

論文の内容の要旨

論文題目 A Study of Spontaneous Ignition Process of a Multicomponent Fuel Droplet
多成分燃料液滴の自発点火過程に関する研究

氏名 森上修

多くの燃焼機関において燃焼は噴霧燃焼の形態を取っており、単一燃料液滴に関する研究はその基礎的なモデルとして有用である。特に点火遅れの制御、逆火の阻止には点火に関する研究が必要である。原油の主成分であるアルカン燃料については、比較的炎温度の低い冷炎の発生の後、ある程度の遅れをおいて熱炎が発生するという二段点火現象が観測される。これは冷炎を発生する低温反応がある温度を超えると抑制されるためである。この現象は過度に簡略化された反応モデルでは再現されず、点火過程の的確な記述には燃料の反応特性に留意する必要がある。また、原油から蒸留される実用燃料は多成分からなる燃料であり、その点火特性の把握には燃料中の反応性および揮発性の違いに着目する必要がある。特に、多成分燃料の特性を把握するため二成分燃料液滴に関する研究が多く行われているが、それらは燃料の揮発性の違いにのみ着目した研究がほとんどであり、反応性の違いに着目した研究は少ない。

以上のような背景から本論文では様々な燃料液滴の二段点火特性を実験的に調べ、冷炎および熱炎の点火遅れという観点から評価・検討する。まず、一成分燃料液滴について、燃料の揮発性および反応性の点火に及ぼす影響を調べる。正デカン、正ドデカン、正テトラデカン、正ヘキサデカンという4つの正アルカン、および1-メチルナフタレン、1,2,4-トリメチルベンゼンという2つの芳香族について調べられる。次に、反応性の大きく異なる成分からなる二成分燃料液滴について各成分の揮発性、および混合割合が点火に及ぼす影響を調べる。正デカン/1-メチルナフタレン、および正デカン/1,2,4-トリメチルベンゼンが二成分燃料として用いられる。最後に、実用燃料として多成分燃料のケロシン JET A-1 液滴の点火を調べ、実用的な観点から、成分の簡略なモデル燃料でその点火特性を再現する可能性を検討する。また、実験で見られる現象の把握、およびモデル燃料の将来的な数値計算への利用のために、二成分燃料液滴の自発点火を模擬する数値計算を行っている。

液滴の点火は高圧容器の中で行われる。室温に保たれた高圧容器下部にて、水平に保持された懸垂線の先端に液滴は形成される。この液滴は高圧容器上部の電気炉内に挿入され、自発点火する。点火の様子は観測窓を通してマイケルソン干渉計にて観測される。この観測により、熱炎の発生はもとより発光をほとんど伴わない冷炎の発生の検知が可能となり、予混合気点火における定義に倣って、冷炎の点火遅れとして第一誘導期間、熱炎の点火遅

れとして総誘導期間，それらの差として第二誘導期間が計測される．液滴径は約 0.7mm に固定される．雰囲気は空気である．雰囲気温度が 500K より 1000K まで，雰囲気圧力が 0.1MPa より 2.0MPa まで，さらに燃料性状が変化される．これらの条件への各誘導期間の依存性が検討される．

数値計算モデルは，一次元，非定常モデルである．液滴蒸発モデルは田辺の一成分燃料液滴の蒸発モデルを元に，液相を二成分に拡張し，気液界面では 2 種類の燃料および空気の 3 成分について平衡が計算される．化学種保存，エネルギー保存式を元に各成分の質量分率および温度分布の時間履歴が求められる．基礎方程式の時間微分項は陰解法により，空間微分項は差分法により展開される．液相，気相の物性値（拡散係数，熱伝導率，熱容量，エンタルピー）は温度，圧力依存とされる．反応モデルは，二段点火を的確に再現するものとして Bikas と Peters の正デカンの反応モデルが用いられる．

まず正アルカンの代表として，正デカン液滴の点火の形態（点火なし，冷炎のみ，二段点火，熱炎のみ），各誘導期間の雰囲気温度，圧力依存性が検討される．冷炎と熱炎には発生下限温度が存在し，冷炎には発生上限温度が存在する．冷炎の発生下限温度の雰囲気圧力依存性は低く，これは低温反応の圧力依存性は低い，という特性によると思われる．冷炎の発生上限温度は雰囲気圧力の上昇とともに増加し，これは低温反応が抑制される温度の圧力依存性による．熱炎の発生下限温度は雰囲気圧力の上昇とともに減少し，やがて冷炎の発生下限温度と一致する．

第一誘導期間は液滴の初期加熱期間および冷炎を発生する低温反応が活性化されるのに要する時間である．よって，燃料の揮発性および低温反応の特性に依存する．第二誘導期間はある程度燃料蒸気層の発達し冷炎の発生した後熱炎の発生に要する時間であり，燃料の化学的特性に主に依存する．すなわち，熱炎を発生する高温反応の特性および第二誘導期間計測開始時の雰囲気条件（冷炎の達成する温度）に依存する．雰囲気温度が比較的高く熱炎のみの発生の場合，総誘導期間は初期加熱期間および熱炎を発生する高温反応が活性化されるのに要する時間である．よって，燃料の揮発性および高温反応の特性に依存する．液滴において第一誘導期間は雰囲気温度の増加とともに単調に減少する．第二誘導期間は増加して極値を取った後減少する．総誘導期間は単調に減少する．数値計算モデルは正デカンの各誘導期間を定量的に再現できていない．また，計算では，雰囲気温度の増加に伴う第二誘導期間の増加が急激なことから第一誘導期間の減少が緩やかなことから，総誘導期間の増加する極狭い雰囲気温度領域が存在する．これは実験結果と定性的に一致しない．反応モデルは無次元での計算では予混合気の自発点火実験と定性，定量的に良い一致を示しているが，液滴蒸発モデルとの組み合わせの際にはさらなる吟味を必要とされると思われる．

4 つの正アルカン液滴の点火は 0.3, 0.5, 1.0MPa において比較される．これらについては第一誘導期間と総誘導期間に大きな違いが見られる．すなわち，揮発性の低いものほどこれらの誘導期間が長い．これは，揮発性の低下に伴い液滴の初期加熱期間が増加すること

による。(沸点:正デカン 447.3K, 正ドデカン 489.5K, 正テトラデカン 526.7K, 正ヘキサデカン 560K) 一方, 第二誘導期間は4つの正アルカンではほぼ一致する. このことから, 正アルカンは非常に似た反応特性を持ち, その点火特性の違いは主に揮発性の違いによることが分かる. また, これら正アルカンの冷炎および熱炎の発生下限温度は非常に近い値となる. 数値計算は, 冷炎の発生下限温度は燃料の物理的性質よりも主に化学的性質に依存することを示し, このことから正アルカンの反応特性が似ていることが分かる. 2つの芳香族液滴は二段点火特性を示さず, また, その総誘導期間は正アルカンに比べて非常に長い. 数値計算モデルに一段総括反応を適用して反応速度定数を見積もると, 芳香族のそれは正デカンのその約100分の1であり, 芳香族の反応性が正アルカンに比べ非常に低いことが分かる.

正デカン/1-メチルナフタレン液滴および正デカン/1,2,4-トリメチルベンゼン液滴は反応性の非常に異なる燃料の組み合わせであり, 点火は主に正デカンによって導かれると思われる. 1-メチルナフタレンの揮発性は正デカンよりも低く, 1,2,4-トリメチルベンゼンのそれは正デカンとほぼ等しい.(沸点:1-メチルナフタレン 517.9K, 1,2,4-トリメチルベンゼン 442.5K) 0.3, 1.0MPaにおいて, いくつかの混合割合について両二成分燃料の誘導期間が計測される. 両二成分燃料において, 芳香族の添加量が多いほど各誘導期間は単調に増加するが, その影響は1-メチルナフタレンの方が小さい. これは両二成分燃料における正デカンの蒸発速度の違いによる. 両二成分燃料を比較して, 正デカンの初期モル分率が等しい場合でも, 正デカン/1-メチルナフタレン液滴の方が蒸発の初期段階において正デカンの蒸発速度が速いことが数値計算により示される. これは, 1-メチルナフタレンの揮発性が低いために液滴からは主に正デカンが蒸発し, その結果液滴表面温度が速く上昇することによる. また, 正デカン/1,2,4-トリメチルベンゼン液滴においては点火にほとんど貢献しないと思われる芳香族がより多く蒸発し, その結果, より大きなステファン流および反応域での熱容量のため点火により不利になる. また, 正デカン一成分燃料について冷炎の発生下限温度が熱炎の発生下限温度より低い0.3MPaでは, 二段点火が見られる雰囲気温度領域において, 冷炎の発生下限正デカン分率が熱炎の発生下限正デカン分率より低い. これは正アルカンの予混合気の点火において見られている, 燃料濃度の第一誘導期間への影響は小さい, という特性によると思われる.

二成分燃料液滴の点火において, 各成分の蒸発速度は液滴表面におけるその成分の液相での濃度に依存するため, 液滴内部の対流による物質移動の促進は, 各誘導期間を左右する要因となると考えられる. この液滴内部の物質移動を実験において観測するのは非常に困難であるため, 数値計算によりその影響が確認された. 数値計算モデルは次元であるため, 対流を表現できない. よって, 拡散係数に適切な乗数を掛けることによって, 対流により物質移動が促進された状態を模擬した. 通常の拡散のモデルと拡散がほぼ無限大の速さで行われるモデルを比較したところ, 正デカン/1-メチルナフタレン液滴では液滴内の物質移動の促進は各誘導期間を短くすることが分かった. これは, 通常の拡散のモデル

では、点火を担う成分である正デカンの蒸発に伴い液相中液滴表面近傍での正デカンの濃度が減少するが、その減少に液滴内部からの正デカンの供給が間に合わないためである。実験結果と計算結果を定性的に比較したところ、液滴内の物質移動はある程度促進されていることが推測されるが、どの程度であるかの見積もりは出来ない。一方、正デカン/1,2,4-トリメチルベンゼン液滴では液滴内の物質移動の促進は誘導期間に影響をほぼ及ぼさない。これは、両成分の揮発性がほぼ等しく、よって液滴内の成分比はほぼ一定に保たれるからである。

ケロシン JET A-1 液滴の点火特性について、冷炎の発生下限温度の雰囲気圧力依存性が低い、冷炎の発生上限温度が雰囲気圧力の上昇に伴い増加する、という点は正アルカンと定性的に一致している。しかしながら、冷炎、熱炎の発生下限温度は正アルカンに比べ高い。また、第二誘導期間は正アルカンに比べ長い。これらのことから、ケロシン JET A-1 の二段点火挙動は正アルカン一成分燃料では的確に再現できないことが分かる。冷炎、熱炎の発生下限温度の上昇、第二誘導期間の増加は正デカンへの芳香族の添加において見られた現象であり、適当な燃料の組み合わせおよび混合割合の正アルカン/芳香族二成分燃料を選択することにより、ケロシン JET A-1 の各誘導期間を再現することが試みられた。この結果、60%正デカン/40%1,2,4-トリメチルベンゼンがそれ満たすことが分かり、複雑な組成の実用燃料の点火挙動が二成分燃料で再現される可能性が示された。

以上、本論文では、基礎的観点から、単一燃料液滴の二段点火に及ぼす燃料性状の影響について調べている。また、実用的観点から、実用多成分燃料の点火挙動を点火遅れの観点から再現する二成分モデル燃料の選定方法を提案している。これらにより、様々な燃料液滴の点火挙動が広範囲な雰囲気温度、圧力下において把握され、また、実用液体燃料を数値計算に用いる場合簡略な燃料で置き換えられる可能性が示される。