

さまざまな換気系をもつ道路トンネルにおける 縦流風の運動方程式と圧力分布

矢島裕介^{*1}, 高橋謙介^{*2}, 千原隆^{*2}, 水野明哲^{*3}

Equation of motion for longitudinal air flow and pressure distribution in variously ventilated road tunnels

Yusuke YAJIMA^{*1}, Kensuke TAKAHASHI^{*2}, Takashi CHIHARA^{*2}, Akisato MIZUNO^{*3}

Abstract

This paper describes characteristics of longitudinal air flow and pressure distribution under various ventilation systems in road tunnels. Longitudinal air flow is important even in non-longitudinal tunnels for safety consideration, etc. The authors established the equation of motion on longitudinal air flow for various ventilation systems, and gave discussion on the air flow velocity and pressure distribution in tunnels.

Keywords: tunnel ventilation, pressure distribution, spatial acceleration, equation of motion, steady state analysis

1 まえがき

自動車トンネルにおいては、その延長や交通量などに応じて汚染物質の濃度を希釈するために機械的な換気が行われる。換気の方式は大きく分けて縦流式と横流式があり、またそれらが組み合わされた換気方式も実用化されている。縦流式換気においては、トンネル内を流れる空気が汚染物質を希釈するので、縦流風速を把握することが重要であることは明らかである。縦流式以外の換気方式においては、多かれ少なかれ横断方向の流れが生じ、それが換気効果に影響することから、縦流風に関しては関心が持たれず、解析方法も確立していなかった。

一方では、近年注目を浴びつつある、火災時における安全確保のための縦流風とトンネル内圧力（静圧）分布の把握は、火災による煙の拡散や本坑と避難坑との圧力差により避難坑への煙の流入の可能性を評価することと関連して、重要度が増している¹⁾。しかし、送気や排気を行うトンネル内の縦流方向の運動を論じた研究はほとんどなく、筆者の一人が発表しているもの²⁾のみと思われる。

本報では、任意の送気風量、排気風量を持つ換気方式を想定して、縦流方向の空気の流れに関して、各種の昇圧要因と空間加速度の記述を行うことで運動方程式を導出する。この運動方程式を定常状態で解析することで、入口・出口における縦流風速とトンネル内の圧力分布を解析する手法を示している。なお、本報においては、換気や交通状況などは時間的

に変動しないことを前提に、定常解を議論しているが、非定常現象を解析するにあたっては同様の原理が適用できるので、非定常への拡張は容易である。

本報では、トンネルの軸方向に x 軸を取る。トンネルの一方の端を入口、他方の端を出口と呼ぶことにする。 x 軸の原点を入口に取り、出口に向かう方向に座標軸を取る。

記号

本報で使用する変数を以下のように定義する。

A	: トンネル断面積 [m^2]
A_j	: ジェットファン噴出面積 [m^2]
A_m	: 大型車混入率を考慮した等価抵抗面積 [m^2]
D	: トンネル等価直径 [m]
dp_r	: 管摩擦損失圧力 [Pa]
dp_t	: 交通換気力 [Pa]
dm	: 微小区間の空気質量 [kg]
F_{cs}	: 検査面から加わる力 [N]
F_{ext}	: 検査面内の空気に加わる外力 [N]
K_j	: ジェットファン昇圧係数 [—]
L	: トンネル延長 [m]
M_{in}	: 検査空間への流入運動量 [N]
M_{out}	: 検査空間からの流出運動量 [N]
N	: 交通量 [台/s] ([台/h])
p	: 圧力 [Pa]
q_b	: 単位長さ単位時間当たりの送気風量

[$\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$]

^{*1} 茨城大学名誉教授

^{*2} (株)FITUT 研究所

^{*3} 工学院大学名誉教授

q_e : 単位長さ単位時間当たりの排気風量 [m³/m・s]
 t : 時間 [s]
 V : トンネル内の(断面平均)縦流風速 [m/s]
 V_0 : トンネル入口での縦流風速 [m/s]
 V_e : トンネル出口での縦流風速 [m/s]
 V_j : ジェットファン噴出風速 [m/s]
 V_n : 自然風風速 [m/s]
 V_t : 車両の走行速度 [m/s] ([km/h])
 x : トンネル入口を原点とする座標 [m]
 Δp_{NW} : 自然風による圧力差 [Pa]
 Δp_e : 入口損失による圧力差 [Pa]
 Δp_j : ジェットファン昇圧力 [Pa]
 $\delta(x)$: ディラックのデルタ関数
 λ : 管摩擦損失係数 [-]
 φ : 面積比 $\equiv A_j/A$ [-]
 ψ : 速度比 $\equiv V/V_j$ [-]
 ρ : 空気密度 [kg/m³]
 ρ_t : 交通密度 [台/m]
 ξ_b : 送気による運動量持込係数 [-]
 ξ_e : 排気による運動量持出係数 [-]
 ζ_e : 入口損失係数 [-]

添字については

+, - : x 座標の正方向, 負方向

2 トンネル内の圧力分布

2.1 さまざまな昇圧要素

2.1.1 局所的な昇圧要素の表現方法

トンネル内では様々な要因で圧力が変化する。これらを昇圧要素と呼ぶ。実際には非定常に変化するが、ここでは定常状態を考える。自動車による交通換気力は連続分布とし、ジェットファン昇圧力、入口損失、自然風換気力は局所的な圧力変化と考えることにする。たとえばジェットファンは、図1のように、前後数十メートルから百数十メートルにわたって圧力上昇が生じ、結果として式(5)に示すような昇圧力となる。しかしトンネル全体が1~10kmのオーダーであることを考慮すると、一点で圧力上昇があると考えても差し支えない。したがって、微分形で表したこれらの圧力上昇は、ディラックのデルタ関数 $\delta(x)$ として表すことができ、それを x で積分するとステップ関数(階段関数)となる。

2.1.2 管摩擦損失

管摩擦による圧力降下は

$$dp_r = -\lambda \frac{1}{D} \frac{\rho}{2} V |V| dx \quad (1)$$

で表される³⁾。ここに、 λ は管摩擦損失係数である。

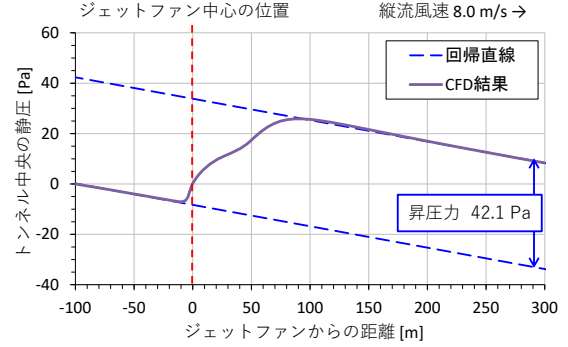


図1: ジェットファンによって生じる圧力分布

2.1.3 入口損失

トンネルの坑口から空気が流入するとき、入口形状に応じて「入口損失」が発生する。また、同時に静止大気から速度 V に対応する運動エネルギーを獲得したことに対応する圧力降下 $(\rho/2)V^2$ も加わるので、

$$\Delta p_e \delta(x) = -(1 + \zeta_e) \frac{\rho}{2} V |V| \quad (2)$$

と書ける³⁾。一般的に入口損失による圧力降下と動圧分の圧力降下を加えた式(2)を単に「入口損失」と呼ぶことも多い。2.1.1節で述べた事情によりディラックのデルタ関数を用いて $\Delta p_e \delta(x)$ で表される。

2.1.4 交通換気力

車両の走行にともない、車両に働く抗力の反作用として車両はトンネル内空気に走行方向に力を及ぼす。車両は一台一台が離散的なものであるが、ここでは分布系と考え、単位長さ当たりの車両台数である交通密度を ρ_t として扱う。正方向、負方向の車両による交通換気力はそれぞれ

$$\begin{aligned}
 dp_{t+} &= \frac{\rho}{2} \frac{A_m}{A} \rho_{t+} (V_{t+} - V) |V_{t+} - V| dx \\
 dp_{t-} &= \frac{\rho}{2} \frac{A_m}{A} \rho_{t-} (V_{t-} - V) |V_{t-} - V| dx
 \end{aligned} \quad (3)$$

と書ける⁴⁾。一般に、交通量 N は、1時間に断面を通過する台数として[台/h]の単位で表されることが多いが、本報では[台/s]の単位で表すこととする。ここで ρ_{t+} , ρ_{t-} はそれぞれ正方向、負方向の交通密度で、 $\rho_{t+} = N_+/V_t$, $\rho_{t-} = N_-/V_t$ であり、[台/m]の単位を持つ。 A_m は、大型車混入率やブロッケージ効果を考慮した等価抵抗面積である。本報では負の方向の車両走行速度は $V_{t-} = -V_{t+}$ とした。

2.1.5 自然風換気力

トンネル内の縦流風の要因として、外部の気圧配置による自然風が考えられる。もしトンネル内に車両が存在せず、換

気設備もまったく運転しない状態で V_n の風が吹いていたとすると、それはトンネルの両坑口の圧力差

$$\Delta p_{NW} \delta(x) = \left(1 + \zeta_e + \lambda \frac{L}{D}\right) \frac{\rho}{2} V_n |V_n| \quad (4)$$

に起因するものとする。この式は両坑口の圧力差が管摩擦と入口損失によるものであることを示している。(管摩擦損失の項および入口損失の項を参照)

本報では自然風による換気力は、便宜上トンネル入口での圧力の増減で表すこととする。2.1.1 節で述べた事情によりディラックのデルタ関数を用いて $\Delta p_{NW} \delta(x)$ で表される。

2.1.6 ジェットファン昇圧力

ジェットファン 1 基あたりの昇圧力は

$$\Delta p_j = \frac{1}{2} \rho K_j V_j |V_j| \varphi \frac{1 - \psi}{(1 - \varphi)^2} (2 - 3\varphi + \varphi\psi) \quad (5)$$

で表される⁵⁾。ここに $\varphi \equiv A_j/A$ 、 $\psi \equiv V/V_j$ であり、 ψ の算出では、そのジェットファンの設置位置における縦流風速 V を用いることに注意する。存在するジェットファンのひとつひとつは添え字 k で表されており、ジェットファンが x_k の位置に設置されているとき、式 (5) より、2.1.1 節で述べた事情によりディラックのデルタ関数を用いて $\Delta p_{jk} \delta(x - x_k)$ で表される。

2.1.7 その他の換気力

上記以外にも、立坑による送排気装置や坑口サッカルドなど、さまざまな昇圧要素が存在する⁴⁾ ので、必要に応じて追加する。

2.1.8 トンネル内空気柱に働く力の合計

トンネル内の空気柱 (空気全体) に加わる力は、以上で述べた 2.1.2 項から 2.1.7 項までの力について加え合わせことで

$$\begin{aligned} \frac{dF_{ext}}{A} &= (dp_r + dp_{t+} + dp_{t-}) + \Delta p_e \delta(x) \\ &\quad + \Delta p_{NW} \delta(x) + \sum_k \Delta p_{jk} \delta(x - x_k) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここに $\delta(x)$ はディラックのデルタ関数であり、入口損失や自然風換気力は $x = 0$ において、またジェットファン昇圧力はその設置位置において、それぞれステップ状に変化するとして扱っている。

2.2 トンネル内縦流風速の運動方程式

2.2.1 トンネル内縦流風速の運動方程式の導出

ここでは、トンネル内圧力分布の基礎式を運動量保存則に基づいて求める。昇圧要素のうち、ジェットファンなどの特異点については別途考慮することとし、ここでは圧力勾配を生じさせる要因として管摩擦、交通換気力のみを考える。

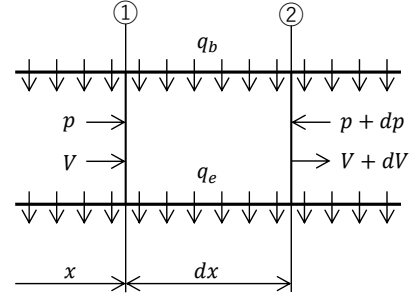


図 2: 微小部分の運動量保存則

トンネル内の縦流風の運動方程式は、筆者の一人が先に発表した報告²⁾に基づいて記述する。 $V > 0$ の場合に限定して考える。運動量保存則⁶⁾は

$$F_{cs} + F_{ext} = dm \frac{\partial V}{\partial t} + (M_{out} - M_{in}) \quad (7)$$

すなわち、左辺はこの検査区間に働く外力の合計、右辺は微小部分の加速度と流入、流出による運動量増加の合計である。図 2 に示すようにトンネル軸に沿う方向に微小区間 dx に着目する。トンネル内にダクトを設置して送気や排気を行う場合、トンネル軸方向の単位長さ当たりの換気風量は、ひとつの換気区間において一定であるとする。実際には換気装置や換気ダクトを設置したときの初期調整を行うことで、これに近い状況が実現されているものと考えられる。この微小区間における x 方向の単位時間当たりの運動量は

断面①から流入する運動量 $\rho V^2 A$

送気により持ち込まれる運動量 $\xi_b \rho V q_b dx$

断面②から流出する運動量 $\rho (V + dV)^2 A$

排気により持ち出される運動量 $\xi_e \rho V q_e dx$

であることから、

$$M_{in} = \rho V^2 A + \xi_b \rho V q_b dx \quad (8)$$

$$M_{out} = \rho (V + dV)^2 A + \xi_e \rho V q_e dx \quad (9)$$

$$F_{cs} = p A - (p + dp) A \quad (10)$$

となり、これらの関係を運動量保存則である式 (7) に代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= -\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + 2V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\xi_b q_b - \xi_e q_e}{A} V \right) \\ &\quad + \frac{1}{A} \frac{\partial F_{ext}}{\partial x} \end{aligned} \quad (11)$$

を得る。ここに、 ξ_b 、 ξ_e は、それぞれ、送気および排気に沿った軸方向運動量の持ち込み率および持ち出し率である。現象として、送気についてはトンネル軸方向に垂直に吹き込まれると考えて $\xi_b = 0$ とし、排気については、壁付近の境界層

は薄く、軸方向の速度を持ったまま排気されると考えるのが自然なので、 $\xi_e = 1$ とする。式 (11) から

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + 2V \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{q_e}{A} V \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial F_{ext}}{\partial x} \quad (12)$$

のように縦流風の運動方程式を得る。

$V < 0$ の場合についても上記と同様の考察を行うことにより同じ運動方程式 (12) が得られる。

2.3 圧力分布の定常解

定常を仮定すると、式 (12) から時間微分項が消え、独立変数が x のみになるので、常微分で表される。さらに縦流風速が

$$V = V_0 + \frac{q_b - q_e}{A} x \quad (13)$$

であることを考慮すると、定常の運動方程式は

$$\frac{dp}{dx} = -\rho \frac{V}{A} (2q_b - 3q_e) + \frac{1}{A} \frac{dF_{ext}}{dx} \quad (14)$$

となる。ここに、右辺第 2 項は式 (6) で与えられるもので、自然風による昇圧要因を含んでいる。この式を x について積分することで必要な圧力分布を求めることができ、トンネル入口直前での圧力を p_1 として、

$$p(x) = p_1 + \int_0^x \frac{dp}{dx} dx \quad (15)$$

となる。積分は数値的に行われる。解析的な積分も可能ではあるが、絶対値の操作などでかなり煩雑になる。また、両坑口間の圧力差は、トンネル全体にわたる積分を行い

$$p_2 - p_1 = \int_0^L \frac{dp}{dx} dx \quad (16)$$

により求められる。

2.3.1 車道内風速算法

ここで、評価関数を

$$J(V_0) = \int_0^L \frac{dp}{dx} dx \quad (17)$$

と定義する。これは式 (16) の右辺が V_0 の関数として表されることを意味する。この式は自然風 V_n による坑口間圧力差も含めたものとなっているため、 $p_2 - p_1 = 0$ でなければならない。そこで、 $J(V_0)=0$ となる V_0 を数値的に（たとえば割線法などを用いて）求めれば、式 (13) によりトンネル内の任意の点での縦流風速が確定し、これを用いて式 (15) を計算（数値積分）すると、トンネル内静圧分布を x の関数として求めることができる。

3 さまざまな換気系における縦流風速と圧力分布

本章では、前節 2.3.1 で入口風速を算出したのち、圧力分布を式 (15) により計算した。その際、さまざまな昇圧要素ごとの圧力分布を個別に求め、その和を算出することにより、その圧力分布を示しながら、それらの特性について論じる。

以下の計算に用いる共通のパラメータは表 1 に示す。ジェットファンに関するパラメータはジェットファンを含むケースのみに適用される。

表 1: 共通パラメータ

パラメータ	単位	値
空気密度	kg/m ³	1.2
管摩擦係数	—	0.025
入口損失係数	—	0.6
ジェットファン噴出風速	m/s	35
ジェットファン噴出面積	m ²	1.227
ジェットファン昇圧係数	—	0.8
自動車の等価抵抗面積	m ²	3.47

3.1 縦流換気における縦流風速と圧力分布

3.1.1 縦流換気式トンネル一方通行における計算例

はじめに、一方通行トンネルにジェットファンが設置されたときの圧力分布の一例を図 3 に示す。使用したパラメータは表 2 の通りである。

表 2: 縦流一方通行で用いたパラメータ

パラメータ	単位	値
トンネル延長	m	2000
トンネル断面積	m ²	63.5
トンネル代表直径	m	8.2
送気風量	m ³ /m·s	0
排気風量	m ³ /m·s	0
自然風風速	m/s	-2.5
交通量（正）	台/h	1360
交通量（負）	台/h	0
車両走行速度	m/s	22.22
ジェットファン台数	台	2
ジェットファン位置	m	200

縦流風速は 7.39m/s であった。図 3 では、式 (14) 右辺第 1 項に対応する空間加速度項（本ケースでは存在しない）、外力の各項である式 (6) 右辺の各項に対応する管摩擦項、交通換気力項（本ケースでは正方向のみ）、入口損失項、自然風項、ジェットファン昇圧項をそれぞれ別に表示し、合計圧力（静圧）を紫色で表示している。入口で自然風換気力と入口

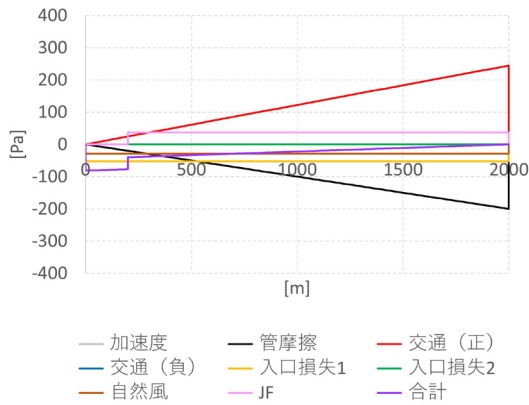


図 3: 縦流換気ジェットファン付き (一方通行)

損失（動圧低下分を含む；以下同じ）が発生し、200m 地点でジェットファンの昇圧力が生じる。また、トンネル延長に沿って交通換気力（正方向のみ）と管摩擦力がそれぞれ直線的に上昇、下降している。合計圧力は入り口で 81.3Pa 低下し、200m でジェットファンにより -40.6Pa まで回復したのち、出口に向かってわずかに直線的な回復を見せている。

3.1.2 縦流換気式トンネル対面通行におけるジェットファン設置位置の影響

ジェットファン縦流換気式トンネルにおいて、対面通行時に、ジェットファンの設置位置によってトンネル内圧力分布がどのように異なるかを示す。

まず、表 3 のように、3000m のトンネルにジェットファンを入口側に寄せて 15 台設置した場合の圧力分布を図 4 に示す。このとき、縦流風速は 3.27m/s で、交通換気力が正方向と負方向で拮抗している。しかし両方向の交通量が等しいにもかかわらず、交通換気力の総計は正方向で 175N であるのに対して負方向は -419N と差があるのは交通換気力が車両速度と縦流風速の差（相対風速）の 2 乗に比例するからである。同じ理由から、15 台のジェットファンを運転しているにもかかわらず、縦流風速は 3.27m/s に留まる。総合の静圧分布は紫色で示されており、ジェットファンの昇圧によりトンネル中央付近まで圧力が上昇していて、1500m における圧力は、 151Pa であり、ほぼトンネル全体にわたって正の圧力になっている。このケースや次のケースにおいては、風速が小さいことと表示スケールが大ききこともあり、入口損失は -10.3Pa 程度であり、存在するが図ではほとんど判別できない。

次に、ジェットファンが出口寄りに設置された場合について検討した。計算に用いたパラメータは表 4 に示す。計算結果の圧力分布は図 5 に示している。縦流風速は先のケースと同じ 3.27m/s である。ジェットファン昇圧の曲線（ピンク）

は、トンネル後半（右半分）で高くなっており、それに伴い、総合の圧力（紫色）は中央付近まで低下しており、1500m 地点では -161Pa となっている点が前ケースとの明確な違いである。圧力はほぼトンネル全体にわたって負の値を取る。火災時の避難環境の検討にあたって、前ケースとの差は明確で、

表 3: 縦流対面通行 (1) で用いたパラメータ

パラメータ	単位	値
トンネル延長	m	3000
トンネル断面積	m^2	63.5
トンネル代表直径	m	8.2
送気風量	$\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$	0
排気風量	$\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$	0
自然風風速	m/s	0
交通量 (正)	台/h	680
交通量 (負)	台/h	680
車両走行速度	m/s	15.28
ジェットファン台数	台	15
ジェットファン位置	m	200 (2 台)
ジェットファン位置	m	360 (2 台)
ジェットファン位置	m	520 (2 台)
ジェットファン位置	m	680 (2 台)
ジェットファン位置	m	840 (2 台)
ジェットファン位置	m	1000 (2 台)
ジェットファン位置	m	1160 (2 台)
ジェットファン位置	m	1320 (1 台)

表 4: 縦流対面通行 (2) で用いたパラメータ

パラメータ	単位	値
トンネル延長	m	3000
トンネル断面積	m^2	63.5
トンネル代表直径	m	8.2
送気風量	$\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$	0
排気風量	$\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$	0
自然風風速	m/s	0
交通量 (正)	台/h	680
交通量 (負)	台/h	680
車両走行速度	m/s	15.28
ジェットファン台数	台	15
ジェットファン位置	m	1680 (1 台)
ジェットファン位置	m	1840 (2 台)
ジェットファン位置	m	2000 (2 台)
ジェットファン位置	m	2160 (2 台)
ジェットファン位置	m	2320 (2 台)
ジェットファン位置	m	2480 (2 台)
ジェットファン位置	m	2640 (2 台)
ジェットファン位置	m	2800 (2 台)

極めて重要な示唆を与える。

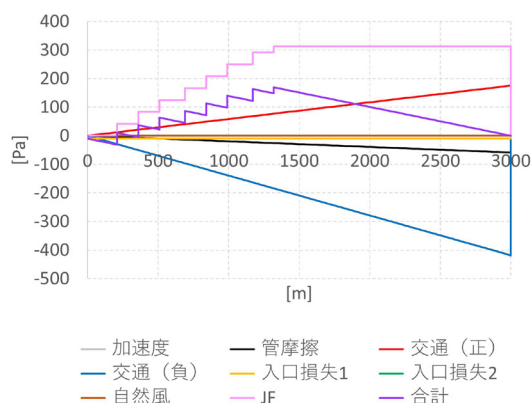


図 4: 縦流ジェットファン付き対面通行 (1)

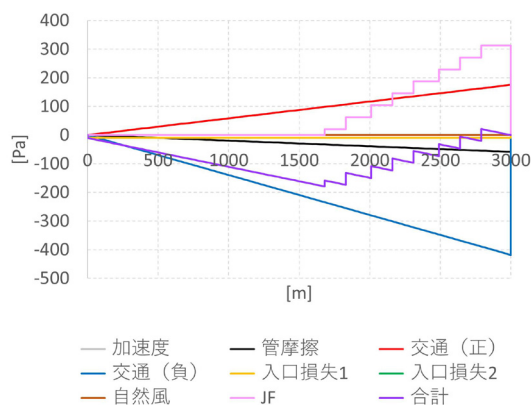


図 5: 縦流ジェットファン付き対面通行 (2)

3.2 横流換気における縦流風速と圧力分布

3.2.1 横流換気一方通行における計算例

横流換気で一方通行のトンネルの計算例を示す。計算に用いたパラメータは表 5 であり、圧力分布は図 6 に示している。横流では $q_b = q_e$ であり、入口風速=出口風速=8.08m/s と高速になっている。空間加速度が正方向に働いているため、縦流換気のケースより大きな風速となっている。それは、式 (14) の右辺第 1 項からわかる通り、送気は減速効果を、また排気は増速効果を持ち $q_b = q_e$ の場合には排気の影響の方が強く出ためである。

表 5: 横流換気一方通行で用いたパラメータ

パラメータ	単位	値
トンネル延長	m	2000
トンネル断面積	m ²	50.2
トンネル代表直径	m	6.6
送気風量	m ³ /m・s	0.2
排気風量	m ³ /m・s	0.2
自然風風速	m/s	0
交通量 (正)	台/h	1360
交通量 (負)	台/h	0
車両走行速度	m/s	22.22

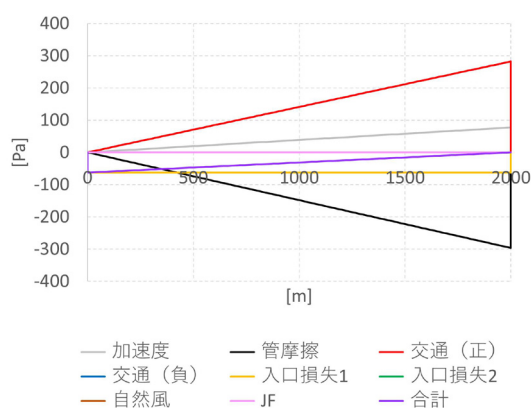


図 6: 横流一方通行の圧力分布

3.2.2 横流換気対面通行における計算例

横流換気で対面通行では、表 6 に対して計算を行った。交通量を対面方向に等しく置いたため、交通換気力は完全に等しい値が符号を変えてかかっており、結果として風速は 0 となる。圧力分布は図 7 に示す。入口損失も管摩擦も存在せず、合計圧力はすべての点で 0 である。

表 6: 横流換気対面通行で用いたパラメータ

パラメータ	単位	値
トンネル延長	m	2000
トンネル断面積	m ²	50.2
トンネル代表直径	m	6.6
送気風量	m ³ /m・s	0.2
排気風量	m ³ /m・s	0
自然風風速	m/s	0
交通量 (正)	台/h	680
交通量 (負)	台/h	680
車両走行速度	m/s	15.28

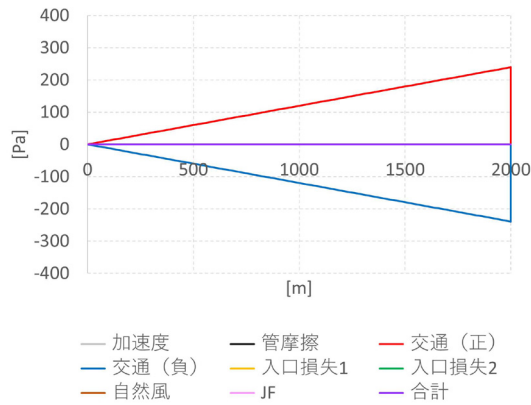


図 7: 横流対面通行の圧力分布

3.3 送気半横流換気における縦流風速と圧力分布

3.3.1 送気半横流換気一方通行における圧力分布

送気半横流一方通行のパラメータを表 7 に、圧力分布を図 8 に示している。縦流風速は入口で 2.46m/s, 出口で 8.77m/s であった。交通換気力（赤色）が大きく正方向に働いているのに対し、管摩擦と空間加速度が減速要因となっている。

表 7: 送気半横流一方通行で用いたパラメータ

パラメータ	単位	値
トンネル延長	m	2000
トンネル断面積	m ²	50.2
トンネル代表直径	m	6.6
送気風量	m ³ /m·s	0.2
排気風量	m ³ /m·s	0
自然風風速	m/s	0
交通量（正）	台/h	1360
交通量（負）	台/h	0
車両走行速度	m/s	22.22

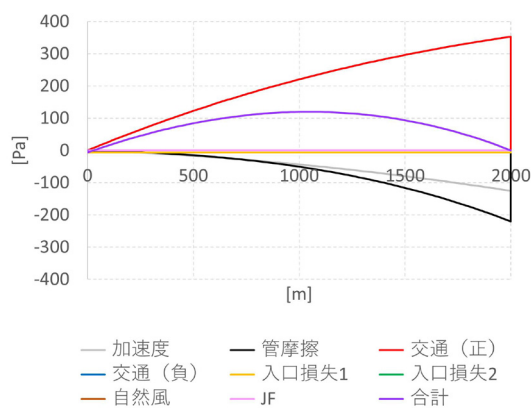


図 8: 送気半横流一方通行の圧力分布

総合の圧力は両端でゼロとなり、それ以外は正の値を取る。交通換気力、管摩擦、対流加速度などがカーブしているのは縦流風速が変化していくためである。

3.3.2 送気半横流換気対面通行における圧力分布

次に送気半横流で対面通行を行う場合について述べる。計算パラメータは表 8 に示す。

入口風速 -3.98m/s, 出口風速 3.98m/s となった。中性点がトンネル中央に来ており、入口側と出口側が対称な流れになっている。圧力分布は図 9 に示している。正方向と負方向の交通換気力の合計は（出口で）等しくなっている。また、入口、出口の両方から換気風が流出するので、入口損失はどちらでも発生していない。交通換気力や管摩擦力、空間加速度などが曲線になっているのも前ケースと同様の理由であり、その結果として総合の圧力（紫色）も曲線になっている。

表 8: 送気半横流対面通行で用いたパラメータ

パラメータ	単位	値
トンネル延長	m	2000
トンネル断面積	m ²	50.2
トンネル代表直径	m	6.6
送気風量	m ³ /m·s	0
排気風量	m ³ /m·s	0.2
自然風風速	m/s	0
交通量（正）	台/h	680
交通量（負）	台/h	680
車両走行速度	m/s	15.28

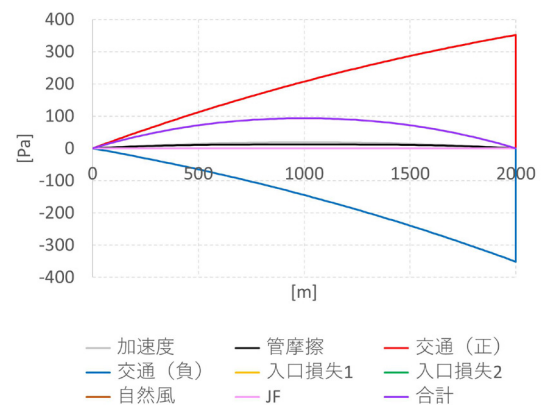


図 9: 送気半横流対面通行の圧力分布

3.4 排気半横流換気における縦流風速と圧力分布

3.4.1 排気半横流換気一方通行における縦流風速と圧力分布

排気半横流一方通行の計算例を示す。パラメータは表 9 に示し、計算結果の圧力分布を図 10 に示している。縦流風速

は入口で 12.6m/s, 出口で 4.65m/s であった。縦流風速がこのような大きな値となったのは、空間加速度項（グレー）が交通換気力と同程度に大きな値となったことによる。式 (15) で右辺第 1 項からわかるように排気運転が大きな増速効果を持つ結果となった。一方通行の交通換気力と空間加速度により増速されることに対して、入口損失（黄色）と管摩擦（黒色）に減速効果が見られる。トンネル内の総合の圧力（紫色）は全体で負の値となった。

表 9: 排気半横流一方通行で用いたパラメータ

パラメータ	単位	値
トンネル延長	m	2000
トンネル断面積	m ²	50.2
トンネル代表直径	m	6.6
送気風量	m ³ /m・s	0
排気風量	m ³ /m・s	0.2
自然風風速	m/s	0
交通量（正）	台/h	1360
交通量（負）	台/h	0
車両走行速度	m/s	22.22

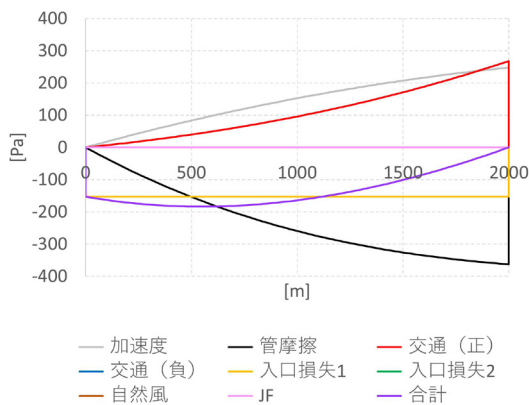


図 10: 排気半横流一方通行の圧力分布

3.4.2 排気半横流換気対面通行における縦流風速と圧力分布

排気半横流で対面通行（交通量 5:5）の場合を計算してみた。パラメータを表 10 に、その圧力分布を図 11 に示す。このときは、入口風速 3.98m/s, 出口風速 -3.98m/s となり、入口と出口に関して対称な流れとなり中性点が中央に存在する。縦流風速の絶対値が小さいために、空間加速度や管摩擦は小さい値にとどまっている。総合の圧力（紫色）は全体にわたってわずかに負の値になっている。

表 10: 排気半横流対面通行で用いたパラメータ

パラメータ	単位	値
トンネル延長	m	2000
トンネル断面積	m ²	50.2
トンネル代表直径	m	6.6
送気風量	m ³ /m・s	0
排気風量	m ³ /m・s	0.2
自然風風速	m/s	0
交通量（正）	台/h	680
交通量（負）	台/h	680
車両走行速度	m/s	15.28

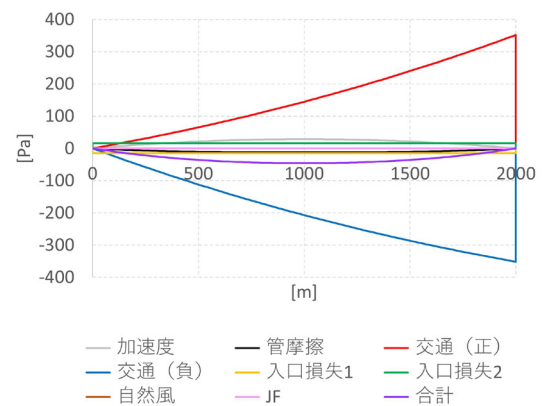


図 11: 排気半横流対面通行の圧力分布

4 まとめ

さまざまな換気方式のトンネルにおいて、定常状態における縦流風の運動方程式を提示した。このなかで、空間加速度に関する議論は、トンネル換気においてはこれまでになされたことがなく、新しい提案を行っている。送気は減速効果を持ち、排気は増速効果を持つこと、送気と排気が等しいときは排気の効果の方が勝ることが、式からも計算例からも確認された。

得られた運動方程式を定常状態に適用し、さまざまな換気方式に対する解を得た。トンネル内静圧分布を求めるにあたっては、その要因ごとの圧力分布を示すことにより換気方式や交通状況によりトンネル内の圧力分布がどのように影響されるかを図示し、解説を加えた。

3000m の縦流換気式トンネルにおいて、15 台のジェットファンを入口に寄せた場合と出口に寄せた場合とで比較したところ（図 12）、その圧力分布には明らかな差があり、避難環境などを考慮して圧力分布を設計に取り込むときのツールとなりうることを示すことができた。

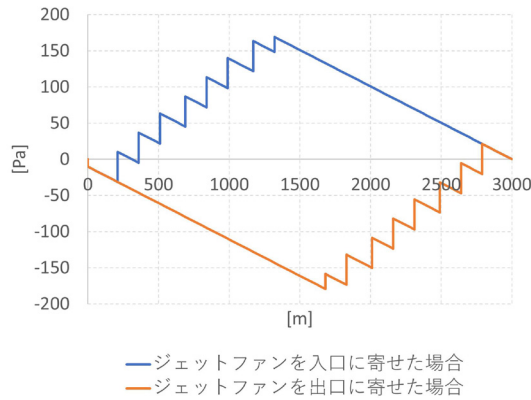


図 12: トンネル内圧力分布のジェットファン位置による依存性

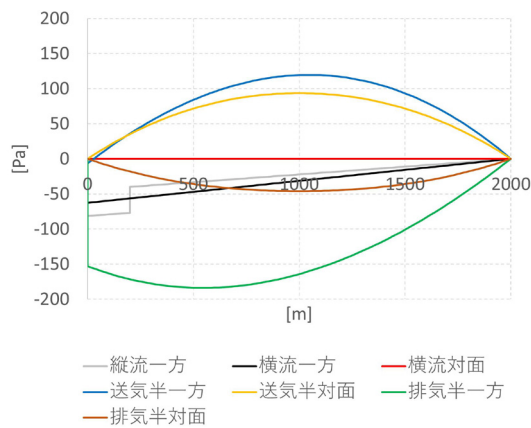


図 13: さまざまな換気系におけるトンネル内圧力分布

さまざまな換気系についての圧力分布をまとめると図 13 のようになる。トンネル内圧が大きくなるのは、送気半横流（一方通行、対面通行とも）であり、逆にトンネル全体で圧力が低いのは、排気半横流で一方通行の場合である。他方、縦流一方通行、横流一方通行、横流対面通行、排気半横流対面通行のケースにおいては圧力がわずかに（100Pa の範囲で）負の値を取ることが分かった。

計算例では取り上げなかったが、 $q_b \neq q_e$ の場合も同様に計算は可能である。

参考文献

- 1) K. Takahashi A. Mizuno. Allocation and operation of jet-fans for a safe evacuation at a fire in a tunnel with longitudinal ventilation system. In *Proceedings of the 18th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels*, pp. 108–122. BHR Group, 2019.

- 2) A. Mizuno T. Kanoh. On the one-dimensional equation of motion for the numerical simulation of transversely ventilated road tunnels. In *3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, USA, FEDSM99-7042*, pp. 1–7. ASME, 1999.
- 3) 大橋秀雄. 流体力学 (1). コロナ社, 1982.
- 4) 日本道路協会. 道路トンネル技術基準（換気編）・同解説（平成 20 年改訂版）. 公益社団法人日本道路協会, 2008.
- 5) U. Meidinger. Längslüftung von Autotunneln mit Strahlgebläsen. *Schweizerische Bauzeitung*, Vol. 82, No. 28, pp. 498–501, 1964.
- 6) 今井功. 流体力学（前編）. 裳華房, 1973.

