

非鉄金属の冷間圧接

The Cold Pressure Welding for Non-ferrous Metals

齋藤哲夫* 山路賢吉**
Tetsuo Saito Kenkichi Yamaji

内 容 梗 概

金属材料を接合するには種々の方法があるが、従来行われていた方法はいずれも加熱融合または鑢接の必要があった。近時諸工業の発達に伴い接合部の強度、耐蝕性などについても高度の要求がなされるようになり、材料を常温で強い圧力のもとで接合する方法すなわち冷間圧接法が新しく登場してきた。

われわれは主として Al および Cu の冷間圧接法について数年にわたり研究を行ってきたが、これら金属の接合にはきわめて有効であることを見出した。また冷間圧接の機構については今まで不明な点が多かったが、本研究の結果、この機構としては原子間引力および原子空孔を通しての相互拡散によるものと考えられるにいたった。したがって冷間圧接でもっとも必要なことは被圧接面の清浄化と接合面の酸化皮膜を変形流動により接触面から排除することである。表面清浄化のためにはワイヤ・ブラッシングを行うのが良いことがわかった。

圧接実験としては重ね合わせ、衝き合わせが基礎となるので両者について実験を行ったが、前者の場合は圧接部近傍が弱く、良好な条件の場合でも母材強度以上の圧接強度をうることは困難である。後者の場合は適当な圧接条件さえ与えれば、引張り、捻回などにより圧接部より破断するようなことはない。ただし線材が強加工をうけている場合は、これを衝き合わせ圧接してもバウシinger効果により、圧接部の強度は母材のそれよりも若干弱くなることがわかった。

1. 緒 言

非鉄金属を接合するには種々の方法があるが近時諸工業の発達に伴い、接合後の材質、機械的性質などについて高度の要求がなされるようになり、材質の変化を避けるため材料の加熱をさげなければならない場合も多い。このような場合には常温で強い圧力により材料を接合する方法すなわち冷間圧接法が必要となる。

冷間圧接法について系統的に研究しその実用化への第一歩を印したのは British General Electric Co., Ltd. の研究所である。この研究所で 1945 年ころより研究が行われ、1948 年 Cold Pressure Welding という小冊子を発表している⁽¹⁾。その後この技術は米国へ導入され、ドイツでもその圧接機構について若干の論文が発表されている⁽²⁾⁽³⁾。わが国においては、岡田⁽⁴⁾、手塚⁽⁵⁾両氏の論文が発表されているが、まだその研究は緒にいたばかりである。

冷間圧接は世界的に考えても比較的新しい問題で、その圧接機構についても多くの不明な点があり、また実際の応用面も今後の発展を期待されている段階である。

冷間圧接は従来その用途としては、主として小物に利用の途を開いていたが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、さらに工業的規模で熔接法、鋸接法と比肩する程度に発達しなければならない。この見地からすれば従来行われていた研究は冷間圧接用 Hand Tool の製作にその目的をおいたような傾向があり、その現象の基礎的追求めはまだ見当らない。

本論文は圧接に及ぼす諸因子、圧接機構ならびに圧接法の基礎をなす重ね合わせおよび衝き合わせ圧接および圧接の応用についてわれわれが数年来研究した結果の概要を示したものである。

2. 冷間圧接の機構

冷間圧接は実用上きわめて有効な接続法であるが、その圧接機構についての理論的考察および実験は行われておらず、このため圧接部自体に不安をもたれる場合がある。このように圧接機構の究明がなされていないのはこれが新しい分野の学問であることおよびきわめて微細な圧接界面に関するためと思われる。

W. Hofmann 氏ら⁽²⁾は冷間圧接に関する実験を行い、 -150°C でも Al と Al を圧接することが可能であり、また圧接速度は圧接後の強度に影響がないことを認めている。これらの実験事実から変形の際に生ずる熱は接合過程の解明にはほとんど関係ないと思われる。W. Hofmann 氏らの説⁽²⁾は、要するに冷間圧接は異種または同種の金属間の金属結合によるものとして粉末冶金関係の研究者によるとこの説も肯定されるところがある⁽⁸⁾。このような結合説に対し、接触している金属体間の相互拡散こそが冷間圧接の本質的な過程であるとする説もある⁽²⁾。

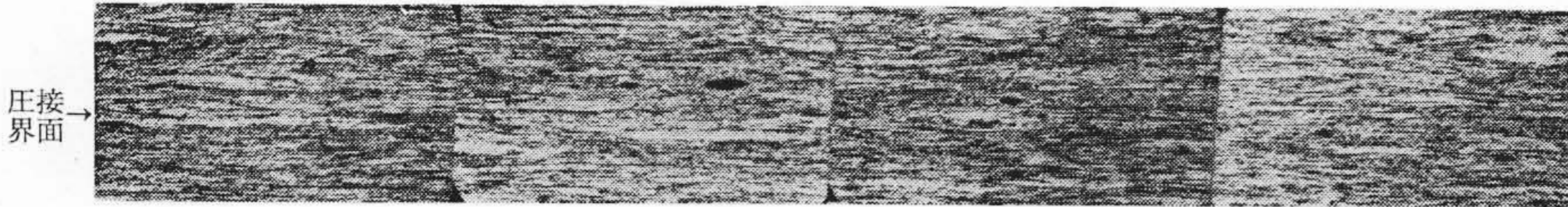
以上の説はすべて推論であり実験による裏付けはなされていない。これに対しわれわれは圧接界面の微視的観察を行い、それらの結果から圧接機構に対する考察を加えた。

* 日立電線株式会社取締役電線工場長

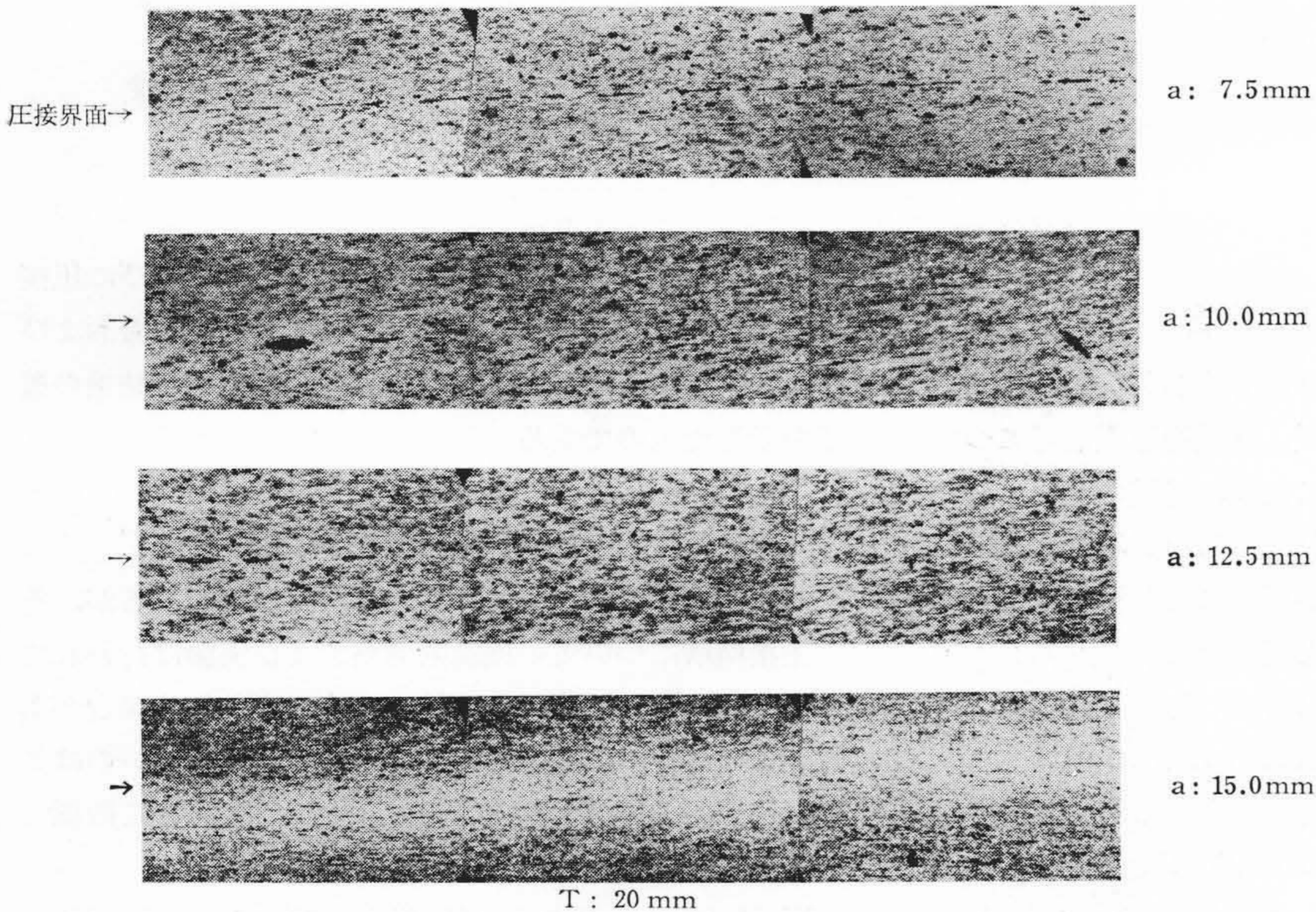
** 日立電線株式会社電線工場

2.1 圧接部の顕微鏡による観察

第 1, 2 図はそれぞれ衝き合わせ冷間圧接した Al および Cu の縦断面の組織である。これらの図よりわかるように圧接界面は Al の場合は異物が存在しなければ認められない。Cu の場合は供試材が電気銅であるため存在している Cu_2O の形状が圧接部付近で強変形のため若干変っているだけで圧接界面を明確にできない。なお圧接

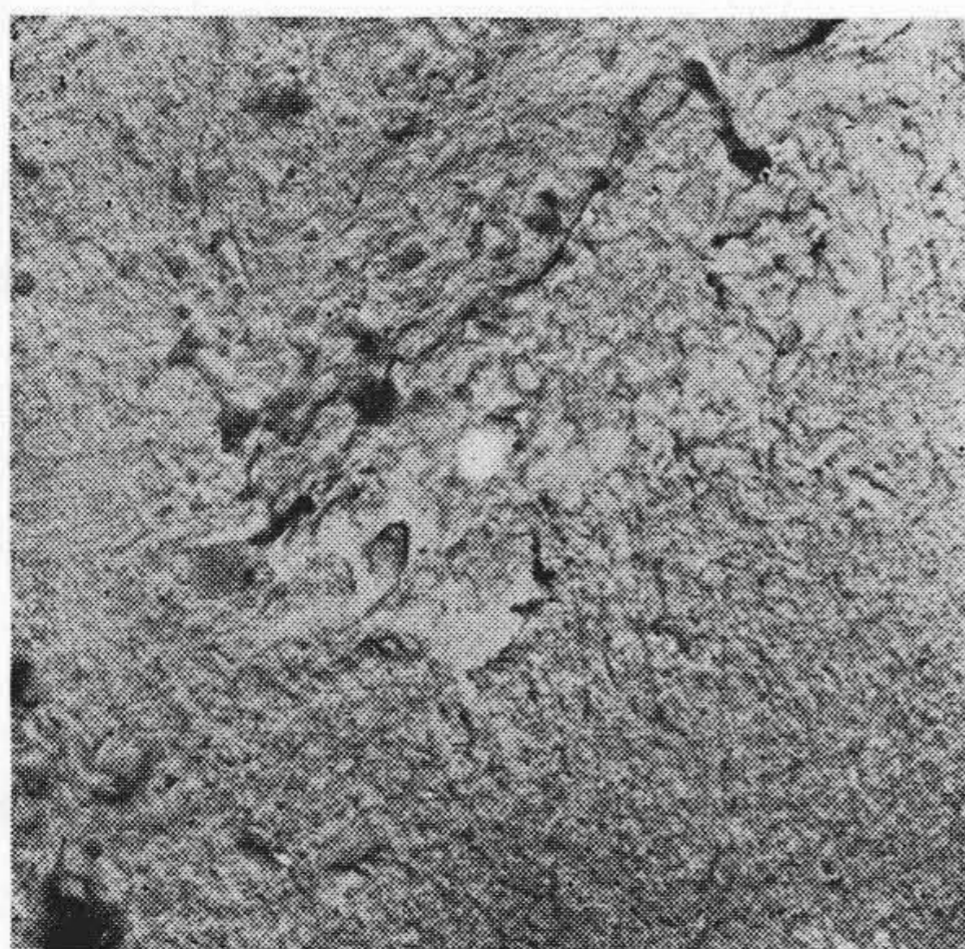


第 1 図 圧接部の組織 (×65) (Al の場合)



第 2 図 a を変化させた場合の圧接部の組織 (×65) (Cu の場合)

注: 1. a, T については第 12 図参照。
2. → は圧接界面を示す。



第 3 図 圧接部の電子顕微鏡写真 (×5,000) (Al の場合)

界面について二段レプリカ法を用い電子顕微鏡による観察も行った。

第 3 図は圧接界面の電子顕微鏡写真の一例を示す。この図において右上方から斜めに下降しているのが圧接界面の圧接不完全な部分のようで、圧接部付近に著しい強加工をうけている領域が存在していることがわかるだけである。

2.2 圧接界面の電子回折による観察

圧接界面における拡散層の有無を検出するため Al と Cu とを重ね合わせ種々の圧力で冷間圧接しその圧接界面近傍について電子回折を行った。圧接する面の表面処理としてはワイヤ・ブラッシングを行った。

第 1 表は実験結果の一例を示す。この場合 Al, Cu とともに試料直径は 11 mmφ, 圧接荷重は 20 t である。

第 4 図は試番 2-5 についての電子回折写真である。

この図は第 1 表に示したように格子常数の異なる Cu 側の 2 種の回折像が認められる。

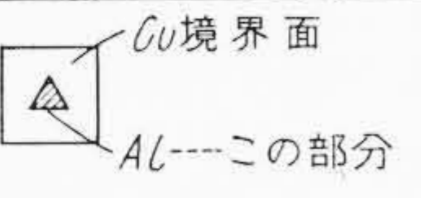
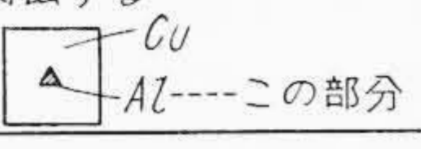
この表および図から圧接界面の構造は次のようになっているものと考えられる。

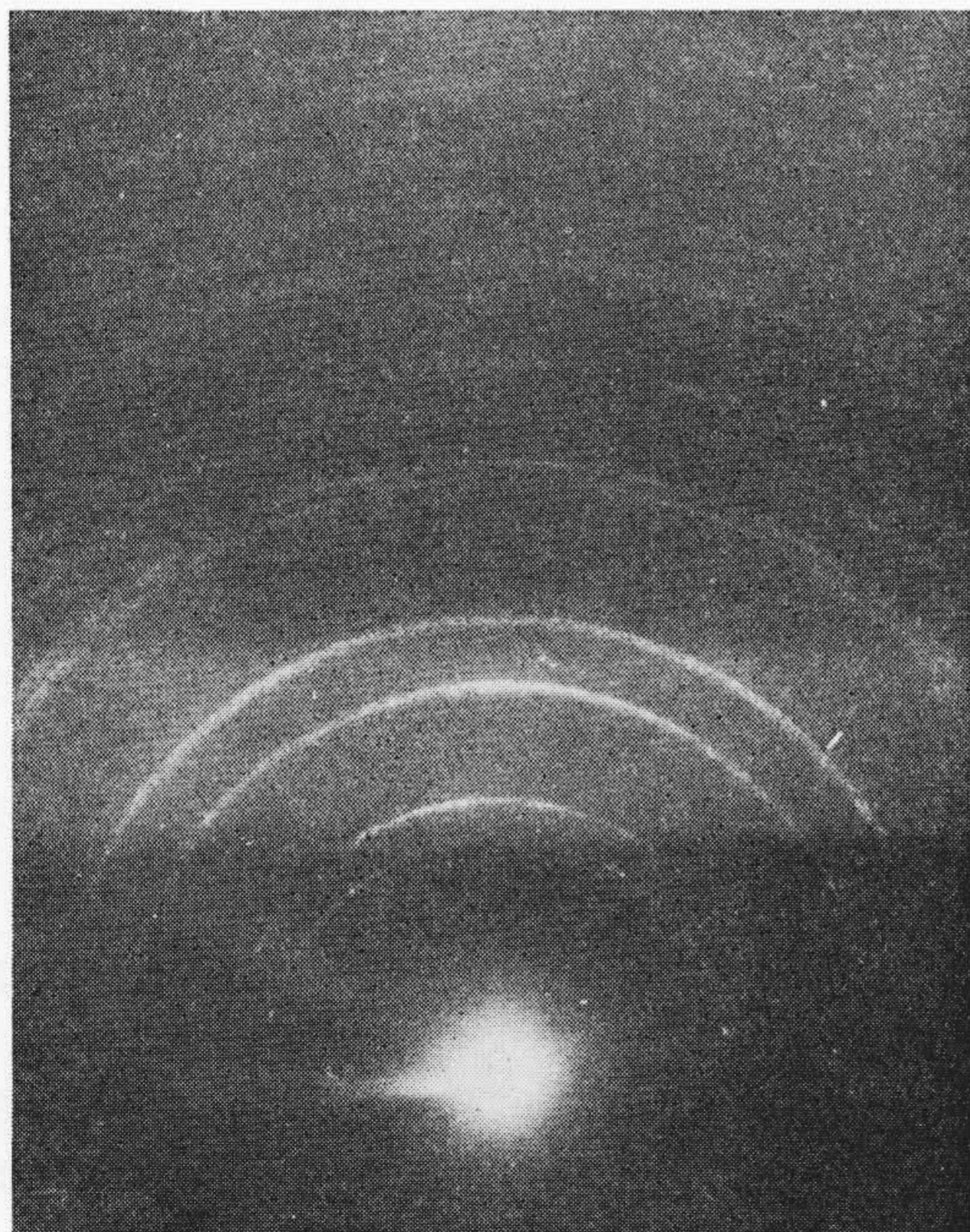
Al 側は境界面までほとんど Cu を固溶しないが (これは Al 側に Cu が固溶しないことから予想される), 境界面近くでは Al の中に, 少量の Al を含んだ Cu 側固溶体が混入していると思われる。逆に Cu 側からみるとほとんど境界面まで正常の格子常数をもつ Cu がみられるが, 同時に境界面では格子常数の大きい Al を固溶したと考えられる Cu 側固溶体による回折像が得られる (第 4 図参照)。

この結果より圧接界面では電子回折でキャッチできる程度の原子の拡散が行われているものと思われる。

なお圧接界面における温度上昇を測定するため圧接面にアルメル・クロメル熱電対をはさみ圧接してみたが見掛け上の温度上昇は 2°C ぐらいしか認められなかった

第1表 試番2についての電子回折結果

番号	回折場所	回折像	格子常数(Å)	
			Al	Cu
2-1	Al側, 境界(AlとCuとの)から0.07mm	Al	4.05	—
2-2	Al側, 境界から0.07mm以下	Al	4.05	—
2-3	 Cu境界面 Al---この部分	Al---強い Cu---弱い Cu ₂ O---弱い	4.05	3.66
2-4	2-3の状態をさらに腐蝕する  Cu Al---この部分	Al---強い Cu---弱い	4.04	3.66
2-5	2-4をさらに腐蝕してAlがなくなった状態	格子常数の異なるCu側の回折像(2種)	—	3.60 3.65
2-6	2-5を0.15mm 研磨したCu側	Cu---強い Cu ₂ O---弱い	—	3.62

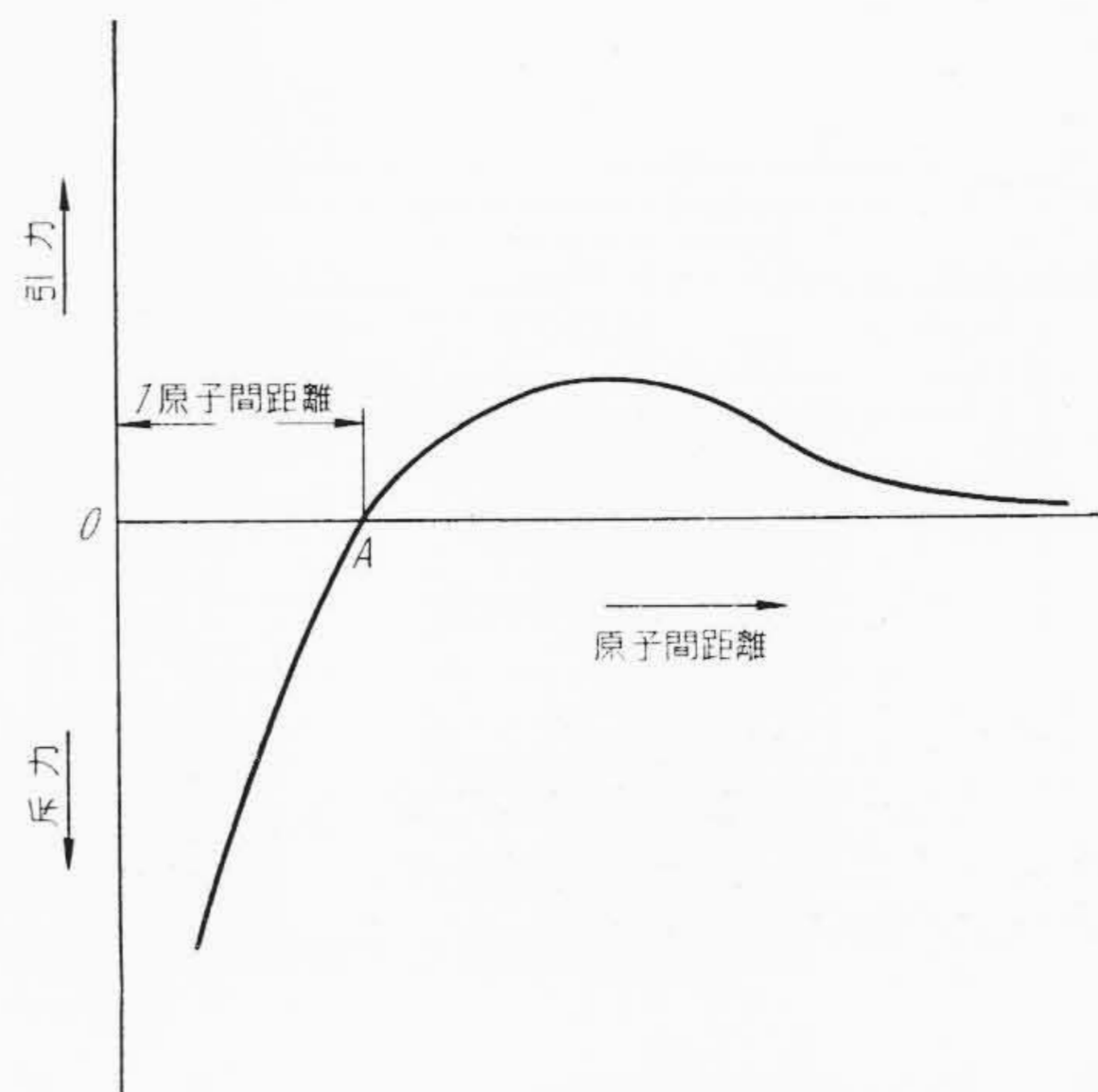


第4図 試番2-5についての電子回折写真

ことを付記する。

2.3 圧接機構に対する考察

第5図は原子間距離と原子間に働く力との関係を定性的に示したものである⁽⁹⁾。この図より、まったく純粋な金属面を互に数原子距離近づけると引力が作用して容易に金属結合すなわち接着が起ることが想像される。しかし実際の場合には圧接初期の面はミクロ的に凹凸があり面と面とが点接触しているものと思われる。したがって



第5図 原子間に働く力と原子間距離との関係

圧接面が純粋すなわちガス吸着、酸化物そのほかの異物が存在しないならばこの点接触した部分では小さな圧力で接着することが考えられる。この部分は大きな応力集中が起っており、最初に変形し、圧力、変形の増大につれて面と面との真の接触が起る。この場合強変形を受けた場所では多数の転位(Dislocation)を発生するとともに転位により多数の原子空孔(Vacancy)も発生する。この空孔を通じて原子の拡散が行われ圧接はより完全なものとなる。このように考えれば常温という温度で圧接界面に拡散がおこることも説明できる。

3. 圧接に及ぼす諸因子

冷間圧接条件を左右する重要因子としては下記に示すとおりである。

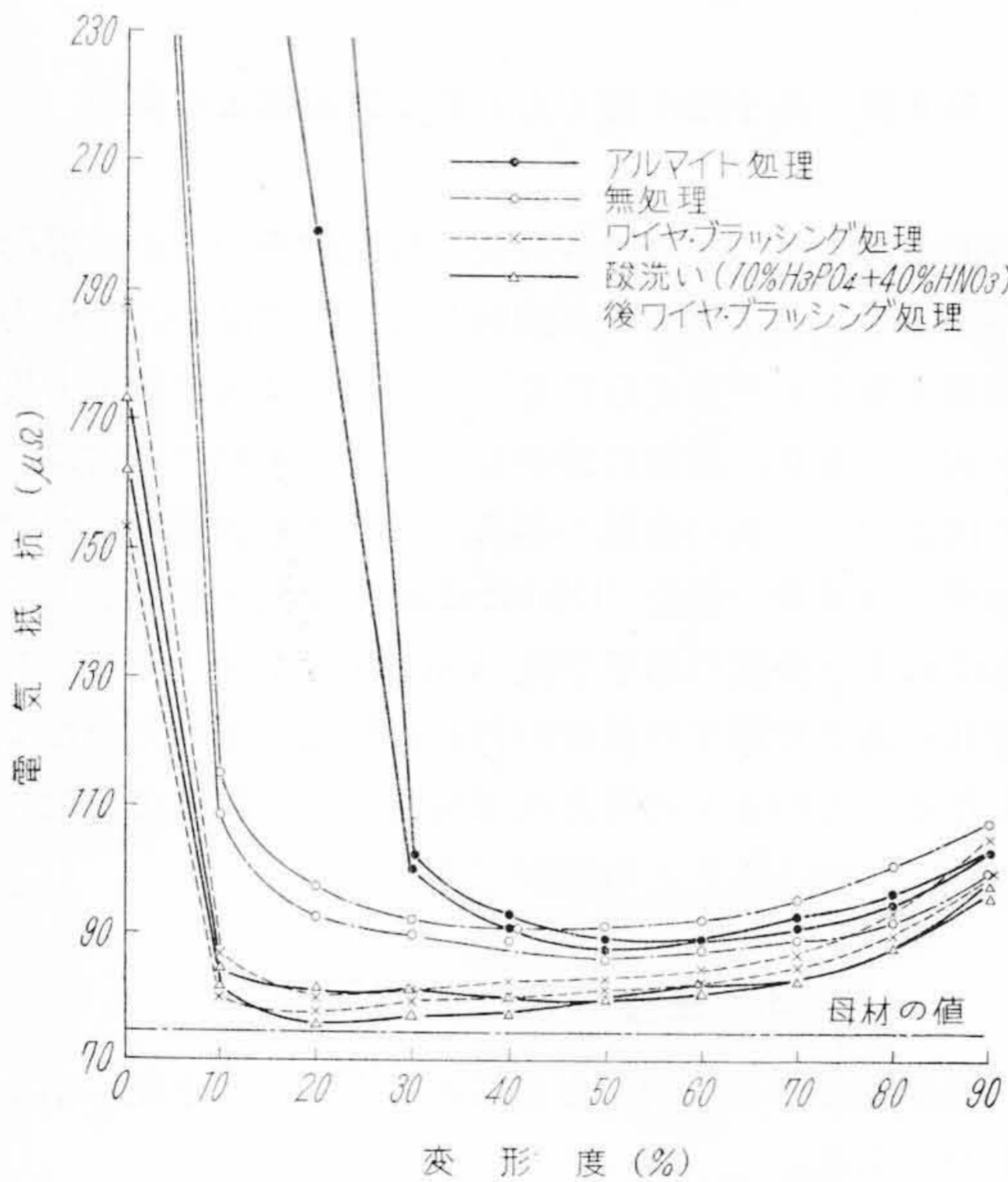
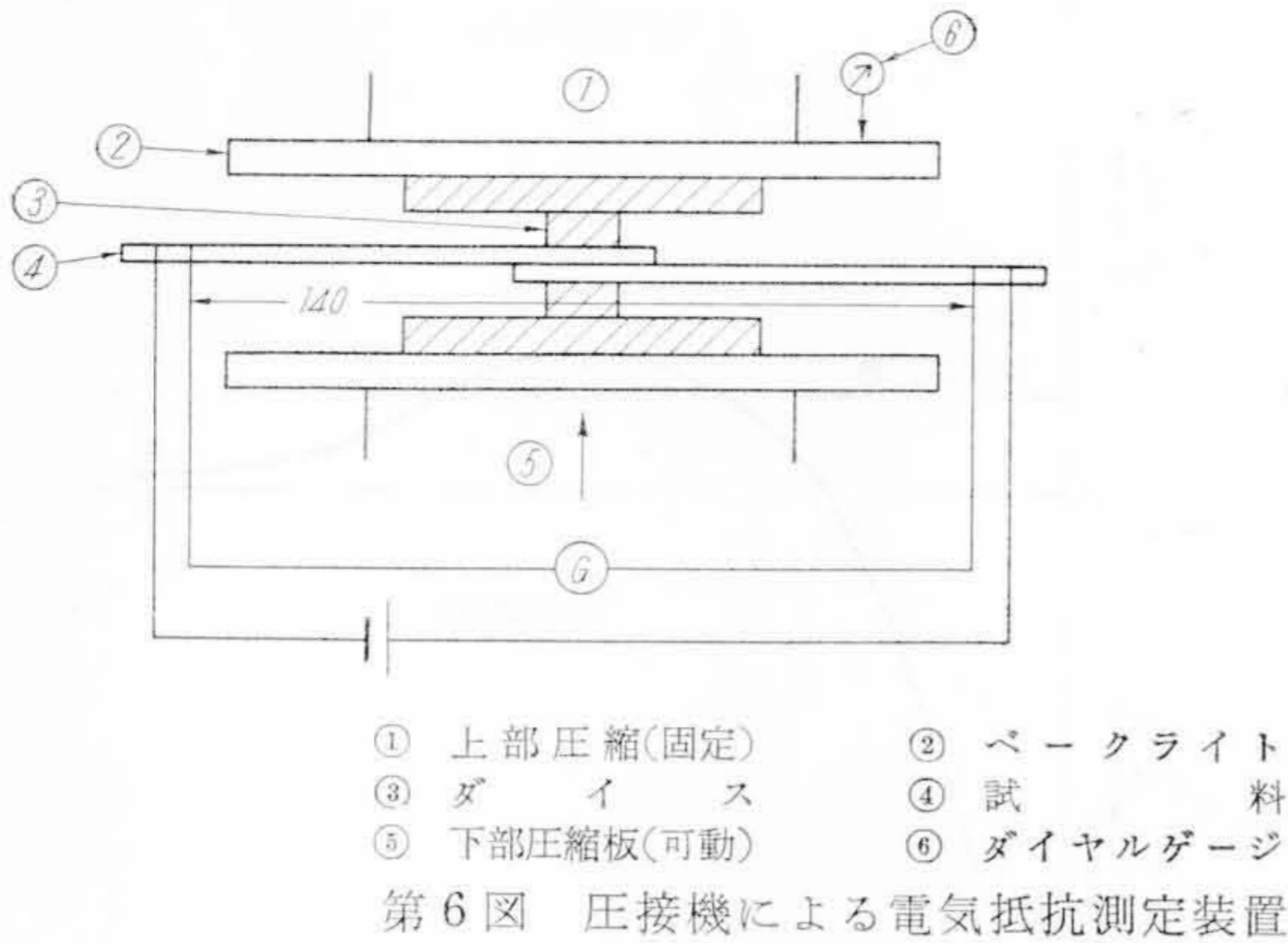
3.1 被圧接面の表面処理方法

前記2章で示したように、圧接の場合もっとも重要なことは被圧接面が清浄なことである^{(10)~(12)}。

被圧接面の清浄法については種々の方法が考えられるが、酸洗した後ワイヤ・ブラッシングするのが、もっとも良いようである。しかし酸洗いは実際上種々の問題を発生する危険性があるので、ワイヤ・ブラッシングだけの効果を確認するため次のような実験を行った。

第6図は圧接時の供試材の電気抵抗測定装置を示す。供試材は幅10mm, 厚さ5mm, 長さ100mmの99.3% Al板で、重ね合わす面を処理した後10mmオーバーラップして圧力をかけた。圧接ダイスは10mm角である。供試料には1Aを通電し、圧接部を中央とした140mm間の電圧を変形量、圧力と関連させて測定した。

第7図は本実験結果を示す。ワイヤ・ブラッシング処理はモータ回転式で10秒間処理したものである。また酸洗いはR.F. Tylecote氏の論文⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を参考にして

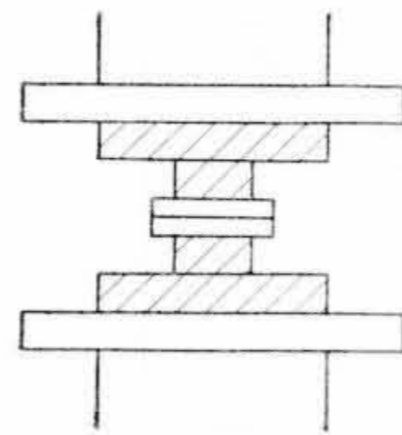


第 7 図 圧縮変形による電気抵抗の変化

10% H₃PO₄ 溶液に 50°C, 5 分浸漬した後ただちに 40% HNO₃ に常温で 30 秒浸漬したものである。この図からわかるようにワイヤ・ブラッシングの前に酸洗いした場合としない場合の差はほとんどないようである。したがって本実験においてはモータ回転式ワイヤ・ブラッシング処理のみ行うこととした。なお Al の場合はブラッシング後放置しておくとも自然発生的な酸化皮膜が成長するので、圧接直前にブラッシングするのが良い。

3.2 被圧接材の材質および変形度

被圧接材の材質および圧接するに必要な変形度については A. B. Sowter 氏の研究⁽¹⁰⁾があり、第 2 表にその結果を引用する。その研究では供試材を注意深く清浄にした後表面を互に向き合せてスタンプの間におき室温で高い圧力をかけ試片が互いに接着するような大きな変形を与えた。最初の厚さのパーセントで変形後の厚さを表わ



したものを残厚比 (Figure of Merit) と呼ぶ。この値は冷間圧接に対する金属の適合性を表わす量として用いられている。第 2 表よりわかるように純 Al はもっとも圧接しやすく、Cu は Al よりも圧接しにくいことがわかる。またこの表より残厚比が金属の融点や再結晶温度に関係をもたないことも想定される。

3.3 圧接工具の形状

衝き合わせ圧接の場合は、圧接工具の形状はいかに“ばり”を取るかの問題だけで、圧接条件にはあまり関係しないが、重ね合わせ圧接の場合は大きな問題となる。

圧接の場合純粋な金属面の直接接触が重要であるので、表面に存在している酸化層その他が圧接部から外へ出ることすなわち接着面で流動しやすい形状をえらぶ必要がある。岡田氏⁽⁴⁾は接着面における流動について種々実験を行い純 Al の場合 Flow Ratio 3 付近で良好な接着がえられることを示している。ただし Flow Ratio とは変形量を長さを基にして表わし、圧接前の単位長さを変形後何倍の単位長さになったかを表わす値である。

A. B. Sowter 氏⁽¹⁰⁾ は長方形のダイスを使用して重ね合わせ圧接する場合次のような形状のものが良いと述べている。

- (A) 同種材料を上下同一ダイスで圧接する場合
 $W = t \quad L \geq 5t$
- (B) 同種材料を上部ダイスのみ使用して、下部ダイスとしては平板を使用する場合
 $W = \frac{1}{2} t$
- (C) 異種材料を圧接する場合
 上, 下の W の比 = 上, 下材料の硬さの逆比
 ただし W, L はそれぞれ長方形ダイスの短辺長辺の長さで t は板厚である。

われわれは 10 種の形状のダイスを試作し、種々の実験を行った結果、ほぼ上記と同様な実験結果がえられた

第 2 表 種々の材料の冷間圧接性

材	料	残厚比
純	アルミ (99.9%)	40
	工業用アルミ (99.5%)	~30
Al-0.4%	Cu-0.6% Mg (DTD 346, 51S)	29
Al-1.25%	Mn (BA 60A, 3S)	20
Al-4.5%	Cu-1.5% Mg-0.6% Mn (Duralmin, 24S)	20
	カドミウム	16
	鉛	16
	銅	14
ニ	ッケル	11
亜	鉛	8
	銀	6

が、重ね合わせ圧接の場合、特にダイスの角の部分の仕上げ、面取に留意する必要があることがわかった。すなわち角をあまり正確にとると圧接部の近傍に剪断作用による機械的弱点を生ずることとなり、またあまり丸味をつけると Flow Ratio の低下した部分を多くすることになって圧接性を害する。なお圧接工具の材質としては Al の場合は高炭素鋼で十分であるが、Cu の場合は工具用 Cr 鋼を使用するのが良い。

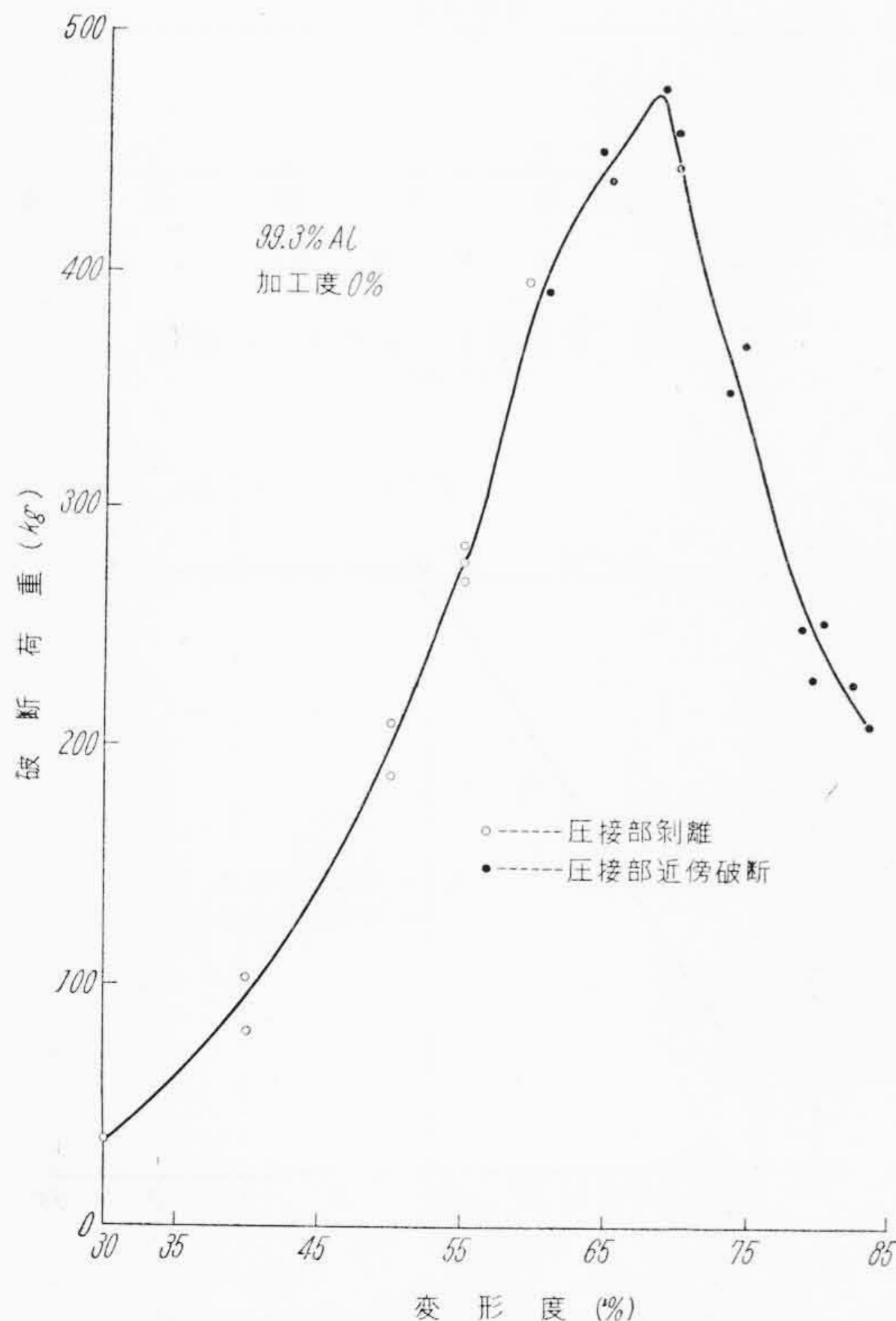
4. 重ね合わせ圧接

重ね合わせ圧接については過去において種々の実験結果が示されているので⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾、ここではわれわれの実験結果の一例を示すにとどめておく。

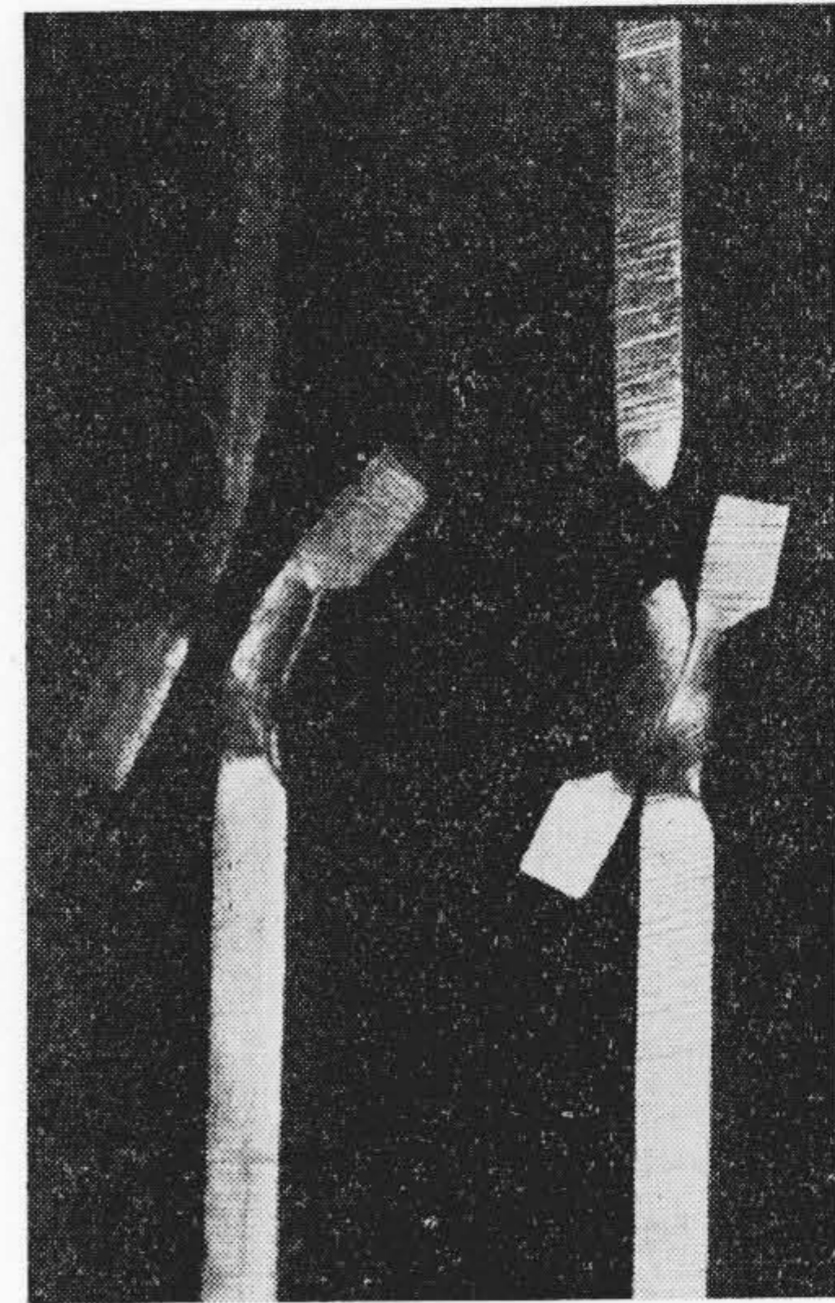
供試材としては焼鈍した 99.3% の Al (板厚 5 mm, 幅 10mm, 長さ 100mm) を用い 10mm 角のダイスを用いて重ね合わせ圧接実験を行った。

第 8 図は圧接した試験片を引張試験した場合の破断荷重と変形度との関係を示したものである。ただし変形度とは圧接前、後の厚さの差と圧接前の厚さの比を%で示したものである。

第 9 図は引張試験後の供試片外観を示した写真で右側が圧接部近傍で切断したもの(第 8 図の黒丸印)左側は圧



第 8 図 破断荷重に及ぼす変形度の影響



第 9 図 圧接試験片の引張試験後の形状

接部で剥離したもの(第 8 図の白丸印)である。

第 8 図よりわかるように破断荷重は変形度の増加とともに増大するが変形度 70% 付近で最高を示し、変形度がこれより増加するとかえって破断荷重は減少する。これは圧接部の強度は変形度とともに大きくなるが、圧接部近傍は変形度が増大するとダイスによる剪断応力のため減少する傾向があり、これら 2 因子がオーバー・ラップしたためと考えられる。この場合最高破断荷重は母材の引張破断荷重の約 85% 程度である。この値は供試材の加工度の増加とともに減少する傾向がある。また前記最高破断荷重は加工度の増加とともに変形度(%)の低い側に移行する。

なおこの実験のほかに Al の純度も変化させてみたが、純度が良好なほど圧接しやすいことがわかった。

5. 突き合わせ圧接

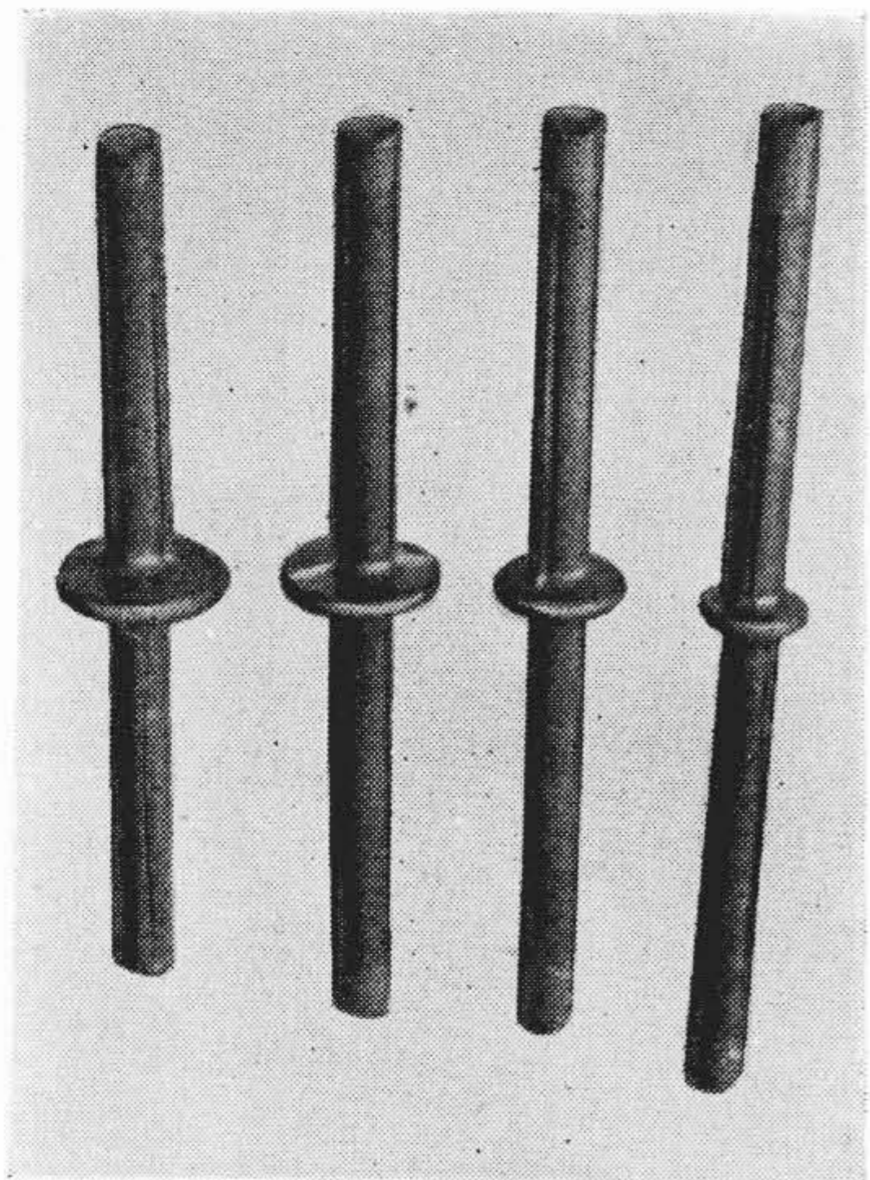
突き合わせ圧接の場合も重ね合わせ圧接の場合と同様に圧接面の表面仕上げが問題であるが、前述の研究よりモータ回転式ワイヤ・ブラッシングを前処理として用いた。

供試材としては電気用の Al (純度 99.78%) および Cu (純度 99.95%) の完全焼鈍した線材(直径 11.08mmφ)を用いた。

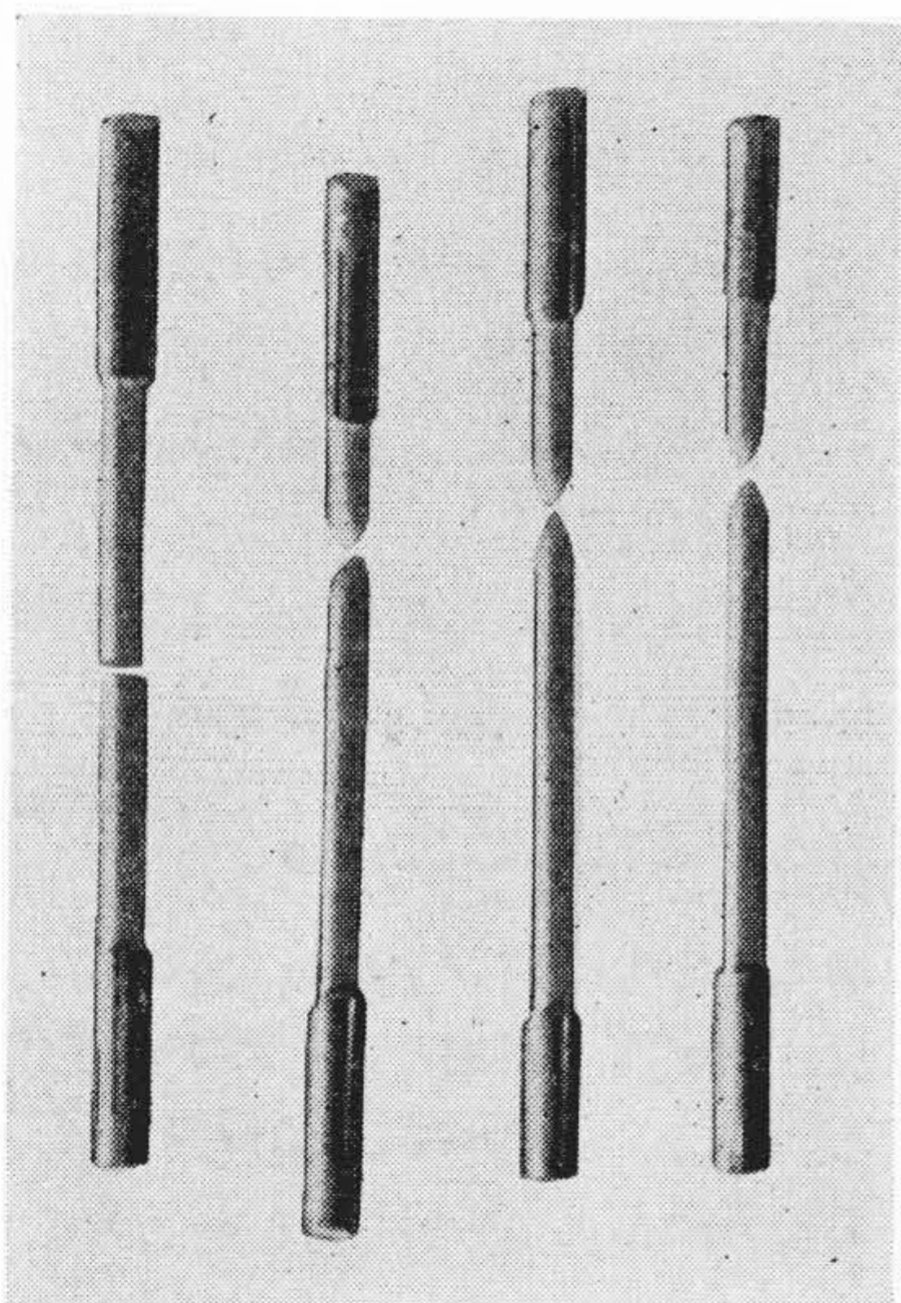
圧接実験としては圧縮試験機にテーパ・スリーブのついた試料把持圧接装置をとりつけ実験を行った。

第 10 図は圧接試料を示す。この試料に旋盤仕上げを行い、引張試験を行ったものを第 11 図に示す。第 11 図の最左側は圧接部より剥離したものでそのほかは圧接部以外で破断したものである。

第 12 図は圧接試験における各部符号の説明図である。



第10図 圧接試験料

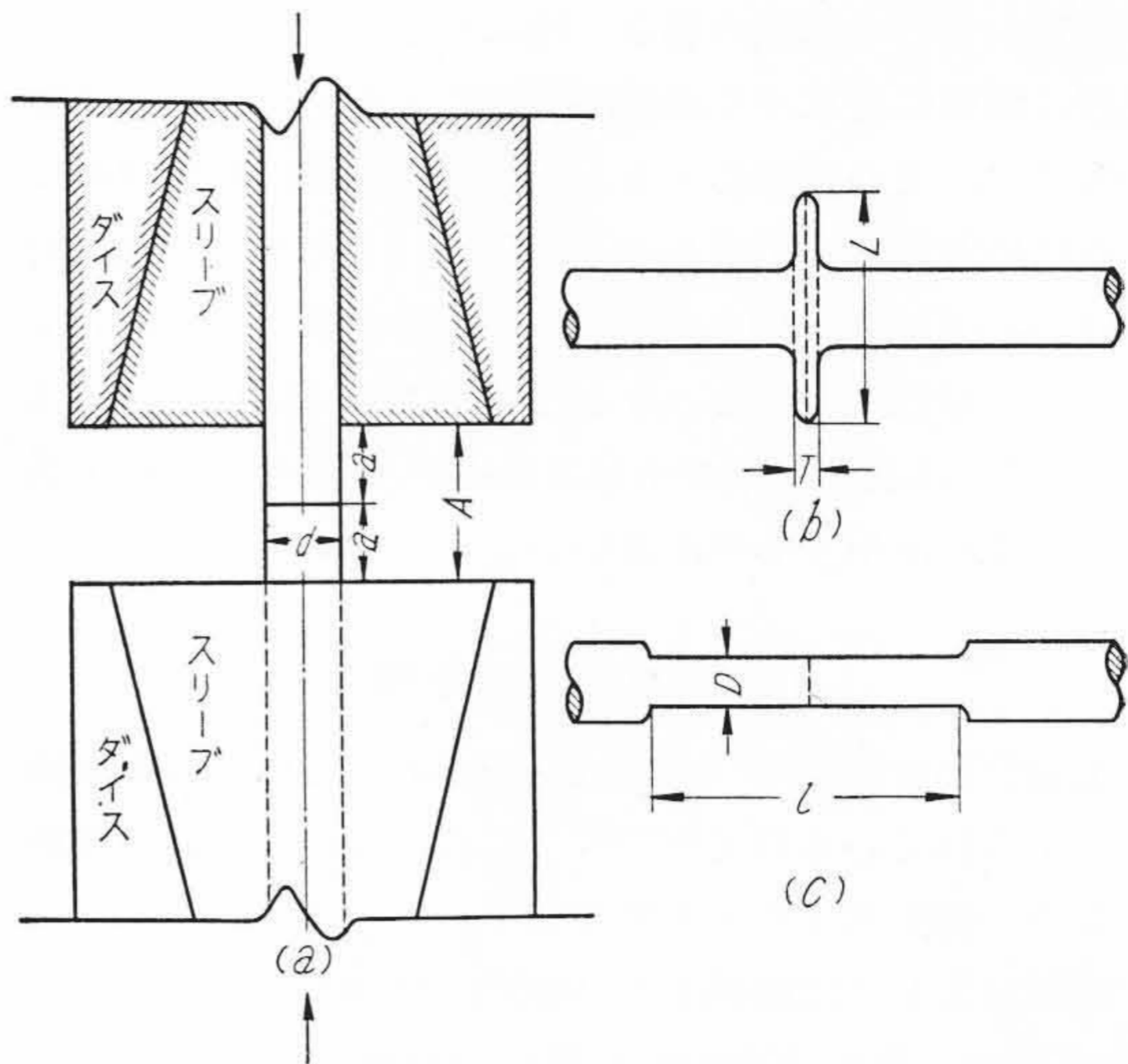


第11図 引張試験後試験料

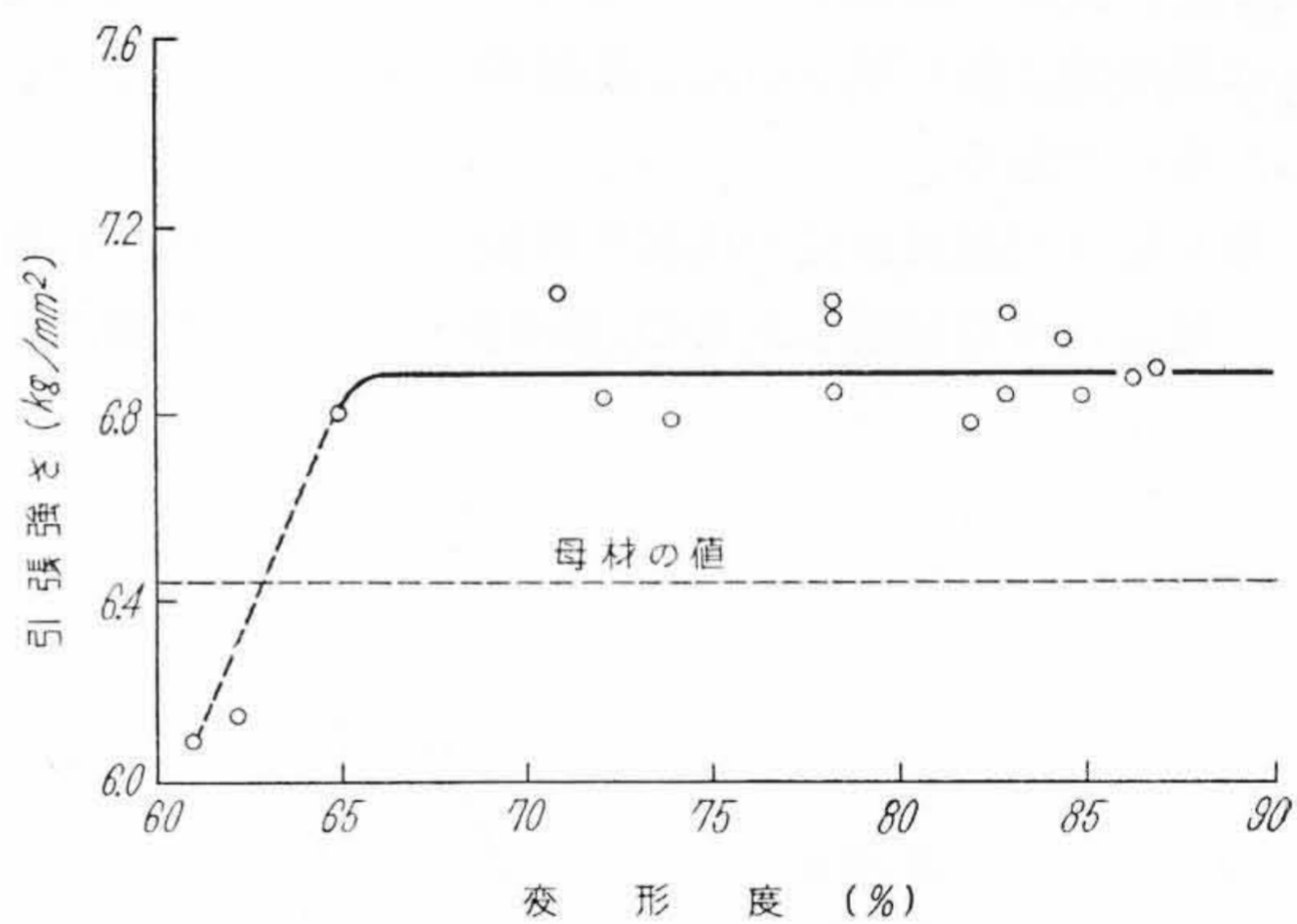
この図よりわかるように圧接前のテーパースリーブ間の距離Aと圧接後のスリーブ間の距離Tから変形度を次のように規定した。

$$\text{変形度} = \frac{A - T}{A} \times 100\%$$

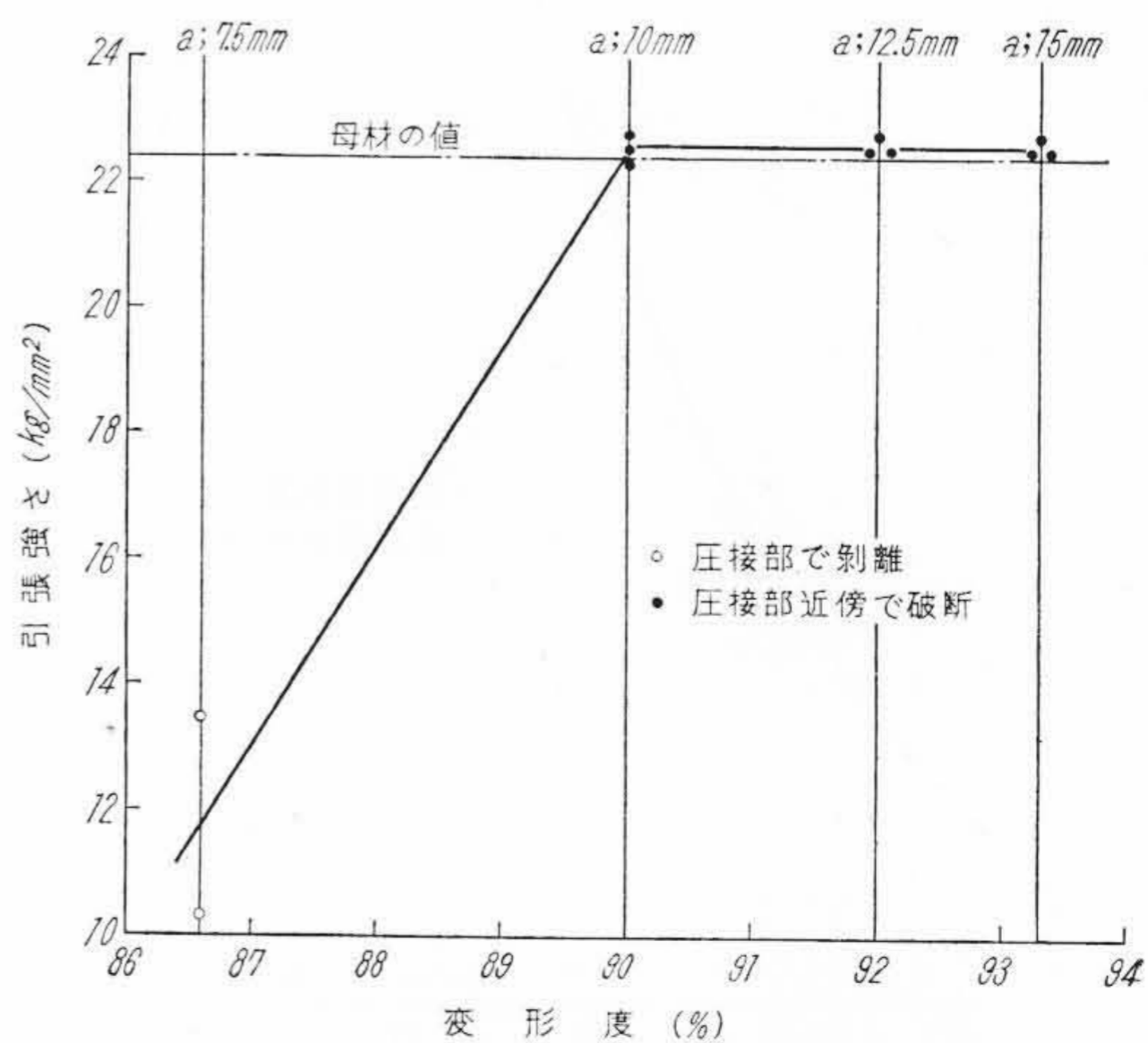
第13, 14図はそれぞれ Al および Cu についてえられた実験結果の一例である。これらの図より、圧接部の引張り強さが母材の強さより大きくなるすなわち圧接が完全であるためには Al の場合 65%、Cu の場合大体 90% の最低変形度を必要とすることがわかる。圧接荷重は Al の場合 25 t、Cu の場合 38 t ぐらいである。なおこの最低変形度は線材の加工度によって変化し加工度が大きくなるにしたがって大きくなる傾向があり、たとえば 67% の加工度の Al では 75% 程度となる。また加工度



第12図 圧接試験における各部符号説明図



第13図 変形度と引張強さとの関係 (Alの場合)



第14図 圧接条件に関する試験結果 (Cuの場合)

の増大、直径の減少につれて圧接しにくくなる。しかし 2 mm 程度の線材では圧接は十分可能である。

衝き合わせ圧接の際に興味ある問題は、線引加工度が約 30% 以上の線材を冷間圧接すると圧接部近傍に機械的強度の低下する部分ができることである。引張試験の時にこの部分で破断する傾向がある。この傾向は第 15 図に示した圧接部の硬さ分布曲線からもうかがわれるところで(供試材は 37.7% 冷間伸線した Al)、この原因について種々研究した結果、バウシンガー効果(Bauschinger Effect)によることがわかった。

圧接した線の捻回、衝撃強度についても実験を行ったが、圧接部で破断するようなことはなかった。

6. 圧接の応用

Al および Cu の冷間圧接は、重ね合わせの場合も衝き合わせの場合も可能であり、種々の工業への応用も大きく開けてくる可能性がある。たとえば Al 製箱の製造(接目を重ね合わせてロール圧接または点圧接する)、冷蔵庫のエバポレータ (Evaporator) の製造、パイプの製造、接続、板、線および棒の接続などが可能となる。しかもこの方法は熱の影響がなく、熟練を要しないので加圧可能な場合には有効に利用できる。

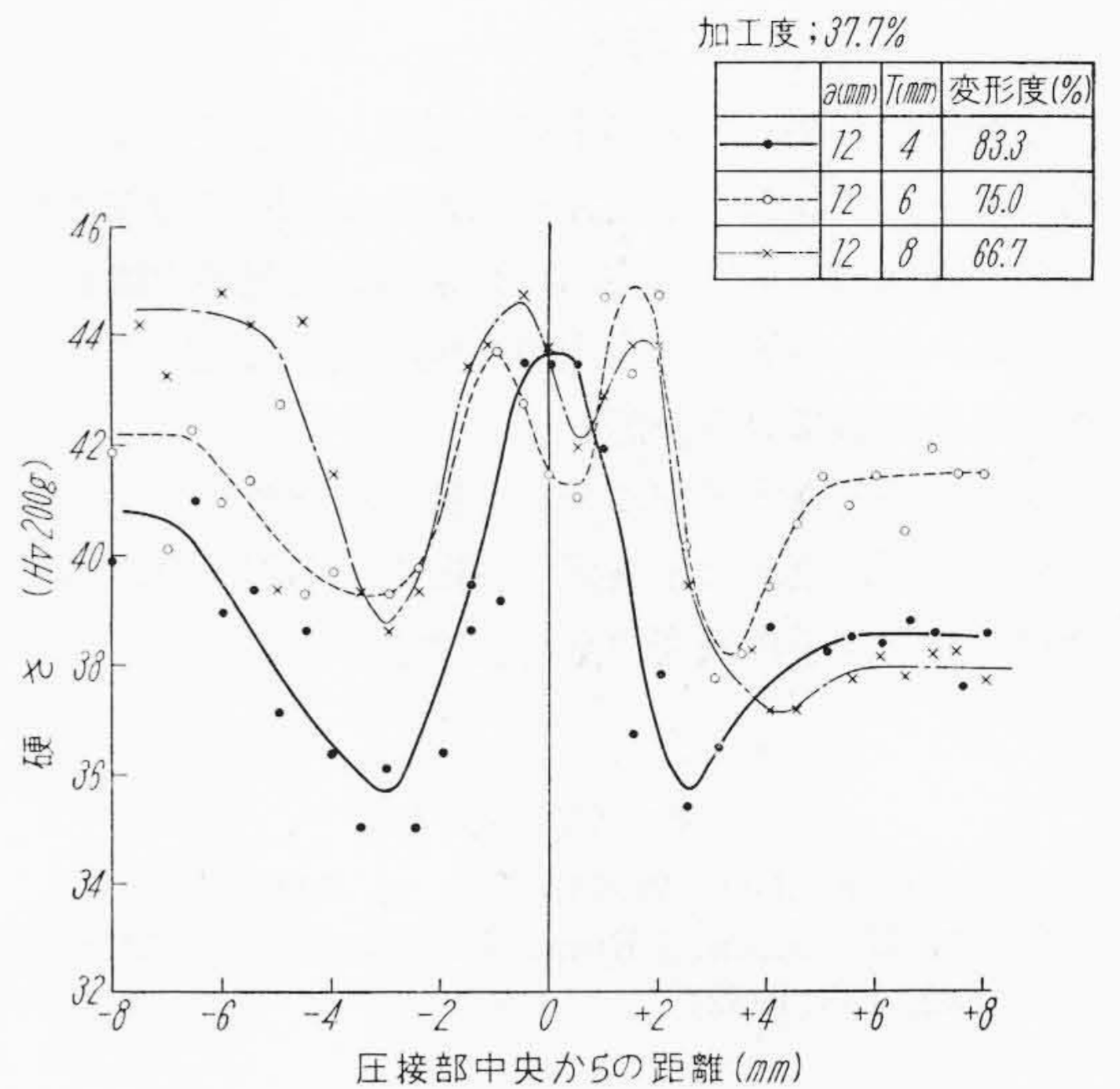
本論文では今まで利用されていない電線工業への応用について述べよう。

電線工業に用いられる導電材料としては主として電気用純度の Cu および Al である。また特に機械的強度、耐熱性を必要とする時には Cu または Al に微量の添加元素を含有した合金が使用されている。たとえば銀入銅、クロム銅、イ号合金(Aldrey 系合金)、“Cond-Al”

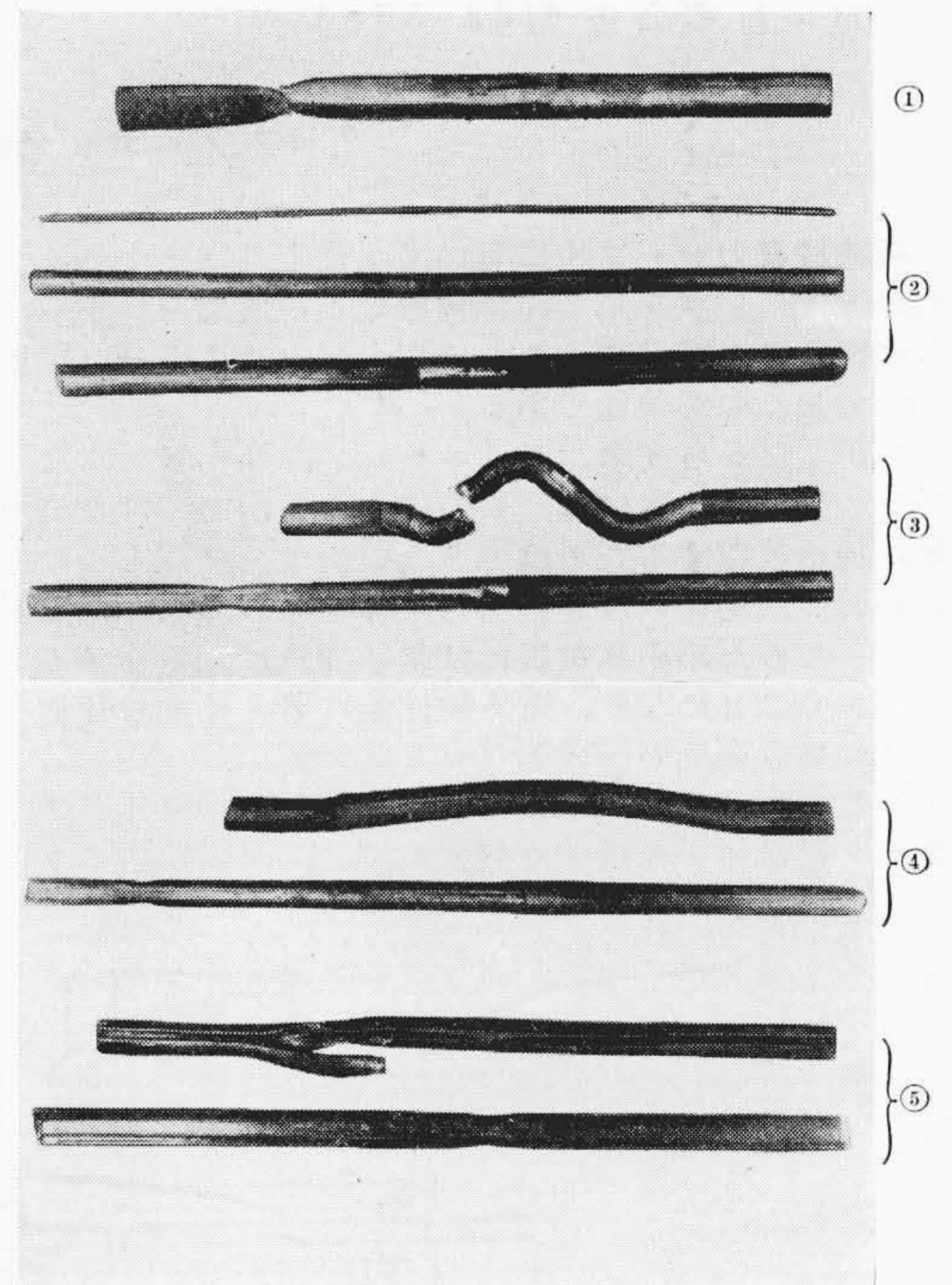
(Al-Fe-Mg₂ Si 系合金) などである。これらの金属および合金線を接続する場合には種々の方法たとえば熔接、銲接などが利用されるが加熱による軟化、接続部の強加工不能、熱処理効果の減少などは避けられない。特に Aldrey や Cond-Al では上記の方法は利用できず接続はその用途をさまたげる大きな障害となっている。またトロリ線(Trolley Wire)の接続も従来は不可能であった。

われわれは上記の各種線材の圧接について基礎的研究を行うとともに衝き合わせ圧接機を新しく製造した⁽¹⁵⁾。この圧接機によれば上記の合金線そのほかにもまた圧接可能である。

第 16 図は上記圧接機により種々の線材を圧接しこれを試験した後の状況を示す。図において①は溶体化処理した Aldrey 線を圧接し引張った場合圧接部以外で破断する状況を示す。②の Al 線は圧接部をふくむ 11mmφ のものを焼鈍することなく 2.8 mmφ まで線引きして異状のないことを示したものである。③および④はそれぞ



第 15 図 圧接部の硬さ分布



第 16 図 種々の線を圧接しこれを試験した後の状態

れ Al および Cu の捻回、引張り試験後の状況を示す。⑤は溝付 110mm² 銀入銅のトロリ線を圧接し、引張り、捻回試験を行った後の状況を示すもので圧接がきわめて有効、完全であることがうかがえる。

7. 結 言

冷間圧接に関して数年来実験研究した結果について要約してみたが、この研究分野は大きな発展が約束されるもので理論的にも実用的にも興味ある問題が山積している。われわれの研究も大山の一角に触れた程度で今後の進展に期待している。

終りにのぞみ本研究に関して御指導いただいた大阪大学岡田教授、東北大学金属材料研究所小川教授、鈴木助教授、渡辺助手に深謝の意を表す。

参 考 文 献

(1) F. C. Kelly : Welding J. 30, 728(1951)
 (2) W. Hofmann, J. Ruge, J. E. Hughes : Z. Metallk., 43, 133(1952)

(3) W. Hofmann, K. Groove ; Z. Metallk., 45, 514 (1954)
 (4) 岡田監修：現代の溶接, 199(1952, 日刊工業新聞社刊)
 (5) 手塚：金属 23, 450(1953)
 (6) W. Dubilier : Welding J. 29, 1077(1950)
 (7) W. Dubilier : Materials & Methods 32, 78 (1950)
 (8) A. J. Shaler : AIME Trans., 185, 796(1949)
 (9) N. J. Petch : Progress in Metal Physics. 5, 1(1954)
 (10) A. B. Sowter : Materials & Methods, 28, 60 (1940)
 (11) M. A. Miller, G. W. Oylar : Welding J. 30, 486-S(1951)
 (12) J. M. Parks : Welding J. 32, 209-S(1953)
 (13) R. F. Tylecote : Metal Ind., 81, 72(1952)
 (14) R. F. Tylecote : Welding J. 26, 88(1947)
 (15) 目下特許出願中



新 案 の 紹 介



実用新案公告昭33-3583号

水 上 徳 五 郎 ・ 川 崎 鎮 雄

プラスチック絶縁扇形導体の被覆装置

紙絶縁電力ケーブルにおいては仕上外径を小さくするため導体の形状を扇形、半円形などの成形導体とし、さらに燃合せを容易にするため燃合ピッチに合せた燃癖をつけておくのが普通である。

しかしながら従来、ポリエチレン、塩化ビニルなどのプラスチック絶縁体は、このような燃癖をつけた成形導体に押し被覆することはできないので、燃癖をつけない成形導体に絶縁被覆を押し出した後それら線心を燃合せていた。このため絶縁被覆には常に捩れによるひずみを与えておくことになり、電気的性能は著しく危険状態にさらされ事故発生の一因となっていた。

この考案はこのような燃癖をつけた成形導体にプラスチック絶縁体を被覆する装置に関し、図に示すように、

口金と心金とを有する押し機ヘッドのニップルに、回転可能なパッキングと真空ポンプとを取り付けたもので、押し被覆時には成形導体の周上にゆるいチューブ状の被覆を押し出すと同時に、ニップル内を真空ポンプによって外気より低い気圧にすれば、チューブ状の被覆は可塑性の高いうちに外気圧力によって導体周上に密合させることができる。

このようにして作られた絶縁線心は、導体ならびに絶縁被覆自体に一定ピッチの燃癖が付与されているから、これを燃合しても無理な捩れやひずみは加わらず、したがって電氣的に安定したプラスチック絶縁扇形導体電力ケーブルを供給できる効果がある。(齊藤)

