

マグネシウム合金鍛造シミュレーション用モデル材料の開発とその検証

桑原田聡^{*}, 牟禮雄二^{**}, 松田豪彦^{*}, 中西賢二^{***}

Development and Verification of Model Material for Forging Simulation of Magnesium Alloy

Satoru KUWAHARADA, Yuji MURE, Takehiko MATSUDA and Kenji NAKANISHI

マグネシウム合金製の新規部品開発の支援を目的に、モデル材料を用いた鍛造シミュレーションについて検討した。シミュレーションに使用するモデル材料は、添加する微粉末量を変えることで、その変形特性を調整することができるため、マグネシウム合金に最適化されたモデル材料の作製が可能となった。このモデル材料を用いた成形加工実験は、室温で実金属の1/200程度の低荷重の条件下で行うことができる。これにより、鍛造加工による成形品の外形状や内部ひずみ分布、成形加工過程などを実用上満足できる精度で予測可能であることがわかった。

Keyword: 鍛造加工, 実験シミュレーション, モデル材料, マグネシウム合金

1. 緒言

マグネシウム合金は、実用金属中で最も軽量で比強度が高く、融点も470～650程度と低いことから、資源の再利用が容易な材料である。このため、パソコンや携帯用家電製品等の筐体にマグネシウム合金を採用したものが急速に増えている。また、近年では部品の軽量化による燃費向上、CO₂ガスの低減を目的とした自動車部材への利用拡大が期待されている¹⁾。

一般的にマグネシウム合金の成形加工は、ダイカストやチクソモーディング等の鑄造、射出成形が主流である。この理由として、マグネシウム合金が室温付近で延性が低いため、プレスや鍛造といった塑性加工が難しいことが挙げられる^{2), 3)}。しかし、自動車部材などの量産部品へ展開するためには、安価で生産性の高い塑性加工が可能となる成形技術の確立が望まれている。

一方、金属の成形加工を支援する技術の1つに、油性粘土あるいはWAXを実金属の代用材（モデル材）として成形加工実験を行う実験シミュレーションがある^{4)~8)}。特にマグネシウム合金のように加工材の変形特性や型・工具との接触条件などの加工技術が確立しておらず、不明な加工過程を明らかにする場合に特に有効な手法である。しかし、成形加工実験に用いられるモデル材料は、実金属と同様な変形特性をもつことが必要とされるが、市販のモデル材料では、マグネシウム合金に最適化されたものがないのが現状である⁹⁾。

そこで、本研究では、WAXに適量の微粉末を添加・調整したWAX粘土を用いて、マグネシウム合金と同様な変形特

性を有するモデル材料を開発するとともにモデル材料を用いた実験シミュレーションと実際のマグネシウム合金の加工実験の結果を比較検証し、その類似性や有用性について検討した。

2. モデル材料の作製と変形特性試験

実験に用いたモデル材料は、WAXと微粉末を混合・混練したWAX粘土である。WAX成分として、マイクロワックス、鉱油、ロジン、微粉末には、カオリン、炭酸カルシウムを用いて、Table 1に示す配合のモデル材料を作製した。また、モデル材料の予備試作から、適度な延性や硬さが得られる配合として、WAX成分をマイクロワックス：鉱油：樹脂 = 5：1：1、微粉末をカオリン：炭酸カルシウム = 2：5の質量比とした。

モデル材料の作製として、WAX成分を150に加熱した油浴中で完全に溶解し、界面活性剤（第一工業製薬(株)製ノイゲンET-129）と微粉末を加えて攪拌した。冷却後、WAXと粉末の混合物を2軸混練機で約1時間混練し、均一化を図った。また、混練後のモデル材料を再度、加熱溶解して金属製円筒型へ流し込み、冷却固化して40×40mmの円柱試料を作製した。

モデル材料の変形特性は、円柱試料の単軸圧縮試験から求めた。試験条件は、加圧速度：1mm/s、変形温度：25℃、潤滑剤：ワセリンで、初期高さの50%になるまで圧縮した。モデル材料の作製から単軸圧縮試験までの流れをFig. 1、

Table 1 Compositions of the model materials

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
WAX ^{*1} (mass%)	100	85	70	50	45	40	35	30	20
Powder ^{*2} (mass%)	0	15	30	50	55	60	65	70	80

^{*1}: Micro WAX : Oil : Resin = 5 : 1 : 1

^{*2}: Kaolin : Lime = 2 : 5

^{*} 素材開発部
^{**} 機械技術部
^{***} 鹿児島大学

モデル材料の圧縮試験で用いた実験装置をFig. 2，単軸圧縮試験前後の試料をFig. 3に示す。Fig. 3では，圧縮試験前の試験片へ潤滑剤を一様に塗布し，工具摩擦の影響を受けない均一変形の単軸圧縮試験が行われたことを，変形後の試験片形状から確認した。

Fig. 4にTable 1の配合試料における単軸圧縮試験の結果から得られたフローカーブ（応力とひずみの関係）を示す。同図では，各配合のモデルが金属材料のみみられる以下の3パターンフローカーブ形状を示していた。

1) 微粉末量 0 ~ 55mass% (Table 1のNo. 1 ~ 5) まで，ひずみ0.05付近の応力値が最大となり，それ以降のひずみの増加に伴って応力が低下する加工軟化型

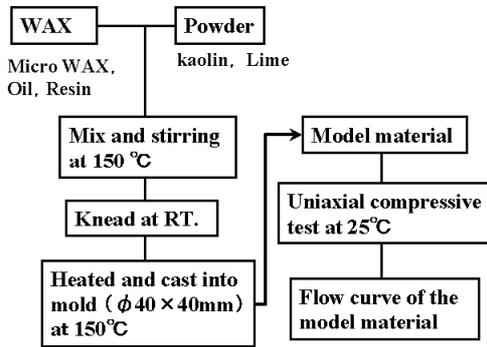


Fig. 1 Flow chart explaining the fabrication processes of model materials and conformation of the flow curves of that materials by uniaxial compressive test

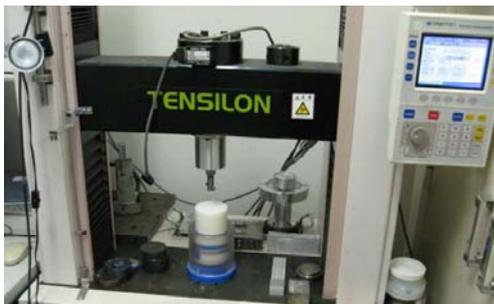


Fig. 2 The experimental equipment

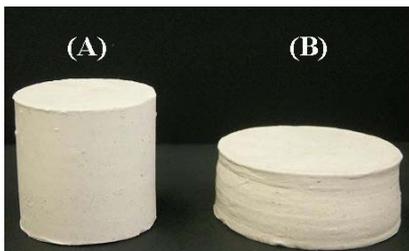


Fig. 3 Model material workpieces, (A) : before uniaxial compressive test and (B) : after uniaxial compressive test

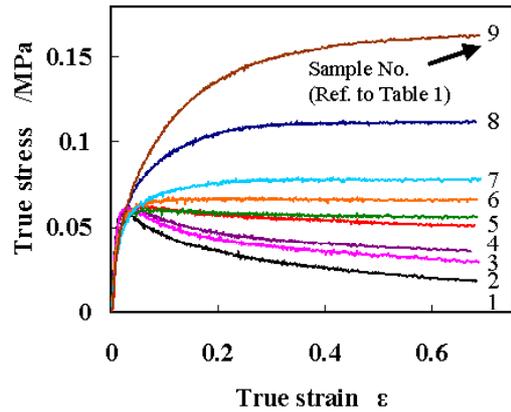


Fig. 4 Flow curves of the model materials

2) 微粉末量60mass% (Table1のNo. 6) で，ひずみ0.05以降の応力値が，ほぼ一定となる定常変形型

3) 微粉末量がさらに増加する (Table1のNo. 7 ~ 9) とひずみの増加に伴って，応力が高くなる加工硬化型

上記の1) ~ 3)は，微粉末量を変えることによって調整できることがわかった。

3. 供試金属材料と変形特性試験

供試金属材料として用いたマグネシウム合金は，大阪富士(株)製AZ31Bで，これを345 で焼鈍し (焼鈍後の硬さHV 65)，実験に使用した。AZ31Bの化学成分をTable 2に示す。

マグネシウム合金の変形特性を求めるために，16×24 mmの円柱試料を作製し，その単軸圧縮試験を行った。試験条件は，加圧速度：0.5mm/s，変形温度：100，200，250，300，350，400，潤滑剤：二硫化モリブデン系潤滑剤である。実験装置外観をFig. 5に，マグネシウム合金の変形特性であるフローカーブをFig. 6に示す。また，圧縮試験後の試料写真をFig. 7に示す。

Table 2 Chemical compositions of AZ31B (mass%)

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
3.50	1.40	1.00	0.10	0.05	0.01	0.01	bal.



Fig. 5 The outside of pressing machine

Fig. 6およびFig. 7からマグネシウム合金は、100、200では、加工途中でせん断破壊しているが、250以上の温度では、十分に圧縮加工が可能であることがわかる。また、マグネシウム合金のフローカーブは、変形過程の動的再結晶によって、ひずみ0.15付近の応力値が最大となる加工軟化型を示していることがわかった。

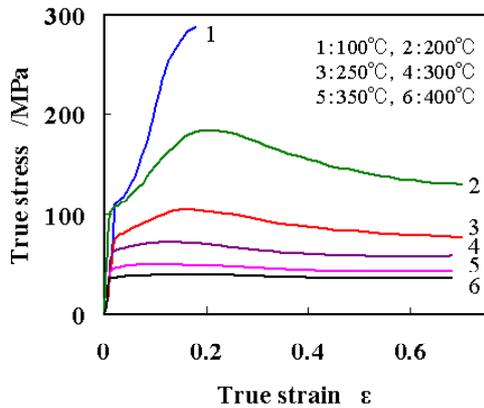


Fig. 6 Flow curves of the magnesium alloy

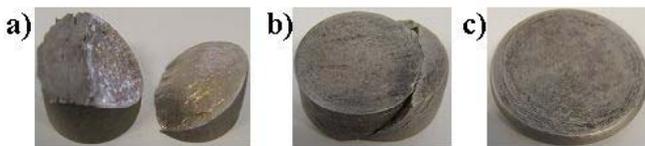


Fig. 7 The workpieces after uniaxial compressive tests, a) : 100 , b) : 200 and c) : 250

4. 平面ひずみ後方押し出し加工実験

マグネシウム合金とモデル材料の類似性の評価として、平面ひずみ後方押し出し加工実験および格子線解析を行い、加工品形状や内部の相当ひずみ分布を相互に比較した。

実験に使用した市販マグネシウム合金は、単軸圧縮試験と同様の材料(AZ31B)で板厚(t)が6mmの焼鈍材である。これを60(W)×20(L)mmに切削後、2mm間隔で格子線をけがき、2つの素材を合わせて実験材料とした。このときの合わせ面の一方は格子線のけがき加工面で、塑性流れ(格子模様)の観測面となる。平面ひずみ後方押し出し加工実験装置の概略図をFig. 8に示す。二硫化モリブデン系潤滑剤を一樣に塗布した実験材を金型内に装填後、油圧プレスと電気管状炉を用いて材料温度300、加圧速度0.5mm/sの条件下で後方押し出し加工実験を行った。

実験シミュレーションに用いたモデル材料は、マグネシウム合金の300におけるフローカーブと類似の変形特性が得られる微粉末量の配合(Table 1のNo. 3)で作製し、マグネシウム合金と同寸法の試験片形状に仕上げた。モデル材料の片側面には、2mm間隔の格子線をスタンプで押印し、実金属と同様に2つを重ねてプラスチック型内に装填

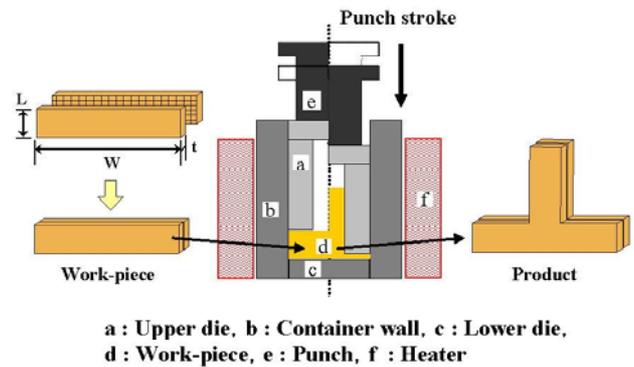


Fig. 8 Schematic sketch of apparatus of backward extrusion, workpiece and product

した。成形加工実験は、単軸圧縮試験と同様の25、ワセリン潤滑、1mm/sのパンチ速度で実施して、塑性流れ(格子模様)を観察した。

Fig. 9に変形温度300で計測したマグネシウム合金のフローカーブ(Fig. 6のNo. 4)を実線で、微粉末含有量30 mass%のモデル材料(Fig. 4のNo. 3)のフローカーブを破線で示す。両者のフローカーブを比較すると、0.15以上のひずみ領域で相互に類似した加工軟化現象を表すことが確認できる。ただし、マグネシウム合金の変形温度が300であるのに対し、モデル材料は25の室温下で、変形抵抗の応力レベルは約1/200である。

今回の加工実験では、格子線解析法を用いるために、パンチストローク停止位置を成形開始位置からいくつか変えた逐次変形実験を行った。成形品の外形状および塑性流れ観測面の格子模様写真をFig. 10に示す。また、最後のパンチストローク位置における加工材内部の相当ひずみ分布をFig. 11に示す。

これらの結果・解析から、モデル材料で得た塑性流れの様相(格子模様の変化)や相当ひずみ分布は、マグネシウム合金を用いた結果と良く一致することを確認した。

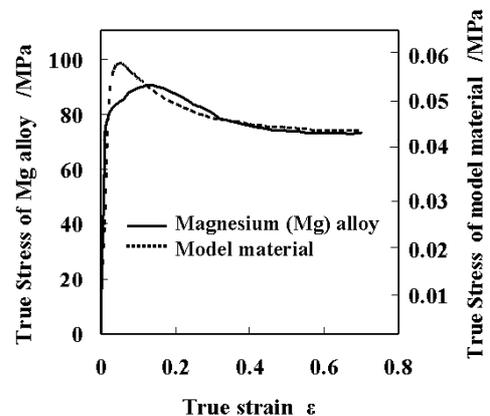


Fig. 9 Comparison of flow curve of magnesium alloy represented by solid line and that of model material represented by broken line

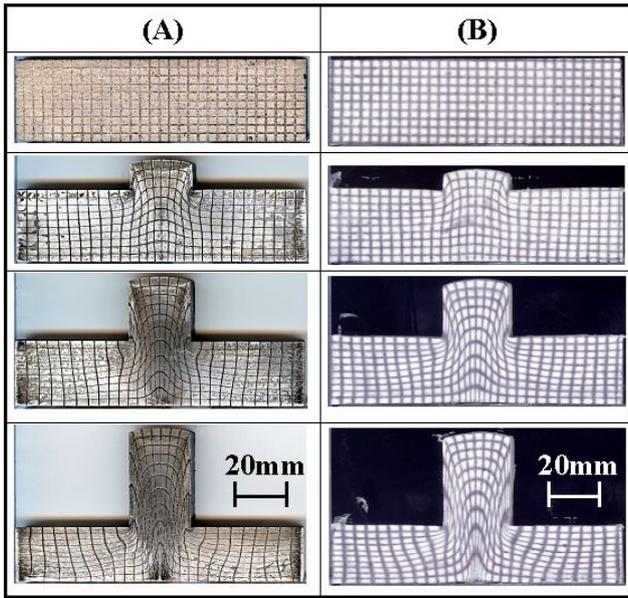


Fig.10 Photographs of the distorted grid patterns observed in the forming experiments, (A) : magnesium alloy and (B) : its model material

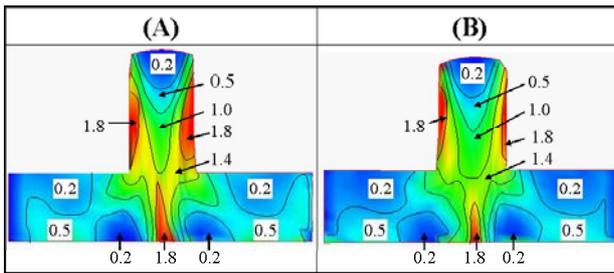


Fig.11 Comparison of the effective strain distribution in the product after forming experiment, (A) : magnesium alloy and (B) : its model material

5. 2重円筒型部品の加工実験

モデル材料を用いた実験シミュレーションをマグネシウム合金製部品の加工へ適用する実施例として、2重円筒型の部品を試作した。実験手順は、最初にモデル材料を用いた実験シミュレーションから加工プロセスや成形品の形状等を確認する。その後に、結果の検証として実金属（マグネシウム合金）での成形加工を行った。

加工前の素材形状と2重円筒部品の形状および実験装置の概略図をFig.12に示す。モデル材料での成形加工実験は、これまでと同様の25mm、ワセリン潤滑、パンチ速度1mm/sで実施した。また、加工過程を検討するために、パンチストローク停止位置を成形開始位置から、いくつか変えた逐次変形実験を行った。成形品の外形状およびその断面写真をFig.13に、パンチ荷重 - パンチストローク曲線をFig.14に示す。これらの結果から、2重円筒部品の成形加工過程

は、Fig.15の概念図に示す3段階に分けられる。

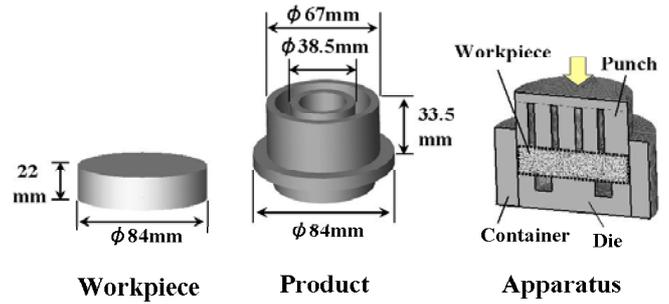


Fig.12 Schematic sketch of workpiece, product and apparatus

No	Stroke /mm	Load /kN	Configuration of Product	
			(Top view)	(Cross section view)
1	0	0		
2	4.5	1.2		
3	7.5	1.8		
4	13.5	3.4		
5	14.5	5.7		

Fig.13 Configuration of products formed by incremental forming experiments

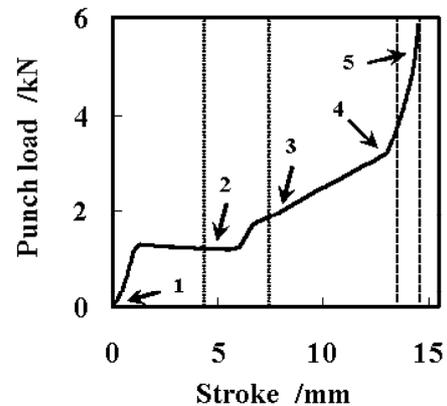


Fig.14 Punch load and stroke curve measured in the forming experiments

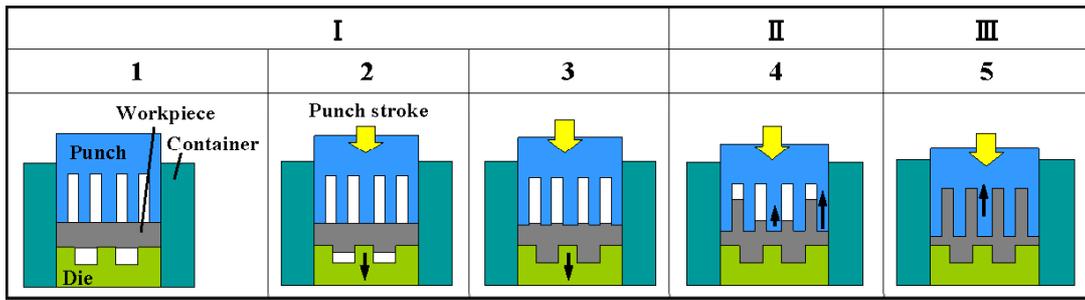


Fig.15 Schematic illustrations of forming conditions in each punch stroke position of three steps

：上部からのパンチによる加圧で、材料がパンチ移動方向と同方向（前方）に押出され、下部が最初に成形される（No. 1～No. 3）。

：下部の成形終了後に、パンチの移動方向と反対方向（後方）へ材料が押出され、円筒部分が成形される（No. 3～No. 4）。ただし、2重円筒の外側が内側の円筒よりも早く成形が進んでいる。

：外側の円筒の成形終了後に内側の円筒が成形される（No. 5）。このときのパンチストローク量は、1mm程度とわずかであるが、加工荷重は急激に上昇しており、材料の充填後に閉塞状態となっているものと考えられる。

このモデル実験の検証として、マグネシウム合金による成形加工実験を行った。実験条件は、これまでの成形加工と同様の材料温度300℃、二硫化モリブデン系潤滑剤、加圧速度0.5mm/sである。鍛造などの塑性加工では、加工材のサイズに関わらず変形の相似則が成り立つことから、実験装置の最大荷重を考慮して、Fig.12の形状から0.6倍の縮小モデルとした（Fig.12の試料直径84mmから50mmに変更）。

Fig.16にマグネシウム合金およびモデル材料による加工品の比較を示す。Fig.16では、どちらも同じ形状に成形されていることがわかる。次に加工途中での断面形状の比較をFig.17に示す。モデル材料と同様にマグネシウム合金を

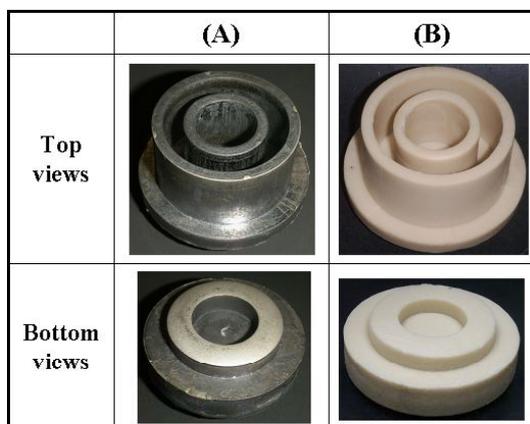


Fig.16 Outer views of the products, (A) : magnesium alloy and (B) : its model material

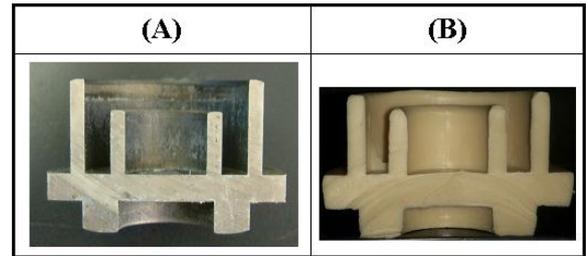


Fig.17 Comparison of a cross section of products, (A) : magnesium alloy and (B) : its model material

用いた場合でも、先に外側の円筒部から成形が完了していた。ここで、内側円筒部の高さに違いが見られるが、これはパンチストローク停止位置の差が影響しているものと考えられる。以上のことから、モデル材料を用いた成形品の外形状や加工過程が、マグネシウム合金と実用上満足できる精度で一致していることが確認できた。

6. 結 言

マグネシウム合金と類似の変形特性を有するモデル材料の作製および、このモデル材料を用いて鍛造加工条件を最適化する実験シミュレーション技術を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) モデル材料に添加する微粉末量を変えることで、その変形特性を調整できるため、マグネシウム合金に最適化されたモデル材料の作製が可能となった。
- (2) 作製したモデル材料を用いた成形加工実験は、実金属（マグネシウム合金）と比較して、室温で実施できると同時に1/200程度の低荷重下で行うことができる。
- (3) 平面ひずみ後方押し出し加工実験において、モデル材料とマグネシウム合金の成形品形状、塑性流れ（格子線模様の様相）および内部ひずみ分布がよく一致することを確認した。
- (4) 2重円筒型の部品試作から、モデル材料を用いた実験シミュレーションは、外形状や加工過程を実用上満足できる精度で予測可能であることを見出した。

参 考 文 献

- 1) 日本マグネシウム協会編：金属材料シリーズ マグネシウム，(株)工業調査会（2009），p81-96
- 2) 小島陽，井藤忠男：マグネシウム合金の応用と成形技術，(株)シーエムシー出版(2002)，p56-63
- 3) 日本マグネシウム協会編：マグネシウム技術便覧，カロス出版（2000），p251-257
- 4) 栗野泰吉，団野敦：塑性と加工，**13**，141，768-775（1972）
- 5) T.Wanheim, V.Maegaard, J.Danckert:Adv.Technol.Plast., **2**,984-996(1984)
- 6) 中西賢二，牟禮雄二：塑性と加工，**36**，418，1300 - 1305(1995)
- 7) 木場博文，中西賢二，上谷俊平：塑性と加工，**42**，488，954-958（2001）
- 8) 桑原田聡，中西賢二，牟禮雄二，松本泰道：塑性と加工，**52**，593，582-586(2010)
- 9) 桑原田聡，牟禮雄二，中村俊一：特開2009-197091

