月資源利用によるガラスの生産及びその利用に関する報告書

スペースレフ
村川恭介

本報告者は、某研究団体向けに作成した、月資源の利用方法に関するレポートである。

1)月面資源の利用による建築的資材の生産と利用方法

月面表面土壌（レゴリス）は月面での建設に利用することができる多くの基本的な資源を含んでいる。これらの資源はレゴリスから直接得ることができるものもあれば、大なり小なりレゴリスを加工処理することによって得られるものもある。

しかしながら、水のない月面では地球上のように有用金属が濃集されたことがなく、地球上には多く存在する純度の高い鉱石鉱物は今までのところ発見されていない。

このことから、月と地球の資源の化学組成は似てはいるものの、環境の違いも加わって資源の利用方法としては地球上とはかなり異なってくるはずである。この様な背景のもと、以下のような月面資源の利用方法が主に提案されている。

●無加工レゴリスによる放射線遮蔽
：月面上での通常の放射線の状態で線量相当を５rem 以下にするには、４００ｇ／ｃｍ^{2}以上の遮蔽が必要であり、レゴリスの密度を 0.9ｇ/cm^3 とすれば、厚さ約 4.4m のレゴリスで居住空間を覆う必要がある。さらに巨大太陽フレアー発生のときには７００ｇ／cm^{2}以上、つまり、7.7m 以上の厚みのレゴリスで覆う必要がある。
●レゴリスを焼結(Sintering)して得られるブロック・パネル、擁壁、舗装道路
：熱源として、マイクロウエーブの使用が有力視されている。強度は当然低いため、大きな応力の生じる部分への使用は難しい。）
●レゴリスを溶解して鋳型に流し込み、再度結晶化させて玄武岩を形作る溶融鋳造玄武岩
：一種の結晶化したガラスと言える。色は黒か黒に近い褐色である。結晶化させるための融液の冷却速度、融液の量、冷却の仕方、固体表面との接触の有無等に注意をする必要があるし、約２４時間の徐冷制御が必要。）
●レゴリスを溶解して急速に冷却することによるガラス、グラスファイバーの生産、それらを利用して生産されるコード、ケーブル類、さらに、鉄筋に替わる構造物の補強材への利用
：コンクリートの補強材として使用するためには、耐アルカリ性を強くする必要があるため、Al_2O_3の含有率が低いか、又は全く含まない材料を使用する必要がある。しかしながら、耐水性を高めるためには酸化物としてはAl_2O_3 が最も有効である。）
●セラミックやセメント（コンクリート）等の生産
：真空中でのコンクリートの生産には、コンクリート中の水分の急激な蒸発が生じ、コンクリートの性能に大きく影響を与えるため、加圧養生設備が必要。あるいは水を使用しないコンクリートの開発が必要。
●さらに発展したレゴリスの利用方法としては、ロケット燃料と生命維持装置で必要な酸素の生産
：様々な処理加工技術および施設が必要で、多少、成熟した月面基地の段階で生産可能。
●鉄、アルミニウム、マグネシウム、カルシウム、チタニウムといった金属の生産。そして、これらの金属、またはそれらの合金は、柱、梁、ワイヤー、ボルト、ナットや様々な道具、機械などの生産に利用可能
：複雑なレゴリス処理加工技術・施設とエネルギー生産施設が必要だが、副産物として酸素、炭素の生産、シリカ、シリコンなどの生産も可能なため、将来目標として最重要検討項目の一つである。

●将来の可能性として、レゴリスに移植された水素やヘリウム、窒素、炭素等の揮発性ガスの抽出も可能
：レゴリスのガス含有量は極めて低いため、大量のレゴリスを処理する必要があり、効率的な掘削技術が必要。

以上は、月面での６ヵ所の有人着陸地点、３ヵ所の無人着陸地点、総面積 10 万m^2から採取された約 380kg という非常に限られたレゴリスのサンプル分析と、地球からやアポロミッションでのリモートセンシング観測等によって得られたデータから導き出されたアイデアである。将来は、さらなる新しい資源の発見や、月面環境下での新しい材料の開発が行われることは十分可能である。

上記のように、様々なレゴリスの利用が考えられる中で、本稿では、月面に無尽蔵に存在するレゴリスの大部分を占めるケイ酸塩(Silicates)を、比較的単純な加工処理によって生産可能なガラスについてまとめたものである。

2)ガラスの定義

ガラスの定義については種々議論があるが主に次の二つに集約される。

［狭い定義］ガラスとは溶融物を結晶化することなく冷却して得られる無機物質つまり、

（１）鉱物のような結晶ではない。言い換えれば、原子が規則正しく並んでいる結晶に対して、原子の並び方が不規則なものがガラス。
（２）溶融物の冷却によって作られている。言い換えれば、作り方、または生成過程を指定しているわけで、原料を高温まで加然して溶融物に変え、これを冷却するという方法で作られてガラスと呼ばれる。
（３）最近では、無機物質と異なる金属や高分子のガラスも含めることが多いが、ここでは一応、無機質物質をガラスの条件とする。

［広い定義］近年言われ始めた定義で、ガラスとはガラス転移現象を示す非晶質固体。

つまり、ガラスを作製方法や物質の種類によらずに、でき上がった材料の状態や特性で定義するもので、ガラスとは不規則な原子配列をもつ固体であり、しかもガラスの転移温度（ある物質の融点の１／２から１／３の温度付近で結晶化現象が起こるか起こらないかの分かれ目になる温度）が存在することを条件とする。この定義によると、狭い定義によるガラスはもちろん、非晶質（アモルファス）金属、非晶質高分子の大部分が、その作製法に関係なくガラスに分類される。
月面でのガラスを定義する場合、月面基地の初期的段階では、エネルギー、製造設備などの未熟さから見て狭義のガラスのみを考慮にいれることになろうが、将来は、半導体にも使われるアモルファスシリコン、金属ガラスといったハイテックなガラス製品の製造も可能であろう。

3)ガラスの製造特性

ガラスは、種類によって程度の差はあるが、大きいブロック、幅広い面積の膜、長いリボンあるいは繊維に成形することが容易であり、しかも均質な材料を製造することができる。ただし、ガラスを大きい形に成形したいときには、大きいものを極めて遠く冷却することが不可能であるために、冷却中の結晶化が問題になる。とくに月面などの真空中での徐冷却(Annealing)［ある時間の割合で、温度を減少させること］は空気の熱伝導を利用した冷却方法は使用できないため、ラディエーター等を使用した放射放熱の工夫が必要であろう。

4) ガラスの化学組成

地球上で多く生産されているガラスの大部分は本質的には酸化物ガラスである。ガラスの組成は広い範囲で変化するので組成割合を一つ一つ書き上げることは不可能であるが、成分の種類だけをあげれば下表のようになる。（表１－酸化物ガラスの組成）

	区　分	組　成　例
1	単純酸化物	SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, GeO_2, As_2O_3
2	ケイ酸塩	Li_2O-SiO_2, Na_2O-SiO_2, K_2O-SiO_2 MgO-SiO_2, CaO-SiO_2, BaO-SiO_2, PbO-SiO_2 Na_2O-CaO-SiO Al_2O_3-SiO_2
3	ホウ酸塩	Li_2O-B_2O_3, Na_2O-B_2O_3, K_2O-B_2O_3 MgO-B_2O_3, CaO-B_2O_3, PbO-B_2O_3 Na_2O-CaO-B_2O_3, ZnO-PbO-B_2O_3 Al_2O_3-B_2O_3, SiO_2-B_2O_3
4	リン酸塩	Li_2O-P_2O_5, Na_2O-P_2O_5 MgO-P_2O_5, CaO-P_2O_5, BaO-P_2O_5, K_2O-BaO-P_2O_5 Al_2O_3-P_2O_5, SiO_2-P_2O_5, B_2O_3-P_2O_5 V_2O_5-P_2O_5, Fe_2O_3-P_2O_5, WO_3-P_2O_5
5	ゲルマン酸塩ガラス	Li_2O-GeO_2, Na_2O-GeO_2, K_2O-GeO_2 B_2O_3-GeO_2, SiO_2-GeO_2
6	タングステン酸塩	Na_2O-WO_3, K_2O-WO_3
7	モリブデン酸塩	Na_2O-MoO_3, K_2O-MoO_3, Li_2O-MoO_3
8	テルル酸塩	Na_2O-TeO_2
9	ホウケイ酸塩	Na_2O-B_2O_3-SiO_2
10	アルミノケイ酸塩	Na_2O-Al_2O_3-SiO_2, CaO-Al_2O_3-SiO_2
11	アルミノホウ酸塩	CaO-Al_2O_3-B_2O_3, ZnO-Al_2O_3-B_2O_3
12	アルミノホウケイ酸塩	Na_2O-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2

表１－酸化物ガラスの組成

但し、溶融法によってガラスを作る場合、ある組成割合でガラスができるとしても全組成範囲で溶融物がガラスになるわけではなく、その一部分のガラス化範囲と呼ばれる領域の組成割合の場合に結晶化が起こらず、ガラスとなる。例えば、地球上で多く生産されているソーダ石灰ガラス（Na_2O－CaO－SiO_2）のガラス化範囲は図１のように三角形で示される。

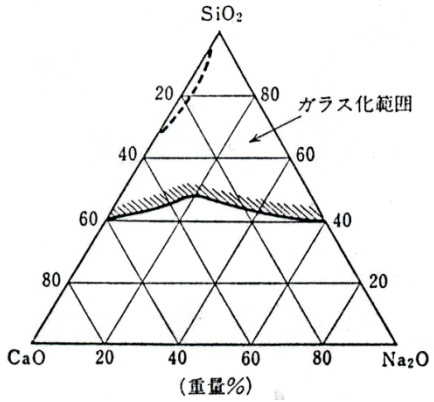


図１－ガラス化範囲

5)ガラス生産に適した月面資源

月面にも自然にできたガラスが存在するが、月面ガラスの大部分は、隕石の衝突エネルギーによってレゴリスや岩石が溶岩となって液状化し、溶解物質の分裂からできた液状の小滴が急激な冷却によって形成されたといわれている。地球上とは異なり、水分のない月面では風化されることがないため、生成したガラスが微細なものも含めそのまま残存している。また、月面は真空状態になっているため、これらのガラスはガスをほとんど含まず、緻密なガラスとなっている。表２は、月面ガラスの組成を示す。

	海・低地域			高　地	
SiO_2	38.6	41.6	46.6	45.4	51.0
TiO_2	8.9	8.4	0.9	0.4	1.6
Al_2O_3	5.9	10.6	12.5	25.4	18.9
Cr_2O_3	0.6	0.5	0.5	0.1	0.1
FeO	21.9	17.9	18.0	5.6	8.3
MnO	0.2	—	0.3	0.04	0.09
MgO	15.0	9.3	10.5	8.0	7.0
CaO	7.2	10.7	10.5	14.5	11.2
Na_2O	0.3	0.3	0.14	0.24	0.7
K_2O	—	0.03	0.04	0.06	0.5
P_2O_5	—	—	0.04	0.02	0.17

表２-月面ガラスの組成

これらのことから、月面の資源を溶融して自然の状態で材質の優れたガラスを形成する可能性を示唆しており、工業生産に必要な施設・設備が貧しいであろう初期の月面基地の段階でも、レゴリスの単純な加工処理によってガラスという応用範囲の広い工業製品を生産できることを意味している。

現在までの調査によれば、月面の表面にある物質の９９パーセントは、たった２種類の岩石のグループに分類できる。一つは、月面で黒く見える“海”に多く存在し、鉄、マグネシウム、そして時にはチタニウムが豊富な玄武岩（ケイ酸塩鉱物の一つである輝石群-Proxene［Mg,Fe,Ca,Zn,Mn Si_2O_6］を多く含む）と、明るく輝いて見える高地に存在し、豊富なアルミニウムとカルシウムを多く

含む灰長石（ケイ酸塩鉱物の一つである斜長石群-Anorthosite 又は Ca rich － Plagioclase ［$Na/CaAl_2Si_2O_8$］のひとつ）に近い岩石である。表３はそれぞれの岩石とソイルに含まれる主な鉱物の容積比と化学組成の重量比を表す。

Distribution of various fragment types of typical mare and highland soils (volume %)

	71061: mare, μm[a]					64501: highland, μm[b]			
	250-500	150-250	90-150	75-90	45-70	90-150	53-74	44-53	30-37
Lithic fragments									
Breccia	7.4	7.9	5.8	6.6	2.3	21.1	26.0	36.0	24.8
Anorthosite	...	...	0.3	...	...	3.0			
Basalt	51.5	34.3	19.6	16.6	9.6	0.3			
Mineral fragments									
Plagioclase	8.5	9.0	17.3	7.0	16.3	20.3	28.2	27.8	32.1
Proxene	10.8	17.4	21.3	26.3	21.3	0.6	1.7	1.7	6.4
Others	2.3	3.9	4.6	3.3	6.0	...	0.7	0.8	0.5
Glass									
Colorless	1.5	...	1.3	1.0	1.0	1.6	6.5	8.9	10.9
Orange	0.8	4.5	6.3	5.0	7.6	...			
Other	6.1	10.1	14.2	16.4	19.7	1.3			
Agglutinates	10.1	11.8	9.3	17.3	13.0	51.6	36.8	24.8	25.4

High-titanium basalts

Modal abundance (Vol. %)	Pyroxene 42-60%	Plagioclase 15-33%
Component (Wt. %)		
SiO_2	44.1-53.8	46.9-53.3
Al_2O_3	0.6- 6.0	28.9-34.5
TiO_2	0.7- 6.0	—
Cr_2O_3	0 - 0.7	—
FeO	8.1-45.8	0.3- 1.4
MnO	0 - 0.7	—
MgO	1.7-22.8	0 - 0.3
CaO	3.7-20.7	14.3-18.6
Na_2O	0 - 0.2	0.7- 2.7
K_2O	—	0 - 0.4

Highlands rocks

Modal abundance (Vol. %)	5-35%	45-95%
Component (Wt. %)		
SiO_2	51.10-55.4	44.00-48.0
Al_2O_3	1.00- 2.5	32.00-36.0
TiO_2	0.45- 1.3	0.02- 0.03
Cr_2O_3	0.30- 0.7	0 - 0.02
FeO	8.20-24.0	0.18- 0.34
MgO	16.70-30.9	0 - 0.18
CaO	1.90-16.7	19.00-20.0
Na_2O	—	0.20- 0.6
K_2O	—	0.03- 0.15

表３－月の岩石と土壌の鉱物配分と化学組成

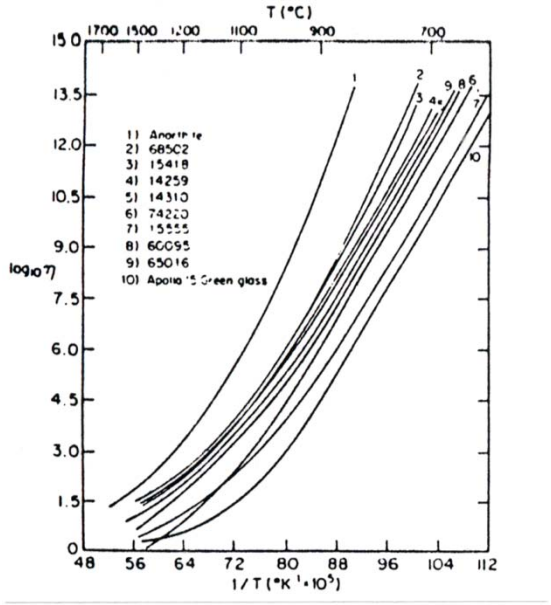
基本的には、一般的なケイ酸塩を溶融し十分に速く冷却されれば、いろいろと異なった特性をもつ様々なガラスを作ることが可能である。しかしながら析出可能な結晶化を避けるために融液がどのくらいの徐冷速度で冷却されればよいのかを知っておかなければいけない。

月面環境でのガラス形成についていえば、極力単純な加工処理による資源利用の要求という観点からすると、月面の自然の状況・環境内でのガラス形成プロセスに注目する必要がある。このプロセスを理解するために、融液内での冷却速度といった熱移動・熱力学的情報と、結晶化のための結

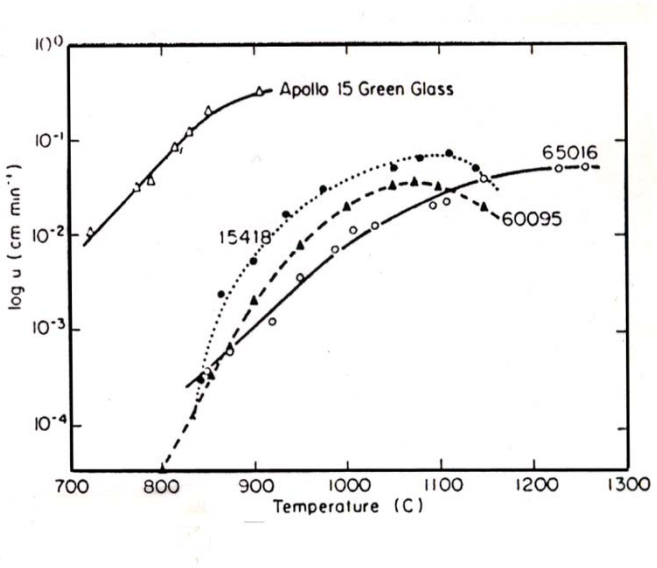
晶核生成の動力学についての情報を得ることが大変重要である。
結晶核生成速度（融液の温度変化に対する結晶核の量的変化）を決定するためには様々な組成をもつ融液の温度変化に対する粘性の変化を知る必要がある。[ガラスの生成、結晶化のメカニズムについての詳細は、本稿では省く。]

ガラス生成のための最も良い融液の特性とは、融点あるいは液相温度（ガラスから結晶析出が始まる最高温度で、この温度以上だと結晶化は起こらず以下だと起こりやすい。）で高い粘度を示し、融点あるいは液相温度以下になったときに急激に粘度が増加して固体のようになり（つまり結晶核生成が起きにくくなる)、高いガラス化範囲あるいは高い核生成障壁をもつ組成から或る融液であると一般的に言われている。

月面からのサンプルを使用した、結晶成長速度と粘度に関する実験結果の分析によれば、灰長石に近い斜長石群(Anorthositic feldspars)がすべての融液の液相温度において、他のどのサンプルよりも最も高い粘度を示し、最も低い冷却速度で最も高い核生成障壁をもっていた。



月サンプルと灰長石の粘度の温度変化



月サンプルの結晶成長速度の温度変化

図２－月サンプルの粘度の温度変化と結晶成長速度

これらの研究から、急速高温加熱による溶融は、最低の不透明状態を示す良いガラスを作りだし、最低の化学的不均一性を示すことを分析した。そして、透明に近い灰長石と同じ様な組成をもつソイルの溶融液は完全に不透明な玄武岩のそれより遠く冷却することがわかった。

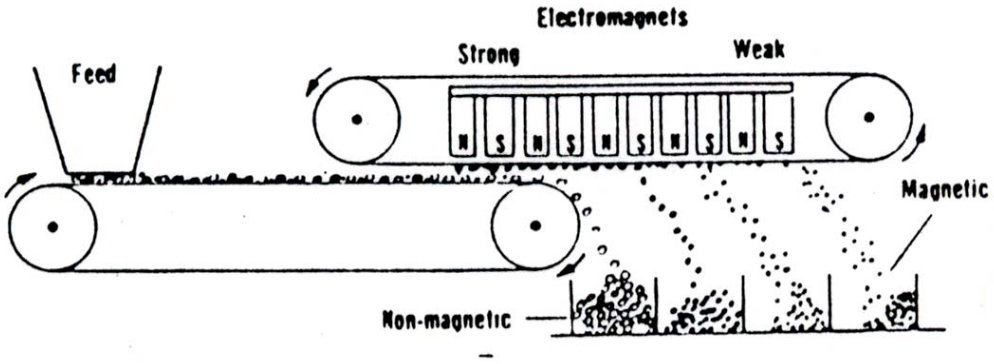
しかしながら、ガラスの研究に対しての十分な月面サンプルがないため、月面ガラスの最も良いタイプ、資源の最も経済的・効率的なガラスへの加工処理方法、生産可能晶とその応用などといった月面ガラスの実際的利用の研究は、月面サンプルと同じ組成をもつ疑似レゴリスを使ってしか研究されていない。

その他、次の条件により、高地にありＣａを多く含む灰長石(Ca-Plagioclase ）が月面ガラス生産のための最有力な鉱物であるともいわれている。

●高地のレゴリスからCa rich － Plagioclase を分離してガラスを作ると透明度の高いガラスができるが、輝石はほとんどが暗緑色か褐色をしているため、透明ガラスにするためには加工処理による組成分の除去等が必要である。

●このCa- Plagioclaseはほとんど純粋に近く、わずかに含まれるNa_2OやFeOも１％未満というごく少量のため、透明にするために加工処理(Processing)によってこれらを分離除去する必要もないため、資源をそのまま溶融して透明なガラス又はガラスファイバーを製造することができる。

●“海”から採取したPlagioclaseには、多めのNa_2Oや１％前後という無視できないFeOを含んでいるために、着色材の一種であるFeを除去するために加工処理が必要である。さらに、“海”の岩石は、非常に硬く細粉化するのが大変な玄武岩が中心であるため、必要鉱物の精製には高地の材料に比べ、より多くのエネルギーが必要である。
●斜長石(Plagioclase)は、レゴリスに含まれる成分の中で最も低い磁化率であるため、強い磁場の使用によって非磁性休として分留されて、ほとんど９９％の純度まで精製することが可能である。それに比べ、海の輝石群(Proxene)は、組成が一定せず磁場による必要な輝石の分留生成は難しい。



Dry magnetic separation of mineral particles.

図３－磁性分離法の概念図

●Ca rich-Plagioclaseは、1550℃程で溶融し、高い粘性をもっているため、板状、ブロック状、繊維状のガラスを作るための加工性が良い。(つまり、低い温度になってはじめて高い粘性を示すようだと、結晶化の可能性が増加し、透明性とか機械的特性の劣化の原因になる。)
Plagioclaseと同じ組成をもつアルミノケイ酸塩ガラスは、膨脹係数が低い。粘度は、溶融ガラスの温度が下がるにつれて急激に高くなる、つまり徐冷温度が極めて高く徐冷は困難であるから、ガラス繊維や焼入れ強化ガラスのように急激な冷却によって成型する必要のあるもの、または徐冷が不要な用途に適する。このことから、複雑で繊細な徐冷工程が不要なこのガラスの生産は、設備に限度がある月面では大変有利と推測できる。

参考までに地球上のガラスについてのべると、ケイ酸塩の$MgO-SiO_2$と$CaO-SiO_2$，アルミノケイ酸塩の$Ca_2O-Al_2O_3-SiO_2$はそれぞれ月面の鉱物資源の多くを占めるPyroxene（輝石群－とくに普通輝石）やPlagioclase（長石群－とくに灰長石）とは化学組成の重量比に多少の差はあるものの同じ組成を示す。
表４に、地球上で生産されているケイ酸塩系ガラスの代表的なソーダ石灰ガラス(Na_2O-CaO／$MgO-SiO_2$)とアルミノケイ酸塩系ガラスの代表的なＥガラスの化学組成と月面の代表的な鉱物の化学

組成を示す。このことから、地球のガラスと月面ガラスとは機械的特性において同じとは言えないし、むしろ無水・超真空という月面環境で生成したガラスは強度の大きな増加（後述）が論理的に予想されてもいるが、理論的には、地球上で生産されているようなガラスは、月面でも生産可能と言える。

組成 wt %	窓ガラス ソーダ石灰ガラス	Eガラス アルミノケイ酸塩ガラス	Pyroxene	Plagioclase
SiO_2	72.0	53.0	44.1-53.8	44.0 -48.0
Al_2O_3	1.5	15	0.6- 6.0	32.0 -36.0
TiO_2	—	—	0.7- 6.0	0.02- 0.03
Cr_2O_3	—	—	0.0- 0.7	0 - 0.02
FeO	0.1	—	8.1-45.8	0.18- 0.34
MnO	—	—	0.0- 0.7	— —
MgO	4.0	2	1.7-22.8	0 - 0.18
CaO	8.0	21	3.7-20.7	19.00-20.00
Na_2O	14.0	0.3	0.0- 0.2	0.20- 0.6
K_2O	—	—	—	0.03- 0.15
So_3	0.3	—		— —
B_2O_3		8		— —

表４－地球上ガラスと月面鉱物の化学組成

6)月面で生産されたガラスの特製

ガラスは熱力学的には不安定な構造である。化学的に言えば、ガラスは、液体、固体、あるいは気体と言った通常の三つの物質の状態のどれとも正確には一致しない。物理的には、ガラスは固体と言うよりは、もっと液体、それも粘度のもの凄く高い液体と言ったほうが適当である。

ガラスは本質的には人間が知る最も強い物質の一つである。真空環境で生成されテストされた傷のないガラスは、140kg/mm^{2}という一般市場にでている合金属よりも約１０倍の強度を達成できる。しかしながら、ガラスの表面は他物体との接触や熱的変化によって表面損傷を受けやすく、破壊は主として表面に存在する微細な割れ目から生じることから、強度のばらつきは大きい。

代表的なケイ酸塩ガラスである石英ガラス(SiO_2)はSi-0という共有結合の高い強固な結合によって構成されている。この理論強度、つまり単位面積あたりのSi-0の結合の強さは2500kg/mm^2(24500MPa)といわれている。一殻にはSi-0以外の成分と結合しているわけで、Si-0の結合の密度が減ると同時に弱い結合も関与し、理論強度は弱くなる。

ところで、水とガラスの関係は極めて堅密であり、ガラスの物理化学的性質に大きな影響を及ぼしている。水分に対するガラスの感応性はよく知られているが、通常のガラスでも水に触れることにより、ガラスの理論強度の１％以下ぐらいの強度低減が観察される。理由として現在までにわかっているのは、ガラスに含まれる水分は水酸基OH（最近では、ある条件下で分子のまま存在しうるともいわれている。）として存在し、これがSi-0結合を加水分解し、結果的にSi-0の強い結合を弱めることになる。

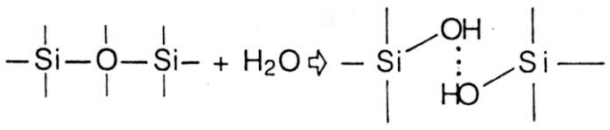


図４－加水分解化学式

月面では真空・無水環境なので、この環境下で生成したガラスは、加水分解による強度の低減は起こらないと予想されている。逆にケイ酸塩の無水による強度増加現象は月面での実際の実験は行われていないものの、数々の地球上での実験では確認されており、これらの研究から、無水環境でのガラスの強度は、通常の地球上の大気の中でテストされたものより極めて高いことはほぼ間違いない。しかも、ガラスの表面のひびのところで、ガラスの表面エネルギーを弱める働きをする水分がないため、表面の傷による静的疲労に対する抵抗力が著しく増加するはずである。

月面で生成されたガラス、およびその他の月面資源利用による生産物の力学的性質は以下に示すが、これらの数値は、計算値、実験値、理論値などである。

	Glass	Basalt	Concrete	Sulfur Con.	Iron
Compressive Strength (MPa)	620	540	76	55	--
Tensile Strength (MPa)	3000	35	--	7.1	270
Modulus of Elasticity (GPa)	870	110	21	--	196
Density (g/cm^3)	2.7	2.9	2.4	2.4	7.8
Melting Point (°C)	1500	1300	600	115	1537
Cooling Point (°C)	760	800	--	--	--
Thermal Expansion (cm/cm°C)	4.2×10^{-6}	7.8×10^{-7}	1.19×10^{-5}	1.44×10^{-5}	1.2×10^{-5}

表５－物理的特性

強度

ここで注意が必要なのが、ガラスの強度が他の材料と異なる意味を持つことである。ガラスの強度は、いかなる表面損傷を受けたかで決まり、同じ組成であっても測定強度がことなるため材料固有の強度とはいいがたい。

例えば、表面層をフッ酸処理によって十分取り除いて表面損傷をなくした板ガラスがガラス繊維に匹敵する高強度を示すことが確認されている。しかも、この表面損傷は機械的損傷によって生じる割れ目であってガラス構造に必然的に存在するものではないと解釈されている。

これらのことから、月面でガラスが生産される場合、製造過程で他の物体との接触を避けたり、とくにガラス繊維の場合、表面のコーティングが行われれば地球上でも実現不可能な強度を持つものが生産可能である。

ガラスの 3000HPa（約 $300kg/mm^2$）という引張強度は高強度のピアノ線に匹敵するがこれを越えることも可能である。さらに、ほぼ純粋の SiO_2 からできる石英ガラスのひとつである光ファイバーは、表面にプラスティック被覆を施すことにより $500kg/mm^2$ 以上の強度を得ている。

放射線遮蔽

アルミノケイ酸塩、つまり灰長石の室温での密度は $2.76g/cm^3$ である。この密度で放射線遮蔽のためにはどの程度の厚みが必要であろうか。ある研究によれば、月面基地の居住エリアと放射線源との間には、遮蔽のための『質量』の存在が必要でるが、１１年周期に発生する最大太陽風が発生し

ていない通常の状態で、人間に対して線量相当 5rem までにするためには、400ｇ／cm^2 以上の遮蔽が必要でる。つまり、次の式が成り立つ。

密度（g/cm^3）×深さ・厚さ（cm）＝$400g/cm^2$

ガラスの密度を $2.76g/cm^3$ とすれば、必要厚みは 145cm となる。この厚みをもつガラスを一工程で製造するのは結晶化の問題があるので不可能に近く、板ガラスを数枚製造して必要厚さまで重ね合わせるなどの方法が必要となる。

ガラス繊維

ガラス繊維には長繊維と短繊維があるが、地球上で生産されている長繊維のほとんどがＥガラスと呼ばれる電気絶縁性に優れた繊維であり、このＥガラス（アルミノケイ酸塩ガラスの一つ）と Ca-Plagioclase とは組成が同じで化学組成割合が大変酷似している。

長繊維ガラス繊維は溶融したガラス素地を白金製加熱容器で精密に温度コントロールし、その底にあけられた数百～数千のノズルから溶融ガラスを引き出し、機械的に延伸しつつ急激に冷却して高速で巻きとってつくられる。

通常は、ノズルから巻き取りまでの間に有機質の集束剤を付着させて数十～数百本の繊維を束ね、一本の糸のようにすることにより、繊維どうしの擦りによる加傷を防止する。

これらのことから、板状などのガラスの製造に必要な徐冷過程という大変難しくエネルギーの必要な工程を要しないガラス繊維の生産は比較的単純であるため、月面基地の初期の段階から生産可能と思われる。

さらに、コーティングのように、生産されたガラス繊維の加傷防止技術が強化されれば、優れた引張り強さを示す材料として金属に取って変わって補強筋やワイヤー等として利用可能である。

なお、不透明なガラス繊維ならば、ソイルを直接溶かしてつくることができる。ただし、不純物などによる性能の不確実性の増加は否めない。海のソイルの融点は約 1200℃から 1250℃で高地のソイルは約 1300℃から 1350℃ほどである。

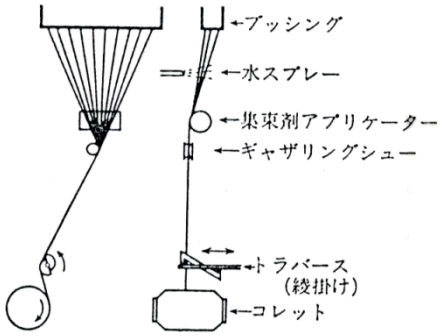


図５－ガラス長繊維の製造工程

前述したように、月面の無水環境下でつくられるガラス繊維は、ガラス素材の純粋度が高く、製造過程で温度、接触等が注意深く管理されれば理論値に近いとてつもない強度を持つものになる可能性がある。

7) 月面でのガラス生産に必要なエネルギー

ガラスの生産に必要なエネルギーは、月面ソイルを融点まで上げるエネルギーと、溶融状態を保

つエネルギー、さらに徐冷のためのエネルギーが必要である。おおまかにいえば、地球上でのガラスの生産には50Gj/m³が必要といわれている。しかしながら、徐冷をほとんど必要としない強化ガラスやガラス繊維の生産には、より少ないエネルギーで十分と思われる。

月資源の比熱は、温度によって大きく変化するが、融点まで達するために必要となるエネルギーという観点からしてみれば、平均して0.8J/gKとされており、さらに溶融するには４０－６０J／ｇのエネルギーが必要であり、しかも集中的に必要であるため、熱源としては実用性を考えれば原子力などが必要と考える。

8)月面でのガラスの利用

ガラスは、他の月面資源利用による生産可能資材より、相対的に高い圧縮強度、引張強度、弾性係数、高硬度、低い熱膨張率、割れやすさなどを特徴とし、資源を有効に使うことが可能なため、鉱物資源を溶融するための集中した高エネルギーの供給が可能ならば、建設用や、その他多方面に渡る応用と利用が可能である。

それは、単独で使用する場合もあれば、コンクリートや鋳造玄武岩等との複合利用もある。しかしながら、地球上ではガラスの大型ブロック状の部材は冷却時の結晶化が伴うので現在までのところ製造不可能であるため、基本的にガラスを利用した部材は、小型・薄形が基本となろう

応用可能な分野としては次のようなものが考えられる。

- ◆ ボルト、ナット、ローラー、歯車、滑車といった機械部品
- ◆ ドライバー、ハンマー、レンチといった工具類
- ◆ 椅子、テーブルといった家具類
- ◆ 板状パネル
- ◆ スペースフレームの部材などといった棒状の部品
- ◆ 補強筋、ひも、ロープ、ケーブル、ベルトといった長尺、帯状の部材
- ◆ 車両のレールの類
- ◆ 液体、気体の輸送管といったパイプ状の部材
- ◆ 太陽光の地下室への伝送、通信用等に必要な光ファイバー
- ◆ 窓ガラス
- ◆ レンズ
- ◆ 内装・装飾部材（ガラス中の含有物によって色の調整が可能）
- ◆ その他多数・・・・・・

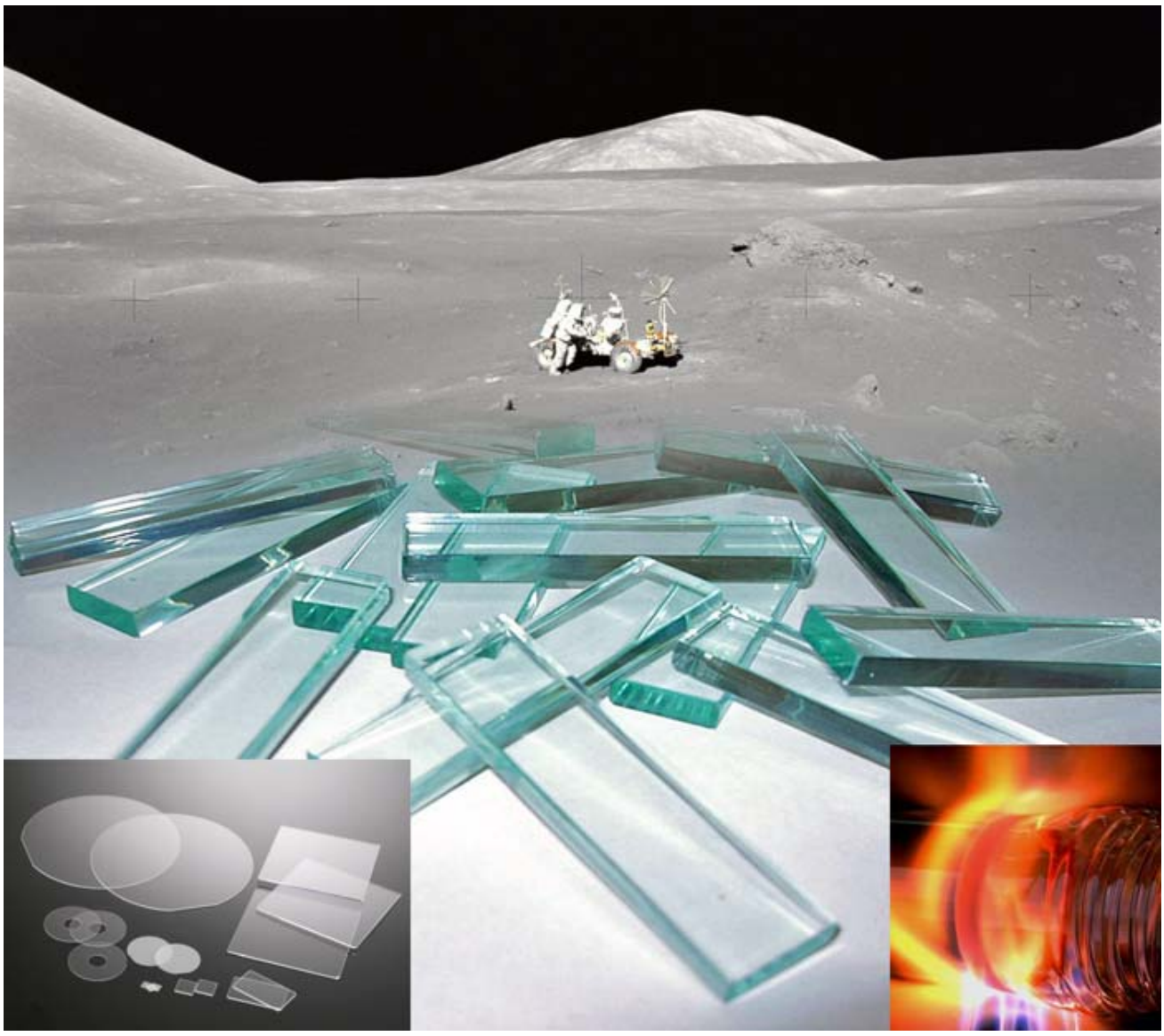
9)将来の可能性

将来、ソイルから酸素・金属等の抽出プラントが建設されれば、金属とガラスの複合材の製造が可能で、それぞれの欠点を補った優れた構造材料となりうる。

また、メタルコーティングすることにより、電磁波遮蔽シール材としても使用可能となる。メタルコーティング技術が発達すれば、太陽光遮蔽に利用でき、駐車場、修理工場といった非加圧空間の外郭構造体に利用できる。

酸素・金属抽出プラントではシリコンの抽出も可能になり、純粋のSiO^2も製造可能で、透明度の高く超高強度の石英ガラスができるので、光ファイバーとか高性能のレンズが製造

可能となる。
　ガラス繊維を利用して織物が製造されるようになれば、クロス、テープ、集塵用フィルター、電線の保護被膜、動力伝達用ベルト、ベルトコンベアー等々に利用できる。

参考文献

1982 年～2006 年 Engineering, Construction and Operations in Space、その他