

RDX/AP/Al 系コンポジット推進薬の燃焼性能

岩尾幸博*, 久保田浪之介*

本研究では、RDX/AP/Al 系コンポジット推進薬の燃焼性能について実験的に検討を行なった。AP/Al 系推進薬の AP の一部を RDX あるいは HMX で置き換えることによって比推力を増大することが可能である。RDX を 15% 含有する RDX/AP/Al 系コンポジット推進薬において金属燃料成分である Al の添加量を変化させた場合、比推力を最大とするような Al の最適添加量は理論値よりも低い値となる。この場合、推力係数 (C_F) は理論値とほぼ同様の傾向を示すが、特性速度 (C^*) は理論値とはやや異った傾向を示す。これは本研究に用いた Al が期待どおりの燃焼をしないためと考えられ、燃焼室内における推進薬の燃焼効率が大きく影響しているといえる。また、本推進薬の燃焼性能に及ぼす Al の粒径及び特性長さ (L^*) の影響については、Al の粒径は小さい方が、 L^* は大きい方が推進薬の燃焼効率が高く比推力も高い値を示す。

1. はじめに

ロケットモータの設計において比推力の増大は常に要求される事項であるが、近年、固体ロケットの高速化あるいは無煙化が重視され、推進薬の燃焼性能向上が重要な課題となっている。無煙化の要求に対してはダブルベース (DB) 推進薬を基本としてコンポジット化ダブルベース (CMDDB) 推進薬やコンポジットダブルベース (CDB) 推進薬など高比推力化された無煙性推進薬を対応させることによって達成しようとする研究がなされている^{1) 2)}。一方、高速化の要求に対しては DB 推進薬に比較して比推力が高いコンポジット推進薬を、さらに高エネルギー化することによって達成しようとする研究がすすめられている^{1) 2)}。

今回報告する RDX/AP/Al 系コンポジット推進薬は、従来から使用されている AP/Al 系コンポジット推進薬に高エネルギー物質であるニトラミン化合物を添加することによって、さらに高比推力化された推進薬を開発することを目的としたものである。高性能爆薬として開発された RDX あるいは HMX を推進薬に添加することによって、比推力が増大しかつ燃焼温度が低下するというロケットモータ設計上きわめて有利な特性を有した推進薬が得られる³⁾。しかしながら、ニトラミンを含有する推進薬の燃焼特性に関しては不明な点が

多く、特に金属燃料成分として使用されている Al の燃焼との関連において、その燃焼効率が不十分であることなど解明すべき点が多々残されている。

本報では、RDX/AP/Al 系コンポジット推進薬の燃焼効率に関して、Al の添加量や粒径あるいは特性長さ (L^*) がどのような影響を及ぼしているかについて定量的に把握するため、主として実験的手法により検討を行ない、その結果について報告する。

2. 供試推進薬の特性

2.1 推進薬の組成

Table 1 に本研究で用いた推進薬の化学的組成を示す。TAP-515, 516, 517 の 3 種類の推進薬は、ニトラミン化合物の添加が燃焼性能に及ぼす影響について検討することを目的としたものである。AP/Al 系の推進薬である TAP-515 及び AP の一部を HMX (RDX) 15% で置き換えた TAP-516 (517) によって、ニトラミン/AP/Al コンポジット推進薬の基本的な燃焼性能の把握を行なうとともに、ニトラミンの添加によって得られる効果について確認した。

TAP-524, 525, 526, 527 の 4 種類の推進薬は、Al の添加量が燃焼性能に及ぼす影響について検討することを目的としたものである。HTPB 及び RDX の量を一定としておいて、金属燃料成分である Al (平均粒径 5 μm) の添加量を 0, 5, 10, 20% と変化させ、RDX を 15% 含有した推進薬の燃焼性能を把握し、Al の最適添加量及び燃焼効率について検討した。

TAP-536, 537, 538 は、Al の粒径が燃焼性能に及ぼ

昭和 57 年 9 月 17 日受理

*防衛庁技術研究本部 第 3 研究所
〒190 立川市栄町 1-2-10
TEL 0425-24-2411

Table 1 Propellant formulations used for this study

Prop.	HTPB	Al	AP	RDX	HMX
TAP-515	12	18	70	-	-
-516	12	18	55	-	15
-517	12	18	55	15	-
TAP-524	12	-	73	15	-
-525	12	5	68	15	-
-526	12	10	63	15	-
-527	12	20	53	15	-
TAP-538	12	10	63	15	-
-537	12	15	58	15	-
-536	12	20	53	15	-

の影響について検討することを目的としたものである。ここでは平均粒径 20 μ m の Al を用い、Al の最適添加量及び燃焼効率について検討した。

また、TAP-527, 536, 537, 538 の推進薬については、燃焼ガスの滞留時間の影響を求めめるため、特性長さ (L^*) を変化させた場合の燃焼性能について検討した。

2.2 燃焼速度特性

供試推進薬の燃焼速度をストランドバーナによって測定した。圧力は 30ATM から 100ATM の間で変化させて行なった。燃焼速度 (r , MM/SEC) と圧力 (P , ATM) の関係は、いずれの推進薬においても両対数紙上で直線となり

$$r = aP^n$$

の関係式が成立する。

Table 2 は、測定結果を整理して燃焼速度の特性値である、定数 a 、圧力指数 n 及び 60, 70, 80ATM における燃焼速度 r_{60} , r_{70} , r_{80} を示したものである。

Fig. 1 は、供試推進薬の燃焼速度の比較を行なったもので、 r_{60} 及び r_{80} について示した。TAP-515, 516,

Table 2 Burning rate characteristics of the propellants used for this study

Prop.	a	n	r_{60}	r_{70}	r_{80}
TAP-515	2.120	0.354	9.03	9.54	10.0
-516	1.435	0.418	7.95	8.47	8.96
-517	1.812	0.372	8.31	8.80	9.25
TAP-524	1.589	0.395	8.01	8.51	8.97
-525	1.336	0.440	8.09	8.66	9.19
-526	1.624	0.395	8.18	8.70	9.17
-527	1.512	0.409	8.07	8.59	9.08
TAP-538	1.280	0.428	7.38	7.89	8.35
-537	1.524	0.391	7.56	8.02	8.45
-536	1.527	0.368	6.89	7.29	7.66

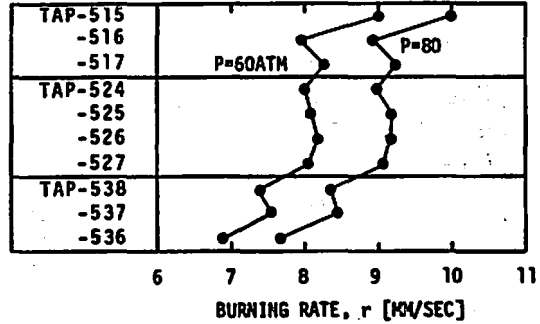


Fig. 1 Burning rate of the propellants used for this study

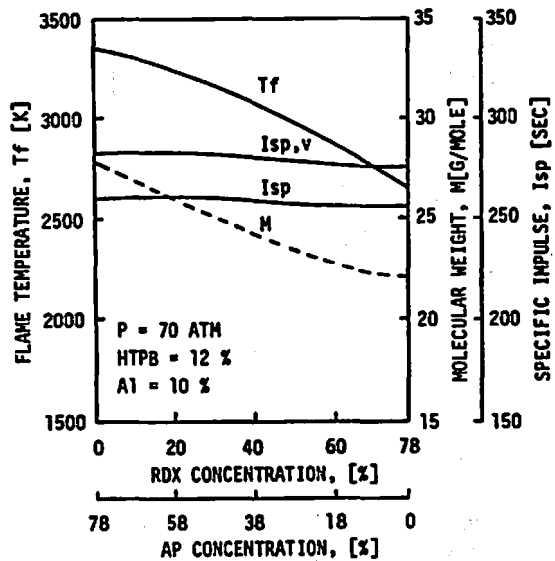


Fig. 2 Variations of specific impulse, molecular weight and flame temperature as a function of RDX concentration

517 について比較してみると、TAP-515 の AP 15% を HMX (RDX) で置き換えた TAP-516 (517) の燃焼速度は大きく低下している。この時、AP の大粒と小粒の混合比は一定となっていることから、燃焼速度の低下は HMX (RDX) を添加したことの影響と考えられる。TAP-524, 525, 526, 527 はいずれも RDX を 15% 含有しており、その燃焼速度は TAP-515 より低くかつ Al 添加量の影響をわずかに受けている。また、Al の平均粒径を 20 μ m とした TAP-536, 537, 538 の燃焼速度は 5 μ m Al の場合に比べて大きく低下しており、Al の粒径や添加量の影響があらわれている。

2.3 理論燃焼性能

実験に先立ち、供試推進薬の理論燃焼性能を計算によって求めた。

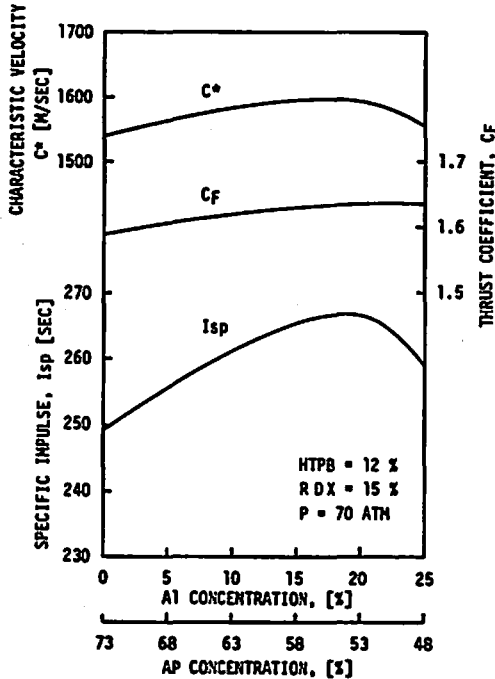


Fig. 3 Variations of specific impulse, thrust coefficient and characteristic velocity as a function of Al concentration

Fig. 2 は、HTPB=12%、Al=10%、AP=78%を基本組成とする推進薬のAPをRDXで置き換えていった場合における比推力 (I_{sp})、燃焼火炎温度 (T_f) 及び燃焼ガスの平均分子量 (M) の値を示したものである。図のように、RDXの量がある特定の範囲において I_{sp} が増大する領域が存在している。従って、RDXやHMXを用いることによって燃焼火炎温度が低下しかつ比推力が増大する、ロケットモータ設計上きわめて有利な推進薬が得られることになる。

Fig. 3 は HTPB=12%、RDX=15%とした場合において Al の添加量が燃焼性能に及ぼす影響について示したものである。APの一部をAlに置き換えていくと比推力 (I_{sp}) はしだいに増加する。しかし、Al=18~20%において最大の I_{sp} を示し、さらに Al の量を増加すると I_{sp} は急激に低下する。この場合特性速度 (C^*) は I_{sp} とほぼ同様の傾向を示すが、推力係数 (C_f) は図の範囲内においてほぼ単調増加の傾向を示している。

3. 実験の方法

小型ロケットモータを用いた燃焼試験を行ない、推進薬の燃焼性能を評価した。供試推進薬は外径80mm、内径40mm、長さ140mmであり、両端面内面燃焼とし標準燃焼圧力が70ATMとなるように設定した。推力

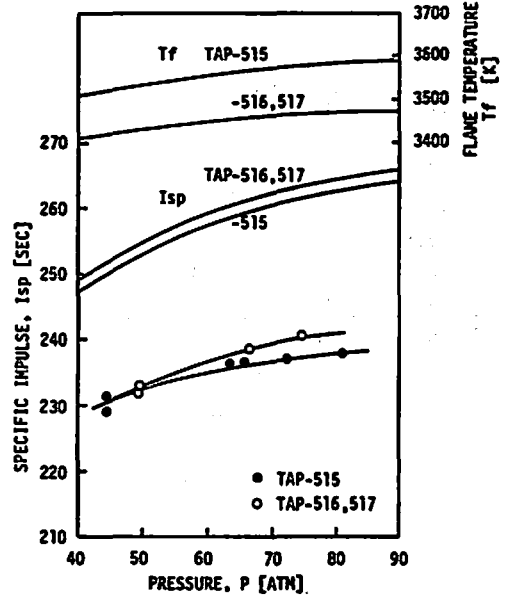


Fig. 4 Variations of specific impulse and flame temperature as a function of pressure for nitramine contained and non-contained propellants

・圧力・標準タイム信号・点火信号等の計測データはデータレコーダに収録され、電磁オシログラフに再生される。ただし、推力及び圧力はデータレコーダに入力されるものと、直接電磁オシロに記録される2系統で行なった。ロケットモータの側方約3mの位置に35ミリ及び16ミリのカメラを配置して燃焼火炎の状態を記録した。また、特性長さ (L^*) が燃焼性能に及ぼす影響を検討する場合においては、推進薬とノズルの間にスペーサを入れ一定の容積を保持して実験を行なった。

4. 実験結果及び考察

4.1 ニトラミンの添加と燃焼性能

ニトラミンを含有しない推進薬 TAP-515 と、これに15%のニトラミン (RDXあるいはHMX) を入れた推進薬 TAP-516, 517 燃焼性能の比較を行なった。

Fig. 4 は、燃焼圧力 (P) と比推力 (I_{sp}) 及び燃焼火炎温度 (T_f) の関係を示したものである。理論計算値は、燃焼圧力の増加に伴って比推力が増大し燃焼火炎温度もまた上昇することを示している。この時、ニトラミンを15%添加すると比推力が約2SEC増大し、燃焼火炎温度は逆に約100C低下している。実験の結果から、RDXあるいはHMXを15%添加すると比推力が2~3SEC増大することが確認された。しかしなが

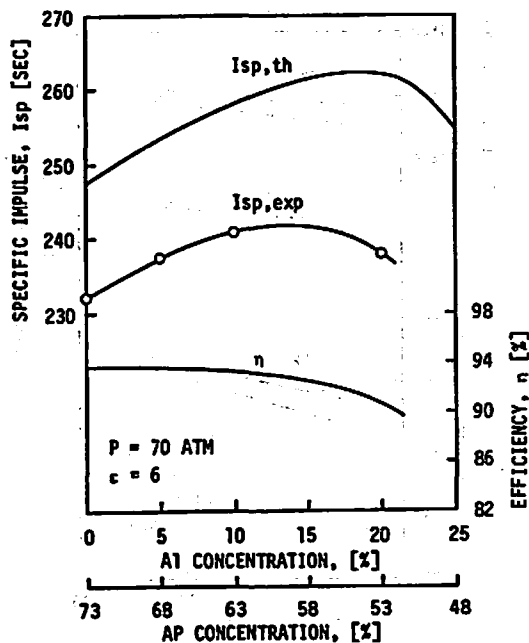


Fig. 5 Variations of specific impulse and efficiency as a function of Al concentration with theoretical and experimental values

ら理論計算値と比較してみると本実験では燃焼性能が十分に発揮されているとはいえない。燃焼時における火炎の状態を観察してみると、火炎の中に多数の明るいストリークが観測されることから、燃焼室内において添加したAlの燃焼が完結せず不完全燃焼のまま排出されていることが考えられる。

そこで、金属燃料成分として添加したAlの燃焼効率に着目し、Alの含有率を異にする推進薬を用いて実験的に検討することとした。

4.2 Alの添加量と燃焼性能

Fig. 5はAlの添加量を変化させた場合の燃焼性能について、燃焼圧力70ATM、ノズル開口比6の条件における理論計算値と実験値とを比較して示したものである。理論比推力 ($I_{sp, th}$) は、Al添加量の増加とともに増大しAl = 18~20%においてその最大値を示し、その後は急激に低下している。これに対し実験値 ($I_{sp, exp}$) は、Alの添加量が少ない領域においては理論値と同様の傾向を示すが、Al = 12~13%において最大値を示しその後はAlの添加量の増加によって低下している。この時、理論比推力と実験値の比 (効率, η) はAl添加量が12~13%以上において急激に低下する結果となった。従って、HTPB=12%, RDX=15%の推進薬においてはAl=12~13%, AP=60~61%が最大比推力

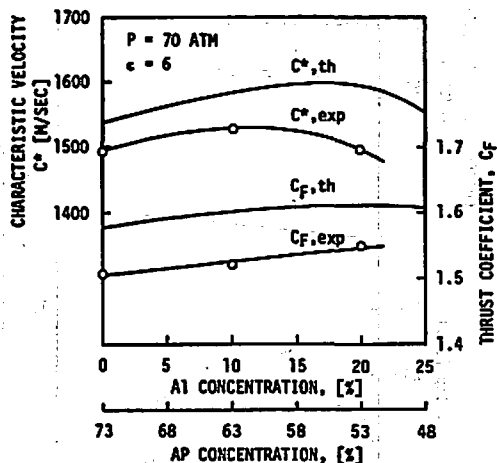


Fig. 6 Variations of thrust coefficient and characteristic velocity as a function of Al concentration with theoretical and experimental values

を示す組成であるといえる。

Fig. 6は、Al添加量と推力係数 (C_F) 及び特性速度 (C^*) の関係を示したものである。 $C_{F, exp}$ 及び C^*, exp は、燃焼試験によって得られた測定値をもとに次式により計算した。

$$C_{F, exp} = \frac{\bar{F}}{\bar{A}_t \cdot \bar{P}}, \quad C^*, exp = \frac{\bar{P} \cdot \bar{A}_t \cdot t_b \cdot g}{W_p}$$

ただし、 \bar{F} : 平均推力 \bar{P} : 平均燃焼圧力

\bar{A}_t : 平均ノズルスロート面積

W_p : 推進薬重量 t_b : 燃焼時間

g : 重力加速度

C_F は燃焼ガスがノズルスロートを通じた以降における推力に対するノズルの作用効率を示す値であり、一方、 C^* は燃焼室内における推進薬の燃焼効率を示す値である。 C_F の理論計算値 ($C_{F, th}$) はAl添加量の増加とともに増加するが、実験値 ($C_{F, exp}$) についてもほぼ同様の傾向となっている。 C^* の理論計算値 (C^*, th) はAl添加量の増加とともに増加するが、Al = 18~20%で最大値となりこれ以上Alを添加すると急激に低下することを示している。これは本実験における推進薬が酸化剤成分であるAPと燃料成分であるAlが置き換えられていく組成となっているために、酸化剤の不足を生じ急激に燃焼温度が低下するためと考えられる。この時、実験値 C^*, exp はAl = 12~13%において最大値を示している。これらのことから、比推力がAl = 12~13%において最大値を示す現象は C^*, exp と密接な関係を有しており、燃焼室内における推進薬の燃焼効率が比推力に大きく影響していると

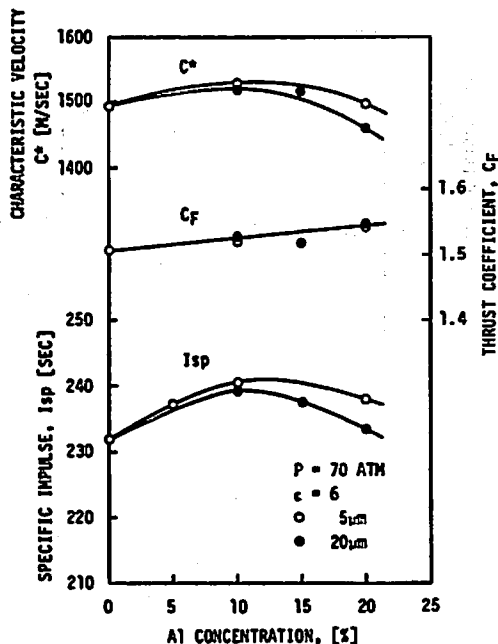


Fig. 7 Variations of specific impulse, thrust coefficient and characteristic velocity as a function of Al concentration for different Al particle sizes

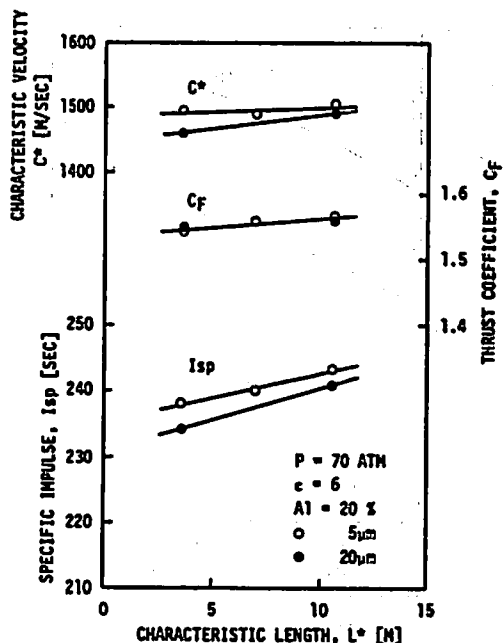


Fig. 8 Variations of specific impulse, thrust coefficient and characteristic velocity as a function of characteristic length for different Al particle sizes

いえる。また、燃焼試験時における火炎の状態を記録写真によって観察すると、Al=20%においては不完全燃焼のAlによると考えられる多数のストリークが観測される。このことからAl添加量が多い場合においては、燃焼室内においてAlの十分な分解・ガス化が進行せずに燃焼効率が低下するものと考えられる。

4.3 Alの粒径と燃焼性能

燃焼室内における推進薬の燃焼効率が、本RDX/A P/Al系コンポジット推進薬の燃焼性能に影響を及ぼす重要な要因であることから、粒径が異なるAlを用いた推進薬について実験的検討を行うこととした。

Fig. 7はAlの平均粒径20 μ mの場合について比推力、推力係数、特性速度の実験値を示したものである。比較のためにAlの平均粒径5 μ mの場合の値についても併せて記入した。図に示すように、20 μ mAlの場合の比推力(I_{sp})はAl=10%以上において添加量の増加とともに低下する傾向が得られており、 I_{sp} の最大はAl=10%前後において生ずるものと考えられる。この時の C^* の値についてみると、20 μ mAlの場合は5 μ mAlの場合に比較して低い値を示すとともに、Al=10%以上において添加量の増加とともに低下する傾向がみられ、Al=20%においては著しい。これらのことから、Alの粒径は推進薬の燃焼効率に大きな影響を及ぼして

おり、Alの添加量が同一であったとしても粒径が大きくなることによって、燃焼室内においてAlの燃焼が完結できず分解・ガス化が不十分なままノズルから排出されてしまうために、その性能が低下するものと考えられる。 C_F についてみると、5 μ mAl、20 μ mAlいずれの場合においてもその傾向及び値はほとんど変化しておらず、不完全燃焼のAlが存在したとしても大きな影響は受けていない。

以上のことから、Alの粒径は推進薬の燃焼性能に重大な影響を及ぼす要因であるといえる。また、比推力が最大値を示す時のAl添加量は20 μ mAlの場合においてはAl=10%前後の値となり、これは5 μ mAlの場合よりも低い値となっている。

4.4 特性長さと燃焼性能

これまでの実験結果から、燃焼室内におけるAlの燃焼完結性が問題の焦点となってきた。燃焼室内において推進薬の燃焼効率を増大させ十分な分解・ガス化を達成することによって、その性能が十分に発揮されるものと考えられる。そこで、特性長さ(L^*)を大きくし燃焼ガスが燃焼室内に滞留する時間を増大させることが、比推力、推力係数、特性速度にどのような影響を及ぼしているかについて実験的検討を行なうこととした。実験にあたっては、推進薬とノズルの間に一定の容積

を保持させて L^* を増大した。これによって燃焼ガスの滞留時間が増加することになる。

Fig. 8は特性長さ(L^*)が比推力(I_{SP})、推力係数(C_F)、特性速度(C^*)に及ぼす影響について示したものである。実験条件は $P=70\text{ATM}$, $\text{Al}=20\%$, $\epsilon=6$ の場合であり, Al の平均粒径 $5\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ の2種類について示した。

I_{SP} と L^* の関係は, いずれの Al 粒径の場合も L^* の増加によって増大しているが, $5\mu\text{mAl}$ の場合に比べて $20\mu\text{mAl}$ の場合の方がわずかに影響が大きい。この時の C_F はいずれの粒径においてもその値に差異はほとんどなく, L^* の増加によって増加の傾向を示すが Al 粒径の影響はないといえる。 C^* についてみると, L^* の増加とともにいずれの Al 粒径の場合も増大する傾向を示しており, 燃焼ガスの滞留時間の増大によって Al の分解・ガス化が有効に促進されたためと考えられる。 $5\mu\text{mAl}$ の場合に比して $20\mu\text{mAl}$ の場合の方が L^* の影響が大きく現われており, これは $5\mu\text{mAl}$ では $L^*=3.2\text{m}$ において Al の燃焼効率が上限に近い状態になっているものと考えられる。また, $L^*=10.6\text{m}$ においては粒径による差は小さくなっており, Al の燃焼効率に L^* が有効に作用しているといえる。

Fig. 9は, $20\mu\text{mAl}$ を用いた推進薬TAP-536 ($\text{Al}=20\%$), TAP-537 ($\text{Al}=15\%$), TAP-538 ($\text{Al}=10\%$)について, L^* と I_{SP} , C_F , C^* の関係を示したものである。いずれの推進薬においても, L^* の増加とともに I_{SP} , C_F , C^* が増大している。 I_{SP} 及び C^* の増大の割合は Al 添加量が多い推進薬ほど大きく, L^* の増加は Al の燃焼効率増大に大きく寄与しているといえる。

以上のことから, L^* は推進薬の燃焼効率に重大な影響を及ぼす原因であるといえる。 L^* を大きくすることによって推進薬の燃焼効率が増大し, この効果は Al の粒径が大きいほど, また Al 添加量が多いほど大きく現われる。

5. 結論

RDX/AP/ Al 系コンポジット推進薬の燃焼性能に及ぼす Al の添加量, Al の粒径, 特性長さ等の影響について実験的に検討した結果, 以下に示す事項が明らかとなった。

- (1) AP/ Al 系コンポジット推進薬にRDXあるいはHMXを15%添加することによって, 比推力が2~3sec増加することが実験によって確認された。また, 理論計算によるとこの時の燃焼炎温度は

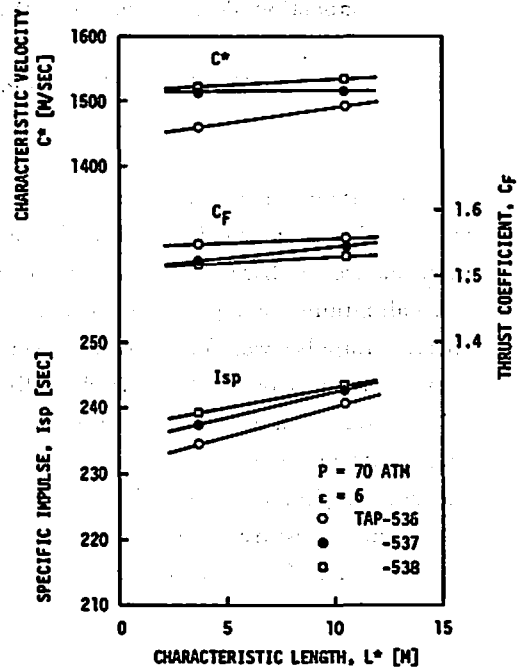


Fig. 9 Variations of specific impulse, thrust coefficient and characteristic velocity as a function of characteristic length for different Al concentrations

約 100°C 低下することが期待される。

- (2) 比推力を最大とするような最適な Al 添加量は, 平均粒径 $5\mu\text{mAl}$ において12~13%, $20\mu\text{mAl}$ においては10%前後の値となり, 理論的な最適添加量18~20%よりも低い値となっている。
- (3) Al の粒径が燃焼性能に及ぼす影響は, 平均粒径 $5\mu\text{mAl}$ を用いた推進薬の方が $20\mu\text{mAl}$ の場合に比較して燃焼効率が高く, 比推力は高い値を示す。
- (4) 特性長さ(L^*)の増加は推進薬の燃焼効率増大に有効であり, この効果は Al の添加量が多いほど Al の粒径が大きいほど大きく現われ, L^* が十分に大きくなると粒径に起因する特性速度(C^*)の差は小さくなる。

文 献

- 1) 久保田浪之介, 工業火薬協会誌, Vol. 41, No. 3 pp 125-130, 1980
- 2) 久保田浪之介, 工業火薬協会誌, Vol. 42, No. 1 pp 2-7
- 3) N. Kubota, M. Takizuka, T. Fukuda, AIAA 81-1582

Combustion Performance of RDX/AP/Al Composite Propellants

by Yukihiro IWAO* and Naminosuke KUBOTA*

Experiments have been performed to study the effects of aluminum concentration, aluminum particle size and characteristic length (L^*) on combustion performance of RDX(cyclotrimethylene trinitramine)/AP(ammonium perchlorate)/Al(aluminum) composite propellants. The Al concentration to optimize the specific impulse was found to be lower than that of the theoretical value. The characteristic velocity (C^*) which indicates the combustion efficiency of propellants in a rocket chamber showed the same trends as specific impulse. In the case of smaller Al particle size or longer characteristic length, the characteristic velocity and specific impulse were observed higher value.

(*Third Research Center, Technical Research & Development Institute,
Japan Defense Agency, 1-2-10 Sakae, Tachikawa, Tokyo 190, Japan.)