

日立トンネル換気設備

Ventilating Facilities of Vehicular Road Tunnels

坂本 明* Sakamoto Akira
伊藤 雅* Itô Tadashi

近年、トンネル換気の必要性は自動車交通の目覚ましい発展に伴い、ますます増えている。換気設備には種々な方式が用いられており、それらの経験から基本的内容はほぼまとまってきた。最近では省エネルギー化や環境汚染対策を重視した設備が要求され、基本方式の組み合わせや電子計算機を駆使した最適制御システム、集塵機付換気設備などが用いられている。また、設備の簡単な縦流式が見直され、ジェットファンは大形化しており、集塵機付立坑送排気式という新しい方式の換気設備も計画されている。

日立製作所は従来から数多くの換気設備を納入しており、この論文はそれらの例をもとに、トンネル換気設備について最近の動向を踏まえながら換気方式別に紹介する。

1 緒言

近年、我が国の自動車交通の発展は目覚ましく、交通量は増加の一途をたどり、これに伴ってトンネルの機械換気の必要が増え、新しいトンネルの建設計画では必ず換気装置設置の必要性が検討されている。

我が国のトンネル換気の歴史¹⁾は、昭和33年に完成した関門国道トンネルに始まり既に20年が経過した。この間に、百数十箇所にも及ぶトンネルに換気設備が設置され、換気方式^{2),3)}にも種々な方法が採用されている。その基本的な考え方やシステムについてはほぼ確立されたものと思われる。

一方、昭和48年のオイルショックを契機に、省エネルギー化を図るため換気設備の消費動力が低減できるシステムの開発が推進され、将来立坑送排気式⁴⁾による換気方式も実現されようとしている。

日立製作所は、トンネル内の自動車通行をより安全に、より快適にという命題を追求して、過去数十箇所のトンネルに対しあらゆる方式の設備を納入し、換気用大形軸流送風機の数には既に100台を超えるに至っている。また、これらの経験を生かしてトンネル換気の計画に積極的に協力するとともに、換気設備をはじめ受配電設備、遠方監視制御設備を含むトータルシステムのエンジニアリングにも寄与してきた。

以下に、日立製作所が納入した例をもとに、最近のトンネルの換気設備について換気方式別に紹介する。

2 換気方式

換気の方式は、自然換気方式とファンにより強制的に換気する機械換気方式とに大別される。自然換気方式は、自然風、

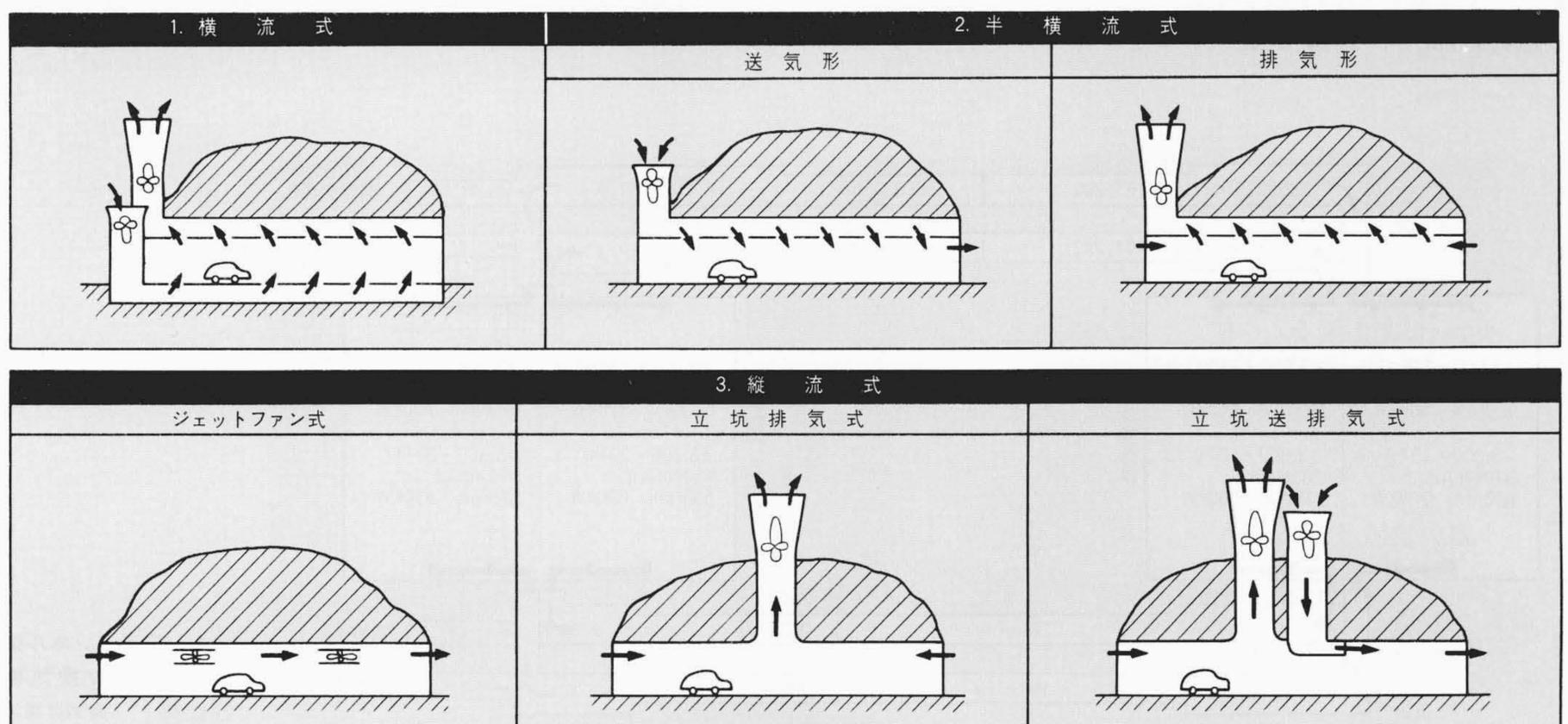


図1 トンネルの機械換気方式 機械換気方式は、トンネル内の空気の流し方によって三つに大別される。

* 日立製作所土浦工場

トンネル坑口間の気圧差や温度差による自然換気力及びトンネル内を自動車が行くために生ずるピストン作用で起こる交通換気力とによって行なわれる。自然換気方式でよいか、機械換気方式を必要とするかは、経験的に交通量(N台/h)とトンネル長さ(Lkm)との積で判断されており、この値が600以上の場合、対面交通時には機械換気が必要とされている。また、一方交通の場合では1,500~3,000程度となる。

機械換気方式は、図1に示すようにトンネル内の空気の流し方によって横流式、半横流式及び縦流式の三つに分けられる。横流式は、トンネルに沿って全長にわたる送排気ダクトを設けて、各断面で空気を均等に車道内を横切るように流して送排気を行なう方法である。半横流式は、送気(又は排気)ダクトを設けて、横流式と同様に車道内に均等に送気(又は排気)し、排気(又は送気)は車道内をトンネルの長手方向に流して換気を行なう方法である。また縦流式は、ジェットファンの吐き出す噴流や排風機でトンネル内の空気を誘引することにより、トンネル内に長手方向の空気の流れを起こして換気する方法である。これらの換気方式の選定に当たっては、換気条件はもちろん、トンネルの立地条件、経済性などを十分に考慮して検討する必要がある。次に、機械換気について各方式ごとに述べる。

3 横流式

横流式は我が国で最初に用いられた換気方式である。この方式によると、トンネル全長で断面ごとに送気と排気が行なわれるため、最も安定した良好な換気状態が得られる。また、ダクト長さを所要風圧と設備費の経済性の点から考えて適当に分割(1.5km以下ぐらいが望ましい)し、各々のダクトの始端に換気機を設けて換気すると、トンネル長さには制限を受けない。これらの理由により、横流式は長大トンネルの換気に採用されている。しかし、トンネルと同じ長さの送排気用のダクトと送風機、排風機を必要とするので設備費、動力費とも最も高い換気方式と言える。

横流式の例として、昭和52年12月に開通した中央自動車道笹子トンネルについて紹介する。このトンネルは、延長が上り線4,417m、下り線4,414mで、各2車線一方交通(計4車線)

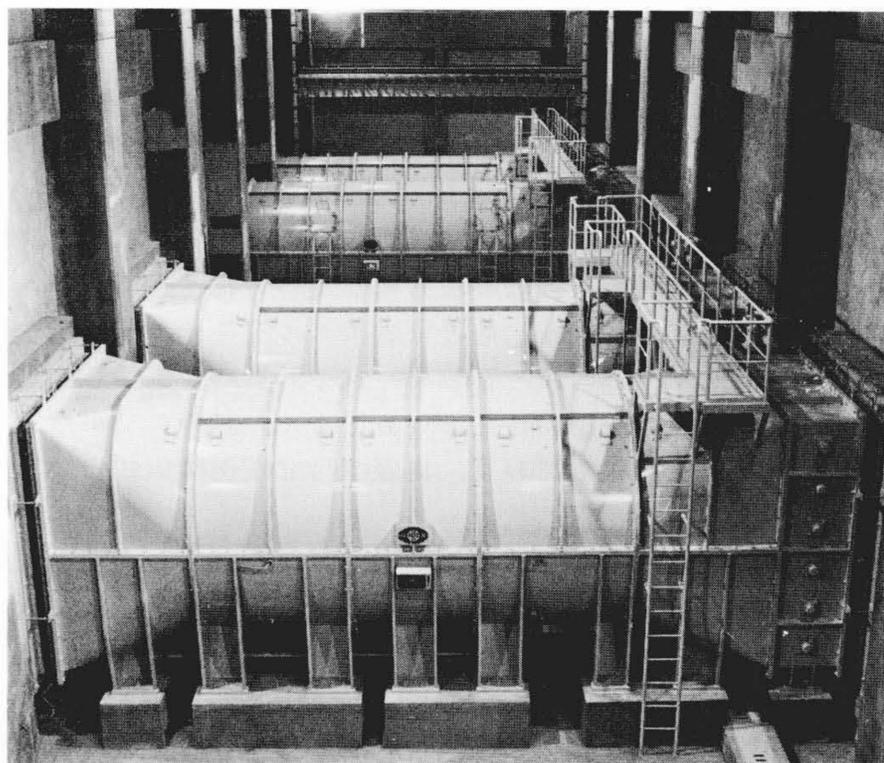


図3 笹子トンネル換気機 手前2台が排風機、奥が送風機を示し、いずれも口径3,000mmの2段軸流送風機である。

のトンネルである。換気系統図と換気機の仕様を図2に示す。新鮮な空気は東西の換気所から送風機でトンネル天井部の送気ダクトを通して送られ、送気口(4.8m間隔)から均等に車道内に吹き出される。排気ガスなどで汚染された空気は、排気ダクトの排気口(9.6m間隔)から吸い込まれ、排風機により大気中に排出される。

換気機としては所要風圧が高いため、2段軸流送風機を使用している。この外観を図3に示す。駆動機としては図4に示すサイリスタモータを採用して、広範囲(30~100%)に回転数を変え風量制御を行なっている。また、要求風量に対して、台数制御と回転数制御とを組み合わせると全体の効率が最も良い条件下で経済的な運転ができるシステムとなっている。

換気制御システムを図5に示す。通常時の制御はトンネル内の煙霧透過率計(以下、VI計と略す)、CO分析計(以下、CO計と略す)による測定データと、トンネル入口とそれより一定距

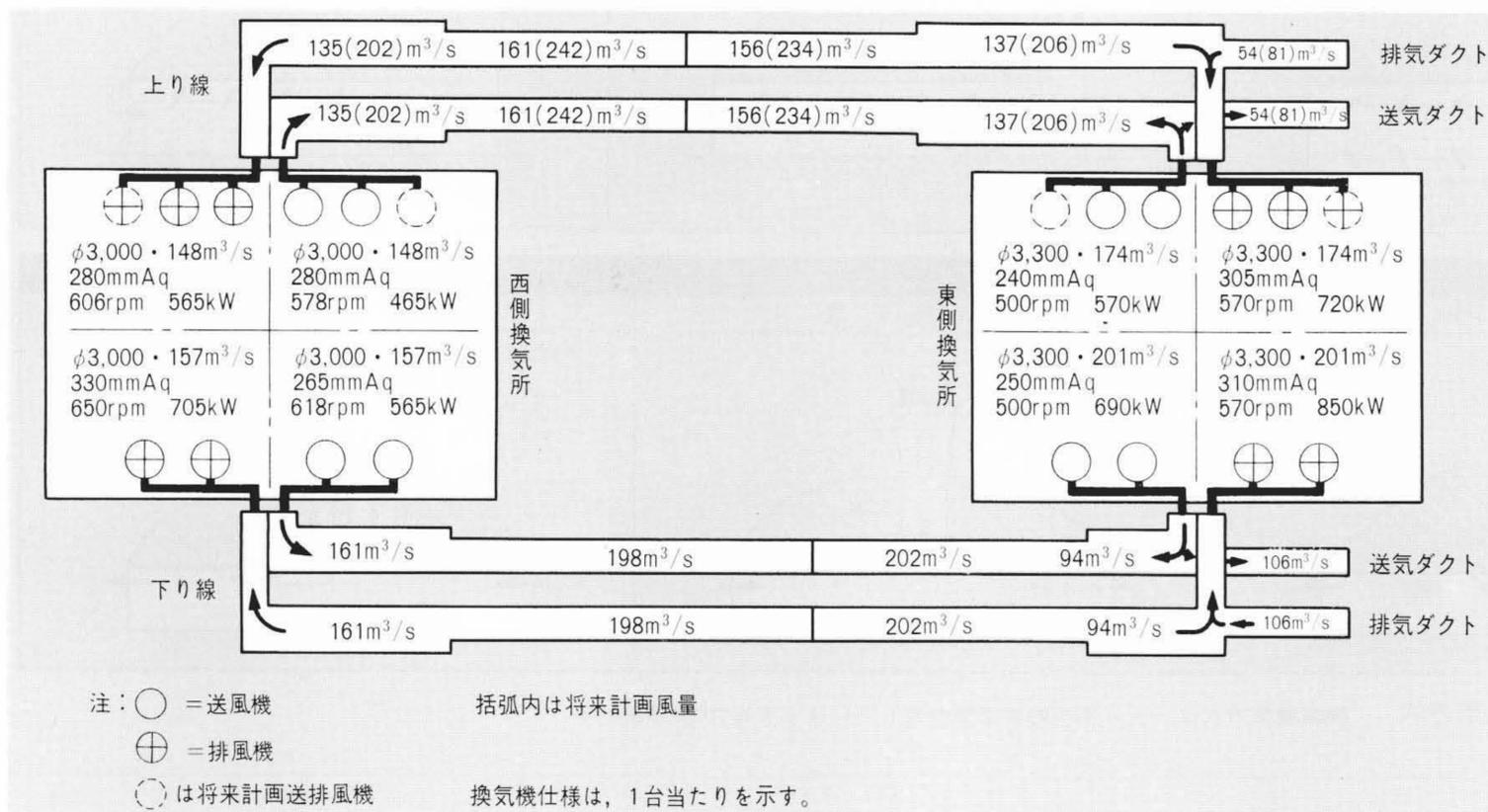


図2 笹子トンネル換気系統図及び換気機の仕様 換気は東西の換気所に設置された軸流送風機によって行なわれる。日立製作所は、そのうち西側換気設備を納入した。

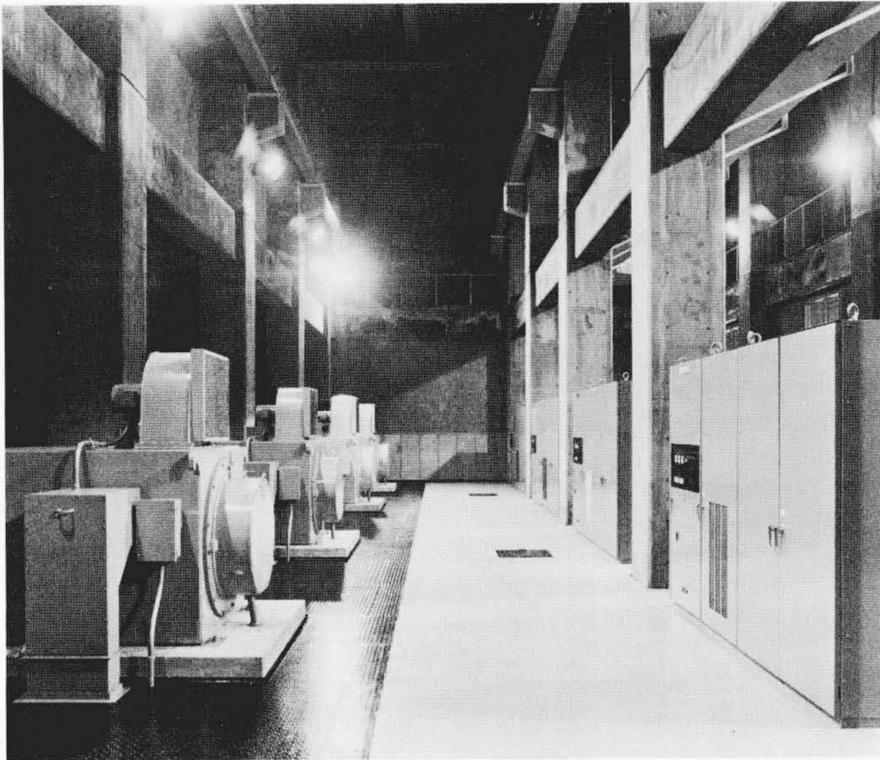


図4 笹子トンネルのサイリスタモータとサイリスタ制御盤
サイリスタモータは、右側の制御盤により速度制御が行なわれる。

離手前の二つの地点の交通量の測定データとを電子計算機で処理し「予測制御」を行なっている。予測制御とは、トンネルより手前の地点での交通量を測定して、その状態がトンネルに到達する時点で最適な換気状態が得られるように予測し制御する方法である。

また、経済的な運転をするために、交通量が少ない時には必要換気量も減少するので、交通量に応じて全排風機を停止させる送気半横流方式と、入口側は排風機だけを停止させて半横流とし、出口側は送・排風機を運転して横流とする「組合せ換気」方式をも併用し動力費の低減を図っている。

4 半横流式

半横流式にはダクトの使用法により送気形と排気形とがあるが、この論文では送気半横流式について述べる。この方式によると、新鮮な空気は換気所の送風機により送気ダクトを通して、等間隔に設けられた送気口から車道内に均等に供給される。このため、横流式のように全長にわたりの位置でも同じように汚染空気の希釈が行なわれることになり、換気

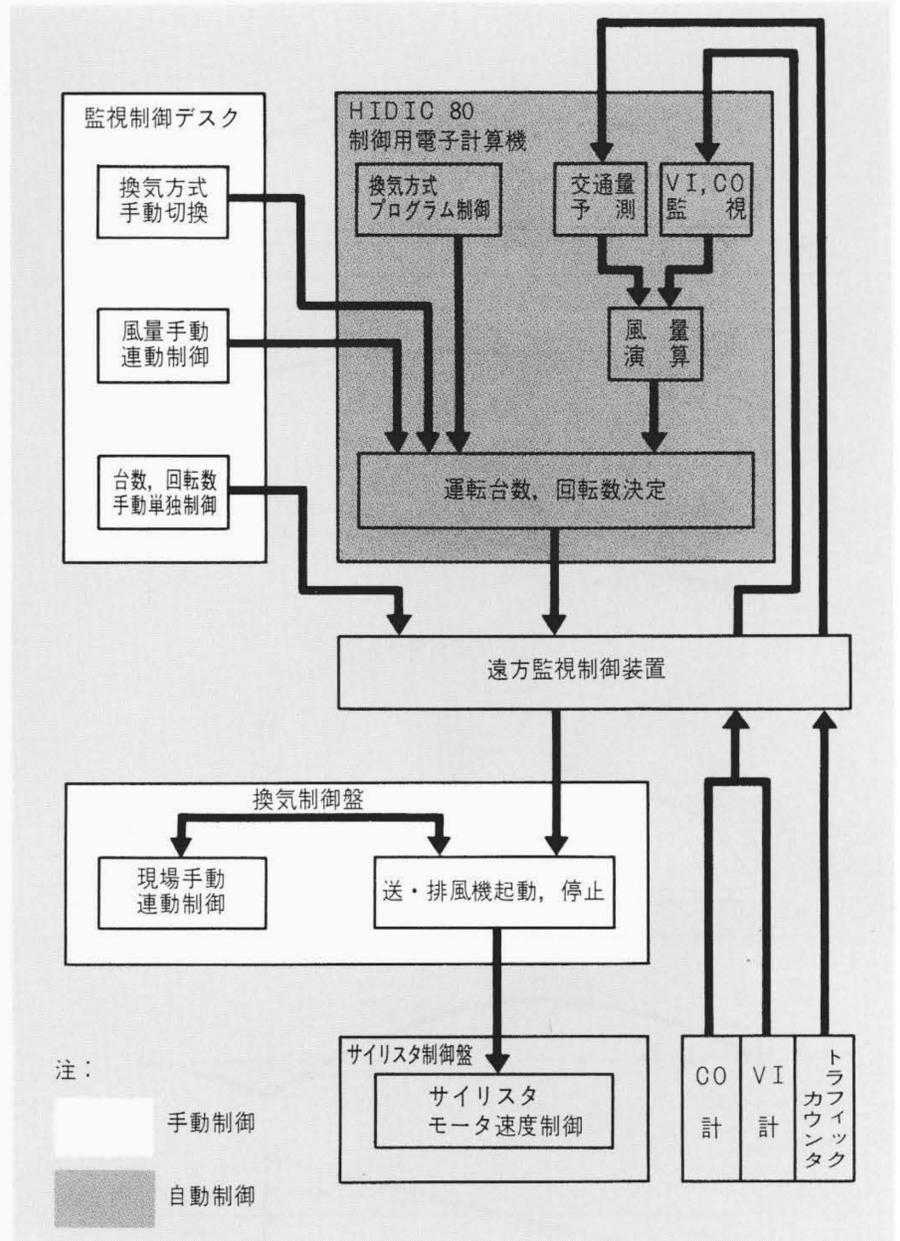


図5 笹子トンネル換気制御システム系統図 通常の制御は、VI計、CO計による交通量の測定データをもとに、電子計算機で必要風量を算出し、換気機を自動予測制御するシステムである。

状態は安定する。排気は車道を通して行なわれるため、トンネルが長くなると坑口付近での車道内風速が高くなり、走行中の自動車に悪影響を与えるので長いトンネルへの適用はできない。しかし、送気半横流式は送気設備だけで済むため、設備費、動力費とも横流式の約半分で済み経済的で、2km程度までの対面交通トンネルに多く採用されている。

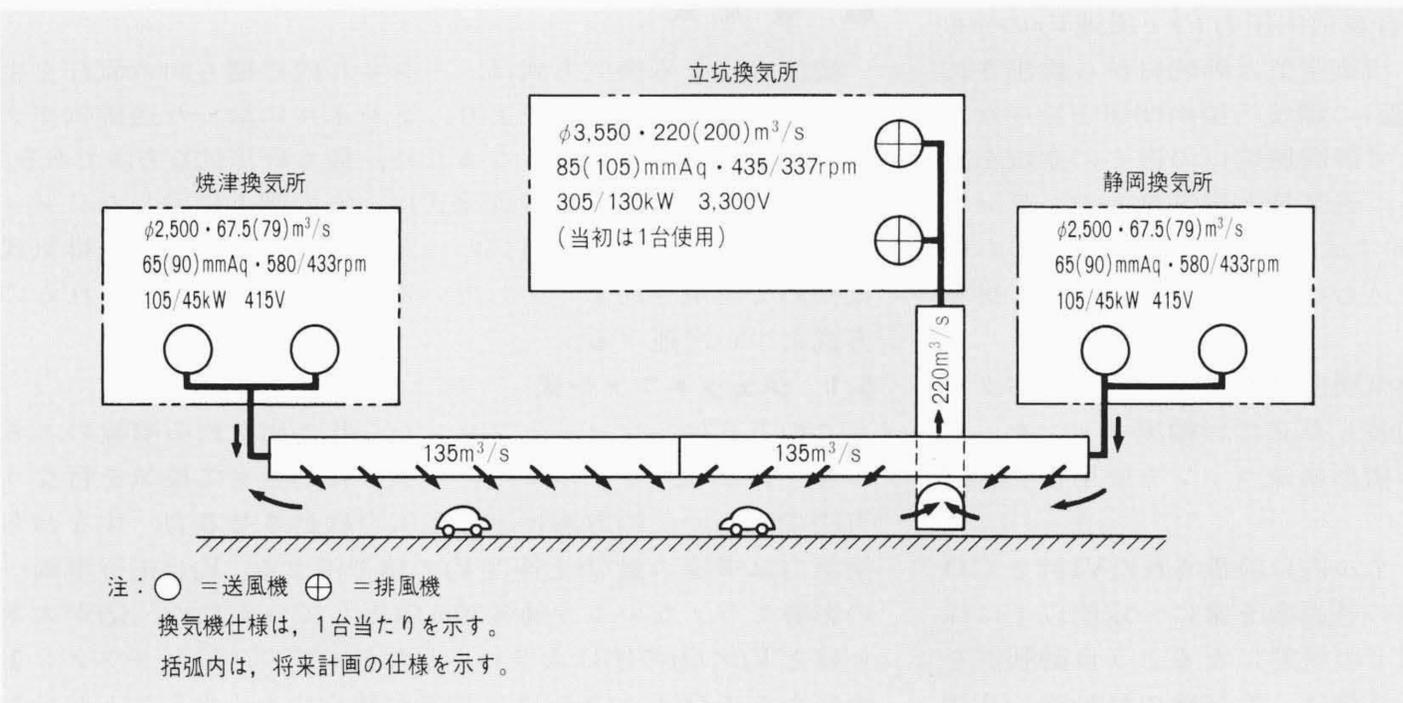


図6 新日本坂トンネル換気システム図及び換気機の仕様
送気は、トンネルを二分して両坑口の換気所から、排気は、立坑換気所で行なわれる。

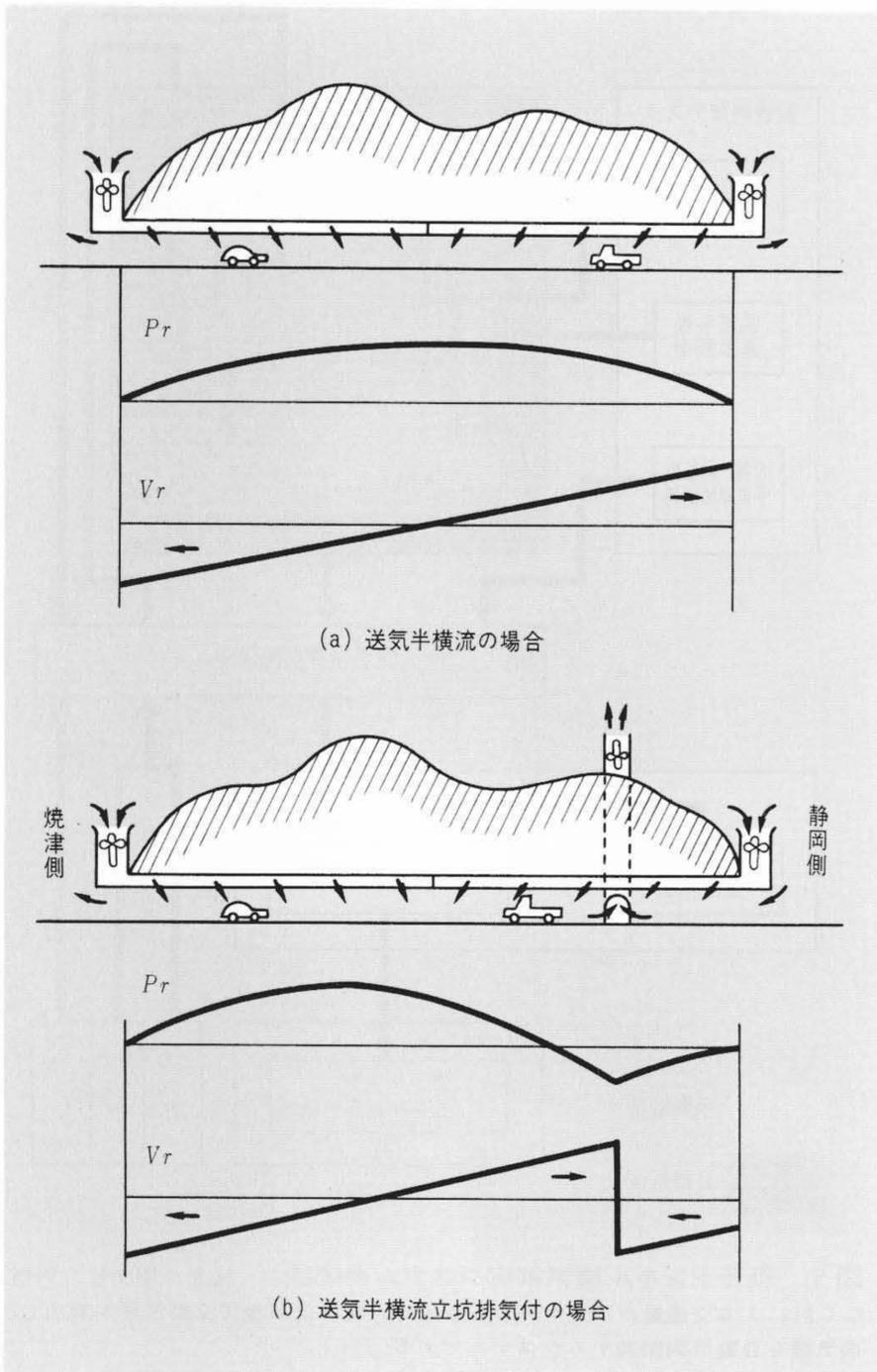


図7 トンネル内の圧力 P_r 及び風速 V_r 分布 (a)の送気半横流では両坑口から吹き出しているが、(b)のように立坑排気を併用すると静岡側坑口からは吸い込んでいることが分かる。

この例として、昭和53年5月に開通した静岡県の国道150号線の新日本坂トンネルについて紹介する。このトンネルは延長2,205m、2車線対面交通で、その換気系統図と換気機の仕様を図6に示す。換気方式は、送気半横流式と立坑排気式とを組み合わせた方式を採っている。この理由は図7に示すように、送気半横流式だけの場合車道内圧力 P_r と風速 V_r の分布は同図(a)に示すようになり、汚染空気は両坑口から排出されるため静岡側坑口付近(果樹園)の環境汚染が問題となったためである。そこで、対策として静岡側坑口の近くに立坑を設け排気する方法をとっている。送気量と排気量とのバランスをとり、 P_r と V_r が常に同図(b)に示すような状態、すなわち静岡側の坑口からは外気を吸い込む状態になるように送・排風機の制御を行なっている。

換気機としては、両坑口換気所内に効率が良くコンパクトな立て軸遊星歯車減速機を内装した立て形軸流ファンを、立坑換気所には、減速機外装の横形軸流ファンを使用している。図8に送風機の外観を示す。

換気制御システムは、トンネル内に設置されたVI計とCO計の指令により、トンネル内の透過率を常に一定値以上に保ち、かつCO濃度が許容値以下の状態になるよう自動制御を行なうシステムである。換気風量は、換気機の駆動機に2速

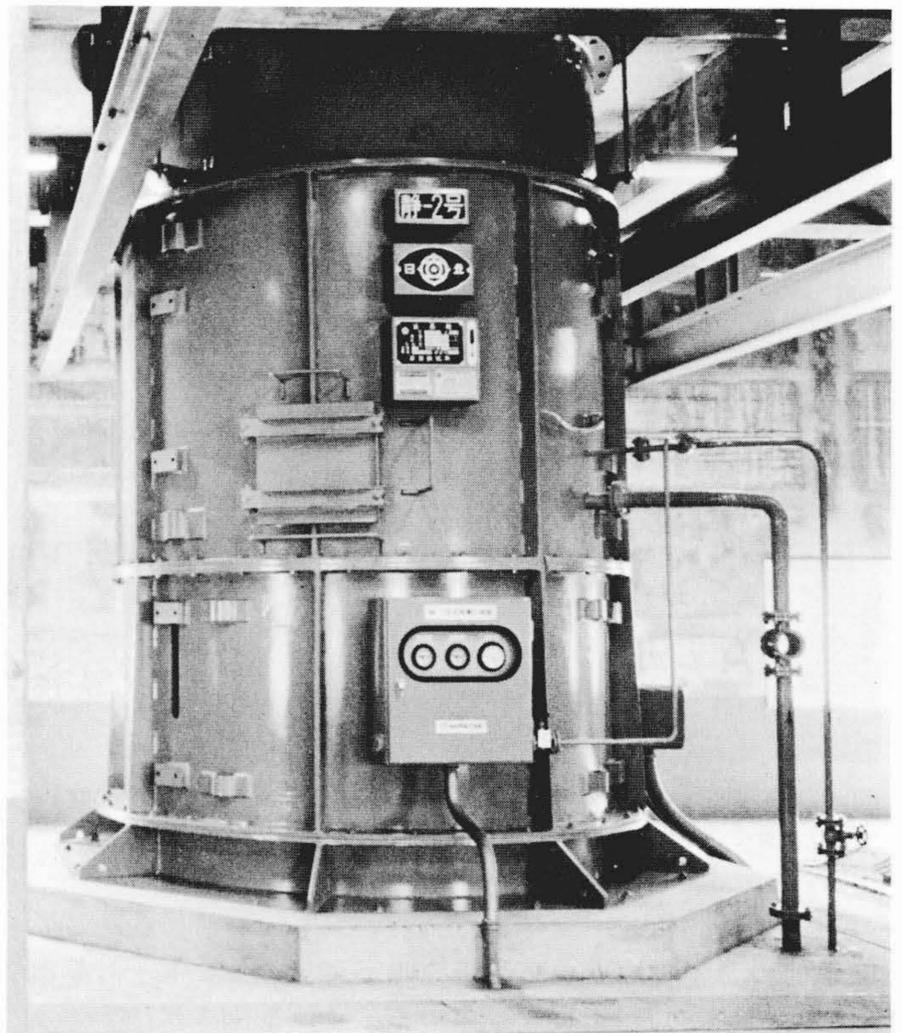


図8 新日本坂トンネル送風機 口径2,500mmの立て形軸流ファンを使用している。立て形の場合、据付面積が小さいことが分かる。

度の極数変換電動機を使用することにより、台数制御と回転数制御とを組み合わせることで段階的に風量制御を行なっている。また、1日の時刻別の交通量パターンを想定したプログラムにより、時刻に応じて風量の制御を自動的に行なう半自動制御と、手動による制御も可能なシステムである。

立坑換気所は山頂近くに位置するため、機器の搬入方法が問題になった。ヘリコプターを使う案など種々の方法を検討した結果、高さ約200mの立坑を通して3tのウィンチを使い搬入する方法を採用した。このように高い立坑を利用したことは初めてであり、今後の立坑換気所の計画や工事に際し大いに役立つ経験を得た。更に、動力電源のケーブルもこの立坑を通して布設されている。

5 縦流式

縦流式による換気方式は、トンネル内に縦方向の流れを生じさせて換気する方法であり、トンネルに沿った送排気ダクトが不要で簡単な設備となるため、最も経済的な方法である。我が国で用いられている縦流式は、先の図1に示したジェットファン方式と立坑排気式がほとんどであり、立坑送排気式は初めて実現されようとしている方式である。次にこれらの方式について述べる。

5.1 ジェットファン式

この方式は、ジェットファンから吹き出される噴流のエネルギーにより、トンネル内の空気を移動させて換気を行なう方法である。この方法による空気を移動させる力、すなわち換気力は噴流の量 Q_j と速度 V_j の積で決まる。 V_j は走行車両への影響を与えないよう通常30m/sとしているため、 Q_j が大きいほど $V_j \times Q_j$ の値は大きい。したがって、ジェットファン1台当たりの Q_j が大きいほど設置台数を少なくすることができ

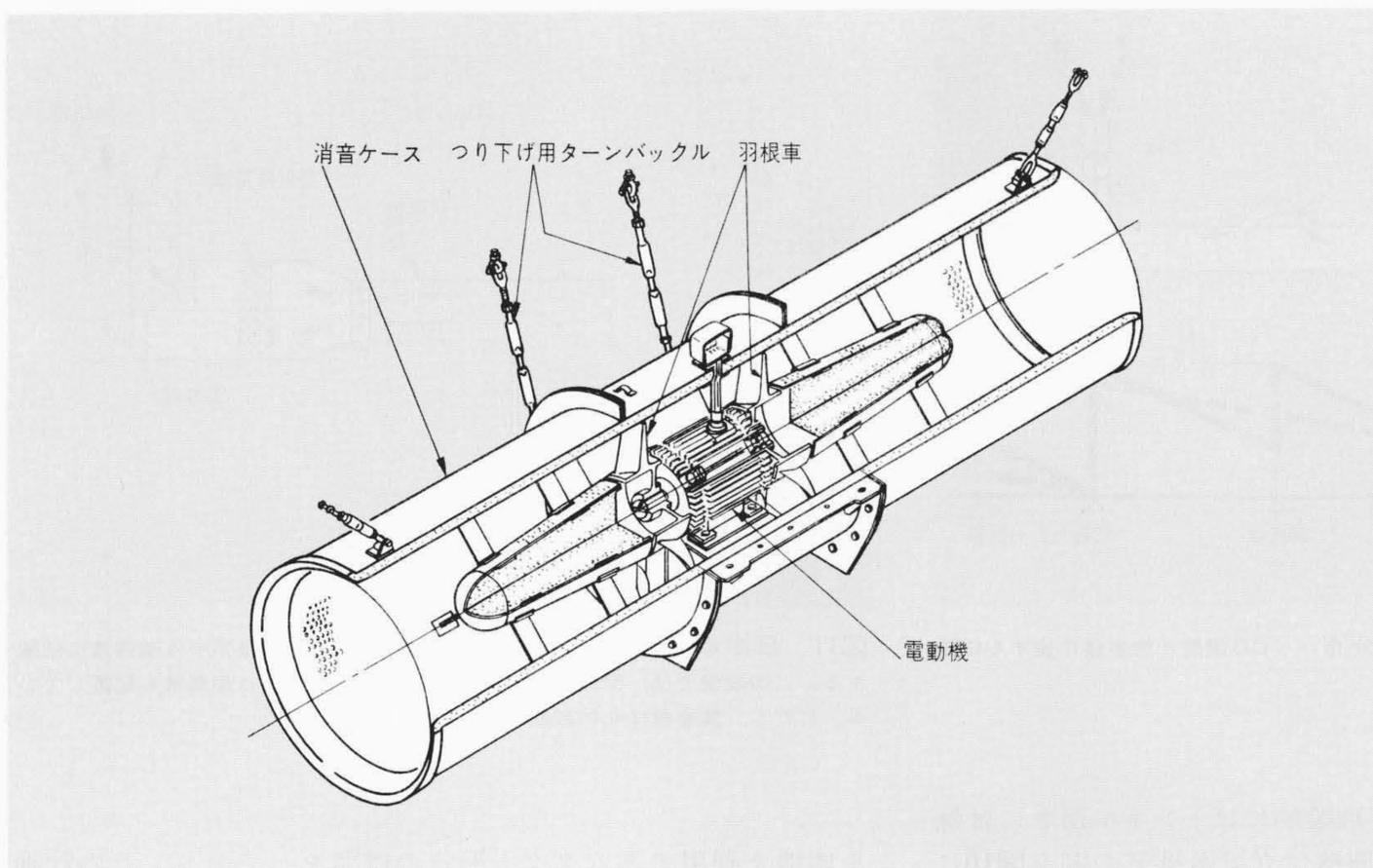


図9 ジェットファン構造図
消音器を兼用したケーシング内に、機械部を収納した簡単な構造である。

表1 日立ジェットファンの仕様 吐出し風量比は1台当たりの換気能力を示している。

項 目	仕 様		
呼 び	JF600	JF1000	JF1500
外 径 (mm)	φ 800	φ 1,150	φ 1,660
全 長 (mm)	3,000	4,800	5,500
重 量 (kg)	630	1,200	2,000
電 動 機 (kW)	10	30	55
吐 出 し 風 速 (m/s)	30	30	30
吐 出 し 風 量 (m ³ /s)	8.1	25	56.2
吐 出 し 風 量 比	1	3.1	6.9

るため、最近では大口径のジェットファンの採用が増えている。ジェットファンはトンネルの必要換気量に応じて、必要台数を適当な間隔にトンネル天井部につり下げて設置される。このため、設備費、工事費とも機械換気方式の中では最も安価であり、使用されているトンネルにも交通量増大時の換気対策として容易に増設できるため、非常に多く採用されている。

日立製作所では、換気条件をはじめ電源、トンネルの大きさなどの条件に最適なものを選定できるよう、表1に示す仕様のジェットファンを標準化している。これらの構造を図9に示す。ジェットファンは電動機の回転方向を変えることにより、交通条件や自然風の方向に応じて吐出し方向を変えることができる。また、天井部に設置されるため簡単に保守管理ができないので、2万時間無給油のベアリングを使用し、メンテナンスフリー化を図っている。更に、つり金具などの安全性確認、羽根車をはじめ各部品の厳格な品質管理の下に、高い信頼性の要求にこたえている。

換気制御方式は、VI計とCO計によってトンネル内の汚染濃度が許容値以下となるように、ジェットファンの運転台数を自動制御する方法をとっており、プログラム制御(ピンボードと時計)、手動制御のいずれも可能なシステムとしている。

この制御システムの主な特徴を次に述べる。

- (1) 各ジェットファンの運転時間を平均化するために、再起動時には今まで停止させていたファンを使用するように、起動順序を循環させるロータリーエンドレス運転システムを採用している。
- (2) 起動時に電源に与える影響を少なくするための順序起動を自動的に行なう。
- (3) 停電から復電したときも自動的に運転が再開できる。など、安定した自動運転ができる制御システムとなっている。

5.2 立坑排気式

この方式は、トンネルのほぼ中央付近に立坑を設け、排風機により排ガスなどで汚染された空気を誘引して、この立坑を通し大気中に排出する方法である。したがって、トンネルの両坑口からは常に新鮮な空気を吸い込んでいる状態にあり、この付近の環境汚染の心配がなく、既設トンネルへの設置もできるため、開通後の交通量の増加による換気対策や環境対策として利用することができる。この方式の場合、換気所をどこに設置するかが問題になることが多い。すなわち地下換気所の場合は、掘削量の増大と換気所内の電気品などの換気が問題になり、立坑の坑口換気所の場合は、機器の搬入や電線布設の問題が生ずるため、立地条件をよく検討し計画する必要がある。開通後の交通量の増大に対処した地下換気所の例として、広島県の国道31号線の魚見山トンネル⁵⁾(860m)があり、立坑換気所では静岡県国道1号線の新宇津之谷トンネル⁶⁾(844m)がある。環境対策を目的とした例としては、先に述べた新日本坂トンネルと、これに隣接する石部トンネル(754m)などがある。

5.3 立坑送排気式

縦流式の場合新鮮な空気はすべて坑口から入るため、トンネル内の汚染濃度は坑口からの距離に比例して増加する。従来は、汚染の許容濃度とトンネル内の許容風速が決まると、適用できるトンネル長さが決まってしまう、長いトンネルへの採用は不可能であった。しかし、汚染濃度が許容値に達する位置に立坑を設けて汚染空気を排出し、新鮮な空気を立坑を通して取り入れ、噴流装置で昇圧してトンネル内に送り込

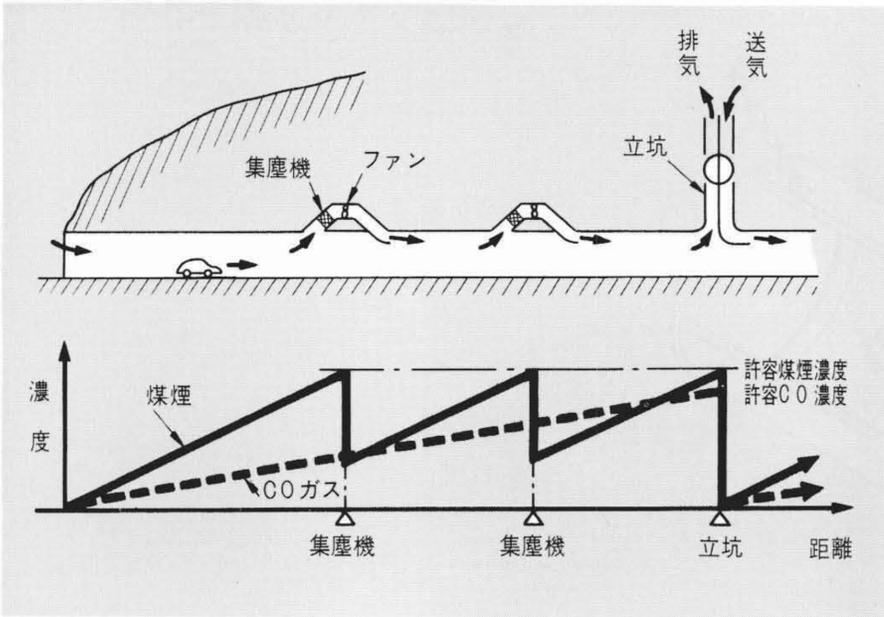


図10 集塵機付縦流換気の濃度分布 CO濃度が許容値に達する位置で、立坑送排気式で換気される。

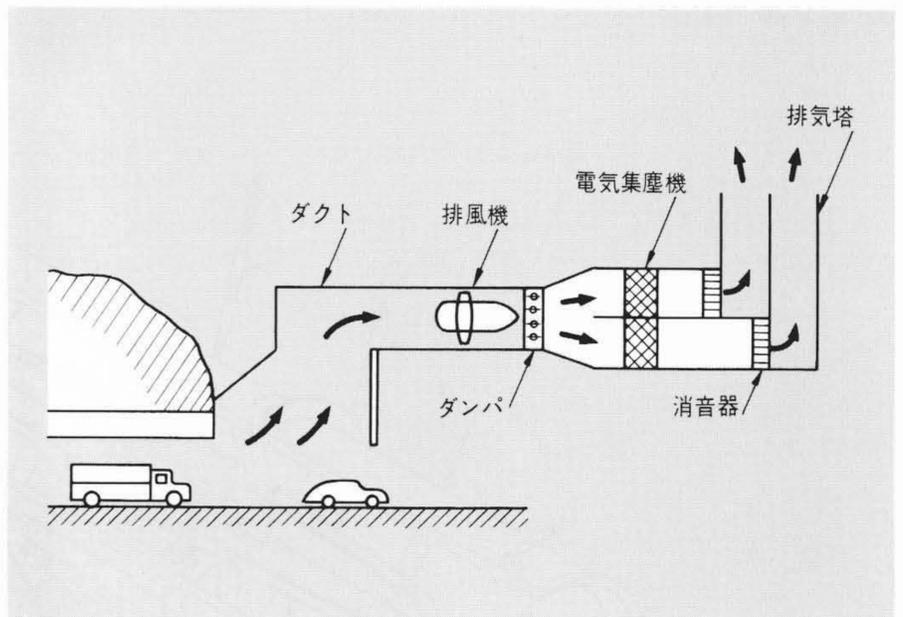


図11 日本坂トンネルの集塵機付換気設備 換気所は道路横に位置する。この設備では、配置上の問題から排風機の後流側に集塵機を配置している。ただし、集塵機は他社製品である。

む方法⁴⁾を繰り返してゆくと、理論的にはトンネル長さには無関係に適用できる(後述する集塵機付立坑送排気の例を図10に示す)。

この方式が立坑送排気式と呼ばれるもので、現在最も注目されている換気方式である。我が国では実績はないが、将来関越自動車道の関越トンネル(約11,000m, 国内最長)で実現される予定であり、九州縦貫道の肥後トンネルをはじめ、今後計画されるトンネルへの応用が多くなると思われる。

この方式を実現させるために、過去多くの調査、検討、模型実験などが行なわれてきた。日立製作所もこれに積極的に参画し、自社研究所で縮尺モデルを製作し数多くの模型実験を行なった⁷⁾。その結果、送排気口による圧力上昇、送排気口の圧力損失、火災排煙時のノズル形状、送気噴流の車道への影響などを、数種類のノズルを使用して広範囲の風量比にわたり明らかにすることができた。また、ノズルを透明アクリルで製作し、吹き流しやドライアイスの白煙などを用いて空気の流動状況の可視化にも成功した。

6 集塵機付換気設備

トンネル換気設備に集塵機を併用して、煤煙を浄化するシステムがあり、目的により次の二つに大別される。

6.1 トンネル内透過率改善用⁴⁾

トンネルの換気を決定する要因²⁾に、視界を妨げるディーゼル車の黒煙と生理的な影響を及ぼすガソリン車のCOガスとがある。しかし、数年来の排ガス規制によりCOガスの発生量は大幅に減り、CO濃度が換気量の決定に影響するケースはほとんどなくなった。一方、黒煙に対する規制は変わっていないため、現在では換気決定の要因はほとんど黒煙に絞られている。長大トンネルのように、新鮮な空気を取り入れるのに巨額の費用を要する場合、透過率低下を防ぐ目的だけで多量の空気を使用することは非常に不経済である。そこで、トンネル内の煤煙を集塵機で浄化すると新鮮な空気の必要量は大幅に低減できる。この方法は、将来前述の立坑送排気式と組み合わせて関越トンネルで実現される予定である。すなわち、図10に示すように一度取り入れた新鮮な空気の煤煙による汚染を集塵機により浄化し、透過率を改善しながら再使用し、CO濃度が許容値に達する位置で排気したあと新鮮な空気と交換しようとする計画である。

このシステムについてもモデルテストを行ない、効率よく

集塵機を利用できるダクト形状の確認をしており、この計画どおりに実現されるものと考えられる。

6.2 環境汚染対策用

トンネルの換気が行なわれると、坑口又は排気塔の付近で環境汚染が問題になることがある。この対策の一つとして、汚染された空気を浄化してから排出する方法があり、これが最も確実な方法である。この目的の集塵機付換気設備は、昭和52年に東名自動車道の日本坂トンネル上り線出口に設置された例などがある。日本坂トンネルは、一方交通で送気半横流式のため、トンネル内の汚染空気が出口側に多量に排出される。この対策として、図11に示すように坑口に排風機を設置し、トンネルから排出される汚染された空気を吸い込ませ、集塵機で浄化したのち排気塔から排出する方式を採った。

この設備を設けたことにより、坑口付近の樹木は緑を回復し設備の効果が大きいことを示している。

7 結 言

以上、自動車トンネルの換気設備について最近の傾向を踏まえ、日立製作所が納入した設備を例に挙げ紹介した。

我が国のトンネル換気は横流式に始まり、半横流式、縦流式としだいに設備の簡易化が行なわれてきた。そして現在、縦流式が改めて見直されており、更に、道路は縦流換気に有利な一方交通化の傾向にあることから、今後はこの換気方式の発展がますます増すものと予想される。

参考文献

- 1) 坂本：道路トンネル用送風機，流体力学，11，No. 122 (昭50-10)
- 2) 日本道路公団：設計要領，トンネル編(2)トンネル換気(昭44. 12発行，昭53-4改訂)
- 3) 日本道路協会：トンネル便覧(昭50-1)
- 4) 大橋：自動車トンネルの換気システム，ターボ機械，6，p.47 (昭53-1)
- 5) 坂本：自動車トンネルにおける縦流換気，産業機械，No. 190 (昭41-7)
- 6) 坂本：新宇津之谷トンネル換気設備，産業機械，No. 203 (昭42-8)
- 7) 三階，ほか4名：立坑送排気縦流式自動車道トンネルの換気特性，日立評論，60，678 (昭53-7)