

銀コンタクトワッペン使用のアルミチャンネル母線

Aluminum Channel Bus Applying Ag Contact Wappen

中西一清* 平野剛* 岡皓一*
Issei Nakanishi Takashi Hirano Kôichi Oka
三宅保彦* 山路賢吉**
Yasuhiko Miyake Kenkichi Yamaji

要 旨

東京電力株式会社姉崎火力発電所に納入・布設した大容量アルミチャンネル母線について、その設計、製造上の諸問題および各種特性を述べる。従来この種の大容量チャンネル母線としては分岐、接続部における接触抵抗の問題から銅チャンネルが使われていたが、日立電線株式会社独自の開発になる銀コンタクトワッペン(国内および国外特許出願中)を電気接続面に使用して初めてアルミの大容量チャンネル母線の製造が経済的となった。

1. 緒 言

東京電力株式会社姉崎火力発電所において大容量アルミチャンネル母線の布設が計画された。すなわち、超高圧および局配開閉所用母線としてアルミチャンネルおよびその付属品、アルミより線および端子いっさいを含むものであり、これに日立電線株式会社が参画した。

本チャンネル母線の設計、製造について特記すべき点は、アルミ導体接続部の表面酸化に伴う接続面の特性低下を防ぐため、電気接続面に新しく開発した銀クラッド材(銀コンタクトワッペンと呼称する)を接着し安定した銀接触面としたことであり、従来のこの種母線に対する銀メッキ処理に比較して種々の長所を有するものである。

2. アルミチャンネル母線の設計

2.1 概 要

アルミチャンネル母線として必要とされた性能を表1に記す。また、母線の布設図を図1に、布設後の状況写真を図2に示す。

2.2 材質、寸法および仕様

母線材質の選定には、機械的強度と耐食性および導電率を考慮してJIS H4172耐食アルミニウム合金押出型材4種 A2S4に熱処理T6を行なったものとした。これは旧ALCOA記号61S-T6に相当するものである。母線の物理的性質、寸法および仕様を表2に示す。

2.3 強度計算

アルミチャンネル母線および使用がい子の強度計算過程の概略とその結果を簡単に下記する。

2.3.1 母線に加わる荷重

(1) 母線短絡電磁力: F_0 (kg/m)

$$F_0=0.866 \times 2.05 \times 1.5 \times \frac{I_s^2}{S} \times 10^{-8} = 24.6 \text{ kg/m}$$

ここに、0.866: 三相短絡電流値を单相短絡電流値に換算する係数⁽¹⁾

I_s : 短絡電流値 (A)

S : チャンネル相間距離 (m)

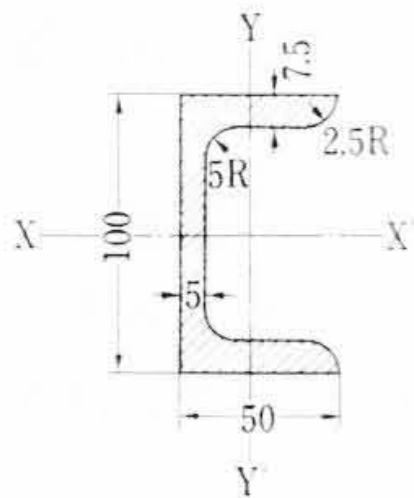
1.5: ストレスファクタであり母線系が電源周波数と共振しないとき1.5を採用⁽²⁾。

表1 アルミチャンネル母線の性能

項 目	記 号	内 容	備 考
定 格 電 圧	V	66 kV	
定 格 周 波 数	f	50 c/s	
常時電流容量	I	2,600 A	
短絡電流容量	I_s	34,700 A	直流分を含んだ値
相 間 距 離	S	1,300 mm	
支 持 間 隔	D	5,000 mm	
地 震 力	G	0.5 G	
周 囲 温 度	T	50℃	
温度上昇制限値	θ	40℃	
使 用 が い 子		DA-80854AF	日本碍子株式会社製造
布 設 条 件		屋 内 布 設	
布 設 場 所		海 岸 地 帯	
機 械 的 強 度		電磁力(34,700 A)と震度0.5Gが重畳して加わった場合、がい子および母線の安全率は3.0以上である。	
接 続 個 所		アルミ対アルミ接続面は母線最大許容温度で長期間にわたり補修が不要である。	
接 続 方 法		現地溶接作業は行なわない。	
母線支持金具		機械的安全率は3.0以上である。材質はアルミとする。	

表2 アルミチャンネル母線の特性

項 目	単 位	仕 様
種 類 お よ び 質 別		耐食アルミニウム合金押出型材4種 A2S4-T6
製 造 法		押 出 し
導 電 率	%	40 以 上
抵 抗 温 度 係 数	/℃	0.00264
線 膨 張 係 数	/℃	23.2×10^{-6}
引 張 強 さ	kg/mm ²	27 以 上
伸 び	%	10 以 上
ヤ ン グ 率	kg/mm ²	7,000
寸 法	mm	100×50×7.5(5.0) t, 下記参照
断 面 積	mm ²	1,183
直 流 抵 抗	Ω/m	3.64×10^{-5} (20℃)
電 流 容 量	A	1,600
断 面 係 数	cm ³	$Z_Y=7.82$ $Z_X=37.8$
慣 性 モ ー メ ン ト	cm ⁴	$I_Y=26.9$ $I_X=189$
重 量	kg/m	3.2



* 日立電線株式会社日高工場
** 日立電線株式会社日高工場 工学博士

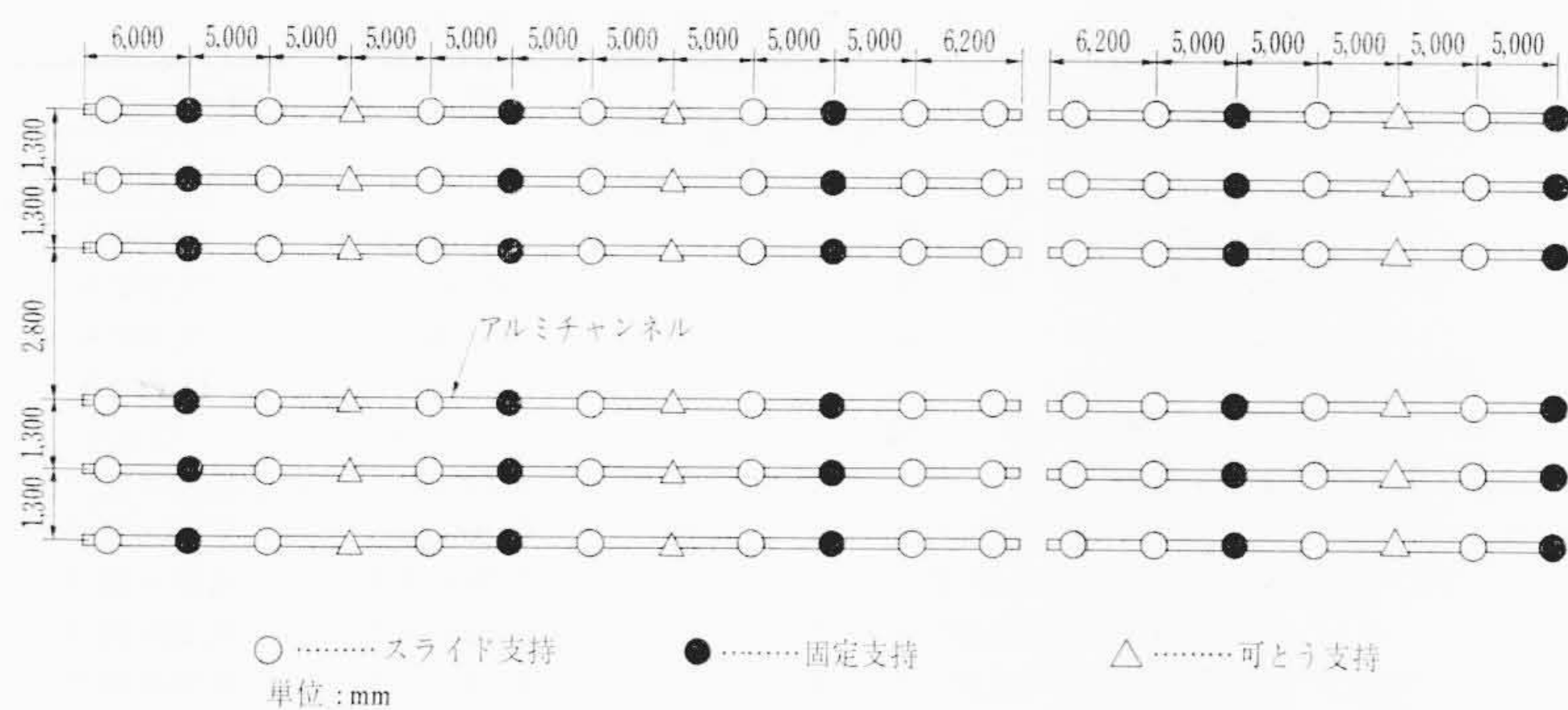


図1 アルミチャンネル母線の布設図

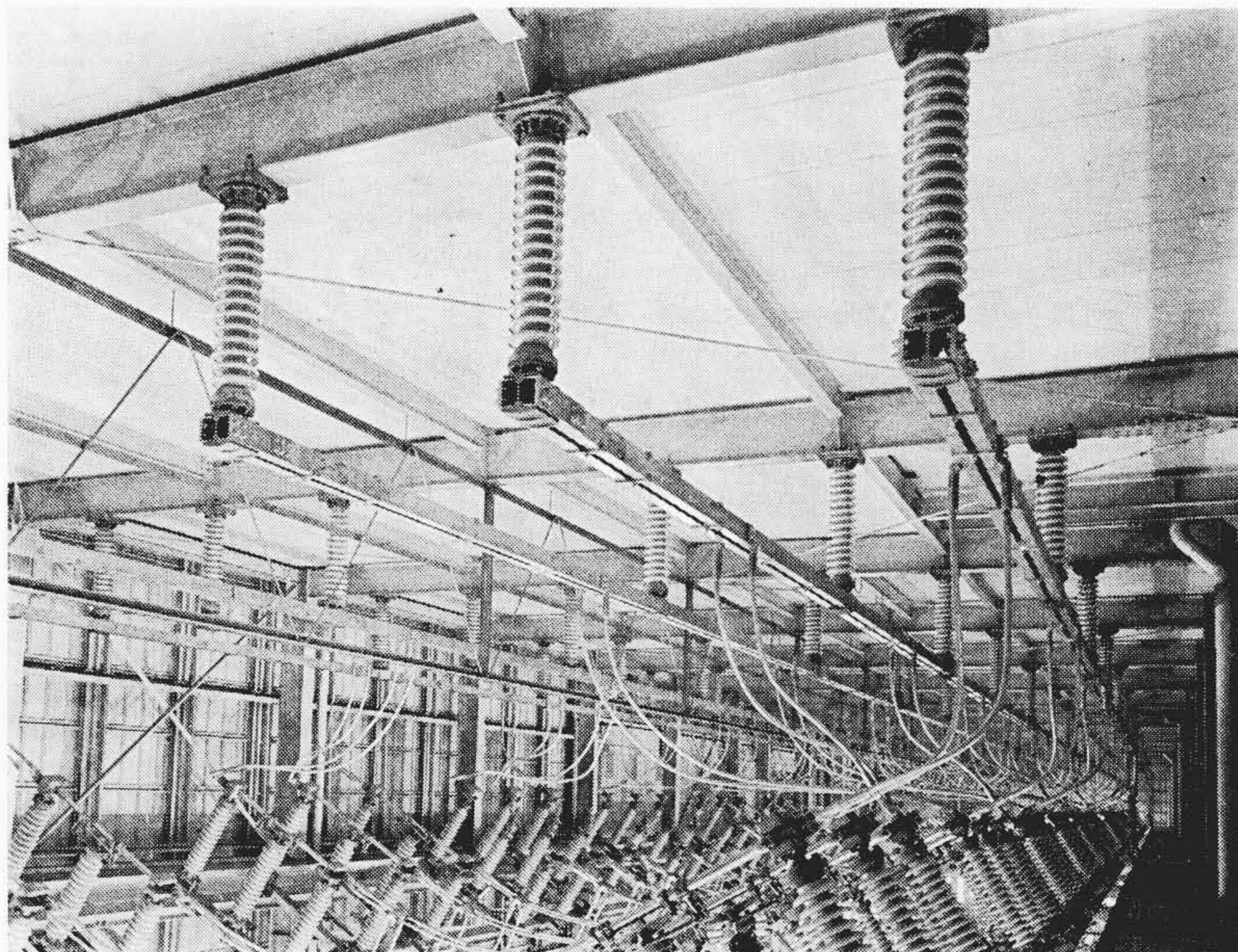


図2 アルミチャンネル母線の布設状況

- (2) 風圧荷重: F_w (kg/m)
屋内布設であるから考慮しない。 $F_w=0$
- (3) 母線荷重: W (kg/m)
チャンネル2個抱合せとする。 $W=6.4$ kg/m
- (4) 地震荷重: F_G (kg/m)
 $F_G=W \times 0.5=3.2$ kg/m
- (5) 合成荷重: F (kg/m)
 $F=\sqrt{W^2+(F_0+F_G)^2}=28.6$ kg/m
- (6) 母線に生ずる最大曲げモーメント: $M_{\max}$ (kg-m)
一端固定, 他端自由支持の条件であるから
 $M_{\max}=\frac{FL^2}{8}=89.5$ kg-m

- (7) 母線に生ずる最大曲げ応力: $\sigma_{\max}$ (kg/mm²)

$$\sigma_{\max}=\frac{M_{\max}}{2 \times Z_Y \times \alpha}=381 \text{ kg/mm}^2$$

ここに, α : スペーサによる補強係数で1.5を採用。(3.4 スペーサの補強効果参照)

- (8) 母線の拡張力に対する安全率: K

$$K=\frac{\sigma_t}{\sigma_{\max}}=7.09$$

ここに, σ_t : チャンネルの抗張力

- (9) 切欠効果を考慮した安全率: K'

チャンネルにアルミ端子取付穴(14φ×6個, ピッチ35mm)をうがった場合には応力集中により母線の安全率は低下する。すなわち, 支持間隔の中央部にジャンパー線接続用端子孔があるとき,

一端固定, 他端自由支持の場合にはチャンネル中央部における曲げ応力は $\sigma_{\max}/2$ となり, 切欠効果を考慮した形状係数を2.3⁽³⁾とすれば母線の安全率はつぎのようになる。

$$K'=\frac{\sigma_t}{\sigma_{\max} \times 0.5 \times 2.3}=6.15$$

- (10) 溶接個所の安全率: K''

チャンネル母線の布設単位長は図1のように11.2m, 10.0mおよび6.0mの3種類となるが, チャンネル単長は6.0mであるので溶接により所定長さのものとした。溶接個所の抗張力は実験結果より母線の約60%となることが判明している。なお, 溶接個所は同相チャンネル(1相あたりチャンネル2個)では同一個所とならぬように配慮した。したがって機械的安全率は4.2以上となる。

- (11) 母線のたわみ: δ (cm)

たわみは母線の自重により生ずるたわみ δ_1 (分布荷重) および母線に付属する各種端子, ジャンパー線によるものと作業員1名が母線に乗った場合を想定したたわみ δ_2 (集中荷重) との和が母線フランジ幅の1/2以下であればよいとした。すなわちチャンネルの両端が自由支持されているとして

$$\delta_1^{(4)}=\frac{5WL^4}{384EI} \text{ (cm)}$$

$$\delta_2^{(5)}=\frac{W'L^3}{48EI} \text{ (cm)}$$

ここに, W : 母線重量 (kg/cm)

W' : 端子, ジャンパー線および作業員一名 (計130kg)

E : 弾性係数 (kg/cm²)

I : 慣性モーメント (cm⁴)

これより, 支持径間中央部におけるたわみ δ は

$$\delta=\delta_1+\delta_2=1.5 \text{ cm}$$

となりわずかである。

2.3.2 がい子に加はる荷重

がい子に作用する力は曲げ荷重およびねじりモーメントであり, 電磁力と地震荷重によって生ずる。がい子は日本碍子株式会社製DA-80854AFである。結果はいずれも十分な安全率を有している。

2.4 チャンネル母線の許容電流

チャンネル母線に対する許容電流の計算式は Melson and Booth の式⁽⁶⁾によった。すなわちチャンネル1個あたりの電流容量を I_1 とすれば

$$I_1=\sqrt{\frac{P\theta^{1.25}h}{R_{ac}\cdot\alpha}} \text{ (A)}$$

で示される。

ここに, P : チャンネル断面における周囲長さ (cm)

θ : 温度上昇値40°C (基底温度50°C)

h : $\frac{K}{P^{0.14}}$ (K は熱放散係数であり表面無塗装であるから 5.0×10^{-4} とした)

R_{ac} : 90°Cにおける母線の直流抵抗 (Ω/cm)

α : 表皮係数

これより $I_1=1,640$ A となる。したがってチャンネル2個を抱合せた場合, 母線の電流容量 I は低減係数0.95を考慮しても3,120 A となり常時電流容量2,600 A に対して十分安全である。

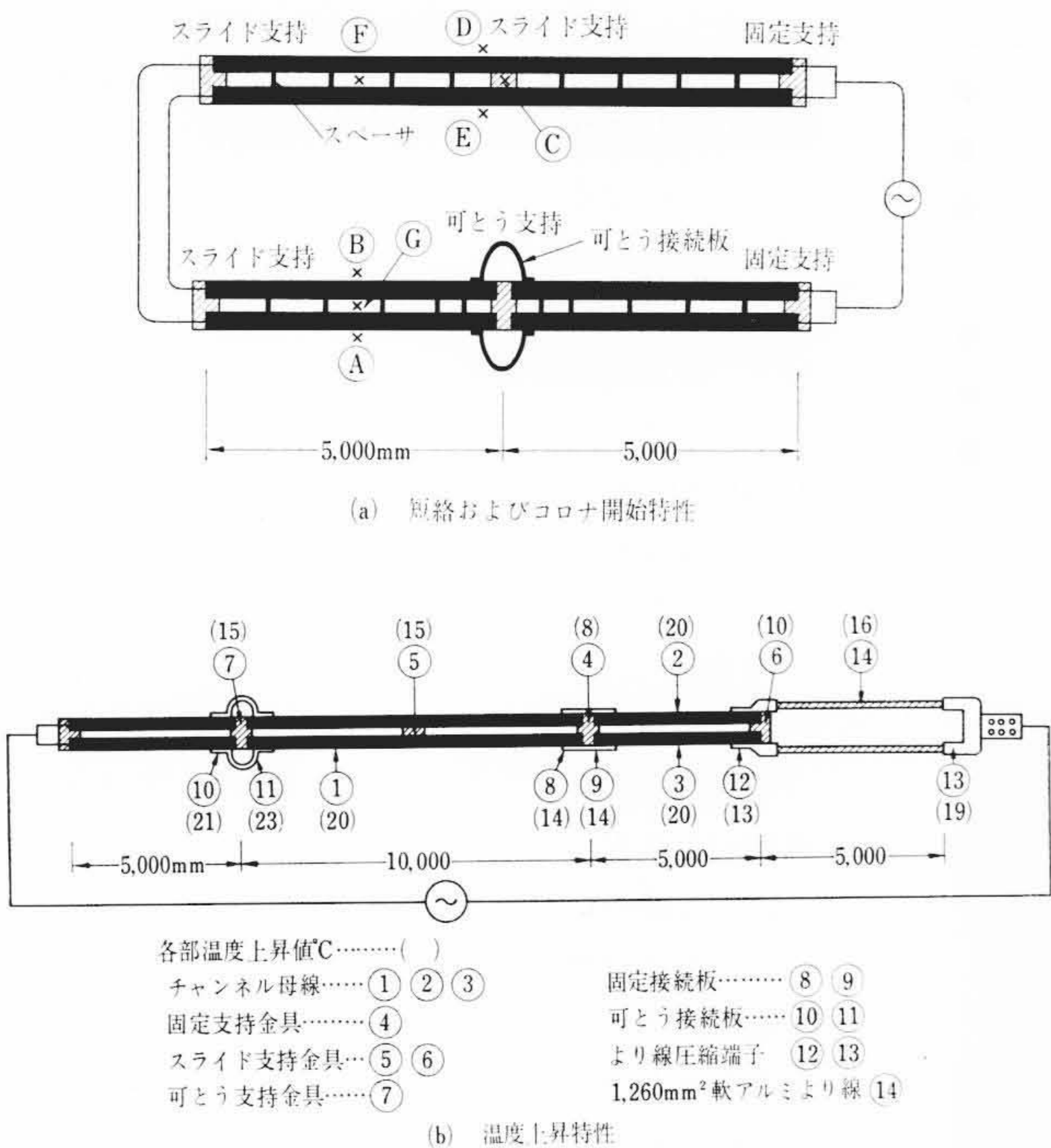


図 3 試験試料の組立状況

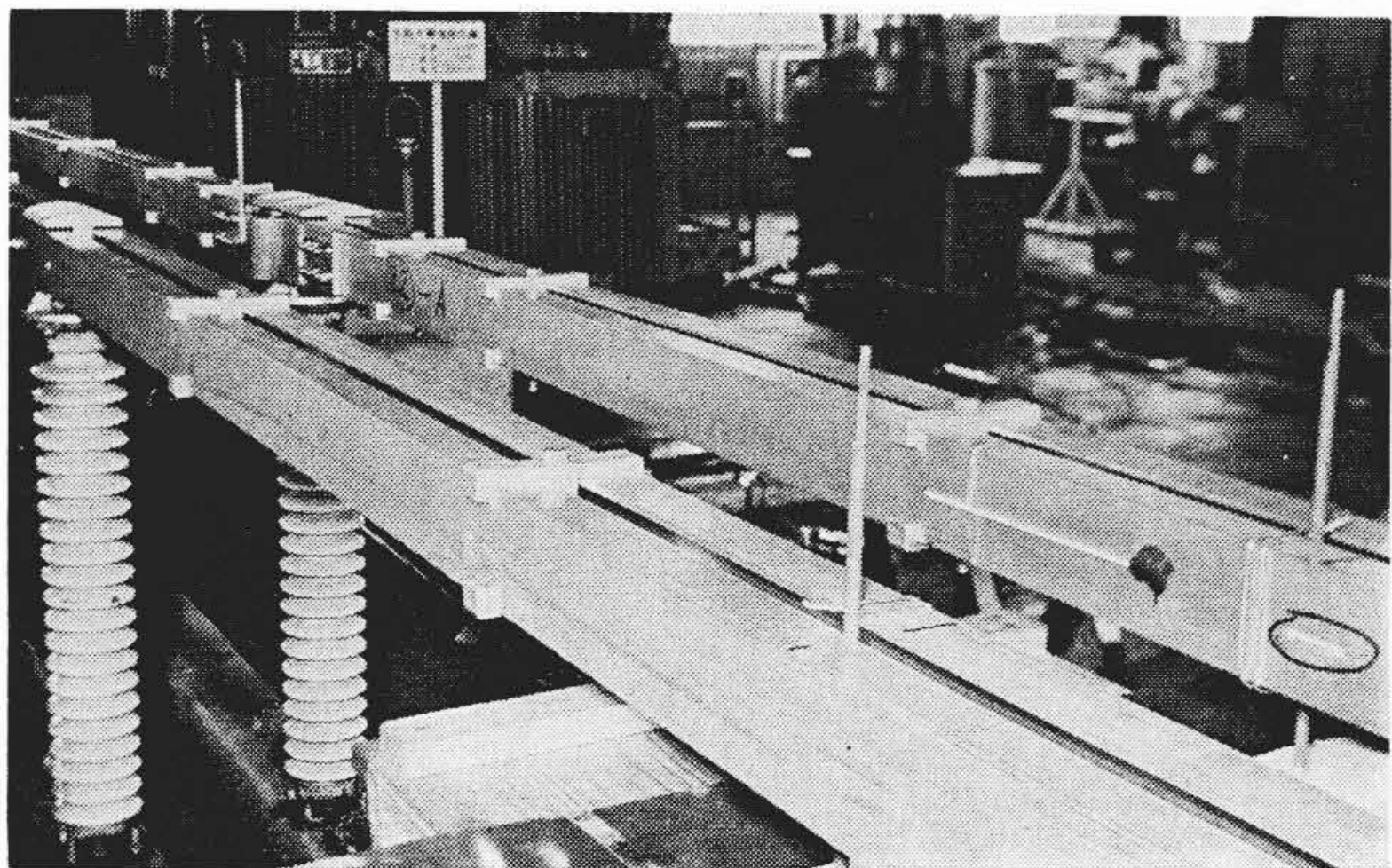


図 4 短絡試験状況

3. チャンネル母線の特 性

本母線の各種特性をは握するため、チャンネル母線および付属品を現場組立と同様な状態とし、短絡電流通電時の諸特性、定格電流通電による温度上昇およびコロナ特性について検討した。またチャンネル母線にスペーサを使用したとき、その機械的補強効果についても検討を行なった。

3.1 短 絡 特 性

短絡時の電磁力は 24.6 kg/m であるが、チャンネル自重および地震荷重を考慮すると最も過酷な場合には 28.6kg/m の力がチャンネルに作用することになる。試験は日立電線株式会社にて行なったが、試験装置の関係から最大可能通電電流は 20 kA 程度であった。したがって、実際布設チャンネルの相間距離は 1,300 mm であるが、短絡試験の目的から相間距離を 430 mm に短縮し 20 kA 通電時に 28.6 kg/m の電磁力が発生するようにした。

チャンネルおよび各種付属品の配列を図 3 に、試験状況を図 4 に示す。測定結果よりチャンネルの最大ひずみは支持端近傍に表われ 1.04×10^{-4} および 0.96×10^{-4} であり、また支持金具の最大ひずみは最も過酷な荷重を受持つスライド支持金具でも 0.70×10^{-4} および 0.21×10^{-4} である。チャンネル母線の抗張力は 27 kg/mm² であり、ひずみから求めた応力は約 0.7 kg/mm² となるから十分な安全率を

表 3 短絡電流試験結果

項 目	場 所	測 定 結 果	
		1 回 目	2 回 目
瞬 時 波 高 値	—	24,700 A	24,700 A
瞬 時 実 効 値	—	17,500 A	17,500 A
波 高 値	—	17,700 A	21,200 A
実 効 値	—	12,500 A	15,000 A
通 電 時 間	—	12 c/s	12 c/s
チャンネル中央部ひずみ (1)	Ⓐ	0.42×10^{-4}	0.45×10^{-4}
チャンネル中央部ひずみ (2)	Ⓑ	0.48×10^{-4}	0.52×10^{-4}
スライド支持金具ひずみ	Ⓒ	0.70×10^{-4}	0.21×10^{-4}
チャンネル支持端近傍ひずみ (1)	Ⓓ	0.42×10^{-4}	0.28×10^{-4}
チャンネル支持端近傍ひずみ (2)	Ⓔ	1.04×10^{-4}	0.96×10^{-4}
チャンネル中央部変位 (1)	Ⓕ	—	26 mm
チャンネル中央部変位 (2)	Ⓖ	—	49 mm
チャンネル温度上昇	—	1℃ 以下	—
チャンネル固有振動数	—	8.5 c/s	8.5 c/s

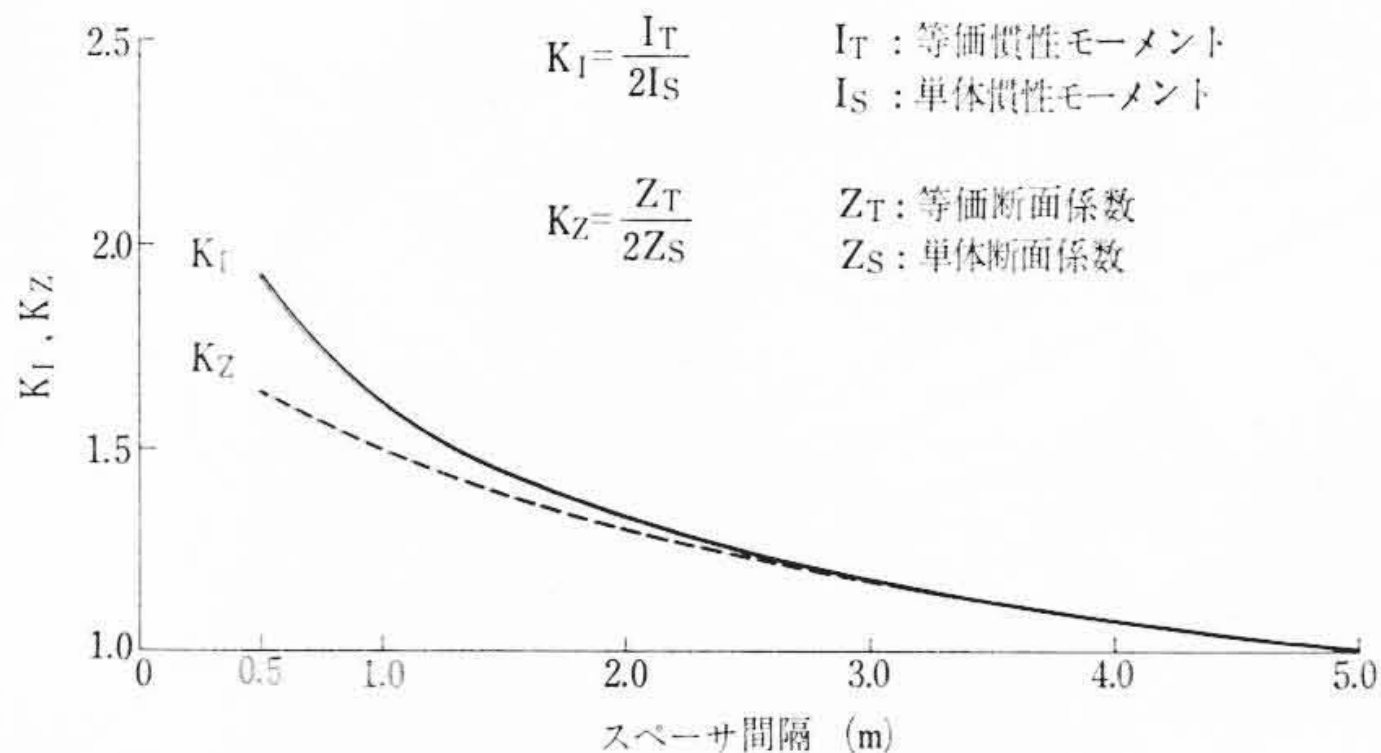


図 5 スぺーサの補強効果

有することがわかる。短絡電流試験結果は表 3 に示すとおりである。

3.2 温度上昇特性

チャンネル、アルミより線および支持金具、各種端子などを図 3 のように現場組立とほぼ同じ状態とし、密閉した室内において A. C. 2,600 A 連続通電時における各部の温度上昇を測定した。温度上昇値は周囲温度 14.5℃ において最大 20℃ であった。これは Melson and Booth の式より求められる値 24℃ に対して若干低い、熱放散係数の若干の相異およびわずかの室内対流によるものと考えられる。

3.3 コロナ開始電圧

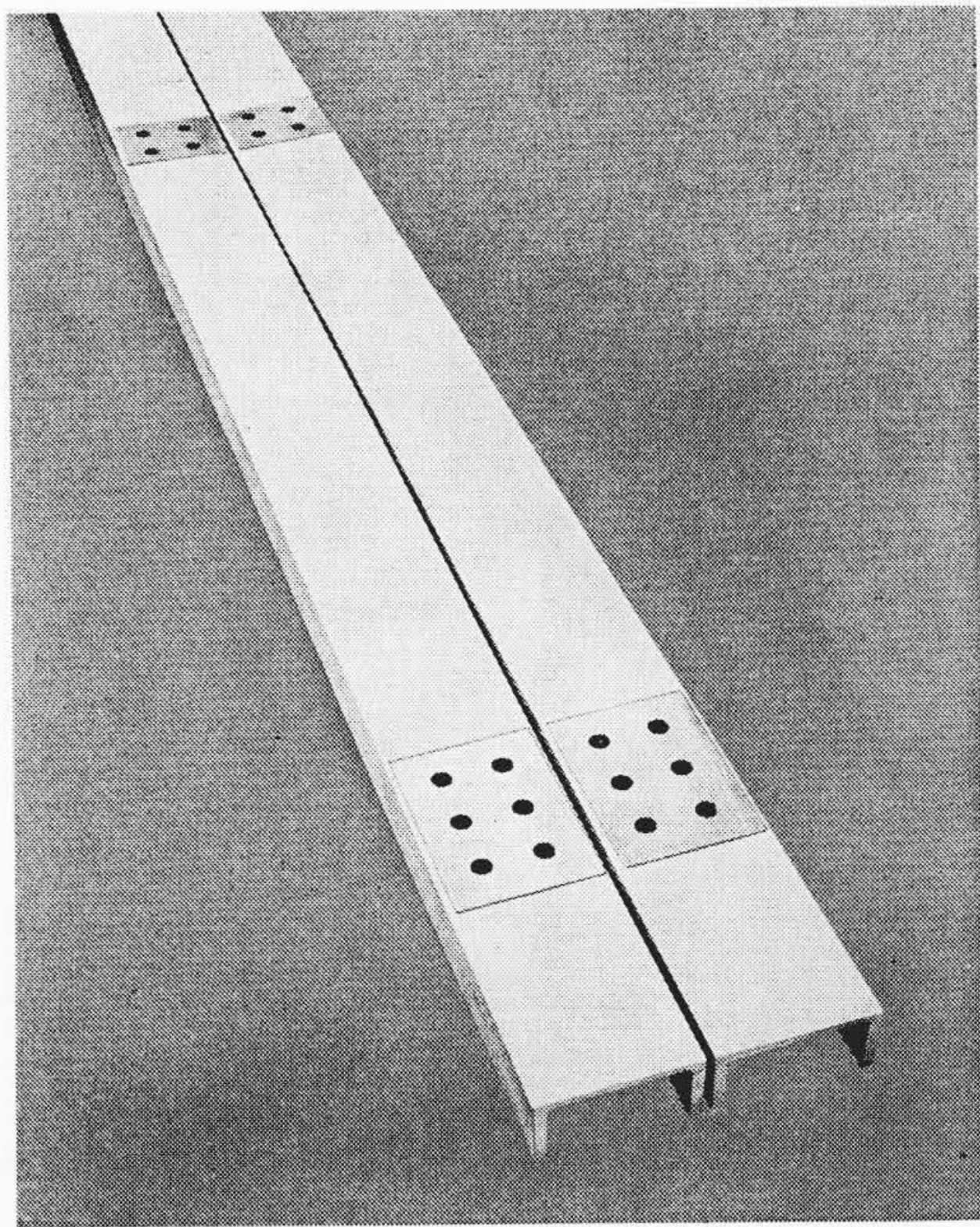
図 3 に示した試料について、暗室内で肉眼により乾燥および注水時における可視コロナ開始電圧を観測した。ただし相間距離は 1,300 mm としてある。本チャンネル母線は系統電圧 66 kV においては、乾燥時はもちろん、結露の際にもチャンネル、支持金具、接続板そのほかいずれの部分からも可視コロナは発生しないことが確認された。

3.4 スぺーサの補強効果

本母線は一相につきチャンネル 2 個を抱合せとし、またスペーサを 1 m 間隔に取り付けてある。このためスペーサによるチャンネル母線の機械的補強効果が期待できる。すなわち、チャンネル 2 個を抱合せ両端自由支持とし、スペーサ間隔を適宜変えた場合のチャンネル一相 (2 個抱合せ) の慣性モーメント I_T および断面係数 Z_T を測定し、これとチャンネル 1 個の場合との比較を行なった。 I_T の増加はチャンネルたわみの減少の割合より求め、 Z_T の増加はチャンネル中央部に生じたひずみの減少の割合より求めた。その結果を図 5 に示す。これよりスペーサの取付間隔を 1 m としたとき I_T 、 Z_T とも 1.5 倍以上増大することがわかる。

4. 可とう接続板の特性

チャンネル母線は熱的伸縮を常時くり返している、可とう接



(a) アルミチャンネルの電気接統面

【(a) 銀 (b) 銅 (c) アルミはんだ】銀コンタクトワッペン
(d) アルミ母材

(b) 電気接統面の断面

図6 銀コンタクトワッペンによるアルミ電接面

統部は導電作用のほかに長期にわたって良好な伸縮作用を行なうことが保証されなければならない。母線の支持方法は図1に示すように固定——スライド——可とう——スライド——固定のくり返しであり、各区間は5mであるから熱的伸縮よりみると20mの長さの伸縮を一個所の可とう接統部で受持つことになる。可とう部の温度上昇、短絡電流、コロナ特性については前述のように良好であり以下疲労特性について述べる。可とう接統板は幅100mm、厚さ0.52mmのアルミニウム条1種A1R1-0を20枚積層し両端にアルミ接統板を溶接したものである。このような可とう接統板に対して疲労試験装置を用い接統板の一方を固定し、他端に荷重計を取り付けクランク機構により往復運動させた。変位は圧縮方向に32mm、引張方向に14mmとした。これは母線最高温度90℃、最低温度-10℃として算出した値である。繰返し伸縮速度は45回/分である。疲労試験35,000回後の可とう部における最大ひずみは0.14%であり、これは疲労試験の初期における値とほとんど同じであった。引続き試験を行なったが100,000回でも異常がなかったので以後の試験を中止した。仮に1日1回の伸縮が繰り返されたとすると約30年間で10,000回程度であることからみてこれは十分な特性である。

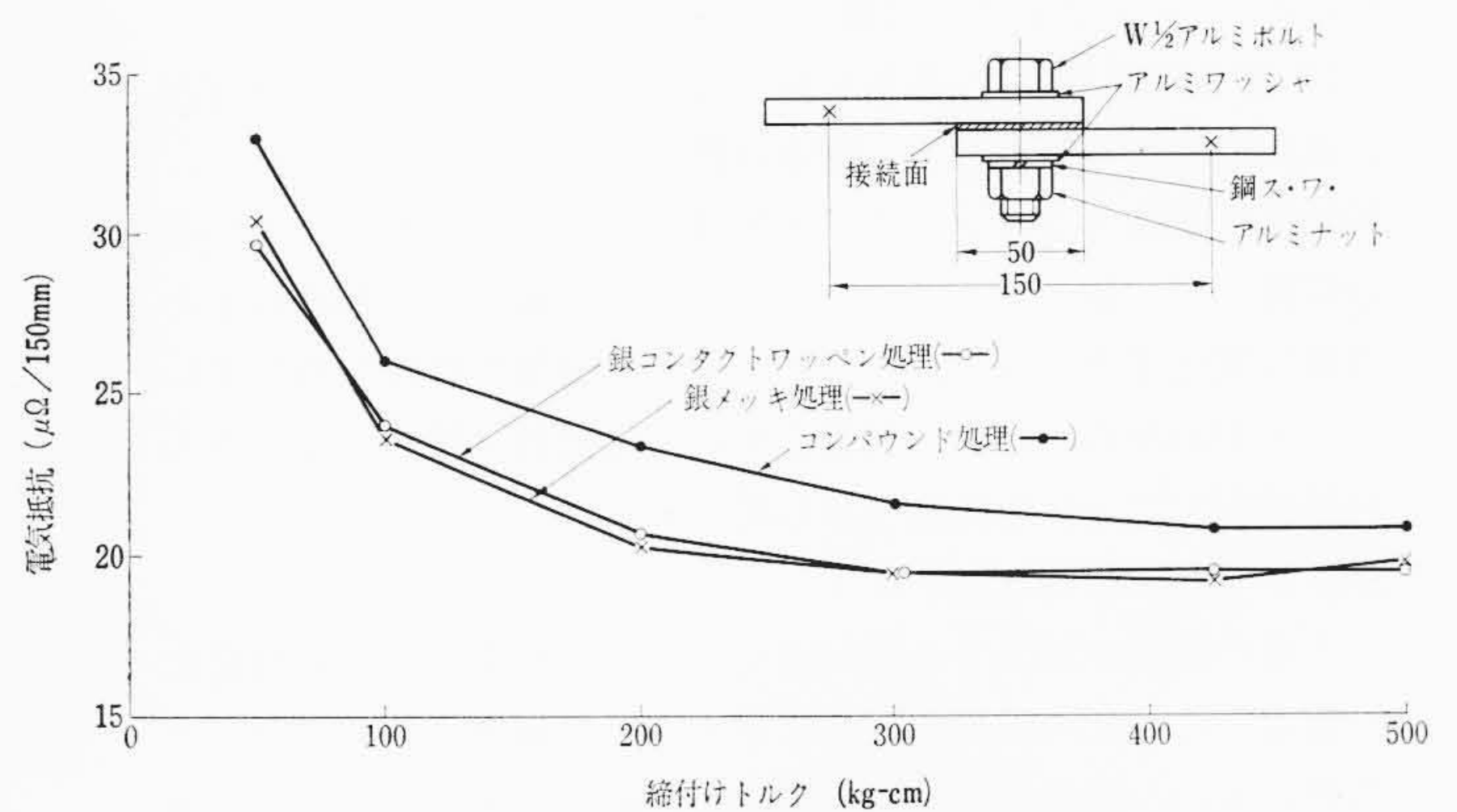


図7 接触抵抗試験結果

5. 銀コンタクトワッペンを使用した電気接統面

5.1 銀コンタクトワッペンの概況

昭和40年末ころから導電材料としてのアルミの使用が広範囲にわたってきた。その際、問題となるのはアルミの電気接統面の処理方法である。すなわち、アルミの表面に生ずる密な酸化被覆による影響を防ぐことであり、このため電気接統面処理方法としてジョイントコンパウンドを塗布したり銀メッキを行ったりしている。コンパウンドによる方法は点検作業時においてコンパウンドはく離、再塗布などの繁雑さがあり、最大使用温度はメッキよりも低い値とすべきであるとの意見⁽⁷⁾もあり、そのほかにも多少の問題点が残されている。銀メッキは銀自体の耐食性が良好なこと、銀の酸化物、硫化物が導電性であるため接触抵抗が低いこと、銀接触の電気接統面の最大使用温度は95~105℃と高くとられていることなど多くの長所をもっている。しかし長尺ブスバーの局部に対して銀メッキを行なう場合には大規模の設備を要し、工程数が多く(アルミに銀メッキを行なうには、まず亜鉛メッキ、つぎに銅メッキを行ない最後に銀メッキする。またメッキ部以外の導体表面をマスクしなければならない。)高価なものとなる。さらにアルミ端子などの鋳物では、表面に生じやすいピンホールのため作業管理が不十分な場合には、いわゆる火ぶくれ現象が生ずるなど満足なメッキができない場合がある。

上記のような状況により、日立電線株式会社においては銀接統面の長所を生かした銀コンタクトワッペン(銀-銅-アルミはんだの銀クラッド材)をアルミ母材の電気接統面に接着して良好な銀接統面を得る方法を開発した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

5.2 銀コンタクトワッペンによる電気接統面

この電気接統面の代表的なものは銀-銅-アルミはんだ-アルミ母材の構成となり、これらの厚さ比は使用目的によって自由に選択できる。なお、銀コンタクトワッペンとアルミ母材との境界面には異種金属の接触によるガルバニック・アクションを防止するためエポキシ系塗料を塗布している。銀コンタクトワッペンによるアルミチャンネルの電気接統面の状況および断面写真を図6に示す。

各種の電気接統面の性能を比較するため5t×40W×120Lのアルミバーを使用し、銀コンタクトワッペン、銀メッキ、コンパウンドの三者について以下に述べるような性能試験を行なった。

5.2.1 接触抵抗試験

ボルトのトルクを増加させながらブスバー両端の電気抵抗を測定した。結果は図7に示すように銀コンタクトワッペンおよび銀メッキ処理のものはコンパウンド処理に比較して抵抗が低く、とくに締付けトルクが小さいときには接触抵抗が低いことがわかる。

5.2.2 ヒートサイクル試験

120°C 1時間加熱後、自然冷却のヒートサイクルを700回行ない抵抗の変化を測定した。図8は抵抗の変化を示したもので、700回の試験ではコンパウンド処理のものが多少増加しているのに対して、銀コンタクトワッペンおよび銀メッキ処理のものの抵抗変化はきん少であり、この両者は同等の性能を有していることがわかる。なお、三者ともに接触抵抗の絶対値は小さく接触面として十分な性能を示している。

5.2.3 屋外暴露試験

工場内建屋の屋上で暴露試験を行ない、6ヶ月間の抵抗変化を測定した。その結果を図9に示す。この場合もコンパウンド処理のものの抵抗増加は多少あるが、銀コンタクトワッペンおよび銀メッキ処理のものにはほとんど変化が見られない。暴露場所は海岸より約2kmの地点である。アルミバー自体もすでに若干腐食が始まって変色し、銀も硫化して変色しているが、接触抵抗の変化は認められなかった。また銀コンタクトワッペンの周囲に塗布したエポキシ系塗料も健全で接触腐食は認められなかった。

6. 結 言

東京電力株式会社姉崎火力発電所に布設されたアルミチャンネル母線について述べた。チャンネル母線は長期にわたって安定した特性を保持することが必要であり、これらを十分満足すべき性能を持ったアルミチャンネル母線を製造、布設することができた。

- (1) アルミチャンネルの接続に際して現場溶接を行わず、すべてボルト締めとした。
- (2) このため、アルミ導体電気接続面の処理方法として、新開発になる銀コンタクトワッペン（銀-銅-アルミはんだのクラッド材）を電気接触面に接着することにより銀接触面とした。
- (3) 母線および付属品を現場組立と同様に接続し、温度上昇試験、短絡電流通電試験を行ない性能を確認した。
- (4) 母線の熱伸縮をあずかる可とう接続板について疲労試験を行ない寿命特性を確認した。
- (5) スペーサ取付けに伴うチャンネルの機械的補強効果を実験により求めた。

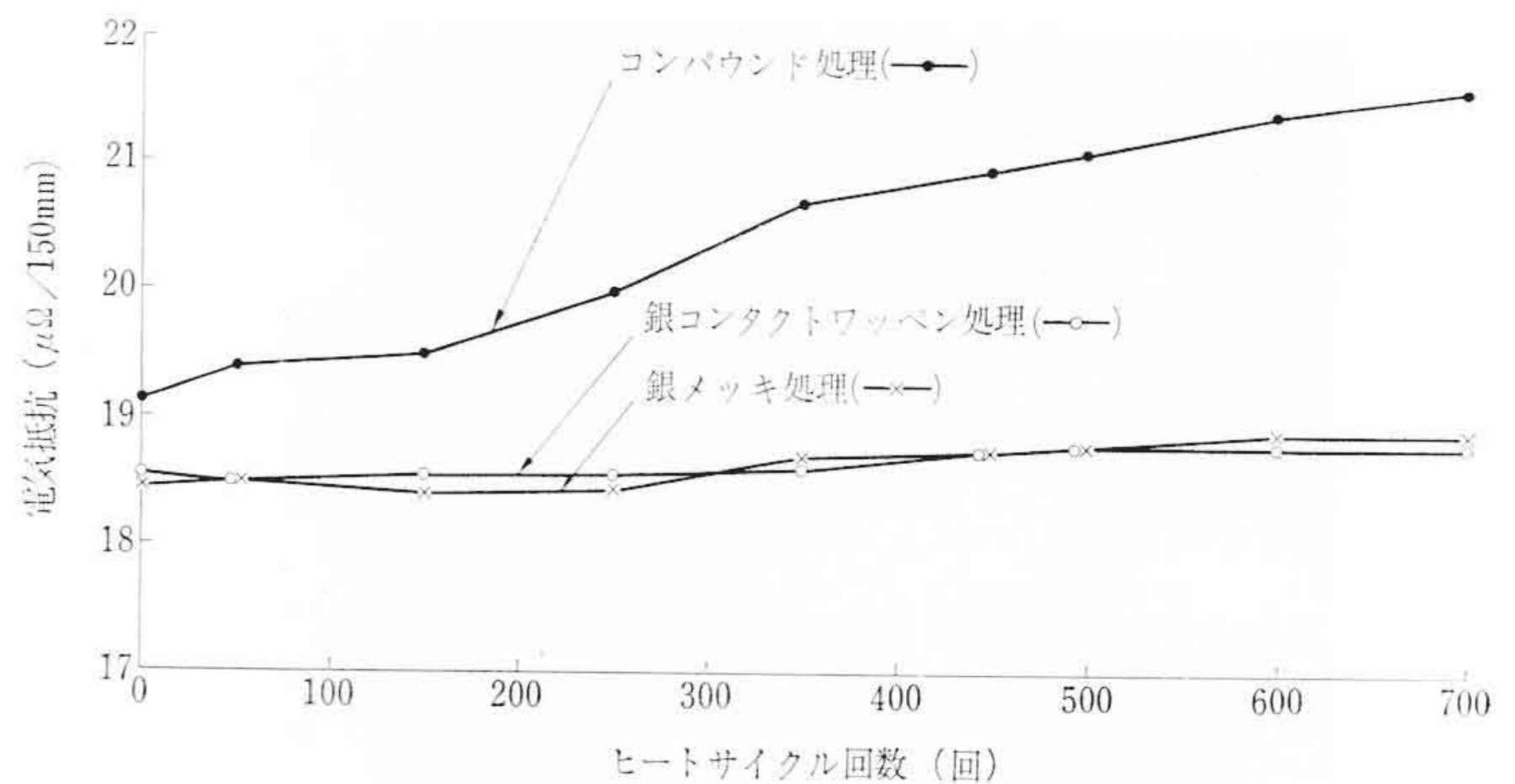


図8 ヒートサイクル試験結果

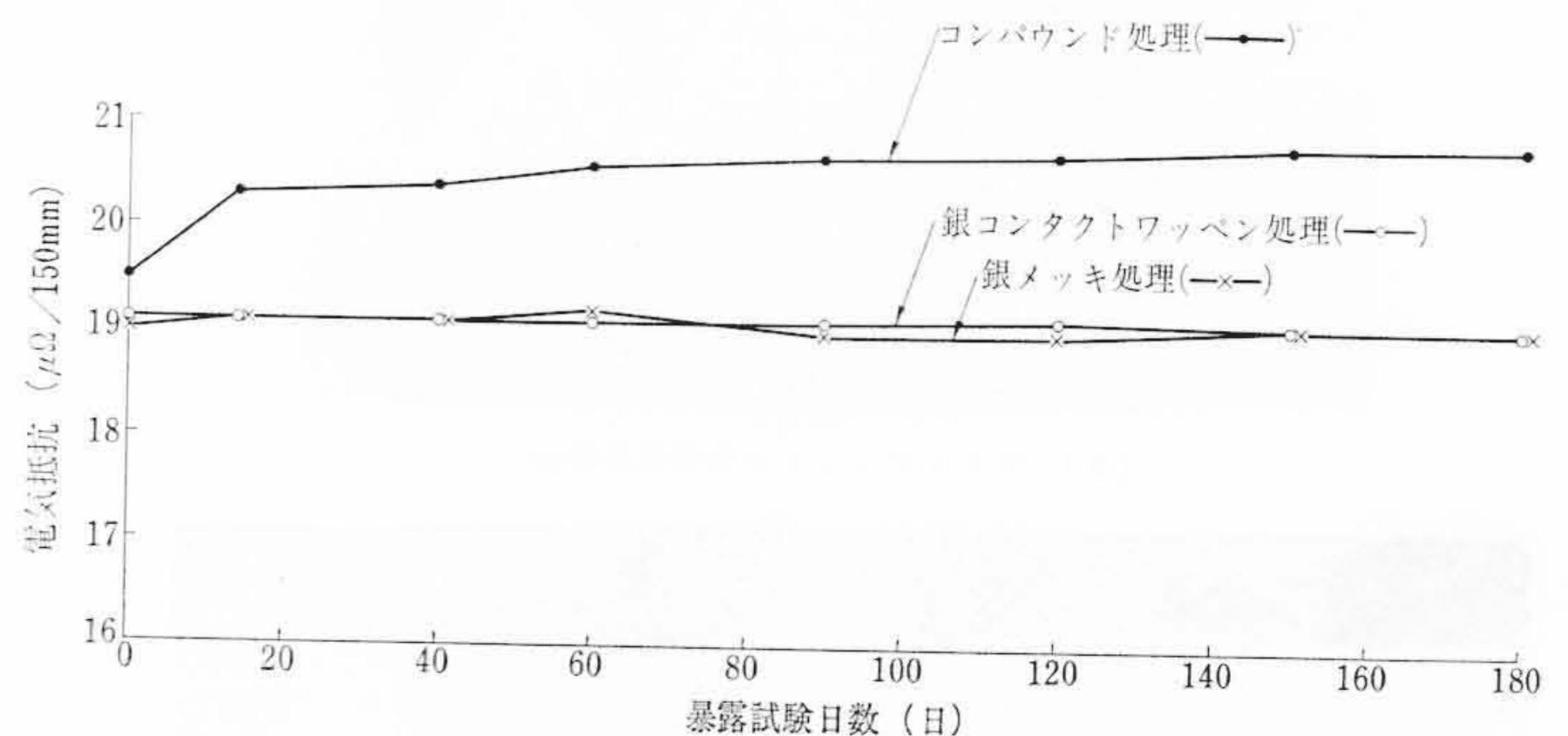


図9 屋外暴露試験結果

最後に本母線の開発にあたり終始ご指導を賜った東京電力株式会社の関係者のかたがたに厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 電気協同研究会：第20巻，第7号（昭39-10）
- (2) O.R. Schurig, M.F. Sayre: Tr. AIEE Vol. 44, 217 (1925)
- (3), (4), (5) 日本機械学会：機械工学便覧
- (6) S.W. Melson, H.C. Booth: JIEE Vol. 19 (1925)
- (7) 日本電機工業会：資料85号 アルミニウム導体（1966-11）
- (8) 山路，高橋ほか：電気学会東京支部大会 85（昭41-10）
- (9) 山路，高橋ほか：電気学会東京支部大会 86（昭41-10）