

特集 冷間鍛造による高精度化*

High Accurate Parts Forming in Cold Forging

佐藤日出之
Hideyuki SATO

今井敏博
Toshihiro IMAI

宇都宮誠治
Seiji UTSUNOMIYA

Cold forging is the manufacturing process that accomplishes cost reduction. Requirements to reduce machining process or grinding process (net-shape forging) are increasing day by day. To answer these demands, we are developing the net-shape forging technology.

In this paper, we describe high accuracy forming technologies related to forming process design and die design in cold forging. For example, accurate improvement of inner diameter by considering the deformation of die or work in process and bottom thickness by automatic press die height control.

Key words : Cold forging, Cost reduction, Net-shape forging, High accuracy forming

1. はじめに

近年、経済状況が不安定な中で、製造業には製品、部品製造コストの低減が強く要求されている。機械構造部品に関して、製造コスト低減方策として冷間鍛造はいつも着目され、適用拡大や更なるレベル向上が要請されてきた。特に、冷間鍛造だけで必要な形状や精度を得て、後加工としての切削や研削を省略させる要請（ネットシェイプ化）は限りなく高い。

素材材加工として冷間鍛造を適用するだけでも、材料の歩留まり向上、設備費削減のメリットはあるが、最近ではさらにネットシェイプ化、ニアネットシェイプではなくネットシェイプ、つまり無切削化の要求が高まっている。すなわち冷間鍛造は仕上げ加工として位置づけられるようになってきており、それに伴って相当の精度を確保し得る加工技術の向上が必要となっている。

本稿では、冷間鍛造の動向を概説すると共に、冷間鍛造の高精度化への試みの一端として、有限要素法によるシミュレーションを導入し変形挙動を踏まえた加工法や金型の設計の工夫などにより、高精度化に取り組んだ事例について述べる。

2. 冷間鍛造の最近の動向概説

Fig.1 は最近の冷間鍛造部品の傾向をまとめたものである。

2.1 被加工材料

従来から、冷間鍛造は被加工材について制約があるとされ、低炭素鋼や一部のアルミニウム、銅合金に限られていたが、近年では、難加工材として敬遠されて

* (社)日本塑性加工学会の了解を得て、第198回塑性加工シンポジウム「ここまでする塑性加工による高精度部品造り(2000.9)」より、一部加筆して転載。

| Material | Shape | Accuracy |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Middle, high carbon steel • Martensite SUS steel • Dies steel | <ul style="list-style-type: none"> • Non symmetric axis • Small thickness wall • Helical gear • Undercut • Scroll • Trocoid | <ul style="list-style-type: none"> • Circular 10-20μm • Non circular 10-μm • Coaxiality 10-μm |
| <p>Material, die material development Forming stress reduction</p> | | <p>Die accuracy, Anticipation of deformation, Press accuracy, Material flow</p> |

Fig.1 Recent trends of cold forging parts

きた中高炭素鋼、特に工具鋼やマルテンサイト系ステンレス鋼など炭素量が1%を超える材料にまで広がっている。

これは製品の性能向上や軽量化に応じて部品設計が極限を追求していることに加えて、これら材料のコストダウンのために冷間鍛造を採用せざるを得なくなっていると言えよう。加工性のよい被加工材料の開発、加工荷重を低くしたり工具にかかる応力を低くする工夫、工具材料の剛性向上や疲労強度が向上し、実用化される事例が増えている。

2.2 加工形状

最も容易な冷間鍛造可能な形状は軸対称であることは言うまでもないが、中心軸を有し、一部に非軸対称成分があるような部品形状（擬軸対称）は既に一般的に冷間鍛造がなされている。カップ状部品の壁の薄さ、穴の細さ及び深さについては、これまで限界とされてきた加工度を上回る加工がなされている。

近年はヘリカルスプラインやギアが冷間鍛造される事例が多くなっている。金型の入り口形状や金型その

ものの回転などを工夫し実用化している。アンダーカットを有する形状も、円周方向に2個もしくは3, 4個に分割したダイを用いて生産されている。更に、スクロール形状やトロコイド形状（ギアと違って、歯先や歯底にもプロフィールとしての精度が必要）の冷間鍛造が試みられている。

2.3 精度

高精度化への試みも目を見張るものがある。単なる円形ならば径精度10 μm 、非円形のものでも数十 μm に達しようとしている。上下の型の同軸にかかわる精度の向上も難しいとされてきたが、加工機械の精度の向上や金型の工夫により、やはり数十 μm レベルである。

このような冷間鍛造の高精度化についてはこれまでに多くの研究がなされ見るべき成果をあげてきた。金型製作の高精度化、各種加工条件のばらつき低減、加工荷重の低減など地道な努力のたまものと言える。更に、近年のコンピュータ援用シミュレーション技術の向上により、金型及び被加工材の弾性変形を見込んだ被加工材の材料流動設計や金型構造設計がなされるようになってきている。

3. 高精度化への取り組み事例

冷間鍛造品の寸法を高精度化するための取り組みとして、金型の変形に着目した円筒部品の内径精度の向上に関する角南らによるシミュレーションでの取り組み事例¹⁾など、これまでに多くの研究成果が報告²⁾⁻⁷⁾されている。

本稿では、筆者らが行ってきた高精度化への試みの一例として、有限要素法を用いたシミュレーションを用いた数値解析により、被加工材の流れをコントロールし、被加工材や金型の弾性変形も考慮して高精度化した例や、被加工材の情報を用い、プレスの下死点を加工ごとに制御して高精度化した例など三つの事例を紹介する。

3.1 底付円筒内径の円筒度高精度化

Fig.2に対象部品の形状と加工の概要を示す。上下両側にカップ形状を有する部品であり、前後方複合押出しを行う。上側と下側の断面減少率が異なるため、断面減少率の小さい上側の端面に背圧を負荷して加工を行う。図中、上側の内径部は円筒度50 μm が要求された部品である。

Material : SCr415

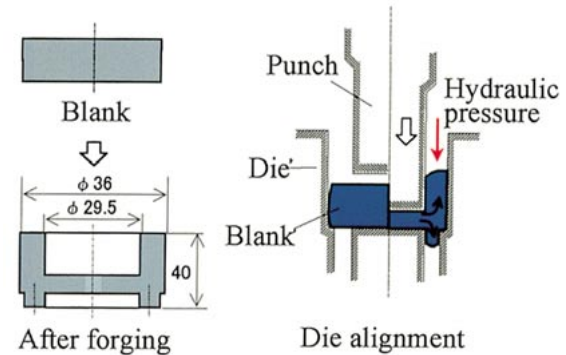


Fig.2 Product and die alignment

ストレート形状のパンチ（ランド部なし）を用いて冷間鍛造したときの側壁の内径の形状をFig.3に示す。製品の上部が開いた（口開き）形状になっている。その量は59～62 μm で目標を満足していない。カップ状部品の後方押出しにおける円筒度については種々研究されているが定説はなく、形状、材質、加工度などの加工条件によって変化するといつてよい。

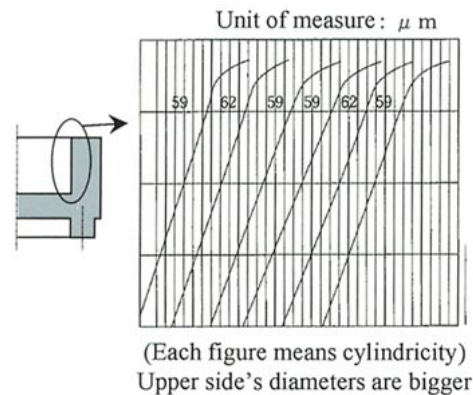
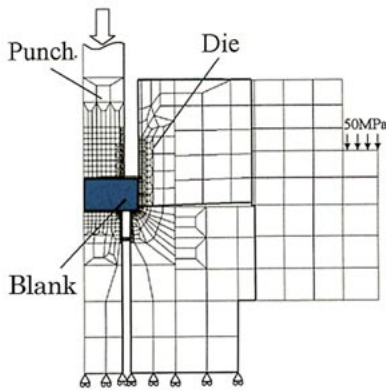


Fig.3 The shape of inside

本部品の内径高精度化は、被加工材の変形挙動を数値解析することにより行った。Fig.4にシミュレーションのための解析モデルと条件を示す。前述の口開き変形が時々刻々変化する金型の弾性変形に起因すると考え、金型と被加工材の両方をモデル化した。



| | |
|----------------|--|
| Solver | : FEM |
| Element | : Axis symmetric |
| Property | |
| Work | : Elastic-plastic body |
| Die | : Elastic body ($E=206\text{GPa}, \nu=0.3$) |
| Friction coef. | : $\mu=0.1$ (coulomb) |

Fig.4 Calculating condition and model

Fig.6は前後方（複合）押し出しの場合（A水準）と後方押し出しの場合（B水準）について同様の数値解析を行った結果を示す。(a)は最終形状、(b)は加工途中の形状を示す。後方押し出しの場合は前後方押し出しの場合と異なり上部が閉じた口閉じ形状になっている。

Fig.5は下死点での素材とパンチの変形状況についての解析結果を表したものである。初期のパンチ径 29.5 ($r=14.75$) に対し、下死点でのパンチ径は拡大しているが、被加工材と接触する部分では被加工材からの半径方向の圧力により、先端ほどその拡大が抑制され、その結果口開き形状になっている。背圧を負荷しているため半径方向の圧力が増加し、パンチ先端を变形(小さく)させていると考えられる。口開き量は実験結果とは一致しないものの口開きの傾向は合っている。

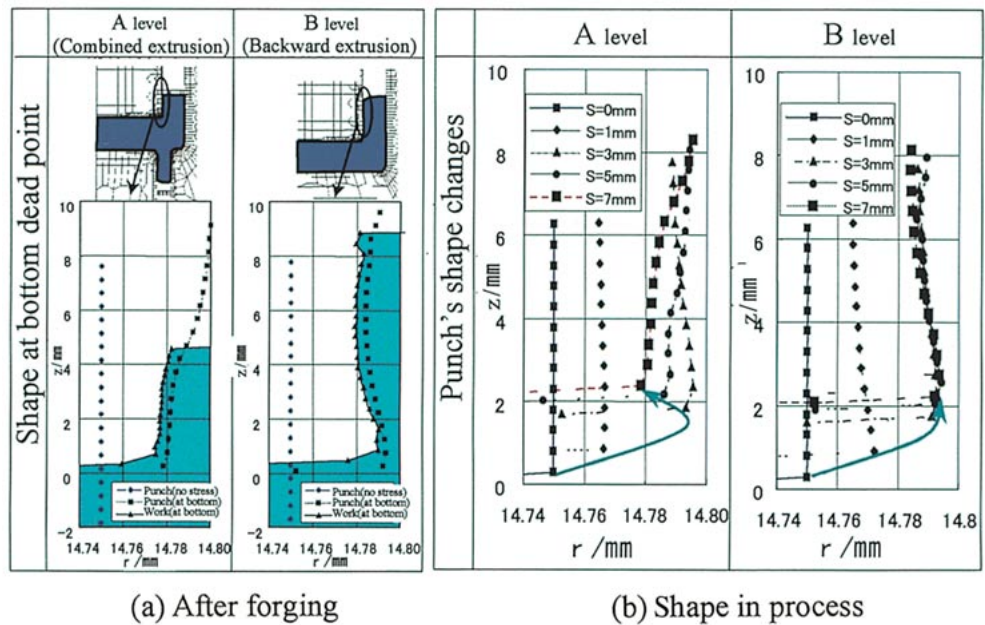


Fig.6 Result

Fig.7はパンチに作用する軸方向及び半径方向の圧力変化とそれらを用いて弾性力学の単純な計算により求められるパンチ先端の径変化を示す。

対象としている前後方押し出しでは加工の進行に伴ってパンチ先端は径を拡大させ、途中、パンチ中間部より太くなる。その後、半径方向の圧力が増加し、パンチ先端の径の拡大は止まり、小さくなる(最大値を持つ)ことを示している。時間が遅れて半径方向の圧力が増加するのでこのような形状になる。一方、後方押し出しでは半径方向の圧力の増加は小さく、パンチ先端の径は拡大するが、その後小さくなることはない。

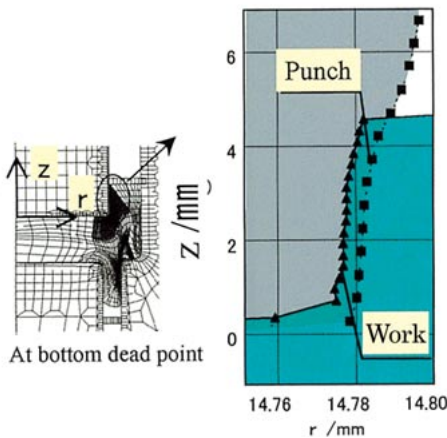


Fig.5 Result

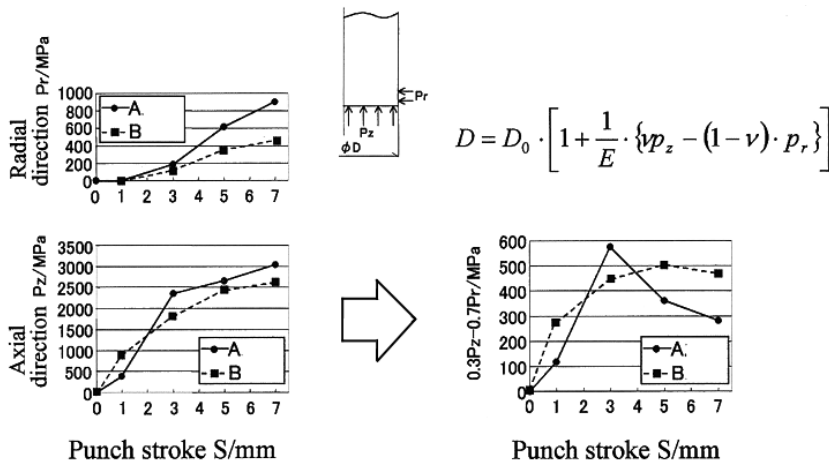


Fig.7 Changes of punch's top diameter

この結果から、内径の円筒度は加工時のパンチの複雑な変形に起因すると考える。口開きの解消方法として、パンチ先端にランドを設けることで材料を内側へ倒れ込ませることを考えた。

Fig.8は先端部にランドを有したパンチを用いて加工したときのパンチと素材の変形挙動について解析した結果である。解析は、素材を金型から取り出すまで行った。ランドが有ると加工時に素材が内側（ランド逃がし部）に流れ込み、取り出し時には逆しごきにより円筒度が確保されることがわかった。実際には、逃がし量、ランド長さ等により円筒度は変化する。種々条件を変えて計算し円筒度が最もよくなる条件を見出している。

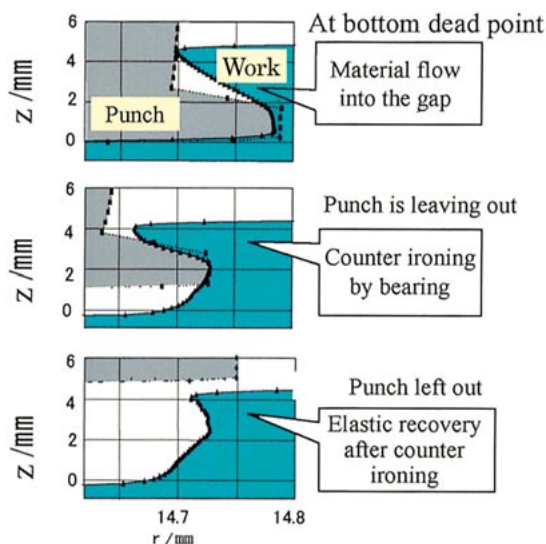
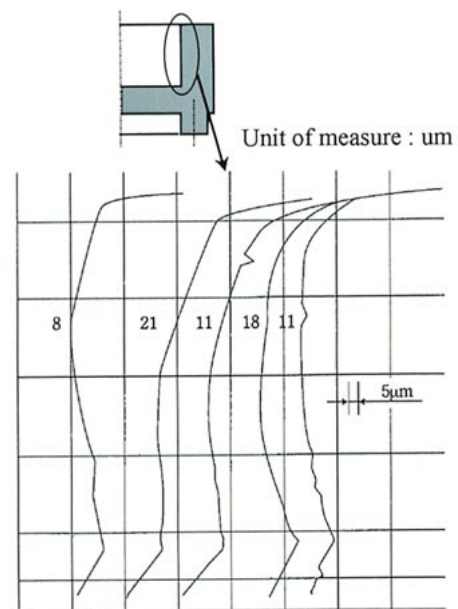


Fig.8 Result (improved)

Fig.9は解析結果に基づき製作したランドを有するパンチを用いて加工したときの内径の精度について形状測定したものである。ランド無しの場合に対して円筒度の精度向上がなされている。



(Each figure means cylindricity)
Fig.9 Accuracy of work (improved)

3.2 細深穴の円筒度高精度化⁶⁾

次に細く深い穴の円筒度を向上させた例を示す。Fig.10に対象部品の形状を示す。内径の円筒度が一般的な押し出しでの加工精度と比べ(以下 従来比と記す), 0.16が要求された段付き形状の部品である, 要求精度を満足させるため, 穴の押し出し加工後にしごき工程を追加して加工することを考えた。

Fig.11にしごき前後の内径の形状測定結果を示す。しごきにより, 円筒度は従来比で0.11 ~ 0.20へと改善されたが, 目標を満足していない。その形状は段付き部を境に軟まっている。

Material : SCM420

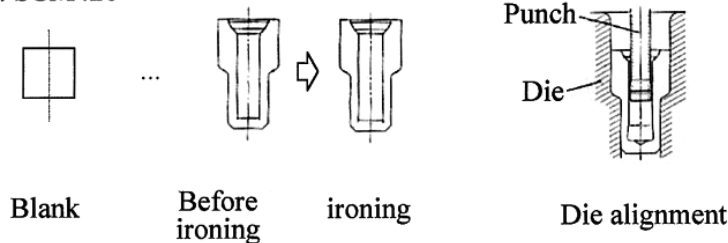


Fig.10 Product and die alignment

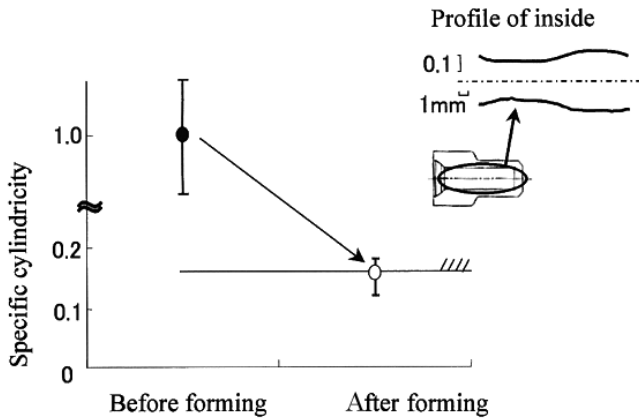


Fig.11 Effect of ironing

本部品の内径高精度化も、前例に同じくシミュレーションにより加工時の被加工材の変形挙動を解析して行った。Fig.12に解析のためのモデルと計算条件を示す。被加工材のみをモデル化し、弾塑性解析を行った。

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| Element | : Axis symmetric (8 points) |
| Property | |
| Work | : Elastic-plastic body |
| Die | : Rigid body |
| Friction coef. : m | =0.1 (shear friction) |

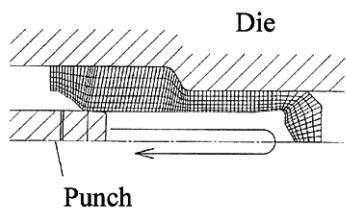


Fig.12 Calculating model

Fig.13はしごき後、被加工材をダイから取り出したときの穴部の形状についての解析結果を表したものである。穴の径寸法は、段付き部を境として肉厚の薄い部位(B部)が厚い部位(A部)に比べ大きくなっており、Fig.11の実験結果と同じ傾向になっていること

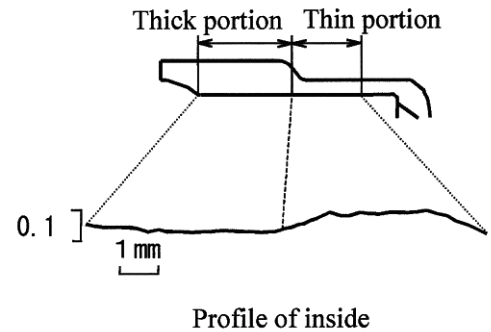


Fig.13 Result of calculation

がわかる。

Fig.14は加工途中のA部とB部の穴内径の変化についての解析結果を表したものである。A部はしごき加工時にパンチ径の2.4% (= d/d) 拡径した後、縮径し、A部とB部では0.3%の差が生じている。加工後の弾性回復量の違いにより内径寸法に差が生じたことがわかる。

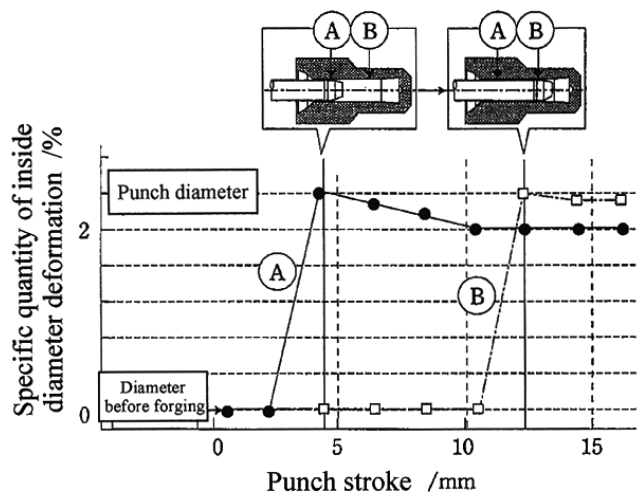


Fig.14 Result of analysis

本結果から、穴内径部の円筒度を向上させるには、肉厚の厚い部位と薄い部位の弾性回復量を合わせるようになる。それぞれの部位のしごき量の変更で対応できると考えた。金型は外径の異なる2段のランドを有

するパンチを使用し、一度にしごく方法を選んだ。

Fig.15は外径の差が0.3%の2段のランドを有するパンチにてしごき加工したときの解析結果である。パンチが通過するとき、A部は2回拡径されて2.7%、B部は1回だけ拡径されて2.45%となるが、加工後は、両部位の弾性回復量が異なるため、内径の差は0.1%となり、ランドが一つのパンチでしごき加工した場合に比べ、内径の寸法差は縮小している。弾性回復量を部位ごとに変更することにより、円筒度の向上が可能である。

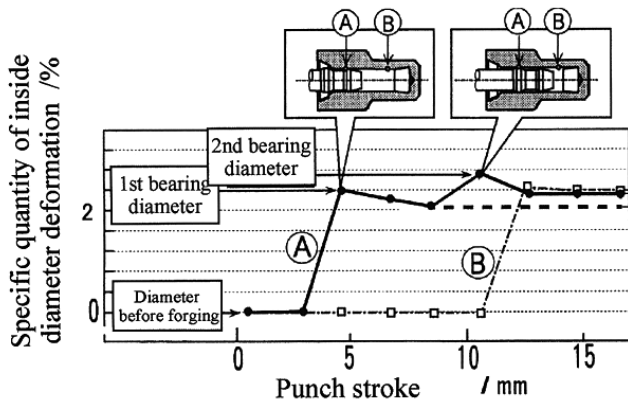


Fig.15 Result of analysis

Fig.16はシミュレーション結果に基づき作製した2段ランド付きパンチによりしごき加工した加工品の内径形状を測定した結果である。穴内径部の円筒度は、0.05 ~ 0.11 (従来比) となり、目標を満足することができた。

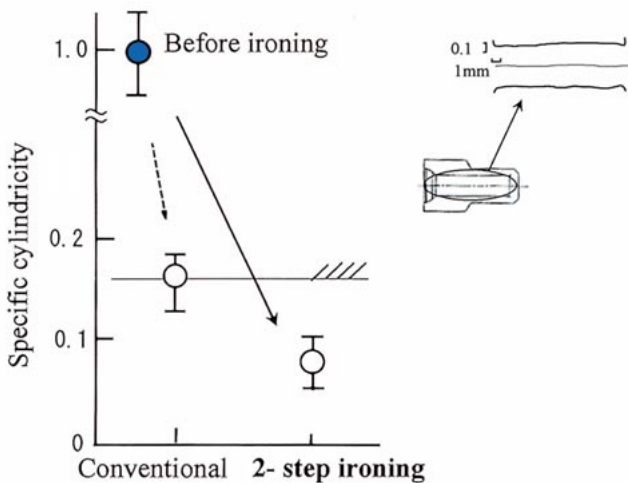


Fig.16 Result

3.3 プレスダイハイトの自動制御による底厚寸法の高精度化⁹⁾

次に加工前の素材の情報や加工品の寸法から最適な

プレスの下死点を加工ごとに算出し、連続運転中にプレスダイハイトを自動調整することにより、人による寸法検査や調整無しに底厚寸法の高精度化を達成した事例について述べる。

Fig.17に対象部品の形状を示す。内壁、外壁を有する円筒部品であり板材成形と冷間鍛造を組み合わせた複合加工で成形される。Fig.18に冷間鍛造工程の加工方法を示す。

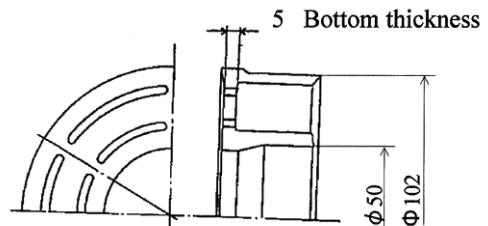


Fig.17 Product

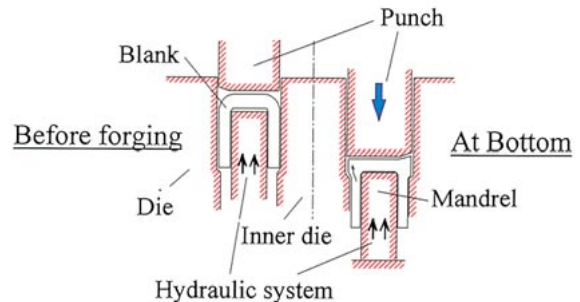


Fig.18 Die alignment

冷間鍛造品の底厚寸法の変動状況について、Fig.19, Fig.20に示す。目標値をゼロとしてずれ量を表した。加工開始直後や素材ロット切り替え時に大きく変動している。加工開始直後は、底厚が急激に減少し、約100ショットを越えると安定している。

冷間鍛造において上型と下型の間隔(プレス下死点時)によって決まる底厚は、一般的に、高い加工精度が得られない。底厚がばらつく原因について、要因系統図をFig.21に示す。寸法は加工時(下死点)の上下金型間寸法のばらつきや加工後のワークの変形ばらつきなどでばらつく。前者の場合、特に金型の変形を支配する素材の変形抵抗や素材の大きさ、また金型の熱膨張などが大きく影響すると推定している。

対象製品では、目標の寸法精度を得るために、作業者が打ち始めや材料ロットの変更時に経験と勘でプレスを停止し、底厚寸法を測定、ダイハイト(プレス下死点)を手動にて調整し、加工を再開するという操作を寸法が安定するまで、数回~数十回繰り返して

いた。その結果、目標の底厚寸法を得ることができ、後工程への不良流出を防止していた。人による調整を行わなかった場合、寸法のばらつきは規格公差幅の約2倍であった。

そこで、底厚のばらつきに影響する因子および影響の程度について調査した。上述した各因子について、それぞれ推定される変動域での底厚寸法の変化をダイハイトや他の加工条件一定のもとで調査した。

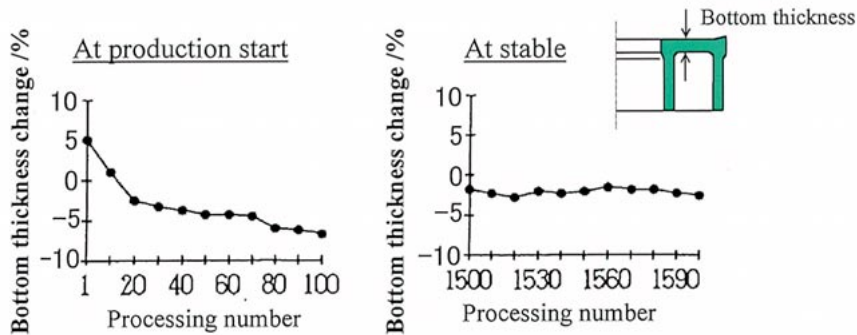


Fig.19 Bottom thickness change

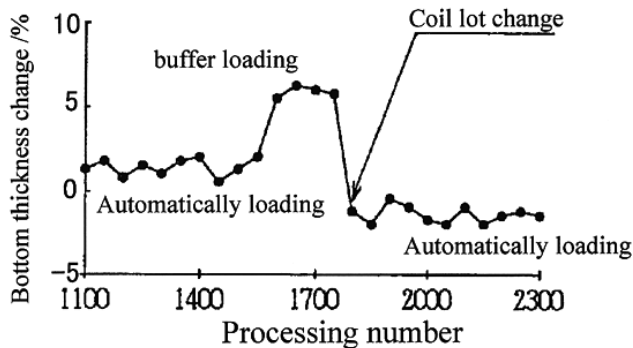


Fig.20 Bottom thickness change at material lot change

Fig.22, Fig.23, Fig.24に調査結果を示す。

結果として、以下の3要因が大きく影響することが判明した。

金型温度（成形開始時の温度上昇）・・・パンチ、マンドレルなどの熱膨張による。

被加工材温度・・・温度が高いと変形抵抗が減少し、底厚は小さくなる。

被加工材硬さ・・・板材成形品の硬さが大きいと底厚は大きくなる。

併せて、各要因と底厚との関係式を得た。

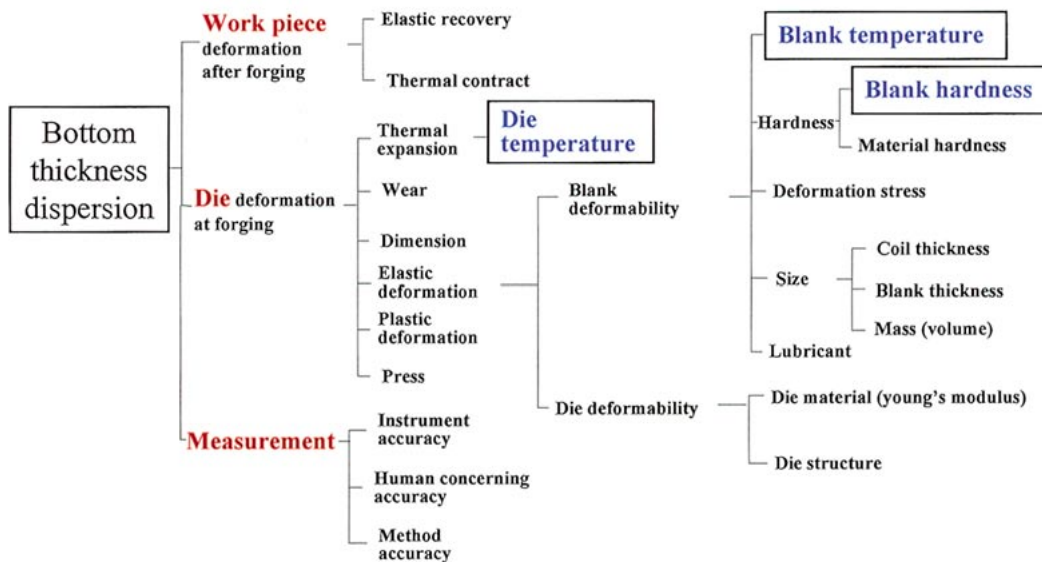


Fig.21 Factor tree diagram

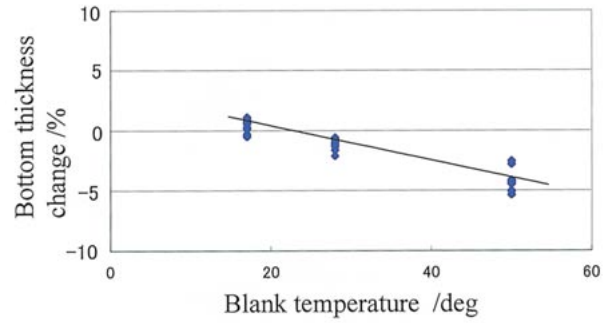
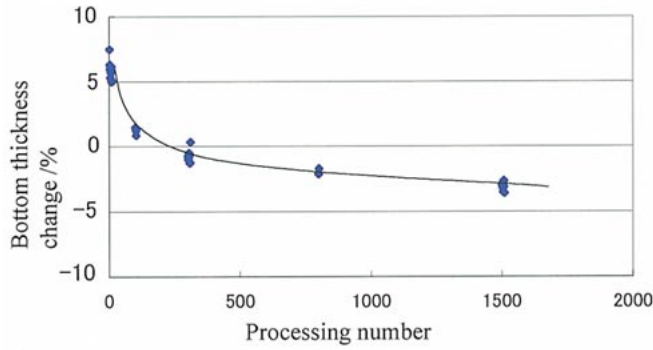


Fig.23 Relation between bottom thickness and punch temperature (at production start)

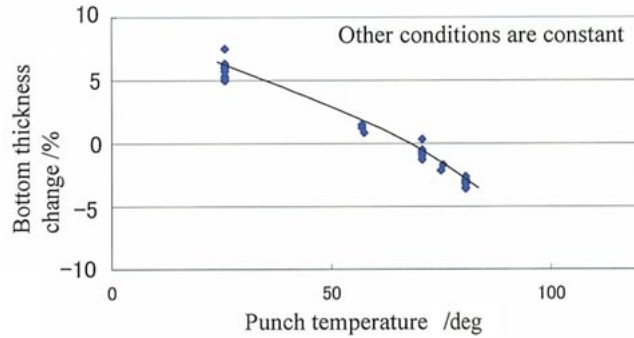


Fig.22 Relation between bottom thickness and punch temperature at production start

工材硬さの3因子は、加工直前に測定し、最適な補正量を算出後、加工ごとにダイハイトを調整する(F/F)。温度は、非接触式の放射温度計、硬さは、超音波硬さ計などで測定する。影響度の少ないその他の要因は、加工後の底厚寸法測定結果のフィードバック(F/B)で補正する。

ダイハイト自動制御システムは、測定装置、制御装置、プレス装置(ダイハイト補正部)の三つからなる。

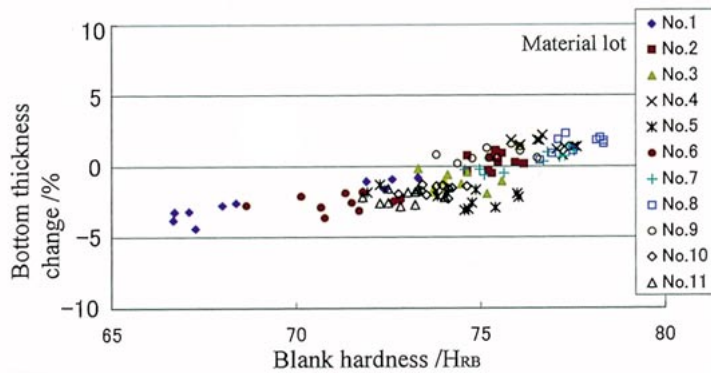


Fig.24 Relation between blank hardness and bottom thickness

Fig.26に開発したダイハイト自動制御システムの概要を示す。人による検査や調整作業がなくても、寸法ばらつき精度は、Fig.27に示すように従来比で約4倍程度向上した。参考としてシステム外観をFig.28に示す。

制御の方法としてF/F (Feed forward) とF/B (Feed back) を併用した制御系を考えた (Fig.25)。底厚の変動に影響する金型温度、被加工材温度、被加

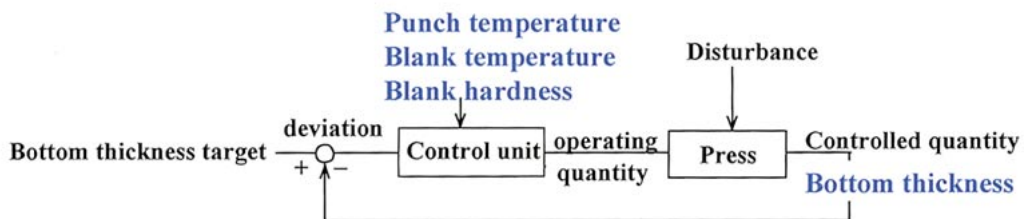


Fig.25 Control diagram

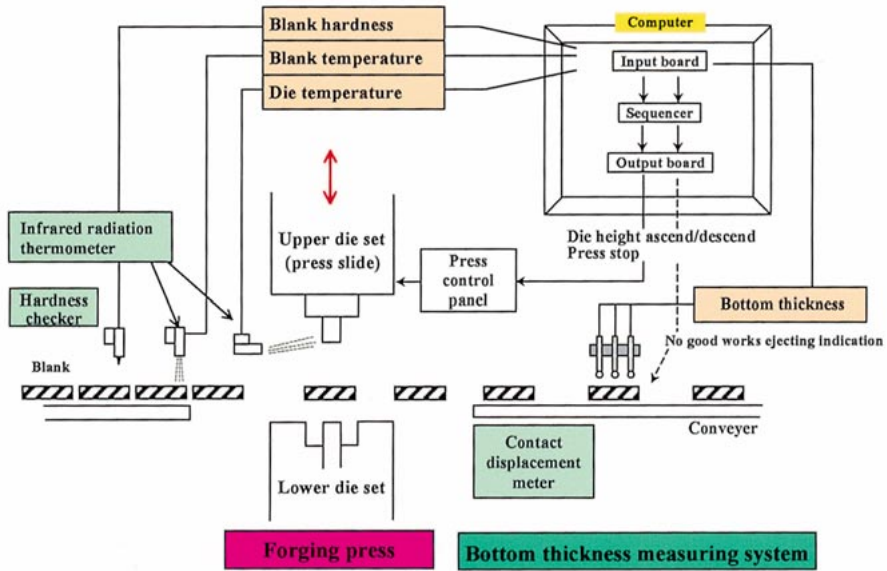


Fig.26 Developed system

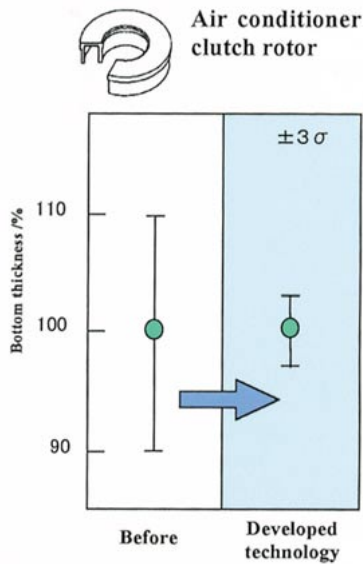


Fig.27 Result

4. おわりに

以上、冷間鍛造における高精度化への取り組みとして、

金型や素材の変形に着目した数値解析による現象の解明と最適な金型形状の設計

被加工材や金型の情報によるプレスダイハイトを自動制御する技術の開発

により、精度を向上させた事例について述べた。

今後は、冷間鍛造品の更なる高精度化に向けて、金型の形状改良や高精度化、また、ITを織り込んだ加工技術の開発などで、ネットシェイプ化（無切削化）が進んでいくと考えている。

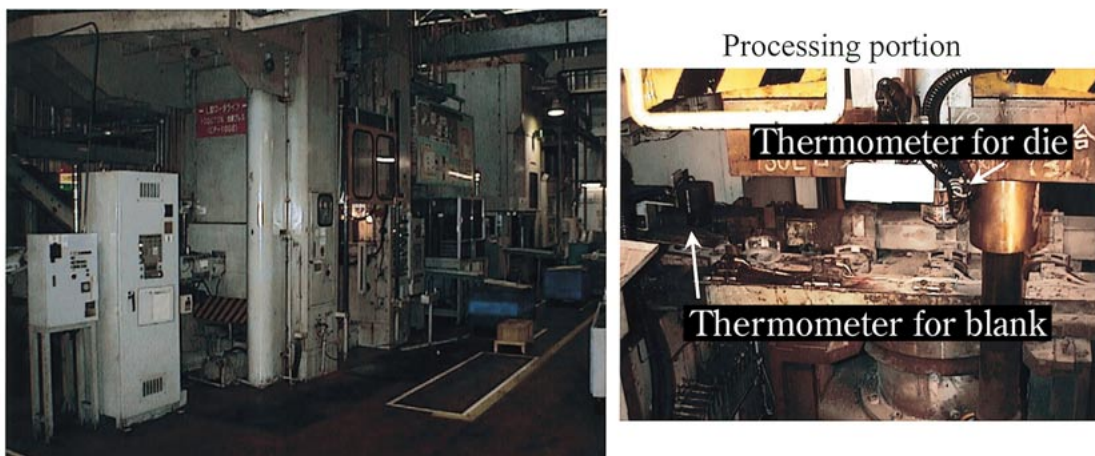


Fig.28 System appearance

<参考文献>

- 1) 角南不二夫：第169回塑性加工シンポジウム テキスト (1996), pp.21-30 .
- 2) 野池一広・春日直明：塑性と加工, 339 (1972), pp.13-136 .
- 3) 松原茂夫：塑性と加工, 633 (1976), pp.17-187 .
- 4) 澤辺弘・高橋昭夫：塑性と加工, 644 (1976), pp.17-187 .
- 5) K.Lange：塑性と加工, 350 (1979), pp.20-220 .
- 6) 工藤英明：塑性と加工, 4 (1988), pp.29-324 .
- 7) 木内学・中沢克紀・遠藤順一・小野宗憲・松原茂夫・堀端眞彦：塑性と加工, 1298 (1992), pp.33-382 .
- 8) 甲賀俊哉・藤井敬之・今井敏博：特開平8-332546 .
- 9) 佐藤日出之・中村拓志：特開平8-24985 .



<著者>



佐藤 日出之
(さとう ひでゆき)

生産技術開発部
セラミック加工研究、鍛造加工研究に従事



宇都宮 誠治
(うつのみや せいじ)

冷暖房製造3部
エアコンクラッチ部品の製造、主に塑性加工に従事



今井 敏博
(いまい としひろ)

生産技術開発部
工学博士
各種固有技術の研究、主に鍛造加工研究に従事