

氏 名	きた の みちお 北 野 三 千 雄
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和50年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	熱・物質移動を伴う自発火の研究
指 導 教 官	東北大学教授 大塚 芳郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大塚 芳郎 東北大学教授 弓削 達雄 東北大学教授 武山 斌郎 東北大学教授 大谷 茂盛

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

適当な割合で混合された燃料及び酸化剤の混合気を容器に封入し、周囲を加熱して混合気の温度を上げてゆくと或る温度で発火する。この現象を自発火といっている。自発火する限界温度を最低自発火温度、加熱し始めてから発火するまでの時間を発火遅れといい、この最低自発火温度と発火遅れの二つが自発火の基本的要素となっている。

もともと自発火という概念は均一な静止混合気について考えられたものであるのでそこには熱や物質の移動過程は含まれてはいないが、移動過程を考えてやれば流れ場における自発火を扱うことができ、本論文の第3章、第4章で同軸噴流及び対向流の二つの代表的流れ場についてこれを実験的に扱い、自発火の過程に簡単な反応モデルを仮定して得られる理論解析との定性的比較を

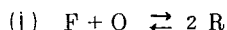
行っている。

又、一度混合気の或る部分にエネルギーを与えることによって自発火させると今度は混合気自らの発生した熱や物質を周囲に伝え次々と発火させてゆくが、この段階になるとこれは火炎伝播と云われ自発火とはこれ迄別な立場で論じられてきた。しかし本論文では両現象の発火過程には本質的な違いはないとの立場に立って第5章で火炎伝播の問題を自発火過程の反応モデルを用いて理論的に扱っている。

第2章 化学反応モデルと発火基準及び基礎式

エンジンノックや高速流れにおける火炎の安定など自発火と関係の深い現象は多く実験的にも理論的にも多くの研究が行われているが、そのほとんどが発火遅れについての研究であって最低自発火温度の理論的解析は見あたらない。これは今までの様な反応モデル、何をもって発火とみなすかの発火基準では明確な最低自発火温度が求められないためと思われる。

そこでこれを解析するために発火までの反応過程に次の様な反応モデルを仮定した。



即ち反応(i)によって燃料Fと酸素Oとから発火に最も影響を持つ何らかの中間生成物Rが生成するとする。そして更にこの中間生成物のモル濃度が或る一定値に達した時に発火すると仮定する。簡単のため、この反応による発熱はないものとする。

もちろん実際の反応過程はこの様な簡単なものではなく途中に数多くの素反応を含んだ複雑な過程であるが、均一な静止混合気と異なって流れ場においてはそれらを一つ一つ考えることは解析する上で大変困難である。従って本研究のように流れ場を扱う場合には個々の素反応は考えずに自発火の実験結果を定量的には無理としても定性的に説明し得るような簡単な反応モデルを考え出す必要があるし、又流れ場においては熱や物質の移動過程が重要な役目を果たすことは十分考えられるから、このような反応モデルでも現象を説明し得ると思われる。

採用している発火基準は今までよく用いられていた着火温度、生成速度などと同様に特に根拠のあるものではないが、現象を説明する上で都合の良い基準として用いている。

発火した後は反応(i)の他に次の発熱反応(ii), (iii)



が並行して起ると仮定した。Pは最終生成物で、中間生成物R, R'は連鎖担体としての役目を果たす。

仮定した反応モデル及び発火基準の他に本章では解析する際に用いた仮定とそれらの仮定の下における保存方程式の一般形及び計算に用いた値について示した。

第3章 同軸噴流における自発火

この種の実験についてはB.P.Mullins が空気過剰な予混合気を一度燃焼させて作った高温空気を使うことによって自発火（特に発火遅れ）に及ぼす燃料の種類、噴霧粒径、圧力、添加剤等の影響を広範囲に調べている。しかし使用している高温空気がいわば“よごれた空気”であるし流れもかなりの乱流であるので実用上の燃焼状態に近い条件下での実験ではあるが、移動論的に発火までの過程を研究するにはもっと扱い易い条件を作り出せる装置での実験が必要である。

本章の実験で使った装置はそれらの点を考慮して設計したものであって、電氣的に加熱された高温空気流中にそれと同温度の燃料（水素）を同軸層流噴流の形で噴出させて流れに安定した自発火炎をつくり、最低自発火温度と見かけの発火遅れ（燃料管ポートから肉眼で観察される火炎先端までの距離を平均噴出流速で割った値）の二点からこれらに及ぼす燃料管径及び濃度、噴出温度及び速度等の影響を実験的に明らかにした。その結果次のことがわかった。

最低自発火温度は

- (1) 燃料と空気のごく狭い混合領域によって決定され燃料管径が細くなると急激に上昇する。
- (2) 噴出速度には余り影響されない。
- (3) 空気に対する燃料の噴出速度の比を下げてくると上昇する。
- (4) 窒素で希釈して水素濃度を下げると上昇するがその影響が顕著になるのは水素濃度が30%以下になってからである。

見かけの発火遅れは

- (1) 余り燃料管径に影響されない。
- (2) 実験範囲内では噴出速度に対して余り依存しない。このことから流れに安定している火炎は、下流からの熱や物質の上流への伝達が支配的な通常の伝播炎とは異なり未燃流体要素の連続的な自発火によって形成されていると考えられる。
- (3) 窒素で希釈し水素濃度を下げると増大するが求められる見かけの活性化エネルギーの値は変らない。

又第2章の反応モデルに基づいて境界層近似を行った保存式を差分で表わして数値的に解析し実験と定性的に一致する結果を得た。更に発火後についても計算を行い、

- (1) 発火面の継面形状が、噴出温度が高い場合にはW字形に、低い場合にはU字形になる。
- (2) 噴出温度が高い場合には、最初に発火する点近くでは燃料と酸素はお互いに予混合された状態であるが、下流の発熱速度の大きくなった所では燃料と酸素は最高温度点付近で分けられており拡散炎の状態になっている。噴出温度が低い場合にはいたるところで予混合の状態である。

等の結果を得た。

第4章 対向流における自発火

乱流は微視的に見ると伸長運動と回転運動の重なったものとみなすことができるから、対向流等によって作られる伸長する流れ場における自発火や火炎の挙動の詳細な研究は乱流炎の微視的構造の解明につながるものであり、実用上の火炎の多くが乱流炎であることを考えれば重要な問題である。

第3章においては速度勾配のない(伸長しない)流れ場における自発火の問題を扱ったが、本章では燃料流及び空気流を衝突させて伸長する流れ場をつくり、そこでの自発火の問題を最低自発火温度の面から扱い噴出速度、燃料濃度等の影響を実験的・理論的に調べた。

実験は燃料として水素を使った。燃料は常温のまま、空気は1KWのニクロム線ヒーターを内蔵した加燃管を通すことによって加熱され夫々直径4mm、10mmのノズルより流出するが、ノズル周辺低速部での発火をおさえるために燃料流は直径10mmのノズルから噴出する窒素流でシールドした。又衝突面を対向している二つのノズルの中間付近に作るため水素と空気のノズル出口中央部における運動量がほぼ等しくなるように流量調整をしたが、温度及び速度境界層の発達によって実際の流速は流量と断面積とから計算される平均流速とはかなり差があるので、予めいろいろな条件下で両流速の関係を求めておく必要があった。ノズル間隔が約8mm以下であれば間隔の最低自発火温度への影響がなかったので約5~6mmにして実験を行った。実験の結果次のことがわかった。

- (1) 最低自発火温度は噴出速度(伸長率)を増大すると上昇し減少させると低下するが、速度が或る程度以下になると一定温度に漸近する。
- (2) 水素と空気とが同温度で噴出する同軸噴流の燃料管径が十分太い時の最低自発火温度と比較すると幾分(約40度)高くなるだけで、水素の予熱の程度は余り最低自発火温度に影響しない。
- (3) 低温側の水素に空気を添加してゆくと、最低自発火温度は或る混合比のところで最小値を示すようなことはなく単調に上昇しており、加えた空気は窒素と同様に燃料を稀釈する役目しか果たさない。

又第2章の反応モデルを用い、境界層近似を行った保存式を繰返し法で数値的に解き実験と定性的に一致する結果を得た。

第5章 高温一次元流における伝播炎

一次元流予混合炎の研究はこれが一般の予混合炎タイプの燃焼の基本となっているので実験面ばかりでなく理論的解析も多く行なわれているが、自発火と関連させて解析しているものは余りない。

本章は第2章で示した反応モデル及び発火基準を使って上流に流れと平行な方向の熱損失を伴う一次元流炎を解析したものであるが、これまでの解析と異なる点は静止混合気における自発火を基礎とした反応モデル及び発火基準を流れ系に応用しているのもので、今まで様々な立場で論じられてきた自発火と火炎伝播とを比較して考えられる点である。

一次元流炎の解析法には大別して二つあり、一つは非定常方程式から出発して定常解を得る方法と、もう一つは定常火炎に対する保存方程式を二点境界値問題として解く方法であるが、本章で扱うような熱損失を伴う場合には前者の方法は使えない。後者の場合には方程式が“stiff equation”となるので計算が大変厄介であるが、本計算ではE.S.Campbellの方法を用いることによってこの問題を解決した。

理論解析の結果

- (1) 静止混合気における最低自発火温度及び自発火限界と流れ場における発火温度及び可燃限界とを比較して考えることができ、流れ場においては下流高温部からの活性基の拡散によって静止混合気の最低自発火温度以下であっても発火したり、自発火限界外の混合気組成であっても安定な伝播炎が形成されるなどのことが明らかになった。
- (2) 燃焼速度と熱損失、混合比、初期温度、燃焼温度などの関係が求められ、熱損失を伴わなくても可燃限界が存在するとか、燃焼速度は燃焼温度が最大となる理論混合比よりも幾分richな混合比で最大となるといったこれまでの熱理論では求められない結果を得た。

第6章 結 論

結論として本論文を要約し第3章から第5章までの研究成果について総括した。

本研究に対して常に懇切なる御指導を賜りました大塚芳郎教授に深く感謝の意を表します。

審 査 結 果 の 要 旨

内燃機関における着火、火炎伝播、ノック、火炎安定などの燃焼現象に共通する基本的過程は自発火である。従来行われた自発火の研究は、ガス体燃料の乱流噴流、密閉容器内の攪拌流、噴霧流などの、移動過程が明確でない流れ系における自発火を対象としたために、自発火現象の鮮明な理解を得るに至っていない。本論文は、移動過程の明確な流れ系について自発火の研究を行ったもので、6章よりなる。

第1章では、既存研究を概括し、本研究の立場と目的を述べている。

第2章では、2種の間媒体を含む3個の素反応からなる反応モデル、および第2、3反応を誘発する第1反応の生成する中間体の基準濃度を仮定することを提案し、最低自発火温度の導入に関して、従来多く用いられた基準温度の代わりに、中間体の基準濃度を仮定することの妥当性を述べている。

第3章は、同温度の水素と空気同軸層流の自発火を扱ったもので、最低自発火温度と燃料管直径の関係、最低自発火温度と発火おくれ時間に対する水素濃度の影響および流速依存性など、同軸層流における自発火に対する移動過程の作用を実験的に解明するとともに、第2章の反応モデルと基準濃度の仮定を考慮した解析を行って、実験結果と定性的に一致する結果を得ている。

第4章は、低温の水素対高温の空気の対向層流における自発火を扱ったもので、最低自発火温度に対する流速および水素濃度の影響を測定し、水素濃度に無関係に、流速が大なるほど最低自発火温度が上昇することを見出している。これは、自発火に対する伸長流の作用として、注目すべき結果である。この作用は、伸長による中間体の蓄積の阻害に起因する自発火性の劣化であることを指摘している。

第5章では、可燃性混合気の高温1次元流に生ずる1次元予混合炎を扱っている。第3、4章の拡散型自発火炎と共通の反応モデルを用いて、予混合炎の燃焼特性を説明することを試みたものである。可燃限界、燃焼速度および発火点温度に関しては、水素-酸素-窒素系予混合炎の実験値と定性的に一致する結果を得ている。最低自発火温度以上の温度範囲で、断熱予混合炎と均質反応の可燃限界の不一致を見出しているが、この結果は、内燃機関の自発火現象の解明に示唆を与えるものとして貴重である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、移動過程の明確な3種の流れ系における自発火の理論的・実験的研究によって、自発火に対する熱・物質移動過程の作用に関し、多くの知見を加えたもので、燃焼工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。