

容器内粒状体の自己組織的臨界状態と 自動給餌器への応用

真鍋 惇* ・ 中村 一生**

Self-Organized Criticality of Granular Materials Packed in a Container and an Application for the Automatic Feeder

Atsushi Manabe and Issei Nakamura

Abstract: We have measured the distribution of avalanches using the porous dry grains for animal food (diameter 9mm, weight 300mg). As an effect of the high coefficient of surface friction, the pile of this grain on a flat platform (diameter 200mm) shows the power-law distribution of avalanches with critical exponent 3.0 which is larger than the value 2.2-2.5 reported for pile of sand, glass beads or plastic beads. Secondly the grains are kept in a container with an outlet (area 900mm²) at the base of side wall. A cavity is formed inside the outlet by the arching effect of frictional particles which are supported one another by mutually acting balanced forces. Disturbing this system by the small and constant impact from a pendulum on the outer side wall, this cavity either grows by small falls of grains or contracts by a large collapse and these grains are dropped out of the container. We have measured the number of particles falling off the container after each impact and obtained a power-law distribution with critical exponent 1.5. This indicates that the volume fluctuations of the cavity also obey the power-law distribution. Behind the cavity collapses, the internal avalanches of grain displacement will be generated, creating local voids by arching effect. Therefore our result will be an observation of self-organized criticality in the system of granular materials packed in a container. An application of these phenomena for the automatic feeder is presented in attention with the accuracy of feeding quantity.

Key words : Self-Organized Criticality, granular materials, internal avalanches, power-law distribution, automatic feeder

1. はじめに

粒状体は特異な現象を示し、固体的であると同時に液体的であり、時にはガラス質の様相も見せる。粒状体特有の現象としては、流動化、アーチ形成、チクソトロピー、ダイラタンシーなどがあり、これらは自然環境において多面的に見られるとともに、工業応用面でも重要な性質となっている。近年の粒状体の研究対象は、連続的流動状態や静的圧縮状態などの定常状態に関するものから、間欠的な流動である雪崩現象に移ってきている。

自己組織的臨界状態 (Self-Organized Criticality : SOC) の理論は、1987年に Bak, Tang, Wiesenfeld¹⁾により、砂山の雪崩現象のモデル (BTW モデル) とシミュレーションの研究において提唱されたもので、多数の要素が相互作用してい

る系は、外部エネルギーの供給が続くとき、自ら臨界状態を保持するというものである。砂山の解析から生まれたこの理論は、今日、複雑系、とりわけ生命・気象・地質・経済などの大規模系が示す時間的、空間的ゆらぎのフラクタル性の仕組みを解明する一つの方法として注目されている。²⁾

ここで自己組織化とは、外部からの制御による受動的な組織化ではなく、系が自ら能動的に進めていく組織化であり、個々には独自に運動する多数の要素からなる集合体が、自ら全体として一つの系とみなせるような動きを示すことである。ここでは、各要素の相互作用の結果として、個々の要素が全体に影響し、全体が個々の要素に影響するような大規模系・複雑系が形成される。

ここで臨界現象、臨界状態³⁾とは、系が二つの状態間で連続転移する場合の相転移点での振る舞いのことで、この状態では、ミクロなゆらぎが連鎖的にマクロなゆらぎを生み出し得て、その結果広範囲のサイズのゆらぎが発生する。言い換えると、ミクロなゆらぎがマクロに成長する境界であり、ここでは大部分の小さな変化の中にまれに大きな変化が引き

(2003年12月1日受理)

* 現：宇部工業高等専門学校名誉教授

**現：協和発酵工業株式会社

起こされる。臨界現象は従来から、ゾル・ゲル相転移、超伝導相転移、強磁性相転移などの物理現象においてよく知られていたが、近年になって雪崩や地震などにおける突発的な系の変動を初めとして、前述の大規模複雑系のゆらぎ現象に広く見出されるようになってきている。

SOC は非平衡系の現象であり、系にゆっくりとエネルギーが供給されることにより、自己組織化が進行して定常状態が実現されるものである。従って、エネルギーの供給がないときの平衡状態からは離れたところで実現している状態であり、わずかなエネルギーの増加が、大きなゆらぎの引き金になりうる状態である。

ここで扱う砂山の現象は、水平に置いた円板上に作った砂の堆積の上から少しずつ砂を落とし続けていく時に生じる雪崩現象の規模と頻度の問題である。このとき砂山は蓄積と雪崩を繰り返す、砂が円板から崩落し、その高さや傾きがほぼ一定に保たれる。SOC の仮説においては、この状態を臨界状態と考え、そこでは小さな雪崩から大雪崩まで様々な雪崩が発生しうるとする。このときさらに砂が加えられて臨界状態を超えた場合、すなわち超臨界状態になれば、砂山は雪崩を起こして臨界状態に戻る方向性を持ち、臨界状態より砂山が低い臨界状態になると、臨界状態になるまで砂は蓄積されると考える。このように砂山は温度などのパラメータ調節や初期条件の選択によらず、自発的に臨界状態に至ると予想される。

BTW モデルはこの砂山に対する二次元セルオートマトンモデルである。このモデルにおいては、格子状に区切られたサイトの一つをランダムに選び、その上に粒子を落とす操作を繰り返す。あるサイトが4個の粒子を蓄積すると不安定とし、その隣の4箇所のサイトへ1個ずつ再配置する。不安定になったサイトが砂山台の端にあれば粒子が台から落ちる。再配置が不安定なサイトを連鎖的に生み出せば、大きな雪崩となり台から落ちる粒子数が増加する。このモデルのコンピュータシミュレーションにより雪崩の規模： x と、その頻度あるいは確率分布関数： $y(x)$ の関係が求められた。ここで雪崩の規模は、雪崩を形成する粒子の数や質量、あるいは雪崩の面積などで表される。その結果、BTW モデルの砂山の雪崩の分布はべき乗法則（Power Law）に従うことが示された。

$$y(x) = ax^{-\beta} \quad (\text{BTW モデルでは } \beta = 1.0)$$

べき乗分布はフラクタル分布とも呼ばれ、雪崩の規模を測るスケールを変えても分布が不変であることを示す。言い換えると分布の幅が広く、様々な規模の雪崩が起こる状態であり、雪崩の事象と事象の間に何らかの相関があることを示すものである。他方、事象どうしの相関がない場合は幅の狭い指数関数的な分布になる。臨界現象やフラクタル現象では、何かの量が必ずこのべき乗分布に従っている。べき指数の値は臨界指数と呼ばれ、臨界現象を定量的に特徴づける量の一つである。従って、砂山の雪崩の分布がべき乗法則を満たす

かどうか、その砂山が SOC の状態であることを決める手段となる。

BTW モデルによる砂山の SOC の提唱後、それを実際の粒子の山で検証する実験が行われた。（以下砂山実験と呼ぶ）Jaeger 等⁴⁾(1989)の回転ドラム内の砂の斜面の実験によると、ほぼ一定の規模の雪崩が周期的に発生し、斜面は安息角とそれより数度高い角度の間を変化する。すなわち砂の斜面は SOC ではないとした。Held 等⁵⁾(1990)は円錐状の山による実験で、充分小さい砂山では雪崩はべき乗分布を示し SOC を確認できるが、大きい砂山は SOC にならず、砂山の雪崩にはサイズ効果があるとした。二つに実験は一致せず、Nagel⁶⁾は1992年のレビュー論文で砂山の SOC は実現しないと示した。その後のより精密な実験で、小さな砂山の雪崩はべき乗分布が観測されるが、システムサイズ（砂山を乗せる円板と粒子径の比で表す）がある値を超えると、べき乗分布の雪崩と共に、それとは別の規模が大きく周期的に発生する雪崩が重なり、雪崩の全質量の主要な部分を占め、全体としてはべき乗分布ではなくなることが Bretz 等⁷⁾(1992)の斜面の実験、Rosendahl 等⁸⁾1993の円板上の実験で明らかにされた。また、粒子の材質や形を変えて SOC の普遍性を確かめる実験も行われた。⁹⁾

砂山の雪崩のサイズ効果を説明する理論として、Prado 等は¹⁰⁾(1992)システムサイズが大きいときには粒子の慣性効果により、粒子が重力に加速され運動エネルギーを得るため雪崩が止まらなくなって大雪崩が発生し、べき乗分布から離れるとする理論を提唱した。それを検証する実験が Frette 等¹¹⁾(1996)および Christensen 等¹²⁾(1996)によって行われた。実験は非球形粒子では慣性効果が効かないと想定して米粒で行われ、その結果周期的な大雪崩は発生せず雪崩分布はべき乗法則を示した。

さらに、Manna 等¹³⁾(1998)はそれまでのモデルが表層雪崩を扱っているのに対し、容器内の粒状体の内部雪崩を扱うモデルを提唱し、内部雪崩では球状粒子でもべき乗分布を示すこと、容器内の粒状体は内部雪崩が繰り返されて SOC に達すると予測している。それは粒状体のアーチ効果により雪崩の進行が食い止められるためと説明している。これを検証する実験は未だ無いようである。

また、べき乗分布検証の別の問題として、実験データの統計処理上の問題があることも分ってきた。Buchholz 等¹⁴⁾(1996)は、砂山の台から落下する雪崩の規模と回数を計測するだけでは不十分で、台から落下しない雪崩が多くあり、これを含めないとべき乗分布にならないとしている。Sannchez 等¹⁵⁾(2002)は、雪崩にオーバーラップがある場合には、個々の雪崩を識別できず正確な分布を知ることが出来ないため、べき乗分布を検証できないことを示した。オーバーラップのある雪崩に対しては、雪崩の規模と回数を測定する方法でなく、静止時間統計などの方法を採用すべきとしている。

このように砂山の雪崩現象に関しては多くの研究がある

が、その力学や SOC 理論との関係には諸説あって未だ充分解明されていないと言える。Turcotte¹⁶⁾(1999) は SOC について展望したレビュー論文において、砂山実験による SOC の検証の結果は、まだ極めて曖昧と書いている。

我々は、粒子の表面摩擦力の影響と容器内の粒状体の現象に着目して実験を行った。粒子の表面摩擦力の影響は今までにあまり論じられなかった問題である。粒子間の表面摩擦力が大きいときには、粒子の質量が大きく球形であっても、慣性効果による雪崩の連鎖的な成長が食い止められ、大規模の雪崩は生じ難くなると予想される。ここではそれを実証する一つの実験データを得るために、多孔質で質量が大きい飼育動物用の飼料粒子を用いて砂山実験を行った。その結果得られたべき乗分布と臨界指数について 2 章に述べる。3 章では、容器内の粒状体の現象に理論の検証と応用の観点から注目する。Manna 等¹³⁾(1998) の内部雪崩の SOC 理論を検証する実験は未だ無いようであるが、その理由の一つとして内部雪崩の規模と回数を観測する困難さがあると思われる。我々は容器の底部側面に排出口を設け、そこからの排出粒子数を測定した。排出口の内側にはアーチ効果による空洞が形成され、そこでは粒子の崩落による空洞の成長と縮小の過程が繰り返され、排出される粒子数がべき乗分布に従うことを示す。この結果より、容器内部の粒状体は内部雪崩によって SOC に達すると推定する。最後に 4 章では、排出口での空洞崩落による粒子排出の分布特性に適合した粒状体の定量排出器として、ペット用の粒状飼料自動給餌器を試作し、その排出精度と排出条件の関係について調べた結果を述べる。

2 . 飼料粒子の砂山実験と臨界指数

本研究で実験に用いた粒子は粒状ドライタイプの市販ドッグフードで、形状は直径 $9 \pm 0.5 \text{ mm}$ 、高さ $9 \pm 1 \text{ mm}$ のほぼ球形、平均質量は 300 mg である。砂粒子に比した特徴として、多孔質であるため表面摩擦係数が大きい。そのため斜面の安息角は $45 - 48$ 度になり、砂山の $34 - 37$ 度に比べてかなり大きい。

実験は図 1 に示すように、水平に置いた円板（直径 105 mm と 200 mm の二種を使用）の中央上部から飼料粒子を落下

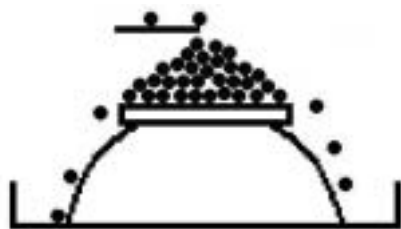


図 1 . 砂山実験の模式図

させて、円板上に粒子の山を形成させる。粒子の山の高さと同様が定常状態になるのを確認し、粒子を一個ずつ山頂に静かに置くように落とし、円板外に崩落する粒子の個数を記録する方法でおこなった。この実験では、粒子を確実に一個ずつ補給し、雪崩を観測することが出来る。

図 2 に実験結果を示す。雪崩による崩落の規模は円板から落ちる粒子数として求めている。大部分の崩落は粒子数にして 1, 2 個に偏り、観測された最大の崩落の粒子数は 5 個であった。それらを両対数グラフにプロットすると、良い直線性を示し、頻度分布はべき乗法則に従う。直線の勾配は、直径の異なる二種の円板台の実験で変化は見られず、臨界指数は 3.0 ± 0.1 と求められた。

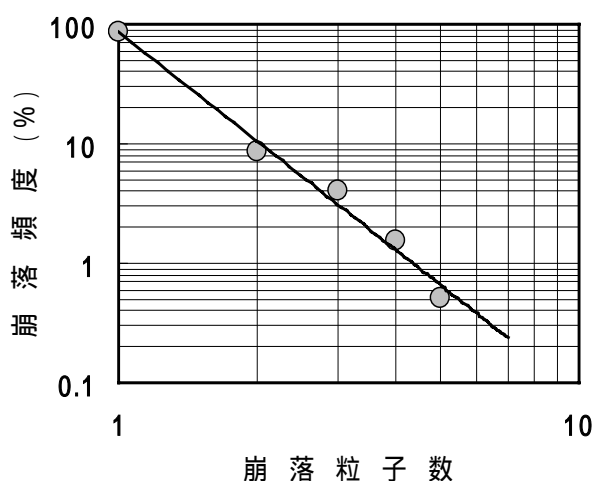


図 2 . 砂山実験の結果。円板直径 200 mm の場合を示す。山の上に落とした粒子数は台から崩落した粒子数に等しく、約 200 個であった。実線は最小二乗法によりフィットした直線でその勾配は -3.0 である。

ここで得た臨界指数の値は、砂粒子やガラスビーズの山での実験値として報告されている値 2.5 ^{5,9)} や 2.2 ⁸⁾ より大きい。べき乗指数が大きいことは、両対数プロットで直線の勾配が大きいこと、すなわち小規模雪崩の頻度が多いことに対応する。これは、雪崩の中の運動粒子はその質量に応じて運動エネルギーを蓄えるが、表面摩擦係数が大きいため静止している粒子間の結合が強く、雪崩の雪だるま効果が小さく、結果として雪崩の成長が進まず小規模雪崩の頻度が増すためと考えられる。すなわち、本実験において得られ臨界指数は、表面摩擦力により慣性効果が押さえられることを示していると言える。ただし、システムサイズをもっと大きくした場合に慣性効果による周期的な雪崩が発生するかどうかは未だ不明である。また、ここで得られた値が、自然界の地滑りのデータから得られている臨界指数¹⁶⁾ $2.3 - 3.3$ に近いことは興味深い。

3. 容器内の飼料粒子の内部雪崩、空洞崩落および粒子排出

図3に示す様に底部側面に排出口を持つ容器に粒状体を収納する場合を考える。排出口の広さが粒子断面積の十倍程度以下で、粒子間および粒子と壁面間の摩擦力が充分大きいときには、排出口のすぐ近くの粒子は外へ押し出されるが、少しはなれた粒子は粒状体特有のアーチ効果によって互いの力がバランスするため排出されない。こうして、排出口の内側に洞窟のような、粒子のない空間としての空洞 (cavity) が生まれる。この系に、微小なエネルギーの外部刺激を加えると、空洞の壁を形成している粒子を支えていた力のバランスが崩れ不安定となる。その結果、重力により1つの粒子が崩落すると、その隣の粒子も不安定となり、連鎖的な崩落が不安定粒子がなくなるまで続く。この連鎖は空洞の壁を作る粒子のみならず、内部の粒子にも及ぶ。内部の粒子は、崩落にはいらないが、不安定性の連鎖的な伝播を受け、重力の作用により下方の新たなバランス位置へ移動することになる。これが内部雪崩であると考えられ、その規模は空洞での崩落粒子と内部の移動粒子の和となる。粒状体のアーチ効果は排出口での空洞形成のみならず、内部の微小な空隙 (void) をも形成する。従って、この空隙を形成する粒子が内部雪崩の引き金になる場合もあり、内部雪崩が常に排出口空洞での粒子の崩落と排出を伴うとは限らないことになる。この内部雪崩に関与する粒子数の直接的な測定は極めて困難と思われる。その理由は、表層雪崩と違って3次元の分布であること、表層雪崩に比べ粒子の動きが制限されているので移動量が微小であることである。

ここでは、排出口からの排出粒子数を測定する実験を行った。排出粒子数は空洞での崩落粒子数と殆ど等しいと言える。何故ならば、崩落して排出されない粒子は稀に数個生じる程度であり、それも次の崩落イベントで排出されるからである。崩落粒子数は内部雪崩に関与する粒子数の一部であり、内部雪崩と崩落の運動関係から両者はほぼ比例すると考えられる。従って、排出粒子数の分布を測定することによって内部雪崩の分布を推定できると考える。

またこの粒子排出現象を排出口の空洞自体に着目して考えることも出来る。すなわち、空洞はアーチ効果によって形成されているので、外部からの刺激により不安定となった粒子が崩落して空洞が成長すると、空洞の不安定性が増し、僅かなエネルギーの付与によって大きな崩落が生じ、空洞は潰れて縮小し、併せて粒子が排出される。このように空洞は、砂山が蓄積と雪崩を繰り返して山の高さを保とうとするように、崩落による成長と縮小の過程を繰り返して一定の体積を保とうとすると考えられる。すなわち、この系が自己組織的に臨界状態にあるとすれば、空洞の崩落およびその崩落による容器外への排出粒子数の分布はべき乗法則に従うことが予想される。

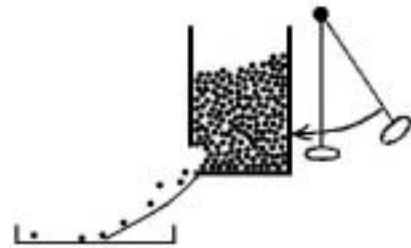


図3 . 容器内の粒状体の雪崩と崩落実験の模式図。容器形状は、幅 110mm、奥行き 165mm、高さ 250mm。粒子排出口は容器の下部側面に設ける。幅 45mm、高さ 20mm。軽い振り子の触れ角を一定にして微小な刺激を与える。排出された粒子は容器に戻す。

実験方法を模式的に図3に示す。容器の材質は、観測を可能にするため透明アクリル材とし、壁面と粒子の間の摩擦を調節するため、底面と排出口周辺に紙やすりを貼り付けた。この系へのエネルギーの供給は、小振り子の打撃により横壁に一定の微小刺激を与える方法を使った。この外部刺激を一回与える毎に、排出粒子数を記録した。一回の刺激と崩落による排出粒子数が、最大で28個に達する崩落が発生した。これは先の砂山実験の場合と顕著な違いである。

図4に示すように、崩落規模(一回の刺激により排出された粒子数で表す)とその頻度を両対数にプロットすると、右下がりの直線性が明らかである。べき乗分布を求めるため、排出粒子数の対数値が出来るだけ一定間隔になるようにデータ区間を再配分して最小二乗法で最適直線を求めた。その結果が図の直線で、臨界指数は1.5である。

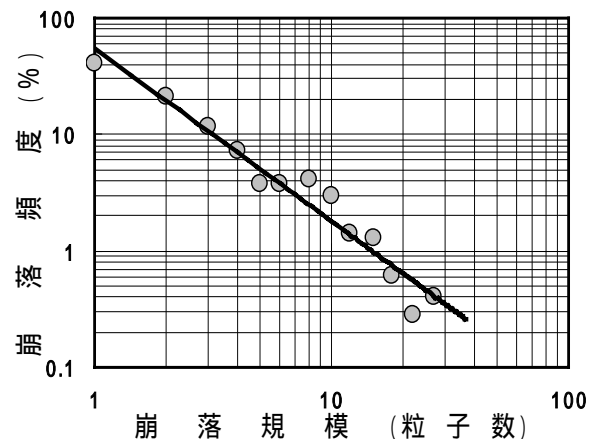


図4 . 容器内空洞の崩落による排出粒子数の分布。振り子による刺激回数 1200 回。排出粒子総数は 3900 個であった。データ点は、排出粒子数の対数値がほぼ一定間隔になるように区間配分している。直線は、最小二乗法による直線でべき乗分布を示す。臨界指数 = 1.5 が得られる。

これより、容器内粒状体の排出口における空洞崩落はべき乗分布を示すことが分った。また、これと連動する内部雪崩もべき乗分布と推定でき、この系はSOCにあると言える。この推定は先述の Manna 等¹³⁾(1998)の理論と一致する。得られた臨界指数 1.5 は Manna 等¹³⁾の二つのシミュレーションによる値 1.7 と 1.48 とほぼ同じである。先の砂山実験と比べると、臨界指数は 1/2 になり、砂山実験より規模の大きい崩落が発生している。これは、崩落事象間の相関が強いことを示しており、その程度は粒子の質量と表面摩擦係数によると考えられる。

4. 容器内の粒状体の現象を応用した自動給餌器の特性

粒状体の雪崩や崩落と言う現象は、不規則で突発的に発生する現象であるため、応用面の障害になるものと思われるが、自己組織的臨界現象という法則的な現象であり、その分布がべき乗法則に従うことが明らかになった。従って、その統計

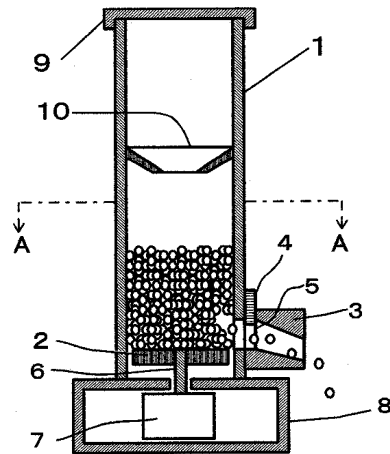


図5. 自動給餌器の構造。

- 1 - 飼料収納容器、2 - 回転円盤、4 - 排出口調整板
- 5 - 排出口、6 - 回転軸、7 - モーター、8 - 基台

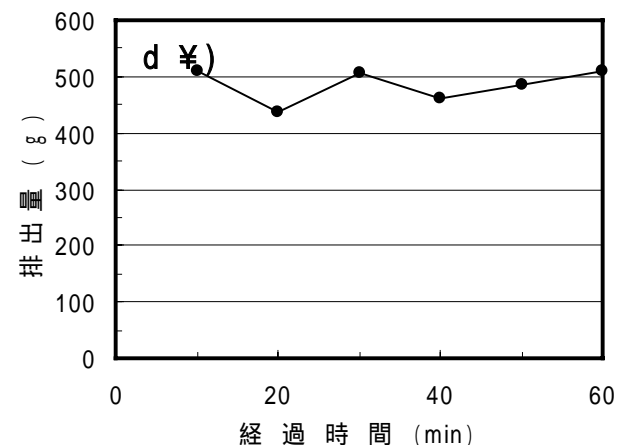
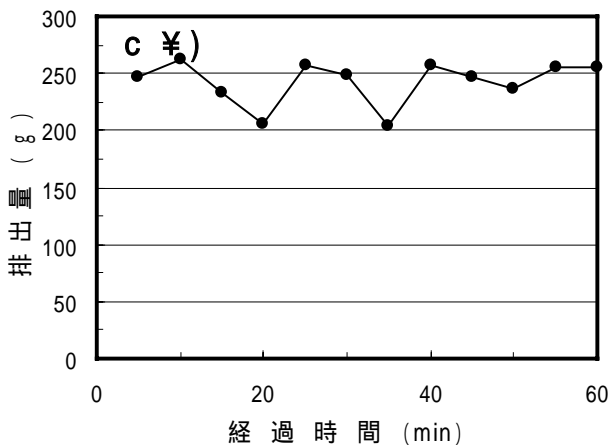
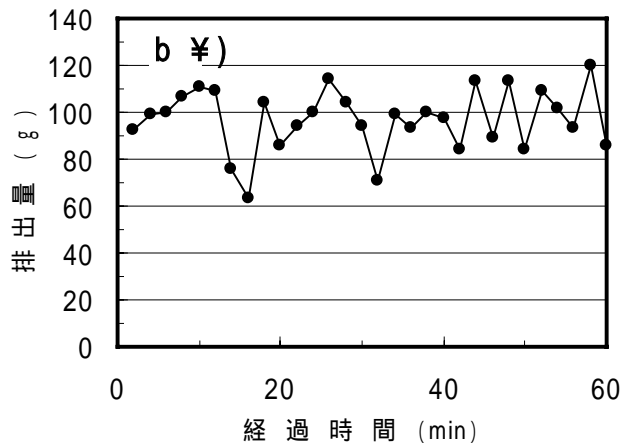
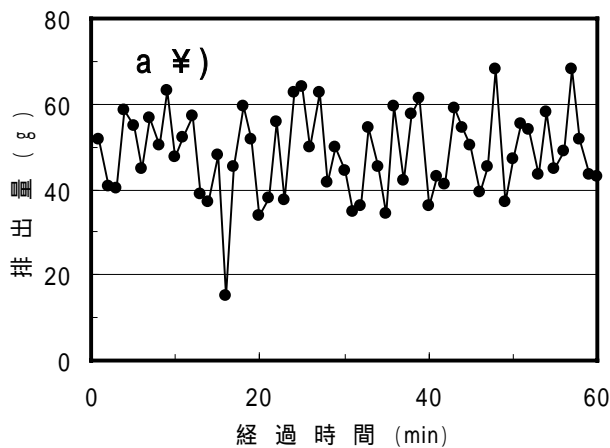


図6 自動給餌器における排出時間別排出量の推移の一例。排出口の広さを幅30mm、高さ20mmとした場合で、繰り返し排出実験を各60分間行ったもの。各々の排出時間は、a) 1分間 b) 2分間 c) 5分間 d) 10分間である。平均排出量は、a) 48.5g b) 96.9g c) 242.3g d) 484.5gで、平均排出量に対する相対的な標準偏差は a) 20.8% b) 13.6% c) 8.0% d) 6.1%である。また排出粒子数は飼料粒の平均質量 0.3gより求められる。

的特性に適合する応用方法を探れば、特定の目的に沿った粒状機器の可能性が考えられる。特に空洞における崩落は、容器内にある粒状体の現象であるので応用性があると思われる。ここでは、粒子定量排出器への応用例として、飼料粒を対象とした小動物用の自動給餌器¹⁷⁾の特性を調べる。これは、旅行や急用で自宅を留守にする場合に、ペットに定時に定量の給餌をする目的で使用される器具を想定した物である。

その構造は図5に示すように、収納容器の底部側面に崩落粒子を排出する排出口があり、かつ底面はモーターにより低速回転して、内部の粒状体にエネルギーを供給し、排出部の空洞の臨界状態を自己組織的に持続させるようになっている。低速回転モーターは、プログラムタイマーにより毎日の定時に起動し、分単位で回転時間を設定する。排出量（給餌量）は、モーターの回転時間と排出口の面積によって、対象動物の大きさに応じて制御できる。試作器の収納容器の内径は105mm、高さは継ぎ足しにより可変で500mm - 1000mm、底面の回転数は1rpmとした。また、収納容器の材質は塩化ビニール、回転底面はアルミ板を用い、底面と容器底部側面に紙やすりを貼って飼料粒子との摩擦を増加させ、底面の微小回転により空洞における小さな崩落が誘導され、底面回転の最小設定時間である1分間においても多数回の崩落と排出事象が発生するようにした。

図6に、一定時間の排出を繰り返して測定した排出量の推移の一例を示す。1分間排出量のデータは、相対標準偏差で20%におよぶゆらぎを見せている。排出時間がより長い場合は、その間に起こる空洞崩落のイベント数が多くなり、多くのイベントの和としての排出量のゆらぎは少なくなってくる。2分間、5分間、10分間のそれは、13.6%、8.0%、6.1%と減少し、排出量は安定していく。実用的には、所要の排出

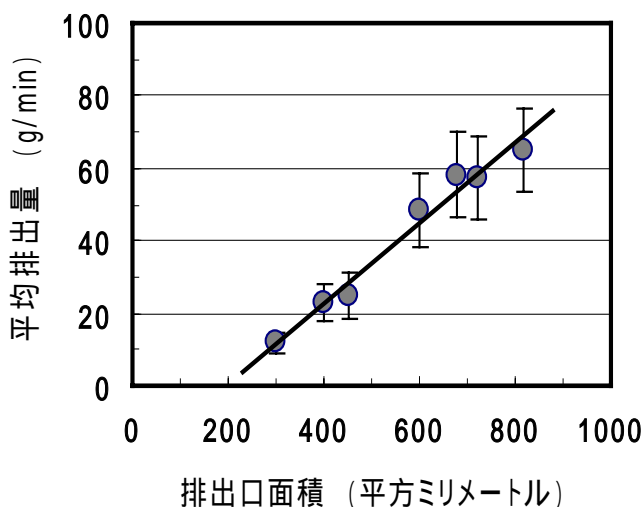


図7．排出口の面積と1分間平均排出量の関係。排出口の幅を15-34mm、高さを15-24mmの範囲で変えて実験したもの。データ点に付く縦線は1分間の標準偏差を表す。直線の勾配は0.11である。

量と排出精度を実現するために、排出時間と排出口の面積を調整することになる。尚、これらのデータは容器への飼料充填高さには殆ど依存しない。

図7に、排出口の面積(mm²)と1分間当たり平均排出量(g/min)の関係を示す。実験条件の範囲内では、排出量と排出口面積の間に比例関係が見られる。この比例関係は排出口サイズの幅または高さのみを変えたときにも同じである。排出口を広くすると排出量が増え、同時に標準偏差の絶対値は増加するが相対値は変化しない。しかし、ある一定量を精度よく排出するには、排出口を狭くし排出に要する時間を長くして、空洞崩落のイベント数を多くすると良い。しかし、排出口の広さの下限は、粒子径の数倍位であり、これより狭くすると粒子が排出されなくなる。排出時間があまり長いと、用途によっては実用性を損なうことになる。実際に中型日本犬に試用した例においては、排出口600mm²、排出時間1日に6分と設定し良好な結果を得た。

5. 結論

本研究は、従来の砂山実験において用いられた粒子に比べて表面摩擦係数と質量が大きくほぼ球形の粒子で実験を行い、粒子間の表面摩擦力が、慣性効果による雪崩の連鎖的成長を抑え、臨界指数の大きいべき乗分布が実現されるとの結論を得た。この表面摩擦効果のシステムサイズ依存性を詳細に調べる実験は今後の課題である。

次に、容器内に収納された粒状体の内部雪崩現象、排出口の空洞崩落などは測定困難な現象であり、今まで殆ど行われていないが、本実験では表面摩擦係数と粒子サイズの大きい粒子を用いることにより測定を可能にした。その結果、排出粒子数、空洞崩落粒子数の分布はべき乗法則に従い、容器内で非平衡にある粒状体が自己組織的臨界状態に至ると推定した。

最後に、この容器内粒状体の特性としての自己組織的臨界状態に適合した応用例として、粒子定量排出器である自動給餌器を試作しその排出精度を明らかにした。この方式は、重力の作用と粒状体本来の性質を応用原理とするので、従来の方式に比べて次のような利点がある。1) 構造が簡単で粒子排出経路に運動機構を全く含まないので粒子の詰まりがない。2) 粒状体に僅かな外部刺激を与えればよいのでエネルギー消費が少ない。3) 粒子の排出が多数回の崩落により緩慢に行われるので、分単位の時間制御で一定の精度を実現できる。4) 以上により、製造コストを低く出来ることになる。ただし、この方法は短時間に定量排出する目的には適さず、ペットのための給餌のように定量排出に要する時間が数分以上でも良い場合に適する。

(付記) 本研究は、1992年に宇部工業高等専門学校機械工学科応用物理学実験室において行ったものである。

参 考 文 献

- 1) Bak P, Tang C, Wiesenfeld K : Self-Organized Criticality- An Explanation of $1/f$ Noise, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 381-4, 1987 : Self-Organized Criticality, *Phys. Rev. A* **38**, 364-74, 1988.
- 2) 例えば、井庭 崇、福原義久：複雑系入門 - 知のフロンティアへの冒険、49-59、東京、NTT出版、1998年。
- 3) 例えば、高安秀樹、高安美佐子：経済・情報・生命の臨界ゆらぎ - 複雑系科学で近未来を読む、東京、ダイヤモンド社、2000年。
- 4) Jaeger H M, Liu C, Nagel S R : Relaxation at the Angle of Repose, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 40-3, 1989.
- 5) Held G A , Solina D H, Keane D T, Haag W J, Horn P M and Grinstein G : Experimental study of critical-mass fluctuations in an evolving sandpile, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1120-3, 1990.
- 6) Nagel S R : Instabilities in a sandpile, *Rev. Mod. Phys.* **64**, 321-5, 1992.
- 7) Bretz M, Cunningham J B, Kurczynski P L and Nori F : Imaging of avalanches in granular materials, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2431-2434, 1992.
- 8) Rosendahl J, Vekic M and Kelley J: Persistent self-organization of sandpiles, *Phys. Rev. E* **47**, 1401-1404, 1993.
- 9) Grumbacher S K, McEwen K M, Halverson D A, Jacobs D T and Lindner J : Self-Organized Criticality : An Experiment with Sand Piles, *Am. J. Phys.* **61**, 329-35, 1993.
- 10) Prado C P C and Olami Z : Inertia and break of self-organized criticality in sandpile cellular-automata models, *Phys. Rev. A* **45**, 665-9, 1992.
- 11) Frette V, Christensen K, Malthe-Sorensen A, Feder J, Jossang T and Meakin P : *Nature (London)* **379**, 49-52, 1996.
- 12) Christensen K, Corral A, Frette J and Jossang T : Tracer dispersion in a self-organized critical system, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 107-10, 1996.
- 13) Manna S S and Khakhar D V : Internal avalanches in a granular medium, *Phys. Rev. E* **58**, R6935-8, 1998.
- 14) Buchholz V and Poschel T : Avalanche statistics of sand heaps, *J. Stat. Phys.* **84**, 1373-8, 1996.
- 15) Sanchez R, Newman D E, Ferenbaugh W, Carreras B A, Lynch V E and Milligen B P : Quiet-time statistics – A tool to probe the dynamics of self-organized-criticality systems from within the strong overlapping regime, *Phys. Rev. E* **66**, 036124, 1-10, 2002.
- 16) Turcotte D L : Self-organized criticality, *Rep. Prog. Phys.* **62**, 1377-1429, 1999.
- 17) 真鍋 惇：粒状飼料の自動給餌器、特許庁公開特許広報、特開 2001-314133.