533, 68:625. 28

高速でトンネルに突入する場合に列車に作用する空気力*

原 朝 茂**

Aerodynamic Force Acting on a High Speed
Train at the Tunnel Entrance

by Tomoshige HARA

When a train enters into a tunnel, at first the pressure of the air immediately before the train head rises and the portion of the air with raised pressure spreads forward with a velocity nearly equal to that of sound. In other words the wave front, the boundary surface between the undisturbed air and the compressed air, moves forward, is reflected at the exit of the tunnel and comes back to the train head. In the present paper the aerodynamic phenomena, during the time interval from the instant of the train head entering into the tunnel to the instant either its tail end coming into the tunnel or the wave front being reflected back to its head, whichever occurs earlier, are treated theoretically. The air is assumed to be compressible and inviscid. The velocities and pressures of air in each portion of the tunnel are calculated. The pressure drag of the train is also obtained. It is interesting to note that the effect of compressibility of air is remarkable in spite of a comparatively low speed of train.

1. 緒 言

列車がトンネルに進入すると列車の周囲の空気の流れは当然平地を走る場合とかなり異なったものになり, そのためトンネル内各部の圧力や列車に作用する空気力は変化する. ことに列車が高速になるとその変化は著しく大きくなると考えられる. 高速鉄道を計画する場合には, これに関連して次のような問題が起ってくる. すなわち, (i) 列車の前面および側面の窓ガラスに作用する風圧, (ii) 換気孔等を通じて起る客車内の風圧上昇—乗客の鼓膜に与える不快感, (iii) トンネル内各部の風圧上昇—トンネル内にいる作業員の鼓膜に与える不快感ないし頭痛, (iv) トンネル内作業員への風の影響, (v) パンタグラフ等突起物に当る風速の増加, (vi) 列車に作用する圧力抵抗の増加, (vii) 単線トンネルの場合と複線トンネルの場合の差異等である. これらの事項を検討するためには, 列車がトンネルに進入する場合の空気力学的問題を全般的に究明しておくことが必要である.

従来この方面の研究としては理論の面では 1927 年に行なった Tollmien⁽¹⁾ の解析があり, また実験の面では鉄道技術研究所の所員⁽²⁾⁽³⁾によって行なわれた実

物列車による列車前頭部岐点圧等の測定があるが, いずれも現象を全面的に解明するに至っていない.

本報告においては著者は空気を非粘性, 圧縮性流体と考え, 一次元問題として厳密解を求め, 高速鉄道計画に伴う上記諸問題の検討に必要な資料を得ることができた.

2. 記 号

a : 列車の断面積 m^2

A : トンネルの断面積 m^2

u : 空気速度 (大地に対する) m/s

$\hat{u}$: 空気速度 (圧縮波面に対する) m/s

$\bar{u}$: 空気速度 (列車に対する) m/s

U : 列車速度 m/s

$c_0 = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}$: 静止大気中の音速, 約 340 m/s

m : トンネルの入口から単位時間に外に向かって吹出す空気の運動量 kg

p : 空気の圧力 kg/m^2

ρ : 空気の密度 $\text{kg s}^2/\text{m}^4$

$q_0 = \frac{1}{2} \rho_0 \bar{u}_0^2 = \frac{1}{2} \rho_0 U^2$ kg/m^2

f : 列車のトンネルにはいつている部分に作用する全空気抵抗 $f = f_* + f_{**}$ kg

f_* : f の中の列車の表面摩擦による部分 kg

* 昭和 34 年 10 月 15 日 東京秋期講演大会において講演, 原稿受付 昭和 35 年 6 月 11 日.

** 正員, 鉄道技術研究所 (東京都北多摩郡国分寺町平兵衛新田).

f_{**} : f の中の圧力抵抗による部分

F_* : トンネルの, 列車のいる部分の壁面に作用する表面摩擦力 kg

$R = \frac{a}{A}$: 列車とトンネルの断面積比

$M = \frac{U}{c_0}$: マッハ数

$X = \frac{p_1 - p_0}{\gamma p_0} = \frac{1}{2} M^2 \frac{p_1 - p_0}{q_0}$

$Y = \frac{p_2 - p_0}{\gamma p_0} = \frac{1}{2} M^2 \frac{p_2 - p_0}{q_0}$

添字 0: 圧縮波面より前方(第1図の①)の部分の状態を表わす. 大気中と同じ状態である.

添字 1: 圧縮波面と列車前面との間, すなわち第1図の場所①の状態を表わす.

添字 2: 第1図の②の場所の状態を表わす.

添字 3: トンネル入口(第1図の③)において外に吹出す気流の状態を表わす.

添字 s: 列車前頭部の岐点における状態を表わす

3. 理 論

列車がトンネルに突入すると, まず列車のすぐ前方の空気が圧縮され, この圧縮された部分は時間とともに前方に広がってゆく(第1図参照). 圧縮された部分とまだ圧縮されていない部分の境界面(波面)は直立衝撃波のように音速に近い速度で前進してゆく訳で, これがトンネルの出口に達すると反射してもどって来る. この論文で取扱うのは, 列車の前頭部がトンネルに突入してから, 波面がまだ列車前頭部までもどって来ず, しかも列車の尾端がトンネルにはいり切っていない期間(通常長いトンネルの場合でも高々10~20 s程度の短い時間)の現象である. 実際の列車による岐点圧の実測値は通常第2図のような時間的変動の経過をたどる. G点で列車の前頭部がトンネルに突入, H点で尾部が突入していることを示している. GHの期間がここで取扱おうとしている期間であ

第 1 図

て, 岐点圧やその他の量もこの図のようにこの期間において最高値を示すことが多い. したがって, この期間の現象を調べることは特に意義のあることなのである.

まず最初に圧縮波面と一緒に動く座標系から観察するものとし, 圧縮波面の前後について連続の式, 運動量の式およびエネルギーの式をたてれば

$$\begin{cases} \rho_0 u_0 = \rho_1 u_1 & \dots\dots\dots (1) \\ p_0 + \rho_0 u_0^2 = p_1 + \rho_1 u_1^2 & \dots\dots\dots (2) \\ \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{1}{2} u_0^2 = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} u_1^2 & \dots\dots\dots (3) \end{cases}$$

となる. 速度 u の上につけた記号 $\bar{u}$ は圧縮波面と一緒に動く座標系から見た速度であることを示し, 添字 0, 1 は第1図に示すように波面の前後の状態を示す.

次に列車とともに動く座標系から列車の前頭部の前後の状態を調べる. 第1図の①の部分と②の面との間に連続の式およびベルヌイの定理をたててみると

$$\rho_1 \bar{u}_1 A = \rho_2 \bar{u}_2 (A-a) \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} \bar{u}_1^2 = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{1}{2} \bar{u}_2^2 \dots\dots\dots (5)$$

速度 u の上につけた横棒の記号 $\bar{u}$ は列車とともに動く座標系から見た速度を意味し, 添字 2 は第1図の②面の状態を表わす. また面①より②への状態変化は断熱的であるものとする. すなわち

$$\frac{p_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{p_2}{\rho_2^\gamma} \dots\dots\dots (6)$$

次に第1図の②面と③面との間を考える. 列車がトンネルに進入するために排除される空気の大部分はトンネルの入口から逆に外にあふれ出る. したがって②面と③面の間では列車の進行方向とは逆方向に空気が流れる. この気流のために列車側面やトンネル壁面に表面摩擦が生じ, そのために②面から③面に向けて圧力降下が生ずる.

$$p_2 > p_3$$

またトンネルの入口では, 内部から噴き出して来た

第2図 列車がトンネルを通り抜ける場合の列車前頭部岐点圧の変動の時間的経過の一例

気流はトンネルの入口の角ではく離し、外に向って真直ぐに噴き出すと考えられる。したがってここでは圧力 p_3 は大気圧 p_0 に等しい。

$$p_3 = p_0 \dots\dots\dots (7)$$

これらの他に当然次の二つの関係が成り立つ。ただし U は列車の対地速度である。

$$\dot{u}_0 - \dot{u}_1 = \dot{u}_0 - \dot{u}_1 \dots\dots\dots (8)$$

$$\dot{u}_0 = U \dots\dots\dots (9)$$

以上の式の中に現われた量のうち $\{p_0, \rho_0, \gamma, U, A, a\}$ は与えられる既知量で $\{p_1, \rho_1, p_2, \rho_2, p_3, \dot{u}_0, \dot{u}_1, \dot{u}_2\}$ の 10 個が未知数である。方程式は 9 個であって未知数より 1 個足りないが、 p_2 をパラメータと考えておくものとする*。この連立方程式を解いた結果のうちあとで必要なものを次に記す。

$$p_1 - p_0 = \rho_0 \dot{u}_0 (U - \dot{u}_1) \dots\dots\dots (10)$$

$$\dot{u}_0^2 = c_0^2 \left\{ 1 + \frac{1+\gamma}{2\gamma} \frac{p_1 - p_0}{p_0} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$\dot{u}_1^2 = \frac{2\gamma(1-R)^2 \{p_1 - p_1^{1/\gamma} p_2^{(\gamma-1)/\gamma}\}}{(1-\gamma)\rho_1 \{p_1^{2/\gamma} p_2^{-2/\gamma} - (1-R)^2\}} \dots\dots\dots (12)$$

$$\dot{u}_2 = \frac{1}{1-R} \frac{\rho_1}{\rho_2} \dot{u}_1 \dots\dots\dots (13)$$

$$\rho_1 = \frac{(1+\gamma)\rho_0^2 \dot{u}_0^2}{2\gamma p_0 + (\gamma-1)\rho_0 \dot{u}_0^2} \dots\dots\dots (14)$$

これらの式から見ても明らかなように、解は複雑で物理的内容がわかりがたく、計算もしにくい。そこで計算は次章において述べるような方法によることとする。

以上求めた諸量から、列車前頭部の岐点圧 p_s や列車のトンネルにはいつている部分の圧力抵抗 $f_{**} = f - f_*$ を計算することができる。

列車前頭部の岐点圧を計算するために第 1 図の①の部分と岐点 S との間にベルヌイ定理を使うと

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_s}{\rho_s} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} \dot{u}_1^2 \dots\dots\dots (15)$$

状態変化は断熱的であるとする。

$$\frac{p_s}{\rho_s^\gamma} = \frac{p_1}{\rho_1^\gamma} \dots\dots\dots (16)$$

(15), (16) 式より ρ_s を消去すれば

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{\rho_1} p_s^{(\gamma-1)/\gamma} p_1^{1/\gamma} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} \dot{u}_1^2 \dots\dots\dots (17)$$

$p_1, \dot{u}_1, \rho_1$ は (10)~(14) 式で求めた値を入れると p_s は定まる。具体的計算法は次章において述べる。

次に列車がトンネルに首を突込んだために起る圧力抵抗の増加を求める。まず列車固定の座標系から現象

第 3 図

を観察するものとして、第 3 図 (a) に点線で描いたような調査面を考え運動量の定理を適用する。

$$(p_1 - p_0)A + (-f) + (-F_*) = m - \rho_1 \dot{u}_1^2 A \dots\dots\dots (18)$$

ただし f は列車の、トンネルの中にはいつている部分に作用する全空気力（摩擦抵抗 f_* と圧力抵抗 f_{**} を加えたもの）であり、 F_* はトンネル壁面に作用する表面摩擦力、 m は単位時間当り KL 面を通過して調査面より外に出る運動量である。

次に第 3 図 (b) の点線で示したような列車を取巻く調査面を考え運動量の定理を適用する。

$$(p_2 - p_0)(A - a) + (-f_*) + (-F_*) = m - \rho_2 \dot{u}_2^2 (A - a) \dots\dots\dots (19)$$

(18), (19) 式より F_*, m を消去すると

$$f_{**} = f - f_* = (p_1 - p_0)A - (p_2 - p_0)(A - a) + \rho_1 \dot{u}_1^2 \left\{ A - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/\gamma} \frac{A^2}{A - a} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

f_{**} は圧力抵抗であるが、これは列車がトンネルに首を突込んだために生じたもので、トンネル外では $f_{**} = 0$ となる性質のものである。なお f_* は非粘性流体として取扱った本理論からは求められない**。

f_{**} の具体的計算については次章において述べる。

4. 計算法および計算結果

前章において一応必要な量は求められたが、式がは

** f_* はトンネルにはいると平地を走る場合に比して増加する。この増加量 Δf_* を複線の場合について概算してみると、これが圧力抵抗 f_{**} と同程度の大きさになる(未報告)。トンネルにはいつたことによる全体の抵抗の増加は $\Delta f_* + f_{**}$ になる訳である。

* p_2 は列車とトンネルの表面摩擦に関係するので、この非粘性流体理論からはきまらない。

なはだ複雑であるため物理的内容が察知できないし、また計算自体が困難なので、本章ではこの点を解決する方法について述べ、あわせて計算結果を示す。まず二つの無次元量 X , Y を考える。

$$\left\{ \begin{aligned} X &= \frac{p_1 - p_0}{\gamma p_0} = \frac{M^2}{2} \frac{p_1 - p_0}{q_0} \dots\dots\dots (21) \\ Y &= \frac{p_2 - p_0}{\gamma p_0} = \frac{M^2}{2} \frac{p_2 - p_0}{q_0} \dots\dots\dots (22) \end{aligned} \right.$$

X は p_1 を無次元化したもの、 Y は前章でパラメータと考えた p_2 を無次元化したもので、ここではこの Y をパラメータと考えておく。計算の手順としてはまず第一に X を計算し、その他の量は X の級数で展開した形で表わして計算する。

X を求めるため (10), (11), (12), (13), (14) 式より p_1 , p_2 を残して他の変数を消去すると

$$\frac{p_1 - p_0}{\gamma p_0} = \frac{\rho_0 c_0}{\gamma p_0} \left\{ 1 + \frac{1 + \gamma}{2\gamma} \frac{p_1 - p_0}{p_0} \right\}^{1/2} \left[U - (1 - R) \left\{ \frac{2\gamma(p_1 - p_1^{1/r} p_2^{(r-1)/r}) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2\gamma} \frac{p_1 - p_0}{p_0} \right)}{(\gamma-1)\rho_0 \{ p_1^{2/r} p_2^{-2/r} - (1-R)^2 \} \left(1 + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \frac{p_1 - p_0}{p_0} \right)} \right\}^{1/2} \right] \dots\dots\dots (23)$$

p_1 , p_2 を (21), (22) 式によって X , Y におきかえると

$$X = \left(1 + \frac{1 + \gamma}{2} X \right)^{1/2} \left[M - (1 - R) \left\{ \frac{2 \{ 1 + \gamma X - (1 + \gamma X)^{1/r} (1 + \gamma Y)^{(r-1)/r} \} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} X \right)}{(\gamma-1) \{ (1 + \gamma X)^{2/r} (1 + \gamma Y)^{-2/r} - (1 - R)^2 \} \left(1 + \frac{\gamma+1}{2} X \right)} \right\}^{1/2} \right] \dots\dots\dots (24)$$

X , Y はともに小さい量であるから (24) 式をこれらについて展開し X , Y について二次の項まで取って整理する。三次以上の項は我々の考えている速度の範囲では非常に小さくなるので考慮の必要はない。このように展開すると (24) 式は

$$\alpha + \beta X + \gamma X^2 = 0 \dots\dots\dots (25)$$

ただし

$$\alpha = M^2 \{ 1 - (1 - R)^2 \} - 2 \{ M^2 - (1 - R)^2 \} Y + \{ (M^2 (2 + \gamma) - (1 - R)^2) Y^2 \} \dots\dots\dots (26)$$

$$\beta = 2(M - 1) \{ M + (1 - R)^2 \} - 4M(M - 1) Y \dots\dots\dots (27)$$

$$\gamma = (1 - M)^2 - (1 - \gamma) M(1 - M) - \frac{\gamma + 1}{2} M \{ 1 + (1 - R)^2 \} \dots\dots\dots (28)$$

(i) $p_1 - p_0$ の計算 ($Y=0$ の場合) $Y=0$ の場合というのは第1図の②面と③面との間に圧力降下がないことを意味する。この圧力降下は列車の側面とトンネルの壁面との間をトンネル入口の方向に向かう流れによって引起される表面摩擦に原因する。したがって列車の前頭部がトンネル入口に突入した直後(第2図 G 時刻)においては、この表面摩擦に関与する面の長さが非常に短いので近似的に $Y=0$ とみなすことができる。すなわち $Y=0$ は第1図の時刻 G の状態を表わ

第1表 $Y=0$ における X の値

R	X			
	M=0.05	M=0.1	M=0.2	M=0.3
0.1	0.000 291	0.001 16	0.004 70	0.011 0
0.2	0.000 686	0.002 71	0.010 75	0.024 6
0.3	0.001 241	0.004 80	0.018 60	0.041 7
0.4	0.002 044	0.007 77	0.028 95	0.063 0
0.5	0.003 281	0.012 08	0.042 77	0.089 7
0.6	0.005 320	0.018 46	0.061 43	0.122 7
0.7	0.008 747	0.028 29	0.086 00	0.162 2
0.8	0.015 274	0.043 57	0.117 60	0.205 6
0.9	0.027 536	0.066 20	0.151 40	0.244 0

第4図 列車前方の静圧上昇
[時刻 G ($Y=0$) における値]

す訳である。

(25) 式において $Y=0$ とおいて X を求めると第 1 表に示すような値になる。これから $(p_1-p_0)/q_0$ を計算すると第 4 図のようになる。なお図中の点線は $R=0.5$ の場合について (25) 式の X^2 を省略して計算してみたものである。

(ii) p_1-p_0 の計算 ($Y \neq 0$ の場合) これは列車がある程度トンネルの中に首を突込んだ状態を表わす。計算の複雑化を避けるために (25) 式の X, Y に関して二次の項を省略する*。解いた解は

$$X = -\frac{M^2 \{1 - (1-R)^2\} - 2 \{M^2 - (1-R)^2\} Y}{2(M-1) \{M + (1-R)^2\}} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$= \left\{ \frac{M^2}{2} \frac{1 - (1-R)^2}{(1-R)^2} + Y \right\} \left\{ 1 - \frac{1 - (1-R)^2}{(1-R)^2} M + \dots \right\} \quad \dots\dots\dots (30)$$

これを計算して $(p_1-p_0)/q_0$ を求めるには、まず式の中にある $Y = (M^2/2) \{(p_2-p_0)/q_0\}$ を定めなければならない。先にも述べたように本理論においては空気を非粘性流体として取扱っている関係上、これを理論より導き出す訳にはゆかない。しかし複線トンネルの場合については列車前頭部の岐点圧を実物の列車によって測定したものがあるので⁽²⁾⁽³⁾、これらの値から逆算してみると第 1 図の H 時刻における値 (最大値) としては

$$\frac{p_2-p_0}{q_0} = 0.7 \quad \dots\dots\dots (31)$$

程度に取っておくのが適當のようである。以上によって X 、したがって $(p_1-p_0)/q_0$ が求まったから、その他の量を X のべき級数で展開して計算する。この場

合 X は小さい量なので一次の項まで取っておけば十分である。

(iii) u_1, u_2 の計算 (12), (13) 式を使って u_1, u_2 を書き表わし、 X, Y を使って書直し、これらによって展開し一次の項まで取る。

$$\begin{cases} u_1 = \bar{u}_1 - U \quad \dots\dots\dots (32) \\ u_2 = \frac{1}{1-R} \{1 + (X-Y)\} \bar{u}_1 - U \quad \dots\dots\dots (33) \end{cases}$$

ただし

$$\bar{u}_1 = c_0(1-R) \left\{ \frac{2(X-Y)}{1 - (1-R)^2 + 2(X-Y)} \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (34)$$

(30) 式より明らかなように M の小さいところでは

$$X - Y \approx X_{Y=0} \quad \dots\dots\dots (35)$$

したがって u_1, u_2 はほとんど Y に無関係である。これらの値は第 5 図に示す。

(iv) p_s-p_0 の計算 列車の前頭部岐点圧 p_s は (17) 式から計算することができる。 X で展開して一次の項まで取ると

$$\frac{p_s-p_0}{q_0} = \frac{p_1-p_0}{q_0} + \left\{ 1 + X + \frac{M^2}{2} \left(1 - \frac{u_1}{U} \right)^2 \right\} \left(1 - \frac{u_1}{U} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (36)$$

となる。右辺の第 1 項は列車前方の静圧、第 2 項は列車が空気に対して相対速度 $U-u_1$ で動くための動圧に比例する量であることを示す。式の中の X と $(p_1-p_0)/q_0$ は上の (i) または (ii) で求めた値を代入し、 u_1 は (iii) で求めた値を代入する。 $Y=0$ の場合につ

第 5 図 列車前方および側方の風速

第 6 図 列車前頭部岐点圧
[時刻 $G(Y=0)$ における値]

* 第 4 図の点線は $Y=0$ の場合において X^2 の項を省略して求めたものであるが、誤差は小さいから、 $Y \neq 0$ の場合にも X, Y に関して二次の項を省略しても著しい誤差は生じないと思われる。

いての値は第6図に示す。

第7図は $Y=0$ の場合の理論値と実物の列車による測定値⁽²⁾⁽³⁾(第2図の G 時刻における値)が比較してある。両者はよく一致しており、理論の信頼性を示している。

第8図は $Y \neq 0$ の場合の理論値とやはり実物の列車による測定値⁽²⁾⁽³⁾(第2図の H 時刻における値)と比較してある。この場合の理論計算には(31)式を使った。理論値と実測値とはこの場合にもよく一致しているが、これは理論の正しさとともに(31)式の妥当性を検証している訳である。

(v) $f_{**}=f-f_*$ の計算 列車がトンネルに突入したために列車に作用する圧力抵抗の増加は(20)式で与えられるが、これを X, Y を使って書き表わし、展開して一次の項まで取ると

$$\frac{f_{**}}{aq_0} = \frac{2}{M^2} \left\{ \frac{R}{1-(1-R)^2} (X-Y) + Y \right\} \dots (37)$$

(35) 式より

$$\begin{aligned} \frac{f_{**}}{aq_0} &= \frac{2}{M^2} \left\{ \frac{R}{1-(1-R)^2} X_{Y=0} + Y \right\} \\ &= \frac{R}{1-(1-R)^2} \left(\frac{p_1-p_0}{q_0} \right)_{Y=0} + \frac{p_2-p_0}{q_0} \end{aligned} \dots (38)$$

$$\left(\frac{f_{**}}{aq_0} \right)_{Y=0} = \frac{R}{1-(1-R)^2} \left(\frac{p_1-p_0}{q_0} \right)_{Y=0} \dots (39)$$

(38), (39) 式より

$$\frac{f_{**}}{aq_0} = \left(\frac{f_{**}}{aq_0} \right)_{Y=0} + \frac{p_2-p_0}{q_0} \dots (40)$$

$(f_{**}/aq_0)_{Y=0}$ は第9図に示す。 $(p_2-p_0)/q_0$ は、複線の場合の最大值(第2図 H 時刻)については先に示した(31)式を使うことができる。

5. 結 論

列車がトンネルに突入した場合の空気力学的現象を一般的に取扱った。トンネル内各部の風速と風圧、列車の前頭部に作用する岐点圧、列車の側面に作用する圧力、列車に作用する圧力抵抗等を理論的に計算した。またこれらの量の、列車速度やトンネル断面積の大きさによる影響を明らかにすることができた。

なお実物の列車による列車前頭部岐点圧実測値と理論値とを比較してみたが、よく一致しており、理論に信頼性のあることがたしかめられた。

文 献

(1) W. Tollmien, VDI-Z, 71, 6 (1927), 199.

(2) 伊東, 川村, 鉄道技術研究所速報, No. 59-36, (昭 34).
(3) 運転, 防災, 物理, 車輛運動研究室, 鉄道技術研究所速報, No. 59-253, (昭 34).

第7図 列車前頭部岐点圧の理論値と実測値との比較[時刻 $G(Y=0)$ における値]

第8図 列車前頭部岐点圧の理論値と実測値との比較[時刻 $H(Y \neq 0)$ の値]

第9図 圧力抵抗係数[時刻 $G(Y=0)$ における値]