

長大道路トンネルにおける新しい換気制御法

A NEW VENTILATION CONTROL FOR LONG ROAD TUNNEL

植木 源 治*・中 堀 一 郎**・前 田 和 男***

By Motoharu UEKI, Ichiro NAKAHORI and Kazuo MAEDA

1. ま え が き

わが国では、高速道路の発達に伴い、中央高速道路の恵那山トンネルを初めとするいくつかの長大トンネルが供用されつつある¹⁾。今後さらに最短ルートの開拓、用地取得難および土木技術の向上などにより、長大トンネルは増加すると思われる。

これらの道路トンネルを運用するには、自動車の排出ガスから運転者および保守要員の安全を守るため、換気設備が必要となる。2 km 以上の長大トンネルでは、通常、トンネル断面の車道空間以外の部分を換気ダクトとして利用する。横流換気方式が用いられることが多い^{2),3)}。この方式では、送気および排気用に設置される換気ファンを駆動する電動機の電力量は小さくないので、有効な運転を行う必要がある。

従来の換気設備では、換気ファンを駆動する電動機として、極数切換型誘導電動機が多く利用されてきた^{4),5)}。しかし、この電動機は風量段階が少ないうえ、風量切換え時間間隔に制限があるので、時間帯ごとの平均交通量に応じて換気風量を定めるプログラム制御以外に、よい方法がなかった^{4),5)}。この制御法は短期間な交通量の変動に対して応答することができず、換気風量の過不足を生ずる欠点がある。

しかるに最近、無段変速のサイリスタ電動機の大容量化が進み、換気ファンの駆動用電動機として利用され始めた^{5),6)}。本論文では、このサイリスタ電動機を用いた新しい換気設備の制御法について考察する。まず、横流換気方式の数学モデルを物質平衡の関係式より導出する。このモデルより、汚染濃度、換気風量および発生汚染量についてそれぞれの基準値から変分に関する線形差

分方程式を導き、システム方程式とする。次に、実用的な評価関数として、汚染濃度と換気風量の基準値からの変分に関する 2 次関数を取り、これを最小にする換気風量の変分が、線形レギュレータ理論により、汚染濃度と発生汚染量の変分の線形結合の形に書けることを示す。さらに、発生汚染量の算出に必要な交通量予測の手法として ARMA (自己回帰移動平均) モデルを提案し、実測によりその有効性を確かめる。

最後に中央高速道路恵那山トンネルの 1 つの換気区間を対象として行われたシミュレーションならびに実地試験の結果に基づいて、提案した制御法の有効性を確かめるとともに重要なパラメーターの設定基準を示す。

2. トンネル換気モデル

長大トンネルで用いられる横流換気方式では、送気および排気が車の流れと直角の方向で行われる。この方式では自然風や自動車のピストン作用などによるトンネル内の縦方向(車の流れと同一方向)の空気の流れは、横方向の空気の流れに比較し、ほとんど無視できるといわれている。以下では横流方式を前提として議論を進めるので縦方向の空気の流れを無視する。

長大トンネルは、通常、Fig. 1 に模式的に示されるようないくつかの独立な換気区間に分割される。Fig. 1 における変数は次のようになる。

x : 換気区間の汚染量

A : 換気区間の容積

Q : 単位時間あたりの換気風量

P : 単位時間あたりの発生汚染量

微小な時間間隔 dt における汚染量の増分を Δx とすれ

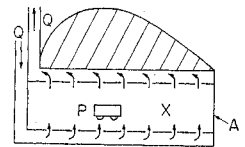


Fig. 1 Schematic diagram of the tunnel ventilation system.

* 日本道路公団 維持施設部機械電気課課長代理

** 正会員 三菱電機中央研究所 研究員

*** 三菱電機中央研究所

ば、物質平衡の関係から次式が得られる*。

$$\Delta x = -\frac{Q}{A} x \Delta t + P \Delta t \dots\dots\dots(1)$$

式(1)において、右辺第1項は換気装置により時間間隔 Δt に排気される汚染量を表わし、右辺第2項は自動車により Δt に排出される発生汚染量を表わしている。

式(1)で $\Delta t \rightarrow 0$ とすれば、横流方式の連続型換気モデルとして、

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{Q}{A} x + P \dots\dots\dots(2)$$

で表わされる微分方程式が得られる。換気風量 Q および発生汚染量 P が時間間隔 T (以下では換気周期と呼ぶ) において一定とし、式(2)を積分すれば次式が得られる。

$$x(t+T) = \exp\left(-\frac{Q}{A} T\right) x(t) + \left(1 - \exp\left(-\frac{Q}{A} T\right)\right) \frac{A}{Q} P \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 x, Q および P を A, T を用いて次のように規準化する。

$$\left. \begin{aligned} x(k) &\triangleq x(t_k)/A, \quad x(k+1) \triangleq x(t_k+T)/A \\ P(k) &\triangleq PT/A, \quad Q(k) \triangleq QT/A \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

式(4)において $x(k)$ は時刻 $k(t=t_k)$ の汚染濃度を表わし、 $Q(k)$ および $P(k)$ は、それぞれ期間 $k(t_k \leq t \leq t_k + T)$ の換気風量および発生汚染量を表わす。式(4)の変数を用いれば、式(3)は次のように書き換えられる。

$$x(k+1) = \exp(-Q(k)) x(k) + (1 - \exp(-Q(k))) \frac{P(k)}{Q(k)} \dots\dots(5)$$

式(5)は横流方式の離散型換気モデルとなる。式(5)より、換気周期 T が小さい時には、第1項すなわち時刻 k の汚染濃度 $x(k)$ が時刻 $k+1$ の汚染濃度 $x(k+1)$ をほぼ決定するが、 T が大きくなるにつれて第1項

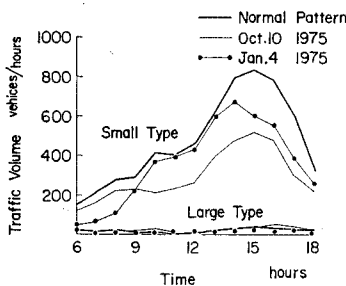


Fig. 2 Daily patterns of traffic volume on Ena Tunnel.

* 車頭間隔が等しいとした場合の車1台あたりの換気モデルは、すでに伊吹山により定式化され、式(1)と同様なモデル化が試みられている。

の影響は小さくなり、それに代わって第2項すなわち期間 k の換気風量 $Q(k)$ および発生汚染量 $P(k)$ が、時刻 $k+1$ の汚染濃度 $x(k+1)$ を決定するようになる。

さて、交通量の日変化特性は、日を週日と祭日に分類すれば、それぞれに特有のパターンを示すことが知られている⁹⁾。これを中央高速道路の恵那山トンネルを例にとり Fig 2 に示す。したがって、30分~1時間における交通量およびそれに基づく発生汚染量はあらかじめ粗い精度で得ることができる。これを基準発生汚染量 P^* とし、この P^* に対し基準汚染濃度 x^* を保つ基準換気風量を Q^* とする。式(5)を用いれば、これらの量の間に次の関係があることがわかる。

$$Q^* = \frac{P^*}{x^*} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、現実の汚染濃度 $x(k)$ 、換気風量 $Q(k)$ および発生汚染量 $P(k)$ とこれらの基準値との変分を次のように定める。

$$\left. \begin{aligned} \Delta x(k) &\triangleq (x(k) - x^*)/x^* \\ \Delta Q(k) &\triangleq (Q(k) - Q^*)/Q^* \\ \Delta P(k) &\triangleq (P(k) - P^*)/P^* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

式(7)を式(5)に代入して変分の2次以上の項を無視すれば、基準値のまわりで線形化された次のシステム方程式を得る。

$$\Delta x(k+1) = \exp(-Q^*) \Delta x(k) - (1 - \exp(-Q^*)) (\Delta Q(k) - \Delta P(k)) \dots\dots\dots(8)$$

式(8)において、 $\Delta x(k)$ は状態変数、 $\Delta Q(k)$ は制御変数、 $\Delta P(k)$ は入力変数と考えることができる。

ここで、期間 k における発生汚染量の変分 $\Delta P(k)$ が0の場合、時刻 k の汚染濃度の変分 $\Delta x(k)$ を時刻 $k+1$ で0にするのに必要な換気風量の変分 $\Delta Q(k)$ は、

$$\Delta Q(k) = \frac{\exp(-Q^*)}{1 - \exp(-Q^*)} \Delta x(k) \dots\dots\dots(9)$$

となる。

また、時刻 k における $\Delta x(k)$ が0の場合、期間 k における発生汚染量の変分 $\Delta P(k)$ にかかわらず、時刻 $k+1$ での $\Delta x(k+1)$ を0にするのに必要な換気風量の変分 $\Delta Q(k)$ は、

$$\Delta Q(k) = \Delta P(k) \dots\dots\dots(10)$$

となる。

3. トンネル換気制御法

従来、道路トンネルの換気ファンの駆動には、極数切換型の誘導電動機が広く用いられてきた。この種の電動機は、風量の切り換えを頻繁に行うことができなく、通常1~数時間風量を一定として運転される。このため換

気風量はその期間内の発生汚染量の変動に定答することができず、トンネル内汚染濃度の変動が大きかった。このような換気設備は、利用者に対するサービスに不公平を生ずるばかりでなく、最も発生汚染量の大きい場合に汚染濃度の基準を満たさねばならないため、平均的に換気風量が過剰となる欠点があった。

これに対し、最近換気ファンの駆動に使用され始めた無段変速のサイリスタ電動機は、風量の切り換えを自由に行うことができる。このため、発生汚染量に応じて換気風量を変化させ、基準汚染濃度を保持する可能性がで

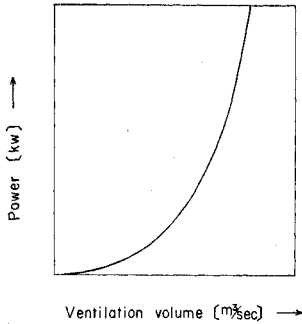


Fig. 3 Power-ventilation volume relationship.

てきた。しかるに、発生汚染量の正確な予測は現在不可能であることおよび Fig. 3 に示すように電力量が換気風量の 2~3 乗に比例するため、あまり頻繁な換気風量の変化は電力量の増加をもたらすことなどの理由から、必ずしも基準汚染濃度を厳密に保つ換気制御が望ましいとはいえない。

ここでは実用的な換気制御法として、汚染濃度を一定に保ちつつ、極端な換気風量の変化をさけることを考えよう。このような制御を行うため式 (8) のシステムの $\Delta Q^0(k)$ を決定するための評価関数として、換気風量および汚染濃度の基準値との変分の 2 乗和

$$J \triangleq \sum_{k=1}^{K-1} (F_x \Delta x^2(k+1) + F_Q \Delta Q^2(k)) \dots \dots (11)$$

を考えよう。式 (11) において K はステップ数、 F_x および F_Q は荷重係数である。ここで荷重係数 F_x を 0 とすれば、換気風量一定制御となり、逆に F_Q を 0 とすれば、トンネル内汚染濃度一定制御となる。

さて、式 (8) をシステム方程式とし、式 (11) で表わされる評価関数を最小にする換気風量変分を、最適換気風量変分 $\Delta Q^0(k)$ と呼び、これを求めることを考える。式 (8) が線形システムであり、式 (11) で定まる評価関数 J が 2 次形式であるから、この問題は線形レギュレータ問題となり⁹⁾最適換気風量変分 $\Delta Q^0(k)$ は、汚染濃度変分 $\Delta x(k)$ および発生汚染量変分 $\Delta P(k)$ の線形関数として、

$$\Delta Q^0(k) = G_x(k) \Delta x(k) + G_P(k) \Delta P(k) \dots \dots (12)$$

ただし、 G_x および G_P は次式で定まるフィードバック・ゲインである。

$$G_x(k) \triangleq \frac{\exp(-Q^*) (1 - \exp(-Q^*)) H(k+1)}{\{F_Q + (1 - \exp(-Q^*))^2 H(k+1)\}}$$

$$G_P(k) \triangleq \frac{(1 - \exp(-Q^*))^2 H(k+1)}{\{F_Q + (1 - \exp(-Q^*))^2 H(k+1)\}} \dots \dots (13)$$

なお、式 (13) における $H(k)$ は次の Ricatti 方程式を逆時間で解くことにより得ることができる。

$$H(k) = F_x + (\exp(-Q^*))^2 H(k+1) \cdot [1 - (1 - \exp(-Q^*))^2 H(k+1)] \cdot \{F_Q + (1 - \exp(-Q^*))^2 H(k+1)\} \dots \dots (14)$$

ただし、

$$H(K) = F_x$$

式 (12) で定まる $\Delta Q^0(k)$ と基準換気風量 Q^* の和として、換気風量 $Q(k)$ が求められる。すなわち、この制御法は基準換気風量を基盤にして、汚染濃度 $x(k)$ および発生汚染量 $P(k)$ に基づく修正換気風量 $\Delta Q^0(k)$ を付加したものと考えることができる。この制御システムのブロック図を Fig. 4 に示す。

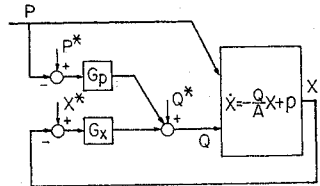


Fig. 4 Block diagram of the ventilation control system.

式 (13) のフィードバック・ゲイン

$G_x(k)$ および $G_P(k)$ は F_x および F_P が定まれば、式 (13) および (14) より求めることができる。以下では、これらのフィードバック・ゲインの実用的な算出法について述べる。式 (14) において右辺第 2 項が右辺第 1 項に比較し十分小さいとすれば、 $H(k) \cong F_x (k=1, 2, \dots, K)$ と近似できる。このとき、式 (13) の $G_x(k)$ および $G_P(k)$ は k にかかわらず定数となり次式で表わされる。

$$G_x(k) \cong G_x \triangleq \frac{\exp(-Q^*) (1 - \exp(-Q^*))}{\{x + (1 - \exp(-Q^*))^2\}} \left. \begin{aligned} G_P(k) &\cong G_P \triangleq \frac{(1 - \exp(-Q^*))^2}{\{x + (1 - \exp(-Q^*))^2\}} \end{aligned} \right\} \dots \dots (15)$$

式 (15) において $x \triangleq F_Q / F_x$ は荷重係数比を表わすパラメーターである。すなわち、 x が 0 に近いときは基準汚染濃度の保持に重点があり、 x が大きいときは基準換気風量の保持に重点がある。ここで、荷重比 x と Q^* の関係について調べよう。

いま、 x を Q^* の関数として、

$$x = \alpha (1 - \exp(-Q^*))^2 \dots \dots (16)$$

と置く。ここに、 α は $[0, \infty)$ の値をとる係数とする。式 (16) を式 (14) に代入すれば、式 (14) の右辺第 2 項は、 $F_x (\exp(-Q^*))^{2\alpha} / (1 + \alpha)$ となり、通常 $\exp(-Q^*)$ が 1 より十分小さいので、第 1 項に比較して十分小

さいことがわかる。式 (16) を式 (15) に代入すれば、

$$\left. \begin{aligned} G_x &= \frac{1}{1+\alpha} \times \frac{\exp(-Q^*)}{1-\exp(-Q^*)} \\ G_P &= \frac{1}{1+\alpha} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(17)$$

となる。

式 (17) を式 (12) に代入すれば、最適換気風量変分は、次式の $\Delta\tilde{Q}^0(k)$ で近似されることになる。

$$\Delta\tilde{Q}^0(k) = \frac{1}{1+\alpha} \left\{ \frac{\exp(-Q^*)}{1-\exp(-Q^*)} \Delta x(k) + \Delta P(k) \right\} \dots\dots\dots(18)$$

式 (18) を式 (9) および (10) と比較すれば、 $\alpha=0$ の時に式 (18) は式 (9) および (10) の和と等しくなり基準汚染濃度一定制御となること、 $\alpha=\infty$ のときに $\Delta\tilde{Q}^0(k)=0$ となり換気風量一定制御となることがわかる。以上の説明より α を式 (16) のように選ぶことの妥当性が確かめられた。

なお、式 (16) のパラメーター α は、安全性と経済性の観点より適正に定める必要がある。いま、 α を 1 とし、式 (16) および (17) より定まる χ , G_x および G_P を Q^* の関数として示せば Fig. 5 のようになる。

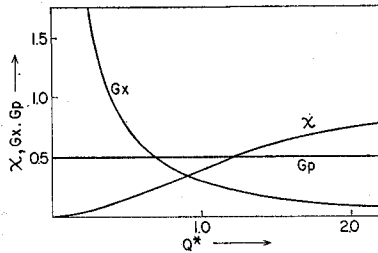


Fig. 5 Variation of χ , G_x and G_P with Q^*

4. 発生汚染量の予測

自動車の排出ガス中には CO, 煤煙, NO_x , SO_2 などの有害物質が含まれる。このうちトンネルでは CO と煤煙が問題になるといわれている^{3),10)}。以下では簡単のため CO を例として考えよう。

CO は人体に有害であり、その濃度 x を基準値 (通常 50~150 ppm といわれる) 以下に保たねばならない。CO はおもにガソリン車から排出され、その排出量は通常速度 (40 km/h 以上) ではほとんど車速に無関係であるといわれている^{3),10)}。したがって、全車種の単位時間交通量を N 、ディーゼル車の混入率を r とすれば、CO の単位時間あたりの発生量の期待値 $E(P)$ は道路の標高および勾配により補正され次式で表わされる。

$$E(P) = a_h \cdot a_g \cdot \mu \cdot L \cdot (1-r) \cdot N \dots\dots\dots(19)$$

ただし、 a_h , a_g , μ および L はそれぞれ標高補正係数、勾配補正係数、単位距離あたりに発生する車 1 台の平均

汚染量および換気区間長を表わす。

式 (19) から明らかなように発生汚染量の予測は、交通量 N の予測に帰着された。交通量の予測手法としては非定常時系列を Karhunen-Loeve 展開し、これにより得られる特徴関数を用いる Farmer 法を利用することが提案されているが⁹⁾、交通量が少ない場合には短期間予測が難しくなる。したがって、ここでは比較的短期間 (1~10 分間) の予測手法として ARMA モデル¹¹⁾ による予測を考えよう。

道路上に上流側と下流側の 2 点 a, b をとり、両点における単位時間あたりの交通量の時系列を $N_a(1), N_a(2), \dots$ および $N_b(1), N_b(2), \dots$ とする。さらに、単位時間を j 個つなぎ合わせ、その期間の交通量として、

$$\left. \begin{aligned} N_a^*(i) &= N_a(i) + N_a(i+1) + \dots + N_a(i+j-1) \\ N_b^*(i) &= N_b(i) + N_b(i+1) + \dots + N_b(i+j-1) \end{aligned} \right\} (i=1, 2, \dots) \dots\dots\dots(20)$$

を考える。

2 点 a, b に囲まれる道路区間を 1 つのブラックボックスと考え、 $N_a^*(i)$, ($i=1, 2, \dots$) を入力、 $N_b^*(i)$, ($i=1, 2, \dots$) を出力とし、その間にインパルス応答関数 β を介した次の関係を想定する。

$$N_b^*(i) = \sum_{m=1}^M \beta(m) N_a^*(i-m) + \epsilon(i) \dots\dots(21)$$

ここに、 $\epsilon(i)$ はモデル化の誤差を表わす。インパルス応答関数 $\beta(m)$, ($m=1, \dots, M$) は、標本数を I とすれば $\sum_{i=1}^I \epsilon^2(i)$ を最小にすること、すなわち、次式によって定まる。

$$v_{ba}(l) = \sum_{m=1}^M v_{aa}(l-m) \beta(m) \quad (l=1, 2, \dots, M) \dots\dots\dots(22)$$

式 (22) において $v_{ba}(l)$ は $N_a^*(i)$ と $N_a^*(i+l)$ との共分散、 $v_{aa}(l)$ は $N_a^*(i)$ と $N_a^*(i+l)$ との共分散を表わす。これらの量は、過去の統計データよりあらかじめ与えられるから式 (22) を解くことにより $\beta(m)$, ($m=1, \dots, M$) が得られる。この $\beta(m)$ を用いれば、式 (21) により上流側の交通量の時系列 $N_a^*(i-1), N_a^*(i-2), \dots, N_a^*(i-M)$ を用いて下流側の交通量 $N_b^*(i)$ の予測が可能となる。

この手法の有効性を確認するため、中央高速道路下り車線の八王子インターチェンジと小仏トンネル入口の 12.6 km

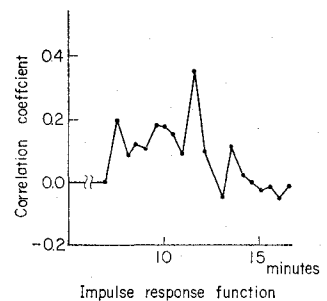


Fig. 6 Response of the flow volume at the tunnel entrance for impulsive input at a point of the upper stream.

区間で実測を行った。ここでは単位時間を 30 秒, j を 1~20 とする。 $j=20$, すなわち 10 分間交通量のインパルス応答関数 $\beta(m)$, ($m=1, \dots, 20$) を Fig. 6 に示す。 Fig. 6 より, この区間の最小旅行時間, 最大旅行時間および平均旅行時間は, それぞれおよそ 7 分, 14 分および 10 分であることがわかる。 Fig. 6 においてインパルス応答関数の 2 つのピークは, それぞれ乗用車およびトラックに相当するものと考えられる。

さて, 予測の精度をパーセントエラー

$$P_e = \frac{100}{E(N_b^*)} \cdot \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left\{ N_b^*(i) - \sum_{m=1}^M \beta(m) N_a^*(i-m) \right\}^2} \quad (23)$$

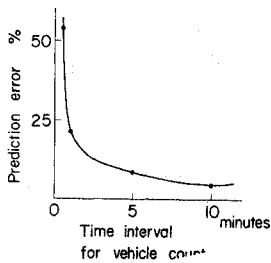


Fig. 7 Variation of the prediction error with the prediction period.

を用いて表わし, 上記の j を 1~20 と変化させて求めれば, Fig. 7 のようになる。すなわち, この区間では約 10 分間程度の予測が最も精度がよく, パーセントエラーが 5% 以下になることがわかる。

この予測手法は, あらかじめインパルス応答関

5. シミュレーションおよび実地試験による検討

第 3 章および第 4 章で述べた交通量予測を加味したレギュレーター制御法 (以下では予測レギュレーター制御法と呼ぶ) の機能を確認するため, 中央高速道路の恵那山トンネル (全長約 8.5 km) の 1 つの換気区間 (1 km) を例として考察しよう。この例の諸条件を Table 1 に示す。このとき, 与えられた交通量に対し, 汚染濃度 x を

Table 1 Conditions of simulation.

length of tunnel	1000 [m]
gradient	1.65 [%]
altitude	657 [m]
section area	43.4 [m ²]
lane of road	2
traffic direction	2
flow volume on up lane	618 [veh/h]
flow volume on down lane	360 [veh/h]
mixed rate of diesel engine	22.1 [%]
average speed	70.0 [km/h]
exhausted gas	
CO, average	33.4 [l/km]

一定に保つのに必要な換気風量 Q は Table 1 と式 (6) および (19) より Fig. 8 のように得られる。

まず, この制御法の有効性をシミュレーションで確かめよう。ここで用いるシミュレーターは, 次に示すような交通シミュレーターと換気シミュレーターより構成されている。

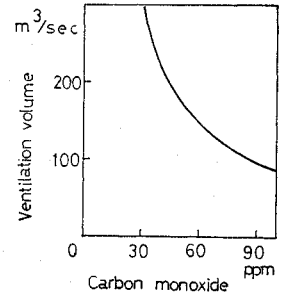


Fig. 8 Variation of the pollution concentration and the ventilation volume.

交通シミュレーターは, 自動車を個別に動かすマイクロシミュレーターである。これは道路上への自動車の初期配置, 上流点での自動車発生, 自動車の走行および排出ガス発生各サブプログラムから構成されている。自動車の発生は, 車頭時間間隔を指数乱数で与えて行う。自動車の走行は簡単のため Greenshields の追従モデル¹²⁾ を利用した。排出ガス発生は Table 1 に示す値を用いた。このシミュレーターは時間間隔を 0.2 秒として動かす。

換気シミュレーターでは, 対象とする換気区間をさらに 100 m 間隔のブロックに再分割し, 各ブロックごとに式 (5) の離散型換気モデルを用いた。交通シミュレーターから得られる発生汚染量 $P(k)$ と予測レギュレーター制御で得られる換気風量 $Q(k)$ を用いれば, 式 (5) より各ブロックごとに逐次汚染濃度 $x(k+1)$ が求まる。このシミュレーターは時間間隔を 10 秒として動かす。

このシミュレーターを使って予測レギュレーター制御の運転を試みよう。予測レギュレーターの設定条件は Table 1 による。ここで, 予測レギュレーターのフィードバック・ゲインを決定する荷重比 α は式 (16) で表わされるとし, パラメーター α を 1 とする。

交通シミュレーターで発生した 1 時間交通量は 978 台/h であり, ディーゼル車混入率は 22.1% である。基準汚染濃度を CO で 75 ppm とし, 換気周期 T を 60, 10 および 1 分としたときのシミュレーション結果を Fig. 9 の a~c で表わす。Fig. 9 より T を 60 分とすれば汚染濃度がかなり変化することがわかる。一方, T を 1 分とすれば汚染濃度はほぼ一定となるが, 換気風量は大きく変化する。

このシミュレーターを利用して, 経済性と環境の質の点より, 適切な換気周期を求めよう。パラメーター α を 1, 基準汚染濃度を 75 ppm と固定し, 換気周期 T を変化させて得られた経済性と環境の質の関係を Fig. 10 に示す。ここで, 経済性は T が 60 分の場合の電力量 W_{60} に対する電力量の増分比 W/W_{60} で表わし, 環境の質は基準濃度に対する標準偏差の比 σ/x^* で表わす。

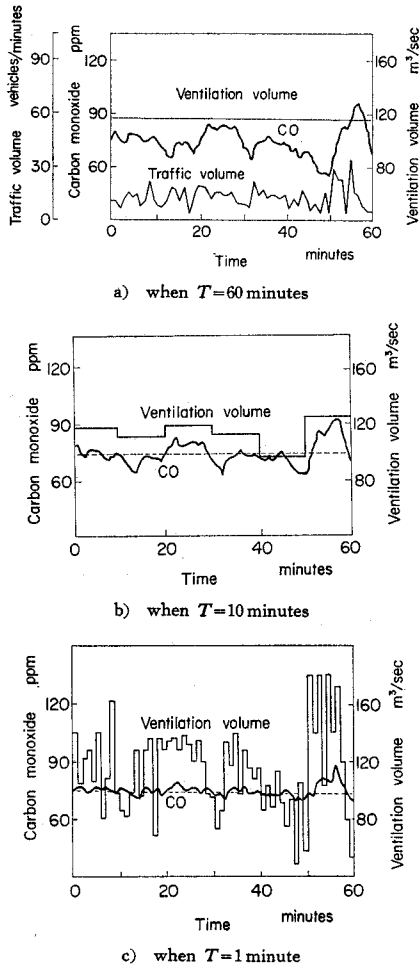


Fig. 9 Simulation results of tunnel ventilation by the proposed method.

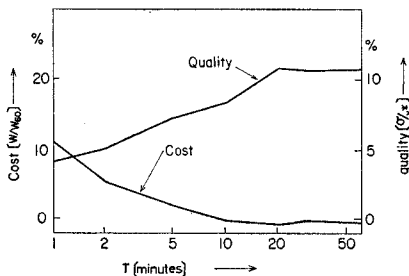


Fig. 10 Variation of ventilation cost and air quality with the ventilation period.

なお、電力量—換気風量の非線形特性は、実データに基づき3次関数で近似した。

Fig. 10において、換気周期 T が5~10分の場合を60分の場合に比較すれば、経済性はほぼ同じであるのに環境の質は2/3程度よくなるのがわかる。さらに T を短くすると、環境の質は向上するが経済性は悪く

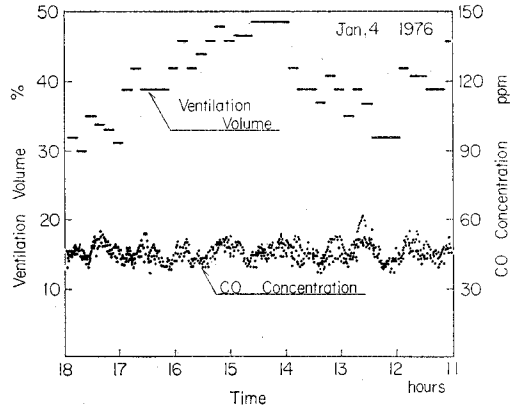


Fig. 11 Field experiment by the proposed method.

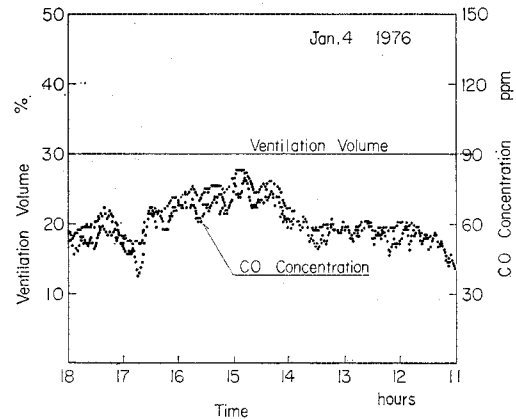


Fig. 12 Field experiment by constant ventilation method.

なる。このことから、この例では換気周期 T を5~10分にすればよいことがわかる。

次に、ここで述べた手法を恵那山トンネルの実際の換気制御システムに適用して、その有効性を確かめる。その一例を Fig. 11 に示す。この例では基準 CO 濃度を45 ppm、パラメーター α を1、換気周期 T を10分とした。この α および T は、若干の実験の結果得られた現時点での暫定的な値であり、今後さらに十分な検討が必要である。一方、同時刻に別の換気区間において、一定換気風量運転を行った結果を Fig. 12 に示す。なお、Fig. 11 および 12 において、縦軸の換気風量は、最大換気風量との比で表わされている。Fig. 11 と 12 を比較すれば、ここで述べた手法は交通量の変動にかかわらず、汚染濃度をほぼ一定に保ち得ることが確認された。

6. むすび

本論文では、長大道路トンネルにおける換気制御方式

について考察した。まず、長大トンネルにおいて用いられる横流換気方式の換気モデルを確立した。次に換気ファンの駆動に無段変速サイリスタ電動機を利用した場合の新しい換気制御法として、予測レギュレーター法を提案した。この制御法に必要な交通量の予測法としては、ARMA モデルを利用した。この換気制御法については、中央高速道路恵那山トンネルの1換気区間を対象として、シミュレーションならびに実地試験を行った結果、良好な制御性能が示された。

今後に残された課題として、換気制御システムの評価関数の改善、発生汚染量の予測精度の向上などがある。換気制御法はこれらの技術の発達とともに改良されていくと思われる。

参 考 文 献

- 1) 長友成樹・小林一夫・矢野俊明・西川 清：恵那山トンネルの掘削を終えて，土木学会誌，60—3，pp. 9—17，1975.
- 2) 土木学会編：土木工学ハンドブック，pp. 1382—1384，技報堂，昭 49.
- 3) 交通工学研究会編：交通工学ハンドブック，pp. 539—553，技報堂，昭 48.
- 4) Foote, R.S. : Research for optimal ventilation at the Holland & Lincoln tunnel, International Symp. on the AVVT, April, 1973.
- 5) 渡辺幸太郎・草野英彦：高速道路における電気設備，電気学会雑誌，94—4，pp. 38—41 1974.
- 6) 植木源治・栗田静夫・片岡正博・中堀一郎・小林憲明：高速道路トンネル換気設備用電動機と制御方式，三菱電機技報，49—12，pp. 767—772，1975.
- 7) 伊吹山四郎：道路トンネルの換気，理工図書，pp. 30—35，1962.
- 8) Nicholson, H. and C.D. Swann : The prediction of traffic flow volumes based on spectral analysis, Transpn Res., 8, pp. 533—538, 1974.
- 9) Takahashi, Y., M.J. Rabins and D.M. Auslender : Control and dynamic systems, pp. 666—690, Addison Wesley, 1970.
- 10) 忍見明男・山田隆司：自動車の排気ガス量に関する実験とその解析，高速道路と自動車，14—8，pp. 55—63，1971.
- 11) 赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御，pp. 36—40，サイエンス社，昭 47.
- 12) Tolle, J.E. : Composite car following models, Transpn Res., 8, pp. 91—96, 1974.

(1976.5.29・受付)