

銅被アルミニウム材の諸性能

Some Properties of Copper-clad Aluminium Products

“Copper-clad aluminium” which is made by coating aluminium with copper into a metallurgically integral body combines the merits of the two different metals in characteristics as well as in economy. As a new conductor material this newly prescribed metal is expected to find wide application. Its basic properties, characteristics and some examples of its application are discussed.

参 本 貞 彦* *Sadahiko Mitsugi*
三 宅 保 彦* *Yasuhiko Miyake*
山 路 賢 吉* *Kenichi Yamaji*
小 林 明 光** *Akimitsu Kobayashi*
佐 藤 伊 勢 次** *Iseji Satō*
石 下 力*** *Tsutomu Ishioroshi*

1 緒 言

銅価の変動に加えて供給面の不安定から、導電材料の銅からアルミニウムへの転換は、現今、大きな定常流とさえなっている。しかし、アルミニウムは銅に比べて接続のめんどろなところから、その応用も限定されたものになっている。このようなアルミニウムの接続性を改良するため、その表面に接続性のよい銅を被覆するアイディアが、かなり以前から知られており、これまでも各種の方式により少量試作的に製造され、一部特殊用途向けに市販された実績もある。しかしながら、コスト面より汎用導電材料として普及するには至らず、かねてからより経済的な大量製造法の確立が望まれていた。

このような情勢にあって、最近この種複合材の工業的な大量製造方式^{(1)~(3)}が開発されるに及び、その実用化が急速に具体化しつつある。アルミニウムと銅の両長所を具備したこの銅被アルミニウム材は、銅、アルミニウムに次ぐ第三の導電材料として、広範囲な用途が期待されている。さらに、電線工業会分科会における屋内配電線のアルミニウム線使用範囲拡大検討に際し、銅被アルミニウム線が総合的に検討されるなど、業界全体としても大きな動向が現われている。日立電線株式会社では、このような導電材料の多様化を予測し、各種導電材料の開発に努力してきたが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、今回液压押出機を導入し、その主応用分野として銅被アルミニウム材、その他の複合材料を製造販売することに決定した。

本報告は、このような動きに対応し銅被アルミニウム材の

一般的特徴と、そのおもな用途たる絶縁電線、ブスバー、巻線などに応用した場合の性能を広く調査した結果の概要を述べたものである。

2 銅被アルミニウム材の製造法

この種複合材の工業的製法としては、TI社の熱間圧接圧延方式⁽¹⁾および高液压を利用した静水压押出し方式⁽²⁾⁽³⁾がある。前者は連続作業が可能で点ですぐれた方式であるが、製品形状が丸形、またはそれに準ずる形状に限定される。一方、後者は押出しであるため、製品形状の制約がなく、丸形を含む各種プロフィルの製造が可能である。なお、圧延と異なり間歇(かんけつ)作業ではあるが、従来の押出しに比較し、冷間でありながら1回の押出しで非常に高い加工比率をとれること、長尺ビレットが使用できることなどから高能率の押出作業が可能である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

図1は、静水压押出しによる銅被アルミニウム材製造の原理を示している。圧力媒体⑤に包まれた複合ビレット(アルミニウムビレットを心材とし、銅管を被覆材として組み合わせたもの)①は、ラム④の進行とともに、静水压を印加され、所定の圧力に到達すると、ダイス孔②よりその形状に応じて排出される。図より明らかなように、ビレットとコンテナ間には摩擦がなく、また高压の圧力媒体によってダイス・ビレット間に強制潤滑効果を生じ、摩擦損失が著しく小さい。

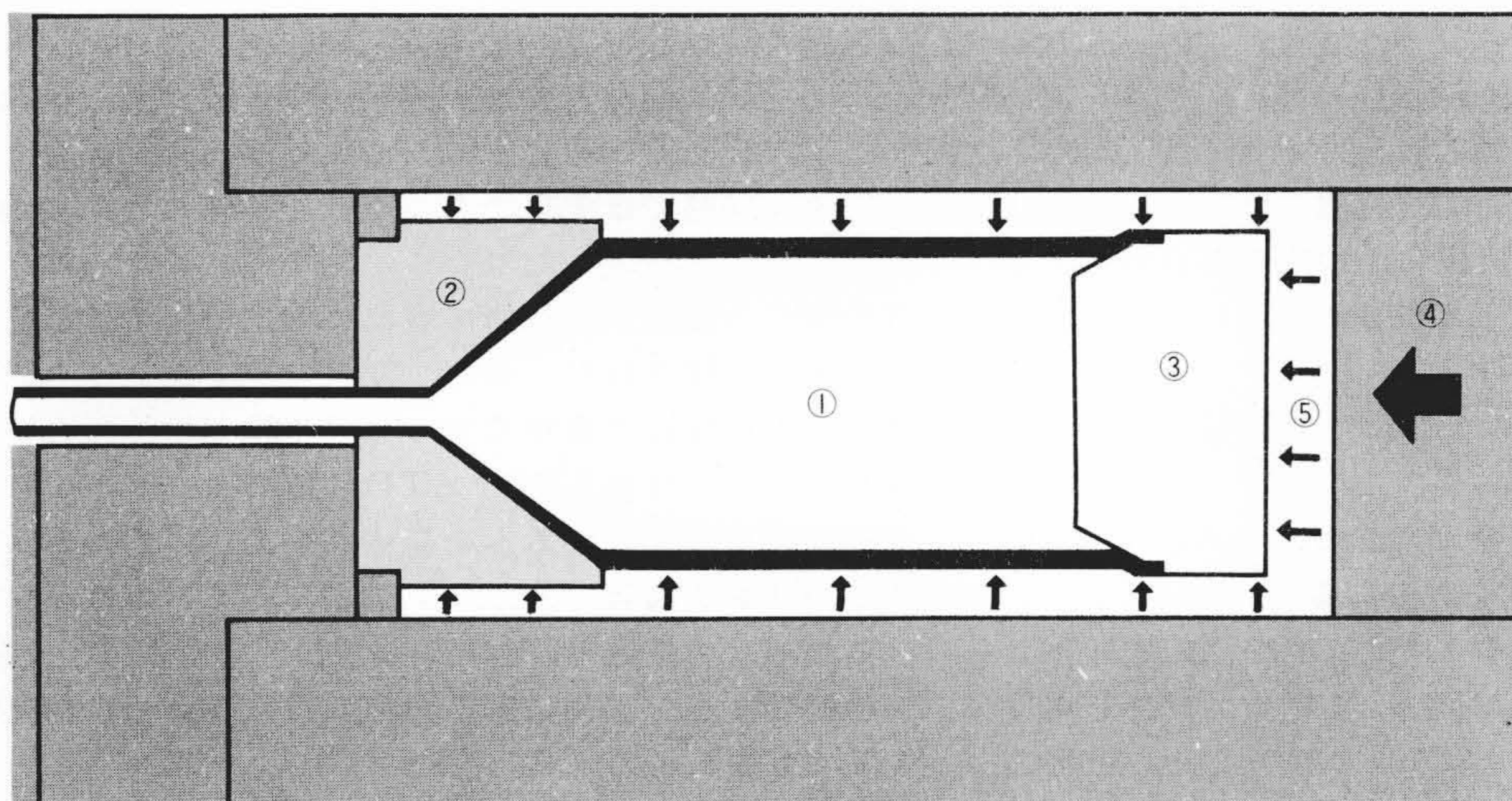


図1 静水压押出しによる銅被アルミニウム材の製造原理
複合ビレットは周囲を圧力媒体で包まれ、ビレット/コンテナ間の摩擦は存在しない。またダイス/ビレット間においても高压媒体の強制潤滑効果が期待されるところから、複合材押出し、難加工性材の押出しが可能であり、一般延性材では1回押出しで高い押出し比が得られる。

Fig. 1 Principle of Hydrostatic Extrusion with Composite Billet

* 日立電線株式会社研究所 ** 日立電線株式会社電線工場 *** 日立電線株式会社日高工場

3 銅被アルミニウム材の基本的性質

3.1 構造

図2に示すように、銅被アルミニウム材はアルミニウムまたはアルミニウム合金を心材とし、その表面に銅層を金属学的に一体化被覆した構造になっている。全断面積に対する銅層の比率は、広範囲に調整することができるが、10～15%が標準的な値である。なお、実際の被覆厚を線材を例にとり示すと図3のようになる。

3.2 物理的機械的性質

表1は、各種線材と対比しながら、2.6φ銅被アルミニウム線の物理的機械的性質を示したものである。前述のように、銅被アルミニウム材はアルミニウムを主体とするため、強度、導電率、比重などの大半の性質はアルミニウムのそれに類似し、その値はほぼ複合材に関する混合則に従っている。

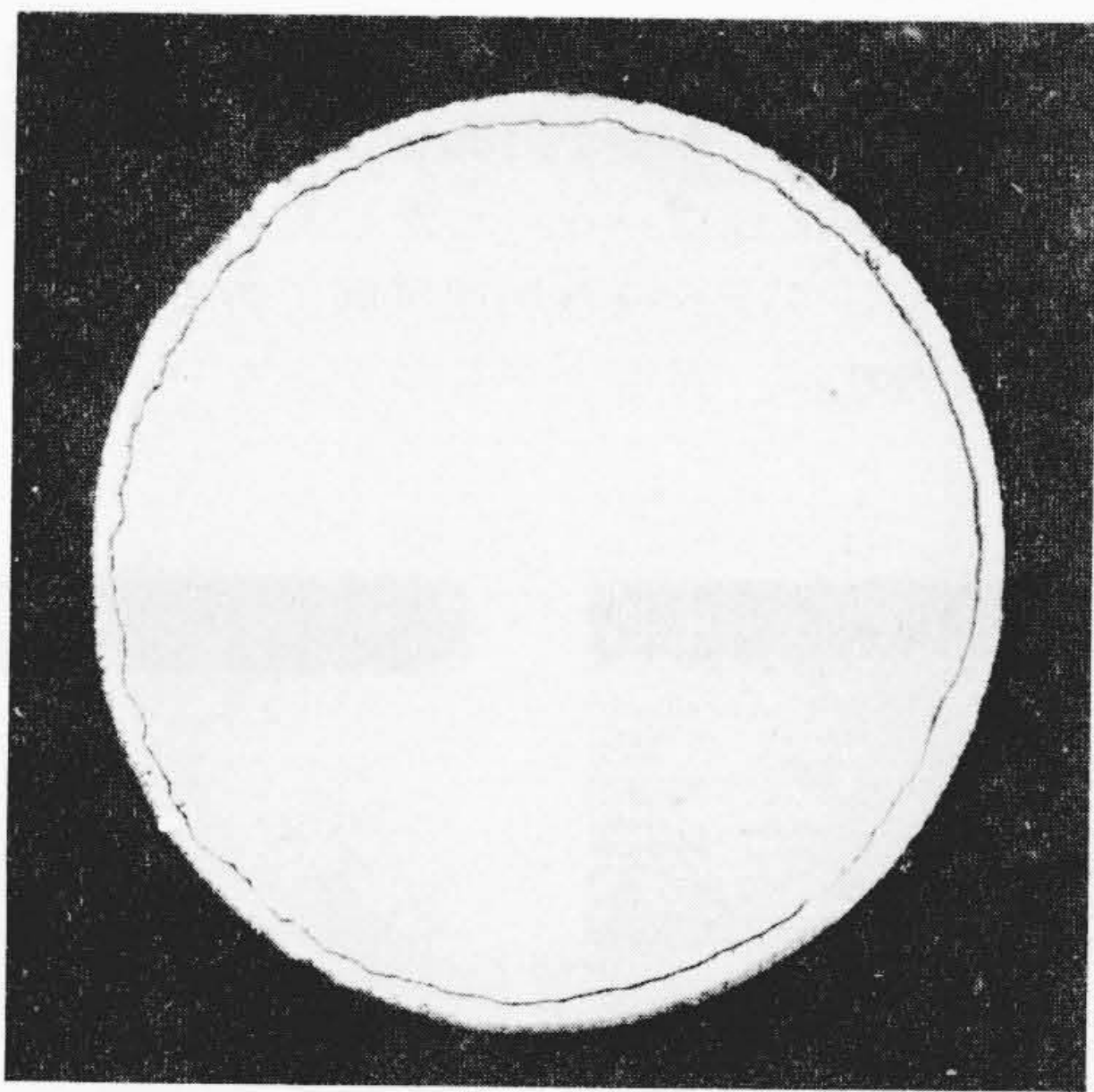


図2 銅被アルミニウム材の断面構造 外層の銅層は心材アルミニウムに金属学的に一体化被覆される。

Fig. 2 Cross-sectional Photomicrograph of Copper-clad Aluminium Wire

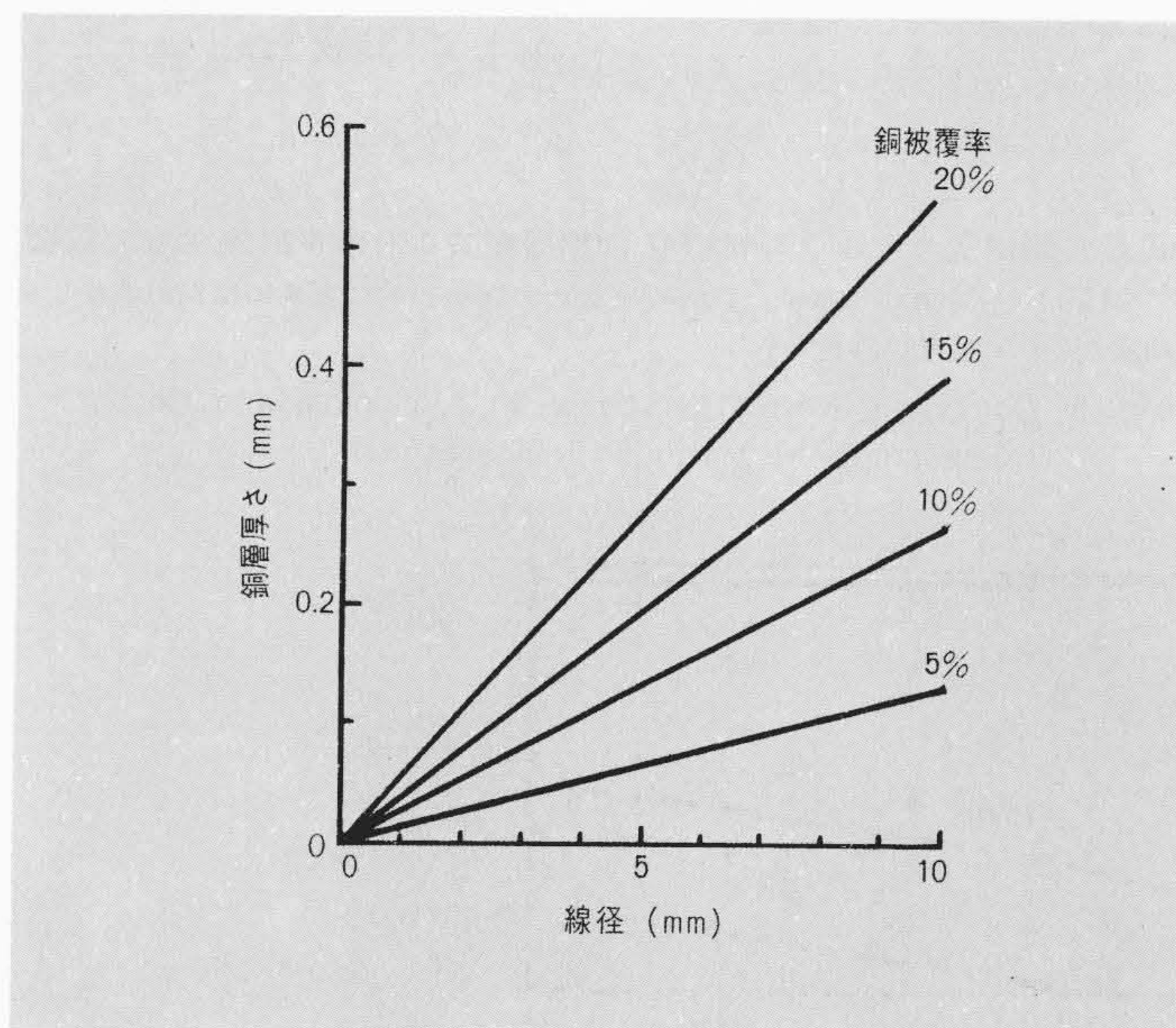


図3 銅被アルミニウム線の線径と銅層厚さの関係 銅被覆率10%の場合、銅層厚さは8φで約0.2mm、2φで約0.05mmとなる。

Fig. 3 Copper Thickness of Copper-clad Aluminium Wire vs Diameter at Various Copper Volume

表1 各種線材の物理的、機械的性質 銅被アルミニウムはアルミニウムを主体とするため、大半の性質はアルミニウムに類似し、その値は複合材に関する混合則にほぼ従っている。

Table 1 Comparative Properties of Aluminium, Copper-clad Aluminium and Copper Wire

項	目	Al	CA (銅被アルミニウム)*	Cu
比	重	2.71	3.34	8.91
導	電 率 (%)	62.0	66.7	101
線	膨 張 係 数 (1/°C)	24×10^{-6}	22×10^{-6}	17×10^{-6}
弾	性 定 数 (kg/mm ²)	7,100	7,500	11,300
引 張 強 さ	硬 質	21.7	22.6	45.5
	(kg/mm ²) 軟 質	9.1	11.3	25.6
耐 力	硬 質	12.6	20.3	44.8
	(kg/mm ²) 軟 質	4.8	6.6	10.6
伸 び	硬 質	2	2	2
	(%) 軟 質	30	31	45

注：* 銅被覆率(体積比) 10%

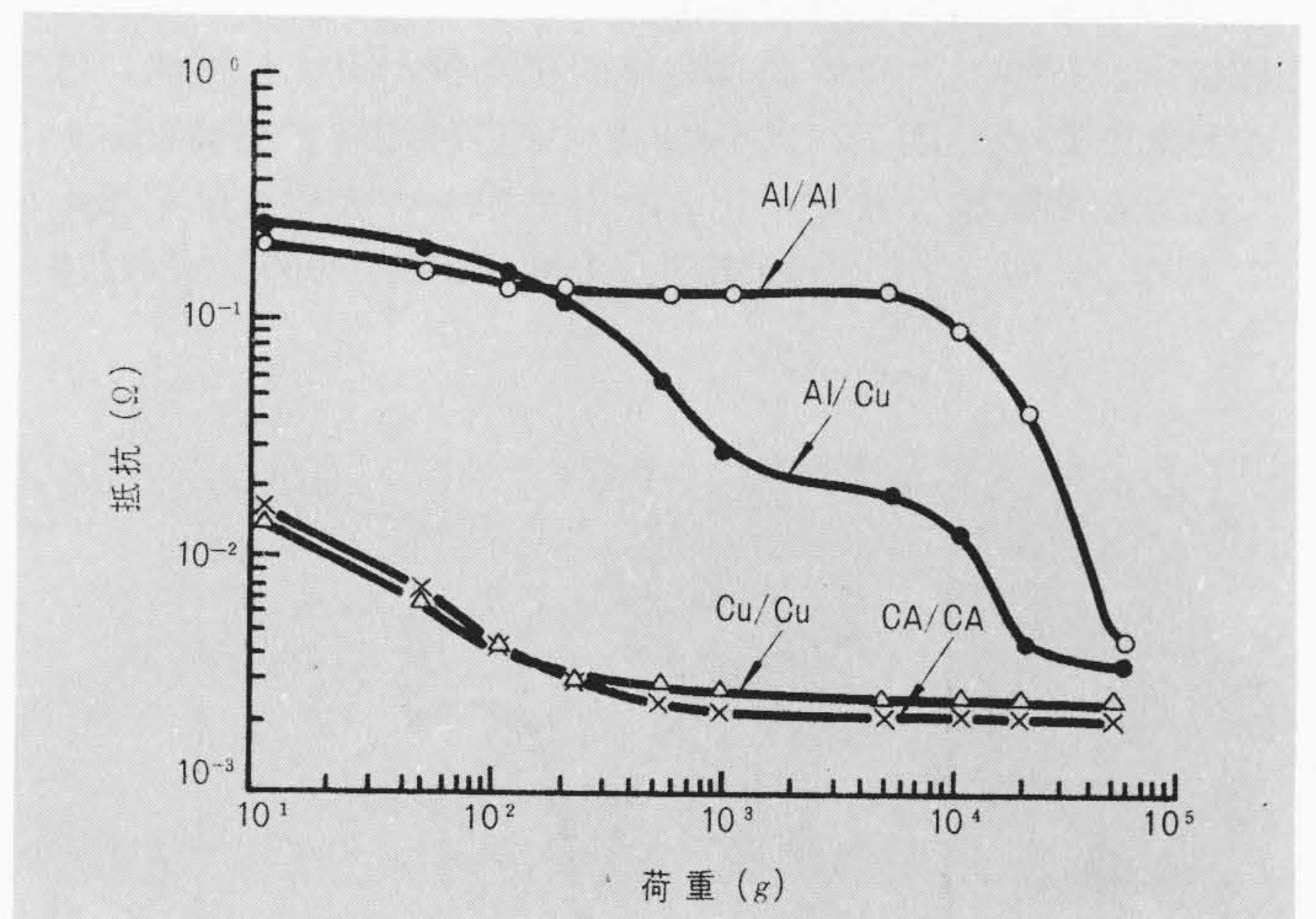


図4 各種線材の接触荷重と接触抵抗の関係⁽⁸⁾ Cu/Cuの組合せと同様にCA/CAの組合せでは、小さい接触荷重で十分低い接触抵抗が得られるが、Al/Alではかなり高い接触荷重を印加後、はじめて低下する。

Fig. 4 Contact Resistance Versus Pressure for Two Conductors Crossed Under Pressure Load.

3.3 表面性状

アルミニウムはその表面に絶縁性の強固な酸化膜を生成し、無処理の状態では接触抵抗の増加を招きやすい。一方、銅の酸化物は多孔性で、半導電性であるため小さな圧力で十分低い接触抵抗が得られる。したがって、銅層を表面に有する銅被アルミニウム材については、銅と同等の表面性能を期待することができる。図4はこの間の状況を示したもので、2.6φの線材を互いに無処理で交差させ径方向に加圧した場合の接触抵抗の変化を示している⁽⁸⁾。

4 銅被アルミニウム材の諸特性

4.1 伸線加工性

銅被アルミニウム線は銅用伸線機を使用し、銅線とほぼ同様のダイス、減面率、スピードで伸線することができ、新たな設備を要しない。むしろ所要動力は銅線より少なく、またアルミニウムと比較した場合、ダイス面での摩擦が少なく、細線への加工が容易である。なお、伸線後も銅とアルミニウムの断面積比率は変化せず、一定値に保たれる。

4.2 軟化特性

図5は、銅被アルミニウム線伸線材(2.6φ)の等時軟化特性を示したものである。なお、図には1時間加熱時の化合物層の生成厚さも示してある。銅被アルミニウム材は、アルミニウムとはほぼ同様の軟化傾向を示し、約300°Cで完全に軟化する。一方、再結晶により回復した伸びが400°Cで再び低下する傾向がみられるが、これは銅とアルミニウムが高温で相互拡散し、その界面にもろい金属間化合物(CuAl₂, Cu₂Alなど)が厚く生成したことによるものである。図6は、各温度に1時間保持した場合の化合物層の生成状況を示したものである。この化合物層も生成厚さを制御することにより、実用上はほとんど問題とならない。なお、焼鈍方法としては、化合物層の過剰生成を防止するため、高温短時間加熱が可能な、いわゆる連続通電焼鈍が理想的であるが、炉焼鈍などのバッチ式焼鈍においても加熱温度と時間を選択することにより容易に所定の焼鈍性能を有する線材を得ることができる。

4.3 高温加熱時の経時変化

銅被アルミニウム材を高温で連続使用する場合、前記と同様に銅、アルミニウム間に金属間化合物が生成し性能の低下が懸念される。図7は2.6φ伸線材を各種温度で長時間加熱した場合の導電率ならびに化合物層の厚さの変化を示したものである。これより化合物層は、温度150°C、200°Cでは緩慢に

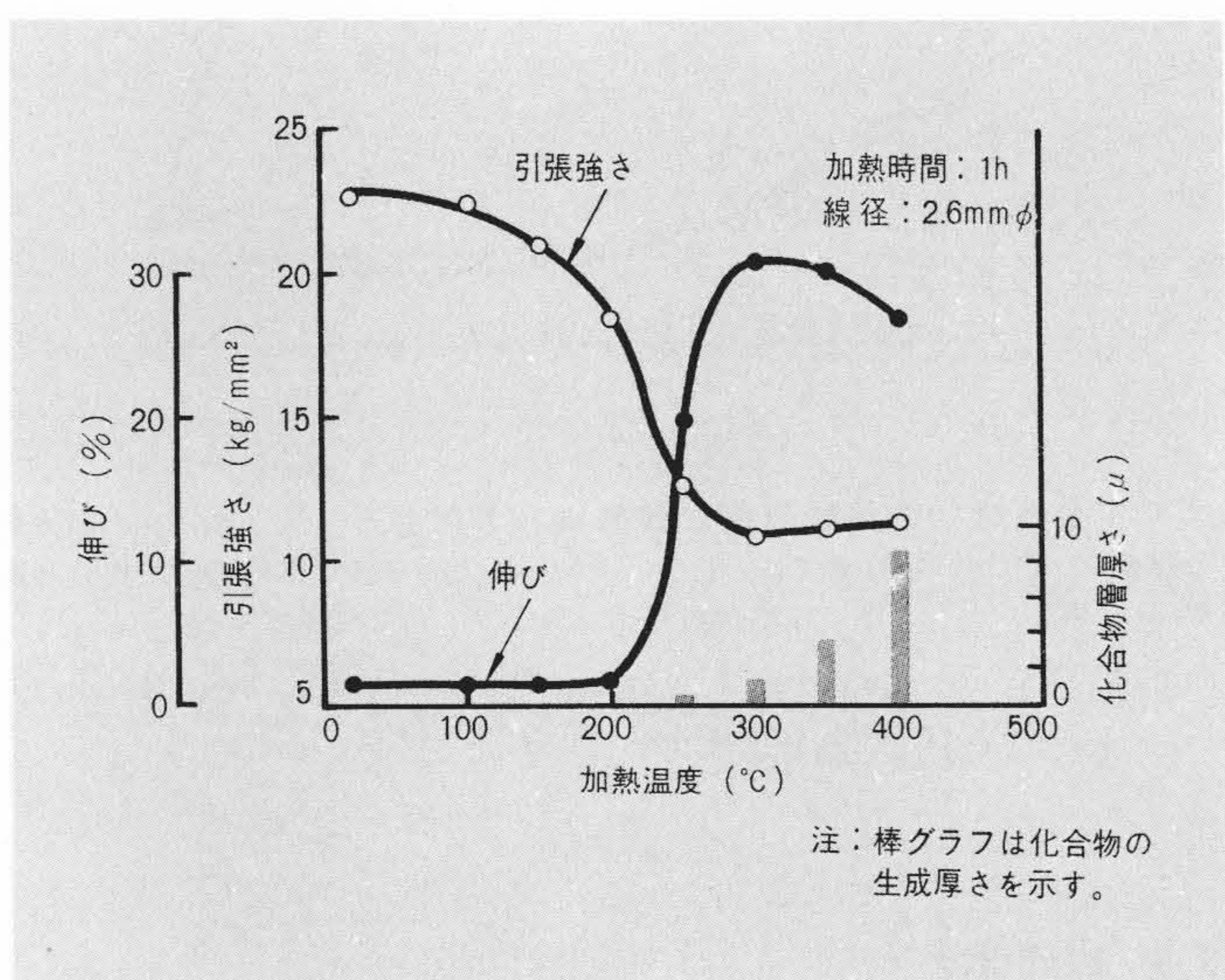


図5 銅被アルミニウム線の等時軟化特性 300°Cではほぼ完全軟化し、それ以上の加熱温度では合金層の成長につれ、伸びは低下する。

Fig. 5 Annealing Characteristics of Copper-clad Aluminium Wire

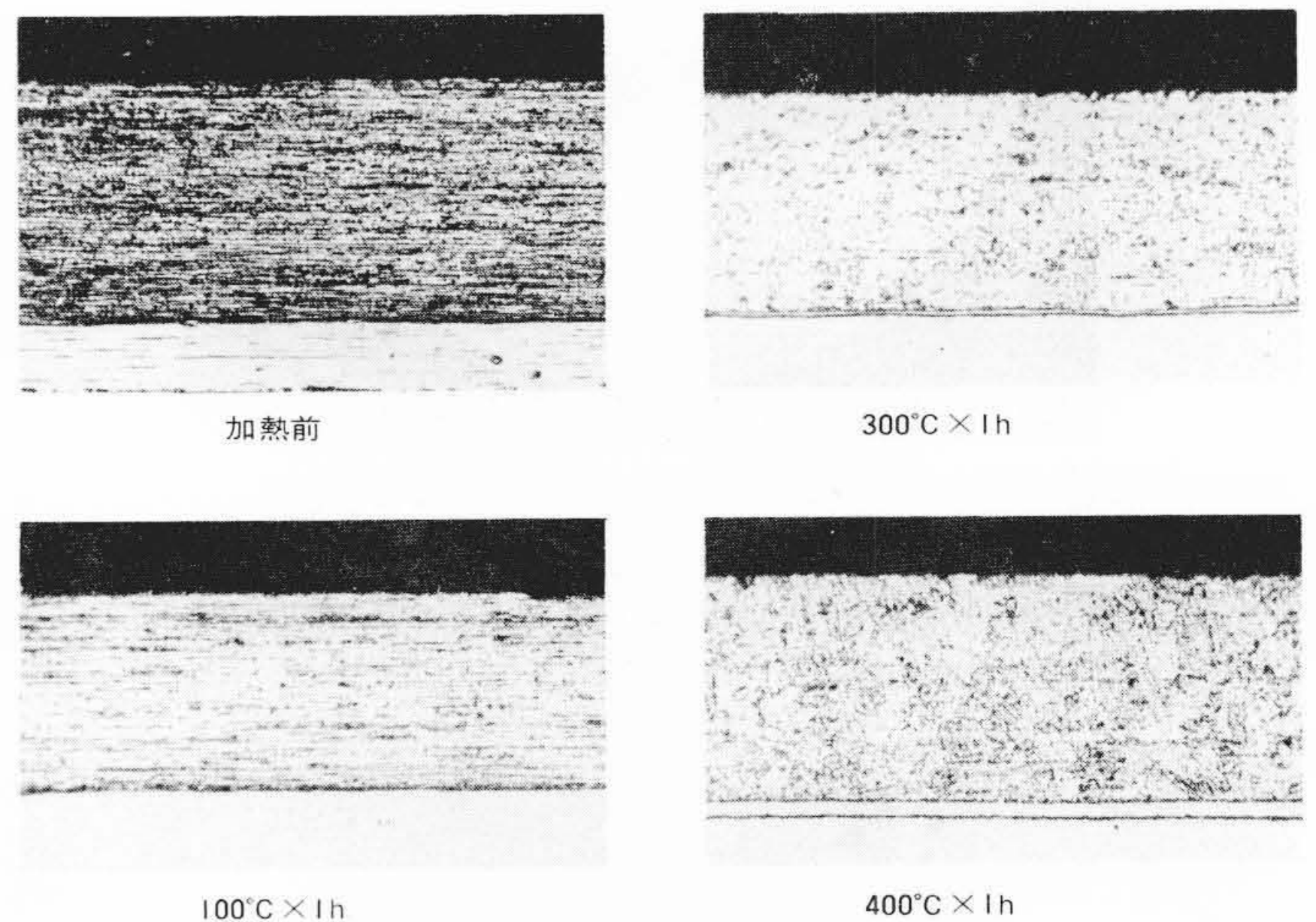


図6 銅被アルミニウム材の化合物層生成に及ぼす加熱温度の影響 (×100) 300°C×60min加熱後、はじめて顕微鏡的に容易に識別可能な化合物層がCu/Al境界に認められる。

Fig. 6 Compound Formation between Aluminium and Copper Components at Various Temperatures

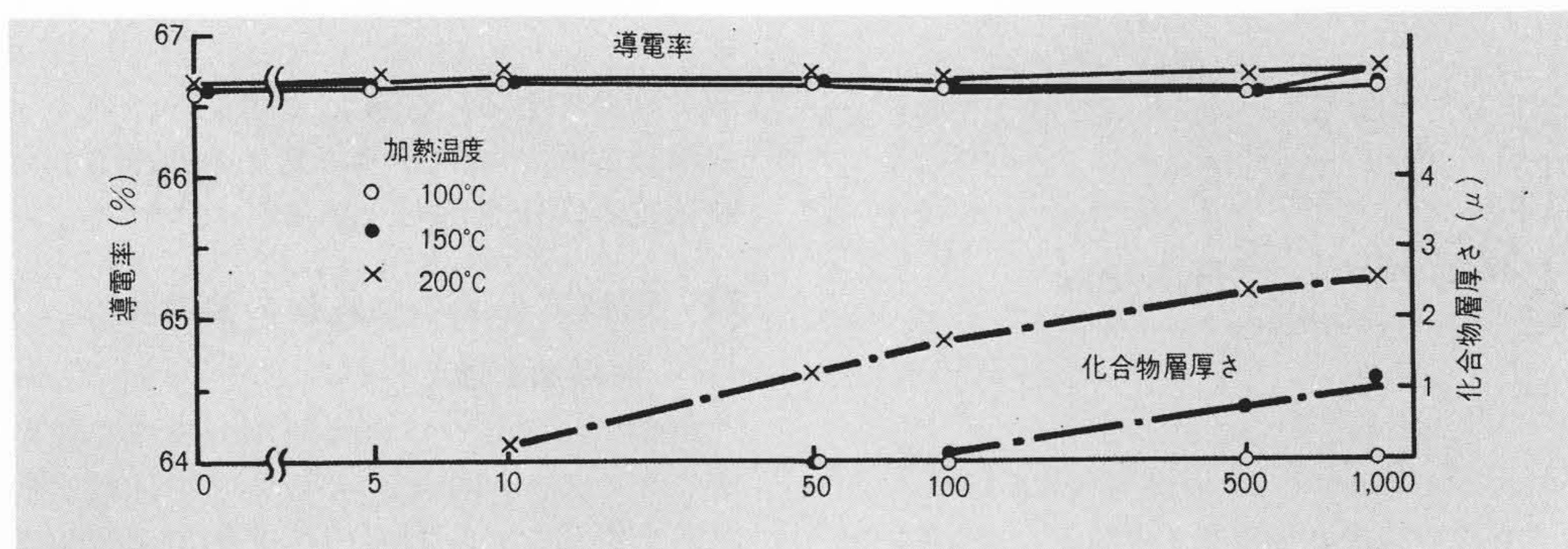


図7 銅被アルミニウム線の導電率および化合物層生成厚さに及ぼす長時間加熱の影響 150°C、200°Cでは1,000時間加熱後、1~2μmの化合物層の生成がみられるが、100°Cでは全く認められない。導電率は前者の場合回復または再結晶により、わずかながら上昇傾向にある。

Fig. 7 Time Dependence of Electrical Conductivity and Compound Thickness in Copper-clad Aluminium Wire at Various Temperatures

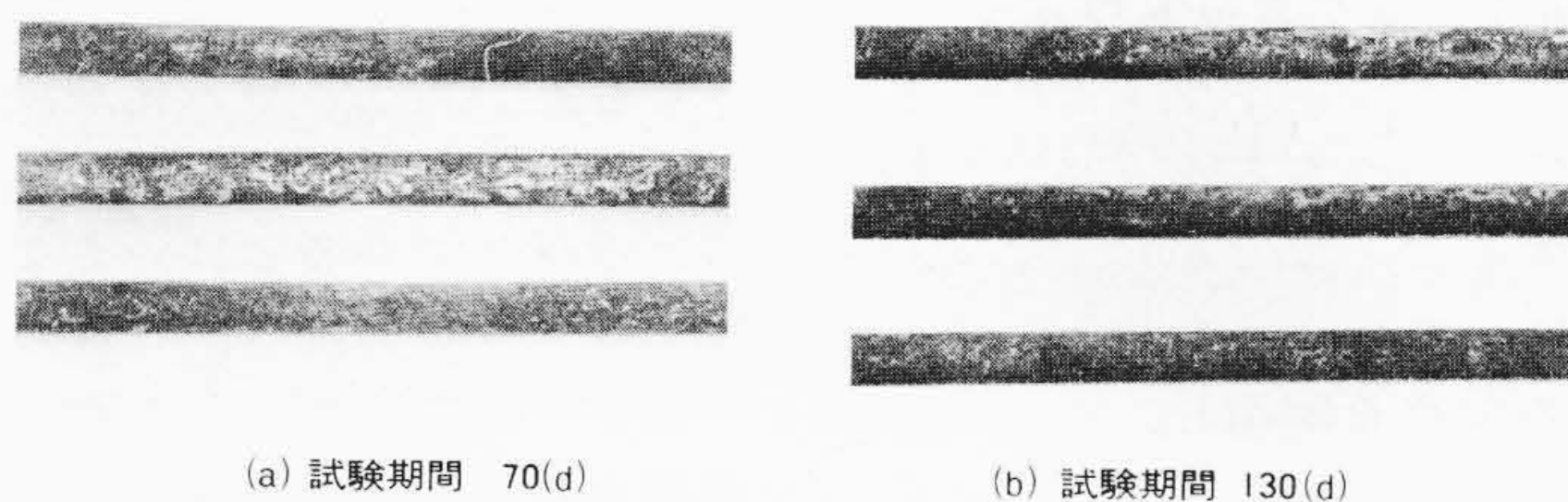


図8 SO₂ガス試験後の銅被アルミニウム線の外観 表面銅層が緑色または黒色に変色する程度で、内部アルミニウムの腐食は認められない。

Fig. 8 Appearance of Copper-clad Aluminium wire After Corrosion Testing in Sulfur Dioxide Atmosphere

表2 SO₂ガス試験後の銅被アルミニウム線(2.6φ)の機械的性質
ばく露後の性能低下は軽微で安定した性能を維持する。

Table 2 Resistance of Copper-clad Aluminium Wire to Corrosion in Sulfur Dioxide Atmosphere

試験項目	ばく露期間		
	試験前	70 (d)	130 (d)
引張強さ (kg/mm ²)	21.1	20.8	20.8
伸び (%)	2.6	2.2	2.0
曲げ (回)	13	12	11
導電率 (%)	66.5	66.3	66.2

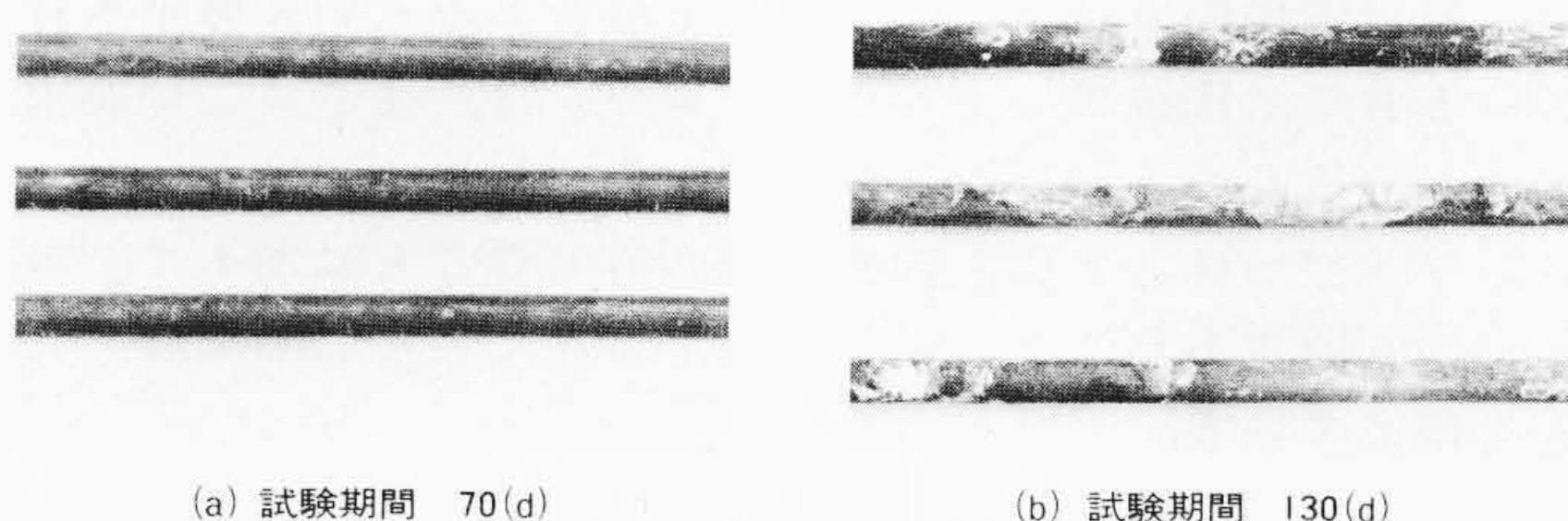


図9 塩水噴霧試験後の銅被アルミニウム線の外観 70日間試験後は試験前とほぼ同様の外観であるが、130日後は一部銅層が腐食し、アルミニウムが露出する。

Fig. 9 Appearance of Copper-clad Aluminium Wire after Corrosion Testing in Salt Spray

5 銅被アルミニウム材の特長

すでに述べた基本的性質および特性より本系複合材の特長はおのずから明らかであるが、あらためてその長所を要約すると次のとおりである。

(1) 接続が容易である。

アルミニウム線の接続にあたってはその表面酸化物を除去し、新たな生成を阻止するためブラッシングおよびコンパウンド塗布などの前処理を必要とするが、銅被アルミニウム線は無処理の状態で、図4に示すように低い圧力でも銅線と同程度の低い接触抵抗を得ることができる。

(2) はんだ付けが可能である。

銅層が被覆されているため、銅線と全く同様にはんだ付け可能で、従来アルミニウム線の応用が困難であった細線分野にも有効である。なお、通常のはんだ付け作業では、先に述べた化合物層の生成は問題とならない。

(3) 軽量かつ柔軟である。

比重が3.34であるため、表3に示すように同一電気抵抗においてもその重量は銅の56%と非常に軽量で、運搬、施工などの作業性に富む。また、銅線に比較しスプリングバックが少ないため、コイル成形が容易で占積率も向上する。

表3 各種導電材料の等価電気抵抗におけるサイズ・重量比較
銅被アルミニウムは等価抵抗で断面積が銅の1.5倍となるが、重量は約1/2にとどまる。

Table 3 Weight and Size Comparison of Copper, Copper-clad Aluminium and Aluminium Wire for Equal Conductivity

項目	Cu	CA *	Al
断面積	100	150	161
直径	100	123	127
重量	100	56	49

注：* 銅被アルミニウム (銅被覆率10%)

(4) 導電率が高い。

銅層被覆により、アルミニウム線より数パーセント導電率が高い。特に高周波回路に使用される場合は表皮効果が銅層でカバーされ、その実効抵抗は同一線径の銅線とほぼ同等である。

(5) 耐食性が良好である。

6 銅被アルミニウム材の応用例

銅被アルミニウム材は上記の特長を生かして、多方面への応用が期待されるが、まず線材としては屋内配電線、機器配線用電線、自動車用ワイヤハーネス、バッテリーケーブルなどの絶縁電線、テレビ消磁、偏向コイル、ボイスコイル、小形モータ、小形変圧器用のマグネットワイヤおよび通信用の同軸ケーブル、電話ケーブル、アンテナ・フィーダ線などがあげられる。図10は、各種用途向けに加工した銅被アルミニウム線の製品例を示したものである。

一方、ブスバーを含む各種型材はバスダクト、配電盤用導体、スイッチ母材、整流子基材、電極棒、接続用端子などへの応用が考えられる。図11は、静水圧押出法によって製造した各種銅被アルミニウム型材の製品例を示したものである。以下、二、三の応用例について説明を試みることにし、各種用途に応用する場合の参考に供したい。

6.1 配電線

現在、アルミニウム線は、架空送配電線、地中電力ケーブル、屋内配電線用として利用されその技術も確定しているが、これらは比較的サイズが大きくまた接続作業も経験者によることが多いため、アルミニウム導体を使用する場合問題となる絶縁性の酸化被膜に対する処置が適切に行なわれ監督され

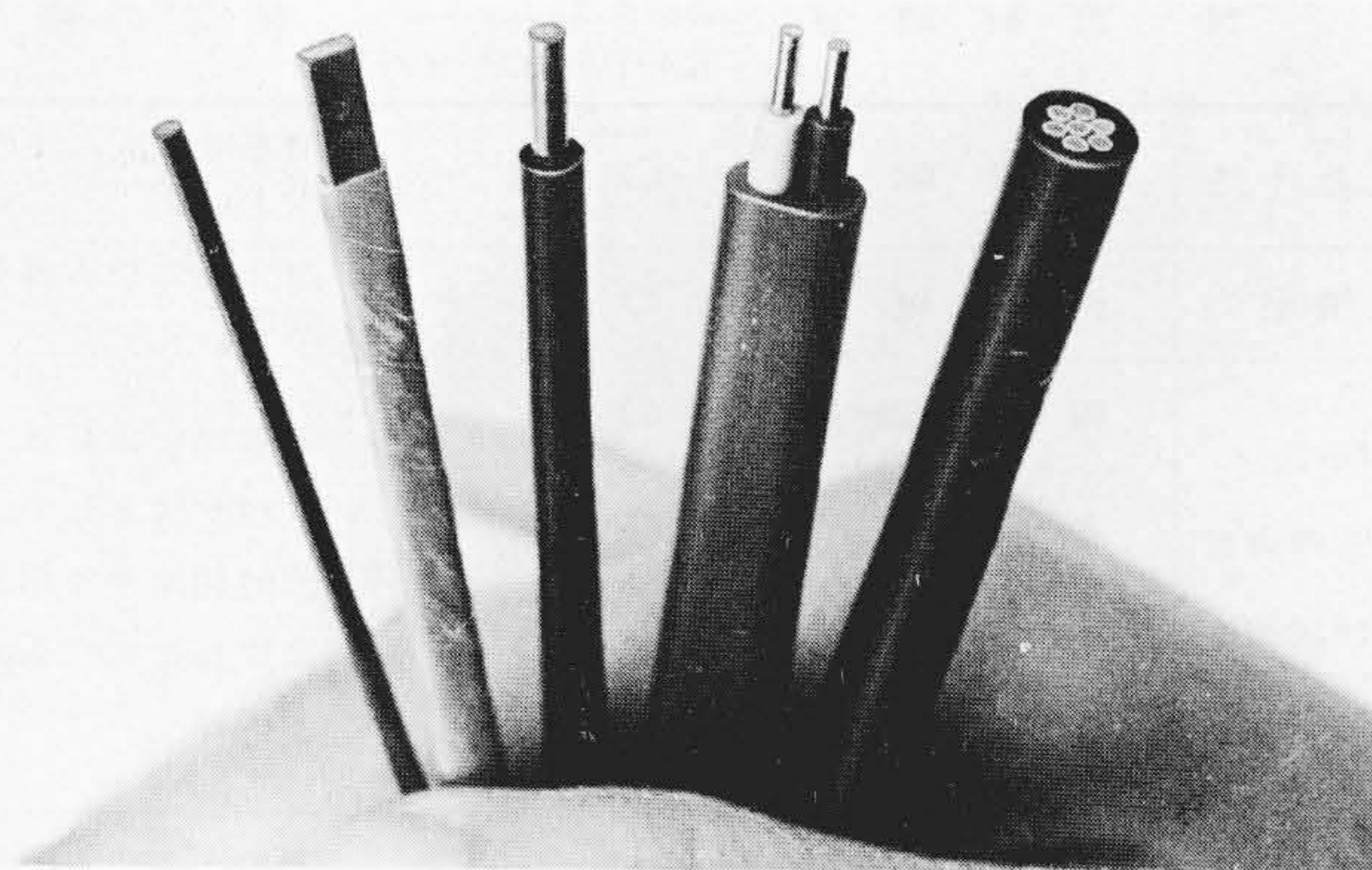


図10 銅被アルミニウム線の応用製品例 屋内配電線、機器配線用電線、バッテリーケーブルなどの絶縁電線、消磁コイル、ボイスコイル、小形モータ、変圧器などの巻線に応用される。

Fig. 10 Some Applications of Copper-clad Aluminium Conductor to Building-, Appliance and Magnet-wire

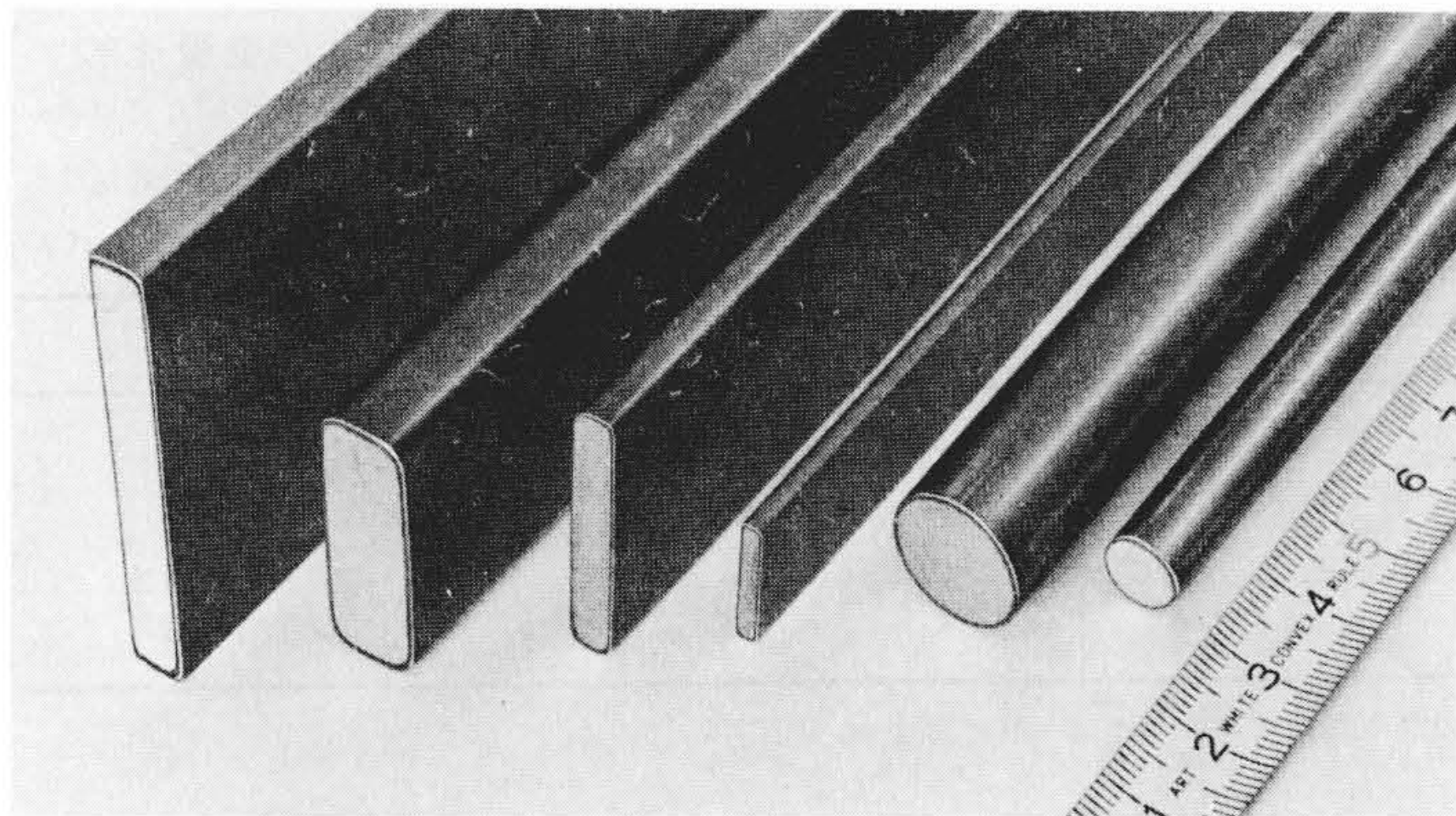


図11 静水圧押し出し法による各種銅被アルミニウム型材の製品例
バスダクト、配電盤用導体、スイッチ母材、整流子基材、接続用端子、電極棒
などに応用される。

Fig. 11 Copper-clad Aluminium Busbars and Section Produced
by Hydrostatic Extrusion

ている。一方、電灯線などの細線では酸化膜の除去が困難で、しかも作業者が不特定多数となるため、正確な作業を期待するのは困難である。さらに市販の配線器具についても、接続子にめっきが施されてはいるものの、これによって細物アルミニウム線を使用する場合の問題点が解決されたとはいえない。このような観点から銅被アルミニウム線をこの分野に応用することにより、アルミニウム導体使用上最大の問題となる絶縁性酸化膜による影響を回避できることは明らかで、好結果が期待される。

表4は、銅被アルミニウム導体電線の一般特性についての試験結果を要約したものである。これより、施工時に問題となる可とう性は、等価サイズにおいても銅導体より曲げやすい結果となっている。また引張り耐力、取扱性、屈曲寿命などは、ほぼアルミニウムと同等である。なお、絶縁被覆層の皮はぎには、銅層の損傷を避けるため、ワイヤストリップの使用が望ましい。さらに配線器具へのねじ締め接続やすでに述べた、端子へのはんだ付も銅線と同様に作業することができる。

表4 銅被アルミニウム導体電線の一般特性 各特性ともアルミニウム導体とほぼ同等の性能を有する。

Table 4 General Characteristics of Insulated Copper-clad Aluminium Wire and Cable

分類	試験項目	試料		結果の要約
		CA-IV	CA-VVF	
可とう性	曲げ剛性	○	—	銅導体に比べて曲げやすい。
引張耐力	引張破断	○	—	アルミニウム導体と同等
取扱性、 屈曲寿命および細線心の効果	繰返し曲げ	○	—	単線同心よりは、焼鈍材が望ましい。 常時屈曲する用途にはアルミニウム導体と同等
	キンク	○	—	
	引張衝撃	—	○	
	回転引張	—	○	
ボルトへの巻付	ボルトへの巻付 巻戻し	○	○	アルミニウム導体と同等
皮はぎ性	ワイヤストリップによる皮はぎ	○	○	ワイヤストリップの使用が望ましい。
	ナイフによる皮はぎ	○	○	

6.2 マグネットワイヤ

マグネットワイヤの分野においても、アルミニウム化が浸透しつつあるが、やはり接続が困難であること、強度が不足することなどから、必ずしも円滑に進行しているとはいえない。このような状況にあって銅被アルミニウム線は、これらの欠点を解消し、しかもアルミニウムの特徴を生かした新しい巻線用材料としてその応用が期待される。また用途によっては、線材の重量そのものが、製品の性能を左右する場合があります。かような用途に対して銅被アルミニウム線の適用は、アルミニウムによる軽量化のメリットを最大限に利用していることになる。

図12は、銅被アルミニウム導体エナメル線のS-Sカーブを示したものである。なお比較のために、アルミニウム導体のそれも併記してある。また表5は、アルミニウム導体と対比しながら銅被アルミニウム導体エナメル線の実験結果を示したものである。これより、銅被アルミニウム導体エナメル線は裸導体と同等の性能を有し、かつ従来のアルミニウム導体エナメル線を上回る特性を有していることがわかる。

6.3 ブスバー

ブスバーは、すでに相当量のアルミニウム化が進んでいる。しかしアルミニウムブスバーは電接面処理が必要で、特に配電盤用などの小形ブスバーでは、材料費の節減と加工手数の増加とが相殺する結果になっている。むろんその他のブスバーにおいてもこの間の事情は共通するものがあり、したがって一般に電接面処理については、より容易なものが要求されているおり、銅被アルミニウムブスバーは、まさにこの要求にこたえるものといえる。静水圧押し出しによる銅被アルミニウムブスバーは、上記電接面処理の容易なことに加えて、軽量かつ安価であること、耐食性がすぐれていることなどの特長を備えている。

表6は、銅ブスバーおよびアルミニウムブスバーと比較しながら、銅被アルミニウムブスバーの一般性能を示したものである。各性能は、アルミニウムブスバーのそれに近く、ほ

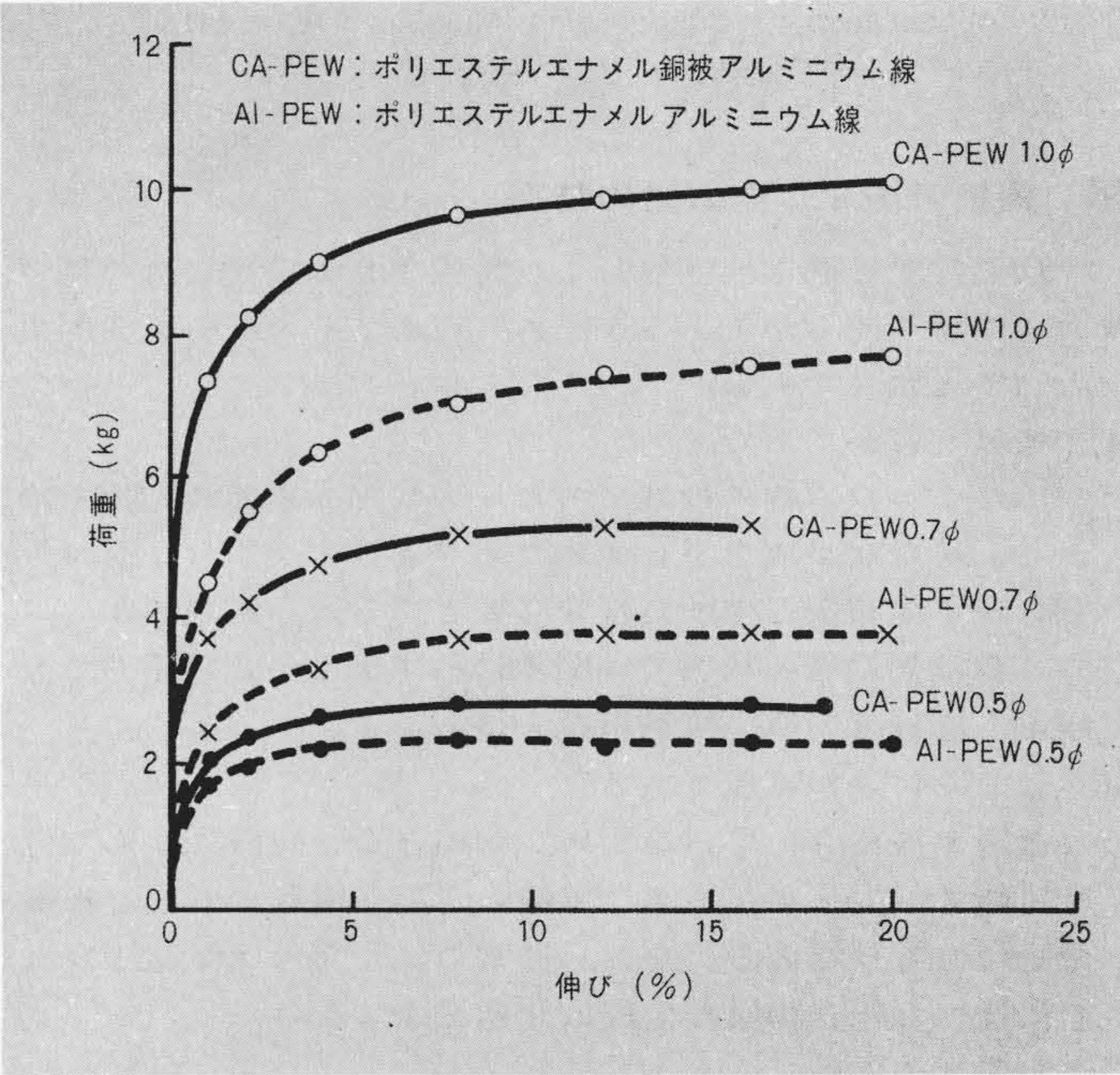


図12 銅被アルミニウム導体およびアルミニウム導体PEWのS-Sカーブ
銅被アルミニウム導体エナメル線のS-S曲線は、各ひずみにおいて、アルミニウム導体エナメル線を上回る高い応力水準にある。

Fig. 12 Load-elongation Curves of Enamelled Copper-clad Aluminium and Aluminium Wire

表5 アルミニウム導体PEWおよび銅被アルミニウム導体PEWの特性試験結果 銅被アルミニウム導体は、アルミニウムと同等ないしは、それを上回る性能を有する。

Table 5 Test results for some Characteristics of Enamelled Aluminium and Copper-clad Aluminium Wire

試 番		寸 法 (mm)			常態可とう性			熱 劣 化 後可とう性	往 径 摩 耗 (回)	薬 品 溶 剤				導 電 率 (%)
サ イ ズ	試 料	導 体 径	皮膜厚さ	仕上り径	無伸長		10%伸長			200℃×6h				
					1 d	1 d	2 d	1 d						
0.5φ	Al-PEW	0.510	0.023	0.556	0	0	0	0	8.0 (2)	◎	◎	◎	3 H	63.1
	CA-PEW	0.517	0.022	0.560	0	0	0	0	33.8 (13)	◎	◎	◎	◎	68.1
0.7φ	Al-PEW	0.700	0.030	0.759	0	0	0	0	20.9 (4)	◎	◎	◎	◎	63.1
	CA-PEW	0.706	0.024	0.754	0	0	0	0	31.3 (7)	◎	◎	◎	◎	66.7
1.0φ	Al-PEW	1.000	0.040	1.079	0	0	0	0	30.4 (14)	◎	◎	◎	◎	63.3
	CA-PEW	1.010	0.035	1.080	0	0	0	0	28.4 (7)	◎	◎	◎	◎	67.9
備 考					供試コイル 5 個中のクラ ックの発生したコイル数 で示す。			6 回の平均 値 () 内は 最小値		鉛筆硬度法により判定 4 H でチェックし、◎ 印は合格を示す。				

は銅とアルミニウムの断面積比および質別から推定される値に一致している。なお、ブスバーにおいては、銅とアルミニウムの断面積比は、Cu15%、Al85%が標準となっている。

また図13は、図示の接続方法に基づき、各種表面処理を施した銅被アルミニウムブスバーの締付トルクと接続部抵抗の関係を示したものである。これより適正締付トルクは、約200 kg・cmが妥当と考えられる。この値は、JIS その他によるアルミニウムブスバーの締付推奨値とよく一致している。なお、現場施工時の電接面処理は銅ブスバーのそれに準じ、切断、穿孔(せんこう)、曲げなどの加工は、アルミニウムブスバーのそれに準じて行なえばよい。

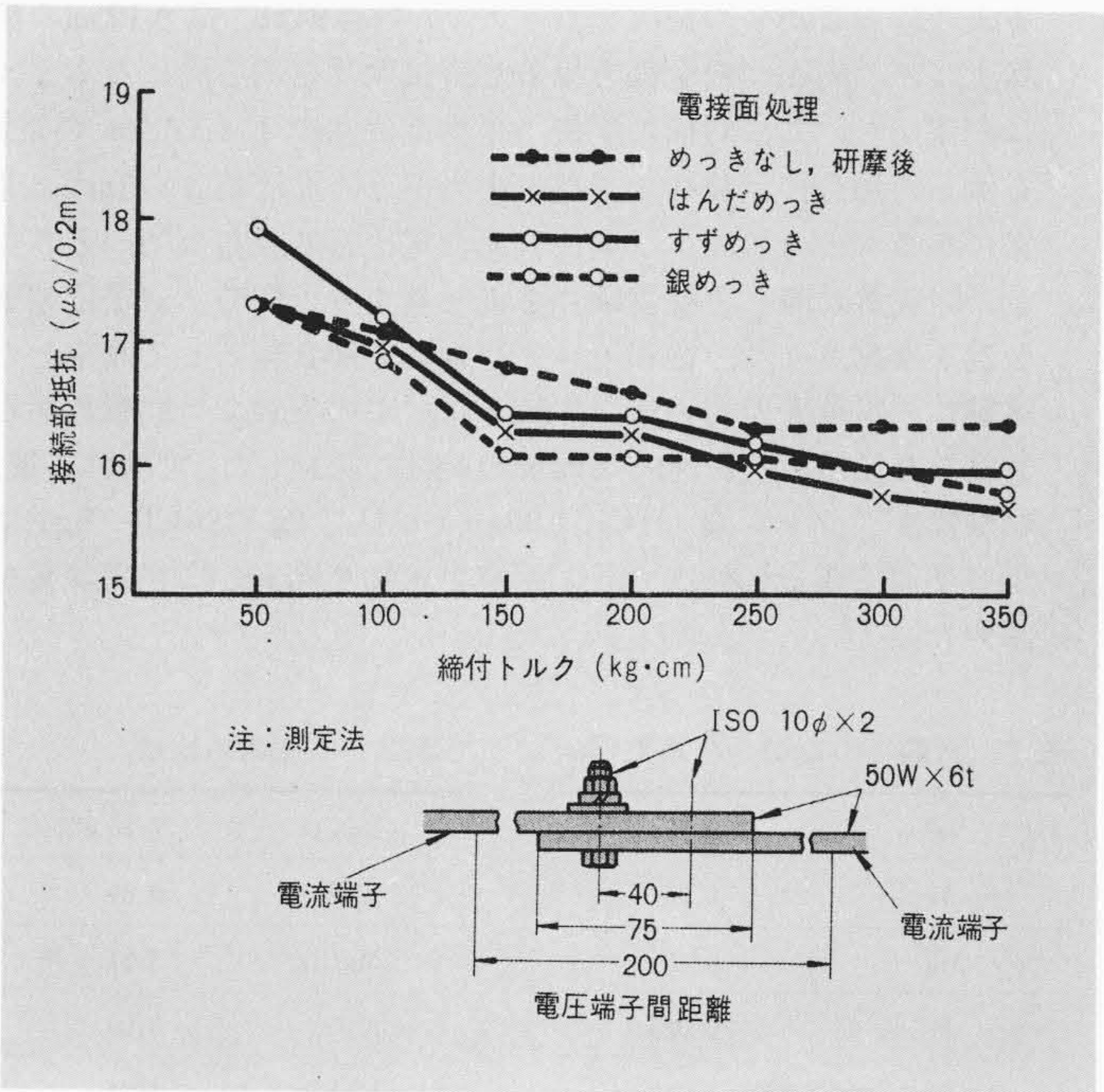


図13 銅被アルミニウムブスバーの締付けトルクと接続部抵抗の関係 締付けトルクの増加につれて接続部抵抗は低下し、150～200kg・cm以上の締付けトルクで安定化する。

Fig. 13 Contact Resistance Versus Clamping Torque for two Copper-clad Aluminium Busbars

表6 銅被アルミニウムブスバーの一般性能 各性能とも銅被覆率およびアルミニウムの質別から期待される値に近似している。

Table 6 Comparative Properties of Copper-clad Aluminium, Aluminium and Copper Busbar

材 料	CA *	Al	Cu	
質 別	F	F	O	H
導 電 率 (%)	67	61	100	100
線膨張係数 (1/°C)	22×10 ⁻⁶	24×10 ⁻⁶	17×10 ⁻⁶	17×10 ⁻⁶
比 重	3.63	2.72	8.92	8.92
引張強さ (kg/mm ²)	19.8	8.1	22.4	38.5
耐 力 (kg/mm ²)	18.9	3.2	7.0	35.0
伸 び (%)	17	37	55	6

注：* 銅被覆率：15%

7 結 言

導電材料に対する要求は、近年ますますきびしさを加えており、コストダウンと性能の向上を同時に満足させる必要が生じてきた。このような要望に対して、銅およびアルミニウムの両長所を兼備した銅被アルミニウム材は、大量製造方式の確立に伴い、第三の導電材料として従来の特殊用途向けから今後は、汎用導電材料として急速に普及するものと考えられる。

本報告を終わるにあたり、終始ご指導を賜った日立電線株式会社電線工場・清宮部長ならびに実験にご協力いただいた日高工場・絶縁線部、検査部および電線工場・巻線部、豊浦工場の関係者各位に深謝する。

参考文献

- (1) Texas Instruments Inc：特許出願公告 (昭44-30870)
- (2) ASEA：Wire Ind, 38, 647 (Sep.1971)
- (3) N.Hornmark, D.Frmel：Draht-Welt 56, 424 (Aug.1970)
- (4) 山路：金属材料, 12, 61 (Jan.1972)
- (5) 山路：金属, 42, 55 (Mar.1972)
- (6) N.Hornmark, J.O.H.Nilson：Metal Forming 37, 227 (Aug.1970)
- (7) 西原ほか：非削加工, 1, 2 (Dec.1970)
- (8) Texas Instruments Inc：Bulletin Number 516-DS92-970