

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煙の流れを知る

一般の鉄道山岳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、煙の制御ができず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煙の流れを知ることは、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、鉄道総研では、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煙流動予測手法の開発を行っています。火災時の煙の流れは、流体力学的現象と熱力学的現象が関係する複雑な流動現象です。ここでは、トンネル火災に関する実験的な研究と煙の流動現象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



斉藤 実俊
Sanetoshi Saito
環境工学研究部
熱・空気流動研究室長

はじめに

火災時に人命を奪うもっとも大きな要因は、「煙」です。火災による死因の統計によると、「火傷」が約35%でもっとも多く、次いで「一酸化炭素中毒・窒息」が約31%です(2018年¹⁾)。しかし、煙を吸い込んだことにより動けなくなり、後に火傷が原因で死亡した場合も、死因は「火傷」と決定される場合があります。そのため、煙が原因で多くの方が死亡していると考えられます。また、延焼速度よりも煙の移動速度の方が速いため、避難の際には炎だけでなく、煙に十分注意を払うことが重要です。

家屋やビルの部屋内などの閉鎖空間での火災時には、発生した煙の逃げ場が限られているため、煙が天井の下にたまり続け、その厚さを増して(煙層が降下して)いきます。そのため、建築物における火災時の避難安全性能の評価では、シミュレーションや予測式によって求められる各部屋における避難時間と煙層降下時間が注目されます。一方、トンネル火災については、青函トンネルや都市トンネル、また、長大な道路トンネルなど排煙設備を備えて

いるトンネルを対象とした、排煙能力や排煙方向に関する研究が中心でした。しかしながら、一般の鉄道山岳トンネルでは長大であっても換気設備や排煙設備を備えていないことから、場合によっては煙層が降下し避難に多大な影響を及ぼすと考えられます。

鉄道総研では、トンネル内で火災が発生した場合に、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)の流動を予測するツールの開発に取り組んでいます²⁾³⁾。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火災実験について紹介し、熱気流の厚さに関する調査結果を紹介します。

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、天井にぶつ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

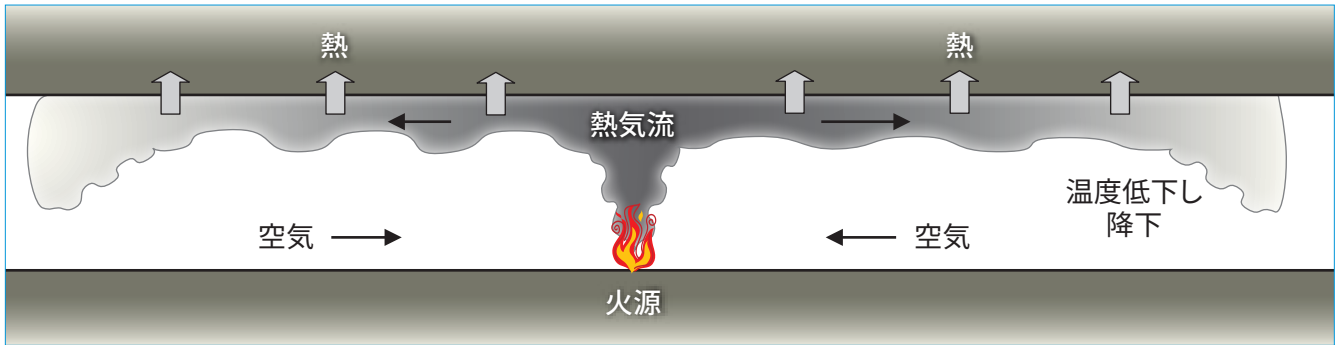


図1 トンネル火災時の熱気流の流れの模式図

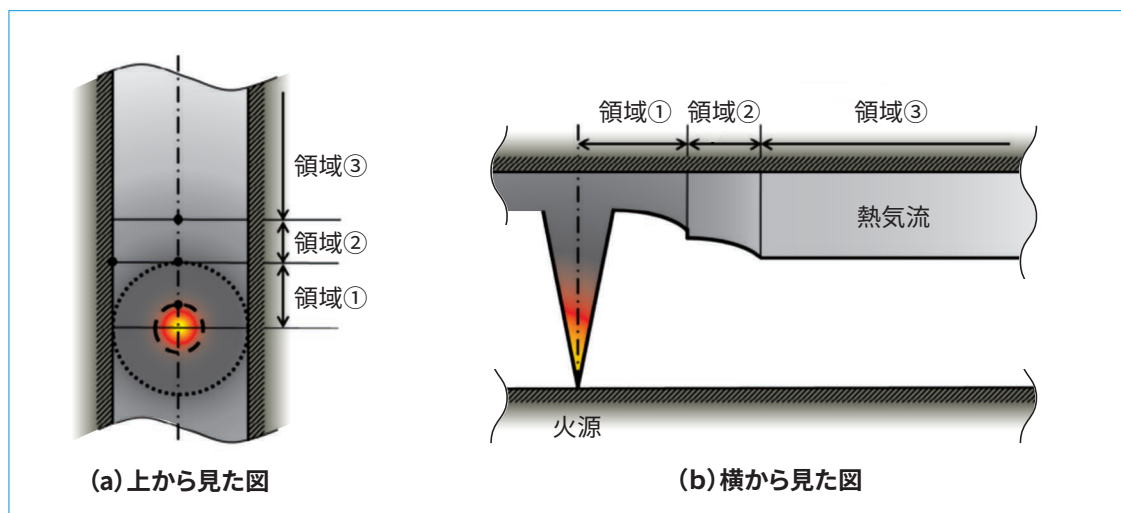


図2 天井流の区分⁴⁾

新鮮な空気が火源に向かって流れます(図1)。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る熱気流は地面に向かって徐々に降下します。

熱気流が天井に沿って頭上を流れていけば、熱気流にさらされることなく避難できる可能性があります。降下した熱気流にさらされると視界が妨げられたり、一酸化炭素などの有毒ガスを吸い込んだりしてしまいます。したがって、熱気流が降下する位置や時間の把握が重要です。

天井流の概略

火災安全工学の研究者である Delichatsios⁴⁾は天井に取り付けられた梁(垂れ壁)の間の細長い空間における熱気流の流れ(天井流)を以下の3つの領域に区分しました(図2)。まず、領域①は、火源からの上昇流が天井面に衝突することで作られる軸対称の流れとなる火源直上の領域、領域②は、軸対称流れが側面に衝突した後から1次元の流れへの遷移領域、そして、領域③は安定した静かな1次元の流れの領域です。

トンネル火災時の熱気流の流動現象はこの垂れ壁間の熱気流の流れと類似しているため、トンネル火災の研究に

においても、同様の区分が行われます。我々は、避難においてもっとも注意しなければならないのは降下してくる熱気流だと考え、火源から離れた領域③における熱気流の温度や速度、熱気流の厚さに注目し研究を行っています。

トンネル模型による火災模擬実験

領域③における熱気流の性状を把握するため、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および速度を測定しました。製作したトンネル模型は長方形断面(高さ $H=0.5\text{m}$ 、幅 $W=0.4\text{m}$ 、全長 $L=21.6\text{m}$)で、実際の単線鉄道トンネルの約10分の1の高

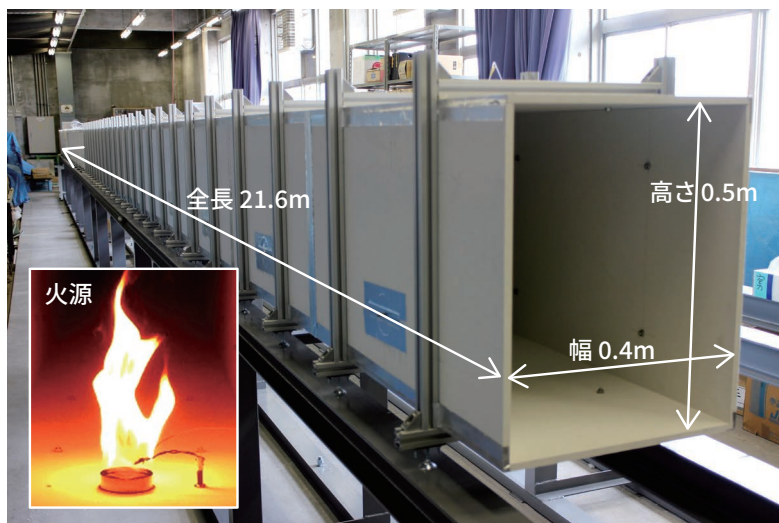


図3 トンネル火災模型実験装置

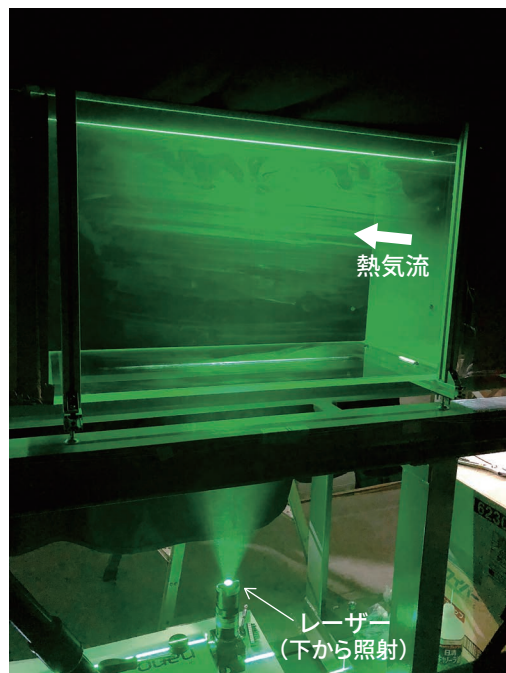


図4 PIVによる流速測定時の様子 (レーザーは下から照射, 熱気流は紙面右から左に流れている)

さです(図3)。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条件に近付けるために、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や速度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厚さを鉛直方向温度分布および鉛直方向速度分布から求めるため、火源からの距離が異なる複数断面において、熱電対

による温度測定およびPIV(※参照)による速度測定を実施しました(図4)。なお、PIV測定実施時には、測定部の一部のみ、アクリル製のトンネル模型を用いました。

実験の結果、鉛直方向温度上昇量分布は、天井付近に最大値をもち、床面に近づくにつれ新鮮空气の温度(大気温度)に減衰するという形状でした(図5(a))。鉛直方向速度分布は、火源から遠ざかる方向を正とすると、天井付近では正方向の成分、トンネル下部では負方向の成分をもつような形状でした(図5(b))。また、鉛直方向温度上昇量分布や鉛直方向速度分布は、火源からの距離に関わらず同様の形状になることがわかりました⁵⁾。以上のことから、天井付近では火源から発生した高温の熱気流が坑口に向かって流

れ、トンネル下部では坑口から流入した新鮮空气が火源に向かって流れていることが確認できました。

熱気流の厚さ

熱気流の厚さの決め方は、以下の2つの方法が考えられます。まず、温度上昇量分布において、天井から温度上昇量の最大値の半分を示す位置までの距離を温度由来の熱気流厚さと定義しました(図5(a))。また、速度分布において、天井から速度の最大値の半分を示す位置までの距離を速度由来の熱気流厚さと定義しました(図5(b))。模型実験結果から求めた熱気流厚さをトンネル高さで無次元化し、火源からの距離で整理しました(図6)。熱気流の厚さは、温度分布由来のものも、速度分布由来のものも、火源から離れるにつれて増加することがわかりました。

さらに、熱気流厚さと温度および速度の関係について理論的な検討を含め考察した結果、火源から離れるにつれて熱気流厚さが増加することには、熱気流の温度の減少よりも、熱気流の速

PIV

Particle Image Velocimetry(粒子画像流速測定法)の略。測定対象の流れに乗った微粒子にシート状のレーザー光を照射し、ハイスピードカメラで撮影された画像を解析することで流れの速度を測定する手法です。さまざまな流体力学的研究において広く使用されています。

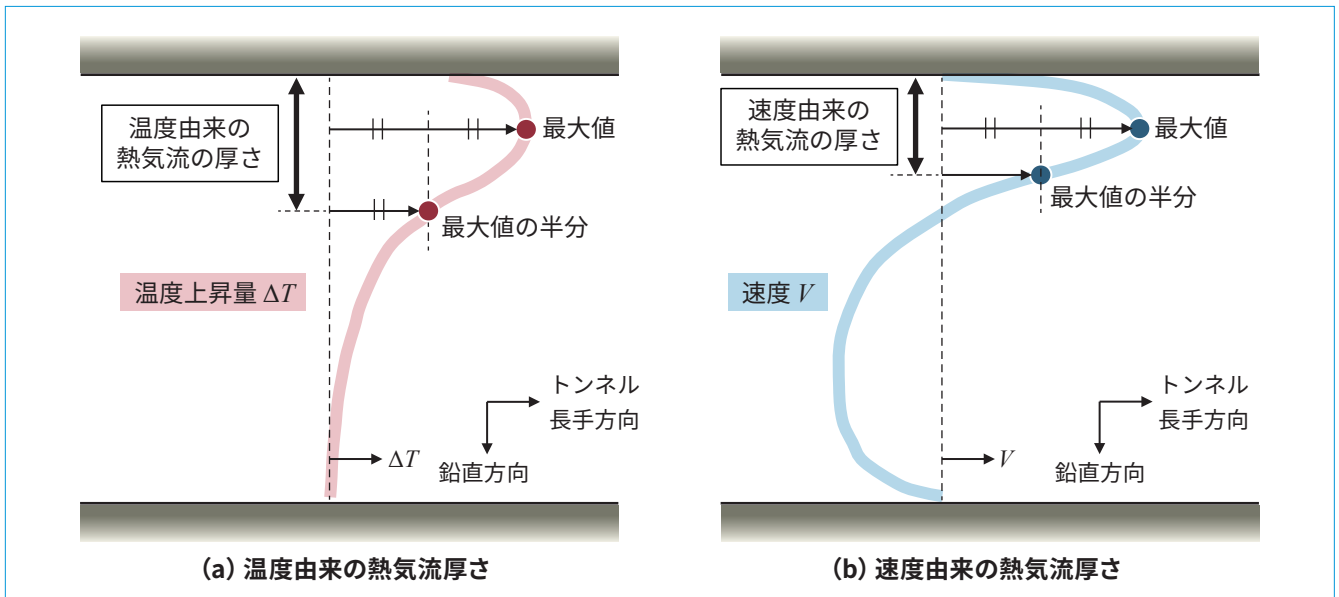


図5 熱気流の厚さの定義

度の減少と強い関係があることが示唆されました⁵⁾。これらの知見をもとに、熱気流の厚さや伝播速度^{でんぱ}を予測するためのツールを整備しています。

おわりに

トンネル火災における熱気流の流動現象および模型実験結果を紹介しました。今回は単純な条件でしたが、今後は車両の存在を考慮するなど適用範囲を拡張していく予定です。また、これらの実験結果は、数値シミュレーションによる結果の精度を検証するためにも使用しています。トンネル火災の研究においては、実物大の実験は用地の確保や安全性の点から1条件でさえ実施が困難のため、数値シミュレーションの担う役割はますます大きくなっています。一方で、正しく模擬しなければ得られる結果の信頼性がなくなってしまうため、理論や実験結果に裏付けられた数値シミュレーションツールの開発を目指しています。[RRR]

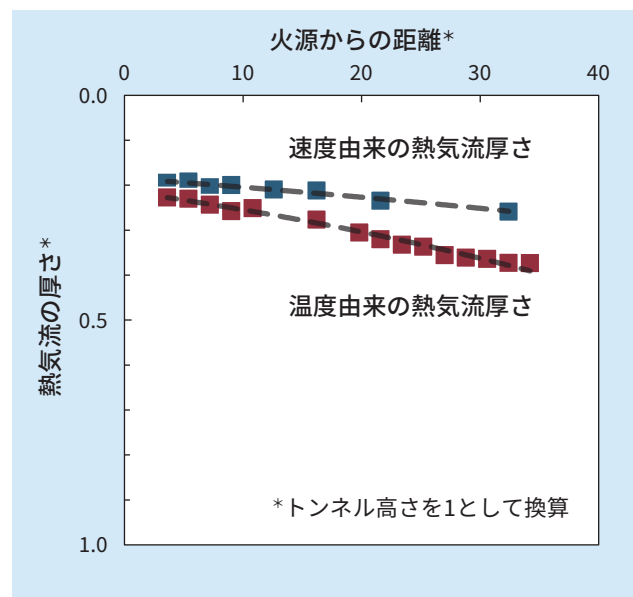


図6 熱気流厚さのトンネル長手方向変化 (下向きが正)

文献

- 1) 消防庁：令和元年版 消防白書, https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r1/items/r1_all.pdf (入手日：2020/08/03)
- 2) 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
- 3) 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
- 4) M.A.Delichatsios：The flow of fire gases under a beamed ceiling, Combustion and Flame, Volume 43, 1981
- 5) 山内雄記, 齊藤実俊, 岡泰資：トンネル火災時天井流の厚さと温度, 流速の関係, 第4回トンネル換気・防災シンポジウム, 2019