

# 塑性変形による超極細導線の端子固定法の開発

東京工業大学大学院 機械宇宙システム専攻

助教 池庄司敏孝

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007025)

キーワード：無酸素銅，マイクロメカニカル接合

## 1. はじめに

近年，電子機器の小型化が従来にも増して求められているが，小型化のためには電子デバイスを構成する電子部品の微細化が必要不可欠である．集積回路の小型化・高密度化技術は飛躍的に進展してきたが，一方で，電力・電波系部品であるコイル部品，例えば，チョークコイル，コンデンサ，トランス等は部品寸法がそれほど小さくなっていない．コイル部品を大容量を確保しながら小型化するには，コイルの形状は従来通りの巻き線型のままで微細化する必要がある（図 1）．巻き線型のコイル部品を小型化するには銅線を細線化しなければならない．毛髪の数分の一の太さである外径数  $10\mu\text{m}$  の極細銅線（図 2(a)）を用いたコイル自体は作成が可能であるものの，しかし，外径  $100\mu\text{m}$  より細い銅線では，端子とのはんだ付け中に溶解して銅線が破断してしまう<sup>1)</sup>．殊に昨今推奨されている鉛フリーはんだでは，Cu-Sn 系の冶金的反応により，極短時間で溶解破断する（図 3）．このため，コイル部品のさらなる小型化のためには銅線と端子とを接合するための新しい接合方法の開発が必要である．そこで，機械的接合方法を基本とした，マイクロメカニカル接合を提案した<sup>2)</sup>．

マイクロメカニカル接合法（Micro-Mechanical Joining: MMJ）は，接合母材間に冶金的な接合を含まず，少なくとも，期待せず，マイクロメートルスケールで機械的な接合を行う技術である<sup>3)</sup>．超極細導線の端子固定でのマイクロメカニカル接合法では，端子に溝を作成し，溝内に銅線を配置した後，溝の脇に楔型のナイフエッジを押し込み，溝を微細に塑性変形させることで銅線を端子に固定する．

無酸素銅導線と無酸素銅製端子の組み合わせではこのような塑性変形を利用したかしめにより強固な接合が容易に得られると予測される．無酸素銅は塑性変形しやすい

ため，接合界面で母材同士の真接触が形成されやすいからである．一方で，一般的にコイル素子に用いられる無酸素銅線は図 2(b)に示すように，ポリウレタン被膜を施してある．図では導線外径  $\text{O}100\mu\text{m}$  に対して，被覆厚さは



図 1 表面実装用の巻線型コイル部品 (NEC トーキョー)

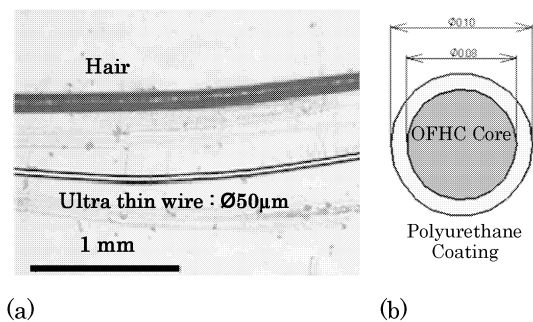


図 2 超極細導線 (a)人毛の比較 (b)断面.

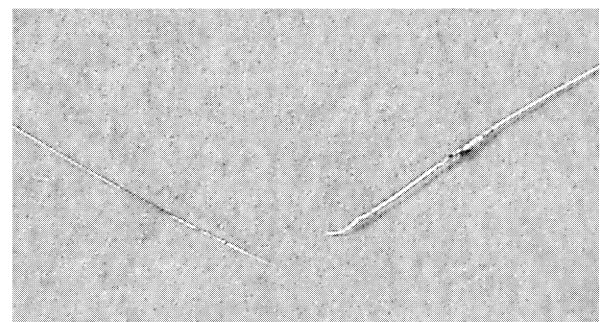


図 3 鉛フリーはんだ (Ag-Sn はんだ) により溶解破断した極細無酸素銅線．銅線外径  $\text{O}50\mu\text{m}$ ， $250^\circ\text{C}$ ， $20\text{s}$ ．

t10 $\mu$ m である。被覆厚さは製法上の理由で薄くし難いため、導線外径  $\phi 10-50\mu\text{m}$  の超極細では芯線とほぼ同等の厚さとなる。そのため、接合時に被覆を剥がす、あるいは、破壊する過程を考えなくてはならない。

本研究では、超極細銅線が無酸素銅端子に固定するためのマイクロメカニカル接合装置を製作する。そして、極細銅線と銅端子とのマイクロメカニカル接合実験を行い、接合部の接合強度を検討し、最適な接合条件等の提案を行う。そして、ポリウレタン被覆無酸素銅線について、被覆を破壊する方法盛り込んだマイクロメカニカル接合を提案し、これによる接合継手についても接合強度と、電気接続性に関して検討を加える。

## 2. マイクロメカニカル接合装置

### 2.1. 接合原理

超極細導線の端子への固定に用いるマイクロメカニカル接合では、端子に穿った溝に導線を収めて溝の側面を変形させることで、導線をかきつけて固定する。その接合過程を図 4 に示す。まず、薄板上のツールを押し込んで端子を変形させて溝を穿つ (図 4(a))。このツールを溝作成用プロジェクションツールと呼ぶ。銅線をその溝の最底部に配置した後に (図 4(b)(c))、溝の脇に、溝に平行に、楔形ナイフエッジツールを押し込む (図 4(d))。楔形ナイフエッジツールを接合用プロジェクションツールと呼ぶ。ナイフエッジツールを抜くと、溝の側壁が塑性変形しているため、導線を固定することができる。

### 2.2. 装置の構成

マイクロメカニカル接合装置 (MMJ 装置) の外観を図

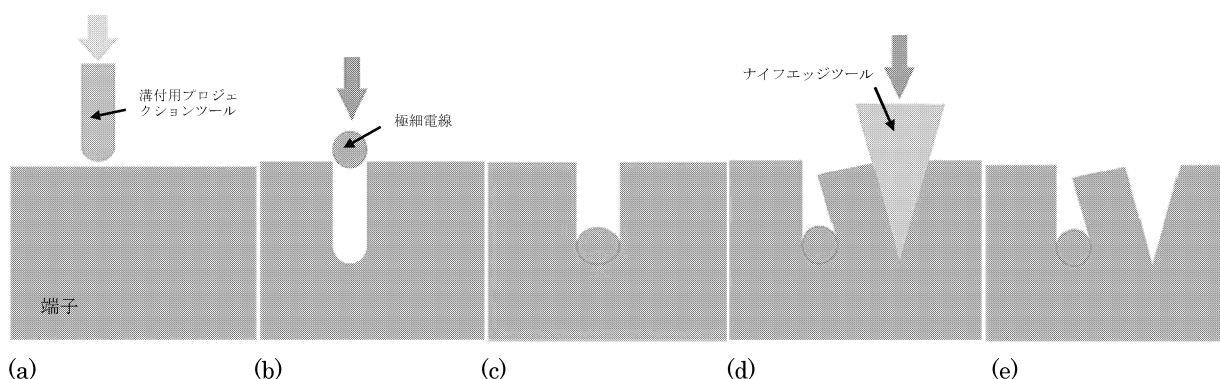


図 4 極細銅線のマイクロメカニカル接合の接合過程. (a)溝付け用プロジェクションツールによる溝付け. (b)極細銅線の溝への配置. (c)溝の最底部に収まった極細銅線. (d)ナイフエッジツールによるかきめ. (e)接合状態.

5 に示す。MMJ 装置はプロジェクションツールの押し込み深さ調整部、プロジェクションツール、試験片固定部、XY テーブルからなっている。

プロジェクションツール押し込み深さ調整部ではシャフトが上下できるストロークを制限することにより押し込み深さを調整できる。プロジェクションツール押し込み深さ調整部のシャフトホルダと装置天板との間に所定の押し込み深さ分のスペーサを挟み、弾上面とプロジェクションツール下面とが接触した状態でプロジェクションツールの高さを固定しスペーサを取り除く。その後シャフトホルダをリアブッシュに押し付けることでスペーサ厚さ分プロジェクションツールが押し込まれる。

また、XY テーブル上に試験片のサイズに合わせた穴を開けた板を載せ、その穴に試験片を入れた後、試験片両脇を上から押さえることで試験片を固定することとした。

### 2.3. プロジェクションツール

プロジェクションツールとは、本実験において銅端子を塑性変形させるために押し付ける治工具のことを指す。溝付け用プロジェクションツールと接合用プロジェクションツール (ナイフエッジツール) の 2 種類がある。

溝付け用プロジェクションツールは SUS304H の箔材を、直型溝、U 字型溝、または段付き型溝が無酸素銅端子に穿つ形状に加工した。U 字型の溝は板材の先端を研磨し R をつけることにより作成した。段付溝を作成するためのツールとしては 2 枚の SUS304H の板材を接着剤で仮止めした後にスポット溶接によって接合して作成した。製作した溝付け用プロジェクションツールの断面を (図 6(a)) に示す。

接合用プロジェクションツールに求められることとしては

- 1) 銅端子への押し込みを容易にするために先端部が鋭利であること。
- 2) 銅端子の塑性変形を繰り返しても変形が少なくすむように剛性が高いこと。
- 3) 微小な接合を行うため薄いものであること。

の3点が挙げられる。より理想的な接合を行うためには専用のプロジェクションツールを製作することが必要であるが、本研究では既存品を改良し用いることとした。オルファ社製ナイフエッジを用いることとした。プロジェクションツールの刃先断面は(図6(b))のようになっており、刃先の角度を計測した結果28度であり、半頂角は14度である。

### 3. 接合強度

#### 3.1. 実験方法

供試材の銅線は、外径 $\phi 50\mu\text{m}$ 、外径 $\phi 100\mu\text{m}$ の被覆のない無酸素銅線と、外径 $\phi 100\mu\text{m}$ 、膜厚さ $t10\mu\text{m}$ のポリウレタン被覆銅線とした。端子側試験片は純度99.96%の無酸素銅板(L20mm $\times$ w10mm)で、端部に高さ1mm、長さ18mm、幅0.40mmの突起部を着け、銅線固定用端子を模した(図7)。端子に溝を作るための溝作成ツールはステンレス鋼製で、断面形状は矩形のもの、矩形で段付きのものを作成した。

接合部の評価は接合強度試験と断面観察で行った。接合強度試験では、銅線を接合継手に対して垂直(引き剥がし)方向、水平(引き抜き)方向の2方向に引っ張った(図8)。銅線が接合部より外れた、あるいは、破断したときの負荷荷重を接合強度とした。断面観察は接合断面を研磨した後に、接合時の銅線及び端子の変形挙動、絶縁膜の除去具合を調べた。

#### 3.2. 接合強度

被覆のない無酸素銅線の場合の接合強度試験の結果を(図9)に示す。外径 $\phi 100\mu\text{m}$ の銅線では、平均して銅線強度の約80%の引き剥がし強度、引き抜き強度が得られた。外径 $\phi 50\mu\text{m}$ では、引き剥がし強度、引き抜き強度ともに無酸素銅線の強度に近い接合強度が得られた。すなわち本接合方法により銅線を端子に十分な強度を持つ

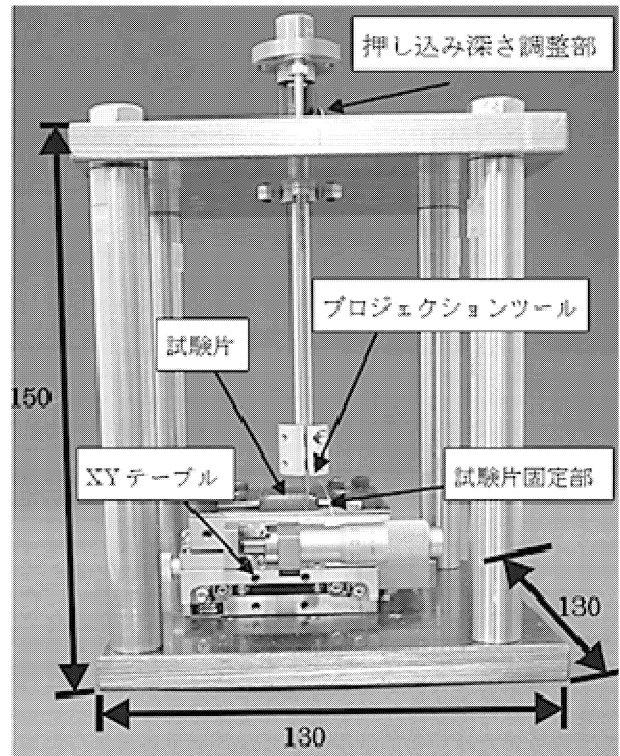


図5 マイクロメカニカル接合装置

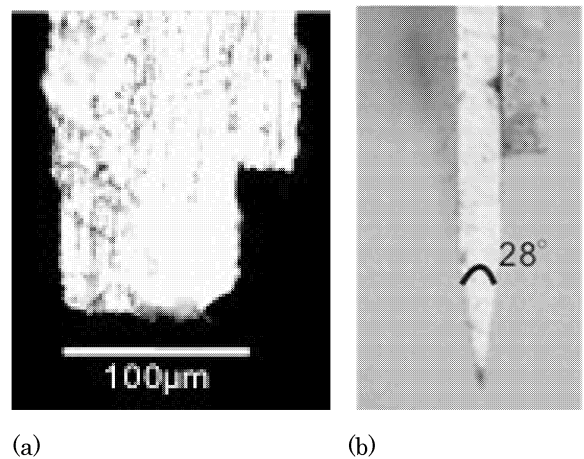


図6 プロジェクションツール。(a)段付き型溝付用ツール。(b)接合用ナイフエッジツール

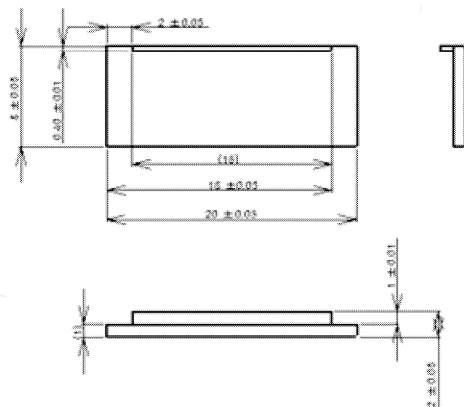


図7 模擬端子試験片

て接合できることが示された。また、本接合方法ではより細い導線の接合でより強固な継手強度が得られることが示唆された。

被覆銅線と矩形溝を付けた端子の接合を行ったところ、図 10(a)に示すように、銅線と端子との間に絶縁膜が残った。このため、導通が得られなかった。ポリウレタン絶縁膜は圧縮荷重に強いため、溝側面の押し付けでは破壊することが困難であると考えられる。溝幅が銅線径よりも小さい端子の場合、図 10(b)に示すように、被覆の一部が削り落された。これは銅線を溝に挿入するときに被覆が一部破壊され、除去されたものと考えられる。しかし、この方法では銅線の芯線と端子の間に直接接触を安定して作ることはできなかった。

図 11(a)に端子に付けた段付き溝の断面写真を示す。段の角部は直角に近い形状を保っており、階段下部の幅を銅線径よりも小さくすることで銅線を挿入する時に絶縁膜が段差角部に食い込みながら押し込まれることが期待される。図 11(b)にナイフエッジを押し込んだ後の接合部の断面写真を示す。銅線の被覆が破壊され、芯線と端子の直接接触部分が大きく形成されていることが示されている。銅線は角部を起点に回転方向の力を受け、絶縁膜が剥けるようにして除去されたと考えられる。

### 3.3. ポリウレタン被覆付導線の接合強度

引抜強度試験の結果を図 12 に示す。極細銅線を収めつ段付き溝の段の高さを接合条件パラメータとしている。段高さが  $30\mu\text{m}$  引き剥がし強度、引抜強度ともに母材強度に達しなかった。極細銅線で破断せず、引き剥がされた、あるいは、引き抜かれた状態で接合部が破壊された。

### 3.4. 導通確認試験

接合部の導電性について調べるため導通確認試験を行った。強度試験と同様に段付き溝の段高さを変化させ接合した試験片について導通試験を行った。図 13 に導通が確実に得られた試験片の数の割合を示す。段高さが  $30\mu\text{m}$  では 20%の試験片のみが完全な導通を得られた。それ以上の段高さではほぼ 100%の試験片で確実な導通が得られた。

## 4. まとめ

マイクロメカニカル接合法によって銅線と端子とを接合することで母材強度並の接合強度が得られた。また、溝

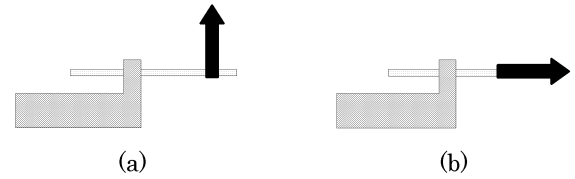
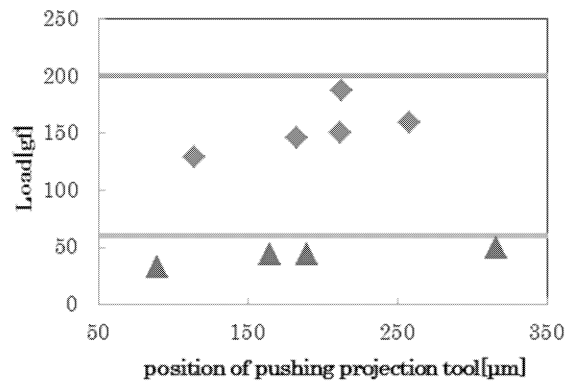
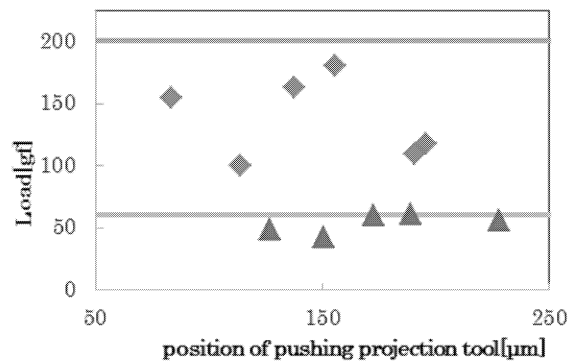


図 8 接合強度試験 (a) 引き剥がし強度. (b)引き抜き強度

- ◆  $100\mu\text{m}$  copper line, ditch depth= $300\mu\text{m}$
- $100\mu\text{m}$  copper line base material strength
- ▲  $50\mu\text{m}$  copper line, ditch depth= $200\mu\text{m}$
- $50\mu\text{m}$  copper line base material strength



(a)



(b)

図 9 被覆なし無酸素銅導線の接合強度 (a) 引き剥がし強度. (b)引き抜き強度

形状を段付の溝にすることで接合時に絶縁膜の除去を安定して行うことができた。これらにより、マイクロメカニカル接合法が微小コイル部品等製造技術として有効な方法であることが示された。

## 参考文献

- 1) 坂本一三, 小型リレーコイルの鉛ふりーはんだに於け

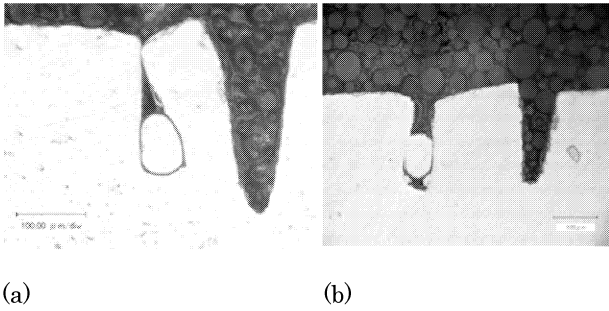


図 10 矩形溝での被覆導線のマイクロメカニカル接合部の断面. 溝幅(a)100 $\mu\text{m}$ . (b)50 $\mu\text{m}$ .

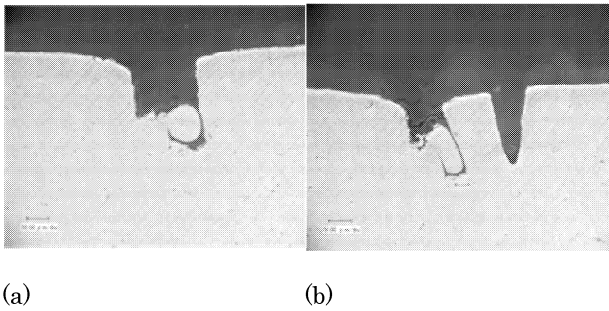


図 11 段付溝での被覆導線のマイクロメカニカル接合部の断面. (a)導線挿入後. (b)ナイフエッジツール押し込み後.

る銅食われについて, 電子情報通信学会技術研究報告. EMD, 機構デバイス (2002)

2) 鈴木暁男, 池庄司敏孝, 野田卓哉, 山崎敬久, マイクロメカニカル接合法, 特願 2007-123463, 特開 2008-282573

3) 鈴木暁男, 野田卓哉, 池庄司敏孝, 山崎敬久, 銅細線の端子固定用マイクロメカニカル接合法の研究, 第 14 回機械材料・材料加工技術講演会 (2006)

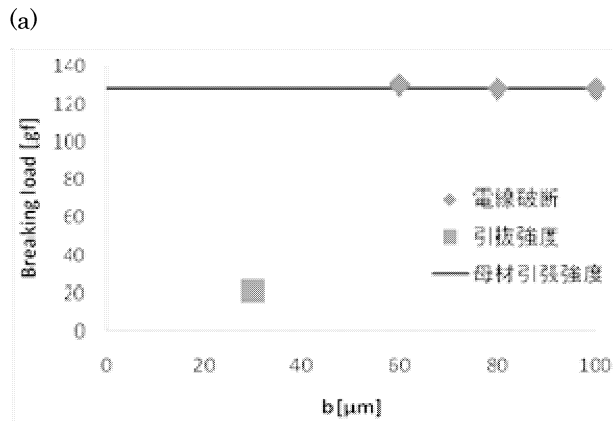
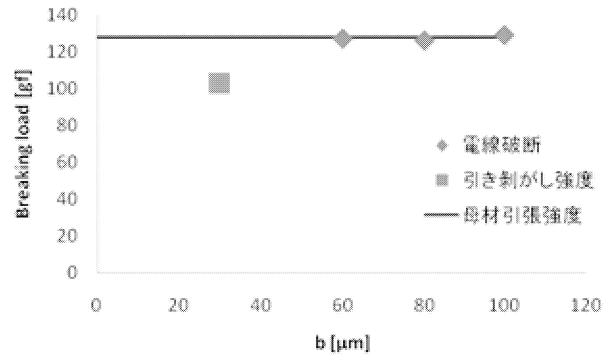


図 12 段付溝での被覆導線のマイクロメカニカル接合強度. (a)引き剥がし強度. (b)引抜強度.

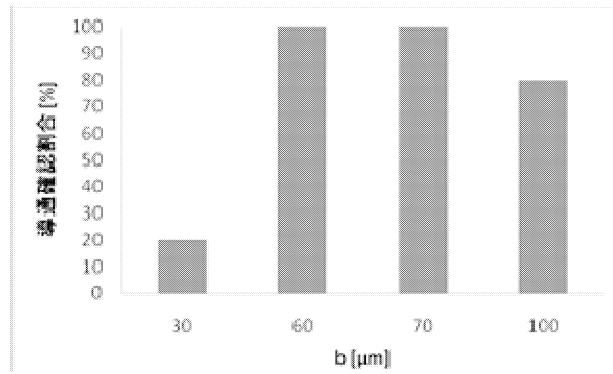


図 13 導電性試験結果