

6. 4 可燃性液体容器槽を移動させた場合の実験結果および考察

6. 4. 1 初期温度と燃え拡がり速度

図6-1 1は、静止時のエタノール、プロパノールおよびプロパノールを浸潤させたガラスビーズ表面に沿った平均燃え拡がり速度 V_{F0} を、着火前の初期液温 T_j を変えて調べたものである。また、実験に使用した可燃性液体の引火点（密閉）をベンスキーマルテンス試験器により調べ、プロパノールが25℃、エタノールが14℃という結果を得ることができた。 T_j と燃え拡がりの様相の変化を観察したが、エタノールとプロパノールについて、それぞれ6℃と18℃を境に伝ばの様相が変化することがわかった。その温度以下では、火炎は急速に前方に動いたり、戻ったりといった振動的な伝ばの挙動を示し、その温度より高い場合には、一定速度で伝ばする。

図6-1 2は、プロパノールの時間経過に対する火炎先端の移動距離を示したもので、 $T_j=20℃$ の場合は一定速度で燃え拡がるが、9.5℃の場合は周期性の強い振動を繰り返しながら徐々に前方へ燃え拡がるのがわかる。ここでの周期は約4 Hzで、前進するときの速度は約27 cm/sである。

T_j の上昇とともに燃え拡がり速度が増加するものの、引火点に達した時に火炎の伝ばの様相が明らかに変化するというようなことはなかった。例えば、プロパノールでは24℃で $V_{F0}=20$ cm/s、引火点25℃を超え26℃では23 cm/sになり、エタノールでは13℃で25 cm/sが引火点14℃を超え、15℃で35 cm/sになるというような燃え拡がり速度の変化を示し、引火点において不連続的な燃え拡がり速度の変化は見られない。引火点よりも2~3℃高い程度では明確な変化が見られないものの、引火点より5℃程度高くなると、燃え拡がりの様相の変化が明確になることがわかった。

エタノールの液温が引火点よりも十分に高い20℃付近では、燃え拡がり速度は100 cm/sにも達し、ほぼ一定速度で伝ばする。このとき火炎先端位置の高さは、 T_j が低い時にそれまで液面上約1mmに形成していたよりも高い位置に形成し、燃え拡がる様子が観測された。メタノール予混合火炎の層流燃焼速度は当量比1.08で最大50cm/sにもなるが[244, p. 462]、火炎先端よりも前方への気相の流れが存在することで、伝ば速度は100cm/sにもなることが明らかになっている[146]。

つまり、このような火炎先端の挙動は、予混合火炎の性質を持つことによって現れる挙動であり、火炎先端の液面からの位置は、おそらく、液面上に形成される予混合気層の化学量論比になる（そこで最大燃焼速度を持つ）位置で、その層に沿って火炎が伝ばするものと考えられる。

6.4.2 容器静止時の液相内の流れの場合

図6-13は、プロパノール液面上の燃え広がり直接撮影した様子である。液相内の流れを可視化するために、アルミニウム粉末を混入し、上方からスリット光（約2 mm）を導入することにより、35 mmスチールカメラにより1/15秒露出で撮影した。この火炎は、初期液温が20℃の際に実験をおこなったもので、火炎は10 cm/s一定速度で画面、左方向へ伝ばしている。この図から、火炎先端のよりも前方液相内に循環流が形成している様子が見られる。この循環流は、図では反時計回りで、深さ約6 mm、長さ約15 mmの領域を持ち、火炎先端よりも約6 mm前方に循環流の中心がある。

目視における液相内の観測では、プロパノール振動燃え広がり範囲（ $T_j = 18^\circ\text{C}$ 未満）では、表面に沿って火炎先端よりも前方に向かう流れと、火炎下の循環流の存在があることがわかった。これはAkitaのメタノールを使った観測と同様である[142]。循環流領域の中心は火炎先端よりも前方にあり、先行する形で移動し、気相中の火炎の移動と液相中の循環流領域の移動がほぼ等しい。ただし、循環流の領域が水平に長く広がり、循環流が二つに分裂することがあることがわかった。初期液温が30℃ほどになると、循環流などの液相の流動は明確に観測できず、火炎の伝ばに液相の流動が依存しなくなるようである。

Ito [144-145] らは、プロパノール液相内の温度をホログラフィ干渉法を用いて測定している。図(b)はその様子で、循環流領域の温度がいわゆる液相の平均温度（バルク温度）よりも高いことを明らかにしている。図(a)と(b)は循環流の中心軸をそろえているが、循環流領域の大きさと温度領域の大きさ、さらに火炎先端の位置が異なるようである。温度分布からは、バルク温度よりも高い領域が二つ存在することが特徴的であるが、流れの場を見ると大きな循環流が一つしか観測できない。

ところで、このような循環流の生成機構には諸説あるが、大きいほうの循環流は、温度差に基づく浮力に誘起される流れ、表面に沿った流れは火炎下の高温領域から火炎先端前方表面の低温領域の温度差に基づく表面張力駆動流であるという説が一般的である [126]。

6.4.3 容器移動時の火炎先端の挙動

(a) 容器の移動方向の影響

図6-14は、左方に燃え広がるのと同じ方向に容器を移動させた場合（加速過程）の火炎の様子をトレースした様子で、左の図は静止座標から、右の図は移動座標から観測される火炎の動きである。ここで示した様子は実験の一例で、循環流が二つに分離形成される場合のものである。循環流の領域の観察は、少量のマイクロバルーン微粒子（白色）をかくはんして液体に混ぜ、浮遊状態にし、火炎の移動とともに流動している範囲を目視によっておこなった。

移動前（(a)と(b)）は、循環流領域と火炎はほぼ同じ速度で動き、移動開始とともにわずかに火炎の移動速度が減少し始め（c）、移動速度が増加するにつれ、右の図に示したように見かけ上、火炎先端は後退するようになる（d）。ただし、静止空間から見ると（左の図）、火炎は燃え広がり速度が減少するものの静止空間を移動している。

移動を開始させると液相内では慣性のため、容器の移動に対して液体が絶対座標系にとどまろうとし、結果として液体の一部が容器後端からあふれることになる。従って、容器の長さの影響もあり、液相内の流動は容器後端で制限される。図(d)において、容器長さにより液相内の流動が制限され、火炎先端が見かけ上後退せず、保持される様子が見られる。

図6-15は、右方向に燃え広がるときに容器を逆に、左方向に動かした場合（加速過程）である。移動速度に火炎の伝ば速度が比例し、循環流領域と火炎先端が相対的に一定位置を保ちながら、それらが一緒に移動することがわかる。循環流の回転は、図では時計回りである。

方向に関わらず、このような一連の挙動で特徴的なことは、火炎の動きと液相内の流動が対応しているということである。火炎先端は循環流領域の端に近い部分上方に位置しているが、容器の移動開始後、循環流の領域、液相の流動とともに

に火炎先端が伝ばする。

(b) 火炎先端の位置

図6-16(a)と(b)は、時間とともに加速移動する容器の移動速度 V_T と火炎先端の位置を移動座標上で測定したものである。

図6-16(a)は初期温度21℃の場合で、測定開始 $t=0$ から0.4 sの間、容器は静止しており、火炎は14 cm/s一定速度で伝ばしている。 $t=0.4$ sで容器が移動を開始すると、火炎先端の移動速度が次第に減少し、0.6 sから0.666 sは停止し、その後1.2 sまで後退する。それから、1.266 sまでわずかに停止し、その後、前方へ移動するという挙動を示す。火炎先端が再び前方へ移動するのは、液相の流動のためである。これは、容器が移動を開始するとすぐ液相全体（バルク）流れは慣性のため、後方へ流れるようになるが、火炎直下の循環流領域はわずかに前方へ移動を続け、火炎先端の挙動と同じように、後退することになる。容器長さのため、一部の液体は容器後端であふれ、全体の液相流れは後端に近いところで滞留し、後端面ではねかえり、前端へ向かう流れとなる。すなわち、液相の流動に火炎先端の移動が大きく影響されることがわかる。

図6-14の左図を参考に絶対静止座標系で見ると、火炎先端は静止空間を $V_F = V_{FT} + V_T$ （2章、式(2-7)）で伝ばしている。 $t=0.4$ sに容器を移動し始めると、時間ごとの移動距離 Δx が減少し、 $t=0.6$ sで Δx が0となる。つまり、 $V_T=9$ cm/sで V_{FT} が0となり、このとき、火炎先端は空間を9 cm/sで伝ばしている。 $t=0.666$ sまでは、そのまま維持し、0.666 s以降1.2 sまで $V_{FT}=-3$ cm/s、この間、 V_T は13 cm/sから22 cm/sまで増加するので、静止座標から見ると火炎先端は $V_F=10$ cm/sから19 cm/sまで増加して伝ばしていることがわかる。

図6-16(b)は、 $V_{F0}=13$ cm/sで燃え拡がっている場合について、容器の移動加速度を小さくした場合の様子である。 $t=0.2$ sで移動を開始して、 $t=0.433$ s（ $V_T=6$ cm/s）以降、火炎先端の移動が小さくなり、 $t=0.966$ sまでの平均的な速度は $V_{FT}=1.5$ cm/s、その間 V_T が6 cm/sから12 cm/sまで増加しているので、静止空間から見ると、 $V_F=7.5$ cm/sから13.5 cm/sまで増加して伝ばしている。さらに時間が経過すると、火炎が大きく前方へ移動をはじめると、これは液相内の

後端面ではねかえってくる流れのためである。

見かけ上、火炎先端の速度が小さくなる $t=0.433$ s から 0.966 s の火炎先端の位置をよく見ると、わずかであるが、前方へ進み停止、というような繰り返しをともなっている。

図 6-16 (a) と (b) を比較すると、加速度が異なっても、移動とともに火炎先端の移動速度が急激に変化しないことがわかった。

(c) エタノールの場合の挙動

図 6-17 はエタノールに関する容器移動時の火炎先端の挙動で、静止時の速度を変えて調べたものである。図より、 V_{F0} が増加すると、火炎先端は見かけ上、後退せずに前方へ移動し続けることがわかる。例えば、 V_{F0} が 25 cm/s の場合についてみると、 $t=0.233$ s から 0.5 s までの V_{FT} の平均速度は 7.5 cm/s で、その間 V_T は 9 cm/s から 18 cm/s まで増加し、 V_F は 16.5 から 25.5 cm/s まで増加する。

同様に V_{F0} が 17 cm/s の場合、 $t=0.266$ s から 0.433 s の平坦部分の V_T は 11 cm/s から 16 cm/s まで増加し、 V_F も 11 cm/s から 16 cm/s まで増加する。

これらの結果から、 V_T の増加とともに V_F が増加するが、その最大が V_{F0} と同程度ではないということが推測される。これは、プロパノールの場合も同様である。従って、 V_{F0} が大きい場合には、 $V_T > V_{F0}$ になると、 $V_F < 0$ となり、火炎先端が気相中を伝ばできる限界の存在が予想される。

液相の流動性についてエタノールとプロパノールを比較すると、エタノール 1.51×10^{-6} m²/s、プロパノール 2.33×10^{-6} m²/s であり [252]、 $V_T=0.15$ m/s、代表長さを深さ 0.01 m とおけば、レイノルズ数はそれぞれ、 993 、 644 となる。エタノール液相の方が流動性が高いことがわかる。このことから、図 6-16 (a) と 6-17 の V_T が同じように変化するにも関わらず、容器が移動を開始して、後端面で跳ね返って戻る時間がプロパノールよりも短いことが説明できる。

(d) 初期温度の影響

図 6-18 は、プロパノールの初期温度が 9.5°C の場合の火炎先端の挙動である。容器が静止している際には火炎先端は振動的に移動しているが、容器が移動を開始するとともに、その周期性は残しながら見かけ上、次第に後退してくる。

$t=0.6$ sから 1.66 sまでの平均的な V_{FT} は 3.5 cm/sであり、 V_T は 8 cm/sから 16 cm/sまで増加するので、 V_F は 4.5 cm/sから 12.5 cm/sまで増加する。静止空間から見ると、火炎先端は前方へ移動していることがわかる。

(c) 容器長さの影響

実験のほとんどは 400 mm長さの容器を用いているが、容器の長さが短い 150 mm長さのものを用いた場合についても調べてみた。その火炎の挙動が図6-21である。プロパノール、 $V_{F0}=10$ cm/sの場合で、火炎先端の動きは 400 mm長さのものと同様であるが、容器が短い分だけ流れが後端面で跳ね返ってくる時間が短いことがわかる。

6.4.4 ガラスビーズ層に浸潤させた場合

(a) 可燃性液体の違い

図6-20は、エタノールとプロパノールを 0.2 mm径のガラスビーズに浸潤させた場合の火炎先端の挙動である。初期温度は、エタノールが 9°C 、プロパノールが 19°C である。これらの火炎の挙動で特徴的なことは、液体のみの場合と違って容器の移動開始後の V_{FT} が増加することである。静止時のエタノールの速度 V_{F0} は 1 cm/s、プロパノールの V_{F0} は 0.2 cm/sであるが、 $t=0.5$ sの速度 V_{FT} はそれぞれ 2 cm/s、 1 cm/s、というように増加する。 V_T の増加とともに火炎先端が振動的に前後しつつ伝ばするが、液体の場合のような連続的な後退が見られない。このような挙動は、図6-8、6-9のような固体の様相に似ており、このような燃え拡がりが凝縮相の流動性に依存していることがよくわかる。

図6-21は、加速が大きく、 V_T が 95 cm/sまでの火炎先端の挙動を調べたもので、火炎先端が振動的に伝ばするが、 V_T が 80 cm/sを超えると、かなり後退したり、逆に大きく前進したりするという挙動が見られる。さらに V_T が増加すると、火炎が表面に近づき、変動の範囲は小さくなる。

図6-22は初期温度 23°C デカンをガラスビーズに浸潤させた場合の火炎先端の挙動である。加速が小さく V_T が 45 cm/sに達する場合(a)、火炎先端は小刻みな変動を伴いながら伝ばすることがわかる。 V_T が 95 cm/sに達する場合(b)、 V_T が

が小さいときは小刻みな変動であるが、 V_T が増加すると、火炎先端が大きく後退し大きく前進するというような挙動を示す。

(b) 温度上昇領域の変化

デカンーガラスビーズ凝縮相 (0.2 mm径) の静止時の燃え拡がり速度 V_{F0} は約 0.07 cm/sと小さく、固体の場合 (図6-6) と同程度である。 V_T に対する火炎先端の挙動がP M M A板の場合に似ていることから、類似した燃え拡がり機構によるものと考えられる。

そこで、60 mm長さの小さい容器を用い、シュリーレン撮影をおこない、その濃淡が見られる領域 (主に温度上昇領域に対応) をトレースしたものが図6-23である。これらの3種の曲線は時間的に連続したものではなく、 V_T が5 cm/sから14 cm/sに加速しているときの様子で、火炎先端の挙動は図6-24の通りである。可視火炎の先端はこのトレースした線の後ろの方に位置している。例えば、実線で示された2本の曲線のうち図の右の曲線に近い位置にある。

V_T の移動とともに火炎先端は小刻みに変動し、2 mm厚さ程度の温度上昇領域もその形状 (厚み) を変化させていることがわかる。変動は約0.1 s周期で、少しずつ前方へ伝ばする。Suzukiら [152, 153] の対向気流中におけるケロシン-砂凝縮相の燃え拡がりでは、火炎先端、温度上昇領域先端、逆流領域先端の三つの時間ごとの位置の変化を調べているが、時間的な変動周期が同じであることを明らかにしている。本実験でもわかるように温度上昇領域の変動幅は、火炎先端の変動幅よりも大きい。つまり、温度上昇領域が凝縮相表面への加熱 (予熱) 作用として燃え拡がりに寄与することが考えられる。この速度範囲ではその領域の厚さが減少、あるいは増加する明確な傾向は見受けられないが、 V_T が増加し火炎が表面に近づくと、結果として上昇領域が前方へ押し出され、凝縮相表面への加熱領域が増加し、火炎先端の保持に寄与しているものと推察できる。これは、気相を通した前方への熱伝達が重要であることを示す結果である。

6.4.5 凝縮層内の熱移動の影響

4章では、凝縮相内前方への熱伝達を制限した実験をおこない、デカンーガラ

スピーズ凝縮相では $V_T=60$ cm/sにおいて、プロパノールでは80 cm/sにおいて吹き飛び、消炎することを明らかにした。そこで、この章の実験と比較してみると、火炎先端が大きく後退する速度がそれらの速度に近いことに気づく。しかし、この章の実験では、火炎先端が後退しても後方の表面で保持されるので、吹き飛び・消炎には至らない。逆に、前方へ移動する様相が見られることからすると、凝縮相内の熱移動が火炎先端の伝ばに影響していることがよくわかる。

6. 5 まとめ

本章では、凝縮相内の前方への熱移動がある場合について、伝ば火炎の可燃性物質移動への追従性を調べた。可燃性固体としては、熱的に薄いものと厚いものの代表として用いられることが多い紙とPMMA板を用いた。可燃性液体については、主に引火点以下の一様燃え拡がり速度を持つ領域について、静止時の燃え拡がり速度を可変するために異なる液体を用いた。また、ガラススピーズに浸潤させた場合についても調べた。その結果、次のような結論を得た。

(1) ろ紙を用いた場合、 V_T の増加とともに火炎先端の移動速度が増加し、むしろ燃え拡がり速度が増加することがわかった。PMMA板を用いた場合、移動速度の増加とともにすぐに火炎先端は後退するが、吹き飛び・消炎に至らず、保持され、振動的に燃え拡がりを続ける。

(2) プロパノールを用いた場合、容器の移動を開始すると、液面に沿ってわずかに前進するが、移動速度が10 cm/sに満たないうちに後退することがわかった。エタノールの場合は、後退は見られなかった。

(3) 液面に沿った火炎先端は見かけ上後退するが、静止空間から見ると伝ばを続けていることがわかった。火炎先端は静止空間を対向気流を受けて、伝ばするが、このような伝ばができる速度の限界は、静止時の燃え拡がり速度に近いことが推測された。

(4) 液相内の循環流の発達の様子を流れの可視化により観測することができ、このような循環流の領域は火炎先端とともに移動することがわかった。

(5) 容器が移動すると液相内の流動のため循環流領域が後退し、それとともに

火炎先端が後退し、容器後端面に跳ね返った前方へ向かう流れによって、逆に火炎先端が対向気流に向かって伝ばすることから、液相内の流動が火炎の伝ばに重要な役割を果たしていることがわかった。

(6) ガラスビーズに浸潤させた場合、火炎先端は固体表面に沿った時と類似した挙動を示すことがわかった。

(7) 固体、液体ともに凝縮相内の熱移動が、火炎先端の保持に寄与し、火炎が保持される限り、凝縮相内の前方への熱移動が継続するので対向気流が増加しても火炎が変動しつつも伝ばできることがわかった。

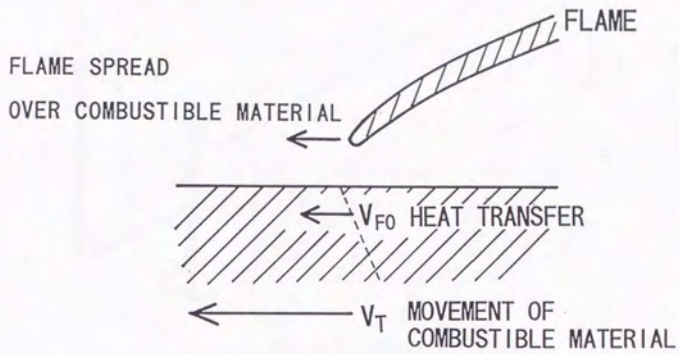


Fig. 6-1. Aspect of flame spread with thermal wave in condensed phase.

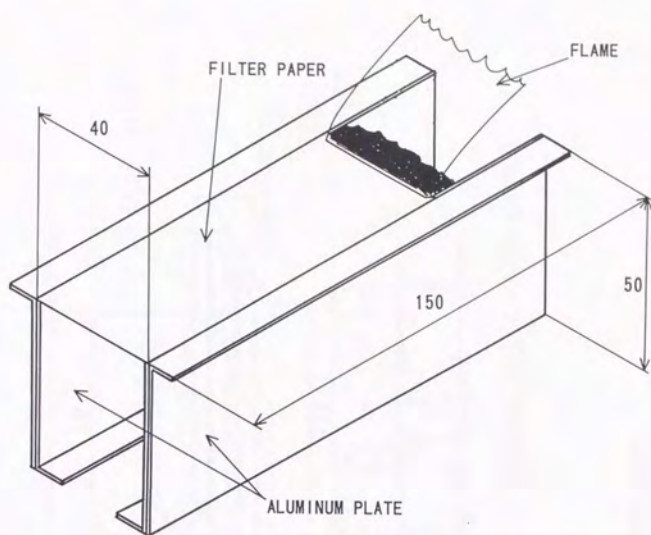


Fig. 6-2. Paper sheet support.

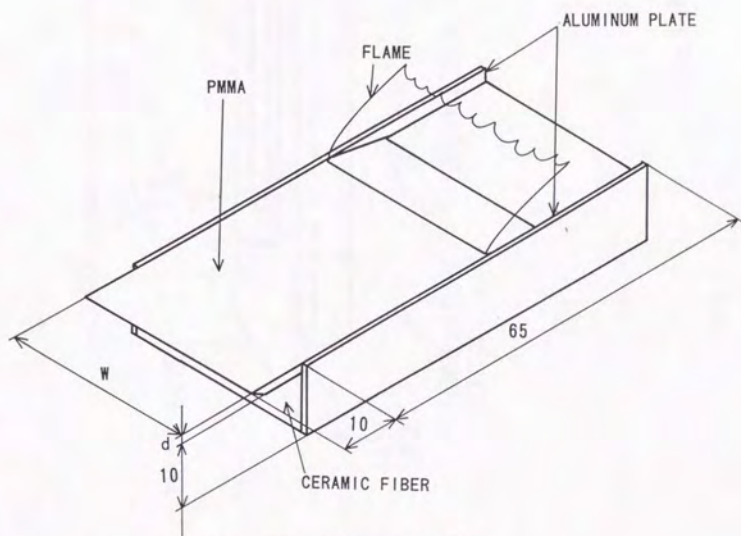


Fig. 6-3. PMMA seat holder.

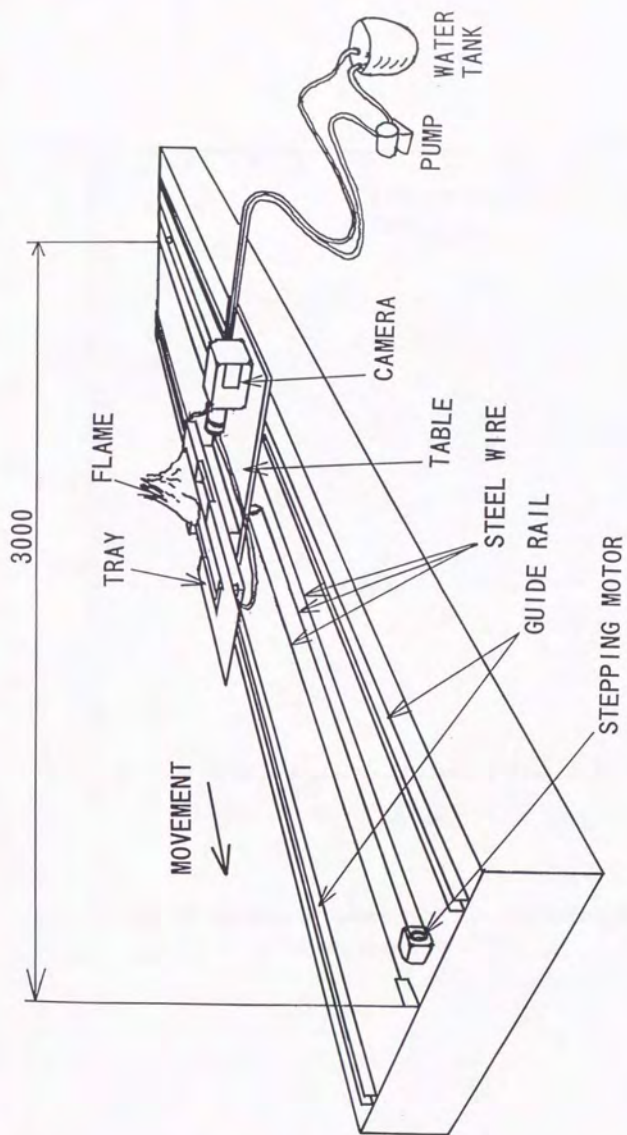


Fig. 6-5. Experimental setup.

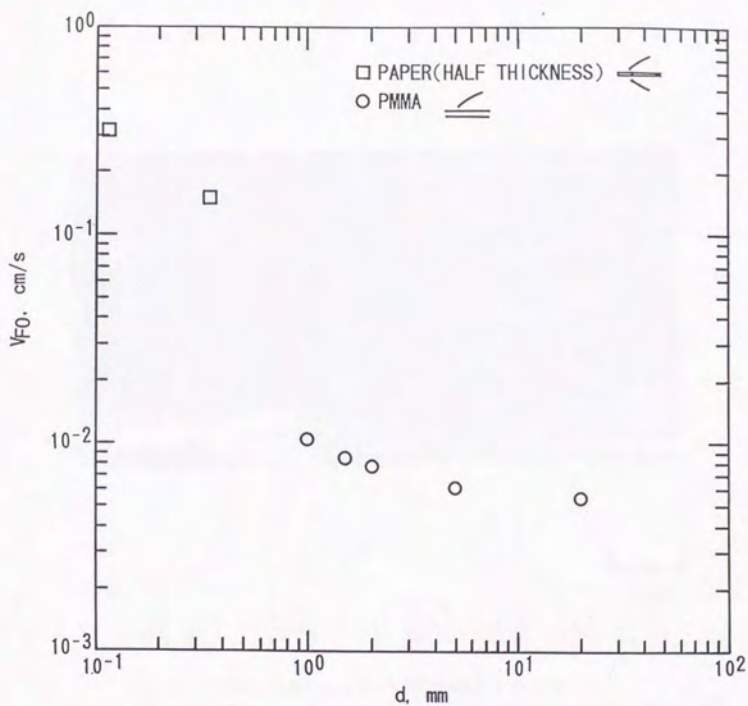


Fig. 6-6. Variation of flame spread rate with combustible solid thickness at rest condition.



1mm

Fig. 6-7. Flow field over a PMMA sheet at rest.
($d=1.0\text{mm}$, interval 7.64ms , exposure $1/8\text{s}$)

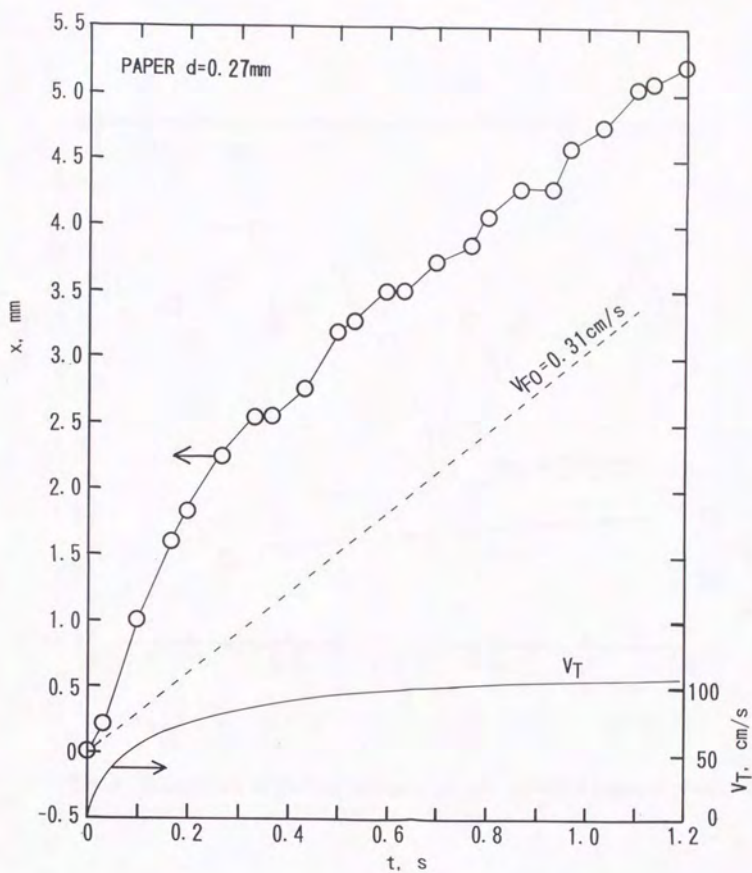


Fig. 6-8. Behavior of leading flame edge with a paper sheet motion.

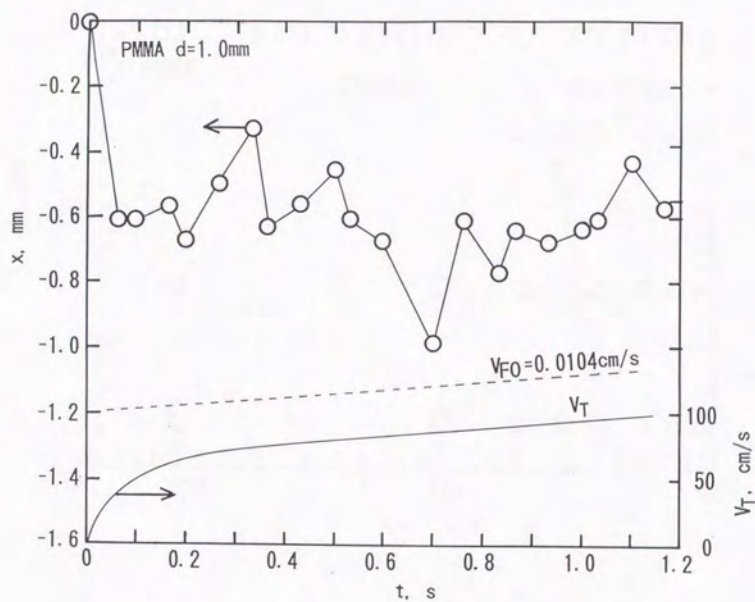


Fig. 6-9. Behavior of leading flame edge with a PMMA sheet motion.

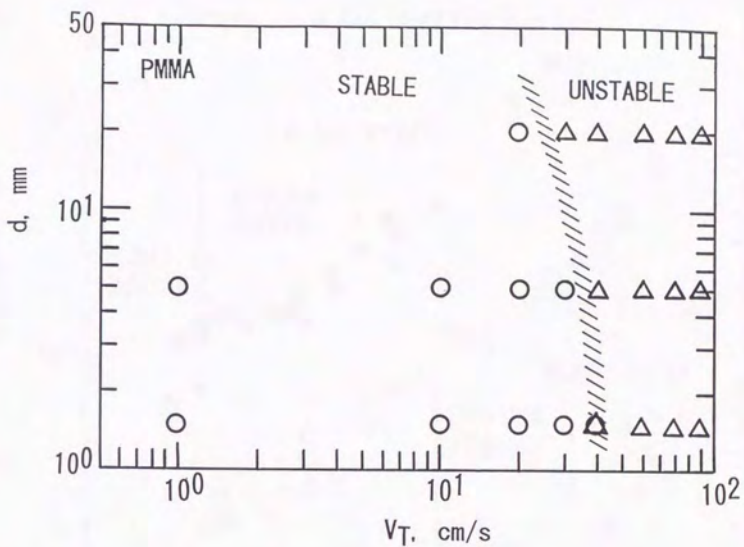


Fig. 6-10. Stability of leading flame edge spreading over a PMMA sheet with V_T .

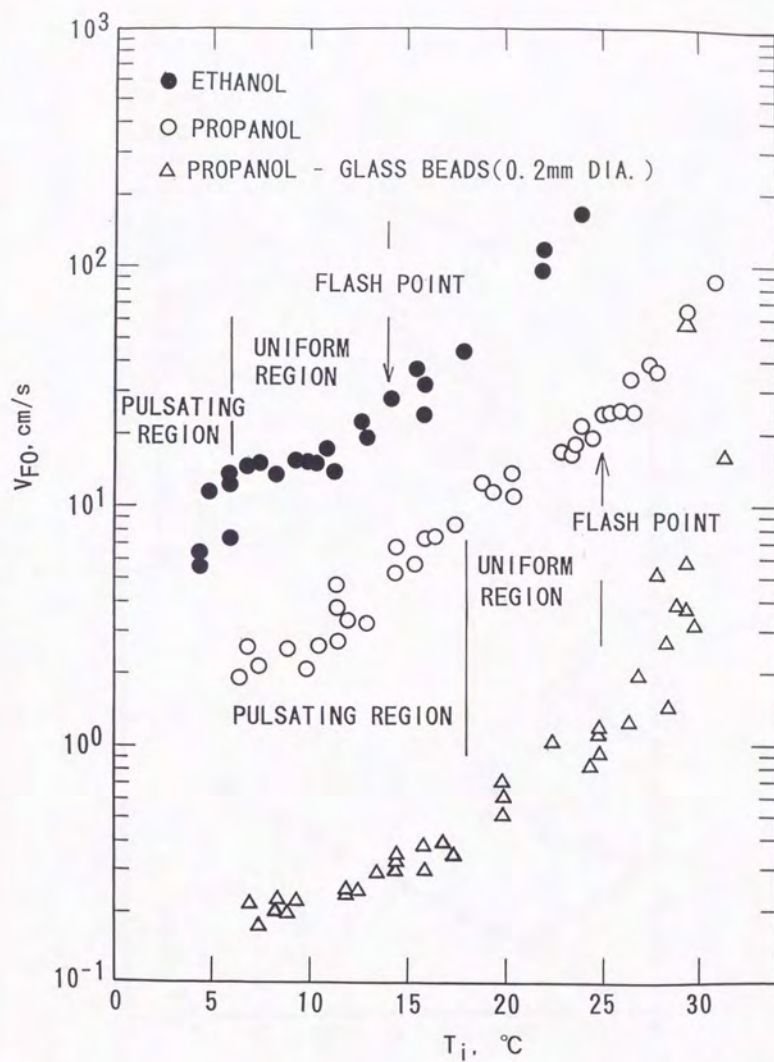


Fig. 6-11. Variation of flame spread rate with initial liquid temperature.

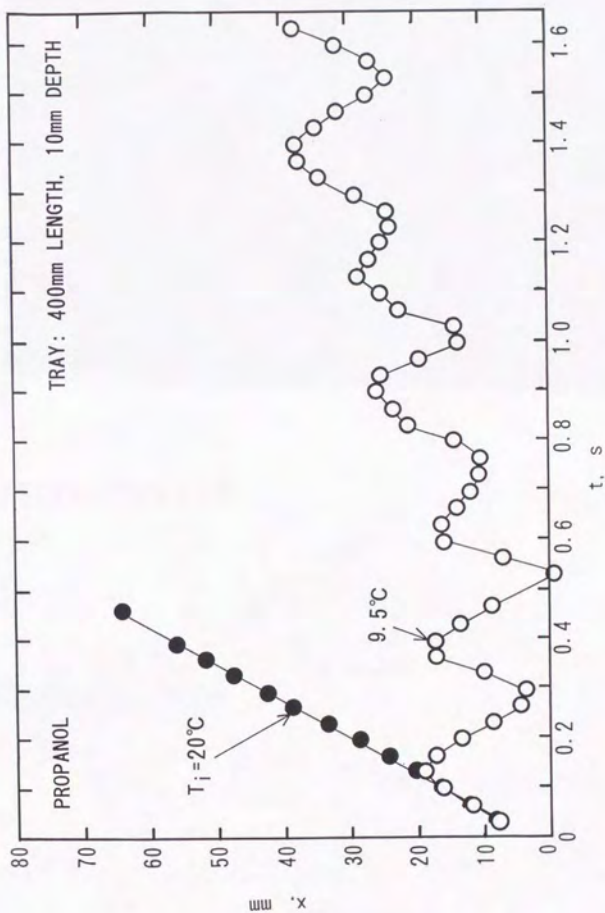
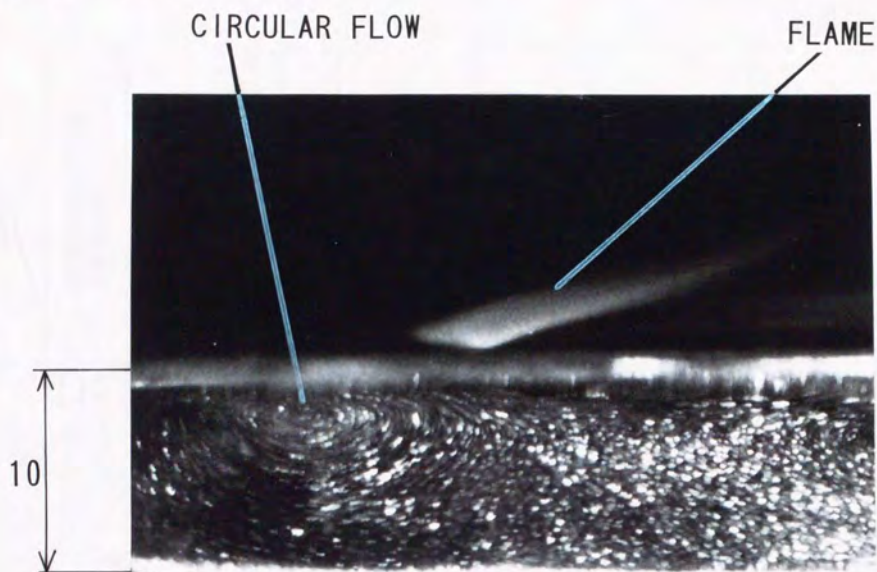
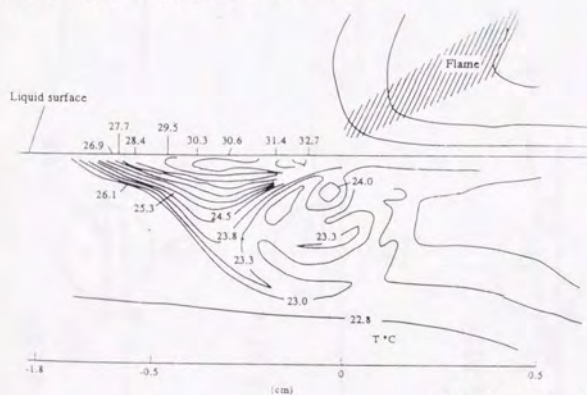


Fig. 6-12. Behavior of leading flame edge with different T_i .

(a) FLOW FIELD



(b) TEMPERATURE PROFILE



[FROM ITO, A. et al.,
COMBUSTION FLAME 83:375-389(1991)]

Fig. 6-13. Flow field in liquid phase during flame spread.
(1-Propanol, aluminum powder, exposure 1/15s)

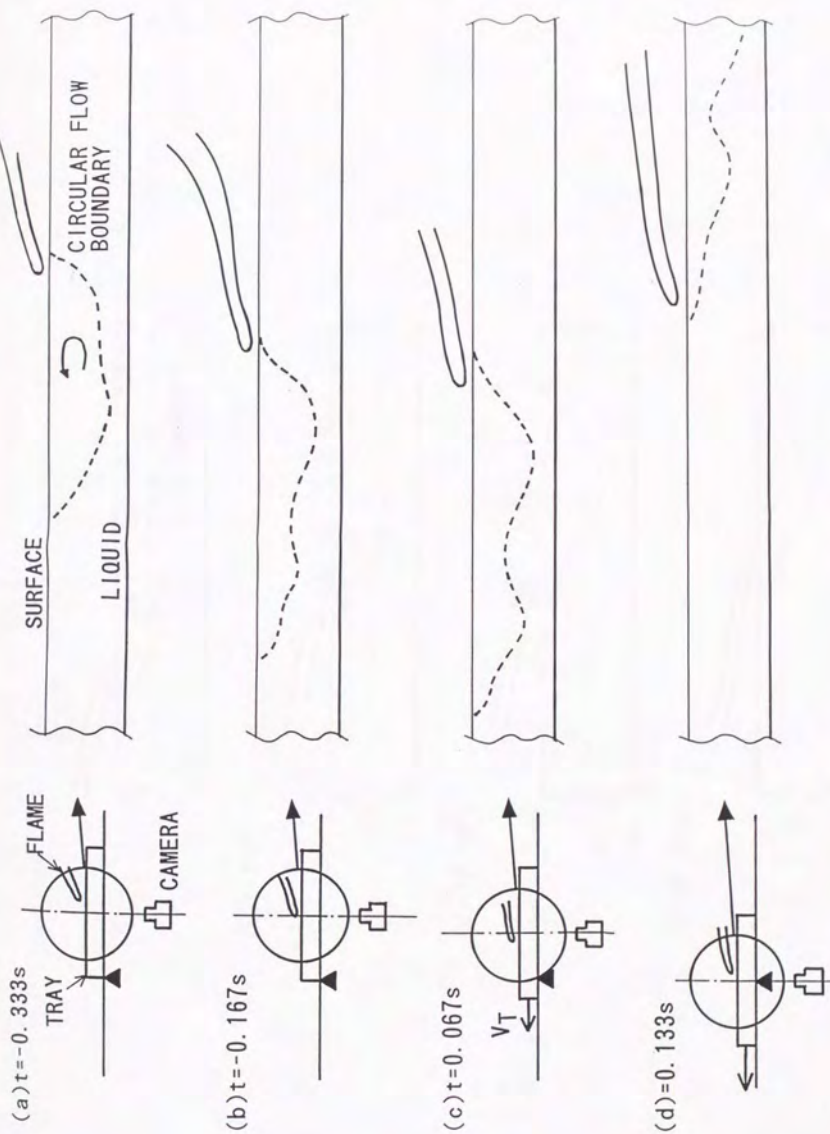


Fig. 6-14. Behavior of spreading flame and liquid flow with tray motion (Same directions).

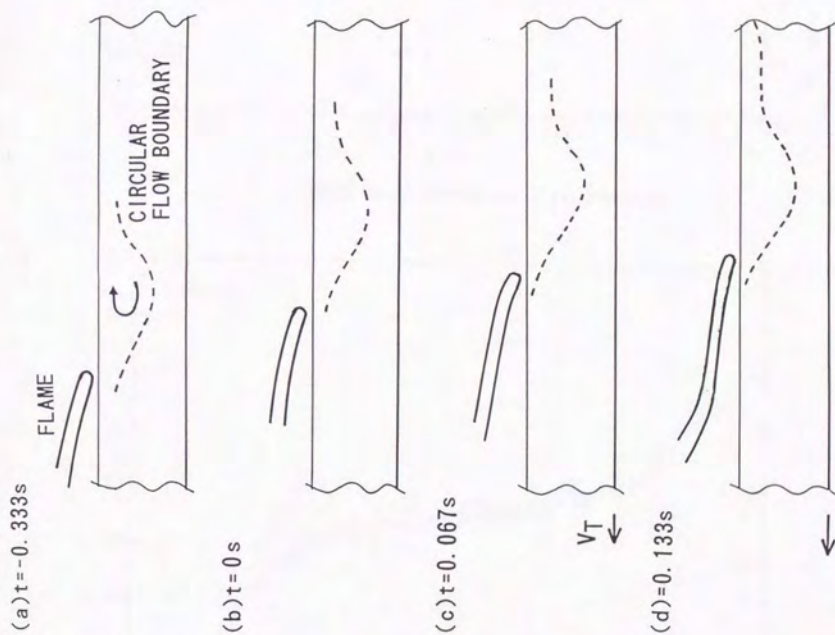
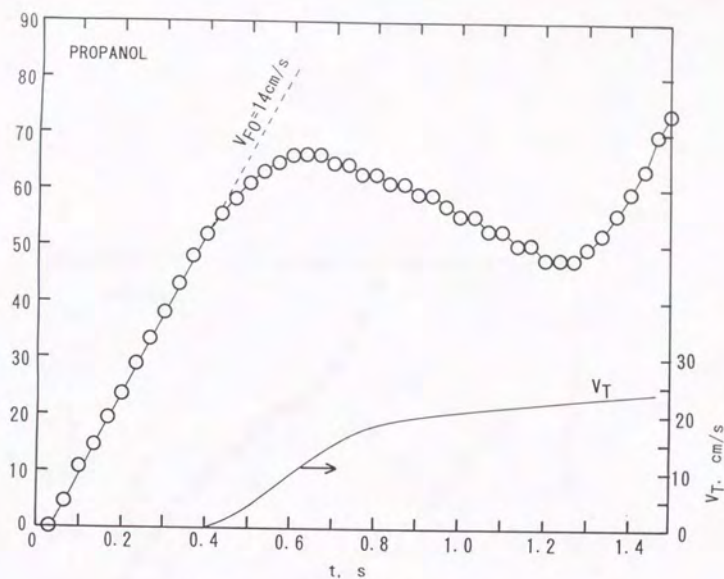
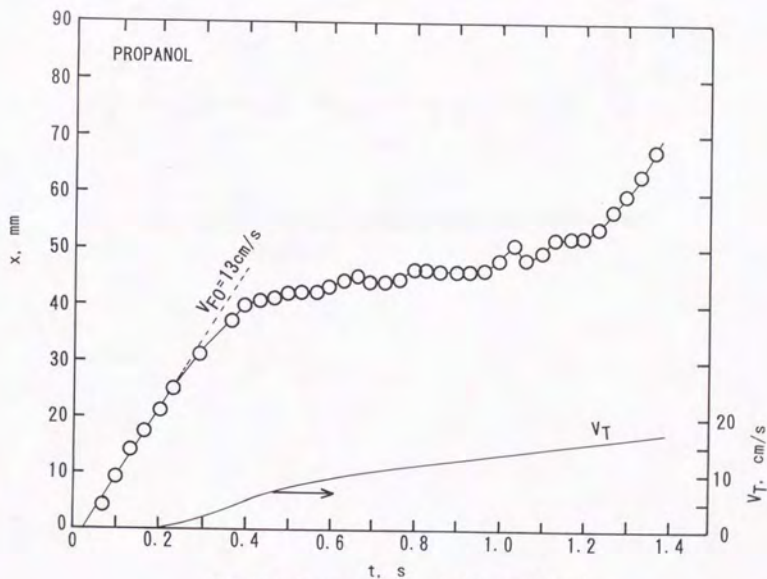


Fig. 6-15. Behavior of spreading flame and liquid flow with tray motion (Opposite directions).



(a) Initial flame spread rate $V_{FO} = 14 \text{ cm/s}$.



(b) Initial flame spread rate $V_{FO} = 13 \text{ cm/s}$.

Fig. 6-16. Behavior of leading flame edge with tray motion.
(1-Propanol)

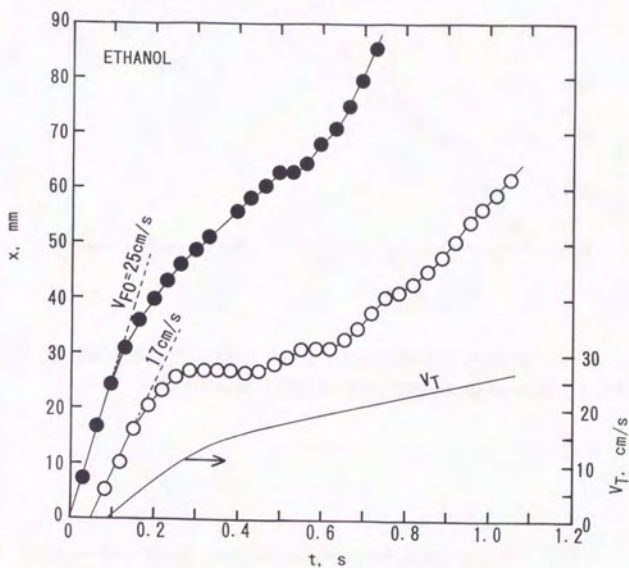


Fig. 6-17. Behavior of leading flame edge with tray motion.
(Ethanol)

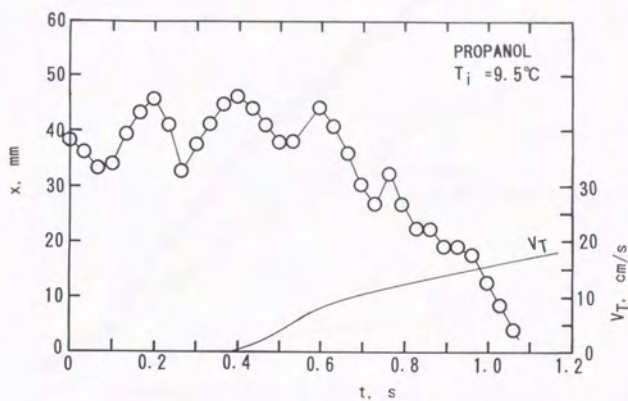


Fig. 6-18. Behavior of leading flame edge with tray motion.
(Influence of initial temperature, 1-propanol, $T_i = 9.5^\circ\text{C}$)

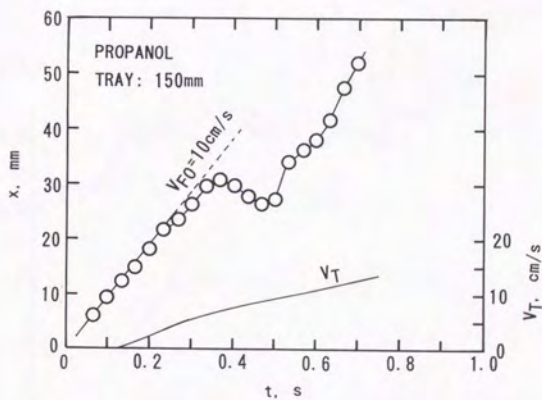


Fig. 6-19. Behavior of leading flame edge with tray motion.
(Influence of tray length, 1-propanol, length 150mm)

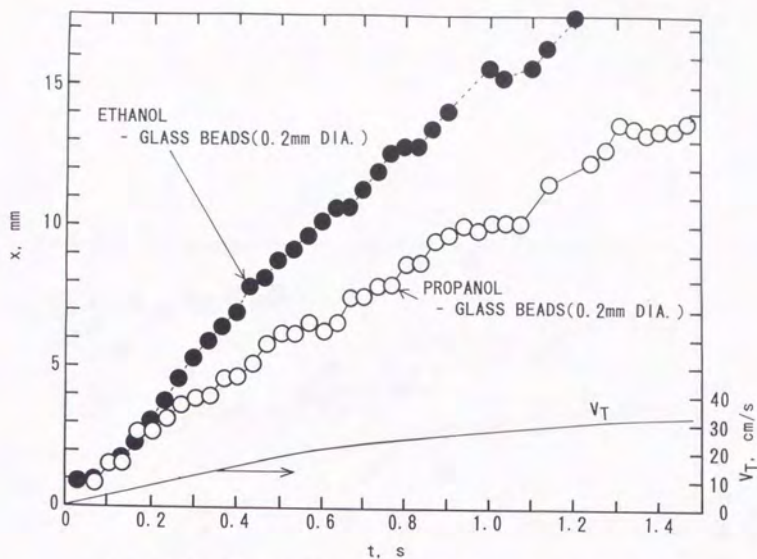


Fig. 6-20. Behavior of leading flame edge with tray motion.
(Combustible liquid soaked in glass beads layer)

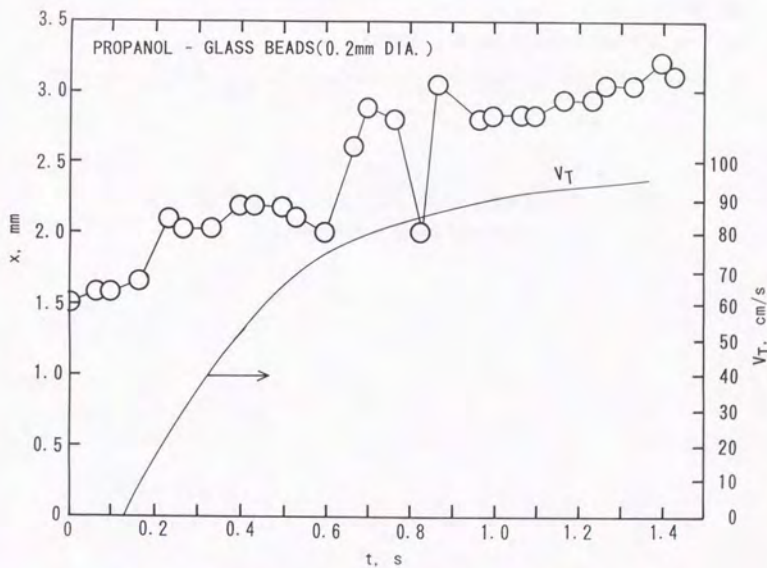


Fig. 6-21. Behavior of leading flame edge with tray motion.
(1-Propanol - glass beads)

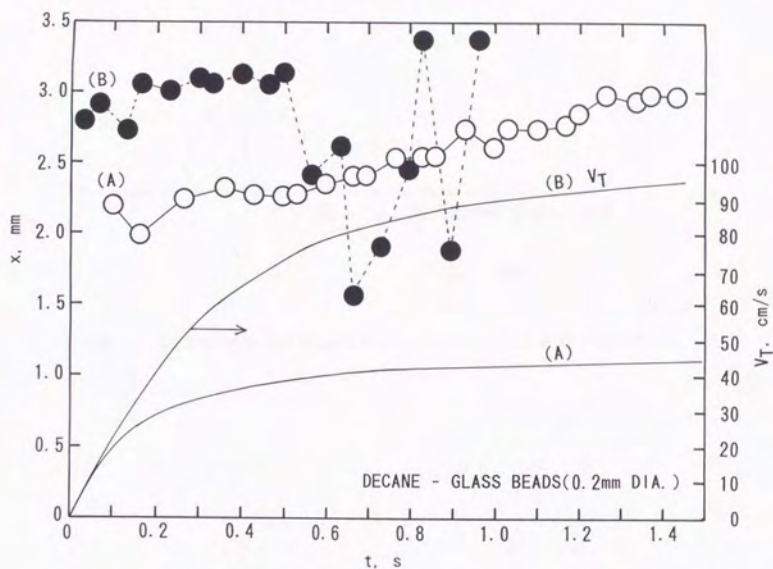


Fig. 6-22. Behavior of leading flame edge with tray motion.
(Decane - glass beads)

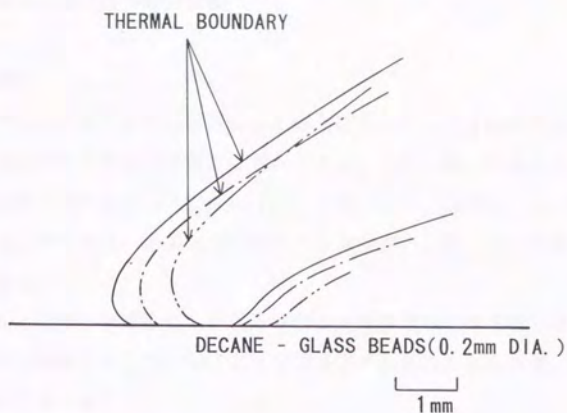


Fig. 6-23. Variation of thermal boundary during tray motion.

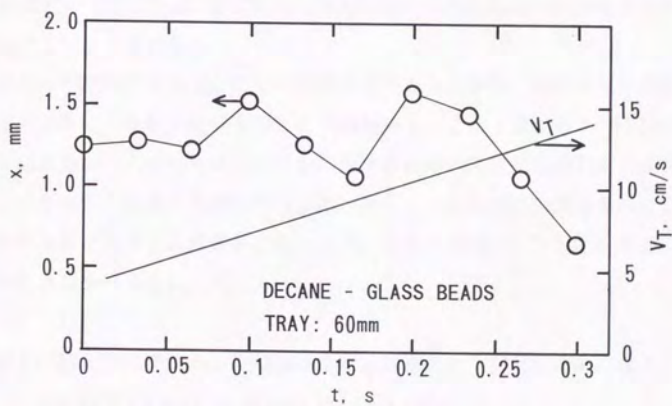


Fig. 6-24. Behavior of thermal boundary with tray motion.

第7章 火炎先端付近の数値解析

7.1 概要

これまでに、可燃性物質表面に沿った燃え拡がりや境界層拡散火炎における火炎先端の付近の火炎構造を明らかにするために、流れの場、温度分布、濃度分布などが数値解析的に調べられてきた [11, 12, 25, 50-53, 113, 162, 176, 178]。

このような計算結果は、実験結果を説明するのに用いられ、火炎先端の性質が議論されてきた。

本章では、可燃性物質表面上を燃え拡がる火炎先端の性質を明らかにするために、簡単な数値解析をおこない、火炎先端付近の火炎形状と濃度場、温度場の様相を調べることにした。

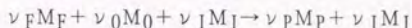
7.2 解析方法

7.2.1 解析対象と解析モデル

一定速度で燃え拡がる火炎先端は、図2-3(a)のように可燃性気体の吹き出し位置の移動とともに、静止空間を移動する。本研究では、図(b)のように火炎先端の移動を気体の吹き出し位置の移動により制御するために、可燃性気体の吹き出し位置を静止空間内で移動させた。火炎先端が可燃性気体の吹き出し位置とともに移動する(追従する)際には火炎先端には、可燃性気体の移動と相対する流れを受けていることになる。

火炎先端が移動する場合には対向気流を受けることから、可燃性気体の吹き出し位置を基準にした移動座標系のもとで検討する。ここでは、図7-1に示すように、平板表面から可燃性気体の吹き出しと平板に沿って酸化剤流れがある流れ場に火炎が形成される場合を解析対象とした。そして、拡散火炎の性質を持った火炎先端の移動性に関する計算をおこなう上で、さらに次のような仮定を置き、計算の単純化をはかることにした。

仮定(1)酸化剤は空気とし、可燃性気体とは次のような反応をおこなう。



ここで、 ν はモル、 M は分子量、各添字はF；可燃性気体、O；酸化剤、I；不活性化学種、P；（総括した）燃焼生成物。

(2) 実験で観測された火炎では、表面での反応がなく、表面への熱損失のため火炎先端は表面に付着することではなく、消炎距離に相当する距離 (stand off distance) だけ表面から離れて形成する。よって、火炎先端付近の反応は有限速度とし特別な取り扱いが必要とされるが、ここでは、表面においても無限大の反応速度をもち、火炎先端が表面に付着しているものとする。

(3) 火炎先端の性質は拡散火炎の性質を持ち、反応速度は無限大であり、酸化剤と可燃性気体の拡散・混合により、量論比の位置で反応が起こり、完結する火炎面 (flame sheet) であるとする。

(4) 吹き出し位置から上流への物質拡散が存在するため、境界層近似はおこなわない。

(5) 重力（浮力）の影響は無視する。

7.2.2 基礎式

流れの場を求めるのに、次式のような渦度 ω と流れ関数 ψ の輸送方程式を用いた。

$$\partial \omega / \partial t + u \partial \omega / \partial x + v \partial \omega / \partial y = (\mu / \rho) (\partial^2 \omega / \partial x^2 + \partial^2 \omega / \partial y^2) \quad (7-1)$$

$$\partial \omega / \partial t = 0 \quad (7-2)$$

$$\rho u = \partial \psi / \partial y, \quad \rho v = -\partial \psi / \partial x \quad (7-3)$$

$$\omega = \partial (1/\rho \cdot \partial \psi / \partial x) / \partial x + \partial (1/\rho \cdot \partial \psi / \partial y) / \partial y \quad (7-4)$$

このとき、エネルギー方程式と化学種に関する方程式は、

$$u \partial T / \partial x + v \partial T / \partial y = (\lambda / \rho C_p) (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2) + H_b \omega_f / \rho C_p, \quad (7-5)$$

$$u \partial Y_i / \partial x + v \partial Y_i / \partial y = D (\partial^2 Y_i / \partial x^2 + \partial^2 Y_i / \partial y^2) + \omega_i / \rho, \quad (7-6)$$

ただし、 $i = F, O, P, I$ 。

$$Y_F + Y_O + Y_I + Y_P = 1 \quad (7-7)$$

状態について

$$p = \sum_{i=F, O, P, I}^4 (Y_i / M_i) \rho RT \quad (7-8)$$

7.2.3 境界条件

境界条件は図7-1のように、図(a)の $u-v$ による表示と図(b)の $\omega-\psi$ による表示を用いて定義した。

領域①：酸化剤の流入は、

$$u=U_{\infty}, v=0, T=T_{\infty}, Y_O=Y_{O\infty}, Y_F=0, Y_I=Y_{I\infty}, Y_P=0. \quad (7-9)$$

領域②：吹き出し前方の表面では、壁面とし、

$$\begin{aligned} \partial u / \partial y &= \partial v / \partial y = \partial T / \partial y = \\ \partial Y_O / \partial y &= \partial Y_F / \partial y = \partial Y_I / \partial y = \partial Y_P / \partial y = 0. \end{aligned} \quad (7-10)$$

領域③：可燃性気体の吹き出し表面では、

$$u=0, v=v_w, T=T_w, Y_F=Y_{Fw}, Y_O=0, Y_I=Y_{Iw}, Y_P=Y_{Pw} \quad (7-11)$$

可燃性気体について、

$$\begin{aligned} \dot{m}_w &= (\rho v)_w \\ &= (\rho v)_w Y_{Fw} - D \{ \partial (\rho Y_F) / \partial y \}_w. \end{aligned} \quad (7-12)$$

$Y_{Fw} < 1$ であり、

$$Y_{Fw} = -D / (\rho v)_w \cdot \{ \partial (\rho Y_F) / \partial y \}_w + 1. \quad (7-13)$$

ただし、 Y_{Fw} は表面付近の濃度勾配によって定まる。

酸化剤は、

$$(\rho v)_w Y_{Ow} = D \{ \partial (\rho Y_O) / \partial y \}_w. \quad (7-14)$$

表面反応がないとし、酸化剤の表面へは酸化剤の拡散がないので、

$$Y_{Ow} = 0. \quad (7-15)$$

生成物と非反応物は、それぞれ、

$$(\rho v)_w Y_{Pw} = D \{ \partial (\rho Y_P) / \partial y \}_w \quad (7-16)$$

$$(\rho v)_w Y_{Iw} = D \{ \partial (\rho Y_I) / \partial y \}_w \quad (7-17)$$

従って、

$$Y_{Iw} = D \{ \partial (\rho Y_I) / \partial y \}_w / (\rho v)_w . \quad (7-18)$$

$$Y_{Pw} = 1 - Y_{Fw} - Y_{Iw} . \quad (7-19)$$

領域④：下流側では、

$$u/\partial x = \partial v/\partial x = \partial T/\partial x =$$

$$Y_0/\partial x = \partial Y_F/\partial x = \partial Y_I/\partial x = \partial Y_P/\partial x = 0 . \quad (7-20)$$

領域⑤：上方では、

$$u=U_\infty, v=0, T=T_\infty, Y_0=Y_{0\infty}, Y_F=0, Y_I=Y_{I\infty}, Y_P=0 . \quad (7-21)$$

領域⑥：火炎面では、

$$(\partial Y_F/\partial r) = -\alpha (\partial Y_0/\partial r) \quad (7-22)$$

ただし、 r は火炎面からの距離、 α は、

$$1/\alpha = (\nu_0/\nu_F) (M_0/M_F) , \quad (7-23)$$

と定義すると、 $(1/\alpha)$ は 1 グラムの可燃性気体を燃焼させるのに必要な酸化剤のグラム比、 (ν_0/ν_F) は 1 モルの可燃性気体を燃焼させるのに必要な酸化剤のモル比を表す。

また、

$$Y_0 = 0, Y_F = 0 . \quad (7-24)$$

7.2.4 火炎面モデル

ルイス数 $Le (= D/(\lambda/\rho C_p))$ を 1 とおくと、次のような結合関数を使い、式を簡略化できる。

$$Y_{0F} = Y_F - (\nu_F M_F / \nu_0 M_0) Y_0 = Y_F - \alpha Y_0 \quad (7-25)$$

$$Y_{PF} = Y_F + (\nu_F M_F / \nu_P M_P) Y_P = Y_F + \beta Y_P \quad (7-26)$$

$$Y_{IF} = Y_F + (\nu_F M_F / \nu_I M_I) Y_I = Y_F + \gamma Y_I \quad (7-27)$$

$$Y_{TF} = T + (H_0 \alpha Y_0) / c_p = T + \theta \alpha Y_0 \quad (7-28)$$

結局、式(7-5)と(7-6)の計五つの式は、次の四つの拡散方程式で表すことができる。

$$u \partial Y_{TF} / \partial x + v \partial Y_{TF} / \partial y = D (\partial^2 Y_{TF} / \partial x^2 + \partial^2 Y_{TF} / \partial y^2) \quad (7-29)$$

$$u \partial Y_{OF} / \partial x + v \partial Y_{OF} / \partial y = D (\partial^2 Y_{OF} / \partial x^2 + \partial^2 Y_{OF} / \partial y^2) \quad (7-30)$$

$$u \partial Y_{PF} / \partial x + v \partial Y_{PF} / \partial y = D (\partial^2 Y_{PF} / \partial x^2 + \partial^2 Y_{PF} / \partial y^2) \quad (7-31)$$

$$u \partial Y_{IF} / \partial x + v \partial Y_{IF} / \partial y = D (\partial^2 Y_{IF} / \partial x^2 + \partial^2 Y_{IF} / \partial y^2) \quad (7-32)$$

なお、この Y_{OF} 、 Y_{PF} 、 Y_{IF} 、 Y_{TF} に対する境界条件は、図7-1(b)に示した通りである。

火炎面モデルでは、 Y_{OF} は酸化剤側が負の値を持ち、火炎面では、

$$Y_{OF} = 0, \quad (7-33)$$

となる点で与えられる。

7.2.5 物性値の簡略化

Strehlowは数値解析に適用しやすいように、物性値を温度と圧力に依存するような簡略な形で表すことを提案している [245, p. 67]。

$$\mu \propto p^0 T^1$$

$$\lambda \propto p^0 T^1$$

$$D \propto p^{-1} T^2$$

本解析では、圧力への依存性が小さいとして、熱伝導率に関しては温度について1次、分子拡散係数については2次で表せるものとし、

$$\mu = \mu_0 (T/T_0) \quad (7-34)$$

$$\lambda = \lambda_0 (T/T_0) \quad (7-35)$$

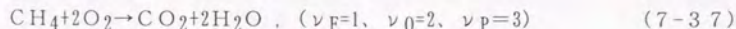
$$D = D_0 (T/T_0)^2 \quad (7-36)$$

の關係を用いた。ただし、 μ_0 、 λ_0 、 D_0 は常温での値である。

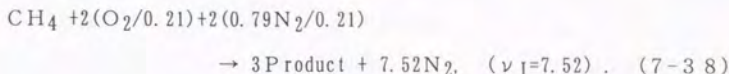
なお、現実的には化学種濃度、温度に依存するので、局所的な空間における物性値の変化をより詳細に考慮するには付録(4)に示した方法もある。

7.2.6 計算例

計算の一例としてメタンを想定した計算をおこなった。



空気を酸化剤に用いると、



生成物は二酸化炭素と水蒸気が一定割合で生成することから、化学種 $i = \text{P}$ の分子量と2生成物の比は等価な分子量 M_P で代表した。

$$M_P = M_{\text{CO}_2}/\nu_P + 2 M_{\text{H}_2\text{O}}/\nu_P \quad (7-39)$$

ここで、等価生成物は3モル生成し、 CO_2 と H_2O のモル比は、

$$(M_{\text{CO}_2}/\nu_P) / M_P : (2 M_{\text{H}_2\text{O}}/\nu_P) / M_P \quad (7-40)$$

と表せる。

計算に用いた数値は、次に通りである。

$T_\infty = T_w = 298\text{K}$ 、空気の密度 $\rho_0 = 1.205 \text{ kg/m}^3$ 、熱伝導率 $\lambda_0 = 0.02578 \text{ J/m K s}$

空気の動粘性係数 $\nu_a = 1.805 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、メタン $\nu_f = 2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

比熱 $c_p = 1.0032 \text{ kJ/kg K}$ 、分子拡散係数 $D = 2.20 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、

$M_{\text{CH}_4} = 16$ 、 $M_{\text{O}_2} = 32$ 、 $M_{\text{CO}_2} = 44$ 、 $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$ 、 $M_{\text{N}_2} = 28$ 。

また、無次元化をはかるために代表長さとして L_p をとり、レイノルズ数を導入した。

酸化剤（空気）一様気流については、

$$Re = U_\infty L_p / (\nu_a), \quad (7-41)$$

可燃性気体の吹き出しについては、

$$Re_w = v_w L_p / (\nu_f), \quad (7-42)$$

とした。

7.2.7 計算領域と計算手順

計算領域は、水平方向が40 mm、垂直方向が10 mm、 L_p は10 mmとした。計算格子は水平0.333 mm、垂直0.25 mm等間隔とし、方程式の差分化をはかった。

計算では、は差分化した式を便宜上、陽的に解くために式(7-1)に時間項を組

み入れ、格子間隔と拡散距離を考慮して計算が発散しない時間ステップを選んだ。計算は反復的におこなうもので、大まかな計算の流れは、次のようになる。

- (1) 時間ステップごとに ω と ψ を求め、速度 u と v に変換し、
- (2) 境界条件、吹き出し表面濃度を求め、式(7-5)、(7-6)に代入し、温度場 T と濃度場 Y_i を求め、
- (3) 場の変数が収束するまで(1)に戻り、繰り返し計算をおこなう。

本計算は拡散方程式を解き、温度依存性に注意しながら、式(7-33)による火炎面を求めるだけなので、解析は容易である。

7. 3 計算結果および考察

7. 3. 1 酸化剤流れの対向速度と火炎先端位置の変化

図7-2は、酸化剤流れの対向速度と火炎先端位置の変化を表面上で調べたものである。一定の可燃性気体の吹き出し速度 Re_w に対して、対向流速を増加させると、火炎先端は吹き出し側(可燃性気体側)に近づくが、次第に一定値に達することがわかる。例えば、 $Re=100$ において、吹き出し速度 Re_w を増加させると火炎先端が前に張り出すことがわかる。

図7-3は、吹き出し速度で整理しなおしたものである。例えば、 $Re=55$ に見られるように、 Re_w の増加とともに次第に火炎先端の前方への変位が一定値に向かう傾向が見られる。対向気流が大きくなると、吹き出し速度への依存性が小さくなり、 Re_w が増加しても火炎先端は一定値のままとなる。一定値に達するのは、流れに対向する分子拡散があるためで、可燃性気体の吹き出し位置前端よりさらに前方への拡散が生じている。

このような火炎先端の変位に関する対向気流と吹き出し速度の影響は、5章の実験結果とよく一致するものである。例えば、図5-4の吹き出し速度が増加しても限界値に達する傾向、図5-6以降に示した V_T の増加とともに x_T が減少し一定値に達する傾向は図7-2、7-3と同様である。ただし、5章はじめ他章の実験との比較で注意する点は、火炎先端が気化領域に追従し、対向気流を受けている場合にのみこの計算結果が適用できる点である。

7.3.2 濃度変化と火炎先端位置の変化

図7-4は、可燃性気体吹き出し表面の濃度 Y_{Fw} に対する火炎先端位置を R_e と R_{ew} について調べたものである。吹き出し速度の増加は表面濃度の増加となることが明らかである(点線)。対向気流が一定の場合(実線に沿う)、 Y_{Fw} が増加すると変位が増加し、逆に濃度が減少すると変位が小さくなり、一定値に向かう傾向があることがわかる。ここで、変位が増加する傾向が大きく見られるのは、 Y_{Fw} が0.8以上のときである。

吹き出し速度と表面濃度は、式(7-13)に示されるように、密接に関連しているので、ある対向流れに対して R_{ew} と Y_{0w} を個々に変化させることは難しいが、もし、吹き出し速度が一定で、表面濃度が変化することができれば、火炎先端位置は大きく変化することになる。

7.3.3 気化領域の移動と火炎先端の移動

これらの図から、火炎先端の位置の変化に対する対向気流と濃度の影響が明らかになり、一定の対向気流のもと濃度が増加すると x_f が前方へ変位することから、両者の関係は図7-4に示したように、変位に対する濃度勾配 dY_{Fw}/dx_f と速度に対する濃度勾配 dY_{Fw}/du の関数で示されることがわかる。時間あたりの濃度変化が、

$$dY_{Fw}/dt = (dY_{Fw}/dx_f)(dx_f/dt) \quad (7-43)$$

と表されるとすると、右辺の時間的な変化(dx_f/dt)は、火炎先端の移動速度 V_{FT} と考えることができる。

$$V_{FT} = (dY_{Fw}/dt) / (dY_{Fw}/dx_f) \quad (7-44)$$

火炎先端が気化領域の移動速度に追従し、火炎先端が対向気流を受けているので、右辺の分母(dY_{Fw}/dx_f)は、図7-4に示したように一定の対向速度 U_∞ ($=V_{FT}$)に対する流れに依存する何らかの関数 $f(V_{FT})$ で表すことができる。従って、時間あたりの濃度変化と火炎先端の移動に対し、次式のように表せる。

$$V_{FT} = f(V_{FT})(dY_{FW}/dt)$$

(7-45)

図7-5は、本研究の可燃性物質の移動実験である気化領域の移動により、火炎先端がどのように移動するのかを模式的に示したものである。

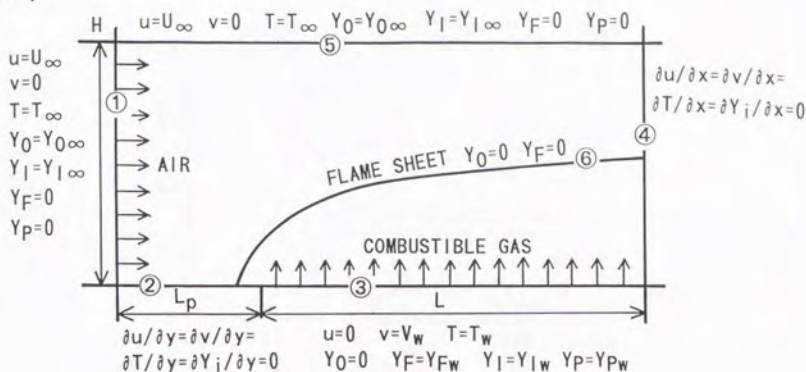
以上のような解析から、時間あたりの濃度変化によって、火炎先端が移動できることがわかる。なお、このような伝ば機構と火炎先端の性質については8章で検討する。

7. 4 まとめ

可燃性物質表面上を燃え広がる火炎先端の性質を明らかにするために、火炎面モデルに基づく簡単な数値解析をおこない、火炎先端付近の火炎形状と濃度場、温度場の様相を調べた。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 火炎先端位置の対向気流速と吹き出し速度への依存性が、実験結果とよく一致することがわかった。
- (2) 火炎先端の位置は、酸化剤の対向気流が増加すると可燃性気体側に変位し、逆に対向気流が減少すると、酸化剤側に変位することがわかった。また、可燃性気体の分子拡散のため、対向流速が増加しても一定値に達することがわかった。
- (3) 吹き出し速度が増加するとともに火炎先端は酸化剤側に変位するが、次第にその変位が一定値に向かう傾向があることがわかった。
- (4) 表面での濃度変化と火炎先端位置の変位の関係から、時間あたりの濃度変化により火炎先端が移動できることがわかった。

(a)



(b)

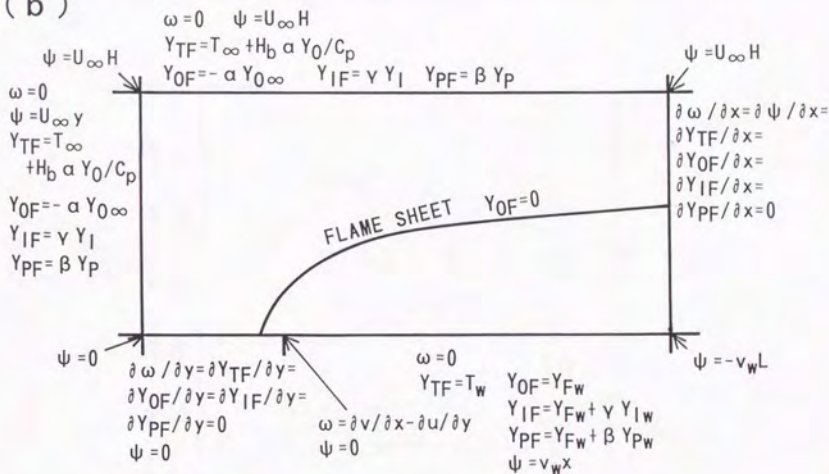


Fig. 7-1. Model and boundary conditions.

(a) $u - v$ system

(b) $\omega - \phi$ system

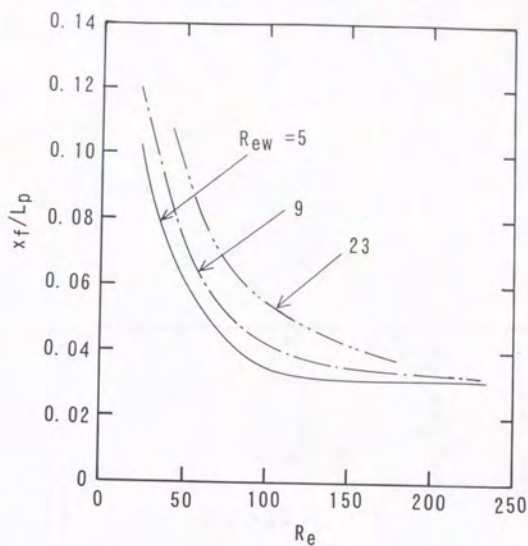


Fig. 7-2. Variation of leading flame edge with oxygen-flow velocity Re .

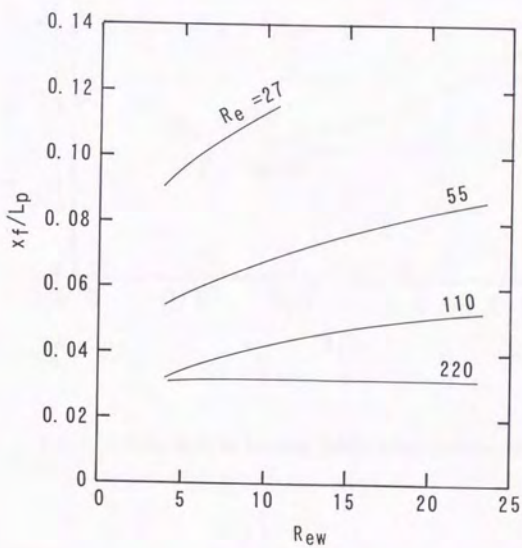


Fig. 7-3. Variation of leading flame edge with combustable gas ejection velocity Re_{ew} .

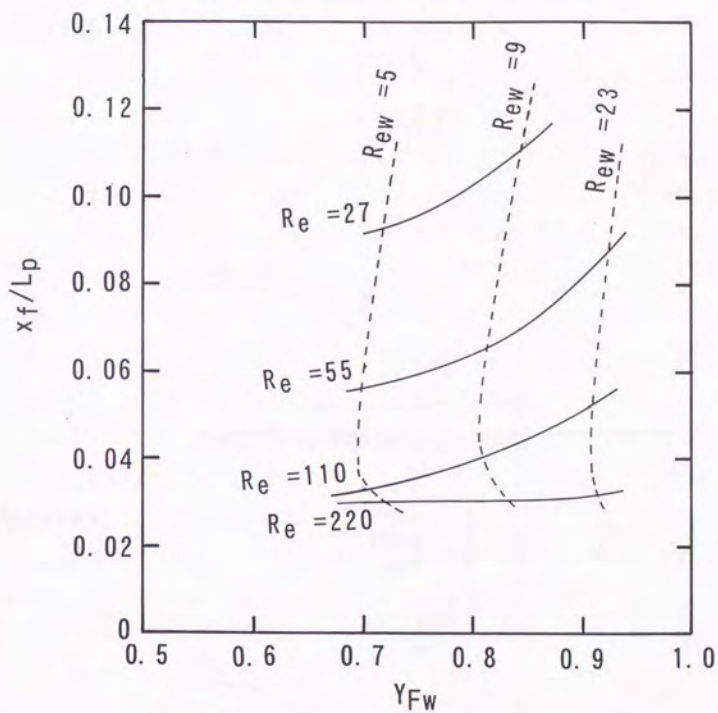
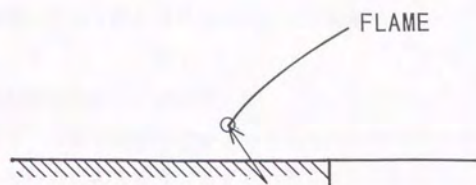
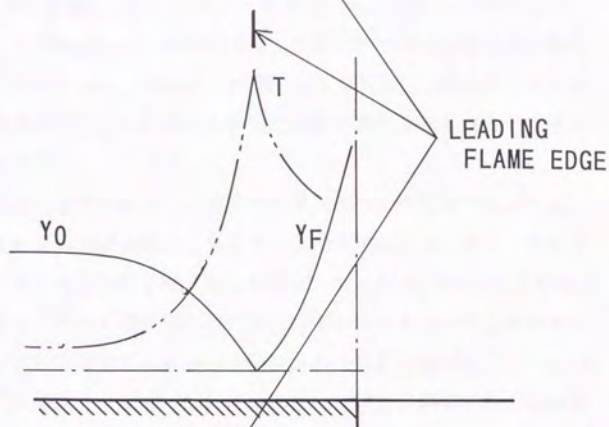


Fig. 7-4. Variation of leading flame edge with surface concentration.

(a)



(b) TIME T_0



(c) $T_1 = \Delta T$

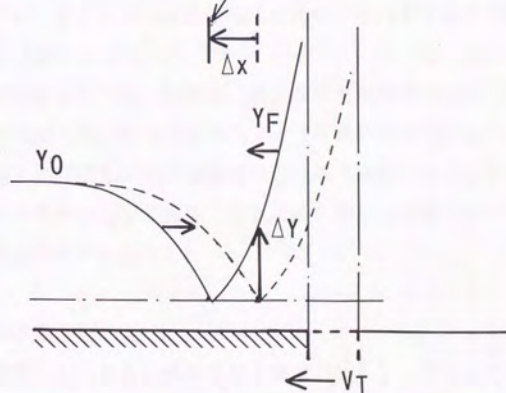


Fig. 7-5. Flame spread with concentration.

第8章 可燃性物質表面に沿って燃え広がる火炎の伝ば機構

8.1 火炎先端の気化領域移動への追従性

可燃性物質（気化領域）の移動速度が増加すると、火炎先端がその速度に追従できなくなることがいずれの可燃性物質にも見られることがわかった。

PMMA片の場合 30 cm/s～40 cm/sで、液体の場合ケロシン-ビーズが25cm/s～30 cm/sと追従できる速度が少し小さいが、概ね 30 cm/s～40 cm/sが追従できる限界速度であることがわかった。気体の場合、予混合気の場合を除けば、追従できる速度はメタンが 20 cm/s、プロパンが 30 cm/sであることがわかった。また、追従できる速度範囲では、いずれも火炎先端が気化領域よりも前方に位置していることもわかった。

3章から5章では気化領域を限定し、凝縮相内前方への熱移動を拘束したが、6章の実験では、凝縮相内の熱移動がともなう状態で実験をおこなった。そこでは異なる挙動が見られ、薄い紙では、移動速度が 100 cm/s近くに達しても後退せずに追従できること、熱的に厚い固体の代表としてPMMA板を使った場合には、移動とともにわずかに後退するものの、保持され、振動しながら 100 cm/s近くまで保持されることが明らかになった。液体を用いた場合、凝縮相内の流動が火炎先端の気相中の伝ばに大きく関わることがわかり、それとともに、見かけ上火炎先端が後退するが、そのときの火炎先端の気相中の伝ばする速度が数10cm/sであるという興味深い結果を得た。

このような一連の実験をおこなった結果、用いた可燃性物質が気体、固体、液体に関わらず、火炎先端の気化領域の移動に追従できる速度が 20 cm/s～40cm/sにあることから、個々の可燃性物質の凝縮相内の現象に支配されるよりも可燃性物質が結果として可燃性気体として発生し、気相内の現象の火炎先端への供給過程がより重要であるように考えられる。

8.2 火炎先端の挙動と安定性

追従できる限界速度よりもさらに移動速度を増加させると、それまで安定していた火炎先端が気化領域前端付近で不安定的に変動するようになることがわかった。

安定性とは追従性とも関連し、また火炎の保持とも関係する。PMMA板を使った場合、厚みが増加するほど移動速度の増加に追従できなくなることがわかった。図6-12を見るとうるやうに、厚さが減少しても移動速度が40 cm/sまでしか追従できないことがその安定曲線の傾向から予想される。しかし、薄いろ紙がより安定的な挙動を示す様相からすると、おそらく、PMMA板がここで用いたろ紙ほど厚みが薄くなっても、移動速度に対する挙動は異なるものと考えられる。

熱移動の影響を受けない5章の可燃性気体の吹き出す場合と他の章の火炎からの熱伝達にともなうて気化し、可燃性気体が吹き出す場合を比較すると、熱移動を伴う方が火炎先端が安定的であることが一連の実験からわかった。このような違いが、可燃性気体の性質にのみ依存するの、あるいは、可燃性気体の供給方法（速度、量、気化する位置など）に依存するのかは明らかにするところまでは至らなかった。ただし、火炎からの熱伝達により可燃性気体が発生する場合、対向気流のため火炎が表面に近づき、熱流束の増加に見合った分だけ可燃性気体が発生するという過程が、移動速度と火炎先端への供給とが密接に関連しあい、単に可燃性気体のみが強制的に吹き出した場合とは異なることがわかった。

8. 3 火炎先端への可燃性気体の供給

(a) 供給に関する質量流束

単位時間に可燃性気体が発生し、供給される量よりも火炎先端で消費される量が大きき場合、火炎先端は間欠的（振動的）な挙動を示すものと考えられる。

十分な可燃性気体が発生する場合、火炎先端では、その供給に見合った速度で燃焼反応がおこなわれる。これは、単位時間の可燃性気体の発生量（発生速度の次元を持つ）が、継続的に燃焼がおこなわれる速度（伝ばする速度）に対し、律速であるということを示唆する結果である。しかし、単位時間の発生量が一定のまま、燃焼反応速度がさらに大きくなつた場合、間欠的な様相を示し、逆に、単位時間の発生量よりも、燃焼反応速度が小さくなつた場合、燃焼反応の低下とともに火炎温度が低下、消炎する。

火炎先端への供給速度は、質量減少速度（質量燃焼速度）で評価すると、3章

のPMMA片の実験では $1.5 \sim 1.7 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ 、4章の液体の場合 $1.0 \sim 3.0 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ で、メタノールはやや大きく $3.0 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ である。5章の可燃性気体の吹き出し実験ではメタンが $0.5 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ 以下になると静止時でも安定形成するのが難しくなり、 $1.3 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ 以上では移動に対する吹き出し量の依存性が小さくなることがわかった。火炎先端にこれらがすべて供給されるわけではないとしても、火炎が伝ばする場合に火炎が形成できるには、 $1.0 \sim 1.5 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ 程度の気化領域からの供給が必要となるものと考えられる。

(b) 供給位置

燃え広がりを支えるのが可燃性気体の供給であるとするれば、図4-2に示したように、火炎先端への供給がどこからおこなわれているのかを明らかにする必要がある。

領域Aから可燃性気体が入る場合、可燃性気体は火炎先端よりも前方から発生するか、あるいは火炎先端下の消炎領域を通して前方へ拡散する必要がある。このとき、酸化剤と拡散混合し、予混合気が形成されている可能性があり、火炎先端は予混合気に向かって伝ばする機構によって説明できるものと考えられる。この考え方では、火炎帯の法線に相対する流れが（層流）燃焼速度になっているはずである。可燃性液体の燃え広がりにおいて、Itoら[144-145]の温度分布測定では、火炎先端前方の凝縮相内が引火点よりも高いために火炎先端前方から可燃性気体の発生の可能性を示唆しているため、まだ議論の余地が残されているが、固体の場合、火炎先端前方に熱分解温度の達する温度領域がないことから[27]、火炎先端前方表面から可燃性気体の発生はほとんどないとみてよい。

予混合気が形成されるには消炎領域を通して前方へ拡散される必要があるが、火炎先端で化学反応なしに可燃性気体がまわりこむような供給は考えにくい。図6-7や図5-11で得られた火炎先端付近の流れを見ると、図6-7では 6 cm/s 程度であることから、（層流）燃焼速度よりもはるかに小さい。自然対流のもとでは、消炎領域で循環流は見られず、流れが酸化剤側から可燃性気体側へ向かう様子からすると、対流に抗して前方への分子拡散が大きくなければならない。

振動伝ばする場合には領域Aから予混合気が入り、予混合気伝ばに保持される

可能性はあるが、数10 cm/s以下で、定常速度にある場合には予混合火炎の伝ば機構は考えられない。

領域Bは、消炎領域において火炎先端に可燃性気体が供給される場合で、わずかに火炎先端よりも水平前方に予混合気が存在し、火炎先端がその方向に対向する（層流）燃焼速度を持ち、水平方向成分が燃え拡がり速度に相当して伝ばできる。この場合、消炎領域では温度が低いため[27]、燃焼反応が起こらず、また境界層内の速度が小さく、拡散混合の可能性が高い。ただし、予混合火炎が十分に形成できる濃度条件を満たしているのかどうかは、さらに検討の余地がある。

ところで、火炎先端に相対する速度が（層流）燃焼速度である場合、火炎先端のわずかの形状変化により燃焼速度と釣り合う必要がある。火炎先端は、表面への熱損失のため、立ち上がり距離（消炎距離）だけ離れて形成し、垂直方向への変位は小さいことが実験からわかっている。移動速度の増加とともに火炎先端が表面に近づくが、これは相対気流の増加のため、火炎が表面に傾くことによる効果として見られるものと推測できる。境界層の発達の影響により、火炎先端が対向気流速度が小さい領域で安定することも考えられるが、垂直変位が小さいことからすると、その影響は小さいものと推測できる。

領域Cでは、火炎先端背後から可燃性気体が供給され、ちょうど領域Aから酸化剤が流入される。あくまで供給に関する性質が領域Cからの拡散が支配的であるが、より微視的にみると領域CとAが近接し、一見、領域Bに集約された現象のように見られるようになる。領域Cからの供給は、外側からの酸化剤が燃焼反応速度に応じて供給されるので、可燃性気体の供給速度と供給量が火炎先端の持続的な形成には重要になる。

8. 4 濃度変化と火炎先端位置の変化

雰囲気酸素質量分率によって燃え拡がり速度が変化する様子は、Fernandez-Pello [8] が検討している。燃焼反応からすると、酸化剤と可燃性気体は量論比で拡散混合して燃焼することから、雰囲気中が高酸素質量分率であれば、不活性物質の質量分率は低下する。このとき、表面燃焼がないとすれば、表面からの可燃性気体は、反応に見合うだけ濃度が増加する必要があり、火炎面で同じ拡散速度で流入することになる。つまり、酸素濃度が増加することで燃え拡がり速度が

増加するというのは、可燃性気体の濃度が増加することで燃え拡がり速度が増加すると解釈できる。

図7-5に示したように、時間あたりの濃度増加により火炎先端の形成位置が移動する現象が、拡散火炎の性質を持った場合の火炎先端の伝ばであることを7章では説明した。時間に依存する現象であることからその非定常性が議論されることになるが、3章の実験から移動が加速過程であっても、実験の範囲内の加速でも定常性が強いことがわかっている。つまり、反応に関わる現象が十分に速く、準定常的な取扱いができる。気化から可燃性気体の発生、供給が火炎の移動とともに密接に関連し、時間並行的・連続的に現象が進行するため、実際の観測では濃度変化がおこって時間遅れの後、火炎が移動するというようなことはない。

吹き出し位置の移動速度が増加すると火炎先端が追従できなくなり、前節では燃焼強度の概念を適用したが、さらに次のようにも解釈できる。

火炎先端に対し、濃度の増加が起こるが、その勾配が増加し、拡散速度に律速で反応が進行する。実際には拡散速度は有限であり、さらに勾配が増加すると供給速度に対し、燃焼反応が追いつかなくなり、拡散混合領域が広がる。そして、無限大の反応速度として取り扱われる火炎面としての性質が成り立たなくなる。有限の化学反応速度を持ち、拡散混合領域の増加とともに、Fendelの解析[190]に見られるように拡散火炎の温度が低下し、吹き飛び消炎に至るものと考えられる。さらに火炎構造の変化については、FreyとT'ien [48-50]、Sirignano [6]が考察をおこなっているが、本研究の一連の実験を通して見て、可視火炎における反応帯が厚く見えるという様子は明確にできなかった。

8. 5 火炎先端の性質と伝ば機構

拡散火炎の性質には自己伝ば性はないといわれている。しかし、図7-5に示したように拡散火炎において可燃性気体側の濃度が増加すれば、火炎の形成位置は酸化剤側へ移動する。火炎を止めて考えた場合、火炎に対して、可燃性物質の気化領域が前方(図では左方)へ移動することは、火炎の後方における可燃性気体の濃度を高くすることに相当する。可燃性物質の移動とともに、火炎先端がその背後で増加した濃度に対応した分だけ酸化剤側へ移動していけば、可燃性固体移動に伴って、現象としてはほぼ同時に、準定常的に前方へ移動できる。この追

従現象により、火炎は気相中を移動する、すなわち伝ばしてゆくことになる。このような現象が可能である火炎の移動速度は、本研究で明らかにした火炎先端の追従速度の限界、20 cm/s~40 cm/s以下である。この追従速度の限界以下の速度で伝ばする場合、火炎先端は、拡散火炎の性質をもっているとも伝ばできる。

可燃性固体表面上に沿った燃え拡がりについてみると、固相の熱移動速度に伴い可燃性気体が発生するその気化領域が移動し、その移動とともに火炎先端が移動することになる。通常 1 cm/s以下の速度での燃え拡がりでは、火炎先端が拡散火炎であっても、火炎の形成位置は移動でき、火炎は伝ばできる。

図8-1は、このような燃え拡がり（伝ば）機構に基づく火炎先端付近の様子を模式的に示したものである。

8. 6 可燃性気体の供給速度と燃え拡がり速度

4章に示したように、Williams [47] は、燃え拡がり速度 V_f が、受熱量に比例し、可燃性気体の気化に関するエネルギー（エンタルピー）が小さいほど、増加することを簡単な式を用いて説明した。このような熱移動に基づく式では、供給速度が増加し、濃度変化による燃え拡がり速度の変化は推定しにくい。Fernandez-Pelloら [8] は、雰囲気濃度の変化による燃え拡がり速度を検討しているが、それは雰囲気全体に適用できるもので、火炎先端付近の局所的な場の濃度変化に適用できない。

前節まで述べたように、火炎の伝ばできる速度は、熱伝達に伴う可燃性気体の供給速度と、有限である火炎先端の燃焼反応速度によって平衡し、定まるものと推察した。従って、熱移動に依存する数10 cm/sまでの火炎の伝ば速度を持つその伝ば機構は、気相中における可燃性気体の発生、供給速度が律速過程であるように考えられる。このことで、熱的に厚い、薄いといった概念に制限されず、どれだけ、火炎からの熱が可燃性物質に伝わり、可燃性気体が発生するかということの説明ができる。そして、この場合の火炎先端の性質は、拡散火炎の性質を持ち、可燃性気体が火炎先端の反応帯にどれだけ拡散流入するかということで燃焼反応速度が定まることになる。

以上のことから、例えば固体の燃え拡がり現象の解析において、固相内の未燃焼部分への熱移動による固相内を伝ばする熱の波（thermal wave）の速度を燃え

拡がり速度として導出されるが、気相に着目し火炎先端への供給速度と燃え拡がり速度が密接に関連していることがわかった（図8-1）。

8. 7 伝ば機構の適用

噴霧液滴中の火炎の伝ばでは、十分な予混合気が見られない空間中を数10cm/sで伝ばする様子が観測されている。楊ら〔272〕の噴霧液滴の実験ではデカンの伝ば速度は 40 cm/s、ヘキサデカン 30cm/s、ヘプタン 100cm/sという結果を得ている。このような場合、液滴表面からの蒸発速度と濃度変化が伝ば速度に影響することから、伝ばする火炎先端前方に予混合気がなくとも伝ばできる可能性がある。

燃焼しながら噴霧や固体粒子が空間を移動し、可燃性気体が発生しつつ燃焼反応が継続している場合、まだ明確にされていない火炎帯（予熱領域）の構造を検討する必要があるが、熱伝達→気化→可燃性気体の拡散→火炎先端への供給という過程を経る可燃性物質の伝ばには、本研究のような伝ば機構が適用できるものと思われる。

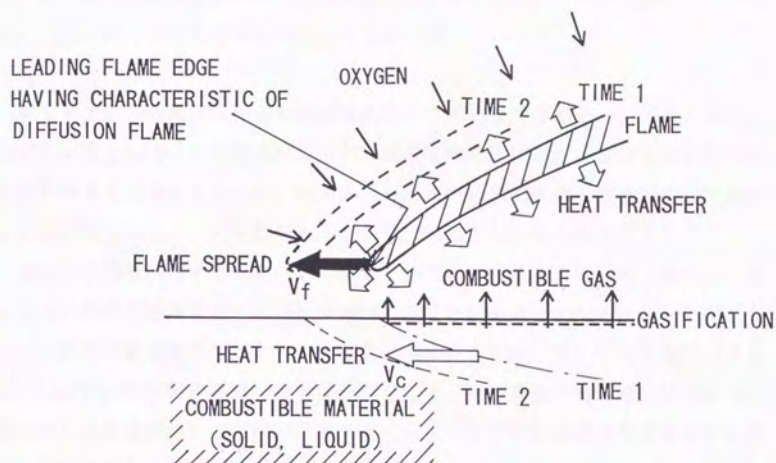


Fig. 8-1. Mechanism of flame spread over combustible material.

第9章 総括

これまでに燃え拡がり現象を把握し、その燃え拡がり機構を明らかにするため多くの研究がなされてきたが、燃え拡がり際の火炎先端の性質については、重要な問題でありながら、あまり明確な説明がなされてこなかった。そこで本研究では、可燃性物質表面に沿って火炎先端が移動（伝ば）できる機構を明らかにし、そのときの火炎先端の性質について調べた。

第1章では、炎の危険性と燃焼制御が未だに不完全であるため、火災による人的被害が減少しない実状を挙げ、火災の拡大を抑えるには燃え拡がり現象そのものを把握する必要性を説いた。そして、これまでの可燃性物質表面に沿った燃え拡がり研究に関して、文献調査をおこない、本研究の方向性を定めた。

実際に空間を伝ばする火炎先端の性質を明らかにするために、第2章では、燃え拡がり現象を燃焼とともに気化領域が移動する現象としてシミュレートできるような移動実験装置を考案し、その装置と実験方法を示した。その移動装置を使い、凝縮相の熱移動を制御した実験計画を立て、第3章から第6章では実験を、第7章では理論解析をおこない、第8章ではこれらの実験と理論解析により総合的な考察のもとで、火炎の伝ば機構を検討した。

第3章では、PMMA片を可燃性物質として用い、そのPMMA片移動（気化領域の移動）に対する火炎先端の追従性を調べた。その結果、PMMA片の移動が定常であれば、その速度が $30\text{ cm/s} \sim 40\text{ cm/s}$ 以下の範囲では、火炎先端は移動速度とともに後退するが、常にPMMA片の前端より先行していること、さらに、移動速度が 30 cm/s から 40 cm/s 以上になると、火炎先端は不安定になり、火炎先端がPMMA片の移動に追従できなくなることを明らかにした。このような火炎先端の性質について、火炎帯に対して可燃性気体と酸化剤が逆方向から拡散流入する対向流拡散火炎と単一液滴まわりに形成する拡散火炎の性質と比較し、それらの火炎先端の強制対流に対する安定限界の類似性から、本実験における火炎先端が拡散火炎の性質と同じであることを推察した。

第4章では、3章と同じ気化領域を持つ小型の容器を製作し、異なる性質を持つ可燃性液体を用いて、容器移動（気化領域の移動）への火炎先端の追従性を調べた。その結果、可燃性液体についても、火炎先端が容器の移動速度に追従できなくなる速度があり、それが 45cm/s 以下にあることが明らかにした。さらに、移動速度が増加すると吹き飛び、消炎に至る速度が可燃性液体ごとに存在することがわかった。種々の可燃性液体を用いた結果、形成する火炎先端の位置が、可燃性気体の分子拡散速度に基づいていること、火炎からの熱伝達にともなう可燃性気体の供給速度（質量燃焼速度）が伝ばの際には重要な役割を果たしていることを明らかにした。特に、ケロシンとデカンは静止時の燃え上がり速度が小さいものであるが、移動させた実験でも、容器に追従し、吹き飛び、消炎に至る速度が小さいことがわかり、それらの質量燃焼速度が小さいこと事実とも併せて、伝ばできる速度がどれだけ可燃性気体が火炎先端に供給されるかということに関わっていることを推察した。

第5章では、3章と4章のような火炎からの熱伝達によって可燃性気体が発生するということと切り放し、可燃性気体の吹き出し速度（供給速度）を制御した実験をおこなった。実験では、3章と4章と同じ気化領域を持つ焼結金属からなる多孔質燃焼器を製作し、メタン、プロパン、そしてメタン-空気予混合気を吹き出させ、火炎先端の燃焼器移動（吹き出し領域の移動）への追従性を調べた。その結果、可燃性気体のみを吹き出させた場合と可燃性予混合気を吹き出させた場合では、移動時の火炎先端の挙動が異なることがわかった。可燃性気体のみを吹き出させた場合の挙動は3章と4章における挙動と同様であり、気化領域の移動に追従できる限界の速度は同じ程度であった。また、移動速度の増加とともに火炎先端が前方へ変位するようになると、火炎帯の前後に循環流が発生していることがわかった。このような循環流が、火炎先端の保持に寄与していると思われるが、循環流の発生がない移動速度でも火炎が伝ばすることから、循環流の発生が火炎の伝ばに必要な条件ではないことを推察した。本実験では吹き出しのみを制御したことから、移動速度と火炎先端への可燃性気体の供給速度の関係を明らかにすることができた。さらに、静止時に安定形成している火炎の場合、移動速度の増加とともに変動するようになるが、吹き消えることはなく、火炎先端の

保持に十分な可燃性気体が供給されていることがわかった。

第6章では、凝縮相内の前方への熱移動がともなう場合について、伝ば火炎の可燃性物質移動への追従性を調べた。可燃性固体としては、熱的に薄いものと厚いものの代表として用いられることが多い紙とPMMA板を用いた。その結果、熱的に薄い固体では、移動とともに火炎が表面に近づき、表面への熱流束が増加し、燃え拡がり速度が増加すること、熱的に厚い固体では、移動とともにすぐに火炎先端は後退するが、吹き飛び、消炎に至らず、保持され、振動的な動きで燃え拡がりを継続することがわかった。このような事実は、同じ熱流束を表面に与えた場合、熱的に薄いものは燃焼反応が継続できるのに十分な可燃性気体の発生があるものの、熱的に厚い場合には可燃性気体の発生が不十分になる場合があることを示唆する。従って、燃え拡がり速度が凝縮相内の熱移動速度に依存するという従来の解釈のほか、燃え拡がり速度が可燃性気体の火炎先端への供給速度に依存するという解釈ができることがわかった。これらのことから、同じ熱流束で気化しやすい可燃性物質では、可燃性気体の発生が燃焼反応を持続するのに十分であり、比較的燃え拡がり速度が大きく、凝縮相内の熱移動がより支配的な場合、燃え拡がり速度が小さいことが説明できる。

さらに6章では、可燃性液体についても調べた。主に引火点以下の一様燃え拡がり速度を持つ領域について、静止時の燃え拡がり速度を可変するために異なる液体を用い、液相内の流動が可能な細長い容器を用いた実験をおこなった。その結果、液相内の流動、循環流の挙動が、液面に沿った燃え拡がりにおいて重要であることを明らかにした。気相の現象として見た場合、液面に沿った火炎先端は見かけ上、10cm/s以下の容器の移動速度で後退するが、静止空間から見ると、その場合でも前方へ燃え拡がりを続けていることがわかった。火炎先端は静止空間を対向気流を受けて、伝ばしているが、このような伝ばができる速度の限界は、静止時の燃え拡がり速度に近いことを明らかにした。また、液体を用いても、凝縮相内の性質に依存することがガラスビーズに浸潤させた場合の実験から明らかになり、火炎先端は固体表面に沿った時と類似した挙動を示すことがわかった。

第7章では、火炎面モデルを使った理論解析をおこない、時間あたりの濃度変

化により火炎先端の形成位置が移動することを示し、そのことが拡散火炎の性質を持つ場合の火炎先端の伝ばであることを説明した。

第8章では、可燃性物質表面に沿った伝ば機構を検討し、異なる可燃性物質を用いても、移動できる限界が概ね 40 cm/s以下である事実を挙げ、その速度までが拡散火炎の性質を持って伝ばできる限界であることを説明した。それ以上の速度では、火炎先端位置と吹き出し位置の変位に見られるように、火炎先端への可燃性気体の拡散供給する速度が追いつかずに、拡散火炎の性質をもつ火炎先端が不安定になったり、あるいは火炎反応帯において可燃性気体が過剰に供給され、燃焼が完結できずに消炎に至ることになる。可燃性物質表面に沿った燃え拡がりにおいて、固体の燃え拡がり速度は、通常 40 cm/sよりも十分に小さいことから、拡散火炎先端の性質で伝ばするものと考えられる。液体では、引火点よりも低く、燃え拡がりが液相の熱移動の影響を受ける場合、(振動伝ばにおいてははまだ議論の余地があるものの)、予混合火炎の性質がなくとも、火炎先端が拡散火炎の性質を持って伝ばできるものと考えられる。

本研究では、火炎先端の挙動をよく見るということから出発し、垂直・水平にどのように動くのか時間ごとに詳細に調べ、それが火炎先端のどのような性質に基づくのか代表的な拡散火炎と予混合火炎の性質と比較しながら考察してきた。その結果、これまで明らかにされてこなかった、拡散火炎の性質を持つ火炎先端が伝ばする現象を明らかにすることができた。このような知見をもとに身の回りで発生する現象を見ると、次のようなことに適用できる。

(1) 拡散火炎が形成している場合に、火炎前方に予混合火炎に関する可燃範囲の領域がなくとも、火炎背後から可燃性気体が供給され続けるならば、燃え拡がり(火炎の伝ば)が可能であることが予測される。このことからすると、可燃性物質表面に沿った燃え拡がりでは、可燃範囲になければ火炎が伝ばしないという解釈では不十分であり、火災時の火炎の拡大危険性は、可燃範囲の概念で想定される以上に高いことが予測される。

(2) 噴霧液滴、炭じんなどの粒子状の可燃性物質が空間を移動するとともに、火炎が伝ばする場合、火炎からの加熱により物質表面から可燃性気体が発生し、

拡散火炎を形成し、物質周囲の気化領域の濃度場の変化に伴って火炎が伝ばを継続する機構があり得る。従って、空間内の可燃性気体の濃度が増加することは火炎の伝ばをしやすい状況を生み出すため、危険な状態におかれることになる。

(3) 室内などの閉空間における予混合火炎伝ばは、圧力上昇を伴い、爆発の結果として被害をもたらすことになるが、その爆発防止のために予混合気が形成しなければ安全であるとは言えないことがわかる。これは、伝ばの初期に可燃性気体の供給により拡散火炎が伝ばしていても、火炎前方に誘起流れを生みだし、状況によっては予混合火炎伝ばに遷移することもあるためである。

(4) 可燃性物質表面に沿った燃え拡がりの燃焼抑制には、燃焼反応の持続に関わる可燃性気体の発生速度を抑制するばよく、可燃性物質表面温度を気化温度(熱分解温度)よりも十分に下げるとか、可燃性気体の発生を抑制するなどして火炎先端への可燃性気体の供給を断ち切ることがその抑制法となりえる。このような方法は新たな方法ではなく、従来からおこなわれてきた消火作業の、水による冷却、泡による封じ込め、不活性ガスによる酸化剤濃度抑制などに見られ、結局のところ、可燃性気体の供給を断ち切り、持続的な燃焼反応を停止させることにほかならない。

火炎先端に着目した燃え拡がり研究はこれまでに例がなく、本研究がさきがけ的である。従って、本研究のように火炎先端の挙動を詳細に観察することだけではなく、今後このような研究を進めるためには、非定常現象としての火炎先端付近の酸化剤と可燃性気体の流れ場、濃度場、温度場を測定することが必要であり、実験結果の蓄積のもと、総合的な考察をおこない、多くのことが明らかにされるものと思われる。火炎先端の性質をより詳細に調べていく上では、まず、火炎先端の定義から始まり、研究者によっては、火炎先端が可視火炎としてではなく、最高温度位置、あるいは最大反応率の位置によって定義されることもあり得るので、火炎先端の性質については、さらに議論されことになるものと思われる。

本研究において火炎先端が保持されるということは、保炎機構の解明とも関連し、さらに研究を進める上では、微視的な実験研究が要求されることとなるが、ぜひとも取り組むべき課題の一つである。実験をおこなった結果、疑問が湧くことも多く、移動速度を増加させていくと火炎先端の挙動が変化する様相から、拡

散火炎の先端の性質が予混合火炎の性質に遷移することが考えられ、臨界においては、両方の性質が共存するような状態を調べることも検討課題の一つである。

最後に、燃焼研究の使命としては、いかなる燃焼反応についても燃焼を制御し得るような知見を得なければならない。炎の性質をよく把握し、燃焼反応を制御できるようになることは、災害を防止し、エネルギーの有効利用に結びつくことになるからである。

謝 辞

この博士論文は、筆者が東京大学大学院博士課程に在学中の研究をまとめたものである。

本研究をおこなうにあたりテーマを与えてくださり、ご指導を戴いた教授 平野敏右先生には深く感謝の意を表します。先生は、燃え拡がりの分野において未だ明確にされていない事柄をご教授され、この分野の研究の必要性を強く説かれた。特に実験事実、現象を重視され、本研究で得られた理解しづらい現象と一緒にあって検討していただき、筆者自身が混乱する際には、多くの助言を戴いた。

研究室の助手 土橋先生には、研究の進行を気にされ、叱咤激励を戴いた。マイペース思考の筆者にとってはまさに激励そのもので、温厚な先生には大変お世話になった。助教授 石塚先生は、先生自身が苦勞して学んだ燃焼に関する知識を惜しみなくご教授され、先生から燃焼に関する多くの基礎知識を得ることができた。また、本研究と他の研究とを比較評価され、有意義な討論をして戴いた。助教授 鶴田先生には、研究室の先輩として、本研究をさらに有意義なものにするように貴重な助言を戴いた。今思うと、諸先生方のそばで学ぶことができたということだけでも幸運なことであり、さらに多くの助言を戴く機会が与えられたことは博士課程3年間の大きな実りであった。諸先生方には深く感謝の意を表します。

また、茨城大学在学中、機械工学科の教授 鈴木鐸士先生、助手 川又正昭先生には、卒業論文、修士論文をまとめるにあたりご指導を戴いた。実験研究における基本的な技術は、両先生から学んだものである。学会発表の折には貴重な助言を戴き、励みになった。改めて感謝の意を表します。

平野研究室のゼミでは、上下関係なく討論がおこなわれ、活性化された雰囲気があった。先輩にあたる楊博士、後輩の鈴木正太郎君（現博士）、山本和弘君（現博士）、陳建林氏（現博士）には有意義な意見を戴いた。鈴木健君（博士）とは、3年間をともにし、燃え拡がり研究に関しては“同志”として歩んできた。彼の研究に打ち込む姿、几帳面な態度からはいろいろ教わったことがある。秘書の武田さんには、不慣れな事務的な手続きをおこなって戴いた。改めて、研究室の方々に感謝の意を表します。

勤務先の高圧ガス保安協会の方々には、この論文執筆のために業務が遅れがち

となり、多大な迷惑をかけた。

平野先生との出会いは今思うと、学部3年の時の“燃焼学”の教科書を図書館で見つけたことに遡ることができると思う。その頃の学生実験の一つに、内燃機関潤滑油の引火点測定というものがあった。実験で引火する際に青炎が見られたので、それを考察としてレポートに書こうと、青炎に関する教科書を大学の図書館で探していた。おそらく5冊はあったと思われる平野先生が書かれた“燃焼学”に目が止まり、その頃、授業では使っていなかったものの、理解しやすい布張りのその教科書に惹かれたことを覚えている。平野先生の経歴と茨城大学の関係、鈴木鐸士先生とつながりが、4年生になった時の卒業研究の希望研究室にそのままつながったことは言うまでもない。その当時、思ってもみなかったことが不思議なことに、このような成果へつながることになった。

燃焼研究への興味は、幼少の頃のジェット機の爆音とそこから生まれる力に惹かれたこと、高校時代には1軒先の幼なじみの自宅が火災に遭ったということに関連しているのかもしれない。火災を目の当たりにし、財産、思い出が自然の力によって無惨にも消失することがよくわかった。自然に対して人間は無力であることが多すぎる。

茨城大学—東京大学、機械工学専攻—化学システム専攻、流体力学（鈴木（鐸））講座そして平野研究室と、通常の進路からすれば、より多くの勉学の機会と環境を与えられたと思う。この博士論文は、平野先生はじめ多くのすばらしい先生方と出会い、良き人々に囲まれ、良質の環境にあればこそ、まとめることができたものである。本研究が社会の役に立つとすれば望外の喜びである。

一人暮らしの生活が困窮しないように、20代後半まで両親から経済的な援助を受けることになった。また、弟からは、研究生活という特殊な環境において世間離れしないような気遣いを受けた。最後に、父、母、弟に研究を続ける機会と援助を与えてくださったことに改めて感謝したい。

平成8年9月

八島正明

参考文献

- 1) 寺田寅彦, 沿面燃焼に関する予備的実験, 理化学研究所集報, 9(7), pp. 55-560, (1930).
- 2) 鈴木清太郎, 金原寿郎, 紙の燃焼(1)~(4), 応用物理, (1):10(6)pp. 252-255(1941), (2):10(7)pp. 332-334(1941), (3):10(9), pp. 415-419(1941), (4):11(12), pp. 557-561(1942)
- 3) Emmons, H. W., Fundamental problems of the free burning fire, tenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1965, pp. 951-964.
- 4) Friedman, R., A survey of knowledge about idealized fire spread over surfaces, Fire Research Abstracts and Review, Vol. 10, No. 1(1968).
- 5) Magee, R. S., and McAlevy, III, R. F., The mechanism of flame spread, J. Fire and Flammability, Vol. 2(October 1971), p. 271.
- 6) Sirignano, W. A., A critical discussion of theories of flame spread across solid and liquid fuels, Combust. Sci. and Tech., 1972, Vol. 6, pp. 95-105.
- 7) Fernandez-Pello, A. C., and Hirano, T., Controlling mechanisms of flame spread, Combust. Sci. and Technol., 1983, Vol. 32, pp. 1-31.
- 8) Fernandez-Pello, A. C., Flame spread modeling, Combust. Sci. and Technol., 1984, Vol. 39, pp. 119-134.
- 9) Sibulkin, M., free convective diffusion flames from burning solid fuels, Prog. Energy Combust. Sci., 1988, Vol. 14, pp. 195-212.
- 10) Weber, R. O., Modelling fire spread through fuel beds, Prog. Energy Combust. Sci., 1991, Vol. 17, pp. 67-82.
- 11) Wichman, I. S., Theory of opposed-flow flame spread, Prog. Energy Combust. Sci., 1992, Vol. 18, pp. 553-593.
- 12) Di Blasi, C., Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels, Prog. Energy Combust. Sci., 1993, Vol. 19, pp. 71-104.
- 13) Hirano, T., Physical aspects of combustion in fires, Fire Safety Sci., Proc. Third Int. Symp., Ed. COX, G., and LANGFORD, B., Elsevier, London, 1991, pp. 27-44.
- 14) Hirano, T., and Saito, K., Fire spread phenomena: the role of observation in experiment, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 20, 1994, pp. 401-485.
- 15) Campbell, A. S., Some burning characteristics of filter paper, Combust. Sci. Tech, 1971, 3, pp. 103-120.
- 16) Campbell, A. S., Fire spread over paper, J. Fire and Flammability, Vol. 5(July 1974), pp. 167-178.
- 17) Parker, W. J., Flame spread model for cellulosic materials, J. Fire and Flammability, Vol. 3(July 1972), pp. 254-269.
- 18) Hirano, T., Noreikis, S. E., and Waterman, T. E., Postulations of flame spread mechanisms, Combust. Flame 22: 353-363 (1974).
- 19) Hirano, T., Sato, K., and Tazawa, K., Instability of downward flame spread over paper in an air stream, Combust. Flame 26:191-200(1976).
- 20) 田沢浩一, 平野敏右, 空気流中の紙の上方燃え拡がり, 火災学会論文集,

第27卷, 1号, pp. 9-16, 1977.

- 21) Sibulkin, M., Keelhut, W., and Feldman, S., Effect of orientation and external flow velocity on flame spreading over thermally thin paper strips, *Combust. Sci. and Tech.*, 1974, Vol. 9, pp. 75-77.
- 22) Fernandez-Pello, A. C., Ray, S. R., and Glassman, I., Flame spread in an opposed forced flow: the effect of ambient oxygen concentration, *Eighteenth Symp. (Int.) on Combust. Combust. Inst.*, 1981, pp. 579-589.
- 23) Suzuki, M., Dobashi, R., and Hirano, T., Behavior of fires spread downward over thick paper, *Twenty-Fifth Symp. (Int.) Combust., Combust. Inst.*, 1994, pp. 1439-1446.
- 24) Lastrina, F. A., Magee, R. S., McAlevy III, R. F., Flame spread over fuel beds: solid-phase energy considerations, *Thirteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst.*, 1971, pp. 935-948.
- 25) Di Blasi, C., Processes of flames spreading over the surface of charring fuel: effects of the solid thickness, *Combust. Flame* 97: 225-239 (1994).
- 26) Fernandez-Pello, A., and Williams, F. A., Laminar flame spread over PMMA surfaces, *fifteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst.*, 1975, pp. 217-231.
- 27) 平野敏右, 越田孝久, 秋田一雄, PMMA表面に沿っての燃え広がり機構, 火災学会論文集, 27巻2号, (1977), pp. 33-39.
- 28) Sibulkin, M., and Lee, C. K., Flame propagation measurements and energy feedback analysis for burning cylinders, *Combust. Sci. and Technol.*, 1974, Vol. 9, pp. 137-147.
- 29) Orloff, L., De Ris, J., and Markstein, G. H., Upward turbulent fire spread and burning of fuel surface, *Fifteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst.*, 1975, pp. 183-192.
- 30) Fernandez-Pello, A. C., and Santoro, R. J., On the dominant mode of heat transfer in downward flame spread, *Seventeenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst.*, 1979, pp. 1201-1209.
- 31) Ito, A., and Kashiwagi, T., Temperature measurements in PMMA during downward flame spread in air using holographic interferometry, *Twenty-First Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst.*, 1986, pp. 65-74.
- 32) Ito, A., and Kashiwagi, T., Characterization of flame spread over PMMA using holographic interferometry sample orientation effects, *Combust. Flame* 71: 189-204 (1988).
- 33) Ray, S. R., Fernandez-Pello, A. C., and Glassman I., A study of the heat transfer mechanisms in horizontal flame propagation, *J. Heat Transfer, ASME*, (May 1980), Vol. 102, pp. 357-363.
- 34) Krishnamurthy, L., and Williams, F. A., On the temperatures of regressing PMMA surfaces, *Combust. Flame* 20: 163-169 (1973).
- 35) 神戸博太郎編著, 高分子の熱分解と耐熱性, 培風館, (1974)
- 36) 秋田一雄, 木材の発火機構に関する研究, 消防研究所報告, 第9巻第1号, 2号, (1959).

- 37) Roberts, A. F., Clough, G., Thermal decomposition of wood in an inert atmosphere, Ninth Symp. (Int.) on Combustion, Combust. Inst., 1963, pp.158-166.
- 38) Roberts, A. F., Problems associated with the theoretical analysis of the burning of wood, Thirteenth Symp. (Int.) on Combust. Combust. Inst., 1971, pp. 893-903.
- 39) Wichman, I. S., and Oladipo, A. B., Examination of three pyrolytic reaction schemes for cellulosic materials, Fire safety Sci., Proc. Fourth Int. Symp., Ed. Kashiwagi, Int. Association for Fire Safety Science, Boston, pp. 313-323.
- 40) Di Blasi, C., On the influence of physical processes on the transient pyrolysis of cellulosic samples, Fire Safety Sci., Proc. Fourth Int. Symp., Ed. Kashiwagi, Int. Association for Fire Safety Science, Boston, pp. 229-240.
- 41) Reich, L., and Stivala, S. S. 著, 岡村誠三, 山岡仁史, 辻 孝三共訳, ポリマーの分解, 化学同人(1974).
- 42) Wichman, I. S., A model describing the steady - state gasification of bubble-forming thermoplastics in response to an incident heat flux, Combust. Flame 63: 217-229 (1986).
- 43) Lengelle, G., Thermal degradation kinetics and surface pyrolysis of vinyl polymers, AIAA J., 1970, Vol. 8(11), pp.1987-1996.
- 44) Kashiwagi, T, Inaba, A., and Brown, J. E., Differences in PMMA degradation characteristics and their effects on its fire properties, First Int. Symp. on Fire Safety Science, Hemisphere, 1986, p. 483-493.
- 45) Glassman, I., Some perceptions on condensed phase flame spreading and burning, J. Fire and Flammability, Vol. 9(January 1978), pp. 88-98.
- 46) Kanury, M. A., Rate of charring combustion in a fire, nth Symp. (Int.) on Combust. pp. 1131-1142.
- 47) Williams, F. A., Mechanism of fire spread, Sixteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1977, pp.1281-1294.
- 48) Frey, A. E., T'ien, J. S., Near-limit flame spread over paper samples, Combust. Flame 26: 257-267 (1976).
- 49) T'ien, J. S., Singahal, S. N. Harrold, D. P. and Prhl, J. M., Combustion and extinction in the stagnation-point boundary layer of a condensed fuel., Combust. Flame 33: 55-68(1978).
- 50) Frey, A. E. and T'ien, J. S., A theory of flame spread over a solid fuel including finite-rate chemical kinetics, Combust. Flame 36:263-289(1979).
- 51) Borgeson, R. A., and T'ien, J. S., Modelling the fuel temperature effect on flame spread limits in opposed flow, Combust. Sci. and Technol., 1983, Vol. 32, pp. 125-136.
- 52) Di Blasi, C., Crescitelli, S., and Russo, G., Near limit flame spread over thick fuels in a concurrent forced flow, Combust. Flame 72: 205-215 (1988).
- 53) Di Blasi, C. Crescitelli, S., Russo, G., and Fernandez-Pello, A. C.,

- Model of the flow assisted spread of flames over a thin charring combustible, Twenty-Third Symp. (Int.) Combust., Combust. Inst., 1988, pp. 1205-1212.
- 54) Loh, H. T., and Fernandez-Pello, A. C., Flow assisted flame spread over thermally thin fuels, Fire Safety Science, Proc. First Int. Symp., Hemisphere, 1986, pp. 65-74.
 - 55) Kulkarni, A. K., and Sibulkin, M., Burning rate measurements on vertical fuel surfaces, Combust. Flame 44: 185-186 (1982).
 - 56) Sibulkin, M., and Kulkarni, A. K., and Annamalai, K., Burning on a vertical surface with finite chemical reaction rate, Combust. Flame 44:187-199(1982).
 - 57) Olson, S. L, Ferkul, P. V., and T'ien, J. S., Near-limit flame spread over a thin solid fuel in microgravity, Twenty-Second Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1988, pp.1213-1222.
 - 58) Chen, C. H., and Hou, W. H., Diffuion flame stabilization and extinction under naturally convective flow, Combust. Flame 83:309-324(1991).
 - 59) Ferkul, P. V., and T'ien, J. S., A model of low-speed concurrent flame spread over a thin fuel, Combust. Sci. and Technol., 1994, Vol. 99, pp. 345-370.
 - 60) Bhattacharjee, S., and Altenkirch R. A., Radiation-controlled opposed -flow flame spread in a microgravity environment, Twenty-Third Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1990, pp. 1627-1633.
 - 61) Bhattacharjee, S., and Altenkirch, R. A., The effect of surface radiation on flame spread in a quiescent, microgravity environment, Combust. Flame 84: 160-169 (1991).
 - 62) Bhattacharjee, S., Bhaskarman, K. K., and Altenkirch, R. A., Effects of pyrolysis kinetics on opposed-flow flame spread modeling, Combust. Sci. and Technol., 1994, Vol.100, pp.163-182.
 - 63) Chen, C. -H., and Cheng, M. -C., Gas-phase radiative effects on downward flame spread in low gravity, Combust. Sci. and Technol., 1994, Vol. 97, pp.63-83.
 - 64) Sato, K, Miki, K, and Hirano, T., Flame spread over paper in an air stream with a velocity change, J. Heat Transfer, ASME, 1984, Vol.106, pp. 7070-712.
 - 65) Takeno, K., and Hirano, T, Delayed extinction of flames spreading downward over paper sheets, Fire Safty Science, Proc. Second Int. Symp., Ed. T. Wakamatsu, Y. Hasemi, A. Sekizawa, P. G. Seeger, P. J. Pagni, and C. E. grant, pp.97-105, 1989, Hemisphere, New York,
 - 66) Zhou, L., and Fernandez-Pello, A. C., Turbulent burning of a flat fuel surface, Fire Safety Sci., Proc. Third Int. Symp., pp.415-424., 1991
 - 67) Zho, L., and Fernandez-Pello, A. C., Solid fuel combustion in a forced, turbulent, flat plate flow: the effect of buoyancy, Twenty -Fourth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1992, pp.1721-1728.
 - 68) Agrawal, S., and Atreya, A., Wind-aided flame spread over an

- unsteadily vaporizing solid, Twenty-Fourth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1992, pp. 1685-1693.
- 69) Mekki, K., Atreya, A., Agrawal, S., and Wichman, I., Wind-aided flame spread over charring and non-charring solids: an experimental investigation, Twenty-Third Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1990, pp. 1701-1707.
 - 70) Atreya, A., and Mekki, K., Heat transfer during wind-aides flame spread on a ceiling mounted sample, Twenty-fourth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1992, pp. 1677-1684.
 - 71) Agrawal, S., Determination of surface heat flux in the burning zone during wind-aided flame spread using burned PMMA samples, Combust. Sci. and Technol., 1993, Vol. 91, pp. 187-190.
 - 72) Kurosaki, Y., Ito, A., and Chiba, M., Downward flame spread along two vertical, parallel sheets of thin combustible solid, Seventeenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1979, pp. 1211-1220.
 - 73) Itoh, A. and Kurosaki, Y., Downward Flame Spread along several vertical, parallel sheets of paper, Combust. Flame 60:269-277(1985).
 - 74) Emmons, H. W., and Shen, T., Fire spread in paper arrays, Thirteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1971, pp. 917-926.
 - 75) Vogel, M., and Williams, F. A., Flame propagation along matchstick arrays, Combust. Sci. and Technol., 1970, Vol. I, pp. 429-436.
 - 76) Anderson, H. E., Fire spread and flame shape, Fire Technology, Vol. 4, 1968, pp. 51-58.
 - 77) Hirano, T., and Sato, K., Effects of radiation and convection on gas velocity and temperature profiles of flames spreading over paper, fifteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1975, pp. 233-241.
 - 78) Hirano, T., and Tazawa, K., A furter study on effects of external radiation on flame spread over paper, Combust. Flame 32:95-105(1978).
 - 79) Kashiwagi, T., Ohlemiller, T. J., and Werner, K., Effects of external radiant flux and ambient oxygen concentration on nonflaming gasification rates and evolved products of white pine, Combust. Flame 69: 331-345 (1987).
 - 80) Quintiere, J., A simplified theory for generalizing results from a radiant panel rate of flame spread apparatus, Fire and materials, Vol. 5, No. 2, 1981, pp. 52-60.
 - 81) Quintiere, J., Harkeroad, M., and Walton, D., Measurement of material flame spread properties, Combust. Sci. and technol., 1983, Vol. 32, pp. 67-89.
 - 82) Kim, J. S., Baek, S. W., and Kaplan, C. R., Effect of radiation on diffusion flame behavior over a combustible solid, Combust. Sci. and Technol., 1992, Vol. 88, pp. 133-150.
 - 83) Altenkirch, R. A., Eichhorn, R., and Shang, P. C., Buoyancy effects on flames spreading down thermally thin fuels, Combust. Flame 37:71-83 (1980).
 - 84) Altenkirch, R. A., Correlating downward flame spread rates for thick

- fuel beds, Combust. Sci. and Technol., 1983, Vol. 32, pp. 49-66.
- 85) Bhattacharjee, S., and Altenkirch, R. A., A comparison of theoretical and experimental results in flame spread over thin condensed fuels in a quiescent, microgravity environment, Twenty-Fourth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1992, pp.1669-1676.
- 86) Bhattacharjee, S., Altenkirch, R. A., and Sacksteder, K., Implications of spread rate and temperature measurements in flame spread over a thin fuel in a quiescent, microgravity, space-based environment, Combust. Sci. and Technol., 1993, Vol. 91, pp. 225-242.
- 87) Ramachandra, P. A., Altenkirch, R. A., Bhattacharjee, S., Tang, L., Sacksteder, K., and Wolverton, M., The behavior of flames spreading over thin solids in microgravity, Combust. Flame 100:71-84 (1995).
- 88) Di Blasi, C., Predictions of wind-opposed flame spread rates and energy feedback analysis for charring solids in a microgravity environment, Combust. Flame: 332-340 (1995).
- 89) Lyons, P.R.A., and Weber, R.O., Geometrical effects on flame spread rate for wildland fine fuels, Combust. Sci. and Technol., 1993, Vol. 89, pp.153-165.
- 90) Lee, C. K., and Diehl, J. R., Combustion of irradiated dry and wet oak, Combust. Flame 42: 123-138 (1981).
- 91) Perrins, L. E., and Pettett, K., Measurement of flame spread velocities, J. Fire and Flammability, Vol. 5(January 1974), pp. 85-102.
- 92) Fangrat, J. and Wolanski, P., One-Dimensional analytical model of flame spread over solids, J. Fire Sci., Vol.9 September/October 1991, pp.424-437.
- 93) Andoh, E., Mizomoto, M., and Ikai, S., Flame-spreading over the surface of a solid propellant Part II:Simplified model, Combust. Sci. and Tecnol, 1982, Vol. 28, pp. 1-13.
- 94) Nakakuki, A., Flame spread over solid and liquid fuels, J. Fire and Flammability, Vol. 7 (January 1976), pp. 19-40.
- 95) Pagni, P. J., and Peterson, T. G., Flame spread through porous fuels, Fourteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1973, pp. 1099-1107.
- 96) Markstein, G. H., and De Ris J., Upward fire spread over textiles, Fourteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1973, pp.1085-1097.
- 97) Hirano, T., Sato, K., Sato, Y., and Sato, J., Prediction of metal fire spread in high pressure oxygen, Combust. Sci. and Technol., Vol. 32, 1983, pp.137-159.
- 98) Hirano, T., and Sato, J., Fire spread along structural metal pieces in oxygen, J. Loss Prevention Process Indus., 6(3), 1993, pp. 151-157.
- 99) Wichman, I. S., and Saito, K., An experimental study of the effects of gravity on flame spread in high oxygen concentration environments, Combust. Flame 52: 291-297 (1983).

- 100) De Ris, J., Spread of a laminar diffusion flame, twelfth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1969, pp. 241-252.
- 101) McAlevy, H. R. F. and Magee, R. S., The mechanism of flame spreading over the surface of ignition condensed-phase materials, Twelfth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1969, pp. 215-227.
- 102) Tarifa, C. S., Del Notario, P. P., and Torralbo, A. M., On the process of flame spreading over the surface of plastic fuels in an oxidizing atmosphere, Twelfth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1969, pp. 229-240.
- 103) Sirignano, W. A., Theory of flame spread above solids, Acta Astronautica, Vol. 1, 1974, pp. 1285-1299.
- 104) Fernandez-Pello, A., and Williams, F. A., A theory of laminar flame spread over flat surfaces of solid combustibles, Combust. Flame 28: 251-277 (1977).
- 105) Kim, J. S., De Ris, J., and Kroesser, F. W., Laminar free-convective burning of fuel surfaces, Thirteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1971, pp. 949-961.
- 106) Wichman, I. S., and Agrawal, S., Wind-aided flame spread over thick solids, Combust. Flame 83: 127-145 (1991).
- 107) Wichman, I. S., and Williams, F. A., A simplified model of flame spread in an opposed flow along flat surface of a semi-infinite solid, Combust. Sci. and Technol., 1983, Vol. 32, pp. 91-123.
- 108) Wichman, I. S., A model describing the influences of finite - rate gas - phase chemistry on rates of flame spread over solid combustibles, Combust. Sci. and Technol., 1984, Vol. 40, pp. 233-255.
- 109) Wichman, I. S., and Williams, F. A., Comments on rates of creeping spread of flames over thermally thin fuels, Combust. Sci. and Technol., 1983, Vol. 33, pp. 207-214.
- 110) Thomas, P. H., Thermal conduction from a moving half plane source to a nearby cold surface, Combust. Sci. and Technol., Vol. 28, 1982, p. 173.
- 111) Carrier, G., Fendell, F., and Fink, S., Towards wind-aided flame spread along a horizontal charring slab: the steady - flow problem, Combust. Sci. technol, 1983, Vol. 32, pp. 161-209.
- 112) Delichatsios, M. A., Exact solution for the rate of creeping flame spread over thermally thin materials, Combust. Sci. and Technol., 1986, Vol. 44, pp. 257-267.
- 113) Bhattacharjee, S., A comparison of numerical and analytical solution of creeping flame spread over thermally thin material, Combust. Flame 43-44 (1993).
- 114) Delichatsios, M. A., Comments on " A comparison of numerical and analytical solution of creeping flame spread over thermally thin material," by S. Bhattacharjee, Combust. Flame 95: 336-339 (1993).
- 115) Bhattacharjee, S., A response to the comments by M. A. Delichatsios on "A comparison of numerical and analytical solution of the creeping flame spread over thermally thin material", Combust. Flame

95: 340 (1993).

- 116) Chen, Y., and Delichatsios, M. A., Creeping flame spread: some new results and interpretation for material flammability characterization, *Combust. Flame* 99: 601-609 (1994).
- 117) Karpov, A. I., On the prediction of flame spread rate over the combustion materials, First Asian Conference of Fire Sci. and Technol., pp. 319-324, Ed. Fan, W., and Fu, Z., International Academic Publishers, Beijing (1992).
- 118) Karpov, A. I., and Bulgakov, V. K., Proc. Fourth Int. Symp. on Fire Safety Sci., pp. 373-384, 1994.
- 119) Ohki, Y., and Tsuge, S., On the flame spreading over a polymer surface, *Combust. Sci. and Technol.*, 1974, Vol. 9, pp. 1-12.
- 120) 長谷見雄二, 垂直面における上方火焰伝播の熱的モデル・I: 現象の数学的表現と自己火焰伝播における未燃領域の予熱過程に関する実験的諸関係, 日本建築学会計画系論文報告集, 第359号, 昭和61-1, pp. 117-124.
- 121) 長谷見雄二, 垂直面における上方火焰伝播の熱的モデル・II: 垂直面上の火焰・熱気流の伝熱機構と火焰伝播性状予測, 日本建築学会計画系論文報告集, 第375号, 昭和62-5, pp. 141-147.
- 122) Bhattacharjee, S., Bhaskarn, K. K., and Altenkirch, R. A., Effects of pyrolysis kinetics on opposed-flow flame spread modeling, *Combust. Sci. and Technol.*, 1994, Vol. 100, pp. 163-182.
- 123) Glassman, I., and Hansel, G., Some thoughts and experiments on liquid fuel spreading steady burning and ignitability in quiescent atmospheres, *Fire Research Abstracts and Reviews*, Vol. 10, No. 3, 1968, pp. 217-234.
- 124) Glassman, I., and Dryer, F. L., Flame spreading across liquid fuels, *Fire Safety J.*, Vol. 3 (1980/81) 123-138.
- 125) 秋田一雄, 液面燃焼, 機械の研究, 第21巻, 第1葉 (1969), pp. 205-211.
- 126) Ross, H. D., Ignition of and flame spread over laboratory - scale pools of pure liquid fuels, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 20, pp. 17-63, 1994.
- 127) Hirano, T., and Suzuki, T., Flame propagation across liquids - A review of gas phase phenomena, *Fire Safety J.*, Vol. 21, 1993, pp. 207-229.
- 128) 金原寿郎, 液体における沿面燃焼の現象; (第一報), 9巻7号, 1930, pp. 561-570, 理化学研究所集報.
- 129) 金原寿郎, 液体における沿面燃焼の現象; (第二報), 10巻7号, 1931, pp. 37-51, 理化学研究所集報.
- 130) 金原寿郎, 液体における沿面燃焼の現象; (第三報), 11巻1号, 1932, pp. 104-119, 理化学研究所集報.
- 131) 金原寿郎, 液体における沿面燃焼の現象; (第四報), 11巻10号, 1932, pp. 1191-1200, 理化学研究所集報.
- 132) 金原寿郎, 液面上に於ける蒸気密度の分布について, 理化学研究所集報, 21巻2号, 1942, pp. 95-119, 理化学研究所集報.
- 133) 金原寿郎, 液体の引火点について, 日本火災学会論文集, 3巻2号, 1953 (昭和28), pp. 51-54.

- 134) Burgoyne, J. H., Roberts, A. F., and Quinton, P. G., The spread of flame across a liquid surface I. The induction period, *Proc. Roy. Soc., A* 308, pp. 39-53 (1968).
- 135) Burgoyne, J. H., and Roberts, A. F., The spread of flame across a liquid surface II. Steady - state conditions, *Proc. Roy. Soc., A* 308, pp. 55-68 (1968).
- 136) Burgoyne, J. H., and Roberts, A. F., The spread of flame across a liquid surface III. A theoretical model, *Proc. Roy. Soc., A* 308, pp. 69-79 (1968).
- 137) Mackinven, R., Hansel, J. G., and Glassman, I., Influence of laboratory parameters on flame spread across liquid fuels, *Combust. Sci. and Technol.*, 1970, Vol. 1, pp. 293-306.
- 138) Sirignano, W. A. and Glassman, I., Flame spread above liquid fuels: Surface-tension-driven flows, *Combust. Sci. and Technol.*, 1970, Vol. 1, pp. 307-312.
- 139) Torrance, K. E., Subsurface flows preceding flame spread over a liquid fuel, *Combust. Sci. and technol.*, 1971, Vol. 3, pp. 133-143.
- 140) Torrance, K. E., and Mahajan, R. L., Surface tension flows induced by a moving thermal source, *Combust. Sci. and Technol.*, 1975, Vol. 10, pp. 125-136.
- 141) Torrance, K. E., and Mahajan, R. L., Fire spread over liquid fuel: Liquid phase parameters, Fifteenth Symp. (Int.) on Combust., *Combust. Inst.*, 1975, pp. 281-287.
- 142) Akita, K., Some problems of flame spread along a liquid surface, Fourteenth Symp. (Int.) on Combust., *Combust. Inst.*, 1973, pp. 1075-1083.
- 143) 松本洋一郎, 斎藤孝基, 液面燃焼伝ばに関する研究, *日本機械学会論文集 (B)*, 46巻405号, (昭和55-5), pp. 998-1006.
- 144) Ito, A., Masuda, D., and Saito, K., A study of flame spread over alcohols using holographic interferometry, *Combust. Flame* 83:375-389 (1991).
- 145) Ito, A., Saito, K., and Cremers, C. J., Pulsating flame spread over liquids, *Fire Safety Sci., Proc. Fourth Int. Symp.*, pp. 445-456.
- 146) Hirano, T., and Suzuki, T., Mashiko, I., and Tanabe, N., Gas movements in front of flames propagating across methanol., *Combust. Sci. and Technol.*, 1980, Vol. 22, pp. 83-91.
- 147) Suzuki, T., and Hirano, T., Flame propagation across a liquid fuel in an air stream, Nineteenth Symp. (Int.) on Combust., *Combust. Inst.*, 1982, pp. 877-884.
- 148) Hirano, T., Suzuki, T., and Mashiko, I., Flame behavior near steps bounding layered flammable mixture, Eighteenth Symp. (Int.) on Combust., *Combust. Inst.*, 1981, pp. 647-655.
- 149) Spalding, D. B., The combustion of liquid fuels, Fourth Symp. (Int.) on Combust., *Combust. Inst.*, 1955, pp. 847-864.
- 150) Takeno, K. and Hirano, T., Flame spread over porous solids soaked with a combustible liquid, Twenty-First Symp. (Int.) on Combust.,

- Combust. Inst., 1986, pp. 75-81.
- 151) Takeno, K., and Hirano, T., Behavior of combustible liquid soaked in porous beds during flame spread., Twenty-Second Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1988, pp. 1223-1230.
 - 152) Suzuki, T., Kawamata, M., Matsumoto, K., and Hirano, T., Behavior of the reverse flow in front of the leading flame edge spreading over fuel-soaked sand in an air stream, Fire Safety Science, Proc. Third Int. Symp., 1990, pp. 227-236.
 - 153) Suzuki, T., Kawamata, M., and Hirano, T., Flame spread over fuel soaked sand in an opposed air stream, Fire Safety Sci., Proc. Second Int. Symp., pp. 199-208, 1988.
 - 154) Hirano, T., Suzuki, T., Sato, J., and Ohtani, H., Flame spread over crude oil sludge, Twentieth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst. 1984, pp. 1611-1617.
 - 155) Suzuki, T., Kudo, N., Sato, J., Ohtani, H., and Hirano, T., Flame spread over thin layers of crude oil sludge, Fire safety Science., Proc. First Int. Symp., pp. 55-64.
 - 156) Ohtani, H., Sato, J., and Hirano, T., An analysis of flame spread over multicomponent combustibles, Proc. AIAA Twenty-Third Aerospace Sciences Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics, (1985) AIAA-85-0396, pp. 1-5.
 - 157) Ji, J., and Fan, W.-C., Flame spread over oil-sand pool, First Asian Conference on Fire Science and Technology, Ed. Fan, W.-C and Fu, Z., 1992, pp. 287-293, International Academic Publishers, Beijing.
 - 158) Suzuki, T., and Hirano, T., Effects of gasification properties of a combustible on flame spread over its surface, Fourth Int. Symp. on Fire Safety Sci., pp. 361-371, Ed. T. Kashiwagi, International Association for Fire Safety Science, Boston, MA, 1994.
 - 159) 鈴木 健, 平野敏右, 可燃性液体を浸潤させたろ紙の空気流中での燃え拡がり, 日本火災学会論文集, 第42巻第2号, 1994, pp. 11-16.
 - 160) Ishida, H., Flame spread over fuel-soaked ground, Fire Safety J., Vol. 10, 1986, pp. 163-171.
 - 161) Furuta, M., and Humphrey, J., and Fernandez-Pelo, A. C., Prediction of flame spread hydrodynamics over liquid fuel, Physico Chemical Hydrodynamics, Pergamon Press, Vol. 6, No. 4, 1985, pp. 347-372.
 - 162) Di Blasi, C., Crescitelli, S., and Russo, G., Model of pulsating flame spread across liquid fuels, Twenty-Third Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1990, pp. 1669-1675.
 - 163) Schiller, D. N., and Sirignano, W. A., Ignition and Flame spread above liquid fuel pools, Paper No. WSCI (Western States Section of the Combustion Institute), 91-96, (1991), pp. 1-28.
 - 164) Ross, H. D., and Sotos, R. G., An investigation of flame spread over shallow liquid pools in microgravity and nonair environments, Twenty-Third Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1990, pp. 1649-1655.
 - 165) Essenhigh, R. H., Combustion and flame propagation in coal system;

- a review, Sixteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst. pp. 353-374.
- 166) Phillips, H., Flame in a buoyant methane layer, Tenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1965, pp. 1277-1283.
 - 167) Liebman, I., Corry, J., and Perlee, H. E., Flame propagation in layered methane-air systems., Combust. Sci. and Tech., 1970, Vol. 1., pp. 257-267.
 - 168) Hirano, T., Suzuki, T., Mashiko, I., and Iwai, K., Flame propagation through mixtures with concentration gradient, Sixteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1977, pp. 1307-1315.
 - 169) Kaptein, M., and Hermance, C. E., Horizontal propagation of laminar flames through vertically diffusion mixtures above a ground plane, Sixteenth Int. Symp. on Combust., Combust. Inst., 1977, pp. 1295-1306.
 - 170) Feng, C. C., Lam, S.H., and Glassman, I., Flame propagation through layered fuel-air mixtures, Combust. Sci. and Technol., Vol. 10, 1975, pp. 57-71.
 - 171) Dold, J. W., Flame propagation in a nonuniform mixture: The structure of anchored triple-flame, Proc. American Inst. Aeronaut. Astronaut., 1988, pp. 240-248.
 - 172) Dold, J. W., Flame propagation in a nonuniform mixture: analysis of a slowly varying triple flame. Combust. Flame 76:71-88(1989).
 - 173) Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, K. N., and Linan, A., Flame spread in laminar mixing layers: The triple flame, Combust. Flame 95: 276-290 (1993).
 - 174) Hirano, T., and Kanno, Y., Aerodynamic and thermal structure of the laminar boundary layer over a flat plate with a diffusion flame, Fourteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1973, pp. 391-.
 - 175) Hirano, T., and Kinoshita, M., Gas velocity and temperature profiles of a diffusion flame stabilized in the stream over liquid fuel, Fifteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1975, pp. 379-387.
 - 176) 森 康夫, 土方邦夫, 宮内敏雄, 池田英人, 液体燃料の層流境界層内拡散燃焼に関する基礎的研究, 日本機化学会論文集(B編), 48巻, 430号(昭57-6).
 - 177) Mao, C. -P., Fernandez-Pello, A. C., and Pagni, P. J., Mixed convective burning of a fuel surface with arbitrary inclination, J. Heat Transfer, ASME, Vol. 106, pp. 304-309, (May 1984).
 - 178) Mao, C.-P., Kodama, H., and Fernandez-Pello, A. C., Convective structure of a diffusion flame over a flat combustible surface, Combust. Flame 57:209-236(1984).
 - 179) Chao, B. H., Cheng, P., and Le, T. Free-convective diffusion flame sheet in porous media, Combust. Sci. and Technol., 1994, Vol. 99, pp. 221-234.
 - 180) Tao, Y.-X., and Kaviany, M. Burning rate of liquid supplied through a wick, Combust. Flame 86:47-61(1991).
 - 181) 小熊正人, 工藤一彦, 谷口 博, 大森 敏明, 汪 昔奇, 固体平板の燃焼・

- 伝熱に関する研究(第2報 固体平板上に形成される拡散炎の保炎機構), 第22回燃焼シンポジウム前刷集(昭和59), pp. 229-231.
- 182) Holve, D. J., and Sawyer, R. F., Diffusion controlled combustion of polymers, fifteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1974, pp. 351-361.
 - 183) Seshadri, K., and Williams, F. A., Structure and extinction of counterflow diffusion flames above condensed fuels: Comparison between poly(methylmethacrylate) and its liquid monomer, both burning in nitrogen-air mixtures, J. Polymer Sci.: Polymer Chemistry Edition, Vol. 16, pp. 1755-1778(1978).
 - 184) Seshadri, K., Structure and extinction of laminar diffusion flames above condensed fuels with water and Nitrogen, Combust. Flame 33: 197-215(1978).
 - 185) Kent, J. H., and Williams, F. A., Extinction of laminar diffusion flames for liquid fuels, -th Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., pp. 315-325.
 - 186) Roberts, A. F., Extinction Phenomena in Liquids, -th Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., pp. 305-313.
 - 187) Tsuji, H., Counterflow diffusion flames, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 8, pp. 93-119, 1982.
 - 188) Tsuji, H., and Yamaoka, I., A gasdynamic analysis of the counter-flow diffusion flame in the forward stagnation region of a porous cylinder, Institute of space and aeronautical science, Univ. of Tokyo, Report No. 404, July 1966, pp. 95-115.
 - 189) Otsuka, Y., and Niioka, T., On the deviation of the flame from the stagnation point in opposed-jet diffusion flames, Combust. Flame 19: 171-179(1972).
 - 190) Fendell, F. E., Ignition and extinction in combustion of initially unmixed reactants, J. Fluid Mech. (1965), Vol. 21, Part 2, pp. 281-303.
 - 191) Potter, Jr. A. E., Heimel, S., and Butler, J. N., Apparent flame strength: a measure of maximum reaction rate in diffusion flames, Eighth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1959, pp. 1027-1034.
 - 192) Bilger, R. W., The structure of diffusion flames, Combust. Sci. and Technol., 1976, Vol. 13, pp. 155-170.
 - 193) Mitchell, R. E., Sarofim, A. F., and Clomberg, L. A., Experimental and numerical investigation of confined laminar diffusion flames, Combust. Flame 37: 227-244 (1980).
 - 194) Puri, I. K., Extinction criteria bouyant nonpremixed flames, Combust. Sci. and Technol., 1992, Vol. 84, pp. 305-321.
 - 195) Linan, A., The asymptotic structure of counterflow diffusion flames for large activation energies, Acta Astronautica, Vol. 1, pp. 1007-1039, 1974.
 - 196) Kalghatgi, G. T., Blow-out stability of gaseous jet diffusion flames Part II: effect of cross wind, Combust. Sci. Technol., 1981, Vol. 26, pp. 241-244.
 - 197) Scholefield, D. A., and Garside, J. E., The structure and stability

- of diffusion flames, Tird Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1949, pp. 102-110.
- 198) Vanquickenborne, L., and Van Tiggelen, A., The stabilization mechanism of lifted diffusion flames, Combust. Flame 10:59-69(1966).
 - 199) Chung, S. H. and Lee, B. J., On the characteristics of laminar lifted flames in a nonpremixed jet, Combust. Flame 86:62-72(1991).
 - 200) Eickhoiff, H., Lenze, B., and Leuckel, W. Experimental investigation on the stabilization mechanism of jet diffusion flames, Twentieth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Flame, 1984, pp. 311-318.
 - 201) Takahashi, F., Mizomoto, M., Ikai, S., and Futaki, N., Lifting mechanism of free jet diffusion flames, Twentieth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1984, pp. 295-302.
 - 202) Melven, A., Moss, J. B., and Clarke, J. F., The structure of a reaction-broadened diffusion flame Combust. Sci. and Technol., Vol. 4 (1971), pp. 17-30.
 - 203) Melven, A., Moss, J. B., and Claeke, J. F., Combust. Sci. and Technol, Vol. 6, (1972), pp. 135-142.
 - 204) Prasad, K. and Price, E. W., A numerical study of the leading edge of laminar diffusion flames, Combust. Flame 90:155-173(1992).
 - 205) Mahalingam, S., Self-similar diffusion flame including effects of streamwise diffusion, Combust. Sci. and Technol., 1993, Vol. 89, pp. 363-373.
 - 206) Karman, von, T., and Millan, G., Thermal theory of a laminar flame front near a cold wall, Fourth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1951, pp. 173-177.
 - 207) Saffman, M., Parametric studies of a side wall quench layer, Combust. Flame 55:141-159(1984).
 - 208) Gross, R. A., Boundary layer flame stabilization, Jet Propulsion, (June 1955), pp. 288-290 and p. 293.
 - 209) Ziemer, R. W., Cambel, A. B., Flame stabilization in the boundary layer of heated plates, Jet Propulsion, 28(September 1958), pp. 592-599.
 - 210) Kumagai, S., Evaporation of fuel Sprays, Sixth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1957, pp. 668-674.
 - 211) Fernandez-Pello, A. C., An analysis of the forced convective burning of a combustible particle, Combust. Sci. and Technol., 1982, Vol. 28, pp. 305-313.
 - 212) Fernandez-Pello, A. C., and Law, C. K., A theory for the free-convective burning of a condensed fuel particle, Combust. Flame 44: 97-112 (1982).
 - 213) Krishnamurthy, L., and Williams, F. A., Laminar combustion of polymethylmethacrylate in O₂/N₂ mixture, nth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., pp. 1151-1164.
 - 214) Ray, S. R., and Glassman, I., the detailed processes involved in flame spread over solid fuels, Combust. Sci. and Tech., 1983, Vol. 32, pp. 33-48.

- 215) T'ien, J. S., Singhal, S. N., Harrold, D. P. and Prahl, J. M., Combustion and extinction in the stagnation-point boundary layer of a condensed fuel, *Combust. Flame* 33:55-68(1978).
- 216) Izumikawa, M., Mitani, T. and Nioka, T., Burning behavior of paper inhibited by NaHCO_3 , *J. Fire Sci.*, 1986, pp. 332-345.
- 217) Delichatsios, M. A., Exact solution for the rate of creeping flame spread over thermally thin materials., *Combust. Sci. and Technol.*, 1986, Vol. 44, pp. 257-267.
- 219) Zhang, Y., Ronney, P. D., Roegner, E. V., and Greenberg, J. B., Lewis number effects on flame spreading over thin solid fuels, *Combust. Flame* 90:71-83(1992).
- 220) Akita, K. and Yumoto, T., Heat transfer in small pools and rates of burning of liquid methanol, Tenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1965, pp. 943-948.
- 221) Wichman, I. S., Williams, F. A., and Glassman, I., Theoretical aspects of flame spread in an opposed flow over flat surface of solid fuels, Nineteenth Symp. (Int.) on Combust., Combust. Inst., 1982, p. 835-845.
- 222) Sato, K. and Segal, S., Mode of burning zone spread in an opposed gas flow, *Combust. Flame* 83:146-154(1991).
- 223) 大塚芳郎, 新岡 嵩, 対向噴流拡散火炎における火炎の偏位について, 日本機械学会論文集(第2部), 第38巻310号(昭47-6), pp. 1506-1512.
- 224) 八島正明, 平野敏右, 移動する可燃性固体表面上の火炎先端の性質, 燃焼の科学と技術, 1995, Vol. 3, pp. 29-40.
- 225) 八島正明, Karpov, A. I., 平野敏右, 可燃性物質表面上を伝ばする火炎の伝ば機構, 第31回燃焼シンポジウム前刷集(1993), pp. 367-369.
- 226) 八島正明, 平野敏右, 伝ば火炎の燃料移動への追従性, 平成6年度日本火災学会研究発表会概要集(1994), pp. 96-99.
- 227) 赤松映明, 非定常平板境界層理論, 日本機械学会誌, 72巻609号, 昭和44-10, pp. 1408-1415.
- 228) 赤松映明, 半無限平板上の非圧縮性非定常層流境界層, 日本機械学会論文集, 32巻244号, 昭和41-12, pp. 1842-1847.
- 229) H. ラウス編著, 有江幹男訳, ラウス 流体力学, 工学図書(1974), p. 314.
- 230) 平野敏右, ガス爆発予防技術, 海文堂(1983).
- 231) 平野敏右, 燃焼学, 海文堂(1986).
- 232) 水谷幸夫, 燃焼工学 (第2版), 森北出版(1989).
- 233) 辻 廣, 燃焼現象論, 機械の研究, 28巻5号(1976) p. 85 ~ 30巻1号(1977) p. 59.
- 234) 熊谷清一郎, 燃焼, 岩波全書(1976).
- 235) 疋田 強, 秋田一雄, 燃焼概論 改訂版, コロナ社(1982).
- 236) 田中孝義, 建築火災安全工学入門, (財)日本建築センター(1993).
- 237) 安全工学協会編, 火災, 海文堂(1983).
- 238) Bernard Lewis, Guenther von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases (Third Edition), Academic Press Inc. (1987).
- 239) Hermann Schlichting, Translated by J. Kestin, Boundary - Layer Theory (Seventh Edition), McGraw-Hill (1979), p. 90, p. 408.
- 240) Forman A. Williams, Combustion Theory, Addison-Wesley Publishing

- Company, Inc (1965).
- 241) Forman A. Williams, Combustion Theory (Second Edition), Addison-Wesley Publishing Company (1985).
 - 242) Dougal Drysdale, An introduction to fire dynamics, Jhon Wiley and Sons (1985).
 - 243) Kenneth Kuan-yun Kuo, Principales of Combustion, Jhon Wiley and Sons, (1986).
 - 244) Irvin Glassman, Combustion (Second Edition), Academic Press, Inc., 1987.
 - 245) Roger A. Strehlow, Combustion Fundamentals, McGraw-Hill (1985).
 - 246) Tau-Yi Toong, Combustion Dynamics, McGraw-Hill (1983).
 - 247) D. B. Spalding, Some Fundamentals of Combustion, Butterworths Scientific Publications, London, (1955).
 - 248) Ed. G. Cox, Combustion Fundamentals of Fire, Academic Press (1995).
 - 249) R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, Transport Phenomena, Jhon Wiley and Sons, (1960).
 - 250) R. C. リード, J. M. ブラウズニツツ, T. K. シャーウッド著, 平田光穂監訳, 中原, 長浜, 石川, 星野 共訳, 気体, 液体の物性推算ハンドブック (第3版), マグロウヒル (1985).
 - 251) 日本機械学会編, 燃焼工学ハンドブック, 丸善 (1995).
 - 252) 日本化学会編, 化学便覧応用編 改訂2版, 丸善 (1973).
 - 253) 化学工学協会編, 化学工学便覧 改訂4版, 丸善 (1978).
 - 254) 有機合成化学協会編, 溶剤ポケットブック, オーム社 (1967).
 - 255) 浅原照三他編著, 溶剤ハンドブック, 講談社 (1976).
 - 256) 村橋俊介, 小田良平, 井本 稔 編, プラスチックハンドブック (改訂新版), 朝倉書店 (1969).
 - 257) 日本機械会編, 機械工学便覧 (流体工学), 日本機械学会 (1986), p. A5-44.
 - 258) 小竹 進, 土方邦夫, パソコンで解く熱と流れ, 丸善 (1988).
 - 259) 荒川忠一, 数値流体工学, 東京大学出版会 (1994).
 - 260) 標 宣男, 鈴木正昭, 石黒美佐子, 寺坂晴夫, 数値流体力学, 朝倉書店 (1994).
 - 261) スモリダリング (くん焼) 一資料集一, 1989年4月, 鹿島学術振興財団研究助成.
 - 262) 総務庁統計局編, 日本の統計 (1995), 大蔵省印刷局 (平成7年).
 - 263) 東京消防庁監修, 平成6年版火災の実態, (財)東京防災指導協会 (平成6年).
 - 264) 東京消防庁監修, 特異火災事例集一その傾向と実態一, (財)東京防災指導協会 (昭和58年).
 - 265) 櫻岡正規, 北海道南西沖地震の火災について, 日本火災学会誌, 44巻2号, (1994-4月).
 - 266) 川村達彦, 延焼シミュレーションによる奥尻大火の分析, 日本火災学会誌, 44巻2号 (1994-4月).
 - 267) 坊池道昭, 兵庫県南部地震一同時多発火災, その原因は一, 日本火災学会誌, 45巻3号 (1995), pp. 34-38.
 - 268) Q A 10月号別冊; 江戸の大疑問, 平凡社 (1992), pp. 131-133.
 - 269) 別冊歴史読本62号; 大江戸おもしろ役人役職読本, 新人物往来社 (1994), pp. 250-253.
 - 270) 東京天文台編, 理科年表 (平成6年), 丸善.

- 271) 王 曉, 加藤裕之, 大八木重治, 燃料噴射を伴う平板境界層における拡散火炎, 第31回燃焼シンポジウム前刷集, 1993, pp. 225-227.
- 272) 楊 新秘, 鶴田 俊, 平野敏右, 可燃性液体の噴霧中を伝ばする火炎の熱的構造とその伝ば機構, 燃焼の科学と技術, 1993, Vol. 1, pp. 197-205.
- 273) 植田利久, 大島 朗, 斎藤直樹, 溝本雅彦, 層流平板境界層拡散火炎の流体力学的構造 (第2報, 実験的検討), 日本機械学会論文集(B), 56巻531号 (1990-11), pp. 3501-3507.
- 274) 伊藤昭彦, Venkatesh, S., Saito, K., 液体燃料プール燃焼の火炎基部構造とエア・エントレイメント, 第30回燃焼シンポジウム前刷集, 1992, pp. 172-174.
- 275) 大島 朗, 植田利久, 溝本雅彦, 層流平板境界層拡散火炎の流体力学的構造 (第3報), 第23回燃焼シンポジウム前刷集, 1985, pp. 97-99.
- 276) Moore, F. K., Unsteady laminar boundary-layer flow, NACA TN 2471, (1951).
- 277) 玉本章夫, 応用力学講座16: 流体力学II, 共立出版, 昭和42, pp. 40-61.
- 278) 平野敏右, 岩井一躬, 菅野義裕, 火炎を伴った平板境界層内の速度分布, 第8回燃焼シンポジウム前刷集, 1970, pp. 23-26.
- 279) 梅田晃司, 植田利久, 溝本雅彦, 平板境界層拡散火炎基部に不安定性に関する研究, 第27回燃焼シンポジウム前刷集, 1989, pp. 356-358.
- 280) 後藤 登, 湯浅三郎, 横風をうける水素噴流火炎の安定性に関する研究, 第25回燃焼シンポジウム前刷集, 1987, pp. 40-42.
- 281) Botros, P. E., and Brzustowski, T. A., An experimental and theoretical study of the turbulent diffusion flame in cross-flow, Seventeenth Symp. (Int) on Combust., Combust. Int., 1979, pp. 389-398.
- 282) 宮下宗仁, 川又正昭, 鈴木鐸士, 気流中の拡散火炎先端付近の熱流体的構造, 第30回燃焼シンポジウム前刷集, 1992, pp. 184-186.
- 283) 真壁國昭, ステッピング・モータの制御回路設計, CQ出版社(1987), p. 59.
- 284) トランジスタ技術SPECIALNo. 32, CQ出版社(1992), p. 54.
- 285) トランジスタ技術1992年7月号, CQ出版社, p. 297.
- 286) オリエンタルモーター総合カタログ, '92/'93, オリエンタルモーター(株).
- 287) 海老原大樹, 岩佐孝夫編著, ステッピングモータ活用技術, 工業調査会(1984).
- 288) 稲葉 保, 精選アナログ実用回路集, CQ出版社(1989).
- 289) 谷腰欣司, メカトロニクス回路集, 工業調査会(1986).
- 290) 最新産業用リニアIC規格集(PART 1), CQ出版社(1992).
- 291) 最新産業用リニアIC規格集(PART 2), CQ出版社(1992).
- 292) 最新モノリシックOPアンプ規格集, CQ出版社(1992).

図表番号

第1章

- 図1-1 室火災の経過

- 表1-1 火災と道路交通事故死傷者数

- 表1-2 火災の出火状況

第2章

- 図2-1 可燃性物質表面上に沿った燃え拡がりの様子

- 図2-2 本研究における火炎先端付近の様子

- 図2-3 火炎先端の移動の様子

(a)凝縮相内の熱移動に伴う火炎先端の移動

(b)気化領域の移動に伴う火炎先端の移動

- 図2-4 実験装置本体

- 図2-5 台車

- 図2-6 台車と可燃性物質の移動

- 図2-7 相対流れの可視化方法

- 図2-8 火炎先端位置の定義

- 図2-9 火炎先端の定義の違い

- 図2-10 可燃性物質の移動速度の変化

(a)一定速度時に観測する場合

(b)加速時に観測する場合

- 表2-1 実験計画

第3章

- 図3-1 可燃性固体の支持

- 図3-2 静止座標から見た火炎全体の移動の様子

- 図3-3 可燃性物質移動時の火炎先端の様子(移動座標から観測)

- 図3-4 移動速度に対する火炎先端位置の変化

- 図3-5 加速移動時の火炎先端位置の変化

- 図3-6 移動速度に対する火炎先端の安定性

- 図3-7 移動座標から見た相対流れの様子(微粒子追跡法)

第4章

- 図4-1 可燃性物質の燃焼の経過

(a)可燃性固体の場合

(b)可燃性液体の場合

- 図4-2 火炎先端への可燃性気体の供給位置

- 図4-3 小型容器槽

- 図4-4 燃焼に伴う可燃性液体の消費量の変化

- 図4-5 移動速度に対する火炎先端位置の変化

(a)メタノール

(b)メタノール/ガラスビーズ浸潤層

(c)1-プロパノール/ガラスビーズ浸潤層

- (d) MMA/ガラスビーズ浸潤層
- (e) デカン/ガラスビーズ浸潤層
- (f) ケロシン/ガラスビーズ浸潤層
- (g) ヘキサン/ガラスビーズ浸潤層

図 4 - 6 移動速度-質量燃焼速度-温度の関係

表 4 - 1 静止時の燃焼速度

表 4 - 2 静止時の火炎先端位置

第 5 章

図 5 - 1 燃焼器

図 5 - 2 可燃性気体の供給系統

図 5 - 3 未燃焼時の吹き出し出口の流速分布
(表面から1mm上)

図 5 - 4 静止時の吹き出し速度と火炎先端位置の関係

(a) メタン

(b) プロパン

(c) 質量燃焼速度による整理

図 5 - 5 移動時の前平板の影響

図 5 - 6 移動速度に対する火炎先端位置の変化 (メタンの場合)

(a) $L=3\text{mm}$, x 方向

(b) $L=3\text{mm}$, y 方向

(c) $L=10\text{mm}$

図 5 - 7 移動速度に対する火炎先端位置の変化 (プロパンの場合)

(a) $L=3\text{mm}$, x 方向

(b) $L=3\text{mm}$, y 方向

(c) $L=10\text{mm}$

図 5 - 8 移動速度に対する火炎先端位置の変化 (メタン-空気予混合火炎の場合)

図 5 - 9 移動座標から見た相対流れの様子

(a) 微粒子追跡法、1/180秒露出の断続、 $V_T=20\text{cm/s}$, $V_w=2\text{cm/s}$

(b) パラフィンを使った煙の流脈法、 $V_T=20\text{cm/s}$, $V_w=2\text{cm/s}$

(c) 微粒子追跡法、1/180秒露出の断続、 $V_T=80\text{cm/s}$, $V_w=10\text{cm/s}$

(d) 微粒子追跡法、1/180秒露出の断続、 $V_T=80\text{cm/s}$, $V_w=10\text{cm/s}$

(e) 広い範囲、微粒子追跡法、1/250秒露出の断続、 $V_T=80\text{cm/s}$, $V_w=10\text{cm/s}$

図 5 - 10 移動速度に対する火炎先端の安定性 ($L=3\text{mm}$)

図 5 - 11 火炎先端の安定性に対する $\rho_f V_w$ と V_T/L の関係

図 5 - 12 火炎先端の安定性に対する V_T と V_T/x_f の関係

第 6 章

図 6 - 1 凝縮相内の熱移動と火炎先端の移動の様子

図 6 - 2 ろ紙の支持

図 6 - 3 PMMA板の支持

- 図 6-4 容器槽
- 図 6-5 実験装置の配置
- 図 6-6 静止時の可燃性固体表面に沿った燃え拡がり速度と厚さの関係
- 図 6-7 静止時の火炎先端付近の流れの場合
(PMMA板、 $d=1.0\text{mm}$ 、微粒子追跡法、1/8秒露出の断続)
- 図 6-8 ろ紙の移動開始に伴う火炎先端位置の変化 ($d=0.24\text{mm}$)
- 図 6-9 PMMA板の移動開始に伴う火炎先端位置の変化 ($d=1.0\text{mm}$)
- 図 6-10 移動速度に対する火炎先端の安定性 (PMMA板)
- 図 6-11 静止時の可燃性液面に沿った燃え拡がり速度と初期温度の関係
- 図 6-12 初期温度の違いによる火炎先端位置の変化
- 図 6-13 燃え拡がり時の液相内の流れの場合
(1-プロパノール、アルミニウム粉、1/15秒露出)
- 図 6-14 容器槽の移動開始に伴う火炎先端と液相内の挙動 (火炎先端の移動方向が容器槽の移動方向と同じ場合)
- 図 6-15 容器槽の移動開始に伴う火炎先端と液相内の挙動 (火炎先端に移動方向が容器槽の移動方向と逆の場合)
- 図 6-16 容器槽の移動開始に伴う火炎先端位置の変化 (1-プロパノール)
(a) $V_{FO}=14\text{cm/s}$ の場合
(b) $V_{FO}=13\text{cm/s}$ の場合
- 図 6-17 容器槽の移動開始に伴う火炎先端位置の変化 (エタノール)
- 図 6-18 容器槽の移動開始に伴う火炎先端位置の変化
(1-プロパノール、 $T_1=9.5^\circ\text{C}$)
- 図 6-19 容器槽の移動開始に伴う火炎先端位置の変化 (容器長さの影響)
- 図 6-20 容器槽の移動開始に伴う火炎先端位置の変化 (ガラスビーズ浸潤層の場合)
- 図 6-21 容器槽の移動開始に伴う火炎先端位置の変化 (1-プロパノール/ガラスビーズ浸潤層)
- 図 6-22 容器槽の移動開始に伴う火炎先端位置の変化 (デカン/ガラスビーズ浸潤層の場合)
- 図 6-23 容器槽移動時の火炎先端近傍の温度上昇領域の変化 (デカン/ガラスビーズ浸潤層)
- 図 6-24 容器槽移動時の温度上昇領域の水平先端位置の変化 (デカン/ガラスビーズ浸潤層)

第 7 章

- 図 7-1 解析モデルと境界条件
(a) $u-v$
(b) $\omega-\psi$
- 図 7-2 酸化剤の気流速度に対する火炎先端位置の変化
- 図 7-3 可燃性気体の吹き出し速度に対する火炎先端位置の変化
- 図 7-4 可燃性気体の表面濃度に対する火炎先端位置の変化
- 図 7-5 濃度変化に伴う火炎先端位置の移動の様子 (説明図)

第 8 章

- 図 8-1 可燃性物質に沿って燃え拡がる火炎の伝ば機構

付録(1) 燃え拡がりに関するこれまでの研究

1. 固体表面に沿った燃え拡がり・燃焼に関する研究

(a) 用いられてきた可燃性固体

身に回りには多くの可燃性物質があり、燃え拡がりだけでなく、固体の燃焼として木材[38, 46]、松葉[89]、綿[96]、一般製品用の熱硬化性合成樹脂[81, 92]、ポリウレタンフォーム[81, 92]、金属[97]、固体推進剤[93]などが可燃性固体として用いられてきた。

一般住宅建築物では木材など天然高分子材が多く用いられていることから、防災上、そのような物質の燃え拡がりの様相を把握することが必要となる。燃え拡がり研究における可燃性固体としては、材料の不均一性、非等方性、熱分解反応の複雑さから天然の木材をそのまま用いられず、一般的に加工された紙が用いられてきた。また、身の回りの建築物、構造物(可燃物)は高分子組織からなるものがほとんどであるので、合成樹脂高分子の一つであるPMMA(ポリメタクリル酸メチル)が用いられてきた。これらの二つの物質は、それぞれ、熱分解においてチャーの生成の有・無[12]、熱的に薄い(thirmally thin)・厚い(thirmally thick)固体として用いられてきた。このようなことから、紙を使った研究[15-23, 25, 40, 48-50, 54, 57, etc.]、PMMAを使った研究[22, 26-34, 44, 52, etc.]が多く見られ、理論解析を主におこなう研究者[11, 12]は好んで解析対象物質としてきた。

(b) 熱分解、燃焼性

一般的な燃え拡がりが、気相中の継続的な燃焼反応であることから、固体表面からの可燃性気体(熱分解ガス)の発生に関する性質が調べられてきた。燃え拡がりの研究からすると、例えば、外部輻射加熱など、所定の熱流束条件下の熱分解速度、表面の降下速度(燃焼速度)、可燃性気体(熱分解ガス)の組成、生成速度などが熱分解における評価項目とされる。高分子全般の熱分解反応は、神戸らの教科書[35]が詳しい。

木材は、木の種類によってセルロース、リグニンなどの組成が異なるため、熱分解過程も各々の成分で異なる。木材の熱分解速度は、各々の成分の熱分解速度

を組み合わせたものと考えられている。木材の熱分解においては、秋田 [36] が木材セルロース、リグニン等を異なる温度で加熱し、質量変化を測定し、熱分解速度、アレニウス (Arrhenius) プロットをおこない、活性化エネルギーを求めている。また、Roberts [37, 38] は、熱分解を 1 次のアレニウス型の反応として活性化エネルギーを求めるなど、理論解析をおこなっている。近年は、燃え拡がりの数値シミュレーションに適用しやすいように、チャーの生成過程を含めた紙の熱分解に関する理論解析もおこなわれている [39, 40]。つまり、固体の熱分解反応が燃え拡がり機構を検討する上では、欠くことができないからであるが、Loh と Fernandez-Pello [54] の実験では、燃え拡がりと気流が同方向である場合、気流は燃え拡がりを支援するが、熱分解速度が燃え拡がり速度に追いつかなければ消炎に至ることを明らかにしている。

PMMA の熱分解、モノマーの生成、組成などは、Reich と Stivala [41] の文献に詳しい。PMMA は加熱とともに気泡が凝縮相内に発生するといった性質があるが、この性質を含め Wichman [42] は入射熱流束に対する熱分解、気化に関して燃焼速度 (表面降下) を理論的に調べている。その中では、PMMA のような可燃性高分子の気化過程に関する加熱による深さ方向への熱移動と可燃性物質 (気泡) の移動から表面の減少速度 (燃焼速度) を検討している。無限に厚い PMMA を仮定し、減少速度が厚さに依存しない結果を得ている。なお、Lengelle [43] の結果と比較検討され、Wichman の得た減少速度が約 3 倍大きいことを明らかにした。

Kashiwagi ら [44] は、異なるメーカーの製品ごとの熱分解性、燃え拡がり特性を比較しているが、実験では 2 社の PMMA 板の熱分析をおこなうとともに垂直下方燃え拡がり速度の比較をおこなっている。TG の比較では、昇温速度による違いが見られ、垂直下方燃え拡がり速度は 20 % の違いがあることがわかった。結論としては、昇温速度の増加とともに、昇温と熱分解の影響が少なくなり、概ね燃え拡がりに及ぼす製品の違いは小さくなるとしている。

Spalding [247] は、可燃性物質から気化により可燃性気体が発生し、形成される拡散火炎を取り扱う際に、熱伝達と流動を分離して解析できることを transfer ナンバ (B ナンバ) を導出して説明した。その B ナンバを用いた燃焼性評価の適用性は Glasman の教科書 [244] に記述が見られ、研究では、Friedman [44] がは

じめに燃焼指数へ適用を試み、合成樹脂高分子についてはGlassman [45] が、木材についてはKanury [46] が解析の中で適用を試みている。

HolveとSawer [182] は、高分子材料 (PMMA、ナイロン、ポリスチレン、エチレン、ポリエチレン、かえで材、パーティクル板など) の有効な燃焼示数として、対向流拡散火炎を用いた実験をおこなうとともに、SpaldingのBナンバを使って理論解析をおこなった。Kanury [46] は、木材の燃焼における熱分解に関するBナンバは熱化学とその力学的な物性だけではなく、露出強度、試料形状、厚さにも依存すること、試料の厚さの増加とともに小さくなること、与えられた形状におけるBナンバと熱移動係数が既知のとき、Spaldingの燃焼速度の予測が妥当であることを明らかにした。また、火炎からの熱で可燃性気体が発生するときに安定燃焼する場合、Bナンバと加熱量が一意に定まることより、この種の燃焼においてBナンバによる導入が妥当であることを示した。

Kimら [105] は、自然対流場において表面上に形成する火炎の表面の傾きと化学反応の影響を調べ、表面の傾きについてはグラスホフ数を用い、化学反応の影響はBナンバを用いることによって評価できることを示した。そして、液体の物性を参考に計算がおこなわれ、メタノールに関しては実験とよく一致したが、ベンゼンやトルエンは分子量が大きいため、実験よりも計算結果の方が大きい質量燃焼速度を得ている。実験と計算のくい違いについては、それらの分子量の違い、一般的な評価基準としては Le 数の違いとして説明した。

(c) 消炎、吹き飛び、燃え拡がり限界

消炎には大きく分けると、主に熱移動による場合と化学反応による場合が考えられるが [7]、燃え拡がり速度と合わせダムケラ数により一括して消炎が評価されることがある [7, 8, 11]。それとともに実験的では、雰囲気圧力、酸化剤濃度、気流、重力、固体の熱的な性質を可変して調べられてきた。また、燃え拡がりにおける火炎の性質、火炎構造も調べられてきた。

薄い固体の消炎に関して、T'ienらのグループが势力的に取り組み、消炎限界に近づくとも化学反応の影響が燃え拡がりにおいて支配的になることを明らかにした [48-51]。FreyとT'ien [48] は、消炎限界付近の紙の燃え拡がりの様相を燃え拡がり方向、幅、厚さ、雰囲気圧力、酸化剤濃度を可変し、そのときの燃え拡が

り速度と温度分布を測定した。火炎先端付近の温度分布を測定した結果、消炎限界付近では火炎が厚くなり、その温度分布から、表面への熱流束が減少することを明らかにした。火炎反応帯が厚くなるというのはLIÑAN [195] の理論解析、Sirignano [6] の記述と一致する。また、Freyらは消炎限界付近ではMcAlevy [101] の燃え拡がり速度に関するべき乗則が成り立たなくなり、化学反応が重要になるため、De Ris [100] の理論解析が適用できなくなることを指摘した。

このほか、FreyとT'ienは、よどみ点付近にできる境界層中の消炎を調べ、対向気流下において、薄い固体表面に沿った燃え拡がりを楕円型の方程式を用いた数値解析をおこなった [49, 50]。その中では、簡単な化学反応モデルが考えられ、燃え拡がりの様相と吹き飛び消炎の性質が酸素濃度、圧力、気流速の関数として求め、熱損失の増加による火炎構造の変化により消炎に至るという興味深い結果を得ている。

BorgesonとT'ien [51] は、Freyらの数値解析の続きとして、薄い可燃性固体表面に沿った燃え拡がりの消炎限界に関して、可燃性固体全体の初期温度（無次元温度で1.5倍まで）の影響を調べた。そして、固体の温度が減少すると、熱分解前面の熱分解速度が減少し、燃え拡がり速度が減少すること、そのことで、熱分解領域がなくなり、火炎の大きさが小さくなること、そして、最終的には火炎が一定の大きさにまで小さくなると、消炎に至るという結果を計算から得、火炎構造の変化とともに消炎過程を説明した。

熱的に厚いPMMA板の消炎時の酸化剤濃度について、KulkarniとSibulkin [55] は、1.9 cm厚さ、7 cm幅、19 cm高さの垂直に立てたPMMA板を自然対流下で燃焼させ、酸化剤の質量分率が0.181の時消炎することを実験から明らかにしている。さらに、Sibulkinら [56] は、垂直に置かれたPMMA板の自然対流、境界層拡散燃焼における質量燃焼速度と消炎限界について、無限化学反応速度、有限化学反応速度を考慮して数値解析をおこなった。その結果、質量燃焼速度は化学反応にはあまり依存せず、解析的に質量燃焼速度を求める場合、火炎面モデル

（無限化学反応速度）が妥当であることを示した。消炎限界については、有限化学反応を仮定した場合、表面からの輻射熱損失の割合が増加するとともに消炎に

至ることを示した。消炎限界における温度変化を見ると、T'ienらの結果と同様に次第に温度低下率が大きくなる。

興味深い結果は、消炎限界外では温度や質量燃焼速度に活性化エネルギーや頻度因子（前指数係数）が依存しないことである。この結果は、T'ienらの紙面に沿った燃え拡がりの消炎限界において、化学反応が大きな役割を果たすということをサポートするものである。なお、PMMA板の燃焼の消炎限界における活性化エネルギーと頻度因子は、実験的に Krishnamurty と Williams [213] が推定している。

消炎と燃え拡がり速度に関する雰囲気希釈剤の影響については、De Risの理論式 [100] を利用し、評価できるようなパラメータの誘導をZhangらがおこなっている。Zhangら [219] は、不活性気体を酸素に添加した場合の希釈酸化剤におけるLe数（その希釈混合気分子相互拡散係数と温度拡散係数に基づく）、化学量論比S（ここでは、酸化剤と可燃性気体の質量比）と燃え拡がり速度の関係を実験的に調べ、燃え拡がり速度が $1/(1+S)$ に比例して増加し、消炎限界を除き、雰囲気圧力への依存性が小さいことを明らかにした。そして、雰囲気組成に応じたLe数を用いることで、燃え拡がり速度の理論式をもとに燃え拡がり速度を求め、燃え拡がり現象を解釈できることを示した。

SatoとSega [222] は、二種類の紙（ろ紙とカード板紙）をそれぞれ円筒状に加工し、対向気流下の下方燃え拡がりについて、特に、火炎のある状態と火炎のないスモルダリング状態の気流速度、燃え拡がり速度、酸化剤濃度の影響を調べ、酸化剤濃度、気流速度への熱分解反応の依存性の違いがこれら二つの材料の燃え拡がりの限界の違いであることを示した。

気流方向と燃え拡がり方向が同じ場合の吹き消え・消炎は、数値シミュレーション [52, 53]、実験 [54] によって調べられている。Di Blasi [52] は、強制気流の方向と燃え拡がる方向が同じ場合の厚い可燃性固体表面に沿った燃え拡がりに関して、酸化剤の濃度の影響を数値シミュレーションによって調べた。酸化剤の質量分率が減少するとともに、有限化学反応の影響が、主に消炎が発生する上流側の火炎先端において見られることがわかった。また、酸化剤の質量分率が

0.111まで低下すると、火炎から表面への熱流束の減少のため、熱分解の拡がる速度は上流側の消炎する速度よりも小さくなり、外部からの熱源が取り除かれる

と、継続的な燃え拡がりができなくなること示した。このような計算結果は、火炎構造の変化とともに議論された。さらに、熱的に薄い固体については、運動方程式を用いずに済むように、ハーゲン-ポアズイユ流れを仮定して解析をおこなっている [53]。解析では、着火から定常燃え拡がりへ推移するまでの様子を解析しており、さらに消炎限界を求めている。この消炎について計算と実験を比較したところ、実験では気流速度 2.18 m/s、計算では 2 m/sであることを示している。

LohとFernandez-Pello [54] は、燃え拡がり気流が同じ方向の熱的に薄い固体表面に沿った燃え拡がりについて調べ、着火後、前端から 15 cmは非定常的な挙動を示すが、その後は定常燃え拡がりに移行することを明らかにしている。特徴的な結果としては、消炎、燃え拡がり限界が厚い場合よりも小さい気流速度 (2 m/s超) で発生することが明らかになったことである。また、燃え拡がり速度の気流速度への依存性は、酸化剤濃度への依存性よりも小さいことも明らかにしている。つまり、このような燃え拡がりにおける消炎限界においては、気相の化学反応速度 (燃焼反応速度) が固相内の熱分解反応速度よりも、重要な役割を果たしていることが推察できる事実である。このほか、強制気流の影響としては、後に述べる Hiranoら [19-20]、Sibulkin [21]、Fernandez-Pello [22] が対向気流中で調べている。

そのような気流の影響のなかで、気流速度を急激に変化したときの紙面上に沿った燃え拡がりの吹き飛び、消炎を調べたのはSatoらである。Satoら [64] は、ろ紙に沿って下方燃え拡がりをおこなっている際に、急激に対向気流の速度を変えた場合の火炎の挙動を調べた。実験では、0.17から 0.36 mm厚さのろ紙を用い、吹き飛び消炎が起こる速度まで速度上昇率、一定速度保持時間など種々の速度条件のもと、特に消炎に至るまでの火炎の挙動を調べ、熱分解領域が消費された後に消炎する場合 (delayed extinction) とすぐに消炎する場合 (instantaneous extinction) の二つの様式があることを明らかにした。その後、Takenoら [65] は、風洞内で流入空気を急激に増加させた流れ場における垂直下方燃え拡がりを観測し、時間遅れのある消炎をする場合のあることを明らかにしている。このような事実は、熱分解速度と燃え拡がり速度が密接に関連していることを示す結果である。

Wichmanら [221] は、燃え拡がり速度への速度分布とLe数 ($= \alpha/D$) の影響を調べるために理論解析をおこない、実験で得られた対向気流速度、酸化剤濃度と燃え拡がり速度の関係を考察した。特に熱的に厚い固体に関して、燃え拡がり速度を速度勾配とLe数を用いて定式化をおこない、速度分布 (速度勾配) からの燃え拡がり速度の誘導を試みた。ただし、実験と理論式の比較では、実験が風洞でおこなわれ、ポアズイユ流れに基づいていることもあり、明確な速度勾配のもとで比較検証がなされていない。

RayとGlassman [214] は、Fernandez-Pelloら [22] の対向気流中のPMMAに沿った燃え拡がり実験において、高酸化剤濃度では気流速度とともに燃え拡がり速度が増加する実験結果を取り上げ、対向気流に関して、燃え拡がりが熱的に制御される領域 (固相支配) と化学反応に制御される領域 (気相支配) の二つに分け、火炎先端に性質について検討をおこなった。可燃性気体が消炎領域を通して火炎前方へ拡散、酸化剤と混合し、その予混合気中を火炎が伝ばするという仮説を立て、境界層の存在によって、火炎先端が対向気流の速度勾配中の層流燃焼速度に等しいところに形成すると説明したことが特徴的である。現象の解釈は主にその予混合火炎に基づいてなされたが、可燃性気体の供給過程についてはうまく説明できなかったようである。また、ダムケラ数によって燃え拡がり速度と気流速度の関係を一般性のある形で整理できることが示されたが、現象論的な説明が今一つというのが現状である。

固体の燃焼性、消炎を調べる場合、火炎からの熱により可燃性気体が発生し、形成される拡散火炎を使って調べられることがある。SeshadriとWilliams [183] は、表面を均一高さに保つことができる実験装置を用い、表面上方よどみ点付近に形成する火炎の濃度分布、温度分布を測定した。また、ポリマとモノマの比較から気相の熱分解過程を考察した。さらに、メタノール、ヘプタン、木材 (樺材) を用い、それらの水 (霧状) と窒素の添加による拡散火炎の消炎に関して調べられた [184]。実験より、水の添加の影響は熱的に消炎するということに相当し、セルロース上の気相中の拡散火炎の消炎が、可燃性液体の場合の消炎と類似していることがわかった。つまり、消炎が気相支配の現象であり、その中の消炎機構によって説明できることが示された。また、アレニウスプロットをおこない、活

性化エネルギーを求めている。

(d) 紙面上に沿った燃え拡がり

Campbell [15] は、紙の厚さ、紙全体の初期温度を可変し、燃え拡がり速度を実験的に調べ、表面付近の熱収支を検討した。そして、初期温度とともに燃え拡がり速度が増加するという結果から、燃え拡がり速度が火炎から表面への熱流束に強く影響を受けることを明らかにした。その後、薄い紙に関する De Ris、Parkerらの燃え拡がり速度の式の妥当性を評価するために、紙の厚さ、初期温度を可変した下方燃え拡がり実験をおこなった [16]。その中では、燃え拡がりについて、火炎先端下に燃焼領域から可燃性気体が表面から拡散し、酸化剤と混合するという火炎付近の様相を模式的に示した。ただし、予混合するという過程よりは、可燃性気体が生成し、火炎先端へ拡散されるという過程が燃え拡がり速度に関しては律速であるとし、この薄い紙の下方燃え拡がりが可燃性気体の拡散に制御されている現象であると説明している。

Paker [17] は、ろ紙の燃え拡がり速度を調べた結果、厚さの1.1乗に反比例して燃え拡がり速度が減少することを明らかにした。これは、De Risの1乗に反比例する関係に近い結果である [100]。可燃性気体の拡散による熱分解領域に沿った燃え拡がりが、火炎から表面への気相を通した熱伝導による熱分解温度までの予熱の効果により燃え拡がりを支配していることを明らかにした。この研究では、火炎から表面への熱移動を定量的に調べるために、模擬的に平板にスリット（熱分解領域に相当、ここでは 3.2 mmとした）があるバーナを用いたモデル実験をおこなっていることが特徴的である。

Hiranoら [18] は、自然対流中において、紙を重力方向に対して角度を変え、燃え拡がりの様子をシュリーレン写真撮影により観測した。得られた実験結果から、1) 鉛直下方燃え拡がりから鉛直と30度傾きの下方燃え拡がりでは、燃え拡がり速度の角度への依存性が小さいこと、2) 30度を超え、水平燃え拡がりの範囲では、燃え拡がり速度は次第に増加するが、水平では不安定で、加速減速を繰り返すこと、3) さらに角度が増加し鉛直上方になるにつれて燃え拡がり速度が増加すること、などを明らかにした。いずれの角度でも、気相を通しての未熱分解領域への対流熱伝達が、薄い紙に沿った燃え拡がりでは、重要な役割を果たす

ことを推察した。Hiranoらは気流の影響として、強制気流中の下方燃え拡がりの不安定性に関する現象も調べた[19]。実験の結果、気流速度が 60 cm/sまでは安定的に燃え拡がり、60 cm/sを超えると不安定的に燃え拡がり、そして110cm/sで吹き飛び・消炎することを示した。このような様相は、時間ごとに熱分解領域をトレースしたことにより明確になり、不安定燃え拡がり時には火炎が幅方向（横方向）に傾斜して、波型（下流方向に凸）になって燃え拡がり、幅方向に部分的に吹き消えても、付近の火炎が幅方向にも燃え拡がり、つまり、交互に補うような形で下方燃え拡がりが継続できる事実を得た。このような熱分解領域の軌跡を追うと、その傾斜角度は気流速度とともに増加するが、次第に限界値約 50 度に達すること、さらに紙表面付近の温度測定から安定燃え拡がり吹き消えるときの温度変化が異なることを明らかにした。

対向流における上方燃え拡がりについて、田沢と平野[20]は、浮力（重力）の影響を調べ、主流空気の速度の違いによって、燃え拡がりの様相が3領域に分けられることを見いだした。1) 領域1は気流速度 85 cm/s以下の範囲で、自然対流中で上方に燃え拡がるように加速度的に燃え拡がること、2) 領域3は125 cm/s以上の範囲で、自然対流中で下方の燃え拡がる場合と同様で、変動が少なく等速的に燃え拡がること、3) 領域2は、85 cm/sから125 cm/sの範囲で、領域1と3の間の遷移的な燃え拡がりかたをすること、などの結果を得た。

Sibulkinら[21]は、Hiranoらのグループと同じような紙に沿う燃え拡がり速度について角度を変えて調べた。垂直下方になるに従い、燃え拡がり速度が一定になることを明らかにした。また、強制対流下の水平燃え拡がりでは、気流速度が 15 cm/sから 55 cm/sの範囲では、ほぼ一定の燃え拡がり速度が得られたが、それ以上では燃え拡がり速度は気流速度の増加により減少し、125 cm/s以上では、もはや二次元的な燃え拡がりが継続できないことを示した。

吹き消え限界に関して、Hiranoら[19]の垂直下方燃え拡がりでは 110 cm/sで吹き消えたが、Sibulkinの角度を変えた実験結果では、125 cm/sでも吹き消えはなく、水平燃え拡がり垂直下方燃え拡がりの違いが見られる。De Risの理論[100]をそのまま適用すると、熱的に薄い紙では燃え拡がり速度は気流速度に依存しないことになり、また、角度によって燃え拡がり速度が変化することなどは単純に説明できない。そこで、理論の適用上、角度によって火炎が誘起する浮力

による上昇気流速度による違いとして解釈されることがある。

Fernandez-Pelloら [22] は薄い紙と厚いPMMA板を用い、対向気流における燃え拡がり速度を酸化剤濃度を変えて調べた。その結果、PMMA板では酸化剤の質量分率が0.432以上になると、気流速度の増加とともに燃え拡がり速度が増加する範囲があることを見いだした。しかし、ろ紙の場合には、このような気流速度に比例して燃え拡がり速度が増加する様子は見られないが、気流速度に対する燃え拡がり速度の減少傾向は、酸化剤の濃度の増加とともに見られなくなる。また、ダムケラ数と燃え拡がり速度の関係を示した。このような結果の解釈については、自身の文献 [8, 248の2章] で検討している。

熱的に厚い範ちゅうに入る紙、厚紙板についても最近調べられている。Suzukiら [23] は、厚い紙板の下方燃え拡がりの様相を観察するとともに、紙の厚さ、密度に対する燃え拡がり速度、熱分解領域長さの変化を調べ、理論解析をおこなった。用いた紙の厚さは0.4から10 mmで、厚さによって燃え拡がりの様相が四つに分けられ、1) 厚さ1.5 mm以下では安定して燃え拡がるが、厚さの-1乗に比例して燃え拡がり速度が減少すること、2) 1.5 mmから7.5 mmの範囲では安定燃え拡がりではあるが、燃え拡がり速度の厚さへの依存性がわずかに小さくなり、特に、5 mmから7.5 mmの範囲では厚さに依存せず燃え拡がり速度は一定になること、3) 7.5 mmから8.4 mmの範囲では燃え拡がりは不安定になり、火炎先端が変動するようになること、4) 8.4 mm以上では継続的な燃え拡がりができなくなり消炎する限界があること、などを明らかにした。このような様相に対して、熱分解領域の熱伝達を含めた表面から凝縮相内部への熱流束を考慮したモデルをたて、解析をおこなった。そして、熱分解領域を通した固相内部への熱流束が熱分解領域前方の表面からの熱流束よりも小さいこと、火炎の進行の停止が熱分解領域から発生する可燃性気体の減少によること、などを推測した。

このような実験研究に対して、Di Blasiらはチャーの生成する厚い固体の数値シミュレーションをおこなっている [25]。熱的に厚い固体について Lastrina [24] が実験を試みたが、1.52 mm以上では燃え拡がりが不安定になり、それ以上厚い固体の燃え拡がりの様相を詳しく調べていないことに注目し、数値解析的に燃え拡がり限界を明らかにしようとおこなわれたものである。垂直下方燃え拡が

りについて、モデルでは固体可燃性物質内部の変化をもとの質量保持され、チャーとして燃え尽きるまで、その体積の密度変化として表した。解析では 0.025 mm 半分厚さから 5 mm 半分厚さ（全体では 10 mm 厚さ）までのセルロース材についておこなった。その結果、燃え拡がり速度において三つの領域に分けられることを示した。1) 0.04 mm 半分厚さまでのきわめて薄い場合には、燃え拡がり速度が厚さと共に増加し、2) 0.05 mm 半分厚さ（全体では 1 mm）から 2.2 mm 半分厚さまでは厚さと共に減少し、3) 2.2 mm 半分厚さ(4.4 mm) 以上では一定値に達する。特に、2) の領域は De Ris の熱的に薄い場合の結果と傾向が一致することがわかった。ここで 3) の領域が熱的に厚い場合に相当する。0.427 mm 半分厚さ (0.85 mm 厚さ) が、De Ris の解析での熱的に薄いと厚いの境にある。1) の領域は

De Ris の解析では得られていないが、これは気相の反応速度を無限大にとっているため得られなかったと説明し、また、薄くなるほど気相の有限の化学反応速度の重要性が増すと推測している。火炎構造についても調べていることが特徴的で、火炎先端では消炎領域を通して可燃性予混合気が形成していることを示した。また、燃え拡がり速度の減少とともに輻射の影響が増加することを示した。熱収支を検討した結果、1) と 2) の領域では気相からの伝導が燃え拡がりにおいて支配的で、火炎前方の固相内への未燃焼方向への熱移動の寄与は可燃性固体の厚さとともに増加し一定値に達するが、熱的に厚い固体では、最大で総熱移動の約 50 % になることを推測した。

Suzuki らの結果と比較すると、燃え拡がり速度一定となるのが 5 mm から、Di Blasi は 4.4 mm からということで、両者はよく一致することがわかる。ただし、Di Blasi の計算では、10 mm 厚さまで調べたものの、燃え拡がり限界を見いだしていない。

(e) PMMA, 合成高分子, その他, 固体表面上に沿った燃え拡がり

Fernandez-Pello と Williams [26] は、PMMA 板を用い、1) 厚さとともに燃え拡がり速度が対数的に減少すること、2) 銅板を裏ばりするとその伝導性のため燃え拡がり速度が増加すること、3) 裏張りのある 0.27 cm 厚さでは、気相から固相への熱伝達は、火炎先端下から 0.3 mm 前方が大きく、1 mm 前方より前では小さくなること、4) その厚さでは、単位幅・厚さ断面で見た場合の熱伝達は、

気相を通した熱伝達よりも固相を通した熱伝達（伝導）がほとんどを占めること、5）異なる幅の断熱材を固体の途中に入れると、0.5 mmの厚さではそこを超えて前方へ燃え拡がることができるが、0.8 mmでは燃え拡がることができないことから、固相内部の熱伝達が重要であること、6）裏張りのない場合、水平から垂直下方に向かうに従い燃え拡がり速度が減少し、その減少が重力の $1/3$ 乗に反比例すること、7）微粒子追跡の様子から流れが偏向すること、などを明らかにした。

平野ら [27] は、自然対流下における、垂直下方と水平方向の燃え拡がりの厚さの影響を調べた。その実験の結果、1）厚さが 2 mmより薄い場合、燃え拡がり速度は厚さに反比例し、20 mmより厚い場合、燃え拡がり速度は厚さに依存せず、次第に一定になること、2）熱伝達の解析の結果、2 mm未満のものは熱的に薄い試料、20 mmより厚いものは熱的に厚い試料と分類できること、3）垂直下方燃え拡がりの場合の流れの場を見ると、燃え拡がる火炎先端 4 mm前方では、いわゆるブラジウス型の速度分布（紙面上で 0 cm/s、紙面上 4 mmで境界層の外側にあたり、約 10 cm/s）になるが、先端2mm前方ですでに流れが加速し、先端から 4 mm後ろ、紙面上から 4 mm、火炎面近傍では 45 cm/sに達すること、4）水平燃え拡がりの場合、火炎先端2mm前方では流れの加速は見られないが、さらに火炎に近づくにつれ加速し始め、ちょうど火炎面で速度が最大になること、5）火炎先端近傍の温度分布から、気相からの熱伝達は、熱分解領域前方の予熱領域から見られ、熱分解領域に近づくにつれて増加すること、などが明らかとなった。

PMMA板は、熱電対を埋め込むなどの加工が容易であることから、熱的に厚い固体の燃え拡がり時の固相内の温度分布を測定するのに適している。

KrishnamurthyとWilliams [34] は、PMMA板の燃え拡がり時の固相内の温度変化を計測し、燃焼時の表面温度、温度勾配、表面降下速度などの熱的な性質を調べている。このような温度測定は、燃え拡がり熱移動がどのような関係にあるのかを把握し、燃え拡がり機構を検討する上では重要なことである。

SibulkinとLee [28] は、PMMA円柱を用い、円柱の径と角度を変えた場合の燃え拡がりの様相を調べた。径Dの増加とともに燃え拡がり速度が減少し、鉛直から 50 度まで調べた範囲では上方になるに従って燃え拡がり速度が増加することがわかった。これとともに、熱分解領域の長さLの変化も調べたが、角度の増

加とともに L が増加し、鉛直下方から水平まででは L/D の値で整理すると径の影響は小さく、水平から鉛直上方になるに従って径の影響が見られることを明らかにした。太い円柱について熱収支を考慮した実験による温度変化と理論解析をおこない、燃焼に伴い発生した熱の約 6 %が円柱に伝わるが、その燃焼により発生した熱の約 1 %が実質的な燃え拡がりに費やされ、その 1 %のうちの 60 %が気相から、40 %が固相内の熱伝導によるものと見積もった。

Fernandez-PelloとSantoro [30] は、熱的に薄い固体と厚い固体の下方燃え拡がりにおける熱移動を支配するモードを明らかにするために、直径 0.16 cmと 5 cmのP MMA円柱を用い、燃え拡がり時の流れ（気相）と温度変化を調べた。その結果、熱的に厚い場合、固相を通じた熱伝導が支配的であり、試料の厚さが減少するとともに気相を通じた熱伝導が支配的になることを示した。

熱電対を使った温度測定においては、急激な温度勾配を有するところでの計測の空間分解能と計測位置の不確かさに関する問題点を常に含んでいるため、Itoらは非接触計測が可能なホログラフィ干渉法を使った実験をおこなっている。ただし、試料の幅は、縞の解像度を上げるのにレーザ光軸方向に短い経路をとる必要性から、小さい幅の板を用いているので、他の研究者の結果と比較する上では注意が必要である。

ItoとKashiwagi [31] は、その温度計測によって、気相から試料表面へ移動する正味の熱流束は気化する先端面から約 1 mm以内で、 1 W/cm^2 から 7 W/cm^2 までに急激に増加すること、気相から表面への正味の熱流束は総熱流束の57%にもなることを見積もった。そのことから、厚い固体において、気相から表面への熱移動が固体内の移動よりも支配的な役割を果たしていることを明らかにした。また、全体の正味の熱移動の 78 %が気化先端から約 3.4 mm、約 2.5 mmの深さの領域（コントロールボリューム）に流入すると見積もり、その領域が燃え拡がりを議論する上では重要であると説明している。

その後、角度を変えた場合の温度測定をおこない [32]、1) 固相内の温度分布は、燃え拡がり速度の増加とともに表面に対する勾配が大きくなり、予熱領域がかなり前方に拡がること、逆に垂直下方燃え拡がりのような小さい燃え拡がりでは、温度勾配は緩やかになり、予熱領域は 5 mm程度前方まで拡がっていること、

2) 気相から熱分解表面に流入する火炎からの熱流束は、下方燃え拡がりでは約 7 W/cm^2 、上方燃え拡がりになるに従い減少し、垂直上方では約 2.8 W/cm^2 になると見積もることができること、などを実験から得た。2) より、熱分解表面の前方(燃え拡がる方向が前方)に気相を通しての単位長さ当りの全体の熱移動割合は、角度とともに増加することがわかった。その割合は垂直下方燃え拡がりでは56%、垂直上方燃え拡がりでは99%に達すると推察できることから、熱的に厚い固体表面に沿った燃え拡がりでは角度を可変しも、熱分解面前方への気相からの熱伝達が支配的であると説明した。

Rayら [33] は、25.4 mm厚さのPMMA板表面に沿った自然対流下の燃え拡がりについて温度測定、流れの場の測定をおこない、熱収支を検討した。その結果、垂直下方燃え拡がりと水平燃え拡がりでは、輻射の影響が異なり、垂直燃え拡がりでは浮力の影響のために火炎が固体表面に沿い、火炎の前方表面への形態係数が小さいが、水平燃え拡がりでは浮力の影響が火炎を固体表面から離れるように作用するので、前方表面への火炎の形態係数が増加し、輻射の熱伝達が重要であることを明らかにした。ただし、この形態の燃え拡がりに関して最も支配的な熱伝達は、固相内の熱伝導であり、温度測定の結果から熱収支を見積もると、総熱流束の60%が熱伝導であると推測した。

PerrinsとPettett [91] は、室温から約 250°C まで温度を変化させた雰囲気中において、種々の高分子材(プロピレン、ポリエチレン等)表面に沿った燃え拡がり速度を酸化剤濃度を変化させて調べ、酸化剤濃度と燃え拡がり速度の関係式を求めた。これらの結果から、燃え拡がり速度と酸素示数の関係を検討した。

FangratとWolanski [92] は、水平燃え拡がり実験とASTM E-648に準拠した輻射を与えた燃え拡がり実験を、5 mmから10 mm厚さのポリプロピレン、ポリアミド、ポリエチレン高分子材に関しておこなった。このような高分子材を用いた実験から、燃え拡がり速度が、固体の化学組成に強く依存することがわかった。併せて、モデル解析もおこない、固体表面に沿った燃え拡がりが、火炎からの熱が輻射熱伝達と対流熱伝達に依存するという仮定のもと、さらに、輻射熱流束が指数的に変化すると仮定し、一次元エネルギー式を解いた。ただし、燃え拡がり速度

は、着火温度（熱分解温度）の移動速度（thermal waveの移動速度）とした。結局のところ、組成に応じたような実験定数を代入することで定量的に実験結果と比較しているが、このような簡単なモデル解析で固体の厚さと燃え拡がり速度の変化を評価できることを示した。

Andohら [93] は、ダブルベース固体推進剤表面に沿った燃え拡がりについて調べ、表面温度に関して三つの温度変化をする段階があり、2次着火をする場合があることを明らかにした。このような現象に関するモデル実験では、平板に沿った空気流れとともに高温ガスが平板から吹き出し、そのすぐ下流側の熱移動について調べ、併せて2次着火現象を明らかにするために、気相と固相の熱伝達を考慮し、推進剤の熱分解に伴う発熱を熱源とするモデル解析をおこなった。その結果、16 m/s気流中では2次着火が発生するが、20 m/sでは凝縮層内の温度が着火に至る臨界温度にならずに2次着火しないことがわかり、この形態の燃え拡がりにこのようなモデルが妥当であることを示した。

Nakakuki [94] は、燃え拡がり機構を明らかにするために固体表面と液体表面に沿った燃え拡がりを調べた。実験の結果、固体では、火炎から表面への熱伝導が重要であることが推測された。火炎から未燃焼表面への熱の移動は Lastrinaら [24] の誘導した式を使って計算され、実験結果と定性的に一致することを示した。この研究では、可燃性液体として揮発性の高いヘキサン液面上の燃え拡がりを調べていることが特徴的である。

PagniとPeterson [95] は、火炎からの熱移動を定量的に評価するために、松葉やカーベットのよう多孔性の可燃性固体とそれに沿った火炎面の関係から一次元熱移動モデルを立て、固体の水平からの角度、気流速度を変え、熱収支を定量的に調べた。その結果、気流速度の減少とともに、燃えさしからの輻射や気相からの熱伝導を含むものの主に火炎からの輻射熱伝達が支配的になること、逆に気流速度が増加すると対流熱伝達が支配的になることを示した。ただし、この解析からは気流速度の増大時の燃え拡がり限界が得られないことが難点である。

MarksteinとDe Ris [96] は、100 %綿（包帯、 61 g/m^2 と 103 g/m^2 ）に沿った上方燃え拡がりを調べた。着火の初期の段階を除き、火炎は乱れ、燃え拡がり速度が増加することを示した。このとき、熱分解長さや燃え拡がり速度を対数的に

整理し、上方へ燃え広がるにつれ、燃え拡がり速度が距離とともに線形的に増加することを明らかにした。

Orloffら [29] は、150 cm長さのPMMA板を用いて上方燃え拡がりを調べ、燃え拡がり速度が18 cmまでは速度の増加が小さいが、それ以上、140 cmの燃え尽きるまでは、燃焼した距離とともに燃え拡がり速度が増加することを示した。このことについて熱の移動を調べ、火炎からの輻射熱量の増加のためであると説明した。

高圧酸素雰囲気中では金属も燃焼するが、Hiranoら [97, 98] は、鉄とアルミニウムを用い、10 MPaまで雰囲気圧力を可変させ、燃え拡がりの様相を観測し、燃え拡がり速度が金属の酸化速度に大きく依存することを明らかにしている。

(f) 固体列に沿った燃え拡がり

複数の紙を一定間隔離して設置した際のそれらの相互作用の影響については、Kurosakiら [72, 73] や Emmons [74] らが調べている。

Kurosakiら [72] は、複数の可燃性固体に沿い個々に形成される複数の火炎 (multiple flame) の相互作用を調べた。実験では、0.2 mm厚さ、100 mm長さ、幅は最大 80 mmの紙を用い、紙面に平行に1枚あるいは2枚設置し、それらの自然対流中の下方燃え拡がりの様子をホログラフィ干渉法を使って調べ、熱伝達に関する理論解析をおこなった。その結果、1) 紙面間の間隔が3 mm以下では、紙面の間に火炎が形成せず外側のみに火炎が形成すること、このときの熱伝達は気相の対流支配であること、燃え拡がり速度は1枚のときの約半分になること、2) 5 mmから10 mm間隔では、紙ごとに個別に形成していた二つの火炎が後方で結合すること、このときの熱伝達は気相の対流と輻射支配であること、そして、燃え拡がり速度は1枚の時よりも大きいこと、3) 10 mmから20 mm間隔では、二つの火炎は結合しないが、気相の対流と輻射熱伝達が最も効率的に紙面伝わるため、燃え拡がり速度が最も大きいこと、4) 20 mm以上では、対流と輻射熱伝達が支配的ではあるが、燃え拡がり速度は一定値に至ること、5) 3 mmから5 mm間隔では、1) と2) の中間で、火炎は不安定な挙動を示すこと、などを明らかにした。

その後、同じグループが枚数を増やし、強制対流下で下方燃え拡がりを調べて

いる [73]。そして、間隔が狭く 3 枚以上の場合は、酸化剤の十分な流入がないため燃え広がらないこと、間隔が 5mm 以上となると中央付近に設置した紙に沿った燃え広がり速度が両側からの火炎からの輻射を受けるため、速度が大きくなることを実験的に明らかにした。ただし、紙の枚数が増加すると、一定の燃え広がり速度になる。このような現象を理論解析により、輻射の効果を紙ごとの形態係数を評価することで、この種の燃え広がり機構を説明した。

この研究において、紙面間隔が 3mm 未満では、空間が狭いために酸化剤の十分な流入がなく燃え広がりが継続できなくなるが、3 mm 厚さの紙板 [23] では燃え広がりが継続できるという相違が見られる点が燃え広がり機構の違いとして興味深い。

Emmons と Shen [74] は、一定間隔で立てて並べた紙について、水平燃え広がりを調べた。燃え広がり研究で紙面は普通鉛直方向に設置されるが、この研究では水平方向に設置された。つまり、紙の幅方向が高さにあたり、厚さ方向が幅にあたる点が異なる。

マッチ棒（木材、ただし先端なし）を一定間隔、縦に並べて燃え広がり実験をおこなった変わった研究があるが、Vogel と Williams [75] は、その棒の間を水平に、飛び火的に燃え広がる様子を観測し、理論解析をおこなった。燃え広がりができる長さと同隔の関係を調べた結果、短い棒は間隔が増加すると飛び火的に燃え広がらず、長い棒は間隔が多少増加しても飛び火的に燃え広がることがわかった。モデル解析をおこなっているが、解析の単純化のため、離散した固体片ではなく連続した固体を仮定し、火炎からの熱がその固体内を熱伝導により伝わり、初期温度から着火温度（熱分解温度）になるまでの時間を一次元非定常熱伝導方程式を解くことで、温度変化を求めた。このような解析結果が実験結果とよく一致することから、隣の棒に火炎が伝わる限界（燃え広がり限界）を棒の長さと同隔を変数として推定できることを示した。

地表における燃え広がりには実地的である。Lyons と Weber [89] は、静置した葉（ボンデロッサ松）の床においては、葉の多くは平らに置かれ、これらの燃え広がり速度は単一の固体に近いことを示した。このような燃え広がりについて、複数の紙面での結果 [72] と詰め込み比（可燃性物質床の密度／その可燃性物質単一での平均密度；空隙率の逆数）を用い、可燃性固体の間隔と燃え広がり速度の関

係、詰め込み比と燃え拡がり速度の関係が検討された。ここでは、詰め込み比の程度によっては、最適燃え拡がりがあることを明らかにしている。つまり、適当な空隙があることで、反応帯への酸化剤の対流を可能にし、かつ紙面間の熱的な相互作用が最大になり、燃え拡がり速度が最大になるということである。

(g) 天井燃え拡がり

天井燃え拡がりとは、固体の下面に炎が形成される場合の燃え拡がりを指し、一般的に熱的に厚い固体を対象とするが、Atreyaらのグループが勢力的に取り組んでいる。

AgrawalとAtreya [68] は、燃え拡がり方向と気流方向が同じ場合の燃え拡がりに関して、定常状態にある気相と遷移状態にある固相の熱分解について現実的なモデルの展開をおこなった。モデルの特徴は、実験結果から得た遷移状態の質量流束を正味の入射熱流束の関数として表し、火炎からの熱流束を流れ方向への距離のみの関数として表したこと導いたことである。計算から、層流で火炎からの輻射が小さい場合の熱的に厚い固体では、表面の熱損失が熱分解速度を0にする原因となることがわかった。また、熱分解速度が0になるとき、熱的に薄い固体（あるいはチャー生成のある紙）では、燃え拡がり速度は熱分解面下部に向かい燃え尽きる速度（表面降下速度）に制御されることがわかった。

その後、Mekkiら [69] が実験に取り組み、AtreyaとMekki [70] は層流下では火炎前方と下方、火炎から表面方向への対流熱伝達が支配的であり、雰囲気中の酸素質量分率の増加とともに火炎からの輻射の影響が増加することを明らかにした。火炎からの熱流束は、表面に近い側の火炎先端（青炎側）からの距離の $1/2$ 乗に反比例して減少し、すぐに熱流束は小さくなり、表面から離れた側の火炎先端付近（輝炎側）では距離の 2.8 乗に反比例して減少するようになることがわかった。

Agrawal [71] は、前述の研究 [68] と同様の燃え拡がりについて、熱分解領域の熱流束分布を燃焼に伴いPMMA板の厚みが減少する量から導いた式を使って、間接的に求めた。実験から、正味の熱流束は気流速とともに増加し、先端からの距離 x とともに減少ことがわかった。しかし、火炎からの熱伝達が $x^{-1/2}$ に比例する結果 [70] は得られていないが、その違いを固相の不安定性と表面からの

輻射であると説明している。

チャーの生成のある天井燃え拡がりに関しては、Carrierら [111] が理論解析をおこなっている。

(h) 輻射加熱環境

実験室程度の小さい火炎での実験研究では、1) 火炎が傾いており、火炎前方への形態係数から、2) 火炎先端付近が青炎であり、輝炎が少ないことから、3) 火炎そのものが小さいことから、4) 解析の簡略化から、などの理由から輻射の影響を無視されることがある。しかし、実火炎を想定したり、実験室でも大きな火炎を形成する場合、large fireとして火炎からの輻射の影響が検討される [14, 236, 237, 242, 248]。火炎が拡大するとともに、熱伝達が主に輻射の影響による予熱が燃え拡がりにおいて重要な役割を果たすことが知られている。

Anderson [76] は、燃え拡がり火炎からの輻射が主な熱移動であるとして、火炎の高さの変わりにランプを用いた実験装置を製作し、火炎形状に対する形態係数の影響を調べ、燃え拡がりを検討した。

HiranoとSato [77, 78] は、紙面に沿って下方に燃え拡がる場合について、対向気流と外部からの輻射加熱の影響を調べた。輻射が主に表面温度を上昇させるために燃え拡がり速度が増加すること、それとともに燃え拡がり速度は燃え拡がる前方の速度分布に密接に関係していることを明らかにした。

火災拡大時の実用的な燃え拡がり速度を予測できるように、モデル解析をおこなっているのがQuintiereらである [80, 81]。その中では、外部からの輻射加熱と燃え拡がり速度の関係をモデル解析により定式化し、実験的にそのモデルの妥当性を評価した。その結果、 $(\text{燃え拡がり速度})^{-1/2}$ と (外部からの輻射加熱流束) の関係が、種々の可燃性固体に適用する場合、それぞれの係数Cを使って整理でき、 $\text{燃え拡がり速度} = [C \{ (\text{初期着火までの加熱 (予熱) 熱流束}) - (\text{外部からの輻射加熱流束}) \}]^{-2}$ と表せることを示した。また、着火までの予熱時間が増加すると、同じ外部輻射加熱流束でも燃え拡がり速度が増加することを明らかにした。その後、種々の可燃性固体へ拡張し、外部輻射加熱条件下の燃え拡がりを調べている。樅木粒の板、P M M A、硬質低密度ポリウレタンフォーム、軟

質ポリウレタンフォーム、カーペット、航空機用内張り材などを用いた [81]。

木材の燃焼に関する輻射の影響は、KashiwagiとOhlemillerが調べている [79] が、さらに含有する水分の影響も調べたのはLeeとDiehlである。LeeとDiehl [90] は、火災相当の輻射熱流束条件下で乾いた木材と 50 %wt水分含有の湿った木材 (いずれもオーク材) の燃焼性を調べた。その結果、水分の影響が主に湿った木材の温度上昇を遅らせ、気化した水蒸気は対流し、熱分解領域を冷やすこと、さらに、その気化した水蒸気が、木材から気化発生する可燃性気体を希釈させること、などを明らかにした。また、定常燃焼における表面の降下速度は、主にチャール領域への酸化剤の供給に支配されているので、乾いたものと湿ったものでは同じであることも明らかにしている。

Kimら [82] は、輻射の効果を楕円型の方程式で表し、理論解析をおこなった。火災先端付近の構造変化も検討している点が特徴的であるが、計算から次のような結果を得ている。1) 可燃性気体の吸収係数が小さいときは気体からの輻射が小さいので、表面から周囲への輻射熱損失があるが、気体の輻射が増加するとともに火炎は後方へ移動する。このとき、火炎の大きさは減少し、火炎から周囲への輻射熱損失のため最大火炎温度が低下する。2) 表面での輻射率が増加すると、火炎はその輻射熱損失のために下流方向へ移動して形成される。このような理論解析から、火炎の形状が気相の輻射過程にきわめて重要であること示した。

(i) 乱流環境

乱流における固体 (PMMA) の質量燃焼速度を調べたのはZhouとFernandez-Pelloらある。ZhouとFernandez-Pello [66] は、平均気流速度を 1 m/sから4m/s、乱れを 1 %から 20 %まで変化させた実験をおこない、1) 表面降下速度 (燃焼速度) は火炎先端に近いほど大きく、表面降下速度は乱れと平均流速の増加とともに大きくなること、2) 層流の場合、無次元質量燃焼速度は $\sqrt{\text{Re}}$ 数に比例するが、乱流の場合、(乱れ $\times\sqrt{\text{Re}}$ 数)の $1/2$ 乗に比例すること、3) 気流の乱れは質量燃焼速度に強く影響するが、それは、主に火炎が変動することによる表面への対流熱伝達の増加のためであること、などを明らかにした。

さらに、乱流中における天井に形成される燃焼条件 (下向き火炎) と通常に表面上の燃焼条件 (上向き火炎) について、その質量燃焼速度の変化を調べた [67]。

乱流中でのこれら2条件の大きな違いが、浮力の影響のために火炎の様相が異なるということで、浮力がこれらの二つの条件では反対の作用をもたらすことを明らかにしている。浮力のため、表面上の火炎は表面から離れるが、天井では表面に近づくように働く。また、火炎のそのような移動と不安定性が可燃性固体への加熱に関連するので、層流では天井燃焼の質量燃焼速度（表面降下速度）が表面上燃焼よりも大きく、乱流になると逆に表面上燃焼のほうが大きい。

(j) 微小重力環境

Altenkirchらのグループは15 m遠心分離器（遠心加速器）を用い、重力を可変した実験を精力的に行っている。Altenkirchら[83]は、薄い固体における燃え拡がり実験から、雰囲気圧力の増加とともに燃え拡がり速度がわずかに増加し、また、重力の増加とともにわずかに燃え拡がり速度が減少することを明らかにしている。実験では、雰囲気酸化剤濃度も可変し、ダムケラ数と無次元燃え拡がり速度の整理をおこなった。浮力の減少に反比例してダムケラ数は増加するが、それは圧力の増加、重力の減少によってもたらされるもので、無次元燃え拡がり速度は、ダムケラ数の増加とともに、1に近づくことを示した。その後、重力、酸化剤濃度、雰囲気圧力を可変し、厚いPMMA板に沿った燃え拡がりを調べ、ダムケラ数に対する火炎からの熱移動の尺度となるように、実験から得られた燃え拡がり速度を無次元燃え拡がり速度として整理した[84]。さらに、固相内の熱的な貫通距離をベクレ数を用い、表面の降下速度の量を考慮することで精度よく整理した。

このようなダムケラ数の適用は、Linan[195]の化学量論比にある拡散火炎に関して適用されたダムケラ数と類似しており、Linanの対象とした対向流拡散火炎とAltenkirchの対象とした燃え拡がる時の火炎の形態が異なるものの、ダムケラ数がある有限値で消炎に至る様子から、火炎先端の議論ができることがわかる。

高酸素雰囲気中で調べたものはWichmanらである。WichmanとSaito[99]は、燃え拡がり速度が重力加速度の燃え拡がり方向成分の $1/3$ 乗に比例するとして導いた理論式[26]を説明するために、特に酸素の質量分率0.91と0.71という高酸素雰囲気中で重力加速度の影響を調べた。このような燃え拡がりの重力への依

存性の傾向は Fernandez-PelloとWilliams [26] の実験結果とは異なり、Attenkirchら [83] の実験結果から説明を試みているが、この実験研究では明確な結果は得られなかった。

Olsonら [57] は、微小重力場における薄い紙面に沿った燃え拡がりについて、特に消炎にいたる過程を調べたが、燃焼が持続できる領域から気流速度の増加とともに吹き飛び・消炎へ至る領域と、気流速度の減少とともにクエンチング・消炎に至る領域があることを見いだした。これらは気流速度-燃え拡がり速度を関数とした安定曲線でまとめられたが、二つの消炎モードを安定曲線上で示すことによって、微小重力場の消炎を理解しやすい有益な結果をもたらしている。

BhattacharjeeとAttenkirch [85, 86] は、1.5 気圧、酸素と窒素の質量分率がそれぞれ 0.53、0.47、静止雰囲気、微小重力における薄い紙の燃え拡がりを調べた。これはスペースシャトルに搭載された実験装置によって調べられたものである。実験から熱流束分布を得、燃え拡がり時の火炎先端位置表面での熱流束は最大値（約 17 kW/m^2 ）を持ち、後方ですぐに低下し、熱分解領域（ここでは約 2 cm ）で一定値（約 7 kW/m^2 ）となり、さらに後方では負の熱流束となることから、表面が気相よりも加熱されていることを明らかにした。実験結果に基づきエネルギーを解いているが、火炎先端よりも 5 cm も前方ですでに輻射の影響が見られる。

この実験から、火炎先端の構造が燃え拡がり速度を定め、気相中、火炎前方予熱領域からの輻射が静止空間、微小重力場の燃え拡がりでは重要な役割を果たしているがわかった。なお、Ramachandraら [87] は、1990年10月から92年9月までのスペースシャトルにおける過去5回の実験結果と、上記のモデル解析 [85] とと比較している。

微小重力場の燃え拡がりに関する数値シミュレーションをおこなったDi Blasiの研究 [88] では、薄い固体ほど気相中の有限化学反応速度が重要な役割を果たすことを明らかにしている。消炎時における輻射による熱損失の影響は、薄い固体ほど強く受けること、厚い固体では燃え拡がり速度が薄い固体よりも小さいことから、燃え拡がり速度の減少が進み最終的に消炎に至る過程を検討し、輻射の影響を説明した。薄い固体では、火炎から固体への熱伝達は、（気流速度の増加とともに気相の熱伝導が阻害されるので）、気流速度の増加とともに減少するが、厚い固体では、熱分解領域前方への固相を通した熱伝導が重要であることを明ら

かにした。

通常重力場における流れ（強制対流）の影響は、強制対流だけでなく浮力の効果として自然対流を含むものであるが、この研究では、微小重力場の自然対流のない条件のもとで、強制対流のみの影響を評価したことが特徴的である。微小重力下における燃え拡がりでは、燃え拡がり速度が減少し、消炎が近づくと輻射の影響が増加するという考え方がなされるようである。特に消炎限界においては、浮力に伴う自然対流がないため、可燃性気体と酸化剤の拡散混合が制限され、有限速度をもつ燃焼反応速度が重要になることがわかってきた。

BhattacharjeeとAltenkirch [60, 61] は、微小重力下における薄い紙面に沿った燃え拡がりにおける輻射の影響を調べるために、強制対流速度を0から消炎する速度まで変化させ、実験と理論解析により調べた。その結果、次のようなことを明らかにしている。1) 気流速度が増加すると輻射の影響が小さくなり、あまり重要ではなくなることがわかった。2) 気流速度の増加と共に燃え拡がり速度が減少するのは、気相中の有限の化学反応速度によるためであると推察された。3) 燃え拡がり速度が小さい場合、有限化学反応速度と輻射熱伝達の競合により、気流速度に対する燃え拡がり速度の最大値をもつことが推察されたが、1 G重力における実験では得られなかった。このことに関して、浮力により誘起される流れの影響が大きく、輻射の影響を覆うためであると説明している。その後、Bhattacharjeeは熱分解の影響も調べている [62]。

FerkulとT'ien [59] は、燃え拡がり方向と気流方向が同じ場合の薄い固体表面上に形成する火炎の構造と消炎限界に関して、酸化剤の濃度、強制対流の影響を理論解析によって調べた。ここでのモデルの特徴は、支配方程式に楕円型の方程式を火炎と予熱領域に用い、火炎よりも下流では取り扱いやすい双曲型の方程式を構成することで計算の広い範囲をカバーするようにしたことである。計算の結果、消炎に至る機構には、吹き飛び・消炎とクエンチング・消炎の二つの場合があることがわかり、これらは他の研究 [57, 58, 63] と同様である。1) 吹き飛び・消炎における現象では、化学反応時間が流体力学的な時間よりも長いので、反応が完結せずに消炎に至るが、このときの火炎の温度は化学反応が持続するうえで十分に高い。しかし、火炎が気流に流されるような場合、化学反応の時間遅れが固体表面への熱流束の減少になり、火炎を持続するだけ十分な可燃性気体

の供給がなくなる。2) クエンチング・消炎における現象では、化学反応は十分に可能であるが、火炎が小さくなるとともに表面からの輻射損失のため火炎の最大温度が低下する。そのようなことで、反応が持続できなくなり消炎に至る。

ChenとHou [58] は、自然対流下、固体表面の沿った燃え拡がりにおける火炎先端の安定性と消炎現象について数値解析的に調べた。特に、重力の大きさと雰囲気酸化剤濃度を可変し、火炎構造、ダムケラ数、頻度因子などを評価した。また、輻射熱伝達の影響も調べている [63]。0.05 G以下の小さい重力下では、誘起流れが小さいので(熱伝導/輻射)で表されるパラメータが小さく、つまり、輻射の影響が大きいことがわかった。このときのダムケラ数は十分に大きく、ダムケラ数による評価は重要ではないと説明している。また、重力が増加するとともに燃焼が強くなり、輻射の影響が小さくなるが、最終的には吹き飛び消炎に至る。このときにはダムケラ数による評価が重要になり、このような燃え拡がりの様相の変化を Olsonら [57] と同じように安定曲線 (flammability map) を使って示した。このような消炎限界へのダムケラ数適用による整理は、このほか T'ienら [50, 59]、Altenkirchら [83]、Fernandez-Pelloら [22] がおこなっている。

(k) 燃え拡がりに関する理論解析

燃え拡がりを熱分解温度領域の移動というモデルを立てた De Ris [100] は、対向気流中における可燃性固体(または液体)に沿った燃え拡がりに関して理論的に燃え拡がり速度を求めた。特徴的な取り扱いは、1) 熱分解温度に達すると可燃性気体が発生し、無限大反応速度と仮定している燃焼反応で拡散火炎面が形成し、その熱分解温度で移動することが燃え拡がり速度であると考えたこと、2) 熱的に薄い場合と厚い場合を分けて取り扱うこと、3) Le数を1とおき、火炎面モデルを適用することで、本質的には化学反応の影響を無視したこと、4) 浮力の影響は考慮していないこと、などである。解析的に解くことによって、以下ののような式を導いた。

熱的に薄い(有限厚さ)場合には、

$$V_f = (\sqrt{2} \cdot \lambda_g / c_{ps} \rho_s d) [(T_f - T_v) / (T_v - T_\infty)] .$$

熱的に厚い（半無限大厚さ）の場合には、

$$V_f = (V_a \rho_g c_{pg} \lambda_g / \rho_s c_{ps} \lambda_s) \cdot [(T_f - T_v) / (T_v - T_\infty) \\ + \{2 R_1 F (2 \lambda_g / \rho_g c_{pg} V_a l_1)\} / \{\rho_g c_{pg} V_a (T_v - T_\infty)\} \\ + \{2 R_2 / (\pi \rho_g c_{pg} V_a (T_v - T_\infty))\}]^2.$$

ただし、 R_1 と R_2 はそれぞれ上流側、下流側への火炎からの輻射熱流束、 l_1 は前方への輻射の及ぶ特性距離、 F は火炎形状に関する複素関数、 D は厚さ、 V_a は対向気流である（他の記号は、従来よく使われるもので省略した）。

これらの式から、燃え拡がり速度が熱的に薄い場合には、[] 内で示された無次元温度比の1乗、熱的に厚い場合には無次元温度比の2乗に比例することがわかる。また、燃え拡がり速度が厚さに反比例して減少することもわかる。このような燃え拡がり速度の定式化が非常に有意義であることから、多くの研究者によって、燃え拡がりに及ぼす影響がこのような式を使って説明されたり、場合によっては拡大解釈され、燃え拡がり現象を説明されてきた。現在では、簡略化のため、重力（浮力）の影響を考慮しなかったことが、むしろ微小重力場における解析にそのまま適用されることとなった。

このように都合の良い式であるが、薄い紙のような場合、対向気流への依存性が説明できないこと、熱的に厚い固体において、無次元温度比の2乗になるとは限らないこと、表面では熱損失があるので火炎先端が表面に付着していないが、そのことをうまく説明できないこと、 Le 数を1と定めることで物質の気相中の拡散をあまり考慮していないこと、熱移動にかかる特性距離が不明確なこと（垂直成分の熱伝導で代表させていること）、など理論解析からは不明瞭な点も多い。特に、理論式の中の係数 $\sqrt{2}$ の妥当性に関して、1980年代に別の研究者が検討を試みている[109, 112]。

McAlevyら[24, 101]は、燃え拡がり速度に関して、気相、固相において有限反応、着火距離を考慮したモデルを立てていることが特徴的で、Tarifaら[102]では、火炎が前方の表面を加熱し、可燃性気体が発生し、予混合気が形成された中を伝ばするモデルを立てたことが特徴的である。表面前方への加熱には輻射の

みが考慮され、それが燃え拡がり速度を決定づけるとした。このような燃え拡がり機構は、個々の現象が過程ごとに順に発生するという考え方に基づいているが、実際の燃え拡がりには、現象が同時進行的・連続的に発生している。従って、そのような考え方 [101, 102] に基づく燃え拡がり機構は、概してあまり適用されなくなった。

OhkiとTsuge [119] は、対向流れをオセーン近似によって定式化をおこなっているが、このモデルの特徴は、火炎先端付近における酸化剤と可燃性気体の混合に関する領域とそこでの取り扱いを容易にするために、無炎面を導入し、拡散火炎をはさみ酸化剤と可燃性気体が分離（共存していない）されていると考えた点である。つまり、固体表面が火炎前方で予熱され、燃焼反応以前に可燃性気体の発生が可能であるようにした。De Risが自身の理論式のなかで、拡散火炎が伝ばし、気化温度になるまで加熱されなければ可燃性気体の発生はない（拡散火炎をはさみ、伝ばする前方に可燃性気体が存在しない）と仮定していた点とは異なるモデルである。得られた結果は、酸化剤希薄雰囲気環境下のPMMA板に沿ったMcAleveyら [101]、Tarifa [102]、Mageeら [5] の結果と比較する形で、燃え拡がり速度の雰囲気圧力、初期温度への依存性などが検討された。

Sirignano [103] は、チャーの生成のない固体表面に沿った燃え拡がりについて、定式化をおこなっている。モデルの特徴としては、Lastrina [24] らと異なり表面でアレニウス型の化学反応を伴い、その反応の非線形性を考慮した点であるが、オセーン流れを近似し、輻射の影響がないとして、化学量論比が1で表面での温度勾配が0（断熱壁）という特別な場合についてのみ解析的に解を求めた。ただし、固有値となる燃え拡がり速度を求めることよりも、主に表面への熱移動の様子を調べることに着目しており、表面に沿った温度分布を見ると予熱領域から最高温度までが緩慢な立ち上がりを示し、プラトー部がない点、酸化剤濃度が原点をはさみ急激に変化せず、既燃焼側で0にならない点など、実験結果との比較検証がなされていないので、モデルをそのまま適用できないようである。

Fernandez-PelloとWilliams [104] は、境界層の発達のある対向気流中を燃え拡がる場合について、特に固相を通した熱伝導により燃え拡がりが制御されることに着目して理論解析をおこなった。ここでは、それまでDe Ris [100]、Siri-

gnano [103]、OhkiとTusge [119] らが用いたオセーン流れの近似ではなく、境界層近似（ただし自然対流下）をおこなっている点が特徴的である。特に、火炎先端の位置を、熱分解の先端位置よりも下流の仮想位置に置き、可燃性気体の火炎前方からの発生を許容した。このようなモデル化をおこなっているものの、併せて記載された実験結果の火炎前方における熱膨張による流管の拡がりに代表されるように、燃焼時の流れと非燃焼時の流れが異なることが説明されずに境界層近似を適用されている点に問題があるように思われる。つまり、流れの場が一致していないようである。

理論解析の分野では、Wichmanのグループが精力的に取り組んでいるので、以下に列挙する。

WichmanとAgrawal [106] は、燃え拡がり方向と気流方向が同じ場合の燃え拡がりに関して、熱分解速度が気流速度と酸化剤濃度に比例して変化する一方、表面から離れた側の火炎先端の移動速度は酸化剤濃度の逆数に比例することを示した。

WichmanとWilliams [107] は、モデルの簡単化のため物質移動の影響は無視し、熱移動モデルを考慮し、燃え拡がり速度を理論解析的に求めた。また、気相と固相の表面に沿った方向のペクレ数 $(u_s/\alpha_{sx})/(u_g/\alpha_{gx})$ を定義し、熱移動過程を考察した。このような熱移動モデルではなく、有限化学反応の影響を考慮したモデルも調べている [108]。その中では、燃え拡がりの際の火炎先端を有限化学反応の影響が重要な領域として予混合火炎の球とし、その背後に続く火炎を拡散火炎としてモデル化をおこなった。火炎先端の説明として予混合火炎の性質を用いることを試みたのは、RayとGlassman [214] の仮説に依るところが大きい。

計算結果として、燃え拡がり速度とダムケラ数の関係を一般性のある形で線図で示したが、大きなダムケラ数においてのみ一致する傾向が見られた（つまり、化学反応により消炎する領域ではなく、吹き飛びから消炎に至る領域で一致する）。結果的には有限化学反応が重要となる消炎領域での現象説明が明確ではないが、計算と実験が一致する領域では、火炎先端が予混合火炎の性質を持つ必要がないことを推察した。

WichmanとWilliams [109] は、1) Thomas [110] の火炎先端付近の表面への熱流束を表面に沿って一定とおいた考え方と、2) De Ris [100] の熱分解温度に基

づき温度差（火炎温度－熱分解温度）を一定とおき、火炎先端前方の予熱領域から下流方向へ表面での熱流束が反比例して減少する（熱流束が変化する）考え方の相違をダムケラ数と燃え拡がり速度の関係から検討した。火炎先端付近の熱流束の取り扱いに関して、De Risの解析では火炎先端が表面に付着するモデルのためその適用性に制限があるものの、Thomasの取り扱いよりもDe Risの取り扱いの方が適当であることを説明した。また、これまでの実験結果[22]との対比から、解析的に求めたDe Risの理論式の係数の $\sqrt{2}$ （＝1.4142；前述）が、むしろ0.8に近いことを明らかにした。つまり、De Risの熱的に薄い場合について誘導した燃え拡がり速度がFernandez-Pello[22]らの実験結果よりも2倍も大きいことを理論解析から指摘し、Delichatosios[112]はそのことについて追実験的に理論解析をおこなっている。解析の中では、De Risの誘導した基礎式を用い、厳密的に解を求め、係数が $\pi/4$ （＝0.7854）となることを明らかにした。これは、Wichmanらの結果の0.8を支持するものである。

1990年代に入ると、火炎先端が熱分解領域よりも前方にあるのかどうかということも議論されるようになってきた。Bhattacharjee[113]は、De Risの誘導した基礎式を四つのパラメータで表せるように変形し、De Risが解析的に解いたのとは異なり、数値解析的に調べた。この研究で明らかになったことは、De Risが熱分解先端と火炎先端を固有値として一致させたものの、火炎先端の位置はたいてい、その固有値よりも上流側にあるということである。さらに、火炎先端位置と火炎形状が蒸発パラメータと化学量論比のパラメータに強く依存することがわかった。火炎の全体形状、火炎先端位置を導出したパラメータで評価できるようにした点がこの研究の大きな特徴であり、有益な結果である。

Bhattacharjeeの研究と同じ頃、Delichatosios[114]は、熱的に薄い固体表面に沿った燃え拡がりにおける火炎先端位置と熱分解領域先端位置の違い（変位）に関して[113]、そのような変位に関する解が数学的にできないことを理論的に示そうとしている。つまり、燃え拡がり速度がその変位によって特性化されないことを示そうとした。誘導された式の解における偏位の効果を0としても、数値解析的には燃え拡がり速度が求められ（ただし、解析解[100]、厳密解[112]と求めている）、変位が燃え拡がりに関して特性を表す値となることが疑わしい

と結論づけた。

そのことについて Bhattacharjee [115] が反論をおこなっており、1) Parker [17] の実験の説明に用いられたのと同様に、消炎領域が実際の現象には存在することから偏位が0でなくともよいこと、2) 数値解析的に解を求めたことに関して、数値解析上の技法としての計算格子における問題点と解の収束性を十分に評価した後に解を求めたこと、を理由に得られた結果 [113] が妥当であることを説明した。

ただし、両者ともオセーン流れ、無限大化学反応速度、 Le 数=1というように熱移動に関するDe Risのモデルをそのままに展開しているため、消炎領域における有限化学反応の影響、物質移動の説明が明確になされていない。

その後、この変位については、消炎領域（火炎の立ち上がり高さ）との関係を議論するために調べられ、ChenとDelichatosios [116] は変位が Spalding の B ナンバと化学量論比で表せることを明らかにし、燃え拡がり速度を酸化剤濃度の関数で表した。しかし、その酸化剤濃度と燃え拡がり速度の関係式が成り立つ範囲では、化学反応の影響が小さいため、燃え拡がり速度と変位の関係は考察されていない。

長谷見 [120, 121] は、未燃焼表面への入射熱流束の分布が火炎高さに支配されるという巨視的にとらえた実験結果を基に、火炎・熱気流に接する垂直表面付近の伝熱機構に関して微視的にとらえ、検討をおこなった。特に、その伝熱に関する次元的な取扱いについて調べ、PMMA板に対する計算をおこない、実験で得られる伝ばの特徴を定性的に説明できることを示した。

Bhattacharjeeら [122] は、セルロース固体表面に沿った燃え拡がり時の熱分解反応に関して、頻度因子（前指数係数）と活性化エネルギーを未知の定数として熱分解温度で代表させたモデルを考え、理論解析をおこなった。計算の結果、頻度因子の増加、あるいは活性化エネルギーの減少は熱分解温度の低下をもたらし、そのことが火炎構造と燃え拡がり速度の変化をもたらすことを数値解析的に調べた。特に、その反応に関する二つの効果は独立に変化しないことを明らかにした。

Karpov [117, 118] は、熱分解による表面降下速度と燃え拡がり速度が密接に関連することに着目し、気相と固相の質量保存を考慮し、境界層近似をおこなっ

た場合と境界層近似をおこなわない場合の二つについて数値解析をおこない、燃え拡がり速度を求めた。境界層近似をおこなわない場合には、楕円型の方程式（境界層近似の場合には、放物型の境界層方程式となる）を数値解析的に解いた。その後、可燃性固体表面に沿った燃え拡がり速度を求めるために、熱分解領域の厚さを含むコントロールボリューム（領域）の熱平衡において、その領域のエントロピーが最小になるとき、燃え拡がり速度が得られるとする固有値問題として考え、解析をおこなった [118]。対向気流の増加にともない、燃え拡がり速度が減少する傾向は他の実験と同様である。しかし、吹き飛び、消炎に至る過程は不明瞭で、最小エントロピー法によるアルゴリズム自体の問題ではなく、気相側のモデリングの単純化による理由を挙げている。燃え拡がり速度が実験結果とよく一致するとは言いがたいが、Prigogineの理論に基づく最小エントロピー法により燃え拡がり速度を求めるという、独自の考えに依っている点が評価できる。

2. 液体表面に沿った燃え拡がり・燃焼に関する研究

（a）液体表面に沿った燃え拡がり

金原の研究第1報 [128] では、長さ 40 cm、幅 5 cm、深さ 3 cmの初期液温度が制御できる燃料容器を使って、エタノール液面上の燃え拡がりを調べた。実験では、初期温度が 4.5℃では伝ば速度は 14 cm/sであるが、初期温度の増加とともに27℃で最大伝ば速度 183 cm/sに達し、その後温度上昇とともに単調に減少することを明らかにした。第2報 [129] では、液体の種類を増やし、混合させた場合について調べ、伝ば性の高いものに低いものがわずかに混入しても燃え拡がり速度に大きな影響はないが、伝ば性の低いものに高いものを混入するとその影響が大きいことを明らかにしている。

金原の論文を手がかりに 1960 年代以降活発に研究がおこなわれるようになった。Burgoyneら [134-136] は連続する3編の論文を出しているが、第1報 [134] では、液面に沿った燃え拡がりの際の着火の初期段階の誘導期、遷移期、伝ば期に関して、その燃え拡がりを調べる第一段階として灯芯を用い、液面上に形成される火炎の着火について物理的な過程を調べた。実験ではブタノール（引火点 35.5℃）、イソペンタノール（43.9℃）、ヘキサノール（59.4℃）を用い、引火点以下でおこなっているが、液相の深さが 0.13 cmより深いときは、液相内に

自然対流が形成され、その傾向は 1 cm 深さまで発達するが、それ以上の深さではそれほど発達しなくなる。逆に 0.13 cm より浅い場合、対流が発達できず、熱損失に至る底部への熱伝導が大きく作用し、0.08 cm より浅くなると伝ばができなくなることを実験から明らかにした。

第2報 [135] では、n-プロパノール、ブタノール、イソペンタノール、ヘキサノールの液面上燃え拡がりに及ぼす初期温度、気流速度の影響を調べた。

初期温度を可変させた実験から、振動伝ばの燃え拡がり速度は熱移動過程に制御され、ヒートシンクとなる深さ、幅の影響も受けることを示した。そして、振動伝ば温度では、引火温度より高温にある火炎下の液体表面に火炎が保持され、その高温領域からの熱が火炎前方表面の低い温度を引火温度まで加熱し、そのことで可燃性気体が気化発生し、予混合気形成され、自己伝ばするという伝ば機構を考察した。振動伝ば以上の温度では、周囲の環境に影響されないが、燃え拡がり速度は気化領域の影響を受け、引火点よりも高い温度では、燃え拡がりが初期温度に依存しないことを明らかにした。この研究で明らかになったことは多いが、燃え拡がり機構に関わる液相、気相の熱移動現象の詳細までは述べていない。

第3報 [136] では、熱源の移動モデルを使い、理論解析をおこなっている。液相内の対流を異方形の熱伝導率を持つ固体と考えている点、固体に沿って無限長さの熱源帯により火炎を代表させ、それが一定の速度（燃え拡がり速度として任意に与える） V_f で移動する点がこの解析モデルの特徴である。ここでの解は、任意に与えた V_f とそのときの熱源前方への表面変化として得られる。解析では、液相内の予熱に制御される範囲の燃え拡がりに適用できる範囲に限定すれば、液相温度にある初期温度と燃え拡がり速度の関係が得られ、さらに深さの影響も考慮して、実験結果を整理できることを示した。

液体表面上の燃え拡がり実験をおこなう上での考慮すべき事項を系統的に調べたのは、Mackinvenらの研究である。Mackinvenら [137] は、燃え拡がりに関わる因子として、1) 燃料の純度、2) 着火方法、3) 液体の温度、4) 燃料容器の大きさや材質、5) 液層の深さ、を挙げ、さらに環境因子として大気圧、室温、湿度を系統的に調べることによって、燃え拡がり現象を説明するとともに、標準的な燃え拡がり実験をおこなう上で考慮しなければならない事柄を詳述した。こ

の実験で興味深いのは、温度制御用の水の上にデカンを浮かべ、そこで実験をおこなっていることである。実験の結果、燃え拡がり速度への影響が大きいのは、幅と深さであることがわかった。一般的に使われる 5 cm 前後の幅の容器は側壁による液相の対流の影響を受けるが、60 cm 以上ではその影響が小さくなる。ここで、20 cm 幅の容器から 5 cm 幅の容器になると、燃え拡がり速度が半分までに減少する。この研究ではデカンの場合、深さが 1.5 mm 以下では、表面張力に伴う液相の対流が阻害されるため、燃え拡がらないことを明らかにしている。環境因子については、ここでは難溶性であるデカンに関する限り、大気圧と温度の影響は小さく、室温についても、 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の変化は影響がないと述べている。

湿度、水分の影響は、溶性であるアルコールについては十分に注意する必要がある [129]、紙など [4] についても、乾燥器から出して短時間に実験をおこなうのが常識になっている。

初期温度－燃え拡がり速度－液相の現象を明らかにしたのは Akita [142] の研究である。メタノールの初期温度に対する燃え拡がり速度を、流し写真撮影法によって調べ、引火温度 11°C 以下において、液相の初期温度の低下に伴って火炎が一樣伝ば ($\sim 1^{\circ}\text{C}$)、振動伝ば ($1 \sim 10.5^{\circ}\text{C}$)、擬一樣伝ば ($10.5^{\circ}\text{C} \sim$) に移行することを示した。そして、この 3 領域を液相内、表面張力流を伴った予熱型の伝ば機構、引火点以上の火炎の伝ばを予混合型の伝ば機構をもつとして一連の伝ば機構を説明した。特に、表面張力流と火炎の挙動に着目し、液体表面の温度測定から、火炎に先行するこの表面張力流の温度が初期温度よりも高いことを明らかにし、火炎先端付近で引火点にまで加熱（予熱）、上昇することを示した。さらに、その表面張力流は、初期温度の増加とともに、火炎先端付近と前方の温度差の減少のため、 1°C 以降はほとんど見られなくなることを観測した。振動伝ばする火炎では、火炎の進行、火炎下表面の加熱、加熱された表面張力流の先行、そして、火炎の加速的な進行という燃え拡がり機構を考察し、説明をおこなっている。

同様の初期温度と燃え拡がりの研究は、松本と斎藤 [143] もおこなっている。実験では、初期液温度を制御できる 700 mm 長さ、20 mm 幅の燃料容器槽を使い、容器深さは 1、2、4、18 mm と可変し、メタノール、エタノール、1-プロパノールの燃料を使い、初期液温度と伝ば速度の関係を調べた。そして、初期温度と燃え拡がり速度の関係を示す片対数グラフから、引火点前後でも燃え拡がり速度が変

化する偏曲点の存在を示し、四つの初期温度依存に関わる速度領域に分けられることを明らかにした。つまり、伝ば機構が引火点で大きく変化するという Glasmanら [124] の説明とは異なる結果を得た。燃え拡がり機構が引火点という温度を境に明確に異なるのかどうかという点については、Ross [126] の総説でも取り上げられ、その妥当性は証明されてはいないようである。

松本らは理論解析もおこなっている [143]。初期液温が引火点以下の場合、火炎の伝ばの速度が、液相の流動、伝熱サイクルの固有値であるとし、それらのエネルギーバランスと併せて、表面張力駆動流を調べ、初期液温度が引火温度以下の場合の火炎伝ば現象が解明されるという立場に基づいている。計算では、引火温度以下で一様伝ばする場合の火炎の伝ばのみを解析した。そこでは、液表面温度分布に従って燃料蒸気圧が定まり、それに従って燃料蒸気が空気中の酸素と拡散混合した可燃性蒸気となり、火炎が可燃性混合気中を伝ばするという過程を考慮している。つまり、ここでは化学量論温度と定義している温度が、移動する速度が伝ば速度である。近似的には、その化学量論温度と引火温度は線形関係であるため、引火温度の移動が伝ば速度であると解析していることになる。計算結果から、初期温度と伝ば速度の関係をよく説明できることを明らかにした。

Itoら [144, 145] は、引火点以下の燃え拡がり機構を調べるために、ホログラフィ干渉計による温度測定法を使って、燃え拡がり時の 1-プロパノール液相内の温度場を詳細に観測した。温度分布測定では、0.1℃の精度で液相中の温度分布を求めた。結果では、1) 引火点以下で振動伝ばあるいは一様伝ばにおいて、液相内の循環流領域が二つの存在すること、そして、この二つの循環流の火炎先端よりも先行するものは引火温度よりも約 7℃高く、もう一つの火炎下の温度差に基づく浮力(重力)駆動の循環流のものは引火温度以上にならないこと、2) 引火点以下で一様伝ばする場合、液相の対流が燃え拡がり速度に律速であること、つまり、気相の対流が循環流の形成に敏感に関わるものではなく、エネルギーの収支から、気相の対流熱伝達と液相の熱伝導が無視し得ること、などを明らかにした。燃え拡がり機構の検討では、一様伝ば範囲で常に引火点よりも約 7℃高い領域が火炎先端前方に存在し、その温度において、可燃範囲の予混合気を形成できることを根拠に、火炎が予混合火炎伝ば機構により移動すると説明している。さらに、ホログラフィ温度測定法を用いて振動伝ば時の気相と液相の挙動を調べ [145]、

振動伝ば時は表面流れが支配的で、気相は副次的な影響を示すことを明らかにした。

(b) 液相における現象

液相における現象は上述のAkita [142]、Ito [144] らが詳しいが、Glassmanらは、特に表面張力流に限定して調べている [138]。そこでは、燃え広がる火炎先端前方の温度差に基づき誘起される表面張力駆動流を解析した。気相現象と切り放し、液相現象の問題として、慣性力、重力、粘性力、表面張力の四つの外力が働き、表面張力駆動流は、表面での表面張力と粘性力がつりあうものとして求めた。その結果、火炎から離れる方向に温度が低下する場合、火炎先端前方から正の表面張力勾配を持ち、火炎先端の前方に向かって表面高さが増加し、表面での前方よどみ点までは、表面に沿って前方の流れがあることを解析的に明らかにした。ただし、この研究は、LandauとLifschitzの表面張力の解析を応用しており、その Re 数がオーダとして1程度ということを仮定していることに注意が必要である。つまり、実際の容器高さが4 mmのデカンの燃え拡がりでは Re 数が100程度になることから、解析で使用された仮定の適用範囲を超えている。

Torranceら [139-140] は液相の流動をよく調べているが、Glassmanと同様に表面張力駆動流の理論解析をおこなっている。引火温度以下の液相の対流を把握するために、火炎の存在を考慮せずに、表面が一定温度（引火点あるいは燃焼点）の領域（熱源）が移動するというモデルを考え、流れ関数と渦度輸送方程式を使い、液相内の表面張力と浮力の効果を調べた [140]。ここでは、燃え拡がり速度と液相の深さに基づく Re 数、プラントル Pr 数、表面張力とせん断力の比（ここでは S 数；表面張力/せん断力）の三つのパラメータを使って、それぞれ、 $10 \leq Re \leq 2500$ 、 $1 \leq Pr \leq 100$ 、 $25 \leq S \leq 250$ の範囲に適用した。ここでは、 Re 数の可変が燃え拡がり速度の変化ではなく、液相の深さとして変化させていることに注意を必要とするが、1) 深さの増加とともに熱源の先端よりも前方に渦（循環流）の発達が見られること、ただし、その増加とともに渦度は一定値に至る傾向が見られること、2) 表面前方によどみ点が存在すること、3) 渦に伴い液相前方にゆがんだ温度分布が見られること、4) 表面張力が増加すると渦の大きさと渦度を増加させ、よどみ点がより前方に拡がること、5) 表面でのよどみ点の存在

から、表面前方へ向かう流れがあること、そして、よどみ点と熱源との距離は表面張力の増加とともに大きくなり、 Re 数の増加とともに小さくなること、6) Pr 数の増加は温度影響領域を前方へ拡張、よりわん曲した温度分布になること、などを明らかにした。

例えば、このような結果からは、メタノールの Pr 数が 6~7、エタノールが 15とみると液相の対流の影響の違いが予測でき興味深い。ただし、数値解析に基づいているため、詳細な現象把握には制限的である。従って、Itoら [144] が見いだした複雑な高温領域は見いだせない。

TorranceとMahajan [141] は、引火点以下の液体の対流が表面張力と浮力により駆動し、それらがプラントル数と容器深さと火炎の伝ばに依存することに着目した解析をおこない、火炎の伝ば方向前方への表面上の誘起流れ速度が主に表面張力と容器の深さに依存することを明らかにした。

(c) 気相における現象

引火点よりも十分に高い場合、その燃え拡がりの挙動は液相によらず、気相支配になる [126-127]。Hiranoら [146] はこの気相中の現象に着目した研究をおこなっているが、静止雰囲気中において、液面上を伝ばする火炎とその前方の気流の動きを、液体の初期温度を変えて調べた。実験では、100 cm長さ、4.2 cm幅、3.3 cm深さの温度制御ができる容器槽にメタノールを入れて用い、特に気流の動きを観測するために、液面上に水平に張ったニクロム線をわずかに加熱し、温度差のある垂直気流を作り、火炎とその気流のシュリーレン映像を観測する方法を考案した。実験では -5℃から 35℃まで初期液温を変化し、1) 引火温度 (11℃) より十分に低い 5℃以下では明らかな気体の流動は観測されないこと、2) 5℃から 22℃では気体の流動とともに伝ば速度が増加すること、3) 22℃以上では、伝ば速度が 180 cm/s一定になり、そのときの気流の速度はばらつくものの一定値に約 120 cm/sに達すること、を実験から得た。そして、引火温度よりわずかに初期温度が低い場合、火炎の伝ばと前方への気流の移動に伴い、液相の熱移動のみならず、気相からの熱移動によっても液面が予熱され、可燃性蒸気の濃度が増加し、可燃性予混合気を形成するものと推察できること、などを明らかにした。ただし、振動火炎の挙動は観測していない。

その後、SuzukiとHirano [147] は、液面に沿った燃え拡がりの強制気流の影響を調べるために、火炎の伝ば方向に対し、同方向と逆方向の境界層の発達のある強制気流を与え、気流速度と燃え拡がり速度の関係を調べた。実験の結果、燃え拡がり方向と気流の方向が同じ場合、燃え拡がり速度が気流速度とともに直線的に増加し、方向が逆の場合、燃え拡がり速度は対向する気流速度の増加とともに減少するものの 20℃初期液温度でも、4.5 m/sの対向気流までは燃え拡がることのできることを実験から明らかにした。

さらに、液面上に混合気層が形成する場合、障壁があっても火炎がその障壁を乗り越えて燃え拡がるという興味深い事実を明らかにしている [148]。これらの火炎の動きと火炎前方の伝ばと同方向への流れを説明するために、火炎の伝ばが非定常現象であることから、境界層理論に基づき流れの場を非粘性と仮定し、火炎を一つの湧き出しと置き換えたポテンシャル流れに基づく数値解析をおこなった [127]。

(d) 固体に液体を浸潤させた場合、混合液体

TakenoとHirano [150] は、ガラスビーズにケロシンを浸潤させた場合の燃え拡がりについて、粒径と浸潤量に対する燃え拡がり速度と温度分布を調べた。その結果、着火前の初期の液面が数mmガラスビーズよりも高いとき、液体表面に沿った燃え拡がりの様相に似ており、燃え拡がり速度は大きい、液面がガラスビーズの高さと同じかそれよりも低いときは、固体表面に沿った燃え拡がりの様相に似ており、燃え拡がり速度が小さいことを明らかにした。また、粒径の違いによる温度分布を得、さらに解析から火炎先端前方への凝縮相を通した熱伝導と対流の影響が大きいことを示した。その後、デカンのみとデカン 90%—ヘキサン 10%の混合した2種類の可燃性液体を用い、その粘性、粒径と燃え拡がりの様相を調べた [151]。そして、デカンの場合、粒径が 0.2 cm前後で燃え拡がり速度が最も小さくなり、混合液の場合はそれとは異なり、液体の粘性が変化すること、燃え拡がり速度に極小値がないという結果を得た。このとき、粒径の減少とともに凝縮相内の流動は制限され、燃え拡がりはむしろ固相に近い現象になることを明らかにしている。なお、Ishida [160] もデカンを浸潤させた実験をおこない、表面の角度を変化させた場合の燃え拡がりの違いを議論している。Jiと

Fan [157] は、このような浸潤層上の燃え拡がりについて数値シミュレーションをおこなっている。

Suzukiら [152] は、砂にケロシンを浸潤させ、強制気流に対する燃え拡がり時の火炎先端付近の気相の流れの場を調べた。特に、境界層の発達のある平板に沿った燃え拡がりでは、火炎先端前方に逆流（循環流）が発生することを線香の煙を用いた流脈による可視化により明らかにした。この逆流の領域は火炎前方水平約 3.5 cm に及び、気流速度によらず一定していることがわかり、また、気流速度の増加とともに境界層の厚さが減少するが、その領域の高さも、気流速度の増加とともに減少することを示した。従って、このような逆流が形成されることで、火炎先端が安定し、対向気流中でも燃え拡がることができることを説明した。また、このような逆流の動きが火炎先端の動きとほぼ同じ 1.1 Hz であり、またシュリーレン像である予熱領域の動きと対応していることもわかった。その後、Suzukiら [153] の研究では、火炎から火炎前方領域への熱移動が凝縮層を通じた熱伝導が支配的であること、安定して燃え拡がりが継続するには逆流領域の存在を含めて、火炎先端付近の気体力学的な構造が重要であること、このような逆流の形成が境界層と高温気体による浮力の相互作用によること、を明らかにした。

ろ紙に可燃性液体を浸潤させた場合については、SuzukiとHirano [158] が調べている。実験ではパラフィン系の可燃性液体（ヘプタン C_7H_{16} からペンタデカン $C_{15}H_{32}$ までの9種類）を用い、ろ紙の厚さによって燃え拡がり速度が変化するものの、ろ紙単体で用いる場合とは異なり、可燃性液体の物性（気化特性）に大きく依存することがわかった。その後、気流の影響についても調べている [159]。

多成分系の燃え拡がりの一つとして、オイルスラッジ表面に沿った燃え拡がりについて調べられている。オイルスラッジは常温では気化しない重質の堆積物で、原油の性質によって異なり、砂や鉄酸化物の多いものはほとんど着火しないが、揮発性のあるプロパン、ブタン、ヘキサンを含む場合は危険性の高い可燃性固体となる。

Hiranoら [154-155] は、オイルスラッジにヘキサンを添加した場合における燃え拡がりを調べた。そして、揮発成分の割合が増加、あるいはスラッジの初期温度が増加すると燃え拡がり速度が増加することを明らかにした。

理論解析的には、Ohotaniら [156] が調べ、これまで燃え拡がり速度は熱的に厚い場合には（気化温度-雰囲気温度）の-2乗、薄い場合には-1乗に比例するとされていたが [100]、ヘキサンを含むオイルスラッジに沿った燃え拡がり実験では-3.7乗に比例することを示した。このように乗数が大きくなる傾向は、ろ紙に浸潤させた場合でも得られている [158]。

(e) 微小重力環境

微小重力環境における液面に沿った燃え拡がりは、実験作業が難しいことから、固体の場合ほど多くの研究者が取り組んでいるとはいいがたく、NASAのグループが精力的に研究に取り組んでいる。

RossとSotos [164] は、15 cm径、1.6 mm深さのセラミック製の容器を5.18sec持続時間の自由落下塔から落下させることによって、微小重力下の引火温度以下の液面上の燃え拡がりを調べた。可燃性液体として、1-プロパノールとn-ブタノールを用い、1) 微小重力下では、常に一樣伝ばすること、2) 重力下で振動伝ばする初期温度条件を微小重力下でおこなうと振動伝ばはせず、次第に消炎に至ること、3) 重力下で一樣伝ばする条件では、微小重力下でも同様に一樣に伝ばすること、4) 浅い容器では、液相の浮力駆動流れは見られず、燃え拡がりに関してその影響は重力下と微小重力下の両方で支配的ではないこと、5) 振動伝ばが重力下でのみ見られことから、この様式の伝ばの際は、気相の対流の影響が支配的であること、6) 引火温度以下で一樣伝ばする条件では、伝ば機構において液相の対流が最も重要で、気相の対流は副次的であることが推測されること、6) 酸化剤濃度の可変や不活性ガスを希釈を窒素からアルゴン、ヘリウムに代えると振動伝ばが変化すること、などを明らかにした。

(f) 燃え拡がりに関する理論解析

SirignanoとGlassman [138]、Torrance [139] がこの分野で先鞭をつけているが、引火温度以下の解析に限定することで、気相現象と切り放し、液相の現象にのみ着目した理論解析をおこなった。

このような制限を除き、気相と液相の現象を結合させて解析をおこなったのは、Furutaら [161] である。引火温度以下の液面上の燃え拡がり現象を調べるために、

気相では、火炎面モデルを適用し、火炎先端は液面表面に付着し、可燃性気体側の液面表面ではどこでも引火温度であるとし、火炎前方の酸化剤側では可燃性気体の発生がないものと仮定した。さらに、気液界面では、粘性力と温度差による表面張力を考慮し、浮力は両相で考慮し、楕円型の方程式を解いた。計算の結果、液相と気相の両方で循環流が存在することが見られたが、特に、気相での循環流は実験では明らかになっていないとして、その妥当性は評価できないと結論づけている。この計算では、火炎面モデルに基づき気液界面に火炎が付着すると仮定しており、その点では、火炎先端から液面への熱流束は無限大になる。つまり、特異点を持つことになり、非現実的な解析となっている。従って、火炎先端では少なくとも、有限反応速度を考慮する必要があるように思われる。

非定常現象を数値シミュレーションによって調べたのはDi Blasiら [162] である。引火点以下のアルコール液体の振動火炎伝ばを想定し、気相と液相の現象を合わせて方程式を解いた。数値解析では、1段アレニウス型反応、浮力に関してブシネスク近似を仮定し、気液界面では、蒸発過程を温度-蒸気圧関係式から説明し、せん断力と表面張力のつりあいを考慮した。この研究は、上記のFurutaら [161] の解析で仮定された制限条件を取り払い、より正確に現象を把握する意図でおこなわれている。計算から、火炎先端付近の濃度場、温度場を示し、振動伝ば火炎では、気相中においても火炎先端前方に渦が生成することを予測した。非定常現象把握につとめ、液相内の渦の動きと火炎の動きから、振動火炎伝ばが、気相支配と液相支配の熱伝達が交互に起こる現象であることを明らかにした。さらに、液相の対流による熱伝達から、振動のサイクルを調べるとともに、その対流による予熱の効果が重要であることも示した。この研究では、濃度場も調べ、酸化剤と可燃性気体の混合拡散領域が火炎先端に存在することから、火炎先端の予混合火炎化を議論している。しかし、液相の渦と火炎先端の位置関係が、Torranceら [139] とわずかに異なることや、全体の火炎形状が表面に近いこと、火炎先端直下の表面の相互作用が明確ではないことなど、その妥当性は議論の余地があるように思われる。

これまで実験的にも数値解析的にも不可能であった、火炎先端付近の非定常現象の詳細を図示したのは ScillerとSirignano [163] である。振動火炎における燃え拡がり機構の説明でよく用いられる予混合燃焼と拡散燃焼の交互に発生する

機構に着目し、デカンを想定した振動火炎伝ばと着火遅れの詳細な数値解析をおこなった。火炎先端の非定常流れ場、濃度場、温度場、反応速度の変化を詳細に調べ、その振動の詳細な様子を図示した。併せて、微小重力下における解析もおこなっている。計算から、振動の際に気相の表面に近いところで渦が発生する様子を予測し、次のような伝ば機構を考察した。1) 振動伝ばで、始めに予混合伝ばした後、表面にごく近い領域を除き、拡散火炎構造をもつようになる。このとき、火炎反応帯を挟み、背後から火炎反応へ可燃性気体が供給され、前方から酸化剤が供給される。2) 振動伝ばは、火炎前方、気相中の循環流に支援される。この循環流は、対向気流と浮力により形成されるもので、微小重力下では、循環流は形成しないことから、振動伝ばは見られない。また、振動現象に伴うその周期には、火炎前方の気体による熱膨張が大きな役割を果たすことを推察した。この微小重力条件の計算結果は、Rossら [164] の結果を支持するものである。

このように気相の循環流発生を予測したが、Di Blas [162] の結果から得られておらず、Glassman [124] の実験を引用する形で、その循環流発生の可能性を説明している。Suzukiら [152] らの砂-ケロシン表面に沿った燃え拡がりとの比較をおこなって見ると、1) 両者ともに火炎先端に循環流が見られるものの、その領域の大きさは異なること、2) 強制対流とScillerらの火炎誘起の自然対流というように火炎先端を保持に関わる流れが異なること、3) Suzukiらは定常状態で循環流が見られること、などの違いがあり、計算による気相の循環流の発生についてその妥当性は確認されていない。

ところで、振動伝ばの機構に関する支配要因については研究者ごとに、1) 気相の熱伝導と輻射 [142]、2) 気相の熱伝導 [124]、3) 気相の熱伝導と液相の熱伝導 [146]、4) 液相の火炎前方への対流 [144]、また、液相内の対流については、1) 浮力のみ [135]、2) 表面張力 [137] などがある。

以上のことから、燃え拡がり速度への初期温度の影響が大きく、それが引火温度で分類整理されてきたことがわかった。しかし、引火温度以上で予混合火炎が形成し、引火温度以下でも、火炎先端が予混合火炎の性質を持つという考えがなされているものの、現象が大きく異なる様子は見られず、引火温度前後の火炎先端の性質が明確にされていないのが現在の状況である。

3. 不均一濃度場における火炎の伝ばに関する研究

気相中の不均一濃度場の火炎の伝ばとしては、1) 火炎からの加熱によって可燃性物質表面から気化・可燃性気体が発生、そして濃度場を形成し、その空間を火炎が伝ばすること(燃え拡がり)、2) すでに気化している可燃性気体が吹き出し、濃度場を火炎が伝ばすること、3) 粒子状の可燃性固体、液体が飛散し、気化とともに濃度場を形成し、火炎が伝ばすること [272]、などが考えられる。この節では、2) の不均一濃度場における火炎の伝ばについて調べた。

(a) 濃度勾配のある流路に沿った予混合火炎の伝ば

予混合火炎の伝ばは、一般的に酸化剤と可燃性気体が混合し、均一濃度になった空間中を伝ばするして、取り扱われることが多い。しかし、可燃性物質表面に沿って気相中を火炎が移動するという現象は火炎の伝ばにほかならず、このような場合、空間にわたって均一な濃度場が形成されているようには見受けられないことから [168]、不均一濃度空間中の火炎の伝ばを理解する必要がある。通常、物質表面から気化により可燃性気体が発生する場では、分子拡散のため表面から離れるように濃度勾配が形成される [127]。

ところで、不均一濃度場中の火炎の伝ばの具体的な例として、炭坑爆発が挙げられる。このような爆発の原因と過程には種々考えられ、爆発の初期の過程では、炭鉱から析出される天然ガスが空気と予混合化され燃焼することが炭坑爆発の動機になる可能性があるといわれる [165]。

そのような炭坑爆発の基礎研究として、濃度勾配中の火炎の伝ばを調べたのは、Phillips [166] である。濃度勾配のある空間として実験室レベルの二つのモデル実験装置を製作し、炭坑から得た 85% 純度のメタン (外は主に窒素) を使った伝ば実験をおこなった。実験では、5~15% の可燃範囲中で予混合火炎が形成できるような形にし、湾曲した予混合火炎の背後に拡散火炎、対流火炎が続く様子を観測している。このような三つの性質を持つ異なる火炎が見られたが、希薄予混合火炎、過濃予混合火炎そして拡散火炎の接続した、いわゆるトリプル火炎 [171] としての記述はおこなっていない。ところで、実験で調べられた伝ば速度は、濃度勾配が大きくなると小さくなり、勾配がゆるやかなときは、約 1.8 m/s で一定になる事実を得た。このような伝ば速度が燃焼速度よりも大きいことについて、

微粒子追跡法による流れの可視化実験をおこない、火炎背後での加速、火炎前方での流線の偏向を調べ、その速度変化から、火炎先端で見ると相対的には燃焼速度になっていることを明らかにした。

Liebmanら [167] は、2.4 m長さの燃焼室（トンネル）内の閉端において点火されたメタン-空気層に沿う火炎の伝ばを観測し、伝ば火炎の速度に関する環境、気体層の影響が調べられ、伝ば速度は次元解析により整理された。実験では燃焼室の高さ h_g 、可燃性予混合気層厚さ h_{fz} 、メタンが100%占める高さ h_{100} 下限界であるメタン 5%含む高さ h_5 の四つのパラメータを可変し、そのときの伝ば速度を測定した。その結果、 h_g が 150 mmでは化学量論比よりも少し過濃燃料域で最大伝ば速度（つまり、そこに火炎先端がある）を持つことを示し、可燃性予混合気層の厚さの減少とともに伝ば速度が小さくなることを明らかにした。伝ば速度は最大で3 m/sにも達することがわかった。

（b）可燃性混合気層上に沿った予混合火炎の伝ば

液面上の燃え拡がりの予混合気が形成する条件において、予混合火炎の伝ばを検討するためには、液面上の濃度場を調べる必要がある [127, 132]。

Hiranoら [168] は、メタノールとエタノール液面上に所定の濃度場を形成し、濃度勾配に垂直にその予混合気層中を伝ばする火炎の性質を調べた。実験から、濃度勾配中（層）を伝ばする火炎が、均一濃度場を伝ばする火炎と異なることを示し、濃度勾配中の伝ばでは、火炎先端が、着火前の液面から層状になった混合気層において、最大燃焼速度となる付近の混合気層を常に伝ばすることを明らかにした。また、伝ば速度は、濃度勾配が増加すると減少することを示し、濃度場を形成するうえでの燃焼容器の高さ、濃度勾配が火炎先端の伝ばの性質を把握するのに重要なパラメータであることを示した。

常温で揮発性の高いベンゼン、ヘキサン、メタノールを使い、その可燃性気体の形成する濃度場を伝ばする火炎は、KapteijnとHermance [169] が調べている。実験とともに流管モデルを構築し、その理論解析から層流予混合の燃焼速度が既知である場合、表面から未燃焼予混合気厚さ、密度、既燃焼温度、未燃焼温度を求めることによって、伝ば速度と圧力降下を予測する式を誘導した。この研究で

は、濃度分布に着目しているものの濃度勾配、室温の影響を評価していないという難点がある。ただし、Feng [170] の伝ば速度の予測式よりも精度がよいといわれる。このような研究からは、気相中の流体力学的な性質が火炎の伝ばに大きく介在していることが明らかになった。

(c) 希薄予混合火炎—拡散火炎—過濃予混合気の伝ば

過濃、希薄燃料の予混合火炎、拡散火炎が結合したトリプル火炎に関して、その火炎先端の構造と伝ばを調べるために、低発熱モデルを使った漸近解析をおこなったのはDold [171-172] である。化学量論位置に沿って火炎が伝ばし、静止気流中ではその解は一つであるが、対流があり伝ば速度よりも対向気流速度が大きいときは、保炎という形で異なる解が存在することを示した。そのトリプル火炎は(最大の)断熱層流火炎速度に関わる伝ば速度を持ち、その伝ば速度は伝ばの垂直方向の混合分率の勾配の増加とともに減少することを明らかにした。

Kioniら [173] は、トリプル火炎を得るため、伝ば方向に平行に所定の濃度を供給できる実験装置を製作し、メタン火炎について得られた結果からは、濃度勾配が大きくなると、希薄から濃濃予混合火炎の幅が減少すること、伝ば速度がわずかに増加することを明らかにした。しかし、伝ばのできる濃度勾配の限界を調べていないため、トリプル火炎の伝ば性を詳しく議論していない。このような結果はDoldの漸近解析の結果 [172] と同じである。

4. 可燃性物質表面上の拡散火炎に関する研究

Parker [17] が燃え拡がり時の表面への熱流束を調べるのにスロットバーナで模擬実験をおこなったり、Maoら [178] が燃え拡がり時の流れを境界層拡散火炎の形で調べたように、しばしば燃え拡がり現象を把握するために、よく知られた燃焼形態で比較検討されることがある。

(a) 境界層拡散火炎

HiranoとKinoshita [175] は、メタノールとエタノールを可燃性液体にした境界層拡散火炎における流れ場と温度場を調べた。その結果、火炎先端の流れ場を見た場合、火炎のある場合とない場合ではその流れが異なり、最大となる速度が火炎帯付近にあることがわかった。また、火炎先端の安定機構についても言及し、

可燃性液体前端より先に火炎が安定形成する場合には拡散火炎であり、気流速度が増加すると、前端よりも後方の可燃性液体上まで後退し、火炎が変動する場合、可燃性気体分子が火炎先端前方へ拡散し、予混合化することで、保持されていることを推察した。HiranoとKannoの研究[174]では可燃性気体を用い、同様の実験をおこなっている。

森ら[176]は、プロパノールを用いた境界層拡散燃焼における実験から速度分布、温度分布、濃度分布を調べ、その構造を実験的に明らかにするとともに、境界層近似を施し、浮力の影響を考慮した数値解析をおこなった。計算では、速度分布の入口条件にブラジウスの解で与え、蒸発に伴う可燃性気体の吹き出し速度は、定数/ $\sqrt{\text{吹き出し先端から距離}}$ で与え、フレイムシートモデルに基づき、火炎位置を求めた。計算の結果、温度が最大になる位置の流速が主流速度の約2倍に達することがわかった。また、フレイムシートモデルを用いているため最高温度が尖ってはいるが、速度分布とともに実験から得られたものとよく一致する結果を得ている。その後、同グループは、Hiranoらが観測した流れのオーバーシュート[174, 174]について検討している[273]。

強制対流条件においても火炎が誘起する自然対流が生じる。そのような強制対流と自然対流の両方の影響を考慮した解析をおこなったのが、Maoら[177]である。境界層拡散火炎の燃焼について強制対流と自然対流の影響を $(Re_x^n + Gr_x^m)^{1/2n}$ の形で表せることを示した。強制対流と自然対流の大きさは、 $\xi = (Gr_x^m / Re_x^n)^{1/2}$ で評価した。計算の結果、水平では $n=5$ 、 $m=2$ 、垂直では $n=4$ 、 $m=2$ と表すことができ、 ξ の変化も併せて示した。この解析は、可燃性気体の発生する表面の傾きを可変することで、任意の傾きの表面に沿った熱流束を求めることができるという特徴がある。

燃え拡がりにおける気相現象把握のため、Maoら[178]は、PMMA板表面に沿った拡散火炎先端の構造を数値解析によって調べた。計算における境界条件は、等温度壁、断熱壁条件で与え、そのときの火炎先端付近の流れ、温度変化を調べ、その火炎構造の違いを議論した。解析では燃え拡がり速度を求めることに主眼を置いていないので、固相を通した熱移動の影響は重要とせず、熱移動は平板からは加熱によって可燃性気体が吹き出すことだけに寄与するものと考え、気相に

おける現象を調べた。この研究では燃え拡がりの研究との関連からおこなわれており、火炎先端付近の可燃性気体と酸化剤の拡散の様子、反応率、温度分布、濃度分布、圧力場、流れの場が視覚的に理解できるように示されている点が画期的な成果である。しかし、 Le 数を1という仮定のため、拡散が明瞭になっておらず、また、表面壁の境界条件によって火炎先端の予混合性が見られないなど、その計算における条件への依存性が強い結果となったようである。

Chaoら [179] は、自然対流下、鉛直に置かれた可燃性物質平板から火炎による加熱によって可燃性気体が水平に吹き出し、拡散火炎が形成する場合について数値解析をおこない、それぞれ可燃性気体、酸化剤のルイス数 $((\lambda/c_p)/(\rho D_j))$ を定義し、それぞれの気体の拡散の効果を調べた。その結果、火炎の形成位置は可燃性気体の方のルイス数、つまり、可燃性気体の拡散係数 D_F に依存し、その D_F が小さいときは火炎は表面近くに形成し、逆に D_F が大きいときは表面から離れて形成することを明らかにした。

TaoとKaviany [180] は、セラミック小球から構成された多孔性の板からエタノールをしみ出し、境界層拡散火炎を形成させた場合の燃焼速度を実験的、理論的に調べた。燃焼速度を得るという目的よりも、特に多孔性板から液体燃料を供給するという現象に着目し、その現象が多孔性板を構成する小球まわりの凝集力によるというモデルをたて理論式の誘導をおこなった。

小熊ら [181] は、石炭に代表される固体燃料の表面上の燃焼について、分解生成ガスによる拡散火炎が表面に付着することがなく保持される現象を、火炎先端が境界層中の速度の小さい領域で燃焼速度とつりあうという、予混合火炎モデルを用いて保炎機構を説明した。

(b) 対向流拡散火炎

対向拡散火炎については Tsuji の総説 [187] があり、その基本的な性質を知ることができるが、拡散火炎は通常、よどみ点に形成されず、流れに対して酸化剤と可燃性気体の拡散があり、化学量論位置に形成されることが知られている。この拡散火炎の形成位置について、OtsukaとNiioka [189, 223] は、衝突噴流場に形成される対向流拡散火炎を対象に酸化剤と可燃性気体の吹き出し速度、種々の可

燃性気体の形成位置の変化をよどみ点からの偏位（変位）として調べた。そして、火炎面へ流入する酸化剤の流束と可燃性気体の流束の割合が化学量論にあるという考えに基づき、噴流速度と偏位の関係を明らかにした。

Fendell [190] は、可燃性物質表面のよどみ点付近に形成する拡散火炎の着火、消炎について理論解析をおこなった。BurkeとSchumannの動力学（ダムケラ数が無限大）に基づく薄い火炎面モデルを用いた場合、酸化剤、可燃性気体、温度の分布を求めるとともに、Arrheniusの動力学に基づき化学反応の温度依存性を考慮したモデルを用い、着火・消炎に関してダムケラ数と火炎温度の関係を明らかにした。

拡散火炎に燃焼強度の概念を適用したのは Potterら [191] である。衝突噴流拡散火炎の場合について、ZeldvithやSpaldingの理論 [247] を希釈した火炎にも適用できるようにしたことが特徴の一つで、純粋な可燃性気体に窒素を添加していくことで燃焼強度が低下する様子を説明した。燃焼強度は、吹き出し速度を増加させ、中央で吹き消える時の燃焼速度を燃焼強度 $[g/cm^2 \cdot s]$ と定義した。

拡散火炎の理論解析は、BurkeとSchumannモデル [240] が知られているが、その後改良され、火炎の形成位置、火炎構造、さらに乱流拡散火炎への応用のため理論解析もおこなわれている [192-194]。

（c）単一液滴における拡散火炎

単一液滴に関する研究は、古くは熊谷 [234]、Spalding [247] が知られ、それぞれの教科書から知識を得ることができる。Kumagai [210] は、懸垂単一液滴について、対流の効果を考慮した実験をおこなった。対流の効果については、Spalding [149, 247] でも検討している。セタンを燃料に使った実験 [210] では、上方強制対流が 45 cm/s までは蒸発係数 (mm^2/s) が増加し、そこで吹き飛び、消炎することがわかった。しかし、雰囲気温度が高く、 310°C のときは、気流速が 90 cm/s まで蒸発係数はそのまま増加し、その速度を超えるとそれまでのenvelope火炎が後退し、浮き上がり（wake）火炎に移行することがわかった。浮き上がり火炎に移行すると、火炎が液滴球を取り囲んでいないので、蒸発係数は減少するが、火炎は吹き飛ばずに液滴上方に形成され、気流速 123 cm/s で吹き飛び消炎することを明らかにした。このほか、蒸発係数と懸垂材料、懸垂線径、初期液滴

直径を調べ、蒸発係数がそれらによって変化することを示した。

液滴の質量燃焼速度に関して、Fernandez-Pello [211] は、強制対流下における球状の液滴の燃焼について理論解析をおこなった。解析では、境界層近似の流れ場、定常層流拡散火炎とした火炎面近似を用いた。境界層近似をおこなったため、火炎先端が球前面から後退し浮き上がり火炎にいたる現象を調べることができないものの、Bナンバ、質量燃焼速度、気流速度を可変することで、球表面の火炎形成位置の変化を有効に評価できることを示した。ここでのBナンバの増加とは、雰囲気酸素分率の濃度増加、燃焼発熱量の増加、化学両論における必要酸素係数の減少、気化熱の増加に依る。得られた結果では、PMMAを対象に発熱量と酸素係数は常に一定として、1) 気化熱一定で、雰囲気酸素濃度を増加させたことによるBナンバの増加は、表面への熱流束の低下になり、表面での燃料濃度の増加になるということ、2) 気化熱を増加させたことによるBナンバの増加は、火炎の形成位置を表面から遠ざけること、3) 火炎の形成位置が表面に沿って下流に向い表面から遠ざかるので、表面への熱流束が小さくなり、質量燃焼速度が小さくなること、従って、Bナンバの増加とともに、表面降下速度が減少すること、などを明らかにした。その後、自然対流中でも解析をおこない [212]、グラスホフ数が浮き上がり燃焼では逆の効果を示し、質量燃焼速度が球形対称モデルにより予測されたよりも1桁大きくなることを推測した。

(d) 火炎基部、壁面消炎領域

拡散火炎の保炎機構を明らかにするために、噴流バーナ上のリムに形成される拡散火炎を用いて、浮き上がり火炎の安定性が調べられ、火炎基部の性質が調べられてきた。

Kalghatgiは [196] は、円形バーナ上に噴流拡散火炎（プロパン、メタン等）を形成し、その可燃性気体の吹き出し方向に対して水平方向から一様空気流（横風）をあてることによる火炎形成の安定性を実験的に調べた。安定曲線を得るとともに、横風の速度により吹き飛ば場合と吹き出し速度の増加により吹き飛ば場合の二つの限界速度を持つことを明らかにした。そして、[速度/バーナ径] つまり、[時間⁻¹] の次元によってプロットされた安定曲線の形状は、いづれの気体

も同様の形状をもつという興味深い結果を得、そのような次元が吹き飛びを評価する上で有効であることを示した。このような結果から、流速が大きい場合、火炎基部付近では予混合火炎の保炎機構によって保持されていることを予測した。

ScholefieldとGarside [197] は、エチレンを用いた噴流拡散火炎における吹き出し速度と火炎の安定性を調べた。その結果、レイノルズ数によって火炎が安定する領域、吹き飛び（消炎）を起こす領域、浮き上がりの領域を示した。

VanquickenborneとVan Tiggelen [198] は、メタンを用いた噴流拡散火炎の乱流領域で浮き上がる火炎は当量になる位置で安定化される実験結果をもとに、気流速度と乱流燃焼速度が平衡する位置に火炎が保持されるという仮説を立て、解析をおこなった。

ChungとLee [199] は、出口が 0.164 mm から 0.247 mm 径の微小石英管を使い、プロパン、エタン、ブタン、メタンをそれぞれ吹き出した場合に形成される噴流拡散火炎の、特に浮き上がり際の火炎基部を詳細に観測した。実験解析では、Kuoの噴流火炎に関する相似解 [243] を使い、火炎の高さ（浮き上がり高さ）をシュミット数 Sc （動粘性係数/分子拡散係数）で整理し、浮き上がり火炎は $Sc > 1$ あるいは $Sc < 0.5$ の場合に形成し、 $0.5 < Sc < 1$ では浮き上がることはなく、バーナリムから離れると浮き上がり火炎に移行せず、すぐ吹き飛び・消炎することを明らかにした。このことから、プロパンは浮き上がり火炎に移行するが、メタンは浮き上がり火炎に移行しない実験事実を説明している。また、この研究では、浮き上がり火炎基部がトリプル火炎 [171] になることに着目し、 $Sc \neq 1$ で有限の吹き出し速度までは、出口下流において吹き出し速度を一定にして得られた火炎形成位置と化学量論濃度一定にして得られた火炎位置が一致する点が存在し、その点は燃焼速度一定である予混合火炎と化学量論濃度で形成する拡散火炎が共に形成できることを明らかにした。

火炎基部の濃度については、Melvenら [202, 203] が水素火炎について、Eickhoiffら [200] が天然ガス（メタン主成分）火炎について調べ、火炎基部で既に拡散混合がおこなわれていることを示した。Takahashiら [201] は、水素拡散火炎と不活性ガスで希釈した水素拡散火炎の吹き飛び安定性を調べた。火炎基部へは酸化剤の拡散とエントレインメントのため、火炎帯に対し斜め上方に内側に流入する流れがあることに着目し、燃焼速度に基づく予混合火炎モデルを用いて、

火炎先端の保持機構を説明した。

これらのことから、噴流拡散火炎が浮き上がる場合、噴流境界上に周囲の空気との混合による予混合気が形成されるので、予混合火炎の燃焼速度の概念が適用できることがわかる。火炎基部の性質を明らかにするための数値解析もおこなわれ [204, 205]、拡散性、火炎反応帯での反応速度が議論されている。吹き飛び、消炎時の予混合火炎と拡散火炎の火炎の性質を議論をする場合、火炎が保持される反応帯では最大の反応率を持つため、特に最大燃焼強度を持つ場合の拡散火炎の性質が予混合火炎の性質に類似する [195]。従って、表面近傍に形成する火炎先端の性質を明らかにする場合には難しい点が多いようである。噴流拡散火炎の基部の性質を調べる際に難しいのは、その予混合性の程度が明確ではないため、対向流拡散火炎における吹き飛びと同一視できないことも挙げられる。

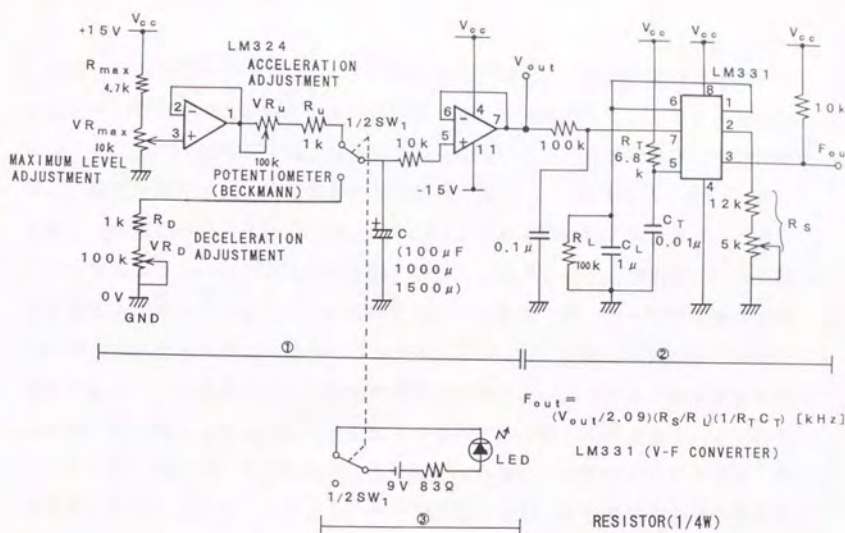
火炎が伝ばする際の表面（流路壁面）付近での消炎、火炎の形成の様子については、KarmanとMillan [206] が熱伝達方程式を使って説明した。そして、消炎距離と熱拡散/主流速度で表した特性距離が可燃性気体（メタン、プロパン、エチレン）の性質にあまり依存しないことを明らかにし、壁面付近の火炎の形状は、熱伝達に関する特性により定まるということを推測した。

すすの生成や火炎の保持という問題に関連して、壁面近傍の消炎領域の温度分布、濃度分布を調べた研究がある。Saffman [207] は、多孔質バーナに垂直に立てた壁（ついたて）付近に形成する予混合火炎とその消炎領域（層）の構造を調べるために、温度分布と化学種濃度を測定した。実験では壁の表面の影響の考慮のために冷却した銅、冷却した白金、冷却したテフロン、加熱した鉄（約 630K）を用いた。そして、消炎層の厚さは予混合火炎の当量比と壁への熱損失に強く依存し、白金やテフロン表面には強く依存しないことを明らかにした。

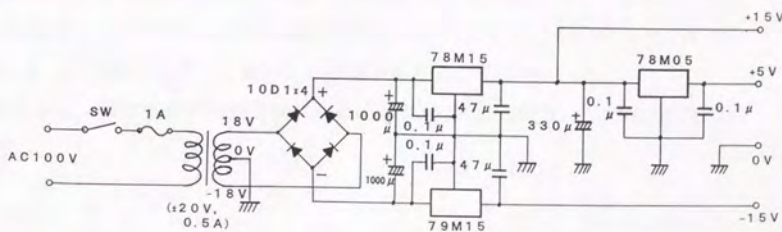
付録(2) 制御回路

本実験条件に適合する市販のコントローラがなかったため、コントローラは、いくつかの文献 [283-285, 288-292] を参考に製作した。

図(2)-1(a)と(b)は製作したコントローラ回路である。V-Fコンバータにより、時間毎の電圧変化を周波数に変換し、パルス列を発生するしくみになっている。モータの回転数(台車と可燃性物質の移動速度)は、最高速度は $V_{R_{max}}$ で変えられ、加速と減速は時定数(CR)に従い、それぞれ、Cと V_{R_H} Cと V_{R_D} により可変できるようにした。従って、実験条件にあった時定数CRを得るために、コンデンサCを適宜差し替えて使用した。



(a) Voltage - Frequency converter



(b) Power supply

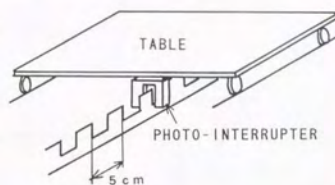
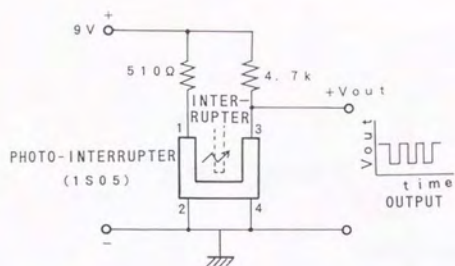
Fig.(2)-1. Pulse generation circuit for stepping motor driver.

付録(3) 移動速度の測定方法

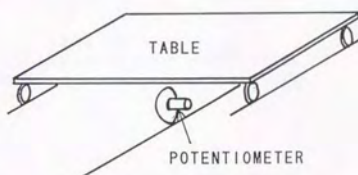
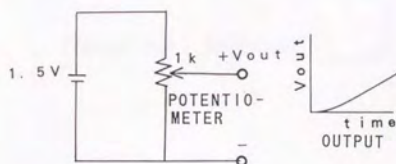
本来、コントローラ上で設定した時間毎の電圧変化は、移動速度の変化に全く対応しているはずであるが、スチールワイヤを介して牽引しているため、台車の移動とモータの回転数が完全に対応している補償はない。そこで台車(可燃性物質)の移動速度を別途、測定することにした。図(3)-1(a)と(b)はその測定方法で、通常は(a)の方法に従った。図(a)は、台車下部に取り付けたフォトインタラプタセンサと一定間隔でレール脇に設けたインタラプタ(光遮断物)から計測する方法である。つまり、一定距離ごと信号が遮断され、その時間間隔からその区間ごとの台車の速度を得るものである。図(b)は、移動し始めの短い区間の速度変化をとらえるために、円盤に取り付けたポテンシオメータ(高精度の可変抵抗器)の回転にともなう信号変化から台車の速度を得るものである。さらに図で示してはいないが、静止絶対系にある静止した物に一定距離ごとに目印をつけておき、移動する台車上のカメラからその目印を追い、その移動の程度から台車の速度を得る方法も使った。

ところで、火炎先端の観測は暗室でおこなうことになる。従って、台車上でカメラを使い火炎先端を観測していても、背景が暗いため、火炎先端に動きが見られたとしても、その状況が移動している場合なのか静止している場合なのか判別がつかない。そこで、移動開始をカメラ撮影中にわかるように、台車上に電圧変化に対応してすばやく点灯する発光ダイオード(LED)を設置し(付録の図(2)-1(a)回路③部分)、撮影中に確認できるようにした。

以上から、可燃性物質移動実験における時間経過は、図(3)-2のように整理できる。



(a) Technique using photo-interrupter



(b) Technique using potentiometer

Fig.(3)-1. Circuit for velocity measurement.

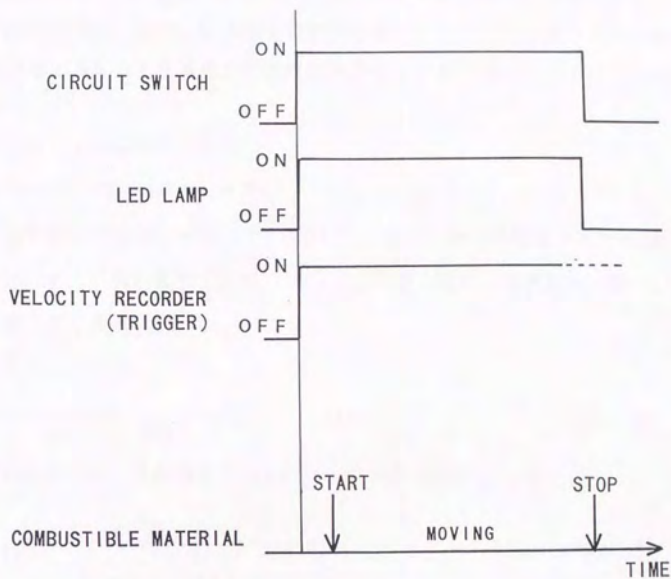


Fig.(3)-2. Time sequence during one experimental running.

付録(4) 物性値の評価法

運動方程式、エネルギー方程式および化学種の方程式を解く際に必要となる熱輸送に関わる物性値には、密度、粘性係数、熱伝導係数、比熱、拡散係数が挙げられる。これらは温度、圧力、組成などの関数であることから、計算の過程において、温度分布と濃度分布を考慮した物性値を求める必要がある [250-253, 260]。

1. 密度

状態方程式 $p v = m R T$ より、

$$p / \rho = \sum (Y_i / M_i) R T \quad (D-1)$$

ここで、全質量 $m = \sum m_i = \sum (Y_i / M_i)$ 、 R ；一般気体定数 ($R = M_i R_i$) [J/kg K]、 p ；(全) 圧力 [atm]、 Y_i ；化学種 i 成分の質量分率、 M_i ； i 成分の分子量、 T ；温度 [K]

よって、

$$\rho = \frac{p}{\sum (Y_i / M_i) R T} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (D-2)$$

数値計算では、各計算格子 (I, J) における密度 ρ_{IJ} として、

$$\rho_{IJ} = \frac{P_{IJ}}{\sum_{i=1}^n (Y_{iIJ} / M_i) R T_{IJ}} \quad (D-3)$$

2. 粘性係数

Hirshfelderらは、常圧における粘性係数 μ を、次式のように導いた。

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-3} \sqrt{(MT) / \sigma^2 \Omega_V} \quad [\text{g/cm sec}] \quad (D-4)$$

ここで、 M ；分子量、 T ；温度 [K]、 σ ；分子の衝突直径 [Å]、 Ω_V ；粘度に関する衝突積分。

Ω_V については、Neufeldらがコンピュータ計算に適用しやすい経験式を提示している。

$$\Omega_V = (A/T^*B) + (C/\exp(DT^*)) + (E/\exp(FT^*)) \quad (D-5)$$

ここで、 $T^* = T / (\epsilon / \kappa)$ ， ϵ ；分子間の最低エネルギー [erg]， κ ；ボルツマン定数 [erg/K]， $A=1.16145$ ， $B=0.14874$ ， $C=0.52487$ ， $D=0.7732$ ， $E=2.16178$ ， $F=2.43787$ 。

上式は $0.3 \leq T^* \leq 100$ で適用でき、平均誤差は 0.064% であるとされる [250]。さらに、混合気体については、Wilke の式がある。

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\{1 + \sum \phi_{ij} (Y_j/Y_i)\}} \quad (D-6)$$

を適用する。ただし、 ϕ_{ij} は、

$$\phi_{ij} = \frac{\{1 + (\mu_i/\mu_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\}^2}{2\sqrt{2} \{1 + (M_i/M_j)\}^{1/2}} \quad (D-7)$$

3. 熱伝導係数

Eucken は分子に関する熱伝達係数 λ の近似式を示した。

$$\lambda = \{C_p + (5/4) (R/M)\} \mu \quad (D-8)$$

C_p ；比熱， R ；一般気体定数， M ；分子量， μ ；粘性係数

さらに、混合気体については、

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \lambda_i}{\sum x_j \phi_{ij}} \quad (D-9)$$

4. 比熱

理想気体 i 成分のモル比熱 C_{pi} は温度のみの関数で次式のように近似的に表せる。

$$C_{pi} = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad [\text{kcal/kg mol K}] \quad (D-10)$$

比熱 c_{pi} は、

$$c_{pi} = C_{pi} / M_i \quad (D-11)$$

このとき、 i 成分のモル分率 x_i とすると、理想混合気体のモル比熱は、

$$C_{pm} = \sum_{i=0}^n (x_i C_{pi}) \quad (D-12)$$

質量分率 Y_i とすると、理想混合気体の比熱 c_{pm} は、

$$c_{pm} = \sum (Y_i c_{pi}) \quad (D-13)$$

5. 拡散係数

Hirschfelder らは、1、2 成分相互拡散係数 D_{12} を次式のように表した。

$$D_{12} = \frac{0.0026280 \sqrt{\{T^3 (M_1 + M_2) / 2 M_1 M_2\}}}{p \sigma_{12}^2 \Omega_D} \quad [\text{cm}^2/\text{s}] \quad (D-14)$$

$$\sigma_{12} = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$$

拡散に関する衝突積分 Ω_D については、粘性係数と同様に Neufeld らがコンピュータ計算に適用しやすい経験式を提示している。

$$\Omega_D = (A/T^*B) + (C/\exp(DT^*)) + (E/\exp(FT^*)) \\ + (G/\exp(HT^*)) \quad (D-15)$$

ここで、 $T^* = T / (\varepsilon_{12} / \kappa)$ 、 ε_{12} ：分子間の最低エネルギー [erg]、 κ ：ボルツマン定数 [erg/K]、 $A=1.06036$ 、 $B=0.15610$ 、 $C=0.19300$ 、 $D=0.47635$ 、 $E=1.03587$ 、 $F=1.52996$ 、 $G=1.76474$ 、 $H=3.89411$ 。

$$\varepsilon_{12} = \sqrt{(\varepsilon_1 \varepsilon_2)}$$

1 対 1 の成分ごとの系としては上式の関係により求められるが、混合気体の多成分系では拡散する成分の組合せは種々あり、単一の物性値とは異なる。このような困難さから、一つの拡散係数の値によって代表することが多い。

