

# 線型モデルによる碎屑性堆積物形成過程の解析

(研究課題番号03640640)

平成4年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書

平成5年3月

研究代表者 水谷伸治郎  
(名古屋大学理学部)

線型モデルによる  
砕屑性堆積物形成過程の解析

水谷 伸治郎

【研究課題】 線型モデルによる砕屑性堆積物形成過程の解析

【課題番号】 03640640

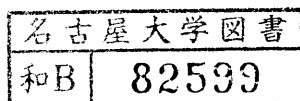
【標 題】 平成3年度 一般研究C  
平成4年度 一般研究C

【研究代表者】 水谷伸治郎 名古屋大学理学部地球惑星科学科 教授

【研究経費】 平成3年度 1,800千円  
平成4年度 600千円

【研究発表】 直接, 本研究費によった研究を含め, 1991—1993年に公表した本研究に関係した成果は以下の通りである。

- ① 勘米良亀齡・水谷伸治郎・鎮西清高 (1991) 地球表層の物質と環境. 岩波地球科学選書 326pp.
- ② Kojima, S., Mizutani, S. and Natal'in, B.A. (1992) Terrane accretion and continental growth of NE Asia and Japan. 29th IGC 1992, Kyoto, JAPAN. Symposium (J. Aitchison, D.G. Howell and Mizutani, S.: Conveners) Terrane Accretion and Continental Growth through Time. 29th IGC Abstracts Vol. 2 of 3. p.255.
- ③ 水谷伸治郎 (1991) 細かく見る, 普通に見る, 大きく見る, そして, もっと大きく見る



—最近の美濃帯の研究から— 土と岩, no.39, 32-36.

- ④水谷伸治郎 (1991) 地球表層部における変質の速さを考える. 地質ニュース, no.440, 34-46.
- ⑤Mizutani, S. (1991) Mesozoic terranes of Japan in relation to the tectonic history of East Asia. Comm. No.42, Dept. Geol. Fac. Cienc. Fis. Math., Univ. Chile, Santiago, Num. Esp. Vth Intern. Circumpacific Terrane Conf., Resum. Expand., 152-154.
- ⑥水谷伸治郎・小井土由光 (1992) 金山地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1. 地質図幅) 地質調査所, 111pp.
- ⑦Mizutani, S. and Kojima, S. (1992) Mesozoic radiolarian biostratigraphy of Japan and collage tectonics along the eastern continental margin of Asia. Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol., v.96, 3-22.
- ⑧Mizutani, S. and Yao, A. (1991) Radiolarians and terranes: Mesozoic geology of Japan. EPISODES, v.14, no.3, 213-216.
- ⑨永井ひろ美・水谷伸治郎 (1991) 美濃加茂市甘屋付近の珩質頁岩中のジュラ紀放散虫化石. 名古屋大学総合研究資料館報告, no.7, 1-13.
- ⑩永井ひろ美・水谷伸治郎 (1992) Snowshoe Formation のジュラ紀 (Bathonian) 放散虫. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no.8, 47-61.
- ⑪Pessagno, E. A., Jr. and Mizutani, S. (1993) Correlation of radiolarian biozones of the eastern and western Pacific (North America and Japan). in G. E. G. Westermann (edit.), Jurassic of the Circum-Pacific. Oxford Univ. Press, (in press).
- ⑫Yang, Q. and Mizutani, S. (1991) Radiolaria from the Nandanhada terrane, north-east China. Jour. Earth Sci., Nagoya Univ., v.38, 49-78.

【研究成果】 研究成果の概要を以下に, 論説の形としてまとめ, 科学研究費補助金研究成果報告書とする.

## 線型モデルによる碎屑性堆積物形成過程の解析

### まえがき

堆積岩のうちで、碎屑性堆積物（ならびにそれが固結した碎屑性堆積岩）は、次のような一般的な性質を持っている。すなわち、(1) 地球上のあらゆる環境に普遍的に分布していること、(2) 地球の歴史のあらゆる時代にあまねく存在していたこと、そして応用地質学的な面において、(3) 日常生活においてもっとも普通に遭遇する一般的な地球物質であること、である。このような性質を持つために、碎屑性堆積物はもっとも広く深く、また多くの分野において研究が続けられてきている。中でも、砂および砂岩はさらにその分布が広い。砂や砂岩は、その構成物質が粘土鉱物ほど細かくなく、また、礫岩を調べる時のように巨大な試料を必要としない。つまり、検査や比較研究には実に適当なサイズの鉱物物質の集合体である。そのため、碎屑性堆積物（岩）の研究は砂あるいは砂岩の研究を中心として進められてきている (Pettijohn et al., 1973)。事実、碎屑性堆積物、とくに砂の大きさや粒径に関する用語についてまとめられた結果 (Allen, 1936; Cailleux, 1954; Pettijohn, 1957) をみると、世界の地域と時代とを問わず、われわれが“砂”として認識する粒子の大きさに関しては、民族や言語にかかわらずほとんどその差がない。このことは砂に代表される碎屑性堆積物がわれわれにとって如何に日常的であるか、また、その分布や生活との関わりが如何に普遍的であるかを物語っている。そして、そのこと自体がこの分野の研究が砂の研究を通して進展した大きな理由の一つになっている。ここで述べる碎屑性堆積物（岩）の組成、厳密に言えば粒度組成と鉱物組成（大きさと物質構成、あるいは量と質）、についての検討も砂あるいは、砂岩を例証として引かれることが多い。本研究では、このような碎屑性堆積物の性質を、その起源から形成環境ならびに続成作用の全過程にわたって考慮し、これまでの研究史を通覧しながら、基礎的問題の総括を行う。

謝辞：なお、本研究は平成3年4月から平成5年3月にかけて、文部省科学研究費（一般研究C）によって行われた。研究代表者として筆者に与えられた研究費とその支出の概要は上記の通りである。関係当局ならびに、配分の審査にあたられた関係者に深甚の敬意と謝意を表すものである。

## 碎屑性堆積物の研究の歴史

(1) 堆積物の研究：— “まえがき” で述べたような性質をもつ碎屑性堆積岩を含め、あらゆる堆積岩をその性質と成因を考慮して系統的に分類し、なおその考えが後世に影響を与えたのは Grabau(1904) である。彼の用いた記載用語、ことに碎屑性堆積物に用いた rudaceous, arenaceous, あるいは lutaceous といった粒径区分用語や pyroclastic とか bioclastic などの成因区分用語は今でも使われているばかりでなく、hydrargillutite といった記述は「系統的な表現性」という点からみると現在でもなおその妥当性を失っていない。A.W.Grabau(1870-1946) は MIT と Harvard で教育を受け、Columbia 大学の職を得た当時に上記の論文を書いた。年齢的にみて、もっとも力強く仕事を進めていた時代であった。1920年に中国に渡る前、彼は Principles of Stratigraphy (Grabau, 1913) をまとめているが、その章建ての基本構想は上記の分類の上に立っている。この書のはじめに、献辞として彼は、“to JOHANNES WALTHER a leader in the fields of knowledge herein explored” と記していることから分かるように、Grabau は Walther に畏敬の念をもって、おそらく Walther の用いた Lithogenesis という用語に表されている事象に興味と関心をもっていたのであろう。Grabau が岩石の成因に基づく分類を常に念頭においていたことは、これらの背景を紹介した Kay(1960) の解説にも記されている。Grabau(1904) に続いて出版された Walther(1908) もその後の Grabau の作品に大きな影響を与えたことであろう。Walther(1908) が Grabau ばかりでなく、その後の地質学者、例えば Holmes(1944) にも影響を及ぼしたことは、両者が同じグランドキャニオンの写真を扉絵に使い、浸食作用が及ぼす物質循環の役割に注目していることから憶測できる。いずれにしても、今日的な表現では surface process (Read and Watson, 1965) 表層過程と呼ばれている地球表層の環境とその変動を重要な問題と考えていたことは明らかである。この分野の研究の一つの源流が Johannes Walther や Amadeus Grabau にあることは興味深い。

しかし、彼らが活躍した 20 世紀の初頭は、残念ながら地質学はまだ近代的な学問にはなっていなかった。いふなれば博物学から地球科学への移行期にあった。地球の歴史的認識の中で最も重要な時間に関する研究がまだ、十分に進んでいなかったのである。放射性元素に基づく年代論が展開され、それがもたらす壊変エネルギーが生きている地球の動きの原動力になっていることが議論されるようになったのは、Holmes and Lawson (1926) な

どの検討が行われるようになった以後で、もう少し後のことであった。Walther(1908)の議論の中で、時間や年代に関する部分、あるいはそれが関係した検討は、必要なデータに欠けるため、大胆な推定に基づいていて、幼稚である。それを責めることはできないが、その代わりに彼は彼なりにとくに、堆積岩や地層の形成に関して環境とその変遷という視点から考察を進めた。それが今日でも facies analysisとして知られている堆積相解析の基礎的概念のもとになっていることは周知の通りである。

(2) 堆積作用と環境：— 20世紀の前半では、地層や地質時代を通して堆積岩を検討する、という立場をとる研究者はほとんどなかった。いわゆる相対年代と地質時代を決める層序学がこの学問の主流をなし、力を振るっていたからであろう。19世紀からの化石の学問は依然として地球科学の分野では強い力をもっていた。しかし、20世紀に入ってから、堆積環境とその後の変動やテクトニクスとの関係、つまり巨視的な立場に立って堆積作用を検討するという試みがなされるようになってきた。Bailey(1930, 1936)がその里程標的な作品であろう。彼は、岩相や堆積構造がいわゆる造山帯と陸棚とでは対照的に異なることを多くの経験に基づいて指摘したのであった。彼に刺激され、堆積作用とテクトニクスが相互に密接に関係している事実にその頃から多くの人々が注目するようになった。当然、広い地域と多様な環境、永い変動の歴史をもつアメリカ大陸の地質が研究の対象として選ばれるようになる。そしてその後、Krynine(1943: Krumbein and Sloss, 1953, による)によって tectonic cycle としてまとめられ、lithologic association という概念、あるいは、sedimentary tectonics として論じられるようになる (Krumbein and Sloss, 1951, 1963)。

一方、地質学に関する研究方法は、鉱物学や岩石学の進歩とともに20世紀の中頃から少しずつ変わってきた。地質学はもっと幅広く、多くの物質を研究対象として選ぶようになり、一つは時空を超えた物理科学的な議論を、他は長い歴史を通じた地球変遷の議論を展開するようになった。歴史を画する作品として挙げられるのは Barth et al. (1939) であろう。この中で火成岩、堆積岩、変成岩の成因が Barth, Correns および Eskola によってそれぞれの立場から論じられている。その内容は博物学的背景から脱し、新鮮な色彩をもった魅力ある科学としての地質学であった。20世紀の初頭から中葉にかけては、地質学においても一つの変化期であった。

(3) 先カンブリア時代の堆積岩：—その頃、堆積岩の研究に関して、注目すべき研究が Pettijohn(1943)によって発表された。彼はカナダの先カンブリア時代の変成岩地帯を研究し、ある種の変成岩がその構造・組織・組成から判断して、変動帯における堆積岩とまったく類似の性質をもつ堆積岩源変成岩であることを実証的に明らかにした。彼の論文は Archean sedimentationと題されているが、それは堆積岩岩石学としても、また変成岩岩石学としても、当時の仕事としては他に類をみない優れたものであった。しかし、それよりも、もっと重要なことは、彼の研究が、われわれの手の届かない古い地球の歴史においても、地球の表面がそれ以後の古生代や中生代と類似の条件にあったことを明示したことである。つまり、それは先カンブリア時代 (Pettijohn は Pre-Huronian という意味で Archean という時代を限定している) のある時期まで疑義なく uniformitarianismが成り立つことを科学的な手法で明らかにしたのである。

Pettijohn(1943) の論文は多くの研究者に影響を与えた。それは、彼の論文が当時の世界の地球科学の最先端で活躍していた岩石学者の Eskola や Tyrell,あるいは、地質学者の Bailey や Jonesなどの研究に大きく啓発されて書かれたものであり、多くの地質学者と通じ合うコトバや表現で記述され、彼らと同じ視点から堆積岩や地球の歴史を取り扱ったからであろう。Pettijohn(1943) の論文は、戦後、とくに、北欧の先カンブリア系の研究者に強い関心をもたれた。それはカナダにおいて Pettijohnが検討した変成岩の岩石学的特徴、組織・構造、他の岩相との共存関係などが北欧の地質学者 (Simonen, 1953) や Simonen and Kouvo (1951, 1955) によって認められたからである。当時、もう一つ、大きな変革がこの分野においてあった。それは乱泥流 -turbidity current-の研究が戦後になって進められ、オランダ学派 (Kuenen, 1953; Kuenen and Migliorini, 1950)の研究が注目されるようになったことである。乱泥流の研究は、堆積機構に関して新しい見解を示したばかりでなく、一方では Bailey(1930, 1936)の指摘した堆積作用と構造運動との関連性を別の観点から説明し、他方では堆積岩岩石学のグレイワッケ砂岩の成因に関連して世界の学会を賑わせた (Pettijohn, 1950; 1954)。そして何時しか、地向斜、乱泥流、グレイワッケという相互関係が暗黙のうちに認められるようになっていった。Pettijohn(1949)の著作とその第2版 (Pettijohn, 1957) とを、グレイワッケ砂岩の研究を背景にしながら比較すると、この動きを知ることができる。ともあれ乱泥流の概念とそれによって形成される

砂岩層に関する研究は、堆積構造の研究 (Bouma, 1964; Dzulynski and Walton, 1965) ともあいまって、地質学に turbidite (Bouma and Brouwer, 1964) の新しい用語を定着させるようになった。この語を用いて述べれば、上に掲げた北欧の研究は、とりまおさず先カンブリア時代の turbidite の確認であった。北欧の研究者は、先カンブリア時代の環境が顕生代のそれと比較できるほど似ていることを論じたものである。この考えは、換言すれば uniformitarianism に基づく地球の歴史の解明であり、堆積環境の解析であった。地質学における説得的な論理は常にこの uniformitarianism に則っている。この方法は、われわれの手のとどかない古い時代のことを論理的に議論する唯一の方法であった。

しかし、この方法に従い、現在が過去を知る手掛かりであるという考え方にのみ準拠して議論を進める限り、われわれは地殻の形成とか地球の誕生といった本質的な環境変化に迫ることが出来ない。また、表層過程の時間的変化・変遷という長い時間にわたる変動を論ずることは出来ない。このことに触れる前に、20世紀最大の話題となったプレート・テクトニクスについて解説する必要がある。この学問も uniformitarianism に基づいて発展した学説の典型としてよく知られているからである。

(4) プレート・テクトニクスと堆積作用：一戦後、海洋の研究が世界的に進められ、その成果を取り入れて、新しい考えであるプレート・テクトニクスが生まれた。1960年代から次の約10年間の比較的短い期間に現れたこと、世界中の地球に関するあらゆる学問が同等に参加したこと、それまでの考えを根底から覆してしまったこと、などから地球科学の革命ともいわれている。1980年代になって、terrane (Coney et al., 1980) の概念などが導入されて一部の修飾を受けたが、プレート・テクトニクスは基本的には、①地球の表面が剛体状のプレートで隙間なく敷きつめられていること、②それらのプレートはお互いに相対的に動いていること、といったきわめて簡単な事象から出発して、地球の変動帯の分布とその性格を統一的に説明する魅力的な考えであった。理解することも比較的容易であった。それ故、当然このプレート・テクトニクスに関係づけて堆積岩形成論も展開されていった。

その中の代表的な研究者の一人は W. R. Dickinson であろう。彼は本来、その頃、つまりプレート・テクトニクスが登場する直前、流行の一つであった続成作用の研究を進めていた (Dickinson, 1962)。ただ、対象として選んだ砂岩の成因について、その環境や地史との



関係において、彼自身は多くの問題を抱えていた(Dickinson and Vigrass, 1964, 1965). 砂岩の成因は、つきつめれば結局、その物質の起源・堆積環境・続成作用の問題になる。彼は、この砂岩の問題を新しくプレート・テクトニクスの舞台に載せて議論しようと試みたのである(Dickinson and Suczek, 1979; Dickinson and Thayer, 1978)。その考えの基本的な骨組みは、砕屑物の後背地として continental block provenance, magmatic arc provenance, recycled orogen provenanceを考えることである。そして、問題の砕屑岩体が subduction 帯で形成されるか、あるいは collision帯で形成されるか、あるいは fore land basinで形成されるか、つまり堆積作用の場を考えることによって、変動帯での砂岩形成をプレート・テクトニクスとともに論ずるという立場をとった。彼もしくは彼の共同研究者は、世界、とくに北米の多くの例を整理して、上のような観点から砂岩のタイプ区分を試みた。その論旨は上述の如き論理によっていて、それなりの正当性はあった。そして、多くの研究者から支持を得た。

しかし、彼らの考えた区分の基礎となったデータの一部は、実は suspect terranes からのもの、あるいは allochthonous terranes のものであることが気付かれるようになって、論理は逆になった。つまり、ある terraneを構成する砂岩については、その砂岩の後背地解析をしない限り、terrane の homeport (Jones, 1990)を知ることはできない。そして、その homeportを知るための provenance としては、大陸地域とか火山列島弧とか古い変動帯という Dickinsonらの区分はあまりにも大雑把過ぎて役立たず、三角図上の表示はほとんど意味をなさない。もっと分解能を挙げなければならない。もっと明瞭な手掛かりを砕屑性堆積岩の中から掴まねばならない。finger printに相当するものを検討し、それを発見しなければならないであろう。

その点、わが国の研究例 (Hattori, 1982, 1989; Mizutani, 1959, 1975; Shibata and Adachi, 1972, 1974; 足立・鈴木, 1992)などは、suspect terrane である Mino Terrane (Mizutani, 1987, 1990) の homeport や Maizuru Terraneの砂岩の起源に関する高感度解析に相当する質の高いものであり、その技術性と精度においては、世界に比肩するものがない。

上述のように、プレート・テクトニクスは砕屑性堆積物の研究に基本的には何の影響も及ぼしていない。また、新しい考えをほとんど導入してはいない。また、プレート・テク

トニクスが広く認められて以後、碎屑性堆積物の研究がその姿を大きく変えたといわれることはない。プレート・テクトニクスは地球の表層部における大規模な物質移動のサイクルをつかさどる過程であるが、プレート・テクトニクス以前にも風化、運搬、沈積、続成作用というサイクルを通し、いわゆる表層過程として、物質が循環しているというサイクルの考えはあった。あらためて、それをプレート・テクトニクスと関わりをもたせて強調する必要はない。プレート・テクトニクスが巷間で話題になった時、Pettijohn(1975)はその姿勢に対してむしろ批判的な態度をとった。それは、テクトニクスに関する説が如何ように変わろうと、堆積岩形成の原理が変わることはないという信念に基づいていたからであろう。Pettijohnは1976年夏、筆者をAppalachianの古生層に案内してくれたが、その時の彼の態度から受けた筆者の印象は、彼も露頭の観察から出発する地道な野外科学者であるということであった。

プレート・テクトニクスと堆積岩岩石学との関係は、研究の流れからみると、地質学の多くの分野がプレート・テクトニクスの誕生によって大きな影響を受けたこととは対照的である。事情は逆のようにみえる。

大陸と海洋の周辺部に allochthonous terrane からなる collage zone の存在が認められるようになり(水谷,1988)、そこに分布する terranes の起源と動きがまったく不明であり、地磁気学的検討も疑問視されてくるようになると、プレート・テクトニクスの研究、とくに変動帯の研究には碎屑性堆積岩構成物の研究が必須のものとなってくる。碎屑性物質の高感度解析なしには、もはや、プレート・テクトニクスの議論は成り立たなくなる。このことが気付かれはじめ、1980年代以降、再び後背地解析の重要性が論じられてきた。後背地解析のデータを添えて、テクトニクスが議論されるようになった(Mizutani, 1991; Mizutani and Kojima, 1992)。この点がおそらくプレート・テクトニクス以後のこの分野の新しい方向といえるであろう。

(5) 時間的経過と変遷：一すでに述べたように uniformitarianismはこの分野における有効な指導原理であった。地球の歴史の大部分はこの原理によって編まれ、その変動が解析されてきた。しかし、われわれがこの原理に則って議論を続ける限り、地球の誕生とか生命の発生とかという始源状態を議論することはできない。同時にまた、永い時間の流れの中でたった1回しか起こらなかった事象を説明するにはまったく役立たない。さらに

また、永い時の流れに沿って変化していく地球の全体像を掴むことはできない。

Pettijohn(1943) は先カンブリア時代の堆積作用を研究して、おそらくそのことに気づいていたであろうと思われる。というのは、彼は自分の第1, 2版の著作の中でともに、lithification, diagenesis あるいは地質時代による堆積岩の変化などをその最後の章にもってきて、「堆積岩」をそのような時間的経過と変遷の問題で締めくくっているからである (Pettijohn, 1949;1957)。もっとも、このような考えは、E.F.McBride (私信) によると、Pettijohn がソ連の研究者の影響を強く受けた結果だといわれている。いずれにしても、北米大陸やユーラシア大陸などといった広大な地域とそこに分布する様々な地層や堆積物を対象として研究できる地質学者にとっては、ごく自然な、巨視的な立場から発想されたものであり、考察を進めることによって到達する大規模な変化、つまり始源状態から現在にいたるまでの変遷の問題である。

砕屑性堆積物について考えてみると、議論は始源地殻の形成に始まる。そして、風化や運搬という表層過程を経て、最初の始源砕屑性堆積物が形成される過程に問題が集中するであろう。始源地殻が何であったかは、大きな問題であるが、少なくとも今日の大陸地殻と同じものを頭に描くとすれば、それは花崗岩質である可能性は高い。少なくとも、大部分の砕屑性堆積物の起源となるものは花崗岩質地殻であったと推定される。地球の表層部でこの数十億年の間に、いかなる変遷があったか、それを明らかにすることが堆積岩岩石学の重要な研究課題であることは Pettijohnの指摘を待つまでもない。

(6) まとめ：一 堆積物や堆積岩の研究を通覧してみると、そこには表層過程とその環境を取り扱うこと、永い地質学的な時間的変化を考察することという共通点がみられる。いわゆる地向斜造山論が主流であった時代においても、プレート・テクトニクスが流行した時代においても、その姿勢は変わっていない。これらを追求することは、堆積岩研究のもっとも本質的な点であるからである。研究課題や研究組織を変えてもその本質は変わることはない。ここで述べる砕屑性堆積物の性質に関する考察も、例外ではない。ただ、ここでは、とくに砕屑性堆積物の粒度組成に焦点を絞り、その本質的な問題点について考察を進めよう。

## 碎屑性堆積物の粒度組成

(1) 粒子とその名称：一すでに述べたように、Allen (1936) や Pettijohn (1949), あるいは Cailleux (1954) などにまとめられた碎屑性堆積物の命名や用語に関する結果を眺めてみると、砂質堆積物や碎屑性堆積物に関するわれわれ人間の感覚は、あたかも対数スケールで固体粒状物質を識別しているように見える。そのことはまた、粒子や粒状物質の名称を対数スケールで記載することがわれわれの認識と合致した実際的な方法であることを示している。一方、碎屑性堆積物の粒度組成に関する研究が系統的に進められるようになって、それが経験的に対数正規分布をなすことが指摘されるようになってきた。地質学の分野でこの種の問題を数学的な厳密さで議論をしたのは Krumbein であった。彼はまず粒度の単位に  $\phi$  スケールを導入することを提案した。Krumbein (1938) の論文はその頃公刊されたこの分野の作品としては数学的にも厳密であり、優れたものであった。加えて堆積物と堆積岩に関する研究法をまとめた Krumbein and Pettijohn (1938) が出版され、その中で Krumbein が詳細に粒度分布論を展開し対数正規と  $\phi$  スケールについて解説したため、 $\phi$  スケールはとくにアメリカを中心として広く使われるようになった。最初に提案された Krumbein (1938) の表記をここに再録すると、

$$\phi = -\log_2 \xi$$

ここで  $\xi$  は mm 単位の粒子の直径であり、 $\phi$  が彼の提案になる新しスケールである。この関係は、一般には  $d$  mm とすると、

$$d = \left(\frac{1}{2}\right)^\phi$$

しかし、次元を考慮に入れると、

$$d = C \left(\frac{1}{2}\right)^\phi$$

となる (水谷ほか, 1987)。ここで、 $C$  は mm の次元をもつ定数である。常用対数表示を用いれば、

$$\phi = -3.3219 \log d / d_0$$

ここで、 $d_0 = 1$  mm である。Krumbein (1938) は  $\phi$  スケールの導入とともに、ガウスの正規分布曲線に議論を進めている。この考えはその後、そのまま Inman (1952) によって踏襲され、次のような表記で用いられている。次の正規分布関数  $[f(x)]$  において、

$$f(x) = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right\} \cdot \sigma \exp \left\{ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

その積分値  $[F(x)]$  (つまり累積曲線上での値) は次式で示される。

$$F(x) = \int_a^b \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sigma \right\} \exp \left\{ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} dx$$

ただし,  $[a = -\infty, b = x]$

ここで,  $b = \phi$  なる時  $F(x) = s$  とし, その時の  $\phi$  を

$$\phi_s$$

で示すことにすると, 一連の統計値は  $\phi$  スケールによって, 次のように示される。

$$\begin{aligned} M\phi &= \frac{1}{2} (\phi_{16} + \phi_{84}) \\ Md\phi &= \phi_{50} \\ \sigma\phi &= \frac{1}{2} (\phi_{84} + \phi_{16}) \\ \alpha_1\phi &= (\phi_{16} + \phi_{84} - \phi_{50}) / (\phi_{84} - \phi_{16}) \\ \beta\phi &= (\phi_{95} - \phi_5) - (\phi_{84} - \phi_{16}) / (\phi_{84} - \phi_{16}) \end{aligned}$$

ここで  $\sigma$  は標準偏差,  $\alpha$  は歪度,  $\beta$  は尖度を示す統計量である。

重要な点は, この表示は基本的にはある種の約束事であって, 事実を規定せず, また, 作業仮説を提供してはいない, ということである。粒度組成が経験的に対数正規分布をなすということから  $\phi$  スケールを導入し, 対数正規分布を代表的に示す簡単なパラメータとして, 上記の統計量を便宜的に使う —ただそれだけのことであり, それは単なる約束にしか過ぎない。この点については, 再び後に議論をするが, とくに, 便宜的な表現上の約束事と事実とを誤認してはならないことをここで強調しておく。

(2) パラメータの表示: —上記の統計量は, 便宜的に決められたことである。実際の統計量は厳密に次のように, 平均値や分散を計算して求める。

$$\text{平均値} \quad \mu = \int_a^b x f(x) dx \quad : [a = -\infty, b = +\infty]$$

$$\text{分散} \quad \sigma^2 = \int_a^b (x - \mu)^2 f(x) dx \quad : [a = -\infty, b = +\infty]$$

$$\text{標準偏差} = \sigma, \quad \text{歪度 (ひずみ)} \quad \alpha = (\mu_3 / \sigma^3), \quad \text{尖度 (とがり)} \quad \beta = (\mu_4 / \sigma^4).$$

$$\text{ただし,} \quad \mu_k = \int_a^b (x - \mu)^k f(x) dx \quad : [a = -\infty, b = +\infty]$$

Inman(1952) などの提案した統計量は, 次のような正規分布関数の基本的な性質に基づいて考えられたものである。

$$x = \mu \pm \sigma \quad \text{には全体の } 68.29 \%$$

$$x = \mu \pm 2\sigma \quad \text{には全体の } 95.45 \%$$

$$x = \mu \pm 3\sigma \quad \text{には全体の } 99.73 \%$$

このような統計量を求めるには、一般には計算よりもむしろ累積曲線を用いる方がよいであろう。さらに実際には Mizutani(1957) のように、確率紙を用いた方がよい。

確率紙を使うと、もし問題の頻度分布が正規分布  $[G\phi(\mu, \sigma)]$  であれば、グラフの上で  $\mu$  と  $\sigma$  を求めることができるという便利な点がある。そして、上記のような約束に従って歪度や尖度も求めることができる。そのために何時しか統計量の算定のためばかりでなく、正規分布の便宜的な検定にも確率紙が用いられるようになっていった。このために幾つかの誤謬を侵すことになる。その一つは、碎屑性堆積物の粒度組成が対数正規分布をなす、あるいは、 $\phi$  スケールで正規分布をなすという信仰が生まれたことである。さらに、その上に、確率紙の上で対数正規分布をなす複数の母集団を識別することができると思っただけの人が現れたことである。これらについて次に検討してみよう。

(3) 対数正規分布：一理論的に粒度組成が対数正規分布をなすならば、それは確率紙の上において、直線で示される分布として識別できる。しかし、現在知られている限り、粒度組成の測定結果が本当に直線上に落ちる例はほとんどない。そして、さらに重要なことにはその場合、何故直線上に落ちないかの議論が十分に尽くされていない。原理的にはこの関係は

$$\text{実際の粒度分布関数} = \text{正規分布関数} + \text{乱数}$$

で表されるであろう。もし、この関係が成り立つならば、先ず右辺の第1項の分布項が何を意味するか、そして、第2項の乱数項が何を意味するかを別々に論じなければならないであろう。この関係において、乱数項が常に0に近い場合のみ、測定された粒度組成は正規分布をなす。乱数項が常に0とは如何なる事象であろうか。そのような環境は表層過程のどこに求められるであろうか。その種の議論は多くの困難が伴う。原理的には、起源が明らかな碎屑性堆積物の母集団からもたらされて形成された碎屑性堆積物の粒度組成をその形成環境毎に比較することによってのみ、議論ができる。しかし、実際にはその議論はきわめて難しく、引用すべき研究例はない。わが国のような複雑で小規模な環境変化のみられるところでは、多くの因子を巻き込むために、この種の議論や観察は実りが少ないであ

ろう。いずれにしても好例はない。つまり、乱数項については、現在のところ明確な回答や見通しはない。今後の研究課題であろう。

第1項の正規分布関数について考えてみよう。困ったことに、本来、この頻度分布が個数分布であるのか、それとも、重量分布であるのかは本質的なことであるが、それも定かでない。未固結堆積物については、篩分析の結果は普通は重量で表現し、また、理論的な扱いも重量百分率で論じられてきている (Mizutani, 1963)。それに対して薄片を用い、顕微鏡下で粒度分布を知るための計算は一般に確率論に基づいていて、個数分布で表現することが多い (例えば Greenman, 1951)。重量と個数とでは、その分布は全く異なる。それにもかかわらず、いずれについても適当に (まったく便宜的に) それらを確率紙上で処理している。第1項の分布関数に対する考えはこの程度の雑駁なものなのである。

ただ、対数正規分布については例外的に、厳密な数学的取扱いがなされている研究がある (Kolmogoroff, 1941)。それは実際の堆積物を例としているのではなくて、思考実験的な理論的考察である。その概要は、個体物質を砕く過程で、1個の粒子が割れて2個に、それがさらに割れて小さな粒子になり、次々と砕かれていき、それが無限に続くと、その結果として形成された粒子の数とその粒径は対数正規分布をなす、というものである。この過程が実際の碎屑性堆積物の形成や沈積作用でどのように働くかを想定してみれば分かるように、Kolmogoroff の計算結果はあるモデルでしかありえない。この例を除いて、碎屑性堆積物の粒度分布に関する対数正規分布の理論的証明はなされていない。つまり、上式の第1項に関する正当性は何も保証されていないのである。

(4) 複数の母集団の混合：一物質の混合過程では、相互に反応が起こったり、混合の間にそれぞれの母集団の性質が変化しない限り、混合比の割合で計算される母集団の和によって全体の性質や統計量が決まる。もっとも簡単な場合、線型の和として示される。

もし、2種のそれぞれ正規分布を持つ変量集団が混合して新しい変量集団を作ったとしよう。Ageno and Frontali (1963) は巧みにこの2種の正規分布を示す重複分布曲線から本源の2種を識別抽出する数学的方法を述べている。つまり、

$$G_1 = G(\mu_1, a_1, \sigma_1)$$

$$G_2 = G(\mu_2, a_2, \sigma_2)$$

という2種の正規分布を考える。ただし、

$$G_n = G(\mu_n, a_n, \sigma_n) = a_n \exp[-(x - \mu_n)^2 / 2\sigma_n^2]$$

とする。この2種が混合して、

$$y(x) = G_1 + G_2$$

を作るとき、頻度分布図から上記の未知の  $\mu_1, a_1, \sigma_1$  と  $\mu_2, a_2, \sigma_2$  とを求めることができる。この場合に限らず、もし元の変量集団が正規分布（あるいは対数正規分布）を持つことが既知であれば、例えば、

$$y(x) = pG_1 + (1-p)G_2$$

とにおいて、未知の  $0.0 \leq p \leq 1.0$ , ならびに  $\mu_1, a_1, \sigma_1$  と  $\mu_2, a_2, \sigma_2$  を計算機を使って最適値として求めることはできる。

(5) 混合比の解析のための確率紙の利用：—上記の計算や推定には、能率は悪いが計算機がなくても試行錯誤法によって適当な混合比を知ることはできる。その時、確率紙を用いることが最適値を推定するのに役立つ。そのような例として Fuller(1961)の海浜砂の粒度分布の検討、Jacobs(1971)による氷河堆積物の粒度組成の解析、Mundry(1972)による分解解析の例などが挙げられよう。後に再度、引用する Spencer(1963)の取扱いも基本的には同じである。

このような取扱いの結果、確率紙の利用がさらに注目された。しかし、Visher(1969)中の展開に見られるように、明らかな誤謬がある。それは確率紙の上で顕著な直線部分があると、それを正規分布曲線の一部と見なしてしまうことである。もちろん、確率紙の上で、2種の直線が2種の正規分布を示す変量集団の混合を示すである場合もないわけではない。ただし、その場合、それぞれの分布は一般の正規分布ではない。「切断正規分布」なのである。一般に、 $x = a$  で左側が切断されている切断正規分布は

$$f(x) = \{ 1/(\sqrt{2\pi}) \sigma \alpha \} \exp \{ -(x - \mu)^2 / 2\sigma^2 \}$$

で表される。ただし、 $a \leq x < \infty$  であり、また、 $\alpha$  は次式で示される値をとるため一般の正規分布とは異なる。

$$\alpha = \int_a^b \{ 1/(\sqrt{2\pi}) \sigma \} \exp \{ -(x - \mu)^2 / 2\sigma^2 \} dx$$

ただし、 $b = +\infty$  である。このような分布においては、平均値  $m$  と分散  $s$  は、

$$m = \{ \sigma / (\sqrt{2\pi}) \alpha \} \exp \{ -(a - \mu)^2 / 2\sigma^2 \} + \mu$$

$$s = \{ \sigma(a + \mu) / (\sqrt{2\pi}) \alpha \} \exp \{ -(a - \mu)^2 / 2\sigma^2 \} + \sigma^2 + \mu$$



によって表される。このような性質をもつ分布は確かに確率紙上で半直線によって表現されるであろう。しかし、一般にはすでに Blatt et al. (1980) によって注意されているように、確率紙上において直線で近似される部分は、理論的には必ずしも、実際的にはほとんどの場合といってもよいくらいに普通に、その半直線部分が代表する正規分布の変量集団からなっていることはない。一般にはそのような直線部分に近似できる分布は、2種あるいはそれ以上の変量集団の混合部分であることが多い。もし、確率紙上で幾つかの折れ線として示される分布があり、それらがそれぞれその直線の線分に相応する正規分布であるとすると、それは上の式で  $a \leq x \leq b$  を満足する切断正規分布の集合である筈である。表層過程においてそのような切断正規分布をなす砕屑性堆積物の形成される条件はきわめて考えにくい。すくなくとも運搬・沈積過程においてはこのような切断正規分布を示すような堆積物形成は不可能であろう。唯一許されるのは、その起源において複数の母集団があること、それらが本来、それぞれ何らかの理由で切断正規分布を示すような変量集団であること、といった仮定が認められる場合のみ、確率紙上で半直線の集まりとして表現できる分布になるであろう。もし、本当に確率紙上でいくつかの折れ線で示されるような分布が存在するのであれば、おそらくそれは切断正規分布をもつ本源砕屑粒子集団が存在することを示唆する。それが Spencer (1963) の考え方である。その考えについて、次に考察する。

(6) 本源砕屑粒子集団：一検討方法は試行錯誤的ではあるが、おそらく明瞭な作業仮説をもって進められたと思われる Spencer (1963) の研究は、結論から解説していくことによって、理解がより容易になる。彼の結論（あるいは推論）は、上記でこれまで議論してきたことから明らかなように、基本的な数個の本源砕屑粒子集団が存在すれば、実際にわれわれが手にする砕屑性堆積物の粒度組成はその混合比によって表されるとするものである。その本源砕屑粒子集団として、彼は次の3集団を見いだした。すなわち、

- ① gravel - 3.5 ~ - 2.0  $\phi$
- ② sand 1.5 ~ 4.0  $\phi$
- ③ clay 7.0 ~ 9.0  $\phi$

の3種で、これらは fundamental population と呼称されている。Spencer (1963) が述べているように、彼は、粒度分布解析の過程で Pettijohn (1949, 1957) によってすでに指摘

されている 2 - 4 mm (-1 ~ -2 φ) と 1/8 - 1/32 mm (3 ~ 5 φ) の 2 クラス範囲の粒子の相対的な不足 (granule deficiency と silt deficiency) を問題にしている。このような考えは、演繹的な論理でモデルを用いて説明される限りきわめて明快であり、ありそうなこととして信じられがちである。たまたま、彼の取扱った堆積物は上の仮説で説明ができたかも知れない。また、上の仮説で説明ができる堆積物は、探せば少なからず存在するであろうことも、想像に難くない。この考えは本質的には碎屑性堆積物の粒度分布に関して一つの統一された解釈であり、論理的には欠陥はない。それ故、この考えは、ある特定の堆積盆地内における運搬・沈積過程を取り扱い、その地域に分布する堆積物の粒度組成に関して fundamental population を設定し、環境に依存するある範囲の size-class deficiency を想定することによって、全堆積物の粒度分布を説明・解釈しようとする時、きっと役立つであろう。しかし、あらゆる碎屑性堆積物に関してこの考えが成り立つわけではないことは、上の説明では解釈できない多くの粒度分布の例があることから明らかである。この考えを認めるには、上記の三種類の fundamental population の存在とそれらの間に位置する granule deficiency ならびに silt deficiency の認知について裏付けが必要である。ただ、最後に強調しておきたいことは、ここで議論した「本源碎屑粒子集団 (fundamental population)」や「本源欠乏粒子集団 (size-class deficiency)」が碎屑性堆積物の粒度組成に深く関わっていることである。これらのことを念頭において次の考察に進むことにする。

(7) まとめ：一表層過程において、繰り返し行われる堆積物の形成とその後の続成作用、そして造山運動を通して再生する地殻物質の循環において、次のような考えは近似を許されれば成り立つように思われる。すなわち、「本源碎屑粒子集団」の存在と「本源欠乏粒子集団」の存在である。これには堆積作用の全過程がかかわっていることは想像に難くない。あらゆる時代と環境の碎屑性堆積物の性質を知ることができれば、全過程のうち何と何がもっとも大きく因子として作用しているのかを見極めることができる。しかし、実際にはそれは不可能であるため、限られた例についてモデルに基づく推論をすることが適当であろう。それには、碎屑性堆積物の混合過程で、その堆積物の物理的性質、とくにその粒度組成がまったく変わらないと考え——この仮定は妥当性があると思われる——、堆積物の粒度組成の特徴を検討するのがよいであろう。しかし、この半世紀のあいだ、あ

たかも真実のよう取り扱われてきた堆積物の粒度に関する対数正規分布は、実際には何らの理論的裏付けはなされていない。単なる経験則である。そして、場合によっては、この“対数正規分布”の信仰から出発して論理を進めるために、誤った推論を行っている研究例もある。このことに留意すべきであろう。

### 碎屑性堆積物形成の混合モデル

(1) 混合モデル：—混合過程において関係する粒子の物理的性質がまったく変化しないならば、碎屑性堆積物のその物理的性質の頻度分布を線型モデルによって説明することができる。例えば、竹内(1986, 1992)は碎屑性ザクロ石の研究において、その起源を議論する中で、複数の後背地からの供給と混合を想定して、線型モデルによるシミュレーションと考察を行っている (Takeuchi, 1989)。また、Mizutani(1975)は砂岩中の碎屑性斜長石の消光角の分布についての具体的な検討を行い、実際に美濃地域の砂岩中の碎屑性斜長石の消光角分布を解析した。後者の研究は、次のような考えによっている。すなわち、ある斜長石の化学成分が既知であれば、ランダムな方位をもつ斜長石の消光角の分布はあらかじめ計算によって求めることができる。多種の化学成分をもつ斜長石が混合している場合には混合比から、全体の消光角分布を線型モデルによって計算することができる。既知の化学組成の斜長石  $j$  種の消光角分布を  $[f_{ij}]$  としてヒストグラムで示し、それら相互の混合比を  $[x_j]$  で表すと、次式に従って全体の消光角分布は  $[a_i]$  となる。すなわち、

$$[f_{ij}] [x_j] = [a_i]$$

ここで、

$$[f_{ij}] = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1j} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{i1} & f_{i2} & \dots & f_{ij} \end{pmatrix}$$

$$[a_i] = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_i \end{pmatrix}$$

この表示を用いれことにすると、Spencer(1968)の考えは次のように表現することができる。

$$[f_{ij}] [x_j] = [a_i]$$

ただし、 $j = 1, 2, 3$ であり、 $x_j$ は $j = n$ における fundamental population (n) の粒度組成についての混合比を示す。

明らかに

$$\sum x_j = 1.0 \quad (j = 1, 2, 3)$$

である。一方、 $f_{ij}$ はヒストグラムで表されているが、本来、仮定が許されるものであれば、そのヒストグラムは対数正規分布関数から計算されるものである。ただし、その仮定が認められないとすれば、通常は、ヒストグラムで示される頻度分布として取り扱った方が一般性がある。

上の例では $[f_{ij}]$ として、斜長石の消光角分布や粒度分布をとった。それに対して、Takeuchi(1989)の研究ではザクロ石の化学組成をとり、混合比から後背地解析を行っている。

(2) 線型計画法：一上に述べた線型モデルにおいて、実際に与えられた課題を解く場合、問題はどの項を既知とし、どの項を未知数とするかにある。もし、例えば既に化学組成の分かっている砕屑性斜長石が何種類もあり、それが混合比で混合集団を作っているとすると、その場合に観察される砕屑性斜長石の消光角分布はどのようなものになるか、という課題であるならば、その答は実に簡単である。つまり $[a_i]$ である。しかし、逆に $[a_i]$ を観測しておいて、実際の混合比をもとめることはできるであろうか、という課題になると、その手続きはいささか厄介になる。つまり、 $[x_j]$ を求めることが目的になる。そして、それには $i \geq j$ の関係が必要である。もしそうでなければ別の方法を考えなければならない。

上のような場合、数学的に、または、計算で $[f_{ij}]$ が決められるならば、 $i \geq j$ を満足するようにヒストグラムを作ればよい。すでに述べたように $[f_{ij}]$ はヒストグラム表示であるからである。しかし、そうすると $[f_{ij}]$ と $[f_{i,j+1}]$ が余りにも似ているために、線型代数方程式の解が安定ではなくなる。改めて言うまでもなく、 $[x_j]$ は実体のある物質の相対比率であるから、正の実数である。しかし、方程式の立て方や定数の配

置によっては、時に  $[x_j] \geq 0.0$  という基本的条件を満足しない解が現れたりする。

この弱点を避けるために、Mizutani(1975)は  $[x_j] \geq 0.0$  の条件を加味して、この問題を線型計画法を用いて数値的に解いた。すなわち、

$$\sum f_{ij} \cdot x_j \geq a_i$$

$$\sum x_j \geq N$$

として、次の目的関数を上の条件で最小にするための解を計算機で求めた。

$$z = \sum x_j$$

なお、上式でNは測定した碎屑性斜長石の測定総数である。しかし、それでも解の安定性についての問題は残った。それは  $[f_{ij}]$  と  $[f_{i,j+1}]$  が似ているためであった。

この種の問題には、必ず解の安定性が話題になる。それは分解能が良ければ良いほど、解の安定性はなくなり、逆に、解の安定性を求めれば求めるほど、分解能が悪くなる、つまり  $[f_{ij}]$  のヒストグラムは粗いものになる、という数学的制約があるのである。それが数学的にも論理的にも避けられないとすれば、このような取扱いは、この線型モデルに対する本質的な制約として常に考慮を払うべき問題であり、必ずそのことを念頭においておかねばならないであろう。

(3) 「本源集団」の表示：—先に、碎屑性堆積物には「本源碎屑粒子集団」が存在すること、また、「本源欠乏粒子集団」が存在すること、という考えのあることを述べた。もしそうであるならば、そのことは何らかの形で解いて求めた  $[f_{ij}]$  の上にはっきりと現れる筈である。とくに、granule deficiency あるいは silt deficiencyがあるとすれば、それはあらゆる混合過程における  $[f_{ij}]$  の中に数値的に現れる筈である。例えば、この行列要素の中の granule と silt の部分 (fraction) をそれぞれ  $f_{i=g}$ 、 $f_{i=s}$  とし、 $[f_{i=g,j}]$  と  $[f_{i=s,j}]$  によってこの deficiency を表すとすると、この部分はすべての堆積物において極小値をとる筈である。そのことを気付いた Pettijohn(1957)は granule は機械的な分解作用に対して不安定であり、容易に mineral grains に分解していくため deficiency が起こるとした。鉱物粒子の粒度組成はその源になる火成岩や変成岩の本来の粒子のサイズに依存してきまると考えられ、分解する過程で大量の砂粒子が生産される。一方、化学的分解の結果として多量の粘土粒子が生産される。したがって、それらの複合効果として、その中間にある silt の相対的極小が現れる。以上が Pettijohn

(1957, pp. 50-51)の解釈である。

この考えを一般化したのが先に述べた Spencer(1963)であり、機械的な破壊による碎屑性物質の代表として「礫」を、鉱物粒子集団として「砂」を、そして化学的分解による生産物として「粘土」をとった。いずれも堆積作用の全過程を想定して考えられた混合過程による粒度組成の説明であった。

おそらくこの考えは、局所的な閉鎖された堆積盆地における碎屑性物質の生産と堆積物の生成の過程をうまく説明するであろう。ただし、この混合比を求めるために提案されている確率紙を用いる方法や、仮定としてあたかも認められている事実として取り扱われた「本源碎屑粒子集団」の粒子構成が対数正規分布になるという考えは、——計算機を用いれば、数値的に問題を解くことは簡単であるが——避けた方がよい。その仮定が正しいという保証はまったくないと考えられるからである。むしろ、線型モデルに基づいて「本源碎屑粒子集団」を求めるというステップを踏むことが当面の重要な課題であろう。適当な観測値さえ集めれば、それは数学的にも可能であろうと考えられるからである。

#### シルト粒子とその形成

(1) シルト粒子の特徴：—これまでは、シルト粒子が存在するというを暗に認めた上で、碎屑性堆積物の粒度組成の問題を考え、論じてきた。シルト・サイズの粒子が多いか少ないかということは、その粒子がどのようにして形成されるかということに深く関わっている。それは、例えば粒径と円磨度との関係によく表れている。一般に気付かれることであるが、砂粒粒子が磨滅作用によって順次、その円磨度が増すという単純な関係は実際には認められていないことが多い。例えば、Pettijohn(1957)はミシシッピの川砂で粒径 0.15 mmのところ、円磨度と粒径の関係に不連続のあることを指摘している。また Swineford(1955)も Kansas 州のベルム紀 Verden 砂岩では、0.2 mmのところ、不連続があり、急激にそれ以下では円磨度が低くなることを彼女のデータで示している。リビア砂漠の砂を検討した Mizutani and Suwa(1966)は Folk(1955)の  $\rho$  スケールを用いて、砂粒粒子の円磨度を調べた。彼らによると、明らかに平均粒度と平均円磨度との関係において  $2\phi$  (0.25 mm) を境にして、それより細かい粒子の円磨度は急激に低下する。明らかに  $2.5\phi$  (0.177 mm) では各粒子はそれより粗い粒子よりも角張っている。砂漠の砂はおそ

らく風的作用によって磨滅され、円磨を受けるであろう。しかし、実際には 0.177 mm 以下の粒子は磨滅を受けていない。

リビア砂漠の砂を他の例と比較してみよう。もっとも良い研究例は実験的に風的作用による磨滅過程を検討した Kuenen(1960)の研究であろう。彼の実験的観測によると、粒径 0.1 - 0.15 mm の砂は風的作用でほとんど磨滅しないという。この値は自然界における砂漠の砂での観察結果と合致する。

以上ことは、シルト・サイズの粒子が磨滅作用によって、それより粗い粒子の粒径が減少するという過程でつくられたのではない、ということを示している。つまり、シルト粒子はある時、どこかで形成され出来てから、そのままの粒径を保ち、シルト粒子として存在し続ける、ということを示唆しているのである。

(2) 衝突による破壊もしくは磨滅：円磨作用や磨滅作用は、物理学的には、粒子の表面に加わる応力とその物質のもつ強度を超えて大きくなった時に起こる素過程の集積である。碎屑性粒子の場合、水あるいは風による粒子の他の物体に対する衝突が上のような状況を作り出すであろう。衝突以外の場合（テクトニクスのような地殻全体に働く応力やそれに関係した破壊作用については、この際、除外し、別項で議論する）には、問題の応力は円磨作用や磨滅作用を起こすほど大きくはならない。ここで理論的考察を進めるために、粒子を石英と考える。そして、粒子が平面に衝突することを想定すると、次のような計算ができる。

$$v \geq \sqrt{6Sr^3e^2(1-e) / \rho R^3}$$

ここで、 $v$ ： 粒子が衝突によって局部的に碎かれる時の臨界衝突速度 [cm/sec]

$S$ ： 破壊強度（石英の） [ 25,000  $\times 10^6$ g/(sec<sup>2</sup>·cm) ]

$r$ ： 衝突する粒子表面の微小な突起部分の曲率半径 [ただし  $r \ll R$  cm]

$e$ ： 石英の破壊強度時における歪み量の値 [0.048]

$\rho$ ： 石英の密度 [2.648]

$R$ ： 碎屑粒子の半径 [cm]

の値を入れると、

$$v = 11,150 \times \sqrt{r^3/R^3}$$

リビア砂漠の砂粒子に関して、水谷ほか(1968)は、その外形、円磨度、表面構造から二

種の異なった砂粒子群を識別したが、その中で円磨作用や磨滅作用が砂粒子の衝突に関係して決まると想定して、上のような考察をおこなっている。

前頁の式は、衝突する粒子の粒径が大きければ大きいほど、また、その粒子は表面に局部的に角張った突起部分をもっていて、その部分の曲率半径が小さければ小さいほど、衝突によって磨滅する臨界衝突速度が小さくなることを示している。地上で普通に観測される風速 (30 m/sec) くらいでは、粒子表面の角張った突起部分が直接垂直に他の粒子や平面に衝突しないかぎり、その部分が砕ける、つまり、磨滅されることはない。もちろん粒子が粗粒で大きければ、問題はない。どンドンと衝突の度に角が取れて、徐々に丸くなっていく。つまり円磨度が高くなっていく。しかし、シルト・サイズ以下の粒子では円磨度はほとんど変化しないと推定される。

(3) cataclastic としてのシルト粒子：—以上の考察から明らかなように、シルト・サイズの粒子は、決してそれより粗い粒子の磨滅によって形成されるのではない。換言すれば、シルト・サイズの粒子は、epiclastics ではない。

シルト・サイズの粒子はそれではいかにして出来るのであろうか、いかなる環境で形成されるのであろうか。一つの起源として考えられるのは pyroclastic としての粒子である。fall out 堆積物の碎屑性粒子である。このような場合には、その粒子を構成する質をみれば一目瞭然であって、顕微鏡下でなくても、火山性堆積物や凝灰岩質堆積物と共存するので簡単に識別できる。また、多くの場合には、堆積後の変質や続成作用の影響を受けるので、肉眼でも識別は可能である。

このようなことを考え、既知のデータを整理し、自分自身で行った実験結果を取り入れて、Kuenen(1969)は、quartz silt は氷河作用によって出来たと推論した。この推論は、本論でこれまで述べてきたことから、強く支持される。

同時に次のような観察例がある。中部日本、愛知県の鳳来町巢山には七滝礫岩とよばれている礫岩がある。この中には、俗称、くいちがい石と称する sheared cobble が多く含まれている。その食い違い部分を鏡下で観察すると、食い違いの剪断面に沿って周囲の鉱物が破壊されているのが分かる。そこには、数 mm の幅で面 (薄片では線) 状に、破壊され、角張った粒子が分布している。その粒度組成を鏡下で測定してみると、次のような結果が得られた。



七滝礫岩 食い違い石の剪断面部分粒度分布

サイズ・クラス	No. req. %	粒径の名称
1/2 - 1/4 mm	6 %	medium sand
1/4 - 1/8 mm	22 %	fine sand
1/8 - 1/16 mm	23 %	very fine sand
1/16 - 1/32 mm	49 %	silt

clastic materials を epi-, pyro-, cata- の 3 種に区分するとすれば、この食い違い礫の剪断面のものも、Kuenen(1969)が指摘した氷河作用に関係するものも、cataclastic の範疇に入るであろう。つまり、シルト・サイズ粒子は、epiclasticでも pyroclasticでもない。すべて cataclasticとして、このようにして形成されたと考えなければならないであろう。

(4) 選択的運搬作用の影響：—Friedman and Sanders(1978)は、洪水時に形成されたシルト堆積物 (Dunbar and Rodgers, 1957) を含め、デルタ性堆積作用の overbank 堆積物にはシルト堆積物が多いと述べている。すなわち、洪水時に破堤した場合、シルト・サイズの物質は泥水に浮遊し、短時間に広くシート状に広がり、シルト堆積物が形成されるという。これはシルトならびにその前後の細・粗粒子が流水の影響で、淘汰をうけて選択的に運ばれ沈積する例であって、このような例は、運搬作用の影響だけで形成されるシルトの典型的な例であろう。

これらの例は、明らかに、淘汰作用の結果としてのシルト堆積物ができることを示している。ただ、注意しなければならないのは、淘汰される前に、それより粗い砂質堆積物が存在したことであり、その中のシルト部分は、上で議論したようにおそらく —再堆積したとしても —本来は cataclastic起源であったであろうということである。

この流体の作用を加味した考察において、さらに、注意しなければならないのは、いわゆる hydraulic radius として取り扱われている重鉱物の粒度組成である。重鉱物はその大きさがシルト・サイズのものゝ圧倒的に多い。とくに fine siltの部分には自形のジルコンやザクロ石が含まれていることが多い。そして、文字通り、その比重が大きい。それ

故, Rittenhouse(1943) や Weyl(1952) の研究が示しているように, 問題の鉱物の比重とその粒度分布には深い関係があり, 比重と粒子の沈降速度とを合わせて考え, 補正項を入れたとすると, シルト堆積物が形成される流速では重鉱物がそれよりやや粗い(そして, 密度の低い)軽い珪長質珪酸塩鉱物とともに沈積するようになると結論できるであろう. それ故, すでに水谷ほか(1987)に指摘されているように, シルト岩には重鉱物が局所的に濃集されていることが多い. それは hydraulic radius から推論すれば当然のことであって, 正確には濃集という表現は妥当ではないとさえ言える. ただ, ラミナ状にきわめて薄い膜状に重鉱物が集まっている部分があることは事実なので, わずかな流速の差がさらに細かい堆積構造を決めているため, このように重鉱物が濃集しているのかも知れない.

(5) loess および loessite : シルト・サイズの碎屑性堆積物のもうひとつの重要な種類に loessがある. これはサイズとしては, medium silt を主成分とすることが多く, 堆積環境としては砂漠に, または風成層として産出する (Tsoar and Pye, 1987). また, 風成層など, そのような条件で形成された岩石を起源とした再堆積物と考えられているものもある (Johnson, 1989). しかし, 多くはそのシルト粒子の起源として氷河堆積物を想定していることが多い (Smalley, 1966; Smalley and Vita-Finzi, 1968). つまり, シルト粒子自体の起源としては, cataclastic を考えていること, そして, それが集積するための淘汰作用としては, 風の作用を考えていること, この2点は共通している.

この2点と同時に, loess形成の制約条件として地球の陸域全体を考え, その分布の広さや地域性を考慮すると, とくに第四紀の未固結の loessについては, その形成には氷河期との関係, すなわち氷河堆積物の形成をあわせて議論しなければならないと最近では考えられるようになってきた. つまり, 碎屑性物質の起源としての氷河堆積物, そしてその運搬・淘汰作用としての乾燥気候と風成層の形成, そして, その分布と発達から推定される地球規模の気候変動である. さらにこの問題は, 当然, 深海底のシルト質堆積物の形成とも直結すると想像される. おそらく, 古い時代の海成シルト岩とそれに対応する陸成の loess や loessite の関係は, 最近の環境問題の新しい観点ともあいまって, 今後も注目されていくであろう.

とにかく, 碎屑性堆積物の中にシルトおよびシルト岩という区分を設け, それを他の堆積物や堆積岩を区分して取り扱うことには十分, 意味があると思われる.

## まとめ

(1) 碎屑性堆積物の研究やいわゆる sedimentologyの歴史をみても、その重要な部分はほとんどが20世紀に始まっていることがわかる。とくに、地質学や地球科学の本質的な分野ともいえるいわゆるテクトニクスなどとの関係からこの学問が問題にされるようになったのは新し世紀が始まって四半世紀を経た後であった。その大きな理由の一つは、その頃から地球の年代に関係した同位体年代値が正確に得られるようになり、時間の経過と地史が具体的に数値の裏付けをもって語られるようになったからである。もし、これらの年代値が信頼できる数値として得られていなかったならば、堆積速度や浸食速度などの基礎的な値を知ることができず、それが故に、厳密で説得的な議論は何も進められなかったであろう。

(2) 他の分野と同じように、この学問も1960-1970年代のプレート・テクトニクスの登場には影響を受けたが、しかし、プレート・テクトニクスが堆積地質学や堆積岩岩石学に大きくはたらきかけ、その進展にあずかり力があつたと思われる点は少ない。むしろ、1980年代に allochthonous terranes の存在が認められるようになってからは、碎屑性堆積岩の後背地解析の重要性は従来に比して比べものにならないくらいに、増した。堆積岩岩石学の進歩によって得られるであろう新しい事実は、今後、プレート・テクトニクスにとって必要不可欠となるであろう。

(3) 碎屑性堆積物の一つの本質的な性質は粒度組成である。その分布に関して、いわゆる対数正規分布をなすという経験的事実と数学的な正規分布（もしくは確率紙を用いて知ることができる正規分布）とを検討した。対数正規分布は、あくまで経験的、しかも、近似的な事実であつて、それ以上の何者でもないことがこれまで発表したデータの再検討と文献調査を含めた比較検討によって明らかになった。ただ、 $\phi$ スケールは実用的にはとても便利であり、試料の整理とかデータベース作成とか、作業用に便宜的に用いことは、むしろ進めるべきことであろう。ただし、それが対数正規分布をなすと言いつけることは危険である。また、確率紙を多用することが、この対数正規分布の信仰を高めることには逆効果なので、その点、考慮に入れておかなければならない。

(4) 一般には、粒度分布の問題は、この対数正規分布の問題から離れて、別の形で議論した方がよい。もし、一般の碎屑性堆積物の粒度分布が対数正規分布でないとする、

その分布を簡単に示すことができる別の関数を探さなければならないであろうか。その答は「否」である。現在の知識ではそのような関数を見いだすことは困難と思われるからである。おそらく多大の努力と時間を費やしても、新しい関数を発見することはわれわれにはできないであろう。また、これまで知られている粒度分布からは、誰も別の関数を提案していない。さらに、そのような別の関数を考えようという議論はこれまでまったく現れていない。内容としては幼稚であるが、しかし、確実な線型モデルによって与えられた問題を解いた方がよいと考えられる。

ただし、線型モデルの解き方次第では、予想に外れた答えが出てくることもある。線型計画法は数学的には巧妙な方法であるが、いずれも、「解の安定性」と「分解能」とが両立しない。理論的な取扱いでは、この矛盾を克服して解決にあたることは出来ない。したがって、実際には、多くの観測量や測定量から、議論を進めた方がよいであろう。

(5) 線型モデルでも対数正規分布による解析においても、それらの分布モデルとはまったく関係なく、実測に基づいて「本源砕屑粒子集団」と「本源欠乏粒子集団」の議論を進めることができる。しかし、global fundamental population があるか否かの回答は現在の段階では困難である。それに対して、限られた小さな堆積盆地で、上記の2集団を考え、それらの混合過程をモデルを用いて解くことは可能であり、今後、試みる価値のある新しい課題であろう。

(6) シルトとシルト岩、ならびに loess と loessite の砕屑性堆積物としての性質を検討してみると、シルト・サイズの粒子の成因は epiclastic や pyroclastic ではなくて、cataclastic であると結論される。シルト・サイズ粒子は、したがって、「本源砕屑粒子集団」になりうる。ただ、シルト岩や loessite などは、デルタ性堆積作用の overbank deposit として形成されるとともに、風の作用の強いところでも広く形成されるので、それらのどちらの因子が強く働いて形成されたかを成因を論ずる際に十分に考慮しなければならない。ことにそれは再堆積の場合に、結論に大きく響いてくる。

(7) hydraulic radiusなどを考慮すると、シルト岩には重鉱物が濃集する可能性はきわめて高い。そしてこの重鉱物類の観察が後背地解析に必要不可欠なものであるが故に、今後、意識するかしないかの別はあっても、シルト岩の研究は盛んになるであろう。その時、氷河期や氷河堆積物、さらに当時のグローバルな気候問題も話題になるであろう。

## 引用文献

- 足立 守・鈴木和博, 1992, 舞鶴帯北東部の上部三畳系難波江層群砂岩中の碎屑性モナザイトおよびジルコンの年代. 地質論集, no.38, 111-120.
- Ageno, M. and Frontali, C., 1963, Analysis of frequency distribution curves in overlapping Gaussians. *Nature*, v.198, 1294-1295.
- Allen, V.T., 1936, Terminology of medium-grained sediments. Rept. Com. Sediment. (1935-1936). Natl. Research Council, 18-47.
- Bailey, E.B., 1930, New light on sedimentation and tectonics. *Geol. Mag.*, v. 67, 77-92.
- Bailey, E.B., 1936, Sedimentation in relation to tectonics. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v.47, 1713-1726.
- Barth, T.F.W., Correns, C.W. and Eskola, P., 1939, *Die Entstehung der Gesteine*. Springer, Berlin, 422pp.
- Blatt, H., Middleton, G.V. and Murray, R., 1980, *Origin of Sedimentary Rocks*. 2nd Edit., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 782pp.
- Bouma, A.H., 1962, Sedimentology of some flysch deposits. A graphic approach to facies interpretation. Elsevier Pub. Co., Amsterdam, 168pp.
- Bouma, A.H. and Brouwer, A. (eds.), 1964, *Turbidites*. Developments in Sedimentology 3, Elsevier Pub. Co., Amsterdam, 264pp.
- Cailleux, A., 1954, Limites dimensionnelles et noms des fractions granulométriques. *Bull. Soc. geol. France*, 6 ser., t.4, 643-646.
- Coney, P.J., Jones, D.L. and Monger, J.W.H., 1980, Cordilleran suspect terranes. *Nature*, v.288, 329-333.
- Dickinson, W.R., 1962, Petrology and diagenesis of Jurassic andesitic strata in central Oregon. *Am. Jour. Sci.*, v.260, 481-500.
- Dickinson, W.R. and Suczek, C.A., 1979, Plate tectonics and sandstone composition. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, v.63, 2164-2182.
- Dickinson, W.R. and Thayer, T.P., 1978, Paleogeographic and paleotectonic

- implications of Mesozoic stratigraphy and structure in the John Day Inlier of central Oregon. in D.Howell and K.McDougall (edits.), Mesozoic Paleogeography of the Western United States, SBPM Pacific Coast Paleogeography Symposium G, 147-162.
- Dickinson, W.R. and Vigrass, L.W., 1964, Pre-Cenozoic history of Suplee-Izee district, Oregon: Implications for geosynclinal theory. Geol. Soc. Am. Bull., v. 75, 1037-1044.
- Dickinson, W.R. and Vigrass, L.W., 1965, Geology of the Suplee-Izee area. Crook, Grant, and Harney counties, Oregon. Dept. Geol. Mineral. Indust., State Oregon, Bull., no. 58, 109pp.
- Dunbar, C.O. and Rodgers, J., 1957, Principles of Stratigraphy. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 356pp.
- Dzulynski, S. and Walton, E.K., 1965, Sedimentary Features of Flysch and graywacke. Developments in Sedimentology 7, Elsevier Pub. Co., Amsterdam, 274pp.
- Folk, R., 1955, Student operator error in determination of roundness, sphericity and grain size. Jour. Sed. Petrol., v. 25, 297-301.
- Friedman, G.M. and Sanders, J.E., 1978, Principles of Sedimentology. John Wiley & Sons, N.Y., 792pp.
- Fuller, A.O., 1961, Size characteristics of shallow marine sand from Cape of Good Hope, South Africa. Jour. Sediment. Petrol., v. 31, 256-261.
- Grabau, A.W., 1904, On the classification of sedimentary rocks. Am. Geologist, v. 33, 228-247.
- Grabau, A.W., 1913, Principles of Stratigraphy. A.G. Seiler & Co., N.Y., 1185pp.
- Greenman, N.N., 1951, The mechanical analysis of sediments from thin-section data. Jour. Geol., v. 59, 447-462.
- Hattori, I., 1982, The Mesozoic evolution of the Mino terrane, central Japan: A geologic and paleomagnetic synthesis. Tectonophysics, v. 85, 313-340.

- Hattori, I., 1989, Length-slow chalcedony in sedimentary rocks of the Mesozoic allochthonous terrane in central Japan and its use for tectonic synthesis. in J.R.Hein and J.Obradovic (Edits.) Siliceous Deposits of the Tethys and Pacific Regions. Springer, N.Y., 201-215.
- Holmes, A. and Lawson, R.W., 1926, Calculation of the ages of radioactive minerals. *Nature*, v.118, no.2970, 478.
- Holmes, A., 1944, *Principles of Physical Geology*. Thomas Nelson and Sons Ltd. London, 532pp.
- Inman, D.L., 1952, Measures for describing the size distribution of sediments. *Jour. Sediment. Petrol.*, v.22, 125-145.
- Jacobs, A.M., 1971, Statistical considerations for grain-size analysis of tills. *Math. Geol.*, v.3, 227-238.
- Johnson, S.Y., 1989, Significance of loessite in the Maroon formation (middle Pennsylvanian to lower Permian), Eagle Basin, northwest Colorado. *Jour. Sediment. Petrol.*, v.59, 782-791.
- Jones, D.L., 1990, Synopsis of Late Palaeozoic and Mesozoic terrane accretion within the Cordillera of western North America. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, v.331, 23-30.
- Kay, M., 1960, Prefatory Note, p.vii-viii, to the *PRINCIPLES OF STRATIGRAPHY* by Amadeus W. Grabau, Dover Publications, Inc. New York, N.Y.
- Kolmogoroff, A.N., 1941, Ueber das logarithmisch Normale Verteilungsgesetz der Dimensionen der Teilchen bei Zerstueckelung. *Compt. Rend. Acad. Sci. USSR*, v.31, 99-101.
- Krumbein, W.C., 1938, Size frequency distributions of sediments and the normal PHI curve. *Jour. Sediment. Petrol.*, v.8, 84-90.
- Krumbein, W.C. and Pettijohn, F.J., 1938, *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton Century Croft, Inc. N.Y., 549pp.
- Krumbein, W.C. and Sloss, L.L., 1951, *Stratigraphy and Sedimentation*. Freeman

- and Co., San Francisco, 497pp.
- Krumbein, W.C. and Sloss, L.L., 1963, *Stratigraphy and Sedimentation*, 2nd Edit., Freeman and Co., San Francisco, 660pp.
- Kuenen, P.H., 1953, Significant features of graded bedding. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, v.37, 1044-1066.
- Kuenen, P.H., 1960, Experimental abrasion, 4: Eolian action. *Jour. Geol.*, v.68, 427-449.
- Kuenen, P.H., 1969, Origin of quartz silt. *Jour. Sediment. Petrol.*, v.39, 1631-1633.
- Kuenen, P.H. and Migliorini, C.I., 1950, Turbidity currents as a cause of graded bedding. *Jour. Geol.*, v.58, 91-127.
- Mizutani, S., 1957, Permian sandstones in the Mugi area, Gifu Prefecture, Japan. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, v.5, 135-151.
- Mizutani, S., 1959, Clastic plagioclase in Permian graywacke from the Mugi area, Gifu Prefecture, central Japan. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, v.7, 108-136.
- Mizutani, S., 1963, A theoretical and experimental consideration on the accuracy of sieving analysis. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, v.11, 1-27.
- Mizutani, S., 1975, Extinction-angle distribution of plagioclase feldspars in clastic sediments. *Math. Geol.*, v.7, 335-348.
- Mizutani, S., 1987, Mesozoic terranes in the Japanese Islands and neighbouring East Asia. In E.C. Leitch and E. Scheibner (Edits.), *Terrane Accretion and Orogenic Belts*, Geodyn. Ser.19, Am. Geophys. Union, Washington, D.C., 263-273.
- 水谷伸治郎, 1988, テレーン解析とコラージュ・テクトニクス. *地質雑*, v.94, 977-996.
- Mizutani, S., 1990, Mino terrane. in K. Ichikawa, S. Mizutani, I. Hara, S. Hada, and A. Yao (Edits.), *Pre-Cretaceous Terranes of Japan*. Publication of IGCP



- Project 224, Osaka, 121-135.
- Mizutani, S., 1991, Mesozoic terranes of Japan in relation to the tectonic history of East Asia. Comm. No.42, Dept. Geol., Fac. Cienc. Fisic. Math., Univ. Chile, Santiago, Num. Espec. Vth Intern. Circumpacific Terrane Conf. Resum. Expand., 152-154.
- Mizutani, S. and Kojima, S., 1992, Mesozoic radiolarian biostratigraphy of Japan and collage tectonics along the eastern continental margin of Asia. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., v.96, 3-22.
- 水谷伸治郎・斉藤靖二・勘米良亀齡, 1987, 日本の堆積岩. 岩波書店, 226pp.
- 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. (要旨), 地質雑, v.74, 144.
- Mizutani, S. and Suwa, K., 1966, Orthoquartzitic sand from the Libyan Desert, Egypt. Jour. Earth Sci., Nagoya Univ., v.14, 137-150.
- Mundry, E., 1972, On the resolution of mixed frequency distributions in to normal components. Math. Geol. v.4, 55-60.
- Pettijohn, F. J., 1943, Archean sedimentation. Bull. Geol. Soc. Am., v.54, 925-972.
- Pettijohn, F. J., 1949, Sedimentary Rocks. Harper & Brothers, N.Y., 526pp.
- Pettijohn, F. J., 1950, Turbidity currents and graywackes. Jour. Geol., v.58, 169-171.
- Pettijohn, F. J., 1954, Classification of sandstone. Jour. Geol., v.62, 360-365.
- Pettijohn, F. J., 1957, Sedimentary Rocks. 2nd Edit., Harper & Row, N.Y., 718pp.
- Pettijohn, F. J., 1975, Sedimentary Rocks. 3rd Edit., Harper & Row, N.Y., 628pp.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E. and Siever, R., 1973, Sand and Sandstone. Springer Verlag, N.Y., 618pp.
- Read, H. H. and Watson, J., 1965, Introduction to Geology. Vol.1, Principles.

- MacMillan & Co. Ltd., London, 693pp.
- Rittenhouse, G., 1943, Transportation and deposition of heavy minerals. Bull. Geol. Soc. America, v. 54, 1725-1780.
- Shibata, K. and Adachi, M., 1972, Rb-Sr and K-Ar geochronology of metamorphic rocks in the Kamiasso conglomerate, central Japan. Jour. Geol. Soc. Japan, v. 78, 265-271.
- Shibata, K. and Adachi, M., 1974, Rb-Sr whole-rock ages of Precambrian metamorphic rocks in the Kamiasso conglomerate from central Japan. Earth Planet. Sci. Lett., v. 21, 277-287.
- Simonen, A., 1953, Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland. Bull. Comm. geol. Finlande, no. 160, 1-64.
- Simonen, A. and Kouvo, O., 1951, Archean varved schists north of Tempere in Finland. Bull. Comm. geol. Finlande, no. 154, 93-114.
- Simonen, A. and Kouvo, O., 1955, Sandstone in Finland. Bull. Comm. Geol. Finlande, no. 168, 57-87.
- Smalley, I. J., 1966, The properties of glacial loess and the formation of loess deposits. Jour. Sediment. Petrol., v. 36, 669-676.
- Smalley, I. J. and Vita-Finzi, C., 1968, the formation of fine particles in sandy deserts and the nature of 'desert' loess. Jour. Sediment. Petrol., v. 38, 766-774.
- Spencer, D. W., 1963, The interpretation of grain size distribution curves of clastic sediment. Jour. Sediment. Petrol., v. 33, 180-190.
- Swineford, A., Petrography of upper Permian rocks in south-central Kansas. State Geol. Surv. Kansas, Bull., no. 111, 179pp.
- 竹内 誠, 1986, 紀伊半島中央部, 中・古生界砂岩中の碎屑性ザクロ石. 地質雑, v. 92, 289-306.
- Takeuchi, M., 1989, A linear model of sedimentary mixing based on chemical

- composition of clastic garnet and its application to the analysis of rock component in the source area. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v.95, 891-904.
- 竹内 誠, 1992, 南西諸島奄美大島中生界砂岩中の碎屑性ザクロ石の起源. *地質論集*, no.38, 237-248.
- Tsoar, H. and Pye, K., 1987, Dust transportation and question of desert loess formation. *Sedimentology*, v.34, 139-153.
- Visher, G.S., 1969, Grain size distributions and depositional processes. *Jour. Sediment. Petrol.*, v.39, 1974-1106.
- Walther, J., 1908, *Die Geschichte der Erde und des Lebens*. Verlag von Veit & Comp., 570pp.
- Weyl, R., *Schwermineraluntersuchungen in schleswig-holsteinischen Jungtertiaer*. *Z. deutsch. geol. Gesel.*, v.104, 99-133.

(SM930314)