

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560721

研究課題名（和文）押出し加工による穴付リブを有する管

研究課題名（英文）Circular Tube with Holed Rib by Extrusion

研究代表者 村田 眞 (MURATA MAKOTO)

電気通信大学・電気通信学部・教授

研究者番号：10106883

## 研究成果の概要（和文）：

穴付きリブを有する管を製造するための押出し加工機を試作し、押出加工の実験を行った。押出し加工の数値解析を行い、この加工法の特徴を明らかにした。

管材の成形において重要となる管肉厚が、本加工法において成形に与える影響について検討を加えた。部材を鉛とアルミニウムとした。管肉厚が薄くなると押出し比が増加し、接合に適したガイド位置が低くなる。薄肉薄においても加工条件を適正化することで厚肉管と同様に、接合強度の向上が確認できた。さらに、リブと管の接合強度についても実験的に調べ、最適値の検討を行った。管の形状を円形にしているが、ガイド位置等がこの断面形状に及ぼす影響とその理由について検討を行った。数値解析により薄肉化とガイド位置の変化による成形品への影響を調べ、リブの変形量を定量的に示した。このことによって、リブと管の接合強度や加工精度が最適となる加工条件を明らかにした。

## 研究成果の概要（英文）：

Prototype machine for product of circular tube with holed rib was made. The circular tubes were extruded experimentally and analyzed by finite element method. The characters of the extrusion were made clear by this study. The thickness of tube was examined at the influence on the extrusion at the experiment. The extrusion materials were Lead and Aluminum. When extrusion ratio increased at the thickness decrement, the guide position should be lower. The welding strength between rib and tube was examined by the experiment. When we took good extrusion conditions, the welding strength would be better. The production influence of guide position and deformation of rib were examined at FEM analysis. The accuracy of the tube and welding strength between rib and tube were well known about working condition.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学、材料加工・処理

キーワード：塑性加工、押出加工、押出し形材

## 1. 研究開始当初の背景

近年地球温暖化などの問題により、省エネルギーが課題となっている。国内での温室効果ガスとしてのCO<sub>2</sub>の排出量は、自動車をはじめとする運輸部門が占める割合が高く、輸送機器の低燃費化が重要である。低燃費化に有効な手段の一つとして、車両の軽量化が挙げられ、軽量で加工性がよいアルミニウム合金が採用されつつある。アルミニウムの特徴の1つに、押し出し加工により複雑断面形状に成形可能であることが挙げられる。アルミニウム管材は、重量に対する曲げ剛性やねじり剛性が高く建築用部材、自動車や航空機、鉄道車両など構造用部材として広く利用されている。中でも内部にリブをもつ管材は、リブを有しないものに比べてより高い剛性が得られ、自動車のフレームに使用すれば、衝突エネルギーを効率よく吸収することができる。また、ヒートパイプに使用する場合、内部にリブをもつ管材は、管内の表面積が増加し、より大きな熱伝達効果を得ることができる。さらに、管材のリブに穴が存在しており、以下に示すさまざまな効果が期待できる。

- 効果1 構造用部材として用いた場合には、リブの穴に対応する部材の軽量化の促進が可能。
- 効果2 衝撃吸収部材として、部材に初期不正を与える。
- 効果3 熱交換用管のリブに穴を設け、熱交換性能を向上させることが可能。
- 効果4 リブにアルミ以外の材料を用いることによって、管材の高機能が可能となる。

以上の穴の形状、寸法および間隔等は、その管材を使用する目的や用途によって異なる。リブに穴を有する形状は、H 型材などであればリブが露出しているため、外部から切削加工を行うことで製造可能である。しかし、管の内部に穴の開いたリブを有する形状は、リブが露出していないため、切削加工等が行えない。また、管内部にリブを有する複雑な断面形状は、押し出し加工の1工程のみで製造可能であるが、一般的な押し出し加工で製造される成形品の横断面形状は、ダイス出口の横断面形状によって決まるため、リブに穴の開いた管材を製造することができない。そこで、本研究ではリブに穴を有する管を製造する方法として、あらかじめ穴あけ加工を行ったリブを、押し出しと同時に供給する方法を提案する。本加工法では、リブと管が別加工のため、

上記の3つの特徴に加え、以下に示す応用が可能である。

## 2. 研究の目的

本研究では新しく提案する『リブに穴を有する管の押し出し接合加工』を用いた押し出し実験を行い、本加工法の工業的実用化を目指し、加工特性および板と管の接合メカニズムを検討する。又、押し出し中のビレット内の変形や、メタルフローの速度分布などを検証するため、数値シミュレーションを用いた解析手法も行う。解析結果と実験結果との比較・検討を行い、変形メカニズムと加工条件の影響を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### 3.1 加工原理

考案した押し出し接合装置の加工原理を Fig. 1.1 に示す。外側の管材は押し出し加工により成形し、管内部の穴あきリブはあらかじめ穴あけ加工をした板材を用いる。押し出し接合である。Fig1.1(a) は正面図、Fig1.1(b) は側面から見た断面の様子である。Fig1.1(c) は Fig1.1(a) の Y-Y 断面、Fig1.1(d) は Fig1.1(a) の X-X 断面を示す。管形状に成形するためにマンドレルを用いているため、ビレットは中空である。マンドレルには内部に板を供給するためのスリットが設けられている。また、マンドレルのスリットから板が供給される箇所にガイドを設けてあり、板が受けるビレットからの圧力を防ぐと同時に、ガイド下方に板を挟みこむためのメタルフローを生じさせる。このガイド付きマンドレルを用いて、マンドレル内部から供給される板を管と同時に押し出し、接合させる。

Fig. 1.2 に押し出し後の管の断面形状を示す。Fig. 1.2(a) に実際に板を挟み込んだ状態を示し、Fig. 1.2(b), (c), (d) に押し出し中に板を供給せず、ガイド付きマンドレルを用いたときの管断面の変化を示す。Fig. 1.2 は Fig1.1(a) に示す X-X 断面である。ガイド下方のメタルフローによってできる管の断面形状（ガイドマーク）は、ガイド位置  $h$  (Fig1.1 に示すガイド先端とダイス面との距離) に応じて、次の3種類に分類できる。

状態(1) ガイド位置とダイス面が同じ位置にある状態 (Fig. 1.2(b)) : ガイド下方のメタルフローは起こらず、ガイドマークはガイドと同一形状となる。

状態(2) ガイド位置がダイス面よりも上

部にある状態 (Fig. 1.2(c)) : ガイド下方のメタルフローによってできるガイドマークは、状態 (1) よりも縦方向の幅、横方向の幅ともに小さくなる。

状態 (3) ガイド位置が状態 (2) よりさらに上部にある状態 (Fig. 1.2(d)) ガイド下方のメタルフローがダイスペアリング部に達する前に充填し、ガイドマークは閉じる。

状態 (1) では、ガイドマークの寸法が板よりも大きくなるため、接合は不可能である。状態 (2) と状態 (3) では板の接合が可能である。ガイド位置によってメタルフローが変化することで、接合強さ・状態が変化する可能性がある。その適正なガイド位置を検討するため、ガイド位置が管とリブの接合強度と成形品形状に及ぼす影響を調べる必要がある。

### 3.2 加工装置

リブとなる板が供給されている間、接合に適したメタルフローを定常に保つには、ガイド位置を押出している間に常に一定に保つ必要がある。すなわち、マンドレルとダイスの位置関係が押し出しの間に一定である必要がある。そこで、マンドレルとラムを独立して制御することが可能な、CNC 押し出し実験装置を使用した。Fig. 1.3 に装置の構成を示す。

本押し出し実験装置は駆動部・計測部・押し出し工具により構成される。ラム、マンドレルの駆動源として、位置決め制御が容易で、位置決め精度の高い AC サーボモータを採用した。ラム、マンドレルの位置は各々に取り付けられた AC サーボモータ (Fig. 1.3 ①・⑤) によって制御されるため、互いの位置や速度によらず、独立して制御することが可能である。ラム、マンドレルの移動条件をパーソナルコンピュータに入力し、AC サーボモータのアンプにパルス信号として送ることにより、ラム、マンドレルの動きを操作する。ガイド位置の設定は、マンドレル側の AC サーボモータで行い、押し出し中は固定とした。

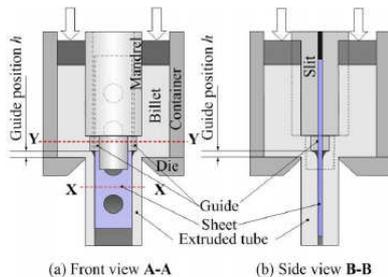


Fig. 1.1 Principle of extrusion

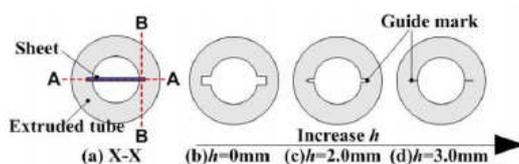


Fig. 1.2 Cross section of extruded tube

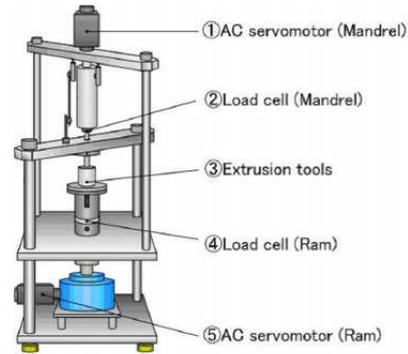


Fig. 1.3 Composition of CNC extrusion

ラム側の AC サーボモータが移動すると、マンドレルとダイスの位置関係 (Fig. 1.3 ①と Fig. 1.3 ③) を保ったまま押し出しが行える。マンドレルとサーボモータ (Fig. 1.3 ①) の接続部、および押し出し工具 (Fig. 1.3 ③) の下部に取り付けたひずみゲージによって、マンドレル荷重、および押し出し荷重を測定する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 本加工法への適応

##### 3.3.1 モデリング

三次元モデルは、対称性を考慮し、1/4 モデルとした。モデルの元となる平面図を Fig. 2.1 に示す。Fig. 2.1(b) における網掛け部分が解析対象である。1/4 ビレットおよびリブとなる板は、z 軸方向に押し出されるものとし、x, y 平面でそれぞれ y 方向、x 方向への変位を拘束されている。

工具類はすべて変形しないものとして定義し、剛体面として構成した。ビレットおよびリブとなる板は弾塑性体とし、von-Mises の降伏条件に従うものとした。ビレットの変形抵抗は圧縮試験により求めた真応力-真ひずみ曲線を用いた。ただし、降伏応力 (0.2 % 耐力) は 5.8MPa、ヤング率は 17.2 GPa、ポアソン比は 0.44 である。

ビレットおよびリブとなる板のメッシュは 4 面体ソリッド要素で構成した。リメッシュにより生成された要素の大きさは変形が一番複雑なガイド先端部で 0.3mm である。

また、押し出し後のビレットは工具により拘束されないため陽解法とし、押し出し加工法は大変形問題であるため、アダプティブリメッシュを行った。なお、ビレットと押し出し工具間の摩擦係数を 0.01 とした。押し出し前の状態

の数値解析モデルおよび各部寸法を Fig. 2.2 および Table 3.1 に示す. 工具はダイス, コンテナ, パンチ, マンドレルによって構成されている.

マンドレルのガイドの有効性を検証するため, ガイドが付いていないマンドレルとガイド付きのマンドレルでそれぞれ押し出しの解析を行い, 押し出し後の成形品形状を比較した. ガイドの形状はリブとなる板を覆う形状であり, ビレットのメタルフローによってリブが座屈するのを防ぐ効果がある. また, メタルフローがガイドにより整流され, リブとの接合面積を増やすことが可能である. また, ガイドを有する場合, ガイド位置の影響についても検証を行った.

### 3.3.2 ガイドの有効性の検討

ガイドの有効性を検証するため, 管断面の観察によりリブと管の接合面積を確認することで接合状態を評価し, リブ穴形状の押し出し前後の形状比較により不良成形を評価する. 押し出し前後の形状変化は少ない方が望ましい. 以下の2通りの方法で接合面積の確認と不良成形の検証を行った.

#### ・管とリブの接合状態

押し出し後のメッシュから切り出した部分を管軸方向に観察し, マンドレルガイドがある場合とない場合でリブと管の接合面積を比較する. 管とリブの接合状態を調べるため,

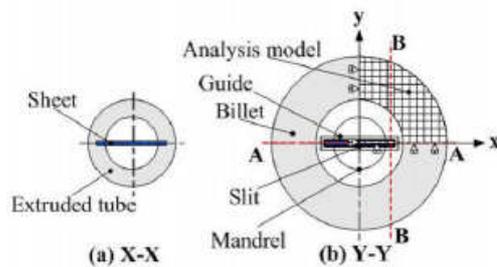


Fig. 2.1 Cross section of extruded tube and billet

Table 3.1: Each part of appellation and dimensions

Billet	inner diameter	20
	outer diameter	40
	length	20
Guide	thickness $T_G$ / mm	1.5
	width $W_G$ / mm	4.0
	length $L_G$ / mm	5.0
Sheet	thickness $T_R$ / mm	1.0
	breadth $B_R$ / mm	15
	length $L_R$ / mm	50
Guide position $h$ / mm		0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0

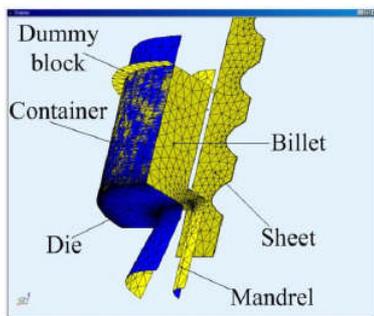


Fig. 2.2 Cut model of extrusion

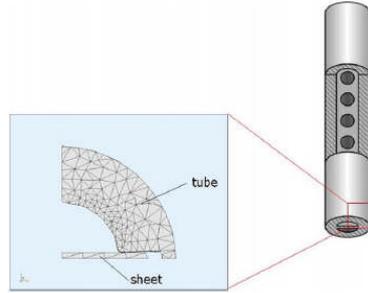


Fig. 2.3 Cross section of tube

し前後の形状比較により不良成形を評価す成形品の管断面を観察した. Fig. 2.3 に測定箇所を示す. Fig. 2.4(a) にガイドのないマンドレルを用いた結果を, Fig. 2.4(b) にガイドを有するマンドレルを用いた結果を示す. ガイドのないマンドレルを使用した場合に比べ, ガイドを有するマンドレルを使用した場合の接合面積が増えていることから, 設けることが有効であることがわかる.

#### ・リブの変形状態

次に, リブの形状変化を調べる. 押し出し後の管内部のリブのみを露出し, リブ穴の押し出し前後の寸法を比較した. Fig. 2.5 に測定箇所を示す. Fig. 2.6(a) はガイドのないマンドレルを使用して押し出しを行った結果, Fig. 2.6(b) はガイドを有するマンドレルを用いて押し出しを行った結果である. Fig. 2.6(a) では, ビレットがマンドレル中心方向に流れる力により, リブが中心方向に圧縮され, リブの穴径が著しく変形する. 穴径の変形は, 押し出し方向に伸び, リブ幅方向に縮む. リブの厚さの変化はわずかである. 一方, Fig. 3.6(b) のガイドを有するマンドレルを用いた場合では, ガイドがリブの変形の原因であるリブ幅方向のメタルフローから圧縮を防いでいるため, リブの押し出し前後での穴変形は小さい.

### 3.2.3 ガイド位置が接合状態, リブ変形に及ぼす影響

次に, ガイド位置が管とリブの接合状態, リブの形状変化に及ぼす影響について検討を行った. Fig. 2.7 に解析後の管およびリブの断面を示す. ガイド位置  $h$  の増加とともにリブと管の隙間が減少し, 接合状態は良好となる. ガイドの存在とガイド位置  $h$  の増加は接合状態を向上させ, 接合強度が改善されることが考えられる. Fig. 2.8 に押し出し後のリブの変形状態を示す. ガイド位置  $h$  が低い場合はリブと管の接触が少なく, リブの変形が小さい. しかし, ガイド位置  $h$  が高くなるとビレットが多く流れ込み, リブを圧縮してリブの穴形状を変化させた. したがって, ガイド位置  $h$  は接合状態をよくするため, 高く設定

する必要があるが、リブの変形も考慮しなければならない。つまり、ガイド位置  $h$  の最適値が存在する。なお、本解析モデルは 1/4 モデルであり、実際とは異なる変形が起こる可能性がある。

その一つとして挙げられるのが、リブの幅方向圧縮による変形である。リブの幅に対するリブの厚さが小さいため、幅方向に圧縮を受けると座屈が生じやすい。特に、ガイドのないマンドレルを使用した場合、リブの変形量が多くなるため、その現象は顕著に現れる。数値解析モデルでは  $x$  平面でリブが拘束されているため座屈は生じないが、実際の加工ではピレットとリブが接合する前にリブが座屈し、接合が行えない場合がある。

本研究に数値解析を適用するための第一段階として、マンドレルに付与するガイドの有効性を明らかにした。得られた結果を以下に示す。

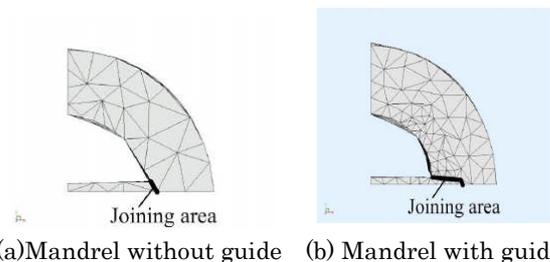


Fig. 2.4 Cross section of extruded tube

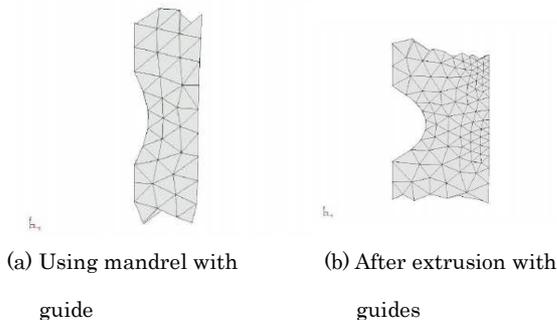


Fig. 2.6 Shape of rib hole after extrusion

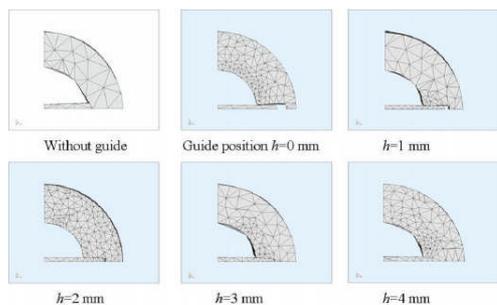


Fig. 2.7 Cross section of extruded tube by analysis

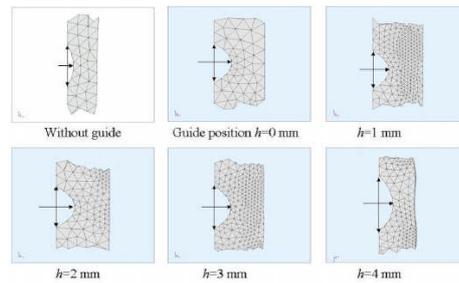


Fig. 2.8 Influence of guide position on sheet hole

- ・ガイドを設けることで接合面積が増える・
- ・ガイドを設けることでリブの変形量が小さくなる・
- ・ガイド位置の増加により接合強度は向上するが、リブの変形量が大きくなる・

接合強度を保ち、リブの変形量を最小にするガイド位置の最適値が存在する。

#### 4. 研究成果

1. 従来加工では製造できない、内面に穴のあいたリブを有する管を製造できる加工原理を提案した。そして、本加工法においてガイド位置が重要なパラメータであり、メタルフローとの関係、成形品断面形状に与える変化について記述した。

2. 本研究に数値解析を適用するための第一段階として、マンドレルに付与するガイドの有効性を明らかにした。汎用有限要素解析ソフトを用いた数値シミュレーションを用い、数値解析を用いることで変形中の金属内部の挙動や押し出し中のメタルフローの速度分布などを測定することが可能となった。

3. 本加工法の特徴である、ガイド位置がメタルフローと接合状態に与える影響を明らかにした。

4. メタルフローを形成するにあたって重要である、ガイド形状について検討を行った。ガイド幅方向、ガイド厚さ方向のメタルフローでそれぞれガイド幅とガイド厚さの影響を調べた。

5. 押し出し材料にアルミニウムを使用して、成形品の形状測定、接合強度の評価、押し出し温度が接合強度と成形品形状に与える影響を明らかにした。アルミニウムに本加工法が適応可能であることを示し、実用化の可能性を示した。

6. 管材の成形において重要となる管肉厚が、本加工法において成形に与える影響を明らかにした。管肉厚が薄くなると押し出し比が増加し、接合に適したガイド位置が低くなる

が、薄肉管においても加工条件を適正化することで厚肉管と同様に、接合強度の向上が確認できた。数値解析により薄肉化とガイド位置の変化による成形品への影響を調べ、リブの変形量を定量的に示した。

以上のように、本研究では押出し加工の一工程で穴のあいたリブを製造する加工法を提案し、その可能性を示した。提案した加工法であるため、工業的実用化に、リブとなる板材の供給長さの問題、押出し設備や生産性などの設備的な問題や、構造材として用いる管材に対する曲げなどの二次加工における成形性など、間接的な課題が山積している。しかしながら、本研究により従来の方法では成形困難であった形状を可能にし、構造材や熱交換器としての可能性を示したことにより、本研究が工業技術の発展に寄与するものと考えている。

#### 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 3 件)

- ① Tsutomu Moroi, Takashi Kuboki, Makoto Murata, Effect of Tube wall thickness in Joining of Aluminum and Holed Rib by Extrusion, 査読有, 2010/01, Vol.424, 121-128.
- ② 諸井努, 久保木孝, 仙崎泰慎, 村田眞, 押出による 1050 アルミニウム円管と穴あきリブの接合, 軽金属学会誌, 査読有, 第 58 巻, 第 6 号, 2008/06, 246-250.
- ③ Tsutomu Moroi, Takashi Kuboki, Makoto Murata, Effect of Temperature on Tube Extrusion and Joining Holed Rib, METAL FORMING, 査読有, 2008/04, Vol.1, 667-684.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 諸井努, 久保木孝, 村田眞, アルミニウム円管と穴あきリブの押出し接合におけるリブ材質の影響, 軽金属学会, 第 117 回秋期大会講演会, 電気通信大学, 2009.11.14-15, 281-282.
- ② 諸井努, 久保木孝, 村田眞, 薄肉管とリブの押出し接合における押出し比の影響, 日本塑性加工学会, 第 60 回連合講演会, 2009.10.31-11.2, 信州大学, 159-160.
- ③ 諸井努, 久保木孝, 村田眞, 薄肉管とリブの押出し接合における接合強度, 日本塑性加工学会, 春季講演会(第 40 回), 京都大学, 2009.5.29-31, 153-154.
- ④ 諸井努, 久保木孝, 村田眞, アルミニウム円管と穴あきリブの押出し接合において管肉厚が成形品に及ぼす影響, 軽金属学会, 第 116 回春期大会講演会, 登別グランドホテル, 2009.5.21-22, 211-212.
- ⑤ 諸井努, 久保木孝, 村田眞, アルミニウム

円管と穴つきリブの押出し接合における管肉厚の影響, 日本塑性加工学会 平成 20 年度 第 59 回塑性加工連合講演会, 広島大学, 2008.11.7-9, 107-108.

- ⑥ 諸井努, 久保木孝, 仙崎泰慎, 村田眞, 1050 アルミニウムのリブ接合押出しにおける温度の影響, 日本塑性加工学会, 塑性加工学会春季講演会(第 39 回), 日本大学, 2008.5.23-25, 183-184.
- ⑦ 諸井努, 久保木孝, 仙崎泰慎, 村田眞, 1050 アルミニウム円管と穴あきリブの押出し接合, 軽金属学会, 第 114 回春期講演会, 愛媛大学, 2008.5.9-11, 215-216.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称: 押出加工物の製造方法及び押出加工物

発明者: 村田眞, 久保木孝, 牧山高大

権利者: 電気通信大学

種類: 特許

番号: 4324671

取得年月日: 2009.06-09

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.mt.mce.uec.ac.jp/index.html>

村田・久保木研究室

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者: 村田 眞 (MURATA MAKOTO)

研究者番号: 10106883

電気通信大学・電気通信学部・教授

(2) 研究分担者: 久保木 孝 (KUBOKI TAKASHI)

研究者番号: 90361823

電気通信大学・電気通信学部・准教授

(3) 連携研究者 なし