



093

土 木 研 究 所 資 料

第990号

道路トンネルの空気浄化技術に関する研究報告

昭和50年3月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

ま え が き

この報告書は、土木研究所重点研究として昭和47年度から49年度の3カ年にわたり実施された「トンネルの空気浄化技術の開発に関する研究」により得られた成果を中心としてとりまとめたものである。

道路トンネルでは通行車両の排出する排気ガスの処理がトンネル設計上の重要な位置を占めており、この問題の解決のために各種の調査研究が進められてきている。本研究では、トンネルからの排出ガスによる大気汚染の防止対策として、また、トンネルの長大化に伴う新しい換気方法として、トンネル汚染空気をトンネル内で浄化する方法に注目し、トンネルの空気を浄化する技術の開発に関する問題にとりくんできた。

汚染空気を浄化する方法は、従来トンネル換気で考えられてきた希釈するという概念と性質を全く異にするものであって、これまでほとんど検討が行なわれたことがなく、本研究によって新しい分野を開くことができたものとする。特に、煤煙等の粉じんについては、その性状を明らかにするとともに、効率のよい集じんを行なえる見通しが得られた。この結果をもとに、既にメーカーの手により実用機の開発にも着手されている段階にある。

なお、本研究は49年度でとりあえず終了するが、集じん機の細部構造ならびに設計仕様の検討、ガス状有害成分(CO、NO_x、等)に対する浄化技術の開発、総合的なトンネル空気浄化システムの検討などこれから解決しなければならない問題も多く、これらに関しては別の機会を得て研究を継続実施する所存である。

本研究の成果が、今後この種の技術の発展のいしずえとなり、またトンネル周辺環境対策あるいは新しい換気方式の策定にあたっての参考となれば幸いである。

千葉支所長

市原 薫

トンネル研究室 室長

今田 徹

研究室 水谷 敏 則

目 次

ま え が き	
1. 研 究 目 的	1
2. 研 究 経 過	2
3. トンネル内空気の汚染状況	4
3 . 1 有害成分の種類	4
3 . 2 有害成分の濃度	4
3 . 3 排気ガスの風量	7
4. 空気浄化技術の現状	9
5. トンネル用集じん機の開発	12
5 . 1 トンネル内浮遊粉じんの実態	12
5 . 2 トンネル空気の集じん方法の検討	15
5 . 3 トンネル用電気集じん機の開発	17
6. トンネル内汚染空気の坑口からの拡散	19
7. ま と め	23
あ と が き	24
参 考 文 献	24

1. 研究目的

都市部への人口集中による過密化と自動車交通の著しい増加はいろいろな面で問題を起しているが、環境問題はこの問題に対する住民の意識の向上を背景として、道路の建設、維持管理のあらゆる面で、最も重大な問題となっている。トンネルは環境の保全という点では最も有効な道路構造であるが、自動車の排気ガスは坑口あるいは排気塔からまとめて排出されることになるため、限られた特定の地域に自動車排気ガスの影響が集中し、問題を起す原因となることがある。

自動車排気ガスの影響としては、人の居住環境に与える影響と植物に与える影響とが主に考えられるが、トンネルからの汚染空気もこの2つの面から問題となっている。どちらの面が強くあらわれるかはトンネルの立地する条件、交通の性質によって異なる。いずれの場合も、影響する範囲は局部的なものであるが、交通量が多く、かつ、住家、畑等が坑口に近接していることが問題の直接的な原因となる。したがって道路トンネルの坑口、排気塔の位置の選定にあたっては、現在および将来にわたって排気ガスの影響を受ける恐れのある物件のないような位置を選定するよう配慮することが第一であるが、現実にはこのような位置を求めることはむずかしく、特に都市トンネルを建設する場合は極めて困難である。

坑口の適地を求めることが困難な場合は、排気ガスの影響が坑口付近に直接およびないよう対策が必要となってくる。この対策としては、適当な方法で汚染空気を拡散希釈し、着地濃度が環境基準等で定められた許容濃度以下にする方法および適当な方法で有害成分を除去し、排出されるガスを許容濃度以下とする方法が基本的に考えられる。いずれの方法によるべきかは個々のトンネルの条件により技術の現状、経済性等を含めた広い視野で判断されるべきであるが、有害成分を除去する方法は環境保全という面からは積極的なものであり、工学的に可能であるならばより望ましい方法であるといえる。

また、トンネル内で有害成分を除去することができれば、この浄化装置をトンネル内の適所に配置することによってトンネル内空気の再利用が可能となり、トンネルの長大化ならびに地下利用の推進にも大いに貢献できる。

これらの視点から、トンネル内空気を浄化する技術の開発は、環境の保全と道路建設の促進の両面の意義を有するものであると考えられ、道路トンネル用の空気浄化技術の開発を目的として研究に着手することとした。

2. 研究 経 過

トンネル空気の浄化技術の開発に関する研究の着手に先立って現時点での問題点の所在を明らかにするため、昭和46年度には、所内に伊吹山所長を委員長とし、関連の各研究室の担当者により構成される、「トンネル空気浄化技術研究会」を発足させ、トンネル空気の汚染状況ならびに空気浄化技術の現状について確認し、検討を加えた。^{注)} その結果、現時点ならびに将来ともに最も問題が多い煤煙等の浮じんに対する浄化技術の開発を最優先して行なう必要があるとの判断が得られた。

本研究の初年度である昭和47年度には、上記の判断に基づき、トンネル内空気に含まれる浮遊粉じんの実態を調査するとともに、静電集じん機による室内の基礎実験を実施した。その結果、トンネル内浮遊粉じんに対しては浄化技術の開発の明るい見通しが得られ、昭和48年度には、建設技術研究補助金の交付のもとにメーカーによる実験機の試作が行なわれることになった。そして、その後も引続き実用機開発のための検討が進められており、現在に至っている。

一方、実用的な浄化技術の開発が現時点では非常に困難であるとされている一酸化炭素などのガス状有害成分に対しては、当分の間は、大気による拡散によらざるを得ないと考えられた。また、集じん機の仕様の決定に際しても、その排出濃度を影響のない範囲内に定めることが必要である。このため、トンネルから排出される有害成分の影響範囲を把握する目的で、昭和48

注) トンネル空気浄化技術研究会の構成員

委 員 長	市 原 薫	千葉支所長
委員 兼 幹 事	今 西 誠 也	地 質 官
"	蒔 田 実	化学研究室長
"	金 安 公 造	交通環境研究室長
"	今 田 徹	トンネル研究室長
"	水 谷 敏 則	トンネル研究室
前 委 員 長	伊吹山 四 郎	前 所 長
前 委員 兼 幹 事	柏 谷 衛	前水質研究室長
"	立 石 俊 一	前トンネル研究室長
"	田 中 康 之	前機械研究室長
"	益 子 真 之	前トンネル研究室
"	後 藤 勇	前機械研究室
"	池 尻 勝 志	前交通環境研究室

年度からは、トンネル坑口周辺で排気ガスの拡散に関する実態調査を実施してきた。

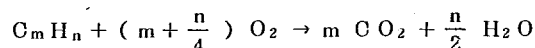
以下に、本研究の検討の経過および成果、ならびに、トンネル空気浄化技術の開発の現状を紹介する。

3. トンネル内空気の汚染状況

空気浄化技術の開発の前提条件として、処理の対象となる道路トンネル内空気に含まれる有害成分の種類、濃度および処理風量について現状を把握しておくことが必要であり検討を加えた。

3.1 有害成分の種類

トンネル内空気を汚染する原因は主として通行車両の内燃機関の排気ガスによるものである。自動車の燃料として使用するガソリン、軽油、LPGはいずれも炭化水素であり、燃焼後は下記の化学式に示されるように本質的には二酸化炭素(CO_2)と水蒸気(H_2O)となる。



しかし、実際には、燃料中の不純物や不完全燃焼等により、これら以外に下記の有害成分が排出される。

(1) 不完全燃焼によるもの

一酸化炭素(CO)、煤煙(C)、炭化水素(HC)、等

(2) 燃料中の不純物によるもの

イオウ酸化物(SO_2)、鉛化合物、等

(3) その他

窒素酸化物(NO 、 NO_2)、等

3.2 有害成分の濃度

道路トンネルでは、前述した自動車から排出される有害成分をある一定限度以下の濃度に保つよう換気が行なわれる。トンネルで目標とする許容濃度は、一般にトンネル内での滞在時間が限られているため、環境基準値よりも高くなっている。表-3.1は環境基準に示されている値であり、表-3.2は道路トンネル技術基準に示されている換気設備設計の際の有害成分濃度の設計目標値である。表-3.2には一酸化炭素と煤煙に対する値のみがあげられているが、これは一酸化炭素と煤煙を換気設計の対象とすれば、窒素酸化物等他の有害成分は十分安全な濃度に保つことができるためである。なかでも、わが国では、ディーゼル車の混入率が高いため、一酸化炭素に対する換気量よりも煤煙に対して必要とする換気量で決まる場合が多いのが現状である。煤煙の濃度は100mあたりの光の透過率という形で与えられており、環境基準で用いられている重

表-3.1 環境基準（昭和48年5月8日、環境庁告示第25号）

物 質	一酸化炭素	浮遊粒子状物質	二酸化窒素	光化学オキシダント
環境上の条件	1時間値の1日平均値が10ppm以下であり、かつ、1時間値の8時間平均値が20ppm以下であること。	1時間値の1日平均値が0.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であり、かつ、1時間値が0.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であること。	1時間値の1日平均値が0.02ppm以下であること。	1時間値が0.06ppm以下であること。
測定方法	非分散型赤外分析計を用いる方法	濾過捕集による重量濃度測定方法またはこの方法によって測定された重量濃度と直線的な関係を有する量がえられる光散乱法	ザルツマン試薬を用いる吸光光度法	中性ヨウ化カリウム溶液を用いる吸光光度法または電量法
備 考 1. 浮遊粒子状物質とは、大気中に浮遊する粒子状物質であって、その粒径が10ミクロン以下のものをいう。 2. 光化学オキシダントとは、オゾン、パーオキシアセチルナイトレートその他の光化学反応により生成される酸化性物質（中性ヨウ化カリウム溶液からヨウ素を遊離するもの）に限り、二酸化窒素を除く。）をいう。				

量濃度で示されていないが、これはトンネルでは煤煙の影響が視距障害という形で現われるため、視距との関係を付けるのに都合の良い単位を用いているためである。透過率と重量濃度との相関はトンネルの状況によって異なることがわかってきてい

るが、一般の国道のトンネルでは、後述する「5.1 トンネル内浮遊粉じんの実態」の図-5.2に示すように透過率が50%で2~3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度の値である。したがって、トンネルの中の空気は環境基準にくらべると、一酸化炭素の場合で10倍、煤煙（浮遊粉じん）の場合で20~30倍程度汚れていることにはなるが、従来、工場のプラントなどで空気浄化の対象とされていた排気ガスの濃度に比べれば、著しく低濃度であり、トンネル空気浄化技術の開発上大きい困難を伴う要因である。

表-3.2 トンネル内有害成分濃度の設計目標値
（昭和49年11月29日、建設省都市局長道路局長通達）

道路の種類別	一酸化炭素	煤 煙 (100m透過率)
第1種、第2種	100ppm	50%/100m
第3種、第4種	"	40%/100m

表 - 3.3 自動車排気ガス規制値

項 目	主 な 経 過	運輸技術審議会(1970.7) 「自動車排気ガス低下対策 基本計画」による低下目標 値*		中央公害対策審議会(1972. 8.18)「自動車排出ガス許 容限度長期設定方策につ いて(中間報告)」		現 行 (48年度規制値) 1972.12	50 年 規 制 値 1974.1 1974.5 51 年 規 制 値 1975.2	1970年大 気浄法改 正法 (マスキー法)
		1973	1975	1975	1976			
一酸化炭素 (CO)	1969.9 最高濃度規 制2.5%以下(平均濃度 1.9%=1.4g/Km以下) 1970.8アイドリング 濃度規制 中古車 5.5%以下 新車 4.5%以下	重量規制へ移行 (4月) 11g/Km以下 (=1.4% 以下)	重量規制強化 (4月) 7g/Km以下 (=0.9%以下)	1975.4以降の 生産車の排 出量の平均値 2.1g/Km 以下		乗用車類 26g/Km以下 重量トラック類 1.6%以下	乗用車 2.7g/Km以下 軽量トラック、軽量バス 1.7g/Km以下 ディーゼル 980ppm	213g/Km 以下
炭化水素 (HC)	1970.9ブローバイ還 元装置取付規制	蒸発量規制 (4月) 6g/日以下 排出ガス規制 1.7g/Km以下	排出ガス規制 強化 0.3g/Km	0.25g/Km 以下		乗用車類 3.8g/Km以下 重量トラック類 520ppm以下	乗用車 0.39g/Km以下 軽量トラック、軽量バス 4サイクル 2.7g/Km以下 2サイクル 1.5g/Km以下 ディーゼル 670ppm	0.26g/Km 以下
窒素酸化物 (NOx)		排出ガス規制 3g/Km以下	排出ガス規制 強化 0.6g/Km以下	1.2g/Km以下	1976.4以降 の生産車の排 出量の平均値 が 0.25g/Km 以下	乗用車類 3.0g/Km以下 重量トラック類 1.1%以下	乗用車 4サイクル 0.84g/Km以下 2サイクル 0.5g/Km以下 軽量トラック、軽量バス 4サイクル 2.3g/Km以下 2サイクル 0.5g/Km以下 ディーゼル 590ppm	1.9g/Km以下 -1975 0.25g/Km -1976
煤 煙	1972.7.1 反射光式測 定装置による値で50 %以下(新車)	測定方法の開 発 実用化				50%	ディーゼル 50%以下	
鉛(Pb)	1970.7 レギュラー 1.1cc/ガロン以下 ハイオク 1.1cc/ガロン以下 1971年度中無鉛ガソ リン使用エンジンの生 産		排気ガスの微 粒子 0.6g/Km 以下					

注) *1600ccガソリンエンジンを対象とした平均排出量

自動車排出する有害成分の将来の動向を予測するものとして、現在規制が進められている自動車排気ガス規制に示されている値を参考とすることができる。

すなわち、自動車排気ガス規制は表-3.3に示すような段階で進められてきているが、この表からわかるように一酸化炭素、炭化水素、窒素酸化物については規制前（現行）とくらべると大幅な減少が期待されるのに対し、煤煙は反射光式測定装置で50%以下という規制はあるものの将来の規制の方向が明らかにされていない現状である。煤煙に対して反射光式測定装置で50%という値は現行値であり、これが使用過程車に適用（50年1月）されるようになったものの大幅な煤煙発生量の低下を期待できないと見なさなければならない。したがって、煤煙に対しては将来についても現在程度の換気量を必要とする一方、一酸化炭素等の濃度は減少し、煤煙の問題が相対的により重要になってくるものと予想される。

3.3 排気ガスの風量

トンネル排気ガスの風量、すなわち、空気浄化装置の必要処理風量は、トンネルの延長、勾配、交通量、車種構成等から決まるトンネルの所要換気量、および、汚染空氣の捕集方式によって異なる。処理風量を換気量と等しいと仮定できる場合には、次式により概算できる。⁷⁾

$$Q = q \cdot N \cdot L$$

ここに、 Q : 必要処理風量 (= 所要換気量 : m^3/sec)

q : 換気量係数 (図-3.1による)

N : 交通量 (台/時)

L : 浄化処理受持区間長 (km)

一般の2車線のトンネルにおける換気量は、設計交通容量時で、 $100 \sim 400 m^3/sec/km$ 程度の値である。

しかし、トンネルの交通量は常に変動し、それに伴って有害成分の発生量も変化するが、効率的な換気を行なうため風量を変化させるのが一般的であり、通常30~100%程度の範囲で風量に変化する。また、交通量の変動に応じて風量を変化させ、濃度をある程度一定にするようになっているが、自動車個々の発生量に大きな変動があるため、短い時間の間でも濃度変動が相当にある。このため、浄化装置の開発にあたっては、これらの変動に対しても十分に対応できるものとしなければならない。

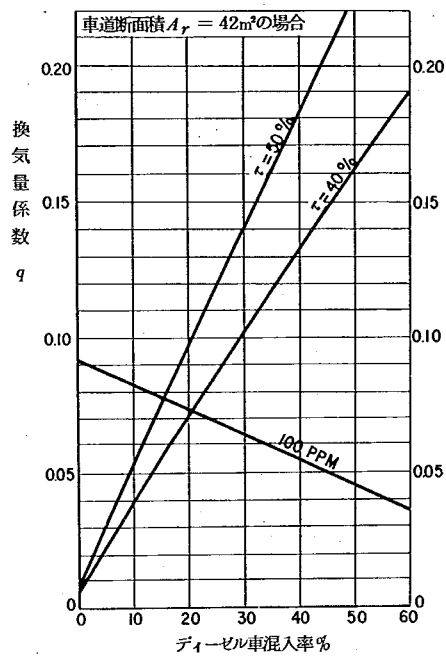


図 - 3.1 換気量係数⁷⁾

4. 空気浄化技術の現状

トンネルの空気浄化の特徴は、前章「3. トンネル内空気の汚染状況」で述べたように、処理すべき空気が大風量で低濃度であることと、有害成分の種類が多いことであり、これらの点を考慮した検討が必要である。

各種の有害成分に対する空気浄化技術の現状を調査した結果を表-4.1~2に示す。表-4.1はガス状有害成分の除去方法およびその特徴と問題点を示したものであり、表-4.2は煤煙等の浮遊粉じんに対する集じん機の種類を示したものである。

トンネル内空気の汚れの主要成分は、「3.2 有害成分の濃度」の表-3.2に示したように一酸化炭素および煤煙であるので、浄化の対象物質としてはまず一酸化炭素および煤煙を考える必要がある。

一酸化炭素の浄化の手法には触媒を用いた酸化が考えられるが、現在ではまだ有効で廉価な触媒が開発されていないこと、処理効率をあげるためには加熱のための2次燃料、空気の供給が必要であること。数十ppm、数百 m^3/s というような濃度、風量を処理しなければならないことを合わせ考えると、現在の技術では実用化が不可能であると考えざるを得ない。自動車の排気ガス中に含まれる一酸化炭素は数%の濃度であり、その処理量も極めて少ないが、その除去装置の開発には種々の問題があることからこのことは理解できよう。極めて残念ではあるが現段階では一酸化炭素の浄化はあきらめざるを得ない。

一方、煤煙の除去に関しては、各種の集じん装置が開発されており、浄化すべき対象が低濃度、大風量であるという点から、既存の処理技術の適用範囲外にあるものの、既存の技術を適用発展させることによって、トンネル空気の除じんが可能であると考えられる。このような見通しのもとに、研究を進めた結果、次章に述べるようにトンネルの集じん装置の開発に明るい見通しが得られた段階に達している。

ディーゼル車混入率の多いわが国においては、トンネルの換気量は、「3.2 有害成分の濃度」で述べたように、煤煙に対して必要とする換気量で決まる場合が多く、煤煙の除去が可能になれば問題の解決に大きく前進したことになる。しかし、ここで一酸化炭素およびその他のガス状有害成分の除去ができないまま煤煙だけを除去しても根本的な問題の解決にならないのではないかという疑問が出てくる。これについては現在進められている排気ガス規制の影響を考え合わせれば、将来において一酸化炭素等の有害成分の量は減少するのに対して、煤煙の量はほとんど減少せず、このため煤煙に対して現在と同じ設計法で計算された換気量で換気を行えば、排出される空気中に含まれる一酸化炭素等は許容できる程度に低くなるであろうこ

とが予想される。したがって、現在および近い将来ともに煤煙に対する対策が最も重要な課題として、最優先されるべき問題であると思われる。

表-4.1 有害ガス除去方法および特徴

有害ガス	除去方法	特徴と問題点
一酸化炭素 CO	△ 触媒酸化 $CO + O_2 \rightarrow CO_2$ (触媒により酸化温度を下げ)	◦ 加熱のための2次燃料、空気が必要である。 ◦ 低廉な触媒の開発研究の段階にある。 ◦ 触媒として2種類のものが考えられる。 i) 貴金属(白金)…耐久的ではあるが資源的、コスト的に不明確。 ii) 非貴金属(鉄、マンガン、銅、ニッケル)…自動車用として開発段階、一般に高温で劣化。
窒素酸化物 NO _x	△ 気相反応+アンモニアガス処理 $NO_2 + NH_3 \rightarrow NH_4NO_3 + H_2 \uparrow + H_2O$ $NO + NO_2 + NH_3 \rightarrow NH_4NO_2 + H_2O$	◦ NOのNO₂への転化法に問題点が残されている。左記の方法でもNOの転化は完全ではない。 ◦ NH₃ガス、H₂のガスの扱いが問題。
	△ 触媒酸化+アルカリ洗浄 $NO + O_2 \rightarrow NO_2$ $NO_2 + \text{アルカリ} \rightarrow \text{アルカリ塩}$	◦ NOのNO₂への酸化触媒については、研究開発されているようだが、未だ実用の段階にない。
	△ 活性炭あるいは石灰類による吸着	◦ 低温時のガス除去に有効と考えられる。 ◦ 脱着方法に問題がある。 ◦ 活性炭が高価である。
亜硫酸 SO ₂	○ アルカリ金属による吸収 $Na_2O + SO_2 \rightarrow$	◦ 吸収剤が高価であるため、損失が大きいと経済的に不利。
	○ 酸化マンガンによる吸収 $MnO_x \cdot nH_2O + SO_2 + O_2 \rightarrow$	◦ 圧力損失が10~20mm H₂Oと少ない。 ◦ 吸収温度 100~150℃。
	△ 活性炭による吸着 $SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ (水蒸気) 活性炭に吸着	◦ 脱着方法に問題がある。 ◦ 圧力損失が比較的大きい。 ◦ 性能の良い活性炭をいかに安く製造するかがこの方法の経済性を支配する。
	○ 触媒酸化+吸収 $SO_2 + O_2 \rightarrow SO_3 \rightarrow H_2SO_4$ 五酸化バナジウム 硫酸カリウム触媒	◦ 各種の方式があり、既成の触媒と技術の利用は可能。
	○ アルカリ溶液またはスラリーによる吸収 (例) $SO_2 + NaOH \rightarrow Na_2SO_3$	◦ 苛性ソーダ(NaOH)のほか、亜硫酸ソーダ(Na₂SO₃)、消石灰(Ca(OH)₂)、石灰石粉末(CaCO₃)、酸化マグネシウム(MgO)なども吸収剤として用いられる。
炭化水素 HC HCHO	△ 活性炭による吸着	◦ 低温時のガス除去に有効と考えられる。 ◦ 脱着方法に問題がある。 ◦ 活性炭が高価である。

注) ○ ある種処理技術として実用化されているか、あるいは、実用化の見通しのかなりあると思われるもの。
 △ 技術的には可能であるが、実用化の点で不明であるもの

表 - 4.2 集じん機の種類と特徴

分 類	適用原理	実用上の補集可能粒径	ガス速度	圧力損失	特 徴	利 用 例
重力式	重力による自然沈降	数 10μ 程度	遅い程効率大	処理速度が小さいため 5~10mmaq程度	構造簡単 大きい空気室が必要	主として前処理装置として使用される
慣性式	じゃま板などによる気流の急激な方向転換および粒子の慣性力	10μ ~数 10μ	速い程効率大	10~数10mmaq	構造簡単 煙道内に取付可能	衝突式 反転式
遠心力式	気流の旋回運動に伴う粒子の遠心力	数 μ 程度	7~15m/sec	100mmaq程度以下	構造簡単 大量処理可能	サイクロン マルチサイクロン
洗浄式	液面液滴あるいは液膜と衝突または接触させ捕捉する	0.1 μ ~数 μ	60~80m/sec	数100mmaqに達することがある	効率が低い 大量の水が必要	ベンチュリースクラバー サイクロンスクラバー
篩過式	篩材を通して篩過分離する	1 μ 程度	0.3~10cm/sec	150mmaq程度	利用範囲が広い	バッグフィルター
音波式	音波による粒子の凝集力と遠心力	1 μ 程度			騒音が高い 経済性が悪い	
電気式	粒子を高電圧で荷電させることによる静電沈降	0.01 μ 程度	1~2m/sec (乾) 3~4m/sec (湿)	10~20mmaq程度	効率が高い 微粒子の捕集も可能 施設規模が大きい	コットレル

5. トンネル用集じん機の開発

5.1 トンネル内浮遊粉じんの実態

処理すべきトンネルの空気に含まれる煤煙等の浮遊粉じんの濃度、組成、粒径分布を明確にするため、一般国道のトンネル、3カ所において実態調査を実施した。(図-5.1)

その結果、従来、トンネル換気制御に用いられていた濃度単位(100m区間の光の透過率)と重量濃度の間に図-5.2の関係が得られた。そして、

- (1) 図-5.3および写真-5.1に示すように、トンネル内浮遊粉じんの粒径は非常に小さく0.2 μ 以下の粒子も多く含まれている。
- (2) 表-5.1に示すように、3トンネルを平均した浮遊粉じんの重量組成は、砂じんが主成分で含有率が約1/2、次いでカーボン(煤煙)が約1/3、残りがタール分やイオウ分である。
- (3) トンネル内浮遊粉じんの粒径分布のうち、粒径の大きい部分は砂じんが主であり、カーボンは粒径が小さい部分に多い。したがって、視距等の問題からみればカーボンの影響が大部分と考えられる。

ことが明らかとなった。³⁾

なお、その他のトンネルで観測された値を引用すれば、図-5.4に示すとおりであり、⁵⁾上記で得られた値とかなりの差異がある。これは、交通量、車種構成、路面の状況などのトンネルの性格の相違による原因、粉じんの測定に当たっての採取位置、方向、吸気速度などの計測手法の相違による原因などが影響したものと推定され、今後、これらの点をも配慮した調査を重ね、逐次データを修正していく必要があると考えている。

表-5.1 粉じんの定量分析結果³⁾

分析項目	分析法	粉じんの組成(%)	
		ハイボリュームサンプラに付着した試料	透過率計のフィルタに付着した試料
タール分	重量法	10.6	6.4
固型炭素分	電量測定法	37.0	16.0
無水硫酸(SO ₃)	吸光光度法	17.1	8.1
灰分	重量法	50.1	67.9

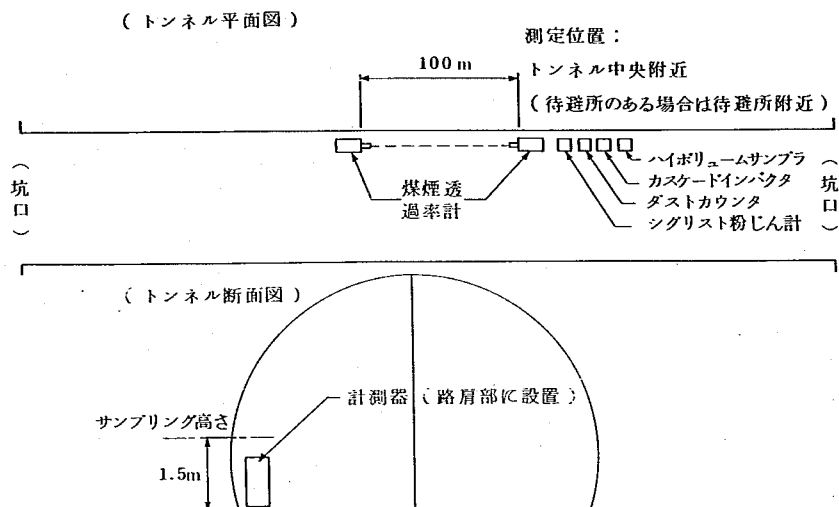


図-5.1 トンネル内浮遊粉じん実態調査概要図

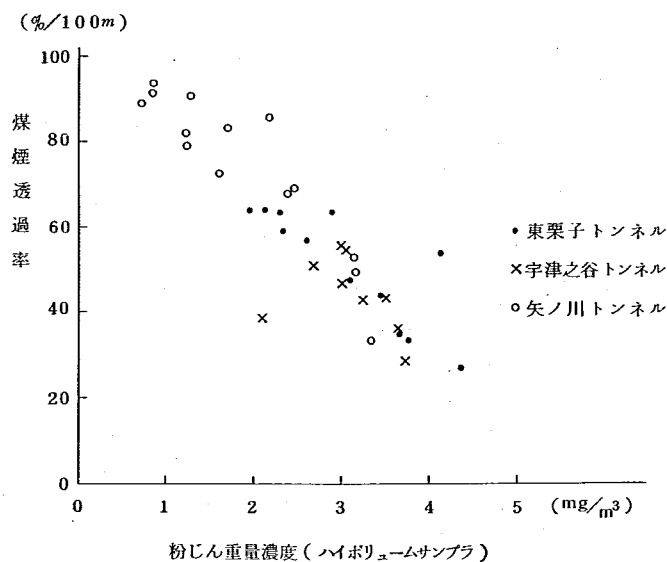


図-5.2 粉じん重量濃度と煤煙透過率との関係

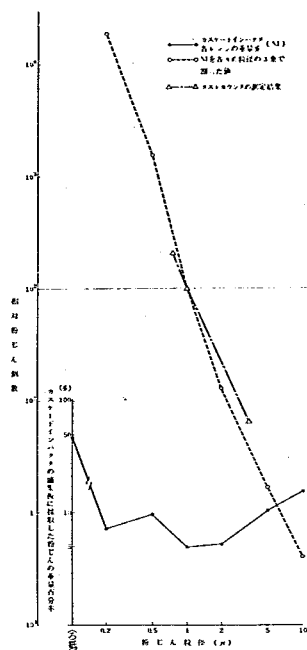


図-5.3 トンネル内空気の粉じんの粒径分布³⁾ (カスケードインパクトによる見かけの相対粉じん個数)

0 0.5 1.0 μm
×40000



写真-5.1 粉じんの電子顕微鏡写真³⁾
(ハイボリュームサンプラに付着した試料)

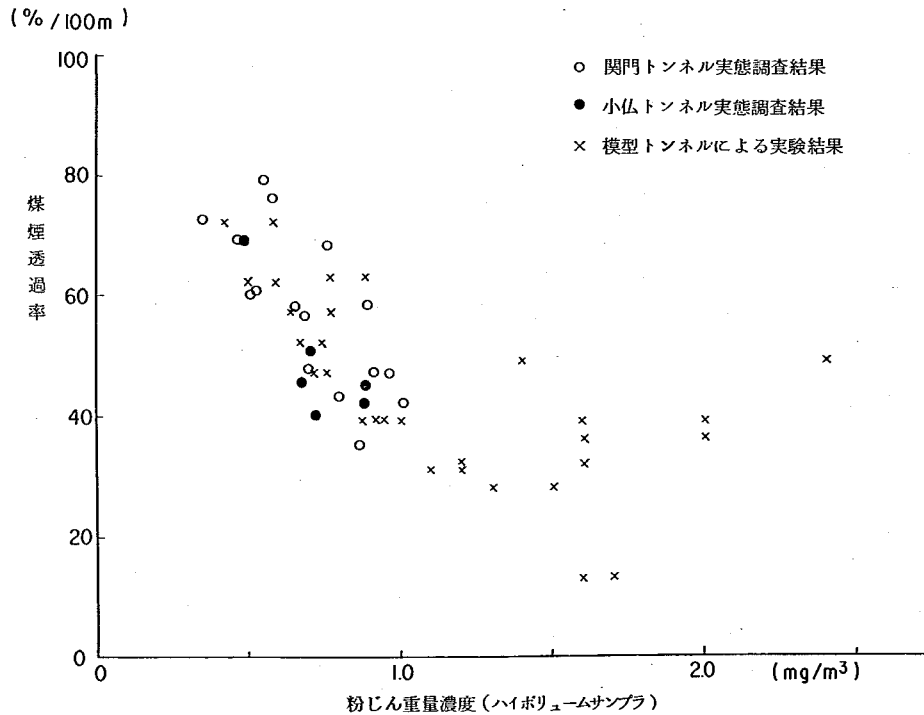


図-5.4 粉じん重量濃度と煤煙透過率の関係⁵⁾

5.2 トンネル空気集じん方法の検討

現在、他の分野で実用化されている集じんの方法には、「4. 空気浄化技術の現状」の表-4.2に示したように各種のものが開発されている。

一方、トンネルの空気に含まれる粉じんの粒径分布の測定結果は前節の図-5.3に示したようになっており、粒径 1μ 以下の粒子が個数ではほとんど大部分を占め、重量的にも70%以上を占めている。この結果と表-4.2とを比較すると、捕集可能粒径の最も小さい電気集じん方式が各種の集じん方式の中では最も適していることがわかる。また、処理風量の大きいトンネルの空気の浄化装置としては、圧力損失が少ないことも重要な必要条件であり、電気集じん方式はこの点でも適している。

以上のことから、電気集じん機が最も有望であると判断し、これがトンネル内空気の浮遊粉じんの主要な要素である煤煙にどの程度有効であるかを調べるため、既存の電気集じん機を用いて室内試験を行なった。(図-5.5、写真-5.2) 試験はディーゼルエンジンの排気ガスをトンネル内の濃度と同程度になるように希釈し、これを集じん機に送り捕集効率を調べる方法によった。その結果、

- (1) 図-5.6に示すように適切な処理風速を選定すれば低濃度においても90%程度以上の捕集効率を得ることができる。
- (2) 図-5.7に示すようにカスケードインパクトによる粒径分布測定の結果から粒径 $1\sim 0.3\mu$ 以下の微粒子も十分捕集している。

ことが明らかとなり、トンネル内空気の浮遊粉じんの除去に対して電気集じん機が有望であることが確められた。²⁾以下にトンネル用の電気集じん機の開発の現状ならびに問題点について述べる。

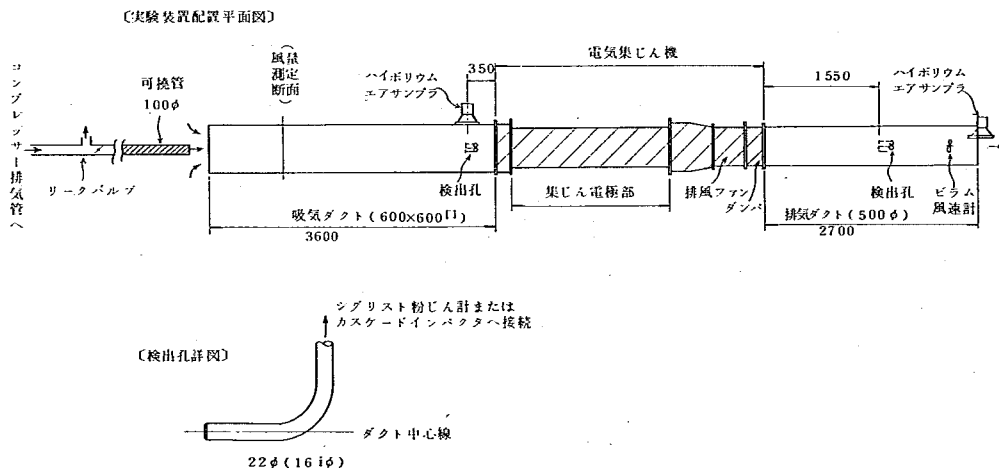
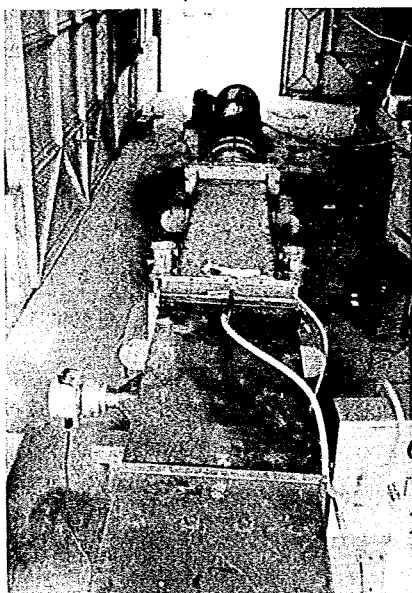
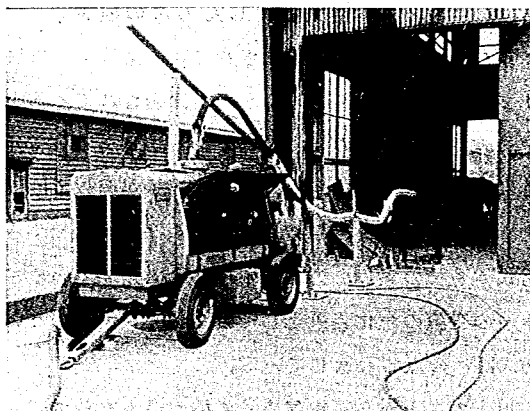


図-5.5 電気集じん機室内実験概要図



(1) 集じん装置



(2) 煤煙発生源

写真 - 5.2 電気集じん機室内実験

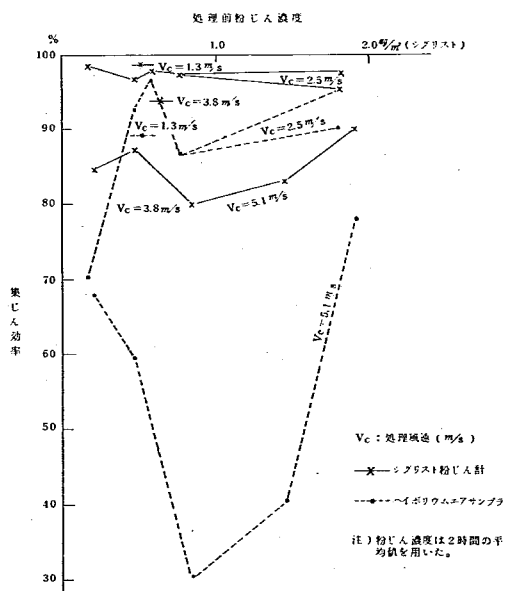


図 - 5.6 室内試験による煤煙の捕集効率²⁾

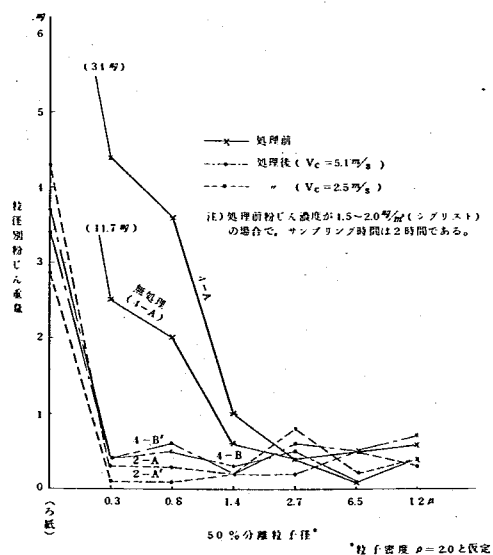


図 - 5.7 処理前後の粉じんの粒径分布²⁾

5.3 トンネル用電気集じん機の開発

トンネル空気の浄化施設としての電気集じん機の性能としては、

- (1) 処理風速が大きく取れるものであること
- (2) 処理空気の大幅な濃度変動に対応できること
- (3) 処理風量の大幅な変動に対応できること
- (4) 1μ 以下の微粒子の捕集効果の大きいものであること
- (5) 2次的公害物質が発生しないものであること
- (6) 捕集物質の2次的処理が容易なものであること
- (7) 設備スペースができるだけ小さいものであること
- (8) エネルギー消費の少ないものであること
- (9) 圧力損失の少ないものであること
- (10) 保守の容易なものであること

などがあげられる。

トンネル換気におけるダクト風速は通常 20 m/s 程度に設計され、ダクト断面積は $7\sim 20\text{ m}^2$ 程度のものが多い。既存の電気集じん機の処理風速は $2\sim 3\text{ m/s}$ 程度のものが多く(表-4.2)、この処理風速では集じん機の面積がダクト断面積の10倍程度となり、据付面積および設備が膨大なものになってしまう。設備として受け入れやすいものとするためには処理風速を少なくとも数 m/s 以上にする必要がある。

既存の集じん設備は風量、濃度ともあまり変動のない場合が多く、トンネルにおいて風量、濃度の変動が大きいことは集じん設備の設計において十分配慮しておく必要がある。

電気集じん機は高電圧を印加する関係から、処理空気が通過する間にその成分の一部が変化することが考えられる。たとえば、ある程度以上の電圧を加えるとオゾンが発生することが知られており、また、このオゾンがトンネル空気中に含まれる NO と反応し NO_2 に変化することなどが考えられる。トンネル空気浄化用の集じん装置としては、なんらかの変化により2次的な公害原因物質が生成されないよう十分な検討が要求される。

このように、トンネル空気浄化設備として電気集じん機を用いる場合は、種々の問題を解決しておくことが必要である。このため、昭和48年度建設技術研究補助金の要望課題として、「トンネル内の空気の集じん技術に関する研究」を提案し、トンネル用電気集じん機の開発を民間も含めて実施することになった。公募の結果、この研究は建設電気技術協会が実施することになり、メーカー2社の協力で実験機の試作改良、現地実験を含む集じん効果の確認および捕集物質の処理方法の検討が行われた。⁴⁾

この研究による実験結果の1例を図-5.8に示す。この図は国道1号線宇津之谷トンネルの換

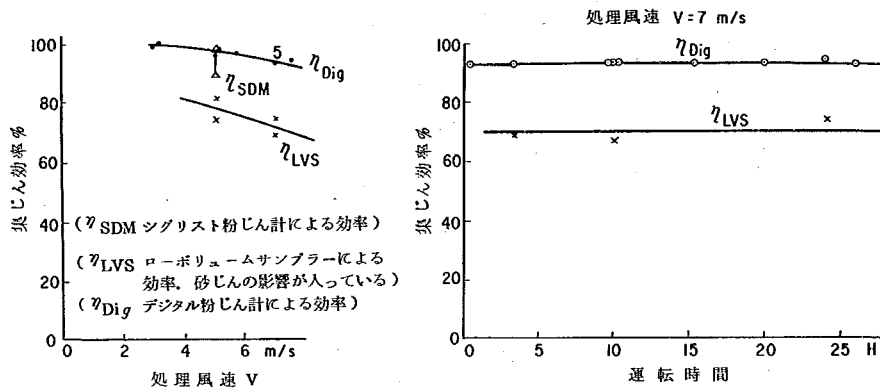


図-5.8 トンネル用に開発された電気集じん機の集じん効率の例⁴⁾

気立坑から排出される空気を試料として行なったものであるが、数 m/s の風速でも高い集じん効率を得られ、また、長時間運転に対する安定性もあることが確められ、集じん機のセルとしては、トンネル空気の浄化に十分使用できる見通しが得られた。

電気集じん機ではまず集じん効率を高めることが問題であるが、システムとして完成させるためには、集じん機の電極に付着した粉じんを除去する方法を完成させることが必要である。除去方法としては、空気吹付、機械的振動、機械的清掃(こすりとり)、水洗などが考えられるが、実験によると電極に付着した粉じんは、空気吹付あるいは簡単なノズルによる水洗を行なえばかなりきれいに洗浄でき、比較的除去が容易であることがわかった。

この他トンネル用電気集じん機の開発を通して明らかになったことを列挙すれば次のとおりである。

- 集じん部の圧力損失は数 $mm a q$ 程度であり、集じん機部を設けるためのダクト増による損失を除けば換気上問題とならない程度のものである。
- 付着粉じんを水洗処理する場合、処理水中には Fe, Mn, Pb, Zn などの金属が含まれることが認められ、処理水の排出については今後の検討が必要である。
- 集じん機の使用条件(電圧、電流の選定)によってはオゾンの発生する可能性があるが使用条件を制御することによって、一定限度以下におさえることが可能である。
- 集じん機がトンネルの排気ガス中に含まれる他の有害成分に与える影響(たとえば $NO \rightarrow NO_2$ 変化等)については、条件を制御することにより大きな影響を与えないようにすることができるものと推定され、宇津之谷トンネルの現地実験では、有意な $NO \rightarrow NO_2$ 変化は認められなかった。

6. トンネル内汚染空気の坑口からの拡散

前述したように煤煙等の粉じんに対しては浄化装置の見通しを得た。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実用的な浄化装置を開発することは現在の技術ではまだ困難な場合が多く、これらについては拡散による希釈効果を期待せざるを得ない。また、集じん機などの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。このためには、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、現状を明らかにするとともに、予測する方法を確立することが重要であり、まず、その実態の調査に着手した。

現地における実態調査の手段として、対象となる有害成分のそれぞれについて濃度分布を測定する方法があるが、この場合、対象物質の濃度がきわ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、トンネル以外の沿道等から発生する同種の有害成分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。このため、今回の実験では各種有害成分に替わるものとしてトレーサを用いることとした。

トレーサガスは、無害、無味、無色、無臭で、自然界にはほとんど存在せず、検出限界も高い（6フッ化イオウ：SF₆の場合、0.001 ppb (10^{-12})）などの特徴を有しており、これまでも工場排煙の拡散調査で広く使われていて、ガス状物質、浮遊粒子状物質の拡散希釈の挙動と良く一致しているといわれている。

実験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において実施した。坑口排気ガスの濃度分布の測定結果の一例を図-6.1～2に示す。トンネル排出ガスの濃度分布は坑口周辺の地形、坑外の自然風など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向に延び、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-6.3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-6.4）。しかし、坑口至近地点では高濃度が検出されるので注

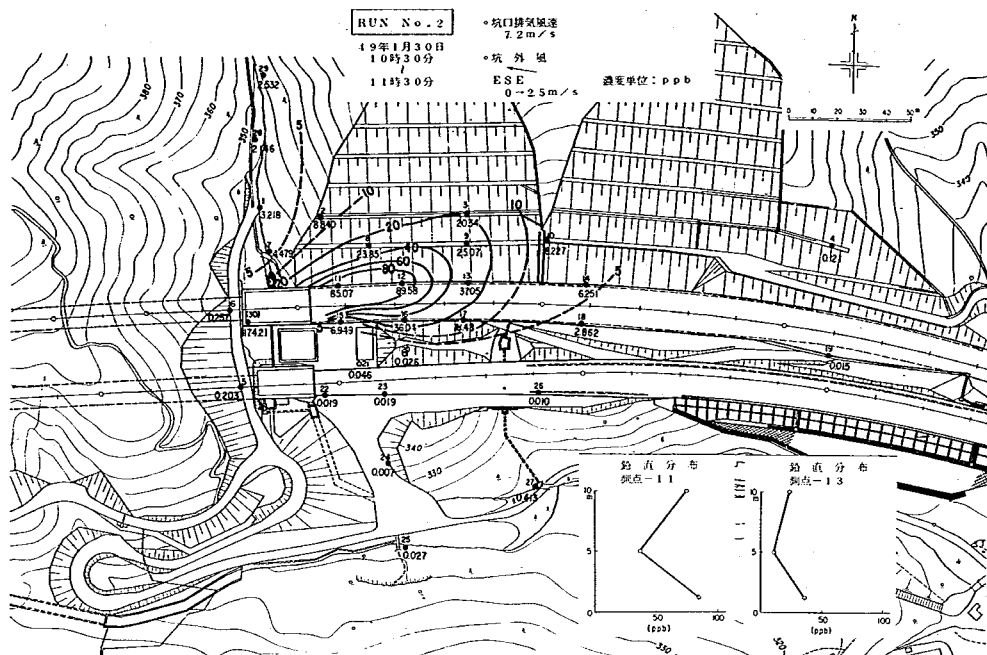


圖-6.1 濃度分布例⁴⁾ (坑口排氣風速 7 m/sec)

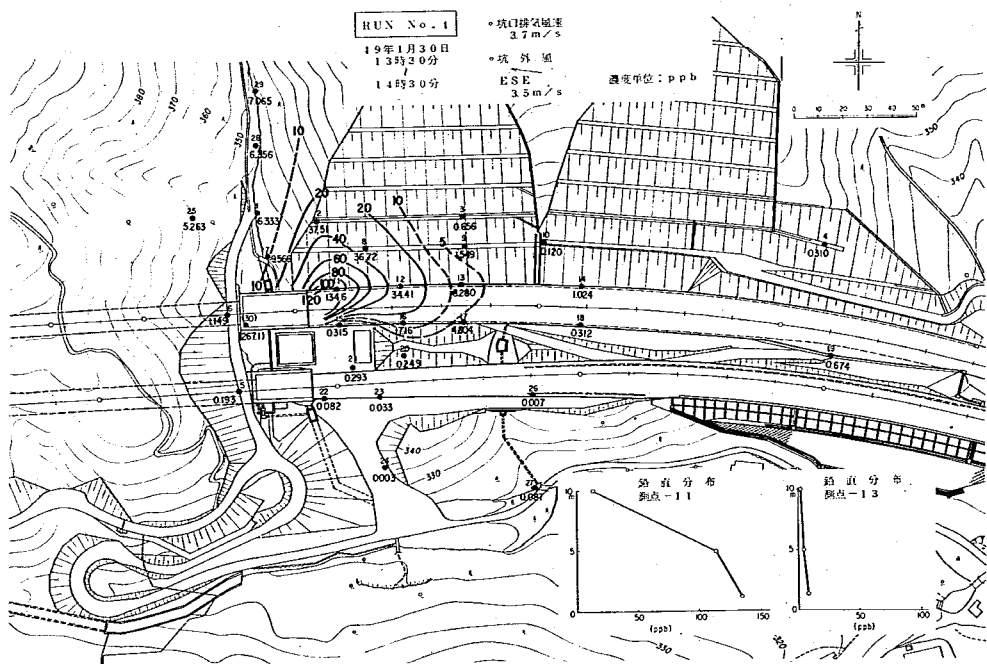


圖-6.2 濃度分布例⁴⁾ (坑口排氣風速 3 m/sec)

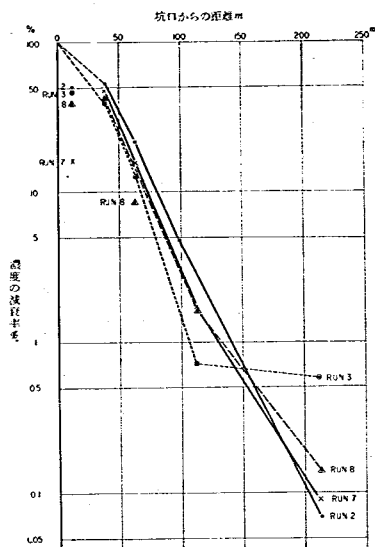


図 - 6.3 濃度減衰率¹⁾
($V_r \div 7 \text{ m/s}$ の場合)

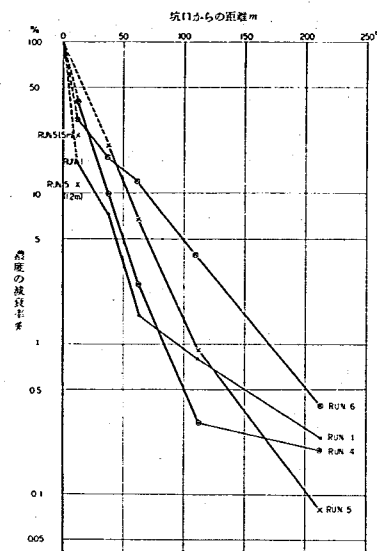


図 - 6.4 濃度減衰率¹⁾
($V_r \div 3 \text{ m/s}$ の場合)

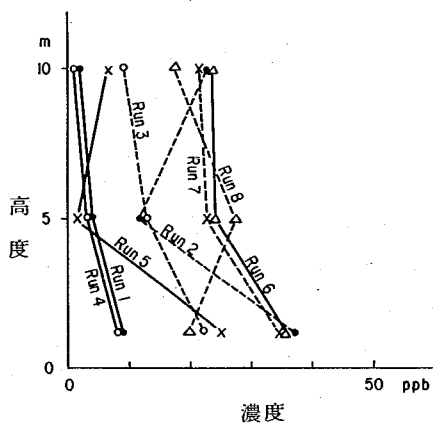


図 - 6.5 鉛直濃度分布¹⁾
(坑口より 12 m 地点)

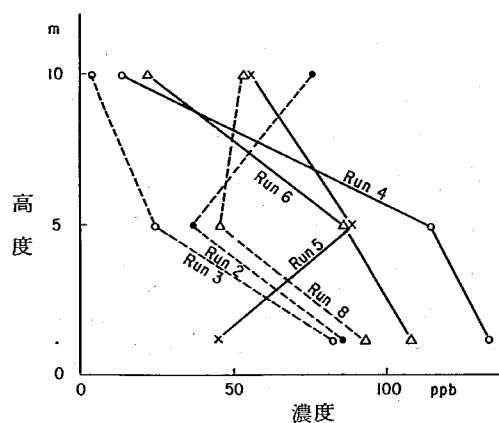


図 - 6.6 鉛直濃度分布¹⁾
(坑口より 63 m 地点)

意を要する(坑口から排出される有害成分の総量が同じ場合)。

- (3) 道路沿いでは、坑口から約 200 m 離れた地点においても、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溯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、有害成分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（坑外自然風が無風ないし坑口に向って吹く $2 \sim 3 \text{ m/sec}$ 程度の風の場合の範囲内では、坑口から $50 \sim 80 \text{ m}$ 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。

(7) 鉛直分布については、図 - 6.5 ~ 6 に示すように坑口よりやや離れた 63 m 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、坑口に近距離（ 12 m ）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押し上げられたことが推測される。

なお、同種の一方交通の N トンネルにおける、一酸化炭素濃度の分布の測定例を図 - 6.7 に示す。⁶⁾ この調査は坑口に向って $4 \sim 10 \text{ m/sec}$ の

風が吹く場合と逆方向へ $5 \sim 8 \text{ m/sec}$ の風が吹く場合の状況下にて実施されたものであり、トンネル排気ガスだけでなくトンネルアプローチの道路を走行する車の排気ガスの影響も含んだものとして得られたものである。その結果、坑口から 100 m 程度までは円形噴流による理論拡散で支配され、それ以遠は Sutton の公式に近づくであろうと考えられている。前述のいずれの調査結果も、坑口周辺の局所的な地形や自然風の影響を大きく受けていることから明らかなように、この種の調査は今後ともデータの積重ねが必要である。

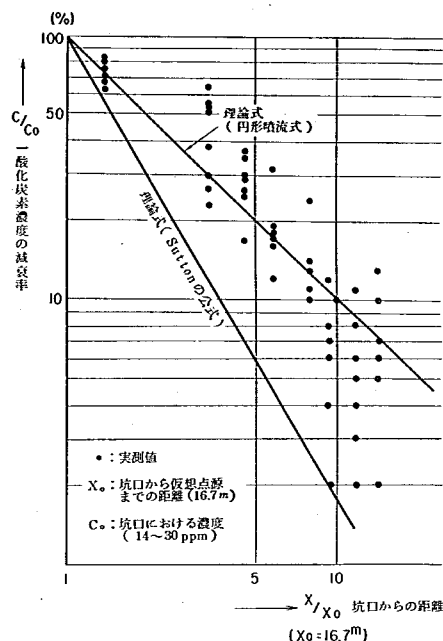


図 - 6.7 濃度減衰率⁶⁾
(N トンネルの調査例)

7. ま と め

以上、トンネル空気の浄化技術についての検討の経緯およびその技術的現状を述べてきたが、最後に、今後の問題点を含めてまとめると次のとおりである。

(1) 集じん機

高効率のトンネル浮遊粉じん除去施設としての開発の現状を要約すれば、電気集じん機の1つのセルについての特性が把握でき、実用機開発への明るい見通しが得られた段階であるといえることができる。電気集じん機の実用化のための今後の問題点としては次のようなことがあげられる。

- a. 捕集物質の2次、3次処理方法の確立
- b. 処理風量の変化に対応した施設の制御方法の検討
- c. 処理空気の2次的変化の有無の確認
- d. 換気設備との関連を考慮した浄化施設としてのシステムの検討（汚染空気の捕集方法等）
- e. 施設を設計、維持管理する際の排出基準の検討
- f. 粉じんの測定方法の規格化

なお、ここでは、電気集じん機を中心として検討したが、高い効率は得られないものの現実にはフィルター方式を採用した例もあり、電気集じん以外の方法あるいは電気集じんと他の方法との組合せなどについても今後検討すべき問題として残されている。

(2) ガス状物質浄化技術

ガス状有害成分のうち特に問題の大きい一酸化炭素に関しては、トンネル空気が低濃度、大風量であることから、残念ではあるが現段階では浄化装置の実用化は極めて困難でありあきらめざるを得ない。一酸化炭素以外の有害成分の浄化方法に関しても、イオウ酸化物、窒素酸化物など一部のものについては現在工場排煙の処理装置等として実用化されているものもあるが、これらをトンネル空気に適用するためには相当の研究開発の努力が必要であらう。

ガス状物質の浄化技術の開発に対する上述の技術的困難さ、自動車排気ガス規制の将来の動向、トンネル換気における（浮遊粉じんに対する）ガス状物質の位置づけなどを合わせ考えれば、当分の間、ガス状有害成分については大気による拡散希釈によらざるを得ないと思われる。この場合、トンネル周辺の環境を阻害することのないよう、換気方式の選定、坑口あるいは排気塔の位置の選定および緩衝地帯の確保などについては総合的かつ慎重な検討が望まれる。

あ と が き

準備期間を含めて、約4カ年にわたる研究の成果および浄化技術の開発の現状を整理し、まとめしてみた。トンネルの空気を浄化するという試みはこれまでは全く未開の分野であったが、一応の収穫が得られたものとする。この研究を契機として、今後トンネル空気浄化技術が広く発展することを期待するものである。

おわりに、本研究の遂行、現地実験、および資料の収集にあたり、建設省、日本道路公団、首都高速道路公団の関係各位に御指導、御協力をいただいたことをここに記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 今田徹、水谷敏則：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、1974.10.
- 2) 立石俊一、今田徹、水谷敏則：電気集じん機によるトンネル内空気浄化実験、土木研究所資料第808号、1973.3.
- 3) 市原薫、立石俊一、今田徹、水谷敏則：道路トンネル内浮遊粉じんの実態調査、土木研究所資料第810号、1973.3.
- 4) 建設電気技術協会：トンネル内の空気の集じん技術に関する研究報告書、1974.3.
- 5) 高速道路調査会：トンネル内自動車排出ガス濃度試験調査報告書、1974.3.
- 6) 高速道路調査会：トンネル坑口部排気ガス拡散に関する調査研究報告書、1972.2.
- 7) 日本道路協会：道路トンネル便覧、1975.1.
- 8) 三 沢 清 扶，他：坑内における静電集じん試験、鉄道技術研究所速報№70-1020、1970.12.
- 9) 三 沢 清 扶，他：坑内における静電集じん試験(その2) 鉄道技術研究所速報№71-68、1971.5
- 10) G.H.C.Norman, et al : Dust Collection Methods, Canadian Mining Journal, 1970.10.
- 11) 大気汚染研究全国協議会：除塵装置ハンドブック、1963.3.

道路トンネルの空気浄化技術に関する研究報告

土木研究所資料第990号

昭和50年3月(1975)

キーワード

市原 薫, 今田 徹

水谷敏則

道路トンネル, 換気, 空気浄化, 電気集じん機, 大気汚染, 大気拡散

要 旨 この報告書は, 土木研究所重点研究として昭和47年度から49年度の3カ年にわたり実施された「トンネルの空気浄化技術の開発に関する研究」により得られた成果を中心としてとりまとめたものである。



郵便はがき

2 8 0 - □ □

十円切手
をはって
下さい

建設省土木研究所
トンネル研究室 行

千葉県千葉市穴川
四丁目十二番五二号

No.093

No.093

(土資第990号)

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第990号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印

