

# 回転ねじり加工押し出し法の開発とアルミニウム合金 結晶粒組織の微細化による高性能化

京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻  
助教 足立大樹  
(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008021)

キーワード：回転ねじり加工押し出し，結晶粒微細化，集合組織制御

## 1. 緒言

近年，二酸化炭素排出量削減のため，輸送車両の軽金属化による燃費向上への要求が年々高まっている．そのため，軽金属合金の高強度化と加工性の向上が急務となっており，靱性の低下なく強度を向上させる結晶粒の微細化がもっとも有効であると考えられる．軽金属合金の結晶粒微細化法として様々な加工熱処理法が用いられてきたが，近年，押し出し加工技術を応用し金属材料に非常に大きなひずみを加え，金属内部の結晶粒を微細化するとともに金属の機械的性質を向上させる巨大ひずみ加工法に関する研究が多く行われている．研究例として金型を回転させるねじり押し出し法<sup>1)</sup>，高速回転偏心ねじり押し出し加工法<sup>2)</sup>，従来の ECAP 法を応用したねじり押し出し加工法の研究<sup>3)</sup>が挙げられる．しかし，これらのねじり押し出し加工は既存の押し出し装置に取り付けが難しく，特注の押し出し加工機が必要となるため実用化が進んでいない．

そこで本研究では，既存の押し出しプレス機を使用し，押し出し口から押し出された材料にねじり加工を加える回転ねじり加工押し出し機を試作し，ねじり押し出し材の機械的特性に及ぼすねじり速度，温度の影響を評価した．また，ねじり押し出し材を使用する製品としてカーポートを想定しているため，優れた押し出し性を有し，建築用部材として使用されている A6063 アルミニウム合金を使用した．

## 2. 実験方法

### 2・1 回転ねじり押し出し機の開発

Fig. 1 に本実験で製作した回転ねじり押し出し機の概略図を示す．また，Table 1 に実験装置の各部の名称を示す．表中の番号は Fig. 1(a)の番号に対応している．実験装置は押し出された材料を掴むチャック，ねじり加工時のトルクを計測するトルク変換機，ねじり加工を行うモーター，この 3 つの装置を連結するカップリング，装置を支えるための支柱，支柱を取り付ける土台，組み上げた装置を支柱に取り付けるための装置接続部から構成されている．実験は Fig. 1(a)のように 110mm を押し出しておきその先端をチャックではさむ．そして押し出しと同時にチャックを回転させ Fig. 1(b)のようにねじり押し出し加工を 10rpm で施した．

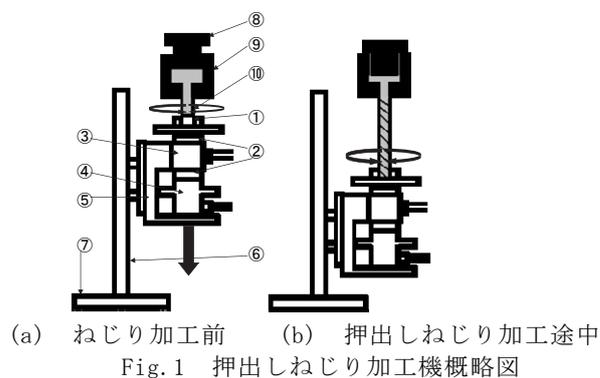


Table 1 実験装置の各部名称

①	チャック
②	カップリング
③	トルク変換機
④	モーター
⑤	装置接続部
⑥	支柱
⑦	土台
⑧	パンチ
⑨	コンテナ
⑩	押し出し材

### 2・2 ねじり加工方法

ねじり押し出し加工は Fig. 1 の回転ねじり押し出し機と 100ton 縦型油圧プレス機を使用して行った．押し出しねじり加工に使用する試料は A6063 鋳造材を使用した．また，加工時の結晶粒の粗大化を防ぐため Zr を添加した A6063-0.15%Zr 鋳造材を製作し使用した．これらの鋳造材を  $\phi 31.8 \times 40\text{mm}$  のビレットに旋盤加工し，100ton 縦型油圧プレス機にて押し出し温度  $T_E=480^\circ\text{C}$ ，押し出し比  $R=10$  ( $\phi 10\text{mm}$ )，ラム速度  $V_R=0.5\text{mm/s}$  で押し出しを行った．モーターの回転速度（ねじり速度）は 10 および 30rpm とした．また，一部の試料では押し出し温度  $T_E=400^\circ\text{C}$  でねじり押し出し加工を行った．押し出しねじり加工で得られた試験片の直径の測定にはマイクロメータを使用し，ねじり押し出し材の先端から 5mm 間隔で直径を測定した．ねじり押し出し材のねじり角度は試料表面のダイラインからデジタルマイクロスコープにより計算して求めた．

### 2・3 硬さ値の測定

ヴィッカース硬さ試験については A6063 押出し材, A6063 ねじり押し出し, A6063-0.15%Zr 押し出し材および A6063-0.15%Zr ねじり材押し出しの試料の先端から 30, 110, 140, 170, 200mm の 5 箇所の硬さをマイクロビッカース硬さ試験により測定した. 各箇所のマイクロビッカース硬さは試料の表面から 0.5mm 間隔で 10 箇所測定した. マイクロビッカース硬さ試験の印加時間および印加荷重はそれぞれ 5s, 490mN とした.

### 2・4 結晶粒組織の観察

先端から 170mm の箇所の表面を 0.5mm 深さまで #80 ~ #2000 までの SiC 研磨紙で研磨した後, ダイヤモンドペーストとコロイダルシリカを用いてバフ研磨を行った. (株)日本電子製 JSM-6500F に搭載した (株)TSL 製 OIM により研磨面の方位測定を行い, 結晶粒組織を観察した. また, 得られた方位データから 111 極点図を作成し, 集合組織の評価を行った. 測定範囲は 110  $\mu\text{m}$  四方である.

## 3. 実験結果

### 3・1 試験片直径およびねじり角度の変化

A6063 押し出し材, A6063 押し出しねじり材の表面のダイラインを観察したものを Fig. 2, Fig. 3 に示す. 図は先端から 30mm, 110mm, 140mm, 170mm および 200mm の 5 箇所の表面の様子である. Fig. 2 のねじり加工を加えていないものは表面のダイラインが先端から後端まで変化が見られない. Fig. 3 のねじり加工を加えたものは, ねじり加工を開始した 110mm 付近から後端にかけてねじれている様子が分かる. このダイラインの変化は Zr を添加した A6063-0.15%Zr 材でも同様の変化が見られた.

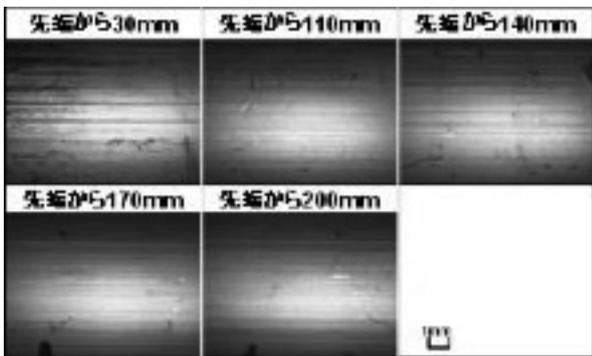


Fig. 2 A6063 押し出し材ダイライン

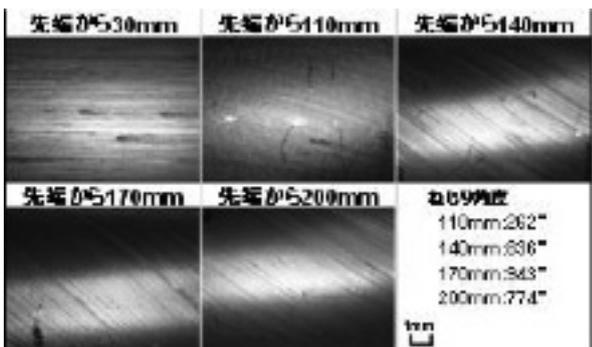


Fig. 3 A6063 押し出しねじり材ダイライン

次に A6063 押し出しねじり材および A6063-0.15%Zr 押し出しねじり材のねじり角度の変化を Fig. 4 に示す. 表面の観察と同様にチャックで掴むために押し出した 30mm 付近のねじり角度は 0 であるが, 押し出しねじり加工を始めた 90~100mm 以降からねじり加工が始まっているのが分かる. また, 回転速度は 10rpm の一定回転のためねじり角度が均一になっていない. 直径の変化を Fig. 5 に示す. 押し出しねじり加工を加えた押し出し材は直径が増加している. これは押し出しねじり加工を行った際に押し出し軸方向に圧縮応力が寄与されていると考えられる.

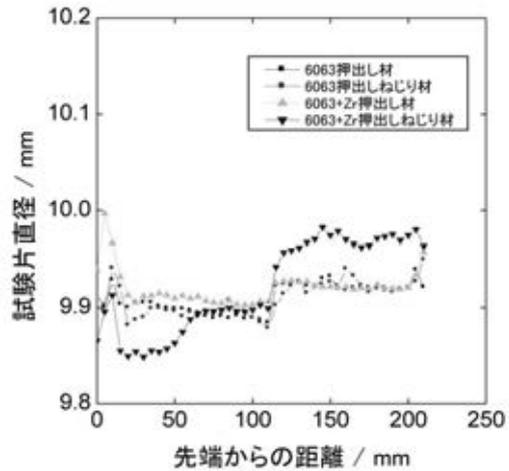


Fig. 4 直径の変化

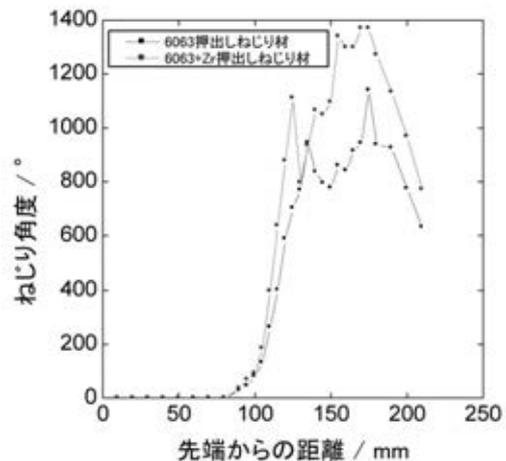


Fig. 5 ねじり角度の変化

### 3・2 マイクロヴィッカース硬さの変化

押し出し温度  $T_E=480^\circ\text{C}$  における A6063 合金および 0.15%Zr 添加した A6063 合金の押し出し材およびねじり押し出し材のヴィッカース硬さの変化を Fig. 6(a), (b), (c), (d) に示す. 回転速度は 10rpm である. A6063 押し出し材, A6063 ねじり押し出し材を比較すると A6063 ねじり押し出し材の硬さが低下している. また, A6063-0.15%Zr 押し出し材と A6063-0.15%Zr 押し出しねじり材を比較するとそれほど硬さの低下は見られなかった. これは Zr を添加したことで,  $\text{Al}_3\text{Zr}$  粒子の析出が生じ, 結晶粒の粗大化を抑制できたため

A6063 ほど硬さの低下が起きなかったと考えられる。

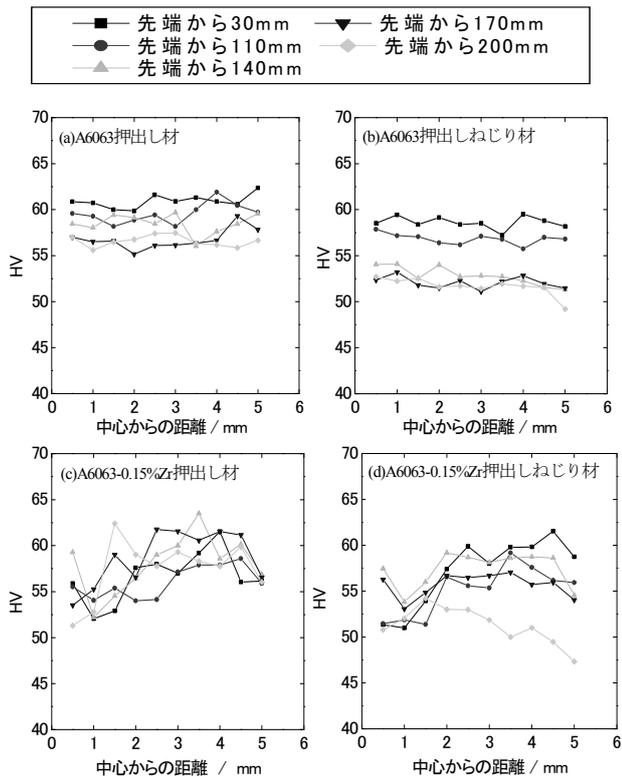


Fig. 6 ヴィッカーズ硬さ試験  
押し出し温度  $T_E=480^\circ\text{C}$ , ねじり速度 10rpm

A6063 押し出し材, A6063 ねじり押し出し材を比較すると A6063 ねじり押し出し材の硬さが低下している. また, A6063-0.15%Zr 押し出し材と A6063-0.15%Zr 押し出しねじり材を比較するとそれほど硬さの低下は見られなかった. これはジ Zr を添加したことで,  $\text{Al}_3\text{Zr}$  粒子の析出が生じ, 結晶粒の粗大化を抑制できたため A6063 ほど硬さの低下が起きなかったと考えられる.

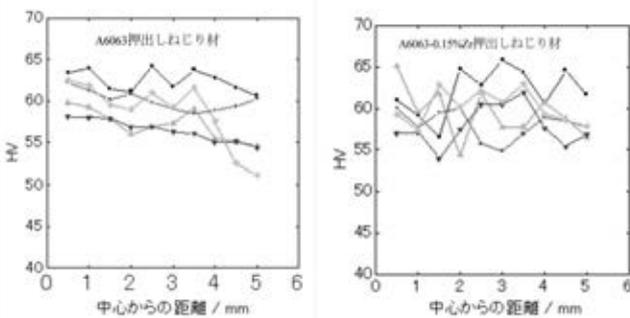


Fig. 7 ヴィッカーズ硬さ試験  
押し出し温度  $T_E=480^\circ\text{C}$ , ねじり速度 30rpm

Fig.7 に押し出し温度  $T_E=480^\circ\text{C}$ , ねじり速度

30rpm でねじり押し出しを行った押し出し材のヴィッカーズ硬度変化を示す. 10rpm でねじり押し出しを行った押し出し材では硬度が低下したが, 30rpmではA6063 ねじり押し出し材と A6063-0.15%Zr ねじり押し出し材ともに硬度が増加した。

### 3・3 押し出し材とねじり押し出し材の組織

A6063 押し出し材では粗大な結晶粒が観察され, ねじり速度の速いねじり加工を加えることにより, 粒界密度が高くなり, 結晶粒が徐々に小さくなっている様子が分かる. また, ねじり押し出し材であっても結晶粒は比較的等軸に近かった.

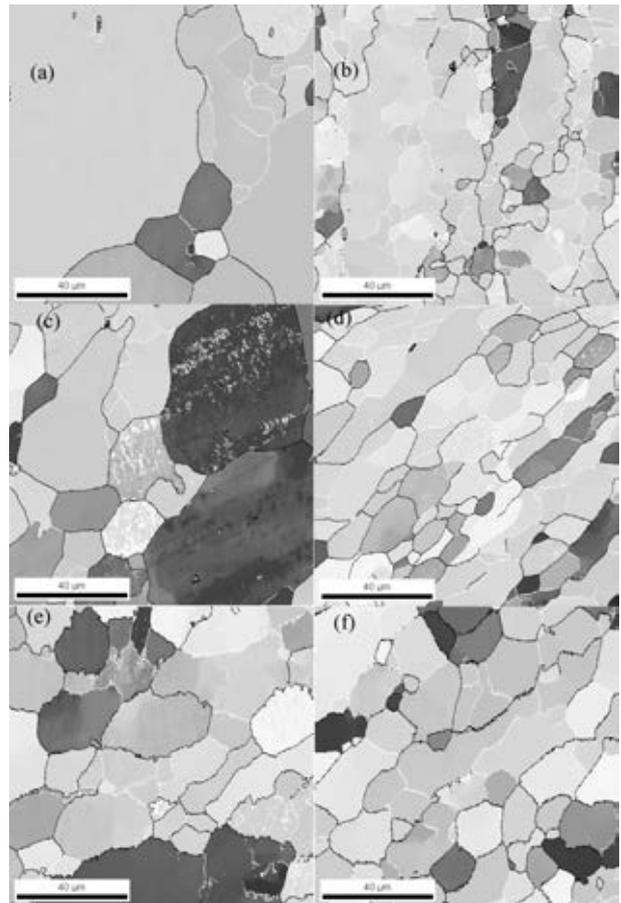


Fig. 8 押し出し材, ねじり押し出し材の微細組織  
押し出し温度  $T_E=480^\circ\text{C}$ , (a) A6063 押し出し材, (b) A6063-0.15%Zr 押し出し材, (c) 10rpm-A6063 ねじり押し出し材, (d) 10rpm-A6063-0.15%Zr ねじり押し出し材, (e) 30rpm-A6063 ねじり押し出し材, (f) 30rpm-A6063-0.15%Zr ねじり押し出し材, 黒線は方位差  $15^\circ$  以上の大角粒界を示す. 紙面上方向が押し出し方向, 紙面右方向が回転ねじり方向

一方, A6063-0.15%Zr 押し出し材では, 押し出し方向に伸びた粒の粒界近傍などに微細な結晶粒がわずかではあるが観察された. これは Zr を添加することによって, 押し出し中に動的再結晶が生じたためと考えられる<sup>4-5)</sup>. ねじり押し出し材では, 繊維状粒がねじり加工によって変形され, ねじり方向に傾いていることが分かるが, 6063 合金よりも結晶粒界密度は

若干高いものの、顕著に結晶粒が微細化されたという様子はみられなかった。これは、加工中に形成された微細な結晶粒が、押し温度が 480℃と非常に高いため、ねじり押し加工中に粒成長が顕著に生じ、粗大化したと考えられる。

よって、粒成長を抑制するため、A6063-0.15%Zr 合金を用い、押し温度を 400℃、ねじり速度 30rpm でねじり押し加工を行った。その結果を Fig.9 に示す。押し温度  $T_E=400^\circ\text{C}$ 、30rpm の A6063-0.15%Zr ねじり押し材では、非常に細い繊維状粒がねじり加工による変形によって回転ねじり方向に傾いていることが分かる。また、繊維状粒の長手方向と垂直方向に分断されることによって、つまり、Grain Subdivision が進行することによって結晶粒が微細化している様子が観察されている。これは押し温度が下がったことにより、ねじり押し加工中の粒成長が抑制されたためであり、480℃押し/ねじり押し材における粒界の曲率が 400℃ねじり押し材における粒界の曲率よりも小さいことがそれを明らかに示唆している。

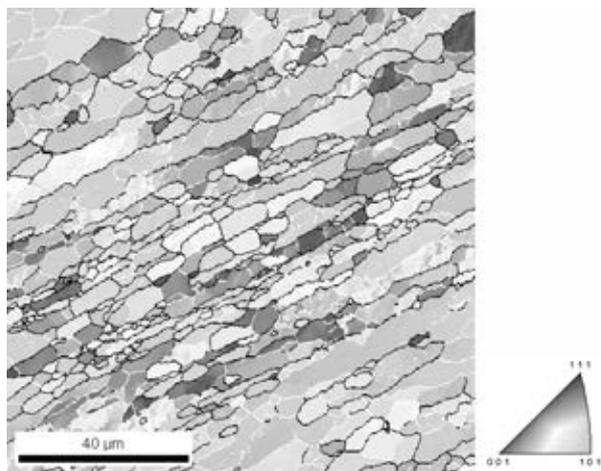


Fig. 9 A6063-0.15%Zr ねじり押し材の微細組織  
押し温度  $T_E=400^\circ\text{C}$ 、30rpm. 黒線は方位差 15° 以上の大角粒界を示す。紙面上方向が押し方向、紙面右方向が回転ねじり方向

### 3・4 押し材とねじり押し材の集合組織

EBSDF 測定結果から計算した(111)極点図を Fig.10 に示す。つまり、表面から 0.5mm 深さにおける集合組織である。紙面上方向が押し方向 (ED)、右方向が半径方向 (RD) であり、ねじり方向と一致する。一方、ねじり押し材では、いずれも同じような集合組織を示しており、ねじり加工を加えることによって、押し材では ED 付近に集積していた極がねじり方向に傾くに伴って二つに分裂していることが分かる。これは、(110)<112>集合組織がねじり方向に傾いた集合組織に近いと考えられる。このことから、ねじり押し加工は、低温で行うことによって結晶粒微細化が可能であるのみならず、集合組織を変えることが可能であることを示している。

押し材では、ED 付近に(111)極が集積しており、ED に伸びた繊維状粒が有する ED//<111>集合組織が

発達していると考えられる。

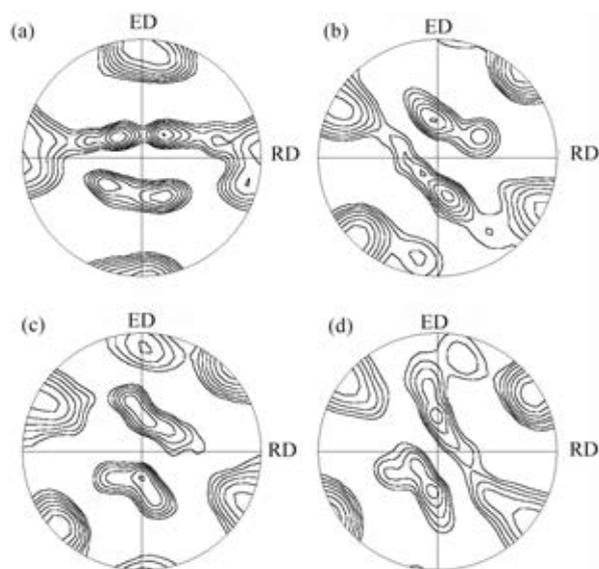


Fig.10 A6063-0.15%Zr 押し材、ねじり押し材の(111)極点図、(a)押し材、(b)480℃、10rpm、(c)480℃、30rpm、(d)400℃、30rpm

一方、ねじり押し材では、いずれも同じような集合組織を示しており、ねじり加工を加えることによって、押し材では ED 付近に集積していた極がねじり方向に傾くに伴って二つに分裂していることが分かる。これは、(110)<112>集合組織がねじり方向に傾いた集合組織に近いと考えられる。このことから、ねじり押し加工は、低温で行うことによって結晶粒微細化が可能であるのみならず、集合組織を変えることが可能であることを示しており、その結果として、加工性の向上が期待される。平行して行った AZ31 マグネシウム合金のねじり押し材では、ねじり角度の増加に伴い耐力が上昇し、室温形成も改善されたことが確認された。これはねじり押し加工による結晶粒微細化と集合組織の変化が原因であると考えられる。

## 4. まとめ

押し加工技術を応用し、アルミニウム合金を中心とした軽金属材料に非常に大きなひずみを加え、結晶粒を微細化する方法として、既存の押しプレス機に容易に取り付けられる回転ねじり押し機の試作開発を行った。

押し温度を高温にすると、ねじり押し加工中に結晶粒の粗大化が生じ、結晶粒を微細にすることが出来なかったが、押し温度を 400℃まで下げることによって、ねじり押し加工中に Grain Subdivision が生じることによる結晶粒微細化が進行することが明らかとなった。また、ねじり押し材の集合組織は、押し材の集合組織とは異なっていたため、回転ねじり加工押し法は集合組織の制御法としても応用することが可能であると考えられる。

また、ねじり加工による変形量は中心部分から表

面部分に向かうにつれて大きくなるため、回転ねじり加工押し出し法による結晶粒微細化の効果は表面近傍の方が大きく、中心部分では比較的小さい。よって、回転ねじり加工押し出し法は特に中空の管材への適用が最も効果が高く、適用が期待される。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、財団法人天田金属加工機械技術振興財団から研究助成をいただきました。ここに記して深く謝意を表します。また、共同研究者の富山大学の准教授 会田哲夫先生ならびに修士吉田克英君に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 高橋肇・水沼晋・飯塚隆道・藤瀬亮・板倉正太・三井和博・高津正秀：平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2008) 199-200.
- 2) 高津正秀・辻川正人・水沼晋・高橋肇・寺西大志：平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2008) 197-198.
- 3) 国吉和男・山根琢矢・近藤了嗣・真壁朝敏：琉球大学工学部紀要 69 (2008/5) 1-5.
- 4) H. Adachi, K. Osamura, K. Kikuchi and J. Kusui : Mater. Trans., 46 (2005) 211-214.
- 5) 足立大樹・長村光造・棚橋拓也・菊池健・楠井潤：軽金属, 55 (2005) 164-168