

月資源を利用したハイブリッド・ロケットの検討

宇宙開発事業団	長島隆一	宇田川悟
航空宇宙技術研究所	毛呂明夫	清水盛生
日産自動車	山本洋一	
日油技研	藤山熙	
細谷火工	笠間恒雄	

1 はじめに

将来、月面の物質を積極的に利用できるようになれば、月面において地球と独立した宇宙活動が可能になる。この宇宙活動をサポートするためには、月の物質のみを利用した推進系の開発が必要である。月面の物質は、各種の固体金属酸化物で構成されている。したがって月面での推進系で用いられる酸化剤は一義的に酸素となるが、燃料としてはこの酸化物を還元した各種の物質が利用可能となる。これらは例外なく固体金属となる。そしてこれらの推進剤の組合せにより推進系として成立可能な形態は必然的にハイブリッドロケットになる。図1に一般的なハイブリッドロケットの概念図を示す。本論ではこのハイブリッドロケットの燃料を月面物質から選定し、実際に燃焼試験を行い、月資源を利用したハイブリッドロケットの成立性について検証した結果を報告する。

2 推進剤の検討

推進剤の基本的要求条件として、製造性の観点から月面物質から大量に製造可能であり、性能の観点から月面から月周回軌道への打ち上げが可能な程度の比推力を有する必要がある。そこでこの各要求条件を満たす推進剤の検討を実施した。

(1)製造性の評価

推進剤の製造性は月面において原材料を収集する難易度と、原材料より推進剤を精製する難易度で評価した。原材料収集の難易度は、月面サンプルの重量分率を評価パラメータとし、具体的には、アポロ11～16号の月面サンプル中の重量分率の平均値とした。推進剤精製の難易度は、原材料物質精製時の標準自由エネルギーで評価し、具体的には、原材料である金属酸化物の1000℃における標準自由エネルギーで評価した。 ΔG が大きいほど精製が容易であることを示す。図2に、レゴリスに含有される酸化物の質量分率と精製の自由エネルギーとの関係を示すが、レゴリスの選別、還元の難易度からSiとFeが注目すべきものでありAlも次点に位置する。したがって製造性の観点から月資源ハイブリッドロケットの候補燃料としてSi, Fe, Alを選定した。

(2)理論性能の評価

製造製から選定した燃料のSi, Al, Feと液体酸素を推進剤としたときの理論比推力特性を調査した。図3に比推力特性を示す。これからAlが最も性能が良く以下Si, Feとなる。以上の結果から、候補燃料は、製造性の観点からSiを、性能の観点からAlを選定し、助燃剤としてFeを用いることにする。

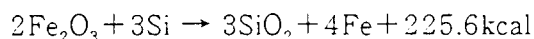
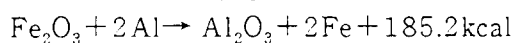
(3)候補燃料の酸化特性

製造性および理論性能の観点から選定した燃料Si, Al, Feの推進剤としての成立性を検討し

た。検討方法は、酸素雰囲気中において試料を一定昇温速度で加熱し、酸化により増加する重量を記録する装置により熱重量分析を行い酸化特性を評価した。図4に結果を示す。酸素との反応性は $Fe > Al > Si$ の順に大きい。Siの反応性が極めて低く、 $1000^{\circ}C$ 以下ではほとんど酸化されていない。Siの酸化物は SiO_2 は非晶質であるため、初期の酸化過程でSi表面が緻密な SiO_2 で覆われてしまうためと考えられる。この結果はこれまでSiがロケット燃料として適当でない原因でもある。

(4)テルミット反応の検討

Siの酸化を促進させるために、テルミット反応の検討を行った。テルミット反応とは、金属酸化物を金属によって高温還元する反応のことで、例えばFeの酸化物とAl, Siを反応させると、Al, Siは酸化され Fe_2O_3 は金属に還元される。



したがってこのテルミット反応を活用することによって、月資源ハイブリッドロケットの燃焼特性を向上する可能性があると考えられる。

(5)候補推進剤の選定

以上の検討結果を基に候補推進剤を決定した。酸化剤は月面での他の候補が存在しないため、一義的に酸素となる。燃料は製造性の観点からSiを、性能の観点よりAlを選択した。そしてSiの酸化を促進するため、酸化鉄を添加した。

3. 燃焼試験

(1)実験方法

候補燃料のハイブリッドロケット推進剤としての成立性を評価することを目的として、図5に示す小型モータにより燃焼試験を実施した。酸化剤はガス酸素とし、燃料グレイン前方に設けたポリウム内に円周方向より噴射した。点火器は固体推進薬を用いた添加モータとした。燃料グレインは燃料とする金属粉末に、粘結剤としてVitonを重量比率で3%（外割）添加しペレット成型方法により製造した。燃料の組成を表1に示す。燃料グレインは、断熱材を兼用するグラファイトサポート内面に配置した。燃料グレイン後部に燃焼効率を向上させる目的でポリウムをもうけた。燃焼推進特性は、燃焼内圧、推力、燃料消費量及び酸素供給量計測データから評価した。

(2)実験結果

主要な燃焼試験結果を表2に示す。図6にSi/Al=50/50の場合の燃焼内圧パターンを示す。イグナイタ点火後燃料に1秒以内に着火し自立燃焼することが確認された。これらの結果より、月資源ハイブリッド・ロケットの燃焼特性について以下の結果を得た。

- ①燃料ペレットの着火性は Fe_2O_3 含有率に依存せず、Si/Alだけでも自立燃焼する。
- ② Fe_2O_3 含有率の増加に伴い、特性排気速度及び比推力は理論性能と同様に低下する。

4. まとめ

月資源より製造可能な推進剤として酸化剤として酸素、燃料としてSi, Al, Feを選定した。そしてSi, Alのみで燃焼可能であることを確認した。今後の課題としては、燃焼残渣のデブリ化の問題を解決する必要がある。

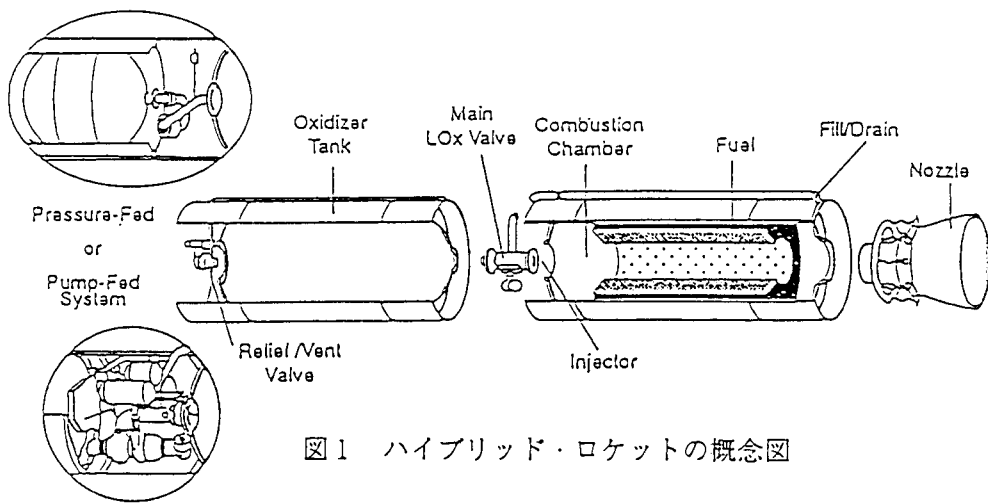


図1 ハイブリッド・ロケットの概念図

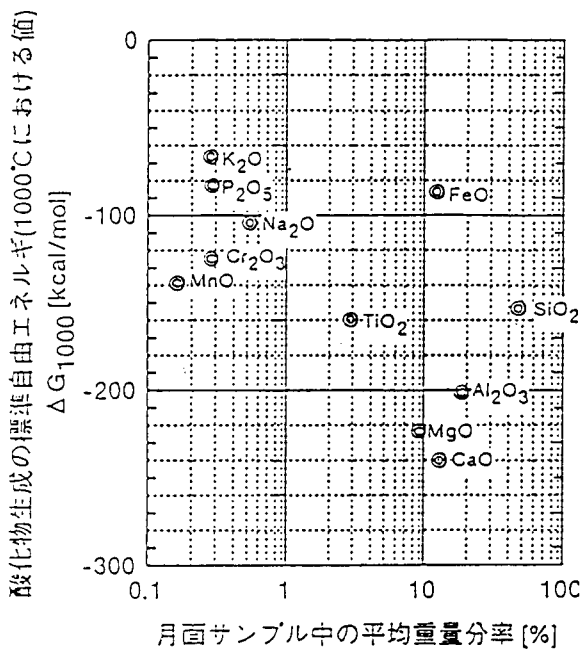


図2 月面物質製造製の評価

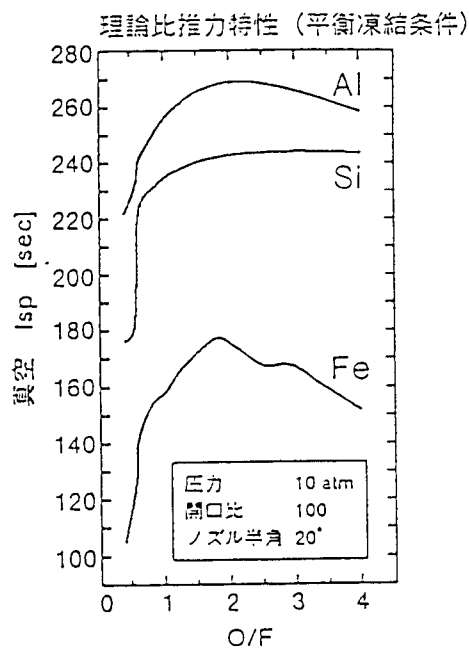


図3 候補燃料理論比推力特性

表1 燃料組成

	燃料組成		
	Si	Al	Fe ₂ O ₃
1	50	50	0
2	40	40	20
3	30	30	40
4	20	20	60
5	10	10	80

表2 燃焼試験結果

	燃焼時間 [s]	C*効率	Cfv効率	真空比推力		
				実験値 [s]	平衡凍結理論値 [s]	Isp効率
1	4.30	0.79	0.90	143	201	0.71
2	3.71	0.80	1.03	162	195	0.83
3	3.41	0.77	0.93	133	185	0.72
4	2.22	0.67	1.14	137	179	0.77
5	3.25	0.70	1.07	123	166	0.74

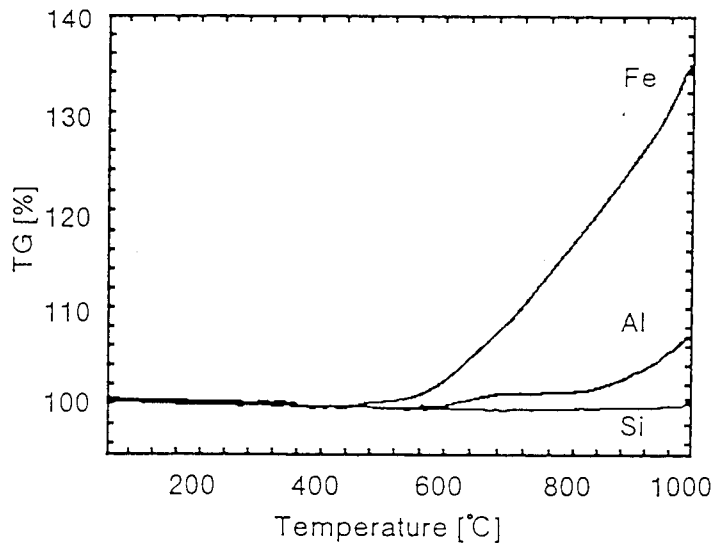


図4 候補燃料酸化特性

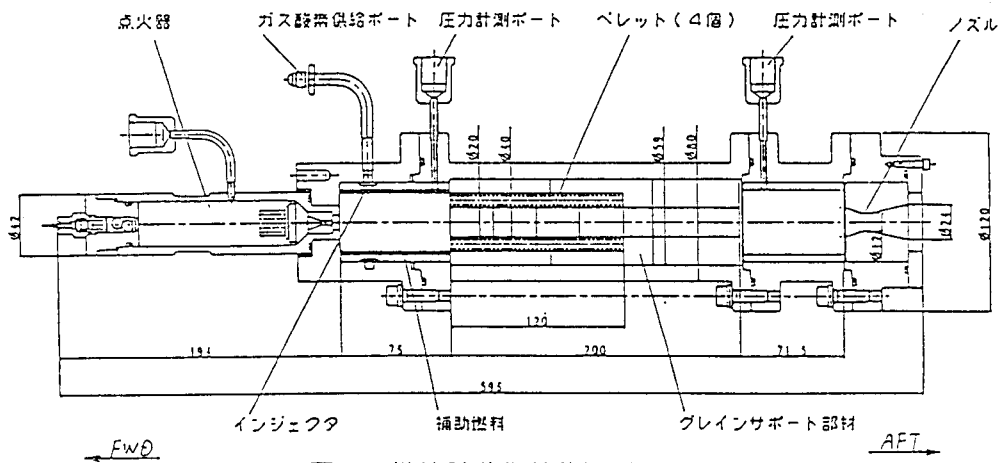
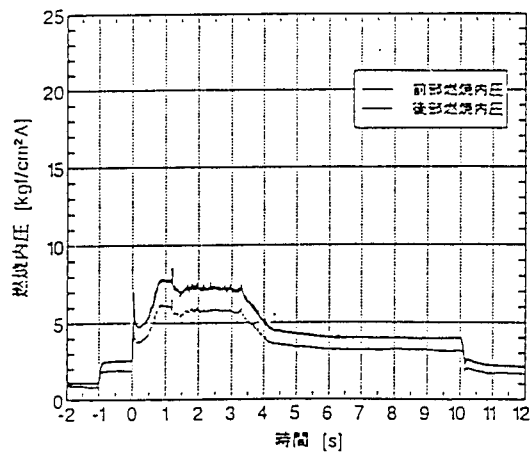


図5 燃焼試験供試体概要



燃料組成 AtSi=50:50

図6 燃焼内圧履歴