

走行車輛の振動解析について(第3報)

The Analysis of Vibration of Running Rolling Stock (No. 3)

桑 江 和 夫*
Kazuo Kuwae

内 容 梗 概

すでに第1, 2報で車輛の振動波形をペリオドグラムを用いて解析し, 車輛振動を起させる軌条の変形を推定してその実測値との比較を行い, 本解析法の妥当性を証明した。本報告では下記の点について述べる。

(i) 軌条変形の測定において車輛を止めて, その車輪の下の軌条の変形を測定した場合と, 車輛走行時における軌条の変形を測定した場合とを比較検討し, 両者の変形の間に関連のないことを確認した。

(ii) 車体の重心位置, 重心まわりの慣性モーメント, 共振曲線の既知な試験車を用いて振動試験を行い, 前報と同様ペリオドグラム解析を行って軌条の変形を推定し, 実測された軌条の変形と比較検討してその一致をみた。

[I] 結 言

走行時の車輛振動を解析して車輛の固有振動数, 軌条の変形を推定する方法として, 一, 二の方法⁽¹⁾⁽²⁾が提案されているが, いずれも一応外力の周期, 固有振動数は求められるが, それは単に軌条の変形の波長や, 固有振動数であつて, 軌条の変形の振幅は求められないと思われる。

筆者はすでに第1, 2報⁽³⁾⁽⁴⁾において, ペリオドグラムを用いて走行時の車輛の車体床面上における振動波形を解析する方法について報告し, 第2報においては, 軌条の変形をも測定して同じくペリオドグラムを用いて解析し, 両者の関係について検討を行つた。

本論文においては, 試験車を用いて行つた振動試験ならびに軌条の変形測定結果について, ペリオドグラムを用いて解析検討を加えるとともに, 車輛走行時の軌条の変形をも測定したので, その結果についてもふれることにする。

[II] 試 験 車

試験車とは, 軌条の変形と走行時の車体の振動との関係を明確にするために特に作られたもので, それ以外にもブレーキ特性の試験, そのほか車輛を実際に走らせて実施しなければならぬ各種の試験を行うに便利なものであるが, その仕様は第1表に示すとおりのものである。第1図はその外観図である。

実測の結果によれば, この車体の重心と車体中心とは長さ方向に7mmの差があり, 長さ方向に直角で, かつ水平な軸まわりの慣性半径は3,015mで, この測定結果からすれば, 重心と車体中心とは一致し, 慣性半径と心皿間距離の半分とは等しいと考えてさしつかえない。

車体の弾性体としての曲げ振動数も実測したが, その

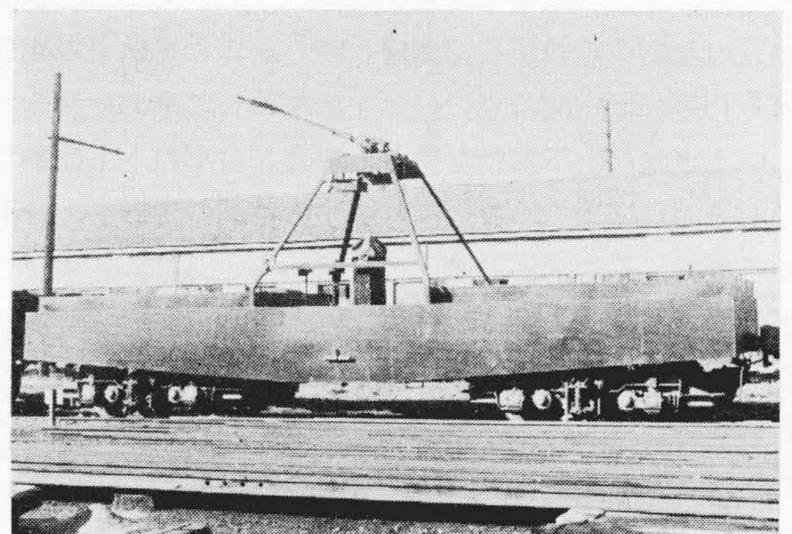
* 日立製作所笠戸工場

結果は18 c/sであつて, 車体の動揺と称せられる2~4 c/s程度の振動を論ずる場合には, 車体を剛体として取り扱うことができる。

本車輛の共振曲線を求めるには, 台車動的試験機⁽⁵⁾を用いた。方法としては車体は試験車の車体そのものを用い, 一台車は台車試験機の駆動輪の上ののせ, 一台車は駆動輪の上面と同一水平面になるように設計された軌条の上に置き, 軌条に回り止めをもうけて車輪が前後に動

第1表 試験車の諸元

台 車 型 式		釣 掛 式
車	長 さ (mm)	9,500
	幅 (mm)	2,500
体	床 面 高 さ (mm)	1,006
	心 皿 間 距 離 (mm)	6,000
軌	間 (mm)	1,067
軸	距 離 (mm)	1,600
車 輪	直 径 (mm)	660
バネ常数 (台車片側)	軸 バ ネ (kg/mm)	80
	枕 バ ネ (kg/mm)	40
オ イ ル ダ ン パ	(kg/cm/s)	0, 30, 60
心 皿 荷 重	(kg)	4, 667



第1図 試 験 車

くの拘束した。台車の諸元は第1表に示すとおりで、オイルダンパの減衰係数を、公称 60kg/cm/s, 30kg/cm/s および 0 の3種類に変えて行つた。

振動計は梅北式 DV-3 型振動加速度計を用い、これを心皿上床面において振動加速度を測定した。第2図はダンパなしの場合の共振曲線で、横軸は振動数、縦軸は振動加速度の振幅を車輪の上下方向の偏位すなわち駆動輪の偏心率で割つたものである。第3, 4図はオイルダンパの減衰係数が公称 30 kg/cm/s, 60 kg/cm/s の場合の共振曲線である。

なお、軌条の上に置かれた台車の心皿上床面で計測した結果は、ほとんど振動がなく、この車体の慣性半径が心皿間距離の半分であること、および重心と車体中心が一致していることから当然のことと思われる。

第2図のオイルダンパのない場合の共振曲線は、一応共振点で有限な振幅を持つように見えるが、実際には上揺枕が振れ止めにぶつかるほど激しい振動をするので、共振時の加速度振幅は明確な値を示していない。

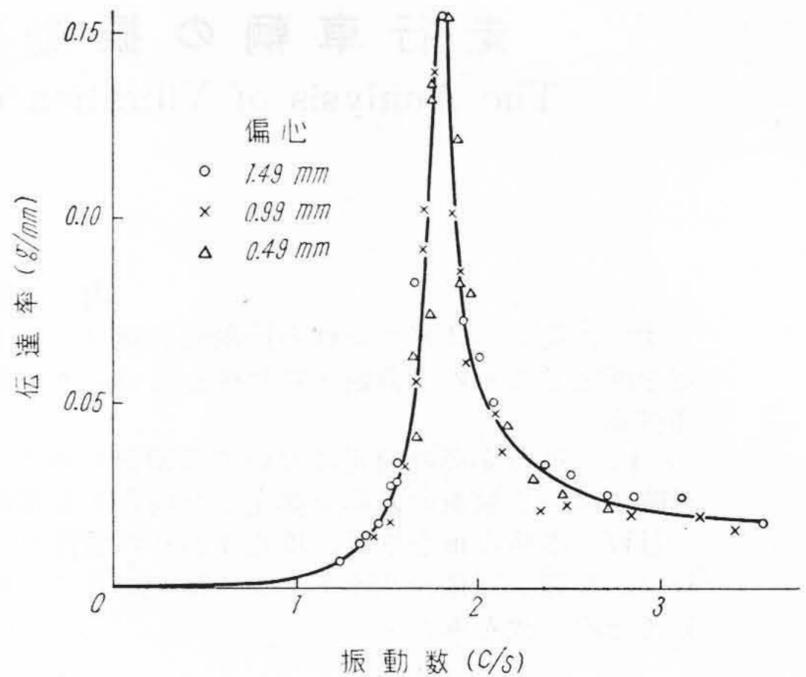
〔III〕 軌条の変形

(1) 軌条の静的変形の測定

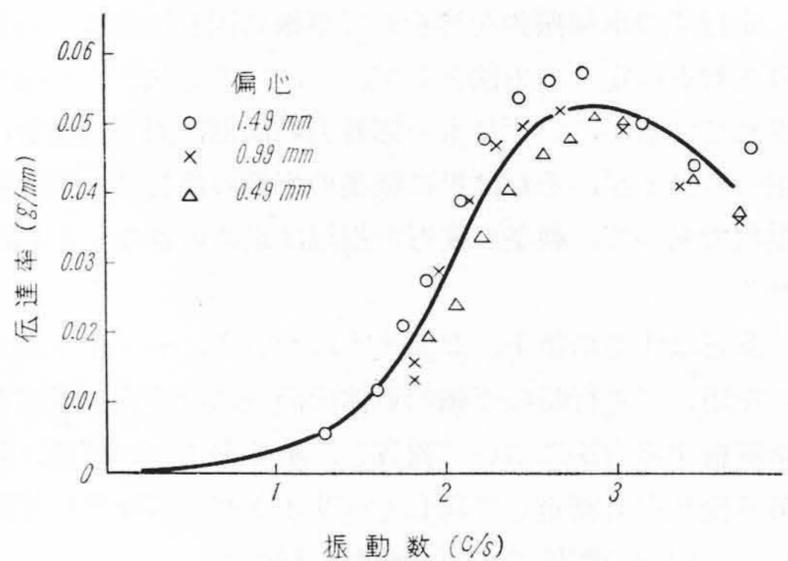
試験車を走らせた軌道は、日立製作所笠戸工場専用線のうちの直線区間 150 m で、軌条は 37 kg/m, 10 m 長さで、軌間は 1.067 m である。軌条変形の測定には第2報と同じ方法を用いた。すなわち L 型鋼の杭を軌条の近くに打込でその杭の上部から腕を出し、腕の先にダイヤルゲージを取り付け、ダイヤルゲージが軌条の足に垂直にふれるようにした。各ダイヤルゲージ間の距離を 400 mm とし、左右両側の軌条の変形を約 70 m にわたつて測定した。負荷としては試験車を用いたが、このときの車輛重量は 17.6 t であつた。この車を動かし、ダイヤルゲージを取り付けてある位置に車輪がきたとき車を止めて、車輪のある位置のレールの変形を測定した。

無負荷時の軌条の変形は、軌条の上面において 400mm の距離にある 2 点の傾斜を水準器で測定することにより求めた。左右の軌条の変形を関係づけるために、測定開始点の左右 2 点の傾斜を測定した。かくして軌条の変形はそれぞれ測定開始点の一点を基準にして求められる。

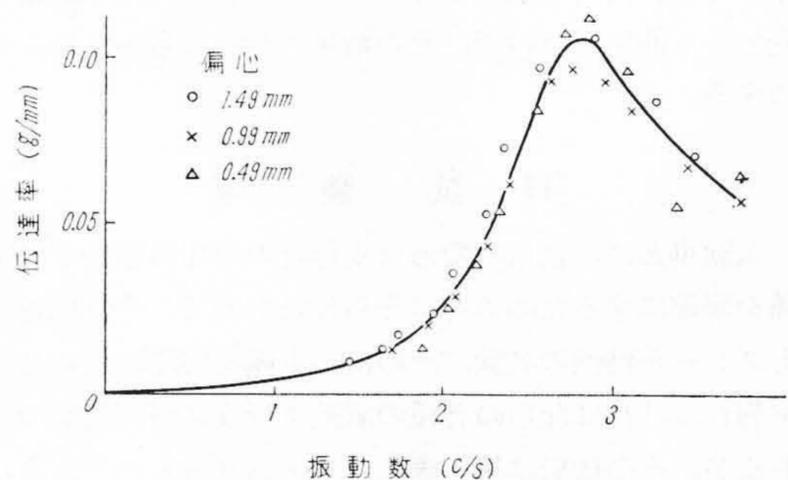
いま車輛の上下振動を考える場合、台車の上下振動だけを考えればよく、これに対応する軌条の変形も、台車の各車輪位置の変形の和として考えればよい。したがつて無負荷の場合と負荷の場合について、それぞれこのような 4 点の変形の平均を求めたが、このようにして求めた変



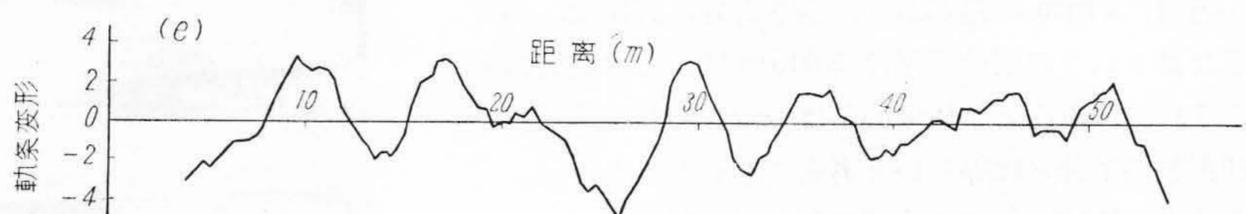
第2図 共振曲線 (C = 0)



第3図 共振曲線 (C = 30)



第4図 共振曲線 (C = 60)



第5図 軌条変形

形は長期傾向をもっているので、9.6 m ごとの算術移動平均を求めて、この傾向を除いた。第5図はかくして求めた軌条変形を示す。

(2) 動的変形の測定

車輛の走行時に生ずる軌条の沈下を、前述のような静的の場合の沈下と同じに扱ってよいかどうか問題がある。そこで車輛の走行中における軌条の沈下量について測定を行った。測定は、静的変形の場合に用いたダイヤルゲージの代りに、梅北式最大変位計を用いて行った。本器は沈下量の最大値を記録するもので、1台車について1個の最大値を示す。この変位計を10個用意し、80 cm か 120 cm おきに軌条に取り付けた。

かくして (i) 軌条変形が車輛速度によつて変わるかどうか、(ii) 試験車の枕バネ、軸バネをかえて試験を行い、バネの剛さの影響、(iii) 負荷を軸重 3.64 t, 4.88 t の2種にかえてその影響、などを検討した。

この場合には変位計をできるだけ軌条継目に近いところに持つていつて、継目附近の変形を調べた。測定番号および継目からの距離を第6図に示す。

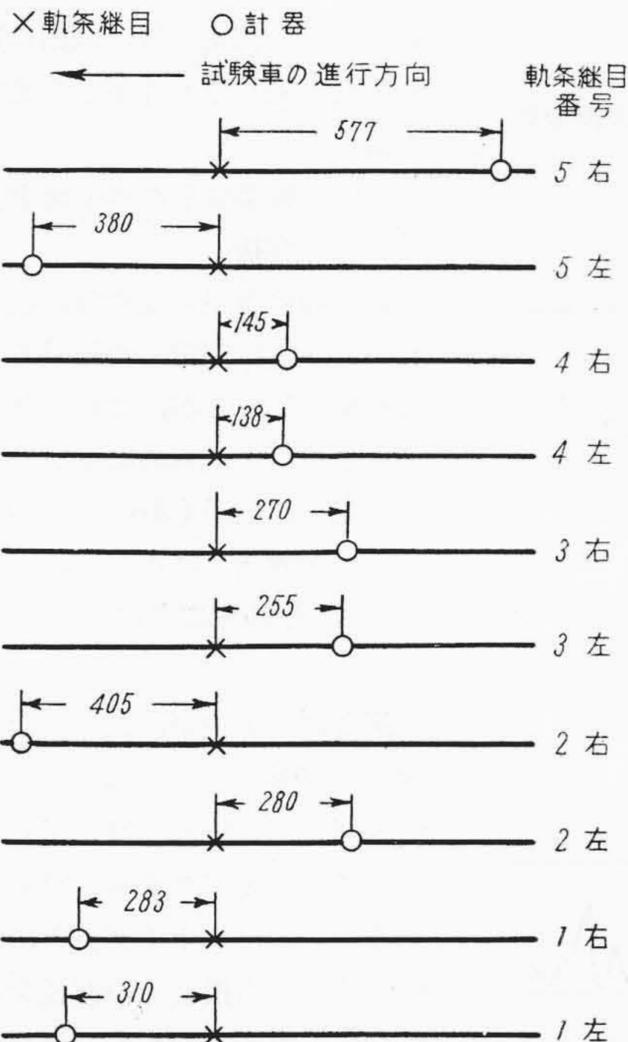
第7図は速度と軌条の変形の関係について得られた結果からの例示である。本図においては(1), (2) 軌条の継目からかなり離れた位置における沈下量で、(5)は軌条継目に近い部分(継目から約 300mm 離れている)の沈下量

である。これから見て多少速度の増加に伴つて沈下量がふえる傾向があるが、ほとんど無視しうる。この結果は高橋博士が小田急相武台で行つた同様な実験結果⁽⁶⁾ともよく傾向を同じくしている。したがつて各速度ごとの沈下量の平均を求めて静的沈下量との比較を行った。第2表はその結果であるが、表中 1, 2,5 は最大変位計を取り付けた場所を示す数で、左右は軌条の左, 右を意味する。沈下量の値は動的の場合には前後台車の平均であり、静的の場合には前車輪と後車輪との中の大きい方の値をとり、それを前後台車について平均した値である。

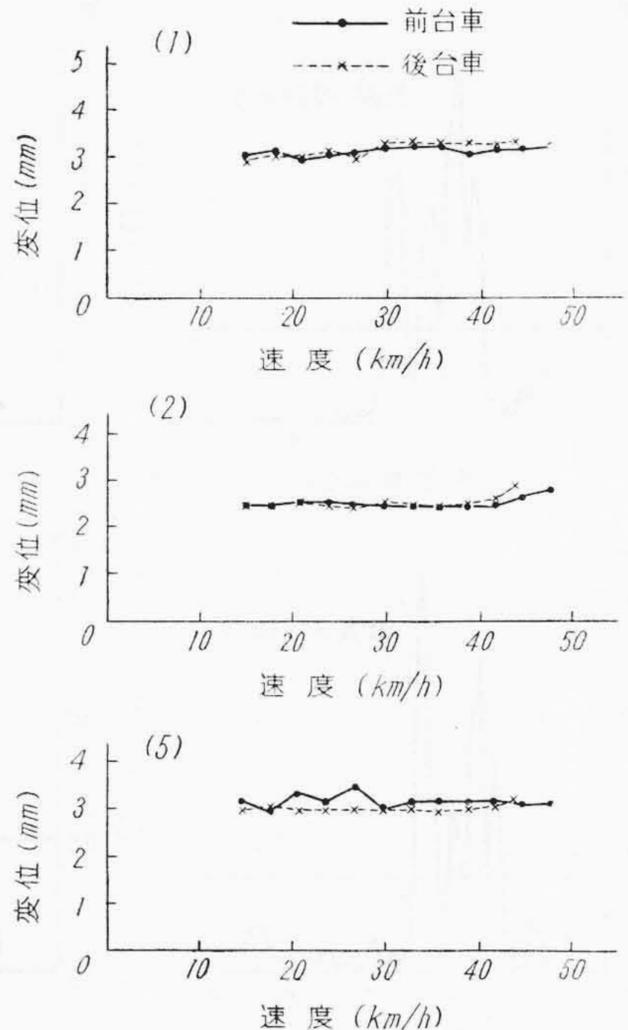
試験車の台車のバネを a, b 2種にかえて測定を行ったが、バネ系の差による軌条の沈下量の差はほとんど認められず、静的、動的の値もほぼ等しいが、継目附近においては、バネのかたい車の動的変化が柔かいものに比べてやや大きく、静的との差も大きくなつている。これは車輛走行時に継目落ちによつて起る衝撃力がバネの堅さによつて異なり、これがレールの沈下量に影響を与える

第2表 動的軌条変形と静的軌条変形の比較 (mm)

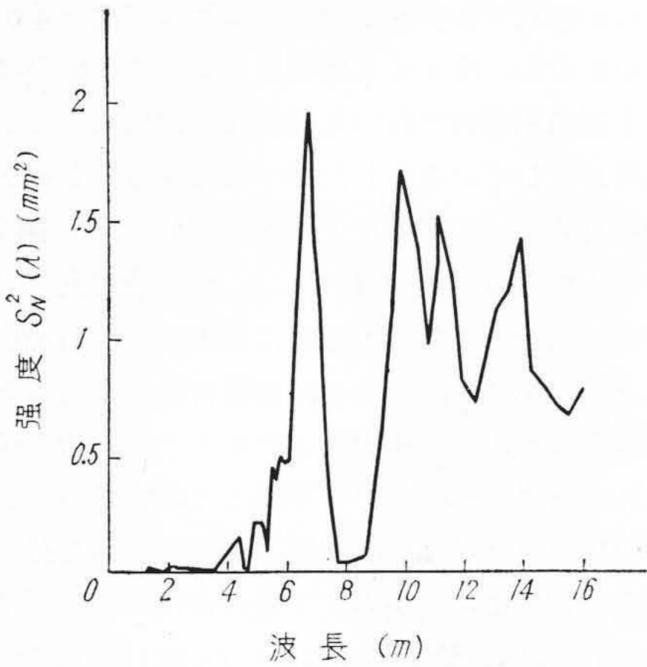
種別	バネ剛性 (枕バネ 軸バネ) (台車片側) (kg/cm)	1		2		3		4		5 (継目附近)	
		左	右	左	右	左	右	左	右	左	右
a	80/160	4.1	3.3	4.7	2.5	4.8	2.5	3.2	—	3.1	3.6
b	40/80	4.2	3.2	4.6	2.6	4.7	2.5	3.2	2.2	2.6	3.2
静的の平均		3.9	3.3	4.6	2.6	4.6	2.7	3.2	2.6	2.7	3.0



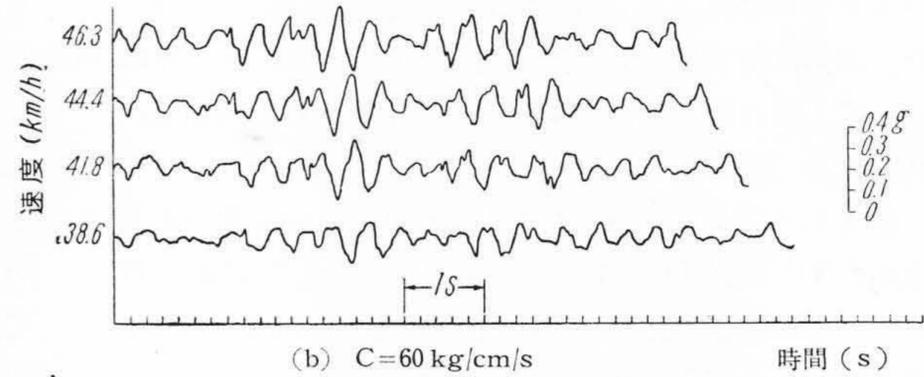
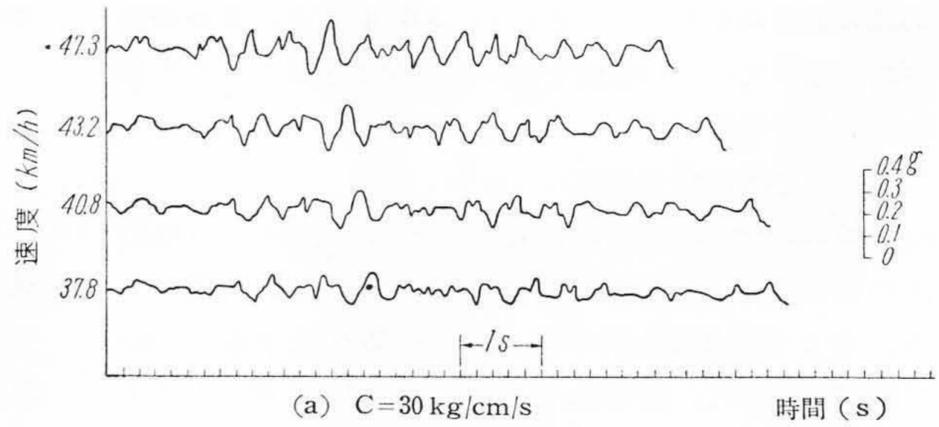
第6図 最大変位計取付け場所



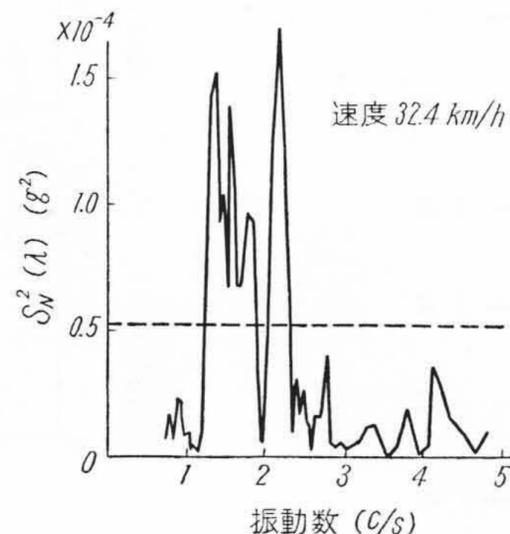
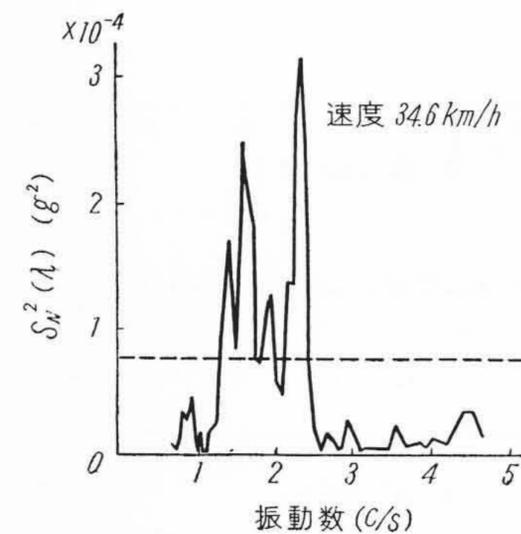
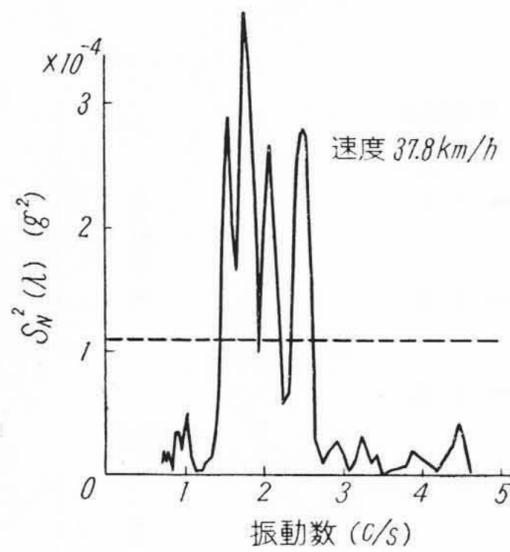
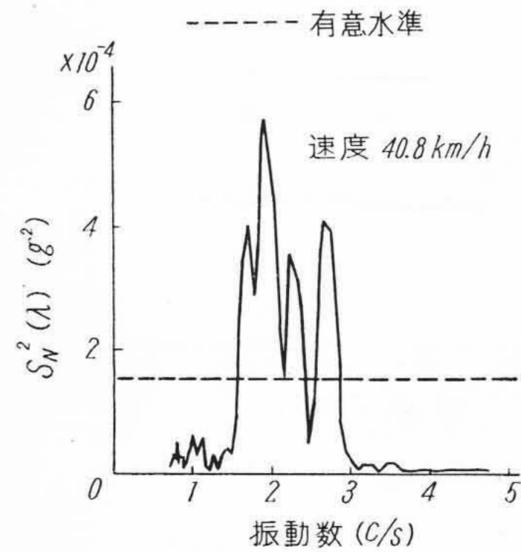
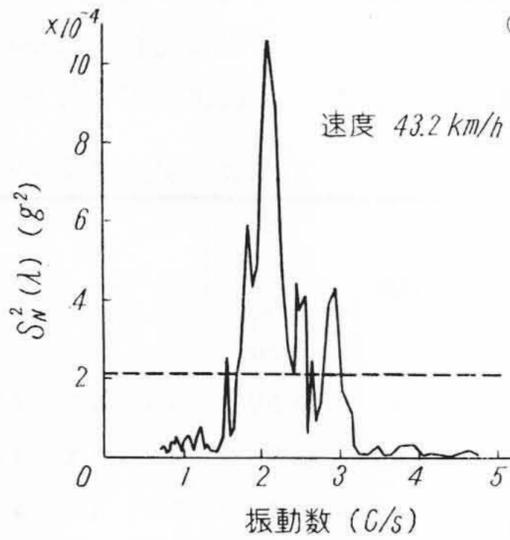
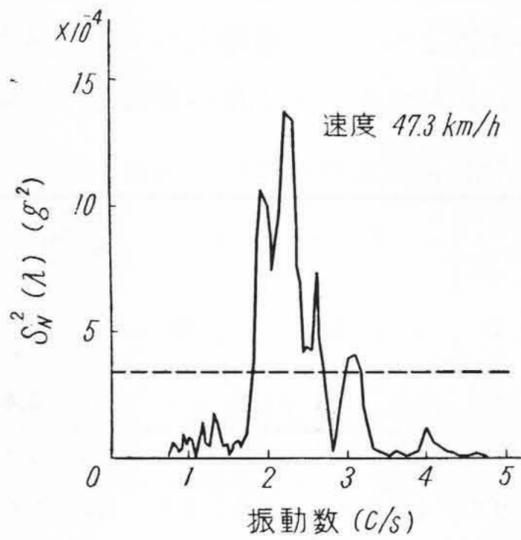
第7図 軌条変形の例



第8図 軌条変形のペリオドグラム



第9図 試験車振動波形



第10図 振動加速度波形のペリオドグラム (C=30)

ものと考えられる。

軸重の差による沈下量の差を第3表に示した。これから、沈下量は軸重がますとそれに伴って増加するが、軸重の増加の割合に比較してそれほどには増加していないことがわかる。このことは軌条の沈下量が荷重と直線関係にないことを示しており、したがって軌条変形の測定には、厳密には走行する車輛と同じ車で沈下量を測定すべきであらう。

(3) 軌条変形のペリオドグラム解析

走行時の軌条の変形は、軌条継目において静的に測定した結果と多少違った結果を生じたが、これを除けば、同一車輛を用いたものにおいては、静的に測定した結果も動的に測定した結果も同一と考えられるので、軌条の変形としては静的に測定した結果を用いる。

第8図は試験車によつて求めた軌条変形の波形から、車輛の走行試験の解析区間と同一場所を選び出し、それについてペリオドグラムを求めたものである。このペリオドグラムにおいて、極大値の平方根とその波長を取り出したものが第4表である。すなわち、軌条の変形はこの表に示される波長およ

第3表 軌条継目附近の変形 (mm)

軸重 (kg)	1		2		3		4		5	
	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右
3,640	2.3	3.2	4.1	1.9	4.9	5.8	2.6	—	2.5	1.9
4,880	2.8	3.5	4.3	1.9	5.6	5.4	2.8	1.7	2.9	1.9

第4表 軌条変形の振幅

波長 (m)	4.2	5.0	6.0	6.8	7.6	8.4	10.0
振幅 (mm)	0.25	0.59	0.92	1.47	0.70	0.71	1.09

び振幅を持った複合調和波で表わされるものと考えられる。

〔IV〕 振動試験ならびに結果の解析

(1) 振動加速度のペリオドグラム

上述のようにして軌条の上を試験車を走らせて振動試験を行った。試験方法は試験区間をできるだけ一定速度を保ちながら車を走らせ、この速度を数種類かえて行う方法をとった。

振動計は梅北式 DV-3 型振動加速度計を用い、車輛の前部心皿上床面に置いて振動加速度を測定した。第9図(a)はオイルダンパの公称減衰係数 30 kg/cm/s の場合 (b)は 60 kg/cm/s の場合である。

この振動波形中より、軌条の変形のペリオドグラムを求めたと同じ区間における波形を選び出し、各速度ごとの波形についてペリオドグラムを求めた。第10,11図は公称減衰係数30, 60 kg/cm/s のときのペリオドグラムである。

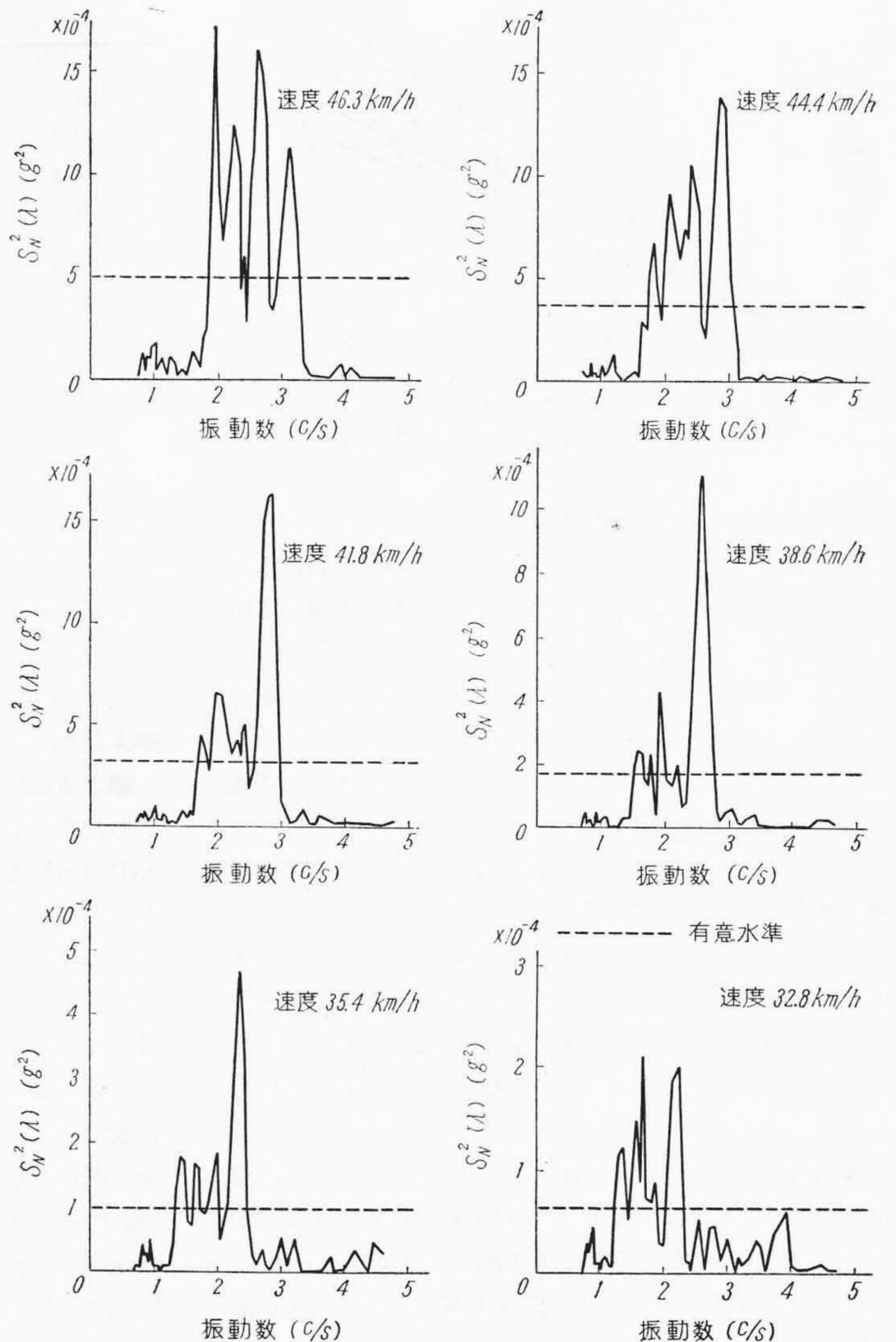
(2) ペリオドグラムを用いた振動解析ならびに軌条変形との関係

前述のペリオドグラムにおいてピークを生ずる振動数およびその強度を取り出す。これらは複合調和波を構成すると考える。各正弦波の振動数はピークを生ずる場合の振動数であり、振幅はそのときの強度の平方根を取る。これらを使つて速度、振動数の関係をグラフにする。すなわち横軸に速度、縦軸に振動数を取り、上述した各速度における複合調和波の各成分の振動数、速度の関係を打点し、かつその点を中心として強度の平方根を半径とする円を描く。その結果が第12,13図である。

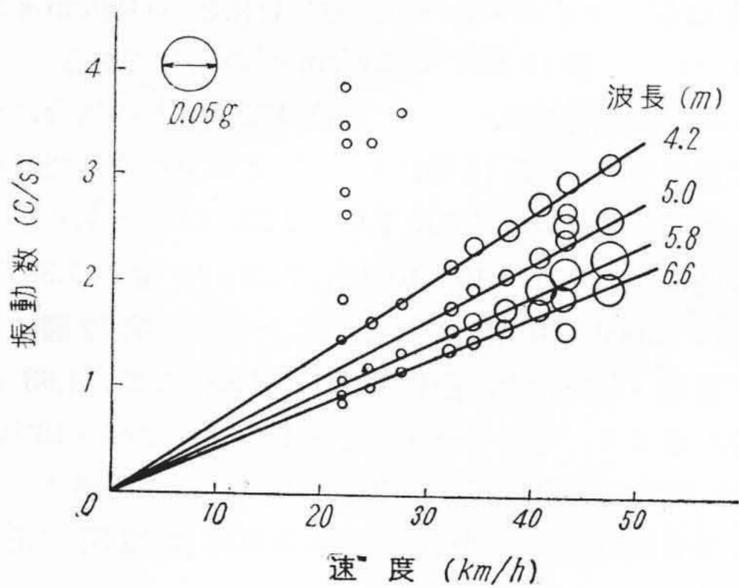
第12図はオイルダンパの公称減衰係数 30 kg/cm/s の場合であり、第13図は 60 kg/cm/s の場合である。

本試験の解析結果において速度 47.3 km/h の場合について説明すると、第10図において、この車輛速度でピークを生じる振動数は 3.11, 2.61, 2.23, 1.93 であり、その強度はそれぞれ $4.15 \times 10^{-4} g^2$, $7.29 \times 10^{-4} g^2$, $1.375 \times 10^{-3} g^2$, $1.060 \times 10^{-3} g^2$ である。したがつて第12図において速度 47.3 km/h, 振動数 3.11, 2.61, 2.23, 1.93 の4点が求まり、その各点を中心として半径 $2.04 \times 10^{-2} g$, $2.70 \times 10^{-2} g$, $3.71 \times 10^{-2} g$, $3.26 \times 10^{-2} g$ の円を描く。かくして各速度ごとに同様の方法を取れば第12図が求められる。

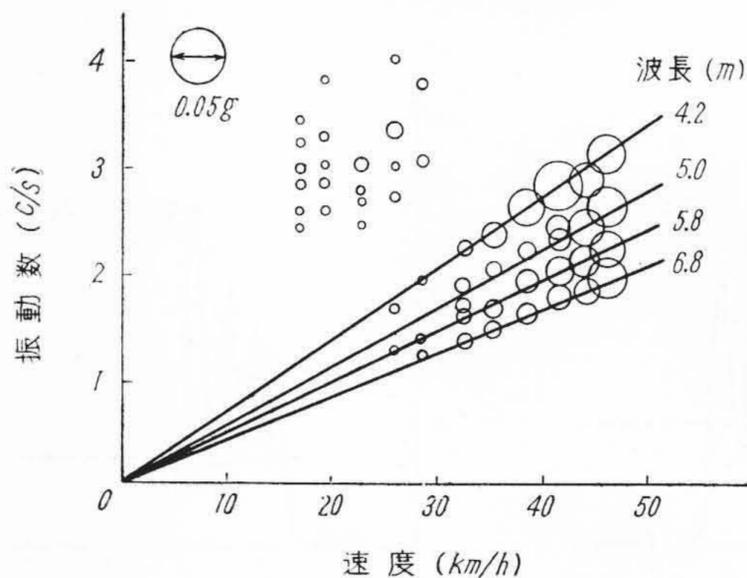
図中原点を通る直線が引かれているが、これはたとえ



第11図 振動加速度波形のペリオドグラム (C=60)



第12図 速度—振動数関係 (C=30)



第13図 速度—振動数関係 (C=60)

ば、軌条の変形が速度に無関係に一定であるとしたとき、その正弦的変形によつて起る車体の振動の振動数は速度と直線関係にあることを示している。すなわち図中5mとあるのは、任意の速度において、たとえば47.3 km/hならば、縦軸に平行に47.3 km/hの点を通る直線を引けば、それと5mと書いてある直線との交点が、5mの波長をもつ軌条の正弦波形的変形によつて起る車体の振動数を表わすことを示している。

〔II〕章で述べた、台車試験機によつて求めた共振曲線第3図を用いて、上述の車輛振動より軌条の変形を求めてみる。この場合、台車試験機を試験に用いた車体と実際走行試験の車体とは同一であり、また車体の慣性半径が心皿間の距離の半分に等しく、かつ重心と車体の中心とが一致しているので、この共振曲線がこのまま使用しうる。

第12図において波長5mについて考えてみる。速度47.3 km/hのときは振動数は2.61 c/sで振幅は0.0270gであり、そのときの伝達率は第3図より0.0517 g/mmであるから、振動加速度振幅0.0270gを伝達率0.0517g/mmで割つた値0.52mmが、5mの波長の変形を表わすことになる。同様にして、速度、波長について振動波形か

第5表 軌条変形の振幅 (mm) (条件 C=30)

速度 (km/h) \ 波長 (m)	4.2	5.0	5.8	6.6
47.3	0.40	0.52	0.90	1.38
43.2	0.40	0.44	0.99	1.27
40.3	0.38	0.45	0.98	1.26
37.8	0.34	0.50	1.16	1.51
34.6	0.39	0.45	1.23	1.51
32.4	0.35	0.56	1.09	1.69
27.7	0.42	—	1.15	2.27
24.6	0.41	—	1.35	1.47
22.1	0.52	—	1.44	1.83
平均値	0.40	0.49	1.14	1.58
軌条変形実測値	4.4m 0.37	0.47	5.6m 0.67 5.9m 0.70	1.40

第6表 軌条変形の振幅 (mm) (条件 C=60)

速度 (km/h) \ 波長 (m)	4.2	5.0	5.8	6.8
46.3	0.37	0.43	0.83	1.80
44.4	0.35	0.47	0.97	1.41
41.8	0.39	0.41	1.00	1.34
38.6	0.36	0.35	0.99	1.32
35.4	0.39	0.50	0.82	1.44
32.8	0.34	0.46	1.05	1.36
28.9	0.38	—	1.32	1.15
26.1	0.55	—	1.10	—
平均値	0.39	0.44	1.01	1.40
軌条変形実測値	4.4m 0.37	0.47	5.6m 0.67 5.9m 0.70	1.40

ら軌条変形の振幅を求めたものが第5表である。ここで軌条変形の実測値とあるのは〔III〕章で述べた軌条変形の実測値から求めたものである。同様にして第13図と第4図から求めたものが第6表である。

第5,6表において、軌条変形の実測値から求めた複合調和波が波長5.6m (振幅0.67mm)、波長5.9m (振幅0.70mm)となつているのに対し、車輛振動から求めたものは波長5.8m (振幅1.14mm)となつている。今車速40 km/h附近を考えると、5.6m、5.9mの波長の変形で引き起される振動の周期は0.5秒、0.53秒となり、この二つの周期の平均は0.515秒となる。

真の周期と試行周期とが違つても、ペリオドグラムの強度はやはりある値を示す。真の周期が0.5秒である場合、正弦波形と考えて、解析に用いたと同じ時間範囲についてペリオドグラムを求めると、0.515秒で真の強度の80%の強度を持つ。0.53秒の真の周期の強度も0.515秒の周期に対しほぼ同じくらいの影響を持つと考えられ、しかも軌条変形のペリオドグラムから5.6m、5.9mの強度はほぼ等しいから、それによつて起る振動もほぼ

第7表 r.m.s (g) の比較

	条 件 (C=30)							
	47.3	43.4	40.8	37.8	34.6	32.4	27.7	24.6
速度 (km/h)								
振動波形より直接求めた場合	0.0469	0.0384	0.0334	0.0290	0.0252	0.0222	0.0193	0.0151
ペリオドグラムより求めた場合	0.0423	0.0392	0.0318	0.0245	0.0207	0.0182	0.0114	0.0086

	条 件 (C=60)							
	46.3	44.4	41.8	38.6	35.4	32.8	28.9	26.1
速度 (km/h)								
振動波形より直接求めた場合	0.0571	0.0504	0.0471	0.0367	0.0285	0.0238	0.0209	0.0189
ペリオドグラムより求めた場合	0.0561	0.0490	0.0429	0.0316	0.0224	0.0196	0.0140	0.0133

等しいと考えれば、0.5秒、0.53秒の二つの周期の調和波のために、0.515秒におけるペリオドグラムの強度は各単独の強度よりも大きくなり、0.515秒にピークが生ずることになる。

(3) 車輛振動加速度の大きさについて

車輛の振動の大小を論ずる場合、従来の方法では試験区間を小区間において、その小区間内の最大振幅を求め、その平均値で示す方法、および波形の一つ一つの振幅を計つてその平均をもつて比較の基準とする方法とがある。筆者は振動波形を時系列として考えたが、かかる統計量で普遍的と考えられるものは r.m.s. であり、これの大小でもつて振動の大小を決める量とする。

いま走行時の車輛振動が複合調和波 $\sum A_n \sin(Wt + \phi_n)$ として表わされるとき、その r.m.s. は

$$r.m.s. = \sqrt{\frac{\sum A_n^2}{2}}$$

である。振動波形から直接求めた r.m.s., とペリオドグラ

ムから上式を用いて計算で求めた r.m.s. を比較すると、第7表のようになる。この表から見て、振動波形より直接求めた r.m.s. とペリオドグラムより計算によつて求めたものは大体一致することがわかる。

[V] 結 言

以上に述べたところを要約すると

(i) 軌条の変形を車体の振動波形より推定したが、実測した結果とほぼ等しい結果が得られた。

(ii) 静的に軌条の変形を測定したものと動的に測定したものととの相違はない。

(iii) 振動波形より求めた r.m.s. とペリオドグラムより求めたものとはほぼ等しい。

したがつてこれらの結果から、軌条の変形がわかっている場合に、台車動的試験機によつて、車体の心皿上床面の振動加速度と振動数の関係が求められれば、その軌条における車輛の振動の大小を推定することができる。

終りにあたり終始御指導をいただいた九州大学石橋教授に深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 機械学会：第26回機械振動とその対策講習会教材 P. 154 (昭25)
- (2) 小田：機械学会論文集 第17巻 第64号 P. 64 (昭26)
- (3) 桑江, 左海：日立評論 36, 1665 (昭29-11)
- (4) 桑江, 日立評論 38, 569 (昭31-4)
- (5) T. Ohashi: Hitachi Review August, P. 87 (1953)
- (6) 高橋, 室町：運輸技術研究所報告 1, 234 (1951)



カルダンモーター用電刷子
GH-135, GH-135B について

近來各電鉄会社は旅客へのサービスとして、色々な努力が払われている。甘い夢をのせて走る、高速度ロマンスカーなどもその一つである。

電車が高速化するにつれて、車体の振動が激しくなってくるので、少しでもその振動を少なくするために、電動機の動力を、車輪に伝達する方式として、カルダン式が採用され始めた。カルダン式というのは、電動機を台車台枠に取り付け、電動機軸とその歯車とは、カルダン軸と呼ぶ特殊の自在接手で連結し、車軸が台車台枠に対して、振動変位しても、歯車装置の噛合せに影響のないようにした方式である。

この電動機は高速回転のモータで、一例をあげればその回転数は1,800~4,320 rpm 周速にして27.3~65.5m/s という高速となり、電流密度も10.4A/cm² という使用条件である。したがつてこのような苛酷な条件で使用するには、従来から使用されてきたような電鉄用刷子では使用にたえない。日立製作所ではこの傾向を考え、特にこの種モータに適合する材質を試作し、“GH-135”, “GH-135B” なる品種を製造した。今その特性は下記のとおりである。

物 理 特 性 表

品 種	見掛比重	比抵抗 (μΩ cm)	抗折力 (kg/cm ²)	弾性率 (kg/mm ²)	硬 度 (ショアー)	摩擦係数	衝撃欠損限度 (h)
GH-135	1.70	4,000	340	950	50	0.24	70
GH-135B	1.70	4,000	360	1,000	58	0.24	80