



った。そこでストランド試験によりニトラミンの粒度及び量の圧力指数に及ぼす影響を調べ、それを現象論的観点から考察し、その結果を高圧力指数 CMDB 推進薬開発の基礎にしようとした。

## 2. 試料組成

ニトラミンとしては、最も一般的なトリメチレントリニトロアミン（以下 RDX と記す）を用いることにした。RDX の粒度は、MIL-R-398C の Classification による粒度区分のものをそのまま用いることにした。これは、RDX の篩分を行うことは実験者にとって保安上困難であるためである。使用した RDX は昭和化成 K. K. 製のタイプ A、ロット SO-69-11-1 であり、粒度区分はクラス A、クラス C、クラス E 及びクラス F の 4 者を選定した。そのメジアン粒径  $dm$  は、各々  $92\mu$ 、 $330\mu$ 、 $20\mu$  及び  $63\mu$  であった。又、それらの粒度分布を Fig. 1 に示す。

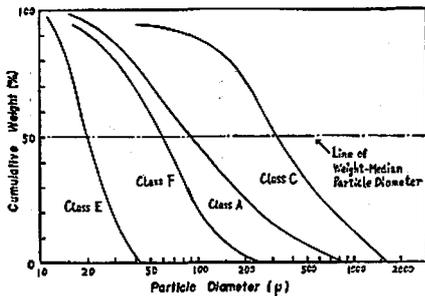


Fig. 1 Comparison of Particle Size Distributions of RDX.

AP は  $dm$   $40\mu$  のグラウンド AP を、そして Al は  $dm$   $6\mu$  のアトマイズ Al を使用した。又、DB 成分を構成するニトロセルロースは球形微粒子状のもの（一般には Fluid Ball Powder として知られており、日本油脂名称は MS (Micro Sphere) である）であり、可塑剤としてニトログリセリン及び不活性なトリアセチンをこれに加えてバインダーとしたものである。バインダーは MS がニトログリセリンより多く含まれる A タイプバインダーと、それよりニトログリセリン量を増した B タイプバインダーの 2 種類を本組成に用いた。

著者は RDX の量及び粒度を変化させることにより、第 1 表に示すような 9 種の組成を決定した。各組成は 3 薬種づつ 3 シリーズに区分されている。この 3 つのシリーズは、各々次に述べることを調べるのを目的としている。

- (1) A シリーズにおいては、RDX 増量の圧力指数に及ぼす効果。
- (2) S シリーズにおいては、AP を RDX に置換

表 1 高圧力指数 CMDB 推進薬の組成

シリーズ	薬種	配合比 (重量部)				RDX クラス
		DB バインダー*	Al	AP	RDX	
A	NOP-204	80	3	7	10	A
	-205				15	
	-206				20	
S	NOP-207	80	3	0	27	A
	-208			7	20	
	-209			13.5	13.5	
G	NOP-210	80	3	7	20	C
	-211					E
	-212					F

注)\* A 及び G シリーズでは A タイプバインダーを、S シリーズでは B タイプバインダーを用いた。

させることの圧力指数に及ぼす効果。

- (3) G シリーズにおいては、RDX の粒度の圧力指数に及ぼす効果。

この組成を定めるに当っては、RDX の増量に伴い、又、粒度の粗くなるに伴い圧力指数が高くなることが期待された。

## 3. 試料作製

推進薬各成分は品川式捏和機により減圧下で混合され、得られたスラリーは  $140 \times 140 \times 30$  mm の箱中に真空注型された。50°C 1 週間のキュアを行った試料ブロックより  $6 \times 6 \times 110$  mm の試料片が切り出された。この側面に信越化学製 MC-900 を浸漬塗布し、レストリクターとしての機能を持たせた。こうして得られたストランド試験片には燃焼秒時の測定のために、約 80 mm 間隔で 2 本の 0.5 A ヒューズワイアを通した。燃焼面がこの位置を通る時にヒューズワイアを断線させ、その電気信号をとらえることにより 2 点間の燃焼時間が計時される。これから燃速を求めるために、2 点間の距離は予め測定された。

## 4. 試験方法

上記のストランド試験片を各薬種につき 15 本づつ用意し、試験圧力 15, 30, 50, 70 及び  $100 \text{ kg/cm}^2$  の 5 点、各点での繰り返し数 3 個でストランド試験を行った。この試験は窒素雰囲気で行われるものである。又、試験温度は室温である。ストランド装置の概略図を Fig. 2 に示す。

一般に、このような圧力範囲においては温度一定の場合に、推進薬の燃速  $r$  と環境圧力  $P$  との間に次のような経験式が成立することがよく知られている。

$$r = aP^n$$

ここで、 $a$  及び  $n$  は定数である。 $n$  がいわゆる圧力

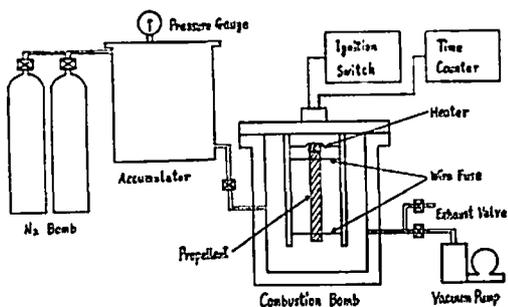


Fig. 2 Schem of Strand Bomb.

指数であり、又しばしば  $n$  指数とも呼ばれている。従つて、圧力とそれに対応する燃速を測定すれば容易に  $n$  指数を上式より算出することができ、ストランド試験はその簡便さの故に  $P-r$  関係あるいは  $n$  指数のみを求めたい時によく行われる試験法である。

### 5. 試験結果

室温  $7.5^{\circ}\text{C}$  におけるストランド試験の結果は第 2 表のようであつた。NOP-206, NOP-207 及び NOP-210 についてはその  $P-r$  プロットを Fig. 3 から 5 に示す。Fig. 4 に示すグラフから明らかなように、NOP-207 においては  $P=30\text{kg/cm}^2$  での燃速のプロットが大きく  $P-r$  ラインからずれている。これは酸化剤が RDX だけの場合には一種の非定常燃焼を起すものと思われる。次に、こうした燃焼特性と組成との関連性を見るためにグラフ化したものを Fig. 6 から 8 に示す。Fig. 6 には組成変数として RDX の量、Fig. 7 には RDX と AP の置換量、そして Fig. 8 には RDX の粒度を各々をつけている。これらのグラフから明らかなように、組成を定めるに当つて期待した RDX 増量及び粒度を粗くすることの指数を大にする効果がいずれも立証された。

表 2 高圧力指数 CMDB 推進薬のストランド試験結果

シリーズ	薬種	圧力指数 $n$	燃速 $r$ (mm/sec) at $P=50\text{kg/cm}^2$
A	NOP-204	0.74	6.1
	-205	0.83	6.2
	-206	0.85	6.1
S	NOP-207	0.83	5.6
	-208	0.83	6.2
	-209	0.78	6.2
G	NOP-210	0.89	6.5
	-211	0.75	6.0
	-212	0.84	6.1

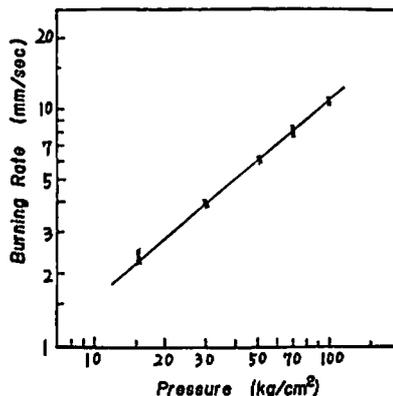


Fig. 3 Burning Rate vs. Pressure of NOP-206.

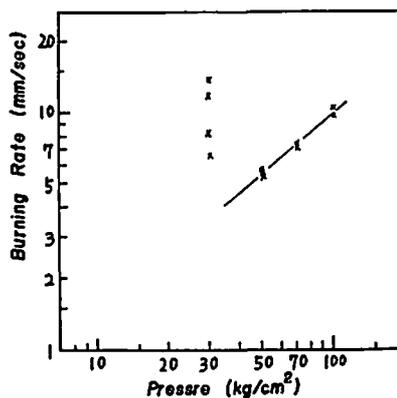


Fig. 4 Burning Rate vs. Pressure of NOP-207.

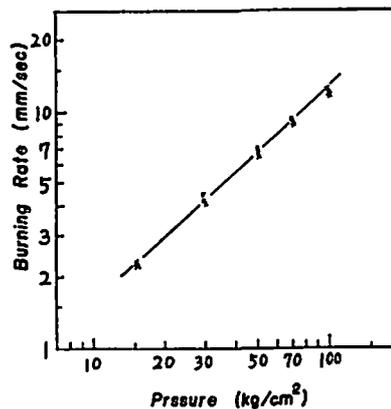


Fig. 5 Burning Rate vs. Pressure of NOP-210.

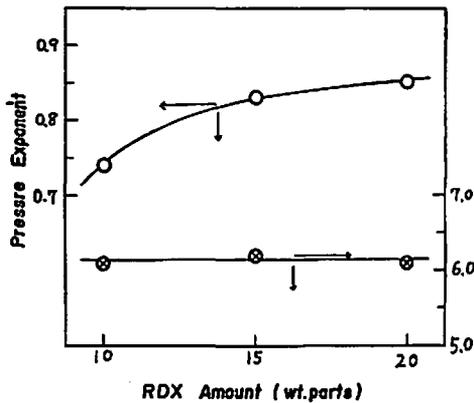


Fig. 6 Pressure Exponent and Burning Rate Variations Increasing RDX Amount.

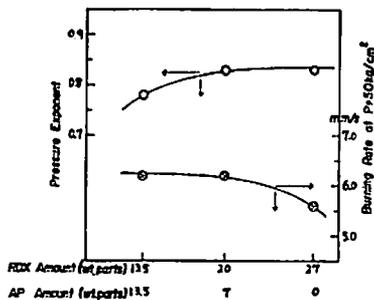


Fig. 7 Pressure Exponent and Burning Rate Variations Substituting RDX for Ammonium Perchlorate.

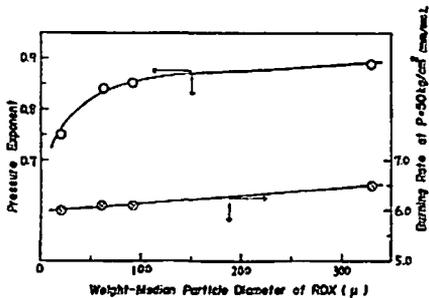


Fig. 8 Pressure Exponent and Burning Rate Variations as a Function of Weight-Median Particle Diameter of RDX.

## 6. 考 察

1) RDX入りCMDB推進薬の燃焼挙動は、DB系バインダー及びAPの分解反応に加えてRDXが反応に関与するために非常に複雑な様相を呈する。現在のところ、CMDB推進薬の燃焼機構はあまり明らかにされておらず、筆者の知る限りではそれらに関する公衆文献は見当らない。更にRDX入り推進薬に関する燃焼機構論的考察もR. Zimmer-Gallerの論文<sup>3)</sup>を

参考にできただけであつた。従つて、本考察では組成の燃焼特性に及ぼす効果を現象論的観点からのみ討議することに留めておき、機構論的には一つの仮説を挙げるだけにしておく。

2) 一般にAPを酸化剤とする通常のCMDB推進薬では、酸化剤量の増加に伴い燃速を増加させるがn指数を高くすることはない。これに反して、RDXはその量が増加するに伴いn指数を増加させていることが、Fig. 6, Fig. 7より明らかに見出せる。又、Fig. 7においてP=50kg/cm<sup>2</sup>における燃速が、RDXが増加するに伴い減少しているのは、ここではRDXの増加分だけAP量を減少させているためであり、前記のAP量の燃速に及ぼす効果を考えれば当然のことである。

以上から、RDX量がCMDB推進薬に及ぼす効果は、その増加に伴いn指数を高めるが燃速には影響しないことが、われわれの実験したRDX量範囲内(10~27重量部)では見出された。

3) RDX粒度の燃焼特性に及ぼす効果であるが、粒度が粗くなるに伴いn指数、P=50kg/cm<sup>2</sup>における燃速共に増加している。通常のコンポジット、CMDBあるいはFig. 9に示されるような転移点より低圧側におけるRDX入りコンポジットの各推進薬においては、一般的に酸化剤粒度が細くなればなるほど燃速が増加する関係にある。

RDX入りCMDB推進薬においてこれらと逆の傾向が現われているのは、n指数の粒度依存性が大きいため、ロケット常用圧近辺ではこのような特異な挙

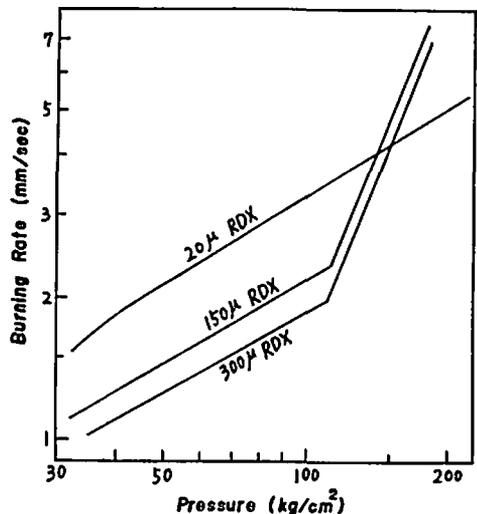


Fig. 9 Burning Rate vs. Pressure of 71% RDX-Polyester Propellant at Various RDX Particle Sizes According to R. Zimmer-Galler.<sup>3)</sup>

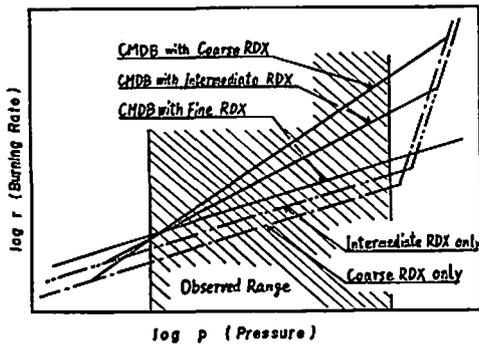


Fig. 10 Model Illustration of Pressure Exponent Dependence on RDX Particle Size in CMDB Propellant.

動を示すものと考えられる。この逆転現象は Fig. 10 のモデル図を見れば明らかであり、又、 $n$  指数の粒度依存性については次節で詳しく論議する。

4)  $n$  指数の RCX 粒度依存性についてであるが、これは Fig. 9 に示される  $P-r$  プロットの折れ曲り点、即ち転移点の存在に大きく関係しているように思われる。この転移点は RDX のような固体爆薬類においては特徴的<sup>67)</sup> なものであり、低圧側の定常燃焼域と高圧側の急激な不安定燃焼域との境界点であると定義されている。そして又、RDX を含んだコンポジット推進薬においてもこの存在が認められており、Fig. 9 のような結果が得られている。ここでは RDX 粒子が細かいほど転移点は高圧側にあり、 $20\mu$  RDX では観測範囲内で見出せないほど高圧側にあると考えられる。

RDX 粒径が小であるほど転移点が高圧側に存在するという事は、次のように説明されている。高圧側の不安定燃焼は RDX 粒子のクラッキングといった表面現象に起因するものであり、そのために粒子が細かいほどこの現象は起り難い、即ち不安定燃焼域がより高圧側に移動することになる。

RDX に関しての上記のような現象が CMDB 中でも起っていると考えると、以下のような仮説が導かれる。

コンポジット中ではバインダーがクーラントの役割を果たすため、推進薬の分解機構は酸化剤である RDX の分解機構のみならず、RDX の表面現象に起因する  $P-r$  プロットの明確な折れ曲り点は推進薬としても折れ曲り点として観測され、その結果、Fig. 9 に示すように転移点として出現する。一方、本実験に用いた CMDB では、バインダーが活性な DB であることに加えて RDX 以外に AP も酸化剤として含んでいるため、これらの個々の分解反応も推進薬の分解機構に影響し、その結果 RDX による折れ曲り点は推進薬とし

ては観測されず、転移域といった圧力幅をもつた状態で出現する。この転移域の圧力範囲がちょうど観測圧力と一致する場合、 $n$  指数の粒度依存性が生じ、そして又、前節で述べた燃速の逆転現象も生じ得る。このことは、Fig. 10 に示されるモデル図を参照すれば一目瞭然であろう。ここでは斜線部分が観測範囲であり、そして推進薬の  $P-r$  プロットは実線のように観測される。

この仮説は非常に大胆なものであり、本来ならばもっと高圧側のストランド試験を行い、その結果転移点の存在しないことが立証されてからたてるべきものであろうが、あえて今後の検討課題の一つとしてうちたてて見たものである。

5) Fig. 4 に示す NOP-207 の  $P=30\text{kg/cm}^2$  でのプロットのずれも興味ある問題である。ここでは 4 個の試料ともこのような挙動を示したことから考えて、単なるレストリクターの不具合による燃速といった現象でないことは明らかである。酸化剤がすべて RDX である CMDB 推進薬の低圧における非定常燃焼の問題についても更に検討を進めたいと考えるが、本報では詳しく論議しない。

## 7. 総 括

RDX 入り CMDB 推進薬を用いて高い指数を有する推進薬の研究を行った。高圧力指数推進薬は今後の固体推進薬の進むべき制御可能な固体ロケットモータにとって必須のものである。推進薬の開発に当って、RDX 増量の高  $n$  指数化を目的とする A シリーズ、RDX と AP の置換による高  $n$  指数化を目的とする S シリーズ、及び RDX の粒度を粗くすることによる高  $n$  指数化を目的とする G シリーズの各シリーズ 3 葉種計 9 葉種を考え、ストランド試験により  $n$  指数を評価した。 $n$  指数は RDX 粒度の最も粗い NOP-210 において 0.89 であり、制御可能高  $n$  指数推進薬用として実用可能な値を持つものの開発ができた。試験結果は組成を定めるに当って期待した効果といずれも矛盾しなかつた。結論としては下記の 2 点が導かれた。

- 1) ニトラミンを含む CMDB 推進薬は  $n$  指数に関し特異な挙動を示す。
- 2) CMDB 推進薬の高  $n$  指数化をはかるには、ニトラミン量を増加し、又粒度の粗いものを用いればよい。

## 8. 結 語

本研究は科学技術庁航空宇宙技術研究所の委託研究の一環として行われたものであり、このストランド試験を基に  $100\phi \times 300\text{L}$  スロティドチューブ型推進薬が製作され、航空宇宙技術研究所宇宙研究グループにおいて種々の燃焼制御の試験が行われている。

われわれはこの研究が、日本の宇宙開発の一助となり、将来はこの推進薬のモータが宇宙空間を飛びまわることを期待している。

最後にこの研究開発に対し、数々の示唆、協力を頂いた航技研宇宙研究グループの五代富文リーダー及び毛呂明夫、清水昭紀の諸氏をはじめとするグループ員の方々に深く感謝すると共に、この報告の発表を快く承諾下さったことも合せて感謝します。

(昭和45年6月工火年会にて発表)

#### 文 献

- 1) 五代富文他, “固体ロケット・モータの推力大きさ制御の研究” 航空宇宙技術研究所報告 (TR-177), 1969年7月
- 2) T. Godai and Y. Yuzawa; “Thrust Magnitude Control of Solid Rocket Motors-Characteristic

Analysis and Small Motor Tests” 8th International Symposium on Space Technology and Science, Aug. (1969)

- 3) 五代富文; “固体ロケット・モータの推力大きさ制御—特性と小型モータによる実験” 第13回宇宙技術講演会講演集, 1970年1月
- 4) 五代富文; “固体ロケットの推力中断と大きさ制御” 日本航空宇宙学会誌, 18, 297, Aug. (1970)
- 5) R. Zimmer-Galler; AIAA J. 6, 2107, Nov. (1968)
- 6) Wilfong, R. E. et. al.; J. Phys. & Colloid Chem. 54, 863. (1950)
- 7) Taylor, J. W.; Trans. Faraday Soc., 58, 561. (1962)

## On CMDB Propellant with High Pressure Exponent (I)

by M. Takizuka, Y. Shimizu, K. Kitoh and M. Shinohara

Propellants with high pressure exponent were studied using CMDB containing RDX. The high pressure exponent-propellant is required to a controllable solid rocket motor aimed at by a future propellant. Nine propellant formulations were prepared and the pressure exponent was evaluated by the strand bomb test. NOP-210 with the most coarse RDX had  $n=0.89$  and this value was applicable to the practical controllable high pressure exponent-propellant.

Conclusions were as follows. 1) CMDB propellant containing nitramine indicates unique behavior concerning pressure exponent of CMDB. 2) In order to increase pressure exponent of CMDB, it is necessary to increase RDX amount or to use coarse RDX.

(Nippon Oils & Fats Co., Ltd., Taketoyo Plant, Aichi)