

立坑送排気縦流式自動車道トンネルの換気特性

Ventilation Characteristics of Vehicular Road Tunnels with Shaft Ventilation System

近年、公害問題や用地確保の困難さのために、自動車道路全体に占めるトンネルの割合が多くなってきた。これに伴い、自動車道路に多い一方通行の特徴を生かした立坑送排気縦流換気方式が経済的な観点から注目されてきた。しかし、この方式は過去に実施例が少なく資料が乏しいので、換気特性を明らかにするために縮小模型を用いて一連の実験を行なった。その結果、送排気口による圧力上昇、送排気口の圧力損失、送気口からの噴流の車道部への影響などを、広範囲の風量比について明らかにした。これらの結果を用いた設計例を示し、交通量の変化に対する換気制御システムを確立することができ、この方式が長大トンネルにも実施が可能であることが分かった。

政野光男* Masano Mitsuo
並木和夫** Namiki kazuo
三階春夫*** Mishina Haruo
工藤光夫*** Kudô Mitsuo
坂本 明**** Sakamoto Akira

1 緒 言

近年、排気ガス、騒音などの公害問題や用地確保の困難さのために、自動車道路全体に占めるトンネルの割合が多くなってきた。トンネルの長さが数キロメートルに達するものも多く、現在計画中の関越自動車道ではトンネルの長さが11kmにも及んでいる。このために、トンネル建設に占める換気設計の重要性が増大してきた。換気設計に当たっては換気方式、換気口の構造、送排風機の容量及び運転方式、汚染濃度の管理、火災時の排煙方式など多くの点を土木的、経済的観点から総合的に検討すると同時に、安全性と快適さを十分考慮する必要がある。自動車道路に多く採用されている一方通行トンネルの増加に伴い、一方通行の特徴である自動車のピストン作用を有効に利用する立坑送排気縦流換気方式が経済的観点から注目されてきた。この方式は我が国では実施例が少ないので、最適設計を行なうにはトンネルの換気特性をも明らかにする必要がある。縮小模型による模型実験は、この問題を解決するのに有効な手段であるから、これにより換気特性を明らかにした。この論文では、これらの結果について述べ自動車道路トンネルの換気設計の参考に供するものである。

2 自動車道路トンネルの換気方式

自動車道路トンネルの換気方式には、自然換気と機械換気とに大別され、トンネルの長さ、交通方式、交通量、立地条件などに応じて種々の方式が考案されている。トンネルの長さが数百メートル以下で交通量の少ない場合を除いて、送排風機による機械換気が多く用いられている。機械換気には、(1)半横流換気、(2)横流換気、(3)縦流換気などの方式がある。換気方式の選定に当たっては、予想交通量に対する建設費及び維持費などの経済性、汚染濃度、立地条件などを考慮しなければならないので、各換気方式¹⁾の特徴を十分理解する必要がある。

2.1 半横流換気

この方式は、トンネル内に車道の外に送気ダクト、又は排気ダクトを設置して換気し、トンネル内の車道に沿った横方向の気流を生じさせるものである。図1に、代表的な半横流

換気方式の構成と汚染濃度を示す。この例では、送気ダクトを設置して送気により換気するもので、気象条件や対面通行の影響を比較的受けにくいので最も多く採用されている。汚染濃度は一方通行の場合には入口付近を除いてほぼ一様であり、対面通行の場合にはトンネル全般にわたって一様となる。このほかに、排気ダクトを設置して排気により換気する方式及びトンネル前半で排気ダクトによる排気と、後半で送気ダクトによる送気により換気する方式とがある。半横流換気方式では、外気と排気ガスが一律にトンネル内に分散されるので、汚染濃度はトンネル全般に比較的一様となる。一方通行の場合には、ピストン作用により気象条件の影響が少なくなる。更に、可逆送風機を備えた送気の場合には火災時にも効果がある。しかし、ダクトを必要とするので、建設費が高くなる欠点があり、1.5～3kmのトンネルにこの方式は多く採用されている。

2.2 横流換気

この方式はトンネル内の車道の外に送気ダクト、排気ダクトを設置して送気と排気とを同時に行なうものである。図2に、横流換気方式の構成と汚染濃度を示す。この方式は、一様の空気分布と排気ガスの速やかな排気が可能であり、トンネルへの送気圧力を一定に保つことができる。この方式は、送排気ダクトを必要とするので建設費が最も高く、2～4km以上の長いトンネルや交通渋滞が発生しやすい都市トンネルに多く採用されている。

2.3 縦流換気

この方式は、トンネル内の限定された場所から送気又は排気し、トンネル内の車線に沿った縦方向の気流を生じさせるものである。図3に、各種縦流換気方式の構成と汚染濃度を示す。同図中(a)の方式では、トンネルの一端から送られた空気が自動車のピストン作用による空気と混合してトンネル内を換気する。

この方式は、一方通行の場合に効果的で、トンネル内の風速は一定となり汚染濃度は出口で最も高くなる。(b)の方式では、トンネルの出入口から吸気された空気は、トンネルの中央付近から排気される。この方式は対面通行に多く採用され、

* 日本道路公団郡山管理事務所 ** 株式会社住友道路研究所 *** 日立製作所機械研究所 **** 日立製作所土浦工場

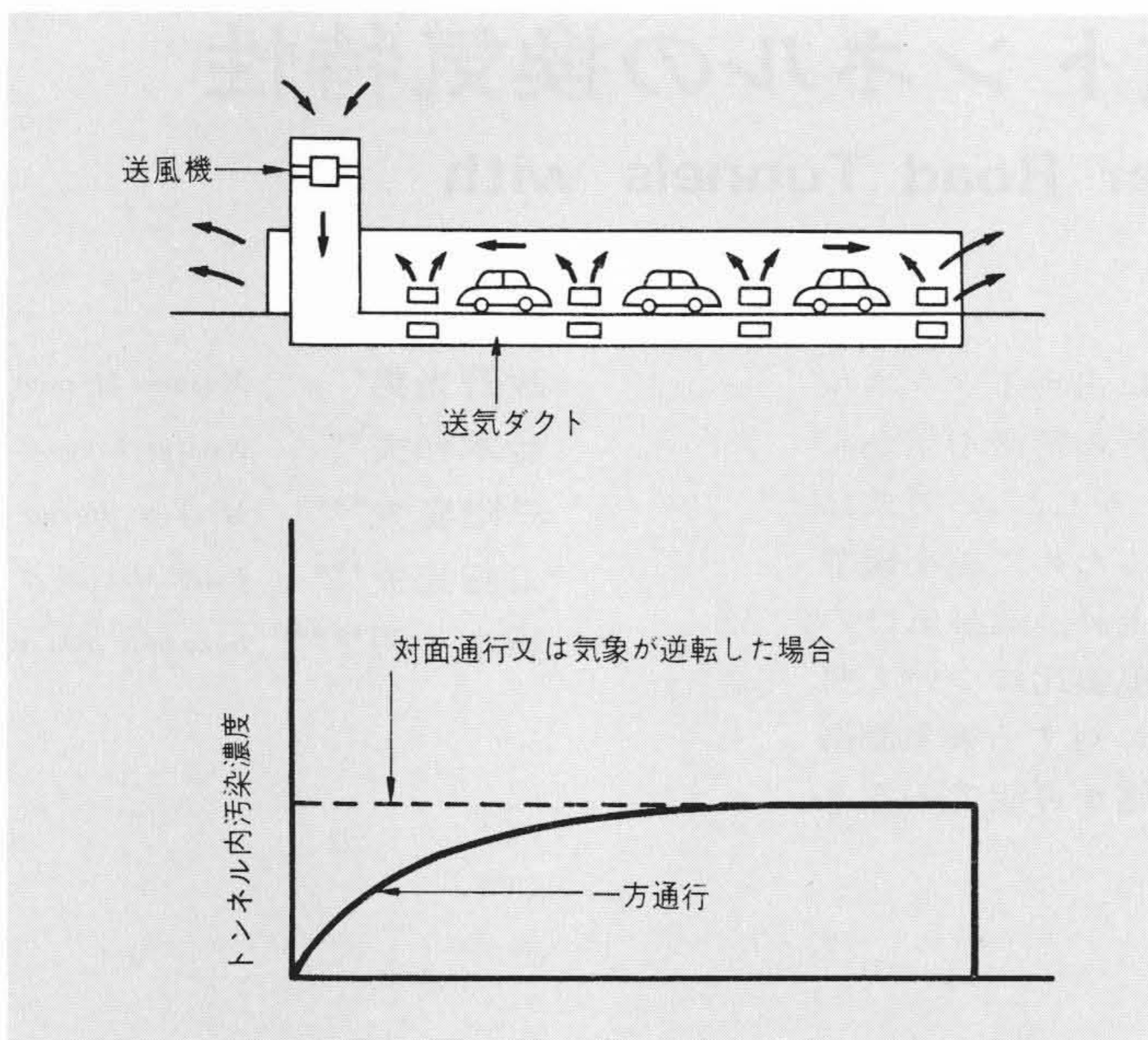


図1 半横流換気方式(送気式) 車道の外に送気ダクト又は排気ダクトを設置して、トンネル内の車線に沿った横方向の流れを生じさせる方式である。代表例として送気式を示す。

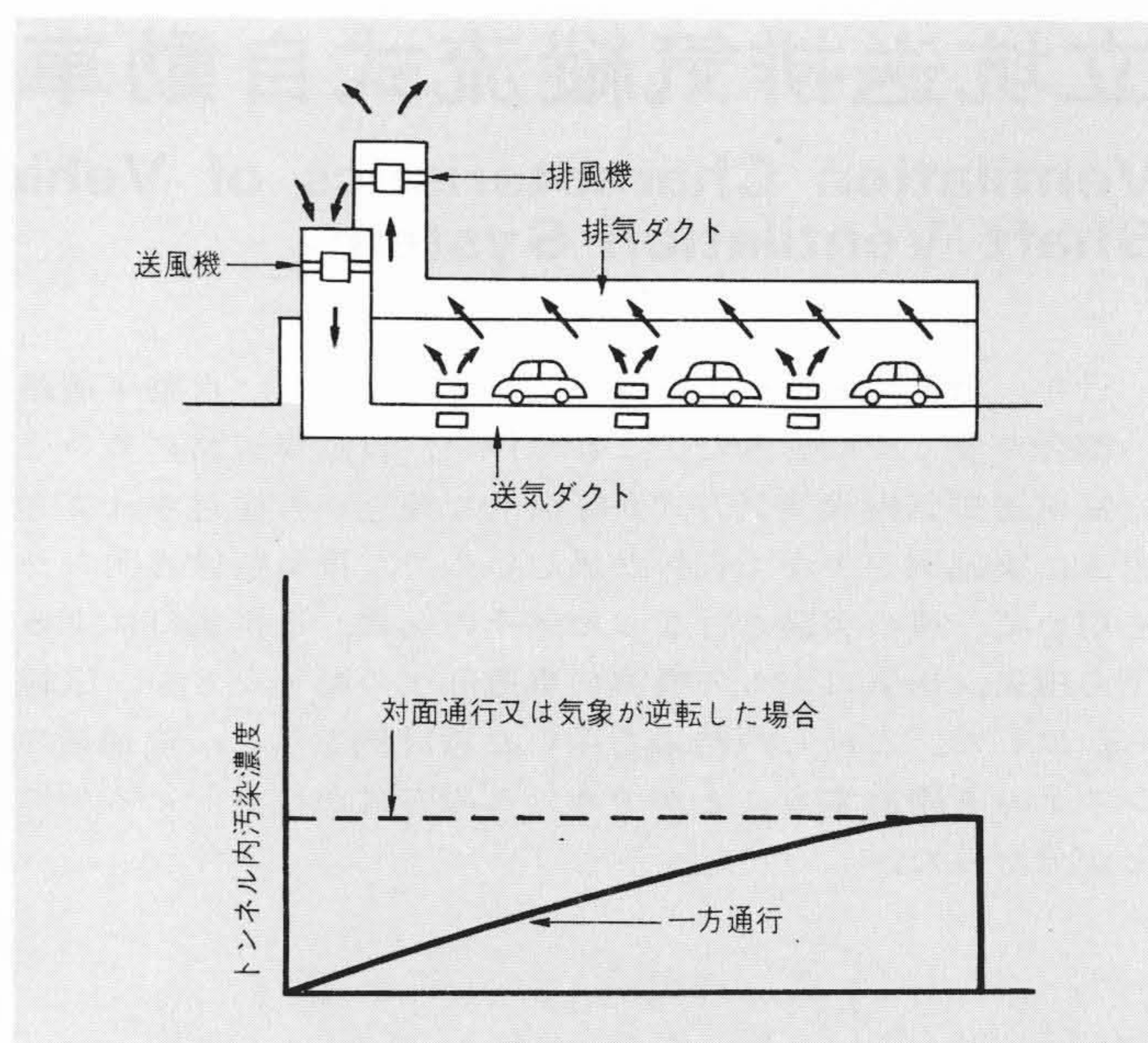


図2 横流換気方式 車道の外に送気ダクト及び排気ダクトを設置して、送気と排気を同時に行なう方式である。

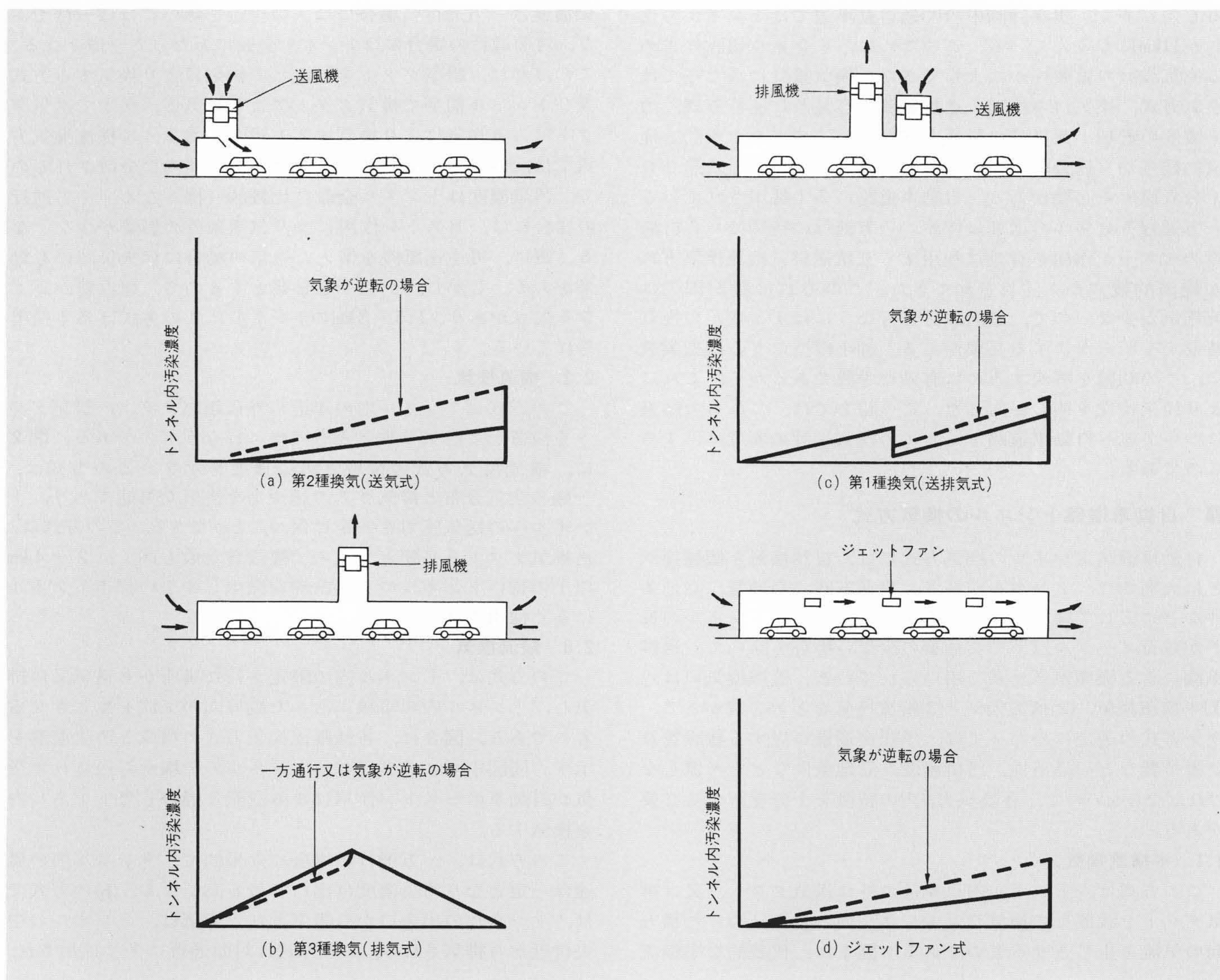


図3 縦流換気方式 限定された場所から送気又は排気し、トンネル内の車線に沿った縦方向の流れを生じさせる方式で、各種方式を示す。

汚染濃度は排風機のある所で最も高くなる。(c)の方式は、送排風機を中央に設置して換気する。汚染濃度は入口より増加し、中央で新鮮な空気と入れ替わって減少し、また出口に向かって増加する。(d)の方式は、トンネルの天井に多数のジェットファンを設置して換気する。送排風機の機械室のスペースが不要であるが、天井を若干高くする必要がある。縦流換気方式では送排気ダクトが不要であるので、建設費が最も安い。トンネルが長くなると車道内風速の増大や煙の拡散などが問題となってくるので、この方式は1～2kmのトンネルに多く採用されている。しかし、一方通行でしかも適当な間隔に立坑を設置することができれば、(c)の方式は長大トンネルにも適用可能であるから、経済的な観点から最近注目され始めてきた。

自動車道路トンネル設備に関して、表1に記すように日立製作所は換気設備を始めとして受配電設備、防災設備、交通管制設備などを多数納入した実績と豊富な経検をもっている。特に、換気設備については経済的で安全性と、快適さの優れた設備を設計するにはトンネルの換気特性そのものについても社会的ニーズにマッチした技術開発を積極的に行なう必要がある。

3 立坑送排気縦流換気

3.1 トンネル内の流れと問題点

トンネル内の流れの様子から本換気方式の問題点を明らかにする。図4に、トンネル内の流れ、圧力分布及び汚染濃度分布を示す。換気風がトンネル内を流れるときに生ずる通風抵抗は、送排気口による圧力上昇と自動車のピストン作用とにより補われる。圧力上昇は、主として送気口からの噴流によるので、噴流の許容値は走行車両への影響を考慮して定まる。送排風機の動力は送排気口の圧力損失によるので、圧力損失の小さい送排気口の構造及び寸法を見いださねばならない。火災時には送風機を逆転して排煙するために、送気口の排煙時の圧力損失を明らかにする必要がある。これらの問題点を解決するには、縮小模型による模型実験が有効な手段であるから、これにより換気特性を広範囲の風量比について明らかにした。

3.2 送排気口による圧力上昇と送排気口の圧力損失

送気口としては、トンネル天井部をそのまま利用した小送

表1 納入先自動車道トンネルの換気方式(長さ2km以上) 過去20年間に、換気設備を納入したトンネルの換気方式としては、半横流方式及び横流方式が多く立坑送排気縦流方式の実施例はない。

納入先	トンネル名	所在地	トンネル長さ(m)	完成年度	換気方式
日本道路公団	関門トンネル	下関一門司	3,461	1958	上方向横流
建設省	東栗子トンネル	福島県	2,374	1967	下方向送気半横流
日本道路公団	日本坂トンネル	静岡県	2,007/2,045	1969	"
建設省	奥只見18トンネル	新潟県	3,057	1971	立坑排気縦流
"	奥只見19トンネル	"	3,134	"	"
日本道路公団	関門トンネル	下関一門司	3,461	1972	上方向横流
"	日本坂トンネル	静岡県	2,007	1976	組合せ
"	笹子トンネル	山梨県	4,417/4,414	1977	横流
静岡県	新日本坂トンネル	静岡県	2,205	1977	下方向送気半横流

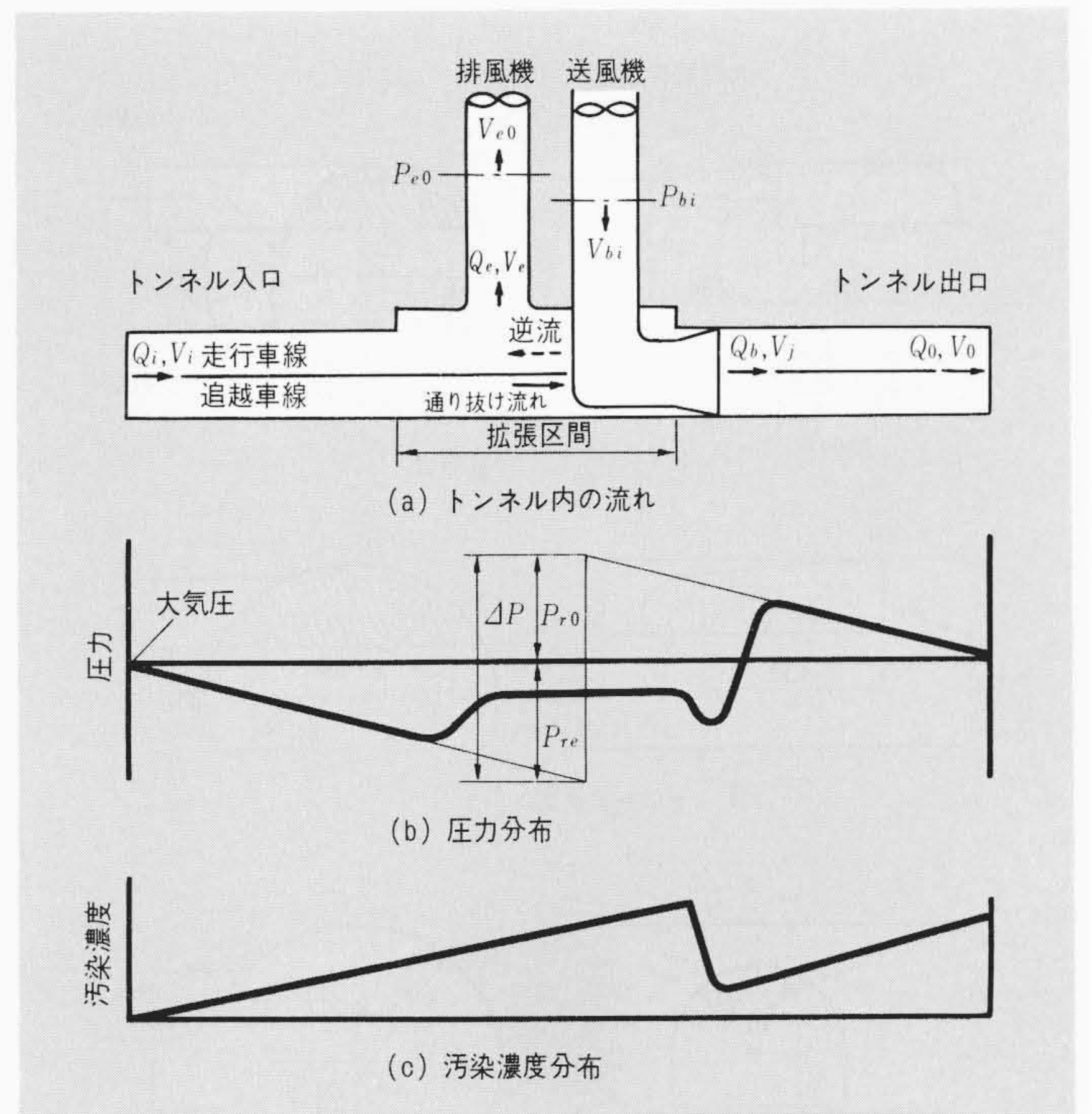


図4 トンネル内の流れ、圧力分布及び汚染濃度分布 トンネル内の流れと使用した記号を、またこの場合の圧力及び汚染濃度分布を示す。

気口と、実トンネルでの噴流速度を20m/sになるように断面積を33%増大した大送気口の二とおりである。大送気口の中央には、隔壁を設けて断面積を半にした場合の実験も可能にした。

排気口としては、送排気口のある拡張区間の天井部をそのまま利用した上部排気口と、横坑を利用した横排気口の二とおりである。横排気口は、走行車両や監視員に悪影響を及ぼさないように、実トンネルでの風速を10m/s以下になるように断面積を定めた。送排気口、拡張区間はすべて透明アクリル樹脂製とし、車道部は鉄板製とした。模型は実物の約1/30であるが、実験は車道部のレイノルズ数が実物の約1/30(3.7×10⁵)となるように風速を高くして行なった。図5に、模型の送排気口の寸法を、図6に大送気口と横排気口とを組み合わせた模型写真を示す。図7に、各種送排気口を組み合わせたときの圧力上昇を示す。同図中の実線は送気口だけの圧力上昇を考慮した「サッカルドの理論値」である。なお、レイノルズ数を1.6～4.0×10⁵に変えたが、圧力上昇は変わらなかった。圧力上昇は主として送気口の噴流によるので、噴流速度が高い送気口との組合せの順に圧力上昇が高い。理論値と実験値との一致はいずれも良い。図8に、大送気口と横排気口との組合せで送気と排気の風量比を変えた場合の圧力上昇を示す。排気風量が送気風量に比べて多い場合には、排気口までの摩擦損失による圧力低下が大きいので、見掛け上圧力上昇が大きくなり理論値との相違も大きい。この傾向は入口換気風量が多いほど顕著となる。このように、排気風量が多い場合には理論式の適用が困難であることが分かる。所定の換気風量を得るために必要な送排風機の動力を定めるのに送排気口の圧力損失を求める必要がある。図9、10に送気口、排気口の圧力損失を示す。なお、送排気口の圧力損失は次式(図4参照)で求めた。

$$\text{送気口の圧力損失 } \Delta P_b = P_{bi} + \frac{\rho}{2} V_{bi}^2 - (P_{r0} + \frac{\rho}{2} V_0^2) \cdots \cdots (1)$$

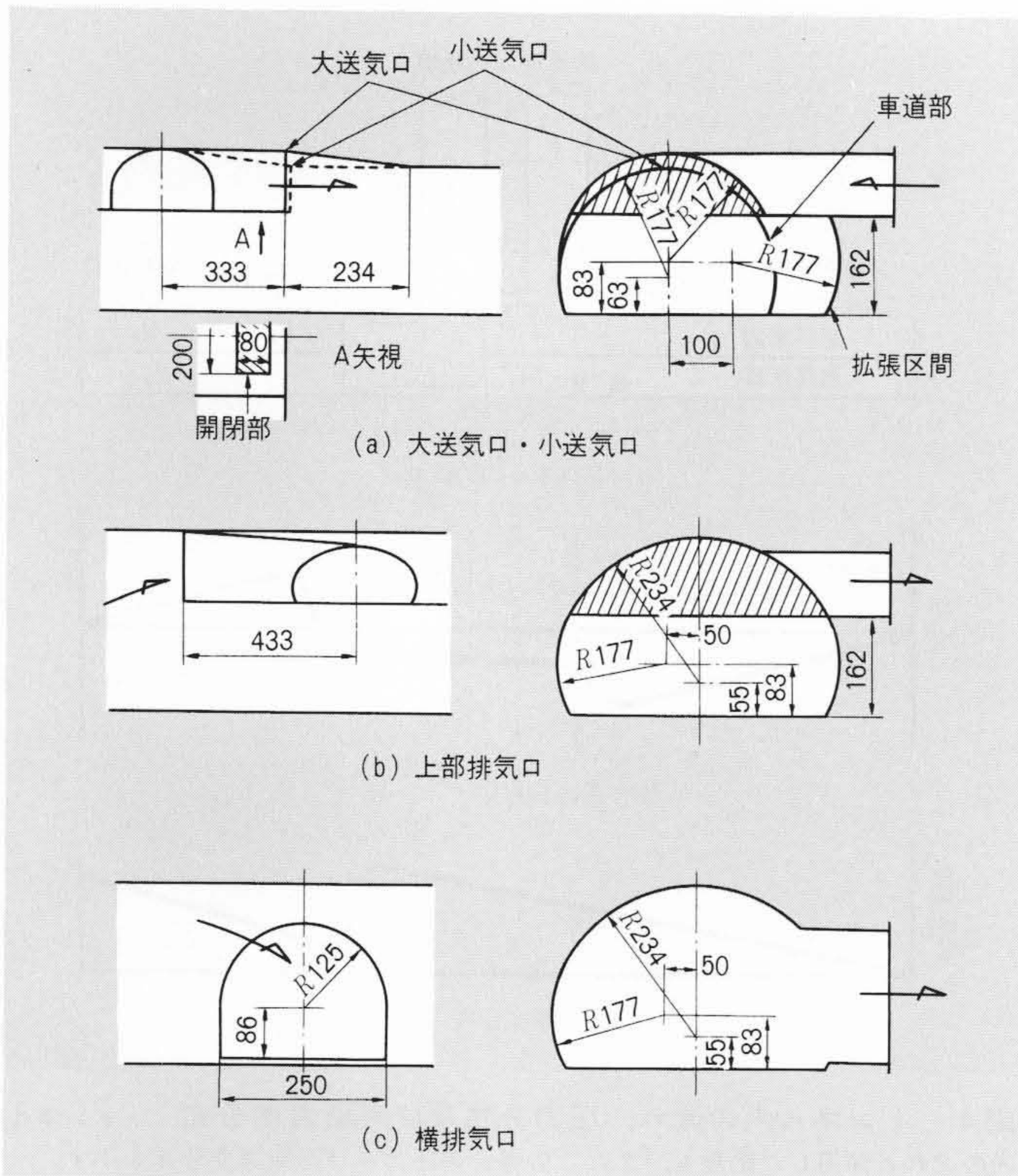


図5 送排気口の寸法 大送気口・小送気口、上部排気口及び横排気口の模型寸法を示すもので、模型は実トンネルの約1/3である。

$$\Delta P_e = P_{re} + \frac{\rho}{2} V_i^2 - (P_{e0} + \frac{\rho}{2} V_{e0}^2) \dots (2)$$

送気口については、小送気口の圧力損失が大送気口の場合に比べて小さい。これは大送気口の場合、拡張区間と車道部とを結ぶ天井が傾斜して、そこに噴流が衝突するためである。 Q_b/Q_0 が増大して送気口から排気口への逆流が生ずると、圧力損失は多少小さくなる。排気口については、横排気口の圧力損失は上部排気口の場合に比べて1/4と小さい。これは上部排気口が天井にあり、更に横方向に曲っているため、曲り損失が大きいためである。両排気口とも Q_e/Q_i が1.0より大きく、送気口から排気口へ逆流が多少生じている場合に圧力損失が最小となっている。

3.3 送気口の排煙時の圧力損失

トンネル内で火災が発生した場合、排気口だけの排気では

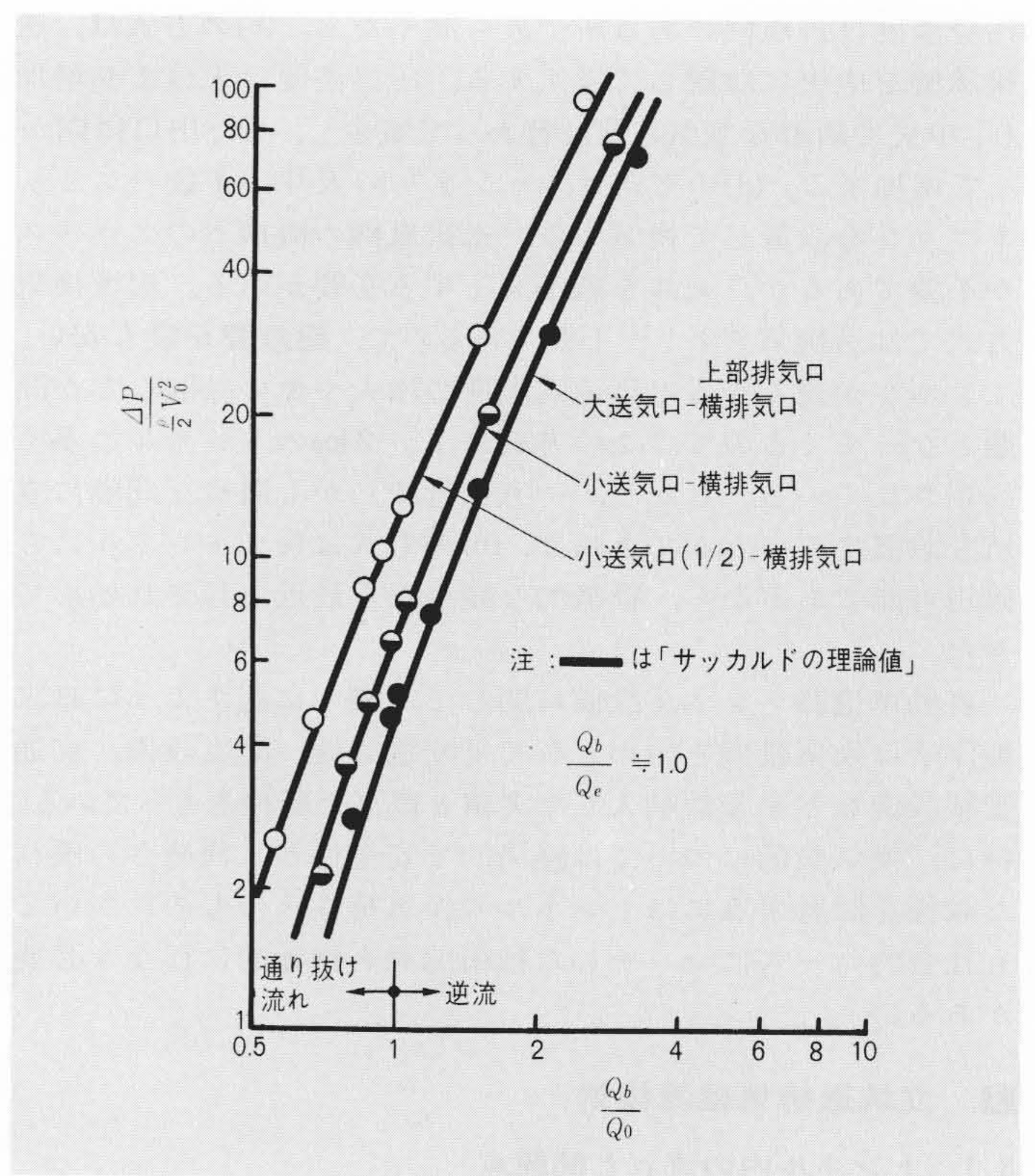


図7 各種送排気口の組合せによる圧力上昇 排気口からの噴流速度が大きいほど圧力上昇が高い。実験値と理論値との一致は比較的よい。

十分でないため、送風機を逆転して送気口からも排気する必要がある。そこで、送気口の排煙時の圧力損失を求めた。図11に送気と排気との風量比を変えたときの小送気口の圧力損失を示す。同図中下方には、送気口の下面に送気口断面積の0.96倍の面積をもつ開閉部(図5参照)を開けて、面積を増大したときの圧力損失を示す。排気口から送気口への通り抜け流れが増大すると、圧力損失が増大して逆流時とは逆の傾向を示している。この傾向は、開閉部を閉じた場合に顕著である。開閉部を開けると、圧力損失は閉じた場合の $\frac{1}{1.9}$ となり排煙時にかなりの効果がある。排気風量が圧力損失に及ぼす影響は、開閉部を閉じた場合に多少あり、排気風量が減少すると圧力損失は多少増大している。

なお、排煙時の圧力損失は前出の送気時の場合に比べると、多少大きい。

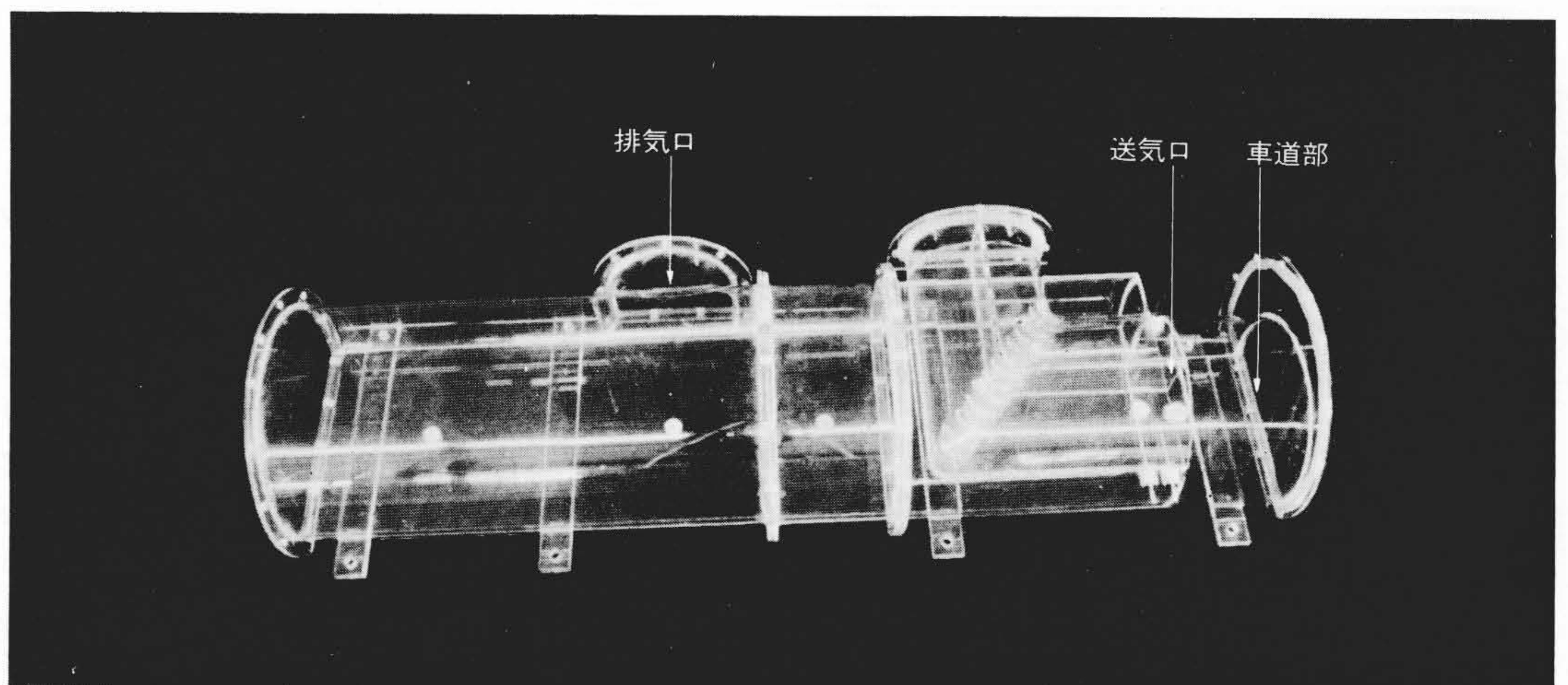


図6 大送気口と横排気口の組合せ模型 模型は透明アクリル樹脂製で、空気は左側から右側へ流れる。左側が排気口で、右側が送気口である。

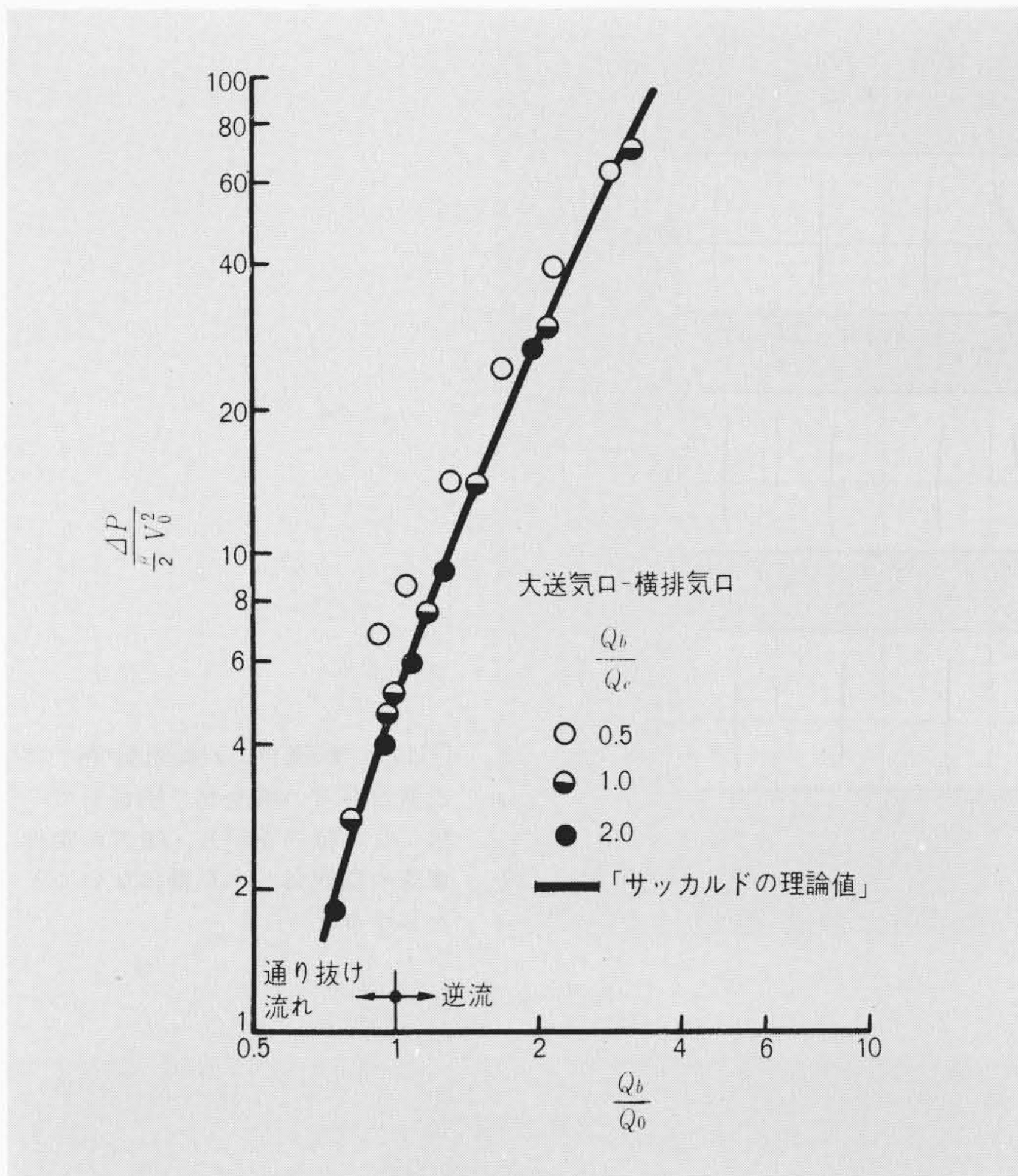


図8 送排気風量比を変えた場合の圧力上昇 送排気風量比 Q_b/Q_e が小さい場合の圧力上昇は理論値よりも大きく、この範囲での理論式の適用は困難であることが分かる。

3.4 車道内の風速分布と流れの可視化

送気口からの噴流が、走行車両や監視員に及ぼす影響を明らかにするために、排気口上流一箇所と送気口下流五箇所でピトー管を用いて風速分布を求めた。また、タフトとドライアイスを用いて流れを可視化した。図12に、大送気口と横排気口とを組み合わせる送気と換気の風量比を三通りに変えたときの風速分布を示す。同図中の実線は追越車線側の風速分布を、点線は走行車線側の風速分布を示す。排気口上流では風速は一樣であるが、送気口下流ではいずれも高さ方向には天井側で、幅方向には追越車線側で風速が高くなっている。送気口からの噴流は、下方に向かって流れながら混合して一樣になる様子が分かる。

風速が一樣となる送気口からの距離は、車道部の水力直径の14～16倍である。送気口と排気口間に流れがない(b)の場合でも、強い噴流による剪断流れにより渦が発生し、局所的に逆流が生じている。同図中に3 mと記した線は、大形バス又は監視路上を歩く監視員の高さであり、ここでの最大風速は一樣風速の1.5倍で、実トンネルに換算しても9 m/s以下であるから噴流による悪影響はない。図13に横排気口での流れの上方(a)、側面(b)からの写真を示す。流れは排気口側にしだいに近づいて排気口に吸い込まれている。(b)の写真をみると、送気口からの逆流が路面近くで生じ、排気口に近づいた流れを巻き上げている様子が分かる。この部分では、(a)の写真のタフトの動きから流れは多少乱れている。

4 換気風量の制御システム

前述の実験結果を用いて、交通量に対する換気風量の制御と汚染濃度を実トンネルについて検討した。トンネルの長さは3.6 km、送排気量はいずれも380 m³/s、大型車混入率29%、

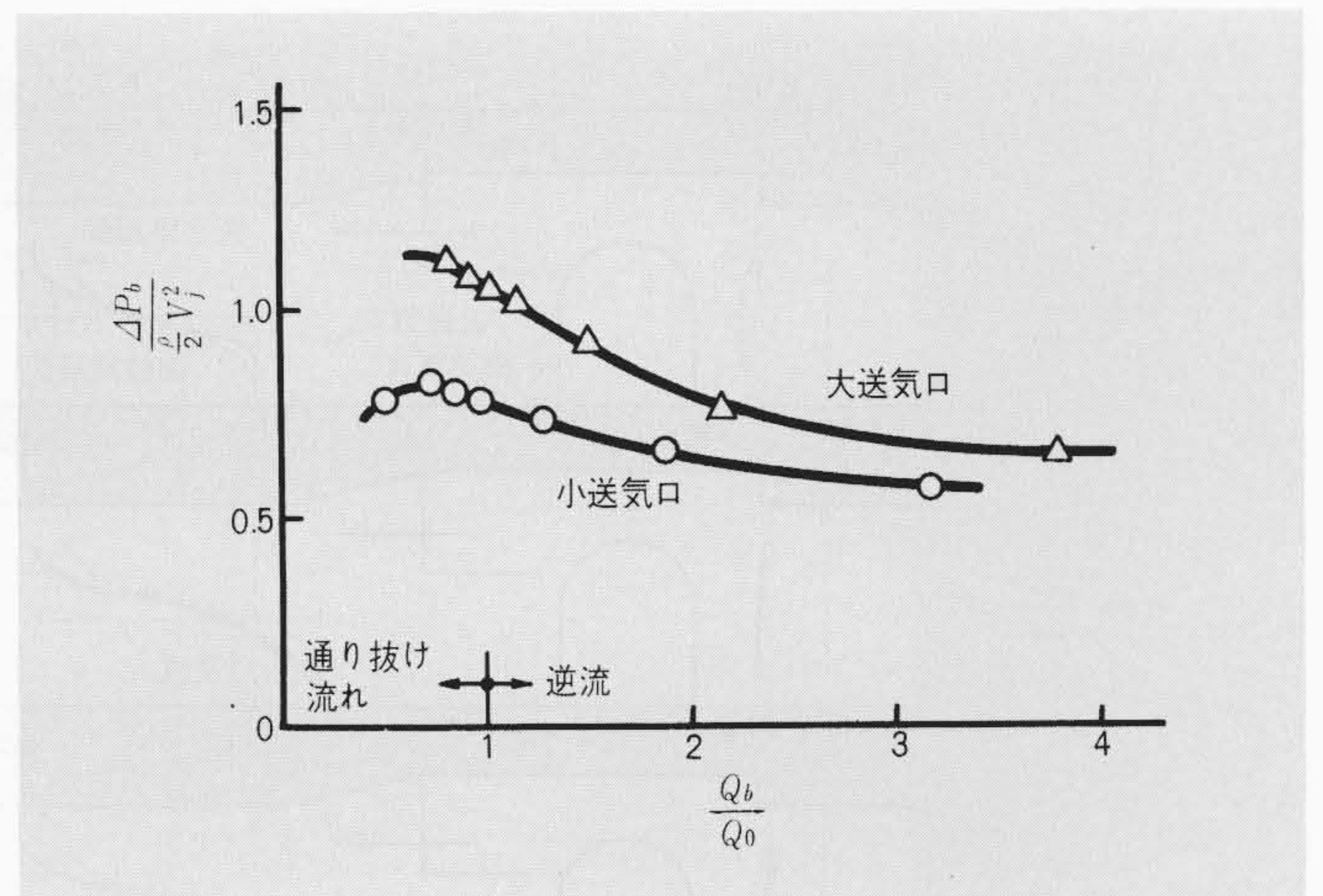


図9 送気口の圧力損失 小送気口の圧力損失は、大送気口の場合に比べて約25%小さい。

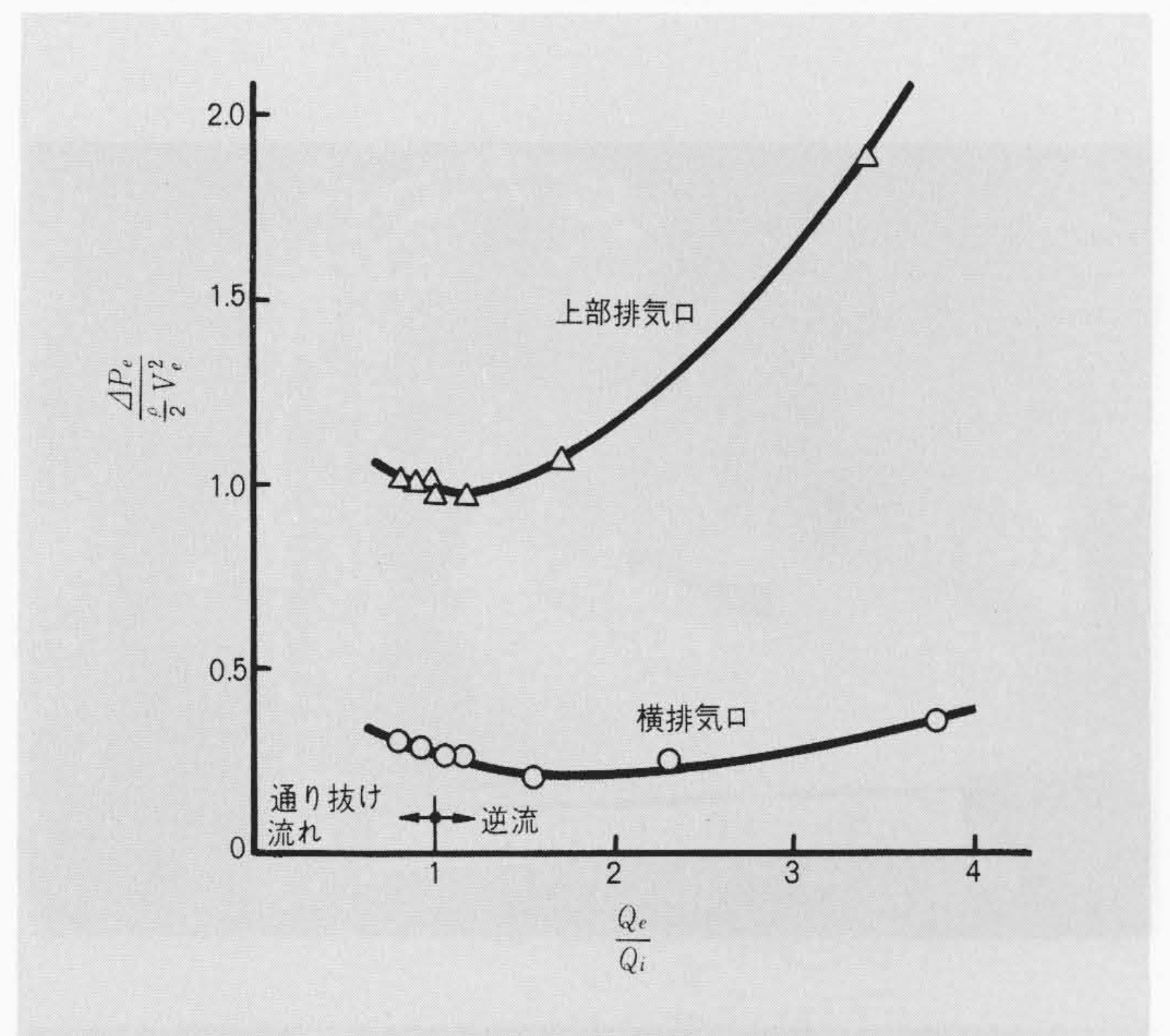


図10 排気口の圧力損失 横排気口の圧力損失は、上部排気口に比べると約半と小さい。

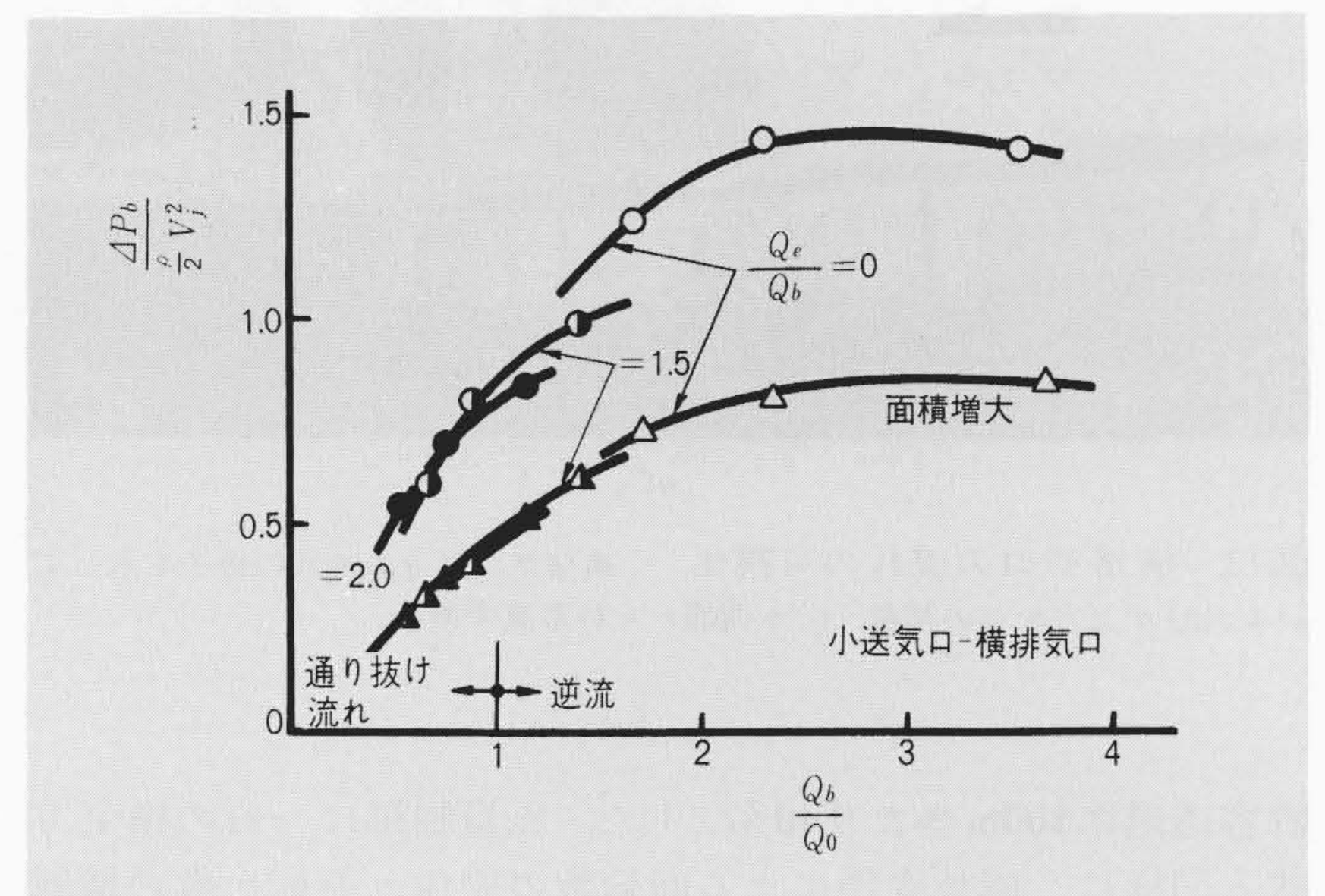
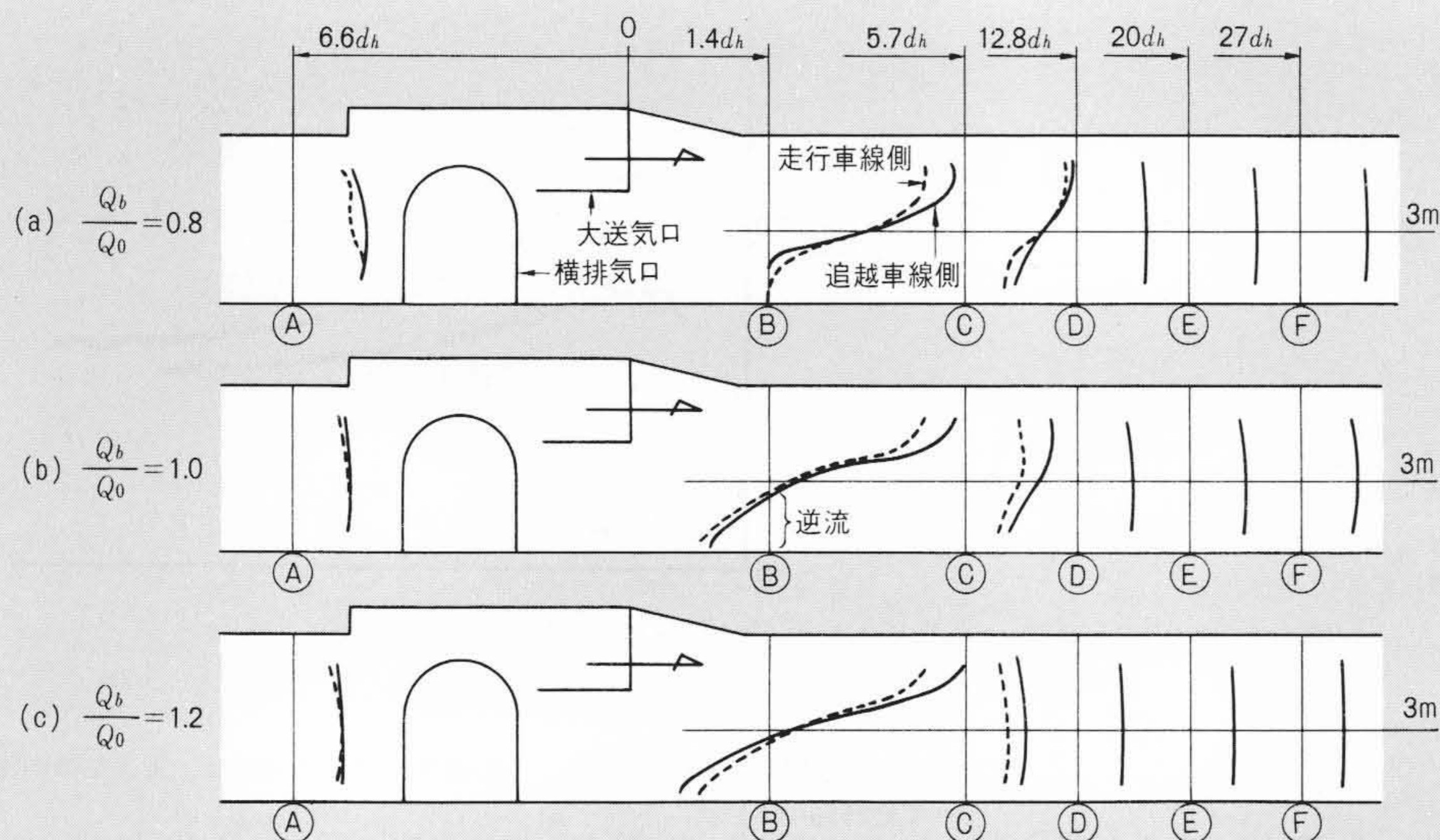
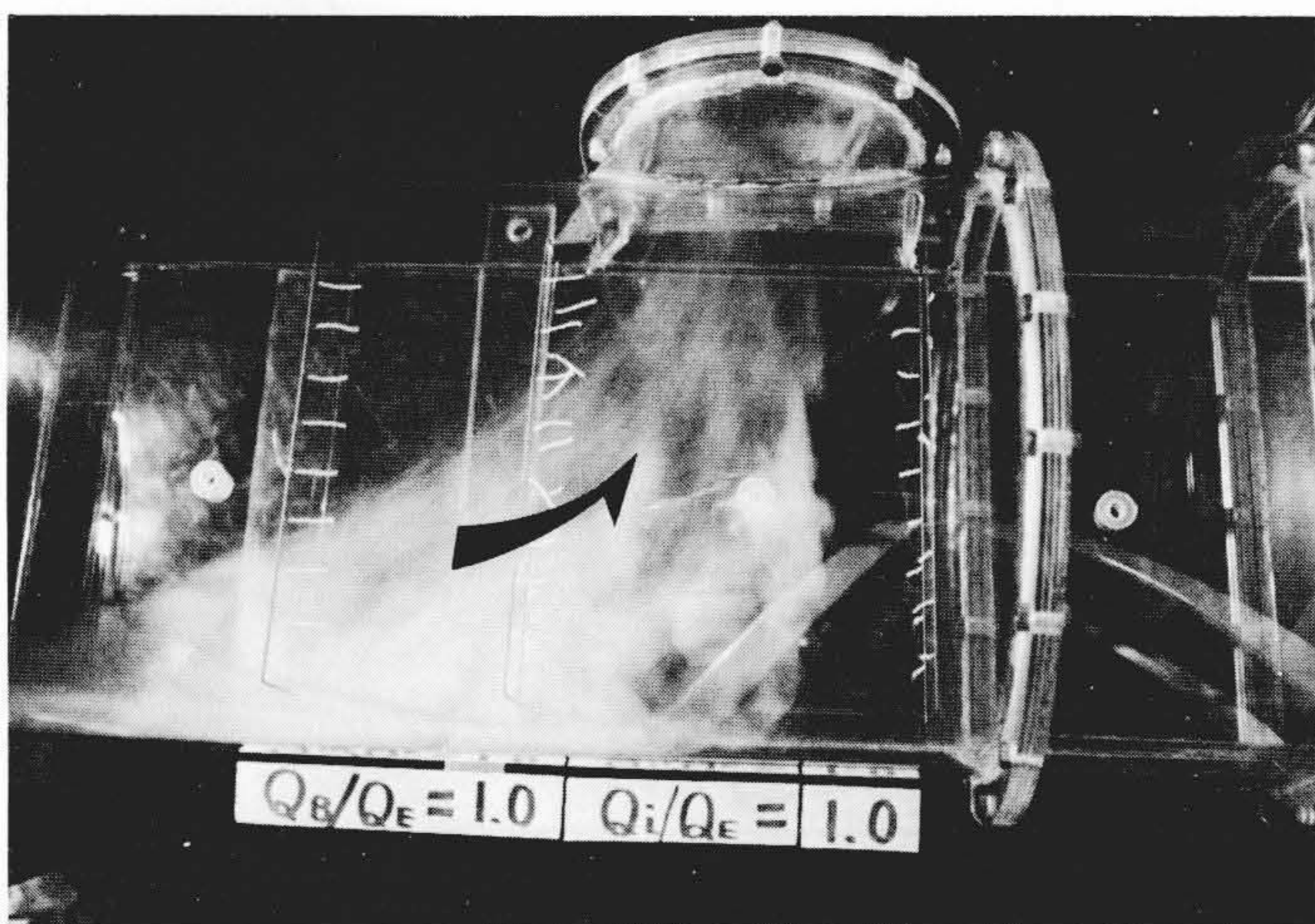


図11 排煙時の送気口の圧力損失 排煙時の送気口の圧力損失は、送気時よりも多少大きい。開閉部を開けると圧力損失は約半となり、排煙には効果がある。

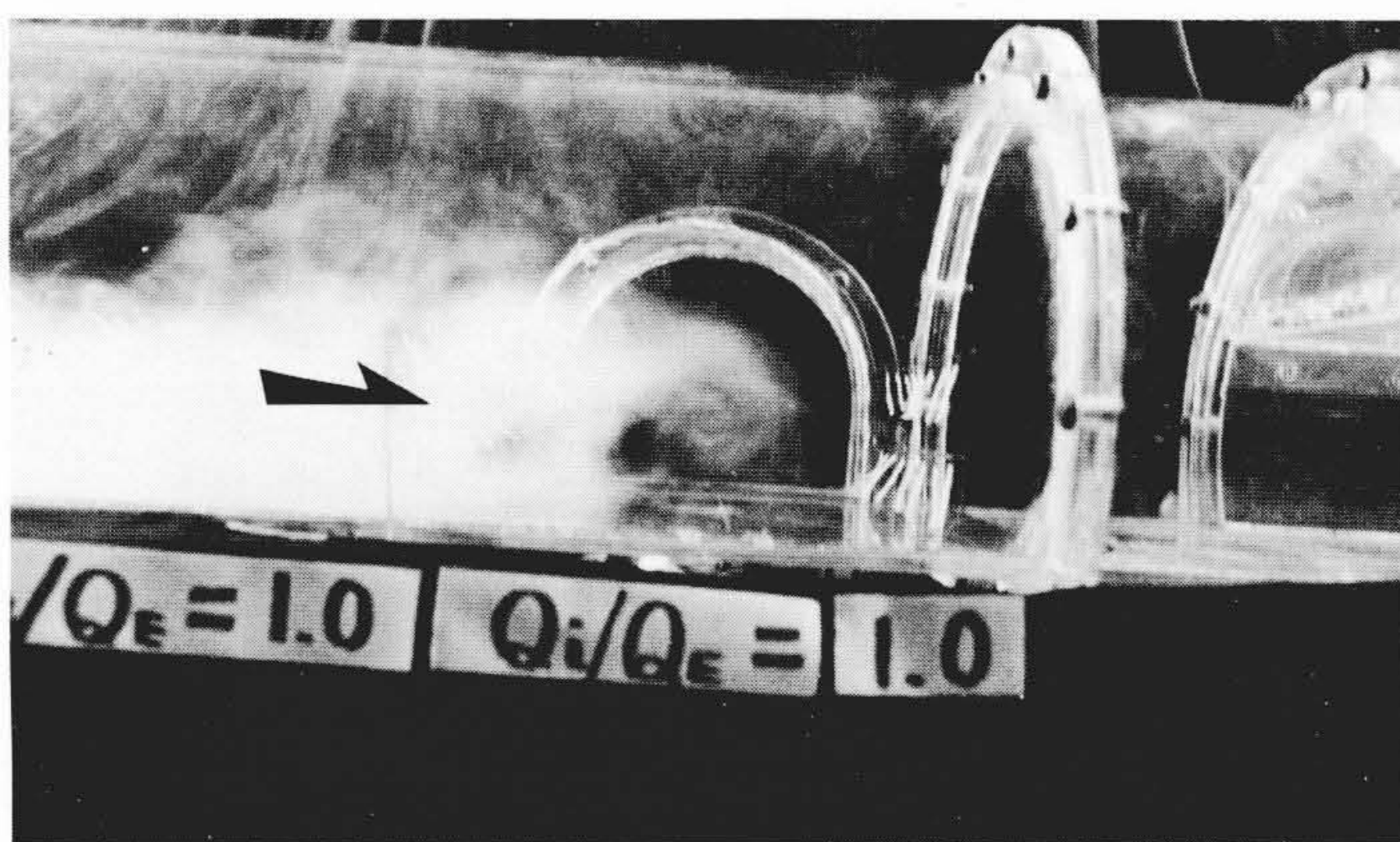


注: d_h = 車道部水力直径

図12 車道内の風速分布
送気口からの噴流が、混合して一様になる様子を示し、噴流の走行車両や監視員への影響はないことが分かる。



(a)



(b)

図13 横排気口の流れの可視化 横排気口付近の流れの様子を示している。(a)が上方からの写真、(b)が側面からの写真である。

許容透過率100m当たり40%とした。風量制御は一般の換気方式と同様に、極数変換による回転数の変化と運転台数の増減により行なうことにし、送排気側とも6極/8極の2速度の送排風機を2台並列とした。図14に、交通量に対して風量制御を行なった場合のトンネル出口部の汚染濃度比と送排風機の

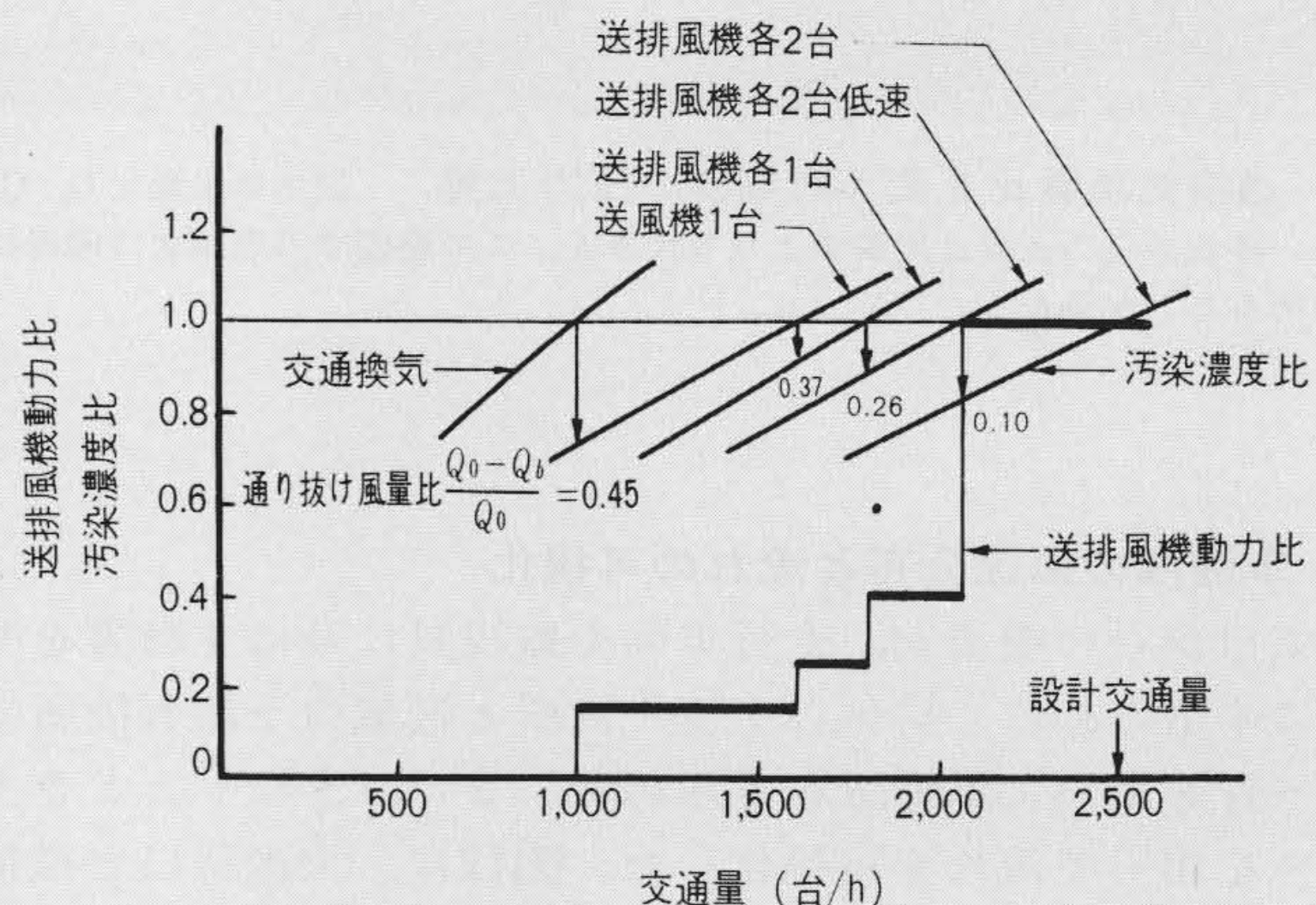


図14 風量制御時のトンネル出口の汚染濃度 一般の換気方式と同様の風量制御で、トンネル出口の汚染濃度を許容値内に抑えることができる。

動力比とを示す。交通量1,000台/hまでは、機械換気の必要がない。1,600台/hまでは送風機1台の高速運転、1,800台/hまでは送排風機各1台の高速運転、2,050台/hまでは送排風機各2台の低速運転、これ以上では送排風機各2台の高速運転により汚染濃度を許容値内に抑えることができる。

送排気口の間には、同図中に示すように常に通り抜け流れがあるので、拡張区間での空気が停滞することはない。

5 結 言

以上、縮小模型を用いて広範囲の風量比について立坑送排気縦流換気方式の換気特性を明らかにし、更に、実トンネルへの適用例を述べた。その結果、この本方式がその特徴を生かして長大トンネルにも十分実施可能であることが分かった。今後、省エネルギー、安全性向上が一段と要望されてくると予想され、いっそうの改善を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) A.G.Bendelius: Design Criteria for Vehicular Road Tunnels, ASHRAE Journal (1975-6)