



Title	ノルウェーのNigardsbreenより放出された氷河砂とシルトの表面構造と鉱物成分について
Author(s)	黒岩, 大助; KUROIWA, Daisuke
Citation	低温科学. 物理篇, 28, 97-104
Issue Date	1971-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18141
Type	departmental bulletin paper
File Information	28_p97-104.pdf



ノルウェーの Nigardsbreen より放出された氷河砂 とシルトの表面構造と鉱物成分について*

黒岩大助
(低温科学研究所)
(昭和45年8月受理)

I. ま え が き

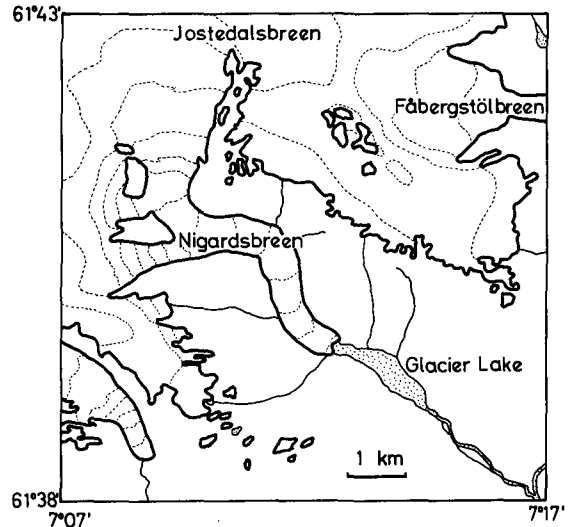
1969年9月7日~13日の間英国ケンブリッジで氷河の水文学に関する討論会が開かれたあと、Østrem 博士が主催して9月14日~20日の間ノルウェーの典型的な氷河を見学する機会があった。筆者がこの見学旅行に参加してノルウェーの後退しつつある氷河の一つである Nigardsbreen (breen はノルウェー語で the glacier の意) を訪れたとき、この氷河の末端で砂とシルトを少量採取した。この報告は、これら氷河砂とシルトの表面構造を走査型電子顕微鏡で調べ、かつ鉱物成分を X 線回折法で分析して両者のちがいを調べたものである。氷河の末端の洞穴からはおびただしい人頭大の岩石、礫、小石、砂、はては顕微鏡の大きさのシルトまで大小さまざまな物質が融解水と共に放出されている。これらの物質はいわゆる“氷河作用”によって形成されたものと考えられるが、氷河がどんな作用で基盤の岩石を大きさが数十 cm から数ミクロンにわたる広い範囲の大きさに破碎しているのかという点になるとすこぶる疑問である。あるいは氷河は直接岩石を破壊しているのではなくて、周辺の風化作用で破碎された岩石を運搬しているのにすぎないのかもしれない。このような問題は氷河—地質学 (glacio-geology) の問題であるが、氷河が放出した砂や岩石の表面の構造を顕微鏡でくわしく調べてみるのもこの問題への一つのアプローチであると思われる。砂や岩石の破面の観察からそれがどのようにして破壊されたかがある程度推定できるし、氷河や融解水によって輸送されている間にこうむった磨耗や溶解の程度も推定できるであろう。

さて砂やシルトにかぎらず一般に凹凸のはげしい物体の表面を直接顕微鏡で調べることは大変困難である。なぜかという光学顕微鏡は焦点深度が浅いので凹凸のある表面を観測することはむずかしい。また電子顕微鏡で表面を調べようとすると表面のレプリカをつくらなければならないが透過型電子顕微鏡ではレプリカ膜の厚さを 0.1μ 以下のうすいものにする必要があり、凹凸の劇しい試料の表面のレプリカをつくるのが困難である。ところが最近開発された走査型電子顕微鏡は従来の透過型電子顕微鏡と原理的に異った光学系からなりたっていて焦点深度が非常に深いので凹凸のある表面を3次元的に観察できる。しかも、試料の薄片をつくらず、レプリカをとったりする必要がなく、試料そのものの表面が観察できるという利点がある。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1098号

II. Nigardsbreen の位置

Nigardsbreen はノルウェーの $61^{\circ}42' N$, $7^{\circ}12' E$ にあって Jostedalsbreen の広大な氷源からはほぼ南東に流下している氷河の一つである。第1図にその周辺の略図を示した。氷河の上の点線は 100 m 毎の等高線である。この氷河は平均して $60\sim 70\text{ m/year}$ の速度で後退しており、末端の氷河湖は 1937 年頃から形成され始め、全長約 200 m, 面積 $6,500\text{ m}^2$, 最大水深 30 m の細長い湖である。図版 I, A は氷河湖の中ほどからながめた氷河の末端の写真で、現在 (1969 年) では写真のように岩盤が露出しており、末端は氷河湖から更に約 100 m ほど後退している。写真右上の白く輝いている部分が源流の Jostedalsbreen の一部である。氷河の末端には図版 I, B に示すような洞穴があって、その洞穴からは多量の融解水と共におびただしい人頭大の岩石、礫、小石、砂、シルトが放出されている。Østrem 博士の測定によると 1968 年 6 月 19 日から 9 月 2 日の間に氷河から氷河湖に流入した物質の量は約 4,400 ton でそのうち約 1,400 ton の物質が氷河湖から流出したという。氷河の両岸は図にみられるようにきりたった露岩の急斜面である。ここに報告する試料の砂は氷河の洞穴から流れ出した小川が氷河湖に流入する直前の川底から採取し、シルトは氷河湖のなかほどの水が淀んでいる小さな入江の底の沈澱から採取した。



第1図 Nigardsbreen と氷河湖周辺の地図

III. 試料の製作

川底に沈積している砂の大きさはいろいろである。われわれが採取した砂の大きさの範囲は $50\sim 700\ \mu\text{m}$ ぐらいであった。乾燥すると太陽光線を反射してキラキラと輝く結晶質のものが多かった。これに反し湖水の底に沈澱していたシルトの粒子は大変細かくて一見泥土に似ており、採取するとき生じた水の渦によって透明な湖の水が一時にごってしまったほどである。乾燥したときの色は全体としてやや青味がかっており、肉眼では個々の粒子を区別することはできない。

砂もシルトも共に蒸留水で何回もすすぎ乾燥器で乾した。走査型電子顕微鏡の試料支持台は直径 1 cm, 高さ 1 cm の真鍮製の円柱である。この支持台の上に砂やシルトをのせて固定するのであるが、われわれはまず両面に粘着性のあるスコッチテープを直径 1 cm の大きさに切って片面を試料支持台の上にしかりとはりつけ、その上に砂やシルトをたっぷりふりかけた。そうして、試料と粘着テープとの接着を確実にするためにきれいなガラス片で砂やシル

トのうえから軽く押しつけた。このままでは検鏡するには試料の量が多すぎるので試料支持台をかたむけ、側面を軽打しつつ不用な試料を除去した。こうするとテープの粘着面には、軽打してもこぼれ落ちないように固定された砂やシルトのうすい層がのこる。このまま走査型電子顕微鏡にかけてもよいわけであるが、鮮明な電子顕微鏡写真をとるために更に次のような処置をした。

走査型電子顕微鏡では、試料表面は非常に細い電子ビームで走査される。そのとき試料表面より放出される2次電子が増倍され、電気信号に変えられたのち、テレビジョンと同じ原理で蛍光板の上に結像される。試料表面より放出される2次電子の強度は、試料表面の凹凸に関係しているので、コントラストのある表面構造の写真をとることができる。ところが砂やシルトは電気的には絶縁物に近い。したがってその表面を一次電子で走査したときに局部的に電荷が試料表面に蓄積され、これが時々放電して像が乱される恐れがある。これを防止するため、試料支持台を真空容器のなかに入れ、試料表面にあらかじめ金の薄膜を蒸着させた。金の薄膜の厚さはきわめてうすいもので、そのため砂やシルトの表面構造が乱されることはない。こうすると試料からの2次電子放射を容易にするだけでなく試料表面の局部的な帯電を防止することができ、よい写真をとることができる。

IV. 氷河砂の表面構造

図版 II, C は川底から採取された砂の典型的な走査型電子顕微鏡写真の一例である。この図にみられるように大部分の砂粒はすどく角ばっている。しかし、なかには平らで滑らかな表面をもっているものもある。砂粒の大きさの範囲は大体 50~700 μm である。この図で **a** と印したやや丸味のある粒子はおそらくこのあとの鉱物成分の X 線分析に示すように、もっとも含有頻度の高い石英であろうと考えられる。これに対し平らで滑らかな面をもっている粒子 **b** は白雲母 (Muscovite) 又は黒雲母 (Biotite) であろうと思われる。図版 II, D は C のなかで **a** と印した粒子の黒い点線でかこんだ部分を拡大したものである。この写真にみられるように、低倍率では一見丸くみえる粒子でもその表面はすどい破面で構成されていることがわかる。この粒子がいつ、どこで、どのようにして破碎されたかはわからないが長時間流水によって輸送され、川底に沈積し、それからあとも長時間流水にさらされていたことは確かである。しかしそれにしても粒子の表面がひどい磨耗や溶解を受けたようにはみられない。図版 III, E は図版 II, C のなかで **b** と印した粒子の拡大写真である。この写真にみられるようにこの粒子はほぼ平らな滑面をもっている。白雲母又は黒雲母の劈開面と考えられる。この写真のなかで黒い点線で囲んだ部分を拡大したのが同じ図版の写真 F である。この図にみられるようにせまくて深い割れ目がほぼ中央を走っているが、その割れ目の壁をみると薄板の重なった構造 (sheet-like structure) がみとめられる。この割れ目は多分この粒子が強い曲げ、または圧縮を受けたときぎ屈したものである。したがって、割れ目をはさむ両側の部分はたがいにかたむいている。このため最上層の薄板 **p** は下の面からはがれていることでわかる。薄板 **p** の厚さはきわめてうすいものと想像される。なぜかという、この **p** の板の下を走っている割れ目が黒いぼんやりとした筋となって板の表面から観測できるからである。倍率から判断して薄板の厚さは 0.2~

0.3 μm の程度である。この写真から、雲母の類は外力を受けると劈開面で劈開し、薄板となって容易に母岩からはがれてゆくものと推察される。このような雲母の薄板の破片は、このあとでのべるシルトの沈澱物の重要な成分の一つをなすものと思われる。

V. シルトの表面構造

図版 IV, G は湖水の底に沈澱していたシルトの走査型電子顕微鏡写真である。シルトの粒子は図版 II に示した砂粒とは外観も大きさも非常にちがっている。その大きさは 3~50 μm の程度である。一見して薄板状のものが多くわかる。G のなかで a と印した角板状の粒子は多分石英、b と印した薄板は白雲母又は黒雲母が劈開された破片であろう。図版 IV, H は G のなかで点線でかこんだ部分を更に拡大したものである。この図にみられるように薄板状の破片が 3 次元的に重なり互いにかみあっている様子がよくわかる。シルト粒子は長年月の間氷河湖の底に沈んでいたものであるが、それにもかかわらず、薄板の破片はすどい縁辺をもって水に溶解したあとはみられない。このようなシルトを少量指先につけてこするとザラザラした抵抗感はなく、すべすべとしている。このことは薄板状のマイカの破片が多く含まれているためと思われる。

図版 V, I はシルト粒子のいま一つの写真である。J は I と同じ視野を走査方向を一方向に変調した電子ビームで走査して得られた写真である。2 本の走査線の間隔はその場所での試料表面の高さの差に比例する。写真 I のなかの p と印した粒子は、J のなかの p と印した粒子に対応している。

VI. 氷河砂の Fractography

これまでは天然の砂粒とシルトの粒子との表面構造を調べてきた。いずれも長い間、流水にさらされていたり湖底に沈んでいてその表面は水と接触していたものである。そこでわれわれは氷河砂を人工的に砕き、すりつぶしたときの破面の電子顕微鏡写真をとって比較してみた。図版 VI の K と L とがその代表的な破断面の写真である。ある粒子の表面は K の写真のようにザクザクの短冊状に破砕された。またある粒子は L のように規則正しい階段状の破断面を示した。L の階段状の一つのステップをよく注意してみると 0.2~0.3 μm ぐらいの薄板からなりたっていることがわかる。そして同じ写真の右下にはそのような薄板の破片がみえる。この粒子はおそらく白雲母または黒雲母の底面に直角に破断がおこったものと考えられる。いずれにしても、砂粒を人工的に破壊すると天然のシルトのなかに見い出されたような厚さのきわめて薄い板状の破片がつくられることがわかる。

VII. 砂粒及びシルトに含まれる鉱物成分

走査型電子顕微鏡写真にみられるように、Nigardsbreen より放出された砂とシルトは、外観も大きさもひどく異なっている。しかし、これらの粒子は何れも広い意味での“氷河作用”によって同じ起源の岩盤から作り出されたものであると考えられる。もしそうだとすれば砂とシルトのなかに含まれる鉱物成分はほとんど等しいであろう。しかしこの仮定は、砂とシル

トがその成生、輸送、沈澱等のプロセスを通じて鉱物成分に何らの変化もおこらなかったと考える限り正しい。次にこれらの点を調べてみよう。

氷河砂やシルトの鉱物成分を調べる一つの方法は岩石学の方法に従ってこれら物質の薄片をつくりこれを鉱物顕微鏡でくわしく調べてみることである。砂及びシルトを特殊なプラスチックで固定し、これを適当な大きさの板に切り出し、研磨機で厚さの非常にうすい薄片に仕上げる。そしてそれを鉱物顕微鏡で解析するのである。図版 VII, M 及び N はこのようにしてつくった氷河砂及びシルトの偏光顕微鏡写真である。写真 M にみられるように一つ一つの砂つぶはそれぞれ異った結晶構造を示すいろいろな鉱物成分からなりたっている。しかし、小さい粒子のなかには光学的にみて単一物質からなると思われるものも含まれていた。写真 N に示すようにシルトの粒子は非常に小さいので結晶構造を観察することはむずかしい。N のなかで斜めに細長くみえる粒子は、シルトのなかに多い薄板状粒子の断面を示すものと思われる。氷河砂の鉱物成分の解析の結果、

石英 (Quartz), 白雲母 (Biotite), 黒雲母 (Muscovite), 長石 (Potash-feldspar)

斜長石 (Plagioclase), 角閃石 (Hornblende), 緑泥岩 (Chlorite), 緑簾石 (Epidot)

風信子鉱 (Zircon), チタン石 (Sphene), 燐灰石 (Apatite), 磁鉄鉱 (Magnetite)

などが含まれていることがわかった。シルトの含有鉱物成分はこの方法ではわからないので次のような粉末 X 線回折法で定性分析を行なった。

X 線回折で分析するためには砂粒はこまかく砕き乳鉢ですりつぶして粉末にする。(シルトはそのままよい) これをプラスチックの枠に入れ X 線 Diffractometer にかける。図版 VIII の A 及び B がそれぞれ氷河砂及びシルトの X 線回折のダイアグラムである。横軸は回折角 2θ を、縦軸はそれぞれの鉱物成分より回折された X 線の強度が示されている。測定は回折角が $5^\circ \rightarrow 90^\circ$ まで行なったが図には $5^\circ \sim 40^\circ$ までの範囲のダイアグラムが示されている。 40° 以上の角度では砂もシルトも回折強度は小さくほとんど変化を示さなかったからである。この図にみられるごとく、ダイアグラムの一般的な形は砂もシルトもあまり変らない。しかし、縦軸の回折強度には A と B とで大きな違いがみられる。まずダイアグラムの左の端に近い回折角 8.8° のところにあらわれている MB と印した山に注目しよう。これらの山は分析の結果、白雲母または黒雲母の底面 (格子常数 $d=10.00 \text{ \AA}$) から回折された X 線の強度をあらわす。明らかにシルト (ダイアグラム B) のこれに相当する山の高さが砂粒 (ダイアグラム A) の山の高さよりも大きいし、また幅も少し広い。このことはシルトのなかに含まれている白雲母又は黒雲母の成分が砂粒のなかに含まれているものに比べて多いことを意味する。次に、A と B のダイアグラムで回折角が 27.5° 付近にあらわれた H と印した山の高さを比べてみよう。この山は角閃石の格子常数 $d=3.252 \text{ \AA}$ の格子面より回折された X 線の強度をあらわす。明らかにシルトの山の高さは砂粒のその約 $1/3$ に減じている。このことはシルトに含まれる角閃石の成分は砂粒に含まれているそれに比べて著しく少ないことを示す。また A と B のダイアグラムで、もっとも強く出ている MBFQ と印した山は主として石英又は長石の格子常数 $d=3.348 \text{ \AA}$ の格子面より回折される X 線の強度を示す。もっともこの山には雲母系鉱物の同じ格子常数の格子面からの回折も含まれるがその割合は石英や長石のそれに比べれば小さく無視できる。した

がって石英と長石はいずれも砂とシルトの主な構成成分であることをあらわす。また、回折角 28.8° のところにあらわれた **PM** と印した山は斜長石と雲母の格子常数 $d=3.195 \text{ \AA}$ の格子面よりの回折である。

VIII. 結 語

ノルウェーの Nigardsbreen から放出された氷河砂とシルトの表面構造を走査型電子顕微鏡で調べた。砂は氷河の洞穴より流れ出る小川の底から採取し、シルトは小川が流入している氷河湖の底から採取した。観測した砂の粒径は $50\sim 700 \mu\text{m}$ 、シルトのそれは $3\sim 50 \mu\text{m}$ であった。氷河砂の表面では、石英又は長石系鉱物のものと思われるすどくとがった破面や雲母系鉱物の比較的平らな劈開面などが観察された。シルトには石英や長石とみられる細かい角ばった破片の他に雲母の薄板とみられる粒子が多く見出された。氷河砂とシルトを固定し薄片をつくり鉱物顕微鏡で調べた結果、氷河砂の主な成分は石英、長石、白雲母、黒雲母、角閃石等から成り立っていた。シルトの岩石学的検査はむずかしかったので X 線 diffractometer で分析した。その結果、シルトにおける雲母系鉱物の割合は氷河砂におけるそれよりも多いこと、逆に角閃石の占める割合はシルトでは氷河砂に比べてずっと少ないことがわかった。このような観測結果はごく大ざっぱではあるが、次のように説明できるであろう。すなわち、シルトのなかに多く見出される薄板状物質は 6 方晶系に属する雲母系鉱物であると考えられる。雲母のモース硬度は比較的小さくて 2.3~3 の程度であるから、雲母系の鉱物が何らかの外力をうけると容易に底面で劈開し、薄片となって母岩から剝離してゆくであろう。図版 III の **F** はこのことを暗示しているし、われわれが人工的に破碎した氷河砂の破面観察からもそのことが裏付けられる。このような雲母系の薄片の比表面積は、粒状の砂のそれに比べてはるかに大きいであろう。したがって流水によってこれらの物質が輸送されてゆくとき、雲母系の薄板は遠くまで運ばれ、やがて氷河湖の底に沈澱し、シルトのなかの有力な成分になるであろう。しかし砂粒はそれほど遠くまで運ばれないであろう。つまり流水によってこれら粒子の sorting (ふるいわけ) が行なわれるわけである。その結果として、氷河の末端から遠くはなれた氷河湖の底のシルトには比較的雲母系鉱物が多く含まれていたと考えられる。またシルトのなかには角閃石の割合が氷河砂のそれに比べて少なかったが、角閃石は斜方、3 斜または単斜晶系などに属する複雑な鉱物でモース硬度も大きく 4~6.5 である。しかも結晶習性は柱状であるといわれている。したがって角閃石は雲母系鉱物に比べれば、同じ外力に対しては破碎されにくいし、また、破碎されたとしても雲母のように比表面積の大きい薄板状にはならないであろう。このことが湖水の底に沈積しているシルトのなかに角閃石の割合の少ない一つの原因と考えられる。

ここにのべた推論は走査型電子顕微鏡による氷河砂とシルトの表面観察と鉱物成分の X 線分析との結果を基礎として行なったものである。氷河砂やシルトの成生機構を知る一つの参考となれば幸いである。

謝 辞

この報告に示した多くの写真は日立製作所那珂工場の走査型電子顕微鏡によって撮影されたものである。また、氷河砂とシルトの鉱物成分の岩石学的検査をしていただいた北大理学部

地質学教室木崎甲子郎博士, X線分析を担当して下さった低温科学研究所凍上学部門堀口薫君に対し深甚なる感謝の意をあらわす。また著者は有益な御教示をいただいた北大理学部地質学教室湊正雄教授及び Nigardsbreen の写真を提供していただき, 同時に有益な御助言をいただいた広島大学文理学部地質学教室吉田栄夫博士に対し深甚なる謝意をあらわす。

Summary

The surface topography of silt and sand discharged from Nigardsbreen was investigated using a scanning electron microscope. Nigardsbreen is one of the retreating glaciers in Norway. A rushing river flowing out from a glacier cave flows down onto the bed-rock and enters a glacier lake. The sand and silt specimens were sampled at the bottom of the river and at the surface of sediments in the glacier lake. Scanning electron photomicrographs of these materials indicated that the surface of sand grains consisted of angular and sharp fractures and that the silt specimens were composed of many minute angular and flaky fragments of minerals. The mineral compositions of these materials were examined by the methods of petrography and X-ray diffractometer. Quartz, biotite, muscovite, feldspars, hornblende and so forth were found. The X-ray analysis of mineral compositions of sand and silt showed that the proportion of biotite or muscovite in the silt was higher than that in sand and the proportion of hornblende in silt was lower than that in sand (Plate VIII, **A. B.**). These differences in mineral compositions may be explained as follows. Many flaky fragments found in the silt specimen are considered to be a biotite or muscovite. As Mohs's hardness of biotite or muscovite is comparatively low, they may be easily cleaved at the basal planes and become flakes as seen in figure **F** in plate III. Fractography of sand grains also showed that many flaky fragments could be produced by crushing and grinding as shown in figures **K** and **L** in Plate VI. Since the specific surface area of these flakes is larger than that of granular sand grains, they may be easily sorted out and transported by running water and sedimented at the bottom of the glacier lake. Contrarily, hornblende is one of the hard minerals and it could not be crushed into flakes. Therefore, the selection process due to running water may be the main reason for producing the differences in proportion of minerals between silt and sand.

図版説明

- 図版 I **A.** Nigardsbreen の末端と氷河湖
 B. 氷河末端より流出する融解水の小川
- 図版 II **C.** 氷河砂の走査型電子顕微鏡写真 (×100)
 a は石英又は長石の類, **b** は雲母系の鉱物
 D. 同上粒子 **a** の点線でかこんだ部分の拡大写真 (×4000)
- 図版 III **E.** 図版 II, **C** の粒子 **b** の拡大写真 (×300)
 F. 同上点線で囲んだ部分の拡大写真 (×3000)
- 図版 IV **G.** シルトの走査電子顕微鏡写真 (×1150)
 a は石英又は長石の岩片, **b** は雲母の薄板
 H. 同上点線でかこんだ部分の拡大写真 (×4000)
- 図版 V **I.** シルトのかたまり (×1150)
 J. 同上, 同じ視野を偏向ビームによって走査して得られた写真 (×1150)
 J と **I** とで **p** と印した粒子は同じ粒子
- 図版 VI **K.** 氷河砂を人工的に破碎したとき生じた破片 (×4000)
 L. 氷河砂の段階的な破断面 (×4000)
- 図版 VII **M.** 氷河砂の薄片の偏光顕微鏡写真 (×105)
 N. シルトの薄片の偏光顕微鏡写真 (×450)
- 図版 VIII 氷河砂とシルトの X 線回折によるダイアグラム。横軸は回折角 2θ , 縦軸は回折強度
 A……氷河砂
 B……シルト

