

特集 「宇宙開発事業団の月探査研究」

将来の月利用

宇田川悟¹、板垣春昭¹

1. はじめに

月の探査については、既に詳しく紹介されている2003年打ち上げ予定の月探査周回衛星を皮切りに、2015年頃までに、月の広域探査を行う月面ローバや月面試料を地球に持ち帰るサンプルリターンなどの無人ミッションにより、本格的な探査が

行われると考えられる。さらにこの時期に、月面からの天文観測、宇宙環境モニタリング等のための先行的なミッションが実施される可能性が高い。

2015年以降は月面有人拠点の建設が開始されるものと予想される。初期の有人拠点は、少人数のクルー(3名程度)が短期間(昼間のみ10日程度)月面に滞在し、ライフサイエンス実験や資源利用実験などを実施するものと想定される(図1)。

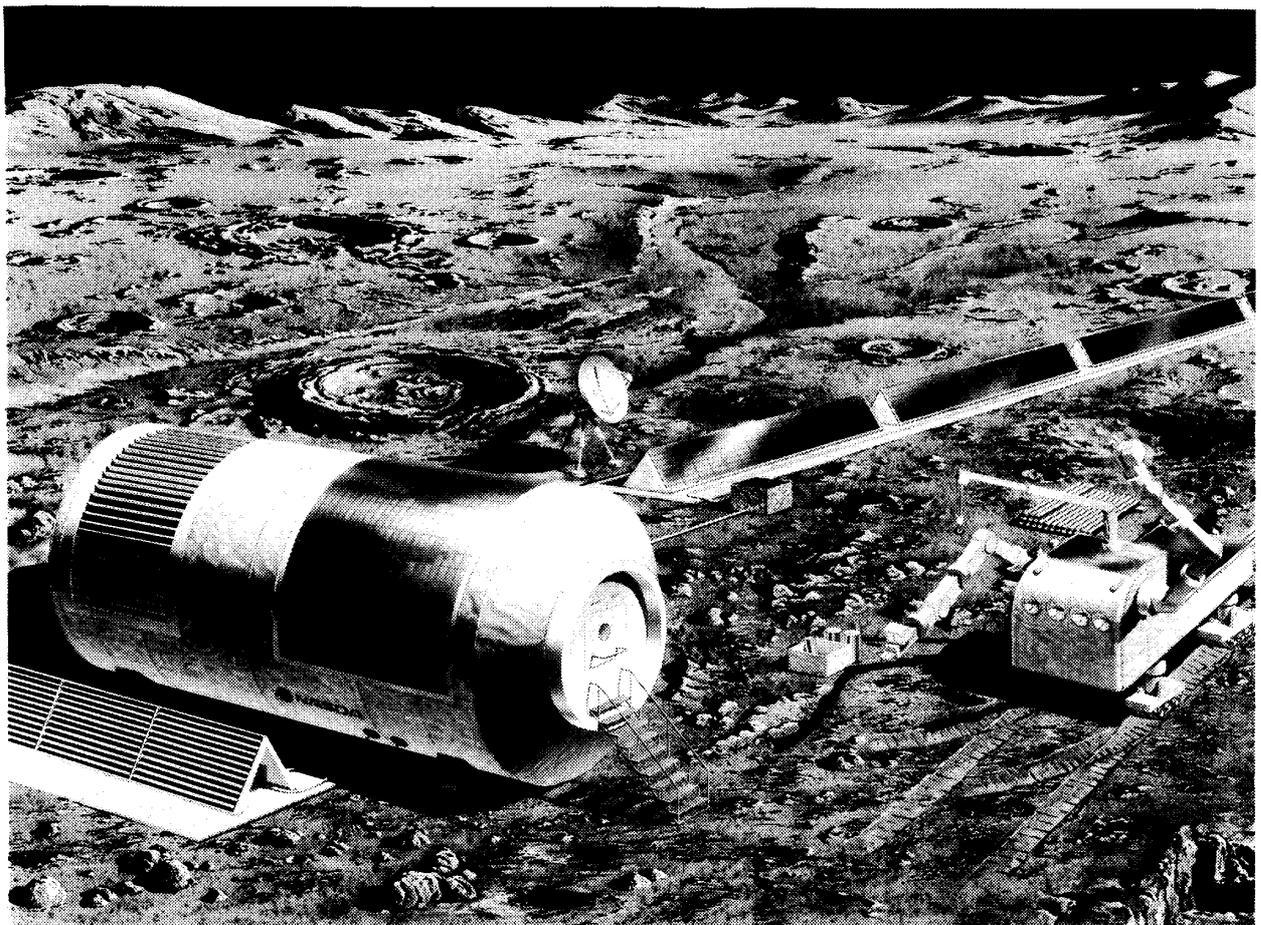


図1. 初期の有人月面拠点

¹宇宙開発事業団

このような初期段階をすぎると全体システムは拡張され、レゴリス被覆等を利用した耐放射線シールドの強化や人間の生存のために必要な空気や水の再利用システムの導入等にともない、より多くのクルーが長期間連続滞在することが可能になる。この結果、酸素やヘリウム3の採取、建設材料の製造実験等、より大規模な実験や本格的月面天文台の建設、運用に対する支援などが活発に行われるようになると思われる。

以上のような有人拠点を含む各種月ミッションは、現時点ではあくまで1つの想定にすぎないが、技術的にみると厳しい開発努力が必要であるものの、実現の可能性はあると考えている。宇宙開発事業団(NASDA)では開発努力が必要と考えられるクリティカルなシステム技術、要素技術について、まず月面用としての成立性を確認するという観点からいくつかの研究を実施しているので、その概要を紹介する。

2. クリティカル技術

月ミッションを遂行するために必要な技術は、

- ・月面離着陸を含む地球～月間の輸送システム技術及び月面上の移動、輸送技術
- ・熱制御、電力供給、有人サポート技術、宇宙服を含む月面滞在技術
- ・月面自動設置、遠隔操作技術
- ・月の裏側との交信を含む通信技術
- ・ロボット活用を含む有人拠点構築技術
- ・各種実験や天文台ミッション等の支援技術

等があげられる。これらのうち輸送システムはもっとも重要なインフラ技術の1つであるが、無人ミッション段階ではH-IIAロケットで対応できる。有人段階になるとさらに大規模な再使用型輸送機が必要となる。遠隔操作や通信技術は我が国が得意とする分野の1つで、現在の技術の展開で実現可能

と考えられる。有人サポート技術については宇宙ステーションで得られた知識や経験が利用できよう。拠点そのものも、月面での構築に工夫を要するが、構造体としてはJEM等で培った技術が適用できよう。

月特有の条件として考慮しなければならない点に、月の昼夜が地球日にして各々14日間続くことがあげられる。このため月面上のシステムは、昼間は厳しい高温にさらされるのに対し、夜は低温状態が長期間続くことになり、熱制御にとっては難しい課題である。

さらに夜間の電力供給は一層難しく、かつ重要な技術課題である。人工衛星では通常、日照中は太陽電池、日陰にはいると蓄電池を使用しているが、これを月面システムに採用しようとする、月面まで輸送しなければならない蓄電池の重量が非常に大きくなる。それでも夜間の使用電力が微々たるものであれば蓄電池も可能であるが、必要電力が大きくなると蓄電池は緊急用等を除いて採用が難しくなる。たとえば夜間100Wを連続使用する場合蓄電池重量は400kgをこえ(Liイオン二次電池を想定)、本来のミッションのためのペイロード重量(H-IIAで800kg程度と想定)の半分以上を占めてしまうことになる。これが有人活動時期になると、夜間の消費電力は飛躍的に増加するものと考えられ、これをすべて蓄電池でまかなおうとすると重量は莫大なものとなり、現実的でない。

さまざまな月ミッションを実施するためには以上のような技術を開発、確立させる必要があることを念頭において、NASDAでは将来の月利用に向けて次のような研究を行ってきている。

まず月面でのエネルギー・熱制御関連としては、レゴリスを蓄熱材とした熱電発電(後述の「ガラスの海」の研究)、フライホイール、燃料電池、レーザによる送電、パラソル型保温システムなどの研究を行っている。

月資源利用の観点からは、レゴリスからのLOXの製造、月資源によるロケット燃料製造、テルミット反応を利用した月面建造物の構築方法などの研究を実施しており、さらにその他月面におけるインフレータブル構造の適用性の研究等を実施している。

これらの研究のなかで2つの概略を以下に述べる。

3. ガラスの海

月面活動において、夜間におけるエネルギーの確保は重要である。月の夜は約14日間も続き、月表面の温度は赤道上で約 -170°C まで低下する。長期間ミッションを遂行する人間や機器にとって、この厳しい低温環境への対応も含めた定常的なエネルギー源の確保は、月開発利用構想における大きな課題となっている。

このような観点より、月資源を利用したエネルギー供給システムの新しい概念「ガラスの海」システムを紹介する。

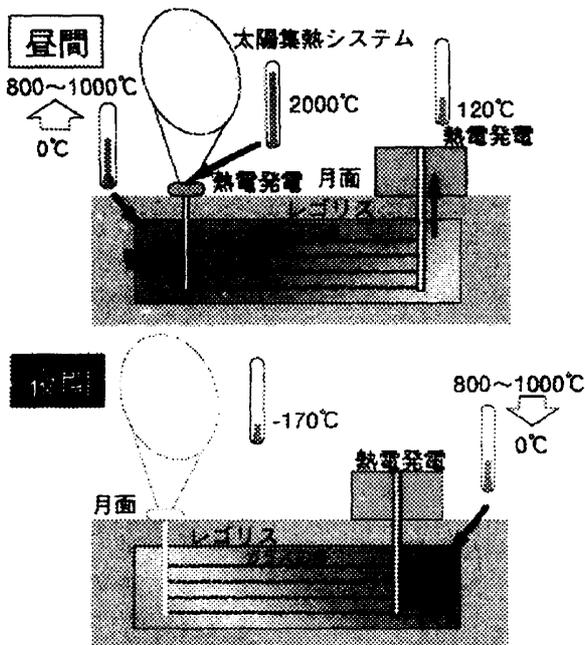


図2. ガラスの海概念図

(1) ガラスの海構想

月の表土(レゴリス)の特徴の一つとして、熱伝導率が極めて低く、月表面下数十cmの温度は昼夜変わらず一定(赤道付近では -20°C)であることが知られている。このことから、月面のレゴリスは優れた保温材としての機能を有することがわかる。

このレゴリスの中に、月面材料を用いた蓄熱材を生成して、14日間の昼間に太陽集熱装置を用いて温め、この熱を、熱そのものとして、もしくは熱電変換を経て電力として利用することが考えられる。このシステムを「ガラスの海」と呼ぶ。

「ガラスの海」と呼ぶ理由は、その蓄熱材の材質の発想にある。蓄熱材として有望なものとして、レゴリスを太陽集熱器により溶解(融点約 $1400\sim 1700\text{K}$)ガラス化し、塊状(ブロック状)にしたものが考えられる。また、熱伝導を促進する目的で、ガラスブロックの中にヘリウムや窒素などのガスを混合したものを利用するアイデアもある。

月の昼間に、このガラスの海を太陽集熱装置を用いて $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 近傍まで加熱しておき、夜間はガラスの海と月面上(赤道約 -170°C)との温度差を利用して発電等を行う。昼間にはガラスの海を太陽集熱装置により加熱すると同時に、太陽集熱部と月面上との温度差により発電も実施する。

図2にガラスの海システム構想の概要を示す。

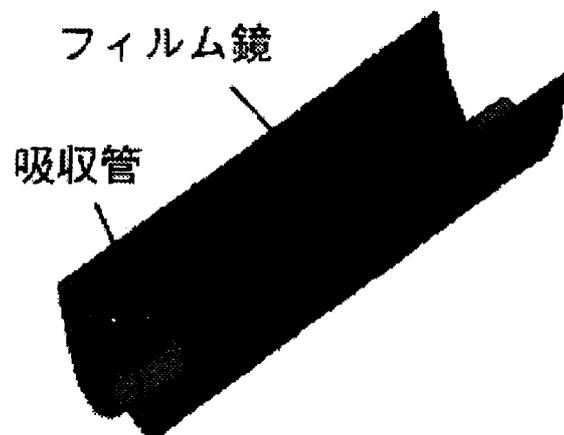


図3. 複合懸垂面集光器 (CSC)

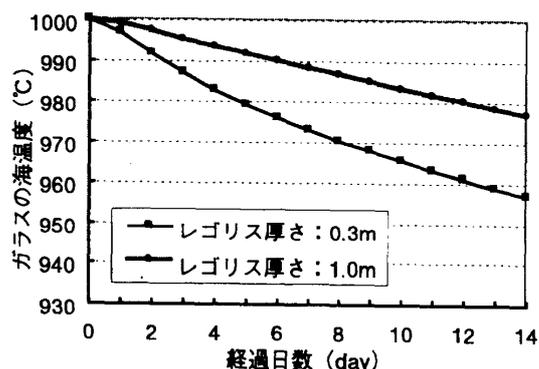


図4. ガラスの海の温度低下

(2) 集熱方式

月面でガラスの海システムのような大規模な構造物を構築するためには、低コストで安易に集光装置を設置する必要がある。ここではフィルム鏡を懸垂させて構成させた、複合懸垂面集光器(Compound Suspensory Concentrator: CSC, 図3)を採用することにより、フレームとそれに懸垂するフィルム材を調達するだけで、月面上に容易に集光器を構築できる。

(3) 蓄熱方式

レゴリスの熱伝導率は、約 $0.01\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ であり、ガラスウールや毛布、羊毛、石綿、コルクなどの $0.04\sim 0.06\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ という熱伝導率と比較しても優れた断熱材であることがわかる。この原因はレゴリスが

パウダー状になっていることに由来する。

ガラスの海の初期温度を 1000°C とし、輻射放熱による温度低下を、レゴリス表面の輻射率を 0.92 として計算した。月面の夜(14日間)におけるガラスの海の温度低下は、ガラスの海の上のレゴリスの厚さが 1.0m のとき約 23°C 、 0.3m のとき約 43°C となり、レゴリスの断熱材としての十分な能力が確認された(図4)

次に、熱の蓄積について述べる。石英ガラスの熱伝導率は、 $2\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 程度であり、月のレゴリスを溶かして固めたガラスの海の熱伝導率はこれに近い値になることが予測される。レゴリスとの熱伝導率の差を利用して効果的に蓄熱し、Fe-Si系熱電素子などにより電気エネルギーに変換することができる。

(4) システムの規模

昼夜 100kW 発電するためのガラスの海システムの大きさと配置のイメージを検討した。その結果集光部が $200\times 140\text{m}$ (幅 1m 、長さ 200m)のCSCを 140 基、蓄熱部 5250m^3 、発電部 800m^2 、放熱部 4750m^2 となることがわかった(図5)。

(5) まとめ

ここでは、月でのエネルギー供給システムとして、ガラスの海システムを紹介した。このような大型の

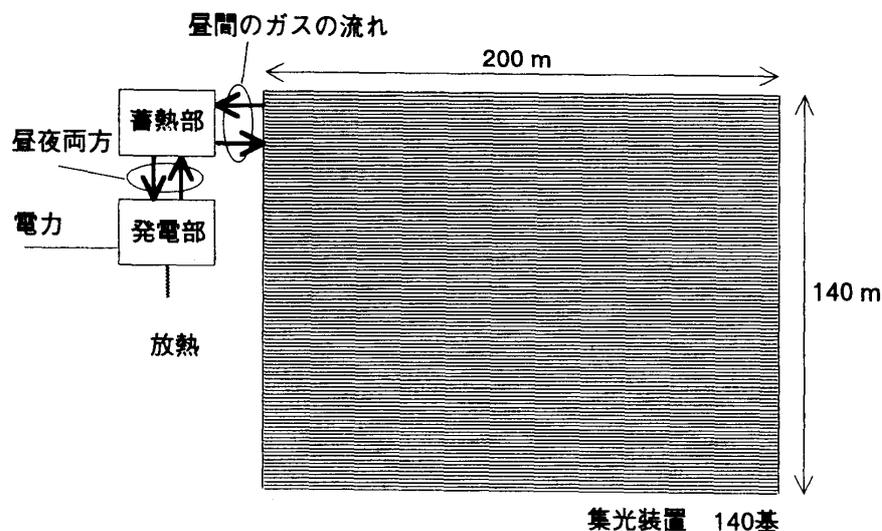


図5. ガラスの海システムの全体図

システムを構築するためには月面のレゴリス加工工場の建築等、有人を含む大規模な月面活動が必要と考えられ、今後更なる検討を行う必要がある。

4. ハイブリッド・ロケット

将来、月面の物質を積極的に利用できるようなれば、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酸素を用いることになるが、燃料としてはこの酸化物を還元した各種の固体金属が利用可能となる。そしてこれらの推進剤の組合せ(液体酸素+固体金属)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6)。ここ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紹介する。

(1) 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。そこでこの要求条件を満たす推進剤の検討を実施した。

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。その結果、レゴリスの選別、還元の難易度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。

製造性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結果、Alが最も性能が良く以下Si, Feとなった。以上から、候補燃料は、製造性の観点からSiを、性

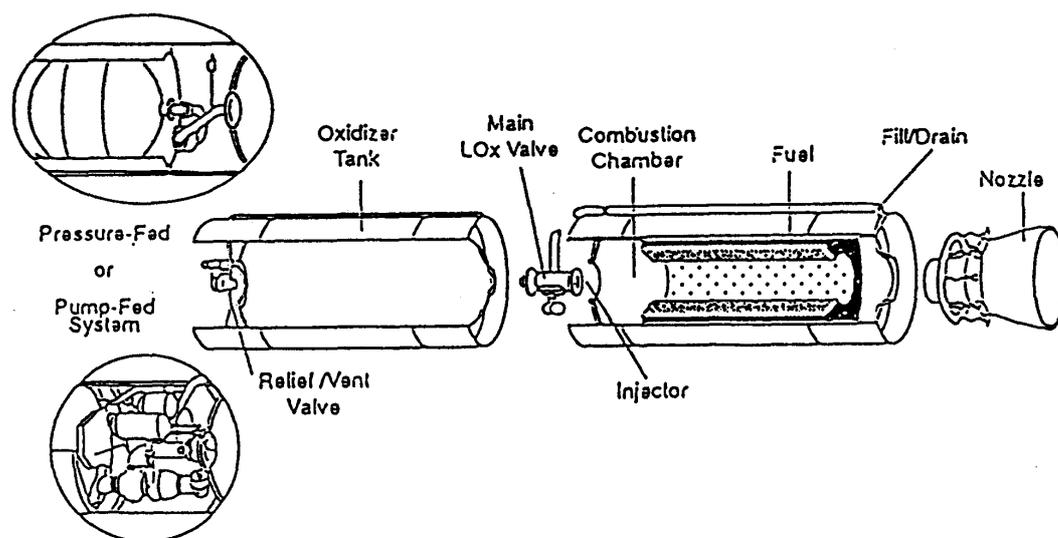


図6. ハイブリッドロケットの概念図

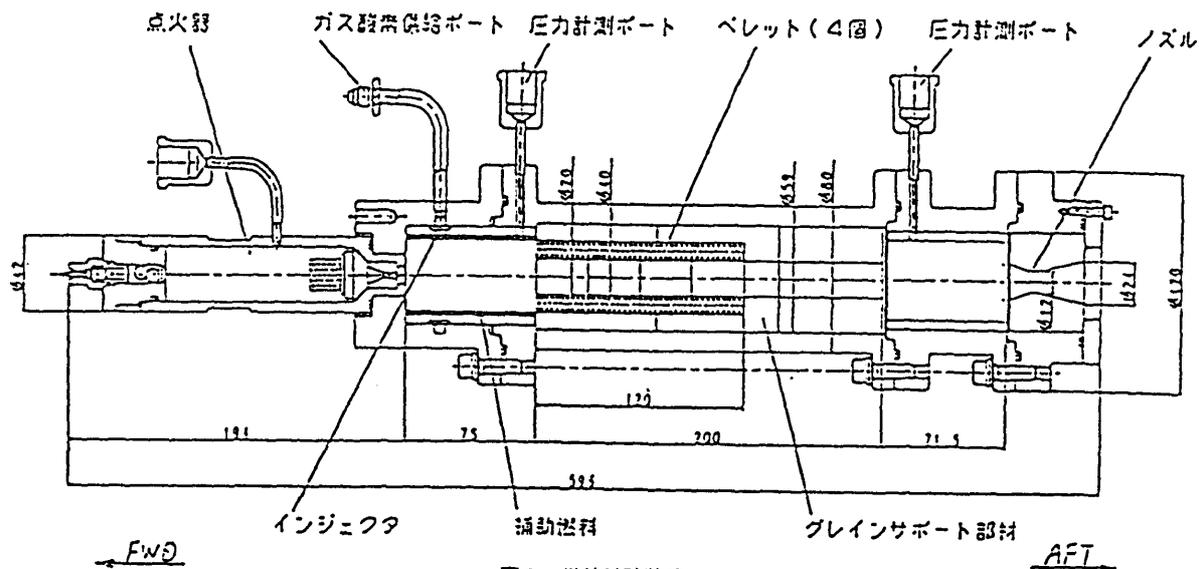
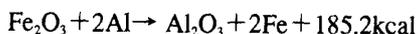


図7. 燃焼試験装置

能の観点からAlを選定し、助燃剤としてFeを用いることにした。

次に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Fe₂O₃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。

以上の検討結果をもと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Si, Alを選択し、Siの酸化をテルミット反応で促進するため、酸化鉄を添加した。

(2) 燃焼試験

・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7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。

表1. 燃料組成

	Al	Si	Fe ₂ O ₃
1	50	50	—
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

・実験結果

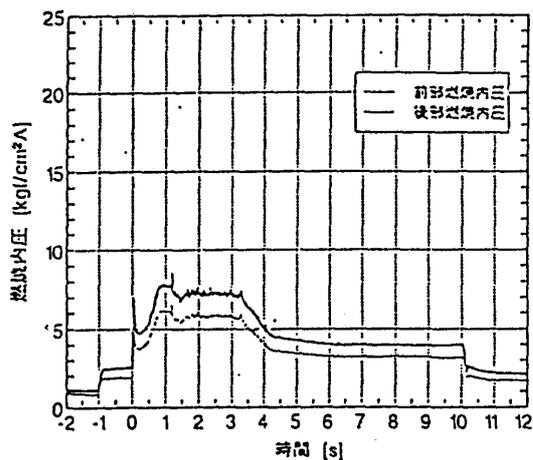
主要な燃焼試験結果を表2に示す。図8にSi/Al=50/50の場合の燃焼内圧パターンを示す。イグナイタ点火後燃料に1秒以内に着火し自立燃焼することが確認された。これらの結果より、月資源ハイブリッド・ロケットの燃焼特性について燃料ペレットの着火性は Fe_2O_3 含有率に依存せず、Si/Alだけでも自立燃焼することがわかった。

(3) まとめ

月資源から製造可能な推進剤を、酸化剤として酸素、燃料としてSi, Al, Feを選定し、燃焼試験の結果Si, Alのみで燃焼可能あることを確認した。このことから将来の月面での輸送系においてハイブリッドロケットが有効な手段の一つである可能性が示された。

5. むすび

NASDAで実施している将来の月利用に向けての研究の一端を紹介した。これらの研究は主として月面での成立性の確認を目的とした、概念的なものであるが、間近に迫りつつある本格的な月探査の幕開けに備えて、より具体的な研究を開始する時期に来ていると考えられる。



燃料組成 Al : Si = 50 : 50

図8. 燃焼内圧履歴