

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

鉄道トンネル火災時の熱気流を予測する

一般の山岳鉄道トンネルには換気設備がなく、万が一トンネル内で車両火災が発生すると、熱気流を制御できずに危険な状況になることが想定されます。そのような状況において熱気流の流れを把握し予測することは、乗務員が旅客を適切に避難誘導するために非常に重要です。そこで、山岳トンネル内での車両火災を想定し、トンネル内における熱気流の流れの予測手法の開発を行っています。ここでは、トンネル内における熱気流の流動特性を説明するとともに、トンネル模型を用いた実験や数値計算を用いた予測手法について紹介します。



山内 雄記
Yuki Yamauchi
環境工学研究部
熱・空気流動研究室
研究員
【専門分野】 空気力学,
熱流体力学



斉藤 実俊
Sanetoshi Saito
環境工学研究部
熱・空気流動研究室
室長
【専門分野】 空気力学,
熱流体力学

はじめに

1972年に北陸トンネルで発生した列車火災は死者30名、負傷者714名という大事故でした。旧国鉄ではこの事故を受け、さまざまな火災試験を行いました(図1)。それらの試験結果を踏まえ、1975年に「トンネル内列車火災時の取扱方」が制定され、車両火災が発生した場合には列車をトンネル内で停止させず、トンネルを走り抜けてから停止させ避難を行うこととしました。しかし、車両火災が発生した際に、脱線や停電、車両故障などが同時に発生してしまうと、トンネル内で停止せざるをえず、トンネル火災が発生する可

能性があります。実際、2011年に石勝線第1ニウトンネル内にて、脱線事故で列車がトンネル内で停止したあと、車両火災が発生しトンネル火災になりました。

避難においてもっとも注意しなければならぬのは火災時に発生する煙や有毒ガスを含んだ高温の燃焼ガス(以下、熱気流という)です。適切な避難誘導方法を検討するためには、熱気流の温度や移動速度などの性状を正確に把握することが重要です。

そこで、我々はトンネル内で火災が発生した場合に熱気流の流動を予測するツールの開発に取り組んでいます¹⁾²⁾。

ここでは、トンネル内における熱気流の流動特性を説明するとともに、トンネル模型を用いた実験や数値計算を用いた予測手法について紹介します。

トンネル火災時の熱気流の流れ

トンネル内で火災が発生した場合の熱気流



図1 宮古線猿峠トンネルでの列車火災試験(1974年10月)

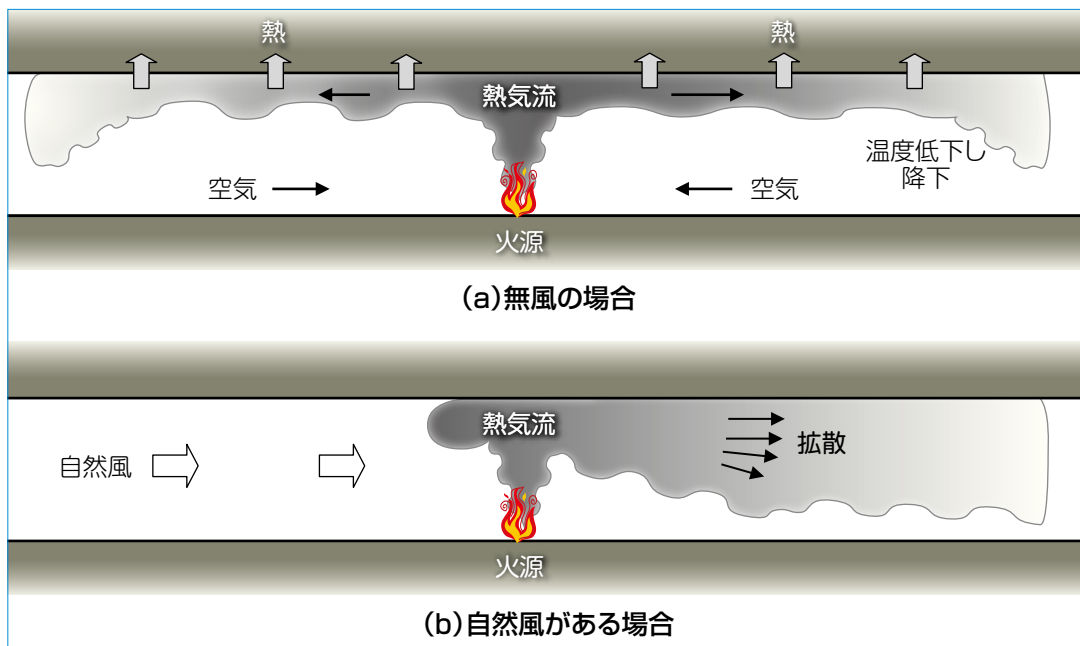


図2 トンネル内火災時の熱気流の流れ

の流れを簡単に説明するために、トンネル内に車両がなく地面付近で火災が発生した状況を想定します。一般的に、火災が発生すると熱気流は浮力によって上昇します。トンネル内に風がない場合は、天井につかかった熱気流はトンネルの両坑口に向かってトンネル上部を流れ、トンネル下部では新鮮な空気が火源に向かって流れます(図2(a))。熱気流はトンネルを流れる間にトンネル壁面や新鮮空気に熱を奪われることにより、火源から離れるにつれて温度が低くなります。その結果、浮力が減り、トンネル上部を流れていた熱気流は地面に向かって徐々に降下します。

トンネル内ではトンネル外と比べて風速は遅いものの、自然風が吹いていることがあります。風は熱気流の流れの特性に大きな影響を与えます。およそ秒速2メートル以上の風が吹いている場合、熱気流は風上側には流れなくなるとともに、風下側では熱気流が拡散されてトンネル断面全体に充満してしまいます(図2(b))。

以上のように、熱気流の浮力が失われたり、自然風によって拡散されたりすると、避難する人が熱気流に含まれる煙や有毒ガスにさらされてしまうこととなります。

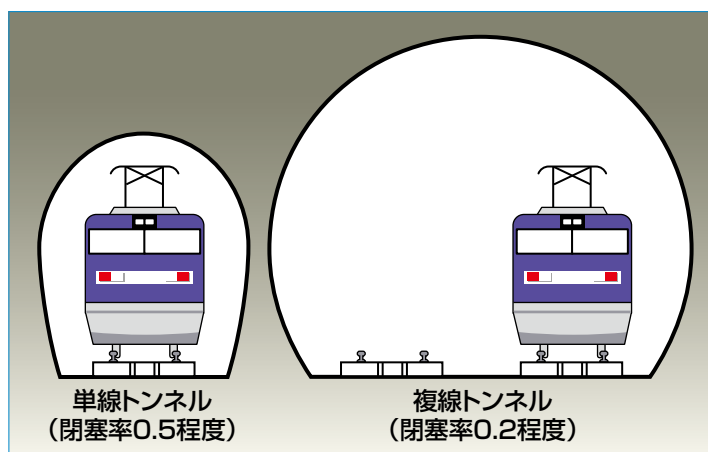


図3 単線トンネルと複線トンネルにおける閉塞率

火災に対する山岳鉄道トンネルの特徴

先ほどはトンネル内に車両がない場合を想定しましたが、トンネル内に留まる車両の存在も熱気流の流れに大きな影響を与えます。鉄道車両の断面積は自動車と比べて大きく、トンネル断面積との比である閉塞率(☞参照)は、複線鉄道トンネルでは約0.2、単線鉄道トンネルでは約0.5にもなります(図3)。閉塞率が高いことにより、車両側面における熱気流の厚さは増し、避難する人に悪影響を及ぼします。

また、閉塞率が高いほど、車両の走行にもなってトンネル内に強い風

(列車風)が発生します。列車風の強さは最大で秒速10メートル以上となることがあり、これが熱気流の移動速度や拡散に大きく影響すると考えられます。

車両の長さは1両20～25メートルであるため、一般的に1列車全体では数百メートルに達します。熱気流がトンネル上部を流れる際、閉塞率が高い状況では熱気流が列車に接しながら流

☞ 閉塞率

トンネルの断面積に対する車両の断面積の比のことです。1に近いほど車両の占める割合が高いこととなります。



図4 トンネル火災模型実験装置

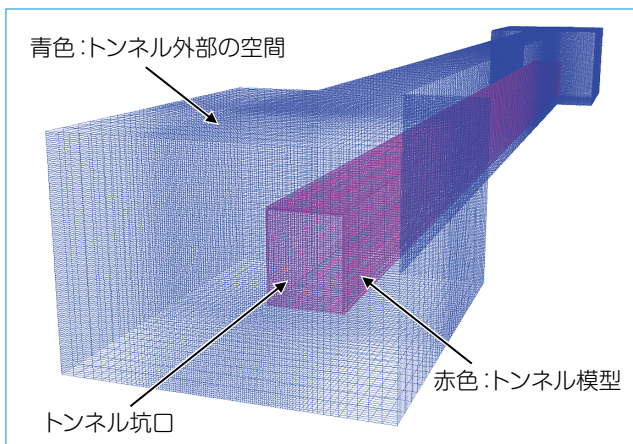


図6 数値計算モデル

れる可能性があります。そうすると、熱気流は列車にも熱を奪われることとなり、列車がない場合よりも早く地面に向かって降下すると予想されます。

さらに、トンネル内は暗く、地面にはバラストやまくらぎがあり足場が悪く、車両からの脱出口が少ないなど、避難環境は良くありません。とくに一般の山岳鉄道トンネルでは、車両とトンネル壁面との隙間が狭く、換気設備は設置されておらず、防災設備や避難用のトンネルは基本的にありません。

鉄道トンネル内での火災事故は道路トンネルでの火災事故に比べて発生件数は少ないものの、以上のように避難環境が良くないことにより、万一発生してしまった場合には大惨事になることが想定されます。とくに換気設備によって熱気流を制御できない山岳鉄道トンネルにおいて、安全かつ迅速に避

難するためには、発生する熱気流がどのように流れるかを予測する必要があります。

トンネル模型による火災模擬実験

熱気流の性状を把握するため、また、数値計算による結果の精度を検証するため、小型の模型実験装置を製作し火災時のトンネル内の温度を測定しました。製作したトンネル模型は長方形断面で、高さ $H=0.5\text{m}$ 、幅 $W=0.4\text{m}$ 、全長 $L=10.8\text{m}$ で、実際の単線鉄道トンネルの約10分の1の高さです(図4)。トンネル壁面には、熱の伝わりやすさなどの条件を実際の鉄道トンネルの場合と相似にするために、建築分野で断熱材として用いられることが多いケイ酸カルシウム板を使用しました。実際の山岳鉄道トンネルは天井がアーチ状

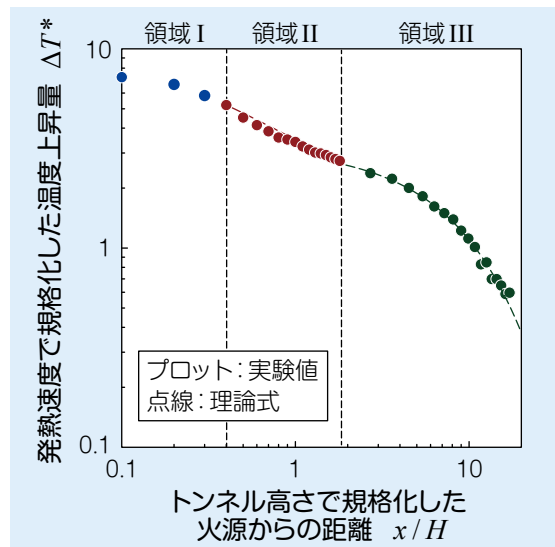


図5 温度上昇量のトンネル長手方向分布の実験値と理論式との比較

の馬蹄形断面のものがほとんどですが、天井を沿って流れる熱気流の温度上昇量の理論式と比較しやすいこと、製作が容易であることなどから、長方形断面形状のトンネル模型を製作しました。火源には液体燃料であるヘプタンを用い、火皿に満たしてトンネル模型内部の底面に設置しました。

トンネル内を流れる熱気流の温度を測定するため、幅中央の天井下10mmの位置にトンネル全長にわたって温度センサーを設置しました。天井下の温度上昇量のトンネル長手方向分布は理論式とおおむね一致しており、本模型実験装置や測定方法が信頼できるものであることが確認できます(図5)。また、火源から離れた領域IIIでは、熱気流の流れは落ち着き1次元的となります。ここでは熱気流の温度は長手方向に指数関数的に減衰していると判断できます。

数値計算による熱気流の流れの予測

実際のトンネルで火災実験を行うことは安全性や費用などの点から困難です。また、トンネル内における火災の状況には、火災の大きさやその発生位置、トンネルの長さや勾配、列車の長さや閉塞率、自然風など、多数の条

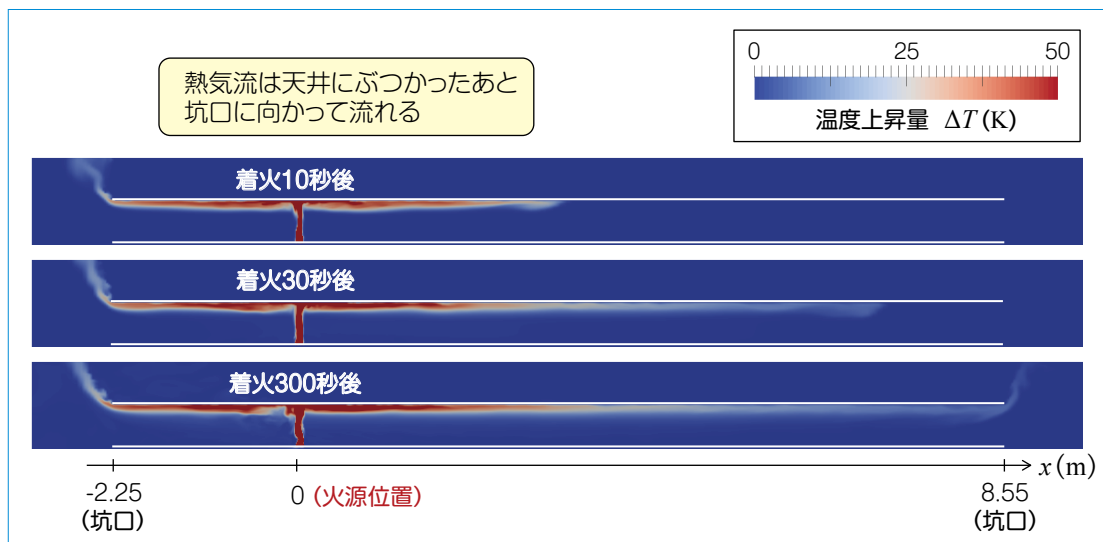


図7 温度分布の計算結果(トンネル中央縦断面図)

件が影響します。想定される多様な状況に対して熱気流の流れを予測するためには数値計算が有効です。本研究では、流体計算の汎用ソフトであるAdvance/FrontFlow/red (AFFr)を用いてトンネル火災模擬実験における条件で数値計算によるシミュレーションを行い、実験結果と比較することでその計算精度の検証を行いました。

計算のため作成したモデルでは、坑口から流れ出る熱気流やトンネル壁面へ熱が伝わることも計算するため、トンネル模型内部の空間だけでなく、トンネル坑口周辺の空間やトンネル壁面内部も計算領域として設定しました(図6)。計算では、火源の入力条件として実験で得られた発熱量に相当する値を時系列データとして与え、気体の流れの方程式に加え固体の伝熱に関する方程式を時々刻々解いていき、熱気流を含む気体の温度、流速、圧力などの時間変化を求めました。

数値計算によって得られたトンネル中央縦断面の温度分布の時間変化をみると、火源から発生した熱気流は上昇し、天井にぶつかったあと坑口に向かって流れる様子がわかります(図7)。このように、数値計算によるシミュレーションでは計算モデル全体のデータが得られ、温度や流速など実際には

見えない情報を簡単に可視化できるという利点があります。

シミュレーションの計算精度を定量的に検証するため、例として幅中央の天井下10mmの位置における温度上昇量のトンネル長手方向分布に関して計算値を実験値と比較しました(図8)。計算値はトンネル模型全長にわたって実験値とおおむね一致していました。本研究で用いた数値計算手法によりトンネル火災時の熱気流の温度を定量的に予測できることが確認できました。

おわりに

長方形断面のトンネル模型で無風かつ車両の影響を無視という単純な条件ですが、トンネル内における火災時の熱気流に関する温度の計算値は実験値

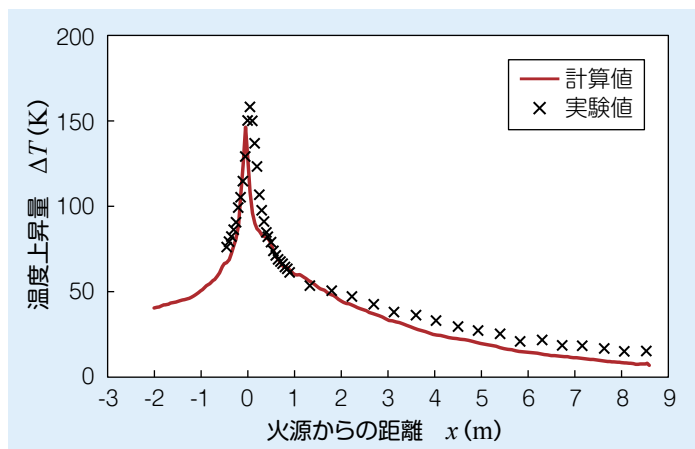


図8 温度上昇量のトンネル長手方向分布の計算値と実験値との比較

とおおむね一致しました。今後はトンネル断面形状の影響や車両の存在の影響を調査し、最終的にはどのような状況でも適切に予測できる数値シミュレーションツールの開発を目指します。また、鉄道事業者が避難誘導の検討に効果的に活用できるよう、トンネル内温度分布や熱気流が降下する距離などを条件ごとにデータベースとして整理する予定です。RRR

文献

- 1) 山内雄記, 齊藤実俊, 斎藤寛之, 梶山博司: トンネル火災時の熱気流の流動特性に関する模型実験と数値計算, 鉄道総研報告, Vol.31, No.9, pp.17-22, 2017
- 2) 齊藤実俊, 山内雄記: トンネル火災時に発生する熱気流の性状, JREA, Vol.60, No.6, pp.12-15, 2017