

# 直感的性状判断の『カギ』情報としての 流れるものの運動学的特徴

## — 動きと感覚の相互関係 —

How can the observational method contribute to clarifying the characteristic kinematics of ubiquitous flowable objects?

車田 研一

福島工業高等専門学校物質工学科

Kenichi Kurumada

Fukushima National College of Technology, Department of Chemistry and Biochemistry

(2012年9月16日受理)

Why can we instantaneously recognize a powder in flow as a distinct type of matter from a liquid only in its kinematic appearance? Powders are often mentioned in analogy to liquids since they are considered as “flowable” objects that behave more or less like liquids. However, this apparently justifiable analogy is considerably puzzling and misleading. Actually, we are not likely to mistake a powdery system in flow as a liquid. Our unconscious and everyday verbal expression for the most typical physical feature, flowability, leads us to a predominant and obstinate bias toward indentifying the characteristics of powders as those of liquids. Nevertheless, we should start with finding the difference in the kinematic observable facts between powders and liquids within the range of the shared feature in predicative and adjective expression, “flowable”. In this work, the author attempts a radical discussion on the unavoidable risk of falling into a tendency of making up chancy stories for reasoning the observed phenomena based on miscellaneous “leaned knowledge in textbooks” about powders and particles. As an example, an observational study for clarifying the most essential difference in the kinematics between water and sand is concisely summarized in the last part of this report to show that the clue for distinguishing different types of flowable matters are to be found in the common feature in the verbal expression, “flowability”.

**Key words:** perception, flowable object, powder, liquid, characteristic kinematics

### 1. 緒言、背景および問題提起

わたしたちは無数の「モノ」に囲まれているにもかかわらず、ほとんどのばあいそれらを的確に判別し、日常生活や諸々の生産活動を不断にいとむことができている。否、より正確には、時々刻々の周辺状況はほぼ偶然の「一回的」な事象であるといきってよいほどに、けっして細部においては合致しないにもかかわらず、それらを、相互に不連続かつ比較的安定な「形態」へ瞬時に分類しつづけられて

いるということを、「周囲の無数のモノや状況を的確に判断している」と便宜的に表現するのだ、といえる<sup>1)</sup>。たとえば、窓のそとで雨が降りしきる状態は、視界内の雨滴の位置関係および速度がいかに一回的で二度と再現されないものであろうとも、おなじ「雨が降っている（雨粒が下方へ集団的に運動している）」状況として認識され、それ以上の細部の記述が附随されることはほとんどない。にもかかわらず、その捨象によってわたしたちのがわになにが

しかの不都合が生じることはほとんどありえない  
 といってよい。また、捨象がなされるがゆえに、わたしたちの「状況判断／状態認識」は必然的に不連続性を示す。すなわち、判別の契機となるところの「差異」のみが状況の記述において前面にうきでてくる。捨象がどのような機構で発生するのか、という始原的な問題に関しては、たとえいわゆる「脳科学」がいくら進んだとしても、現実に「捨象がおこる」という事実性を事後的に追認するかたちでしか説明のストーリーを組み立てることは不可能であろう。ちかごろはごく安価なデジタルカメラにも人の顔を認識するような機能がそなわっておりはなはだ驚かされるが、「○●の認識アルゴリズム」を成功裡に応用できることと、わたしたちがたえずある自明性と安定性をもって状況を認識しつづけ(られ)ていることとは、たとえ前者が後者の問題を考えるうえでひとつの参考的な事実を提供することはたしかであるとしても、あくまでも別次元の問題である。

モノや事象の認識 (cognition) に関する論考はおそらく記述的言語の成立と同時に生じてきたのであり、その全容を概観することなど到底できることではない。ただ、ごく粗いいかたではあるが、「言語化するからはっきりと認識する(ことばにしてみるとやっとなかたつような気がする)」というはおそらくかなり核心的なところであり、さらにいえば、言語化により発生した「構造(共時的に喚起されるイメージ)」により、わたしたち自身の「事象のとらえかた」がたつよく規定されてくることは明らかである。それがゆえに、おなじ対象を目のまえにしても、異なる人間の集団間で言語化の枠組みに差異があるばあいにはそれら複数の集団のあいだで相互に通じないと感じられるような記述がなされる。これはけっしていわゆる「分野のたこつぼ」や「セクショナリズム」といった文脈でのみみられるようなことではない。たとえば、ふつう讃嘆の意図でもちいられる「匠の奥義」、「不世出」といった、なかば意図的に口をつぐんだような表現が、わたしたちになにがしかの伝達不可能性、もしくは、伝達を最初からあきらめていることを暗示的に感じさせるのは、おそらくそのことと関係している。さらにいえば、自然科学や工学が「再現可能性

(reproducibility)」という点にその存立の根拠をおかざるをえないのは、「言語化されたことがらが言語化の規約の範囲で確証的にあらわれる」という点にその「解明」の要件をおいているからである。しかしいっぽうでわたしたちには、たとえば、「よいものは(再現性をもって)よい」といった無視できない実感があり、しかもこれは多くの場合大多数の人により共有される心象である。もし「モノづくりを科学的にみる」のが工学であるとするのであれば、再現性をもってよいと感じられるモノの特徴を見出し、ひいてはこれを言語化する努力をはらう正当性はあるだろう。

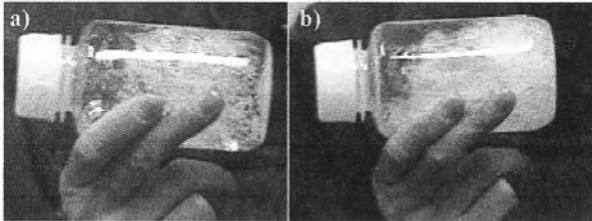
筆者は相当な期間にわたり、直接もしくは間接に、工業的な加工工程を主たる対象とするプロセス工学(単位操作、化学工学)にたずさわっており、現在もそれを続けている。もともとこの一工学分野は、「所望のモノを所望の量だけ可能な限り無駄をだすことなく、くりかえし、信頼にたる再現性をもって製造する」ためにはどのようなハードウェア(製造機械および原料)およびソフトウェア(方法論)を調べればよいのか、という問題をあつかう、いわば工学的設計論に分類される。たとえば、いわゆる研究段階ではラボスケールである所望の性状や特性をしめすサンプルを文字どおりある一定の知見を組み合わせで試作し、その過程での試行錯誤をデータベース化していくことはプロセス工学研究における主たる作業内容である。そして試作品ができれば、これが所望の被要求条件(スペック)を充たすか否かは原則論としてはある規定され、くりかえされた測定に依らねばならない。原則論として、これは試行と検証という手続きとしては正しい。ところが、サンプル作製などに熟達してくると、実際にサンプル製作に従事している途中でなぜかそのサンプルが「いけている」か「ボツ(ダメ)」かが直感的にわかってしまうケースが多い。もちろん、このような事象はとほうもない昔から実際にモノをあつかうことをつねにしている人々により意識されているにちがいないし、この「感知」の瞬間の心象を詳細に記述してのこしておいてもらうことがもし可能であるならば実際はどれほどありがたいか想像もつかないが、それらは現実としてはほとんど記録されない。それでもひじょうに稀有な一

例を挙げると、レオロジーの黎明期の泰斗であるスコット・ブレアー (G. W. Scott Blair) は、その高名な著書“Elementary Rheology (1969)” (和訳本『入門レオロジー (朝倉書店, 1970)』) の第13章を「サイコロロジー、感覚の測定、熟練技術」と題し、物体の大変形に際してのひとの感覚がレオロジカルな手法でとらえられるのか否かを論じている<sup>2)</sup>。レオロジーとは、(rheology, 流変学) なんらかの力の支配下にある物体のながれや変形を数学的な形式へと整理する一種の現象論的、記述科学的な分野であり、樹脂、塗料、食品、化粧品などのながれと変形を必然的にともなうような対象物の性状の記述ではかならずあられる。具体的には、ブレアーと共同者は熟練パン職人が練り小麦の性状を手の感触で瞬時にみわけるといことがらに着目し、練り小麦にたいして既存のレオロジカルな測定をおこなったときにえられる結果と熟練職人の触手印象のあいだには相関がみいだされるか否かを検討した。これに関するブレアー自身の結論はかなり否定的であり、*「われわれはレオメーターで測定した練り粉の性質と熟練したパン職人が評価する品質のあいだに相関関係をみつけようと試みたが、熟練工の判断をとりあつかうのは心理学者の仕事であって、レオロジストの仕事ではないことがすぐに明らかになった。」*といいきっている。さらには、その理由づけをするにあたりブレアーは*「たとえばコシ、しなやかさあるいは弾力性などのような心理学的性質は粘性、弾性などの物理的性質に対応するものではなくて、皮膚、筋肉、腱、関節などのいろいろな感覚が複雑に作用しあった結果なのである。したがって、パン職人が弾力性とかしなやかさと呼んでいる性質は物理的弾性とは対応しておらず、粘性／弾性などの比(すなわち緩和時間)によってより正確にあらわされるものである。」*と記述している。率直なところ、この見解は現象の虚心坦懐な記述としてはまったく整理されておらず、明晰さと啓発性に欠いており、有意であるとは思えない。(たとえば、コシが心理学的性質であるというの理解できない。)ブレアーほどの高名な大家が練り小麦の性状を意外なほど短絡的に心理的要因へと帰してしまったことについては筆者なりに憶測するところもあるが、ここではそれは考えないこと

にする。ただ、パン職人が練り小麦の質を区別できるという事実には必ずながしかのフィジカルな要因はあるはず(みいだされるはず)だと筆者は考える。さらにいえば、プロセス工学(すなわち、実際のものづくり)の視点では、ブレアーが「心理学的性質」とよぶ瞬時に獲得される性状情報はしばしば重要になることはひろく経験的に知られるところであろう。

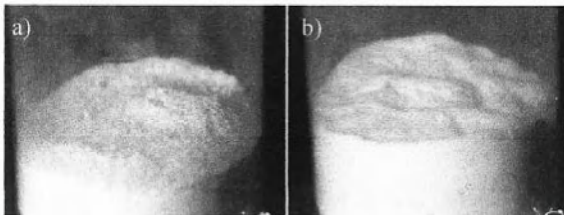
一例として、Fig. 1に、透明なプラスチック製瓶に容積の半分だけ水(左)とペンタン(右)をいれ、両者の差異がもっともわかるように振とうさせたときのスナップショットをしめす。静止画像ではややわかりづらいが、それでも、わずかな練習をつめばこれらの視覚的判別はきわめてはやく、容易におこなわれるようになる。ここで振とう条件については、「両者の差異がもっともわかるように振とうさせた」とのみ記したのには理由がある。内容物が水とペンタンというかなり巨視的性質がたがいに相異なるものである場合、被験者に「両者の差異があなたにとってもっとも顕わになるように振とうしてください」という指示をあたえた場合に、振とう動作が同一条件でおこなわれる保証はたしかにない。しかし、わたしたち(被験者およびそばの肉眼観察者)自身がその振とう条件の差異を視覚的に把握することは不可能だった。すなわち、わたしたちは対象に与えている運動条件(力学的境界条件)の相互差異を認識はできず、当面それは巨視的操作条件としては「同一条件である」といわざるをえないのである。すくなくともわたしたちが巨視的境界条件として設定するところのものは相互に共通であり、その相互差異性は不可知要件である。にもかかわらず、わたしたちはそれら両者間に誘起される視覚的結果事象の差異は容易に感知できるようになる。さらにいえば、わたしたちが手に感じる反動感覚(力覚)は視覚的情報以上に内容物の差異を明白にわたしたちに伝える。しかしその差異は「たしかにちがう」という意味での差異性であって、これを云い表わすことは、日常生活感覚の水準においては不可能である。これは、わたしたちが通常ほとんどのにも意識せずに検知しているところの「事象間の差異」を明確に表現はできない、ということの意味する。よって、ここでわたしたちが研究課題として

とりあげられるのは、上記の「いまのところ表現できない、言語化できない」ところの「現象の差異性」を実体的にデータとしてとらえ、論考の俎上にのぼらせることである。



**Fig. 1** Snapshot of liquid in a transparent plastic bottle in hand-shaking motion at the condition where the shaking person can perceive the difference in the dynamic tangible texture between these two sorts of liquids. a) water and b)pentane.

つぎに、**Fig. 2**に二種類の強力粉を内径約6cmの円筒状の透明プラスチック容器に封入し振幅約2mm、50Hzの条件で振動させたときの外観のスナップショットを示した。



**Fig. 2** Snapshot of surface pattern of hard bread flour contained in a glass cylinder ( $\phi 60\text{mm}$ ) vibrated at 50 Hz (amplitude : approximately 2mm). a) fine flour after sieving with 100 mesh/inch. b) as-grained flour (before sieving with 100 mesh/inch).

おなじ条件で振動させても、aとbとは互いにまったく異なる外観を示しており、この両者の区別がつかないということはほとんどありえない。じつはaはb（粉砕し異物をとりのぞいた強力粉）に100mesh/inchのフルイをかけて相対的に粗い粒子を除いただけの差しかない。フルイかけ前のbでは対流のような全体的な流動状の動きが目立つのに対してフルイかけ後のaでは1mmから2mmほどの大きさの団粒が表面にあり、しかもそれらは観察と件上主要な運動単位としてほぼ同じ位置で跳びはねるような運動をくりかえしている。端的にいうと、

なぜかフルイをかける前の強力粉のほうが流れる外観をしめしている。この顕著な流動的挙動の差異を説明づけようとするばあい、たとえば下記のまったく対照的なストーリーをつくることができってしまう。

1)フルイをかけることにより粒子が全体的に小さいものだけになり、比表面積が大きくなる。この結果粒子間に作用する付着力がより支配的に効くようになり、振動印加下では団粒状の運動パターンが生じる。

2)いちどフルイをかけることにより粒子間の弱い架橋を断つことになる。その結果、振動印加下で個別粒子間に作用する相互拘束が減少し、全体的に粉が対流状に流動する傾向があらわれる。

**Fig. 2**に示された実験結果をみるかぎり、2は明らかに誤謬で、1が正しいようにみえる。しかし、もともと1と2のいずれをも予見的に択ぶことが不可能であるいじょうは、わたしたちはたかだかこの強制振動状態にあるだけの小麦粉の挙動をいくばくでも推測が可能なほど理解しているとはいえないのである。すなわち、もしほかの考えかたで“フルイをかける” $\Rightarrow$ “団粒状運動がみられる”というふたつの事柄のあいだの関係性が捻出されさえすれば、そのストーリーが上記の1と比べて信頼性に劣るということは証しえない。

粉をのぞましいかたちでハンドリングする方法論は、プロセス工学の教科内容としては『機械系単位操作・粉体工学』という名称でたばねられてきた経緯がある。諸般の情勢の変化もあり、この分類も昨今はかなりの違和感をもってうけとめられるようになってきたが、「粉 (powder)」の運動の単位が「粒 (particle)」という剛体的離散体であり、それがゆえに粉 (粉体) の運動学は、離散体に作用する力の定式化により構成される力学問題

(mechanics) へ帰着される、というみかたはいまだに支配的である。それゆえ、粉のハンドリングにまつわる諸問題群はすくなくとも当分のあいだは機械系単位操作 (mechanical unit operation) のカテゴリーへ分類され続けるだろう。しかしいっぽうで、「流れる (flowable)」という様態を粉が示し、なおかつその「流動性 (flowability)」が粉をハンドリングする装置の基本構造上の要諦をあたえるこ

とから、しばしば、「粉は、粒という微細な固体の集合体であると同時に、流れるという性状を示す、いわば、固体と液体の中間にあたる状態である」というようないいかたがなされる。たとえばガラス容器内へ乾いた砂をいれ、容器下部から一定以上の速度で送気すると、砂がたえまなく集団的に流れるという現象がおこる。これを流動床 (fluidized bed) とよび、工業反応器内などで固体を触媒などの目的で高頻度で接触する媒介物として使用する必要がある場合に利用される。

このように、粉には液体と類似した性状があるにもかかわらず、現実には人が粉と液体をとりまちはがえることはほとんどおこらないということに筆者はつよい関心をいだいてきた。また、実際の工程で本来液体状態になければいけないものがなにかの要因で固体 (粉、粒) の状態へ転化してしまった場合に、ごく短時間のうちにそれを感知できなくてはならない。おそらくそのような感じたいは現場の人の感覚によりそれこそごく短時間でなされるだろう。では、もしも粉を液体と誤認することが高い確率でおこるとすれば、それはどのような条件においてであろうか？もしもさまざまな種類の「流動物」が呈する視覚的および力覚的印象をめぐり、数年来、高速度撮影および衝突インパルス測定を中心に測定をくりかえしおこなってきた<sup>3) - 10)</sup>。むしろこのような測定は、おなじ「流れる」といわれるものであっても、わたしたちが (たとえば視覚的に) それらを容易に区別できるとすれば、それはフィジカルにはどのようなシグナルにおもに依拠するのか、という問題意識をもつてのことである。

上記のような問題に関連し、述語的同一性 (predicative identification)<sup>11)</sup> という考えかたが考察の出発点として有効であることに筆者は気づいた。たとえば、ここでのキーワードであるところの「流れる」を例にとってみよう。水は流れる、というのはきわめて常識的な命題である。この「水」をたとえば「砂」と替えて、砂が流れる、とすると、「流れる」という述語を介して水と砂の挙動上の類似性が明文化され、意識される。このとき、自然現象という水準では、水が流れる、ということと、砂が流れる、ということが「相互類似性」というパイアスのもとで想起される必然性はじつはまったく

ない、という点は重要である。つまり、常識として「砂が流れる」という感じかたをする必然性は原理的に見出しえないのである。(たとえばかりに、ある世界では「砂」という主語に「なめる」という述語が慣用的にくみあわされてもおかしくはないのである。) この意味で、「粉も液体と同様に流れる」という表現に馴らされていると、そもその出発点から水と粉の運動を相互類似性の文脈で感知してしまう傾向がわたしたちのがわにかたちづくられる。しかしそれは粉の呈するフィジカルな特徴のうちなにかを捨象することによって成立するみかたであり、わたしたちになにかを「見なく」させていると考えられる。わたしたちは、「粉も水と同じように流れるのだ、・・・だからそれら両者は似たように挙動するのだ」という結論を最初からもって観察にのぞんでしまう。このことが必然的に「水と粉の動きの類似性をみつけだすような、観察における捨象」をきわめてつよく方向づけてしまうことは明らかである。よってここでは、類似性をあえて意識せず、逆に、「粉の流れ」が現実として「液体の流れ (すなわち、ほんもの流れ)」とは容易に区別できること、また、ときにそれが区別しがたいときがあること、という経験的な事実性にもとづき、その差異化の契機の役をはたす物理的因子を主として運動学的な観察手法のなかからみいだすことをねらう。この探求においては、わたしたちは定型的な理化学的手法をもちえない。そしてそのことが、これだけ身近でだれもが想起できるような単純な事象であってもほとんど理工学の研究対象になることがなかった要因であろうと考える。若いころに文体論をコアにしたきわめて非凡な文芸評論を書いた柄谷行人がその著書『日本近代文学の起源』のなかの一節で、リアリズムと通称される文体の基本的な姿勢に関してこう記しており、それはまさに筆者の研究の動機の真中を射抜いていると感じた。《ロシア・フォルマリズムの理論家シクロフスキーは、リアリズムの本質は非親和化にあると述べている。つまり、見慣れているために実は見ていないものを見させることである。したがって、リアリズムに一定の方法はない。それは、親和的なものをつねに非親和化しつづけるたえまない過程にほかならない。(一 中略) リアリズムとは、たんに風景を描くの

ではなく、つねに風景を創出しなければならない。それまで事実としてあったにもかかわらず、だれもみていなかった風景を存在させるのだ。》<sup>12)</sup>

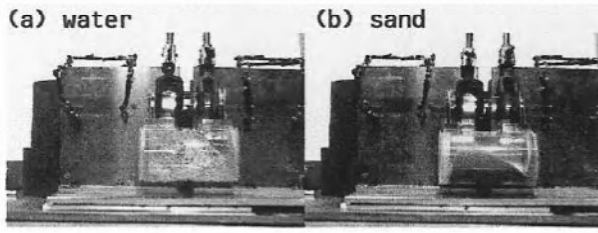
ここで本試論の動機と全体的な粉体工学研究の流れのなかでの位置づけをやや概括的に述べておく。従前にも、粉体の「ながれるという性質 (flowability)」を研究の対象とした事例は数多くあり、その意味においても、「粉体の流れ」じたいはすでに永く扱われてきた現象である。そもそもこれは観察者の眼前で生起するなじみぶかい事象であり、なおかつ、粉体の形態を有したあまたの製品の移送に直截にかかわるがゆえに、若干のニッチ性はあるものの間断なく研究のおこなわれてきた物理現象であるといえる。たとえば、理工学分野の文献検索を「powder」, 「flowability」というキーワードの積集合でおこなうだけでも千あまりの数にのぼる既往の出版物が挙がる。さらには2010年以降だけに限ってもかなりの数の新たな研究報告がなされていることがわかる<sup>13)~19)</sup>。本稿でそれらをひとつづつ具体的に紹介することはむしろ不可能だが、これらの報告を概観すれば、粉体の「ながれ」は、工業原料もしくは工業中間製品としての粉体のとりあつかい性 (ハンドリング性) の良否にかかわる、実用上の重要度が高い粉体の基幹的な性質のひとつであることがはっきりとわかる。そこでは、レオロジー、高速度観察などが基本データとしてあたえられ、粉体の性状の記述パラメーターとなっている。いっばんに理工学は使われる用語の「意味」をあるていどその出発点において定置するのをスタンダードなスタイルとするので、筆者がさきに述べた「述語同一性」を問題にとりあげるのはやや異例な感はあるかもしれない。しかし、筆者は、「粉体は (液体とおなじように) ながれる」という定型的な通説命題に依拠しておこなわれる粉体の動力学的研究にたいしてはつねにある種の根本的な疑念をいだきつづけてきた。いふならば、その一連の研究は必然的に、液体が「ながれる」という実物的参照対象においてなされる論考であるいじょう、粉体と液体の運動現象は現実としては容易に相互弁別可能であるという、通常人 (あるいは職人) のごくあたりまえの感覚を説明しうるとは考えられないのである。比喩的にいえば、粉体の運動の「見かた」

じたいが無反省的に液体でのそれに圧倒的にひきずられてしまい、それがなぜ容易に区別しうるものであるかという点は不問に付される。実際の問題としては、工業プロセスにおいて攪拌されている液体にゲル化や分散顆粒化などのなにがしかの物理形態上の変化が生じることは (たとえば食品工業などではとくに) プロセス管理の立場からは看過されざるべき事象である。わたしたちが身のまわりであたりまえのように生起する事象をそれぞれ「理解」しようとするときに、つねにそれを表現するためのことばによって、まさに言語がわでの恣意的な「くくり」を施してしまうことにたいする筆者自身の長年にわたる疑問もあいまって、筆者は、この「ながれる」という述語により通常は表現されてしまう粉体群の運動をつぶさに観察し、その本質的特徴を把握することが重要であると考えている。とりわけ、液体と粉体のあいだで共通して「ながれる (flowable)」と形容される運動の (ほぼ瞬時の) 弁別を、わたしたちにとって可能にする要素を発見することが本研究の中心的な課題である。さらには、それはおそらく長い視点では工業プロセス内にくみこまれるセンシング機構の原理の問題に直結しうるという意味において、なんらかの工学的情報としての有用性をそなえうると考えている。

本報以下の部分では、流れる挙動をしめす粉体 (砂) が強制的に振動運動下におかれたときにどのような流動を呈するかを明らかにする試みを紹介する。同一の条件下で振動される水の運動との比較をおこない、その比較によりみいだされる運動の差異が、わたしたちが水と砂の流れを瞬時に識別できるといふ事実とどのように関連しうるのかを考察した。

## 2. 事例：“流体”と“流れる粒子群”

Fig. 3に水と砂を同一の振とう条件で強制的に運動させたときの同一位相でのスナップショットを示す。(単振動, 振幅6cm, 周波数8/3Hz, 容器内径10cm, 容器内長18cm) この比較例は視覚だけでも区別が付きやすい組み合わせであり、両者とも「流れる」という共通の挙動を示すにもかかわらず、わたしたちが両者間の有意差を容易に感知できるケースである。



**Fig. 3** Snapshot of shaken flowable object constrained in a cylindrical space ( $\phi 100\text{mm}$ , length = 180mm). The shaking motion is mechanically simulated as a harmonic oscillation (8/3Hz, amplitude = 6cm). a) water and b) sand.

実速度・肉眼でこれらを観察するとその差異は明らかである。しかし、これを過不足なく言語表現で明文化することは、まず不可能としかいいようがないほどに困難であることに気づかされる。ただ、

「遅れ (delay)」を感じさせるような印象が砂の場合にはあり、これは、水は振動運動のきりかえし直後に、顕著な「破碎」的外観を特徴とする壁面への衝突と乱れを呈するのに対し、砂はほとんど衝突に起因するような乱れをしめさないことと関係していると考えられる。(ここでは壁面への内容物の衝突という事象を着目すべき印象ポイントであるとみなした。わたしたちが測るべき、あるいは、とらえるべき印象ポイントがあるとすると、それはけっして最初から自明に共有された知見ではなく、恣意的な印象ポイントでしかありえない。なおかつ、恣意的な選択によりその印象ポイントをうきぼりにしているという明確な認識をもちつづける、という意味において、それは「非親和的」な観察である。) 高速度撮影という、いわば補助的な「眼」を援用すると、この遅れの印象はより明確である。

やや粗けずりではあるが、古典的な力学的枠組みでは、このFig. 3の二例間の差異を「慣性支配モード 対 散逸支配モード」という考えでとらえることが可能であることを以下で示そう。aの水のばあい、内径 $R(\text{m})$ 、内長 $L(\text{m})$ の容器に封入して振幅 $A(\text{m})$ 、角速度 $\omega(\text{rad/s})$ で単振動させたときの速度緩和時間はつぎのように見積もられる。水の密度を $\rho(\text{kg/m}^3)$ とすると、封入されている水の質量はこれに容器の容積 $R^2L(\text{m}^3)$ を乗じたほぼ $\rho R^2L(\text{kg})$ である。また液

の上端と下端のあいだの隔たりはおおむね $R(\text{m})$ であるから、この振幅 $A(\text{m})$ 、角速度 $\omega(\text{rad/s})$ の単振動により誘引される、水のなかの速度勾配はおおむね $A\omega/R(\text{s})$ である。ここで水の粘性率を $\eta(\text{Pas})$ とすると、水の粘性起因のせん断応力は上記の速度勾配と粘性率の積、すなわち、 $A\omega\eta/R(\text{N/m}^2)$ となる。よって、水の粘性により、振動運動下の水には $A\omega\eta/R(\text{N/m}^2)$ に、水の水平方向のおおざっぱな断面積である $RL(\text{m}^2)$ をかけた、 $A\omega\eta L(\text{N})$ だけの粘性抵抗が、水の速度を減じる方向に作用することになる。いま、水の質量が $\rho R^2L(\text{kg})$ であるから、この粘性抵抗により水には $A\omega\eta L(\text{N})$ を $\rho R^2L(\text{kg})$ で除した $A\omega\eta/(\rho R^2)(\text{m/s}^2)$ だけの減速が生じることになる。水の速度が単振動下の容器の速度 $A\omega(\text{m/s})$ 程度であるとすると、水の速度の緩和時間はごくおおざっぱには $A\omega(\text{m/s})$ を $A\omega\eta/(\rho R^2)(\text{m/s}^2)$ で除して得られる時間スケールであると考えられる。よって、水の場合、速度の緩和の所要時間は $\rho R^2/\eta(\text{s})$ 程度であろう。 $\rho$ 、 $R$ 、 $\eta$ にそれぞれ実際の値の概数であるところの $10^3\text{Pas}$ 、 $10^{-1}\text{m}$ 、 $10^{-3}\text{kg/m}^3$ を代入すると、

$$(\text{水の速度緩和時間}) = \rho R^2 / \eta (\text{s}) = 10^4 (\text{s}) \quad (1)$$

となる。実際は水の運動量の散逸は粘性応力だけによるわけではなく、衝突などの他の要因も関与するので、上記ほど速度緩和時間は大きくはなく、高々 $10^0$ 分の桁のスケールであり、上記の概算は、やや単純化のいきすぎであるように思われる。これに対し、bの砂では、つぎのように速度緩和時間が見積もられる。砂のかさ密度を $\rho_{\text{apparent}}(\text{kg/m}^3)$ とすると、砂の質量は $\rho_{\text{apparent}}R^2L(\text{kg})$ 程度である。重力加速度を $g(\text{m/s}^2)$ とすると、砂にかかる鉛直下向きの重力は $\rho_{\text{apparent}}R^2Lg(\text{N})$ である。ここで、砂粒(シリカサンド)間の動摩擦係数を $\mu$ とすると、単振動下の容器内の砂にかかる動摩擦抵抗は $\mu\rho_{\text{apparent}}R^2Lg(\text{N})$ 程度であろう。この動摩擦抵抗力に起因する減速は、上記の摩擦力を砂の質量 $\rho_{\text{apparent}}R^2L(\text{kg})$ で除した $\mu g(\text{m/s}^2)$ となる。よって砂の停止にかかる時間は、 $A\omega(\text{m/s})$ を $\mu g(\text{m/s}^2)$ で除した $A\omega/(\mu g)(\text{s})$ 程度である。 $A$ 、 $\omega$ 、 $\mu$ 、 $g$ にそれぞれの実際の値の概数、 $0.06\text{m}$ 、 $10^1(\text{rad/s})$ 、 $0.3$ 、 $10^1\text{m/s}^2$ を代入すると、

$$(\text{砂の速度緩和時間}) = A\omega/\mu g = 0.3 \text{ (s)} \quad (2)$$

となる。いま振動の周波数が8/3Hzであるから、上記の砂の速度緩和所要時間の0.3秒はたかだか振とうの運動周期ていどあるいはそれ以下の時間であり、砂は単振動の周期ごとに、加速と運動エネルギーの完全散逸を繰り返しているだけであることが示せる。また水よりもはるかに速度の緩和に必要な時間が短く、水の場合に印象的な壁面への衝突はほとんどめだたない。要するに、壁面へ到達する以前に運動エネルギーが動摩擦抵抗によりほぼ散逸してしまう、という力学的図式が描ける。

上に示した考えから、強制的な振動下におかれた場合に、液体が顕著な容器壁面への衝突挙動をしめすのとは対照的に、粉粒体は印加される周期的運動の特性時間よりも短いくらいの時間スケールで迅速に速度を緩和させてしまうために、遅れ感・受け身感のある運動応答を呈している、という説明を創ることができる。つまり、異なった二種類の「流れる」という点においては共通であっても（述語的同一）、対象物に人為的に運動がくわえられた場合、その二種の対象物の流動様態の差異をうきだたせるかたちで運動応答をひきだせる場合には、ともに「流れる」にしても、そのとうの流れる、という特徴的な運動モードじたいのなかに、対象物の識別ポイントとなる判別シグナル的な差異事象を見出すことが可能なのである。逆に、なにかの述語的キーワード（ここでは「流れる」）のもとに同一視される様態のなかに差異性を見出すように、判別可能性をもたらす現象上の着目点を定めることがカギとなる、と筆者は考える。紙面の都合でここでは紹介しきれないが、衝突インパルスによる力覚応答における差異からも、おなじ流動物であっても判別可能性をひきだせることが見出された。

Fig. 4はある特殊な、外観上はかなり流動性がめだつ砂の一種をFig. 3と同じ容器にいれ、意図的に壁面への衝突が顕著におこるような条件で単振動させ、かつ視覚情報を制限するために光量をしばって撮影した際の壁面への衝突のスナップショットである。（照明が少なく暗い工場のなかをイメージしたもの）この場合、とりわけ動画像では内容物が

砂であることはきわめてわかりづらい。とくに、水との比較画像がない場合、これを砂であると自信をもって識別することはほとんど不可能であるように思われた。

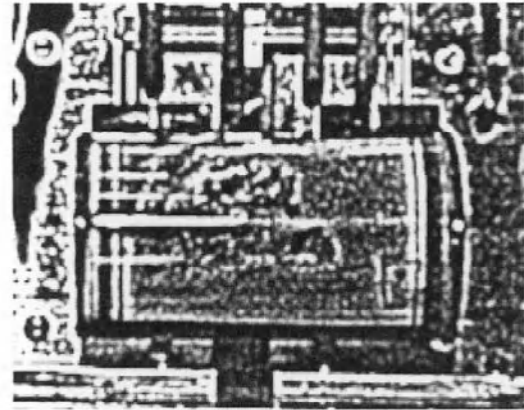


Fig. 4 Snapshot of sand shaken in a harmonic oscillation (3Hz, amplitude = 6cm). The shaking motion is set to be sufficiently vigorous to induce prominent impingements of the contained sand onto the end wall of the container. The illumination is purposely limited to restrict the visual information to the silhouette of the moving sand.

すなわち、Fig. 4のような状態が実際に暗い工場のなかでおこっているときに、たとえば、気温が下がりがすぎたせいで、ほんらいそれは液体でなくてはならないのに粒化していても、それを見逃してしまう、というようなことはおこりえるのだということを暗示している。もうすこし俯瞰的にみれば、この結果は、衝突に際しての特徴的な過渡的モルフロジー（形状）は流動物の判別に際してとりわけ重要な役割をはたすことを示唆している。

### 3. 結言

種々のプロセス現象（行程中の現象）からモノの状態を瞬時に把握して適切なアクションをとるという一連の判断行為は一般的にすでに確立された理化学的な手法によるものではない、という点に着目をし、考察をおこなっている。これはいっけん「客観化された指標としての測定値」に依拠していないという意味では信頼度に欠ける方途のようにみえるが、じつは、測定値と感覚与件からの直感のあいだにいくちがいがあるときに決してにわかに測定値を信用できないという経験を考慮すれば、むしろ



瞬時の直感のほうがものづくりにおける人の判断因子としては重要であることをがわかる。たとえば、「流れる」というモノの運動様式のなかには上記のようなアクションの鍵となるシグナルが含まれていると考えられるが、それは無意識にとりあつかわれており決して自明ではない。またそれを抽出する方法が確立されているわけでもない。砂にせよ水にせよ、流れという共通の性質のなかに特徴を見出しているとすればそれはどのような点か、という問題に関して、試行的な観察法から、差異化の枠組みをとらえる試論をおこなった。概括すると、ある述語 (predicative word) の表現によって囲いこまれている領域の現象に注目し、その範疇で現象の細部に差異を見出すという方針の有効性を今後も実験的に検証する必要がある。

#### 謝 辞

本論考のためにおこなった実験において多大な協力をしてくれた2011年度物質工学科5年生大井川亮氏、藤田将弘氏に深謝する。

#### 文 献

- 1) ルネ・トム (訳 彌永昌吉, 宇敷重広) : 構造安定性と形態形成, p. 1 (“形態の遷移”) (岩波書店, 1980) .
- 2) スコット・ブレイアー (訳 岡小天, 東健彦) : 入門レオロジー, 第13章 (朝倉書店, 1970) .
- 3) K. Kurumada : “Particle Characterization by Tactile Impression/Sensing. 1. Effectiveness of Tactile Texture in Particle Characterization. 2. Artificial Finger-Mimicking System”, Leeds Seminar of Advanced Particle Handling Science, JSPS Core-to-Core Program, Leeds(UK), September, 2006.
- 4) K. Kurumada : “Artificial Tactile Sensing for Particle Characterization - Advantages and Challenges -”, Kyoto Seminar of Advanced Particle Handling Science, JSPS Core-to-Core Program, Kyoto, July, 2007.
- 5) K. Kurumada, “Touching is Believing.”, 14th APHS Seminar (Young Researchers Symposium), The University of Melbourne, Melbourne, December, 2007.

- 6) K. Kurumada, “Signal Capture from Microparticles for Alternative Characterization Method of Microparticles”, 8th Japan-Korea Symposium on Materials & Interfaces – International Symposium on Frontiers in Chemical Engineering -, P-65, Sapporo, November, 2008.
- 7) K. Kurumada, “Challenge for “Grasping” the Powder Properties from Our Tangible or Audible Signals”, JSPS Core-to-Core Program, Advanced Particle Handling Science, CTC Seminar (Erlangen), Lecture room KS II, Institute of Particle Technology (LFG), Cauerstraße 4, Erlangen, Germany, September, 2009.
- 8) K. Kurumada, “Quest of Measurable Signals as Sources of Information for Perception of Particles, Powders and Liquids”, 40th Advanced Powder Handling Sciences Seminar in Switzerland, 2010, ETH Zürich (Hönggerberg), Zürich, Switzerland, August 12th, 2010.
- 9) K. Kurumada, “What is the Clue for Physical Perception of Various States of Materials? – An Observational Study of Motion for Cognition –”, Core-to-Core 2010, World Network Seminar on Advanced Particle Science and Technology, Kyoto, November, 2010.
- 10) K. Kurumada, “How can we truly study “powder” or “particle”?”, submitted to *Journal of the Society of Powder Technology, Japan*.
- 11) 市川浩 : 精神としての身体, p. 128 (述語的同一性), (講談社学術文庫, 1992) .
- 12) 柄谷行人 : 定本 日本近代文学の起源, (岩波書店, 2008) .
- 13) T. Kojima and J. A. Elliot, “Incipient flow properties of two-component fine powder systems and their relationships with bulk density and particle contacts”, *Powder Technology*, Volume 228, 2012, Pages 359-370.
- 14) I. Tomasetta, D. Barletta, P. Lettieri and M. Poletto, “The measurement of powder flow properties with a mechanically stirred aerated bed”, *Chemical Engineering Science*, Volume 69, 2012, Pages 373-381.
- 15) D. M. Koller, A. Posch, G. Hörl, C. Voura, S. Radl, N. Urbanetz, S. D. Fraser, W. Tritthart, F. Reiter, M.

Schlingmann and J. G. Khinast, “Continuous quantitative monitoring of powder mixing dynamics by near-infrared spectroscopy”, *Powder Technology*, Volume 205, 2011, Pages 87-96.

16) L. Susana, P. Canu and A. C. Santomaso, “Development and characterization of a new thief sampling device for cohesive powders”, *International Journal of Pharmaceutics*, Volume 416, 2011, Pages 260-267.

17) A. Persson, G Alderborn and G. Frenning, “Flowability of surface modified pharmaceutical granules: A comparative experimental and numerical study”, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, Volume 42, 2011, Pages 199-209.

18) A. N. Faqih, B. Chaudhuri, A. Mehrotra, M. S. Tomassone and F. Muzzio, “Constitutive model to predict flow of cohesive powders in bench scale hoppers”, *Chemical Engineering Science*, Volume 65, 2010, Pages 3341-3351.

19) G. Léonard, N. Abatzoglou, “Stress distribution in lubricated vs unlubricated pharmaceutical powder columns and their container walls during translational and torsional shear testing”, *Powder Technology*, Volume 203, 2010, Pages 534-547.