

銅被アルミニウムブスバーの諸性能

Some Properties of Copper Clad Aluminium Bus Bar

Copper-clad aluminium bus bars made by the hydrostatic extrusion method are superior or similar to aluminium bus bars in general properties including strength, electrical conductivity, specific gravity, and thermal coefficient as well as in machinability with respect to bending, drilling and torsion, while in joint surface preparation property, joint property, solderability and corrosion resistance they stand comparison with copper bus bars.

参木貞彦* *Sadahiko Mitsugi*

ディートリッヒ・エールシュレーゲル**

Dietrich Oelschlägel

三宅保彦* *Yasuhiko Miyake*

1 緒 言

導電材料の銅からアルミニウムへの転換は、現在では、大きな潮流をなしており、一時的にとどまることはあっても、その流れは動かしがたいものとなっている。しかしながら周知のように、アルミニウムは接続が困難であるため、用途によっては、必ずしも代替が円滑にゆかず、限定されたものになっていることも事実である。

一方、ブスバーに着目した場合、すでに相当量アルミ化が進んではいるものの、その電接面処理については、依然注意深い手数のかかる処理が必要で、このことは、施工工数の増加を招き、アルミニウムブスバー使用時の問題点とされている。たとえば、配電盤用などの小形ブスバーでは、材料費の節減と加工工数の増加とが相殺する結果になっており、アルミ化が遅れている理由となっている。もちろん、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、かねてから電接面処理の容易なブスバー用材料が望まれていた。この要望にこたえて日立電線株式会社では、アルミニウムを心材とし、その表面に接続性にすぐれた銅層を金属学的に一体化被覆した銅被アルミニウム材を製造販売することに決定し、その性能の概要についてはさきに報告した⁽¹⁾。

本報告は、この種複合材の主要な応用分野の一つであるブスバーの一般性能と実用性能に関する試験結果について述べたもので、広く各種用途に応用する際の参考に供しようとするものである。

2 銅被アルミニウムブスバーの構造

図1に示すように銅被アルミニウムブスバーは、電気用アルミニウムを心材とし、高導電性純銅を被覆材としたもので、全断面積に対する銅層の比率は、15%を標準としている。なお、一例として、10t×50wについて、平均の銅層厚さをみると図1右上端に示すとおりである。ここでフラット面に比較してエッジ面では銅層が厚い傾向にあるが、これは押出しの際、複合ビレット径の減少率が両面で異なることによるものである。

また本製品は静水圧押出し法により、冷間で押し出したものであるため⁽¹⁾、いわばアルミニウムAlと銅Cuは、冷間圧接された状態にあり、したがって、図2に示すようにCu/Al界面には、合金層などの反応相は存在せずに、両者は完全に密着している。

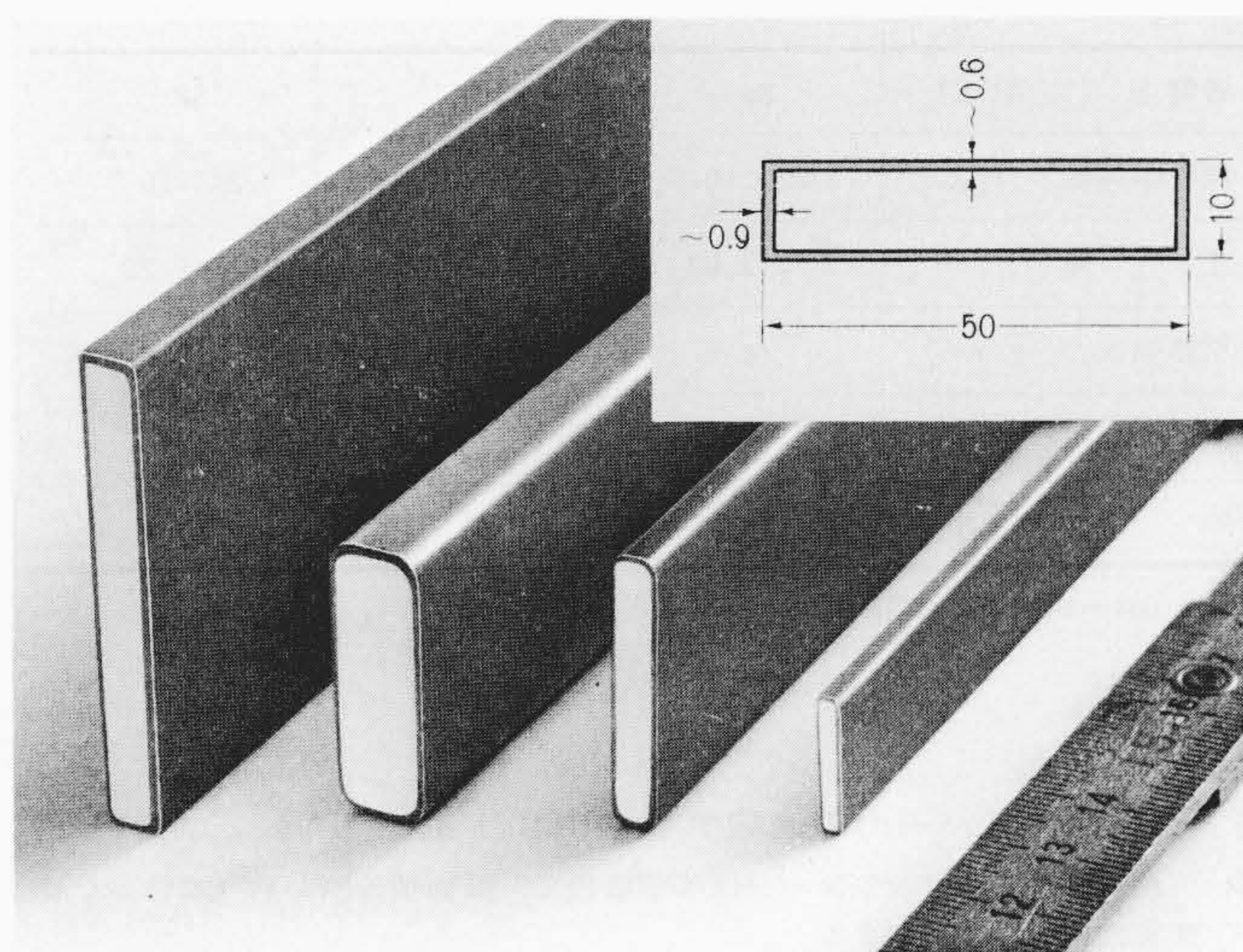


図1 銅被アルミニウムブスバーの断面構成 電気用アルミニウムを心材とし、高導電性純銅を被覆材としている。

Fig. 1 Hydrostatically Extruded Copper-clad Aluminum Bus Bars

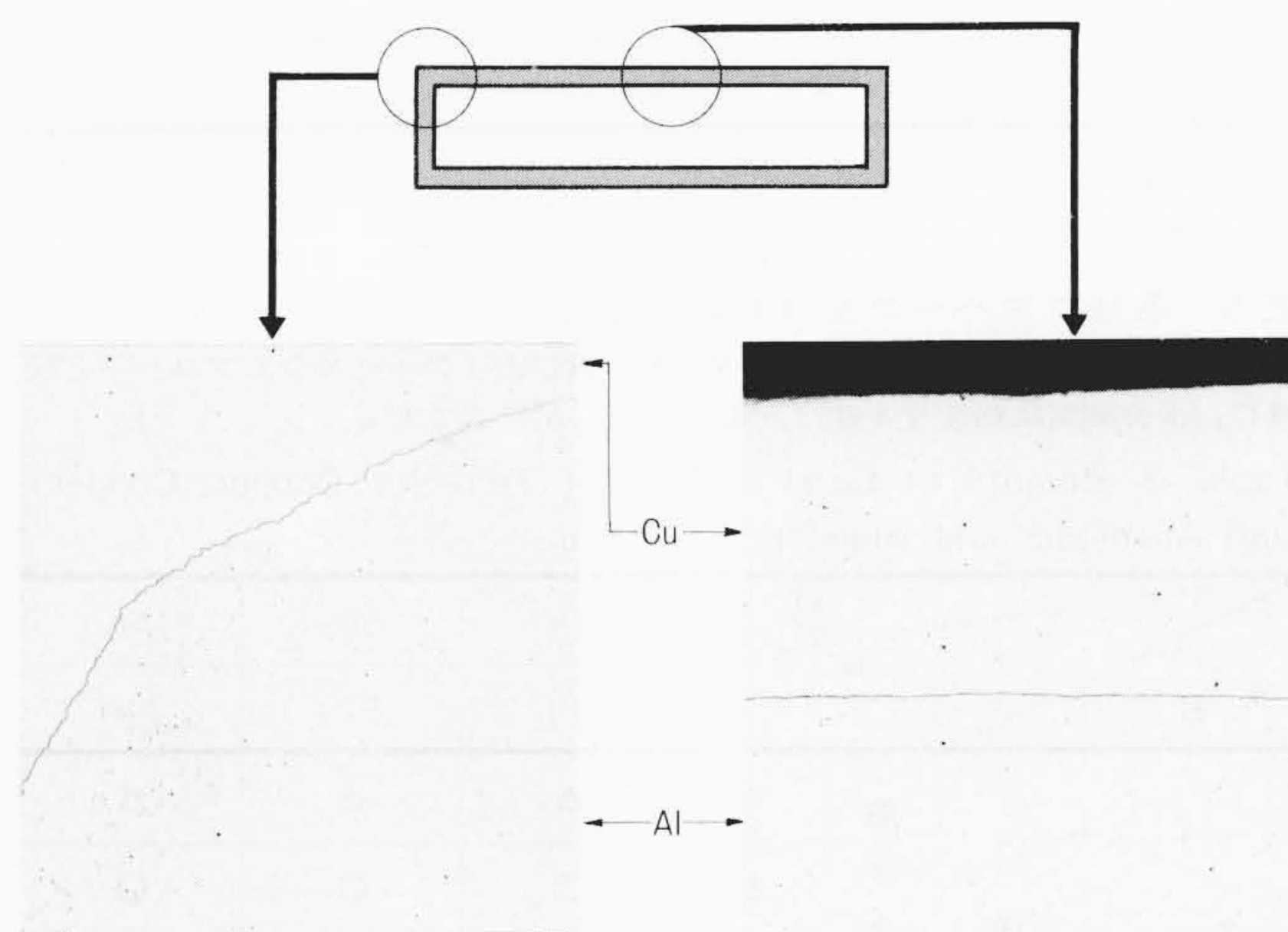


図2 銅被アルミニウムブスバーの断面マイクロ写真 Cu/Al界面には、合金層は存在せずに、両者は完全に密着している。

Fig. 2 Microphotograph of the Interface of the Copper-clad Aluminum Bus Bar (×100)

* 日立電線株式会社研究所 ** 日立電線株式会社研究所 理学博士

3 銅被アルミニウムブスバーの一般性能

表1は、銅およびアルミニウムと比較しながら、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似し、ほぼ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。

表2は、直流抵抗を同一にした場合の銅被アルミニウムブスバーと他種ブスバーとの断面積および重量を比較したもので、いずれもアルミニウム側によっていることがわかる。

表1 各種ブスバーの一般性能 銅被アルミニウムブスバーの各性能は、銅被覆率および構成材の質別から期待される値に近似している。

Table 1 General Physical Properties of Copper-clad Aluminum, Copper and Aluminum Bus Bar

特 性	材 質	CA *	Cu	Al
	質 別	F	½H	½H
導電率 (%IACS)		66	101	62
線膨張係数 (1/°C)		22×10 ⁻⁶	17×10 ⁻⁶	24×10 ⁻⁶
比 重		3.63	8.92	2.72
引張強さ (kg/mm ²)		16.1	27.6	10.8
耐 力 (kg/mm ²)		15.3	26.5	10
伸 び (%)		43	37	23

注：* CA=銅被アルミニウムブスバー

表2 各種ブスバーの等価電気抵抗における断面積および重量比較 銅被アルミニウムブスバーは等価抵抗で、断面積は銅の約1.5倍となるが、重量は約60%にとどまる。

Table 2 Cross-section and Weight Comparison of Copper-clad Aluminum, Copper and Aluminum Bus Bar for Equal Conductivity

項 目	材 料	Cu	CA	Al
断 面 積		100	149	161
重 量		"	61	49

表3 各種ブスバーの曲げおよびねじり試験結果(サイズ：5t×30w) 銅被アルミニウムブスバーは、銅およびアルミニウムブスバーと同様に、十分実用に耐えうる曲げ、ねじり加工が可能である。

Table 3 Results of Bend and Twist Test for Copper, Copper-clad Aluminum and Aluminum Bus Bar

項 目	材 質		CA	Cu	Al
	質 別		F	½H	½H
フラットワイズ 曲 げ	曲 げ 半 径 (mm)	0	△	△	△
		5	○	○	○
		10	○	○	○
エッジワイズ曲げ	10	○	○	○	○
ね じ り	ス パ ン (mm)	30	○	○	○
		60	○	○	○

注：△=曲げ面はだ荒れ
○=曲げ・ねじり部良好

4 銅被アルミニウムブスバーの加工性

4.1 曲げおよびねじり加工

表3は、銅およびアルミニウムを比較材として、銅被アルミニウムブスバーのフラットワイズ、エッジワイズ曲げおよびねじり試験の結果を示したものである。曲げ角およびねじり角はいずれも90度で、供試材は表1に示すものを用いた。各曲げ半径および各スパンとも、き裂の発生もなく正常で、銅およびアルミニウムブスバーと同様に、十分実用に耐えるものである。図3は、供試材の試験後における外観の一例を示したものである。

4.2 穴あけ加工

図4は、プレスせん孔による、角穴のせん孔結果を示すものである。角穴、丸穴形状とも、プレス、ドリルでせん孔可能で、図示のようにせん孔による銅層のはく離も全く心配ない。

4.3 めっき性

銅被アルミニウムブスバーは、表面に銅を被覆しているため、銅ブスバーと同様に容易にめっきすることができる。図5は通常の作業手順で、スズ、銀めっきした銅被アルミニウムブスバーの外観および断面組織を示すものである。各めっき処理ともめっき層は、所定厚さだけ銅層に十分密着しており、Cu/Al界面にも異常は認められなかった。

4.4 加熱処理性

図6は、銅被アルミニウムブスバーの等時軟化特性を示すものである。比較のために、銅およびアルミニウムブスバーのそれも併記してある。これより銅被アルミニウムブスバーは、アルミニウムブスバーと同様の軟化挙動をとり、約200℃で軟化を開始し、400℃ではほぼ完了することがわかる。なお、300℃×1時間以上の加熱では、しだいに合金層の成長がみられるが、400℃×1時間の加熱で～9μ生成した場合においても機械的、電気的性質にはほとんど影響しなかった。

5 銅被アルミニウムブスバーの腐食試験

図7は、1ヶ月間亜硫酸ガス(SO₂濃度1%、湿度99%)および塩水噴霧試験(塩水濃度5%、温度35±1℃、8時間噴霧、16

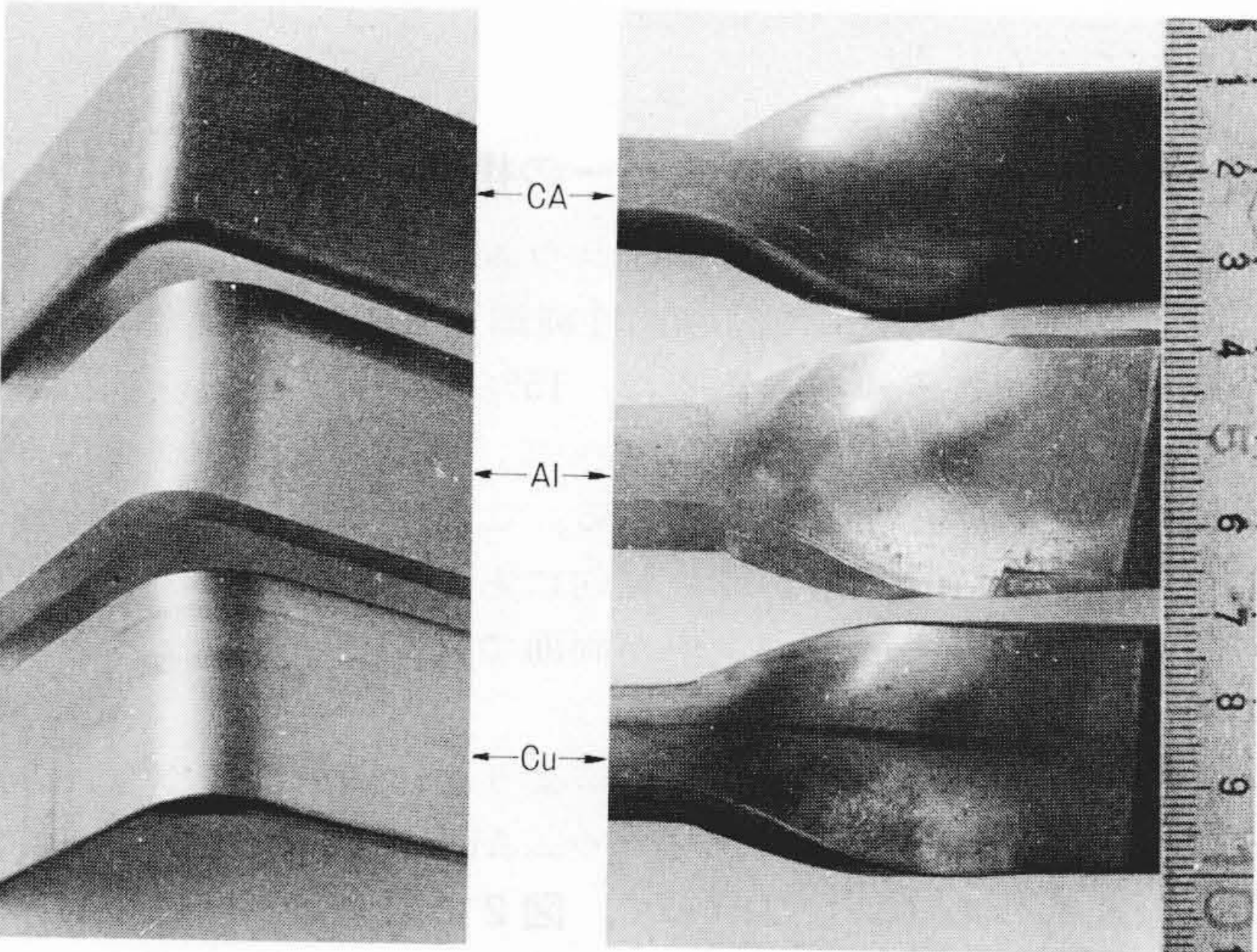


図3 各種ブスバーの曲げ(左)およびねじり(右)試験後外観(曲げ半径5mm、ねじりスパン30mm) 各ブスバーとも、曲げ、ねじり部にき裂は認められず健全である。

Fig. 3 Appearance of the Various Types of Bus Bars after Bend and Twist Test

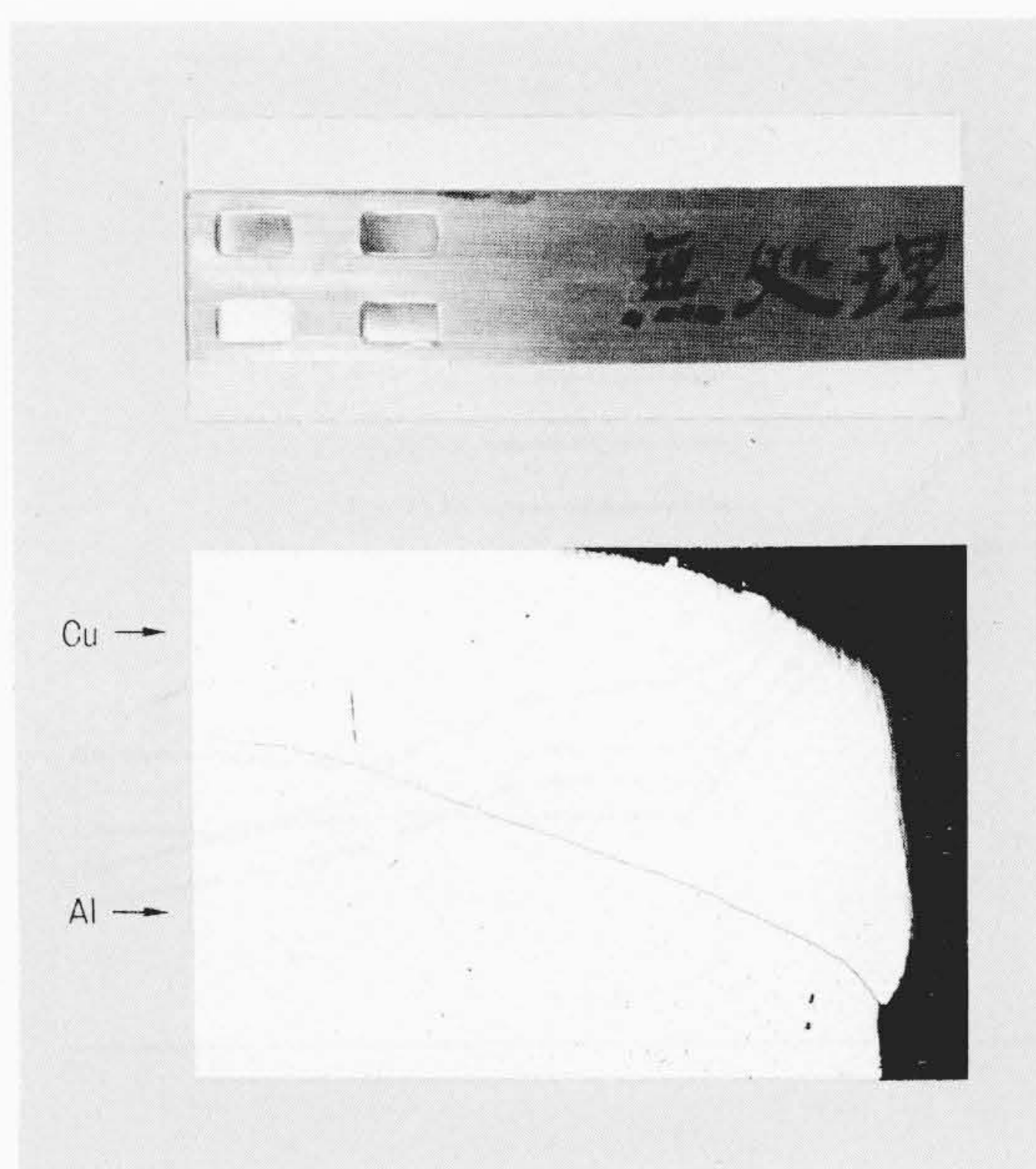


図4 プレスせん孔による銅被アルミニウムブスバーの角穴の外観および断面 プレスおよびドリルせん孔のいずれも可能で、せん孔による銅層のはく離は認められない。

Fig. 4 Appearance and Cross-section of the Copper-clad Aluminum Bus Bar after Press-punching

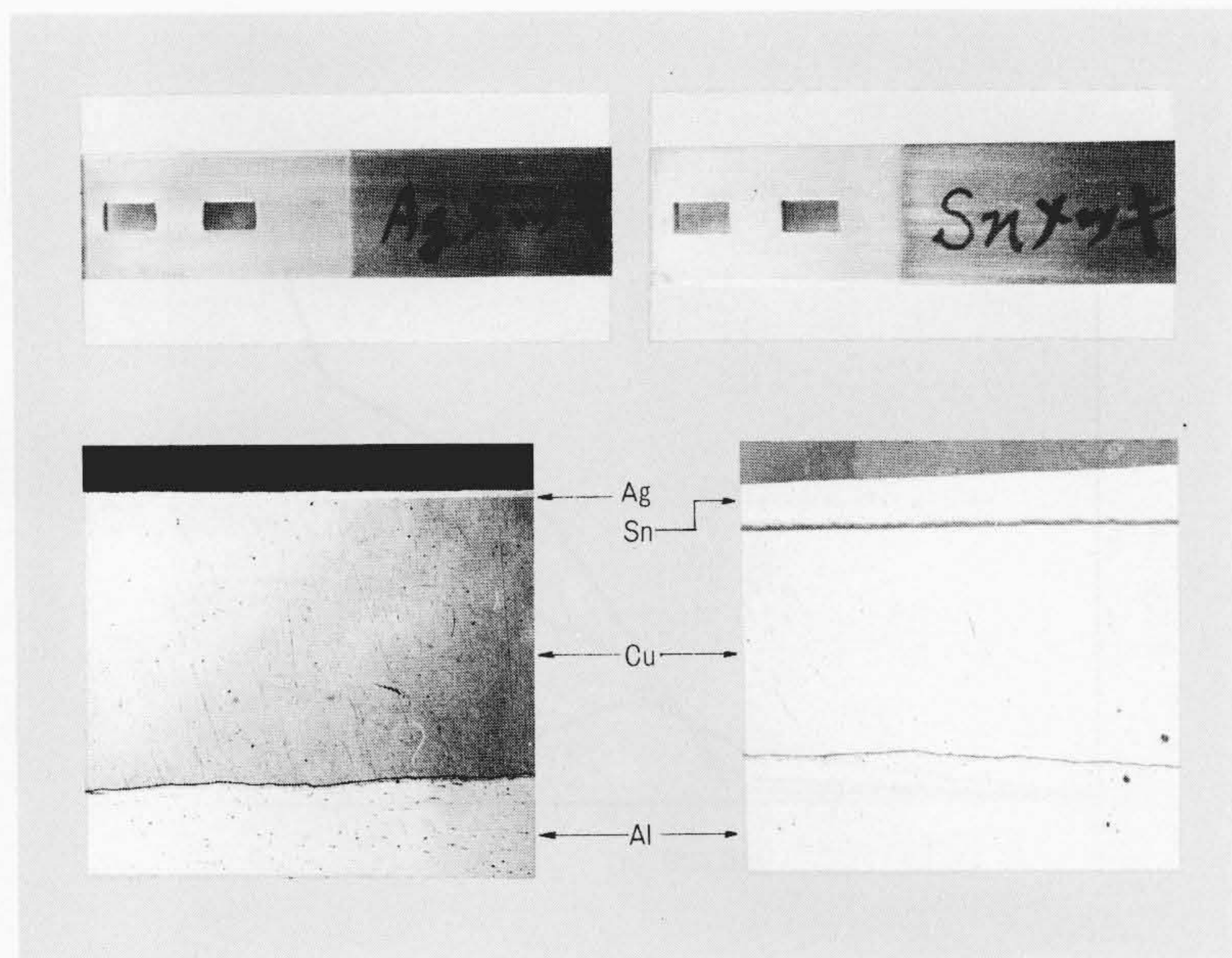


図5 銀めっきおよびスズめっき後の銅被アルミニウムブスバーの外観および断面 めっき層は、所定厚さ、銅層に十分密着し、Cu/Al界面にも異常は認められない。

Fig. 5 Appearance and Cross-section of Silver-and Tin-plated Copper-clad Aluminum Bus Bar

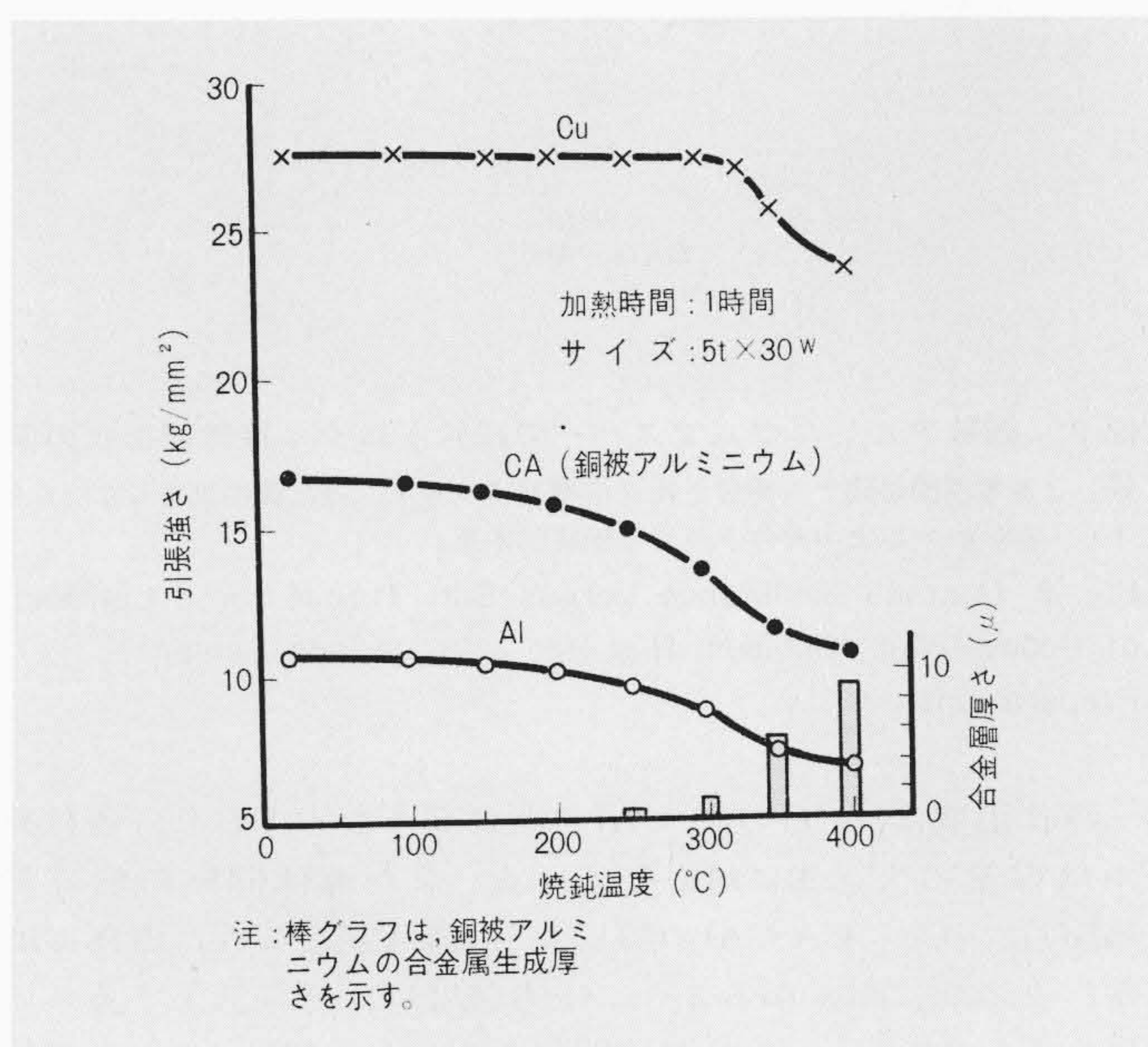


図6 各種ブスバーの等時軟化特性 銅被アルミニウムブスバーは、アルミニウムブスバーと類似の軟化挙動を示す。

Fig. 6 Annealing Characteristics of Copper, Copper-clad Aluminum and Aluminum Bus Bar

時間放置のくり返し)後の端面(アルミニウムが露出している)の腐食状況を示すものである。亜硫酸ガスに比較して、塩水噴霧材のほうが腐食は大きい、試験条件が過酷なわりには軽微で、界面において著しい腐食は発生せず銅とアルミニウムのはく離も認められなかった。これは、銅に対してアルミニウムの面積が著しく大きいため、腐食電流密度が小さくなること、いわゆる **mass anode effect** によるものと思われる⁽²⁾。

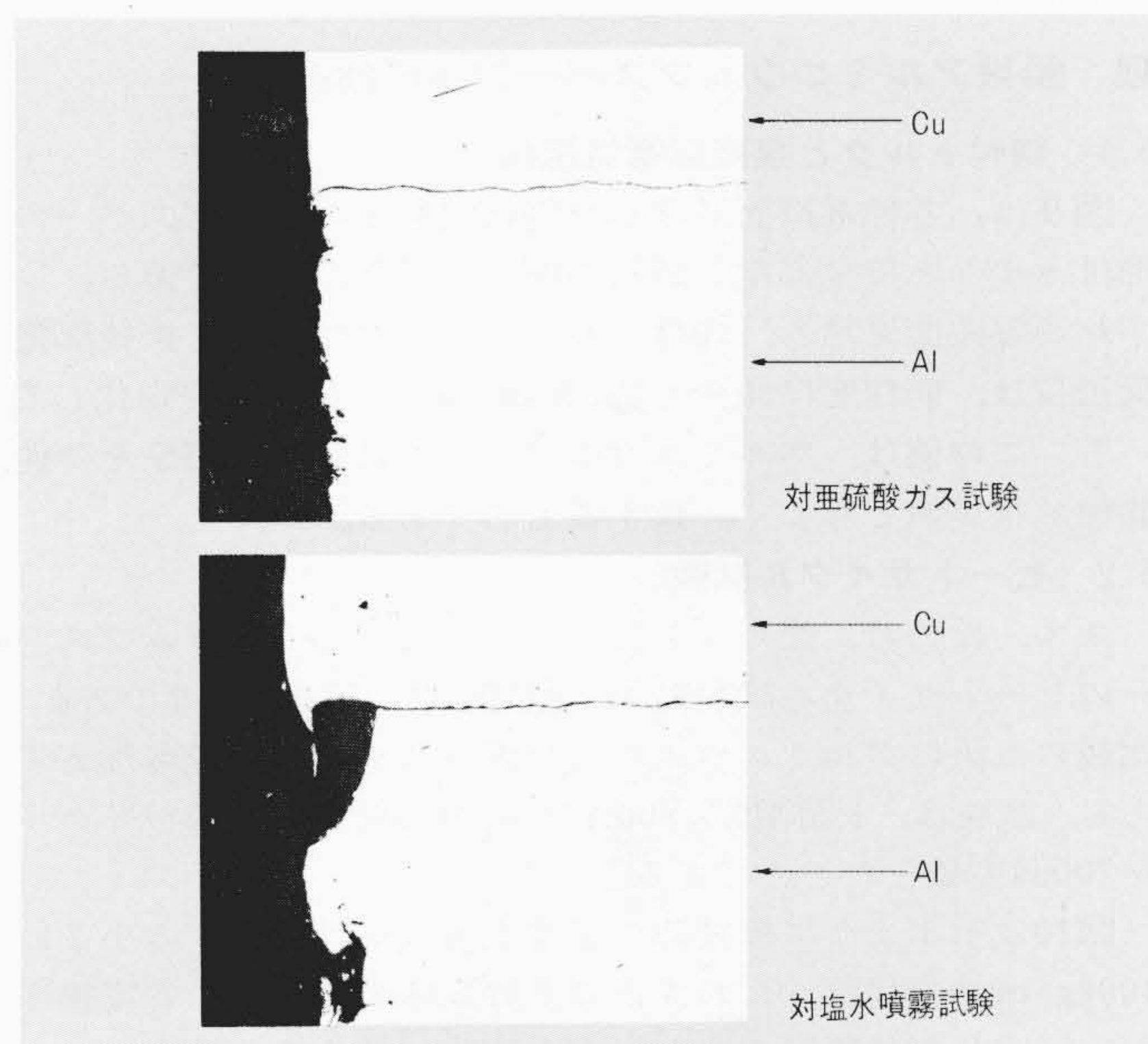


図7 銅被アルミニウムブスバーの端面腐食試験後断面(×100), 試験期間1ヶ月 塩水噴霧試験では、亜硫酸ガスの場合より侵食程度が大きい、写真に示す程度であれば、実際の腐食環境では、耐食性はほとんど問題とならない。

Fig. 7 Cross-section of the Cut End of the Copper-clad Aluminum Bus Bar after Corrosion Test in Sulfur Dioxide Atmosphere and Salt Spray

また図8は、各種ブスバー接続部の塩水噴霧試験による接続部抵抗の変化を示したものである。アルミニウムブスバーは、研磨後コンパウンド処理し、銅および銅被アルミニウムブスバーは、研磨のみで試験に供した。アルミニウムブスバーは、10日以後急激に抵抗が増加するのに対し、銅被アルミニウムブスバーは、銅ブスバーと同様に緩慢な上昇にとどまり、安定した性能を示している。

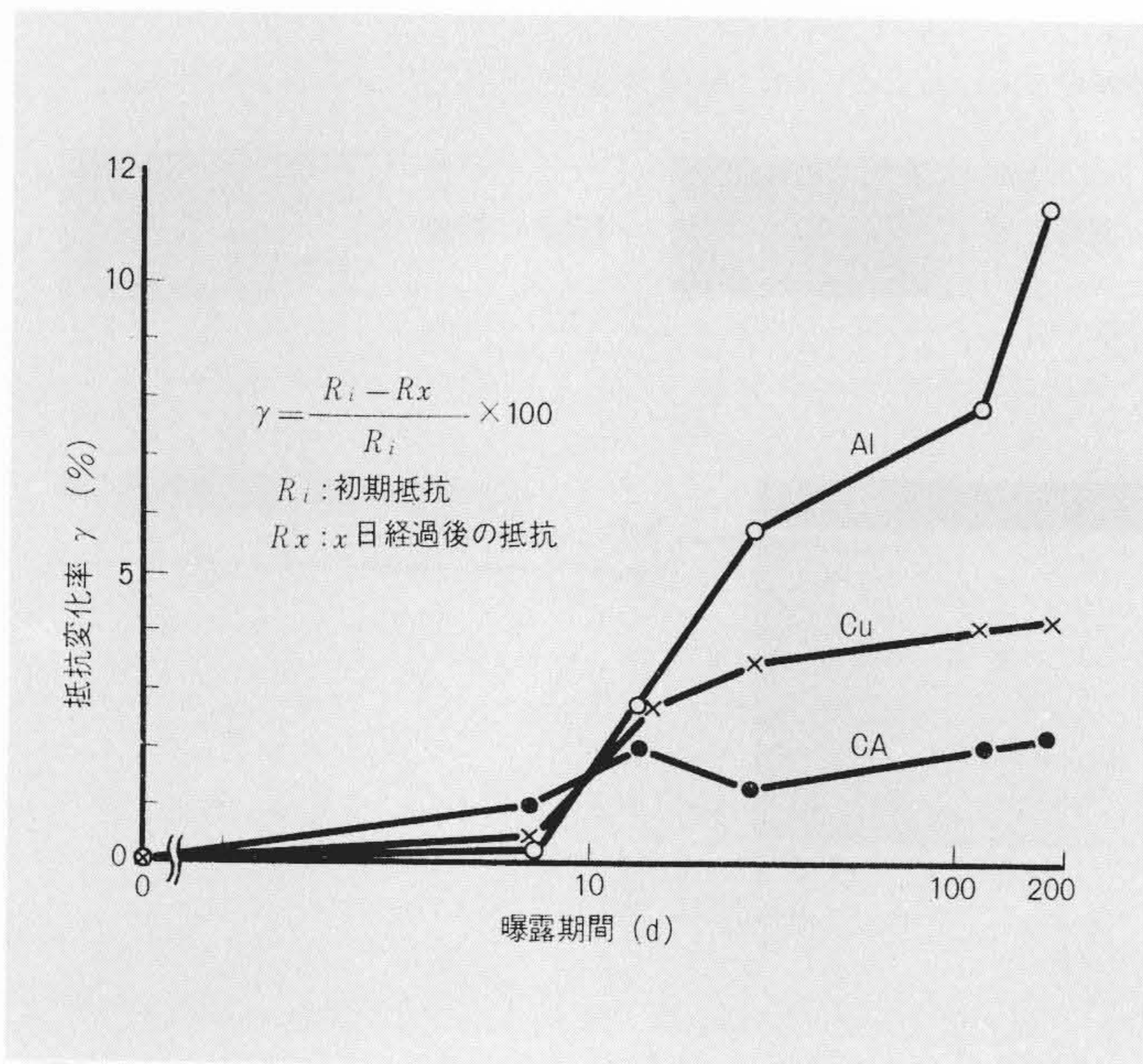


図8 各種ブスバーの塩水噴霧試験による接続部抵抗の変化
銅被アルミニウムブスバーの接続部抵抗は、銅ブスバーとほぼ類似の増加傾向にとどまり、その増加率は緩慢である。

Fig. 8 Contact-resistance Increase of Lap Joint for Copper, Copper-clad Aluminum and Aluminum Bus Bar in Salt Spray Test

6 銅被アルミニウムブスバーの接続性能

6.1 締付トルクと接続部電気抵抗

図9は、各種電接面処理した銅被アルミニウムブスバーの締付トルクと接続部電気抵抗の関係を示したものである。いずれの電接面処理も、締付トルクの増加につれて、接続部電気抵抗は、同程度に減少し約200kg・cmのトルクで安定化している。この値は、アルミニウムブスバーに対するJISその他諸種の推奨値ともよく一致するものである。

6.2 ヒートサイクル試験

スズ、はんだ、銀めっき処理した銅被アルミニウムブスバーのヒートサイクル試験結果は図10、11に示すとおりである。比較のためにアルミニウムおよび銅ブスバーの接続も加えてある。試験は、1.5時間×800A通電、1.5時間停止のサイクルを200回実施したものである。

図10に示すように接続部の温度上昇は締付トルクの小さい100kg・cmの接続部が、わずかに上昇気味のほかは、各電接面とも安定した状態にあり、大きな変化は認められない。

7 銅被アルミニウムブスバーの電気的特性

7.1 交直抵抗比

図11は各種ブスバーの交流および直流抵抗を示すものである。これより交流抵抗(R_{AC})と直流抵抗(R_{DC})の比 R_{AC}/R_{DC} を求めると $Cu > CA > Al$ の順に小さくなり、また温度上昇とともに小さくなる傾向にある。ちなみに銅被アルミニウムブスバーでは、50~500Aの範囲で $R_{AC}/R_{DC} \approx 1.01 \sim 1.02$ であり、直流および交流による電流分布の差は、あまりないことがわかる。

7.2 短絡試験

表4は短絡試験時の導体温度および導体間隔の永久変位量を示したものである。なお、試験時導体配置は同表に示すとおりで短絡電流時間は、15,000A(実効値)×1秒を目標とした。

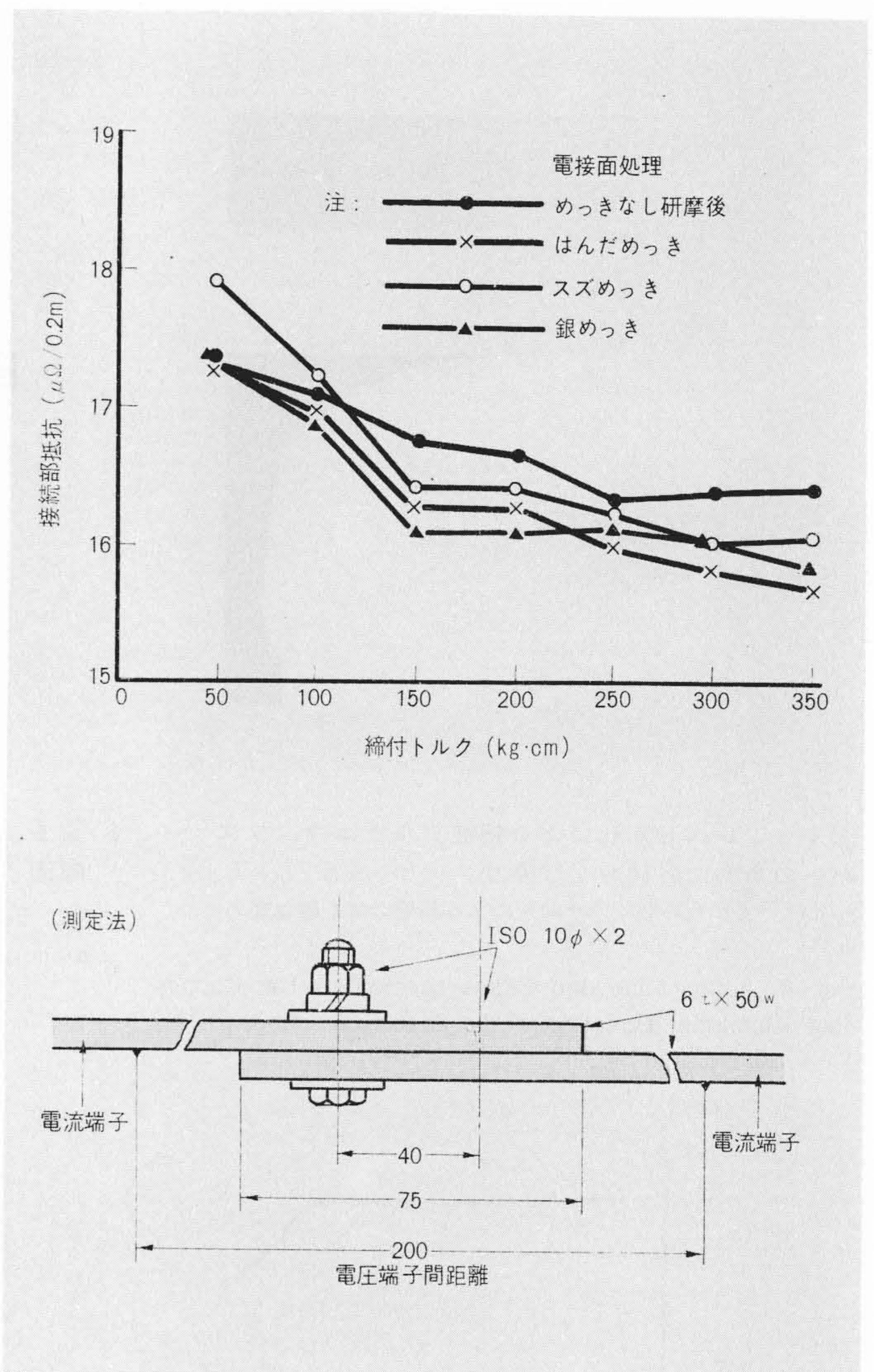


図9 銅被アルミニウムブスバーの締付トルクと接続部抵抗の関係
各電接面処理とも締付トルクの増加につれて、接続部抵抗はしだいに低下し、200kg・cm以上の締付トルクで安定化する。

Fig. 9 Contact Resistance Versus Bolt Torque for a Lap-joint of Copper-clad Aluminum Bus Bar with Various Surface Preparations

導体温度は、 $Cu < CA < Al$ の順に高くなっており、各材料の熱容量の大きさに対応している。また導体間隔の変位量(Δd)は、 $Cu < CA < Al$ の順に大きくなるが、これは導体温度が、この順に高くなること、一方強度は、逆に低下することによるものである。なお導体間隔の変位は、210mmスパンの場合で比較すると、銅被アルミニウムブスバーのそれはアルミニウムブスバーの約 $\frac{1}{2}$ にとどまっている。さらに銅ブスバーと比較すると、約9倍のひずみ量になっているが、等価抵抗サイズで比較すればこれより低い水準にとどまるものと思われる。なお、210mmスパンおよび310mmスパンの中央に分岐用の刃形ソケットをそう入したが、短絡により各ブスバーとも若干傾斜する程度で、はずれることはなかった。

表5は、短絡試験前後の各ブスバーの性能変化を示したものである。短絡により各ブスバーとも、若干軟化しているが銅被アルミニウムブスバーの引張強さの低下量は、他の二者より小さい。また導電率も、強度の低下に対応し、いずれもわずかに増加する程度である。なお試験後、銅被アルミニウムブスバーの断面を観察したが、 Cu/Al 界面に合金層は認められなかった。

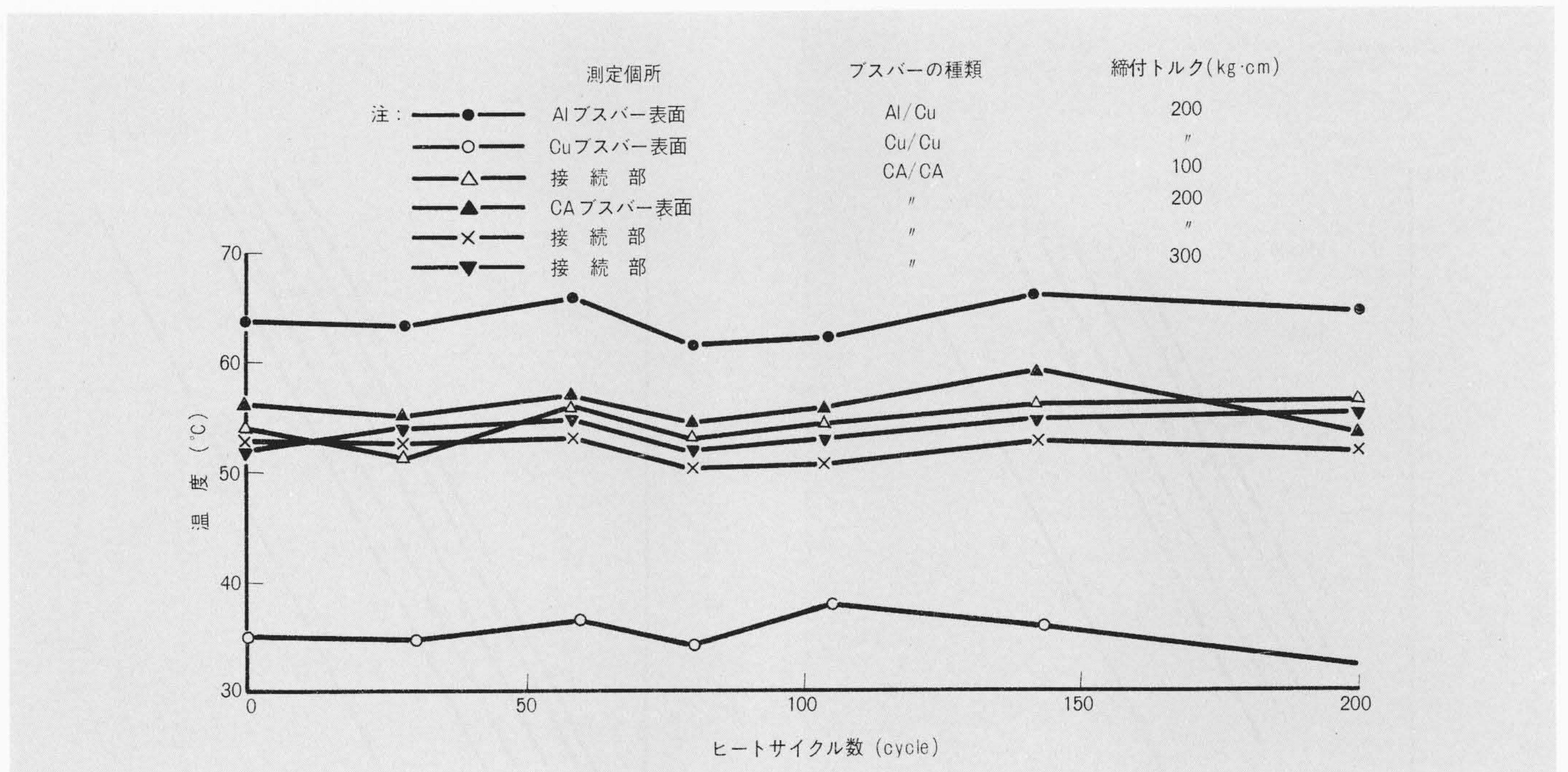


図10 銅被アルミニウムブスバーのヒートサイクル試験による接続部の温度上昇 接続部抵抗の変化に対応し、接続部の温度上昇も締付トルクが適切であれば大きな変化は認められず、安定した傾向を示している。

Fig. 10 Variation of the Temperature Increase of Copper-clad Aluminum Bus Bar Joint During Heat Cycling

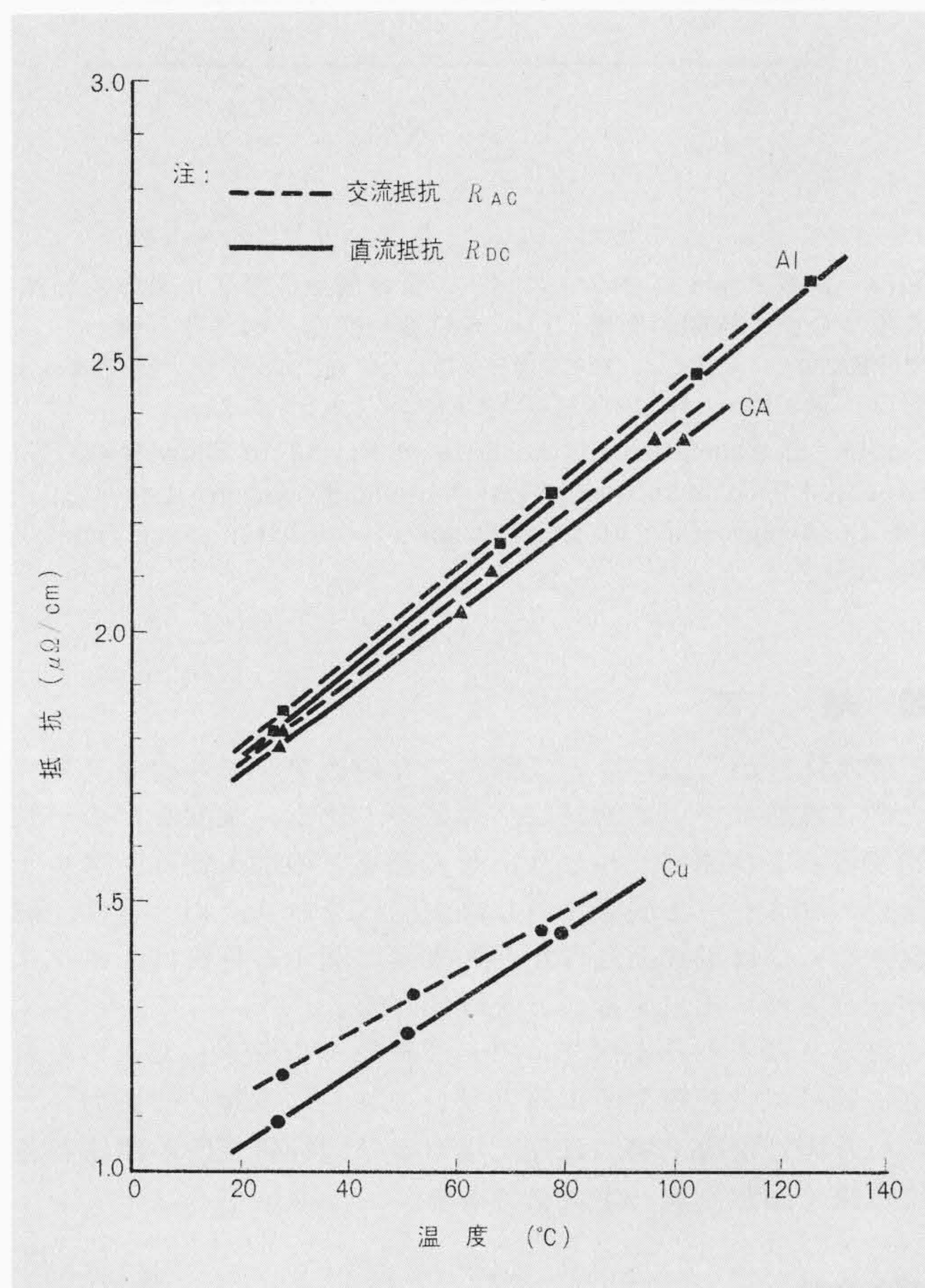


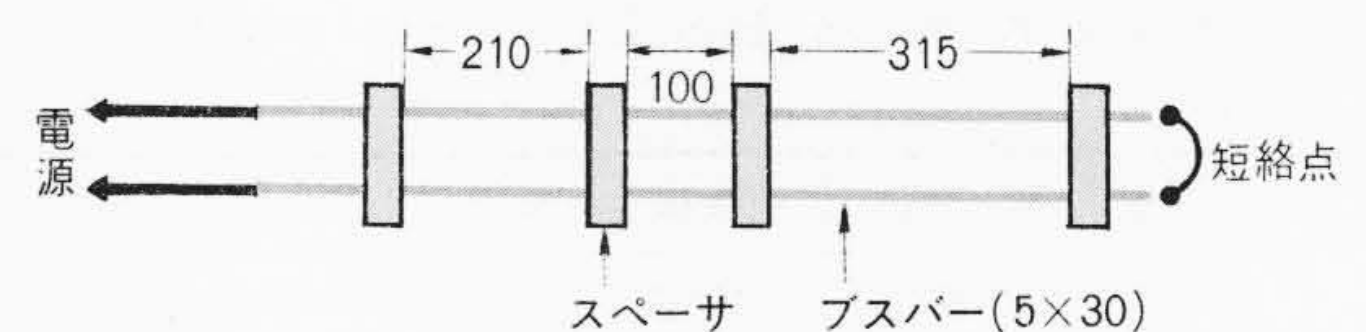
図11 各種ブスバーの交直抵抗の温度依存性 銅被アルミニウムブスバーの交直抵抗比 R_{AC}/R_{DC} は測定した温度範囲で1.01~1.02であり、直流および交流による電流分布の差はほとんどないものと考えられる。

Fig. 11 Temperature Dependence of Direct and Alternative Current Resistance of Copper, Copper-clad Aluminum and Aluminum Bus Bar

表4 各種ブスバーの短絡時、温度上昇ならびに導体間隔の永久変位量(短絡条件: 15,000 A × ~1秒) Cu<CA<Alの順に導体間隔の変位量は大きくなるが、同一波高値で比較すると、銅被アルミニウムブスバーのそれは、アルミニウムブスバーの約1/2にとどまる。

Table 4 Results of Short-circuit Test for the Copper, Copper-clad Aluminum and Aluminum Bus Bar

項目 試料	電 流 (kA)		時間 (s)	温 度 (°C)		導 体 配 置 (mm)		
	波高値 (第1波)	実効値 (平均値)		通電前	温度上昇 (ΔT)	スパン 長	設定間隔 (d)	間隔変化 量 (Δd)
Cu	28	15	48	22	76	100	55.1	0.1
						210	55.0	"
						315	54.8	1.0
CA	"	"	43	"	169	100	53.1	0.0
						210	54.9	0.9
						315	"	5.0
Al	"	"	48	"	250	100	54.1	0.1
						210	54.8	2.1
						315	53.5	6.7



8 銅被アルミニウムブスバーの最高使用温度

最高使用温度は、熱による強度の低下よりCu/Al界面における合金層生成の面から考慮する必要がある。図12は、合金層厚さに及ぼす加熱温度と加熱時間の関係を示したものである。さらに図13は、上記の実験結果を長時間低温側に外そうとしたものである。これにより使用温度を80°Cとすると、30年連続して使用しても生成厚さは~1μであるから、なんら問題とならない。

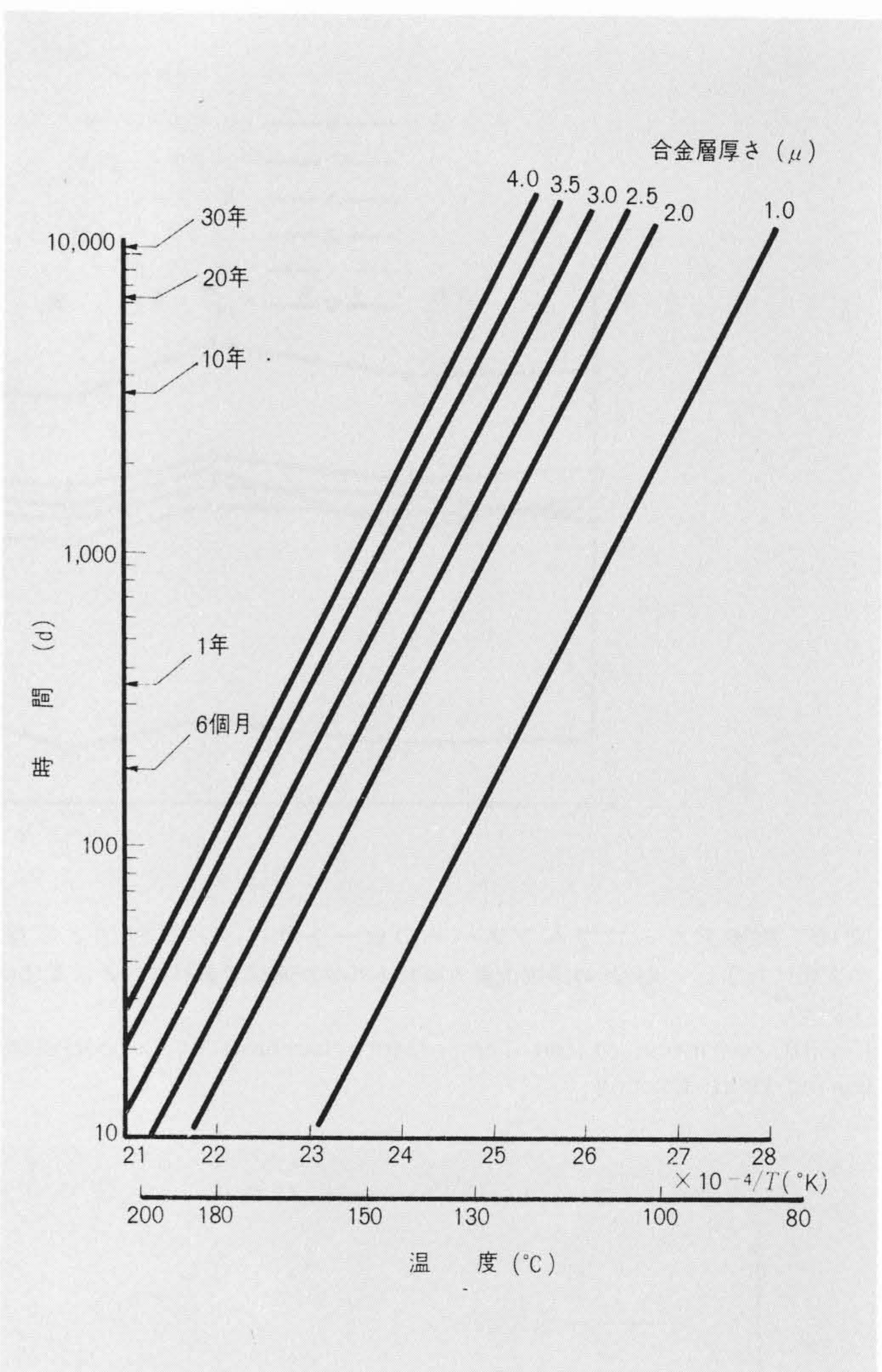
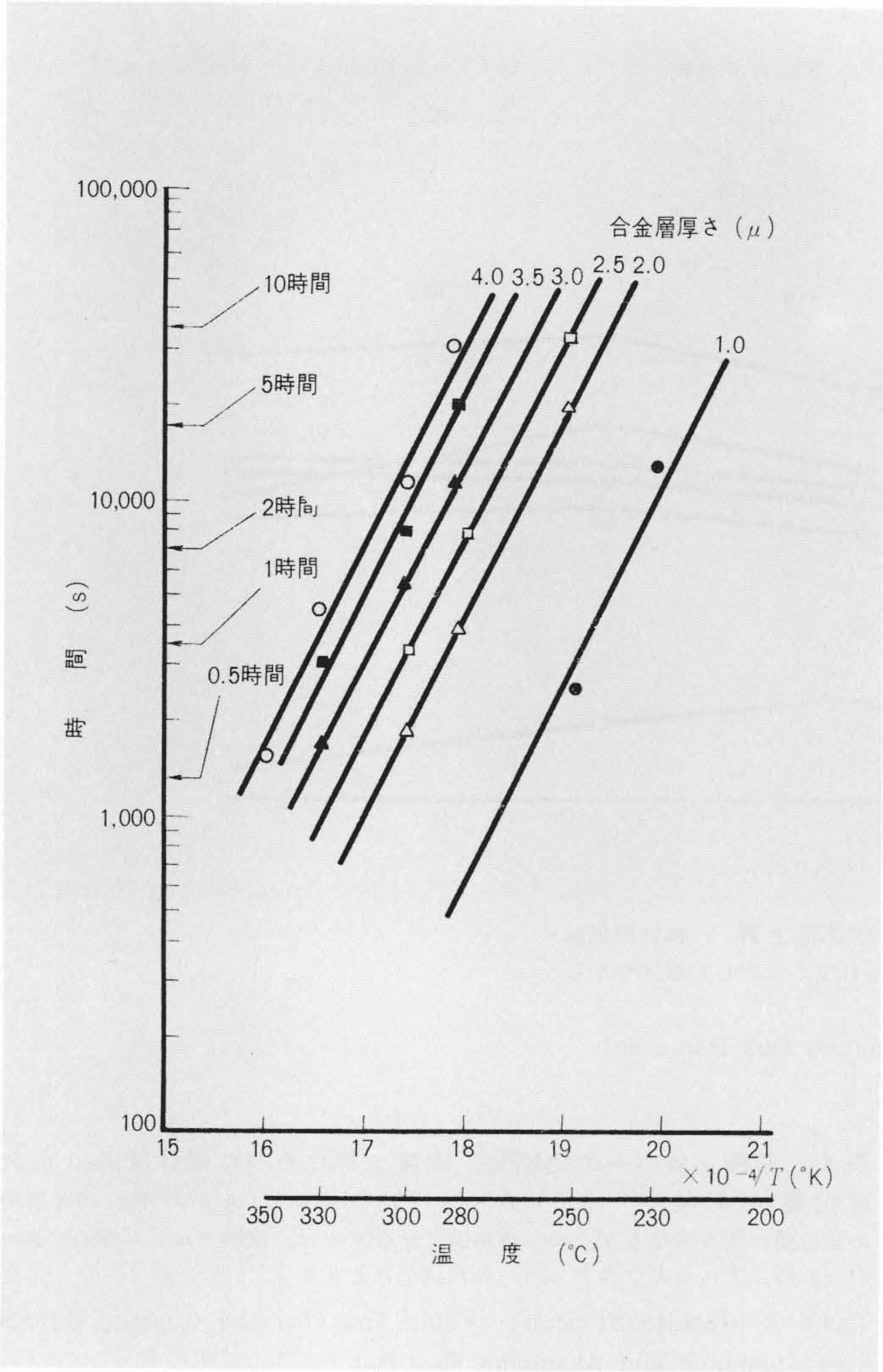


図12 銅被アルミニウムブスバーの合金層生成厚さに及ぼす加熱温度ならびに時間の影響 (I) 実験値 一定の合金層生成厚さに対して加熱時間 t の対数と温度 T の逆数の間には直線関係がある。

Fig. 12 Effect of Annealing Temperature and Time on the Thickness of the Intermetallic Compound Layer at the Inter Face between Copper and Aluminum of Copper-clad Aluminum Bus Bar (Experimental Results)

表 5 短絡試験前後の各種ブスバーの性能変化 短絡時温度上昇により各ブスバーとも若干軟化するが、銅、アルミニウムに比較し、銅被アルミニウムブスバーの軟化は軽微である。

Table 5 Tensile and Electrical Property of Copper, Copper-clad Aluminum and Aluminum Bus Bar before and after Short-circuit Testing

特性 試料	導 電 率 (%)		引張強さ (kg/mm ²)		伸 び (%)	
	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後
Cu	101.2	101.5	29.4	26.4	35	41
CA	65.5	66.6	16.6	16.0	16	19
Al	63.0	63.4	10.9	8.8	30	31

また短絡電流に対しても、短絡時温度を 250℃とし、持続時間を 2 秒とすると、1,000回短絡を起こした場合においても通常2,000秒程度であり、その結果生成する合金層の厚さは、たかだか1μ程度である。したがって、銅被アルミニウムブスバーの連続使用温度は80℃(必要なれば、105℃も可)、短絡時最高温度は、250℃まで許容される。

図13 銅被アルミニウムブスバーの合金層生成厚さに及ぼす加熱温度ならびに時間の影響 (II) 低温長時間側への外そう値 使用温度80℃においては、30年間連続使用した場合においても、合金層厚さは約1μに過ぎない。また100℃においても約2μである。

Fig. 13 Extrapolation of the Data in Fig 12 to Show the Expected Thickness of the Intermetallic Compound Layer at the Cu-Al Interface at Low Temperatures After Long Time Service

9 結 言

静水圧押出し法によって製造した銅被アルミニウムブスバーの諸性能について検討し、導電率、比重、強度などの一般的性質および曲げ、ねじり、せん孔などの加工性は、アルミニウムブスバーと同等ないしは上回っており、めっき性、耐食性ならびに電接面処理などの表面に関する性質は、銅ブスバーのそれに相当することを確認した。

終わりにあたり本研究に際して終始ご指導をいただいた日立電線株式会社研究所山路副所長ならびに実験にご協力いただいた同社電線工場、日高工場および同社研究所の関係者各位に深く謝意を表わす次第である。

参考文献

(1) 参木、三宅ほか「銅被アルミニウム材の諸性能」日立評論、54、956 (昭47-11)
(2) 川西、大内「各種金属の接触腐食の研究」日立評論 45、828 (昭38-5)