

## 論文の内容の要旨

論文題目 LES による乱流噴霧燃焼場の数値予測

氏名 伊藤 裕一

化石燃料の枯渇の問題は、その有限性・可採年数から見ても非常に深刻な問題であり、エネルギー資源をより有効に利用することは必要不可欠な技術である。

各種工業、産業に用いられるガスタービンなどの内燃機関や工業用燃焼炉の効率向上を図るためには、燃焼により得られた熱エネルギーの機械仕事への変換効率が重要となる。同様に、地球環境問題の観点から燃焼と有害排出物の発生の因果関係を知ることも必要である。このような要請を受けて、現実の燃焼器設計や改良に関して、経験的でなく、合理的かつ客観的なデータに基づく指針を示す必要が出てきており、燃焼器の設計支援ツールとしての数値シミュレーションにかかる期待は大きい。

これらの工業用燃焼場では制御性の容易さ、高負荷燃焼が可能、という利点から噴霧燃焼形態を採用する燃焼炉が非常に多い。このような乱流噴霧燃焼場は、燃料の微粒化、液滴の気相への分散、蒸発、燃焼化学反応といった素過程が相互作用を及ぼしながら進行する、マルチスケール・マルチフィジックスの非常に複雑な現象であり、これらの素過程を分離して計測、理解することは難しく、この面からも数値解析による現象理解への期待が高まっている。

そこで、本研究では実用工学問題としての乱流噴霧燃焼問題の予測手法の確立を目指し、マルチスケールで非定常な複合現象を直接的に解析しうる LES (Large-Eddy Simulation) を基礎とした乱流噴霧燃焼場の高精度な非定常解析手法を開発することを目的に掲げ、特に噴霧液滴と乱流の挙動の相互作用および噴霧蒸発の予測と噴霧燃焼場の温度予測に焦点をあてた。

### 数値解析手法とエネルギーカップリングモデルの提案

乱流噴霧場を数値的に表現する手法として、気相乱流燃焼場を LES により Euler 的に取り扱い、噴霧液滴は個々の液滴パーセルを Lagrange 的に追跡することで表現する (DDM モデル)。気相基礎方程式は LES のために粗視化された低 Ma 数近似圧縮性流体の運動量、質量保存式と空気と燃料気体の混合分率  $Z$  の輸送方程式である。燃焼モデルには flamelet モデルを採用し、SGS 変動は  $\beta$ -PDF によって表現した。

液滴については、個々のパーセルの位置、質量、運動量に関する運動方程式を解く。液滴の蒸発は単一液滴の準定常蒸発を仮定し、周囲雰囲気との分圧差（濃度差）による物質拡散としてモデル化した。なお、液滴の

変形や分裂を考慮していない。

上記の手法を用いて噴霧燃焼現象を表現するためには、気相と液滴の間の熱交換についても運動量や温度と同様のカップリングを行なう必要がある。実際の解析においては気相温度は flamelet library によって一意に決定されるが、そこには噴霧の存在による影響は考慮されていない。そこに噴霧の存在による影響を考慮するために、次のような「Lagrange 型エネルギーカップリングモデル」を提案した。噴霧の存在による火炎の冷却を考慮した気相温度を以下のように表現する：

$$\tilde{T} = T_0 + \sum^k \left\{ \frac{\pi \lambda D_d^k}{c_{p,d} m_d^k} \text{Nu}(\hat{T}_g - T_d^k) - \frac{\dot{m}^k L_v}{c_{p,d} m_d^k} \right\}. \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{T}$  は気相温度、 $T_0$  は flamelet library から算出される（仮の）気相温度、右辺第 2 項が液滴によって燃焼ガスが冷却される寄与である。

### 乱流中を飛散する蒸発噴霧の数値解析

本研究ではまず最初に、蒸発する噴霧挙動の予測精度に注目して検討を行なった。解析対象は Widmann and Presser (2002) によるメタノールの噴霧実験とした。常温常圧下において、ホローコーンインジェクタにより液体メタノールが噴霧され、その周囲流入部から約 3m/s、スワール数約 0.6 の旋回空気が流入する体系で、Reynolds 数は約 10,000 である。

図 1 に本解析で得られた、流れ方向速度コンタ（図中左側）と、混合分率 Z（図中右側）および液滴の様子を示す。流れ方向速度コンタを見ると、非定常の強い流れとなっていることが見てとれる。また、インジェクタが設置されている流入部中心付近に旋回流れによる逆流域が形成されており、図中右側の混合分率分布を見ると、液滴が蒸発することで発生する燃料ガスは、周りの空気と混合しながら下流へと輸送され、その混合気は空気の流れ同様に非定常な乱れた状態になっていることが見て取れる。また、逆流域に滞留する蒸発ガスも存在しており、実機においては、ここが保炎がなされる、すなわち燃料ガスが滞留する箇所であるが、数値解析においても同様の現象を捕らえることに成功した。



図 1 代表的な流れ場の様子（左：流れ方向速度、右：混合分率）

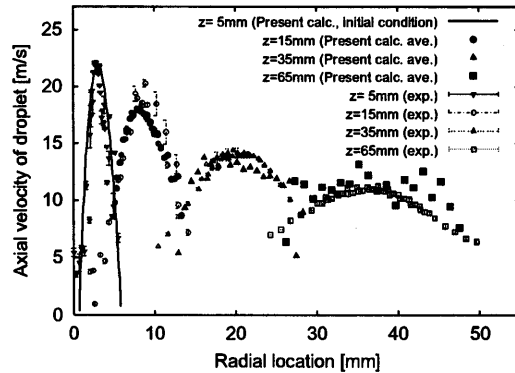


図 2 液滴速度の半径方向分布（実験値と比較）

図2は噴霧液滴の流れ方向速度の半径方向分布をいくつかの流れ方向距離( $z$ で表す)でとったものである。この図より、噴霧速度の減衰の推移や半径方向への拡散の様子が実験値と非常に良く一致しており、噴霧挙動を定量的に予測できていることがわかる。これは本研究で採用したモデル体系、とくに噴霧の抗力と蒸発モデルが適切であったことによる。

### 乱流噴霧燃焼場の解析

上記の知見を元に実験室レベルの乱流噴霧燃焼場の解析を行なった。参照する実験体系は、Karpetsis and Gomez (2000) による、乱流非予混合噴霧火炎である。メタノール噴霧が超音波スプレーノズルにより約20m/sで噴霧され、ノズル内点火後縮流部を通過し、燃焼を伴った流れとして直径12.7mmの開口部より開空間へ噴出する。そのときの気相速度はおおよそ25m/sである。

図3に本解析で得られた代表的な流れ場の様子を示す。噴霧は(時間方向に)均質に投入されるが、投入後5D程度下流では粗密な構造ができていく。これは、局所渦によってできる粗密構造であると考えられる。また、中心軸上における気相速度 $u_g$ および噴霧速度 $u_d$ を計算と実験とで比較したものを図4に示す。この図から、投入直後の噴霧が周囲の気相成分によって加速される過程は実験値と非常によい一致を見た。このことから、本解析においては、気相-液相間の相互干渉をGS成分のtwo-couplingで表現したが、そのモデル化が妥当であったことも伺える。なお、本体系における噴霧現象はElghobashi (1994)によるregime diagramに照らし合わせてもtwo-way coupling領域であるため、その面からも本解析でも採用したtwo-way couplingが妥当なモデルであることを裏付けられる。また、下流部においては実験同様に噴霧液滴は気相に追従している。この領域はone-way coupling領域であり、このregimeに対しても本解析は実験とよい一致を示すことがわかる。

図5は、本研究で提案したLagrange型エネルギーカップリングモデルの使用/未使用による影響を示す図である。図中、左側にはカップリングを施した結果を、右側にはカップリングを施していない結果をそれぞれ示している。なお、右図は左図の中心軸付近を拡大したものである。この図から、本カップリングモデルにおいて、噴霧液滴への熱伝達と蒸発潜熱による火炎の冷却効果が認められ、噴霧濃度の濃い流入ノズル近傍および中心軸付近においてその効果が大きく見られる。このため、火炎温度がより現実に近い分布を示すようにな

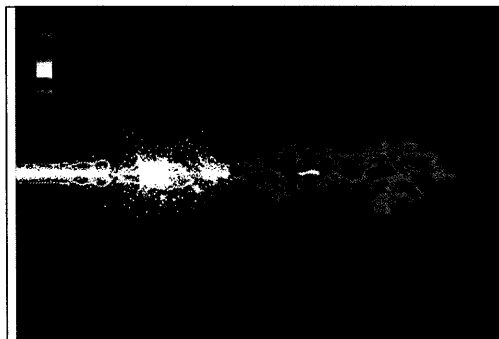


図3 代表的な噴霧燃焼場の速度分布と噴霧の様子

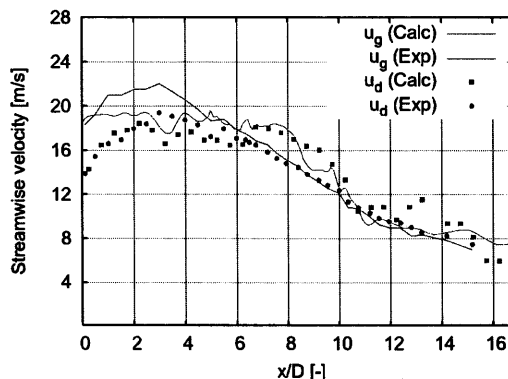


図4 中心軸上における気相速度と噴霧速度の実験値との比較

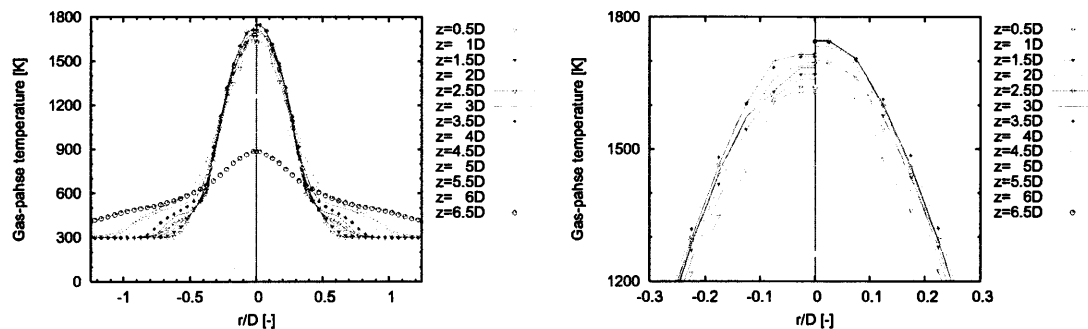


図5 Lagrange型エネルギーカップリングモデルの影響（右図は左図の中心付近を拡大したもの）

り、本カップリングモデルの有効性を示すことができた。

#### まとめ

本研究では、実用工学問題としての乱流噴霧燃焼問題の高精度予測手法の構築を目指し、Euler/Lagrange法とflamelet approachに基づく乱流噴霧燃焼LES解析手法を開発した。

その過程において、まずLES乱流燃焼場解析手法の乱流噴霧燃焼場への拡張を行ない、その問題点を指摘し、噴霧の存在による火炎の冷却効果を導入した「Lagrange型エネルギーカップリングモデル」を提案した。この解析手法を用い、蒸発噴霧を含んだ乱流解析への適用とその予測精度の検証を行なった結果、旋回による逆流生成などに対してもLESを用いることによって精度良く予測できることを示し、噴霧液滴の空間分布は、初期の液滴粒径、位置、速度を正確に模擬した上で、適切なモデルを選択することで実験値と非常に良い一致を見た。これらのことから、本研究で採用したモデルや計算手法の妥当性を示すことができた。

この知見を元に、乱流噴霧燃焼場へのLES解析の適用を行なった。その結果、気相温度分布においては、本研究で提案したLagrange型エネルギーカップリングモデルの導入により、噴霧の蒸発による火炎の冷却効果が導入され、本カップリングモデル導入前と比較して、実験値とより整合する結果を得た。また、噴霧速度分布において、気相成分による加速過程を定量的にも正確に予測することができた。本解析においては、気相-液相間の相互干渉をGS成分のtwo-couplingで表現したが、そのモデルの妥当性についても解析結果とregime diagram両面から検証できた。一方、燃焼流れ速度分布においては、ダイナミクスの定性的な一致は見られたものの、定量比較では実験データとの差異が見られた。これは、流入変動成分の導入方法を再検討することでさらなる予測精度の向上が見込まれる。

以上の成果から、本研究で提案したLES解析手法を用いることで、乱流噴霧燃焼場における気相温度や噴流燃焼の発達過程の全容を捉えることができ、個々の噴霧の挙動、運動量交換や液滴の蒸発など噴霧燃焼に関わるダイナミクスを正確に予測することがわかった。