



002

土 木 研 究 所 資 料

第 9 1 9 号

道路トンネル坑口付近における
排気ガス拡散実験調査報告

昭和49年10月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

ま え が き

最近、道路を2次的な発生源とする大気汚染が問題視されつつある。特に道路トンネルにおいては、坑内で自動車排気ガスが蓄積されるため、トンネルの換気によって坑口あるいは換気塔から集約されて排出される汚染空気が周辺地域に与える影響がうんぬんされている。

この問題に対処するため、土木研究所では昭和47年度からトンネル空気浄化技術の開発という見地から検討を進めてきており、その成果の1つとして煤煙等の粉じんに対しては浄化装置の見通しを得ている。しかし、トンネル内空気を汚染している物質のすべてについて効果的な浄化装置を開発することは現在の技術では未だ困難な場合が多く、拡散による希釈効果を期待せざるをえない。また、浄化装置の仕様を決定するに当たっても、その処理後の排出濃度が影響のない限度以下となるよう目標値を定める必要がある。これには、トンネルから排出される汚染空気がどのように拡散し、周辺に影響を及ぼしているかについて実情を把握することが重要であり、この点についての調査に着手した。

本報告は、トンネルの坑口から排出されるガスの拡散状況についてトレーサーガスを用いて実施した現地実験の結果を紹介するものであり、道路トンネルの計画の策定あるいはトンネル周辺の環境対策の検討に当たっての参考としていただければ幸いである。

トンネル研究室 室 長 今 田 徹
研究員 水 谷 敏 則

目

次

まえがき

1. 実験目的	1
2. 実験内容	1
2.1 概 要	1
2.2 実験場所および日程	1
2.3 実験方法	3
3. 実験結果	5
3.1 気象調査結果	5
3.2 トレーサーガス噴霧量	7
3.3 濃度分布	7
4. 考 察	19
4.1 濃度分布の概要	19
4.2 濃度の距離に伴う減衰	20
4.3 坑口排気風速の影響	23
4.4 坑外風の影響	24
5. ま と め	24
あとがき	25
資 料	27

1. 実験目的

道路トンネル内において通行車両が排出する有害物質は、自然換気、機械換気などにより希釈されてトンネル坑口あるいは換気塔から排出され、さらに坑外において自然風により拡散される。

本実験の目的は、坑口から排出される排気ガスが拡散、希釈される状況について現地実験により調査し、坑口周辺地域の汚染程度とその範囲の把握、ならびに坑口排気ガスの排出濃度の検討に資することである。

2. 実験内容

2.1 概 要

トンネル坑口排気ガスの拡散についての現地調査の手段としては、検討の対象となる各汚染物質についてその濃度分布を測定する方法が直接的である。しかし、この場合、対象物質の濃度が極めて低くなるため計測器の精度上から調査の限界があり、また、調査の対象であるトンネル以外の沿道等から発生する同種の汚染物質の影響によりトンネルに起因するものだけを取り出すことが困難である。これらの測定上の問題を避けるため、エアトレーサー用の特殊なガスを用いる方法により実験を実施することとした。

使用したトレーサーガスは、工場の煙突からの排煙等のトレーサー実験に広く用いられている六フッ化イオウ (SF_6) である。このガスは自然界にはほとんど存在しないうえ検出限界も高く ($0.001 \text{ ppb} = 10^{-6} \text{ ppm}$)、また、無味、無色、無臭、無害の気体である。

2.2 実験場所および日程

実験を実施した場所は、送気半横流式換気設備を有する一方交通トンネルの出口側坑口の周辺であった。この地点は東方向に開いた谷の奥に位置し、付近の地形は図-1に示すように坑口に向って左側が谷間、右側が切土ののり面となっていて、坑口に向って右方向にはやや大きい沢が入っている。

実験の日程は次のとおりである。

第1日 昭和49年1月29日 機材搬入、計測器調整

第2日 1月30日 実験 5回

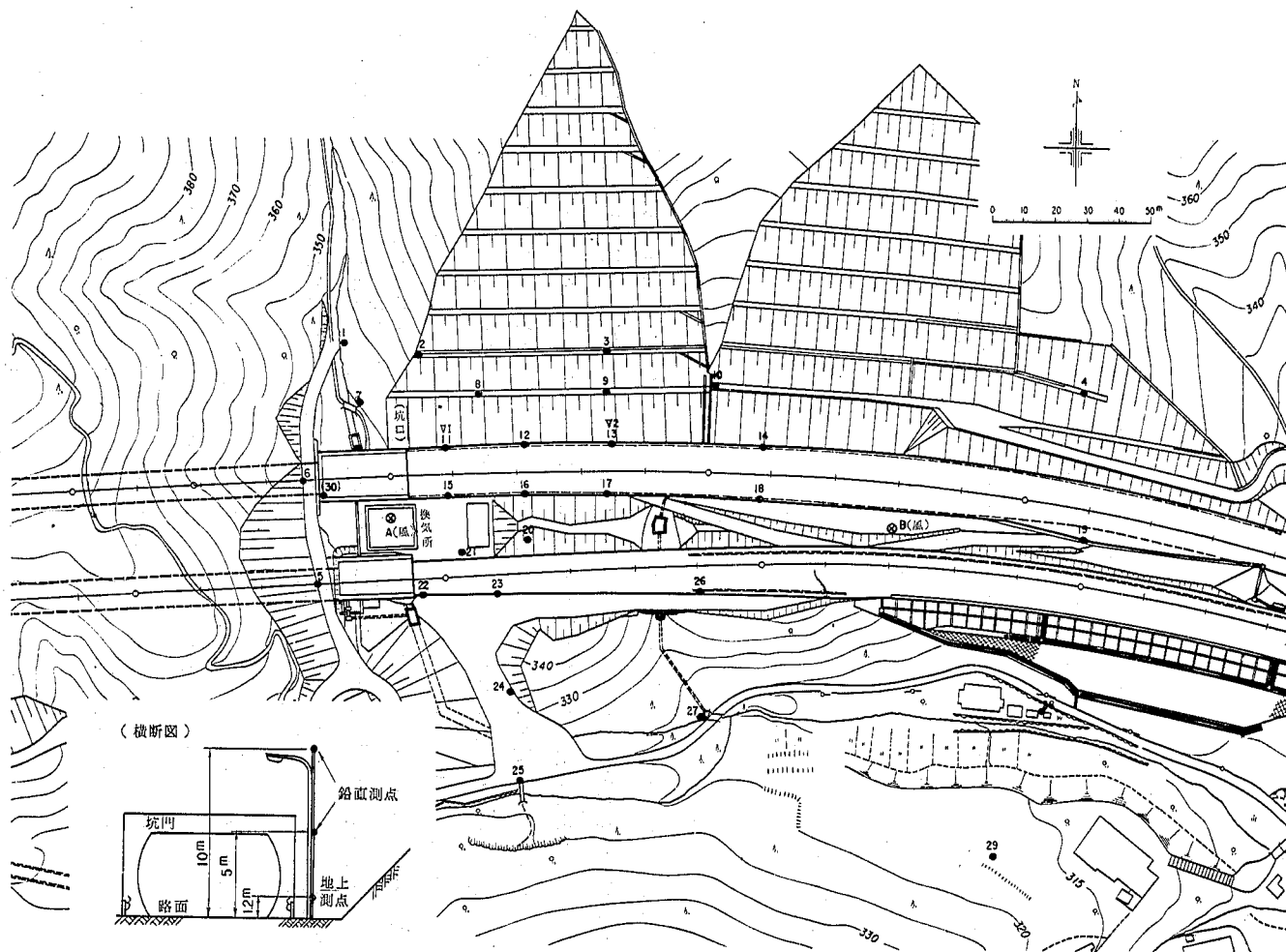


図 - 1 測点の配置図

第3日 昭和49年1月31日 実験 3回

第4日 2月1日 機材撤去

2.3 実験方法

(1) トレーサーガスの噴霧

トレーサーガスは六フッ化イオウ (SF_6) を N_2 ガスにより希釈したもの (容積比 26.0~26.2 %) を、一定の圧力のもとに出口側坑口から約 450 m 奥の地点で噴霧した。トレーサーはトンネル内通行車両の攪拌効果等により坑口に達する間に一様な濃度に希釈される。(写真-1)

なお、排気ガスの吐出風速の影響を調べるため、換気ファンにより坑口排気風速を約 3 m/s または 7 m/s に設定した。



写真-1 トレーサーガス噴霧

(2) トレーサーガスのサンプリング

測点は図-1に示すように坑口を中心として約 10 m, 30 m, 60 m, 100 m, 200 m の円弧上に配置し、地表面より 1.2 m の高さとした。また、坑口から 12 m, 63 m の沿道の2地点 (No. 11, 13 測点) においては地上 5 m, 10 m の高さにも測点を設けた。地上測点 30 点、鉛直測点 4 点の合計 34 測点を設けたがその配置は坑外の自然風の状況に応じて適宜移動した。なお、No. 30 測点は坑内に設置して坑口から排出される排気ガスの濃度を測定した。(写真-2, 3, 4)

サンプリングはサランパック (6 l) に毎分 100 cc の割合で 60 分間採集した。

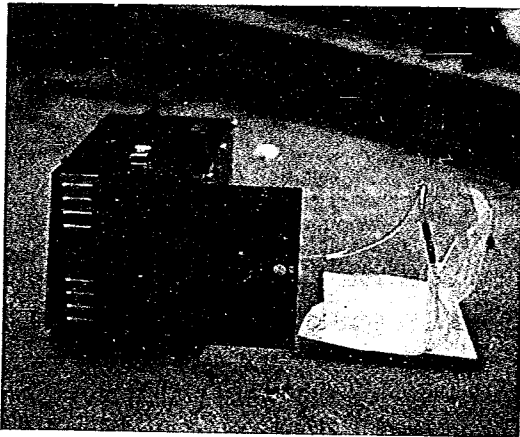


写真-2 オートサンプラーと採集袋

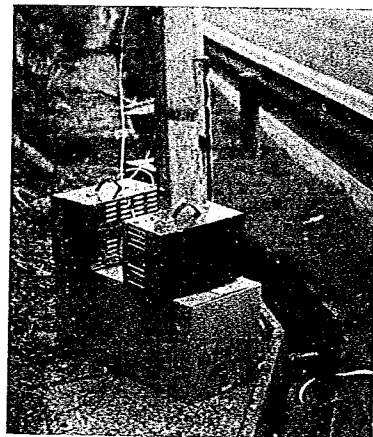


写真-3 サンプリング状況

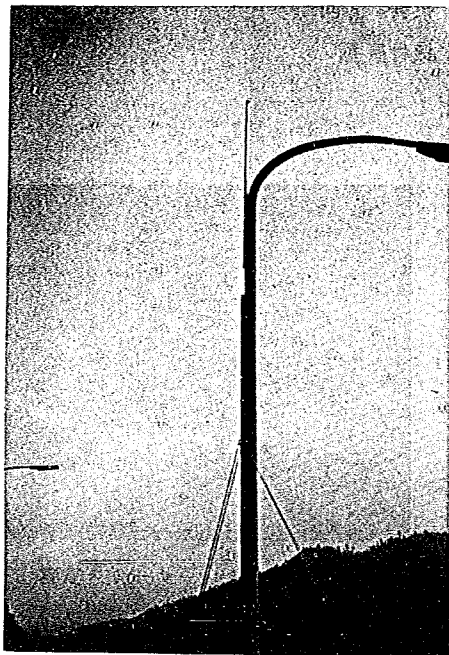


写真-4 鉛直サンプリング点(10 m)



写真-5 坑外風観測(中央分離帯)

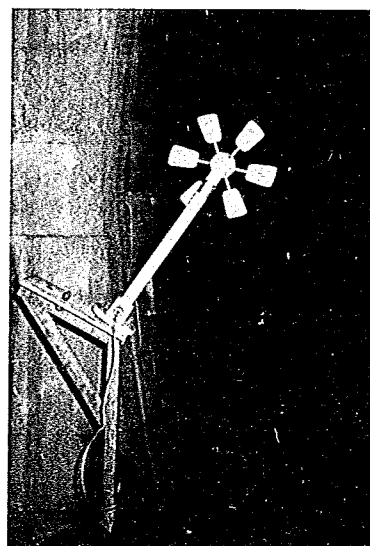


写真-6 坑口排気風速測定

(3) トレーサーガスの分析

バッグにサンプリングしたトレーサーガス(SF₆)の分析は、ガスクロマトグラフにより定量分析を行ない、1時間平均値として整理した。(トレーサーガスの定量分析法の詳細については巻末資料を参照)

(4) 気象観測その他

坑外自然風については、坑口換気所の屋上および坑口から150 mの中央分離帯(図-1の(A), (B)地点, 写真-5)で高さ8 mの支柱を立て、風向、風速の観測を行なった。また、坑口排気ガスの風速を路肩で測定した。(写真-6)

なお、坑内、坑外の温湿度の観測を行なった。

実験に使用した測定機器を表-1に示す。

表-1 調査項目および測定機器一覧表

測定項目	測定点	測定器	型式	メーカー	測定方法の概要
SF ₆ ガスの サンプリング	地上測点 30点 鉛直測点 2地点×2 高度=4点 (図-1参照)	3チャンネル オート サンプラー	APR-HS5	公害気象 研究所	所定の位置に3チャンネル オートサンプラーを設置し、 大気吸引口を1.2mの高さに し、6φ用サラン袋に 100cc/minの吸引量で60分 間吸収する。鉛直の場合、所 定の高度に吸引口を設け、ビ ニールパイプにてサンプラー に導いて行なう。
SF ₆ 濃度の 定量分析		ガスクロマ トグラフ	3-AE	島津製作所	(分析法については巻末 資料を参照)
坑外自然風	換気所屋上 および坑口 から150m 地点(2点)	風車型電気式 風向風速計	KL-111	光進電気 工業	プロベラ式風向風速計に より自記紙に記録
坑口排気ガス の吐出風速	坑口の路肩 (1点)	トンネル用 風速計	TV-110	光進電気 工業	プロベラ式風向風速計(10分 間平均化装置付)により自記 紙に記録
気温、湿度	坑内および 坑口から 150m 地点 (2点)	アスマン通 風式乾湿計	SY-IA	太田計器 製作所	通風後3分~10分で読 取る。

3. 実験結果

トレーサー実験は、第1日に5回、第2日に3回の合計8回実施した。以下に実験の条件および結果について述べる。

3.1 気象調査結果

(1) 天気概況

実験期間中の天気概況は次のとおりである。(天気図については巻末資料を参照)

(昭和49年1月30日)

前日沖縄付近にあった低気圧は東北東に進んだため、日本付近は弱い冬の季節風型の気圧配置となったが、高気圧の中心は北に偏っていた。

現地の天気は朝くもっていたがのち晴、午後は快晴となり、日中は弱いSE風系の谷風となった。

〔昭和49年1月31日〕

前日に続いて北高型に近い気圧配置であり、本州南岸沖には前線が停滞した。

現地の天気は朝のうちくもったがのち晴天となって、日中は前日に続いて弱いS E風系の谷風が出た。

(2) 坑外自然風

当初の実験計画では坑外自然風の風向、風速について次の条件が予定された。

- ① Calm 状態
- ② アプローチから坑口方向の風 (3 m/s 程度)
- ③ 坑口からアプローチ方向の風 (")
- ④ 道路に直交する方向の風 (")

しかし、実験日程が2日間に限られていたため、上記の全条件を満たすことはできず、結局、①および②の条件が出現しただけであった。実験中の坑外自然風の状況の概要は表-2に示すように、3 m/s 程度のS E系の風が多く、時々無風の状態があった。換気所屋上(A)の坑外自然風は(B)の中央分離帯測点の風よりも風向変動の振幅が大きく両者の風向にはやや偏差がある。また、両地

表-2 坑外自然風および排気ガス吐出風速

RUN No	サンプリング 時刻 (時, 分)	排気ガス 吐出風速 (平均値 m/s)	坑 外 自 然 風							
			坑口から15.4m中央縦帯(B)				換気所屋上(A)			
			風 向		風速(m/s)		風 向		風速(m/s)	
			変動幅	平均	変動幅	平均	変動幅	平均	変動幅	平均
1	9.00~10.00	2.5	SE~ESE	ESE	0~3	2.0	ESE~E	ESE~E	0~2	1.5
			後半ほとんど無風							
2	10.30~11.30	7.2	始め20分位ほとんど無風				始め15分位ほとんど無風			
			ESE~SE	SE	0~3	2.5	E~SE	ESE	0~3	2.5
3	12.00~13.00	7.0	E~SE	SE寄り	0~6	3.5	E~SE	ESE	0~5	3.0
4	13.30~14.30	3.7	E~SE	SE寄り	0~6	3.5	E~SE	ESE	0~5	3.0
5	15.00~16.00	3.4	ESE~SE	SE寄り	0~3	2.0	E~SE	ESE	0~3	2.0
			後半は次第に無風に近づく							
6	10.00~11.00	3.4	始め約30分無風							
			SE~ESE	SE寄り	0~4	3.0	ENE~SE	SE寄り	0~3	3.0
7	12.00~13.00	6.8	SE~ESE	SE~ESE	0~3	2.0	E~SSE	SE~ESE	0~3	2.0
			後半は次第に無風に近づく							
8	14.30~15.30	6.8	ESE~S	SE~SSE	0~6	3.0	E~S	SE	0~4	2.5

点とも地形の影響で風速の変動幅が大きい。

なお、同表には坑口からの排気ガスの吐出風速も併記した。

3.2 トレーサーガス噴霧量

各実験におけるトレーサーガスの噴霧の状況を表-3に示す。表中、「SF₆容積比」はN₂をバランスガスとしたSF₆の容積百分率を示し、噴霧強度q（単位時間当りの噴霧量）は次式により求めた値である。

$$q = \frac{2.24 (m^3)}{146 (kg)} \times \frac{\text{実噴霧量 (kg)}}{\text{噴霧時間 (分)} \times 60 (\text{秒})} \times \frac{273^\circ K + \text{平均気温} (^\circ C)}{273^\circ K} (m^3/s)$$

表-3 トレーサーガス噴霧実績一覧表

RUN	年月日	噴霧			SF ₆ ポンベ		SF ₆ 実噴霧量 (kg)	平均気温 (°C)	噴霧強度 q (m ³ /s)
		開始時刻 (時,分)	終了時刻 (時,分)	時 間 (分)	ポンベNo	SF ₆ 容積比 (%)			
1	49.1.30	8.30	10.25	115	NSL-14-81	26.2	2.92	5.3	0.6617×10 ⁻⁴
2	"	10.30	13.00	150	MLC-14914	26.1	3.11	5.3	0.5405× "
3	"	"	"					6.2	0.5422× "
4	"	13.10	14.50	100	NSL-14-80	26.1	2.07	7.3	0.5434× "
5	"	15.00	16.00	60	MSL-15-35	26.0	1.20	7.5	0.5386× "
6	49.1.31	9.30	11.00	90	MSL-15-35	26.0	1.81	6.0	0.5256× "
7	"	11.30	13.00	90	MSL-14918	26.1	2.27	5.6	0.6579× "
8	"	14.00	15.30	90	NSL-14-82	26.1	2.46	6.5	0.7156× "

3.3 濃度分布

各測点の濃度および濃度分布図を図-2-1～図-2-8に示す。坑口の至近距離では工場煙突の出口の場合に似て濃度傾度が非常に大きいためその分布の詳細を明らかにするには多くの測点が必要であるが、今回の実験では周辺のやや広範囲の分布状況に重点を置いているので、坑口付近の濃度分布はその概況を示す程度にとどめた。以下に各実験 (RUN) における濃度分布の概要について述べる。

(1) RUN 1 (1/3 9:00～10:00)

① SF₆ の濃度の主軸は坑口付近では排気風速によって、ほぼ道路沿いにのびているが、坑口から210mの円弧上では取付道路上のNo19測点から南に下ったNo28測点の濃度 (1.465 ppb) が高く、濃度主軸が南方の低地に下ったことを示している。これは表-2に示したように

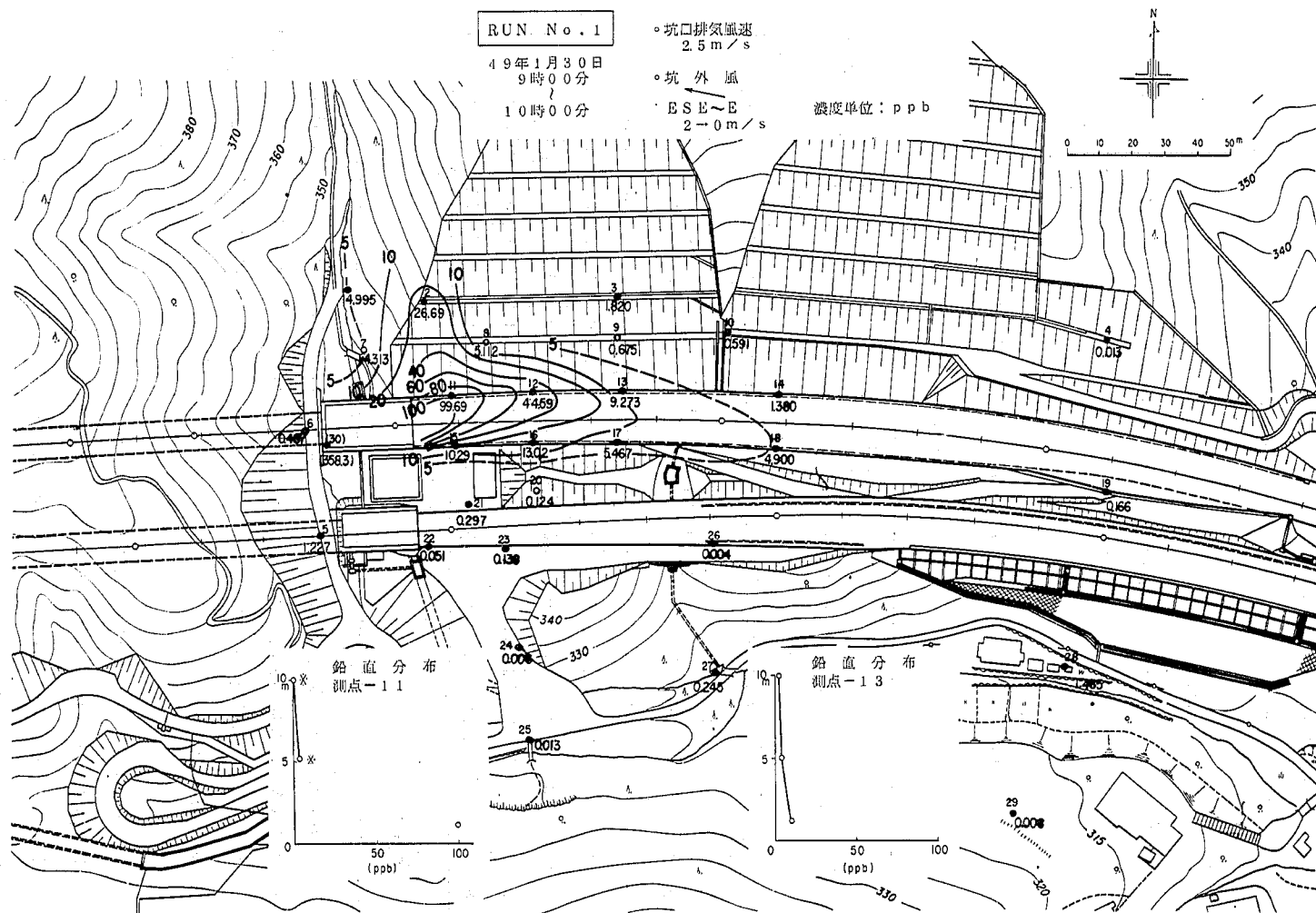
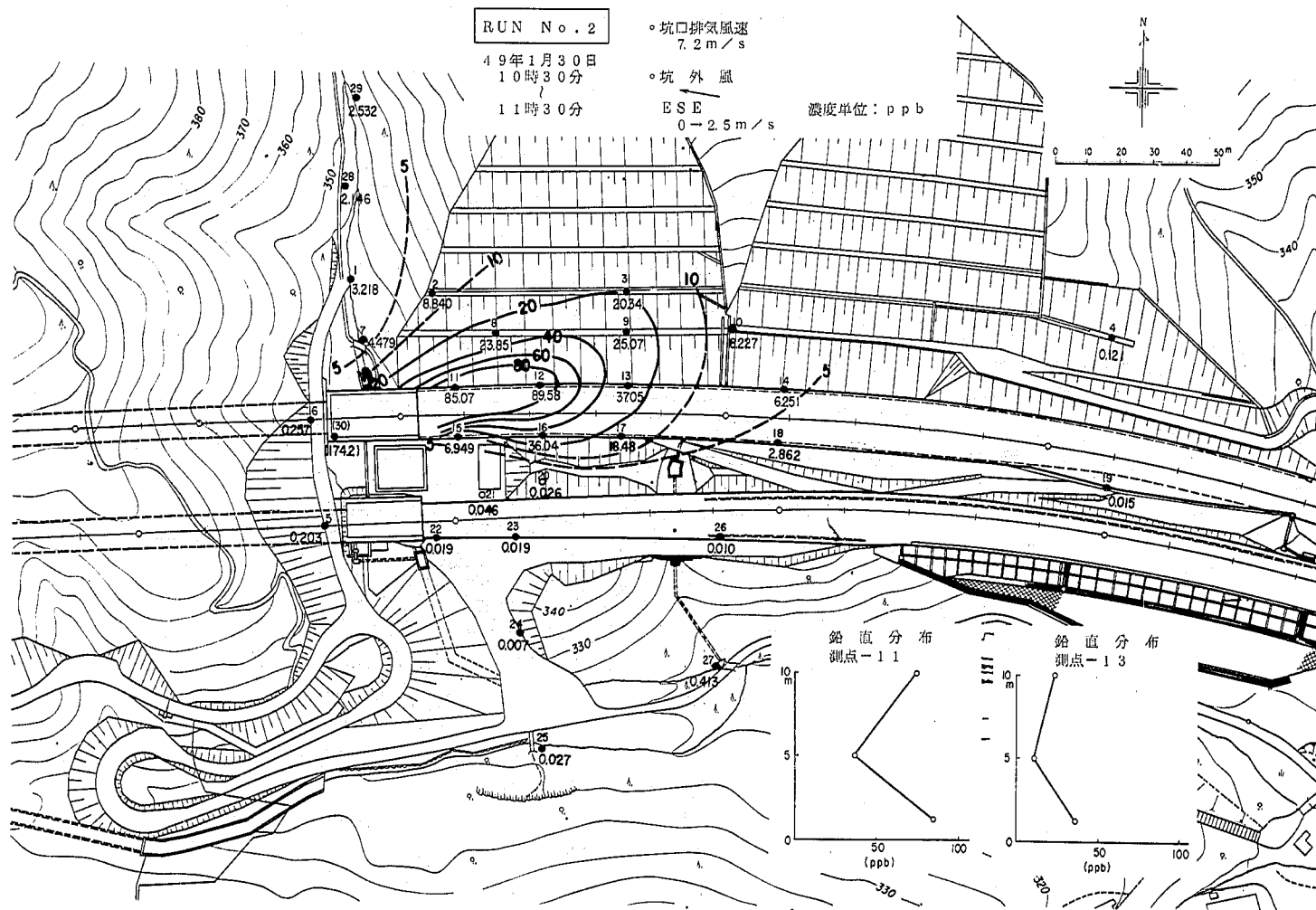


圖-2-1 SF₆ 濃度分布 (RUN 1)



RUN No. 3

49年1月30日
12時00分
13時00分

坑口排氣風速
7.0 m/s

坑外風
ESE
3.5 m/s

濃度單位: ppb



0 10 20 30 40 50 m

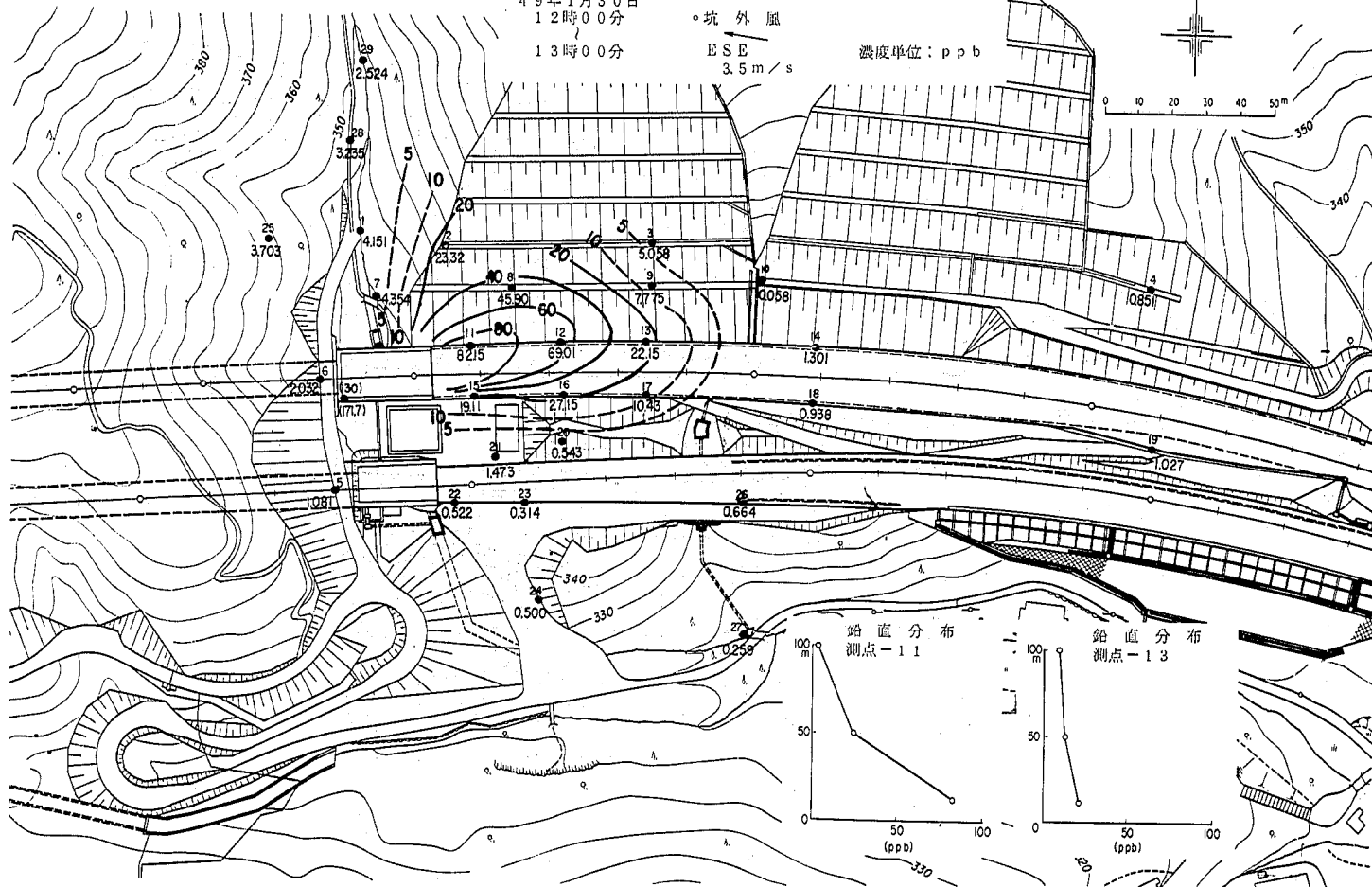


図-2-3 SF₆濃度分布(RUN 3)

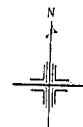
RUN No. 4

49年1月30日
13時30分
14時30分

坑口排氣風速
3.7 m/s

坑外風
ESE
3.5 m/s

濃度單位: ppb



0 10 20 30 40 50 m

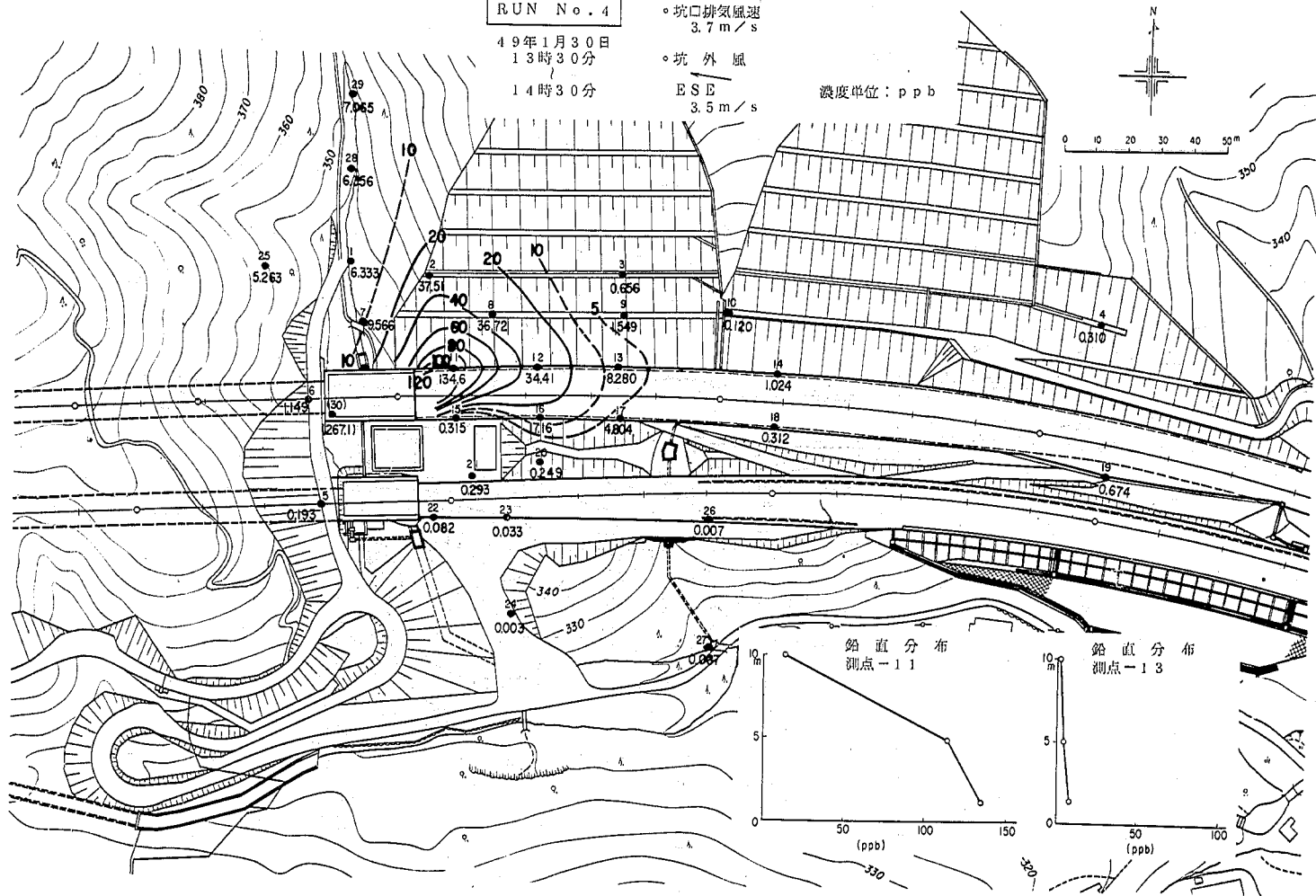


図-2-4 SF₆濃度分布 (RUN 4)

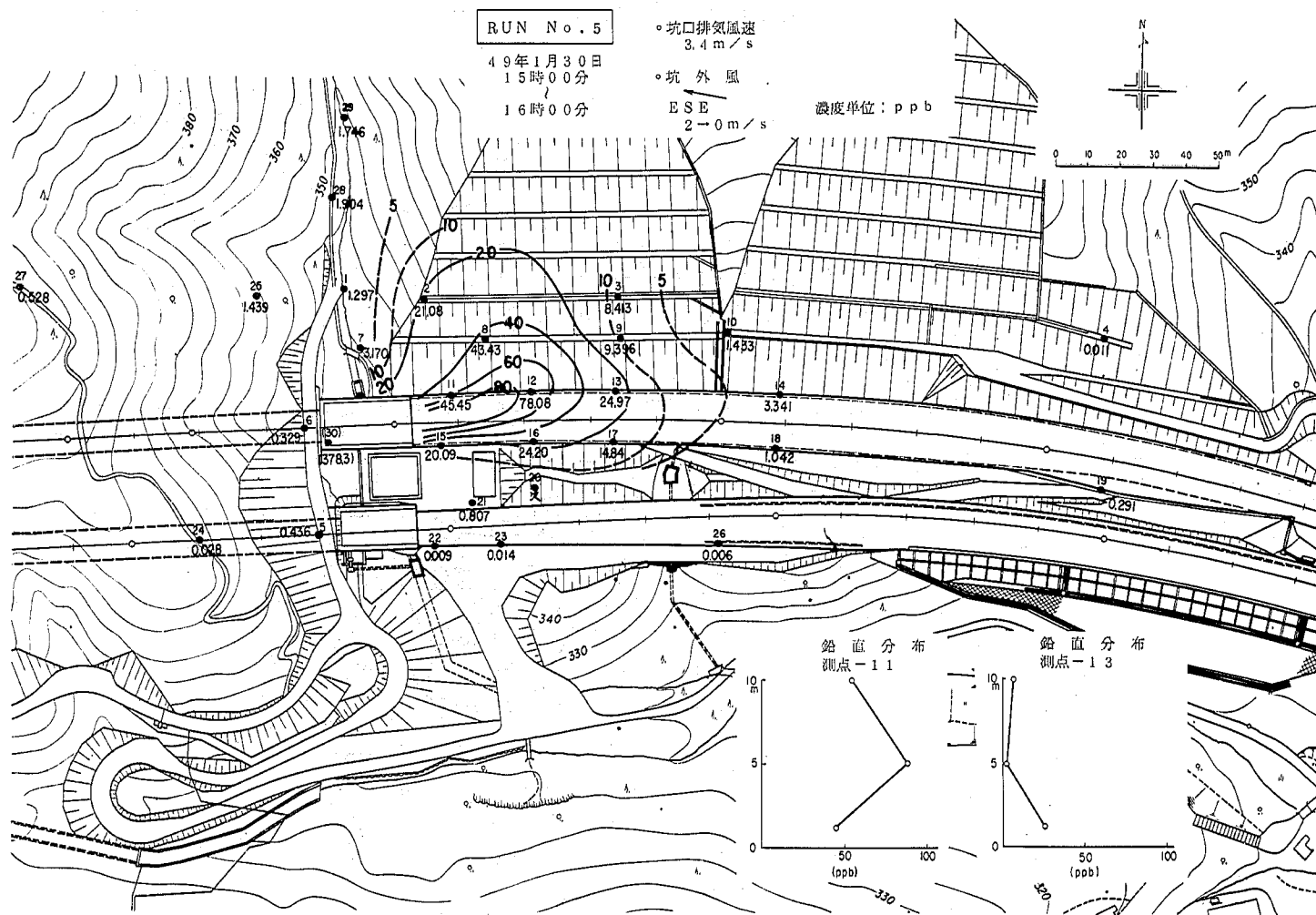


圖-2-5 SF₆ 濃度分布 (RUN 5)

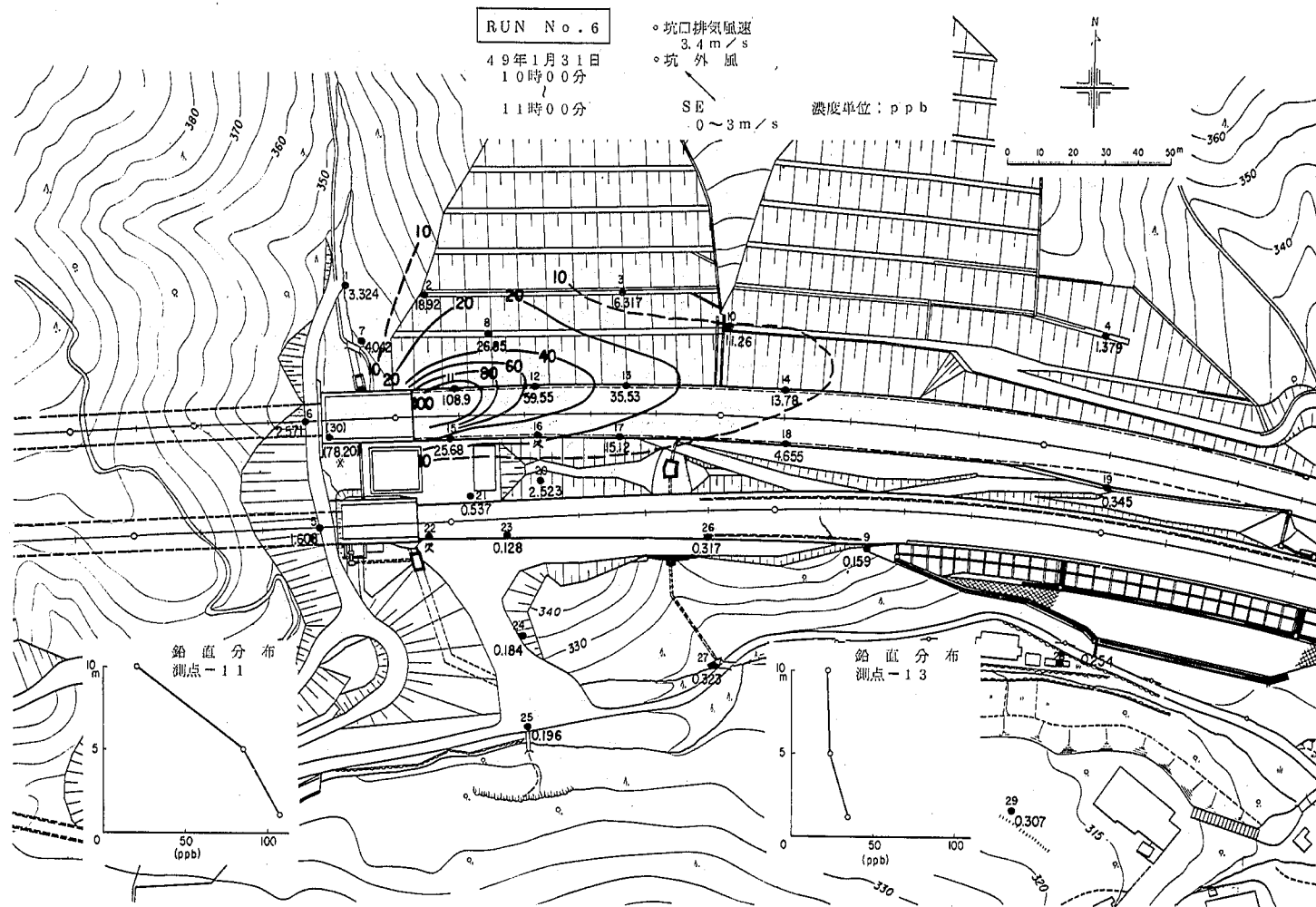


图 - 2 - 6 SF₆ 濃度分布 (RUN 6)

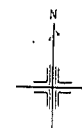
9 ●
3.353

RUN No. 7

49年1月31日
12時00分
13時00分

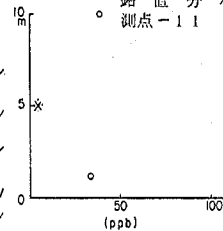
坑口排氣風速
6.8 m/s
坑外風
ESE ~ SE
2 ~ 0 m/s

濃度單位: ppb



0 10 20 30 40 50 m

鉛直分布
測點-11



鉛直分布
測點-13

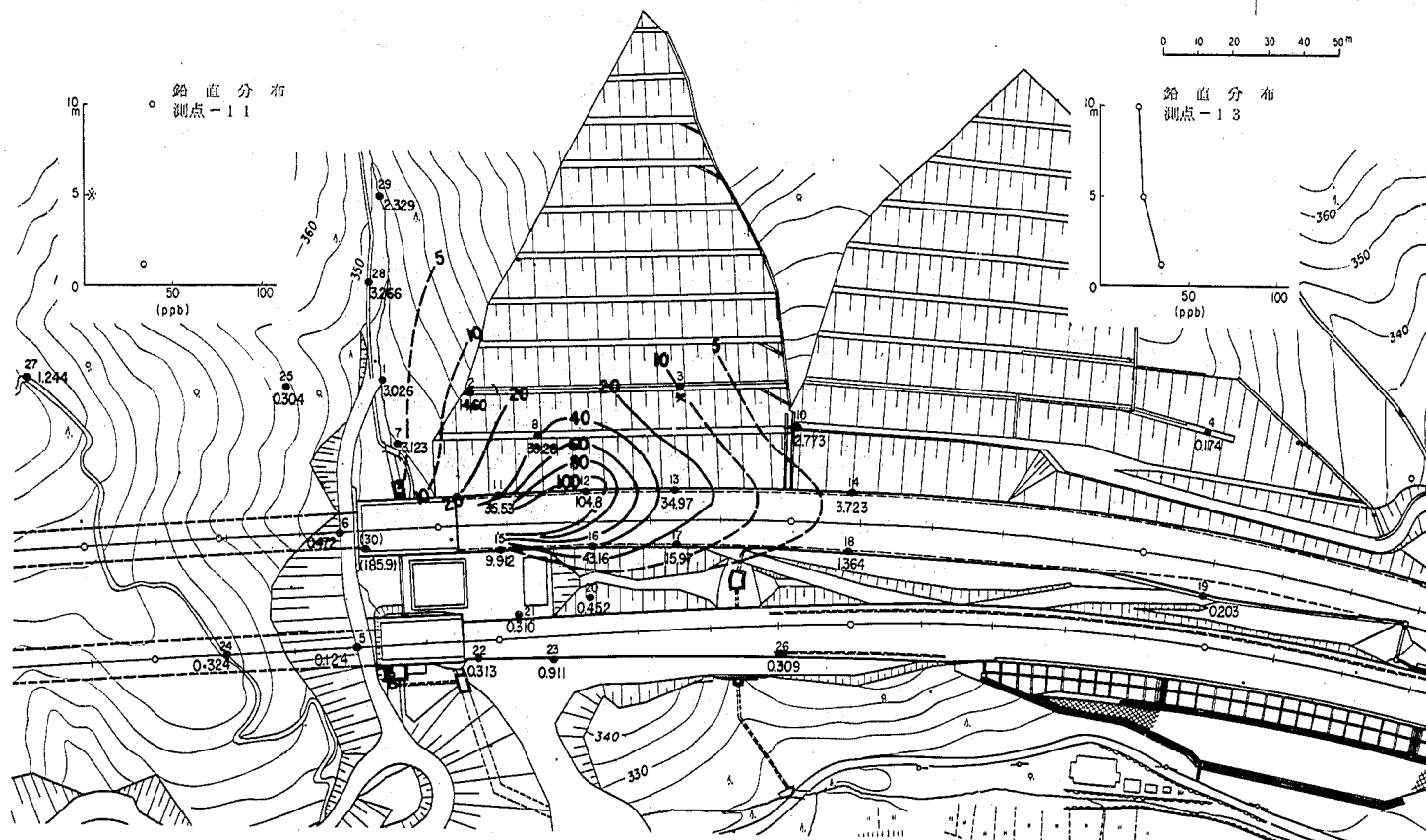
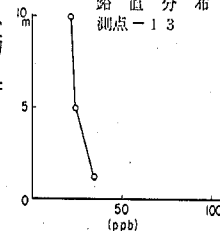
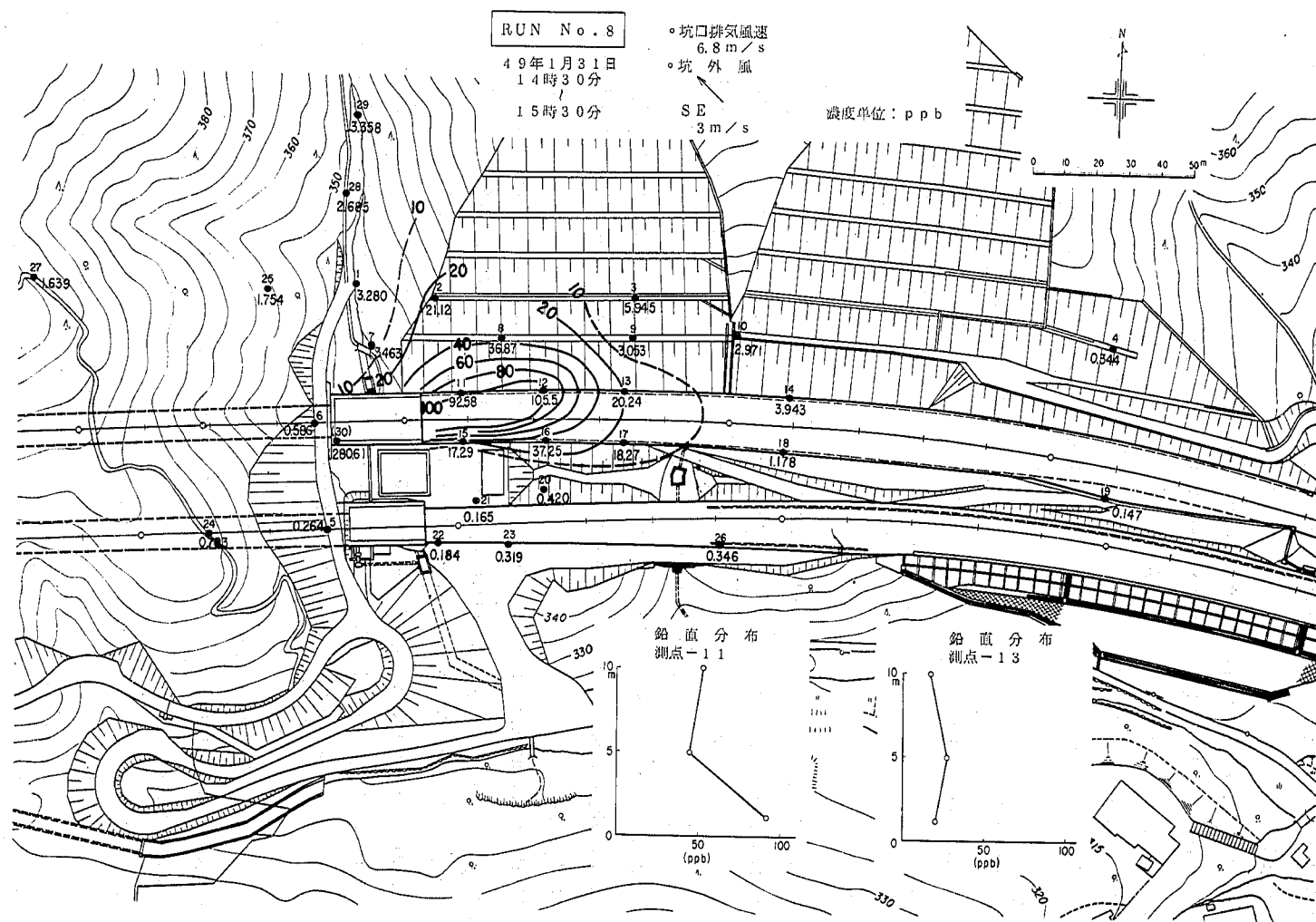


圖-2-7 SF₆ 濃度分布 (RUN 7)



サンプリング期間の後半の坑外風がほとんど無風であったことや走行車両による引きずり効果等の影響と見られる。

②上記とは別の濃度軸が坑口付近で北方にのび、 $\#2$ 測点で 26.69 ppb の濃度を示している。これはサンプリング期間の前半に $SE \sim E$ 風 $1.5 \sim 2 \text{ m/s}$ のアプローチから斜めに坑口に向う風向の坑外風があったことによる影響である。

③坑口 ($\#30$ 測点) の濃度 358.3 ppb に対し、坑外では最も近い道路北側の $\#11$ 測点で最高の 99.69 ppb を示している。すなわち濃度は坑口から 12 m 離れた地点で約 $\frac{1}{3}$ 以下に希釈されたことになる。しかし、同じ道路南側の $\#15$ 測点では 10.29 ppb の濃度に過ぎない。これは $E \sim SE$ 風系の坑外風のために濃度主軸が道路北側に偏ったためである。

④坑口に近い $\#11$ 測点の 5 m 、 10 m 高度における濃度値は他の RUN の場合に比較して異常に低い。この原因として分析に際してバックからの空気もれが確認され、検体不良として除外した。

(2) $RUN 2$ (10:30 ~ 11:30)

①濃度主軸は取付道路の北側沿いにのびており、北側斜面上の $\#10$ 、 $\#4$ 測点 (坑口から 9.8 m 、 21.2 m) の濃度が道路上よりも (高度差はあるが) 高い。道路北側測点の濃度は坑口から 38 m の距離にある $\#12$ で最高となっている。

②この RUN ではトンネル内風速 (坑口排気風速) が 7.2 m/s と強く、トンネル内でのトレーサガスの希釈率が大きいので、坑内の $\#30$ 測点の濃度も 174.2 ppb で $RUN 1$ の場合の約 $\frac{1}{2}$ になっている。

③坑外風は(A)、(B)測点とも始めの $15 \sim 20$ 分位はほとんど無風であり、その後は $E \sim SE$ 風系の 2.5 m/s となった。取付道路南側測点の濃度が道路北側測点および北側斜面の測点に比較して低濃度であるのは、 $RUN 1$ の場合と同様 $E \sim SE$ 風系の自然風によるものである。

④坑口に近い $\#11$ 測点の濃度の鉛直分布は 5 m 高度より 10 m 高度の方がかなり高濃度であり、 $\#13$ 測点の鉛直分布も同じ傾向を示している。上方 (10 m) に垂直拡散を妨げる安定層等の原因があったと考えられるが、現在の資料の範囲では明らかにできない。

(3) $RUN 3$ (12:00 ~ 13:00)

①濃度の主軸はほぼ道路沿い (北寄り) にのびているが、これは平均約 7.0 m/s の坑口排気風速によるものである。

②上記のほかに二次的な濃度軸と見られるものが坑口付近の斜面沿いに北側にものびて、その一部は北上りの谷沿いにはいり込んでいる。これは $E \sim SE$ 風 $3 \sim 3.5 \text{ m/s}$ の自然風によるものであるが、資料の範囲内では分布の詳細は明らかにできない。

③ $\#11$ および $\#13$ 測点の鉛直濃度分布はともに上方に向かって減少する形となっている。

(4) RUN 4 (13:30 ~ 14:30)

① RUN 3 と同様濃度の主軸は坑口付近の北側斜面および北上りの谷に向ってのびており、E ~ SE 風系 ($3.0 \sim 3.5 \text{ m/s}$) の自然風の影響が強く現われている。

② 坑口排気風速の影響と見られる濃度分布は、道路の北側沿いにのびているが、短距離の間に濃度が急速に減少している。これは排気風速が弱い (3.7 m/s) ためであり、自然風の主濃度軸に対し 2 次的な濃度軸となっている。

③ 11, 13 測点における濃度の鉛直分布はともに上方に向って (特に坑口付近では急速に) 減少している。

(5) RUN 5 (15:00 ~ 16:00)

① 坑口付近の北側に濃度の主軸がのびている。これはサンプリング期間前半の坑外風の影響と見られるが、資料の範囲内では分布状況は明らかではない。

② RUN 4 と同様排気風速が弱い (3.5 m/s) ため道路沿いの濃度軸は 2 次的なものとなり、濃度の減少率は RUN 4 に次いで急である。最高濃度は坑口に最も近い 11 測点でなく 12 測点 (78.08 ppb) であるが、これは排気風速が強い場合に多く見うけられる型である。

③ 11 測点の 5 m 高度ではこの RUN 最高の 88.16 ppb を測定しているのが注目される。サンプリング期間の後半は坑外風が次第に無風に近くなったことや、排気速度が弱かったためにトレーサーが坑口付近上空に滞留した可能性が考えられるが資料の範囲内では明らかでない。

(6) RUN 6 (10:00 ~ 11:00)

① 坑外風は、サンプリング期間の前半は無風であり、後半は SE 風系 $2 \sim 3 \text{ m/s}$ となった。濃度分布型は RUN 1, RUN 2 の中間に近い。排気風速は弱かった (3.4 m/s) が、坑外風の静穏期間が長かったこと、および走行車両の引ずり効果により、取付道路の北側沿いに濃度分布がのびており、坑口からの距離に伴う濃度の減少の割合は全 RUN 中の最小となった。

② 坑口の北斜面にのびる 2 次的な濃度軸は資料の範囲内では明瞭でない。

③ 11, 13 測点の濃度の鉛直分布は、いずれも上空に向って、てい減している。

(7) RUN 7 (12:00 ~ 13:00)

① 排気速度が強い (6.8 m/s) ため最大濃度は 12 測点にあり、主軸濃度はその風下方向である取付道路の北側沿いにのびている。

② 坑口付近から北側斜面にのびた他の濃度軸があるが分布の詳細は明らかでない。しかし、北上りの谷沿いの 28, 29, 9 測点方向や、西北西方向の山地 (標高 400 m) の 27 測点方向に $3.4 \sim 1.2 \text{ ppb}$ の濃度が測定されているのが坑外風の影響として注目される。

③ 11 測点の鉛直濃度分布は 10 m 高度が地表 (1.2 m 高度) よりも少し高い濃度を示して

いる。(5 m 高度は検体不良のため除外した)

(8) RUN 8 (14:30 ~ 15:30)

①坑口排気平均風速は 6.8 m/s であり、最高濃度は $\#12$ 測点にあって主軸濃度は取付道路沿いにのびている。しかし、ESE ~ SE $2.5 \sim 3 \text{ m/s}$ の坑外風が継続したため北側斜面に向う濃度軸も見られ、北上りの谷間や西方の山地の比較的広い範囲に、坑口付近より低濃度 ($3.4 \sim 1.6 \text{ ppb}$) とはいえ影響が及んでいるのが注目される。

②濃度の鉛直分布は $\#11$ 測点では高度5 m よりも10 m の濃度がやや高く、 $\#13$ 測点では5 m 高度の濃度が最も高くなっている。

4. 考 察

4.1 濃度分布の概要

各RUNの濃度分布の概要については3.3に述べたが、それを総括すれば次のとおりである。

①アプローチから坑口に向う自然風の場合(斜方向を含めてE風系の風)には、坑口の排気風速の影響する範囲内では排気風の周辺で自然風との境界層ができ、排気風の影響外では自然風による拡散となる。つまり排気風と自然風との組み合わせにより拡散パターンが決定されることになる。この場合、排気風速の影響範囲は自然風によって縮小され、自然風の風下にも濃度の主軸が生じる場合もある(RUN 4, 5 参照)。

②坑外風が無風の場合には排気風が直接影響する範囲外および周辺(特に谷合いの窪地等)にも汚染質が滞留する可能性が考えられる。(RUN 1 参照)

③SE風系の自然風がある場合、北側の上り沢の奥地の西方の山地の測点において、これとほぼ等しい距離にあるアプローチ上の測点の濃度を上回る濃度が測定され、自然風の風下にはかなり広い範囲に影響することが判った。(RUN 7, 8 参照)

④濃度の鉛直分布は図-3-1~2に示すように地上から上方に向かって減少するケースが最も多かったが、高度5mで最高濃度を測定した場合(RUN 5の Δ 11, RUN 8の Δ 13)や、5mよりも10mの濃度が高い場合(RUN 8の Δ 11, RUN 2, 5の Δ 13)があった。

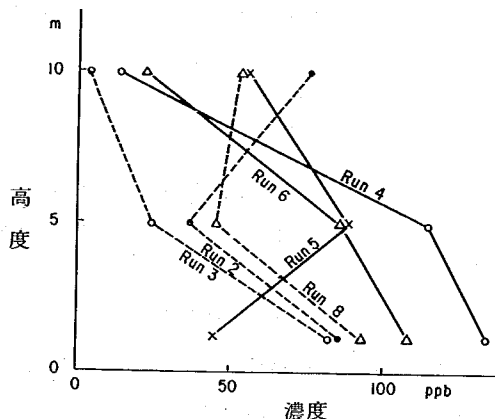


図-3-1 鉛直濃度分布

(Δ 11 測点, 坑口+12m)

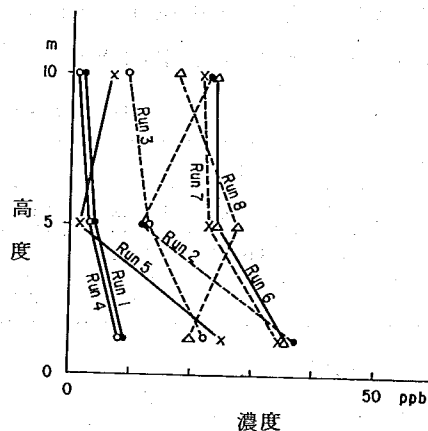


図-3-2 鉛直濃度分布

(Δ 13 測点, 坑口+63m)

4.2 濃度の距離に伴う減衰

坑口からの距離に伴うトレーサーガス濃度の減衰を調べるため、まず、坑口から排出される排気ガスの濃度について検討を加え、その後、坑口からの濃度減衰率の検討を行なう。

(1) 坑口排気ガス濃度

トレーサーガスは坑口から約450 m奥の地点でトンネル内に噴霧している。したがって、トレーサーガスはトンネル換気風に運ばれて坑口に到達するまでの間に通行車両により攪はんされ、希釈されて坑口からはほぼ一様の濃度で排出されと考えられる。坑口におけるトレーサーガスの平均濃度は次のように計算される。

$$\text{平均濃度} = \frac{q_i}{A \cdot V_i}$$

ここに、 q_i : SF_6 の噴霧濃度 (m^3/s , 表-3 参照)

A : トンネル内空断面積 ($43.9 m^2$)

V_i : 平均排気風速 (m/s)

i : RUN №

一方、坑口排気ガスの濃度は、 $\#30$ 測点で測定を行っており、上式による計算値と測定値を比較して示すと表-4 のとおりである。

実測値と計算値は、RUN 2, 3, 5 で $\pm 2 \sim 3 \%$ 、RUN 4, 7, 8 で $\pm 16 \sim 21 \%$ の誤差範囲内にあり、トンネル内平均風速の計測などの測定法上の誤差を考えれば、良く一致しているものといえる。(RUN 6 はピンホールによる検体不良のため除外した。RUN 1 にも検体不良の疑問がある。) 以上の結果から、トレーサーガスはトンネル断面内ではほぼ均一な濃度となって坑口から排出されていると判断できる。

表-4 坑口排気ガス濃度の計算値と実測値の対比

RUN №		1	2	3	4	5	6	7	8
濃度 (ppb)	実測値 A	358.3	174.2	171.7	267.1	378.3	—	185.9	280.6
	計算値 B	607.8	170.3	177.7	336.4	366.2	349.1	221.0	238.7
濃度比 A/B(%)		59	102	97	79	103	—	84	118

(2) 濃度減衰率

前項で示した坑口におけるトレーサーガス平均濃度(計算値)とアプローチの道路沿いの測点で測定された濃度を坑口からの距離にしたがって表-5 に示す。同表には、坑口濃度を100%とした各測点の濃度比も併記した。図-4-1~2は、アプローチ沿いの濃度の減少の様子を坑口排気風速の強弱(7 m/s, 3 m/s)の別で図示したものである。排気風速の強い場合の減衰の傾向はよく一致しており、坑口濃度に対して10%の濃度に希釈されるまでに坑口から70~80 mの距離を必要としている。排気風速の弱い場合はバラツキが大きい、濃度が10%になるのは30

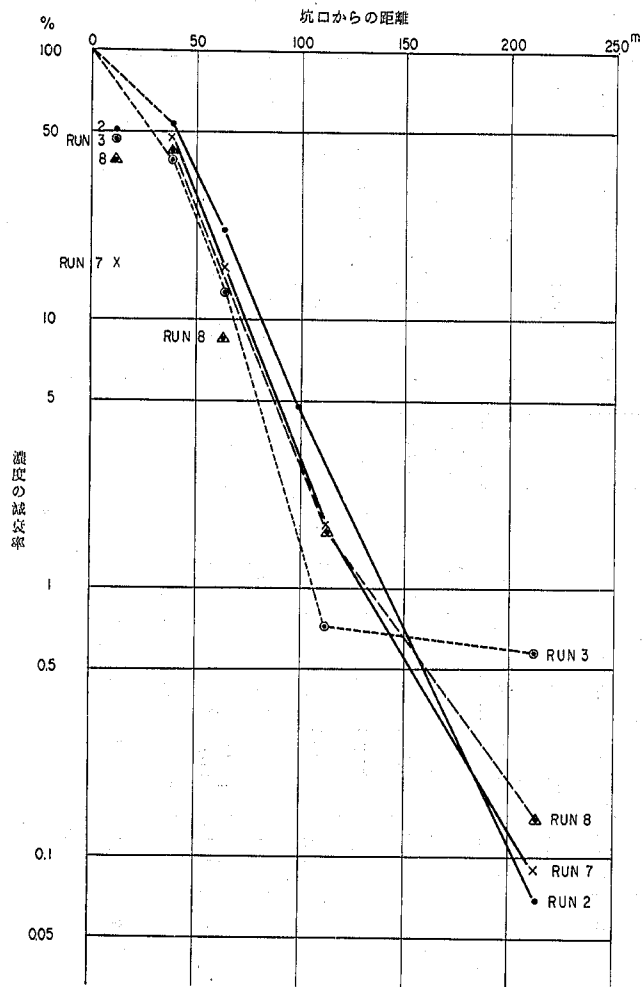


図 - 4 - 1 濃度減衰率 (排気風速が強い場合)

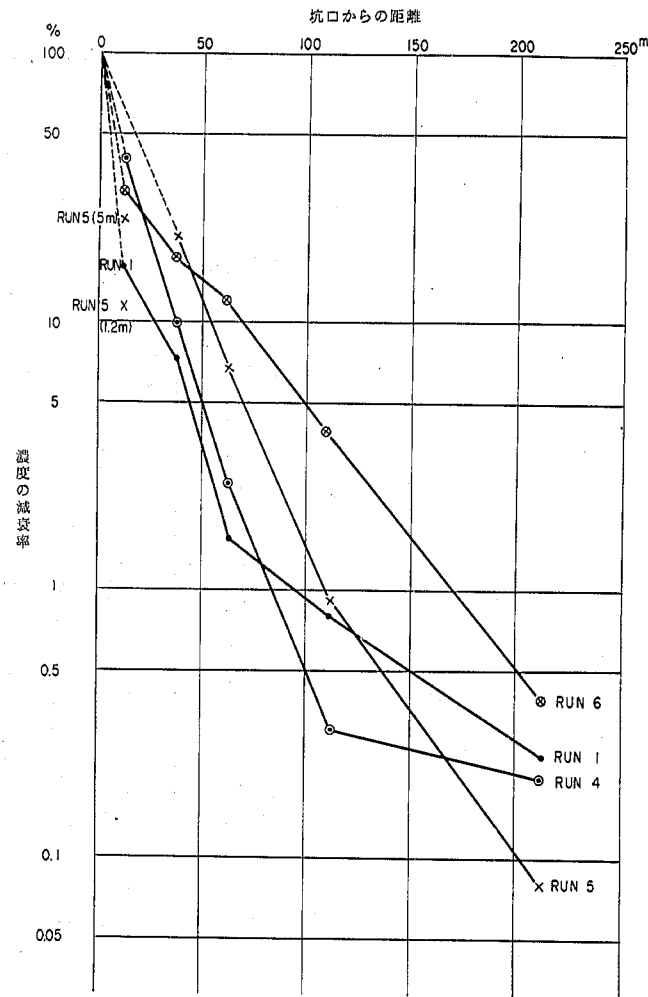


図 - 4 - 2 濃度減衰率 (排気風速が弱い場合)

～70 mの地点となっている。

なお、次式で示される濃度(%)の減衰率から減衰係数 α を求めると表-6のとおりである。

$$\Delta C = e^{-\alpha \cdot \Delta X}$$

ここに ΔC : 濃度の減衰率

ΔX : 距離(m)

α : 減衰係数

表-5 アプローチ沿いの濃度と濃度比

測 点 № 坑口からの距離	坑 口	1 1	1 2	1 3	1 0 *	1 8	1 4	19, (28)	4 *	坑口排気風速 (m/s)			
	0 m	12 m	38 m	63 m	98 m	111 m	112 m	212 m	213 m				
濃 度 (p p b)													
R U N №	1	607.8	99.67	44.59	9.27	8.227	4.90		0.166 (1.465)	0.121	2.5		
	2	170.3	85.07	89.58	37.05							7.2	
	3	177.7	82.15	69.01	22.15				1.301		1.027	7.0	
	4	336.4	134.6	34.41	8.28				1.024		0.674	3.7	
	5	366.2	45.45	78.08	24.97				3.341		0.291	3.4	
	6	349.1	108.9	59.55	35.53				13.78			1.379	3.4
	7	221.0	35.53	104.8	34.97				3.723		0.203		6.8
	8	238.7	92.58	105.5	20.24				3.943			0.344	6.8
坑口濃度を 1 0 0 とした濃度比 (%)													
R U N №	1	100	16.40	7.34	1.53	4.83	0.806		0.0273 (0.241)	0.071	2.5		
	2	100	49.95	52.60	21.76							7.2	
	3	100	46.22	38.84	12.46				0.732		0.578	7.0	
	4	100	40.01	10.23	2.461				0.304		0.201	3.7	
	5	100	12.41 (5m24.07)	21.32	6.87				0.912		0.079	3.4	
	6	100	31.19	17.06	10.18				3.947			0.395	3.4
	7	100	16.08	47.42	15.82				1.684		0.092		6.8
	8	100	38.79	44.20	8.48				1.652			0.144	6.8

* №10, 4 測点は北側斜面上にあり(№28) 測点は南側低地にある。

表 - 6 減衰係数 α

RUN No	坑口排気風速 (m/s)	減 衰 区 間		減衰係数 α
		区間距離 (m)	濃度の減少 (%)	
2	7.2	38 ~ 213	52.60 ~ 0.071	0.0378
3	7.0	38 ~ 63	38.84 ~ 12.46	0.0455
7	6.8	38 ~ 112	47.42 ~ 1.684	0.0451
8	6.8	38 ~ 112	44.20 ~ 1.652	0.0444
1	2.5	12 ~ 111	16.42 ~ 0.806	0.0305
4	3.7	12 ~ 63	40.01 ~ 2.461	0.0547※
"	"	12 ~ 112	40.01 ~ 0.304	0.0488※
5	3.4	38 ~ 112	21.32 ~ 0.912	0.0426※
6	3.4	63 ~ 112	10.18 ~ 3.947	0.0193
"	"	63 ~ 212	10.18 ~ 0.395	0.0218

※ 副主軸 (4.3(2)項参照)

4.3 坑口排気風速の影響

(1) 坑口排気風速が強い場合

強い風速で坑口から排出された空気はその運動量のため直進しながら、斜横から吹く坑外風によってその主軸が曲げられ、同時に乱渦による拡散が開始される。アプローチ上の測点はガードレールから約1m後退している。このため坑口から12mの位置にあるNo11測点は、僅かながら排気風速の直接の影響圏から外れるので、最高濃度は主として風下38mのNo12測点に出現している。また、RUN8のNo13測点(63m)およびRUN3のNo14測点(112m)も濃度主軸から外れて低い値となっている。RUN3のみはNo11測点の濃度が最高であるが、この場合はSE風系の坑外風がやや強かったため濃度主軸が北寄りに曲げられたことによるものである。反対に坑外風が弱くサンプリング期間の後半無風に近づいたRUN7の場合には、No11測点の濃度は著しく低くなっている。したがって排気風速が強い場合の濃度分布は、一般に坑口からNo12測点付近まで減衰率がゆるく、その後の減衰は急になる。なお、RUN3のNo19(212m)点では車両の引ずり効果によると見られる高い濃度が現われている。

(2) 排気風速が弱い場合

排気風速が弱い場合には相対的に坑外風の影響が大きくなる。このため主軸の湾曲は早められて坑口近くのNo11測点に主として最高濃度が出現している。RUN5のみは例外でNo11測点の地上(1.2m)濃度はNo12点よりかなり低いが、高度5mでは最高の88.16ppb(24.07%)を測定している。最高濃度点が坑口に近く、坑口付近では濃度の減衰が急であるが、その後はRUN6, RUN1で見られるようにゆっくり減衰している。ただしRUN4, RUN5の場合は、

濃度の主軸が北側の斜面あるいは上り谷方向にあるためアプローチ沿いでは2次的な濃度軸となっており、見掛け上の濃度の減衰は排気風速が強い場合と同程度になっている。(表-6※印参照)

4.4 坑外風の影響

(1) アプローチから坑口方向の自然風の場合

今回の実験期間の自然風はほとんどすべてアプローチから坑口に向うSE風系であった。強い排気風速の場合は、自然風(3.5 m/s以下)の影響が比較的少なく、坑口からアプローチ沿いの濃度の減衰率も図-4-1、表-6に示したように比較的狭い範囲にまとまっている。坑外の最大濃度は坑口から40 m前後の測点にあり、この間の減衰率は以遠のものよりもややゆるやかである。排気風速が弱い場合は、自然風の影響を大きく受け、アプローチ沿いの濃度は副主軸となっており、その減衰率は強い排気風速の場合とほぼ等しくなり(RUN 4, 5)、またサンプリング期間の約半が無風となった場合(RUN 1, 6)は濃度の減衰率はゆるやかになっている。坑口から至近距離における濃度の減衰率は、資料の範囲内では排気風速が強い場合よりも著しく大きくなっている(噴霧強度qを一定とした場合)。

(2) 自然風が無風の場合

今回の調査でサンプリング中の一部に無風期間を含んだRUNがあった。無風の場合、汚染質は坑口排気風速によって道路沿いに排出されるので谷沿いの道路では汚染質の滞留が起こり、特に地形によっては滞留が著しくなる場所が出現することが考えられる。

(3) 坑口からアプローチ方向の自然風の場合

今回の調査ではこの種の自然風は出現しなかったが、坑口からの排気風速と自然風の影響が合成されるので、(地形の影響があるとしても)濃度分布は道路風下方向にほぼ正規分布型に近い形で長い範囲にのびることになると考えられる。しかし、坑外風の風速が強い場合には拡散も助長されるので排気風速が弱くても十分な希釈が行なわれるであろう。

5. ま と め

トンネル坑口排気ガスの濃度分布は坑口周辺の地形や気象条件により大きい影響を受けているが、一般的な特徴として次の事柄が明らかとなった。

(1) 排出ガスは、まず坑口排気風速および自動車による持出し(引きずり効果)により道路に沿って比較的拡散が少ない状態で運ばれ、次いで坑外の自然風によって急激な拡散が行なわれる。このため、濃度分布の主軸はいったん沿道の方に延び、やがて坑外風の風下方向に曲げられる。

(2) 坑口排気風速が大きい場合は、排気ガスのもつ運動量によって坑口から遠くまで運ばれるため、道路沿いに強い濃度主軸が現われる。この場合、図-4-1に示すように坑口から40 m

付近までは濃度の減衰が少なく、その後急速に減衰している。

坑口排気風速が小さい場合は、坑口において直ちに自然風による急速な拡散が始まり、濃度の減衰が著しい（図-4-2）。しかし、坑口の至近地点では高濃度が検出されるので注意を要する（汚染物質の総量と同じ場合）。

(3) 道路沿いでは、坑口から離れた地点（図4, 19測点）においても、自動車の持出しによると思われる比較的高い濃度が観測されることがあった。

(4) 風下側の沢筋では、濃度の減衰が少なかった。これは、排気ガスが拡散されないまま遡上するためであると思われる。

(5) 坑外風が無風（Calm状態）となると、汚染物質が滞留し濃度分布の広がりが大きくなる。

(6) 今回の実験条件の範囲内では、坑口から70～80m程度離れた地点で10倍以上の拡散による希釈効果が認められた。（図-4-1～2）

(7) 鉛直分布については、坑口より63m地点では高度に従ってやや薄くなる傾向はあるがほぼ同程度の濃度に拡散されている。一方、坑口より12mの地点では、一般的には高度とともに急速に拡散しているが、中には濃度勾配が逆のケースもみられる。これは自然風の影響により濃度主軸が上方に押し上げられたことが考えられるが、今回の結果からは判定できない。（図-3-1～2）

あ と が き

今回の現地実験によりトンネルの坑口から排出される排気ガスの挙動についてやや定量的に把握することができたと考えている。しかし、拡散の現象は地形や自然条件等により著しく影響されることも明らかであり、今後もこの種の調査の積み重ねが望まれる。

また、トンネル排気ガス対策としては、トンネル換気方式の検討、トンネル空気浄化技術の開発などを含めた総合的な検討が必要であると考えている。

資 料 編

。 S F₆ 定 量 分 析 法

。 S F₆ 分 析 表

。 S F₆ 相 対 濃 度 表

。 調 査 期 間 の 天 気 図

。 坑 外 風 向 風 速 観 測 表

。 乾 湿 球 温 度 表

。 ト ン ネ ル 交 通 量

◎ 大気拡散実験に関するトレーサーガス (SF_6) 定量分析法

(A) 定量分析操作

試料ガスの入ったサラン袋をガス濃度装置に連結しC-22を填めた吸収用U字管をあらかじめ液体酸素に浸漬し、 -100°C 以下に冷却し、これに流量毎分200mℓで試料ガス250～1000mℓを吸引導入し、試料中のトレーサーガス (SF_6) を凝縮し吸収する。

次いでこのU字管をガスクロマトグラフのガス試料挿入口に連結し、寒剤(氷と食塩)を用いて、 -30°C 附近まで加温し、吸収ガスを気化し、窒素をキャリアーガスとして分離カラムに導きガスクロマトグラフ法の常法に従って定量操作を行う。(SF_6 分析フローチャート参照)

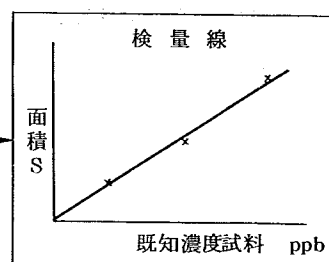
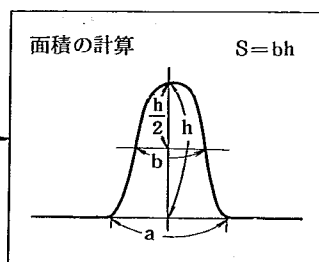
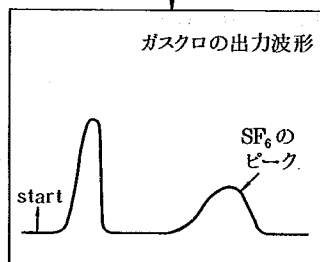
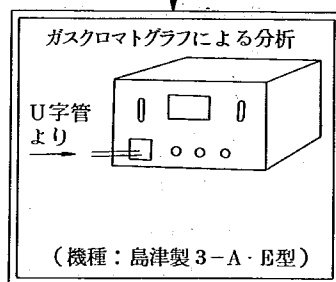
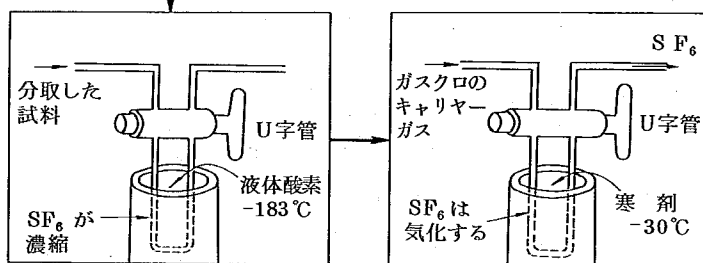
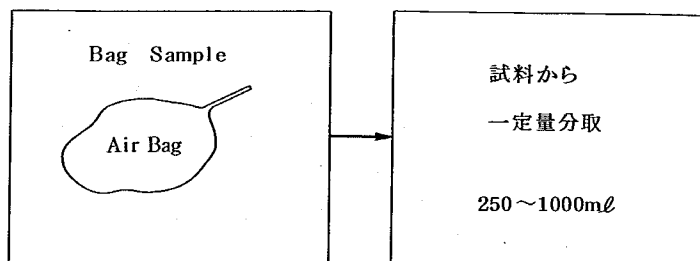
(B) 定量条件

ガスクロマトグラフによる定量条件は次のとおり

充 填 剤	シリカゲル30～60 mesh
メインカラムの長さ	300 cm
プレカットカラムの長さ	45 cm
プレカットタイム	4 min
キャリアーガス	N_2 (高千穂製, ガスクロ用ドライガス)
キャリアーガス流量	20 mℓ/min (保持時間を13～15 minに調整)
スカベンジガス	N_2
カラム温度	50°C
E. C. D. 温度	110°C
E. C. D. 印加電圧	パルス電圧
チャート速度	10 mm/min
標準ガス	SF_6 標準ガス (高千穂製)
ガスクロマトグラフィー機種	島津製3-A・E型

以上の条件で得たガスクロマトグラフの出力波形のピーク面積を標準ガスのそれと比較して定量する。

SF₆ 分析フローチャート



◎ SF₆ 分 析 表

(単位: ppb)

RUN 点 測 点	1	2	3	4	5	6	7	8
	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/31	1/31	1/31
	9:00~10:00	10:30~11:30	12:00~13:00	13:30~14:30	15:00~16:00	10:00~11:00	12:00~13:00	14:30~15:30
1	4.995	3.218	4.151	6.333	1.297	3.324	3.026	3.280
2	26.69	8.840	23.32	37.51	21.08	18.92	14.60	21.12
3	1.820	20.34	5.058	0.656	8.413	6.317	欠 測	5.945
4	0.013	0.121	0.851	0.310	0.011	1.379	0.174	0.344
5	1.227	0.203	1.081	0.193	0.436	1.608	0.124	0.264
6	0.487	0.257	2.032	1.149	0.329	2.571	0.472	0.586
7	4.313	4.479	4.354	9.566	3.170	4.042	3.123	3.463
8	5.112	23.85	45.90	36.72	43.43	26.85	39.28	36.87
9	0.675	25.07	7.775	1.549	9.396	0.159	3.353	3.053
10	0.591	8.227	0.058	0.120	1.433	11.26	2.773	2.971
11	99.69	85.07	82.15	134.6	45.45	108.9	35.53	92.58
12	44.59	89.58	69.01	34.41	78.08	59.55	104.8	105.5
13	9.273	37.05	22.15	8.280	24.97	35.53	34.97	20.24
14	1.380	6.251	1.301	1.024	3.341	13.78	3.723	3.943
15	10.29	6.949	19.11	0.315	20.09	25.68	9.912	17.29
16	13.02	36.04	27.15	17.16	24.20	欠 測	43.16	37.25
17	5.467	18.48	10.43	4.804	14.84	15.12	15.97	18.27
18	4.900	2.862	0.938	0.312	1.042	4.655	1.364	1.178
19	0.166	0.015	1.027	0.674	0.291	0.345	0.203	0.147
20	0.124	0.026	0.543	0.249	※欠 測	2.523	0.452	0.420
21	0.297	0.046	1.473	0.293	0.807	0.537	0.310	0.165
22	0.051	0.019	0.522	0.082	0.009	欠 測	0.313	0.184
23	0.138	0.019	0.314	0.033	0.014	0.128	0.911	0.319
24	0.006	0.007	0.500	0.003	0.028	0.184	0.324	0.783
25	0.013	0.027	3.703	5.263	1.439	0.196	0.304	1.754
26	0.004	0.010	0.664	0.007	0.006	0.317	0.309	0.346
27	0.245	0.413	0.259	0.087	0.528	0.323	1.244	1.639
28	1.465	2.146	3.235	6.356	1.904	0.254	3.266	2.685
29	0.008	2.532	2.524	7.065	1.746	0.307	2.329	3.358
30	358.3	174.2	171.7	267.1	378.3	※ 78.20	185.9	280.6
V1-05	※ 2.650	36.52	24.09	114.3	88.16	86.14	※ 0.039	45.28
V1-10	※ 0.012	74.83	3.327	13.51	55.21	20.97	39.50	52.94
V2-05	3.751	11.53	12.37	3.520	1.817	24.31	23.49	27.70
V2-10	2.017	22.85	9.078	1.264	6.560	23.20	21.04	17.05
V1/V2 は点 11/13 測点 の鉛直分布 (5m, 10m)	※ 検体不良				※ 袋破損の ため欠測	※ ビンホー ルのため 資料不良	※ 検体不良	

◎ SF₆ 相 対 濃 度 表
(単位噴霧強度当りの測点濃度)

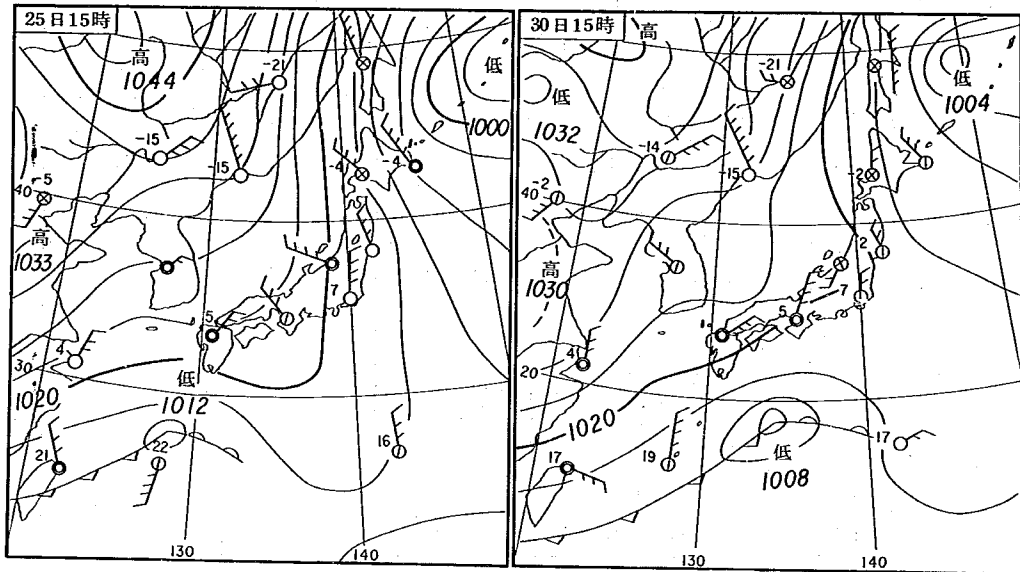
単位: 10⁻⁶ (s/m³)

RUN 測点 №	1	2	3	4	5	6	7	8
1	75.5	59.5	76.6	116.5	24.0	63.2	46.0	45.8
2	403.4	163.6	430.1	690.3	391.4	360.0	221.9	295.1
3	27.5	376.3	93.3	12.1	156.2	120.2	欠	83.1
4	0.2	2.2	15.7	5.7	0.2	26.2	2.6	4.8
5	18.5	3.8	19.9	3.6	8.1	30.6	1.9	3.7
6	7.4	4.8	37.5	21.1	6.1	48.9	7.2	8.2
7	65.2	82.9	80.3	176.0	58.9	76.9	47.5	48.4
8	77.3	441.3	846.6	675.7	806.3	510.8	597.1	515.2
9	10.2	463.8	142.8	28.5	174.4	3.0	51.0	42.7
10	8.9	152.2	1.1	2.2	26.6	214.2	42.1	41.5
11	1506.6	1573.9	1515.1	2477.0	843.9	2071.9	540.1	1293.7
12	673.9	1657.4	1272.8	633.2	1449.7	1133.0	1592.9	1474.3
13	140.1	685.5	408.5	152.4	463.6	676.0	531.5	282.8
14	20.9	115.7	24.0	18.9	62.0	262.2	56.6	55.1
15	155.5	128.6	352.4	5.8	373.0	488.6	150.7	241.6
16	196.8	666.8	500.7	315.8	449.3	欠	656.0	520.5
17	82.6	341.9	192.4	88.4	275.5	287.7	242.7	255.3
18	74.1	53.0	17.3	5.7	19.3	88.6	20.7	16.5
19	2.5	0.3	18.9	12.4	5.4	6.6	3.1	2.1
20	1.9	0.5	10.0	4.6	※	48.0	6.9	5.9
21	4.5	0.9	27.2	5.4	15.0	10.2	4.7	2.3
22	0.8	0.4	9.6	1.5	0.2	欠	4.8	2.6
23	2.1	0.4	5.8	0.6	0.3	2.4	13.8	4.5
24	0.09	0.1	9.2	0.06	0.5	3.5	4.9	10.9
25	0.2	0.5	68.3	96.9	26.7	3.7	4.6	24.5
26	0.06	0.2	12.3	0.1	0.1	6.0	4.7	4.8
27	3.7	7.6	4.3	1.6	9.8	6.1	18.9	22.9
28	22.1	39.7	59.7	117.0	35.4	4.8	49.6	37.5
29	0.1	46.8	46.6	130.0	32.5	5.8	35.4	46.9
30	5414.8	3222.9	3166.7	4915.3	7023.8	※	2825.7	3992.4
V1-05	※	675.7	444.3	2103.4	1636.8	1638.9	632.8	※
V1-10	※	1384.4	61.4	248.6	1025.1	399.0	739.8	600.4
V2-05	56.7	213.3	228.1	64.8	23.7	462.5	387.1	357.0
V2-10	30.5	422.8	167.4	23.3	121.8	441.4	238.3	319.8

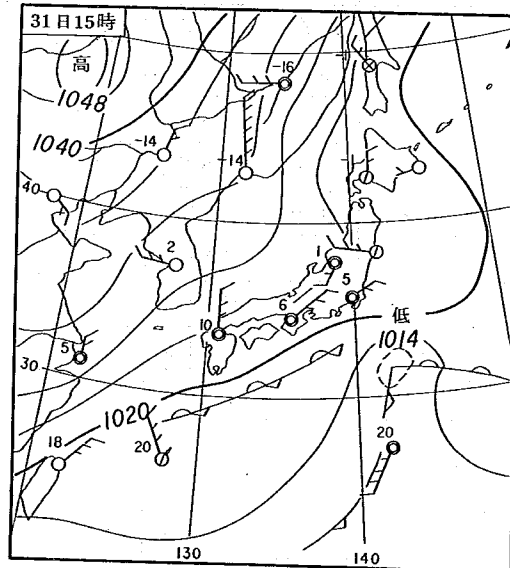
◎ 調査期間の天気図

昭和49年1月29日15時

昭和49年1月30日15時



昭和49年1月31日15時



◎ 坑外風向風速觀測表

時刻	換氣所屋上 (A)				中央分離帶 (B)			
	1/30		1/31		1/30		1/31	
	平均風向 (16方位)	平均風速 (m/s)	平均風向 (16方位)	平均風速 (m/s)	平均風向 (16方位)	平均風速 (m/s)	平均風向 (16方位)	平均風速 (m/s)
0	CALM		CALM				(CALM)	時計故障
1	CALM		CALM					(A)点より推定
2	CALM		CALM					
3	CALM		CALM					
4	CALM		CALM					
5	CALM		NW	1.0				
6	CALM		WNW	0.5				
7	CALM		CALM					
8	CALM		CALM		CALM			
9	CALM		CALM		CALM		CALM	
10	E	1.0	CALM		ESE	0.5	W	0.5
11	ESE	2.5	E	3.0	SE	2.0	SE	3.0
12	ESE	3.0	ESE	2.5	SE	3.5	SE	2.0
13	ESE	3.0	SE	0.5	SE	3.5	SE	0.5
14	ESE	3.0	ESE	2.5	SE	4.0	SSE	3.0
15	ESE	2.0	ESE	2.5	SE	2.5	SSE	3.5
16	CALM		E	1.5	CALM			
17	CALM				CALM			
18	CALM				CALM			
19	CALM				CALM			
20	CALM				CALM			
21	CALM				CALM			
22	CALM				CALM			
23	CALM				CALM			

◎ 乾湿球温度観測表

年月日 時刻	トンネル出口			分離帯			備考
	乾球 (℃)	湿球 (℃)	相対湿度 (%)	乾球 (℃)	湿球 (℃)	相対湿度 (%)	
4 9.1.3 0							
8:00	5.1	1.6	52	2.3	-4.3	60	湿球はすべて不凍結
9:00	4.9	1.1	48	0.1	-3.3	44	
10:00	5.7	1.5	45	1.2	-3.0	31	
10:30	5.2	0.6	39	2.2	-2.4	28	
11:00	5.4	0.3	34	2.3	-2.2	30	
11:30	5.4	0.6	37	4.6	-0.9	24	
12:00	5.9	0.4	30	4.7	-0.9	23	
13:00	6.5	0.9	31	5.2	-0.4	25	
13:30	7.1	3.2	40	5.4	0.1	31	
14:00	7.7	1.9	32	5.5	0.2	31	
14:30	7.5	2.0	35	5.2	0.2	31	
15:00	7.6	2.1	35	4.8	-0.3	30	
16:00	7.4	1.9	35	2.4	-1.4	42	
4 9.1.3 1							
9:00	5.2	1.3	48	0.8	-2.1	51	湿球はすべて不凍結
10:00	5.6	1.7	48	2.2	-1.5	43	
11:00	6.3	2.1	45	1.8	-1.4	48	
12:00	5.2	1.3	48	1.4	-1.9	46	
13:00	5.9	1.2	39	2.6	-1.0	45	
14:00	7.0	2.1	39	2.6	-1.1	43	
14:30	6.1	1.8	45	2.9	-0.5	48	
15:00	6.0	1.6	43	3.1	-0.3	48	
15:30	6.9	2.2	51	2.8	-0.9	44	

◎ 調査トンネルの交通量

(単位：台/時)

時刻 月日	1/30 (水)	1/31 (木)	備 考
0	8 4	1 0 2	大型車混入率 6 0 % (推定)
1	7 0	7 4	
2	6 5	5 3	
3	9 3	9 8	
4	1 3 5	1 2 2	
5	1 3 0	1 5 2	
6	1 4 6	1 6 1	
7	3 0 7	2 8 1	(昼間) 大型車混入率 3 0 ~ 3 5 % (推定)
8	2 4 7	2 6 7	
9	2 3 5	2 4 7	
1 0	3 7 3	3 6 2	
1 1	3 4 2	3 4 3	
1 2	3 6 2	3 2 2	
1 3	4 0 9	3 3 7	
1 4	4 1 2	4 1 7	
1 5	5 0 3	4 5 5	
1 6	5 2 2	4 0 6	
1 7	4 9 6	4 0 7	
1 8	3 3 6	3 3 5	大型車混入率 3 0 ~ 5 0 % (推定)
1 9	3 1 0	2 8 3	
2 0	2 2 3	1 8 8	
2 1	1 9 0	1 3 8	
2 2	1 3 4	1 3 7	
2 3	9 9	1 0 7	

道路トンネル坑口付近に
おける排気ガス拡散実験
調査報告

土木研究所資料第 919 号
昭和 49 年 10 月

キーワード

今田 徹 水谷敏則

道路トンネル, 大気汚染, 大気拡散, トレーサー

要 旨

本報告は、道路トンネル内の汚染空気が坑口から排気される場合
について、坑口周辺における排気ガスの拡散状況を把握するため
に実施した現地トレーサー実験の結果を紹介するものである。



郵便はがき

十円切手
をはって
下さい

2 8 0 - □ □

千葉県千葉市穴川

四丁目十二番五二号

建設省土木研究所

トンネル研究室 御中

No. 002

No. 002

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 919 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印