



E. MURAI

# 鍛造用金型製造技術の過去から未来への進化

村井 映介\*

## 1. はじめに

鍛造用に限らず金型の多くは一品ごとの受注生産となる。金型の寸法もメートル単位のものから数ミリ単位のものまでさまざまである。金型加工は切削加工、研削加工、放電加工が代表的な加工法となり、これらを組合せて加工される。加工方法は金型材料、形状、寸法精度、表面性状、コスト等を考慮して決定される。

近年は加工が難しい金型材料が増えている。さらに金型形状は複雑化が進み、表面性状の高品質化や寸法の高精度化が要求されている。鍛造品の高精度化には金型の高精度化は不可欠であるが、高精度化によるコストの増大は許されない。需要に波がある金型生産ではコストの削減は難しい問題であるが、IT化やCAD (Computer-Aided Design)・CAM (Computer-Aided Manufacturing)・CAE (Computer-Aided Engineering)、加工機械の技術革新による省人化、高速化はコスト削減を可能にした。

今後も工作機械、放電加工機等の金型加工機械、CAD・CAM・CAEの技術革新は進むものと考えられる。さらに3次元造形、電子ビーム、レーザー等の新しい金型加工技術も提案され、研究開発が進められている。ここでは、冷間鍛造を中心に金型製造技術の過去から現在までの発展を述べ、既存加工技術と新しい金型加工技術の未来への可能性について述べる。

## 2. 金型技術の変遷

### 2.1 手作業から機械加工へ

60年代以前の金型加工は熟練技能者による手作業が主流であったが、60年代に入ると自転車、バイク、乗用車の発展とともに冷間鍛造品が急激に増え、機械加工への置き換えが始まった。型彫盤、フライス盤や研削盤、放電加工機などの当時としては最先端の装置も導入された。生産体制も作業者別の形態から工程別分業形態へ移行していった。

70年代に入ると多品種少量生産による製品の多様化に伴う労働力不足が問題となり、加工能率の向上と自動化などの生産性の向上が課題となった。これらの課題に対してNC (Numerical Control) 旋盤、NCフライス盤、マシニングセンタ、ワイヤーカット放電加工機が普及していった。図1<sup>1)</sup>は70年代の工作機械のNC化率を示したグラフであ

るが、70年代後半に旋盤のNC化率が急激に進んだ。

### 2.2 CAD・CAMの導入

80年代に入るとCNC (Computerized Numerical Control)化が進み、CAD・CAMの導入が始まった。最初は大手企業を中心に導入が始まり<sup>2),3)</sup>、価格の低下によって中堅企業でも導入がはじまった<sup>4)</sup>。CAD導入によって、図面はデータ化され、類似形状については作図の効率化が進んだ。CAMではNCプログラムの自動化が進み、90年代に入ると3次元CAD・CAM・CAEの導入によって、製造コストの低減、製造期間の短縮、金型形状の高精度化、複雑化が急速に進んだ。図2<sup>5)</sup>はベベルギアの鍛造解析、図3<sup>5)</sup>はスパイダーの金型解析の事例である。現在では中堅企業でも3次元の鍛造解析が容易にできる。

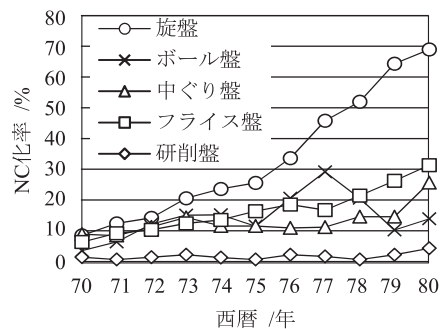


図1 1970年代の工作機械のNC化率<sup>1)</sup>



図2 ベベルギアの鍛造解析<sup>5)</sup>

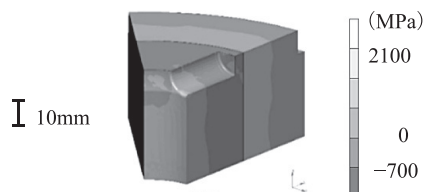


図3 スパイダーの金型解析<sup>5)</sup>

原稿受付 平成 28 年 3 月 3 日

\* (株)ニチダイ 宇治田原工場

〒 610-0201 京都府綴喜郡宇治田原町禪定寺塩谷 14

### 3. 各加工技術の変遷

#### 3.1 放電加工

(1)型彫放電加工 1943年頃にソ連のラザレンコ夫妻によって発明され、国内では1945年頃に鳳誠三郎教授が紹介された<sup>6)</sup>。1960年代には国内で約1500台の放電加工機が稼働し、国内メーカーの放電加工機も多く普及していたが(図4)、標準的サイズのものがほとんどで精密機、小型機、大型機、高速機は輸入に頼っていた<sup>7)</sup>。しかし、これらの機械においても徐々に国内メーカーの加工機が普及していった。

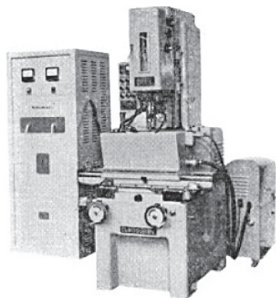
放電加工は切削では効率的な加工が困難な超硬合金など高硬度材料の加工に使用されている。しかし、低加工速度、電極消耗が問題となっていた。近年では電源の開発やNC制御の高精度化、リニアモータ駆動により、これらの問題の解決が図られている。

(2)ワイヤーカット放電加工 ワイヤーカット放電加工は1959年にソ連において加工実験が実施された。1960年代に加工実験と装置化が行われ、1970年代には急速に普及していった<sup>8)</sup>。近年は型彫放電と同様に電源の開発やNC制御の高精度化が図られている。

#### 3.2 工作機械

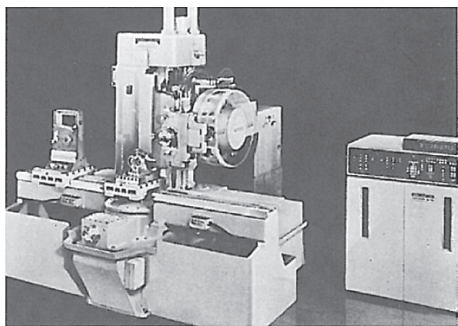
1952年アメリカでNCが開発され、1950年代後半になると国内メーカーでもNC旋盤、NCフライスなどのNC工作機械が開発された。1958年にはアメリカのKearney Tecker社から世界初のマシニングセンタ(4軸)が発表された(図5)<sup>9)</sup>。しかし、NCに不具合が多く、工具交換に失敗することもあったため普及はしなかった。

1960年代に入ると国内でもマシニングセンタの開発が



(DiAx DM 102B : 三菱造船・三菱電機)

図4 国産初期の型彫放電加工機<sup>7)</sup>



(ミルウォーキーマチック MODEL II)

図5 Kearney Tecker社の世界初4軸マシニングセンタ<sup>9)</sup>

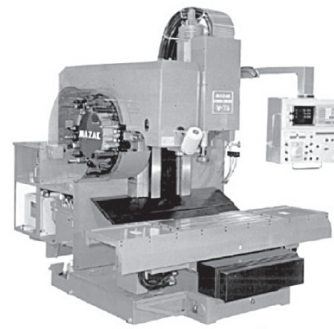


図6 1976年に国内メーカーにより発表されたマシニングセンタ<sup>9)</sup>

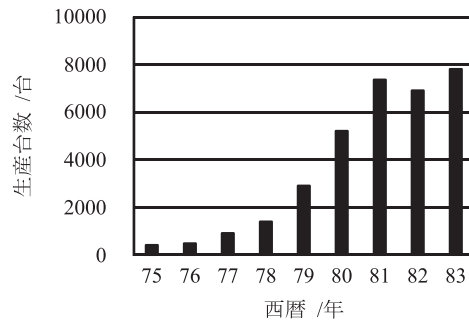


図7 国内でのマシニングセンタ生産台数<sup>9)</sup>

始まった。1968年には5軸のマシニングセンタが商品化されたが、制御軸の運動方向反転時に加工面にキズ、段差、溝などが残る等の問題で、金型加工には積極的に使用されなかった<sup>9)</sup>。1970年代にはNC装置は計算回路や記憶回路をコンピューターに置き換えられCNCとなり、1976年には国内メーカーによりNCフライスに自動工具交換装置(ATC)をつけたマシニングセンタ(図6<sup>9)</sup>)が発売された。この機械は低価格でNCやATCの信頼性が高かったことから多数生産され(図7<sup>9)</sup>)、金型加工にも使用された<sup>9)</sup>。

1990年代に入るとリニアモータ駆動の工作機械が登場し、2000年初め頃まで多くの機種が発売された。当初は「高速、高加速」が特徴とされてきたが、ボールねじの背リード化などにより回転型モーターにおいても高速、高加速への対応が進んだため、近年は「高精度」「高速運動」が特徴とされている<sup>10)</sup>。リニアモータ駆動は一時的なブームがあったものの、切削代によってはボールねじ式よりも精度が低下するなどの問題もある。

#### 3.3 切削工具

切削工具に使用されている材料は主に超硬、ダイヤモンド、cBNである。超硬工具は1925年頃にドイツで販売されたのが始まりで国内では1930年頃に販売がはじまり、鍛造金型の切削工具として現在でも使用されている。

1970年代にはアメリカのGE社が世界初のPCD(焼結ダイヤモンド)とcBNを開発した<sup>11)</sup>。PCD工具は韌性が高く衝撃に強いが、結合材が強度、耐摩耗性に影響を及ぼしている。この問題に対して、結合材を使用しないナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)が開発されている<sup>12)</sup>。cBN工具は鍛造金型の切削工具として広く使用されているが、PCDやNPDは鍛造用金型加工ではあまり普及はしていない。

### 3. 4 表面処理

硬質膜被覆は1970年代から1980年代にかけて実用化が進んだ。1960年にドイツでCVD (Chemical Vapor Deposition) によるTiC皮膜に関する報告があり<sup>13)</sup>、その後1970年頃に国内でも販売が始まった<sup>14)</sup>。その他、国内ではTRD (Thermo-Reactive Diffusion and Deposition) が開発され<sup>15)</sup>、PVD (Physical Vapor Deposition) 処理に関しては1972年に最初の報告がされている。鍛造用金型への適用は1970年代から1980年代にかけて進み、この3つの方法が主流の表面処理技術となった。しかし、CVDは高温での処理となるため、母材の変形が発生しやすく、PVDは低温処理で母材の変形を抑えられるが、処理膜の密着性が低いという問題があった。1986年に低温で処理できるプラズマCVD法が開発され、密着性、緻密性に優れた皮膜処理が可能となった<sup>16)</sup>。

2000年代にはDLC (Diamond-like Carbon) の性能評価に関する基礎研究も行われ、テーパカップ試験<sup>17)</sup>やマグネシウムのテーパ付きプラグ通し試験<sup>18)</sup>が行われている。また、密着性の比較的高いDLC-Si<sup>19)</sup>のボール通し試験<sup>20)</sup>も行われ、低摩擦特性や焼付き防止への効果が示されている。

熱間鍛造では表層部の硬化と断熱と加工発熱を抑える目的で窒化処理が施される。窒化処理は1923年に開発された表面硬化処理である<sup>21)</sup>。従来、熱間鍛造用金型にはガス軟窒化処理が施されてきたが、最近ではガス浸硫窒化が実用化され、寿命が2倍になった事例も報告されている<sup>22)</sup>。

## 4. 現状での生産性向上と品質の安定化事例

### 4. 1 放電加工から直彫りへの加工転換

放電加工では、個々の金型形状・寸法に合わせた電極を製作する必要があるが、直彫りに加工転換できれば大量の電極製作と管理が不要となる。特に試作型で有効であり、形状が変更となった場合はプログラム変更のみで加工が可能となる。また、放電硬化層がないため、ラップ仕上げ加工の削減と品質の安定化に有効である。近年は超硬、高硬度材の直彫り加工に関する事例が多く報告されている<sup>23), 24)</sup>。

図8<sup>25)</sup>は5軸加工機による加工事例を示している。(a)は

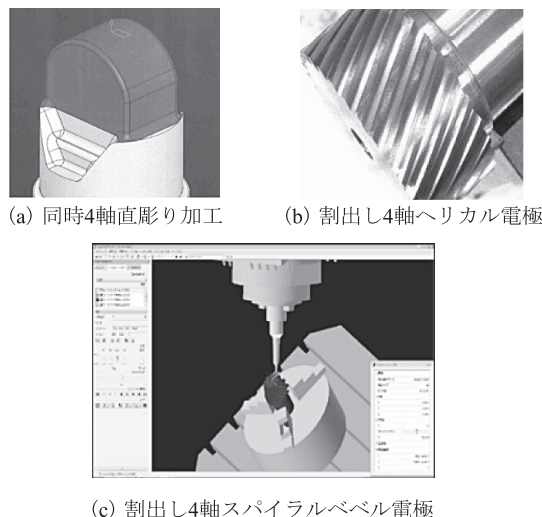


図8 5軸加工機による加工事例<sup>25)</sup>

現状の放電、ワイヤ、R手加工、ラップ作業を同時4軸の一体加工に転換した事例である。(b)は現状の研削から割出し4軸加工に加工転換した事例である。(c)は歯切り加工を割出し4軸加工に加工転換した事例である。(a)では手作業の削減、品質の安定につながっている。(b)と(c)では型補正が可能となった。

図9<sup>25)</sup>は放電後の仕上げ加工で使用したダイヤモンド電着工具を示している。図9(a)は3軸加工機により中仕上げ、最終仕上げともにダイヤモンド電着工具を使用した場合であり、先端部に早期に剥離が発生している。図9(b)は中仕上げにダイヤモンド電着工具、最終仕上げにPCD工具を使用した場合である。電着工具は先端の早期剥離を防止するために形状を変更したもので、剥離を完全に防止することはできなかったが、改善がみられる。一方でPCD工具では欠損等の問題は発生していない。図10<sup>25)</sup>は電着工具先端の剥離の原因となった工具中心の周速0を同時4軸加工により解決した事例である。

### 4. 2 放電加工の標準化と自動化

超硬金型の放電加工では、同じ寸法の電極で数回の加工が必要になる場合がある。また、形状別に加工条件を微調整する場合があります。単純な形状(丸形状・六角形状など)においても加工条件に対する多くの知識が必要である。放電CAMを導入することによって、加工に対する知識がなくても、加工の段取りをすることができ、人為的なミスを防ぐとともに作業者の負担を大幅に軽減できる<sup>25)</sup>。

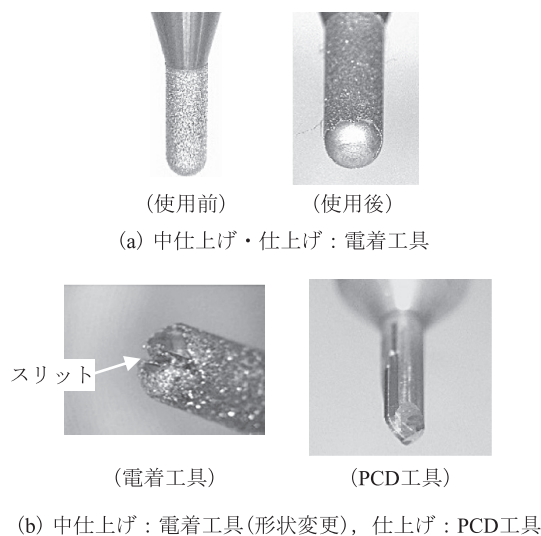


図9 超硬直彫り工具<sup>25)</sup>

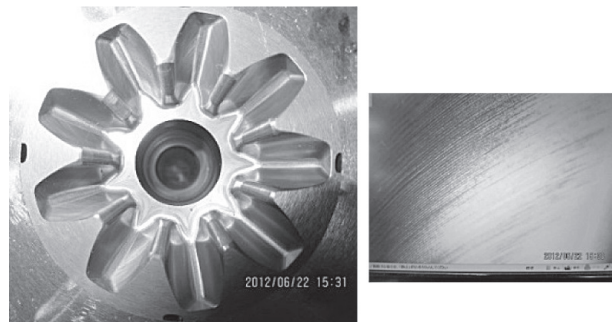


図10 5軸加工機による超硬直彫り事例<sup>25)</sup>

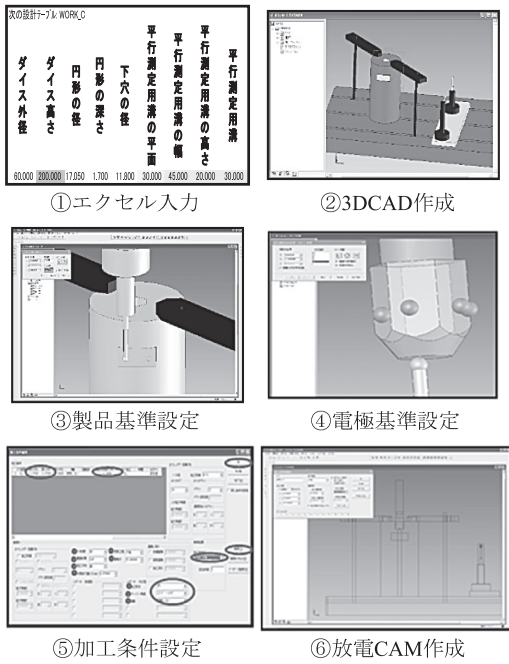


図 11 放電 CAM システム<sup>25)</sup>

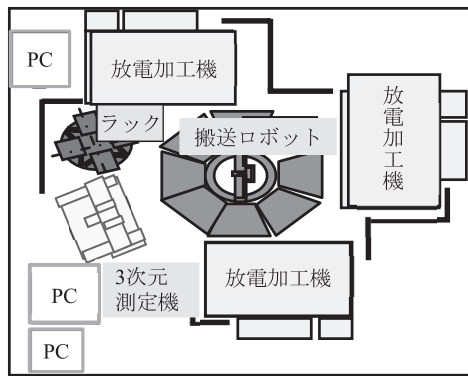


図 12 放電加工ロボットシステム<sup>25)</sup>

図 11 は放電 CAM の一例である。この CAM は電極のダイスや電極の情報等を入力すると 3 次元データが作成できるもので、ワークの位置出しと芯出しを 3 次元モデル上で行い、加工条件を入力すると NC プログラムが作成される。

#### 4.3 放電加工搬送ロボット

近年はロボットを利用して放電加工機の稼働率を向上させる試みも行われている<sup>25), 26)</sup>。図 12<sup>25)</sup> は自動搬送ロボットを利用した放電ロボットシステムの 1 例である。このシステムは放電加工機 3 台・3 次元測定機 (基準測定用)・搬送用ロボット・製品パレット 15 枚・電極ホルダー 64 個で構成されており、加工後に誤差のある場合には 3 次元測定機で誤差を検知し、再加工することができる。このシステムを導入することにより放電加工機の稼働率が従来の 60% から 80% まで向上できる<sup>25)</sup>。

### 5. 金型製造技術の未来

#### 5.1 既存技術の進歩

放電加工、直彫り加工等は加工原理が大幅に変わることはないものの、放電加工機、工作機械の高速化、高精度化

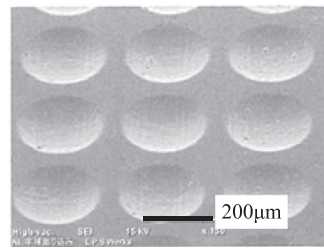


図 13 レーザーで加工された金型表面のディンプル<sup>30)</sup>

は今後も進むと考えられる。工具について NPD のような新しい工具材料が開発されているが、従来、使用していた工具と比較すると価格が約 10 ~ 20 倍にもなり、コストの問題から使用できないのが現状である。PCD、NPD の低価格化が実現できれば、鍛造金型の加工に使用される可能性は十分にある。

表面処理については 2000 年代に DLC、DLC-Si の基礎研究が実施され、低摩擦特性や焼付き防止への効果が示された。しかし、現状では膜の密着性が不足しているため、鍛造金型には適用されていない。膜の密着性が改善されれば、鍛造金型への適用は進むと考えられる。

近年は金型表面に微小凹凸を形成することにより、潤滑性能、鍛造品の表面性状を向上させる基礎研究が行われ、押し出し加工における表面平滑化<sup>27)</sup>、超硬金型を用いたリング圧縮試験により潤滑特性が報告されている<sup>28)</sup>。ボール通し試験の報告もあり<sup>29)</sup>、効果が確認できれば、鍛造金型に適用される可能性は十分ある。表面の微小な凹凸を形成するための加工方法としては機械加工、ショットピーニング、レーザー加工があげられる。特にレーザー加工は、マクロオーダーからフェムト秒レーザーでサブミクロンオーダーの凹凸を形成することが可能であり、有効な加工方法となる可能性はある (図 13<sup>30)</sup>)。

#### 5.2 新しい金型加工技術の展望

(1)電子ビーム照射 金型のラッピングは多くが手作業で行われている。金型は複雑形状であるために、自動化が困難な加工である。しかし、2000 年に入り電子ビーム照射により、表面を鏡面化あるいは改質をする技術が開発されている。この方法は 1 回の照射時間が 2 ~ 3 μm の大面積電子ビームを 0.2 Hz で数回照射することによって金属表面を溶融・蒸発除去し、表面を鏡面化あるいは改質をするものである (図 14<sup>31)</sup>)。

熱間工具鋼に照射した後に熱疲労試験を行った事例では、

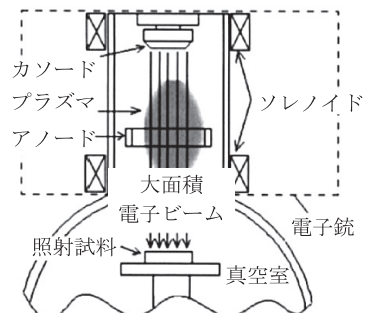


図 14 電子ビーム装置概要<sup>31)</sup>

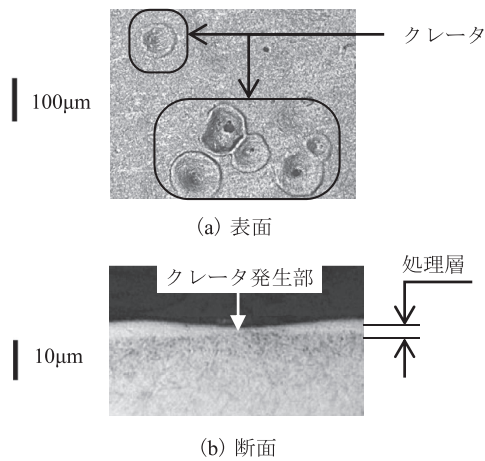


図 15 電子ビームにおけるクレータの発生

照射直後の引張残留応力が、サイクル数増加に伴い減少し、クラックも減少する結果が報告されている<sup>32)</sup>。

超硬に照射した事例も報告されており、平滑化が可能であることが示され、また超硬のバインダー成分である Co が凝集し、表面状態が変化することも報告されている<sup>33)</sup>。

電子ビーム照射は形状変化<sup>34)</sup>やクレータ発生(図 15)<sup>35)</sup>の問題も示されており、課題は多い。しかし、これらの問題が解決されれば、金型表面のラッピングに利用できる可能性は十分あると考えられる。

(2) **3次元造形** 金属の3次元造形は1992年に米国で商品化され、国内でも1994年に製品化された。これらの造形方法はSLS(Selective Laser Sintering)と呼ばれる技術で金属粉末の造形も可能であったが、粒子表面にコーティングされた樹脂で結合する方法であった。金属を焼結する方法は、SLM(Selective Laser Melting)と呼ばれ、ベルギーの鍛造用金型の成形事例が紹介されている<sup>36)</sup>。また、このSLMと高速切削を組合せた複合加工機が製品化されており<sup>37), 38)</sup>、プラスチック射出成形用金型への適用事例が報告されている。

SLMが開発された頃はレーザーのパワー不足等の問題から成形密度や表面性状の確保に問題があったが、ファイバーレーザーの登場で成形密度や成形速度が向上した。

鍛造用金型に適用して実際に使用された例はないが、今後、試作用金型への適用等で普及する可能性は十分あると考えられる。

## 6. おわりに

鍛造品形状の複雑化、高精度化への要求は今後も高くなることは容易に予想できる。それにともない、金型の高品質化への要求も当然高くなる。金型材料についても難加工材が増え、金型製造技術の高度化が必要となる。幸いにも工作機械、放電加工機、表面処理技術等の研究開発が進められている。

これまでに鍛造金型製造に積極的に使用されなかった3次元造形、電子ビーム、レーザー等の研究開発も進められており、近い将来に鍛造金型の製造に利用される可能性は十分にある。既存の技術とこれらの新しい技術が融合することによって、新しい金型製造技術が生まれる可能性も十分にある。

## 参考文献

- 高村正一：精密機械，**50-1** (1984)，97-99.
- 後藤玲嗣：塑性と加工，**26-297** (1985)，1008-1015.
- 牧野勉・大山浩康・児島隆徳：電気製鋼，**59-3** (1988)，196-203.
- 田中善昭：塑性と加工，**26-297** (1985)，1031-1034.
- 中山省二：塑性と加工，**57-661** (2016)，100-104.
- 倉藤尚雄：精密機械，**29-10** (1963)，683-684.
- 倉藤尚雄：精密機械，**29-10** (1963)，773-785.
- 木下夏夫：精密機械，**44-9** (1978)，1157-1162.
- 高山直士：大阪大学博士論文，(2011).
- 内田裕之・曾我部正豊：精密工学会誌，**75-2** (2009)，242-245.
- 鴻野雄一郎：精密工学会誌，**61-6** (1995)，754-758.
- 角谷均・原野佳津子・佐藤武：精密工学会誌，**78-2** (2012)，108-111.
- 土屋能成：塑性と加工，**56-650** (2015)，163-164.
- 平原民雄・高野正：塑性と加工，**19-204** (1978)，82-87.
- 新井透：塑性と加工，**19-204** (1978)，88-93.
- 河田一喜：塑性と加工，**45-518** (2004)，153-157.
- 伊藤樹一・堂田邦明・吉田広明・五十川幸宏：塑性と加工，**49-566** (2008)，211-215.
- 松本良・河島宏明・小坂田宏造：塑性と加工，**48-553** (2007)，156-160.
- 太刀川英男・森広行・中西和之・長谷川英雄・舟木義行：まてりあ，**44-3** (2005)，245-247.
- 北村憲彦・山本隆弘・土屋能成・堂田邦明：塑性と加工，**50-582** (2009)，655-659.
- 八代浩二：塑性と加工，**50-582** (2009)，605-609.
- 野村博郎：型技術，**30-12** (2015)，74-75.
- 福井雅彦：型技術，**28-6** (2013)，18-23.
- 吉武理人：型技術，**28-6** (2013)，28-31.
- 村井映介：塑性と加工，**55-644** (2014)，820-824.
- 安齋正博：塑性と加工，**53-612** (2012)，5-9.
- 上谷俊平・中西賢二・Syahrullail, S.：軽金属，**58-3** (2008)，111-116.
- 松本良・甲斐信宏・富田雄人・梶岡彰・森章司・宇都宮裕：塑性と加工，**56-656** (2015)，793-797.
- 那波正規・北村憲彦：第63回塑性加工連合講演会講演論文集，(2012)，257-258.
- 井ノ原忠彦：型技術，**30-6** (2015)，65-69.
- 宇野義幸・岡田晃：精密工学会誌，**71-5** (2005)，553-556.
- 薩田寿隆：神奈川県産業技術センター報告，**15** (2009)，13-18.
- 北田良二・岡田晃・宇野義幸・郭洪閣：精密工学会誌，**76-12** (2010)，1393-1397.
- 岡田晃・宇野義幸・仁科圭太・植村賢介・Purwadi, R・佐野定男・虞戦波：精密工学会誌，**71-11** (2005)，1399-1403.
- 岡田晃・大地慶明・近藤温・宇野義幸・佐野定男・植村賢介：精密工学会誌，**74-4** (2008)，385-389.
- 阿部史枝・小坂田宏造：塑性と加工，**42-484** (2001)，393-396.
- 中村良光・吉田徳雄：精密工学会誌，**69-9** (2003)，1242-1245.
- 漆崎幸憲：塑性と加工，**56-649** (2015)，102-106.