

トンネル換気の空気力学

水野 明哲*

Aerodynamics of Road Tunnel Ventilation

Akisato MIZUNO

1. はじめに

自動車トンネルはある限度を超える延長や交通量のもとでは、走行環境を適切に維持するため機械換気が必要である。比較的短い(延長が2km程度以下の)トンネルにおいては Fig.1 に示す縦流換気, 長大トンネルにおいては Fig.2 に示す横流換気というのが一般的な認識であった。横流換気設備はコストがかかるものの, グレードが高いとされ, 日本でもヨーロッパでもこのような換気方式の使い分けがなされていた。しかし, 日本道路公団では, 国内で最大規模の関越トンネル(I期線; 対面通行; 延長11km), 恵那山トンネル(II期線; 一方通行; 延長8.4km)において, 縦流換気方式を採用することとなった。ジェットファンに加えて, 立坑送排気と電気集塵機が併用された。これらはいずれも1985(昭和60)年の開通であり, 国内外を通じて先端的な選択であった。筆者はたまたまこの頃から換気検討に加わっており, この30年余りの経過をつぶさに見てきたことになる。ここでは, トンネル換気技術の30年を振り返ってみたい。なお, 私自身の研究活動と密接に関連しているため, いささか自分の仕事を中心にお話することになるが, ご理解をいただければ幸いである。ここでは道路トンネルの換気技術を中心に記述することとし, 鉄道トンネルについては議論の対象外としている。

2. 関越トンネルの換気計画

2.1 関越トンネルにおける縦流換気方式の採用

関越トンネル(I期線; 暫定対面通行)の換気検討委員会に加わったのは1979(昭和54)年のことであった。この委員会の委員長をしておられた大橋秀雄先生のもとで学位をいただいて, 工学院大学に講師として着任したばかりの時に, 急に委員会に加えていただき, 換気検討のお手伝いをすることになった。11kmという日本で最長のトンネルを, 縦流で換気することになったという説明を伺った。当時は2kmを超える長大トンネルでは横流換気が常識であったから, かなり思い切った決断であったろう。

縦流にすることで掘削断面が少なくて済み, 建設コストが抑えられる半面, とりわけ火災時の安全確保には細心の検討が必要となっていた。これに加えて, 2万kWにも及ぶ換気設備を, いかに効率的に制御し, 最小限の電気代で必要な換気を行うかも深刻な課題であった。

2.2 換気シミュレーションの提案

関越トンネルは, Fig.3 に示すように2本の立坑, 5か所の電気集塵機室と, 48台のジェットファン(噴き出し口径1500mm)を備えた複雑な換気系を持つトンネルである。私が検討に加わったのは1979年で, 6年後に開通を控えていた。暫定的に対面通行で供用されるため,

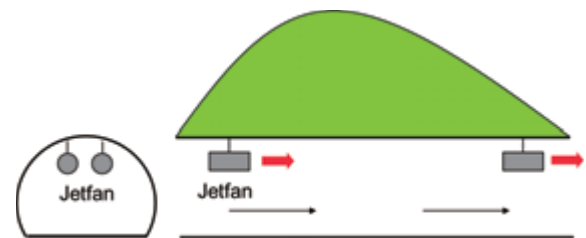


Fig.1 Longitudinal ventilation system.

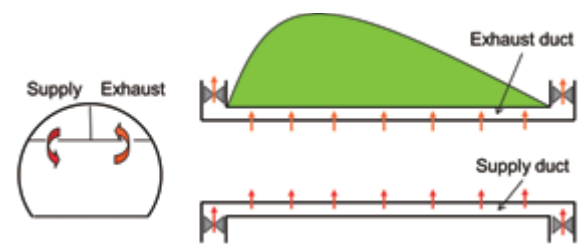


Fig.2 Transverse ventilation system.

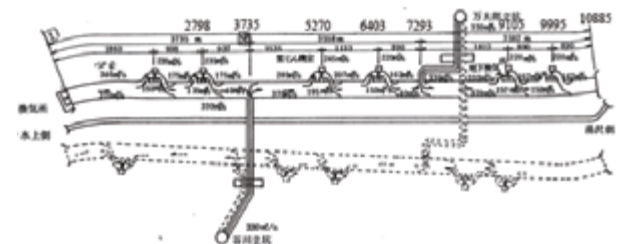


Fig.3 Outline of the ventilation system for the Kan-etsu tunnel.

* 工学院大学
(〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2,
E-mail: mizuno@cc.kogakuin.ac.jp)

非常時には縦流風を止めることで避難環境を確保するという考え方を取ることになった。一方通行トンネルでは、火災時に交通方向への換気風を(通常 2~3m/s で)維持すれば、煙は火点の前方を走り去る車両に追いつくことはないし、火点の後方へ煙が遡上することも避けられるので、対面の場合に比べてはるかに対応しやすい。

トンネルの空気に圧縮性を考慮して、坑口付近の1台のジェットファンを起動するという計算をまず行った。そうすると、Fig.4に示すように風速は両方の坑口で追っかけっこしながら階段状に上がっていく状況が再現できた。階段の幅は、音波が11kmを往復する時間と対応していた。これはもっともらしい結果であったが、それでは、何百台という移動中の自動車や48台のジェットファンを昇圧要素として計算に取り入れるとなると、気が遠くなるような作業となり、現実的ではないと考えた。

そこで、圧縮性を無視して、立坑で区切られた3つの換気区間のそれぞれについて空気の運動方程式を立て、立坑送排気量と圧力を接続条件として連立させた。空気に働く力は、管摩擦力、交通換気力、集塵機や立坑の昇圧力などで、これに両坑口間(換気区間)の差圧をいわゆる自然風として考慮した。この運動方程式はさまざまな空気の挙動を教えてくれた。最初に分かったことは、Fig.5に示すように平常時におよそ6m/sの定格風速で吹いている状態から事故が発生し、ジェットファンをすべて止めたとしても、大きな空気の慣性のために風の流れ

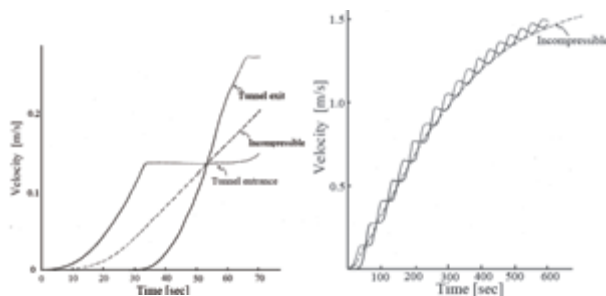


Fig. 4 Air velocity in the tunnel by the analysis with compressibility

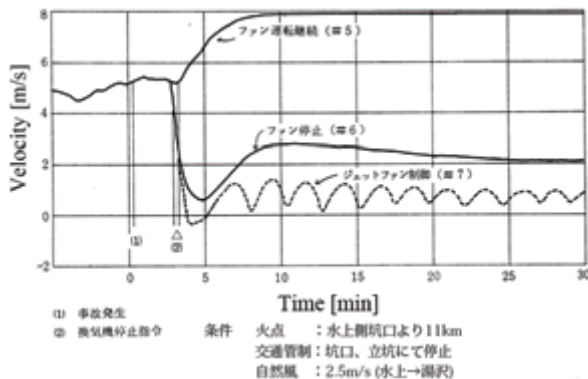


Fig. 5 Air velocity in the tunnel after an accident with jetfans reversely rotated (simulation)
はなかなかおさまらず、避難に悪影響を及ぼすであろう

ことであった。

2.3 火災時の避難環境の確保

火災発生時に、道路利用者が350m間隔で設置された避難連絡坑に到達できるためには、風速を短時間で抑制する必要があった。慣性に任せていては間に合わない。そこでジェットファンを逆転するのが手取り早いと考えた。シミュレーションをしてみると、確かに3分以内に風速をゼロに持っていくことが可能になる。しかし、あるメーカーの方から、そんな乱暴な運転を提案しても、公団さんは採用されないのではないか、と心配してアドバイスを受けた。私も恐る恐る「これは単に数値計算の結果としてお聞きください。」と前置きして委員会で説明したのであるが、思いのほかトントン拍子に話は前に進み、実現の日の目を見ることとなった。技術を大切にす道路公団の姿勢に感謝と敬意を覚えたものである。1985(昭和60)年8月に行われた現地実験はバスを燃焼させるなど大規模なものであったが、Fig.6に示すとおり数値計算の予測通りに風速が減衰したことには感動した。同時に数値計算が正しかったことが証明されて面目を保つことができた。

火災時の数値シミュレーション結果を1985年に¹⁾、火災実験との比較を1988年に²⁾ヨーロッパで発表している。

2.4 平常時の換気制御

関越トンネルの換気設備は総容量約2万kWとのことであった。適切な制御をおこなうことにより、換気の動力費を削減することが可能となる。実際に近い交通のマ

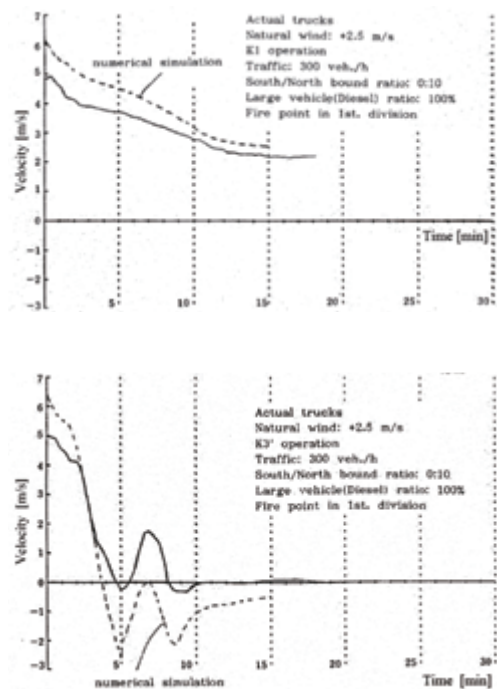


Fig. 6 Comparisons of air velocities by measurements and simulations

クロモデルを用いて非定常計算を行い、必要な換気レベルを維持しつつ、最低限の動力費で済むような運転の考

え方を検討した。煤煙でいえば、立坑と電気集塵機の直前でそれぞれ許容値ギリギリになるような運転が一番経済的なのであるが、時間的変動があるなかで、立坑ファン、電気集塵機、ジェットファンをそれぞれどんな割合で運転すればよいかはなかなかの難問であった。我々は、交通フィードフォワードとフィードバックを組み合わせたレギュレーター制御によってかなりの省エネ効果を達成できることを示すことができた³⁾。

3. 横流換気の風速ゼロ化

対面通行トンネルに縦流換気を適用するときの火災対応として、風速ゼロ化を関越トンネルで採用した。その後同様の検討を、肥後トンネルなどでも行い、ほぼ検討手法は確立した。しかし、まだ都市部で適用されていた横流換気において、同様の風速ゼロ化が可能かどうか気がなっていた。横流換気における縦流風の運動方程式を確立し⁴⁾、換気区間が複数ある場合には、Fig.6に示すように火災区間の前後で送気・排気のインバランス制御をおこなうことにより、ある程度縦流風速の制御が可能であろうと考え、シミュレーションを行った。この結果も国際学会で発表している⁵⁾⁶⁾。この考え方は、名古屋の東山トンネルや首都高の山手トンネルの火災対応に応用された。2007(平成19)年11月にフランスとイタリアの国境に位置するプレジュストンネルを訪問した際、現地の技術者が、同トンネルで火災時のためにインバランス制御をおこなっていると説明したので、それは私が10年以上前に発表したものだとして説明した。

4. 外乱予測最適制御

私は学部時代、制御の研究室において、最適制御に関する研究を卒論のテーマにした。そんな関係で、風速を急速にゼロに持っていくための制御の方法について頭を巡らせていた。一般的にはPIDによるフィードバック制御が行われるのであるが、オーバーシュートをしたり、偏

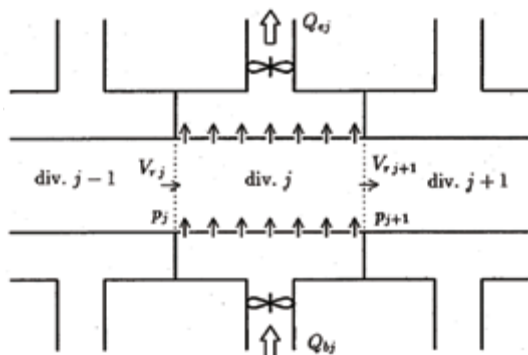


Fig. 7 Principle of the imbalance control; a way to control the longitudinal air velocity in transversely ventilated tunnels

差が残ったりして、どうも良好な制御とは言い難い。風速ゼロ化における系に以下の特性があることに着目した。

1) 制御対象は風速であって、位置ではない

2) 風速に影響を及ぼす要素のうち、交通換気力は未知数であるが、管摩擦やジェットファン昇圧力は定量的に予測可能である

すなわち、外乱要因がなければ、縦流換気トンネルにおいてジェットファンで目的の風速にできるだけ早く移行させるには、以下の考えでよいことになる

- 1) 可能な限りのジェットファンを目的方向に運転する
- 2) 目標風速に達した瞬間にすべてのジェットファンを止める

風速はトンネル内の空気に力が働かなければ、ニュートンの運動の第1法則に従って定速運動を続けるはずである。これは最適制御のコンセプトそのものである。他方、外乱要因については、速度の時間微分に質量をかけたものが力の総計であることから、外乱を予測し、その

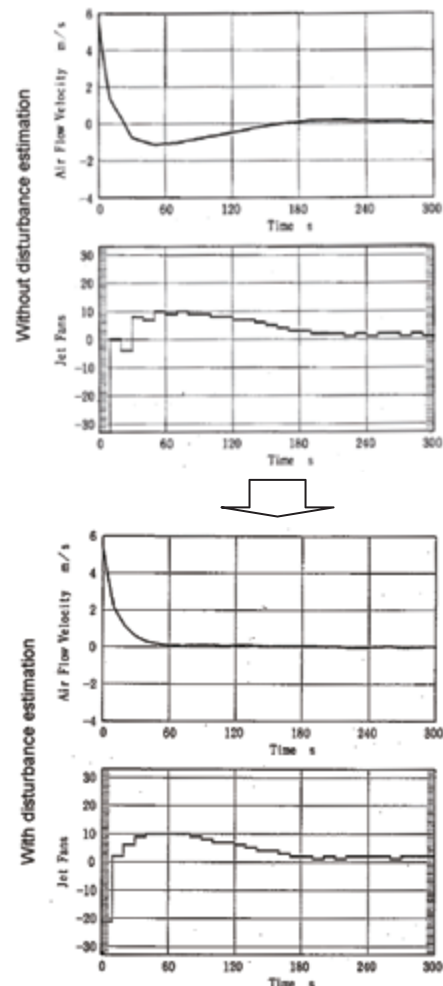


Fig. 8 Improved results by optimal control with disturbance estimation compared with the standard PID control (lower)

分を除外して上記の最適制御を行えば、最も早く安定に風速を目標値に近づけることができることになる。

この考え方は Fig.8 に示すとおりシミュレーションで完全に証明され⁷⁾、私は自信に満ちていた。ところが、これを九州のあるトンネルに適用してみると、思ったほ

どの性能が出なかった。後でわかったことは、制御に用いた風速計が、変動を抑えるために平滑化されており、信号に遅れがあったことが原因であった。この外乱予測最適制御を成功させるには、遅れない風速信号が得られることが必要と思われる。

5. 横流複雑換気トンネルの解析

1990年代後半から東京の山手通り(環状6号線)の下に中央環状新宿線が計画され、長大トンネルが建設されることになった(後に山手トンネルと命名された)。山手トンネルは延長10kmに及ぶ大規模トンネルであることに加えて、横流換気であり途中でランプなどの分岐合流などを多数含む複雑な換気系である。筆者らはこのような複雑換気系に対する運動方程式を確立し、解析を行った⁸⁾⁹⁾。先に検討を行っていた横流の送気量と排気量を意図的に違わせるインバランス制御を用いて渋滞時を想定した火災に対して、縦流と同様の縦流風速0化を目指すという立場で検討を行った。インバランス制御はジェットファンによる制御ほどの直接的な効果が得られないうえに、分岐点において圧力が逃げてしまうので、風速0化は比較的難しい課題であった。重交通量の都市内トンネルの安全を図ることは重要な課題で、上記数値解析と委員会検討を経て安全を確認して、実際のトンネルに適用された。

山手トンネルは、将来的に縦流換気を行う品川トンネルと接続される予定で、平常時換気、非常時換気ともに、より複雑な換気系をなすこととなり、今後に向けて十分な検討が望まれる。

6. トンネル換気に関する海外との交流

山手トンネルは、将来的に縦流換気を行う品川トンネルと接続される予定で、平常時換気、非常時換気ともに、より複雑な換気系をなすこととなり、今後に向けて十分な検討が望まれる。私にとって初めての国際学会参加は1982(昭和57)年3月、イギリス・ヨークで開催されたBHRA(注1)主催の第4回トンネル換気国際会議(ISAVVT)であった。ここで、前節で述べた関越トンネルの平常時換気シミュレーションの結果を発表した。生まれて初めての英語による発表でもあり、緊張の極みであったが、聴衆には温かく受け入れていただけたように思う。

この学会参加に先立ち、ヨーロッパのトンネルを見学する機会があり、当時世界最長であったオーストリアのアールベルクトンネルも見ることができた。海外における発表の経験は、私の好奇心と意欲に火をつけたと言ってもいいだろう。ヨーロッパの人たちと対等に意見を聞かせ、自分の意見を主張することができればどれほど素晴らしいことか、憧れにも似た気持ちを抱いたものである。その後、海外で発表することがヤミツキになり、ISAVVTには、上記の第4回以後3年ごとに2006年のスロベニア・ポルトロス(第12回)まで欠かさず出席した。

2年前の第13回は仕事の関係で出席できず、連続参加記録を断念せざるを得なかった。

日本人の国際学会参加は極めて消極的である。日本国内で開発した技術を、わざわざ旅費や参加費を払って国際学会で外国の人たちに教えてあげる必要はない、というような考え方があると聞いた。このことに、日本人の外国語アレルギーが手伝って、日本の立場をどれほど弱いものにしてきたことだろう。そんな中で、私は悪戦苦闘しながらも数十回の国際学会参加を通じて、日本のトンネル換気のことを主張し、理解してもらえるよう努力してきた。いささか国際貢献ができたことと自負している。我が国は、とりわけ安全に関してヨーロッパに学ぶべき点も多いと考えられ、今後さらに交流が深まることが望まれる。

2011年5月にダンディー(スコットランド)で開催された第14回ISAVT(今回2年間隔で開催され名称もISAVVTから修正された)に大学院生と参加でき、研究発表¹⁰⁾を行うとともに、多くの知人たちと旧交を温めることができて喜ばしいことであった。

注1: BHRAはBritish Hydromechanics Research Associationの略で、当時英国の半官半民の研究組織として流体工学に関連するさまざまな分野の国際学会を主催していた。その後民営化されて、BHR Groupと呼ぶようになり、今日に至っている。ISAVVT(International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels)を1973年から3年に一度開催している。

7. モンブラントンネル火災以後の対応

1999(平成11)年3月にフランスからイタリアに抜けるモンブラントンネルで大火災が発生し、50時間以上燃え続け、結果として39名の死者を出した。同じ年にオーストリアのタウエルトンネルで、2年後にスイスのゴットハルトトンネルでやはり大規模な火災事故が発生した。これらをきっかけに、ヨーロッパでは換気設備基準の見直しが行われた。設備のみの基準というよりは、管理・運用をも含んだ全体システムについてのものである。しかもそれは、大変厳しいもので、500m以上のトンネルに避難設備、排煙設備を要求するものである。これはEU指令(EU-directive)¹¹⁾と呼ばれ、EU加盟国の幹線道路に適用される。

このEU指令は2004(平成16)年4月に公布されたが、わが国ではこれを受けた見直しがまだ行われていない。これから建設されるトンネルの安全をどのように確保するか、という問題と、既設のトンネルをどうするかという問題がある。後者については、工事のために長期間通行止めをすることが難しいことが多く、また極端に大きな経費を伴うものは実施が困難である、などの現実的な条件下で何ができるかを考えなければならない、必ずしも容易な課題ではない。しかし、新設、既設トンネルを問わず、いつどこで発生するかもしれないトンネル火災を

考えるとき、一日も早い対応が望まれる。

8. モンブラントネル火災以後の対応

関越トンネル(I期線)の縦流換気に関する検討が始まってから30年以上が経過した。縦流換気の技術はある程度成熟したともいえる。以前は、トンネルは大きな土木構造物であり、換気設備はその附属品であるという考え方が強かったように思われた。しかし最近では、計画の初期段階から安全や効率性という立場で換気設備を意識した土木の設計がなされるようになってきたという点で、非常に改善されてきているように感じる。

他方で、対面通行トンネルにおいて火災時に風速を0にすることさえも基準化されていない。また、EU指令に相当する総合的な防災対策はいまだ策定されていない。そもそも、火災時に人命保護のための避難環境を確保するのに必須のジェットファンは換気設備であって非常用設備ではない、というような扱いである。今後作られるであろうトンネル防災基準では、このようにコンセプトの根本的な修正が必要で、非常用設備の設置基準だけではなく、それらの運用や制御をも含んだ総合的安全対策を担保するものでなければならない。そして、この安全の確保にはある程度のコストを伴うことも容認しなければならないという共通認識が広がることが望まれる。

この30年あまりにわたってご指導いただいた方々、またトンネル換気の発展に貢献された関係諸氏に敬意を表するとともに感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) Mizuno, A., Ohashi, H., Nakahori, I., Okubo, N. : Emergency Operation of Ventilation for the Kan-Etsu Road Tunnel, 5th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (1985) pp. 77-91.
- 2) Mizuno, A., Ohashi, H., Ishidaka, T., Nakahori, I., Kimura, S., Fujimura, H. : Practical test of emergency ventilation combined with bus firing at the Kan-Etsu Tunnel, 6th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (1988) pp. 353-366.
- 3) Ohashi, H., Mizuno, A., Nakahori, I., Ueki, M. : A new ventilation method for the Kan-etsu road tunnel, 4th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (1982) pp.31-47.
- 4) Mizuno, A., Kanoh, T. : On the one-dimensional equation of motion for the numerical simulation of transversely ventilated road tunnels, 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference (1999) pp. 19-22. (以下の論文(6)(7)と時間的に前後するが、方程式を最終的に確立したのは本論文である)
- 5) Mizuno, A., Ichikawa, A. : Possibility of controlling longitudinal air flow velocity in emergency for a transversely ventilated tunnel, 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (1991) pp. 349-364.
- 6) Mizuno, A., Ichikawa, A. : Controllability of longitudinal air flow in transversely ventilated tunnels with multiple ventilation divisions, 1st International Conference on SAFETY IN ROAD AND RAIL TUNNELS (1992) pp. 425-437.
- 7) Mizuno, A. : An optimal control with disturbance estimation for the emergency ventilation of a longitudinally ventilated road tunnel, 3rd Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement, and Visualization (1991) pp. 393-399.
- 8) 西馬功泰, 後藤幸夫, 福嶋秀樹, 水野明哲 : 複雑トンネルにおける換気システム設計のための空気力学モデル, 日本機械学会論文集B編, Vol. 68, No. 675 (2002) pp. 2990-2996.
- 9) Makino, M., Sangu, M., Itou, T., Yachi, S., Mizuno, A. : The ventilation system and emergency simulation of Shinjuku Tunnel, 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (2003) pp. 465-481.
- 10) Hagiwara, M., Mizuno, A., Tsutaki, T., Takahashi, K. : Study by numerical simulation on the breathing effect in a semi-underground Highway with Beams and a roof above it, 14th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Tunnels (2011) pp. 563-576.
- 11) Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network, Official Journal of the European Union (2004).