

自己反応性物質と固液混合相の燃え拡がり

Flame Spread over Self-Reactive Materials or Solid-Liquid Mixed Phases

石田 博樹*

Hiroki Ishida

1. はじめに

「燃え拡がり現象」というと、固体あるいは液体の可燃物の表面が酸化性雰囲気である空气中で燃える場合を想定することが多いが、酸化性雰囲気を必要としない自己反応性物質の燃え拡がりや、また、固体と液体の混合層の燃え拡がりといったケースもある。今回は、これらの燃え拡がり現象の例や、特徴、研究の進展状況などについて取り上げる。

2. 自己反応性物質の燃え拡がり¹⁻¹⁰⁾

自己反応性物質としては、通常、火薬類一般を想定できるが、本節では、固体ロケット燃料で代表させる。固体ロケット燃料は、均質系と混成系（不均質系）とに大別される。均質系とは、燃料分子中に酸化剤成分が含まれているものであり、ダブルベース推進剤と呼ばれている。混成系とは、燃料（ポリウレタンやポリブタジエン等の高分子弾性体）と酸化剤（過塩素酸アンモニウム等の固体無機酸塩）との混合物であり、コンポジット推進剤と呼ばれている。今日では、大型の固体燃料ロケットエンジンには、殆どコンポジット推進剤が用いられており、その際に、発熱量を高め、燃焼を安定化させるために

金属粉末（アルミニウムやマグネシウム等）を、さらに燃焼速度（燃料の消費速度）を上げ、燃焼を安定化させるために様々な触媒を混入させている。図1に固体燃料ロケットエンジンの概念図を示す¹⁾。

固体燃料ロケットの発射時に、エンジンに着火してから必要な燃焼室内圧力に達するまでの、いわゆるIgnition transientは、固体燃料ロケットエンジンの初期挙動を支配する重要な過程である。Ignition Transientは、一般にIgnition (Phase I)、Flame Spreading (Phase II)、Chamber Filling (Phase III)の三段階に分かれる。その中で特に、Flame Spreadingの段階における何らかの不具合は、発射の失敗や、燃焼室圧力の異常上昇による機体の爆発といった重大事故の大きな要因となる。そのため、固体ロケット燃料の表面におけるFlame Spreadingの現象については、実質的には1950年代の後半から主にアメリカ人の研究者グループにより、理論と実験の両面から活発に研究が行われてきた。Ignition Transientは、しかし、圧力が急上昇しつつある雰囲気の中での、ごく短時間の内に完了する過程であるために、実験的にも理論的にも研究が難しく、その成果の蓄積は今日でも十分とは言えない。特に、大型のロケットエン

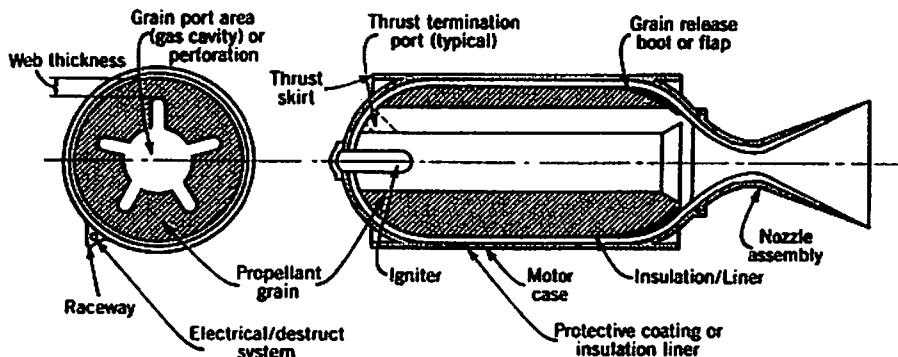


図1 固体燃料ロケットエンジンの概念図¹⁾

*長岡工業高等専門学校

ジンに多用されているコンポジット系固体ロケット燃料の表面におけるFlame Spreadingの研究は、今日、依然として開始段階にあるといえよう。

一般に、固体、液体を問わず、凝縮相の表面に沿って火炎が伝ばするためには、当然のことながら、火炎の先端近傍の未燃側の表面温度が上昇し、さらに、そこで可燃範囲濃度の混合気が発生されていなければならない。即ち、その未燃表面上における可燃性混合気の生成具合（生成の速度や混合気層の厚さや挙動）に影響を与える全ての因子が、火炎の拡がり速度の決定に関与することになる。気・液系や気・固系、つまり不均一系における火炎伝ば現象は、先ずこのような視点に立って考えていくのが通常である。火炎の先端の移動が予混合火炎型になるか、拡散火炎型になるかについては、いろいろな場合についての条件により、現象を深く検討しなければならない。以前は、「拡散火炎であれば、なぜ伝ばをするのか」といった議論がなされていたことがあったが、今日では、伝ば火炎の先端の近傍に関する詳細な研究により、生成した可燃性混合気の挙動と火炎の動きとの関係から、伝ばが予混合火炎型にも、拡散火炎型にもなりうるということが解明されているといえよう。一方、固体ロケット燃料のような自己反応性物質の表面では、火炎の伝ばの機構は一変する。

固体ロケット燃料のような自己反応性物質の表面における火炎の拡がりについて考えてみると、最大の特徴は、凝縮相内に酸化剤成分が含まれているために、未燃表面が局部的に火炎からの十分な熱流束を受けると、燃料分子と雰囲気内の酸素分子との拡散や混合等を必要とせずに、固有の着火遅れ時間の後に、自己反応による着火が起き、未燃表面に「火炎が拡がる」ことである。即ち、それは雰囲気圧力が急上昇しつつあるロケット燃焼室内における「着火領域の拡がり現象」と見ることができる。そのため、(1) 火炎の伝ば速度が雰囲気中の酸素濃度の影響を殆ど受けないこと（ロケットは、真空中でも水中でも発射できる）、(2) 燃焼室の中で膨張した燃焼ガスにより、常に追い風を受けつつ未燃表面に火炎が拡がること、(3) 火炎により誘起される周囲の気流による火炎先端の挙動への影響は極めて小さい

こと、等に、通常の固体表面における火炎の伝ば現象との大きな違いがある。図2に固体ロケット燃料の表面における火炎の伝ばの模式図を示す。

固体ロケット燃料の燃焼機構については、軍事と宇宙開発の両面の競争時代の要請の中で、今日まで50年近い研究の歴史がある。その中で特に、線燃焼速度（燃料消費速度）に影響を与える様々な因子、即ち、雰囲気圧力、燃焼触媒、燃料や酸化剤の物性と配合割合、強制流れの場合、等の影響が、理論と実験の両面から精力的に検討されて来た。しかし、固体ロケット燃料の表面が局部的に十分な熱流束を受けた場合に、そもそも、着火が、表面上に発生した熱分解ガス中の気相反応で起きるのか（気相着火）、あるいは、まさに表面で起きるのか（表面着火）、それとも、温度が上昇した固相内の反応で起きるのか（固相着火）、といった点にさえも、今日まで依然として、あれこれの意見の相違がある。1950年代の後半から、主にアメリカ人の研究者グループにより理論と実験の両面で活発に行われてきた固体ロケット燃料の表面に沿う火炎の伝ば機構の解明の研究は、そのため、局部的に熱流束を受ける燃料表面の着火機構の解明、即ち、固有な着火遅れ時間を決定する支配的要因を究明する研究と併行しつつ行われてきた。末尾に挙げた参考文献の中に、火炎の伝ばと着火の両機構を関連させて検討している論文が多いのはそのためである。

理論的研究では、多くの論文が、着火後の火炎の伝ばによる燃焼室圧力の変化を検討している。それは、開発時代におけるロケットエンジンの始動安定性への要請から当然であった³⁻¹¹⁾。また、実験的研究も、同じ理由により、雰囲気圧力の変化による火

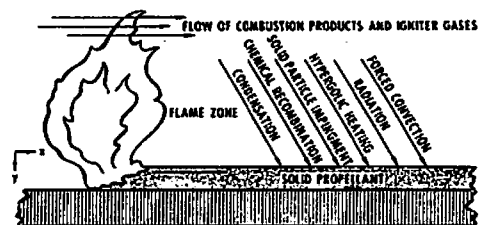


図2 固体ロケット燃料の表面における火炎の拡がりの模式図¹⁾

炎伝ば速度への影響や、燃料内の亀裂の存在による火炎伝ば速度への影響を検討している¹²⁻¹⁷。さらに、強制気流中の未燃表面への熱伝達モードや熱流束を詳細に検討した研究もある^{11, 18}。1980年代の中期以後は、これらの研究が鳴りを潜めた感があるが、しかし、一方、この頃から時代の要請に応じて、RDX, HMX, GAP等の高エネルギーの固体ロケット燃料が盛んに研究され始め、これらの新しい燃料についての燃焼特性に加えて、火炎の伝ば特性の研究の必要性が再び生まれてきた。しかし、筆者の知る限り、今日、公開されているその研究例は極めて少ない。固体ロケット燃料の表面を伝ばする火炎の先端の近傍を詳細に検討し、火炎の拡がり機構を統一的に検討した研究例は、通常の固体表面上の火炎伝ば機構を検討した多くの研究例に較べると、極めてわずかである。即ち、この分野の研究は、今日でも、困難だが重要で興味深い、未開拓の研究課題として残っている。

3. 固液混合相¹⁹⁻²³

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。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だろうか。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だろうか。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だろうか。こうした背景から、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、即ち、固液混合相の表面に沿う火炎の拡がり現象の研究が、本格的には、15、6年前から、筆者を含めた主に日本人研究者により開始された。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。そこで、今までの研究内容を概観することにする。

液体燃料が浸潤した固液混合相の表面に着火した

場合に、伝ば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、次の様になる。

(1) 流出燃料の引火温度と固液混合相の温度との高低関係、(2) 火炎周囲の気流、(3) 燃料の流出量（流出面積）、(4) 固液混合相の空隙率、(5) 固液混合相の傾斜角度、この他、燃料の化学的物性、固液混合相の材質や燃料流出後の経過時間、等がある。

固液混合相の表面に沿って火炎が伝ばするためには、火炎先端の前方の未燃表面に可燃範囲の燃料混合気生成されていなければならない。即ち、燃料が流出（浸潤）した後の固液混合相表面における可燃範囲の燃料混合気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、(1) 燃料の流出量、(2) 固液混合相の温度が燃料の引火温度よりも高いか低いか、(3) 表面上の気流の特性、等が火炎の挙動や規模を決定する最大の直接要因といえる。そのため、液体燃料が浸潤したガラスピース層を用いて行われてきた今までの研究を、その固液混合相の初期温度で分類してみると以下のように要約される。

3.1 固液混合相の温度が燃料の引火温度よりも低い場合^{21, 22, 27, 28}

この場合、表面を伝ばする火炎を見ると、ピース径の大小、即ち、空隙の大小が、ピース層の表面への燃料供給速度に直接影響を与えるために、火炎の規模と伝ば速度を支配する最大の因子であることがわかる。火炎の伝ば距離と経過時間との関係を見ると、ピース径が小さい（空隙が小さい）場合は、火炎の伝ば速度はほぼ一定であるが、ピース径が大きい（空隙が大きい）場合には、火炎伝ば速度が着火後の経過時間とともに次第に低下し、伝ば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、比較的粗いガラスピース層の表面に沿う気流の中における伝ば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^{21, 29}。

ピース径の増大とともに、火炎の平均伝ば速度は著しく減少し（ピース径の減少とともに、火炎の平均伝ば速度は著しく増大し）、また、ピース層温度の上昇による火炎伝ば速度の増大の効果は、ピース

径が大きい場合には顕著ではなくなる。これらの結果は、固液混合相の表面における燃焼による燃料消費速度と固相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、固液混合相上の火炎伝ば現象を詳細に解明するためには、火炎から固相への支配的な伝熱形態の検討に加えて、固相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。火炎が伝ばする際の固液混合相内の燃料の挙動については、詳細な研究例がある²⁰。

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ば現象に近づき、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、火炎伝ば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ば現象に近づき、火炎伝ば速度は固有値に近づくことになる²⁰。

図3は、傾斜した固液混合相上の火炎伝ばにおける、固相の燃料輸送の模式図である。温度計測の実験によれば、伝ば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

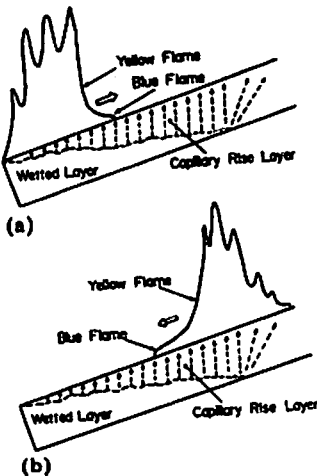


図3 火炎伝ばにおける傾斜した固液混合相内の燃料輸送の模式図²¹

既に気化しており、固相内から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。空隙が比較的大きい傾斜した固液混合相上における火炎の伝ば距離と経過時間との関係を見ると、上方伝ばでは、火炎から未燃表面への伝熱効果が大きく、始めは火炎の伝ばが速い。しかし、加熱された未燃表面への固相内からの燃料供給（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、下方伝ばでは、始めは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ばにおけるこうした違いは、固相内から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。

図4は、固相内の空隙が小さい（毛管上昇効果による燃料供給速度が大きい）傾斜した地面上における火炎の伝ば速度を示す。火炎伝ば速度はほぼ定常である。下方伝ばでは傾斜角度の影響が小さいが、上方伝ばでは、傾斜角度の増加により、火炎伝ば速

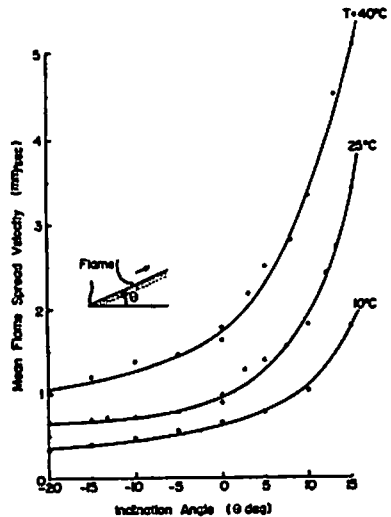


図4 固相内の空隙が小さい傾斜した地面上における火炎の伝ば速度²²

度が急に大きくなる、即ち、火炎から未燃地面への放射熱流束の効果が大きいことが分かる。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、表面を伝ばする火炎の先端からの伝導熱損失が大きく、火炎伝ば速度が低下する。即ち、固液混合相の表面の熱伝導率の増加は火炎伝ば速度を低下させる。液体燃料が浸潤した固液混合相の表面に沿った火炎の拡がり現象は、熱伝達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。

3.2 固液混合相の温度が燃料の引火温度よりも高い場合^{20, 21, 24, 25)}

この場合には、固液混合相の表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ばすることになり、表面の形状、空隙率、傾斜角度、熱伝導率、燃料が流出した後の経過時間といった因子は、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ば現象となることが予想される^{24, 25)}。

しかし、実際はそう単純ではない。図5は火炎の拡がり速度に対する固液混合相の温度の影響を示す。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ば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^{24, 25)}。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ば現象となり、温度の影響を受けない。さらに、これらの結果に対して、固相表面の熱伝導率の増大や、燃料が流出した後の経過時間は、殆ど影響を与えない。固液混合相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、固相の空隙率即ち、毛管上昇効果による燃料供給速度が火炎の伝ば速度に大きく影響を与え、そして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、火炎

の伝ば速度は固相の空隙率の影響を受けない。

実際の道路上の燃料流出事故に伴う火炎の伝ばが2次元であることから、これまでの一方向火炎伝ばの研究成果を踏まえて、さらに、軸対象の自由な火炎伝ばについても研究された^{27, 28)}。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。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。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見ると、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。その際の、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見ると、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とがわかる。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

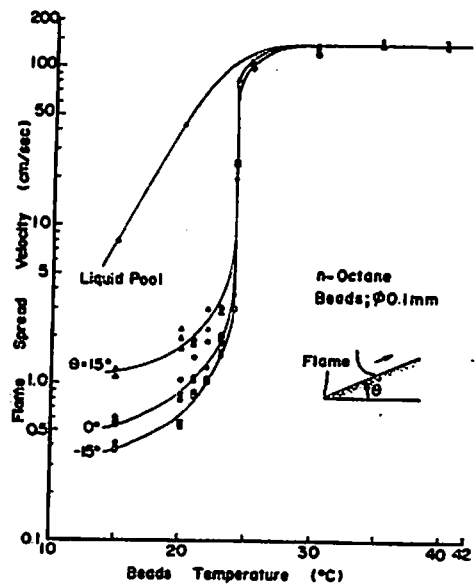


図5 火炎の拡がり速度に対する固液混合相の温度の影響²⁴⁾

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、プール火災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。

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²⁰⁾。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見ると、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ばし、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。

図6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²⁰⁾。

主に日本人研究者により本格的に開始された、液

体燃料が浸潤した固液混合相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残っている。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といえよう。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。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、想像を遙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。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

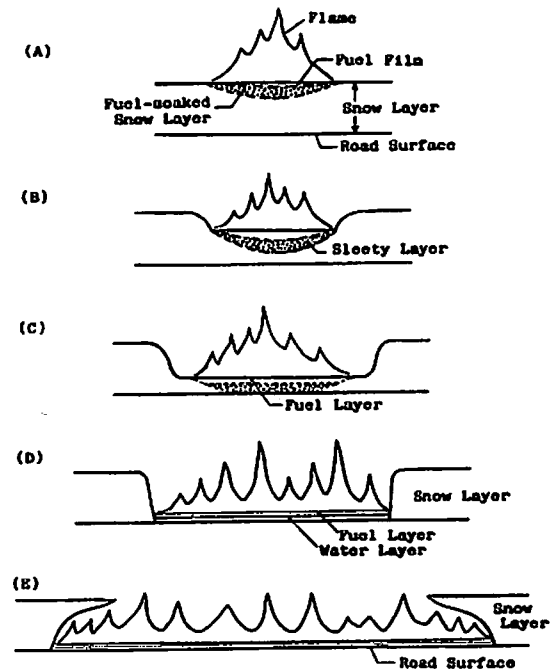


図6 ガソリンが流出した雪道における火炎の拡がりの模式図²⁰⁾

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。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災の挙動と、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。

参考文献

自己反応性物質 (固体ロケット燃料)

- 1) Sutton, G. P.: Rocket Propulsion Elements, An Introduction to the Engineering of Rockets, 5th edition, Chap. 10-12, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986.
- 2) Kuo, K. K. and Summerfield, M.: Fundamentals of Solid Propellant Combustion, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 90, AIAA, 1984.
- 3) deSoto, S. and Friedman, H.A.: AIAA Journal, Vol.3, No.3, pp. 405-412, 1965.
- 4) Mitchell, R.C. and Ryan, N.W.: Journal of Spacecraft, Vol.2, No.4, pp. 610-612, 1965.
- 5) Jensen, G.E., Brown, R.S., D. A. Cose, and Anderson, R.: AIAA Paper No.66-677, AIAA Second Propulsion Joint Specialist Conference, 1966.
- 6) Raizberg, B.A.: Fizika Goreniya I Vzryva, Vol.4, No.4, pp. 568-578, 1968.
- 7) Kuo, K. K., Vichnevetsky, R., and Summerfield, M.: AIAA Journal, Vol.11, No.4, pp. 444-451, 1973.
- 8) Krier, H., Rajan, S., and Van Tassell W. F.: AIAA Journal, Vol.14, No.3, pp. 301-309, 1976.
- 9) Kuo, K. K., Chen, A. T., and Davis, T. R.: AIAA Journal, Vol.16, No.6, pp. 600-607, 1978.
- 10) Kumar, M. and Kuo, K. K.: AIAA Journal, Vol.19, No.12, pp. 1580-1589, 1981.
- 11) Ando, E., Mizomoto, M., and Ikai, S.: Combustion Science and Technology, Vol.28, pp. 1-13, 1982.
- 12) Mitchell, R. C. and Ryan, N. W.: Journal of

Spacecraft, Vol.2, No.4, pp. 610-612, 1965.

- 13) McAlevy III, R. F., Magee, R. S., Wrubel, J. A., and Horowitz, F. A.: AIAA Journal, Vol.5, No.2, pp. 265-271, 1967.
 - 14) Bakhman, N. N. and Librovich, V. B.: Combustion and Flame, Vol.15, pp. 143-155, 1970.
 - 15) Siddiqui, K. M. and Smith, I. E.: Combustion and Flame, Vol.25, pp. 335-341, 1975.
 - 16) Kuo, K. K., Chen, A. T., and Davis, T. R.: AIAA Journal, Vol.16, No.6, pp. 600-607, 1978.
 - 17) Kumar, M., Kovacic, S. M., and Kuo, K. K.: AIAA Journal, Vol.19, No.5, pp. 610-618, 1981.
 - 18) Andoh, E., Mizomoto M., and Ikai, S.: Combustion Science and Technology, Vol.26, pp. 135-146, 1981.
- #### 固液混合相
- 19) Kuwana, K., Suzuki, M., Dobashi, R., and Hirano, T.: Fire Safety Science -Proc. of the Sixth Int'l Symp., pp. 367-378, 1997.
 - 20) Kaptein, M. and Hermance, C. E.: Proc. of the Sixteenth Symp. on Comb., pp. 1295-1306, 1976.
 - 21) Murphy, M. J.: Combustion Science and Technology, Vol.42, pp. 223-227, 1985.
 - 22) H. Ishida: Fire Safety Journal, Vol.10, pp. 163-171, 1986.
 - 23) Takeno, K. and Hirano, T.: Proc. of the Twenty-First Symp. on Comb., pp. 75-81, 1986.
 - 24) Ishida, H.: Fire Safety Journal, Vol.13, pp. 115-123, 1988.
 - 25) Takeno, K. and Hirano, T.: Proc. of the Twenty-second Symp. on Comb., pp. 1223-1230, 1988.
 - 26) Suzuki, T., Kawamata, M., and Hirano T.: Fire Safety Science -Proc. of the Second Int'l Symp., pp. 199-208, 1988.
 - 27) Ishida, H.: Fire Safety Journal, Vol.18, pp. 213-230, 1992.
 - 28) Suzuki, T., Kawamata, M., Matsumoto, K., and Hirano T.: Fire Safety Science -Proc. of the Third Int'l Symp., pp. 227-236, 1992.
 - 29) Ishida, H., Sato, K., Hokari, K., and Hara, T.: Journal of Fire Sciences, Vol.14, pp. 50-66, 1996.