

ジェットファンによる道路トンネルの換気

Ventilation of Vehicular Road Tunnels by Jet Fan

道路トンネルの換気の必要性は、自動車交通の発展に伴いますます増えている。我が国のトンネル換気方式^{*1)}は、横流式、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。なかでも、換気方式としては比較的新しいジェットファンによる縦流式は、過去15年間に中小トンネルの主流を占める換気方式となった。

これは、トンネル内の天井部に取り付けたジェットファンの噴流により換気する方式である。この方式は建設工事が容易で、設備費が安いこと、一方交通の場合には自動車の走行換気力を利用でき省エネルギーに寄与する方式である。また、ジェットファンは大形化し、当初の7倍の能力をもつものまで使用され始めている。

日立製作所では、数多くの経験を生かしてジェットファンと制御設備を標準化している。

本稿は、ジェットファンによる換気方式とジェットファン及び制御設備について紹介する。

坂本 明* Akira Sakamoto

沢地末明** Sueaki Sawachi

伊藤 雅* Tadashi Itô

1 緒 言

我が国の自動車交通の発展は、オイルショックを契機にやや鈍化したとはいえ目覚ましく、これに伴い道路整備が進められている。地理的条件からトンネルが多い我が国では、トンネル換気についてトンネル内走行の安全性、快適性、環境問題などの面から十分に検討し、強制機械換気の要否と換気の方法を決定している。

自動車トンネルの換気方式の歴史は¹⁾、昭和33年に完成した関門トンネルに採用された横流式に始まり、続いて送気半横流式と立坑排気縦流式の実現を見た。これらの方式は、トンネル全長にわたるダクトや立坑、更に換気所を設けて換気機(大形軸流送風機)を設置するため建設費が多額となる。そのため、建設費が安く、交通量の増加に対しても既設のトンネルに簡単に設置できる方式の要求が生じ、これにこたえるものが昭和35年(1960年)に西独 Voith 社によって開発された Strarl Ventilator(ジェットファン)である。我が国でも昭和41年に既設の奥田トンネル(641m)に、同社製の口径630mmのジェットファンが設置され、比較的延長の短い(主として1,000m以下)トンネルに急速に広まった。更に、昭和50年には福島トンネルで口径630mmのファンの約3倍の能力をもつ、口径1,030mmのジェットファンが採用された。

一方、昭和48年のオイルショックは、トンネル換気にも省エネルギー化の新たな工夫と見直しが求められることになり、自動車の走行に伴う交通換気力(ピストン作用)を有効に利用できる縦流換気方式がクローズアップされた。また、昭和53年に日本道路公団では、換気量を従来の70~80%に減量したことにより、一方交通のトンネルでは2,000mぐらいまではジェットファンによる縦流式が適用できるようになった。これ

により、更に大口径化が要求されることになり、本年(昭和56年)谷稲葉トンネルでは口径1,530mmのジェットファンが採用された。

日立製作所では、関門トンネルをはじめとして、トンネル換気の歴史とともに各種の方式の換気設備を納入してきた²⁾。ジェットファンも、多くの実績と経験を生かしながら開発を続け、口径630mm、1,030mm及び1,530mmの3機種を中心として標準化している。

本稿では、縦流換気方式の代表となっているジェットファンによる縦流換気方式について制御設備を含めて紹介する。

2 ジェットファン換気方式

2.1 換気方式

ジェットファン換気方式は、機械換気を必要とする場合には最初に検討される方式であり、最も多く採用されている。この方式は、トンネル天井部に設置したジェットファンの噴流(30m/s)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。この説明図を図1に示す。換気流が片側の坑口から入り、もう一方の坑口へ向かって一定速度で流されるため、トンネル内の汚染濃度は、同図(b)に示すように出口坑口に向かって直線的に増加する。したがって、出口部での濃度が許容値を越えないように計画される。

この方式の長所は、(1)換気所、ダクトが不要であり、設備費が安価であること、(2)交通量の増加に応じて、あとからジェットファンを新設、又は増設する段階施工が容易であること、(3)一方交通の場合、ピストン作用を有効に利用できること、(4)対面交通の場合は、上下線の交通状態などに応じて、

※1) トンネルの機械換気方式は、トンネルの長手方向を縦軸と考え、換気流の方向により大別できる。

縦流式：トンネルダクトがなく、車道内をダクトとして縦軸方向に換気流を流す方式をいう。

横流式：トンネル全長にわたり、送・排気ダクトをもち、車道

内を横切るように換気流を流す方式をいう。

半横流式(送気式)：送気ダクトにより全長に均等に送気し、車道を通して坑口から排気する方式をいう。排気式はこの逆となる。

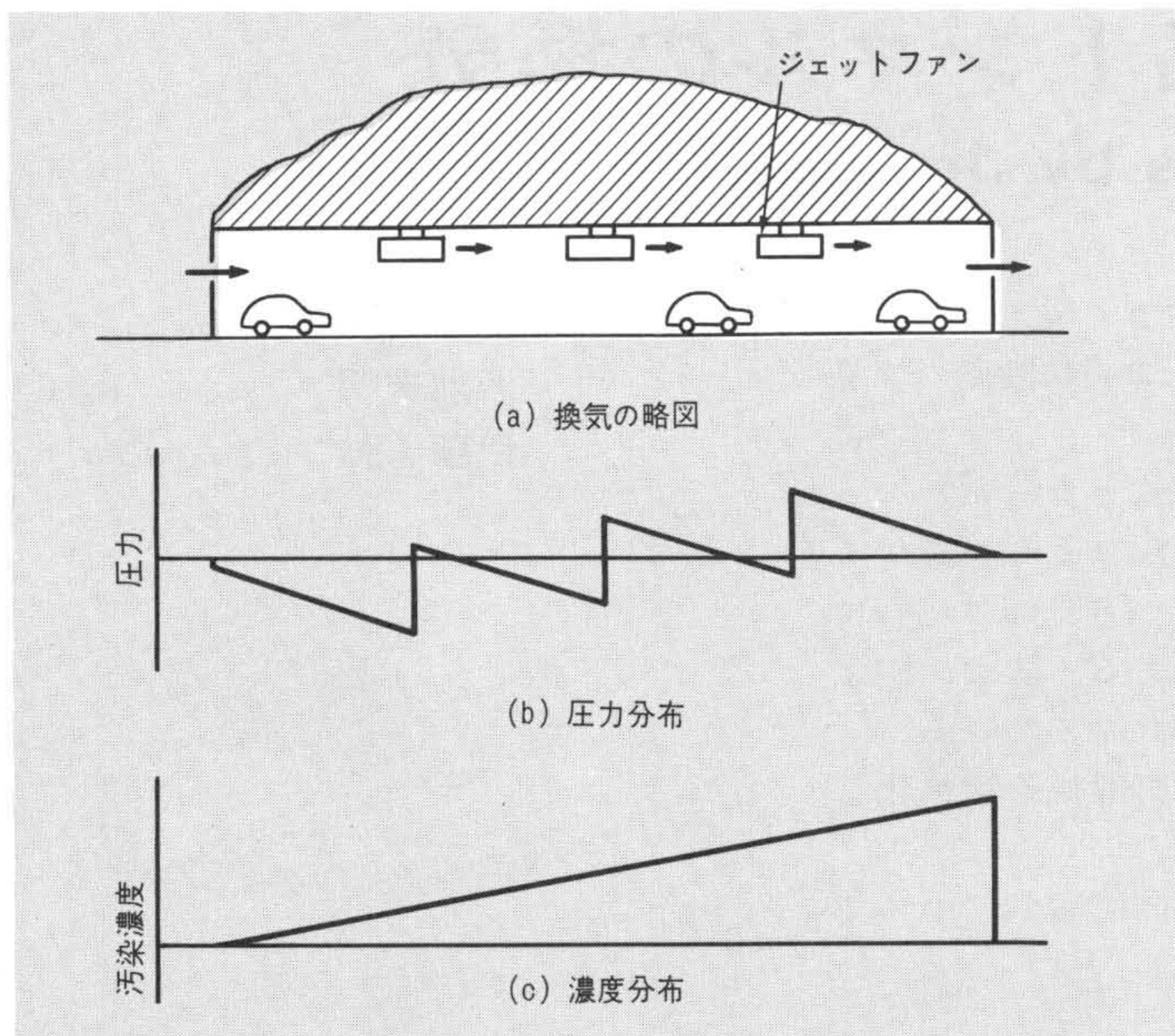


図1 ジェットファン換気方式 トンネル上部の空間につり下げたジェットファンの噴流により、トンネル内空気を移動させて換気する方式である。トンネル内の風速は一定であり、汚染濃度は直線的に増加する。

ジェットファンの回転方向を変えることにより、換気方向の選択ができること、などがある。

一方問題点は、(1)設置台数が多いと、トンネル内設置という点で維持管理上難点があること、(2)煤煙がジェットファンの消音器に付着すると騒音が高くなること、などがある。

2.2 換気の計算

ジェットファンによる換気は、トンネル内に所要換気量を流すのに必要な圧力に見合う昇圧力を得るためのファンの台数が設置される。

ジェットファンによる換気の理論については、スイスの *Schweiz Bauzeitung*³⁾などで明らかにされている。これによると、理論式は(1)式となるが、同式{ }内の第2項は小さな値となるため、近似的には省略でき、(2)式が実用的であるとされている。

$$\Delta P_j = \frac{\rho}{2} V_j^2 \left\{ 2\phi(1-\phi) + \frac{\phi^2 - 2\phi^3 + 2\phi^3\phi - \phi^2 \cdot \phi^2}{(1-\phi)^2} \right\} \dots (1)$$

$$\Delta P_j \doteq \frac{\rho}{2} V_j^2 2\phi(1-\phi) \dots (2)$$

ここに ΔP_j : ジェットファン1台当たりの圧力上昇(mmAq)

V_j : ジェットファンの吐出し風速(m/s)

ρ : 空気密度(kg・s²/m⁴)

ϕ : 面積比 $\phi = \frac{A_j}{A_r}$

A_j : ジェットファンの吐出し口面積(m²)

A_r : トンネルの断面積(m²)

ψ : 風速比, $\psi = \frac{V_j}{V_r}$

V_r : トンネル内の平均風速, $V_r = \frac{Q}{A_r}$ (m/s)

Q : トンネルの所要換気量 (m³/s)

(1)式の理論式と(2)式の近似式との誤差は、 A_r が58m²、 V_r が6m/sの場合で試算して見ると、後述の表1に示す標準ジェットファンJF600で0.3%、JF1000で0.9%、JF1500で2%と少ない値である。したがって、(2)式を簡易式として用いても実用上問題はないと考える。

ジェットファンの必要台数 Z は、以下の式によって求められる^{4),5)}。

$$Z = \frac{\Delta P_R + \Delta P_t + \Delta P_M}{\Delta P_j} \dots (3)$$

$$\Delta P_R = \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \frac{L_r}{D_r} \right) \frac{\rho}{2} V_r^2 \dots (4)$$

$$\Delta P_t = \frac{A_e}{A_r} \cdot \frac{L_r \cdot N}{V_t} \cdot \frac{\rho}{2} \left\{ n_+ (V_t - V_r)^2 - n_- (V_t + V_r)^2 \right\} \dots (5)$$

$$\Delta P_M = \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \frac{L_r}{D_r} \right) \frac{\rho}{2} V_n^2 \dots (6)$$

ここに ΔP_R : トンネル内の通気抵抗(mmAq)

ΔP_t : 交通換気力(mmAq)

ΔP_M : 自然風による換気力(mmAq)

L_r : トンネル延長(m)

D_r : トンネル断面の代表寸法(m)

λ_r : トンネル壁面の摩擦損失係数

ζ_e : トンネル入口の損失係数

N : 交通量(台/s)

V_t : 自動車の走行速度(m/s)

A_e : 自動車の等価抵抗面積(m²)

V_n : トンネル内に生ずる自然風速(m/s)

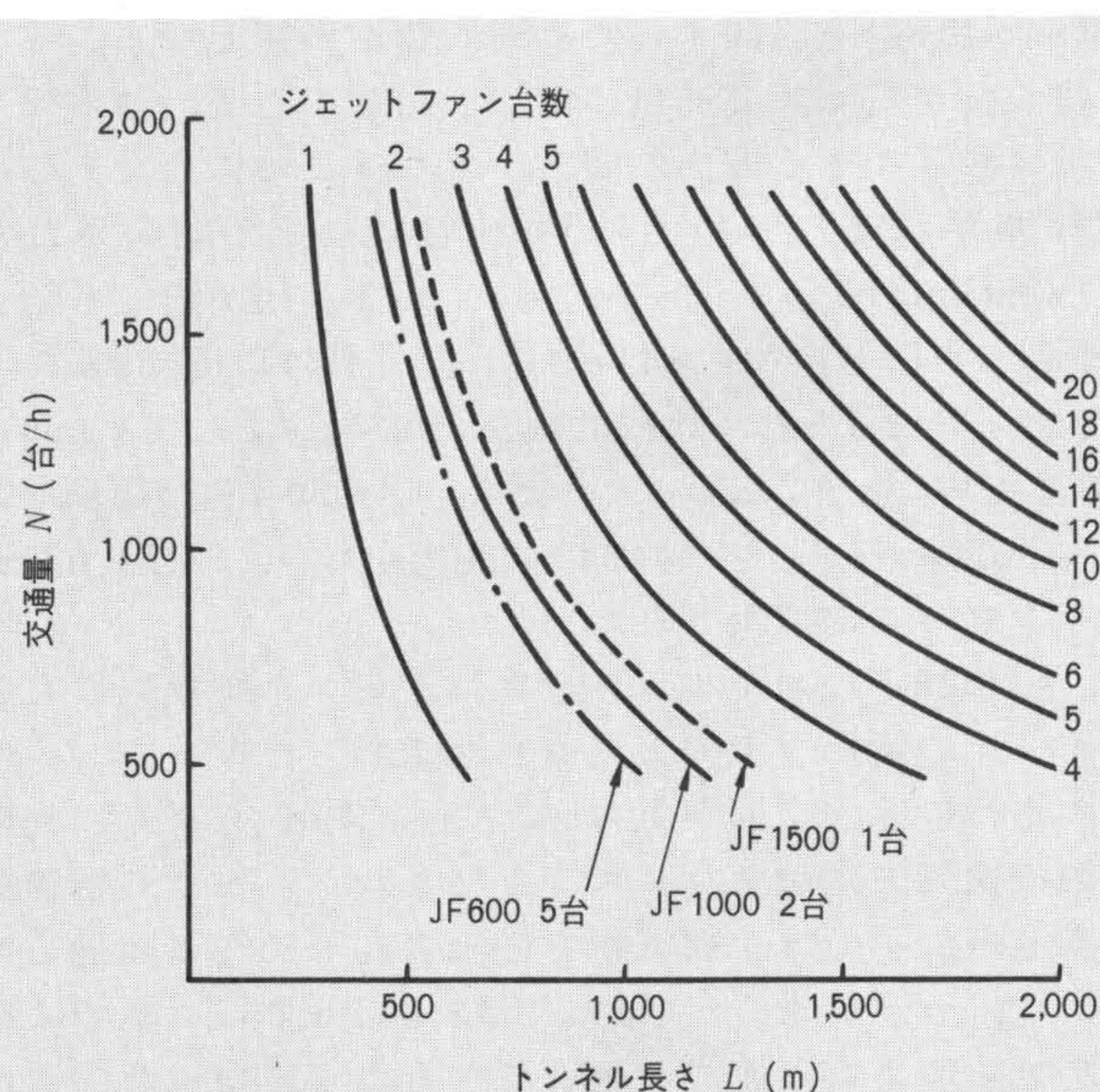
n_+, n_- : 上下線の交通量比($n_+ + n_- = 1.0$)

一方交通の場合は、 $n_+ = 1.0$ とする。

参考までに、対面交通の場合での、トンネル延長と交通量及びジェットファンの必要台数の関係を図2に示す。同図は、換気設計条件を図示のように仮定し、次の(7)式から所要換気量 Q を求めて、前述の(2)~(6)式からジェットファン台数を算出したものである。

$$Q = q \cdot N \cdot L_r \cdot K \dots (7)$$

ここに q : 換気量係数(m³/(km・台))



注：JF600, JF1000, JF1500は、日立ジェットファンの製品呼称である。

計算条件

1. $n_+ : n_- = 0.5 : 0.5$

2. $A_r = 55\text{m}^2$

3. $V_t = 60\text{km/h}$

4. $V_n = -2.5\text{m/s}$

5. $q = 0.0865\text{m}^3/(\text{km} \cdot \text{台})$ (以下の条件から)

大形車混入率 $\gamma = 25\%$

許容透過率 $\tau = 40\%$

許容CO濃度 $K_{CO} = 100\text{ppm}$

図2 トンネル長さ、交通量とジェットファン台数の計算例 本図の全体はJF1000を代表として示すが、JF600, JF1500についても、図中の比較線図を利用して比率で求めることができる。

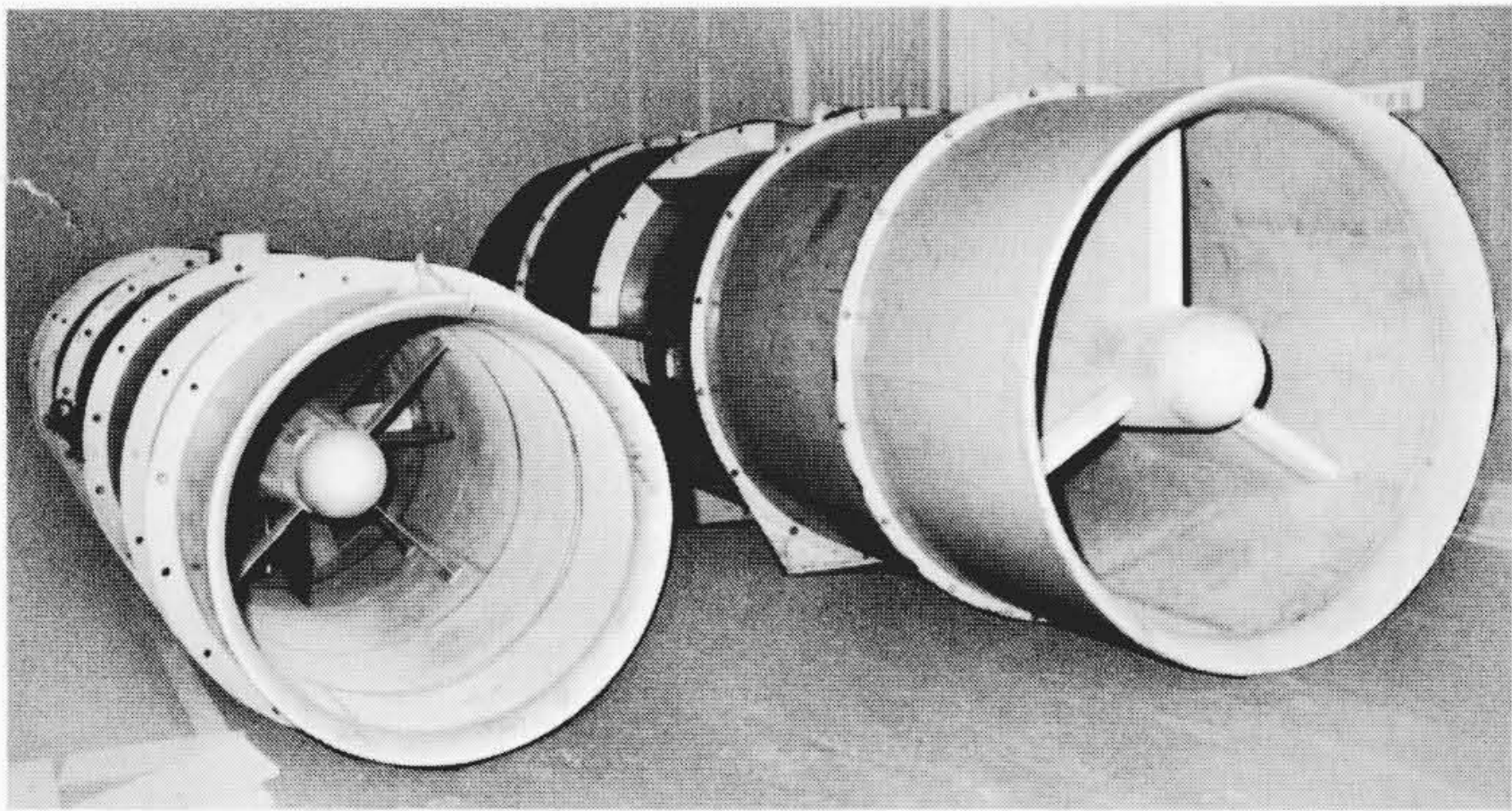


図3 ジェットファンの外観 JF1000とJF1500の外観を示す。各々、口径は1,030mm, 1,530mmである。

(トンネル便覧⁴⁾, 図5.2.1から $q = 0.0865$)
 K : 補正係数(こう配, 標高の補正)
ここでは, $K = 1.0$ とした。

詳細の設計段階では, そのトンネルの設計条件によって計算する必要があるが, 概略検討段階では図2を用いて, ジェットファンのおよその台数, 交通量と台数の関係を知ることができる。

3 ジェットファン

日立製作所では, 換気条件をはじめ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に, 表1に示す仕様のジェットファンを標準化している。図3に外観を, 図4にJF1000の構造を示す。

ジェットファンは, ケーシング内の電動機の出力軸に羽根車を直結した送風機本体部と, 前後の消音器部から成り, トンネル天井部にターンバックルによってつり下げて設置される。以下に, 主な特長と構造を示す。

- (1) 羽根車は, 排気ガスに対して耐食性をもち, 大形の軸流ファンでも実績のあるアルミニウム合金鋳物製で, 正転, 逆転とも同一性能で高効率をもつように開発した対称翼としている。製作に当たっては, 材料検査, 動バランステストをはじめとした厳しい品質管理がなされている。
- (2) ケーシングは, 薄板鋼板に適切な補強を加えた独自の構造で, 軽量かつ十分な剛性をもっている。内筒と外筒内側は,

表1 日立ジェットファンの仕様 風量比は1台当たりの換気能力を表わしており, JF600を1.0として示す。騒音値は, 吸込側正面1.5mの点での値である。

製品呼称 項目	標準タイプ			低騒音タイプ	
	JF 630	JF 1000	JF 1500	JF 700S	JF 1500S
口径(mm)	630	1,030	1,530	730	1,530
全長(mm)	3,000	4,900	5,500	6,000	5,500
風速(m/s)	30	30	30	28	30
風量(m³/s)	8	25	55	8	55
風量比	1.0	3.1	6.9	—	6.9
騒音[dB(A)]	90	92	98	80	93
電動機(kW)	10	30	55	10	55

パンチングプレートと吸音材(グラスウール)で効果的な消音器構造としている。特に低騒音の要求に対しては, ジェットファン用として開発したサウンドトラップ, スプリッタ方式などの消音器を用いて, 低騒音タイプとして製作している。例えば, JF1500Sは, 表1に示したように標準タイプのJF1500と同じ換気能力をもちながら, 騒音値は5dB(A)低く, JF1000と同じ程度の値である。この周波数特性を図5に示す。

(3) 電動機は, トンネル内の環境に対し信頼性の高い絶縁(E種以上)と, 密閉度をもつ全閉形である。軸受は, 密封形の玉軸受に長寿命の「日立WR グリース」を封入してあり, 2万時間又は3年間はメンテナンスフリーで運転することができる。

(4) ジェットファンをつり下げるターンバックル, 取付金具類は, 強度的に十分な安全性が要求される。そこで, 実機つり下げ運転試験をはじめ, 自主的に部品の要素試験, 破壊試験も行ない, 安全性の確認には万全を期している。また, トンネル天井部への取付基礎ボルトの引き抜き強度は, 施工後に荷重試験を行ない, 十分安全であることを確認している。

更に, ボルト, ナットまでの各部品の品質管理, 各地のトンネル換気システムで積み上げた実績, 研究開発などの技術を十分に生かして製作している。

4 制御設備

換気計画で, 換気風量はほぼ最大交通量を推定して決められる^{4), 5)}。そこで, 通常運転時には, 交通量に見合った適切な風量制御を行なうことにより, 有効かつ経済的なものとなり得る。また, 省力化と安全性の確保のために自動化されなけ

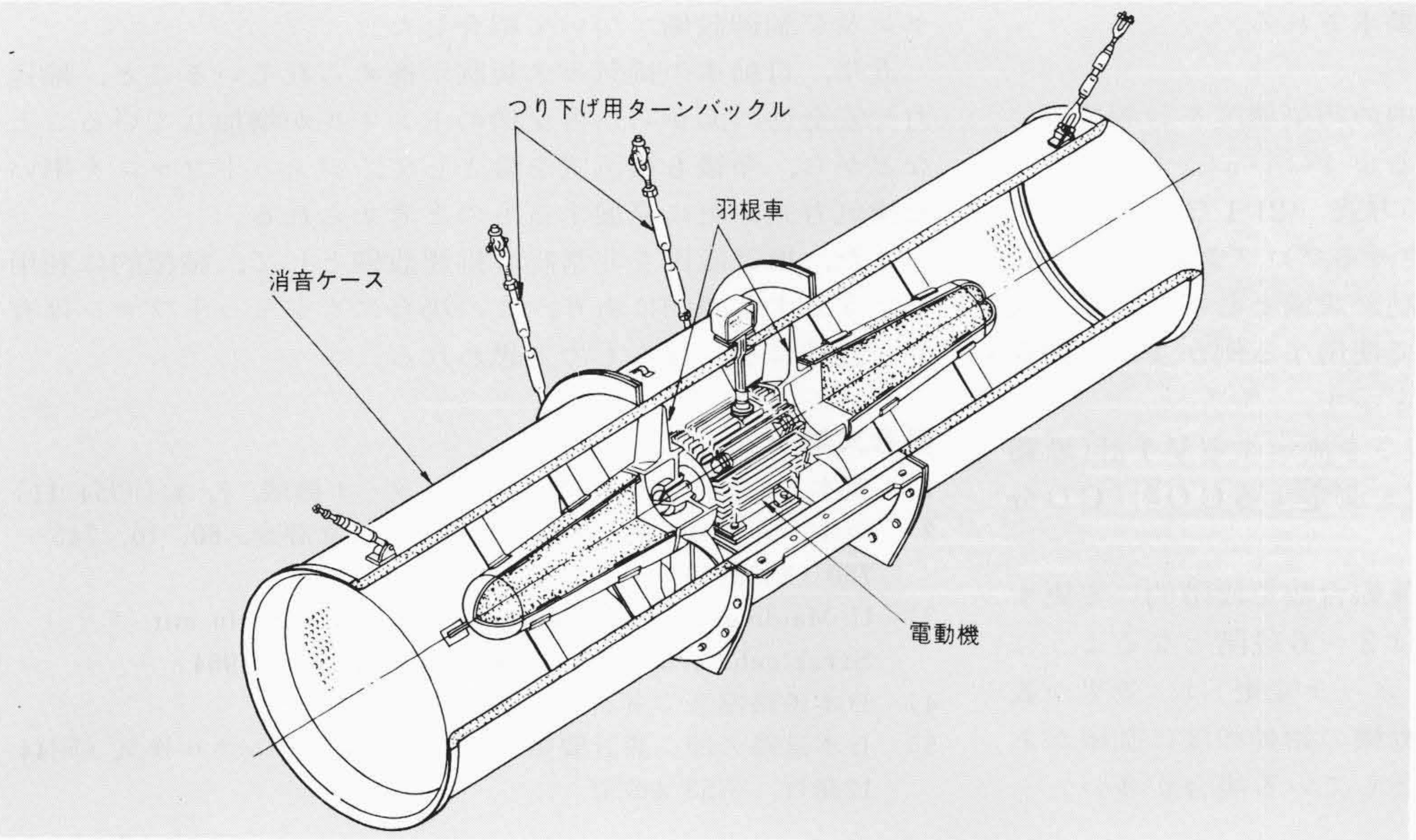


図4 ジェットファン構造 消音器を兼用したケーシング内に, 機械部を収納した簡単な構造である。ターンバックルによりトンネル天井部につり下げられる。

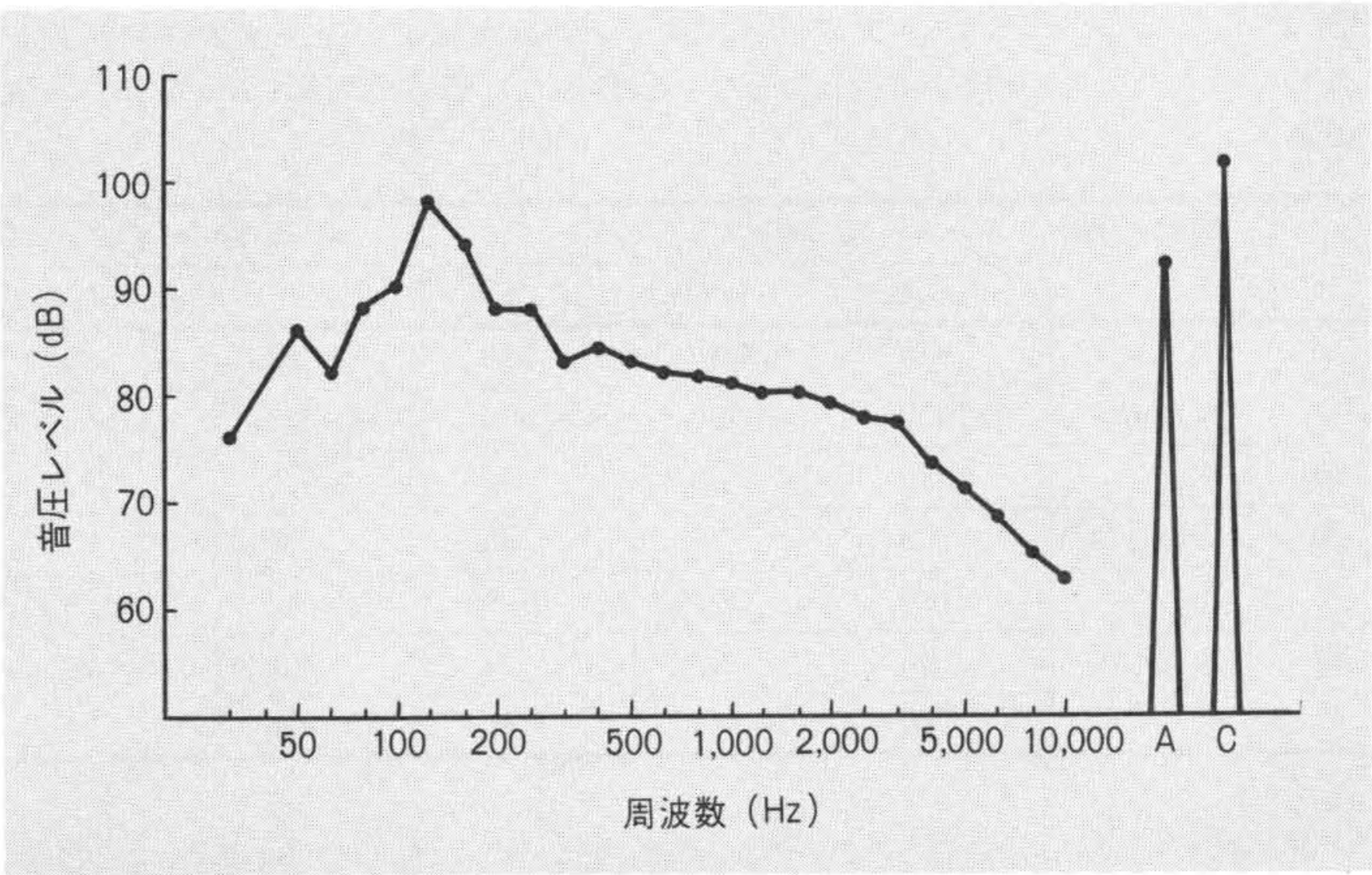


図5 JF1500Sの騒音周波数特性 吸込口正面1.5mの点での周波数分析値を示す。消音器の効果で、耳ざわりの高周波成分の音圧レベルが低い特性である。

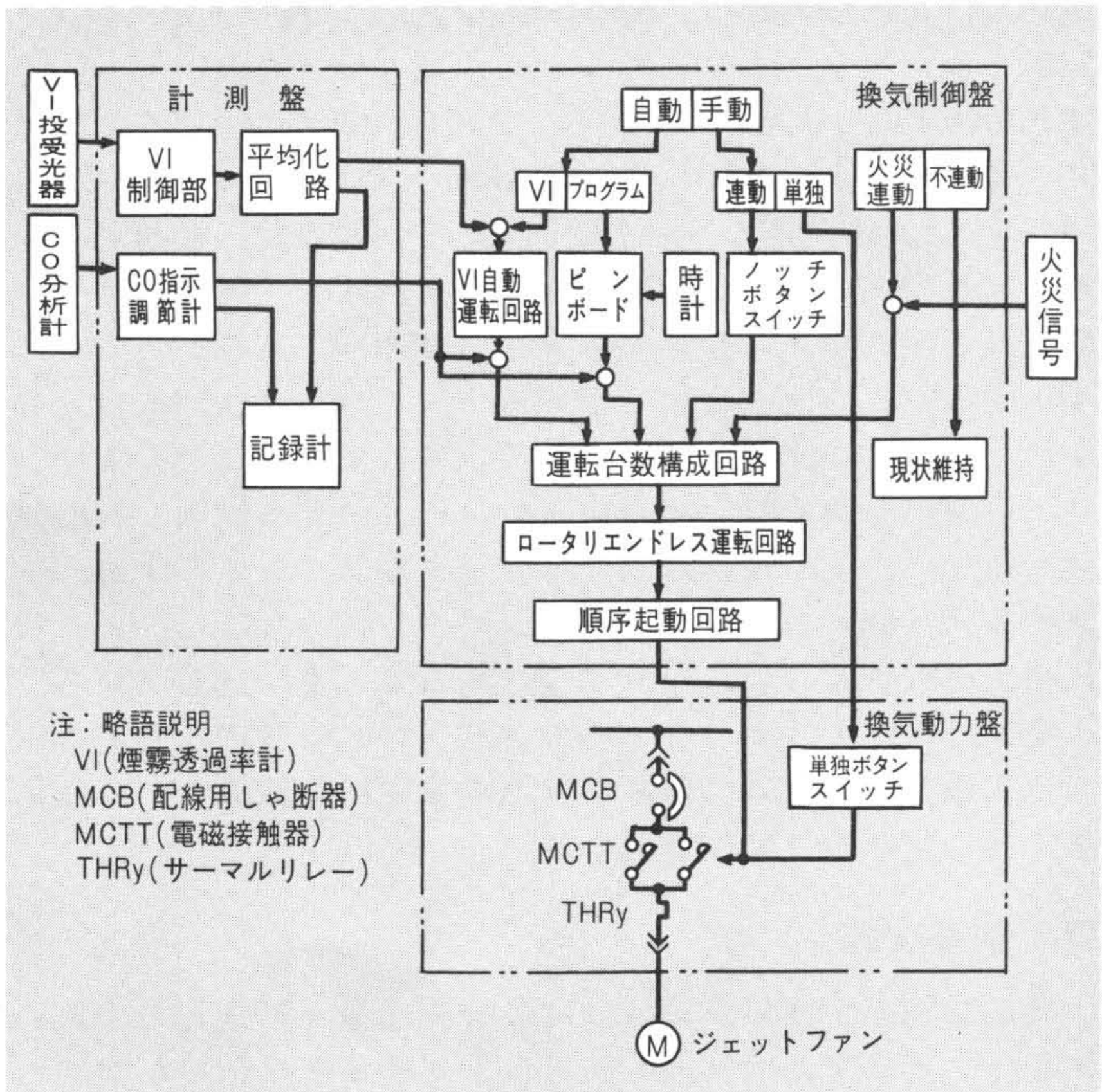


図6 制御回路ブロック図 VI計とプログラム制御の両機能を持ち、切り換えて使用できる代表的な方法である。

ればならず、安定した自動制御が要求される。

4.1 換気制御

自動制御の方法は、(1)トンネル内の汚染濃度を計測装置により測定し、目標値以下に保たせるようにジェットファンの運転台数を変更するフィードバック方式、(2)1日の運転パターンを設定し、これに従って運転させるプログラム制御方式、が代表的な方法である。ただし、制御設備としては両者の機能を備えて、どちらかに切り換えて使用する例が多い。図6に代表的な制御回路のブロック図を示す。

計測装置は、通常は、見通しの良さを測定するVI計(煙霧透過率測定装置)、一酸化炭素濃度を測定するCO計(CO分析計)が併用されている。

風量制御は、ジェットファンの運転台数を段階的に変更する方法とし、その段階を一般的には2～6段階となるようにノッチを構成している。制御間隔(ノッチ変更)は、効果が表われるまでの時間が長いこと、電動機の始動頻度に制限があることを考慮して、15～30分程度としている場合が多い。

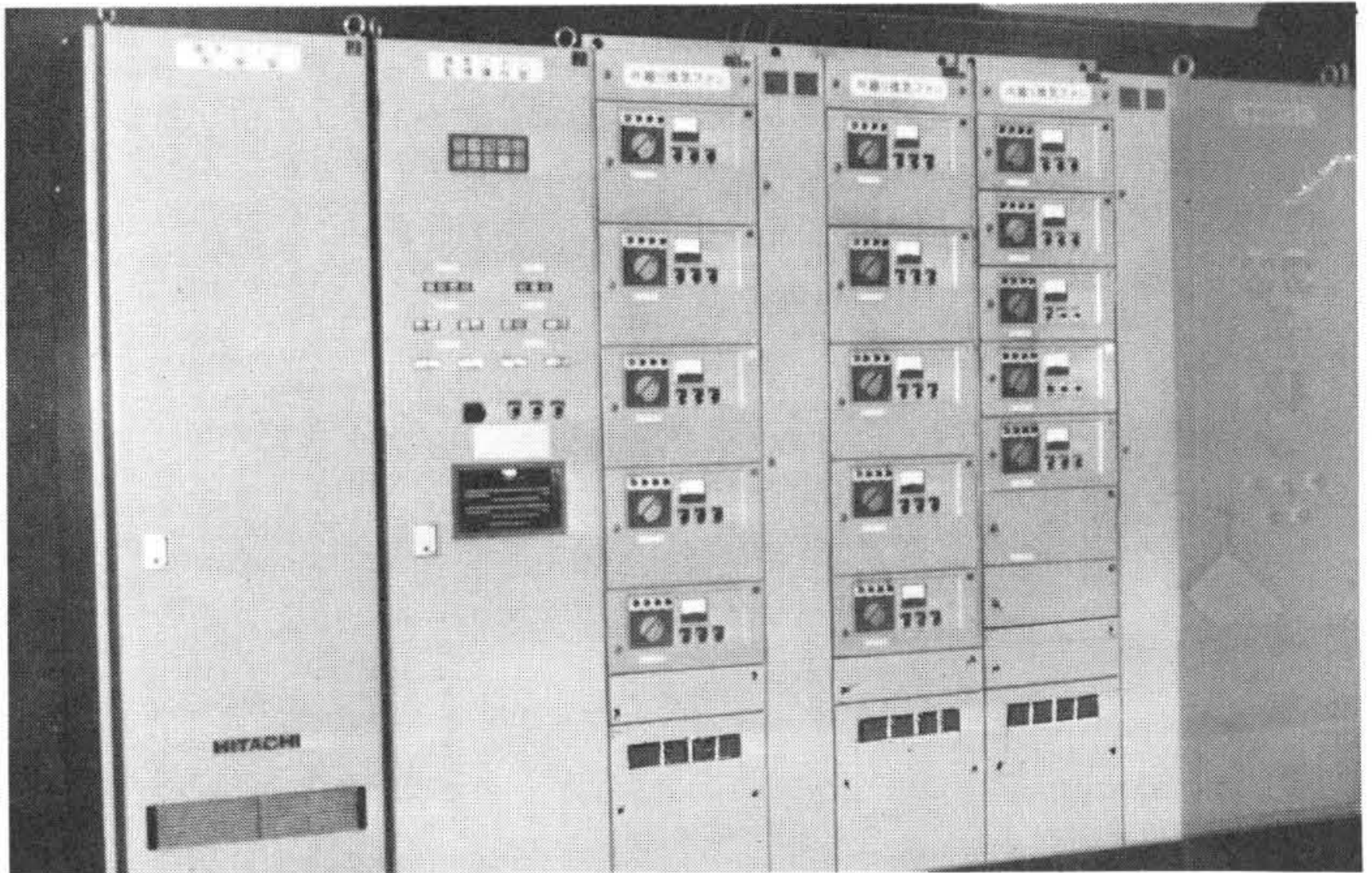


図7 制御設備の外観 左側から2面が換気制御盤、次の3面が換気動力盤である。

4.2 制御設備の構成

制御設備の構成は、先に述べた計測装置、運転ノッチを決定し指令を出す換気制御盤、及びジェットファンの主回路の開閉器を収納した換気動力盤から構成される。図7に制御設備の外観を示す。以下に、このシステムの主な特長を述べる。

- (1) ロータリエンドレス運転方式(最も先に停止したファンから始動し、最も先に運転したファンから停止させる方式)を採用し、各ファンの運転時間の均一化を図っている。
- (2) 故障機は自動的に飛び越し、除外して制御する。
- (3) 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、自動的に行なうシステムである。
- (4) 回路の主要部は半導体化され、高い信頼性をもっているなど、自動的に安定した運転ができるシステムとなっている。

5 結 言

ジェットファンによる縦流換気方式は、比較的新しい換気方式であるが、現在は中小規模の道路トンネルの換気を中心に占める方式に発達した。

これに伴い、ジェットファンはしだいに大形化が要求された。日立製作所では、これにこたえて口径630mm、1,030mmに続いて1,530mmと開発を行ない、これら3機種 of ジェットファンと制御設備を含めて標準化している。

本稿では、ジェットファンによる換気方式と、ジェットファン及び制御設備について紹介した。

近年、自動車の排気ガス規制が進められていること、輸送力や安全性の面から一方交通のトンネルが増加していることなどから、今後も縦流式を軸として、ジェットファンを用いた換気方式が更に発展するものと考えられる。

また、換気設備を非常時の排煙設備として、積極的に利用しようとする傾向にあり、この場合にもジェットファンは有効な設備になり得るものと思われる。

参考文献

- 1) 坂本：トンネル換気特集号総論，ターボ機械，7，4（昭54-11）
- 2) 坂本，外：日立トンネル換気設備，日立評論，60，10，745～750（昭53-10）
- 3) U. Maidinger：Längslüftung von Autotunneln mit Strahlgebläsen, Schweiz Bauzeitung. 840（1964）
- 4) 日本道路協会：トンネル便覧（昭50-1）
- 5) 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）