

トンネル火災とシミュレーション

やま だ とき よし
山 田 常 圭*

高速・大量輸送を可能にする社会基盤の整備に伴い、長大あるいは地下トンネルが徐々に増えてきている。これらのトンネル空間での火災時の安全性を確保する上で合理的な設計法および対策の確立が必要であり、そのための火災現象のシミュレーション技術が重要となる。本稿ではトンネル火災時の避難や消防活動に大きな影響を及ぼす煙の挙動を対象にしたシミュレーション手法を1) 経験的実験式モデル、2) CFDモデル、3) その他現象論的モデルの三つに大きく分け、それぞれの文献レビューと今後の課題について概説する。

キーワード：トンネル、火災、シミュレーション、煙

1. はじめに

ここ10年来、欧米を中心にトンネル内での火災安全への関心が高まってきている。米国ではメモリアルトンネル、欧州では8か国にまたがるEUREKA-EU499 FIRETUNという研究プロジェクト¹⁾が進行中であり、1994年にはスウェーデンのボラス、1995年にはスペインのグラナダで相次いで道路・鉄道トンネルの火災安全にかかわる国際会議が開かれている。こうした背景には、大量かつ高速な輸送交通網の整備拡充にあたり、都市域のようなすでに土地が高度利用されている場所でのトンネル需要が生じてきていること、また一方では、車両が高速化し、その積載物も多種多様化してきており、事故時には大規模な火災につながる危険性が高く、万一の時の直接・間接損害が社会に及ぼす影響も測りしれないものになるとの危機意識があるのではないかと推察される。その他、欧州域内では、EC統合にともなう安全対策の一元化といった政治的な背景や、英仏海峡トンネルの開通に先立ち、数多くの組織的な研究が行われたことも、最近のトンネルの火災研究を推進させる重要な要因であったといえる。

一方、わが国においては、東京湾横断道路のような大規模プロジェクトが進行中であり、また将来、第二東名高速道路等、長大トンネルが前提となる開発構想が掲げられている。しかしながら、トンネルの防火安全にかかわる研究活動では、火災学会等各種学会での

発表、報告書を見る限り、昭和48年の北陸トンネル列車火災、昭和54年の東名日本坂トンネル車両火災以降に見られた時期と比べて、また欧米でのトンネル火災研究への取り組みと比べても見劣りする観は否めない。将来の社会基盤の安全を担う重要な研究課題の一つでもあり今後より多くの研究者の参画が期待されている。

さてトンネルでの防火安全上、科学技術により裏打ちされた合理的な設計法・対策技術の確立が必要である。そのために、火災現象の予測技術(シミュレーション)の開発は不可欠であり、現在進行中のトンネル火災に関する研究の多くはこのシミュレーションに力が注がれている。筆者の所属する消防研究所においても大深度地下空間の安全に関連した研究の一環として、ここ5年余りトンネルの火災に関連した研究を行ってきた。すでに研究結果の一部については報告²⁾してきたが、特殊な空間だけに未解決の課題も多く残されている。以下、この研究を進める上で行った文献レビューをもとに、トンネル火災のシミュレーション手法について概説する。

2. トンネル火災のシミュレーション手法

トンネル火災のシミュレーションと一口にいっても、火災発生から、燃焼性状、熱気流を含む煙挙動、避難、消火等さまざまなものが対象として挙げられるが、本稿では、トンネル火災の避難や消防活動に安全上大きな影響を及ぼす煙の挙動に的を絞って、話を進めたい。いいかえると、トンネル内での火災煙の拡散を阻止するにはどのような換気対策が必要であるかといった意味での流れのシミュレーションである。なお、

* 自治省消防庁消防研究所第二研究部特殊火災研究室：

〒181 東京都三鷹市中原3-14-1

トンネル内部で車両等可燃物がどのような燃焼性状を示すかは煙の挙動シミュレーション上も重要である。しかしながら、火源の形状、燃料種は多岐にわたるため、既往の実大実験の燃焼データを与条件として利用するのが現在のところ一般的であり、本稿では燃焼性状のシミュレーションには特に触れない。

トンネル内火災時の煙の挙動に関連したシミュレーションの文献レビューとしては、Lea³⁾のものが簡潔かつ網羅的にまとめられている。ここでは彼のレビューを参考に、トンネル火災のシミュレーション手法を1) 経験的実験式モデル、2) CFD (Computer Fluid Dynamics) に基づくモデル、3) その他現象論的モデル(ゾーンモデル)の三つに大きく分類し、以下のおのシミュレーションの概要について述べる。

2・1 経験的実験式モデル

(1) 風上への遡上阻止風速

一方通行のトンネルで火災が発生した場合、トンネルの一端から送風し火源風上側に煙を遡上させないようにして、風上側から避難・救助活動を行うことが基本的な対策となる。この場合、どの程度送風すればよいかが、防火安全上非常に重要な情報となる。ここでいう経験的実験式モデルとは、この火源と換気風速の関係式のことを指す。このモデルでは、図1に示すような遡上が阻止されるか否か、また遡上した場合、どの程度の距離遡上するかといった情報が手計算で得られる反面、煙の温度分布等詳細な情報についてはなんらの情報も得られないという欠点を有する。



図1 火源風上への熱気流遡上状態

(条件：発熱速度=9 kW, 平均断面風速 1.03 m/s)

トンネル内で火災が発生した場合、風上へ煙が遡上するかどうかの研究は、1968年英国火災研究所(FRS: Fire Research Station)のThomasの研究⁴⁾に遡る。基本的な考えは、トンネル内の風上への煙の挙動は、給気側の慣性力と熱気流の浮力の比(フルード数)によって定まるといものである。

つまり

$$Fr = gH\Delta\theta / TV^2 \quad (1)$$

$$Q = C_p V \rho_a A \Delta\theta \quad (2)$$

ここで、 Fr :フルード数、 H :トンネル高さ[m]、 T :煙の温度[K]、 V :トンネル内の平均風速[m/s]、 Q :火源の発熱速度[kW]、 C_p :空気の比熱[kJ/kg・K]、 ρ_a :空気の密度[kg/m³]、 A :トンネルの断面積[m²]、 $\Delta\theta$:煙の雰囲気温度から上昇分[K]

式(2)を式(1)に代入し整理すると換気風速と発熱量の関係が以下のように求まる。

$$V = k(gQ'/C_p\rho_a T)^{1/3} \quad (3)$$

なお、 k : Fr 数を含む実験定数

Q' :トンネル断面方向単位幅当たりの火災の発熱速度[kW/m]

この関係式は、火源近傍での風による熱気流の傾きやトンネル内部で火源が断面をブロックすることによる気流の変化、およびトンネル断面形状の Q' への影響等、微細な条件の影響を考慮していないが、その簡便さとそこそこの妥当性ゆえに、その後のモデル構築に大きな影響を及ぼしてきた。

このモデルに類似して、Hinckley⁵⁾が、ショッピングモールのような廊下状空間の天井を流れる煙層流速を与える式を導出している。またそのアナロジーとして、Heselden⁶⁾がトンネル内での風上への遡上阻止に必要な限界風速を求める以下の式(4)を提案している。この式(4)と後述するSESプログラムで提案されている式の二つのモデル式が、欧米での火災時におけるトンネル内部での煙遡上阻止設計風速を定める上での基準として多く用いられてきたようである。

$$V_c = Ck(gQT/C_p\rho_a T_a^2 w)^{1/3} \quad (4)$$

ここで、 V_c :遡上阻止風速[m/s]、 T_a :雰囲気温度[K]、 w :トンネル幅[m]、 C, k :実大実験に基づく実験定数で、 $C=1, k=0.8$

こうした物理現象に基づく理論面での研究と平行して、数多くの実大・模型実験が行われてきた。上記の式では、発熱量が増大するとそれに伴い遡上阻止風速も増大することになる。しかしながら、現実には、火源が大きくなった場合には、風速はそれほど大きくなくても遡上阻止できることが経験的に知られていた。例えば、水谷ら^{7,8)}の土木研究所で実施した実験では、火源によらず、煙の遡上を防ぐには2~2.5 m/s以上の風速があればよいことが示されている。

また後述する地下鉄トンネル内の環境制御用に米国で開発されたSESプログラムでは、以下のような式⁹⁾が遡上阻止風速として用いられている。

$$V_c = K_g k(gQH/C_p\rho_a AT)^{1/3} \quad (5)$$

ただし

$$T = (Q/C_p\rho_a AV_c) + T_a \quad (6)$$

ここで、 k, K_g は実験定数、なお K_g は傾斜路の場合

合の補正係数。

これによると、発熱量が低く温度 T も低い間は、臨界風速と発熱量の間は比例関係になるが、発熱量が大きくなると徐々に臨界風速は頭打ちになる。この傾向は、英国の保健安全研究所 (HSL: Health and Safety Laboratory) での半実大¹⁰⁾ および模型実験¹¹⁾ でも明らかになっており、筆者らが消防研究所で実施した模型実験¹²⁾ でも確認されている。

なお、こうした頭打ち現象が、どのような物理機構によるのか、またどのような火源状況で成立するのか現在のところあまり解明されてなく今後の課題として残されている。

(2) 遡上到達距離に関して

防火安全上、風上への煙の遡上阻止できるかどうか重要な関心事であるため、遡上した場合の到達距離についての研究報告はあまり多くない。例えば、フランスのトンネル研究所の Vantelon¹³⁾ らの実験研究では、以下のような無次元パラメータで与えられることが示されている。

$$L/H = k\Psi^n \quad (7)$$

ただし

$$\Psi = (gQ/\rho_a C_p T_a V^3 H) \quad (8)$$

ここで、 L は火源直上からの煙先端到達距離 [m]、 n は実験定数で 1/3、 k は実験係数。

この実験では、熱源は小さく、発熱量も 1 kw 以下と非常に限られているため、同様な実験を筆者ら¹²⁾ も行い、上記関係を確認した。その結果、無次元パラメータのべき乗数 n はほぼ同じ 1/3 で一致をみたが、その係数 k には非常に差がある結果となった。今後、実用に当たっては、異なったスケールや発熱条件、傾斜角度でのデータをもとに、本モデルの適用範囲についての検証が不可欠であろう。

(3) 管路網としてのシミュレーション手法

山岳トンネルのように、トンネルが一对の出入り口から構成されている場合には、上記の煙遡上阻止のための換気方向は、例えば車両走行方向へのように一意に定まる。しかしながら、炭坑の坑道や一部の地下鉄のように、網目のようにトンネルや換気経路がつながっているような場合には、全体を一つの系として給排気計画をたてる必要が生じる。こうした給排気計画のために一般的に用いられるのが管路網計算と呼ばれるもので、かなり以前から坑道等でのシミュレーション手法として用いられている。以下、この換気網計算として火災時の換気制御にも対応できる SES というプログラム¹⁴⁾ を中心に簡単に紹介する。

SES は、地下鉄環境シミュレーションプログラム (Subway Environment Simulation Program) の略で

あり、米国運輸省の都市大量輸送委員会 (Urban Mass Transportation Administration) による組織的な調査研究のもとに作られた。その技術的な内容は、プログラムとあわせて地下鉄環境デザインハンドブック¹⁴⁾ に記載されている。1975 年にハンドブックができた後、5 年間にわたり SES のプログラムが北米、欧州等の 10 か所の地下鉄で実用に供され、その後必要な点が改良され、1980 年 12 月に SES (Ver. 3) の最終レポートがでている。このプログラムは文字通り、地下鉄内 (トンネルおよび駅舎をも含む) の空気的环境 (温度、湿度、空気の質、風速そして車両通過時の一時的な昇圧) を車両運行スケジュールのもとに予測する目的で、また適正な環境を守るための空調設備の設計あるいは運転計画のツールとして用いられている。本プログラム中には、非常時の運行スケジュールとして地下鉄火災のモデルも含まれており、火災時のトンネル内での空気の流れる方向、流量、温度等の予測が可能となっている。

SES 換気網計算: SES での流れのモデルでは、1 次元の非圧縮性、乱流の非定常流が前提とされている。計算に当たって、トンネル網はラインセグメント (トンネル部分に相当) と呼ばれる部分と、ノード (換気塔のような地点に相当) と呼ばれる部分からなる換気網に置き換えられ、各部位ごとの流れ (流量・方向・温度等) が求められる。この SES は、大きく以下の四つのサブプログラムからなっている。

1) 車両性能サブプログラム (Train Performance Subprogram): システム中で運行中の車両の所在地、スピード、廃熱、車両抵抗等を計算。

2) 熱シンク/環境制御素部プログラム (Heat Sink/Environmental Control Subprogram): 各ラインセグメントの長期的な廃熱の周囲の地盤への吸熱、蓄熱を計算。

3) 空気力学サブプログラム (Aero Dynamic Subprogram): 各ラインセグメント、換気塔セグメントの空気流量、風速、動作中のファンによる圧力上昇を計算。

4) 温度/湿度サブプログラム (Temperature Humidity Subprogram): 各ラインセグメント、換気塔セグメントの温度、湿度を計算。

SES トンネル内火災モデル: SES (Ver. 3) では火災時の換気モデルが含まれている。このプログラムで特に考慮されているのは、閉鎖的な空間内の火源近傍での急速な空気の膨張による流れの減速効果 (throttling) と呼ばれる影響と、排出する熱気流の方向 (上方あるいは下方) による浮力の流れへの減速・加速の影響である。また火災は、風速の関数で与えられる発

熱量で設定され、この条件下で、前述の式(5)、(6)を用い、送風によって煙が所定方向への遡上が生じるかどうか判定できるようになっている。

わが国での管路網計算：こうした換気網による火災時の煙の検討は、わが国においても、例えば青函トンネル¹⁵⁾の非常時の換気運転の設計に用いられている。SESと類似の換気網計算で、セクションと呼ばれるトンネル部と分岐点のノードと換気が生じる換気系(圧力の閉合条件を満足するループ)が仮定されている。こうした経路網中の各経路における運動方程式と各ノード(接点)における連続式、それに各ループにおける圧力の閉合条件を連立させて数値解法で解くものである。なお、圧力ループで用いる基本式として、各セクションにおける非定常のベルヌーイの式、セクション内の圧力損失、ファンの加圧式、列車加圧力が用いられる。このシミュレーションのおもな考え方、仮定は以下のようなものである。

- 1) トンネル網を管路網として管路網流れの非定常計算を行う。
- 2) 熱計算および煙・ガス濃度計算は行わない。したがって煙突効果は無視する。
- 3) 列車加圧力の算定は定常流れの場合のモデルが非定常流においても近似的に成り立つものとして行う。
- 4) 列車の抗口進入時および支抗接続点の通過時および列車のすれ違い時はシミュレートしないものとする。すなわち、これらの部分を列車は瞬時に通過するものとする。
- 5) ファン・ダンパー・風門の切替えも瞬時に行われるものとする。
- 6) 抗口間の自然気圧差はシミュレーション時間中は一定とする。

いずれの換気網の計算法においても、各トンネルごとの平均流速、温度、方向等巨視的な情報にとどまり、煙の成層状況等についてはなんらの情報も得られないという点では先の経験的実験式モデルの範疇に含まれる。

2.2 CFDによるシミュレーション手法

ここ数年、海外でのトンネル火災に関連する研究の中には、CFDを用いた研究が数多く見受けられる。これは、コンピュータのダウンサイジングに伴い、高速・大容量メモリの計算機が比較的手頃な値段で入手できるようになったことと、アプリケーションソフトとして使用勝手のよい商用CFDプログラムがいくつか開発され、ワークステーションクラスの計算機で計算が可能になったことによる。このCFDによるシミュレーションでは、複雑な形状における微細な熱気流の

挙動を現実によく表現できるため、現象の理解を補うものとして、将来有望な工学的なツールとなると考えられている。CFDのモデルの詳しい内容については本稿の主旨から外れるため省略し、主としてこのCFDモデルがトンネル火災のシミュレーションの中でどのように用いられてきたか、その経緯と今後の動向について以下簡単に触れる。

(1) トンネルへのCFDへの適用

1985年に英国FRSのKumarら¹⁶⁾がJASMINEと呼ばれるコードを用いてZwenbergトンネル火災をシミュレーションしたのがトンネル火災へのCFDへの本格的適用の最初と考えられる。このJASMINEの乱流モデルとしては、通常の $k-\epsilon$ モデルに浮力の影響を考慮して修正した乱流モデルを、火源には渦消散モデル(eddy break-up)と呼ばれる燃焼モデルが用いられている。この取扱いはその後の多くのトンネル火災のCFDシミュレーションで一般的なものである。彼らのシミュレーション結果の妥当性については、メッシュの粗さや、比較対象となった実験データの曖昧さに関連して疑問視する向きもあるが、強制換気条件下で、風上への煙の遡上が生じない条件を再現している。また、火源近傍を除く風下側の高温層の平均風速や、温度場を実験値と近く再現を行っている。しかしながら、自然換気状態での煙の挙動については、かなり粗い渦粘性乱流モデルを使っただけのみ解を得ており、また実験結果との一致も良くない。その後、1988年に、彼ら¹⁷⁾は、6 fluxモデルという輻射を考慮した計算により、実験値とより近い結果を得ている。

このJASMINEをベースに英国の輸送道路研究所(Transport and Road Research Laboratory)と共同してTUNFIRE¹⁸⁾と呼ばれる、鉄道・道路トンネルでの火災時のトンネル周壁への対流、輻射伝熱、換気口からの質量、熱流束が計算できるコードが開発されている。もっぱらトンネル設計時のコンサルタントのツールとして使用されているせいも、どの程度実用に供されているかは研究文献等からは明らかでない。

(2) キングスクロス地下鉄駅の火災シミュレーション

1987年11月、ロンドンのキングスクロス地下鉄駅のエスカレータ部分でおきた火災では、複雑に繋がった空間構成が災いし、死者33人を出す大惨事となった。本火災はトンネル火災ではないが、その後のCFDの研究に大きな影響を及ぼしており、トンネル火災に類似したものとしてここで取り挙げる。この火災では、木製の踏面を有するエスカレータで発生した火災が、いわゆるトレンチ効果(溝の内部にはりつくような流れが生じる現象)によって急速に延焼拡大したことが

研究者の注目をひき、理論・実験双方から多くの研究^{19),20)}が報告された。とりわけ、これらの研究の中で注目されたのは、火災原因調査の一環として初めて本格的に CFD によるシミュレーションが採用されたことである。この解析には、AEA テクノロジー社の Harwell FLOW3D という商用プログラムが用いられ、同社と英国の保健安全研究所 (HSL: Health and Safety Laboratory) の協力のもとで火災調査研究が行われた。トレンチ効果の再現の他、3 次元的な等温分布図、気流の流線図等の計算結果がグラフィックで示されたことが多くの火災研究者に CFD のもつ安全設計ツールとしての将来の可能性を知らしめることとなった。実際、これを契機に、世界的に CFD を用いた火災の研究あるいは応用例が増えたといっても過言ではない。

(3) 英仏海峡トンネルの安全を巡る CFD の適用

最近の国際研究集会でのトンネルに関連した研究発表の中には、世紀の大事業といわれた英仏海峡トンネル開発時の調査研究がベースとなっているものが散見される。先述の FRS の Kumar²¹⁾ は、英仏海峡トンネルの自動車輸送車両 (Shuttle Wagon) 内に積載した自動車が火災を起こした際の通常状態での換気下での車両内への煙の伝播・温度上昇等について、実大実験と JASMINE による予測値との比較検討を行っている。その結果、車両内での温度および二酸化炭素あるいは煙濃度の予測が満足のいくレベルで検証できたと報告している。一方、海峡トンネル内部での煙の拡散の危険性については、HSL において、実験と CFD の両面から、かなり綿密な検討が行われている^{10),22),23)}。このトンネルの火災時の安全性の検討対象とされたのは、可燃物の大きい自動車 (通称 HGV: Heavy Goods Vehicle) を積載した貨車での火災である。ちなみに 1996 年 11 月に発生した英仏海峡トンネル火災はこの HGV の火災であったことは記憶に新しい。この一連の研究では特に、トンネル内で緊急停車した車両から非常用の連絡通路に避難する際、安全が確保されるような遮煙に必要な換気風速を確認するため実験とシミュレーションが平行して行われた。以下その研究概要を紹介する。

実験: 実験は、HSL の粉塵爆発ギャラリーと呼ばれる長さ 366 m、断面積 5.6 m² の実験用トンネルを用いて行われた。このトンネルは、片側から給気が可能である。この断面方向のスケールは、実際の英仏海峡トンネルの約 1/2.8 であり、実験に用いられた HGV 用貨車もこれにあわせ 1/3 スケールで作られた。実験時の発熱量、換気速度は、フルード相似によって ($Q=1/L^{5/2}=1/15.6$, $V=1/L^{1/2}=1/1.17$: Q , L , V は発熱

速度、長さ、速度の相似比) 調整された。実験条件としては、2 MW (実スケールで 30 MW) の発熱量と 1.2 m/s の換気風速を基準として、その他 1.8 m/s の換気条件下で、発熱量を 1 から 20 MW に変化させたり、より大きな火源条件 (10 MW で 3.6 m/s) での実験等いくつかのケースの実験が行われた。この実験を通じて、2・1 節で述べたように、発熱量がある程度以上になると、煙の遡上阻止に必要な風速が一定になるという知見が得られている。

CFD シミュレーション: 上述の実験データは、CFD によるシミュレーション手法の妥当性検証のために用いられた。計算上、すべてのトンネルの長さにわたってメッシュをきることは計算機の能力上困難であり、計算領域は、列車模型の前後 5 m を含めた 47 m に限定された計算が行われた。CFD プログラムは、キングスクロス火災の調査研究に用いられた FLOW3D であり、乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルが、燃焼モデルとして渦消散モデルが採用された。また火源近傍での流れに影響を及ぼすと考えられる輻射については、Monte Carlo 法によるパッケージソフトプログラム (RAD3D) が用いられ、輻射計算と連成させた流れ場の計算が行われた。左右両端部の流れの境界条件としては、実験時の風速分布データが給気側条件として与えられ、排気側は一定圧力の境界条件とされた。実験データとの比較検討では、火源風下直近を含め、総じて予測温度が実測温度を下回る傾向が見られるが、実験で観察された熱気流の定性的傾向は、風上への遡上を含めてほぼ実験値と合致するものであったと報告されている。

(4) わが国における CFD のトンネル火災の研究および安全設計への適用

わが国においても、近年 CFD が火災の分野に適用されつつあるが、トンネル火災の安全への適用といった観点からすれば日が浅い。消防研究所の佐藤²⁴⁾ が米国ノートルダム大学で開発された UNSAFE を改良し、トンネル状空間での自然換気下での煙の流れについて計算したのが比較的早い。主として、換気量、天井温度について既往の実験と流れの定性的な比較を行っている。また、新田²⁵⁾ は、トンネルそのものではないが、傾きの異なる傾斜路内の天井に沿う煙流について、JASMINE コードを用いシミュレーションを行い、煙流への新鮮空気の巻き込み量について考察を行っている。この計算において、傾斜角度が大きく、対向流があり、内部に大きな渦が生じる場合には計算解の収束が悪いことが報告されている。

こうした研究の動きとは別に、CFD を設計等実用に供しようとする動きが見られる。例えば、都市域での

高速道路における 8% の急勾配のトンネル内部²⁶⁾ や東京湾横断道路の斜路部分 (4% 勾配)²⁷⁾ で火災が発生した際の遡上阻止限界を探るような問題に使用されている。これらの報告書では、研究が目的でないため、乱流モデル、メッシュ分割数、タイムステップ等、結果の妥当性を議論するのに十分な記載がされていないが、一部の計算結果の等温線図をみる限り、計算の解の収束性等、今後の検討課題が残っているように見受けられる。前提となる火源に関して、わが国では、危険物車は原則としてトンネル内部を通過させないことが前提であるため、英仏海峡トンネル等の設定に比べると、20 kW 程度と多少控えめな設定である。こうした火源条件下で、8% の勾配がある場合においても、最終的には 3.5 m/s あれば風上 (かつ上り勾配方向) への遡上が阻止できると結論づけている。なお、これらと類似の研究は、川端ら²⁸⁾ によっても報告されている。

こうした CFD の予測結果の妥当性については、わが国では、実験データをもとにした検討は少なく、実用化への大きな障害となっている。非常に限られたものとしては薛ら²⁹⁾ の CFD 予測結果と模型実験の比較検討があるが、実験模型が、断面で、高さ 10 cm・幅 50 cm、全長 3.8 m と小さく、流れが層流領域にかかっており、現実への適用妥当性について検証されているとはいえない。消防研究所では、こうした CFD によるシミュレーションの可能性を調べるため、いくつかの実験ケースにあわせたシミュレーションを行った。以下その結果³⁾ の一部について簡単に紹介する。

消防研究所での CFD シミュレーション例：シミュレーションの対象としたトンネル形状は、あらかじめ実施した実験模型に近い長さ 20 m、高さ 0.3 m の 2 次

元トンネルである。このほぼ中央にメタノール火源に相当する熱源を置き、換気風速を変えて火災気流のシミュレーションを行った。流体解析コードとして、FLOW3D (Ver. 3.1) を用いた。計算条件および計算時に設定する主要なオプションパラメータを表 1 に示す。シミュレーションの一例として、0.10 m ϕ 相当のメタノール発熱量、換気風速 0.2 m/秒とした時の各時間ステップでの熱気流のベクトルを図 2 に示す。トン

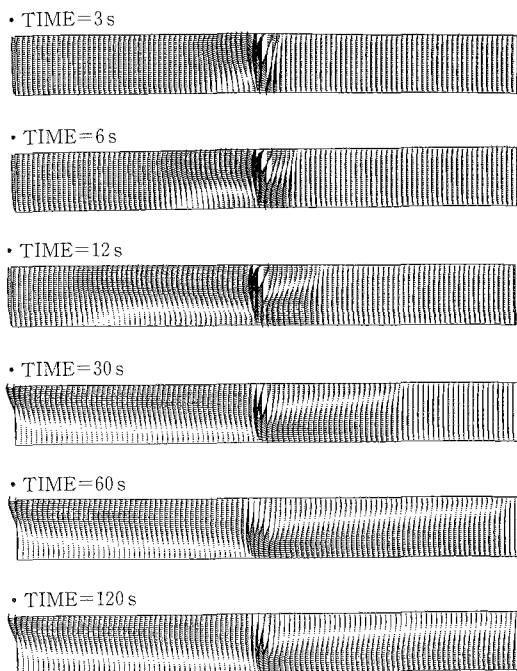


図2 二次元水平トンネル内における風速分布計算例 (火源 2.3 kW, 換気風速 0.2 m/s 相当)

表1 シミュレーション計算のためのおもな設定条件

計算対象の空間形状	<ul style="list-style-type: none"> ・長さ 20 m、高さ 0.3 m の二次元 ・セルサイズ：[高さ方向] 等間隔 30 セル [長さ方向] 等間隔 100 セル
境界条件	<ul style="list-style-type: none"> ・天井、床：断熱壁 ・境界層：対数則 (デフォルト値) ・開口部：[出口] 圧力境界条件 (大気) [入口] 風速 (0.1~1.0 m/s)
乱流モデル等	<ul style="list-style-type: none"> ・乱流モデル：$k-\epsilon$ モデル ・浮力効果および圧縮性：“WEAK COMPRESSIBLE FLOW”を指定し、密度は理想気体の状態方程式から計算。 ・輸送方程式：“HEAT TRANSFER”指定で計算。 ・非定常計算：TIME STEP=0.6 s, 200 STEP
熱 源	火源面積にかかわらず、0.10 m ϕ 、0.15 m ϕ 、0.25 m ϕ のメタノールを燃焼した際に発生する熱量を 0.2 m \times 0.1 m 四角のメッシュに均等に与えた。

ネル出口付近では外気の流入が生じ、また、火源によって熱せられた熱気流が風上側へ遡上している様子を見ることができる。この結果は、これまで行ってきたトンネル模型実験での目視およびビデオ観察による火源風下側の空気の流入状況、火源風上側での煙の遡上状況の様子を定性的に再現している。また火源風上への遡上を阻止する限界換気風速についてもおおむね実験結果を再現する結果となった。しかしながら、遡上が生じる場合の停止距離、温度分布は実験値とかなり隔たりが生じており、周壁の熱的境界条件の適切な取扱いが、予測精度向上に不可欠であることが明らかとなった。

(5) CFD を巡る最近の研究動向および今後の課題

計算機のダウンサイジングに伴い、ここ数年急速に CFD を使用した研究が進んできていることは前述のとおりである。最近では、より現実に近い予測をめざし、2次元から3次元へ、また、乱流モデルの改良等にかかわる基礎研究も活発になってきている。Lea²³⁾は、先の海峡トンネルでの火災研究の一貫として、3次元場でのトンネル内での遡上阻止と発熱量の関連について、かなり詳細な CFD シミュレーション計算を行い、先の実験結果、遡上阻止限界風速が発熱量が大きくなると頭打ちとなる実験の結果を再現している。また、乱流モデル自体の改良も行われ、Woodburn³⁰⁾は、通常の $k-\epsilon$ モデルの Boussinesq 近似程度の修正では、十分精度の良い予測ができないため、乱流の非等方性と壁による乱流強度の減衰 (wall damping) を考慮した修正 $k-\epsilon$ モデルを用い、先の HSL での実験結果をより精度高く予測することに成功している。この中で、対流熱伝達、輻射熱伝達、壁の粗度、傾き、風下の境界条件の解全体に及ぼす影響について検討を行い、特に、風下の流れにおいては、最初の三つの条件に解が敏感であることを示している。

トンネル火災への CFD の適用の研究については、主として英国で精力的に進められてきたが、最近ではフランスのトンネル研究所³¹⁾でもモデルの妥当性の検証と開発が行われている。米国では、多くの地下鉄道に、前述の SES の換気網の計算が使用されているようであり、設計等実用面での CFD の利用の動きは筆者の知る限り見られない。しかしながら、研究面では、トンネルに応用の効く研究が進行中であり、例えば、Baum, H.³²⁾らのダイレクトシミュレーションモデルがその一つに挙げられる。このモデルでは、特別な乱流モデルによらず、できる限り小さなメッシュを用いることにより、流れの様相を微細に再現しようとしている。トンネルを前提に開発されたものではないが、

トンネル内部を流れる煙のような管路中の密度の流れを再現するには十分であり、先の $k-\epsilon$ に比べて流れの非定常性が顕著になる分より本物の流れらしく見える。また、流れの先端の挙動についての予測値と実験値の比較により妥当性が検証され、将来実用面への適用が期待されている。

トンネルのように長い空間を対象とした CFD でのシミュレーションでは、つねに設定できるメッシュによる制約が生じる。現在のところ気流や温度変化の大きい火源近傍ではメッシュを細かく設定し、火源から遠ざかるにつれて大きくしていくといったテクニックがとられているが、長さ方向は数 100 m 程度が限界である。長いトンネル空間を予測するために、メッシュを粗くしていった場合、実際の程度解の精度が確保されるか明らかではない。それゆえ、トンネルの一部分を切り出してシミュレーションを行うことになるが、その両端における境界条件をいかに与えるかが大きな課題となっている。こうした設定には既往の実大実験等のデータから経験的にサブモデルの構築が必要とされる。今後 CFD を実用的な実際の安全設計のツールとして用いる上では不可避の作業であろう。また、さらに建築火災等への CFD モデルの適用と同様、予測結果と現実の対応は十分吟味されておらず、幅広いユーザー間での地道な検証と使用に当たっての基準づくりが今後必要とされている。

2.3 その他のモデル

実験式と、CFD のモデルの中間に、建築火災のモデルでいえばゾーンモデルのような現象論的なモデルが存在する。これは、便宜上、一空間を煙層と新鮮空気層の二つの部分に分けて、おのおのについて、質量・運動量・エネルギーの保存式をたてて、巨視的な動きを予測するものである。CFD では、高速のワークステーションと流体力学、特に乱流モデルや数値計算手法について高度な専門知識が要求されるのに対し、現象の単純化が図られる本モデルでは、パーソナルコンピュータクラスの計算機でシミュレーションが可能となる。このモデル研究は、Hwang ら³³⁾の研究のように比較的早くから行われ、わが国では、北原ら³⁴⁾、あるいは松下ら³⁵⁾による通称 Hybrid モデルもこれに該当する。また、トンネルを長手方向にいくつかの仮想的な境界をつくることによってゾーンモデルでシミュレーションすることも可能であり、例えば Charters, D.³⁶⁾はトンネル内を、高さ方向に高温層、混合層、常温層の三つに分割したモデルを提案している。

煙層がはっきり層化する場合には、こうしたモデルは換気網では得られなかった煙層厚さや、温度、先端速度を求めるのに簡便な式で予想できる利点を有す

る。一般に建物火災でのゾーンモデルにおいてもそうであるが、こうしたモデルを組み立てる上では、現象を構成しているいくつかの基本的な現象、例えば、ブリュームの流量や浮力換気式については十分理解が得られていることが前提となる。しかしながら、トンネル火災においては、閉鎖空間での換気条件下でのブリューム形状一つをとっても不明の部分が多いし、換気時の、煙層と空気層の境界面での混合のプロセスも複雑で満足のいくモデル化は行われていない。また、それ以前に、ゾーン分けができるほど煙が層化するかどうか不明である。今後、トンネル火災の現象を構成する基礎現象の理解が進めば、こうした比較的簡便なシミュレーション手法も実用に供される可能性もあるが、現時点では、トンネルの火災時のシミュレーションとしてあまり用いられていないのが実情である。

3. ま と め

以上、トンネルの火災のシミュレーション、特に煙の挙動に関して用いられてきた手法について概説した。本稿では具体的内容に立ちいらなかったが、冒頭で触れたように、わが国では昭和40年代後半から昭和50年代にかけて多くのトンネル実大規模火災実験が行われた。当時は、計算機の能力も十分でなく、実験結果の多くは、経験的実験式として利用されたとどまっている。その後現在に至るまで、計算能力も予測技術、特にCFDを中心とした技術が格段に進歩してきた。こうしたシミュレーションが実用に供される上では、数多くの実大実験との比較検討が必須である。こうした検証のための実験は、費用も労力もかかり容易に行えないため、こうした過去のデータの有効利用が必要となろう。また、トンネルという空間は、土木・機械等の広範囲な分野にまたがって研究されており、学際的な協力は不可欠であるが、土俵の異なった研究コミュニティ間の交流はなかなか機会が少ない。昨今のめまぐるしい情報化の波が、こうした研究者間の垣根をなくし、多くの研究者の参加のもと、この分野での火災研究が進展することを期待している。

参 考 文 献

- 1) Haack, A. : Introduction to the EUREKA-EU 499 FIRETUN Project, Proc. of the Int. Conf. on Fire Tunnels, Sweden (1994)
- 2) 自治省消防研究所：地下利用の特殊空間内における火災性状に関する研究報告書，消防研究所資料第29号（1994）
- 3) Lea, C. : A Review of Available Data and Models for Tunnel Fires, HSL Project Report, IR/L/FR/94/12 (1995)
- 4) Thomas, P. H. : The Movement of Smoke in Horizontal Passage against an Air Flow, Fire Research Note. 723 (1968)
- 5) Hinckley, P. : The Flow of Hot Gases along an Enclosed Shopping Mall : a Tentative Theory, Fire Research Note 807 (1970)
- 6) Heselden, A. : Studies of Fire and Smoke Behaviour Relevant to Tunnels, Proc. of the 2nd Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels (1976)
- 7) 水谷他：トンネル内自動車火災実験，トンネルと地下，13，2，47（1982）
- 8) 水谷他：道路トンネル内火災実験，土木技術資料，26-6（1984）
- 9) Danziger, N., et al. : Longitudinal Ventilation Analysis for the Glenwood Canyon Tunnels, Proc. of the 4th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels (1982)
- 10) Bettis, R., et al. : Interim Validation of Tunnel Fire Consequence Models : Summary of Phase 1 Tests, HSL Project Report, IR/L/FR/94/2 (1994)
- 11) Oka, Y., et al. : Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, Fire Safety Journal, 25 (1995)
- 12) 山田常圭他：トンネル火災時の換気条件下での煙の遡上に関する実験研究，消防研究所報告，83（1997）
- 13) Vantelon, J. P., et al. : Investigation of Fire Induced Smoke Movement in Tunnels and Stations : An Application to the Paris Metro, Proc. of the 3rd International Symposium of IAFSS (1991)
- 14) U. S. Department of Transportation : Subway Environment Design Handbook (1980)
- 15) 日本鉄道運転協会：青函トンネルの火災に関する調査研究報告書（1976）
- 16) Kumar, S., et al. : Mathematical Modeling of Fires in Road Tunnels, Proc. of the 5th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels (1985)
- 17) Kumar, S., et al. : Radiant Heat and Surface Roughness Effects in the Numerical Modeling of Tunnel Fires, Proc. of the 6th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels (1988)
- 18) Building Research Establishment : Fire Modeling Technique-TUNFIRE, leaflet (1991)
- 19) 例えば，Moodie, K. : Damage Assessment and Overview of the Technical Investigation, Seminar paper for King's Cross Underground Fire (1989)
- 20) Simcox, S., et al. : Computer Simulation of the Flows of Hot Gasses from the Fire at King's Cross Underground Station, Fire Safety Journal, 18 (1992)
- 21) Kumar, S. : Field Model Simulations of Vehicle Fires in a Channel Tunnel Shuttle Wagon, Proc. of the 4th International Symposium of IAFSS (1995)
- 22) Bettis, R., et al. : The Use of Physical and Mathematical Modeling to Assess the Hazards of Tunnel Fires, Proc. of the 8th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels (1988)
- 23) Lea, C. : CFD Simulations of Fires in Longitudinally-Ventilated Tunnels, HSL Project Report, IR/L/FR/94/10 (1995)

- 24) 佐藤他：トンネル内における大規模火災の数値計算，消防研究所報告，通巻 68 号 (1989)
- 25) 新田：数値計算における傾斜路煙流の解析，日本建築学会計画系論文集，467 (1995)
- 26) 首都高速道路技術センター：都市内における長大トンネル換気システムに関する調査研究報告書 (1990)
- 27) 日本道路公団：東京湾横断道路 4% 勾配部の煙の挙動に関する調査報告書 (1990)
- 28) Kawabata, N., et al.: Numerical Simulation of Fire fume Propagation along the Ceiling of a Down-grade Tunnel, Proc. of the 7th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels (1991)
- 29) 薛宏他：火災時におけるトンネル内気流のモデリング，第 22 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集 (1988)
- 30) Woodburn, P., et al.: CFD Simulations of a Tunnel Fire-Part I & II, Fire Safety Journal, 26 (1996)
- 31) Biollay, H., et al.: Validation and Optimizing 2D and 3D Computer Simulations for the Ofenegg Tunnel Fire Tests, Proc. of the 8th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels (1994)
- 32) Baum, H., et al.: Mathematical Modeling and Computer Simulation of Fire Phenomena, Proc. of the 4th International Symposium of IAFSS (1995)
- 33) Hwang, C. C., et al.: Reverse Stratified Flow in Duct Fires; A Two Dimensional Approach, 16th Symp. on Combustion (1977)
- 34) 北原他：トンネル内における熱気流の移動(1)および(2)，日本火災学会論文集，34 (1984)
- 35) Matsushita, T., et al.: Smoke Movement in a Corridor Hybrid Model, Simple Model and Comparison with Experiment, NISTIR 4982 (1992)
- 36) Charters, D. A., et al.: A Computer Model to Assess Fire Hazards in Tunnels (FASIT), Fire Technology, 1st Quarter (1994)