

地下空間における火災性状に関する研究  
Study on Fire Behavior in an Enclosed Space  
- In cases of Underground Long Space and Atrium Space

佐藤博臣\*, 栗岡均\*, 須川修身\*\*, 岡泰資\*\*\*

Hiroomi SATOH, Hitoshi KURIOKA, Osami SUGAWA and Yasushi OKA

Keyword: Underground long space, Atrium space, Fire behavior, Froude modeling

The objective of this study is to investigate the fire behavior in enclosed spaces of underground long space (horizontal space) and of tall-and-narrow atrium space (vertical space) connecting the corridor and staircases. These two spaces have common characteristics, i.e. enclosed space separated from free boundary space, and this property give the limitation on air entrainment into flame and hot current flow. Reduced and full scale tests were carried out for both tall-and-narrow atrium space and underground long space. The similarity on the flow behavior between these models was certified in a fire zone of upward and downward direction with and without giving the ventilation air. Froude modeling technique was suggested as an effective tool to characterize the fire behavior for both spaces.

## 1. まえがき

国土の狭小な我が国において地下空間の有効利用は必要不可欠な検討課題である。しかるに、地下空間の利用目的から分類すれば、道路トンネル・鉄道トンネル・地下街・地下駐車場など定常的に不特定多数の人々が利用する施設、備蓄施設や工場など限られた少数の人々が利用する施設、ならびに殆ど保安要員以外は立ち入ることのない電力・上下水道・情報ケーブルなどの管路に大別される。今後さらに空間利用の範囲の拡大が予想されるが、いずれにしても長時間の継続的利用と不特定多数のしかもさまざまな行動特性を持つ人々の利用が前提となる。

このとき、機能的かつ快適で安全な生活や行動をこれらの空間で行うためには、火災に対する安全性の確保も従来以上に最重要な課題となる。この火災安全対策の合理的な設計検討には、最近の建築物の火災安全設計で行われている、対象とする空間での火災進展の特徴を細かに反映させ、守るべき対象の安全目標との兼ね合いで性能的に対処する方法と同様な方法を採用することが必要となろう。一方、空間の安全目標は施設ごとにその公共性なども踏まえてさまざまであるが、火災の進展性状は空間の用途に支配される可燃物の種類や量、空間の形状・規模、空間の周壁条件、給・排気の状態などに左右される。また、燃焼性状に大きな影響をおよぼす要因の一つとしての地下空間の形状は、地下街の店舗部分や駐車場などのように比較的天井高さの低い大面積の空間、劇場やホールなどの立方体に近い大空間、地下街の通路間の接点などの緩衝広場などに見られるスポット的な筒状の吹き抜け空間、さらにトンネルや管路あるいは地下街の通路などのチューブ状の空間などに分類される。

本研究では、これらの空間形態のうち、特に、形態的に火災気流の流動性状が制限されるトンネルや地下街の通路に見られるチューブ状の空間、および地下街の通路の接合部などに見られる筒状の天井の高い空間を研究対象として取り上げ、それぞれの空間形状と火災挙動の関係のモデル化を試みた。また、火災挙動のモデル化に際しては、人命の安全確保との関係が大きい火災初期の火災挙動と煙の流動特性について着目した。

---

\* 鹿島建設技術研究所 主管研究員

\*\* 東京理科大学火災科学研究所 助教授

\*\*\* 横浜国立大学安全工学部 助手

しかるに、これらの空間における火災挙動の基本的な特性は、燃焼によって生じた浮力とこれに抗する慣性力の比としてのフルード数を用いれば、両空間共に空間因子(C)を媒介変数としてフルードモデルの形状で自由空間における場合と同様に表現できる。

図-1～3 に示す様に模式化して考えれば、筒状空間は垂直の空間であるのに対し、チューブ状空間は筒状空間を傾斜あるいは水平方向へ空間を倒しただけで、拡散しようとする火災気流の方向の違いはあっても同じ形式で(1)式のごとく表現される一連の理論によって説明できよう。

$$\left( \frac{\Delta T}{T_a} \cdot \frac{1}{Fr} \right) \propto \left( \frac{1}{C} \right)^n \cdots (1)$$

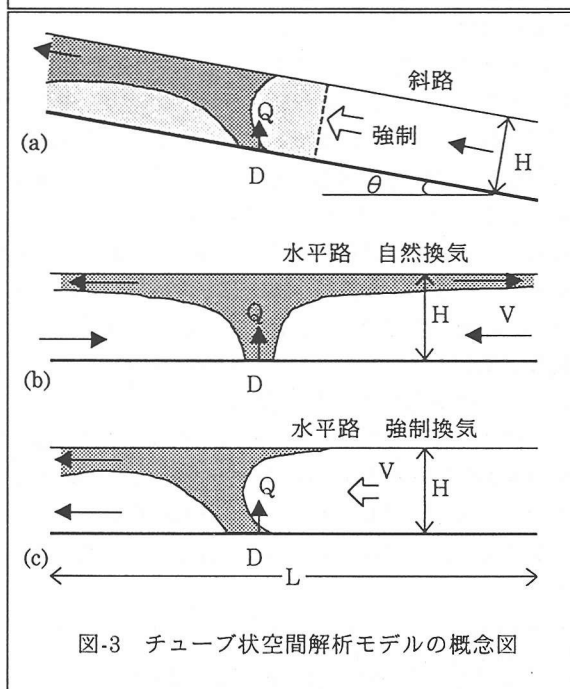
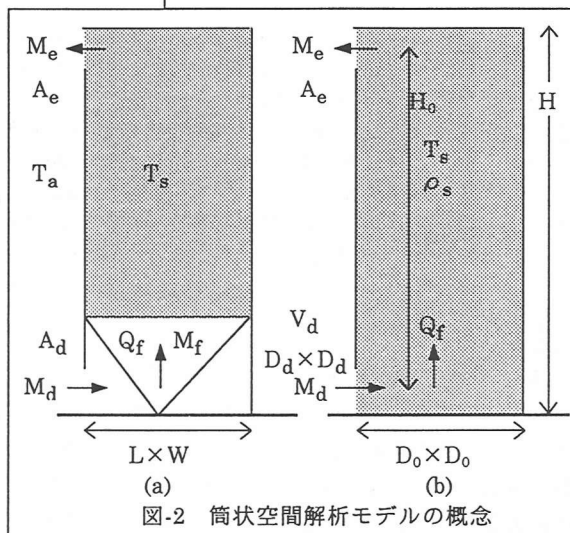
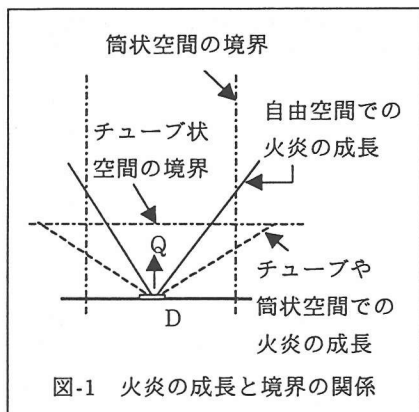
すなわち、本研究で対象とする空間では図-1 の破線で模式化したようにある高さ以上にブルームが成長する過程で空間の規模に関連して生ずる境界(一点鎖線)によって空氣の巻き込みが制限され、火災やブルームの特性は自由空間での性状とは異なる。すなわち、火災やブルームへの空氣の巻き込みは、下部においては、給気口の影響を受けその形状は王冠状に広がり、扁平な温度分布となるとともに同じ高さではピーク温度も低い傾向を示すこと、火源軸上の温度減衰傾向については徐々に自由空間の性状に近づくが、空間の形状と温度成層の影響を受ける。これらのことはチューブ状空間の研究に先立つ 2 章に概説する筒状空間の模型や実建物での燃焼実験の結果から導かれた。また、Lee, C.K.<sup>1)</sup>によれば、トンネル内での遡上阻止について煙層が床から天井まで存在することとして、(2)式のように限界フルード数

$$Fr_c = \frac{gHQ}{\rho C_p A T_f V_c^3} \cdots (2)$$

を提案している。

以上のことから、チューブ状空間の断面形状や傾斜の条件、ならびに換気条件などとともに発熱速度を変化させた実験から、空間の幾何学的な条件としての空間因子が火災挙動にどのように影響をおよぼすかを示す各特性について(1)式の形状で表現される実験式が導けると判断した。

すなわち、空間の上下あるいは両端に開口部があるときの空氣や火災・ブルームの流れは、燃焼によって生じる区画内外の温度差(火災の初期を除いて一般に内部が高い)や外部の風速・風向に支配されるので、空間因子(C)を変えた実験装置を用いて、温度差を発生させる火源規模や、外部の風速・風向



に相当する強制換気量などを変えた実験を行った。

図-2, 3はそれぞれの空間に対する解析モデルを誘導するための概念図で、図-2は筒状空間での実際のブルーム形状および煙層（熱気流）の流動性状が(a)のごとなるものを簡便のために(b)のように均一、定常状態のごとく仮定したもので、この図より2章に示した(3)～(6)式を導いた。一方、図-3はチューブ状空間の解析モデル構築に関連した模式図である。図-3の(a)は斜路における実際の火災あるいはブルームは図中の濃い網掛け図のような性状を見せるが、モデルでは(2)式に示したように、薄い網掛け図のように均一な分布を仮定して導かれている。同様に(b), (c)は水平路における自然および強制換気下での性状をモデル化したものである。いずれの場合も、基本変数である $Q$ ,  $\theta$ ,  $D$ ,  $H$ ,  $V$ で模式化できる。

## 2.筒状空間における火災挙動

### 2.1.筒状空間の火災挙動モデル

拙論<sup>2)</sup>では、アトリウム空間の物理的規模・形状・用途に応じた標準火源が与えられた場合の適切な給気・排煙口の位置・大きさの決定に関する簡易尺度を提案した。すなわち、概要設計用の指標の誘導を意図し、空間因子と火源条件が、空間の温度上昇と給気開口部の風速にいかん作用するかを明らかにした。このとき、避難安全上の観点から特に温度の予測が100℃未満の範囲で良く一致することを心掛けた。

アトリウム内の煙層制御の概念は自然・機械等の排煙方式によらず図-2(a)に示す形状をとると考える。しかし本研究では特に筒状の空間では空気の流れが制限されるため比較的短い時間で空間が煙で汚染されることを考慮に入れて、図-2(b)のように定常時には、煙層は空間の下部まで発達するとした。なおこのモデルでは、火源はアトリウムの底部にある場合を対象とし、かつ給気・排煙口はそれぞれ開放しているとした。

アトリウムのアスペクト比と開口条件の関数として空間因子  $C$  は(3)式で表わされる。

$$C = \left( \frac{j}{C_D m} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{2K^{1/2}}{1+K^{1/2}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{H^2}{A} \right)^{\frac{1}{3}} \dots (3)$$

提案式の誘導に際して、質量保存式、周壁への熱損失を考慮したエネルギー収支式、運動量保存式などの基礎式を用いることにより<sup>2)</sup>開口部フルード数は(4)式で表現できる。

$$Fr_d = C \left( \frac{Q_{fd}^*}{Y^*} \right)^{\frac{2}{3}} \dots (4)$$

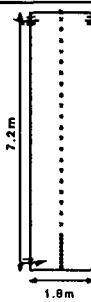
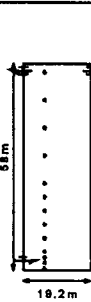
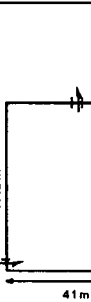
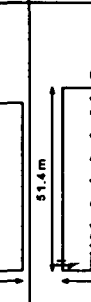
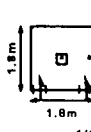
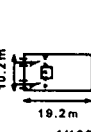
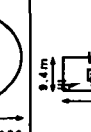
自然排煙の場合の温度上昇は(3)式より(5)式を得る。

$$\frac{\Delta T}{T_a} = \left( \frac{Q_{fd}^*}{Y^*} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{C_D C^{1/2}} \right) \dots (5)$$

(5)式に(4)式を代入すれば、(1)式に示したものと同様の形状の(6)式を得る。

$$\frac{\Delta T}{T_a} \cdot \frac{1}{Fr_d} = \frac{1}{C_D C^{3/2}} \dots (6)$$

表-1 アトリウム実験条件一覧

|                               | Reduced Model                                                                       | Full-Scale Model                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                               |                                                                                     | O-Bld                                                                               | B-Bld                                                                               | A-Bld                                                                                |
| Section                       |   |   |   |   |
|                               | 1/100                                                                               | 1/1000                                                                              | 1/1000                                                                              | 1/1000                                                                               |
| Plan                          |  |  |  |  |
|                               | 1/100                                                                               | 1/1000                                                                              | 1/1000                                                                              | 1/1000                                                                               |
| Inlet Area [m <sup>2</sup> ]  | 0.0675                                                                              | 26.1<br>33.9<br>38.8<br>46.2                                                        | 0<br>4<br>8                                                                         | 2<br>5.6                                                                             |
| Outlet Area [m <sup>2</sup> ] | 0.0675                                                                              | 0<br>2<br>4<br>6<br>12.1                                                            | 0<br>3<br>8.5<br>17<br>34                                                           | 0<br>6.3                                                                             |
| HRR [kW]                      | 1.6<br>3<br>6<br>12<br>24                                                           | 83<br>361<br>748<br>1684                                                            | 76.5<br>171<br>402<br>1206<br>1608                                                  | 76.5<br>171<br>402<br>804                                                            |

いずれにしても自然排煙・強制換気の場合の開口部風速や空間の温度上昇は開口部基準での無次元発熱量と空間因子から導ける。しかし(4),(5)式には周壁の熱損失特性に関する無次元数  $Y^*$  と隙間の影響が含まれている。そこでこれらの影響を比例定数と見なして、その実用的な範囲の値を以下の実験により導くこととした。

### 2.2.実験条件と方法

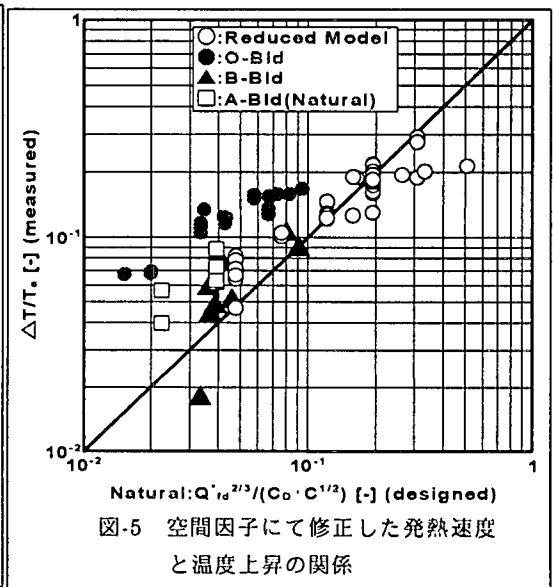
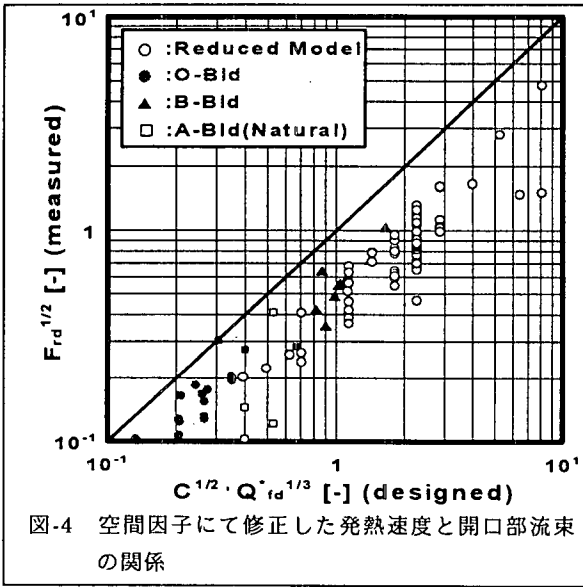
筒状空間については表-1 に示すように、1.8m×1.8m、高さ 7.2m の模型および 3 種類の実大空間で実験を行った。模型実験ではプロパンガス、実大実験ではメタノールあるいは灯油を燃料とした。

模型は、側壁の一对と天井・床は厚さ 21mm の石膏ボード ( $k=0.16 \times 10^{-3} \text{ kW/m/K}$ ,  $\rho=950 \text{ kg/m}^3$ ,  $c=0.8 \text{ kJ/kg/K}$ 、火炎性状の観察のために壁面的一部分床上 0.9m までは 6mm 厚さの網入りガラスとした。), 他の一对は 6mm 厚さのガラス壁 ( $k=0.65 \times 10^{-3} \text{ kW/m/K}$ ,  $\rho=2540 \text{ kg/m}^3$ ,  $c=0.7 \text{ kJ/kg/K}$ ) である。開口部は同じ厚さの網入りガラスでスライド式とし、給・排気開口部とも高さ 0.225m×可変幅(最大開口幅 1.8m)とした。この実験の全シリーズを通じての基準とした開口幅は 0.3m である。

### 2.3.実験結果

筒状空間について、模型実験から空間および開口部の形状指数を基に空間の温度上昇と開口部からの流入空気の流れを予測する上記(4),(5)式を見出し、これが模型および実大実験でも合致することを確認した。

図-4,5 に実験の結果を示す。結果は前節に提案したモデルに基づいて得た関係式に沿って整然と整理されていることがわかる。図-4 は開口部の風速の実測値による  $Fr_d^{1/2}$  と断熱条件の  $C^{1/2}Q_{rd}^{1/3}$  との関係、図-5 は  $\Delta T/T_\infty$  と  $Q_{rd}^{2/3}/C_D C^{1/2}$  の関係である。これらの図から断熱条件での予測値に対して、いずれの実測値もある規則性を持っていることを示している。ここで得られた実測値の曲線が理論式のそれに平行な関係が認められ、その切片の違いは実験装置の周壁からの熱損失や隙間によるものと考えられる。強制換気についても図は省略するが、同様なモデルで説明できることを確認した。



## 3.チューブ状空間における火災挙動

### 3.1 火災挙動に関する要因

チューブ状空間での火災安全に対する要求項目およびこれらの要求を達成するために考慮すべき検討項目を整理したのが表-2 である。

火災安全対策の基本事項としては、未然防止、公共的機能の維持および人命安全の 3 項目が考えられる。まず未然防止策としては、例えば自動車トンネルの話に限定して考えると危険物質の通行規制や通行可能であってもその量に対する制限、エスコート方式による一般通行車両との区別、早期発見や初期消火に重要な

表-2 チューブ状空間における要因

| 安全対策 | 未然防止                                                                                                                                                        | 公共的機能の維持                                                                                                                                                                              | 人命安全                                                                                                                                        |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 要求項目 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・危険物種類・通行量の制限</li> <li>・計画的な車両の運行</li> <li>・維持管理体制の強化</li> <li>・早期感知</li> <li>・消防設備の充実<br/>(消火水、薬剤の処理も含む)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造的条件</li> <li>必要な耐火性能</li> <li>・機能的要件</li> <li>火災領域の局限化</li> <li>隣接空間との区画化</li> </ul>                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・避難計画</li> <li>避難方法・経路の指示</li> <li>スムーズな情報伝達</li> </ul>                                              |
| 検討項目 | <ul style="list-style-type: none"> <li>車両事故発生確率</li> <li>事故発生場所</li> </ul>                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>標準火源(燃焼効率)</li> <li>火災形状</li> <li>火源近傍の温度分布</li> <li>熱気流の温度</li> <li>遮断ドア、貫通部の耐火性能</li> <li>空間形状や組み合わせ(圧力分布)</li> <li>換気流と熱気流との相互関係</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>避難経路</li> <li>出入口の数とその位置</li> <li>煙・熱の伝播速度</li> <li>遡上阻止速度</li> <li>2層分布維持の有無</li> <li>照度</li> </ul> |

役割を果たす火災感知器や消火設備の充実が図られている。また公共的な機能の維持に関しては、構造体自体の耐火性能の強化、電力・通信ケーブルなどのライフライン設備空間との区画化の強化などによる、火災伝播阻止対策等が講じられている。さらに弱者に対してもスムーズな避難を行うために、避難方法や避難経路の指示、的確な情報の伝達が要求される。

しかるにチューブ状空間での火災挙動を把握するためには、どこで、どの程度の火災が発生するかが問題となる。まず過去 25 年間に国内で発生したトンネル内車両火災について場所とトンネル延長の関係を図-6 に整理した。図示のごとく、トンネル延長と火災発生場所には明確な相関が認められない。このことから、トンネル内での火災発生場所は、特定の場所ではなくあらゆる場所を想定する必要があることを意味し、火災の頻度を別にすれば道路上で発生する火災の可能性と同様の危険がトンネル内にもあるといえよう。

また、トンネル内での火災事故発生頻度については、トンネルが長くなるほど事故発生率が大きくなる傾向がある。一方、トンネル内で発生した火災規模についても十分な統計資料が報告されているわけではないが、通常的高速道路上で発生する車両火災の最頻度のものに、何倍か(倍率については今後の課題)の安全率を乗じたものを想定すればよいと考える。ここでは火源の大きさを、火災の高さが模型などの天井に達しない規模のものから天井高さ以上の長さになる規模のものまで数段階を用意し、各種の特性値がそれぞれの状況とともにどの様に変化するかを調べることにした。例えば、表-3 に示すように実大実験から得られた火災規模に関してまとめた H.Ingason の報告がある<sup>4)</sup>。幾何学的に実大の 1/30 縮尺模型トンネルを使用する場合、模擬火源での 1kW は実大での約

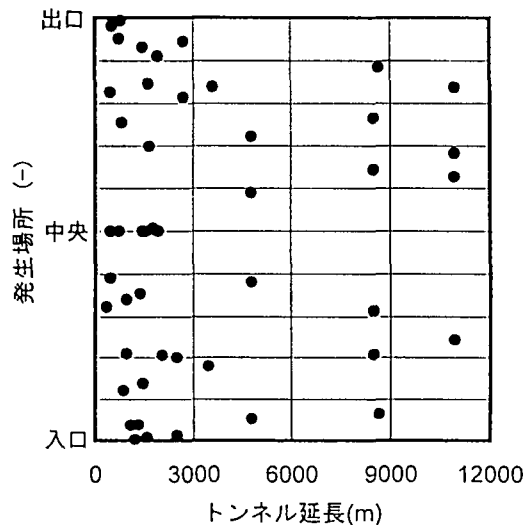


図-6 トンネル内火災発生場所<sup>3)</sup>

表-3 各種燃焼物の発熱速度の比較<sup>4)</sup>

| 可燃物種類        | 最大熱放出速度(MW) |
|--------------|-------------|
| 普通乗用車        | 12          |
| 旅客列車         | 13.5        |
| トラック 1 台分の積荷 | 17          |
| バス           | 25          |
| 地下鉄車両        | 35          |
| 貨物トラック       | 150         |

4.9MWに相当する。

さらにトンネルではその長さや通行形態によりさまざまな換気方式が採用されている。一般に一方通行で10～12m/sec以下、対面交通で7m/sec以下の換気が施され、火災時には2～3m/sec程度の送風が考えられている。先ほどと同様に1/30縮尺模型での1m/secは実大での5.48m/secに相当する。

3.2 チューブ状空間の火災挙動実験

ここでは火災挙動、特に煙や熱の流動性状に大きな役割を果たすと考えられる火源近傍性状に注目し、天井に火災またはブルームが衝突した位置とこの温度がどの様になっているかについてのみ考察する。

3.2.1 実験方法

a. 模型実験

表-4に実験条件を示したように、Phase1では1ユニット(延長0.9m)での自然換気条件、Phase2では5ユニットでの強制換気条件、Phase3では10ユニットでの自然換気および強制換気条件とした。

使用した縮尺模型の断面形状は0.3m×0.3mの矩形と高さ0.325m最大横幅0.3mの馬蹄形(断面積は同一)の2種類とした。これは実大の1/15～1/30の大きさに相当する。模型自体は、@3mmの鉄製で火源を設定した1ユニットはトンネル全体を、その他のユニットは天井部のみを厚さ10mmの耐火ブランクで被覆した。模擬火源として砂バーナー(10cm角)を用い、トンネル床面高さ(火源表面とトンネル床面は同じ高さ)に設置した。燃料にはLPGを用い、供給燃料量を調整することにより発熱速度を変化させた。火源近傍の温度場計測用に水平・垂直方向の任意の位置に網目状に線径0.56mmのK-熱電対を張り巡らした。さらに天井直下に形成される熱気流の温度は火源直上を原点として10cm間隔に天井面下1cmで測定した。

b. 中規模実験

中規模実験装置として使用した模型の概略および温度および熱気流風速等の測定位置を図-7に示す。このトンネル想定部の空間形状は1.6m(H)×0.9m(W)×12.8m(L)で、その断面形状は矩形である。天井部および側壁部は鉄筋コンクリート、床面は仮想床(厚さ10mm合板上に厚さ10mmの石膏ボードを重ね合わせ)で構成されている。

トンネル想定部の両端には図-7に示した①～③の開口部を有する隣室があり、この隣室を通じて給排気を、さらに換気風速の調整はダンパーにより行った。強制換気時の給気口①の面積は1.54㎡(開口下端高さ1m、上端高さ2.6m)である。同様に排気口の面積は②、③とも0.68㎡(②下端高さ0.12m、上端高さ1.32m、③下端高さ1.61m、上端高さ2.81m)である。測定項目は、温度、流速、燃料重量であり、計測点数は温度用にK-熱電対91点、流速測定用(2方向管)に8点、熱線風速計による3点、および重量測定用に電子秤1点である。実験条件一覧を表-4に示したように、計9回の実験を行った。燃料にはメタノールを用い、燃焼時間が20分程度になるように燃料量を火源の大きさに合わせて調整した。

表-4 実験条件一覧

| 実験                | 実験<br>パターン<br>名 | 空間<br>長さ<br>[m] | 燃料  | 火源<br>面積<br>[㎡] | 発熱<br>速度<br>[kW] | 換気条件<br>[m/s]or<br>設定 |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----|-----------------|------------------|-----------------------|
| 模型<br>実験          | Phase1-1        | 0.9             | L   | 0.01            | 0.9～<br>7.5      | 自然(0.0)               |
|                   | Phase1-2        |                 |     |                 |                  |                       |
|                   | Phase2-1        | 4.8             | L   |                 | 1.5～<br>12       | 0.1～1.0               |
|                   | Phase2-2        | 5.2             |     |                 |                  |                       |
|                   | Phase3-1        | 10.2            | L   |                 | 4～21             | 自然(0.0)<br>～1.0       |
|                   | Phase3-2        | 10.35           |     |                 |                  |                       |
| 中規<br>模<br>実<br>験 | F-1             | 12.8            | M   | 0.09            | 23               | 1.6                   |
|                   | F-2             |                 |     | 0.18            | 44               | 1.5                   |
|                   | F-3             |                 |     | 0.50            | 180              | 1.4                   |
|                   | F-4             |                 |     | 0.09            | 28               | 0.7                   |
|                   | F-5             |                 |     | 0.18            | 40               | 0.7                   |
|                   | F-6             |                 |     | 0.50            | 170              | 0.7                   |
|                   | N-1             |                 |     | 0.09            | 37               | 0.3                   |
|                   | N-2             |                 |     | 0.18            | 60               | 0.3                   |
|                   | N-3             |                 |     | 0.50            | 180              | 0.5                   |
| 実大<br>実<br>験      | 1               | 400             | M   | 0.25            | 89               | 自然(0.0)               |
|                   | 2               |                 | M   | 0.50            | 198              | 自然(0.0)               |
|                   | 3               |                 | M   | 2.0             | 897              | 自然(0.0)               |
|                   | 4               |                 | K   | 1.0             | 391              | 0.8                   |
|                   | 5               |                 | K   | 0.25            | 988              | 1.1                   |
|                   | 6               |                 | K   | 0.25            | 557              | 0.9                   |
|                   | 7               |                 | K   | 0.5             | 2246             | 1.0                   |
|                   | 8               |                 | K+M | 0.25            | 396              | 0.6                   |
|                   | 9               |                 | K   | 0.25            | 676              | 0.9                   |
|                   | 10              |                 | M   | 1.0             | 397              | 0.9                   |
|                   | 11              |                 | M   | 0.25            | 97               | 自然(0.2)               |

燃料:L=LPG,M=メタノール,K=灯油

なお、平均断面風速の算出は、トンネル内の流速分布を求め、給気口側、排気口側および火源断面部の流量を比較し求めた。

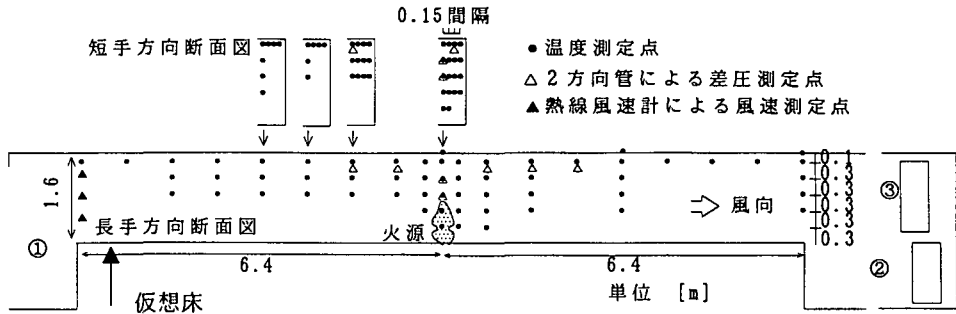


図-7 中規模実験空間

### c. 実大実験

実験坑は通産省九州石炭鉱山技術試験センターの 400m 試験坑道を使用した。この試験坑道は全長 400m、内径 1.38m、高さ 2.3m の馬蹄形断面(断面積 5.4m<sup>2</sup>)を有しており、全体が給気側から排気側に向かって約 1/100 の傾斜を保ちながら平面的に緩やかな円弧を描いている。この試験坑道の給気側から約 80m の地点に模擬火源を設定した。燃料にはメタノールおよび灯油を用い、換気条件は自然換気および強制換気とした。なお燃焼部の壁体表面は、厚さ 9mm および 16mm の鉄板で保護されており、この内部はコンクリートで母岩に接している。表-4 に実験条件を示したように計 11 回の実験を行った。

換算した平均発熱速度は 89～878kW(燃料量は 1 ケースあたりの燃焼継続時間が 20 分程度に相当する量)、火源から給気側 25m の位置で換気流の代表流速を熱線風速計にて 1 点測定し、予備計測の風速分布を基に平均断面風速に換算した。その結果、平均断面風速は 0.6～1.3m/sec であった。火源近傍の温度場の性状を把握するために、火源近傍部に 69 点、トンネル長手方向に 35 点(天井下 10cm の位置)設置した。また煙層の温度を計測するために、火源から給気側へ 25m と排気側へ 75m の範囲は 5m 間隔、排気側へ 75～175m の範囲は 10m 間隔、それ以上の排気側への範囲は 30m 毎に K-熱電対を配置した。

### 3.2.2. 個々の実験結果

実験結果を総合的に観察すればチューブ状空間では、模型と実大との間に、自然換気および強制換気ともに連続的な良好な関連が認められた。また、断面形状については矩形と馬蹄形では、それぞれ特徴的な差異が確認され、フルードモデルでモデル化できることがわかった。それぞれの結果は以下の通りである。

#### a. 模型実験

##### ① 直線近似での火炎の長さ

図-8 に直線近似での火炎の長さを示す。具体的には、網目状に張り巡らせた熱電対の出力をもとに、等温度線図を作成し、ある温度上昇曲線 ( $\Delta T=350K$ ) と火炎あるいはブルームの主軸の交点から火源表面までの直線距離を火炎の長さとして定義した。

自然換気でトンネル天井に接炎しない条件では自由空間での火炎の長さと同程度の長さを示したが、接炎する条件ではより火炎が伸びた結果となった。強制換気でしかも接炎しない条件では、無風時の自由空間での火炎の長さよりも短く、この結果は有風時の自由空間での火炎の長さに対する知見と一致した。これは火炎の長さを温度上昇から判定したため強制換気流によ

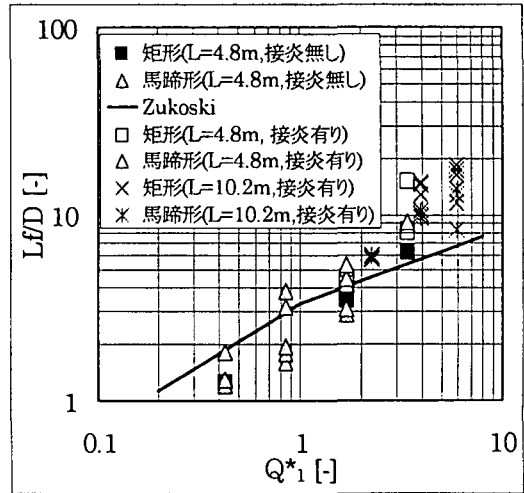


図-8 発熱速度と火炎の長さの関係

る冷却効果と燃焼領域への空気供給量が無風時に比べ、増大することによって考えられる。

一方、火炎先端が天井に接する場合、断面形状、空間長さによらず、無風時の自由空間での火炎の長さよりも伸びた結果となった。さらに長手方向の長さが同じ場合、断面形状が馬蹄形の方が矩形よりも火炎が長くなったが、これは同条件下では馬蹄形の方が矩形よりも高温領域が広がっているためと推察される。

## ②火炎の傾斜角度

火炎あるいはブルームの主軸の最大勾配を表わす接線が鉛直方向からの角度で定義した火炎の傾斜角度( $\theta_1$ )と  $V/U_0$  (平均断面風速/軸上鉛直上昇速度) の関係を図-9 に示す。ここで  $U_0$  は McCaffrey<sup>9)</sup> が提案した自由空間での火源中心軸上の上昇速度を意味する。設定した発熱速度における自由空間での火炎の長さを Zukoski<sup>9)</sup> のモデルにて算出し、この高さが模型トンネルの天井高さよりも低い場合 (接炎しない条件) には間欠火炎領域 ( $U_0 \propto \dot{Q}^{1/5}$ ) のモデルを、天井高さよりも高い場合 (接炎する条件) には火炎領域 ( $U_0 \propto z^{1/2}$ ) のモデル式を適用した (ただし上昇速度を定義する高さを  $z=H/2$  とした)。その結果、接炎の有無に係わらず傾斜角度と  $V/U_0$  には一定の関係が成り立っていることが確認できた。

## ③天井近傍の最高温度呈示位置

横風を受けた火炎やブルームは傾斜し、その先端が天井面で接した位置が最高温度を呈示し、その位置から風下側の天井直下の温度は徐々に減衰する。図-10 は  $300^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C}$  の範囲の火炎またはブルームが接した位置について無次元化して整理したものである。 $Fr/Q^{*2/5}$  を横軸に、縦軸に  $Fr^{1/2}(H-H_0+L_1)/H$  で表すと、0.2 以下では比例的な関係を示し、0.2 以上では一定の値を示すことが得られた。

## b. 中規模実験および実大実験

### ①自然換気時の温度減衰

図-11 に自然換気時のトンネル長手方向への煙層の温度変化を示す。これより熱気流の移動距離と煙層温度には

$$\Delta T / Q^{2/3} \propto (L'/H)^n \quad \cdots (7)$$

(a)  $L'/H < 0.6$   $n = -2/3$ , (b)  $0.6 < L'/H < 15$   $n = -2/5$ , (c)  $15 < L'/H$   $n = -5/2$ , なる関係があり、それぞれの領域は、(a)火源軸上領域、(b)ブルームが天井に衝突する領域、(c)壁体の仕様、表面の濡れ状態により変化する領域に相当すると考えられる。

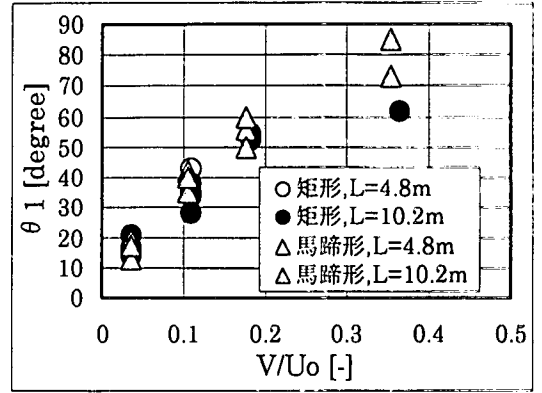


図-9 火炎の傾斜角度

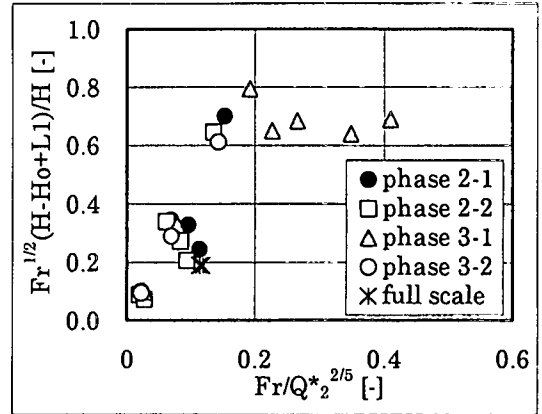


図-10 最高温度呈示位置

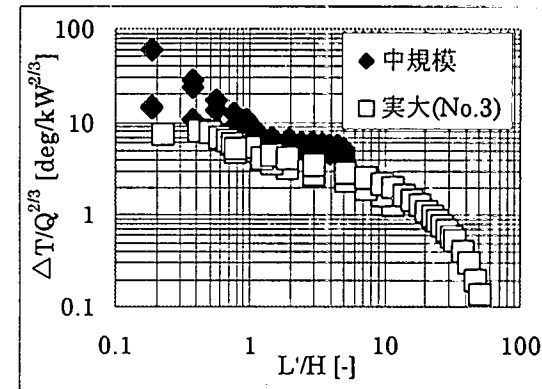


図-11 熱気流の移動距離と上昇温度の関係

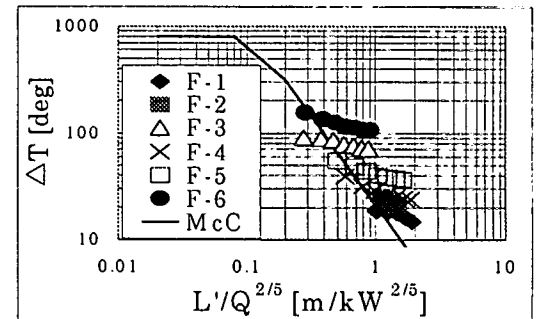


図-12 発熱速度で規格化した距離と温度上昇の関係

## ②強制換気時の温度減衰

中規模の強制換気時の天井面軸上温度分布を図-12 に示す。長手方向の性状は自由空間よりも緩やかな温度減衰を示した。風速が強く、発熱速度が小さい場合は自由空間の性状に近づいた減衰を示した。また強制換気時であっても、換気条件が同じ場合には、実験に用いた発熱速度の範囲ではトンネル長手方向の温度減衰と熱気流の移動距離には規則性が伺われる。

## ③自然、強制換気時両者の比較

図は省略したが自然換気時の温度減衰と比較すると、火源近傍では強制換気の方が、一方火源から遠ざかった領域では自然換気の方がそれぞれ温度減衰が大きいことが明らかとなった。

### 3.2.3. 模型から実大に共通する火災挙動

#### ①強制換気時の熱拡散

ブルームが火源から天井まで流動する間に熱拡散し、天井近傍で最高温度を示すと考え、模型、中規模および実大実験それぞれの初期温度に対する温度上昇比と  $Q^*_2/Fr^{1/2}$  の関係を示したのが図-13 である。中規模、実大実験では炎が接炎しなかったため、ここではそれにあわせて模型の結果も接炎しなかった結果を選択した。ここで無次元発熱量およびフルード数を算出するにあたり代表長さとして火源表面からトンネル天井までの距離を用いた。この図から温度上昇比と  $Q^*_2/Fr^{1/2}$  の関係は実験規模に係わらず、一定の関係が成り立つことが、また強制換気速度が大きくなるにしたがい、温度上昇比が小さくなることが確認された。

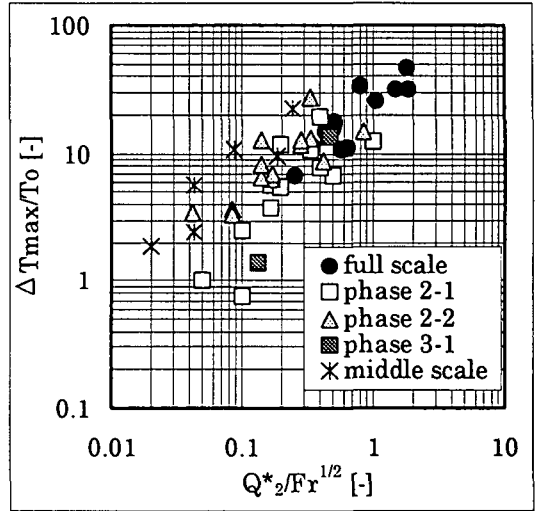


図-13  $Q^*_2/Fr^{1/2}$  と  $\Delta T_{max}/T_o$  の関係

#### ②自然換気時のブルーム幅

自然換気時のブルーム幅を自由空間でのブルーム幅と比較したのが図-14(実大 No.3)である。ここでのブルーム幅は温度上昇から定義した幅に相当する。火源面積の影響を取り除くため Thomas の仮想点源モデル<sup>7)</sup>を導入し、さらに火源からの熱エネルギーのみによる温度上昇を捉えるため、トンネル天井直下に蓄積された高温層の影響を取り除いた。その結果、自由空間でのブルーム幅に比べ 2~3 倍程度広がった分布形状を示した。さらに下部領域では長手方向、短手方向ともほぼ同じ広がり形状を示した。

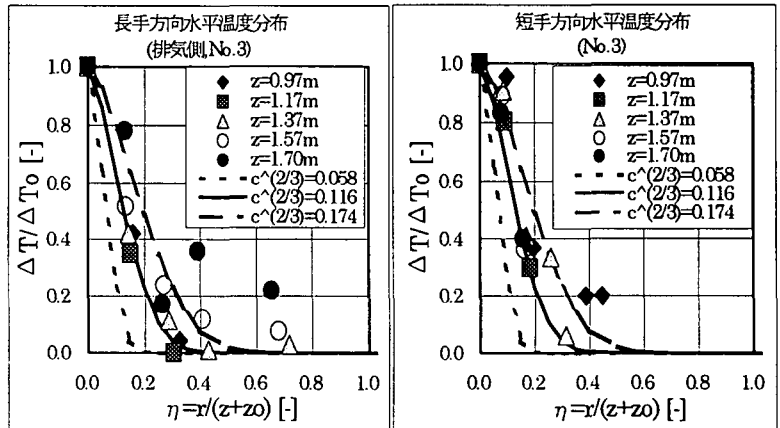


図-14 水平方向温度分布

## 4. まとめ・今後の課題

本論文は筒状空間については文献<sup>2)</sup>、チューブ状空間については文献(8)~(10)などを基に再構成したものである。

筒状空間での火災挙動が、フルードモデルで説明できることから、チューブ状空間においても同様のアナロジーにて、その挙動が推定できるだろうとの立場からさまざまな実験装置にて燃焼実験を行った。

その結果の解析の一部として、特に空間内の温度場がどの様に形成されるかを見積もるための代表特性として、天井直下に出現する最高温度とその呈示位置に着目し、その定式化を試みた。

筒状空間において火源上部に形成される高温層がある高さから頂部まで比較的一定の均一温度になるのに対し、チューブ状空間では火源からある距離離れた位置まで二層流れが保存されるため、前述したLeeモデルのように火源近傍領域も含め、空間全域の温度を一樣と仮定するには無理があり、各場所での垂直温度分布をトンネル長さ、発熱速度などの関数としてモデル化する必要がある事が認められた。しかし、本論文ではその途中段階として、天井下に形成した熱気流の温度性状を把握する上で、原点となる最高温度についてのみ解析した。今後は以下の課題とともにこれらのメカニズムを解明したい。

- ①強制換気の有無、発熱速度の大小に係わらず、その熱気流の移動距離に対して一定の減衰性状を示す事が明らかとなったが、この減衰速度への換気流の影響についてのさらなる検討（例えば、強制換気による熱損失を加味したモデル式の導入）。
- ②給気側へ熱気流の遡上が生じた時の熱気流の温度減衰性状と、排気側への熱気流の減衰性状の比較。
- ③火炎性状へのトンネル状空間の勾配の影響。
- ④トンネル状空間と筒状空間が連結されたような複合空間での火災性状。
- ⑤実大規模のトンネルでのモデルの検証。

## 5. 謝辞

本研究にあたり、中規模実験に関しては自治省消防庁消防研究所、実大実験に関しては通産省資源環境技術総合研究所の関係各位、および実験およびデータ整理に対し鹿島技研桑名秀明氏、新井芳明氏にご尽力いただきました。ここに、感謝の意を表わします。

## 記号

### 共通

$C_p$ : ガスの比熱 [kJ/kg/K]

$g$ : 重力加速度 ( $\approx 9.8 \text{ m/s}^2$ )

$\Delta T$ : 上昇温度 [°C]

$T_a$ : 外部の雰囲気温度 [K]

$\rho_a$ : 外気の密度 [kg/m³]

### 筒状空間

$A$ : 床面積 [m²]

$A_d$ : 給気口面積 [m²]

$A_e$ : 排気口面積 [m²]

$A_t$ : 全表面積 [m²]

$c$ : 比熱 [kJ/kg/K]

$C$ : (1)式で定義した空間因子 [-]

$C_d$ : 開口部縮尺係数 [-]

$D_d$ : 給気口の代表長さ ( $= A_d^{1/2}$ ) [m]

$D_0$ : 基底部床の代表長さ長さ

( $= A^{1/2}$ ) [m]

$Fr_d$ : 開口部基準のフルード数

( $= V_d^2 / g D_d$ ) [-]

$H$ : 火源上の天井高さ [m]

$H_o$ : 上下開口間距離 [m]

$h_e$ : 有効熱伝達率 [kW/m²/K]

$j$ : ( $= H_o/H$ ) [-]

$k$ : 熱伝達率 [kW/m²/K]

$K$ : ( $= A_e/A_d$ ) [-]

$m$ : ( $= D_d/D_o$ ) [-]

$M_d$ : 給気量 [kg/s]

$M_e$ : 排気量 [kg/s]

$Q_f$ : 火源の発熱量 [kW]

$Q_{fd}^*$ : 開口部基準の無次元発熱量

( $= Q_f / (\rho_a C_p T_a g^{1/2} D_d^{5/2})$ ) [-]

$T_a$ : 室温 [K]

$V_d$ : 給気開口部風速 [m/s]

$Y^*$ : Beyler の無次元熱損失

( $= 1 + h_e A_t / M_d C_p$ ) [-]

$\rho$ : 密度 [kg/m³]

$\rho_a$ : 空間内の空気密度 [kg/m³]

### チューブ状空間

$A$ : 空間の断面積 [m²]

$D$ : 火源代表径 [m]

$D_H$ : 火源面から天井面までの距離 [m]

$Fr$ : フルード数  $= V^2 / (g D_H)$  [-]

$H$ : 空間高さ [m]

$L$ : 流動距離 ( $= L_1 + L_2$ ) [m]

$L_1$ : 火源直上から長手方向への水平距離 [m]

$L_2$ : 火源表面から天井までの高さ [m]

$L_f$ : 火炎長 [m]

$Q$ : 発熱速度 [kW]

$Q_1^*$ : 無次元発熱速度(火源代表径規格)

$= Q / (\rho_a C_p T_a g^{1/2} D^{5/2})$  [-]

$Q_2^*$ : 無次元発熱速度(空間高さ径規格)

$= Q / (\rho_a C_p T_a g^{1/2} D_H^{5/2})$  [-]

$To$ : 換気流の初期温度 [°C]

$\Delta T_{max}$ : 天井直下最高温度上昇 [°C]

$U_o$ : 熱気流上昇速度 [m/sec]

$V_c$ : 遡上阻止風速 [m/s]

$V$ : 平均断面風速 [m/sec]

$z$ : 火源面からの高さ [m]

### 参考文献

- 1) Lee, C.K., "Interaction between Duct Fires and Ventilation Flow: An Experimental Study", Combustion

Science and Technology, Vol.20, 59-72, 1979

- 2) 佐藤他 2 名, 筒状アトリウムの空間温度上昇および給気開口部風速の簡易予測手法に関する研究, 1994/9, 日本建築学会計画系論文集 463 号

- 3) 例えば: 日本道路公団, (財)総合安全工学研究所, 危険物の事故事例等に関する調査研究, 1991 の事例を基に作表した

- 4) Haukur Ingason, Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires, Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels, Borås, Sweden, 1994

- 5) McCaffrey, B.J.: Purely Buoyant Diffusion Flames - Some Experimental Results, NBSIR79-1910, 1979

- 6) Zukoski, E.E., Fluid Dynamic Aspects of Room Fires, Proceedings of the First International Symposium on Fire Safety Science, Hemisphere, 1984

- 7) Thomas, P.H., Hinkley, P.L., Theobald, C.R. and Simms, D.L.: Investigations into the flow of Hot Gases in Roof Venting, Fire Research Technical Paper, No.7, HMSO, 1963

- 8) 栗岡他 6 名, 地下トンネルの火災安全設計法の開発に関する実験的研究(その 1), 日本火災学会研究発表会, 1996/5

- 9) 桑名他 7 名, 実大トンネルにおける煙性状(矩形断面), 日本火災学会研究発表会, 1997/5

- 10) 栗岡他 6 名, 実大トンネルにおける煙性状(馬蹄形断面), 日本火災学会研究発表会, 1997/5