

路面電車の起動加速度及び表定速度 上昇に関する一考察

平 田 憲 一*

Considerations on the Starting Acceleration and Schedule Speed of Surface Cars

By Ken'ichi Hirata
Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The starting acceleration and schedule speed of surface cars in our country must be increased much higher than the present practice for the economical operation.

The writer investigated theoretically about the specific power consumption, root mean square current and mean starting current of main motors for surface cars, provided with main motors, 38 kW×2 (non-automatic control) and 25~45 kW×4 (automatic multi-notch control), the acceleration and schedule speed being varied between 1.5~5.0 km/h/s and 12~24 km/h respectively, and discussed on the slipping of driving wheels, heating and commutation of main motors. The results of the actual starting and dynamic braking tests, carried out for 38 kW×2 and 25 kW×4 surface cars are described briefly.

[I] 緒 言

表定速度の上昇は電車運轉に於ける重要問題の一つである。即ちこれによつて、乗客に對するサービスと同時に車輛の利用率を向上することとなるので、電鐵會社經營合理化上最も有効な手段となる。米國に於てはニューヨーク地下鐵或は P. C. C. 電車の如く、高加速度及び高減速度の採用により、表定速度を 30~40% 上昇した例がある。

表定速度を上昇するには單位重量當りの主電動機容量即ち kW/t を増加すると共に、平均驛間距離の比較的短い場合、特に路面電車等の如く最高速度が制限せられている場合に於ては起動加速度並びに制動減速度を増大することが最も有効である。而して加速度を上昇するためには單位重量當りの起動牽引力を増大することが必要であるが、このためには主電動機容量及びその個數、齒數比、驅動方式、制御方式、粘着重量等が問題となり、主電動機二乗平均平方根電流、最大起動電流、粘着係數、

起動時の衝動等を吟味することが必要である。

筆者は昭和 15 年、本誌上に於て「電車電動機の過負荷起動に関する一考察」⁽¹⁾なる表題の下に本問題に觸れたことがあつたが、最近益々路面電車の性能強化が要望されるに至つたので、改めて本問題を探り上げ、路面電車の加速度及び表定速度は如何なる程度迄増大し得るか又その制限條件は如何等の問題に就て、理論的及び一部實驗的に研究し、各種の場合に就て論評を試みることにした。

トロリーバスが都市交通機關として幾多の優秀な性能を有していることは改めて論ずる迄もなく、我國に於ても現在既にその使用を計畫中の交通會社が十數社に達している状態であるが、路面電車は輸送能力の大なること安全な高速運轉を行い得ること、耐用年限の大なること等の諸點に於てはトロリーバスに比し勝れており、米國に於ても今尙大都市の主要交通機關たるを失わず、今後兩者は夫々の分野に於て各々、その特長を活かし、併用されるものと考えられる⁽²⁾。ゴムタイヤの生産量の多い米國に於てすらかゝる現状にあることを思えば、我國の

* 日立製作所日立工場

路面電車としては特に大都市交通機関として益々その性能を強化して経済的に有利なる特長を活かす必要が痛感される次第である。

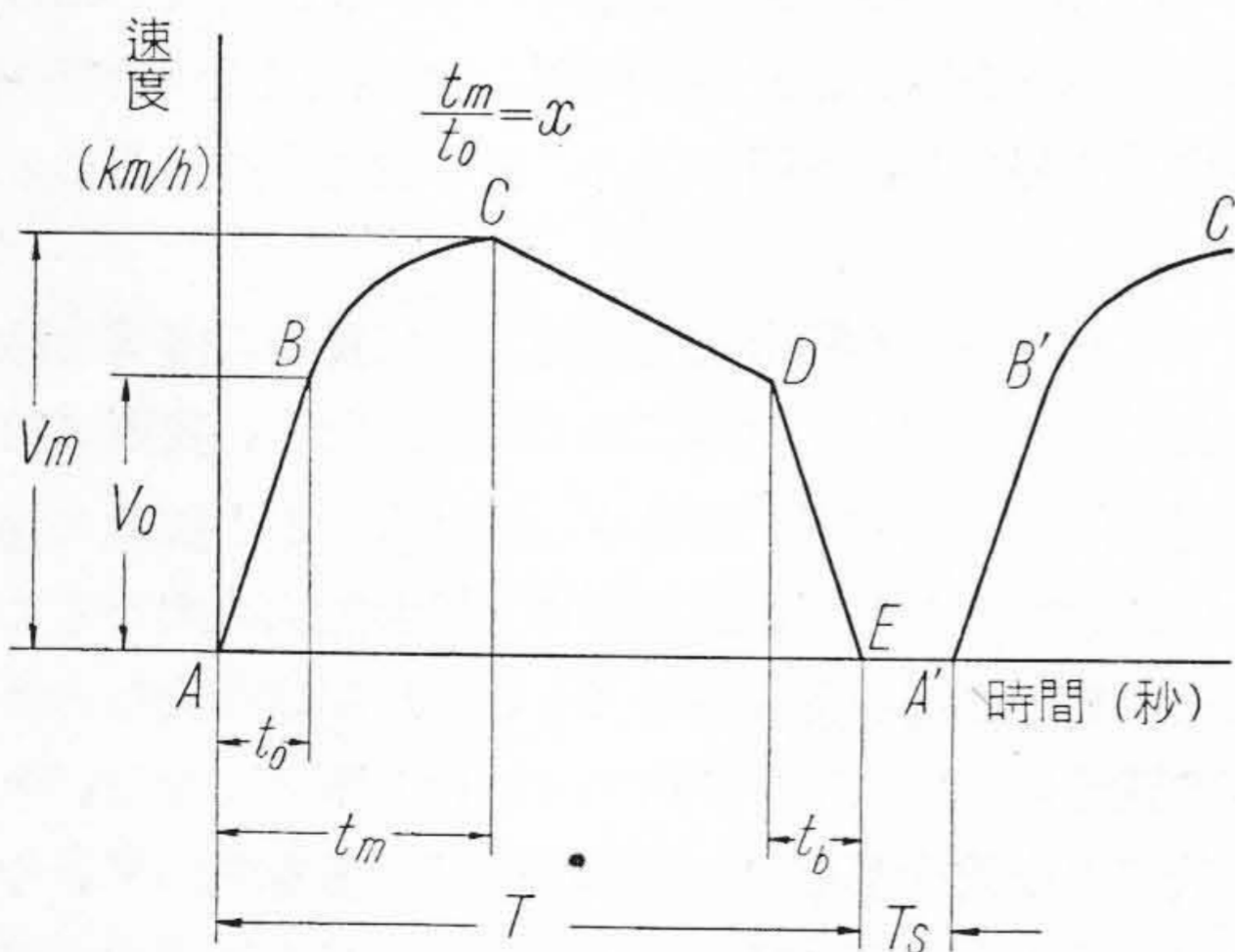
現在我國に於ける路面電車は自重 15~16 t, 38 kW × 2 臺程度のものが多く、起動加速度は定員荷重に於て 1.6~1.8 km/h/s, 平均驛間距離 400~500 m に於ける表定速度は 12~15 km/h に過ぎないが、バスに對抗するためには少くとも起動加速度 2.5~3.5 km/h/s, 表定速度 18~20 km/h 程度に高める必要がある。同時に振動並びに騒音減少、照明並びに通風方式の改善等、今後の路面電車として改良を加うべきものは甚だ多い。

[II] 路面電車運轉特性計算

先づ路面電車の運轉特性を明かにするために、代表的と考えられる下記の場合に就てペンダー計算を行つた。

- (1) 電車重量 (荷重時) 23 t, 動輪直徑 660 φ
- (2) 電車線電壓 600 V
- (3) 表定速度 18 km/h, 驛間距離 0.4 km, 停車時分 15 秒
- (4) 起動加速度及び制動減速度 1.5~5.0 km/h/s
- (5) 惰行減速度 0.35 km/h/s
- (6) 定格速度 20~30 km/h
- (7) 制御方式 非自動直接制御 (發電制動非常用) 自動間接制御 (發電制動常用)

ペンダー氏法⁽³⁾⁽⁴⁾は主電動機容量決定の豫備計算法の一つであつて、既に上田大助博士によつて屢々紹介されているので詳細は省略するが主電動機百分率特性を一定と假定し、力行時間 t_m と直線加速時間 t_0 との比を力行係數(假稱) x (第 1 圖参照) とすれば、運轉特性に必要な諸量は次の (1)~(5) 式の如く、 x の函數として表わされる。但し下記の記號を使用する。



第 1 圖 速度時曲線
Fig. 1 Speed Time Curve.

記號

- a = 起動加速度 (km/h/s)
- b = 制動減速度 (//)
- c = 惰行減速度 (//)
- E = 電車線電壓 (V)
- I_e = 主電動機二乘平均平方根電流 (A)
- I_0 = 主電動機直線加速時起動平均電流 (A)
- I_{max} = 主電動機直線加速時起動最大電流 (A)
- I_b = 發電制動電流 (A)
- L = 驛間距離 (km)
- M = 主電動機個數
- P_0 = 主電動機直線加速時最大出力 (kW)
- T = 走行時間 (秒)
- T_s = 停車時間 (秒)
- t_m = 力行時間 (秒)
- t_0 = 起動直線加速時間 (秒)
- t_b = 發電制動時間 (秒)
- U = 比電力消費量 (WH/t-km)
- V_0 = 起動直線加速時最大速度 (km/h)
- V_m = 力行時最大速度 (km/h)
- V_1 = 定格速度 (km/h)
- V_a = 平均速度 (km/h)
- V_{sch} = 表定速度 (km/h)
- W = 電車重量 (t)
- x = 力行係數 = t_m/t_0
- η = 主電動機能率

(1) 直線加速時末端最大速度

$$V_0 = \frac{V_a}{J + \sqrt{m(H - J^2)}} \dots\dots\dots(1)$$

ここに

$$J = \frac{x + \beta y}{q}, \quad \beta = \frac{a}{c}, \quad q = \frac{a(1+m)}{A}$$

$$m = \frac{2A(b-c)}{bc}, \quad A = \frac{V_a}{T}, \quad V_a = \frac{L}{T}$$

$$H = \frac{\lambda + \beta y^2}{2q}$$

y, λ は x の函數として數表より與えられる。

(2) 直線加速時主電動機電流

$$I_0 = \frac{84.4(a+c)V_0W}{ME\eta} \dots\dots\dots(2)$$

(3) 直線加速時主電動機出力

$$P_0 = \frac{0.0843(a+c)V_0W}{M} \dots\dots\dots(3)$$

(4) 主電動機二乘平均平方根電流

$$I_e = \frac{a_i V_0 W}{ME\eta\sqrt{X}} \dots\dots\dots(4)$$

$$x = \frac{aT}{V_0}$$

i は x の函数として數表より與えられる。

(5) 比電力消費量

$$U = \frac{uV_0^2}{L\eta} \dots \dots \dots (5)$$

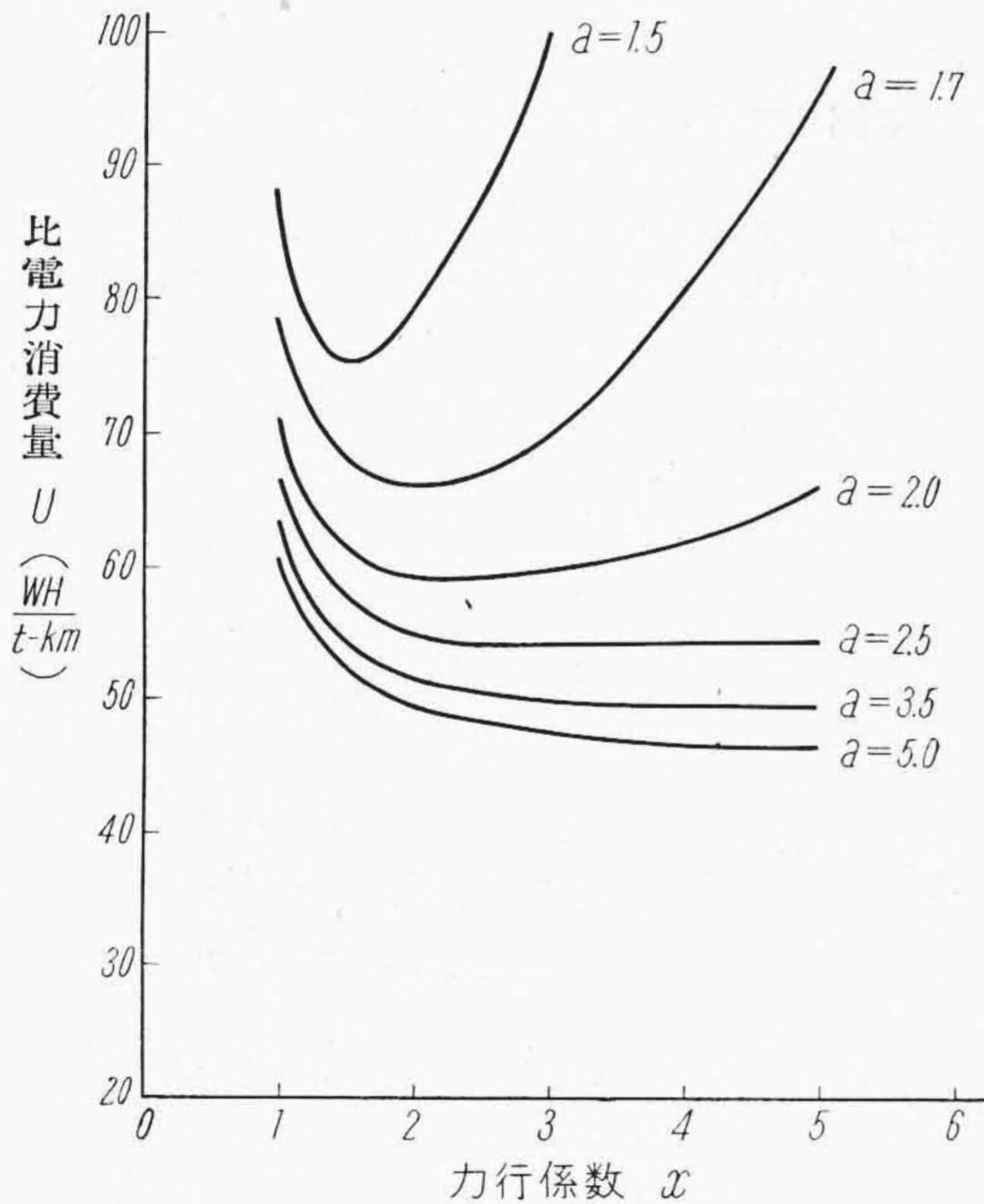
こゝに u は x の函数として數表より與えられる。

上記(1)~(5)式に於て $W=23$, $L=0.4$, $T=65$, $V_{sch}=18$, $V_a=22.2$, $E=600$ 及び 300 , $M=2$ 及び 4 とし $a=b=1.5\sim 5.0$, $c=0.35$ なる場合に就き、 $x=1\sim 5$ として前記諸量を求めた。又表定速度を變化した場合の影響を見るために、 $V_{sch}=12\sim 24$ とし、 $a=b=1.5\sim 5.0$ なる場合に就き $x=2.5$ として同じ諸量を求めた。これ等の結果より第2~12圖を作成した。

[III] 計算結果吟味

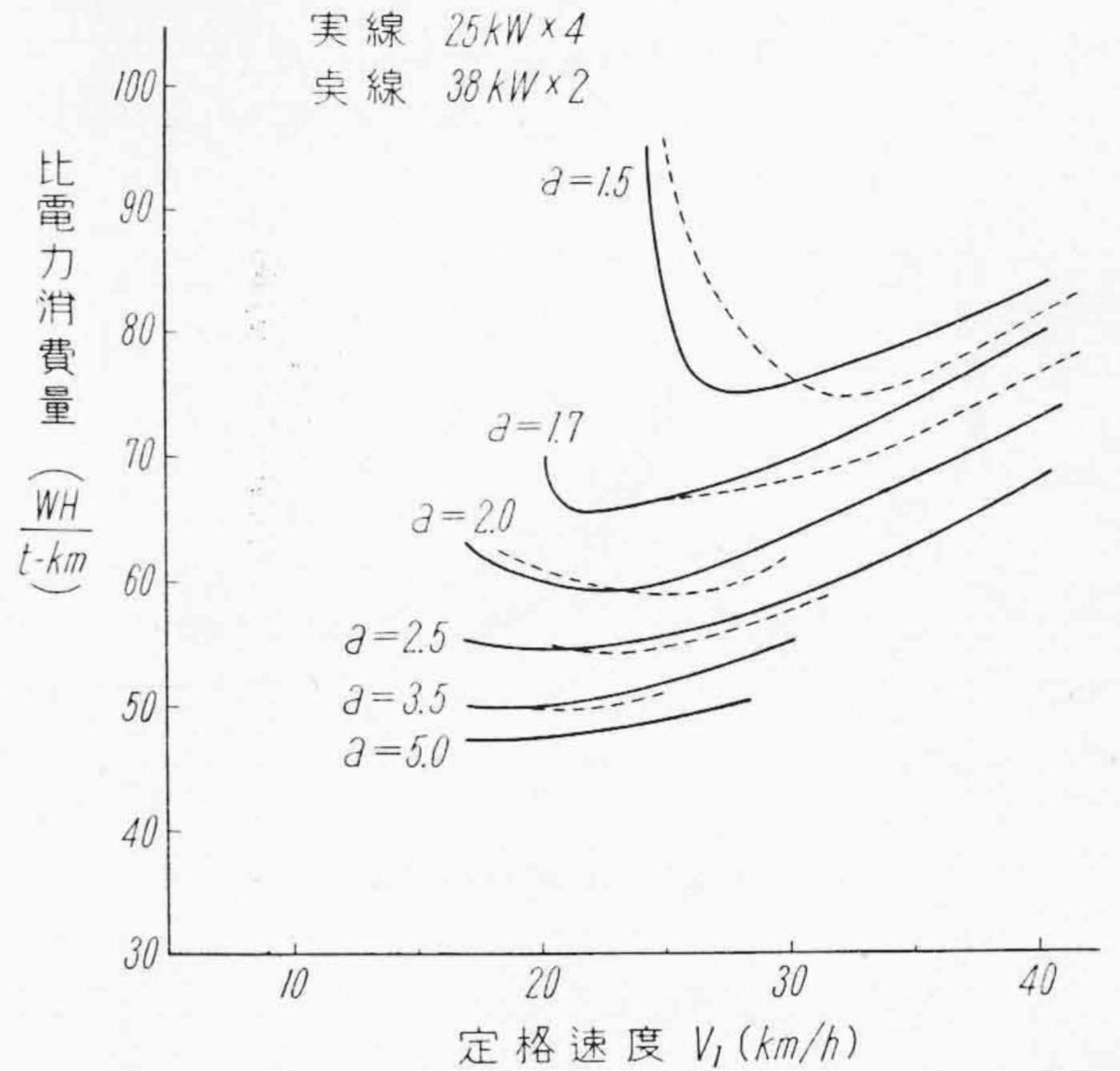
上記計算によつて求めた諸量の中、比電力消費量 (U) 二乗平均平方根電流 (I_e), 平均起動電流 (I_0) に就て吟味する。

(1) 比電力消費量 (U) 先づ第2圖の U と x との関係を見るに $a < 2$ では U は大となり不經濟である



第2圖 比電力消費量 (U)—力行係数 (x) 曲線
Fig. 2 Specific Power Consumption (U)—Powering Coefficient (x) Curves.

a が大となるにつれて U は次第に減少するが $a > 2.5$ ではその割合は次第に減少する。又 U の最小點は a の増大するにつれて x の大なる方へ移動する。全體的に見て $a=2\sim 3.5$ km/h/s に対しては $x=2\sim 3$ 程度が經



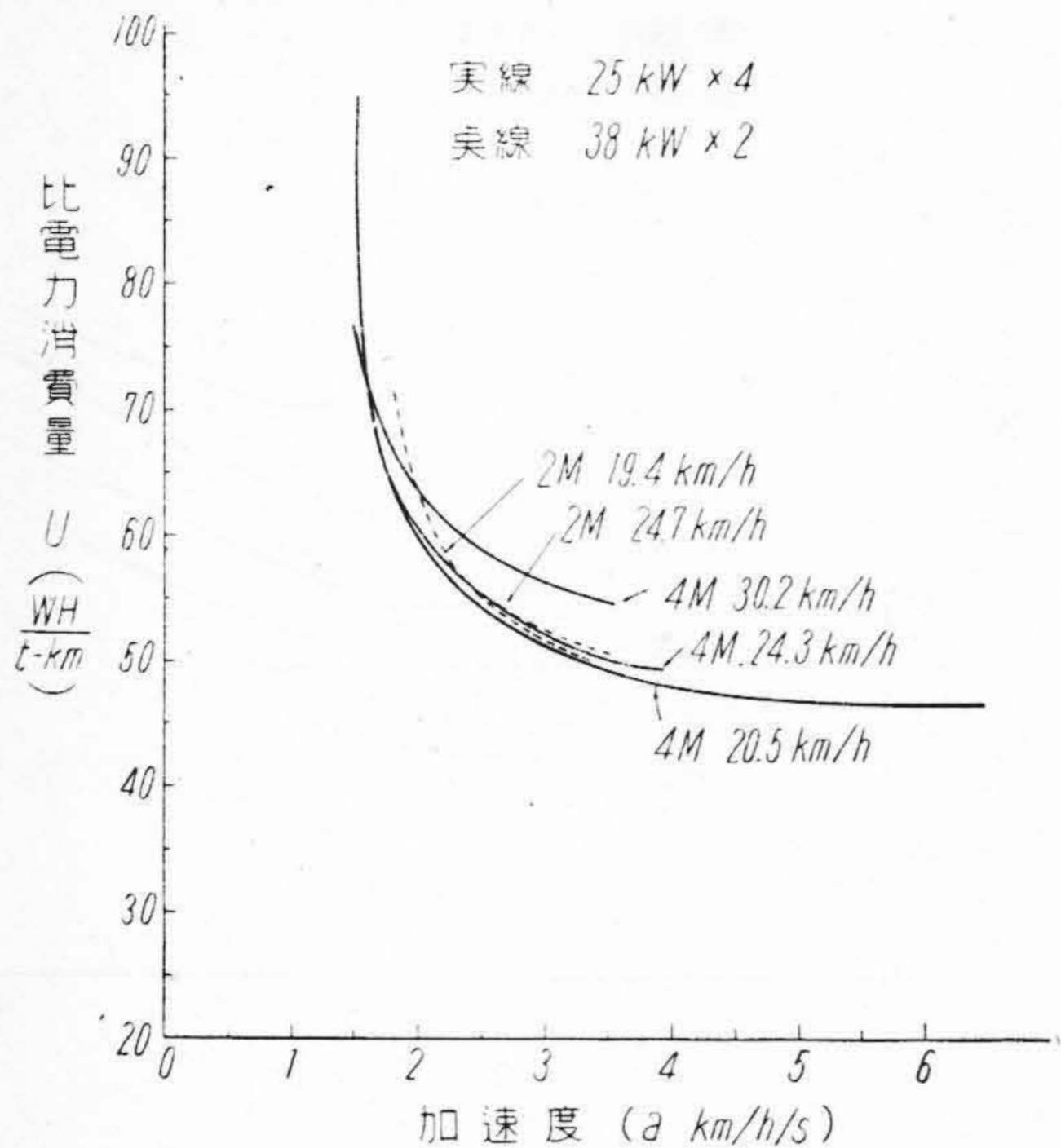
第3圖 比電力消費量 (U)—定格速度 (V_1) 曲線
Fig. 3 Specific Power Consumption (U)—Rated Speed (V_1) Curves.

濟的であると考えられる。

第3圖は第2圖を U と定格速度 V_1 との関係に換算したもので、 $25\text{ kW}\times 4$ 及び $38\text{ kW}\times 2$ の場合を記載した。本圖によれば a の増大と共に經濟的定格速度は次第に低下する傾向にあり、 $a=3.5\sim 2.0$ km/h/s に対しては $20\sim 26$ km/h が經濟的である。故に主電動機定格回轉數を 2000 r/m とすれば、齒數比は $12\sim 10$ 程度とすることが必要である。然し實際問題として釣掛式驅動方式では齒數比は小齒車の強度、齒車箱下の間隙の制約を受け、 660ϕ の動輪徑の場合は 6.0 程度以上にする事は困難であり、従つて定格速度もこの関係にて制約を受けることとなる。従つてこれ以上の齒數比を選定する場合はカルダン軸式その他の齒數比を大にとり得る驅動方式に変更することが必要である。尙定格速度或は齒數比の選定に當つては、電車最高速度及び主電動機の最高許容回轉數の制約を受けることは勿論である。

第4圖は $25\text{ kW}\times 4$ 臺及び $38\text{ kW}\times 2$ 臺の場合に於ける U と a との関係を二三の定格速度に就いて求めたものである。 $a=3.5$ 迄は a の増加と共に U は急激に下るが $a=3.5$ 以上は下り方少く、 5 以上は殆ど一定となる。 $a < 2$ とすれば U は急激に増大し、不經濟である。 $a=2\sim 3.5$ とすることが望ましい。又 $25\text{ kW}\times 4$ 臺定格速度 30.2 km/h の場合は U は他に比して稍々、大となるが、釣掛式の場合は前述の如く齒數比の制約を受けるため、高速電動機を使用するものとすれば定格速度をこの程度以下にすることは困難である。

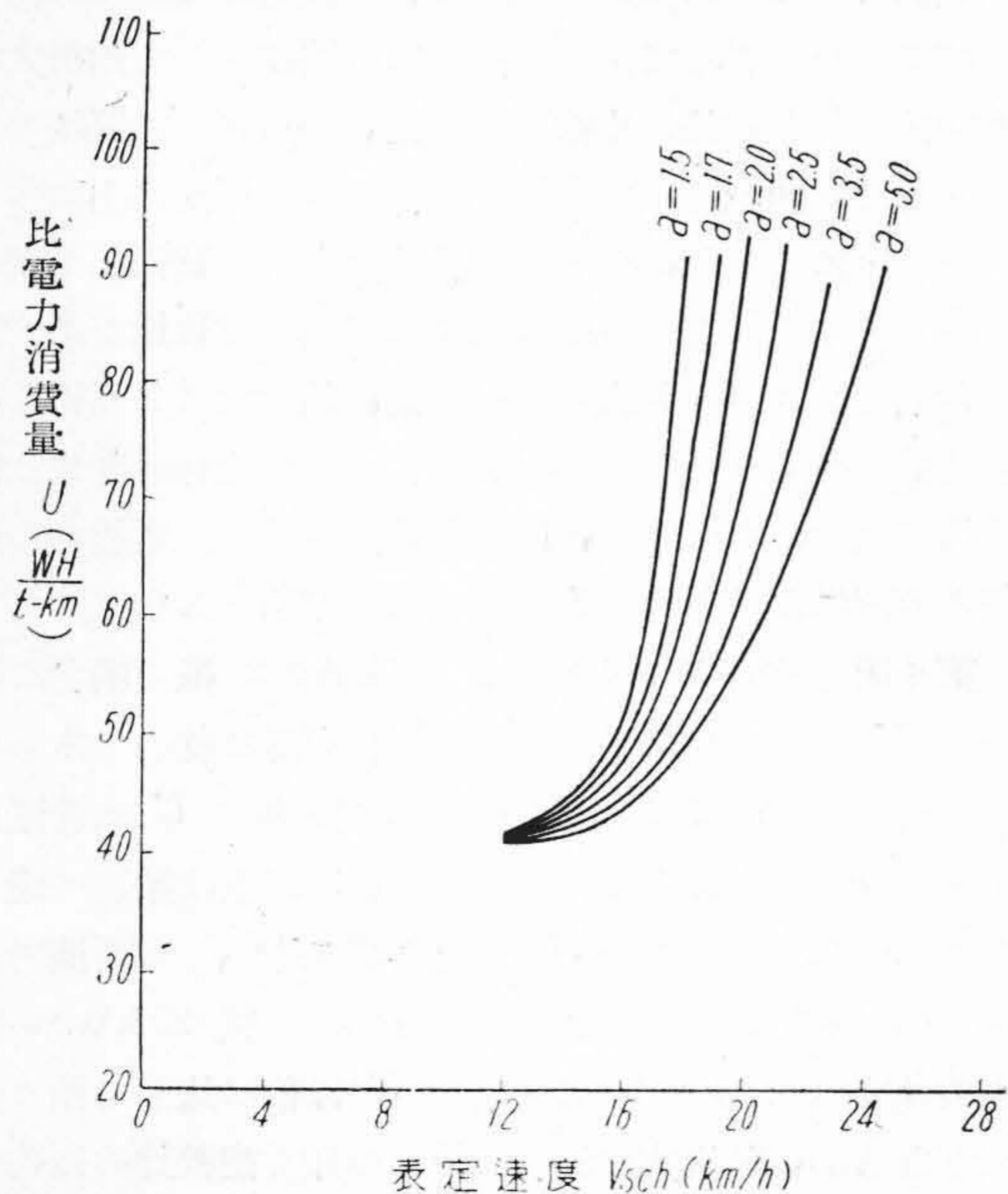
以上比電力消費量より見れば、表定速度が 18 km/h



第 4 圖 比電力消費量 (U)—加速度 (a) 曲線
Fig. 4 Specific Power Consumption (U)—Acceleration (a) Curves

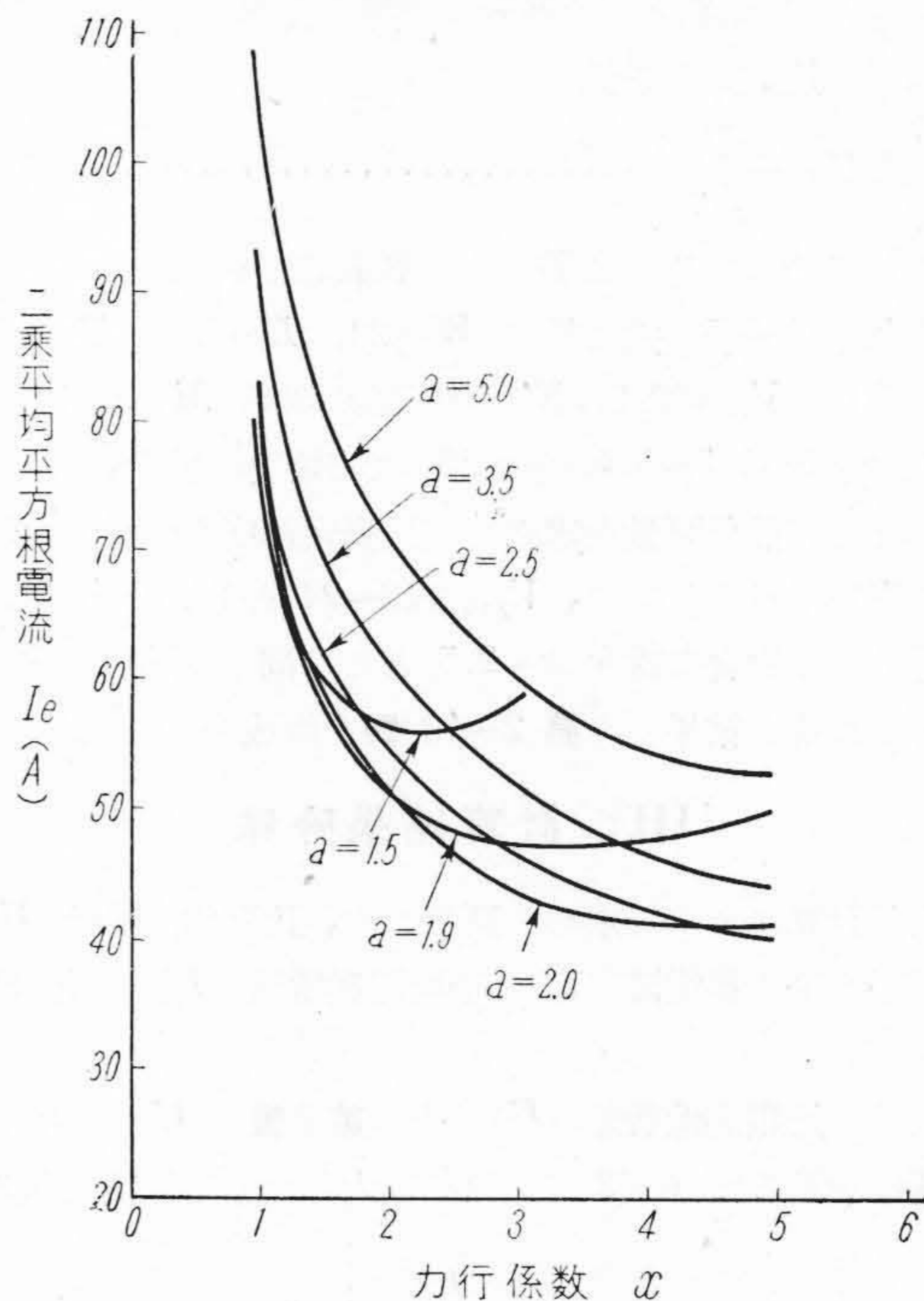
の場合、加速度及び減速度は 2~3.5 km/h/s が経済的であると云えるが、特に表定速度を増大する必要がある場合は比電力消費量は増大しても大なる加速度及び減速度をとるべきは勿論である。

第 5 圖は表定速度 V_{sch} を 12~24 km/h に變化した場合を示す。 V_{sch} が小で 12~14 km/h 程度なるときは

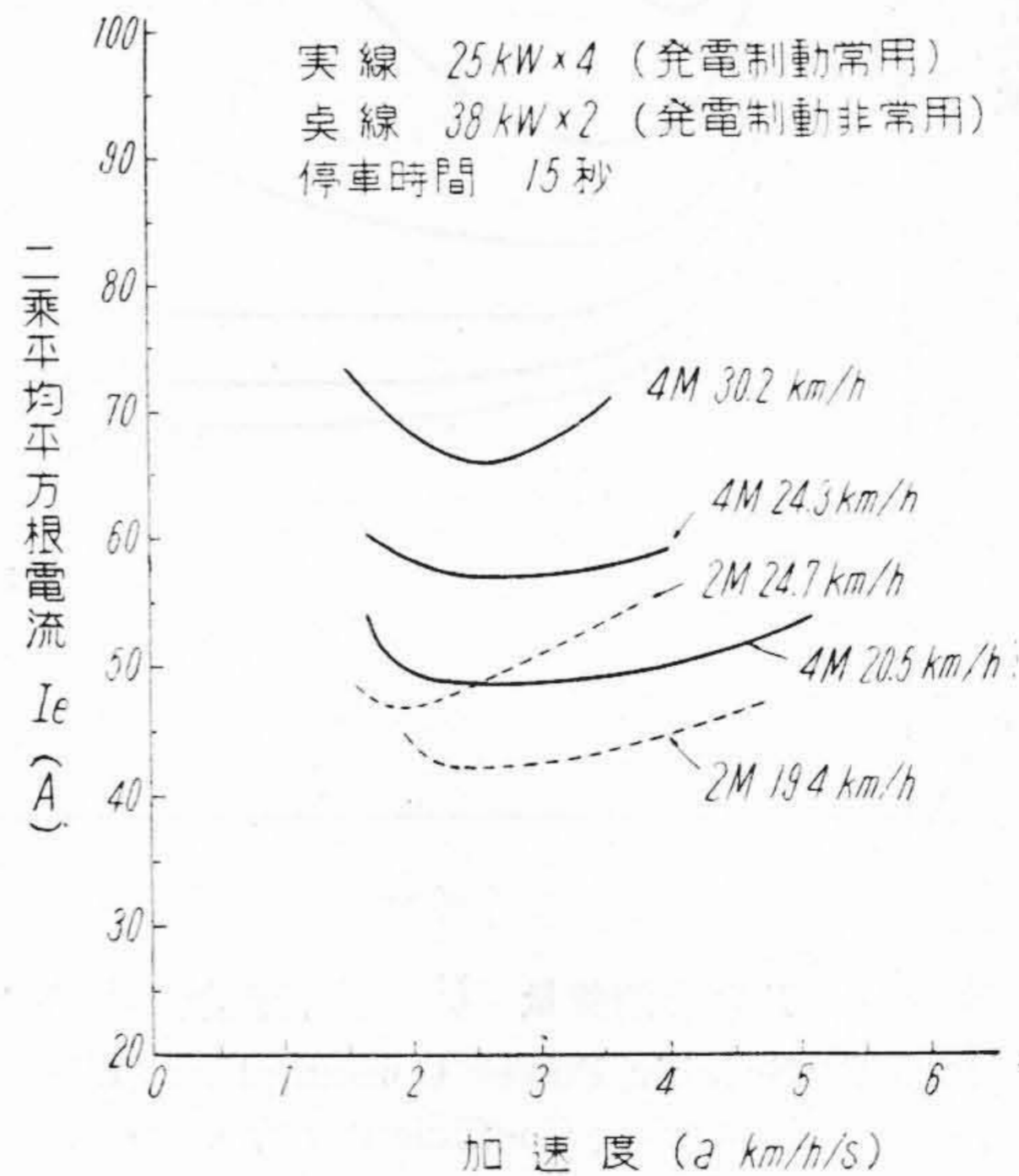


第 5 圖 比電力消費量 (U)—表定速度 (V_{sch}) 曲線
Fig. 5 Specific Power Consumption (U)—Schedule Speed (V_{sch}) Curves.

a を増大しても U 減少の利益は少く、 $V_{sch}=12$ では U は殆ど一定であるが、 $V_{sch}>18$ になると a 増大の利



第 6 圖 二乗平均平方根電流 (I_e)—力行係数 (α) 曲線
Fig. 6 Root Mean Square Current (I_e)—Powering Coefficient (α) Curves.

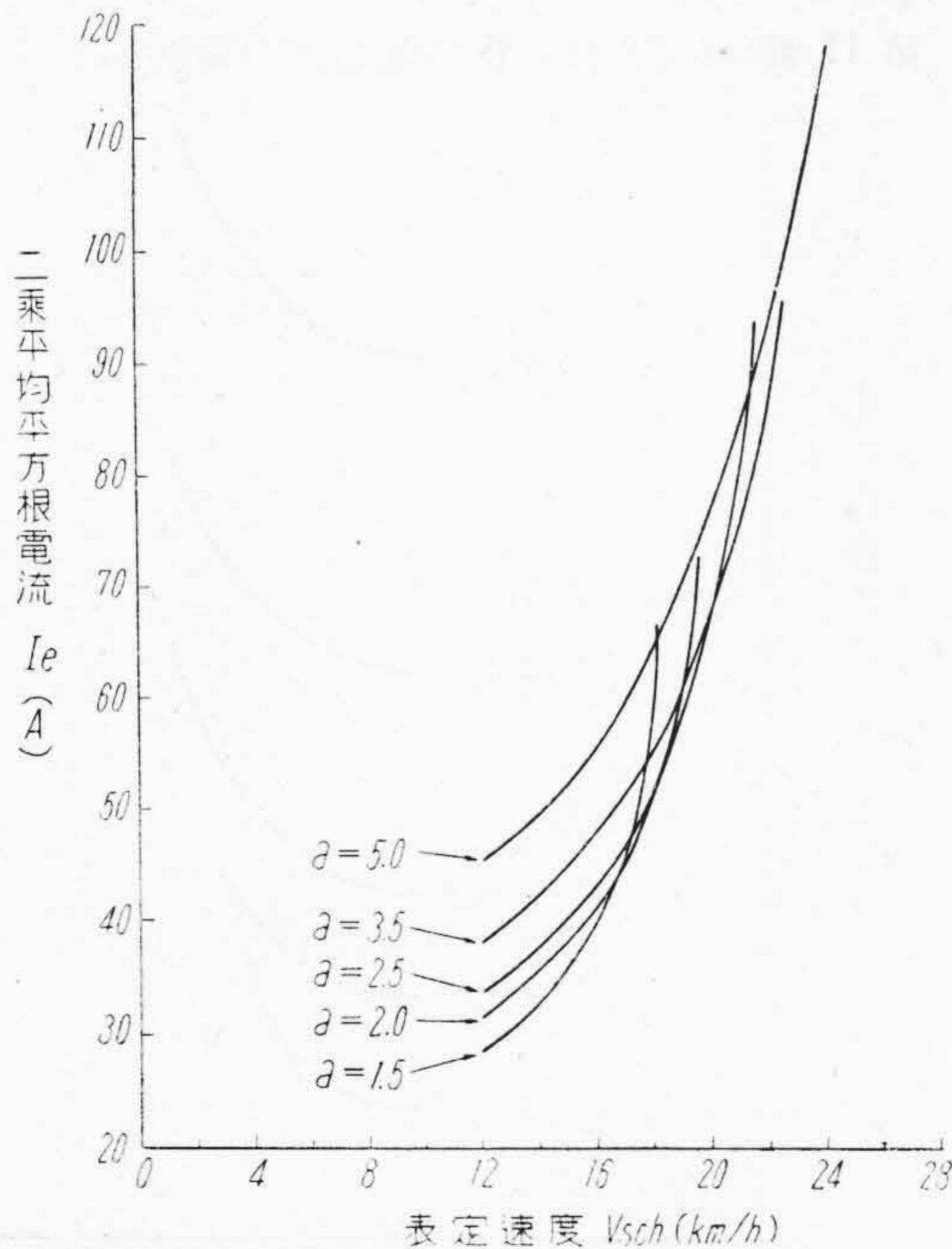


第 7 圖 二乗平均平方根電流 (I_e)—加速度 (a) 曲線
Fig. 7 Root Mean Square Current (I_e)—Acceleration (a) Curves.

益は大きくなる。即ち瞬間距離一定として表定速度を上昇するためには、加速度を上昇することが必要である。今 $U=85$ に制限するものとすれば $a=1.5, 2.5, 5.0$ に對する最大表定速度は夫々 18, 21, 24 km/h となる。即ち起動加速度を大とすれば、電力消費量を餘り大とすることなしに表定速度を大となし得る。

(2) 二乗平均平方根電流 (I_e) 第6圖を見るに $a=1.5$ のときは $x=2.25$, $a=1.7$ のときは $x=3.5$ に I_e 最小の點があり、 $a>2$ となると x の大なる程 I_e は低下する。今の場合 $a<2$ のときは a の小なるにもかゝらず、 I_e は却つて大となる場合あり、 U も亦大となつて、非常に不經濟な運轉をすることとなる。これより見るも少くとも $a>2$ とすることが必要である。

第7圖は 25 kW×4 臺及び 38 kW×2 臺の場合の I_e と a との關係を示すものである。4 個電動機の場合は $a=2.5\sim 3.5$ の間に、2 個電動機の場合は $a=2\sim 2.5$ の間に夫々 I_e 最小の點がある。これ等の a より加速度を増大又は減少すれば、 I_e は次第に大となる。又今の範囲内では定格速度の小なる方が I_e は小となる。尙本圖に於ては停車中の主電動機の冷却を考慮してあり、又 4 個電動機の場合は停車用に電氣制動を常用するものとしてこれ等の補正を加えてある。

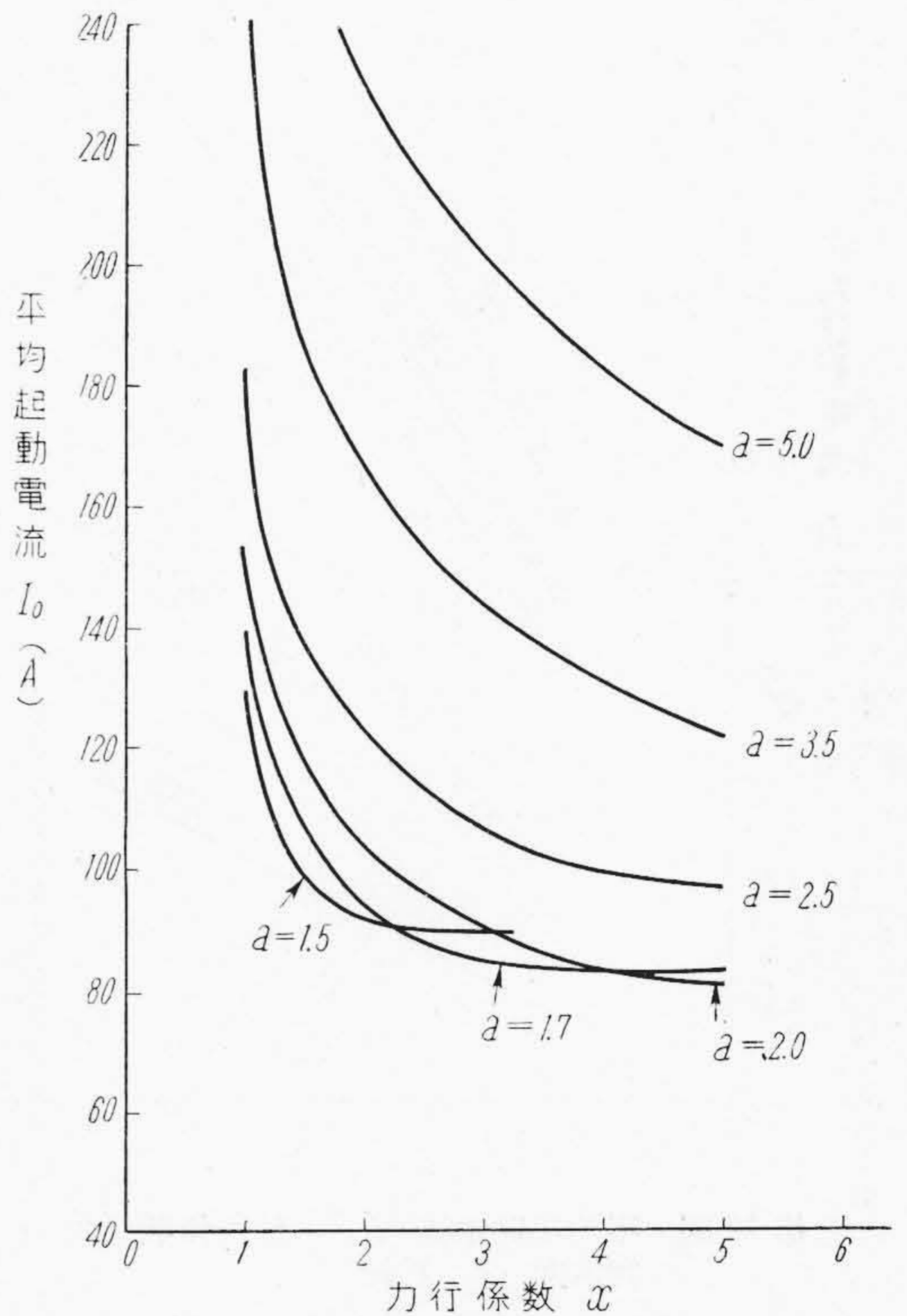


第8圖 二乗平均平方根電流 (I_e)—表定速度 (V_{sch}) 曲線

Fig. 8 Root Mean Square Current (I_e)—Schedule Speed (V_{sch}) Curves.

第8圖は表定速度を變化した場合を示す。何れの a に對しても V_{sch} の増大につれて I_e は急激に増大する傾向にある。 V_{sch} が小で $V_{sch}=12\sim 16$ km/h の場合は a の小なる程 I_e は小であるけれども、 $V_{sch}>18$ km/h になると $a=1.5$ に對する I_e が急激に増大し、 $a=2.5$ に對する I_e の方が却つて小となる。又 $V_{sch}>22$ となると $a=2.5$ の I_e が急激に増大し、 $a=5$ に對する I_e の方が小となる。即ち本圖より見るも表定速度を上昇するためには加速度を上昇することの必要なるは明かである。

(3) 起動平均電流 (I_0) 第9圖に I_0 と x との關係を示す。各加速度共 $x<2$ となると I_0 は急激に増大



第9圖 平均起動電流 (I_0)—力行係数 (x) 曲線

Fig. 9 Mean Starting Current (I_0)—Powering Coefficient (x) Curves.

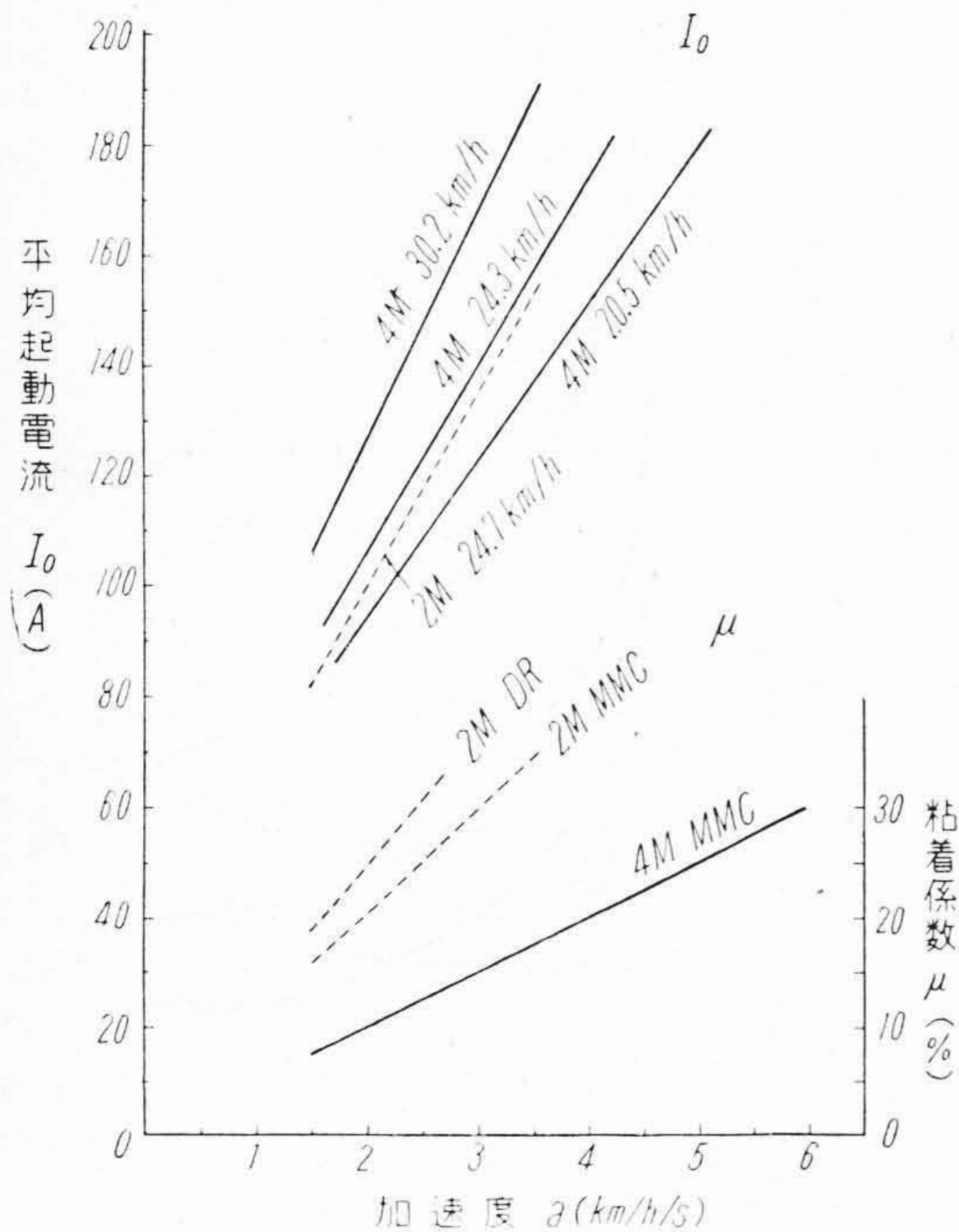
する。又 x が大となるにつれて I_0 は減少するが、 $a<2$ のときは $a=2$ のときより大となることあり、 I_0 の點に於ても不利なることを示す。 $a>2$ とすることが望ましい。

又ここに云う I_0 は直線加速時の起動平均電流であつて、實際起動時の最大尖頭電流は、實測結果によれば非自動直接制御方式 8 ノッチでは $1.55 I_0$ 、自動間接制御方式 13 ノッチでは $1.25 I_0$ の程度となる。起動時の主電動機整流に就てはこの點考慮することが必要である。

今最大尖頭電流を一時間定格電流の 200% に制限するものとすれば、平均起動電流 I_0 は、8 ノッチでは $I_0 = 1.3 I_1$ 、13 ノッチでは $I_0 = 1.6 I_1$ となる。

従つて主電動機熱容量に余裕ある場合に於ても、整流の制限、即ち閃絡事故防止の點より、8 ノッチの場合は 13 ノッチの場合に比して起動平均電流は約 80% に制限せざるを得ない。この點より見ても起動加速度を増大するためには多段式制限方式の採用が望ましい。

第 10 圖には平均起動電流と加速度との關係及び加速度とこれを發生するに必要な粘着係數との關係を示す。粘着係數の算出に當つては直接制御の場合は起動最大尖



第 10 圖 平均起動電流 (I_0)、粘着係數 (μ)—加速度 (a) 曲線

Fig. 10 Mean Starting Current (I_0) Adhesive Coefficient (μ)—Acceleration (a) Curves.

頭牽引力は平均牽引力の 160%、間接制御多段式の場合は 130% とし、各臺車の軸重移動を考慮してその補正を加えてある。尚粘着係數は第 1 表の通りで、軌條の状態によつて可成廣範圍に變化する。

38 kW × 2 臺のときは、定格速度 24.7 km/h とすれば $I_0 = 1.3 I_1 = 1.3 \times 73 \text{ A} = 95 \text{ A}$ 故に第 10 圖より $a = 1.85$ 、この場合の $\mu = 23\%$ にて略々限度一杯であり、2 個電動機の場合は動輪滑動に制限せられ、1.85 km/h/s 以上に加速度を高めることは困難である。

25 kW × 4 臺のとき、定格速度 30.2 km/h とすれば

第 1 表 粘着係數 (μ)

Table 1 Adhesive Coefficient. (μ)

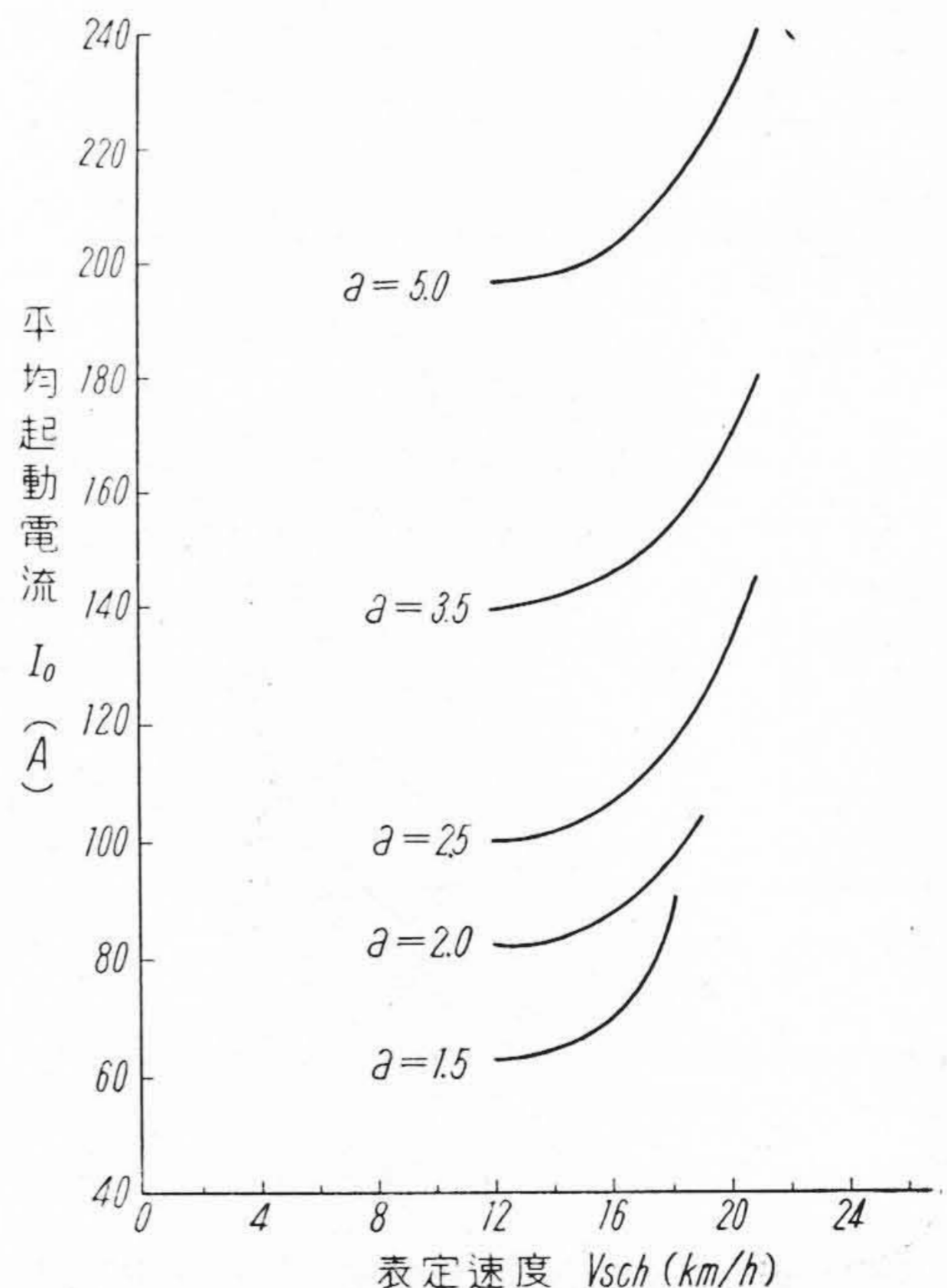
	通常の場合	撒砂を行つた場合
清淨で乾燥した軌條	0.25~0.30	0.35~0.40
濕つた軌條	0.18~0.20	0.22~0.25
油附着し且濕つた軌條	0.15~0.18	0.20~0.22
霰で蔽われた軌條	0.15	0.20
乾いた雪で蔽われた軌條	0.10	0.15

$I_0 = 1.6 I_1 = 1.6 \times 97 \text{ A} = 155 \text{ A} \therefore a = 2.7$ このときの $\mu = 13.5\%$ にて差支えない。定格速度 20.4 km/h とすれば、 $a = 4.15$ となり、 $\mu = 20.5\%$ にて未だ動輪滑動の危険はなく差支えない。

又もし起動電流の増大を許して摩擦係數の限度一杯の最大加速度を求めると、2 個電動機の場合は $\mu = 25\%$ とするも $a = 2$ 、 $\mu = 20\%$ とすれば $a = 1.6$ に過ぎない。4 個電動機の場合は同じく $\mu = 25\%$ とすれば、 $a = 5.0$ 、 $\mu = 20\%$ とすれば、 $a = 4.0$ となる。

以上述べた通り 2 個電動機では如何に牽引力を増大しても、動輪滑動のため、2 km/h/s 以上の加速度を出すことは困難で、是非共 4 個電動機とし、且多段式制御方式を採用して起動時の牽引力の變化を小ならしめることが必要である。

第 11 圖は表定速度と平均起動電流の關係を示すもの



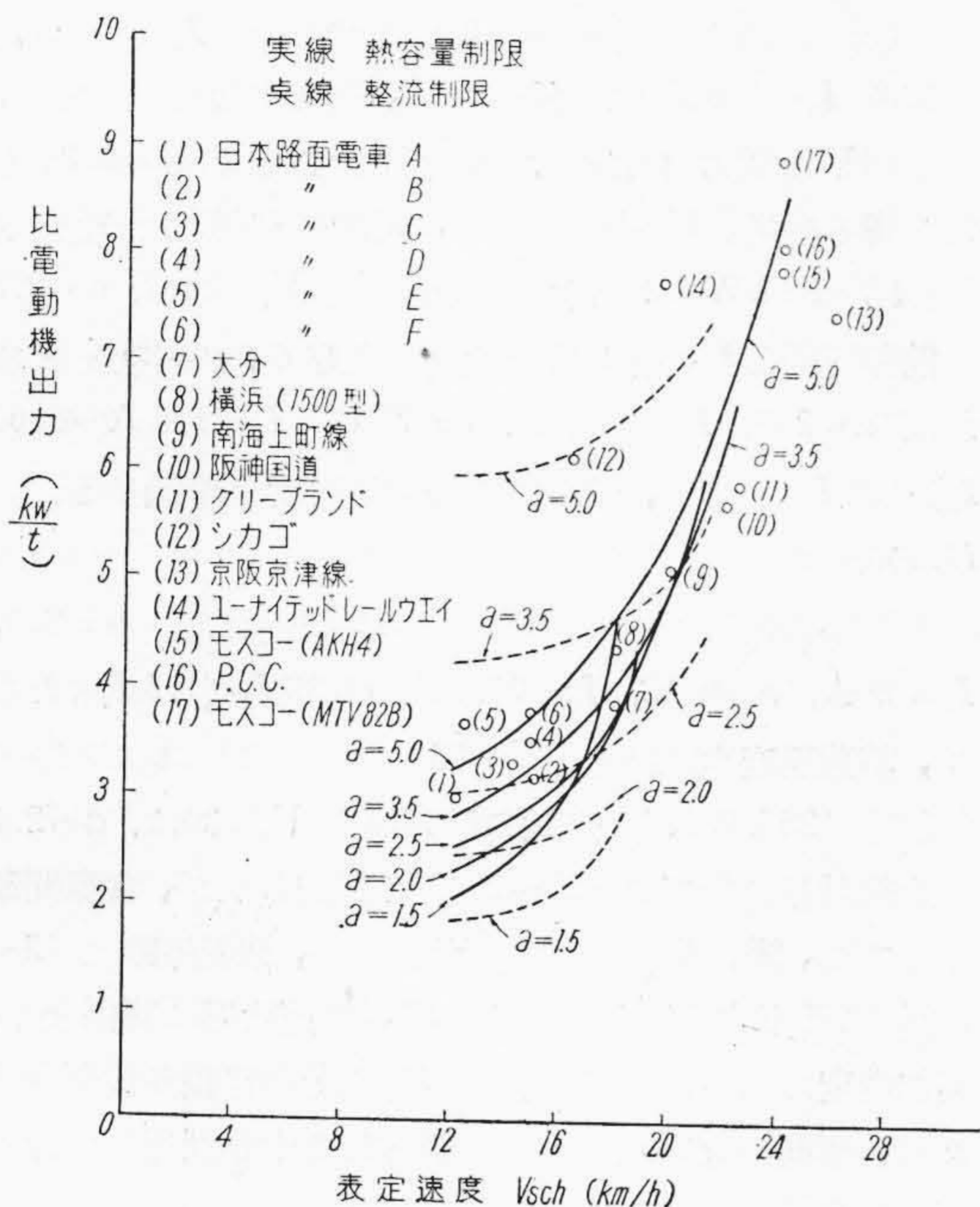
第 11 圖 平均起動電流 (I_0)—表定速度 (V_{sch}) 曲線

Fig. 11 Mean Starting Current (I_0)—Schedule Speed (V_{sch}) Curves.

で、各加速度に對し、表定速度の上昇と共に平均起動電流は可成急激に増大する。25 kW×4 臺の場合、 $a=2.5$ とすれば $V_{sch}=21$ で、 $V_{sch}=24$ とするためには整流の制限より、 $a=5.0$ 、主電動機容量を 45 kW×4 臺以上に増大しなけばならない。

(4) 比電動機出力 (kW/t)

第 12 圖は I_c 及び I_0 を比電動機出力 (kW/t) に換算し、これと表定速度 (V_{sch}) との關係を求めたものゝ



第 12 圖 比電動機出力 (kW/t) — 表定速度 (V_{sch}) 曲線

Fig. 12 Specific Motor Out Put (kW/t) — Schedule Speed (V_{sch}) Curves.

一例で、 $a=2.5$ の場合を示す。本圖より表定速度を上昇するためには、加速度と共に主電動機容量を可成急激に増大する必要があることが分る。又現在我國路面電車の kW/t は 3.0~3.8 で、現在の表定速度に對しては餘裕

あるもの多く、自動多段式制御方式を採用すれば、 $a=2.0$ 、 $V_{sch}=17\sim18$ に上昇し得る可能性がある。更に 4 個電動機式として kW/t=5.0~6.0 及び 8.0~9.0 に増大すれば $a=2.5\sim3.5$ 及び 4.0~5.0、 $V_{sch}=18\sim20$ 及び 22~24 に上昇し得ることが分る。第 2 表に我國並びに歐米路面電車數例の主要項目を示す。

[IV] 計算結果の應用

前述の第 2~12 圖を用いて、38 kW×2 直接制御式及び 25 kW×4 自動式路面電車に就て許容加速度と制限條件たる粘着係數、主電動機溫度上昇及び整流、並びにこれに關連して比電力消費量に就いて吟味する。

先づ制限條件を下記の如く設定する。

- (1) 粘着係數 $\mu=25\%$ 及び 20%
- (2) 主電動機許容溫度上昇
38 kW (600 V, 73 A, A 種絶縁) $\theta=85^\circ\text{C}$
25 kW (300 V, 97 A, B 種絶縁) $\theta=105^\circ\text{C}$
- (3) 主電動機連續定格電流 $I_c=0.7 I_1$
- (4) 主電動機許容最大電流 $I_{max}=2 I_1$
- (5) 主電動機許容平均起動電流
直接制御非自動式 (8 ノッチ) $I_0=1.3 I_1$
間接制御自動式 (13 ノッチ) $I_0=1.6 I_1$
- (1) 38 kW×2 非自動直接制御式 $V_1=24.7$, $a=1.6$

(a) 粘着重量 2 個電動機の場合、最大の制限は粘着重量である。第 10 圖より $\mu=20\%$ とすれば $a=1.6$ となり、主電動機回轉力を如何に増大しても動輪滑動のため a をこれ以上増大することは困難である。然も非自動直接制御方式であるから、起動電流の最大尖頭値は可成不規則に變動するものと考えねばならないから條件は更に悪くなる。最大牽引力は軸重に比例する故、平均荷重 18.5 t の場合も同様 $a=1.6$ が最大である。

(b) 主電動機溫度上昇 第 7 圖に於て $a=1.6$ とすれば $I_c=47.5 \text{ A}$ となる。今 38 kW 機の連續定格電

第 2 表 路面電車主要項目表

Table 2 Principal Data for Surface Cars.

電車名	自重 (t)	定員	主電動機出力 (kW)	比電動機出力 (kW/t)	加速度 (km/h/s)	表定速度 (km/h)	最高速度 (km/h)	駆動方式	制御方式
日本路面電車(E)	16.00	96	38×2	3.65	2.0~1.8	12.5	35	鈞掛式	直接非自動式
同上(D)	17.00	94	38×2	3.50	2.0~1.8	15.0	35	鈞掛式	直接非自動式
同上(B)	16.26	80	38×2	3.75	2.0~1.8	15.0	35	鈞掛式	直接非自動式
大分交通	18.85	90	45×2	3.85	2.5~2.0	18.0	40	鈞掛式	自動多段式MMC
横浜市電(1500型)	17.00	120	25×4	4.35	3.2~2.5	18.0	45	鈞掛式	自動多段式MMC
P. C. C. 電車	16.50	80	41×4	8.02	7.5~5.5	24.0	75	カルダン軸式	自動多段式
モスコウ市電	15.00	108	40×4	7.85	7.0	24.0	60	カルダン軸式	自動多段式
モスコウ市電	17.50	100	50×4	8.9	3.5	24.0	60	カルダン軸式	自動多段式

流 $I_c=51$ A とすれば $W=23$ t 満載時、主電動機温度上昇 θ は略々次式にて與えられる。

$$\theta \cong 85 \times \left(\frac{47.5}{51} \right)^2 = 74^\circ\text{C}$$

又もし $W=18.5$ t の平均荷重をとれば $I_e=38.24$ となる故、同様にして $\theta=48^\circ\text{C}$ となる。横濱市交通局の實車試験の場合は後述の如く $W=18.5$ t の平均荷重にて $a=1.6\sim 1.8$ とし、營業状態にて連続温度上昇試験を行つた所 $\theta=46^\circ\text{C}$ で略々上記計算結果と一致した。

かくの如く2個電動機付路面電車の主電動機温度上昇は粘着重量の制限のため概して低く相當の餘裕がある。

(c) 主電動機整流 第10圖より $a=1.6$ とすれば、 $V_1=24.7$ の場合 $I_0=86$ A $=1.18 I_1 < 1.3 I_1$ にて略々整流限度内に納まる。

(d) 比電力消費量 第2圖より $U=75$ で可成り不利な運轉となる。

(2) 38 kW \times 2 非自動直接制御式 $V_1=24.7$, $a=2.0$

(a) 粘着重量 2個電動機でも線路状態が良好で、 $\mu=25\%$ 、運轉操作も理想的に行われた場合は第10圖の如く $a=2.0$ となし得る。これは2個電動機非自動制御式の場合の最高限度であつて、實際問題としては動輪滑動防止のため $a=1.6\sim 1.8$ 程度が適當で $a=2.0$ は特別の場合のみに制限すべきものと考えられる。後記横濱市交通局の試験結果を見ても力行時 2.2, 制動時 1.8 にて動輪は滑動している。

(b) 主電動機温度上昇 $a=2.0$ とすれば第7圖より $I_e=47$ A となり $\theta=72^\circ\text{C}$ となる。もし平均荷重 $W=18.5$ t とすれば $I_e=37.8$ A, $\theta=47^\circ\text{C}$ となり、温度上昇は $a=1.6$ の場合と殆ど同様である。

(c) 主電動機整流 第10圖より $a=2.0$ とすれば $I_0=100$ A $=1.37 I_1 > 1.3 I_1$ となり、整流の制限を超過し閃絡の危険がある。もし平均荷重 18.5 t をとれば $a=2.0$ のとき $I_c=84$ A $=1.15 I_1 < 1.3 I_1$ にて限度内に納まる。

(d) 比電力消費量 第2圖より $a=2.0$ とすれば $U=60$ に低下し可成り改善される。

(3) 38 kW \times 2 自動多段制御式 $V_1=24.7$ $a=2.0$

現在の路面電車の實態は前述の如くで、主電動機温度上昇は概して低く、主電動機熱容量に大なる餘裕あるにもかゝらず、動輪の滑動に制限されて起動加速度は $a=1.6\sim 1.8$ に制限される。又假に軌道状態が良好で、 $a=2.0$ となし得たとすれば、主電動機整流容量の制限を超過し、閃絡の危険を生ずる。従つて2個電動機付にて $a=2.0$ 以上にするためには、直接制御方式を捨て、自動加速多段式とする必要がある。今多段式制御器を用

るものとすれば、運轉技術に關係なく規則正しい起動を行うことが出来る上に、平均電流に對する尖頭電流の割合が減少するので、前記粘着重量の制限、整流の制限が可成り緩和される結果、加速度を上昇し得る。

(a) 粘着重量 $\mu=20\%$ とすれば $a=2.0$ となる。

(b) 主電動機温度上昇 $a=2.0$ とすれば $I_e=47$ A, $\theta=72^\circ\text{C}$, $W=18.5$ とすれば $I_e=37.8$ A, $\theta=47^\circ\text{C}$ にて可成り餘裕がある。

(c) 主電動機整流 $a=2.0$ とすれば $I_0=100$ A, $=1.37 I_1 < 1.6 I_1$ にて餘裕あり、差支えない。

(d) 比電力消費量 $\mu=20\%$ とすれば $a=2.0$ となし得る結果、 $U=60$ となり、可成り有利となる。

(4) 38 kW \times 2 自動多段制御式 $V_1=24.7$, $a=2.5$
前記同様とし、特に軌道状態が良好で、 $\mu=25\%$ とすれば $a=2.5$, $I_e=48.5$ A, $\theta=77^\circ\text{C}$, $I_0=118$ A $=1.62 I_1 > 1.6 I_1$ となり、僅かに整流耐量限度を超過する。
 $U=55$

もし平均荷重をとり、 $W=18.5$ t とすれば $a=2.5$, $I_e=39$ A, $\theta=50^\circ\text{C}$, $I_0=98.5$ A $=1.35 I_1 < 1.6 I_1$ となり、整流限度内に納る。 $U=55$

(5) 25 kW \times 4 自動多段制御式 $V_1=30.2$, $a=2.5$
上記計算に於て $\mu=25\sim 20\%$ と假定したが、實際問題として油、曇、雪の附着等の影響にて、粘着係数は $15\sim 10\%$ に低下することもあるので、軌道状態に關係なく、高加速度にするためには、4個電動機付自動多段制御式とし、車輛の全重量を粘着重量として十分利用しなければならぬ。

(a) 主電動機温度上昇 4個電動機の場合は粘着重量の制限は著しく緩和され、主電動機温度上昇が問題となる。今 25 kW 機の場合連続定格電流 $I_c=65$ A とし、限度一杯に使用するものとすれば、 $\theta=105^\circ\text{C}$, 第7圖より $a=2.5$ となる。もし平均荷重をとり $W=21.4$ t とし、起動電流を同一とすれば $a=2.71$ となり、 $I_e=61.4$ A に減少し、 $\theta=94^\circ\text{C}$ となる。横濱市交通局實車試験に於ては平均荷重 $W=21.4$ t, $a=2.2\sim 2.5$ の場合主電動機温度上昇 $\theta=91^\circ\text{C}$ であつた。

(b) 主電動機整流 $a=2.5$ のとき $I_0=145$ A $=1.5 I_1 < 1.6 I_1$ にて限度内にある。

(c) 粘着重量 $a=2.5$ のとき $\mu=12.5\%$ にて問題はない。 $W=21.4$ t, $a=2.71$ とするも $\mu=13.4\%$ にて差支えない。

(d) 比電力消費量 $a=2.5$ のとき $U=60$, $a=2.71$ のとき $U=57.5$ となり、滑動の心配なく有利な運轉を行うことが出来る。

(6) 25 kW \times 4 自動多段制御式 $V_1=30.2$, $a=2.7$
整流限度一杯にて起動するものとすれば a は更に増

大し得る。即ち $I_0=1.6I_1=155\text{ A}$ 、故に第 10 圖より $a=2.7$ 、 $I_e=65.5\text{ A}$ 、 $\theta=106^\circ\text{C}$ にて温度上昇は略々限度一杯である。 $\mu=13.5\%$ 、 $U=57.5$

平均荷重をとり $W=21.4\text{ t}$ とすれば $a=2.94$ となり $I_e=62\text{ A}$ 、 $\theta=95^\circ\text{C}$ 、 $\mu=14.5\%$ 、 $U=56.5$ となる。

(7) 25 kW×4 自動多段制御式 $V_1=24.3$ 、 $a=3.45$

$V_1=30.2$ とすれば、主電動機整流条件及び温度上昇の制限より $a=2.7$ 以上に増大することは出来ない。駆動方式をカルダン軸式等に變更し、齒數比を大ならしめ定格速度を 24.3 に低下し、整流限度一杯にて起動するものとすれば a は可成大となる。 $I_0=1.6I_1=155\text{ A}$ 、第 10 圖より $a=3.45$ となる。故に $I_e=57.5\text{ A}$ 、 $\theta=82^\circ\text{C}$ 、 $\mu=17.5\%$ 、 $U=50.5$ となる。又平均荷重 $W=21.4\text{ t}$ 、とすれば $a=3.74$ 、 $I_e=54\text{ A}$ 、 $\theta=73^\circ\text{C}$ 、 $\mu=18.8\%$ 、 $U=49.5$ となり差支へない。

(8) 25 kW×4 自動多段制御式 $V_1=20.5$ 、 $a=4.15$ 更に V_1 を 20.5 km/h に下げるものとし、整流限度一杯にて起動するものとすれば、 $I_0=155\text{ A}$ 、 $a=4.15$ $I_e=50.5\text{ A}$ 、 $\theta=63.5^\circ\text{C}$ 、 $\mu=20.5\%$ 、 $U=47.5$ となる。平均荷重 $W=21.4\text{ t}$ のときは $a=4.48$ 、 $I_e=48\text{ A}$ 、 θ

$=57^\circ\text{C}$ 、 $\mu=22\%$ 、 $U=47$ となり、この場合は主電動機整流と共に粘着重量の制限を受けることとなる。

(9) 30 kW×4 自動多段制御式 $V_1=20.5$ 、 $a=5.0$ 上述の如く高加速度の場合は主電動機整流が制限条件となることが多い。従つて前述の如く電力消費量の點のみならず、整流の點よりも齒數比を大として定格速度を下げ起動電流を制限することが必要である。然るに路面電車の制限速度は 35 km/h で、最高速度としては 40~45 km/h を考えておく必要があるので、定格速度は最低 20 km/h 程度に止むべきであり、場合によつては界磁制御を有利とすることもある。今 30 kW 主電動機を用いるものとし、粘着係數限度一杯の最大起動電流を許すものとすれば、最大起動加速度は下記の如く 5.0 km/h/s となる。第 10 圖に於て $\mu=25\%$ とすれば $a=5.0$ これが 4 個電動機式の場合の最高加速度である。又 $I_0=179\text{ A}=1.54I_1<1.6I_1$ 、となり整流の點も差支えない。更に $I_e=53.5\text{ A}$ 、 $\theta=46^\circ\text{C}$ にて温度上昇には大なる餘裕がある。又 $U=47$ で、 a をこれ以上増大しても U は殆ど一定で最低値に近い。

(10) 45 kW×4 自動多段制御式 $V_1=24.6$ 、 $a=5.0$ 上記は何れも表定速度 $V_{sch}=18\text{ km/h}$ の場合であつ

第 3 表 路面電車の加速度及び表定速度と制限条件 (電車重量 23t, 動輪直徑 660φ, 電車線電壓 600V) (瞬間距離 0.4km, 停車時分 15 秒)

Table 3 Acceleration and Schedule Speed of Surface Cars.

番 號	主電動機				定 格 速 度 V_1 km/h	制 御 方 式	發 電 制 動	加 速 度 a km/h/s	表 定 速 度 V_{sch} km/h	粘 着 係 數 μ %	二 乗 平 均 平 方 根 電 流 I_e A	温 度 上 昇 θ °C		起 動 電 流 I_0 A	比 電 力 消 費 量 $\frac{U}{WH}$ t-km	制 限 條 件 吟 味
	出 力 kW	電 壓 V	電 流 A	個 數								計 算	實 測			
1	38	600	73	2	24.7	非自動 制御	非常用	1.6	(18)	20	48 (38)	74 (48)	(46)	86	75	$\mu=20\%$ $I_0=86=1.18I_1<1.3I_1$
2	"	"	"	"	"	"	"	2.0	(18)	25	47 (38)	72 (47)		100 (84)	60	$\mu=25\%$ $I_0=100=1.37I_1>1.3I_1(I_0=84=1.15I_1<1.3I_1)$
3	"	"	"	"	"	自動多 段制御	"	2.0	18	20	47 (38)	72 (47)		100	"	$\mu=20\%$ $I_0=100=1.37I_1<1.6I_1$
4	"	"	"	"	"	"	"	2.5	"	25	49 (39)	77 (50)		118 (99)	55	$\mu=25\%$ $I_0=118=1.62I_1>1.6I_1(I_0=99=1.35I_1<1.6I_1)$
5	25	300	97	4	30.2	"	常 用	2.5 (2.71)	"		65 (61)	105 (94)	(90)	145	60 (57)	$I_e=65=0.67I_1<0.7I_1$ $I_0=145=1.5I_1<1.6I_1$
6	"	"	"	"	"	"	"	2.7 (2.94)	"		66 (62)	106 (95)		155	57 (56)	$I_0=155=1.6I_1$ $I_e=66=0.68I_1<0.7I_1$
7	"	"	"	"	24.3	"	"	3.45 (3.74)	"		58 (54)	82 (73)		"	50 (49)	$I_0=155=1.6I_1$ $\mu=17.5$ ($\mu=18.8$)
8	"	"	"	"	20.5	"	"	4.15 (4.48)	"		51 (48)	64 (57)		"	47	$I_0=155$ $\mu=20.5$, ($\mu=22$)
9	30	"	116	"	"	"	"	5.0	"	25	54	46		179	"	$\mu=25$ $I_0=179=1.54I_1<1.6I_1$
10	"	"	"	"	24.6	"	"	"	20	"	74	87		138	56	$\mu=25$ $I_e=74=0.64I_1<0.7I_1$, $I_0=138=1.19I_1<1.6I_1$
11	38	"	147	"	"	"	"	"	22	"	94	87		158	68	$\mu=25$ $I_e=94=0.64I_1<0.7I_1$, $I_0=158=1.08I_1<1.6I_1$
12	45	"	175	"	"	"	"	"	24	"	116	94		277	83	$\mu=25$ $I_e=116=0.66I_1$, $I_0=277=1.58I_1<1.6I_1$

(註) () 内の數字は營業運轉温度上昇試験に於ける平均荷重時の電車重量 (番號 1~4 は 18.5t, 番號 5~8 は 21.4t) に對するものを示す

たが、表定速度を増大する場合を考察する。一例として $V_1=26$, $a=5.0$ とし, $V_{sch}=20, 22, 24$ と増大するものとすれば、第 5, 8, 11 圖より U, I_e, I_o は下記の如くなる。従つてこれに對し、必要な主電動機容量は夫々 30, 38, 45 kW となり、表定速度を 20 km/h 以上に増大するためには主電動機容量を可成り急激に増大する必要があることが分る。

以上各種の場合に就いて許容最高加速度及び表定速度とその制限條件に就いて吟味したが、これを纏めれば第 3 表の如くなる。元より本表は種々の假定を前提とするものであるから実際には可成りの餘裕を見込むことが必要である。

	V_{sch} (km/h)		
	20	22	24
U (WH/t-km)	56.5	68	83
I_e (A)	74	94	116
I_o (A)	138	158	277

[V] 實 車 試 験

横濱市交通局に於ては路面電車の性能強化を企圖せられ、38 kW×2 臺裝備非自動直接制御式の普通車と、25 kW×4 臺裝備 MMC 多段式制御の新型車との綜合比較試験を実施せられた。こゝにはその中本問題に關係ある温度上昇試験及び起動並びに發電制動試験の概要を摘記し前記計算結果と比較する。

(1) 試験車概要

	普通車	新型車
自重 (t)	15.3	17.0
主電動機出力×個數 (kW)	38×2	25×4
定格速度 (km/h)	24.7	30.16
制御方式	直接制御 非自動式	MMC型多段 制御自動式
電気制動	非常用	常用

(2) 試験條件

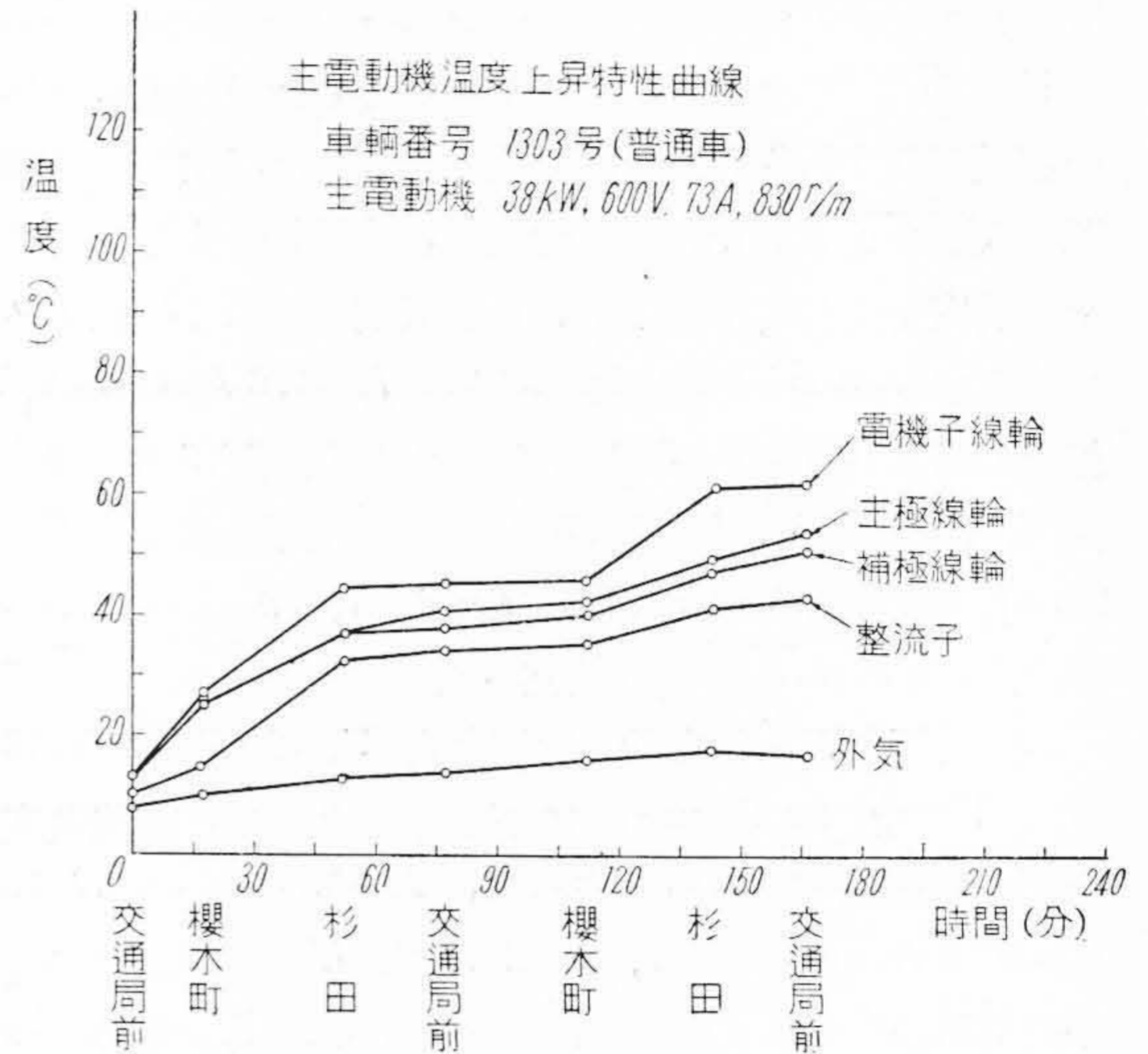
	温度上昇試験	起動及び發電制動試験
試験路線	櫻木町一杉田	三吉橋一長者町一丁目
荷重 (t)	營業運轉の乗客 普通車 3.2 新型車 3.6	6t 荷重積込、外 測定器類 一式 測定人員 20 名
速度 (km/h)	$V_{sch}=17\sim18$	$V_{max}=35\sim45$
a (km/h/s)	普通車 1.6~1.8 新型車 2.0~2.5	普通車 1.8~2.2 新型車 1.8~3.2

b (km/h/s)	2.0~2.5	2.0~2.5
--------------	---------	---------

(3) 試験結果

(A) 普通車 38 kW×2 非自動直接制御式 $V_1=24.7$, $a=1.8$

(a) 温度上昇試験 温度上昇特性曲線は第 13 圖の通



第 13 圖 路面電車主電動機温度上昇特性曲線 (38 kW×2, 發電制動非常用)

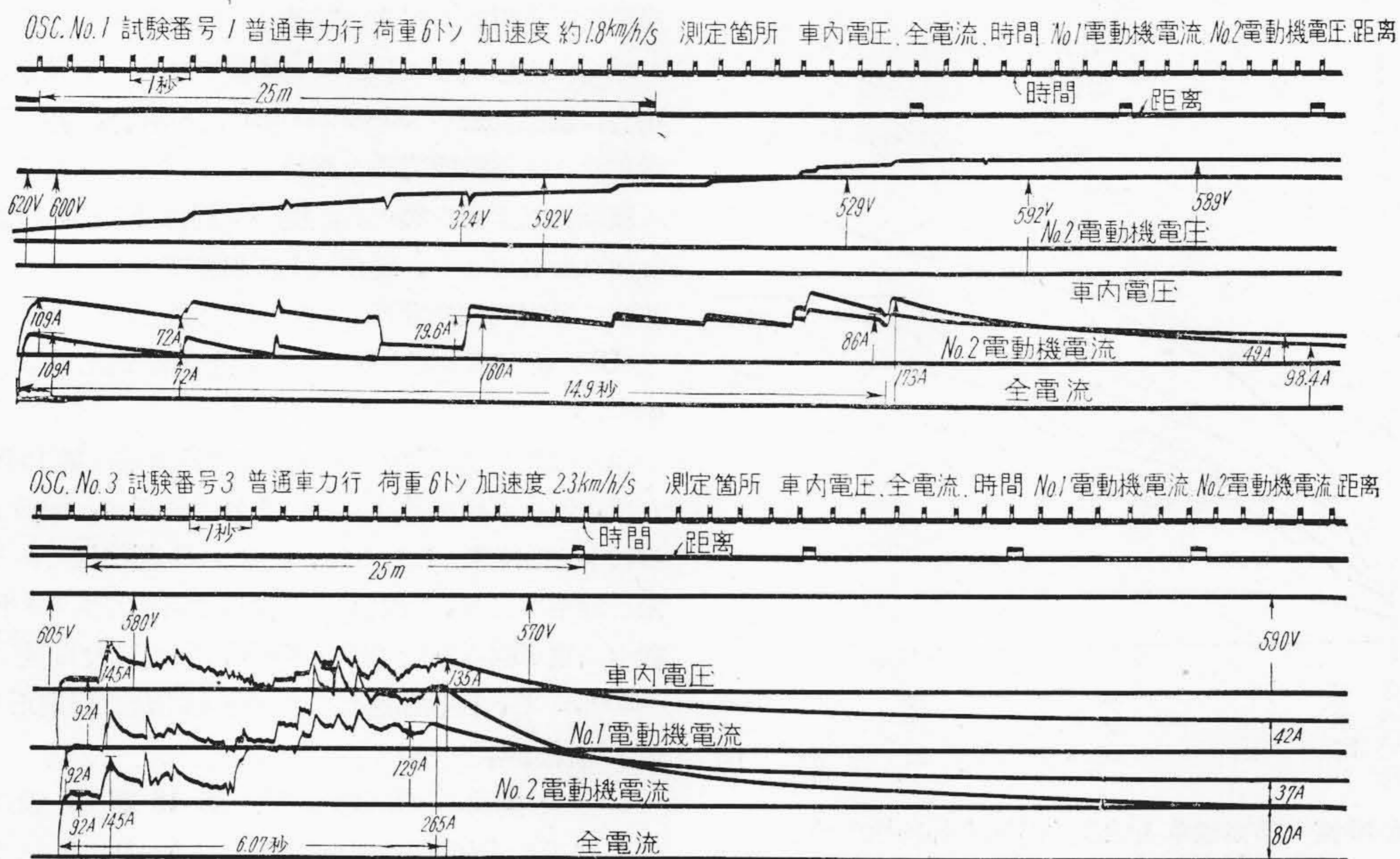
Fig. 13 Temperature Rise Characteristic Curves. (38 kW×2, Dynamic Braking Emergency Use)

りて、停止直後に於ける温度上昇の最高は、電機子線輪の 46°C (抵抗法)、運轉の都合上試験打切は少しく早きに失した嫌いはあるが、相當の餘裕があることを示している。尙本試験中、電車線電壓は 500~570 V, 起動最大電流は 100~150 A で、非自動式なるため可成不規則な變化を示した。

(b) 起動及び發電制動試験 第 14 圖 (a) は荷重 6t 積載時に於ける起動特性のオシログラムで、 $a=1.6$, $I_{max}=1.5 I_1$ である。熟練者によつて運轉されたので、電流波形は比較的良好である。

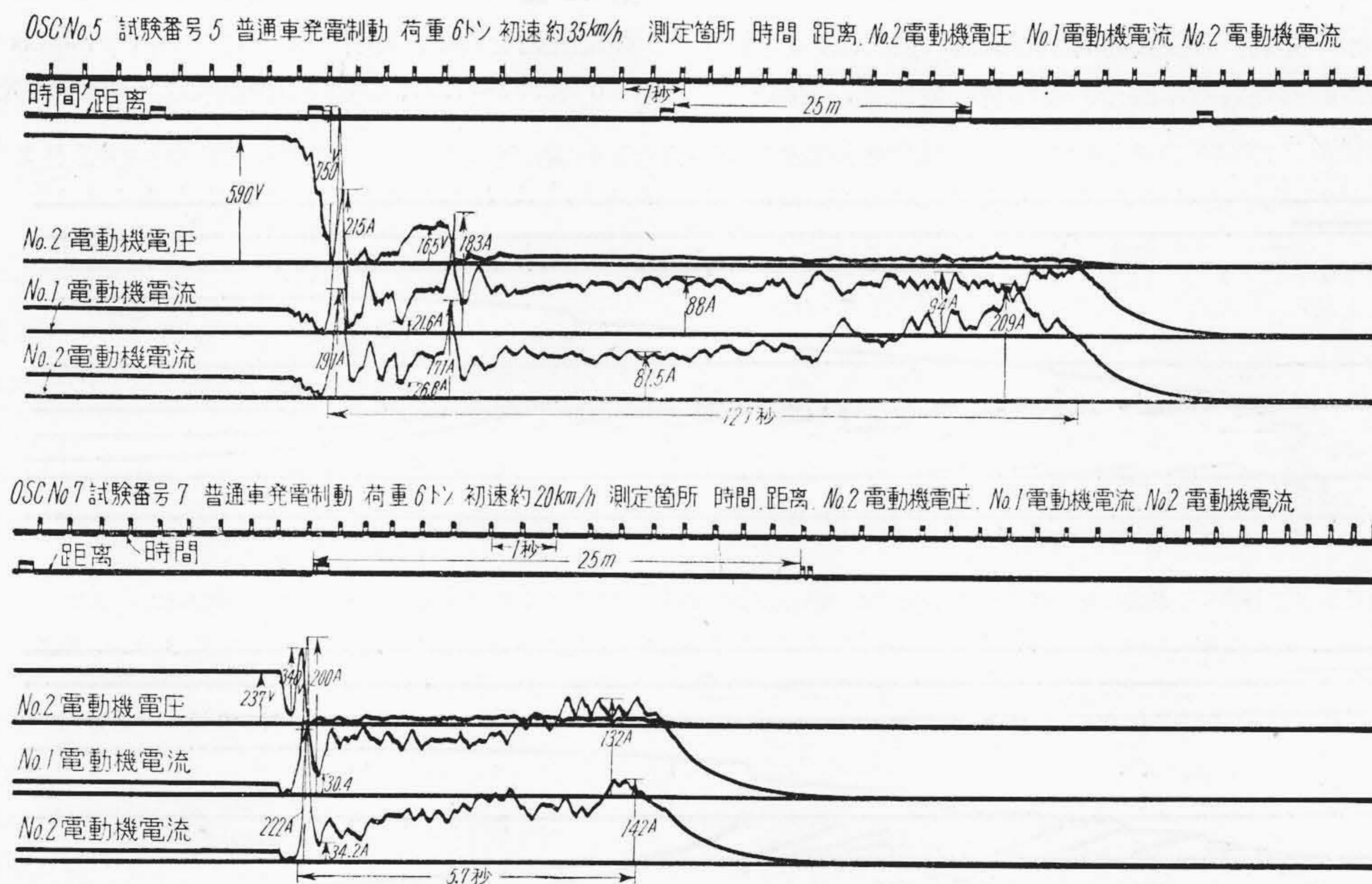
第 14 圖 (b) は早ノッチ起動をした場合であつて $I_{max}=2.04 I_1$ に達し、主電動機最大回轉力は動輪粘着重量相當値を超過して動輪の滑動を惹起し、起動電流は甚だしく不規則な鋭い波形を呈しており、常軌の起動とは認め難い。この場合 $a=2.2$ であつて、前記計算結果吟味 (2) の場合に該當する。

第 14 圖 (c) は 35 km/h より發電制動をかけた場合のオシログラムで、猛烈な滑動を呈しており、制動電流の波形は極めて不規則である。 $I_{max}=3.03 I_1$ に達し、主電動機は明かに閃絡を生じている。この場合の $b=$



第 14 圖 (a) (b) 起動特性オシログラム (38 kW×2, 直接制御非自動式)

Fig. 14 (a) (b) Oscillograms of Starting Characteristics. (38 kW×2, Direct Control, Non-Automatic)



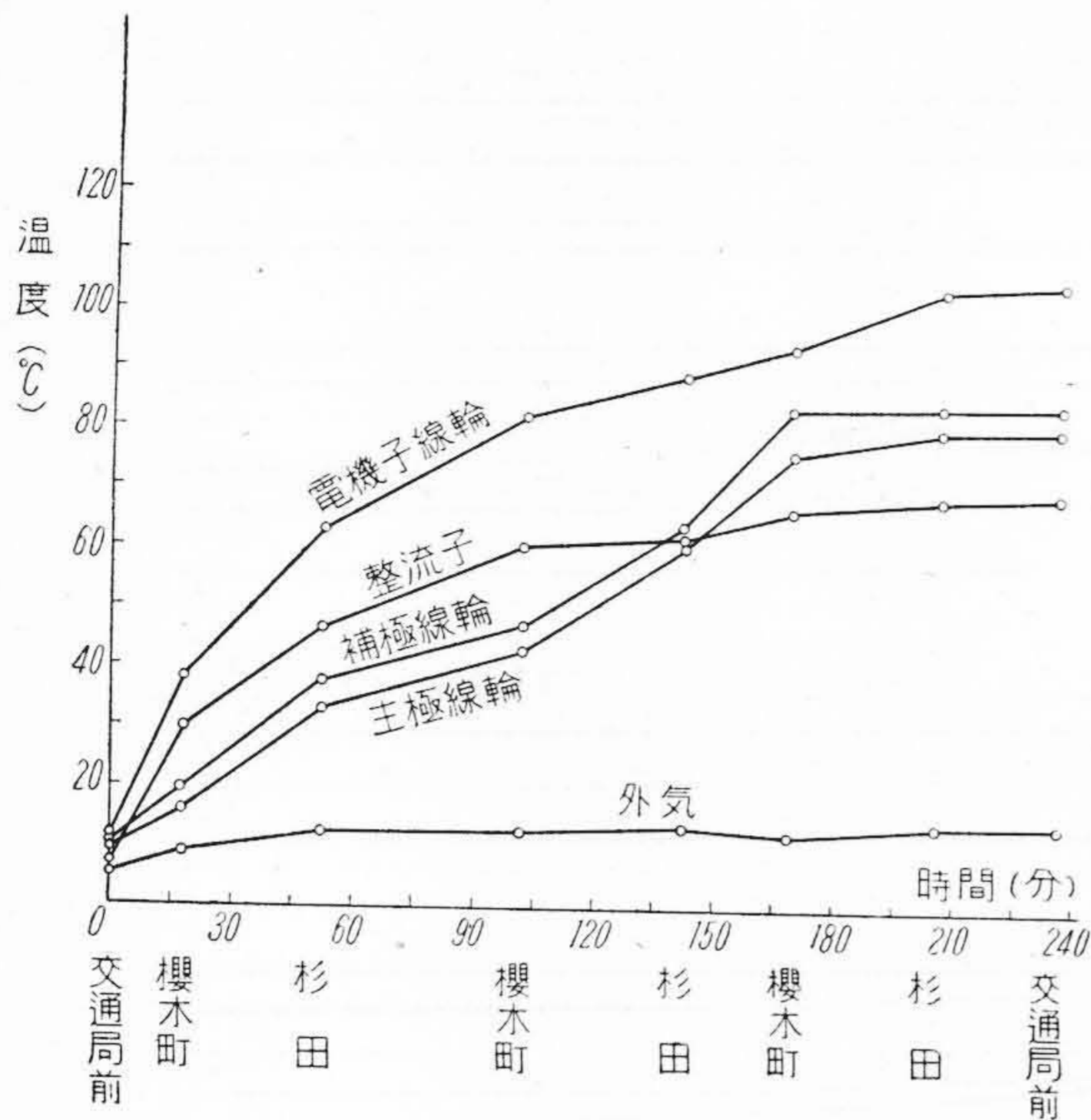
第 14 圖 (c) (d) 発電制動特性オシログラム (38 kW×2, 直接制御非自動式)

Fig. 14 (c) (d) Oscillograms of Dynamic Braking Characteristics. (38 kW×2, Direct Control, Non-Automatic)

1.92 $\frac{1}{2}$ であった。

第 14 圖 (d) は同じく 20 km/h より発電制動をかけ

た場合のオシログラムで、低速の場合も同様に動輪の滑
 輪を惹起している。この場合の $I_{max} = 2.8 I_1$, $b = 1.8$



第 15 圖 路面電車主電動機温度上昇特性曲線 (25 kW×4, 發電制動常用)

Fig. 15 Temperature Rise Characteristic Curves. (25 kW×4, Dynamic Baking Service Use)

であつた。

かくの如く従來の直接式圓筒型制御器に於ては、起動の場合主電動機熱容量に餘裕ある場合に於ても、動輪の

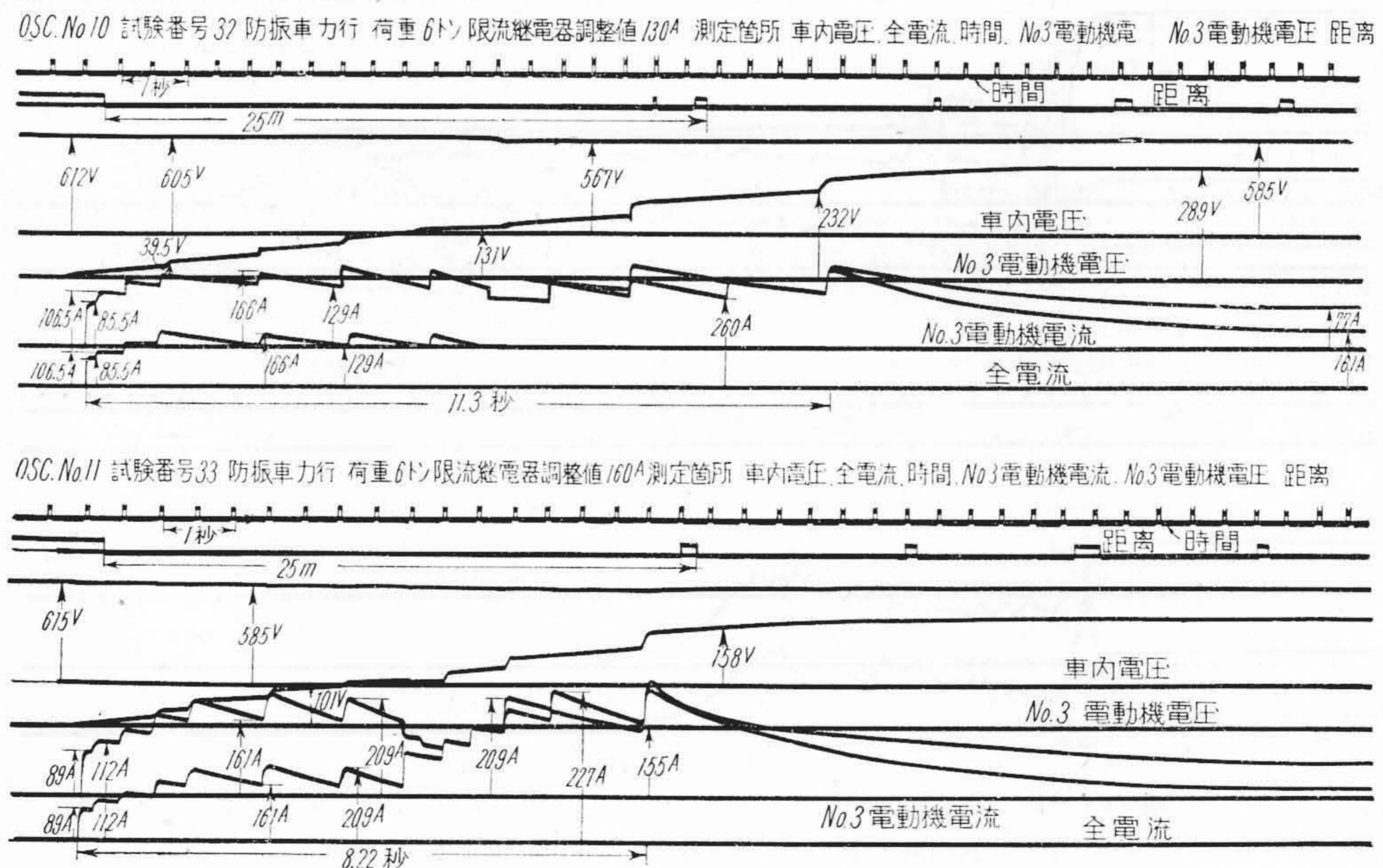
滑動及び主電動機閃絡に制限せられ、起動加速度は 2.0 km/h/s 以上に高めることは困難である。又發電制動の場合は制動初速が 35~20 km/h なる場合、共に動輪の滑動及び主電動機閃絡を惹起し、主電動機に電氣的並びに機械的悪影響を與える。従つて制御器の操作には充分な注意を必要とし、現在以上に加速度を上昇すること、並びに發電制動の常用は避くべきである。

(B) 新型車 25 kW×4 自動多段制御式 $V_1=30.2$, $a=2.5$

(a) 温度上昇試験 温度上昇特性曲線は第 15 圖の通りで、停止直後に於ける温度上昇の最高は、電機子線輪の 90°C (抵抗法) であるが、本機は B 種絶縁であるから未だ餘裕があり、發電制動の常用は可能である。尙本試験中の電車線電壓は 500~570 V, 起動最大電流は 200~250 A で、自動加速なるため起動電流は規則正しく、最大電流は殆ど一定であつた。

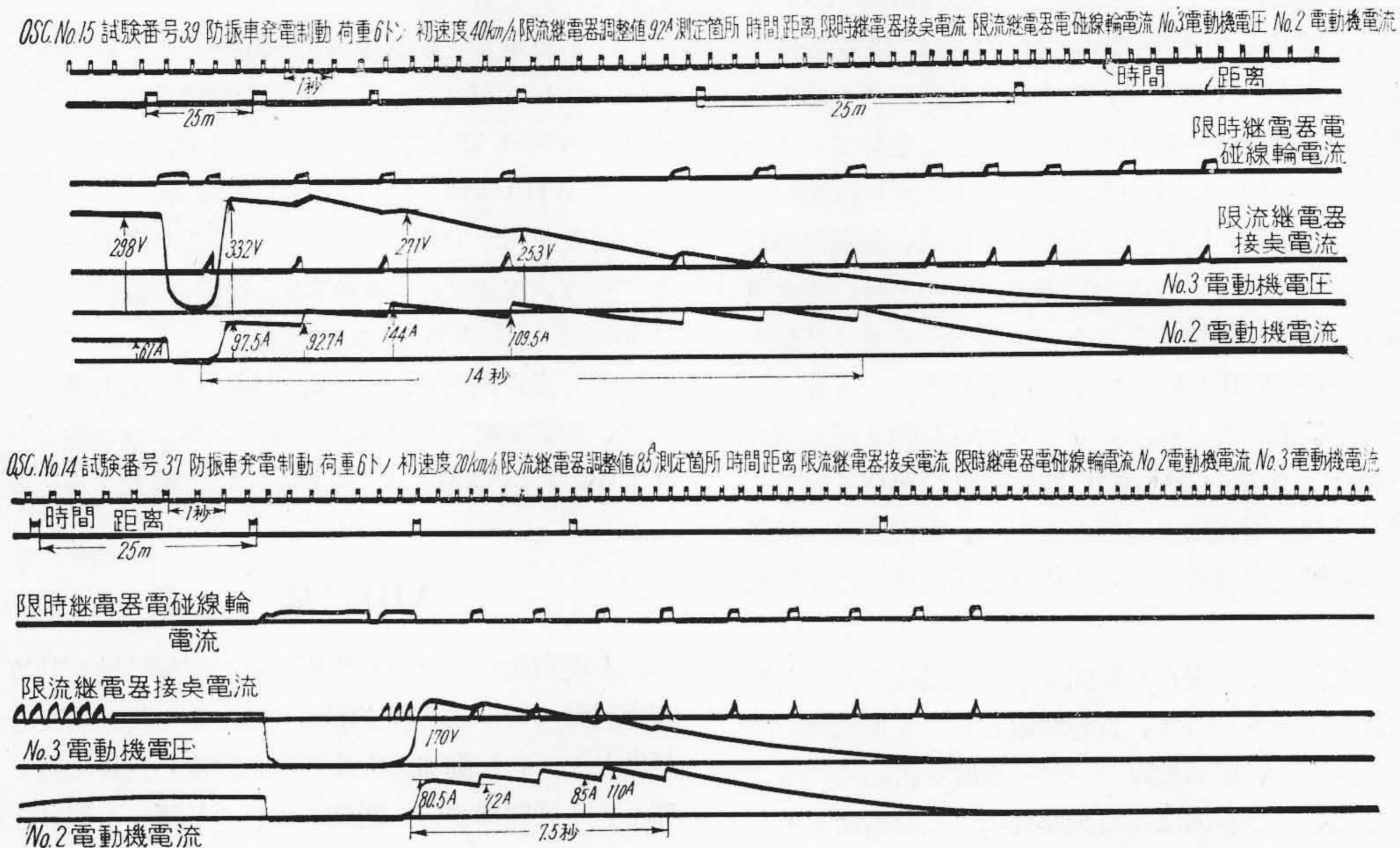
(b) 起動及び發電制動試験 第 16 圖 (a) 及び (b) は荷重 6 t, 限流繼電器調整値 130 A~160 A として起動した場合のオシログラムで、 $a=2.08\sim 2.57$, $I_{max}=2.16 I_1$ であるが、波形は規則正しく動輪の滑動、主電動機の閃絡は全然發生していない。

第 16 圖 (c) 及び (d) は夫々 40 及び 20 km/h より發電制動をわけた場合のオシログラムで、 $I_{max}=1.61 I_1$, $b=2.52\sim 1.37$, 動輪の滑動及び主電動機の閃絡は

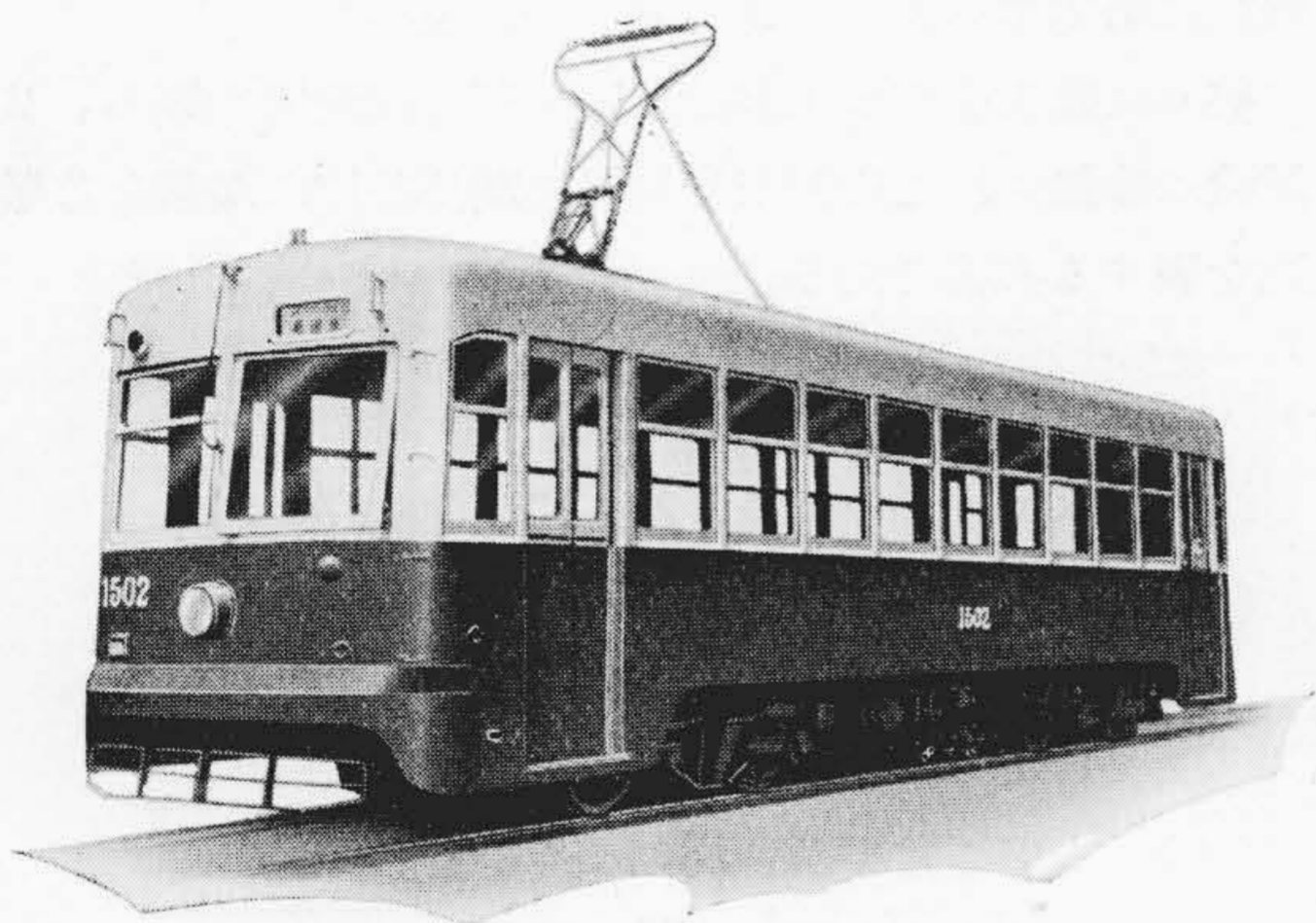


第 16 圖 (a) (b) 起動特性オシログラム (25 kW×4, 自動多段式 MMC 制御)

Fig. 16 (a) (b) Oscillograms of Starting Characteristics. (25 kW×4, Automatic Multi-Notch MMC Control)

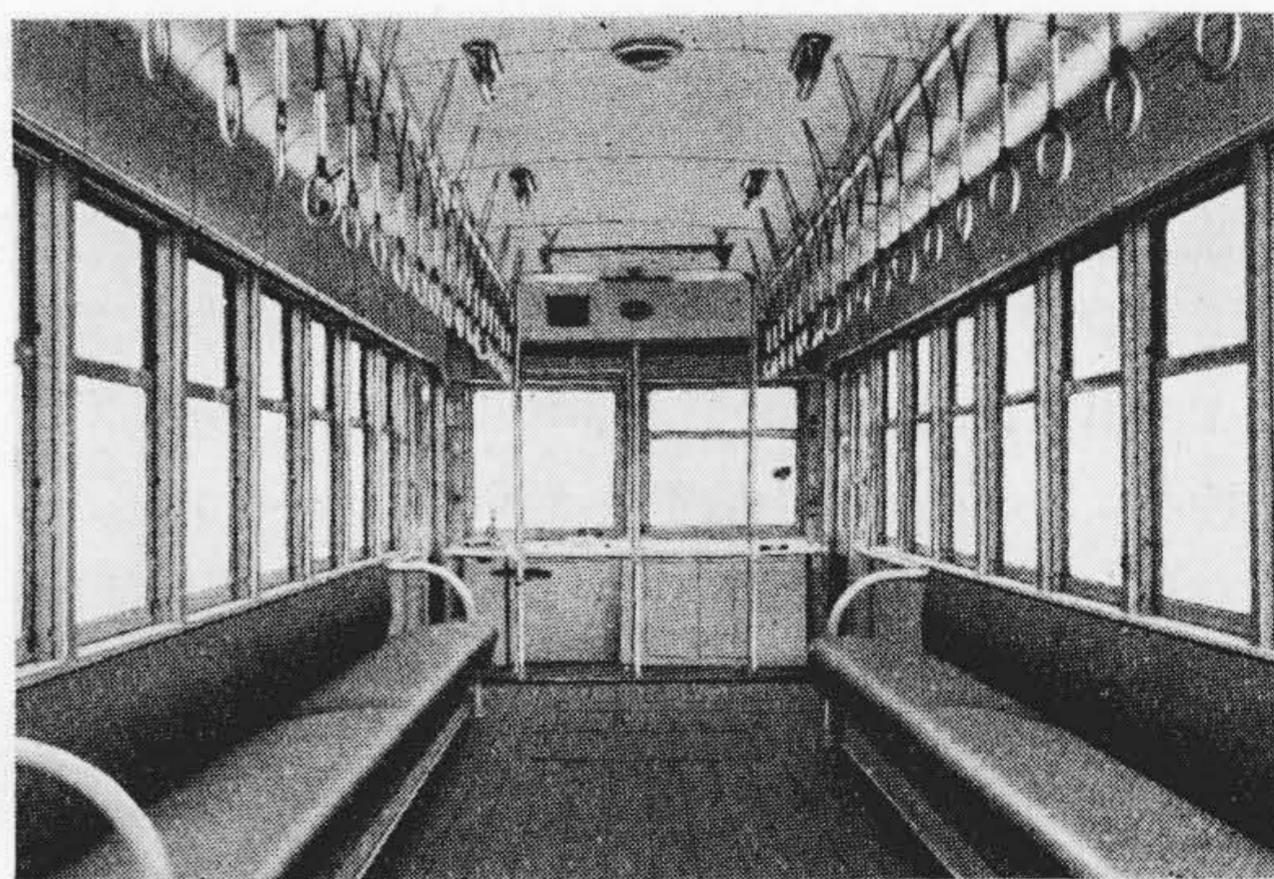


第 16 圖 (c) (d) 発電制動特性オシログラム (25 kW×4, 自動多段式 MMC 制御)
 Fig. 16 (c) (d) Oscillograms of Dynamic Braking Characteristics. (25 kW×4, Automatic Multi-Notch MMC Control)



第 17 圖 (a) 横濱市交通局納 1500 型路面電車 (25 kW×4 主電動機及び自動式発電制動付 MMC 制御器装備)

Fig. 17 (a) Type 1500 Surface Car for Yokohama Transport Bureau. (Provided with 25 kW×4 Main Motors and MMC Controller with Automatic Dynamic Braking)



第 17 圖 (b) 左 圖 内 部

Fig. 17 (b) Ditto, Interior View.

全然なく、圓滑なる自動式発電制動を遂行している⁽⁵⁾。

第 17 圖 (a) (b) に横濱市交通局納入新型電車を示す。主電動機は 25-kW×4 臺、制御器は MMC 多段式である。

[VI] 計算並びに試験結果に対する考察

路面電車に於ては専用軌道を走行する電車と異り、交通障害、交叉點、分岐點、曲線等の線路状況その他により、ノッチ切入の回数多く、且電車線電壓の相當低下する場合もあるので、その運轉特性は理想的運轉を假定した計算結果とは或る程度相異なるものと思はれるけれども大體の傾向は前記結果より把握し得るものと思う。

前記計算と實車試験の結果とを参照しつつ結論として次のことが云える。

(1) 38 kW 主電動機 2 個付直接制御式路面電車に

於ては實際運轉中の主電動機温度上昇は満載時 (23 t) を假定しても 74°C 、平均荷重時 (18.5 t) は 48°C 程度で可成餘裕あるにかゝらず、粘着重量及び整流の制限にて起動加速度は $1.6\sim 1.8\text{ km/h/s}$ 以上に上昇することは困難であり、強いて 2.0 km/h/s 以上にすれば動輪の滑動及び主電動機の閃絡の危険を生ずる故、制御器の取扱いには注意を要する。従つて表定速度の上昇、或は運轉間隔の調整等が困難である上、比電力消費量は甚だ大にして $75\sim 65\text{ WH/t-km}$ に達し、全體として非常に不利な運轉を餘儀なくされている。又發電制動は制動初速の高い場合は勿論、 20 km/h 程度の低い場合に於ても動輪滑動及び主電動機の閃絡を惹起し、主電動機に電氣的並びに機械的悪影響を與える故非常用以外には使用を避くべきである。

(2) 上記の如く現在の路面電車主電動機の温度上昇は可成低いにかゝらず、實際問題として主電動機の故障は可成り多く、電車故障の 30% 程度を占めていることを思えば、その原因は非自動制御による苛酷なるノッチ進め、發電制動或は逆ノッチ濫用等による閃絡、過熱等に基くものが可成多いのではないかと思われる。従つて 2 個電動機付の場合に於ても多段式制御方式を採用し、非自動直接制御 8 ノッチ短絡渡り方式を、自動制御 MMC 型 13 ノッチ橋絡渡り方式に改造すれば、主電動機故障は可成り減少するものと期待し得る。同時に起動電流は運轉技術に係なく規則的となり、起動電流變化率も減少するもので、起動加速度を 2 km/h/s に高めることが出来、表定速度を 18 km/h 程度に上昇し得る可能性がある。又比電力消費量は 60 WH/t-km となり可成有利な運轉を行い得る。この場合主電動機温度上昇は殆ど變化はない。

(3) 4 個電動機付とするときは車輛の全重量を粘着重量として利用し得る結果、更に高加速度とすることが出来る上、發電制動常用も可能となる。 25 kW 4 臺付、定格速度 30.2 km/h とすれば、加速度は $2.5\sim 2.7\text{ km/h/s}$ となり、比電力消費量は $59\sim 57\text{ WH/t-km}$ に低下

し約 20% 節減し得る。

(4) カルダン軸驅動方式を採用して定格速度を $26\sim 20\text{ km/h}$ に低下すれば、主電動機整流限度内にて加速度は $3.45\sim 4.15$ に高めることが出来、比電力消費量は $51\sim 48\text{ WH/t-km}$ となり、約 30% 節減し得る。主電動機容量を $30\text{ kW}\times 4$ として粘着重量限度一杯の起動をすれば、加速度は 5 km/h/s 、比電力消費量は 47 WH/t-km となり 35% 節減し得る。

(5) 表定速度を $20, 22, 24\text{ km/h}$ に上昇するためには、主電動機容量は整流容量及び熱容量の點より夫々 $30\text{ kW}\times 4, 38\text{ kW}\times 4, 45\text{ kW}\times 4$ に増大する必要がある。

[VIII] 結 言

以上現在並びに今後の路面電車の運轉特性を計算及び實車試験により或る程度解明することを得た。又これを基礎として、起動加速度及び表定速度の上昇に關して考究し、主電動機容量、制御方式その他種々の制限條件に就いて論じた。最初に述べた如く本計算は種々の假定を前提としているので、實際の場合には相當の餘裕を見込む必要がある。路面電車は今後共都市交通機關として重要な役割を果すべきものであることを認識し、その性能強化に努力すべきであると考え一言述べた。

終りに臨み前記實車試験に際し種々御配慮を賜り、且試験に参加された横濱市交通局外關係各位に深甚なる敬意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 平田：日立評論、23, 135 (昭 15—2)
- (2) 野田：交通技術、4, 1 (昭 24—3)
- (3) Pender: Handbook for Electrical Engineers, P 1317 (1922)
- (4) 上田：電學誌、53, 734 (昭 8—9)
- (5) 平田：日立評論、32, 913 (昭 25—11)