

# 粒子衝突による金属薄板突合せ接合とその接合性評価

兵庫県立大学大学院 工学研究科 物質系工学専攻  
准教授 原田泰典  
(平成 18 年度一般研究開発助成 AF-2006005)

キーワード：ショットピーニング，突合せ接合，塑性流動

## 1. 研究の目的と背景

近年、高張力鋼や強化プラスチックなどの機能性材料の開発に伴い、高機能複合材料の利用範囲が急速に広がっている。複合材料は各種の接合技術によって作製されており、接合部を熔融状態にして接合する熔融接合法のほか、ろう付や拡散による界面接合法が用いられている。熔融接合法の場合、機械的接合や接着などの化学的接合に比べて継手効率が大きいことが大きな特徴であるが、母材熔融に伴う材質変化や溶接欠陥などの問題がある。一方、界面接合法の場合、拡散や圧接などの固相接合法であるので接合界面での反応が制御しやすいが、接合部の密着性や汚染皮膜除去などが要求される。また、界面接合法は異種金属間の接合に適しているが、接合部への熱的影響がある場合が多いので接合界面に金属間化合物層が形成されることが多い。このことは継手強度の低下につながる問題となっている。

接合部への熱的影響が比較的小さい接合法は、機械的接合法であり、リベットやボルトなどによる結合助材法やかしめ継手のような塑性変形による構造締結法がある。小型部材の組立の場合、塑性変形によって部材同士を機械的に結合することが多く行われている<sup>1), 2)</sup>。この構造締結法は、前述した機能性材料との接合による複合機能をもつ製品を得る方法としても用いられている。しかしながら、開発される材料や機能性材料の中には塑性変形が困難な金属材料、例えば高張力鋼、金属ガラス、マグネシウム合金は異種材料との接合が困難とされている<sup>3), 4)</sup>。とくに、熔融や材質変化を極力抑えた条件下での薄板同士の重ね合わせ接合や突合せ接合は容易ではない。そのため、新しい接合技術の開発が強く求められている。もし、難加工性材料との接合が可能となれば、複合機能をもつ製品の利用範囲が飛躍的に広がるものと考えられる。

報告者はこれまでにショットピーニング技術のように表面強加工を特徴とする粒子衝突による塑性変形を利用した異種材料同士の接合を試みている<sup>5-7)</sup>。ショットピーニング技術は、自動車や航空機などの機械部品の疲労強度向上を主な目的とした表面処理技術である。本技術はショットと呼ばれる無数の小径鋼球を高速度で材料表面に衝突させることで表面近傍に大きな塑性変形を生じさせてピーニング効果を発現させる冷間加工法である。

本研究では、ショットピーニングによって生じる材料表面近傍の大きな塑性変形を利用して異種金属薄板同士の冷間突合せ

接合を試みた。主に、金属薄板の接合性に及ぼすショットピーニングの加工条件の影響について調べた。接合性は、引張試験によって評価を行った。

## 2. 実験方法

### 2-1 突合せ方法

ショットピーニングの表面強加工で生じる塑性変形を積極的に利用することによって、冷間での異種金属薄板の突合せ接合を試みた。図1に、ショットピーニングによる金属薄板の突合せ接合法を示す。接合する薄板 A と薄板 B は段差なしで突合されており、接合部となる両薄板端部は凹凸形状となっている。接合部におけるクリアランスは投射材であるショットの直径以下である。また、マスキング板はショットピーニングによる薄板の変形、すなわちピーンフォーミングを防ぐためであり、接合部のみが部分加工されるようになっている。突合せ部にショットピーニングを行うと、表面層は塑性変形を生じるので凸部では展伸し、薄板 A と薄板 B の凸部同士はかしめ状態となる。本方法では、凸部の表面層で生じる塑性変形によって両薄板が接合する。

### 2-2 実験材料とショットピーニング

供試材は、市販の極低炭素鋼 SPCC、ステンレス鋼 SUS304、純チタン TB340、純アルミニウム A1050、純銅 C1100 である。金属薄板は幅 30 mm、長さ 60 mm、板厚 0.5-1.0 mm で、接合部である凸部は幅 3 mm、長さ 3 mm である。表1に、用いた金属材料を示す。

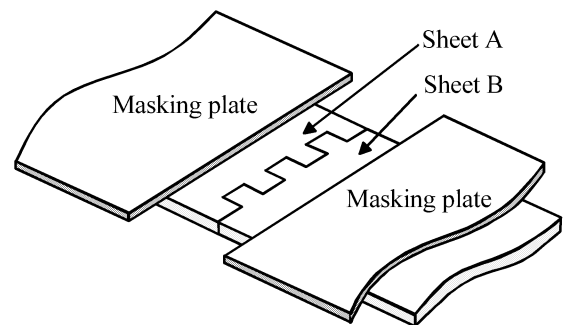


図1 ショットピーニングによる金属薄板の突合せ接合法

表1 ショットピーニング加工条件

Shot machine	Air type
Shot media	High carbon cast steel (700 HV), Cemented carbide (1400 HV)
Shot size d/mm	0.1
Air pressure p/MPa	0.4, 0.6, 0.8
Peening time s/s	30, 60, 120, 180, 240
Working temperature	Room temperature
Metal sheet (t=0.5, 1.0 mm)	Low carbon steel; SPCC, Stainless steel; SUS304, Pure titanium; TB340, Pure aluminum; A1050, Pure copper; C1100
Atmosphere	Air

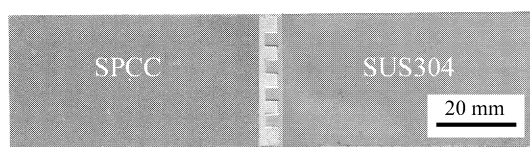


図2 突合せ接合した SPCC/SUS304 試験片の外観

ショットピーニングは空気式装置（新東プレーター社製，MY-30B）を用い，投射圧力 0.4-0.8 MPa，投射時間 30-240 s，室温の加工条件で行った．投射材は平均直径 0.1 mm の微細な鋳鋼製ショット（700 HV）と超硬合金製ショット（1400HV）を用いた．ショットは圧縮空気によってエアノズルから接合部の両面に対してほぼ垂直に噴射を行い，ノズルと試験片との投射間隔は 280 mm と一定にした．また，試験片は接合部の領域を除いて，マスキング板で覆い，同時にマスキング板で固定を行った．なお，本試験では，投射を試験片の接合部両面に対して行ったので，投射時間は片面の加工時間である．表 1 に，ショットピーニングの加工条件を併せて示す．

### 2.3 接合性の評価

接合性の評価は，引張試験機（インストロン社製，5582 型）を用い，クロスヘッド速度 2 mm/min の引張試験で接合強度を測定した．評価は，同一加工条件で処理した 3 個以上の試験片で行った．接合強度は，引張試験で得られた最大引張強さを金属薄板の長手方向に対して垂直な断面で割った値と定義した．

## 3. 鉄系／鉄系薄板の接合性

### 3.1 試験片の外観

鉄系同士における異種金属薄板の冷間突合せ接合を行い，接合性を調べた．図 2 に，ショットピーニングによって厚さ 1.0 mm の SPCC 薄板と SUS304 薄板を突合せ接合した試験片の外観を示す．加工条件は， $d=0.1$  mm の鋳鋼製ショット， $p=0.6$  MPa， $s=60$  s である．接合部である凹凸部はショットの衝突によって塑性変形し，クリアランスが無くなって密着して接合している様子が分かる．

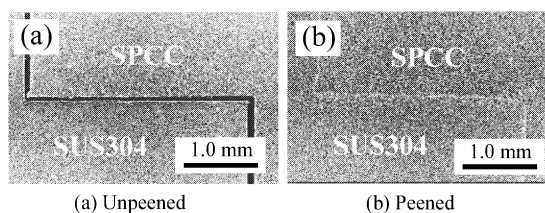


図3 SPCC/SUS304 試験片の接合部の SEM 写真  
(a) 未処理，(b)  $p=0.6$  MPa， $s=60$  s.

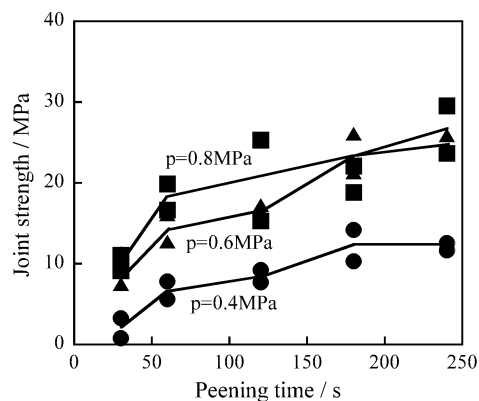


図4 投射圧力を変化させたときの SPCC/SUS304 試験片における接合強度と投射時間の関係

図 3 に，ショットピーニング処理前後の凸部表面における SEM 写真を示す．加工条件は， $d=0.1$  mm の鋳鋼製ショット， $p=0.6$  MPa， $s=60$  s である．接合前に見られる凸部間における空隙はショットの繰り返し衝突によって消えているのが分かる．この接合した試験片において，長手方向に対して手による引張力を与えたところ，接合部は破断しない程度の接合強度を示した．そこで，接合強度に及ぼす投射圧力や投射材などの投射条件の影響について調べるため，引張試験機を用いた接合性の評価を行った．

### 3.2 投射圧力の影響

図 4 に，厚さ 1.0 mm の SPCC 薄板と SUS304 薄板を突合せ接合した試験片における接合強度と投射時間の関係を示す．加工条件は， $d=0.1$  mm の鋳鋼製ショット， $p=0.4-0.8$  MPa， $s=30-240$  s である．投射圧力と投射時間の増加につれて接合強度が増加することが分かる．しかし，投射時間が長くなると，接合強度はあまり大きくならない．これは，ショットの繰り返し衝突によって，表面層が十分に塑性変形したためと考えられる．

### 3.3 投射材の影響

投射材材質の影響を調べるため，商用材の中で最も高比重かつ高硬度の超硬合金製ショットによる接合を行った．図 5 に，厚さ 1.0 mm の SPCC 薄板と SUS304 薄板を接合した試験片の接合性に及ぼす投射材の影響を示す．比較として  $d=0.1$  mm の鋳鋼製ショットの結果も破線で示す．加工条件は， $p=0.6$  MPa， $s$

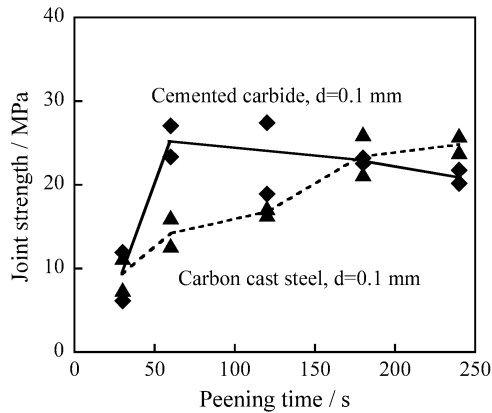


図5 投射材を変えたときの SPCC/SUS304 試験片における接合強度と投射時間の関係

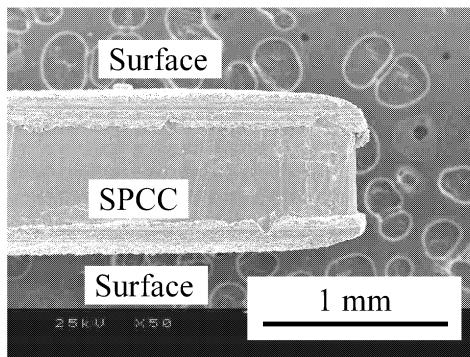


図6 引張試験後の SPCC 薄板の接合部における破断面の SEM 写真

=30-240 s である。超硬合金製ショットは鋳鋼製ショットに比べ、投射時間の短い段階で接合強度が高くなることから分かる。これは、超硬合金の比重が鋳鋼の約 2 倍であり、表面層の塑性変形が短時間に進んだためと考えられる。

### 3.4 接合部の状態

接合部である薄板凸部の接合状態を調べるため、引張試験後の凸部の破断面の観察を行った。厚さ 1.0 mm の SPCC 薄板と SUS304 薄板を突合せ接合した試験片を引張試験で破断させた。加工条件は、 $d=0.1$  mm の鋳鋼製ショット、 $p=0.6$  MPa、 $s=60$  s である。図6に、SPCC 薄板の凸部破断面の SEM 写真を示す。ショットが衝突した表面近傍には引張によって生じた接触傷が見られる。ショットの衝突によって両薄板の表面が塑性変形し、接合していた領域であることが分かる。しかしながら、断面中央部では接触傷はまったく見られない。断面中央部では接合されていないと思われる。これを確認するため、引張試験を行う前の凸部断面の観察を行った。

図7に、厚さ 1.0 mm の SPCC 薄板と SUS304 薄板を突合せ接合した試験片における凸部断面を示す。加工条件は、 $d=0.1$  mm の

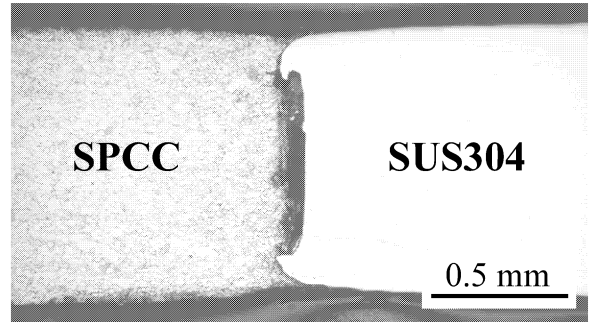


図7 ショットピーニング後の SPCC/SUS304 試験片における接合部断面

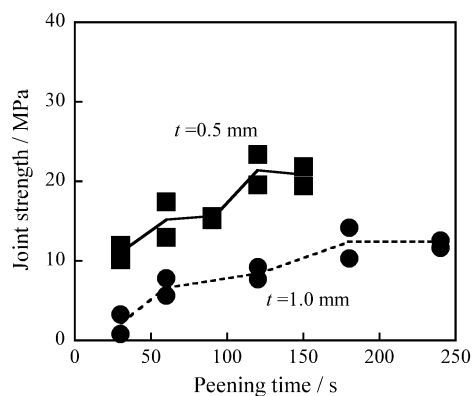


図8 板厚 0.5 mm の SPCC/SUS304 試験片における接合強度と投射時間の関係

鋳鋼製ショット、 $p=0.6$  MPa、 $s=60$  s である。ショットの衝突による塑性変形領域は薄板の中央付近までは到達していないことが分かる。

### 3.5 板厚の影響

前節において、薄板の接合は表面近傍のみで薄板中央部では接合していないことが分かった。接合部断面における接合領域の割合を増加させるため、薄板の板厚を減少させて接合性を調べた。図8に、厚さ 0.5 mm の SPCC 薄板と SUS304 薄板を突合せ接合した試験片における接合強度と投射時間の関係を示す。比較として厚さ 1.0 mm の場合で得られた結果も破線で示す。加工条件は、 $d=0.1$  mm の鋳鋼製、 $p=0.4$  MPa、 $s=30-240$  s である。接合強度は投射時間の増加につれて増加するが、 $s=120$  s 以上ではほぼ一定になる。また、厚さ 1.0 mm の結果と比べると、同じ投射時間に対して約 2 倍の接合強度を示す。加工条件は同じであるので薄板の表面層で生じる塑性変形領域もほぼ同じであると考えられる。それゆえ、接合強度の算出の定義から、薄板の板厚が半分、すなわち断面積が半分になったので接合強度は約 2 倍になったと考えられる。

## 4. 鉄系/非鉄系薄板の接合性

鉄系と非鉄系の組み合わせにおける異種金属薄板の冷間突合

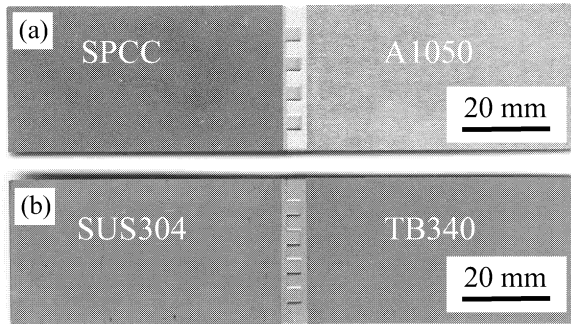


図9 突合せ接合した鉄系/非鉄系試験片の外観  
(a) SPCC/A1050 試験片,  
(b) SUS304/TB340 試験片

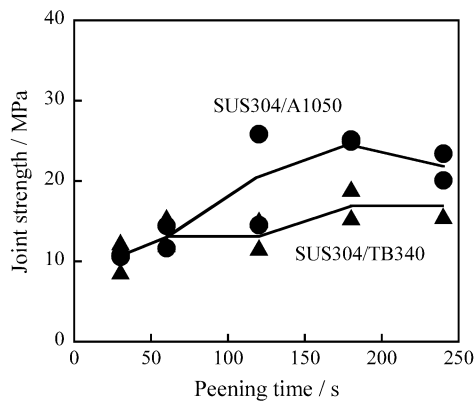


図10 SUS304/A1050 試験片及び SUS304/TB340 試験片における接合強度と投射時間の関係

せ接合を行い、接合性を調べた。図9に、ショットピーニングによって突合せ接合を行った厚さ1.0 mmのSPCC/A1050試験片(a)とSUS304/TB340試験片(b)の外観を示す。加工条件は、 $d=0.1$  mmの鑄鋼製ショット、 $p=0.6$  MPa、 $s=60$  sである。接合部における材料表面は塑性変形し、凹凸部が良好に密着して接合している様子が分かる。

図10に、厚さ1.0 mmのSUS304薄板に対して厚さ1.0 mmのA1050薄板及びTB340薄板において突合せ接合を行った試験片における接合強度と投射時間の関係を示す。加工条件は、 $d=0.1$  mmの鑄鋼製ショット、 $p=0.6$  MPa、 $s=30\text{--}240$  sである。投射時間の増加につれて接合強度は増加するが、 $s=180$  s以上では両試験片ともほぼ一定となる。接合部における薄板の表面層が十分に塑性変形したためと考えられる。

## 5. 非鉄系/非鉄系薄板の接合性

非鉄系同士の組み合わせにおける異種金属薄板の冷間突合せ接合を行い、接合性を調べた。図11に、厚さ1.0 mmのTB340薄板に対して厚さ1.0 mmのA1050薄板及びC1100薄板において

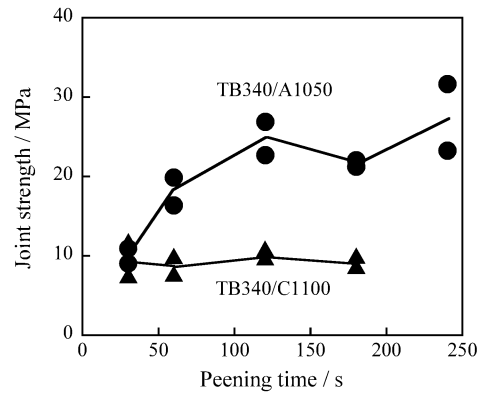


図11 TB340/A1050 及び TB340/C1100 試験片における接合強度と投射時間の関係

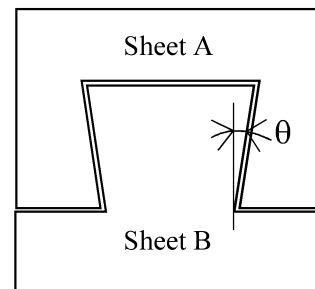


図12 改善した接合部の概略図

突合せ接合を行った試験片における接合強度と投射時間の関係を示す。加工条件は、 $d=0.1$  mmの鑄鋼製ショット、 $p=0.6$  MPa、 $s=30\text{--}240$  sである。投射時間に対する接合強度の変化は、金属薄板の組み合わせによって違いがあることが分かる。TB340/A1050試験片の場合、投射時間の増加につれて接合強度は増加し、 $s=150$  s付近で一定となる。しかし、TB340/C1100試験片の場合、投射時間が増加しても接合強度にほとんど変化が見られない。この理由の一つとして、引張試験中での純チタンと純銅の接触面における凝着性が低いことが考えられる<sup>8)</sup>。しかしながら、本理由については現在のところ明らかにできていない。

## 6. 接合性の改善

前章までの結果から、ショットピーニングによって異種金属薄板の冷間突合せ接合が可能であることが分かった。しかしながら、突合せ接合を行った試験片における接合強度は接合した異種薄板の母材強度に比べてかなり低い。そこで、接合性を改善するため、接合部である凸部形状の工夫を試みた。

図12に、接合強度を高めるために改善した接合部の形状を示す。凸部はテーパ形状となっており、両薄板の突出部がアンカー効果を生ずることができるようになっている。

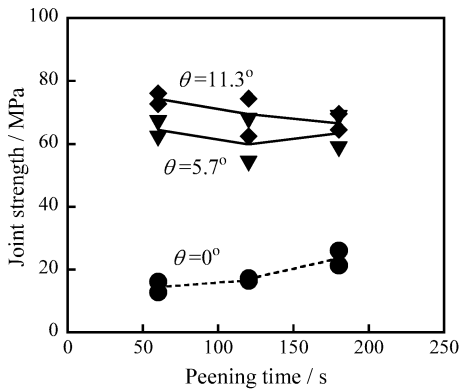


図13 改善した接合部をもつSPCC/SUS304試験片における接合強度と投射時間の関係

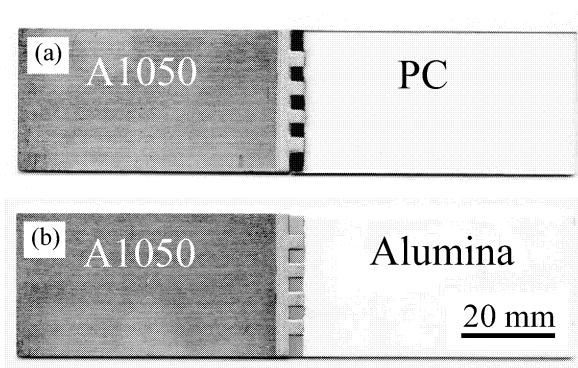


図14 突合せ接合した金属/非金属試験片における外観  
(a) A1050/PC試験片,  
(b) A1050/Alumina試験片

図13に、テーパ付凸部を有する厚さ1.0 mmのSPCC薄板とSUS304薄板を接合した試験片における接合強度と投射時間の関係を示す。比較としてテーパなし凸部の試験片で得られた結果も破線で示す。テーパの角度は $\theta=5.7^\circ$ と $\theta=11.3^\circ$ である。加工条件は、鑄鋼製ショット、 $p=0.6$  MPa、 $s=60\text{--}180$  sである。接合強度は投射時間が増加してもほとんど変化していない。また、接合強度に及ぼすテーパ角度の影響もあまり大きくないことが分かる。一方、凸部形状の変更によって、接合性は改善されているのが分かる。テーパ付凸部試験片の接合強度は、テーパなし凸部試験片のそれと比べ3~4倍である。しかしながら、母材強度に比べると高くはない。現在、投射条件、投射材及び接合部形状などを変化させることによってさらなる接合性向上の検討を行っている。

## 7. 金属系/非金属系薄板の接合性

前章までの接合結果より、塑性変形の可能な材料であれば、組み合わせる材質にあまり影響されないことが分かった。これ

は、本方法が薄板凸部の表面における塑性変形によって接合が達成されているためである。そこで、一方の薄板の接合部表面が塑性変形しても接合は可能であると考え、金属系と非金属系の接合を試みた。図14に、厚さ1.0 mmの純アルミニウム薄板に対して、厚さ1.0 mmのポリカーボネイト; PC (a)及びアルミナ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (b)をそれぞれ接合させた試験片の外観を示す。加工条件は、 $d=0.1$  mmの鑄鋼製ショット、 $p=0.4$  MPa、 $s=60$  sである。接合強度は低かったが、いずれの試験片においても接合部において密着しており、接合は可能であった。

## 8. 結言

本研究では、ショットピーニングによって材料表面近傍に生じる大きな塑性変形を利用して異種金属薄板同士の冷間突合せ接合を試みた。本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 投射圧力と投射時間を増加させると、接合性は向上するが、表面層の塑性変形が十分に進行すると接合強度は一定となることが分かった。
- (2) 鑄鋼製ショットに比べ高比重かつ高硬度の超合金製ショットは、短い投射時間で接合強度を高めることが分かった。
- (3) 接合部断面の観察によって、接合はショットの衝突した表面近傍のみで達していることが分かった。
- (4) 接合強度は接合した薄板の母材強度に比べてかなり低いことが分かった。接合部形状の工夫によって接合性の改善が見られたが、今後さらなる接合性の改善が必要であることが分かった。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成 (AF-2006005) を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 松村吉修・小川伸一・三崎利次:自動車技術, 61-4(2007), 78-82.
- 2) 加藤亨・森謙一郎:塑性と加工, 47-541(2006), 119-123.
- 3) 西山信行・富永亮・網谷健児・井上明久:金属, 75-2(2005), 121-124.
- 4) 中田一博:軽金属溶接, 46-8(2008), 347-351.
- 5) 原田泰典・宇治橋諭・森謙一郎:塑性と加工, 45-525(2004), 842-846.
- 6) 原田泰典・宇治橋諭・梅村貢・小林祐次・土田紀之・深浦健三:同上, 47-542(2006), 221-225.
- 7) 原田泰典・宇治橋諭・小林祐次:ショットピーニング技術, 19-1(2007), 9-16.
- 8) 村田裕滋:チタニウム・ジルコニウム, 40-2(1992), 81-86.