

「フリーズ」と「フリーズ堆積物」— 予報

志岐 常正*・鈴木 一久**

“Freeze” and “freeze deposits” - A preliminary report

Tsunemasa Shiki* and Kazuhisa Suzuki**

The new term “freeze” can be defined as sudden stop of a moving system in an infinitely short time without any change of the internal features such as structure and fabric of the system. The movement may be of some high energy just before the stop instance. “Freeze of chaos” can be one of the most interest, if it is in nature or mathematics. Freeze of sedimentary phenomena can be called as “sedimentary freeze”.

“Freeze” in the strict sense, i.e. “ideal freeze”, can not be in nature. “Actual freezes”, however, can occur and provide sedimentary records of high energy events such as earthquakes and chaotic flows in geohistory. Ambiguous use of “freezing” may be convenient sometimes.

Key words : freeze, sedimentary freeze, sedimentary records, chaos

はじめに

宇宙（人間社会を含む自然）には、線形変化過程、平衡、periodical changes, カオス、フラクタル、ゆらぎ、その他各種の時空的構造（運動）パターンがみられる。それらの運動のかなりの部分が物質、物体に記録されている。とくに地層は、その積成の特質の故に、もっともすぐれた記録体である。

これらの運動とそのパターン、たとえばカオスやフラクタルは、数学的研究の対象としてすでに10年以上にわたり興味を集めてきた。また、近年、自然に生起する大小オーダーの cyclicity とその記録の地質学的その他の解析手法が開発され発展している。真に cyclic な運動については、その記録から実際に起こった運動を知ることが容易であろう。しかし、もっと複雑な現象、たとえばカオスを記録から数学的に復元、記述することは、写真記録による場

合を除き、いまだ提起されていない。多分これは、カオスの記録そのものが自然界に稀であることにもよる。だが以下に記すように、カオスの記録は存在しないわけではなく、また人工的（実験的）につくれないわけでもない。

数学的には、これは解がわかっているときに方程式の係数を導くような、一種の“逆問題”である。考えてみると、これまでのほとんどの地質学的研究は、数学的なアプローチを欠いてはいるが、記録から実際に起こったことを知るか、その手法を研究してきたという意味において、“逆問題”を解くことを課題としてきたと言える。その中で、われわれは、以下に“フリーズ”および“堆積学的フリーズ”の概念を提案することによって、とくに、激しく運動し変化しつつあった、その一瞬の状態の記録を地質学的、堆積学的に観察・研究する課題（およびその数学的意義）を指摘したい。

フリーズなどの定義

フリーズ (freeze) を下記のように定義する。

「相対的高エネルギーで挙動中の事象が瞬間的に停止し、その事象系（運動物質系）の様態（構造や組織など）がその瞬間（無限に短い時間内）に変化

受理：1998年2月24日

* 宇治市木幡北畠15-8

15-8, Kitabatake, Kohata, Uji 611-0002, Japan

** 洛東高等学校

Rakuto High School, Anshu, Yamashina, Kyoto 607-8017, Japan

することなく固定されること」。

ここで、“高エネルギー”というのは、運動エネルギー量の絶対値ではなく、普通ならば運動が停止しにくいエネルギーレベルの意味である。エネルギーレベルが次第に低下して、まさに停止しようとしている状態が固定されることは、なんら特別の現象でなく、ここで定義する“フリーズ”ではない。自然界には episodic あるいは catastrophic な現象がいくつもある。それらは、エネルギーの集中と開放の現象である。しかし、それらのエネルギーの高い状態そのものは普通には堆積物に記録されない。堆積物は、むしろエネルギーの低下過程を反映している。そうでないのがフリーズ堆積物 (Freeze deposits, Frozen deposits) である。

自然界に、「カオス状態の運動系が瞬間的に運動を停止し、その瞬間（無限に短い時間内）の構造や組織が固定されること」がもしあれば、もっとも興味深い現象である。これをとくに“カオスのフリーズ”と呼ぶ。実際には、たとえばカオスの解説書によくみられる煙草の煙の流れのように、エネルギーの絶対値が高い状態ではないカオスも存在する。しかし、運動しているという意味においては、相対的に“高エネルギー”状態にあると言えるだろう。そのフリーズ記録が堆積物として存在するならば、必ずエネルギーの瞬間的低下と結びついているはずと思われる。フリーズにより保存された構造や組織は、高エネルギー下、あるいは、カオスの状態の記録とみなされうる。言い換えれば、フリーズされた運動系は一種の地質記録であり、その記録解読により、フリーズの直前の運動系の状態を知ることができる。この記録が堆積物であれば、“フリーズ堆積物”と呼ばれる。その形成が“堆積学的フリーズ (sedimentary freeze)”である。

厳密なフリーズ現象 (ideal freeze) は自然界に存在しない。長さだけあって幅も厚さもない直線が、物体としては存在しないのと同じである。現実の問題になるのは、これに近似されるとして扱うことができる場合 (actual freeze, または practical freeze) である。このような場合については、いちいち“近似的”などと付けず“フリーズ”と呼んでよいとしたい。ここで重要なのは、運動の停止が瞬間的と言ってよいほど急に起こり、かつその直前と、直後以後とで構造や組織の変化がほとんど認められないことである。言うまでもなく、“フリーズ堆積物”はこの意味でしか存在しない。

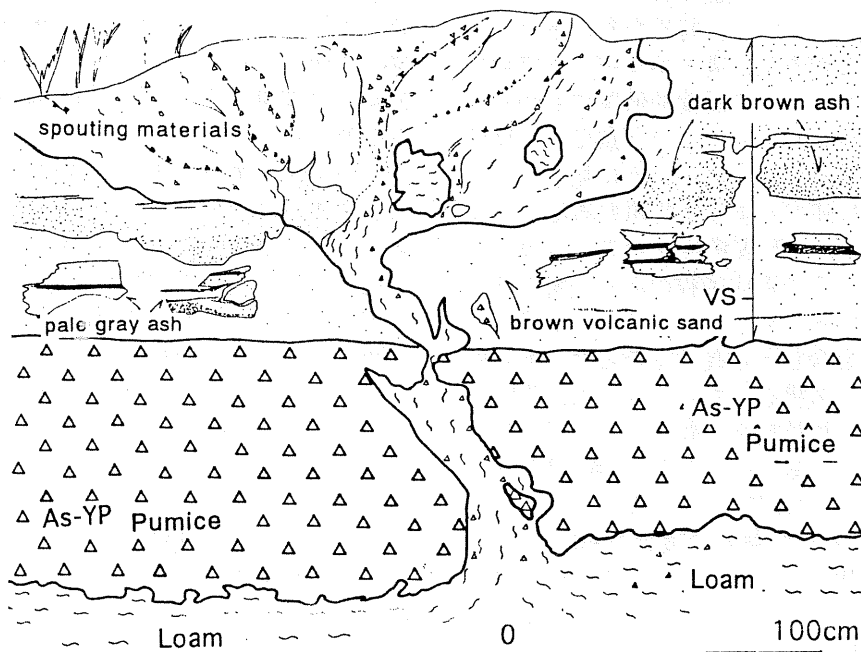
なお、従来“フリージング (freezing)”という言葉が、ときに堆積物重力流の瞬間的停止などに関して使われている（たとえば、Collinson & Thompson 1982；新版地学事典，1996）。その定義はあまり厳密にはみえないが、上記の“フリーズ”よりは広義であるらしい。後述の理由で、この語も存続させる方がよいと考える。

フリーズ堆積物の例、および定義の検討

フリーズは、たとえば物体の運動に関しては、慣性の法則があるかぎり、多少とも弾性を持つものには起こり得ない。塑性体や完全粘性体では、理論上はフリーズが起こる。しかし、地球上では、重力下に有る以上、普通の流体には起こりがたい。したがって、その記録が残されるはずもない。しかし、塑性や粘性の非常に高い流体ならば、あるいは運搬粒子の“混み合い”効果が働く場合には、運動がほとんど瞬間的に停止して、その直前の流れの様態をかなりよく残す場合がありうる。たとえば、非常に含泥量が高く含水量が低い土石流は、流動底面の傾斜の消失や底面摩擦の急激な増大の効果と相まって、フリーズ的なこと（フリージング）を起こす場合がある。

実際の土石流では、流動の停止はそれほど瞬間的ではない。また、それに含まれる砂や水が大きな慣性を持って石礫から分かれ、flashするので、ほとんどの場合、流動中の構造がそのままフリーズされはしない。フリーズで近似されるとして扱える可能性があるものとしては、むしろ seismite（地震性堆積物）を挙げる方がよいだろう。流動化（液状化）砂層や砂岩脈には、強震動のもとでのチクソトロピーによって流動中の状態を、grain fabric や flow structure によく残すものが少なくない（第1・2図）。従来、あいまいに揺変構造として一括され、あるいはスランプ構造、脱水構造、反砂堆などと扱われてきたものの中には、激しい乱流（その中の碎屑粒子の配列やそのなす構造）が、まさにフリーズされたものがあるように思われる。一例として、ある中新統海底津波堆積物 (submarine tsunamiite) の砂部に見られるものを示す（第3図）。乱流のフリーズがもしあるとすれば、それは上記のカオスのフリーズの例と言える。

高流階 (high flow regime) 下で砂質堆積物がつくる反砂堆 (antidune) は、一般に、流水のエネルギーが“しきい値 (いき値)”以下に低下するとた



第1図 軽石層 (As-YP), 火山灰層 (VS) に貫入, 吹きあげた液状化ローム層。粒子の配列は流動状態をフリーズしていると思倣してよいだろう。ただし, 原著者らは, 他のトレンチで, ローム層の吹きあげだけでなく, それにひき続く引きこみを認めている。こうなると話はまた厄介である。このような問題を議論する際に, “フリーズ” の使用が有効であると考ええる。群馬県烏川中流地域のトレンチ記録。(大塚ほか, 1997)



第2図 地震のショックによると考えられるチクソトピック揺変構造。礫質ツナミタイトのすぐ下位の, これに侵食面をもって覆われたシルト層に見られる。愛知県知多半島の中中部中新統。(Yamazaki and Shiki, 1989より)



第3図 海底礫質ツナミタイトのすぐ上位に見られる砂層に発達する乱流フリーズ堆積構造(?) (C). 反砂堆, チュート・プール構造などの発達 (B). 平行ラミナ (A). (Shiki and Yamazaki, 1996.)

ちまち破壊され、堆積物の構造はより低い流階のものに変化してしまう。しかし、特殊な条件下ではこれが保存されることがある。高エネルギー下で形成された構造が、エネルギーの瞬間的低下にもかかわらず破壊されず固定されているという点では、反砂堆の保存はフリーズと言ってよいように見える。ただし、これには下に述べるような問題もある。

堆積物はすべてその形成過程を反映しており、とくに堆積構造は、その形成過程のある一瞬の状態を記録、保存している。もしフリーズを、形成過程の積算結果の固定を含むと定義するならば、あらゆる堆積構造はフリーズ構造である。しかし、上記フリーズの定義では、堆積構造一般をフリーズの結果とすることを排している。たとえば、底痕（層裏紋、sole mark）をフリーズ記録としてよいかどうかは問題である。確かにそれは物質の運動の記録であり、しかも底痕それ自体について見れば、ある瞬間の状態が保存されているには間違いない。しかし、多くの底痕は、ある瞬間ではなく一定期間の侵食・埋積結果の総和である。言い換えれば、このような底痕の形状や埋積物は、瞬間的流況をフリーズしたものではない。

単層表面構造のうち、たとえばリップル（ここでは堆積地質学で近年通称するように、その内部構造を含めて用いる）の表面形状（砂れん、ripple mark）については、ある瞬間的状态を固定していると言える。しかし、それはリップルの内部構造（ラミナ）の変化・形成の積算結果を強く反映している。このことは、最表層のラミナをつくる個々の砂粒の姿勢やその配列などについても言える。この点で、リップルは、その表面構造についてさえも、フリーズの定義に合った例からは外れる。リップルの内部構造がフリーズとは言えないことはもちろんである。こう考えれば、上にフリーズ的として触れた反砂堆についても、同様な問題があることがわかる。反砂堆をつくるラミナ構造は、リップルと同様に多くのラミナ形成の積算結果であるからである。

フリーズの、瞬間の変動状態が固定されるという定義にかかわって重要なのは、本来保存され難いはずであるにもかかわらず保存されるという点にある。この点について見れば、たとえば、高エネルギーの波浪によってつくられるスエール（swell）構造、ハンモック（hummock）構造などや、ある程度激しい流れのもとで河床などにつくられるトラフ（trough）型斜交層理も、エネルギー状態がゆっく

り低下すれば保存され難いという点では反砂堆と同様である。しかしこれらは自然界に多く観察される。逆にこのことは、エネルギーレベルが、高流階から砂粒子の運動が停止してしまう低流階条件までかなり急激に低下したこと（および、その後、粒子を動かすまで高まらなかったこと）を示している。これをも広義にはフリーズ的現象と呼びたいという考えがあるかもしれない。しかし、これらの構造は、反砂堆に比べてもある程度の時間を要する積算過程を反映しており、また安定性もより大きいので、その固定をフリーズの例とすることはできない。要するに、スエールやハンモック構造のようなもので“フリーズ”の概念に含めると、いくらでも中間的な場合があつて切りがなく、定義だけでなく課題の所在がはっきりしなくなるので好ましくない。しかし、高エネルギー状態から低エネルギー状態へ、高流階から低流階へ、流況が一挙に変わり、ロードが瞬間的に運動を停止する場合、そうして、さらに望ましいのは、積算的にせよ形成されつつあった不安定な構造が固定される場合については、フリーズと呼ぶことが許されてよいと考える。それは述語としての曖昧さ故にかえって便利であるだけでなく、現実自然界に存在するのは、ほとんどこのような場合であり、後述のように、研究対象として現実的であるからである。

ともあれ、土石流、混濁流、洪水、地震、津波など、自然界のエピソードあるいはカタストロフィックな運動状態の全体がそのままフリーズされることはない。フリーズは、自然界では、近似的にそれとして扱われる場合でも例外的、局所的現象であり、だからこそ、その地質記録は地球史研究上貴重である。

フリーズのメカニズム

上に繰り返し述べたように、エネルギーの急速な低下がフリーズの要因である。これを反砂堆の例について、もう少し検討してみる。

問題はその低下の時間と幅、そして質にある。

反砂堆を形成中の流水の強さの低下が急速でも、それが反砂堆をつくる強さから平行ラミナをつくる強さまで落ちるだけなら反砂堆は保存され難い。反砂堆が保存されるためには、流水のエネルギーが反砂堆部と平行ラミナ部（上部）との間の境だけでなく、平行ラミナ部（上部）と大小の砂れん部との境、砂れん部と平行ラミナ部（下部）などの境、そして

掃流侵食限界などの“しきい”をも構造の再編ができない短時間内に破って落ちなければならない。おそらく他の場合にも、同様な“しきい”の瞬間的突破がフリーズの条件であろう。

一般に、より高エネルギー下で形成された堆積構造がよく保存されるメカニズムとして最も一般的なのは、碎屑物（砂粒など）の供給がある限度を越えて多い場合である。高エネルギーで形成された構造が、形成後すぐ、より新たな碎屑物により被覆される場合には、エネルギーレベルの低下にかかわらず破壊されることが少ないと考えられている。被覆物があれば、その後、その場の流水などのエネルギーが再び高くなっても侵食から守られるからである。この場合には、上記のようないくつもの境界値を一挙に破って掃流力が低下しなくとも、高エネルギー下での運搬・堆積物が保存されるというわけである。

実際の自然界では、この2つのメカニズムは同時に起こっている。つまり、碎屑物の堆積速度も早く、また流速の低下も早い場合に高流階の堆積物が形成、保存されている。たとえば、多くの外浜堆積物のハンモック構造部の上には、引き続いて堆積・形成された平行ラミナその他の堆積部を見ることができ、土石流の砂質堆積物や混濁流堆積物中に見られることがある反砂堆構造の上にも、当然ながらより低い流階の構造部が載っている。

だが、この被覆による保護は、ここで定義しているフリーズ現象とは異なる。被覆される前になぜ高流階での構造が壊されないかが問題なのである。自然界でも実験でも、掃流力が落ちると反砂堆はあつと言う間に消えてしまう。流況が変わったあとの堆積やその効果は、フリーズとは別の、もっと一般的な、どこにでもある問題である。

堆積物の供給が多い場合のフリーズに関係するのは、おそらく、その流れ自身の粒子密度であろう。いわば“混み合い”効果がそれら運動粒子の瞬間的停止に大きな役割をはたすのではないだろうか。前章に触れた乱流堆積物についても、ある限界以上の運搬粒子密度がフリーズが起こりうる条件として必要かもしれない。

先年、エネルギーレベルの低下に関連して武藤鉄司氏から指摘を得た（私信）。その指摘のとおり、ここで言っているエネルギーとは粒子や流体の運動エネルギーのことであり、その損失分は、摩擦による仕事、すなわち熱に変換されている。摩擦が作用

するには有限（ >0 ）の時間が必要であり、“フリーズ堆積物”がフリーズ直前の様態を直接表すか否かは非常に微妙な問題である。この意味では、フリーズはフリージングと同じく“過程”である。しかし、それは武藤も言うとおりのスケールにもよる。繰り返し述べたように、その過程が瞬間的といつていほど急激に起こり、かつその前後で、構造などの問題になるほどの変化が事実上認められない場合のメカニズムが、ここでの研究課題である。

数学的逆問題としてのフリーズと、その検討の展望

数学的逆問題は、近年、断層を地震記録として見ることその他に関して、研究課題となっている（山口昌哉氏の教示による、私信）。断層面の条痕は、両側地盤の瞬間的なずれを記録している。だがそれは、運動系そのものがフリーズされたものではない。断層破碎帯は瞬間的に形成されたものという意味では、上記のフリーズの定義に合うと言えるだろう。しかし、断層破碎帯は、必ずしも一度の断層活動により形成されたものではなく、むしろ何度かの動きの産物であるのが普通である。また本当に瞬間ではなく、断層運動に続く地震の震動によるシアや破碎をも弱く記録している可能性があり、逆問題の研究対象としては複雑である。フリーズ、とくにフリーズ堆積物を材料とする研究は逆問題の一種であるが、その中で定義を限ることによって問題が限定、明確化されており、比較的に接近しやすい課題であると予想される。

ところで、上に、長さがあつて幅がない直線は具体的には存在しないと述べたが、数学的には存在する。同様の意味で、定義そのままのフリーズが存在するか否かは問題であろう。筆者が今期待したいのは、むしろ、 t が変化するとき、その関数 s が非常に急に、カオス的に、一定値に収束するような式が存在することである。もしこのような式が存在したならば、次に問題になるのは、流れやその運搬ロードの分布構造に関係する式の中に、上のようなことを起こしうる性格を持つものがあるか否かをチェックすることであろう。どうやらこの方は、そう簡単ではなさそうである。

激しい乱流はカオス現象の代表的例である。しかし、流水や波浪のもとでの碎屑物の堆積機構をカオス現象として扱う研究は、それほど進んでいない。そのフリーズの研究はすべて今後の課題である。自然界でフリーズ現象が現われるのは、上記の例のよ

うな激しい episodic なイベントに限られる。このような場合にしか、瞬間的に高エネルギー状態が消失することがないからである。しかし、実験では人為的にこれが可能である。たとえば、流水を瞬間的に止めて反砂堆を固定することが、完全ではないものの可能である。この意味で、実験は自然の単なる再現ではなく、それによる研究は自然の観察とは異なる有利さと危険性を持っている。

おわりに

本ノートの目的は、研究の結果を報告することではなく、問題の存在と意義を提起すること、そうしてさらに、これらに興味をもって共同の研究に参加する人を求めることにある。とくに、数学者との討論と共同研究をすすめることのできる、数学と流体力学に“強い”人の参加が切に求められる。

フリーズは点や直線、あるいは質点と同様に抽象概念である。そして、これらが数学や力学に必須であると同様に、自然の運動記録を考える上で必要である。

ジオロジストとしてのわれわれの問題提起の動機は、とくに激しく運動し、変化したエピソードの一瞬の記録を地質学的、堆積学的に観察、研究することにある。

繰り返して述べたように、フリーズは、近似的な意味でもはなはだ起こり難いことである。しかし、塑性体や粘性の非常に高い流体ならば、ほとんど瞬間的に停止して、その直前の様態（組織や組成）をほとんどそのまま残すこともありうるのではないか。これがフリーズとその記録が、とりわけて堆積学的研究の対象として期待されうる理由であると思われる。同じ理由によって、火成岩やある種の変成岩の組織にもフリーズの好例が期待される。むしろ、そのことの暗黙の了解の下でこれらの研究が行なわれているのかも知れない。

ノートの執筆にあたっては、多くの方々にご教示や激励を得た。とくに、数学的視点からは竜谷大学の山口昌哉先生、堆積学的問題としては長崎大学の武藤鉄司氏、より一般的な研究の方向については神戸大学の伊藤敬祐氏から、貴重な教示をいただいた。元新潟大学の植村武氏、京都大学の増田富士雄氏、ダイヤコンサルタント(株)の橋 徹氏、京都教育大学の井本伸広氏、その他の方々にも、激励や討論をいただいた。厚く御礼申し上げる。

文 献

引用文献の他に、参考ないし関連文献を若干あげる。フリーズ問題そのものの文献は存在しない。

Ager, D. V., 1993: *The New Catastrophism*. Cambridge University Press, Cambridge, 231p.

Allen, J. R. L., 1985: *Principles of Physical Sedimentology*. George Allen & Unwin, London, 272p.

地学団体研究会(編), 1996: 新版地学事典. 平凡社, 1443p.

Clifton, H. E. (ed.), 1988: *Sedimentary Consequence of Convulsive Geologic Events*. Geol. Soc. Am. Spec. Pub., 229, 157p.

Collinson, J. D. and Thompson, D. B., 1982: *Sedimentary Structures*. George Allen & Unwin, London, 194p.

大塚富男・高浜信行・中里裕臣・野村哲, 1997: 群馬県烏川中流域のテフラ層中にみられる液状化現象とその意義, 第四紀研究 (*The Quaternary Research*), 36, 123-136.

碎屑性堆積物研究会(編), 1983: 堆積物の研究法—礫岩・砂岩・泥岩. 地学団体研究会, 377p.

Seydel R. 1985: *From Equilibrium to Chaos, Practical Bifurcation and Stability Analysis*. Elsevier, Amsterdam, 367p.

Shiki, T., 1996: Reading of the trigger records of sedimentary events - a problem for future studies. *Sed. Geol.*, 104, 249-255.

Shiki, T. and Yamazaki, T., 1996: Tsunami-induced conglomerates in Miocene upper bathyal deposits, Chita Peninsula, central Japan. *Sed. Geol.*, 104, 175-188.

Thomas, W. R., Pomerants, M. J. and Gilpin, M. E., 1980: Chaos, asymmetric growth and group for dynamical stability. *Ecology*, 61, 1312-1320.

山口昌哉(監修), 1986. 現代科学の述語集. 駁々堂出版, 235p.

山本悟・田辺晃生, 1984: 科学と認識構造. 昭和堂, 349p.

Yamazaki, T. and Shiki, T., 1989: Miocene off-shore tractive current-worked conglomerates-Tsubutegaura, Chita Peninsula,

Central Japan. In Taira, A. and Masuda, F. (eds.), *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*, Terra Pub, Tokyo, 483-494.

Yuen, D. A. (ed.), 1992: *Chaotic Process in the*

Geological Sciences. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications. Springer-Verlag, Berlin, 317p.