

名神高速道路天王山トンネル換気設備

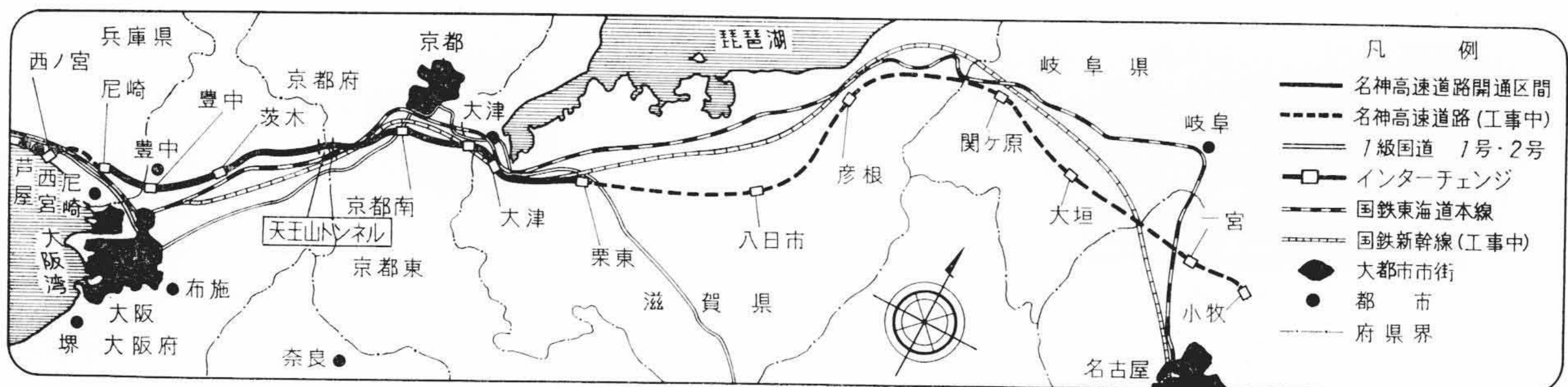
Ventilating Facilities at Tennozan Tunnel of Nagoya-Kobe Expressway

坂 本 明*
Akira Sakamoto

内 容 梗 概

昭和38年7月15日、日本道路公団名神高速道路の一部が開通した。この高速道路にある、延長約1,500 mの天王山トンネルは、わが国における、道路技術の総力をあげて完成したもので、現在日本において計画中の各トンネルのモデルケースとなるものである。

日立製作所においては、関門トンネルに引き続いて、天王山トンネルの換気設備を製作完成した。ここに本トンネル換気設備の送風機およびその付属品についての概要を紹介する。



1. 緒 言

名神高速道路は、小牧と西宮を結ぶ約191 kmのわが国における最初的高速道路で阪神と中京の2大経済圏を結び、自動車輸送量の増大とスピードアップをはかるために計画されたもので、わが国における道路技術の総力がかけられ、昭和32年10月に着手され、全線の開通を急いでいるものである。

本年7月15日より、この名神高速道路の栗東インターチェンジより尼崎インターチェンジまで71 kmが開通された。この区間にある天王山トンネルは、日本で3番目の長さのトンネルとなっている。

このトンネルには自動車の排気ガスをトンネル外に排出するための換気装置が設けられており、換気方式は半縦流方式を採用している。これは既設の関門トンネルの横流方式を簡略化したもので、日本では初めての試みであり、今後日本における高速道路トンネルのモデルケースになるものと考えられている。

トンネル内における自動車の煤煙と一酸化炭素を検出し、すべて自動的に8~12段階に換気量を制御するもので、関門トンネルに引きつづいて換気装置、中央遠方監視制御装置、一酸化炭素検出装置などを日立の総合技術により製作したものである。

2. 自動車トンネル換気方式

2.1 換気方式の概要

一般に自動車トンネルの換気方式は次の3種類に大別される。

- (A) 横流式換気方式
- (B) 半横流（または半縦流）換気方式
- (C) 縦流式換気方式

横流式とはトンネル車道の上下などにダクトを設け、トンネルの横断面に沿って空気を流して換気を行なう方法で、2,000 m以上の長大トンネルや都市トンネルにおける交通量が多く、しかも停滞しやすい場合などに採用される。

縦流式は前者とは反対に、トンネルの入口部または中央部などに送風機を取り付け、吐出圧力を利用して、トンネル延長方向にジェ

第1表 各換気方式の比較

項 目	換気方式	横 流 式	半 縦 流 式	縦 流 式
掘 削 断 面		大	中	小
ダ ク ト 断 面		大	中	な し
交 通 方 向		いづれでも可	一方向が可	一方向が可
幅 員		関係なし	大なる方がよい	大なる方がよい
最 大 換 気 区 間 長		約1,000m まで	約700m まで	—
最大換気可能トンネル延長		立坑があれば無制限	約1,400m まで	—
火 災 に 対 す る 安 全 性		大	小	な し
工 事 費		大	中	小
信 頼 性		大	中	小

ット流を吹かせて、トンネル内空気を縦方向に流し、トンネル出口より排気する方法で、ごく短いトンネルや一定時間に通過する鉄道トンネルなどに採用されている。

半縦流式は前2者の中間のもので、横流式における給排気ダクトの1方のみを設け、たとえば給気ダクトを設けて、トンネル内に新鮮な空気を送りこみ、トンネル車道部を排気ダクトに利用しているもので、1,500 m 程度までのトンネルや1方向トンネルに交通換気を利用できるので採用されている。これらの換気方式は、いずれも長所、短所をもっており、トンネルの延長、交通量、勾配、地形などを考慮して、もっとも経済的な方法を総合的に決定すべきである。おもな比較を第1表に示す。また各換気方式の系統図を第1~3図に示す。

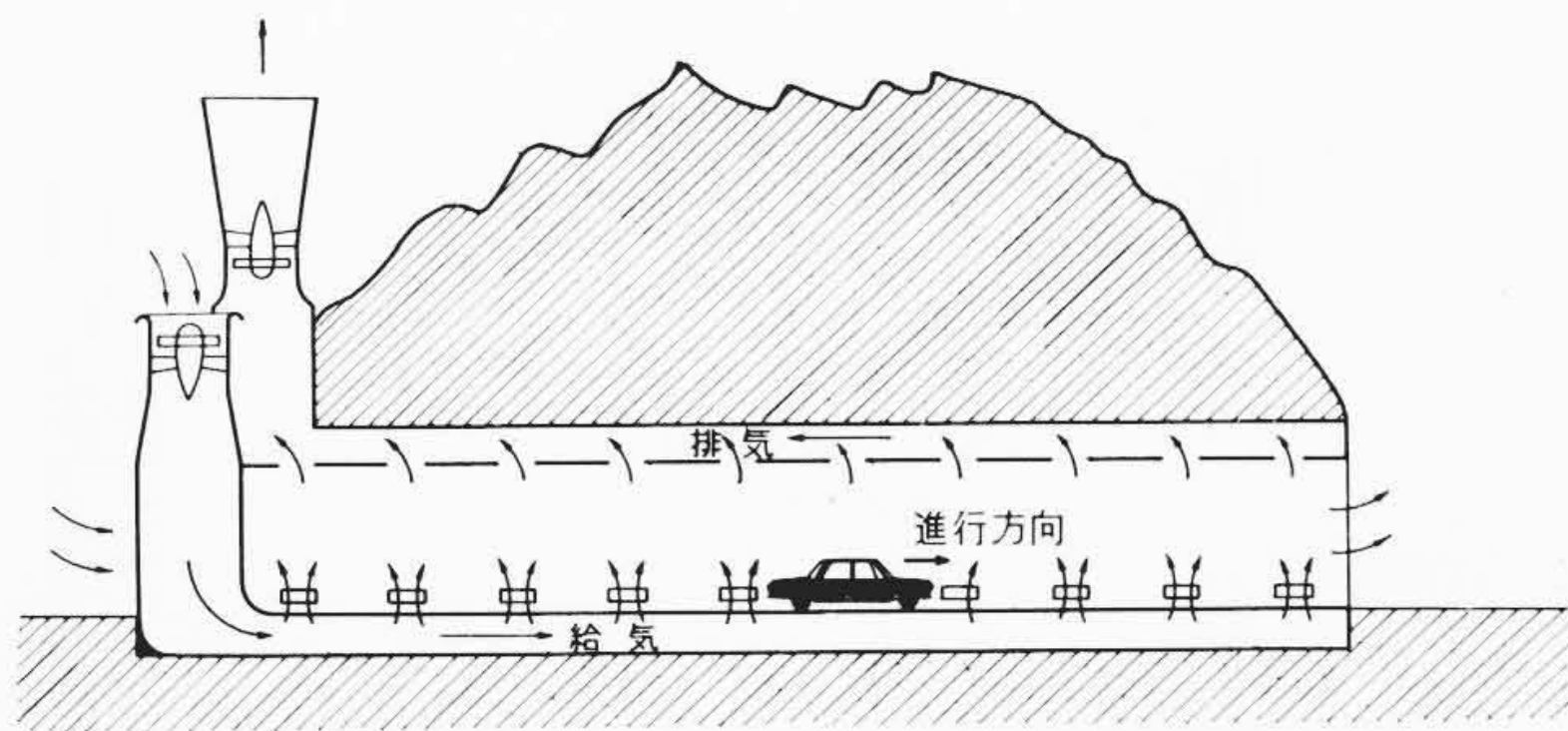
2.2 半縦流方式の換気計算

天王山トンネルに採用した半縦流式の換気に関する決定数値について説明する。

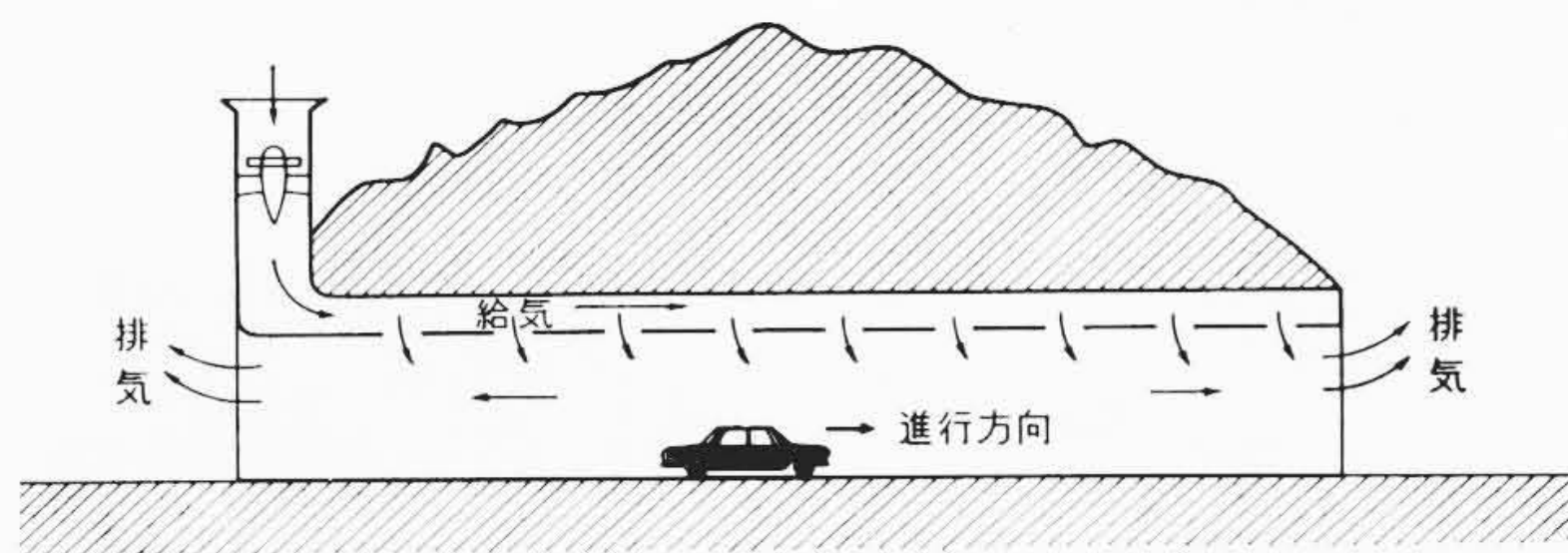
トンネル換気の目的は自動車の排気ガス中に含まれている有害成分を除去することで、日本においてはディーゼル車が多いので、排気ガス中の煤煙をトンネル外に排出するのが第1の目的となり、次いで人体に猛毒性のある一酸化炭素を稀釈して、排出することとなる。

いま車種別交通量を第2表のように推定して換気量を煤煙に対して次式により算出した。なお一酸化炭素よりの換気量は少ないので除外した。

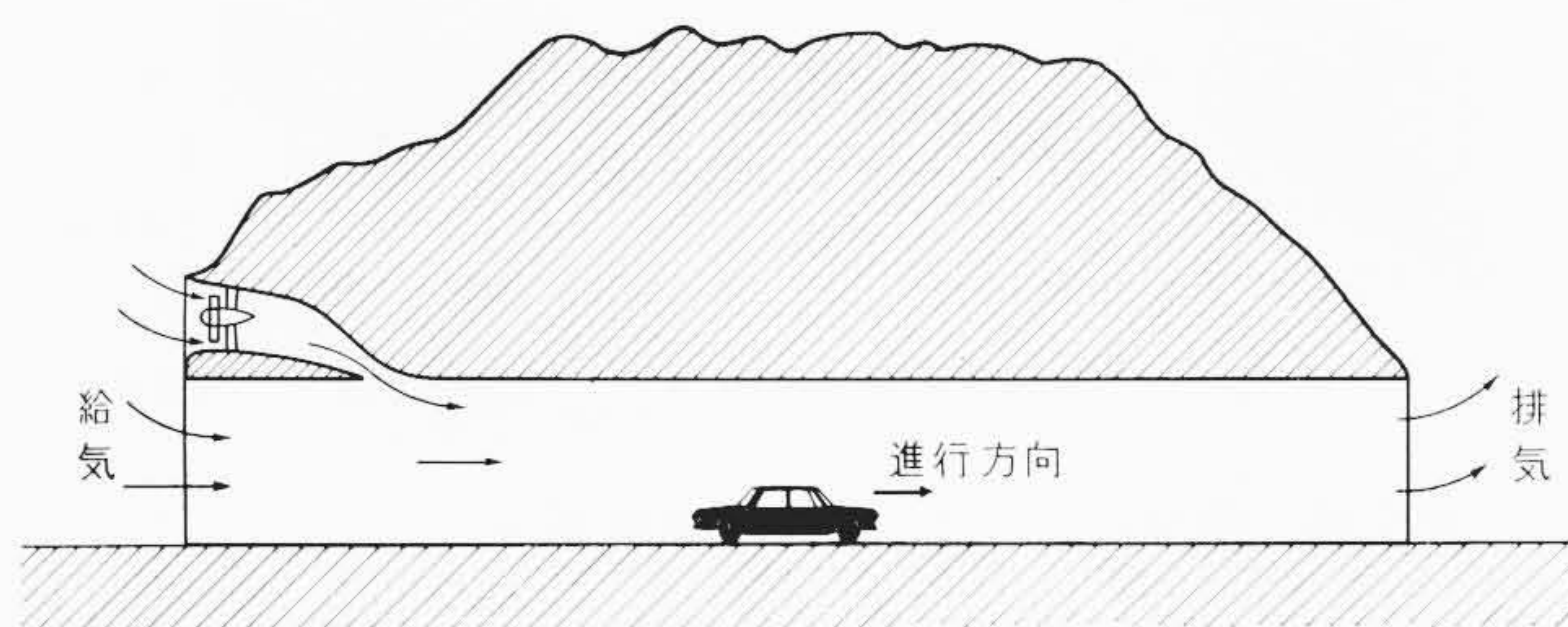
* 日立製作所川崎工場



第1図 横流式換気方式



第2図 半縦流式換気方式



第3図 縦流式換気方式

$$\sqrt{Q} = \frac{3\sigma + \sqrt{9\sigma^2 + 8\mu KA}}{\sqrt{8AT} \cdot K} \dots\dots\dots (1)$$

ここに Q : 換気量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$)
 A : トンネル1kmの内容積 (m^3)
 T : 自動車の間隔時間 (s)
 K : 許容煤煙濃度
 μ : 煤煙量
 σ : 煤煙量の標準偏差

また所要風圧を決定する各要素には次のものがある。

- (1) トンネル車道部圧力分布
- (2) トンネル天井ダクト部圧力分布
- (3) 接続ダクト部圧力損失
- (4) 吸込部圧力損失

(1)のトンネル車道部圧力分布は次式により求められる。

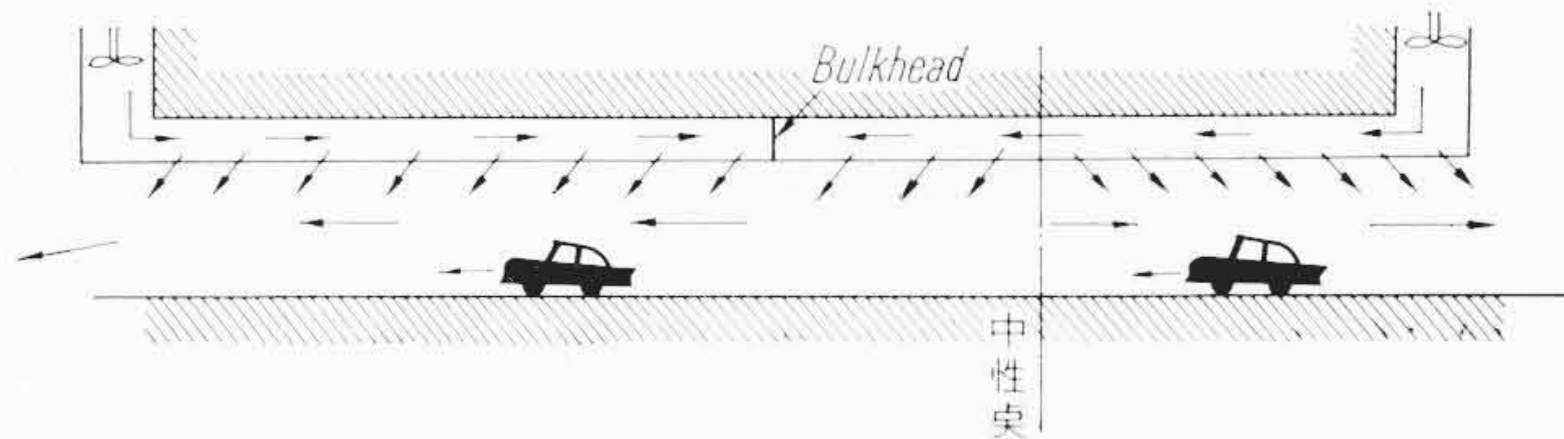
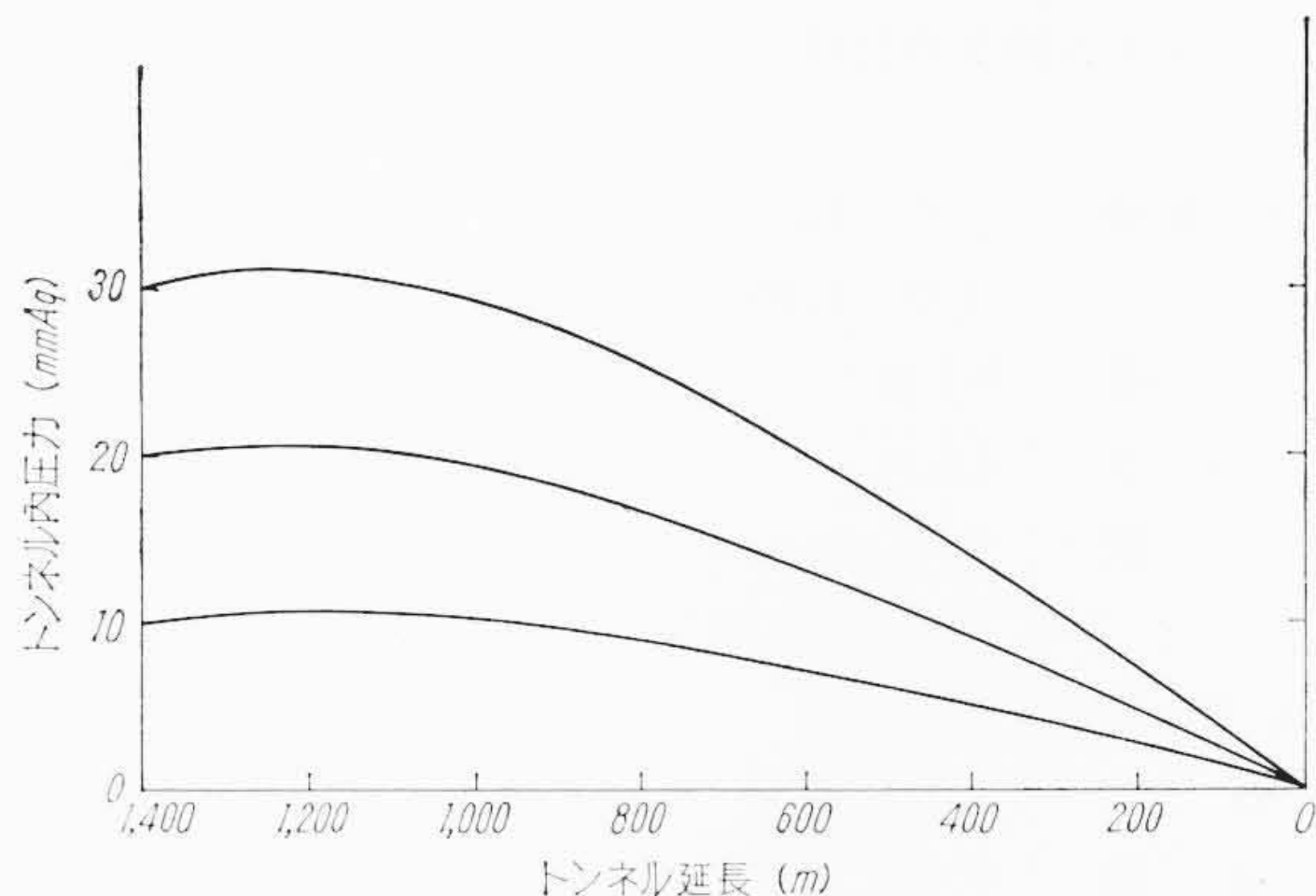
$$P_c - P_x = \left(\frac{q}{A}\right)^2 \left(1 + \frac{\lambda}{6D} x\right) x^2 \frac{\gamma}{g} \pm \alpha x \frac{\gamma}{g} \left\{ V_T^2 \pm V_T \left(\frac{q}{A} x\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{q}{A} x\right)^2 \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに P_c : 中性点におけるトンネル内圧力 (mmAq)
 P_x : 中性点より x m のトンネル内風圧 (mmAq)
 q : トンネル長さ1m 当たり換気量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)
 A : トンネル車道部面積 (m^2)
 λ : トンネル壁面摩擦抵抗係数
 D : トンネル車道部代表寸法 (m)
 α : 交通換気常数
 V_T : 車速 (m/s)

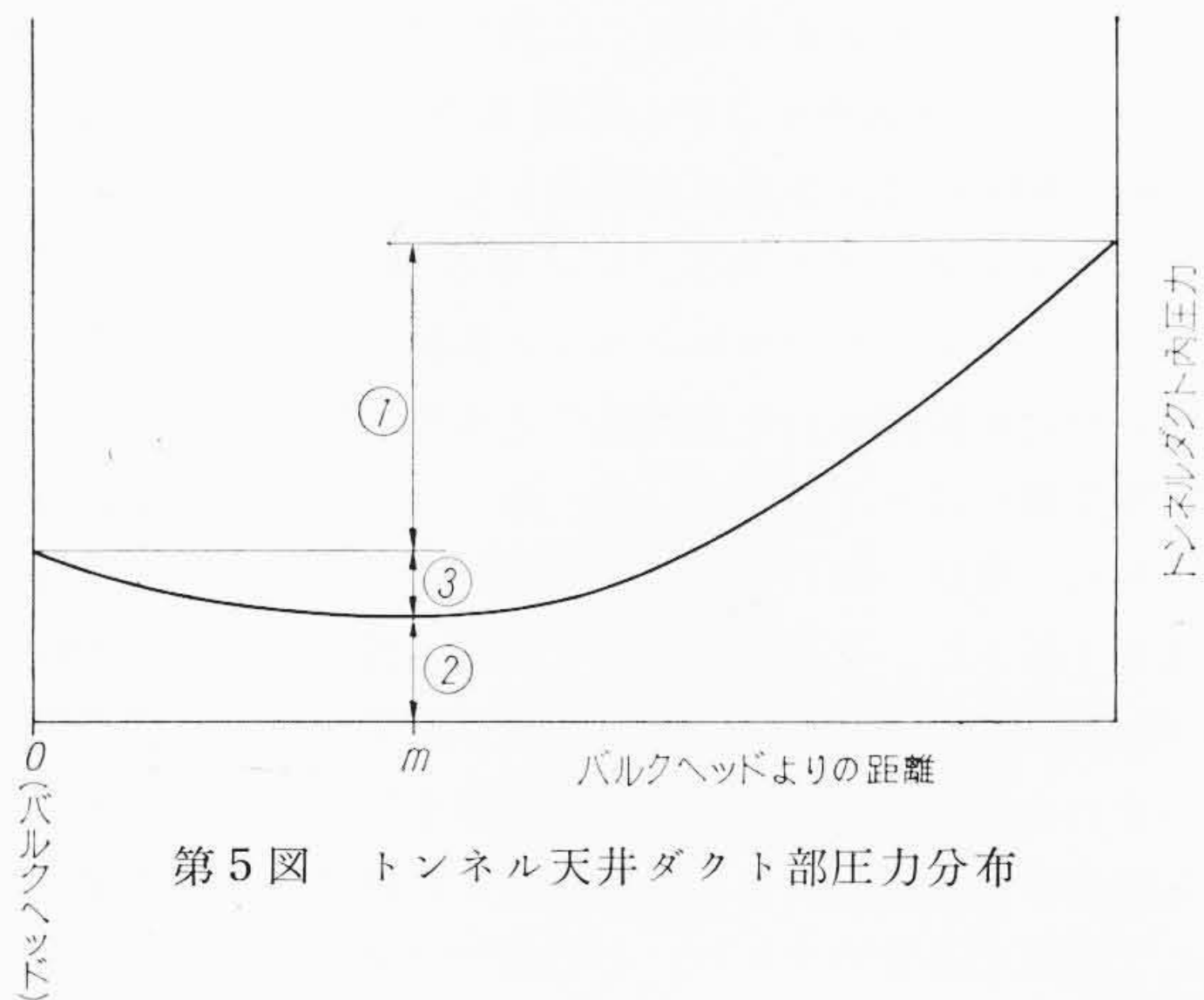
自然風と交通換気より、第4図に示す中性点 (トンネル内換気流

第2表 車種別交通量推定値

項目 \ 車種	トラック			バス		乗用車		合計
	大形ガソリン	大形ディーゼル	小形ガソリン	大形ディーゼル	大形ガソリン	普通	小形	
推定交通量 (台/時)	800	228	422	74	26	218	232	2,000
比率 (%)	40	11.4	21.1	3.7	1.3	10.9	11.6	100
1台当たり排気量 (m³/km)	4.5	7.7	1.5	6.5	6.5	3.4	1.5	—
1台当たり燃料消費量 (l/km)	0.209	0.165	0.058	0.166	0.202	0.107	0.058	—



第4図 トンネル車道部圧力分布



第5図 トンネル天井ダクト部圧力分布

が左右に分岐する点) の位置が考えられるので、トンネル車道内圧力は最大 30 mmAq とした。つぎにトンネル天井ダクト部圧力分布を第5図に示す。図中の①, ②, ③の各部の圧力は次式により求めた。

$$\textcircled{1} \quad P_x - P_0 = \frac{\gamma}{2g} V_x^2 \left(\frac{\lambda x}{3D} - 1 \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\textcircled{2} \quad \Delta P_s = \{ (1 + \xi) v^2 + (\zeta_2 - 1) V_x^2 \} \frac{\gamma}{2g} \dots\dots\dots (4)$$

$$\textcircled{3} \quad P_m - P_0 = \frac{\gamma}{2g} V_m^2 \left(\frac{\lambda m}{3D} - 1 \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{ただし } m = \frac{2D}{\lambda}$$

ここに P_x : バルクヘッドより x m の点におけるダクト内圧力 (mmAq)

P_0 : バルクヘッドの圧力 (mmAq)

D : トンネルダクト代表寸法 (m)

λ : トンネルダクト壁面摩擦抵抗
 V : ダクト内風速 (m/s)
 ΔP_s : x 点における分岐点とトンネル内との圧力差 (mmAq)
 v : スロット吹出し速度 (全開時) (m/s)

ξ : スロットの抵抗係数

ξ_2 : 分岐損失係数

以上よりトンネル換気の仕様を次のように決定された。

トンネル延長	上り 1,453 m 下り 1,389 m
幅員	8.7 m
天井高さ	4.5 m
勾配	上り -0.88% \searrow 下り +1.59% \swarrow
換気延長	約 700 m
交通量	2,000 台/時
換気量	300 m ³ /s (トンネル全長に対し)
所要風圧	50~80 mmAq

3. 換気装置の概要

天王山トンネルの換気方式は、第6図のトンネル平面図に示すように、新鮮な外気を天井ダクトに設けた 5 m ピッチで 1 m × 0.155 m × 3 ケ所のスロット吹出口より車道に送り、車両の排気ガスで汚染された空気は、車道空間よりトンネル両坑口に押し出されて排出する半縦流式換気法である。トンネルは中心間隔 30 m の上下 2 本とし、トンネル延長約 1,400 m で、2 車線の幅員となっており、トンネル車道上部の弓形状トンネルダクトは、トンネル延長の中央部より東西に 700 m づつに区切られ、コンクリート接続ダクトにより西口、東口の各坑口付近に設置された換気塔の送風機に接続されている。

この換気塔には上下線用として、各 2 台ずつ計 4 台の送風機が据え付けられ、東口、西口合計 8 台の送風機が使用されている。換気は給気を主体とし、交通量に応じて運転台数 1~2 台、回転速度 2 種類(電動機の極数変更による)、および動翼の取付角度 8 種類を適宜組み合わせて、8~12 段階に風量制御を行なう。またトンネル内にて自動車の火災発生の際は、急ぎ送風機を逆転させて、最大風量にて排風するものであり、この動作はすべて火災感知器により自動制御となっている。第7図は換気塔とトンネルとの関係を立体的に示したものである。

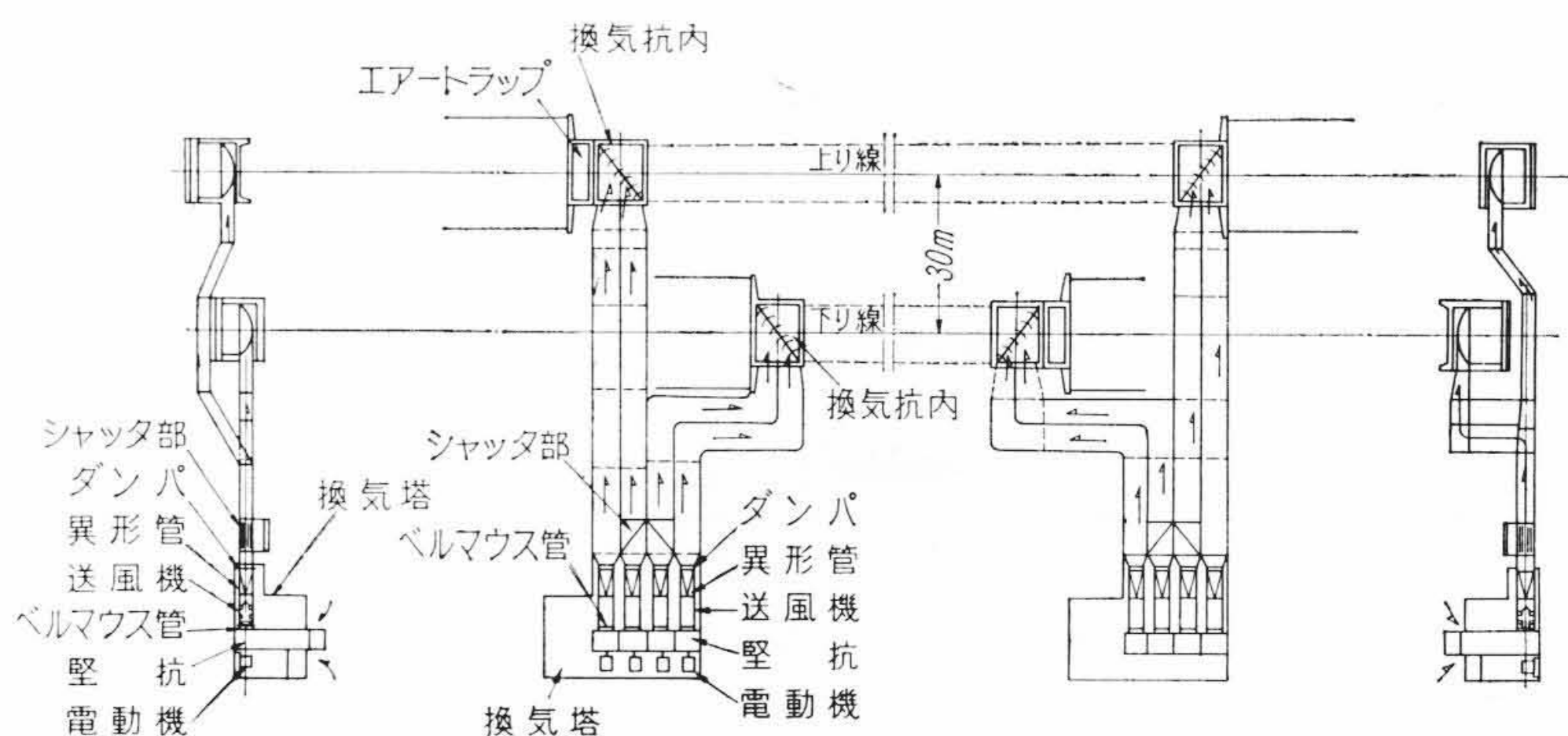
4. 換 気 塔

換気塔の概略構造および寸法を第8図に示す。2 階建にて吸込塔が高く、屋上より突き出しており、1 階には送風機、ダンパなどが据え付けられた送風機室と、電動機、減速機などが据え付けられた電動機室がある。送風機搬入部は床面積を広くしてあり、送風機、電動機などの分解、運搬には送風機室と電動機室にクレーンを設けて便利にしてある。

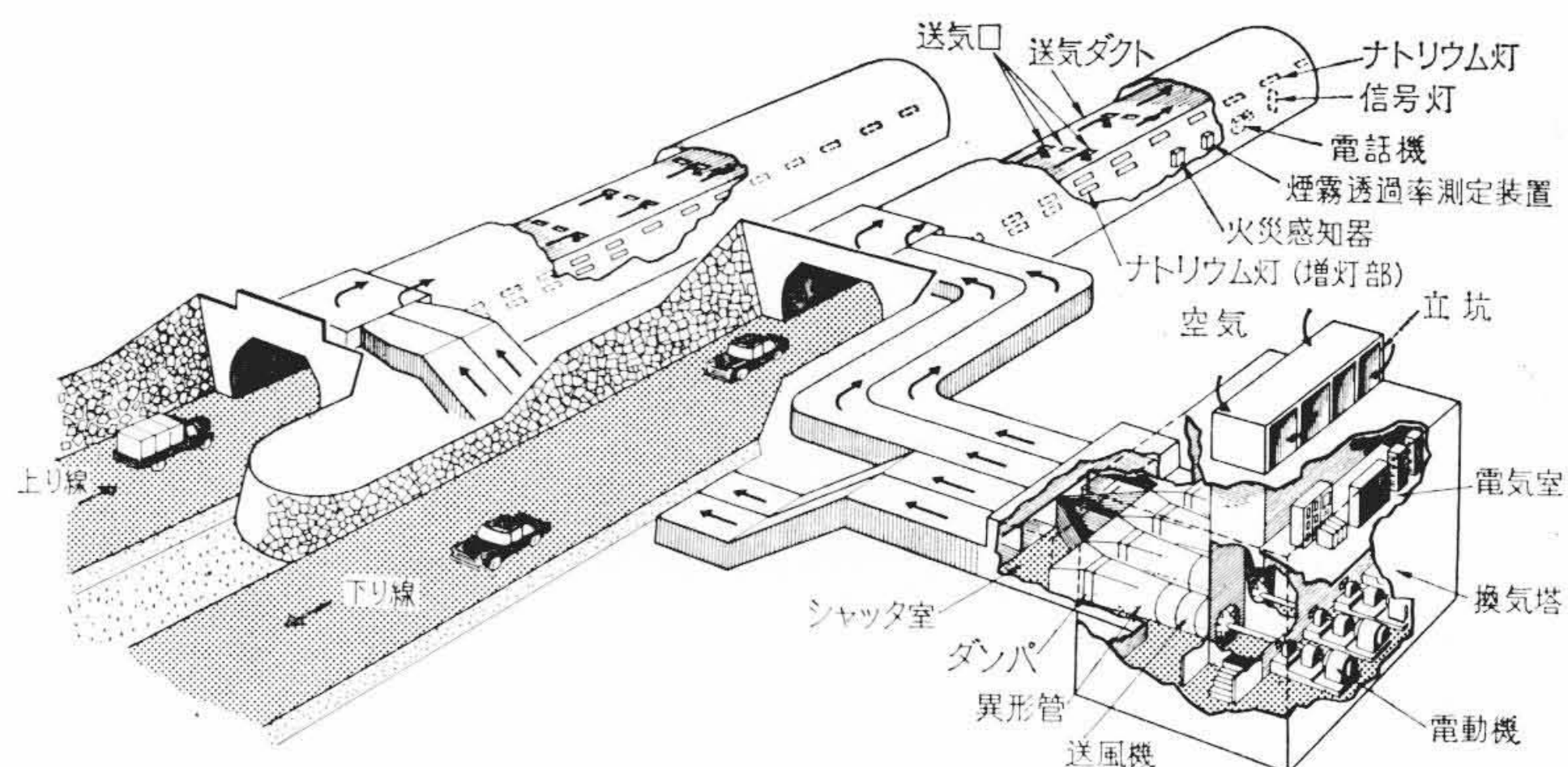
電動機室の 2 階は電気室になっており、4 台の電動機盤、極数変更盤、可逆制御盤、ローカル盤、CO メーター、補機接触器などが据え付けられている。

また換気塔とトンネルダクトとを接続しているコンクリートダクトには、切換シャッター 3 台が取り付けられており、これにより 4 台並列の中央の 2 台は上下線に切換えが可能である。

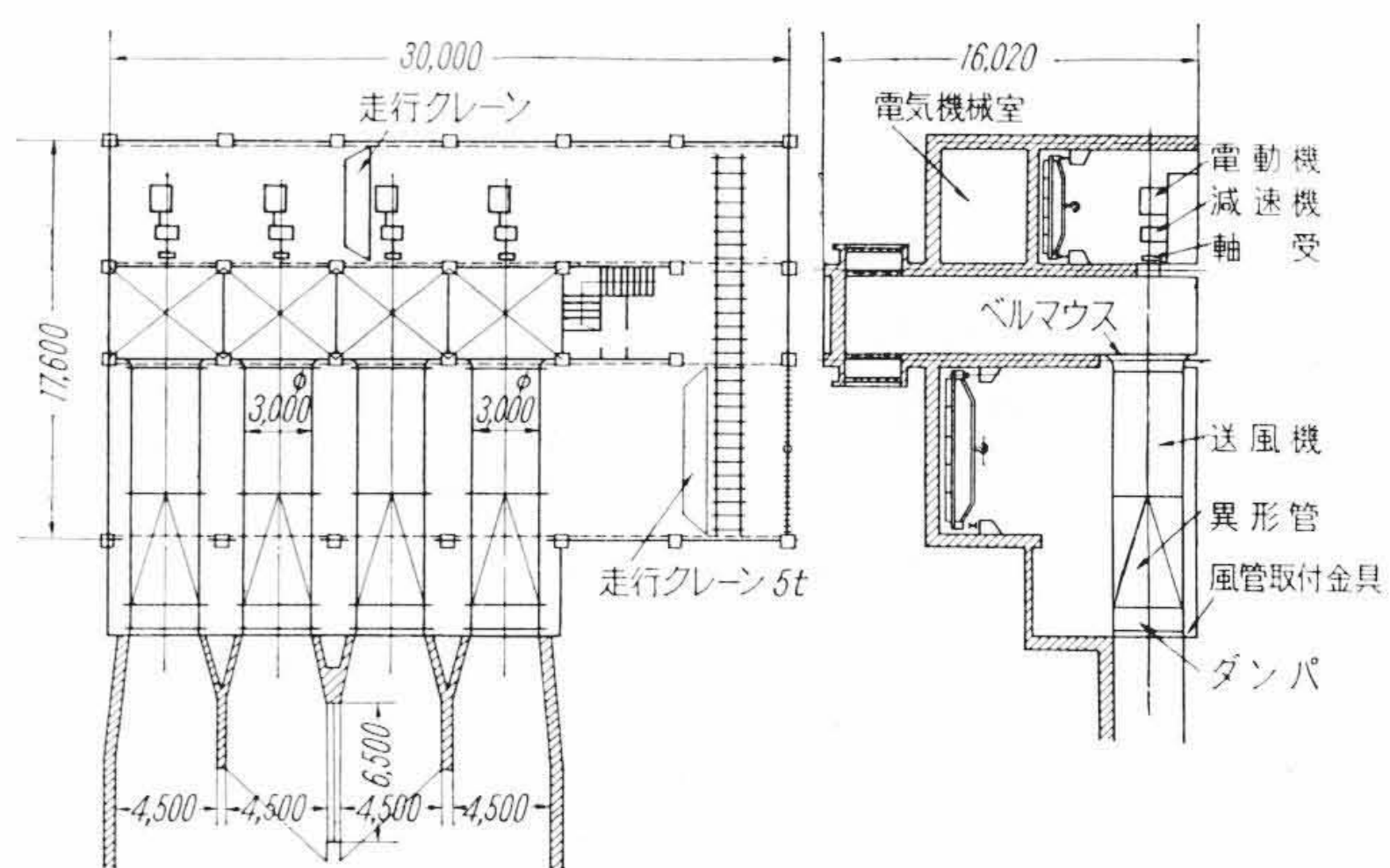
これらの制御は約 1,500 m 離れた中央制御室より CO メータお



第6図 トンネル平面図



第7図 換気塔およびトンネル立体図



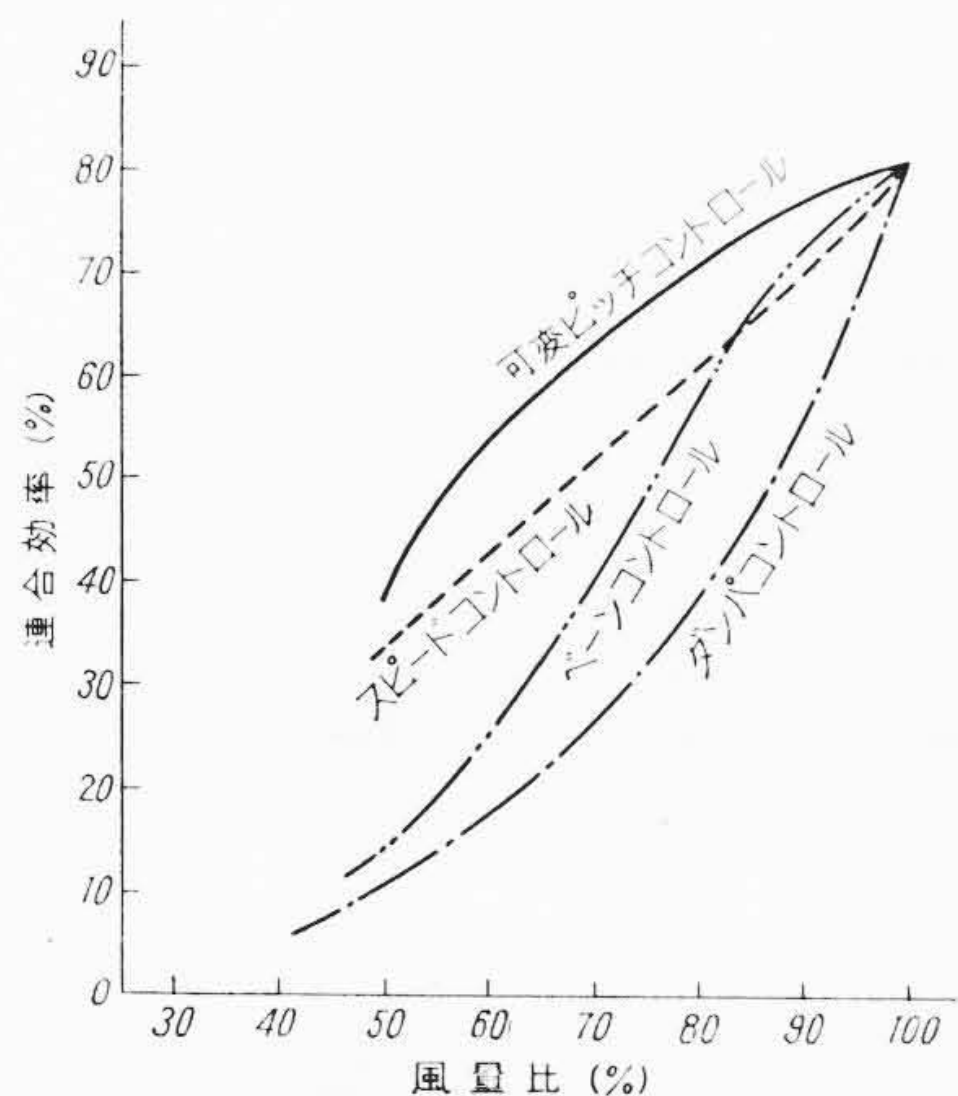
第8図 換 気 塔

よび煙霧計と連動して、自動制御を行なえるようになっている。

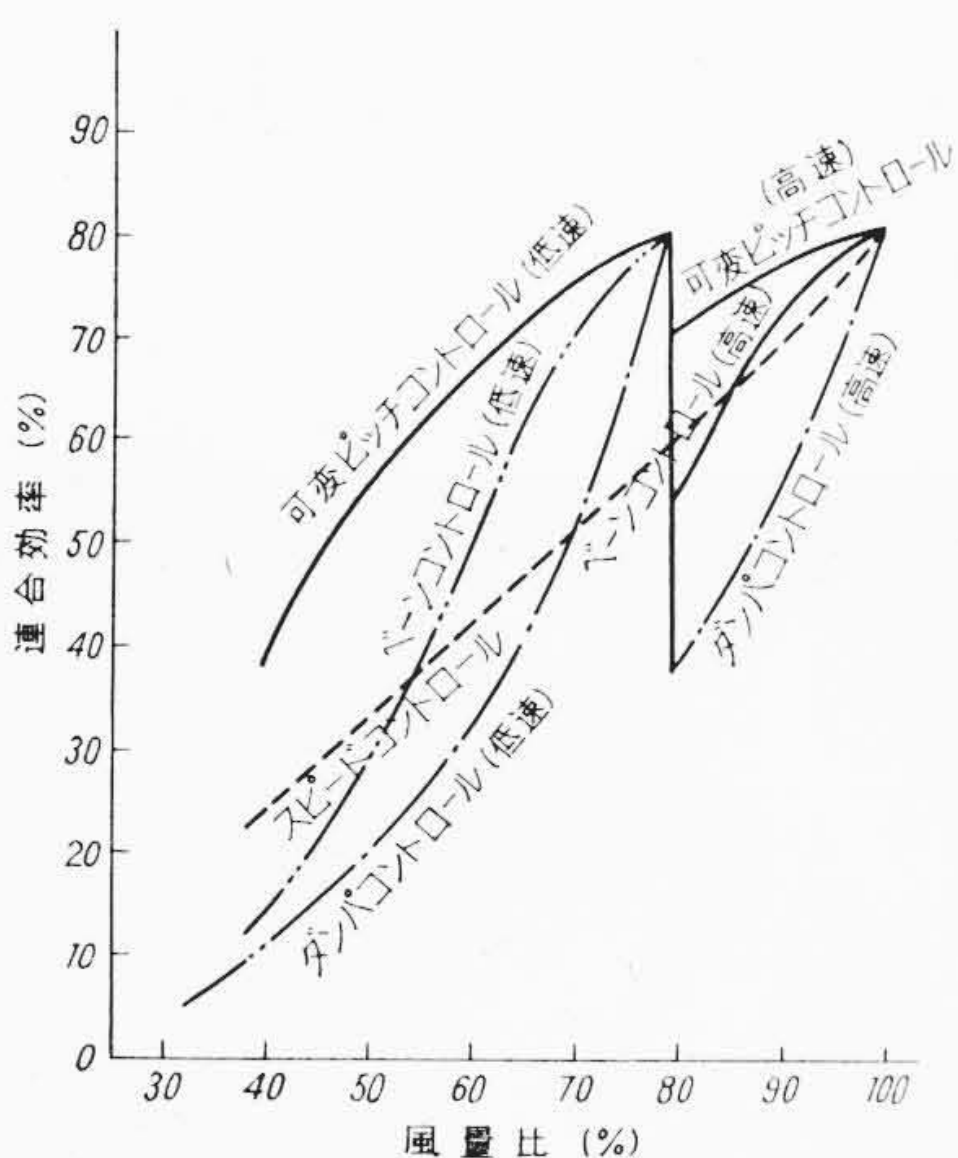
5. 送 風 機

本送風機の仕様は次のとおりである。

形 式	3,000 mm 1 段直管形, 正逆転, 動静翼可変ピッチ式歯車減速, 軸流送風機
送 排 風 風 量	75 m ³ /s
送 排 風 全 風 圧	50~80 mmAq (常用 65 mmAq)
温 度	0~20°C (ただし火災時は 100°C)
回 転 数	420/315 rpm
電 動 機 出 力	100/70 kW
電 動 機 極 数	6/8 極
動翼角度変更範囲および速度	200 度 (2.25°/s)
静翼角度変更範囲, 速度	200 度 (9°/s)
動翼設定角度種類	9 種類



第9図 プロペラファンの各種コントロール方式の効率比較



第10図 プロペラファンの各種コントロール方式の効率比率(2速度の場合)

この送風機の風量調節方法はトンネル内交通量に応じて、1ダクトに対し送風機2台、回転数2段、動翼角度8種類を適宜組み合わせ、送風量 $40 \sim 150 \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で高性能を維持しつつ8または12段階に風量調節を煙霧計と連動させて自動的に制御できるものである。各種の風量調節方法中、極数変換、動翼可変ピッチ方式が最もすぐれていることが第9、10図に示されている。

火災その他、非常時には送風機の動静翼角度を約180度回転させ、電動機を逆相に入れ、逆回転として排風するもので、正転より逆転までを2分以内におこなうようにしている。逆転は風量 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ の1段階のみとなっている。

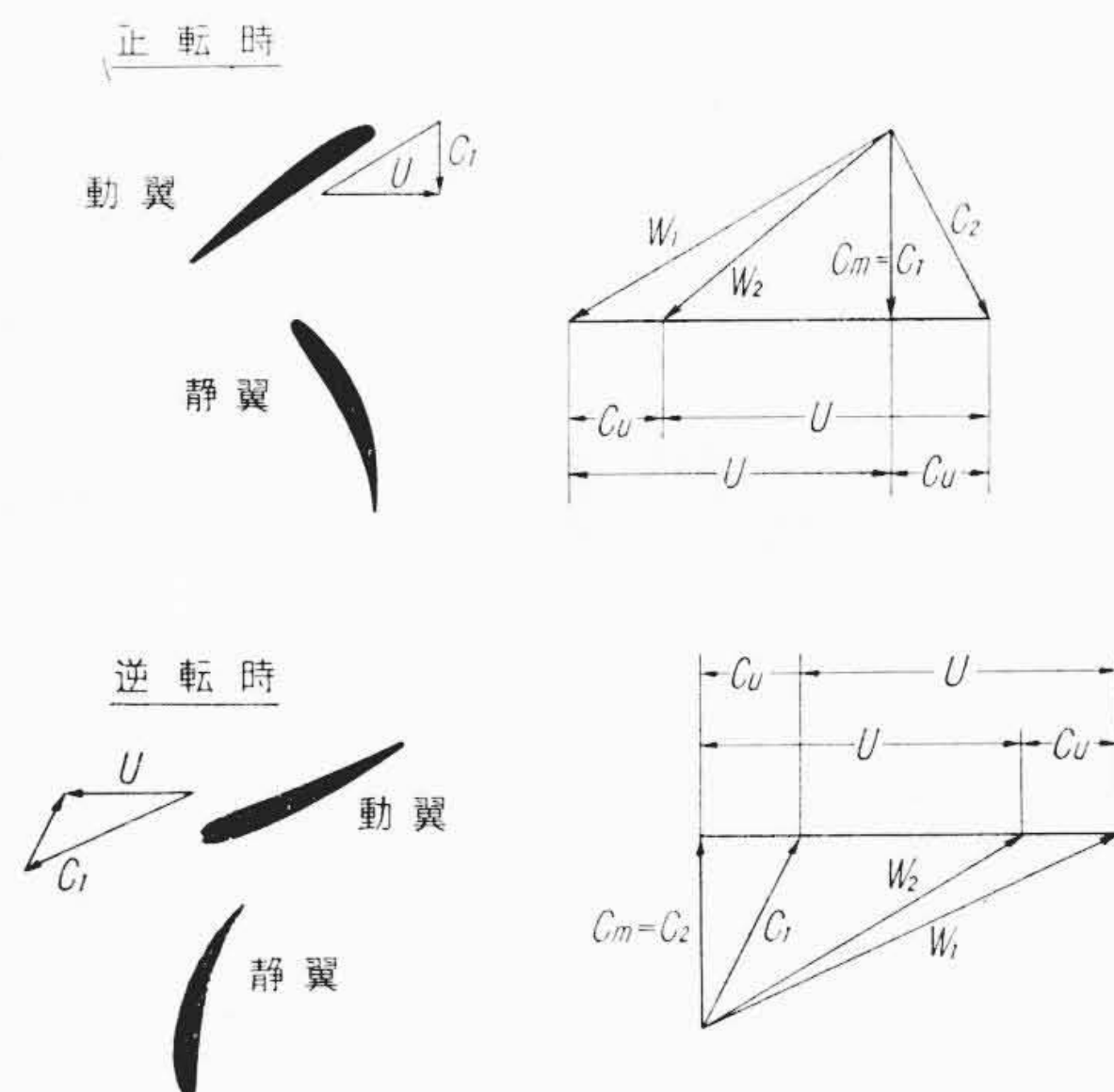
正転時は後置静翼式であったものを、逆転時には前置静翼式として運転するもので、正、逆転のいずれの場合でも効率が低下しないよう考慮して動静翼が設計されている。第11図はこれらの速度線図を示したものである。

この送風機は大風量の部分を2台並列運転とし、この際サージングを起こさないよう設計製作されており、また電動機は 0°C においても10%の出力の余裕のあるものとした。本送風機の特性曲線を第12図に、外観図を第13～15図に示す。

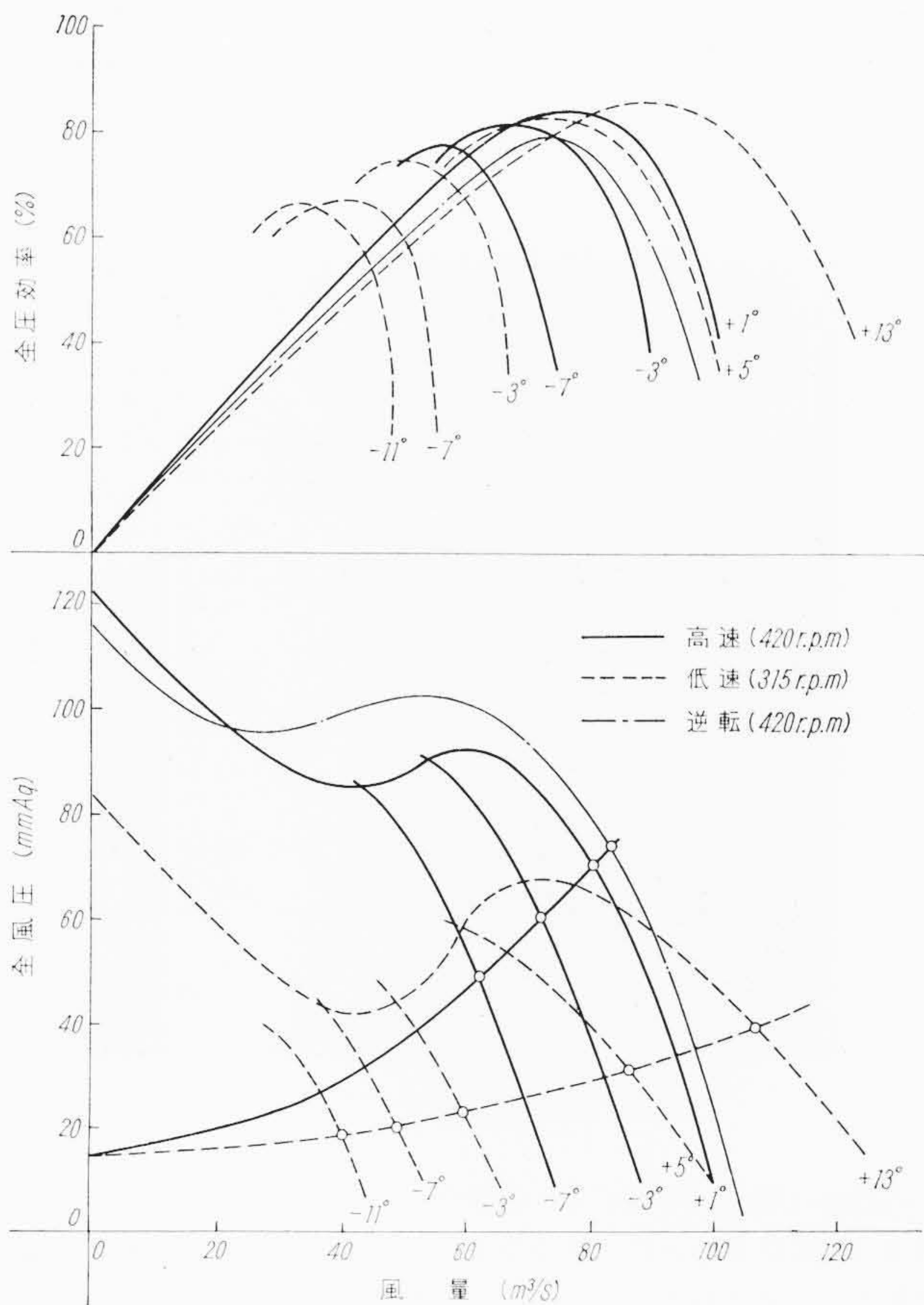
本送風機は正逆転可能の電動機により、歯車減速機を介して約 $1/3$ に減速され、中間軸を経て主軸に取り付けられた羽根車を駆動させ送風を行なうもので、そのおもな部分の詳細についてのべる。

5.1 羽根車

動翼とボスはアルミニウム合金鋳物製とし、動翼の遠心力に対しては単式スラスト玉軸受を、ラジアル方向にはニードル軸受を使用



第11図 翼列速度三角形

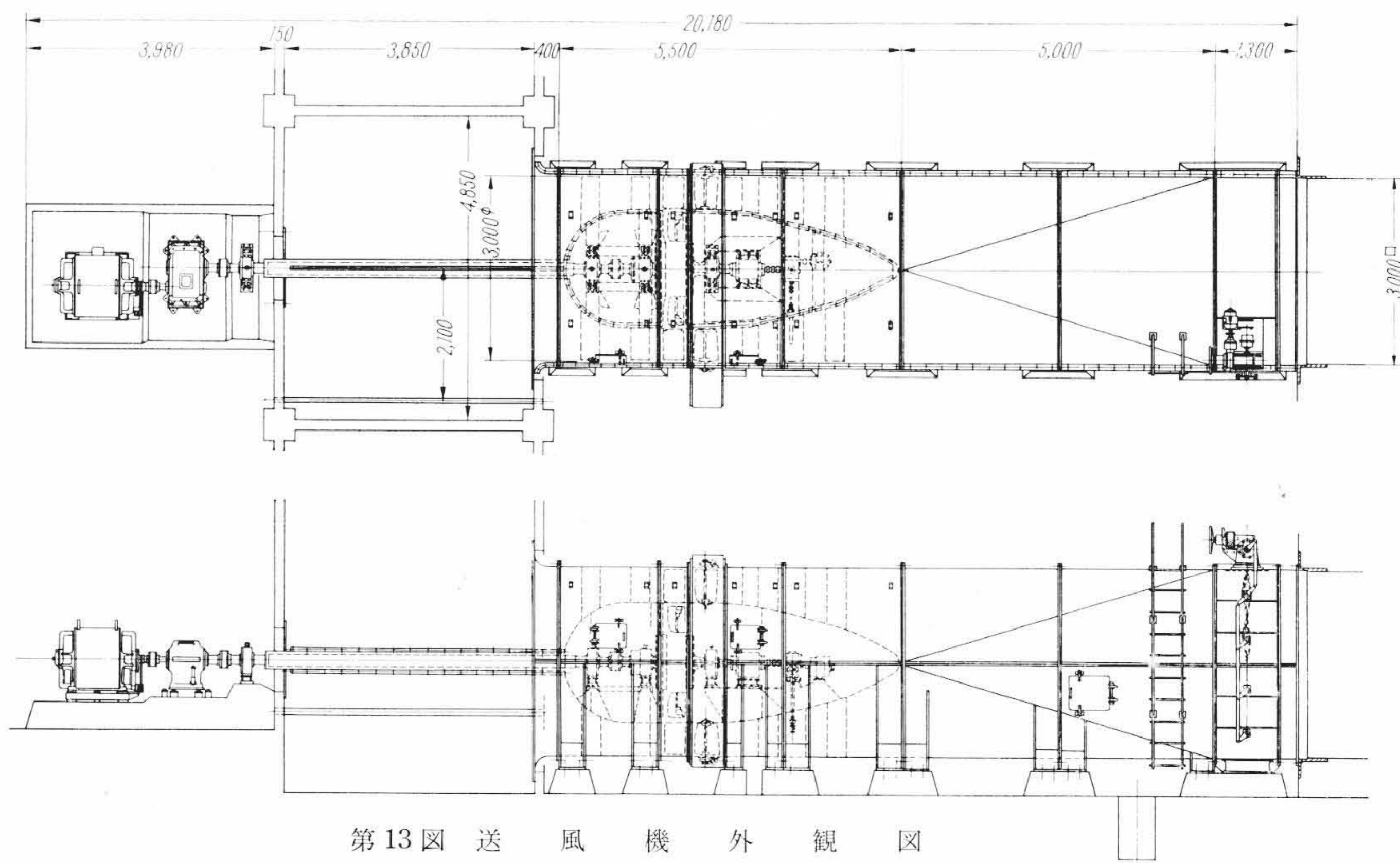


第12図 送風機特性曲線

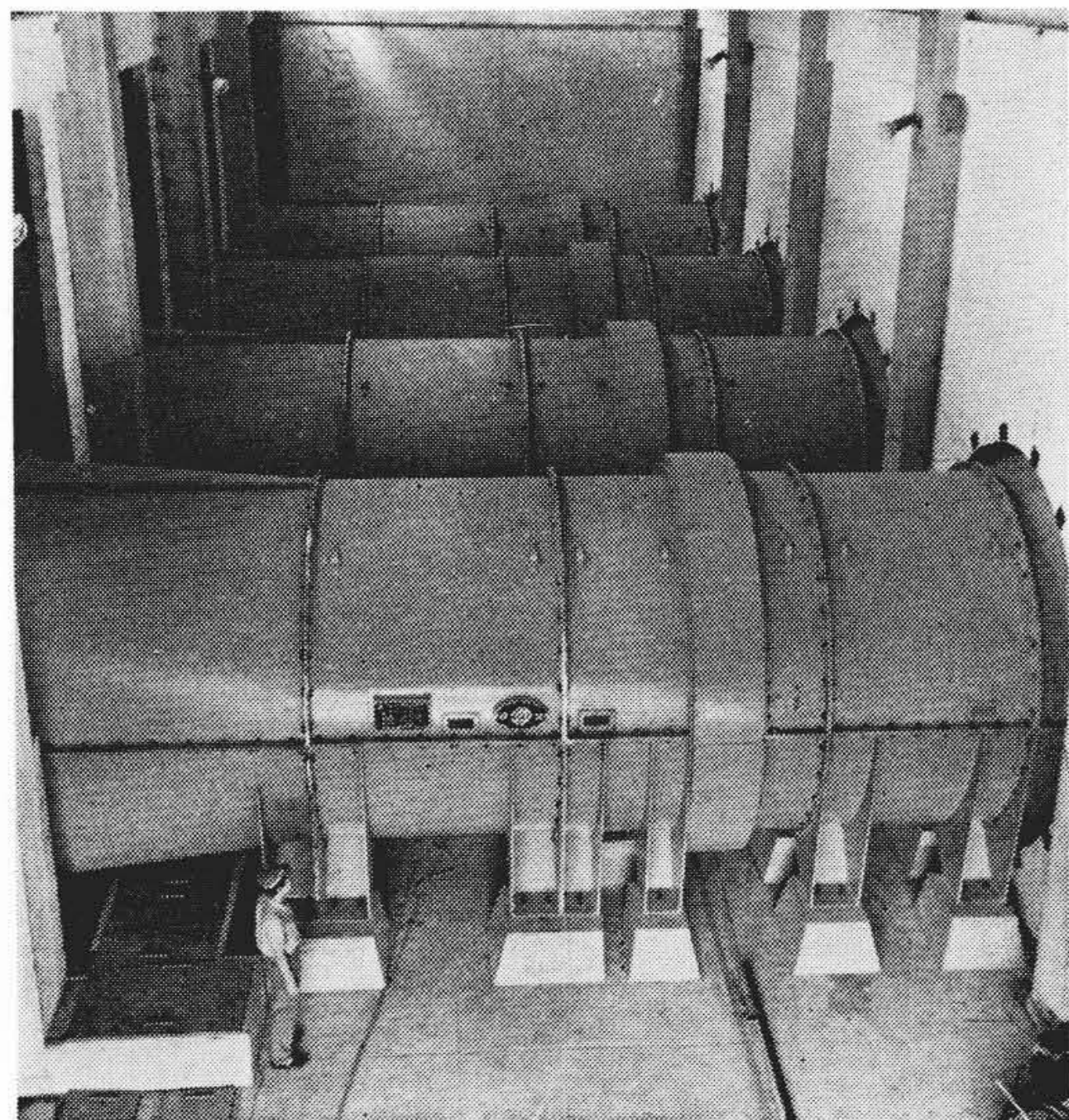
して摩擦損失を極力小さくし、可変ピッチ機構の所要出力を小さくしてある。また動翼角度は180度以上変更するので、ボス外面とケース内面は球面とし、いずれの角度でもハネ先端および根本のギャップを一定として、容積効率の上昇をはかってある。この種の可変ピッチ機構をもつ送風機としては、回転数が比較的高いので、翼部は中空とし遠心力を小さくし、表面はポリウレタン系塗料を焼き付けて母材を腐食より保護している。第16図は羽根車の外観を示す。

5.2 ケーシング

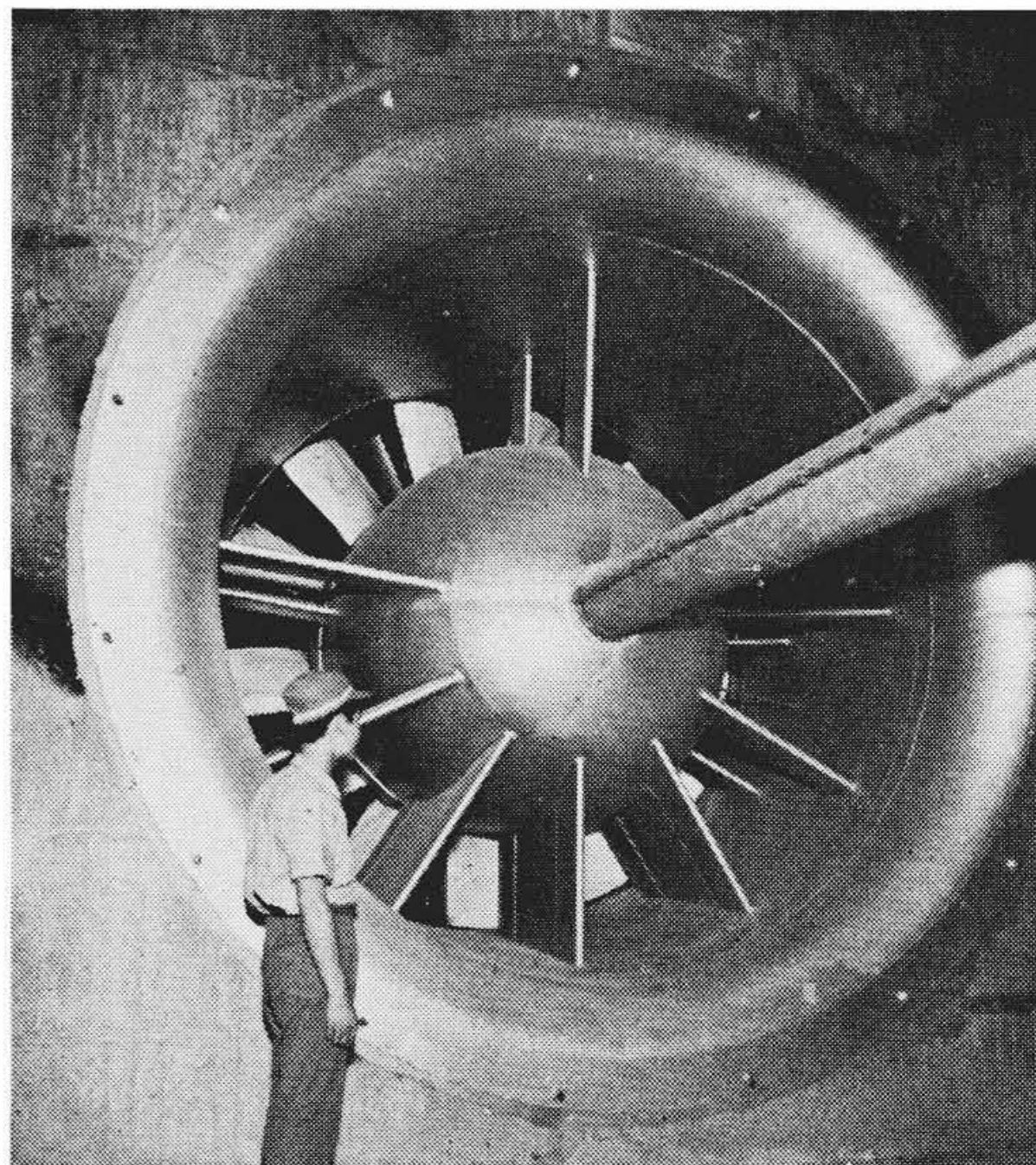
銅板製で上下に2分割とし、軸方向に4分割し、分解、組立、運搬に便利な大きさとし、各合せ面はフランジによりボルト締めしている。ケースの内外筒は翼型断面のステーにて強固に結合されており、内筒の形状は流線型とし、尾筒は徐々に風速をおとして効率良く、動圧を回収するようにしている。



第13図 送風機外観図



第14図 換気所に据付られた送風機



第15図 吸込口より見た送風機

内筒には軸受、可変ピッチ機構などの重要部品が内装されているので、防塵、防水などには完全なものとするための特別の装置が施してある。通常は軸受、カップリングの点検はマンホールより入り、ケースを分解する必要のないようになっている。

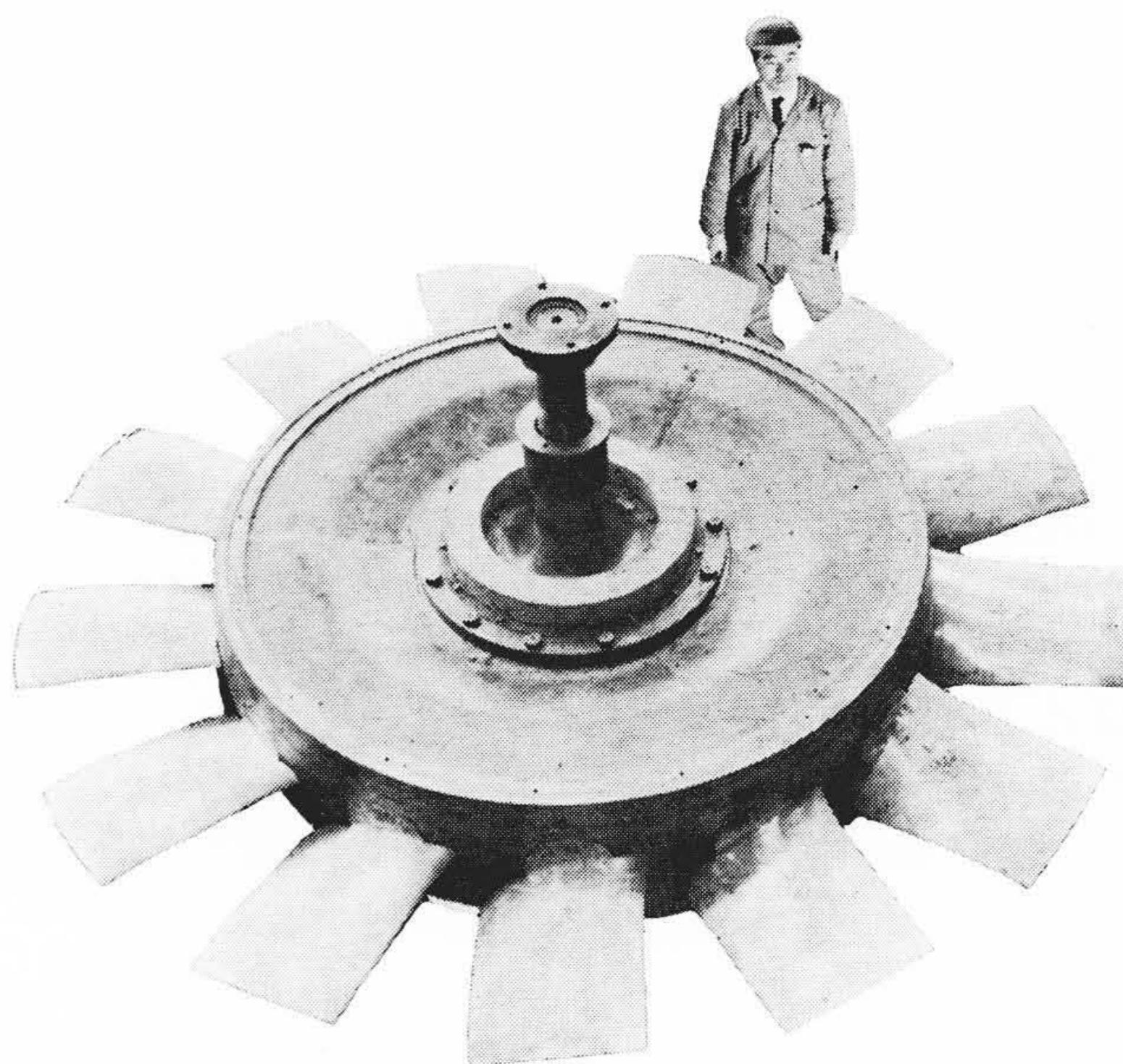
5.3 主軸および中間軸

主軸は炭素鋼、中間軸は鍛造鋼に熱処理を施したものを使用し、機械総仕上を行なったもので、十分熱処理により運転中に曲りやひずみの生ずるのを防いでいる。軸径は危険回転数における振動をさけるよう十分な太さとし、常用回転数より第一次危険回転数を大きくとってある。

5.4 軸 受

軸受はコロガリ軸受を使用し、グリース潤滑を採用している。ラジアルには球面コロ軸受、主軸のスラストにはアンギュラーコンタクト玉軸受を脊面合せして使用している。いずれも形式、寸法はグリース潤滑限界速度以下の十分安全なものとなっている。

軸受箱は鋳鉄製にて上下2つ割れとし、長期運転中、塵埃、水滴その他の異物の侵入やグリースの漏洩のないように軸封は完全なものとしている。

第16図 3,000 mm ϕ 羽根車

5.5 カップリング

主電動機と送風機、減速機間はすべてギヤカップリングを使用している。このカップリングの歯面は大きくクラウニングを施し、若干の偏心、ねじれが生じても安定した運転ができるので、本機のように据付場所の地盤条件の悪い場合には適している。

5.6 動力伝達用減速機

電動機の回転数 (1,200 rpm) を本減速機により減速して、送風機 (420 rpm) に動力を伝えるもので、ヘリカルギヤを使用している。ギヤは炭素鋼、ピニオンはニッケルクローム鋼製で熱処理後歯面研磨を行ない、精度をあげている。軸受はコロガリ軸受を使用し、ギヤケースに 1 体に取り付けられ油浴潤滑とし、外部に取り付けられた油面計により油面を監視できるようになっている。

5.7 動翼可変ピッチ機構

内筒に内装された電動機より減速歯車、ネジ、ラックなどを介して羽根の角度を調節する構造で、可変角度が 200 度となっている。

電動機の制御開閉には、ギヤドリミットスイッチを使用し、あらかじめ設定した任意の動翼角度にセットすることができる。このリミットスイッチは可変角度範囲内で自由に調節できるもので、送風機ケースの外部に取り付けられ、調節作業を容易に行なえるようになっている。電動機はトンネル内における火災時の温度上昇を考慮して H 種絶縁としている。

5.8 静翼可変ピッチ機構

動翼と異なり静翼は簡単な構造となり、ケース外周に多数のウォームとウォーム歯車を組み合わせ、静翼の軸端にウォーム歯車を取り付け、ウォームは自在接手により多角形に接続して回転させて、角度変更を行なうものである。

静翼は翼の設計上ピッチ/コードが根元部で約 0.6 程度を必要とするので、同一方向に全部を回転した場合、途中で隣の翼と接触して 180 度回転を行なうことができないので、半数ずつ回転させ、リミットスイッチとマグネットカップリングにより切り換えを行なっている。

5.9 保安装置

主軸および中間軸の軸受には電気式温度計が取り付けられ、送風機外部の計器盤にて計測できるようになっており、一定以上の温度上昇の場合には警報を発し、送風機を停止するようになっている。

6. 付 属 品

6.1 吐出ダンパ

本ダンパは送風時に送風機吐出側に取り付けられるもので、各送風機が停止時に全閉させて、隣の送風機よりの送風のバイパスを防ぐものである。ダンパの有効面積は $3 \times 3 \text{ m}$ で風圧 $\pm 160 \text{ kg/m}^2$ にて開閉できるようになっている。4 枚の流体抵抗の少ないベーンよりなるルーバ型ダンパで、ベーンの重なり部やケースとの間隙部

はゴムパッキングにて気密を保つようになっている。

6.2 切換シャッター

送風機故障時 2 つのダクトの間の送風の切り換えを行なうため、シャッターを取り付けている。これは送風機吐出側のダクト内に設けられ、開閉時間 2 分間で建築用のシャッターで強度をもたせた補強入り 2 重スラットを採用し、気密を保つように改造したものである。

7. 日本におけるトンネル換気の動向

近年における道路の開発によるトンネル換気計画が急増しており、その換気方式については、そのトンネル特有の条件により種々の方式が採用されているが、一般的にいて都市トンネルでは横流式換気方式が採用されている。これは自動車の流れの停滞がある程度予想されるため、交通換気の利用が困難な場合と、交通量の増大や火災発生時を考慮して決定されるものである。

しかし都市トンネルにおいてもトンネル延長の短いもの (600 m 以下) では半縦流式を採用しており、その欠点である火災時におけるトンネル内の煙や、炎の拡大も大きくないと考えられるためである。

郊外における高速道路トンネルは 1,500 m 以下では半縦流式を、それ以上では横流式が採用されるべきである。また普通道路トンネルでは半縦流式か縦流式が主に採用されているようである。

いずれのトンネルの場合も火災時における換気方式の欠点に対する処理を考慮する必要がある、その点で各トンネルともそれぞれの対策が考慮されている。

日本におけるトンネル換気では、ガソリン車とディーゼル車の比率上、煤煙により換気量が決定されており、トンネル内における煤煙を浄化する方法や、自動車排気管に再燃焼装置を取り付けるなどにより、換気量を減少させるとともに、数 km におよぶ長大トンネルの実現する時代になると考えられる。

これらに使用する送風機も速度変換を 3 段程度とし、台数制御と合わせた風量調節のものが多くなり、ノッチ段階も 3 ~ 6 段階程度とし、保守の簡単な形態にと移行してゆくであろう。

8. 結 言

以上、天王山トンネル換気設備の概略を説明したが、現在全国各地に高速道路が建設されつつあり、天王山トンネルは、あらゆる意味で今後の日本における自動車トンネルのモデルとなるものと考えられる。

日立製作所では引き続いて、首都高速道路公団より三宅坂インターチェンジ・千鳥ヶ淵トンネルの換気設備を受注、昭和 39 年 6 月完成の予定で製作中である。

最後に、本換気設備の完成に終始ご指導をいただいた、日本道路公団関係者各位に深く感謝の意を表する次第である。