

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2006 ~ 2008
 課題番号：18360402
 研究課題名 (和文) 酸化剤噴流衝突場における固体燃料の燃焼機構の解明
 研究課題名 (英文) Regression Mechanism of a Solid Fuel around Oxidizer Jet Stagnation Region
 研究代表者
 永田 晴紀 (NAGATA HARUNORI)
 北海道大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：40281787

研究成果の概要：

- 申請者らが開発を進めている無火薬式小型ロケット「CAMUI型ハイブリッドロケット」の特徴的な燃焼特性を実験および数値計算により明らかにし、以下の成果を得た。
- 固体燃料のガス化速度を燃料形状、酸化剤供給量、および燃焼室圧力の関数として予測する手法を確立した。
 - ロケットモータのスケールが燃焼特性に与える影響を解明し、小型モータによる燃焼実験で実機モータの燃焼特性を明らかにする手法を開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2007年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	10,800,000	3,240,000	14,040,000

研究分野：航空宇宙工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：燃焼、宇宙インフラ、ロケット、再使用型宇宙輸送機

1. 研究開始当初の背景

高層大気サンプリング、無重力実験、および超小型衛星の軌道投入など、小型ロケットを用いた科学ミッションを安価に行うことを目的に、提案者らはこれまで、火薬を用いない CAMUI 型ハイブリッドロケット (プラスチックと液体酸素を推進剤とする) を開発してきた。概念を図 1 に示す。CAMUI 型ロケットでは酸化剤を含んだ高温ガスが衝突する淀み点近傍で燃焼が進行する。燃料グレインの形状を最適化するためにはそのガス化速度を予測することが必要である。

2. 研究の目的

- 申請者らが開発を進めている無火薬式小型ロケット「CAMUI 型ハイブリッドロケット (図 1)」における特徴的な燃焼形態である「酸化剤噴流が固体燃料表面に衝突する淀み点近傍における拡散燃焼」の火炎構造を基礎的に明らかにすることにより、
- 固体燃料のガス化速度を燃料形状、酸化剤供給量、および燃焼室圧力の関数として予測する手法を確立する。
 - これにより固体燃料の燃料後退履歴を予

測する手法を確立し、燃料グレインの初期形状から燃料流量履歴および推力履歴を予測できるようにする。

- 得られた予測手法により、燃酸比変動による比推力損失と固体燃料の燃え残りを最小にするための燃料グレイン形状の最適設計を可能にする。

ことを目的とする。

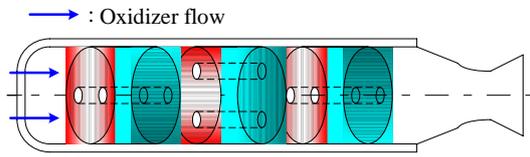


図1 CAMUI型ハイブリッドロケット

3. 研究の方法

本研究は、主に下記3通りのアプローチを組み合わせ進められた：

- 1) 基礎燃焼実験による燃焼場の詳細な観察：

図2に示すような試料支持装置を燃焼容器内に設け、ハイブリッドロケットにおいて燃料として用いられている高密度ポリエチレンを燃料試料として燃焼実験を行う。燃料試料表面にはガス酸素が垂直に衝突し、淀み点近傍にはガス化した燃料と酸化剤噴流との拡散火炎が形成される。燃焼容器には光学観察用の窓が設けられている。また、燃焼による圧力上昇を緩和するため、内容積200Lの大容量キャッチタンク（既存設備）と配管で繋がれている。

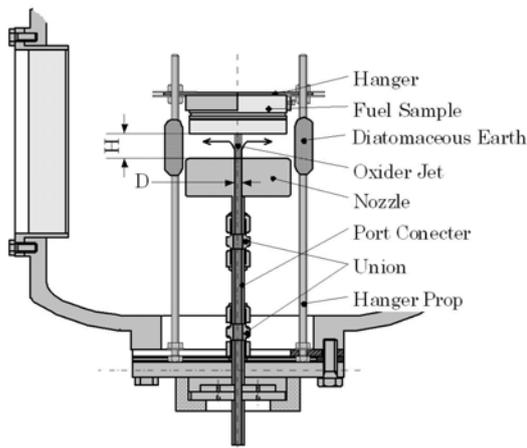


図2 基礎燃焼実験の詳細

- 2) 乱流の近似解析モデルである Large Eddy Simulation (LES) を用いた燃焼場モデルの構築：

LESの手法をCAMUI型燃焼器における酸化剤衝突噴流領域近傍の燃焼場に適

用するための各詳細モデルの構築を行う。

- 3) 実燃焼器を用いた検証実験：

数種類のスケールの実燃焼器を用いて燃焼実験を実施し、基礎燃焼実験データとの対応を確認する。実験装置の概要を図3に示す。

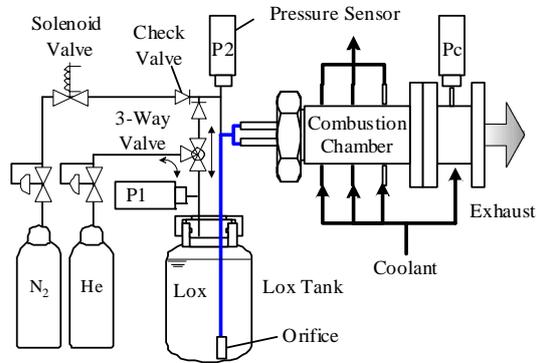


図3 実燃焼モータを用いた実験装置の概要

4. 研究成果

- 1) 燃焼面の定義：

CAMUI型燃料グレインの燃焼面後退は、図4に示すように、前端面、ポート内面、および後端面でそれぞれ独立に起こるとして取り扱うことが可能である。燃焼実験後、燃焼面後退量の計測結果から計算した燃料質量と実測された燃料重量の比較を図5に示す。両者はよく一致しており、本燃焼面後退モデルの妥当性を示している。

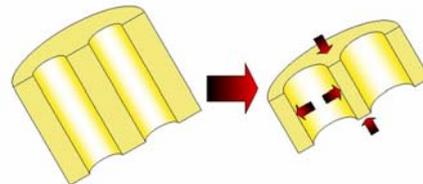


図4 燃焼面後退の様子

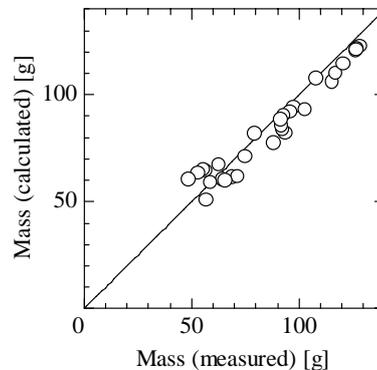


図5 燃焼面後退モデルの妥当性

2) 燃料後退速度式の取得：

各燃焼面における燃料後退速度式は図5のようになる。例えば前端面では、燃料後退速度 \dot{r} [mm/s] は、上流側ポート内流量密度 G_p [kg/m²/s]、および上流側ポート内径 D と衝突距離 H との比である H/D (図9) の関数として表される。定数 a , m , n の値が得られれば、後退速度式が得られるが、このうち、 m および n は流れ場の特性により決まり、全ての燃料ブロックで同一の値になる。一方、 a は局所 O/F の関数になるため、上流側の高 O/F 領域に有る燃料ブロックと下流側の低 O/F 領域に有る燃料ブロックとでは値が異なる。

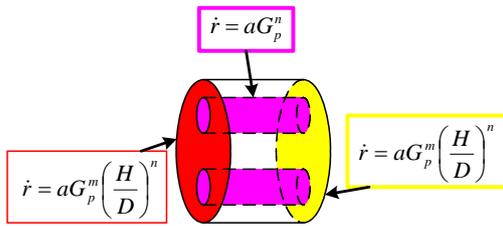


図6 各燃焼面における燃料後退速度式

3) 寸法スケール則の解明：

一部の例外(後述)を除いて、各燃焼面の燃料後退速度は、レイノルズ数が一定の条件のもとで形状スケールに反比例する。これは、固体燃料のガス化において燃焼ガスから固体燃料への対流熱伝達が支配的であることを示している。これを利用して、小型スケールモータにより実機スケールでの燃料形状履歴を予測可能である。図6に、1/2スケールモータにより燃料後退形状を予測したものと実測値との比較を示す。

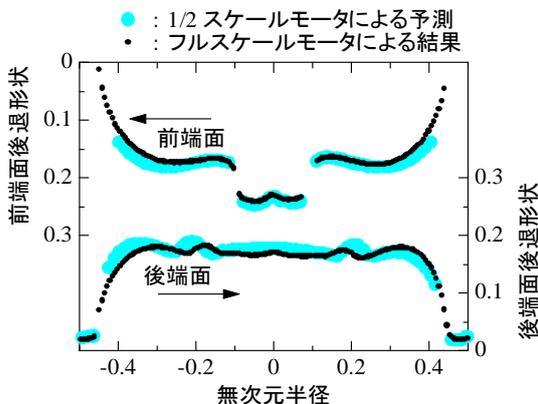


図7 小型スケールモータによる後退形状の予測

4) 最上流前端面の後退機構の解明

燃料後退速度に及ぼす寸法スケールの効果は対流熱伝達におけるスケール則に従う(図7)が、高温の燃焼ガスではなく酸化剤が衝突する最上流ブロック前端面においては、図8の上段に示すように、このスケール則が成り立たない。更に、 Re 数を一定に保ったまま燃焼室圧力および流速を変化させ、化学反応速度と化学種流量との比が等しくなるように条件を改めると燃料後退速度が相似形になる(図8下段)ことを確認し、最上流ブロック前端面において対流熱伝達のスケール則が成り立たなくなるのは化学反応速度の影響によるものであることを明らかにした。

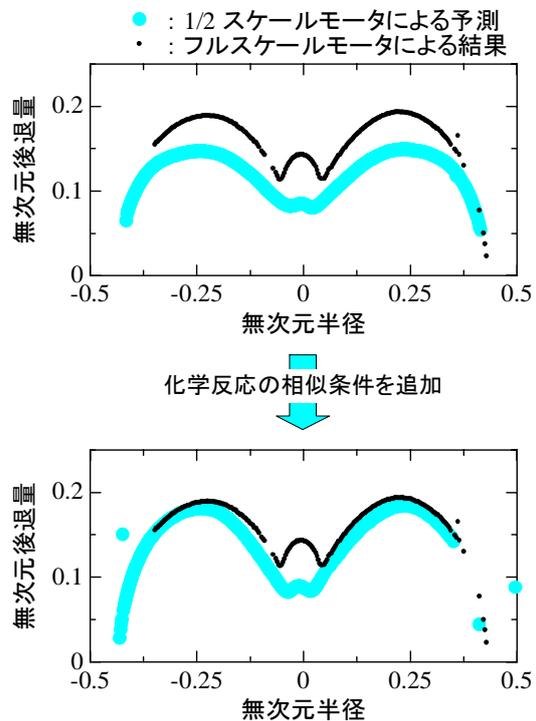


図8 最上流前端面の後退形状

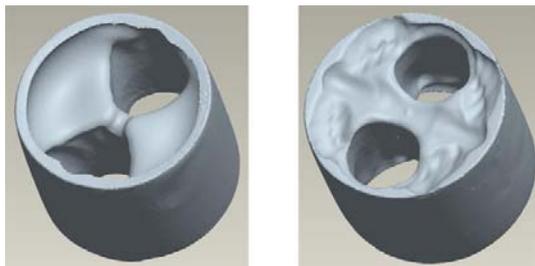
5) 最下流後端面の後退機構の解明

最下流ブロックの後端面においても、前述のスケール則が成立しない。最下流後端面では下流に壁面が存在しないため、対流熱伝達量が減少し、相対的に輻射の影響が強くなると考えられる。輻射の影響を確認するため、 Re 数を一定に保ったまま燃焼室圧力を減少させ、後退量の相似性に及ぼす影響を確認した。実験の結果、燃焼室圧力を減少させるに従って、2スケール間の後退形状が相似形に近づくことを確認した。これにより、最下流後端面において相似則が成り立たないのは輻射の影響によるものであることを明らかにした。

6) グレイン内流れ場の説明：

Large Eddy Simulation (LES) により、燃料グレイン内部の流れ場の様子を求め、燃焼面の後退および熱伝達率分布との比較および考察を行った。燃焼を途中で中断して得られた燃料ブロックの形状を図9に示す。(a) は前端面側、(b) は後端面側である。前端面はほぼ均一に後退が進むのに対して、後端面は複雑な形状で後退が進行する。燃料間隙の流れ場の様子を図10に示す。上が上流ブロック後端面、下が下流ブロック前端面である。2噴流の衝突により上方向のファウンテン流が生成され、後端面中央部に衝突している様子が判る。これにより後端面中央部は局所的に熱伝達が促進され、後退が進行する(図9(b))。

燃料後退の進行により流路形状が変化し、流れ場が変わることによって燃焼面の後退特性が変化することを示した。図10に示したファウンテン流の影響は、図11に示すように後退進行と共に小さくなり、その結果、後端面の後退率は面内で一様になる。



(a) 前端面側 (b) 後端面側

図9 最上流前端面の後退形状

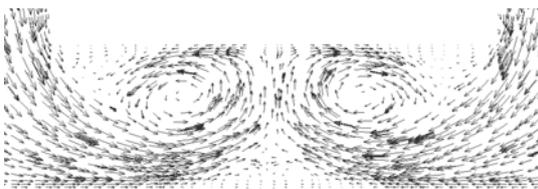


図10 ブロック間隙部の流れ場の様子

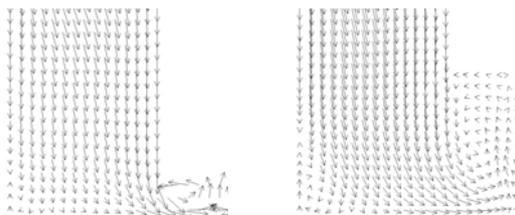


図11 後退進行による流れ場の変化

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8件)

- ① 永田晴紀、CAMUI 型ハイブリッドロケットの開発 — 異常燃焼の発生とその克服 —、伝熱 (日本伝熱学会誌)、47 巻、pp. 23-29、2008、無 (依頼原稿)
- ② 永田晴紀、バルブレス技術による小型ロケットの開発、バルブ技報、49 巻、pp. 15-20、2008、無 (依頼原稿)
- ③ 永田晴紀、小型ハイブリッドロケット開発の狙い、エンジンテクノロジー、51 巻、pp. 29-33、2008、無 (依頼原稿)
- ④ 永田晴紀、カムイロケット燃焼室における固体燃料の燃焼、日本燃焼学会誌、49 巻、pp. 163-169、2007、無 (依頼原稿)
- ⑤ 永田晴紀、カムイロケット燃焼室における固体燃料の燃焼、日本燃焼学会誌、49 巻、pp. 163-169、2007、無 (依頼原稿)
- ⑥ 伊藤光紀、前田剛典、柿倉彰仁、金子雄大、森一大、中島卓司、脇田督司、植松努、戸谷剛、大島伸行、永田晴紀、縦列多段衝突噴流(CAMUI)方式を用いたハイブリッドロケットの燃料後退特性、日本航空宇宙学会論文集、55 巻、pp. 516-526、2007、有
- ⑦ C. Lauer, H. Nagata, T. Uematsu, The Challenges of Developing a Hybrid Launch System for Microsatellite Payloads Using CAMUI Hybrid Upperstages with the Rocketplane XP, Proceedings of the 25th ISTS Selected Papers, pp. 821-827, 2006, 有
- ⑧ H. Nagata, M. Ito, T. Maeda, M. Watanabe, T. Uematsu, T. Totani, I. Kudo, Development of CAMUI Hybrid Rocket to Create a Market for Small Rocket Experiments, Acta Astronautica, Vol. 59/1-5, pp. 253-258, 2006. 有

[学会発表] (計17件)

- ① 植嶋健太、金子雄大、室井典和、飯島直純、和久宏之、萩原俊輔、脇田督司、戸谷剛、永田晴紀、「CAMUI 型ハイブリッドロケットにおける燃料後退速度に及ぼす局所 O/F の影響」、宇宙輸送シンポジウム、JAXA 宇宙科学研究本部、相模原、2009.1.19
- ② 永田晴紀、伊藤光紀、金子雄大、柿倉彰仁、森一大、植松努、戸谷剛、「CAMUI 型ハイブリッドロケット固体燃料の燃焼速度に及ぼすスケールの影響」、第46回燃焼シンポジウム講演論文集、pp.56-57、京都テルサ、京都、2008.12.3

- ③ 永田晴紀, 植松 努, 伊藤献一, 「小型弾道飛行試験による宇宙工学研究の新展開」, 第 46 回宇宙科学技術連合講演会, pp.408-412, 淡路夢舞台, 淡路, 2008.11.6
- ④ 金子雄大, 伊藤光紀, 植嶋健太, 戸谷 剛, 永田晴紀, 「超音波パルス反射法を用いたハイブリッドロケット燃料の後退履歴の取得」, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, Vol.5, pp.403-404, 横浜国立大学, 横浜, 2008.8.6
- ⑤ 植嶋健太, 伊藤光紀, 柿倉彰仁, 金子雄大, 森一大, 飯島直純, 室井典和, 植松努, 戸谷剛, 永田晴紀, 「CAMUI ハイブリッドロケットの性能履歴予測モデルを用いた燃料グレイン設計」, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, Vol.5, pp.401-402, 横浜国立大学, 横浜, 2008.8.6
- ⑥ H. Nagata, T. Uematsu, M. Ito, A. Kakikura, Y. Kaneko, "Development of 90 kgf Class CAMUI Hybrid Rocket", Proceedings of the 26th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS2008-u-08, アクトシティ浜松, 浜松, 2008.6.6.
- ⑦ Y. Kaneko, M. Itoh, A. Kakikura, K. Mori, K. Uejima, T. Nakashima, M. Wakita, T. Totani, N. Oshima, and H. Nagata, "Fuel Regression Rate Behavior of CAMUI Hybrid Rocket," Proceedings of the 26th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS2008-a-24, アクトシティ浜松, 浜松, 2008.6.5
- ⑧ 永田晴紀, 柿倉彰仁, 伊藤光紀, 森一大, 金子雄大, 上嶋健太, 室井典和, 植松努, 「250 kgf 級 CAMUI 型ハイブリッドロケットの推力・比推力特性」, 日本航空宇宙学会第 39 期通常総会及び講演会, pp.50-52, JAXA 調布航空宇宙センター, 調布, 2008.4.4
- ⑨ 永田晴紀, 「CAMUI 型ハイブリッドロケット技術」, 日本航空宇宙学会第 39 期通常総会及び講演会, 第 17 回学会賞受賞講演 (技術賞), pp.32-37, JAXA 調布航空宇宙センター, 調布, 2008.4.3
- ⑩ H. Nagata, T. Uematsu, M. Ito, A. Kakikura, Y. Kaneko, K. Mori, T. Totani, "Development and Flight Test of 250 kgf-class CAMUI Hybrid Rocket", Proceedings of 2007 JSASS-KSAS Joint International Symposium on Aerospace Engineering, pp.304-307, 福岡国際会議場, 福岡, 2007.10.11
- ⑪ 永田晴紀, 植松努, 伊藤光紀, 柿倉彰仁, 金子雄大, 森一大, 戸谷剛, 「推力 250 kgf 級 CAMUI 型ハイブリッドロケットの燃焼特性」, 第 45 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.508-509, 仙台国際センター, 仙台, 2007.10.1
- ⑫ 金子雄大, 伊藤光紀, 柿倉彰仁, 森 一大, 植嶋健太, 戸谷 剛, 永田晴紀, 「超音波パルス反射法を用いたハイブリッドロケット燃料後退履歴の取得に関する研究」, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, Vol.5, pp.407-408, 関西大学, 大阪, 2007.9.11
- ⑬ 伊藤光紀, 前田剛典, 柿倉彰仁, 金子雄大, 森一大, 植松努, 戸谷 剛, 永田晴紀, 「CAMUI 方式ハイブリッドロケットの燃料後退特性に及ぼすスケール効果」, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, Vol.5, pp.405-406, 関西大学, 大阪, 2007.9.11
- ⑭ Harunori Nagata, Nozomu Hashimoto, Mitsunori Ito, "Combustion of Solid Fuels in Unconventional Hybrid Rocket Motors", The 18th International Symposium on Transport Phenomena, 27 August, 2007, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, KOREA (招待講演) .
- ⑮ 伊藤献一, 永田晴紀, 植松努, Charles Lauer, 「CAMUI ロケット開発の現状とその将来構想」, 日本航空宇宙学会第 38 期年会講演会, pp.43-46, JAXA 調布航空宇宙センター, 調布, 2007.4.5
- ⑯ 永田晴紀, 「CAMUI 型ハイブリッドロケットによる小型宇宙産業の創出」, 日本航空宇宙学会北部支部 20 周年記念講演会ならびに第 8 回再使用型宇宙推進系シンポジウム講演論文集, pp.49-52, 仙台国際会議場, 仙台, 2007.3.8 (招待講演) .
- ⑰ 前田剛典, 伊藤光紀, 柿倉彰仁, 難波江亮, 永田晴紀, 戸谷剛, 工藤勲, 植松努, 「CAMUI 方式を用いた推力 400 kgf 級サウンディングロケットの研究開発」, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集, Vol. V, pp.341-342, 熊本大学, 熊本 2006.9.21

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: バルブレス液体供給装置
 発明者: 永田晴紀, 金子雄大
 権利者: 国立大学法人 北海道大学
 種類: 公開特許公報 (A)
 番号: 特許公開 2008-240643
 出願年月日: 平成 19 年 3 月 27 日
 国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永田 晴紀 (NAGATA HARUNORI)
 北海道大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 40281787

(2) 研究分担者

戸谷 剛 (TOTANI TSUYOSHI)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00301937

大島 伸行 (OSHIMA NOBUYUKI)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10217135

(3) 連携研究者

なし