

研究種目：基盤研究（C）  
研究期間：2006-2008  
課題番号：18560083  
研究課題名（和文）ねじり押し加工した材料の機能と強度特性  
研究課題名（英文）Strength and performance of materials deformed by torsion and extrusion processing

研究代表者  
真壁 朝敏（MAKABE CHOBIN）  
国立大学法人琉球大学・工学部・教授  
研究者番号 70181609

研究成果の概要： 塑性加工によって、軽金属等の結晶粒を微細化し強度特性を改善する手法について検討した。本研究手法は、材料をねじり押し出すことに大きな特徴があり、特にねじり変形によって加工ひずみに差が生じることに起因して、内部と表面層で異なる性質の素材が形成される。ねじり押し加工した場合、表面層と内部で硬さの異なる材料が作製され、特にアルミニウムにおいては、静的強度特性および疲労強度特性が共に改善されることがわかった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	800,000	0	800,000
2007 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	510,000	3,010,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：材料設計・プロセス・物性・評価・傾斜材料

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 金属材料の結晶組織の微細化について

結晶の微細化によって金属材料の比強度が向上し、高機能化する。それによって用途が高まるのが材料開発の観点からも注目されている。そのため、粉末を用いた微細結晶材料の生成、熱処理による材料の機械的性質の改善、そして塑性加工による金属材料の結晶粒の微細化と高強度化を目指した研究が継続的になされている。結晶粒が微細化された比強度の高い材料の中には、超塑性特性を示すものもこれまでの研究によって開発されている。また、材料の比強度を高めることはエネルギー問題とも関連し、このような

研究分野は材料開発のフロンティア的な分野として注目され、種々の研究機関で積極的な研究推進がなされてきた。そして、それらの一部の研究成果は実用化されている。しかしながら、それらの研究成果では、十分に大きな寸法の材料を生成することが困難なこともあり、大型の機械要素等への適応には至っていないと思われる。

## (2) 塑性加工による材料の強化等について

結晶粒の微細化手法の一つに ECAP (Equal-Channel-Angular Pressing) という手法がある。その手法においては、同じ面積の矩形断面の溝孔が内部で交差した金型を用い、被加

工材料を金型溝孔へ押し込む。そして、材料の接触面と溝孔の面の位置関係を変えながら、複数回の工程（8回程程度の工程）で押し出し加工を行い、材料の結晶を微細化する。また、断面全体に渡って一様な組織が得られることも大きな利点の一つとなっていると思われる。ECAP では、溝孔の断面は正方形が多く、溝の交差部は直線的で湾曲していないという特徴があり、アルミニウム合金や銅合金に適応されている例が多い。また、その手法においては、静的強度が改善されるが疲労強度は改善されない、静的強度や疲労強度が両方とも改善される等の事例があり、また、加工による材料の素性と強度特性が明らかになっていない面もある。そして、ECAP は安価に行える加工手法としても注目されていることが報告されている。そこで、本研究では、ECAP を参考にして検討を進めている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、塑性加工によって結晶組織が微細化した材料を作成し、その材料の変形特性と強度特性を評価することである。常温で塑性加工した材料の強度が向上し変形能がある程度保たれるならば有意義なことであると考えられる。加工手法として ECAP にならば、溝を加工した金型を用いてねじりと押し出しを行うことを検討した。そして、安価な手法として、特殊な設備を必要とせず、小さな研究室や中小企業においても適応できるものであることを念頭においた。そのため本研究においては安価に作成した金型を用いて、ねじりながら押し出し加工をする手法とその加工手法の実現性に関して主に検討していく計画を練った。

ECAP においては、加工した金属材料の組織が断面全体に渡ってほぼ均質になることが示されている。本研究の手法でも ECAP と同様に経路が屈曲した溝孔を設けた金型を用いて塑性加工を行ったが、ECAP とは異なり、表面と内部で結晶組織が異なる材料の開発を検討することを目的とした。材料の表面と内部で結晶組織が異なり、異方性の生じた材料では疲労特性や静的な破壊特性において、従来の材料とは異なる形態を示すことが考えられるので、基礎実験的にも非常に興味深いことと思われる。

## 3. 研究の方法

研究を推進する際には材料の加工方法の開発を主にして、加工手法の理論的解釈そして加工した材料の機械的性質に基づく材料特性の評価を行った。

特に、加工手法として、材料試験機である軸力ねじり試験機を用いた検討と旋盤を用いた検討を行った。原理は同じであるので、まず前者によって基本的な手法を示し、加工

手法を主眼に置くという観点から最終的に工作機械を用いる手法で実験を進めている。また、ねじりながら押し出し加工をするためには、屈曲した円形断面の溝孔を有する金型を設計・製作することが重要であり、種々の形状の金型を作成する必要がある。そして、製作した金型と被加工材料を用いた試験片の形状との関係の検討や加工手順の関係について検討した。最後に、静的および動的な材料試験によって加工された材料の特性を評価し、材料の改善性について検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 基礎的なねじり押し出し手法の提案

初めに、軸力ねじり試験機を用いて、本研究手法による加工の可能性、金型の溝寸法と組み合わせる試験片の直径について検討した。その際に検討したねじり押し出し加工の機構の概略図を図1に示す。これらは、試験片を掴む装置、押込む装置、ねじる装置、改良した金型およびこれらの固定台から構成される。また、一般的な工作機械である旋盤を用いることによっても同じような原理で加工ができた。

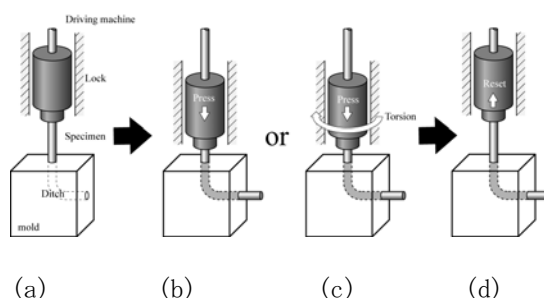


図1 改良したECAP金型とねじり試験機を用いた結晶粒微細化処理技術の略図 (a) 金型の溝へ試験片を挿入 (b) 試験片の押し出し作業 (c) ねじりながら押し出す作業 (d) 掴み部をもとの位置にもどす。

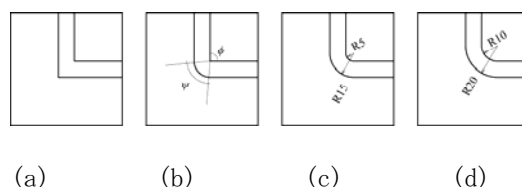


図2 金型の比較 (a), (b) ECAP で用いられる金型と (c), (d) 本研究手法 (円形断面) の金型の例

加工の手順としては、まず、試験片を掴む装置で試験片を固定する {図1 (a)}。次に、金型に押込む {図1 (b)} か、あるいは、押込みと同時にねじることで金型に試験片をねじ込む (ねじり押し出す) {図1 (c)}。掴み

部の稼動範囲の限界まで押し込んだ後、掴み部を初期位置に戻して、試験片を掴み直す {図 1(d)}、そして、再び、試験片を金型に押し込む工程を連続的に行うことで、より長い材料が加工できる。この手法から、材料を金型に押し込むだけよりも、押し込みと共にねじりを与えた方が、より強ひずみを付与でき、その結果、結晶粒の微細化が進行することが期待できると考えた。

加工に用いる金型溝孔の断面形状の例を図 2 に示す。従来の ECAP における金型 {図 2(a), (b)} は、矩形溝孔が金型内部で交差しているタイプと、交差部の近傍に曲率を与えたタイプがある。この場合、 $N$  回の押し出しにより、溝孔交差部でせん断変形により材料に与えられる相当塑性ひずみ量は次式で表される。

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left\{ 2 \cot \left( \frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right\}$$

ここで、 $\phi$  は溝孔交差角度、 $\psi$  は交差点近傍の曲面部が成す角度である。

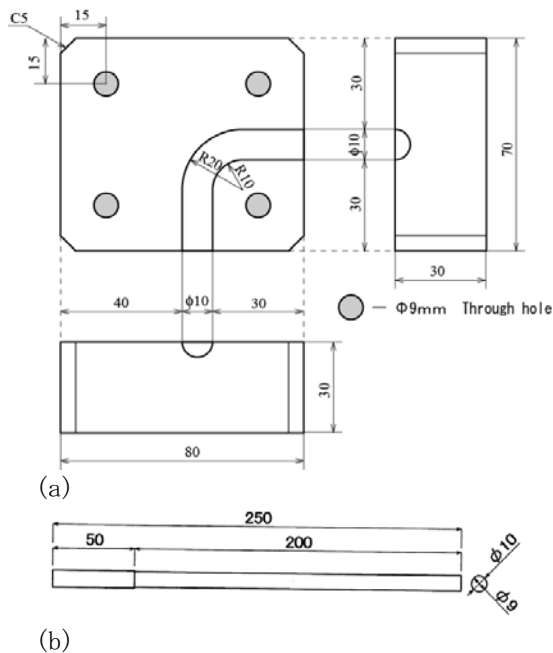


図 3 用い金型の詳細寸法と押し込んだ試験片の例 (直径 9mm の場合) (a) 金型の寸法 (b) 試験片形状の例

本実験手法で用いた金型 {図 2(c), (d)} は溝孔の交差部を湾曲にしているのが特徴であるが、それはねじり加工を行うため、交差部が直行していた場合は加工が不可能であるためである。また、溝孔はねじり加工に適した円形断面である。図 3(a) は用いた金型の寸法の例であり、金型は割型となっており、同じ形状の 2 つの金型を突き合わせて使用した。このようにすると特殊な加工を必要と

せず、金型製作費用が安価で済む。また、図 3(b) に使用した試験片の形状の例を示す。加工の可能性を検討するため、種々の形状の試験片を作成して、試験片寸法と金型溝形状の適正な組み合わせについて検討した。詳細は省略するが、全体的に均質な変形が生じる試験片も検討した。

## (2) 加工による材料硬化の理論について

押し出しの際にねじりを同時に負荷することで、押し出しの場合よりも結晶粒が微細化するとともに材料の強度が増す可能性があることに関して理論的な考察を行った。その詳細な解析結果は省略するが、本加工による結晶粒の強化等に関して次のように考察された。

多結晶における変形は、隣接結晶粒間における弾性不適合応力の効果、塑性ひずみの非適合性の効果、粒界に堆積した転位列による応力集中の効果が重畳し、粒界を通じた変形拘束の相互作用を及ぼし合いながら生じている。このため、GN 転位の発生は、粒界における変位の連続性を満たすために、不均一変形が生じる粒界近傍が主要である。しかしながら、これだけではなく、結晶粒の形状変化の相互拘束により、結晶粒内部に発達した帯状の領域に、GN 転位が高密度に堆積する GN 転位組織を形成することがわかっている。変形の進行と共に GN 転位組織が発達し、新しい結晶粒界 (GN 粒界) として大傾角化することで結晶粒の微細化が生じる。このため、外部負荷を与える段階で材料内部においてひずみの空間勾配が生じるように制御すれば、結晶粒の微細化の進行を促進することができると考えられる。

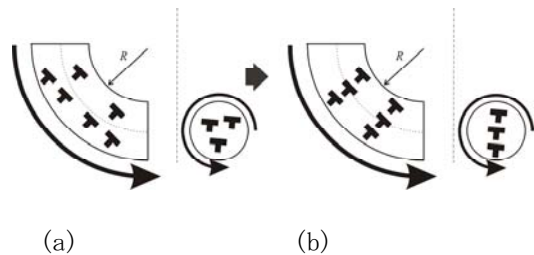


図 4 ねじり押し出しによって転位が増殖する過程の模式図 (a) GN 転位の発生 (b) 変形の進行に伴う GN 転位組織の発達

ここで、試験片を金型にねじり込んだ場合における変形状態の概略図を図 4 に示す。ねじり込みによって曲経路を通過することにより、せん断変形とともに、材料には曲げとねじりに伴うひずみの空間勾配が生じ、GN 転位が発生する {図 4(a)}。この場合、試験片表層側の

変形勾配が大きく、GN 転位の発生が顕著となり、変形の進行と共に GN 転位組織を形成する {図 4(b)}。このため、本研究で提案する方法で、変形前後で断面形状をほぼ一定に保ったまま、結晶粒微細化と硬化を促進させることができると考えられる。

以上の理論的な解釈によって、ねじり押し出しによって材料組織の改善が期待できる機構が検討された。

### (3) ねじり押し出し材、ねじり加工材の材料特性について

材料試験機および旋盤を用いて試験片をねじり押し出し加工とねじりだけの加工を行った。まず、ねじり加工で試験片にひずみを与えた材料の強度特性に関する結果を示す。

用いた素材は 99.7%の純アルミニウムと 99.8%の純銅である。それらの素材は半径  $r$  が 5 mm の丸棒である。素材の初期の引張り強さをなるべく揃えるという観点から、純アルミニウムの場合は受け入れたままの状態、純銅の場合は、400℃で 1 時間の焼きなましを行って加工した。加工した素材のせん断ひずみ  $\gamma$  の値は純アルミニウムの場合が 1.96 と 3.96 であり、純銅の場合が 1.85 と 3.70 である。押し出し速度  $F$  はねじりのみの場合は、0 mm/min であり、押し出しも加えた場合は約 100 mm/min である。

加工によるひずみが材料の強度に及ぼす影響について、静的な破壊試験、硬さ試験および疲労試験を行った。

図 5 と図 6 は、それぞれ純アルミニウムと純銅の硬さ分布である。ねじり加工によって、

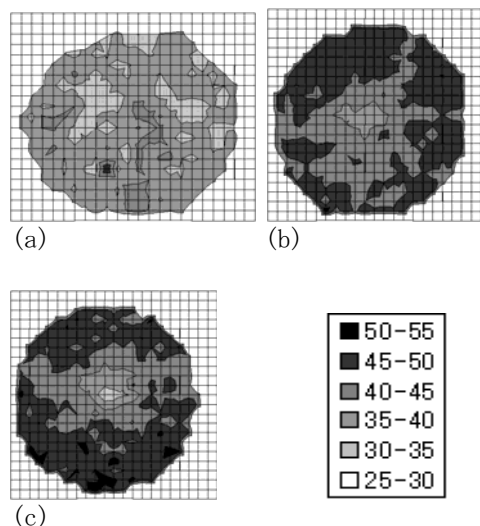


図 5 純アルミニウムの硬さ分布 (a)  $\gamma = 0$  (b)  $\gamma = 1.96$  (c)  $\gamma = 3.93$

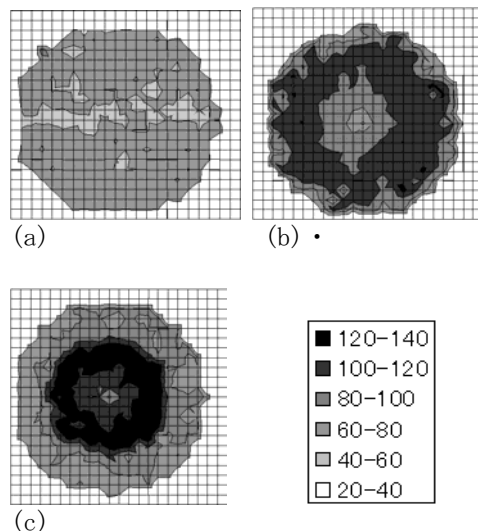


図 6 純銅の硬さ分布 (a)  $\gamma = 0$  (b)  $\gamma = 1.85$  (c)  $\gamma = 3.70$

硬さが増し、内部と表面部分で硬さが変化している様子がわかる。後にも示すように、他の加工条件の場合も同じ結果になった。したがって、硬さ試験の結果によって目的とした表面と内部で硬度差が生じた材料が作製されていることが確認できた。なお、図 6(c) の場合から伺えるように、純銅を過度にねじると表面の硬度が低下し軟化が生じる結果となった。その原因については現在の段階では不明であるが興味深い結果が得られ、純銅と純アルミニウムではねじりによる加工硬化特性が異なることがわかる。

図 7 に結晶組織の観察例を示す。ねじり加工前と加工後の観察結果から、結晶粒が微細化されていることがわかる。純アルミニウムと純銅における結晶組織の様相は定性的に

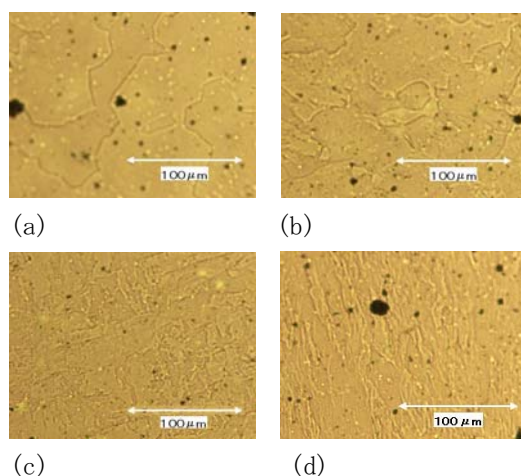


図 7 純アルミニウムの結晶組織 (a) 未加工の場合の中央部 (b)  $\gamma = 3.93$  の場合の横断面中央部分 (c)  $\gamma = 3.93$  の場合の横断面表面層 (d)  $\gamma = 3.93$  の場合の縦断面表面付近

同じであり、表面層と内部で結晶粒の大きさが異なっている。

表 1 と 2 にそれぞれ、純アルミニウムと純銅の引張強さと断面減少率の値を示す。断面減少率は純アルミニウムでは加工によって大きな変化が生じないが、純銅においては加工による変化が大きい。そして、ひずみ量  $\gamma$  が 3.70 の場合においては、表面からき裂が発生し、ぜい性的にらせん状の破壊が生じたため、断面減少率が測定できなかった。また、そのことは硬さ分布にみられるように、ひずみ量  $\gamma$  が 3.70 では純銅の表面層が軟化し、表面よりも内部において硬さが高い状態となることに関係することが考察される。このような硬さに関係した材料の変形挙動は興味深いものであり、本実験の加工手法の強度上昇が硬さに関係することはこのことから裏付けられる。

表 1 純アルミニウムにおける引張強さと断面減少率の変化

Pre-strain	Tensile strength (MPa)	Reduction of area (%)
$\gamma = 0$	95.1	92.6
$\gamma = 1.96$	124.5	90.7
$\gamma = 3.93$	134.6	88.0

表 2 純銅における引張強さと断面減少率の変化

Pre-strain	Tensile strength (MPa)	Reduction of area (%)
$\gamma = 0$	221.3	77.3
$\gamma = 1.85$	327.5	65.8
$\gamma = 3.70$	367.4	-

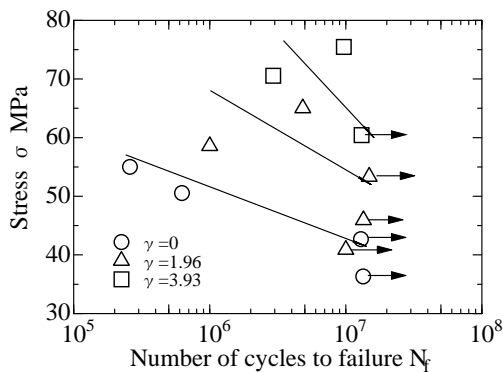


図 8 純アルミニウムの S-N 曲線

片持方式の回転曲げ疲労試験機を用いて疲労試験を行った。

図 8 に純アルミニウムの場合の S-N 曲線、すなわち繰返し応力と破断するまでの繰返し数の関係を示す。矢印を付したデータは、

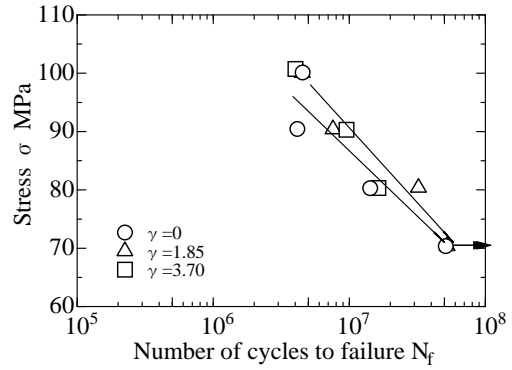


図 9 純銅の S-N 曲線

試験片が破断しなかったものである。図 8 から明らかなように、疲労強度は、ねじり加工した場合が加工しない場合よりも高くなっている。これらのことから、純アルミニウムにおいては、静的引張り強度特性と同様に疲労における強度が加工硬化と関連して向上することが明らかとなった。

図 9 に純銅の S-N 曲線を示す。純アルミニウムの場合にはねじり加工時のせん断予ひずみの差によって疲労強度に差が生じたが、純銅の場合においては、その予ひずみの差がほとんど疲労強度に影響していない。また、加工材と未加工材の強度を比較しても、両者の疲労強度にはほとんど差がない。硬さの分布から純銅の場合は表面層での加工軟化が疲労強度にも影響していると考えられる。

純アルミニウムを用いて、ねじり加工を  $\gamma = 1.96$  で行った後に手で  $F = 100$  mm/min で押出して塑性加工した場合の結果を示す。

図 10 は横断面の硬さ分布を測定した結果である。表面で硬く、内部が軟くなっていることが確認できる。図 11 は回転曲げ疲労試験を行って得られた S-N 曲線である。実線は加工していない試験片とねじり加工を行った試験片の平均的なデータであり、プロットはねじり押出して加工した試験片のデータである。これからわかるように、ねじり押出した試験片の疲労強度は加工していない試

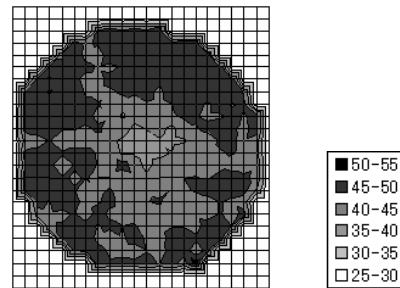


図 10  $\gamma = 1.96$  でねじり  $F = 100$  mm/min で押出した場合の硬さ分布

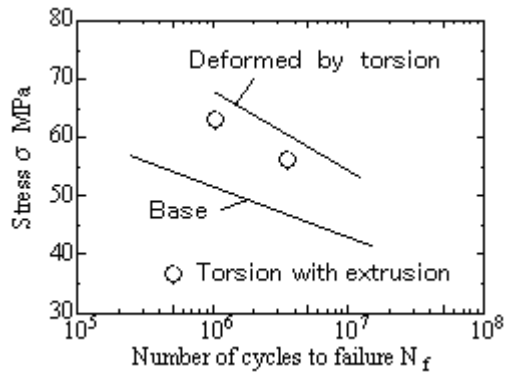


図 11  $\cdot = 1.96$  でねじり  $F=100$  mm/min で押出した場合の疲労強度特性

験片の疲労強度よりも向上している。

以上のことから、加工によって硬くなった試験片の強度は未加工材の強度よりも高くなり、加工によって強度改善がなされることがわかる。ただし、顕著な加工傷が生じた場合、ねじり押出し材の強度は改善されなかった。そして、金型の溝の仕上げ精度が材料の強度にも影響することがわかった。

本研究結果から、ねじり押出し加工は材料試験機や一般的な工作機械そして溝付き金型を用いることによって実施可能であることが示された。ねじり押出し加工材によって、表面層と内部で硬さが異なる材料が作成される。純アルミニウムにおいては、表面が硬く内部が軟らかくなった。そして、表面が硬くなった材料においては、静的引張強度、疲労強度ともに未加工材よりも高い値となった。したがって、高精度に仕上げた金型を用いることによって加工傷が少ない材料が作製できれば、ねじり押出し加工によって、結晶粒が微細化され強度が改善された材料が作製できることが期待される。

なお、琉球大学の学生および院生、そして沖縄工業連合会の国吉氏の協力を得て実験を行った。ここに記して感謝の意を表す。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

①T. Yamane, R. Kondou, C. Makabe, Grain Refinement and Strengthening of a Cylindrical Pure-Aluminum Specimen by using Modified Equal-Channel Angular Pressing Technique, Key Engineering

Materials, Vols. 340-341, pp. 937-942, 2007、査読有

②国吉和男、山根琢矢、近藤了嗣、真壁朝敏、ねじり押し出し法による純アルミニウムの高強度化の試みに関して、琉球大学工学部紀要、第 69 号、pp.1-5、2007、査読無

[学会発表] (計 3 件)

①国吉和男、近藤了嗣、篠原大作、真壁朝敏、ねじり予ひずみを与えた延性材料の疲労に関して、第 58 期日本材料学会学術講演会論文集、pp.395-396、2009-5.

②篠原大作、國吉和男、近藤了嗣、真壁朝敏、ねじり予ひずみ材の疲労特性について、日本機械学会九州支部講演論文集No.098-1、pp.39-40、2009-3.

③平松智、國吉和男、真壁朝敏、近藤了嗣、ねじり押し出し加工による材料の機械的性質の改善について、沖縄講演会論文集(日本機械学会講演論文集No.078-2)、pp.47-48、2007-10.

[産業財産権] (計 1 件)

○出願状況

名称：金属材料の結晶粒微細化装置、及びこの方法によって製造された金属材料  
発明者：真壁朝敏、近藤了嗣、高良一夫、山根琢矢

権利者：岩政輝男

公開番号：特開 2007-125587、

公開日：平成 19 年 5 月 24 日

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

真壁朝敏 (MAKABE CHOBIN)

国立大学法人琉球大学・工学部・教授

研究者番号 70181609

(2) 研究分担者

近藤了嗣 (KONDOU RYOUJI)

国立大学法人琉球大学・工学部・准教授

研究者番号 80404549

(3) 連携研究者

なし