

ガラス科学と地球科学

菅原 透

秋田大学 総合環境理工学部 環境数物科学科

ガラスや鉄鋼は、地球表層に最も多く存在する酸化物である二酸化ケイ素 (SiO_2) を含む鉱石を溶融して製造される。このとき SiO_2 は、鉄鋼製錬ではスラグとして捨てられるが、ガラスの製造では重要な主成分として利用される。ガラス溶融炉や溶鉱炉は地下で岩石が溶けてマグマが発生する様子を人工的に模擬しているとも言える。それらの鉱石の特徴や溶融ケイ酸塩物質の性質を解明することは、地球科学だけでなくガラス製造や鉄鋼製錬にも関係する学際的なテーマである。本稿ではガラスとその原料を地球科学の観点でレビューしてみる。

1. 自然界のガラス

我々の身の回りには多くのガラスがあるが、それらのほぼ全ては人工的に作られたガラス製品だ。しかし、自然界にガラスがないわけではない。最もよく知られているのは石器時代にナイフや矢尻として利用された**黒曜石**だろう（図1）。黒曜石は SiO_2 を約 70wt% 含むガラスで、産地によって化学組成に特徴があるため、縄文時代の交易を探る手掛かりとなる。黒曜石は粘性率の高い流紋岩質マグマがドーム状の火山を作るときに、その周縁部が急冷してできる。



図 1. 黒曜石の露頭の例^[1]

玄武岩や安山岩のマグマが噴火する時の火山灰は**火山ガラス**や鉱物の結晶の微粒子からなる。火山ガラスは、噴火時にマグマが急冷されてできたガラスが、マグマに含まれている H_2O が急激に発泡する時の衝撃で細かく破碎されることのできる。火山ガラスの屈折率は火山や噴火の時代ごとに異なるため、その観察により過去の噴火史を探ることができる。

噴火した火山灰が厚く堆積すると、その熱と重みにより、堆積した火山灰層の下の方が強溶結し、大きさ数 mm~数 cm のレンズ状のガラス物質ができることがある。そのような岩石を**溶結凝灰岩**と呼ぶ。地質調査をしていて溶結凝灰岩が見つければ、そこはかつて陸上火山の火口の付近であったことの証拠になる。

火山灰だけでなく溶岩にもガラスが含まれていることがある。溶岩は流出したのち固結するが、冷却が早いときには斑晶と呼ばれる結晶の隙間にあったメルトがガラス化することがある。また、地下のマグマ溜まりでは、マグマがゆっくりと冷却しながら斑晶が析出する。この時、斑晶が周囲のメルトを取り囲みながら成長することがあり、岩石では斑晶中に

大きさ数十 μm の**メルト含有物**と呼ばれるガラス状物質として観察される。メルト含有物は地下のマグマが斑晶のカプセルに取り込まれて地上に輸送されたものであり、マグマ溜まりの環境を推定する手掛かりとなる。

海底の火山が噴火すると溶岩そのものが直ちに冷やされるため、地上のように連続的に流れることはなく、長径数十 cm 程度の**枕状溶岩**となる。枕状溶岩の周囲は海水で急冷されているため、その周囲が厚さ数 mm の薄いガラスの殻で取り囲まれている。

このように、自然界のガラスは噴火したマグマが急冷されてできるものがほとんどである。SiO₂ に富む流紋岩質マグマはガラス形成能が高いため、そこでできる黒曜石は野外でもすぐにそれとわかる数 cm~m 規模の大きさのガラスになるが、それ以外は、それぞれのでき方の理由のために μm から mm スケールの小さなガラスであることが多い。

2. 元素の話

ガラスは SiO₂ などの網目形成酸化物を主成分とし、他の様々な成分をいろいろな割合で混合することで、その性質を変えることができる。表 1 には、主なガラスの化学組成の例を示した。本稿ではこうしたガラスに数 wt%以上の量で共通的に含まれている SiO₂, Al₂O₃, B₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, Li₂O について取り上げてみたい。これらの元素がどのようにして生まれたのか、地球化学の考え方を解説する。

表1. いろいろなガラスの化学組成 (wt%)

	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	SrO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	ZnO	P ₂ O ₅	Others	Total
シリカガラス	100.0														100.0
板ガラス	71.0		1.5	0.5	3.9	8.5			13.8	0.7					99.9
びんガラス	71.4		2.3	0.3	0.5	10.5			13.5	1.2				0.1	99.8
Pyrexガラス	80.6	13.0	2.3						4.0					0.1	100.0
ガラス繊維用ガラス	55.0	4.9	14.2		1.3	23.7			0.4	0.1					99.6
FPD用基板ガラス	60.2	10.3	16.4		0.3	8.0	4.3	0.5	0.02	0.01					100.0
放射性廃棄物固化ガラス	48.2	15.7	5.2	0.9		3.3		0.6	10.2	0.9	3.8	2.9	1.7	8.2	101.6
結晶化ガラス	66.0		22.1	0.02	0.7	0.04		1.2	0.4	0.3	4.3		1.2	4.1	100.3

Pyrexガラス: Corning Technical data

びんガラス: 日本ガラスびん協会の公表値

その他は筆者による分析値

世の中には周期表にあるだけの種類の元素が存在するが、地球上でのその存在比には特徴がある。図 2 に太陽光球の可視光スペクトル (フラウンホーファー線) の解析から推定された、太陽の化学組成を示す。この組成は地球を構成する元となった炭素質コンドライトという隕石の成分とよく一致することが知られている。

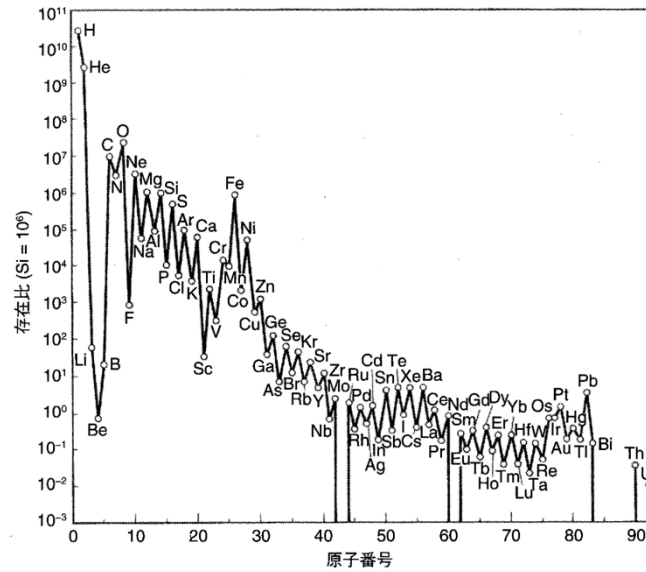


図 2. 太陽光球の可視光スペクトルの解析から求められた元素の存在比^[2]

表 2. 地球, 中心核, マントル, 大陸地殻, 花崗岩(代表的なもの)の化学組成 (wt%)^[3]

	地球全体	中心核		マントル	大陸地殻	花崗岩
Si	16.5	6.0	SiO ₂	45.3	60.9	68.8
Al	1.6		Al ₂ O ₃	4.4	16.3	15.0
Fe	32.6	88.0	FeO	8.0	4.2	2.7
Mg	15.7		MgO	38.4	6.8	1.0
Ca	1.7		CaO	3.5	6.6	2.8
Na	0.2		Na ₂ O	0.3	3.3	4.2
K	0		K ₂ O	0.0	2.0	3.5
Ni	1.9	6.0				
O	29.7					

図 2 の元素の存在比はそのまま地球の平均化学組成 (表 2) にほぼ等しいものと考えられており、次のような特徴がある。

まず、全体として原子番号が大きくなるにつれて存在比が少なくなる。太陽に水素(H)が最も多いのは、ビッグバンで宇宙ができた時に最初に水素できたためである。水素以外の元素は基本的に恒星の中でできる。恒星の中では水素が核融合して He が生成されている。その後、He が核融合をすることで C、O、Mg が生成され、さらにそれらが核融合して Na、Si、S、Ca などが生成される。これらを**恒星内元素合成**と呼ぶ。我々が現在ガラスの原料に

しているケイ素 (Si) は、オリオン座の明るい大きな星であるペデルギウスのような赤色超巨星の中で作られたものである。

恒星は核融合をしながら次第に膨張し、赤色巨星、赤色超巨星とよばれる星になる。そしてその寿命 (約 100 億年) を迎えると、最後には超新星爆発をする。ニッケルや銅などよりも重い元素は、その爆発に関連して生成される。

このように、元素は恒星の進化に伴って合成されるため、進化の後期に生成される原子番号の大きな元素であるほど、宇宙空間での存在量が少ないことになる。ところが、元素の存在量は原子番号に対して単調に変化するのではなく、ジグザグになっており、原子番号が偶数の元素は隣り合った奇数の元素よりも多く存在する。例えば、原子番号 14 の Si は 13 の Al や 15 の P よりも顕著に多い。この規則性のことを**オッド-ハーキンスの法則**という。これは元素の中性子捕獲断面積という性質に関係していて、原子番号が奇数の原子は捕獲断面積が大きいために中性子を受け取りやすく、不安定になるためである。

しかし、以上の規則性に従わない元素もある。リチウム(Li)、ベリリウム(Be)、ホウ素(B)だ。これらの元素は原子番号が小さいにも関わらず、太陽や地球にはほんのわずかにしか存在しない。その理由は、それらの元素は恒星内元素合成ではなく、一旦合成された炭素や酸素が宇宙空間で宇宙線と呼ばれる放射線を浴びて核破砕することで生成されるからである。ディスプレイガラスの原料のホウ素や結晶化ガラスのリチウムが地球上に希少であるのは、その元素としての特異な生成過程によるものである。

3. 地球科学の基礎

ガラスの原料資源の成り立ちに関係する地学現象を以下に概説する。

3-1. 地球と金星、火星の違い

太陽系には、 SiO_2 を主成分とする岩石からなる地球型惑星 (水星、金星、地球、火星) と H_2 や He などのガスや氷を主成分とする木星型惑星 (木星、土星、天王星、海王星) がある。これらの惑星は、宇宙空間に分散していた塵やガスが互いに万有引力で集合することで形成された。岩石質の惑星が太陽系の内側の軌道に、ガス質の惑星が外側にできたのは、その密度の違いによる。

地球を隣の金星、火星と比べた時の顕著な違いは、地球に液体の水があることだろう。しかし太陽系全体をみると、 H_2O (氷) はむしろ木星型惑星に集中して存在している。ではなぜ、地球型惑星の中で地球にのみ水が存在できたのか？ これは地球と太陽の距離に関係している。

太陽系に地球型惑星ができたばかりの頃、金星や火星にも水が存在していた。ところが金星は太陽に距離が近いことや高い二酸化炭素濃度による温室効果により気化してしまった。火星はその大きさが小さく重力が弱いために、水蒸気を原始大気に留めておくことができなかった。また、太陽からの距離が遠いためにわずかに残った水は地下で氷になった。

一方、地球は太陽との距離がほどよく、水が液体として存在できる地表温度であった。加えて、蒸発した水蒸気を大気に留めておくのに十分な万有引力を有していたために、水が海や水蒸気として存在することができた。その海で生命が誕生し、今日の我々がいることになる。

地球は大気の点でも金星や火星と大きく異なる。金星や火星は二酸化炭素（CO₂）が大気の主成分であるが、地球は窒素（N₂）が主成分だ。初期の地球の大気には金星や火星と同様にCO₂が多かったのだが、地球に海ができたことで次第にその濃度が低下し、現在のような大気になった（3-4節を参照）。

3-2. 地球表層のプレート運動

地球型惑星の断面を見ると、いずれも外側から順に地殻、マントル、核で構成されている。地球と金星、火星の最大の違いは、地球の地殻とマントルの最上部は**プレート**と呼ばれる複数の岩盤からなり、それが移動するが、金星や火星のプレートは一枚の岩盤のみからなり、移動しないということである。地球におけるプレート運動は、ガラスの鉱物資源の形成に大きく関係している。

太陽系ができたばかりの頃、地球のプレートは金星や火星と同様に不動の岩盤であったらしい。しかし、地球には液体の水があったことからプレートに応力がかかった弱い部分に割れ目ができて複数のプレートに分裂し、それらがマントルの対流やプレートそれ自体の重みで移動し始めたと考えられている。

現在の地球表層は十数枚のプレートがあり、様々な方向に移動している。これを**プレートテクトニクス**という。プレート同士が衝突すると一方のプレートが地球の中に沈む。そのような場所をプレート収束境界または**沈み込み帯**という。隣り合ったプレート同士が互いに離れるように移動すると、その境界となる割れ目に地下からマグマが上昇してきて海底火山をつくる。これをプレート拡大境界または**海嶺**という。

3-3. 沈み込み帯の火山活動

プレートの上部は水分を含んだ海底堆積物が堆積している。あるプレートが別のプレートの下に沈み込んで深さ 100km 位の場所に到達すると、プレート表面に含まれていた水分が超臨界流体となって分離し、プレート直上のマントルに供給される。マントルはカンラン石や輝石などからなる鉱物から構成されるが、そこに水が加わることで融点が下がって溶け始め、周囲のマントル物質と一緒に上昇する**マントルダイアピル**となる（図3）。

マントルダイアピルは深さ 30-60km 程度マントルの最上部に到達すると浮力が釣り合って停止し、融解していたメルトが分離して上昇、集合し、**マグマ溜まり**を形成する。

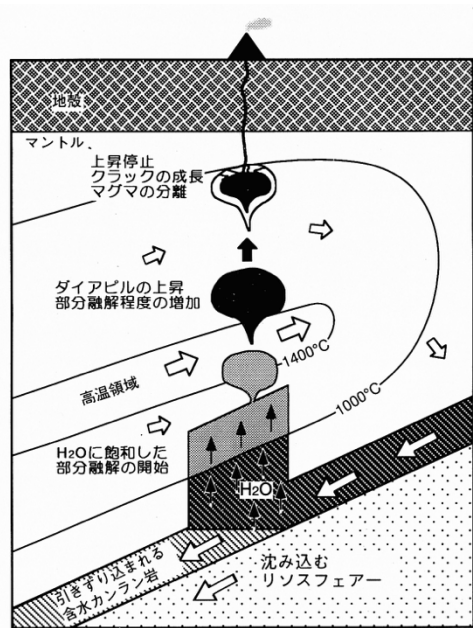


図 3. 沈み込み帯におけるマグマの形成過程^[4]

マグマ溜まりのマグマは少しずつ冷えながら、カンラン石、輝石、斜長石などが結晶化する。これらの結晶は MgO, FeO, CaO に富み、SiO₂ が少ない。そのため、マグマは次第に MgO, FeO, CaO などに乏しくなり、SiO₂ や Na₂O に富むようになる。析出した結晶はその場に沈殿するが、残ったマグマは密度が軽いためさらに上昇して新たなマグマ溜まりを作る。このようにマグマが上昇と結晶析出を繰り返しながら、その組成が連続的に変化することを**結晶分化作用**という。

結晶分化作用の過程において、SiO₂ 量がおよそ 45-52wt% のマグマのことを玄武岩質マグマ、52-66wt% を安山岩質マグマ、それよりも SiO₂ に富むマグマのことを流紋岩質マグマと呼ぶ。それぞれのマグマが噴火して固結すると、玄武岩、安山岩、流紋岩となる (図 4)。

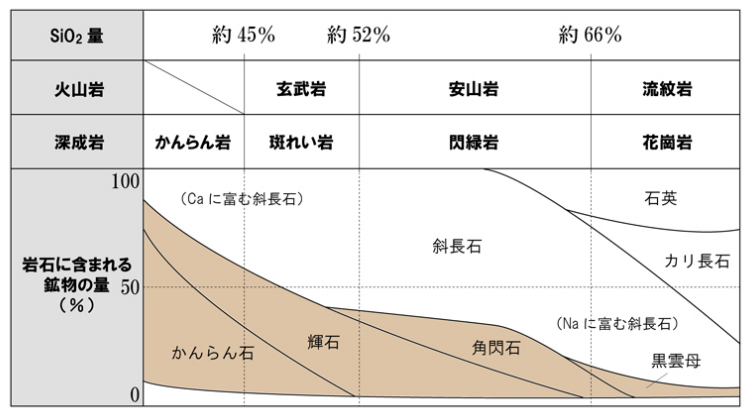


図 4. 火成岩の分類^[1]

3-4. 花崗岩と石灰岩

花崗岩と石灰岩はガラス原料として重要な岩石である。これらの形成は火山活動やプレート運動、そして地球大気の進化に関係している。

花崗岩は石英、カリ長石、斜長石、黒雲母などの結晶からなる深成岩で、その形成過程として次の二つのモデルが考えられている。ひとつには、地殻の下部で停止したマントルダイアピルやそこで発生した玄武岩質マグマの熱によって地殻そのものが広範囲に溶けたのちゆっくりと冷えて固結してできるとするモデル。もうひとつはプレート運動に伴い海嶺が移動して大陸の下に沈み込み、プレートそれ自体の上層部が溶けて上昇したのち、固結してできるとするモデル。地球上ではこれらの両方が起こっているらしい。

花崗岩が冷える過程で、結晶析出後の残液と超臨界流体が岩体の天井に濃集してできる岩石を**ペグマタイト**という。ペグマタイトには主要造岩鉱物の結晶構造には取り込まれない、さまざまな微量元素（例えば、Cl, Fなどのハロゲン、Be, Ce, La, Nb, Ta, Yなどの希元素、U, Thなどの放射性元素）が濃縮されるため、それらの元素の鉱床を作ることがある（4-4節を参照）。

火山で噴出した玄武岩や安山岩、地殻変動で隆起した花崗岩などの岩石は、地表で雨や風的作用で風化し、鉱物に含まれているCa, Mg, Na, Kなどが河川を伝って海に流れる。Caは海水に溶解しているCO₂と反応してCaCO₃となり、サンゴやプランクトンなどの骨格をつくる。その後、それらの遺骸が海底に堆積して石灰岩となる（図5）。

初期の地球大気の主成分はCO₂であったが、この過程が繰り返されることで、大気からCO₂が次第に取り除かれるとともに、生命が誕生し光合成により酸素(O₂)が生じたことで現在のような大気組成となった。地球に元々あったCO₂は、今ではその99%以上が石灰岩中に固定されていると考えられている。

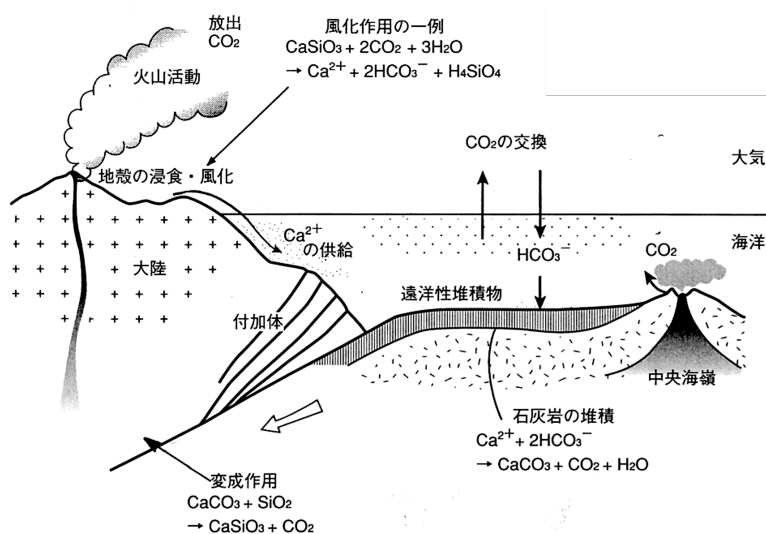


図5. 地球表層における二酸化炭素の循環と石灰岩の形成^[5]

4. ガラスの原料資源

セラミックスや金属の資源は、その産状により(A) 地下浅部または地表付近に集合して多量に存在するものと、(B) 地下浅部から深部に局在するものに分類される(表3)。

(A)は鉄鉱石、ボーキサイト、石灰石、セラミックスやガラスの原料鉱石などであり、Si, Fe, Al, Ca, Na など原子番号が比較的小さな、つまり地球上に多く存在する元素からなる。(B)にはCu, Pb, Zn, Snなどのベースメタル、V, Cr, Ni, Coなどのレアメタル、Au, Ag, Ptなどの貴金属で、原子番号の大きな地球上には少量しか存在しない元素の鉱石である。

(B)は埋蔵量に限りがあるため探査や採掘のコストが高つく。一方、ガラスの原料資源は(A)であるので、資源としてはほぼ無尽蔵なものが多い。これらの鉱石は低コストの大量生産が可能で、鉱石それ自体よりも物流コストの方が高つく傾向がある。

以下では、ガラスの主成分であるSiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, B₂O₃, Li₂Oについて、それらの原料鉱石の特徴と形成過程について述べる。

4-1. SiO₂

二酸化ケイ素はガラスの最も重要な成分であり、石英がその原料である。石英はまず初めに花崗岩中に結晶化する。花崗岩が雨に打たれて風化をすると、河川を伝って海に流れる。この過程で結晶同士はぶつかりあり細粒になっていくが、石英そのものは化学的に分解されにくいいため、その結晶構造を保ったまま海底に堆積する。こうした石英を**珪砂**と呼ぶ。

花崗岩は大陸を構成する主要な岩石であるため、それが風化してできる珪砂も世界中の至る所にある。そのため、資源としての珪砂は各国が自給自足していることが多い。

日本における珪砂の産地として、愛知県の瀬戸地域が知られている(図6)。このあたりには約300万年前に東海湖と呼ばれる大きな湖があった。その東方にある白亜紀にできた花崗岩が風化した鉱物が河川で流され、湖底堆積物となることで、現在の珪砂の地層が形成

表3. 鉱物資源の年間生産量, 埋蔵量と可採年数^[6]

(A) 地下浅部または地表付近に集合して存在する資源

	鉄および酸化物	年間生産量 (2014)	埋蔵量	可採年数
	鉄鉱石	322000	19000000	59
ガラスの原料資源	珪砂(SiO ₂)			ほぼ無尽蔵
	石灰石(CaCO ₃)	35000	膨大	ほぼ無尽蔵
	長石(Al ₂ O ₃)	2150	膨大	ほぼ無尽蔵
	ソーダ灰(Na ₂ CO ₃)	1460	2400000	1644
	リチウム	3.6	1350	375
	ホウ素	372	21000	56
	滑石, ろう石(Al ₂ O ₃)	695	37100	53
	希土類酸化物	11	13000	1182

(B) 地下浅部～深部に局在する資源

	非鉄金属	年間生産量 (2014)	埋蔵量	可採年数
ベースメタル	Cu	1870	70000	37
	Pb	546	8700	16
	Zn	1330	23000	17
	Sn	29.6	480	16
レアメタル	V	7.8	150	19
	Cr	2900	48000	17
	Mn	1800	57000	32
	Ni	240	8100	34
	Co	11.2	720	64
	W	8.24	330	40
	Mo	26.6	1100	41
	Ta	0.12	10	83
貴金属	Au	0.286	5.5	19
	Ag	2.61	53	20

された。

瀬戸の珪砂は不純物がやや多く Al_2O_3 や Na_2O を 3wt%以上含むことがある。この純度の低下はアルカリ長石など他の好物の混入に由来するものである。世界的に純度の高い珪砂のひとつとして、オーストラリアのフラタリー珪砂が知られている（純度 99.8wt%）。オーストラリア北東のヨーク岬の南東では、最終氷期(1-7 万年前)の頃に風化した花崗岩が河川で海に運ばれたのち、海流によって運ばれて堆積した。その後、海面が上昇して波と風的作用で分級されることで、純度の高い珪砂の砂丘が形成された。



図 6. 愛知県瀬戸地域の珪砂の採掘場の例^[7]

4-2. Al_2O_3

アルミナの原料として、日本では主に風化花崗岩が用いられる。風化花崗岩は、古い花崗岩が露出する岐阜県東濃、愛知県三河、広島県などに多くみられ、陶磁器の主原料として利用される。アルミナは鉱物中には斜長石 ($(\text{CaAl}, \text{NaSi})\text{AlSi}_2\text{O}_8$) やアルカリ長石 ($(\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) として存在している。

無アルカリのアルミナの原料としてはろう石クレーがある。これは流紋岩が熱水変質を受けて脱アルカリし、葉蠟石 ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) となったもので、ガラス繊維やディスプレイガラス用のアルミナとして用いられる。葉蠟石は広島県勝光山や岡山県三石に産地がある。

欧米ではアルミナの原料として霞石閃長岩が用いられる。これはシリカに乏しく、アルミナとアルカリに富む深成岩で、大陸に特有のもので日本には産出しない。霞石閃長岩に含まれる霞石 ($(\text{Na}, \text{K})\text{AlSiO}_4$) やアルカリ長石がアルミナのソースとなる。

4-3. CaO , MgO

カルシウムとマグネシウムの原料としては、それぞれ石灰岩 (CaCO_3) とドロマイト

(CaMg(CO₃)₂) が用いられる。ドロマイトは石灰岩が海水中の Mg と反応してできた岩石である。

石灰岩とドロマイトは海洋プレートに乗って移動したのち、プレートが沈み込む時に剥ぎ取られて地球の表層に溜まっていく。日本列島にはそのようにしてできた石灰岩の産地が多数あり、特に高知県（鳥形山、土佐山）や大分県（新津久見、戸高）に大きな鉱山がある。石灰岩全体のうちガラス用途の割合はわずかで、主には鉄鋼製錬やセメントに用いられる。石灰岩と比較するとドロマイトの産地は少なく、工業用原料としては栃木県葛生や岐阜県美山で採掘されているのみである。

4-4. Na₂O, B₂O₃, Li₂O

ナトリウム、ホウ素、リチウムの資源は、いずれも花崗岩や流紋岩が風化して乾燥地帯にある盆地状の内陸湖や外海から隔てられた海に流れたのち、湖水や海水が蒸発することでできる。こうした岩石を**蒸発岩**と呼ぶ（図7）。この成因のために、ナトリウム、ホウ素、リチウムの鉱床は同一地域に形成されることが多い。

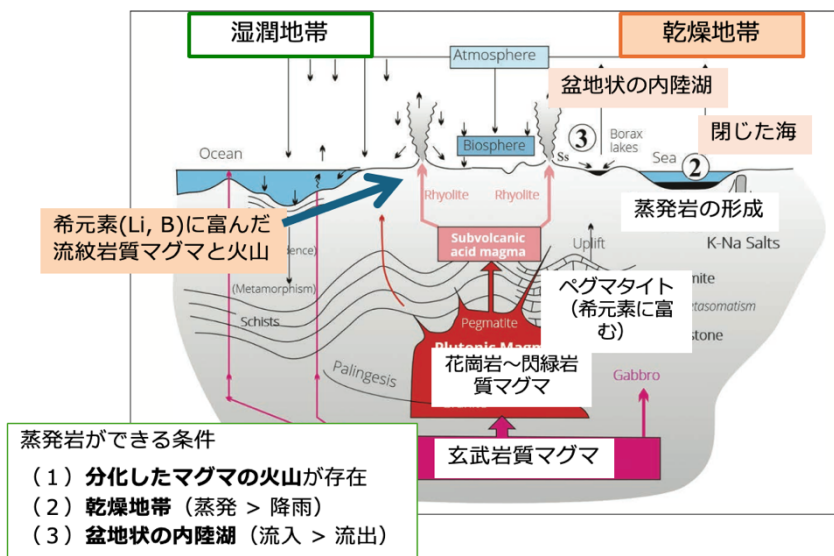


図7. 蒸発岩の形成過程. Helvacı C. (2015)^[8]に加筆

ナトリウムは、米国 Green River 盆地に形成された炭酸ナトリウム鉱床が知られ、トロナ石 (Na₃H(CO₃)₂·2H₂O) として産する。かつては、アンモニア、岩塩、石灰石を原料としてソルベー法により生産され炭酸ナトリウム (Na₂CO₃) が用いられてきたが、世界的にコストの安い天然鉱石の利用が増えつつある。

ホウ素は Borax (Na₂B₄O₇·10H₂O)、Ulexite (NaCaB₅O₉·8H₂O)、Colemanite (Ca₂B₆O₁₁·5H₂O) などの結晶として産し、米国 Death Valley 地域の鉱床などが知られている。世界のホウ素資源のうちの半分以上がガラス産業で利用されている。

リチウム資源としては、塩湖によるものとペグマタイトによるものがある。チリのアタカマ塩湖では、湖水かん水してLiを濃縮し炭酸リチウム (Li_2CO_3) とし、世界の炭酸リチウムのうちの40%が生産されている。ペグマタイト起源のリチウムは電気石 ($\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Li})\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH}, \text{F})_4$) やリチア輝石 ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) として晶出し、ペグマタイトそのものが花崗岩質マグマに由来するため、鉱床は世界各地に点在している。

5. 終わりに

ガラスは地球表層に豊富にある資源をうまく活用した人類の発明品だ。我々がガラスを作る時、最初に試薬や原料を調合する。つまり、原料が既にそこにある状態からスタートするわけだが、ここではそれらの元素が宇宙のどこで生成し、地球上でどのように濃集して資源になるのかを概説した。

宇宙には地球と似た条件を持つ星が数十億あると言われている。それらの中には水を有する星もあるはずだ。地球型惑星に水が存在すると海ができ、表層ではプレートが運動して、沈み込み帯の火山活動が始まる。それによる大陸の形成と雨の作用による風化や侵食、海での堆積とその後の水の蒸発が繰り返されることで、花崗岩や石灰岩、蒸発岩が形成される。

これらの一連の過程のひとつひとつに水が関与している。生命は海で生まれたと考えられるから、宇宙のどこかにあるはずの知的生命体が住む星には、地球と同様な花崗岩や石灰岩、蒸発岩があるはずだ。そこでは、地球人と同じようにしてガラスを作っていたり、あるいはより高度な文明と科学技術を有していて、今の我々がまだ知らない素晴らしいガラスを手に入れているのかもしれない。

引用文献

- [1] 板村地質研究所 http://geo.w-human.com/e_science/i_rocks.html
- [2] 佐野有司・高橋嘉夫 (2013) 地球化学, 共立出版
- [3] 巽好幸 (2012) なぜ地球だけに陸と海があるのか, 岩波科学ライブラリー 191
- [4] 巽好幸 (1995) 沈み込み帯のマグマ学, 東京大学出版
- [5] 酒井治孝 (2005) 地球学入門, 東海大学出版会
- [6] Mineral Commodity Summaries 2015, USGS.
- [7] <http://seto-guide.jp/setostory/joukouzi/setokyanion>
- [8] Helvacı C. (2015) Bull. Min. Res. Exp., 151, 169-215.