

# シミュレーションを用いたトンネル換気制御システムの 開発と運用状況

野口 憲章 (株)高速道路総合技術研究所

Development and operation situation of tunnel ventilation control system utilizing computer simulation  
Noriaki Noguchi (Nippon Expressway Research Institute Company Limited)

It is important to ventilate road tunnel for interior environment of the tunnel. These days, it is necessary not only to control CO/VI index in the tunnel interior, but also to control the wind velocity in the tunnel interior or to preserve the outside environment of the tunnel, like controlling amount of ventilation of auto emission. As we developed computer software of tunnel ventilation control deliberating season or week condition, we report present operating situation of the tunnel installed this system.

キーワード：トンネル換気制御，シミュレーション，MPVC  
(tunnel ventilation control , simulation, MPVC)

## 1. はじめに

通常のトンネル換気制御は、トンネル内環境確保を目的としているが、トンネル出口坑口付近に住居がある場合など、近年では坑口周辺環境への影響を考慮した換気制御が求められるようになってきた。このため、トンネル出口手前に設置された排気口から坑内空気を排出する『坑口集中排気方式』(図1参照)などが採用されている。また制御管理目標として、トンネル内環境を目的としたVI、CO管理に限らず、トンネル坑口環境を目的としたSPM(浮遊粒子状物質)やNO<sub>x</sub>管理を行う事も必要となっている。

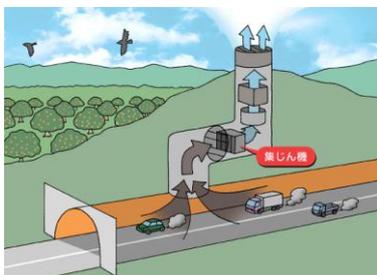


図1 坑口集中排気方式の概要

Fig.1 Outline of centralized exhaust method.

トンネル換気制御のソフトウェアは、従来換気システムメーカーが製作を行っていたが、近年のこれらの状況を踏まえた換気制御が可能でシミュレーション予測による最適な制御を行えるソフトウェア、MPVC(Model-based Predictive Ventilation Control)をNEXCO 総研で開発し、

各所で導入運用している。本件は、このような環境対策として有効なこの換気制御ソフトウェアの開発について報告するとともに、実際の運用状況について報告するものである。

## 2. シミュレーション予測による換気制御ソフトウェア(MPVC)の開発

従来の換気制御方式は、フィードバック制御(FB)、フィードフォワード制御(FF)、AIファジィ制御(図2参照)と精度向上に向け技術開発を行ってきたが、更なる精度向上や従来方式の課題改善のためにMPVCを開発したものである。

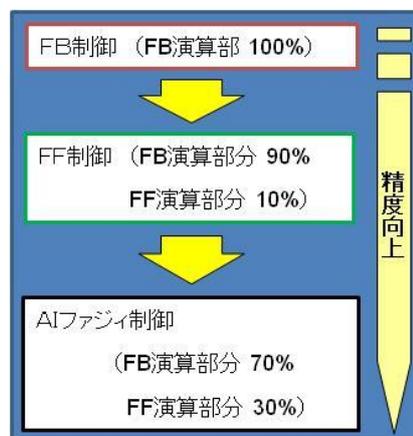


図2 換気制御方式の概要

Fig.2 Ventilation control method.

換気制御は、基本機能としてのプログラム制御や手動制御、VI、CO悪化制御、火災時制御等があり、また、トンネル内のVI、CO、風速等計測機器データから制御する計測制御がある。(図3参照)

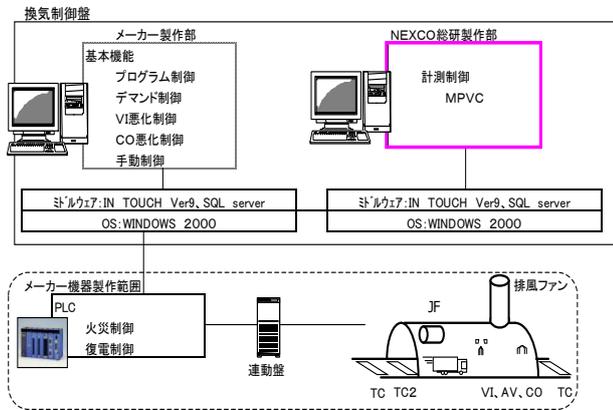


図3 換気制御システム

Fig.3 Ventilation control system with MPVC.

トンネル換気の制御ソフトウェアは、各種管理値を守りながらも、過剰に運転することなく電気代を抑えることが求められる。特に坑口集中排気トンネル(図4参照)では、持出し風を抑制するために出口付近を逆風に保つ必要があるが、交通換気力に逆らって常時換気機器が運転するため、非常に電気代が高額となるので少しでも効率のよい運転が求められる。

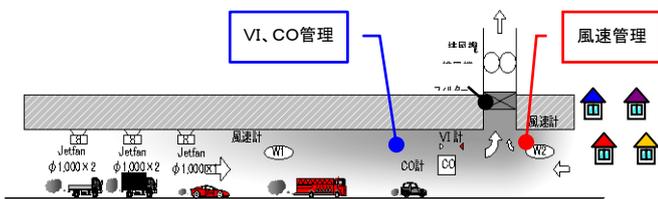


図4 坑口集中排気方式の断面図

Fig.4 Cross section of the tunnel ventilation image.

また、従来制御ソフトウェアでは、供用後に運転状況を確認しながらパラメータ調整を行う必要があり、多くのパターンを検証しながらの調整のため数ヶ月を要している状況である。このため、パラメータ調整の効率化も求められる。

そこで、シミュレーションで将来のトンネル内の交通やVI、CO及び風速を予測し、換気機器を効率的に高精度に運転制御を行える換気制御ソフトウェア「MPVC」を開発し様々なトンネルに順次導入しているところである。

### 3. MPVCの概要

MPVCは、トラフィックカウンターによる交通データやトンネル内計測機器からの環境データにより、シミュレーション予測による最適な換気制御を行うもので、併せて予測値と実績値の比較により各種パラメータを自動補正する

ものである。(図5参照)

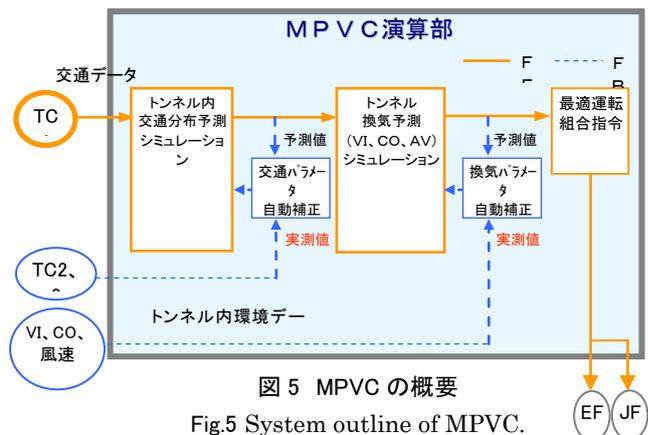


図5 MPVCの概要

Fig.5 System outline of MPVC.

シミュレーションにおいては、トンネル内の風速と濃度を予測する。

①風速区間…風速の予測単位

②濃度区間…濃度(VI・CO等)の予測単位

次に、換気モデルの作成を以下の条件で作成する。

①トンネル諸元…延長、断面積、勾配等

②換気設備…送・排風機や電気集塵機などの機器

また、トンネル内流体は一般的に30m/s以下の場合が多いため、非圧縮性流体として扱う。

ここで、風速区間は以下のような風速変化が生じる地点を境界に分割して算出する

○トンネル断面積の変化地点 ○電気集塵機の流入出地点

○送排風機の送排気口地点

トンネル内の濃度区間は、濃度は風速によって変化することや計算の連続性を考慮し、風速区間を約10mに区切った濃度区間とし、拡散を考慮しない移流拡散方程式を用いる。

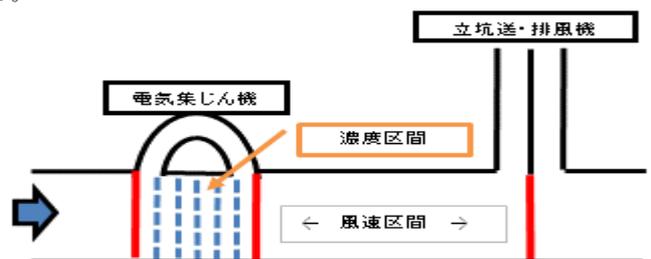


図6 風速、濃度区間の設定

Fig.6 Simulation unit.

MPVCの演算はこれらの予測方法から、まずトンネル入口上流にあるTC1～TC2(TC:トラフィックカウンター)で得た交通情報から、該当トンネルの制御周期(10分など)後のトンネル内の交通分布を予測する(図7参照)。

これにより交通換気力、車両が発生するVI及びCO等の入力値を予測し、この入力値に対して換気機器の様々なパターンで運転を行った場合のトンネル内VI、CO及び風速をシミュレーション予測する(トンネル換気予測シミュレーション)。

この換気運転パターンは、換気機器台数と制御種別の組合せに制御周期並びに計算区画を掛け合わせたもの(2000mのトンネルで1分間あたり約35万通りの組合せを約200区画分計算)であり、この中で最も消費電力が少ない組合せを選定し運転制御を行う。(図8参照)

また従来からの課題であったパラメータ調整は、交通パターンや計測値などシミュレーション予測と実測値とを制御周期毎に比較し自動補正する機能を備え、次制御周期の予測に反映する補正量を自動調整するものであり、パラメータ調整の効率化を実現している。

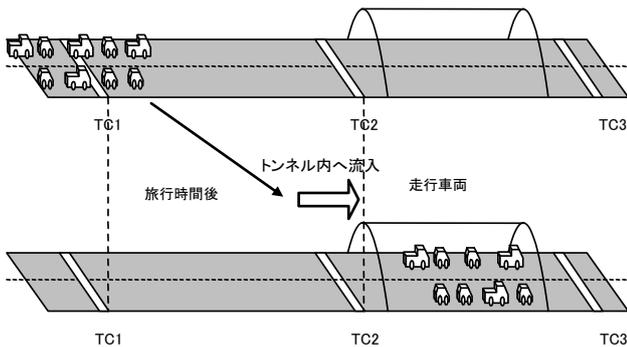


図7 交通シミュレーション  
 Fig.7 Traffic simulation.

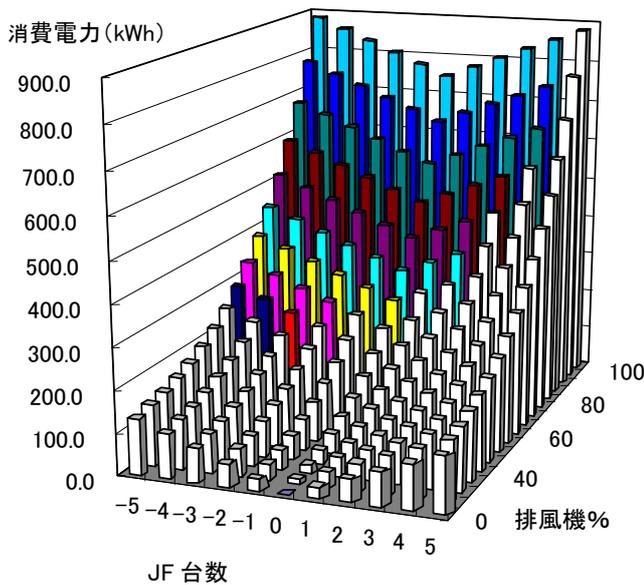


図8 換気機器の組合せと消費電力

Fig.8 Combinations of ventilation equipments and the consumption of electricity.

### 3. MPVC の機能向上

当該ソフトウェアは、開発以来現地状況や条件に併せ様々な改良を行い機能の向上を図っている。

(1) 交通予測の改善として、トンネル出口渋滞などによりトンネル入口との車速差が発生し排気量が過剰となる場合が発生する。このためトンネル出口のTC3の車速データを車速予測に活用することで交通換気力の精度向上を図

っている。(図9参照)

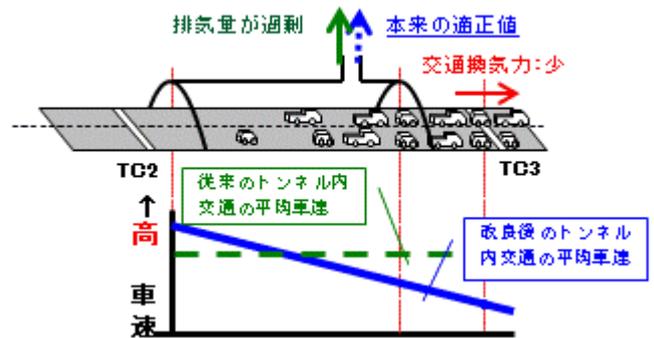


図9 交通予測の改善

Fig.9 Improvement of traffic simulation I

(2) 当初は旅行時間法の導入のみであったが、換気運転の効率化を目的に交通パターン法の導入も行っている。過去の実績交通量から1日の交通量パターン形状を作成し、実績との誤差の傾向を今後の交通量パターンに反映することが可能となり、更にはスケジュール運転も可能である。(図10参照)

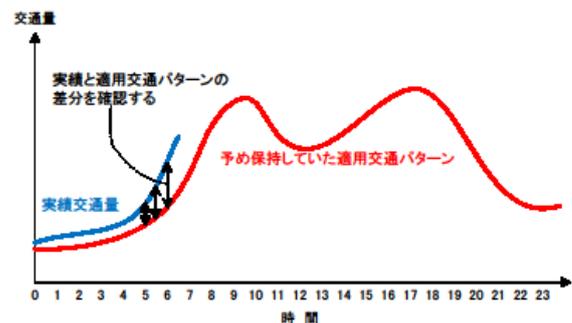


図10 交通パターン法による補正

Fig.10 Improvement of traffic simulation II

(3) 1日の運転予測のロジックを追加し、最も効率的な1日の運転計画を作成する事が可能となった。これは環境対策物質の排出規制を受ける場合に有効である。まず環境対策物質の1日の発生量を予測し、次に環境基準を守るための除去量を予測。電気料金単価が高いが高風量で短時間運転するのが良いのか、逆に電気料金単価が安く低風量で長時間運転する方が結果的に電気料金が安いかなど換気制御方法を選択し1日の最も効率的な運転計画を作成することができる。

(4) 1日運転計画の補正機能を備え、過去の実績と直近値から今後を予測し、実績値と設定値に過不足が生じないよう今後1時間の運転計画を常に立案することができる。これにより今後10分間の最終的な換気機運転量を決定し予測精度を高めている。

また前記同様、年間で環境対策物質の排出規制を受ける場合、実績と設定値の過不足は翌日に繰越し翌日の運転計

画に反映することも可能となっている。(図 11 参照)

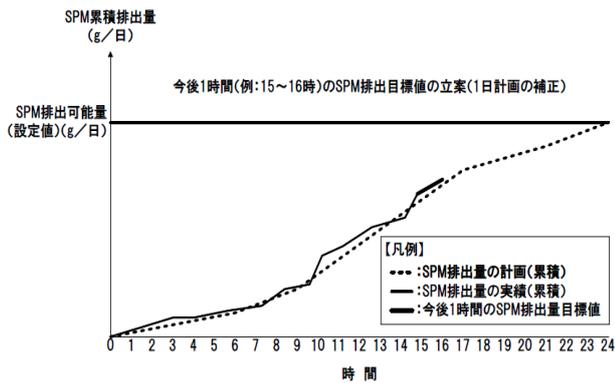


図 11 運転計画の補正

Fig.11 Revision of the daily ventilation plan.

(5) 複数トンネルの環境対策として、環境基準を順守するためには各トンネル坑口からの排気ガスの総量を管理しなければならない、今までは各トンネルごとに管理基準値を設けて換気制御を行っていたが、各トンネルごとの交通状況に併せてこのトンネルでは風量アップ、他方のトンネルは交通量が少ないから排風機停止など、全てのトンネルを一括して換気制御することで効率的な換気運転を行う事ができる。このように連携制御することにより、電気料金が安価となる運転方式をシミュレーションにより選択する事が可能である。(図 11 参照)

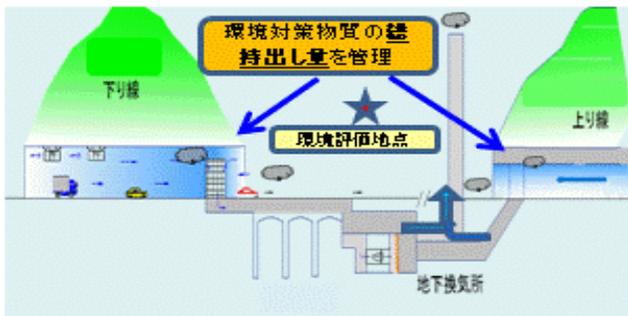


図 12 複数トンネルの環境対策

Fig.12 Synchronous control of two tunnels.

#### 4. MPVC の運用状況

このように、MPVC は様々な機能向上を行い、現地の状況や条件に合わせた効率的な制御を行える換気制御ソフトウェアである。

当該ソフトウェアは、新設トンネルや換気システムの更新に合わせ順次導入しており、下記のようなトンネル換気方式を採用するところに導入されている(ただし、管理目標対象物質は各トンネルにより異なる)。

- ①トンネル坑口集中排気による排気率制御方式
  - ②選択排気縦流換気方式
  - ③立抗送排気方式による一定風量制御方式 など
- 排気率制御方式トンネルにて導入した効果を検証したところ、出口風速状況を確認すると 80%以上の時間の割合で

約 85%(導入前は 65%)を出口風速をマイナスに維持していた。(図 13 参照)

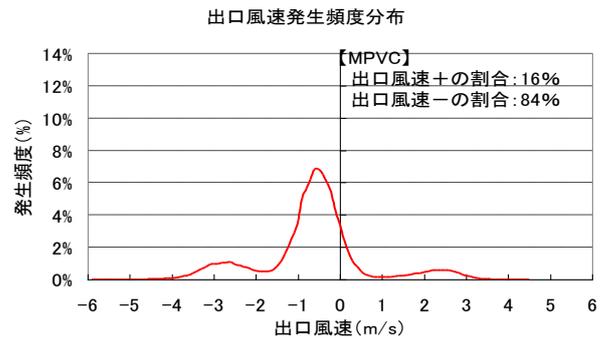


図 13 出口風速の発生頻度分布

Fig.13 Histogram of air velocities at tunnel exit.

また、以下に実際の長大トンネルでの導入前後の消費電力量と電力量削減率を示す。導入前はレギュレーター制御方式(交通量予測により制御目標値を設定し、設定値からずれた場合に自動補正する制御方法)を採用しており、更新において MPVC を導入したものである。

導入前後 1 年間を比較すると年間平均約 49%の削減となっており、高いレベルで効率的な運転制御を行っている事がわかる。また、電気料金においても季節別時間帯別単価を考慮した運転計画により消費電力量の削減率以上の削減となっている。(図 14 参照)

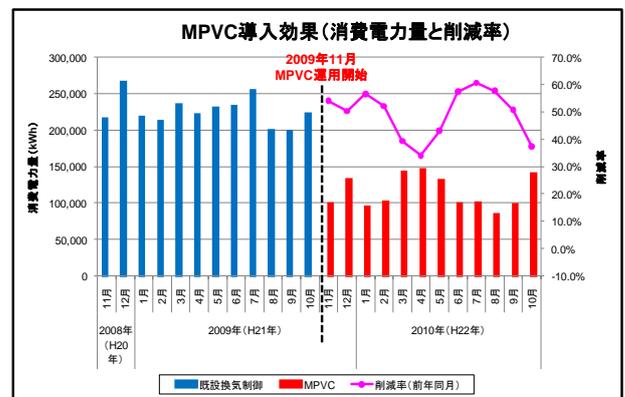


図 14 導入効果

Fig.14 The electricity reduction results.

#### 5. まとめ

平成 19 年度に当該ソフトウェアを開発、導入して以来様々な機能向上を行ってきたが、今後も複雑な換気方式や制御内容を満足する MPVC の開発を行うとともに、トンネルごとに行うカスタマイズの簡略化も併せて検討を行う必要がある。

#### 文 献

- (1) H.Tokieda: "Implement and evaluation of MPVC (tunnel ventilation control software by a simulation prediction method)", Mechanical Engineering Congress, 2008 Japan