

# アルミ被鋼線の瞬時電流容量

## Short-circuit Current Carrying Capacity of Aluminum-clad Steel Wire

田 中 昭\* 沼 尻 文 哉\*  
Akira Tanaka Fumiya Numajiri

### 内 容 梗 概

亜鉛メッキ鋼線の上に電気用アルミを圧接被覆したアルミ被鋼線の瞬時電流容量を決定するため、素線とより線の両方について通電実験を行なった。

実験の結果、全熱量と温度上昇の間には一定の関係があること、より線の温度上昇を求めるためには内部の温度こう配を考慮しなければならないこと、アルミ被鋼線の最高許容温度は400°Cにできることなどがわかった。この結果に基づくとアルミ被鋼より線の瞬時電流容量は同じ径の架空地線用鋼より線や鋼心イ号アルミ合金より線に比較して30~50%大きいことが示される。

### 1. 緒 言

架空送電線には雷遮へいと誘導防止の目的で架空地線が使用されている。この架空地線用電線にはこれまで鋼より線が使われてきたが、最近では送電線の送電電圧の上昇と短絡容量の増大にともなって導電性が高い鋼心イ号アルミ合金より線や、導電性が高く耐食性もすぐれているアルミ被鋼より線が採用されるようになってきている。

架空地線用電線の大きさを決める要因に瞬時電流容量、すなわち雷電流のように非常に大きい電流がごく短時間流れた場合の電流容量がある。アルミ線やイ号アルミ合金線の瞬時電流容量はアルミ裸電線電流容量専門委員会で検討されており<sup>(1)</sup>、最高許容温度をそれぞれ180, 150°Cとして計算されている。

アルミ被鋼線は亜鉛メッキ鋼線の上に、電気用アルミを均一、完全に圧接被覆したものであり<sup>(2)</sup>、このような複合電線の瞬時電流容量の研究はこれまで行なわれていないようである。このためアルミ被鋼線の素線とより線の短時間通電時の温度上昇と引張強さの低下率を検討した。同時にそれをアルミ線や亜鉛メッキ鋼線の特性と比較して、その瞬時電流容量の決定に必要な資料を得ることができた。なお種々の計算には電子計算機 HITAC 3010 を利用した。

### 2. 通 電 実 験

通電実験に使用した試料のうち、素線は同一外径でアルミ厚さが違う特強アルミ被鋼線2種類(以下EASと略称する)、比較用として同径の硬アルミ線(以下Alと略称する)、および亜鉛メッキ鋼線(以下Stと略称する)各1種類の合計4種類である。またより線の試料は7本より、19本よりのEAS各1種類と、比較用として同じ構成のアルミより線各1種類、および一般架空地線用鋼心イ号アルミ合金より線と同じ構成の鋼心アルミより線2種類(以下ACSRと略称する)の合計6種類である。これら各試料の寸法と性能は第1表のとおりである。

通電実験回路を第1図に示す。素線は金属光沢の表面のまま通電したがより線はエージングを模擬するため表面を黒くぬった。通電を50~、2,000 kVA 大電流発生装置を使用して行ない、通電時間は0.5秒と2.0秒の2種類とした。通電時の電流・電圧および熱電対の出力は電磁オシログラフに記録され、通電時間の選択はロータリースイッチで行なわれた。また試料の電流遮断後の表面放熱特性は温度測定用mV計を用いた熱電温度測定装置で測定された。なお、実験はどの種類もそれぞれ数本ないし十数本の試料についてくり返された。

素線の実験結果を第2表に、より線の実験結果を第3表に示す。

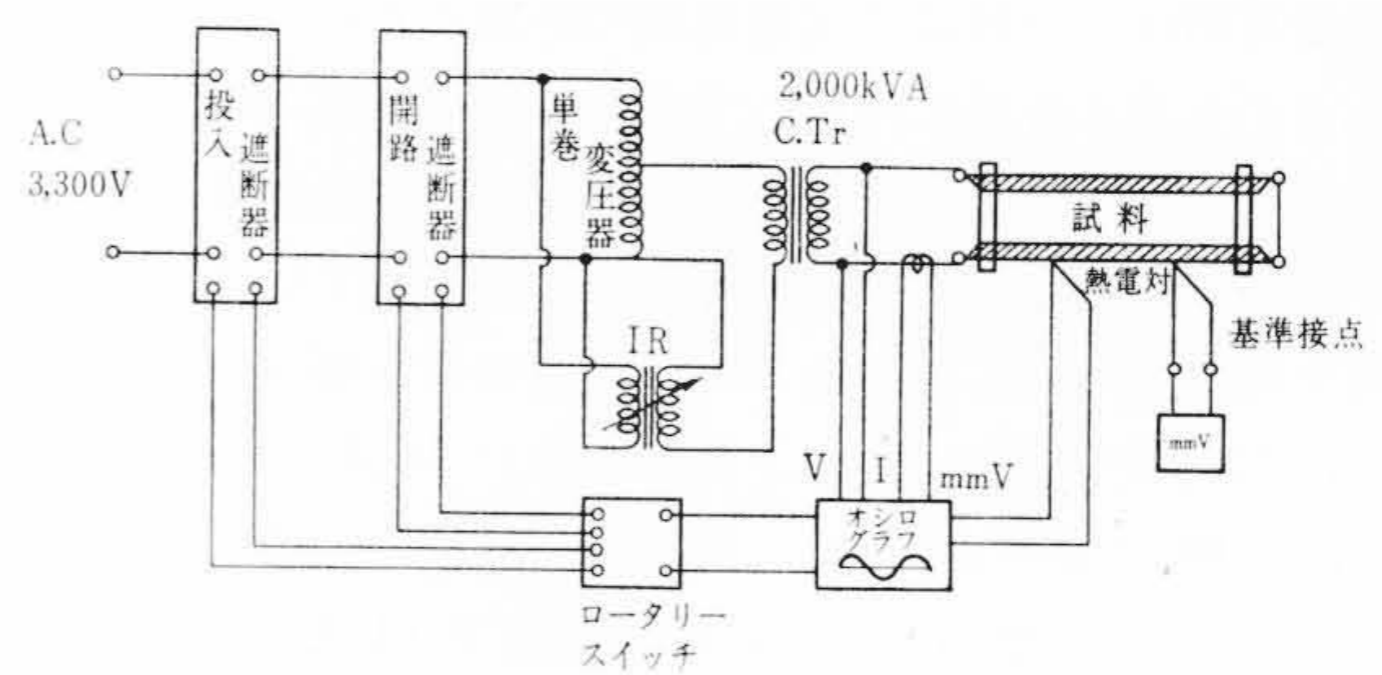
\* 日立電線株式会社日高工場

第1表 試料の寸法と性能

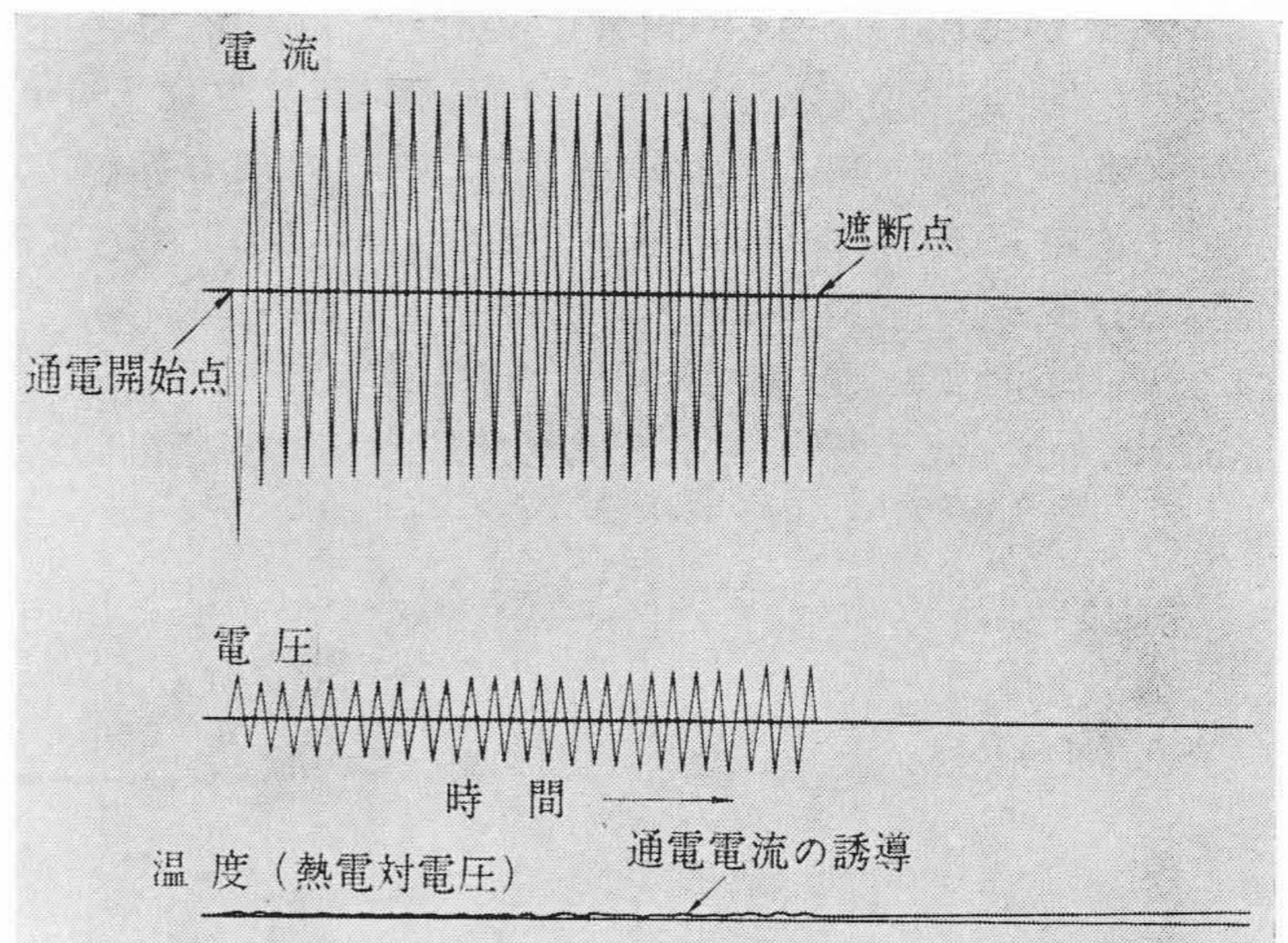
(a) 素 線							
種 類	寸法と略号 (mm)	直流抵抗(20°C) (Ω/km)	計算断面積 (mm <sup>2</sup> )			直流抵抗 (20°C) (Ω/km)	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )
			アルミ	鋼	計		
硬 アルミ線	3.2 Al	3.39					18.82
亜鉛メッキ鋼線	3.2 St	25.2					149.7
特強アルミ被鋼線	3.2(0.35)EAS	5.87					120.7
同 上	3.2(0.65)EAS	4.82					73.91

注：1. 特強アルミ被鋼線の寸法中カッコ内の値は標準アルミ厚さを示す。  
2. 直流抵抗と引張強さは実測値を示す。

(b) より線							
種 類 (mm <sup>2</sup> )	構 成 (mm)	外径 (mm)	計算断面積 (mm <sup>2</sup> )			直流抵抗 (20°C) (Ω/km)	最小引張荷重 (kg)
			アルミ	鋼	計		
150 Al	19/3.2 Al	16.0	152.8	0.0	152.8	0.188	2,270
55 Al	7/3.2 Al	9.6	56.3	0.0	56.3	0.507	838
120 ACSR	12/3.5Al+7/3.5St	17.5	115.5	67.3	182.8	0.233	9,590
79 ACSR	12/2.9Al+7/2.9St	14.5	79.3	46.2	125.5	0.366	6,820
100 EAS	19/3.2(0.65)EAS	16.0	98.9	53.9	152.8	0.268	9,780
36 EAS	7/3.2(0.65)EAS	9.6	36.4	19.9	56.3	0.729	3,600



第1図 通電実験回路



第2図 電流、電圧および温度オシログラムの一例



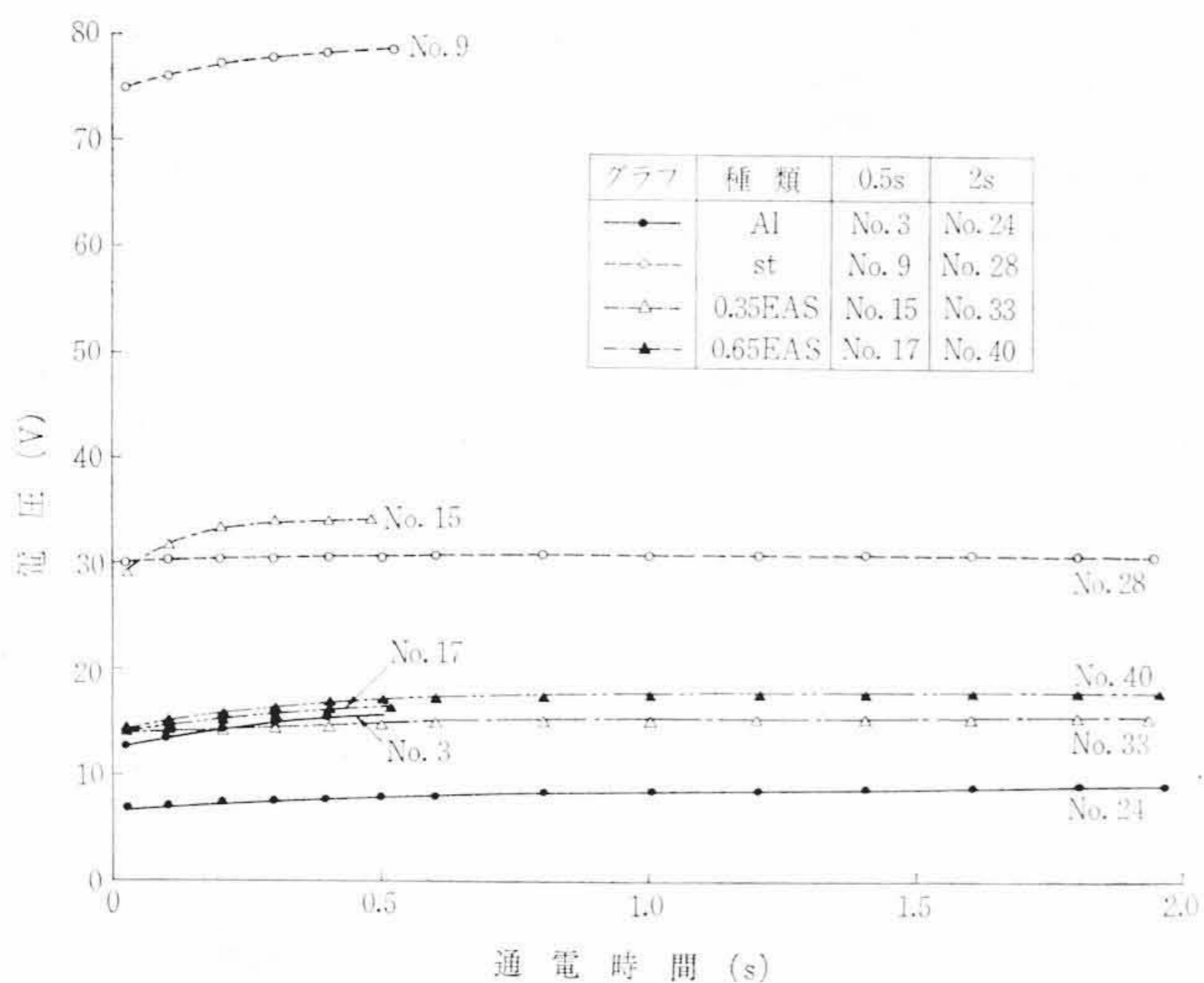
第 3 表 より 線 の 通 電 実 験 結 果

(a) 通 電 時 間 0.5 秒

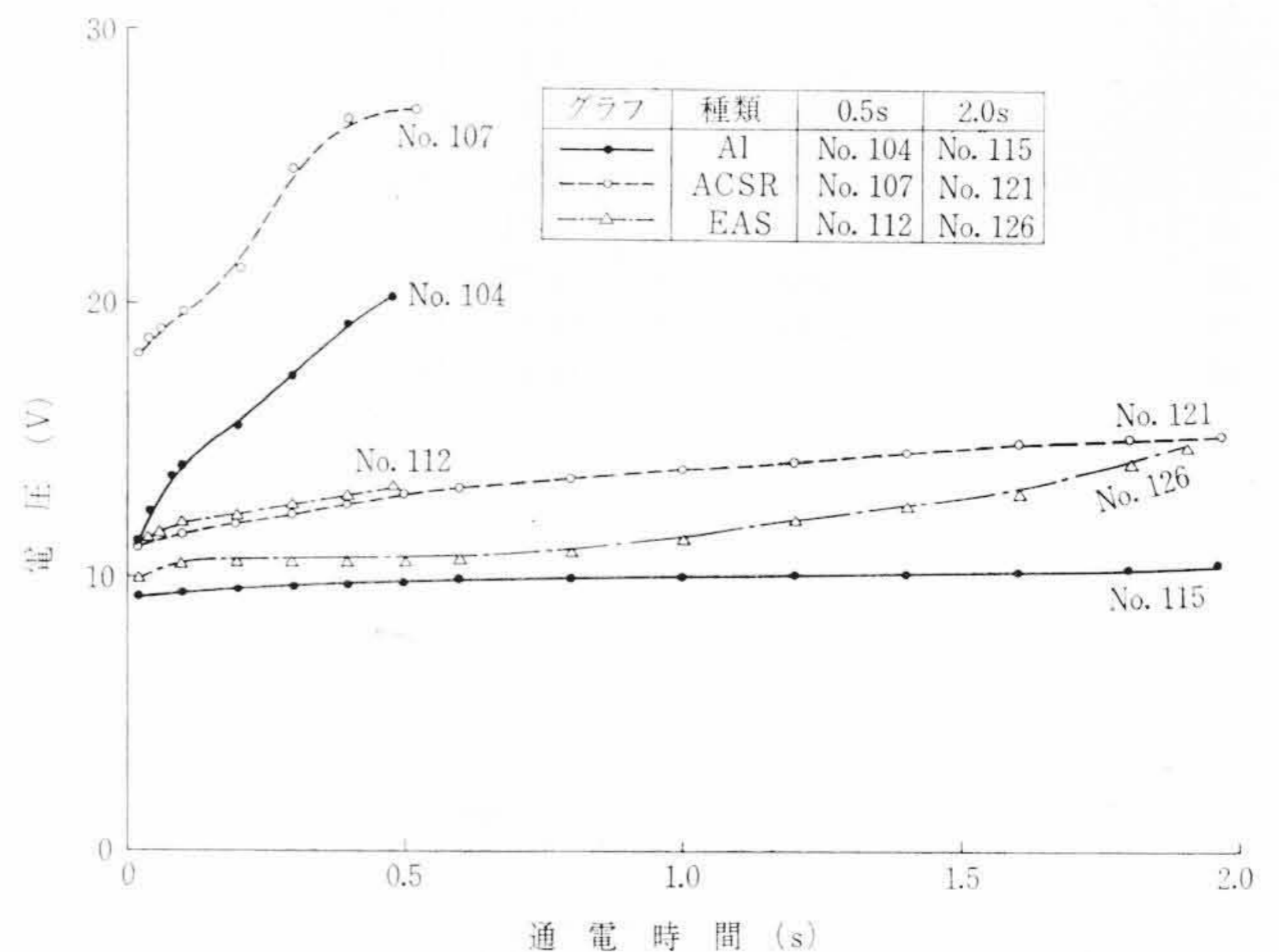
試番	試料の種類 (mm <sup>2</sup> )	電 流 (A)		電 圧 (V)		通 電 時 間 (s)	温 度 (°C)			表面温度上昇(°C)		抵 抗 (Ω)		電 力 (W)		全熱量 (kcal)
		初 期	遮 断 時	初 期	遮 断 時		表 面 遮 断 時	表 面 最 大 値	気 温	遮 断 時	最 大 値	初 期	遮 断 時	初 期	遮 断 時	
101	150 Al	21.6 × 10 <sup>3</sup>	21.6 × 10 <sup>3</sup>	13.6	15.9	0.50	138	164	30	108	134	0.630 × 10 <sup>-3</sup>	0.736 × 10 <sup>-3</sup>	294 × 10 <sup>3</sup>	344 × 10 <sup>3</sup>	38.1
102	55 Al	8.90 × 10 <sup>3</sup>	8.20 × 10 <sup>3</sup>	10.6	13.2	0.48	142	152	28	114	124	1.190 × 10 <sup>-3</sup>	1.609 × 10 <sup>-3</sup>	94.4 × 10 <sup>3</sup>	108.4 × 10 <sup>3</sup>	11.60
103		9.40 × 10 <sup>3</sup>	9.20 × 10 <sup>3</sup>	12.8	17.4	0.50	197	225	28	169	197	1.361 × 10 <sup>-3</sup>	1.890 × 10 <sup>-3</sup>	120.3 × 10 <sup>3</sup>	160.2 × 10 <sup>3</sup>	16.77
104		9.90 × 10 <sup>3</sup>	9.25 × 10 <sup>3</sup>	11.1	20.1	0.48	256	268	28	228	240	1.122 × 10 <sup>-3</sup>	2.170 × 10 <sup>-3</sup>	110.0 × 10 <sup>3</sup>	186.0 × 10 <sup>3</sup>	16.98
105	120 ACSR	18.5 × 10 <sup>3</sup>	18.5 × 10 <sup>3</sup>	19.4	26.2	0.52	140	144	28	112	116	1.048 × 10 <sup>-3</sup>	1.416 × 10 <sup>-3</sup>	359 × 10 <sup>3</sup>	485 × 10 <sup>3</sup>	52.5
106	79 ACSR	18.4 × 10 <sup>3</sup>	16.4 × 10 <sup>3</sup>	12.7	16.9	0.52	158	168	24	134	144	0.690 × 10 <sup>-3</sup>	1.031 × 10 <sup>-3</sup>	234 × 10 <sup>3</sup>	277 × 10 <sup>3</sup>	31.7
107		20.6 × 10 <sup>3</sup>	17.5 × 10 <sup>3</sup>	18.0	26.9	0.52	284	302	24	260	278	0.873 × 10 <sup>-3</sup>	1.537 × 10 <sup>-3</sup>	371 × 10 <sup>3</sup>	471 × 10 <sup>3</sup>	52.3
108		20.6 × 10 <sup>3</sup>	20.2 × 10 <sup>3</sup>	13.6	21.6	0.52	211	228	26	185	202	0.660 × 10 <sup>-3</sup>	1.070 × 10 <sup>-3</sup>	280 × 10 <sup>3</sup>	437 × 10 <sup>3</sup>	44.5
109	100 EAS	18.5 × 10 <sup>3</sup>	18.5 × 10 <sup>3</sup>	17.4	20.0	0.48	125	182	32	93	150	0.940 × 10 <sup>-3</sup>	1.080 × 10 <sup>-3</sup>	323 × 10 <sup>3</sup>	370 × 10 <sup>3</sup>	39.7
110		21.4 × 10 <sup>3</sup>	20.4 × 10 <sup>3</sup>	20.1	26.9	0.48	210	270	32	178	238	0.939 × 10 <sup>-3</sup>	1.318 × 10 <sup>-3</sup>	430 × 10 <sup>3</sup>	550 × 10 <sup>3</sup>	56.2
111	36 EAS	8.50 × 10 <sup>3</sup>	8.24 × 10 <sup>3</sup>	13.4	17.8	0.48	113	161	27	86	134	1.577 × 10 <sup>-3</sup>	2.160 × 10 <sup>-3</sup>	114.0 × 10 <sup>3</sup>	146.7 × 10 <sup>3</sup>	14.94
112		7.46 × 10 <sup>3</sup>	7.34 × 10 <sup>3</sup>	11.2	13.4	0.48	131	165	28	103	137	1.502 × 10 <sup>-3</sup>	1.827 × 10 <sup>-3</sup>	83.7 × 10 <sup>3</sup>	98.4 × 10 <sup>3</sup>	10.43
113		10.1 × 10 <sup>3</sup>	9.80 × 10 <sup>3</sup>	17.6	30.2	0.48	407	462	27	380	435	1.742 × 10 <sup>-3</sup>	3.080 × 10 <sup>-3</sup>	178.0 × 10 <sup>3</sup>	296 × 10 <sup>3</sup>	27.1

(b) 通 電 時 間 2.0 秒

試番	試料の種類 (mm <sup>2</sup> )	電 流 (A)		電 圧 (V)		通 電 時 間 (s)	温 度 (°C)			表面温度上昇(°C)		抵 抗 (Ω)		電 力 (W)		全熱量 (kcal)
		初 期	遮 断 時	初 期	遮 断 時		表 面 遮 断 時	表 面 最 大 値	気 温	遮 断 時	最 大 値	初 期	遮 断 時	初 期	遮 断 時	
114	150 Al	8.24 × 10 <sup>3</sup>	8.04 × 10 <sup>3</sup>	5.70	6.20	1.98	105	108	29	76	79	0.692 × 10 <sup>-3</sup>	0.771 × 10 <sup>-3</sup>	47.0 × 10 <sup>3</sup>	49.8 × 10 <sup>3</sup>	22.9
115		12.1 × 10 <sup>3</sup>	11.3 × 10 <sup>3</sup>	9.20	10.6	1.96	170	210	30	140	180	0.764 × 10 <sup>-3</sup>	0.943 × 10 <sup>-3</sup>	111.8 × 10 <sup>3</sup>	119.3 × 10 <sup>3</sup>	54.1
116		13.3 × 10 <sup>3</sup>	13.2 × 10 <sup>3</sup>	10.1	13.6	1.84	255	315	30	225	285	0.759 × 10 <sup>-3</sup>	1.030 × 10 <sup>-3</sup>	134.5 × 10 <sup>3</sup>	179.6 × 10 <sup>3</sup>	69.2
117	55 Al	3.78 × 10 <sup>3</sup>	3.70 × 10 <sup>3</sup>	4.40	5.50	1.92	107	116	30	77	86	1.163 × 10 <sup>-3</sup>	1.486 × 10 <sup>-3</sup>	16.63 × 10 <sup>3</sup>	20.4 × 10 <sup>3</sup>	8.50
118		5.20 × 10 <sup>3</sup>	4.36 × 10 <sup>3</sup>	6.60	7.30	1.98	146	155	27	119	128	1.178 × 10 <sup>-3</sup>	1.676 × 10 <sup>-3</sup>	37.0 × 10 <sup>3</sup>	31.8 × 10 <sup>3</sup>	16.28
119	120 ACSR	16.8 × 10 <sup>3</sup>	16.7 × 10 <sup>3</sup>	6.82	7.48	1.98	141	145	32	109	113	0.406 × 10 <sup>-3</sup>	0.447 × 10 <sup>-3</sup>	114.5 × 10 <sup>3</sup>	125.0 × 10 <sup>3</sup>	56.7
120		18.8 × 10 <sup>3</sup>	18.8 × 10 <sup>3</sup>	8.80	10.3	2.00	198	236	30	168	206	0.468 × 10 <sup>-3</sup>	0.548 × 10 <sup>-3</sup>	165.5 × 10 <sup>3</sup>	193.8 × 10 <sup>3</sup>	86.0
121		15.6 × 10 <sup>3</sup>	14.7 × 10 <sup>3</sup>	11.2	15.2	1.96	368	415	28	340	387	0.696 × 10 <sup>-3</sup>	1.034 × 10 <sup>-3</sup>	180.5 × 10 <sup>3</sup>	224 × 10 <sup>3</sup>	94.6
122	79 ACSR	8.26 × 10 <sup>3</sup>	8.00 × 10 <sup>3</sup>	6.38	7.20	2.00	119	139	23	96	116	0.772 × 10 <sup>-3</sup>	0.900 × 10 <sup>-3</sup>	52.7 × 10 <sup>3</sup>	57.6 × 10 <sup>3</sup>	26.4
123		12.25 × 10 <sup>3</sup>	10.6 × 10 <sup>3</sup>	9.24	20.2	1.94	365	410	27	338	383	0.754 × 10 <sup>-3</sup>	1.906 × 10 <sup>-3</sup>	113.3 × 10 <sup>3</sup>	215 × 10 <sup>3</sup>	76.2
124	100 EAS	12.4 × 10 <sup>3</sup>	10.8 × 10 <sup>3</sup>	8.58	10.6	1.94	170	209	30	140	179	0.692 × 10 <sup>-3</sup>	0.982 × 10 <sup>-3</sup>	116.4 × 10 <sup>3</sup>	114.5 × 10 <sup>3</sup>	53.5
125		13.5 × 10 <sup>3</sup>	13.2 × 10 <sup>3</sup>	11.0	17.6	2.00	304	381	34	270	347	0.815 × 10 <sup>-3</sup>	1.334 × 10 <sup>-3</sup>	148.8 × 10 <sup>3</sup>	233 × 10 <sup>3</sup>	91.3
126		12.6 × 10 <sup>3</sup>	12.0 × 10 <sup>3</sup>	9.90	15.0	1.90	212	244	30	182	214	0.764 × 10 <sup>-3</sup>	1.256 × 10 <sup>-3</sup>	124.8 × 10 <sup>3</sup>	179.5 × 10 <sup>3</sup>	69.2
127	36 EAS	4.52 × 10 <sup>3</sup>	4.50 × 10 <sup>3</sup>	6.60	8.58	1.96	96	119	27	69	92	1.460 × 10 <sup>-3</sup>	1.906 × 10 <sup>-3</sup>	29.8 × 10 <sup>3</sup>	38.7 × 10 <sup>3</sup>	15.06



第 4 図 (a) 素線の電圧時間特性



第 4 図 (b) より線の電圧時間特性

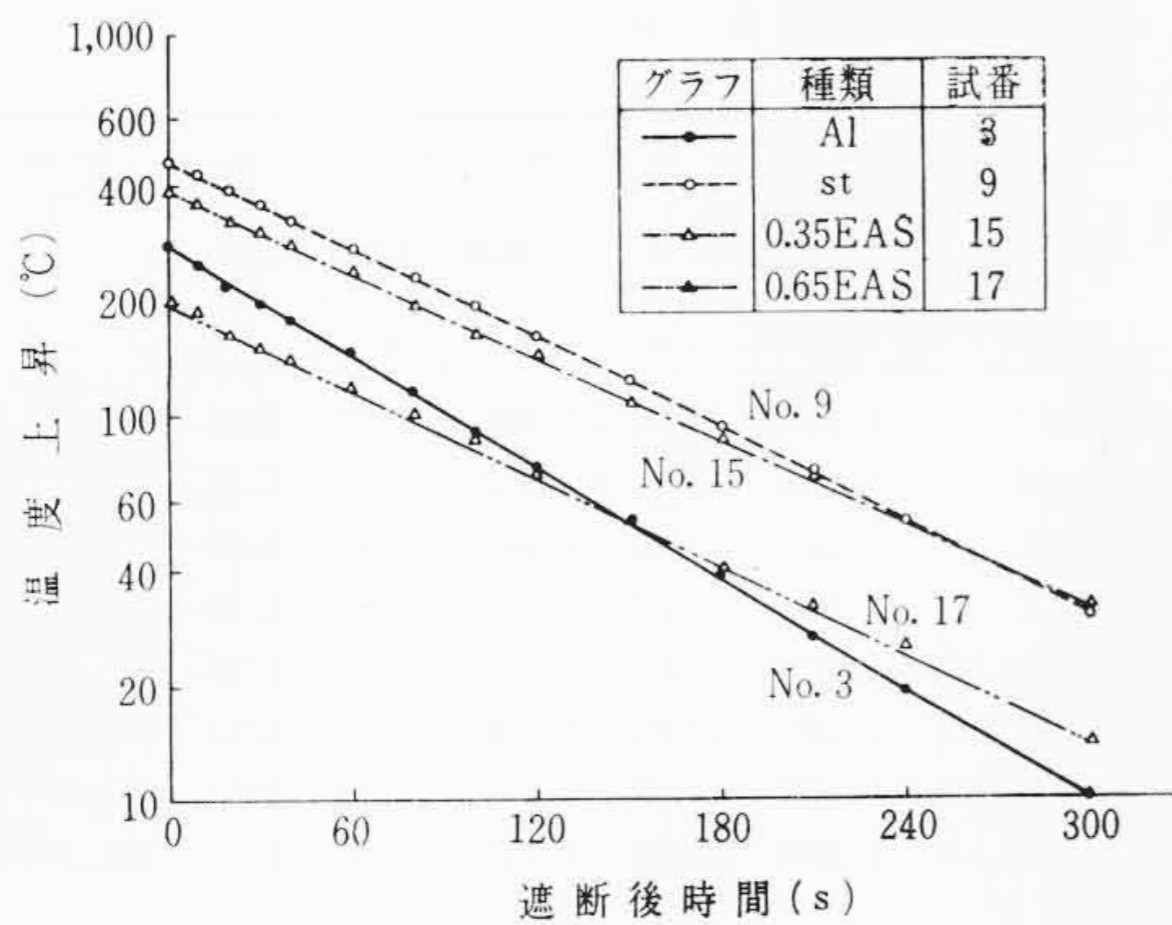
遮断器開閉時の影響を除くため通電電流、電圧の初期値、遮断値としてはそれぞれ通電後 1~目、遮断前 1~目の値をとった。通電時間はオシログラムから読みとった。また遮断時の試料の温度は表面放冷特性から外そうし、これから気温をさし引いたものを温度上昇とした。なお、より線の温度上昇としては遮断時の値と最大値の両方を示した。遮断時の温度上昇はオシログラムに入れた熱電対で測定した。

実験結果からわかるように電流は時間とともに減衰するが、電圧は逆に増加している。電圧、電流および温度の時間特性は第 2 図の

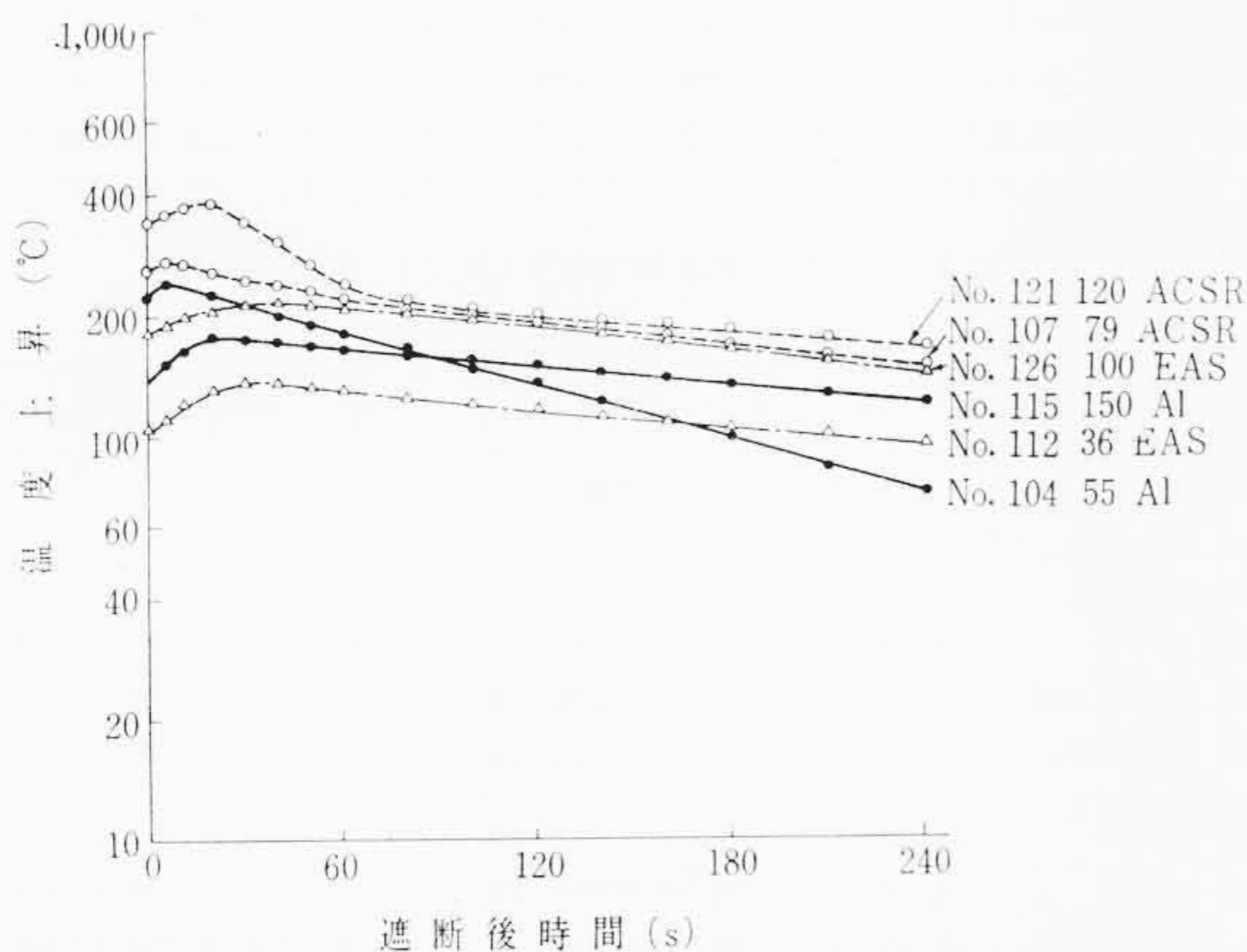
ようなオシログラムから読みとることができる。素線とより線の通電電流時間特性、端子電圧時間特性をそれぞれ第 3, 4 図に示す。また熱電温度測定装置によって求めた素線とより線の表面放冷特性を第 5 図に示す。

### 3. 抵抗温度係数と熱容量

通電電流と温度上昇との関係を考察するためには、まず抵抗温度係数と熱容量を知る必要がある。試料の抵抗はオシログラムによる電圧、電流の実測値から簡単に計算できるので、その初期値と遮断



第5図(a) 素線の放冷特性



第5図(b) より線の放冷特性

時の値を第2, 3表中に示してある。ここで初期抵抗と遮断時抵抗の間には次の関係がある。

$$R_f = R_i [1 + \alpha_i (\theta_f - \theta_i)] \quad (1)$$

ただし、 $R_f$ : 遮断時抵抗 ( $\Omega$ )

$R_i$ : 初期抵抗 ( $\Omega$ )

$\theta_f$ : 遮断時温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta_i$ : 初期温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha_i$ : 初期温度での抵抗温度係数 ( $1/^{\circ}\text{C}$ )

したがって  $20^{\circ}\text{C}$  での抵抗温度係数  $\alpha_{20} (1/^{\circ}\text{C})$  は次式から求めることができる。

$$\alpha_{20} = \frac{1}{\left(\frac{R_f}{R_i} - 1\right) + (20 - \theta_i)} \quad (2)$$

(2)式に実測値を代入して各素線の  $20^{\circ}\text{C}$  での抵抗温度係数を求めた結果が第2表最後列中に示されている。実測値の各種類の平均値と、アルミの値を  $0.0040 (1/^{\circ}\text{C})$ 、鋼の値を  $0.0045 (1/^{\circ}\text{C})$  とし、ア

ルミと鋼の断面積の比からEASの抵抗温度係数を計算した値を比較すると第4表(a)のようになり、実測値は計算値よりわずかに大きい。いずれも鋼の断面積比が大きいほど抵抗温度係数も大きくなっている。以後の検討にあたって抵抗温度係数には実測値を用いることにする。なお、より線は素線の値から抵抗温度係数を定めた。これを同表(b)に示す。

一方、試料の熱容量は比熱、比重および断面積の積として求めることができる。いまアルミと鋼の常温の比熱をそれぞれ  $0.214 (\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 、 $0.111 (\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$  として計算した熱容量は第4表(a)のようになるが<sup>(3)</sup>、今回の実験のように温度上昇が数百度にもなる場合には、これを一定値としないで温度の関数としてあらわすことが必要である。したがってここでは素線の放冷特性に基づいて熱容量を計算した。

いま試料内部の温度こう配が無視できれば、電流遮断後の試料表面の温度変化はNewtonの法則により次式から求めることができる。

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{K\theta}{C} \quad (3)$$

ただし、 $\theta$ : 温度上昇 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$C$ : 熱容量 ( $\text{J}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}$ )

$K$ : 熱放散係数 ( $\text{W}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}$ )

一方、電線の無風時の対流熱放散係数については、Nusselt, Mc Adams, Rice などによりそれぞれの式が提案されているが、ここでは風がある場合との理論的関連をはっきりさせておくため Rice の式<sup>(4)</sup>を採用する。この場合熱放散係数  $K$  は次のようになる。

$$K = K_c + \eta K_r \quad (4)$$

$$K_c = \frac{2.466 \times 10^{-3} \sqrt{\theta d^3}}{[273 + 0.5(\theta_a + \theta_c)]^{0.123}} \quad (5)$$

$$K_r = \frac{1.812 \times 10^{-3} d}{\theta \left[ \left( \frac{\theta_c + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_a + 273}{100} \right)^4 \right]} \quad (6)$$

ただし、 $K_c$ : 対流熱放散係数 ( $\text{W}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}$ )

$K_r$ : ふく射熱放散係数 ( $\text{W}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}$ )

$\eta$ : ふく射率 (素線 0.45, より線 0.9)

$\theta_a$ : 気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta_c$ : 試料温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$d$ : 試料径 ( $\text{cm}$ )

(3)式で微小時間  $\Delta t$  内の温度変化を  $\Delta\theta$  としてこれを差分方程式にかき直すと、次式のようになりこれからある温度に対する熱容量を計算することができる。

$$C = \frac{-K\theta}{\frac{\Delta\theta}{\Delta t}} \quad (7)$$

過渡時にも熱放散係数が(4)式で表わされると仮定すると、素線の表面放冷特性を利用して(7)式で求めた熱容量はほぼ温度の一次関

第4表 試料の抵抗温度係数と熱容量

(a) 素線					(b) より線					
種類 (mm)	抵抗温度係数 ( $1/^{\circ}\text{C}$ )		熱容量 ( $\text{J}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}$ )		熱容量と温度の関係式	種類 (mm <sup>2</sup> )	抵抗温度係数 ( $1/^{\circ}\text{C}$ )		熱容量 ( $\text{J}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	
	計算値	実測値	計算値	実測値			計算値 <sup>(1)</sup>	実測値 <sup>(2)</sup>	計算値 <sup>(1)</sup>	実測値 <sup>(2)</sup>
3.2 Al	0.0040	0.00405	0.1945	0.2157	$C(\text{J}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}) = 0.734 \times 10^{-4} T(^{\circ}\text{C}) + 0.2036$	150 Al	0.0040	0.00405	3.696	4.098
3.2 St	0.0045	0.00456	0.2914	0.3321	$C(\text{J}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}) = 6.28 \times 10^{-4} T(^{\circ}\text{C}) + 0.2181$	55 Al	0.0040	0.00405	1.362	1.510
3.2(0.35)EAS	0.0043 <sup>(1)</sup>	0.00443	0.2536 <sup>(2)</sup>	0.2979	$C(\text{J}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}) = 0.741 \times 10^{-4} T(^{\circ}\text{C}) + 0.2728$	120 ACSR	0.0040	0.00424	5.232	5.890
3.2(0.65)EAS	0.0042 <sup>(1)</sup>	0.00440	0.2243 <sup>(2)</sup>	0.2605	$C(\text{J}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}) = 1.827 \times 10^{-4} T(^{\circ}\text{C}) + 0.2466$	79 ACSR	0.0040	0.00424	3.592	4.043
						100 EAS	0.0042	0.00440	4.262	4.950
						36 EAS	0.0042	0.00440	1.570	1.824

注: (1) 抵抗温度係数の計算値は、アルミを  $0.0040 (1/^{\circ}\text{C})$ 、鋼を  $0.0045 (1/^{\circ}\text{C})$  としアルミと鋼の断面積比より求めた。

(2) 熱容量の計算値は、比熱をアルミ  $0.214 (\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 、鋼  $0.111 (\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$  としアルミと鋼の断面積比より求めた。

注: (1) 計算値は素線の計算値に基づいて求めた。ただし ACSR の鋼線の抵抗温度係数は無視した。

(2) 実測値は素線の実測値に基づいて求めた。

数となる。これを第 4 表(a)の最後列に示したが、温度による熱容量の変化は St がもっとも大きく、500°C では 0°C の値の 245% にもなっており、また Al では同じく 18% 増しになっている。なお同表の式と実測値との差は ±0.05 (W/cm·°C) 以下である。これら実測値の各種類の平均値を前述の計算値と比較すると前者の方が 11~17% 大きい。この値を金属便覧<sup>(5)</sup>、化学工業便覧<sup>(6)</sup>に示された値と比べると、アルミではほぼ一致しているが鋼ではかなり高い値を示している。しかし以後の検討には熱容量は実測値を用いることにする。なおより線は表面放冷特性が第 5 図(b)のように特異な形状になるので、その熱容量を素線と同様に計算することはできない。したがって素線の値に基づいてその熱容量を決定した。これを第 4 表(b)に示す。

#### 4. 瞬時大電流による温度上昇

瞬時電流容量は熱放散を無視し、発生した熱量がすべて電線の温度上昇に費やされるとして計算されている。いま電線内部の温度こう配を無視すると

$$C \frac{d\theta}{dt} = I(t)^2 R_0 (1 + \alpha\theta) \dots\dots\dots (8)$$

である。

- ただし、 $I(t)$ : 通電電流実効値 (A)
- $R_0$ : 初期抵抗 ( $\Omega/cm$ )
- $\alpha$ : 初期温度での抵抗温度係数 ( $1/^\circ C$ )

これまでの計算法では(8)式中の  $I(t)$  を一定として計算されているが、この場合の通電電流を  $I_0$  (A) としたときの温度上昇は(8)式を

$$\theta = \frac{1}{\alpha} (e^{\frac{\alpha I_0^2 R_0}{C} t} - 1) \dots\dots\dots (9)$$

となり、瞬時電流容量は次式のようになる。

$$I_0 = \sqrt{\frac{C \log(1 + \alpha\theta)}{\alpha R_0 t}} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $t$ : 通電時間 (s)

しかし一般に瞬時大電流は減衰特性を示すのが常であるから、 $I(t)$  は次の形であると考えられる。

$$I(t) = I_A e^{-At} + I_B e^{-Bt} \dots\dots\dots (11)$$

- ただし、 $I_A$ : 交流実効電流分 (A)
- $I_B$ : 直流実効電流分 (A)
- $A$ : 交流分減衰率 (1/s)
- $B$ : 直流分減衰率 (1/s)

これを(8)式に代入すると、

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{R_0}{C} (1 + \alpha\theta) (I_A e^{-At} + I_B e^{-Bt})^2 \dots\dots\dots (12)$$

初期条件を、 $t=0, \theta=0$  においてこれを解くと、温度上昇は次式で表わされる。

$$\theta = \frac{1}{\alpha} (e^{F(t)} - 1) \dots\dots\dots (13)$$

$$F(t) = \frac{\alpha R_0}{C} \left[ \frac{I_A^2}{2A} (1 - e^{-2At}) + \frac{I_A + I_B}{A + B} (1 - e^{-(A+B)t}) + \frac{I_B^2}{2B} (1 - e^{-2Bt}) \right] \dots\dots\dots (14)$$

しかし第 3 図からわかるように通電電流の直流分は交流分より減衰が早いので、ある時間  $\tau$  を境として近似的に次の関係が成り立つ。

$$I(t) = \begin{cases} I_A e^{-At} + I_B e^{-Bt} & (0 \leq t < \tau) \\ I_A e^{-At} & (\tau \leq t \leq t_f) \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 $t_f$ : 遮断時間 (s)

第 5 表 通電電流、温度上昇計算値と実測値

(a) 素線

標準 通電 時間 (s)	試 番	種 類 (mm)	通 電 電 流				通 電 時 間 (s)	遮 断 時 温 度 上 昇 (°C)		
			絶対値 (A)		減衰率 (1/s)			$\theta_1$	$\theta_2$	実 測
			$I_A$	$I_B$	A	B				
0.5	3	3.2 Al	1,833	175	1.011	12.91	0.50	257.7	256.8	280
	5	3.2 Al	2,811	842	1.209	14.13	0.49	511.5	509.3	437
	8	3.2 St	1,483	704	1.494	20.81	0.50	379.8	378.3	319
	9	3.2 St	1,543	1,363	1.877	25.56	0.52	488.9	487.3	457
	14	3.2(0.35)EAS	1,800	1,163	1.130	13.59	0.50	362.8	361.4	315
	15	3.2(0.35)EAS	2,471	1,021	1.316	10.27	0.48	430.5	427.0	390
	17	3.2(0.65)EAS	1,886	463	0.716	11.68	0.51	258.8	258.1	200
	18	3.2(0.65)EAS	2,550	1,097	1.142	25.00	0.51	364.3	362.8	310
2.0	24	3.2 Al	1,683	138	0.305	8.54	1.96	407.8	397.7	345
	25	3.2 Al	1,568	556	0.323	5.18	1.97	526.4	513.3	458
	28	3.2 St	845	273	0.371	3.74	1.94	378.8	372.6	329
	29	3.2 St	925	415	0.396	3.43	1.95	471.7	462.7	410
	33	3.2(0.35)EAS	1,651	423	0.368	8.48	1.93	438.0	429.1	354
	35	3.2(0.35)EAS	1,713	999	0.394	5.15	1.92	595.2	587.0	540
	39	3.2(0.65)EAS	1,653	536	0.377	5.89	1.93	512.7	502.4	420
	40	3.2(0.65)EAS	1,625	1,672	0.358	8.59	1.95	584.1	571.1	520

注:  $\theta_1$  は熱放散を無視した,  $\theta_2$  は熱放散を考慮したそれぞれ計算値。

(b) より線

標準 通電 時間 (s)	試 番	種 類 (mm <sup>2</sup> )	通 電 電 流				通 電 時 間 (s)	遮 断 時 温 度 上 昇 (°C)			
			絶対値 (A)		減衰率 (1/s)			$\theta_1$	$\theta_2$	実 測	
			$I_A$	$I_B$	A	B				直 後	最 大 値
0.5	104	55 Al	9,508	4,765	0.05469	52.01	0.48	213.0	212.7	228	240
	107	79 ACSR	18,094	34,023	0.06506	74.92	0.52	283.8	283.5	260	278
	112	36 EAS	7,451	72	0.02849	10.54	0.48	139.2	139.0	103	137
2.0	115	150 Al	11,516	1,846	0.01238	29.12	1.96	156.9	156.4	140	180
	118	55 Al	4,690	1,326	0.03844	21.97	1.98	139.4	138.4	119	128
	121	120 ACSR	15,152	3,143	0.01451	48.55	1.96	356.0	355.2	340	387
	123	79 ACSR	11,610	5,262	0.04268	46.74	1.94	376.5	375.1	338	383
	124	100 EAS	10,983	4,543	0.01221	29.01	1.94	180.0	179.6	140	179
	126	36 EAS	12,183	3,869	0.00884	60.14	1.90	223.9	223.4	182	214

注:  $\theta_1$  は熱放散を無視した,  $\theta_2$  は熱放散を考慮したそれぞれ計算値。

(15)式の対数をとると

$$\left. \begin{aligned} \log(I(t) - I_A e^{-At}) &= \log I_B - Bt & (0 \leq t < \tau) \\ \log I(t) &= \log I_A - At & (\tau \leq t \leq t_f) \end{aligned} \right\} \dots\dots (16)$$

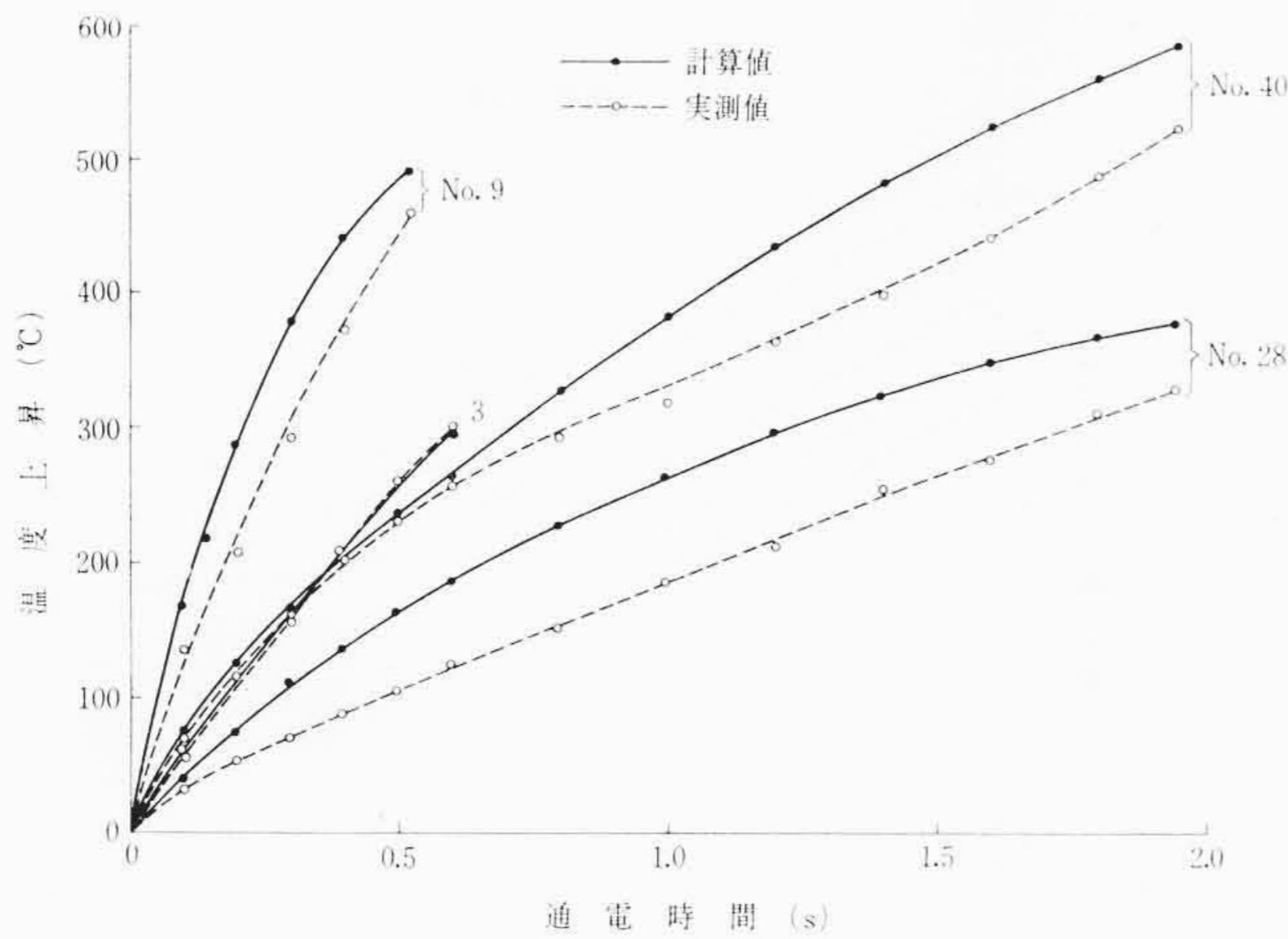
となるから、(16)式の第 2 式に  $I(t)$  の実測値を代入し最小自乗法によって  $I_A$  と  $A$  を求め、ついで第 1 式から  $I_B$  と  $B$  と求めることができる<sup>(6)</sup>。計算結果を第 5 表に示す。計算値と実測値の差は ±10% 以内である。

このようにして求めた通電電流  $I(t)$  を(13)式に代入して、減衰特性を示す電流に対する温度上昇を計算すると第 5 表の  $\theta_1$  となる。なお熱放散も考慮した場合の温度上昇は次式より求められる。

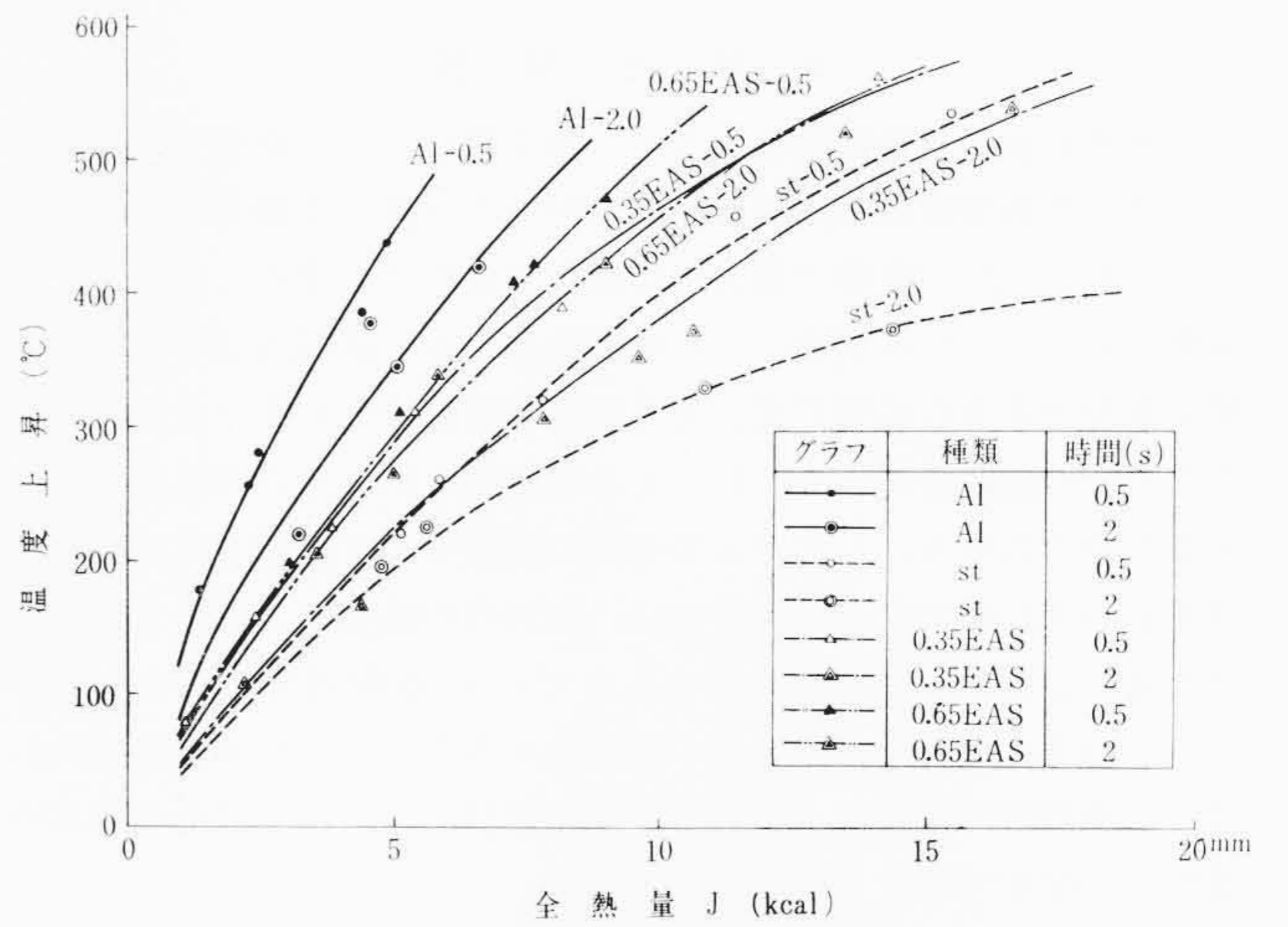
$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{R_0}{C} (1 + \alpha\theta) (I_A e^{-At} + I_B e^{-Bt})^2 - \frac{K\theta}{C} \dots\dots (17)$$

ここで  $K$  は(5)式で表わされる熱放散係数で温度の関数であるから、これを解析的にとくことは非常に困難である。しかし電子計算機を利用し、Runge-Kutta-Gill 法<sup>(7)</sup>によって逐次数値計算を行なえば任意の時間の温度上昇を求めることができる。この結果を第 5 表の  $\theta_2$  として示した。

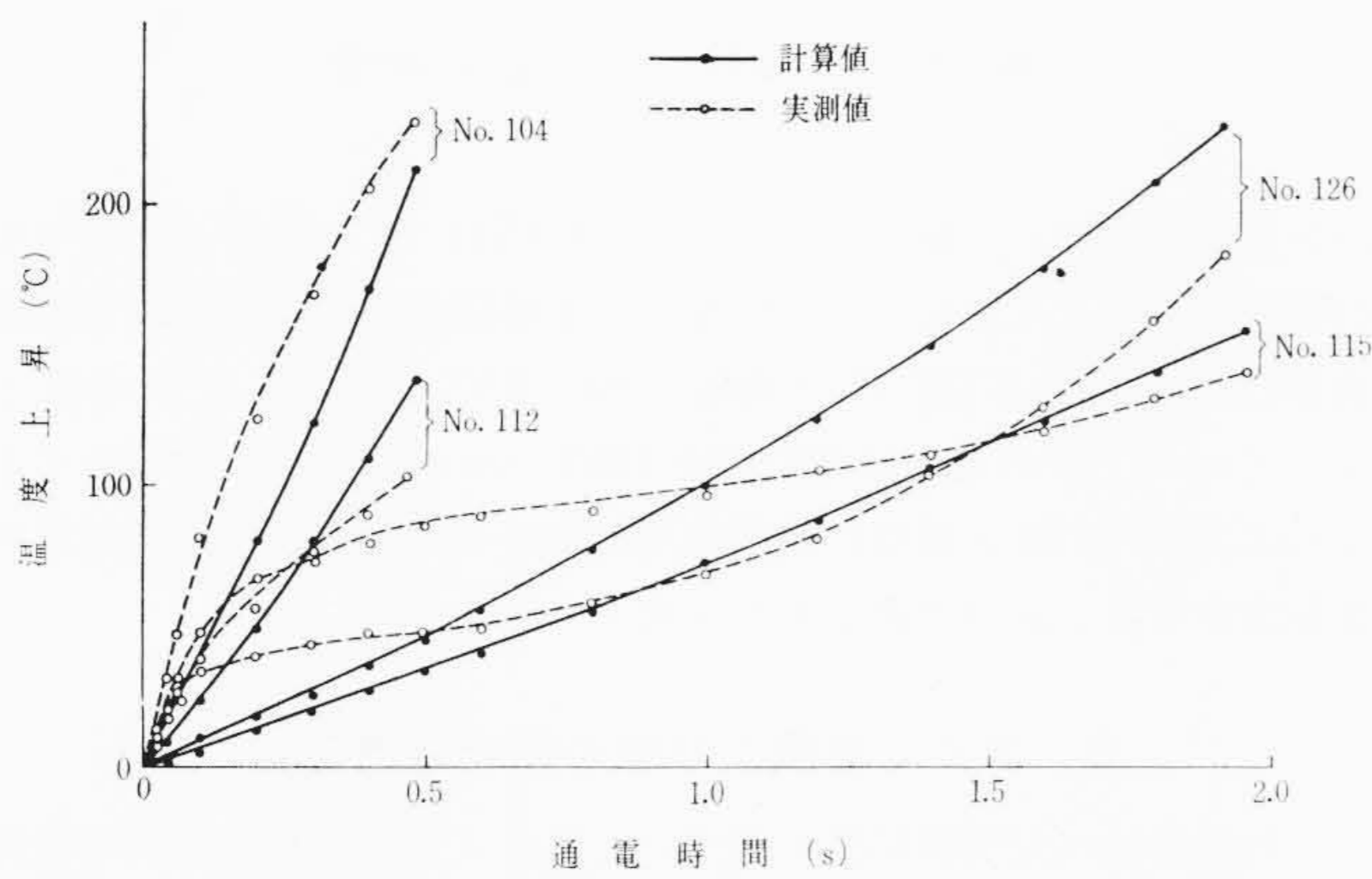
第 5 表をみるとわかるように  $\theta_1$  と  $\theta_2$  とはほとんど同一であるが、これは通電時間が短く発生熱量が放散熱よりはるかに大きいためであり、瞬時大電流の検討には熱放散は無視できる。また、遮断時温度上昇の計算値と実測値の差は 20% 以下で比較的よく一致している。第 6 図は表面温度上昇時間特性の例であるが、素線では計算値と実測値は同一形状の特性曲線を示しており、両者の絶対値の差は抵抗温度係数、熱容量の差のためと考えることができる。しかしより線では計算値と実測値は同一形状とはならない。これはより線は素線を何本もより合わせた構成で、各素線の抵抗温度係数や熱



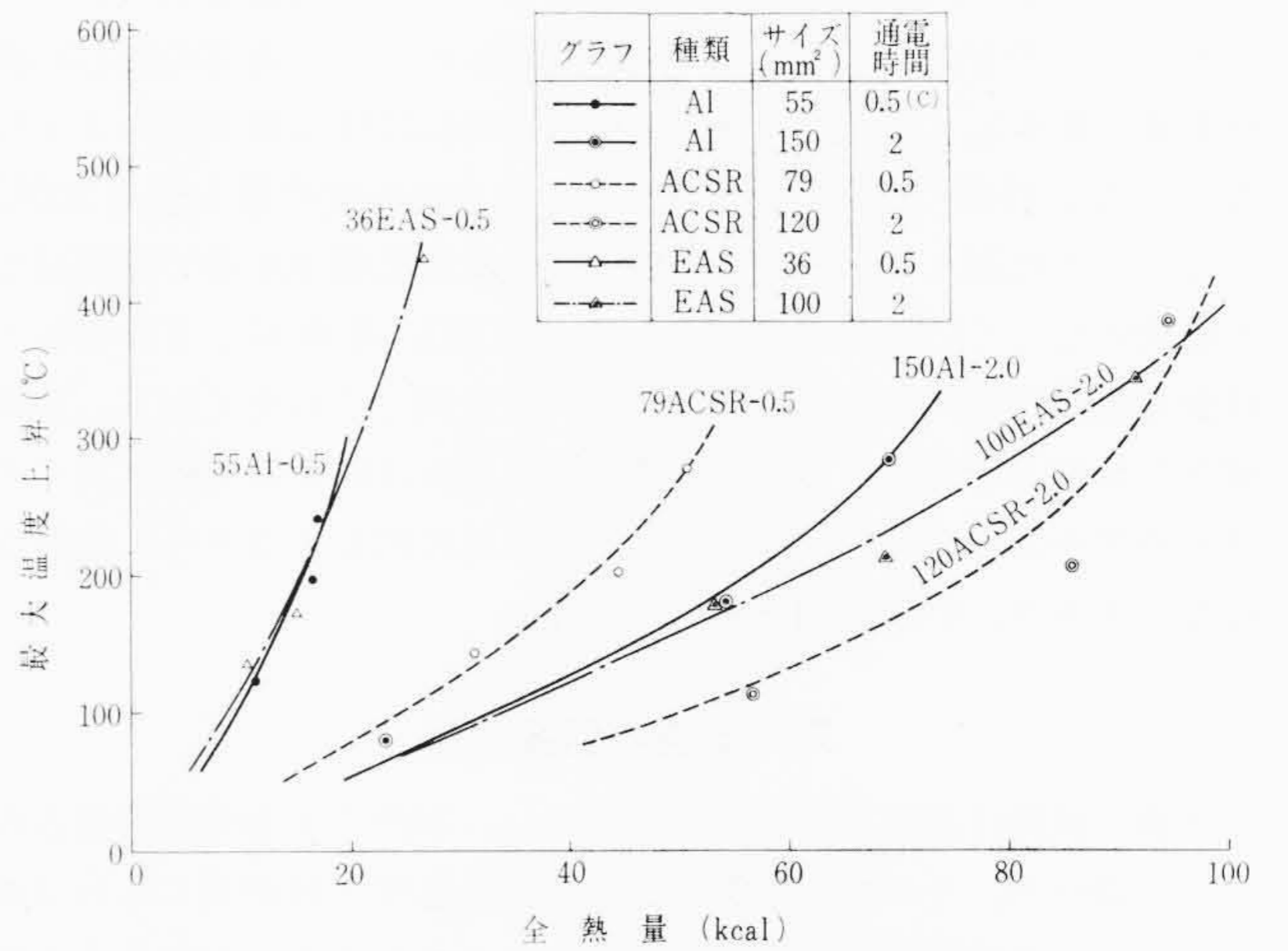
第6図(a) 素線の温度上昇時間特性



第7図(a) 素線の全熱量温度上昇特性



第6図(b) より線の温度上昇時間特性



第7図(b) より線の全熱量温度上昇特性

容量にバラツキがあること、また各素線間に熱抵抗があることなどのためと推察される。

5. 全熱量と温度上昇

以上述べたように、通電電流は減衰するのでその初期値だけから温度上昇を論ずることはできない。しかし熱放散を無視することができるので、通電中試料が得た全熱量と温度上昇の間には一定の関係がある。

いま熱容量が一定であり、また熱量が  $Q(t)$  で表わされるとすると(8)式より、

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{Q(t)}{C} \dots\dots\dots(18)$$

したがって温度上昇は次のようになる。

$$\theta = \int_0^t \frac{Q(t)}{C} dt \dots\dots\dots(19)$$

また全熱量を  $J$  とするとこれは次式で表わされる。

$$J = \int_0^t Q(t) dt \dots\dots\dots(20)$$

したがって、(19)式と(20)式より次式が成り立つ。

$$J = C\theta \dots\dots\dots(21)$$

一方、通電電流が(11)式で表わされる場合には通電後  $t_f$  たったときの温度上昇と全熱量はそれぞれ次式のようになる。

$$\theta_f = \frac{1}{\alpha} (e^{F(t_f)} - 1) \dots\dots\dots(22)$$

$$J_f = \int_0^{t_f} (I_A e^{-At} + I_B e^{-Bt})^2 R_0 e^{F(t_f)} dt = \frac{C}{\alpha} (e^{F(t_f)} - 1) = C\theta_f \dots\dots\dots(23)$$

$$F(t_f) = \frac{\alpha R_0}{C} \left[ \frac{I_A^2}{2A} (1 - e^{-2At_f}) + \frac{I_A I_B}{A+B} (1 - e^{-(A+B)t_f}) + \frac{I_B^2}{2B} (1 - e^{-2Bt_f}) \right] \dots\dots\dots(24)$$

すなわち通電時間と熱容量が一定ならば全熱量は温度上昇と熱容量の積に等しい。

電圧と電流の積として表わした電力の初期値と遮断時の値は第2, 3表中に示されているが、電力は時間に対してほぼ直線的に変化するので全熱量は近似的に次式によって表わされる。

$$J = 2.389 \times 10^{-4} \cdot \frac{t_f}{2} (W_i + W_f) \dots\dots\dots(25)$$

- ただし、  $J$  : 全熱量 (kcal)
- $t_f$  : 通電時間 (s)
- $W_i$  : 初期電力 (W)
- $W_f$  : 遮断時電力 (W)

(25)式による計算値を第2, 3表中に示したが、これを電力時間特性の積分値と比較するとその差は10%以下である。こうして求めた全熱量と温度上昇の関係を第7図に示す。これをみるとわかるように、素線、より線とも通電時間が同一である場合、同じ全熱量に対する温度上昇はほぼ熱容量に逆比例している。また素線は上に凸の曲線になっているがこれは温度とともに熱容量が増加するためと考えられ、より線が逆に下に凸の曲線となっているのは素線間の熱抵抗の影響によるものと考えられる。

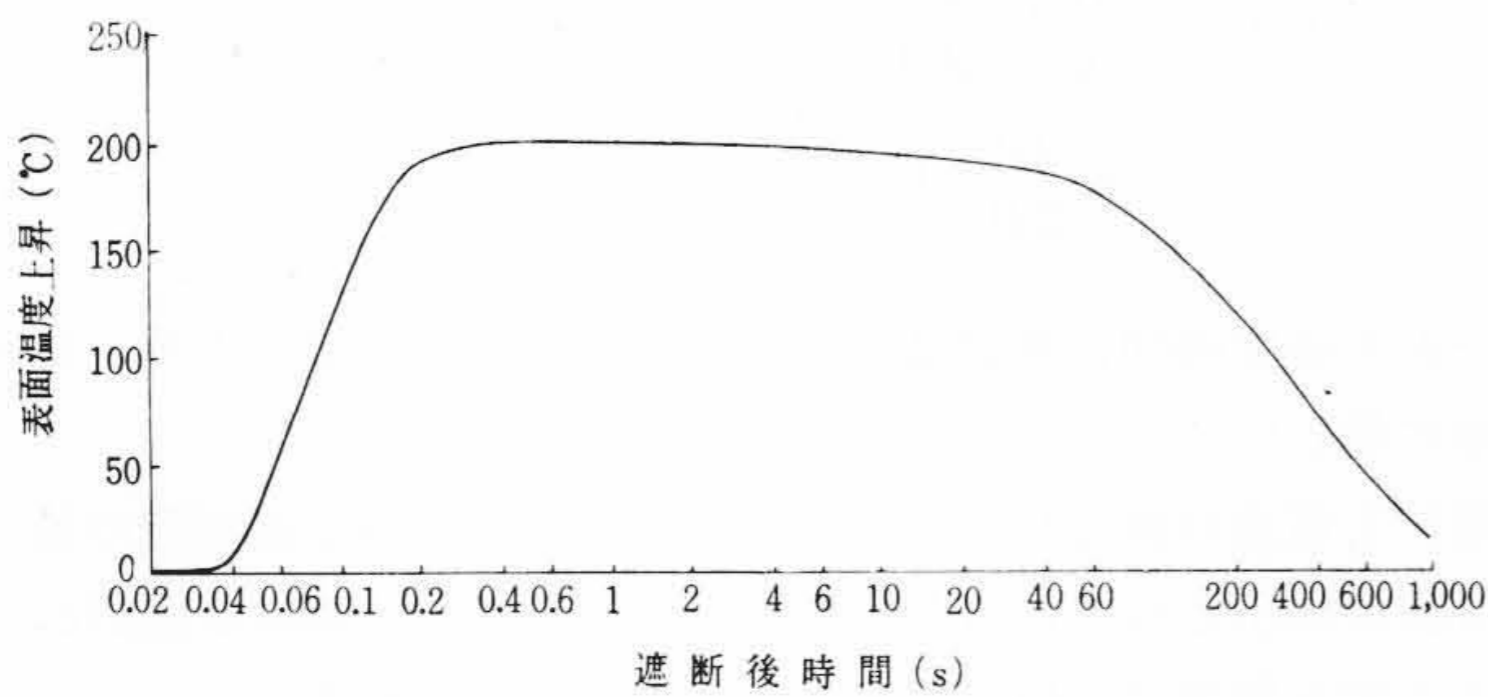
### 6. 放冷特性

電流遮断後の放冷特性をみると、第5図のように素線では表面温度はほぼ指数関数的に低下しているが、より線では表面温度はいったん上昇し、20~40秒で最大値に達した後に低下するという奇妙な現象がある。これは素線はその断面積が小さく試料内部の温度こう配を無視できるのに対して、より線は素線を何本もより合わせているためその熱容量が大きくしかも各素線間にかかなりの熱抵抗が存在するためであろう。したがって今回の実験のように通電時間が短く電流値がきわめて大きい場合には、試料内の温度こう配が大きく内部で発生した熱量が表面に達するまでにある程度時間がかかるので、このような現象を生じたのではなかろうか。これが事実であればより線の瞬時電流による温度上昇の検討にさいしてはその内部の温度こう配を考慮する必要がある。

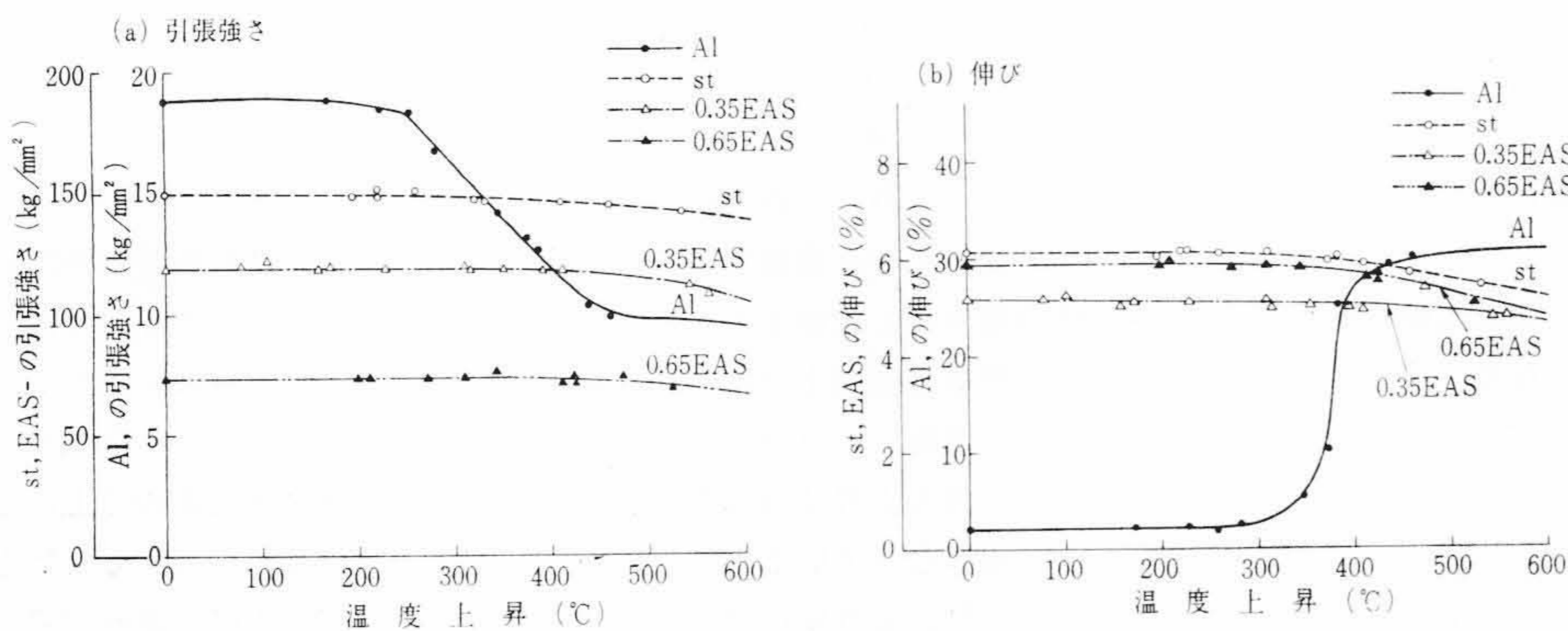
このような瞬時大電流による温度上昇の一例として、円柱の中心にある大きさの熱源が瞬間的に発生し、そして消滅した場合の温度上昇を求める<sup>(9)</sup>。この場合の温度上昇はグリーン関数を利用して求めることができる。たとえば外径16mmのアルミ丸棒の中心に瞬時電流が集中して流れた場合の表面温度時間特性は第8図のようになる。なお同図では瞬時熱源の大きさは表面温度の最大値が200°Cになるように選んである。この例では電流遮断後0.4秒で表面温度が最大になっているが、アルミ丸棒より熱伝導率が小さい物体では表面温度が最大になる時間はこれに逆比例しておそくなる。実測値と計算例とを比較するとより線の熱伝導率は同径の丸棒に比べてきわめて小さくしなければならない。これらに関してはさらに検討を行っており、いずれ明らかにならう。

### 7. 素線の引張試験

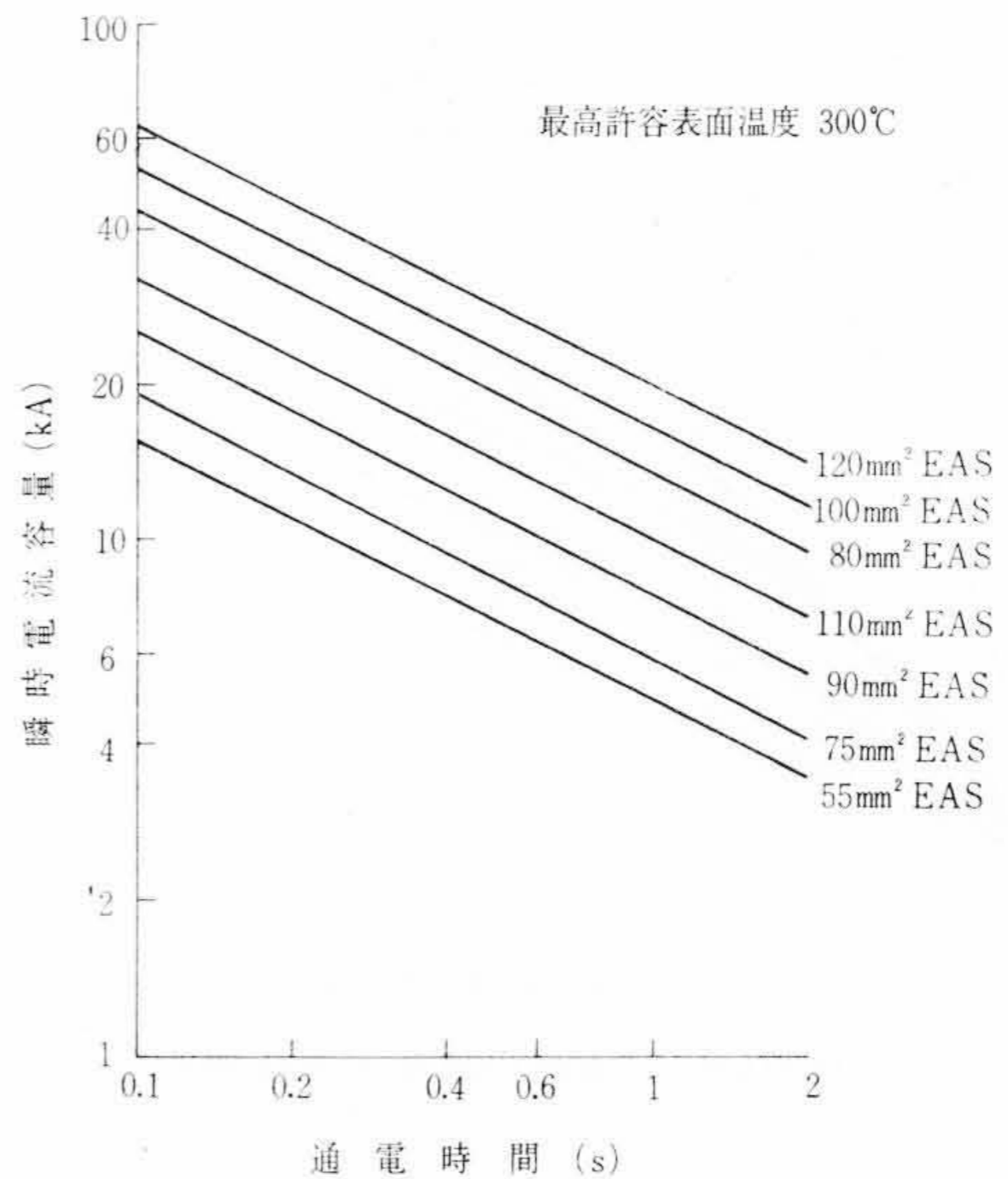
素線の試料は通電後引張試験を行ない、加熱による機械的強さの低下を調べた。その結果を第9図に示す。温度上昇が同じならば通電時間による差は認められなかった。これをみるとわかるようにAlは200°Cをこえると引張強さが低下しはじめ、300°Cになると伸



第8図 瞬時熱源による表面温度上昇時間特性



第9図 素線の加熱後の引張強さ・伸び



第10図 EASの瞬時電流容量

びが急激に増加して軟化しているが、EASはStと同様400%でも引張強さはほとんど低下していない。1時間加熱した場合にも引張強さの低下はAlが200°Cで10%、St、EASは400°Cで3~5%となっており、Alの最高使用温度を180°C、Stのそれを400°CとするならばEASはStと同様に最高使用温度を400°Cとして瞬時電流容量を決定することができるものと考えられる。

### 8. アルミ被鋼より線の瞬時電流容量

これまで述べた実験結果に基づいてアルミ被鋼より線の瞬時電流容量を求めることができる。EASの最高使用温度は400°Cであるが、より線では内部の温度こう配のため中心部の温度は表面より高いことが当然予想される。中心部と表面の温度差がいくらであるかは今後の検討に待たねばならないが、第3表の実測値を調べると表面温度の最大値と遮断時の値との差は最大77°Cとなっており、遮断時の中心温度と表面温度との差は100°Cとすれば安全であろう。これより、中心部最高温度を400°C、表面最高温度を300°C、気温を40°Cをとって、(10)式より種々のサイズの架空地線用アルミ被鋼より線の瞬時電流容量を計算した結果を第10図に示す。またこれと同じ外径の架空地線用電線の瞬時電流容量を比較のため示すと第6表のようである。アルミ被鋼より線は外径が等しい鋼より線に比べ30%、鋼心イ号アルミ合金より線(IACSR)に比べ50%それぞれ瞬時電流容量が大きいことがわかる。

### 9. 結 言

アルミ被鋼より線の瞬時電流容量を求めるため素線とより線に瞬時大電流を通電して諸特性を調べた。その結果を取りまとめると次のようになる。

- (1) 瞬時大電流は減衰特性を示すので、温度上昇の検討にあたってはこれを直流分と交流分の和として取り扱うことが望ましい。
- (2) アルミ被鋼線の抵抗温度係数の実測値は、アルミと鋼の断面積比から計算した値と同等である。
- (3) アルミ被鋼線の素線の放冷特

第6表 架空地線用アルミ被鋼より線，同径相当電線の寸法，性能と瞬時電流量

アルミ被鋼より線							外径同一相当電線						
品名サイズ (mm <sup>2</sup> )	構成 (mm)	外径 (mm)	引張荷重 (kg)	電気抵抗 (Ω/km)	瞬時電流量(A)		品名サイズ (mm <sup>2</sup> )	構成 (mm)	外径 (mm)	引張荷重 (kg)	電気抵抗 (Ω/km)	瞬時電流量(A)	
					0.5秒	2.0秒						0.5秒	2.0秒
55 EAS	7/3.2(0.25)EAS	9.6	6,670	1.29	7,040	3,520	55 St	7/3.2 St	9.6	6,300	3.45	5,000	2,500
70 EAS	7/3.5(0.3) EAS	10.5	7,810	1.03	8,320	4,160	70 St	7/3.5 St	10.5	7,560	2.89	5,980	2,990
90 EAS	7/4.0(0.35)EAS	12.0	10,080	0.775	11,300	5,650	90 St	7/4.0 St	12.0	9,890	2.21	7,860	3,930
110 EAS	7/4.5(0.4) EAS	13.5	12,660	0.607	14,340	7,170	110 St	7/4.5 St	13.5	12,500	1.75	9,920	4,960
80 EAS	19/2.9(0.6)EAS	14.5	7,870	0.323	19,680	9,840	79 IACSR	12/2.9IA1+7/2.9St	14.5	7,890	0.429	12,340	6,170
100 EAS	19/3.2(0.65)EAS	16.0	9,780	0.268	23,600	11,800	97 IACSR	12/3.2IA1+7/3.2St	16.0	9,350	0.352	15,020	7,510
120 EAS	19/3.5(0.7)EAS	17.5	11,920	0.227	28,400	14,200	120 IACSR	12/3.5IA1+7/3.5St	17.5	11,150	0.295	17,960	8,980

注：最高許容温度は，EAS 300℃，IACSR 150℃，St 400℃とした。

性から計算した熱容量は温度の関数である。しかしアルミと鋼の断面積比から計算した値と常温では大きな差はない。

- (4) 通電時間が短く通電電流値が大きい場合は熱放散を無視して温度上昇を計算することができる。
- (5) 温度上昇時間特性をNewtonの法則に基づいて計算した結果を実測値と比較すると，素線では同じ形状の曲線であるがより線では違った形の曲線となる。これはより線内部の熱抵抗を考慮しなければならないことを示すものであろう。
- (6) 熱容量を一定とすれば全熱量は温度上昇と熱容量の積として表わされる。実際には熱容量は温度とともに増加し，この関数は完全には成り立たない。
- (7) 素線の放冷特性はNewtonの法則にしたがった曲線となるが，より線は電流遮断後に表面温度が最大となる。これはより線を構成する各素線間の熱抵抗と，それに基づく温度こう配によるものと推察している。
- (8) 素線の加熱後の引張試験から，最高使用温度をアルミ線180℃，亜鉛メッキ鋼線400℃とした場合，アルミ被鋼線は400℃とすることができる。

- (9) 電線内部の温度こう配を考慮して，表面の最高使用温度を300℃としてアルミ被鋼より線の瞬時電流量を計算すると，電流量は同一外径の鋼より線より30%，また同一外径のIACSRより50%それぞれ大きくなる。アルミ被鋼より線は引張り荷重，電気抵抗などもこれらの電線よりすぐれており，耐食性もよいので架空地線としてもっともすぐれているといえることができる。

終わりに本研究にあたり実験に協力された日立電線日高工場第一研究課林氏，第二検査課高木氏，および素線の引張強さの資料を提供された第二研究課川西主任に感謝する。

参 考 文 献

- (1) アルミ裸電線電流量専門委員会：電気協同研究 4 (6)，1 (1948)
- (2) 山路，川西，柿崎：日立評論別冊 43，29 (1961)
- (3) 栗野，葛岡：伝熱工学 283 (1957，丸善)
- (4) C. W. Rice：TAIEE, 43, 131 (1924)
- (5) 日本金属学会：金属便覧 528 (1952，丸善)
- (6) 化学工学協会：化学工学便覧 60 (1958，丸善)
- (7) 乗松：数値計算法 94 (1958，電気書院)
- (8) 日立製作所：UMAC資料 4, 11 (1963)
- (9) 甲藤：熱伝導論 100 (1956，共立出版)



特 許 と 新 案

最近登録された日立製作所の特許(その4)

(67頁よりつづく)

特許番号	名 称	氏 名	特許登録日	特許番号	名 称	氏 名	特許登録日
412406	X線管電圧自動選択装置	山根 真 巖 児 沼 武 博 柿 永 島 敏 雄 永 島 敏 雄 松 井 照 男 林 文 也	38. 11. 9	413423	変圧器用放圧弁	沢 村 寅 治 村 部 昭 浩 坂 秋 山 修 友 梅 貞 睦 今 沢 昭 夫	38. 11. 9
412407	トロリ線引止装置	石 原 茂 人	"	413424	荷電粒子加速装置	武 田 康 嗣	"
412409	多翼型送風機	高 川 乍 憲	"	413425	ブラズマ発生装置	加 藤 和 克 竹 間 敏 一	"
412410	下抜き形ストリップクレーンの上抜き装置	大 塚 昭 俊	"	413426	電動機制御装置	静 河 敏 好	"
412411	コンベヤーベルトのまくれ防止装置	大 塚 昭 俊	"	413427	内燃機関燃料供給装置	尾 木 隆 彦	"
412412	直流送電制御装置	大 塚 昭 俊	"	413428	列車等備運転装置	平 井 一 孝	"
412413	半導体発電機制御装置	大 塚 昭 俊	"	413429	荷電粒子位相解折装置	武 田 康 嗣	"
412416	直流発電機負荷補償方式	大 塚 昭 俊	"	413430	信号伝送装置	加 藤 和 克 竹 間 敏 一	"
412417	水車起動装置	大 塚 昭 俊	"	413431	デジタル計算機と伝達インピーダンス測定盤を用いる水火併用経済負荷配分計算装置	静 河 敏 好	"
412418	変圧器用比率継電器	大 塚 昭 俊	"	413432	回転ターゲット	山 崎 龍 生 山 崎 龍 生	"
412419	ウラニウム系合金	大 塚 昭 俊	"	413433	回転ターゲット	山 崎 龍 生 山 崎 龍 生	"
412422	走行車の自動方向決定装置	大 塚 昭 俊	"	413434	ベータatron型電子加速装置	大 松 島 裕 之 大 松 島 裕 之	"
412425	複式気化器	大 塚 昭 俊	"	413435	直流電源用スイッチ回路方式	米 山 隆 夫	"
412429	パイプ鋳ぐるみ部品	大 塚 昭 俊	"	413436	複導体巻線	米 山 隆 夫 須 田 昭 悦	"
412430	発電機電圧調整装置	大 塚 昭 俊	"				