



S. Ikeda

# 金属クラッド材の新しい接合強度評価法

池田 千里\*

## 1 緒言

近年、金属加工の高度な制御技術やナノテクノロジーを応用した組織制御技術による材料創製により、従来では予想されなかった複合・接合形態で金属材料が使用されている。しかしながら、これらの微小寸法形状の機械的性質、特に引張特性に関しては適切な試験方法が見当たらず、統一した強度評価を困難にしているのが現状である。通常の引張試験片を採取することも非常に困難である。従って、小型の試験片内に引張応力を生じさせる試験法の開発が非常に重要である。

一方、クラッド材における接合強度に関しては、基準となるのは離試験の方法や、評価基準とすべき物理量は未だに系統化されていないため、複合材料製品や部品の強度や信頼性の保証に関しては、関係者がケースバイケースで対応している現状である<sup>1)</sup>。特に、国際的に共通した評価基準で表示するためには、異種材料双方の機械的性質や金属学的特性の他に、接合界面の状態の詳細な情報が必要である<sup>2)</sup>。

本研究では、金属クラッド材の接合強度を定量的に評価できる試験基準を得ることを目的として、「ウェッジ押込み型引張試験法」を提案、試作し、金属クラッドの接合強度を測定し、はく離面組織や接合性について比較して、本試験法の有効性を検討した。

## 2 接合と接合性評価について

### 2.1 接合性評価研究の状況

塑性加工を利用した接合の研究は多く、古くは刃物等の鍛接、近年では、セラミックスを含む超伝導材料の線材化<sup>3)</sup>研究などもあって、実用化されているものも少なくない。また、自動車をはじめとする、複合体のリサイクル化<sup>4)</sup>など、これからの複合材のほとんどは、「解体」も視野に入れた複合化プロセスが求められる。これまでの接合試験の分類と評価について関連した研究状況は以下のとおりである。

1. 系統化については、現在まで、塑性加工学会の「接合・複合分科会」WGでは、町田、三木、森ら<sup>5)</sup>の努力がなされてきている。永年にわたる研究や企業での実例を総括したものが「塑性加工要覧『接合・複合』」にまとめられている。しかし、強度を含む「接合性の評価基準」を定めるにあたっては、今後とも広範かつ多岐にわたり加工プロセスや材料界面などの研究例を重ね、データの蓄積と『共通基準の測定法の確立』を図る必要がある。

2. これまで、Wright<sup>6)</sup>、志村<sup>7)</sup>、外本<sup>8)</sup>らは塑性力学から、また、材料学からも、金属以外の材料についても、複合材料の接合機構に関する多くの基本的報告がなされている<sup>9)</sup>。

3. これらの他に、押出し、爆発圧接、鍛造などの塑性変形を利用した接合に関する報告もみられるが、工業レベルや

金属系複合材料分野での「接合性の定量的基準や雛型」となりうるモデルは未だに数少ない。

4. 接合強度試験法としての、材料試験法のスタンダードは少なく、製品からサンプルを切り出すにしても、モデルの標準試料を作るにしても、「測定試験片の作製」は一般的に困難な場合が多い。

### 2.2 接合強度試験法における問題点

これまでの複合材料の接合強度を評価試験にあたって注意すべきは、いずれも異種材料が接合している界面状況から、採取する試験片は機械的にも化学的にも精密かつ慎重な加工が必要となる点である。試験片は純負荷応力によって界面ではく離・破壊することが要求され、他の変形に使われる仕事量の分散を極限まで少なくするか、明らかに定量的分別評価ができること<sup>10)</sup>、が必須である。

1) 引張試験：一般に短冊形の引張試験片は、つかみ部が重要な要素で、CFRPでは試験材料より弾性定数の低いGFRPのタブを接着する方法が広く用いられている(ASTM D3039, JIS K7073)。しかし、これでも応力集中は避けられず、タブの部分も含めたゲージ部で縦割れを伴う破壊が生じ、純粋な引張破壊であるかの判定が難しい。

2) 圧縮試験：圧縮試験での破壊機構は主として繊維の局部せん断破壊または座屈である。しかし、複合材料中の繊維あるいは全体の微視的、巨視的の座屈の判定は極めて困難で、根本的問題が多く含まれ、確立していない試験法と言える。

3) せん断試験：この方法は、均一な純粋せん断変形領域を作るのが難しく、決定版のない方法である。積層板で考えると、最大せん断応力が働く面が、積層面に垂直な「面内せん断」と、積層面に平行な「層間せん断」の二方向のせん断荷重の状態があるが、微視的な繊維配置を除けば、ほぼ同様のモードである。クラッドの接合強度について最近の試験法は、瀬川光男ら<sup>11)</sup>の方法がある。金沢<sup>12)</sup>は一部の層を除去して押し込むことで引張成分を作り、接合強度を求めている。これは広く用いられている3点曲げ試験の応用で、スパンを試験片の厚さに対して比較的短くして、荷重点の直下で応力集中を生じて破壊させており、見かけの定性的な強度を評価している。これらはいずれも純粋せん断応力場にはならず、厳密には引張、圧縮応力を伴うために、試験方法によって値に差が生じる。著者ら<sup>13)</sup>はクラッド接合部の一部を限定してせん断変形を強制してはく離強度を測定したが、測定値にばらつきが大きく、箔やラミネートのような薄い接合体には適切ではない。

4) 曲げ試験法：曲げ試験は基本的には、引張、圧縮、せん断などの均一応力下で強度を求める手法ではなく、比

較的低荷重で簡単な治具を用いて簡便に接合強度の参考値を求めるのが目的である。3点曲げ、4点曲げ試験法がJIS,ASTMで規定されている。この手法は簡便ではあるが、微小な試験片など、体積依存性がある場合の強度評価は注意が必要で、応力勾配との関係が問題となる。結晶粒度も影響因子で、圧縮強度が引張強度と同程度またはより低い場合、応力集中も問題となる。

### 3. 実験方法

#### 3.1 ウェッジ押し込み型引張試験

ウェッジ押し込み型試験法は、図1のように、試料に上下から荷重を負荷し、横方向に引張りの力が加わるようにしてある。試験片でもスリット入れることで引張強度を知ることができ、従来の引張試験片形状が得られない小さな場合の問題を克服することが期待される。

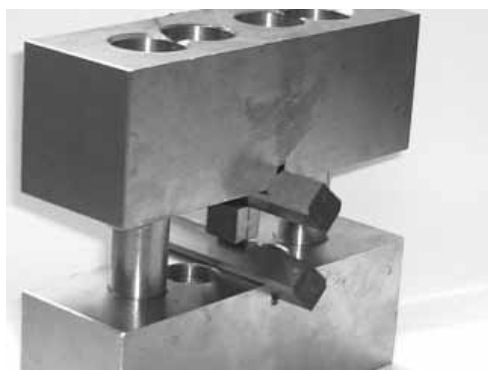
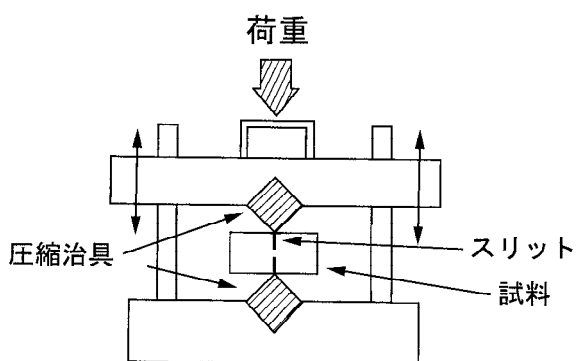


図1 ウェッジ押し込み型引張試験

#### 3.2 供試材

供試材には、異なる金属3種類を準備した。金属では軽量化材料のマグネシウム合金（AZ31）、高強度のアルミニウム合金（A7075）、および延性に優れた純鉄（極低炭素鋼）を用いた。さらに、参考材料としてプラスチックの場合を考慮し、エンジニアリングプラスチックとして高強度なポリカーボネート（PC）とポリアセタール（POM）、および汎用プラスチックのメタクリル樹脂（PMMA）の3種類の試料を準備した。

試験片作成には、帯鋸盤とフライス盤を使用して受取材から10×10mmの正方形断面棒材とし、ワイヤカット放電加工機（BROTHER製HSC-300）を用いて図2に示す立方体試料形状に削り加工した。試料の治具との接触部での塑性変形やスリット先端部での応力集中を最小限に抑え、より正確な引張応力成分を作用させるための形状とし

表1 金属供試材の化学成分

| AZ31B (mass%)   |                 |                 |              |            |             |              |             |     |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|------------|-------------|--------------|-------------|-----|
| Al              | Zn              | Mn              | Fe           | Si         | Cu          | Ni           | Ca          | Mg  |
| 2.5<br>~<br>3.5 | 0.6<br>~<br>1.4 | 0.2<br>~<br>1.0 | 0.005<br>Max | 0.1<br>Max | 0.05<br>Max | 0.005<br>Max | 0.04<br>Max | Rem |

| A7075 (mass%) |           |      |     |      |     |      |      |
|---------------|-----------|------|-----|------|-----|------|------|
| Mg            | Cr        | Zn   | Fe  | Cu   | Mn  | Si   | Al   |
| ~<br>0.29     | ~<br>0.35 | ~6.1 | 0.5 | ~0.2 | 0.3 | 0.04 | Rem. |

| Ultra-low Carbon Steel (mass%) |      |      |       |        |     |
|--------------------------------|------|------|-------|--------|-----|
| C                              | Si   | Mn   | P     | S      | Fe  |
| 0.0048                         | 0.01 | 0.12 | 0.009 | 0.0039 | Rem |

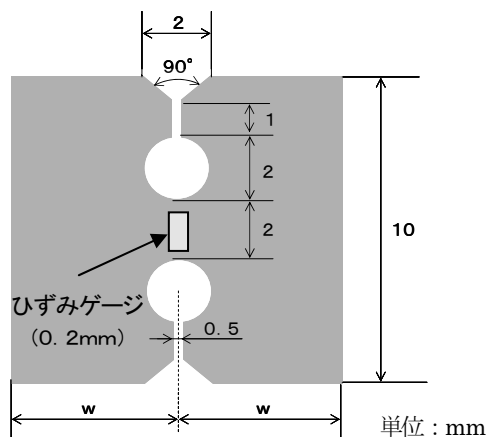


図2 試料の寸法形状

た。接触部の傾斜は、縦方向負荷荷重が横方向成分として均一に加わるように45°とし、スリット先端の穴の直径は、加工時や保存時の困難を避けるために2mmとした。また、穴と穴間の距離、すなわち引張変形域部の幅は2mmに決定した。また、試料の変形影響領域を調べるために、側面幅2w=10, 15, 20 [mm]の3種類の立方体試料も作成した。

ウェッジ押し込み試験は、図1の写真のように、試作治具に試験片を取り付け、油圧サーボ式圧縮試験機（島津製UH-C 200 A）を用いて圧縮負荷をかけて、水平方向に引張力成分が作用するようにした。このように10mm立方程度の大きさの試験片が得られれば、スリットを入れて、引張応力成分を作用させることができ、簡単な引張特性を得ることが期待できる。クロスヘッド速度は0.5, 1.0, 2.0, および5.0 mm/minとし、荷重—ストローク曲線を記録した。また、変形部にひずみゲージを貼り付けて荷重—ひずみ曲線を記録した。

### 4. 結果および考察

#### 4.1 ウェッジ押し込み型試験の結果

AZ31とA7075は破断したが、極低炭素鋼（電磁軟鉄）は破断しない例が多くあった。このことは、工具接触面と引張変形部との間の応力伝達部として剛性域が弱い場合は本試験法はあまり適さず、セラミックスや金属間化合物などには適する可能性を示唆している。（図3）

このような傾向を反映して、AZ31とA7075の荷重—ひず

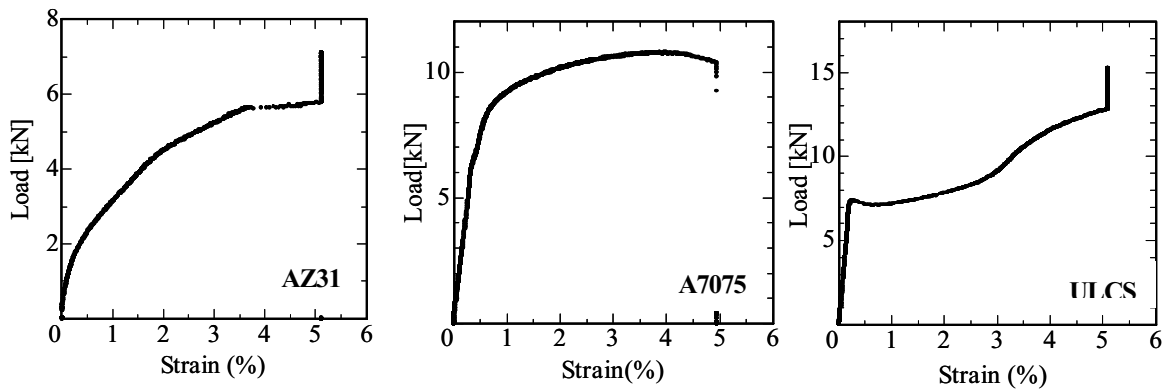
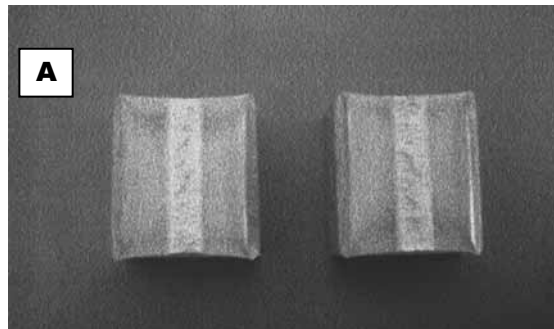


図3 ウェッジ押込み試験の荷重 - ひずみ曲線



ウェッジ押込み試験での引張破断面

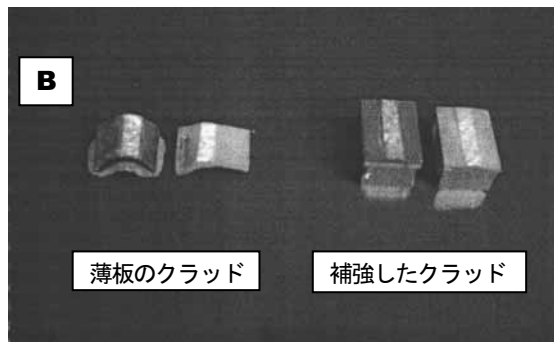


図4 クラッド材のウェッジ押込み試験によるはく離の様相  
み曲線は一般的な引張試験の応力-ひずみ関係とよく類似  
して、試料中央部には引張成分がほぼ荷重通りに作用し  
ていることが推測される。

#### 4.2 有限要素解析

今回解析の対象となる試験片を、三角形要素に分割して  
応力、ひずみの分布を有限要素解析ANSYS 8.1により計  
算した。本研究では弾塑性体を仮定して、ミーゼス塑性の  
等方硬化則を用い、弾塑性解析を行った。

図3は、A7075に0.5 kNを負荷した場合の線形弾性体を  
仮定した有限要素解析例である。穴の底部に最大引張応力  
成分が作用している。また、解析によると、鉛直加圧方向の  
0.5 kNの圧縮に対して0.497 kNの水平方向の引張荷重  
が作用している。このことから、圧縮荷重は他の仕事に分  
散せず、ほとんどが引張荷重に置き換わっていることが分  
かる。

#### 4.3 押し込み速度の影響

##### 4.3.1 金属系材料

金属の中ではMg合金AZ31がクロスヘッド速度が最も遅  
い0.15 mm/minがより引張標準値に近い結果が得られた。Al

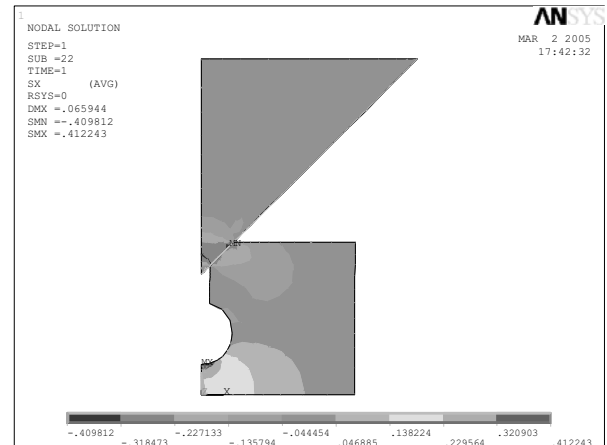


図5 ウェッジ押込み試験のFEMによるひずみ分布

合金7075では1.0 mm/minの場合がより標準値に近い値と  
なった。本研究のような微小な試験片ではクロスヘッド速度  
は可能な限り小さくとるべきだが、このような差異が生じる  
理由としては、Mgのようなhcp金属は室温で活動底面すべ  
りが引張特性に大きく関わってくると考えられる。

##### 4.3.2 プラスチック系材料

###### a) POM (ポリアセタール)

POMの結果ではクロスヘッド速度0.1～0.5mm/minが標準  
値により近い値であった。1.0および2.0mm/minになると、  
POMにとっては衝撃に近いひずみ速度となり、変形抵抗が増  
加するため、より離れた高い値になると考えられる。実験条  
件の範囲で最も遅い0.5mm/minのクロスヘッド速度が引張強  
度の近い値が得られた。

###### b) PC (ポリカーボネート)

PCの結果では、全体的に標準値よりも20～60%高い値  
が得られた。これはPOMに比較して剛性がより小さく、工具  
接触部が軟弱で、X字体のような変形状態になり測定不能に  
なってしまう例がある。ひとたび工具接触面で変形が開始す  
ると、負荷の多くの割合が接触部の摩擦や変形仕事に費や  
されるため、直接引張成分に置き換わることができなくなる  
ものと思われる。工具接触部に工夫を加えれば正当な評価  
が可能になるが、金属のように形削形状を制御できることが  
必要条件となる。

また、スリットが長い場合は、変形過程で破断に至らず、  
変形領域が拡大して行き、変形影響領域が試料内に収まら  
ず、破断しなかった。これは、試験片の材料特性に依存す

るので、形状寸法を適切に変えることで塑性変形から破断までの行程が得られるようにする必要がある。

#### c) PMMA (アクリル樹脂)

PMMAは、全体的に標準値よりも約 1/2 の引張強度が得られた。荷重－ストローク線図はより緩やかなカーブではなく直線的に上昇して破壊していることから、ガラスの変形破壊に極めて類似している。

プラスチックの通常の破断測定値は理論強度の 1/10 ～ 1/100 と言われているが、今回の実測値では約 1/2 の値が得られた。ウェッジ押込み型引張試験の測定値と引張強度の比をこのまま 2 倍として論ずる訳にはいかないが、更に多くの試験条件を吟味して試験数を重ね、データに信頼性を増す必要がある。

また、SEMで観察を行った (X30 ～ X1000) がこの範囲では顕著な異方性は認められなかった。むしろ、ミクロクラックの存在や、試験片作成工程での組織不均一の吟味が必要と思われる。これらの因子を検討することで、本ウェッジ押込み試験法はエンブラをはじめとする汎用プラスチックや非晶質材料にも応用できる可能性が出てくると思われる。

## 5. 結 言

接合強度の評価試験法としてウェッジ押込み試験を試行し、検討した結果、以下のことが明らかとなった。

1. 工具接触面に傾斜を付け、中心の引張部上下に孔を開けることにより、スリット先端部角の応力集中を緩和した。この試料形状の改良により、微小試料中にも水平に引張応力成分を作用させることができる。
2. 寸法や性質の異なる材料についても有限要素解析 ANSYS 8.1 を用い、ひずみ分布や応力分布を半実験的に予測できた。
3. 金属材料の実測値は、従来の引張試験のデータと比肩できるものがある。特に、Mg 合金 AZ-31 では、ほぼ同等

の引張強さとして特性評価することができる。

4. 本試験法は、セラミックス、プラスチック、金属間化合物およびその他の複合材料の接合界面強度の評価測定にも応用範囲を広げることができる。

## 参考文献

- 1) 石尾雅昭：鉄と鋼，vol.75，no.5，pp.716，1989.
- 2) 中村保 近藤一義：塑性と加工，vol.28，no.332，pp.1150，1987.
- 3) S.Saito, K.Ikeda ほ か：Materials Transactions, JIM,31(1991)，415.
- 4) S.Ikeda, S.Saito and K.Suzuki:J. of Mater. Process. Technology, 45 (1994)，395.
- 5) 町田ほか：塑性加工技術シリーズ 19, 日本塑性加工学会編，コロナ社，(1990).
- 6) P.K.Wright et. al.:Metals Technology, (1978),24.
- 7) 志村宗昭，田中英八郎：日本金属学会報，14(1975)，707.
- 8) 外本和幸，小野寺龍太ら：塑性と加工，29-334(1988)，1159.
- 9) 三木光範ほか：複合材料，共立出版，(1997)，103.
- 10) E. Breslauer& T. Troczynski: Materials Science & Engineering A, 302(2001)，168.
- 11) 瀬川光夫ほか：塑性と加工，36-418 (1995) 1265.
- 12) 金沢敏昭：第 51 回日本塑性加工連合講演会，東北地域フォーラム予稿集，(2000).27.
- 13) 菊地史長，池田千里：宮城工業高等専門学校専攻科論文集，2，(2001)，8-1.

## 謝辞

本研究は（財）天田金属加工機械技術振興財団の研究助成（AF-2000019）を受けて行われたものであり、ここに財団関係各位に対し深く感謝申し上げます。