

氷河堆積物に含まれる石英砂粒の 化学的作用による表面組織

清 水 文 健*

国立防災科学技術センター

Chemical Weathering Features on Quartz Grains in the Glacial Deposits of the Europe Alps, the Nepal Himalaya and the Japan Alps

By

Fumitake Shimizu

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

It is a generally believed concept that the intense degree of chemical weathering is a function of the length of time. In order to confirm the validity of this concept, the surface textures of quartz sand grains in the glacial deposits of known age have been examined by scanning electron microscopy. Quartz grains were sampled from the glacial deposits of the Europe Alps, the Nepal Himalaya and the Japan Alps. The results are as follows.

Among chemically produced surface textures, those of silica precipitation far outweigh those due to solution. However, silica precipitation on quartz grains under glacial environments is not so active in comparison with those under marine or aeolian environments.

There is not a difference between the intense degree of chemical weathering on the quartz grains in the late Pleistocene glacial deposits and those in the modern glacial deposits. This fact indicates that the length of time is not an important factor for the chemical weathering. Chemical weathering on quartz grains in glacial deposits is controlled by the surrounding natural environments. Among various environmental factors which are related to chemical weathering, the chemical composition and the movement of melt-water are the most important ones.

I. はじめに

Biederman (1962), Krinsley and Takahashi (1962) によって初めて報告されて以来、堆積物に含まれている石英砂粒の表面組織を指標として、堆積物の形成環境を明らかにしようとする試みは、多くの研究者によって行われてきた。走査電子顕微鏡 (Scanning

* 第3研究部地表変動防災研究室

Electron Microscope ; 略称, SEM) の出現は, この種の分析研究に, 短時間で多数のサンプルを, 直接正確に観察し処理できるという便利さを提供し, 形成環境の解釈は長足の進歩をとげた.

各種環境下の堆積物に含まれている石英砂粒は, 多かれ少なかれ, 化学的作用を受けており, 表面組織の解釈が困難な場合も多い. 従来, この化学的作用の著しさの度合は堆積物が形成されて以来今日に至るまでの時間の長さや密接な関係があると考えられ(例えば, Margolis, 1968), 形成時代の古い堆積物に含まれている石英砂粒ほど化学的作用を強く受け, 表面組織が複雑になるとされてきた(例えば, 金折ほか, 1978).

本稿では, ヨーロッパ・アルプス, ネパール・ヒマラヤ, 日本アルプスに発達する形成時代の判明している最終氷期および現成の氷河堆積物に含まれている石英砂粒640粒(32試料)を走査電子顕微鏡によって調べ, その表面組織に見られる化学的作用の諸相を比較することによって, 化学的作用の強弱は時間の関数ではなくて, 堆積物のおかれている自然環境に支配されていることを明らかにし, さらに, 氷河環境下では, 化学的作用の中でも Solution (溶解作用) よりシリカの precipitation (沈殿作用) の方が顕著であることを示した. これらのことを考え合わせて堆積物の風化を知る手掛りとしたい.

なお, 使用した試料は, ヨーロッパ・アルプスのものは明治大学の小嶋尚教授, ネパール・ヒマラヤのものは, ネパール・ヒマラヤ氷河学術調査隊(代表者, 名古屋大学 樋口敬二教授), 日本アルプスのものは筆者らが採取したものの一部である.

II. 石英砂粒表面組織の観察

1. 試料の分類

氷河堆積物は, 氷河の底に沿って運搬され, 氷河の後退した谷底に堆積した無層理, 無淘汰の角礫・亜角礫と粘土の雑多な混合物であるロッジメント・ティル (lodgment till), 氷河を囲む岩石斜面からマス・ウェスティングによってもたらされ, 氷河の中や表面に乗って運搬され, 氷河の融解とともにロッジメント・ティルの上に堆積したアブレーション・ティル (ablation till), 融けつつある氷河の近くに堆積した部分的に淘汰され, おおまかに成層したアイスコンタクト堆積物 (ice-contact stratified drift), 融氷水によって運搬され, 堆石堤の前面に堆積したアウトウォッシュ堆積物 (outwash deposit) に分けられる. これらの物質は1ないしそれ以上の種類の氷河堆積物とともに, 堆石堤 (moraine), 底堆石 (ground moraine), 側堆石堤 (lateral moraine), ケーム段丘 (kame terrace), ドラムリン (drumlin) 注1, アウトウォッシュ平野などの氷河成堆積地形をつくる (Embleton

注1: 移動中の氷の下に形成された堆積地形で底堆石の一部. 平面形は楕円形, 縦断面は上流端付近に頂上部をもつ滑らかな流線形を成す. 長軸は氷河の流れの方向に平行. 終堆石堤の内側に群をなして存在する. アイルランド語源で, M. Close (1866) によって術語化された.

and King, 1968; Flint, 1971). いろいろな山岳氷河とそれらがつくる堆積地形の位置関係は図1のようである(Vivian, 1975より作図).

観察した試料を採取した堆積物の種類, 採取場所, 時代は次の通りである(表1参照).

ヨーロッパ・アルプス: 最終氷期の4万年前から現在に至る間に形成された各種氷河堆積物のうち, ロッジメント・ティルから7試料, アブレーション・ティルから4試料, アイスコンタクト堆積物から1試料, アウトウォッシュ堆積物から2試料.

ネパール・ヒマラヤ: 最終氷期末から現在に至る間に形成された氷河堆積物のうちのロッジメント・ティルから4試料.

日本アルプス: 自馬岳松川谷における最終氷期の各種氷河堆積物のうち, ロッジメント・ティルから12試料, アブレーション・ティルから1試料, アウトウォッシュ堆積物から1試料. これら試料の合計は32である.

2. SEM用試料作成方法

- 1) 試料約50gを約半日, NH_4OH 10%溶液に浸しておいてから, 蒸留水で十分に洗浄する.
- 2) 蒸留水で約10分間煮沸した後, 乾燥器で充分乾燥させ, 篩で0.062~2mmの大きさの砂をふるい分ける.
- 3) ふるい分けた砂の中から, 双眼実体顕微鏡下で, 石英粒20粒を無作為に選び出す.
- 4) 選び出した石英粒を試料ホルダー上に銀ペーストで固定し^{注2}, 銀ペーストが充分乾燥してからイオンスパッタリング装置(JEOL FC-1000)を使って金蒸着^{注3}を行う. 蒸着に要する時間は約20分. 10分間蒸着したら試料の向きを変え, さらに10分間蒸着を行う.

これらの試料を走査電子顕微鏡(SEM)により, 倍率 $\times 50 \sim \times 3,000$, 試料傾斜 $25^\circ \sim 30^\circ$ で観察した. 使用した走査電子顕微鏡は日本電子K.K.製のJSM-T20型である.

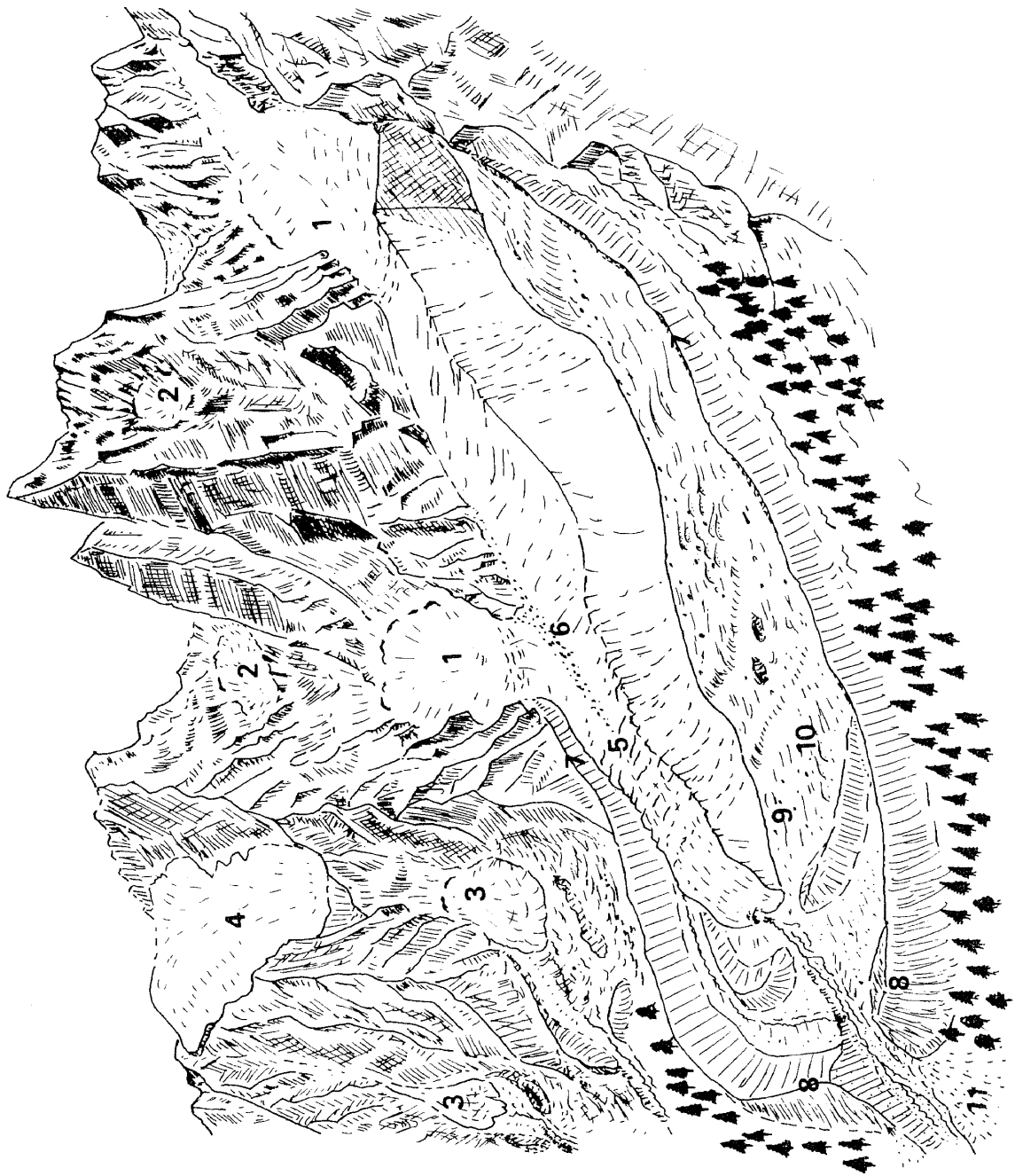
3. 氷河起源の表面組織と認定方法

これまでに確認されている氷河起源の主な表面組織は, (1)大きな破断ブロック($>1\mu\text{m}$), (2)大規模な貝殻状破断面($>1\mu\text{m}$), (3)直線的な溝, (4)ステップ状の破断面, (5)弧状のステップ, (6)角ばった外形, (7)非常に高い起伏($>1\mu\text{m}$), (8)滑らかな破断面などで, このほか

注2: 短時間の場合はこの方法で良いが, 長時間に渡って試料を取扱う場合には, 両面テープで石英粒を固定し, 石英粒のまわりを銀ペーストでぬりつぶす.

注3: 一般に, 金属以外のものは, 大部分, 導電性をもたないか, あるいは, あっても極めて少ないため, 適当な金属を蒸着する必要がある. 普通, 金, 銀, クローム, 銅, アルミニウム, 白金パラジウムなどが使用されているが, 蒸着粒子が比較的小さい, 酸化しない, 二次電子放出率が良い, 融点が高いので蒸着量が増減できるなどの理由により金が最もよく使われている. 導電性がないと, Charge up(帯電)を起したり, 二次電子発生率が悪くなったりして, 映像が不鮮明になり, 観察をさまたげる.

図1 いろいろな山岳
氷河とそれがつくる
堆積地形. (R. Viv-
am(1975)より作図)
1: 谷氷河 2: カー
ル氷河 3: なだれ涵
養型氷河 : アイス
キャップ(氷冠) 5
: クレバス 6: メデ
ィアンモレーン(中堆
石) 7: ラテラルモ
レーン(側堆石堤)
8: ターミナルモレ
ー(端堆石堤) 9:
グラウンドモレーン(
底堆石) 10: ドラム
リン 11: アウトウ・
ッブレイン



(a) いろいろな長さの平行的な条線, (b) 貝殻状破断面に伴う不規則で短い条線, (c) (2) より小さい大小様々な貝殻状破断面, (d) 曲線的な溝などの付属的な表面組織があり, これらが石英粒の表面にグループをなして存在することが最大の特徴とされている (Krinsley and Donahue, 1968; Margolis and Kennett, 1971; Krinsley and Margolis, 1971; Krinsley and Doornkamp, 1973).

ある堆積物が氷河堆積物か否かを判断する場合には, 1 粒の石英粒の表面に, 前記の主要な特徴が四つ以上認められ, そのような石英粒が観察試料 20 粒の 50% 以上を占めている場合, 試料を採取した堆積物を氷河堆積物と判断する (Margolis and Kennett, 1971; Krinsley and Margolis, 1971; 清水, 1975; 小疇ほか, 1978).

Photo. 1-A, B は典型的な氷河起源の石英粒表面組織を示している. A, B ともスイスの Golner 氷河の底堆石から採取した石英粒で, 鋭く角ばった外形, 高い起伏, 大規模な貝殻状破断面, 滑らかな破断面, 大規模な破断ブロック, 弧状のステップなどの氷河起源を示す主要な特徴が明瞭に認められる.

III. 観察結果と考察

1. 化学的作用の種類

石英粒に認められる化学的作用には, solution (溶解作用) とシリカの precipitation (沈殿作用) が区別される. これは地形形成作用における侵食作用と堆積作用にあたる. solution には結晶の構造的に弱い部分に集中的に作用するエッチング (etching) があり, precipitation には結晶成長 (crystal growth) を生じるものもある.

Photo. 2-1-A~B, 2-2-C~E, 2-3-F~G は solution (etching を含む) の例を示している. 観察した 32 試料 640 粒の石英粒のうち, 顕著な solution を示す表面組織の認められる石英粒は, 全体の 2% 以下である.

Photo. 2-1-A は典型的な V 字形エッチピット (V-shaped etch pit) と呼ばれているもので, Biederman (1962) によって初めて海成環境下の堆積物から見出され報告された. その後, Krinsley and Newman (1965) によって, インド洋の深海底ボーリングコア中の石英粒においても確認された.

写真を見ると, 大小の V 字形エッチピットが, ある方向性をもって配置していることがわかる. この写真では右から斜左下へ延びる結晶構造に支配され, それに沿って配置されている. このため, 一般に, "oriented V-shaped etch pit" と記される. V 字形エッチピットは海成環境を示す重要な指標である表面組織と形態的に非常に良く似ているが, 後者はその配置に方向性がなく雑然と分布し, 石英粒表面に存在する密度が高いという違いのほかに, 機械的作用によって形成される (波のエネルギーにより海水中で石英粒同士が衝突することに

よって形成される)という大きな違いがあり、明瞭に区別できる。機械的作用によるV字形エッチピットは、“mechanical V-shaped etch pit”と記される。solutionによって作られたV字形エッチピットは海成環境下の石英粒に比較的多く見られるが、熱帯環境下の風化物質中の石英粒に最も多く認められる。観察した試料640粒のうち、この表面組織は2例(Photo. 2-1-Aと2-2-D)のみであった。Photo. 2-2-Dは、シリカの沈殿が石英粒全面を著しくおおった後にsolutionが働いている。

Photo. 2-1-B, Phot. 2-2-C, 2-3-F, Gは、solution pitの例である。solution pitは、B, Fのように、一般的に、円形ないし半円形のものが多く見られる。しかし、CやGのように、石英粒の結晶構造に支配され、連続して溝状に延びたものもある。この種の表面組織は、結晶面あるいは破断面がシリカの膜におおわれた石英粒にsolutionが働いた場合に表われやすい。

Photo. 2-2-Eは、solution crevasseの例である。破断面の原面をおおう薄いシリカの膜が溶食され剥離する状態が明瞭に示されている。このような表面組織は、破断面の縁辺部に多く認められる。

シリカのprecipitationは、観察した640粒のほとんどすべてに認められる。氷河環境下で石英粒表面組織に影響をおよぼす化学的作用はといえば、シリカのprecipitationであると言っても過言ではない。しかしながら、ミクロな環境変化、シリカの供給量の多寡、シリカの沈殿速度の違い、石英粒の粒径の大小などによって、各々の環境ごとに、あるいは、同一環境においても、化学的作用が表面組織におよぼす影響の度合は違ってくると思われるにもかかわらず、ティル、アウトウォッシュ堆積物のいかなを問わず、氷河環境下の堆積物中の石英粒には、それほど大きな違いはなく、また、Krinsley and Doornkamp (1973)に例示されている海成堆積物や乾燥地域の堆積物に含まれる石英粒のように、シリカ膜の厚いものは認められず、表面組織を識別できない石英粒の数は極めて少い。これらのことは、氷河環境下にはシリカの存在が過少であること、言い換えれば、氷河環境下における化学的作用にとって重要な役割を担う融氷水にはシリカの含有量が極めて少ないことを示唆していると同時に、ほかの環境に比べれば、シリカのprecipitationはそれほど活発ではないことを示している。

シリカのprecipitationは結晶面と結晶面の縁辺部、貝殻状破断面に沿って、破断面の凸状の部分、ステップ状破断面の各ステップの角の部分、破断ブロック上などに生じ易い。

Krinsley and Doornkamp (1973)によると、シリカのprecipitationの速さによって、表面組織に違いが表われる。沈殿の速度が極めて速いと、乾燥地域の石英粒のように、凹凸の少ない、全体的に滑らかで丸味をおびた石英粒となり、速度が適当な速さで進行すると、Photo. 3-2-Dのような“upturned plates”と呼ばれる表面組織を示す。沈殿が極めてゆっくり行われると、Photo. 3-1-B (Photo. 3-1-Aの一部を拡大したもの)に示した

ように、見事な菱面をもつ石英の結晶成長 (quartz crystal growth) が行われる。Photo. 3-1-B は日本アルプスの試料に認められた例で、ヨーロッパ・アルプスやネパール・ヒマラヤの試料には認められなかったが、例が少ないので、これだけのことから沈殿速度は日本アルプスの方が遅いとは言えない。

Photo. 3-1-A を見ると、結晶成長が石英粒のほぼ全面に発達しているが、その結晶成長にも方向性が認められる。ほかの化学的作用による表面組織と同様に、石英粒の結晶構造に支配されているものと考えられる。結晶成長は各種環境下において数段階の発達段階が識別されている (Pittman, 1972; Higgs, 1979) が、氷河環境下での研究例はほとんどない。

2. 化学的作用の進行と時間の関係

一般に、化学的作用は時間の関数であると考え、堆積物の形成時代が古いほど、その中に含まれている石英粒は、より活発な化学的作用を受けており、新しい時代の石英粒の表面組織に比べて、その表面組織は複雑になると考えられている (例えば、金折ほか, 1978)。この場合、化学的作用は solution だけに限定され、ミクロおよびマクロな環境の違いによる化学的作用の影響の差異は無視されている。この問題の妥当性を論じるには、まず、堆積物の形成時代の判明している、同一環境下の試料を使用して、化学的作用の影響を比較検討することが必要である。

Hamilton and Krinsley (1967) は透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope, 略称, TEM) を使用し、南アフリカ (試料数 2)、オーストラリア (試料数 3)、南極 (試料数 1) に発達する古生代後期の氷河堆積物 (tillite 化している) 中の石英粒の表面組織をレプリカ法^{注4}によって処理し調べた結果、古生代後期に堆積して以来今日までの約 3 億年の間に経過した環境変化に応じて、各種環境下で卓越する作用が古生代後期の氷河環境下で受けた作用に重複していることが、観察した試料の 50% 以上に認められ、また、古生代後期における氷河起源の表面組織は、現成・更新世の氷河堆積物に含まれる石英粒表面組織とあまり変らない新鮮さを示すものも多数認められたと述べている。おそらく、試料を採取した堆積物 (岩) は堆石堤、底堆石を構成する粘土分の多いロッジメント・ティルが、比較的短い時間で固結したために、表面組織が保護され、維持されてきたものと考えられる。

Krinsley (1973) は、南極海における深海底ボーリングコアサンプル (第三紀中新世から第四紀更新世前期にかけての堆積物) の形成環境を調べた際、石英粒の化学的作用についてもふれている。それによると、同地点の更新世から中新世に至るコア中の石英粒の表面組織におよぼされた化学的作用の影響に顕著な違いが認められないことから、少なくとも、

注 4：電子線に対して不透明な物体の表面状態を観察するため、試料の表面状態の型をかたどった薄い膜をつくる方法 (地学辞典, 平凡社, 1970)。試料の表面を直接観察できないので、解釈の正確さに欠ける。

海成環境下では、時間の長さが化学的作用によって必ずしも重要な要因とはなっていないと述べている。

使用した試料の時代は次の通りである（表1参照）。

ヨーロッパ・アルプスの氷河堆積物は最終氷期4万年前から現在（数年前）にかけて形成されたもので、“Little Ice Age”と呼ばれている16世紀から19世紀にかけての、最終氷期以来の氷河進出期の堆積物の試料も含む（Woldstedt, 1958; Hantke, 1960; Mayr and Heuberger, 1965; Richmond, 1970; 阪口, 1973）。ネパール・ヒマラヤの氷河堆積物は、最終氷期極相期頃のもの1試料，“Little Ice Age”のもの2試料、数年前に形成されたもの1試料である（Iwata, 1976; 岩田, written communication, 1977）。日本アルプスの氷河堆積物は、50,000年前と25,000年前に形成されたものである（清水ほか, 1974; 小疇ほか, 1975; 町田, 1979）。

Photo. 4-1-A~E, 4-2-Fはヨーロッパ・アルプス, Photo. 4-3-G~H, 4-4-I~Jはネパール・ヒマラヤ, Photo. 4-5-K~L, 4-6-M~Nは日本アルプスから採取した試料の、各試料に、一般的に認められる化学的作用の諸相のうち、圧倒的に多いprecipitationによる表面組織を示したもので、ネパール・ヒマラヤの2例（Photo. 4-4-IとJ）を除いて、縮尺の小さい写真・部分拡大した写真を一組とし、時代の古い順に配列してある。

写真を見ると、ヨーロッパ・アルプスでは、Photo. 4-1-Aは19,000年前の端堆石堤構成層のロジメント・ティル（Photo. 4-1-BはAの部分拡大）、Photo. 4-1-Cは“Little Ice Age”である17世紀の端堆石堤のロジメント・ティル（Photo. 4-1-Dの部分拡大）、Photo. 4-1-Eは現成氷河であるGolner氷河（スイス）の氷舌端が数年前に後退した跡に残された底堆石の構成層であるロジメント・ティル（Photo. 4-2-FはEの部分拡大）に含まれる石英粒の表面組織の示している。縮尺の小さい写真では、各々の間には化学的作用の著しさの度合にそれほど顕著な差は認められないが、部分拡大した写真では、化学的作用の影響の違いがかなりはっきり区別できる。

すなわち、形成時代の新しいEにおいては、写真の左側中央と右側中央に見られるように、各々の氷河起源の表面組織に鋭さがなくなり、かなり丸味をおびている。特に、左側中央付近では、シリカが破断ブロック上に厚く沈澱している様子が認められる。Dでは、写真左下の部分に顕著なシリカの沈澱が認められるものの、ほかの部分では薄く、各々の氷河起源の表面組織の鋭さはかなり残っている。Bでは、シリカが石英粒全体を薄くおおっているが、氷河起源の表面組織はDより尖鋭で、明確に識別できる。

日本アルプスでは、縮尺の小さい写真、部分拡大した写真のいずれにおいても、時代の古い石英粒（Photo. 4-5-K~L,）の方が時代の新しい石英粒（Photo. 4-6-M, N）より活発な化学的作用を受けていることが容易に識別される。

ネパール・ヒマラヤでは、Photo. 4-3-G（4-3-HはGの部分拡大）は数百年前、

Photo. 4-4-I は数年前, Photo. 4-4-J は数千年前にそれぞれ形成された堆積物中の石英粒の表面組織を示している. 1,000 倍に拡大した写真を比較すると, H は破断面上にかなり厚くシリカが沈殿しているが, 氷河起源の表面組織の鮮明さ, あるいは, 鋭さはあまり変化していない. I では, 写真の右半分はシリカにおおわれ, 表面組織の識別をむずかしくしており, 左半分でも, 表面組織の識別はできるが, 鮮明さはかなり失われている. J では, ステップ状の破断面と破断面の境付近および写真右下の部分にシリカの沈殿が認められるが, 表面組織の鮮明さ, もしくは鋭さは完全に残っている.

これらの事実は, 形成時代の古い堆積物の石英粒ほど活発な化学的作用を蒙り, その表面組織が複雑になるとは一概には言えないことを示している.

試料を採取した堆積物の種類・堆積相(層相)を考慮すると, 化学的作用の進行に重大な影響をおよぼしている要因は, 堆積物のおかれてきた, あるいは, おかれている自然環境であり, 具体的には, 局所的な地下水の多寡および化学成分, 堆積物の透水性の良否(粘土分の含有量の多寡)などの要素が, 時間の長さよりもより直接的に影響すると考えられる. 試料を採取した氷河堆積物は, 温暖氷河と呼ばれる融氷水が常時多量に存在する氷河によって形成された. 氷河の後退期には進出期より融氷水の量が圧倒的に多くなる. したがって, 堆積物の透水性の良し悪しは, 石英粒に対する化学的作用の進行を左右するはずであり, 実際に, 透水性の悪い(粘土分の多い)ロッジメント・ティルの石英粒は透水性の良い(粘土分の少ない)ほかの氷河堆積物の石英粒に比べ, 表面組織は明瞭であり, 化学的作用は不活発であった. しかし, 粘土分の少ない堆積物中の石英粒でも, 氷河起源の特徴を消してしまうほど, 例えば, 海成環境や砂漠環境下での化学的作用ほど著しいものではない. 氷河環境下において表面組織を不明瞭にする最も強力な作用は, 融氷水の流動に伴う石英粒同士の衝突による磨滅である(例えば, Photo. 5-1-A). 粘土の含有量の多い堆積物では, このような機械的作用からも表面組織は保護され, 最初の表面組織が維持される.

3. 氷河環境下の石英粒表面組織における機械的作用による諸相

本稿で使用した試料を採取した氷河堆積物は, 形態的な分類によれば谷氷河(valley glacier), 氷の熱的な性質による分類(例えば, Ahlmann, 1948)では温暖氷河(temperate glacier)と呼ばれる氷河によって形成された. この種の氷河は, 氷床(ice sheet), あるいは, 極地氷河(寒冷氷河, polar glacier)とは異なり, 常に融氷水が氷河とともに多量に存在する. 夏の融解季, 氷河の後退期(縮少期)には特に多く, 進出期に形成された氷河堆積物および地形に多大の影響をおよぼす. 融氷水の直接的影響を受ける堆積物は粘土分の少ない, ルーズなアウトウォッシュ堆積物である.

機械的作用は石英粒が融氷水に運搬される際に, 石英粒同士が衝突することによって生じる. このために, 氷河起源の特徴である鮮明な表面組織は磨滅し鈍化して, 全体的に丸味を

おびた外形へと変えられてしまう。

Photo. 5-1-Aは融氷水による変形を受けた石英粒で、底堆石の一部であるドラムリン(drumlin)から採取したものである。この堆積地形は氷河の進出期(氷河の活動が活発な時期)に、氷河の下底に形成されたものであり、極めて融氷水の影響を受け易い条件下にある。写真を見ると、石英粒の右側には氷河起源の特徴がかなり鈍化しながらも明瞭に残っている。しかし、中央から左側にかけての部分では、ほとんどの氷河起源の表面組織は磨滅し、写真中央部に残存する破断面がわずかに氷河起源であることを示すにすぎない。

Photo. 5-1-B, Cは、“upturned plates” と呼ばれる機械的作用による表面組織である。これは乾燥地域において砂丘を作るような風の強い環境下の石英粒に多く認められるもので、風に飛ばされた石英粒が互いに空中で衝突することにより、あるいは、堆積している石英粒に吹きつけられることにより作られる。海岸地域でも砂丘は形成されるが、風の強さとその継続する時間が乾燥地域とは極端に違うらしく、海岸地域の堆積物にはあまり認められない表面組織である。

観察した試料中には、風成作用を示す石英粒は、B, Cの例を含めて5粒ほど認められたが、いずれもヨーロッパ・アルプスの試料であった。おそらく、最終氷期のスカンジナビア氷床に由来するレスカ、あるいは、アフリカの砂漠地帯の砂がその起源であろうと思われる。

機械的作用の場合、流水のエネルギーの大きさと石英粒の運搬されている時間、風の強さと強風の吹く頻度および継続時間が石英粒に働きかける力の強弱に極めて直接的かつ重要な役割を演じており、これらの点で化学的作用とは根本的に異なる。

IV. 結 論

形成時代の判明しているヨーロッパ・アルプス、ネパール・ヒマラヤ、日本アルプスの更新世末期から現在に至る氷河堆積物から32サンプル640粒の石英粒を選び出し、走査電子顕微鏡によって石英粒表面組織に認められる化学的作用の諸相を比較分析し、次のような結果を得た。

1. 化学的作用は solution (溶解作用) と silica precipitation (シリカの沈殿作用) が区別される。1粒の石英粒に両者が共に認められる場合もあるが、調べた石英粒640粒の90%以上は silica precipitation が主である。
2. silica precipitation の程度についてみると、Kransley and Doornkamp (1973) に例示されている形成時代のほぼ同じ頃の高成堆積物や風成堆積物に比べて、最初の表面組織は鮮明であり、シリカの沈殿は極めて不活発である。これは氷河環境下での化学的作用にとって特に重要な役割を担う融氷水には、シリカの含有量が極めて少なく、また、シリカを溶かす水酸化ナトリウムやフッ化水素などもほとんど含まれていないことを示唆する。
3. 形成時代の古い堆積物中の石英粒と新しい堆積物中の石英粒を比較しても、両者の間に

時間の経過による化学的作用の影響の差は認められない。また、新しい粘土分の少ない堆積物中の石英粒の方が古い粘土分の多い堆積物中の石英粒より活発な化学的作用を受けている例が多数認められる。これらの事実は、石英粒に働く化学的作用は時間とともにその影響が強くなるのではなくて、むしろ、堆積中、あるいは、堆積後に、水の影響を受け易いか否かといったような、堆積物のおかれている環境に大きく支配されていることを示している。言いかえれば、化学的作用の影響の程度は必ずしも時間の関数ではなくて、堆積物のおかれている、あるいは、おかれていた自然環境に大きく支配される。いろいろな環境要因の中でも特に重要な要因は、水の性質と動態であると考ええる。

謝 辞

この研究を行うにあたって、明治大学・小嶋尚教授、東京都立大学・岩田修二氏に、ヨーロッパ・アルプス、ネパール・ヒマラヤの氷河堆積物の試料の提供を受けた。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Ahlmann, H.W. (1948): Glaciological research on the North Atlantic coasts. *Roy. Geogr. Soc.*, No. 1, 83 pp.
- 2) Biederman, Jr. E.M. (1962): Distinction of shoreline environments in New Jersey. *J. Sediment. Petrol.*, 32, 181-200.
- 3) Embleton, C. and King, C.A.M. (1968): Glacial and periglacial Geomorphology. Edward Arnold, London. 608 pp.
- 4) Flint, R.F. (1971): Glacial and Quaternary Geology. John Wiley and Sons, New York, 829 pp.
- 5) Hamilton, W. and Krinsley, D. (1967): Late Paleozoic glacial deposits of South Africa and southern Australia. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 78, 783-800.
- 6) Hantke, R. (1960): Zur Gliederung des Jungpleistozans im Grenzbereich vom Linth-und Rheinsystem. *Geographica Helvetica*, 15, 239-248.
- 7) Higgs, R. (1979): Quartz-grain surface features of Mesozoic-Cenozoic sands from the Labrador and western Greenland continental margins. *J. Sediment. Petrol.*, 49, 599-610.
- 8) Iwata, S. (1976): Late Pleistocene and Holocene moraines in the Sagarmatha (Everest) region, Khumbu Himal. *Seppyo*, 38, 121-126.
- 9) Krinsley, D. and Takahashi, T. (1962): Surface features of sand grains; an application of electron microscopy. *Science*, 135, 923-925.
- 10) Krinsley, D. and Newman, W.S. (1965): Pleistocene glaciations; a criterion for the recognition of its onset. *Science*, 149, 442-443.
- 11) Krinsley, D. and Donahue, J. (1968): Environmental interpretation of sand grain surface textures by electron microscopy. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 79, 743-748.
- 12) Krinsley, D. and Margolis, S.V. (1971): Grain surface textures, in Carver, R.E. ed., *Procedures in Sedimentary Petrology*. Wiley, New York, 151-180.
- 13) Krinsley, D. and Doornkamp, J.C. (1973): Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge University Press, 91 pp.
- 14) Krinsley, D. (1973): Surface features of quartz sand grains from LEG of the deep sea drilling project. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Vol. XVIII, Washington, 925-933.
- 15) 金折裕司, 宮越勝義, 角田隆彦, 佐竹義典 (1979): 断層粘土中の石英粒子の表面構造. 電中研究報告 377011, 1~21.
- 16) 小嶋 尚, 杉原重夫, 清水文健, 宇都宮陽二朗, 岩田修二, 岡沢修一 (1974): 白馬岳の地形学研究. 駿台史学, 35, 1~86.
- 17) 町田洋 (1979): 信濃川上流と姫川の自然と歴史. 「松本砂防のあゆみ—信濃川上流直轄砂防百年史—」, 建設省松本砂防工事々務所, 1~240.
- 18) Margolis, S.V. (1968): Electron microscopy of chemical solution and mechanical abrasion features on quartz sand grains. *Sediment. Geol.*, 2, 243-256.
- 19) Margolis, S.V., and Kennett, J.P. (1971): Antarctic glaciation during Tertiary recorded in sub-Antarctic deep sea cores. *Am. J. Sci.*, 371, 1-36.
- 20) Mayr, F. and Heuberger, H. (1965): Types areas of Late glacial and post-glacial deposits in Tyrol, Eastern Alps. in G.M. Richmond ed., *Glaciation of the Alps*, Univ. of Colorado Studies, No. 7, 143-165.
- 21) Pittman, E.D. (1972): Diagenesis of quartz in sandstones as revealed by scanning electron microscopy. *J. Sediment. Petrol.*, 42, 507-519.

- 22) Richmond, G.M. (1970): Comparison of the Quaternary stratigraphy of the Alps and Rocky Mountains. *Quaternary Res.*, **1**, 3-28.
- 23) 阪口 豊 (1 9 7 3) : ウ ィ ー ン と 東 アルプス . 古今書院, 217 pp.
- 24) 清水文健, 岡沢修一, 小崎 尚 (1 9 7 4) : 白馬岳東面松川谷北股入の角礫層, および泥炭層の ^{14}C 年代. 地球科学, **28**, 259~260.
- 25) 清水文健 (1 9 7 5) : 白馬岳松川谷における氷河堆積物中の石英砂粒表面組織 . 式正英編「日本の氷期の諸問題」古今書院, (205 pp.) 72~87.
- 26) Vivian, R. (1975): Les Glaciers des Alps Occidentales. Inst. de Geographie Alpine, France. 508 pp.
- 27) Woldstedt, P. (1958): Das Eiszeitalter. Band 2, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. 438 pp. cs. p. 176-205.

表1 試料の産状と石英粒表面組織の観察結果

Photograph Number (Magnification)	Sample Occurrences				Surface Textures			References
	Location	Type of Glacial Deposits	Landform of Glacial Deposits	Age	Chemical Action		Mechanical Action	
					Solution	Precipitation		
1-A (x 75)	Switzerland (Zermatt)	Lodgment till	Ground moraine (Golner glacier)	Several years ago	X	○		
1-B (x 100)	ditto	ditto	ditto	ditto	X	○		
2-1-A (x 7,500)	Nepal Himalaya	Lodgment till	End moraine (Khumbu glacier)	Late Pleistocene* (Periche stage)	Oriented V- pattern etch pit	△		* Iwata (1976), Iwata (written com., 1977)
2-1-B (x 2,000)	Austria	Lodgment till	End moraine (Pasterze glacier)	Seventeenth* Century	Etch pit	◎		* Mayr and Heuberger (1965). Sakaguchi (1973)
2-2-C (x 750)	Austria	Lodgment till	End moraine (Pasterze glacier)	Seventeenth* Century	Etch pit	○		* ditto
2-2-D (x 1,500)	Switzerland	Lodgment till	Ground moraine (Golner glacier)	Several years ago	Oriented V- pattern etch pit	◎		
2-2-E (x 3,500)	Nepal Himalaya	Ablation till (?)	Moraine (Chukung glacier)	Several hundred Years ago*	Solution crevasse	◎		* Iwata (1976), Iwata (written communication 1977)
2-3-F (x 500)	Switzerland (Gossau)	Till (Sandy)	Drumlin	40,000 y.B.P.*	Etch pit	○		* Hantke (1960) Richmond (1970)
2-3-G (x 750)	Switzerland	Lodgment till	Ground moraine (Golner glacier)	Seven years ago	Solution crevasse, Etch pit			
3-1-A (x 200)	Japan Alps, (Shiroumadake, Matsukawa-dani)	Lodgment till	End moraine	50,000 y.B.P.* (Iwatake stage)	X	◎ (quartz crystal growth)		* Koaze and others (1975) Matsumoto-sabo Construction Work Office (1979)
3-1-B (x 5,000)	ditto (Close-up of Photo. 3-1-A)	ditto	ditto	ditto	ditto	ditto		ditto
3-2-C (x 350)	Switzerland (Gossau)	Till (Sandy)	Drumlin	40,000 y.B.P.*	X	◎		* Hantke (1960) Richmond (1970)
3-2-D (x 750)	Austria	Lodgment till	End moraine (Pasterze glacier)	Seventeenth* Century	X	○		* Mayr and Heuberger (1965) Sakaguchi (1973)
3-2-E (x 1,000)	Switzerland (Zermatt)	Lodgment till	Ground moraine (Golner glacier)	Several years ago	○	△		
4-1-A (x 50)	Switzerland (Hegunau)	Ablation till	Lateral moraine	19,000 y.B.P.* (Zürich stage)				* Woldstedt (1958) Richmond (1970)
4-1-B (x 1,000)	ditto (Close-up of Photo. 4-1-A)	ditto	ditto	ditto	X	△		ditto
4-1-C (x 75)	Austria	Lodgment till	End moraine (Pasterze glacier)	Seventeenth* Century				* Mayr and Henberger (1965) Sakaguchi (1973)

Photograph Number (Magnification)	Sample Occurrences				Surface Textures			References
	Location	Type of Glacial Deposits	Landform of Glacial Deposits	Age	Chemical Action		Mechanical Action	
					Solution	Precipitation		
4-1-D (x 200)	ditto (Close-up of Photo. 4-1-C)	ditto	ditto	ditto	X	○		ditto
4-1-E (x 75)	Switzerland	Lodgment till	Ground moraine (Golner glacier)	Several years ago				
4-2-F (x 750)	ditto (Close-up of Photo. 4-1-E)	ditto	ditto	ditto	Δ	◎		
4-3-G (x 80)	Nepal Himalaya	Ablation till	End moraine (Chukung glacier)	Several hundred years ago*				* Iwata (1976), Iwata (written communica- tion, 1977)
4-3-H (x 1,000)	ditto (Close-up of Photo. 4-3-G)	ditto	ditto	ditto	X	○		ditto
4-4-I (x 1,000)	Nepal Himalaya	Lodgment till	Ground moraine (Chukung glacier)	Several years ago (Lobuche stage)*	Δ	◎		ditto
4-4-J (x 1,000)	Nepal Himalaya	Lodgment till	End moraine (Khumbu glacier)	2,000 ~ 6,000 y.B.P. (Thukika stage)*	X	Δ		ditto
4-5-K (x 50)	Japan Alps (Shirouma-dake, Matsukawa-dani)	Lodgment till	End moraine	50,000 y.B.P.* (Iwatake stage)				* Koaze and others (1975) Matsumoto-sabo Construction Work Office (1979)
4-5-L (x 1,000)	ditto (Close-up of Photo. 4-5-K)	ditto	ditto	ditto		○		ditto
4-6-M (x 100)	Japan Alps (Shirouma-dake, Matsukawa-dani)	Lodgment till	End moraine	25,000 y.B.P.* (Akakurazawa stage)				* Shimizu and others (1974)
4-6-N (x 1,000)	ditto (Close-up of Photo. 4-6-M)	ditto	ditto	ditto	X	◎		ditto
5-A (x 50)	Switzerland (Gossau)	Till (Sandy)	Drumlin	40,000 y.B.P.*	○	Δ	by meltwater	* Hantke (1960) Richmond (1970)
5-B (x 50)	Switzerland	Lodgment till	End moraine (Ober Grindelwald glacier)	Recent	Δ	○	Aeolian (wind abrasion) Mechanical impact Glacial surface textures super- impose on aeolian surface textures. (upturned plate)	
5-C (x 50)	Austria	Sand	Dirt-cone overlying lateral moraine (Pasterze glacier)	Seventeenth* Century				* Mayr and Henberger (1965) Sakaguchi (1973)

Legend: ◎ more active, ○ active, △ common, X inactive.

写 真 説 明

Photo.1-A~B: 典型的な氷河起源の石英粒表面組織を示す走査電子顕微鏡写真。A, Bとも最近後退したGolner氷河(スイス)の現在の氷舌端から10m下流の底堆石から採取。鋭く角ばった外形, 高い起伏, 大規模な貝殻状破断面, 滑らかな破断面, 大規模な破断ブロック, 弧状のステップなどの氷河起源を示す主要な特徴が明瞭に認められる。

Photo.2-A~G: 氷河環境下の化学的作用のうちのsolution(溶解作用)による石英粒表面組織の走査電子顕微鏡写真。AはKhumbu氷河(ネパール・ヒマラヤ)の端堆石堤(Periche期, 更新世末)から採取。solutionによって作られた, ある方向性をもつV字形エッチ・ピット。方向性は石英粒の結晶構造に支配されている。BとCはPasterze氷河(オーストリア)の端堆石堤(17世紀)から採取。エッチ・ピットの例である。Bのエッチ・ピットは石英粒をうすくおおうシリカ膜の上に形成されている。DはGolner氷河(スイス)の現在の氷舌端付近の底堆石から採取。シリカ膜が比較的厚く石英粒をおおった後にsolutionが働き, V字形エッチ・ピットがつくられた。EはChukung氷河(ネパール・ヒマラヤ)の端堆石堤(数百年前)から採取。solution crevasseを示す。FはGossau付近(スイス・チューリッヒ湖北方)のドラムリン(40,000y. B. P.)から採取。石英粒をおおうシリカ膜の上に生じたエッチ・ピット。

Photo.3-A~E: 氷河環境下の化学的作用のうちのprecipitation(沈殿作用)による石英粒表面組織の走査電子顕微鏡写真。Aは日本アルプス・白馬岳松川谷の端堆石堤(岩岳期, 5万年前)から採取。石英の結晶成長を示す。BはAの一部を拡大したもの。見事な菱面が発達している。結晶面上のピットはsolutionによるものである。CはGossau付近(スイス・チューリッヒ湖北方)のドラムリンから採取。滑らかな破断面上のシリカの沈殿を示す。DはPasterze氷河(オーストリア)の端堆石堤(17世紀)から採取。破断面の凸状の部分に生じたシリカの沈殿。EはGolner氷河(スイス)の現在の氷舌端から10m下流の底堆石から採取。機械的作用によって磨耗した表面組織がsolutionによってさらに鈍化される状態を示す。

Photo.4-A~N: 形成時代別に見たsilica precipitationによる石英粒表面組織の走査電子顕微鏡写真。形成時代の古い石英粒と新しい石英粒の表面組織における化学的作用の影響の度合を比較している。AはHegnau付近(スイス・チューリッヒ湖北方)の側堆石堤(Zürich期, 19,000年前)から採取。BはAの一部を拡大したもの。CはPasterze氷河(オーストリア)の端堆石堤(17世紀)から採取。DはCの一部を拡大したもの。EはGolner氷河(スイス)現在の氷舌端から10m下流の底堆石(数年前)から採取。FはEの一部を拡大したもの。GはChukung氷河(ネパール・ヒマラヤ)の端堆石堤(数100年前)から採取。HはGの一部を拡大したもの。IはChukung氷河(ネパール・ヒマラヤ)の現在の氷舌端付近の底堆石(数年前)から採取。JはKhumbu氷河(ネパール・ヒマラヤ)の堆石堤(Thakku期, 2,000~6,000年頃)から採取。Kは日本アルプス・白馬岳松川谷の端堆石堤(岩岳期, 50,000年前)から採取。LはKの一部を拡大したもの。Mは日本アルプス・白馬岳松川谷の端堆石堤(赤倉沢期, 25,000年前)から採取。NはMの一部を拡大したもの。時代の古い石英粒と新しい石英粒の間には, 化学的作用の影響にほとんど差が認められない。このことは, 石英粒を含む堆積物の形成時代が古いほど著しい化学的作用を受け, 表面組織はより複雑になるとは一概には言えないことを示している。

Photo.5-A~C: 氷河環境下の石英粒に見られる機械的作用による表面組織の走査電子顕微鏡写真。AはGossau付近(スイス・チューリッヒ湖北方)のドラムリンから採取。融氷水による機械的作用を蒙って, 石英粒の表面組織は磨耗され, 鈍化し, 全体的に丸味をおびている。その後, solutionとprecipitationを受けた。BはOber Grindelwald氷河(スイス)の端堆石堤から採取。CはPasterze氷河(オーストラリア)の側堆石堤(下部に氷体が存在する)上のダート・コーンから採取。BとCには細かい無数の凹凸(uptuned plates)が認められる。これは風成環境下において, 強風に運搬される無数の石英砂が空中で衝突することにより, あるいは, 堆積している石英砂に吹きつけられることによって生じる表面組織である。Bでは, 氷河作用による表面組織が風成作用による表面組織の上に重複している。Cはほぼ完全に風成作用による表面組織が残っている。

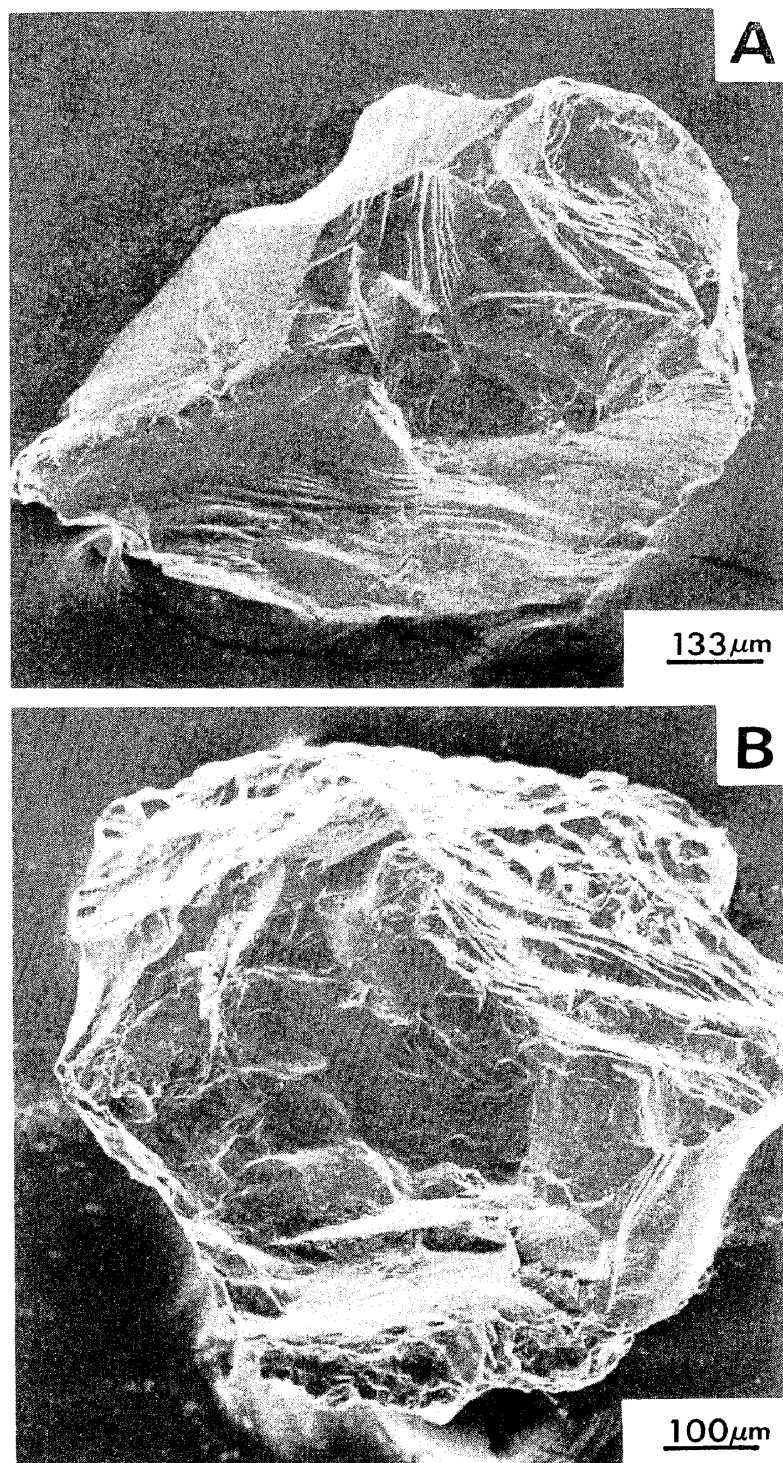


Photo.1

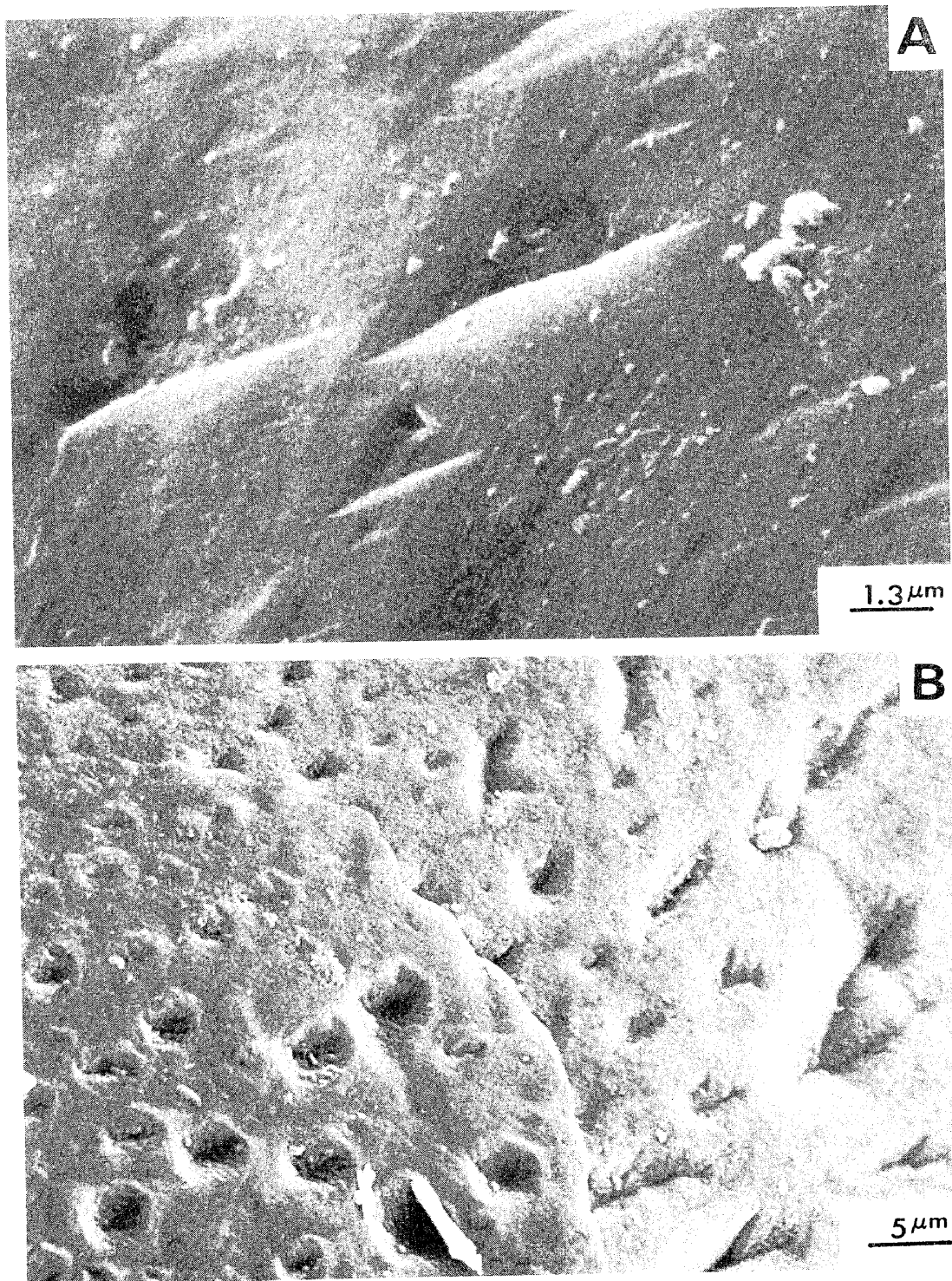


Photo.2-1

氷河堆積物に含まれる石英砂粒の化学的作用による表面組織 - 清水

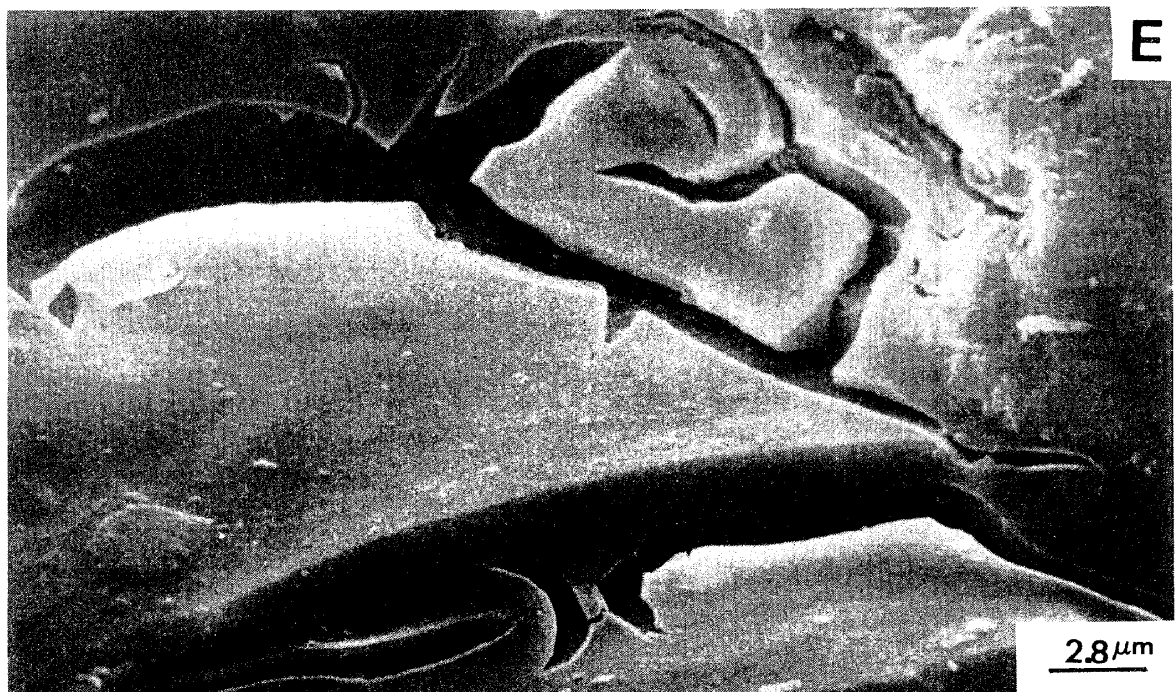
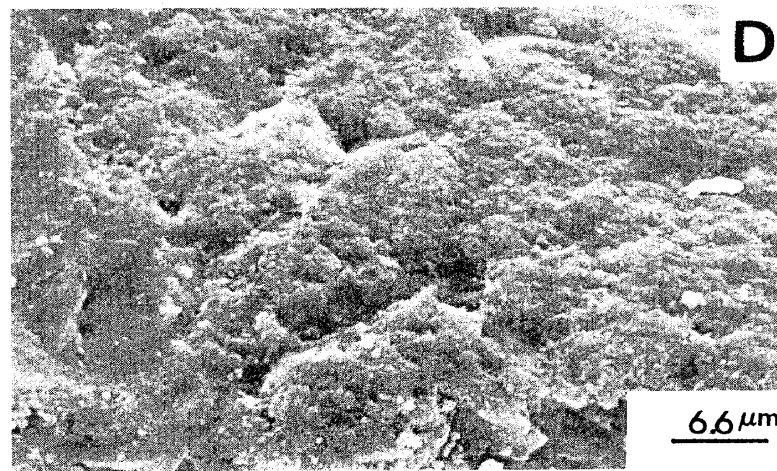
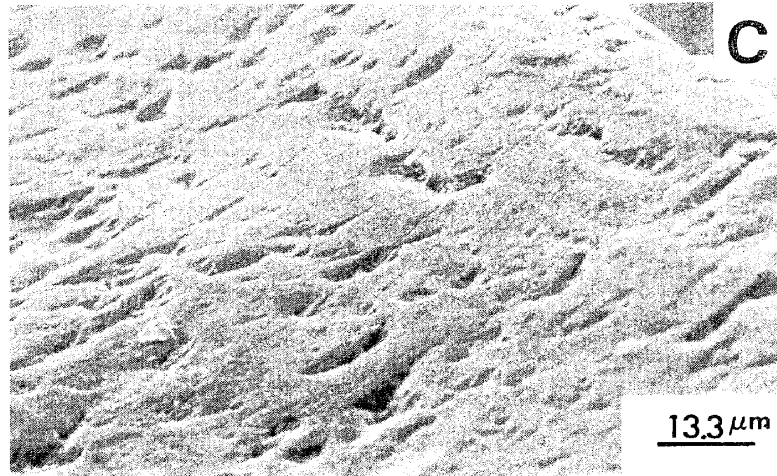


Photo.2-2

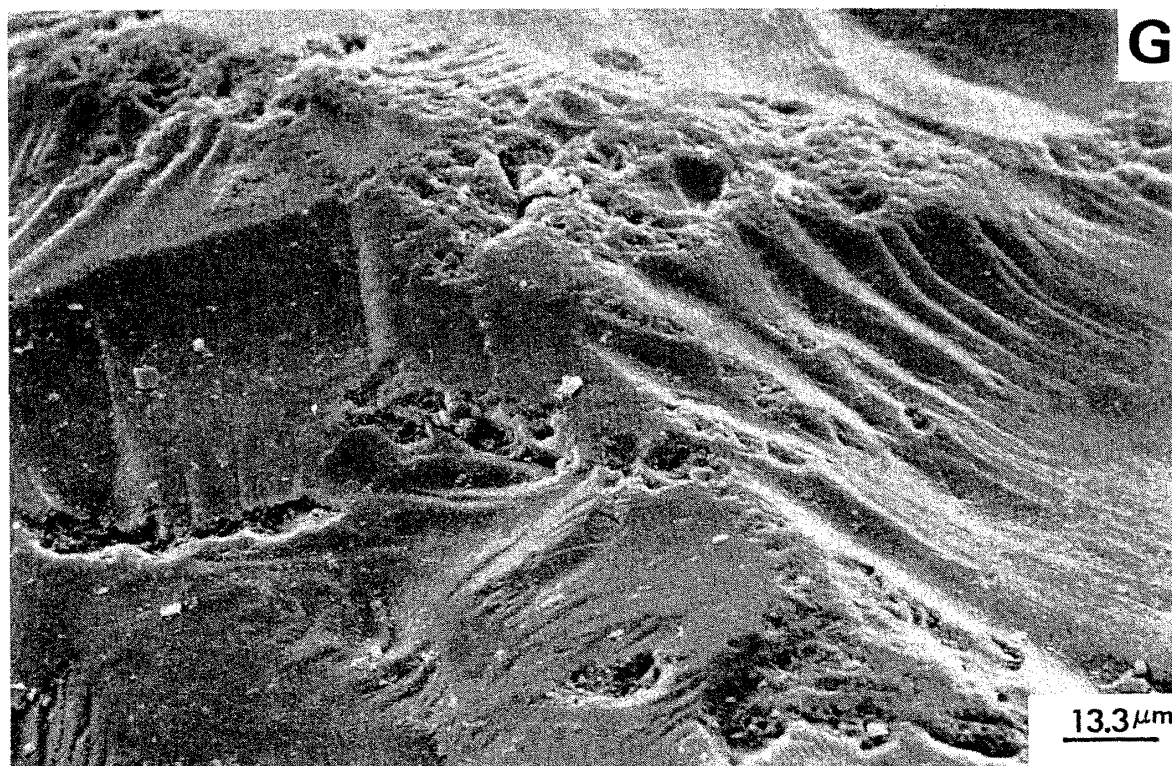


Photo.2-3

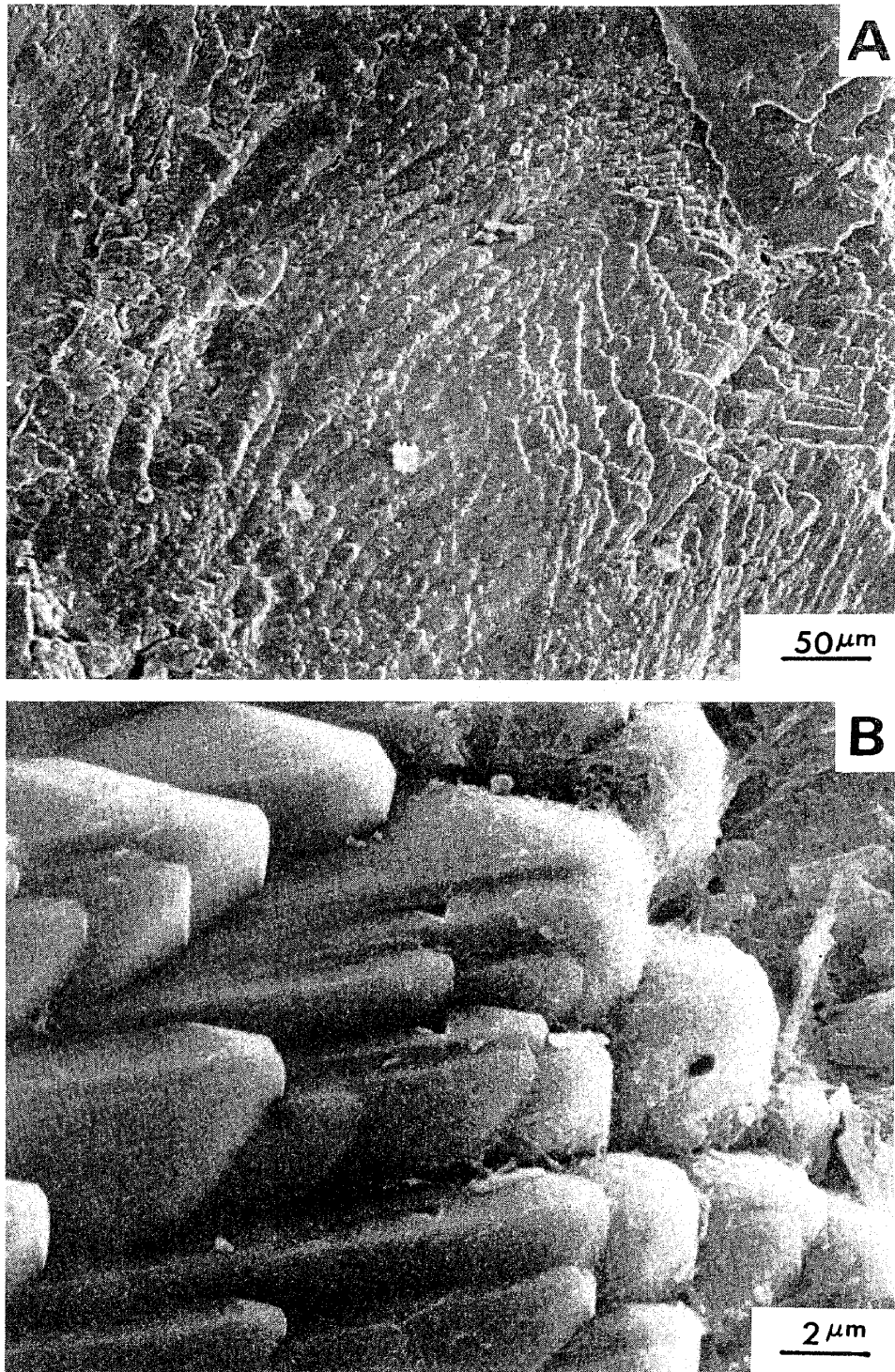


Photo.3-1

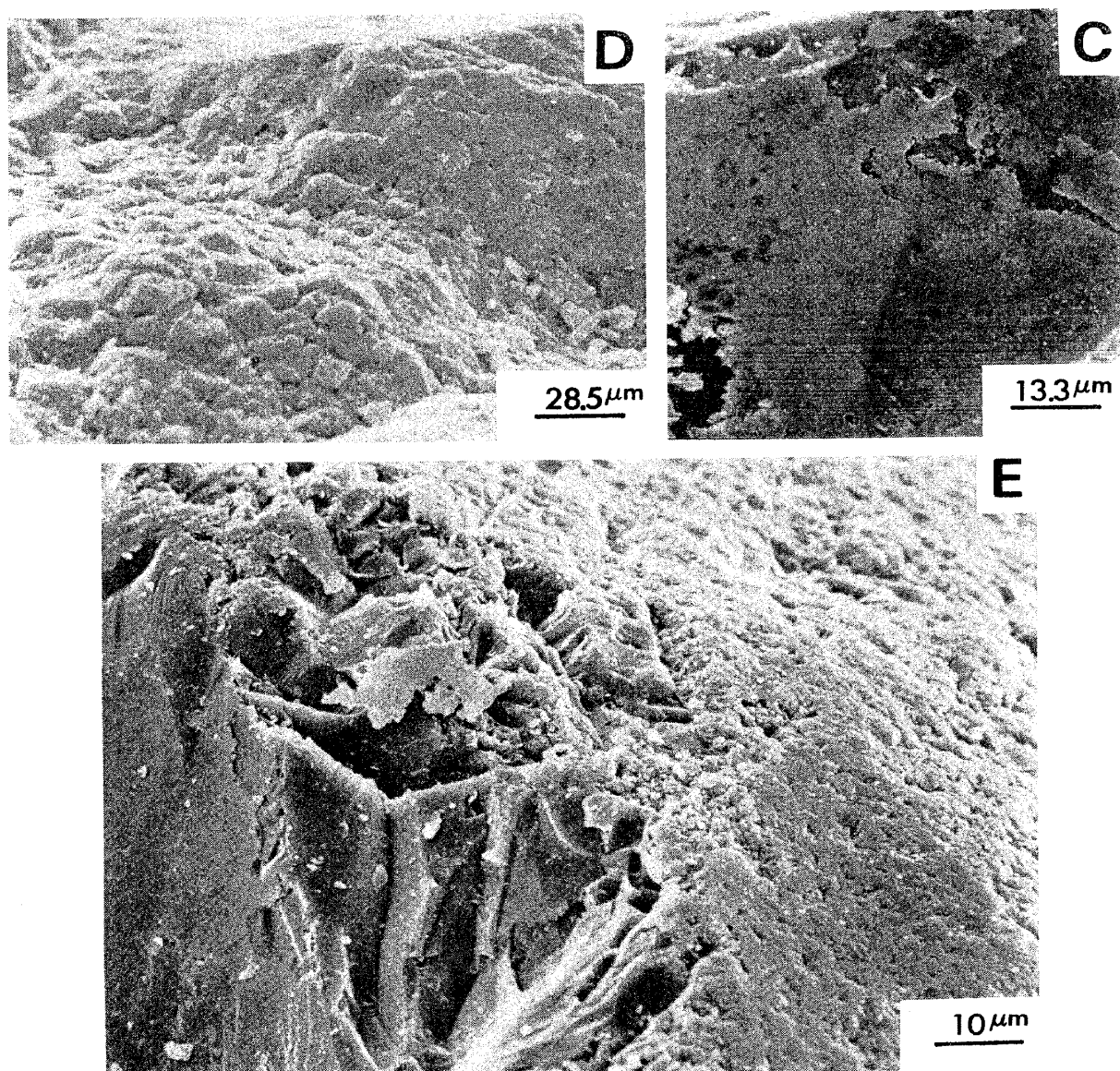


Photo.3-2

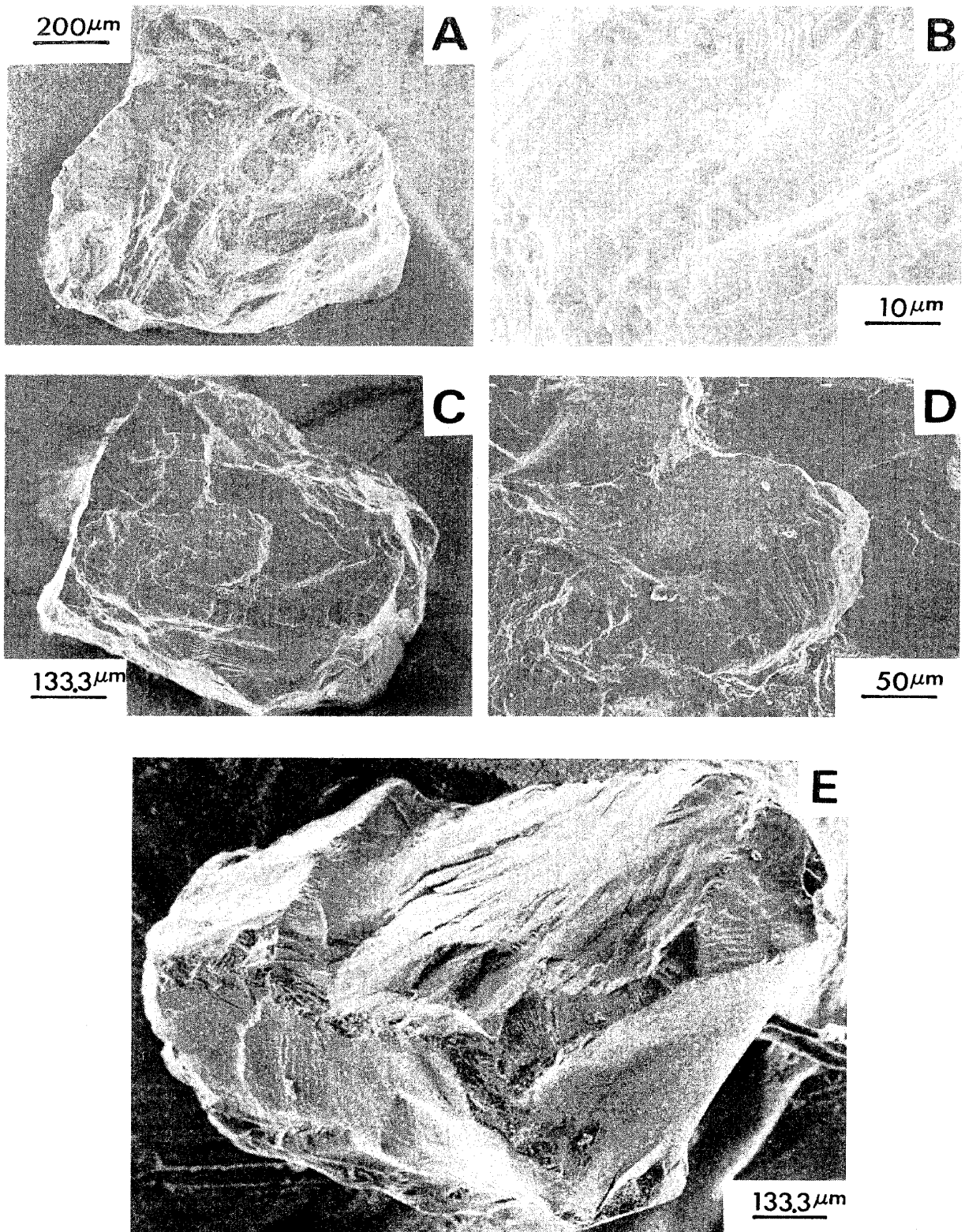


Photo.4-1

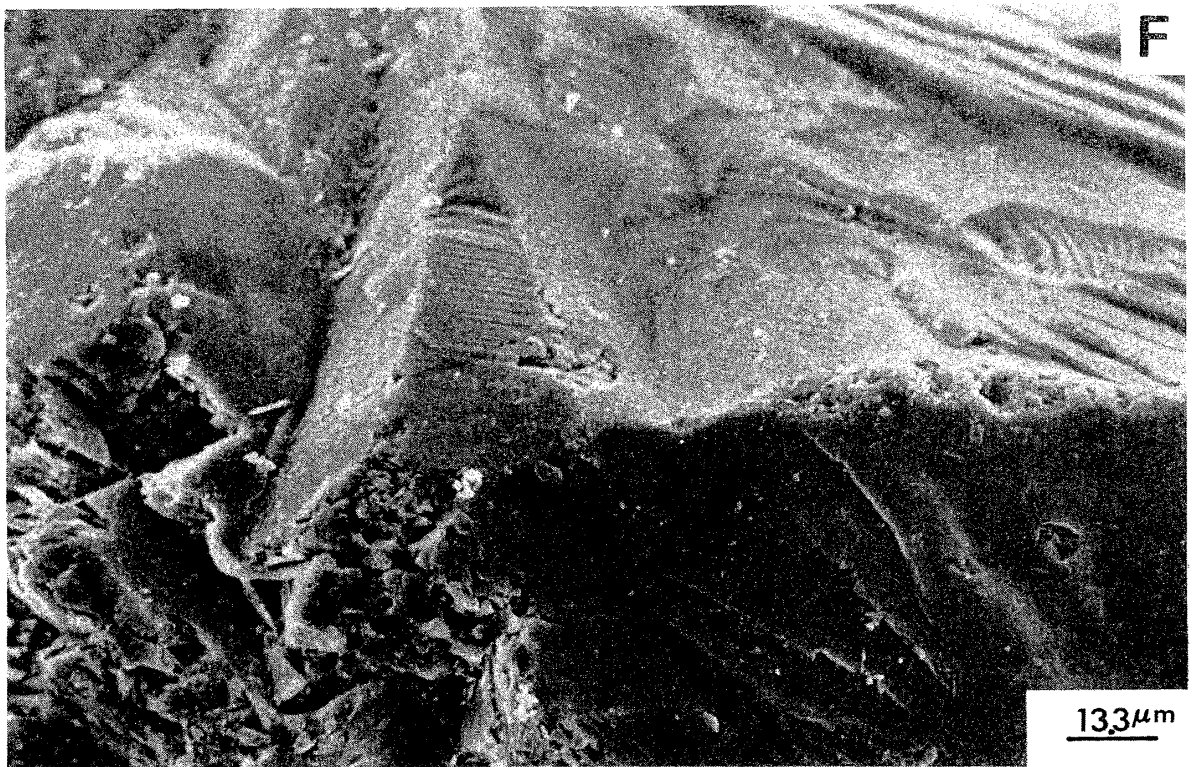


Photo.4-2

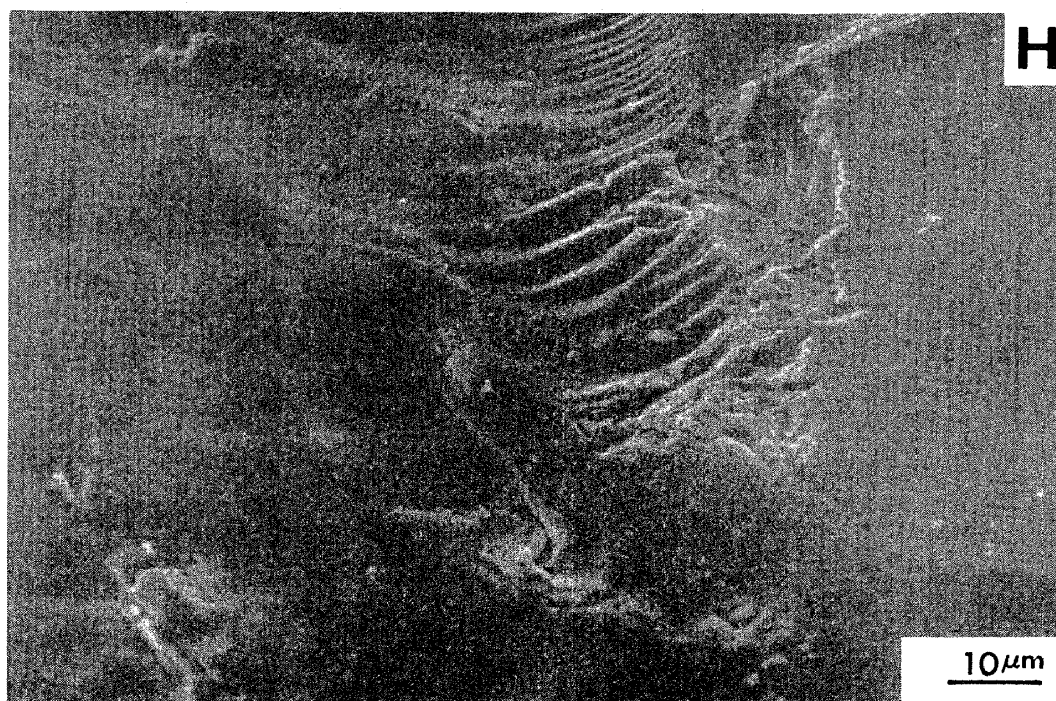
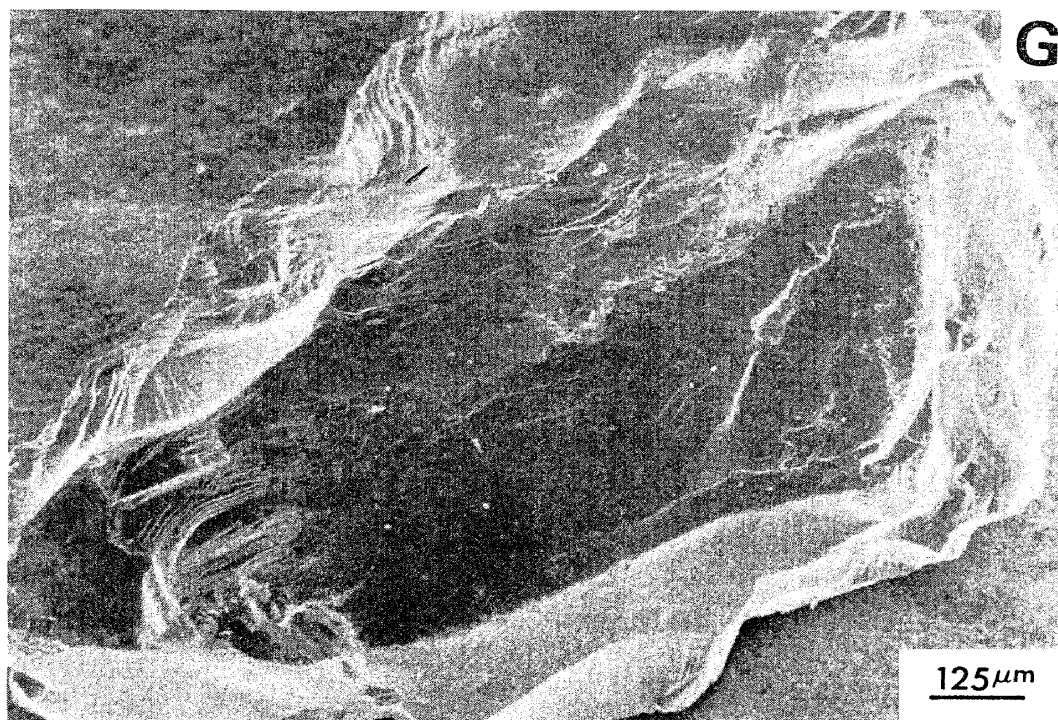


Photo.4-3

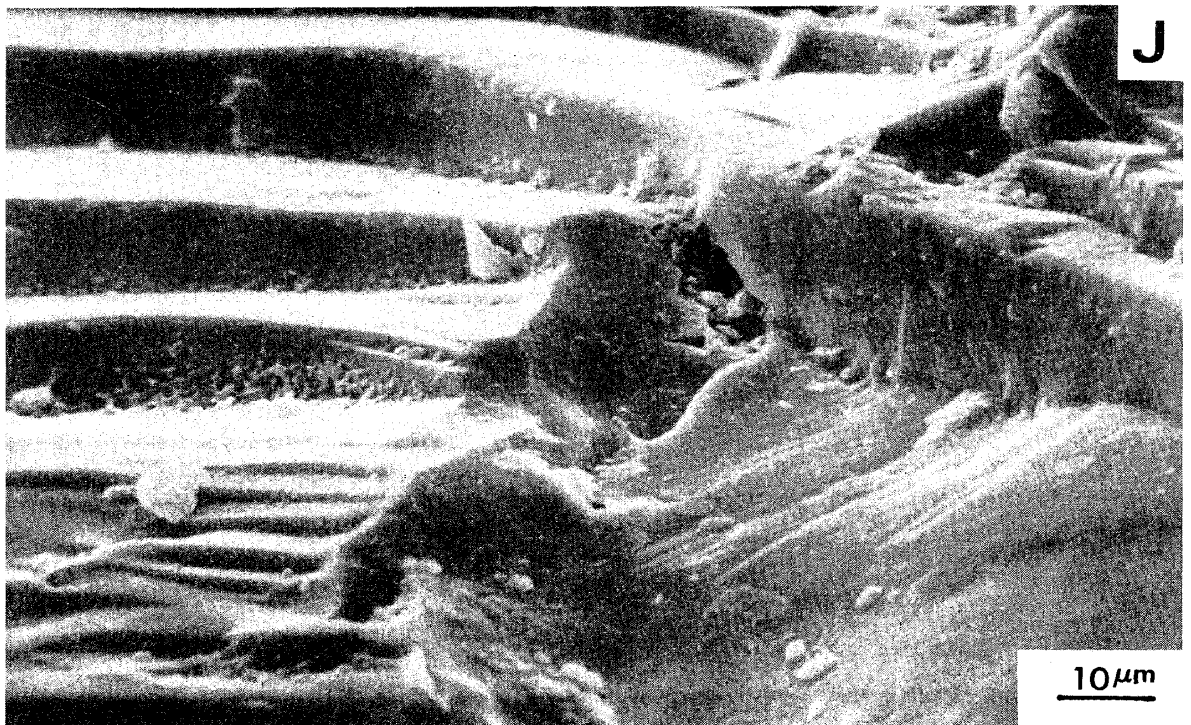


Photo.4-4

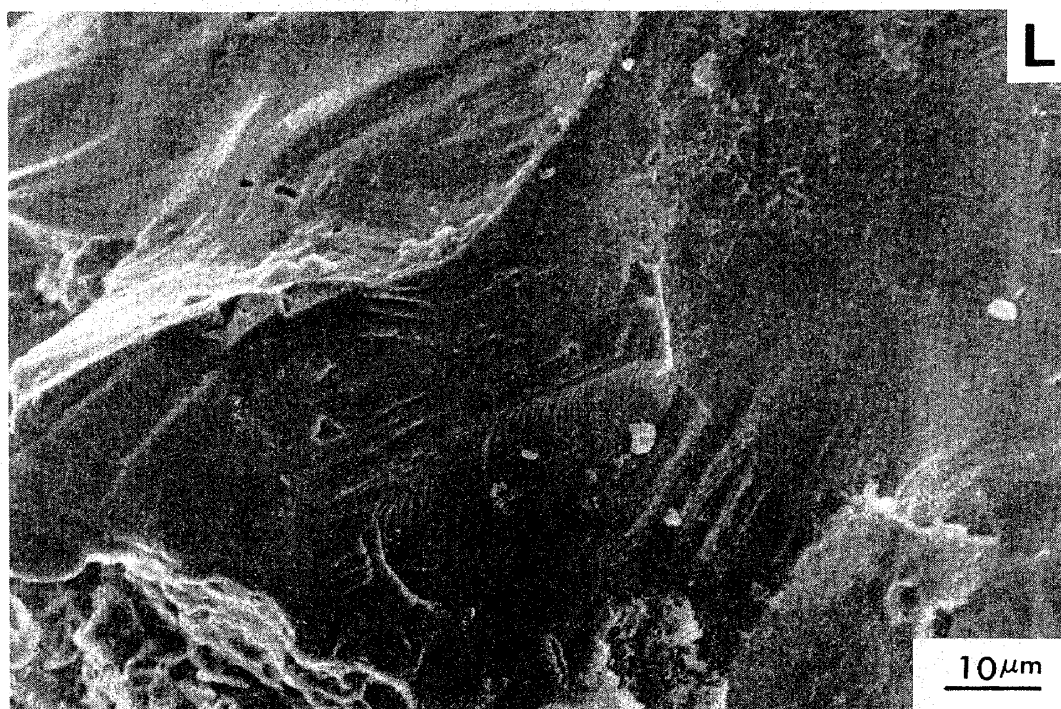
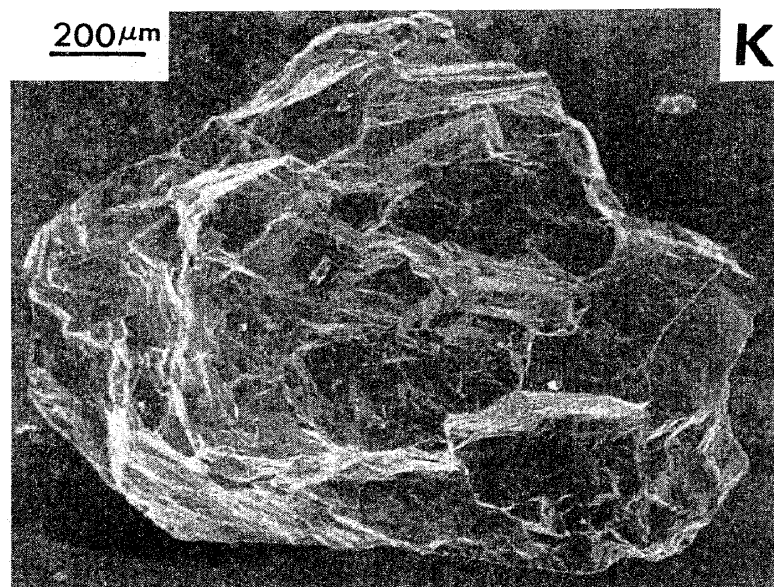


Photo.4-5

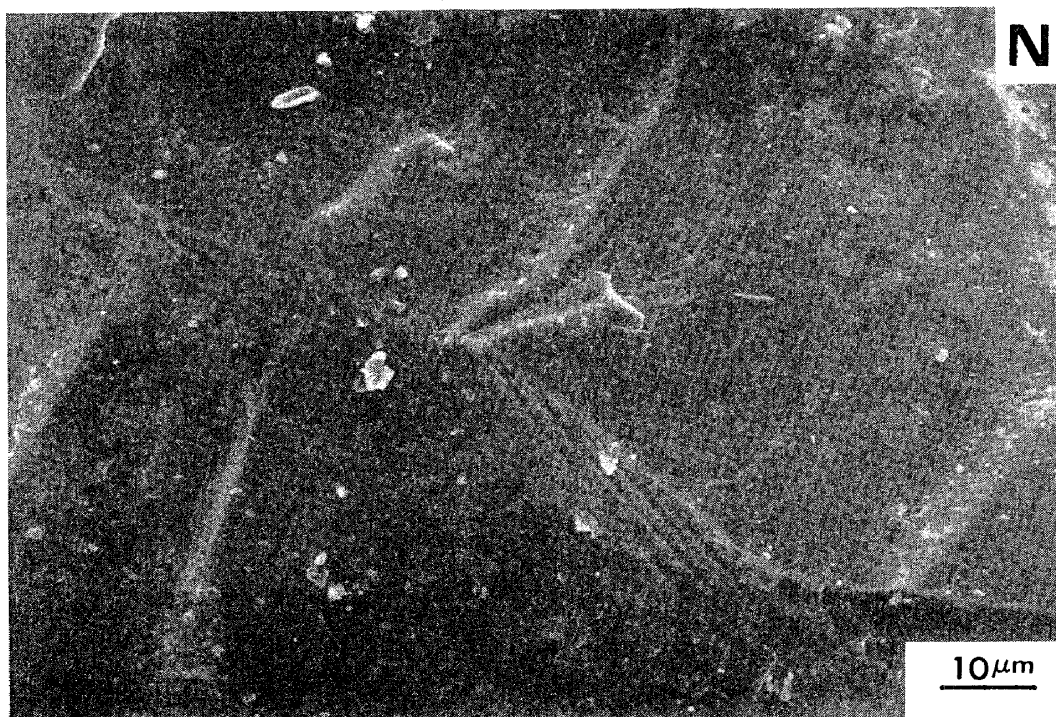
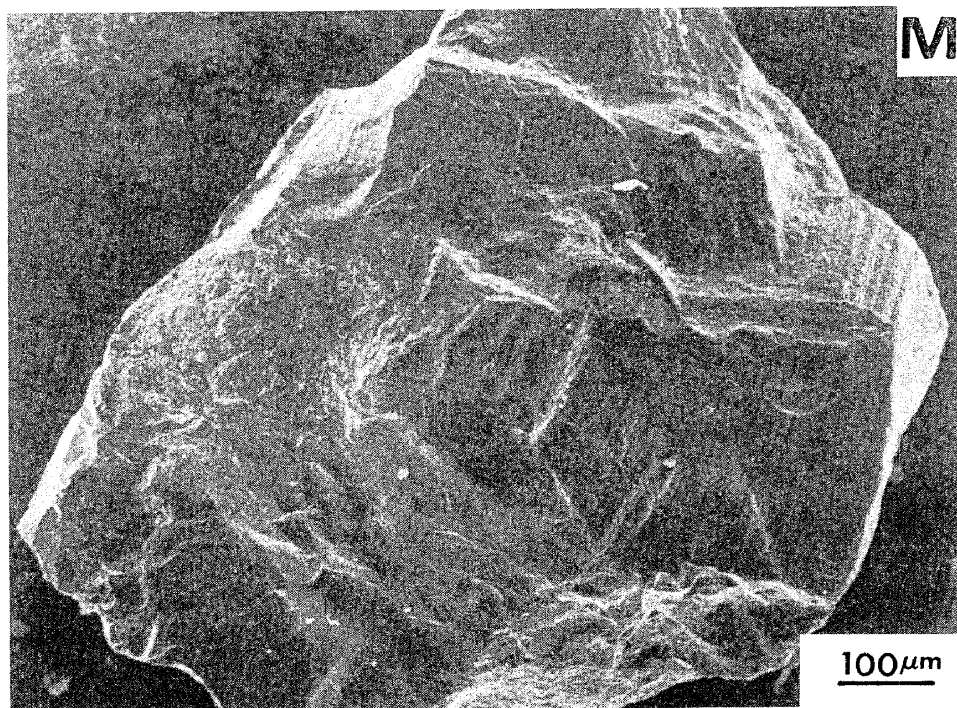


Photo.4-6

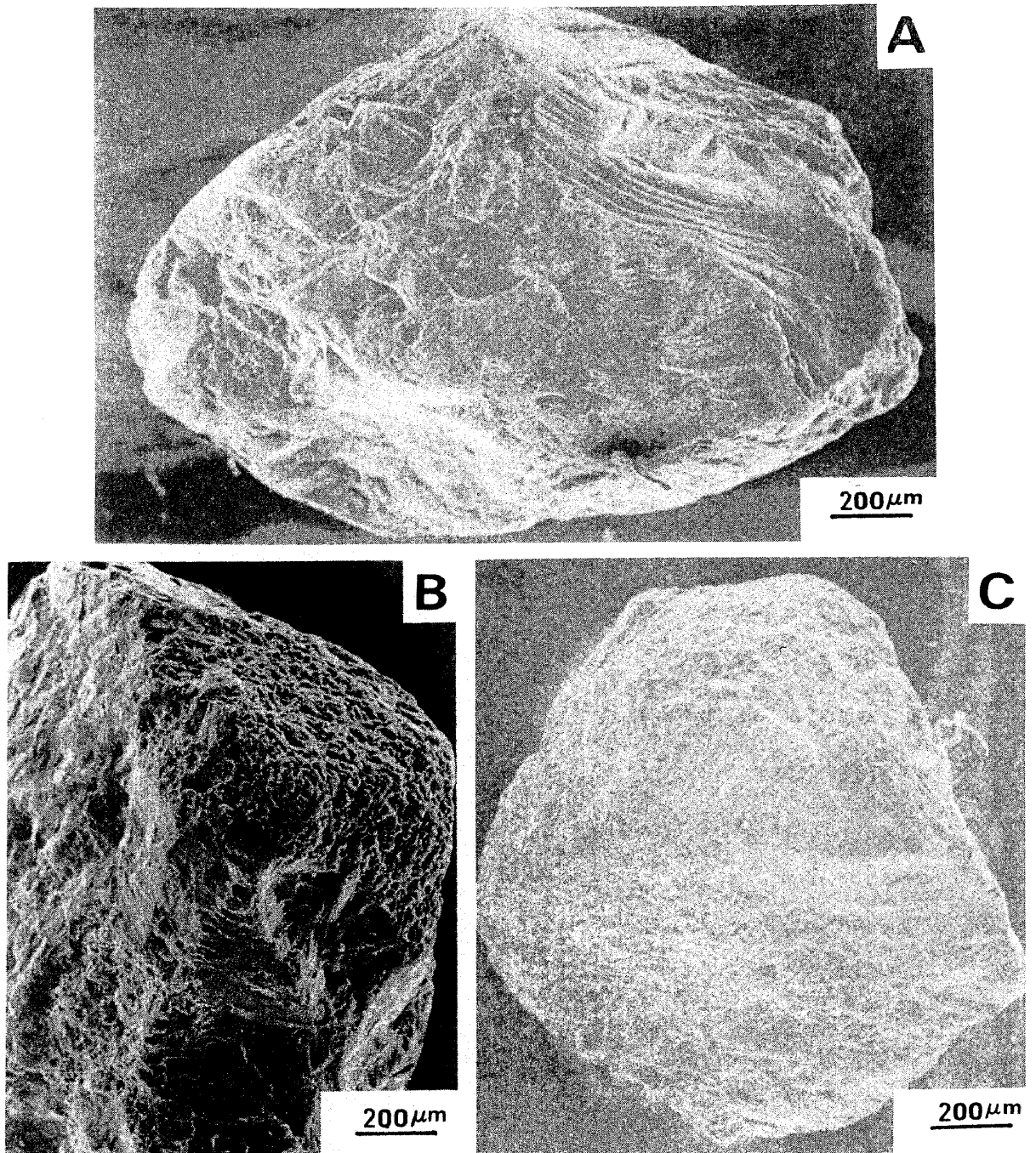


Photo.4-7