

放射虫層状チャートを形成した底層流の速度を推定するための実験的考察

道前香緒里*・石賀 裕明*

Flume experimental study for estimation of bottom current velocity of radiolarian bedded cherts

Kaori Douzen and Hiroaki Ishiga

Abstract

Biostratinomy of macrofossils such as conical shaped moluscus, bivalves and ammonites has been studied minutely in shallow marine environments. On the other hand microfossils have been hardly studied as much. Conical or elongate shaped microfossils for example, radiolarians and spongy spicules are important components of siliceous rocks, which are regarded to have deposited under CCD. Orientation of these fossils and their relation to current velocity are one of the interesting object for understanding pelagic environments. On behalf of conical radiolarian shells Early Jurassic *Parahsuum* spp. are adopted in a flume experiment to clarify relationship between their arrangement and current velocity.

The result compiled in rose-diagramme indicates correlation between radiolarian shell arrangement and current velocity. 1) When current velocity is fast ($Re=1121$, where Re is Reynolds number), concentration rate of shell apex directed upstream is clearly observed. This position could be hydrodynamically stable in the current for conical shaped radiolarians. 2) When current velocity is under $Re=971$, shell arrangement vertical to the current occupied higher rate. But in less current velocity, concentration of this style is gradually diversified to increase ratios of radiolarians arranged perpendicular to the current, which were previously facing to upstream. 3) As for relation between rate of shell apex facing to downstream and current velocity, this correlation can not be accorded in the case of current velocity exceeding over $Re=1121$ and under $Re=336$. The slower current velocity is, the higher rate of shell apex directed downstream is. These lines of observation will help us to interpret paleoenvironmental condition and current deduced from field data.

When current velocity excesses over $Re=971$ in the flume, ripple marks appear. This limits possible range of current velocity of bedded cherts under $Re=971$, for pelagic bedded cherts have not hitherto produced ripple marks.

Key words : conical radiolarians, biostratinomy, paleocurrent, bedded cherts, bottom current velocity

はじめに

西南日本内帯の中・古生界に広くみられる層状チャートは、放射虫化石を多産し、これらが水流の影響を受けて堆積したと考えられている (Imoto, 1983; 道前・石賀, 1993印刷中)。一般に層状チャートの堆積場は CCD 以下であり、このような深海底では底層流が恒常的に流

れている (サイボルトほか, 1986)。底層流の流速は、現在の大洋底 (大西洋) でおよそ $15\text{m}^3/\text{S}$ であり (Crowley and North, 1991), 地形や海洋環境などによって変化する。

ところで、中生代トリアス紀からジュラ紀の層状チャートについては極めて詳細な放射虫生層序が確立され (Yao, 1990 参照), 層状チャートの堆積速度や堆積環境についての議論が進んでいる (堀・趙, 1991)。とくに、ジュラ紀古世 Toarcian には世界的な海進にとまな

* 島根大学理学部地質学教室 〒690 松江市西川津町1060

う OAE (海洋無酸素事変) があったとされ (Jenkyns, 1988; 堀, 1993), この事変を挟む遠洋性堆積物の堆積環境の変遷を検討することは重要である。

筆者らは美濃帯犬山地域の勝山セクションにおいて円錐形放散虫化石 (主に *Parahsuum* spp.) の配列をもとに, Toarcian における層状チャート堆積時の海洋変化を検討している (道前・石賀, 1993). 結果は, Toarcian の黒色チャートはこれを挟む上下の赤色チャートに比べ放散虫の配列が認められず, この時期に停滞した海洋環境が発生した可能性があるとした。

化石の配列パターンと流速の相関を明らかにすることは, 層状チャートの堆積機構や当時の海洋環境を推定するうえで大きな手掛かりになる。そこで, 水中での円錐形放散虫殻の挙動および配列様式が流速によってどう変化するかを調べるため, 水路において実験を行なった。その結果の一部を報告する。

実験方法

アクリル板で作った幅 3 cm 深さ 3 cm 長さ 125 cm の水路に水を流し (水中ポンプによって水を循環させ流速を一定に保つ), そこに水とともに放散虫殻をスポイトで静かに滴下した (第 1 図)。水深はおおむね 1.5 cm 程度であった。実験は室温にて真水を用い, ここで供した堆積物は犬山地域 (Yao *et al.*, 1992, Stop 1-3 の下位の Toarcian 層準) の緑色チャートを HF 処理して得られた残査を用いた。

水路底面のアクリル板の直上に放散虫殻が運搬されてくると, 円錐形放散虫殻は上流の方向に頭部に向けて止まる。しかし堆積物が増え底質が放散虫殻で覆われるようになると, 下流側に頭部を向けるものや, 流れに対し

垂直に止まるものが増す。水路底面が見えなくなるくらい堆積物が定置したところを双眼実態顕微鏡で観察し, 円錐形放散虫殻が頭部を向ける方向を計測し, ローズダイアグラムにプロットした (第 2 図)。流速を $Re=164$ から $Re=1121$ まで 10 段階に変化させ, 16 資料について計測値がおおむね 150 になるまで測定した。ここでは流れの粘性をレイノルズ数を用いて示す。 $Re=Vh_d/\nu$ (V : 平均流速 (流量/断面積), h_d : 径深, ν : 動粘性係数, $\nu: 1.0038 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 水温 20°C)。測定に供した放散虫殻は, *Parahsuum* spp. を主とする群集である。平均的な大きさは, 長さ (L) $200 \mu\text{m}$, 幅 (W) $90 \mu\text{m}$, W/L は 0.45 である。形態は軸対称で, 殻内部には充填物はほとんどみられない。

結 果

流速とローズダイアグラムにみられるピークの形状の関係について以下にまとめる。水路での観察結果の概要とローズダイアグラムのタイプについてははじめに簡単に整理し, 次項の議論の助けとする。

$Re=1121$ のように相対的に流れの速いものは, 滴下した放散虫殻の半分以上が水路の末端まで運ばれ定置せず流れ去ってしまい, トラフ型のリップルマークが形成された。配列パターンは上流方向に頭部を向けるものが多く, ローズダイアグラムでは, 上流に向く大きなピーク (15%) と下流に向くやや小さなピーク (13%) があり, 垂直方向のピークは認められない (exp. 3)。 $Re=971$ では, 下流に向くピークが小さくなり (8%), 流れに対して垂直方向にピーク (13%, 14%) が認められる (exp. 15)。 $Re=971$ から $Re=598$ の条件下でもこのような傾向が見られるが, リップルマークは形成され

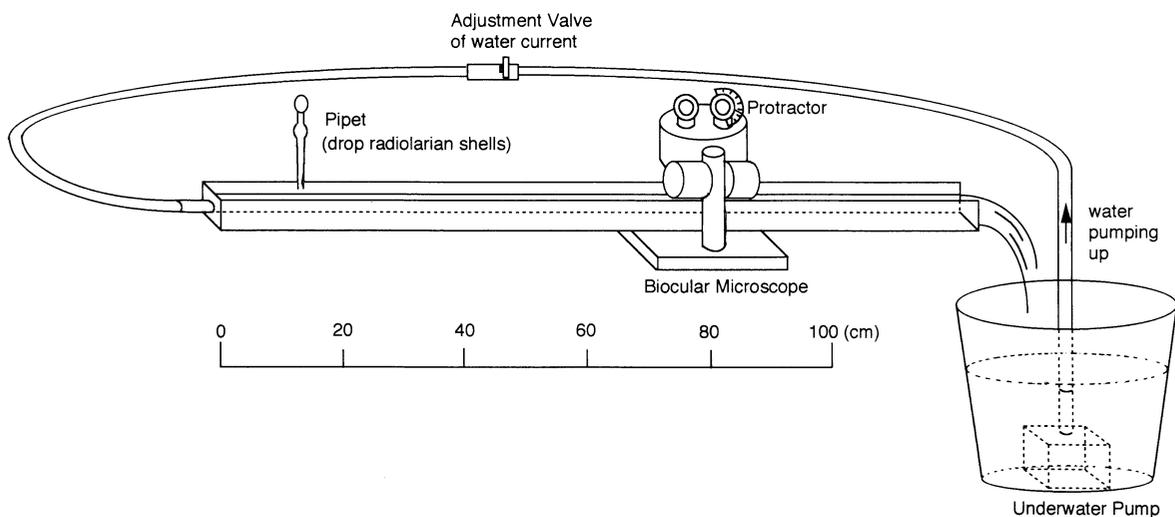


Fig. 1 Flume experimental equipment for examination of relationship of radiolarian arrangement and current velocity.

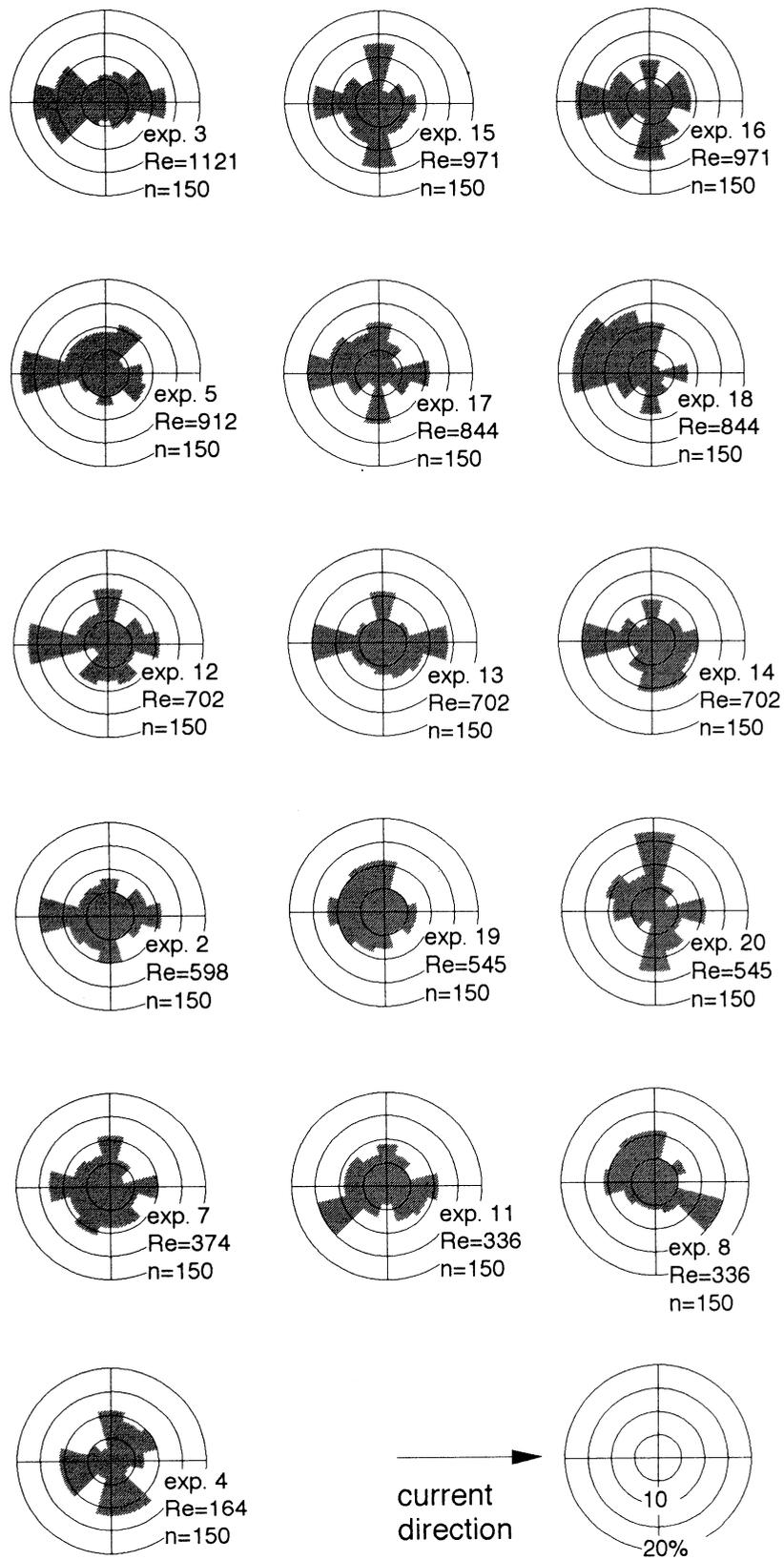


Fig. 2 Rose-diagrammes indicate orientation of conical radiolarian shell apex in varied Reynolds number.

ない。この時は滴下位置から60cm~70cm程度の下流域まで放散虫殻はよく集中して沈積する。Re=545では、次のような2種類の配列パターンが区分された。1つは、上流方向から垂直方向までの範囲にかけて(ローズダイアグラムの左半分の領域)の広い範囲に分散し(10%前後)、反対側に(下流に向けて)小さなピーク(7%)がみられるパターンである(exp. 19)。もう1つは、上流に向くピークが縮小し(9%)、流れに垂直方向にほぼ対称な大きなピーク(17%, 13%)をもつパターンである(exp. 20)。Re=374では分散が強いものの、上流とこれにほぼ垂直方向、そして下流側に頭部を向ける円錐形放散虫殻がみられる。ローズダイアグラムではこれら4方向に弱いピーク(13%~10%)がみられ、その他は種々の方向に配列している(exp. 7)。Re=336では放散虫殻はほとんど運搬されず、滴下位置から下流に10cmの範囲にのみ堆積物は沈積する。このとき水深は約1cmであった。Re=336における2回の実験結果からは流れの方向とは無関係なピークをもったローズダイアグラムが得られた(exp. 11, exp. 8)。Re=164のときは放散虫殻は流れによってほとんど運搬されず、スポイトから滴下すると、そのまま水路の底に沈積した。しかし、ローズダイアグラムからは上流側とこれに垂直な2方向に広いピークをもつことがわかる(exp. 4)。

考 察

A. 水中での放散虫殻の挙動

水路実験で観察される放散虫殻の挙動についてまとめる。円錐形放散虫殻は、相対的に流れが速い場合には(Re=1121)運搬される距離も長く(120cm以上)、停止するとき上流に頭部を向けて一番水の抵抗の少ない姿勢をとる。やや速度が低下してくると(Re=971)、一番安定な上流方向とともに流れに垂直な方向を向く。円錐形放散虫殻は重心が開口部付近にあり、相対的に流れが遅い場合には、開口部を下に頂部を上に向けた状態で沈降し、水路底面に到達する。そしてほとんど運搬されず、ゆるやかな流れによって頂部が下流側に倒される確率が高くなる。

B. 放散虫殻の頭部が上流に向く割合と流速の関係

上述の観察をもとにすれば、円錐形放散虫殻が水中で抵抗が少なくなるのは頭部を上流に向ける場合であるといえる。そこで、レイノルズ数(Re)を横軸にとり、円錐形放散虫殻が定置するとき頭部が上流方向に向く割合(集中度)を縦軸に分散図表を作成した(第3図)。実線は回帰直線である。相関係数は0.74であるので、かなり相関があるといえる。このグラフは放散虫殻の配列の集

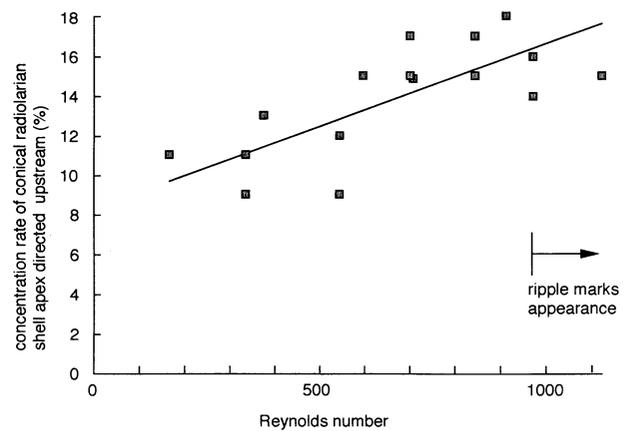


Fig. 3 Scatter diagram indicates relationship between concentration rate of shell apex directed upstream and Reynolds number. Solid line is regression line.

中度が約10%から18%の間で変化し、Reの値が大きくなるほど頭部が上流に向く割合が高くなることを示している。

Re=971以上のとき底質にはリップルマークが形成されはじめた。実際には層状チャートにリップルマークがともなう例は報告されていない。従ってこのことは、底層流がRe=971以下の場合に放散虫殻が堆積盆に定置し、層状チャートが形成される可能性を示唆する。

C. 水流の上流方向、垂直方向に配列する放散虫殻と流速の関係

上述の考察から、相対的に流れが遅くなると放散虫殻が上流に向く割合が減少するといえる。このとき放散虫殻は流れに垂直方向に転動をはじめると考えられる。従って、分散をはじめ放散虫殻がどの向きに配列するかを検討するために、流速と垂直方向に配列する放散虫殻の割合について検討する。

円錐形放散虫殻が定置するとき、頭部が上流方向に向く割合と流れに垂直に配列する割合に対する流速の関係をグラフに示した(第4図)。ここに示す $V/(U+V)$ (V:流れに垂直に配列する割合, U:上流方向に頭部を向けて配列する割合)はこのような考えの妥当性を検証するために試みに求めた割合である。Reを横軸に、 $V/(U+V)$ を縦軸にとり、値をプロットした。このグラフは両者に負の相関があることを示すと同時に、度数の分布範囲が、ある直線で画された領域の上部に存在することを示す。このことから、円錐形放散虫殻はReが大きいときには頭部を上流に向けており、Reが小さくなると、上流に向いている放散虫殻が今度は流れに垂直方向に配列するようになると仮定できそうである。流れに対して垂直方向に配列する放散虫殻の割合と相対的な

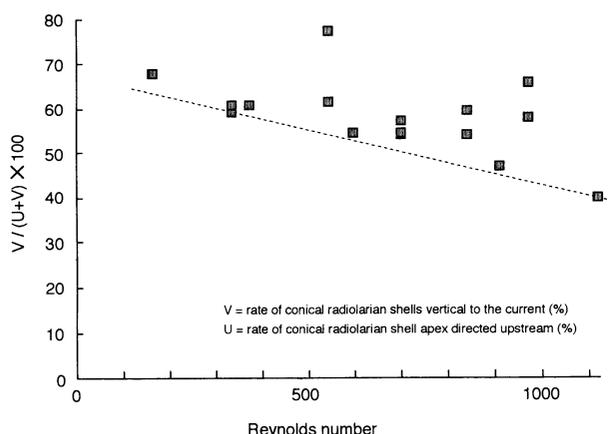


Fig. 4 Scatter diagram indicates relationship between $V/(U + V)$ and Reynolds number.

流れの速さの間に、この直線に示されるような相関があるとすれば、流速を推定する重要なパラメーターとなりうる。

D. 放射虫殻が上流方向、下流方向に向く割合と流速の関係

今度は流れに対して最も定置しにくいと思われる、頭部を下流に向ける場合について考察する。開口部を上流に向けると、流水の抵抗を受けてすぐに方向を変えらると思われる。しかし実際には、ローズダイアグラム上で相対的な流れの速さにかかわらずほとんどの場合に頭部を下流に向けるものが存在する。そこで、 $D/(U + D)$ (D：下流方向に頂部を向けて配列する場合、U：上流方向に頂部を向けて配列する割合)をパラメーターとして Re との関係性を求めた(第5図)。

$Re = 1121$ では、流れに対して垂直方向に向くものがほとんどなく、それがローズダイアグラムでは上流方向の広いピークと下流方向のやや細いピークの両極に分散しており、下流を向く割合が異常に高い (exp. 3)。

$Re = 971$ から $Re = 374$ の場合には、下流に頭部を向けるものの割合は7%~14%存在する。 $Re = 336$ では、水流の影響よりもピペットから滴下するときの影響を強く受けてしまったので、水流とは無関係な方向にピークがみられる (exp. 11, exp. 8)。 $Re = 164$ では、上流方向とそれにほぼ垂直な方向に分散され、下流を向くものの割合は低い。

グラフにおいて、 Re と $D/(U + D)$ には負の相関があるように見える。しかし、上述の $Re = 1121$, $Re = 336$, $Re = 164$ の値はこの相関からは外れた領域に存在するようである。このような特殊な条件のもとでの下流に頭部を向けるものを除いて回帰直線を求めてみた。実際は回帰直線であり、相関係数は-0.73である。 Re が小

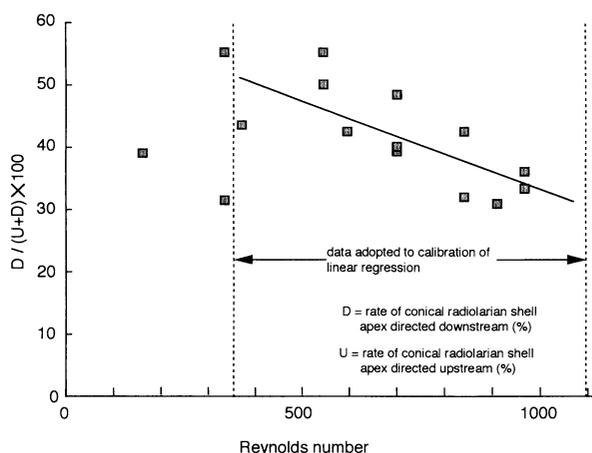


Fig. 5 Scatter diagram indicates relationship between $D/(U + D)$ and Reynolds number.

さくなるほど、上流方向に向くものに対する下流方向に向く円錐形放射虫殻の割合が増加する。これは考察A項に述べたように、相対的に流れが遅いときに放射虫殻が重心から沈下して、水流の抵抗によって頭部を下流に向けて倒れる確立が高くなることを示す。さらに $Re = 336$, $Re = 164$ のような流速の極端に遅い場合には、水の抵抗もなく放射虫殻が水路底面に到達したときに頂部が倒される方位が特定しないことを反映しているかもしれない。

謝 辞

本研究の水路実験については島根大学中山勝博先生にご助言をいただいた。京都教育大学井本信広先生には日頃から御討論、激励いただいている。また、本原稿投稿中に集中講義で来られた大阪大学増田富士雄先生には流速の表示についてご意見をいただいた。以上の方々に感謝します。

文 献

- Crowley, T. J. and North, G. R., 1991. *Paleoclimatology*. Oxford Monographs on Geology and Geophysics, 16, 339 pp.
- 道前香諸里・石賀裕明, 1993: 下部ジュラ系層状チャートに含まれる円錐形放射虫による古流向の推定と海洋無酸素事変. 日本地質学会第100年学術大会講演要旨, 750.
- 道前香諸里・石賀裕明, 1993印刷中: ジュラ紀古世層状チャートに記録される酸化還元環境の変遷とそこに含まれる円錐形放射虫殻の配列から推定される古流向変化. 第4回放散虫研究集會論文集, 大阪微化石研究会誌, 特別号, 第9号.
- 堀 利栄・趙 章熙, 1991: 層状チャートのリズムとそ

- の起源について. 月刊地球, 13, 543-551.
- 堀 利栄, 1993: 層状チャート中の Toarcian Oceanic Event. 日本地質学会第100年学術大会講演要旨, 76-77.
- Imoto, N., 1983. Sedimentary structure of Permian Triassic cherts in the Tamba district, Southwest Japan. *In* Iijima, A., Hein, J. R. and Siever, R. (eds.). *Siliceous Deposits in the Pacific Region*. Developments in Sedimentology, 36, 377-393.
- Jenkyns, H. C., 1988. The early Toarcian (Jurassic) anoxic event : stratigraphic, sedimentary and geochemical evidence. *American Jour. Sci.*, 288, 101-151.
- E. サイボルト・W. H. バーガー・新妻信明, 1986: 海洋地質学入門. シュプリンガー・フェアラーク東京. 296 pp.
- Yao, A., 1990. Triassic and Jurassic radiolarians. *In* Ichikawa, K., Mizutani, S., Hara, I., Hada, S. and Yao, A. (eds.), *Pre-Cretaceous Terranes of Japan*, IGCP Project, 224, 329-346.
- Yao, A., Adachi, M., Shibuya, H. and Setoguti, T., 1992. Triassic and Jurassic sequence of the Mino Terrane in Central Japan. *29th IGC Field Trip Guide Book Vol. 1*, Paleozoic and Mesozoic Terranes : Basement of the Japanese Island Arcs, Adachi, M. and Suzuki, K. (eds.), Nagoya University, B 14, 179-188.