

酸化剤として H₂O/HNO₃ を用いたガスハイブリッドロケットの燃焼特性

鈴木一希, 浅野貴則(日大・理工・学)
加藤美紀生, 松本幸太郎(日大・理工・院)
桑原卓雄(日大・理工・教授)

1. 研究背景

現在の宇宙開発は、月や火星などの地球近傍の惑星上の探査が進められている。それに伴い惑星間を飛行可能な推進機関の開発が必要になる。ガスハイブリッドロケットをはじめとする化学推進ロケットを用いれば、惑星での打上げ等の大きな推力を必要とするミッションに使用可能である。しかし、搭載する燃料と酸化剤だけでは飛行範囲に限界がある。そこで、惑星現地で調達できる燃料と酸化剤を利用するガスハイブリッドロケットが実用化されると、従来の化学推進ロケットとは異なり、飛行範囲を広げることが可能になる。

本研究では惑星間飛行用の推進機関の一つとして、惑星現地で調達できる燃料と酸化剤を利用するガスハイブリッドロケットに着目した。

Fig. 1 にガスハイブリッドロケットの構造図を示す。

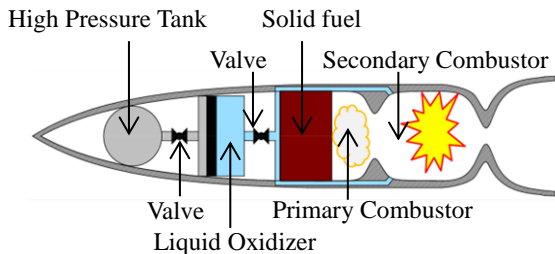


Figure 1. Gas Hybrid Rocket

ガスハイブリッドロケットは、一次燃焼室で固体燃料を燃焼させ燃料過剰ガスを生成する。そして、二次燃焼室で燃料過剰ガスと液体酸化剤を混合し、燃焼させることで推力を得る。さらに、一次ノズルがチョークしている場合には酸化剤流量と燃料流量、アンチョークしている場合には酸化剤流量を変化させる事により推力制御が可能である。

惑星現地で調達できる燃料と酸化剤として、固体の金属と液体の水(H₂O)があげられる。H₂O は多くの惑星で存在が確認されており、調達可能な酸化剤である。月や火星などの地球近傍の惑星は、地球型惑星と呼ばれる。地

球型惑星の元素の割合は、地球と同様の傾向であると考えられる^[1]。金属については、地球上の地表付近に存在する元素の割合を火成岩の化学分析結果に基づいて推定した結果を質量パーセントで表したクラーク数で評価した。Fig. 2 にクラーク数^[2]の高い元素を示す。

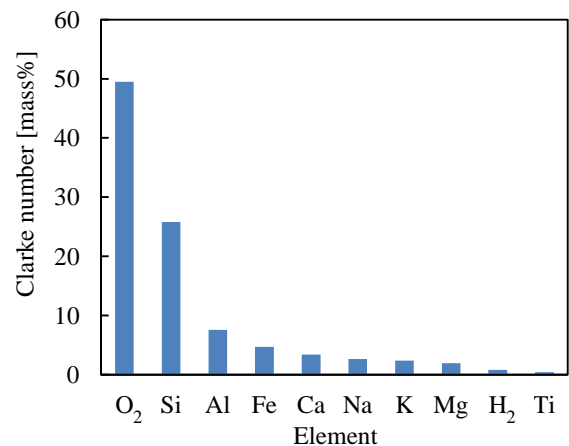


Figure 2. Clarke number

Fig. 2 より、地殻に Si や Al などの金属が多量に存在していることが分かる。よって、金属は惑星現地で調達が可能であると考えられる。

以上のことから、固体燃料には金属を含んだパイロラントを使用する。パイロラントとは、燃料の金属と酸化剤を混合した粉末またはバインダーを混合した固体燃料である^[3]。液体酸化剤に H₂O を用いる場合の、パイロラントの金属の選定条件を以下に示す。

- (1) H₂O との燃焼熱が高い
- (2) 地球近傍の惑星に多量に存在する

Fig. 3 に各元素の H₂O との燃焼熱を示す。Fig. 3 より、H₂O との燃焼熱はベリリウム(Be)、リチウム(Li)、アルミニウム(Al)、マグネシウム(Mg)、の順で高いことがわかる。しかし、H₂O との燃焼熱が高い Li, Be はクラーク数^[2]より惑星に存在する割合が非常に少ない。また、Li は反応性が高く、Be は毒性が高いこと

から扱いにくいという欠点がある。そこで、Li、Beの次に燃焼熱が高く、Fig.2より惑星に多量に存在するAlがあげられる。しかし、Alは着火しにくい。そこで、着火しやすい金属としてMgがある。MgはAlの次にH₂Oとの燃焼熱が高く、惑星に豊富に存在する。AlとMgの合金であるマグナリウム(Mg-Al)をパイロラントの金属として選定した。

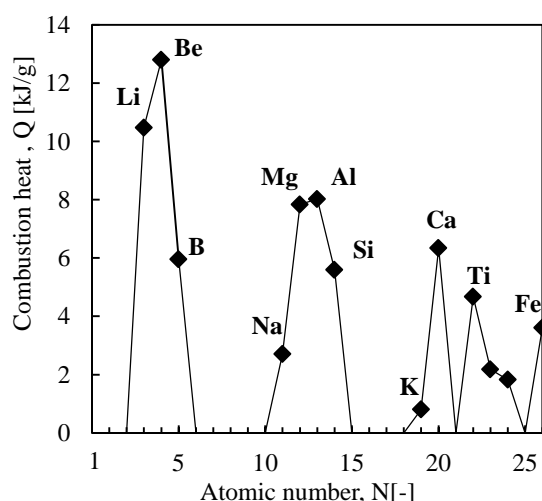


Figure 3. Combustion heat of the elements with H₂O

H₂OとMg-Alを二次燃焼室で燃焼させるためには、Mg-Alを高温にする必要がある。そこでパイロラントの酸化剤には、AlとMgに対して酸化力に優れているフッ素を多量に含んでいるテフロン(Teflon)、Mg-AlとTeflonの物理的結合を得るためバインダーとして、フッ素を有するバイトン(Viton)^[4]を用いた。よって、パイロラントにはMg-Al/Teflon/Vitonを選定した。

過去の研究より、Mg-Al/Teflon/Vitonの混合量には79.2/8.8/12 mass%が適していることが得られている^[5]。Mg-Alを多量に含ませることにより金属多量の燃焼ガスが生成でき比推力(Isp)が上がる。また、Teflon/Vitonの組成比を着火、物理的結合に必要な最小限にすることで惑星に持ち込む量を減らせる。

ガスハイブリッドロケットのパイロラントにMg-Al/Teflon/Viton、液体酸化剤にH₂Oを用いた場合、酸化剤流量と燃料流量の比(O/F)が1.0以上においてC*燃焼効率が95%から60%に低下する^[5]。C*燃焼効率が低下する要因として、H₂Oの解離温度に着目した。H₂Oを金属と反応させるためには、H₂とO₂に解離させる必要がある。Fig.4にH₂Oの解離と

温度の関係を示す。Fig.4より、H₂Oの解離を開始する温度が2000Kと高温であることが分かる。O/Fが1.0以上において、混合ガス温度が低下しH₂Oが十分に解離できずC*燃焼効率が低下したと考えられる。そこで、H₂Oの解離を促す酸化剤をH₂Oに少量混合させることで、C*燃焼効率を改善させることが可能になる。

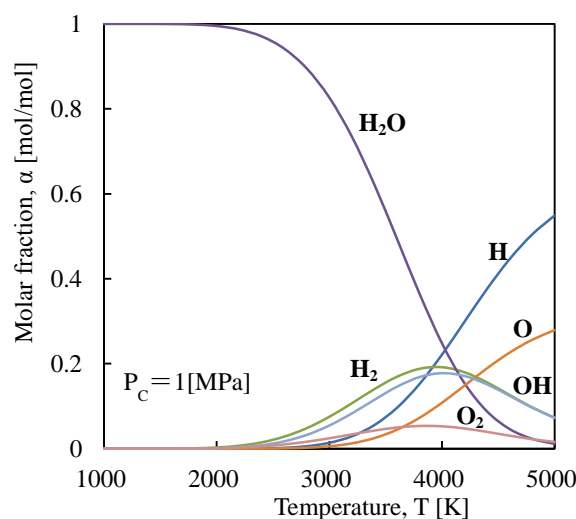


Figure 4. Dissociation temperature of H₂O

2. 目的

H₂Oに混合する酸化剤を選定し、混合する酸化剤の濃度がC*燃焼効率に及ぼす影響を求める。

3. 混合する酸化剤の選定

選定条件を以下に示す。

- (1) 水溶性がある
- (2) 分解温度が低い
- (3) Mg-Alとの断熱火炎温度が高い

H₂Oに混合させるため水溶性が必要になる。次に分解温度が低く、Mg-Alとの断熱火炎温度が高い酸化剤を混合させることで、H₂Oよりも先に燃焼させ、高い断熱火炎温度を得ることでH₂Oの解離を促すことが可能である。

Table 1.に水溶性を持つ各酸化剤^[3]の分解温度を示す。Fig. 5にO/Fに対するMg-Alと各酸化剤の断熱火炎温度^[6]を示す。

Table 1. Calculation results for each oxidizer

Chemical Formula	HNO ₃	H ₂ O ₂	NH ₃ (OH)NO ₃
Decomposition Temperature [K]	360 ^[7]	750 ^[8]	460 ^[9]

(P_c=0.1[MPa])

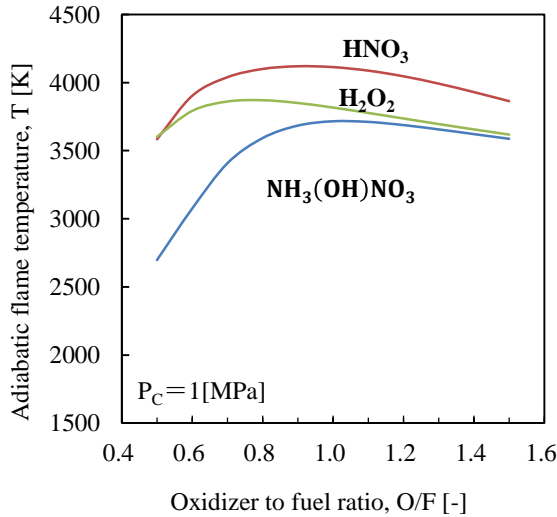


Figure 5. Result of computation

Table 1.及び Fig. 5 より，硝酸(HNO₃)は分解温度が低く，Mg-Al との断熱火炎温度は O/F が 0.5-1.5 において高い．よって，H₂O に混合する酸化剤として HNO₃ を選定した．

4. 燃焼実験

C*燃焼効率(η_{c^*})は以下の式で求めた．

$$\eta_{c^*} = \frac{C_{exp}^*}{C_{th}^*} \times 100 \quad (1)$$

ここで，C*_{th} は理論特性排気速度であり化学平衡計算ソフト NASA-CEA^[6]を用いて取得した．C*_{exp} は実験で得られる特性排気速度であり以下の式より求める．

$$C_{exp}^* = \frac{P_c A_t}{\dot{m}} \quad (2)$$

ここでP_cは二次燃焼室圧力，A_tは二次ノズルスロート断面積， \dot{m} は燃料と酸化剤の質量流量である．

実験は以下のような手順で行った．Mg-Al/Teflon/Viton の着火はニクロム線を電氣的に加熱をすることで行った．また，着火

を促すために Mg-Al/Teflon/Viton の表面に黒色火薬を少量塗布した．二次燃焼室内圧力及び一次燃焼室圧力を圧力センサから A/D コンバータを通して，P.C.に記録させた．

Table 2.に実験条件を Fig. 6 に実験装置を示す．

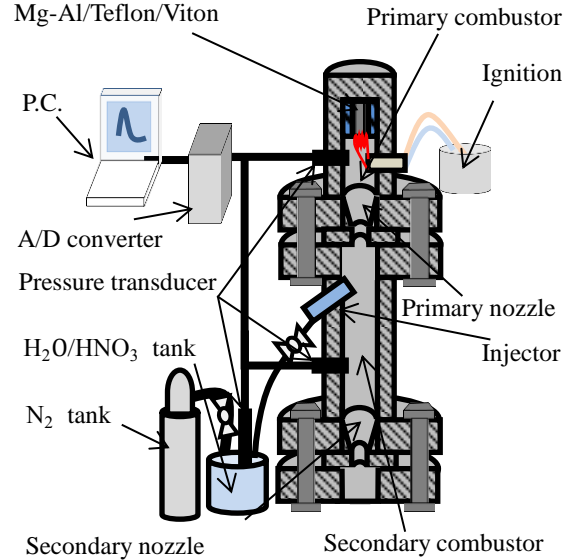


Figure 6. Experimental apparatus

Table 2. Experimental conditions

Composition of the pyrolant Mg-Al/Teflon/Viton [mass%]	79.2/8.8/12
Composition of Mg-Al alloy Mg/Al [mass%]	50/50
Composition of the oxidizer H ₂ O/HNO ₃ [mass%]	80/20 90/10
Primary nozzle throat diameter [mm]	11
Secondary nozzle throat diameter [m]	5.0
Measurement of the Primary Combustor $\phi \times h$ [mm]	38×57
Measurement of the Secondary Combustor $\phi \times h$ [mm]	49×154
Initial temperature of the oxidizer [K]	293
Droplet diameter of the oxidizer [μm]	90

5. 実験結果と考察

実験結果を Fig. 7 に示す．グラフの縦軸は C*_{th} 燃焼効率 η_{c^*} ，横軸は O/F である．

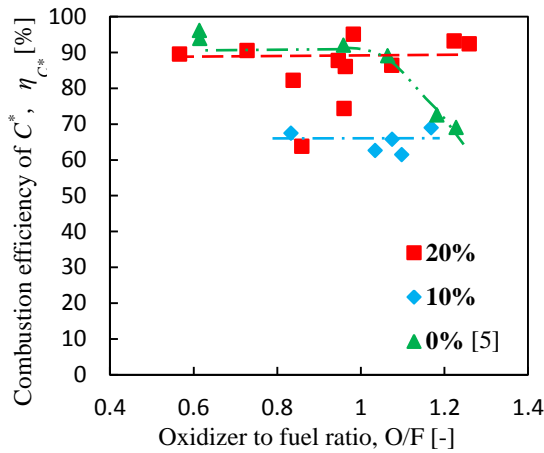


Figure 7. Experiment result

HNO₃ 10 mass%では、O/Fが0.8-1.2でC*燃焼効率は70%まで減少した。HNO₃ 20 mass%では、O/Fが0.6-1.0においてC*燃焼効率はHNO₃ 0 mass%同様に90%になり、O/Fが1.0-1.25においてもC*燃焼効率は90%を維持することができた。このことからH₂OにHNO₃ 20 mass%を混合させることで、O/Fが1.0-1.25においてC*燃焼効率が向上したと考えられる。

HNO₃ 10 mass%とHNO₃ 20 mass%では、C*燃焼効率に及ぼす影響が全く違った。そこで、HNO₃の濃度の効果を求めるために各濃度の圧力履歴を比較した。燃焼開始から圧力の最大値に達するまでの時間に差がある傾向が求められた。Fig. 8にO/Fの値が一致している1.1における各濃度の燃焼開始から圧力の最大値に達するまでの圧力履歴と線形近似線を示す。

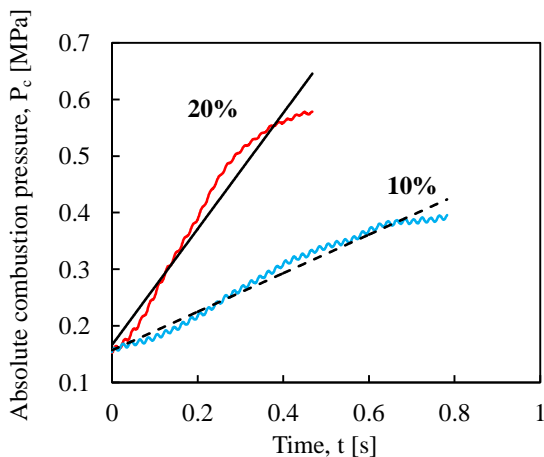


Figure 8. Rise of absolute combustion pressure

Fig. 8より、HNO₃ 20 mass%の方が燃焼開始から圧力の最大値に達するまでの時間が短い。また、HNO₃ 20 mass%とHNO₃ 10 mass%のそ

れぞれの燃焼時における平均の酸化剤流量と燃料流量はほぼ等しい値となった。よって、HNO₃の濃度変化が圧力勾配を変化させたと考えられる。このことから、HNO₃はMg-Al/Teflon/VitonとH₂Oの燃焼時の反応を変化させる効果があり、その効果がC*燃焼効率を変化する一つの要因と考えられる。

6. 結論

H₂Oに混合させる酸化剤としてHNO₃を選定し、O/Fが1.0-1.25においてHNO₃を20[mass%]混合させることでC*燃焼効率が向上する。

参考文献

- [1] 久城育夫, “火星の景色と表面の物質”, 東京大学理学部, 東京大学理学部広報 8 巻 5 号, pp.4~5(1976).
- [2] F. W. Clarke and H. S. Washington, “The composition of the earth's crust”, US. Geol. Surv. Prof. Paper 127(1924).
- [3] 栗原卓雄, “ロケットエンジン概論”, 産業図書, pp. 83~86, 118~119(2009).
- [4] 久保田浪之介, “マグネシウム/テフロン燃焼速度”, 技術研究本部技報, 1986-03, 防衛庁技術研究本部 技術部防衛庁技術研究本部技術部技術第 2 課 [編], pp.1~7 (1985).
- [5] M. Kato and T. Kuwahara, “Combustion efficiency of Gas-Hybrid Rocket using H₂O and Mg-Al/Teflon/Viton”, 44th International Annual Conference of ICT, pp.30-1~30-8(2013).
- [6] S. Gordon and B. J. McBride, “Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications”, NASA Reference Publication 1311(1996).
- [7] 内田俊一, 津田信英, “硝酸”, 産業図書, pp.16~19(1954).
- [8] D. Sengepta, S. Mazumder, J. Vernon, and S. Lowry, “Controlling NonCatalytic Decomposition of High Concentration Hydrogen Peroxide”, CFD Research Corporation, F04611-03-M-3208(2004).
- [9] 栗原卓雄, 滝塚道則, 恩田敏男, “硝酸ヒドロキシルアンモニウム系推進薬の燃焼および熱分解特性”, 35th燃焼シンポジウム講演論文集, pp.751~753(1997).