

## 論文の内容の要旨

氏名：菅沼祐介

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：燃料噴霧を単純化した液滴列を用いた火炎燃え広がりに関する実験的研究

液体燃料を霧化して燃焼させる噴霧燃焼は、ボイラや炉をはじめ、ディーゼル機関や液体ロケット機関、ガスタービンなどの燃焼器に広く用いられている燃焼方式である。一方で、その燃焼機構は非常に複雑であり、燃料微粒子、燃料蒸気および空気からなる極めて不均一な系で起こる現象である。噴霧燃焼を支配する重要な因子として、液滴直径や燃料組成、温度、ガス組成、圧力、液滴と周囲気体の相対運動などが挙げられる。また、蒸発・拡散・混合、それによって生じた混合気の燃焼が同時に進行し、かつ相互に影響を及ぼしあうため、燃焼現象を直接解析することは非常に困難であり、現在においても燃焼メカニズムの完全な解明には至っていない。したがって、従来それぞれの燃焼機器について個別に研究されることが多く、噴霧燃焼の一般的特性が把握されていないのが現状である。噴霧燃焼の機構解明のアプローチとして、二つの極端なモデルが考えられる。噴霧中の液滴の気化が極めて速やかで、かつ燃焼過程が比較的ゆっくり進行するような場合には、液滴の蒸発後に燃焼が開始すると考えられ、バーナ拡散火炎の燃焼に近いものとなり、数多くの研究が行われている。これとは逆に、噴霧中の液滴が比較的大きく、燃焼過程が比較的速みやかに進行する場合には、燃焼末期まで液相の粒子が残存して蒸発過程と燃焼過程とが平行して進行する状態になり、液滴の蒸発速度がその燃焼速度を律する要因になると考えられる。この考えに基づき、噴霧燃焼の最小構成単位である単一燃料液滴を利用して液滴燃焼の研究が行なわれてきた。噴霧燃焼の基部にて生じる燃料液滴群の燃焼は火炎の安定性に重要な役割を果たすと考えられている。噴霧燃焼の群燃焼メカニズムは実験、数値解析、仮説の提案などによって検討が行われているが、未だ詳細な把握には至っていない。そのため、実機の数値解析において噴霧液滴は単純化あるいはある仮説に基づき計算モデルを構築している。より高精度で計算負荷の小さな計算モデルを構築するためには、燃料液滴の群燃焼発現メカニズムを明らかにする必要がある。群燃焼メカニズムについて種々のアプローチで燃焼研究が行われており、直線状に配置した燃料液滴列モデルを用いた研究もその一つである。本論文では燃料噴霧を単純化した燃料液滴列を用いて火炎燃え広がり実験を実施した。実験では液滴間隔、液滴直径、周囲の燃料蒸気 - 空気予混合気の当量比、雰囲気圧力を変えた。実験パラメータが火炎の燃え広がり挙動、火炎の燃え広がり速度および火炎直径に及ぼす影響について調べた。また、液滴間の燃え広がりに関する時間（燃え広がり誘導時間）について考察し、現象を支配する特性時間を明らかにした。また、実験結果を基にして実験モデル式の構築をした。

本論文は全 8 章から構成される。

第 1 章では噴霧燃焼に着目し本研究を行うにあたっての背景、噴霧燃焼における液滴燃焼の重要性と課題、過去に行われた研究について述べ、本論文の位置付けについて述べた。

第 2 章では、第 3 章から第 6 章で用いた液滴列燃焼実験の実験装置、微小重力実験を実施するための落下塔の詳細について示した。

第 3 章では、液滴列の周囲を液滴と同一の燃料の蒸気で満たし燃え広がり実験について示した。噴霧燃焼において、液滴は蒸発が進み、周囲に混合気が形成された状態で燃焼していると考えられる。そこで、燃料液滴の周囲を予混合気で満たして実験を行うことで、予混合気と液滴の干渉や予混合気の当量比が液滴列燃焼に及ぼす影響を調べた。第 3 章では、通常重力実験の結果を示した。通常重力環境では、燃え広がりにおいて自然対流が誘起され、実機と同様の現象を観察することはできない。そこで、予混合火炎伝播と液滴の干渉について考察を行った。揮発性の異なる 2 種類の燃料を用いることで、予混合火炎と液滴の干渉の度合いを考察した。揮発性が低い燃料の場合は、予混合火炎と液滴は干渉することはなかった。一方、揮発性の高い燃料を用いた場合、進行する予混合火炎に液滴から燃料蒸気が供給され、火炎伝播速度が変化することが分かった。この結果は、他研究者が実施した部分予蒸発噴霧の結果と定性的に同一の結果が得られており、噴霧と液滴列燃焼実験をつなげる重要な知見が得られた。

第4章では、第3章と同じく液滴列の周囲を液滴と同一の燃料の蒸気で満たした火炎燃え広がり実験を微小重力環境で実施した結果を示した。燃料蒸気 - 空気予混合気が液滴列に沿った火炎燃え広がりに及ぼす影響を考察した。気体当量比の増大に伴って、すべての無次元液滴間隔で燃え広がり速度は増大する。これは、気体当量比の増大により液滴の周囲に可燃性混合気が形成されるまでの時間（初期加熱時間）が減少するためと考えられる。また、気体当量比の増大に伴い発熱量が増大したことで熱的干渉距離が増大したことも一つの要因であると推定される。

第5章では、雰囲気圧力を変えて液滴列の火炎燃え広がり実験を行った結果を示した。実機では高圧環境で燃焼しているケースが多い。そこで雰囲気圧力が燃え広がりに及ぼす影響を調べるため、加圧環境に液滴列を挿入して液滴列燃焼実験を微小重力環境で実施した。雰囲気圧力の増大に伴って、すべての無次元液滴間隔で燃え広がり速度は減少する。これは、圧力の増大により密度が増大し熱伝導が抑制されたこと、および燃料の沸点が増大したことで可燃性混合気の形成までの時間が増大したことによると考えられる。無次元液滴間隔の増大に伴い燃え広がり速度の圧力依存度は増大した。燃え広がりを支配する特性時間の割合は無次元液滴間隔により異なる。無次元液滴間隔が広い場合は圧力依存性の高い高温域の熱伝導が支配的となるため、前述傾向が表れたと考えられる。圧力依存度は燃え広がりモードによって大きくグループ分けできる結果が得られた。これも燃え広がりモードにより燃え広がりを支配する特性時間の割合が大きく異なることが要因と考えられる。

第6章では、初期液滴直径を変えて液滴列の火炎燃え広がり実験を行った結果を示した。これまでの研究では、実機の燃焼器内の液滴直径に比べて粗大な液滴を用いて実験が行われてきた。これは、現象の空間的、時間的分解能を上げるためである。液滴直径が異なる場合でも、初期液滴直径で正規化することで実験により得られた結果から実機での液滴サイズの現象を推定としてきた。しかしながら、液滴直径を小さくすると相似則が成立しないことが指摘されていた。そこで、燃え広がりにおける初期液滴直径依存性について考察を行った。初期液滴直径を変えて燃え広がり実験を行った結果、燃え広がり誘導時間が約 20 ms を下回る条件では、相似則が成立しなかった。粗大な液滴の場合は、火炎から得未燃液滴への熱の移動および液滴の初期加熱時間にのみ着目してきたが、液滴直径が小さくなり現象が高速になると化学反応の時間を無視できなくなると考えられる。初期液滴直径の増大に伴って初期火炎直径比は減少した。無次元液滴間隔が広い条件では、高温域の熱伝導や液滴の初期加熱が燃え広がり誘導時間対して支配的であるため、火炎燃え広がりにおける初期液滴直径の相似則が成立するが、無次元液滴間隔が狭い条件では、燃え広がり誘導時間に占める相似則が当てはまらない燃料蒸気の拡散時間の割合が増えたことが、燃え広がりの相似則が成立しない要因の一つであると考えられる。

第7章では、第3章～第6章の総合考察を示した。本論文の実験装置の燃焼容器は、液滴列の実験結果を3次元の液滴列マトリックスに拡張して議論できるように工夫されている。第4章の実験結果から群燃焼について考察を行った。自然対流が無視できる条件においては、大気圧の燃料蒸気-空気予混合気中に単純立方格子状に配置された正デカン液滴マトリックスの外縁の液滴が同時に点火した場合、気体当量比が火炎伝播限界以上の条件では気相火炎伝播が起こり、火炎はマトリックス中心まで進行するが、気体当量比が火炎伝播限界以下の条件では、液滴を伝っての火炎燃え広がりはマトリックス内部に進行しないことが示唆された。これまで、液滴列の実験結果を噴霧に拡張して議論した論文は数少なく、本論文により新たな知見が得られた。第5章で得られた結果を基にモデル式を構築した。無次元液滴間隔と圧力依存性の関係から実験モデル式を構築し、大気圧の燃え広がり速度を用いて、加圧雰囲気の燃え広がり速度を表すことができた。この実験式を発展させて、ベースとなる実験結果を用いずに、燃え広がり速度を算出する実験モデル式を構築した。雰囲気圧力依存性については良好な一致を示す結果を得た。初期液滴直径依存性については、本論文で実施した範囲ではフィッティングパラメータを液滴直径ごとに調整することで、実験結果と良好な一致を示した。ただし、この実験モデル式で実機の噴霧サイズの現象を表すことはできなかった。また、気体当量比依存性についても、前述の2条件よりも実験結果と実験モデル式の値に差が生じた。これは、第4章で考察したとおり気体当量比の増大に伴う発熱量の増大が影響していると考えられる。この要因により差が生じたと考えられる。実験モデル式から、各実験条件における燃え広がり誘導時間に示す各特性時間の支配割合について、定量的に示した。

第8章では、本論文によって得られた知見を結論と、今後の課題について示した。