

層位学 (総論 その9-2)

福田 理 おさむ

2.5. 構造土

風化およびその産物である土壌と密接な関係を有し一般地質学の教科書では風化のところで また 地形学のそれでは周氷河地形のところで普通扱われているものに わが国では広く構造土 (独 Structurboden) として知られているものがある。構造土は 高緯度地方あるいは高山地方 すなわち寒冷なところである条件の下に 細かい砂土と粗い砂礫がふるい分けられ かつ後者が移動して形成される各種の幾何学的な模様をもった表土で そのでき方から 流土 (Flow earth) と呼ばれることもある。また 構造土がよく発達している土地は 模様のある土地 (Patterned ground) と呼ばれている。

小林国夫 (1955) は 日本の高山地方に見られる構造土に 大別して次の7種を認めている。

A. 平坦なところに行けるもの

- 1) 環状砂礫 (Stone rings): 亀甲土 亀甲砂礫および多角土など
- 2) 凹穴砂礫 (Stone pits)
- 3) 亀裂土 (Earth fissures)
- 4) 礫原 (Stone pavement, Blockmeer)

B. 緩斜面に行けるもの

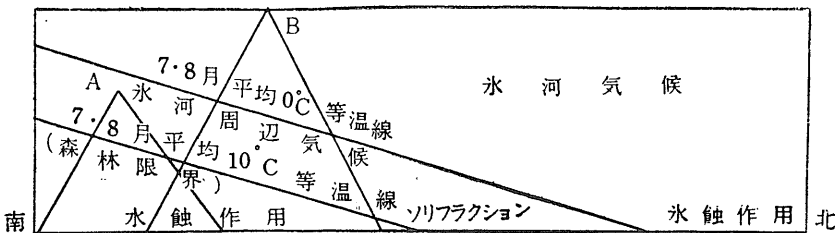
- 1) 階段状砂礫 (Stone terraces): 芝草階段など
- 2) 条線砂礫 (Stone stripes)
- 3) 岩塊流 (Block streams): 岩石氷河 (Rock glaciers) など

このような構造土は 極地旅行者には古くから知られていたが 1910年 ヨーロッパで国際地質学会議が開か

れ その出席者の一行がスピッツベルゲンを訪ね そこで見られるものについて いろいろな意見が出されるまで 地質学者にそれほど注意されていなかった。構造土は初めは高緯度地方にだけ見出されていたが そのうちにアルプス山地にも発見された。日本で学術的にもっとも早く知られた構造土は 1920年 田中阿歌麿・橋本福松によって発見された乗鞍岳亀が池付近の 亀甲砂礫であろう。その後 日本でも構造土が各地から知られるようになったが 本格的に研究されるようになったのは戦後のことで 中でも信州大学の小林国夫のこの方面に対する貢献は大きい。

構造土は 一口でいえば 凍結(霜結) と融解(霜解) とがくり返して行なわれる裸地において 表層土壌中の大・小の構成物質中で行なわれる分級作用の結果できるものである。このような条件をもっともよく備えているのは いわゆる 周氷河気候 (Periglacial climate) が卓越している 周氷河地域 (Periglacial region) であるが 周氷河気候が卓越しているのは 必ずしも氷河の周辺地域ばかりではなく 極地を除く各気候帯の適当な高度帯にも同様なところがある (図4-12) ので 小林国夫 (1955) は これまで氷河周辺地形 (Periglacial topography) とされてきたものを生み出す条件を備えた気候を 周氷河気候 また そのような気候が卓越しているところを 隣接地における氷河の有無に関係なく 周氷河地域 と呼ぶことを提案している。この提案の中でとくに重要なことは 氷河の存否とは関係なしに 独立に周氷河気候があり得ることを認めたことで 筆者も小林の提案に全面的に賛成である。

次に もっとも典型的な構造土とされている 環状砂礫 (図4-13~15) のでき方について もう少し具体的に



第4-12図
北半球における周氷河気候の分布模式図 (A: 周氷河気候だけが存在する山と B: 氷河気候と周氷河気候の両方が存在する山があることに注意された) (小林国夫 1955)

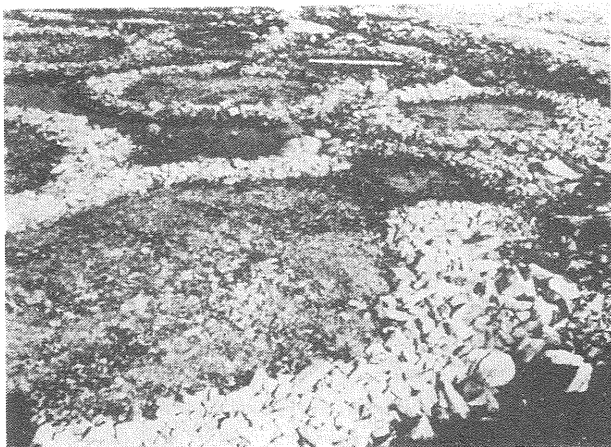
考えてみよう。

まず 風化によってできた岩片や 氷河の運搬物である砂礫のうち 大きなものは その間の空間を埋めている同容積の小さなものの集まりよりも 熱をよく伝えるので その下の水が早く凍結し その膨張による圧力で地表に向かって 選択的に押し上げられる(図4-16)。このようにして一度氷ができると それは激しく成長を続ける。それは 大きな石の下で水が凍結・膨張すると その下の砂・土の中に水の通路ができ 氷の層が成長するのに有利に働くからである。

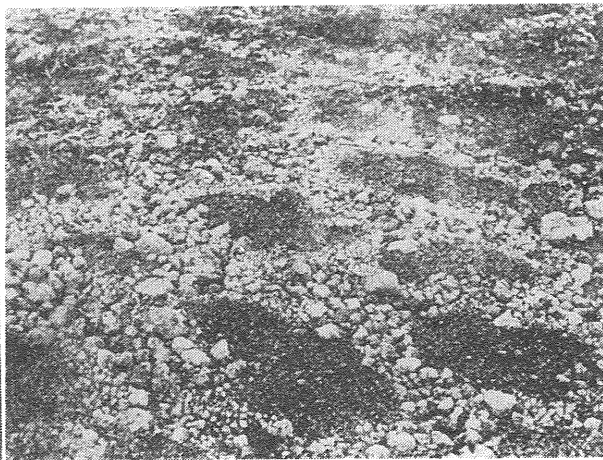
しかし これだけでは 比較的大きな石が地表近くに集まることは説明できても それらが環状に並びかつ連なって 大・小の網目を作っていることを説明できない。この点を明らかにするため 環状砂礫の断面を出して見ると 地表における大・小の砂礫の配列がある程度の深さまで続いている。したがって 環状砂礫を作るような地下における物質の動きは ある意味では“対

流”と呼ばれるような性質のものであることがわかる。気温が上ると 地表面に近い氷がまず融解して水となり温度も上昇するが 下位の氷が融解した水は 0°C に近い水温を保つ。水の比重がもっとも大きいのは4°Cなので ここで比重の垂直分布の逆転が生じ 対流が起こるが 小林国夫(1955)は それだけでは環状砂礫の形成には不十分であるという。すなわち 彼によれば水とともに対流するより細粒の砂・土の動きに誘われて大きな石も徐々に動き ついには環状砂礫を形成するに至る。この説明を図示すると 図4-17のようになる。一般に 環状砂礫の成因については凍結による膨張によって中央部が高くなり 大きな礫が周囲へ滑り落ちるためという説明が与えられているが 実際に中央部からフロントへの勾配がそれほど大きくなることはないので この説明は受け入れがたい。

上に述べた小林の環状砂礫の成因についての対流説に



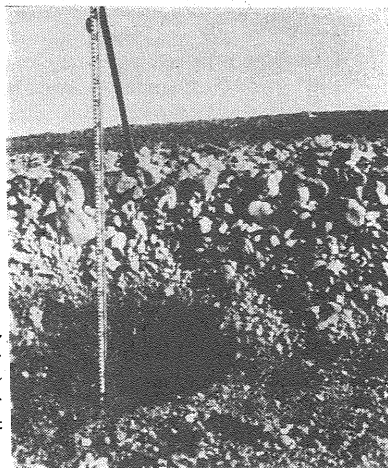
第4-13図 グリーンランドの Thule 付近の緩斜面における環状砂礫 (GILLULY et al., 1968)



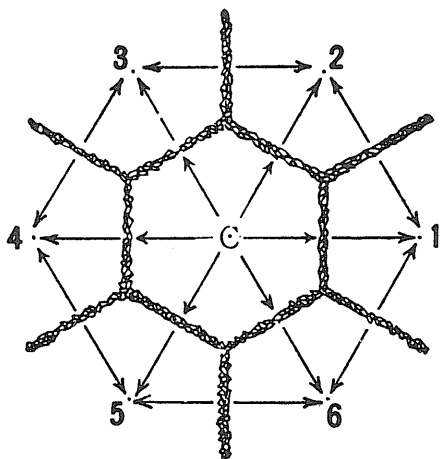
第4-14図 乗鞍岳亀ヶ池畔の環状砂礫(径およそ30~50cm)(辻村太郎による 小林国夫 1955より)



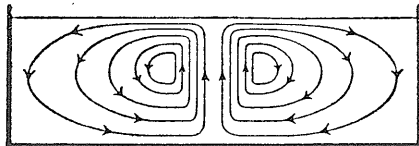
第4-15図 中央アルプス上の岳の環状砂礫(高度2,660m付近)(小林国夫 1955)



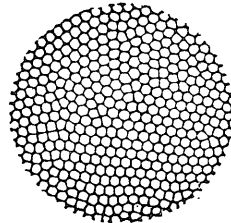
第4-16図 凍結-融解サイクルによる岩片の垂直方向の分級(グリーンランドの Thule 付近)(GILLULY et al., 1968)



第4-17図
環状(亀甲)
砂礫の形成
を示す模式
図(地表に
おける対流
の動きを矢
印で示す)



第4-18図
定常状態に達した対流渦の断面図(下
から一様に熱せられた流体層の中で
対流の方向を示す)(HOLMES 1965)



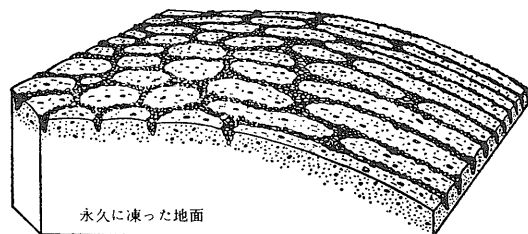
第4-19図
上からみた BENARD の渦
(竹内 均 1970)

関連して思い出されるのは マントル対流の説明によく引き合いに出されるフランスの BENARD, H. (1900) の熱対流に関する実験である。図4-18は 対流が定常状態に達して 下の面で与えられた熱が より熱くて軽い物質の上向きの動きによって 上の面に運ばれ 同じ量のより冷たくて重い物質が下へ移動するような状態になった時の 対流渦の断面図である。対流が均一に分布している時には 液体の層が同じ大きさの対流の細胞に分けられる。それらがお互いに干渉し合って やがて蜜蜂の巣のような すなわち 垂直の壁によって境された六角形の渦ができる(図4-19)。渦の幅は対流層の深さの約3倍であるが それはまた液体の粘性とともに増すとされている。

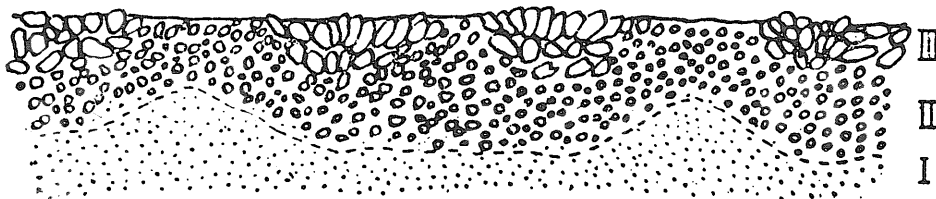
BENARD の実験の場合と同様に 周氷河気候下にある平坦地の岩屑層の中で行なわれる“対流”の細胞の大き

さが等しい場合には 六角形の環状砂礫 すなわち亀甲砂礫 (Stone septaria) ができるが それが不同的場合には 大・小ささまざまな 多角砂礫 (Stone polygons) ができる。岩屑層の厚さ その他の自然条件は 不揃いなのが普通なので 多角砂礫の方がむしろ一般的である。また 凹穴砂礫は 環状砂礫の径が中央に細粒の平坦部ができないほど小さい例と考えればよい。傾斜が数度以内のごくゆるい斜面では 上のような形が崩れ斜面の勾配の方向に伸びて 楕円形かあるいは菱形に近くなる。それがきれいな菱形をなす場合には 菱形砂礫 (Stone lozenges or rhombi) と呼ばれることもある。傾斜がさらにきつくなると 粗い礫と細かいものとが平行の条線をなして並ぶに至る(図4-20~25)。その模式的なものが 条線砂礫 であることは いうまでもない。

環状砂礫と同じような構造は 泥と砂が混り合ったような粒度の小さい物質からなる平坦地にもできる。一般に 亀裂土 と呼ばれているものがそれで 環状砂礫と隣り合わせで見られることもある。たとえば 八が岳の横岳の山麓にある亀甲池(高度2,030m)のほりには 径30~150cmの環状砂礫があるが 礫の少ないところでは 六角形にひび割れ その中央部がもり上った軟泥があり 割れ目には礫や水が入っている。すでに小林(1955)が述べているように このような径の小さい泥の多角形からなる亀裂土の形成過程は 環状砂礫のそれに準ずるものであろう。たとえば HOLMES(1965)によって 夏の間水分がなくなって収縮が起こるためにできるという説明が与えられている 図4-26に示し



第4-20図 条線砂礫の形成を示す模式図 (HOLMES 1965)

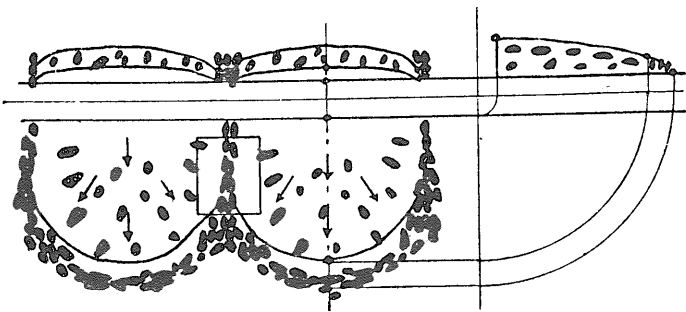


第4-21図
鉢伏山(松本市
南東にあり高度
1,998m)の条線
砂礫にみられる
2~3層構造
(小林国夫1955)

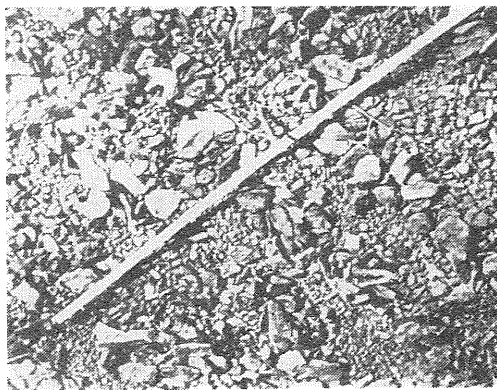
たスピッツベルゲン（北緯80度付近）の亀裂土についても 私には小林（1955）の意見の方がもっともらしく思われる。

しかし 最近南極の南ビクトリアランド（南緯70度付近）で見つかったような 直径が平均30ftもある多角形からなる亀裂土（図4-27）の形成過程までも すべて

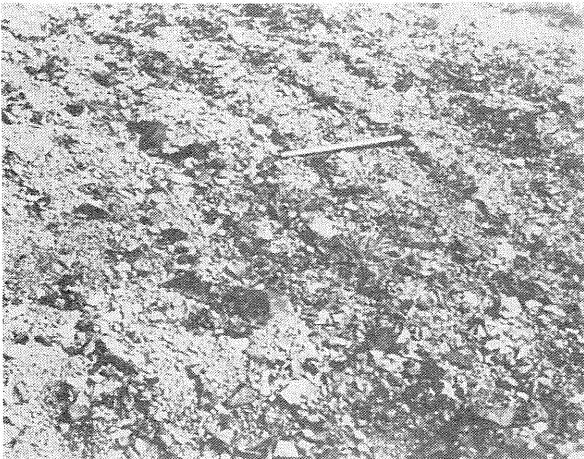
同様に考えることには いささかためらいを感じる。この例では一般に多角形は深さ約2ftの溝で縁取られているが 中には溝の深さが10ftもあるものも知られている。これに対して HOLMES（1965）は 多角形を縁取っている割れ目は 夏から冬にかけて気温が急に下って



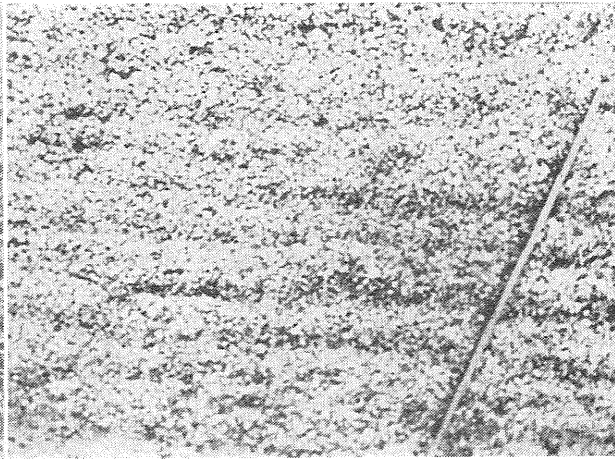
第4-22図 条線砂礫の末端における石の動き方を示す模式図（LUNDQVIST による；小林国夫 1955より）



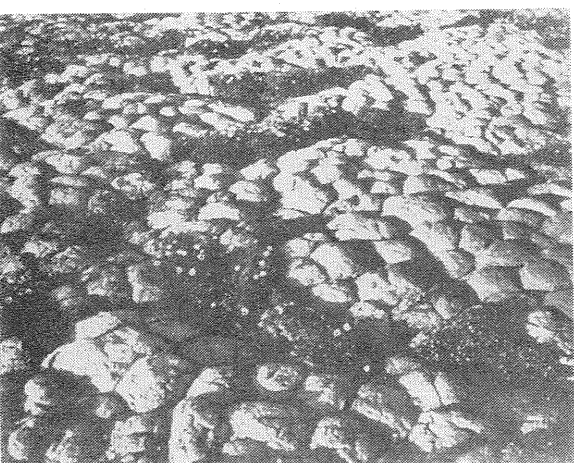
第4-23図 針伏山の条線砂礫（高度1,640m付近）（小林国夫 1955）



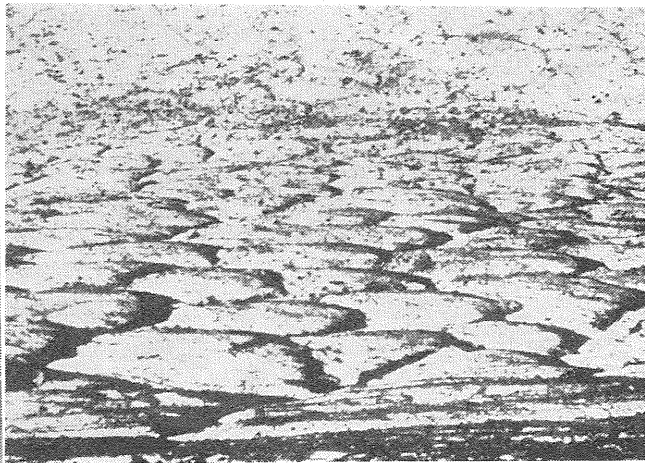
第4-24図 針伏山の条線砂礫（高度1,830m付近）（小林国夫 1955）



第4-25図 木曾南駒ガ岳の条線砂礫（高度2,830m付近）（小林国夫1955）



第4-26図 スピッツベルゲンの亀裂土（多角形には大小があり また大きい割れ目には みやまだいこん草が生えている）（WALTON による；HOLMES 1965より）



第4-27図 南ビクトリアランドの亀裂土（堆石のマントル中に形成されたもので 多角形の直径は平均30ftもある）（WEBB & McKE-LVEY による；HOLMES 1965より）

収縮が起きることによってできる という説明を与えている。すなわち 彼はその成因を 0°C 以下における温度低下による体積の減少（すなわち比重の増加）に帰している。さらに 彼は 雪とそれに少しばかりの融水 および風に吹きつけられた砂が割れ目を埋める結果 割れ目は毎年幅が広くなり かつ深くなる氷の楔に成長すると述べている。この地方は年中霜があり ほとんど融けない寒冷なところなので 上に述べた HOLMES の説明はおよそ的を射ているものと思われる。

また 平坦地において 小林 (1955) のいう“対流”が起こらず もっぱら大きな石の選択的な押し上げによる垂直方向の淘汰だけが行なわれる場合には 礫原が形成される。

模式的な構造土とともに、周氷河地形を特徴づけているものに ソリフラクション (Solifluction) による地形・地物がある。ソリフラクションは 流水の作用によらず 水の凍結と融解の繰り返しによって 岩層が斜面をずり落ちるような運動である。ソリフラクションの名はスウェーデンの地質学者 ANDERSON, J. G. (1909) が 北極海のベア島で見た砂礫の特殊な運動に対して与えたものであるが このような現象に注目したのは 彼が初めてではなく 古くは DARWIN の観察がある。彼の有名なビーグル号航海記 (1831~36年周航) を見ると 1834年3月19日 南大西洋のフォークランド島 (南緯52度付近) の海岸の溪谷に 変な 岩屑流 (Stone rivers) があることを こまかに書いている。

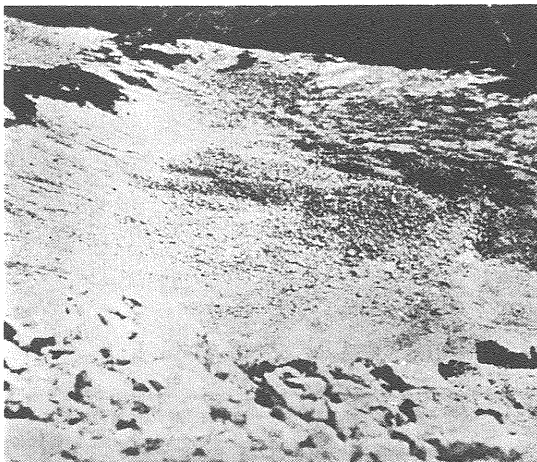
ところで ソリフラクションによってできたと解釈される岩屑流には 淘汰作用の跡が明らかに認められるものと それがはっきりしないものがある。前者の代表的なものが 階段状砂礫であり 後者のそれが 岩石

永河である。わが国では 3,000m級の高山においても 本来の意味での岩屑流はできにくい事情になっているが 薬師岳の中央カール底の堆積物 (図4—28) のように 周氷河気候下にあった後氷期の初め頃の小規模な岩石氷河の遺跡と思われるものが カール底に残されている例は少なくない。

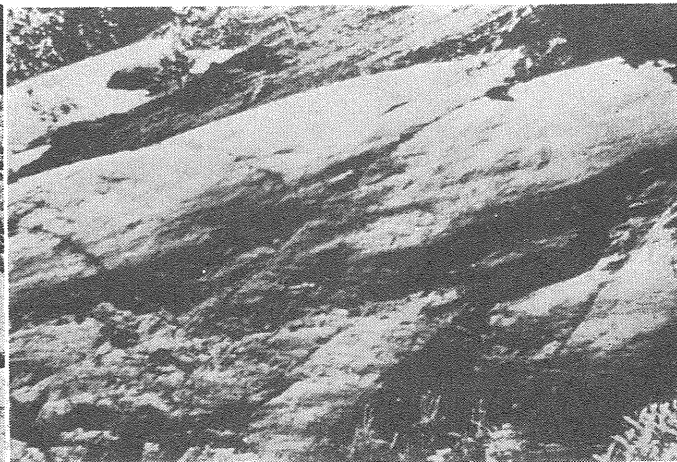
2.6. 風化の速度

風化の速度は 岩石と気候の種類によって 著しく変化する。氷河によって磨かれた火成岩の表面は ニューヨークやマサチューセッツの温帯気候の中にあっても 10,000年以上を経ても なお輝やいている (図4—29) し 同じ氷河によって残された 細かく砕かれた岩石粉末は 分解された物質を ほとんどあるいは少しも含まない。他方 アイオワでは 同じ頃の氷河沈積物に風化による土壌断面がよく発達している。

化学的風化が 湿潤な熱帯気候の中で もっとも早く進行することは ほとんど確実なことであるが 時間がある程度経過すると 分解された物質の厚い被覆が形成されて まわりの環境との間に 事実上の平衡状態が成立するに至る。カンボジアにおいて 有名なアンコール (Angkor) の遺跡のラテライトで建造された丸屋根が 7世紀を経過しても ほとんど完全に保たれているのは このためである。反対に 8世紀ほど前 フン族によってボルガ河谷に残された墓塚の上には すでにかなり明瞭な土壌断面が認められる。これについては 墓塚の建造に使われたボルガの河川堆積物は 冷涼な気候の中にあっても その場所での風化の産物であるため まわりの環境との間に平衡状態が成立しやすいカンボジアのラテライトよりも 風化を受けやすいと考えるべき



第4—28図 岩石氷河の遺跡と思われる堆積物 (薬師岳中央カール底のもの) (小林国夫 1955)



第4—29図 氷河によって磨かれた火成岩の表面 (ニューヨーク州 Adirondacks におけるもので 10,000年もの間の風化によく耐えている) (GILLULY et al., 1968)

であろう。

風化の速度がきわめて変化に富んでいることを明らかにするために さらにいくつかの例を挙げておこう。

ニューヨークおよびニューイングランドの氷河砕屑物は西ヨーロッパと大差のない気候の中にあつて わずかしか風化を受けていないのに ノルマンディでは ある城の1066年頃を中心集積されたと考えられるカキ殻の山塞に 厚さ9cmのA層 および厚さ31cmのB層がすでに形成されている。 イングランドの Northumberland では 古い建造物の測定によれば 石灰岩が300年間におよそ1インチの割合いで溶け去っているように見えるが 同じ地域の他の資料から見ると この速度の推定は大き過ぎ 実際にはその半分以下であつたろうとされている。 インドネシアでは Krakataw 火山の1883年の噴火に由来する火山灰に発達したA層は 60年間に C層に比べて シリカが5%減少し アルミナが2%増加していることが知られている。 このような相違は 火山灰中のガラス質軽石の分解がきわめて早いことを暗示している。 ウィスコンシンにおいては 砂地の耕作を通してばらまかれた黒雲母が 継続して行なわれたわずか4回の小麦の収穫の結果 含水粘土鉱物であるバミキュライト(Vermiculite)に変わっている。 さらに南のノース・カロライナでは 放棄された耕地に 合わせて5インチ(12cm)の厚さの 新しいA層およびB層をもった土壌が 50年以内に形成されている。

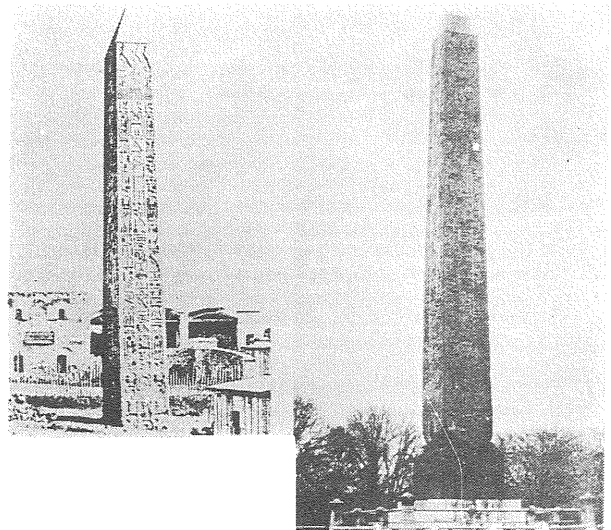
古い墓石もまたこの問題に興味ある資料を提供する。 スコットランドの Edinburgh では 80年を経ないで炭酸ガスの発見者 JOSEPH BLACK の記念碑中の大理石に刻まれた銘文が 皮肉にも おもに彼が発見したガスの作用で ほとんど読めなくなつてしまった。 多くの例から見て Edinburghでは 平均1世紀におよそ1/8インチの割合いで 上張りの石灰岩が溶け去っている。 このような化学的風化に強い粘板岩でさえ 1世紀を経過すると 表面が見すばらしいまでにざらついてくる。

風化の速度がもっとも小さいのは 熱い乾燥気候の中で行なわれる場合である。 北西アラビアの脆い砂岩の崖の中に作られた墓穴のドアに B. C. 3年~A. D. 79年の間に刻まれた銘文は 今日でもなお読むことができる。 40世紀もの昔から 上エジプトの Assuan ダムからほど遠くない石切場に置かれていた Syene 花崗岩と呼ばれる赤い花崗岩から オベリスクとして切り出され 磨かれ かつ日付けを刻まれた岩塊について見ると その表面は 直射日光に曝されているにもかかわらず 現

在なお堅硬で 磨かれたままになっている。 B. C. 2850年から同213年の間のいろいろな年代に この石切場から切り出された岩石で作られた巨大な彫像が Luxorをはじめとする幾分湿潤な気候の中・下エジプトの各地で建られ また 同じ岩石のブロックが Cairo 付近のピラミッドの上張りに使われた。 このようなエジプト全域に分布する Assuan の花崗岩で作られた建造物を研究したアメリカの地質学者 D. C. BARTON (1916) は わずかに湿潤な下エジプトにおけるこの花崗岩の剝落の平均速度を 1,000年当りおよそ1あるいは2mmと計算している。

それぞれ多くの深く切りこまれた神聖象形文字(Hieroglyphics)をもち かつ今日「クレオパトラの針」(Cleopatra's Needle)と呼ばれている Syene 花崗岩で作られた2つのオベリスクは エジプトに置かれている間は およそ3,500年も経っているのに わずかに風化を受けているに過ぎない。 しかし 後年 London に運ばれたその1つは ある程度評価に値する風化を受けている。 また 1,800年頃 New York に運ばれ Central Park に建てられて そこで霜 湿気 および2酸化炭素に富んだ空気に曝された他の1つは (1920年および1950年に 保存のためのシェルラック塗付が行なわれているにもかかわらず) 1,950年までに 絵物語の部分完全に消えてしまうほど 風化のために表面が崩壊してしまつた(図4-30)。 これから考えると エジプトにおけるおよそ3,500年間のすべての風化の営力よりも New York におけるわずか70回の冬の間の霜だけによる風化の営力の方が大きい といわざるを得ない。

(筆者は 燃料部)



第4-30図 クレオパトラの針(左エジプトにおける状態; 右 New York 市 Central Park のもの)(GILLULY et al., 1968)