

解説

小特集号 激変するモノづくり環境に対応する鍛造技術の最新動向



T. ISHIKAWA

次世代鍛造技術の動向

Next Generation Forging Technologies

石川 孝司*

1. はじめに

鍛造産業は自動車および産業機械などの基礎部品を供給する重要な役割を担い、大量生産には必須の成形プロセスとして我が国産業の国際競争力を支えてきた^{1),2)}。図1に鍛造技術の変遷を簡単にキーワードで整理した。1970年代~80年代は、高度経済成長と高品質化への対応が進められた時代で、自動車メーカーは、これまで機械加工によって生産していた部品を大量生産に有利な鍛造品に置き換えていくため、設備の近代化、加工精度の向上を急いだ。80年代に入ると多種少量生産と公害対策のために、鍛造品の高精度・高機能化・軽量化等への対応を進めた。その後の平成の時代になると、ニーズの多様化・高度化とグローバル化に対応すべく、鍛造業界も自動車メーカーの世界同時生産に対応するため、海外でも日本と同等の鍛造品を生産するための柔軟な設備、小型少量生産設備が求められるようになった。現在、「CASE」(コネクテッド、自動運転、シェアリング、電動化の頭文字をとった造語)は、自動車業界に100年に1度の大変革をもたらすといわれ、車の造り

方も大きく変化していくことが話題になっている。ここでは今までの技術発展をみながら今後の鍛造技術について考えてみたい。

2. 軽量化技術

エンジン車では燃費向上のため、これから増加が予想されるEV車では航続距離の延長のために車体を構成する各部品の軽量化は今後も永続的に続く重要なテーマであり、軽合金や樹脂、CFRPの使用、高強度化による部品のスリム化、中空化などの方法がとられている。

2.1 アルミニウム鍛造

図2³⁾はアルミニウム合金製ハイマウントナックルの鍛造事例で、丸棒素材をロール鍛造により荒地を成形し、2工程の鍛造とバリ抜きで仕上げている。このプロセスではプレス、熱処理炉も新たに開発し、後工程の機械加工工程と直結して同じ工場内に配置させた(一個流し)。タクトタイムは40秒と従来の鍛造からするとかなり遅く、機械加工のスピードに合わせたプロセスで、鍛造の弱点であるバッチ処理を解消できる革新的なラインとなっており、今

年代	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
	昭和							平成							
自動車	トラック中心の少量生産時代		中量生産時代 乗用車へ中心移行		大量生産、基幹産業としての役割			環境問題・多種少量生産 国際化・コスト競争力の激化							
技術課題	基礎技術の確立		量産技術の確立		設備の近代化・加工精度の向上		高精度・高機能化・軽量化への対応		グローバル化・新機構への対応とスピードアップ ネットシェイプ、スリム、コンパクト				高付加価値化 ネットプロパティ 見える化・知能化		
冷鍛	冷間鍛造機導入 (ヘッダー、マイプレス)		1,000 ton冷鍛トランスファープレス		超硬合金型			長軸物の高精度スプライン成形 (高精度油圧リンクプレス)				ワンショット成形			
			歯形鍛造加工法の開発		閉塞鍛造			分注鍛造		中空鍛造		板鍛造			
			大型部品の冷間鍛造化		アルミニウム冷間鍛造			軟質冷間鍛造用鋼		ヘリカルギアの量産化					
			アルミニウム冷間鍛造 TD, PVD処理		ファイブブランピング			逐次成形の実用化		サーボプレス利用拡大					
					ブラズマCVD処理			DCL膜		一液潤滑剤		医療関連製品			
温熱鍛造	フリーハンマードロップハンマーによる鍛造		コンロッドの自動鍛造 熱間閉塞鍛造の開発		非超硬鋼			3Dシミュレーション 加工熱処理				制御鍛造			
	型鍛造プレス		型鍛造プレス		ステアリングナックルの自動鍛造			高歩留、高速化した一貫生産ラインの革新							
	アブセッタによるワンヒート鍛造		アブセッタの増強 自動アブセッタ導入		ホットフォーマーによるギア ブランクの高速生産			大型ホットフォーマーによる熱間押し加工 異形大物部品の自動鍛造							
					温間歯形鍛造			熱間クロスロール鍛造		大物歯形部品の熱冷複合成形					
					等速ジョイントの高精度温間鍛造技術の開発			クイックダイチェンジ				50,000 ton鍛造プレス			
	粉炭炉		高周波加熱(MG)		高周波加熱機の効率化(サイリスタ)			アルミニウムサスペンションの鍛造				白色潤滑剤			

図1 鍛造技術の変遷

原稿受付 2019年12月10日

* 中部大学 工学部 機械工学科 〒478-8501 春日井市松本町 1200

E-mail: tak_ishikawa@isc.chubu.ac.jp

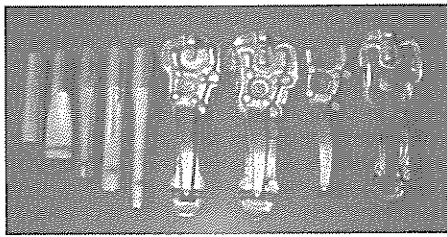


図2 アルミニウム合金製ハイマウントナックル³⁾

後の鍛造工場の一つの方向性を示している。この一貫ラインは、材料費は高価でも、鋼の鍛造と比較して低い鍛造温度、低い成形荷重などの有利さを活かして、設備の小型化、省スペース、省投資による製造原価低減を達成したもので、グローバル化にも対応できるものと報告されている。

2.2 中空鍛造

軸物部材の軸中心部の中空化は、部材軽量化のために有効で、特に高速で運動する部材への適用は効果が大きくカムシャフトやラックバーの中空部品が実用化されている。図3¹⁾は中空エンジンバルブを示すが、単に軸部を中空にただけでなく、円柱状の金属材料を冷間鍛造の連続加工で仕上げ、従来の機械加工では困難だった形状に傘部も中空化することで15%の軽量化を図っている。鍛造による部品の中空化は効率の点から有利であり、今後適用部品が増加していくであろう。

2.3 異材固相接合

適材適所に材料を配置して接合することで軽量化は容易に実現できるため、接合技術の開発は重要である。図4¹⁾はアルミニウム合金と高張力鋼のポンチ押込みによる鍛造スポット接合を紹介したもので、塑性変形による表面積拡大と高い面圧により容易に固相接合が可能である。摩擦攪拌接合(FSW)、メカニカルクリンチング、塑性締結などはアーク溶接やレーザー溶接が不可能な異種材料の接合にこれからも重要である。

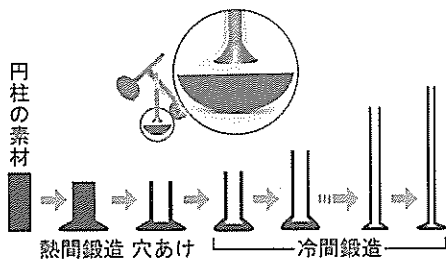


図3 傘中空エンジンバルブ¹⁾

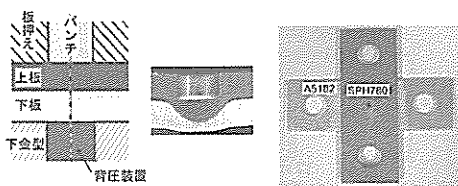


図4 スポット鍛造接合法¹⁾

3. 高精度化技術

日本では各種の歯車鍛造方法が開発されるなど、精密鍛造法については日本の開発が世界に先行していると言える。ベベルギアの閉塞鍛造はすでに多くの実績があり、金型駆動法など可能性のある新しい加工法も日本から提案されている。

3.1 ヘリカルギアの量産

従来の型鍛造では、型内への材料の完全充填は不可能であるが、「捨て軸の原理」と「逃がし穴の原理」をうまく使った分流鍛造法⁵⁾により荷重増加を抑制した状態で平歯車やヘリカルギアなどの鍛造を可能にした。図5⁶⁾はヘリカルギアに対しての実用化の1例である。まず、リング素材をマンドレルで拘束し、インサートパンチとアウトーパーンチで同時据込みを開始する。このとき、インサートパンチは背圧制御で成形する。このままでは面圧が増加するだけで刃先まで材料が充填されないため、インサートパンチの背圧をゼロとして見かけ上の材料逃がし部をつくり分流成形により充填を完了する。

3.2 板鍛造

板鍛造は、図6⁷⁾に示すように板成形技術に冷間鍛造技術を組み合わせる工法で、成形限界の向上と高精度化により新しい技術に展開可能である。減肉には高荷重が必要であり、増肉には座屈を防止するなどの工夫が必要で簡単ではないが、外国との差別化が可能な今後に期待がかかる成形法である。図7²⁾は板鍛造製品の例で、工法転換により板鍛造化できれば精度、強度、工程数、生産性、後加工の削減等の面で優位性が発揮でき、大幅なコストダウンが可

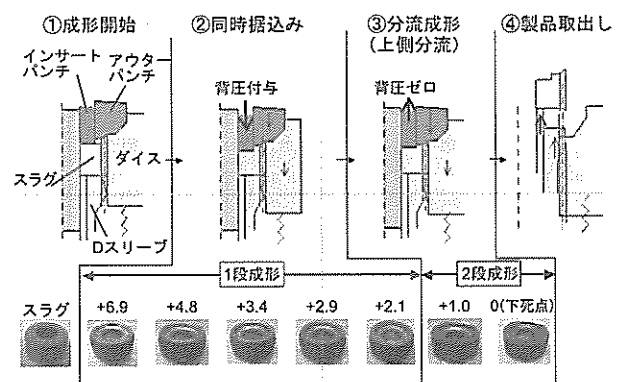


図5 ヘリカルギア鍛造工程図⁶⁾

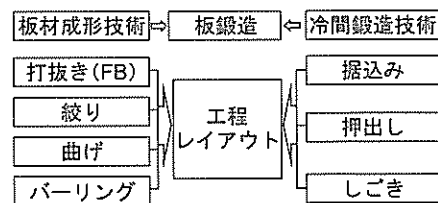


図6 板鍛造の位置づけ⁷⁾

注1) 三菱重工: https://www.mhi.co.jp/products/detail/hollow_head_engine_valve.html.



図7 板鍛造製品例¹²⁾

能になる。

4. 高機能化・高品質化技術

4.1 ネットプロパティ鍛造

図8⁸⁾は、強度傾斜製品の例を示したもので、このように必要などころに必要な特性を造り込む技術を、ネットプロパティ鍛造技術と呼んでいる。軸物の表面を強化する部品、ハブのような内部を局部的に強化する部品、コンロッドのように一部を強化する部品など考えられる。このような部品を鍛造するための工程設計には材質予測システムが必要である。バナジウム (V) 添加非調質鋼で炭化バナジウム (VC) の析出を制御することによる強度傾斜化の考え方は、高強度を付与したい場所は高温まで加熱してVを十分オーステナイト中に固溶させ、加工後の冷却過程において微細なVCとして析出させる。非強化部は低温加熱としてVのオーステナイト中への固溶量を減少させることにより、VCの析出量を抑える (図9⁹⁾)。図10⁹⁾は温度傾斜を付与したピレットを押し出した時の強度の予測結果を実験と比較したもので、良く一致している。非定常かつ不均一な過程である熱間鍛造の組織・材料特性予測を、変形・温度解析と連成して加熱・加工・冷却の各プロセスを通して行うことが可能である。このプロセスの適用先は多くある。

4.2 サーボプレスの利用拡大

サーボプレスは日本で開発されたが、鍛造への応用例は

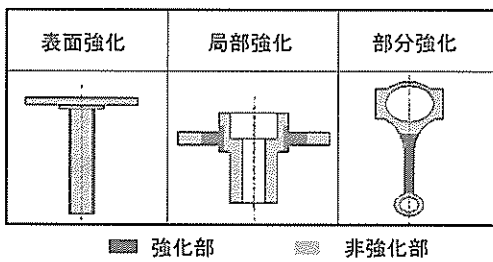


図8 強度傾斜部品の例⁸⁾

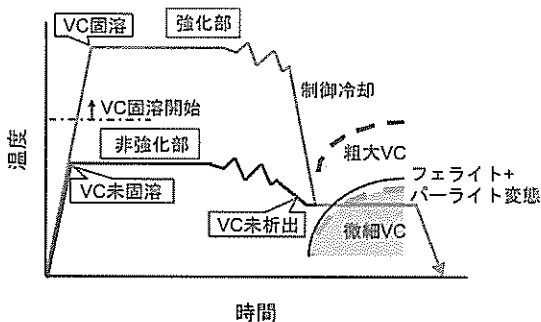


図9 VC析出制御による強度の傾斜化⁹⁾

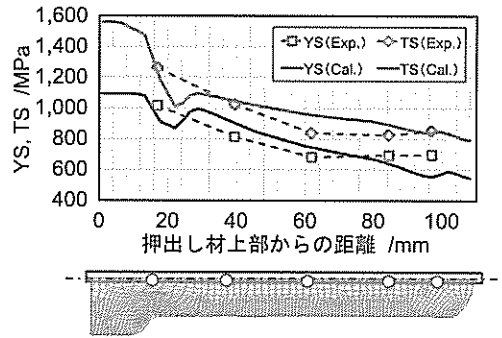
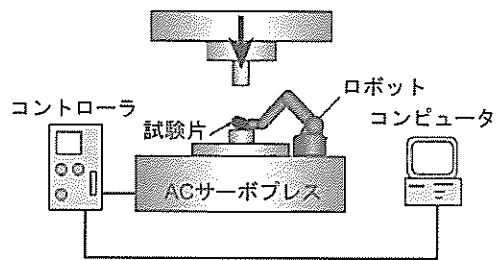


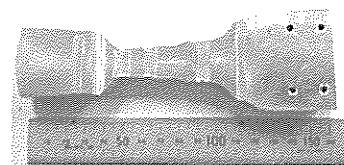
図10 実測値との比較 (引張強度: TS, 降伏強度: YS)⁹⁾

多いとはいえない。ラムの自由な動きは新しい加工法に適しているので、サーボプレスを用いた新加工法開発の可能性は大きい^{10), 11)}。また、サーボプレスはスライドモーションを自由に設定できると同時に外部装置との同期が容易である。コンロッドの荒地製品をアームロボットとの同期逐次鍛造で試みた例を図11¹²⁾に示す。逐次鍛造は、高価な金型を省略できるとともに従来の手法では不可能な成形を可能とするフレキシブルな加工技術である。

付加価値増大の重要な鍵は、鍛造の仕上げがせいぜい研削仕上げで済むような鍛造品を作ること、これはネットシェイプ鍛造と呼ばれ、今日の努力目標になっている。鍛造部品の高精度化は、常に追求されてきた永遠のテーマである。特に冷間鍛造における従来の50数ミクロンの精度を10ミクロン以下にもっていくには、金型やプレスの弾性変形、被加工材の塑性発熱、弾性回復などを高精度に予測し、寸法制御を行う必要があるが、ここでもサーボプレスの活用が期待できる。図12¹¹⁾は、冷間後方押し鍛造でカップ成形するとき、その外径精度に及ぼすプレスのスライドモーションの影響を実験 (Exp.) と解析 (Cal.) で調べたもので、パルスモーションにより高さ方向の精度の良い製品の鍛造が可能であることを示した。



(a) システム概要



(b) コンロッド荒地製品

図11 ロボット同期逐次鍛造¹²⁾

注2) 寺方工作所: <https://www.terakata.jp/publics/index/18/>

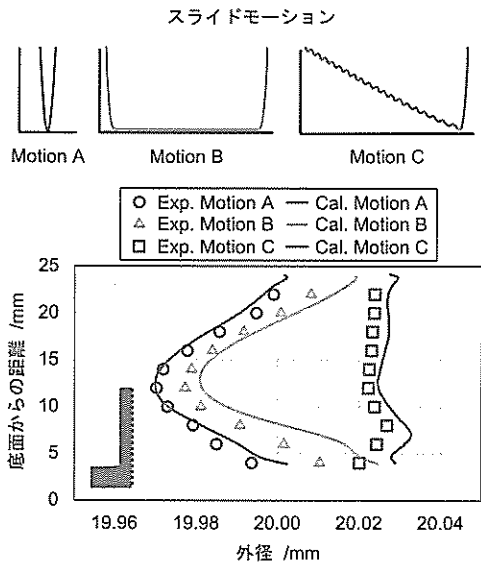


図12 鍛造カップ外径の分布¹¹⁾

4.3 多軸油圧サーボプレスによるワンショット鍛造

全ストロークどの位置でも最大荷重を発生させることができる油圧プレスの特徴を活かして、スライド側、ボルス側側に複数のシリンダを装備することにより、ワンストローク内で種々の成形を順次行うことができる複動油圧サーボプレスが開発され、その利用が展開されている¹³⁾。6軸油圧プレスの構造を図13に示す。各シリンダの油圧制御には油圧サーボバルブを採用することで各軸±0.005～±0.050mmの繰り返し位置決め精度を可能としている。このプレスにより、製品のワンショット化(図14)、設備の小型化、複合ラインによるリードタイムの短縮、設備費の削減、金型寿命の延命化などが実現でき今後の展開が期待

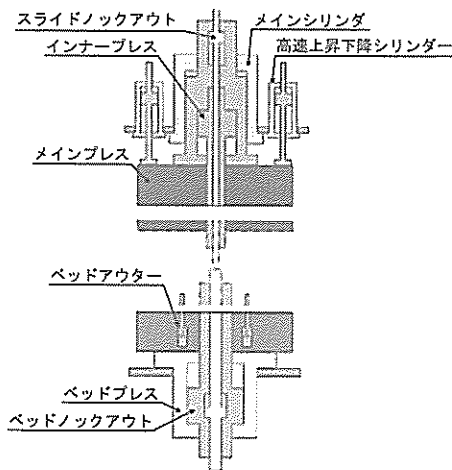


図13 複動油圧サーボプレス¹³⁾

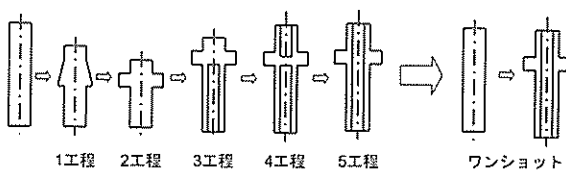


図14 鍛造で考えられるワンショット化¹³⁾

できる。

4.4 航空機用大型鍛造

日本エアロフォージ(J-Forge)は国内で初めてとなる能力5万トン級の最新鋭大型鍛造プレスを導入し、世界で需要拡大が見込まれる航空機向けを中心に大型鍛造品の製造を開始した。図15¹⁴⁾はそのプレスの外観で、プレス加圧速度が可変、また優れたバランス制御が可能で、チタン・ニッケル・高合金等の大型鍛造品の国内での安定生産が可能となる。材質予測技術を適用して今後の大型部品の製造に生かしたい。

4.5 医療分野への展開

現在、インプラントは、約9割が欧米からの輸入品であるため、欧米人とは骨格的に異なる日本人にとって適合しているとはいえない形状がそのまま使用されている。また輸入品であるため価格も非常に高価である。日本国内において加工しようという動きはあるが、生体適合性が高いチタンは、非常に加工がしにくい材料であるため現在は切削加工で作られており、材料歩留まり向上・コスト削減の観点から鍛造加工方法の確立が急務となっている。特に取組み実績やデータがほとんどないチタンの冷間鍛造技術を医療分野においても適応すべく、早期の取り組みが望まれている。図16¹⁴⁾はサポイン事業で実施されたインプラントの冷間鍛造品である。今後この分野で冷間鍛造への期待は大きい。

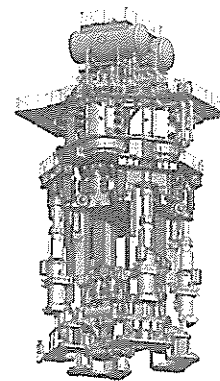


図15 5万トン油圧プレス¹⁴⁾

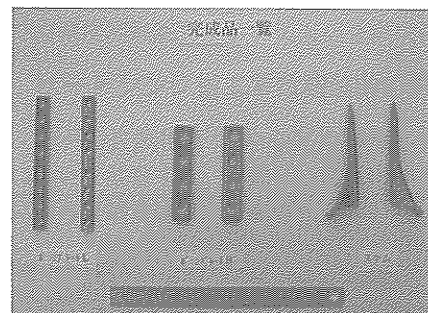


図16 インプラントの冷間鍛造¹⁴⁾

注3) J-Forge : <https://www.jsass.or.jp/propcom/ap53/schedule.html>

注4) 中小企業庁 : <http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/senryaku/download/2lhosei.pdf>

5. 環境対応技術

冷間鍛造の潤滑には、塗布、乾燥だけで表面に潤滑皮膜を形成し、処理工程の簡素化、廃棄物の削減を可能にすることで、環境面、コスト面において優れた、環境対応型鍛造用潤滑剤（一液性潤滑剤）が開発されているが、現状では厳しい加工には従来からのリン酸塩化成皮膜処理に及ばない（図17¹⁴⁾。今後は図の左下部分を拡大できる潤滑剤や潤滑技術さらにはミスト潤滑、ドライ潤滑技術の開発が期待される。熱間鍛造では、環境問題としての潤滑剤の開発も重要であり、黒鉛系の潤滑剤から白色系潤滑剤への転換が進められ、さらには冷却水としての水潤滑のみの鍛造も期待される。そのためには金型材料やその表面処理の開発も平行して進める必要がある。金型の摩耗に対して、潤滑剤、冷却方法、加工温度等の影響は大きく、最適条件の検討や摩耗予測には計測技術とCAE (Computer Aided Engineering) の導入が不可欠である。熱間鍛造工程でのインライン摩耗計測や温度分布計測など物理量をみえる化することも重要である。

6. IoT, AIの利用

様々な種類の部品が加熱や鍛造を繰り返すなど、製品ごとに工程の内容が異なる場合、製品一つ一つを個体管理し、

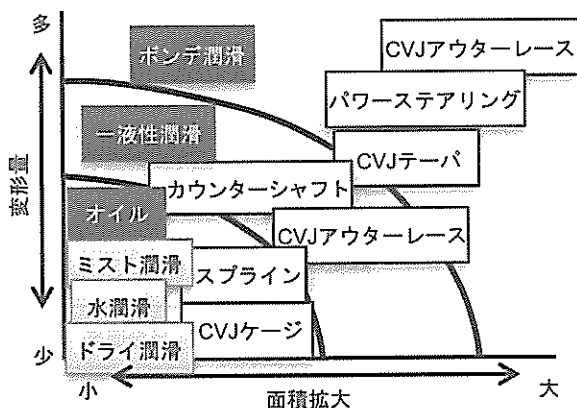


図17 冷間鍛造における潤滑剤の適用¹⁴⁾

その製造プロセス管理を行うのは、至難の業である。金型寿命の予測や良品条件の設定・監視等、各種センシング技術やIoT (Internet of Things), AI (Artificial Intelligence) 技術の導入により可能になっていくものと考えられる。

7. まとめ

日本の鍛造技術が今後も世界の先頭を走り続けるためには、低コストで高精度、高品質な鍛造品を製造可能にする新しい技術を開発しつづけること以外にないように思う。そのためには、技術開発と同時に人材育成が重要であり、広い範囲の知識を集約して、企業、大学、研究機関、国が協力した活動が必要である。

参考文献

- 1) 小坂田宏造：素形材, **60-2** (2019), 38-46.
- 2) 小坂田宏造：素形材, **60-3** (2019), 60-67.
- 3) 森下弘一：素形材, **47-1** (2006), 47-52.
- 4) 小林章人・石川孝司・水野一路：2019年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2019), 141-142.
- 5) 近藤一義：第42回鍛造実務講座テキスト, (2015), 1-10.
- 6) 新井慎二：第319回塑性加工シンポジウムテキスト, (2016), 23-30.
- 7) 中野隆志：第296回塑性加工シンポジウムテキスト, (2012), 41-48.
- 8) 五十川幸宏：NEDO「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」シンポジウム講演予稿集, (2010), 123-124.
- 9) 湯川伸樹・石川孝司：NEDO「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」シンポジウム講演予稿集, (2012), 103-104.
- 10) Osakada, K., Mori, K., Altan, T. & Groche, P.: CIRP Ann., **60-2** (2011), 651-672.
- 11) 石川孝司・石黒太浩：塑性と加工, **55-645** (2014), 902-906.
- 12) 山岡良祐・湯川伸樹・石川孝司・山田幸浩・野田拓也・三吉宏治：平成23年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2011), 29-30.
- 13) 森孝信：日本塑性加工学会鍛造分科会第36回実務講座テキスト, (2009), 61-68.
- 14) 石川克彦：第18回国際鍛造会議論文集, (2005), 27-29.