Report

T.Ishikawa

ネットシェイプ＋ネットプロパティ融合鍛造加工技術に関する研究

石川 孝司*

1．はじめに

鉄鋼材料の熱間圧延においては，TMCP (Thermo - Mechanical Control Process) 技術に代表されるように，材質制御技術が積極的に導入され，優れた延性を持った高強度鋼板（ハイテン）が製造されており，超微細粒鋼（スーパーメタル，超鉄鋼）の製造技術に関する国のプロジェクトも実施され成果をあげている [1),2)]．鍛造の分野ではネットシェイプ加工技術の高度化により高精度鍛造品を効率よく製造できるような技術，環境を構築すべく研究が進められている．最近では形状・寸法ばかりでなく低コストで優れた材質の部品製造の要求が高まっており，いわゆるネットシェイプ＋ネットプロパティ成形をめざす時代になってきたといえる．コスト，リサイクルの面からも合金成分を変えることなく，製品の形状と同時に材質を造り分ける技術に対する期待は大きい．その実現のためには，材質予測技術の確立が不可欠である．平成19年度よりNEDOのプロジェクトとして「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」が採択され，この中で制御鍛造による傾斜機能付与技術の研究がスタートしている [3)]．

塑性加工後の材質・機械的性質の予測手法は，熱間圧延・制御圧延の分野で発展してきた [4),5)]．ここではほとんどのモデルがSellers[6)]，矢田ら[7)]の研究をもとにしたものであり，結晶粒径などの組織をまず予測し，それをもとに機械的性質を求めるものである．圧延は，変形が定常で単純化できるので，ひずみ，ひずみ速度，温度等を材料内で一様と仮定して予測式は導かれているが，鍛造の場合には変形が非定常でひずみ，温度が大きく分布するので，取り扱いが単純ではない．しかし，熱との連成有限要素解析が実用段階に入りつつある現在では，鍛造加工における材質予測精度も向上するものと考えられる．材料流動や型への負荷だけを考えるのではなく，加工後の組織，機械的性質もねらいをつけた新たな鍛造の工程設計，プロセス設計手法が完成し，部品全体が均一な，さらに進化して部分的に特性の異なる鍛造品ができるものと思われる（**図1**）．ここでは，鍛造加工における材質予測技術について述べる [8)]．

2．金属材料の強化機構

材料の特性を造りこむ目的は，強靭化を図ることであり，材料を強化するということは，結晶のすべりに対する抵抗を高めること，すなわち転位の運動を抑制することである．その代表的な強化法として，固溶強化，析出強化，結晶粒微細化強化，変態強化，加工硬化などがある．鉄鋼材料の機械的性質は組織状態によって大きく変化し，非常に広範囲の強度レベルをカバーできる．これは他の金属材料に見られない鉄鋼材料の大きな魅力の一つである．それゆえ，用途に応じた性質を得るために，適切な合金元素や組成の選択に加えて，組織を最適に制御することが重要である．

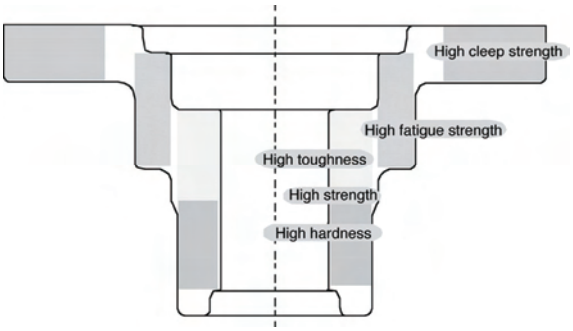


図1　部分的に材質を制御した部品の概念図

2.1 固溶強化

固溶強化は，侵入型固溶体あるいは置換型固溶体をつくる不純物元素を合金化してわざと点欠陥を作り，転位の運動に対する抵抗を高めて強化する方法である．

2.2 析出強化

転位運動の障害となる粒子（第２相粒子）を結晶中に分散させることによる強化機構で，第２相が固溶体から析出することによって形成される場合を析出強化，析出以外の過程（例えば酸化物粒子の形成等）で第２相が形成される場合を分散強化として両者を区別している．特に，析出強化は実用上の観点から重要で，超高張力鋼，アルミニウムおよびチタン合金における強化のほとんどは，この強化機構によっている．具体的には鋼の中にTi（チタン），Nb（ニオブ），V（バナジウム）などの炭窒化物を細かく析出させて転位の移動を妨害することにより強化する．

2.3 結晶粒微細化強化

多結晶体の降伏強度 σ と結晶粒径 d の間には次式のホール・ペッチ（Hall-Petch）の関係があることはよく知られている．

＊名古屋大学大学院工学研究科　マテリアル理工学専攻　教授

$$\sigma = \sigma_0 + k\sqrt{d} \qquad (2)$$

結晶粒界は転位の運動を阻害する壁として働き，外力により活動した転位が結晶粒界に堆積する．結晶粒が細かくなると粒界密度が増加し限界応力も増加，すなわち降伏強度が増加する．この関係は結晶粒径がサブミクロンまで成立するといわれている．この結晶粒微細化のため多くの研究が行われ，微細化のための各種の方法が提案されている．

2.4 変態強化

炭素鋼は，**図 2** に示すように冷却速度により様々な組織となる．変態強化は，高温からの急冷により，マルテンサイトのような微細緻密な組織を生成させ高強度化する機構である．DP 鋼はフェライトとマルテンサイトを共存させて強度と成形性を両立させた高強度鋼である．

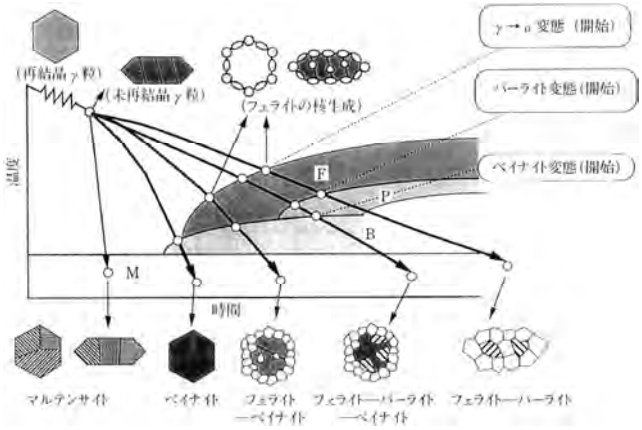


図 2　鉄鋼材料の変態組織

3．材質予測手法

図 3 は，材質予測システムの説明図である [9),10)]．塑性変形（ひずみ）と温度の履歴が再結晶（動的再結晶，静的再結晶，粒成長），変態，回復，析出などの組織変化に影響し，結果としてそれが機械的性質に影響する．また，延性が不足する場所では割れなどの欠陥を引き起こすことにもなる．現在までに鍛造の分野でこの系を統合モデルとしてまともに解析した例は報告されていないが，いろいろな近似や手法を用いて予測しようという努力がなされている [11)-13)]．

Sellers，矢田らの熱間圧延で提案された基礎式をベースとした方法について述べる．

図 3 に示す熱間加工中に生ずる様々な冶金現象を熱間加工シミュレータによる実験結果をもとに定式化し，熱間圧延の材質予測のために提案された予測手法を熱間鍛造に適用しようとするものである．そのまま非定常，不均一変形の鍛造に適用できるかどうかは実験との対応をとりながら確認していく必要がある．

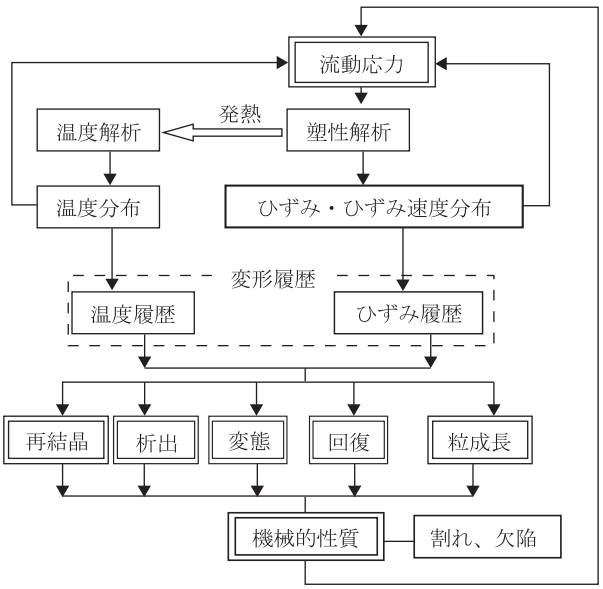


図 3　材質・機械的性質予測システム

3.1　動的再結晶

Sellers，矢田らは鉄鋼材料に対して，変形中に材料内部のひずみ(ε)がある限界ひずみ(ε_c)を越えたとき動的再結晶が生じ，その限界ひずみは次式のようにピークひずみ(ε_p)の 0.8 倍であるとした．

$$\varepsilon_p = 4.9 \cdot 10^{-4} \cdot d_o^{0.5} \cdot Z^f \qquad (2)$$

$$\varepsilon_c = 0.8 \cdot \varepsilon_p \qquad (3)$$

ここで，f は 0.15 から 0.175 までの C 量によって決まる値であり，d.は初期粒径，Z は Zener-Hollomon パラメータである．また，再結晶後の粒径は次式で決定した．

$$d_{dym} = 22600 \cdot Z^{-0.27} \qquad (4)$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

そして，動的再結晶の割合を次式で表現した．

$$X_{dym} = 1 - \exp\left(-0.693 \cdot \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0.5}}\right)^2\right) \qquad (5)$$

ここで，

$$\varepsilon_{0.5} = 1.144 \cdot 10^{-3} d_0^{0.28} \dot{\varepsilon}^{0.05} \exp\left(\frac{6420}{T}\right) \qquad (6)$$

3.2　静的再結晶

静的再結晶は変形で導入された転位のほとんどが同時に消滅するプロセスであり，多くのモデルで次式のような Avrami 式が採用されている．すなわち，矢田らの式を例にとると再結晶率は

$$X_{st} = 1 - \exp\left(-0.693 \cdot \left(\frac{t - t_0}{t_{0.5}}\right)^{n_r}\right) \qquad (7)$$

ここで，

$$t_{0.5} = 2.2 \cdot 10^{-12} S_v^{\ 0.5} \dot{\varepsilon}^{0.2} \varepsilon^{-2} \cdot \exp(30000/T) \quad (8)$$

$$S_v = \frac{24}{\pi d_0} \left(0.491 e^{\varepsilon} + 0.155 e^{-\varepsilon} + 0.1433 e^{-3\varepsilon}\right) \quad (9)$$

であり，nr=2 とすればよいがモデルによっては初期粒径，ひずみ，温度の関数とするものもある．このときの結晶粒径は，

$$d_{st} = 5/(S_v \cdot \varepsilon)^{0.6} \quad (10)$$

3.3 粒成長

オーステナイト粒の再結晶により，変形によって導入された内部エネルギーのほとんどを放出するが，組織はまだ準安定状態であるため，高温状態では残留エネルギーにより粒成長する．

$$d^2 = d_{st}^2 + 1.44 \cdot 10^{12} \cdot t \cdot \exp(-Q/RT) \quad (11)$$

3.4 変態

一般に鋼の変態は炭素の拡散に律速される核生成-成長過程と考えられる．変態速度は，変態率を X とすると，核生成速度 I と成長速度 G が時間によらない場合，次式で書ける 7).

$$\frac{dx}{dt} = 4.046 (k_1 IS)^{\frac{1}{4}} \cdot G^{\frac{3}{4}} \cdot \left(1n \frac{1}{1-X}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot (1-X) \quad (12)$$

ここで S は単位体積当たりの核生成サイト，k1 は連続冷却実験により決定される定数である．I と G を温度と成分の関数として表し，任意の冷却経路に対して変態量を計算する．

また，非調質鋼のように析出強化を利用する材料に対しては，析出現象の考慮も必要である．

3.5 計算手順

図 4 に計算のフローを示す．各計算式を増分表現 [14] にして，有限要素法により温度，ひずみ，ひずみ速度を計算する．ひずみが限界ひずみを越えた領域には式(4)～(6)を適用して動的再結晶の割合，粒径を計算する．越えない領域は式(7)～(10)により静的再結晶割合，粒径を算出する．この計算は微少時間ごとに行い，残留ひずみは次式で仮定し，再結晶が完了するまで繰り返す．

$$\varepsilon_{i+1} = \varepsilon (1 \times X_{st}) \quad (13)$$

その後，温度と焼入れまでの時間をもとに式(11)より最終的な粒径を計算する．

これら組織と粒径をもとに硬さ，引張強度，変形抵抗等の機械的性質が求められる．組織から機械的性質の予測は回帰式を用いている．

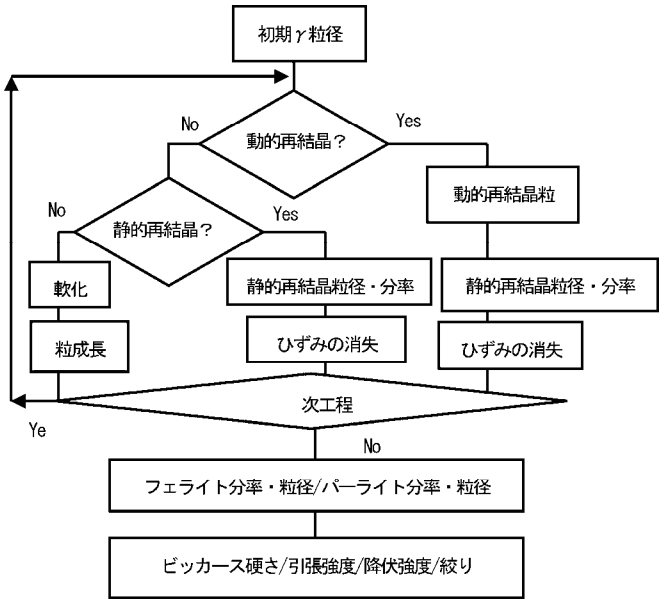


図 4 材質予測システムのフローチャート

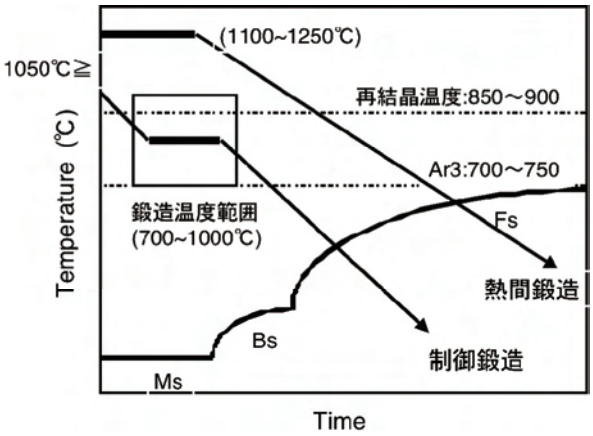


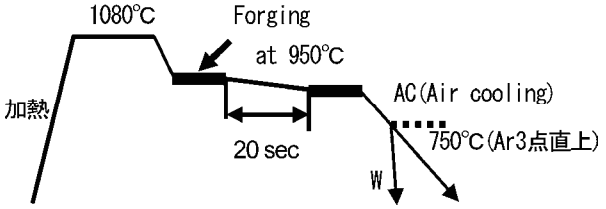
図 5 制御鍛造の熱履歴

4．制御鍛造

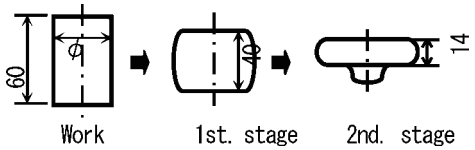
最近自動車部品に多用されている非調質鋼は，加工後に焼入れ，焼戻し等の熱処理を行う調質鋼に比べて強度や靭性が劣ることが以前より指摘されている．この問題に対して非調質鋼に加工熱処理 [15)~17)]を適用することによりフェライト・パーライト型非調質鋼（以降 F+P 型非調質鋼と呼ぶ）は調質鋼なみ，またはそれ以上の特性が得られることが従来の研究により確認されている．鍛造と加工熱処理プロセスを組み合わせた制御鍛造により非調質鋼の強靭化が可能である．制御鍛造の特徴は，鍛造温度と冷却速度をコントロールすることで（F+P）組織を微細化し機械的性質を向上させる点にある．その熱履歴を図 5 に示す．Ar3 点以上，再結晶温度前後の温度域で鍛造を行いその後，制御冷却して（F+P）組織とする．（F+P）組織を微細化するためには，変態前のオーステナイト粒を微細化すること，転位密度の高い加工硬化オーステナイトから（F+P）変態させること，冷却速度を速めることである．この間，組織は鍛造によって微細化されたγ粒界および導入された転位が変態時に核生成サイトとして働き微細なフェライトが生成する．

4.1　組織予測精度検証 [18),19)]

図 6 は鍛造工程の一例で，バナジウム非調質鋼を対象に２工程でスパイク形状に鍛造するものである．**図 7** はその２工程終了後の微細組織の実測結果であり，白い部分がフェライト，黒い部分がパーライトである．完全に再結晶した微細なγ組織から変態したＡ部およびＢ部の F+P 組織は微細で，未再結晶から変態したＣ部の F+P 組織は粗い組織となっている．結晶粒径，フェライト分率などの計算結果（**図 8**）は実測値とほぼ一致することが示され，硬さも**図 9** に示すようにほぼ一致した．



（a）鍛造工程



（b）試験片形状の変化

図 6　鍛造工程

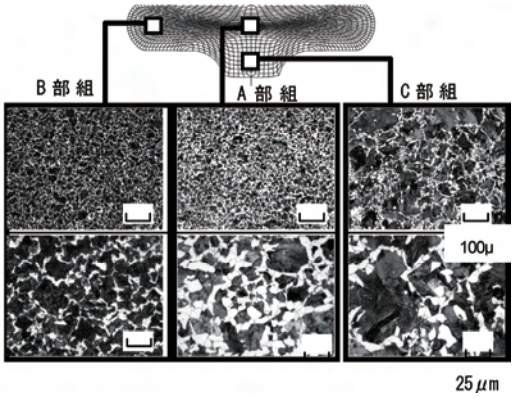


図 7　各部位の微細組織

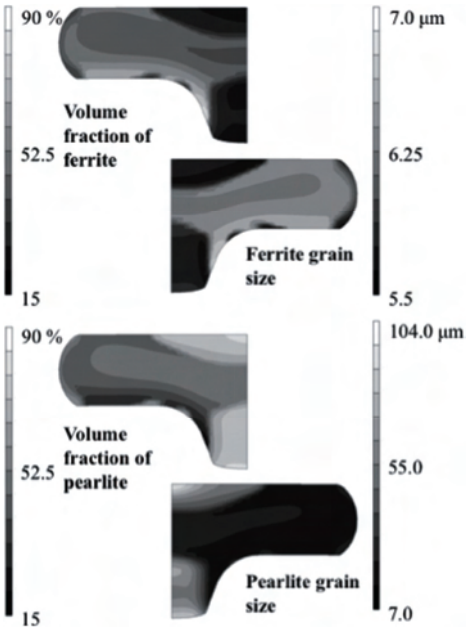


図 8　空冷後の組織予測結果

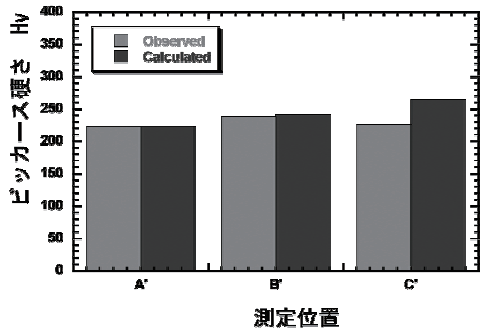
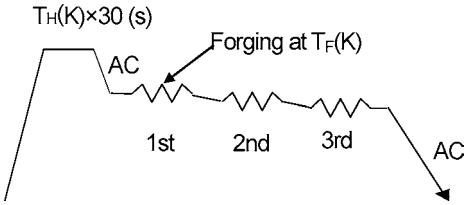


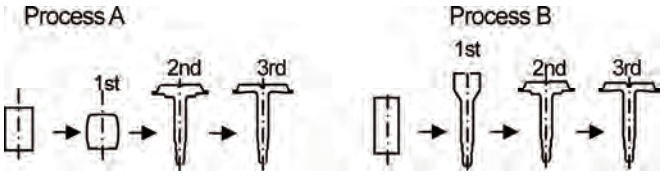
図 9　計算結果と実測結果の比較

4.2　鍛造工程設計への適用 [20),21)]

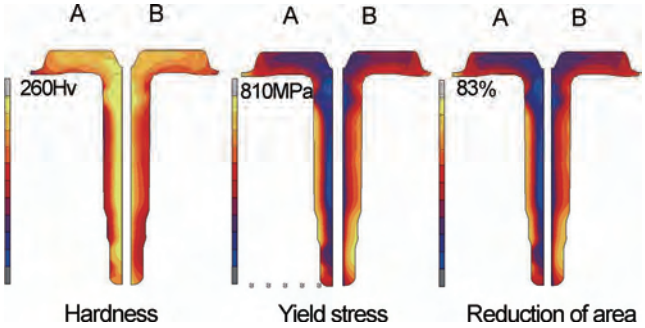
図 10 にこの材質予測システムを利用した鍛造工程の設計事例を示す．図(a)に示す温度履歴に対して，図(b)に示す Process A，B の２種類の鍛造工程を設定し，その結果として得られる鍛造品の組織、特性を解析した．鍛造工程での違いは，第１工程が Process A ではすえ込みであるのに対し，B で押出しであることのみで，他は同じである．図(c)に予測した硬さ，降伏応力，絞りの分布を示す．図から明らかなように Process B の方がいずれの特性も製品内の分布が一様に近いことがわかる．このように本システムを温度履歴も含めた鍛造工程設計に使うことで，必要な所に必要な特性をもった鍛造品を造ることが可能である．



（a）　温度履歴



（b）鍛造工程



（c）解析結果

図 10　鍛造工程設計への適用事例

5．　まとめ

鍛造における材質予測について現状の成果を述べた．それぞれのモデルは適用範囲に制限があり，一般的な統一モデルにするにはまだ努力が必要である．材料面の予

測手法の確立が遅れているのは，塑性変形や温度の解析に比べ，冶金現象は影響因子が非常に多いこと，しかも影響の仕方が複雑でなかなか定式化しにくいことなどが主な原因である．今後，ソフトを含めた数値解析環境が急速に進歩していることから，鍛造の分野でも加工時の製品の形状・材料流動・応力分布だけでなく，加工後の機械的性質や組織も設計に組み入れた鍛造統合設計システムの開発が進むものと思われる．それには，加工屋と材料屋が今以上に緊密に情報交換して討議を積み重ねなければならないと考える．

謝　辞

本研究は，天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成（AF-1999006）の支援がもととなっており，財団に感謝致します．

参考文献

1) スーパーメタルの技術開発成果報告書，平成 12 年度，JRCM.
2) 環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術の開発プロジェクト，第 1 回～第 4 回シンポジウムテキスト.
3) 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト，第 1 回シンポジウムテキスト, (2009).
4) Special Issue : ISIJ Int., 32-3(1992).
5) 変形特性の予測と制御部会報告書, (1994), 日本鉄鋼協会.
6) C. M. Sellars & J. A. Whitenman : Met. Sci., March-April (1979), 187.
7) 矢田浩: 塑性と加工, 28-316 (1987), 413.
8) 石川孝司:電気製鋼, 66-3(1995),186.
9) 吉野雅彦，白樫高洋: 塑性と加工，33-382 (1992), 1285.
10) 品川一成: 塑性と加工, 35-405 (1994), 1169.
11) 王　哲，河野亮，湯川伸樹，石川孝司:塑性と加工, 40-465(1999)992.
12) 王　哲，李　廷全，河野亮，湯川伸樹，石川孝司: 塑性と加工, 40-460(1999)490.
13) 吉田広明，五十川幸宏，金子義典，与語康宏，石川孝司：塑性と加工，43-498，(2002)，619.
14) J. Yanagimoto, K. karhausen, A.J. Brand, R. Kopp, Trans. ASME, J. of Manu. Sci. and Eng., 120-2(1998), 316.
15) 田村今男：鉄と鋼，No.1 (1988), 18.
16) 牧正志：鉄と鋼，81?11 (1995), N547.
17) 大内千秋：塑性と加工，40?467 (1999), 7.
18) 吉田広明・五十川幸宏・石川孝司・大林一也：平成 12 年塑加春講論，(2000), 173.
19) 吉田広明･五十川幸宏･石川孝司:51 回塑加連講論，(2000), 163.
20) 吉田広明, 五十川幸宏, 石川孝司:塑性と加工, 42-485, (2001)，569.
21) わかりやすい鍛造加工：日本塑性加工学会鍛造分科会編，日刊工業新聞，(2005),46.