

塑性加工品の限界精度に関する調査研究

木内 学* 中沢 克紀** 遠藤 順一***
小野 宗憲** 松原 茂夫** 堀端 眞彦***

1. 緒言

本調査研究は、(社)機械技術協会内に設置された「塑性加工の高精度化調査委員会」が、(財)天田金属加工機械技術振興財団の助成を受け、「塑性加工により現在達成し得る製品の寸法精度と将来達成し得ると考えられる限界寸法精度とを把握し、併せて今後塑性加工品の寸法精度の高度化を達成するために促進すべき技術開発課題を調査し、広く提言する」ことを目的として、昭和62・63年度に実施したものである。

製品の高寸法精度化技術の必要性・重要性は、改めて指摘するまでもなく広く認識されており、塑性加工の各分野において過去一貫して研究開発の試みがなされている。しかしながら、各分野・各加工技術について、今後期待し得る製品寸法精度やその限界に関して体系的に調査されたデータが殆ど無いため、各分野における高精度化技術の目指すべき方向や目標が必ずしも明確ではなく、そのことが研究開発の効率的実施や研究者・技術者の意欲を阻害する要因となっている事実も無しとは言えない。

塑性加工品の寸法精度は、(1)加工方法、(2)加工機械の剛性・精度、(3)工具の材質・形状・寸法精度・表面精度、(4)加工工程、(5)被加工材の材質・機械的特性・素材の寸法精度・表面性状、(6)製品の寸法・形状、等の他に、(7)潤滑条件、(8)加工温度、(9)加工速度、等の各種因子に依存しており、それらの関係を明らかにすることは必

ずしも容易ではない。しかしながら、このように複雑に影響し合っている関係を解きほぐし、事実関係や実績あるいは経験的知見等を整理することは、塑性加工製品の寸法精度の高度化を促進するうえで避けて通れぬ課題であり、そのような努力の積み重ねが、大きな技術的進歩へと結びつくものと考えられる。

さらに、上述の諸因子の影響を系統的・個別的に解明することと併せて、塑性加工品の寸法精度の現状についての確に知り、現時点で達成されている寸法精度の水準と今後の見通し、さらに一層の高寸法精度化を実現するために解明を必要とする技術的諸問題について、全体像を把握することは極めて重要であり、この様な認識に基づいて個々の問題に対処することが、研究開発の効率的推進にとって必要であると考えられる。

そこで、本調査研究では、以下の三点即ち、

- (1) 現在、塑性加工技術によって製造される製品の寸法精度(以下、単に精度とも呼ぶ)は如何なる水準に達しているか?
- (2) 将来、塑性加工技術による製品の限界精度は如何なる水準まで達し得るか?
- (3) 塑性加工品の寸法精度を向上させるためには、如何なる技術的課題を解決することが重要でありまた望まれているか?

について調査し、その結果を広く提示することにより、塑性加工技術および塑性加工品の高精度化技術の発展を促すことを目指している。

2. 調査研究の基本的考え方

塑性加工技術は、圧延・鍛造・押し出し・引抜き・板成形など多岐に亘っており、製品の寸法精度高度化に関してもそれぞれ固有の技術的課題を有している。塑性加工技術全般に亘って網羅的に上記調査研究を実施することは現実問題としては困難であるので、本調査研究では以下の基本的考え方を採用した。

- (1) 塑性加工技術の中でも、近年、製品精度の高度化が特に要求されている冷間鍛造加工を調査対象とする。
- (2) 基準となる製品を指定し、それを製造する場合に、各鍛造品メーカーが現状で達成し得ると考えている寸法精度について調査し、その結果を通して、鍛造品の高精度化に関する現在のわが国の技術水準を把握する。
- (3) 併せて、基準とする製品について、各鍛造品メーカーが将来どの程度まで寸法精度を向上させ得ると考えているかを問うことにより、鍛造技術の高精度化の可能性や目標とすべき限界精度を明らかにする。
- (4) 基準となる製品としては、比較的単純な形状であるものの、寸法精度に関する基本的な問題点あるいは技術的課題を内包している底付き円筒容器を対象とする。

以上の基本方針に基づき、広範囲の鍛造品メーカーに調査アンケートへの回答を依頼し、その結果の集計・分析を通して、本調査研究の目的の達成を図った。実施に際しては、まず、鍛造品の精度問題に関連する文献の調査から始め、代表的な鍛造品メーカーの意見を求めつつ、調査の内容、設問事項と範囲、求める回答の形式等を決定した。

調査内容の詳細な説明は省略するが、設問は大別して4項目よりなっている。

- (1) 指定された円筒容器を現状で経済性を考慮して生産する場合に得られる各部の寸法精度。
- (2) 指定された円筒容器を現状でコストを度外視して生産する場合に可能な技術的限界精度および将来達成できると考えられる限界精度。
- (3) 指定された円筒容器に限定せず、鍛造品の精

度を向上させる上で現在重要と思われる技術開発課題。

- (4) 鍛造品の高寸法精度化を更に推進する上で重要と思われる将来の技術的開発課題。

アンケート調査の内容および実施方法に関する詳細は参考資料として示した本研究委員会報告書「塑性加工の限界精度に関する研究」(平成元年3月提出)を参照されたい。

3. 鍛造品の精度に与える各種因子の影響 (従来知識の整理)

調査結果について示す前に、鍛造加工により得られる製品の寸法精度を高めるために考慮すべき各種因子・条件等に関連する既存の知識・考え方・方法等を取りまとめて以下に示す。

3.1 工具材質の影響

冷間鍛造加工においては、発生する工具面圧が非常に高く、たとえば、円筒容器の後方押し出し加工においても、パンチ圧力が 200kgf/mm^2 を越すことはまれではない。それゆえ、工具の弾性変形は無視しえぬ大きさをもつのが普通であるし、場合によっては工具自体にも塑性変形が起きる。したがって、鍛造品の精度向上を図るためには、工具材料の機械的性質をまず考えなければならない。

最初に工具材料の弾性的性質について示す。図1には、冷間ダイス鋼(SKD11)とモリブデン系高速度工具鋼(SKH51)の縦弾性係数Eに与える焼き戻し温度の影響を示す。両材種とも焼き戻し温度の上昇とともにEの増大が生じる。SKD11は 200°C 前後で焼き戻しされることが多く、この場合、炭素鋼のEとほぼ等しい $21,000\text{kgf/mm}^2$ が得られる。一方、SKH51の縦弾性係数EはSKD11より高いがその差は5%程度に過ぎず、弾性ひずみの観点からは、冷間ダイス鋼に比較して高速度工具鋼が格段に有利であるとはいえない。

実用的な工具材料のなかで縦弾性係数Eが著しく高いのはタングステンカーバイド系超硬合金である。超硬合金の縦弾性係数Eは組成によりかなり異なることが知られているが、図2に超硬合金のEとコバルトの重量パーセントとの関係を示す。タングステンカーバイド自体のEは、

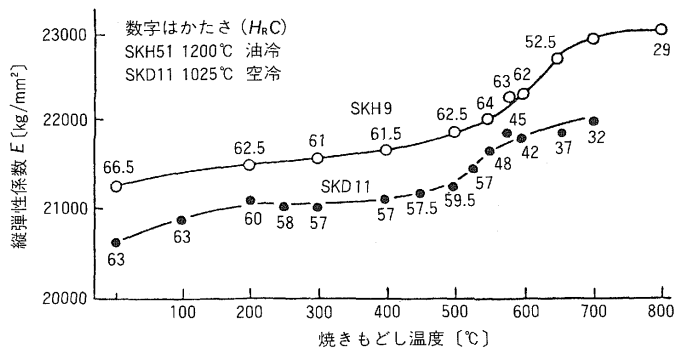


図1 縦弾性係数と焼きもし温度の関係(奥野による)

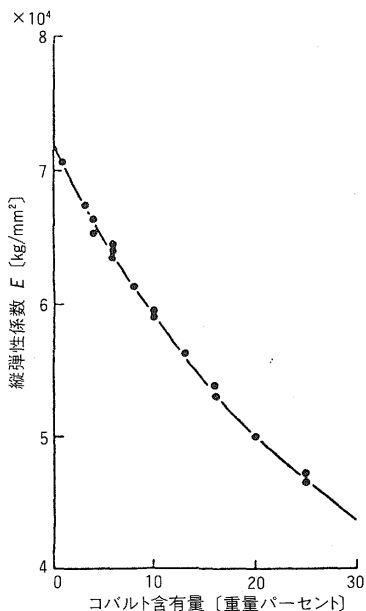
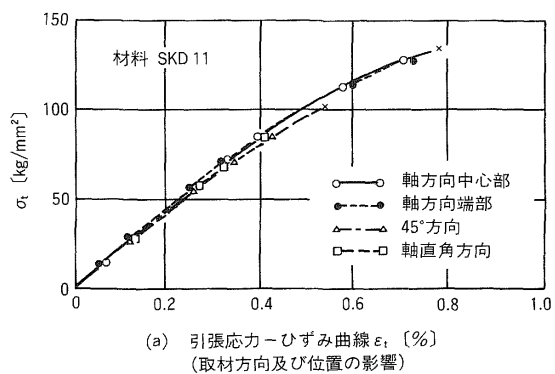
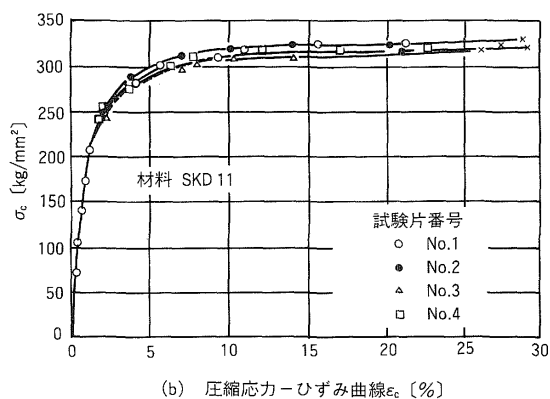


図2 タングステンカーバイド系超合金の縦弾性係数(Doiらによる)



(a) 引張応力-ひずみ曲線 ϵ_t [%]
(取材方向及び位置の影響)



(b) 圧縮応力-ひずみ曲線 ϵ_c [%]

図3 SKD11の応力-ひずみ曲線(中根らによる)

72,000kgf/mm²であり、コバルトが増すにつれ超合金のEは低下するが、それでも炭素鋼のEの数倍の値を持つ。

次に工具材料の塑性的性質について検討するため、それらの応力・ひずみ関係を示す。図3(a)、(b)は冷間ダイス鋼のSKD11の引っ張り変形およ

び圧縮変形における応力・ひずみ関係を示す。SKD11では、等しいひずみにおける圧縮変形抵抗が引っ張り変形抵抗と比べて高いにもかかわらず、圧縮の際の破断ひずみは30%近くに達することに注目されたい。図4には高速度工具鋼の、図5には超合金の圧縮変形時の応力・ひずみ関係を

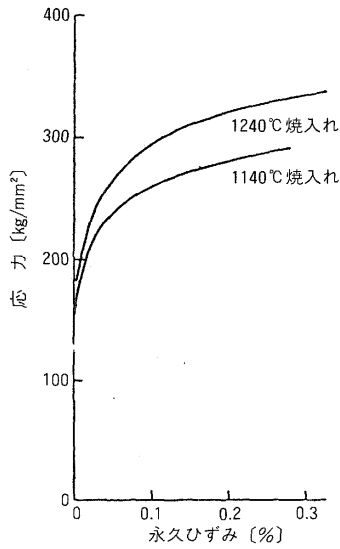


図4 高速度鋼(SKH9)の応力-ひずみ曲線 (PERA Reportによる)

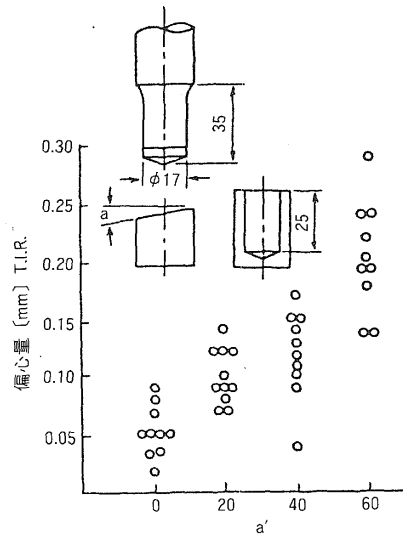


図6 素材端面傾角と製品同心度の関係 (石原らによる)

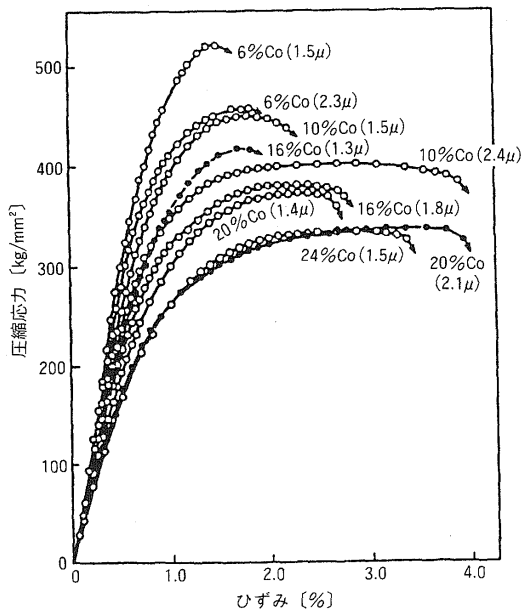


図5 WC-Co(6~24)合金の圧縮応力-ひずみ曲線 (Doiらによる) (括弧中の数値はタングステンカーバイドの粒子径を示す)

示す。コバルト含有率が低下するほど、また、タングステンカーバイドの粒子が小さいほど、比例限度および耐力が高く、かつ、破断ひずみが小さ

表1 各種材料の熱伝導率と熱膨張率

材 料	熱 伝 導 率 [cal/cm·s·°C]	熱 膨 張 率 [1/°C]
高 速 度 鋼 (SKH 9)	0.05~0.07	9~11×10 ⁻⁶
熱間ダイス鋼 (SKD 61)	0.07~0.08	11~13×10 ⁻⁶
炭 素 鋼	0.09~0.13	11~14×10 ⁻⁶
超 硬 合 金 (10~20% Co)	0.15~0.18	5~6×10 ⁻⁶

くなることが分かる。

工具材料では熱的性質についても十分考慮する必要がある。温間鍛造はもとより冷間鍛造においても、被加工材の変形ともなう発熱および摩擦熱により型温度の上昇が見られ、温度上昇により工具寸法が変化し、製品の寸法精度が影響を受ける。表1には各種工具材料の熱伝導率の参考値を示す。超硬合金の熱伝導率は高速度工具鋼および熱間ダイス鋼の2倍以上であり、逆に、熱膨張係数は後者が前者の2倍ほどであることに注意する必要がある。

3.2 素材(被加工材)の形状・寸法精度の影響

円筒容器の後方押し出し用素材は、棒材あるいはコイル材からせん断加工によって製作されるこ

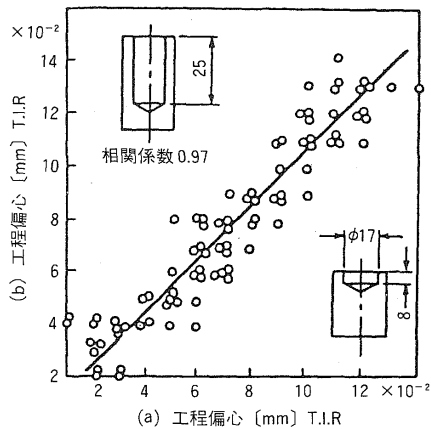


図7 (a),(b)工程間の相関 (石原らによる)

とが多い。このとき、素材端面は中心軸に対して垂直状態から多少ともずれることが普通である。図6に素材端面の傾き角と円筒容器押し出し製品の内外壁偏心量との関係を示す。偏心量はこの素材端面の傾き角にほぼ比例して増大する。図7はせん断後の素材を後方押し出し加工により深い円筒容器に1工程で押し出す前に、ガイド用の浅い穴を付ける前工程を設けた場合の前後工程における偏心の関係を示す。前後工程における偏心は1:1に対応しており、前工程において精度の高いガイド穴をつけることができれば、最終製品の偏心量を大幅に低減できることがわかる。

3.3 パンチの弾性変形の影響

パンチの弾性座屈荷重 P_{cr} は一端固定、他端自由と考えれば次のように与えられる。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{4 l^2}$$

ここで E はパンチ材料の縦弾性係数、 I_z はパンチの断面二次モーメント、 l はパンチ長さである。

P_{cr} はパンチと素材が接する端面の条件により大きな影響を受け、この端面条件は加工前の素材の形状・寸法精度に左右されるので、 P_{cr} の的確な算出は簡単ではないが、通常の端面条件の場合について、種々の長さ・直径比を持つパンチの耐える最大圧縮力の値を図8に示す。後方押し出し加工の初期に、パンチ先端が素材に予成形され

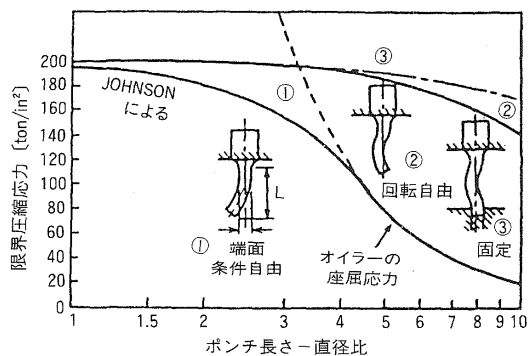


図8 パンチの限界圧縮応力と長さ-直径比の関係 (Mckenzieによる)

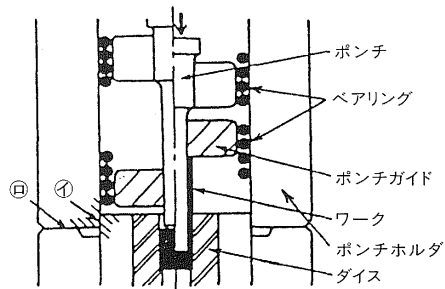
た穴によってガイドされる場合には、同図の曲線2に示すように、座屈限界荷重は増大する。このとき製品の同心度も向上することは上述のとおりである。

円筒容器の後方押し出しの際のパンチの弾性変形による偏心については、一般に次の傾向があることが知られている。

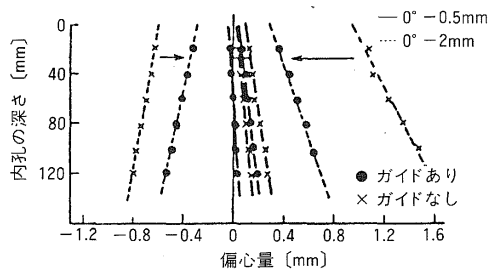
- (1) 断面減少率が大きい場合、パンチには求心力が働き、小さい場合、遠心力(横推力)が働きやすい。
- (2) パンチのランド長が大きくなると、求心力、遠心力ともに低下する。
- (3) 偏心的におかれた小径素材の場合には大きな横推力が生じる。

3.4 パンチの支持方法の影響

パンチはその構造上の制約の故に剛性が低く、また、補強あるいは支持が難しい場合が多い。パンチの支持方法として最も簡単なものは、パンチシャンク部がダイ穴上部でガイドされた後に、押し出し加工が始まるようにする方法である。この方法では、ガイド部を長くすると加工時の操作性が悪くなるので、深穴の加工に対しては、適用上種々の問題がある。そこで深い円筒容器の後方押し出しの場合には、特殊な構造によりパンチを支持する方法が開発されている。図9(a)にその構造の例を示す。素材とダイ内径との間にクリアランスが存在する場合について、この方法で達成される製品寸法精度の実績例を図9(b)に示す。製品



(a) 深穴後方押し出し型構造



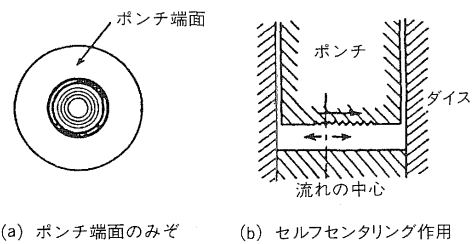
(b) 端面の傾き0でクリアランスがある場合の偏心

図9 深穴容器押し出し型構造と精度の例 (鈴木らによる)

の偏心量は、パンチ先端の支持のない場合の1/2程度に減少していることがわかる。なお、内外径がそれぞれパンチ外径およびダイ内径にほぼ等しいリングをパンチに浮動形で取り付けておき、これによりパンチをダイでガイドする簡単な方式は国内外で用いられている。

3.5 セルフセンタリング効果

前項ではパンチの剛性を高くすることにより製品精度を向上させる考え方について示したが、逆にパンチおよびプレス自体の横剛性が低い方が都合がよい場合もある。アルミニウムの薄肉チューブを製造する、いわゆる衝撃後方押し出しのような場合には、製品の側壁厚さがたとえば0.05~0.1mmであるので、パンチの偏心が0.01mm程度発生したとしても被加工材の流れが大きく変化して良好な製品ができない。ところが、実際には横剛性の低いプレスを用いて問題なく生産されており、その理由として、図10に示すような自律調心作用が働くことが見いだされている。すなわち、例えば、パンチが左にわずかに偏心すると、右側のダイ



(a) ポンチ端面のみぞ (b) セルフセンタリング作用

図10 衝撃押し出しパンチのセルフセンタリング (工藤による)

壁とパンチとの間のすき間が大となり材料流動が多くなる結果、パンチに働く横方向荷重の合計はパンチの偏心をなくす方向へ変化し、その結果パンチは右へ移動する。このような効果を有効に活用するためには、パンチの横剛性は小さい方が好ましい。

3.6 パンチランド直径変化の影響

パンチ底面に作用する圧力 P_2 およびランド部温度上昇 Δt によるランド直径 d の変化 Δd は

$$\Delta d = (v \cdot P_2 / E + \alpha \cdot \Delta t) \cdot d$$

によって与えられる。ただしランド部に働く側圧力、端面の摩擦力および温度分布などの効果は考慮されていない。超合金の縦弾性係数 E は高速工具鋼やダイス鋼よりはるかに高く、かつそのポアソン比は若干小さいこと、さらに熱伝導率が高いので温度上昇が低く、かつ熱膨張係数が小さいこと、などがあいまって、超合金パンチランドの弾性変化および熱膨張変化は他の工具材料を用いたパンチに比べはるかに小さい。

なお上式かっこ中の第2項は、作業開始後の加工個数とともに変化するが、毎分5個の速度で円筒容器の後方押し出しを行うSKD11製パンチの温度は約50個の加工の後、定常状態に達するというデータがある。

3.7 ストップブロックの効果

加工荷重のばらつきによるプレス本体、受圧板、パンチ、エジェクタなどの弾性変形量の変動が製品としての同筒容器等の底厚精度に影響を与えることは良く知られている。そこで製品の底厚精度を高めるために、ストロークの下死点直前で上下

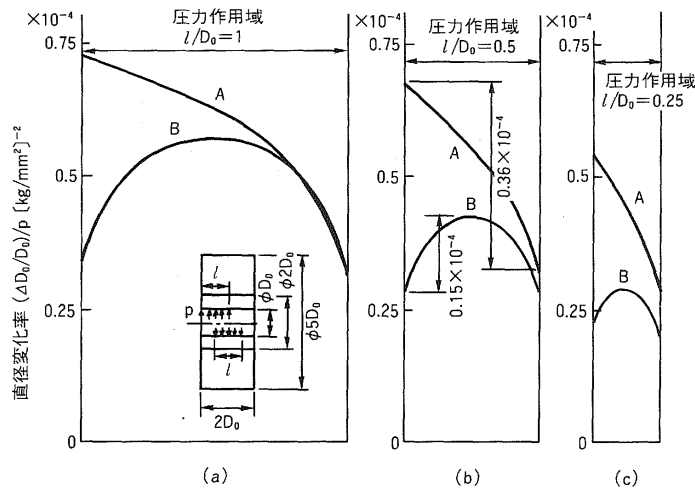


図11 内圧作用位置と直径変化率の分布

型の中にストップブロックを置くことがある。加工荷重の変動 ΔF に対応するパンチ、エジェクタ端面間のすき間の変動 Δe はストップブロックの剛性 K_s が高いほど小になる。しかし K_s を大とすることは使用プレスの荷重能力の増大を必要とし、また、ストップブロックの組み付けが難しくなるなどの問題がある。実際の効果の例として、外径40mm前後までの円筒容器で底厚が3~10mmの場合、ストップブロックを用いないで達成できる底厚の公差は0.2mmが限度のところ、ストップブロックを用いたときには確実に0.1mm以内におさめることができたという報告もある。

3.8 加工内圧によるダイの弾性変形の影響

円筒ダイについて内圧作用域の位置とダイの弾性変形の間を関係を図11に示す。図中に示すように、円筒ダイ内面に有限幅一様内圧が作用するときの内径変化率は、圧力作用幅が一定であっても、その作用位置によって異なる。図11(a)の曲線Aは内径に等しい幅に分布する内圧がダイの一端から働く場合の内径変化率の分布を示し、左右対称な曲線Bは同じ幅の内圧分布がダイ中央に働く場合の内径変化率の分布である。ダイの一端より有限幅に内圧が働く場合には端における変形が大きく、またダイ内壁にそって変形の度合いが大きく変化する。内圧作用域がダイ中央部に限られている場合には内径増加率は相対的に小さい。図11(b)、

(c)は内圧作用幅が内径のそれぞれ1/2および1/4の場合の内径増加率を示す。ダイ中央部負荷の場合、内圧作用幅が小になると内径増加率の不均一が急速に小になる。

縦弾性係数 E がダイの弾性変形に与える影響についても注意を要する。パンチの場合には一体材で製作するのが普通であり、それゆえ、 E の大きさに逆比例して変形量が小になる。しかしながらダイの場合には一体材で作られることはなく、必ず分割組合せ構造が採用される。それゆえ、超硬合金をインサートとして用いても、補強リングが炭素鋼であれば、超硬合金の縦弾性係数 E の大きさに逆比例するほどダイ内径変化率が小になるわけではない。外径比が5の円筒ダイの場合に、ダイ内径変化率と締めばめインサートの外・内径比 $D1/D0$ との関係を図12に示す。ただし超硬合金の縦弾性係数 E を炭素鋼製補強リングの E の2.5倍とした場合である。 $D1/D0=1.5$ の場合の内径増加率は、ダイ全体を超硬合金とした場合より35%大きいことに注意されたい。

縦弾性係数 E の異なる工具材料の組合せと実生産における製品精度の関係の例を図13に示す。ただし、製品形状は同図中に示す。(a)はインサートがダイス鋼で、パンチが高速度工具鋼の場合の製品外径および内径の精度をそれぞれ丸印および三角印で示す。短い線で結んだ右側が製品底部に

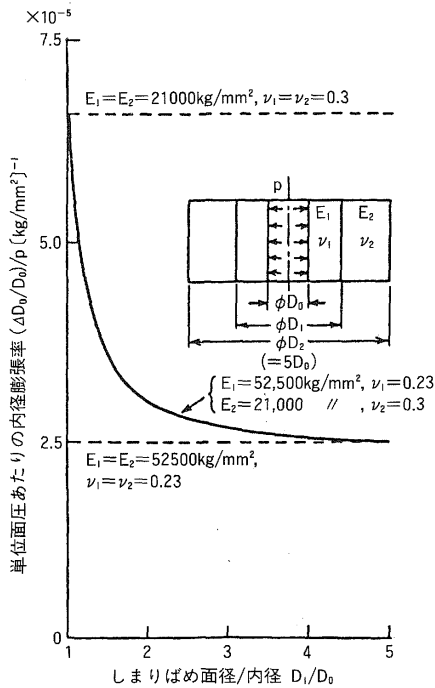


図12 超硬合金インサートにおけるしまりばめ面直径と内径膨張の関係

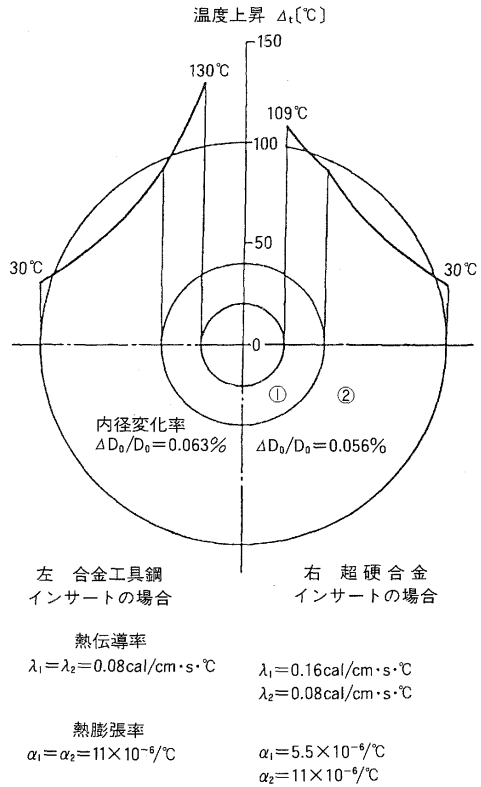


図14 しまりばめダイの定常温度分布と内径変化率

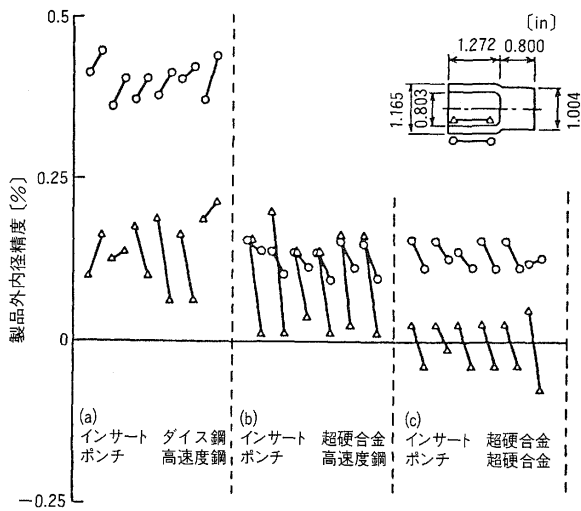


図13 工具材料と製品外径精度 (Morganによる)

近い箇所、左が上部の精度を示す。(b)はダイインサートを超硬合金とした場合であり、(c)はインサートおよびパンチとも超硬合金の場合で

ある。

3.9 熱膨張によるダイの変形の影響

素材の変形および素材とダイの間の摩擦による発熱と熱伝導によりダイが温度上昇し、その結果、ダイ内径は増大する。ダイ内壁での温度上昇の程度は加工条件や操業条件によっても異なる。素材がダイに投入され加工を受ける非定常の過程までも考慮すると、到達する最高温度は極めて高いことが予想できる。実際、使用前後のダイの組織観察から、ダイの一部が高温焼き戻しされるほどの温度に上昇することがあることも知られている。しかしながらこのような高温にさらされるダイの領域は非常に狭いので、ダイの温度上昇による変形は繰り返し加工の際の定常温度分布から算出される値とそれほど違わない。ダイ寸法として内外径比を5、締めばめ面直径・内径比を2にとり、インサートおよび補強リングがともに合金工具鋼の場合を考え、ダイ外壁温度上昇を30°C、内壁温度

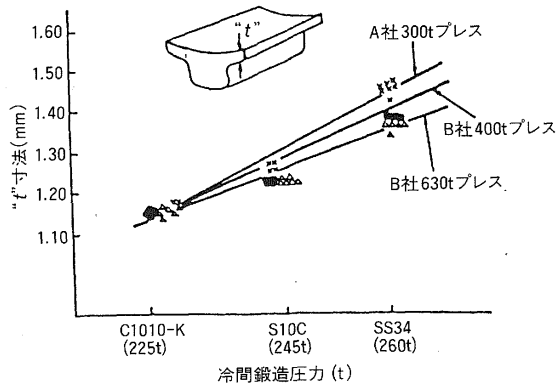


図15 製品厚さと荷重の関係 (工藤ら)

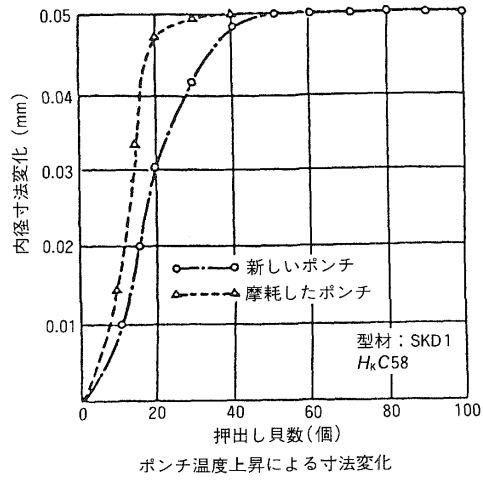


図17 容器押し製品の径変化と押し回数との関係 (工藤ら)

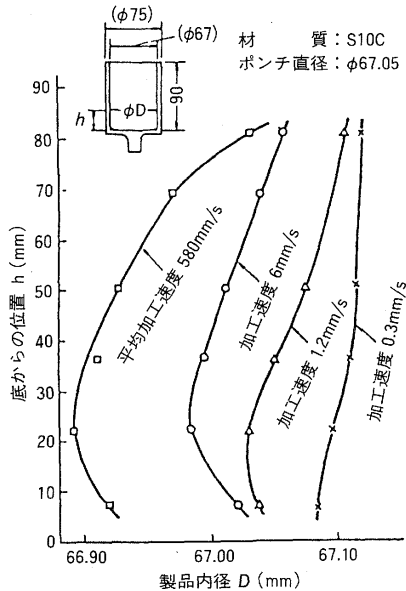


図16 容器押し品(エアポンプロータ)の内径に対する加工速度の影響 (澤辺ら)

上昇を130℃と仮定すれば、定常温度分布は図14の左側のようになり、この定常温度分布による内径変化率 $\Delta D_0/D_0$ は0.063%になる。インサートが超合金の場合、その熱伝導率を合金工具鋼の補強リングの2倍とし、熱膨張係数を $5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とすれば、定常温度分布は図14の右側のようになり、内壁最高温度は合金工具鋼インサートの場合より20℃あまり低下する。このとき内径変化率は0.056%となる。超合金インサートの場合

には熱伝導率が高いので最高温度が低くなり、そのうえ、熱膨張係数が低いので内径変化率が小になるが両者の差異は意外に小さい。このような定常温度分布に達するのは多数個の加工の後であって、それ以前には多少小さめに製品が製造されることになる。ダイはパンチと比較して熱容量が大きいうえに外周部の拘束もあるので熱による変形率はパンチランド径のそれよりかなり低いといえる(表2)。

3.10 プレス機械の影響

図15は3種類の荷重容量をもつプレスによって製造された図中に示す製品の高さを調べた結果を示す。荷重容量の大きなプレスによるほど精度が高いことがわかる。荷重容量大のプレスでは、フレーム、スライド、ボルスタ等の断面寸法が大きく剛性が高いことによることは明らかである。

つぎにスライド速度、あるいは、上型(パンチ)の下降速度の影響を示す。図16には種々の速度で後方押し出した円筒容器の外径の高さ方向の分布を示す。速度が大なるほど外径寸法が小さく、かつ高さ方向における不均一性が高くなる。この寸法の変化は、加工によって生じる熱により膨張した状態で型の寸法になじんだ製品がその後冷却する過程で収縮することにより生じる。容器の上部の寸法が大きいのは、加工初期のまだあまり

表2 容器押し出し品の精度に対する影響因子とその目安

項目	原因 I	工具系の変形	原因 II 素材の変形
底厚精度	加工荷重の変動によるポンチ, エジェクタ, 受圧板, プレスの弾性変形	+0.2~+0.4mm	素材の冷却過程における収縮加工時温度上昇100℃当たり -0.1%
	ポンチ, エジェクタの温度上昇による長さ変化	先端温度上昇100℃当たり 鋼ポンチに対して -0.06mm 超硬合金に対して -0.03mm	
	ポンチ, エジェクタの塑性変形	——	
	ポンチ, エジェクタ先端面の摩耗	——	
外径精度	ダイの内圧による弾性変化	内圧 100kg/mm ² 当たり 鋼インサートに対して直径の +0.7% 超硬合金に対して直径の +0.3%	同 上
	ダイの温度上昇による変化	温度上昇 100℃当たり 直径の +0.05%	
	ダイの摩耗	——	
	ポンチランドの弾性変化	押し出し圧力 100kg/mm ² 当たり 鋼ポンチに対して直径の +0.15% 超硬合金に対して直径の +0.04%	
内径精度	ポンチランドの温度上昇による変化	温度上昇 100℃当たり 鋼ポンチに対して直径の +0.1% 超硬合金に対して直径の +0.05%	同 上
	ポンチランド径の塑性変形による増大	——	
	ポンチランド部の摩耗	——	

温度上昇していない段階での寸法が規定されるためその後の収縮が小さいことによるものである。

3.11 操業条件の影響

図17には操業開始後の加工個数と円筒容器底厚との関係を示す。加工により生じる熱の一部は金型に伝導し型の温度を上昇させる。このため、パンチやカウンタパンチの長さの増大が生じ、底厚は徐々に小さくなっていく。ほぼ定常的な温度サイクルに達すると容器底厚が一定値を示すようになる。定常状態に達する加工個数は1個あたりの変形量に依存する。

4. 調査結果

以下、アンケート調査により得られた結果を示

す。指定された円筒容器の製造に際して、(1)現状で達成できている寸法精度、(2)経済性を無視すれば現在でも達成可能な寸法精度、さらに、(3)将来達成可能と考えられる寸法精度について、それぞれ示す。

4.1 調査対象範囲

a) 被加工材の材質、製品の寸法、加工条件

表3に、調査により収録された各事例における被加工材の材質、冷・熱間鍛造等の区分、採用された工程数を示す。工程数としては1工程の場合が多いが、2工程以上かけている場合もある。被加工材としてはアルミ合金、各種炭素鋼、肌焼き鋼、ステンレス鋼等が含まれている。

図18、19に製品の寸法範囲を示す。直径は、

表3 回答された材料、加工温度区分および工程数
(その1)

材 料	温度区分	工程数
A2218	冷間	1
A5052	冷間	2
A5056	冷間	1
A6061	熱間	1
A6061	冷間	1
A6151	熱間	1
H3250	冷間	1
SPCC	冷間	3
S10C	冷間	1
S10C	冷間	1
S10C	冷間	2
S10C	冷間	2
S10C	冷間	2
S12C	冷間	1
S15C	冷間	2
S15C	冷間	1
S15C	冷間	1
S15C	冷間	1
S33C	熱間	1
S35C	冷間	1
S35C	冷間	1
S53C	冷間	2
SWCH25	冷間	1
SWRCH12A	冷間	1

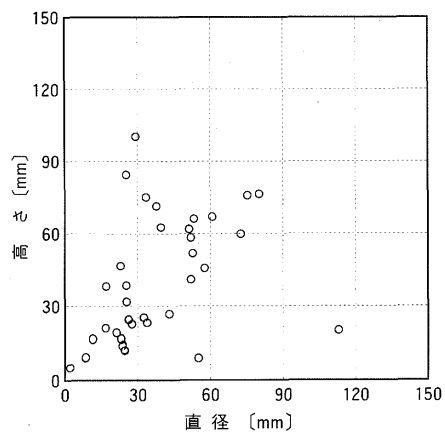


図18 製品寸法範囲

表3 回答された材料、加工温度区分および工程数
(その2)

材 料	温度区分	工程数
SCM415	冷間	1
SCM415	冷間	1
SCM415H	冷間	2
SCM418	冷間	1
SCM420	冷間	1
SCM420H	冷間	1
SCM420H	冷間	1
SCM420H	冷間	1
SCr420	冷間	2
SCr420	冷間	2
SCr420H	冷間	1
SUJ2	温間	1
SUS304	冷間	1
SUS410	冷間	7
ステンレス	冷間	1
ステンレス	冷間	2
チタン合金	熱間等温	1

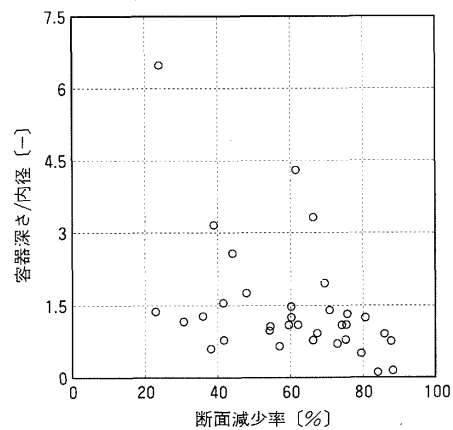


図19 断面減少率および容器深さ内径比の範囲

1.85mmから111.5mm、また高さは5.7mmから約100mmに及んでいる。断面減少率は24%から88%、容器深さ・内径比は0.1から6.5までの広い範囲に亘っている。

素材(被加工材)としては、熱間圧延材と引き抜き材が多い。切断方法としてはせん断加工法を

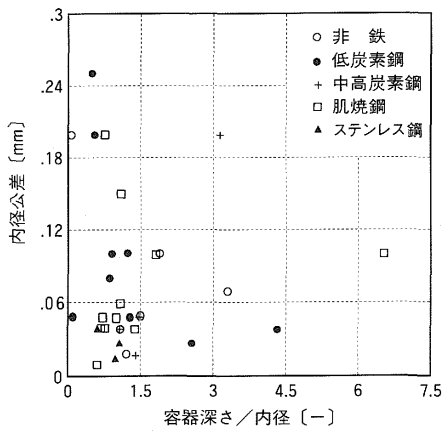


図20 容器深さ内径比と内径公差の関係

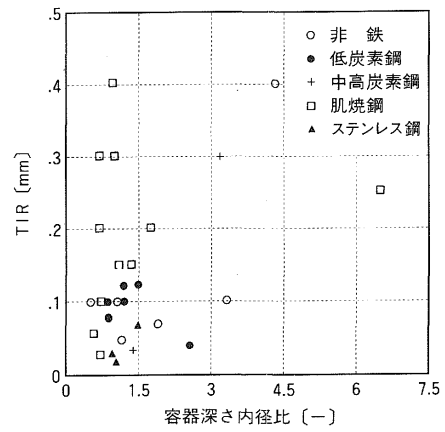


図23 容器深さ内径比とTIRの関係

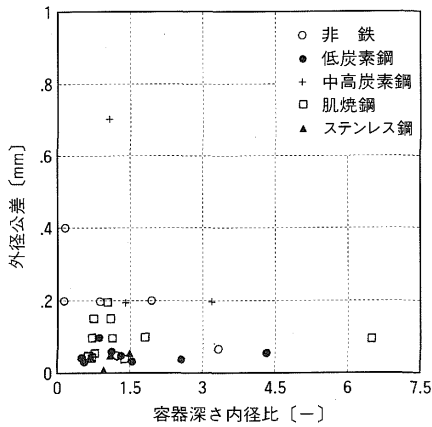


図21 容器深さ内径比と外径公差の関係

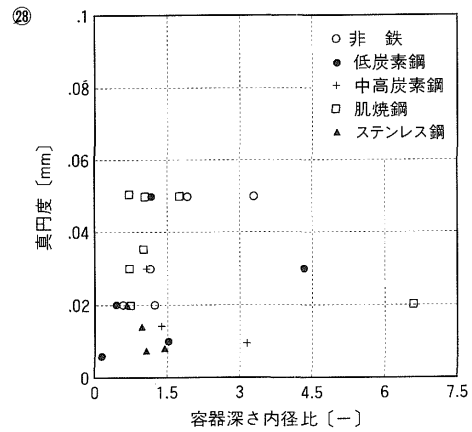


図24 容器深さ内径比と真円度の関係

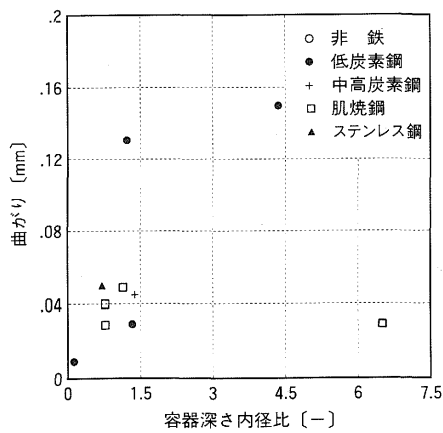


図22 容器深さ内径比と曲がりの関係

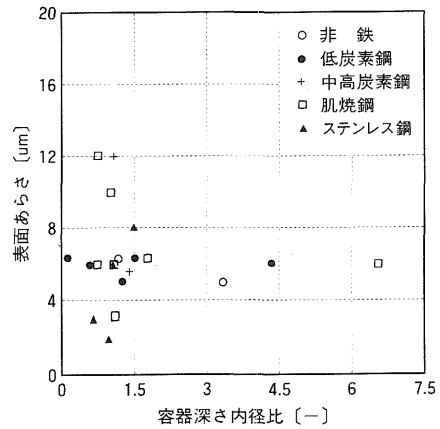


図25 容器深さ内径比と表面あらかさの関係

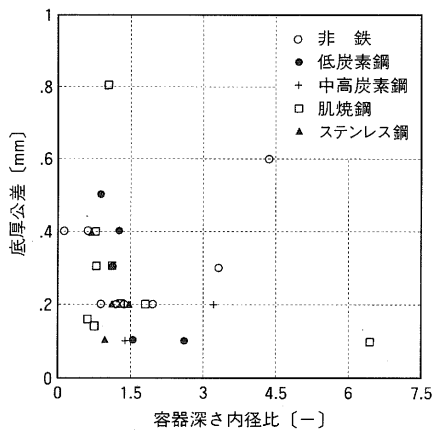


図26 容器深さ内径比と底厚公差の関係

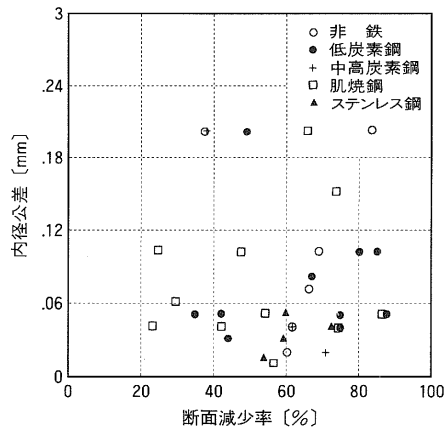


図27 断面減少率と内径公差の関係

採用している場合がもっとも多いが、丸鋸・帯鋸をあわせた鋸切断も同程度採用されている。素材（ピレット）の体積誤差は切断法によらず平均すると1.3%である。

せん断加工により切断された素材にはほとんど予備据込みが施されており、その方法としては拘束据込みが多く採用されている。鋸切断の場合には予備据込みをしない素材がそのまま用いられていることが多い。

潤滑剤としては、1工程加工の場合には、ほとんどの場合ボンデライトとボンダリユーベの組み合わせが用いられているが、2工程以上の加工の場合には、油性潤滑剤が用いられている例がある。

型材としてはダイインサートには超硬合金が、また、パンチには高速度工具鋼が多く採用されている。合金工具鋼製パンチおよびインサートには、表面処理が多く施されている。しかし、超硬合金については表面処理は行われていない。

製品精度向上のための型組み方法としては、ダイセットの使用あるいはダイとパンチの嵌合法を用いていることが多い。また、両者をともに採用している場合もある。

4.2 現状における寸法精度

対象とした円筒容器の精度に影響を与えると考えられる因子が多いので、寸法精度の評価結果をどのように表示すべきかという点については種々の考え方があるが、ここでは容器深さ・内径比、

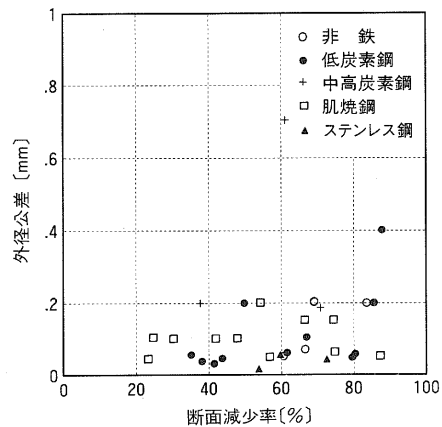


図28 断面減少率と外径公差の関係

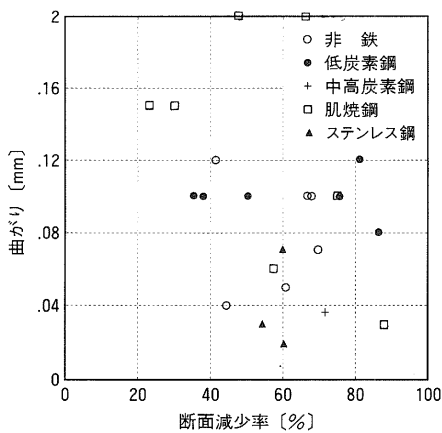


図29 断面減少率と曲がりの関係

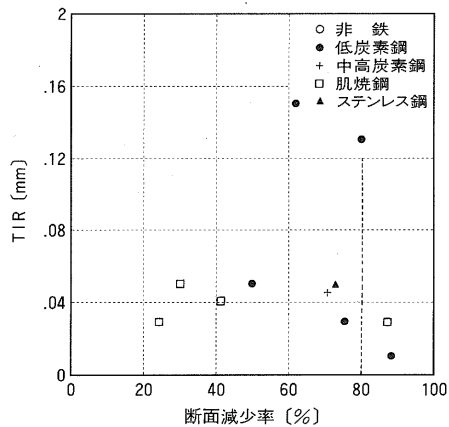


図30 断面減少率とTIRの関係

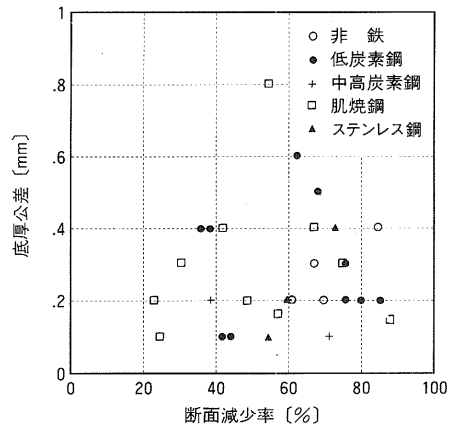


図33 断面減少率と底厚公差の関係

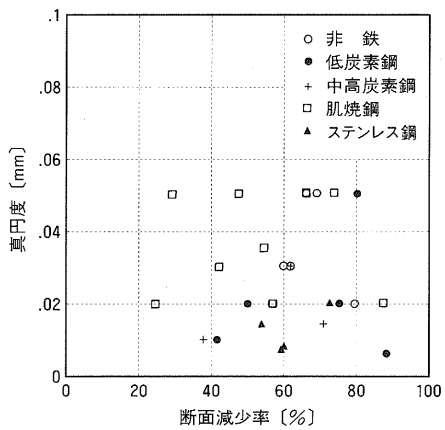


図31 断面減少率と真円度の関係

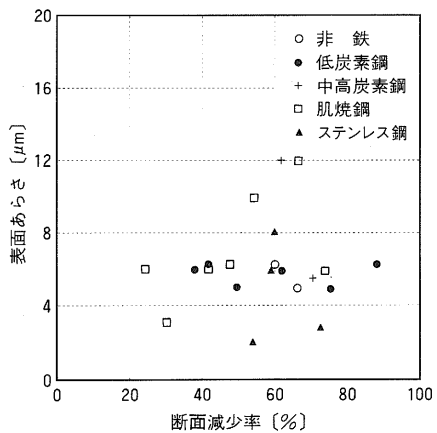


図32 断面減少率と表面あらさの関係

または断面減少率を横軸にとり、各部位の寸法精度を縦軸にとって表示することにする。また、製品の寸法範囲が広範であるので、たとえば、内径公差そのもので表示すべきか、あるいは、内径に対する公差の比で表すのが妥当か、議論が分かれるところであるが、以下、前者の表示方法による結果のみを示す。

なお、温間、熱間、等温鍛造については事例が少ないので、図示しないこととする。

図20から図26までは横軸に容器深さ・内径比を、図27から図33までは同じく断面減少率を選び、内径公差、外径公差、曲がり、TIR、真円度、表面あらさ、および底厚公差の実績値を素材の材種別に示す。

これらの結果より、大多数の場合、

- (1)内径公差： 0.06mm
- (2)外径公差： 0.15mm
- (3)曲がり： 0.08mm
- (4)TIR： 0.05mm
- (5)真円度： 0.03mm
- (6)表面あらさ： 6 μ m
- (7)底厚公差： 0.3mm

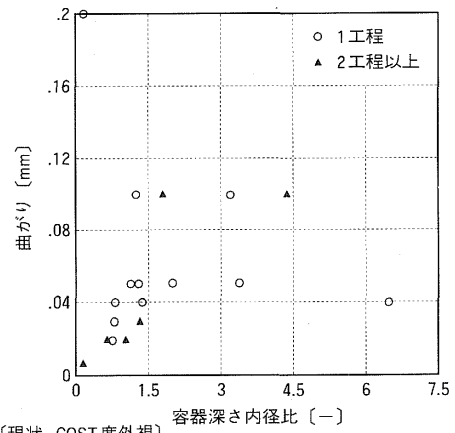
程度の寸法精度が達成されているといえることができる。

最も優れている数値としては、

- (1)内径公差： 0.01mm

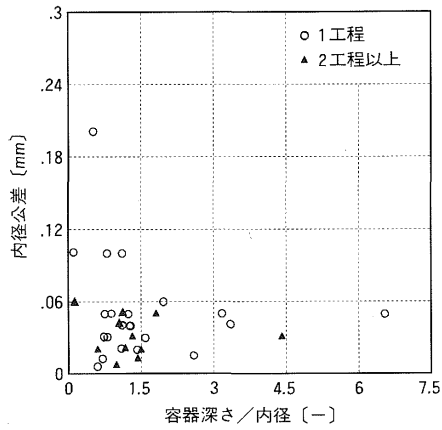
- (2) 外径公差： 0.02mm
- (3) 曲がり： 0.01mm
- (4) TIR： 0.02mm
- (5) 真円度： 0.006mm
- (6) 表面あらさ： 2 μ m
- (7) 底厚公差： 0.1mm

程度の寸法精度が達成できるとの結果を得ている。ただし、これらの数字は同一製品について同時に達成できるとするものではなく、全体を通して最も優れた数値を集めた結果であることに注意されたい。



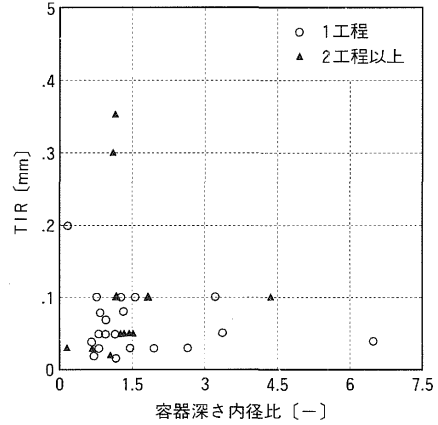
[現状, COST度外視]

図36 容器深さ内径比と曲がりの関係



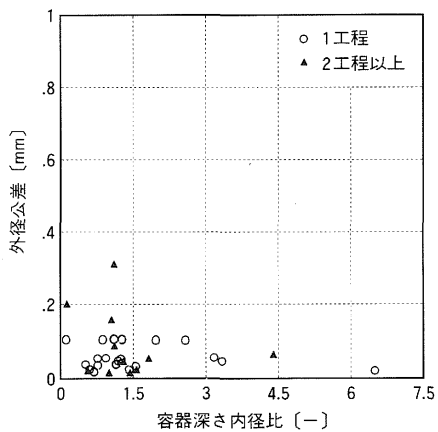
[現状, COST度外視]

図34 容器深さ内径比と内径公差の関係



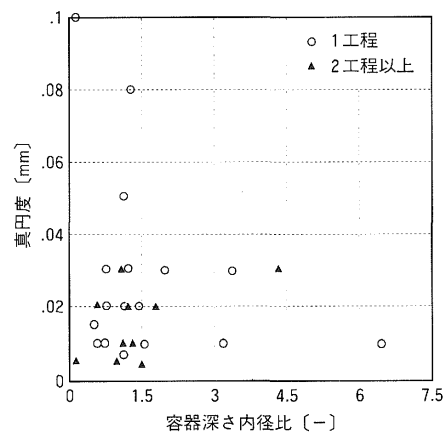
[現状, COST度外視]

図37 容器深さ内径比とTIRの関係



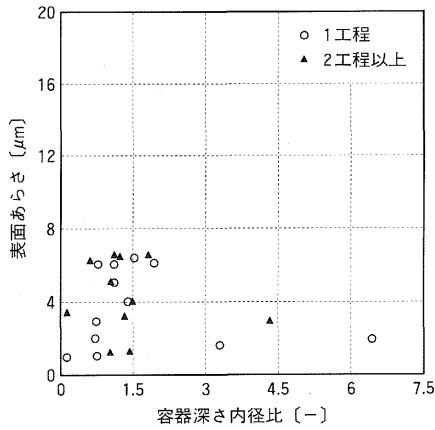
[現状, COST度外視]

図35 容器深さ内径比と外径公差の関係



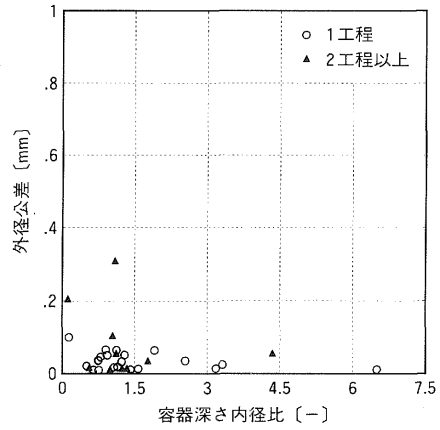
[現状, COST度外視]

図38 容器深さ内径比と真円度の関係



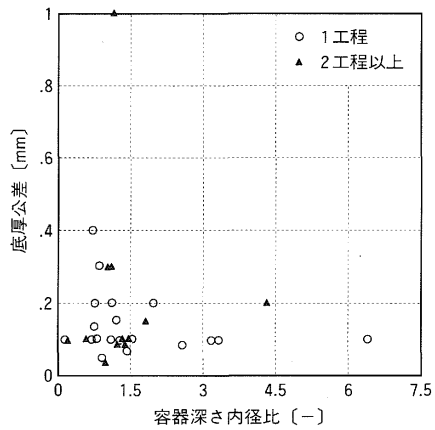
[現状, COST度外視]

図39 容器深さ内径比と表面あらさの関係



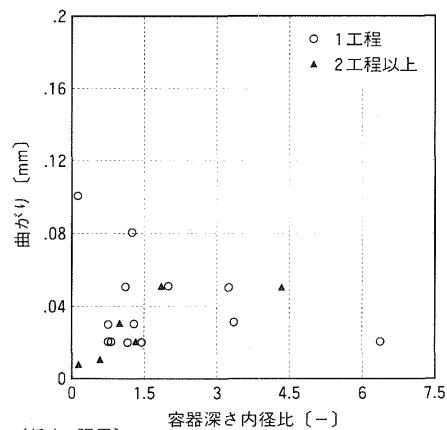
[将来, 限界]

図42 容器深さ内径比と外径公差の関係



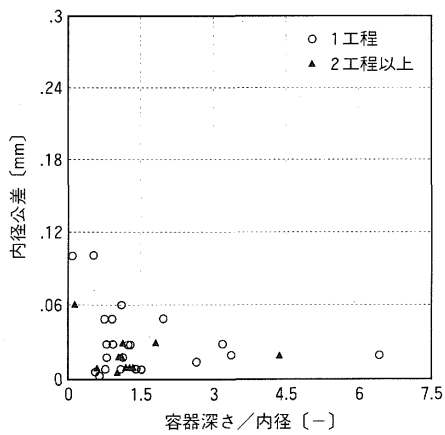
[現状, COST度外視]

図40 容器深さ内径比と底厚公差の関係



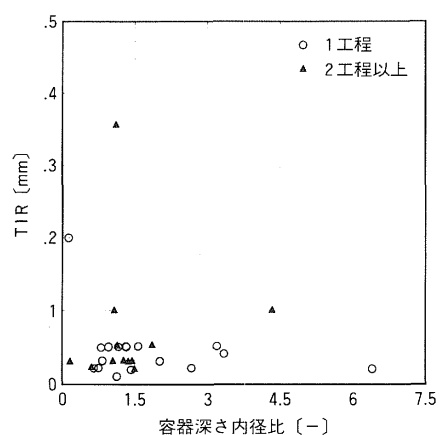
[将来, 限界]

図43 容器深さ内径比と曲がりの関係



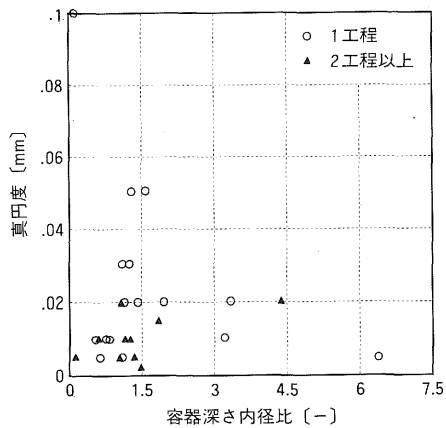
[将来, 限界]

図41 容器深さ内径比と内径公差の関係

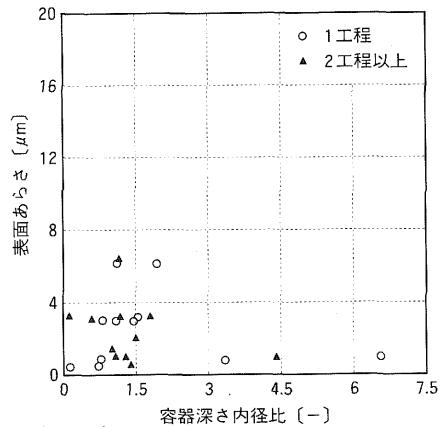


[将来, 限界]

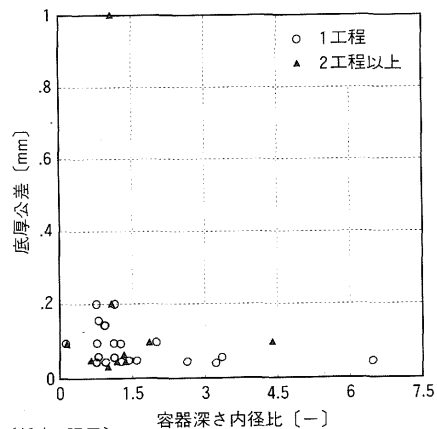
図44 容器深さ内径比とTIRの関係



〔将来, 限界〕
図45 容器深さ内径比と真円度の関係



〔将来, 限界〕
図46 容器深さ内径比と表面あらしの関係



〔将来, 限界〕
図47 容器深さ内径比と底厚公差の関係

表4 設問3 アンケート集計結果(その1)

順位	回答数	項目
1位	(26)	素材の体積誤差の低減
2位	(25)	型の仕上げ精度の向上
3位	(21)	型構造の改善
4位	(19)	機械の剛性の改善
5位	(18)	型の温度制御
6位	(16)	予備掘込みブランク形状の改善
7位	(15)	潤滑剤の変更・改善
8位	(12)	機械のスライド精度の改善
9位	(9)	硬質表面処理の実施
9位	(9)	前工程形状の変更
9位	(9)	機械の下死点精度の管理
12位	(7)	潤滑剤厚さの管理
13位	(6)	成形型穴とブランク間の隙間の低減
14位	(5)	型材料の変更
15位	(4)	潤滑剤成分の管理
15位	(4)	ダイセット(ガイド)の使用
15位	(4)	型の固定方法の改善

4.3 寸法精度に関する将来予測

コストを考慮しなければ、現状でも技術的に達成できると考えられる寸法精度について、前節と同じ様式で表示した図を、図34から図40までに示す。

さらに、将来極限的に高め得る限界精度と考えられる数値を図41から図47に示す。

将来達成可能な限界寸法精度としては、最も高い精度として以下の数値が挙げられている。

- (1)内径公差： 0.005mm
- (2)外径公差： 0.001mm
- (3)曲がり： 0.008mm
- (4)TIR： 0.01mm
- (5)真円度： 0.005mm
- (6)表面あらし：0.5 μ m
- (7)底厚公差： 0.05mm

現状で行われている精度と比べてかなり高い寸法精度が予測されている。そのような精度を達成するために必要と考えられている技術開発課題については、次節以降に示す。

表5 設問4 アンケート集計結果

順位	1	2	3	4	5	6	回答数	総合点	総合順位
工程設計技術	9	7	2	3	6	12	39	130	4
型設計技術	9	9	9	3	7	2	39	160	1
型材料・表面処理	5	5	10	8	7	5	40	138	3
潤滑剤・処理方法	1	8	8	9	7	6	39	125	6
加工機械	10	6	6	8	5	5	40	153	2
素材	6	5	4	10	6	8	39	127	5
回答数	40	40	39	41	38	38	—	—	—

注) 総合点は1位を6、2位を5、……5位を2、6位を1として積算

5. 製品の寸法精度高度化のために今後求められる技術開発課題

以下、一般論として、鍛造品の寸法精度を向上させる上で重要と思われる技術開発課題について、各回答者の見解をまとめて示す。この結果は、鍛造品の寸法精度に影響を及ぼすであろうと考えられる技術課題として、予め、素材および予備成形に関する項目、潤滑に関する項目、型に関する項目、工程に関する項目、加工機械に関する項目、および生産環境に関する項目等、合計20項目をあげ、各回答者にこの中から重要と思われるものを5項目選択してもらい、全回答数43件についてまとめたものである。表4には重要度が高いと考えられている順に技術課題を示す。

各回答者が選択した項目は、回答者自身が直接実務に携わりつつ、特に重要視している項目であると思われる。回答者によって加工対象が異なり、技術的環境も異なるため、重要と考える項目は必ずしも一致していない。

素材に関しては、体積誤差の低減およびブランク形状・寸法の改善が高い順位を得ている。型に関しては、仕上げ精度だけでなく、型構造や型の温度管理が重要であると考えられている。また、加工機械の剛性やスライド精度の改善が強く望まれている。

表5は上述の製品精度向上のための技術課題に対して各回答者が与えた重要度の順位別分布を示す。はっきりした傾向はこの図からは読み取れな

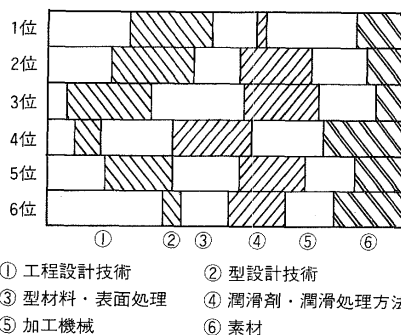


図48 製品精度向上のための技術的課題の重要度(その1 順位別の分布)

いので、脚注に示したように順位に重みをつけて評価した結果を図48に示す。

最も重要と評価されているのは型設計技術であり、2位は加工機械である。このアンケートの回答者のほとんどが実際に型設計に携わっていると思われるが、その影響もあって、最重要技術課題として型設計技術が選ばれている。次に重要なのは加工機械であるとしているが、常日頃、加工機械により製品精度が左右されることを強く感じている結果と思われる。3位は型材料と型の表面処理に関する技術であるとしているが、これは、たとえ金型を精度よく仕上げても、型の摩耗等により、製品の寸法精度の劣化に悩まされているためと思われる。4位は工程設計技術である。工程設計の善し悪しにより、被加工材の変形・流動が異

なり、製品精度が左右されることは良く知られている。この他に潤滑剤・潤滑処理方法も製品精度に影響するとしている。

ただし、図から明らかなように、各々の技術課題の間には、重要度の程度に際だった差はなく、いずれの問題についても、有効な対応策や技術が求められていると考えるべきであろう。

6. 今後求められる技術開発課題の詳細

鍛造品の高寸法精度化、鍛造技術の高度化のために、今後必要であると考えられている技術開発課題のより詳細な内容を整理して以下に示す。

a) 工程設計技術

- (1) コンピュータによる自動設計技術
 - ・荒地形状自動設計技術の開発
 - ・ファイバーフローの予測技術の開発
 - ・材料流動の完全解析技術の開発
 - ・加工限界予測技術の開発
 - ・工程設計エキスパートシステムの開発
 - ・AI を利用した工程最適化技術の開発
 - ・形状、性能、数量に関するコストミニマムを達成するシミュレーション技術の開発
 - ・CAD/CAM 利用技術の開発
- (2) 1工程で最終形状が得られる鍛造方案設計技術の開発
- (3) 各工程の成形荷重均一化を実現する工程設計技術の開発
- (4) 周辺技術の向上にマッチした工程設計技術の開発
- (5) 全工程中における完全無酸化環境化技術の開発

b) 型設計技術

- (1) コンピュータによる自動設計・CAD/CAM 統合化技術の開発
- (2) コンピュータ利用による金型寿命予測技術の開発
- (3) 型寿命予測精度の向上技術の開発
- (4) 鍛造中の応力・ひずみの解析技術の開発
- (5) 組立図を作成すれば自動的に部品図が作成できる CAD 技術の開発
- (6) 最終（複雑）形状に対する最適ブランク設

計技術の開発

- (7) 剛性の高い型構造設計技術の開発
- (8) 自動求心パンチ、自動調心ダイの設計・利用技術の開発
- (9) 組立誤差 0 の型加工・製作技術の開発
- (10) 割れ、折損防止型設計技術の開発
- (11) 周辺技術の向上にマッチした型設計技術の開発
- (12) パンチとダイの偏心防止技術と型の剛性向上技術の開発

c) 型材料・表面処理技術

- (1) 弾性限度の高い材料（現在の3～4倍）の開発
- (2) 弾性限とヤング率の高い型材料の開発
- (3) ハイスのヤング率の改善技術
- (4) より靱性があり高硬度の型材料の開発
- (5) 耐圧500kg/mm²以上の型材料の開発
- (6) 高靱性高圧縮強度型材料の開発
- (7) 加工時には被削性がよく、鍛造時は硬くなり、生涯寿命中に自在に両特性を変えられる材料の開発
- (8) 熱影響のない型材料の開発
- (9) 加工熱の影響で変形しない型材料の開発
- (10) 焼き付きの発生しない型材料の開発
- (11) 潤滑不要の型材料の開発
- (12) 耐磨耗型材料、無摩擦型材料の開発
- (13) 超硬に優る高剛性型材料の開発
- (14) セラミックの応用技術の開発
- (15) 後方押し出しパンチへのセラミック材料の適用技術の開発
- (16) ダイヤモンドのダイインサートへの応用技術の開発
- (17) 表面処理後の寸法変化抑制技術の開発
- (18) 靱性があり表面硬度が高い表面処理（窒素ボライドなど）技術の開発
- (19) 温間鍛造品（700～800℃）用型材料の開発

d) 潤滑剤・潤滑処理技術

- (1) 膜厚が薄くても高面圧に耐える潤滑剤の開発
- (2) 形状変化に対応できる自動潤滑技術の開発
- (3) 潤滑剤の役目も兼ねる皮膜技術の開発
- (4) MoS₂ 並の耐焼付性を有する石鹼（リユー

べ)の開発

- (5) エッジ部焼付性カジリ等防止技術の開発
- (6) 1液で処理でき、材料の伸びに追従する潤滑剤の開発
- (7) 潤滑状態の均一性が保たれる高性能潤滑剤の開発
- (8) μ の小さい潤滑剤の開発
- (9) 型温度変化等にも対応できる μ の一定化技術の開発
- (10) 環境改善に対応しうる潤滑剤の開発
- (11) 使用環境を常にクリーンに保つことができ、かつ離型性の良い潤滑剤の開発
- (12) ボンデ処理の代替技術の開発
- (13) 加工後の除去が容易な潤滑剤の開発
- (14) 薄い膜厚で、伸びがよく、メッキ不具合を起こさせない潤滑剤の開発
- (15) 処理時間を1秒以内に短縮できる潤滑剤の開発
- (16) 黒鉛系以外の不燃性潤滑剤の開発
- (17) 冷却能低下防止潤滑剤の開発
- (18) 1000℃以上での潤滑技術の開発

e)加工機械関連技術

- (1) 加工機の精度・剛性を飛躍的に向上させる技術の開発
- (2) 動的精度の向上（現在の1/10以下）技術の開発
- (3) 動的精度が静的精度に限りなく近いプレスの開発
- (4) ラムの振れ、下死点位置のバラツキ防止技術の開発
- (5) 底厚を測定しながら下死点を変化できるプレスの開発
- (6) 製品底厚をプレスにフィードバックするシステムの開発
- (7) 下死点制御および偏心防御を行うコンピュータ化された圧造機の開発
- (8) 高剛性・高スライド精度プレスの開発
- (9) フィードバック制御できるプレスの開発
- (10) 熱膨張及び負荷時のたわみを極小とする加工機の開発
- (11) 加工速度を自由に制御できる加工機の開発

- (12) 偏心荷重に強い500ton未満のトランスファ圧造機の開発
- (13) 2次元あるいは3次元に可動なプレスの開発
- (14) ローコストな閉塞鍛造機の開発
- (15) せん断機に重量管理（ $\pm 0.001\%$ ）用の研磨機がついたスラグ圧造機の開発
- (16) インライン精密切断（重量公差0.5%）技術の開発
- (17) 低騒音、低振動、高生産性、低価格プレスの開発

f)素材に関連する技術

- (1) 変形抵抗の低い素材の開発
- (2) 加工硬化の少ない素材の開発
- (3) 剛完全塑性素材の開発
- (4) 冷鍛後熱処理しなくても加工性に優れる素材の開発
- (5) 加工度に関係なく割れない素材の開発
- (6) 冷鍛成形性のよい素材の開発
- (7) 熱処理による性質の変化の少ない素材の開発
- (8) 冷鍛後の熱処理によるひずみの少ない素材の開発
- (9) 組成成分のばらつきが少ない均質な素材の開発
- (10) 偏折や介在物のない素材の開発
- (11) 不純物が極限的に少ない素材の開発
- (12) 加工時は軟らかく、加工後室温度下で硬くなる素材の開発
- (13) 重量バラツキのすくないコイル材の開発
- (14) 素材径バラツキ $\pm 0.05\text{mm}$ 以内達成技術の開発
- (15) 真円度0.15mm以内達成技術の開発
- (16) 剛片寸法の一定化技術の開発
- (17) 複雑形状ブランク製造技術の開発
- (18) 超塑性現象の完全制御技術の開発
- (19) 結晶粒径 $1\mu\text{m}$ までの等軸微細化技術の開発
- (20) 変形抵抗が低く、焼付きにくいステンレス鋼の開発
- (21) 変形性、耐摩耗性、被削性に優れた銅合金

の開発

(22)強度、耐食性などの特性に優れ、冷鍛性のよい (C量の少ない) 素材の開発

7. 結言

以上の調査研究を通じて、鍛造加工の実務に携わっている人々が、広範な技術課題に関しても現状では満足できないでいること、製品寸法精度をさらに向上させるためには数多くの問題が残されていることが明らかである。上記各項目の中には、コストを度外視しているものや、当面実現が非常に難しいと思われるものもあるが、すでに研究開発がかなり進行しているものもある。関係各位の一層の開発努力が期待される。

参考資料

- (1)「塑性加工品の限界精度に関する研究」
(財)天田金属加工機械技術振興財団、
(社)機械技術協会、(1989-3)

(原稿受付日/9月21日 *東京大学生産技術研究所教授 **工業技術院機械技術研究所材料工学部部長 ***株式会社アマダ技術研究所所長 ****大同工業大学機械工学科助教授 *****職業訓練大学校教授 *****工業技術院機械技術研究所塑性加工課)