

(II. 3. 4)

ポリウレタン～過塩素酸アンモニウム系推進剤の 燃焼安定性におよぼす燃焼速度抑制触媒の影響

岩間 彬・青柳 鐘一郎
祖父江 照雄・山崎 毅 六

Effect of Burning Rate Depressants on the Combustion Stability of Polyurethane~Ammonium Perchlorate-Based Propellants

By

Akira IWAMA, Syoichiro AOYAGI, Teruo SOFUE and Kiroku YAMAZAKI

Abstract: Test firings of solid propellant rocket were made to study effects of some halides available as the burning rate depressants on the combustion stability. It was noted that polyurethane~ammonium perchlorate-based propellant grains containing these additives caused acoustic combustion instability as the operating pressure increased above a critical value for the motor slender ratio more than 17.

The main type of the oscillatory combustion to which these composite propellants are susceptible is the longitudinal mode. Observed frequency of an illustrated pressure oscillation was approximately 340 c/s, where there occurred abnormal combustion in SSR 3/4 size motor (the grain of 100 mm ϕ \times 1,700 mm L). However, there has been no occurrence of such an unstable combustion in a motor employing the grain of length to diameter ratio less than 11 at the fixed grain diameter of 100 mm even in the case of higher content of the burning rate depressant. Addition of another halide depressant with mild effect to the propellant increases a critical value of the operating pressure above which the motors become unstable.

概 要

固体推進剤の燃焼速度抑制触媒として有用なハロゲン化合物が燃焼安定性におよぼす影響を、小型ロケットモータ地上燃焼実験によって検討した。これらの添加物を含むポリウレタン～過塩素酸アンモニウム系推進剤は、モータの L/D が 17 以上の場合、作動圧力がある限界を越えると、音響的不安定燃焼を発生することが見出された。その振動燃焼はロケットモータの軸方向を伝ばする長さ方向のモードである。SSR 3/4 モータ（グレイン寸法 100mm ϕ \times 1,700mm L ）において、不安定燃焼を起こしたときのガス振動の周波数は約 340 c/s であった。しかし、SSR 1/2 および 1/4 モータでは燃焼速度抑制触媒の量を増やしても、不安定燃焼は発生しない。また、抑制効果が比較的穏やかな別のハロゲン化合物を加えた推進剤は、不安定燃焼を発生する限界作動圧力が上昇する。

1. 緒 言

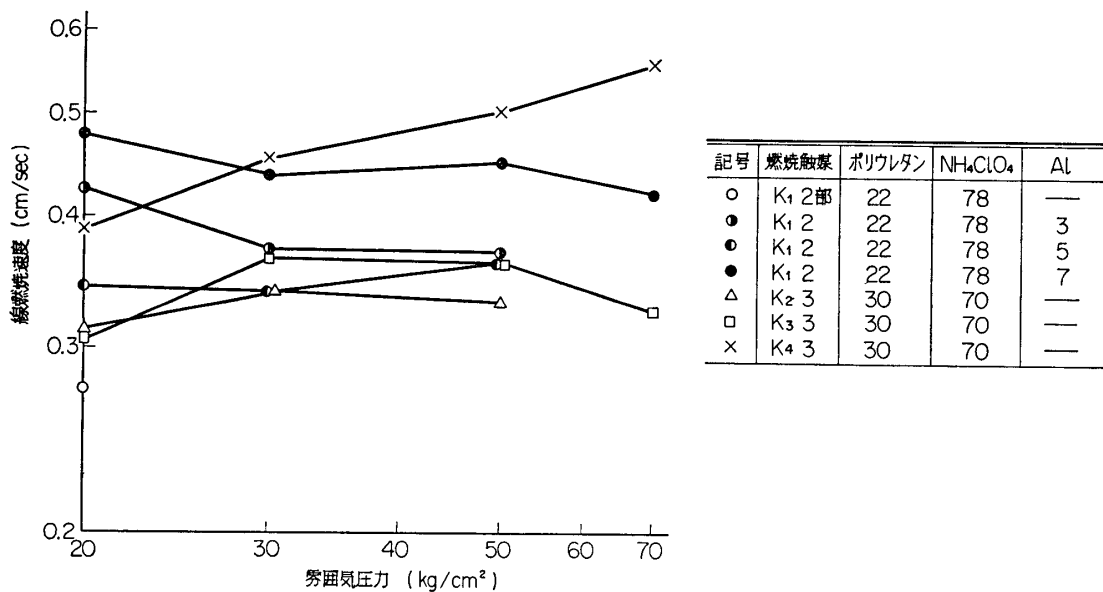
ARIS-SSR 計画は、長径比の大きいロケット・モータを開発目標におき、推進剤に対して比推力が高く、かつ線燃焼速度が著しく低いものを要求した。これにこたえ、筆者らは多数の化合物について検討を加えた結果、線燃焼速度の抑制効果がすぐれているハロゲン系燃焼速度抑制触媒を数種発見し[1]、その一つを推進剤へ添加することを提案した。

その後著者らは、Dickinson[2]らが同様の研究を行なっていることを知った。彼の結論によれば、このような燃焼触媒を推進剤に加えると、定常燃焼圧力下では振動燃焼の発生するおそれが強まり、低圧における燃焼は安定であるけれども、推力が十分でないという理由で使用を断念したとのことである。事実、ARIS 計画(1963年)の地上燃焼実験では異常燃焼の発生がしばしば経験され、また Horton[3]らも、高燃速と低燃速の推進剤について、グレイン燃焼面の音響アドミッタンスを測定比較すると、後者の方が振動燃焼に対する抵抗力は弱いと述べている。これらの結果は、ハロゲン系燃焼触媒を用いるのに不安を感じしむるものではあるが、モータ内に強いじょう乱を与える原因の除去と、推進剤グレイン自励の振動ダンピング性の向上などの対策を積極的におし進めれば、十分実用に供しうることがわかった。

この研究は、振動燃焼を防ぐ手がかりを得るために、燃焼触媒と燃焼安定性の関係を見出す目的をもって企画されたもので、燃焼触媒の量と種類を変えて、ミゼットモータと SSR 1/4~3/4 サイズ・モータ(推進剤グレインの径 100mm, 長さ 550~1,700mm)の地上燃焼試験による基礎的性能と燃焼振動の計測がなされた。

2. 実験結果と検討

第1図は、ストランド・バーナ法[4]で計測された一連の燃焼触媒を含むポリウレタン〜

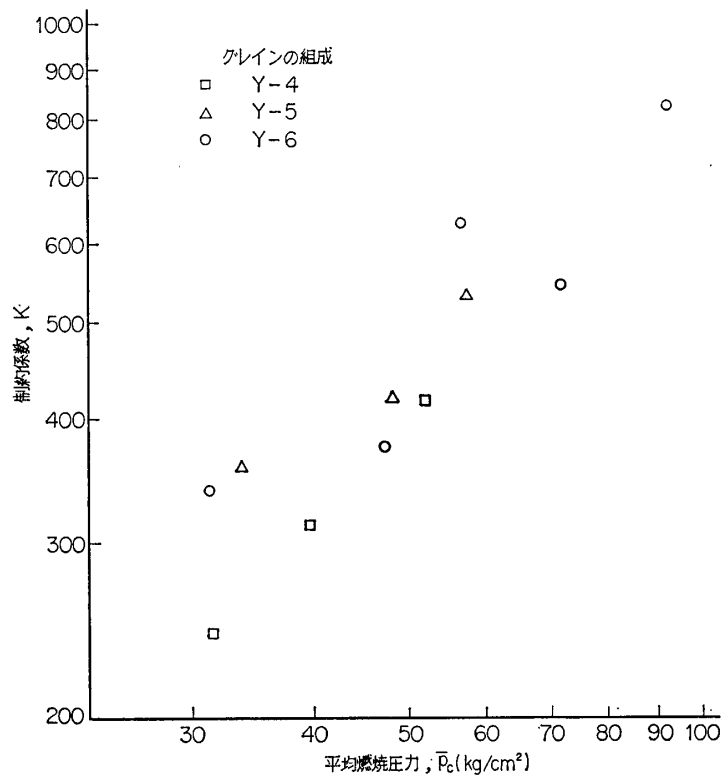


第1図 燃焼触媒の効果

過塩素酸アンモニウム系推進剤の線燃焼速度を示す。いずれの燃焼触媒もハロゲン化合物で、線燃焼速度の圧力指数はほぼ同じであるが、しかし、その効果にはかなりの差がみられる。

これらの中からもっとも強力な燃焼触媒 K_1 が選ばれ ARIS-SSR 計画を通じ、推進剤に添加されることになった。一方、先述のように燃焼安定性が低下するという副作用が燃焼触媒 K_1 にはあるので、その量を変えることによって、また K_1 より比較的効果が弱い K_2 に変えることによって、いかに燃焼安定性が影響を受けるか検討がなされた。

まず、予備実験として、内径 10mm、外径 54mm、長さ約 160mm の両面燃焼型グレイン [5] が試作され、第 2 図に示すように、制約係数と平均燃焼圧力との関係が求められた。



第 2 図 平均燃焼圧力と制約係数との関係

第 1 表 推進剤グレインの成分

成分 \ 処方記号	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-6
過塩素酸アンモニウム	75部	75	75	75	75	75
ポリウレタン	25	25	25	25	25	25
アルミニウム粉	7	7	7	8	8	8
燃焼触媒 K_1	2.0	2.5	3.0	0	1.5	2.0
燃焼触媒 K_2	0	0	0	3.0	0	0

この結果にもとづき、第 1 表に示す Y-4、Y-5 のグレイン組成の、内孔断面が 7 点星型の推進剤グレインを試作し、3/4 サイズ厚肉モータの地上燃焼実験を行ない、推力、定常燃

焼圧力のほか、燃焼圧力振動を計測した。

高周波圧力ピックアップとしては、ひずみゲージ型（新興通信 K. K. 製品、固有振動数 20kc）を用い、出力は直流増幅器で増幅し、電磁オシログラフ（ガルバノメータ固有振動数 2kc）と磁気テープに記録した。

これらの燃焼成績は第 2 表に示す通りである。K₁ 燃焼触媒添加量を 3 部に増加した推進剤を使用した B-3-1 および B-3-2 モータでは比推力が低下しているのは、不安定燃焼と

第 2 表 SSR(B) 燃焼成績一覧表

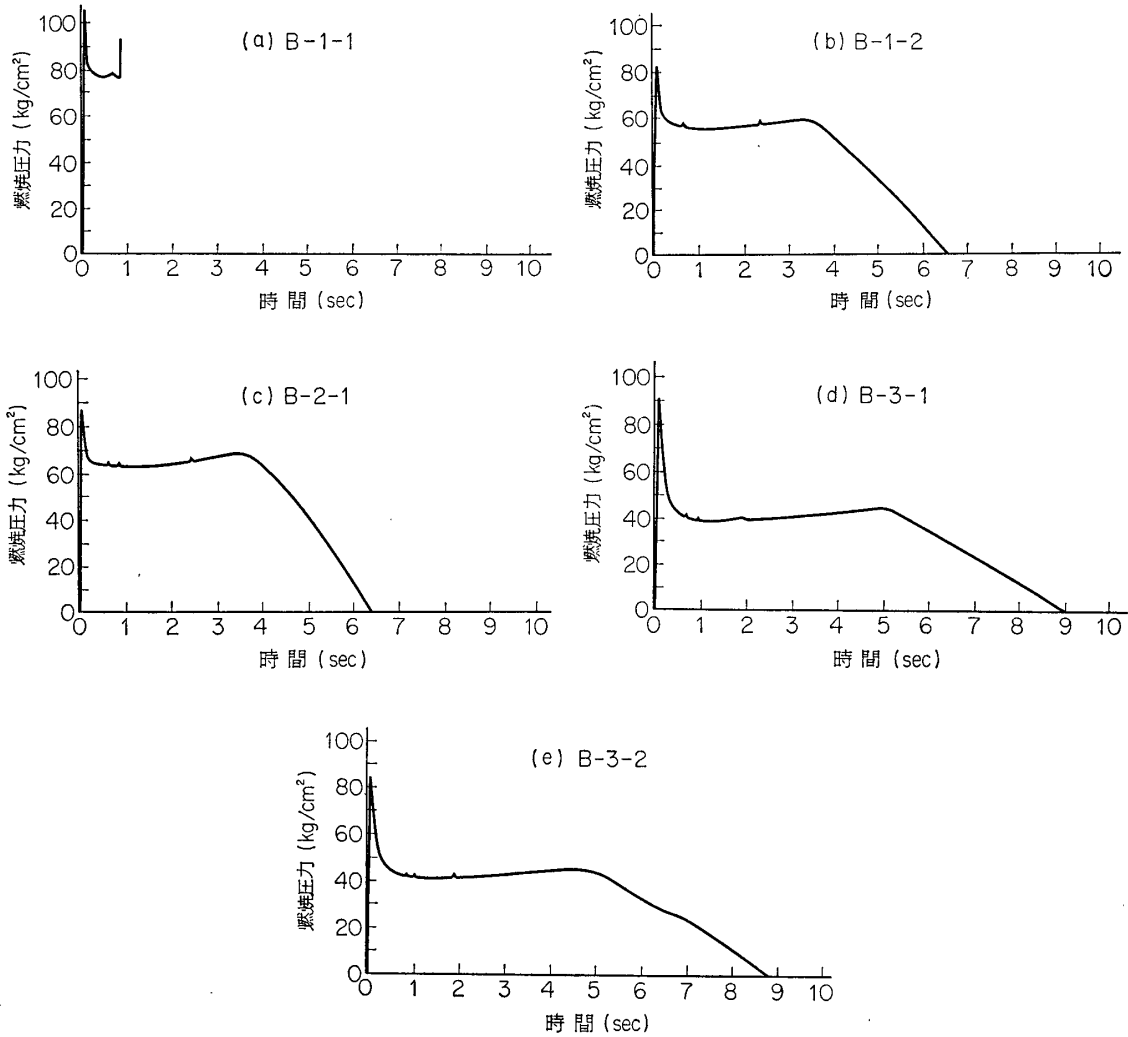
番 号	燃 焼 年月日	グレイ ン処方	燃焼筒 サイズ	ノズルス ロート径 d_i (mm)	ノズルス ロート断 面積 A_i (cm ²)	マンドレ ル 番 号	フリーポ ート断面 積 A_F (cm ²)	フリーポ ート周長 L_F (cm)	点 火 時 最大圧力 p_{peak} (kg/cm ²)
B-1-1	39-8-4	Y-5	3/4	29.92	7.03	No. 3	13.11	17.52	105.7
B-1-2	39-8-4	Y-5	3/4	32.27	8.17	No. 3	13.11	17.52	82.5
B-2-1	39-8-11	Y-4	3/4	32.84	8.46	No. 3	13.11	17.52	94.6
B-3-1	39-9-7	Y-3	3/4	34.90	9.56	No. 3	13.11	17.52	88.0
B-3-2	39-9-7	Y-3	3/4	33.04	8.57	No. 3	13.11	17.52	84.3

番 号	最大圧力 p_{max} (kg/cm ²)	最小圧力 p_{min} (kg/cm ²)	平均圧力 p_{mean} (kg/cm ²)	点火遅れ 時間 t_d (sec)	燃焼時間 t_b (sec)	開放部 面積比 K_F	外部制約 係 数 (初期) $K_{initial}$	外部制約 係 数 (最終) K_{final}	比推力 (sec)	結果
B-1-1	—	—	—	0.47	1.58	1.86	418	764	—	×
B-1-2	58.8	55.4	45.6	0.55	4.25	1.60	367	671	216	○
B-2-1	72.0	78.6	64.8	0.51	4.35	1.55	347	630	218	○
B-3-1	46.3	38.7	36.4	0.65	6.00	1.37	309	553	205	○
B-3-2	47.1	41.0	36.5	0.60	5.74	1.53	344	617	209	○

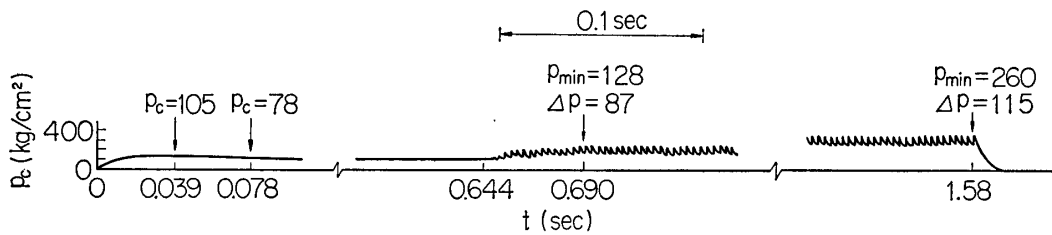
激しい侵食燃焼の発生が心配されたため、ノズルスロートをやや広げて平均燃焼圧力を下げたからである。B-2-1 モータは平均燃焼圧力が高く、比推力が大きい、線燃焼速度が高いために燃焼秒時は短縮されている。

燃焼触媒の添加量を減ずれば、燃焼速度が増加し、同一条件で燃焼させる限り平均圧力は当然高くなる。ここで問題となるのは燃焼速度を減らしたはね返りが燃焼圧力を高め、かえって不安定燃焼を助長しないかということである。Y-5 組成のグレインを使用した B-1-1 モータは、第 3 図 (a) に示すように燃焼圧力が推移して、点火後 0.64sec に振動燃焼を起こしている。この結果から推測すると、燃焼触媒 K₁ の添加量を 2.5 部から 1.5 部へ変えても、燃焼安定性を増す上にそう効果的ではないと思われる。B-1-2 および B-2-1 モータで得られた燃焼圧力-時間曲線の tail-off は、Y-2 グレインを同じ条件で燃焼させた場合よりも短縮し、侵食燃焼はやや弱まり、比推力は増大するが、燃焼秒時の減少によって飛しょう高度の増加は期待できない。

B-1-1 モータで得られた燃焼圧力振動の推移を第 4 図に示す。振動燃焼が励起されるときは、わずか 4~5 サイクルではほぼ一定レベルのしかも高振幅の圧力振動が繰り返されている。もし軸モードの音響的振動と仮定すれば、振動数は次の近似式で表わされる。



第 3 図 燃焼圧力-時間曲線



第 4 図 不安定燃焼を発生したモータの燃焼圧力-時間曲線

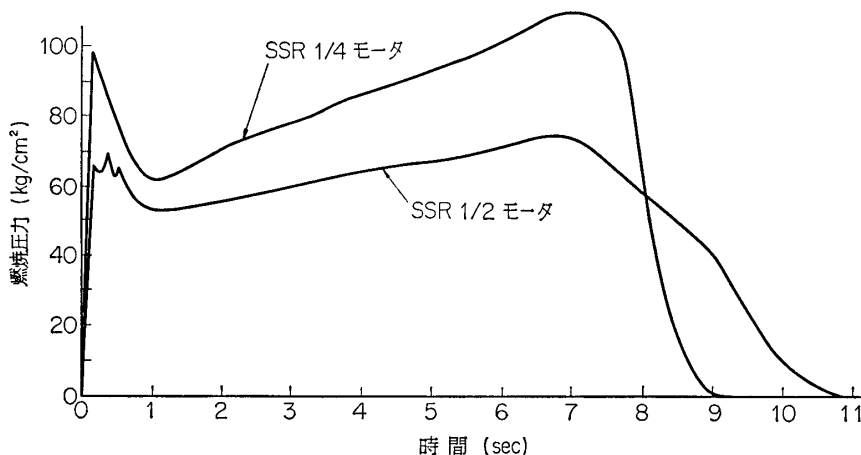
$$f = \frac{\sqrt{\kappa g R' T_c}}{2L} \dots \dots \dots (1)$$

L : モータ長さ, R' : ガス定数, T_c : 燃焼温度 ($^{\circ}K$), κ : 燃焼ガス比熱比
 この式に次の設計値と理論値[3],
 $L=1,680\text{mm}$, $g=9.8\text{m/sec}^2$, $R'=3.62\text{kg}\cdot\text{m/kg}^{\circ}K$, $T_c=2,980^{\circ}K$, および $\kappa=1.234$

を代入して、 $f=340\text{cps}$ と求められる。実験値は約 308cps であるから、比較的良好一致し、この燃焼振動は、長さ方向のモードであると推定される。なお、この実験結果については辻の詳しい報告がある[6]。

また、異常燃焼が起こらない場合でも、点火薬ケースがノズルから飛び出すときのじょう乱とみられる小スパイクが、定常燃焼の前期で発生した(第3図(b)~(e))。この原因は点火器がノズルスロートから飛び出すときのショックによるものである[7]。Y-2 組成でも SSR 1/4 および 1/2 サイズのモータに使用する限りでは全く異常燃焼は発生しない。すなわち、異常燃焼はモータの L/D が 17 をこえた場合に発生するのである。第5図は、1/4 サイ

	初期制約係数	最終制約係数	スロート径(mm)	グレイン
SSR 1/4 モータ	597	1170	13.9	Y-1
SSR 1/2 モータ	508	1008	15.2	Y-2



第5図 SSR 1/2 および 1/4 モータの燃焼圧力-時間曲線

ズと 1/2 サイズモータで、制約係数が 1,000 以上のかかりきびしい条件における燃焼圧力-時間曲線を示す。1/2 サイズから侵食燃焼の影響がみられ、tail-off が長く伸びている。B-3-1 と B-3-2 モータでは、燃焼触媒 K_1 を逆に増加した Y-3 組成のグレインが使われたが、Y-2 組成のグレインより燃焼が目立って不安定となるとはいえない。

3. 結 論

(1) 燃焼触媒 K_1 の添加量を Y-2 組成 2.5 部から 2.0 部に減らしても、あるいは逆に 3.0 部にふやしても、燃焼安定性が大幅に変わるとは考えられない。したがって、振動燃焼の防止には別の手段を求めるべきである。

(2) K_1 より効果が穏やかな K_2 を添加すると侵食燃焼の強さは弱まるが、同時に反応時間が小さくなり、飛しょう性能は低下する。しかし、燃焼が安定な限界燃焼圧力は高くなる。

(3) K_1 を含むグレインでも SSR 1/2 サイズ以下のモータに適用する限り異常燃焼のおそれはない。

1963年6月3日 材料部

参 考 文 献

- [1] 日特許, 40-21359
- [2] L. A. Dickinson and F. Jackson: Fifth Agard Colloquium, pp. 531-550, Pergamon Press (1963)
- [3] M. D. Horton and D. W. Rice: Combustion and Flame, **5**, 1, pp. 21~28 (1964)
- [4] 岩間 彬, 山崎毅六, 岸 和男, 青柳鐘一郎, 上月 功: 工化, **65**, 8, pp. 1218~1219 (1962)
- [5] 山崎毅六, 岩間 彬, 青柳鐘一郎, 祖父江照雄, 林 実, 岸 和男: 航研集報, **3**, 6(A), pp. 381~389 (1963)
- [6] 辻 広: 高周波振動燃焼, 本特集号[II.2.3]
- [7] 岩間彬, 青柳鐘一郎, 祖父江照雄, 山崎毅六: 点火器の形状・材質と不安定燃焼との関連について, 本特集号[II.3.5]