

## ロケット燃料について

日本化薬KK厚狭作業所\* 日野熊雄\*\*

## 1. 緒言

ロケットは近年人工衛星の打上げや月ロケットの実現で大きな問題となり最先端の研究問題として世界の注目を引くに至つたが、これ等の高性能ロケットの問題点は第一に推力の大きなロケット燃料の問題であり、またこのロケット燃料は推力が大きいのみならず、その燃焼特性の信頼性が大きいことが必要である。すなわち燃焼精度の問題があり、また一つはロケット誘導の電子工学的宇宙航空力学的問題がある。この他に構造材質の耐熱性、重量の軽減の問題が生じてくる。本篇においては以上の問題点の内ロケット燃料について述べてみたい。

さてロケット燃料といつても従来実用されたもの、または実用されていると推察されているもの、将来の実用に備えて研究されているものを考慮すると甚だ広範囲のものとなる。まず初期には、黒色火薬系燃料すなわち火薬が試用され、ついで膠質火薬すなわちニトロセルローズ、ニトログリセリンの膠化体を主とした火薬が第2次世界大戦では多量に実用された。すなわち所謂ダブルベース推薬である。一方第2次大戦終期にはドイツによつて過酸化水素、メチルアルコール、ヒドラジンハイドレートの液体ロケット燃料が使用された。ロケット液体燃料としてはその後多種多様のものが提案されているが、いわゆる「比推力」すなわち燃料単位質量当りの推力  $I$  が固体および液体燃料においては  $400(\text{sec})$  より以上にはならない。これを越えるために色々の研究が行われているが、この超高比推力を得るための第1案は遊離基、すなわち free radical の使用である。ある分子を熱するか他のエネルギーを加えて分子を破壊して遊離基を作ると、これは再結合しようとする。再結合した時には加えられただけのエネルギーを放出する。たとえば  $H$  が  $H_2$  となる時は  $90,000 \text{ Btu/lbs}$  を放出し  $I=1,000\text{sec}$  を越す。問題は遊離基を多量に製造することと、貯蔵中の再結合を防ぐことである。その方法の一つは絶対零度の低温までに冷却すること。他の方法は不活性ガスたとえばヘリウムを混合することであるが、冷却法は大きな重い冷却機を必要とし他の稀釈法は遊離基の濃度をうすめてしまう欠点がある。また他の欠点は燃焼温度が  $12,000$

$^{\circ}\text{F}$  の高温となり、現在の金属材料ではこの高温に耐えられないことである。

また超高比推力を得る第2の方法は原子力の利用である。たとえば  $U^{235}$  の分裂は  $10$  億  $\text{Btu/lbs}$  のエネルギーを放出し、この熱で水素を膨脹させると  $I=900\text{sec}$  を得る。この場合も超高温に耐える金属が必要となる。

また超高比推力を得る第3の方法は核分裂の直接利用で分裂して生じた粒子を高速で排出させて推力を得る方法である。

さてわが国の今後のロケット燃料研究を具体的に考えると超高比推力を得るための先端的研究は遠い将来に属することであつて、まず手近な基礎的な処から進むべきであろう。ロケット液体燃料は多くのポンプ系の動作が必須となつて、複雑な機械体系を必要としその研究、試作、製造もまたわが国の現状に必ずしも適したものととは考えられない。かくして当面の問題は研究、試作、製造の最も容易で経済的な固体燃料の研究に最重点を置くべきであろう。アメリカ、ロシア等の大国の研究動向も固体燃料に益々大きな重点を置いてきつつあることを考えると研究の動向は以上の如くなるべきことはまず動かない処であろう。しかして固体燃料の研究において、当面解決すべき問題点は安定な燃焼を得ること殊に燃焼圧力や初期温度により燃焼が変動しない燃料を得ることにあるが、これを本格的に解決するには、まず固体燃料の燃焼の機構に関して正しい理論と正確な実験値をつかむことが必要であろう。

## 2. 固体推薬の燃焼速度式

ロケットにおける固体推薬の設計をする場合最も重要な点は燃焼速度  $V$  がガスの圧力  $P$  の如何なる関数であるかを知ることである。これに関しては最も古典的な  $n$  乗式 (1861年 Franklands, St. Robert, 1893年 P. Vieille 等) が提出され、現在も最も広くこれが使用されていて、この点結論的には何等の進歩変化がないのは奇妙なことである。すなわち、

$$V = b \cdot p^n \quad (1)$$

もつとも初期の式は純然たる実験式であつたのに比し、近年の研究は  $b$  および  $n$  の物理化学的意義の理論づけをするようになったが、広範囲の圧力変化に対して(1)式の如き簡単な圧力の一項式で十分だと考えるのは大い

\* 山口県山陽町厚狭

\*\* 工博，研究課長

に行過ぎであろう。

主としてダブルベース固体火薬については、つぎの直線式が提出された。(1907年 J. H. Mansoll, 1907年 C. H. Lees, J. E. Petavel) すなわち、

$$V = a + b_2 p \quad (2)$$

さらに気体運動論と反応速度論の進歩に伴なつて次の比例式が提出された。(1922年 M. G. Létang, 1923年 G. Schweikert 1930年 山家信次) すなわち、

$$V = b_3 p \quad (3)$$

高圧燃焼すなわち大砲内や密閉爆発器内の 1,000気圧前後以上の範囲においては(3)式がよく適合し、また関係する基礎微分方程式は(3)式の場合は(1), (2)式に比べて甚だしく解法が容易となる利点があるが、100気圧前後以下の圧力範囲すなわちロケットとして最も重要な圧力範囲では(3)式は実験に全く合致することが明らかとなつた。以上の事情を考慮に入れて筆者はロケット火薬の点火から燃焼および高圧燃焼までにいたる広範囲な問題を解くために、つぎの一般式を提出した。(1945年) すなわち、

$$V = a, p + b_4 p^n \quad (4)$$

### 3. ロケット固体燃料燃焼の機構

ロケット燃料は液体と固体に大別されるが、取扱が安全で確実で簡単な点から固体ロケット燃料の方が液体ロケット燃料より、ますます重要となりつつある傾向にあるので本篇においては固体燃料について述べよう。

この固体ロケット燃料は大別して膠質系の燃料と混合系の燃料に分けられる。前者はまた **double-base** とも称せられ主としてニトログリセリン、ニトログリコールのニトロセルローズ膠化体を主体とするものであるが、大型ロケット用としては適当なものが得られない。後者すなわち **Composite** が最も重要なものである。

混合ロケット燃料の主体は硝酸塩または過塩素酸アンモン塩を酸化剤として使用し、これを有機物の混合体すなわちマトリックス内に分散させ、さらに推力増進のために軽金属粉末たとえばアルミニウム粉やマグネシウム粉を加えて燃焼の温度を高め、また燃焼生成物の平均分子量を引下げてガスの流速を上げるために水素に富んだ固体を混合する。また燃焼性を良好たらしめて不規則燃焼や燃焼の中断、異常な高圧の発生を防いだり、着火を良好たらしめたりするために各種の燃焼調節剤または触媒を利用する。また適当な成形性、耐熱性、機械的強度等をもたせるために特殊な有機可塑剤が利用される。

固体ロケット燃料の燃焼機構を知ることはその設計や実用上極めて重要なことであるので近年多くの理論的実験的研究が活発に行われているが、その大要について述べよう。

過去15年間主として行われてきた考えの一つは酸化剤

と還元剤の両者がまず気化蒸発し、この両者の蒸気が発熱反応を起し、この反応熱が未反応の固相に伝わり、さらに気化を起すという考えであり、気化理論と略称し得るものである。もつともこれより以前の考え方の一つには燃焼ガス分子が固体に衝突して、これを活性化すると考えるガス分子衝突活性化理論が主として高圧の燃焼理論として唱えられたが、ロケットで重要な低圧力範囲ではこの理論は全く実験に合わない。また燃焼生成ガスの輻射熱で固体が分解するという輻射理論が、たとえば筆者によつて提出され、この理論は一応燃焼速度  $V$  の圧力  $P$  への依存関係、また  $V$  の燃焼温度  $T$  への依存関係を説明し得ているが、その後さらに複雑な燃焼層の構造が色々と考えられて来るようになった。その内の一つは拡散理論である。この理論では発熱化学反応速度と拡散速度の相対的關係を重視する。粒子の径がある値以下になると拡散が極めて速になつて、ガス体はあらかじめ混合されているのと同じように燃えるから、燃焼速度では拡散速度  $D$  には無関係になる。また圧力が減少すると一定の粒子径に対して  $D$  は増大し、化学反応速度  $C$  は減少するからある圧力以下になると拡散が十分大となつて  $D$  はもはや燃焼速度  $V$  に関係しなくなる。そこで粒子径が十分小さいか圧力が低い場合は燃焼速度  $V$  は予め混合された気体燃焼の燃焼速度、伝播速度となり  $p^m$  で変化する。ここに  $m$  は反応の次数である。高温のガス燃焼の燃焼速度と圧力の関係から  $m$  の値は多くは 2 と出るが、そうすると  $V$  は圧力  $P$  に比例し粒子径には無関係となる。

反対に高圧で粒子径が大となると拡散がおそくなつてこの拡散  $D$  が  $V$  を支配する。そして  $V$  は粒子の大きさに逆比例し圧力とは無関係になる。

以上の拡散理論に対して新しく現われたのがガスポケット理論である。この理論では粒子は球状のガスポケットを生じ、これは四方八方に膨らんで比容積の比の立方根だけ元の固体粒子より大きくなる。この大きくなる程度は圧力に依つて異なる。燃焼速度  $V$  は圧力  $P$  の立方根に比例して変化し粒子直径に逆比例する。

これ等の理論に対するさらに一つの反論は単独反応理論ともいふべきものであつて、それは過塩素酸アンモニア硝酸アンモンがそれ自体だけでも燃焼波を維持することが出来て必ずしも第 2 成分を必要としないことである。しかもこの燃焼波(固体のもつアンモニウム基と酸素により維持される)の速度がロケット燃料としての燃焼速度  $V$  に近いのである。然し過塩素酸リチウムの如く可燃物がないと燃焼出来ないものでは先の拡散理論が成立つわけである。

以上は定常燃焼の理論であるが、この他に不定常燃焼の問題すなわち点火、焼蝕燃焼(ガス流動の  $V$  に対する影響)、共鳴燃焼ガス振動と燃焼の共鳴による爆発)な

## 生産と技術

どの問題が理論外にも実験的にも研究されている。

(1959. 11. 6.)

### 文 献

- 1) James Taylor : Solid propellant and exothermic de Compositions (1959) George Newnes Ltd, London (固体推進の化学)
- 2) Francis A. Warren : Rocket propellant (1958) (最も新しい固体推進の成書)
- 3) George P. Sutton, Rocket propulsion Elements, Second Edition (1958) (推進一般殊に液体推進)
- 4) Raymond Friedmann and John H. Grover : Combustion ; Industrial and Engineering Chemistry, Chemical Engineering Review, Sept. 1959. Vol. 51 No. 9, Part II. pp. 1067~1074. (固体推進燃焼機構の最新レビュー)
- 5) 日野熊雄 : 火薬類の点火, 燃焼, 爆轟 : 工業化学雑誌 60巻, 2号 (1957) pp. 113~117 (圧力関数形と燃焼機構)
- 6) J. Vandenkerckhove and G. Lampens : Note sur la Combustion erosive des propergols au Nitrate d'ammonium ; Communications présentées au XXIe Congrès International de Chimie Industrielle dans la section Poudres et Explosifs, Liège, Sept 1958. pp. 117~120 (硝安推進の燃焼燃焼機構ガス流動の影響)
- 7) R. W. Bussard and R. D. Delaner : Nuclear Rocket Propulsion 1958 mc grow Hill Inc. New York (初歩的原子力ロケットの記述)
- 8) 黒田泰弘 : ロケットエンジン 1958 山海堂 (一般的解説)
- 9) 足田強 : ロケット燃料 : 化学と工業 1958. Vol. 11, No. 7. p. 623 (ロケット燃料の一般的記述)
- 10) Luigi Crocco and Sin-J. Ching : Theory of Combustion Instability in liquid propellant Rocket motors : 1956. Butterworths Scientific Pub. (液体ロケット燃料)
- 11) R. N. Winkress : Internal Ballistics of Solid-Fuel Rocket : 1950. mc grow Hill, New York (固体推進の弾道論)
- 12) John Humphries : Rocket and guided missiles 1955. Ernest Ben Ltd. London (主として液体ロケット)
- 13) その他最近 10年間に関係学術誌に発表されたロケット燃料関係の研究報告は400篇を下らないが、その内主要なものは次の 定期刊行物に発表されている。
  - 13-1) Third (1950) Fourth (1952) Fifth (1954) Sixth (1956) Seventh (1958) Symposium (International) on Combustion
  - 13-2) Journal of American Rocket Society
  - 13-3) American Chemical Society, Chemical and Engineering News.
  - 13-4) A. C. S. Industrial and Engineering Chemistry
  - 13-5) G. M. 協議会々報