

## 地史・考古・天文学へのガラス解析技術の適用

Applications of characterization techniques for glass to geohistory, archeology and astronomy

岸井 貫 千葉工業大学 附属研究所 教授

Tōru Kishii

問合せ/ キシイ トオル 〒 168 東京都杉並区高井戸東 3-14-11 tel (03)3329-3537

### 1 地上と宇宙でのガラスの存在

ここでガラスを「ケイ酸塩組成の高温の融液を冷却して得られる非晶質個体」と取りあえず決めておく。成因が不明でも非晶質で組成と外観がガラスと同じであれば「ガラス」と記す。その他の非晶質についてはそれぞれの所で断っておく。

ガラスは工業製品として普通に存在するとともに、火山溶岩からできた黒曜石、火山灰ガラスなどとして地殻表面に、隕石、月表面の物質として宇宙に、また宇宙起源或いは隕石の落下・衝突でできたかと疑われる物体(テクタイト、マイクロテクタイト)として地上に見いだされる。黒曜石は石器時代のある地域およびある時期で人類の利器として重要な材料であった。

ガラスは熱力学的には安定相ではないので、その存在自体が過去にガラスを作った特殊な熱的条件を反映している。その上に最近の材料解析技術の進歩が、ガラスを工業以外の分野でも重要な研究材料にした。

これには

ガラスを対象として開発された解析技術が他の材料にも適用分野を見つけるようになった、および新しい解析技術をガラスに適用すると、学問的に重要な知見を与えるようになった、

という状況がある。その結果、従来の学説が変えられた

ことも多い。特に考古学的、地史的な実年代観・定説が大幅に変えられ、古人類学、歴史言語学にも影響が及んだ。

しかし他方では、各手法による研究がたがいに違う結論に導いて、結論を出しにくい問題もある。

工業技術の場合と違うのは、地史・考古学それから天文学でさえも、年代・時期・場所などを知ることが大切だという点である。成分分析技術でも大部分はその目的のために開発された。解析技術の精度もこの観点で評価されることが工業技術と違っている。

本稿では始めに火山関連のものについて解析法を含めて記し、次にその他のガラスや非晶質に関して記す。

日本と地球の時代区分と、日本・中国の区分を対照したものを図1に掲げる。

引用の便宜上、総説的なもの、複数の著者の文献を纏めたもの、特集号を始めに A) 乃至 Q) として文献欄の始めに掲げる。

### 2 火山岩<sup>1)</sup>と火山灰と火砕流<sup>L),2)</sup>

火山岩には、その組成によって玄武岩—安山岩—デイサイト(石英安山岩)—流紋岩という系列がある(図2)<sup>1)</sup>。火山岩のもとになった溶岩についても玄武岩質から流紋岩質までの系列がある。流紋岩に近い方が「酸性」、

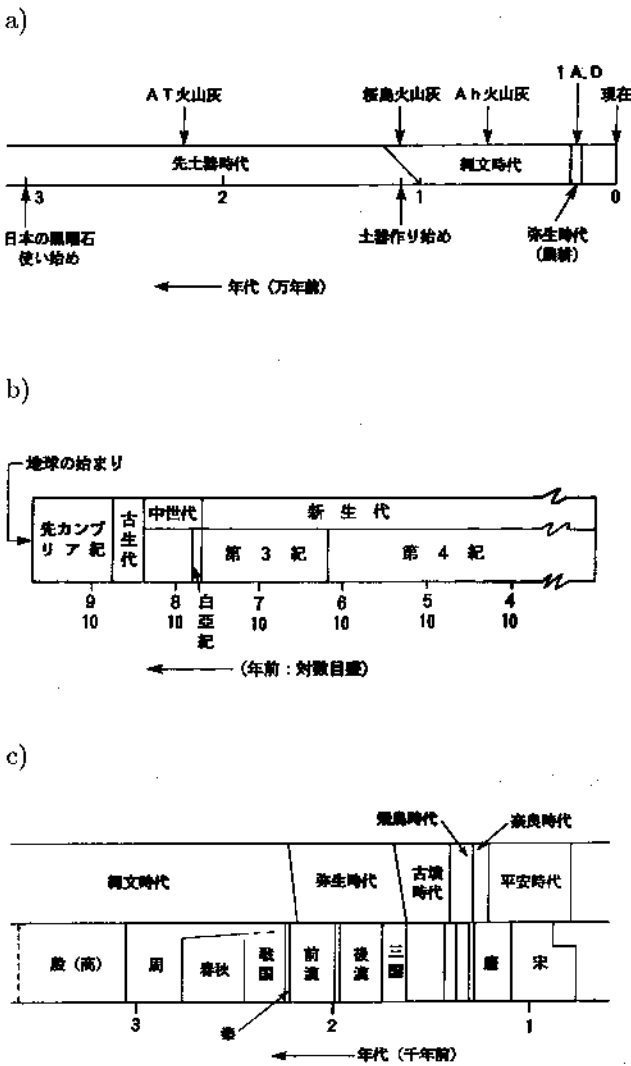


図 1 a) 日本の考古学的年代。鍵層になる火山灰層も示す。 b) 地球の地質学的年代 c) 日本・中国の年代対比

玄武岩に近い方が「塩基性」であると表現される。融液(溶岩)状態では塩基性であるほど粘性係数が小さくて良く流れ、酸性ではその逆である。

地下の特別に深い所から由来したと考えられる「超塩基性岩」も希に存在してダイヤモンドを包蔵する母岩脈になっているが、ガラスとの関連が今の所注意されて居ないので本稿では取り扱わない。

溶岩は地下の高温、高圧の状態に対応して揮発性物質(水、硫化水素、フッ素など)を含んでいる。火口に現れた時期には、塩基性溶岩では粘性係数が小さいので、揮発成分が気化・脱出して失われているが、酸性の場合は

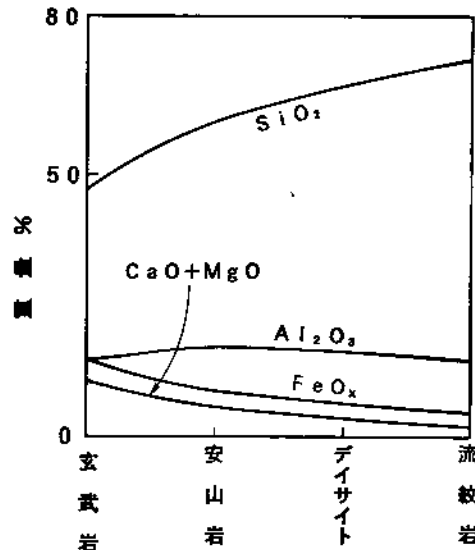


図 2 火山岩の系列と成分の関係

揮発成分を保持しており、爆発現象をおこし易い。

溶岩が流出、冷却する時に、酸性であれば粘性係数が高くガラス化し易い(結晶化しにくい)が、塩基性であれば特に早く冷却された時だけにガラス化する。同じガラス質であっても、もとの溶岩の組成により比重も屈折率も異なる(図 3) 3)-4)。酸性の火山岩では結晶の周囲を埋める石基にガラス質を含むことが多い。鳥原普賢嶽のデイサイト質溶岩がその例である<sup>5)</sup>。

溶岩の粘性係数はガス泡、結晶の含有量で幾桁も違うので相互の比較が難しいが、黒曜石、塩基性溶岩(高温域だけ)、商用ガラスを図 4 に比較した<sup>6)</sup>。同じガラスでも、黒曜石は  $Al_2O_3$  が多くアルカリ酸化物が少なく、商用ガラスよりは粘性係数が高い。黒曜石はガラス工業で「アルミノシリケートガラス」と呼ばれるものに近いと考えれば良いと思う。

黒曜石でも水を含むと粘性係数が低くなる(2%当たり1桁)ことが知られる<sup>7)</sup>。

塩基性溶岩は光を透過させないので、内部から赤外線輻射で直接に冷えることがない。火山から流出する時には表面の薄皮は固化しても内部は良く流動するから、組成や粘性データから想像するよりも流れ易い。

火山灰は溶岩が爆発現象によってこまかい粒子になって吹き上げられたものであるから、セメントに似て水分により固化する性質を示す事が多い。この過程で灰層の上を歩いた人類や動物の足跡を記録し保存し易い<sup>8)</sup>。ま

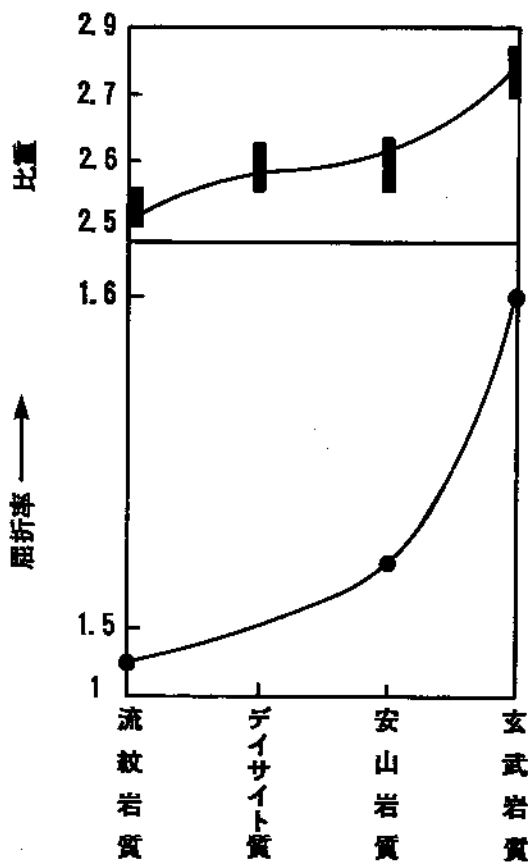


図3 火山ガラスの比重と屈折率

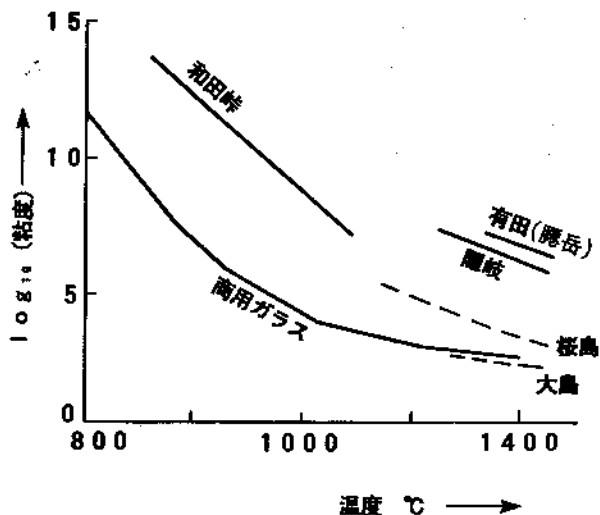


図4 黒曜石、溶岩、商用ガラスの温度-粘性係数曲線  
 実線：黒曜石と商用ガラス 点線：溶岩

た火山灰に含まれるガラス、鉱物粒から、カリウム・アルゴン法またはフィッショソ・トラック法で噴出年代が求められる(後記)<sup>9)-10)</sup>。さらに火山灰が地層の中に層状に残って、年代の基準になることが多いので、火山灰の解析は考古学、古人類学での年代決定に有効な手段である。

吹き上げられた灰や岩片が落下して山腹を駆け下る、噴火が側方に向けて起きる、岩塊が砕けながら山腹を転落するなどの場合には「火砕流」になる。灰や岩は熱量を持ち、地上から水蒸気を発生させながら進むだけでなく、それ自体が熱ガスの放出源であるから、全体がガス流動層のようになって、受ける抵抗が小さく、速く長距離を走る。海上を渡って対岸に上陸した例さえ幾つか知られる(後記)<sup>1)</sup>。火砕流の層も火山灰層とともに年代測定に役立つ。

古代の火山には現代のそれよりも2桁も多い灰を吹き散らしたものが幾つもあり、その火山灰層が日本の全土と近海で見つけ出される。これらは年代決定のための「鍵層」として利用される(図1a)。

猿類から人類への進化は1000万年近く前に始まったと推測されるが、化石が出土して人、類人猿双方の特徴を合わせ持つ体制を確認されたのは300万年前のもの(図5)<sup>10)</sup>、それに次ぐのは200万年前のもの<sup>11)</sup>である。これらはいずれもタンザニア、ケニヤ、エチオピアを貫く地溝帯で見いだされた。この地溝帯には火山が多くて火山灰層が厚く積み重なり、その間に人骨を含む堆積層が保持されていたし、年代は火山灰を使い、かつ灰層間の整合関係まで調べ徹底的かつ慎重に研究され決定された<sup>12)</sup>。この地帯では黒曜石も産出して考古学の対象になっている(後述)。

ジャワ直立原人も火山灰地帯から出土し、その年代は新しい方法で決定され、従来の定説より50%くらい古く遡った(70万ないし100万年前)<sup>13)</sup>。

### 3 玄武岩質のガラス

ハワイ島キラウエア火山の溶岩は塩基性のものの例である。粘度が低くて、その飛沫が球状ガラスになったものを現地では「ペレーの涙」と呼ぶ。「ペレー」は火山の女神である。糸状に尾を引いてガラス化したものは「ペ



図5 300万年前の人類女性（エチオピア・アファール出土、愛称ルーシー）の復元像、身長約100cm。ジュネーブ自然史博物館 所見

レーの髪の毛」と呼ばれる。これらには鉱物名としては「タキライト」が与えられる<sup>3)</sup>。「ペレアイト」がこれらを指した例がある<sup>14)</sup>。

アイスランドのラキ火山が髪の毛を降らした例<sup>15)</sup>や、ザイールの最近の噴火で髪の毛が降り積もり、草とともに食べた牛が数十頭死亡した例がある<sup>16)</sup>。

日本でハワイの溶岩を展示している博物館では、ペレの涙と髪の毛が含まれていることがある<sup>17)</sup>。日本では「髪の毛」は幾つかの火山（例：浅間山の天明の噴火<sup>18)</sup>）で見られ、「涙」は日本では鬼岳（長崎県福江市）に産する<sup>19)</sup>。

大洋中で玄武岩質溶岩が湧き上がってくる「海嶺」では、溶岩表面が海水で冷却されて厚さ数センチメートルのタキライトの「周縁急冷相・パラゴナイト」となる<sup>20)</sup>。溶岩が海へ流れ込んだ場合も同じである。

玄武岩は、融液の細い穴からの吹き飛ばしにより岩綿断熱材を作る時の原料になる。

## 4 流紋岩質のガラス

### 4.1 黒曜石

流紋岩質溶岩がそのままガラス化すると黒曜石（＝オプシディアン）になる。薄片を透過光で見ると淡青黒ないし褐黒色で、色は溶けている酸化鉄が原因である。黒色の外観は光を中へ透過させつつ吸収してしまうことに原因しているため、表面はガラス状で光沢があり、光の散乱がない。この点で東洋系の人の瞳の色が一見黒く見える原因と似ている。黒曜石（昔は「黒曜石」の字を充てた）が瞳の文学的形容として使われることが多い時代もあった。イースター島の石像モアイの調査で、黒曜石と白珊瑚でできた眼が発見された<sup>21)</sup>。白眼と瞳を持ったモアイはにわかに生々しく感じられて来る。

世界での産出地は、日本、中米、エチオピア、トルコ、アメリカ西部（図6）などである。

水分を多く含んだ溶岩がガラス化した場合にはクラックが多数発生し、外見から「松脂岩（ピッチストーン）」、「真珠岩（パーライト）」などと呼ばれる。これらは黒曜石が水和したものだとも考えられる<sup>23)</sup>。実際に真珠岩の中に黒曜石の団塊が含まれるという産状がある（マレカナイト<sup>24)</sup>）。

上記の三種類の岩石をまとめて玻璃質岩石（ガラス質岩石・Holohyaline rock とも）と総称する<sup>25)</sup>。

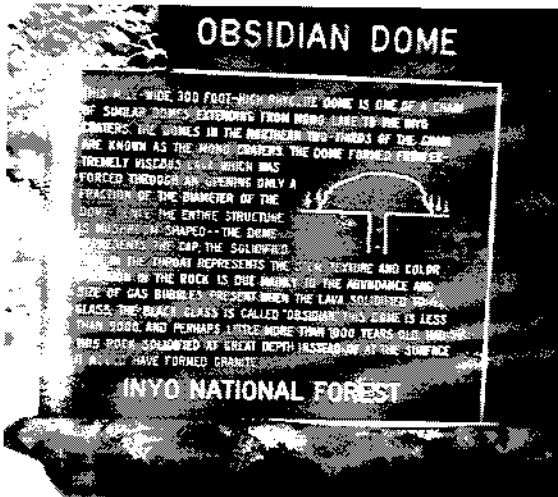
パーライトは加熱するとガラスが軟化し、水分のために20倍くらいまで発泡・膨張し、骨材・フィラー・濾過助剤などへの利用ができる<sup>26)</sup>。

黒曜石から結晶が発生するときは輝石などが鉄分を優先的に取り込むので、色が明るくなり、さらに結晶分が多くなると石英、長石が現れ白斑になる。大部分が結晶化した時には黒点を散らした白色の岩になる。結晶の配列が噴出時の流線の影響を受けるので「流紋」が生ずる。「流紋岩」まで変化しても石基にはガラス質が多い。

白い結晶塊を散らした黒曜石は研磨面に白斑模様を現すので「スノー・フレイク（＝雪片）」とも呼ばれる（図7）。表面下に泡がある時は、入射した光が泡表面で反射してくるので、黒曜石の色調によっては明るい淡褐色の光が見える。これは「ゴールド・シーン（＝金の輝き）」と呼ばれる。赤い斑紋を持つものは花黒曜。または産地



(a)



(b)

図 6 a) 黒曜石ドームの見学 b) ドームの成因説明図  
カリフォルニア・インヨー国立公園。噴出した年代は  
28 万年前と測定された<sup>22)</sup>。

の名をとって花十勝と呼ばれる。

一つの溶岩脈でも場所によって冷却速度が違うため、結晶析出密度も異なる。色、結晶の種類、大きさ、外見、分布の状態は今まで黒曜石の産地同定の一つの方法であったが、新しい方法に比べると信頼性が劣るとされる。

溶岩が地下にあったままゆっくり冷えると流紋を欠き、結晶粒子が大きく成長して花崗岩になる（花崗岩には別に変成岩起源のものもある）。英名“granite”は結

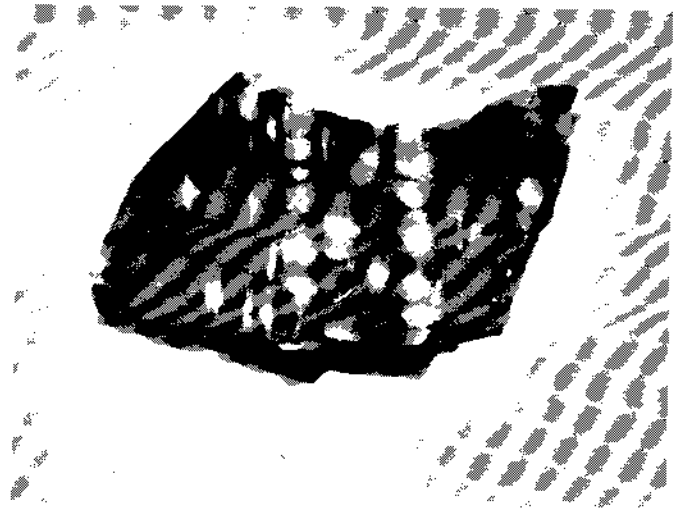


図 7 「スノー・フレイク」黒曜石の表面。流紋を判断できる。

晶粒”grain”が大きいことによる。<sup>27)</sup>

黒曜石は割れた時に鋭い縁を現すので、古代人がナイフ、鎌、槍先などの利器として使用した。ギリシャの歴史家ヘロドトスは、エジプトのミイラ製作に「エチオピヤ石」が使われると記した<sup>28)</sup>。これは黒曜石のナイフを指しているのだと思う。トルコの遺跡では 7000 年前の黒曜石の鏡が見いだされた<sup>29)</sup>。

黒曜石の使用、石器の製作技法と形状の編年、原石産地、採取と流通過程が考古学的に重要な問題になる。日本銀行貨幣博物館では、貨幣以前の時代に貨幣の役割を担ったものとして黒曜石の鎌と砂金、麻布を選んで展示している。アテネ、ヘレネス海事博物館では、有史以前の環エーゲ海貿易の商品として黒曜石を展示している<sup>30)</sup>。年代は 10000 年前、メロス島からギリシャ本土に海を越えて 150km 運ばれ、「トロヤ戦争」を含むギリシャ人の海上活動の発端になったと想定される。シュリーマンがミケーネ（ギリシャ、前 15-13 世紀）の遺跡を発掘した時、黄金の仮面などとともに黒曜石のナイフを得ている<sup>31)</sup>。当時はまだ青銅器時代であったので、このナイフは十分実用価値があったであろう。

エチオピヤでは黒曜石器の 12 万年前の使用が認められた例がある（後出）。

黒曜石器の展示がある例は、人類学博物館（パリ）とサウス・ウェスト博物館（ロサンジェルス近郊、図 8）である。

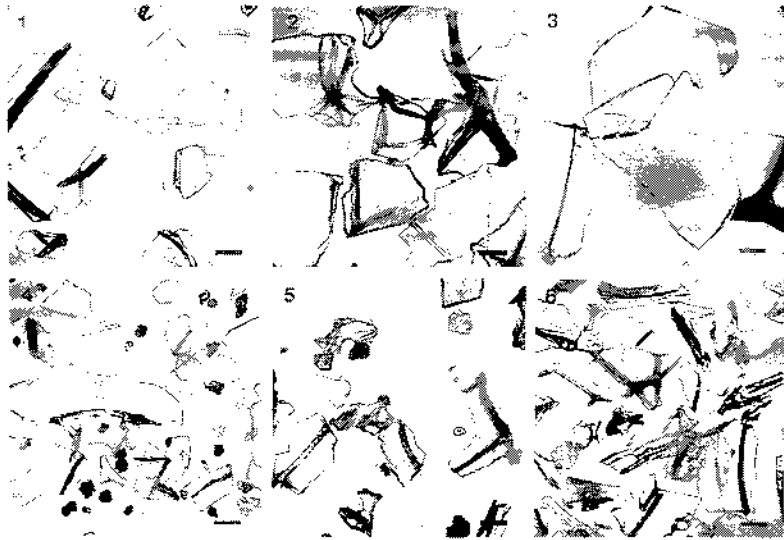


図9 日本全国から採集した阿蘇第4火山灰のうち6例のガラス片。町田 洋 東京都立大学教授の御厚意による。



図8 アメリカ大陸先住民の黒曜石石器と人骨。カリフォルニア、サウス・ウェスト博物館

#### 4.2 火山灰ガラス<sup>1)</sup>

酸性の溶岩がガス爆発（溶岩起源のガスによる爆発）または水蒸気爆発（溶岩が地下水または海水に接触してできた水蒸気による爆発）をすると、ガラスが泡立ってから激しく吹き飛ばされる。泡の壁はガラスの小薄片（火山灰ガラス：図9）になり、火山灰の一部になって広い範囲に降り積もる。

日本には年代測定に火山灰を使える地域が多く、これに関係した研究が進んでいる（後出）。

#### 4.3 軽石とガラス質水砕岩

溶岩が噴出する時に、減圧により揮発性物質がガス化して泡を作り、全体が多孔質の岩石になったものが軽石（パミス）である。軽石にもガラス質が多く含まれる。海底噴火の時の方が圧力と冷却条件のために軽石になり易いことがある。

軽石は園芸用資材として販売される。昔は入浴時の垢すりとしての利用が普通であった。見掛け比重が小さいものが縄文時代に漁網の浮子に使った例がある（千葉県加曽利貝塚）。また同じ理由で流紋岩は海岸の漂石として見付かる。

流紋岩質の多孔質の岩として伊豆・新島の抗火石（こうがせき）がある<sup>32)</sup>。断熱建材として切り出される他に、ガラス工芸用の原料としても利用される。

最近、酸性溶岩が海底に噴出して作ったガラス質水砕岩（ハイアロクラスタイト）が注意された（例：福島県貝見）<sup>33)</sup>。流紋岩質溶岩ドームが側面を厚さ10cmくらいのガラス殻に覆われて水底へ顔を出し、周辺は軽石片とガラス片とで積み囲まれているという珍しい産状を見せる。

#### 4.4 日本の黒曜石<sup>34)</sup>

日本の黒曜石の産地として1950年頃に知られていたのは18箇所である（松脂岩は7箇所）<sup>35)</sup>が、現在は42

箇所が数え上げられる<sup>36)</sup>。日本の考古学で重要な所は白  
滝（北海道）、和田峠（長野県）、神津島（伊豆諸島、図  
10）、隠岐（島根県）、腰岳（佐賀県）である。



図 10 神津島・砂糠湾を隔てて、黒曜石露頭のある崖を  
望む。

玄武岩質・安山岩質の火山でも局所的には酸性溶岩が  
現れ、黒曜石が見出だされる例（富士山、箱根）がある  
<sup>37)</sup>。箱根の畑宿は先土器時代以来南関東への黒曜石の給  
源であった。

丹念な調査により黒曜石の小規模な産出地が多数見つ  
けられ、それらの近くの遺跡での使用が確認されたこと  
もある<sup>38)</sup>。河川の転石として見付かるが原産の露頭が未  
発見である例も多いとのことである。

伊豆諸島では大島、三宅島の列が玄武岩質、新島、神  
津島が流紋岩質、中間の利島が安山岩質という違いがあ  
り<sup>39)</sup>。石器用の良質な黒曜石は神津島で局所的に産出す  
だけである。

日本での黒曜石の使用開始は3万年前より古くはない  
ようである<sup>40)</sup>。縄文時代が黒曜石器使用の最盛期であっ  
た。弥生時代になっても鎌と穂摘み器のような農耕具に  
石器が残った。前者は黒曜石製が多かった。

黒曜石は加工しやすく鋭い石器になるが、強度は頁岩や  
微結晶質のケイ岩に劣る。従って黒曜石は太身のナイフ  
（茂呂型、東京都板橋区）<sup>41)</sup>や消耗品に近い鎌に多く使  
われ、細身のナイフは燧石で作る（杉久保型、野尻湖付  
近）という使い分けがあった。中部山岳でも同じ事が見  
いだされた<sup>42)</sup>。従ってまた黒曜石の補充が当時の生活



図 11 黒曜石原石の展示、井戸尻考古館

に大事であったろう。現代では黒曜石粒を加熱して含有  
水で発泡させ、園芸用および土壌改良材として使われる  
（「フォーライト、ミネイオン」など、長野県下諏訪町）。  
通気性と微量成分の溶出が有効に作用するのであろう。

中部山岳地帯では和田峠とその付近から得られる黒曜  
石で作られた石器の出上が多いので、現地の資料館では  
それらの展示は勿論のこと、大型の原石を置いたり、各  
地産の原石を集めたりしている（南牧村郷土資料館＝鎌・  
細石器、尖石考古館、井戸尻考古館（図 11）など）。黒  
曜石以外の石材原石と、縄文・弥生時代の鎌・ナイフの  
多くを展示する例は國學院大学考古学史料館（東京）で  
ある。明治大学考古博物館では岩宿遺跡（群馬県、日本  
の先土器時代の最初の確認）、矢出川遺跡（長野県、日  
本の細石器の最初の確認、細石器は小さい刃物を柄に植  
えて鋸のように使う。南牧村の資料館もこの遺跡の出土  
品を展示する）などの黒曜石器を展示する。笠懸野郷土  
資料館（岩宿遺跡の近く）は原石と石器製作技法を詳し  
く示している。東京国立博物館は北海道のものを展示し  
ている。

## 5 ガラスの耐久性

ガラスは水分の進入によつて風化する<sup>43)</sup>し、温度が  
高いと結晶化や熱水への溶解が起きるので、長い年代に  
亙っては存在しにくい。玄武岩質ガラスでは第三紀まで  
遡りうるが、特別に条件が良いと先カンブリヤ紀のもの  
が残っている。この場合には 200°C 以上にならなかつ  
たからだと推論された<sup>44)</sup>。

酸性のガラスが白亜紀（中生代の最終期）と暁新世（第三紀の最初の時期）の地層に残っていることが認められた<sup>45)</sup>。

## 6 特性解析の方法

### 6.1 フィッション・トラック法<sup>47)~55)</sup>

米国 GE 社のフライシャー、プライスらはプラスチック、ガラス、結晶中を荷電粒子が走る時に生ずる粒子径路（＝飛跡、トラック）を研究した。飛跡に沿って原子配列が乱され、結晶ならば無定形になる。飛跡は電子顕微鏡で直接に観察できる場合があるが、荷電粒子の原子番号が高い場合には薬品で基体を腐食すると飛跡部分が細長い孔になり、光学顕微鏡で容易に観察することができるようになる（図 12）。

ウラン 235 は半減期 7 億年で  $\alpha$  線（ヘリウム核）を放出して崩壊するが、これとは別に熱中性子（速度の小さい中性子）と出逢うと、核分裂（フィッション）をして原子量がほぼ半分の原子核 2 個に変わり、高い運動エネルギーをもって飛び散る（原子炉の原理）。<sup>235</sup>U を溶かし込んだガラスを熱中性子束に曝すと、発生した核分裂片の飛跡（フィッション・トラック、以後 F.T. と略記する）ができる。既知量のウランを含むガラスを使うと、トラック数から逆に中性子束の線量を測ることができる。ヘリウム核の飛跡は腐食では孔にならない。

他の利用例としてウランにアルゴン核を当てて三体分裂を行わせ、それを記録する事が挙げられた。

次に天然の鉱物や黒曜石を腐食するとトラックが現れることが観察された。これは<sup>238</sup>U の自発核分裂と考えて、年代測定に使うことを工夫した。

天然のガラス（黒曜石、火山灰ガラス、テクタイトなど、後出）、鉱物（雲母、ジルコン、アパタイトなど）粒は微量のウランを含み、その大部分は<sup>238</sup>U である。これは 45 億年の半減期で  $\alpha$  線を出して崩壊するが、それとは別に  $6\sim 9 \times 10^{-17}$  / 年の割合（半減期約  $10^{16}$  年）で自然に核分裂（自発核分裂）を起こし F.T. を作る。ウラン含有量と F.T. の数を知れば、鉱物粒ができてから現在までの年数を計算できる。ウラン含有量は、鉱物を原子炉に入れ既知量の中性子を当てるか、または既知量

のウランを含むガラス（例：100ppm のウランを含む鉄リン酸塩ガラス）と一緒に中性子を当てるかして F.T. を数え、<sup>235</sup>U 含有を決めてから  $^{238}\text{U} / ^{235}\text{U}$  (= 138 : 既知) 比を使い<sup>238</sup>U 含有量を計算する。黒曜石は広い表面を測定に使えて都合が良い。

求められる年代は、鉱物が冷えて F.T. が消えなくなる温度（閉鎖温度）になってから現在までの期間である。地上に現在ある他の自発核分裂性同位元素（ウラン、トリウム）や、宇宙線に誘導されての分裂でできる F.T. 数は無視できる。

中性子束に熱中性子以外の高エネルギーのものが混ざると、<sup>238</sup>U (<sup>232</sup>Th も) の核分裂も起きるので、対策が必要である。

黒曜石の腐食条件の一例は次の通りである：

48%フッ化水素で 23°C, 15 秒。

フィッション・トラックの体積密度が小さいと、表面に顔を出して孔になって数えられるものの数が非常に少ない。粒子加速器で重元素（例：ニッケル）核を加速して表面に垂直に当てると、その飛跡が<sup>238</sup>U の飛跡と連結して、腐食でこれを光学的に見えるようにする。トラックの検出感度が 20~50 倍になる<sup>50)</sup>。真空中で表面を人工の核分裂性同位元素<sup>252</sup>Cf に曝しても同じ効果をえられた（図 13）。

中性子を当てて F.T. を作る実験をする時には、雲母片をサンプルの研磨面に貼り中性子照射してから雲母片上まで伸びたトラックを数える方法（外部検出器法）も実行される。

野外の鉱物片、ガラス片には他の地層からのものが混入する恐れがあるし、森林火災や野火を受けた可能性もあるので、注意して採集した多数の粒で測定し、極端に違う値のものは除き、統計的に一つの母集団に属すると判断された値の群から年代を決定する。

現在では、 $^{235}\text{U} / ^{238}\text{U}$  比の異なる 2 種の標準ウラン含有ガラスと、いろいろの方法により生成年代（1600 - 9900 万年）がほぼ確実に決められた天然試料（ジルコン、アパタイト、スフェン = Ca と Ti のケイ酸塩鉱物 5 種とを基準試料として入手できるようである<sup>51)</sup>。

閉鎖温度は鉱物により違うので、一つの岩の中で各鉱物の年代を測ると、深成岩（非常にゆっくり冷える）の



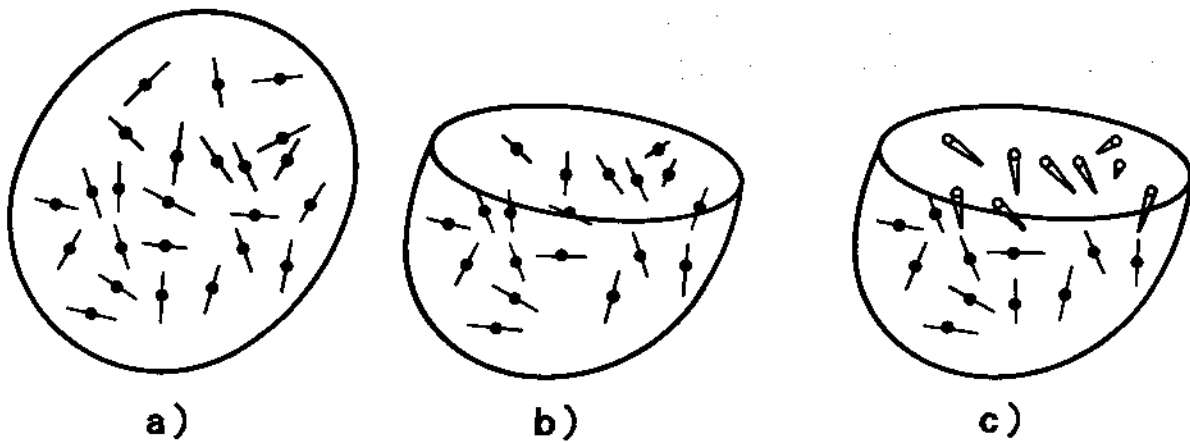


図 12 フィッション・トラック観察の原理 a) 石塊中の核分裂飛跡 b) 切断し研磨面を作る。 c) エッチングして孔を作る。

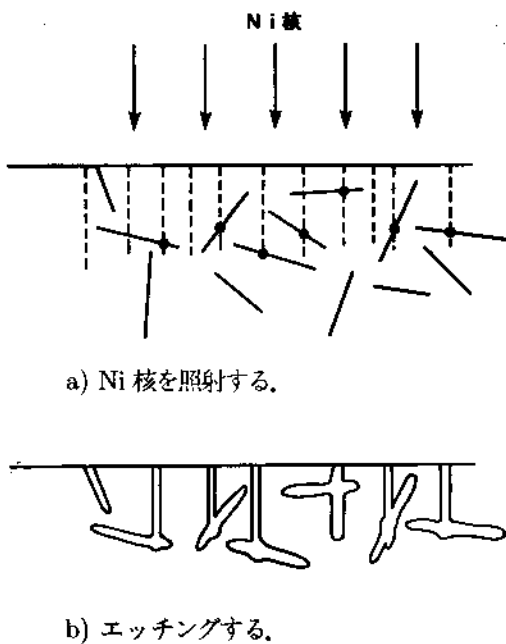


図 13 ニッケル核照射による F.T. 法の感度上昇の原理

冷却の履歴を知ることができる。

フィッション・トラックはガラス・鉱物粒を再加熱すると消える。トラックの端に近いほど低い温度で消えるので、トラックの長さに分布があるような試料では、最初の冷却以後の再加熱の履歴を推定できる場合がある<sup>52)</sup>。これらの研究方法のその他の考えられる適用範囲として、造山帯での熱的冷却史、鉱床と貫入岩体の熱史(地熱発電との関連がある<sup>54)</sup>)、隕石の衝突でできたク

レーター熱史の研究が挙げられる<sup>51),52)</sup>。

遺跡から得られた黒曜石がもしも住民の生活や火災により加熱されていたならば、F.T. 法はその遺跡の年代を与える<sup>53)</sup>。

ウラン 235 の自然核分裂の崩壊定数は余りに小さくて直接に測ることができないので、得られる年代値がカリウム・アルゴン法やルビジウム・ストロンチウム法(後出)によるものと一致するように決められる<sup>46d),55)</sup>。従ってこの二つの方法と F.T. 法とは互いに独立ではないが、F.T. 法は遥かに簡便で多数のサンプルを測定できるという利点がある。

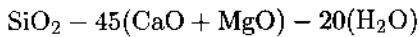
他方では F.T. 法と独立な他の方法との比較を機会を見て行い、信頼度を高める必要がある。フィッション・トラック法は他の方法と同じ年代値を與える筈であり、実際にこれは屢々確認されている。しかしもし両方の値に差がある時には、その原因を調べるのが地史の解明にも必要である<sup>56)</sup>。

フィッション・トラック法は、ガラス・鉱物粒の安定度とそれらのウラン含有量とによるが、数百万ないし数千万年までは適用され、第四紀の人類史・地史を辿るのに適する。意識的にウランを成分として入れたガラス(以前には気密封着用と蛍光性黄色ガラスとして工芸用とに使われた)で6ヶ月を判断できた<sup>46d)</sup>。

6.2 ガラスの表面水和層厚さの測定<sup>57)~60)</sup>

ガラス質のものは大気中に放置されると、表面から内部へと水が拡散、進入して水和層を作る。水和層は屈折率が基体と違うので、表面に直角に切った薄片標本を光学顕微鏡で観察して進入深さを測ることができる。水の進入が拡散の式に従うとして、式の中の定数を実験的に決め、またガラスが置かれていた気候の状況を仮定すると、水和層の厚さから表面の形成以来の年代を算出できる。石器を作るために黒曜石を打ち欠き、使用後に放置された場合には、破面の水和層厚さは石器になって以来の年代、また遺跡に住民が居た時代からの年代に対応する。

拡散の式からは水和層の厚さの二乗が気候への暴露時間に比例する筈なので、図 14a) では (厚さ $\mu\text{m}$ の二乗) / 1000 年を横軸にとって、同図は数種類のエチオピア産黒曜石で温度の影響を示している。高い温度での実験は加速試験に相当する。組成の影響が大きいことがわかる。組成を



で規格化すると組成/水利速度関係が一つの母曲線に乗ることが導かれた (図 14b))<sup>59)</sup>。この実験では試料の K/Al 比の変化範囲が小さかったので、日本産の石では、K/Al 比を考慮する必要があると指摘されている<sup>57)</sup>。

拡散速度は湿度にはよらないが、上式の通り黒曜石の水含量の影響は大きい。

数十年から数百万年の年代範囲に適用でき、誤差がプラス・マイナス 10% という評価がある<sup>59)</sup>。

日本産黒曜石でのデータも得られた。2 万年で層厚さの二乗 (単位:  $\mu\text{m}$  の二乗) は箱根産で 4、神津島産で 55、和田峠産で 150 近くと差がある<sup>57)</sup>。エジプト、エクアドル産のもの、寒帯ないし温帯での水利速度のデータも得られている<sup>57)</sup>。

年代と関係づけるには初期には遺跡で供伴した遺物の<sup>14</sup>C 法 (後出) 年代、後には F.T. 年代を使った。いずれにしても年代絶対値は他の方法で決める必要がある。

流紋岩は石基が体積の 3 / 4 以上を占め、またその大部分をガラスが占める。岩の割れ目のガラス表面を使っても同じ測定ができる。神津島で噴火の年代が 1500、

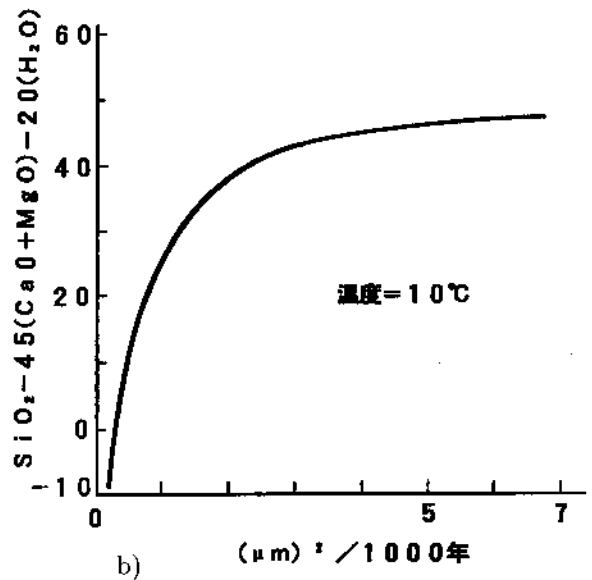
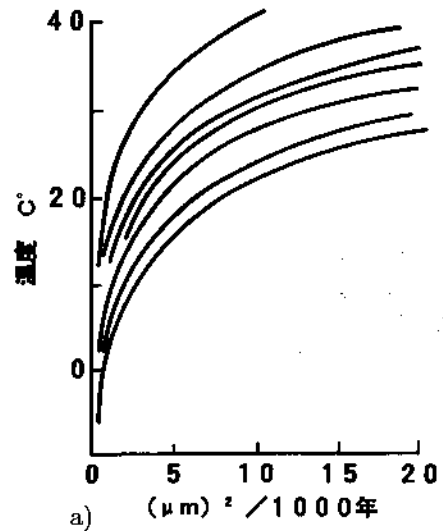


図 14 a) エチオピア各地産の黒曜石の温度-水和層深さ関係。横軸は 1000 年間の水和深さ (単位:  $\mu\text{m}$ ) の 2 乗を表す。 b) 成分を規格化して比べると、一定温度での深さ-成分関係は一つの曲線に載る。

3500、60000 年前 (それぞれ中心値) と見積もられた、同島の黒曜石を使った F.T. 法の結果と対比された<sup>39b)</sup>。

玄武岩質ガラスの表面変質速度が、動力炉・核燃料開発公団によって研究された。富士山のガラスがシリカを約 50% 含み、高放射性廃棄物をガラス化して貯蔵処理する場合のガラス組成に似ているので、貯蔵中の表面変質速度の評価をする目的であった。噴出後の年代 (2750 年及び 280 年) 間の変質深さを測った。1000 年で  $8\mu\text{m}$

であった。

## 7 その他の年代測定法

フィッション・トラック法や水和層厚さ測定法によって得られた鉱物、ガラスの年代値は、ほとんどの場合歴史的には確認できない。また放射性元素の変換を利用する方法では半減期の見積りに不確定さがある場合が多い。年代測定の信頼性は他の方法による値と絶えず比較検討することで高められる。

酸性溶岩起源の黒曜石と火山灰ガラスは次のような利点がある。

短時間で冷却したから年代測定の開始点が明確である、

ウラン含有量が比較的多く、さらにガラス、結晶とも F.T. 法に適する、

カリウム・アルゴン法 (次記) による年代決定もできて、F.T. 法の結果とも比較できる。実験では二つの方法はほぼ同じ結果を與える<sup>56)</sup>。

対比される測定法として本稿で扱うのは次のようなものである。それらについて簡単に触れる。

### 7.1 カリウム・アルゴン法<sup>61)</sup>

鉱物粒中の<sup>40</sup>K が半減期 13 億年で<sup>40</sup>Ar に変換することを利用する。カリウムとアルゴンの量をそれぞれ測って年代を計算する。

最近ではサンプルに中性子を当てて<sup>39</sup>K を<sup>39</sup>Ar に換え、アルゴンの同位体比だけ測ると年代が得られるように工夫されている<sup>62)</sup>。

海底から湧き出す玄武岩質溶岩では、ガラス、結晶とも噴出時に溶岩中のアルゴンが十分に逃げないため、年代が古く測定されることが注意された<sup>63)</sup>。

### 7.2 ストロンチウム-ルビジウム法

ストロンチウム 87  $\rightarrow$  ルビジウム 87 変換が半減期 488 億年で起きることを利用する。

### 7.3 カーボン 14 法 (A), (B), (D) ~ (G), (H)

上空では宇宙線によって<sup>14</sup>N  $\rightarrow$  <sup>14</sup>C の核反応で<sup>14</sup>C が作られる。一方で、<sup>14</sup>C は半減期 5700 年で $\beta$ 崩壊し (<sup>14</sup>N になる) 消滅する。その結果、大気中の炭酸ガスは約  $10^{-12}$  の割合で<sup>14</sup>CO<sub>2</sub> を含む。炭酸ガスは生物に取り込まれて植物体、珊瑚、貝殻などを作るので、これらの中にも一定の割合で<sup>14</sup>C が含まれる。生物が死ぬと遺体中の<sup>14</sup>C が同じ半減期 5700 年で減少する。遺体中の<sup>14</sup>C の割合を測ると生物死後の年代を計算できる。

炭素 14 を定量するには、これが変換する時に出す $\beta$ 線を検出していたので、検出の能率が悪くて感度が低く、適用可能年代が 3 万年程度であった。最近粒子加速器付き質量分析器で原子そのものを定量するので、6 万年くらいまで適用できることになった<sup>63), 64)</sup>。

質量分析法では大気起源の<sup>14</sup>N が妨害になるので、イオン化特性の差により分別し、また薄いマイラー箔で<sup>14</sup>N を遮り<sup>14</sup>C だけを通過させることで、N への対策をしている。

陸上では火山灰層に埋もれた木材で、海中では放散虫の殻で<sup>65)</sup>、F.T. 法との相互チェックがしばしば行われる。

スリランカ産の石墨を使ってバックグラウンドの補整をする工夫がある<sup>66)</sup>。

### 7.4 組成、微量成分の分析

遺物の成分分析も知識を引き出すために大きい役目をする。主成分を知る必要が多いことは勿論であるが、微量成分を知ることが必要なことも多い。さらに含有量の絶対値ではなくて、複数のものの間の含有量比が有効なことがある。

このためには微量のものを敏感に、かつ短時間で、あるいは多数の成分を同時に定量する事が求められる。さらに考古遺物では非破壊測定が絶対条件となることが多い。微量成分には中性子放射化分析、高周波誘導結合炎光 (ICP) 法及び同質量分析 (ICP MS) 法、非破壊分析には蛍光 X 線分析などの方法があり、これらのうちには自動的に、あるいは無人で複数成分の同時定量ができるように工夫されたものもある<sup>67)</sup>。その一つとして X 線

源に放射性同位元素を使うことがある。蛍光 X 線分析は非破壊という特徴のほか、含有量よりも含有量比を知りたい時に特に適している。

高周波誘導結合プラズマは高融点物質の分析精度を高めた。X 線分光器が波長分散式からエネルギー分散式に遷つたのはこの点で好都合であった。また最小限の加傷が許される場合には、電子線マイクロプローブ法も使われる<sup>68),69)</sup>。

これらの分析方法ではそれぞれ標準物質を使って含有量の精度を上げるように試みられる。天然の物質に似たものを合成したり、工業的に作られた単結晶を使ったりする<sup>68),70),71)</sup>。

一例：GaP, 合成ケイ灰石, 黄鉄鉱, 翡翠

他の例：シリカ用：人工テクトライト, チタニヤ用：玄武岩質ガラス, アルミナ用：流紋岩。

米国標準技術研究所 (略称 NIST=旧 NBS) による規格化された標準サンプル (SRM) としても入手できる。

これらの方法は黒曜石だけでなく他の石器材料, 土器とその原料粘土および翡翠の産地同定と流通事情の推定に有効に利用されている。しかし本稿では黒曜石以外には立ち入らない。

## 8 黒曜石の原産地, 使用年代, 流通に関する研究

### 8.1 成分比による原産地の同定

日本の三つの産地からの黒曜石で、横軸に幾つかの成分の組み合わせ、縦軸にその比をとって折れ線カーブを作ると、三つのものを明確に分離できることが示された (図 15)。なお同じ方法で、日本の知られている全産地の石のデータが蓄積されている<sup>N)</sup>。

日本・ソビエト (当時) が共同研究を行い、中性子放射化分析により、白滝産・隠岐産・男鹿半島産の黒曜石がそれぞれ対岸のシベリヤにまで運ばれていたことが確認された (図 16)<sup>72),73)</sup>。

一つの溶岩流が冷却の履歴によって黒曜石や流紋岩に分かれる時、結晶化に際してアルカリ、アルカリ土類は溶脱して含有量が変わる。しかし希土類は変わらないので、黒曜石、流紋岩に関係なく一つの溶岩流に属してい

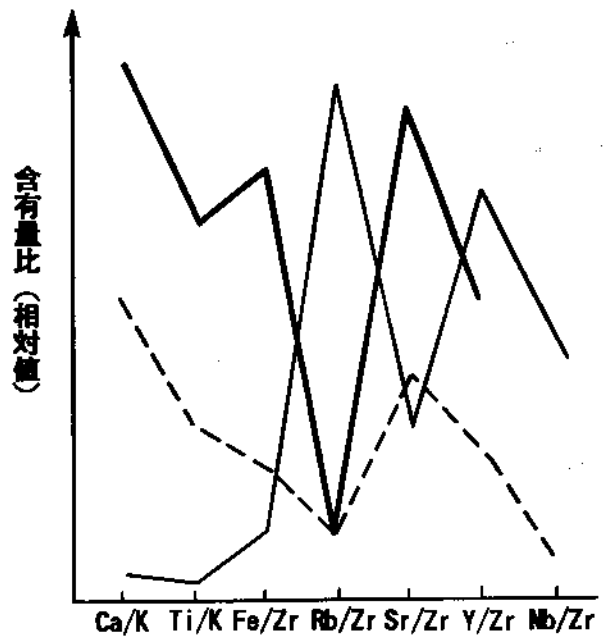


図 15 日本産黒曜石 3 種の成分-含有量パターンは互いに違う。



——— 石材の関連  
----- 技法の関連

図 16 環日本海域での黒曜石と石器製作技法の関連

たか、別のものに属していたかを判断できる。米国産・中東産・ニュージーランド産・環エーゲ海域などの黒曜石を集めて中性子放射法で調べ、一つの流れかどうかの判断は40%、違う流れかどうかは100%の確度で判断できた<sup>74)</sup>。

東地中海地域の黒曜石についてレンフルーの放射化分析による網羅的な研究がある<sup>75)</sup>。

日本の調査隊がトルコの幾つかの遺跡で採集した黒曜石を Ba Y の組み合わせで分類すると、レンフルーによって分類された産地のうちの二つからのものであることが認められた (図 17)。おなじデータを Ba Zr に関

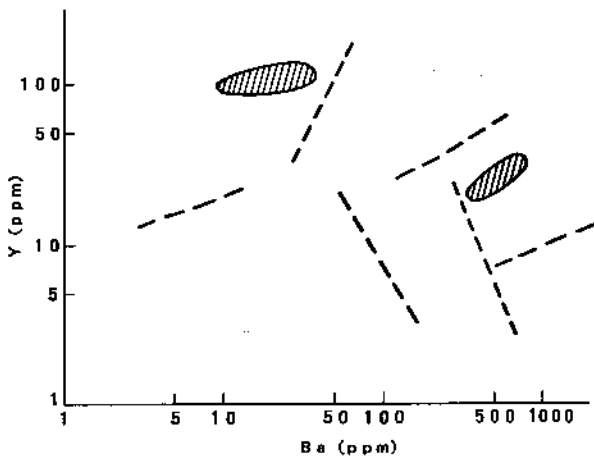


図 17 アナトリア産黒曜石の産地と組成範囲の関係。点線は原産地間の区別を示す (レンフルー<sup>75)</sup>)。斜線は日本の調査隊が得た黒曜石器の組成範囲。

して整理しても同じ結論になった<sup>76)</sup>。

その他産地同定のために使われた成分として、La, Sm, Ti, Sc, Th, As, またはこれらの間の比とそれらの組み合わせがある<sup>77)</sup>。

### 8.2 ルビジウム・ストロンチウム含量による原産地同定

ルビジウム・ストロンチウム法による年代測定のためにこれらの元素の含有量が精密に求められるようになった。このデータの組み合わせも原産地の同定に有効である。地中海東半分の地域で産出する黒曜石がこのデータにより綺麗に産地別に分別できた (図 18)<sup>77)</sup>。

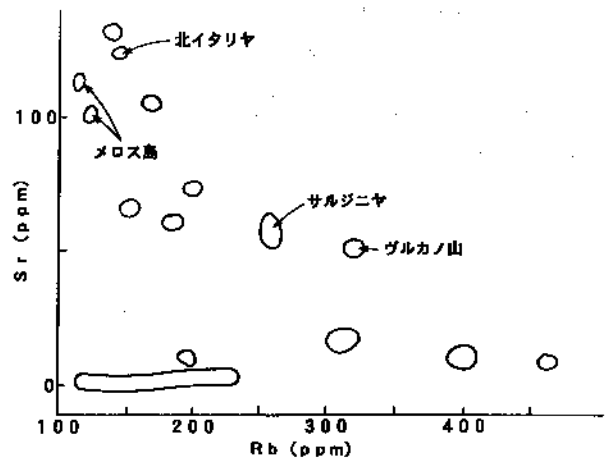


図 18 地中海東半の黒曜石産地による組成範囲<sup>77)</sup>

### 8.3 噴出年代/ウラン含量データによる原産地同定<sup>78)</sup>

フィッシュン・トラック法では溶岩の噴出年代とウラン含量が同時に求められるので、このデータの組み合わせを産地の同定に使うと確実性が高い (図 19)。

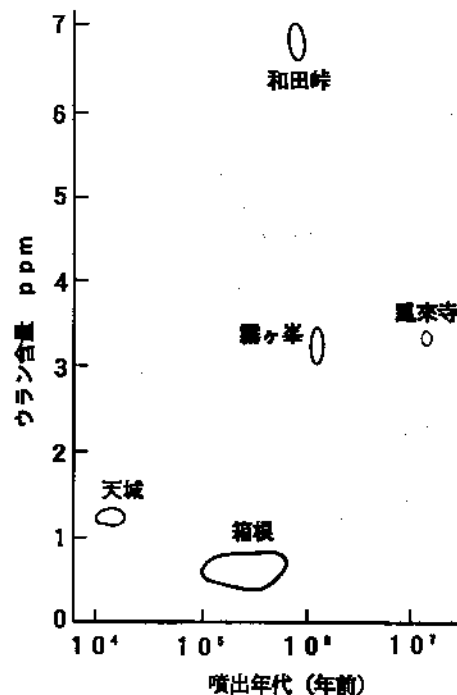


図 19 日本産黒曜石の噴出年代とウラン含有量による区分<sup>78)</sup>

関東地方の遺跡へ流入した黒曜石の原産地別比率とその地域、遺跡年代との関連が明らかにされている。

伊豆諸島の遺跡から出土した黒曜石について、この方法で徹底的に調査された。僅かの本土産がある他はすべて神津島産であった。水和層年代は縄文時代と弥生時代とに大きく分かれた<sup>78)~80)</sup>。

南関東の遺跡で2万年以上前(先土器時代)の神津島産の石が見付かったので、その流通事情に関心が持たれた<sup>81),82)</sup>。特に島との間の水上交通がその時代にできたのは、従来定説よりはるかに古いことであった。

関東地方への黒曜石の流入は、3~2万年前の間に信州・箱根のものが南関東へ、信州のものが北関東へ入った。1.2~1万年前に信州・箱根・神津島から関東へ、また神津島から東海地方(浜松が西限<sup>83)</sup>)へ伝わった。縄文時代には本土から土器・石材・猪が来たことが認められた(図20)。

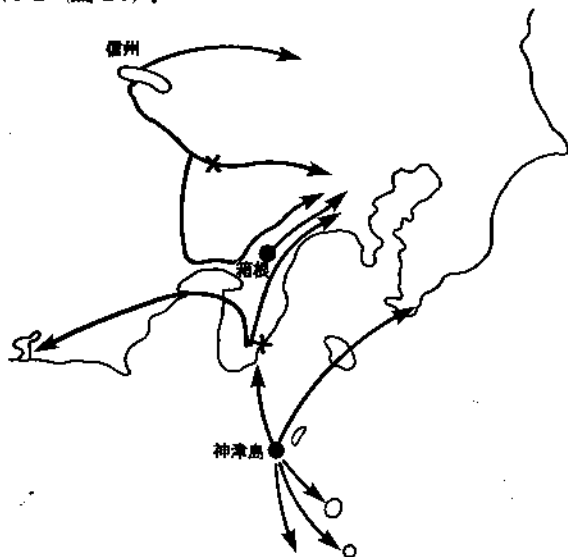


図20 中部・関東・東海地域での黒曜石流通の推定。十字形は大量貯蔵があった遺跡を示す。

神津島産黒曜石の出土地分布から、伊豆半島に神津島からの中継基地があると予想されたが、後に段間遺跡(静岡県河津町)での大量、大型の原石貯蔵の発見で裏付けられた<sup>79),80)</sup>。信州からのものを貯蔵する釈迦堂遺跡(山梨県勝沼・一宮両町)も見いだされた。交易で得られたと見える蛤があり、黒曜石と在地の水晶との鎌・皮剥用ナイフも出土した(同博物館)。

大量ではないが貯蔵が認められた遺跡は多い<sup>81a)</sup>。

五領ヶ台遺跡(平塚市)では信州・神津島・上多賀(伊東の北方)の黒曜石があり、水和層厚さ2.3~6.7 $\mu\text{m}$ ,

年代は5600~5500年前、上多賀産には原石の面があり、水和層厚さ20 $\mu\text{m}$ 、年代40万年前となった。焼けた黒曜石が見つかり、F.T.年代は4850年で、水和層による値との差は当時の温暖な気候によると想定された<sup>84)</sup>。

#### 8.4 外国での流通の研究例

南ギリシャで見いだされる黒曜石はキュクラデス諸島のメロス(ミロ)島産であると認められた。使われた年代は<sup>14</sup>C法で9000年前で<sup>75),85)</sup>、そのため同島は当時富裕であったという<sup>86)</sup>。

ニュージーランドと米国での研究も進められた<sup>F)</sup>。

#### 8.5 黒曜石の使用年代の測定

西及び中央アフリカでは1000カ所以上の適用例がある。石器にするために新しくできた破面の水和層厚さを測る方法である。東アフリカ・ケニアの一つの遺跡で調べた例では、住民が居た年代として12-5-3-2-1-0.3万年が重なってそれぞれ認められ、この中の最後の二つの年代は<sup>14</sup>C法でも確かめられた。この地域の黒曜石の使用はエチオピアまで1400×100kmの地域で分布しており、黒曜石の交易は中石器時代(数万年前)から、ただし盛んになるのは3000年前からだと推定された<sup>87)</sup>。

#### 8.6 黒曜石の存在

黒曜石は産地が限られているので、普通の土地では存在すること自体が人為の証拠になる。日本での先土器時代(「旧石器時代」,「岩宿時代」との表現もある。縄文時代に先立つ時代)に人が住んで赤土層の中に遺物を残したことは相沢忠洋氏によって気づかれていた。しかし考古学界の人々に研究を促したのは、住民も遺物もありえないとされていた赤土層から見いだされた黒曜石の槍先であった(岩宿遺跡・群馬県、昭和24年)<sup>88)</sup>。

発掘の結果、此処の文化層は上下二つあり、後にその間にAT火山灰層(後記)があることがわかった。槍先はそれらよりも上の層にあったと推定され、従来縄文時代のものとされていた他の遺跡の出土類品を再検討して、縄文以前の品であることが確かめられた(図21)<sup>89)</sup>。



図 21 上：遺跡発見当時の岩宿 中：黒曜石の右槍先  
下：相沢忠洋氏の肖像 相沢忠洋記念館の展示、相沢千  
恵子館長のご了承により撮影した。

### 8.7 歴史言語学への影響

レンフルーは $^{14}\text{C}$ 法と、先にも言及したとおり黒曜石を試料にしての中性子放射化分析による中近東の遺跡の年代測定と交流の研究を行い、それらの年代が従来の想定以上に古いことから言語学、特に「インド・ヨーロッパ語問題（一つの祖語を話す遊牧民が東西に拡散して、古代インド語と古代・現代ヨーロッパ語が成立したという学説に関する議論）」を論じている<sup>90),91)</sup>。

#### 【参考文献】

- A) 馬淵久夫・富永健 編 考古学のための化学 10 章 東京大学出版会 (1987)
- B) 馬淵久夫・富永健 編 続考古学のための化学 10 章 東京大学出版会 (1986)
- C) 山崎 雄 古文化財の科学 思文閣出版 (昭 62)
- D) 新しい研究法は考古学になにをもたらしたか クバプロ (平元)
- E) 考古学・美術史の自然科学的研究 日本学術振興会 (平元)
- F) 東村武信 改定 考古学と物理化学 学生社 (1990)
- G) 数理科学 1977 年 8 号 「考古学と自然科学」特集
- H) J.Non-Crystalline Solids 67 巻 1-3 号 「天然ガラス特集」 (1984)

- I) Science 167 巻 Jan. p.447 (1970) 「月の石」特集
- J) 木越邦彦 年代測定法 紀伊国屋書店 (1965)
- K) 考古学ジャーナル No.329 「遺跡の地層・土層のとらえ方」特集 (1991)
- L) 町田 洋 火山灰は語る 蒼樹書房 (1986)
- M) 新井房雄 編 火山灰考古学 古今書院 (1993)
- N) 東村武信 石器産地推定法 ニュー・サイエンス社 (昭 61)
- O) P.M. ハーレイ 地球の年齢 河出書房 (1967)
- P) 考古学ジャーナル No.244 「黒曜石研究の現状」特集 (1985)
- Q) 地質ニュース No.469 「地球化学における微量・微量分析技術」特集 (1993)

- 1) 久野 久 火山および火山岩 第 2 版 岩波全書 p.128 (1986)
- 2) 早田 勉 文献 K) p.2
- 3) W.R.Phillips 他 Optical Mineralogy p.328 (1981) Freeman Co.
- 4) 井尻正二 他 「地学入門」 p.62 築地書館
- 5) 地質調査所 地質標本館 所見
- 6) 村瀬 勉 火山 II-7 [2-3] p.75 (昭 37)
- 7) 下鶴大輔 「地震・火山・岩石物性 (宮村撰三編)」 p.260 共立出版 (昭 47)
- 8) リーキー 他 サイエンス 12 [4] 34 (1982)
- 9) ジョハンスン 他 「ルーシーの子供たち」 (1994) 早川書房
- 10) ラブジョイ サイエンス 19 [1] 16 (1989)
- 11) リーキー 他 サイエンス 8 [10] 46 (1978)
- 12) 兼岡一郎 文献 G) p.18
- 13) ジャワ原人ピテカントロプス展図録 (1979)；日本人の起源展図録 (1988) 国立科学博物館
- 14) G.Baker Miner.Mag. 36 1012 (1968)
- 15) ヴロタヴーツ 火山エネルギーと地球 p.71 東京図書 (1974)
- 16) N.Zana 他 火山 II-28 [3] 313 (1983)
- 17) 豊橋市地下資源館 所見
- 18) 早田 勉 考古学ジャーナル No.392 p.2 (1991)
- 19) 竹内 均 日本列島地学散歩 九州・四国編 p.67 (1977) 平凡社
- 20) J.N.Delany 他 Geochim.Cosmochim.Acta 42 p.581 (1987)
- 21) 奈良文化財研究所とチリ調査州との共同調査；イースター島観光パンフレット ジャパンアメニティトラベル社
- 22) R.L.Fleischer 他 Geochim.Cosmochim. Acta 28 p.755 (1964)
- 23) W.Haller Phys.Chem.Glass 4 [6] p.214 (1963)
- 24) C.S.Ross Am.Mineral. 40 1071 (1955)
- 25) 佐藤文夫 他 岩鉱 62 [3] p.198 (1969)

- 26) 山田正春 地質ニュース p.34 昭 56/8 月
- 27) 仲山 勇 新・石の文明と科学 p.43 啓文社 (1990);  
林 良重 化学雑話 叢華房
- 28) ヘロドトス 歴史 岩波文庫
- 29) 田中 琢 日本の歴史 (2) 倭人騒乱 p.253 集英社
- 30) 同博物館図録
- 31) A.C. ブラックマン 古代への夢—トロヤに憑かれた男  
シュリーマン
- 32) 一色直記 新島地域の地質 (1962) 地質調査所; 鈴木  
番 セラミックス 25 3 p.218 (1990); The Glass  
No.10 p.38 (1988)
- 33) 黒川 明 岩鉱 86 p.439 (1991)
- 34) 小泉安太郎 ハケ岳の三万年—黒曜石を追って 法政大学  
出版局 (1988)
- 35) 河野義礼 本邦産玻璃質岩石の研究 地質調査所
- 36) 東村武信 文献 N) p.50
- 37) 町田 洋 文献 L) p.10
- 38) 岡村道夫 日本石器時代史 第 9 章 (1990) 雄山閣出  
版; 井上真利子 考古学論叢 (II) (1989)
- 39) 一色直記 a) 新島地域の地質; b) 榑津島地域の地質; c)  
大島地域の地質; d) 利島地域の地質 地質調査所
- 40) 筆者調査所見
- 41) 片沢長介 考古学ジャーナル No.271 (1986)
- 42) 鳥羽嘉彦 平出考古博物館紀要 第 4 集 p.1 (1987)
- 43) J.L. Crovisier Geochim. Cosmochim. Acta 51 p.2977  
(1987)
- 44) 高木秀男 地質ニュース 1991 年 1 月 p.15
- 45) M. Kastner 文献 H) p.463
- 46) P.B. Price 他 a) J. Appl. Phys. 33 [12] p.3400; 3407  
(1962); b) 34 [9] 2903 (1963); c) J. Geophys. Res. 68  
[16] 4847 (1963); d) 69 [2] 331 (1964)
- 47) 鈴木正男 文献 A) p.115
- 48) 西村 進 文献 E) p.57
- 49) J.D. マクドガル サイエンス p.30 (1977) 2 月
- 50) 大平寛人 他 地質学雑誌 100 p.129 (1994)
- 51) 西村 進 火山 II-36 [3] 371 (1991)
- 52) 升本真二 他 地質学雑誌 98 [12] 口絵 (1992)
- 53) 鈴木正男 文献 G) p.25
- 54) 伊藤久敏 他 電力中央研究所報告 U92041, U92051  
(平 5)
- 55) 西村 進 文献 E) p.57
- 56) 島 誠 他 岩鉱 61 p.100 (1969); 62 p.299 (1969)
- 57) 東村武信 文献 F)
- 58) 鈴木正男 文献 G)
- 59) I. Friedman Science 191 p.347 (1976)
- 60) 近堂祐弘 文献 E) p.68
- 61) 兼岡 一郎 文献 E), G)
- 62) 宇津浩三 地質ニュース No.461 p.32 (1993)
- 63) 兼岡 一郎 地質ニュース No.442 p.16 (1991)
- 64) 中井信之 文献 D) p.83
- 65) 村山雅志 他 地質学雑誌 99 [10] p.787 (1993)
- 66) 中村俊夫 地質学雑誌 98 [9] p.905 (1992)
- 67) 東村武信 文献 F), N)
- 68) 森 健 火山 II-28 [3] 225 (1983)
- 69) R.H. Brill 他 "Advances in Glass Technology"  
Plenum Press (1963)
- 70) P.A. Jeseke Am. Mineral. 63 266 (1978)
- 71) C.H. Nielsen 他 Am. Mineral. 66 p.547 (1981)
- 72) 木村秀明 日本人と文化の起源を訪ねて—アルタイ・シ  
ベリヤ歴史文明展図鑑 p.188 日本対外文化協会  
(1987)
- 73) 江坂輝弥 考古学ジャーナル No.305 p.2 (1989); 戸  
田正勝 同前 No.333 p.2 (1991)
- 74) R.A. Gordus 他 Science 161 382 (1968)
- 75) C. Renfrew 他 Proc. Prehist. Soc. 33 p.30  
(1966)
- 76) 望月明彦 古代オリエント博物館紀要 第 3 巻 p.83  
(1981)
- 77) N.H. Gale Archeometry 23 p.41 (1981); 東村武信  
文献 F) p.143
- 78) 鈴木正男 第四紀研究 9 [1] 1 (1970)
- 79) 小田静夫 歴史手帖 9 [6] p.11 (1981)
- 80) 金山喜昭 月刊文化財 p.13 (昭 63/9)
- 81) 季刊考古学 No.12 雄山閣 (1985) a. 斎藤幸恵  
p.27 b. 安藤政雄 p.19
- 82) 小野 昭 日本人類文化の起源 (安藤政雄編) p.147  
六興出版 (1988)
- 83) 史跡現場遺跡 浜松市博物館
- 84) 鈴木正男 自然と文化 (平塚市博物館資料) No8 p.27  
(1977)
- 85) C. レンフルー ことばの考古学 p.213 青土社 (1993)
- 86) アテネ・国立考古博物館 所見
- 87) J.W. Michels Science 219 p.316 (1983)
- 88) 相沢忠洋 赤土への執念 相沢忠洋記念館 (平 3)
- 89) 白石浩之 旧石器時代の石槍 p.12 東京大学出版会  
(1989)
- 90) レンフルー 前掲書
- 91) 風間喜代三 印欧語の故郷を探る 岩波書店 (1993)



## 地史・考古・天文学へのガラス解析技術の適用 (その2)

Applications of characterization techniques for glass to geohistory, archeology and astronomy

岸井 貫 千葉工業大学 附属研究所 教授

Tōru Kishii

問合せ/ キシイ トオル 〒 168 東京都杉並区高井戸東 3-14-11 tel (03)3329-3537

### 9 火山灰による年代測定<sup>L),92)</sup>

#### 9.1 火山灰の「鍵層」

火山灰は広い地域に分布しても、その中のガラス片の形・屈折率・F.T.法による年代、含まれる結晶(輝石・角閃石・橄欖石が多い)の種類・形・屈折率から同じ火山灰かどうかを決めることができる。ガラス片はF.T.法の適用に都合がよい、火山付近に存在する火砕流では一続きの層の決定はもっと容易であり、含まれるガラスや結晶(アパタイト、ジルコン)は火山灰同様F.T.法による年代測定に役立つ。

火山灰は日本上空の偏西風のため普通は給源の西あるいは北西に偏って分布する。

火山灰層は海底にも分布し、海棲生物の消長の研究にも役立つ。生物遺骸のカーボン14による年代測定値との対照もできる。

ガラス片を含みかつF.T.法で年代の知られている火山灰層は30万年前のものがある。ガラス片のF.T.法で年代は8万年前くらいまで決められた<sup>93)</sup>。

古いものはガラスが変質または凝灰岩に変化する<sup>94),95)</sup>が、その場合には結晶を年代測定に利用できる。凝灰岩はしばしば多くのガラス質を含む。緑色で緻密なものは「碧玉」として、古代の装身具、器具の模製品と

して古墳の副葬品になった。これらは考古学的に重要な遺品である。大型素材を得易く、材質的には柔らかいので青い顔に比べれば加工が容易であったろう。

広い地域に降った火山灰層は、「鍵層」としてその地域内での共通の年代の基準に使える。現在では鍵層をキーワードとした考古学的研究が数えきれない程多い。有史時代にも有史前にも同様に適用できる。

ガラスは水を含んでいるので、加熱により発泡し、多孔質の粒や中空の球になる(例:シラス・バルーン)。プラスチックの軽量フィラー、浮力材、濾過材、液体クロマトグラフ用吸着床などへの利用が研究されている<sup>96),97)</sup>。

インドネシアの火山灰についても、日本と同国との共同で利用法が研究された<sup>98)</sup>。

有史前日本の大噴火、これに伴う広域火山灰の散布は次のものが知られる。

A. アカホヤまたは鬼界-アカホヤ(Ah または K-Ah) 火山灰:

九州南方の硫黄島(鬼界ヶ島として俊寛の故事でも知られる)<sup>99)</sup>を火山壁の一部とする直径20kmの火山が供給源である。噴火は6300年前と測定されている。カーボン14法でもほとんど同じ年代値が得られた<sup>100)</sup>。火山灰は空中を飛んで散布され、北部を除いた日本全部を

覆っただけでなく、火砕流は海上を走り九州南部へ上陸して積もった。「アカホヤ」は宮崎県地方でのこの地層の呼び名である。

硫黄島の火山は今も硫黄を含むガスと強酸性の水を噴出し、流紋岩は成分が溶出して非晶質のケイ岩に変化している<sup>99)</sup>。

Ah 火山灰の時代は環境に恵まれ温暖で、縄文時代の貝塚が多く作られ、中部山岳地帯にも多くの住居遺跡が残された。この時代の海面の高まりによってできた浜名湖の底には、ガラスを含む Ah 火山灰が確認されている<sup>101)</sup>。Ah 火山灰はこのような状況から厳しい気候に移る時期に当たる。

アカホヤと同じく海上を火砕流として渡った例には8000年前の朝鮮北部の白頭山のものがあり、北海道を覆っている。

B. 始良・丹沢 (あいら・たんざわ, AT または A Tn) 火山灰:

鹿児島市の前面の湾 (錦江湾) を火口とした火山 (「始良火山」) が給源である (図 22)。始良はその地域の地



図 22 桜島中腹から錦江湾を隔てて鹿児島市を望む。対岸の市街の背後がシラス台地である。

名、「丹沢」はこの火山灰層が始め関東地方で気付かれ、丹沢山系を給源と考えて「丹沢パミス (軽石)」と呼んだことによる。21000年くらい前 (測定・比較の方法や再検討により 24500年前位までの値<sup>65)</sup>が報告されている。) の噴火であり、日本全部を覆っている。縄文時代に入る直前の先土器時代の指標になる。典型的な酸性溶岩の水蒸気爆発で、特に巨大なものであった。少なくとも

もその近傍の住民と植物環境に壊滅的影響を与えたと考えられる。各地の遺跡の資料館で地層の断面を示し、AT 層を見せていることがある (図 23<sup>102)</sup>)。

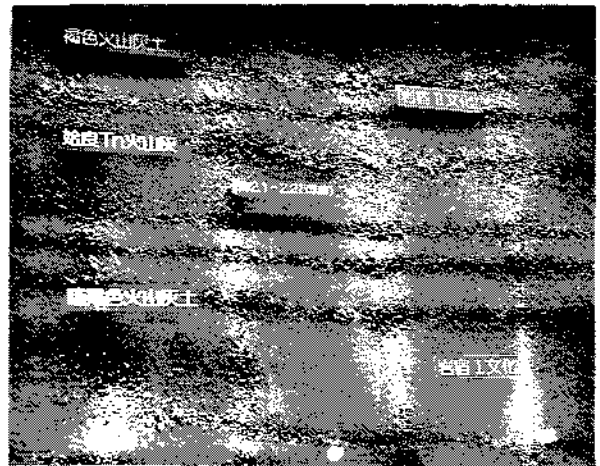


図 23 岩宿遺跡の火山灰層序の断面

この時代は旧石器時代の最終時期であり、石器の形式の遷移が速かったので、AT 火山灰は石器形式の編年と実年代決定に有効である。

桜島火山は始良火山の火口壁付近での噴火に相当する。鹿児島市周辺の「シラス」台地は始良火山の火山灰でできている (図 24)。シラス台地は雨期に崖崩れを起こし



図 24 シラス台地の砂取り場

やすいので、コンクリート工事による対策が実行されているが、災害は絶えない。

桜島火山からの「薩摩火山灰」は付近の約 1.1 万年前の時代の日印に使われる<sup>103)</sup>。

鹿児島県北部でも地層断面には灰、火砕流の重なりが見える(図25)。

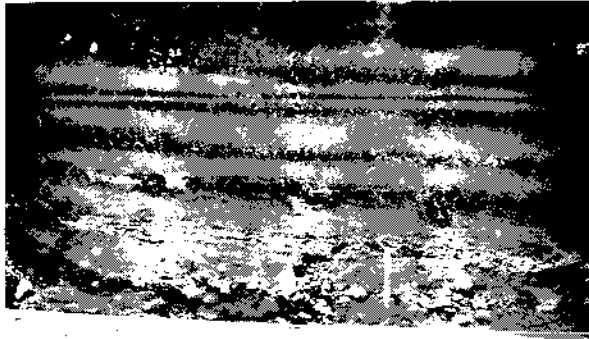


図25 川内市での地層の一断面。軽石・火山灰の層を示す。

丹沢火山灰が関東地方で気付かれた後、給源を探して遂に始良火山に辿りつき、広域火山灰であることを突き止めた経過が、町田教授により記された<sup>104)</sup>。また日本全国の火山灰の分布状態が「火山灰アトラス」としてまとめられている<sup>105)</sup>。

#### C. 阿蘇第4火山灰(Aso-4)：

阿蘇火山を給源として日本全部を覆う、噴火は約7万年前とされる。この年代はその上下の地層中の黒曜石の年代から推算された<sup>106)</sup>。

#### D. その他

以上の他に考古学に活用されている火山灰層は、東北地方の脊梁山脈からのもの(日本三景の一つ松島の地形は火山灰起源の地層の浸食による)、北海道南部の諸火山からのもの、関東地方北部の赤城、榛名、浅間火山からのもの、南九州の桜島・開聞岳からのものなどがある。関東地方南部は広域火山灰に加えて箱根(40万年前から)、富上(10万年前から)の火山灰も加わり長い年代にわたり厚い層を作っているため、火山灰層の重なりの特徴的地域とされている。

火山灰層の研究と同定が古い年代まで進み、10万ないし100万年前の時期に近畿・関東両地域を覆う広域火山灰層があることに気付かれ始めた<sup>107)</sup>。

火山の付近だけに局地的に分布するものでも、年代測定には広域火山灰と同様に利用できる。火山灰層は年代

と共に風化してゆくの、各層を明瞭に区別はできなくなる。既知の層からガラスを洗い出して電子線マイクロプローブ法やICP 炎光法で分析してデータを蓄積しておく、未知の層からのガラスを分析して、どの火山灰層と同じかを知ることができる。

広域火山灰の十数個の成分を分析すると、火山灰相互の区別だけでなく、噴火の各回の区別もできることがわかった<sup>108)</sup>。

近畿地方での分別のためのデータが発表されている。分析された元素のうちNa, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Feだけでほぼ十分と見られた<sup>109)</sup>。多摩丘陵でもAT、阿蘇-4を含む火山灰のデータが発表された<sup>110)</sup>。

## 9.2 火山灰層から得られた知見

火山灰を利用した研究とそれによって得られた重要な知見は数えきれないので、ここでは少数例だけを記しておく。

AT火山灰で日本全国の2万年前の時期とその地層が明らかになった。この時期に限定しての日本全国の石器文化が互いに比較された。AT以前には地方色が強くなかったのに対して、以後地域差が明瞭になった<sup>111)</sup>。

関東平野では、AT期以前の石器用石材が在地産で多種類であったのに対し、以後は黒曜石の使用率が大きくなった。AT期に社会あるいは住民間の関係が密になり、運搬・交換が頻繁になったのであろう<sup>112)</sup>。

岩宿遺跡地点では第一、第二文化層(前記)の間がAT層であることが判明した<sup>113),102)</sup>(図23)。

東京都多摩ニュータウンの旧石器時代遺跡群の研究において、火山灰層の保存が悪かった。しかしAT層が見付かって、付近の保存が良い立川ローム層・武蔵野層などとの対応がつけられた。この遺跡(約3万年以降)やここで火を使用した年代(14000年前)の確定に有効であった<sup>114)</sup>。

目加田市(鹿児島県)の遺跡で定住したと見られる住居が見付かった。桜島の火砕流により約1.2万年前とされ、定住開始の年代が従来の定説よりも遡った<sup>115)</sup>。

Ah火山灰はその前後の間で縄文土器の形式が違って、ここが縄文時代早期、前期の区分に当たっている。100km圏まで動植物が全滅した形跡があり、また東海地

方でさえこの時期に貝塚が廃絶した<sup>116)</sup>。

宮城県では10万年を超えて古い遺跡が次々と確認されている。この地域でもAT、阿蘇一第4、御岳第一(30万年前降下)など広域火山灰層が見付けだされ、近い給源からの層とともに年代決定に役立っている。火山灰層の重なり中に火山起源でない石の石器があることは、人為があったことの証拠を認め易かった<sup>117)</sup>。

高森遺跡では50万年前の石器の出土が確認された。ここでは8万年前までの層はF.T.法で、それ以前は熱ルミネッセンス法、電子スピン共鳴(ESR)法、古磁気法(いずれも本稿では言及しない)の測定を若い年代の方から積み上げて年代を決めた<sup>117)</sup>。現在の日本では此処がもっとも古い年代の遺跡である。

ジャワ原人が出土した地層の年代が日本・インドネシアの共同で研究された。88の層が識別され、古磁気法により原人の層は90ないし97万年前と判断された<sup>118)</sup>。

時代に関係なく、火山作用で埋没した遺跡は後世の農耕・居住によって災害当時の地表面が破壊されることなしに、また有機物は炭化して、残ることが多いので、環境と生活の復元に役立ち、「東洋のポンペイ」と例えられる。関東北部では榛名・赤城の火砕流や火山灰に埋もれて保存された水田・住居跡・墓地またはこれらのセット(三原田遺跡・縄文時代、中筋遺跡・古墳時代、日高遺跡・古墳時代直前、いずれも群馬県)が幾つも掘り出された。平安時代の例もある<sup>119)</sup>。江戸時代、富士宝永山噴火(1707年)とそれによる大災害の状況は新田次郎氏の小説「怒る富士」に描かれているが、江戸での宝永火山灰の廃棄跡が芝公園遺跡で認められた<sup>119)</sup>。

縄文期の村落は、移動する狩猟採集民という従来の考えの再検討を促した。

## 10 鉛の同位体比の測定<sup>120)</sup>

普通の元素では実用上、同位元素の存在比(同位体比)は地上いずれの地域でも一定である。しかし放射性元素とその娘元素が関連する場合は例外で、精度を極端に高めた測定では同位体比の変動を検出でき、重要な情報を与えることが多い。

カーボン14法やカリウム・アルゴン法はこのことを利用している。またウラニウムの自然集積に原因する天

然の原子炉現象によって<sup>235</sup>Uが減少した例も知られている。

鉛にはウラン・トリウムが放射性崩壊して最後に辿りつく同位元素がある。鉛は時に少量の放射性元素を含み、ハンダ合金になって使われたとき半導体素子にソフトウェアを起こしうるので、材質に注意が払われる。

鉛の同位体比には、鉱床があった地域のウラン・トリウム・鉛の存在量と鉛が地殻から洗い出されて鉱床を形成した時期とによって、差が生ずる(図26)。この事

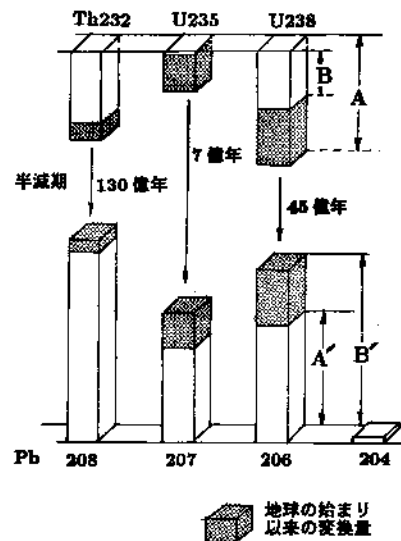


図26 ウラン・トリウムから鉛への変換の説明図

A, A': 地球誕生時の存在量

B, B': 現在の存在量

実を鉱床形成年代の決定に利用することは、原理的には可能であるが誤差が大きいとされた<sup>121)</sup>。

### 10.1 考古学への応用

米国コーニングガラス美術館のブリルは、鉛同位体比を鉛を含む遺物の原料産地推定に使うことを考案した。その背景には、メソポタミヤの釉薬、中国や日本の古代ガラスと青銅器に鉛が含まれていることである。

始めにギリシャ・エジプト・トルコ・イギリス・スペインなどの鉛鉱山の鉱石の測定をしたところ、国により同位体比がはっきりと異なり、同位体比による原料産地の同定が可能と考えられた<sup>122)</sup>。この方法は鉛を原料・添加物として作られた製品だけでなく、不純物として鉛を含むものにも適用できる。考古遺物としてはガラス以

外にも青銅・銅・銀製品がこれに当たる。一つの鉱石から鉛・銅・銀が吹き分けられた場合には、いずれの鉛同位体比も同じであると期待できる。

同位体比は普通の化学反応によっては変化しないので、ガラスの表面風化物や金属の錆を測定しても目的を達せられる。現在では青銅製品の錆を使った測定例が多い。

この方法は、「今までに実用化されたのはガラスのみ」<sup>123)</sup>と記された時期を経て、現在ではむしろ青銅製品で多くの実績を挙げている。日本ではガラスと青銅製品とが同じ地域から出土し、双方の結果を突き合わせて検討できることがある<sup>124)</sup>。

鉛鉱山のデータが多く集められると、国ごとに割然と分かれるという状況ではなくなる<sup>125)</sup> (図 27)。しかし

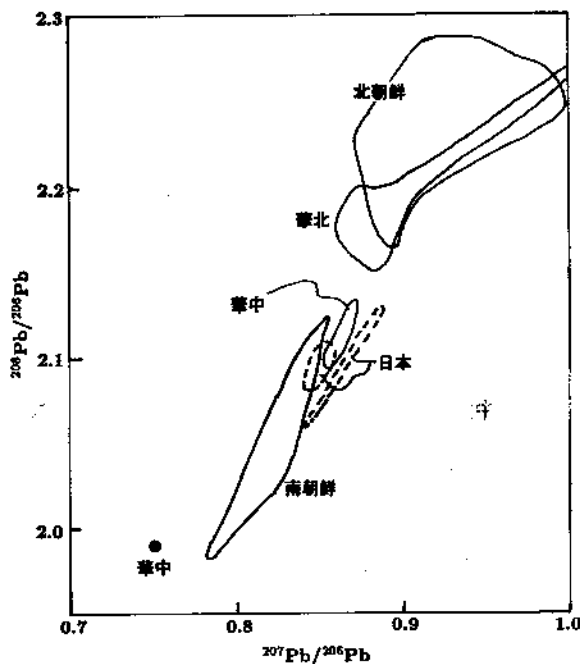


図 27 東アジアでの鉛鉱石の鉛同位体比の分布

考古遺物では現代に比べて採鉱された鉱山と加工工場の数が限られ、原料や製品として輸出する際にも人為的選択が働く<sup>126)</sup>ので、原料・遺物の生産地は年代ごとに比較的狭い範囲に収まり、原産地域の同定ができる。従ってそのために鉱山・考古遺物の両面からのデータの蓄積が必要である。

## 10.2 測定技術

測定には質量分析計を使うが、有効数字 3 桁を超える精度が必要なので、装置と操作の検討や複数研究機関の間での比較・検定で精度を確認する必要がある<sup>127)</sup>。

同位体比に影響する可能性がある要因には、たとえば分析器内でのイオン化率も含まれる。

空気中には鉛が浮遊しているので、濾過した空気雰囲気内で作業して汚染を防ぎ、水や試薬も精製し、鉛の混入量を 1ng 以下に抑えている。最多の混入源は水である<sup>128)</sup>。

日本では室蘭工業大学、東京国立文化財研究所で測定が実施されている。地質学への利用を目的に地質調査所で準備が進められ、予備的データが出ている<sup>128)</sup>。ここでは独自の工夫 (高周波誘導結合プラズマ加熱イオン源と複数イオン検出器) をした質量分析器<sup>129)</sup>を加えた二つの方式がそれぞれ研究された。地殻の進化の研究にウラン・鉛の同位体比を使う目的があるが、もう一つ火山灰ガラスのウラン・鉛の同位体比を測り、非平衡ウラン系列法 (本稿では触れない) で降下年代を計算して、遠隔地間での広域火山灰層の同定をすることも目的に挙げられている<sup>130)</sup>。またその目的から鉛含有量が ppm で測られる岩石も測定できるよう考慮された。岩石標準試料についての測定値が報告されている<sup>130),131)</sup>。

四種の同位体間の比で独立なものは三個である。考古学では<sup>206</sup>Pb を分母にしたもので先ず検討し、必要に応じて<sup>204</sup>Pb を分母としたものでの検討を加えるが、地質関係ではこれらの逆比を使うことがある。判断の誤りを防ぐために多角的に比較・検討することが重要である。

現代の問題への適用例としては、最近、西日本の空気中の鉛に中国起源のものがあるのが確認された。

## 10.3 ガラスと青銅の遺物

### 10.3.1 ガラスの起源<sup>132),133)</sup>

ガラスが単独に発明されたか、または青銅合金の鉱滓・セラミック (「ファイアンス」と呼ばれる材質であった) の釉薬・銅-ケイ酸塩系の顔料<sup>134)</sup>などから派生したかについては議論があるが、結論が出ていない<sup>135)</sup>。

### 10.3.2 オリент地域の古代ガラス

オリент地域（近東・中東・エジプトなど）がガラスの発源地と考えられ、単体のガラスとして知られる最も古いものは前 2300 年ごろのメソポタミヤで得られた。前 1600 年ごろからはエジプトでの製造が始まり、上記の両地域は互いに関連しながらガラス製造を続けていた。これら地域のガラスの一部に鉛ガラスがあり、またここから広く世界に伝わったガラス製品には「トンボ玉」（図 28）がある。

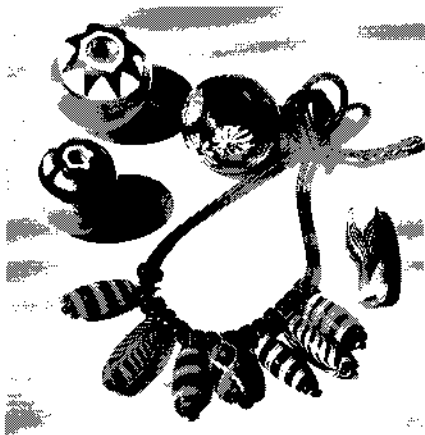


図 28 ガラスのとんぼ玉、日本製・ヴェネツィア製・その他

### 10.3.3 中国の古代ガラス

中国で知られる最古のガラス製品はトンボ玉である。鉛ガラス製であった。ついでバリウムを含む鉛ガラスが現れた。同時に江南地方でガラス璧<sup>136)</sup>（図 29）が作られ、かなり広い範囲の人々に所持されたようである。これは中原地方と違って材料の「玉」が入手し難かったからだと考えられる。材料はバリウムを含む鉛ガラスであった。ガラス璧は日本に移出され、弥生時代の墳墓から出土する（図 30）。

バリウムを含むガラスが中国産であることはほぼ確かと考えられるが、それより古いものが中国製かオリент起源かについては鉛同位体比を引用しての議論がある<sup>137)</sup>。

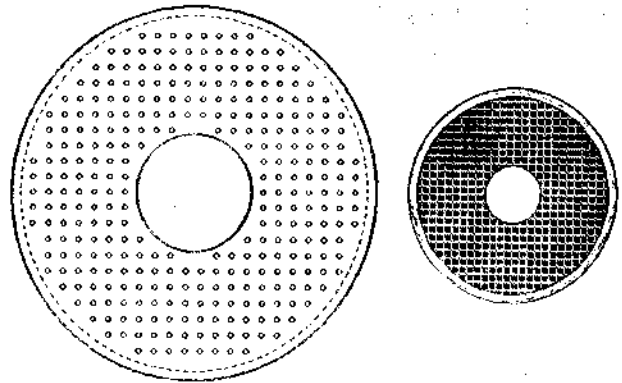


図 29 ガラス璧または玉璧の概念図

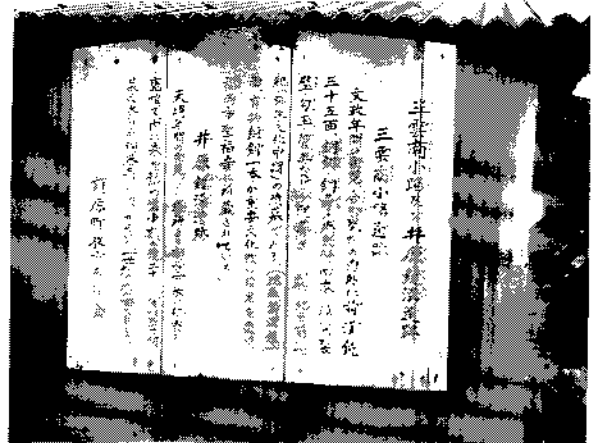


図 30 三雲遺跡（福岡県）説明 「文政年間 … 前漢鏡 35 面 … 玻璃製璧 … 弥生文化中期の墳墓である。」

### 10.3.4 中国の青銅製品

殷の時代に精巧な青銅器が作られた。知られる範囲で青銅鏡の最古のものは 4000 年前の青海省の古墓から<sup>138a)</sup>、ついで殷墟（殷王朝の遺跡）から出土した<sup>138b)</sup>。前漢の時代から多く作られるようになった。鏡は新・後漢・三国、さらに随・唐を経て清代まで中国の特徴的な製品であった。中国の鏡は弥生時代以後日本に将来された。日本出土の中国鏡は中国出土のものに比べて大型のものを含むことが特徴である。

青銅製の貨幣も長い時代に亘って使用された。

### 10.3.5 日本の古代ガラスと青銅製品

弥生時代

ガラス・青銅とも日本には弥生時代に大陸から移入さ

れたので、弥生時代及びそれ以後の遺跡からだけ出土する。ただしガラス玉に関しては例外として青森県で亀ヶ岡縄文遺跡で一個、是川仲居遺跡（同）で複数の出土があった<sup>139(a),c)</sup>。この地方は西日本が弥生期になっても縄文時代的な様相を残して居た（後出）からだと言われる。ガラスは小玉とガラス璧とが北九州地域の弥生王墓から見出された<sup>140)</sup>（図 30）。

青銅製品では、鏡・剣・矛が大陸から伝来した。剣・矛が祭儀用に大型化したものは日本でも鋳造され、石鑄型の発見が多い。鏡は形式の研究から、初期のものが朝鮮製、ついで前漢製であると結論された。

日本独特の青銅製品である銅鐸は、おそらく朝鮮伝来の馬鐸をヒントにして祭儀用に大型化したものと考えられ、日本で鋳造されたものである。石製・粘土製の鑄型が北九州地域・近畿地方で発見された。

青銅鋳造遺跡が同時にガラス製品（ガラス勾玉・小玉）の製作をしていたことが知られる（大阪・東奈良遺跡）。北九州地域での青銅・ガラス製造技術の詳細が最近明らかになり始めた（須玖遺跡群・春日市、図 31）。ここ



図 31 須玖遺跡群の一つ岡本遺跡の跡

でもガラスと青銅製品とが一つの遺跡で鋳造されていた<sup>141)</sup>。

古墳時代

古墳時代には鏡・剣・ガラス小玉が古墳の副葬品としてかなりの割合で出土する。ガラス小玉製作用鑄型の出土もある。

原材料

弥生ないし古墳時代には、青銅・ガラス製品とも大陸からの製品輸入または原材料の輸入によると考えられる<sup>122)-126)</sup>。

弥生時代に銅鐸に含まれた鉛は初期の小型のものは朝鮮型、その後は華北型の鉛であった<sup>142)</sup>。青銅鏡は弥生遺跡からのものは華北型、古墳からのものは華中地域型の鉛を含んでいる（図 32）。前漢では長安周辺で、後

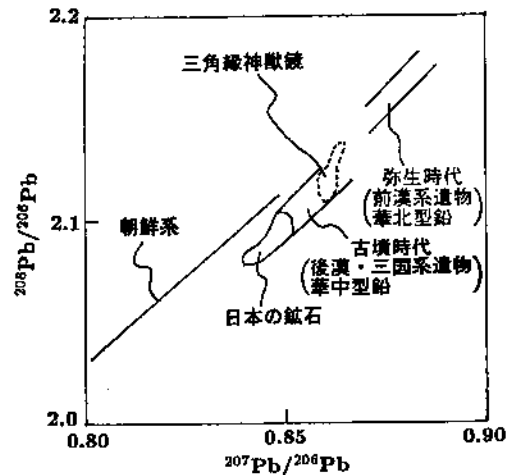


図 32 古代遺品の鉛同位体比

漢以後には三国時代を経て後世まで揚子江流域で鏡の製作が盛んになったことに対応すると考えられる。華北型の鉛と同じ同位体比の鉛を産出する鉱山が長安の 150km 圏に見付かった<sup>120,D)</sup>。

弥生・古墳両時代の遺跡から出土した鏡には、中国から輸入されたと思われるもの（舶載鏡）と青銅原料を中国から輸入して日本で鋳造したと考えられるもの（倣製鏡）とがある。舶載・倣製双方とも鉛は、弥生時代は華北型、古墳時代は華中型で、原料面では舶載・倣製の区別がつけられない<sup>143)</sup>。従って弥生時代の青銅原料の日中交流が確認できたし、技術・技術者についてもその可能性がある。一方で、鋳造地が中国か日本かで論争が続いている鏡（「三角縁神獸鏡」<sup>144)</sup>、図 32 参照）の場合には、従来「舶載」とされているものと「倣製」とされているものとは、鉛の同位体比が僅かに違うがいずれも華中型のものと判断され、「舶載」三角縁鏡も地金を移入して日本で鋳造した可能性が従来より高まった<sup>141)</sup>。

ガラスに関して言えばいずれの時代にも、アルカリケイ酸塩系ガラスと鉛ガラスとの双方が出土している。

前者でも少量含まれる鉛の同位体比を測ることができる<sup>122)</sup> (図 33)。ガラスの鉛同位体比は青銅器のそれに比

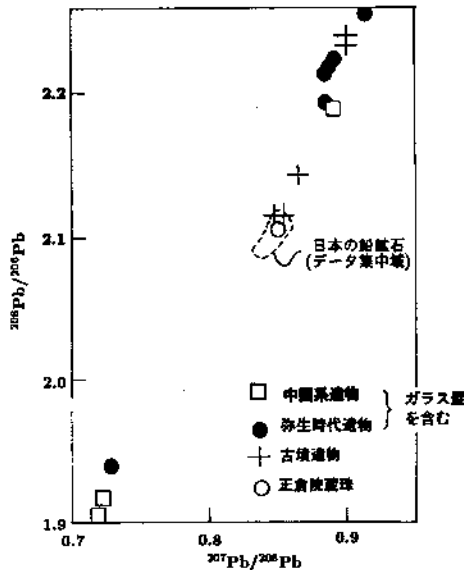


図 33 古代ガラス遺品の鉛同位体比

べて広い範囲に存在し、また同時代であっても広く散らばる傾向がある。

飛鳥京の銅遺品、奈良時代の正倉院ガラス遺品<sup>145)</sup>、和同開珎 (奈良時代、700 年頃から発行開始) の青銅銭とそれ以後の日本製青銅貨 (皇朝十二銭) が日本の鉛石から作られたことが認められている。従ってこの時代に日本での鉛・ガラス・青銅が国産化されたと推定された<sup>146)</sup>。

最近になって、弥生時代の矛が純度の高い鉛で作られており、鉛が対馬産であることが認められた<sup>147)</sup>。これは材質、鉛の原産地とも弥生遺品としては初めて知られた例である。

和同開珎の銀銭は、不純物として含まれる鉛が朝鮮型であった<sup>148)</sup>。これは長安の故地でも発掘されて、交流の証拠になった<sup>149)</sup>。

中国で鑄造された通貨は宋時代になっても引き続き華中型の鉛を含んでいた<sup>122a)</sup>。

## 11 生物起源の「ガラス」

動物や植物がケイ酸質の非晶体を作る例がある。これらは「植物ガラス」・「植物ケイ酸体」・「動物ケイ酸体」などと呼ばれたが、最近では「プラントオパール」・「アニマ

ルオパール」という表現が増して来たように見える。これらは常温の生物体液から析出して来たものであるから、成因に共通点がありしばしば X 線的に非晶質なものもある<sup>150)</sup>。「オパール」を使った方が誤解が少なくて良いと思う。

植物が山火事や野火で焼かれると、これらのケイ酸体と植物体中のカリ・リン酸とが溶融してガラスになる。これらは「ヘイ (株) グラス」・「ウッドグラス」と呼ばれる (後出)。

### 11.1 アニマルオパール

針状の小片が関東地方のローム層中に存在したり<sup>151)</sup>、同地方出土の陶器 (縄文土器、埼玉県比企郡の窯跡、武蔵国分寺跡) の胎土に含まれたりしている事が注意された<sup>152)</sup>。各種のものと比較した結果、海綿の体の中で餌を漉し取るための網を作る骨針であると結論された。

焼かれていないものは非晶質であり、陶器中のものはクリストバライトの X 線回折ピークがあるともないとも確言できかねるというくらいの状況であった。土に入っているのは海から風に吹かれて来たとか、昔暖かい海が関東平野の奥まで入り込んでいたからとか考えられよう。

### 11.2 プラントオパール<sup>153)</sup>・<sup>154a)</sup>

禾本科またはケイ酸植物と分類される植物は、シリカを取り込む性質の化合物を光合成して、土中からシリカを吸い上げ、細胞の中にケイ酸質の小片を形成して体型を保ち、また遺伝子の合成にもシリカを利用する<sup>155)</sup> (図 34)。これらは植物体の有機成分に比べて熱的にも化学的にも強くて、植物の死後も永く土中に残る。従って米・麦・粟・稗などの主食穀物・雑穀と芒などの雑草があったことの証拠になる<sup>156)</sup>。探したい地域・地層の上を掘上げて、慎重に洗い出してプラントオパールを集める<sup>157)</sup>。

各種プラントオパールの存在量・存在比を測るには、同サイズ (直径 40-50 $\mu$ m) のガラスビーズの既知量と混じた後で顕微鏡下で数える<sup>158)</sup>。

プラントオパールは種類によってそれぞれ形が違っているので、予め多くの植物のものを採集して形を確認しておく



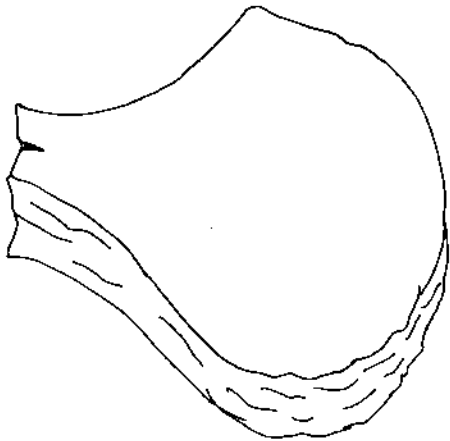


図 34 現生日本うるち米のプラント・オパール (概念図)

ことが必要である。米については総ての栽培国の協力を得てデータ造りが進んでいる<sup>159)</sup>。

プラントオパールによると、埋没した水田面の検出が容易であり、米作があったか、米か他の穀物か、インディカ米かジャポニカ米か、水田の使用期間中の米の全生産量はいくらであったか、米に比べての雑草の繁殖度はどうか、米が主であったか雑穀扱いであったか、などの判断ができる。水田でなく陸稲としての生産も検出できる。住居の屋根に使われた材料が判断できることもありうる。

一つの種類であっても部分により、また植物の若さによりプラントオパールの形が違うから、藁と稈の集積地の違い、本田と苗代の違いを判断できる<sup>154b)</sup>。

プラントオパールは古代・現代の稲の遺伝子 (DNA) の研究<sup>160)</sup>、炭化米、糊痕を持つ土器<sup>161)</sup>、花粉による考古学的・気候史的研究<sup>162)</sup>と相補って新しい研究分野を開いた。日本各地での水田遺跡の発掘が多くなり、稲作開始の時期についての定説が改められる例がでてきた。

穀殻をシリカの原料にしようという研究が続けられている<sup>163)</sup>。プラントオパールは他種の非晶質シリカに比べても化学反応性が大きく、塩化物やシランに転換して精製シリカを得るのに有利と考えられた<sup>155)</sup>。大米作地帯であるカリフォルニアでも同じ考えがあった。

### 11.3 稲の伝来と稲の道

米の原産地と稲作・水田農耕の日本への伝播経路は永く関心の的であった。原産地は野生種・栽培種・中間種・水稻/陸稲未分化種が混在する雲南・アッサム地方と考えられ、従って耕作もここを出発点として伝わったとされた。最近の、一部は日本・中国の共同で行われた研究によると、揚子江下流 (河姆渡遺跡、約 5000 年前) 域、洞庭湖周辺 (さらに 1000-2000 年古い) に雲南地方よりも古い水田農耕遺跡が見付かり、稲作の発生地について新しい問題が出てきた<sup>164)</sup>。

日本で見いだされた最古の稲作遺跡は、現在のところ唐津湾に近い菜畑 (縄文晩期) とされ、この地方から日本の他の地域へ広がったと考えられる<sup>154c)</sup> (図 35)。菜



図 35 菜畑遺跡の水田の復元。唐津湾末廬館 (考古博物館展示施設) 敷地内。

畑と対岸の朝鮮半島の対岸地域とでの耕作用石器の共通性が注意された<sup>165)</sup>。中国から九州北部への想定可能な経路は揚子江下流域を経過している (図 36、経路 1、2)<sup>154d), 166)</sup>。

プラントオパールの解析では現代の中国・日本で栽培される「温帯ジャポニカ (温帯での日照条件に適応して成長・開花・結実するものの意味)」の他に、「熱帯ジャポニカ」と言うべき品種が古代日本に多かったことが知られる。従って原産地から「温帯ジャポニカ」に改変されることなく、より直接的に日本へ伝わった経路 (図 36、経路 3) を無視できないと論じられた<sup>166)</sup>。DNA の研究でも同じ結論になっている<sup>160)</sup>が、いまのところ経路

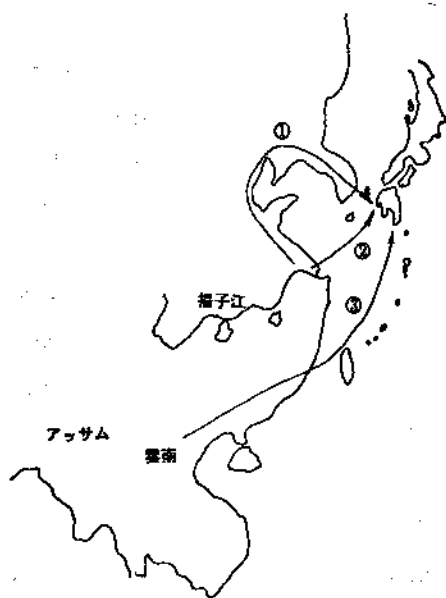


図 36 稲または稲作の想定される伝播経路

上での考古学的な証拠は未発見である。

平安時代と現代の水田で得られたプラントオパールの形の分布状況が比較された。平安時代のものは、形・寸法を表すパラメーターが広い範囲にばらつくのに対し、現代のものは近接した二つの点だけに集中する。これは近代の品種改良の結果であろうとした<sup>167)</sup>。さもありませんと感じられる。

傾斜面に畦を斜めにつけた稲作遺跡の例では、陸稲を栽培したもので、灌水の必要上畦を等高線に添ってでなくつけたと推定された<sup>168)</sup>。

縄文時代遺跡から得られた「パン（植物性の食料、井戸尻遺跡<sup>169)</sup>）」などの植物性遺物からプラントオパールを検出しようと試みたが、見いだせなかった<sup>170)</sup>。しかし熊本県の遺跡で縄文土器の胎土にプラントオパールが見いだされ、立地条件から陸稲であろうと論じられた<sup>171)</sup>。縄文晩期の土器中にプラントオパールを検出した例が増えており、稲作開始と弥生時代開始とを結びつける従来の考え方を変える必要があるともされている<sup>171)</sup>。4500年もの前の姫笹原遺跡（縄文中期、岡山県）の土器からのプラントオパールの発見が報じられた<sup>172)</sup>。

北九州地域に稲作が入ってから青森地方に伝播する（有史時代と考えられていた）には長い時間を要したとされていた。しかし最近では、水田跡の発見と稲のプラン

トオパールの確認（砂沢遺跡、弥生前期と垂柳遺跡、弥生中期）とから、稲作の伝播時間は短かくて弥生時代に水田が作られたことが判明した<sup>154c),173)</sup>。しかしこの地方では稲作を取り入れても縄文時代的な社会システムが遅くまで残り、また稲作不適地は放棄されたと判断される<sup>174)</sup>。亀ヶ岡式縄文土器（図 37）の形式の編年的変化に弥生土器の影響があった<sup>139b)</sup>という見方があり、また縄文晩期の土器紋様が弥生土器に残った<sup>173)</sup>。



図 37 亀ヶ岡式遮光眼鏡型土偶（概念図）

馬場塚 A 遺跡（宮城県）では 20 万年前までの地層でプラントオパールの存在量が計測された<sup>175)</sup>。大部分は笹であった。この地域での古い年代の遺跡の発掘に対応して、同様な研究が多く、多種類の植物が永年の間に生えていたことが知られた。火山灰層の深さ方向にプラントオパールが絶え間なく分布していれば、火山灰は時間をかけて降り積もったことを示し、そうでなければ短時間に積もったと推定される<sup>176)</sup>。

現在は乾燥地帯であるインダス文明の故地では 3600 年前に稲作があったと認められた<sup>153)</sup>。

【参考文献】

- 92) 文献 L): 町田 洋 日本第四紀学会講演要旨集 20 号 p.2 (1990)
- 93) 文献 M) p.33
- 94) 小野晃司 他 地質ニュース No.192 p.45 (昭 45)
- 95) 須藤俊男 「地質学の諸問題」 p.16 日本地質学会編 (1961)
- 96) 中島忠夫 New Glass 3 p.20 (1989)
- 97) セラミックス 26 p.257 ニュース欄 (1991)
- 98) 木村邦夫 他 昭和 55 年窯業協会年会予稿 11

- 99) 藤原宏志 地質ニュース No.472 口絵及び p.6 (1993) 12月
- 100) 阪上正信 文献 E) p.36
- 101) 池谷仙之 他 地質学論集 36号 p.129 (1990)
- 102) 岩宿遺跡遺構保護観察施設
- 103) 長野貞一 考古学ジャーナル No.242 p.18 (1985)
- 104) 文献 L) p.163
- 105) 町田 洋 他 火山灰アトラス 東京大学出版会
- 106) 町田 洋 他 火山 II-30 [2] p.49 (1985); 早川由紀夫 他 火山 II-36 [1] p.25 (1991)
- 107) 吉川清志 日本第四紀学会講演要旨集 20号 p.48 (1990)
- 108) 吉川清志 他 地質調査所月報 40 [1] p.1 (1989)
- 109) 西岡史郎 考古学と自然科学 18号 p.93 (1958); 日本第四紀学会講演要旨集 20号 p.150 (1990)
- 110) 館野 孝 考古学ジャーナル No.286 p.13 (1988)
- 111) 「約2万年前に遡る日本文化の地域性」特集 考古学ジャーナル No.370 (1994)
- 112) 金山喜昭 國學院大學考古資料館紀要 6輯 p.1 (1990)
- 113) 明治大学考古学博物館
- 114) 工藤敏久 他 考古学ジャーナル No.222 p.2 (1983)
- 115) 日加田市教育委員会
- 116) 小田静夫 日本第四紀学会講演要旨集 No.20 p.44 (1990)
- 117) 河合和信 科学朝日 p.28 (1994) 4月
- 118) 兵頭政幸 他 日本第四紀学会講演要旨集 No.18 p.128 (1988)
- 119) 町田 洋 文献 D) P.46
- 120) 文献 A)p.157; B)p.129; C)p.265; p.319; D)p.188; E)p.383
- 121) 文献 J) P.120
- 122) 山崎一雄 他 a) 日本化学会誌 [8] p.1112 (1978); b) 同 [6] p.821 (1975)
- 123) 山崎 雄 他 考古学雑誌 56 [1] p.85 (1970)
- 124) a) 馬淵久夫 他 考古学雑誌 75 [4] p.385 (1990) b) 柳田康雄 同前 p.405
- 125) 馬淵久夫 他 考古学雑誌 73 [2] p.199 (1987)
- 126) 馬淵久夫 他 考古学雑誌 68 [1] p.42 (1982)
- 127) 馬淵久夫 他 分析化学 30 [9] p.T87 (昭56)
- 128) 松本哲一 地質調査所月報 44 [11] p.649 (1993)
- 129) 平田岳史 地質ニュース No.469 p.7 (1993) 9月
- 130) 吉川清志 他 地質調査所月報 43 [3] p.189 (1992)
- 131) H.Shirahata 岩石鉱物鉱床学会誌 77 p.100 (1982)
- 132) 由水常雄 ガラスの道—形と技術の交渉史 徳間書店 (昭49)
- 133) D.B.Harden, A History of Technology Vol.2 p.311 Edited by C.Singer Clarendon (1958)
- 134) J.Riederer Naturwiss. 70 480 (1983)
- 135) 谷 一尚 世界ガラス美術全集 1 古代・中世 p.206 求龍堂 (1992)
- 136) 高 至喜 (小野山伸訳) Glass No.32 p.13 (平5)
- 137) 由水常雄 世界ガラス美術全集 4 中国・朝鮮 p.122 求龍堂 (1992)
- 138) a) 五島美術館 館蔵古鏡展: 漢・三国・六朝・隋・唐の古鏡 (1994) 6月; b) 青木 豊 和鏡の歴史 p.6 刀水書房 (1992)
- 139) 村越 潔 亀ヶ岡式土器 a) p.69, b) p.19 (昭58); c) 国立歴史民俗博物館 新収蔵品展: 花ひらいた亀ヶ岡文化 (平3)
- 140) 中山平次郎 考古学雑誌 11 [1] 213 (大9); 塩満 温 日本の遺跡発掘物語 4 弥生時代 II (西日本) p.237 森 浩・編 社会思想社 (1984)
- 141) 小田富士夫 他編 奴国の首都 須玖岡本遺跡 吉川弘文館 (1994)
- 142) 馬淵久夫 他 考古学雑誌 77 [4] 524 (1992)
- 143) 馬淵久夫 ミュージアム No.320 p.4 (1982); No.382 p.16 (1987)
- 144) 近藤喬一 三角縁神獸鏡 東京大学出版会 (1988); 馬淵久夫 他 辰馬考古資料館考古学研究紀要 No.2 p.19 (1991); 樋口隆康 他 謎の鏡 同朋舎出版 (1990); 樋口隆康 三角縁神獸鏡綜覧 新潮社 (平4); 王仲殊 三角縁神獸鏡 学生社 (1992); 山崎 雄, 馬淵久夫他 前掲 三角縁神獸鏡綜覧 p.239
- 145) 文献 C) p.265
- 146) 文献 D) p.187
- 147) 平尾良光 他 ミュージアム No.509 p.26 (1993) 8月
- 148) 藤井一二 和同開珎 p.183 (1991) 中公新書
- 149) 「シルクロードの都・長安の秘宝」展図録 天津市立歴史博物館, セゾン美術館 (1992); 「長安の秘宝と万里の長城」展 古代オリエント博物館 (1994)
- 150) J.B.Jones Naturwiss. 204 p.940 (1954)
- 151) 板橋区教育委員会 武蔵野の生い立ち p.15 (昭56)
- 152) 宇津川 徹 考古学ジャーナル No.181 p.22 (1980); No.184 p.14 (1980)
- 153) 藤原宏志 他 文献 D)p.156; E)p.214
- 154) 上薬善通 水田の考古学 a)p.32 b)p.120 c)p.112
- 155) 柳嶋喜昭 セラミックス 28 [1] p.7 (1993)
- 156) 古崎昌 考古学ジャーナル No.355 p.2 (1992)

157) 梶坂恭代 考古学ジャーナル No.355 p.32 (1992); 三浦丰介 同 p.29  
 158) 藤原宏志 考古学ジャーナル No.222 p.2 (1984)  
 159) 藤原宏志 考古学ジャーナル No.337 p.36 (1991)  
 160) 柏原精一 科学朝日 p.74 (1990) 10月  
 161) 渡部忠世 稲の来た道 NHK ブックス (昭52)  
 162) 中村 純 数理科学 No.170 p.41 (1977); 文献 E) p.185; 安田喜憲 文献 E) p.103  
 163) 奥谷 猛 他 ニュー・セラミックス 5 [9] 35 (1992)  
 164) 藤原宏志 科学朝日 p.12 (1993) 1月  
 165) 石川日出志 季刊考古学 No.35 p.34 (1991)  
 166) 佐藤洋一郎 考古学ジャーナル No.348 p.26 (1992)

167) 藤原宏志 他 考古学雑誌 75 [3] p.93 (1990)  
 168) 藤原宏志 他 考古学と自然科学 18号 p.111 (1985)  
 169) 「井戸尻」 第6集 富士見町教育委員会 (昭63)  
 170) 松谷暁子 考古学ジャーナル No.192 p.18 (1981)  
 171) 藤原宏志 考古学ジャーナル No.337 p.36 (1991)  
 172) ノートルダム清心女子大 (1994) 3月  
 173) 遠藤正夫 考古学ジャーナル No.273 p.4 (1987)  
 174) 「みちのくの弥生時代」 展覧録 大阪府弥生文化博物館 (1993)  
 175) 柳沢和明 他 考古学ジャーナル No.270 p.5 (1986)  
 176) 佐瀬 隆 第四紀研究 19 [2] 117 (1980)

## 図書案内

### 申し込み

(株) ティー・アイ・シー販売部宛  
 〒530 大阪市北区天満 2-1-20  
 (天満松茂ビル) TEL.(06)352-2704  
 FAX(06)351-3044

作製から応用まで

### 誘電体セラミックス材料

B5版、400頁 定価23,000円

#### ■誘電体材料の作製法から応用までを詳述

ロッシェル塩、燐酸カリにつづく強誘電材料として、BaTiO<sub>3</sub>、PZTに代表される材料が発見されて、40年余りが経過しました。これらの材料は、コンデンサ、フィルター、振動子等の機能電子部品として家庭用電器、通信機器、情報処理機器等に使用され、半導体産業と同様の一大産業を形成しています。

近年、電子機器等の高性能、小型化は、増々進み、それらの機器を構成する電子部品の小型・軽量化は凄まじい勢いで進んでおり、これらの要求に答えるべく、新しいセラミックスの合成法の開発や単結晶の育成技術、また薄膜技術の発達によって高性能なデバイスを実現しています。

#### (目次)

- I 総論
  - 1. 誘電体セラミックス総論
  - 2. 強誘電体セラミックスの電気光学的特性とその応用
- II 作製技術
  - 1. 新しい合成法と特性評価
  - 2. BaTiO<sub>3</sub>単結晶の作製技術
  - 3. ペロブスカイト型化合物の組成変動
  - 4. 強誘電体薄膜の作成プロセス
  - 5. Pb含有ペロブスカイト膜の作製と応用
  - 6. 水熱電気化学法による機能性複合酸化物薄膜の作製
- III 応用
  - 1. キャパシタ材料
  - 2. BaO-TiO<sub>2</sub>系マイクロ波誘電体
  - 3. ELパネル
  - 4. 高感度AEセンサの開発
  - 5. PTCサーミスタと粒界
  - 6. PLZTセラミックスとその応用
  - 7. 多孔性PLZTの温度、湿度変化に対する電気特性
  - 8. 強誘電体セラミックアクチュエータ
  - 9. 電圧アクチュエーターの圧差型トンネル顕微鏡への応用
  - 10. 圧電セラミックスのセンサへの応用
  - 11. オプトエレクトロニクス材料としての酸化物単結晶
  - 12. 強誘電体薄膜を用いた電子デバイス
  - 13. PbTiO<sub>3</sub>薄膜Siモノリシック超音波センサ
  - 14. 無電形赤外線センサの最新動向
  - 15. 強誘電体薄膜集積メモリ
  - 16. 強誘電体薄膜を用いた光導波型機能素子
  - 17. フォトリフレクティブ材料
  - 18. 波長変換材料
- IV 特許情報
  - 1. 誘電体セラミックス
  - 2. セラミックバリスタ
  - 3. セラミックアクチュエータ
  - 4. 強誘電体材料
  - 5. セラミックコンデンサ

## 地史・考古・天文学へのガラス解析技術の適用 (3)

Applications of characterization techniques for glass to geohistory, archeology and astronomy

岸井 貫 千葉工業大学 附属研究所 教授

Tōru Kishii

問合せ/ キシイ トオル 〒 168 東京都並区高井戸東 3-14-11 Tel (03)3329-3537

### 12 テクタイト・マイクロテクタイト・衝撃 ガラス<sup>177)-182)</sup>

#### 12.1 テクタイト

地球上で地域的に天然のガラス片が散在して見いだされる所がある。ガラスは外見上、融液が空气中を高速度で飛びながら固化してできたかのような形をしているので、ギリシャ語の「融ける」という言葉を借りて「テクタイト」と名付けられた(図 38)。化学組成の上では比較的均質であり、泡が皆無あるいは少ない。これらはその起源鉱床が見当たらないし、黒曜石ではないし(水含量が大変少ない)、溶岩起源の物質ではない(揮発性物質が少なく、シリカ含有量同一のものを比べるとアルカリが少、アルミナ・酸化マグネシウム多)し、地球の物質らしくない(金属の鉄・ニッケル小粒を含み、 $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ 比が高くて還元または真空雰囲気ですてきたらしい)し、隕石起源でないらしい(Ni/Fe比が隕石と違う・隕石中の岩石が塩基性であるのに対して酸性である・鉛同位体比をはじめ Rb・Sr の同位体比や元素比が地上の岩石に近い...)し、雷放電による溶融-ガラス化によるもの(フルギュライト)ではないし、月の火山活動で放出された溶岩が地球に落下した(当時は検証できない)ものかも知れないし、非常に広い範囲に分布す

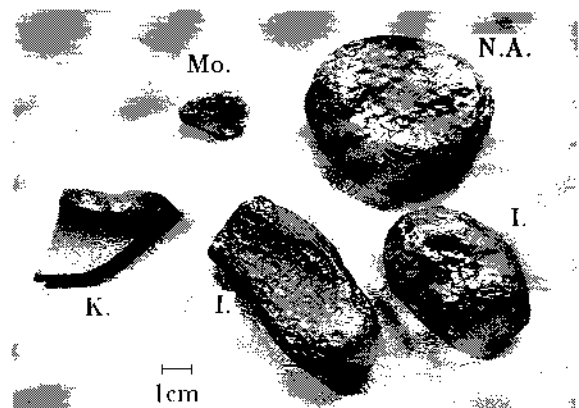


図 38 テクタイト

N.A.: 北アメリカテクタイト,  
Mo: モルダバイト, I: インドチャイナイト,  
K: 広東産.  
名前・産地はノミナルなものである。

るものがあるのに源泉地から空气中を高速度飛行して散布されるメカニズムが想像できないし、... 成因が不明で「謎のガラス」と形容された。その研究には「地質学・地質化学・天文学・鉱物学・航空流体力学が適用された」。近年の各種の解析技術(微量分析・微少部分分析・赤外分析・磁性測定・同位体比・年代測定...)の発達によっては議論は細部にわたり益々混乱していった。

従ってテクタイトはその特性の解析の殆どは成因・熱的履歴の究明を目的とし、また「新しい解析技術の適用」競争のような状況であった。解析技術の進歩に伴って結論が改まる例も多かった。

現在はかなりの程度に議論の整理がついて、一般向けの解説には「隕石が落下して地上の岩石を溶かし、放出してガラスにした。対応する隕石落下クレーター（隕石孔）が知られているものと、見付かっていないものがある。」<sup>183)</sup>と簡単に割り切って書けるようになった。これにはこの数十年間にアポロ計画での月岩石の入手・地上での隕石孔の探査と発見・ガラスと地層の年代測定・微量成分分析技術が貢献している。

隕石孔内部で岩石・隕石の融液がガラス化したものが「衝撃ガラス」である。さらに1960年代後半にテクタイトがその散布域にガラス小球（「マイクロテクタイト」）を作ることが知られた<sup>184)</sup>。

## 12.2 テクタイトと人類との関わり

テクタイトは中国唐の時代に知られていた<sup>185)</sup>。ヨーロッパでは、オーストリア・ウィンドルフ遺跡でクロマニオン人がナイフにしていたことが知られた（前29000年頃）。フィリッピンの新石器時代にもテクタイト石器が使われた（前8000~6000年）。現代のオーストラリアでは先住のアボリジニー人が護符として所持する例がある。

モルドバイト（後記）の産地はホヘミヤガラスの生産地に近く、人工のガラスと考えられていたこともあった。他のテクタイトについても同じことがあった<sup>186)</sup>。

テクタイトは地表で採集されるものがあるので、近世の産物ともされたが、化学分析からはシリカとアルミナの合計が85%ないし98%もあり、ジーメンスによる蓄熱式炉の発明以前には製造できなかったため、人工物でないと判断された<sup>187)</sup>。年代測定の技術が適用されると古い年代のものであることが解り、これからも人工説は成り立たなくなった。むしろ地層が乱されていない地点ではテクタイトの年代とその上下の地層の年代とは順々に重なっている（「整合的」）と認められた<sup>188)</sup>。

## 12.3 隕石孔<sup>178)</sup>と衝撃ガラス

隕石が落下すると地表に隕石孔を作る。この時に強い衝撃波が発生し、つぎに隕石の運動エネルギーが熱に変わって高温も発生する。この状況下で隕石と隕石孔内の岩石は熔融・気化し、融液が飛散する。融液が急冷されればガラスになる。隕石孔内部やその近くでガラスになったものは「衝撃ガラス」であり、遠くへ飛ばされたものがテクタイトであると考えられる。

隕石孔内には衝撃ガラス以外にも、衝撃により光学性が不均一になった結晶（石英→衝撃石英）、高圧によって変換されてできた結晶（石英→コーザイト・スティショバイト）と非晶質（ダイアブレクティクガラス、例：長石→マスケリナイト）がしばしば見出される。これらは衝撃ガラス内にも含まれる。

従って衝撃ガラスは、気泡と融け残りの鉱物粒と高圧変態相の鉱物粒を含み不均質で流紋が顕著である。

これに対してテクタイトには高圧鉱物は稀にしか見られず、逆に高温の融液からできたガラス（石英→石英ガラス=ルシャテリエライト）が認められるので、テクタイトが高温を経てできたことの証拠と見なされる。

最近では人工衛星を含めての地理探査技術の進歩により全地球的に多数（2500と記した例がある）の隕石孔が確認された。オーストラリア西半分には20個があり、その中で衝撃ガラスを持つヘンベリー隕石孔の見聞記が報告されている<sup>189)</sup>。タスマニア島の衝撃ガラス（ダーウィングラス、ダーウィン山の東斜面で得られる。）の産出状態の詳しい報告があるが、対応する隕石孔が認められたのはごく近年のことである<sup>190)~191)</sup>。

また隕石孔の新発見とその内部の衝撃ガラスの存在が報告されるのもしばしばである。ガラスが関連する隕石孔の多くは堆積岩（粘土・石英が主材料である）地域で、従って酸性地質であるが、玄武岩質の地域（インドーテカン高原）にあってガラスを包蔵する例もある<sup>192)</sup>。

## 12.4 衝撃ガラスとテクタイトの比較

テクタイトと衝撃ガラスには経験上表1のような差が認められる<sup>193)</sup>（表1）。

テクタイトと衝撃ガラスとの差は化学組成（特に揮発

表 1 衝撃ガラスとテクタイトとの特性比較

文献 193) に一部追加した。

	衝撃ガラス	テクタイト
化学成分	岩の融けたもの	揮発性成分が 少ない傾向
均質度	不均質	かなり均質
水	0.01%よりかなり多い	約0.01%
包含物	鉱物・岩・衝撃鉱物 高圧鉱物・Fe/Ni 球	ルシャテリエライト 稀にコーザイト・Fe/Ni 球
泡	多い	少ない
再結晶物	微晶ないし結晶質岩	なし
分布域	隕石孔内または 孔内と近傍	数百 km から数千 km に及ぶ

性に基づく)と均質度(または不均質度)と分布域の広さにあると言える。この差が生じてテクタイトができる理由は今もって議論が多く、従ってテクタイトは依然として「謎のガラス」である。この差は量的なものでもあるから、中間的な性質を持っていて時代によりまた人によりテクタイトに分類されたり、衝撃ガラスに分類されたりするガラスがある(例:ダーウインガラス・イルギツァイト<sup>194)</sup>など)。

テクタイトが作られた時間が短い筈なのに組成が均一でガス泡が良く取り除かれていること、組成が起源地の岩石に比べて高シリカ・高アルミナ・低アルカリ側に偏っていることと、超高速で飛び出して広い地域に撒布されたメカニズムの細部については問題が残っているように見える<sup>187)</sup>。超高温のためプラズマができ、凝縮してテクタイトとマイクロテクタイトになったとの考えもある<sup>193),195)</sup>。この時に、適したイオン半径を持つ元素が優先的に取り込まれたとも言う<sup>193)</sup>。隕石孔の現地の地質がさまざまであること、超高速・超高圧・超高温・大質量が関係する実験ができず推測によらなければならない

ことが最終的結論の妨げになっているのであろうか。

## 12.5 成因の研究史

早期にはテクタイトの月起源説が強かったように見える<sup>177)</sup>。

1961年頃にテクタイトと隕石孔との関係が知られた(後記)ので、1964年頃は成因の議論が最も錯綜した。月起源を説き、その前提でテクタイトの特性解明に努力する人が多かった一方で、月表面の物質の形成年代が古いと推定されていたことから、月起源の物質ではあり得ないとの主張もかなり強かった。その他に彗星が地球に衝突して高温ジェットを生じその中で分別・蒸発を経てテクタイトができた、ガラス質の隕石が落下した、など論旨が多様であった。

その後にルナ計画による月岩石の持ち帰りとサーベイヤー計画による月表面の遠隔的成分分析は、観察された組成が塩基性であったことから、テクタイトの地上起源説を強めることとなった。

アポロ計画で月岩石が集められている頃(1970年前後)、テクタイトと隕石孔に関するシンポジウムがそれぞれ開かれた。論文特集号の巻頭言は当時の学界の気分を良く表している:「…テクタイトが隕石の落下によるということが人体の同意を得た状況である。…しかし月起源説に固執する人も多い。…第三のグループもある。…今回の纏めが月岩石到着以前の研究の最終的な結論になるだろう…<sup>180)</sup>」,「…いろいろな議論があるので読者は健全な科学とドラマチックなアイロニーとを感ずるだろう…<sup>181)</sup>」。

テクタイトの研究と同時に、テクタイトと同じ組成のガラスを人工的に合成して、その熱的な性質、例えば高温度での粘性・蒸気圧・成分の蒸散速度と磁気的性質を測り、また空気中での飛行と加熱・流動・変形をシミュレーションするというように、多角的に研究されてもいた。

月岩石入手後について言えば、その研究はテクタイトの月起源説を支持しなかった。しかし月のまた採集されていない種類の岩石、例えば火山噴出岩や隕石の落下により放出された岩(テクタイトも含まれる)が起源だと主張は残っている。

「テクトライト」の性質が詳しく測られるにつれて分類が変わってきたり、隕石起源でないとの議論が出て来たりした例がある。分類が違えば実験・観察結果が同じでも結論が見掛け上違い得る。このような変遷があったため、テクトライトに関する報文を見るときには、その時期と著者が前提としている「テクトライト」のイメージと範囲に注意する必要がある。

アメリカとヨーロッパでは国内・地域内にテクトライトを産するので関心が深いようである (図 39)。テクトイ



図 39 テクトライトの展示 (ジュネーブ自然史博物館)  
ショウケースのガラスに産地を示す世界地図が鏡映している。

トのうちのあるものが超高速で空気中を飛行して空気力学的加熱・溶融・浸食作用 (アブレーション) を受けたような形をしている (図 40) ため、宇宙関連の研究機関でミサイル・宇宙船の飛行・大気圏再突入に関係があるとして研究対象になった時期がある。

テクトライトは F.T. 法 を適用し易い材料であったので、この方法の開発初期からサンプルに選ばれたし、衝撃ガラスとの年代比較も行われた。

### 12.6 マイクロテクトライト

マイクロテクトライトは宇宙塵 (後出) のうちのガラス質のものを指していた。これは収集される量が少なく、また石炭灰中のガラス球との区別に良い方法がなかったため、南極の氷層や海底の地層内の永年にわたる沈積試料を得ることが試みられた。約 30 年程前から、テク

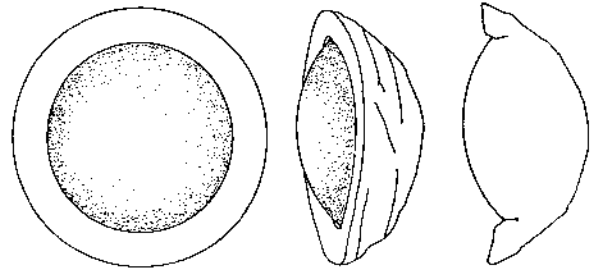


図 40 アブレーションを経たような形をしているオーストラライトの概念図  
左から背面図、側方やや後ろから見た図、軸を含む面による断面図

イトの撒布域である海の底からのボーリングコア・ピストンコア中にガラス球が見つけれ<sup>184)</sup>、「マイクロテクトライト」の名を受け継いでその研究に力が注がれた。直径 0.5mm 以下のガラス小球であり、特に海底のボーリングではその上下の地層とともにコアとして採集される。マイクロテクトライトが隕石落下に起因するという一方で、大隕石落下による中生代末の「大絶滅」説 (後記) と関連しての研究が多い。

マイクロテクトライトはテクトライトと生成年代が同じで、同時に撒布されたと考えられる。マイクロテクトライトの発見により、撒布されたガラス全重量の見積もりは数桁増え、テクトライトの成因と撒布メカニズム論に新しい問題を提出した。オーストリア・アジアテクトライトの撒布域での見積もりは、テクトライト  $10^5$ t、マイクロテクトライト  $10^7$ t である<sup>196a)</sup>。北アメリカテクトライト撒布域ではマイクロテクトライト  $10^9$ t と推算された<sup>197)</sup>。

日本ではマイクロテクトライトの産出は知られていない。最も近い産出地点は紀伊半島の南 600km の海底である。

最近でもホーン岬西方 1400km の海底でマイクロテクトライトが新しく見付かった。成分は玄武岩質で隕石の未融解物を含み、年代は 230 万年前、原隕石の大きさ  $0.5\text{km}\phi$  と推定された<sup>198)</sup>。

マイクロテクトライトの発見当時に、ヘイグラスではな



いかと検討された。外見・比重・屈折率では区別できない場合があったが、成分ではヘイグラスに比べてアルミナ多、リン・カリ少であって、はっきり差がある<sup>199),200)</sup>。ウッドグラスについても同じことが言える。

### 12.7 テクタイトと衝撃ガラスの産地

テクタイトと衝撃ガラスの種類・産地を図41・表2に示す。表2を次に補充しておく：

#### 1. オーストラリアーアジア (オーストラレイシア) テクタイト。

オーストラリア南半分からインドネシア・フィリッピン・インドシナ半島を経て中国南部とそれらに接する海域に産する。マイクロテクタイトを伴う。オーストラライト・ジャワイト・フィリッピナイト・インドチャイナイトなどに細分されることもある。撒布源は未発見である。隕石孔の直径を17km以上と推定して、重力分布・海面の高低(海軍衛星による観測)からベトナム東方175kmの所に孔があると論じられた<sup>201)</sup>。

#### 2. 北アメリカテクタイト。

米国東海岸(カナグ東岸の一部を含む)に分布する。細分してジョージアイト・テキサスベディアサイト・マーサズビニヤードテクタイトなどと名付けられる。マイクロテクタイトを伴う。撒布源は未発見である<sup>202)</sup>。

#### 3. モルダバイト。

中部ヨーロッパ産。ドイツ南部のリースケッセル(ケッセルニ釜・鍋・盆地、リース隕石孔とも)が撒布源。地層中からマイクロテクタイトを洗い出せる。

#### 4. 象牙海岸テクタイト。

ガーナ海岸と付近の海中で産する。隕石孔は水を溜めてボスムトゥウィ湖になっている。マイクロテクタイトを伴う。

#### 5. イルギツァイト。

アラル海の北方にある。衝撃ガラスとテクタイトとの中間的性質(例：含水量0.05%)を持つので、衝撃ガラスに分類されることもある。このサンプルの存在がテクタイトと衝撃ガラスとの関連性を確実にしたとの評価がある<sup>194)</sup>。

#### 6. アウエルールガラス。 モーリタニア産。

#### 7. ヘンベリーガラス。 中央オーストラリア産。

表2 テクタイトと衝撃ガラスの産地

	生成年代 (単位：百万年)
A. 放出源未発見のテクタイト	
1. オーストラリヤー	
アジアテクタイト (マイクロテクタイトを伴う)	0.7
2. 北アメリカテクタイト (マイクロテクタイトを伴う)	35
B. 隕石孔・衝撃ガラスと関連するテクタイト	
3. モルダバイト (リースケッセル、 衝撃ガラスはスウェバイト岩、 マイクロテクタイトを伴う)	15
4. 象牙海岸テクタイト (アシャンティ隕石孔 =ボスムトゥウィ湖 マイクロテクタイト ・スウェバイト岩を伴う)	1.3
5. イルギツァイト (ザマンシン隕石孔、 衝撃ガラスはザマンシナイト)	~1
C. 衝撃ガラス	
6. アウエルールガラス ( " 隕石孔)	4
7. ヘンベリーガラス ( " 隕石孔)	
8. ワバルガラス ( " 隕石孔)	
9. ダーウィンガラス (ダーウィン川近くの隕石孔)	0.7
10. リビヤ砂漠ガラス (成因に異論あり)	28

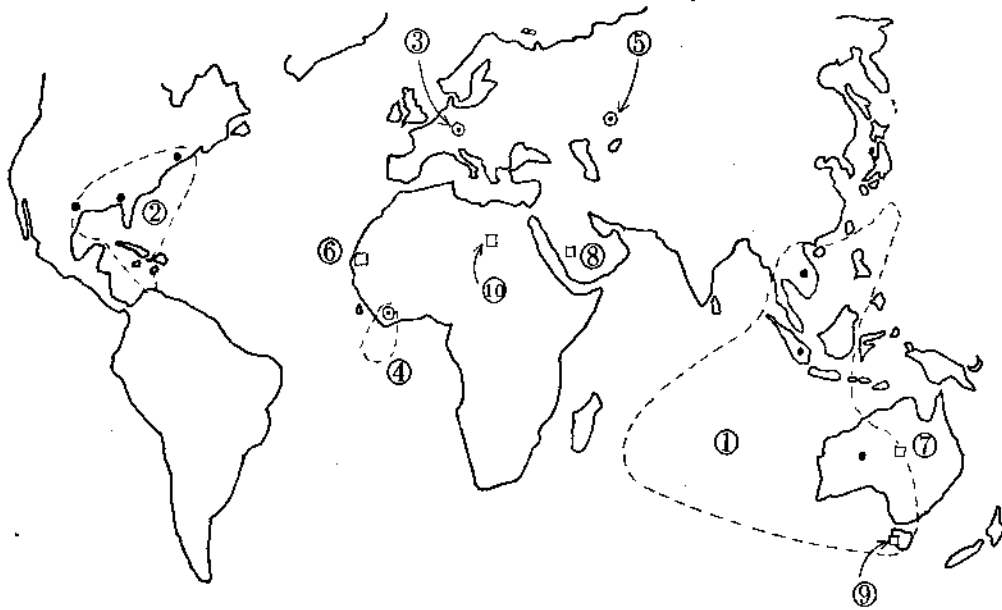


図 41 テクタイトと衝撃ガラスの産地 数字は表 2 と対応する。点線は随伴するマイクロテクタイトの撒布域を示す。

8. ワバルガラス。

シリカ 90%前後の組成である。アラビヤ半島西部産。

9. ダーウインガラス。

タスマニア島ダーウイン山周辺に産する。隕石孔は撒布域の東端で最近認められた。

10. リビヤ砂漠ガラス。

エジプト南西部産。シリカ 97%以上という組成である。テクタイトに似ているとし、近くの隕石孔の存在も報告されるが、また砂漠でのゾルーゲル過程でできたなど成因について詳細な議論が交わされた<sup>203),206)</sup>。

衝撃ガラスにはシリカ含有量が特に高いものがあり、石英ガラス質の隕石が落下したという議論がある<sup>196b)</sup>。

テクタイトは日本では産出しないが、インドチャイナイトとモルダバイトを鉱物標本として容易に入手できる。イルギツナイトも最近は見られる。アメリカ産のものは米国の大文台のショップで得られる。

12.8 隕石孔とテクタイトとの関係の確認史<sup>207)</sup>

リースケッセルはミュンヘンから北へモルダウ河（ドナウ河の上流）を越えて北岸へ移った地域にある。直径 20km 弱の盆地で、比高 200~300m の崖を周囲にめぐらし、中にはノルトリンガーの町がある。ここが隕石孔だと確認されたのはごく最近（1960 年頃）である。地質

的には基盤の変成岩上に中生代・第三紀の堆積岩が何層も積もっている。

地形の成因としては火山起源・水蒸気爆発説・氷河地形説が主であった。隕石説が出たのは 1900 年頃だが、当時は殆ど認められなかった。内部では衝撃ガラスに相当する「スウェーバイト」岩を産し、これを建築材にしようとの試みもあった。これはガラス塊を包含する岩で、火山灰と火山弾起源の凝灰岩だと考えられていた。

アリゾナのキャニオン-ディアプロ（ニバリンジャー）隕石孔（1.2kmφ、落下衝撃は TNT1.7Mt 相当）から隕石の破片が得られて隕石起源が確認されたのは 1900 年頃である（図 42）。1960 年頃にシューメーカー等はここでシリカの高圧鉱物相であるコーザイトを確認し、隕石孔であることを迫認した<sup>208a)</sup>。天然のコーザイトの初めての発見例であった。

彼らは次いでリースケッセルに同じ手法を適用してコーザイトを確認し、ここも隕石孔であることを初めて明らかにした<sup>208b)</sup>。

ついでキャニオン-ディアプロでシリカの更に高圧の相であるスティショバイトを発見した<sup>209)</sup>。「スティショバイト」の命名もこの時であった。ここでは更に固形のガラスと軽石の存在が知られ<sup>210)</sup>、ガラス化が当時の地下水面以下で起きたと推測される<sup>208c)</sup>。隕石落下時の衝

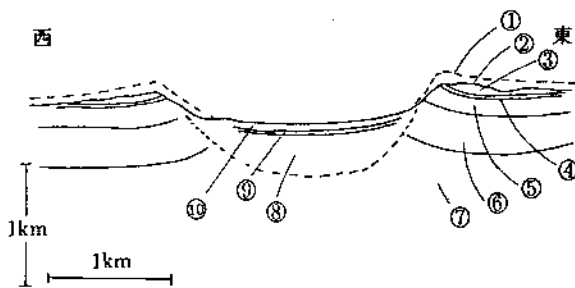


図 42 キャンニオンディプロ (バリンジャー) 隕石孔の構造<sup>208d)</sup>

- 1: 落下当時の地表面, 2: 現在の地表面,  
3: 放出物, 4~7: 砂岩, 8: 隕石物質と破碎岩,  
9: 孔壁からの落下物, 10: 最近の堆積物

撃上力過程もこの頃に解析された<sup>211)</sup>。

次いでスウェーバイトとモルダバイトの成分・年代の比較により両者の関連が確かめられた<sup>212)</sup>。同じ主旨の研究は最近にも発表された<sup>193), 213)</sup>。

アシャンティ隕石孔<sup>214)</sup>とヘンベリー隕石孔<sup>189), 215)</sup>についての詳しい研究が、隕石孔内のガラスと周辺の衝撃ガラス・テクタイトとの関連を明らかにして、テクタイトの地上起源説を強めた。これらはいわば広域撒布テクタイト研究のミニモデルの役割を果たしたことになる。

## 12.9 成分・微量成分の分析<sup>214)~217)</sup>

テクタイトと衝撃ガラスの主成分・微量成分を分析し、起源隕石孔付近や分布地域にある岩石の混合によって説明しようとする試みが多かった。大体の傾向としては衝撃ガラスについては説明に成功したが、テクタイトについてはどうしても不一致が残るといった結論が多かった。ガラスやセラミックスの調合のように多元連立式を立てて数学的に扱くと、1 原岩では成分の選択的蒸散を仮定してもテクタイトに合わないが、2 原岩以上ならば合わせられるという結論を出したことがある<sup>216)</sup>。

全体としてテクタイトと火山岩とは合致しないが、風化・分別を経た堆積岩 (砂岩・頁岩) とはかなり良く合う<sup>217), 218)</sup>。

## 12.10 年代測定

フライシャー等は世界各地産のテクタイト・衝撃ガラス・黒曜石の形成年代を F.T. 法で測定した<sup>219)</sup>。F.T. 法の初期の時代であったので、ウラン 235 の崩壊定数をカリウム-アルゴン法の測定値と一致するように決めた。結果としては地域毎の黒曜石とテクタイトの年代は合致しないが、テクタイトと衝撃ガラスとは同じ年代であった。また、オーストラリア-アジアテクタイト群や北アメリカテクタイト群はそれぞれ広い範囲で産するが、各群の中では一定年代であった。このように広いがしかし限定されてもいる産出地域での同時形成を彼らは月起源の証明と考えた。なおこの時に北アメリカテクタイトはリビヤ砂漠ガラスとも同年代と測定し、これら双方を含めた撒布域の広さに注目したが、この結果は後に改められた<sup>220)</sup>。

カリウム-アルゴン法で年代を測定する時、テクタイトの形成中に大気中のアルゴンを取り込んでいると誤差を生ずる。これが次のように検討された：オーストラリア-アジア及び北アメリカテクタイトが広い撒布域にもかかわらずそれぞれ一定の年代を示すので、誤差が同等に導入されたという考えにくい偶然の事情を仮定する必要があるから、誤差はないと推論された。

テクタイト中の泡には 40mmHg までのガスが含まれるが、その中の  $N_2 \cdot Ar \cdot Kr \cdot Xe$  の含有比や同位体比は地球大気と等しいと認められた<sup>221)</sup>。

オーストラリア-アジアテクタイトの中での年代の差を F.T. 法で検出しようとする試みがあった。サンプルを原子炉中に並べて照射するなどの注意をして、10 万年強の差を検出した<sup>222)</sup>。しかしボーリングコア中のマイクロテクタイトの観察からは一つの層としての分布しか認められなかった<sup>223)</sup>。

オーストラリアには飛行時にアブレーションで溶融してできたような鏢 (図 40) を持つものが多い。鏢と本体の部分とを別々に年代測定すると同じ値である。テクタイトが形成され固化してから時間を措かずに「アブレーション」が起きたと想像される<sup>179)</sup>。二つの部分の間にくらかの時間があったとの報告もある<sup>225)</sup>。

マイクロテクタイトでも、アルゴン放出にレーザー加

熱を使うなどの工夫でカリウム-アルゴン法 ( $^{40}\text{K}/^{39}\text{Ar}$ 法) が使える<sup>226)</sup>し、F.T.法も適用できる。さらにコアとして得られると古磁気法や海生生物化石からの年代評価ができるし、逆に隕石落下と生物絶滅との因果関係の有無を調べることができる。

35m.y. (1m.y.=Ma=100 万年) 前の北アメリカテクタイト随伴マイクロテクタイトを使い、隕石落下と生物絶滅との関連性が調査された。この時期の「大絶滅」は認められないという研究<sup>227)</sup>と、时期的にずれて、ただし絶滅の方が先に生じたという研究<sup>228)</sup>とがある。この時期は中生代末の「大絶滅」から 3000 万年後であり、「大絶滅 3000 万年周期説」との関連で関心がもたれた。

地磁気極の逆転は地質時代に度々起きている。地磁気为零に近い時期に地表の宇宙線束増加・生物絶滅があるかも知れない。この時期とテクタイトの撒布時期との関連も調べられた。撒布とともに逆転が始まっていれば、隕石→地磁気逆転開始→地磁気零の時期→生物絶滅の因果関係が確からしくなる。

オーストラリア-アジアテクタイトの生成時期と地磁気逆転期は合致していた<sup>229)</sup>。象牙海岸マイクロテクタイトの撒布時期は磁極反転の最中に当たっていた。従ってこの隕石落下が磁極反転を引き起こしたのではないと結論された<sup>230)</sup>。

### 12.11 鉛同位体比<sup>214b),231)</sup>

この比は原岩石が地球深部の物質系から分かれて地表付近のものになった時期と関連する。テクタイト中の鉛同位体比は地球上の岩石のそれに近いと測定され、地球上起源が説かれた。また月岩石の生成年代が地球の生成年代に近くて古い (45 億年) と推定されていたので、その入手以前にテクタイトが月岩石起源ではないと結論された。月岩石入手後の測定では、月岩石の年代は以前の想定より数億年若いことが判明した<sup>232)</sup>が、結論を変える必要はなかった。

### 12.12 ストロンチウム・ルビジウム・ネオジウム同位体比<sup>233)-238)</sup>

これらは放射性元素と関連していて、鉛と同じような意味で原岩石の生成年代と関連している。テクタイト・

衝撃ガラス形成中にこれら元素の選択的蒸発・発散・取り込みがないとすれば、原岩石の日印及び原岩石のあり場所推定の手がかりになる。テクタイト・衝撃ガラスと放出源地域の岩石との間に類似があると認められた。またこの測定からオーストラリア-アジアテクタイトの隕石孔の位置を推測した例がある<sup>238)</sup>。

### 12.13 鉄族・親鉄元素の挙動<sup>239),240)</sup>

地球では鉄と親和性の強い元素 (Fe・Ni・Co と白金族) は地球生成以来の永い分別作用で鉄と共に地球深部に落ち込んでいて、表面の地殻では存在量も鉄に比較しての比含有量も地球生成時の値より小さくなっている。隕石はこのような分別を経ていないかまたは僅かしか経ていないので、鉄質隕石・石鉄質隕石は勿論、石質隕石でもこれらの元素に富んでいる。

この点についての多くの検討では、テクタイトの Ni/Fe 比は地上性物質と近いが、衝撃ガラスではこの比が大きく、隕石・地球深部起源岩石に近いという結論が出されている<sup>239)</sup>。衝撃ガラスには隕石物質が多く取り込まれたが、テクタイトは大部分が地上の岩石からできたと解釈されよう。図 43<sup>240)</sup>では隕石・地球深部起源の岩・火山岩・堆積岩とテクタイト・衝撃ガラスとを比べている。テクタイトは地上性系列、衝撃ガラスは隕石系列上にそれぞれ打点される。

隕石が石質か鉄質かでこのような相関が明瞭か不明瞭かの差ができると論じられた<sup>241)</sup>。

テクタイトや衝撃ガラスには Fe・Ni の金属小球がしばしば見いだされる。これは鉄隕石のものがこれらに移ったとされて、隕石起源説の論拠になったが、最近では岩石中の酸化鉄が衝突時の高温環境や雰囲気のために還元されると論じられる<sup>242)</sup>。

オスミウム・レニウムも親鉄元素である。その含有量を中性子放射化法で測り、テクタイトの原岩が地上起源であると結論された<sup>243)</sup>。

### 12.14 酸素同位体比<sup>190),193),214b),236),237)</sup>

岩石の酸素同位体比は形成時の温度の高 (例: 火山岩) 低 (例: 水中での析出・沈積) による。その後に酸素の交換・解離・再結合過程を経なければ変化がない。テク

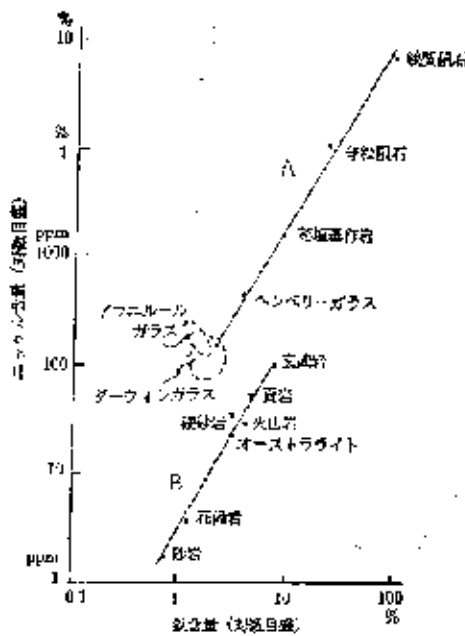


図 43 各種岩石・隕石・ガラスの Ni/Fe 比の比較<sup>240)</sup>

- A: 地球深部起源・隕石起源物質の系列
- B: 地表性物質の系列

タイト形成時に比が変化しないとすれば、原材料岩石の口印になる。この比の測定から、テクタイトと衝撃ガラスの起源岩が同じであることを結論した例がある<sup>240)</sup>。また岩石との蒸が認められた場合には、隕石物質の混入によると説明された。

12.15. 衝撃鉱物・高压変成ガラスの研究

高压または衝撃によってケイ酸塩鉱物がガラス化（アモルファス化・非晶質化）する場合がある。これは「ダイヤモンドプレクティクガラス」と呼ばれる。「せりやりに捻られた」というニュアンスの言葉である。ガラスになると結晶の時期に示していた複屈折は無くなる。

衝撃鉱物生成の条件は特に石英（水晶をサンプルに使う）について、ガラス生成について石英と長石について研究された。衝撃実験では衝撃時の温度・圧力の見積もりが難しく、圧力だけによるガラス化が溶融過程があったかの判断に不確かさが残る。

石英をダイヤモンドアンビル間で常温で静的に圧縮しつつシンクロトロン放射光で X 線解析した実験では、20GPa でコーザイトが、30GPa (1GPa=1 万気圧) でステイショバイトがそれぞれ非晶質になる<sup>244)</sup>。アルミ

ニウム弾丸を使って衝撃実験をすると 36GPa でコーザイトが得られる<sup>245)</sup>。高压の加時間が長いともっと低圧（例：2GPa）でコーザイト化するとの評価がある<sup>208a)</sup>。隕石落下では高压が長く続く部分があると解析され<sup>211)</sup>、高圧鉱物への進み・遷移を促すのに有利だとされた。

衝撃による石英のガラス化を調べた例では、30GPa でガラス化がはじまり、50GPa で完全にガラス化する。ソーダ長石-珩長石固溶体系ではガラス化開始 25GPa、完全ガラス化は 30~55GPa であった<sup>246)</sup>。

雲母類・角閃石・タルクを衝撃した実験では、30~60GPa でガラス化した。あるものは熱的に溶融してガラス化したと判断された。振動成分が細い経路を作って脱出したことが観察された<sup>247)</sup>。

12.16 衝撃プラズマの実験

金属・プラスチック弾丸を用いたの衝撃実験が行われた。63m/秒の条件で 450GPa のプラズマが作られた<sup>195)</sup>。隕石落下過程の計算ではこの 5 倍以上の速度を仮定する。

12.17 マイクロテクタイトへの他種ガラス混入の検討

テクタイト散布域の海底からマイクロテクタイトが見いだされた時、ヘイガラス・ウッドガラスではないかとの見方で検討された。東南アジアの植竹の燃焼によるガラス球と成分を比べた結果、植物起源は否定された<sup>(前述)</sup>。

ミシシッピの北アメリカテクタイト対応の地層中からガラス球が得られたが、サンプル採取地域と成分の検討で人工物であったとの報告がある<sup>248)</sup>。モルダバイト散布域で得られたガラス球は、ボーリングマシンが石炭灰により汚染されていたためであった<sup>250)</sup>。工業化されていた地域ではどこでも人工物が混入する<sup>249)</sup>。

12.18 「宇宙空間滞在時間」測定の試みと隕石落下年代の推定

テクタイトを大体起源と考えていた時期に、地球への落下以前の経過時間を見積もろうとした研究がある。

テクタイトの宇宙飛行中に、構成原子核が一次宇宙線をうけて核分裂をする確率がある。この時の T<sub>1/2</sub> は自

発核分裂のそれと違い V 字型になっているから、これを数えて宇宙滞在時間を測定し得る。

また同じくテクタイトの宇宙飛行中に、一次宇宙線による核反応が起きる。生成物のうちの<sup>26</sup>Al (半減期 74 万年)・<sup>10</sup>Be (250 万年)・<sup>36</sup>Cl (31 万年)などは半減期が数十万年・数百万年の桁なので、地球表面物質としては存在し得ない(と考えられていた)から、検出されれば天体起源の証拠になるし、現在の残留量比から地上へ落下した年代も知りうる。これは隕石研究では知られている方法である<sup>250</sup>。

始めは研究者たちの間で結果が一致しなかった。V 字型の F.T. は検出できず、年数の最大限を推測したに止まり、それらは地質的・宇宙的年代に比べてはるかに小さかった(例:9000 年, 270 年など)<sup>251</sup>。

また<sup>21</sup>Ne の質量分析で検出量が誤差以下であり、宇宙滞留時間の最大値をモルダバイト 1.8m.y., オーストラリヤ-アジアテクタイト 0.04m.y. と推算した<sup>252</sup>。

他方では崩壊率から同位体量を計算する方法で、オーストラライトが 1m.y. の間飛行していたから、「テクタイトはガラス質隕石であると言えるかも知れない。しかし強くは主張できない。」と控え目に述べられた<sup>253</sup>。モルダバイト・ベディアサイトでは「落下後に崩壊してしまったので<sup>10</sup>Be・<sup>26</sup>Al は検出されない。」

またオーストラリヤ-アジアテクタイトで<sup>26</sup>Al により 1 万年以下とも評価された<sup>254</sup>。

その後、C-14 法の場合と全く同じ経過で、加速器付き質量分析器により検出感度が高まった。同時にテクタイト形成と宇宙線による地球での同位元素形成の過程が明らかになった。すなわち大気中でも地表でも、一次・二次宇宙線・宇宙線誘起中性子による核反応で同位元素が形成されていること、大気中でできたものはエアゾル化して地表に沈降し吸着・蓄積されることなどが知られた。地下数メートル以深ではこのような同位元素形成はない。

これらのことを基礎として新しい観点からの測定が実行された。

まず隕石をはじめ、大気中・地表の物質(テクタイトを含む)の同位元素の含有量が測定された<sup>255</sup>。

オーストラリヤ-アジアテクタイトは<sup>10</sup>Be を  $1 \times 10^8$

原子/g 含み、一方モルダバイトでは崩壊してしまって検出されなかった。前記の<sup>10</sup>Be の量は宇宙での滞留でも地表で永く止まっても生じ得ない位の多量であったので、これは地上の物質に吸着・蓄積されたものがテクタイトの原材料になったからだと結論された<sup>255,256</sup>。

衝撃ガラスでの測定では、<sup>10</sup>Be・<sup>26</sup>Al が隕石・月岩石に比べて 2~3 桁少なく、しかし空気中の量よりは 2 桁多いという結果であり、結論はテクタイトと同じことであった<sup>257</sup>。

これらの同位元素は隕石落下年代の推算にも使われた。隕石孔では、隕石落下時に地下から表面に露出した岩層がある場合に、此処で同位元素が作られ始め、時間とともに濃度が増してゆく。このことを利用してキャニオン-ディアブロ隕石孔での落下年代が評価された。従来の約 2 万年に比べて、5 万年前後という結果が得られた<sup>258</sup>。

## 12.19 「大絶滅」

### 12.19.1 マイクロテクタイト・イリジウム・隕石孔

中世代末(白亜紀末としても同じことである。約 6500 万年前)に恐竜を始め当時栄えていた多くの動植物が絶滅したことが化石により知られている。絶滅の原因として、大隕石が落下して地球の環境を急変したことがアルバレスらにより唱えられた<sup>259</sup>。その証拠として白亜紀(K または C と略記する。白亜紀の別名「クレタ紀」による)と次の第三紀(T と略記する。)との境界(K/T または C/T 境界)にあたる地層にマイクロテクタイト・衝撃石英があり、イリジウムの濃縮が認められることが挙げられる。

イリジウムは Re・Os と同じく親鉄性で、地表性でない(天体・隕石起源または地球深部由来)ものの証拠と考えられる。従ってこの議論はテクタイト・マイクロテクタイトについての永い議論を取り入れている。

隕石落下に伴う環境変化には津波、放出物による日照低下と気温降下、植生の破壊、マイクロテクタイトの降下による火災の拡大、地磁気の変化による地表での宇宙線束増加などが考えられる。

この理論に対する反論(後記)があるけれども、ここ

ではマイクロテクトイトと隕石落下・大絶滅説との関連に絞って記す。

マイクロテクトイトとイリジウムの濃縮がほとんど「全地球的に」、地上だけでなく海底からのコアにも見いだされると報告された<sup>260)</sup>。これは「隕石落下」があったことの証明とされ、落下地点についてコラ半島・中央シベリヤ北部・アイオワ・コロンビア盆地などの意見が出されたが、漸次注目がメキシコ湾・カリブ海付近に集まり、キューバ南方海中・ハイチ南方・ユカタン半島北部などが候補地点として挙げられた(図44)。



図44 カリブ海・メキシコ湾地域概略図

ユカタン半島北岸の丸印は重力分布異常部を示す。

カリブ海で早い時期にマイクロテクトイトとイリジウム異常のある層が報告された<sup>261)</sup>。その後の追加発見報告もある<sup>262)</sup>。

ハイチ南部の地層から多くのマイクロテクトイトと少しの衝撃石英含む厚い地層が発見され、 $^{40}\text{A}/^{39}\text{A}$ 法で年代が64.5m.y.と測定された。ガラス球は直径8mmまでのものがあり、風化により表面が粘土化したもの・表面が結晶化したもの・全く風化して粘土球になったものであった。地層は乱れており、隕石落下直後の数回の津波があったと結論された。マイクロテクトイト含有層厚さ15cm、ガラス質含有量25%であった。 $^{40}\text{A}/^{39}\text{A}$ 法で年代が64.5m.y.と測定された<sup>263) - 266)</sup>。

キューバで同様の厚い地層が見付かり、放出源が南方海中にあると推定された<sup>267)</sup>。

メキシコ北東部の400mの海底からテクトイト・

マイクロテクトイトを含む厚さ3mの破砕性の地層が見付かり、生物化石からK/T境界だと判断された<sup>268), 269), 270)</sup>。

ユカタン半島北部(Chicxulub)では油田探査の重力分布・地磁気分布の測定から、海岸線に中心を置く形の直径180kmの異常が見いだされていた(図7)<sup>271)</sup>。保存されていたボーリングコアを精査して、地下1500m位の所で厚さ100mのガラス球を含む層が見付かった。ガラスは安山岩質であった<sup>272)</sup>。今の所最も有力な候補地とされているように見える。

## 12.19.2 「大絶滅説」への異論

異論の論点は多岐にわたる<sup>273)</sup>が、ここでは本稿に関係するマイクロテクトイト・イリジウム・衝撃石英について述べる。

マイクロテクトイト様のものは火山から作られ得る(ペレの涙)。イタリアで発見されたガラス球は、最近の生産物による汚染であった。K/T境界にある球状粘土は長石粒の風化でできたものであり、しかも長石粒は在地性ではなかった(他所でできて運ばれて来た)。

イリジウムの全量は $32 \times 10^{10}\text{g}$ であるが、ハワイ・キラウエア火山は毎H 31gのイリジウムを放出している。K/T境界時代はインド・デカン玄武岩高原の形成など火山活動が活発であったから、その状況が1万年も続けばイリジウム量は説明できる。K/T境界でのイリジウム濃縮層は多層であり、一回のイベントによるのではない。

当時はインドネシ・クラカタア火山噴火の400倍の規模の噴火さえ多かった。この状況で衝撃石英は噴火でも溶岩の貫入でもできる<sup>274)</sup>。

イタリアのガラス球は最近の汚染によるものであった<sup>275)</sup>。

粘土を含んでの部分的な反論<sup>276)</sup>がある。

以上のようにマイクロテクトイト球が論争のための証拠として使われている。

K/T境界の粘土がガラス由来であることがかって論じられた<sup>277)</sup>。論争の中でアルバレスは大形隕石が落下する確率を、1億年あたりピーク時期に50回、全平均で17回と見積もっている<sup>278)</sup>。イリジウムのある層の鉛同位体比の測定では、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ が15%ほど定常値よ

り高く、火山説より隕石説に有利な結果だと報告された<sup>279)</sup>。

### 【参考文献】

- 177) テクタイトシンポジウム特集号 *Geochim. Cosmochim. Acta* **14** 25 7-379 (1958)
- 178) クレーターシンポジウム特集号 *J. Geophys. Res.* **66** [10] 3371 (1961)
- 179) 第2回テクタイトシンポジウム特集号 *Geochim. Cosmochim. Acta* **28** [6] 753~ (1964)
- 180) テクタイトの地質化学特集 *Geochim. Cosmochim. Acta* **33** [9] (1969)
- 181) コーニング第3回テクタイトシンポジウム特集号 *J. Geophys. Res.* **74** 6722 (1969)
- 182) 天然ガラス特集 *J. Non-Crystalline Solids* **67** [1~3] (1984)
- 183) ジュネーブ自然史博物館 所見
- 184) B.P.Glass *Nature* **214** 372, 372 (1967)
- 185) V.E.Barns *Progress of Tektite Studies in China* *Trans. Amer. Geophys. Union* **50** 704 (1969)
- 186) R.S.Clark *J. Geophys. Res.* **66** 2520 (1961)
- 187) J.O'Keefe 他 *Glastech. Ber.* **43** 199 (1970); *サイエンス* **8** [10] 98 (1978)
- 188) W.Gentner 他 *J. Geophys. Res.* **65** 2492 (1960)
- 189) 川口紳 - *地質ニュース* No.444 p.37 Aug. (1991)
- 190) T.Meisel 他 *Geochim. Cosmochim. Acta* **54** 1463 (1990)
- 191) R.F.Fudali *Meteoritics* **14** 283 (1979)
- 192) A.V.Murali 他 *J. Geophys. Res.* **92** [B4] 729 (1987)
- 193) W.Engelhardt *Geochim. Cosmochim. Acta* **51** 1425 (1987)
- 194) E.A.King *Nature* **269** 48 (1977); B.P.Glass 文献 182) p.333
- 195) D.A.Crawford *J. Geophys. Res.* **96** [E3] 18807 (1991)
- 196) J.O'Keefe a) 文献 181) p.6795; b) *EOS Trans. Am. Geophys. Union* **66** [1-26] 89 (1985)
- 197) B.P.Glass *Tectonophysics* **171** 393 (1990)
- 198) S.V.Margolis 他 *Science* **251** 1594 (1991)
- 199) G.Baker *Mineral. Magazine* **36** 1012 (1968)
- 200) B.P.Glass 文献 180) p.1135
- 201) C.C.Schnetzler 他 *Geophys. Res. Lett.* **15** 357 (1988)
- 202) B.P.Glass *Meteoritics* **24** 209 (1989)
- 203) A.J.Cohen *Phys. Chem. Glass* **2** 83 (1961)
- 204) R.A.Weck 他 文献 182) p.593, 629
- 205) G.H.Frischat 他 文献 182) p.621; *Glastech. Ber.* **55** 228 (1982)
- 206) D.M.McPherson 他 *Glastech. Ber.* **62** 208 (1989)
- 207) 白井正明 *地質ニュース* No.473 Jan. (1994)
- 208) E.M.Shoemaker 他 a) *Science* **132** 220 (1960); b) *J. Geophys. Res.* **66** 3370 (1961); c) *Guidebook to the Geology of Meteor Crater, Arizona* Arizona Univ. (1974) d) P.Adams *Moon, Mars and Meteorites* p.36 Her Majesty's Stationary Office for the British Geological Survey (1977)
- 209) E.C.T.Chao 他 *J. Geophys. Res.* **67** 419 (1962)
- 210) A.J.Cohen *Advances in Glass Technology Part 2 (The 6th Intern. Congress on Glass 1962)* p.360
- 211) R.L.Bjork 文献 178) p.3379
- 212) W.Gentner 他 *Geochim. Cosmochim. Acta* **27** 191 (1963); 文献 180) p.1075
- 213) W.Engelhardt *Tectonophysics* **171** [1-4] 259 (1990);
- 214) a) W.Gentner *Z. Naturforsch.* **19a** 150 (1964); b) W.B.Jones *Geochim. Cosmochim. Acta* **49** 2565 (1985)
- 215) S.R.Taylor 他 *Nature* **203** 390 (1964)
- 216) K.M.Love 他 *Geochim. Cosmochim. Acta* **52** 2085 (1988)
- 217) S.R.Taylor 文献 180) p.1083
- 218) B.P.Glass 文献 182) p.333
- 219) R.L.Fleischer 他 文献 179) p.755; *Geochim. Cosmochim. Acta* **29** 161 (1965)
- 220) W.Gentner 他 *Naturwiss.* **56** 255 (1969)
- 221) J.Zaehlinger *Nature* **199** 583 92 (1963)
- 222) D.Storzer 他 *Naturwiss.* **67** 90 (1980)
- 223) B.P.Glass *Earth Planet Sci. Lett.* **77** 428 (1986)
- 224) R.L.Fleischer 文献 179) p.799
- 225) I.M. McDougal 文献 180) p.1075
- 226) B.P.Glass 他 *Chem. Geology* **59** 181 (1986)
- 227) G.Keller 他 *Science* **221** 150 (1983)
- 228) A.Sanfillipo *Nature* **314** 613 (1985)
- 229) B.P.Glass *Nature* **214** a) p.372, b) p.372 (1967)
- 230) D.V.Kent 他 *Earth Planet Sci. Lett.* **107** 182 (1992)
- 231) G.R.Tilton 文献 177) p.323
- 232) 月サンプル予備検査チーム *Science* **165** 1211 (1969)



- 233) H.F.Shaw *Earth Planet Sci. Lett.* **60** 155 (1982)
- 234) C.C.Schnetzler 他 文献 180) p.1015; *Science* **151** 817 (1966)
- 235) W.Compston 文献 180) p.1023, p.1037
- 236) W.H.Pinston 他 文献 177) p.331
- 237) H.P.Taylor 他 *Science* **153** 173 (1966)
- 238) J.D.Blum 他 *Geochim. Cosmochim. Acta* **56** 483 (1992); H.H.Ngo 他 *Geochim. Cosmochim. Acta* **49** 1479 (1985)
- 239) E.D.Ehmann *Geochim. Cosmochim. Acta* **19** 149 (1960); **26** 489 (1962)
- 240) S.R.Taylor *Geochim. Cosmochim. Acta* **28** 471 (1964)
- 241) W.H.Pinson 他 文献 181) p.6811
- 242) H.P.Schwarz *Nature* **194** 8 (1962); R.Ginapathy *Earth Planet Sci. Lett.* **65** 225 (1983)
- 243) J.F.Lovering 文献 179) p.761
- 244) R.J.Hemley *Nature* **334** 52 (1988)
- 245) P.S.DeCarli 他 *J.Chem.Phys.* **31** 1675 (1959)
- 246) 庄野安彦 他 日本板硝子材料工学助成会成果報告 No.8 p.129 (1990)
- 247) P.Lambert 文献 128) p.521
- 248) G.R.Byerly 他 *Meteoritics* **25** 89 (1990)
- 249) P.Rost 文献 181) p.6816
- 250) 島 誠 隕石の科学 p.88 上川大学出版部 (1977)
- 251) R.L.Fleischer 他 *J.Geophys.Res.* **70** 1491 (1965)
- 252) J.H.Reynolds *Geochim. Cosmochim. Acta* **20** 101 (1960)
- 253) W.D.Ehmann 他 *Geochim. Cosmochim. Acta* **14** 364 (1958)
- 254) E.Viste 他 *J.Geophys.Res.* **67** 2913 (1962)
- 255) D.K.Pal 他 *Science* **218** 787 (1982)
- 256) B.P.Glass 文献 182) p.333
- 257) F.Yiou 他 文献 182) p.503
- 258) F.M.Phillips 他 *Geochim. Cosmochim. Acta* **55** 2695 (1991); K. Nishiizumi 他 *Geochim. Cosmochim. Acta* **55** 2699 (1991)
- 259) L.W.Alvarez 他 *Science* **208** 1095 (1980)
- 260) J.Smit *Earth Planet science Lett.* **74** 155 (1985)
- 261) B.P.Glass 他 *J.Geophys.Res.* **87** Suppl. 425 (1985)
- 262) A.R.Hildebrand 他 *Science* **248** 843 (1990)
- 263) G.A.Izett *J.Geophys.Res.* **96** [E4] 20879 (1991); *Science* **252** 1539 (1991)
- 264) H.Sigurdsson 他 *Nature* **349** 482 (1991)
- 265) D.A.Kring 他 *Geochim. Cosmochim. Acta* **55** 1737 (1991)
- 266) J.J.-M.Maurrasse 他 *Science* **252** 1690 (1991)
- 267) B.F. Bohor 他 *Nature* **344** 593 (1990)
- 268) J.Smit 他 *Geology* **20** 99 (1992)
- 269) L.W.Alvarez *Geology* **20** 697 (1992)
- 270) K.O.Pope 他 *Nature* **351** 105 (1991)
- 271) G.T.Penfield *Mtg. Soc. Explor. Geophys. Abstr.* **51** 37 (1981)
- 272) A.R.Hildebrand 他 *Geology* **19** 867 (1991)
- 273) 無署名 *科学朝日* p.19 6月 (1993)
- 274) C.B.Officer 他 *Nature* **326** 143 (1987)
- 275) A.Montanari *Geology* **14** 1024 (1986)
- 276) A.Hallam *Science* **238** 1237 (1987)
- 277) L.W.Alvarez 他 文献 182) p.465
- 278) L.W.Alvarez 他 *Nature* **329** 118 (1987)
- 279) S.J.Galer 他 *Geophys. Res. Lett.* **16** 1301 (1989)

## 「シナジーセラミックス」研究委託先を公募

通産省が平成6年度から研究開発を進めることになった「シナジーセラミックス」の委託先の公募説明会が7月21日、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の会議室で行われた。シナジー・セラミックスは通産省工業技術院の「産業科学技術研究開発制度」に基づいて今年度から推進されるもので、ファインセラミックス材料の高度かつ広範なニーズへの適用を図るために「相反する特性の調和、種々の機能の同時付加を可能とする、材料の構造要素を高次制御する技術、及びその技術を用いて革新的な特性を持った材料を創製する技術の確立のための研究開発」を行うこと、とその委託業務の概容は述べている。

シナジー（Synergy）セラミックスとは「高次構造制御」という概念の下に相反する特性の調和、複数機能付与のみならずそれらの間の相乗作用（Synergistic）の期待できるセラミックス材料の創製を目指すもの、と定義づけている。シナジーセラミックスの命名にあたっては英国の Brook 教授の小説があったという。

### ・いつまで続ける

研究開発は2期に分けて行う。第1期は平成6年度から5年間と第1期の研究開発状況を踏まえて改めて定める第2期とである。

### ・誰がまとめる

第1期の研究開発は、研究開発費総額約50億円を投下して、NEDOの公募によって採択された民間企業等が組織する「ファインセラミックス技術研究組合」（東京都港区虎ノ門3-7-10 ランディック虎ノ門ビル、電話（03）3437-3651）及び工業技術院名古屋工業技術研究所の研究者達の共同研究として実施される。

### ・その目的は

第1期の研究開発の目標について「シナジーセラミックス研究開発基本計画」は次のようにまとめている。

#### (1) 高次構造制御技術

これは更に高次構造を造るための基礎技術と高次構造を各要素に分割して制御する技術の二つに分けられる。

##### ① 構造創製基礎技術

前駆体を利用してセラミックスの合成を行うケミカルプロセス、複数の「階層」にまたがる構造制御の基本であるナノ構造化技術、組織形成のシミュレーションとその実証、構造が形成される際の化学反応

や析出反応を利用した基本プロセスの設計

##### ② 構造要素制御技術

構造要素の配置、配向、分布等を任意に制御するため「階層」間での析出反応制御、細孔形態分布の制御、界面構造制御、異方粒成長制御などの要素技術を開発し、特性及び機能間の調和、相乗効果（シナジー効果）の発現を目指す。

#### (2) 解析・評価技術

(1)と同様に基礎技術開発と要素評価技術に分かれる。

##### ① 解析・評価基礎技術

特性・機能の発現に関係する因子を材料の構造と関連づけて解析し、発現機構の解明を図る。また発現因子のモデル化を行う。

##### ② 特性発現要素評価技術

特性・機能を迅速に評価する技術や機械的特性の発現因子の解析に不可欠な破壊現象の直接観察技術等の開発を行い、特性発現因子のデータ集積を効率的に行う。

## 調査報告書

### 「窒化ケイ素とサイアロン」第3集 発刊

セラミック産業にとって苦痛なことは、セラミック製品の幅広い分野で多面的な応用が期待され、優れた特性と適合性が評価されている一方で、製品化の可能性は将来においてもなお特定の領域に限られていて、いまだ到達していない、ということにある。窒化ケイ素やサイアロンにしてみても例外ではない。多年に亘る研究・開発にもかかわらず窒化ケイ素製品の实用化はそのありうべき可能性の用途のほんの一部である。研究の上たる応用分野として期待されている高温特性の改善とその実現にあるが結果は今のところ、達成の域には至っていない。然しながら新しい市場・技術の調査から分かったことは窒化ケイ素には依然として十分に意義ある可能性を秘めていること、とりわけそれほど厳しくない性能が要求される分野、また耐摩耗特性が要求される分野では殊のほか優れた素材である、ということである。

「窒化ケイ素とサイアロン」は、Mitchell Market Reports で有名な Vivien Mitchell と Advanced Ceramic Report の発行社 Elsevier Advanced Technology が共同で第3集としてまとめた調査報告書。同報告書が指摘しているのは、世

## 地史・考古・天文学へのガラス解析技術の適用 (4)

Applications of characterization techniques for glass to geohistory, archeology and astronomy

岸井 貫 工業工業大学 附属研究所 教授

Tōru Kishii

問合せ/ キシイ トオル 〒 168 東京都杉並区高井戸東 3-14-11 Tel. (03)3329-3537

### 13 隕石とガラス (280)–285)

#### 13.1 太陽系の起源と隕石

隕石のうち 85% は「球粒隕石 (コンドライト)」と分類され、他は「非球粒隕石 (エイコンドライト)・鉄隕石」・「石鉄隕石」である。

球粒隕石は球粒 (コンドリュール) を含み、その間隙を微細な粒子から成る石基が充填している。球粒は 0.1mm ないし mm の桁の寸法をもつ球形粒子で、隕石の切断面に明瞭に認められる。さらに球粒には全ガラス質、部分結晶化したガラスから粗大結晶質まであり、ガラス滴から結晶が析出したかのような外見を示すものが多い。

球粒隕石の石基の組成は球粒の組成に近く、石基にもガラス細片が見いだされる。全体としての組成は塩基性であるが、地球上の岩石と違い鉄はほとんど 2 価イオンの形であり、金属鉄も存在している。

球粒隕石は組成が水素・ヘリウムを除いた太陽大気のもので、太陽を始めとする太陽系を作った基本的物質であるとされる<sup>285a)</sup>。従って球粒は太陽系が作られていた時期の、しかも早期に出現した物体で、この時期の形跡を最も良く残しているとして研究されてきた。

他種類の隕石 (鉄隕石・石鉄隕石・非球粒隕石) は変

成作用を経過しているため、それ以前の状況の記憶は消えている筈である。

#### 13.2 球粒の問題

太陽系形成期間中の球粒の成因はまだ明らかでなく、多くの説が出されている。図 45 にはそのうちの二つを記入してある (図 45 中の経路 1 および 2) <sup>285b), c)</sup>。

太陽系ができあがったのは 45~46 億年前とされる。この年代は球粒隕石中の鉛物の年代測定値による。その少し前に超新星が爆発してガスと塵を吹き散らした。経路 1 では、これらはすぐに集積をはじめて塵粒から小型天体を経て太陽と惑星群となった。この期間は短くて例えば 2000 万年位と見積もられる (理論・球粒隕石中の短寿命核分裂性同位元素の F.T.・同短寿命放射性元素の崩壊生成物などから)。

球粒は球粒隕石中に多く含まれ、この隕石はまた隕石の大部分を占めるから、球粒の形成は普遍的な現象であったと想像される。しかし気圧が低く天文学的なスケールを持つ空間で、物質がガラス融液になるまで加熱され、次いで急冷されるメカニズムは、静的・準静的な状況では考えにくい。融液自体が蒸発して消えることにもなるであろう。

従って衝撃波・放電などが起きている擾乱状態が想定

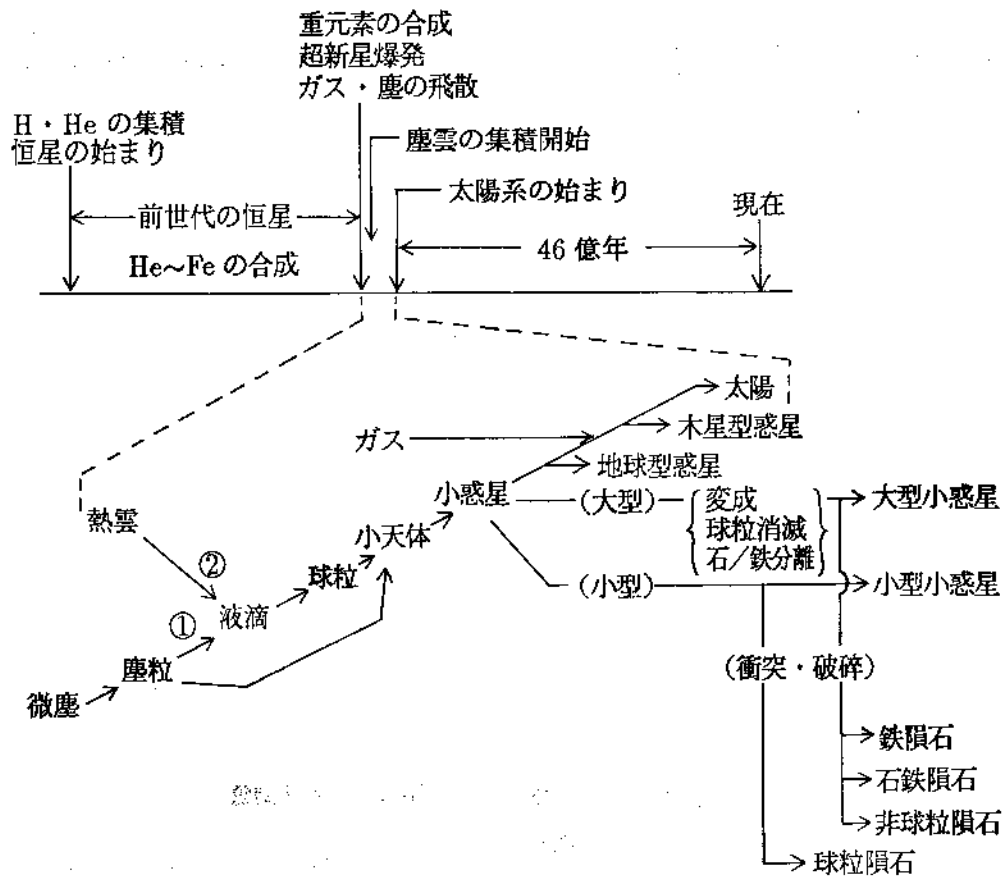


図 45 太陽系形成過程の一仮説と球粒（コンドリュール）の役割

される<sup>286)</sup>。

球粒の成因に関する説を二、三挙げる。

融解説（図 45 の経路 1）：球粒の観察から次のように結論している。球粒の前駆物質である鉱物集合体の加熱で融解したが、多くの球粒は完全には融解していない。加熱温度は  $1500 \pm 200^\circ\text{C}$  である。完全に溶融したらしいものは橄欖石・輝石・ガラスから成る。急冷で生じた組織（表面から内部へ向かう放射状品、球晶など）が屢々ある<sup>285b), 286)</sup>。

凝縮説（図 45 の経路 2）：ガスと塵の雲は  $2000^\circ\text{C}$  以上の高温と  $10^3 \text{ atm}$  以上の高圧状態から冷え、数 mm のサイズの液滴を生じた。残りの物質は直接塵へと凝縮した<sup>285c)</sup>。前者は球粒に、後者は石基となった。

球粒の組織を分類して論じたものがある。完全に溶融して急冷されたものは、球粒表面を中心として放射状品

が成長する<sup>287)</sup>。

また球粒を実験室的に合成し結晶化させて、シミュレーションにより形成条件を探る試みもある<sup>288)</sup>。

球粒中の鉱物の組み合わせが相平衡状態であるか否かにより、「平衡コンドリュール」・「非平衡コンドリュール」と分類される。後者の方が太陽系形成期の擾乱状態の形跡を良く残していると考えられる。ガラスの存在は非平衡コンドリュールであることの明瞭な印である<sup>289)</sup>。

球粒や塵は集積をして小型の天体を経て、小惑星→惑星→太陽と成長する（図 46）が、その途中で相互に衝突を繰り返す。この時に碎かれてできた小片が地球へ向かう軌道に入り隕石になる。

球粒隕石には母天体から衝撃により撥ね飛ばされた時にできた衝撃ガラス・衝撃鉱物の構造を示すものがある<sup>290)</sup>。

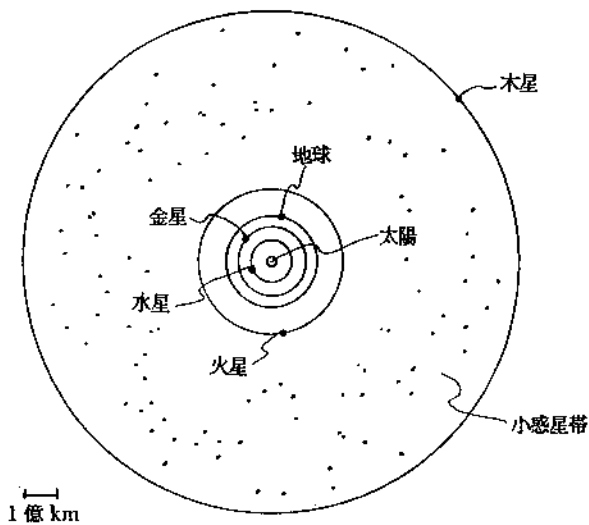


図 46 太陽—木星間の惑星軌道

### 13.3 月起源の隕石<sup>291)–293)</sup>

南極の氷床上に隕石が集積されていることが日本観測隊によって発見されてから、各国により多数の隕石が集められた。

そのうちに月から来たと判断されるものが 8 個 (分裂したものをそれぞれ数えると 11 個) 知られる。これらは月の表面にある岩石と同じもの (角礫岩: 砕かれた岩石片が再固結した岩) で、月岩石を研究した人には薄片を一目見て判断できたとのことである。

これらは隕石が月表面に落下して岩石を撥ね飛ばし、地球へ向かう軌道へ送り込んだものと考えられる。従って大筋としては月岩石と同質であるが、撥ね飛ばされた時の衝撃の影響を受けている<sup>293)</sup>。

一例では衝撃ガラスに似たガラスが含まれ、その含有量は 50% 以上であった<sup>294)</sup>。

H 本隊の得た月隕石の衝撃ガラスで Rb-Sr 法で年代測定をした例がある<sup>295)</sup>。橄欖石は 39 億年、長石とガラスは 7 億年であった。後者が撥ね飛ばされた時の年代と解釈され、年代が適合する「チコ・クレーター」が起源地の候補に挙げられた。

南極以外での月隕石発見はオーストラリアでの 1 個だけである。これは月の「海」を作る岩石 (「月の玄武岩」, 還元雰囲気できて、3 個の鉄を欠く) と「高地」にある碎石片から成る角礫岩との組み合わせであった<sup>296a), b)</sup>。

### 13.4 火星起源の隕石<sup>296c), 297), 298)</sup>

火星起源の隕石も発見された。発見地のうち三つの頭文字を並べて「SNC 隕石」と呼ばれる。南極隕石のうちにも火星起源の隕石が三個知られている。火星起源とする根拠は組成と含有ガス成分 (火星表面と雰囲気組成はバイキング探査機の遠隔測定で知られている) が火星に近いことに加え、岩石の生成年代が 1 ないし 2 億年や 13 億年前と異常に若いことである<sup>297)</sup>。この時期に地球の火成・火山作用と同じものがあつたのは他に火星だけであった。

火星への隕石の衝突で地球軌道へ跳ね出されると、衝撃で全体がガラス化してしまう筈だから、火星の地下にあるハイドレートが隕石落下の衝撃を受けて爆発し、岩石を放出したのであるとの議論がある<sup>299)</sup>。

実際には斜長石がマスケリナイト化したもの、衝撃ガラス化したもの (50~80 GPa) がそれぞれ見つかっている<sup>297)</sup>。石基にもガラスが多かった<sup>296c)</sup>。

### 13.5 アブレーションによる隕石の被膜

地上に落下した隕石の表面がアブレーションによりできたガラス質の多い被膜で覆われていることは普通に観察されている。アブレーションで飛散した液滴が宇宙塵 (次章) の一つの起源であろうと推測される。

隕石の熔融被膜は落下後に、含まれる<sup>40</sup>K の変壊により放射線照射を受ける。この時に膜中に熱発光中心ができ、時間とともに蓄積してゆく。加熱して発光量をはかると落下後の経過時間を推算できる。南極隕石で  $10^3$  ないし  $10^6$  年であった<sup>300)</sup>。

## 14 宇宙塵<sup>301)</sup>

地球外から細塵が降って来るらしいことが古くから気付かれて、「宇宙塵」として研究の対象になった。起源としては、彗星の構成物であつてその軌道上で撒布されたもの、隕石表面が大気中でアブレーションで融解し液滴として散乱したものなどが推定されていた。

人工物の混入を避けるために 18km の高空へ飛行機を飛ばしたり、海底・南極氷床中から採集したりしていた。

その落下の頻度と流星雨や地球の彗星軌道との交差との相関を調べられた。

宇宙塵のうちガラス質のものは「マイクロテクタイト」と呼ばれたが、これがテクタイト関連のガラス球を指すようになった経過は前述した。

アポロ計画で月の岩石（ガラス球を多量に含む）が得られた時期に、南極・海底・岡山・乗鞍で得られたマイクロテクタイトや飛行機・気球で得られたものと月のガラス球の組成を較べた。マイクロテクタイトの組成範囲はかなり広くて、月のガラス球はこの組成範囲に含まれていた<sup>302)</sup>。

## 15 月のガラス <sup>303)-307)</sup>

### 15.1 衝撃起源と火山起源

アポロ計画は17号まで実施され、13号を除き11~17号がそれぞれ岩石を持ち帰った。

アポロ11号月着陸船が持ち帰った月の岩石中にガラス球が多量に含まれていた。また岩石やガラス球自体の表面に隕石衝突によると考えられる凹孔が掘られ、その表面がガラスで釉薬掛けされたようになっていることも観察された。これらは隕石の衝撃に伴うガラス形成・飛散・球化や蒸発・凝縮（蒸着）によると考えられた<sup>308)</sup>。

またガラスが岩片を接着して角礫岩を作る役目もしていた<sup>309)</sup>。

従ってガラス球の組成は岩石そのままであるとの見方があった。

その後の岩石収集が進むにつれて、14号あたりから、ガラス球には低粘度の玄武岩質溶岩が噴き出す時にできたものもあると、ペレの涙を引照して論じられるようになった<sup>310)</sup>。

アポロ計画で得られた岩石を精査して、23群の火山ガラス球があると判定された<sup>311)</sup>。

月ができた年代は太陽系や地球のそれとほぼ同じで45~46億年前と考えられ、実際にその年代の岩石が知られている<sup>312)</sup>。

月のガラスについての研究は多いが、此处では生成年代や月の地質史と関連し、またガラス生成過程と関連するものだけを引用する。収集された岩石は多くの場所か

ら多くの種類が集められているし、またガラスの成因についても必ずしも意見が一致しない場合があり得るから、個々の研究の間で結論が合致するとは限らない。また追試ができない場合も多いであろう。

### 15.2 ガラスの組成

衝撃起源のガラスの場合、原岩石が蒸発時にシリカを失ってガラス球になったとの議論がある。シリカ含量が30%まで低下した例が知られた<sup>313)</sup>。

火山起源のガラスは溶岩の組成と良く対応しているとして、岩石名を形容詞として冠した「picritic glass, komatiitic glass」などの表現が使われた。前者は700kmの深部から噴出してきた溶岩からできたと推論された<sup>314)</sup>。

ガラスは結晶と違ってもとの玄武岩質溶岩の組成を保存していると考えられる<sup>315)</sup>。

しかしガラスと同じ組成の玄武岩や、ガラスと結晶分別系列の関係にある玄武岩が必ずしも一緒には収集されていない<sup>316)</sup>。

アポロ16号が得た衝撃融解岩を地球のそれと比較した<sup>317)</sup>。マスケリナイトが屢々見られた。結晶はポリキリティック（結晶粒子内に他の結晶が包含される構造）であり、地球の直径20~60kmの隕石クレーターで見られるものと同じであった。この岩は深さ数kmまでに存在していた原岩石が溶融して構成したものであった。

月形成時期にガラスが形成され、その結晶化熱が月での岩石の分別に影響を与えたと論じられた<sup>318)</sup>。

### 15.3 密度

ガラスはガラス転移温度近くで熱処理すると密度が増加することが認められた。従ってガラスは高温から急冷された状態にあることが証明された<sup>319)</sup>。冷却速度として105°C/secという大きい値が推算された<sup>319a)</sup>。

### 15.4 光学特性

月の表面にはガラス球やガラス薄膜が多いため、交通標識用ガラスビーズの塗布面と同じように、表面の光反射率がランバートの法則から外れていて、地球から可

視光や赤外線を観察した時に特殊な明るさ分布を見せる原因であると論じられた<sup>320)</sup>。

鉄分のあるガラス球の光学特性が調べられた<sup>319a),321)</sup>。FeO を数%含むにも拘わらず Fe<sup>2+</sup>の色が現れておらず、加熱してアニールすると色が濃くなるので、極端な急冷状態にあることが色に影響していると結論された。

アポロ計画の前には、月表面の暗い部分（「海」）は月の玄武岩、明るい部分（「高地」）は玄武岩から分別してできた酸性岩石からできていると想像されていた。しかし、月表面の反射率は表面の微粉物質によるので、玄武岩質の表面は見かけ上暗い部分の2倍くらいあるだろうと推測された<sup>322)</sup>。

高地にある酸性岩石は「斜長岩（斜長石だけから成る岩石）」であることが判明している。しかし高地であっても「斜長石麻痺岩」ともいべき塩基性の地質であるとの見方がある<sup>323)</sup>。

### 15.5 粒子トラックの研究

ガラス中には次のものによるトラックがあった：

- a. <sup>238</sup>U による F.T.
- b. 短寿命自発核分裂性同位元素<sup>244</sup>Pu による F.T.
- c. 宇宙線中の高エネルギー重元素核（主として鉄）によるもの
- d. 太陽から噴き出す太陽フレア中の低エネルギー重元素核によるもの

これらは腐食でできる孔の直径や、加熱処理による消滅特性で区別することができる。

始めの二つではガラスができた年代を、後の二つでは月表面に存在していた時間を推算できる。

F.T. が<sup>238</sup>U によるとすると45~61億年、<sup>244</sup>Pu が共存したことを考慮すると39~40億年という値が得られた。表面露出年代は10<sup>1</sup>~10<sup>7</sup>年であった<sup>324)</sup>。

また別の測定例ではガラスの年代として37億年、月表面にあった年代として1100万年という結果が得られた<sup>325)</sup>。

他方では U-Pb 法の測定で、ガラスは非放射性起源の同位元素を含む恐れがあるので、サンプルから除外するという意見があった<sup>326)</sup>。

## 16 木星系の色ガラス

外惑星を探索したボイジャー宇宙機は木星の衛星イオに火山があり、硫黄・ナトリウムを放出していることを発見した（図47）。噴火のための熱源は、木星の引力に

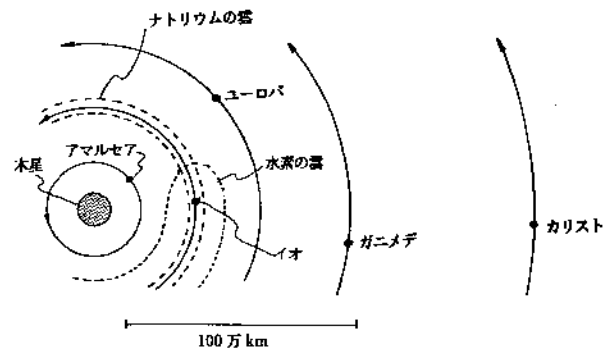


図47 木星系の内側の衛星軌道

D.P. クルークシャン 他 別冊サイエンス  
太陽系の天文学 p.123 (1977) の図に加筆した。

よりイオが変形し内部摩擦を起こして、これが熱に転換されているものと考えられた。噴出物はイオの軌道に雲として残っていることも観察された。

イオに明るいオレンジ色をした地域があるのが既に観測で知られていた。イオの内側を廻る衛星アマルセアは地上観測では暗い深赤色であるが、ボイジャーは緑がかったいくつかの地点を見つけた。これらの色の原因物質は硫黄化合物を含むガラスであるとして説明できると提案された<sup>327)</sup>。

硫黄が急冷されると非晶質になり、紫がかった色になるが、反射率は非常に低くてイオの色には合わない。

硫黄と玄武岩とを真空及び1atmのアルゴン雰囲気中で反応させると、FeSコロイドを含む明るい赤ガラスとなり、特に後者がイオの可視分光反射率が観測と合う。

さらに炭素を加えて反応させると、アマルセアの色と似たものになった。ただしこれはボイジャーがスペクト

ルを測定した波長域が狭い (400-600nm) ために、まだいくらか不確かさがある。アマルセアの硫黄はイオの噴出物が降り注いで供給されているのであろうと論じた。

## 17 彗星のアモルファス氷<sup>328)</sup>

彗星の核は氷と岩石片とから成ると推論されていて、屢々「汚れた雪連磨」と形容される。彗星の氷は宇宙の環境中で凝縮したので非品質 (アモルファス) な状態であると言われる。

赤外線観測によると、太陽系外の暗黒星雲・分子雲にもアモルファス氷が存在する。結晶質の氷でも宇宙線や紫外線によって非品質化することも判明した。

彗星の核になる氷についても、高温の星雲が急冷された時に凝縮したとの説と、原始太陽系の前駆物質である星雲中にあったが、太陽が輝き始めると太陽近傍では氷が蒸発し、遠方だけに残って彗星を作ったとの説がある。

アモルファス氷の熱伝導度が測定された。普通の実験室の条件では 140K 以下で薄膜としてしか得られないので、温度計で膜温度を測るかわりに、膜表面への室内からの輻射熱と水蒸気の凝縮熱とを熱源とし、電子線回折で結晶化をモニターして温度計の代わりとした。測定値は蒸着速度によって  $1 \sim 10^3 \text{ erg}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$  の範囲であった。従来推定されていた値よりも 4 桁小さかった。

実際の彗星核は空孔率 0.8 という多孔質なので、見かけの熱伝導度は  $0.01 \sim 0.1 \text{ erg}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$  と推測される。この値では彗星核の内部は外部加熱によっては温度が上がらず、彗星が太陽の極めて近くを通過しても氷の蒸発量は僅かであり、核が消滅することなく度々回帰することができる。他方では核の直径が 3km 以上あれば、放射性元素の発熱のためアモルファス氷は結晶化してしまうと推算された<sup>329)</sup>。

## 18 結び

新聞や科学雑誌などからガラス・アモルファス固体が関連する記事をメモしているうちに、意外に広い範囲でガラスの解析技術が開発・活用されていることを知った。これらの事項の文献的根拠を見易く整理して置きたいと思い立って纏めた。

各種の年代測定法とその適用の工夫によって年代が数量的に表現できるようになったことは、単なる編年・形式編年とその形式論理的積み重ねだけに終わっていたそれぞれ学問の内容を豊富にただけでなく、地史・天文・考古学相互間の関連づけも可能にした。明らかになった時間スケールは従来の想定値の数倍から数十倍であった。

これらの経過に対してガラス材料は一定の役割を果たして来た。適用された解析技術は、一部は工業から派生したとはいえ、工業界の人々の関心が薄かったように思える。

写真について配慮を頂いた町田 洋 (東京立大学教授) と柘根千恵子 (相沢忠洋記念館長) に謝意を表します。

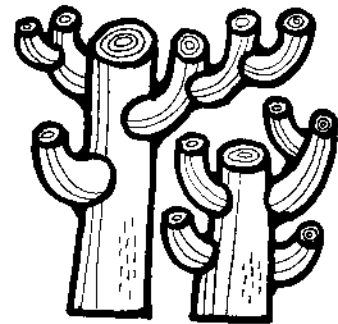
文献は東京工業大学・明治大学考古学教室・世田谷区郷土資料館・横浜美術館・千葉工業大学の図書館・図書室で調査したことも記して謝意を表します。

### 【参考文献】

- 280) 島 誠 隕石の科学 玉川大学出版部 (1977)
- 281) Moon, Mars and Meteorites p.34 Her Majesty's Stationary Office for the British Geological Survey (1977)
- 282) 彗星と隕石 別冊 サイエンス (1981) 9月
- 283) a) 長谷川博一 現代の太陽系科学 上 太陽系の起源と進化 p.107 大林辰蔵 他編 東京大学出版会 (1984); b) 永原裕子 同前 p.145
- 284) 北村雅夫 他 固体惑星物質科学 p.151 武田 弘 他編 サイエンスハウス (1994)
- 285) 小沼直樹 宇宙化学—コンドライトから見た原始太陽系 a)p.13; b)p.37; c)p.29 サイエンスハウス (1987)
- 286) 永原裕子 岩鉱 78 133 (1983)
- 287) P.Z.Budka J.Non-Crystalline Solids 67 p.413 (1984)
- 288) 小沼直樹 化学と工業 26 [4] 213 (1973)
- 289) 池田幸雄 p.291 南極隕石特集号 月刊 地球 (1979) 4月
- 290) 島 誠 文献 280) p.120
- 291) 児島秀康 最新南極報告 p.16 日経サイエンス 別冊 (1992) 7月
- 292) 矢内桂三 文献 282) p.128
- 293) 矢内桂三 マルト—総合カタログ p.134 (1987)
- 294) R.F.Fudali 他 J.Non-Crystalline Solids 67 p.383 (1984)
- 295) K.Takahashi 他 Natnewiss. 75 614 (1988)



- 296) R.A.Haag Field Guide of Meteorites a)p.28  
The Robert A.Haag Collection (1992); b)R.A.Haag  
他 Nature **352** [6336] 614 (1991); c)Field Guide  
of Meteorites p.53
- 297) 池田幸雄 固体惑星物質科学 p.179
- 298) H.Y. マックスウィーン 他 文献 282) p.114
- 299) 田中 剛 地質ニュース No.473 (1994) 1月
- 300) 三尾野重義 天文月報 p.190 (1994) 5月
- 301) 島 誠 星の誕生と宇宙の塵 p.43 (1978) 玉川大学  
出版部
- 302) 島 誠 他 岩鉱 **63** 239 (1970)
- 303) 月特集号 Science **167** [3918] (1970) 30th, Jan.
- 304) アポロ 11 号月科学会議 Vol.1~3 (1970) Pergamon  
Press
- 305) 第2回月科学会議 Vol.1~3 (1971) Pergamon Press
- 306) 第4回月科学会議 Vol.1~3 (1973) Pergamon Ppress
- 307) 第5回月科学会議 Vol.1~3 (1974) Pergamon Press
- 308) E.C.T.Chao 文献 307) p.35
- 309) K.Fredriksson 他 文献 305) p.727
- 310) J.B.Adams 他 文献 307) p.171
- 311) R.F.Fudali 他 J.Non-Crystalline Solids **67** 383  
(1984)
- 312) M.Tatsumoto 他 science **167** [3918] p.461  
(1970); L.T.Silver 同 p.468
- 313) K.Fredriksson 他 文献 304) p.419
- 314) a)P.C.Hess Geophys.Res.Letr. **18** 2069 (1991);  
b)C.K.Shearer 他 Geochim.Cosmochim. Acta  
**54** 1851 (1990)
- 315) J.J.Pike 他 Geology **18** 295 (1980)
- 316) C.K.Shearer 他 Geochim.Cosmochim.Acta **54**  
851 (1990)
- 317) R.A.F.Grieve 他 文献 307) p.261
- 318) I.S.McCallun 文献 307) p.287
- 319) a) A.R.Cooper 他 J. Amer. Ceram. Soc. **55**  
260 (1972); b) R.Roy 他 文献 305) p.2069; c)  
C.H.Green 他 文献 305) p.2049; d) T.Kishii 私  
信 文献 319a) に引用.
- 320) K.J.K.Buettner 他 Glastechn.Ber **43** 211 (1970)
- 321) S.K.Sarkar J.Material Sci.Letr. **7** 227 (1988)
- 322) J.W.Head 文献 307) p.207
- 323) A.M.Reid 他 Geocim.cosmochim.Acta **36** 903  
(1972)
- 324) D.Storzer 他 文献 306) p.2363
- 325) I.D.Hutcheon 他 文献 307) p.2597
- 326) P.D.Nunes 文献 307) p.1485
- 327) J.Gardie J.Non-Crystalline Solids **67** p.471 (1984)
- 328) 香内 晃 他 日経サイエンス p.96 (1991) 7月号
- 329) 香内 晃 天文月報 **87**[1] p.15 (1994)



## 地史・考古・天文学へのガラス解析技術の適用

—最近の成果発表に関連する追加コメント—

千葉工業大学 付属研究所 教授 岸井 貫

本誌 1994 年 8 月号～11 月号に表記題目の記事を連載させて頂いた。連載の間にも古人類学・考古学の新しい研究結果が発表されて、既述の事項の変更・補充が必要になったので、必要事項を追加する。

日本での黒曜石の石器が使われ始めた年代が、従来の 3 万年前に較べて 1 万年遡った。野尻湖畔で 4 万年前の地層からスクレイパー（搔器）、3 万 5 千年前の地層からナイフ形石器が得られた。和田峠周辺から持ち込まれたと推定される。

明治大学安蒜政雄教授の「石材産地と狩場との間を往復移動していたことをうかがわせる」とのコメントが記されている。(1994.8.9)

東京大学諏訪 元・助教授のグループが「ラミダス原人」の骨化石を先に発見した。その研究結果が報道された。地層の年代として 450 万年が得られた。発見された骨の部位の全体に対する割合が充分でなくて、確定的なことは未だ言えないが、歯に人類的な形のものと同様な形のものとの共存するので、初期の人類と考えた。350 万ないし 300 万年前の人類（エチオピア・アファール出土。連載第一回の図 5。種名アウストラロピテクス・アファールシス。「アファール出土の南の国の猿人」の意味。アウストラロ=接頭辞「南の」、ピテクス=「猿」。人類的特徴があれば ピテクス=猿人 と訳せよう。）と同じ属名（アウストラロピテクス）にしておくことである。(1944.11.16.)

アファール原人の骨格模型（複製品）を図 1 に掲げる。実物の写真は「ルーシーの子供達」（ジョハンソン 他 早川書房）の 33 頁に掲載されている。

ザイールのゴマの近くでの火山の噴火が報じられた。嘗てベレの髪の毛を噴出した噴火の報文「1981 年 Nya-



図1 アウストラロピテクス・アファールシスの骨格模型。ジュネーブ市立自然史博物館

muragira の噴火で生じたベレーの毛 Zana, 浜口（火山 II—28 p. 313 1983 年）」を読み返した。ゴマの北方 20km にニイラゴンゴ火山、北北西 40km にニヤムラギラ火山があり、当時の噴火はこの二つの火山の間で起きた。ストロンボリ式噴火（低粘度の溶岩を噴水状に噴き上げる形式）であり、噴出した高さの最高は 500 m と推定された。この火口はルガラムピロと命名された。噴出物は南西方向に降り積もった。

有史以前に北海道へ広域火山灰を降らした白頭山は、最近噴火の予兆らしいものを示しているとのことである。

# 生産・出荷・状況

■ 1994年9月分 通産省機械電気統計調査室の調査、「ファインセラミックス」[単位：数量(千個)，金額(百万円)]

品目	生産		出荷						在庫
	数量	前年同 月比 (%)	販		売				
			数量	金額	数量	金額	数量	金額	
合計				49,748		15,981		33,767	
機能材計	9,822,208	115.5	10,319,312	41,867	1,572,852	13,484	8,746,460	28,383	4,969,769
ICパッケージ計	86,551	102.2	84,358	11,468	45,757	8,333	38,601	3,135	39,479
サーディップ	50,422	77.9	50,281	1,025	35,551	583	14,730	442	24,852
多層	36,089	180.9	34,077	10,443	10,206	7,750	23,871	2,693	14,627
基盤(白基盤)	86,540	102.8	71,455	1,323	14,220	134	57,235	1,189	23,287
コンデンサ素子	8,630,419	115.4	9,078,065	13,073	911,299	1,168	8,166,766	11,905	4,436,923
圧電素子	291,589	114.5	301,739	7,995	43,913	1,559	257,826	6,437	106,083
ガスセンサ素子	3,779	133.8	3,603	3,712	800	1,335	2,803	2,377	437
その他	723,370	120.9	780,092	4,295	556,863	956	223,229	3,339	363,560
構造材計				7,881		2,497		5,384	
触媒担体*	1,141,804	70.7	1,102,169	1,425	606,214	785	495,955	640	717,435
耐熱材	49,650	102.4	49,730	2,232	29,025	1,010	20,705	1,223	11,393
工具材	4,036	113.1	4,155	1,196	1,739	305	2,416	891	7,444
耐摩耗・耐蝕材	50,476	91.2	51,671	2,516	5,492	287	46,179	2,230	11,186
その他	42,958	114.6	39,630	512	708	111	38,922	401	31,205

\* 数量単位 kg

■ 1994年9月分 通産省調査統計部編「機械統計月報」から [単位：数量(千個)，金額(百万円)]

生産品目	生産			受入 数量	消費 数量	出荷			月末 在庫 数量
	数量	数量前年 同月比 (%)	金額			販売		その他	
						数量	金額	数量	
ダイヤモンド工具	896	105.2	7,018			923	7,486		646
C(W)BN 工具	164	119.7	827			164	900		264
超硬チップ	36,685	110.4	7,845		1,389	36,363	5,938		32,390
光コネクタ	765		517						
固定コンデンサ計	12,687,342	98.0	42,976						
磁器コンデンサ	9,414,987	96.0	15,327						
複合部品	91,024		4,018						
水晶振動子	127,068	104.8	7,118						
サーミスタ計	73,910	122.1	3,135	7,862	2,335	77,999	3,563	2,831	79,882
PTC サーミスタ	23,753	104.8	1,182		15	24,959	1,270	54	39,228
NTC サーミスタ	50,157	132.5	1,953	7,862	2,320	53,040	2,293	2,777	40,682
バリスタ	42,414	33.9	2,845	24,955	465	41,373	2473	24,030	27,717
混成集積回路計	50,871	98.1	18,823	9,080	3,173	53,009	17,155	4,797	24,648
薄膜集積回路	857	120.2	432		1	651	246	50	682
厚膜集積回路	50,014	97.8	18,391	9,080	3,172	52,358	16,909	4,747	23,956