U.D.C. 621.335.4: 531.112
621.313.2−9.016.2

高速電車の表定速度と電力消費量及び主電動機容量

平　田　憲　一*

Schedule Speed, Power Consumption and Main Motor Capacity of Rapid Transit Electric Trains

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

Abstract

Economical acceleration and deceleration-rates should be adopted to minimize the power consumption and motor capacity in the operation of rapid transit electric trains.

In an effort to determine these economical rates the writer investigated theoretically the power consumption and motor capcity by Pender's method under various conditions, and compared the calculated values with the actual data furnished by the several railway companies in Japan. Discussion is also made about the effects of the weight reduction of the rolling stocks on the power consumption and motor capacity.

〔I〕 緒　　言

最近に於ける我国の電気鉄道は、すべての面に於て既に戦前の水準を突破し、国鉄、私鉄共サービス向上に、或はバス、航空機の進出に対処すべく、スピードアップに懸命の努力を傾倒している。電気学会電鉄部門委員会に於てもこれに関連して、先に「今後の電車」の速度及び主電動機容量に就て研究調査した結果[1]を発表し、次いで「変電所の合理的容量とその間隔」に関して研究を進めている。筆者は本誌上に於て、高速電車の経済的起動加速度[2]に関連してスピードアップの問題に多少触れたことがあるが、こゝに改めて本問題に就てペンダー氏法により稍々詳細に論述し、表定速度と電力消費量及び主電動機容量に就ての計算結果と、我国主要電鉄会社の実績とを比較検討し、最後に車輛軽量化の影響に就て考察した。読者諸氏の御批判を戴ければ幸である。

〔II〕 表定速度上昇とその制限条件

表定速度の上昇には周知の如く、次の方法が考えられる。

1. 停車時分の短縮
2. 最高運転速度の上昇
3. 起動加速度及び制動減速度の増大

上記の中 1. は改めて論ずる迄もないが、停車回数の多い場合は 20～25 sec が採用されることが多く、扉幅は広く場合によつては両開きとし、戸閉機械の開閉時間は出来るだけ短いことが望ましい。

2. は長距離特急列車の如く、駅間距離が 5～10 km 程度以上の場合に効果があるが、駅間距離の短い場合は最高速度で運転する時間が短く、大なる効果は望み得ない。又列車単位重量当りの主電動機容量が十分大なる場合に於ても、最高速度には運転上一定の制限[1]がある。即ち車輛の振動、騒音に基く乗心地、軌道及び道床、制動距離等安全性に基く制限、その他車輛の電力費、保守費及び保線費等経済上の制限があり、現状に於ては狭軌に対しては 120 km/hr, 標準軌に対しては 160 km/hr 程度が限度であると考えられている。

3. は特に駅間距離が 1～5 km の各駅停車及び普通急行の場合に於て可成大なる効果が期待される。起動加速度及び制動減速度は共に粘着重量の制限を受け、許容最大加速度[2]は MM—MTM—MT 編成に対してそれぞれ 4～4.5—3—2 km/hr/s 程度、又減速度は 4～5 km/hr/s 程度である。従つて駅間距離の短い場合は MM を列車編成基準とすることが望ましい。

表定速度上昇は上記制限条件と列車運行計画とを勘案して決定することが必要である。

* 日立製作所日立工場

〔III〕 計算結果と実績との比較検討

計算はペンダー法[3][4]による。我国の高速電車は特殊の場合を除けば駅間距離は5km以下の場合が多いので、駅間距離は 1—2—5 km とした。惰行減速度は走行抵抗と共に運転特性に重大なる影響を与えるものであるが、平坦線の場合を考え 0.25 km/hr/s とした。

又力行係数は各駅間距離に対しそれぞれ電力消費量を略々最小とする場合の値[2]をとることゝし、電気ブレーキは使用しないものとしてある。

列車編成:	MM 及び MT
列車重量: (W)	94 t
電車線電圧:	1,350 V
駅間距離: (L)	1—2—5 km
表定速度: (Vsch)	25～75 km/hr
停車時分: (T_s)	20 sec
加速度: (a)	1.5-1.75-2-2.5-3-3.5km/hr/s
減速度: (b)	1.5-1.75-2-2.5-3-3.5km/hr/s
惰行減速度: (c)	0.25 km/hr/s
力行係数: (x)	3 (L=1) 4 (L=2) 5 (L=5)

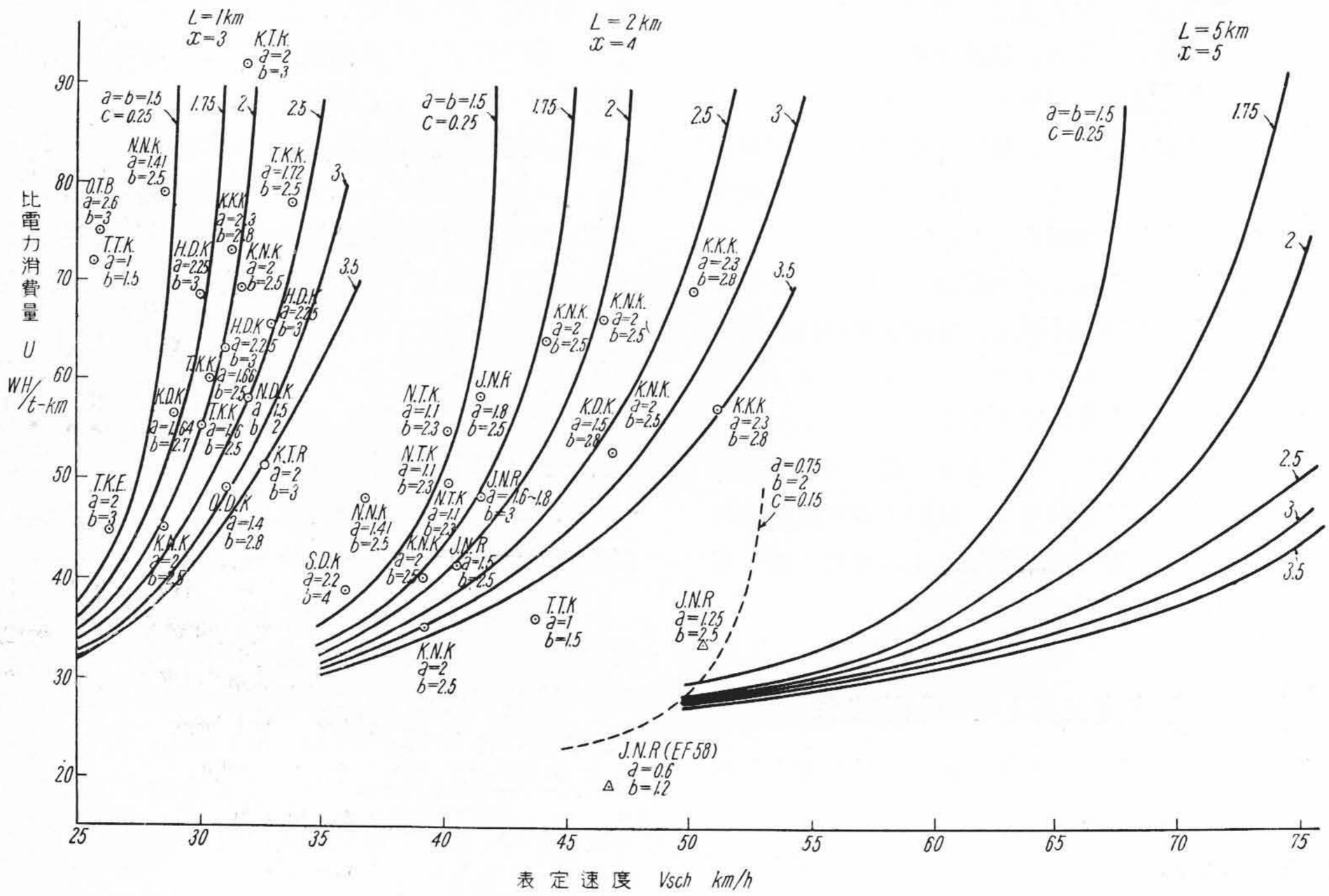
(1) 電力消費量 (U)

第1図に駅間距離 L=1—2—5 km に対し、表定速度 Vsch=25～75 に変化した場合の比電力消費量 (U) を示す。

先ず L=1 km の場合に就て見るに、何れの加速度 (a) 及び減速度 (b) に於ても表定速度 (Vsch) の上昇と共に比電力消費量 (U) は急激に増大する。Vsch が低く 25～27 程度のときは a 上昇による U の節減は少いが Vsch>28 になると a=b=1.5～1.75 の場合は U は急激に増大して不経済であり、Vsch>29～31 とすることは困難で、少くとも a=b>2 とすることが望ましい。今 U=60 に制限するものとすれば、a=b=1.5—1.75—2—2.5—3—3.5 に対する Vsch はそれぞれ Vsch=28—29.5—31—32.5—33.5—34.5 となり、Vsch=33 とするためには a>3 とすることが望ましい。又 Vsch=33 の場合 a=b=2.5 とすれば U=65 であるが a=b=3.5 とすれば U=55 となり 15% 程度節約される。

L=2 km 及び 5 km の場合も同じ傾向にあり、U=60 とし、前回の論文[2]に述べた所により L=1—2—5km に対する経済的起動加速度及び減速度として a=b=3—2.5—2 km/hr/s とすれば Vsch=33—48—73 km/hr に上昇し得るが、後述の如く主電動機容量が過大にならぬ程度に止むべきである。

計算結果と実績とを比較するために、本邦主要電鉄会社より電気学会電鉄部門委員会へ提出された報告中より L=1—2—5 km (±10% 程度の裕度を許容した。) に近いものを摘出し、停車時間を 20 sec と仮定して、表定速度と比電力消費量との関係を求め、これを**第1図**に打点



第1図 比電力消費量 (U) と表定速度 (Vsch) との関係

Fig. 1. Relation between Specific Power Consumption (U) and Schedule Speed (Vsch)

した。勿論各社の線路状態、車輛仕様、運転条件等が異るので可成バラッキのあるのは当然であるが、大体の傾向は計算結果の範囲内に納まるようである。実績の表定速度は或る特定の代表区間のものであつて、全線の表定速度ではない。又電力消費量は該区間の受持変電所の交流側運転用電力量（1 時間最大電力量を走行総屯粁で除したもの）であるから、電車入力に比して変電所機器及び直流饋電回路の損失だけ大となつているし、こゝにいう U に対しては更に補機用電力が加わつているが、急行、貨物等の異種列車の電力消費量を分離することの困難な場合もあり、他にも条件の相異する事項が多いのでこのまゝとした。

各電鉄会社の実績を見るに $L=1$ km の場合、現用の表定速度は Vsch$=29\sim34$ km/hr, これに対する電力消費量は $U=50\sim70$ Wh/t-km で、稀に 45～90 のものがある。$L=2$ 及び 5 km の場合に比し、一般に U が大である。これは明かに短距離区間に於て表定速度を上昇させるために電力消費量を或程度犠牲にしていることの現われである。然しこの場合にも加速度は比較的低く $a=1.4\sim2.25$ km/hr/s, 又制動度は $b=2.5\sim2.8$ km/hr/s 程度であつて、a 及び b を増大することにより U を節減し得る余地あることを示している。MM 編成とし、多段式制御器を採用したものは $a=2.5\sim3.5$ km/hr/s, 又電空併用ブレーキ式[5]の場合は $b=3.5\sim4.5$ km/hr/s とすることが出来る。

又 $L=2$ km の場合の実績は Vsch$=36\sim51$ km/hr に対し、$U=40\sim60$, 稀に $U=70$ に達するものもある。$a=1.1\sim1.8$, $b=2.3\sim3$ で、$L=1$ のときより多少低くなつている。

$L=5$ km の場合の実績は、今回の資料中には少いが、Vsch$=48\sim51$ km/hr に対し、$U=32\sim55$ Wh/t-km, $a=1.25\sim2$ km/hr/s, $b=2.5\sim2.8$ km/hr/s である。電気機関車と比較するために、EF 58 形牽引普通旅客列車の場合を併記した。この場合は $a=0.6$, $b=1.2$ で、電動列車に比し、a 及び b は可成低い。特に U が小となつているのは、急行、貨物等の電力消費率の少い列車の電力消費量を分離することが困難で、走行総屯粁の平均値を示したためである。

上記の如く各駅間距離共表定速度を上昇する場合は、電力消費量は急激に増加するので、所要の表定速度に対し、適当な起動加速度及び制動減速度を採用して電力経済を計るべきである。

（2） 二乗平均平方根電流 (I_e)

第 2 図は 4 箇電動機の場合の I_e と Vsch との関係を示す。起動加速度の関係にて 8 箇電動機とする必要ある場合は I_e はその 1/2 をとればよい。

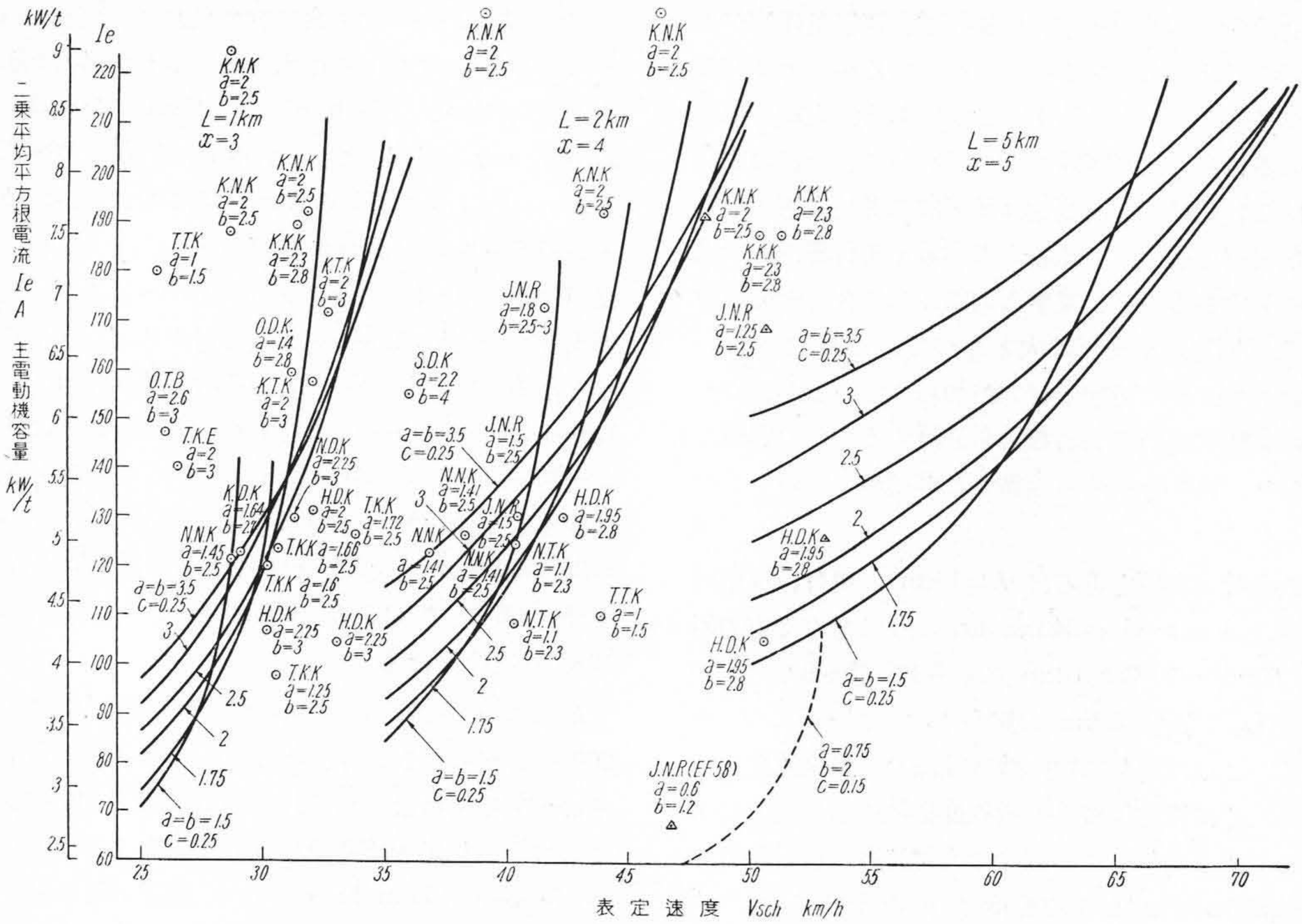
先ず $L=1$ km の場合に就て見れば、何れの a 及び b に対しても Vsch の増大するにつれて I_e は急に増大する傾向にある。Vsch が小で Vsch$=25\sim27$ の間は a, b の小なる程 I_e は小であるが、Vsch$=28\sim29$ になると $a=b=1.5$ に対する I_e が急激に増大し、$a=b=1.75$—2—2.5—3—3.5 に対する I_e の方が却つて小となる。又 Vsch$=31\sim32$ になると $a=1.75\sim2$ の I_e が急激に増大して $a=b=2.5$—3—3.5 に対する I_e の方が却つて小となる。今 $I_e=200$ A に制限するものとすれば、$a=1.5$—1.75—2—2.5—3 に対する最高表定速度は Vsch$=29$—30—31—34.5—35 となり、Vsch$=35$ とするためには少くとも $a=b=3$ とすることが必要である。又 Vsch$=35$ の場合 $a=b=2.5$ とすれば $I_e=209$ A となるが、$a=b=3.5$ とすれば $I_e=189$ A となり、I_e は却つて 10% 程度小となる。

$L=2$ km 及び 5 km の場合も同様の傾向にあり、$I_e=200$ A に制限するものとすれば、$L=1$—2—5 km に対する最大表定速度はそれぞれ Vsch$=35.7$—49—70km/hr, この場合の起動加速度及び制動減速度はそれぞれ $a=b=3.5$—3—1.75 km/hr/s となり、駅間距離の短い場合は加速度減速度を大にした方が、表定速度を大となし得るが、駅間距離の長い場合は I_e の制限により却つて加速度減速度を小にした方が表定速度を大となし得ることを示している。

次に熱容量より見た単位重量当り主電動機容量 kW/t と表定速度 Vsch との関係を見るために、$I_e=200$ A のとき kW/t$=8$ とし、大体の傾向を知るために kW/t は I_e に比例するものと仮定して、主要電鉄会社の kW/t と Vsch との実績を**第 2 図**に打点した。$L=1$ km の場合は Vsch$=29\sim34$ に対し、kW/t$=4\sim8$ で稀に 9 に達するものもあり、$L=2$ km の場合は Vsch$=36\sim51$ に対し、kW/t$=4.5\sim7.5$ で、山岳地帯を走行することの多い電車に於ては、電気ブレーキを採用する関係もあり 10 に達するものもある。$L=5$ km の場合は Vsch$=48\sim57$ に対し、kW/t$=4\sim7.5$ となつており、EF 58 形電気機関車牽引旅客列車は 2.5 程度で可成り低い。かくの如くある駅間距離に対し、表定速度を上昇するには主電動機熱容量を急激に増大することが必要となるが、各駅間距離に応じてそれぞれ適当な加速度及び減速度を採用して主電動機容量を過大にしないようにすべきである。

（3） 平均起動電流 (I_0)

第 3 図に 4 箇電動機の場合の I_0 と Vsch との関係を示す。I_0 も I_e と類似の傾向を有するが、$a=b>2.5$ に対しては I_e と異り、ab の増大に伴い I_0 は可成り急激に増大する。即ち表定速度を増大する場合加速度を過度に増大することは主電動機整流容量の増大を必要とし不



第2図　二乗平均平方根電流(I_e)及び主電動機容量(kW/t)と表定速度(Vsch)との関係

Fig. 2. Relation between Root Mean Square Current (I_e), Motor Capacity (kW/t) and Schedule Speed (Vsch)

利な場合あり、適当な起動加速度を選定する必要がある。

今 I_0=450 A (8 箇電動機のときは 225 A) に制限するものとすれば、L=1—2—5 km に対する最大表定速度は Vsch=36—50—71 km/hr となり、この場合の加速度及び減速度はそれぞれ $a=b$=3—2.5—1.75 となつて、主電動機整流容量より見ても、起動加速度及び制動減速度は、駅間距離の短い場合は大とし、駅間距離の長い場合は小とすることが有利なることを示している。

前節同様 I_0=450 A のとき kW/t=8 とし、kW/t は I_0 に比例するものと仮定して計算結果と主要電鉄会社の実績とを対比した。

(4) 主電動機容量 (kW/t)

前述の如く主電動機容量としては熱容量と整流容量とを考えることが必要である。今二乗平均平方根電流(I_e)は連続定格電流に等しく1時間定格電流(I_1)の70%にとるものとし、又起動最大電流は $1.8I_1$, 制御段数は 21 ノッチとすれば次式が成立する[2]。

$$I_1=\frac{I_e}{0.7} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

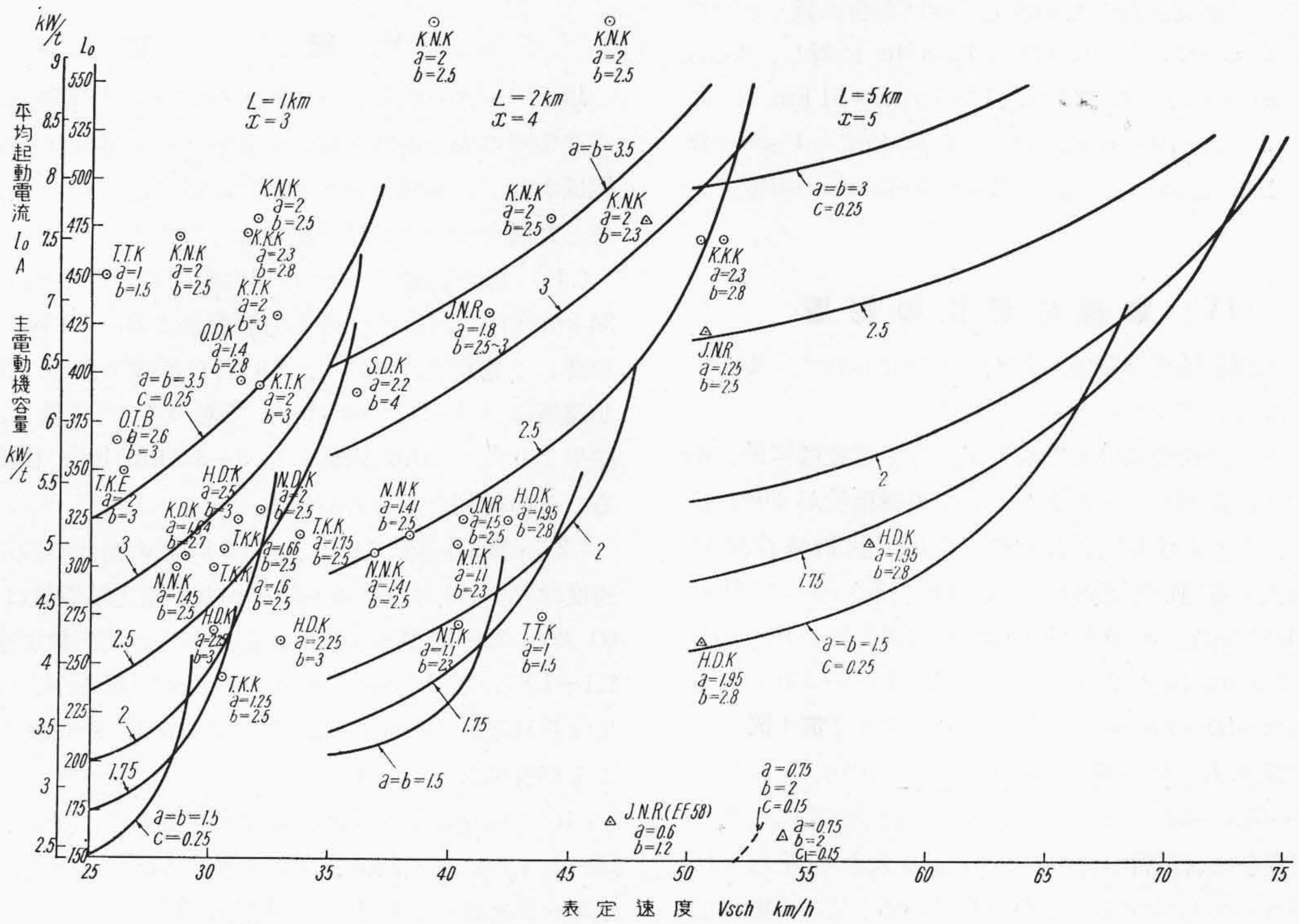
$$I_1=\frac{I_0}{1.58} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

主電動機容量は (1) 式の I_1 の方が大きな場合は熱容量より決定されることゝなり、(2) 式の I_1 の方が大なる場合は整流容量より決定されることゝなる。即ち第2及び第3節の計算により求められた I_e 及び I_0 をそれぞれ (1) 式及び (2) 式に代入して算出した I_1 の中何れか一方大なる方をとり、主電動機1時間定格電流を決定する。

第2図及び**第3図**の kW/t 計算値はそれぞれ上記熱容量及び整流容量より算出したものであるから、この中何れか大なる方を採れば主電動機容量が決定される。勿論幾多の仮定を前提とするものであるから、実際の場合は相当の余裕を見込むべきであり、更に電気ブレーキを常用するものに於いては状況により 10～20% 程度の補正を加える必要がある。

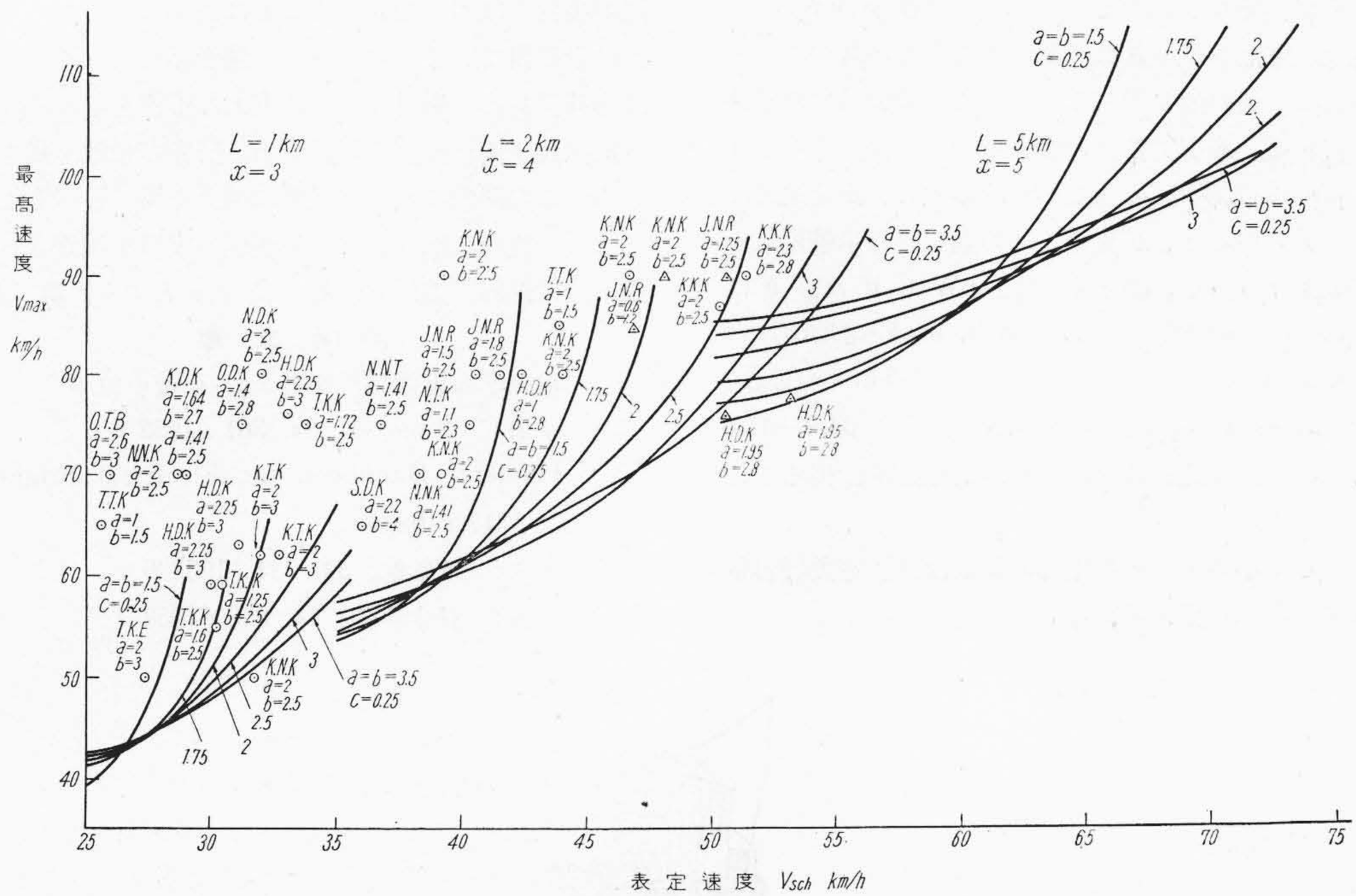
(5) 最高速度 (Vmax)

線路並びに車輛の受ける衝撃及び振動、保修費等の点より表定速度に対して最高速度は成る可く低いことが望ましい。**第4図**に計算による Vmax 及び主要電鉄会社の実際の Vmax と Vsch との関係を示してある。計算上は L=1—2—5 km に対し Vsch がそれぞれ 28—42—60 km/hr 程度以上になると、a, b を大にした方が Vmax を低下することが出来、有利であることを示しているが、実際の Vmax は下り勾配のため、平坦線に於ける理論値よりも特に駅間距離の短い場合可成高く、又駅間距離の



第3図 平均起動電流 (I_0) 及び主電動機容量 (kW/t) と表定速度 (Vsch) との関係

Fig. 3. Relation between Mean Starting Current (I_0), Motor Capacity (kW/t) and Schedule Speed (Vsch)



第4図 最高速度 (V_{max}) と表定速度 (Vsch) との関係

Fig. 4. Relation between Maximum Speed (V_{max}) and Schedule Speed (Vsch)

長い場合は速度制限のため最高速度は割合に低くなつており、$L=1$ km. Vsch=29～34 km/hr に対し、V_{max}=55～80 km/hr, $L=2$ km, Vsch=36～51 km/hr に対し $V_{max}=70$～90 km/hr, $L=5$ km, Vsch=48～57km/hr に対し $V_{max}=75$～90 km/hr の程度である。

〔IV〕 車輛軽量化の影響

最近車輛軽量化の問題が真剣に研究せられているが、これに関連して少しく考察してみる。

先ず電力消費量に就てであるが、今主電動機容量、牽引力及び制動力を同一のまゝとして車輛重量が 20% 軽くなつたものとすれば、起動加速度及び制動減速度は25%増大する(動輪滑動はないものとする)。従つて $W=94$ t, MT 編成、$a=b=2$ km/hr/s の場合は、$W=75$ t, $a=b=2.5$ km/hr/s となる。故に $L=1$—2—5 km の場合 Vsch=30—40—60 km/hr 一定とすれば**第1図**より電力消費量 $U=55$—40.5—33,5 なりしものが、それぞれ $U=47$—37.5—32 となり、加減速度上昇の結果により、電力消費量は、軽量化の比率 20% より大きく、それぞれ30～25%程度減少することを示している。又この場合電力消費量を同一に保つものとすれば表定速度は Vsch=33.6—45.5—70 km/hr となり、それぞれ 10～15% 程度上昇し得ることが分る。

次に主電動機容量に就てゞあるが、駅間距離に対し、表定速度が一定以上大なる場合に於ては所要 kW/t は熱容量及び整流容量共加減速度の大なる方が却つて小となることは前述の通りである。従つて車輛軽量化の結果主電動機容量、牽引力及び制動力を一定に保つものとすれば、kW/t 並びに a 及び b は増大し、表定速度は可成り上昇し得ることが分る。即ち前記同様車輛重量を20% 軽量化したものとすれば、kW/t, a 及び b は25% 大となり 6 kW/t は 7.5 kW/t, $a=b=2$ km/hr/s は 2.5 km/hr/s に増大する故 $L=1$—2—5 km のとき、Vsch=31.5—44—61 なりしものがそれぞれ 34.2—47.6—64 となり、表定速度は 8.5～5% 程度上昇し得ることを示している。

かくの如く車輛軽量化の電力消費量及び主電動機容量に及ぼす影響は可成大である。

〔V〕 結　　言

以上ペンダー計算及び本邦主要電鉄会社の実績により高速電車の表定速度と電力消費量及び主電動機容量との関係を論じ、車輛軽量化の影響に就て述べた。本文に記述した所を要約すれば下記の如くである。

（1） 駅間距離 1 km の場合現用の表定速度は 29～34 km/hr, これに対する電力消費量は 50～70 Wh/t-km 程度、主電動機容量は 4～9 kW/t 程度である。又起動加速度は 1.4～2.25 km/hr/s であつて、可成低く、計算結果より見て MM 編成とし 3～3.5 km/hr/s 程度にすることの有利なることが分る。

（2） 駅間距離 2 km 及び 5 km の場合の現用表定速度は 36～51 及び 48～51 km/hr, 電力消費量は 40～60 及び 32～55 Wh/t-km 程度である。又起動加速度は 1,1～1.8 及び 1.25～2 km/hr/s 程度であるが、計算結果はそれぞれ 2～2.5 及び 1.5～2 km/hr/s 程度とすることが有利なることを示している。

（3） 車輛重量を 20% 軽量化するときは表定速度を同一とすれば加速度減速度が上昇する結果、電力消費量は30～25%節約される。もし電力消費量を同一とすれば、表定速度を10～15%程度増大し得る。又主電動機容量を同一とすればkW/t及び加速度減速度が増大し、表定速度はそれぞれ 8.5～5% 程度上昇し得ることを示している。

本計算は種々の仮定を前提とするものであるから、実際の場合とは可成相異することは当然であるが大体の傾向は示し得ているものと思う。読者諸氏の御参考になれば幸甚である。尚計算結果に重大な影響を与える所の走行抵抗及び惰行抵抗の取扱い方に研究の余地が残されているがこの問題に就ては又別に機会を得て述べることゝしたい。終りに臨み各社電気運転の実績を調査された電気学会電鉄部門委員会に対し、謝意を表する次第である。

参　考　文　献

（1） 電気学会電鉄部門委員会： 今後の電車
（2） 平田： 日立評論、**34**, 361 (1952-2)
（3） Pender: Handbook for Electrical Engineers, p. 1317 (1922)
（4） 上田： 電学誌、**53**, 734 (1933-9)
（5） 平田： 日立評論、**34**, 855 (1952-7)