



T.-T. Ikeshoji

塑性変形による超極細導線の端子固定法の開発

池庄司 敏孝*

1. はじめに

近年、電子機器の小型化が従来以上に求められおり、電子機器を構成する電子部品の微細化が必要不可欠である。抵抗やコンデンサ、IC等は表面実装部品化され、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。これは、コイル部品の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での微細化が必要なためである。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。

コイル部品を作る極細導線は、現在、毛髪の数分の一の太さである外径 $\varnothing 10\text{--}100\mu\text{m}$ のものが製作可能である（図1(a)）。コイル部品用には外径数 $10\mu\text{m}$ の無酸素銅線に厚さ約 $10\mu\text{m}$ の高分子被膜を施した被覆極細導線が用いられる。図1(b)の被覆極細導線では外径 $\varnothing 100\mu\text{m}$ に対して、被覆厚さは $t10\mu\text{m}$ 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 $\varnothing 10\text{--}50\mu\text{m}$ の超極細導線では芯線とほぼ同等の厚さとなる。

被覆極細導線を巻いてソレノイド状のコイルを製作することは可能であるが、端子に固定することは難しい。例えば、外径 $\varnothing 100\mu\text{m}$ より細い銅線では、端子とののはんだ付け中に溶解して銅線が破断してしまう¹⁾。殊に昨今推奨されている鉛フリーはんだは Sn 含有率が高く、Cu-Sn 系の冶金的反応により、極短時間で溶解破断する（図2）。このため、コイル部品の更なる小型化のためには被覆極細導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²⁾。

マイクロメカニカル接合法 (Micro-Mechanical Joining;

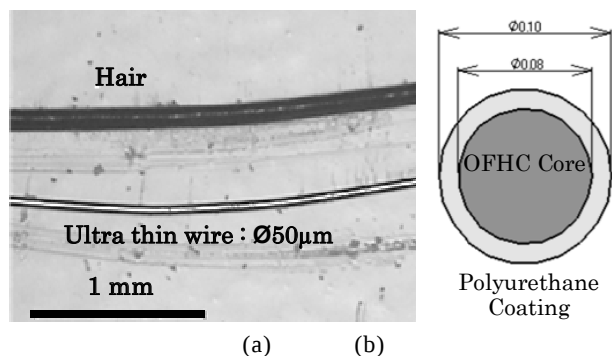


図1 超極細導線 (a)人毛との比較 (b)断面。

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³⁾。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、溝内に導線を配置した後、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（図3）。無酸素銅導線と無酸素銅製端子の組み合わせでは、無酸素銅は塑性変形しやすいため、接合界面

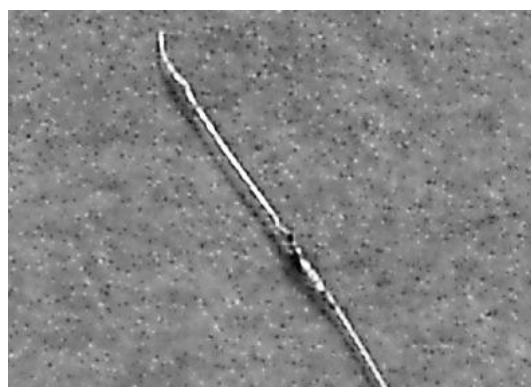
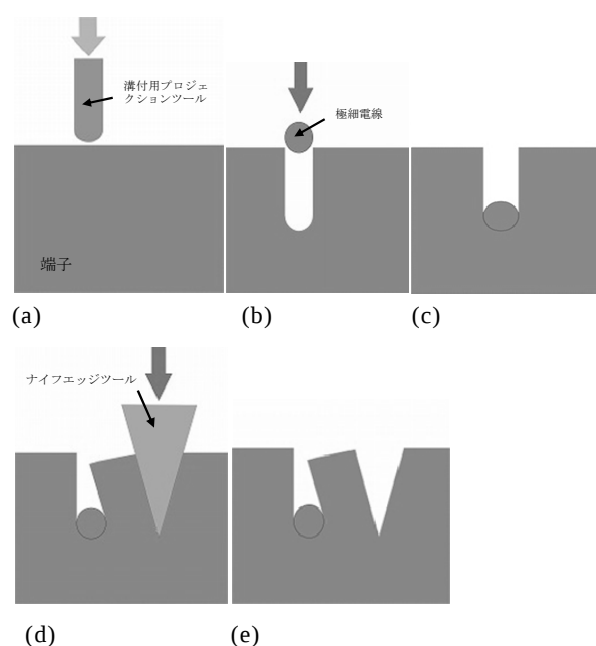
図2 鉛フリーはんだ (Ag-Sn はんだ) により溶解破断した極細導線。芯線は無酸素銅。導線外径 $\varnothing 50\mu\text{m}$, 250°C , 20s.

図3 極細導線のマイクロメカニカル接合の接合過程。
(a)溝付用プロジェクションツールによる溝付け。(b)極細導線の溝への配置。(c)溝の最底部に収まった極細導線。
(d)ナイフエッジツールによるかしめ。(e)接合状態。

* 東京工業大学大学院理工学研究科 助教

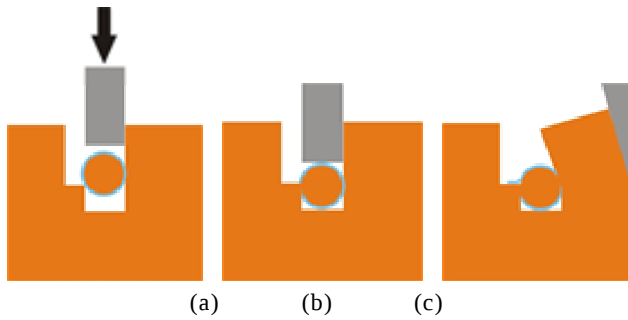


図4 被覆極細導線のマイクロメカニカル接合の接合過程．(a) 極細導線の溝への配置．(b) 溝の最底部に収まった極細導線．(c) ナイフエッジツールによるかしめ．

で母材同士の真接触が形成されやすいので，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．

一方で，一般的にコイル素子に用いられる被覆極細導線はポリウレタン被膜を施してある．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．そこで，マイクロメカニカル接合の導線を収める溝の形状を段付きにする（図3）⁴⁾．段付き溝の底側の溝の幅は被覆極細導線の外径とほぼ同じか若干大きめである．また，段の高さは極細導線の外径より低い．溝の底側に極細導線をしっかりと納めた後，ナイフエッジツールを打ち込んでかしめる．かしめる際に極細導線が段の肩部に食い込み，被覆を破ることで導通が確保される．

本研究では，ポリウレタン被覆超極細無酸素銅導線を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し，接合試験を行い，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．

2. マイクロメカニカル接合装置

2.1 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，シャフトの上下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，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ニ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形状，寸法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．

2.2 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．

段付き型の溝付け用プロジェクションツールは SUS304H の箔材を重ねて拡散接合して製作した．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要件は，
- 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て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接合用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，本研究では既存品であるオルファ社製ナイフエッジを用いることとした．接合用プロジェクショ

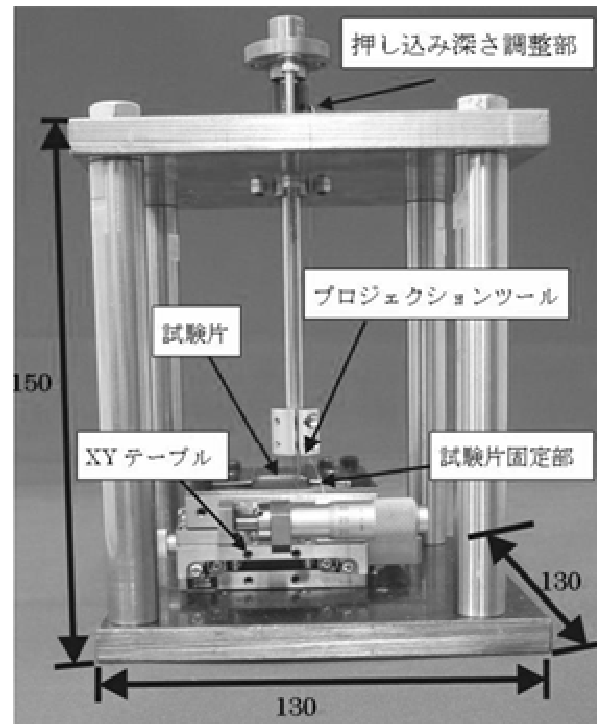


図5 マイクロメカニカル接合装置

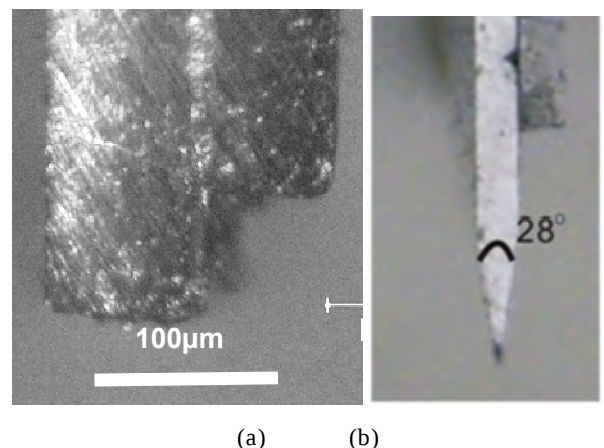


図6 プロジェクションツール．(a) 段付き型溝付け用ツール．(b) 接合用ナイフエッジツール

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°，半頂角は 14° だった。

3. マイクロメカニカル接合試験

3.1 実験方法

供試材のポリウレタン被覆極細無酸素銅導線は外径 $\phi 100\mu\text{m}$ で、ポリウレタン被覆の膜厚さ $t10\mu\text{m}$ とした。端子側試験片は純度 99.96% の無酸素銅板（L20×w10mm）で、端部に銅線固定用端子を模した高さ 1mm，長さ 18mm，幅 0.40mm の突起部を加工して付けた（図 7）。

端子に溝を作るための段付き溝型溝付け用プロジェクトンツールは SUS304H ステンレス鋼製で、箔材を重ねて拡散接合することにより製作した。

溝形状、および、接合条件は溝深さ a ，段高さ b ，溝下部幅 c ，段上面幅 d ，ナイフエッジ押し込み位置 e ，ナイフエッジ押し込み深さ f の値を変更して各条件について試行した（図 8）。

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 9）。ポリウレタン被覆極細無酸素銅導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行い、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 接合部の観察

接合試験により得られた接合体の例を図 10 に示す。接合条件は $a = 200\mu\text{m}$ ， $b = 70\mu\text{m}$ ， $c = 70\mu\text{m}$ ， $d = 70\mu\text{m}$ ， $e = 250\mu\text{m}$ ， $f = 120\mu\text{m}$ の場合である。図 10 (b) で観察されるように、ポリウレタン被覆極細無酸素銅導線の断面はほぼ円形を保ち、かつ、ポリウレタン被覆が壊れて段付き溝肩部と直接接合していた。このことから適切な条件により、ポリウレタン被覆極細無酸素銅導線の強度を損なうことなく、接合体が得られるものと考えられる。

3.3 接合強度

引抜強度試験の結果を図 11 に示す。図 11 (a) は溝深さ a を $150\sim 350\mu\text{m}$ まで変化させて引抜破断強度試験を行った結果である。 a が $150\mu\text{m}$ のとき約 90gf で極細導線が破断せずに接合部から抜けた。 a が $250\mu\text{m}$ では接合部の外側で極細導線が破断し、破断強度は極細導線の引張強度と同等の値となった。 a が $350\mu\text{m}$ では約 120gf で接合部から極細導線が破断せずに抜けた。

図 11 (b) は段高さ b を $30\sim 100\mu\text{m}$ まで変化させて引抜破断強度試験を行った結果である。 b が $30\mu\text{m}$ のとき極細導線が接合部から抜け、約 20gf の引抜強度となった。 b が $50\sim 100\mu\text{m}$ では全て接合部ではなく極細導線が破断しており、破断強度は極細導線の引張強度と同等の値となった。

図 11 (c) は溝下部幅 c を $80\sim 100\mu\text{m}$ まで変化させて引抜破断強度試験を行った結果である。 c がこの範囲内では接合部ではなく極細導線が接合部の外で破断しており、破断強度は極細導線の引張強度と同等の値となった。

段上面幅 d を $10\sim 100\mu\text{m}$ と変化させた時も同様な傾向

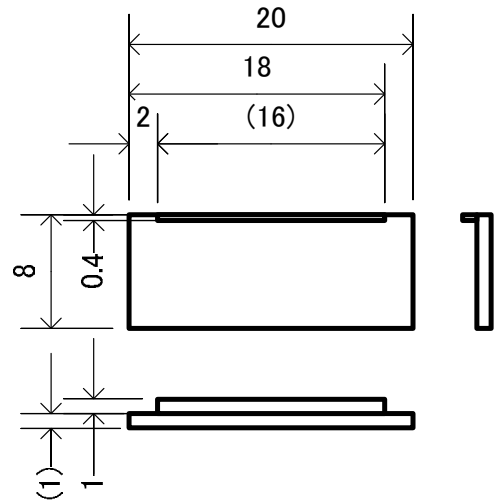


図 7 模擬端子試験片

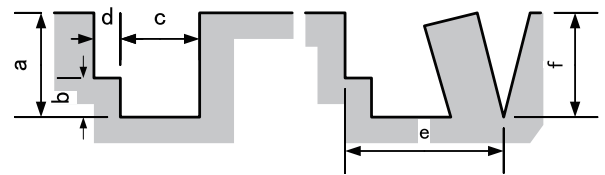


図 8 接合条件パラメータ

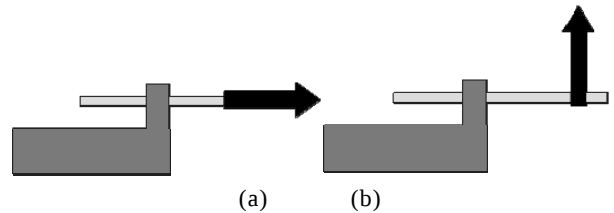


図 9 接合部強度試験模式図. (a) 引抜強度試験方向, (b) 引き剥がし強度試験方向.

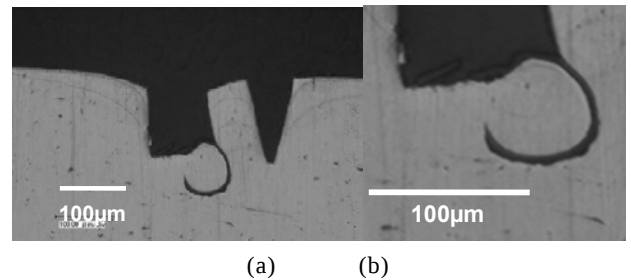


図 10 接合部断面の写真. 接合条件, $a = 200\mu\text{m}$ ， $b = 70\mu\text{m}$ ， $c = 70\mu\text{m}$ ， $d = 70\mu\text{m}$ ， $e = 250\mu\text{m}$ ， $f = 120\mu\text{m}$. (a): 光学顕微鏡観察結果 (b): 被覆膜破断部図.

となった（図 11 (d)）。

図 11 (e) はナイフエッジ押し込み位置 e を $200\sim 450\mu\text{m}$ まで変化させて引抜破断強度試験を行った結果である。 e が $200\mu\text{m}$ のとき破断強度は 110gf 程度で接合部の端部で極細導線が破断した。 e が $350\mu\text{m}$ では接合部の外で極細導線が破断し、破断強度は極細導線の引張強度と同等の値となった。 e が $450\mu\text{m}$ のとき 110gf 程度で接合部の端部で極細導線が破断した。

図 11 (f) はナイフエッジ押し込み深さ f を $100\sim 400\mu\text{m}$ まで変化させて引抜破断強度試験を行った結果である。 f が $100\mu\text{m}$ のとき 30gf 程度で接合部の端部で極細導線が

破断した。250–400 μm の範囲では接合部ではなく導線が破断しており，破断強度は母材強度と同等の値となった。

引き剥がし破断強度試験の結果においても同様な傾向が得られた。引抜強度試験の際に接合部から極細導線が引き抜かれたものは，引き剥がし試験においても接合部から極細導線が破断せずに引き剥がされた。

引抜強度値がほぼ極細導線の引張強度となった接合パラメータの組み合わせの内，接合部の導電性について調べた結果，試行した接合体の全てで導通の確認が取れた組合せを表に示す。

表 1 導通確認割合が 100%だった接合条件範囲

a	b	c	d	e	f
250–350	60	80	70	350	250
250	60–70	80	70	350	250
250	60	80	70	350	250
250	60	80	30–70	350	250
250	60	80	70	250–350	250
250	60	80	70	350	250–350

単位： μm

4. まとめ

ポリエチレン被覆極細無酸素銅導線と無酸素銅端子とを段付き溝型溝付け用プロジェクションツールを用いたマイクロメカニカル接合法によって接合を行ったところ，引き抜き強度，引きはがし強度いずれにおいても被覆導線の引張強度と同等の接合強度が得られた。また，段付き溝によりポリウレタン被覆を破壊し完全に導通を得ることが可能であることを確認した。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であることが示された。

なお，本研究は平成 19 年度公益財団法人天田財団一般研究開発助成 (AF-2007025) により行われたことを記し，感謝の意を表します。

参考文献

- 坂本一三，鉛フリーコイルはんだ接合部の銅食われの加速信頼性予想について(回路 EMC/一般)，電子情報通信学会技術研究報告．EMD，機構デバイス 105(216) (2002) 19-22
- 鈴木暁男，池庄司敏孝，野田卓哉，山崎敬久，マイク

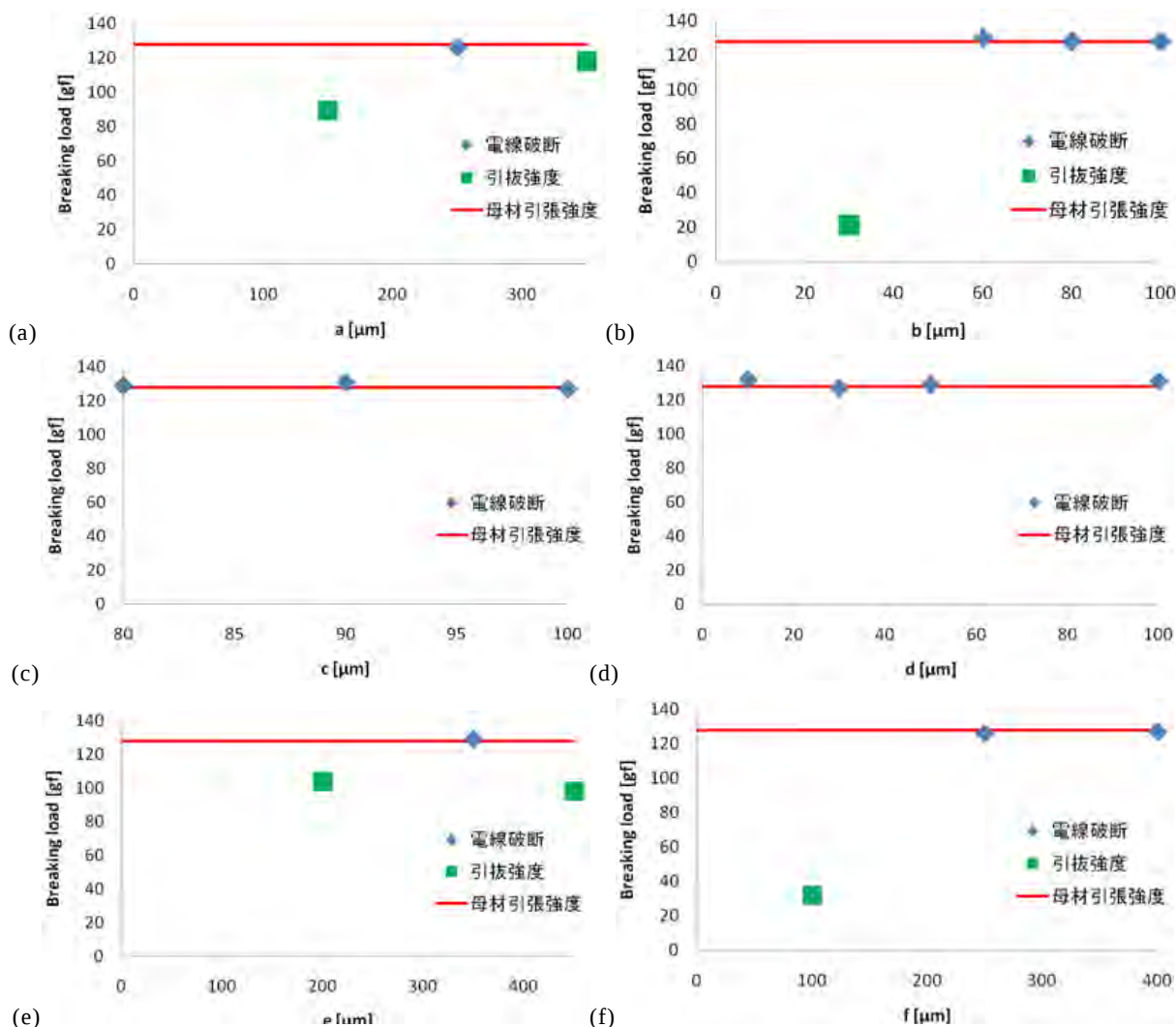


図 11 接合部強度への接合条件の影響．(a)溝深さ a，(b)段高さ b，(c)溝下部幅 c，(d)段上面幅 d，(e)ナイフエッジ押し込み位置 e，(f)ナイフエッジ押し込み深さ f。

- ロメカニカル接合法，特願 2007-123463，特開 2008-282573 (2007)
- 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）111-112
- 4) 鈴木暁男，下嶽光一，池庄司敏孝，山崎敬久，マイクロメカニカル接合法，特願 2009-249169，特開 2011-096508 (2009)