

シルトとシルト岩

Silt and Siltstone

水谷伸治郎 (MIZUTANI Shinjiro)¹⁾・坂 幸恭 (SAKA Yukiyasu)²⁾・
矢入憲二 (YAIRI Kenji)³⁾・足立 守 (ADACHI Mamoru)⁴⁾

- 1) 名古屋大学博物館
The Nagoya University Museum
- 2) 早稲田大学名誉教授 (平成 22 年 3 月 31 日逝去)
Waseda University; died March 31, 2010
- 3) 岐阜大学名誉教授
Gifu University
- 4) 名古屋大学博物館
The Nagoya University Museum

Abstract

Size and shape properties of clastic grains of silt and siltstone are discussed using desert sands from Egypt and siltstones from Malawi; it is revealed that most of the silt grains (i.e. diameter of the grains finer than 4.0 ϕ and coarser than 8.0 ϕ in size) are invariably angular in shape. Once the silt grains were formed, they seem to retain their shape and even their surface features. Although the occurrence of siltstone is not so common, it frequently occurs in the geological formations within the Permo-Triassic Karroo system in the African continent. The glacial deposits named the Dwyka system has been reported from the Gondwana Land, particularly in South Africa. The occurrence of the siltstone may be related to the glaciofluvial deposits in this region.

In the supplementary part of this report, we present the outline of the Database named IDARC (Image Database of African Rock Collection), and explain how to read it on the Home Page of the Nagoya University Museum open to the public.

Key Words: silt, siltstone, sedimentary petrology, desert sand, roundness, eolian, glaciofluvial, Gondwana, Egypt, Malawi, database.

はじめに

名古屋大学には、1962年に諏訪兼位が第1回のアフリカ大陸の調査研究を行って以来、調査の時に各地で採取された岩石試料をはじめとして、大量の岩石・鉱物、化石類が保管されている。2001年から、名古屋大学博物館では、足立 守を中心に、この試料の整理を開始した。とくに、岩石試料の一部を薄片とし、その偏光顕微鏡による観察結果を基礎データとして、画像データベース：“IDARC 計画：Image Database of African Rock Collection”を構築することにした。平成8年に提言された「学術標本画像データベース作成の指針（学術審議会学術情報資料分科会学術資料部会大学博物館ワーキンググループ：1996）」を参考にした計画であった。

この報文は、そのIDARC計画のうち、すでに公表されている次の学術報告（Mizutani and Suwa, 1966；Mizutani and Uemura, 1967：MS；水谷伸治郎・植村 武・諏訪兼位, 1968；ならび

に、Saka, 1977) の基礎データを提示し、「砂漠の砂」および「マラウイ国のカルー系中のシルト岩」を実例として、とくに碎屑性粒子の形成について、まとめたものである。

アフリカの地質については、上記のほか Mizutani and Yairi (1969), Yairi and Mizutani (1969), 矢入 (1979), 諏訪・矢入 (1979) 等にも解説した。また、堆積岩一般に関しては、水谷 (1987) や水谷・斎藤・勘米良 (1987) においても述べた。

著者の一人、早稲田大学の坂 幸恭名誉教授は、以前から体調を崩していたが、この原稿の完成をみることなく、平成 22 年 3 月 31 日、他界した。あらためて、心から彼の冥福を祈る。ここに記した数々の議論については、すでに多くの時間を使って、彼の意見を聞き、議論を重ねていた。彼の考えは、出来る限り尊重し、Saka (1977) を参考にして、書き記した。なお、彼の採取した試料や所蔵してあって標本は、彼から直接、または、早稲田大学高木秀雄教授を通じて、手にすることができた。

序章 碎屑粒子のサイズの名称

“silt”とは、“Sediment deposited by water in channel, harbour”で、河口や漁港などの環境に形成される堆積物一般を指す。しかし、その語に対して、正確な定義を与えたのは、Wentworth (1922) であり、1/16 mm より細かく、1/256 mm より粗いものを“silt”と呼ぶことになった。当時、彼は、流水実験で、砂礫が摩滅してゆく過程を検討する研究を行っていた。実験結果を整理しながら、彼は堆積物・堆積岩を構成する碎屑性物質のサイズに研究者の間で共通な定義を与えておく必要を痛感していた。まだ、仲間の間においても、それらを記載する際の明確な定義は確立していなかったからであった。Wentworth は研究者や地質学者の知人に質問書を配って、言葉の定義を明らかにしようと試みた。英米独仏で用いられている語を整理し、今では慣用語になっている“granule”という語を導入し、また、1 mm を基点として、2 の階乗（詳しくは、 $\sqrt{2}$ の階乗）目盛りを用いることを明記した点で注目に値する。しかし、これはあくまで英語表記であり、それが必ずしも、科学的表記に合致するわけではない。Cailleux (1954) や Pettijohn (1949, 1957) がまとめているように、国際的にもさまざまな呼び名がある。参考までに、Correns (1968) や Füchtbauer und Müller (1970) によるドイツ学派の命名区分について記しておこう。ドイツには自国の基準である DIN (Deutsche Industrie Normen) があり、それによると、

Tom / 0.002mm / Schluff / 0.063mm / Sand / 2.0mm / Kies / 63mm / Steine

という区分を用いている。これは、基本的な粒子のサイズ目盛りを、

(0.002mm) – (0.02mm) – (0.2mm) – (2.0mm) – (20.0mm) – (200mm)

におき、加えて、それらの中点の対数、0.6327 を補助的に使って、区分命名する方法である。

これらの区分と名称は、Krumbein (1934) が phi-scale を提唱して以来、これに基づく目盛りと名称の区分がこの分野で広く使われるようになった。主としてアメリカの流れを組む Udden・Wentworth・Krumbein と継がれて定着した名称と区分が国際的にも定着しているので、ここでも、慣例として、

{1/16mm = 4 ϕ } / silt / {1/256mm = 8 ϕ }

を使用することにする。

この名称にしたがって、固結した岩石、すなわち、シルト岩については、“siltite”が用いられるこ

とがある (Kay, 1951). これもいわゆるアメリカ学派の呼称であるが, シルト岩は “siltstone” と書かれることが多い (Pettijohn, 1957; *Am. Geol. Inst.*, 2005). 未固結堆積物について, “シルト” を強調したのは, Shepard (1954) で, 彼の 3 要素三角形, つまり “sansiel” は粒度組成を便宜的に表す手法として, しばしば使われた. Pettijohn (1984) が紹介しているように, Shepard は資産家で, 自家用のヨット (a seagoing yacht) を所有していた. そして, 初期には Massachusetts 州沖の Cap Cod Bay の底質を調査していたという. このような体験には, おそらく, 彼の “sansiel” は有効に役立ったと想像される. しかし, Kay (1951) をはじめ, Pettijohn *et al.* (1972) なども同じように, 地殻内における堆積岩の全組成という問題を論ずる際には, 碎屑岩の中に, siltite や siltstone を必ず含めて検討が行われている. とくに統計的考察がなされる場合には, 粗粒から細粒にいたるまで, おしなべて粒度による構成を対象としなければならないので, この語が登場することになる. Kay (1951) は, いわゆる変動帯地域における岩石の構成を論ずるために, “siltite” を使っている.

第1章 エジプトのリビア砂漠の砂

1962 年, 諏訪兼位はエジプトのサッカラで, 砂漠の砂を採取した. その砂を調べて, Mizutani and Suwa (1966) はその特徴を明らかにして, 報告を書いた. わが国には, 典型的な砂漠というものはなく, いわんや砂漠の砂の地質学的性質については, ほとんど記載も報告もなかった. その点, サッカラの試料は貴重であった. そこで, 我々は, その特徴を明らかにし, 同時に, 粒子の形態的な性質に関して, 物理学的な考察を行った (Mizutani and Uemura, 1967: MS). そして, その結果を, 日本地質学会で報告 (水谷・植村・諏訪, 1968) した. ただし, Mizutani and Uemura (1967: MS) は, その時, 学会で口頭発表を行ったまま, 今日に至っている. 今回, この機会に, 当時の報告に目を通して, あらためて解説することにした. 以下, まず, Mizutani and Suwa (1966) を紹介し, 続いて, この砂漠の砂の砂粒子の形態的特徴に関する物理学的考察 (Mizutani and Uemura, 1967: MS) について述べる.

第1節 リビア砂漠の砂質粒子の形態

諏訪が採取したこの砂漠の砂は, ほとんど石英の粒子からできている (粒子の約 95% は石英). そのほかに, 石灰岩もしくは方解石の粒子が数% 混じっている. この地域に分布する Eocene の石灰岩に由来するものであろう. 砂質粒子の石英は波動消光するものと波動消光しないものとを合わせ, さらに複粒子石英 (polycrystalline) を加えると, それだけで全砂粒子のほぼ 90% になる. その他にわずかにカルセドニー質石英がある.

一般的な傾向として, 砂質粒子のサイズが小さくなると, その粒子の中における複粒子石英の数が少なくなる. Greensmith (1963) や Conolly (1965) もその傾向を指摘している. しかし, 波動消光する石英と波動消光しない石英の比率は, 砂質粒子のサイズにはあまり関係がない.

これらの粒子は, 淡黄色, もしくは, 淡褐色を帯びている. 加熱した塩酸で洗うと, これらの色はなくなって, 白い石英粒子となる. おそらくこの色は粒子表面に付着した酸化鉄によるものであろう. 表面の酸化鉄を除いた粒子について, 双眼顕微鏡で観察すると, これらの石英粒子の表面にはいわゆる “磨りガラス” 模様 (frosted texture) がついていることが分かる. 砂漠の砂を特徴づけるこの表面組織 (surface texture) は, 次の述べるように, ほとんどの粒子, とくに, 粗粒の粒子の全表面に限なく見られる.

砂質粒子のほとんどは, 外形が丸く (角がとれて丸いという意味で, その外形が球形に近いという

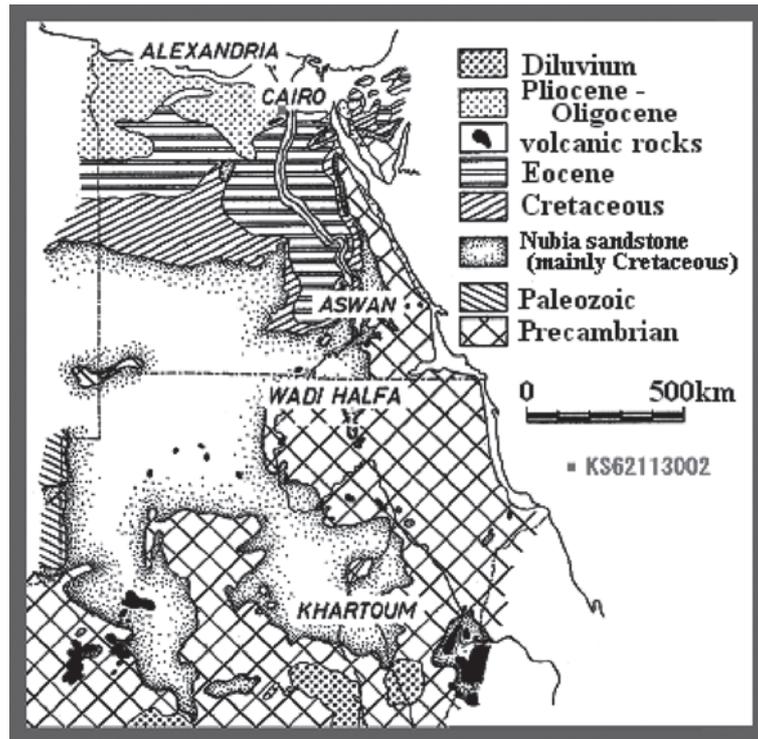


Figure 1 砂漠の砂 [試料番号：KS62113002] の採取地点 (CAIRO) と付近の地質

意味ではない), いわゆる円磨度が高い。しかし, 球形度 (sphericity) が高いわけではない。円磨度については, その測定結果について, 詳しく後述する。

この地域 (カイロ付近) の気候は, 年平均気温 21.7°C, 年間雨量 28mm で, 典型的な乾燥地域である (Kendrew, 1961)。風による運搬作用だけが著しく卓越し, まれに降る雨によって, 淡黄色の色が砂質粒子の表面に付いたのであろう。砂漠の砂の形成機構は主として風によると考えられる。

Figure 2 の向かって右側の粒子は, 表面にいくつかの凹みがみられる。おそらく, それはもとの岩石 (多分, 石英質砂岩: orthoquartzitic sandstone) がもっていた特徴であろう。

Figure 2 の写真は, とともに砂質粒子を示している。両者ともに似た程度に円磨されている。しかし, 向かって左側の粒子の方が球に近い。つまり, 球形度が高い。円磨度とは, 厳密には, “本来あった角の部分” がその後, どの程度, 摩滅されて丸くなっているかという程度を示すものである。したがって, 本来どの部分が角であったかが分からないと, 厳密には決められない。一方, 球形度は, もとの形には触れないで, 現在のその粒子の形態が球にどの程度近いかだけを議論する。粒子のどこが本来角であったかなどは不明なことが多い。とすれば, 円磨度を知るには, 幾つかの粒子を数多く選び出し, 統計的にそれらの傾向を調べる以外に方法はない。

あるサイズの粒子を数多く集める。そして, その一つひとつについて, その円磨度を調べることにする。便宜的に円磨度を数字で示すことにする。まず, 最初に, 円磨度を表す粒子の形の標準形を準備しておいて, それを目で比較しながら, 円磨度を数値で示すことにする。この比較視覚対比法 (visual comparison method) は, 慣れるとかなりの信頼性と再現性をもち, 数値で円磨度を示すことができる。このような考えに基づいて, Folk (1955) は Powers (1953) が示した粒子のさまざまな形態に円磨度を示す数字を与えた。そして, サイズについての Inman (1952) の手法にならって, そのスケールを rho-scale (ρ -scale) として, その平均値と標準偏差を示した。すなわち, 角張っている形に 0-1 (very angular) という数値を, そして, 最も丸い形に 5-6 (well rounded) という数

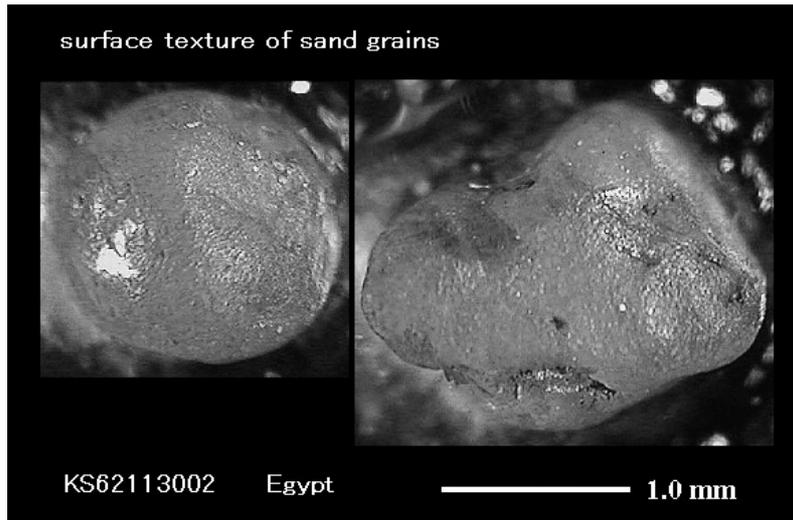


Figure 2 砂質粒子の表面組織（磨りガラス組織，frosted texture）

値を与えた。あるサイズ（例えば，32mesh よりも細かく，42mesh よりも粗いサイズ）の粒子の形を沢山測ってみる。その丸さ（ ρ -scale）の平均値を $Md\rho$ で示す。同じように，その時の測定値の標準偏差を $\sigma\rho$ で示すことにする。このようにして，数多くの粒子の形態についての統計的処理を行うと，円磨度を数値で示すことができる。実際の砂漠の砂についての測定例を下記に示す。この表は，Mizutani and Suwa（1966）の Table 3（p.143）からの引用である。

Table 1 42mesh および 60mesh サイズの砂粒子の円磨度の測定結果

Mesh 篩	opening mm 目の開き	roundness in ρ -scale (freq. %)						調べた粒子数
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	
42	0.337	0.0	2.6	13.2	29.0	34.3	21.0	386 個 (1)
60	0.244	0.1	10.3	35.4	27.4	23.1	3.7	295 個 (2)

上の表において，(1) は，42mesh の篩に残ったサイズの砂質粒子である。その粒子を 386 個調べ，その円磨度を ρ -scale で測定した。その結果は， $Md\rho = 4.13$ ， $\sigma\rho = 1.11$ であった。同様に，(2) は，60mesh の篩に残ったサイズの砂質粒子である。その粒子を 295 個調べ，その円磨度を測定した。結果は， $Md\rho = 3.16$ ， $\sigma\rho = 1.06$ であった。

以上をまとめると，ある一つの砂の試料について，まず，その試料の粒度分析を行い，それぞれの粒度クラスの試料について，上のように，円磨度を調べる。その結果は，その試料の各粒度クラスのサイズとその円磨度の関係として，図示することができる。

その結果を，横軸に各粒度クラスのサイズを ϕ -scale で，縦軸に円磨度を ρ -scale で示すと，次の Figure 3 のようになる。

さらに，試料として取り扱った個々の砂漠の砂質粒子について，その表面組織の特徴を比較してみる。よく観察すると，粒子の全表面にわたって磨りガラス模様がついているものと，そうではなくて，粒子のごく一部だけにしか磨りガラス模様がついていないものがあることに気づく。その成因を推定すると，おそらく，大きな粒子が新しく割れ，石英粒子の内部が現れたものでは，そこにはまだ磨りガラス模様が形成されていないのであろう。

Figure 3 は，試料に含まれる砂質粒子の「サイズ」と「円磨度」と「粒子前面に磨りガラス模様がついている粒子の割合」の関係を示したものである。この図から，試料に含まれている砂質粒子は，

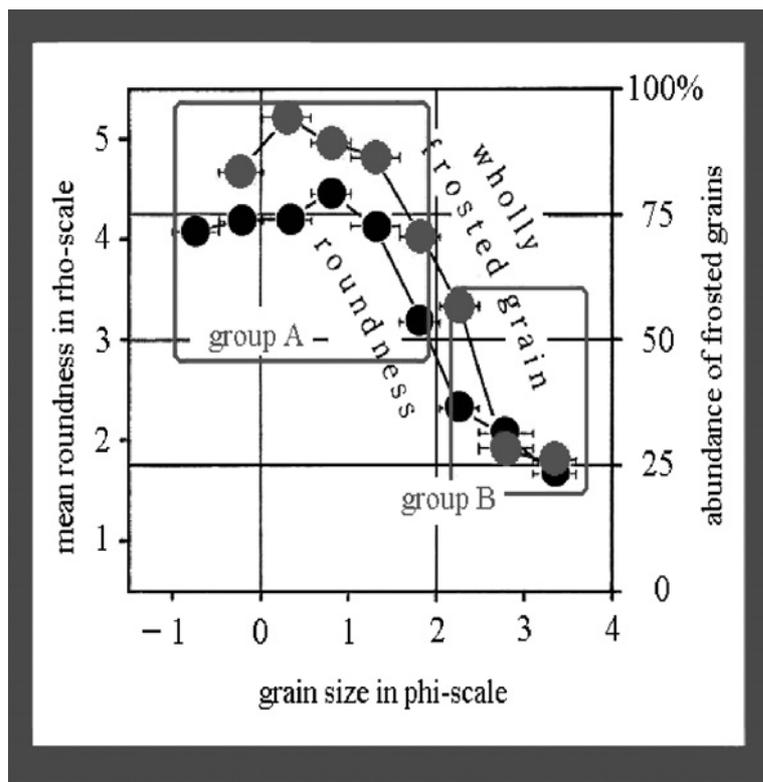


Figure 3 試料 [KS-62113002] の砂質粒子について、その円磨度（縦軸： ρ -scale）と粒径（横軸： ϕ -scale）をプロットしたもの、Mizutani and Suwa (1966) の Fig. 5 を一部改変。
 黒丸：砂質粒子のサイズ（下横軸）と円磨度（左側縦軸）の関係。
 赤丸：砂質粒子のサイズと粒子の表面全体に磨りガラス模様がついている粒子の割合%（右側縦軸）の関係。

group A と group B の二つに分けられることが分かる。前者、すなわち、group A は粒度が粗く、しかし、円磨度は高く、丸く、ほとんどの粒子はその全表面に磨りガラス模様がついている。これに対して、後者、すなわち、group B は粒度が細かく、円磨度は低く、つまり、角ばっていて、粒子の全表面に磨りガラス模様がついている固体は比較的少ない。

Figure 3 のような図示法においては、もし、砂漠の砂が次のような過程で形成された場合には、それらを観察し、測定した結果はどうなるであろうか。大きな粒子があって、それが時間の経過とともに、だんだんと小さくなっていったとすると、粒径は左から右へと変わるであろう。そして、その過程で粒子が順次、丸くなっていくならば、円磨度は下の方から上へと変わるはずである。それらを一緒にこの図に入れると、左下から右上へと測定結果が並ぶであろう。そして、一連の過程が連続的に起こるならば、測定点はお互いに連続して並ぶであろう。それらが幾つかのグループに分けられるというようなことはないはずだ。Figure 3 は、どうも砂質粒子はそのような過程で形成されたのではないことを示唆している。

おそらく、砂質粒子はそのような簡単な、連続的な過程で形成されたのではないのであろう。そして、細粒の粒子は、粗粒の粒子が磨り減って、小さくなった結果、形成されたのではなからう。細粒の粒子群は、粗粒の粒子群とは別の形成過程を経てできたのであろう。

第2節 粒子の摩滅とその結果による円磨作用に関する物理学的考察

筆者の一人（水谷）は、かつて、共同研究者とともに、砂粒子の衝突に関する物理学的考察に基づく論文を書いた。その基本的な考えは、昭和43年、日本地質学会において口頭で報告された。その講演要旨は、次のように記録されている。

水谷伸治郎・植村 武・諏訪兼位（1968）

リビア砂漠の砂にみられる二種の砂粒子群

“エジプトのサッカーで採取したりビア砂漠の砂は 94wt.% の石英粒を含み、これらは『きわめて円磨され、かつ、全表面が磨りガラス状を示す粗粒子群』と『角ばっていて一部が磨りガラス状になっている細粒子群』の二つに明瞭に分けられる。

石英粒子の円磨作用について、その機構を粒子の衝突時における角の破壊と考えて、粒子の大きさとその運動速度の関係を知ることができる。その結果と砂粒の移動沈積に関する知識をあわせて考慮すると、碎屑性の砂粒子はいくつかの群に分けられる。

以上の考察に基づき、碎屑性堆積物の生成条件をより詳しく論ずることができるであろう。リビア砂漠の砂にみられる二種の砂粒子群はほとんど完全に成熟した風成石英砂の典型的な特徴と考えられる。”（『』記号は、新たに挿入）。

この時、報告された研究の概要は、すでに Mizutani and Uemura (1967: MS) の連名で書かれていたが、それを発表する機を逸し、現在まで、公表されていない。ここでは、その内容を分かりやすく解説する。

物体Aの先端に突起があり、その物体Aが他の物体Bに衝突した場合について、その先端部の変形に関して、衝突による歪みエネルギーに基づいて、考察してみよう。

Figure 4において、物体Aの一部に突起部があつて、その部分の先端部の曲率半径を r とし、物体Aの大きさを粒径 R とする。仮に、相対的な大きさとして、 $r = R/100$ としておこう。

物体Aを実際には石英を考える。石英の力学的性質は、Handin (1966) などによって、実験的に検討されている。彼によると、石英の破壊強度 (ultimate strength) は 25,000 bars (実験温度 24°C, 封圧 confining pressure = 0) で、その時の全歪みは、4.8% とある。さらに、破壊時のときの差応力 (differential stress) = 14,000 bars 等のデータを参考に検討することにしよう (Handin, 1966: p.263)。

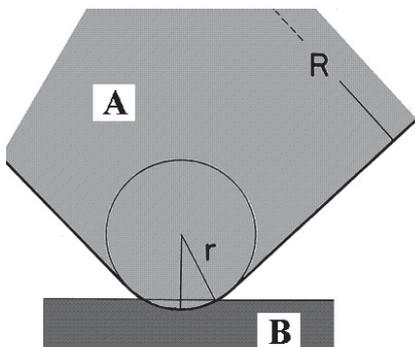


Figure 4 物体Aと物体B

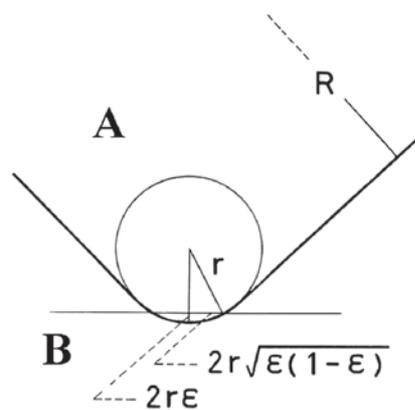


Figure 5 Aの突起部の形状

もう少し、細かく観察して、Figure 4における物体Aの突起部と物体Bとの接触部の関係を下のように示す (Figure 5)。左図 (Figure 4) において、物体Aの一部に突起部があり、その物体Aの一部が他の物体Bに衝突する場合を考える。この時の応力による歪みエネルギーは、結局は体積変化によって蓄積されるエネルギーである (植村, 2000: p.128)。Figures 4 & 5 において、 R は物体Aの半径、 r は物体Aの突起部の半径、 ϵ は歪みである。この突起部の変形によって、そこに蓄えられるエネルギーを考えてみる。

垂直応力がゼロから σ まで増加する間に縦歪みがゼロから ϵ まで変化したとすると、これによってなされた単位体積当りの仕事の仕事量 W は、ヤング率を E として、次のように表される。

$$\text{すなわち, } W = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon = \int_0^\epsilon E\epsilon d\epsilon$$

$$\text{ゆえに, } W = 1/2 \{4\pi r^2 \epsilon (1-\epsilon) \sigma \cdot \epsilon 2r\}$$

である。

物体Aの突起部の幾何学的形態を Figure 5 のように表すと、垂直応力による歪みエネルギー W は次のように表されることになる。

$$W = (1/2)4\pi r^3 \varepsilon^2 (1 - \varepsilon) \sigma$$

この式において、突起部が壊れるときの、すなわち、破壊直前の、歪みと応力の大きさをそれぞれ、 ε_{\max} 、 σ_{\max} とすると

$$W = 4\pi r^3 \varepsilon_{\max}^2 (1 - \varepsilon_{\max}) \sigma_{\max}$$

となる。

一方、物体Aが速度 v で運動している時、それが持っている運動エネルギー E は

$$E = (1/2)mv^2$$

である。故に、もし速度 v が小さく and/or 質量 m が小さければ、 E は小さくなり、 W より小さくなって、結果として、物体Aの突起部の破壊は起こらないであろう。

これに対して、もし、 v が大きく、and/or 質量 m が大きい場合には、 E は W を超えて大きくなり、突起部の破壊が起こるのである。

物体Aの幾何学的形態をモデルとして r より十分に大きな R をもつ球形としよう。また物体Aの密度を ρ (石英の場合、約 2.65) としよう。

$$E = (1/2) (4/3)\pi R^3 \rho v^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$W = 4\pi r^3 \varepsilon_{\max}^2 (1 - \varepsilon_{\max}) \sigma_{\max} \dots\dots\dots (2)$$

これらの式において、式 (1) が十分に大きくて、式 (2) の値を超えたならば、破壊が起こり、粒子は摩滅する。一方、この大小関係が逆ならば、破壊は起こらず、粒子は摩滅しないで、その形態を保ったまま移動するであろう。

すでに述べた Handin (1966) の実験結果を利用すると、石英の破壊強度はかなり大きく、少なくとも、通常の条件下では、石英粒子が風で運ばれて移動し、その速度で粒子同士が衝突しても、また仮にその粒子にかなり鋭利な突起部があったとしても、そこが破壊するにはいたらない。とくに砂質粒子のサイズが小さな場合には、衝突による破壊や摩滅は起こりにくいと考えられる。

この推論は、少なくとも、リビア砂漠で観察された砂質粒子の形態とサイズ、そして、その表面組織の特徴と矛盾しない。すなわち、砂漠の砂の、より細粒の粒子群は、より粗粒の粒子群に比べて、①角張っているものが多く、また、②その粒子の全表面に磨りガラス模様がついているものが少ない、という特徴がある。粗粒の粒子群と細粒の粒子群とは、別の過程で形成されたものであり、前者が繰り返して移動し、運搬される過程で、そのサイズが小さくなって、後者の粒子群になったものではない。

第3節 考 察

砂質粒子の形態において、その円磨度とサイズの間、これまで述べてきたような特徴があるということは、以前から気づかれていた。たとえば、Swineford (1955) は、サイズが小さくなるにしたがって、円磨度が連続的に高くなっていくのではなく、むしろ、サイズが小さくなると円磨度の変化率が急に小さくなることを指摘している。また、Tanner (1956) は、砂質粒子のサイズと円磨度について、ここで述べたことと同じ内容のことをすでに指摘している。もし、注意深く、顕微鏡観察を続けている人がいたら、彼女や彼は必ず、このことに気づいたに違いない。

そうでなくても、Kuenen (1960, 1969) のような実験的研究をした人は、砂が移動し、運搬される過程では、砂の個々の粒子が摩滅してサイズが小さくなるようなことはごくまれであることに気づいている。実験的研究については、古典的な Bagnold (1954) の研究があるが、この種の研究には、実験条件において制約があって、その結果として、有効な、あるいは、実用的な推論を得るにはいたっていないし、それ故に類似の研究を続けている例はほとんどない。

むしろ、基本的に問題を自然に求め、シルトあるいはシルト岩に関する問題を、砂質粒子の形成過程に求めるのではなくて、そもそも砕屑岩一般に関する問題、すなわち、砕屑性粒子の根源に求める考えも少なくない。それには、どうしても、いわゆる火成岩の構成粒子のサイズ構成に関する研究も必要となろう。少なくとも、砕屑性粒子のサイズはその起源である火成岩や変成岩の構成鉱物のサイズについても、考察をしなければならないであろう (Blatt, 1967, 1970)。

最後に、この報告においても後述する計画であるが、自然界におけるシルト形成の最大の因子として指摘されている氷河作用との関係を見捨てることはできない。事実、多くのシルトならびに、シルト岩の存在と分布は、氷期、あるいは氷河、氷河作用と深い関係にあることはかなり昔から指摘されている。古典的な研究もそれには触れていて、いくつかの教科書は、シルトの項目において氷河とその作用について、論述している (Füchtbauer und Müller, 1970; Pettijohn, 1975)。

第2章 マラウィのカルー系のシルト岩

第1節 はじめに

アフリカ大陸南部には、オーストリアの構造地質学者 Suess によって、Gondwanaland と呼ばれるようになった地質学的な証拠、Dwyka Tillite が分布する。南アフリカの Karroo System について、記述している Du Toit (1938) は、その著書の比較的はじめ (p.231) に次のように書いている。

『Furthermore, the strata certainly extended far beyond the present confines of the land, evidence being available to show that South Africa was at that time joined to South America, Madagascar, India, Australia and Antarctica, and consequently formed only a part a huge continent, called by Suess "Gondwanaland".』

今や、定説になっている大陸移動説に固執した Du Toit と彼の説を支持した Holmes の研究史は、Wood (1985) によって分かりやすく解説されている。Holmes (1951) は、その初版から、この Dwyka Tillite (late Carboniferous) の露頭の写真を Plate 95 <95B; 著者はその説明において、Dywkka とミス・スペルをしているので注意> に掲載し、同じ写真を再度、Holmes (1965) の Fig.537 に Erratic block in Dwyka Tillite として掲載している。さらに、この新版では、Fig.199 に the Kimberley Diamond Pipe の地質断面図に Dwyka & Karroo System を示しており、加えて、Dwyka Tillite (upper Carboniferous) を Fig.535 に、また、この Dwyka Tillite の直下にある Ventersdorp basalt 上についているみごとな擦痕 striation の写真を Fig.536 に載せている。それらはすべて、地質学的事実であり、説得的な証拠であり、いずれも、読者の注意を惹きつけている。南アフリカ地方の地質をまとめた Reed (1949) は、この地域の層序学の詳細な解説の中で、Du Toit らがまとめた地質図 (Fig.9) を掲載している。

以上の資料から、われわれは 19 世紀からの地質学の歴史と Gondwanaland の意義をおおよそ知ることができる。これらは 20 世紀後半になって、プレート・テクトニクスとなって甦り、地球科学の革命的な成果として世界中に知られるようになっていく。

第2節 マラウイのカルー系

1977年、名古屋大学のアフリカ調査団は、マラウイの調査にでかけた。諏訪兼位を隊長として、坂幸恭（早稲田大学教授）ほかの隊員がマラウイの野外調査を行った。坂は、当時、学術振興会の駐在員としてナイロビに居た矢入憲二と共に、マラウイの Livingstonia のカルー系（Karoo System）を調査し、その結果は、Saka（1977）によってまとめられている。ここでは、その報告を中心として、現地で採取された試料を検討しながら、主として、シルト岩についての問題点を整理して、述べる。

アフリカ大地溝帯は、Lake Tanganyika からその南方延長、Lake Malawi へ一連の西部地溝系をつくる。両湖は、その幅が狭い割合に深く、地形的にも、そのままこれらの湖が地溝を形成している。Lake Malawi を横切って、いわゆる Karoo System が分布する。坂と矢入は、Chilumba 付近の Karoo System を調査し、北から南へ Nkana, Kasikisi, Mwesia, North Kukuru, Nthalire, Lion Point, Livingstonia, Heng Valley 付近一帯を調査し、その岩相と堆積構造から、古流系を復元した。Figure 6 ならびに Figure 7 に示した地域のうち、② Kasikisi と③ Mwesia 地域、および、⑥ Lion Point と⑦ Livingstonia 地域については、調査結果をまとめ、それぞれ満足な結果を得ている（Saka, 1977, Fig.3）。

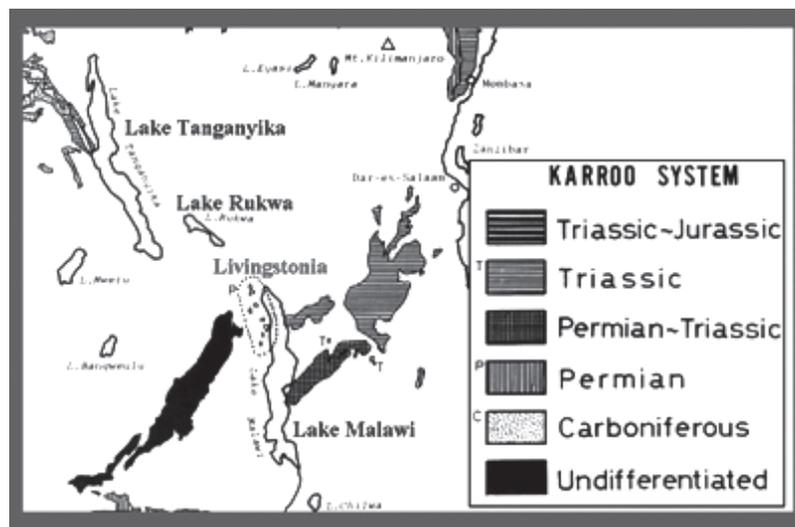
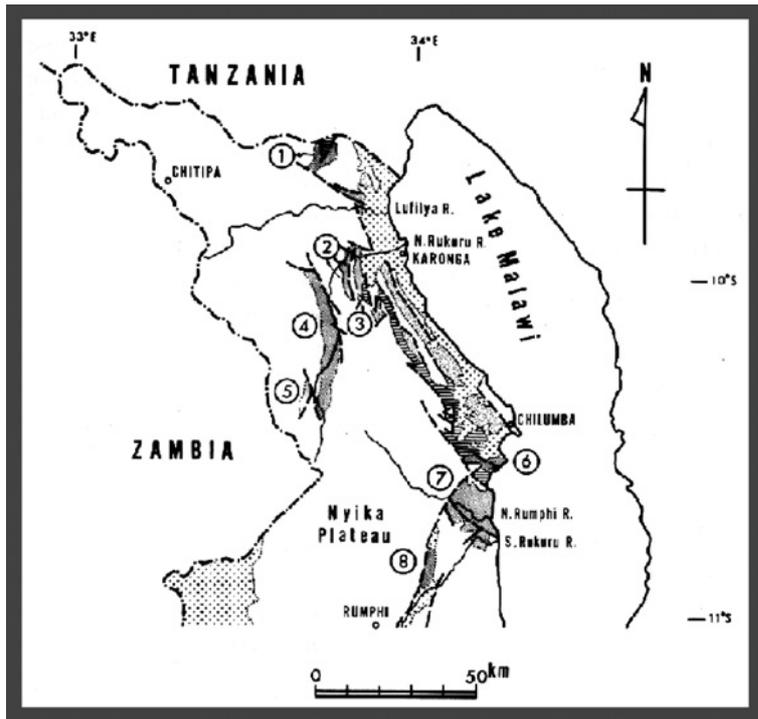


Figure 6 Lake Malawi 北部, Livingstonia と付近の Karoo System.

Karoo System の堆積環境を明らかにするために、彼らは、露頭で観察される層理面（stratification）、地層の底面と上面（bedding）、Lamina ならびに Lamination, Cross lamina, Micro cross lamina を観察し、それらの方位を測定し、統計的に処理してそれらの卓越方向を求めている。堆積構造としては、とくに、ripple mark, micro cross lamination, cross lamina, sole mark, そして、さらにそれらに加えて、deformational structure を記載し、古流系を復元している。Karoo System は、環境としては、glacio-lacustrine とされているが、その中には、興味あることにシルト岩が含まれている。一般に、碎屑岩類では、その分布を柱状図で示す場合には、「シルト岩」という表現を使うことはまれである。多くは砂岩、あるいは、泥岩という記載がなされていて、とくにシルト岩が優勢でない限り、“siltstone” を使うことは少ない。

坂と矢入の研究結果を読むと、堆積構造には、次のような興味ある事実が記されている。例えば、slump structure (=product of the gravity-generated movement of sediments), slump fold, contorted beds truncated by the overlying bed, convoluted laminae and load-flame structure, angular



Karoo Basin の名称

- ① Nkana
- ② Kasikisi
- ③ Mwesia
- ④ North Rukuru
- ⑤ Nthalire
- ⑥ Lion Point
- ⑦ Livingstonia
- ⑧ Henga Valley

原図 (Saka, 1977, Fig.3) 一部, 改変.

Figure 7 Lake Malawi 付近の Karroo System の分布とその地域の名称
これらの地域のうち、⑥と⑦付近の調査結果を次の Figure 8 に示す。

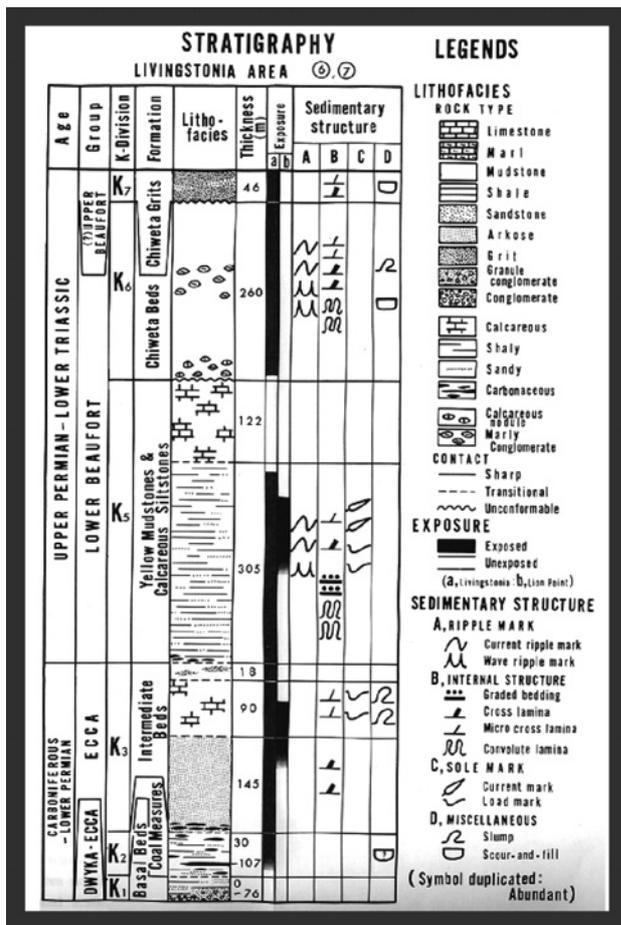


Figure 8 Lake Malawi 付近 (Figure 7 を参照) の ⑥ Lion Point, ならびに、⑦ Livingstonia 付近の調査結果：原図は Saka (1977) の Fig.3. 一部改変。

pebbles of siltstones derived from penecontemporaneous erosion, a flysch sequence intercalated in siltstones, flute marks of conical type and bulbous type, 等などであるが、それらは Dzulynski and Walton (1965) あるいは Potter and Pettijohn (1963) などに記載され、論じられている turbidity current に関連した堆積構造に類似している。しかし、注意すべきは、マラウイの Karroo System の一部は glacio-lacustrine の環境で形成されたとも考えられている点である。この種の環境で形成された堆積物については、Martini and Brookfield (1995) のカナダのオンタリオ州の Wisconsinan 期の堆積物の研究、あるいは、Phillips (2006) のスコットランドの水期堆積物の研究で詳しく論じられているように、岩相の特徴には、水期堆積物の特徴と湖水堆積物の特徴との両者を兼ね備えている。それらには、glacial assemblage ならびに lacustrine assemblage の両者が認められ、さらに、この二つの assemblages の中間的な堆積構造を示すことも少なくないという。

Phillips (2006) の研究は、問題の露頭をそのまま大型薄片にして、その上で、細微な構造に関して、識別を試みていて、流動体の中におけるせん断作用による変形構造も合わせ論じていて、議論は実に細かい。

第3節 マラウイの Karroo System 中のシルト岩

坂・矢入が現地調査の時に採取した岩石試料の代表的なものを選んで Figure 9~Figure 13 に示す。Figure 9 (T75090204) はおそらく層理面に平行に割れた試料で、ほかの岩石試料が塊状であるのに対して、例外的に平板状で、薄い。Figure 10 (YS75090207-2_A) には、斜めの層理面が見られるが、試料全体はほぼ水平の大きな層理面に支配されて、形が決まっている。Figure 11 (YS75091101_A) は全体が塊状で、層理面の発達は見られない。この種の塊状で均質な岩石は希である。Figure 12 (KY75092407_A) は、内部に乱れた堆積構造が見られる。おそらく、堆積当時に、かなり水分を含んでいたものと推測される。

Figure 13 (YS75092409-1_A) には、ほぼ平行な、しかも、水平な層理面がみられる。

Figure 14 (YS75092409-2_A) の内部には、乱れた構造が見られるが、おそらく、これも、堆積当時、かなりの水分が含まれていたことを暗示する。

これらの岩石試料の顕微鏡下の特徴を見てみよう。それぞれの岩石について、単ポーラーとクロ



Figure 9 (T75090204_A)



Figure 10 (YS75090207-2_A)



Figure 11 (YS75091101_A)



Figure 12 (KY75092407_A)



Figure 13 (YS75092409-1_A)



Figure 14 (YS75092409-2_A)

ス・ポーラーの写真を次に掲げる。

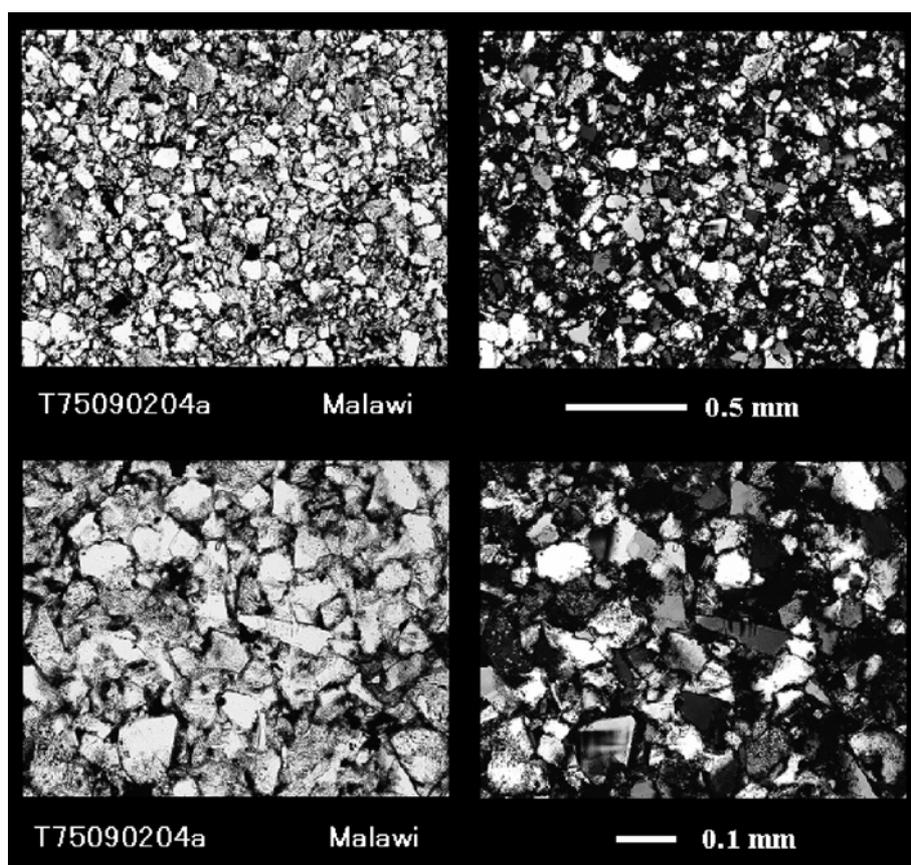


Figure 15 (T75090204a) 倍率を変えた撮影。
注目すべきは、粒子が小さいものでも、その円磨度が高いわけではない点である。

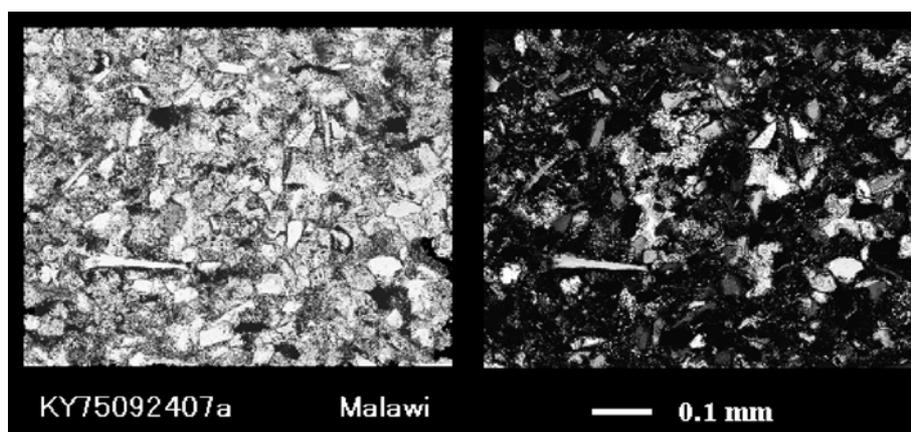


Figure 16 (KY75092407a) 前頁の鏡下写真。
前図と同様、碎屑粒子が小さくなっても、その円磨度が高くなっているわけではない。
Figure 12の岩石試料からも判るように、組織は不均質で、碎屑粒子の淘汰は悪い。

鏡下の観察から、これまで問題にしていた砂質粒子のサイズと形状の関係について、マラウイの試料（とくに、シルト岩）ではその特徴を確かめることができた。それらの特徴をさらに幾つかの例について、顕微鏡写真で示すことにしよう。

マラウイの試料とアフリカの他地域の試料（ともに、砂岩の類）を同じ倍率で撮影したものを比較

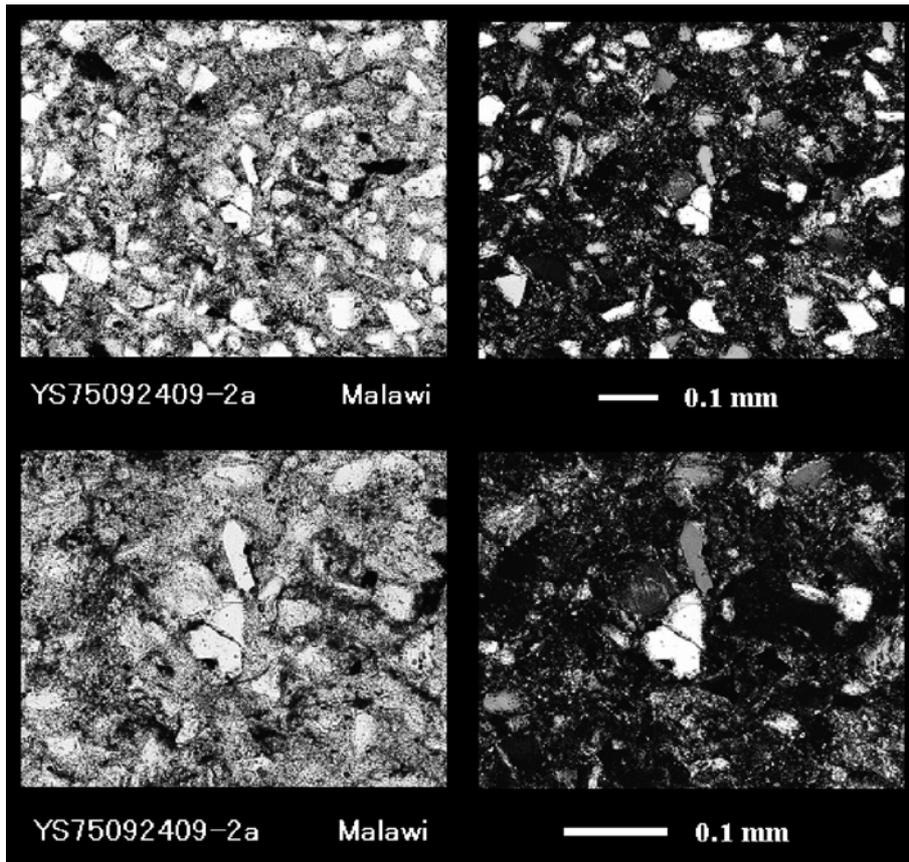


Figure 17 (YS75092409-2a) 上図, 2 対・4 枚の顕微鏡写真。
 この試料も前々ページの岩石試料の写真から分かるように, 組成も組織も不均質であり, 碎屑粒子の淘汰も悪い。しかし, すでに述べた例と同様に, 粒子が細粒になっても, その外形は角ばっていて, 円磨度は高くはない。

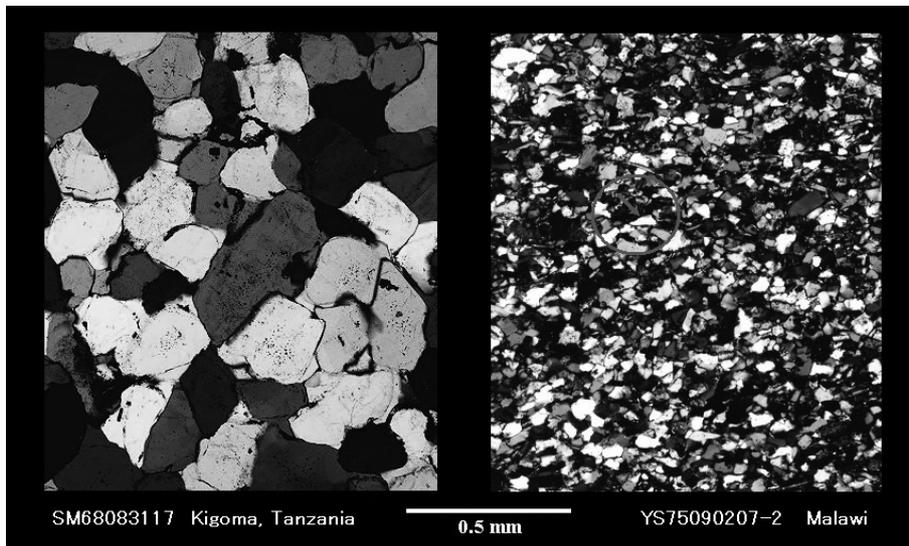


Figure 18 (左: SM680831-17, Kigoma, Tanzania, 右: YS75090207-2, Livingstonia, Malawi)

してみよう。上図 (Figure 18) の左は, タンザニアの西方, キゴマで採取された砂岩である。この砂岩は, 先カンブリア系の花崗岩質変成岩からなる基盤岩類を不整合に覆うやはり先カンブリア系の石英質砂岩である (Yairi and Mizutani, 1969)。この砂岩が堆積した環境については, 詳しいことは分かっていないが, 多分, 長い期間にわたって風化と運搬を繰り返した結果, 形成された石英を主成

分とする砂が固結したものであろう。よく見ると、この砂岩の主成分である碎屑性石英粒子には明らかに dust ring が認められ、また、その石英粒子と結晶方位的に連続していて、石英の二次的成長 (secondary overgrowth) が認められる。Dust ring から推定される石英粒子の外形は極めて円磨度が高く、おそらく堆積当時の環境は、砂漠であった可能性も高い。この顕微鏡写真から判るように、砂岩の構成粒子の淘汰は極めて良く、典型的な orthoquartzitic sandstone であると言える。

一方、同じ Figure 18 の右側の写真は、マラウイの Livingstonia のシルト岩である。同じ倍率で撮影した写真上で、その構成粒子のサイズと外形の関係が対照的であることが理解できよう。すなわち、シルト岩では、碎屑粒子のサイズは小さく、また、その外形は角張っている (例えば、図内の丸印)。この形は、左側の写真の砂岩とは全く異なっている。左側の砂岩に特徴的な粒子のサイズは大きく、丸く、円磨度が高い。

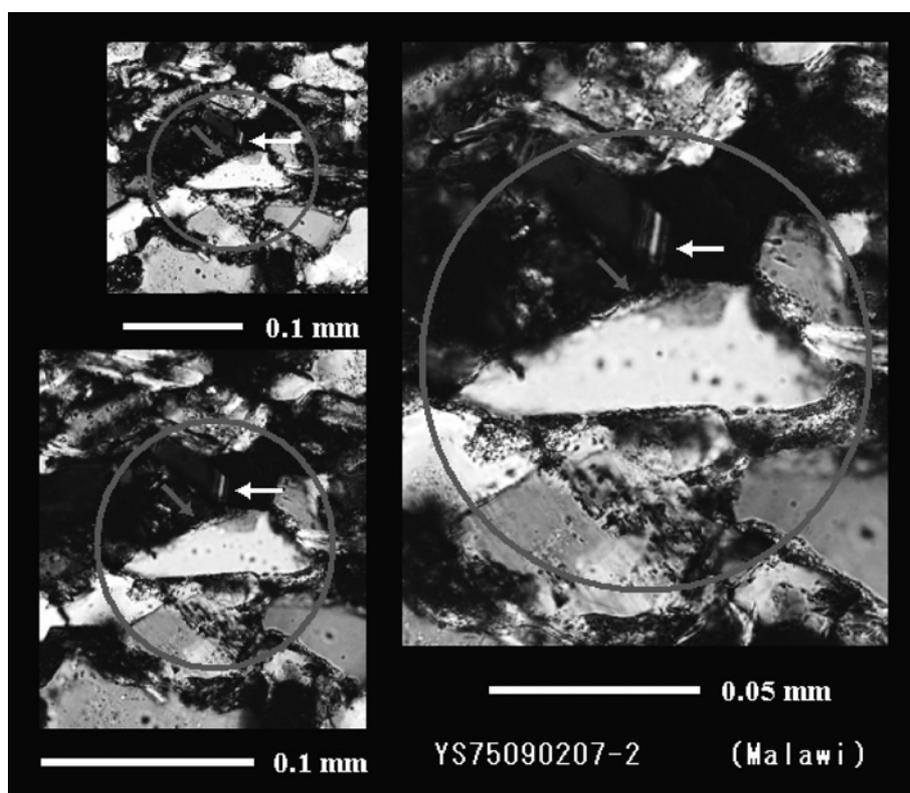


Figure 19 (YS75090207-2) マラウイのシルト岩

上図 (Figure 19) は、倍率を変えて撮影したマラウイの試料である。赤い丸印内に示した赤い矢印の碎屑粒子の外形は角張っている。赤い丸印内の白い矢印で示した粒子はさらに小さく細粒である。polysynthetic twinning をした斜長石粒子であろう。この粒子も小さいが、摩滅して丸くなったものではないように見える。

以上の図で示した関係、すなわち、サイズと外形の関係を、マラウイの別の例で示すことにしよう。

次頁の図 (Fig.21 ならびに Fig.19) は同一対象を示したものであるが、これらを比較すると、顕微鏡観察は、特定の対象を、倍率を変えて、何度も繰り返して行う必要があることがわかる。問題点は、ここでは、単にサイズと外形との関係であるが、Fig.20 の解説でも述べたように、対象によっては、粒子の内部構造にも留意しなければならない。このような高倍率下での観察には、薄片の良否が決定的な役割を果たす。薄片の厚さが厚いと細部の観察には適さない。

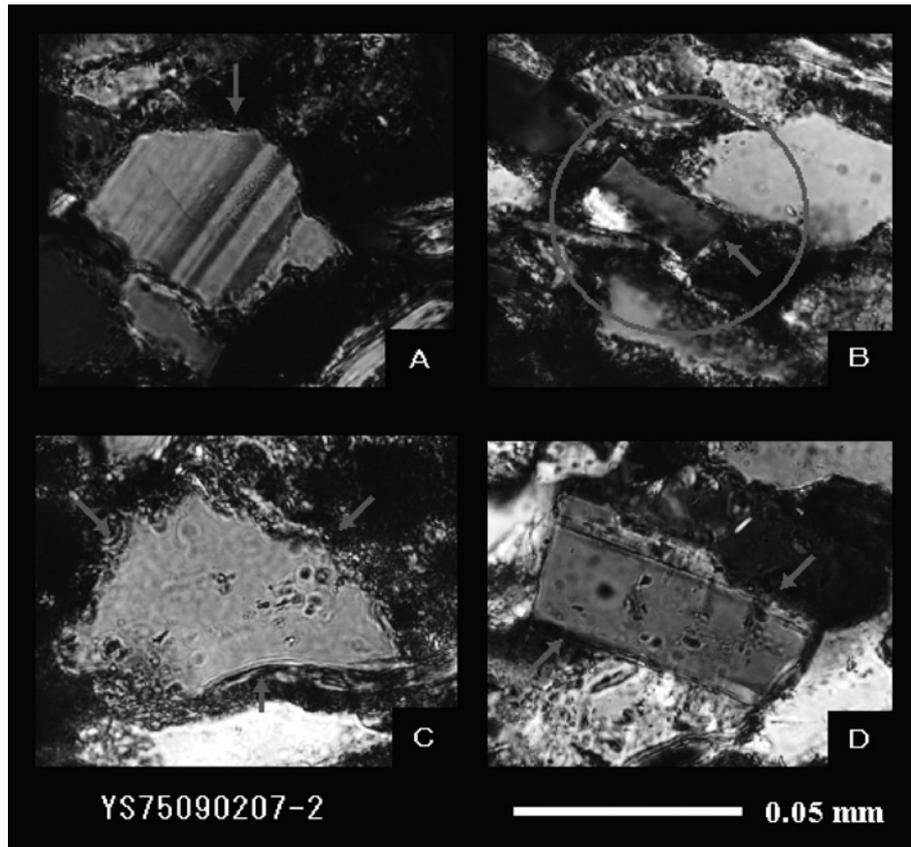


Figure 20 (YS75090207-2) A, B, C and D.

これは前の図 (Fig.19) の別の部分の写真である。A, B and Dは斜長石, Cは石英。
AとDの斜長石の外形は、結晶構造には無関係であるが、Bの赤矢印とDの左下から
右上への赤矢印は劈開面を利用した割れ目であろう。

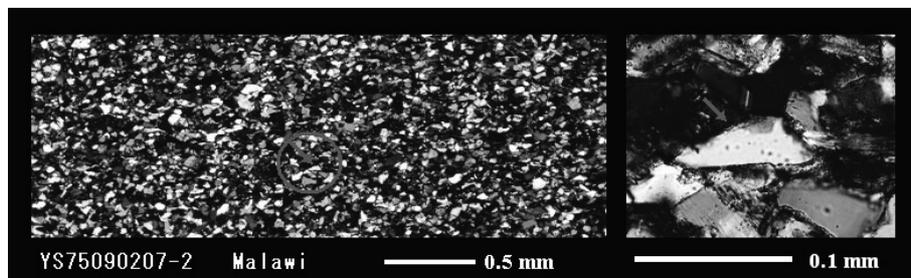


Figure 21 (YS75090207-2) 前の図 (Fig.19) と同じ試料で、同一部分。

顕微鏡観察は、高倍率にして注意深く行う必要があることが分かる。

第4節 碎屑粒子の形成環境：氷河との関係

Du Toit の研究を参考にしてまとめた Reed (1949) の教科書には、南アフリカ地域のみならず、アフリカ大陸中部の Karroo System の紹介とまとめが記載されている。そこには Malawi の代わりに Nyasaland の名でこの地方の地質の概略が述べられているが、glaciolacustrine という堆積環境を示す用語も使われている。最近の報告によると、Wopfiner (2002) は Lake Malawi の東方に分布する Ruhuhu Basin の Karroo System を詳しく検討し、基盤の Ubendian 変成岩類を不整合に覆う “glacigene” の堆積層について、そこには “dropstone” も観察されると述べ、明らかに tillite と考えられる礫岩も分布するという。Siltstone の記載も見られる。堆積構造には “dewatering” と考えられる形状を示すものもある。これらを考慮すると、坂と矢入によって 1975 年に調査された Lake Malawi 湖畔の Livingstonia 一帯の Karroo System は、この Lake Malawi 東方の Ruhuhu Basin の Karroo System と一連のものと考えられる。

堆積地質学、とくに碎屑性堆積物の研究史を通覧すると、その粒径やクラス分けと表現方法が論じられる過程で、粒度組成と堆積環境の関係が考察された。そして、当然、例外的に複雑で多様な組成をもつ氷河堆積物の粒度組成が関心の対象となった。この視点からみて、Krumbein (1933) の研究は注目すべき成果を残していると言えよう。問題はこの氷河堆積物にある不均質性と多様性であろう。全体と部分、この問題は対象をフィールドに求める研究者には常に付きまとう問題である。その解決のために、多様性とその原因についての基礎的な研究も多く行われている。例えば、氷河堆積物の粒度組成はそれがもたらされた母岩に大きく依存するという考え (Beaumont, 1971; Räsänen *et al.*, 2009)、堆積過程の条件で規定されるという考え (Boulton, 1978; Haldorsen, 1981)、その堆積環境を反映しているとする考え (Buller and McManus, 1973; Nahon and Trompette, 1982; Menzies *et al.*, 2006) などの研究例がある。

これらの研究のうち、氷河が流れ下った基盤岩類の性質がその上に堆積した till の性質に関係しているという報告 (Fig.22)、ならびに、氷河の削剥・摩滅・破碎作用が氷河堆積物の粒度に関係しているという Haldorsen (1981) の総括図 (Fig.23) を以下に紹介しておく。

なお、成因論的な考えの中で、砂質粒子自体のサイズと形態については、Curry and Griffiths (1955)、Swineford (1955) や Tanner (1956) などの研究、また、粒子の表面組織については、Bond (1954)、Kuenen and Perdock (1961, 1962)、Walker (1957) などの報告がある。砂漠や風成層形成などの環境については、直接、実験的研究を試みた例も少なくない。古典的な Bagnold (1954) の仕事をはじめ、Kuenen (1960)、Rogers *et al.* (1963) や Rogers and Schubert (1964) の主張もある。

一方、すでに述べたように、Blatt (1970) や Pettijohn *et al.* (1972) の議論のように、本来の砂質粒子の根源的な誕生を考察して、その生成条件からサイズまでを推測する考えもある。つまり、火成岩を構成する鉱物粒子のサイズにまでさかのぼることも必要とする考えである。この点については、残念ながら、具体的な考察はまだ行われていない。火成岩中の鉱物粒子のサイズは、結晶成長に関係しているが、結晶成長速度に関するわれわれの知識は、まだまだ、貧弱であって、この種の議論を進めるまでには到っていない。

研究対象を天然の産物に限ったとしても、サイズや形態の関係を具体的に数値的に示すことができないことにも、問題がある。サイズについても、円磨度についても、厳密な数値化がされていない。例えば、サイズをどう定義するかという問題だけに絞っても、すべてを“球”と仮定することが

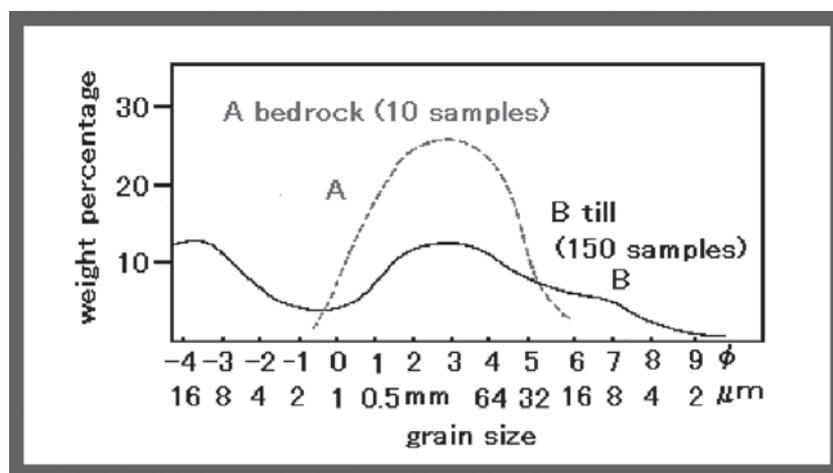


Figure 22 基盤岩類 bedrock (堆積岩類) の粒度組成とその上の氷河堆積物 till の粒度組成との関係。Haldorsen (1981) Fig.5 の一部を訂正。

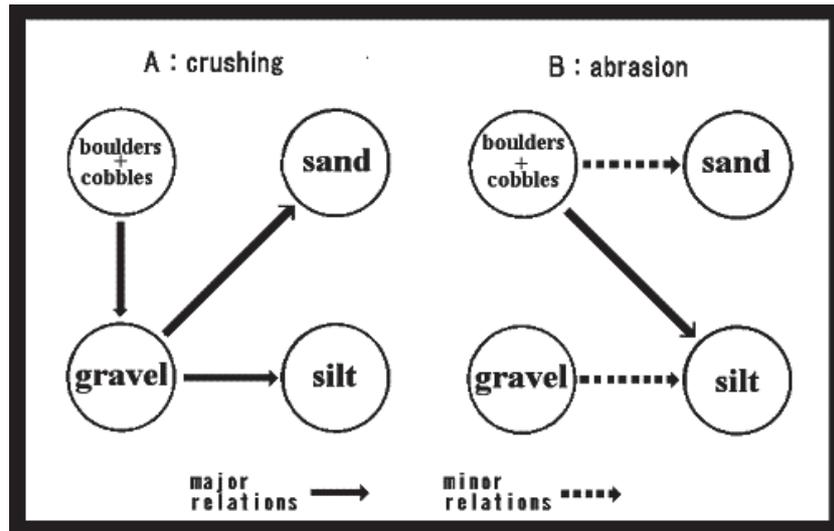


Figure 23 氷河堆積物を形成する際に働く破碎作用と摩滅作用。それによって形成される氷河堆積物との関係。Haldorsen (1981) Fig.6 による。

許されるわけではないから、簡単に扱うこともできない。筆者の一人（水谷）は、篩を使用する粒度分析、いわゆる“Ro-tap” sieving について、理論的な考察を行ったが、その結果を考えると、粒度分析の評価も、厳密には一義的に、決定的に、決めるわけにはいかない（Mizutani, 1963）。ここでは、円磨度の数値表現については、便宜的な visual comparison method によったが、どうしても円磨度よりも球形度を好む研究者もいる（Curry and Griffiths, 1955）。以上の諸研究を通覧して、現在のところ、われわれのまとめとして、砂質粒子のサイズと形状については、より粗い粒子群（円磨度は高く、丸くなっている）、および、より細かな粒子群（円磨度は低く、角張っている）に分けられる、という点を強調しておく。

第5節 ゴンドワナ大陸の周辺

プレート・テクトニクスの考えが提案され、定着する以前から、ゴンドワナ大陸の存在とその意義については、大陸移動説を支持する多くの研究者から、かなり説得的な証拠を提示しながら、主張されてきた。その中でも、Holmes (1951; 1965) の考えは説得的である。

これらの図とすでに述べたマラウイの Karroo System は、ともにゴンドワナ大陸にその頃存在していた氷河に深い関係があると Saka (1977) は述べている。

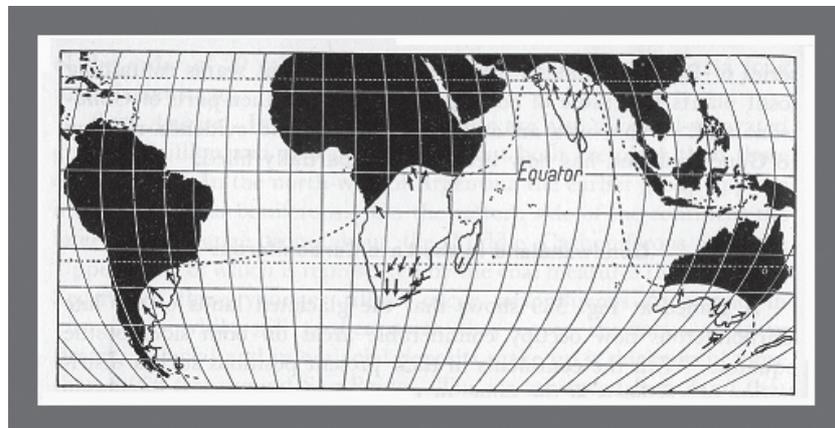


Figure 24 ゴンドワナ大陸の石炭紀後期の氷河の分布。矢印は、氷河の動きの方向を示す (Holmes, 1951 : p.501, fig.259)。

第4章 全体のまとめ、および、幾つかの残された問題

(1) シルト・サイズと碎屑性粒子の形成

この報文では、実際の砂漠の砂、シルト・サイズの碎屑性堆積物が固結したシルト岩、さまざまな氷河堆積物の報告、物理学的考察などの側面から、シルトおよびシルト岩について考察した。すでに、別の視点から砂質粒子のサイズと円磨度については、指摘されている事実も少なくない。これらを総合してまとめてみると、シルト・サイズの粒子のほとんどは、氷河に関係して形成されると考えられる。アフリカ大陸に関してはこのような環境は、Gondwanaland に深く関係していると推測される。

以上のような結論につづいて、さらに、シルトならびにシルト岩については、次のような推論もまた可能であろう。

地球の表面で風の作用で移動し、運搬される物質として碎屑性粒子や塵埃を考えてみよう。われわれが日常体験する例としては、いわゆる黄砂（甲斐，2007）がある。これはアジア大陸のうち、一部に発達する黄土層が西からの風で運ばれてくるものである。この種の細粒物質は普通の堆積物に混入することも期待される。よく知られているように、堆積岩の放射性元素に基づく年代決定法の一つに Rb-Sr アイソクロン法という方法がある。実例として、Shibata and Mizutani (1982) と Mizutani and Shibata (1983) の 2 編、取り扱った試料として 3 件の研究結果がある。これらについて、Mizutani and Shibata (1983) や Mizutani (1983) は、同位体年代と続成作用について、論じた。興味深いことに、この三つの実例において、Rb-Sr isochron age の Sr 同位体初期値 $R_0 = [^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}]_0$ (initial ratio) がわずかに異なっている。

例えば、 $R_0 = 0.7155$ (for upper Jurassic siliceous shale), $R_0 = 0.7011$ (for Middle Jurassic siliceous shale), そして、 $R_0 = 0.71325$ for middle Triassic bedded chert) が得られている。筆者（水谷）は、このわずかな違いは、これらの岩石（三畳紀のチャート、ジュラ紀の珪質頁岩）の中にごく微量含まれている古期岩石類（おそらく、大陸基盤岩類）物質の混入によるものと考えている。そして、その形成環境を考えると、それは風による混入ではないかと想像される。それは別に Gondwana 大陸に限らないが、とにかく、近くに古い大陸があり、それを覆って、eolian dust の根源になる氷河堆積物などがあれば条件は整っていることになる。

(2) Tectonostratigraphic terranes の識別

筆者の一人（水谷）は、かつて次のような事実——“石灰岩の中に、ごくわずかであるが、シルト・サイズの石英が含まれている事実”——を、偏光顕微鏡観察の折に、見出した経験がある。時は、1976 年 4 月 7 日、カナダの UBC = Univ. British Columbia, Prof. Danner の研究室でのことであつた。Vancouver に着いたばかりで、とくに予定していた旅行などがなかったため、私は、Prof. Danner をお願いして彼の所有している薄片を見せてもらっていた。彼は古生代の紡錘虫の研究では、名の知っている研究者であつたから、石灰岩の薄片は沢山、持っていた。それを私は岩石学的に、偏光顕微鏡下で、丹念に観察し、メモをとっていた。そして、彼の石灰岩の中に、明らかにシルト・サイズの石英粒子が含まれている岩石をみつけた。私は、その石灰岩の堆積した地域のそばには砂漠があつて、そこから風成砂として運搬されてきたものがその石灰岩（Tamihiy Creek 産）中に含まれていると考えた。そして、そのことを Prof. Danner に語ったが、彼から明瞭な回答は得られなかった。まだ、Coney *et al.* (1980) の Tectonostratigraphic terrane の論文は出ていなかったが、その考えを支持している一連の考えは Canadian Cordillera について、Monger and Ross (1971), Monger *et al.* (1972), あるいは、Jones *et al.* (1972) などによって、語りはじめられていた。UBC における

私のその時の推論は、石灰岩相にはこの eolian dust を含む一群と、含まない別の一群があるのではないかと、いうことであった。この地域の新しい総括的な地図 (Tipper, Woodsworth and Gabrielse, 1981) は多くの示唆的な事実をまとめていて、参考になるが、それを眺めながら、私はこの時の石灰岩の薄片を思い出している。アフリカ大陸と日本列島とは、少なくとも現在は地理的に大きく離れている。しかし、ゴンドワナ大陸に関する議論になると日本列島も無関係ではない。事実、IGCP (国際地質対比計画) NO.411 では、Geodynamics and Tectonic Process associated with Assembly and Final Emplacement of Gondwanaland-derived Terranes in East & South Asia. (Project Leader, Prof. S. Hada) と題する研究が進められてきている。その中で詳しく議論されているが、日本列島の外帯、黒瀬川帯の地史は、Cawood *et al.* (2002), Hada and Landis (1995), Hada *et al.* (1999), Hada, Yoshikura and Gabites (2000), Hada *et al.* (2001) など丹念に研究されてきた結果、黒瀬川帯は、ゴンドワナ大陸の分裂と散逸の過程に深く関わっていると考えられている。その意味で、筆者(水谷)は、以前から彼らの一連の研究に深い関心を抱いていた。もし、ゴンドワナ大陸と氷河堆積物などに関係した事実があるとすれば、それは黒瀬川帯(あるいはそれに匹敵する地質体)の中に、顕微鏡下で eolian dust の証拠を見出すことが出来るかもしれない。Mizutani (1985) の考えを参考にした、波田 (2000) の解説を読むと、その可能性のあることを強く感ずる。ただ、eolian effect の証拠は彼らの議論に決定的な手がかりを与えるわけではない。傍証にすぎないが、しかし、古地理や古環境についての別の見方ができるという意味では、興味があろう。

(3) meteoritic silica glass

筆者(水谷)は、かつてシリカ鉱物を徹底的に調べたことがある。Lechatelierite の名を知ったのもそのときであった。Frondel (1962) は、meteoritic silica glass なる節において、fulgurite や lechatelierite を解説している。砂漠の中でしばしば発見される fulgurite については、Shrock (1948) に記載されていて、その産出状態も文字の上だけでは知っていた。

このような珍しい天然産の鉱物や固体物質については、自然に、多くの関心が集まる。一方、“リビア砂漠”と呼ばれている砂漠は、実は、世界最大の砂漠、サハラ砂漠のごく一部である。それはサハラ砂漠の東方のごく一部を占めているに過ぎない。ただ、エジプトやカイロなど旅行に便利な都会が近くにあるために、調査に便利であったためであろうが、19世紀には、ドイツから、リビア砂漠の調査団が送られている。著名な古生物学者、Karl A. Zittel がその調査団に参加していて、膨大な報告書をまとめている。それは、Beiträge zur Geologie und Paläontologie der Libyschen Wüste und der angrenzenden Gebiete von Aegypten, unter Mitwirkung mehrerer Fachgenossen, herausgegeben von Karl A. Zittel, として発行され、すぐ、Nature 誌上に、W.T.B. (1883) によって紹介されている。注目すべきは、この Acronym 氏が Nature 誌に「the abundance of fulgurites」と記していることである。何しろ、リビア砂漠といっても、実はサハラ砂漠の一部であって、ドイツ隊がどの範囲まで調査にあたったかは、原書を見ていないので、分からないが、地質学者が歩き回る範囲内にもこの落雷の証拠である fulgurite がかなりの数あったと推察される。fulgurite については、古くから実験的研究によって、その形成過程が実証 (Wood, 1910) されているので、成因については疑念はない。Rogers (1946) は、California の Riverside County でみつけた fulgurite について、詳しく述べているが、その中で lechatelierite (屈折率=1.457±0.003) を記載している。彼の報告には、同時に、cristobalite も記載されていて、興味深い。

珍奇なものとしては、Scotland のペルム紀砂岩の露頭に落雷した証拠を調べた Harland and Hacker (1966) の報告がある。砂漠のような環境では、肉眼で直接観察される物体はよく話題になる

であろう。かつて、Darwin glass とよばれていたものなど (Taylor and Solomon, 1962) はその好例である。一括して, tektite と呼ばれているものも, Frondel (1962) に記されているように, fulgrite にもなって, 算出する可能性は高い。最近, ニュージーランドの Abrahamson and Dinniss (2000) によって, 興味深い実験結果が報告されている。それは Ball Lightning に伴って, nanoparticle が形成されるという報告である。彼らもまた, fulgurite について, 触れているので, 直接の成因は, 自然現象としての落雷に関係していると考えている。その形やサイズを検討してみると, ここまで述べてきた砂漠の砂粒子のサイズと形状とはまったく異なったものである。つまり, 極めて細粒で, かつ極めて丸い粒子 (nanoparticle) が形成されるというのである。これで思い出すのは砂漠の砂から例外的な円磨度の高い, しかし, 細粒の砂を報告している諏訪 (1997, p.210-211), および, 諏訪 (2007, p.82) の記載である。これがいかなる成因の産物であるかは, さらに詳しい検討が必要であろうが, 砂漠 > fulgurite > ball lightning > nanoparticle という知見から推察すると, 諏訪の記載は雷の作業である可能性が高いと考えられる。

球電, ball lightning という現象は, 珍しい現象ではあるが, 実際に観察された例もあってまんざら作り話ではなさそうと想像される。しかも, 広い砂漠の中で起こっている雷現象であって, fulgurite の産出がごく普通のこととされている事実から推察すると, 諏訪の記載した丸い砂粒子も, この nanoparticle 源であるかもしれない。ただし, これには, 研究の過程で SEM の助けを必要とするので, “Darwin Glass” とか Queenstownite という名を与えていた F.E. Suess の時代とはまったく別の視点からの観察や考察が必要であろう。

このような物質について, それが extra-terrestrial origin であるか否かの議論において, とくに最近, 注意を要することがある。それは, 近代, とくに 20 世紀以降, 工業用としての glass beads が多産され, 日常生活に使用されていることである。卑近な例としては, 自動車道路用の交通上の注意が書き記されるペイントにこの glass beads が使われているという。そのサイズは, 目的によって, さまざまであるので, さらに検討は必要であろうが, 製品としての glass beads は, 数ミクロンから数十ミクロン, さらに数 mm まで, かなりのサイズ幅に及んでいる。これが一見, いわゆる cosmic dust と見誤まって議論されることがあるので, 心して注意しなければならない。

補 章 IDARC (Image Database of African Rock Collection) の解説

名古屋大学博物館では, アフリカ大陸の調査研究によって集められた岩石試料について, その一部を薄片にし, それらの偏光顕微鏡下の特徴を画像データとして, それらをまとめてデータベース化する作業を始めている。それらは, IDARC と名づけられ, 一部公開されているが, そのデータベースの内容と使用方法について, 簡単にここで解説することにする。

以下, IDARC と略記するが, それはこのデータベースの略称である。IDARC は, 同時にそのデータベースが含まれるプログラム全体 (または, それを記録した CD) を指すこともある。

(1) IDARC の構成

このデータベースの中は, 主として, 偏光顕微鏡写真が中心になっているが, 具体的には, その産地, 試料採集者名, 試料名, 顕微鏡写真の倍率などが記されている。アフリカと一語で言っても, 実際にはその面積はきわめて大きく, その中にある独立国も数多い。そのため, このデータベースの中では, アフリカ大陸のうち, 我々が実際に試料を集め, その試料について検討したデータをまず整理した。それらは, 国別に記すと, Egypt, Kenya, Tanzania, Malawi, Seychelle, Swaziland < 国

別試料編>である。これらの国のデータのち、ごく一部を選んで、とくに興味ある問題を解説した<解説編>。以上のほかにも、独立国は多くある。それらについては、とくに国別に、主な公用言語、人口、主な地下資源、等を New York Times ALMANAC (Wright, ed., 2008) から引用して、記した。そのほか、その地理的位置を Times Atlas から引用して記した。また、UNESCO が総括した地質図から、その国の部分を引用して示した<国別データ編>。

IDARC の中では、これらの区別を付けて説明してある部分もあり、また、区別をつけないで示した部分もある。実際に、データベースとして役立てようとする場合には、目的によって、検索方法が異なる。ここでは、検索方法を、<解説編>、<国別試料編>、および、<国別データ編>の順に、詳しく説明することにする。

<解説編>は、データベースの中で、特別に話題として、あるいは、興味深い課題、などについて、ただ、試料を提示するだけでなく、その試料の周辺や関連する問題をあわせて、解説した部分である。中には、アフリカ大陸以外の地域からの試料などと比較検討した例もある。

<国別試料編>は、IDARC のうち、とくに、Egypt, Kenya, Tanzania, Malawi, Seychelles, Swaziland の国々については、その国で採取された試料の薄片が作られた。その偏光顕微鏡写真が提示されている。そして、その一部には、簡単な解説もされている。<国別データ編>は、実際に、岩石試料が採取されていないか、もしくは、その薄片が手元にない場合、その国の地下資源などについてのデータを New York Times ALMANAC (Wright, ed., 2008) から引用して、記した。同時に、その国の地質図も示した。

(2) 検索の実例

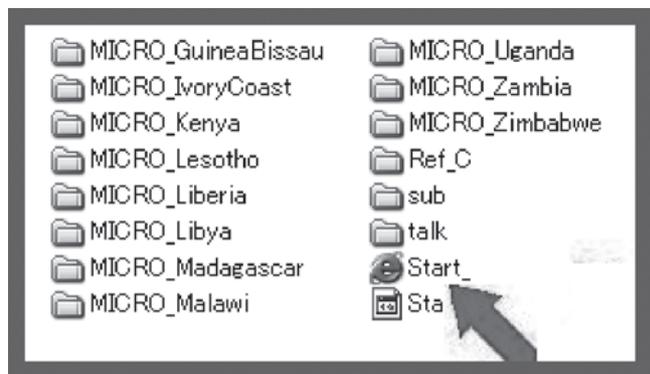


Figure 27 IDARC を開いて start を選ぶ。

DARC の最初には、Start という名の付いたファイルがある。これが IDARC を開く最初の鍵である。ここをクリックすると Fig.28, すなわち、最初のページが表示される。

そのページが現れたら、その画面のどの部分でもかまわないから、クリックする。

しばらくすると、画面が変わる。その画面の上で、まず最初の検索肢である<解説編>を選ぶことにしよう。

次の図は、IDARC の表紙の一部である。ただし、ここでは、そのサイズがやや縮小して示してある。この表紙の任意の場所をクリックする。そうすると、下図 (Fig.29) に変わる。

そこで、これから行う検索肢を選ぶことになる。実際には<解説編>か、または、<試料編>のどれを選ぶかを考える。



Figure 28 IDARC の表紙

ここでは、まず、＜解説編＞を選ぶことにする。

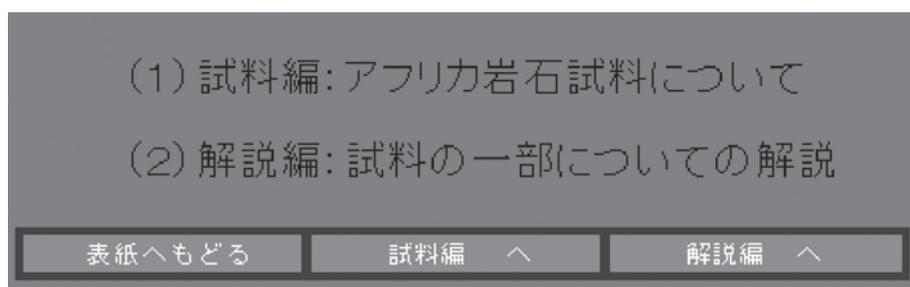


Figure 29 <解説編へ>を選ぶ

上図において、その下欄の右端、すなわち『解説編』を選んで、クリックする。画面はその次に変化するが、指定されているように、『次へ』をクリックする。

画面は自動的に変化して、解説されている課題が示される。

現在、考えられている課題としては、次のような話題が準備されている。

すなわち、

- (1) キンバライト (Tanzania),
- (2) 魚卵状石灰岩 (Tanzania),
- (3) シルト岩 (Malawi),
- (4) 砂岩 (Tanzania),
- (5) 砂漠の砂 (Egypt) である。



Figure 30 <次頁へ>を選ぶ

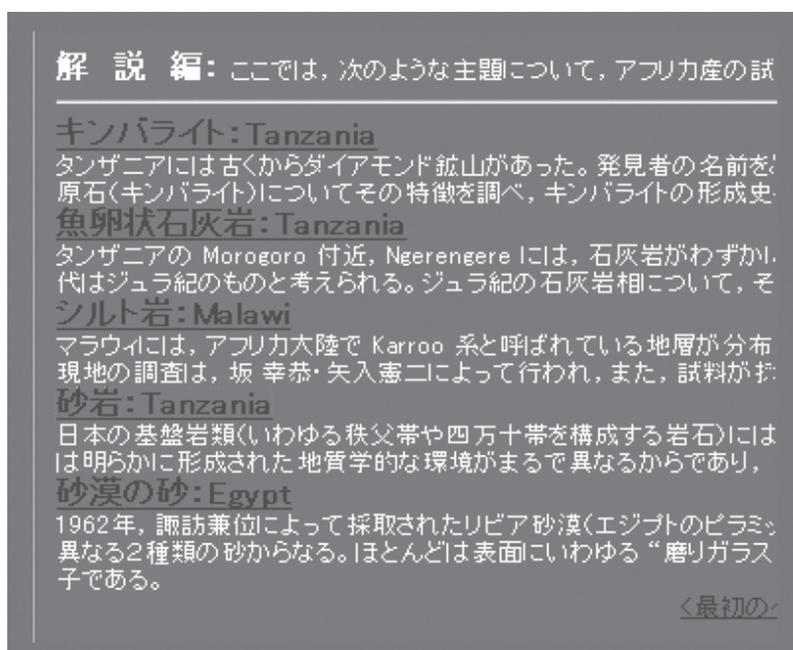


Figure 31 幾つかの話題が提示されている

これらのうち、希望するものを選んで、クリックすると、その課題や話題が画面上に現れる。以下、それぞれの課題について、詳細な解説が示される。以上が、＜解説編＞の検索法である。

次に＜国別試料編＞に移ることにする。＜解説編＞を選んだ画 (Figure 29, 32) を使って、次に、



Figure 32 解説編と試料編との選択肢

<試料編> をクリックする。

画面は次のよう変わる (Figure 33)。すでに述べたように、この <試料編> では、次の各国の試料が整理されている。

すなわち、Egypt, Kenya, Tanzania, Malawi, Seychelles, Swaziland の試料である。これらの国については、次の図の上端の覧にその国名が記してあるので、そこをクリックすると地理的位置が地図の上にあらためて示される。

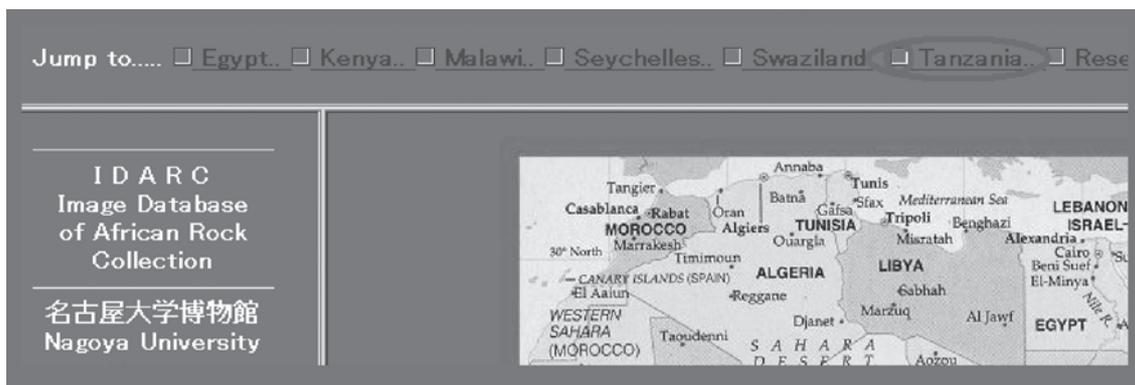


Figure 33 各国の試料編を選ぶ選択肢 (上端の国名を選ぶ)

上図 (Fig.33) の上端にある各国のうちの一つを選び、その前にある□をクリックする。すると、画面は変わり、地図が示される。そこには、下図の例で Egypt, Kenya, Tanzania, Malawi, および, Seychelles の国名が白枠内に赤文字で表現されている。このうち、Egypt, Kenya, Tanzania, Malawi の国々は、地図の上にその位置が示されているが、しかし、この地図から離れたところに位置している Seychelles 諸島については、地図の外になるため、その地理的位置をこのアフリカ大陸の地図の上には示すことができない。いずれにしても、これらの国々のさらに正確な地図は、この白枠に赤字で記した国名をクリックすることによって、示される。



Figure 34 選択された国名

ここでは、Tanzania の例を示すことにする。

Figure 35 に示した例がその結果である。いずれの国についても、同様に、その国の地図上での位置が示される。そして、その地図の右側に、「国名：TANZANIA」と「呼び名：United Republic of Tanzania」が記され、つづいて、「人口：40,213,162」

Figure 35 に示した例がその結果である。いずれの国についても、同様に、その国の地図上での位置が示される。そして、その地図の右側に、「国名：TANZANIA」と「呼び名：United Republic of Tanzania」が記され、つづいて、「人口：40,213,162」

(2008年7月現在の推定値), さらに, その国で用いられている「言語: スワヒリ語と英語など」, そして, 「主たる地下資源」が記載されている. これらの基礎データの出展は, The New York Times 2009 ALMANAC (Wright, ed., 2008) である.

この例, つまり TANZANIA の例では, その地図の下に『地形図』, 『地質図』さらに, 『地域別細分』と記されているが, それをクリックすると, それぞれ, さらに詳しい地形図, 地質図, ならびに, 地域別細分地図が現れる. TANZANIA の場合だけは, 扱った試料の数が多いため, とくに地域を細かく分けて, その地域ごとに, 特色ある試料を整理して示した. また, 一部には, それらの試料についての簡単な解説も記述されている.

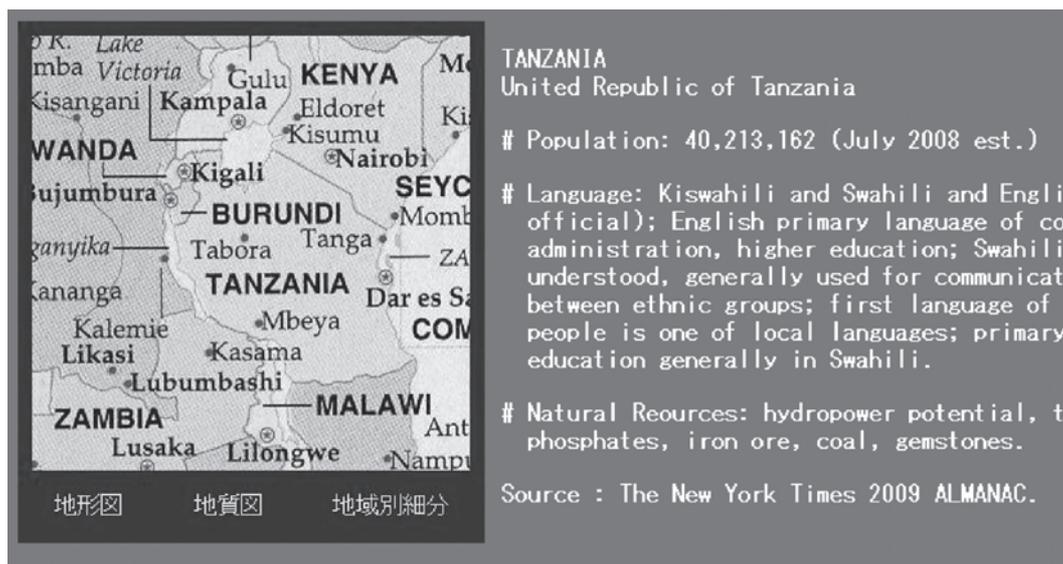


Figure 35 選択肢で TANZANIA を選んだ場合に提示される画面

上図に示した様式に従って, それぞれの国について, 試料が提示される. TANZANIA の例では, 『地域別細分』をクリックすると『タンザニア国内の各地域図』が示され, その中の例えば『Kigoma』という地域名を選ぶと, その地域付近で集められた試料の偏光顕微鏡写真が示されることになっている.

以上が<試料編>とまとめて説明した検索法とその結果である. それらは, 重ねて記すが, 先に記した Egypt から Seychelles についての国だけについての記載である.

しかし, アフリカには他に数多くの国がある. それらについては<国別データ>編として, まったく別の扱い方がしてある. それらについて, 概略を以下に記すことにする. Figure 29 あるいは Figure 32 で, <試料編>を選んだように, そこをクリックするとアフリカ大陸の地図が現れる. その地図 (Fig.36) の上で, 丹念に自分の関心のある国名を探す. 例えば, カメルーンについて知りたいと思った場合は, 『CAMEROON』を探して, その国名を選んでクリックするとその国についてのデータ, つまり, カメルーンの国のデータが現れる.

ここでは, タンザニアについて説明した場合と同様, 「国名」, 「その呼び名」, つづいて, 「人口」そして, 「言語」, 「地下資源」と続く. そして, カメルーンの地図の下には, 『地形図』, 『地質図』, 『顕微鏡写真』と選択肢が示されている. このうち, 最初の地形図については, これまで同様にそれぞれの国の地形図が示される. しかし, 後二者については, 右欄に言い訳が記されているように, カメルーンについての, 地質図と顕微鏡写真はデータが無い. つまり, 示すことが出来ない. このような場合には, データが無いということを明確に示しておくという意味で, データの無い記号 (no data) が提示される.



Figure 36 アフリカ大陸の他の国, 例えば, Cameroon を選ぶ

CAMEROON
Republic of Cameroon

Population: 18,467,692 (July 2008 est.)

Language: English and French (both official), 24 major African language groups.

Natural Resources: crude oil, bauxite, iron ore, timber, hydropower potential.

Source : The New York Times 2009 ALMANAC.

地形図
地質図
顕微鏡写真

地質図と顕微鏡写真は、ここでは、示されていない。

Figure 37 Cameroon 国のデータ

すべての国について、常に、興味ある試料が得られているわけではなく、残念ながらまだ研究が進んでいないという例もある。そのような場合、

例えば、『顕微鏡写真』を選んだ際には、Figure 38のような画像が現れる。ここで示すような整理されたデータが、まだ、無いということを示すためである。

この図の右下に <start> とあるのは、その部分をクリックするとすべての選択肢の中から、“振り出しに戻る”を選んだことになることを意味する。

また、例えば、『顕微鏡写真』を選んだ際にも、上のような画像が現れる。つまり、ここで示すよ

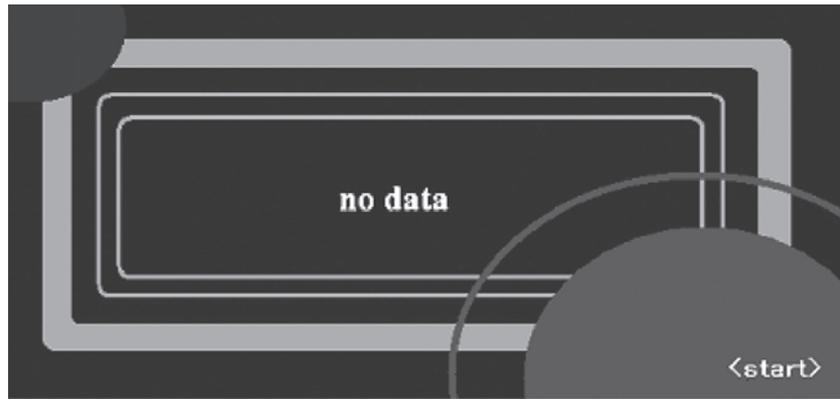


Figure 38 適切なデータがまだ無い場合

うな整理されたデータが、まだ、無いということを示す。この図の右下に<start>とあるのは、その部分をクリックするとすべての選択肢の中から、“振り出しに戻る”ことを選んだことになり、結果として、それを意味するアフリカ大陸の各国の画像が現れる。

(3) その他



Figure 39 このIDARCの選択肢のうち、Figure 29の<試料編へ>を選ぶと、画像の左端にこの図のような画面が見られる。その中で、上にある<References>を選択してクリックすると、次の参考文献リスト (Figure 40) が示される。

書籍には表紙があり、帯紙が付いていたり、奥付があるように、このIDARCにも、幾つかの参考資料が付されている。その中で、もっとも重要なものは、試料の解説の際に参考にした文献である。これはアフリカ大陸の地図の枠 (frame) に、<引用文献 (References)>として、次のような形式で示し、関心がある方々の参考に供している。一般的なデータベースについては、文献に限らず、関係のある手がかりや情報を第三者に提示してあると便利であろう。

左図のこの部分には、白文字でIDARCに関係した研究者名とこのデータベースの発行責任組織である名古屋大学博物館の名が記されている。その下に青文字で、『References』 (Fig.39) とあるが、ここをクリックすると引用文献のリストが一覧表になって現れる。左図 (Fig.40) にその一部を示す。

そのFigure 40において、その下に、最初のページに戻る指示『back to start page』がある。これは「振り出しに戻る」と同じ意味の指示である。

その下に『Note on UMLAUT』と青文字で示してあるが、これはドイツ語などで、文献の著者名や用語にUMLAUTがある場合に、誤解のないように、その実例を示した注意書きである。

References

(A)

(B)

* Blatt,H. (1967) Original characteristic
Petrol., 37, 401-424.

* Blatt,H. (1970) Determination of mean s
method. Bull. Geol. Soc. Am., 81, 255

* Brinkmann,R. and Kroemmelbein,K. (1991)
Historische Geologie. Erd- und Lebensge

(C)

(D)

* Downie,C., Humphries,D.W, Wilcockson,W.
of Kilimanjaro. Nature, Vol.178, No.453

(E)

(F)

(G)

* Geological Survey of Tanganyika (1965)
Map of Kilimanjaro (1:125,000; covering
The United Republic of Tanzania, Minist
Power. 9pp., Printed by the Government

(H)

* Haldorsen,S. (1981)
Grain-size distribution of subglacial t

Figure 40 この IDARC の解説で引用され、あるいは、参考に
供した文献資料の一覧表

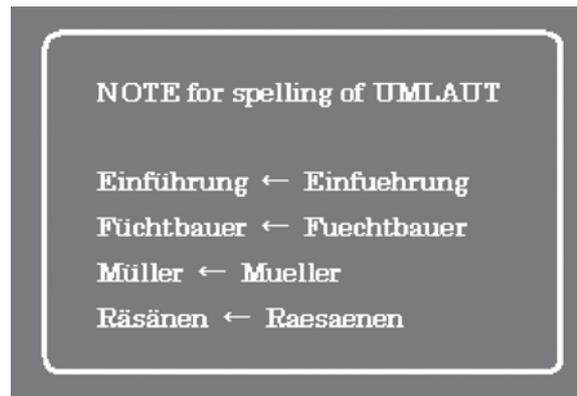


Figure 41 References 参考文献の中で、用いられているド
イツ語表記などのうち、UMLAUT が使われて
いる場合の注意書きの例

この部分をクリックすると、Figure 41 のよ
うな説明が示される。この文献リストの一覧表
作成の際に、適当なフォントが無かったので、
その言い訳である。誤解を招くといけないの
で、UMLAUT を付けたものと、そうでないも
のとの区別を付けるために、記した注意書きで
ある。

この [UMLAUT] の部分をクリックすると
Figure 41 に示したような注意書きが現れる。
本文の中では、文字のフォントが無いために、
この UMLAUT をつけた正式の綴りを示すこと
が出来なかった言い訳である。

左図において、引用した文献は、Author(s),
year, title, JOURNAL, vol, page, の順に、
そして、文献の著者の ABC 順に並べて示した。

さらに、Figure 39 の中には『Acknowledgements』すなわち、謝辞の項目がある。この部分をク
リックすると、この仕事について、お世話になった方々に、簡単に感謝が記してある。これらは、こ
の IDARC 本体とは、直接関係がないので、検索作業の場合には、煩雑になることを避けるために、
表には出ないようにした。

さらに、前に <国別試料編> のところで、説明したが、このとき各国を選ぶ場合に用いた画面に
は、上端の右端に『Research Group』という項目があった。

この部分を選択すると、このデータベース構築に関係した研究者の名前とその連絡先が現れる。も
し、このデータベースをご覧になって、何かお気づきの点があったら、それをこの連絡先（実際
には、電子メールのアドレスの形で、それが示してある）に送って欲しい。

以上で、概略ではあるが、おおよその IDARC の検索法について、述べた。

実際には、このほかに、偏光顕微鏡特有の“偏光板”の使い方の知識がないと理解できないような
画像もなかにはある。しかし、そのような「偏光板を挿入して、偏光を十字にした場合」、それに対
して、「下方だけの偏光板にした場合」の二つの画像の区別、などの説明は省いてある。偏光顕微鏡



Figure 42 IDARC 作成に当たった研究グループの氏名と連絡先

の使用法に慣れたかたには、とくにそれを説明する必要がないと考えたからである。

以上で、この補章（IDARC の使用法）を終る。

この種の画像類は、直接、原図に触れない限りは、壊れるものではない。あちこちに選択肢が網目のようになっていて、途中でわからなくなる場合には、すぐに“振り出しに戻る”ことで、検索作業の最初の状態になることを思い出すことが肝要である。なお、この IDARC の中ではなく、各自が使用しているパソコン操作の中で指定されている“直前の状態に戻る”ボタンを押すことは、最も使用頻度の高い操作であることも覚えておくことも重要である。

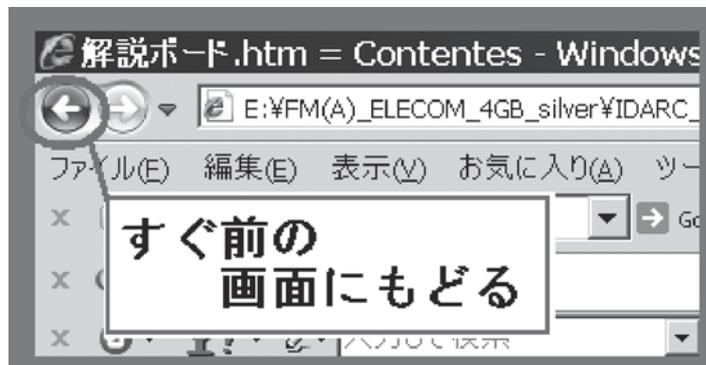


Figure 43 この IDARC とは別に、それぞれのパソコンで使われる画面の中に、『直前の画面に戻る』というボタンがある。これも、検索作業の中では、使用頻度が高い。

謝 辞

この報告をまとめるにあたり、次の方々には、お世話になった。

とくに氷河堆積物については、その好例がわが国にはなく、実際に手に入る氷礫岩や縞状氷河堆積岩については、岐阜大学の小嶋 智 教授に、中国の先カンブリア時代の試料（SK88083003）をお借りして、その鏡下の特徴について、比較検討を行った。

この報告で検討した諸標本や試料は、諏訪兼位 名古屋大学名誉教授、ならびに、坂 幸恭、矢入憲二にお世話になり、また、一部は、星野光男 名古屋大学名誉教授、および、早稲田大学の高木秀雄教授の手を煩わせた。

本文中、石英の強度と粒子の角の摩滅に関する考察では、Mizutani and Uemura (1967: MS) の考えをほとんどそのまま解説した。この英文草稿をこれまで、公表せずにいたのは、ひとえに、筆者（水谷）の怠慢であり、深く反省している。にも関わらず、今回、この項目について、ここで解説することを許された共同研究者の植村 武新潟大学名誉教授には、心から感謝の意を表したい。あらためて記すまでもないが、内容に関する全責任は原稿を執筆した筆者（水谷）にある。

この報文の主旨に直接関係はないが、ゴンドワナ大陸に関する研究、とくに日本列島の黒瀬川帯に関する研究については、神戸女子大学学長・波田重熙教授には、研究の都度、貴重な文献をいただき、新しい知見について、ご親切な解説をいただいた。ここに記して、あらためて、感謝の意を表する。

偏光顕微鏡観察のための薄片の作成については、名古屋大学博物館の與語節生 技官の協力を得た。薄片の種類によっては、比類なき高等技術を必要としたが、それを克服して、研究目的に合致した作品を作っていただき、心から感謝と敬意を表したい。

以下、引用文献を見ていただくと理解していただけると思うが、この報文のために、国外の多数の研究を引用した。多くは、歴史的な意味のある古典に相当する文献であり、また、論文の長短に関係なく必読文献に相当する文献が多い。これらを手に入れるについては、名古屋大学理学部図書室の伊藤由美さんの協力を忘れることは出来ない。ここに記して、お礼を申しあげる。

この報告をまとめるにあたり、資料の整理、試料の作成などには日本学術振興会からの研究費（平成 18 年度科学研究費：課題番号 188074，平成 20 年度科学研究費：同 208046，平成 21 年度科学研究費：同 de217041，および、平成 22 年度科学研究費：同 de2208041）を使用した。長期間にわたる作業には、学生・院生諸君の手もわずらわせた。陰で助力をいただいた関係者の皆様に、深甚なる敬意を表し、記して謝意としたい。

引用文献

- Abrahamson, J. and Dinnis, J. (2000) Ball lightning caused by oxidation of nanoparticle networks from normal lightning strikes on soil. *Nature*, **403**, 519-521.
- American Geological Institute (2005) *Glossary of Geology*, Fifth Ed., 779p.
- Bagnold, R.A. (1954) *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen & Co. Ltd., 265p.
- Banerjee, I. (1964) Size-roundness relation in the Barakar sandstones of the south Karanpura coalfield, India. *Sedimentology*, **3**, 22-28.
- Beadnell, H.J.L. (1910) The sand-dunes of the Libyan desert. *Geogr. Jour.* **35**, 379-392.
- Beaumont, P. (1971) Break of slope in particles-size curves of glacial tills. *Sedimentology*, **16**, 125-128.
- Boulton, G.S. (1978) Boulder shapes and grain-size distributions of debris as indicators of transport paths through a glacier and till genesis. *Sedimentology*, **25**, 773-799.
- Bond, G. (1954) Surface textures of sand grains from the Victoria Falls Area. *Jour. Sediment. Petrol.*, **24**, 191-195.
- Blatt, H. (1967) Original characteristics of clastic quartz grains. *Jour. Sediment. Petrol.*, **37**, 401-424.
- Blatt, H. (1970) Determination of mean sediment thickness in the crust: a sedimentological method. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **81**, 255-262.
- Buller, A.T. and McManus, J. (1973) The quartile-deviation / median-diameter relationships of glacial deposits. *Sedimentary Geology*, **10**, 135-146.
- Callieux, A. (1954) Limites dimensionnelles et noms des fractions granulométriques. *Bull. Soc. Geol. France*, 6 Ser., **4**, 643-646.
- Cawood, P.A., Landis, C.A., Namchin, A.A. and Hada, S. (2002) Permian fragmentation, accretion and subsequent translation of a low-latitude Tethyan seamount to the high-latitude east Gondwana margin:

- evidence from detrital zirconage data. *Geol. Mag.*, **139**, 131-144.
- Coney, P.J., Jones, D.L., and Monger, W.H. (1980) Cordilleran suspect terranes. *Nature*, **288**, 329-333.
- Conolly, J.R. (1965) The occurrence of polycrystallinity and undulatory extinction in quartz in sandstone. *Jour. Sediment. Petrol.*, **35**, 116-135.
- Correns, C.W. (1968) *Einführung in die Mineralogie*. Springer-Verlag, 458s.
- Curray, J.R. and Griffiths, J.C. (1955) Sphericity and roundness of quartz grains in sediments. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **66**, 1075-1096.
- Du Toit, A.L. (1939) *The geology of South Africa*. Oliver and Boyd, London, 539p.
- Dzulynski, S. and Walton, E.K. (1965) *Sedimentary structures of flysch and greywakes*. Development in Sedimentology, **7**, Elsevier, 274p.
- Folk, R.L. (1955) Student operator error in determination of roundness, sphericity and grain size. *Jour. Sediment. Petrol.*, **25**, 297-301.
- Frondel, C. (1962) *Silica Minerals*. The System of Mineralogy of James D. Dana and Edward S. Dana, Seventh Ed., Volume III, John Wiley and Sons, 334p.
- Füchtbauer, H. und Müller, G. (1970) *Sedimente und Sedimentgesteine*. E. Schweizerbart'sche Verlag. 726s.
- 学術審議会学術情報資料分科会学術資料部会大学博物館ワーキンググループ (1996) 学術標本画像データベース作成の指針 (報告), 1-17.
- Greensmith, J.T. (1963) Clastic quartz, provenance and sedimentation. *Nature*, **197**, 345-347.
- 波田重熙 (2000) 大陸の分裂・集合テクトニクス —黒瀬川帯を例として— 深田研ライブラリー, **40**, 48p. 深田地質研究所
- Hada, S. and Landis, C.A. (1995) Te Akatarawa Formation — an exotic oceanic-continental margin terrane within the Torlesse-Haast schist transition zone. *New Zealand Jour. Geol. Geophysics*, **38**, 349-359.
- Hada, S., Bunopas, S., Ishii, K. and Yoshikura, S. (1999) Rift-drift history and the Amalgamation of Shan-Thai and Indochina/East Malaya Blocks. Metcalfe *et al.* (edits.) *Gondwana Dispersion and Asian Accretion*, 67-87.
- Hada, S., Yoshikura, S. and Gabites, J.E. (2000) U-Pb zircon ages for the Mitaki Igneous rocks, Siluro-Devonian tuff, and granitic boulders in the Kurosegawa Terrane, Southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **56** (Geotectonic Evolution of The Paleo-Ryoke and Kurosegawa Terranes), 183-198.
- Hada, S., Ishii, K., Landis, C.A., Aitchison, J. and Yoshkura, S. (2001) Kurosegawa Terrane in Southwest Japan: Disrupted Remnants of Gondwana-derived Terranes. *Gondwana Research*, **4**, 27-38.
- Haldorsen, S. (1981) Grain-size distribution of subglacial till and its relation to glacial crushing and abrasion. *Boreas*, **10**, 91-105.
- Handin, J. (1966) Strength and Ductility., *Geol. Soc. Am., Memoir*, **97**, 223-289.
- Harland, W.B. and Hacker, J.L.F. (1966) 'Fossil' lightning strikes 250 million years ago. *Advancement of Science*, April 1966, 663-671.
- Holmes, A. (1951) *Principles of Physical Geology*. Thomas Nelson and Sons Ltd., 532p.
- Holmes, A. (1965) *Principles of Physical Geology*. Second Ed. Thomas Nelson and Sons Ltd. 1,288p.
- Inman, D.L. (1952) Measures for describing the size distribution of sediments. *Jour. Sediment. Petrol.*, **22**, 125-145.
- Jones, D.L., Irwin, W.P. and Overshine, A.T. (1972) Southeastern Alaska — A displaced continental fragment? *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, **800-B**, B211-B217.
- Jørgensen, P. (1976) Some properties of Norwegian tills. *Boreas*, **6**, 149-157.
- 甲斐憲次 (2007) 黄砂の科学, 気象ブックス 018, 成山堂, 146p.
- Kay, M. (1951) North American Geosynclines. *Geol. Soc. Am. Memoir*, **48**, 143p.
- Kendrew, W.G. (1961) *The climates of the continents*. 5th edit., Oxford, the Clarendon Press, 608p.
- Krumbein, W.C. (1933) Textural and lithological variations in glacial till. *Jour. Geol.* **41**, 382-408.
- Krumbein, W.C. (1934) Size frequency distribution of sediments. *Jour. Sediment. Petrol.*, **4**, 65-77.
- Kuenen, P.H. (1960) Experimental abrasion, 4: Eolian action. *Jour. Geol.*, **68**, 427-449.

- Kuenen, P.H. (1969) Origin of quartz silt. *Jour. Sediment. Petrol.*, **39**, 1631-1633.
- Kuenen, P.H. and Perdock, W.G. (1961) Frosting of quartz grains. *Kon. Ned. Akad. Wetensch. Amsterdam, Proc., Ser.B*, **64**, 343-345.
- Kuenen, P.H. and Perdock W.G. (1962) Experimental abrasion, 5: Frosting and defrosting of quartz grains. *Jour. Geol.*, **70**, 648-658.
- Martini, I.P. and Brookfield, M.E. (1995) Sequence analysis of upper Pleistocene (Wisconsinan) glacio-lacustrine deposits of the north-shore Bluffs of Lake Ontario, Canada. *Jour. Sedimentary Research*, **B65**, 388-400.
- Menzies, J., Jaap, J.M. Van der Meer, and Rose, J. (2006) Till — as a glacial “tecomict”, its internal architecture, and development of a “typing” method for till differentiation. *Geomorphology*, **75**, 172-200.
- Mizutani, S. (1963) A theoretical and experimental consideration on the accuracy of sieving analysis. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **11**, 1-27.
- Mizutani, S. (1983) Duration of chemical diagenesis. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **31**, 17-35.
- Mizutani, S. (1995) Mesozoic evolution of the Japanese Islands. *Proc. Intern. Symposium, Kyungpook Univ., Korea*, 11-41.
- Mizutani, S. and Shibata, K. (1983) Diagenesis of Jurassic siliceous shale in Central Japan. Iijima, A., Hein, J.R. and Siever, R. edits., *Siliceous Deposits in the Pacific Region. Developments in Sedimentology*, **36**, 283-297.
- 水谷伸治郎 (1987) シルトおよびシルト岩, 水谷伸治郎・斎藤靖二・勘米良亀齡 編 日本の堆積岩, 74-76.
- 水谷伸治郎・斎藤靖二・勘米良亀齡 (1987) 日本の堆積岩, 岩波書店, 226p.
- Mizutani, S. and Uemura, T. (1967: MS) Physical implication of rounding of eolian sand. (manuscript)
- 水谷伸治郎・植村 武・諏訪兼位 (1968) リビア砂漠の砂にみられる二種の砂粒子群。(講演要旨), *地質雑*, **74**, 144.
- Mizutani, S. and Suwa, K. (1966) Orthoquartzitic sand from the Libyan Desert, Egypt. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **14**, 137-150.
- Mizutani, S. and Yairi, K. (1969) Tectonic sketch of the Mbeya area, Southern Tanzania. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **17**, 107-124.
- Monger, J.W.H. and Ross, C.A. (1971) Distribution of Fusulinaceans in the Western Canadian Cordillera. *Can. Jour. Earth Sci.*, **8**, 259-278.
- Monger, J.W.H., Souther, J.G. and Gabrielse, H. (1972) Evolution of the Canadian Cordillera: a plate-tectonic model. *Am. Jour. Sci.*, **272**, 577-602.
- Nahon, D. and Trompette, R. (1982) Origin of siltstones: glacial grinding versus weathering. *Sedimentology*, **29**, 25-35.
- Pettijohn, F.J. (1949) *Sedimentary Rocks*. Harper & Brothers, 526p.
- Pettijohn, F.J. (1957) *Sedimentary Rocks*. 2nd Edit., Harper & Brothers, 718p.
- Pettijohn, F.J. (1975) *Sedimentary Rocks*. 3rd Edit., Harper & Row, 628p.
- Pettijohn, F.J. (1984) *Memoirs of an unrepentant Field Geologist*. The Univ. of Chicago Press, 260p.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R. (1972) *Sand and sandstone*, Springer-Verlag, Berlin New York, 618p.
- Phillips, E. (2006) Micromorphology of a debris flow deposit: evidence of basal shearing, hydrofracturing, liquefaction and rotational deformation during emplacement. *Quaternary Sci. Rev.*, **25**, 720-738.
- Potter, P.E. and Pettijohn, F.J. (1963) *Paleocurrents and basin analysis*. Springer, 296p.
- Powers, M.C. (1953) A new roundness scale for sedimentary particles. *Jour. Sediment. Petrol.*, **23**, 117-119.
- Räsänen, M.E., Auri, J.M., Huitti, J.V., Klap, A.K. and Virtasalo, J.J. (2009) A shift from lithostratigraphic to allostratigraphic classification of Quaternary glacial deposits. *GSA Today*, **19-2**, 4-11.
- Reed, F.R.C. (1949) *The Geology of the British Empire*. 2nd Ed., Edward Arnold & Co., London, 764p.
- Rogers, A.F. (1946) Sand fulgurites with enclosed lechatelierite from Riverside County, California. *Jour. Geol.*, **54**, 117-122.
- Rogers, J.J.W., Krueger, W.C. and Krog, M. (1963) Sizes of naturally abraded materials. *Jour. Sediment. Petrol.*, **33**, 628-632.

- Rogers, J.J.W. and Schubert, C. (1964) Size frequency distributions of sand-sized grains in an abrasion mill. *Sedimentology*, **3**, 288-295.
- Said, R. (1962) *The Geology of Egypt*. Elsevier, Amsterdam, 734p.
- Saka, Y. (1977) Sedimentological notes on the Karroo System in northern Malawi, Africa. *Gakujutsu Kenkyu, School of Education, Waseda Univ.*, Ser. Biology & Geology, **26**, 35-51.
- 諏訪兼位 (1997) アフリカ大地溝帯の謎, 講談社選書メチエ, **107**, E, 256p.
- 諏訪兼位 (2007) 科学を短歌によむ, 岩波書店, 119pp.
- 諏訪兼位・矢入憲二 (1979) アフリカ, 都城秋穂 編: 岩波講座, 世界の地質, 61-98.
- Shepard, F.P. (1954) Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Jour. Sediment. Petrol.*, **24**, 151-158.
- Shibata, K. and Mizutani, S. (1982) Isotopic ages of Jurassic siliceous shale and Triassic bedded chert in Unuma, central Japan. *Geoch. Jour.*, **16**, 213-223.
- Shrock, R.R. (1948) *Sequence in Layered Rocks*. McGraw-Hill, 507p.
- Swineford, A. (1955) Petrography of upper Permian rocks in south-central Kansas. *State Geol. Surv. Kansas, Bull.*, **111**, 179p.
- Tanner, W. (1956) Size and roundness in sediments: a discussion. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **67**, 535.
- Taylor, S.R. and Solomon, M. (1962) Geochemical and geological evidence for the origin of Darwin glass. *Nature*, **196**, 124-126.
- Tipper, H.W., Woodsworth, G.J. and Garielse, H. (1981) Tectonic assemblage map of the Canadian Cordillera and adjacent parts of the United States of America. Cordilleran Geology Division, Geol. Survey Canada. MAP 1505A & Legend, Scale 1: 2000000.
- 植村 武 (2000) 構造地質学要論, 愛智出版, 324p.
- Walker, T.R. (1957) Frosting of quartz grains by carbonate replacement. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **68**, 267-268.
- Wentworth, C.K. (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Jour. Geol.*, **30**, 377-392.
- Walker, T.R. (1957) Frosting of quartz grains by carbonate replacement. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **68**, 267-268.
- Wood, R.M. (1985) *The Dark Side of the Earth*. George Allen & Unwin, 246p.
- Wood, R.W. (1910) Experimental study of Fulgurites. *Nature*, **84**, 70.
- Wopfiner, H. (2002) Tectonic and climatic events controlling deposition in Tanzanian Karroo basins. *Jour. African Earth Sci.*, **34**, 167-177.
- Wright, J.W., Edit. (2008) *The New York Times 2009 ALMANAC*. 1,004p., Penguin Books.
- W.T.B. (1883) The Geology of the Libyan Desert. *Nature*, **29**, 121-122.
- Yairi, K. and Mizutani, S. (1969) Fault system of the Tangnyika Rift at the Kigoma Area, western Tanzania. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **17**, 71-96.
- 矢入憲二 (1979) 東アフリカ地溝帯, 植村 武・水谷伸治郎 編: 岩波講座, 地質構造の形成, 19-31.

(2010年10月12日受付)