided engineering technologies were also developed to assist the process designers of precision forging. The recent economical situation demands the forging technology to form more accurate products to decrease the machining operation. Thus the economical production of precision parts such as the gears is the main target of precision forging. In this article, the precision forging methods are outlined and some exam of the forged precision products are introduced. Recent researches on precision forging methods and the computer aided engineering such as computer simulation of forging processes and expert system are explained.

**Key words :** precision forging; cold forging; warm forging; near net shape processing; CAE; FEM; expert system.

## 1. まえがき

1960年代から70年代にかけて大量均一生産のために自動車部品などの冷間鍛造化がすすめられた。1970年代後半から1980年代には冷間鍛造化できるものが少なくなったが、オイル危機後に急増したFF車のための等速ジョイント部品の温間鍛造、閉塞鍛造が脚光を浴びた。1980年代後半は次第に製品の高度化やCAEと呼ばれるコンピュータ化技術へ塑性加工の研究開発の中心が移っていった。1990年代に入り、バブル経済崩壊後は製品のコストダウンの強い要請から切削・研削部品の塑性加工化が再び注目されるようになったが、歯車などの高精度部品の塑性加工といった、以前に比べるとかなり厳しい条件がついていることが特色である。

こうした傾向は鍛造、粉末成形など各種のネットシェイプ加工で見られるが、塑性加工の中で特に精度向上が求められるのは、他の加工法（切削、粉末成形、鍛造など）と競合する鍛造の分野であり、以下では精密鍛造を中心に説明する。

## 2. 精密塑性加工と経済性

鍛造加工で精度を向上させることの経済的効果について、水谷<sup>1)</sup>はFig.1のように説明している。鍛造で作成される素形材の精度を高めると素形材加工費は上昇するが、仕上げ加工費用が低下（または不要になる）し、総合的な費用を最小にする素形材の精度が存在する。図から鍛造製品を高精度にすることにより経済的効果を生じさせるには、

高精度鍛造において加工費用を低減できることが不可欠であることが分かる。最近では切削加工の高速化により、仕上げ加工を全部省けるか、NC切削でのチャック回数を減少させるかが精密鍛造化の目安となっている。

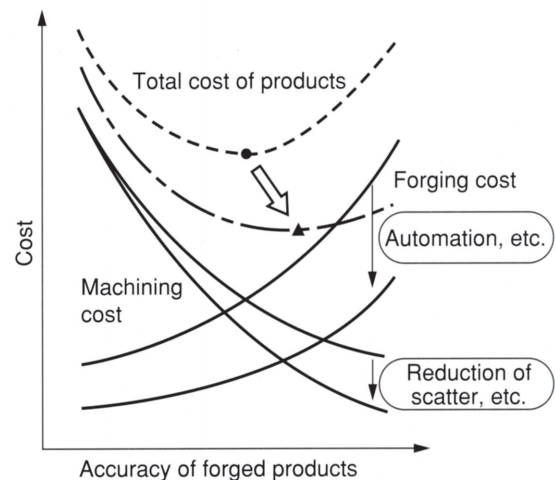


Fig.1 Reduction of total cost due to improvement of accuracy of forged products. (I. Mizutani)

高精度加工において費用がかかる原因として次のような事項が考えられる。

- 1) 精密鍛造用プレスは高剛性で高価である。
- 2) 高精度金型は高価である。
- 3) 精度を向上させる試し打ちなどの試行錯誤に経費がかかる。
- 4) 高精度品はばらつきの許容範囲が小さく、歩留まりが悪くなりやすい。

\* 大阪大学 [Osaka University, 1-1 Machikameyoma Toyonaka, 560], 工博

高精度鍛造には、大きな初期投資を必要とするもの（設備）、製品毎に費用がかかるハードウェア（金型）およびソフトウェア（工程設計や型設計）など多岐にわたる問題がある。

これらの問題に対して次のような対応策が考えられている。

- 1) 高剛性プレスの加工速度を高めて、時間当たりのコストを削減する。
- 2) 高剛性のダイセットを用い、通常のプレスで高精度の加工を可能にする。
- 3) FEMなどにより加工中に生じる材料変形、工具変形、温度、などの現象のシミュレーションを行い、試行錯誤を省く。またエキスパートシステムにより、過去の知識を有効に利用する。
- 4) 素材寸法、材料特性、潤滑条件、加熱条件などのばらつきを低減して製品寸法のばらつきを低減し、歩留まりを上げる。
- 5) いくつかの部品を1個の部品に集約する（新加工法が必要）。
- 6) 工程数を削減する（新鍛造加工法、鍛造と熱処理、切削の新しい組み合わせ）。

### 3. 鍛造における精密加工技術

#### 3・1 冷間鍛造

冷間鍛造は前方押し出し、後方押し出し、据込みを中心とした室温での加工法であり、鍛造の精密化は冷間鍛造に始まった。冷間鍛造は1960年ごろわが国に導入され、自転車、オートバイ、乗用車などの発展とともに急成長してきた。最近わが国で生産されている乗用車1台あたりに搭載されている冷間鍛造品の重量は36kg程度で、仕上げ加工前の鍛造後の重量では約43kgである<sup>2)</sup>。この数字はドイツなど他の国の数値の2倍以上であると言われている。これらの自動車部品以外にボルト・ナットなどの締結部品も冷間鍛造されているが、その重量が乗用車1台あたり35kg程度ある。各種の統計などから推定すると締結部品以外の冷間鍛造部品の年間生産量は60～70万ton、締結部品が200万ton程度であり、熱間型鍛造品の約150万tonより多くなっている。

#### 3・2 温間鍛造

温間鍛造は1970年代に開発され、現在ではかなり利用が進んでいる（自動車産業では冷間鍛造の15%程度）。基本的な加工方法は冷間鍛造と同じであるが、600～800℃の温度に鋼を加熱して鍛造すると変形抵抗が下がるため加工荷重を低下でき、冷間鍛造に比べて大きい部品や強度の高い材料の加工に利用されている。特に後で述べる閉塞鍛造を温間において行い、等速ジョイントの部品が生産されるようになり普及が進んだ。

#### 3・3 精密熱間鍛造

ホットフォーマと呼ばれる横型の多段鍛造機ではコール

ドフォーマによる冷間鍛造とほぼ同じ様式で加工が行われる。この方法ではインダクションヒータによる高速加熱のため酸化膜の付着量が少なく、高速の精密鍛造が可能である。ホットフォーマの製品開発はリング状品やナットなどから始まり、かなり複雑な製品も生産されている。温間鍛造と同様に大量の水溶性潤滑剤による工具の冷却がこの方法を可能にしている。

#### 3・4 閉塞鍛造

閉塞鍛造はFig. 2に示すように素材をダイキャビティの中に閉じこめ、1本または複数のパンチを押し込んで成形を行うもので、複数のラムを駆動することが特色である。加工温度は冷間、温間熱間いずれも採用されている。1980年代初めに中小企業事業団の委託で調査研究が行われ、その後等速ジョイント部品やベベルギヤの生産に適用され効果があつたため注目され、自動車部品の生産において広がった。

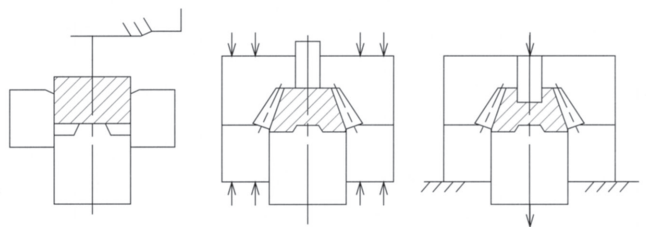


Fig.2 Closed die forging with dies moving upward and downward.

#### 3・5 複合鍛造

一般に高精度の型加工を行おうとすると型による拘束が大きくなり、加工圧力が過大になりやすい。このため加工温度を上げると加工力は低下するが、工具および素材の熱変形により精度低下を招く。そこで熱間または温間で加工した後に冷間で仕上げ加工を行い精度を向上させる複合鍛造が増加している。

### 4. 精密鍛造の製品例

Fig. 3～6に最近の精密鍛造事例を示す。これらは日本の鍛造メーカーから代表的な精密鍛造事例を提供頂き、工藤教授と筆者が1992年に米国オハイオ州で開催された1992年冷温間鍛造会議<sup>3)</sup>で発表したもののなかの一部である。

Fig. 3は等速ジョイントのアウタアウトボードと呼ばれるチューリップの花状の部品である。この部品は圧延棒から鋸切断によって作成した素材を焼純3回、燐酸塩皮膜潤滑処理3回、冷間鍛造4回で仕上げたもので、NS (Net Shape) と記入されている内面の最も重要な部分は鍛造で仕上げたままで用いる。



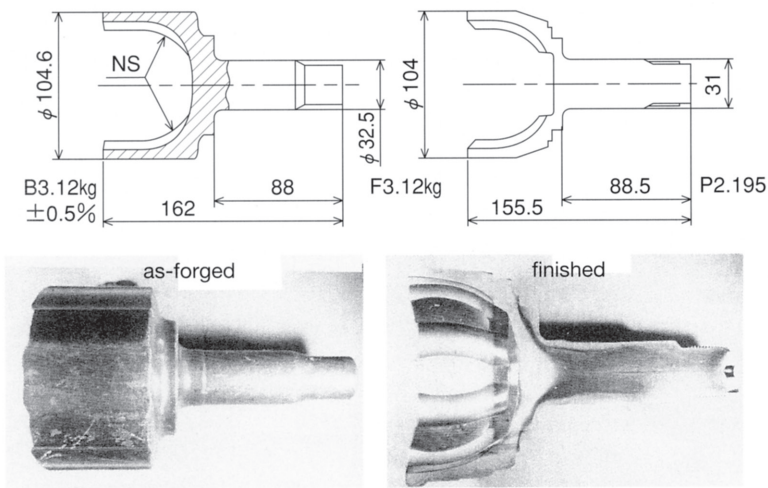


Fig.3 Outer outboard (constant velocity joints) / S53 C. (Honda Motor Co., Ltd)

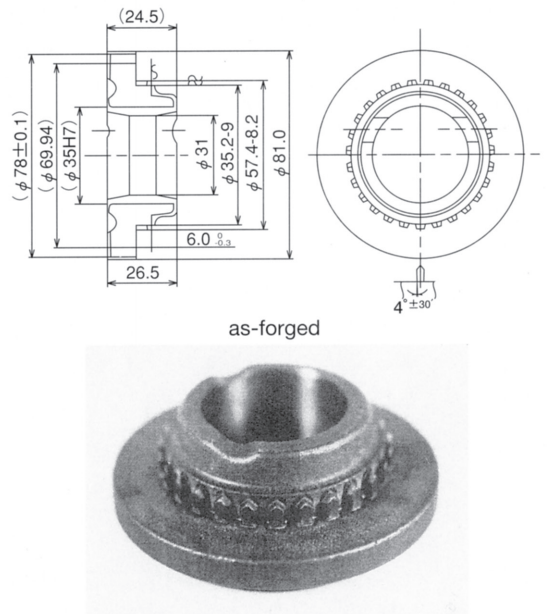


Fig.5 Transmission gear with spline / SCR 20. (Metal Art Corp.)

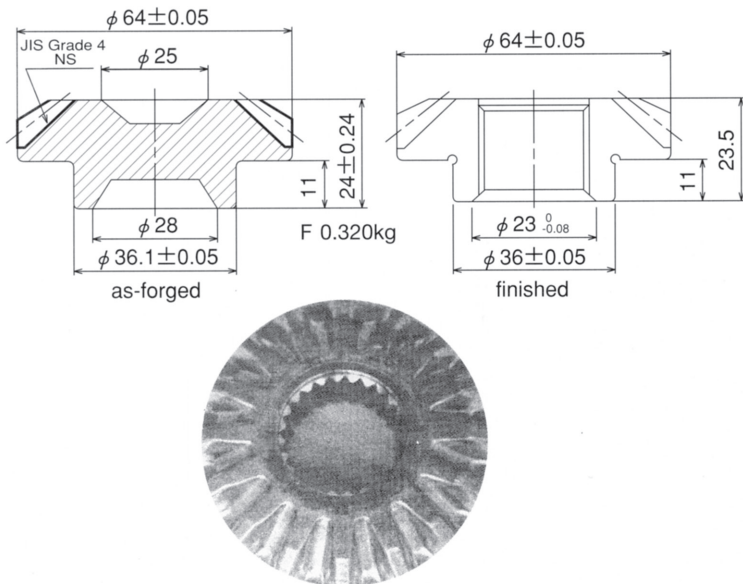


Fig.4 Differential side gear / SCR 420 H. (Mazda Motor Corp.)

Fig. 4 はデフのサイドギヤ用の傘歯歯車であるが、焼純、燐酸塩潤滑処理した線材から冷間鍛造、球状化处理、潤滑処理、冷間鍛造で鍛造した後、旋削、表面焼き入れをして製品としたものである。この場合は歯の部分がJIS4級で鍛造したまま用いる。

Fig. 5 はスプライン付きトランスミッションギヤである。圧延棒をせん断によって素材を作成し、熱間鍛造3回、打ち抜き、焼準、燐酸塩潤滑処理、冷間鍛造2回で作成したものを、切削歯切り、焼入れで仕上げたものである。スプラインの部分を冷間の半径方向に動く工具で仕上げている。

Fig. 6 はビスカスカップリングケースで、圧延棒をせん断の後、熱間鍛造3回、打ち抜き、切削、燐酸塩潤滑処理、冷間鍛造、冷間しごきの後、切削で仕上げたものである。この製品は鍛造工程の途中で切削工程を導入して位置決め部を作成していること、スプラインを冷間しごきで作成してそのまま用いるところが特色となっている。

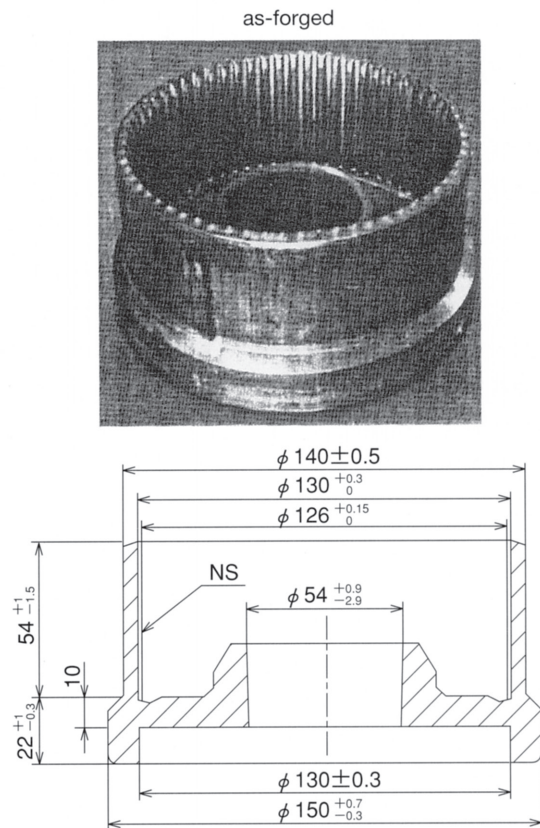


Fig.6 Viscous coupling case / S 30 C. (Toyota Motor Corp.)

### 5. 鍛造の精密化の最近の研究開発

ニアネットシェイプ加工では金型の製作精度を高くしても、製品精度が高くないことが多い。これは主に工具の弾性変形量が要求精度の範囲以上になっているからである。例えば長さ100mmの鋼製パンチに100kg/mm<sup>2</sup>の軸応力が加わるとその弾性変形量は0.5mmに達する。まず、加工圧力自体をできるだけ低くするような加工方法が求められることが分かる。また、除荷時の製品の弾性変形（スプリングバック）や工具・素材の温度上昇に伴う熱変形も製品形状を変化させる。こうした工具と製品の弾性変形はニアネットシェイプ加工で要求される精度（5～50μm）よりも大きく、弾性変形量の予測を行って金型の形状を予め補正しておくことが不可欠である。

工具の弾性変形を見込んで金型を作成したとしても、加工にばらつきがあり、精度は完全には良くならない。例えば、上述の例で加工力に±5%のばらつきがあると、それによって弾性変形量が変動し±25μmも製品寸法のばらつきを生じることになる。超硬工具の弾性係数は鋼の1.5～2倍程度であり、弾性変形量を小さくでき、工具の弾性変形を抑えるため、超硬工具を用いることがある。

精密鍛造で達成される精度は現在のところ±20μm程度が限界である場合が多いが、今後それ以上の精度を要求される可能性が高い。このため、加工荷重自体を低く抑え、そのばらつきを±1%程度にする必要が出てくる。工具弾性変形を制御することは板圧延用のロールで実用されているが、制御技術も鍛造で要求されるようになるものと考えられる。

#### (a) 工具面圧の低減

工具で囲まれた型鍛造においては変形拘束が大きく、加工圧力が大きくなりやすい。特に工具隅角部などに材料を充填するための工具面圧は材料の強度（変形抵抗）の3～4倍程度になり、工具の変形が著しく大きくなりやすい。

近藤ら<sup>4)</sup>は材料を一方向に押し出す場合に比べ、Fig.7のように材料を2方向に流れるようにすると加工圧力が低下することを利用して、圧力を低減する分流法を提案し、歯形鍛造に利用することを提案している。最近この原理を応用

した加工法も実用化されつつある。筆者らもパンチとともにコンテナも駆動する加工法で大幅な加工圧力低減が実現できることを提案した。

#### (b) 工具弾性変形の制御

Fig.8は筆者らが採用した二重ダイスによる押し出しにおける寸法制御法である<sup>5)</sup>。押し出し圧力が高くなると、外側ダイスの内径がふくらむ。しかし、内側ダイスは軸力により下方向に押しされ、両ダイスの間の摩擦を小さくしておくことで内側ダイスの外面に半径方向圧縮力が作用する。この圧縮力がダイス内側の半径方向の圧縮力より大きい時（両ダイスの接触部の円錐の角度が小さいとき）、ダイス穴径は縮小することになる。これにより摩擦条件や素材の寸法ばらつきに影響されず製品寸法をほぼ一定にした押し出しが可能である。

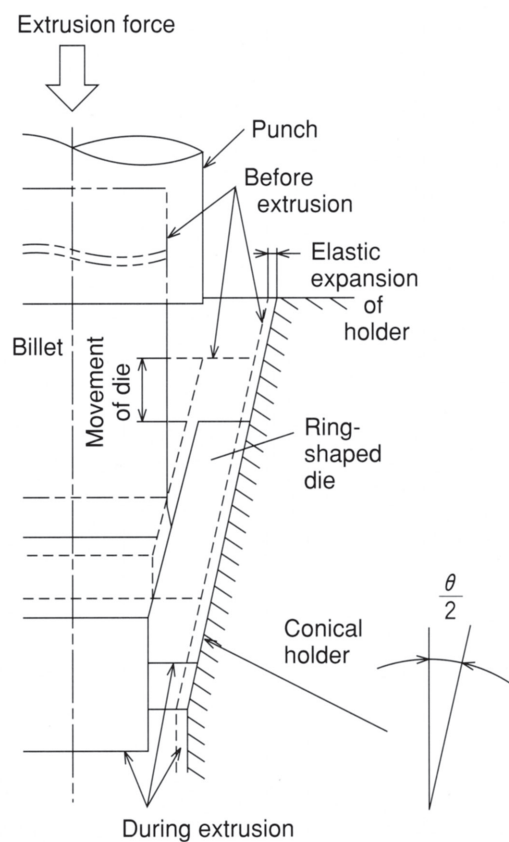


Fig.8 Process of extrusion with ring shape die.

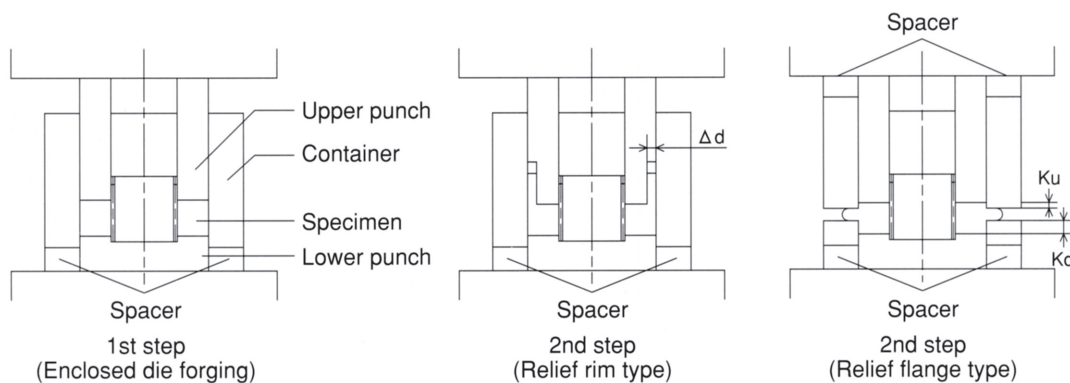


Fig.7 Process of divided flow forging applied to gear shaped product.



## 6. CAEの利用

### 6.1 FEMシミュレーション

鍛造のシミュレーションは剛塑性有限要素法によって行われるのが普通になっている。剛塑性有限要素法によるシミュレーションは1970年代に始まり、1980年代には応力計算の原理および塑性加工へ適用する場合の基本的問題が解決され、2次元の変形シミュレーションについてはすでに実用段階に達していると言える。市販のソフトウェアとしてScientific Forming社のDEFORMやフランスCEMEFのFORGE2があり、その他いくつかのソフトウェアが販売されているようである。

また汎用ソフトウェアの中にもMARCのように剛塑性有限要素法が利用できるものもある。計算機の面では最近の小型コンピュータの進歩により、200~300万円クラスのワークステーションでも100MIPS程度の速度を有するようになり、要素再分割（リメッシュ）を行わない場合には200~300要素を用いた比較的精度の高いシミュレーションが10分~1時間のオーダーで可能になっている。

メッシュ作成は主に図形的な問題であり、力学的な面から見ると本質的な問題ではないが、実用性や効率といった経済性の面では非常に重要であるといえる。

2次元のシミュレーションがほぼ実用段階に達したことから三次元問題のシミュレーションが関心を持たれた。計算時間について考えると2次元のシミュレーションの10~100倍も計算時間がかかるので、複雑な金型の内部の精密な流動解析はまだ十分に実用的であるとは言えないが、コンピュータの速度向上や実験や試し打ちのコスト上昇から三次元シミュレーションを実用化するための環境は整いつつあると言える。

三次元変形と二次元変形との理論には本質的な相違がないが、まだ解決すべき問題点が残っている。問題の一つは工具形状の表現方法である。2次元においては工具形状を直線と円弧により表現することにより境界条件の処理を容易にしている。これを3次元に拡張すると平面、円筒、円錐、トーラス（ドーナツ状）などの面の組み合わせになるが、それらが交差する曲線は必ずしも陽な形で表現できないなど、未解決の問題が多い。

他の問題は三次元の要素分割の方法である。三次元の要素作成のプログラムも市販されているが一般に作業者と会話型で操作するようになっており、かなりの熟練を要する。現在の段階では3次元自動要素分割方法は確立していない。

### 6.2 エキスパートシステム

塑性加工におけるCAEは、通常、考えている工程が妥当であるか否かを検討するための道具として用いられる。工程を作るのは熟練技術者であると想定されることが多いが、多品種少量生産では簡単な工程はエキスパートシステムに任し、全く新しい工程を人間のエキスパートが考案するのが適当であろう。

工程を設計するにはFig.9のように工程の候補を挙げ、それが適当かどうか評価するといった作業が必要である。エキスパートシステムでは専門家の知識を収集してこうした評価に利用することを想定しているが、知識の獲得が困難であることが分かり、エキスパートシステムの利用の広がりを妨げている。

筆者らは変形シミュレーションを多くの例について予め行い、経験の代用とすることを提案している<sup>6)</sup>。また、エキスパートシステムにより推定した工程の結果をシミュレーションにより確認し、最終的な判断を行うことも考えられる。今後エキスパートシステムはシミュレーション技術に依存しながら発展するものと思われる。

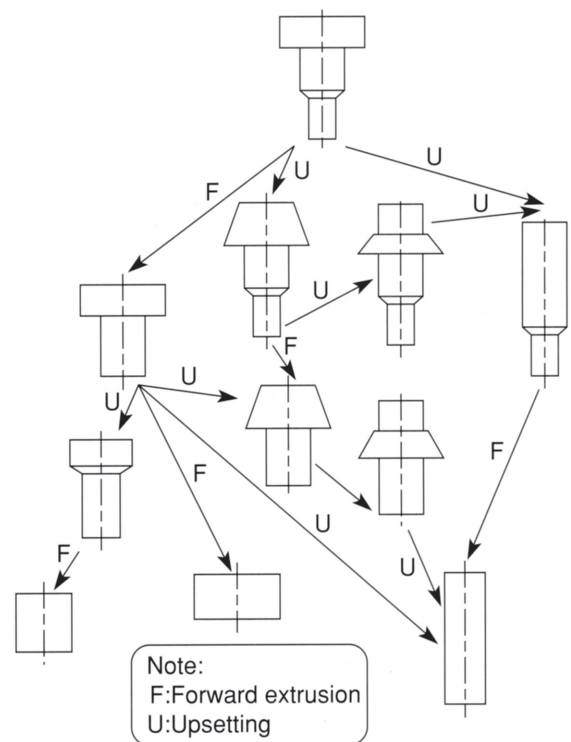


Fig.9 Example of inferred processes of cold forging by expert system.

### 6.3 データベース

FEMシミュレーションを高い精度で行うためには精度の高い材料・変形抵抗データ、摩擦データ、熱特性データ、加工限界データなどが必要である。いままでこれらに関連した研究は多くなされてきたが、CAEに利用するためにはデータベースとして整備する必要がある。しかし、現在のCAEに利用できるようなデータは非常に少なく、データを自動的に収集できるようなシステムが必要になる。

こうした目的のため、筆者らはリング圧縮による摩擦測定と変形抵抗測定<sup>7)</sup>、丸棒の横圧縮による変形抵抗測定の方法<sup>8)</sup>などを提案したが、荷重や変位から変形抵抗と相当ひずみを計算するためにFEMシミュレーションの結果を用いている。

## 7. あとがき

1960～70年代の量産効果をねらった塑性加工による大量生産では、外国に手本があり、それを導入してさらに改良を加えるといた方法が可能であった。最近の精密化によるコストダウンにおいては外国に手本が無く、ハードウェアとソフトウェアの両方で今までにない技術を要求されている。こうしたことは日本全体が直面している問題の一部であろうが、新しい塑性加工技術の実現のために研究開発が重要になっている。

生産の分野でのアイデアは世間から隔絶された大学にこもっていて突然出てくるものではなく、大学の研究者と産業界との密接な情報のやりとりの中で出てくるものではないだろうか。こうしたことから、産学協同により独創的な技術開発が進展することを願っている。

## 文 献

- 1) 水谷 蔵：塑性と加工, 30-343 (1989), p.1082
- 2) H. Kudo and A. Takahashi: VDI Berichte, 810 (1990), p.19
- 3) K. Osakada & H. Kudo : Cold & Warm Forging Technology 1992 (1992)
- 4) K. Kondo, Y. Imamura, K. Yamauchi, I. Iwasaki, N.Itoh and Y. Yokoo: 27th ICFG Plenary Meeting, (1994), Paper
- 5) 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), p.2199
- 6) K. Osakada, G.-B. Yang, T. Nakamura and K. Mori: Annals of CIRP, 39-1 (1990), p.249
- 7) 小坂田宏造, 白石光信, 村木重節, 徳岡雅康：日本機械学会論文集 (C編), 55-516 (1989), p.2213
- 8) 白石光信, 小坂田宏造, 国光 孝：日本機械学会論文集 (C編), 54-504 (1988), p.1836