502 CAMUI ハイブリッドロケット燃料グレインの形状履歴の予測

Prediction of geometric history of CAMUI hybrid rocket fuel grain

○柿倉 彰仁 (北大院工) 伊藤 光紀 (北大院工) 金子 雄大 (北大院工)
 森 一大 (北大院工) 植嶋 健太 (北大院工) 室井 典和 (道工大院)
 植松 努 (CSW) 正 戸谷 剛 (北大院工) 正 永田 晴紀 (北大院工)

Akihito KAKIKURA, Hokkaido University, North 13 West 8, kita-ku, Sapporo, Hokkaido

Mitsunori ITOH, Yuudai KANEKO, Kazuhiro MORI, Kenta UEJIMA, Hokkaido Univ.

Norikazu MUROI, Hokkaido Institute of Technology

Tsutomu UEMATSU, CAMUI Space Works.

Tsuyoshi TOTANI, Harunori NAGATA, Hokkaido Univ.

緒言

CAMUI とは CAscaded Multistage Impinging-jet (縦列多段衝突噴流) 方式の略で、ハイブリッドロケットの燃焼形態を表している。本方式では、酸化剤および燃焼ガスを固体燃料表面に衝突させ、衝突噴流熱伝達により燃焼速度を向上させることができる。燃料グレインの概略を Fig.1 に示す。本方式では 2 つのポートを設けた軸長の短い燃料ブロックを縦に複数個つなげる。このとき隣り合う燃料ブロックのポート位置が互いに 90° ずれるように配置する。また、燃料ブロック間には円筒形の燃料スペーサーを設置することで、燃料ブロック間に燃焼域を形成する。

Fig.1 Fuel configuration

燃焼ガスはポートを通過し、次段の燃料ブロック前端面へ衝突し、衝突噴流熱伝達を伴った激しい燃焼が引き起こされる。また、衝突に伴う強い乱流により、燃料と酸化剤の混合が良好におこなわれることで、高い燃焼効率を得ることができる。ポート内では、従来のハイブリッドロケットと同様に境界層燃焼となる。

現在、著者らは CAMUI 方式ハイブリッドロケットの実用化に向けたモータの大型化を進めている。実機を想定した大型モータの燃焼実験にはより多くのコストや人手が必要である。小型モータにおける実験の詳細なデータからフルスケールモータの性能を予測することが可能となれば、実機開発にかかるコストや人手を大幅に縮小することが可能となる。これまでの研究により、モータの大型化が及ぼす燃焼への影響が明らかとなりつつある。これらの成果を活用すれば、従来型ハイブリッドと比較して複雑な燃焼形態を持つ CAMUI 方式においても、燃料後退履歴を予測することが可能となるはずである。本研究では、従来型ハイブリッドロケットの境界

層燃焼に加え、燃焼ガスの衝突領域近傍でも拡散火炎を形成する複雑な燃焼形態をもつ CAMUI 方式の燃料形状の時間変化を予測することが可能であると明らかにする。

実験概要

地上燃焼実験に用いたモータはインジェクター、燃焼室、ノズル、点火機構からなるシンプルな構造のものである。推進剤には高分子量ポリエチレンおよび LOX を使用した。実験に用いた固体燃料は外径が 70 mm で、段数は 3 段である。燃料グレイン重量は約 600 g である。燃焼後の燃料ブロックを回収し、ポート内および両端面の後退量を測定することで、燃焼に影響を及ぼす定数を取得する。取得された実験値を用いて、燃料形状の変化を予測するプログラムを作成する。その後、プログラムの有効性を確認するために予測された燃料後退履歴を実験結果と比較する。

燃料後退速度の実験式

CAMUI 方式における各燃料ブロックの燃焼面は、衝突面（上流側端面）、ポート内、および後端面（下流側端面）である。ポート内における燃料後退速度の式は、推進剤流量をポート面積で除した推進剤流量密度、代表寸法スケール比 D 、定数 a 、および n を用いて以下のように表される。

$$\dot{r} = a G_{prop}^n D^{n-1} \quad (1)$$

両端面における燃料後退速度の式 (2) は、上記のパラメータのほかに、ブロック間距離 H 、定数 m を用いて以下のように表される。

$$\dot{r} = a G_{prop}^n H^m D^{n-1} \quad (2)$$

燃料スケールおよびブロック間距離が燃料後退速度に与える影響については、同実験と平行に行われている実験から明らかになりつつある。実験におけるそれぞれの燃焼面での燃料後退速度と推進剤流量密度の関係を Fig.2 に示す。

Fig.2 Relation of regression rate with propellant mass flux

図は上からポート、衝突面、および後端面における燃料後退速度と推進剤流量密度の関係について、各段ごとに回帰曲線を引いたものである。グラフより計算された n の値を用いて算出した各段の定数 a , n , および m を Tab.1 に示す。

Tab.1 Combustion character

		1st	2nd	3rd
port	a	0.0145	0.0153	0.0189
	m	-0.09	-0.09	-0.09
front	a	0.1195	0.1281	0.1066
	m	-0.09	-0.09	-0.09
back	a	0.4324	0.2702	0.8022
	m	-0.65	-0.65	-0.65

実験式の有効性の検討

以上を基に、酸化剤流量、燃焼時間およびブロック形状をパラメータとしたプログラムを作成した。燃焼の詳細なデータを取得した実験シリーズの燃料ブロックの寸法（燃料直径 70 mm）を基準スケールとする。プログラムの有効性を検討するために、実際の実験条件に合わせて計算をおこない、実験で取得した値と比較する。結果を Fig.3 に示す。図から、両結果はよく一致している。また、燃焼後の燃料重量の計算値と実験値の比を Tab.2 に示す。

Fig.3 Calculated value and Experimental value

Tab.2 Ratio of mass of combusted fuel blocks

	experiment 1			experiment 2			experiment 3		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
weight	1.02	1.05	1.11	1.07	1.09	1.13	1.04	1.07	1.13

任意の時刻における燃料形状がわかれば、燃料流量の履歴が計算できる。燃料形状の履歴から取得された燃料流量と酸化剤流量の測定値をもとに化学平衡計算をおこない、そこから取得された燃焼室圧力を実験値と比較した。結果を Fig.4 に示す。本計算は燃焼室の立ち上がりを考慮していないため、燃焼の初期段階における燃焼室圧力は実験値と一致しない。しかし、それ以降の燃焼が安定した状態の圧力は概ね一致しているといえる。従って、燃料流量もまた概ね一致していると思われる。

Fig.4 History of the combustion chamber pressure

以上から、計算に用いた燃料後退速度の実験式が CAMUI 方式の燃焼の様子をよく再現しているものであるといえ、燃焼を時々刻々と再現するプログラムの有効性が確認された。

結言

実験式の有効性および、それを用いて構築されたプログラムが、実際の燃焼状態をよく再現していることから、CAMUI 方式の複雑な燃焼形態再現でき、燃料形状の変化を燃焼開始から終了まで予測可能であるといえる。