非線形計画法およびファジィ制御に基づく 道路トンネル換気制御

正員 小山 敏博 (東 芝) 非会員 篠原 正憲 (東 芝)
非会員 吉持 達郎 (日本道路公団) 正員 三吉 京 (東 芝)
正員 渡辺 孝裕 (東 芝) 正員 江連 久 (東 芝)

Road Tunnel Ventilation Control Based on Nonlinear Programming and Fuzzy Control

Toshihiro Koyama, Member (Toshiba Corporation), Tatsuro Yoshimochi, Non-member (Japan High-way Public Corporation), Takahiro Watanabe, Member, Masanori Shinohara, Non-member, Miyako Miyoshi, Member, Hisashi Ezure, Member (Toshiba Corporation)

The paper presents a road tunnel ventilation control system for longitudinal tunnels with nonlinear programming and fuzzy control applications. The ventilation control system has two tasks: to keep the pollution level within a proper range, and to save electric power for ventilation equipments. In large-scale tunnels with various ventilators, the system uses ventilators efficiently as the traffic flow varies. The proposed system can operate ventilators based on traffic volume prediction using its daily change pattern with nonlinear programming (multiplier method). Pollution materials in longitudinal tunnels are propagated by the wind, so the process is represented by a distributed parameter system. Moreover, the wind velocity in the tunnel is constantly changing depending on traffic volume and natural conditions, so the process is very complicated. The proposed system, therefore controls not only the pollution level, but also the wind velocity for stable ventilation. Furthermore, fuzzy control is applied for humanlike control. The control system has been applied to actual tunnels and is producing satisfactory results.

キーワード：道路，トンネル，換気制御，非線形計画法，ファジィ制御，AI，エキスパートシステム

1. ま え が き

自動車道路トンネルの分野では，通行車両の安全な走行環境を維持するためにトンネル換気に関する研究が進められている^{(1)~(3)}。なかでも，トンネル内透視度の指標となるVI値 (VI: Visibility Index) の制御 (VI制御) は安全走行のために重要な機能となっている。

道路トンネルにおいて，現在主流となっている縦流

式トンネル (トンネルの縦断方向に強制的に換気風を流す換気方式) のVI制御に関して，従来は次のような制御方式がとられていた。

まず，VI値はトンネル内の通行車両から排出される煤煙の量に大きく左右されるため，交通量負荷予測値に応じた換気機の運転台数あるいは運転風量の値をテーブル値としてもち，これをもとに各時間帯の換気機の運転台数あるいは運転風量を設定する (換気機運用計画)。また，VI値の悪化の程度に応じた換気機の

運転台数・運転風量の増減値をあらかじめ決めておき、これに基づき VI 値の検出値に応じて、換気機の運転台数・運転風量の増減を行っていた（換気フィードバック制御）。

しかしながら、従来の換気運用計画においては、交通量に応じてトンネル内汚染濃度を許容値以下に維持することに重点が置かれているため、換気機の所要電力の面で必ずしも最適な運用となっていない。また、従来のように VI 値変動のみに基づくフィードバック制御ループを基本とした場合、対面通行のように通行車両によってトンネル内空気の流れが大きく左右されるようなトンネルにおいては、換気風の流れを安定化させることが困難であった。そして、このことが結果としてトンネル内汚染濃度が不安定となる大きな要因となっていた。

本研究では上述の問題点への対策として、以下のような制御方式を開発した。

まず、換気運用計画では汚染濃度許容値および換気設備能力などの制約条件を満足したうえで、換気機の所要電力を最小に抑える必要がある。著者らは、この問題を制約条件付き最適化問題として定式化し、非線形計画法（NLP）を応用した換気機運用計画機能を開発した。

一方、交通量の予測誤差、数式モデルの誤差などの影響で換気機運用計画は必ずしもトンネル内の換気状態の実態に即したものににならない。このため、フィードバック制御による補償が必要である。煤煙はトンネル内を流れる換気風に従って移流拡散されるため、VI 値は風速にも大きく依存する。そこで、著者らは従来のように VI 値のみによるフィードバック制御ではなく、VI 値に加えて車道内風速をもフィードバック要素として取込む換気制御方式を開発した。

トンネル換気プロセスは煤煙の移流拡散を伴うため、むだ時間の大きい分布定数系となる。また、厳密な動的モデルが確立していない分野であることから、最適制御など現代制御理論の適用は困難な分野とされる。本研究では、数式モデルに依存しないファジィ制御⁽⁴⁾⁽⁵⁾を応用することにより、次元の異なる入力変数を同時に扱う換気フィードバック制御方式を開発した。

ここで、開発された制御方式は既に実トンネルにおいて採用され良好な制御結果を得ている。

以下、第 2 章で換気機運用と換気フィードバック制御を主要機能とする換気制御システムの構成を示す。第 3 章で NLP を応用した換気機運用の詳細を示し、第 4 章でファジィ制御を応用した換気フィードバック

制御方式を示す。第 5 章で実トンネルにおける本方式の適用結果について示す。

2. 換気制御システムの構成

ここでは、一方通行トンネルに比較して制御が難しいとされる対面通行トンネルの換気制御を対象としている。一方通行トンネルでは、交通量の予測が比較的容易であり、またトンネル内換気状態も安定しているため、交通量予測に基づいて換気機の運転風量・台数を決める換気機運用を主体とする制御方式も可能である。しかしながら、対面通行トンネルでは、交通換気力が互いに打ち消し合う方向に働くため、車道内風速が不安定となりやすく、汚染濃度も悪化しやすい。従って、換気機運用に加えて、トンネル内の汚染状況に基づくフィードバック制御が不可欠となる。図 1 は今回開発した換気制御システムの機能構成を示しており、大きくは、

- (i) 交通量予測に基づく換気機運用機能
- (ii) トンネル内汚染状況に基づく換気フィードバック制御機能

から構成される。

以下、図 2 に示す代表的な縦流式トンネルを例にとり各機能の特徴を述べる。

3. 換気機運用機能

換気機運用機能は図 1 に示すとおり、(i)交通量予測、(ii)換気機運用計画、(iii)換気機組合せ切替判断

図 1 トンネル換気制御システム

Fig. 1. Tunnel ventilation control systems.

の3機能から構成される。ここでは、本研究で開発した前記(ii), (iii)の機能を説明する。

〈3・1〉換気機運用計画 換気機運用計画では、まず1時間周期で行われる交通量予測値に基づき、トンネル内汚染発生量の予測を行う。そして、図3の換気機運転組合せ選択方式に従い、汚染発生量に応じた換気機運転パターンを選択する。汚染発生量の増減に従って運転パターンは切り換えられるが、換気機の起動頻度を抑制するため、運転パターンの切換えにはヒステリシスをもたせている。運転パターンの設定を図2の八代側と人吉側に分離し、それぞれ独立に行うことも考えられるが、図2のような縦流式トンネルにおいては車道内全体の圧力バランスおよび立坑下の車道風量バランスを介して、八代側と人吉側とが互いに干渉することになるため、完全な分離は困難となる。

図2 縦流式トンネルの例
(九州自動車道肥後トンネル)

Fig. 2. Example of a longitudinal ventilation type tunnel (Higo Tunnel in the Kyushu Expressway).

パターン番号	運転状態 (白: 運転, 黒: 停止)			
	第1集塵機	第2集塵機	送排風機	第3集塵機
パターン1	黒	黒	黒	黒
パターン2	黒	黒	白	黒
パターン3	黒	黒	白	白
パターン4	白	黒	白	白
パターン5	白	白	白	白

図3 換気機運転組合せ選択

Fig. 3. Choice in the operating combination of ventilation machines.

従って、本研究ではトンネル全体を一体として扱い運転パターンを設定を行っている。

更に、選択された運転パターンに対して、各換気機の風量分担計画を立てる。ここでは風量分担計画を、汚染濃度や換気機運転風量などの制約条件を満たしたうえで換気機の所要電力を最小とする制約条件付き最適化問題として定式化し、非線形計画法(NLP)を適用して解を求める方式を採用した。NLPの手法としては、制約条件付き最適化問題を制約なし最適化問題に変換して解を求める乗数法⁽⁶⁾を採用している。図2のトンネルに対して定式化すると、次のようになる。

(1) 目的関数

$$f = \sum_{k=1}^m W_{Ck} + W_E + W_B + \sum_{k=1}^n W_{Jk} \rightarrow \min \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 f : 目的関数、 k : 換気機番号を示す添え字、 m : 集塵室設置箇所数、 n : ジェットファン設置台数、 W_C : 集塵室所要電力、 W_E : 排風機所要電力、 W_B : 送風機所要電力、 W_J : ジェットファン所要電力、電力の単位: (kWh)

(2) 乗数法決定変数

- X_k : 第 k 集塵室運転風量(m^3/s) ($k=1, 2, 3$)
- X_4 : 立坑排風機運転風量(m^3/s)
- X_5 : 立坑送風機運転風量(m^3/s)
- X_6 : 八代側車道風量(m^3/s)
- X_7 : 人吉側車道風量(m^3/s)
- X_8 : 八代側ジェットファン運転台数(台) (現状では八代側にはジェットファンは設置されていないため、 $X_8=0$ となる)
- X_9 : 人吉側ジェットファン運転台数(台)
- X_{10} : 立坑下の圧力(Pa)

ただし、八代側とは図2において八代側坑口から立坑直下までの区間、人吉側とは立坑直下から人吉側坑口までの区間を意味する。

(3) 不等式制約条件

(i) トンネル内汚染濃度制約条件

$$V_{ik} \geq V_{iL} \quad (k=1, 2, \dots, 6) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_{ok} \leq C_{ou} \quad (k=1, 2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 k : 添え字、 L : 下限を示す添え字、 U : 上限を示す添え字、 V_i : VI計位置に相当するVI値(%), V_{iL} : VI目標値(%), C_o : CO計位置に相当する一酸化炭素(CO)濃度(ppm)

(ii) 換気設備容量条件

$$X_{kL} \leq X_k \leq X_{kU} \quad (k=1, 2, 3, 4, 5, 8, 9) \quad \dots\dots\dots (4)$$

(iii) 車道風量条件

$$X_k \leq X_6 \quad (k=1, 2, 4) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$X_k \leq X_7 \quad (k=3, 5) \quad \dots\dots\dots (6)$$

(4) 等式制約条件

(i) 車道内圧力収支条件

$$P_{TY} + P_{MY} + P_{RY} + P_{C1} + P_{C2} + X_8 P_{YV} - X_{10} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$P_{TH} + P_{MH} + P_{RH} + P_{C3} + X_9 P_{HV} + P_B + X_{10} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、Y：八代側を示す添え字、H：人吉側を示す添え字、 P_T ：通行車両による交通換気力、 P_M ：自然風による換気力、 P_R ：車道抵抗、 P_C ：集塵機の昇圧力、 P_J ：ジェットファン1台分の昇圧力、 P_B ：送風機の昇圧力、圧力の単位：(Pa)

(ii) 車道風量収支条件

$$-X_4 + X_5 + X_6 - X_7 = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

(2)～(9)式に述べた制約条件の下で(1)式の目的関数を最小化する問題は、最終的に制約条件付き最適化問題、

$$\begin{aligned} \min & [f(X) | g_i(X) \leq 0, \quad i=1, 2, \dots, M; \\ & h_j(X) = 0, \quad j=1, 2, \dots, N; X \in R^N] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

の形に整理される。(10)式において、 $g_i(X) \leq 0$ は不等式制約を表す条件式であり、 $h_j(X) = 0$ は等式制約

を表す条件式を示している。(10)式に対して、

$$\begin{aligned} L_{t,r}(X, \lambda, \mu) \\ = f(X) + \sum_{i=1}^M \frac{1}{2 \cdot t_i} [\max\{0, \lambda_i + t_i g_i(X)\}^2 \\ - \lambda_i^2] + \sum_{j=1}^N \mu_j h_j(X) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N r_j \{h_j(X)\}^2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (11)$$

を拡張ラグランジュ関数という。(11)式の最小化をKuhn-Tucker 乗数 λ, μ とパラメータ t, r の各数列 $\{\lambda^k\}, \{\mu^k\}, \{t^k\}, \{r^k\}$ に対して、 $k=0, 1, 2, \dots$ と収束するまで行ったときに得られる極限値が(10)式の最適解となる。

図4は、換気機運転組合せが図3のパターン5に決定された後の風量分担を上記手法を用いて演算した結果の一例である。汚染濃度の最も悪化する地点においても、VI値は50%以上を満足していることが示されている。トンネル換気制御においては、VI値に関する指標として図4に示したようなVI目標値、VI許容値のほかにVI管理目標がある。VI目標値は制御上の目標値であり、VI値をVI管理目標以上に安定に維持するためにVI管理目標よりは多少大きめに設定している。VI許容値はトンネル内通行車両の安全走行上許容される限界の値を示している。

〈3・2〉 換気機組合せ切替判断 換気機運用計画を実行に移す際には、図1の換気機組合せ切替判断機能により、各換気機の負荷状況やトンネル内の汚染状況を考慮しながら、切替時に汚染濃度の悪化や過剰換気が生じないように適切なタイミングを判定している。また、運転されている換気機すべての負荷が高い場合

図4 乗数法による風量分担演算結果の例

Fig. 4. Example of airflow assignment calculation using the multiplier method.

には、停止している換気機を起動する処理（計画の修正）も行う。本機能にはエキスパートシステムを適用し、切換えに関する条件と切換方法を知識ベースとして記憶している。基本的な切換判断の知識を以下に示す。

〔RULE a〕 VI 値が『VI 許容値(30%) + 25%』以下のとき、換気機運転台数・風量を減少させる切換えは実施しない（VI 悪化防止）。

〔RULE b〕 VI 値が『VI 目標値 + 20%』以上のとき、換気機運転台数・風量を増加させる切換えは実施しない（過剰換気対策）。

〔RULE c〕 立坑送排風機が停止中であかつジェットファンが高負荷運転中ならば、送排風機を最小風量にて起動する（換気機高負荷運転対策）。

換気機運用機能では、1 時間ごとに交通量予測値に基づき計画値を演算した後、5 分周期で切換判断を行い、切換えの条件を満足した時点で計画値に従って実際の切換えが実行される。

4. 換気フィードバック制御機能

〈4・1〉 風速逆転時の VI 悪化現象 対面通行トンネルの大きな問題点は、一方通行トンネルとは異なり、換気方向と逆方向に走行する車両が存在するため、車道風の流れが極めて不安定になりやすい点である。特に、大型車が通過する場合などは車道風が逆転する場合さえある。車道風が逆転すると煤煙が滞留し、図 5 に示されるような VI 値の急激な悪化現象が発生する。

このような VI 急激悪化が生じたときは、従来から図 1 に見られる異常悪化時制御により強制的に換気機

の運転台数・風量を増加することにより対処しているが、これは使用電力の増加に結びつく。従って、可能な限り異常悪化時制御の動作頻度を抑制する必要がある。

特に対面通行のトンネルでは車道内風速を管理することが重要となる。このため、現場サイドで、車道風を安定して一方向に流すための対策として、ジェットファン（以下、JF と略記）に最低運転台数を設け、トンネル内汚染状態にかかわらず一定台数以上の JF を運転する方式を試みたトンネルもある⁽⁷⁾。しかしながら、この方式では VI 値の改善効果はあるものの必要以上に JF が運転されるという問題があった。

〈4・2〉 ファジィ応用換気制御の必要性 上述の方式において JF の最低運転台数を設けた理由は、車道風の逆転を防止するため、ある一定値以上の風速を確保することにあつた。そこで、本研究では VI 値のみならず車道内風速をもフィードバック要素として取込む多入力制御系の構築を試みた。

一般に縦流式トンネル内の汚染プロセスは分布定数系で表され、通行車両から排出される汚染物質の伝搬は次のような一次元移流拡散方程式によって近似できる。

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = -V_r \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} + \frac{q}{A_r} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $C(x, t)$ ：煤煙濃度、 x ：トンネル縦断方向距離(m)、 t ：時間(s)、 V_r ：車道内風速(m/s)、 D ：拡散係数(m²/s)、 A_r ：車道断面面積(m²)、 q ：単位距離・単位時間当たりの煤煙発生量(m³/m・s)

上式のような分布定数系で表される制御対象に対して多変数制御系の構築を試みようとした場合、最適制御など現代制御理論の適用は困難とされる。しかしながら、既存トンネルの換気状態およびシミュレーション解析により定性的にはあるが、VI 値と車道内風速の両者を取入れた換気制御のノウハウが蓄積されつつある。そこで、本研究で開発した換気フィードバック制御においては、これらの制御ノウハウをファジィ制御ルール形で表現している。

〈4・3〉 ファジィ応用濃度・風速制御

(1) 入力変数のファジィ表現 入力変数としては、トンネル内の視界の程度を表す VI 値の目標値からの偏差 ΔVI (%) とトンネル風の流れを示す風速の目標値からの偏差 ΔV_r (m/s) を取込んでいる。図 2

図 5 車道風逆転時の VI 値急激悪化現象
Fig. 5. Sudden VI drop in wind shifting.

の例では、立坑より八代側の区間に VI 計 4 台と風向風速計 3 台、立坑より人吉側の区間に VI 計 2 台と風向風速計 2 台が設置されている。

このため、上記 ΔVI および ΔV_r を次のように定めた。

$$\Delta VI = \min\{VI_1 - VI_{1REF}, VI_2 - VI_{2REF}, \dots, VI_6 - VI_{6REF}\}$$

$$\Delta V_r = \min\{V_{r1} - V_{r1REF}, V_{r2} - V_{r2REF}\}$$

ここに、 $VI_1, VI_2, \dots, VI_6$ ：各 VI 計の出力、 $VI_{1REF}, VI_{2REF}, \dots, VI_{6REF}$ ：各 VI 計の目標値、 V_{r1} ：立坑より八代側の 3 台の風向風速計の出力を平均したもの、 V_{r2} ：立坑より人吉側の 2 台の風向風速計の出力を平均したもの、 V_{r1REF} ： V_{r1} の目標値、 V_{r2REF} ： V_{r2} の目標値

ただし、各 VI 計の目標値は現場サイドにて設定される値であり、 V_{r1} 、 V_{r2} の目標値は、図 1 の換気機運用機能にて決定される値である。上記入力変数に対するファジィ集合表現を図 6 に示す。

(2) 出力変数のファジィ表現 出力変数としては、図 2 のようなトンネルを例にとった場合、ジェットファン運転台数の修正量 ΔN_{JF} (台)、立坑排風機風量の修正量 ΔQ_E (m³/s) および立坑送風機風量の修正量 ΔQ_B (m³/s) が挙げられる。このうち、 ΔQ_E と ΔQ_B とは一体のものとし、最終的には ΔN_{JF} と ΔQ_B とを出力変数に選んだ。出力変数に対するファジィ集合表現を図 7 に示す。また、集塵機は応答性の問題からファジィ制御の操作量からは除外した。

図 6 入力変数のファジィ集合
Fig. 6. Fuzzy sets for input variables.

図 7 出力変数のファジィ集合
Fig. 7. Fuzzy sets for output variables.

(3) 制御則のファジィ表現 上述の入出力変数を用いた換気フィードバック制御則を例えば、

「If ΔVI IS PB AND ΔV_r IS NM,
THEN ΔQ_B IS NM AND ΔN_{JF} IS Z.

…トンネル内の視界 (ΔVI) はかなり良い状態 (PB) だがトンネル内の風の流れ (ΔV_r) が悪い (NM) ときは、送風機風量 (ΔQ_B) を減少 (NM) させ、ジェットファン運転台数 (ΔN_{JF}) を現状維持 (Z) とする。」

のように表現することとした。

(4) 換気制御安定化のためのファジィ制御則

図 8 はファジィ制御則を二次元マトリックス表現したものであり、50 個のルールから構成されている。左上の領域の各要素は、

『トンネル内の視界が良いからといって、むやみに換気機運転風量・台数を減少させるような動作はさせず、風速が低い場合には風速逆転減少により視界の急激な悪化の恐れがあるため、換気機運転風量・台数を現状維持とするか、あるいは減少の程度を制限する。』

を基本思想とした制御安定化のためのルールである。

(5) 使用電力低減化のためのファジィ制御則

図 8 で右下の領域の各要素は、

『トンネル内の視界が悪いからといって、むやみに換気機運転風量・台数を増加させるような動作はさせず、風速が高い場合には、すぐに煤煙がトンネル外に排出され視界の回復が見込めるため換気機運転風量・台数を現状維持とするか、あるいは増加の程度を制限する。』

を基本思想とした使用電力低減化のためのルールである。

そのほか、図 8 の右上は領域は視界が良く風速も高いため、換気機運転風量・台数を減少させるルールを示し、左下の領域は視界が悪く風速も低いいため、換気

		低い ← 風速 → 高い				
風速 ↑ ΔV _r ↓	ΔVI	NB	NM	Z	PM	PB
	PB	NM	NM	NM	NM	NM
	PM	Z	Z	Z	NM	NM
	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	NM	PM	PM	PM	PM	PM
		送風量 ↑ ΔQ _B ↓				
		NB	PM	PM	PM	PM
		PB	PM	PM	PM	PM

図 8 ファジィ制御則
Fig. 8. Fuzzy control rules.

機運転風量・台数を増加させるルールを示している。

(6) 制御周期およびセンサ出力の処理 ファジィ応用濃度・風速制御の制御周期はジェットファンの起動頻度制約を考慮して5分周期とした。また、VI計および風向風速計の出力についても5分周期の平均値とした場合、急激な変動への追従性に問題が生じるため、制御タイミングごとに過去1分間の平均値(5秒サンプリング値12点の平均値)を採用して平滑化を行った。

5. 実トンネルにおける評価

〈5・1〉換気機運用機能の評価 図9は前掲の図2に示した九州自動車道肥後トンネルに本研究で開発した換気制御システムを適用し、換気機運用機能の検証を行った結果である。交通量の変動に従い、立坑送排風機、電気集塵機の運転パターンが切り換えられ、本トンネルのVI管理目標である40%以上が安定に維持されていることがわかる。なお、図4に示したVI目標値50%という値は制御上の目標値であり、VI管理目標である40%という値に対しては10%の余裕をもたせている。図中、10時から18時において、交通量が多いにもかかわらず送排風量が小さいが、これは第1～第3集塵室の運転によりVI値が良好な状態に保たれているためである。しかしながら、車道内風速を確保するためにジェットファンの運転台数は多めに推移している(図8のファジィ制御則マトリックスの3行1列のルールが作用している)。20時から24時までは交通量は少ないが、換気方向と逆方向に走行する大型車が多いため、やはり車道内風速を確保するためにジェットファンの運転台数は多めに推移している。20時から21時の間に車道内風速の低下あるいは逆転が見られるが、これは換気方向とは逆方向の大型車の車群がトンネルに突入した直後に生じた現象であり、換気フィードバック制御では応答しきれなかったものである。

〈5・2〉換気フィードバック制御機能の評価

上述の肥後トンネルにおいては、換気機運用機能と換気フィードバック制御機能の両者が搭載されているが、このうち換気フィードバック制御機能のみについて、従来のVI値のみによるフィードバック制御との比較を行った。対象トンネルとしては、図10に示す北陸自動車道親不知トンネルを選んだ。これは、本トンネルが換気機としてジェットファンのみを有しフィードバック制御のみを行っているため、上記比較に適しているためである。

図11は従来制御(VI値のみによるフィードバック

図9 換気機運用機能の検証結果

Fig. 9. Application results for the ventilation operating plan function.

制御に前述〈4・1〉節で述べたジェットファン最低運転台数を導入した方式)と、ファジィ応用濃度・風速制御の制御状態とを比較したものである。従来制御ではJF最低運転台数を4台に設定しており、4台以下の運転は行われていない。これに対して、ファジィ制御では換気負荷に応じてJFが運転されており、負荷が低いときはJFを4台以下にまで下げて運転している。その結果、1日の所要電力も5,837 kWh/日から

図 10 北陸自動車道親不知トンネル概要図
 Fig. 10. Outline of Oyashirazu Tunnel in the Hokuriku Expressway.

図 11 制御状態比較(1)
 Fig. 11. Control results comparison (1).

従来制御とファジィ制御の比較

図 12 制御状態比較(2)
 Fig. 12. Control results comparison (2).

5,437 kWh/日へと削減されている。

両制御方式の比較試験結果をVI悪化回数(VI値が許容値30%を下回った回数)と電力量について図12にまとめた。これは、ファジィ制御導入のねらいである換気制御安定化と使用電力の低減化の両側面から比較するためである。隣接した1週間どうしのデータで比較したものであるが、ファジィ制御の採用によりVI悪化回数が1週間トータルで18回から8回へ減少し、電力量も1週間平均で9.2%減少している。

6. むすび

道路トンネルの中でも制御が難しいとされる対面通行のトンネルを対象として、換気制御システムの開発および性能評価を行った。以下、本研究で得られた結果を列挙する。

(1) 非線形計画法を応用し、交通量の推移に伴い各換気機の風量分担計画を立てる換気機運用機能が、複数の換気設備を有する長大トンネルにおいて有効である。九州自動車道肥後トンネルに本機能を適用し、VI値を管理目標値である40%以上に安定に維持することができた。

(2) 交通換気力が互いに打ち消し合う方向に働

き、車道内風速が不安定となりやすい対面通行のトンネルでは、VI 値と車道内風速の両者をフィードバック量として用いるファジィ応用制御方式が制御安定性の向上および所要電力量の低減化に有効である。

(3) ファジィ制御を導入することにより、制御安定化のためのルールと使用電力低減化のためのルールの記述が容易となる。ルール数は、ジェットファンのみを有するトンネルにおいては 25 ルール、立坑送排風機を有するトンネルにおいては 50 ルールとなる。

(4) ファジィ制御方式を北陸自動車道親不知トンネルに適用し、以下の実績を得た。

(i) 1 週間あたりの VI 悪化回数が従来の 18 回から 8 回に減少。

(ii) 所要電力量は従来に比較して 9.2% 減少。

最後に、本研究にあたって有益なる御意見、御協力をいただいた関係各位に謝意を表します。

(平成 4 年 6 月 26 日受付)

文 献

- (1) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説（昭 60）日本道路協会編
- (2) 植木・藤村・水谷・中崎・古藤：「トンネル内換気系シミュレーション」，三菱電機技報，59，No. 4，298（昭 60）
- (3) 藤村・長島・高橋・松田・末吉：「関越トンネルの監視制御システム」，同上，60，No. 7，494（昭 61）
- (4) 寺野，他：ファジィシステム入門（昭 62）オーム社
- (5) 水本：ファジィ理論とその応用（昭 63）サイエンス社
- (6) 今野・山下：非線形計画法（昭 53）日科技連
- (7) 吉持・渡辺・小山・吉野・篠原：「ファジィ応用トンネル換気制御システムの検証結果」，平 4 電気学会全大，No. 644
- (8) 長滝・小山・三吉・篠原・吉野・飯田：「AI 応用トンネル換気運用システム（第 1 報）」，平元同上，No. 1733
- (9) 長滝・三吉・小山・江連・篠原・安達：「AI 応用トンネル換気運用システム（第 2 報）」，平元同上，No. 1734

小 山 敏 博（正員）

昭和 25 年 11 月 2 日生。51 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月（株）東芝入社。重電技術研究所に勤務し、プロセス制御システムの研究開発業務に従事，現在に至る。計測自動制御学会会員。

吉 持 達 郎（非会員）

昭和 26 年 12 月 8 日生。50 年 3 月東京電機大学工学部機械工学科卒業。同年 4 月日本道路公団入社。道路管理設備システムの計画，設計，施工および運用に従事，現在に至る。

渡 辺 孝 裕（正員）

昭和 34 年 10 月 3 日生。53 年 4 月（株）東芝入社。重電技術研究所に勤務し、プロセス制御システムの研究開発業務に従事，現在に至る。

篠 原 正 憲（非会員）

昭和 35 年 6 月 18 日生。60 年 3 月東北大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻修士課程修了。同年 4 月（株）東芝入社。府中工場電算機応用システム部にて道路向け遠方監視制御システムの開発設計に従事，現在に至る。

三 吉 京（正員）

昭和 32 年 1 月 1 日生。57 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科制御分野修士課程修了。同年 4 月（株）東芝入社。重電技術研究所に勤務しプロセス制御システムの研究開発業務に従事，現在に至る。日本ファジィ学会会員。

江 連 久（正員）

昭和 20 年 8 月 27 日生。45 年 3 月千葉大学工学部電気修士修了。同年 4 月（株）東芝入社。重電技術研究所に勤務し、システム制御の研究に従事，現在に至る。