一 般 論 文

大幅なランニングコスト削減を実現するトンネル換気シミュレータの開発

Development of the Tunnel Ventilation Simulator for Great Reduction of Running Cost

藤 元 仁 志[*1] Hitoshi Fujimoto
五 十 嵐 慎[*2] Makoto Igarashi
宮 田 寛 之[*2] Hiroyuki Miyata

トンネル換気設備は排気ガスで汚染された空気を換気し，安全な走行環境を維持する本来の目的とともに，運転電力を必要最小限に抑えた適正な制御が要求される．適正な制御の実現には，換気制御の効果を検証する必要があるが，実際のトンネルでの調整は多様な交通状況や換気方式があるため，現実に行なうことは難しい．そこで，数値シミュレーションによって，トンネル内状況を再現する汎用のトンネル換気シミュレータを用いて，様々な制御状態を評価することで，大幅なランニングコスト（消費電力）の削減可能な換気制御の適正化を実施することができたので，その概要を報告する．

1. は じ め に

全国の高速道路で消費される電気料金は，年間で約213億円に達し，この内トンネル換気に要する費用は約21億円を占めている．そのため，トンネル換気に要する電気料金の削減が重要な課題となっており，適正な換気制御となる制御設定値の管理がますます要求されている[(1)]．

しかし，実際のトンネルにおいて制御設定値の調整を行うことは，多様な交通状況や換気方式への対応及び，無駄な電力消費や急激な走行環境の悪化を引き起こす危険性が考えられるため，現実に行なうことは難しい．

そこで，当社はこれらの問題点を解決し，適正な制御設定値を見出すため，多様なトンネル内状況の再現を可能にするトンネル換気シミュレータを開発し，制御設定値の適正化手法を見出した．本シミュレータ技術は，客先が求めるトンネル内の安全な走行環境の維持と消費電力の最小化に大きく貢献できると考えている．

2. トンネル換気シミュレータ

実際のトンネルは，坑内で計測された風速やVI値（煤煙透過率）をもとに換気制御プログラムによって換気機の運転を制御しているが，実際のトンネルを，シミュレータによって再現したバーチャルトンネルに置き換えることで，実際では困難だった制御効果の検証を可能にした（図1）．

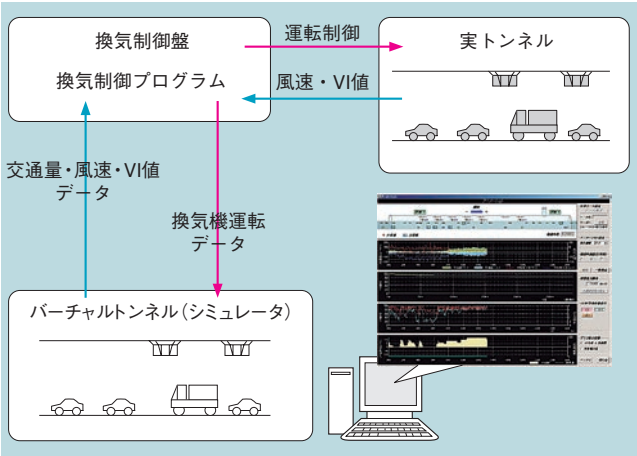

図1　シミュレータの役割
実トンネルをバーチャルトンネルに置き換えることで，制御効果の検証が可能．

また，本シミュレータは，グラフ理論を適用することによって分岐・合流をもつ複雑なトンネルにおいても高速な演算処理を可能としている[(2)]．

シミュレーション時には，初期条件としてトンネル条件（延長・断面積・壁面摩擦損失係数・縦断勾配など），換気機条件（風速・風量・効率・起動特性・機械特性），交通条件（交通方式・車両投影面積・煤煙排出量・大型車混入率など）を設定することで目的に応じたシミュレーションが可能である．また，実際のトンネルで記録された実測データを入力することで，記録された日時のトンネル内状況を再現することができる．

[*1] 広島製作所鉄構装置部鉄構装置技術課長
[*2] 広島製作所鉄構装置部鉄構装置技術課

換気制御プログラムには当社が内製する制御盤に組み込むものを用い，これとシミュレータとを組み合わせて制御設定値を任意に変えたシミュレーションを実施することで，現実では難しい制御効果の検証を可能にした．シミュレーション結果は，交通量・風速・VI値･換気機運転データの関連性を容易に把握するため，ミクロ交通流アニメーションと同時に各種の時系列グラフをインターフェイス上に表示できる（図２）．

図２　シミュレータ・インターフェイス
交通量アニメーション，トンネル内VI値分布，VI値及び風速の時系列変動，換気機運転状況の確認が可能．

3. シミュレータの再現性の確認

シミュレータを実用化するためには，その再現性を確認し信頼性を確かめる必要がある．そこで，シミュレータの再現性の検証を行った．対象とするトンネルは，２車線対面通行，延長：約 3 000 m，断面積：約 65 m^2，ジェットファンによる縦流換気方式のトンネルを対象とした．検証には，実際のトンネルで記録された交通記録とジェットファンの運転記録を用いた．交通記録には，車両の走行速度が記録されていないため，車両一台一台の走行速度を把握できない．そこで，全ての車両に対して走行速度を 70 km/h と仮定した．図３に実測の風速記録とシミュレーション結果の比較を示す．

この結果から波形は概ね一致していることが確認できる．この結果を定量的に評価するため，相互相関係数を調べたところ，平均 0.7 以上あり，制御適正化を目的としたシミュレータとして十分な再現性を有していることを確認した．

4. 換気制御の適正化

多数の換気制御手法のうち，現在多くのトンネルが採用するフィードバック制御を対象として制御設定値の適正化を試みる．対象は再現性の検証と同様のトンネルとした．

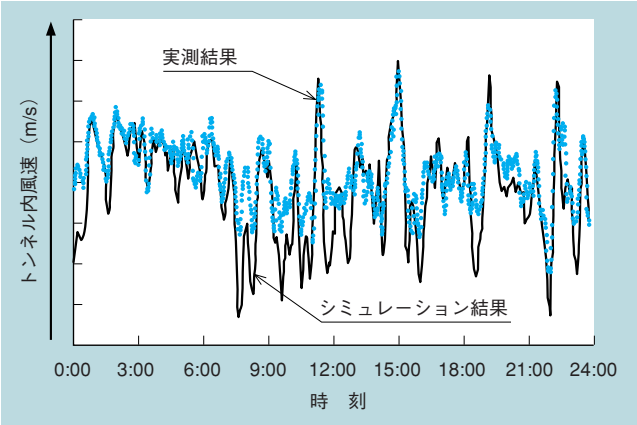

図３　実測値とシミュレーション結果の風速比較
シミュレーション結果は実測値をよく再現している．

適正化の手法としてタグチ式実験計画法を適用するため，各制御設定値から重要な設定値を制御因子として選出し，それぞれに水準を設けた．誤差因子には，交通の状況の違いによる制御効果のバラツキを抑えるため，計画交通量を一致させた２パターンのミクロ交通流の違いとした．

設定した制御因子と誤差因子を直交表に割り付け，実験計画法によって，少ないシミュレーション回数で各制御設定値がもつトンネル内環境及び運転電力に与える影響の大きさを要因効果図から評価することで，適正化を実施した．図４に適正化した結果を示す．

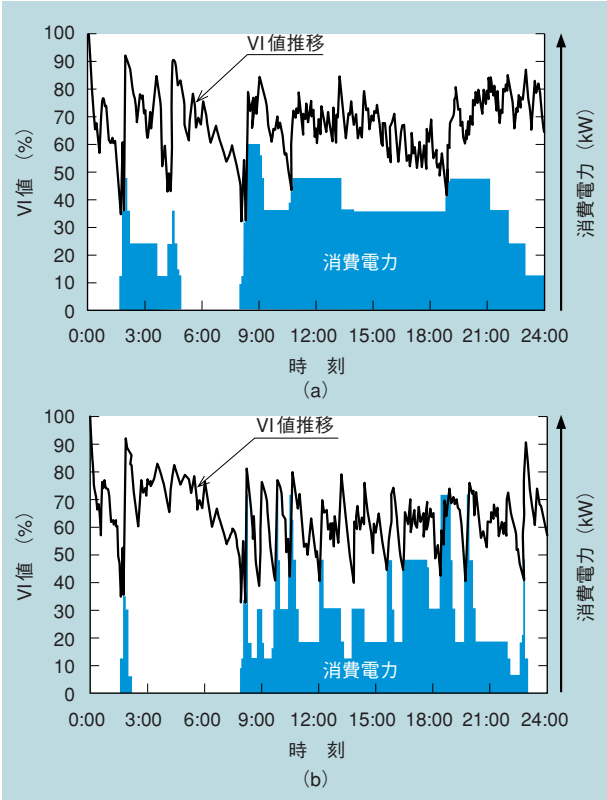

図４　消費電力の比較結果
制御設定値を適正化することで，走行環境をほとんど変えずに消費電力を大幅に削減．

納入時の制御盤の初期値(a)と適正化した値(b)の２つのシミュレーション結果を比較したところ，走行環境（VI 値）をほとんど変化させずに，初期値の約 40 %の消費電力を削減できることがわかった．

5. ま　と　め

本論文では，大幅なランニングコスト（消費電力）の削減を実現する換気制御の適正化を目的としたトンネル換気シミュレータを開発し，実測値とシミュレーション結果の風速データについて波形と相関係数を調べ，シミュレータとしての妥当性を確認した．また，制御設定値を変更した多数のシミュレーションを実施し，タグチ式実験計画法を用いた適正化手法によって，消費電力に対して寄与率の高い制御設定値を求めることに成功し，従来よりも 40 %程度のランニングコスト（消費電力）削減を実現した．

これにより当社は換気設備だけでなく，運用改善サービスと合わせた換気制御システムの提供が可能となった．また，開発したシミュレータは，トンネル内火災時の煙挙動のシミュレーションにも活用が可能で，安全な避難環境を確保する適正な排煙制御，防災計画に対しても有効であり，今後の更なる発展が期待できる．

参　考　文　献

(1) 成田俊彦ほか，トンネル換気シミュレーションシステムの開発，日本道路公団試験研究所報告 Vol.35 No.6（1998）p.100
(2) 前田和男ほか，グラフ理論による分岐・合流などを持つトンネル内の非定常換気解析，高速道路と自動車第 45 巻第 9 号

藤元仁志

五十嵐慎

宮田寛之