

## 回転する固体ロケット推進薬の燃焼性

横山 孝夫\*・名和小太郎\*

### 1. 序論

ロケット・モータに回転をあたえる方式は、ロケットの動的安定性を保持し、またその軌道分散を抑制するために、設計者により、従来、興味をいだかれてきた。この方式は、固体推進薬の研究者にとつても、近年、にわかに関心の対象となるにいたっている。その理由は、回転する固体ロケットモータのしめず特異現象が報告されはじめたことにある。すなわち、この種のモータは、第一に、その燃焼パターンにおいて内圧を増大し、燃焼時間を減少せしめ、第二にそのチャンバを異常に加熱せしめる。そして、この第一の特異性が、固体推進薬研究者の、したがつてわれわれの、興味の対象となるわけである。

この興味は、次の研究にわれわれをみちびくであろう。すなわち、第一に、この特異性を予測する方法を確立し、第二に、この特異性を除去する技術を開発することが、われわれの作業となろう。しかし、本報告におけるわれわれの作業は、その第一のものに限定される。なぜならば、従来の諸報告は、現象それ自体の記載について、また、そのメカニズムの説明について、きわめて多様であり、したがつて、われわれは、まず、この現象の統一的な把握を要求されているからである。このため、われわれ自身があつかっている推進薬について、その回転特性を現象的・実験的に調査することから、われわれははじめる。

### 2. これまでの諸成果

#### 2.1 諸経験

これまでに報告されている各種モータの回転特性を、表1に要約する。この表は、回転特性の多様性を反映している。なお、表1には軸方向加速をうけるモータに関する報告も引用されている。

#### 2.2 諸実験

##### (1) Horton II<sup>2)</sup>の実験

100gまでの軸方向加速度環境下においては、燃速の変動をみとめることができなかつた。

##### (2) Landau et. al.<sup>3)</sup>の実験

190gまでの加速度環境下において、燃速の変動をみとめることができなかつた。ここでは、加速度の方向、推進薬の組成、モータの寸度、燃焼の圧力による副次的な変動もみとめることができなかつた。

##### (3) Murphy et. al.<sup>7)</sup>の実験

アルミニウムをふくまぬポリサルファイド系推進薬は、40000 rpm において、燃速の増大傾向をしめした。この傾向は、円孔の場合に墨孔におけるより大となる。

##### (4) Hortham et. al.<sup>8)9)</sup>の実験

ポリブタジエン系推進薬においては、燃速の増大は加速度の増大にともなう。この傾向は、アルミニウムの有無に無関係である。ただし、150g以下では、回転変動は、かならずしも明確ではない。また、アルミニウム含有量の大きなものについては、燃速の増大に飽和限界値がある。さらに、燃速の変動は、加速度の方向に対して、きわめて敏感である。

また、バインダを変化させた場合、燃速の増大傾向は、ポリウレタン>ダブルベース>ポリブタジエンの順におおきい。

### 2.3 諸仮説

#### (1) Wallの仮説

回転により、推進薬中心軸付近に、たかい角速度をもつガス流が生成する。このガス流が推進薬表面に浸食燃焼の効果をおよぼし、これにより内圧が増大する。(原論文は confidential であるため詳細は不明である。)

#### (2) Coy, Irvin et. al., Barber などの仮説

回転による遠心力で推進薬中に歪が発生し、このために燃速の増大、したがつて、内圧の増大がひきおこされる、というものである。(これらの報告はいずれも confidential であり、具体的な内容は明確でない。)

#### (3) Bastress<sup>1)</sup>の仮説

回転により、チャンバ内のガスが回転方向の速度成分をもち、このため、ノズル・スロート部のガス流速が音速以下となる。これは、スロートの有効面積の減少と同様の結果をみちびき、したがつて内圧は増大する。

昭和44年5月14日受領

\*旭化成工業(株)板ノ市工場 大分市大字里2620

表1 これまでの諸経験

モータ	メーカー	モータ径 cm	推進薬重量 kg	推進薬組成 <sup>1)</sup> %	回転数 <sup>2)</sup>	燃焼変動 <sup>3)</sup>	報告
ALCOR IA	Aerojet	50.8	415	? + Al(16)	480 rpm	あり	4), 5)
BE 3	Hercules	?	?	?	600	なし	11)
Black Brant III	Bristol	25.7	200	PU(25)+AP(70)+Al(5)	11000	"	5)
CETUS-17	NPP	43.6	62.6	PU(25)+AP(57)+Al(18)	200	あり	4)
CYGNUS-15	NASA	38.1	45.8	PS(18)+AP(81)+Al(1)	900	なし	4)
CYGNUS-15	Aerojet	"	"	PU(15)+AP(68)+Al(17)	"	あり	4), 5), 11)
FW-4 S	UTC	49.8	272	PBAN+AP+Al(17)	400	"	8), 13)
HYDAC	Lockeed	29.9	103	PBAN(16)+AP(68)+Al(16)	900	"	4), 5)
1-KS-250	Aerojet	94.0	0.45	PU+AP+Al	160 g	なし	3)
10-KS-2500	"	23.8	47.6	"	190 g	"	3)
NOTS 551	NOTS	33.0	144	PU(25)+AP(57)+Al(18)	480 rpm	あり	4), 5), 9)
480 S-II	日産	48.3	92.5	PU(19)+AP(65)+Al(16)	390	"	12)
TE-388 Iroquois	Thiokol	19.7	82.1	PBAA(14)+AP(68)+Al(18)	12000	"	5)
TM-3	UTC	45.7	{214 272}	PBAN+AP+Al	400	"	4)
TX-3	Thiokol	12.7	1.36	PBAA+AP+Al	145 g	なし	3), 11)
X 248	Hercules	45.7	206	CMDB(97)+A(13)	720 rpm	あり	4), 5), 8)
X 258	"	"	227	CMDB(80)+Al(20)	250	"	4), 5), 11)
X 259	"	76.3	1160	"	"	なし	4), 11)
XM-85	Atlantic	43.6	?	PU+AP+Metal(12)	200	"	4), 5)
実験モータ	Thiokol	11.4	?	PS+AP	40000	あり	7)
"	"	21.9	{36.9 45.4}	PBAA+AP+?	100 g	なし	2)

注 1) 組成名略称 PU: ポリウレタン, PS: ポリサルファイド, PBAN: ポリブタジエン・アクリル酸, PBAN: ポリブタジエン・アクリルニトリル, CMDB: 過安入ダブルベース, AP: 過安, Al: アルミニウム.

- 2) 単位を g でしめしたのは軸加速をうけたもの。  
3) 燃焼変動の有無の判定は報告者にしたがった。

(4) Northam et. al.<sup>9)</sup> の仮説

回転の加速度により、推進薬表面に金属の反応生成物が付着する。このため、推進薬表面上に小孔が多数発生し、したがって、燃焼面積および燃速が増大し、その結果、内圧が増大する。

(5) Whitney et. al.<sup>10)</sup> の仮説

回転によりガス流が偏向し、したがって、ガス中の金属の反応生成物のチャンパ内滞留時間が増大する。これが、推進薬への熱伝達をたかめ、このため、燃速が増大し、そして内圧が増大する。

(6) Lucy<sup>5)</sup> の意見

回転により、インシュレータの機能がうしなわれ、これが内圧の変動をもたらす。(これは、Lucy が他のいくつかの仮説と共にあげているものである。)

3. 装置

3.1 スタンド

(1) 仕様

実験のために製作されたスタンドは、次の仕様をもつものである。

モータ姿勢	垂直
モータ最大径	30 cm
モータ最大長	80 cm
モータ最大推力	5000 kg
モータ最大内圧	70 kg/cm <sup>2</sup>
最大回転数	1000 rpm
計測量	内圧および回転数
動力	2 HP

上記仕様は、次の考察にもとずき決定された。

モータ姿勢——これを垂直方式にした理由は、これが、水平方式に比較して、モータ支持の確実性と安定性において、また、スタンド製作費において、まさっているためである。

モータ最大寸度——この寸法は、工場所有の各種試験用モータを余裕をもつて利用しうるようにきめられ

た。

モータ最大推力——前項に準じた。

モータ最大内圧——この値は、市販の耐圧式回転ジョイントの仕様から決定された。

最大最大回転数——前項に準じた。また、表1により、この値は十分に意味をもつ範囲をおおうものと判断された。

計測量——推力の計測は省略された。これは回転による雑音の除去が困難であったためである。

動力——動力源として電動機をえらび、タービン方式または自己回転方式をとらなかつたのは、回転数の要求が電動機で十分に確保できたからである。

## (2) 構造

スタンドの構造は、図1に示めされる。モータは、その前部を回転テーブルに結合される。回転テーブルは推力受により水平に保持され、無段変速機を介して電動機により駆動される。回転テーブルには、その回転数をしめすためのマイクロ・スイッチが接触する。推力受は中心軸をもつ円筒であり、モータ回転は中心軸でうけられ、モータ推力は円筒部でささえられる。(この円筒部にゲージを貼付すれば、推力計測が可能である。) 中心軸はその中心に空孔をもち、その上端は回転テーブルおよびモータ前部鏡板を貫通してチャンパ内部に達し、その下端は耐圧式回転ジョイントを介して圧力計にみちびかれる。モータ胴部は3本の支

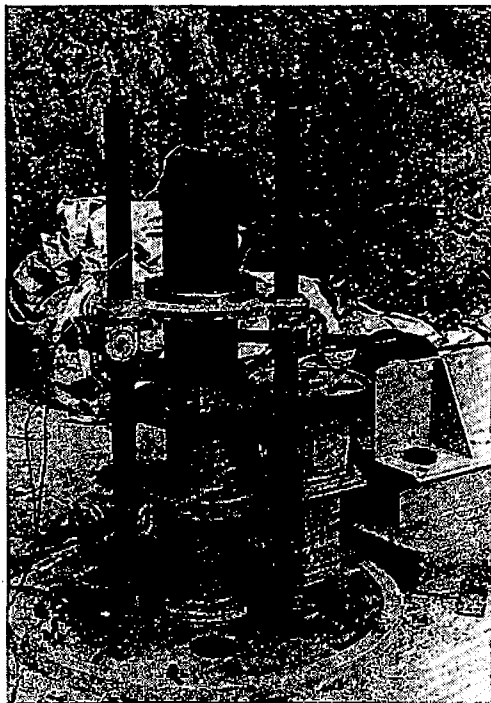


図1 スタンドおよび供試体

柱により垂直に保持される。構造の各部において、回転部と非回転部とはベアリングによつて接触をもたれる。カーボン・ブラシがモータ周囲にまいた割バンドに接触し、これがモータ内のイグナイトに点火電流をあたえる。本スタンドは坂ノ市工場の設計製作にかゝるものである。

注 Manda<sup>9)</sup>, Swain et.al.<sup>10)</sup> などの報告によれば、アメリカではきわめて高性能の回転燃焼スタンドが建造されている。しかし、ここにしめした簡便で低価格のスタンドでも、基礎的な実験については、相当程度まで処理しうる。

## 3.2 計測器

圧力計測は、ストレイン・ゲージ方式のピックアップの出力を増幅し、これを記録する方式とした。ピックアップには新興通信製 PRE-100 型圧力計を、増幅器には新興通信製 DS 6/RX 型ストレイン・メータを、記録器には三栄測器製 500-B 型電磁オシロを使用した。

回転数計測は、マイクロ・スイッチのオン・オフを電磁オシロ上に記録することによりおこなわれた。

## 4. 供試体

供試体は図1に示めされている。

### 4.1 推進葉

推進葉としては、フリー・スタンディング方式、内面燃焼型のものをえらんだ。その寸度は 14cm φ×25cm l であり、内孔形状は表2に、組成および燃焼性能は表3に示めされる。本推進葉は、坂ノ市工場において製造された。

表2 内孔形状

名称	形状	周辺長 cm	断面積 cm <sup>2</sup>	ウェブ cm	正味外径 cm
S 3	8 スロット	45.0	41.9	2.2	13.7
S 4	"	41.1	26.9	3.0	"
S 11	"	27.0	17.8	3.9	"
T	円孔	23.9	45.3	3.0	"
S 15*	6 スロット	13.9	27.6	1.6	6.4

注 \* 補足実験にて使用した。

表3 組成と性能

名称	組成				性能***	
	バインダ* %	過安 %	ZrO <sub>2</sub> %	触媒** %	燃速 cm/s	比推力 s
F 45-1	14.3(PB)	75.2	9.0	1.5(LC)	0.52	211
L 46	17.7(PB)	70.8	8.8	2.7(LC)	0.35	196
F 25-4	15.9(PB)	72.6	8.8	2.7(LC)	0.36	197
B 35-10	14.8(PB)	72.2	8.7	4.3(HC)	1.23	208
L 69	24.0(PS)	72.1	1.0	2.9(LC)	0.46	195

注) \* PB: ポリブタジエン, PS: ポリサルファイド

\*\* LC: 低燃速触媒, HC 高燃速触媒

\*\*\* P=30 kg/cm<sup>2</sup> において

#### 4. 2 イグナイタ

点火薬の組成と重量とは、表4に示す。これらは布製の袋につつまれてチャンバ前部鏡板にとりつけられた。スキップはDDNPを主剤とするものである。小粒黒色火薬は日本化薬製、その他は坂ノ市工場製である。

表4 点火薬

	黒色火薬 (径1mm)	黒色火薬 (径5mm)	推進薬 ペレット (径5mm)	計
低燃速推進薬用	5g	25g	5g	35g
高燃速推進薬用	15	20	0	35

#### 4. 4 チャンバ

チャンバは鋼製であり、ノズルは、スロート部をグラファイト・インサート方式としている。本チャンバも坂ノ市工場製である。

#### 5. 実験

実験は、すべて、20°Cの推進薬温度および常圧の外気圧下において、実施された。回転数は、最大800rpmとされたが、この値は、次の考察により決定され

たものである。

(1) われわれは、径14cmの試験モータを、X258(Scout4段モータ)と、すなわち、径45.7cm、回転数250rpmのモータと、同等の条件下で燃焼に供しようとかんがえた。このため、試験モータの接線速度を、X258のそれに略一致するように、回転数をきめた。

(2) スタンドはその最大能力(回転数1000rpm)より若干下まわる状態で、使用されることが要求された。

実験は7グループに分割されて実施された。各グループの実験目的は、次に示すとおりである。

グループI: 実験装置および実験方法全般にわたり、その機能および手順を確認するために実施された予備実験。

グループII: 低燃速用ポリプロタジエン系推進薬に対する実験。

グループIII: グループIIに準ずる。ただし推進薬組成は若干ことなる。

グループIV: Knの高低、すなわち、内圧の高低によ

表5 実験結果

No.	試験	組成	内孔	モータKn	回転数 r/min	最大圧力-最小圧力 kg/cm <sup>2</sup>	スライパ期 s	圧力積 kg/cm <sup>2</sup> -s	ノズル径 変化* mm
1	I	F45-1	S 3	207	0	11.6	1.05	128	-0.7
2	"	"	"	207	200	12.0	1.01	127	-1.2
3	"	"	"	208	400	12.0	1.03	129	-0.7
4	II	L46	S 3	249	0	11.0	1.64	160	-3.3
5	"	"	"	249	600	12.7	3.10	159	-3.7
6	"	"	"	251	800	12.2	3.00	158	-3.5
7	III	F25-4	S 4	318	0	16.1	0.53	351	-1.4
8	"	"	"	309	400	19.1	1.92	334	-1.4
9	"	"	"	315	800	29.1	1.89	322	-1.9
10	IV	F45-4	S 4	305	400	17.7	1.80	269	-1.5
8	"	"	"	309	"	16.1	1.92	334	-1.4
11	"	"	"	445	"	23.8	1.94	377	-1.3
7	V	F25-4	S 4	318	0	16.1	0.53	351	-1.4
12	"	"	T	314	"	30.3	0.18	331	-1.1
9	"	"	S 4	315	800	29.1	1.89	322	-1.9
13	"	"	T	314	"	41.0	0.30	312	-1.2
14	VI	B35-10	S 3	99	0	12.0	0.41	61.1	-0.5
15	"	"	"	98	400	12.0	0.38	60.5	-1.0
16	"	"	"	101	600	10.6	0.38	60.4	0.0
17	"	"	"	99	800	10.2	0.40	60.3	-1.1
18	VII	L69	S11	282	0	24.4	0.40	285	1.0
19	"	"	"	277	400	23.9	0.68	280	1.2
20	"	"	"	279	600	23.6	0.55	248	0.6
21	"	"	"	275	800	24.2	0.73	293	1.6

注) 正は径の拡大、負はその減少を示す。

る副次的効果を確認する実験。

グループV：内孔形状による副次的効果を確認する実験。

グループVI：高燃速用ポリブタジエン系推進薬に対する実験。

グループVII：低燃速用ポリサルファイド系推進薬に対する実験。

## 6. 実験結果

実験結果は、表5および図2～図8に要約してしめされる。表5には、波形の変動をしめす量として、圧力の最大値と最小値の差および、スライバ期を記載した。

回転変動の生じたものについては、全般的に次の現象がみとめられる。

(1) 変動の発生した場合、その傾向は、燃焼末期にいたる程顕著になる。すなわち、燃焼末期の内圧が増大し、また、スライバ期も増大する。(浸食燃焼は、燃焼初期に内圧が増大することにおいて回転変動とことなり、スライバ期が増大することにおいて回転変動と一致する。)

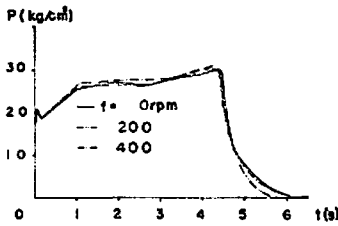


図2 グループIの実験結果

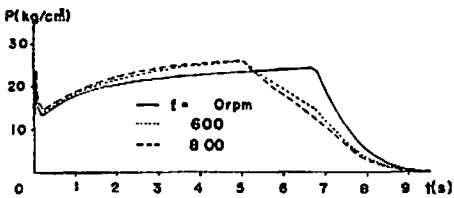


図3 グループIIの実験結果

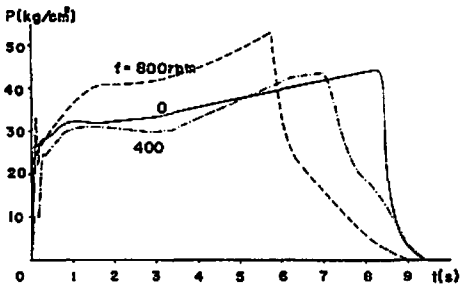


図4 グループIIIの実験結果

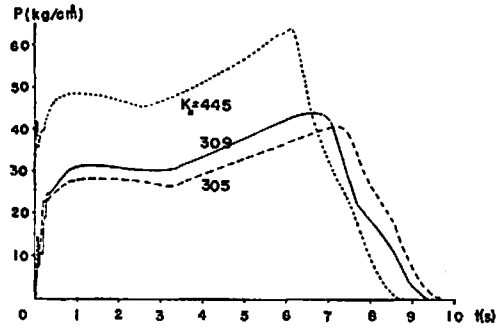


図5 グループIVの実験結果

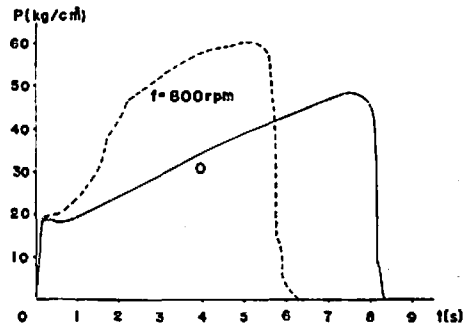


図6 グループVの実験結果

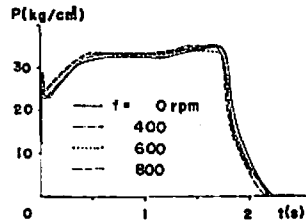


図7 グループVIの実験結果

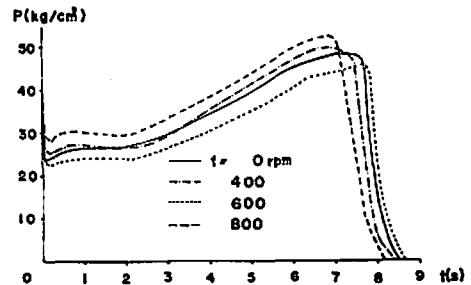


図8 グループVIIの実験結果

(2) 変動の生じた供試体については、その燃焼後のレストリクタの焼損が大である。その焼損の程度は、スロット部において、特に、その前方部分において顕著である。これは、(1)のスライバ期増大の結果をうらずける結果である。また、この事実、推進薬

前部における燃速の増大を予想させる。

(3) 変動の生じた組成からなる 供試体は、回転の有無にかかわらず、燃焼後ノズル・スロート径の減少をしめす。ノズル・スロート径の減少は燃焼残渣の付着によるものであり、その組成は、F 25-4 について湿式分析した結果によれば、アルミニウム 10.4%、アルミナ 80.8%、その他 8% である。また、ノズル側レトリクタ 内側にも燃焼残渣の付着がみとめられた。ただし、これまでに報告されているようなノズル・スロートの焼食は、みとめられなかつた。

(4) 変動の生じた 供試体については、スライパ期に、ノズルより排出する炎が旋回する。この事實は、ガス流が回転方向の運動量成分をもつことを予想させる。

(5) 変動の生じた場合には、圧力積の減少がみとめられる。これは比推力の減少を示唆する。

### 7. 補足実験

回転変動の 浸食燃焼に対する関係を確認するために、浸食燃焼の実験を実施した。実験は、回転変動をしめす組成と、これをしめさない組成とについて、おこなわれた。供試体と実験条件、実験結果は、表 9 および図 9、図 10 にしめされるとおりである。

F 25-4 については、ことなる Kno によつて高 L/D の供試体と低 L/D の供試体とが燃焼されているので、後者の解析値を前者の Kno にあうように換算した。( ) 内にしめす値がそれである。

表 6 浸食燃焼実験

供試体 No.	E 1	E 2	E 3	E 4
組 成	F 25-4	F 25-4	B 35-10	B 35-10
長さ/外径	5	10	10	15
Kno	240 (285)	285	185	185
ノズル面積/内孔面積	0.83 (0.67)	1.00	0.54	1.00
平均内圧	28.7 kg/cm <sup>2</sup> (33~34)	39.5	89.6	108.5
平均燃速	0.34 cm/s (0.35~0.36)	0.49	1.64	1.91

(注 供試体：フリー・スタンディング、内孔形状 S 15、外径 6.6 cm)

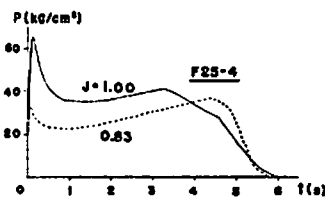


図 9 回転変動のある推進薬の浸食燃焼

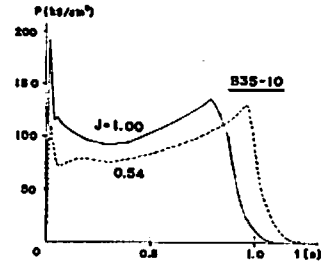


図 10 回転変動のない推進薬の浸食燃焼

## 8. 考 察

### 8.1 加速度の効果

本実験においては、推進薬のうける加速度は、その周辺部で、600 rpm の場合に約 25 g、800 rpm の場合に約 40 g である。したがつて、以下の考察は、40 g 以下における回転変動にかざられる。

ここで、40 g の回転加速度により推進薬中に生ずる歪力を計算すると、約 0.05 kg/cm<sup>2</sup> となる。この値は燃焼内圧により発生する歪力に比較して、2桁小さい。すなわち、回転の歪力による燃速の増大は、かりに存在したとしても、無視しうる。

### 8.2 組成の効果

組成の効果は、グループ I、II、III、VI および VII の結果を検討することにより、みちびかれる。この結果は、表 7 のように整理され、この表から、次の結論がえられる。

表 7 組成の効果

グループ	組 成		最大 回転 速度	回転 変動	金属性 残渣
	バインダ	アルミ ニウム			
I	ポリブタジエン	9.0	400 rpm	なし	ややあり
II	"	8.8	800	あり	あり
III	"	8.8	"	"	"
VI	"	8.7	"	なし	ややあり
VII	ポリサルファイド	1.0	"	"	なし

すなわち、組成により、回転変動のある場合と、そのない場合とがある。この結果は、これまでのおおきの報告に一致している。しかし、その具体的内容に関しては、かならずしも一致しない。

(1) アルミニウム含有の組成がかならず回転変動をひきおこすとはかざらない。すなわち、アルミニウムを含有し、しかも回転変動をしめさない F 45-1、B 35-10 のような組成がある。しかし、アルミニウム含有量が零にちかい L 69 には回転変動がみとめられない。(ただし、L 69 においてはバインダも他の組成

とことなっているため、ここでアルミニウムの効果を主張することは困難である。)

(2) 前項にのべたように、推進中のアルミニウムの含有量は、かならずしも回転変動の有無を決定する要因とならないが、6にのべたように、金属性残渣を生じやすい組成(L46, F25-4)については、回転変動がみとめられる。さらに、これも6にのべたように、推進薬前部の燃速の増大が回転変動するものに対してみとめられる。これらの結果は、金属粉のチャンバ内での滞留時間の増大による燃速の加速、または金属粉の推進薬表面への付着による燃速の加速などの仮説を支持するものといえよう。

本項の結果を前項の結果とまとめて考察すると次の結論がえられる。すなわち、回転変動はアルミニウムの含有がなければ発生しないが、しかし、回転変動がアルミニウム含有のすべての場合に生ずると主張することはできない。

(3) 回転変動をしめす組成は浸食燃焼の効果が大きく、回転変動をしめさない組成は浸食燃焼の効果が小である。これを確認するため、7にのべたように、回転変動をしめす代表的な組成 F25-4 と、これをしめさない代表的な組成 B35-10 とをえらび、これらに関する浸食燃焼の実験を実施し、表6の結果をえた。これを表5の結果と対応させて整理したものが表8である。表8において、F25-4, L/D 10の供試体にしめす性能値としては、Kno 285の換算値をもちいた。さらに、この表におけるJの値に注目し、F25-4がもつ0.67という値を、B35-10がもつ0.54という値にちかざれば、F25-4のしめすRe/RoおよびPe/Poは表中の値より大となり、浸食効果の回転変動に対する相関はよりたかまるであろう。

表8 浸食燃焼と回転変動との比較

	燃 速		内 圧	
	Rerosive /Ro*	Rspin /Ro**	Perosive /Po*	Pspin /Po**
F25-4	>1.37	1.46	>1.18	1.24
B35-10	1.21	1.04	1.16	1.03

注) \* Ro, PoはJ=0.67 (F25-4), 0.54 (B35-10)に対する値

Rerosive, PerosiveはJ=1.0に対する値

\*\* Ro, Poは非回転に対する値

Rspin, Pspinは800rpmに対する値

浸食燃焼は燃焼初期、すなわち、ガス流速の最大な条件下で顕著である。回転変動は燃焼末期、すなわちガス流速の最大な条件下で顕著である。ここに、双方のメカニズムの類似性が予想される。

### 8.3 内孔形状の効果

内効形状の効果はグループの結果Vよりみちびかれる。この実験では、供試体として円孔推進薬と星孔推進薬とをえらび、それぞれのウェブを同一とした。この結果を、時間に対する推進薬燃焼量でプロットしたものが図11である。ここで推進薬燃焼量としては、 $\int_0^t p dt / \int_0^T p dt$ をとつた。ただし、Tは全燃焼時間をしめす。この図から燃速の変動をつかむためには、そのウェブ燃焼時間に注目すればよい。円孔推進薬についてはその全燃焼時間をウェブ燃焼時間とすることができ、最大推進薬については推進薬燃焼量が、95%に達するまでの時間をウェブ燃焼時間とみなすことが

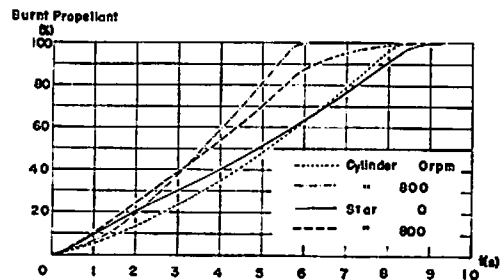


図11 内孔形状の効果

できる。(これは0rpmの星孔に対するこの時間が、0rpmの円孔のウェブ燃焼時間にひとしいことから主張できる。)

したがって燃速の増加率は、ウェブ燃焼時間の変動率の逆数をとることによつてえられる。すなわち、円孔に対しては8.4 sec/6.2 sec=1.35、星孔に対しては8.3 sec/7.0 sec=1.19という値がもとめられる。一方、Murphy et. al.<sup>2)</sup>によれば、燃速の増加率は形状因子Xに対し、対数目盛上で線型関係をもつ。われわれの場合について、同様の処理をおこなうと、図13にしめすように、Murphy et. al.の結果と類似の傾向をもつ結果がえられる。なお、形状因子Xとは

$$X = \text{内孔面積} / \text{周長のひとしい円孔面積}$$

であたえられ、われわれの場合には、円孔に対して1.0、星孔に対して5.0の値をしめす。

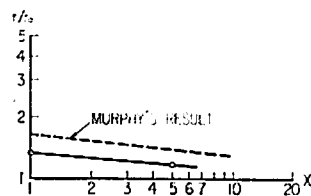


図12 内孔形状因子と燃速増加率

#### 8. 4 $K_n$ (内圧) の効果

$K_n$  (内圧) の効果は、グループ IV の結果よりみちびかれる。ここでは、えられた燃速を  $K_n$  309 に換算した。(この換算は、この組成に対して実施された別の実験から圧力指数をもとめ、この圧力指数をもつ曲線にそつてデータを移動させることによりおこなつた。圧力指数は 0.291 であつた。)

この結果を、回転数 0 の場合からの燃速の増加率としてしめすと表 9 のようになり、 $K_n$  の効果はみとめられないことがわかる。

表 9  $K_n$  の 効 果

$K_n$	燃速増加率*
305	1.14
309	1.18
445	1.13

\*  $K_n$  による変動分は除去した。

#### 9. 要 約

回転による固体ロケットモータの燃焼性の変動については、推進薬に含有されるアルミニウムの影響がおおきいものと推定される。ただし、アルミニウムを含有するすべての推進薬に回転変動がみとめられるわけではない。回転変動は、浸食燃焼の効果のおおきな組成の推進薬において顕著である。また、回転変動に対しては、内孔形状は副次的な効果をもつが、モータ  $K_n$  はそれをもたない。

#### 10. 謝 辞

本研究は1967年に開始されたものであるが、当時この未知で重要な課題にわれわれの関心をひきつけてくださったのは宇宙開発推進本部の黒田博士である。また、本報告に引用したおおくの論文をこころよく貸与して下さつたのは東大宇宙研の倉谷教授である。ここに感謝の意を表する。さらに本実験全般にわたり、坂ノ市工場の同僚諸氏から貴重な援助をうけた。あわせて感謝したい。

#### 文 献

1) E. K. Bastress : Interior Ballistics of Spinning Solid-Propellant Rockets, J. Spacecraft, 2, [3], 455 (1965)

2) J. G. Horton II : Experimental Evaluation of Solid Propellant Rocket Motors under Acceleration Loads, J. Spacecraft, 1, [6], 673 (1964)

3) Z. H. Landau & J. M. Cegielski : Ballistic Behavior of Solid Propellant Grains under High Acceleration, J. Spacecraft, 2, [3], 358 (1965)

4) M. H. Lucy, G. B. Northam & R. L. Swain: Rocket Motor Spin Data Summary, Presented at the NOTS Symposium on Behavior of Propellant under Acceleration Fields (1964)

5) M. H. Lncy: Spin Acceleration Effects on Some Full-Scale Rocket Motors, J. Spacecraft, 5, [2] 179 (1968)

6) L. J. Manda: Compilation of Rocket Spin Data, Vol. 1, NASA CR 66625 (1968)

7) J. M. Murphy & P. H. Wall: Effects of Grain Configuration upon the Burning Rate of Spinning Rocket Motor, J. Spacecraft, 3, [2], 263 (1966)

8) G. B. Northam: An Experimental Investigation of the Effects of Acceleration on the Combustion Characteristics of an Aluminized Composite Solid Propellant, Presented at the ICRPG/AIAA Solid Propulsion Conference (1966)

9) G. B. Northam & M. H. Lucy: On the Effects of Acceleration upon Solid Rocket Performance, Presented at the 3rd ICRPG/AIAA Solid Propulsion Conference (1968)

10) R. L. Swain, M. H. Lucy & P. H. Foss: Rocket-Motor Spin-Test Apparatus, Presented at the 2nd Annual Meeting of the ICRPG Working Group on Static Testing (1964)

11) C. K. Whitney, T. F. Owens, J. Paskind & M. B. Rubin: Scout Motor Performance Analysis and Prediction Study, NASA CR-336 (1965)

12) 倉谷, 秋葉: L-エンジンの地上燃焼試験, 宇宙研報告, 4, [4B], 625, (1968)

13) FW-4S: UTC Brochure

## Spin Acceleration Effects in Solid Propellant Rocket Motors

by T. Yokoyama and K. Nawa

Spin acceleration effects on solid propellant rocket motors are experimentally



investigated. A special stand, which allows spin-test at 1000 rpm, is designed and constructed. Test-motors are 14 cm in diameter and 25 cm in length and contain poly butadiene propellant or polysulfide propellant. Summary of this investigation is as follows;

1) Ballistic anomaly due to spin becomes remarkable, provided the propellant shows intensive effect of erosive burning.

2) An interrelation between configuration and spin acceleration is obvious, but that between moter Kn and spin is not revealed.

(Asahi Chemical Industry, Sakanoichi Plant, Ohita, Japan)

---