

ステンレス鋼の加熱ヘッドニング加工

松田豪彦*, 堀之内悠介*, 牟禮雄二*, 田中耕治**

Heating Header Processing Method of the Stainless Steel

Takehiko MATSUDA, Yusuke HORINOCHI, Yuji MURE and Koji TANAKA

ステンレス鋼 (SUS304棒材)を用いて、短時間で数百度の高温に加熱し、高温になった材料のヘッドニング加工を試みた。加熱には、電流を流すことで材料自体が持つ電気抵抗を利用した自己発熱を適用した。加熱実験を行い、温度上昇の過程や電流との関係を明らかにし、1秒間の通電で数百度まで加熱できることを確認した。また加工したい箇所を加熱して据込み加工を行い各温度での加工荷重を測定し、材料を加熱することで冷間の場合よりも加工荷重が低減することを確認した。さらに、冷間加工品と加熱加工品について中心断面での金属組織等の比較評価を行った。加熱して加工した場合であっても冷間加工品と大きな差は確認されなかった。

Keyword : ステンレス鋼, 温間・熱間加工, ヘッドニング, 据込み, 加熱

1. 緒言

棒材の端部をプレス機等で強制的に変形させるヘッドニング加工 (圧造加工) は、ねじ類や端子部品などの生産に用いられる加工方法である¹⁾²⁾。同加工方法は、大量生産を可能にし、用いられる材料は低炭素鋼をはじめ、各種合金鋼や非鉄金属類など多岐にわたる。中でもオーステナイト系ステンレス鋼は、優れた耐食性から広く使用されており、屋外や沿岸部等腐食環境下での使用に欠かさない材料である。しかし、同鋼は冷間での加工硬化が進みやすく変形抵抗が大きい材料である。そのため金型への負担が増大し、低炭素鋼等に比べ金型寿命が短くなる傾向にある。変形抵抗を小さくするには、材料を高温度に加熱することが有効である。しかし、従来の温間・熱間加工方法では、材料及び金型等の加熱に電気炉等を用いて常時加熱する必要があり、高温度への昇温及び温度維持に必要なエネルギーによって生産コストの増大を招いている。

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304 (以下SUS304)を使用して、金型への負担を減らすことを目的に加工前のSUS304棒材を短時間で加熱し、温間・熱間温度域でヘッドニング加工を行う技術開発を行った。材料の加熱には、材料自体が持つ電気抵抗を利用した自己発熱を適用した。常時材料を加熱するのではなく、加工前に材料に直接電流を流し短時間で加熱を試みた。実験により、加熱温度と時間及び電流値との関係を調べた。

次に、加熱した材料をヘッドニング加工の1つである据込み加工によって圧縮成形する加工実験を行い、材料加熱による加工荷重の低減効果を調べた。また、金型の応力分

布を検証した。さらに、得られた加工品の評価を行って、冷間加工品との比較を行った。

2. SUS304棒材の変形特性

2.1 単軸圧縮試験

SUS304棒材の変形特性を把握するため、円柱試験片を用いて単軸圧縮試験を行った。円柱試験片には引抜き加工でできた直径5mmのSUS304棒材を長さ8mmに切断して使用した。単軸圧縮試験の圧縮速度は0.5mm/sとし、あらかじめ電気炉を使用して圧縮試験治具と材料を各試験温度(20℃, 200℃, 400℃, 600℃)まで加熱して試験を実施した。

2.2 単軸圧縮試験結果及び変形特性

得られた結果による真応力-真ひずみ曲線を図1に示す。20℃では加工硬化型の曲線を示している。真ひずみ0.1以上で真応力が1000MPa以上になり変形抵抗が大きいことがわかる。なお、材料温度が高温度になると200℃で真応力約800MPa, 600℃で約600MPaとなり、高温度になるほど変形抵抗が小さくなった。

この結果から、材料を高温度に加熱することによって、ヘッドニング加工に必要な荷重値を大幅に減少させ、材料の加工硬化を抑制できると考えられる。

3. 材料の急速加熱

3.1 材料の加熱実験方法

前述の結果から、SUS304棒材は高温に加熱することで変形抵抗が減少することがわかったが、より効果的に短時間で材料を加熱する方法として、SUS304鋼はアルミニウム合金や炭素鋼に比べ電気抵抗が大きいことから、材料の電気抵抗を利用した加熱方法を試みた。材料加熱実験の概略を

*生産技術部

**元 企画支援部

図2に示す。材料の寸法は直径5mm、長さ50mmである。材料の端面から4mmの側面部分を2つの電極で挟み、材料自体に電流を流すことで抵抗発熱させた。電源には単相交流式電源（日本アビオニクス(株)製 NRW-5A）を用い、トランスを経て電流値を設定した。なお、実際の電流値を把握するため、電極につながったケーブルにクランプ電流計を用いて最大電流値の実効値測定を行った。電極には直径3mmの純銅を用いた。電極による加圧力は50Nとし、通電時間は1.0秒間とした。なお、加熱時の温度は、図2に示した箇所に熱電対を設置することで測定をした。また、赤外線カメラを用いて、材料の温度分布を測定した。

3. 2 加熱実験結果及び考察

加熱実験を行い赤外線カメラで撮影した材料表面の温度分布を図3に示す。このとき測定された電流値（最大値）は775Aであった。材料は電極との接点部から温度が上昇し、電極間の中心部へと熱が伝わっていった。熱電対で測定した温度は545℃まで達した。電極で挟んだ部分の温度は急上昇するが、それ以外の部分は通電後5秒で余熱によって約80℃まで加熱された。熱電対で測定した材料温度と通電開始からの時間との関係を図4に示す。通電が始まってから材料温度は急速に上昇し、通電が終わる1秒を

過ぎても温度の上昇は続き、約1.5秒後まで温度上昇が続いた。その後、温度は低下しはじめたが、温度低下の曲線カーブはなだらかであり、通電開始から2秒後で500℃以上を維持し、3秒後であっても450℃以上を維持していた。なお、いくつかの電流値で加熱実験を行って得られた材料温度と電流値との関係を図5に示す。電流値が大きくなるほど、材料の加熱温度は高くなった。

本加熱実験では、材料に電流を1秒間流すことによって短時間で材料を温間温度域まで加熱できることがわかった。特に加熱が進んだ箇所は、2つの電極で挟んだ部分であったことから、高温で加工したい箇所を選択的に電極で挟むことにより、狙った箇所を加熱することができる。

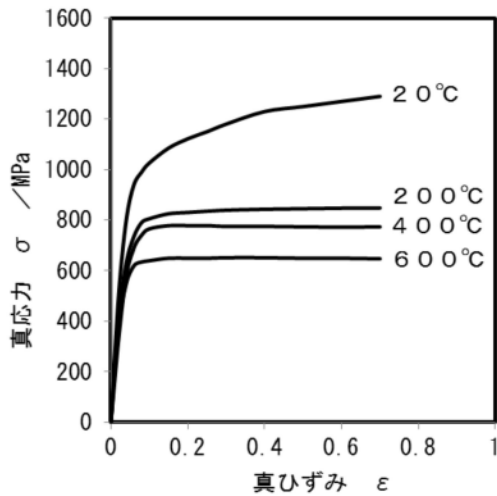


図1 SUS304の真応力-真ひずみ曲線

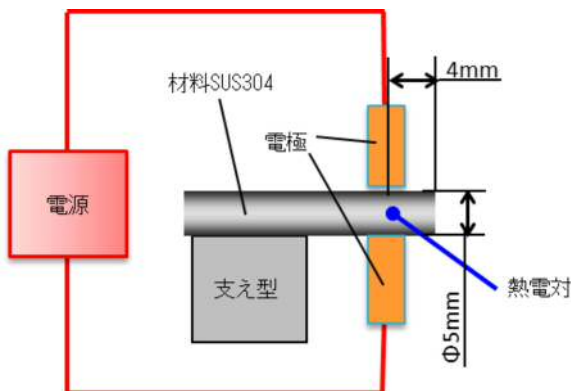


図2 材料加熱実験の概略

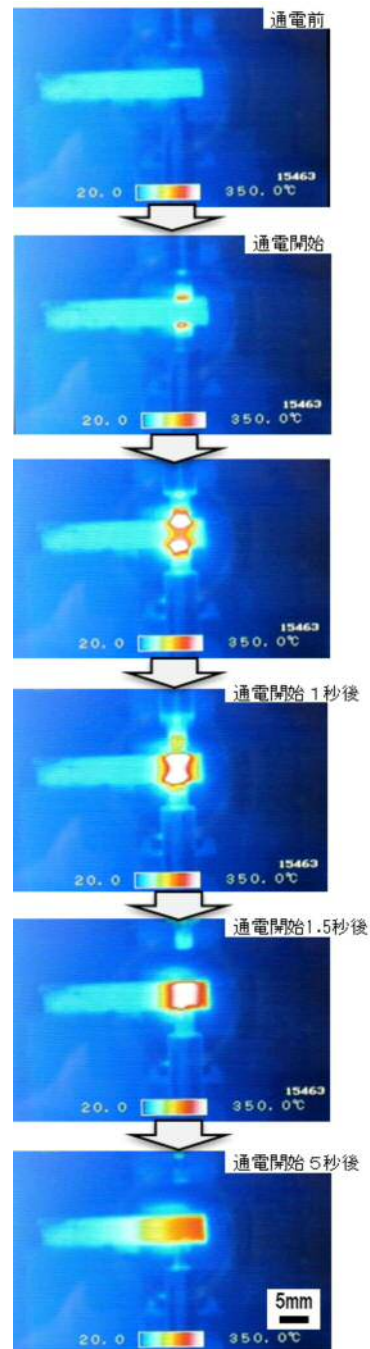


図3 材料表面の温度分布変化

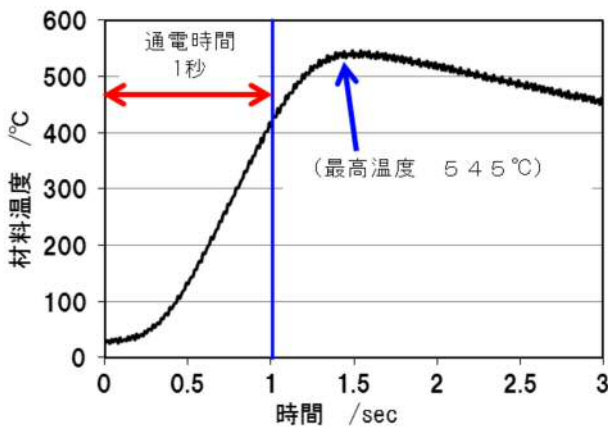


図4 材料温度と時間の関係（電流値775A）

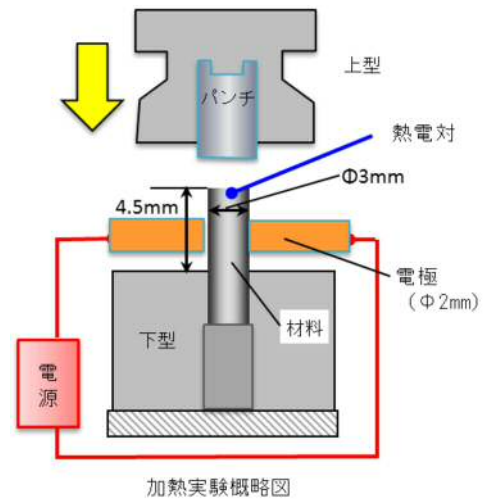


図6 温間ヘッドリング加工の概略図

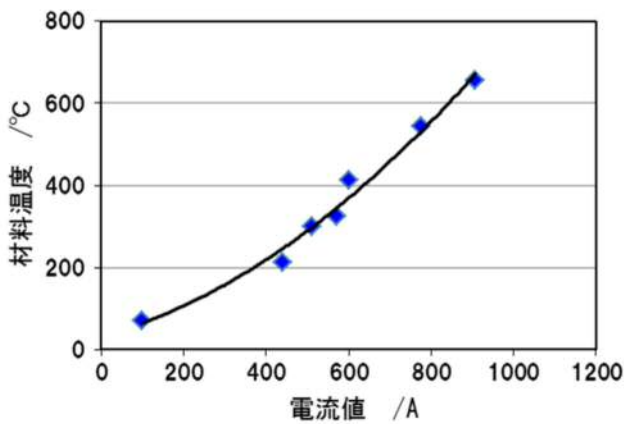


図5 材料温度と電流値との関係

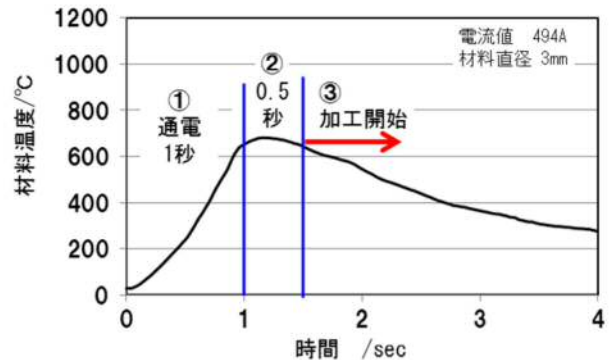


図7 通電開始から加工開始までの工程時間

また、材料の直径が3mmと8mmのものでも加熱実験を行った。直径5mmのときと同様に1秒間の通電のみで材料を400°C以上まで加熱することができた。なお、直径が大きくなる程、加熱にはより大きな電流値が必要であった。

4. 材料加熱によるヘッドリング加工

4.1 実験方法

SUS304棒材を用いてヘッドリング加工を行うため、SKD61材でダイスとパンチを製作し、据込み加工金型を製作した。加工の概略図を図6に示す。上型にはフラット目のパンチがついており、下型で材料を支えた。金型は油圧プレス機のボルスター上に設置し、プレス機のシリンダ下降とともにパンチで材料を加圧した。加工速度は1mm/s、パンチストロークは2.8mmとし、ストロークの最下点で1秒間保持し上昇させた。材料サイズは直径3mm、長さ7.5mmとした。加工部の材料長さは4.5mmとした。なお、温間ヘッドリング加工を実施する際は、図中に示すとおり材料の側面に電極（直径2mm純銅）を接触させ、あらかじめ材料に電流を流し電気抵抗を利用した加熱を行った。材料温度と時間の関係と通電開始から加工開始までの工程順を図7に示す。①で通電を1秒間行い、通電が終わってから②に示す0.5

秒の間に材料から電極を離れた。③は、通電開始から1.5秒後の加工開始であり、パンチで材料を加圧する工程を示している。加工時には、油圧プレス機に設置した荷重計と変位計によって加工荷重とパンチストロークを測定した。

4.2 実験結果

加工前の試験片形状と冷間（20°C）での加工実験で得られた加工品を図8に示す。加工された試験片上部は据込まれて樽形状に成形された。加工終了時の最大荷重値は27kNであった。

材料に通電を行い815°Cまで加熱して得られた加工品を図9に示す。加熱した場合、電極と接触した部分は黒色に変色していたが、得られる形状は冷間の場合とほぼ同じであった。材料温度の違いによる加工実験で得られた加工荷重とパンチストロークの関係を図10に示す。図中に示す材料温度は、材料に接触させた熱電対で測定された最高到達温度である。なお、同図には冷間（20°C）の加工荷重も記す。これは材料へ通電を行わずに冷間で測定した値である。いずれの温度でも加工終了時に最も荷重値が大きくなった。冷間（20°C）では最大荷重値は27kNであったが、材料を通電によって加熱して936°Cにすると、14kNまで荷重値は低下した。材料を加熱した場合、いずれの温度でも冷間

よりも荷重値は低下した。各温度の加工荷重—パンチストローク曲線を比較すると、高温になるほど荷重値は低下した。また、パンチストロークの小さい加工初期において荷重値の低下が顕著であった。

4. 3 実験結果からの考察

上記の結果より、加熱した場合に加工初期で荷重低下が起きる結果が得られたことから、加熱された材料の熱が加工中に金型に奪われていることが要因と考えられた。なお、今回の加工実験では加工速度を1mm/sで実施したが、加工速度を速くすることで材料の熱が金型に奪われるまでに加工を完了させ、さらに荷重を低減させる効果があると考えられる。そこで、材料温度が650℃で加工速度を10mm/sにした場合を想定して有限要素解析で荷重値を算出した。そ

の結果、最大荷重値は9.3kNとなった。加工速度1mm/sで最も温度の高かった936℃の実験で得られた最大荷重値は14kNであったが、それよりも荷重値が低減する結果となった。この結果から、加工速度を速くすることが加工荷重の低減に有効であると考えられる。

次に加工速度10mm/sで材料温度20℃と650℃で加工終了時における金型内部の相当応力分布を算出した。算出結果を図11に示す。材料温度20℃では、金型に1500MPa以上の相当応力が広く分布しているが、650℃の場合は、その範囲はわずかである。材料を加熱することで金型の負担を大幅に低下できることがわかる。

5. 冷間及び加熱ヘッディング加工品の評価

5. 1 加工品の評価方法

前述のヘッディング加工実験において、加工速度1mm/s及びパンチストローク3.5mmの加工条件で冷間(20℃)及び通電による加熱(936℃)で据込み加工を行い、加工品を得た。その両者の中心断面における金属組織観察及びビッカース硬さの測定を行った。

5. 2 評価結果

金属組織の観察結果を図12に示す。変形部は冷間及び加熱加工品ともに結晶粒が変形し潰れた状態となっていた。未変形部は結晶粒に変形は見られず、冷間及び加熱加工品ともにオーステナイト組織を確認できた。

加工品の中心断面において冷間加工品の変形部での硬さはHV437であった。加熱の変形部ではHV402であった。一方、冷間加工品の未変形部はHV329であり、加熱加工品の未変形部はHV322であった。

以上の評価を行ったが、変形部の硬さに若干の差が出たものの、金属組織及び硬さともに大きな違いは現れなかつ



図8 試験片と加工後の成形品 (20℃)



図9 加熱して得られた成形品 (815℃)

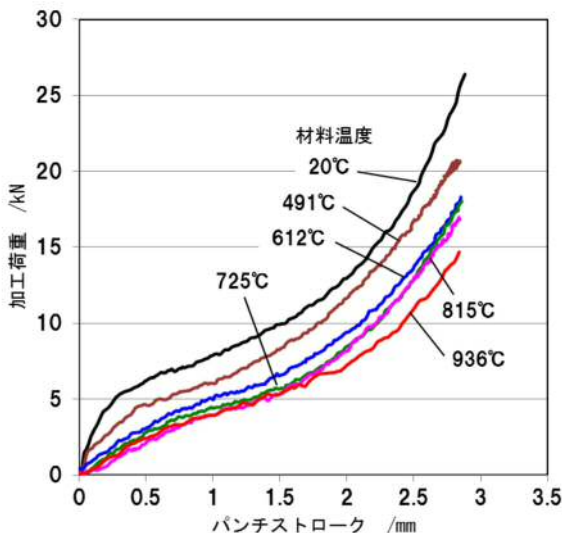


図10 加工荷重とパンチストロークの関係

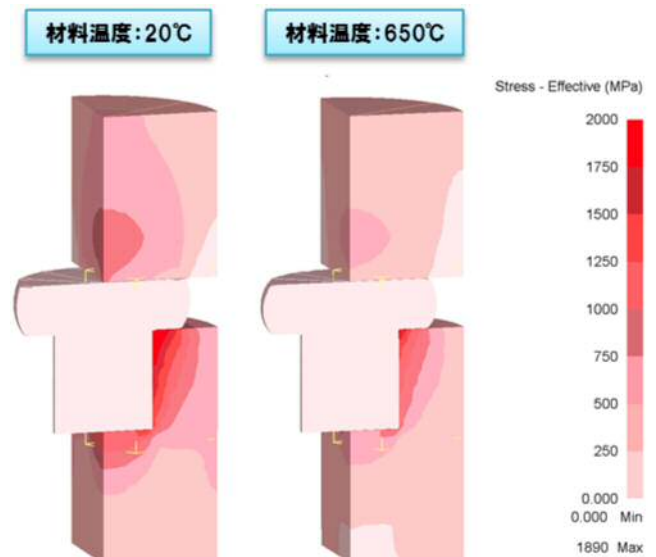


図11 金型内部の相当応力分布

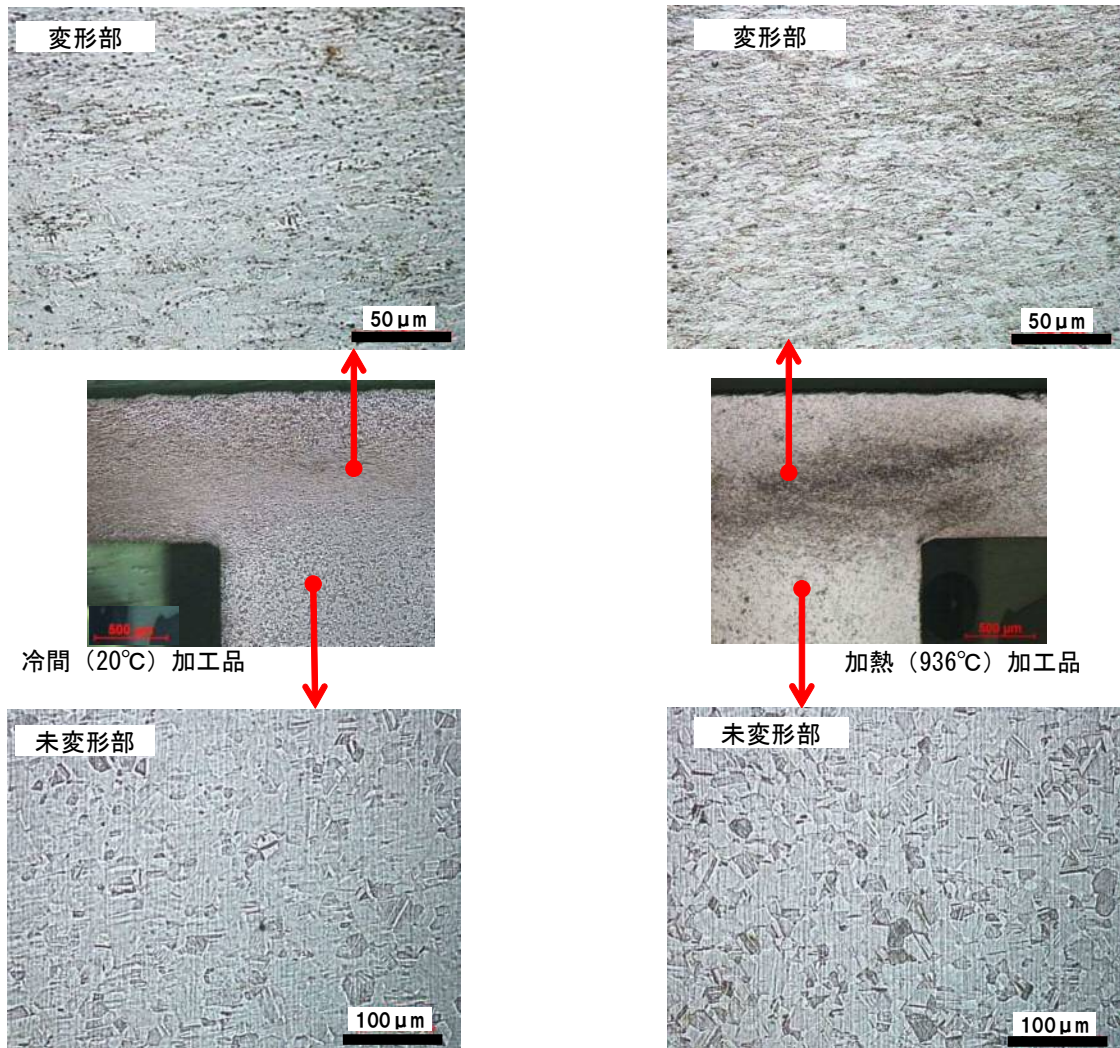


図12 金属組織の観察結果

た。通電によって材料を自己発熱させてヘッドリング加工を行っても、冷間と加熱では加工品内部に大きな差は生じにくいと考えられる。

6. 結 言

本研究では、SUS304棒材に直接電流を流し、材料自体が持つ電気抵抗を利用した加熱を行った。加熱した材料をヘッドリング加工することにより、加工荷重を減らせることを確認した。以下に確認した内容を記す。

(1) 加工したい箇所を電極で挟むことで、部分的に加熱できた。また、材料の加熱温度、時間及び電流値との関係を明らかにした。

(2) 材料の加熱によって、ヘッドリング加工の荷重を低減することができ、金型の負担低減につながる。

(3) 本加熱方法を用いた場合、冷間の場合と比較して加工品内部の金属組織及び硬さに大きな差は見られなかった。

参 考 文 献

- 1) 松田豪彦, 中西賢二: 塑性と加工, **54**, 632, 831-835 (2013)
- 2) 牟禮雄二, 中西賢二, 東俊浩, 尾崎俊一郎, 杉山一雄, 小中浩志: 塑性と加工, **52**, 603, 496-473 (2011)