



T. Nakamura

塑性加工（鍛造・板成形）技術のイノベーション

静岡大学 教授
中村 保

1. はじめに

日本における鍛造製品および板材成形品の70%は自動車用部品であるため、自動車の生産の拡大と効率化に併せて、鍛造や板材成形のイノベーションも進展してきた。図1に、日本の自動車の生産台数の推移を示す。国内の自動車の生産は1960年以前から開始し、1973年のオイルショック等の一時的減少があったものの、1990年までは、その生産台数は急激に拡大していった。1990年から国内生産台数は急激に減少したが、1985年頃からは海外生産が急激に増加し、総生産台数はほぼ右肩上がりに拡大し、2005年には2000万台を突破している。最近では、海外生産台数が国内生産台数を凌駕してきている。そこで、本稿では、このような自動車の生産の拡大に併せて、鍛造と板材成形技術のイノベーションがどのように進展してきたかを展望してみる。

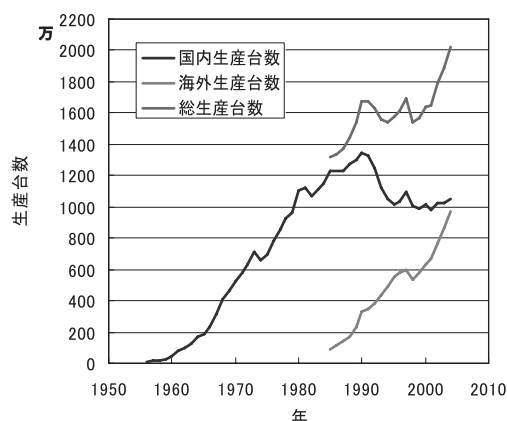


図1 日本の自動車生産台数の推移

2. 精密冷間鍛造のイノベーション

2.1 自動車の生産と精密鍛造の推移

自動車の生産に併せて、冷間鍛造は1960年代にドイツとアメリカにおいて初めて自動車用の小さな部品の製造に用いられた。日本における冷間鍛造の開発は国のプロジェクトとして工藤先生をチームリーダーとして始められた。1969年に、工藤先生が、自動車、鍛造部品、プレス、鋼素材、工具等の製造メーカの技術者と大学等の研究機関の研究者を集めて、日本塑性加工学会に冷間鍛造分科会を組織した。その冷間鍛造分科会では、塑性力学、材料科学、トライボロジー等の研究成果を実際の冷間鍛造技術に活かして改良に努めた[1]。

1970年代になると、日本の冷間鍛造技術のレベルは先進諸国の技術に追いつき、日本独自の鍛造技術が開発されるようになった。それらの中で、とくに、温間鍛造技術は1970年代の最も顕著な技術開発である。その温間鍛造技術は、1980年代になって、FF駆動自動車の等速ジョイント(CVJ)用の比較的大きな部品の製造にうまく適用された。図

2は1987年と1991年のトヨタ自動車における鍛造工程割合の変化を示すもので、熱間鍛造が減少し、冷間鍛造と温間鍛造の割合が増加しているのが分かる[2]。

図3は、1960年から1995年にかけて自動車に搭載された冷間鍛造部品の鍛造ままの重量と仕上げ切削後の重量の推移、およびこの間に新たに開発された典型的な部品を示す[3]。自動車に搭載されている冷間鍛造部品の重量は1985年以降ほぼ横ばいで45kg程度で飽和している。また、冷間鍛造部品の鍛造したままの重量に対する仕上げ切削後の重量の比は、いわゆるネットシェイプ率を表すが、鍛造品開発初期の頃は、ボルト類の鍛造のため、ネットシェイプ率がほぼ100%であったが、1980年代以降は80%程度でほとんど変化がない。

1960年代にはハブボルトのような小さな軸対象部品が開発され、1970年代には、オルタネータやエアポンプのような比較的大きな部品の開発が行われた。1980年代になると、CVJのアウトター部品やインナーレース部品が重要な鍛造品として開発された。

精密鍛造は、他の製造法、特に機械加工よりも製造コストが安くなる場合に使われる。図4はトランスミッションギアとシンクロギアの一体化鍛造による製造コストの削減の

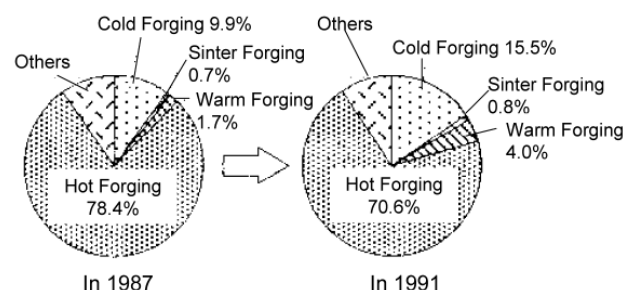


図2 鍛造工程の変遷 [2]

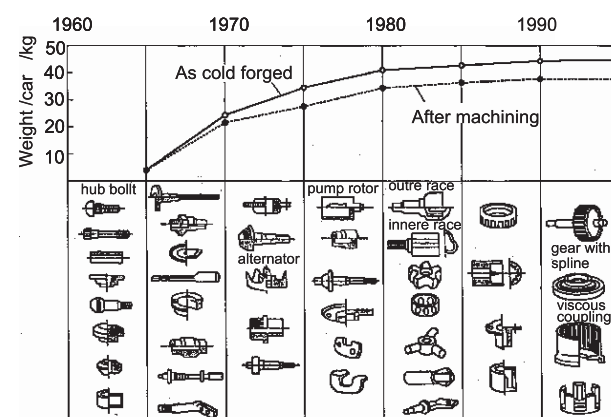


図3 日本における1960-1995年代の冷間鍛造部品の重量変化 [3]

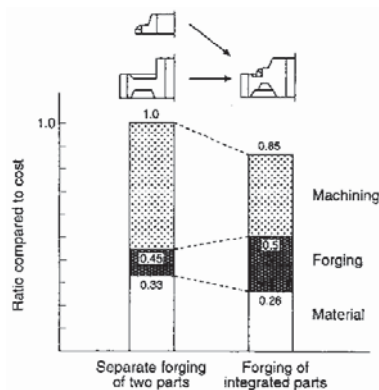


図4 トランスミッションギアとシンクロギアの一体化鍛造による製造コストの削減 [2]

例を示すものである。鍛造コストの増大よりも切削コストの削減が大きくなるため、トータルコストは15%削減されることがわかる。

もう一つの精密鍛造の重要な特徴は、生産量が増加するほど、1個当たりの製造コストが低下する点である [2]。

この後、主として、1980年代以降に開発された精密鍛造製品の開発について紹介する。

2.2 新しい精密鍛造法

(1) 閉塞鍛造法

1980年代に新たに開発された閉塞鍛造法は、かさ歯車、スパイダー、その他の等速ジョイント (CVJ) の部品の製造に適用された。図5は、この閉塞鍛造法の原理と、その製品例を示す。クランプされた上下のダイスの密閉空間に置かれた素材ビレットは、上下のパンチを同時に下降および上昇させることにより圧縮される。素材はパンチと同じ接触面積を保ちながら水平方向に変形するため、半密閉鍛造より低いパンチ荷重で成形できる。この方法では、上パンチと下パンチは独立に稼動し、ダイスの閉塞荷重も別個に与えるため、多軸の動きが可能な装置が必要になる。

図6は、閉塞鍛造を一つのダイセットで実現可能にした閉塞鍛造装置である [4]。上下パンチを同時に稼動するため、

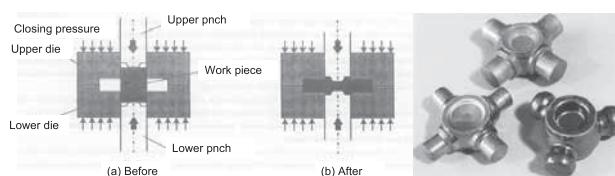


図5 閉塞鍛造法の概念と等速ジョイントの製品例

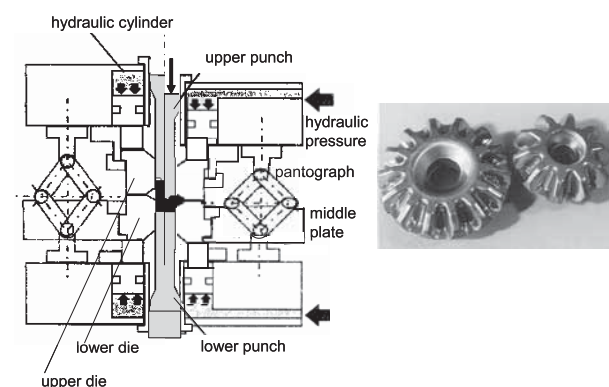


図6 パンタグラフ式閉塞鍛造装置とかさ歯歯車の製品例 [4]

パンタグラフのメカニズムを使っている。上パンチはメカプレスのラムの動きで押し下げられる一方、下パンチはプレスのベッドに固定されている。ダイスは中間プレートにセットされているため、ラムの半分の速度で下方に稼動される。このため、ダイスに対して、上下パンチが相対的に同時に上下から稼動されることになる。

(2) 分流鍛造法

大きな断面減少率の後方押出しでは、図7に示すように、前方軸押出しを同時に行うことにより、押し出しパンチ荷重の低減を図る方法が使われる [5]。この方法では、素材が中立点を境に、外周方向と中心軸方向の両方に流れるため、近藤らはこの成形法を分流鍛造法と名づけ、いくつかの製品の鍛造法を開発している。ヘリカルギアを鍛造する場合、第一ステップとして通常の閉塞鍛造を行い、その後、歯の部分を上上げるために分流鍛造が用いられる。図8は、内部にスプラインを有するボス付きヘリカルギアの分流鍛造の例で、第一ステップの鍛造で作製された円周状の溝が、材料の分流を生じるように工夫されている [6]。

(3) 背圧鍛造法

多数の孔を有するダイスを用いて前方押出しを行う場合、その押出される長さは、図9(a)に示すように不揃いになる。その場合、図9(b)のように、背圧を与える対向工具を用いて

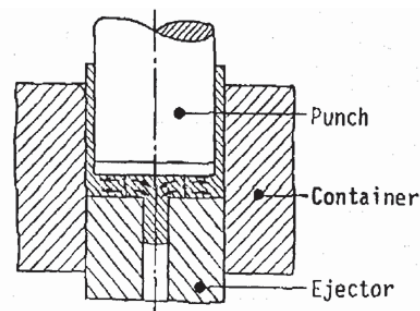


図7 分流鍛造法の概念 [5]

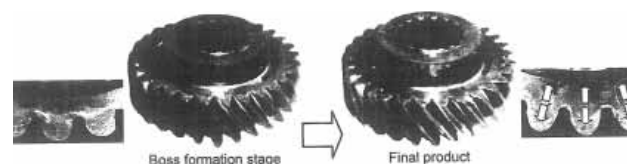


図8 分流鍛造法によるボス付ヘリカルギアの鍛造工程 [6]

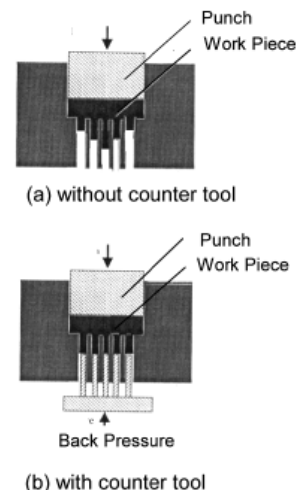


図9 背圧付加押出しの概念図 [7]

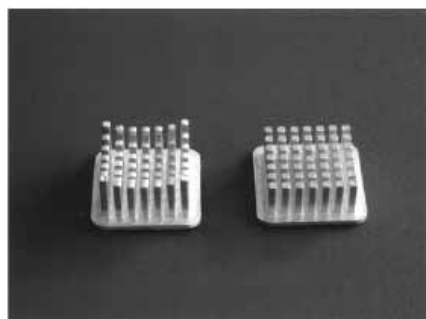
押出しを行うと、その長さを揃えることができる[7]。対抗工具は速く押出される部分を拘束するため、その対向圧は、素材の降伏応力の5%程度もあれば十分である[7]。図10にこの鍛造法で製造された製品の例として、ヒートシンクとスクロールを示す[8]。

(4) 板鍛造法

最近、種々の精密な電子部品を成形するため、金属板からの鍛造が行われている。図11は、ブラウン管の電子銃部品の例で、板素材のファインブランキングと板鍛造を組み合わせで成形している[9]。また、図12は、極薄板ステンレス鋼板の微細テーパ穴空けの例で、後に示すサーボプレスを用いて精度良くテーパ孔の鍛造を行っている[9]。

図13は多段の深絞り工程を3工程に短縮するため、複動プレスを用いてフランジ部端面に圧縮荷重を付加して増肉加工を行った例である[10]。図14はその製品例である。

図15に、深絞りとバーリング加工を組合わせて歯形部分を鍛

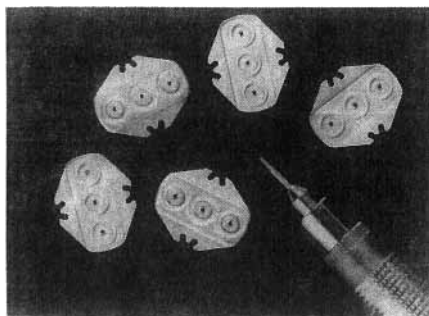


(a) heat sink



(b) scroll

図10 背圧付加押出しによるヒートシンクとスクロールの製品例[8]

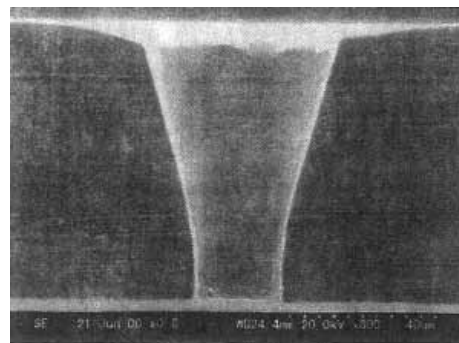


(a) ブラウン管の電子銃部品

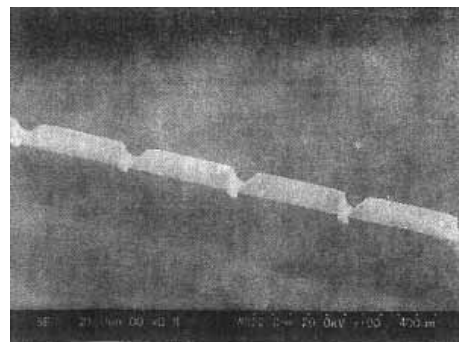


(b) 座ぐり成形の工程レイアウト

図11 電子部品の板鍛造加工[9]



テーパ穴



多列のテーパ穴

図12 極薄板ステンレス鋼板の微細テーパ穴空けの例[9]

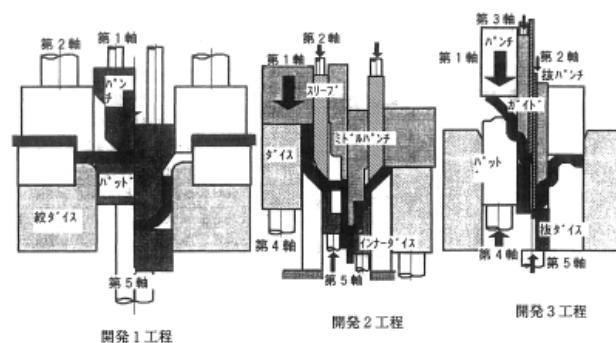


図13 複動プレスによる深絞り限界の向上[10]



図14 深絞りによるフランジ増肉成形工程製品例[10]

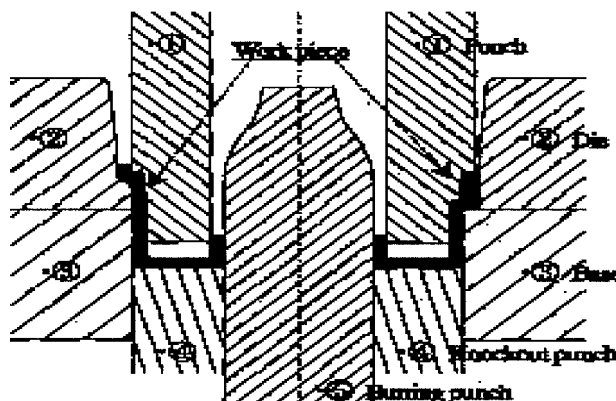


図15 板成形と精密鍛造の組合わせ加工[11]

造する製品の加工工程を示す [11]. 図 16 はこの方法で製造された歯車部を有する製品例である. 素材板は厚さ 5mm の 0.35% 炭素鋼である. アウターリム部の厚さは, 軸圧縮により増加され, 押出しタイプの鍛造によって歯車部を形成している.

松本らは, 図 17 に示すように, マグネシウム板の高温鍛造法を提案している [12]. 素材を 200–300℃ に加熱した工具で挟み込んで直接鍛造温度まで過熱して鍛造する方法で, この方法では素材の酸化を避けるのにも有効である.

図 18 は, 板素材を増肉スピニング加工してボス部を成形し, さらに, 図 19 は, 外周部に凹溝成形をする方法である [13].

(5) 工具の弾性変形を活用した鍛造

鍛造製品の公差は $10\ \mu\text{m}$ であるにも拘わらず, 鍛造工具の弾性変形量は 50–500 μm にも達する. 製品の寸法精度に及ぼす弾性変形の影響をキャンセルするため, 工具形状を

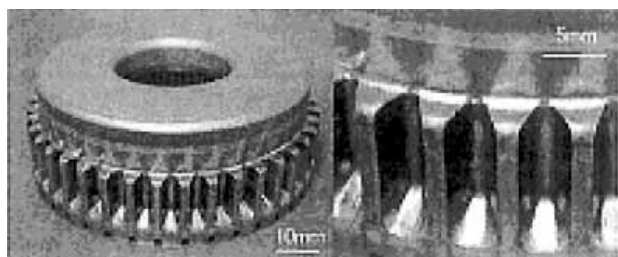


図 16 板成形と精密鍛造の組合わせ加工による歯車付製品例 [11]

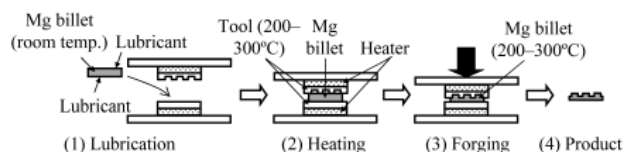


図 17 マグネシウム合金板の加熱鍛造 [12]

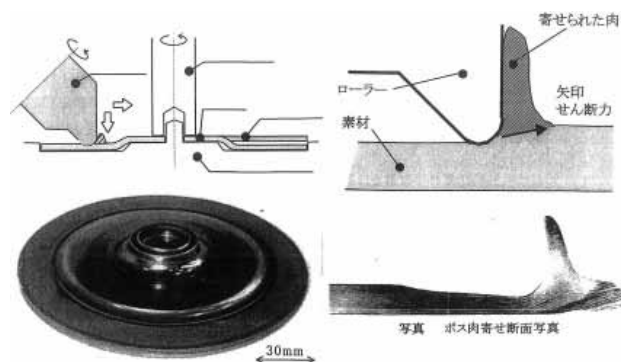


図 18 ボス成形における材料流れ [13]

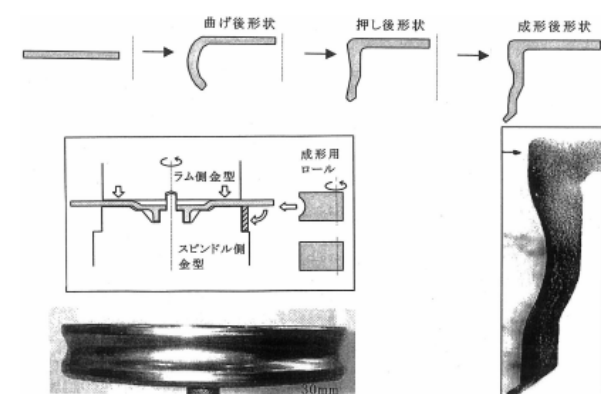


図 19 外周凹溝成形モデル [13]

修正しなければならない. しかし, 各鍛造毎に成形面圧の変動が生じるため, 寸法精度を完全に補償することは難しい.

小坂田らは, 棒材の押出しにおける直径の寸法精度の変化を削減させるために, 図 20 に示すようなダイスの構造を提案した [14]. 押出し荷重の増加によってダイホルダーは広がるが, そのテーパ角度が適切に設定されていれば, リング状のダイは荷重によって下方に押し下げられ, ダイの出口寸法は一定に保たれる. 図 21 に示されるように, 押出し後の直径は, テーパー角度 15° の場合にほぼ一定になることがわかる.

石田は, 図 22 に示すように, ダイの弾性変形を活用してクラウニング付ハスバ歯車を成形するネットシェイブ鍛造法を開発した [15]. コアダイがテーパダイケース中に押し込まれる

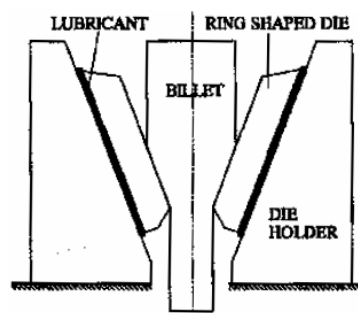


図 20 棒材の押出しにおける直径の寸法精度の変化を削減する方法 [14]

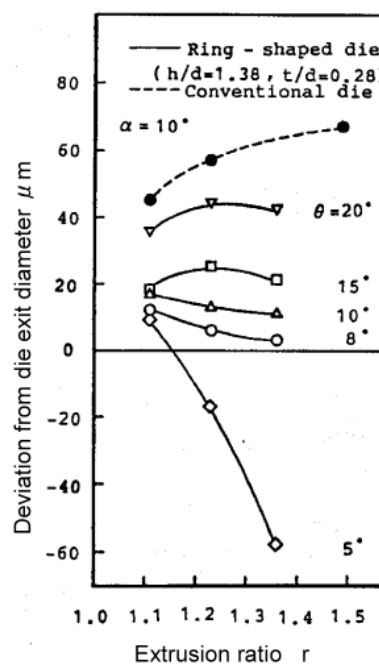


図 21 元のダイ出口直径と押出し製品直径の差異 [14]

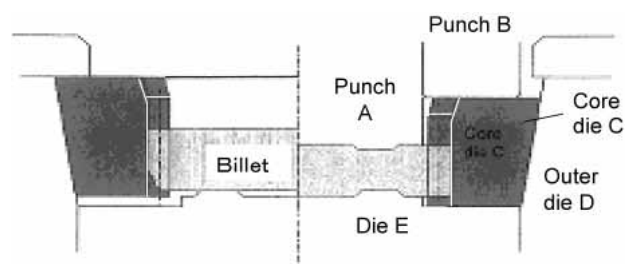


図 22 ダイの弾性変形を活用したクラウニング付き歯車のネットシェイブ冷間鍛造の原理 [15]

と、そのコアダイは中心方向に弾性的にシュリンクし、ギアの歯にクラウニング形状を成形する。コアダイがダイケースからロックアウトされるとき、元の形状寸法まで戻るため、鍛造された製品形状をくずすことなく取り出すことができる。このダイのもう一つのユニークな点は、鍛造中にコアダイを回転するメカニズムを持つような構造となっていることである。図 23 はこの方法で成形されたヘリカルギアの製品例である。

(6) 摩擦を活用した鍛造法

塑性加工では、摩擦は塑性変形を妨げる向きに作用するため、荷重の増加や成形限界を低下させることがほとんどである。しかし、もし工具が材料流動より速く動けば、摩擦はその材料流動を促進し、成形荷重を低減し、したがって成形限界を増加させることができる。中村ら [16] は、図 24 に示すように、缶の後方押しにおいて、コンテナを材料流れの方向に動かすことにより、超薄肉缶の成形法を提案している。

小坂田ら [17] は、駆動ダイによる摩擦を利用した鍛造法を提案している。図 25 は、それぞれ (a) 固定ダイ、(b) 浮動

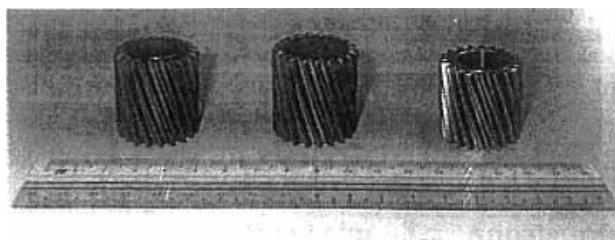


図 23 ダイスの弾性変形を活用したクラウニング付きはすば歯車の製品例 [15]

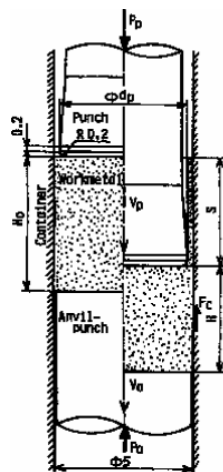
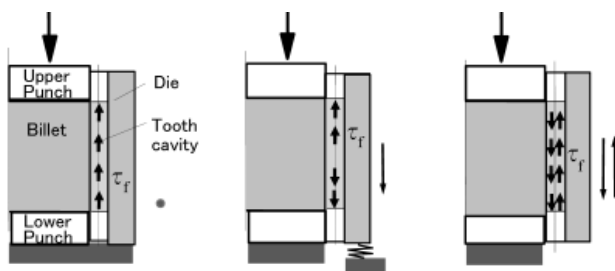


図 24 コンテナ駆動による摩擦力を活用した缶の後方押し成形の原理 [16]



(a) fixed die (b) floating die (c) moving die

図 25 固定ダイ、浮きダイ、稼動ダイによる閉塞鍛造 [17]

ダイ、(c) 駆動ダイを用いた閉塞鍛造法を示す。ダイを軸方向に駆動すると、材料は摩擦力によって型隅に流動するため、歯車の歯先の充満を促進する。その結果として、図 26 に示すように、ダイキャビティへの充満面圧を固定ダイの場合のほぼ半分に低減させることができる。

2.3 サ-ボプレス

1998 年頃から、日本のプレスメカは AC サーボメカニカルプレスを製造し始めた。これは高パワーサーボモータの開発によって可能になった。AC サーボプレスでは、クラッチブレーキやフライホイールが使われないため、動力を伝えるギアの数やこれらの機構に使われる油が削減される。最も重要な特徴はラム / スライドの動きがフレキシブルになり、そのために新たな成形工程や機能が実現できるようになった [18]。油圧サーボプレスに比較して、より正確な動きが可能となり、オイルポンプの騒音が生じなくなった。

図 27 に示されるように、3 種類のサーボプレスが製造されている [19]。最もシンプルなサーボモータの利用は、タイプ A に示されるようなボ-ルスク-リュ-によってスライドを上下させる形式である。この形式のサーボプレスではどの行程位置でも最大荷重が生じるが、最大荷重はモータのパワーの制限

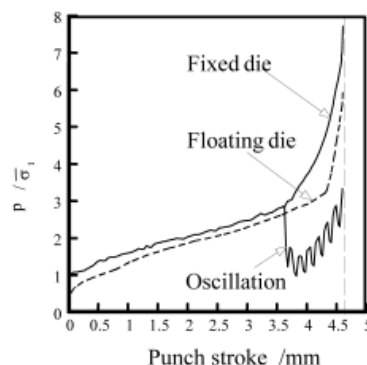


図 26 固定ダイ、浮きダイ、稼動ダイによる閉塞鍛造における加工面圧比 [17]

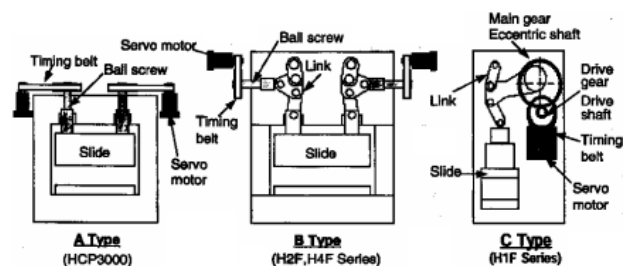


図 27 AC サーボ制御によるプレスの駆動メカニズム [19]

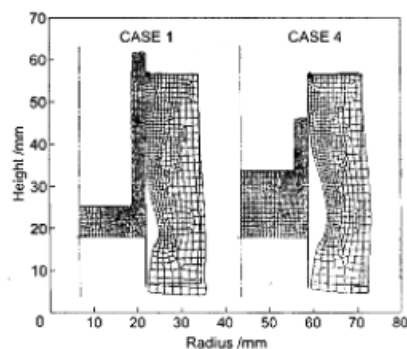


図 28 缶の後方押しの有有限要素法シミュレーションによるダイの弾性変形を考慮した缶製品の寸法誤差 [20]

であるが、松本らはマグネシウム合金の 200–300℃での温間鍛造として、図 35 に示すように、超硬合金のパンチを用いて、無潤滑で缶の後方穿孔法の開発を行っている [28]。

(2) トライボロジー試験法

済木ら [29] は、図 36 に示すように、棒材の引抜き形摩擦試験法を提案している。引抜き速度と試験片温度を変えることができ、ダイスの波型形状を変えることにより表面積拡大量を変えることができる。潤滑性能は平均の摩擦係数によって評価される。中村ら [30] は、図 37 に示すように、(a) 前方円錐缶－後方直缶押し形摩擦試験法、および (b) 前方円錐軸－後方直缶押し形摩擦試験法を提案している。摩擦係数は押し出し品の缶の深さから見積もられる。北村ら [31] は、焼付き特性を評価する摩擦試験法として、図 38 に示すようなボール通し形摩擦試験法を提案している。中空円筒試験片にベアリングボールしごき込む方法で、ボール通し後の試験片の表面状態を観察することにより、焼付き特性を評価している。

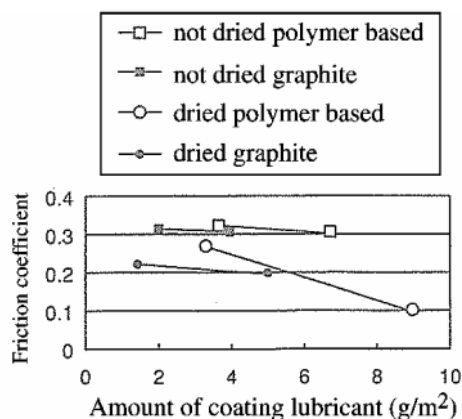


図 33 黒鉛系と高分子樹脂系潤滑剤の摩擦係数 [27]

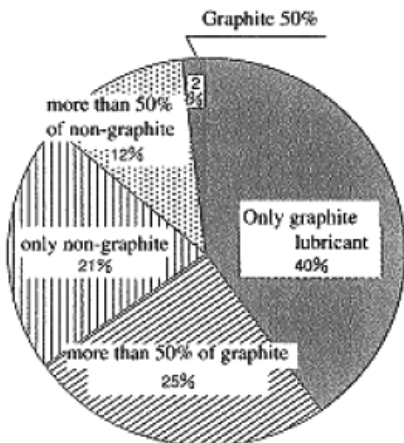


図 34 1993 年に適用されていた熱間鍛造用潤滑剤の種類 [27]

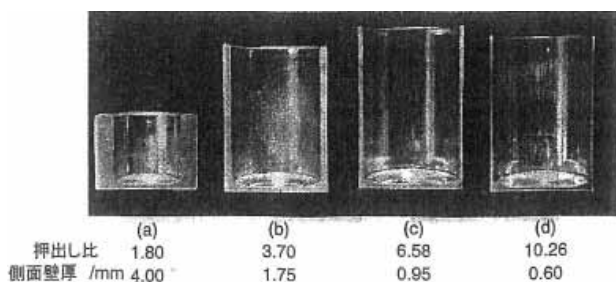


図 35 200–300℃におけるマグネシウム合金の超硬合金パンチによる缶の後方押し出しの無潤滑鍛造の例 [28]

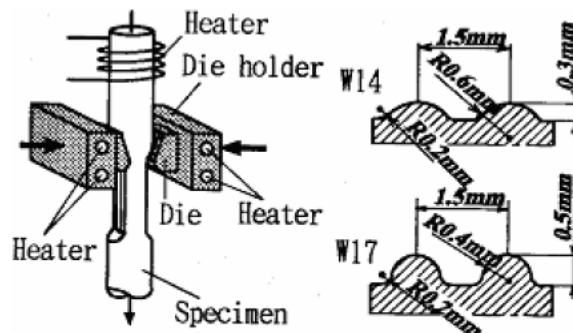


図 36 棒材の引抜き形摩擦試験法 [29]

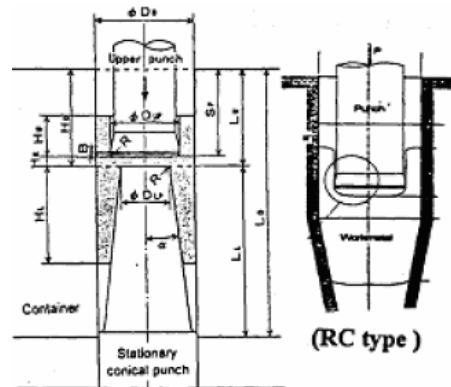


図 37 前方円錐缶および前方円錐軸と後方円錐缶形摩擦試験法 [30]

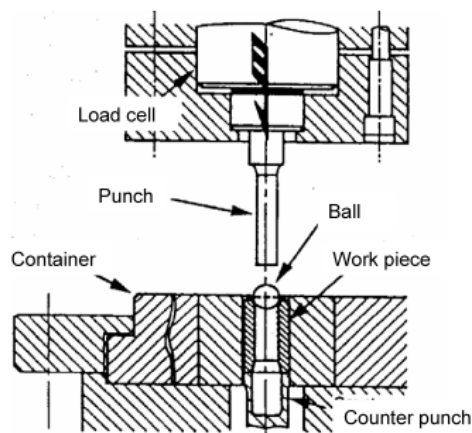


図 38 ボール通し形耐焼付き性評価試法 [31]

3. 板材成形のイノベーション

春日ら [32] は、図 39 に示すように、深絞りにおけるダイス側の潤滑効果を改善するため、ダイス内に潤滑油を閉じ込めて深絞り加工を行う圧力潤滑深絞り法を開発した。この方法では、潤滑油の圧力は潤滑効果以外に、パンチへ素材が押付けられるため、その摩擦力が深絞り荷重を負担する効果が大きくなり、深絞り性が顕著に向上する。この方法は、さらに、中村ら [33] により、対向液圧成形法としてリファインされ、図 40 に示すような大型の金型を用いる深絞り成形において、ダイスなしでパンチだけで成形できる利点を活かした方法として実用化されるようになった。

パンチもダイスも用いない板成形法として、松原 [34] は、図 41 に示すような薄板のインクリメンタルフォーミング法を

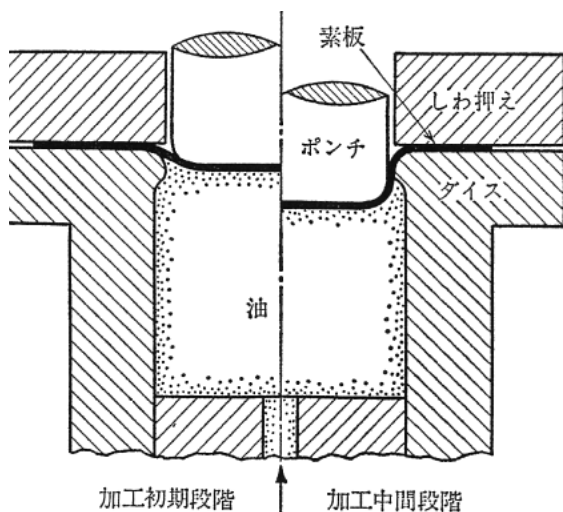


図 39 圧力潤滑深絞り法 [32]

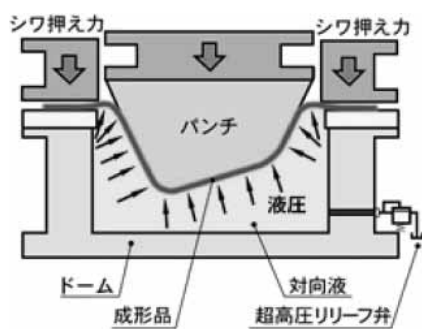


図 40 対向液圧成形法 [33]

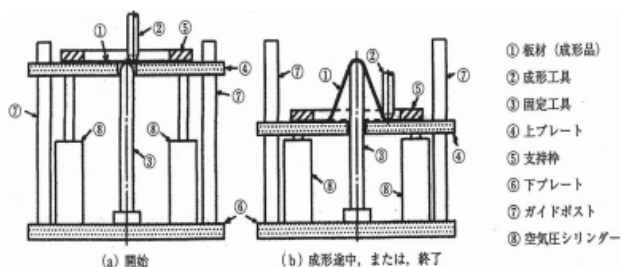


図 41 CNC 制御インクリメンタル成形法 [34]

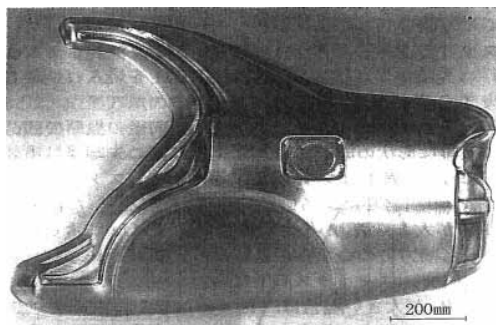


図 42 CNC 制御インクリメンタル成形による自動車クウォーターパネルの製品例

開発した。この方法についても、大型の成形機が開発され、図 42 に示すような自動車用板部品の成形に実用化されている。田中ら [35] は、図 43 に示すような 4 軸逐次張出し装置を開発し、図 44 に示すような純チタン製義歯床の成形法を開発を行っている。

自動車の燃費向上を図るため、車体の軽量化が叫ばれてい

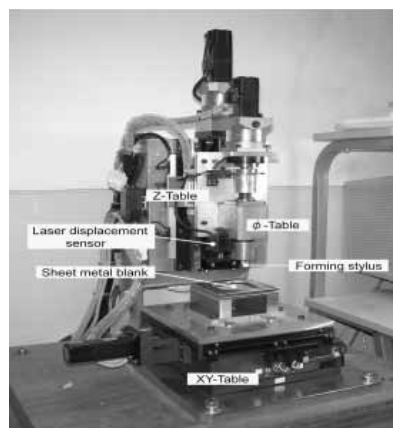
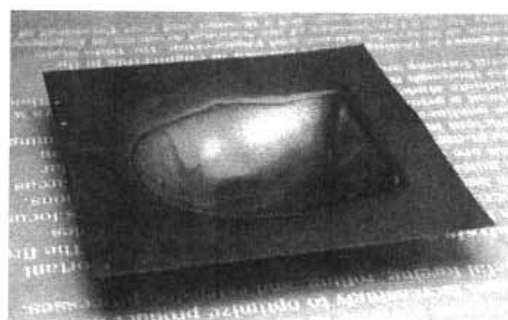


図 43 4 軸逐次張出し装置 [35]



銅合金製工具 (tip radius: $r_f = 0.5\text{mm}$, Blank: $t_0 = 0.2\text{mm}$.)

図 44 インクリメンタル成形による純チタン製義歯床の成形例 [35]

表 1 各部品に要求される特性

部位	主な部品	主要要求特性(○板厚決定要因)					材料強度 (MPa)	板厚 (mm)
		全体剛性	強り剛性	耐打撃性	耐久性能	衝突性能		
		$\propto E \cdot t$	$\propto E \cdot t^3$	$\propto \sigma_y \cdot t^2$	$\propto \sigma_B \cdot t^2$	$\propto \sigma_y \cdot t^2$		
外板	フード、ドア、ラゲージ		○	○		○	~340	0.6~0.9
内板	パネルフロア、ダッシュ	○				○	軟鋼	0.6~1.4
	骨格	○				○	~590	0.8~2.3
	補強	○			○	○	~590	0.8~2.3
足回り	サスペンションアーム	○			○	○	~590	1.4~3.2
その他	バンパーR/F					○	~1180	1.4~1.6
	ドアビーム					○	~1470	1.0~2.0
	ホイール				○		~780	2.6~3.2

る。軽量化技術として、鋼素材に替えて、チタン、アルミニウム、マグネシウム、カーボンファイバー強化樹脂などの軽量素材の使用も試みられているが、日本では、高張力鋼板の使用によって軽量化を図る方法が主流として用いられている。

表 1 は、自動車部品として使用されている高張力鋼板の例であるが、現状では、590Pa 級の高張力鋼板が多用されており、さらにバンパーなどでは 1180MPa 級のものも実用化されている [36]。これらの高張力鋼板には、図 45 に示すように、固溶強化形、析出強化形、二相合金形、変態強化形等が製造されているが、引張強さが高くなるほど、延性が低下するため、割れ等に対する成形性が悪くなる。また、表 2 に示すように、スプリングバック等が大きくなるなど、成形精度が悪くなる傾向にある。そこで、図 46 ~ 49 に示すように、成形性をカバーするための種々の成形技術の開発が行わ

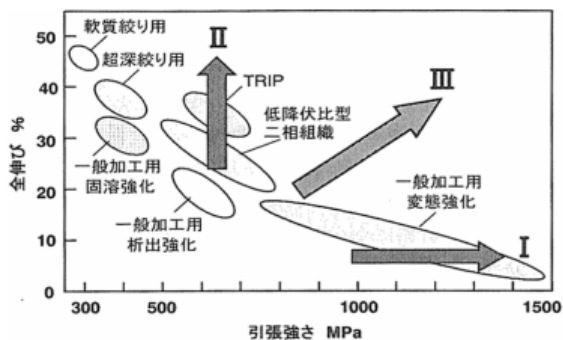


図 45. ハイテン材の方向性

表 2 寸法精度不良の分類

不良現象	フレーム、メンバー類	パネル類(内・外板)
I 角度変化 スグランド バグ スグランド ゴウ	曲げの破綻	Ex, フェンダ, クォーターパネル
II ねじり		Ex, ロッカーパネル
III ねじれ (ひねれ)		Ex, フロントビラ板
IV 縦線そり (面そり)	そり 破綻	そり Ex, フロントフェンダ
V (パンチ痕の) 形状変形不良		Ex, ルーフ

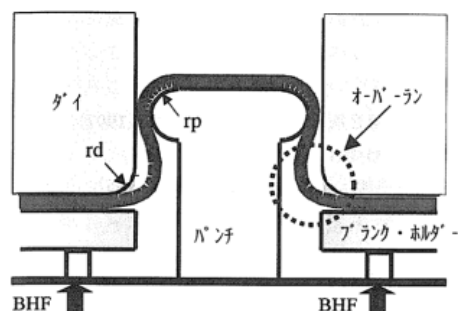


図 48 オーバーラン誘発パンチ技術²²⁾

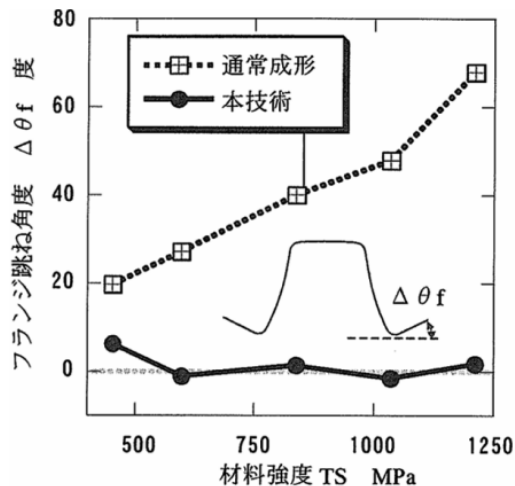


図 49 フランジ跳ね角度に及ぼすオーバーラン誘発パンチ技術の影響²²⁾

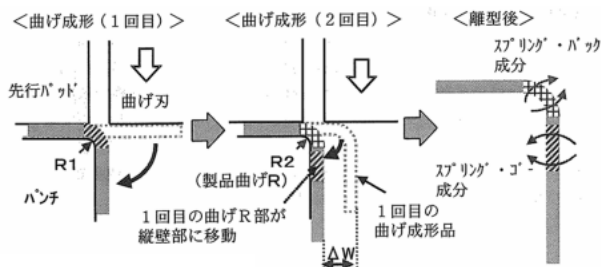


図 46 「2 回曲げ」技術とその効果の考え方

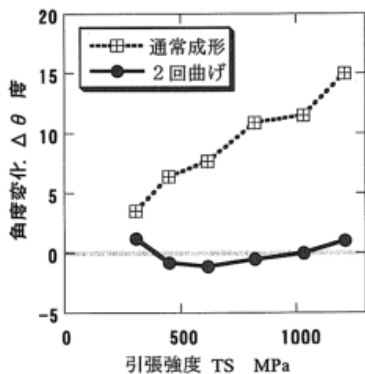


図 47 L 曲げ時の角度変化 ($\Delta \theta$) に及ぼす材料強度および「2 回曲げ」の影響²¹⁾

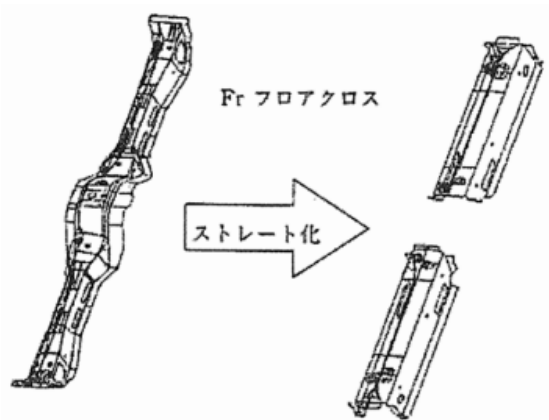


図 50 部品形状のシンプル化

51 に示すように、スプリングバックが生じにくい熱間プレス成形法の開発も行われている [36]。

4. おわりに

本稿では展望できなかったが、塑性加工技術のイノベーションには、板材や棒材等の素材製造技術のイノベーション、すなわち圧延、押出し、引抜き等の技術開発が不可欠である。世界の競争にさらされている自動車等の輸送機製造メーカの厳しいニーズを受けて、これまでも日本の製鉄メーカ等において、素材製造のイノベーションがなされてきたが、今後はグローバルな競争が益々激しくなるため、両者が切磋琢磨して塑性加工技術のイノベーションがさらに進展することを期待したい。

れている [37]。また、図 50 に示すように、部品形状をシンプルな形状に設計変更すること行われる [36]。さらに、図

 : 超ハイテン材
 : 熱間プレス材

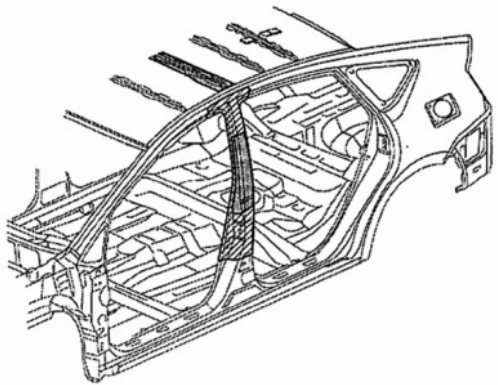


図 51 熱間プレス適応例

参考文献

- [1] Kudo, H.: Manufacture of Net Shape or Near-Net Shape Forgings in Japan, Technical Presentation of 25th ICFG Plenary Meeting, (1992).
- [2] Iwama, T.: Current Trends in Automotive Forging Industry, JSTP Proc. 1st Int. Seminar on Precision Forging, (1997), 9-1-9-7.
- [3] Kudo, H. and Takahashi, A.: Extrusion Technology in the Japanese Automotive Industry, VDI Bericht Nr.810 (1990), 19-35.
- [4] Yoshimura, H. and Wang, C.C.: Manufacturing of Dies for Precision Forging, Proc. 1st JSTP Int. Seminar on Precision Forging, (1997), 15-1 ? 15-7.
- [5] Kondo, K.: Some Reminiscences of the Development of Precision Forging, Advanced Technology of Plasticity 2002 (ed. M. Kiuchi), JSTP, (2002), 11-16.
- [6] Kondo, K., Ikushima, K., Inoshita, H., Ogura, M. and Ono, K.: Net Shape Forging of an External Helical Gear with Boss and Internal Spline, Advanced Technology of Plasticity 2002 (ed. M. Kiuchi), JSTP, (2002), 11-16.
- [7] 小坂田宏造・花見・新井：背圧下での押し出しの変形モード，塑性と加工，41-477 (2000)，1026-1030.
- [8] 日本塑性加工学会：鍛造，日刊工業新聞，(2005)，122.
- [9] 森下弘一：環境に優しい自動車製造における鍛造用潤滑剤の動向，Technical Review of Forging, 87-26(2001)，12-18.
- [10] 石原貞夫・峯功一：板・管材による自動車部品成形の新展開，第216回塑性加工シンポジウムテキスト，(2002)，15-21.
- [11] 平澤勝芳：板鍛造による製品開発事例，プレス技術，44-1(2006)，
- [12] Matsumoto, R. and Osakada, K.: Precision Warm Forging of Magnesium Alloy with Consideration of Material Property, Wire, 54-6 (2004), 20-24.
- [13] 山田信二・佐藤清臣・竹井健一郎：円板増肉スピニングによるニアネットシェイブ精密生産システムの開発，第216回塑性加工シンポジウムテキスト，(2002)，31-44.
- [14] Osakada, K., Shiraishi, M. and Kawasaki, K.: Precision Cold Extrusion with Controlled Elastic Deformation, Wire, 45-4 (1995), 229-232.
- [15] 石田：ダイスの弾性変形を活用したクラウニング付きヘリカルギアの冷間鍛造技術，塑性と加工，44-505(2003)，85-88.
- [16] 中村保：摩擦力を活用した塑性加工，塑性と加工，28-319 (1987)，783-790.
- [17] Osakada, K.: New Methods of Precision Forging, Advanced Technology of Plasticity 1999 (ed. M. Geiger), Vol.2, Springer-Verlag, (1999), 735-740.
- [18] Miyoshi, K.: Current Trends in Free Motion Presses, Proc. 3rd JSTP Int. Seminar on Precision Forging, (2004), 69-74.
- [19] Otsu, M., Yamagata, C. and Osakada, K.: Reduction of Blanking Noise by Controlling Press Motion: Annals of the CIRP, 52-1 (2003), 245-248.
- [20] Ishikawa, T., Yukawa, N., Yoshida, Y., Kim, H. and Tozawa, Y.: Prediction of Dimensional Differences of Product from Tool in Cold Backward Extrusion, Annals of the CIRP, 49-1 (2000), 169-172.
- [21] Wang, Z., Ishikawa, T., Yukawa, A., Kono, N. and Tozawa, Y.: Computer Simulation and Control of Microstructure and Mechanical Properties in Hot Forging, Annals of the CIRP, 48-1 (1999), 187-190.
- [22] Osakada, K., Kawasaki, T., Mori, K., Taniguchi, N.: A Method of Determining Flow Stress under Forming Conditions, Annals of the CIRP, 30-1 (1980), 135-138.
- [23] Osakada, K., Shiraishi, M. and Tokuoka, M.: Measurement of Flow Stress by the Ring Compression Test, JSME Int. J., Ser.1, 34-3 (1991), 312-318.
- [24] 小坂田宏造・白石・国光：棒線材の側面圧縮による変形抵抗の自動計測，日本機械学会論文集，C編，54-504 (1988)，1836-1842.
- [25] Kada, O., Miki, T., Toda, M. and Osakada, K.: Calculation of Isothermal Flow Stress by Combination of FEM and Simple Compression Test, Annals of the CIRP, 47-1 (1998), 185-188.
- [26] 檜村・竹内・小田・川原・尾島・伴野：環境に優しく高性能で単純な潤滑処理が可能な冷間鍛造用潤滑剤の開発，塑性と加工，41-469(2000)，109-114.
- [27] 川辺：熱間鍛造用潤滑剤，鍛造技術，53-18(1993)，13-15.
- [28] 松本良・小坂田宏造：マグネシウム合金のドライ・セミドライ加工，塑性と加工，46-528(2005)，43-47.
- [29] Saiki, H., Ngaile, G., Ruan, L. and Marumo, Y.: A Tribo Testing Method for High Performance Cold Forging Lubricants, 31st ICFG Meeting, Gothenburg (1998).

- [30] Nakamura, T., Bay, N. and Zhang, Z.L.: FEM Simulation of a Friction Testing Based on Combined Forward Conical Can-Backward Straight Can Extrusion, Trans. ASME, J. Tribology, 120 (1998), 16-723.
- [31] 北村憲彦・大森・団野・川村：ボール通し試験による冷間鍛造用潤滑剤の耐焼付き性評価，塑性と加工，34 (1993)，1178-1182.
- [32] 春日保男・野崎：圧力潤滑深絞り法（第1報），日本機械学会論文集，24-146(1958)，720-727.
- [33] 中村和彦・姿晴仁：長方形筒容器の深絞り限界に及ぼす素板形状と対向液圧の効果；塑性と加工，42-491(2001)，1228-1232 .
- [34] 松原茂夫：薄板の逆張出しインクリメンタルフォーミング，塑性と加工，42-489, (2001), 991-995.
- [35] 田中繁一，中村 保，早川邦夫，中村英雄，本村一朗，山田信二，笠間優一：インクリメンタルフォーミング技術の歯科医療への応用（チタン製義歯床の成形），第53回塑性加工連合講演会，浜松，(2002)229-230.
- [36] 川口博史：自動車のハイテン材適用の現状と将来動向，第228回塑性加工シンポジウムテキスト，(2004)，1-6.
- [37] 岩谷二郎：自動車のハイテン材プレス成形技術，第