

平成22年 5月 1日現在

研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2006～2008
課題番号：18360404
研究課題名（和文） 微小重力実験から導かれた新理論に基づく本格的な噴霧燃焼数値シミュレータの開発
研究課題名（英文） Development of a genuine numerical simulator for spray combustion based on new concepts derived from microgravity experiments
研究代表者 梅村 章 (MEMURA AKIRA) 名古屋大学・大学院工学研究科・教授 研究者番号：60134152

研究成果の概要(和文)：有名な噴霧燃焼シミュレータソフトに米国で開発された KIVA がある。世界中で利用されているが、保炎に関連する火炎伝播と、噴霧燃焼の前提になる微粒化特性について、自ら正確に予測する能力を備えておらず、シミュレータの威力を大幅に損ねている。本研究では、宇宙環境利用研究プロジェクトの一環として微小重力実験で解明してきた液滴間火炎伝播と乱流微粒化機構の知見を応用し、独創的な構想に基づき本格的な噴霧燃焼数値シミュレータの構築を目指す基礎研究をおこなった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：噴霧燃焼，微粒化理論，微小重力実験，数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

有名な噴霧燃焼シミュレータソフトに米国で開発された KIVA がある。産業界を中心に世界中で利用されているが、詳しく調べてみると、いずれの現行ソフトも、噴霧燃焼に特徴的な要素過程を正しくとらえていないことがわかる。特に、保炎に関連する火炎伝播と、噴霧燃焼の前提になる噴射液の微粒化については、自ら正確に予測する能力を備えておらず、このことがシミュレータの威力を大幅に損ねている。燃料の噴射条件より生成噴霧の性状が予測でき、且つ、噴霧の性状

に応じた着火および火炎伝播が正しく模擬できないと、真に研究や設計に有力なシミュレータにはなり得ない。

2. 研究の目的

本研究では、宇宙環境利用研究プロジェクトの一環として微小重力実験で解明してきた液滴間火炎伝播と乱流微粒化機構の知見を応用し、独創的な構想と方法論に基づき従来の噴霧燃焼シミュレータの問題点を克服した本格的な噴霧燃焼数値シミュレータの構築を目指す。

3. 研究の方法

現行の噴霧燃焼シミュレータの基礎式が噴霧燃焼に固有な特性をとらえた定式化になっていないにもかかわらず、一見もってもらしい計算結果が出せるのは、微粒化データのインプットや実験データに合わせた燃焼計算パラメータの調整がなされているからである。この問題点を解決すべく、微小重力実験で明らかになった新しい知見を取り入れた新しい定式化により、調整パラメータを一切含まない噴霧燃焼シミュレータの計算スキームの開発するための基礎研究を実施する。

(1) 現行噴霧燃焼計算スキームの活用

先ず噴霧燃焼計算スキームの開発から取り掛かり、現行の計算スキームの若干の修正だけで、微小重力実験であきらかになった液滴間火炎伝播の効果を組み込んだ計算が行える新しい計算スキームを考案する。

(2) 乱流微粒化機構の解明

次に、噴射液の微粒化特性を計算機上で表現するために、微小重力実験ならびに実験室での高圧噴霧生成実験と突き合わせ、微粒化機構を理論的に解明し、様々な微粒化現象を統一的に記述し、且つ微粒化特性の定量的予測を可能にする新しい微粒化理論を構築する。その上で、乱流微粒化の流体力学構造を数値的研究によって明らかにする。

4. 研究成果

(1) 霧滴間火炎伝播計算スキームの開発

KIVAコードを米国エネルギー省より購入し、同ソフトの全体構造を把握し、本研究で開発する噴霧燃焼数値シミュレータに流用できる箇所を同定した。予混合燃焼しか記述できない現行のソフトでは、保炎に至る非定常な火炎伝播状態を適切に記述できないことを確認した。問題は、多数の液滴（現行ソフトでは代表的な1液滴で表現される）の間の火炎伝播をどのように記述するかである。微小重力実験で検証された液滴間火炎伝播モードマップに基づいて、局所的な噴霧状態の変化に対応して火炎伝播様式を切り替える計算スキームを考案し、これまで記述できなかった霧滴間火炎伝播の効果も発現できる計算アルゴリズムを開発した。

(2) 液糸の分断機構の解明

噴霧燃焼以外にも噴霧を利用する分野は幅広い。噴射方式により噴射液の変形の様子は異なるが、いずれの場合にも細い液糸が形成され、それが切れて液滴が作られる点は共通である。従って、液糸の分断機構の解明と原理の定式化は、微粒化シミュレーションサブ

グリッドの構築に当たって、最初に取り組みなければならぬ課題である。

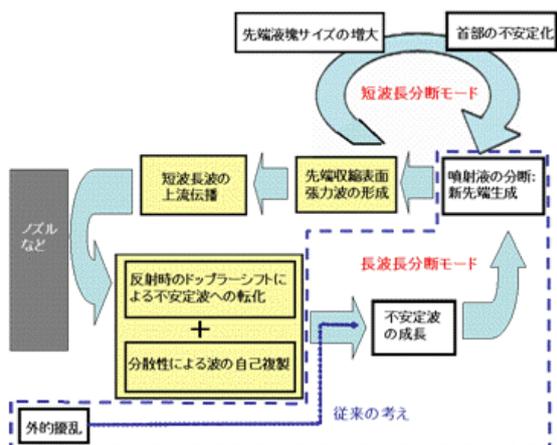
著名なレーリー卿による解析以降も今日に至るまで液体の微粒化機構の真相が謎に包まれたままできたのは、微粒化現象が微細且つ高速であるために詳細な観察が困難であり、機構を解き明かすのに有力な概念の創出が難しかったからである。従来の研究になかった新しい実験手段「微小重力環境」を利用し、乱流微粒化に現れる液糸の分断と同じ現象を、拡大した空間スケールでもってゆっくりと生起させる模擬噴射液実験によって、液糸の分断過程の詳細観察を行った。その結果、新たに見出された現象には従来の理論で説明できないものが多々あることが判明した。微小重力実験の結果を合理的に説明するための理論的探求を原点に立ち返って行い、以下の成果を得た。

① 従来微粒化理論の問題点の判明

噴霧は微細化した液柱（液糸）が表面張力によって分断されて作られるので、液体の微粒化機構の理解は表面張力による液柱の変形の特徴を知ることから始まる。凸凹した液柱表面には二種類の表面張力が作用する。母線方向に働く表面張力が復元力を生むのに対し、円周方向に働く表面張力は液柱を絞り切ろうとする。液柱の分断は、括弧部において後者の作用が前者に打ち勝つ条件で発生するから、従来の微粒化理論では、この不安定な関係を満たす不安定波だけが取り上げられて論じられてきた。その結果、深刻な問題点を孕むことになった。すなわち、円周表面張力による不安定波には上流に遡って伝わる能力がないので、下流で発生する液柱の分断の原因は上流に存在すると考える外ないが、どのようにして上流で初期不安定波が作られるかについては何も答えることができないのである。この困難点を回避する「どんな噴射液にもなんらかの擾乱が含まれており、その中から最も不安定な波が発達して分断が起きる」という従来の説明には説明放棄の響きがあり、到底受け入れられるものではない。例えば、蛇口から漏れる水が滑らかな長い糸を作った先でにわかには表面が波打だして切れるのはよく目にしているものである。従来の考えに従って分断位置から逆算して初期不安定波振幅を評価すると、信じがたい程小さな値を取り、原子のサイズよりも小さくなる。それにもかかわらず、誰が噴射実験を行っても、再現性の良い結果が得られているには、偶発的な要因から生じた不安定波によって分断が起きている訳ではないことを暗示している。

②新しい微粒化概念の確立

そこで、我々はどんな液柱にも必ず端がある点に着目した。液柱の端は、母線方向に働く表面張力によって丸まって収縮し、液柱部に上流に伝播する表面張力波（短い波長の表面の凸凹）が作られる。端が小球状になると液圧が上がり、液柱部の液体を押し出す。この力が、表面張力波を生み出す源になっている。上流伝播表面張力波が途中で非一様な流れと干渉するか、あるいは、ノズル出口まで遡って反射すると、ドップラーシフトを起こして波長が長くなり、不安定波に化けることができる。また、先端液塊を伴った表面張力波は、それ自身で不安定化できる。この知見によれば、液体は噴射されればそれだけで自然に分断を繰り返すことになり、従来の微粒化理論で遭遇する困難点が解消できる。すなわち、表面張力波にこそ微粒化現象の本質があることが判明し、液糸の分断過程を記述する閉じた理論体系の構築により、さまざまな条件での液糸の分断特性を統一的に記述できるようになった。



■ 図1 噴射液の自己完結分断サイクル

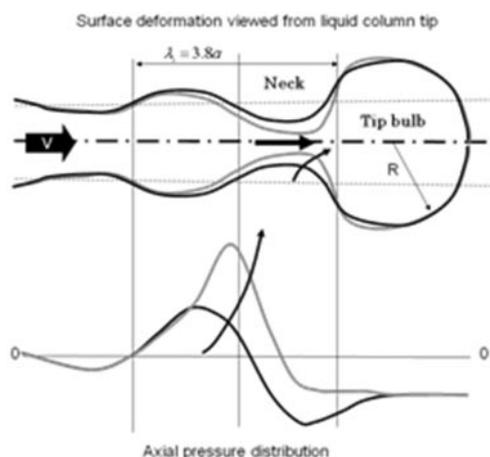
わかってしまえば極めて単純な事柄ながら、噴射液柱において最初に変化が起きる場所はどこかと言えば、雰囲気最初に触れる先端部であり、ノズル内の液体ではない。ノズル出口における液体の状態の変化は、下流（過去に噴出した液体）で起きている現象の影響を受けて生じるから、従来の微粒化理論に則って考えたのでは、将来に起きる事象が初期状態を決定する（因果が逆）ことになり、うまくいかないのは当然であった。

図1は、新しい微粒化概念を体現するノズルから一様噴射する液体に現れる自己完結的な分断サイクルを表す。乱流微粒化でできる液糸にはノズルに対応するものがないから、噴霧の生成は先端収縮によってできる

表面張力波によって自然に切れる短波長分断によっていることがわかり、従来のレーリーの理論に準拠した液滴生成モデルは適切でないことがわかる。従来の微粒化理論では、表面張力波の概念を欠いていたために、不安定化後の事象しか見ていなかったため、自己不安定化の機構がわからなかったのである。

(3) 液膜の分断

噴射液から液糸が作られる前段階において液膜が作られることが多い。ガス流によって伸張される液膜の変形過程を数値シミュレーションによって追跡し、気液速度差が非常に大きい段階においても表面張力が有意に効き、表面形状が階段状に変形して次第に液膜が薄くなり、最後の段形成において表面張力波の特性によって分断が起きることが判明した。この液膜の不安定化は、従来考えられてきた流体力学的不安定性とは圧力分布が逆であり、新しく発見された機構である。



■ 図2 短波長分断機構

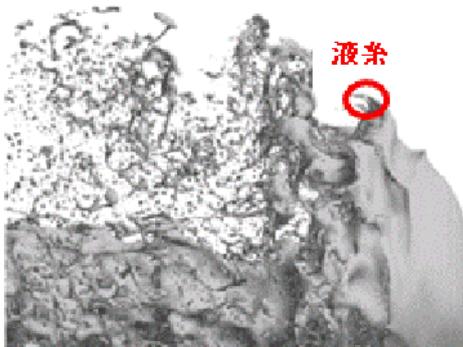
る。噴射液表面が段を作ることは、2流体噴射器の微粒化特性を調べる実験的研究において、噴射液の高速撮影で確認された。また、この実験により、高速ガス流から働く逆流生成圧力の重要性を認識することができた。

(4) 乱流微粒化シミュレータの計算スキームの構想

KIBAと同程度の計算負荷で噴射液からの乱流微粒化を表現する計算スキームを考案した。

(5) 乱流微粒化過程の詳細説明への数値的接近

新しい微粒化概念に基づき、乱流微粒化過程の流体力学構造を考察することにより、微粒化シミュレータ開発への筋道が描けるようになったことより、研究目標を微粒化シミュレータの開発に特化し、JAXAおよび東大との連携で液体ロケットエンジンの設計に実用化できる微粒化シミュレータの開発を目指す研究に組み直す作業をおこなった。幸いこの計画は前年度に申請した基盤研究(A)として採択された。さらに幸運なことに、JAXAに新しく導入されたスーパーコンピュータのお披露目式典に使うデモ用計算として、高速噴射液の微粒化の直接シミュレーションが取り上げられ、独占的にスーパーコンピュータを使用する機会が得られた。高圧静止空气中に高速噴射した液体ジェットの先頭部で起きる微粒化過程の直接数値シミュレーションを行い、噴射液が内臓する乱流には無関係に乱流微粒化が出現することを実証した。この計算は、世界で初めて信頼できる精度で噴射液から噴霧が作られていく過程をシミュレートできたものであり、高速噴射液からの無数の液糸の形成過程など、乱流微粒化サブグリッドモデルを作るのに必要なデータを前倒しで獲得できた。液糸の分断は新しい微粒化理論に則るものであった。これまで複雑でわからないことは全て乱流の



■ 図3 高圧空气中に水を100m/sで噴射したときの先頭部の微粒化過程の直接数値シミュレーション。

性にし、深く考究されることがなかったが、乱流微粒化も比較的単純な自己完結的な法則の繰り返しによって起きていることが示され、本研究の構想を支えるものになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

(1) J. Shinjo & A. Umemura, Simulation of

liquid jet primary breakup: Dynamics of ligament and droplet formation, Int. J. Multiphase Flow, 査読有, **36** (2010) pp. 513-532.

- (2) 梅村章、川那辺翔、小鹿仁史、陳峰、新城淳史、低速噴射水分裂の微小重力実験から得られた知見(第2報: 重力の効果と分断距離の決定機構) 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, (2010) (印刷中).
- (3) 梅村章、川那辺翔、小鹿仁史、陳峰、新城淳史、低速噴射水分裂の微小重力実験から得られた知見(第2報:) 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, 58 (2010) pp. 15-23.
- (4) 梅村章, 液糸の短波長分断機構の理論的研究, 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, **56**, (2008), pp. 228-238.
- (5) 梅村章, 噴射液の自己不安定化機構の理論的研究 (第4報: ノズル出口での継続的な不安定波生成) 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, **56**, (2008) pp. 433-441.
- (6) 梅村章, 乱流微粒化研究における微小重力実験の意義, 日本マイクロ重力応用学会誌, [解説]査読無, **25** (2008) pp. 50-57.
- (7) 梅村章, 噴射液の自己不安定化機構の理論的研究 (第1報: 噴射液の不安定化に関連する表面張力波), 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, **55** (2007) pp. 216-223.
- (8) 梅村章, 噴射液の自己不安定化機構の理論的研究 (第2報: 分断フィードバックループ), 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, **55** (2007) pp. 224-231.
- (9) 梅村章, 噴射液の自己不安定化機構の理論的研究 (第3報: 短距離分断過程の1次元計算), 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, **55** (2007) pp. 359-366.
- (10) 新城淳史, 小川哲, 梅村章, 液膜端の収縮により発生する表面張力波の特性, 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, **55** (2007), pp. 273-281.
- (11) T. Owaki and A. Umemura, Premixed swirl combustion modes emerging for a burner tube with converging entrance Proceedings of the Combustion Institute, 査読有. **31**, (2007), pp. 1067-1074.
- (12) A. Umemura, Y. Nagase and T. Ando, Marangoni effect on a droplet approached by a diffusion flame, Combustion Theory and Modeling, 査読有, **10**, (2006), pp. 57-84.

[学会発表] (計 18 件)

- (1) J. Shinjo and A. Umemura, Detailed simulation of primary atomization mechanism in Diesel jet spray (Isolated identification of liquid jet tip effects), 33th International Symposium on Combustion, Beijing, China, August 6, 2010.
- (2) Ali, M, and Umemura, A., Capillary Instability of a Cylindrical Liquid Column, 12th Asian Congress on Fluid Mechanics, Daejeon, Korea, August 20, 2008.
- (3) J. Shinjo, S. Matsuyama, Y. Mizobuchi, S. Ogawa and A. Umemura, Liquid ligament disintegration mechanism driven by capillary waves, 32nd International Symposium on Combustion, Montreal, Canada, August 8, 2008.
- (4) J. Shinjo, S. Ogawa, and A. Umemura, "Numerical simulation of circular liquid jet disintegration due to capillary force", Asia Pacific Conference on Combustion 2007, Nagoya, May 23, 2007.

[図書] (計 1 件)

A. Umemura, Chapter 11: Spray Group Combustion, in Handbook of Atomization and Sprays, Ed. N. Ashgriz, Springer, (2010).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: ガスジェネレータの環状 2 段燃焼器

発明者: 梅村章・西脇康太

権利者: 名古屋大学

種類: 特許

番号: 特願 2010-079890

出願年月日: 平成 22 年 3 月 30 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: インフレーター構造形態計算方法、計算プログラム及び計算プログラムを記憶したコンピュータ読み取り可能な記録媒体

発明者: 梅村章、加藤基

権利者: JST

種類: 特許

番号: 特許第 4359101 号

取得年月日: 平成 21 年 8 月 14 日

国内外の別: 国内

[その他]

- (1) 宇宙環境利用に関する公募地上研究ニュース、Vol. 11, pp. 3-4、2009 年 3 月、JSF・JAXA 刊
- (2) 中部経済新聞一面トップ記事、2008 年 6 月 16 日
- (3) 平成 18 年度無重力セミナー「微小重力実験から生まれた新しい微粒化理論」セラトピア土岐、2006 年 11 月 27 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅村 章 (UMEMURA AKIRA)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60134152