

トンネル内の列車風に関する現地実験 (第1報)

川 畑 早 苗・米 倉 豊 彦*

(受理 昭和49年5月31日)

FIELD TESTS ON THE 'TRAIN-WIND' IN THE TUNNEL (Report 1)

Sanae KAWABATA and Toyohiko YONEKURA*

The temperature-rise during the summer within the sub-way and the wind-velocity at the moment when a high-speed train entering a tunnel and so on, have recently been put under researches, and it has been seemed to be not insignificant to have some items ascertained concerning the 'train-wind' in a tunnel.

It is against this standing tendency that with the use of modelling and actual experiments the authors have carried out some investigations concerning the 'train-wind' in a tunnel; some results obtained from the latter experiment are reported in this paper.

Owing to the larger body-scale of the trains the inertia of air is stronger in actual trains than in the modelling ones; accordingly the wind-velocity along the train is to be expected higher than that of the modelling one, but in general tendency there seems to be no noteworthy difference between these two experiments; the actual and the modelling.

1. 緒 言

最近、夏季における地下鉄内の温度上昇が、問題になっているが、これは、トンネル内の換気と密接な関係がある。また、高速列車が、長大トンネルに突入する際にあふれ出す突風が、人体やパンタグラフ等に悪影響を及ぼすことも問題になっている。以上のような事実から、トンネル内の列車風について説明することはきわめて有意義なことである。

そこで、筆者らは、列車がトンネルに突入してから出坑するまでの間の列車風について、模型実験を行なって来たが、その結果については、既に学会にも発表済である^{(1),(2),(3)}。本報においては、実車について行った現地実験の結果について述べる。

2. 記 号

以下の如く記号を定める。

v_0 : 列車の速度 (m/s)

L : 列車の全長 (m)

l : 列車先頭部より、車内熱線位置までの距離 (m)

s : トンネル入口より、待避所内熱線位置までの距離 (m)

x : 車窓より、熱線位置までの水平距離 (m)

x' : トンネル内壁より、熱線位置までの水平距離 (m)

y : レール面より、熱線位置までの垂直距離(m)

正流: 列車進行方向の気流

逆流: 列車進行と反対方向の気流

3. 実 験 方 法

列車風に関する現地実験は、日豊本線と肥薩線の各トンネルについて行なったが、トンネルの要目と、断面図の例を、それぞれ、表1、2および図1、2に示す。そして、次の通り四つの場所に分けて実験を行なった。すなわち、

(1) 列車内部

(2) トンネル入口

(3) トンネル内部

* 元鹿児島大学工学部機械工学科講師

表1 日豊本線

トンネル名	長さ (m)	駅 間
鳥越トンネル	396.36	鹿児島—隼 人
壁ヶ鼻 "	308.60	" "
大崎 "	393.47	" "
日木山 "	341.99	" "
青佐 "	376.19	" "
岩戸 "	266.30	隼人—北永野田
松永 "	328.70	" "
襲山 "	1928.60	" "
小鹿野 "	187.00	" "
床浪 "	243.00	" "
馬渡 "	195.00	" "
黒ヶ迫 "	110.00	" "
符川 "	520.00	" "

表2 肥薩線

トンネル名	長さ (m)	駅 間
羽根原トンネル	241.40	隼 人—吉 松
嘉例川 "	427.50	" "
鳥掛 "	110.60	" "
赤水 "	633.70	" "
後平 "	201.80	吉 松—矢 岳
中竹 "	210.20	" "
踵蔓 "	492.90	" "
矢岳第三 "	131.16	" "
矢岳第二 "	142.80	" "
矢岳第一 "	2096.17	" "

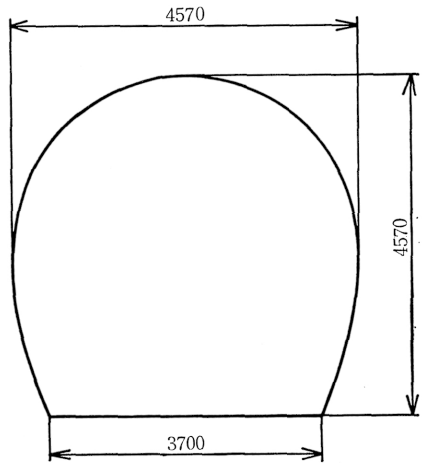


図2 矢岳第一トンネル断面図 (単線甲型)

(4) トンネル出口

ただし、実験装置は、何れの場合も同一であって、その概略を図3に示す。すなわち、熱線風速計としてアネモスタを使用し、風速変化による熱線の抵抗変

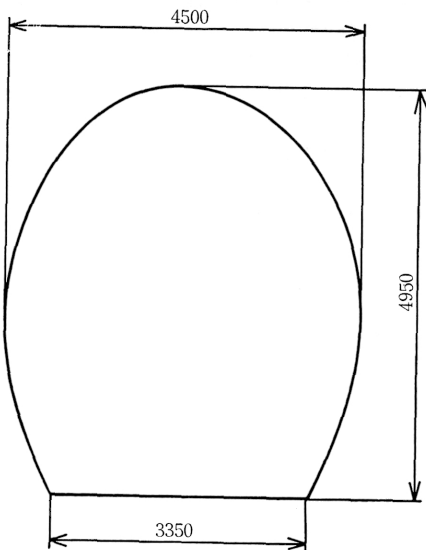


図1 鳥越トンネル断面図 (単線甲型)



品 名	型 式	製 作 所
アネモスタ	AM-A11/11-1111(0~5.5~40m/s)	日本科学工業K.K
オシログラフ	PR-101	三栄測器K.K
インバーター	DC-AC (12V~100V)	"
電 池	12V~3A	"

図3 実験装置略図

化をオシログラフに記録した。そして、これをもとにして、熱線の検定曲線から風速を求めたが、検定曲線の一例を図4に示す。また、トンネル入口、内部および出口における実験では、実際の風向きを確かめる意味で、旗の動きも調べた。なお、列車の速度測定は、国鉄に依頼したが、その方法は、レール上に二つの接点を置き、車輪がそこを通過する際電流が流れるようにしたものである。

次に、前記それぞれの場所について行なった実験の方法および結果について述べる。ただし、以下の表ならびに図中の番号はそれぞれ対応するものとする。

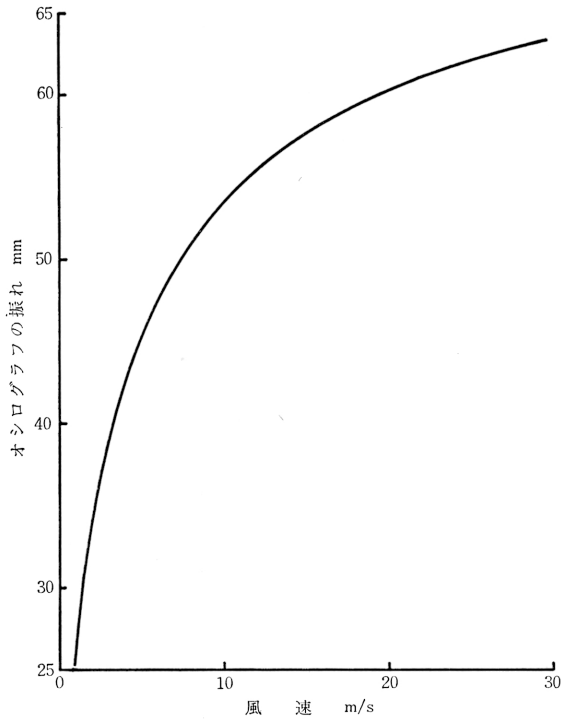


図4 熱線の検定曲線

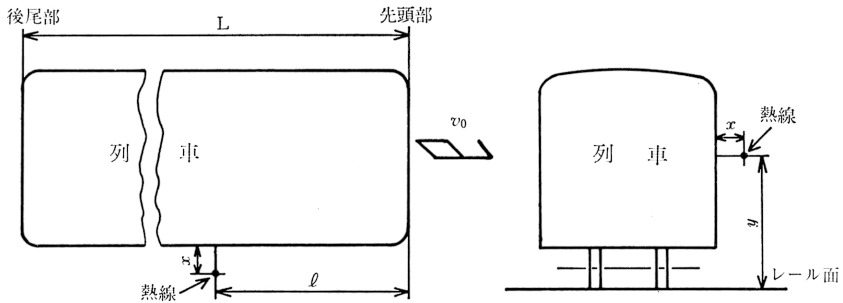


図5 列車内部における実験法

4. 列車内部における実験

4.1 実験方法

図5に示すように、走行中の車窓から熱線を出し、それが、トンネルに突入してから進出するまでの間の風速変化をオシログラフに記録した。

なお、各トンネルにおける実験要目を、それぞれ、表3～25に示す。

表 3 鳥 越 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	下り	15.20	129.5	29.3	0.200	2.2	48.11.2
2	上り	16.87	88.0	24.5	0.175	2.3	48.1.27
3	下り	17.08	132.0	46.5	0.110	2.3	47.11.7
4	上り	18.00	88.0	24.5	0.110	2.3	48.8.24
5	"	18.40	88.0	29.0	0.135	2.0	48.12.20
6	下り	18.40	88.0	15.0	0.135	2.0	48.12.20
7	上り	19.44	198.0	11.0	0.110	2.3	47.11.27
8	"	19.62	88.0	40.0	0.200	2.2	48.11.2

表 4 壁 ケ 鼻 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	14.70	88.0	15.0	0.135	2.3	48.12.20
2	下り	16.60	88.0	29.0	0.135	2.3	48.12.20

表 5 大 崎 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	18.22	198.0	11.0	0.110	2.3	47.11.7
2	下り	18.70	88.0	15.0	0.135	2.3	48.12.20

表 6 日 木 山 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	13.22	88.0	24.5	0.175	2.3	48.1.27
2	下り	13.65	84.0	24.5	0.175	2.3	47.11.27
3	上り	14.70	129.5	29.3	0.200	2.3	48.4.2
4	"	15.29	198.0	11.0	0.110	2.3	47.11.27
5	"	15.60	88.0	29.0	0.135	2.2	48.12.20
6	下り	16.80	88.0	15.0	0.135	2.2	48.12.20
7	上り	19.00	88.0	24.5	0.110	2.3	47.8.24
8	"	19.38	132.0	24.5	0.110	2.3	47.11.7
9	"	19.54	132.0	46.5	0.110	2.3	47.11.7

表 7 青 佐 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	下り	15.70	129.5	29.3	0.200	2.2	48.11.2
2	"	17.90	88.0	15.0	0.135	2.3	48.12.20
3	上り	18.80	88.0	40.0	0.200	2.2	48.11.2
4	"	19.90	88.0	29.0	0.135	2.3	48.12.20

表8 岩戸トンネル（車内）

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	11.60	88.0	29.0	0.135	2.2	48.12.20
2	〃	17.80	88.0	40.0	0.200	2.2	48.11.2
3	下り	19.70	88.0	15.0	0.135	2.2	48.12.20

表9 松永トンネル（車内）

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	10.30	88.0	29.0	0.135	2.2	48.12.20
2	〃	13.10	88.0	40.0	0.200	2.2	48.11.2

表10 襲山トンネル（車内）

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	11.60	132.0	24.5	0.110	2.3	47.11.7
2	〃	11.34	88.0	40.0	0.200	2.2	48.11.2
3	〃	15.60	198.0	11.0	0.110	2.3	47.11.27
4	下り	17.00	44.0	24.5	0.110	2.3	47.8.24
5	〃	17.50	154.0	33.0	0.110	2.3	47.11.27
6	〃	18.70	129.5	29.3	0.200	2.2	48.11.2
7	〃	20.20	88.0	15.0	0.135	2.2	48.12.20
8	〃	20.70	44.0	46.5	0.110	2.3	47.11.7

表11 小鹿野トンネル（車内）

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	9.60	88.0	40.0	0.200	2.2	48.12.20
2	〃	10.20	88.0	29.0	0.135	2.2	48.12.20
3	下り	18.30	88.0	15.0	0.135	2.2	48.12.20
4	〃	18.70	129.5	29.3	0.200	2.2	48.12.20

表12 床浪トンネル（車内）

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	11.90	88.0	29.0	0.135	2.2	48.12.20
2	下り	15.70	88.0	15.0	0.135	2.2	48.12.20

表13 馬渡トンネル（車内）

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	9.75	88.0	40.0	0.200	2.2	48.11.2
2	下り	15.60	129.5	29.3	0.200	2.2	48.11.2
3	上り	15.90	88.0	29.5	0.135	2.2	48.12.20

表14 黒ヶ迫トンネル(車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	8.80	88.0	40.0	0.200	2.2	48.11.2
2	下り	15.70	129.5	29.3	0.200	2.2	48.11.2
3	〃	15.70	88.0	15.0	0.200	2.2	48.12.20
4	上り	16.20	88.0	29.0	0.200	2.2	48.12.20

表15 狩川トンネル(車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	下り	14.65	51.0	33.0	0.110	2.3	47.11.27
2	上り	15.00	88.0	24.5	0.110	2.3	47.8.27
3	〃	15.29	198.0	11.0	0.110	2.3	47.11.27
4	〃	15.43	132.0	24.5	0.110	2.3	47.11.7
5	下り	17.00	44.0	24.5	0.110	2.3	47.8.27
6	〃	18.43	132.0	42.5	0.110	2.3	47.11.7

表16 羽根原トンネル(車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
	上り	10.73	88.0	24.5	0.175	2.3	48.1.27

表17 嘉例川トンネル(車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
	上り	12.08	88.0	24.5	0.175	2.3	48.1.27

表18 鳥掛トンネル(車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
	上り	19.75	88.0	24.5	0.175	2.3	48.1.27

表19 赤水トンネル(車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
	下り	14.47	88.0	24.5	0.175	2.3	48.1.27

表20 後平トンネル(車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	6.74	264.0	33.5	0.175	2.3	48.1.27
2	下り	10.15	66.0	33.5	0.175	2.3	48.1.27

表 21 中 竹 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	7.56	66.0	33.0	0.175	2.3	48. 1.27
2	〃	10.34	26.4	33.5	0.175	2.3	48. 1.27

表 22 躰 蔓 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
	下り	9.78	66.0	33.0	0.175	2.3	48. 1.27

表 23 矢 岳 第 三 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	11.00	264.0	33.5	0.175	2.3	48. 1.27
2	下り	11.40	264.0	33.5	0.175	2.3	48. 1.27

表 24 矢 岳 第 二 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	11.90	66.0	33.0	0.175	2.3	48. 1.27
2	下り	12.40	66.0	33.0	0.175	2.3	48. 1.27

表 25 矢 岳 第 一 ト ン ネ ル (車内)

No.	列車進行方向	v_0	L	l	x	y	実験日
1	上り	11.20	264.0	33.5	0.175	2.3	48. 1.27
2	下り	13.40	66.0	33.0	0.175	2.3	48. 1.27

4.2 実験結果

それぞれのトンネルについての実験結果（平地の分を含む）は、列車に対する相対速度であるので、列車の速度から、それを差引いて絶対値に換算した値を、それぞれ、図6～28に示す。

図からわかるように、熱線がトンネルに突入した瞬間、その風速は急に減少し、場合によれば、逆流になる。その後、列車の進行につれて、風速は徐々に増大するが、長いトンネルでは、ほぼ定常になる。なお、熱線がトンネルを出始めると、その風速は急に増大するがまもなく平地での風速に落着く。

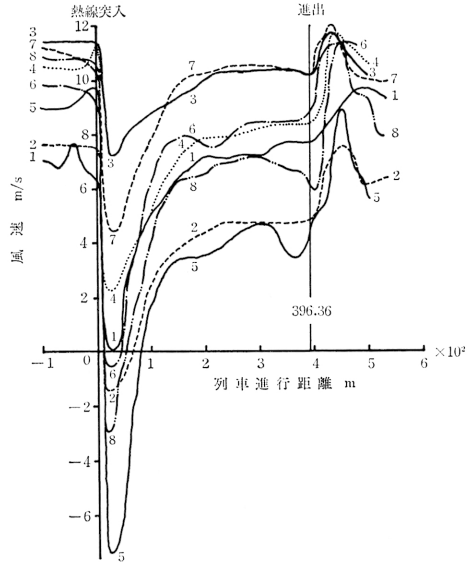


図6 鳥越トンネル (車内)

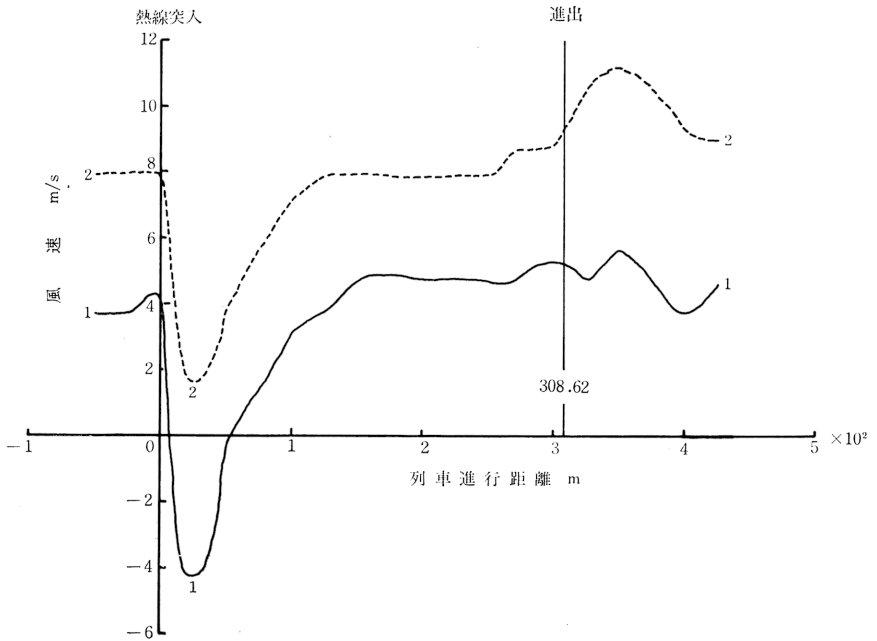


図7 壁ヶ鼻トンネル (車内)

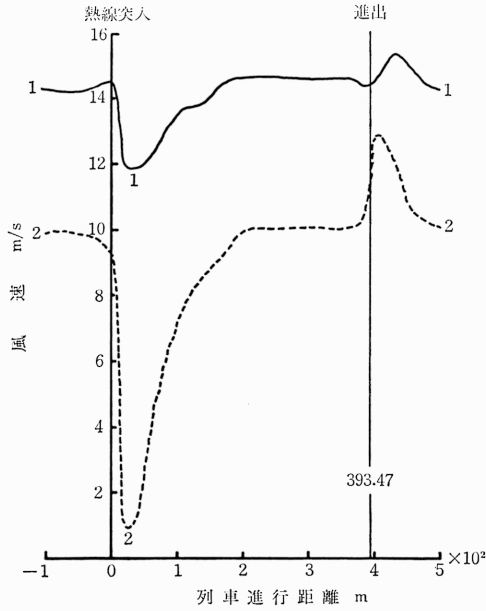


図8 大崎トンネル（車内）

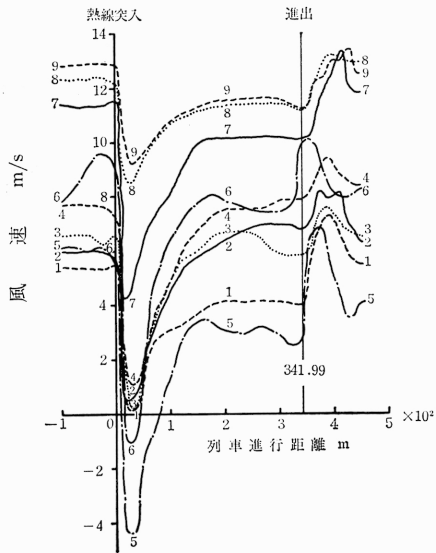


図9 日木山トンネル（車内）

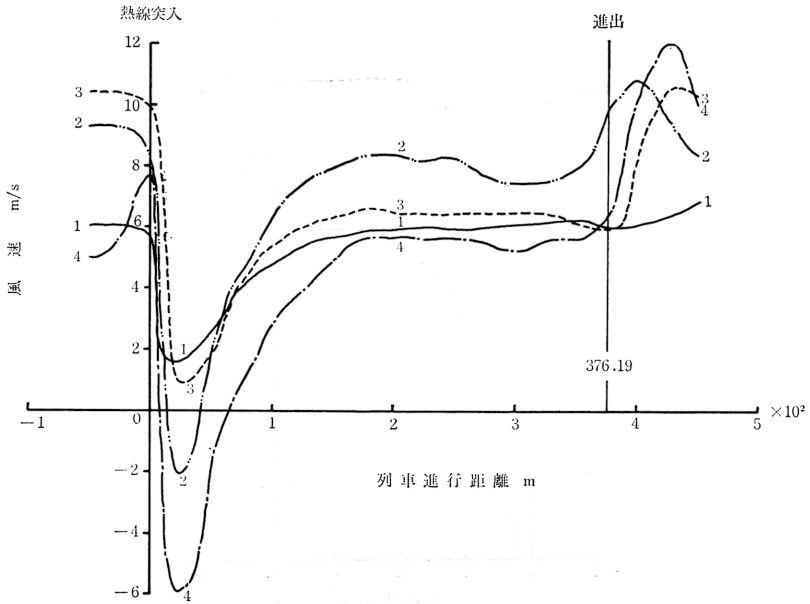


図10 青佐トンネル (車内)

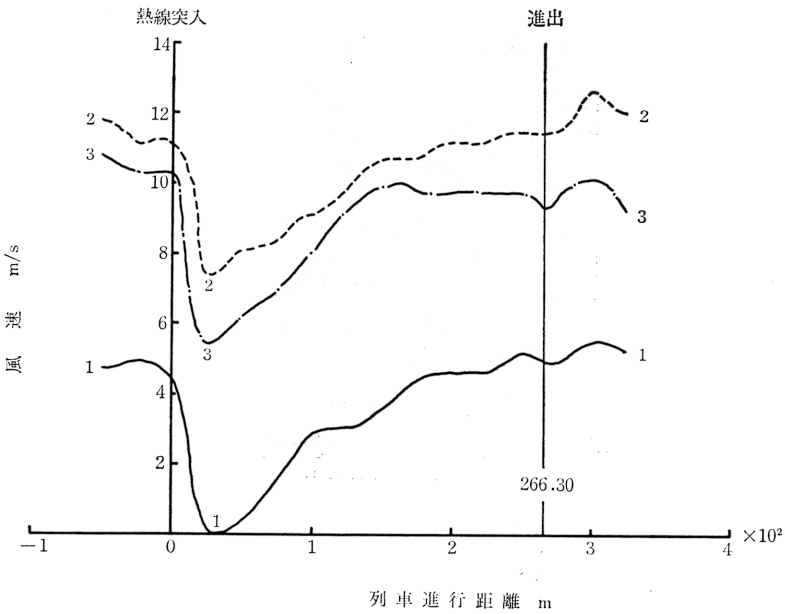


図11 岩戸トンネル (車内)

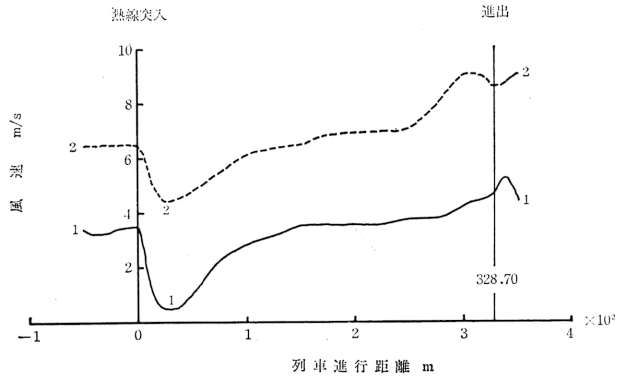


図12 松永トンネル(車内)

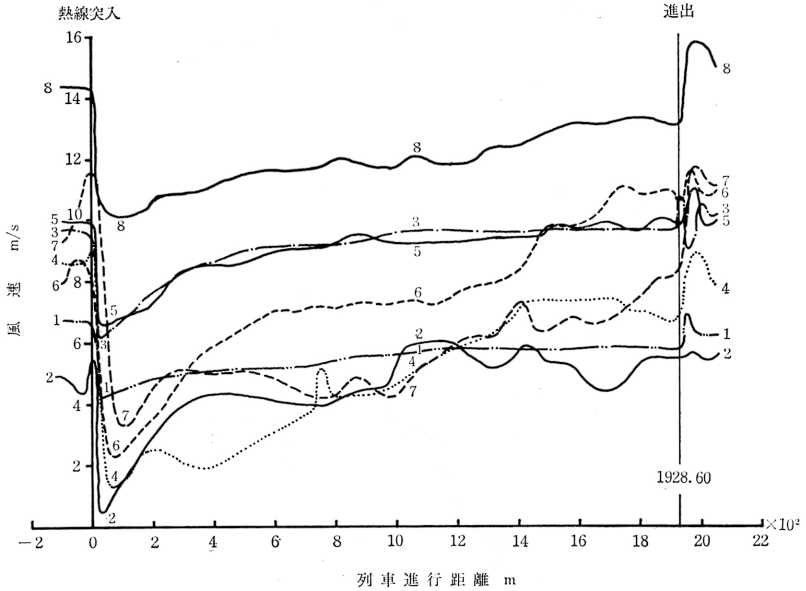
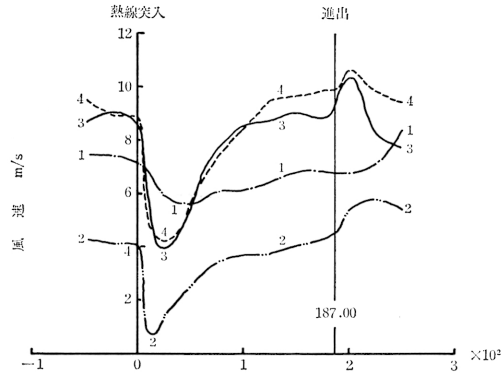
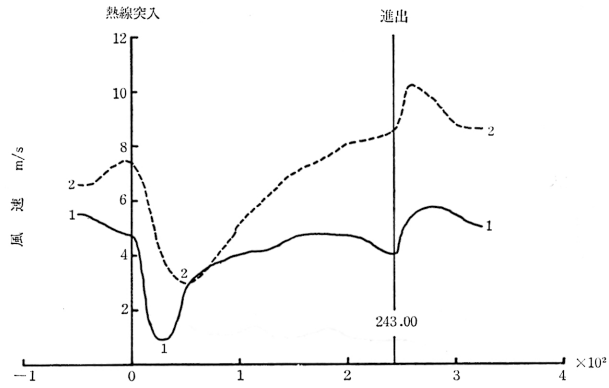


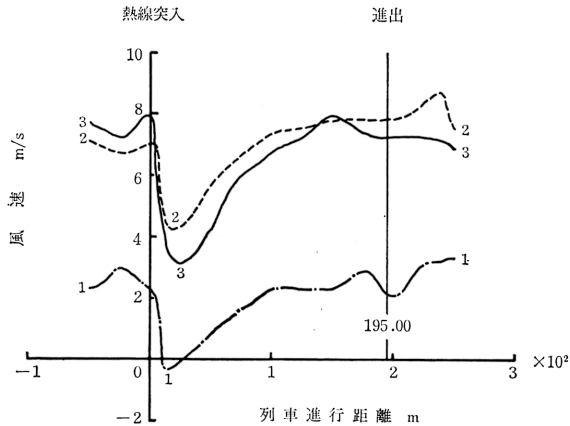
図13 襲山トンネル(車内)



列車進行距離 m
 図14 小鹿野トンネル (車内)



列車進行距離 m
 図15 床浪トンネル (車内)



列車進行距離 m
 図16 馬渡トンネル (車内)

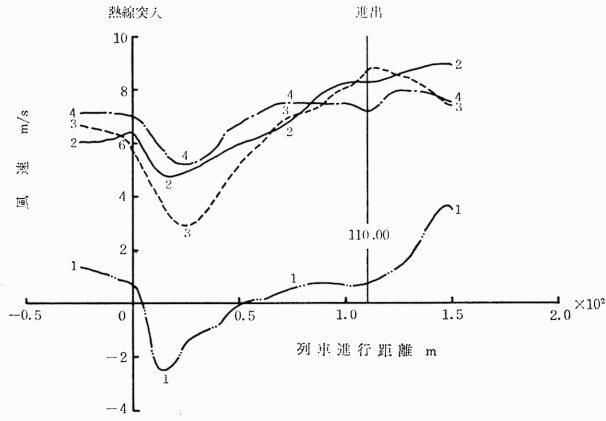


図17 黒ヶ迫トンネル（車内）

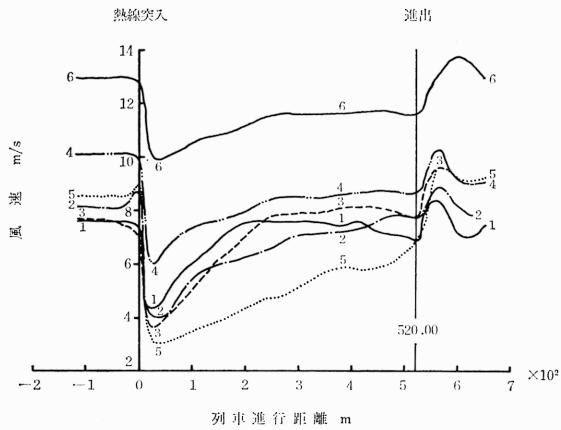


図18 狩川トンネル（車内）

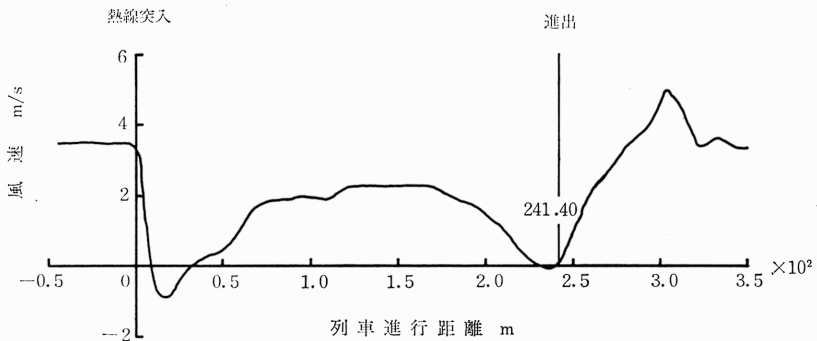


図19 羽根原トンネル（車内）

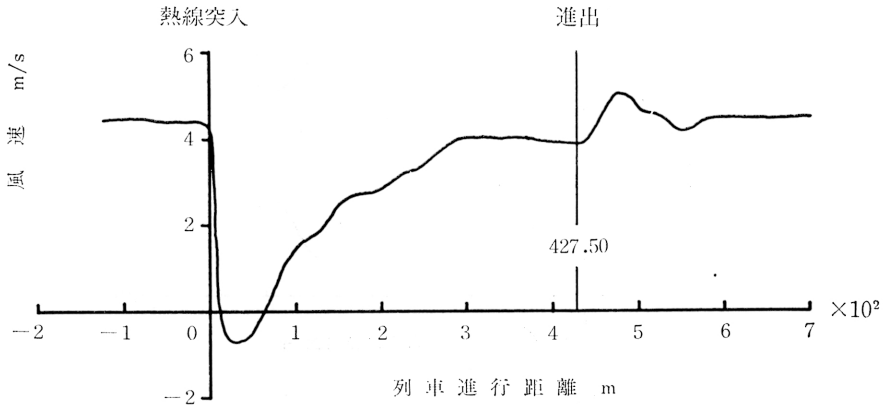


図20 嘉例川トンネル (車内)

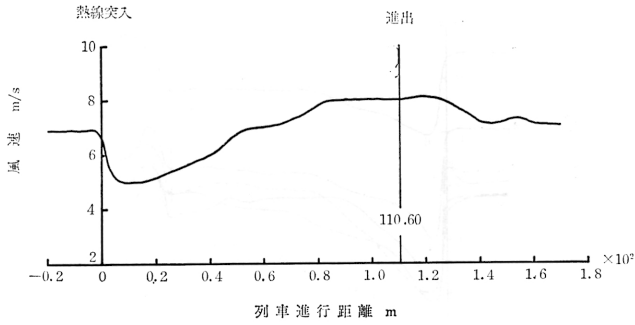


図21 鳥掛トンネル (車内)

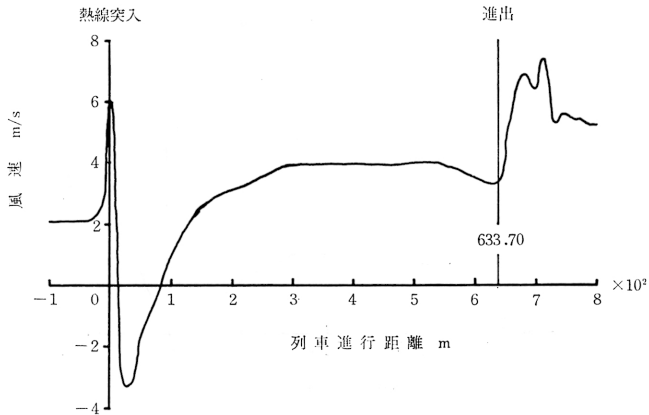


図22 赤水トンネル (車内)

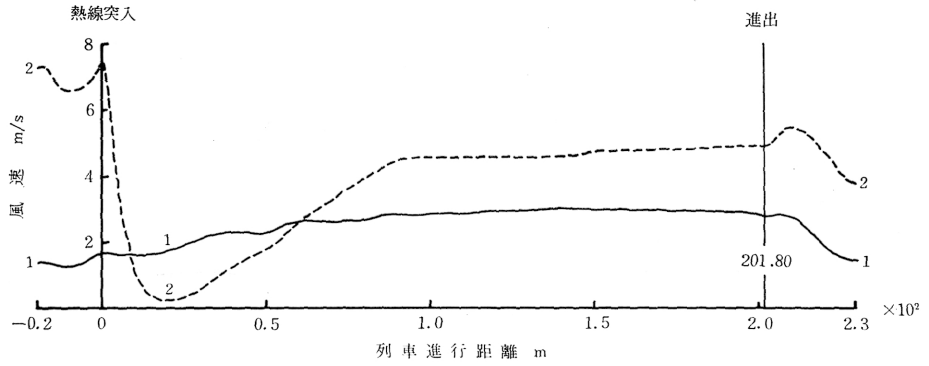


図23 後平トンネル（車内）

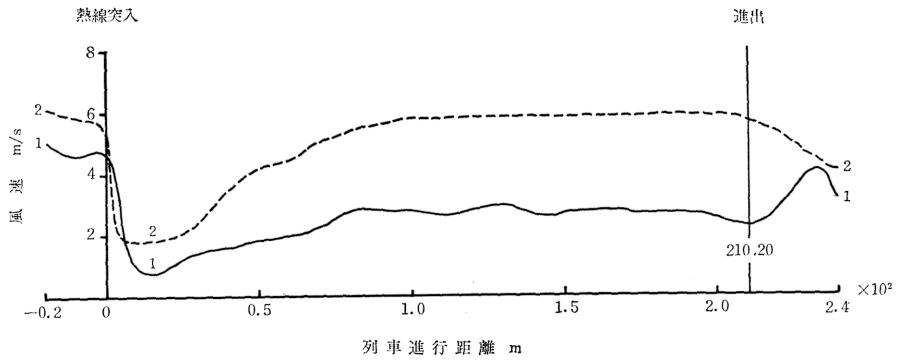


図24 中竹トンネル（車内）

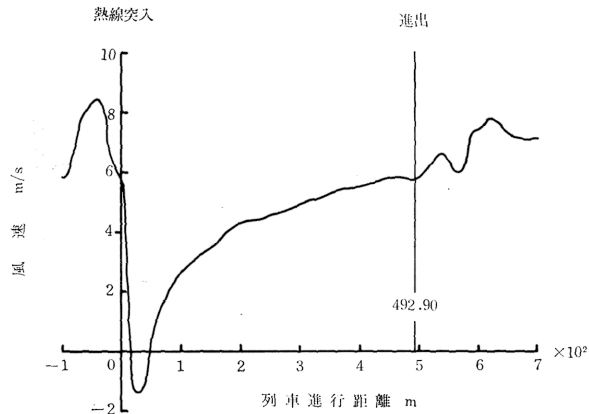


図25 鍾蔓トンネル（車内）

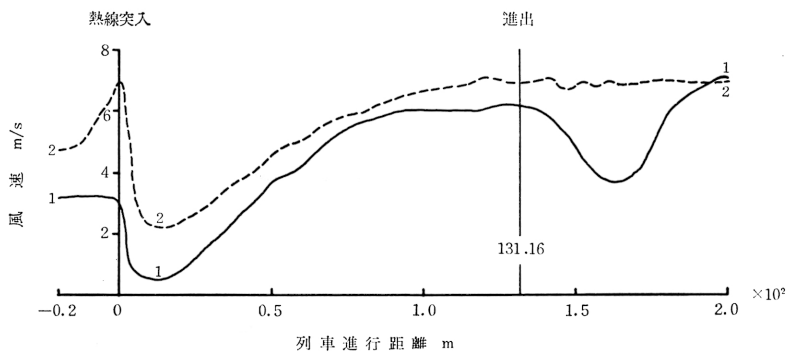


図26 矢岳第三トンネル (車内)

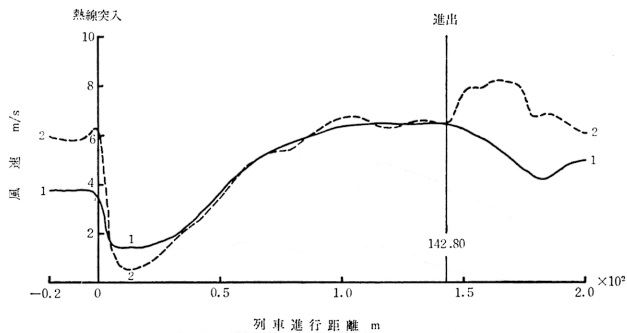


図27 矢岳第二トンネル (車内)

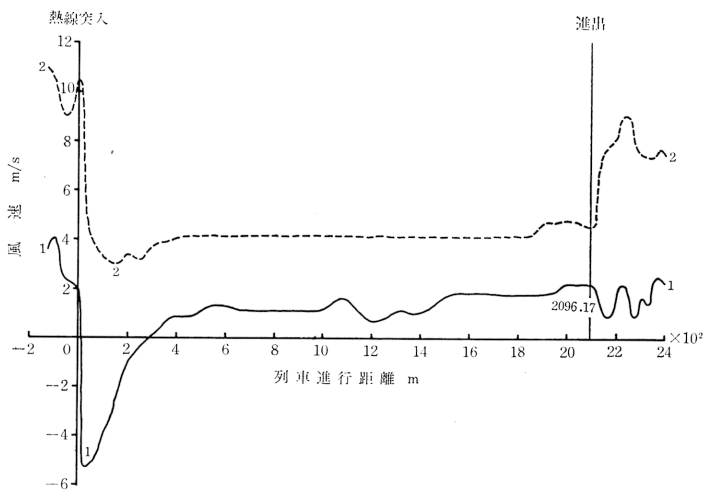


図28 矢岳第一トンネル (車内)

さて、実験で得た風速は、車窓から 20 cm 以内の距離における値で、列車側面に生ずる境界層の影響を受けている。したがって、列車側面とトンネル内壁との間における平均風速とは、多少異なるはずであるが、このことについては、次報で述べる予定である。

5. トンネル入口における実験

5.1 実験方法

図 29 に示すように、トンネル入口に熱線を設置し、列車が突入してから後の風速変化をオシログラフに記録した。また、トンネル入口に白旗を設置し、列車風

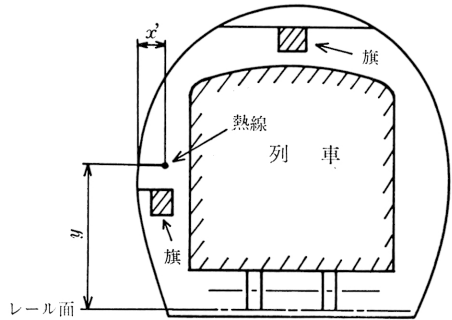


図 29 トンネル入口

表 26 矢 岳 第 一 ト ン ネ ル (入 口)

No.	列車進行方向	v_0	L	x'	y	実験日
1	下り	6.71	264.0	0.175	1.6	48. 1.27
2	〃	8.62	264.0	0.175	1.6	48. 1.27
3	〃	10.00	154.0	0.175	1.6	48. 1.27
4	〃	10.64	88.0	0.175	1.6	48. 1.27
5	〃	10.64	88.0	0.175	1.6	48. 1.27

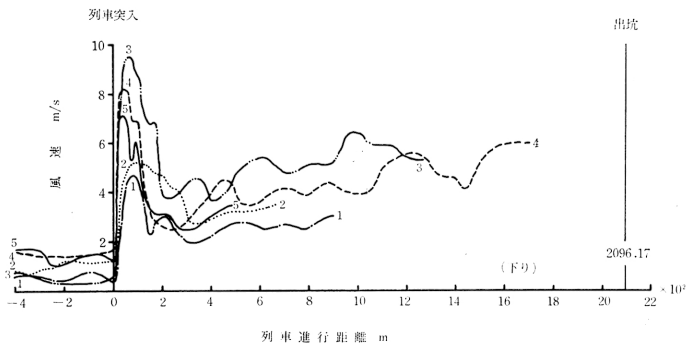


図 30 矢 岳 第 一 ト ン ネ ル (入 口)

によるその動きを 8 ミリカメラに取めた。

なお、実験要目を表 26 に示す。

5.2 実験結果

トンネル入口における実験結果を図 30 に示す。

図からわかるように、列車がトンネルに突入してからは入り込むまでの間、気流は正流になっているが、旗の動きから見て実際には逆流であって、空気はトンネル外にあふれ出す。したがって、この部分では、図

をひっくり返すべきであるが、熱線には方向性が無く正流と逆流との境目がはっきりしないので、図では、いちおう、正流のままにしてある。

6. トンネル内部における実験

6.1 実験方法

図 31 に示すように、トンネル内部の待避所に熱線を設置し、列車がトンネルに突入してから出坑するま

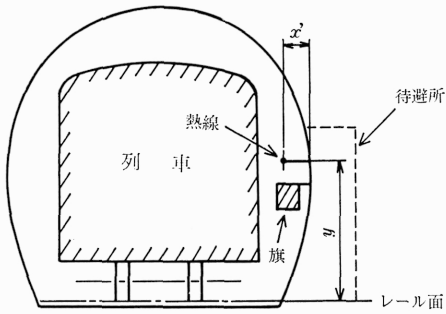


図31 トンネル内部

での間の風速変化をオシログラフに記録した。また、待避所に白旗を設置し、列車風によるその動きを8ミリカメラに取めた。

なお、実験要目を表27に示す。

6・2 実験結果

トンネル内部における実験結果を、それぞれ、図32、33に示す。

図上でははっきりしないが、列車が測定位置に近くまでの間、気流は正流で、先頭部がそこに達した瞬間減速する。その後、後尾部が通過するまでの間は、旗の動きから見て、多くの場合正流であるが、まれに、

表27 鳥越トンネル (内部)

No.	列車進行方向	v_0	L	s	x'	y	実験日
1	上り	17.20	198.0	200.4	0.080	1.2	47. 2. 7
2	"	17.90	154.0	200.0	0.080	1.2	47. 2. 7
3	"	19.60	44.0	200.4	0.080	1.2	47. 2. 7
4	下り	16.10	154.0	36.0	0.110	1.2	47. 2. 7
5	"	16.70	44.0	196.0	0.080	1.2	47. 2. 7
6	"	16.70	110.0	116.0	0.070	1.2	47. 2. 7
7	"	16.70	44.0	36.0	0.110	1.2	47. 2. 7
8	"	17.20	66.0	36.0	0.110	1.2	47. 2. 7
9	"	18.50	22.0	36.0	0.110	1.2	47. 2. 7

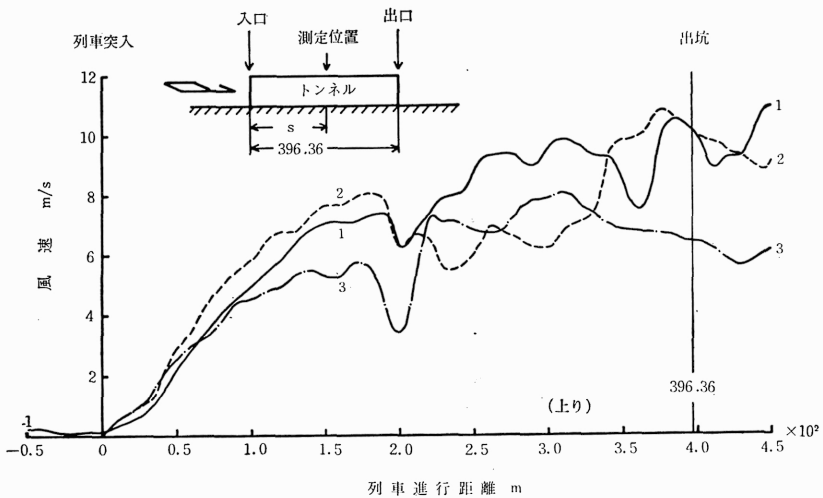


図32 鳥越トンネル (内部)

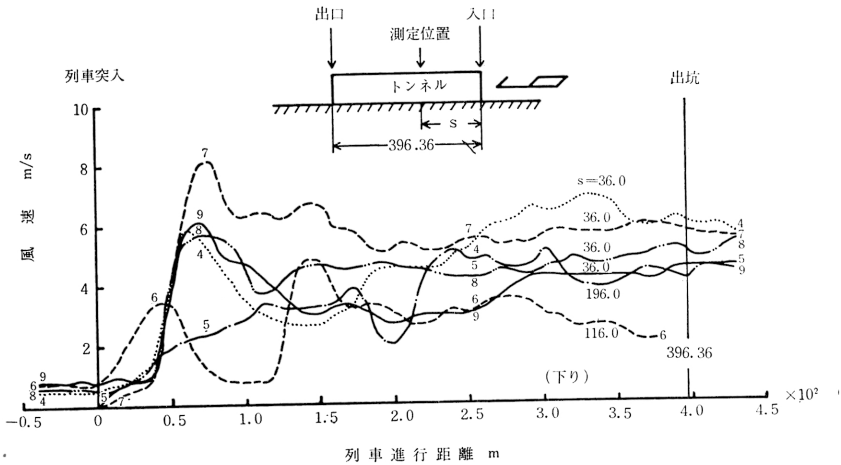


図33 鳥越トンネル（内部）

逆流になる。しかし、正流との境目がはっきりしないので、図では、いちおう、正流のままにしてある。

なお、列車の後尾部が測定位置を通過してからは、気流は正流である。

7. トンネル出口における実験

実験場所は、前項(4)の場合と同じであるが、上り列車については、ここが出口となる。

7・1 実験方法

実験方法も、前項(5・1)の場合と同様であるので、ここでは省略する。そして、列車先頭部が、トンネルを出坑し始めてからの風速変化をオシログラフに記録した。また、トンネル出口に白旗を設置し、列車風によるその動きを8ミリカメラに収めた。

なお、実験要目を表28に示す。

表28 矢岳第一トンネル（出口）

No.	列車進行方向	v_0	L	x'	y	実験日
1	上り	7.58	154.0	0.175	1.6	48. 1.27
2	〃	8.93	352.0	0.175	1.6	48. 1.27
3	〃	10.53	66.0	0.175	1.6	48. 1.27

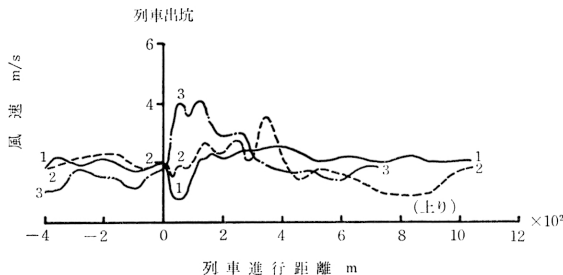


図34 矢岳第一トンネル（出口）

7・2 実験結果

トンネル出口における実験結果を図34に示す。図からわかるように、列車先頭部がトンネルを出坑した後の気流は正流になっているが、旗の動きから見て実際には逆流であり、空気は、トンネル内に吸込まれる。しかし、正流との境目がはっきりしないので、図では、いちおう、正流のままにしてある。

8. 考 察

列車内部における実験結果を、トンネル入口、内部および出口におけるそれと比較してみると、両者の間には、測定方法の違いと熱線位置のずれがあって、厳密には比較の対照にはならないが、総体的な傾向としては合っている。

なお、トンネル内には自然風があるが、これは、2 m/s程度以下で、列車がトンネル内を進行する間の列車風に及ぼす影響はほとんど無いものとみられる。

9. 結 言

実験に際しては、トンネルの長さ、列車の速度や長さ等がいちいち異なるので、それぞれの実験結果を厳密に比較することはむずかしい。

また、実験結果は、いずれも、熱線取付位置における風速であって、トンネル内部の平均風速とは多少異なるはずであるが、トンネル内の列車風についてのだいたいの傾向はわかる。

実験結果を総合すると、列車風について、次のようなことがわかる。

- (1) 列車が、トンネルに突入してからはいり込むま

での間においては、列車前方では正流でだんだんと増大してゆく。

- (2) 列車が、トンネル内にはいり込んでから、出坑し始めるまでの間においては、列車前方および後方では正流であり、列車側面では正流、まれに逆流になる。

- (3) 列車が、トンネルを出坑し始めてから後においては、多くの場合、正流で空気はトンネル外にあふれ出す。長いトンネルでは逆流で空気はトンネル内に吸込まれる。すなわち、比較的短いトンネルでは、空気の慣性のほうがトンネル内の摩擦よりも大きく利いて正流となるが、長いトンネルでは、逆に摩擦のほうが利いて逆流になるものと推察される。

以上の如く、トンネルの内部と出口において、正流と逆流の二通りの場合が存在する理由については目下検討中である。

次に、実車と模型とを比較してみると、両者間では、レイノルズ数やマッハ数にかなりの相異があり、したがって、相似性に問題がある。しかし、現地実験の結果と模型実験のそれとを比較検討してみると、傾向としてはなんら矛盾しないことがわかる。

終りに、本実験は、一重に、国鉄当局のご協力によるもので、ご厚意に対し深謝するものであります。なお、実験とデータ整理に労を惜しかなかった、本学、加藤栄二助手、末吉久男技官ならびに当時の学生諸君に感謝します。

文 献

- 1) 川畑，機械学会論文集，27—177(昭36—5)，619.
- 2) 川畑，機械学会論文集，29—207(昭38—11)，1742.
- 3) 川畑，機械学会論文集，35—269(昭44—1)，71.