

非定常的堆積現象研究の意義と方法 —海洋環境変化の問題とIGBPに関係して—

志 岐 常 正*

Significance and way of study of unsteady sedimentary phenomena
and their products, with special reference to the problems
of ocean environmental change and IGBP research

Tsunemasa SHIKI*

Transport process affecting marine environmental change is commonly unsteady. Role of the various unsteady transportation mechanisms is elucidated only by repeated observation at fixed stations and systematic analytical study of the cored sediments. Procedure of the study of the core should be 1) check of sedimentary structure, 2) pickup of sample materials from the each structural divisions, 3) high resolution age determination, 3') fractionation based on particle sizes by means of sieving and decantation, 4) Chemical analysis of the each fractionated materials.

はじめに

地球環境の危機が誰も否定できないほど顕在化するにいたり、科学の各分野の対応が問われている。1986年9月、国際学術連合会議(ICSU)は、ベルンにおける総会で、地球圏—生物圏国際共同研究計画: 地球環境変化の研究(IGBP)の創設を決定した。この研究計画は、ICSUがこれまでに実施した研究の中で、もっとも野心的で、もっとも広範なものであり、人類の未来の理解に影響を与える点でもっとも重要なものとなるとされている(ICSU, 1988MS)。

しかし、この計画の実施にあたっては、主に実効といった観点から、当面は以下の4つのパネルだけが取り上げられることとなった。

- * 陸上生物—大気化学相互作用
- * 海洋生物—大気相互作用
- * 陸水循環と生物圏
- * 陸上生態系への気候変化の影響

つまり、関係する各分野のテーマのうち数10年から

数100年の時間スケールで生物圏に影響を与え、人類活動の影響を受けやすく、実際に予測可能であるような問題だけを扱うことにし、このスケールではあまり役に立ちそうにない研究は、重視しないというわけである。日本における学術会議のIGBP計画では「古環境の復元」が含まれるようではあるが、全体としてはICSUのものと同じ観点が貫かれると思われる。この状況をみるかぎり、堆積学、とくに、地質学的堆積学のIGBPにたいする貢献は、今のところ、ほとんど期待されていないように見える。

しかし、われわれ堆積学研究者の立場から考えれば、堆積学こそは、環境問題を解決するための基礎としてもっとも重要な分野の一つといえる。以下に、われわれの多くにとって関係の深い学術会議のIGBP研究領域(2)「海洋における物質循環と生物生産」(海洋学研究連絡委員会, 1989MS)、地質学研究連絡委員会堆積学小委員会から同会議に提出されている「物質循環過程の堆積学的総合研究」(堆積学小委員会, 1989MS)にふれつつ、おもに碎屑性堆積物に関する事項にしばってこの問題を検討しよう。

なお、古環境の復元に関する堆積学の役割については、堆積学研究会員にとって自明であり、ここでは論

*京都大学理学部地質学鉱物学教室. Department of Geology and Mineralogy, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto 606, Japan

しない。

堆積学的現象としての物質交換とその非定常性

堆積学小委員会 (1989MS) も指摘しているように、地球環境の変化は、地球表層における物質交換によって行われる。そのうちとくに水圏と気圏と岩石圏 (固態地球) との物質交換は、多くの生物の活動とも相互に関係しつつ、それらの生存や生活環境に直接影響を与える。このような物質交換は運搬、堆積、固着、再移動の過程を通じて行われる。言いかえればそれは堆積学的現象であり、地球環境変化の解明のためには堆積学的研究が一つのかねめと見なされなければならない。

近年、湖沼における環境問題が深刻化するにつれ、水質、底質の相互作用に関連して、湖底堆積物の再移動過程が重要な研究課題となっている。たとえば、滋賀県琵琶湖研究所においては、底泥の風波によるまきあげと再沈降が栄養塩類の湖水への回帰におよぼす影響や、湖岸から湖心への各種物質の輸送量の評価に関する研究がすすめられている (琵琶湖研究所, 1987a, b)。同様の問題が海洋についても存在することは、いうまでもない。

ところで、たとえば流水や静水中の物質は、溶存状態での他、構成粒子の粒度と粒度組成に応じて懸濁、跳動、転動、各種集合運搬などにより移動する。環境に影響を与える各種有機物質や重金属は、水中のイオンとしてだけでなく、あるいは粘土に吸着または収着され、また、砂、れき、などの鉱物粒、岩石粒、生物遺骸などの構成要素としても存在する。有機物質や重金属の運搬機構、あるいは堆積後の挙動、その他あらゆること、どのような粒度の粒子中に、どのような状態で存在するかにより異なる。したがって、ある底泥試料をとって粒度により分画しそれぞれのクラス毎に分析すれば、化学組成は粒度によって異なりうる。

このような例を先駆的に示した、YASUMATSU (1973 MS) の宍道湖堆積物の研究によれば、たとえば、斐伊川河口底泥中Moの含有量は、湖心部に比べてむしろ低く、宍道湖底泥中のMoが中海を通して日本海から供給されていることを思わせるが、砂やシルトを除いた細粒の分画試料中のMo濃度は河口で異常に高い。他方たとえばCrは、砂粒としてごく岸近くの山地から供給されていることが明らかにされた。

この例にも示されたとおり、具体的存在状態を無視した化学分析は、単に得られる情報が少ないだけでなく、物質移動量評価の基礎を得るための手法としては

ナンセンスに近い。

“存在状態”というとき必ず着目せねばならぬことがもう一点ある。上記運搬機構のどれが優越するか、いいかえれば運搬過程は、時空的に異なる。その結果形成される堆積物には、大小のサイズ (あるいはオーダー) の堆積構造ができる。これを記録として読むことは、各種運搬機構、運搬過程の変化を知り、それらによる運搬量とその変化を評価するために有効であるだけでなく、必須であり、前記のような堆積物試料分析の大前提である。この点は、地質学出身の研究者にとってはあまりにも当然かつルーチンワークに属することであるが、以前の日本の地球化学的研究の中には、層序や堆積構造の認定も堆積機構の想定も欠いたまま底質の分析を行ったものが少なくない。しかし、近年この点の認識が進み、IGBP研究領域(2)においても留意されるに至ったことは幸いである (海洋学研究連絡委員会, 1989MS)。

さて、その運搬・堆積機構の時空的变化の問題であるが、上記研究領域(2)の計画案にも配されているように、海洋底ではこれまで予想されていた以上に物質循環が活発である。そのもっとも顕著なものは海嶺熱水活動であるが、その他にも、海中の表層や中層から海底への大粒子の急速沈降、沿岸域から深海底に向かう非定常流、一旦沈積した物質の再侵食や分解・溶出などがあり、これらは熱水活動にくらべれば激しくないとはいえ、その起こる場の全海洋的広さのために海洋環境に及ぼす影響を考える上で重要である。

ここで指摘しなければならないのは、これら再侵食、再移動の過程が多くの場合非定常的なことである。もちろん、河川から海洋や湖盆への碎屑物の直接供給自体も決して定常的ではない。日本の海洋化学や海洋生物学研究者がこのことに注目しだしたのは比較的最近のこのようであるが、あるいは、イベント的、ないし、エピソード的な動きの起りやすい悪天候時の観測の困難に原因があるのかもしれない。観測の容易な時と所で日常的な定常現象を観測しているだけでは、海洋環境変化にかかわる物質循環を全面的、定量的に評価することができるはずはない。

実は、海洋での砂や泥の非定常的移動については、おもにその結果として生成された堆積物を対象として、地質学の分野では約30年まえから研究されてきた。現在や地質時代の海底の、いわゆる混濁流堆積物 (タービダイト)、暴風性堆積物、その他に対する地質学関係の堆積学研究者の関心は、今もなみなみならぬものがある。とくにX線写真撮影や、剥ぎとり転写法によっ

て堆積構造を識別し堆積物に記録された非定常的な動きを考えるテクニックは、今ではルーチン化されており、これによる地質学関係者の寄与が期待される。

一方、日本の地質学関係の堆積学の欠陥の一つは、対象がすでに堆積した物質にのみ集中しており、海水中の懸濁物や、海底面での物質交換などの研究をおろそかにしてきたことにある。これは、おそらく非定常的堆積に関する地質学関係者の研究が、混濁流堆積物への興味からはじまったことによるものであろう。いうまでもなく、混濁流は、とくに海洋においては発生の予測も難しく、観測は極めて困難だからである。

現世海洋の懸濁物の採取や研究は、日本においては海洋化学者や海洋生物学者によって行われてきた。ただし、これらの研究者のいう非定常的物質移動とは、たとえば、大阪湾から潮流によって汚濁物質が外海に流れだすといったことを指しており、より高濃度の、混濁流その他の堆積物重力流は関心の外にあるようである。また、この場合、採取試料中の生物の研究は問題ないとしても、粘土鉱物その他種々の鉱物粒の研究には、かなりの困難が感じられているのではないだろうか。これらの点でも、今後異なった専門出身者間の学際的協力が望まれる。もしもこのような協力関係がIGBPが学際的に進められる中で生まれるならば、IGBPの成功につながるだけでなく、日本の学界にしばしば見られるセクト性の克服のためにも喜ばしいことである。

研究方法

定点観測

海底や湖底の環境変化にかかわる堆積現象を研究するためには、上に検討したいいくつかの問題点をふまなければならない。学際的研究の必要性は当然のこととして別にすれば、問題点の一つは、非定常的な物質移動をいかにとらえ、評価するかである。それには定点における長期連続観測が有効に違いない。

IGBP領域(2)においても、定点、定線における、水温、流速、流向、塩分濃度、溶存酸素濃度などの観測の他、セジメントトラップ係留による沈降粒子束試料採取や海底堆積物採取が計画されている。その定点の設置位置や観測海域としては、沿岸域から外洋域へのフラックス変動を研究するフィールドとして、これまでに地球化学的あるいは地球物理学的研究が比較的よくされている大阪湾や東京湾、生物生産性の高い縁海や大河川をひかえた海域としてベーリング海、オホーツク海、日本海、東シナ海、インド洋、海水混合の盛

んな西北太平洋、地球環境変化の影響をもっとも受けやすい極域の海水圏などがあげられている。

しかし、海底地形や底質に関する情報量が多い点では駿河湾や富山湾も大阪湾や東京湾に劣らないだけでなく、物質の直接流入が盛んな点で、河川洪水や重力流の深海への影響をみるのには一層適している。

この理由から、堆積学小委員会(1989MS)も、駿河湾から駿河トラフ、南海トラフにかけての軸方向とこれに直行するトラヴァースとに観測点をもうけることを提案している。またここならば、あまり大きい観測船の必要はなく、比較的安い経費で反復して観測・試料採取ができる。もちろん、重要地点には観測塔をもうけて継続観測を行うこととする。

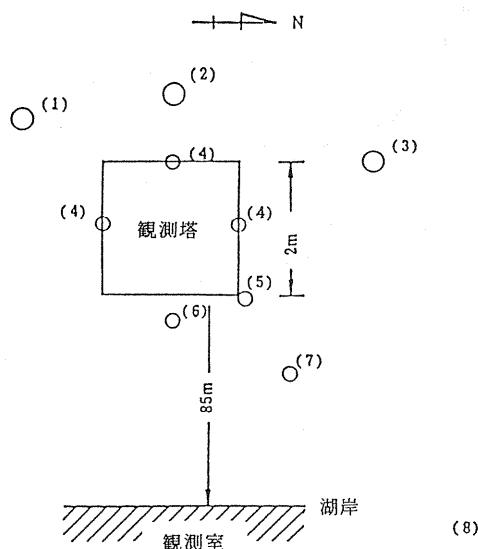
また、陸域から大洋への物質散布パターンを明らかにするためには、フィリピン海北部を加えて南海トラフや東シナ海から四国海盆にわたって観測点を配置することも必要である。

季節変化や気象との関係、たとえば雪解け水や暴風雨による影響をみる方法開発のテストフィールドには琵琶湖が適している、ここではすでに、IGBPの海洋関係全体のテーマとほぼ同じような研究が多角的に実施されている、大学関係者、地質調査所、石油公団なども琵琶湖の調査を行っているが、とくに滋賀県琵琶湖研究所の研究は、海洋環境研究のミニチャー版として全面的に参考になるべきものである。同研究所では流入泥粒子自体をも汚濁物質として(化学物質のキャリアーとしてだけでなく)とらえ、雪解け時の碎屑粒子密度流やストーム時の再移動、およびそれらによる底質の変化などを定点観測設備をもうけて観測・研究している(第1図)。もちろん琵琶湖研究所の研究目的は琵琶湖の環境保全である！(前田ほか, 1987; 奥田ほか, 1987; 横山ほか, 1987)

試料の研究

つぎに主に試料採取法や試料の処理、研究方法などについて検討する。

懸濁・沈降物の非定常的変動を捉えるためにはセジメントトラップその他の機器は日別、時刻別などに試料捕集が可能なものでなければならない。琵琶湖においては、観測塔に20~30分間隔に測定のできる波高計、濁度計、水温計、電気伝導計を設置して、水中懸濁物量(SS量)の時間的変動を追跡している。また、風波によってまきあがった底泥の量を測定するために一定時間間隔だけでなく水位や波高の変動をトリガーとしての採水の開始、停止ができる水位計を設置している。



第1図. 琵琶湖における観測塔, およびその周辺観測機器配置図(横山ほか, 1987). この観測塔での主たる目的は, 湖底堆積物が波によってどのようにまきあがるかを調べることにある. そのため観測塔には3台の波高計, 濁度計, 水温計, 電気伝導計を設置して, 波高, 波向, 波長の変動による湖水中の懸濁物量の時間的変動の追跡を行っている.

- (1) 堆積深測定板 (2) 日別沈降物捕集装置
- (3) ビーズの埋設 (4) 波高計
- (5) 水中ポンプ (6) 超音波流速計
- (7) サーミスター堆積計センサー
- (8) 風向・風速計

しかし, 今後, 海洋で, たとえば混濁流をとらえるためには, 技術面だけでなく効率や経費の問題を含めて, 新しくかなり大胆な発想を行うことが必要であろう.

採泥試料は, もちろんドレッジによるものではなく柱状でなければならない. 柱状採泥試料の研究にあたっては, 前章で強調したように, まずその中の層理, 葉理, その他の堆積構造を識別しなければならない. その際, 従来のラジオグラフによる方法(“軟X線写真撮影”)や剥ぎとり転写法では, 試料の整形が必要である. これを避け, 試料の非破壊観察とともに, 物性やガス・水分含有量をも同時に測定するには, CTスキャン法が有効である(志岐ほか, 1986; 志岐ほか, 1987). ただし, これに使えるCTスキャンの価格は当面1億円である.

底質柱状試料の堆積構造を識別できれば, 分析試料の採りわけも, それにもとづいて構造部位ごとに行うことができる. またそうしなければならない.

ところで, 近年, 100~1000年オーダーの高分解能で年代を測定する技術や, 数10年前のイベントを捉える方法が発達してきた(松本, 1975; ROBBINS, 1978; KAMIYAMA *et al.*, 1982; NAKAI *et al.*, 1984; NAKAMURA *et al.*, 1987; 太井子ほか, 1987).

一方, ある柱状試料の全く同じ層位, 同じ構造部位から採られた試料について ^{14}C 年代を測定した場合でも, 試料処理方法や試料物質の違い(たとえば木片中の部分の違いや, フミン酸とフミン質といったこと)によって測定値が異なる(山田, 1985; 中村・岩花, 1990). 流されて堆積した木片や貝殻片の年代測定値は, 必ずしもその場での堆積年代を示すものではない.

これらのことは, ただ1個の測定値から柱状試料全体の堆積年代や堆積速度を考えたりすることの危険性を示すと同時に, このことを逆用して, 多くの層位や部位からの, 種々の年代値を総合的に検討することによって, 従来えられなかったような新しい情報が得られる可能性を示している. 最近, 志岐らは駿河トラフ底(水深2840m)の植物遺体を含む混濁堆積物の示す年代値が, 組成物質の浅海での堆積年代に影響されていること指摘し, そのトラフ底への再移動が, 洪水による砂泥や植物片の新しい過負荷堆積に引き続く陸棚堆積層の崩壊と重力流の発生によるものであることを示唆した(志岐ほか, 1989).

今後, 混濁流堆積物と半遠洋性泥とを区別して測定試料を採る必要があることはもちろん, 混濁流堆積物の1枚ごとに, あるいは, ある1枚の混濁流堆積物の各堆積部位ごとに試料を採取してそれらの年代の違いを検討することも, 試料によっては夢ではない.

最後に, 物質の運搬機構と存在状態の研究にかかわって, とくにシルトの粒度分画の問題について述べよう. なお, 試料採取と運搬・堆積機構にかかわる事項として, 糞石(fecal pellets)の問題があるが, ここでは省略する.

先に分画試料のクラスごとの重金属の含有量を調べたYASUMATSU (1973MS)の研究を紹介したが, この場合の粒度分画法は, 砂分については古典的なふるい分け, 泥分については沈降法であった. しかし, この方法では, シルトの細分画は精密にできず, セジメントトラップ捕集物のような少量の試料を扱うことも困難である. また, 化学物質の具体的な存在状態の把握は目標にとどまっている.

シルトの粒度分画については, 精巧なふるい分けを超音波振動下で行う機器が開発され, その粒度分画物のクラスごとの構成物組成成分が可能になっている(山

崎・志岐, 1984; SHIKI and YAMAZAKI, 1985). 砂分と同様にシルトについても, 粒度による構成鉱物・岩石片・生物遺骸などの量比の違いや, 鉱物なり, 生物遺骸なりの種類の違いを調べ, さらに, それに規制あるいは影響された化学組成の違いをも検討するみちが開かれたわけである。

しかし, この方法では, $2\mu\text{m}$ 以下の粘土粒子の細分画はできない。また, 化学分析のためなど, ある程度の量を必要とするときには対応できない。遠心分離によってビニールチューブ中に試料を展開する方法が有効と思われるので, その開発が望まれる。

このようにして得られた分画物から化学物質を抽出したり, その存在状態を検討したりすることは, 本来地球化学者の得意とするところであろう。しかし, なにゆえ以上のように複雑な手順に従うことがよいかについては, 地質学出身の堆積学者でなければ, 確信を持ちえないかもしれない。ところが, 地質学出身の地球化学的堆積学者は, そもそもその人口においてIGBPをすすめるに不足であると思われる。これらの点からも, やや無責任な言い方ではあるが, IGBPの組織や取り組みが学際的なことを望みたい。

お わ り に

本論で強調したのは以下のようなことである。

- 1) 地球環境の変化に影響する物質移動とその固着は堆積学的現象であり, 堆積学的研究が重要である。
- 2) 物質移動はしばしば非定常的に起こる。むしろ, 多くの場合, 非定常的動きのほうが定常的動きよりも重要ですらある。
- 3) 非定常的物質移動を定量的に評価するためには, 海洋や湖に定点をもうけて連続観測や反復試料採取を行うべきである。砕屑性堆積物の試料採取は, 柱状になさなければならない。
- 4) 柱状試料について, 先ず堆積構造を識別し, 次にそれにもとづいて, 年代測定試料や各種分析・研究試料を採りわけ。さらに採りわけられた試料の粒度分画を行う。このような手順を踏むことによって以前には得られなかった豊かな情報を得ることができる。

いずれにせよ, IGBPをすすめるため, 従来の壁を破った学際的, 総合的な取り組みが望まれる。

しかし, これまでの経過をみると, ICSUが当面生物学的, あるいは化学的テーマを重視していることも反映してか, 少なくとも我が国では, この点が必ずしもうまくなされているとは思われない。とくに, 堆積学

関係に関しては, 堆積学研究会で多少の努力を行いはしたが, 全体としてほとんど参加できていない。堆積学研究小委員会の提案も, 一部でもとりあげられるか否か, 予断を許さない。とくに地質学関係者に関しては, 堆積学だけでなく第四紀学の研究者もごく少数のもの以外はこれまで組織されていない。

しかし, そのようなことで文句を言っているだけでは, 直面する地球環境の危機を解決することはできない。あるいはIGBPでは期待されていないかもしれないが, 近い将来に必ず堆積学のアプローチの重要性が理解されるよう, 環境問題への取り組みを発展させ実績を積んで行きたいものである。

文 献

- 琵琶湖研究所, 1987a: 琵琶湖水の動態に関する実験的研究 総合報告書(I), 物質の水平移動に関する基礎的研究。琵琶湖研報告, 86-A04, 164p.
- 琵琶湖研究所, 1987b: 琵琶湖水の動態に関する実験的研究 総合報告書(II), 物質の鉛直移動に関する基礎的研究。琵琶湖研報告, 86-A05, 110p.
- ICSU, 1988MS: IGBP, 地球の変化, 第四報告書。仮訳, 20p.
- 海洋学研究連絡委員会, 1989MS: IGBP研究領域(2), 海洋における物質循環と生物生産。学術会議「人間活動と地球環境」に関する特別委員会, 地球圏—生物圏国際共同研究計画 (IGBP) —地球変化の研究—(第一次案), 20-34.
- KAMIYAMA, K., OKUDA, S., and KOYAMA, M., 1982: Vertical distribution of ^{137}Cs and its accumulation rate in lake sediments. *Jap. J. Limnol.*, 43, 35-38.
- 前田広人・熊谷道夫・大西行雄・児玉哲夫・横山康二・奥田節夫・河合 章, 1987: 琵琶湖における底泥巻きあげに関する調査・研究, 琵琶湖研報告, 86-A04, 71-82.
- 松本英二, 1975: ^{210}Pb 法による琵琶湖湖底泥の堆積速度。地質雑誌, 81, 301-306.
- NAKAI, N., NAKAMURA, T., KIMURA, M., SAKASE, T., SAITO, S. and SAKAI, A., 1984: Accelerator mass spectrometry of ^{14}C at Nagoya University. *Nucl. Instr. and Meth.*, B5, 171-173.
- 中村俊夫・岩花秀明, 1990: 岐阜県諸家遺蹟出土の遺物から採取された炭化物とその抽出フミン酸の ^{14}C 加速器年代の比較。考古学と自然科学, (印刷中)。
- NAKAMURA, T., NAKAI, N. and OHISHI, S., 1987: Application of environmental ^{14}C measured by AMS as a carbon tracer. *Nucl. Instr. and Meth.*, B29, 355-360.
- 奥田節夫・熊谷道夫・横山康二・西 勝也, 1987: 琵琶湖堆積物の再移動に関する観測結果。琵琶湖研報告, 86-A04, 59-64.
- ROBBINS, J.A., 1978: Geochemical and geophysical appli-

- cations of radioactive lead. In NRIAGU, J.O., ed., *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*, Elsevier, Amsterdam, 285-393.
- 志岐常正・奥田節夫・横山康二・太井子宏和・井内美郎, 1987: 人為的攪乱による湖底微地形および底泥堆積構造の変化. 琵琶湖研報告, 88-A04, 83-89.
- 志岐常正・徐 垣・谷本喜哲, 1986: 堆積物試料のCTスキャン観察について—2・3の例. 堆積学研究会報, 24, 27-30.
- 志岐常正・山田 治・中村俊夫・中井信之, 1989: タービダイト泥の ^{14}C 年代—駿河舟状海盆底柱状試料の例—. 地質学会関西支部報, 106, 9.
- SHIKI, T. and YAMAZAKI, T., 1985: A lamina-by-lamina analysis of grain-size distribution in fine grained turbidites. *Sed. Geol.* 41, 201-220.
- 堆積学小委員会, 1989MS: 物質循環過程の堆積学的総合研究. 7p.
- 太井子宏和・奥田節夫・五十棲泰人・横山康二, 1987: 琵琶湖湖底表層における堆積速度見積もりと突発的気象変動による堆積異常. 琵琶湖研報告, 86-A04, 91-97.
- 山田 治, 1985: 北白川追分町遺蹟出土木材の ^{14}C 年代測定. 京大埋蔵文化財調査報告, III, 自然科学的調査篇, 159-162.
- 山崎貞治・志岐常正, 1984: 超音波篩分装置による粒度分析装置と沖繩海盆底細粒タービダイトの粒度合組成. 碎屑性堆積物の研究, 4, 29-39.
- YASUMATSU, S., 1973MS: Geochemical study of bottom sediments of Lake Sinji, Shimane Prefecture, with special reference to the concentration of minor elements. Master Thesis Kyoto Univ., 123p.
- 横山康二・奥田節夫・西 勝也・熊谷道夫, 1987: 湖底堆積物の再移動に関する観測手法. 琵琶湖研報告, 86-A24, 51-57.