

論文の内容の要旨

論文題目

エンジン内のガソリンの蒸発および燃焼におよぼす燃料組成の影響

氏名 尾山宏次

1. 緒論

石油の主要製品である自動車ガソリンは、製油所内の蒸留装置、改質装置、接触分解装置などの各種装置からの中間製品(基材)を混合することで製造しており、炭素数で4~10程度の炭化水素化合物を主成分とした混合物である。製油所の石油製品は連産品であり、独立的に製造することができないため、今後予想されている日本での重油比率低下などの石油製品需要の構成変化への対応策として、基材の選択肢が多く製造方法の自由度が高いガソリンの製造方法を変更することで、石油製品の品質を保ちつつ、生産構成比を変えることが考えられている。このガソリンの製造方法変更による燃料組成の変化に加え、新しいエンジン技術の開発・導入によりガソリンに要求される特性が変わることも考えられる。このような状況下で常にガソリン品質を適正に保つためには、従来の経験則の積み重ねによる方法、すなわちガソリンの特性として蒸留性状などの燃料性状(燃料の規格試験法による計測値)を用いて、車両・エンジンによる運転性試験や排出ガス試験などの実験結果を統計解析により関係付けた結果の積み重ねのみでは迅速な対応が難しいと考えられる。一方、エンジン内では蒸発・燃焼に関する各種現象が起きており、これら現象が運転性や排出ガスのエンジン性能を決めている(図1)。

このため、エンジン内の各現象に対して、燃料組成がどのような特性を介して、どのように影響するかを理論的に明らかにすれば、今後の燃料組成の変化や要求特性の変化に対してあらかじめその影響を推定することができ、これにより迅速かつ適切な対応が可能となると考えられる。

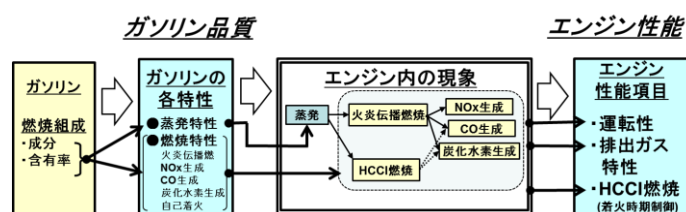


図1 ガソリン品質とエンジン性能の関係

本研究の目的は、現行の火花点火(SI)エンジン内で起こる複合的な現象を混合気形成時の蒸発、およびエンジン燃焼時の火炎伝播、NOx生成、CO生成、炭化水素(HC)生成に分け、さらに将来のエンジン燃焼技術として予混合圧縮着火燃焼(HCCI燃焼)を加えた上で、エンジン内のこれら現象におよぼす燃料組成の影響を理論的に明らかにすることにある。このため、燃料組成から導かれるガソリンの特性を用いて、各現象における動的挙動をモデル化し、実験およびシミュレーションによりそのモデルの妥当性を確認することでこれら現

象におよぼす燃料組成の影響を調べることにした。また、得られた結果を元に結論として将来のガソリンの製造方法等について望ましい方向を示す。

2. 混合気形成時の蒸発におよぼす燃料組成の影響

運転性は重要なエンジン性能の一つであり、加速時の運転性の良否は吸気ポート部でのガソリンの蒸発挙動に依存することが知られている。エンジン内では噴射されたガソリンの一部が吸気ポート部に液膜状のガソリン(壁流)として壁面に付着しており、加速でのガソリン噴射増量時にはこの壁流を経由した気筒内へのガソリンの流入に応答遅れが生じるため、運転性が悪化する(図2)。

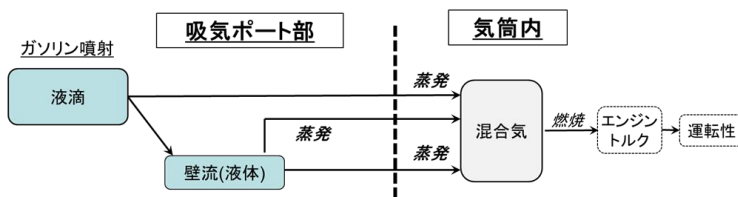
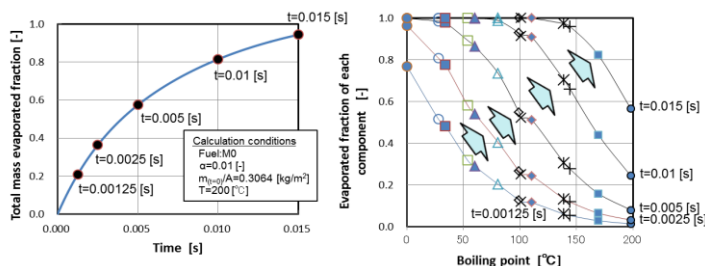


図2 加速時の運転性におよぼす壁流とガソリン蒸発の関係

特性の影響を調べるためにこの壁流量の時間変化についてモデル化を行った。またモデル化に際して、蒸留性状をガソリンの蒸発特性として用いる従来の方法ではガソリンの動的な蒸発挙動、すなわちガソリンの蒸発速度を表わすことができないため、新たな蒸発特性として燃料組成によりこの蒸発速度を表わす方法も合わせて検討した。

まずガソリンの蒸発速度を表わすために、気体分子運動論における平均分子速度に注目し、単成分の蒸発速度を飽和蒸気分圧と分子量の式で表した。この式を Raoult 則により多成分系に拡張することで、ガソリンからの各成分の蒸発速度を混合率、飽和蒸気圧、分子量で表す式を導出した。



(a)ガソリン蒸発量挙動 (b)各成分の蒸発挙動

図3 ガソリン蒸発の動的挙動

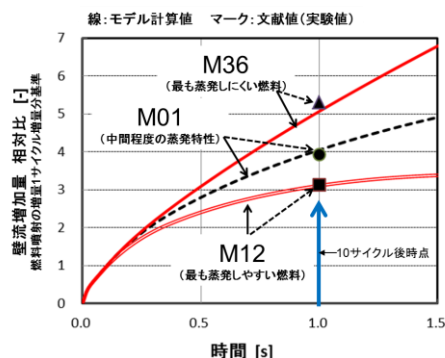


図4 壁流量の時間変化

この蒸発速度式の妥当性を確認するために、気筒内で蒸発したガソリン蒸気の組成に着目し、点火直前の気筒内混合気のサンプリングおよび組成分析を行った。この実験による混合気組成は計算値と良く一致し、導出した蒸発速度式が妥当であることを確認した。

これによりガソリンのような多成分系燃料の蒸発では、ガソリン中の蒸発速度が速い低沸点成分が先に蒸発し、時間とともに液体側の高沸点成分濃度が上昇することで高沸点成分の蒸発が促進するといった挙動をとることが分かった(図3)。

次にガソリン噴射増量時の吸気ポート部における壁流からの蒸発現象に対して、この蒸発速度式を適用することで壁流量の時間変化をモデル化した。さらに既存文献における加速 1 秒後の壁流変化量を計測したエンジン実験値が壁流モデルによる計算値と良く一致することを確認し、モデルの妥当性を示した (図 4)。

以上のことから、運転性の良否は、吸気ポート部の壁流量の時間変化に依存しており、この壁流量の時間変化はガソリンの蒸発特性、すなわち各成分の飽和蒸気圧と分子量で表されるガソリンの蒸発速度式を用いて表されることを明らかにした。また蒸発速度が遅い高沸点成分ほど壁流になりやすく、運転性を悪化させることが分かった。さらに構築した壁流モデルを用いて燃料組成の影響を調べ、これにより運転性を改善させるためには蒸発速度が遅い高沸点成分を削減することが効果的な方法であることを定量的に明らかにした。

3. 火炎伝播燃焼および NO_x、CO、HC 生成におよぼす燃料組成の影響

SI エンジン内における火炎伝播燃焼および NO_x 生成、CO 生成、HC 生成の各現象の機構およびそれらの関係について、既存の知見より図 5 の通りまとめた。この機構を踏まえて、燃料組成を変更したエ

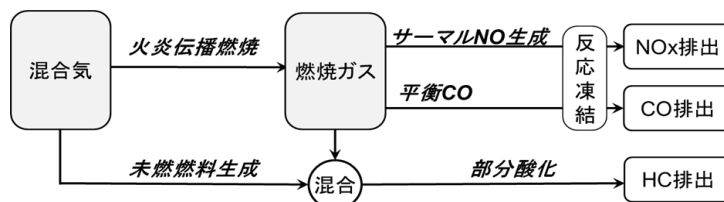


図 5 SI エンジンでの火炎伝播および排出ガス生成の関係

ンジン実験により熱発生率の挙動および NO_x、CO、HC の各排出濃度を計測し、これらの現象に燃料組成がガソリンのどの特性を介して影響しているかをシミュレーションや回帰分析により確認した。その結果、NO_x 生成は高温の燃焼ガス中のサーマル NO 生成によるものであり、ガソリンの特性として理論燃焼温度および層流燃焼速度が燃焼ガスの温度挙動を変化させることで、NO 生成量に影響することが分かった。また CO 排出量および HC 排出量については H/C 比、すなわちガソリン中の炭素含有率の違いによる影響が大きいことが分かった。なお排出ガスでは NO_x 排出の燃料組成の影響が最も大きく、この理由はサーマル NO 生成の反応機構が高い温度依存性を持つためと考えられた。また燃料組成の変更による排出ガスの低減効果は高沸点成分の削減による運転性の改善効果ほど大きくないことを明らかにした。

4. HCCI 燃焼における自己着火におよぼす燃料組成の影響

低燃費と低排気の両立が可能な HCCI 燃焼をガソリンエンジンで実用化するためには、自己着火による着火時期の制御範囲を拡大することが必要とされている。したがって図 6 に示す HCCI 燃焼における着火時期におよぼす各要因がどのように影響するかを十分に理解することが必要である。この課題に対応するために、HCCI 燃焼の着火時期を簡便に予測できる方法を確認し、その方法を用いて各要因の影響を調べることにした。まず、燃料の自己着火特性(オクタン価)およびエンジン側の制御要因(酸素分率、空気過剰率、圧力、温

度)をパラメータとして、反応速度論による自己着火の詳細反応機構を用いた数値計算により着火遅れ時間を求めた。この着火遅れ時間の結果より、各パラメータによる複数の Arrhenius 式を組み合わせた着火遅れ時間の近似式を作成した。さらにこの近似式により着火時期を推定する方法を考案した。またこの推定方法で求めた着火時期と既存文献の実験による着火時期を比較し、この推定方法の妥当性を確認した。

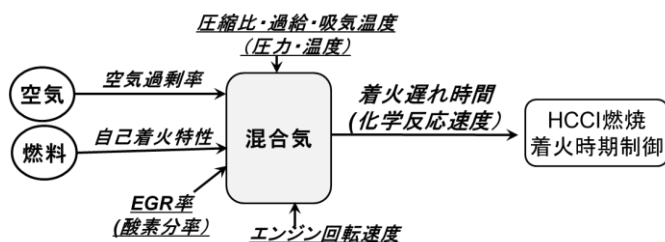


図 6 HCCI 燃焼の着火時期制御の関係

この推定方法を用いて、燃料の自己着火特性およびその他の要因の影響を解析した。その結果、燃料の自己着火特性、空気過剰率、酸素分率の条件が異なっても、圧力に対する着火遅れ時間の極小点の温度（低温酸化の反応機構から次の反応機構に切り替わる時の温度）の関係を一致させると、圧力・温度条件で決まる着火遅れ時間はほぼ同じになることを明らかにした。これによりこの低温酸化反応から次の反応に切り替わる時の圧力・温度の特性が HCCI 燃焼の着火時期を制御する上で有益な指標になる可能性を新たに見出した。

5. 結論

SI エンジン内で起こる蒸発、火炎伝播燃焼、NO_x 生成、CO 生成、HC 生成、および将来技術として HCCI 燃焼の 6 つの現象において、燃料組成がガソリンの各特性を介して、どのように影響するかを実験とシミュレーションにより明らかにした。これにより燃料組成が変化した場合に、各現象におよぼす影響を定量的に推定することを可能にした。その結果、燃料組成の変更による運転性への改善効果はいずれの排出ガスへの改善効果よりも大きく、高沸点成分の削減により蒸発特性の改善を狙うことが効果的なガソリンの品質改善策であることが分かった。これはガソリンの蒸発は低沸点成分より先に蒸発し、高沸点成分ほど壁流になりやすいことによる。本研究ではガソリンの蒸発速度式を導出し、その式を用いて燃料組成の変更による運転性改善の効果を定量化できるモデルを構築することで、動的な蒸発挙動における燃料組成の影響を初めて理論的に明らかにすることができた。

本研究の結論として、将来におけるガソリンの製造方法について、芳香族化合物を多く含む接触改質ガソリン基材の高沸点成分をなるべく削減し、不足するオクタン価を接触分解ガソリン基材の軽質なオレフィン分の増量で補うことが望ましい方法であることを示した。