地層の厚さとその分布について

水谷伸治郎^{1*}

Bed-thickness and its frequency distribution

Shinjiro Mizutani^{1*}

The bed-thickness of sedimentary beds and its frequency distribution in a geological body have been treated to show a lognormal distribution. In this paper it is discussed on a basis of a model presented by a great Russian mathematician, Prof. Kolmogorov, A.N. who said that a sedimentary bed has a thickness of so-and-so cm, but in some cases, it has a negative thickness. Actually, the presence of a washed-out phenomena will erode the pre-existing sedimentary layer, and sometimes the pre-existing will completely disappear. For such a washed-out bed, Kolmogorov described that it has a negative thickness. In this paper, an example for the Neogene Kakegawa Formation and its bed-thickness is presented, and additionally the bed-thickness of varved diatomite in the Hiruzenbara Formation of Okayama Prefecture is noted as an example of rather accumulative type of sedimentation.

Key words: bed-thickness, Kolmogorov, distribution, wash-out

はじめに

先日、送られてきた『堆積学研究』(Journal of the Sedimentological Society of Japan, vol. 74, no. 2, 2015)の表紙には、みごとな縞状堆積物の写真が載せられている。さらに、この表紙の説明として、Cover Storyには、石原与四郎・佐々木 華(福岡大学)による英文(ならびに、和文)の記述がある(Ishihara and Sasaki, 2015)。私は、この岡山県蒜山高原の湖成縞状珪藻土(中部更新統)の分布地域を訪れたことはないが、しかし、ここに示されている厚さ1~2mmの濃淡の葉理のセットからなる年縞の見事さには驚いた。

どうして、このような縞に見える模様できるのか、そして、それらの縞模様が如何なる環境を反映しているのか、という極めて素朴な疑問は、古くからあった。

1943年、名著“Archean sedimentation”(Pettijohn, 1943)を書き上げたPettijohnは、ついで、Pettijohn(1949)をまと

め、地層の厚さについての問題を指摘した。そして、新しい時代のものについてだけではなく、古い基盤岩類に見られる縞状片岩についても、その厚さの分布について、議論された(Simonen, 1953; Simonen and Kouvo, 1951)。堆積地質学者の間では、Bokman(1957)の指摘などに注目が集まった。

これらの例が示すように、地質学者の間では、地層の厚さに関しては、経験的に、その厚さを対数でとれば、全体として山の形をし、左右に裾野をひく形を示すので、いわゆる「対数正規分布(lognormal distribution)」をすると信じられてきた。

私は、かつて、服部 勇氏と二人で、この問題について議論したことがあった(Mizutani and Hattori, 1972; 水谷・服部, 1973)。また、最近、Drummond(1999)を読んで、まだ、似たような議論が続いていることを知って、再び、筆を執って、紹介したことがある(水谷, 2000)。ここでは、それらを思い出して、極めて、根本的な問題、“いかにして層理面ができるのであろうか?”という疑問を、ソ連の大数学者、Kolmogorovのモデルを紹介しながら、考察する。

最初に、あまり我々には、馴染みのないKolmogorov, A.N.

受付: 2016年2月9日 受理: 2016年3月28日

¹ 〒465-0084 名古屋市名東区代万町2-21

2-21, Daiman-cho, Meito-ku, Nagoya City, 465-0086, Japan

* Corresponding author: jiro@sd.starcat.ne.jp

について、簡単に記すことにする。たまたま、私の友人に、名古屋大学理学部の数学科出身の櫃田倍之先生（元：熊本大学理学部長）を紹介されたことがあった。その時、私は、櫃田先生に、彼（Kolmogorov, A.N.）は二十世紀の十大数学者と言えてしょうね、と言ったところ、櫃田先生は、「いや、三大数学者の中に入ると言うべきだ」と、即座に言い返された。もちろん、我々には、その偉大さなどは、とても理解は出来ない。ただ、そのような偉大な数学者が、たまたまそばにいた、数理に強い地質学者（Vistelius, A.B.）が咬いた疑問、「どうして層理面はできるのでしょうか？」という問題（Vistelius, 1949）に、真面目に取り組んで、一つの作品（Kolmogorov, 1951）を書いたのであった。

Kolmogorov (1951) が考えたのは、地層の形成には、堆積作用と一口に言うが、実際には堆積物が運ばれてきて、堆積する過程と、その後で、一旦堆積したものが次の段階で、えぐり取られて（wash-out）しまうという過程の積み重なりによってできる、という歴史の結果だ、というモデルであった。そして、場合によっては、そこにマイナスの厚さをもった地層が出来る、という考えであった。このモデルでは、マイナスの厚さを有する地層を想定することが重要な点であり、それが実際には、眼に見えず、確認できないこともあって、彼のモデルについて、詳しく議論されることなく、現在に至っている。以下、述べる拙論では、このモデルを中心に、議論を進める。

最近の研究

最近、多くの堆積地質学者が野外で活躍し、地層の集り状態に関する興味が増してきたためか、ここで議論しようとする層厚分布についての報告も多くなった。それらをすべて紹介する能力や時間は、私にはない。ただ、いくつかの代表的な研究例をまず、簡単に紹介することにする。

まず、最近の研究例として、フィールドにおける露頭を観察し、そこで層厚分布について考察した例として、ギリシャの変動帯での研究（Pantopoulos et al., 2013）、次に、堆積層形成の水理実験を試み、水槽内で形成された Delta-Basin の観察から、層厚分布を議論した例（Straub et al., 2012）、そして、石油探査の観点から、その貯油層の適否について、層厚分布の視点から、議論をした我が国の中嶋（2002）の三例をあげて、紹介する。

Pantopoulos et al. (2013) の報告は、ギリシャの Patras 大学 Ph.D. の労作を基礎にして解説したもので、ギリシャの南西部で NW-SE に走る “External Hellenides” 帯に分布する Paleogene turbidite について、連続露頭で層厚を計測した結果をまとめたものである。そこで検討された露頭は Amfilochia 地区、ならびに、ギリシャ東南端の小さな

Karpathos 島に分布するタービダイトで、彼らは、層厚測定以前に、野外における観察から、例えば、“thickening and coarsening up” と言った堆積環境の特徴を把握している。重要な点は、この論文では、いわゆるマイナスの層厚を持つ例を取り上げていないことである。すなわち、彼らは、Kolmogorov のモデルについては何も述べていない。しかし、丹念に、多くの層厚を測定し、その結果を集計している。統計的取扱いの結果から、測定結果の集計では、それぞれの柱状断面について、skewness や kurtosis は計算できる。そして、それらから、著者らは、「結果は、“normal (Gaussian) distribution” ではない」と結論している。彼らの総括（Table 1, p. 45）に示されているように、ある単位のタービダイトについては、まず、“depositional environment” として、“inner fan/channel” とか “outer fan/lobe” といったように、地質学的に環境を決めている。そして、その環境におけるそれぞれの層厚分布の平均値、標準偏差などを計算している。この研究は、実際に露出しているタービダイトを例にして、その層厚の計測結果を集計した例としては、極めて注目すべき研究であり、集計結果と堆積環境を比較するためには実例としては参考にすべき作品である。しかし、これから述べようとするマイナスの厚さを考慮した Kolmogorov のモデルとは関係はない。その点、次に述べる Straub et al. (2012) とは全く異なる研究例である。

Straub et al. (2012) には、もちろん、Kolmogorov (1951) や Mizutani and Hattori (1972)、Muto (1995) などが引用されており、詳細な検討は、実際に水槽実験を行って、流路を通して運ばれる泥流によって、如何なる堆積層が形成されたかを検討したものであり、異色の研究と言えよう。

ただし、彼らの記載の中には、“Kolmogorov coefficient” という語が各所に出て来る。この語は、私たちがそう名付けた語（Mizutani and Hattori, 1972, p. 127-129）であって、そのことにどうも気づいていないように読める。さらに、もう一点、彼らは、Kolmogorov がガウスの誤差関数を用いていると明記しているが、この点、誤解がある。私は、高等数学についてその公理体系や定理を理解できないので、数学的に厳密な説明はできない。しかし、Kolmogorov (1949) を見る限り、彼は、“somewhat cumbersome but entirely possible” という表現をはさみながら、Fig. 2 (Kolmogorov, 1949, p. 368) で、“Figure 2 plots $f(x)$ and $f^*(x)$ for the case” と述べた後で、 $\phi(x)$ にガウスの誤差関数を

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$

として示しているだけである。決して、断定しているわけではない。想定される層厚分布の形は、多分、uniform-random ではなく、normal-random で、しかも単峰性 (unimodality) と思われるので、上記の文章によって、数学的に

良く知られている関数の形を一例として示したものと、私は考える。

Straub et al. (2012) の研究は、この論文の共同研究者のうち、第二番目に名を連ねている Vamsi Ganti が所属する Minnesota 大学で実施された。“Delta Basin facility” と呼ばれている装置、すなわち、大きさ、5 m×5 m、深さ 0.61 m の水槽を作り、その一方の角から、水流を流す。それには、70% の白い砂と 30% の黒い砂（実際には無煙炭の粉末）が加えられている。実験が進むと、この水槽の角から扇状に、デルタ状の堆積層ができて上がる。その先端から先は海洋の地域と想定しておく。何度もこの水流を流して、堆積層が形成される過程を観察する。水槽の角から、2.5 m までのところに扇形の堆積層ができあがる。その時、水流の流し口の先端から 1.75 m 離れた地点で形成された堆積層の積み重なりを計測する。これが彼らの実験の概要である。この種の実験結果を決める多くの因子が知られているので、実験の実行にあたっては、他のいくつかの因子も、細かく検討されている。彼らの研究の目的は、この種の水槽実験によって、我々が議論している堆積層の形成過程で、その層厚分布がいかなる規則性をもっているかを実際に確かめることにある。彼らの結論の一つは、Kolmogorov が言うような deposition と erosion が起こるとして、それらの頻度を合わせた現象は、切断分布（彼らの表現では “truncated Pareto distribution” と記しているが、私は、残念ながら、不勉強で、この語を知らない）、とくに、マイナス側の領域まで描いて考えると、うまく合致するという。

中嶋 健（産総研地圏資源環境研究部門）の論文は、Bergen Univ. において行った研究を中心に、地層の厚さの分布に関する優れた総括を行っている。彼の研究の目的は、“もし、坑井から得られる一次元の層厚分布からタービダイトのサイズまたは体積に関する情報が得られるならタービダイトの層厚分布は石油探鉱にとって重要な意味を持つことになる”（中嶋、2002, p. 316）

と述べているように、実際に、この種の研究が上記のように役立つならば、この分野における重要な研究課題になるであろう。しかし、彼の卓抜な検討においても、タービダイトに限らず、一般の堆積岩に関して、この層厚分布の問題は、現時点においては、そこまで研究は進んではない。中嶋（2002）は、これから述べる Kolmogorov (1951) の研究をはじめ、Mizutani and Hattori (1972)、Drummond (1999)、らの研究を読み、それらを検討しながら、層厚分布について、詳細な総括を行っている。とくに、層厚分布が如何なる分布（標本分布）をするかについて、確率紙を用いた識別の実例を示している。彼が示した幾つかの実例とそれに関する生成環境との関連についての彼の総括、すなわち、

“層厚分布にどの統計則を当てはめるかは恣意性のある余地がある”（中嶋、2002, p. 314）

には、私も賛成である。私は、層厚分布の基本的議論が未熟である過程で、地質学で議論されている堆積作用や自然環境に結び付けて議論することはできないと思う。Mizutani and Hattori (1972) が議論したことは、これから詳しく説明するように、Kolmogorov の考えに基づく堆積作用のモデルであり、そこに新しく導入されたマイナスの厚さを持つ地層の存在をどのように、取り扱うかという点にある。中嶋（2002, p. 314）も記しているように、

『侵食を受けない場合の元々の地層の層厚確率分布を $f(x)$ (x は層厚) とし、観察された truncated distribution を $f^*(x)$ とすると、 $f(x)$ と $f^*(x)$ との間には次の関係がある（第 2 図参照）。

$$f^*(x) = f(x) / p; \quad \text{for } x > 0 \quad (1)$$

$$f^*(x) = 0; \quad \text{for } x < 0 \quad (2)$$

ここ係数 p は地層の保存率を表し、コルモゴロフ係数と呼ばれる。』

すでに述べたが、この p を “コルモゴロフ係数 (Kolmogorov's coefficient)” と名付けたのは、Mizutani and Hattori (1972, p. 129) であって、Kolmogorov 自身がそう呼んでいるわけではない。私たちが、これらの係数をそのように呼んで、読者に注意を喚起したのは、このモデルに基づいて、我々が想定する地質体や堆積層の形成過程を具体化するための手がかりとしたいと考えたからである。

純粋数学的に議論をした Kolmogorov (1951) はこの係数 p に対しては、単に数学的な意味だけを持たせているに過ぎない。後で話題になる係数 q (Kolmogorov's ratio) に関しても、全く同様である。

後で、詳しく述べる予定であるが、最も本質的な点は上記の $f(x)$ をどのように想定するかにある。理想的には、それは実際に観察されたデータを参考にして、論ずべきものであるが、現在の状況では、それは出来ない。それには、なお、幾つかの仮定をおいて、議論を進めざるを得ない。

Kolmogorov の地層形成のモデル

地質学者ではない数学者の Kolmogorov は、同じ研究所に居る地質学者であり、数理に強い関心をもっていた友人の Vistelius (1949) の議論に対して、まず、次のような地層形成のモデルを考えた（第 1 図）。この図がこの解説の基本になるので、詳しく、解説することにする。

第 1 図は、Shiriyayev ed. (1986) の中で、Kolmogorov の原著 (1949) (ロシア語) を英文化したものの中で使われている図である。今、その論文を英語で読むと、彼の考えを理解するのに役立つ。

第1図 地層が形成される過程を、縦軸に形成される地層の厚さを取り、横軸に形成される時間をとって示した図。この図は、Shiriyayev ed. (1986) の p. 364 にある図をコピーしたものである。

地層が出来る過程を、このように議論したのは、Barrell (1917) が最初であろう。彼が記載している地層形成の過程は、もし、図化すれば、Kolmogorov (1951) のそれとよく似たものになるであろう。Barrell は、基礎科学について、かなりの知識があり、近代的な地質学について具体的に議論を展開しているが、しかし、数学者ではなかった。そのため、彼は、自分の概念的な考えを数学的に扱うことはできなかった。

第1図に戻って、時間の経過と形成される地層の厚さについて考えよう。すなわち、 t_0 から s_1 の間に、 g_1 までの地層（地層“1”と名付ける）が出来る。そして、次の s_1 から t_1 の間には、地層が削剥される。それに続く t_1 から s_2 の間には、 h_2 から g_2 の厚さの地層（地層“2”と名づける）が形成される。しかし、続く t_2 までの間には、地層は h_1 までけずられる。その結果として、 t_1 から s_2 の間に形成された地層（地層“2”）は無くなってしまふ。そして続く t_2 から s_3 の間に g_3 に達するまでの地層（その名前を地層“3”とする）が形成される。・・・こうして、 t_{n-1} と s_n の間に地層“n”が形成される。しかしその後の削剥のため残っている地層“n”の厚さは $g_n - h_n$ となる。

参考までに、ここで削剥とした語は、英語では、washout とされている。それは、現象的に堆積作用の実態を説明しているのではなく、強調されているのは、一旦形成された地層がそこで削られて無くなることを考慮に入れていることである。それを何度も繰り返してゆくと、地層の厚さには、プラスの厚さを持つ地層（例えば、地層“1”）もあるが、地層“2”のように、実際にはもう無くなってしまった地層がある。それは、つまり、マイナスの厚さをもつ地層と考えてもよいであろう。

第2図 地層の厚さを縦軸にとり、横軸に時間をとって、ある地質体について、その層厚の頻度分布を表すと、(a) もし、地層の厚さに関して、プラスの値だけを考慮して図示すると、実線の曲線 $f^*(x)$ となり、(b) もし、地層の厚さに関して、マイナスの値も考慮に入れて図示すると、点線の曲線 $f(x)$ のようになる。

以上の点がこの Kolmogorov が考えた地層形成のモデルである。それをさらに十分に理解するために、ここで、普通一般的に考えられている頻度分布 (distribution) ならびに、切断分布 (truncated distribution) との二つを考えることにしよう。それは、第2図に示されるように、実線ならびに、点線によって示される。数式では、前者（実線）は $f^*(x)$ と書かれ、後者（点線）は、 $f(x)$ と書かれる。念のために、 $f^*(x) = 0$ for $x < 0$ である。

第2図は、第1図と同様、Shiriyayev ed. (1986) の中で、Kolmogorov の原著 (1949: ロシア語) を英文化した解説の p. 368 に Fig. 2 として掲げられているものをコピーしたものである。

Kolmogorov の考えは、ここまでである。彼は、 $f(x)$ や $f^*(x)$ の形については何も言っていない。野外の観察をやっていない数学者には、それを語る資格はない。それが、おそらくガウスの誤差関数のような形をしているかもしれないという議論は可能であるが、しかし、そうだと断定はできない。実際に $f(x)$ や $f^*(x)$ の形を決めることができるのは、地層の厚さが、ある地質体で如何なる分布をしているかを測って、集めたデータを持っている野外地質の研究者だけである。

ただし、次の点は、とくに、注意する必要がある。それは、実際問題として、地層厚さの分布が如何なる形をしているかについては、誰も知らない。また、その母集団から、標本抽出を行い、実測値として、適切な小集団を観測値として得たとしても、それが、『適切』だと言えるような実例も知られていない。すなわち、層厚分布論は、目下のところ、まだ、標本抽出論の段階にあるのである。すでに、述べたように、中嶋 (2002) は、このことを、『層厚分布にどの統計則を当てはめるかは恣意性の入る余地がある』と表現している。

ここでは、議論をもっと具体的にして、まず、服部 勇

第3図 掛川層群の地層の厚さの分布を示した結果。この図は、Mizutani and Hattori (1972) の Fig. 7 at p. 136 をコピーしたものである。

によって集められた掛川層群の地層の厚さの分布(第3図)を例にして議論を進めることにしよう。彼が集めたデータは、明らかに、切断分布をしているように見える。この分布(自然が示した層厚分布の実例)を参考にして、以下、議論を進める。

この図から、これがいわゆるガウスの誤差曲線の一部に似ていると考える。何に似ているかという想定も、かなりの任意性があるが、私たちは、 $f(x)$ を誤差関数と考え、その、誤差関数の平均値 μ とその分散 σ を推定した。すなわち、次の二つの値、 p と q とを計算することができた。

誤差関数の形：

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

また、 p と q とは：

$$p = \int_0^{\infty} f(x) dx$$

$$q = \int_0^{\infty} x f(x) dx / \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

これらは第3図について、 $\mu=5.31$ 、および、 $\sigma=6.33$ 、となり、次いで、 p と q は、 $p=0.79$ 、 $q=0.80$ となる。

この p の値は、試行回数の割合を表している。つまり、 $p=0.79$ という値は、全体で 100 回の堆積作用があった時、79 回は堆積物が地層として残ったが、21 回は、一度、堆積した地層が剝削されて無くなってしまったことを示している。また、 $q=0.80$ という数値は、堆積した堆積物の全量のうち、80% が地層として残り、20% は剝削されて、除去されてしまったことを示している。

こうして、数値的に処理した結果は、或る地域の地質体の堆積作用について、それがどの程度、“蓄積的”であったか、あるいは、逆に“剝削的”であったかの手がかりになる。

再度、注意しておくが、上述の μ 、 σ 、 p 、 q は、実際の野外の観察の結果に基づき、さらに、その分布関数がガウスの誤差曲線に似ると仮定して、計算されたものである点を忘れてはならない。考え方の基礎になっているのは、Kolmogorov が示唆した『マイナスの厚さをもつ地層の存在』にある。

以上の実例に示したように、重要なのは、野外で如何なる地質体について、如何なるデータが集められているかによって、それがより蓄積的か、あるいは、剝削的かの議論ができる。言うまでもなく、具体的な検討には、面倒な計算をしなければならない。当時、我々は、京都大学の大型電子計算機 Facom 230-60 を使用することができて、その力を借りて、計算結果を得た。しかし、それよりも忘れてならないことは、具体的な野外の測定値があったことであつた。私自身の例で言えば、美濃帯の砂岩泥岩互層(つまり、タービダイト)についての測定値があった。その実測値に基づいて、いわゆる「地向斜堆積相」あるいは、「変動帯の堆積相」における特徴を議論することができたのであつた。

総まとめとして、Mizutani and Hattori (1972) は、いくつかの代表的な地質体について、その堆積作用の特徴を、上述の指標にしたがって、区分し、また、特徴づけた。そして、実際に経験的に理解されている堆積作用との関係を論じたのであつた。

堆積作用の特徴

偉大な大数学者 Kolmogorov のモデルは、我々に、地層の厚さを考えるときに、プラスの厚さをもつものとマイナスの厚さをもつものがあることを示唆した。さらに、それに基づいて、ある地質体に存在する堆積層(地層群)の層厚の分布を議論しなおしてみようことを教えてくれた。

私は、かつて、美濃帯を対象を絞って、研究していたころ、日本地質学会のほとんどの人が、石灰岩のある地域において、しかも、紡錘虫の研究だけをしていたことに、大きな違和感を持っていた。美濃帯には、石灰岩はもちろん出るが、しかし、大半は、砂岩やチャートが分布するところが多い。それらに手をつけずにいるのは間違っていると感じていた。そして、そのような地域では、何を研究するかについて考えていた。そして、まだ、何も知らない頃から、ただただ、そこに産出している砂岩泥岩互層(タービダイト、当時はまだこの言葉もなかった)の厚さを測っていた。その結果を Mizutani and Hattori (1972) に紹介し、検討の対象とした。

その研究は、層厚を丹念に測定しておけば、計算によって、その堆積学的特徴を、このモデルに基づいて、検討できることを示した実例であつた。私たちは、その実例を、

第4図 層厚分布から、かなり「蓄積的」と想定できる頻度分布曲線の例。

第5図 層厚分布から、かなり「削剥的」と想定される頻度分布曲線の例。

自分たちのデータばかりでなく、他のタービダイト・氷綽粘土などさまざまな堆積物について Atkinson (1962), Bouma (1962), Potter and Siever (1955), Kelling (1969) 等のデータを整理し、総括しておいた (Mizutani and Hattori, 1972, Table 4 at p. 138-140). これらを相互に比較してみると、組上に載せた堆積物の特徴を, “alluvial or fluvial deposits”, “near-shore sediments”, “geosynclinal sediments” および, “varves” に大きく区分できると思われた。

私は、これらの結果、さらに、その後に書いた論文 (水谷, 2000) など、何度も、議論しているうちに、いわゆる「層厚解析」についての概略の把握ができると、感ずるようになった。

例えて言う、慣れてしまえば、肉眼で眺めただけで、砂岩が graywacke であるか、それとも、別のタイプの砂岩であるかは、分かるようなものだと思う。

すなわち、地層を (たった数枚では、駄目だが) 眺めたとき、その厚さがほとんど一定で、しかも、多数が集まっている場合には、それはおそらく、切断分布によって示すと、厚さ=0の縦軸から右によったところに大きな極大値をもつようなものと理解できるであろう。すなわち、それは、非常に「蓄積的」な堆積作用であったと考えられるのである (第4図)。

逆に、もし、かなり横にひろがり、また、頻度が低い分布

第6図 岡山県蒜山原層の層厚分布曲線 (この図は、想定されたものである)。

を示す場合 (第5図)、マイナスの厚さも考慮に入れると、厚さがマイナスの領域にもかなり広くひろがるような、換言すれば、かなり「削剥的」な堆積環境であったと考えられることがわかる。

上述の例のように、層厚分布曲線を頭に描くことができ、さらに、それから、その地質体が他と比べて、より「蓄積的」であったか、あるいは、より「削剥的」であったかを判断し、区別することができるようになったら、野外調査も、さらに面白くなるであろう。

私は、今回、「堆積学研究」の最新号に掲げられた岡山県の蒜山の湖成層の露頭写真を見て、私は、この蒜山原層の“地層群”は、薄い色の薄層からなる部分と、濃い色のやや厚い層からなる部分の2種類の“地層群”からなると直観的に分けられると見た。

この写真だけから判断しても、今、層厚分布を描けば、その層厚頻度分布曲線は、第6図のように、双峰性 (bimodality) がある。そのうち、向かって左にある頻度の高い山は薄い色で薄層からなる“地層群” (地層群“A”と名付ける) と向かって右にあるやや頻度の低い山の、すなわち、濃い色で厚い層からなる“地層群” (地層群“B”と名付ける) からなる。

これまで、述べてきたように、この図から、我々は、2種類の異なった堆積環境における堆積作用があったと推定することができるであろう。その時、第6図から、さらに、それぞれについて、切断分布曲線を描いて、地層群“A”と地層群“B”の特徴を、すでに述べた Kolmogorov のモデルを使って、堆積環境を推定することが出来るであろう。私達はすでに経験によって、地層群“A”は湖成層の特徴をもつものと考えられる。しかし、今のところ、地層群“B”が

如何なる性質のものかは、分かっていない。おそらく、蒜山原層は、これら二つの地層群からなるというのが特徴なのであろう。しかし、一方では、このうちの片方、層群“B”が他の地域の異なった環境の堆積作用を特徴づけるものと判明したら、結論的に蒜山原層の堆積環境をさらに具体的に想定することができる。その時、我々は、この問題は、もう数学者の手を離れたものと考えてよいであろう。そして、そこは、我々が最も得意な「堆積環境の変化」の知識を基に、議論と推論を戦わせることになるであろう。そこには新しい問題があり、期待も大きい。

おわりに

私たちの仕事 (Mizutani and Hattori, 1972) は、その原稿を投稿した段階で、編集責任者は、原稿を、念のために、Kolmogorov に送って、彼の感想を訊ねている。その結果を、Vistelius は、個人的に、私に知らせてくれた。それによると、Kolmogorov はとても忙しくて、われわれの原稿を細かく検討する時間はないが、おおよそ、この内容で問題はなかろう、というものであった。私は、その結果を知って、とても嬉しく感じた。とにかく、何とか、Kolmogorov (1951) を読んで、理解できたことに大きな満足を感じたのであった。

我々の仕事については、次のような最近の情報がある。大数学者 Kolmogorov の業績については、世界中から、注目が集まっている。そのため、彼の弟子 (おそらく、愛弟子) である Shiriyayev, A.N. が編者になって、いわゆる Collected Papers (Shiriyayev, 1986) が編纂された。そして、それが、英訳されて出版されている。その中に、もちろん、彼らの先生、Kolmogorov が書いた原著が掲載されている。また、その彼の書いた論文に関して、世界から如何なる反応があったかも、紹介されている。とくに、地質学に関する問題については、彼らソ連の数理地質学者の仲間である Vistelius (1986) が解説を書いている。そして、上記の層厚分布の議論に関して、私たちの論文 (Mizutani and Hattori, 1972) を紹介している。

私は、Vistelius と個人的に会ったことがある。当時、信州大学の黒田吉益先生 (当時：学術会議会員) に招かれて、訪日した時、名古屋へ行きたいと彼が語ったからであった。私は、彼を彼の希望のところ (花崗岩地帯) へ案内した。また、当然、数理地質学についても、議論した。彼は、Chicago から出ていた Journal of Geology の編集委員の一人として、数理地質学部門の編集業務に当たっていた。だから、当時、流行を始めていたこの分野の研究者たちには詳しく、彼らについて人物月旦をやってくれた。それは、とても良い勉強になった。

帰途、お土産にと、彼の同僚と子どもとに、赤のボールペンと色鉛筆が欲しいというので、丸善へ連れていったら、彼は、何と、それぞれ 1 本か 2 本を選んで買うという。あまりの貧しさに私は驚いた。私は、彼の目の前にあったボールペンを一つ掴み (十数本) と色鉛筆の 24 色の 1 セットと買って、私が支払って、彼に与えた。私は、ソ連という国が実際には、かなり、貧しいことを実感として知った。しかしながら、そのような環境においても、世界一流の数学者が野外調査をやっている地質学者と共同研究をしているというその学術的な研究環境に、舌を巻いて驚いたのであった。そして、彼らがアメリカと競争して、宇宙開発に乗り出していったその実力を推し量ることもできたような気がした。

謝辞：この報告に関係した研究には、多くの人にお世話になった。まず、私が大学院修士課程へ進み、独りで Kolmogorov (1951) の論文を読んだ時、大学の同級生で、数学科へ進んだ当時の名古屋市立大学梅田助教授には、私の最初の草稿を読んでいただいて、いろいろ有益な助言をいただいた。

その後、数学科の櫃田倍之先生には、Prof. Kolmogorov との交流について生々しい体験を伺い、とても啓発された。櫃田先生は、Prof. Kolmogorov のゼミに参加されていて、そのことについても話を聞いた。

さらに、共同研究者として、一緒に、Kolmogorov の論文を再読し、自分たちの論文を書いた服部 勇 (福井大学名誉教授) には、今回のこの草稿に関しても、いくつかの助言をいただいた。服部 勇氏は、数学的な厳密さを尊び、その視点から、私の雑な考えに対して、鋭い批判を与えてくれた。しかし、私自身は、数学者の立場と地質学者の立場を、峻別して、議論すべきであるとの視点に立ってこの草稿をまとめた。本来、これは、私と彼との連名で書き上げるべき作品であるが、彼の希望も考えて、私の単名で書かせていただいた。もちろん、内容についての全責任は、私にある。

私達の作品を、Vistelius, A.B. は、Prof. Kolmogorov に紹介し、その仲介の労をとってくれた。さらに、彼は、後になって、日本にやってきて私と一緒にフィールドへも出かけた。そして、1953 年 4 月 6 日、名古屋大学地球科学教室で特別講演をしてくれた。もちろん、Vistelius, A.B. にはその後も、お世話になっている。

彼が来日したとき、学術会議会員として、彼の世話をされた信州大学の黒田吉益教授にも、私は、感謝している。その頃、黒田吉益教授は、数理地質学に強い関心をもっておられ、とくに、マルコフ過程モデルの地質学、とくに、岩石学への応用について、検討されていた。

さらに、その後、私が名古屋大学を定年退官し、日本福祉大学情報社会科学部へ移ったところにまとめた報告(水谷, 2000)については、岡田博有先生に草稿を読んでいただいた。

なお、本論の手稿を丁寧に読んでいただき、投稿について適切な助言をいただいた信州大学理学部の保柳康一先生、ならびに、覆面査読者の某氏には、あらためて、心から感謝する。彼らの助言によって、私の筆がいに軽くなったか、その有りがたさを表す言葉がない。彼らの存在は、この学会にとっては、実に貴重だと痛感した。

以上、列記したように、私の考えは、これら国内外の研究者の多くの方々に議論をしていただいた。これらの人々には、いつも、深い感謝の気持ちをもっている。最後に、これらの方々の名をここに記し、謝辞とする。

文 献

- Atkinson, D.J., 1962, Tectonic control of sedimentation and the interpretation of sediment alternation in the Tertiary of Prince Charles Foreland, Spitzbergen. *Geol. Soc. America, Bull.*, **73** (3) 343-364.
- Barrell, J., 1917, Rhythms and the measurements of geologic time. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **28**, 745-904.
- Bokman, J., 1957, Suggested use of bed-thickness measurements in stratigraphic descriptions. *Jour. Sediment. Petrol.*, **57**, 333-335.
- Bouma, A.H., 1962, Sedimentology of some flysch deposits; a graphic approach to facies interpretations, Elsevier Publ. Co., Amsterdam, 168 pp.
- Ishihara, Y. and Sasaki, H., 2015, Lacustrine varved diatomite and deformation structures in the Middle Pleistocene Hiruzenbara Formation, *Jour. Sediment. Soc. Japan*, **74** (2), 112.
- Drummond, C.N., 1999, Bed-thickness structure of multisourced ramp turbidite: Devonian Brallier Formation, central Appalachian basin. *Jour. Sediment. Res.*, **69**, 115-121.
- Kelling, G., 1969, The environmental significance of cross stratification parameters in an Upper Carboniferous fluvial basin. *Jour. Sediment. Petrol.*, **39** (3), 857-875.
- Kolmogorov, A.N., 1949, Solution of a probabilistic problem relating to the mechanism of bed formation. Shiriyayev. ed. 1986. pp. 364-368. (the Russian paper was published in *Dokl. Akad. Nauk, SSSR*, **65** (6), 1949, 793-796)
- Kolmogorov, A.N., 1951, Solution of a problem in probability theory connected with the problem of the mechanism of stratification. *Am. Math. Soc. Trans.*, no. **53**, 171-177.
- Mizutani, S. and Hattori, I., 1972, Stochastic analysis of bed-thickness distribution of sediments. *Mathematical Geology*, **4** (2), 123-146.
- 水谷伸治郎, 2000, 確率過程モデルに基づく堆積環境の解析について, *日本福祉大学情報社会科学論集*, **3**, 1-20.
- 水谷伸治郎, 服部 勇, 1973, タービダイトおよびそれに関連する砂泥互層の層厚解析, *海洋科学*, **5**, 23-28.
- Muto, T., 1995, The Kolmogorov model of bed-thickness distribution: An assessment based on numerical simulation and field-data analysis. *Terra Nova*, **7**, 417-423.
- 中嶋 健, 2002, タービダイト層厚分布の統計学的解析, —その貯留岩キャラクター化への応用の可能性—, *石油技術協会誌*, **67** (3), 308-320.
- Pantopoulos, G., Vakalas, I., Maravelis, A. and Zelilidis, A., 2013, Statistical analysis of turbidite bed thickness patterns from the Alpine fold and thrust belt of western and southwestern Greece. *Sedimentary Geology*, **294**, 37-57.
- Pettijohn, F.J., 1943, Archean sedimentation. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **54**, 925-972.
- Pettijohn, F.J., 1949, *Sedimentary Rocks*, Harper & Brothers, N.Y. 526 pp.
- Potter, P.E. and Siever, R., 1955, A comparative study of Upper Chester and Lower Pennsylvanian stratigraphic variability. *Jour. Geol.*, **63** (5), 429-451.
- Shiryayev, A.N., ed. 1986, *Selected Works of A.N. Kolmogorov. Vol. II: Probability Theory and Mathematical Statistics*. Kluwer Academic Publishers, Mathematics and Its Applications (Soviet Series), Vol. 26, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA. 597 pp.
- Simonen, A., 1953, Stratigraphy and sedimentation of the Svecofenidic, early Archaean supracrustal rocks in southwestern Finland. *Bull. Comm. geol. Finlande*, no. **160**, 1-64.
- Simonen, A. and Kouvo, O. 1951, Archean varved schists north of Tampere in Finland. *Bull. Comm. geol. Finlande*, no. **154**, 93-114.
- Straub, K.M., Ganti, V., Paola, C. and Fofoula-Georgiou, E., 2012, Prevalence of exponential bed thickness distributions in the stratigraphic record: Experiments and theory. *Journal of Geophysical Research*, **117**, 2011-2029.
- Vistelius, A.B., 1949, On the question of the mechanism of the formation of strata. *Doklady Akadmy Nauk CCCP*, vol. **65**, 191-194.
- Vistelius, A.B., 1986, On inter-bed washout (no. 37) in Shiriyayev, A.N. ed. 1986, *Selected Works of A.N. Komogorov, Vol. II: Probability Theory and Mathematical Statistics*, Kluwer, Academic Publishers, pp. 591-597.