

ゲル化燃料の燃焼及び安定特性

桑原卓雄*, 松尾信二*, 那賀川一郎*

ゲル状物質は液体と固体の両方の特性をもっている。即ち外力が加わらない限り一定の形状を維持するが、これに圧力等の外力が加わると形状が自由に変化する。ゲル化燃料を使用するにあたってこの特徴が大いに役立つ。即ち、ゲル化燃料を液体燃料と同様タンク内に貯蔵し、さらにこれに圧力を加えて噴射することが出来る。このようにゲル化燃料は液体と固体の特徴を持つことから、液体推進薬同様取り扱い易く、かつより安全であり、今後の推進薬として使用されることが期待される。ゲル化した HNO_3 (硝酸) とグリシジルアジドポリマー (以降 GAP (glycidyl azide polymer) と略記) との理論 I_{sp} は240秒と比較的大きな値をとっている。また、試作したゲル化硝酸の噴射特性は噴射口が0.2mm以上のときには H_2O と同様であり、振動試験においてクラック等が発生せず、試作したゲルは安定していることが得られた。試作したゲル化硝酸を酸化剤として用い、AP系コンポジット推進薬の分解ガスをガスハイブリッドロケットとして燃焼したところ C^* 効率で75-80%の値が得られた。

1. 緒言

液体をゲル化することは固体の特性を引き出して安全をはかるのが一つの理由である。ゲルとは液体に固体粒子等を添加することで液体の特性に固体の特性を付加するものである。ゲルは性状として固体の特徴を持つが、液体が化学反応をして結合しているものではなく、単に物理的なつながりを持っているだけである。固体の特性の中で最も優れたものとして形状を変えないことが上げられる。形状を変えないことは表面積を極力小さくして蒸発しやすいものもガスの発生を低く抑えられる。常温で安定な液体酸化剤としては HNO_3 、 NTO (四酸化二窒素, N_2O_4)、 H_2O_2 (過酸化水素) 等が上げられる。これらの蒸気は人体に対して有害であり取り扱いには十分に注意する必要がある。液体をゲル化することで有害な発生ガス量を極力抑えられ安全性が向上する。液体酸化剤を用いる推進系として、例えばハイブリッドロケット等が考えられる。ハイブリッドロケットとしては従来型のものからガスハイブリッドロケットといくつかのタイプがあるが^{1)~4)}、これらにゲル化燃料を用いた実験例はない。そこで液体酸化剤の一つである HNO_3 をゲル化することで液

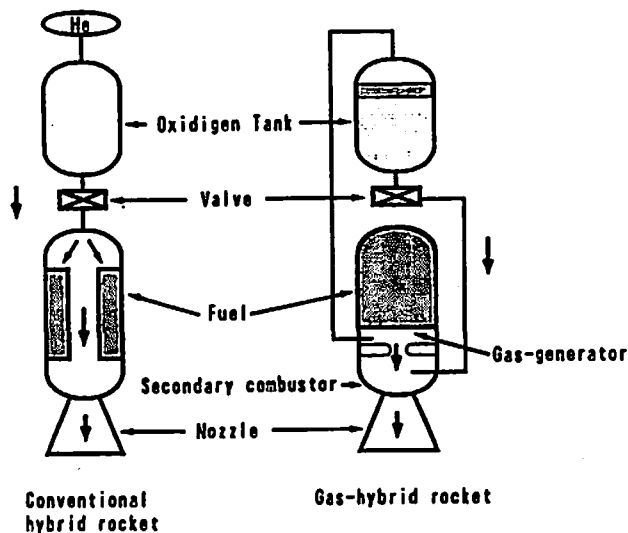


Fig. 1 Hybrid rockets

体の特性と固体の特性がどのように現れるかを求めると同時に、ガスハイブリッドロケットの酸化剤として用い燃焼特性を取得した。

2. 理論燃焼特性

固体燃料にGAPを用い酸化剤に HNO_3 とゲル化硝酸を用い理論燃焼特性を求めた。従来型のハイブリッドロケットとガスハイブリッドロケットをFig. 1に示した。従来型のハイブリッドロケットは燃料を燃焼室内に充填し燃料の上流側から酸化剤を噴射して燃焼するものである。燃焼は燃料の表面を流れるガスの境界

1996年5月27日受理

*日産自動車(株)宇宙航空事業部 研究開発センター
〒350-11 川越市市場新町21-1
TEL 0492-31-1114
FAX 0492-31-1116

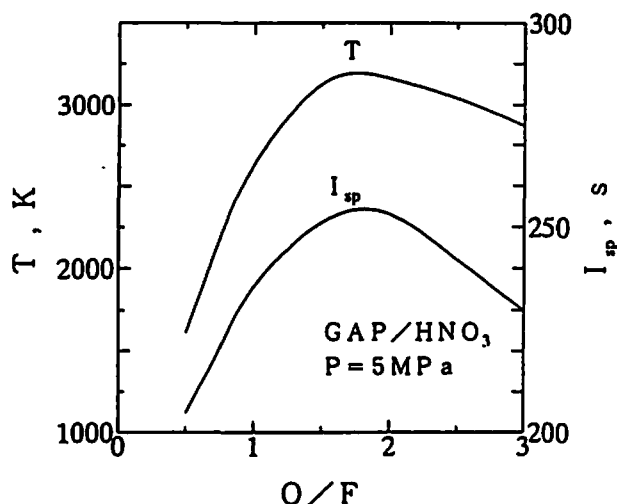


Fig. 2.1 Theoretical combustion characteristics of GAP/HNO₃ propellant

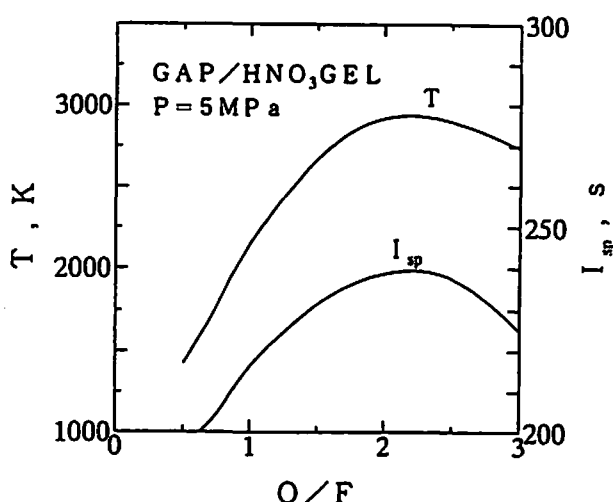


Fig. 2.2 Theoretical combustion characteristics of GAP/gel-HNO₃ propellant

層内で主に行われることから境界層燃焼となる。このことから燃焼効率が幾分低く、かつ燃料の燃焼速度が小さく大きな推力を得るためには燃料の燃焼面積を大きくする必要がある。これに対してガスハイブリッドロケットはガスジェネレータと酸化剤のタンク、2次燃焼室より構成されている。燃料はガスジェネレータ内で自立燃焼をすることが必要になる。ガスジェネレータ内で燃焼した燃料は燃料過剰な高温ガスを発生し、2次燃焼室に噴射され酸化剤と混合燃焼する。ガスハイブリッドロケットは2次燃焼室において燃料ガスと液体酸化剤との燃焼により、容易に自発着火する。小さな燃焼器でも燃焼効率は比較的高い。このようなハイブリッドロケットに硝酸、ゲル化硝酸を酸化剤に用いたときの理論性能を求めた。ここでゲル化硝酸は85%がHNO₃、10%がH₂Oで残りがゲル化に必要な酸化剤である。理論燃焼性能は燃焼圧力5 MPa、最適開口比にて求め、結果をFig. 2に示す。酸化剤に液体のHNO₃を用いた時の値をFig. 2.1に示した。理論燃焼性能はO/F (O: 酸化剤の流量流率, F: 燃料の流量流率) をパラメータに断熱火炎温度Tと比推力Ispを求めたものである。酸化剤に硝酸を用いたとき断熱火炎温度及びIspはO/Fが約1.9の時に極大値をとり3173Kに達している。一方、Ispは254秒に達し、O/Fが1.9より大きくなっても小さくなくてもT, Ispは急激に低下している。HNO₃をゲル化したときの理論燃焼性能をFig. 2.2に示す。ゲル化硝酸はイナートな物質を含有することから燃焼性能、Isp, Tは液体HNO₃のときに比較して低下し、IspとTが極大値をとる値はO/Fが大きくなる傾向を示している。ゲル化することでO/F=2.2のときIspは240sに達している。一般にゲル化するとき添加物の密度が大きいもの

を用いれば液体の密度が増加し、密度比推力は向上し性能の低下を極力抑えられる。また、断熱火炎温度は2938Kに達しており比較的高い。断熱火炎温度が3000K近傍に達していることは、燃焼器内の高温部にさらされるところには耐熱材料を用いる等の熱対策を考慮する必要がある。

3. 実験及び実験結果

ゲル化硝酸を試作して安定化試験として振動試験及び転倒試験を実施した。振動試験はMIL-STDより一般用輸送環境における基本的輸送⁵⁾ならびにNDSの火工品試験方法⁶⁾に準じた。試験は基本的輸送における最大加速度の0.8Gを一定ピーク加速度とした単振動を加え、振動周波数を5～50Hzの間で対数的に変化させ、全周波数範囲の掃引往復時間を30分間とし、垂直軸の一方向のみに振動を与えた。振動試験装置は明石製作所製のものを用いた。ゲルの試料は容量 290×10^{-6} m³の容器に195, 357gと容器の約半分と満杯に入れた2種類の容器を加振して行った。ゲル化硝酸の量が異なるのは容器に大きな空間がある場合とない場合でどのような影響があるかを比較したものである。ゲル化したHNO₃の色は褐色である。HNO₃をベースにしたゲル化硝酸の振動試験は1週間ごとに3回、1ヶ月間行った。一方、転倒試験は取り扱い中あるいは輸送中にゲル容器が倒れた場合を想定したものである。容器にゲル化硝酸を入れた状態で容器を転倒してゲルの状態を観察したものである。容器が小さいため転倒しても大きな力は働かない。試験は振動試験と同様に1週間ごとに計3回の転倒試験を実施した。

3.1 振動試験

振動試験に基づく異状かまたはゲル化硝酸の持つ特性かを明らかにするために振動試験後の試料と振動試

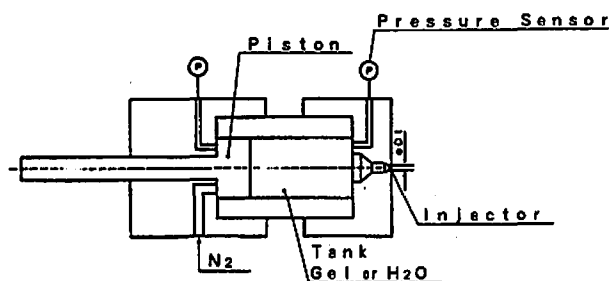


Fig. 3 Injection equipment of gel-HNO₃ propellant

験を行わず参考用に保存したものとの比較を行った。ゲル化硝酸を製造した後の状況は液のしみだしはなかったが幾分気泡は入っていた。一週間後に振動試験前後のゲルの状態を観察したところ、液のしみだしは一部に発生していた。2週間後の振動試験後のゲルの状態は安定しており3週間後では特に異状はなかった。更に、一ヶ月後の振動試験後においてゲルは安定していることが得られた。振動試験後の半分充填及び完全充填したときともにクラック等は発生せずゲルの破損もなく容器に入れた場合にはゲル化硝酸は外力の負荷に対して非常に安定していることが得られた。

3.2 転倒試験

転倒試験における初期のゲル化硝酸の状態は、振動試験のときとはほぼ同様であり、一部気泡が入っていた。完全充填時には一週間おきの試験において特に異状は観察されなかった。一方、半分充填ゲルの場合には2週間後に容器とゲルとの間に隙間ができ、液のしみだし量も多くなってきた。一ヶ月後にはゲルと容器の間の隙間が大きく顕著になりゲルは一部破壊された。このことからゲル化硝酸は外力を与えられても大きな変形を生じないような、容器にはほぼ満杯の状態で保存しておくことが良い。

3.3 噴射特性試験

噴射特性試験に用いた試験器材をFig. 3に示した。タンクとインジェクターより構成されており、タンク内にはピストンをセットしピストンの動きよりゲルの噴射量を求めた。タンク内に直接ゲルを充填してピストンの上流からガスでピストンを加圧した。ゲル化硝酸を用いて噴射試験を実施した。ここで、ゲルの噴射特性はH₂Oと比較しているが、流量特性は次の流量係数 C_D を用いた。

$$C_D = Q_{\alpha} / Q_{th} \quad (1)$$

$$Q_{\alpha} = \pi/4 \times D_c^2 \times V \quad (2)$$

$$Q_{th} = \pi/4 \times D_i^2 \times v \quad (3)$$

ここで、 Q_{α} はインジェクターを通過する実際の流体の量、 Q_{th} はインジェクターを通過する理論値、 D_c は

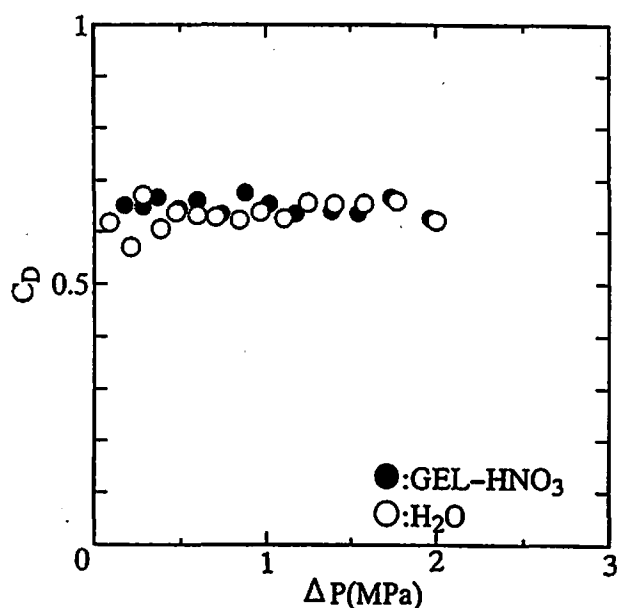


Fig. 4 Injection characteristics of H₂O, gel-HNO₃ propellant

タンクの内径、 V はピストンの移動速度、 D_i はインジェクターの孔径、 v はインジェクターを通過する流体の流速である。インジェクターを通過する流体の流速は次の式で与えられる。

$$v = (2\Delta P / \rho)^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 ΔP はインジェクターの差圧、 ρ は流体の密度である。インジェクターには孔径が0.2mm以上のもので平行部の $L/D=5$ のストレート型の単孔タイプのもを用いた。インジェクターの出口孔径が0.3mmの時の噴射差圧 ΔP と流量係数 C_D との関係をFig. 4に示す。ゲルの噴射特性を求めるためにH₂Oとゲル化硝酸とを比較した。インジェクターの孔径が0.3mmのときには水とゲル化硝酸の流量係数はほぼ同じで0.65であった。インジェクターの差圧が2MPaのときインジェクター孔径と C_D との関係をFig. 5に示した。出口孔径が0.2~1.5mmの間で孔径により C_D はばらついているが、ゲル化硝酸とH₂Oとではほとんど変わらず本試験範囲においては両者の特性はほぼ等しいことが得られた。

4. 燃焼特性

ゲル化硝酸を酸化剤に用いたときのガスハイブリッドロケットの燃焼試験装置をFig. 6に示した。燃料にはAP(過塩素酸アンモニウム)/HTPB(末端水酸基ポリブタジエン)=60/40%のもを用いた。燃焼器は燃料を燃焼するガスジェネレータとゲルのタンク、2次燃焼器より構成されている。ガスジェネレータには内端面燃焼方式のもを用いてガスジェネレータと

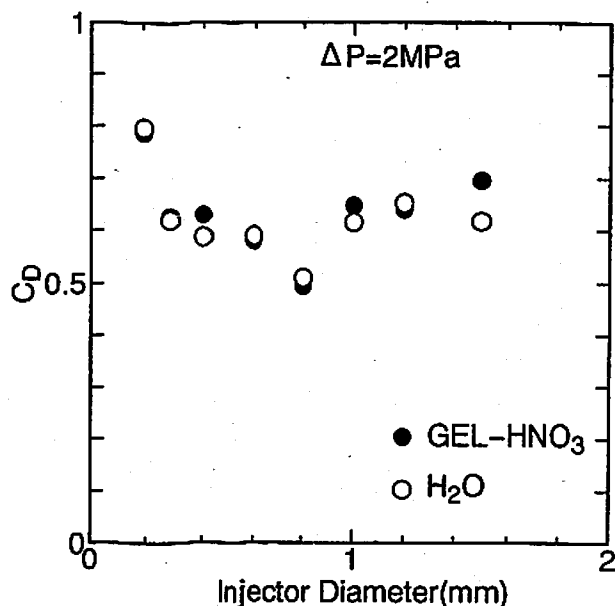


Fig. 5 Relationship between C_D and the diameter of injector

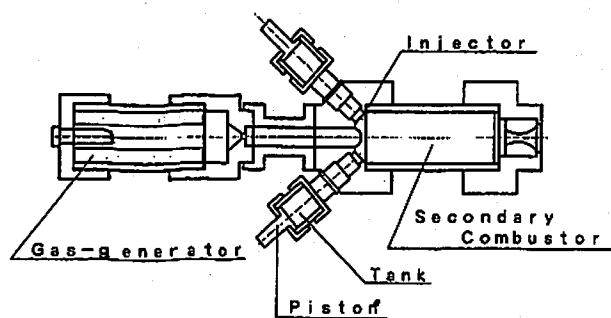


Fig. 6 Gas-hybrid rocket test equipment

2次燃焼器の間はガス温度の低下を防止するために、通路には断熱材を入れている。ゲルは直接タンクに充填して用いた。ガスハイブリッドロケットの燃焼圧力カーブを Fig. 7 に示した。燃焼圧力の立ち上がりは 0.5s から始まっているが、これはゲルタンクにガスを供給し始めてからガスジェネレータに点火してガスハイブリッドロケットを作動しているためである。ガスジェネレータの圧力及び2次燃焼室の圧力の立ち上がりはスムーズであり、容易に2次燃焼室で自発着火する事が得られた。ガスジェネレータの圧力は 2.7~3.6MPa の範囲で変化しているが、圧力は安定している。2次燃焼室の圧力は約 0.7MPa とほぼ一定の値を取っている。この圧力カーブを用いて燃焼効率 ηC^* を求めた。燃焼効率 ηC^* は次の式で表される。

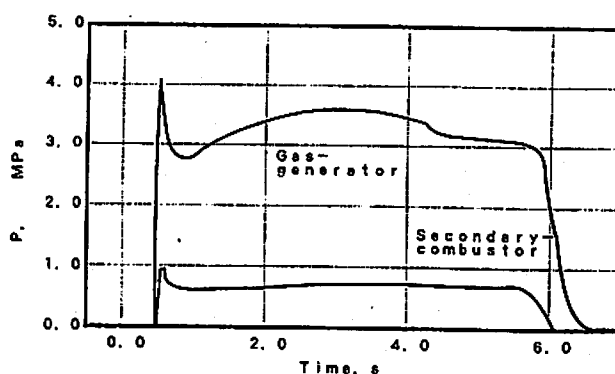


Fig. 7 Relationship between ηC^* and O/F

$$\eta C^* = C^*_{ex} / C^*_{th} \times 100 \quad (5)$$

ここで添字 *ex* は実験値、*th* は理論値である。燃焼効率 ηC^* は O/F によらずほぼ 75% から 80% であった。燃焼効率は液体の HNO_3 を用いたときに (95% 以上) 比較して低い値を示した。インジェクタには霧化をよくするようにスワラタイプのものを用いたが、ゲル化することで液体のときほど小粒化していないためと考えられる。

5. 結 論

- (1) HNO_3 をゲル化することで理論燃焼性能の I_{sp} は 254 秒から 240 秒に低下した。
- (2) 試作したゲル化硝酸は振動試験及び転倒試験において安定した特性を示すことが得られた。
- (3) 試作したゲル化硝酸のインジェクターの流量係数は孔径 0.2mm 以上のときに H_2O と同様であった。
- (4) ゲル化硝酸を酸化剤として用いた燃焼実験では燃焼効率は 75~80% であった。

文 献

- 1) B. Greiner and R. A. Frederick, AIAA Paper 92-3301.
- 2) N. S. Cohen and L. D. Strand, AIAA Paper 93-2550.
- 3) T. Kuwahara, M. Mitsuno, H. Odajima, S. Kubozuka and N. Kubota, AIAA Paper 94-2880.
- 4) T. Kuwahara, M. Mitsuno and H. Odajima, AIAA Paper 95-3083.
- 5) 環境試験方法と工学的指針 (MIL-SRD-810E), (社) 日本防衛装備工業会編集部, 1989.
- 6) 防衛庁規格 火工品試験方法, NDS K 4815B.

Combustion and stable characteristics of gel-propellant

by Takuo KUWAHARA*, Shinji MATSUO* and Ichirou NAKAGAWA*

A gel-propellant has characteristics of both a liquid and a solid material. Pressure or other outer forces acting on the gel-propellant, it changes the shape like a liquid material. And this is the important characteristic of the gel-propellant. The gel-propellant can be stored in a tank and injected into a combustor similarly to a liquid propellant by pressurizing the tank. The gel-propellant is to handle and, moreover, is safer than a liquid material. And so a gel-propellant will be used for rocket motor propellants in future. Isp of GAP and gel-HNO₃ propellant is 240s at O/F = 2.2. Injection characteristics of the gel-HNO₃ propellant and H₂O have the same value when the injector diameter is larger than 0.2mm. After the vibration test and the violent fall test extending over a month the gel-HNO₃ propellant still was stable. And combustion between gel-HNO₃ and gases issuing from AP/HTPB (60/40%) in the secondary combustor of gas-hybrid rocket, the combustion efficiency reached over 75%.

(*Nissan Motor Co. Ltd., Aerospace Division, 21-1 Matoba-shinmachi,
Kawagoe-City Saitama-Prefecture, 350-11 Japan.)
