

# 博士論文（要約）

## MPS 法における自動車エンジンの 燃料挙動解析のための キャビテーションモデルの研究

A cavitation model for analyzing the fuel behavior of automobile  
engines in Moving Particle Semi-implicit method

関根 章裕

## 論文の内容の要約

論文題目      MPS法における自動車エンジンの燃料挙動解析  
                    のためのキャビテーションモデルの研究  
                    A cavitation model for analyzing the fuel behavior of  
                    automobile engines in Moving Particle Semi-implicit method

氏      名      関根   章裕

キャビテーションは沸騰と同様、液体が気体へ相変化する現象である。ただし、沸騰が液体の温度上昇によって生じるのに対して、キャビテーションは流速の増加に伴う流れ場の圧力低下によって生じるという点が異なる。例えば、ポンプやプロペラ、スクリーなどに代表される流体機械や水中推進機構において、キャビテーションはその性能を劣化させるだけでなく、発生し成長した気泡がより圧力の高いところへ流入することで瞬間的に崩壊して高い衝撃圧を生じ、騒音や振動、固体表面の壊食といった問題を引き起こす。しかし、キャビテーションにはこういったマイナス面がある一方で、キャビテーションを意図的に生じさせることによってこれを利用しようとする試み多くある。キャビテーションを有効利用する応用先には、洗浄、加工、医療などが例として挙げられるが、本研究は自動車用燃料インジェクタに注目している。

従来、ガソリンエンジンの燃料インジェクタはポート噴射方式が一般的であった。しかし、今日では圧縮比を高くすることができることなどから、燃費をより向上させることが可能となる直噴方式が広く使用されるようになってきている。しかし、吸気行程に直接筒内に燃料を噴射することから、ポート噴射方式のように空気と混合気を生成する際に生じるタイムラグがないので、均質な混合気生成のためには微粒化に対する噴霧特性がさらに重要性を持つ。そして、この噴霧特性に対して重要な影響を及ぼす因子の1つとしてキャビテーションが存在する。

ノズル噴孔内に発生するキャビテーションは、噴流の微粒化に重要な影響を及ぼすこ

とが知られている。キャビテーションの発生はノズル流量に、そして、発生領域の分布は噴霧（噴流）形状に関係し、これらは燃費性能に加えて排ガスのクリーン性能に対しても影響を与える。しかし、キャビテーションにおける物理学は未だ明らかにされていないことが多く、また、実寸のインジェクタを用いた実験的調査は困難を伴う。したがって、キャビテーションの発生によるノズル流量および噴霧特性への影響を数値解析によって把握することができれば、効率的な微粒子化ノズルの設計を低コストで行うことが可能になると考える。そこで、本研究ではこのような工学的な有用性を目的に、粒子法的一种であるMPS（Moving Particle Semi-implicit）法を用いてノズル内のキャビテーションを伴う流動解析のためのキャビテーションモデルの開発に取り組んだ。

これまでに、インジェクタにおけるキャビテーションを伴うノズル内流れや噴霧特性に対する予測手法の構築に関してMPS法を含め、粒子法を用いた研究例はほとんどなく、格子や要素に基づき、また、流れ場をオイラー記述によって表現する手法が大半を占める。しかし、自由表面や界面の動きに合わせて格子を移動させる場合には、キャビテーション流れのような瞬時的に形状が大きく変わり得る複雑な気液二相流に対して、界面の大変形によって格子が大きく歪み計算が破綻する可能性をはらむ。そして、オイラー法では、対流項を計算する必要があり、数値拡散によって界面がぼやけるという問題が生じ得る。一方、粒子法は、格子を用いない手法であるので、格子が大きく歪み計算が破綻するという問題が生じず、対流項の離散化を必要としないラグランジュ法であるので、界面がぼやけるという問題も生じない。したがって、複雑な気液二相流であるキャビテーション流れの解析に対して大いに活かせると考えられる。

本研究では、第1の目的として、自動車エンジンの燃料挙動解析のためのキャビテーションモデルを開発すること、第2の目的として、開発したモデルを用いてキャビテーション流れを伴うノズル内流れの解析を行い、実験との比較による妥当性確認をすること、第3の目的として、ノズル内に発生するキャビテーションが噴霧（噴流）へ与える影響の妥当性確認をすること、これら3つを主たる目的とした。

キャビテーションモデルの開発にあたっては、まず、MPS法におけるキャビテーションの従来モデル（山川らのモデル）で確認される計算に対する不安定性とパラメータ依存性を改善した改良モデルを考案した。従来モデルでは、液体中の気泡の質量を各流体粒子に変数として持たせ、キャビテーション発生に伴う気泡の成長と崩壊を流体粒子の粒子径を可変として粒子を膨張・収縮させることによって表現をする。しかし、近傍粒子間で粒子径が大きく異なることで計算の不安定性が増すという問題を有する。また、内包する気泡の半径の変化に伴う流体粒子の粒子径の変化率を任意の定数パラメータによって決定するので、パラメータの設定値によってキャビテーション気泡の発生分布が大きく変わり得るという問題を有する。均一粒子径を用いた改良モデルでは、従来モデルのように計算の破綻を確認することはなくなったが、流体粒子に内包される気泡の

成長速度に対する計算において数値的に不安定になることを確認した。そこで、改良モデルで確認された問題の発生を排除した新たなキャビテーションモデル（提案モデル）を考案した。このモデルは、キャビテーション流れの解析において気泡の成長速度を考慮する方法としてよく用いられるRayleigh-Plesset方程式を使用せずに、ノズル内の気相領域に対しては一様近似を用いて粒子を配置せず、液相領域にのみ粒子を配置する手法である。そして、この手法は、気液二相粒子を用いる手法や、液相に粒子を、気相には格子を用いるハイブリッド手法、といったその他の手法と比較して、MPS法を用いた気液二相流解析においてこれまでに最も使用されている。

開発したモデルの妥当性確認では、自動車用燃料インジェクタにおいて、ノズル流量は空燃比に、キャビテーション発生領域は燃料の噴霧（噴流）形状に関係するという観点から、ノズル流量とキャビテーション発生領域の様相に関するシュミットノズルを用いた実験結果との比較を行った。提案モデルのノズル前後差圧に対するノズル内の質量流量の結果は実験結果によく一致し、提案モデルによってノズル流量の閉塞状態を再現できることを示した。提案モデルによるノズル流量の閉塞状態は、ノズル内に空洞が発生して液相粒子の数が減少することによって表現され、発生する空洞はキャビテーション領域を表すことから、キャビテーションの発生がノズル流量に影響を及ぼしていることが分かった。また、キャビテーションの発生領域は、まずはノズル入口角部、次にノズル出口角部、最終的にはノズル下流全域で確認されるようになり、ノズル前後差圧が大きくなるにつれてその様相を変えていった。このキャビテーション領域の発達過程は実験の傾向と一致し、各差圧値に対するキャビテーションの発生領域の分布は実験で得られたものに概ね一致するという結果を得た。さらに、ノズル流量に関しては、乱流モデルを用いた解析結果とも比較をしてより良好な結果を示すことによって、ノズル内流れに対する乱れの考慮がノズル流量に対して及ぼす影響は小さく、一方で、キャビテーションの影響力は非常に大きいということを明らかにした。

ノズル内に発生するキャビテーションが噴霧（噴流）へ与える影響の妥当性確認では、2次元ノズル内キャビテーションと液体噴流の数値解析を行い、実験結果と比較した。手法の妥当性確認を行うにあたっては、まず、負圧を考慮した計算を行うことによって生じ得る噴流部の粒子の挙動の不安定性を低減すべく、仮想粒子を考慮する手法を導入し、その効果を調べるための試験解析を行った。これにより、仮想粒子を考慮することによって噴射粒子が大域領域に広く散らばることが抑制されることを結果として示した。そして、次に、勾配モデルに対する影響半径の大きさを変えて解析を行い、影響半径の大きさがノズル内に発生するキャビテーションの様相に大きな影響を及ぼすことを示した。また、同時に、結果が収束することを確認した。その結果、良好な解析結果を得るためには、MPS法で通常用いられる影響半径よりも大きくする必要があるという

知見を得た。これらの検討を踏まえて最終的に行った解析では、キャビテーション長さ  
と噴霧半角に対する実験結果との比較において、解析結果は実験結果に概ね一致し、手  
法の妥当性が認められる結果が得られた。ただし、その一方で、ノズル内において自由  
表面とキャビテーション領域の区別が困難となること、実験では左右一方のみの側壁に  
沿ってキャビテーション領域が伸びるHydraulic Flipの再現ができていないこと、Wavy  
Jetとなる低流速域において噴射粒子の分布が時間の経過とともに精度低下を招く（広  
く散らばる）こと、さらには、分裂や蒸発によって液滴径が減少することなどは考慮さ  
れていないこと、などは今後の課題である。