

# 縦流式換気制御は難しいか？

水野 明哲、 大久保 智昭  
工学院大学

## 1 緒言

道路トンネルでは、通行する自動車の排出ガスによるトンネル内空気の汚染を防ぐために機械換気が必要であり、日本では、縦流換気が多く採用されている。しかし、縦流式は横流式と比べて換気が難しく、様々な制御手法が開発されているが、いまだ確立しているとは言い難く、制御結果に対する評価手法も明確にはなっていない。

そこで本研究では、制御手法を検討する上で不可欠な換気シミュレータを開発した。さらに、いく通りかの制御を組み合わせることでトンネル内汚染濃度の挙動を検討した。また、トンネル内の汚染濃度と換気動力の両面を一元的に評価するための評価関数の提案を行い、これをシミュレーション結果に適用して、評価手法として適切であるかどうかの考察を行った。

## 2 換気シミュレータ

### 2.1 換気シミュレータの構造

換気シミュレータ（換気シミュレーションプログラム）は、機能的に大別すると図1に示すように現象を表すプラント部、制御を行うコントローラ部およびそれを結びつける計測機器から成る。プラント部は、トンネル内の物理現象を表し空気力学モデル、汚染モデル、交通モデル、換気モデルから構成される。空気力学モデルは、交通モデルから交通換気力、換気モデルから換気機の運転状況（交通量）をうけてトンネル内の風速を計算する。さらに、汚染モデルでは、空気力学モデルからトンネル内風速、交通モデルから汚染物質の発生量を得て、トンネル内の汚染状況を計算する。

また、制御モデルは交通センサより交通量、透過率計より煤煙濃度、CO計より一酸化炭素濃度を得て換気機の運転量を計算し、換気機モデルによって換気機の運転量を決定する。

### 2.2 空気力学モデル

トンネル内の空気を非圧縮として自然風による力 $F_w$ 、ジェットファンによる力 $F_j$ 、車両のピストン効果 $F_t$ 、壁面の管路損失 $F_r$ などの力を合計することにより風速 $V_r$ を支配する運動方程式を得る。

$$m \frac{dV_r}{dt} = F_w + F_j + F_t + F_r. \quad (1)$$

(1)式の各項については参考文献[3]を参照。

### 2.3 汚染モデル

煤煙・一酸化炭素の対流（移流）、拡散、発生によるトンネル内の濃度分布を計算するために、発生項を含む次元移流拡散方程式を用いる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V_r \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \xi, \quad (2)$$

ここで、時間を  $t$ 、トンネル入口からの距離を  $x$ 、トンネル内風速を  $V_r$ 、拡散係数を  $D$ 、単位時間あたりの汚染物質の発生量を  $\xi$  とすると煤煙及び一酸化炭素の濃度は  $c$  である。また、本シミュレーションプログラムでは、発生項の影響を明確に把握するために、拡散係数を  $D=0$  とした。日本においてディーゼル車の割合が高いことから煤煙濃度は、一酸化炭素等の汚染物質よりも大きな問題であり、主な汚染源であると考えられる。透過率  $\tau$  は、煤煙濃度  $c$  と次のような関係がある。

$$\tau = e^{-lc}, \quad (3)$$

$l$  は、投光器と受光器の距離。一般に 100m である。(3)式より煤煙濃度の単位は[1/m]という次元を持っていることになる。

### 2.4 交通モデル

縦流式換気においては、交通換気力が縦流風に影響することや、大型車の走行が煤煙発生量を決定するなど、交通モデルの他のモデルへの影響が大きく、従って交通モデルはシミュレーションを妥当に行う上で重要である。本シミュレーションにおいては、交通は車両 1 台 1 台を指定した時刻にトンネル内に進入させるようなモデルとし、実測データを用いてシミュレーションを行った。このモデルは、本研究において汚染分布や風速の変化が頻繁に変化する短いトンネルのシミュレーションをする上で特に重要である。

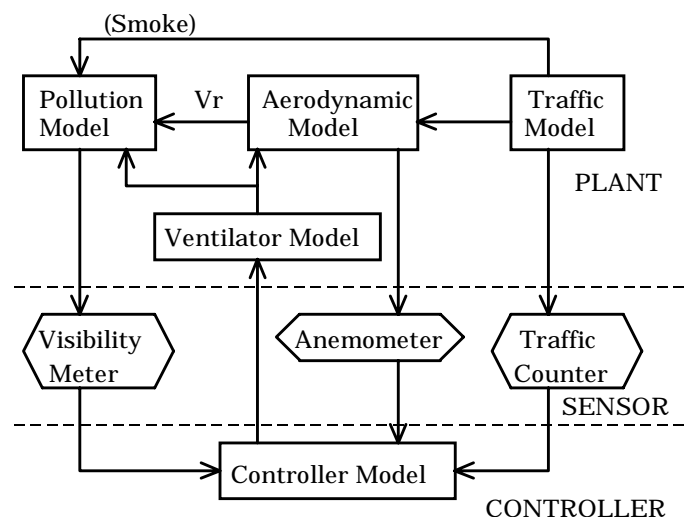
### 2.5 制御モデル

換気制御の目的は、トンネル内の汚染濃度を目標値に納めると共に換気機の使用電力を小さくすることである。トンネル換気の自動制御は、フィードバック制御やフィードフォワード制御のほか最近では AI・ファジー制御も採用されるようになっている。

本論文においては基本的な、制御手法であるフィードバック制御とフィードフォワード制御を用い組み込んでみた。

#### 2.5.1 フィードバック制御

フィードバック制御においては、必要なジェットファン台数は、汚染の度合いとトンネル内風速の値の両局面から決定されるものとする。



2 図1 数値シミュレータの構造<sup>[3]</sup>

制御周期  $t_c$  毎に透過率計より得られた透過率  $\tau$  (トンネル両坑口に設置されている透過率計の値の低い方) を制御目標値  $\tau_c$  に近づけるようにジェットファン台数を計算する。

$$J^i_1 = J^{i-1} - K_1 \times (\tau - \tau_c) \times J_{max}, \quad (4)$$

$i$  は制御周期の番号,  $K_1$  は制御ゲイン,  $J_{max}$  はジェットファン設置台数である。  $J^{i-1}$  は変更前の運転台数。ここで,  $\tau_c$  は許容透過率  $\tau_0$  から十分余裕を取った値。また, 汚染物質が逆流しないように以下のようにジェットファン台数を計算すると,

$$J^i_2 = J^{i-1} - K_2 \times (V_r - V_{r0}) \quad (5)$$

ここで,  $V_{r0}$  は, 0~1m/s の範囲の値とする。

変更後のジェットファン台数は,  $J^i = \max(J^i_1, J^i_2)$  とする。max は大きい方で, 四捨五入して決定する。

### 2.5.2 フィードフォワード制御

フィードバック制御では, 透過率を制御目標値に近づけるようにジェットファン台数を求めていたが, これでは, 遅れのために急激な煤煙濃度の悪化には対処できない。そこで, 坑口手前に設置されているトラフィックカウンタの情報によって, トンネル内の汚染状況を予測した運転を行う。トンネル内存在台数の平均を計算し, 必要換気量  $Q$  を次のように求める。

$$Q_0 = q_0 \times N \times L \times \frac{1}{1000}, \quad (6)$$

$$Q = \{(Q_0 \times r_t \times k_{i1}) + (Q_0 \times (1-r_t) \times k_{i2})\} \times k_h, \quad (7)$$

$q_0$  は, 単位基準換気量 [ $m^3/s/km/h$ ]。  $Q_0$  は基準換気量 [ $m^3/s$ ]。  $N$  はトンネル内存在台数の平均から求めた時間交通量 [veh./h],  $L$  はトンネル延長 [m],  $r_t$  は重方向交通量率,  $k_{i1}$ ,  $k_{i2}$  は煤煙に対する勾配補正係数,  $k_h$  は標高補正係数である。必要風速  $V_r$  は,  $Q / A_r$  で求まり, ジェットファン台数は,

$$J = \frac{p_w - p_r - p_t}{p_j} \times k, \quad (8)$$

$p_r$  は管摩擦力,  $p_w$  は自然換気力,  $p_t$  は交通換気力,  $p_j$  はジェットファン換気力。ここで,  $p_r, p_t, p_j$  は  $V_r$  の関数,  $p$  はすべて(1)式の力  $F$  をトンネル断面積  $A_r$  で割ったものである。  $k$  は過剰換気を抑えるための補正係数である。

### 3 換気制御の評価

トンネル内の環境の維持とコストの節減は相反するものであると同時に絶対的な基準の設定しにくいものである。しかしながら換気制御がうまくいっているかどうかを客観的に判断することの必要性はますます高まってきている<sup>[1][2]</sup>。

評価関数は汚染ペナルティと電力ペナルティを合わせたものであると考える。

### 3.1 汚染ペナルティ

汚染に対するペナルティは許容濃度を越えてしまった場合、その偏差が大きくなるに従い、比例的にペナルティが課せられる。汚染ペナルティは

$$\pi_{poll} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt, \quad (9)$$

ただし

$$F(t) = 1 - \frac{\tau}{\tau_0} \quad (\tau < \tau_0), \\ = 0 \quad (\tau \geq \tau_0).$$

透過率  $\tau$  は、両坑口で計測された煤煙透過率の低い方の値。ペナルティはこのように時間とともに変化する関数を一定の時間  $T$  にわたって平均された量として評価される。本論文では、 $T$  は 24 時間とする。

### 3.2 電力ペナルティ

消費電力そのものを電力ペナルティとして評価するのは適切ではない。なぜなら、通過交通量に対して必要な換気を行ったことに対しては、ペナルティを課すべきではないからである。しかし、必要な換気がどれだけ、必要以上に費やした電力がどれだけかを適切に算出することは一般に困難である。ここで、必要換気動力が交通量の  $j$  乗に比例するとして電力ペナルティは、

$$\pi_{power} = \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \frac{P}{P_0} - \left( \frac{N_d}{N_{d0}} \right)^j \right\} dt, \quad (10)$$

$P$  は換気動力、 $P_0$  は総動力、 $N_d$  は大型車の交通量、 $N_{d0}$  は大型車の設計交通量である。

### 3.3 一元的评价

以上のような 2 つのペナルティを加え合わせる。(9),(10)式の場合、無次元で表されているため単位の整合化をする必要は無いが、一般には異なる物理量で表されているので同一の単位になるように係数  $b$  をかける必要がある。さらに、汚染ペナルティと電力ペナルティの重要度のバランスを設定するために重み係数  $a$  ( $0 \leq a \leq 1$ ) を用いる。重み係数  $a$  は汚染濃度が大切であると考えた場合大きくし、石油価格が上昇し電力費が高騰したとき小さくする。

$$\pi_{total} = a\pi_{poll} + b(1-a)\pi_{power}. \quad (11)$$

## 4 シミュレーション条件

### 4.1 対象トンネル

シミュレーションの対象としてジェットファン縦流換気トンネルである上信越自動車道大山トンネルを採用した。このトンネルは、対面交通でトンネル延長 1,722m、ジェットファン設置台数 18 台である。設置台数は、時間交通量 1,850 台/時、設計速度 60km/h、設計濃度 30%、大型車混入率 35.3%の条件で換気設備が設計されている。この大山トンネルを選んだ理由は、対面交通であり、トンネル延長が適当であることが

挙げられる．図 2 に大山トンネルの断面図を示す．ここでは，トンネル両坑口を西坑口，東坑口とする．

#### 4.2 交通データ

本換気シミュレーションプログラムは，車両進入時刻データを使用することでシミュレーションの再現性の向上と交通状況の現実化を図っている．車両進入時刻データは高速道路に設定してあるトラフィックカウンタから採取された生データを用いる．データは，1996年7月31日(水)午前0時から翌日の0時までのものを使い，24時間にわたるシミュレーションを行った．図 3(a)，3(b)は，24時間のトンネル内存在台数の変化を表している．

本シミュレーションでは自然風の影響は無視する．

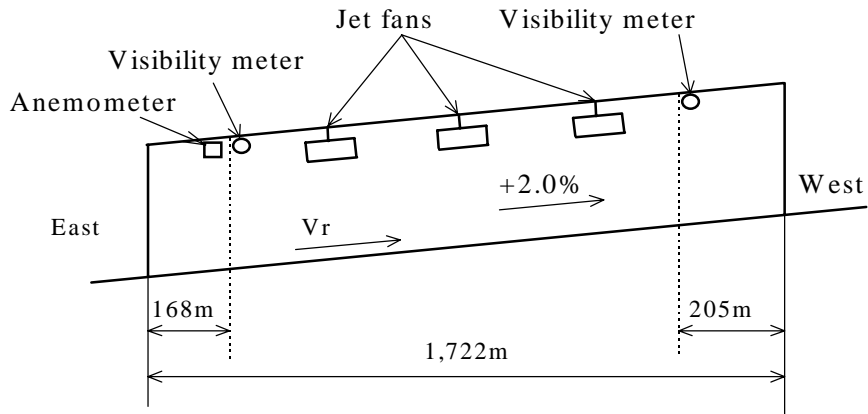
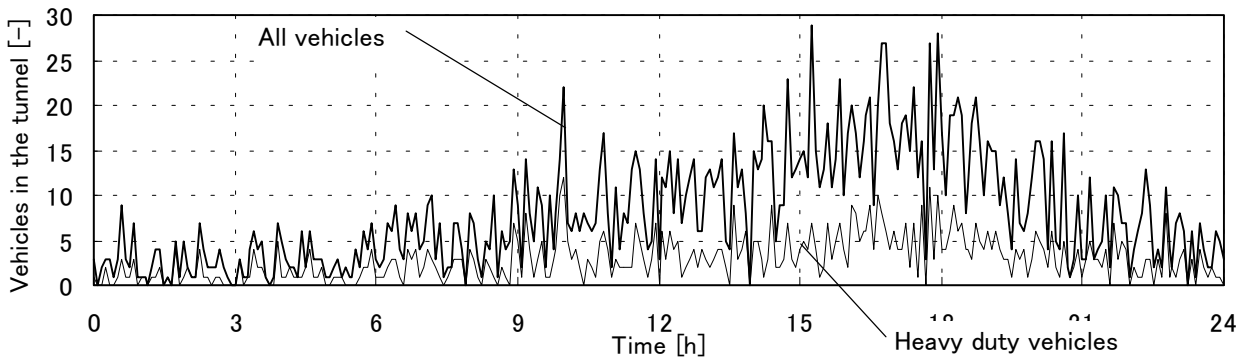
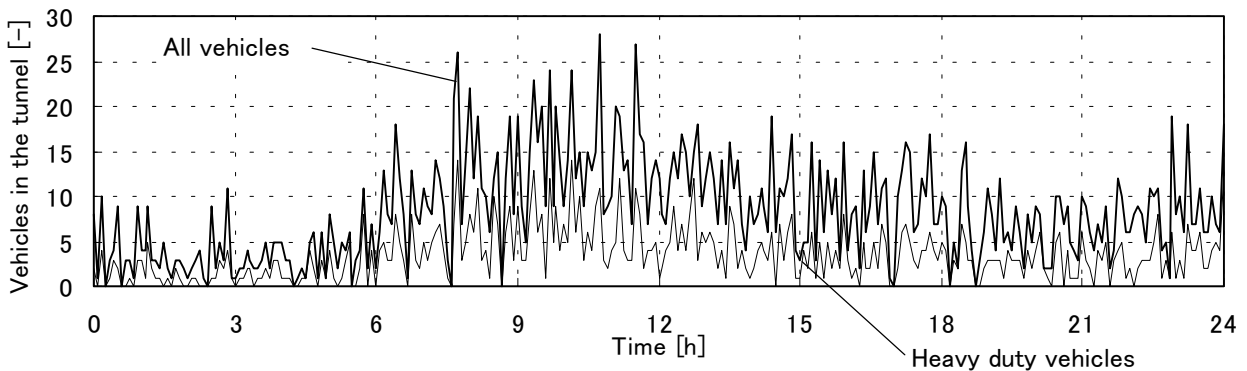


図 2 大山トンネル



(a) 西坑口行き交通量



(b) 東坑口行き交通量

図 3 トンネル内の交通量

## 5 さまざまな運転に対する煤煙濃度の挙動

換気シミュレーションを以下のケースで行った．

ケース 1：ジェットファン全機停止．

ケース 2：ジェットファン全機運転．

ケース 3：フィードバック制御で運転．

ケース 4：フィードフォワード制御で運転．

### 5.1 ケース 1

ジェットファンは 24 時間にわたって運転をしない．図 4 は，この場合の結果である．図 4 (a)は煤煙透過率計，図 4 (b)はトンネル内風速の変化を示している．トンネル内風速は車両のピストン効果によって変化している．昼までは，トンネル内風速は負になっている．これは，トンネル内の交通量（特に大型車）の割合によると思われる．0 時から 11 時にかけては，交通量が少ないため煤煙透過率が許容透過率を下回らない．それに対して，12 時と 18 時で急激に悪化し，最も悪いところで約 20%まで下がっている．

### 5.2 ケース 2

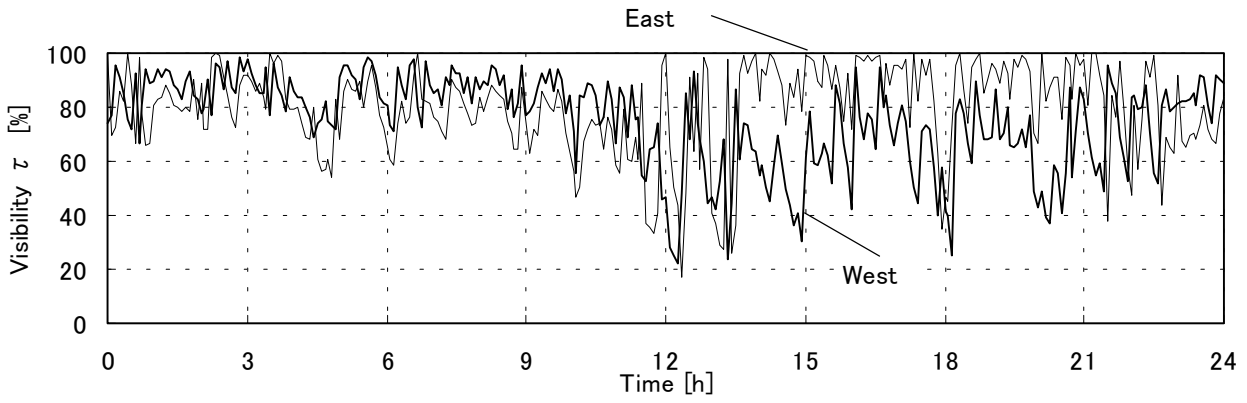
24 時間 18 台全機で運転した場合，図 5 に示すように煤煙透過率はほとんど 80%以上で，トンネル内風速も 4~12m/s である．経済性を考慮しなければ理想的な運転といえる．

### 5.3 ケース 3

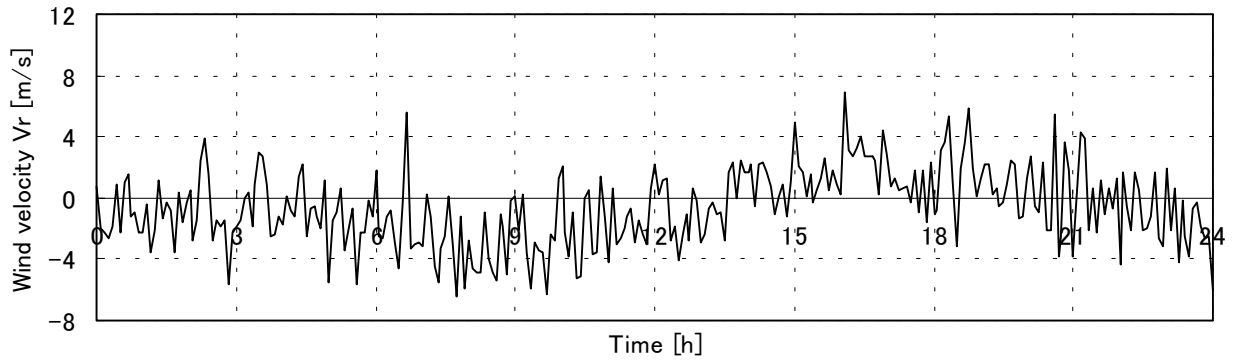
図 6 に示すように 5 分毎に 2.5.1 節で述べたフィードバック制御でシミュレーションを行った．制御目標値  $\tau_c$  はいろいろな値を検討した結果 60%とした．0 時から 6 時までは，東行き交通が多いため風速のフィードバック制御が作用している．9 時以降は煤煙透過率が 60%を下回るため煤煙のフィードバック制御が作用している．18 時から 21 時までは，西行き交通が多くなり，煤煙透過率が制御目標値を下回った時にジェットファンが運転される．

### 5.4 ケース 4

フィードフォワード制御の結果を図 7 に示す．0 時から 6 時の間は，交通量が少ないのでジェットファンはほとんど運転されていない．7 時頃に煤煙透過率が許容透過率を下回り，ジェットファン台数の半分が運転している．15 時から 18 時の間は，交通量が多いにもかかわらずジェットファンがほとんど運転されていない．その理由は，西坑口行きの交通量を利用して換気が行われているからである．この結果からケース 4 は，ケース 3 よりジェットファンの電力量が減少していることがわかる．補正係数  $k$  は 0.8 で行った．

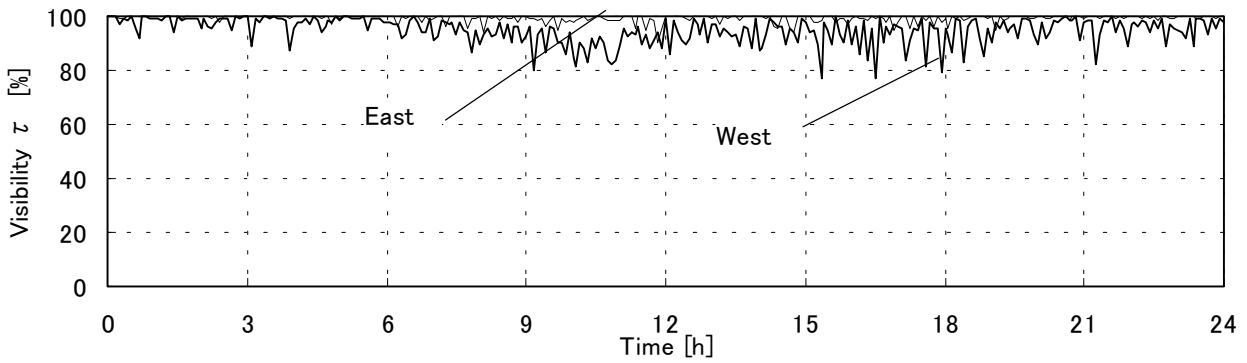


(a) 煤煙透過率

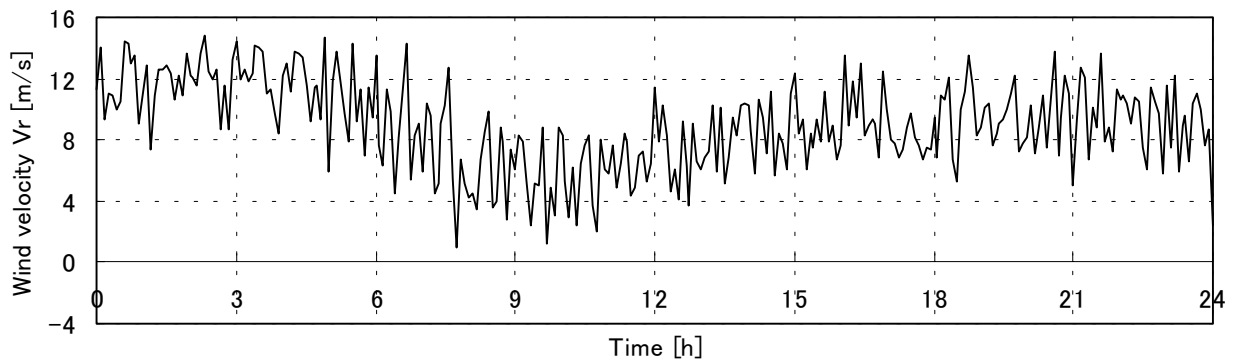


(b) トンネル内風速

図4 ジェットファン全機停止した場合のトンネル内状況の時間経過 (ケース1)

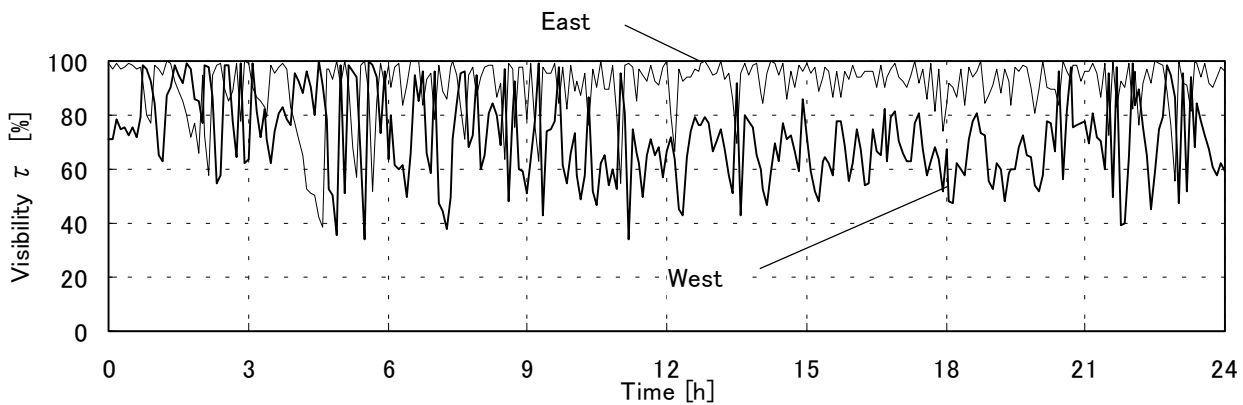


(a) 煤煙透過率

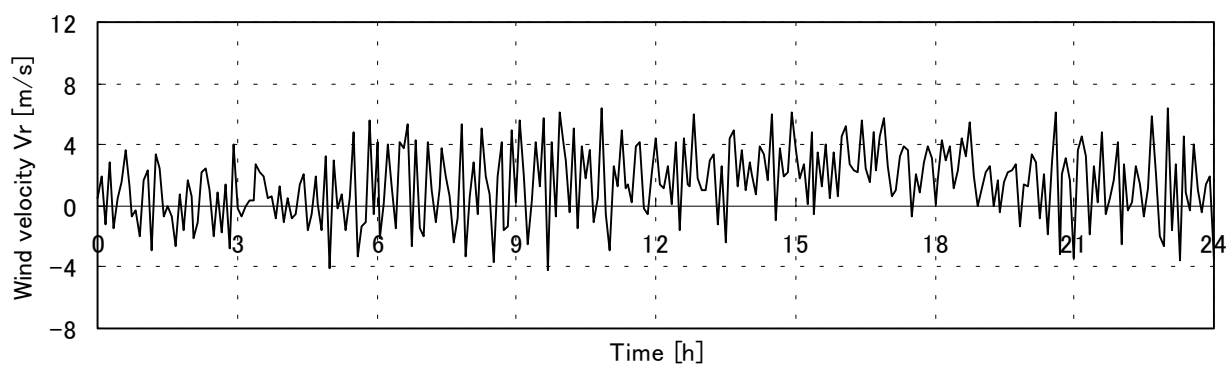


(b) トンネル内風速

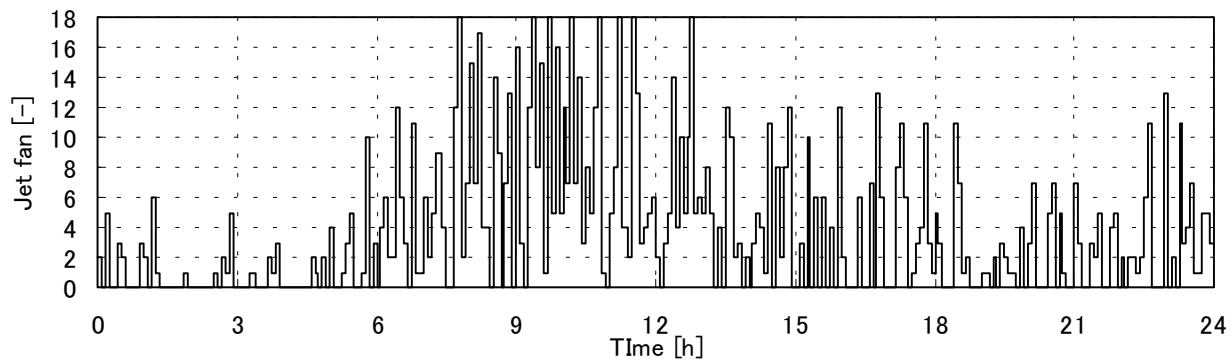
図5 ジェットファン全機運転した場合のトンネル内状況の時間経過 (ケース2)



(a) 煤煙透過率



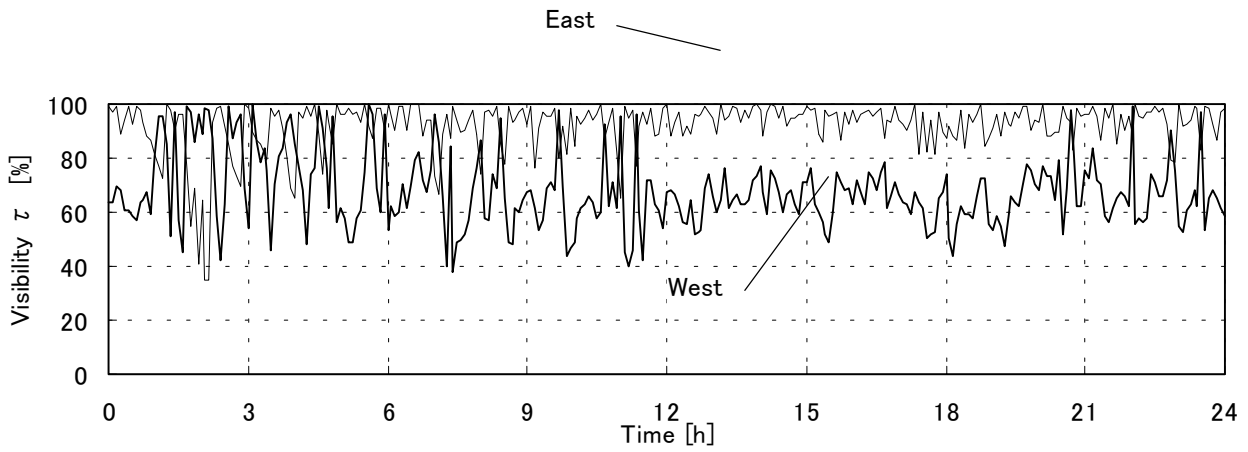
(b) トンネル内風速



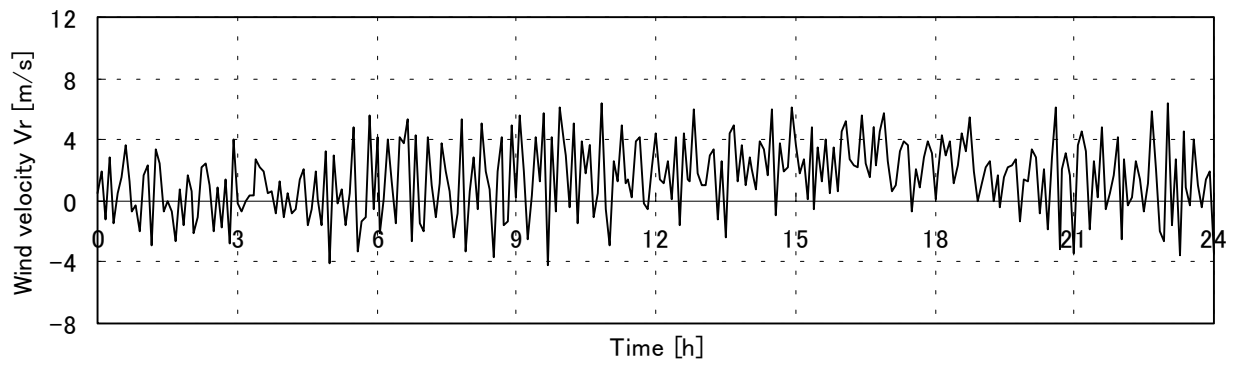
(c) ジェットファン台数

図6 フィードバック制御で運転した場合のトンネル内の時間経過 (ケース3)

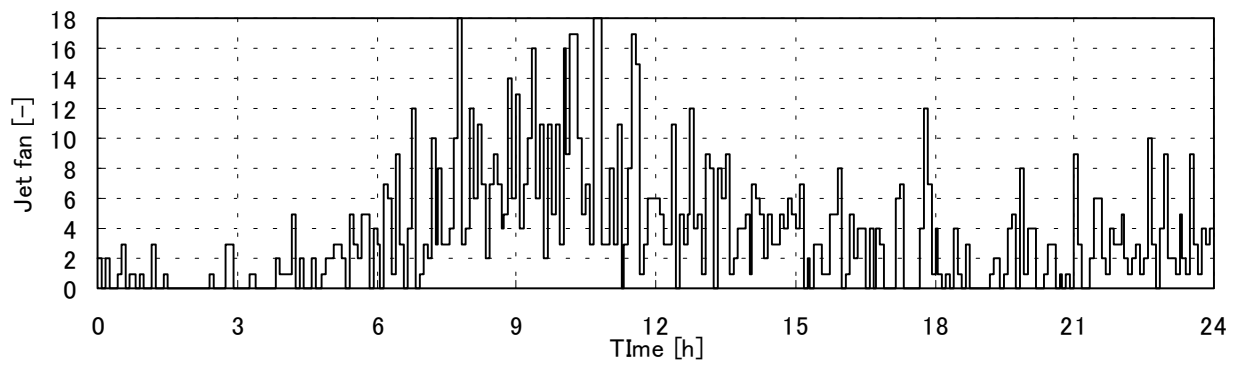




(a) 煤煙透過率



(b) トンネル内風速



(c) ジェットファン台数

図7 フィードフォワード制御で運転した場合のトンネル内の時間経過(ケース4)

## 6 評価関数の中の係数の決定

制御結果を評価関数に適應するために係数  $a$  ,  $b$  を設定する必要がある．この場合，両ペナルティは無次元であるので換算係数  $b$  は 1 となる．また，重み係数  $a$  は，ケース 4（フィードフォワード制御で運転）のシミュレーション結果を用いることにして 0.9 とする．重み係数は，汚染ペナルティと電力ペナルティのバランスを考慮して設定される．この重み係数 0.9 は，電力ペナルティよりも汚染ペナルティの方を重要とした．以後この値を用いることにする．

## 7 考察

### 7.1 問題と対応策

日本において，縦流式は 10 年前から都市間高速道路の暫定的な対面交通トンネルの長大トンネルに使用されたきた．その期間は，トンネルの拡張工事とデジタル制御の開発を同時に行ってきた．著者は，縦流式換気はより難しく，また建設費用を抑えた一部は制御手法の開発に使うべきだと指摘する．実際に，汚染物質が出口坑口で検知された時，汚染物質の固まりがトンネルから出ていく．ということは，フィードバック制御は原理的に適切ではないということになる．縦流式において交通はトンネル内の風の流れに大きな影響を与える汚染物質の放出の原因となる．理想的な制御手法は，これらの様々な特徴を考慮に入れたもので構成されるべきである．よって，縦流式は横流式に比べて制御が難しいと言える．

フィードバック制御において汚染物質の大きな誤差は必然的に縦流式換気の特徴として起こる．それは，制御目標値を許容透過率から十分な余裕を取らなければならないということである．

フィードフォワード制御は，縦流式にとって制御の力学的特徴から考慮すると，より適合していると言える．この制御を使うことにより必要電力が，理論上では評価関数の電力ペナルティの第 2 項と一致するはずである．評価結果は，他の制御の結果と比べて思っていたよりよくならなかった．その理由として，汚染物質の放出又は，不安定な現象が考えられる．しかし，フィードフォワード制御の基本的な概念は，見通しが明るく，今後より精巧な考えで供給することによって改善が望まれる．

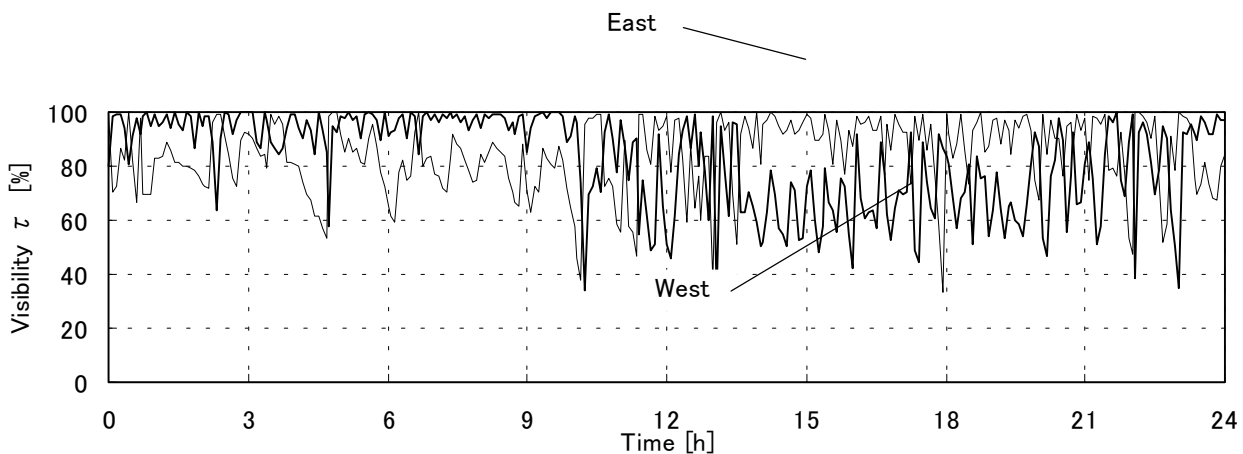
### 7.2 逆転を許容する制御について

トンネル換気運用上，換気方向を変えて運転することは一般的には行われていない．2.5.1 節の(4)式のみで，トンネル内の風向きを考慮せず両坑口に設置されている煤煙透過率計のみでフィードバック制御を行ってみた．（ケース 5：図 8）制御目標値  $\tau_c$  は 60%である．最も注目すべき違いは，0 時から 10 時までの間である．この間はジェットファンが運転されていない．交通量によってトンネル内風速が逆転し逆方向に換気が行われていることがわかる．ある時間帯で何回か風向きが逆転しているが，それに伴う煤煙濃度の深刻な悪化は，一時的な悪化を除いては起こらなかった．「逆転を許容する縦流換気制御」を確立し実用化するまで多くの研究を必要とするべきであるが，著者はこのシミュレーション状況では可能であると示した．

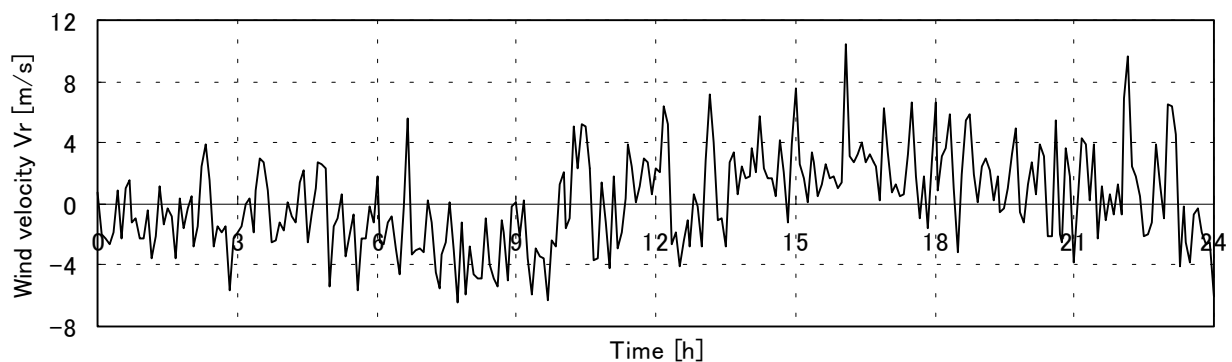
### 7.3 評価関数の適用

第 3 章において提案した評価方法を換気シミュレーション結果に適應した．汚染ペナルティと電力ペナルティの重み係数は  $a = 0.9$  ，換算係数は  $b = 1.0$  とし，計算結果を表 1 に示す．許容透過率  $\tau_0$  は 40% ，必要換気動力は交通量の 2 乗 ( $j = 2$ ) に比例するものとする．ジェットファン全機停止の場合（ケース 1）に汚染ペナルティが最も大きいことがわかる．それに対してケース 2 のジェットファン全機運転の場合は汚染ペナルティが 0 で電力ペナルティが最も大きいことがわかる．この状況で，ケース 1 は交通量が少ないときは最もよ

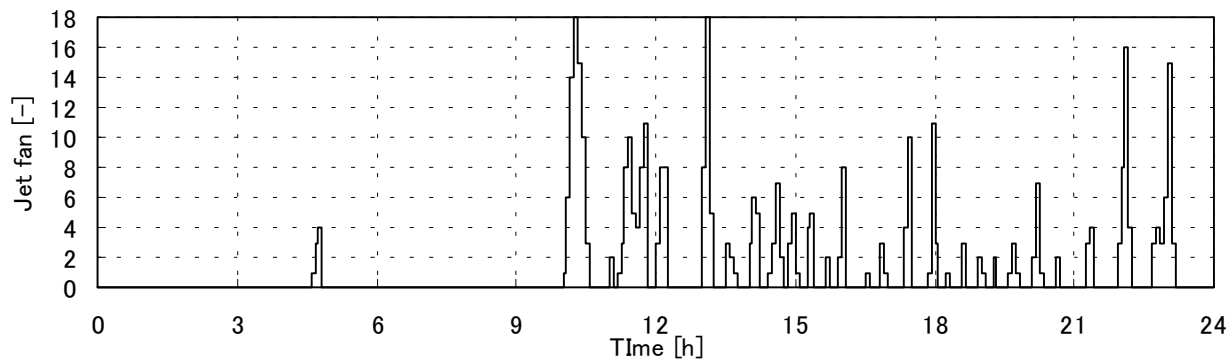
い評価となっている。ケース3やケース4では、最適な結果になるように制御目標値や補正係数が調整されている。ケース4がケース3よりもペナルティの値が小さかった。



(a) 煤煙透過率



(b) トンネル内風速



(c) ジェットファン台数

図8 風向の逆転を考慮した場合のトンネル内の時間経過（ケース5）

表1 ペナルティの計算結果

	汚染ペナルティ	電力ペナルティ	合計ペナルティ
ケース1	0.01867	0.0	0.0168
ケース2	0.0	0.841	0.0841
ケース3	0.0017	0.136	0.0152
ケース4	0.0015	0.094	0.0108
ケース5	0.0020	0.035	0.0053

## 8 結言

ジェットファンにより縦流換気を行うトンネルの平常時換気を数値シミュレーションにより再現した。4つのケースは、ジェットファン全機停止、ジェットファン全機運転、フィードバック制御で運転、フィードフォワード制御での運転である。以下は、24時間の交通データをもとにシミュレーション結果から述べたものである。もしトンネル総延長、交通データなどの諸条件を代えた場合、シミュレーションはわずかに異なった結果になるが、著者は、一般的な特性は変わらないと考えている。

換気制御についてフィードバック、フィードフォワード等の制御手法をシミュレータに組み合わせて、トンネル内煤煙透過率の時間変動について観測した。交通の変動のため、制御を行っていても透過率の変動はかなりのものとなり、20%程度の余裕を取らなければ許容濃度が確保できないことがわかった。

また、制御結果に対して、汚染濃度と換気コストを合わせた評価関数を適応して評価を行った。交通が少ないときは、ジェットファンを停止したケースが全機運転よりもいいことがわかった。フィードフォワード制御は、フィードバック制御よりもいいことがわかった。換気原理の観点からフィードフォワード制御は、さらに改善すべき基盤として推薦されるだろう。

逆転を許容するフィードバック制御は、経済性に優れていることがわかった。十分な検討を要することは言うまでもないが、今後実用化に向けて研究する価値があるだろう。

## 参考文献

- [1] A. Mizuno et al., "Evaluation of the Performance of Control of the Road Tunnel Ventilation," Proc of the 8th ISAVVT, Liverpool 1994, pp. 903-917.
- [2] A. Mizuno, "Necessity of Evaluation of Ventilation Control and its Future Prospect," Proc. of the First ICTCC, Basel 1994, pp. 195-201.
- [3] H. Ohashi et al., "A New Ventilation Method for the Kan-etsu Road Tunnel," Proc. of 4th ISAVVT, York 1982, pp. 31-47.