# アルミと銅との常温圧接

Cold Pressure Welding of Aluminium with Copper

斎藤哲夫\*山路賢吉\*Tetsuo SaitoKenkichi Yamaji

#### 内 容 梗 概

最近新しく開発してきた圧接に関する研究成果の一部はすでに発表したがいずれも同種金属すなわちアルミとアルミ,銅と銅との圧接であった。これに対し本論文は異種金属すなわちアルミと銅との常温圧接について研究したものである。

供試材としては加工度の異なる電気銅と電気用アルミを用い, 衝き合せならびに重ね合せ圧接の場合の諸条件を検討した。

実験結果を要約すると次のようになる。

- (1) アルミと銅との常温衝き合せ圧接は比較的容易であり適当な突出長さを選べばきわめて簡単に圧接できる。
- (2) 衝き合せ圧接部を含む供試材について種々機械的試験を行った結果,引張り,捻回に強くても衝撃には弱いことがわかった。これはノッチ効果によるものである。
- (3) 硬いアルミと銅とを衝き合せ圧接した場合,圧接部は耐衝撃性がよくないが,2段圧接法を用いるとこのような欠点はなくなる。
- (4) 軟アルミと軟銅との重ね合せ圧接につきW形ダイスを用いて実験した結果,変形度を70%にすれば確実に圧接されることがわかった。

## 1. 緒 言

金属材料を接合する方法としては従来熔接(Welding)、 鎖接(Brazing, Soldering)などが用いられていたが、これらの方法はいずれも接合部に溶融現象を含むものである。これに対して最近新しく登場してきた圧接(Pressure Welding)は強大な圧力によって接合面を溶融させることなく接合する方法である。

圧接法はその圧接温度が再結晶以上の場合と以下の場合で区別しそれぞれ熱間圧接,冷間圧接と呼んでいる。 したがって常温における圧接は冷間圧接の分野に属するものである。

冷間圧接(常温圧接)を系統的に研究し、その実用化を 計ったのは英国のゼネラル・エレクトリックの研究所で 1954年ころから始められた。

この革命的な冷間圧接法はアルミニウムおよびその合金,カドミウム,鉛,銅,ニッケル,亜鉛,銀などの非鉄金属に適用でき、特にアルミニウムおよびその合金の場合に有効とされている<sup>(1)</sup>。その後この方面の研究,技術は急速に発展しつつあり、欧米のみならずソ連、中共でも重要な接合法としてクローズアップしているようである。

わが国においては、岡田氏<sup>(2)</sup>、手塚氏<sup>(3)</sup>の論文が発表 されているがまだその研究、実用化はようやく始まった ばかりといって過言ではない。

常温圧接は従来の熔接, 鎖接に比べて種々のすぐれた 特長があり, ある場合にはきわめて有効な方法である。

\* 日立電線株式会社電線工場

たとえば加工材または熱処理材の接合にはこの方法しかない。なぜならば従来の方法では加熱による軟化,熱処理効果の消滅などが起るからである。また異種金属の接合にもこの圧接法はきわめて有効である。従来の方法では異種金属ではその融点が異なるためにその熔接が困難な場合が多かった。ここにとりあげたアルミニウムと銅との熔接もその一例である。ところが圧接する場合には融点はなんら問題とはならない。したがってアルミニウムと銅とが容易に圧接されるならば、種々応用の分野が開けてくるものと思われる。なおアルミニウムと銅との接合は本質的に腐蝕ふんいきでは周知のように局部電池作用による腐蝕の問題を発生するので十分な防蝕対策を必要とすることを付言する。

筆者は過去3年有半にわたり圧接に関する研究を行っており、その成果の一部はアルミニウムとアルミニウムとアルミニウム およびその合金、銅と銅およびその合金の場合にはすでに発表した(4)(5)。本論文ではアルミニウムと銅との常温 圧接について述べる。

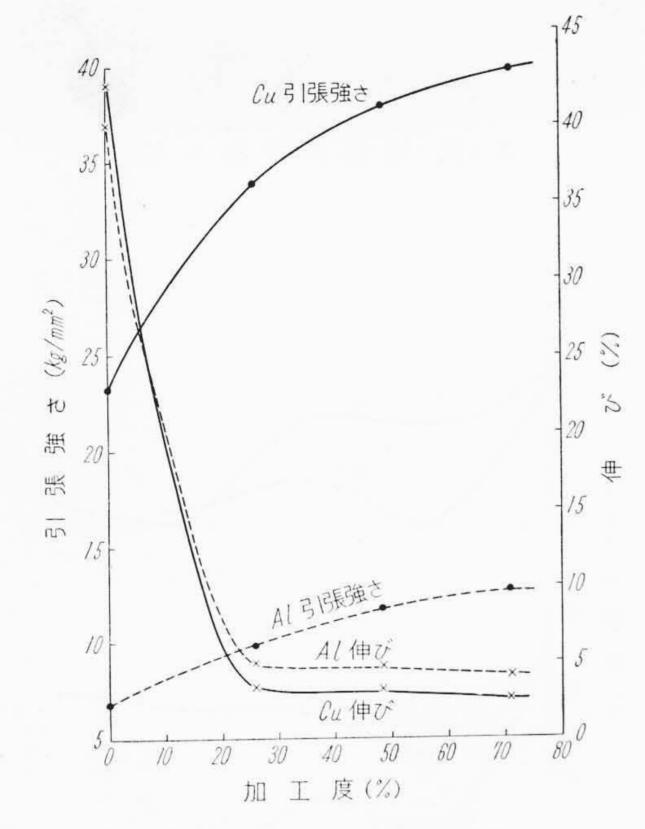
### 2. アルミと銅との圧接機構

圧接機構を解明するためにもっとも問題となるのは圧 接界面に原子の相互拡散がおこなわれているかどうかで ある。

圧接界面における拡散層の有無を検出するためアルミと銅とを重ね合わせて常温圧接し、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方法としてはワイヤ・ブラッシングを行った。この実験結果より圧接界面では電子回折でわかる程度(数百Å)の原子の

第1表	供試材の記号説明表
77 - 1	D/11/11 -> 117 -> 107 -> 1 ->

記号	Al の加工度(%)	記号	Cu の加工度(%)
A <sub>1</sub>	0	C <sub>1</sub>	0
$A_2$	25.8	C 2	25.8
A <sub>3</sub>	48.5	C <sub>3</sub>	48.5
A <sub>4</sub>	71.0	C <sub>4</sub>	71.0



第1図 供試材の機械的強度

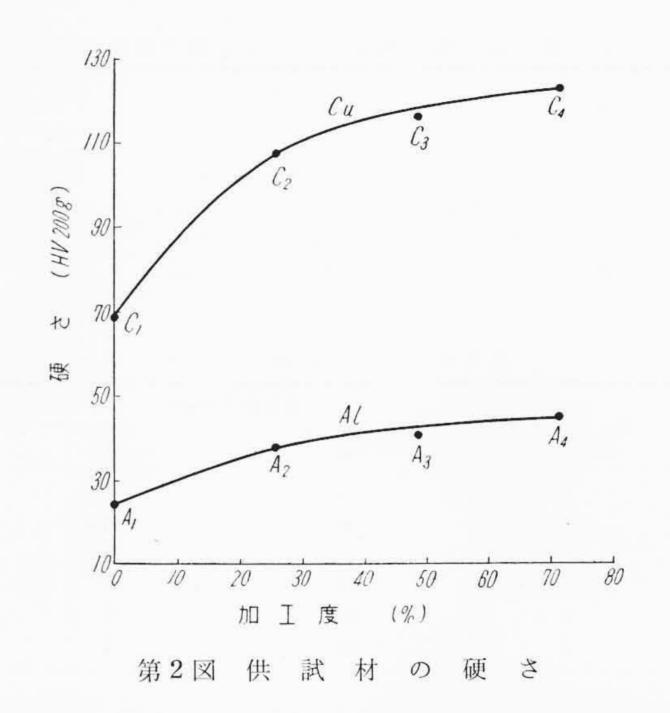
拡散層が存在するものと思われる。またこの場合アルミと銅との金属間化合物 (Cu Al<sub>2</sub> など) の存在は認められなかった (この事実は圧接の場合は熔接したときと異なり,接合部に脆い中間層が生成しないことを意味し,前者が後者に比べて機械的に丈夫であることを示している)。

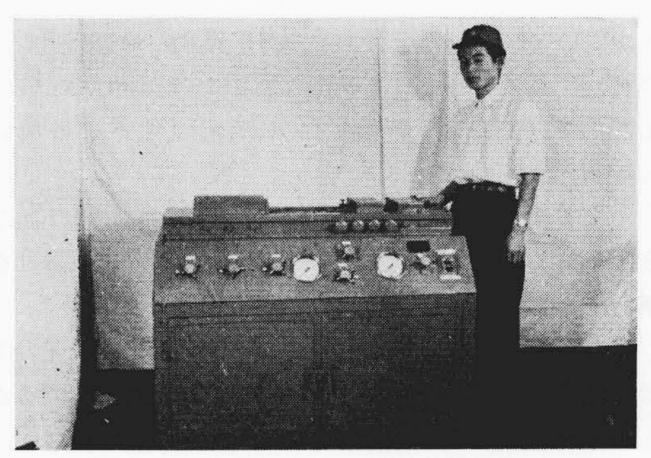
上述およびそのほかの実験結果<sup>(4)</sup>から圧接機構について簡単に述べると次のようになる。

原子間距離と原子間に働く力との関係から考えると、相互原子を数原子距離に近づけてやると引力が作用して容易に接着が起る。これが圧接機構の根本を成すものである。次に圧接界面について考えてみると、この近傍では強変形を受けることにより多数の転位(Dislocation)を発生するとともに転位により多数の原子空孔(Vacancy)も生ずる。この原子空孔を通じてアルミ原子と銅原子との相互拡散が行われ完全な接合が得られるものと考えられる。

# 3. 衝き合せ圧接

### 3.1 供試材および実験方法





第3図 圧 接 機 外 観

供試材は電気銅(Cu 99.95%,  $O_2$  0.04%)および電気用アルミ(Al 99.76%)を用い焼鈍後冷間伸線を施すことにより線径はすべて  $8.4 \text{ mm} \phi$  で加工度が 0%, 25.8%, 48.5% および 71%の供試材を作成した。

第1図は供試材の機械的強さを示すもので,第1表は 供試材の記号説明表である。引張強さ,伸びはそれぞれ 3本の供試材についての平均値である。なお第2図は母 材の硬さを測定した結果である。

圧接の場合もっともたいせつなことは圧接する面の処理方法である。これについては今までの実験結果<sup>(4)</sup>からモータ回転式ワイヤ・ブラッシングをいずれの供試材についても行った。

第3図は用いた実験装置の外観を示す。この装置は筆者らが考案したもので供試材を把持する装置,圧接させる装置はモータ駆動によって油圧をかけるようにしてある。銅棒を把持するチャックは固定とし,アルミ棒を把持するチャックは可動式とした。圧接する面からチャック端までの距離,すなわち突出長さを種々変化させることにより圧接による変形度を変化させることができる。

第2表 加工度の異なるアルミと銅の組合せ表

Al		Cu		
	C 1	C 2	C <sub>3</sub>	C 4
$A_1$	A <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	$A_1C_3$	A <sub>1</sub> C <sub>4</sub>
$A_2$	$A_2C_1$	$A_2C_2$	$A_2C_3$	A <sub>2</sub> C
$A_3$	A <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	$A_3C_2$	$A_3C_3$	A <sub>3</sub> C <sub>4</sub>
$A_4$	$A_4C_1$	$A_4C_2$	$A_4C_3$	$A_4C_4$

第3表 アルミと銅の突出比

色出 比 —	突出長さ	(mm)
: ш и —	A1	Cu
a	3	17
b	6	14
c	9	11
d	12	8
e	15	5
f	18	2

しかしいずれの場合もアルミの突出長さと銅の突出長さの和, すなわちチャック端間の距離は 20 mm で一定とした。なお圧接後のチャック間の距離はすべての場合 0.5mm で一定とした。

圧接条件を検討する上に必要なことは供試材の加工度,突出長さであるので,それぞれについての組合せを 第2,3表に示した。

第2表は加工度の異なるアルミ,銅の組合せを記号で示したものである。圧接の場合ばりが一様に外へでることが必要なので,圧接する両金属の硬さの差が少ないことが望ましい。この点から考えると最悪条件は $A_1C_4$ すなわち焼鈍したアルミと強加工した銅を圧接する場合である。

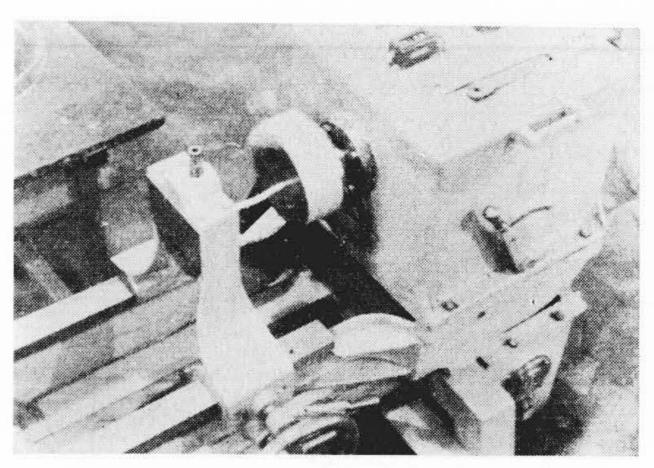
第3表はアルミおよび銅の突出長さとその記号を示したものである。これらの表からたとえば  $A_4C_4$ -e といえば71%加工したアルミと銅を圧接する場合でその突出部の長さはアルミが15mm,銅が5 mmであることを示す。

実験としては圧接部を中央に含む供試材について引張 強さ, 捻回強さ, 衝撃強さなどを測定するとともに, 圧 接面近傍の顕微鏡組織, 硬さ分布を測定した。なお2段 圧接の効果についても検討した。

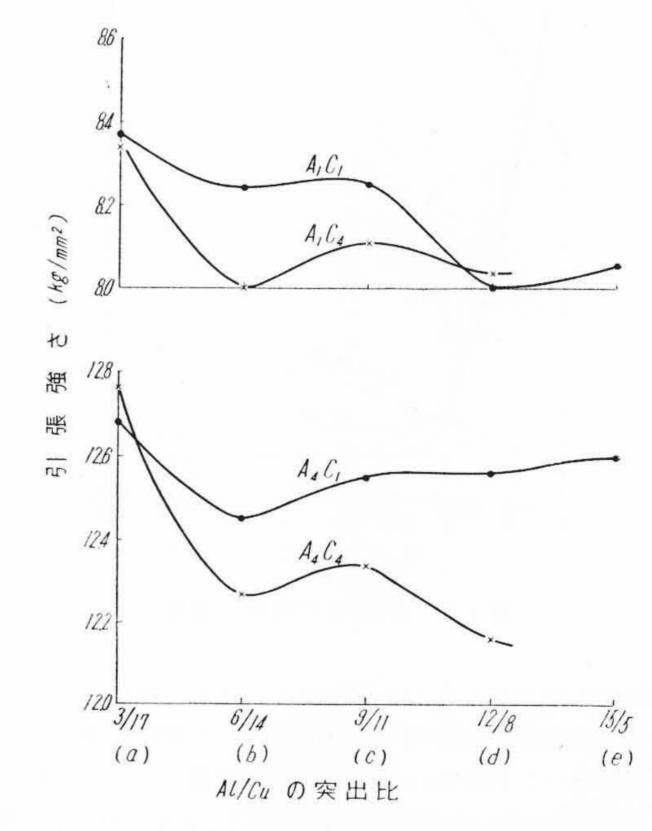
引張試験片は長さ200mmである。また捻回試験片は 長さ200mm, チャック間の距離120mmで圧接部はちょうど中央にくるようにした。

第4図は使用した捻回試験機外観を示す。捻回数は一端を固定し他端を180度回転して1回,360度回転して2回,次に反対方向に180度戻して3回,原位置に直して4回とした。なお試験値は各3本の平均値である。

衝撃試験には 30 kg-m のシャルピー衝撃試験機を用いた。供試片はほかのものと同じく  $8.4 \text{ mm} \phi$  である。 長さは 55 mm とし、ノッチはつけず、槌がちょうど圧接



第4図 捻回試験機外観



第5図 突出比と引張強さの関係

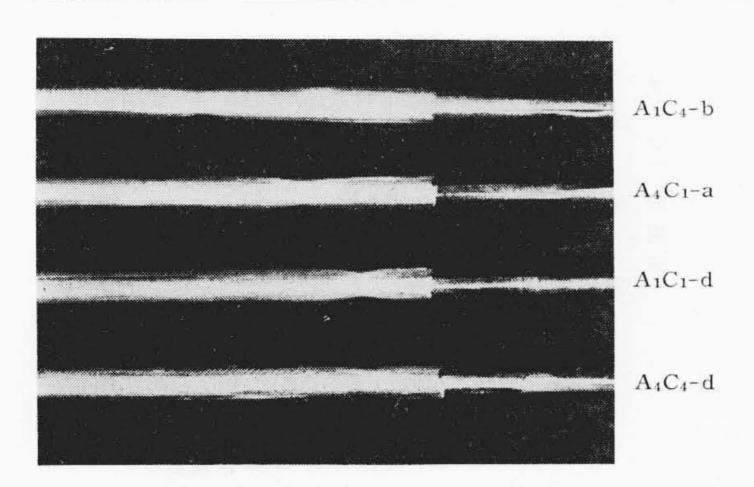
部をたたくようにした。腕の持上げ角度は60度とし銅の 母材について試験するときだけ90度とした。硬さ分布の 測定には荷重 200 g の微小硬さ計を使用した。

### 3.2 実験結果

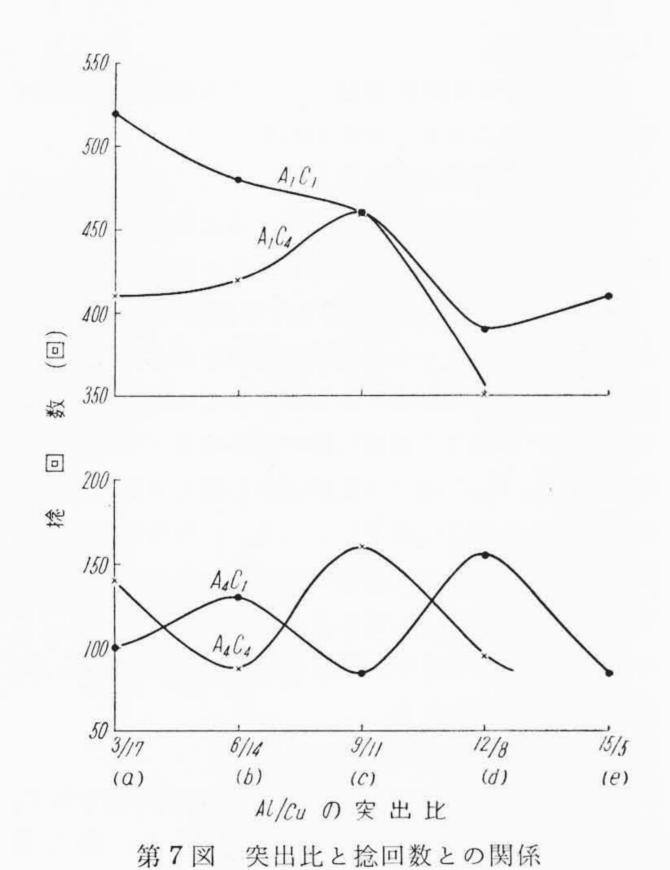
#### (1) 引張試験

第5図は引張試験結果の一例を図示したものである。第5図には加工材の組合せの中で最も極端な場合を示した。すなわち焼鈍したアルミと加工度の最も高い銅  $(A_1C_4)$ ,焼鈍したものどうし  $(A_1C_1)$ ,最も加工度の高いものどうし  $(A_4C_4)$ ,最も加工度の高いアルミと焼鈍した銅  $(A_4C_4)$ ,最も加工度の高いアルミと焼鈍した銅  $(A_4C_1)$  などである。第5図において横軸は Al/Cu の突出長さ比をとったものである。

あらゆる組合せの中で Al/Cu の突出長さ比が 17/3

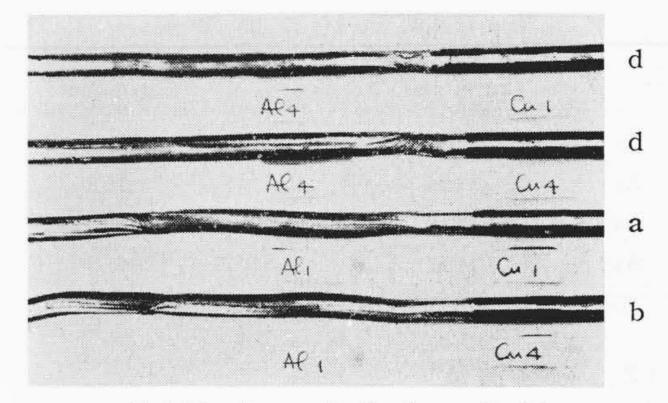


第6図 引張試験後の外観

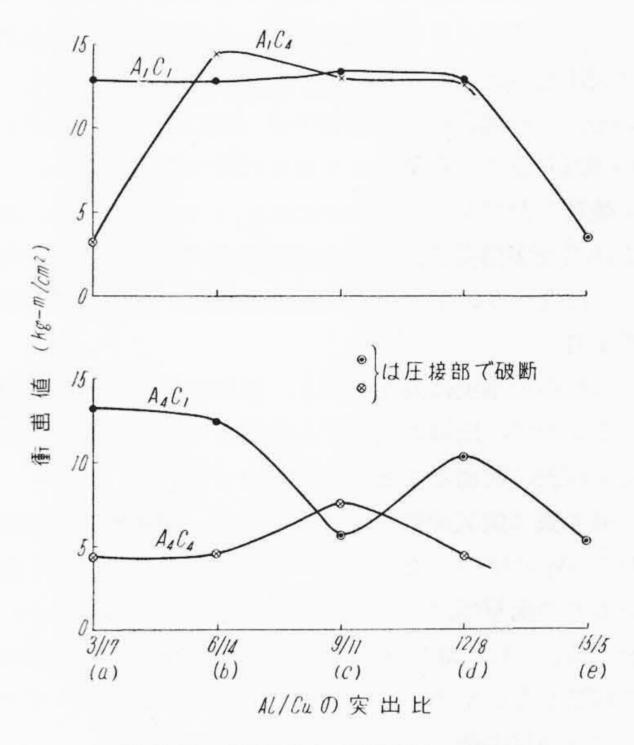


すなわち第3表のfに相当するものはすべて圧接不可能であった。また組合せの中で $C_4$ を含む場合はAI/Cuの突出長さ比が15/5(第3表のe)では圧接されなかった。そのほかの場合はいずれも圧接は完全で引張試験ではすべて圧接部以外で破断した。したがって焼鈍したアルミ $(A_1)$ のはいった組合せでは,圧接試験片の引張強さはアルミ母材の引張強さ以上である。また加工度の高いアルミ(t)にとえば(t)のはいった組合せでは,同じ加工度のアルミ母材よりも若干低くなる。これはバウシンガー効果が発生したためと考えられる(t)。この効果は組合せの中で銅の加工度が高いほどはっきりしてくる。

第5図よりわかるように引張強さは組合せの中に軟 銅を含んだ方が硬銅を含んだ場合よりも安定してい る。また Al/Cu の突出長さ比が大きくなりすぎると



第8図 捻回試験後の外観



第9図 突出比と衝撃値との関係

圧接されない。第6図は引張試験後の外観を示すもので、圧接部以外でネッキング(Necking)を発生しているのがわかる。

### (2) 捻回試験

第7図は実験結果の一例を示す。縦軸に示した捻回数とは捻回試験により亀裂がはいるまでの回数である。捻回試験はその試験の性質上相当のばらつきがあるが、いずれの組合せにおいても圧接試験片が得られたものではすべて圧接部以外で亀裂がはいった。また捻回数は組合せの中に焼鈍したアルミを含む場合がもっとも大きい値を示した。これは当然のことで本試験において亀裂が入るのはすべてアルミ側で、軟アルミの方が硬アルミより捻回しやすいからである。

第8図は本試験後の外観を示したもので、組合せの中に加工度の高いアルミを含む場合は圧接部近傍で亀裂がはいっている。焼鈍したアルミの組合せではこのようなことはない。これもバウシンガー効果によるものであろう。

第4表 供試材の衝撃値

記号	衝 撃 値 (kg-m/cm <sup>2</sup> )	記号	衝 撃 値 (kg-m/cm²)
A1	10.11	C <sub>1</sub>	22.9
$A_2$	12.84	C <sub>2</sub>	32.5
A <sub>3</sub>	13.73	C <sub>3</sub>	38.3
$A_4$	14.67	C <sub>4</sub>	40.3

### (3) 衝擊試験

第9図は衝撃試験結果の一例を示す。第9図からわかるように加工度の高いアルミが組合せの中にはいっている場合は、その圧接されている相手が硬銅であれば突出長さ比のいかんにかかわらず圧接部で破断している。この場合相手が軟銅では Al/Cu の突出長さ比が 6/14 までは衝撃により曲るだけで破断しない。

焼鈍したアルミが組合せにはいっている場合は、ある適当な突出長さ比の場合は衝撃力で破断するようなことはないが、突出長さ比が適当でないと圧接部で破断する。

これらの事実は前記引張り, 捻回の場合と非常に異なるもので, 圧接の完全であるかどうかを衝撃試験は 最も端的に物語ることを示すものである。

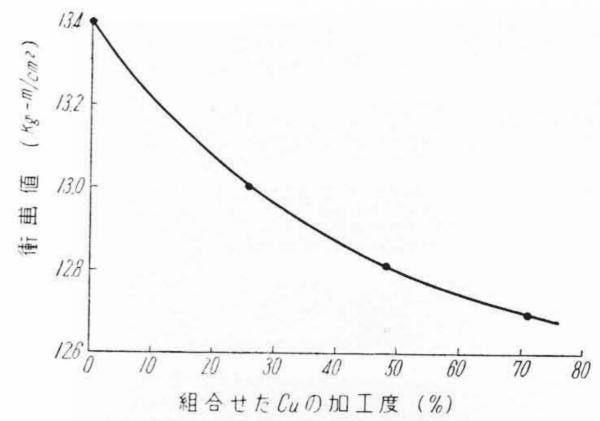
第4表は供試母材の衝撃値を示す。第4表と第9図 から  $A_1$  のはいった組合せの場合は圧接部で破断しないものの衝撃値は、すべて母材の値以上であることがわかる。これに対し  $A_4$  のはいった組合せでは、圧接部で破断しないものでもその衝撃値はバウシンガー効果により母材の値より低いことがわかる。

以上の衝撃試験結果から軟アルミの組合せの場合は 適当な突出長さ比をえらべば衝撃強さの大きい圧接が 得られるが、加工度の高いアルミと銅との組合せでは 突出長さ比をいかにしても衝撃強さは不良であること がわかった。この改善策として2段圧接法<sup>(6)</sup>を採用し

た。2段圧接法とは1回の圧接で完全でない場合,圧接界面に存在する異物をもっと外部に排出するためもう1回同じような圧接操作を繰り返す方法である。

第10図は2段圧接法によって硬アルミ(A4)と種々の加工度の銅とを圧接した場合の衝撃強さを測定した結果である。この場合 A1/Cu の突出長さ比は12/8と一定とした。供試片はすべて3本ずつであるがいずれの場合もバウシンガー効果のため同じ加工度のアルミの強さより若干低かったが圧接部で破断することはまったくなかった。

第11図は衝撃試験後の外観写真を示し



第 10 図 2 段圧接法による衝撃強さ (硬 Al-A<sub>4</sub>- と Cu とを組み合わせた場合)

たものである。

第11 図より 2 段圧接法がこのような場合きわめて 効果的であることがうかがわれる。

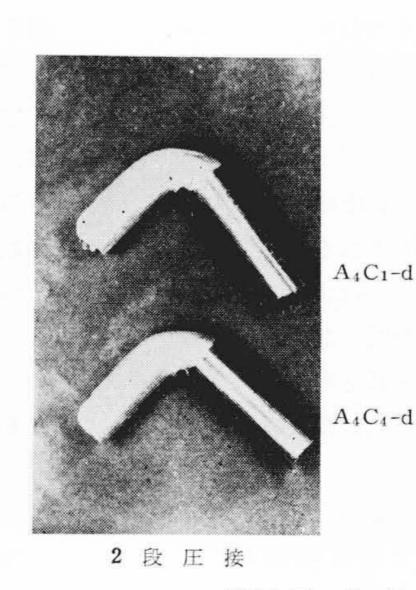
# (4) 圧接面近傍の硬さ分布

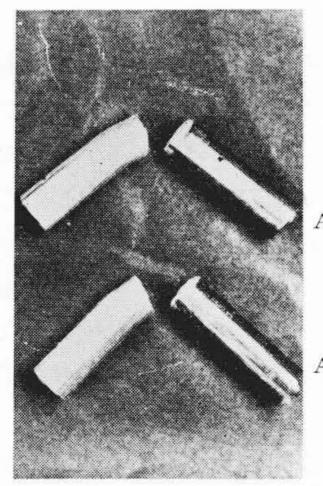
圧接面近傍の硬さ分布を測定するため圧接した線の 縦断面中心部で線軸方向の硬さ分布を測定した。

第12 図は圧接面近傍の硬さ分布曲線の一例を示す。この 第12 図 はもっとも極端な場合を示したものでパウシンガー効果の存在することがよくわかる。すなわち  $A_1$ ,  $C_1$  の場合圧接面近傍の硬さはすべて母材より高いが、 $A_4$ ,  $C_4$  の場合は圧接面から数ミリ離れると母材よりもその硬さは低下している。この分布曲線から圧接面では相当の加工硬化が認められるが、母材が加工材の場合にはたいして大きくないことがわかる。このことはほかの場合の硬さ分布曲線である 第13,14 図からもうかがわれる。

#### (5) 圧接部の顕微鏡組織

第15 図は圧接界面の加熱による組織の変化を示す。 検鏡部分は圧接部を含む縦断面中央である。第15 図 (a)は圧接したままの状況で界面にはなにも認められない。(b)、(c)、(d)はこれを加熱したもので、たと



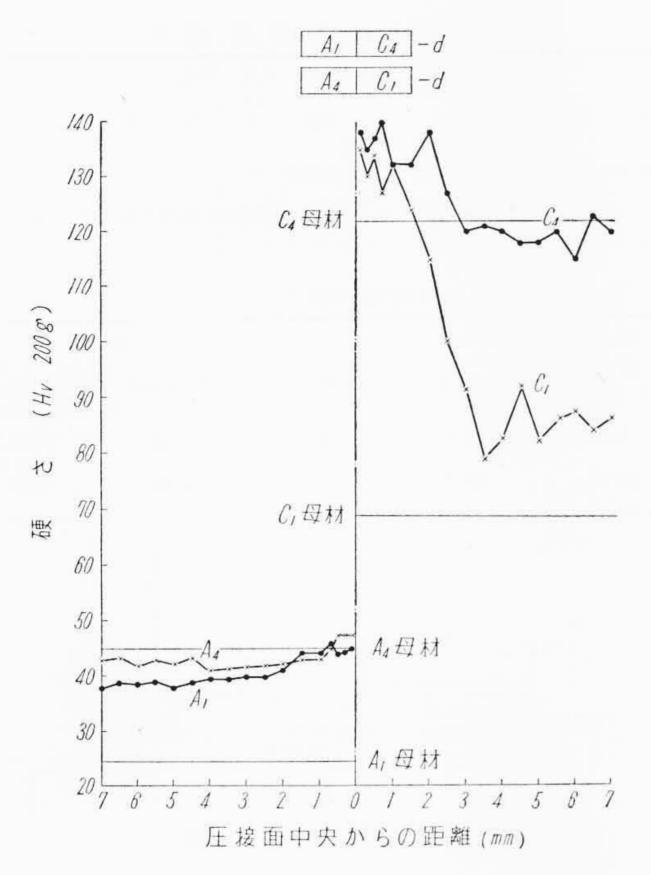


A<sub>1</sub>C<sub>1</sub>-e

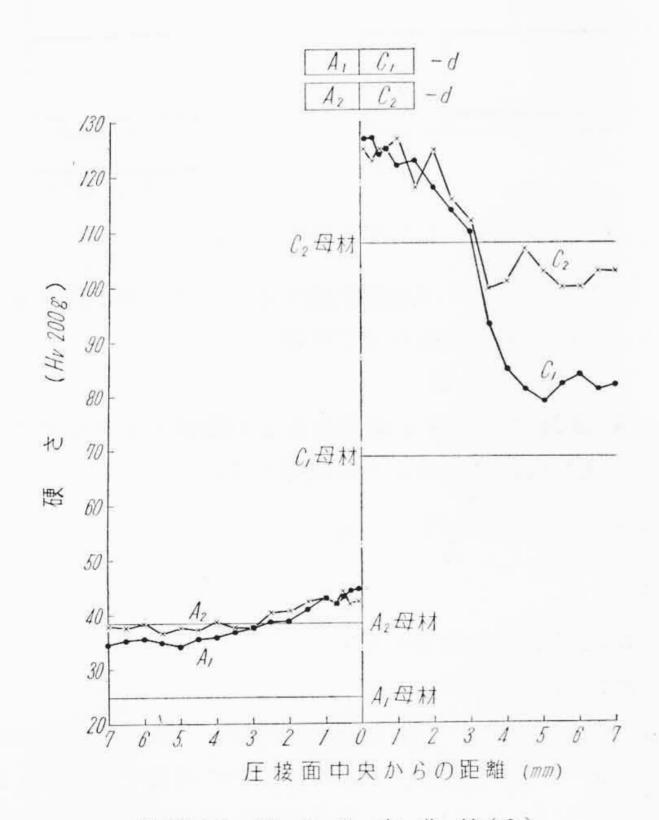
 $A_4C_4$ -b

1 段 圧 接

第11図 衝撃試験後の外観



第12図 硬さ分布曲線(1)

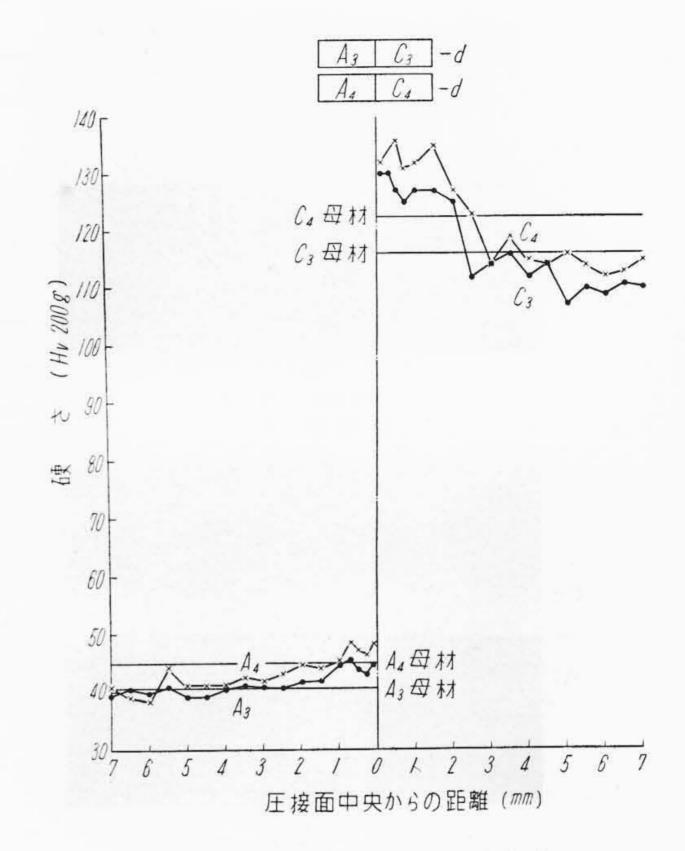


第13図 硬さ分布曲線(2)

えば  $400^{\circ}$ C×10 分加熱してみると(c)に示すように拡 散層 $(CuAl_2)$  が認められる。従来の熔接法ではこの脆 い  $CuAl_2$  の層が問題となることはいうまでもない。

#### 3.3 実験結果に対する考察

衝き合せ圧接に関して行った実験結果から次のような ことが考えられる。



第14図 硬さ分布曲線(3)

圧接の完全性をはっきりあらわすのは衝撃試験である。この試験法が引張り、捻回などよりもすぐれているのは、ノッチ効果(Notch Effect)が大きいためである。たとえば圧接界面に異物が残留していたり、圧接界面に圧力が不足で十分圧接されていないような場合には、圧接面で引き裂くような衝撃を加えるとそれらの部分にノッチ効果を生じ圧接面で剥離することとなる。これを防ぐためには圧接面に十分な圧力が作用するようなチャックを使用することおよび圧接面における変形を十分行わさせる必要がある。第9図に示した実験結果から考えると、耐衝撃性は軟アルミの場合良好で、突出長さ比は1ぐらいが良好のようである。これは圧接材の変形能が大きいことおよび圧接界面で十分変形させなければならないことを意味する。

2段圧接を行うと耐衝撃性が向上するということは, 結局圧接界面における変形をより大きくさせることにより圧接面に残留するガス吸着層,酸化物そのほかの異物 などをより少なくさせるためと思われる。

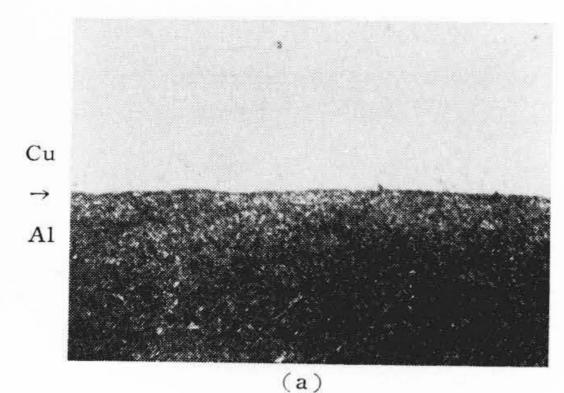
#### 4. 重ね合せ圧接

### 4.1 供試材および実験方法

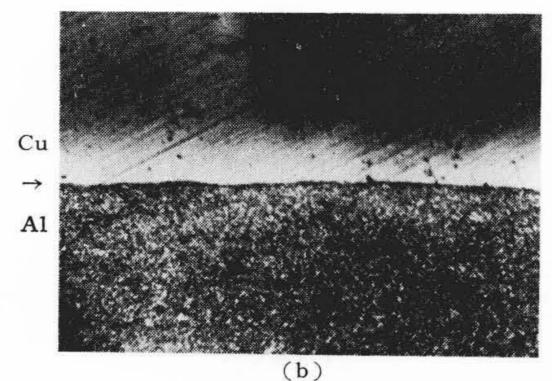
第5表は供試材の分析結果を示す。第5表からわかるようにアルミ,銅ともに比較的純度の高いものである。

第6表は母材の機械的強さと圧接試片の大きさを示し たもので、母材はアルミ、銅いずれも焼鈍材である。

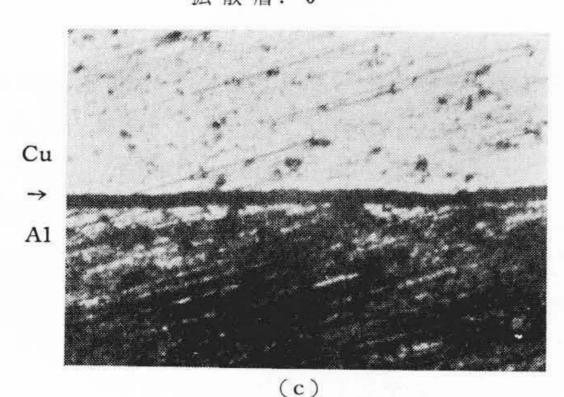
第16図は実験装置の説明図である。この装置を圧縮



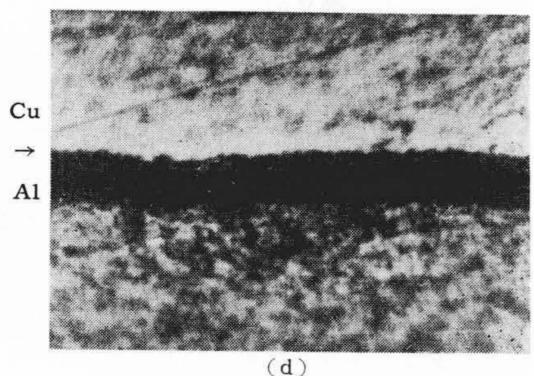
加熱条件: 常温 拡散層: 0



加熱条件: 140°C×60分 拡 散 層: 0



加熱条件: 400°C×10 分 拡 散 層: 厚さ3 μ



加熱条件: 400°C×60分 拡 散 層: 厚さ 7.5 μ

第 15 図 圧接界面の加熱による変化 (供試材: A<sub>1</sub>C<sub>1</sub>-C) (×400)

試験機に取り付けることにより圧接実験を行った。

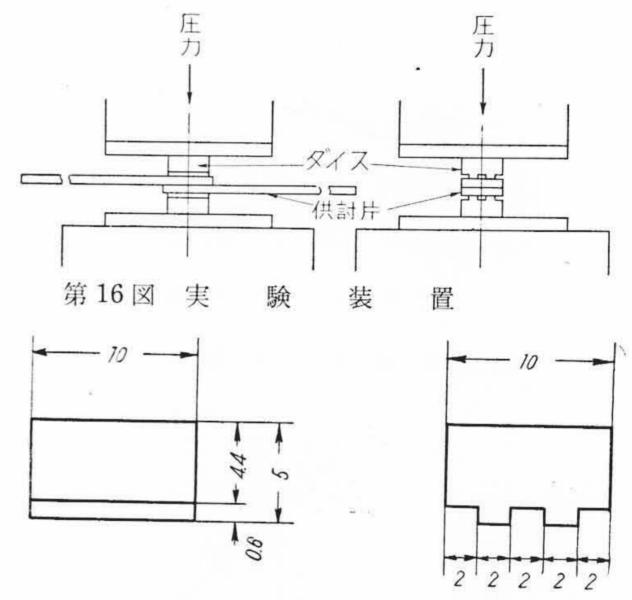
第17図は使用したダイスの寸法,形状を示したものでこの形を選んだのは圧接界面において容易に変形流動を起させるためである<sup>(4)</sup>。

第5表 供試材の分析結果

供試材				分	析	成	分	(%)			
241773	Al	Cu	Si	Fe	Ti	Mn	S	Ni	As	Pb	$O_2$
A1	99.61	0.116	0.10	0.24	0.013	0.019			-		_
Cu		99.976	Tr	0.0005	500		0.0021	0.0012	0.0018	0.0006	0.02

第6表 供試材の機械的強さと試片の大きさ

供試材-	機械的	対 強 さ	試片の大きさ			
	引張強さ (kg/mm²)	伸 び(%)	幅(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)	
Al	9.62	28.5	8.5	1.55	100	
Cu	24.50	53.5	9.0	1.60	100	



第17図 ダイスの形状と寸法

実験方法としては最初圧接する面をワイヤ・ブラッシングしたのち重ね合わせて圧接した。

#### 4.2 実験結果

第18 図は変形度と破断荷重との関係を示すものである。変形度とは次のように規定している。

変形度(%)=
$$\frac{h-h_0}{h}$$
×100

ただし

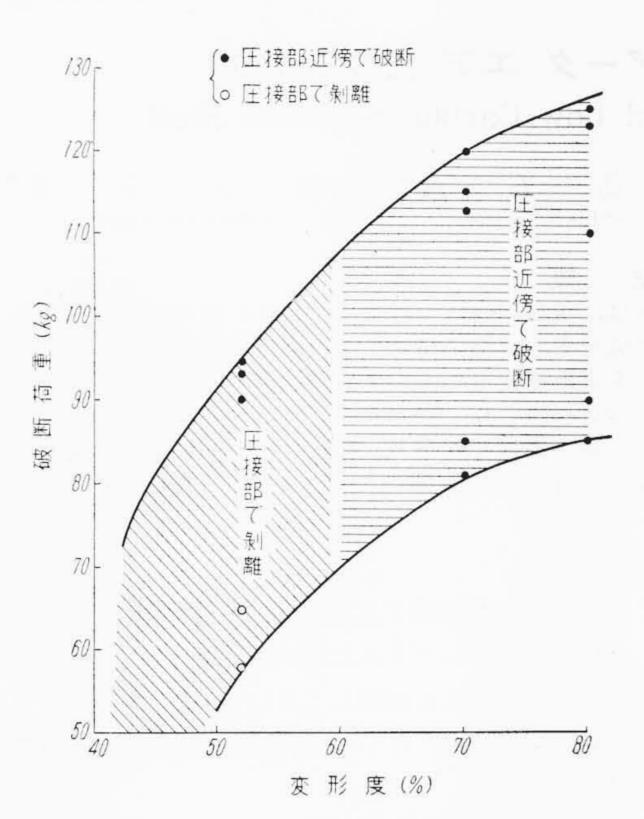
h: 圧接前の両者の和

h<sub>0</sub>: 圧接後の両者の和

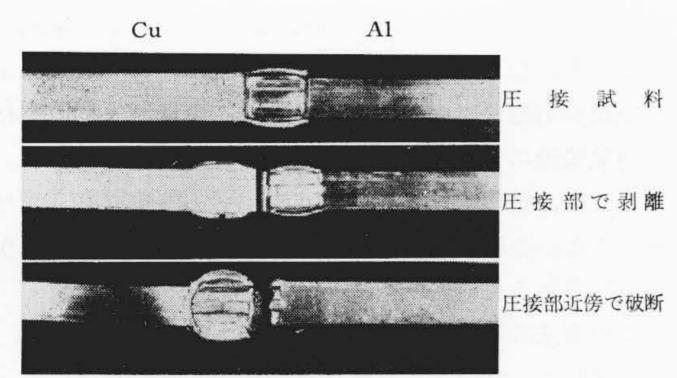
変形度40%ではいずれも接着されない。52%では引張試験を行った場合剥離するものと完全に圧接するものと2とおりある。したがって変形度52%では作業が不安定になる。70%の場合にはいずれの場合も接着した。すなわち変形度70%以上でなければくっつかないことを示す。なお第19図は圧接したものの外観を示したものである。

#### 5 結 =

アルミと銅との常温圧接法について, 衝き合せ圧接を 中心に述べてきたが, 得られた結論を要約すると次のよ



第18図 重ね合せ圧接による変形度と破断荷重との関係



第19図 重ね合せ圧接試料の外観

#### うになる。

- (1) アルミと銅との常温圧接は比較的容易であり適当な突出長さを選べばきわめて簡単に圧接できる。
- (2) 圧接された銅とアルミの間には電子回折でチェ

- ックできる程度の拡散層が認められる。しかもこの拡 散層は両者の固溶体であり CuAl<sub>2</sub> のような金属間化 合物は存在しない。
- (3) 圧接機構としては原子間引力によるものであり, 圧接面における拡散は原子空孔を通じての相互原子の移動によるものと考えられる。
- (4) 衝き合せ圧接で問題となるのは、圧接する面の 清浄化、チャックの形状のみならず、供試材の加工度、 突出長さである。
- (5) 圧接部を含む供試材について種々機械的試験を 行った結果,引張り, 捻回には強くても衝撃に弱いこと がわかった。これはノッチ効果のためと思われる。
- (6) 硬いアルミと銅とを圧接した場合,種々突出長さを変化しても圧接界面で剥離する。しかし同じ圧接法を繰り返す2段圧接法を用いるとこのような場合でも十分耐衝撃性の良好なものが得られた。
- (7) 圧接界面近傍の硬さ分布を測定した結果,バウシンガー効果の存在することが明らかにされた。この効果は種々の機械的性質にも影響を及ぼし,加工度の高い供試材では圧接面近傍の機械的強さが低下する。
- (8) 軟アルミと軟銅の重ね合せ圧接につきW形ダイスを用いて実験した結果,変形度を70%にすれば確実に圧接されることがわかった。

終りにのぞみ御鞭撻をいただいた日立電線株式会社電 線工場久本部長,山本課長ならびに実験に尽力された平 野,沼田両君,金属係の人達に深謝する次第である。

#### 参考文献

- (1) F.C. Kelly Welding J., 30 728(1951)
- (2) 岡田監修: 現代の熔接, 199(1952 日刊工業新聞 社刊)
- (3) 手塚: 金属, 23 450(1953)
- (4) 斉藤, 山路: 金属, 28 702(1958)
- (5) 斉藤,山路:日本金属学会第43回講演会概要第8分科会29,47(昭33-10)
- (6) 特許出願中

### Vol. 41 日 立 評 論 No. 5

#### ガス分析機器特集

- ◎IGA-2 形 赤 外 線 ガ ス 分 析 計 ◎日 立 RM-3 形 質 量 分 析 計 の 試 作
- ◎質量分析計によるガス分析について
- ◎日 立 ガ ス ク ロ マ ト グ ラ フ
- ○誤動作防止回路付新形変圧器差動保護継電 方式と東電稲荷変電所における試験結果
- ◎変圧器励磁突入電流とその計算法
- ◎主蒸気管再熱気管のブローイングアウトについて

- ◎電気機関車の軸重移動とその補債法 (2)
- ◎90 度 V 形 圧 縮 機 の 共 振 実 験
- ◎カラー受像管 21CYP22 の構造及び製作法
- ◎カラー受像管 21CYP22の試験
- ◎導電用アルミニウム合金の熱処理効果
- ◎新大形疲労試験機による鋼材の疲労強度に 及ぼす寸法効果
- ◎熱間工具鋼 Si-Cr-W-V 鋼に及ぼす Cr の 影響
- ◎指数分布の順序統計量とその応用◎超短波無線電話装置の保守
- 発 行 所 日 立 評 論 社 東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地 振替口座東京71824番 取 次 店 株式会社オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 振替口座東京20018番