

すべり面上の光沢質黒色薄層土に起因した斜面崩壊

Slope Failure due to Glossy Black Thin Soil Layers on Sliding Surfaces

山本 哲朗 (やまもと てつろう)

山口大学教授 工学部社会建設工学科

福岡 正人 (ふくおか まさと)

広島大学教授 総合科学部

岡林 茂生 (おかばやし しげお)

(株)宇部三菱セメント研究所宇部センター グループリーダー

鈴木 素之 (すずき もとゆき)

山口大学助手 工学部社会建設工学科

宮内 俊彦 (みやうち としひこ)

山口大学大学院理工学研究科博士前期課程

瀬原 洋一 (せはら よういち)

常盤地下工業(株) 部長

1. まえがき

第一著者らは山口県内で梅雨期およびその末期、台風襲来時の集中豪雨によって崩壊した三郡変成岩からなる自然・切土斜面の現地調査を実施するとともに、斜面土の諸性質を調べている。これら調査・試験から三郡変成岩には、それ特有の片理のみならず、一般に節理が縦横に数多く存在し、これら不連続面が三郡変成岩斜面の崩壊を容易にしていることを明らかにしてきた^{1)~4)}。

崩壊した三郡変成岩の切土斜面の節理には、非常に滑らかで光沢のある黒色ないし褐黒色の薄層土が沈積しており、このことが素因になって特異なすべり崩壊が発生したものと判断した^{2),3)}。場合によっては、黒色土表面に“すべりきず”が認められた。これら黒色物、さらに光沢質黒色薄層土の斜面安定性に与える影響は明らかにされておらず、今後の検討課題であった。

最近、第一著者らは試作した簡易現場せん断試験装置^{5),6)}を用いて堆積岩・三郡変成岩からなる切土斜面土のせん断試験を実施した際、この斜面の節理にも同様の光沢質の褐黒色薄層土が存在することを見出した。

本文では、最初にこれまでの調査で対象にした崩壊斜面も含めて、片理、節理に沈積した黒色を基調にした光沢質の薄層土（以下、特に断らない限り黒色土という）が確認された五つの斜面の概要を記述する。次いで、これら黒色土のうち、特に最近の調査で採取した土試料に的を絞り、それらの化学・物理的性質を調べ、さらに黒色間のせん断強度を測定した結果を記載する。

2. 崩壊斜面の概要

片理や節理に光沢のある黒色土が沈積していた山口県内の五つの切土斜面の概要を調査時期の古いものから順次、以下に記述する。表-1に崩壊斜面の地質年代の一覧を示す⁷⁾。

(1) 斜面 A²⁾：宇部市の丘陵地に位置し、三郡変成岩（塩基性片岩）の風化した切土斜面であるが、1995年5月7日の豪雨時にトップリングによって鋸状に崩壊した。その規模は延長約100 m、高さ約16 mである。風

表-1 崩壊斜面の地質年代⁷⁾

| 斜面名 | 地質年代 |
|-----------------|-----------------------|
| A ²⁾ | 中生代トリアス紀 (205—250 Ma) |
| B | 新生代第四紀 (0.01—1.6 Ma) |
| C | 中生代トリアス紀 (205—250 Ma) |
| D | 中生代白亜紀 (95—135 Ma) |
| E | 中生代トリアス紀 (205—250 Ma) |

化岩の平坦な節理（勾配1：0.25）には1~2 mm厚の光沢のある黒色土が沈積していた（文献2）の口絵写真-4）。

(2) 斜面 B⁹⁾：1997年台風9号災害時に、県北部のむつみ村における村道沿いの多くの切土斜面（勾配1：1）が崩壊した。当該斜面はその一つで安山岩からなり、やや上側に凸状を呈した節理が斜面切取りに伴い潜在すべり面となって崩壊が発生したが、節理には厚さ約2 mmの光沢のある黒色土が沈積していた。崩壊規模は長さ9.8 m、幅16.8 m および厚さ1.0 mであった（口絵写真-9）。

(3) 斜面 C³⁾：宇部市の丘陵地にあり、白亜紀の花崗岩の貫入を受けた三郡変成岩（泥質片岩）の切土斜面が、ほとんど当日降雨量のないときに崩壊した。この崩壊に近接する泥質片岩斜面のすべり面になった上側に凸曲面をもつ片理に厚さ2 mm程度の光沢のある褐黒色土が広範囲に沈積していた（文献3）の口絵写真-8）。

(4) 斜面 D：県西北部の豊北町に位置し、砂岩の風化土からなる山腹を開削している途中、切土斜面（勾配1：1.2）に見られた節理に最大厚約5 mmで光沢のある褐黒色土層が沈積しているのが観察された（口絵写真-10）。その面の走向はN80°E、傾斜は36°SEであった。黒色土が露出した部分は総延長17.2 mに達し、最大幅1.3 mであった。黒色土の沈積した上方に湾曲した節理に沿って、その上に載っている砂岩の風化土層が断続的に下方に滑落している。

(5) 斜面 E：宇部市における丘陵地の三郡変成岩からなる山腹をバックホーによって開削している際に、蛇紋

岩の下位に堆積していた泥質片岩内の褶曲した片理に沿って厚さ1 mm程度の金属光沢のある黒色土層が沈積している様子が数箇所確認された。黒色土層に沿うすべり面の大きなものは、幅4 m、長さ14 m程度であった(口絵写真—11)。その面の走向はN40°E、傾斜は40°SEであった。

以降、斜面A、…Eで採取した黒色土を土試料A、…Eと呼称し、各土試料の諸性質を以下に記載する。

3. 黒色土試料の化学・物理的性質

3.1 黒色土試料の表面構造

採取した黒色土試料の多くの表面には、主として土塊のすべり方向に間隔1~3 mmで細い“すべりきず”が見られた。さらに土試料の表面構造を微細に見るために走査型電子顕微鏡(SEM)観察を行った。土試料EのSEM写真(二次電子像)を口絵写真—12に示す。この写真から粒子径10 μm前後の小さな板状の土粒子が積層構造で堆積している様子がよく分かる。

3.2 表面の元素組成

X線像をエネルギーレベルの相違で区別して、土試料表面に含有される元素を定性的に分析するために上述の走査型電子顕微鏡にエネルギー分散型X線検出器⁹⁾を装着し、加速電圧15 kV下で実験を行った。土試料E表面でのマンガン、鉄のX線像をそれぞれ口絵写真—13(a), (b)に示すが非常に小さな白い点の密度が元素の濃度を表す。

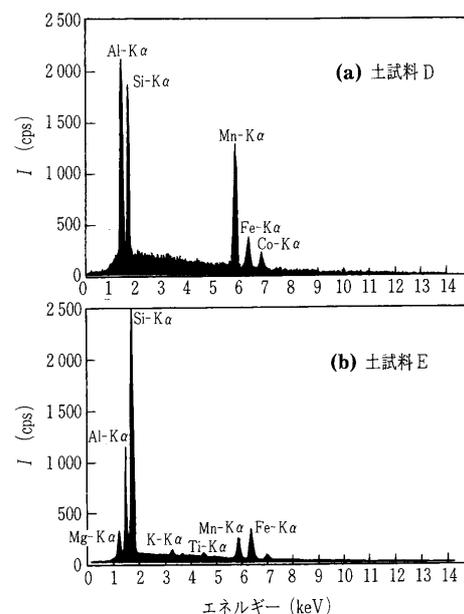
土試料D, Eのエネルギー分散型X線分析スペクトル回折図をそれぞれ図—1(a), (b)に示す。ほかの土試料と同様に両方の土試料には珪酸塩鉱物を構成する代表的な元素である珪素、アルミニウムのほかに鉄およびマンガン、さらに場合によっては、コバルトが含まれていることが明らかになった。このことから対象にしている土試料が黒色を呈する理由として、マンガンの酸化物ないし水酸化物といったマンガン含有する鉱物が存在することが示唆された。また褐色を呈するのは鉄の酸化物ないし水酸化物に起因するものと考えられた。

3.3 粉末X線回折試験による鉱物の同定

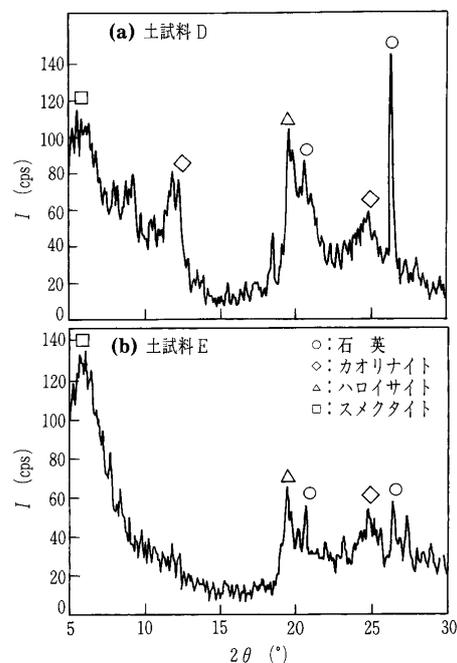
通常の粉末X線回折試験から得られた土試料D, EのX線回折図をそれぞれ図—2(a), (b)に示す。粉末X線回折試験は不定方位試料を用いて実施し、X線管球にはCuを用いている。これら土試料の結果も含めて、すべての土試料において回折ピーク強度は小さいものの、石英のほかにカオリナイト、ハロイサイトあるいはスメクタイトといった粘土鉱物の存在は確認することはできたが、マンガンおよび鉄の酸化物(水酸化物)の回折ピークは全く認められなかった。この理由としては、マンガンおよび鉄を含む鉱物は、結晶度の程度が低いか、あるいは非晶質であることが多いことが挙げられる。

3.4 化学組成

各土試料の湿式化学分析値を表—2にまとめて示す。比較のため、一例としてまさ土の結果を示した。この表に見られるように、まさ土にはマンガンはその酸化物と



図—1 エネルギー分散型X線分析スペクトル



図—2 粉末X線回折図

して重量百分率で0.1%程度しか含有されていないのに対して、本土試料にはそれは2~3%含有されている。鉄の含有率についても本土試料はまさ土に比べて多い。

マンガンの酸化物および水酸化物のうち、代表的なものとその諸性質を表—3にまとめて示す。この表は参考文献^{10)~12)}を引用して作成した。現在まで二酸化マンガンは表—3に掲げたものを含めて20種類程度が確認されている。

表—3から分かるように、パイロルース鉱が代表であるが、マンガンの酸化物あるいは水酸化物は金属光沢のある黒~鋼灰色を呈する。一方、ゲーサイトに代表されるように、鉄の酸化物あるいは水酸化物のほとんどは黄褐~赤褐色を呈する。このように総じてマンガンの酸化物(水酸化物)の方が鉄の酸化物(水酸化物)よりも黒色系である。したがって、本対象斜面で見られた黒~褐

黒色を呈する土では、黒色および褐色はそれぞれマンガ
ン、鉄の酸化物ないし水酸化物によってもたらされたも
のと考えることができる。両者の含有量比により、土試
料の彩色が相違するものと考えられた。なお、黒色のマ
ンガン酸化物（水酸化物）の含有率が10%を超えると、
それと共生する鉄の酸化物（水酸化物）の赤色系の色彩
は完全に隠されると言われている¹³⁾。

一般に地表条件（25°C, 101.325 kPa）で生成され、
かつ生成年代の新しいマンガンおよび鉄の酸化物および
水酸化物は非晶質に近いことが多く、粒径も極めて小さ
いことが鉱物学上の大きな特徴である。そのため、マン
ガンおよび鉄の酸化物（水酸化物）の化学組成を決める
ことは、容易な作業ではないと理解されている。さらに、
本土試料にはカオリナイトに代表される粘土鉱物も混在
していることもあって、マンガンおよび鉄からなる鉱物
の化学組成を決定することはできなかった。

地表環境下では、マンガンおよび鉄の酸化物の安定領

域は酸化還元電位（あるいは酸素分圧）と pH に支配さ
れるが、これらの黒色酸化物は循環する表層水ないしは
地下水によって母岩から溶脱されたマンガンおよび鉄が
中性かつ酸化的条件下で節理や片理などの不連続面に沈
殿した¹⁴⁾と推定される。微生物の関与も否定できな
い¹⁵⁾が、水循環が活発であったことが、これらの酸化
物の生成にとって重要であったと考えられる。

4. 黒色土層間のせん断強度

黒色土面をせん断面と一致させて黒色土層間のせん断
強度を在来型の一面せん断試験を行って求めた²⁾。試験
では、まずブロックサンプリングした土塊から切り出し
た供試体のせん断面を、ちょうど黒色土面に一致させた
二つ割りの供試体（直径60 mm, 高さ10 mm）を上部
・下部のせん断箱に詰めた。その後、鉛直圧 $\sigma_N=24.5,$
49.0および98.0 kPa の3 ケースについて供試体を圧密
させ、その後せん断速度0.1 mm/min でせん断した。

表-2 各土試料の化学分析値

| 土試料 | 化学組成 (重量%) | | | | | | | | | | 有機物含有量 (%) |
|-----------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-------------------|------------------|------------------|-----|---------|------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | MnO | Ig-loss | |
| A ²⁾ | 37.2 | 20.0 | 26.0 | 0.2 | 0.4 | — | — | — | — | 13.5 | — |
| C | 51.5 | 22.1 | 9.3 | 0.1 | 1.7 | 0.04 | 1.1 | 0.73 | 1.8 | 11.5 | 0.09 |
| D | 54.4 | 18.0 | 12.5 | 0.1 | 0.8 | 0.05 | 1.8 | 0.70 | 3.2 | 8.3 | 0.05 |
| E | 46.9 | 19.3 | 12.5 | 0.2 | 6.4 | 0.09 | 1.2 | 0.94 | 2.5 | 9.8 | 0.05 |
| 宇部まさ土 | 59.4 | 21.6 | 3.2 | 0.2 | — | 1.21 | 4.3 | — | 0.1 | 6.6 | — |

—: 測定していない

表-3 代表的なマンガンと鉄の酸化物-水酸化物の鉱物学的特徴

| 鉱物名 | | 化学式 | 晶系 | 硬度 | 比重 | 色 | 形状 | 産状 | 産出頻度 | |
|-----------|--------------------|--|---|-----|---------|------------|------------|-------------------|-------------------|----|
| マンガン | パイロルース鉱 | pyrolusite | MnO ₂ | 正方 | 2~6.5 | 5.06 | 黒~暗鋼 灰色 | 短~長柱 状, 塊状 | 二次鉱物 | 大 |
| | ラムスデル鉱 | ramsdellite | MnO ₂ | 斜方 | 2~4 | 4.4~4.8 | 鋼灰~鉄 黒色 | 柱状, 塊状 | 鉱脈中 | 極小 |
| | エンスータ鉱 (「横須賀石」) | nsutite | Mn _{1-x} Mn _x ²⁺ O _{2-2x} (OH) _{2x} | 六方 | 6.5~8.5 | 3.9~4.7 | 暗灰~黒 色 | 板状, 楔状結 晶 | 二次鉱物 | 中 |
| | クリプトメレーン鉱 | cryptomelane | K(Mn ⁴⁺ , Mn ²⁺) ₆ O ₁₆ | 単斜 | 5~6.5 | 4.36 | 鋼灰色 | 緻密塊状, 葡 萄状 | 二次鉱物 | 大 |
| | ロマネシュ鉱 | romanechite | (Ba, H ₂ O) ₂ Mn ₅ O ₁₀ | 単斜 | 5~6 | 6.45 | 黒~鋼灰 色 | 塊状, 葡萄状 | 二次鉱物 | 小 |
| | 轟石 | todorokite | Mn ²⁺ Mn ₃ ⁴⁺ O ₇ ·H ₂ O | 単斜 | 1.5~2.5 | 3.5~3.8 | 褐~黒色 | 細かい繊維状 結晶 | 二次鉱物, マン ガン団塊中 | 中 |
| | バーネス鉱 | birnessite | Na ₄ Mn ₁₄ O ₂₄ ·9H ₂ O | 単斜 | 1.5 | 3.0 | 黒色 | 土状 | 二次鉱物 | 中 |
| | 高根鉱 | takanelite | (Mn ²⁺ , Ca)Mn ₄ ⁴⁺ O ₉ ·H ₂ O | 六方 | ~5 | 3.41 | 鋼灰~黒 色 | 塊状 | 酸化帯 | 極小 |
| | リシオフォル鉱 | lithiophorite | (Al, Li)MnO ₂ (OH) ₂ | 三方 | 3 | 3.1~3.4 | 緑黒~青 黒色 | 粉状, 魚卵状, 塊 | 二次鉱物 | 小 |
| 鉄 | 赤鉄鉱 | hematite | α-Fe ₂ O ₃ | 三方 | 5~6 | 5.26 | 鋼灰~鉄 黒色 | 板状(雲母状) | 堆積岩中 | 大 |
| | マグヘマイト (磁赤鉄鉱) | maghemite | γ-Fe ₂ O ₃ | 立方? | 5 | 4.90 | 褐~褐黒 色 | 塊状 | 磁鉄鉱の酸化産 | 小 |
| | 磁鉄鉱 | magnetite | Fe ₃ O ₄ | 立方 | 5.5~6.5 | 5.18 | 鉄黒~褐 黒色 | 塊状 | 火成岩・鉱脈中 | 大 |
| | ゲーサイト (針鉄鉱) | goethite | α-FeO(OH) | 斜方 | 5~6 | 3.3~4.3 | 黄褐~赤 褐色 | 鱗片状, 纖維 状 | 鉄鉱物の風化生 成 | 大 |
| | 赤金石 | akaganeite | β-FeO(OH) | 単斜 | | 3.56 | 黄褐色 | 微細結晶の土 状集合体 | 温泉沈殿物 | 極小 |
| | 鱗鉄鉱 | lepidocrocite | γ-FeO(OH) | 斜方 | 5 | 3.85 | 濃赤~赤 褐色 | 鱗片状, 纖維 状結晶 | 土壌・堆積物中 | 中 |
| | フェロキシハイト | feroxyhyte | δ-FeO(OH) | 六方 | | 4.20 | 赤褐色 | 微細針状結晶 の集合体 | グライ土壌中, マンガ団塊中 | 小 |
| フェリハイドライト | ferrhydrite | 5Fe ₂ O ₃ ·9H ₂ O | 三方 | | 3.80 | 黄褐~濃 褐色 | 土状 | 低湿地土壌中, 温泉沈殿物中 | 中 | |

(注) 二酸化マンガン鉱物の場合、報告されている鉱物学的データはほとんどマンガン鉱脈産のものである。

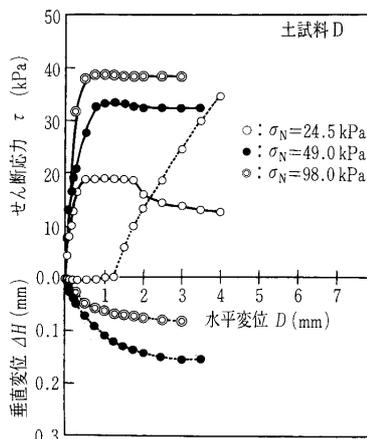


図-3 土試料 D の黒色土層間の一面せん断試験結果

図-3には土試料 D の黒色土層間のせん断応力 τ (垂直変位 ΔH) ~ 水平変位 D の関係を示す。鉛直応力が小さいと、せん断応力はピークを示した後、減少している。体積ははじめほとんど変化しないが、せん断応力の減少とともに著しく膨張している。一方、鉛直応力が大きくなると、せん断応力のピークは明確でなくなり、体積変化も圧縮を示すようになる。このように、鉛直応力が大きい場合には、本供試体の力学挙動は典型的な土の挙動に類似したものになった。破壊線は図-4に示す。表-4には供試体を作製することができた土試料 A, D および E について粘着力 c_d および内部摩擦角 ϕ_d を示す。

表-4に見られるように、 ϕ_d は $13.9 \sim 21.3^\circ$ と求められた。このように、光沢質黒色土をせん断面に一致させて得られた土の内部摩擦角は、通常の不飽和土のそれに比較してかなり小さいことが特徴である。

以上に述べた点から黒色土間の内部摩擦角が小さいことに起因して、この黒色土の沈積した節理あるいは片理に沿って容易にすべり崩壊が発生したと解釈することができる。言い換えると、黒色土の存在は斜面崩壊の素因となる。したがって、斜面防災の観点から、こういう黒色土を不連続面等にもつ斜面の切取りに際しては、十分な配慮を払って施工せねばならないとすることができる。

5. まとめ

節理および片理に沈着した光沢質の黒色薄層土について、黒色物を明らかにするために表面の元素分析、粉末 X 線回折試験および化学分析を行い、黒色の彩色はマンガン酸化物(水酸化物)に、褐色は鉄酸化物(水酸化物)に起因することを示した。これらマンガンおよび鉄酸化物(水酸化物)は節理や片理という不連続面に浸透した表面水あるいは地下水から酸化条件下で沈殿生成されたと考えられる。これらの鉱物は非晶質に近く、粒子径がきわめて小さく、さらに粘土鉱物と混在しているので、今回の試験範囲では同定できなかった。

在来型一面せん断試験から得られた黒層土間の内部摩擦角は約 $14 \sim 21^\circ$ で非常に小さく、このことが原因とな

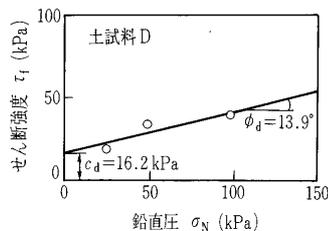


図-4 土試料 D の黒色土層間の破壊強度線

表-4 黒色土層間の粘着力 c_d および内部摩擦角 ϕ_d

| 土試料 | 粘着力 c_d (kPa) | 内部摩擦角 ϕ_d (°) |
|-----------------|-----------------|--------------------|
| A ²⁾ | 0.0 | 21.3 |
| D | 16.2 | 13.9 |
| E | 17.3 | 15.1 |

り、黒色層土の沈積したすべり面になった節理や片理に沿って容易に斜面崩壊が発生したと結論づけられた。

参考文献

- 1) 山本哲朗・大原資生・西村祐二郎・瀬原洋一：山口県下の三郡変成岩からなる切土斜面に見られる豪雨崩壊の特徴，地盤工学会論文報告集，Vol. 36, No. 1, pp. 123~132, 1996.
- 2) 山本哲朗・高本直邦・西村祐二郎・瀬原洋一：三郡変成帯における鋸状斜面崩壊，土と基礎，Vol. 44, No. 11, pp. 9~12, 1996.
- 3) Yamamoto, T.: Some geotechnical engineering properties of weathered soils on failed slope in the Sangun metamorphic region, Proc. of the International Symposium on Problematic Soils, IS-TOHOKU '98, Vol. 1, pp. 537~540, 1998.
- 4) 山本哲朗・鈴木素之・松本直・国広清己：花崗岩の貫入を受けた三郡変成岩からなる斜面の崩壊，土と基礎，Vol. 47, No. 4, pp. 27~29, 1999.
- 5) 鈴木素之・山本哲朗・三浦壹章・榊井明・芋岡俊彦・村上俊秀：簡易現場せん断試験装置の試作，第34回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 687~688, 1999.
- 6) 山本哲朗・鈴木素之・村上俊秀・三浦壹章・榊井明・芋岡俊彦：試作した簡易現場せん断試験装置による土のせん断強度測定，第34回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 689~690, 1999.
- 7) 山口地学会編(編集代表者 西村祐二郎・松里英男)：山口県の岩石図鑑，第一学習社，p. 207, 1991.
- 8) 山本哲朗・鈴木素之・松本直：対策工を施した切土斜面の豪雨崩壊—1997年台風9号災害—，地盤と建設(地盤工学会中国支部論文集)，Vol. 16, No. 1, pp. 41~50, 1998.
- 9) 合志陽一・佐藤公隆編：エネルギー分散型 X 線分析—半導体検出器の使い方—，日本分光学会測定シリーズ18，学会出版センター，pp. 83~129, 1989.
- 10) Mandarino, J. A.: Fleischer's glossary of mineral species 1999, The mineral record Inc., Tucson, 1999.
- 11) Roberts, W. L., Campbell, T. J. and Ropp, G. R. Jr.: Encyclopedia of minerals (2nd Ed.), Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1990.
- 12) 地学団体研究会編：新編地学事典，平凡社，1996.
- 13) Dixon, J. B. and Skinner, H. C. W.: Manganese minerals in surface environments, Catena supplement 21, pp. 31~51, 1992.
- 14) Skinner, H. C. W. and Fitzpatrick, R. W.: Iron and manganese biomineralization, Catena supplement 21, pp. 1~6, 1992.
- 15) 吉津研・田崎和江：鉄，マンガンを形成における微生物のはたらき，鉱物学雑誌，Vol. 26, No. 2, pp. 69~72, 1997.

(原稿受理 1999.8.16)