

道路火災における輸送現象

Transport Phenomena in the Fire on the Fuel-Spilled Road

石田 博樹 (長岡工業高等専門学校)
Hiroki ISHIDA (Nagaoka National College of
Technology)

1. 緒言

交通事故により車両から燃料が道路に流出した場合、あるいは、燃料貯蔵タンクの損壊により燃料が地面に流出した場合に、燃料が浸潤したその道路や地面で、万一、火災が発生すれば、人的、物的に大きな被害をもたらす大災害となることは直ちに予測できる。

1960年(昭和35年)10月26日、兵庫県西宮市において、LPGタンクローリが横転し、流出したLPGに着火し、道路周辺が爆発炎上し、大災害になった。1979年(昭和54年)7月11日、東名高速道路の日本坂トンネルの中で発生した玉突事故による火災による大災害は、今日でも記憶に新しい。1985年(昭和60年)5月6日、東京都目黒区柿の木坂において、タンクローリが横転し、大量の液体燃料が道路に流出し、運悪く着火したために、その市街地で大規模な道路火災が発生し、大きな被害が出た。また、湾岸戦争において、燃料貯蔵タンクや油井が爆撃を受けて損壊し、流出した燃料が周囲の地面に浸潤し、着火し、大火災が発生した場面も、記憶に新しい。

液体燃料が浸潤した道路あるいは地面に着火した場合、道路(地面)に沿って火炎はどのように拡がるのであろうか。道路(地面)上における火炎の拡がり現象においては、どのようなパラメータが支配的なのであろうか。さらに、道路火災による被害を低減するためには、道路やその周辺環境の整備にどのような要件が必要なのであろうか。

液体燃料が流出し浸潤した多孔質の地面上における火炎の拡がり現象は、本格的には、約10年前から、筆者を含めた主に日本人研究者により、研究が開始され、実験室規模の現象については、今日、大体の輪郭がわかってきた。[1-5] ここでは、当然予想されるように(通常の燃焼現象と同じく)、熱と流れと物質移動を含む輸送現象が深く関連しあっている。ここでは、そうした分野を専門とし、

得意とする伝熱工学の研究者諸兄からの有益な御教示を期待しつつ、今までの研究内容を概観することにする。

2. 研究の内容

実験室規模における研究では、道路(地面)のモデルとして、ガラスピーズ層がよく用いられる。液体燃料が浸潤した道路あるいは地面に着火した場合に、多孔質の地面に沿って伝播する火炎の挙動に大きく影響を与える主要な因子を列挙すると、次のようになる。

- (1) 流出燃料の引火温度と道路面(地面)温度との高低関係
- (2) 火炎周囲(道路周辺)の気流
- (3) 燃料の流出量(流出面積)
- (4) 道路面(地面)の空隙率
- (5) 道路面(地面)の傾斜角度

この他、燃料の化学的物性、道路面(地面)の材質や施工具合、燃料流出後の経過時間、等がある。

道路面(地面)に沿って火炎が伝播するためには、当然のことながら、伝播する火炎先端の前方の道路面上に可燃範囲の燃料濃度が生成されていなければならない。即ち、燃料が流出(浸潤)した後の道路面における可燃範囲の燃料濃度の生成の速度や範囲は火炎の拡がり速度と火炎の規模を直接支配する。従って、燃料の流出量、道路(地面)温度が流出燃料の引火温度よりも高いか低いか、道路面上の気流の特性、さらに、道路面が多孔質であるかないか、が火炎の挙動や火炎の規模を決定する最大の直接要因といえる。

2-1: 地面温度が流出燃料の引火温度よりも低い場合 [3]

Fig. 1は、長さ100 cm、幅5 cm、深さ2 cmの定温容器(25°C)にガラスピーズを満たし、液

体燃料 (n-Decane, 引火温度 46 °C) を浸潤させ、ガラスビーズ層の表面の一端に着火させた後に、伝播する火炎の直接写真である。ビーズ径の大小、即ち、空隙の大小は、ビーズ層の表面への燃料供給速度に直接影響を与えるために、道路 (地面) 温度が流出燃料の引火温度よりも低い場合には、火炎の規模と伝播速度を支配する最大の因子である。

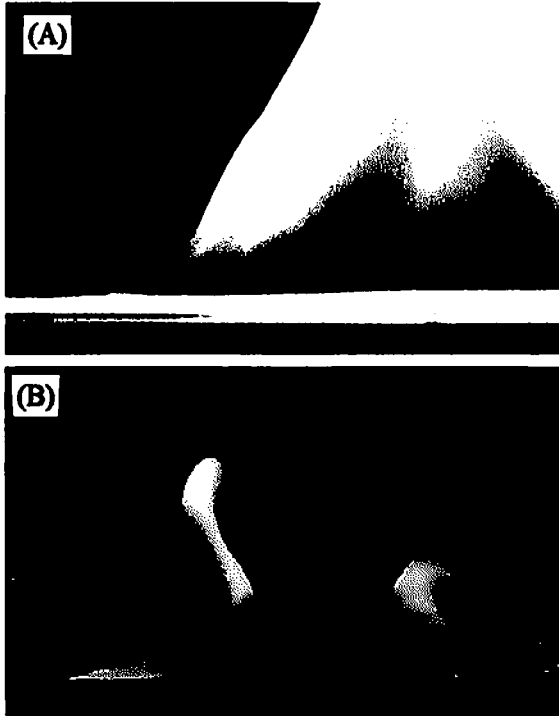


Fig. 1 : Direct Photographs of Spreading Flame.
Beads Diameter; (A) 0.1 mm, (B) 1.0 mm

Fig. 2 は、火炎の伝播距離と経過時間との関係を示す。ビーズ径が小さい (空隙が小さい) 場合は、火炎の伝播速度はほぼ一定であるが、ビーズ径が大きい (空隙が大きい) 場合には、火炎伝播速度が着火後の経過時間とともに次第に低下し、伝播火炎の先端が脈動を始め、遂には、しばしば、立ち消えする。燃料が浸潤した、比較的粗いガラスビーズ層の表面に沿う気流の中における伝播火炎の安定性については、火炎の先端近傍に形成される特異な逆流領域の役割が重要であると指摘した研究例もある。 [6、8、9]

Fig. 3 は、平均火炎伝播速度に対するビーズ径とガラスビーズ層温度の影響を示す。ビーズ径の増大とともに、火炎の平均伝播速度は著しく減少し (ビーズ径の減少とともに、火炎の平均伝播速度は

著しく増大し)、また、ビーズ層温度の上昇による火炎伝播速度の増大の効果は、ビーズ径が大きい場合には顕著ではなくなることが分かる。

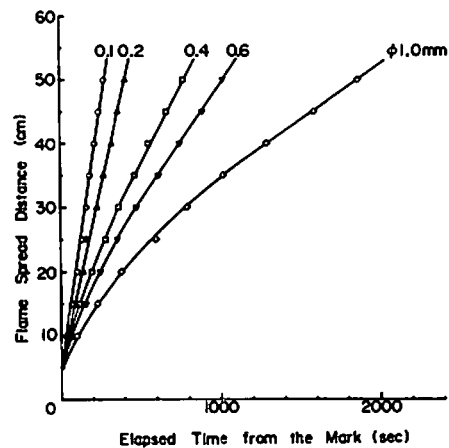


Fig. 2 Relationship between flame spread distance and elapsed time with variation in beads diameter; the mark exists 5 cm away from the ignition position at one end of the tray; beads temperature 40 °C, horizontal spread; fuel n-decane.

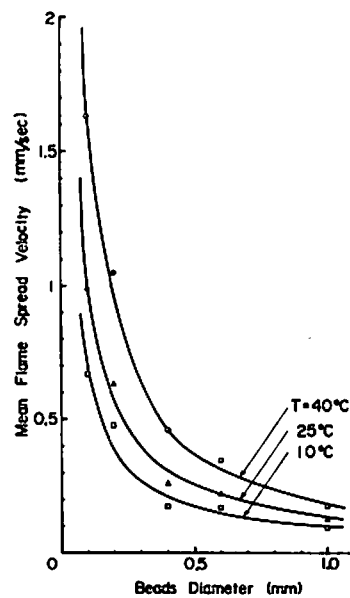


Fig. 3 Effect of beads diameter on flame spread velocity in horizontal spread; fuel n-decane

これらの結果は、地面の温度が流出燃料の引火温度よりも低い場合には、地表面における燃焼による燃料消費速度と地面内からの燃料供給速度との大小関係のバランスが火炎の挙動に大きな影響を与えること、即ち、地面上の火炎伝播現象を詳細に解明するためには、火炎から地面への支配的な伝熱形態の検討に加えて、地面内における毛管上昇効果を

含む詳細な燃料輸送過程の解明が重要であることを示している。火炎が伝播する際の地面内の燃料の挙動については、詳細な研究例がある。[5] なお、ビーズ径がより一層大きくなった（空隙が大きくなった）場合には、砂利が敷かれている道路上の水たまりを想像すれば、容易に予測できるように、しだいに通常の液面上の火炎伝播現象に近づき、即ち、火炎先端に先行する表面流がガラスビーズにより阻止されないために、火炎伝播速度は再び増大することになる。また、ビーズ径が著しく小さくなった（空隙が小さくなった）場合には、通常の可燃性固体面上の火炎伝播現象に近づき、火炎伝播速度は固有値に近づくことになる。

Fig. 4 は、傾斜した地面上の火炎伝播における、地面内の燃料輸送の模式図である。温度計測の実験によれば、伝播火炎の先端直下のビーズ層の表面近傍の温度は、液体燃料の沸点よりも遥かに高い。即ち、火炎直下のビーズ層の表面近傍では、燃料が既に気化しており、地面内から地表面への燃料輸送現象の解明のためには、温度勾配のある多孔質固体内の毛管上昇効果に加えて、固体内の空隙内で部分的に気化を伴う液体燃料の輸送、即ち、空隙が気相と液相からなる不飽和状態である多孔質内の燃料輸送過程を検討する必要がある。最近、これに関係した優れた研究が報告されている。[12, 13]

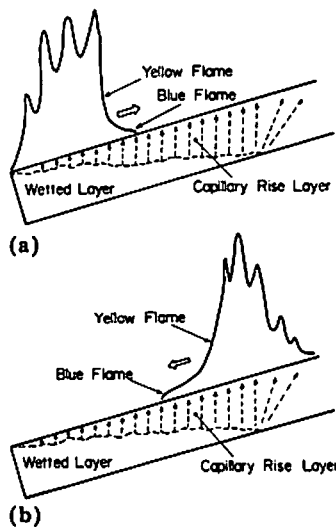


Fig. 4 Schematic diagram of fuel supply by capillary rise effect to beads bed surface during flame spread (a) upward and (b) downward.

Fig. 5 は、空隙が比較的大きい傾斜した地面上における火炎の伝播距離と経過時間との関係の典型例である。上方伝播では、火炎から未燃表面への伝熱効果が大きく、始めは火炎の伝播が速い。しかし、加熱された未燃表面への地面内からの燃料供給（一部、気化を伴う）が遅れるために、火炎はしだいに遅くなり、しばしば立ち消える。一方、下方伝播では、始めは地表面への燃料の供給が遅れるために火炎は遅いが、しかし、未燃表面では毛管上昇効果による燃料供給速度が大きく、火炎はしだいに速くなる。上方と下方の火炎伝播におけるこうした違いは、地面内から地表面への燃料の輸送過程の変化（毛管上昇と蒸発）と、その変化の時間的方向が逆であるためである。

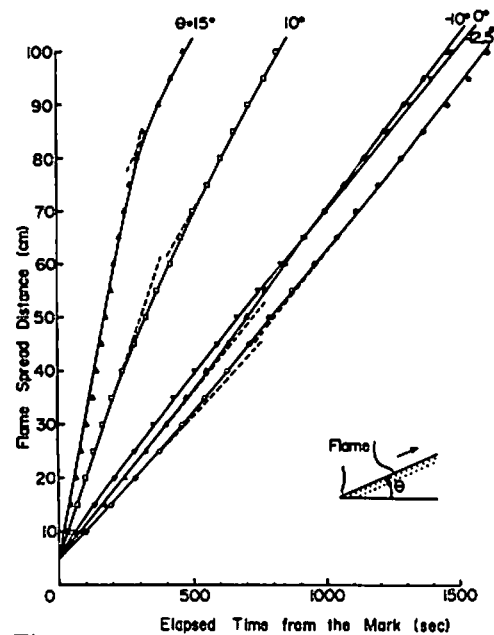


Fig. 5 Relationship between flame spread distance and elapsed time with variation of surface inclination angle; beads bed temperature 25 °C; beads diameter 0.2 mm; fuel n-decane.

また、ガラスビーズ層の表面に金属粉を散布して表面の熱伝導率を大きくすると、表面を伝播する火炎の先端からの伝導熱損失が大きく、火炎伝播速度が低下する。即ち、多孔質固体の表面の熱伝導率の増加は火炎伝播速度を低下させる。[3]

液体燃料が浸潤した多孔質固体の表面に沿った火炎の拡がり現象は、伝熱工学の研究対象の立場からも、このように大変に興味深いものである。

2-2: 地面温度が流出燃料の引火温度よりも高い場合 [4]

一方、地面の温度が流出燃料の引火温度よりも高い、即ち、通常の引火性の高い燃料が地面に浸潤した場合には、火炎の拡がり現象はどう変わるであろうか？ 地面上に生成した濃度勾配を有する層状の可燃性混合気の中を火炎が伝播することになり、地面（道路面）の形状、空隙率、傾斜角度、熱伝導率といった因子は、火炎の挙動には殆ど影響を与えず、地面上の気相の条件のみに支配される火炎の伝播現象となることが予測される。[1、2]

しかし、実際はそう単純ではない。液体燃料として n-Octane（引火温度 15 °C）を用いた実験の結果は、ガラスビーズ層が燃料の引火温度以上であっても、燃料の化学量論比温度（24 °C）よりも僅かに（3、4 °C）高温になるまでは、やはり、地面内からの燃料供給速度と火炎の伝播に伴う燃料消費速度との大小関係のバランスが火炎の挙動に大きく影響を与えること、即ち、ビーズ層の温度、空隙率、傾斜角度等が火炎の挙動に大きく影響を与えることを明らかにした。

Fig. 6 は、火炎の伝播速度に対するガラスビーズ層の温度と傾斜角度の影響を示す。ガラスビーズ層の温度が燃料の化学量論比温度（24 °C）よりも 3、4 °C 以上高くなると、もはや気相の条件のみに支配される火炎伝播現象となり、ガラスビーズ層の影響を受けなくなることが分かる。

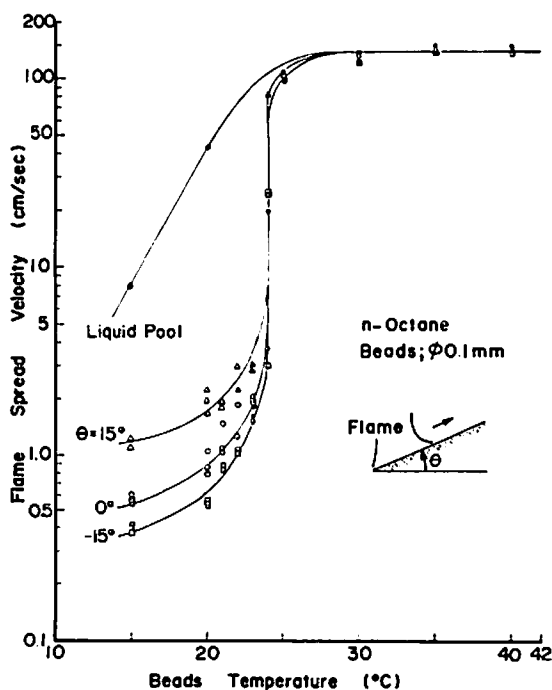


Fig. 6 Effect of the beads bed temperature on the flame spread velocity; beads diameter 0.1 mm.

Fig. 7 は、地面上に生成した濃度勾配を有する層状の可燃性混合気の中を、下方に伝播する火炎のシュリーレン写真である。火炎の前方にある層状の可燃性混合気の生成状態が伝播火炎の挙動を支配することを強く示唆している。

Fig. 8 は、火炎の伝播速度に対するビーズ層の粒径の効果（空隙の大きさの効果）を示す。ビーズ層の温度が引火温度以上であっても、燃料の化学量論比温度（24 °C）以下では、Fig. 3 の結果と同様に、毛管上昇効果による燃料供給速度が火炎の伝播速度を支配すること、しかし、化学量論比温度よりも十分高くなると、気相の条件に強く支配される火炎伝播現象となり、粒径の影響を受けないことが示されている。

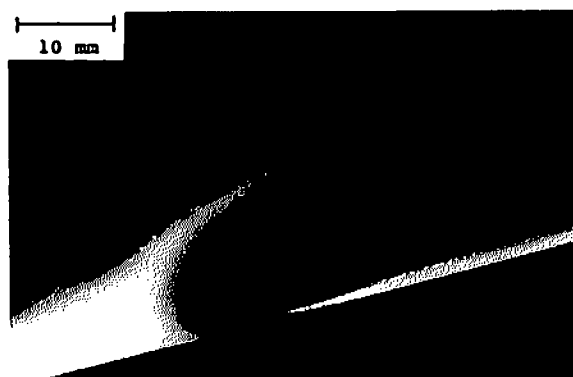


Fig. 7 Schlieren photograph of downward propagating flame; inclination angle 15°, beads bed temperature 35 °C, beads diameter 0.1 mm.

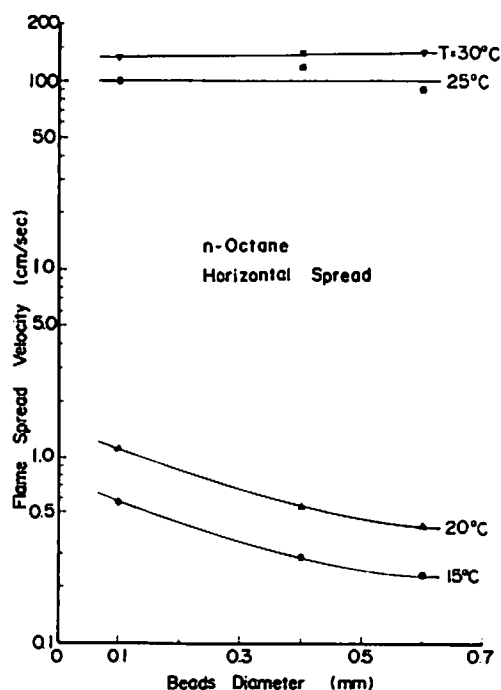


Fig. 8 Effect of the beads diameter on the horizontal flame spread velocity.

実際の道路上の燃料流出事故に伴う火炎の伝播が2次元であることから、これまでの一方向火炎伝播の研究成果を踏まえて、さらに、軸対象の自由な火炎伝播についても研究された。[7]

Fig. 9は、n-Decaneの浸潤したガラスビーズ層(20°C)の表面上における軸対象の自由火炎伝播の直接写真である。

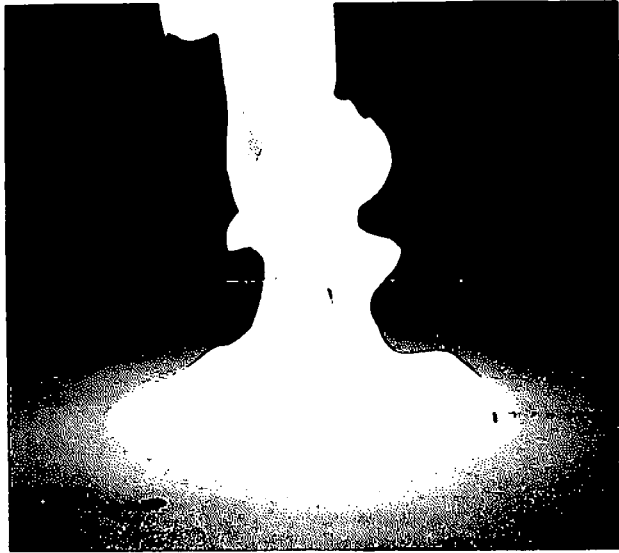


Fig. 9 : Direct Photographs of Free Spreading Flame. Beads Diameter; 0.1 mm

Fig. 10は、火炎の基部の直径の時間変化をしめす。着火後の初期段階では、火炎の半径方向の拡がり速度は、加速性があることがわかる。しかし、火炎柱が大きく発達した場合における火炎基部の拡がり速度については、未だに研究例がない。

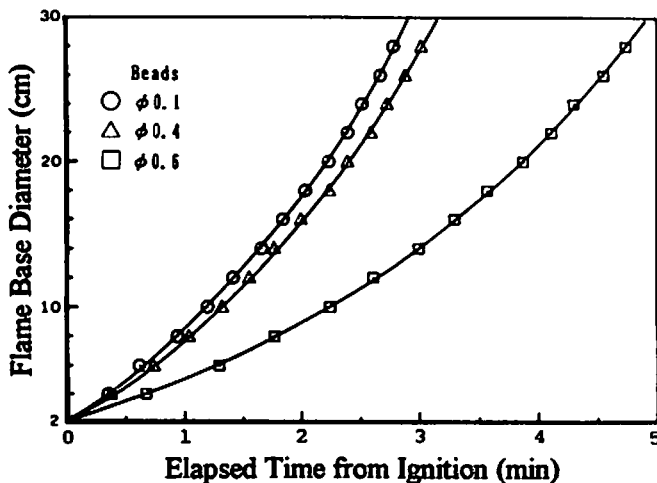


Fig. 10 : Flame Base Diameter as a function of Elapsed Time

Fig. 11は、可視化実験により得られた、発達する火炎柱の周囲の気流の様子を示す。火炎柱が発達するにつれて、浮力の効果が大きくなり、さらに周囲の気体の entrainment も促進されるために、火炎柱は気体力学的に不安定となり、大きく振動を開始する。

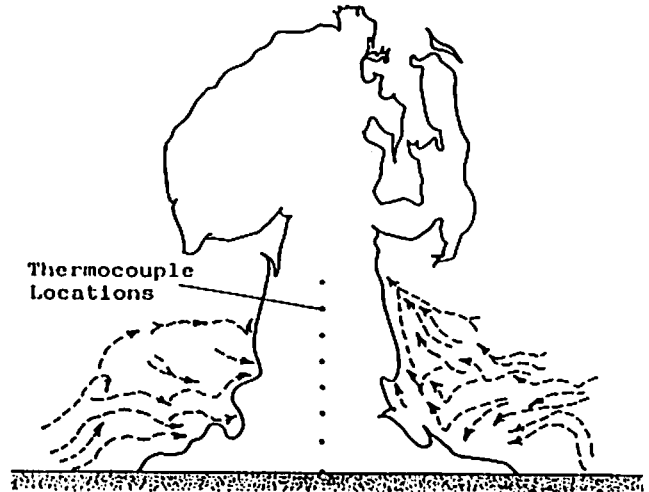


Fig. 11 Visualized Flow Pattern of Flame Induced Convection around Flame Pillar.

Fig. 12と Fig. 13は、それぞれ、発達する火炎基部の直径と高さの比の変化、また、火炎柱の発達に伴う火炎の高さの振動数の変化を示す。実験式が示すように、火炎柱の発達に伴って変化する火炎の平均的な高さや、火炎の高さの振動数は、しだいに火炎基部の直径によってほぼ決まる一定値に近づく。これらは、より大きな火炎についても確認されており、また、フルード数を考慮した理論的検討でもこれらと同様な関係式が得られている。

これらの現象は、燃料タンクの火災や液面燃焼、即ち、一般のプール火災に共通することであり、火炎柱の周囲における防災の観点から、重要な研究課題であるために、古くから多くの研究例がある。今日では、プール火炎の基部の安定化機構や火炎柱内部の熱的・化学的構造、火炎柱からの熱放射の特性等について、特にアメリカと日本の火災研究者達により、詳細な研究が進行中である。

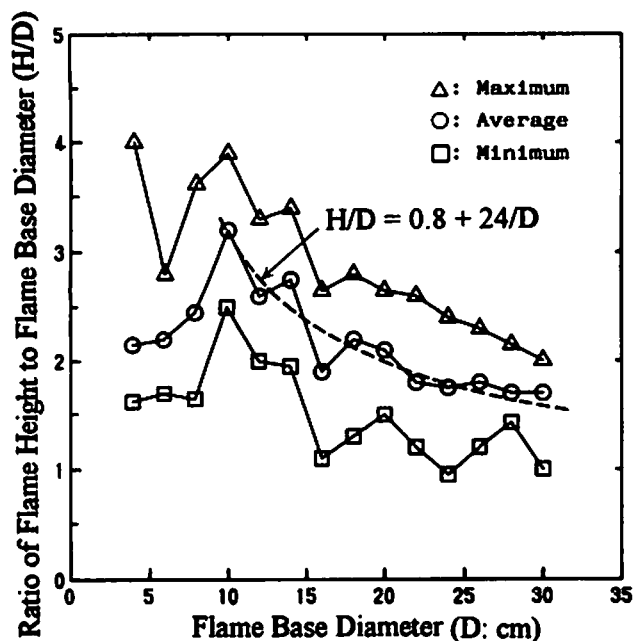


Fig. 12 : Ratio of Luminous Flame Height to Flame base Diameter (H/D) as a function of (D)

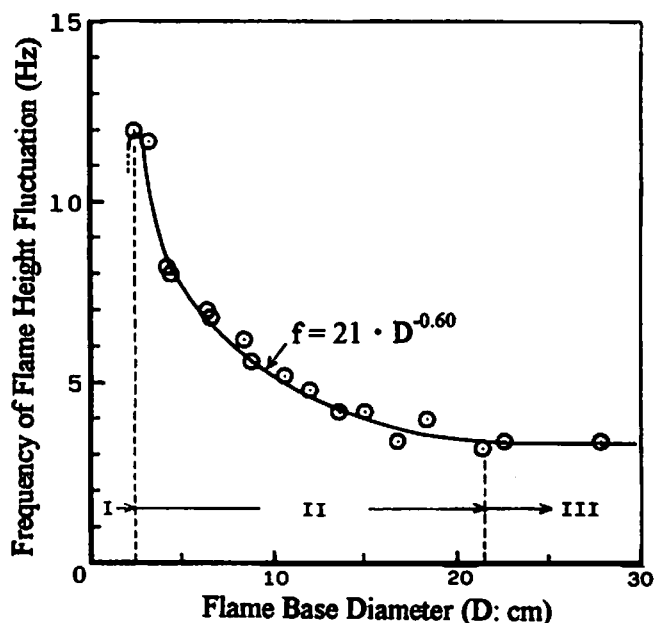


Fig. 13 : Frequency of Flame Height Fluctuation (f:Hz) as a function of Flame Base Diameter (D:cm)

今日、さまざまな利点のために、排水性のアスファルト舗装道路の建設が広がっている。そのような道路における、燃料流出後の火炎の拡がり現象、またさらに、燃料が流出した雪に覆われたアスファルト道路上における火炎の拡がり現象も研究された。[10, 11]

Fig. 14 は、燃料が流出した排水性のアスファルト舗装道路上における火炎の拡がり現象をまとめたものである。燃料の引火温度が道路面温度よりも高い場合には、熱損失と路面への燃料供給の遅れにより、仮に着火が起きたとしても、火炎はすぐに消える。道路の内部の空隙が大きく、毛細管上昇による燃料の輸送ができないためである。一方、燃料の引火温度が道路面温度よりも低い場合には、燃料流出領域に生成した層状の可燃性混合気中を火炎が伝播し、燃料流出領域の全域が火炎に覆われるが、それは長続きせず、道路面の空隙から発生する燃料ガスの着火が間欠的に続くのみであり、火炎が燃料流出領域以外へ拡がることはない。空隙が大きく、毛細管上昇効果による燃料輸送ができない場合の多孔質固体の表面における燃焼の機構は興味深い研究課題である。

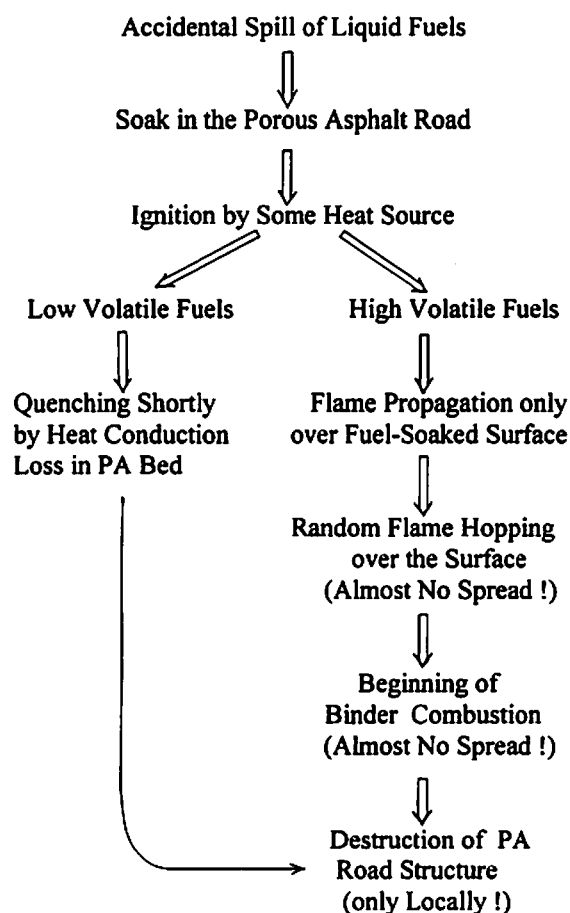


Fig. 14 : Summarized Process of Flame Behavior on the Fuel-Soaked Porous Asphalt Road.

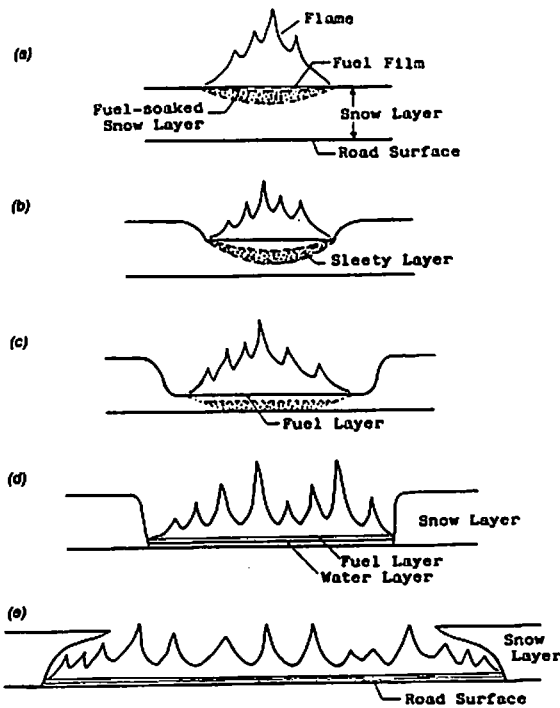


Fig. 15 : Schematic Illustration of Flame on the Fuel-Soaked Snow Layer on the Road.

Fig. 15 は、ガソリンが流出し吸収された雪道における、火炎の拡がりの様子の模式図である。燃料を吸収したシャーベット状の雪の上で燃焼が続くが、燃料の流出量が少ない場合には、(b)の段階で、火炎が立ち消える。シャーベット状の雪の層の中から水とは混じらないガソリンがどのような機構で表面に輸送されてくるのかは、全く研究例がなく、未知である。また、雪道における(d)以後の火炎の拡がり機構の研究も始まったばかりであり、現在、その詳細は未知である。これらは、火炎からの複雑な伝熱形式と周囲の融雪の機構を含む輸送現象の興味深い研究課題である。[10、11]

3. 今後の課題

主に日本人研究者により本格的に開始された、液体燃料が浸潤した地面上における火炎の拡がり現象の研究により、今日までに、その現象を支配する多くの重要な因子が明らかにされて来た。

しかし、今までの研究成果をもとに、道路火災の防止、あるいは、それによる被害を最小限に留めるために、それでは道路やその周辺環境にどのような現実的な対策が必要であろうか、と改めて問い直してみると、依然として大きな課題が横たわっている

ことを痛感させられる。

即ち、今までの研究は殆ど全て、実験室における比較的小規模な現象を対象としており、スケール効果の研究が全く遅れていることが分かる。スケール効果の検討を欠いた火災の研究など、文字通り、画龍点睛を欠くものであろう。トンネル道路内における燃料流出事故による火災に至っては、日本では、今日でも基礎研究さえ十分とは言えない。1994年10月、スウェーデンのボロスで開かれたトンネル火災の国際会議のプログラムの内容は、ユーロトンネルと同様な長大な海底トンネルを有するこの日本にも、そうした基礎研究の重要性を強く訴えているといえよう。

阪神大震災は、Fire Induced Flow、即ち、火災旋風の威力がいかに巨大であるかを見事に教えてくれた。筆者自身の僅かな体験でも、アスファルト道路上にガソリンが流出し、拡がった後に着火した場合の火炎の規模と勢いは、想像を遥かに越える恐ろしいものであった。こうした事実の前に立つと、箱庭のようなモデル実験における小さな火炎のみによる研究からの結論では、火災現象の研究としては、いかにも心許ないことを知らされる。

今後の研究課題の焦点は、特に防災の観点に立つならば、先ず第一に、こうしたスケール効果を考慮した道路上の火炎の挙動と、それに影響を与える、熱と流れを中心とする輸送現象を解明することであろう。幸いに、計算機の性能の最近の著しい向上と、今日の計算機科学の目覚ましい進歩は、世界の火災研究者にも一層の勇気を与えている。

4. 結言

約10年前から、筆者を含めた主に日本人研究者により本格的に開始された、液体燃料が浸潤した多孔質の地面上における火炎の拡がり現象の研究を Review してきた。現象を支配する多くの重要な因子が、今日、少しずつ明らかにされて来てはいるが、その現象に対するスケール効果の研究は未だに全く遅れていると言わなければならない。その打開のためには、火災現象の研究への、熱と流れを含む輸送現象の解明を専門とする伝熱工学研究者のより多くの参入によるチームワークが不可欠であることを、ここに改めて強調したい。

火災現象も、燃焼現象である以上、熱と流れと、化学反応を伴う物質移動の、典型的な複合現象であ

る。アメリカの火災研究者の中には、気体力学や伝熱工学の研究者から転身した者が少なくない。一方、この日本では、そうした例がまだまだ少ない。国内外の火災関係の学会に出席する度に、日本における火災研究の中で、熱と流れと物質移動を含む輸送現象の解明を得意とする伝熱工学研究者と火災研究者とが、もつともつと固いスクラムを組んだならば、どんなにより素晴らしく、より大きく日本の火災研究が進展することか、と痛感する。また、それは、日本における伝熱工学の学問分野と、その研究者自身にとっても、研究の視野の一層の拡大をもたらすに違いない。

伝熱学会は、燃焼学会の2倍以上、火災学会の4倍以上の大きな会員数を擁する。燃焼現象、火災現象に直接関する日本人研究者の一人として、伝熱工学の研究者諸兄の火災研究への積極的な、より多くの参入を期待したい。

5. 参考文献

- (1) M. Kaptein and C.E. Hermance: Horizontal Propagation of Laminar Flames Through Vertically Diffusing Mixtures Above a Ground Plane, Proc. 16th Symp. on Combustion (International), The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, p.1295-, (1976)
- (2) M.J. Murphy: Flame Spread Rates Over Methanol Fuel Spills: Combustion Science and Technology, vol.42, p.223-, (1985)
- (3) H. Ishida: Flame Spread over Fuel-Soaked Ground, Fire Safety Journal, vol.10, p.163-, (1986)
- (4) H. Ishida: Flame Spread over Ground Soaked with Highly Volatile Liquid Fuel, Fire Safety Journal, vol.13, p.115-, (1988)
- (5) K.Takeno and T.Hirano: Behavior of Combustible Liquid Soaked in Porous Beds during Flame Spread, Proc. 22nd Symp. on Combustion (International), The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, p.1223-, (1988)
- (6) T. Suzuki et al.: Flame Spread over Fuel-Soaked Sand in an Opposed Air Stream, Proc. of the Second International Symp. on Fire Safety Science, p.199-, (1989)
- (7) H. Ishida: Initiation of Fire Growth on Fuel-Soaked Ground, Fire Safety Journal, vol.18, p.213-, (1992)
- (8) T. Suzuki et al.: Behavior of the Reverse Flow in Front of the Leading Flame Edge Spreading over Fuel-Soaked Sand in an Air Stream, Proc. of the Third International Symp. on Fire Safety Science, p.227-, (1992)
- (9) 田中昭人 他: 気流に対向して燃え広がる火炎の先端付近の流れの詳細、第32回燃焼シンポジウム講演論文集、p.319-, (1994)
- (10) 石田博樹 他: 液体燃料が流出した排水性舗装道路上の火炎の拡がり現象、第2回ポーラスアスファルト研究会論文集、(1995)
- (11) H. Ishida et al.: Flame Spread over Fuel-Spilled and/or Snow-Covered Asphalt Road, Journal of Fire Sciences, vol.14, p.50-, (1996)
- (12) 赤堀 他: 不飽和粒子層内に置かれた加熱平板上の気流熱伝達、第33回日本伝熱シンポジウム講演論文集、p.665-, (1996)
- (13) 青木 他: マイクロ波加熱による粒子層の乾燥、第33回日本伝熱シンポジウム講演論文集、p.129-, (1996)