

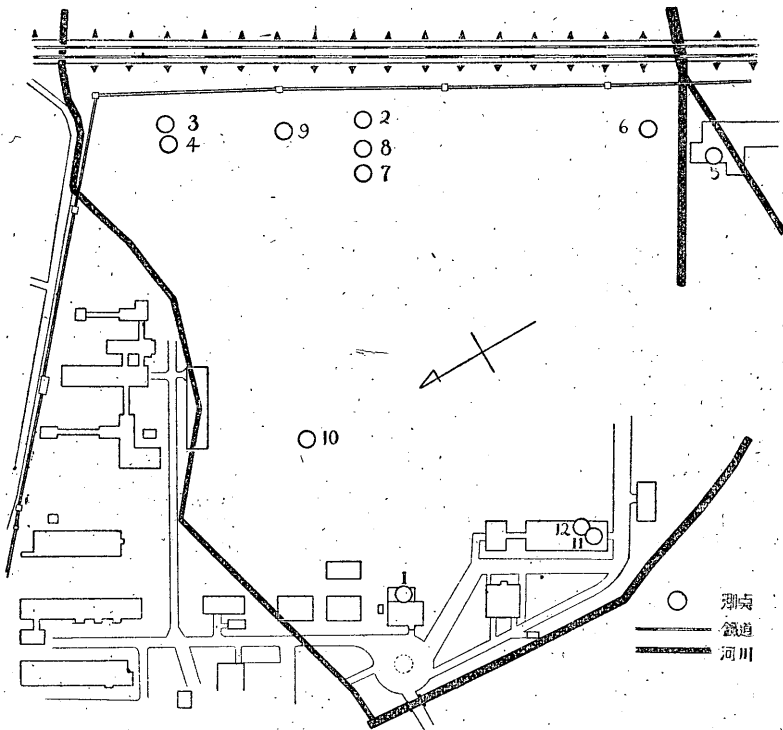
列車に因る地面震動の測定

森田稔，波佐谷慶孝

1. 緒言 列車に因つて誘發される土地の振動を調べたものには古くは西歐諸家のものがあるが、我國では近く(1) 柵橋技師のものがある位で、比較的類例に乏しい様である。

著者等は富士寫眞フィルム株式会社よりの依頼に依り、昭和 14 年 9 月 12 日より 3 日間に亘り神奈川縣小田原町井細田の同社小田原工場用地に於て東海道線各列車の通過に伴ふ地面の振動を測定した。以下其概要を報告する。

第 1 圖 現場附近略圖



(1) 柵橋嘉市；海と空，18，161~164（昭 13）。

第 1 表

測點番號	x	y	觀 測 場 所
1	135	234	事務所テレス, コンクリート床上
2	160	27	野 外
3	203	29	野 外
4	201	38	野 外
5	0	44	建築中の藥品工場, 地締めをせる土の上
6	29	31	野 外
7	160	51	野 外
8	160	40	野外, 地中に杭を打ち厚さ15mmの鐵板上
9	194	32	同 上
10	185	168	同 上
11	53	214	精機工場コンクリート廊下上
12	58	210	精機工場板張床上

現場は東海道線酒匂川鐵橋より小田原驛に至る鐵路（鐵橋より小田原驛に向ひ若干下り勾配）に接し、酒匂川の右岸より約150米を距てた地點で、第1圖に測點を記入せる現場附近の要圖を示す（測點の番號は測定を行つた順序に従ふ）：各測點位置の精確なる測定値並びに觀測場所を第1表に示す。表中 x , y は測點の位置を示す座標で、 x は測點 5 より線路に平行に北向きに測つた距離、 y は四本の線路軌條中最も近き側のものより線路に直角に測つた距離を示す。測點は大體、1) 線路よりの距離一定なる線上の諸處に、2) 線路に直角なる一線上の諸處に夫々當る様擇ばれたが、現場の都合により若干の移動を餘儀なくされたものもある。

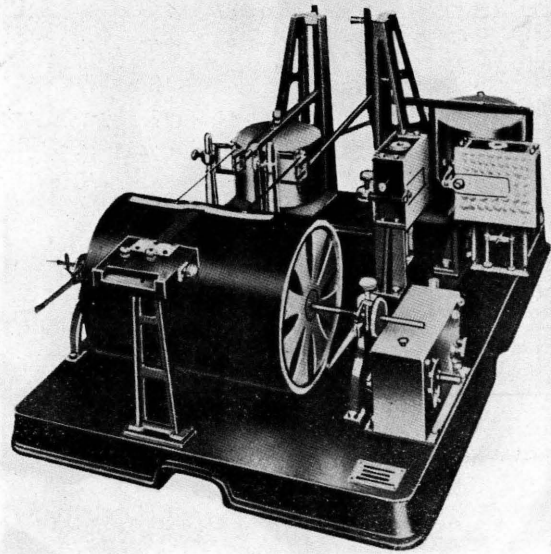
2. 計器 振動の測定には中央氣象臺に於て製作せる携帯用振動計を使用した。第2圖は其寫真である。此振動計は同一の臺座上に水平動二成分を備へ、之等を同一記象紙上に記録せしめる様設計されて居り、大凡次の如き性能を有つ。

倍率 30~80, 固有週期 3~5 秒, 摩擦係數 0.02 mm/sec², 制振度 1~∞, 重錘の質量 18 kg.

今回の測定に當つては、何れの測點に於ても、水平動二成分の一つが線路に平

行、他の一つが直角な方向の振動を記録する様に機械を設置し、又測定せらるべき振動は週期極めて短かく振幅も小なる故、倍率・週期共に夫に適する様調整した。倍率は常に平行成分 50 倍、直角成分 80 倍にとり、週期は 2.8~3.5 秒に落して使用した。然も尙此週期は地動の週期に比し約 30 倍も長い故、この爲めには制振作用の必要は殆どないのであるが、風其他比較的長週期の擾亂の影響を避ける爲、測定に當つては制振度 5 前後の制振作用を働かしめた。

第 2 圖 振 動 計 寫 眞

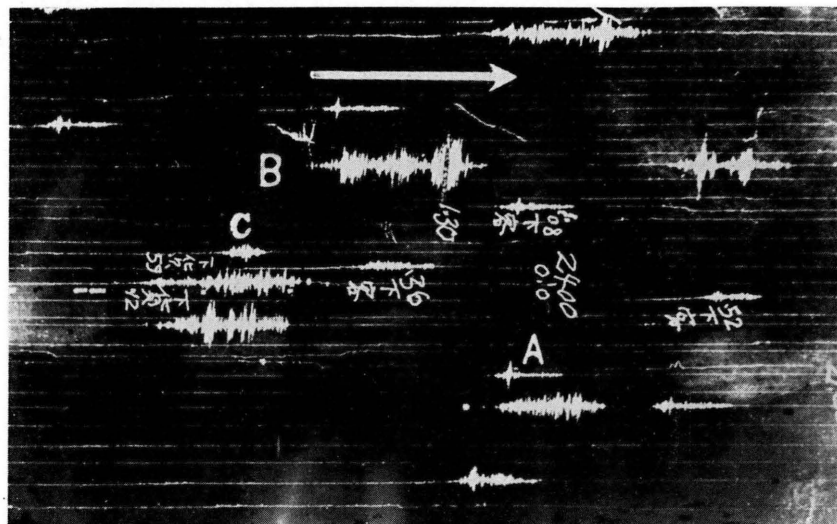


3. 測定方法 測點

1・5・11・12 は屋内に在るが、他は凡て野外に在る爲風に依る擾亂を受け現象を亂され易い。幸ひ測定期間中は天候状態極めて良く、三日間を通じて晴天無風乃至微風の状態であつたが、野外觀測に於ては振動計に硝子張りの覆ひを被せることに依り風の影響を完全に避けることが出来た。野外の測點中 8・9・10 に於ては地面に長さ約 40 cm の杭 4 本を頭迄打込み、之に厚さ 15 mm、廣さ振動計臺の夫より稍大なる鐵板 (80×82 cm) を載せ、其上に機械を据付けて觀測を行つたが、其他の個所に於ては地上に直接振動計を設置して觀測した。

振動計の記録圓筒は晝間は特に振動週期の測定に便なる様毎秒 2~4 mm 即ち毎分 12~24 cm の速さにて廻轉せしめ、之に毎秒 1 回電接する電接時計を以て 1 秒毎に刻時せしめ、夜間は毎分 25~30 mm の速さとし、觀測者が半時間毎に刻時した。測點 6 及び 9 に於ては夜間觀測を行ひ、他の個所に於ては晝間觀測を行つた。晝間觀測にては 1 ヶ所に 5~15 回の列車振動を記録せ

第 3 圖 記 象 寫 眞



しめ、夜間観測にては測點 6 に於て 93 回、測點 9 に於ては 128 回の列車振動を記録せしめた。第 3 圖に測點 9 に於ける記象の一部を示す。

4. 測定結果(其一) 三日間に亘つて得られた記象紙 12 枚を験測し、各列車に因る振動の最大全振幅・振動時間・週期等を讀取つた。振動時間は振幅 1μ 以上と思はれる部分に就てとり、週期は最大動附近に於て 10 乃至 20 振動の平均値をとつた。次に夫等の結果を各別に述べる。

(1) 最大振幅 各測點に於ける平均の最大全振幅を第 2 表に示す。第 4 圖及び第 5 圖は之を圖示せるもので、各種記號の意味は圖中に與へてある。観測値を示す記號の傍の括弧内の數字は観測材料の數を示してゐる。従つて一般に數字の大なる程其観測値の統計的確からしきが大い譯である。

圖中實線は貨車に因る振動の直角成分の最大全振幅平均値、點線は客車に因る同様のものを夫々連ねたものである。兩曲線の上り下りが略平行してゐることは各測點に於て貨車と客車は略々同じ割合に振幅を増減することを示すものである。尙、客車及び貨車の振動の水平成分に於ては缺測せる測點がある爲観測値を連ねなかつた。

圖に依つて貨車及び客車の各測點に於ける振幅の割合を見るに、測點 6 が最

第2表 各測點に於ける觀測結果平均値 (y の順に排列す)

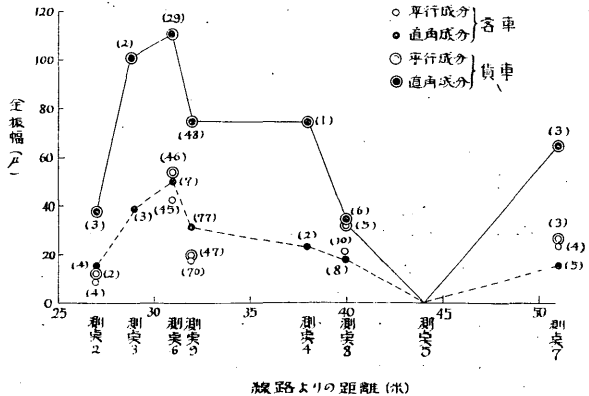
測點 番號	x	y	最大全振幅 (μ)				振動時間		週期 (秒)	
			平行成分		直角成分		客車	貨車	平行	直角
			客車	貨車	客車	貨車				
2	160	27	(4) 9	(2) 12	(4) 15	(3) 38	—	—	—	—
3	203	29	—	—	(3) 39	(2) 101	—	—	—	—
6	29	31	(45) 42	(40) 55	(7) 50	(29) 111	(45) 25	(40) 47	—	—
9	194	32	(70) 18*	(47) 20*	(77) 30	(48) 75	(70) 31	(48) 100	—	—
4	201	38	—	—	(2) 23	(1) 75	—	—	—	—
8	160	40	(10) 21	(5) 32	(8) 18	(6) 32	(9) 34	(5) 116	—	—
5	0	44	—	—	< 1	< 1	—	—	—	—
7	160	51	(5) 24	(3) 27	(5) 16	(3) 65	(4) 24	(3) 52	—	—
10	185	168	(3) 8	(2) 6	(3) 5	(1) 10	—	—	—	—
12	58	210	< 1	—	~ 2	—	—	—	—	—
11	53	214	~ 2	—	< 1	—	—	—	—	—
1	135	234	~1	~1	~1	~1	—	—	—	—
平均									(14) 0.10	(25) 0.15

(註) 括弧内の數字は觀測材料の數, * 參考値.

も大きく、貨車 111 μ 、客車 50 μ に及ぶが、これより線路に近いと振幅は却つて小さく、又其處より遠く距たるに従ひ振幅は漸次減少の傾向を示す。

振幅變化の此様な傾向に對する著者等の検討の結果を第 6 節に述べる。

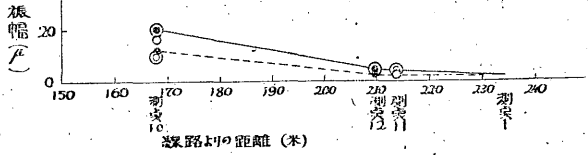
第 4 圖 振幅—距離曲線 (其 1)



尙今回の測定に於

第 5 圖 振幅—距離曲線 (其 2)

て、日は異なるが時刻
の同じ列車の振動を
異なる測點に於て記録
せしめたもの數例あ



り、之等を比較して各測點に於ける振幅の比を一層精確に決定することが出來た。第 2 表に夫等の材料並びに結果を掲げる。即ち測點 2 に於ける振幅を 1 とすれば測點 8 及び 10 に於ける振幅は夫々 1.4 及び 0.5 で、又測點 9 に於ける振幅は測點 7 の振幅の約 0.6 倍であることが知れる。之等二組の比の相互間並びに其他の測點間の關係に就ては遺憾乍ら比較の材料が得られなかつた。

第 3 表 同時刻の列車に依る各測點の振幅の比較

測點 2・8・10 に於ける振幅の比較							
列 車	13:40 (上貨)	13:56 (下客)	14:12 (上特)	14:14 (下特)	14:20 (上客)	平 均	
	平 直	平 直	平 直	平 直	平 直	平 直	平 直
2	12 ^μ 34 ^μ	7 ^μ 13 ^μ	10 ^μ 18 ^μ	7 ^μ 13 ^μ	14 ^μ 18 ^μ		
8	22 22	14 19	16 15	20 18	22 —		
10	6 10	6 5	6 6	12 4	— —		
比	8/2	1.8 0.7	2.0 1.5	1.6 0.8	(2.9) 1.4	1.6 —	1.4
	10/2	0.5 0.3	0.9 0.4	0.6 0.5	(1.7) 0.3	— —	0.5
測點 7・9 に於ける振幅の比較							
列 車	10:50 (上宅)	10:57 (下客)	11:18 (上宅)	11:24 (上貨)	11:32 (下客)	11:53 (下急)	平 均
	平 直	平 直	平 直	平 直	平 直	平 直	
7	24 ^μ 24 ^μ	24 ^μ 16 ^μ	26 ^μ 20 ^μ	36 ^μ 66 ^μ	20 ^μ 16 ^μ	22 ^μ 13 ^μ	
9	(22) 43	(14) 21	(16) 40	(18) 99	(14) 28	(14) 21	
7/9	0.56	0.76	0.50	0.67	0.57	0.62	0.61

(註) 括弧内は参考値。

こゝに考ふべきは測點 5 に於て振幅が異常に小なることである。此測點に於ては測定中客車貨車數回通過したが、記象上には殆ど振幅の痕跡をも印さな

つた。これは一つには該地點が地締めを施せる堅固なる地盤であること、又一つには該建築物の床下を嘗て幅約 2 m の用水路であつたものが現在暗渠として走つて居り、更にその東側には建物より約 10 m 離れて幅約 3 m の水路が掘られて居る爲と考へられる。今回測定を行へる現場は第四紀の新らしい軟弱な地層を成し、かゝる地盤に於ては列車の進行に伴つて誘發される如き短週期波動の速度は極めて小さく、従つて其波長も亦極めて短かく、之位の幅を有する地面の間隙を以てしてもよく振動を遮斷し得るものと考へられる。

(2) 振動時間 二三の測點に於ける振動時間の平均値は第 2 表所掲の如くなる。振動時間も測點により若干の變化はあるが、振幅に於ける程の著しい變化はなく、大體に於て貨車は 1 分前後、客車は 30 秒前後を示す。又個々の列車に依る振動時間の差異は客車に在つては貨車程著しくない、之に就ては次節に詳述する。

(3) 振動週期 週期は各測點或は客車・貨車の別に依つて一定の特徴は認められなかつたので、各測點に於ける値を全部平均して第 2 表に示して置いた。平行成分と直角成分とでは機械の爲か可成り統一的に異つた値が得られたので、各別に平均値を求めた。何れにしても週期は 0.10~0.15 秒である。詳細は次節に譲る。

5. 測定結果 (其二) 上記以外の若干の測定並びに統計結果を一括して本節に述べる。之等は本振動調査依頼の目的以外のものである。

(1) 大なる振幅を與ふる列車 測點 6 及び 9 に於ける夜間觀測の結果、大なる振幅を與ふる列車は第 4 表所掲の如きものであることが知れた。其等は盡く貨車で、大部分は夜間夜半後に通過するものである。

(2) 客車と貨車の振幅の比 各測點毎に客車と貨車の振幅の比を取れば第 5 表の如くなる。測點毎の偏差は比較的小さい。平行成分と直角成分とで比が若干異つてゐるが、概して客車に依る振幅は貨車の 5 割前後と云ふことが出来る。

(3) 振幅頻度曲線 測點 6 及び 9 に於ける多數の觀測材料より上下客貨車別に最大全振幅 5μ 或は 10μ 毎の頻度を求めた。夫等の結果を第 6・7 兩圖に示す。貨車は客車に比し振幅大なるものゝ多いことが明かである。貨車が

第4表 大なる振幅を與ふる列車

列車		最大全振幅		
時刻	種別	平行	直角	
21 ^h 47 ^m	上貨	82 ^μ	162 ^μ	測點6
0 30	"	80	149	
2 14	下貨	60	149	
5 42	上貨	44	149	
2 13	上貨	—	171	測點9
1 20	下貨	—	154	
2 14	"	—	143	

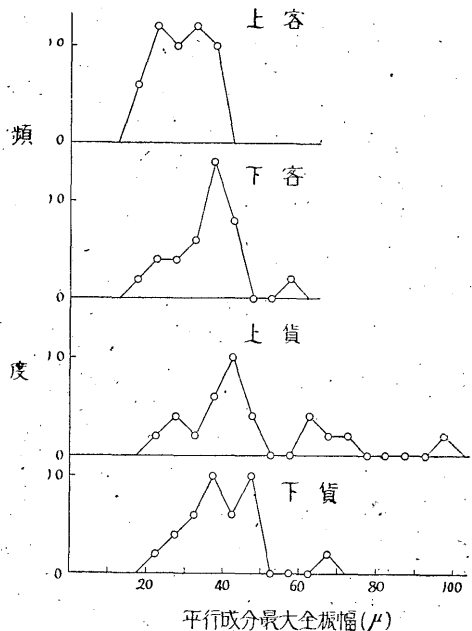
第5表 客車と貨車の最大振幅の比

測點番號	比	
	平行成分	直角成分
2	0.76	0.41
3	—	0.39
4	—	0.31
6	0.77	0.45
7	0.89	0.25
8	0.66	0.56
9	0.41	0.50
10	—	0.50
平均	0.70	0.42

客車に比して振幅の變化範圍の大きいことは貨車には大小輕重種々のものゝあることを示すものである。上り下りの區別は客・貨何れの列車に於ても曲線上餘り顯著ではない。

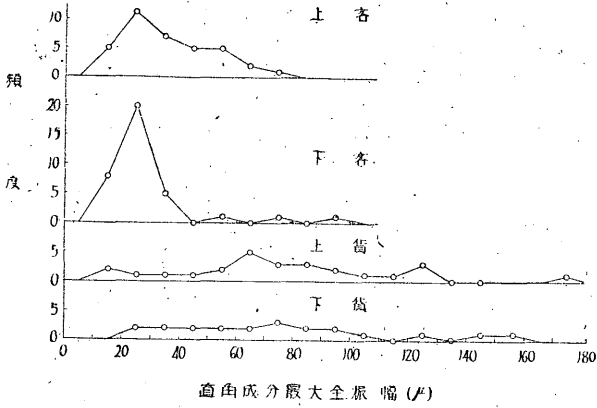
(4) 振動時間頻度曲線 測點6及び9の材料に依る振動時間の頻度曲線を第8・9兩圖に、又之等を凡て加へ合はせたものを第10圖に示す。客・貨車共上り下りに依る差異は餘り顯著でない。頻度最大を示す振動時間は貨車が客車の約2倍になつてゐることは兩圖に共通な傾向である。又振幅頻度曲線に於けると同様、貨車が客車よりも振動時間の變化範圍の大きいことが解る。

第6圖 振幅頻度曲線(測點6に於ける)

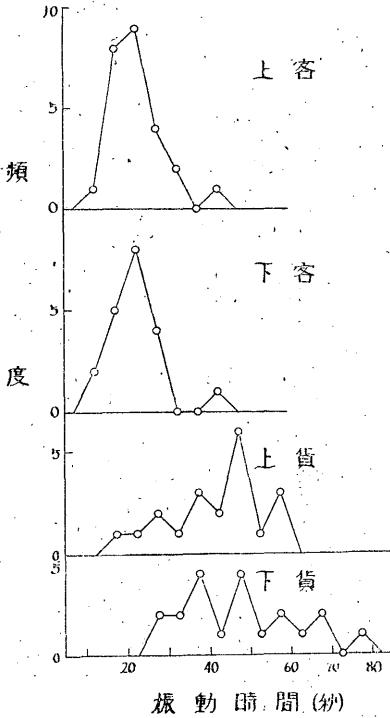


(5) 週期頻度曲線 記録圓筒速廻しの記象凡てを通じて觀測され週期の頻

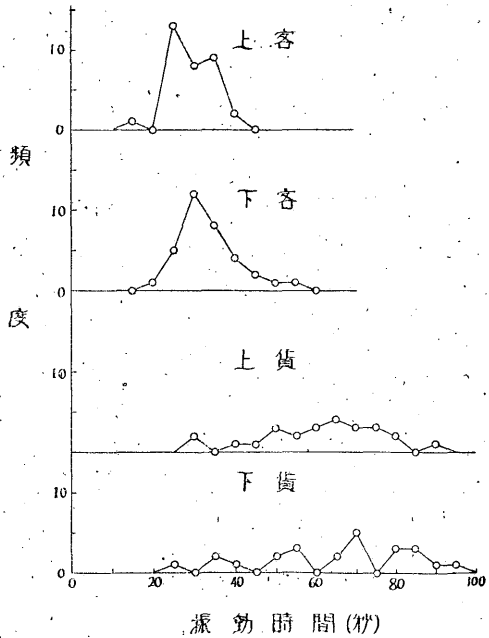
第 7 圖 振幅頻度曲線 (測點 9 に於ける)



第 8 圖 振動時間頻度曲線 (測點 6 に於ける)



第 9 圖 振動時間頻度曲線 (測點 9 に於ける)



度曲線を第 11 圖に示す。材料寡少の爲之から確定的の結論は得られないが、平均値としては平行成分 0.10 秒、直角成分 0.15 秒が得られた。

(6) 記象型及び最大振幅の發現時 一列車通過の際振動計の描く記象型は客・貨車に依り略と一定し、夫々に特徴を有する。

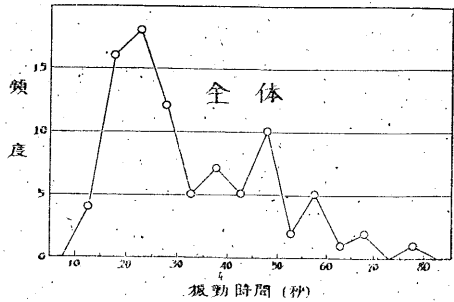
客車は大部分第 2 圖中 A の如き形をとり、最大振幅は振動記象の首部に現れる、貨車に比し一般に振幅が小さく、振動時間が短い。最大振幅の現れる時刻は機關車が測點の最近點を通過する

際である。貨車の記象型は客車程には一定しないが、一般に振幅が大きく、振動時間が長い。車輛數の多いものは第 2 圖 B の如き記象型をとるものが多い。即ち客車の如く振幅の時間的増減が單調でなく、反覆増減を繰返し、最大振幅の現はれる場所も一定しない。貨車でも車輛數少く、速さの大なるものは一見客車の如き記象型を示し、客車との判別困難である。第 2 圖 C の如きものがそれで、宅扱の貨車等は此型になる。

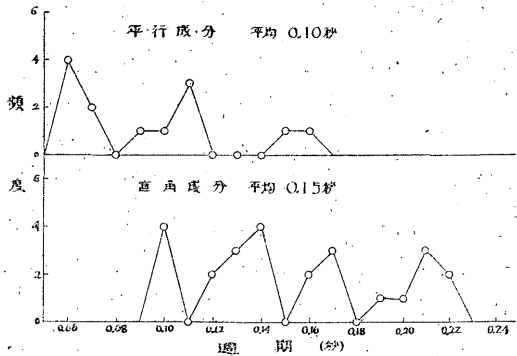
6. 結果に對する考察 本調査に於ける二三の結果に就き若干の考察を試みる。

(1) 水平成分最大振幅 今回調査の結果は水平動の最大振幅が鐵路より或距離に於て一つの極大値をとることを示した。然るに柵橋技師が神戸製鋼所附近に於て石本式加速度計を用ひて同様な測定を行はれた結果によれば其様な現

第 10 圖 振動時間頻度曲線



第 11 圖 週期頻度曲線



(1) 前出, 162~163 頁.

象は認められず、振幅は震動源よりの距離と共に単調に減少してゐる。尤も同氏の場合は、汽車の線路は測點より 3.5 m 高い土堤の上に在り、地下鐵の線路は約 8.5 m 低い所を通つてゐるので、條件は今回の場合とは大分異つてゐる。

大森博士・福島博士等の研究に依れば、列車々輛の振動を起す外力は軌條の繼ぎ目・其の曲率・ポイント・車輛の蛇行運動等であるが、今回の測定現場附近に於ては線路は略々直線で又ポイントも存在しないから、専ら最初と最後の因子のみが働くものと思はれる、之等の外力に因つて起る車輛の運動は形式的には種々のものに分け得るが、結局震動源として有效な運動は大部分上下動で、列車に直角或は平行な方向への水平運動は極めて少いものと考へられる。故に今回の測定現場に於ては列車は主として地表に直角な方向のみに力を及ぼす一つの震動源と見做して差支ないであらう。

地表に垂直な力を震動源とする彈性波傳播の問題は多くの人々に依つて取扱はれてゐるが、こゝでは大體の模様を知るため中野博士のものを参照する。半無限彈性體の表面上の一點を中心とする半径 ω なる圓の内部にのみ一様な力 $Re^{i\omega t}$ が作用し、外部には作用しない場合の結果は必ずしも本文の場合に適當とは言へないが、大體の模様を知るには十分であらう。斯る力によつて生ずる P 波・S 波及び Rayleigh 波の地表に於ける振幅を與へたものを見るに、水平(動徑成分のみ)・上下兩成分共振幅は原點よりの距離と共に單調に減少してゐる。而して原點よりの距離が P 波の波長の 5 倍位となれば既に Rayleigh 波が最も優勢を示すことが認められる。振幅の減衰は距離の自乗根に逆比例し、棚橋技師の場合とよく一致してゐる。

即ち均質な媒質中では著者等の如き場合は理論的に起り得ないことが明かである。著者等の觀測は振幅極大値を與へる水平距離 30 m 以内の二つの測點に於ける觀測の信頼度に若干の懸念があるが、先づ之等の二點は地質的異常を示すものと解釋するのが適當であることが明かとなつた。

尙、著者は本多博士及三浦氏の靜力學的の場合に於ける計算結果中に類似の

(1) 妹澤克惟; 振動學(昭 12), 349~9 頁。

(2) 同上。

(3) H. Nakano; Geophys. Mag. 2, 189~348 (1930).

(4) 同上, 294 頁第 19 表。

(5) H. Honda and T. Miura; Geophys. Mag. 9, 61~81. (1935), Chapter V.

分布曲線の與へられてゐることに著目し、其に依る解釋を試みたが、單なる類似に過ぎないことが知れた。

(2) 振動時間 貨車が客車に比して一般に振動時間の長いことは前述の通りであるが、之には三つの理由が考へられる。第一は列車が長く、従つて影響範圍が長いことである。貨車にして 60 輛又は其以上連結せるものは左程珍しくなかつたが、客車は多く 10 輛内外であつた。第二は速度が一般に小さいことである。第三は質量が大なることである。震動源としての效力を生ずるのは質量よりは寧ろ運動量であると考へられるが、貨車は著者等の目測に依れば客車に比して質量が大なる割には速度が小でなく、従つて運動量も大きいことが看取された。

(3) 週期 一個の振動記象の週期には次の様な標準的變化が認められる。先づ列車の頭部が線路上測點の最近點より若干の距離（多く 100 m 位と認む）に來ると記象上に週期約 0.3 秒の比較的規則的な正弦波型が現れる。其振幅は 1μ 程度である。此波動は列車が一層近付いても波形・週期・振幅等に殆ど變化が認められない。列車が更に近付いて線路上上述の點より或距離に達すると急に短週期振動が始まる。此距離は測點の線路よりの距離によつて異なるものゝ様である。此振動の週期は前述の如く 0.1 秒前後であるが、記象を詳細に調べると、振動の振幅が極大に達する所で最も短く、其前後では之を距るに従ひ僅か宛長くなつてゐることが判る。但し上述の 0.3 秒程度の振動とは劃然と區別出來る。列車の尾部が最近點を通過し、或距離に到ると短週期振動は止み、再び 0.3 秒前後の正弦波型が認められる様になり、暫くの後それも消失する。

多くの振動記象は以上述べた形を採るが、若干のものでは記象の首部及び尾部に 0.3 秒の波型に重つて可成り長時間短週期微動の認められるものがある。第 3 圖にも此様な若干の例が見えてゐる。此様な差異の起る原因は明かでないが、考の上ではかゝる場合の方が自然の様に思はれる。事實平行成分の記象は殆ど全部此種のものである。

(1) 大森博士の觀測に依れば、ボギー車の上下振動の週期は其速度に殆ど關係なく 0.5 秒内外である。之は現今の車輛に於ても殆ど變りないものと思はれるか

(1) 大森房吉；震災豫防調査會報告、40 (明 35), 42 (明 36), 74 (明 44)。

ら、著者等の得た週期 0.3 秒並びに 0.1 秒は如何に解釋すべきであらうか。著者等は週期 0.3 秒は今回測定を行へる土地の固有振動週期と考へ度い。之は一つには 0.3 秒なる値は今回の測定現場と同じ第四紀層で廣く認められてゐる固有週期であり、一つには測定當時現れた脈動に同様な週期のものが認められたからである。又週期 0.1 秒は列車の爲の強制振動の週期と考へ度い。大森博士の振動記象を見るに 0.4 秒の卓越週期の他に 0.1 秒程度の短週期振動も混入してゐることが認められるからである。之は大森博士の研究にもある如く主としてジョイントに於ける車輛の衝撃的振動に依つて起るものと考へられる。

7. 結語 今回の振動調査は指定地域内の或特定個所の振動状態を調査するのが主な目的であつたが、其等の特殊な事項以外に、一般性を有する觀測結果も若干得られた。其主なるものを振動要素別に摘記すれば次の如くである：

I. 最大振幅 (1) 貨車は客車の約 2 倍である。(2) 貨車は客車に比し變化範圍が大である。(3) 今回の測定地域に於ては客・貨車共線路よりの距離 32 m (複線の中心より測つて) 附近に於て振幅極大を示し、其前後に於ては單調に減少する(極大に於ける振幅の平均値は貨車直角成分 110 μ 、客車直角成分 50 μ である)。之に關し若干の検討を試みた。

II. 振動時間 (1) 貨車は平均 1 分前後、客車は 30 秒前後である。(2) 貨車は客車に比し變化範圍が大である。

III. 週期 (1) 列車通過の際の強制振動に因るものと地盤の固有振動に因ると解釋されるものとの二種の週期が觀測された。(2) 列車通過の際の強制振動による週期は客・貨車の別又線路よりの距離によつて著しい差異は無く、平行成分 0.06~0.16 秒、直角成分 0.10~0.22 秒の範圍に於て變化し、各成分毎の平均値は夫々 0.10 秒及び 0.15 秒である。(3) 地盤の固有振動に因ると解釋される波形の週期は約 0.3 秒である。

IV. 記象型 (1) 客車 一般に振動の首部に振幅の著しく大なる部分ある外、振幅の略一樣な記象型を示す。振幅大なる部分は汽關車の最近點通過に當るものである。振動時間が概して短い。(2) 貨車 隨處に振幅大なる部分現れ、振幅の變化は一定せず。振動時間が概して長い。

此調査は中央氣象臺に對する富士寫眞フィルム株式會社の依頼に依り、岡田臺長の命を受け、本多博士監督の下に行つたもので、同社小田原工場長新木壽藏氏は調査全般に亘つて熱誠なる指導と援助を與へられ、又同工場井原正氏は觀測に際し徹宵觀測を引受られる等多大なる助力を惜まれなかつた。藤井新氏其他同工場諸氏よりも少からざる援助を頂いた。茲に厚く謝意を表する次第である。又種々御協力下さつた本臺地震掛の諸氏並びに製圖の勞を引受けられた仙臺地方氣象臺植野・牧田兩氏等に厚く御禮申上げる。

(昭和 15年 4 月)