



流動している粒状体の内部に発生するアーチングに関する研究

阪口, 秀
五十嵐, 徹
青木, 一郎

(Citation)

神戸大学農学部研究報告, 21(1):73-80

(Issue Date)

1994-01

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00198258>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00198258>



流動している粒状体の内部に発生する アーチングに関する研究

阪口 秀*・五十嵐 徹*・青木 一郎*

(平成5年8月10日受理)

Arch Formation in the Flow of Granular Media

Hide SAKAGUCHI, Tohru IGARASHI and Ichiro AOKI

Abstract

Dynamic process of the arch formation in the flow of granular media from the 2D hopper was investigated by numerical simulations using DEM. Basic flow patterns and its instabilities were found in mono-size dense regular packing system. Either left-side or right-side asymmetric flow was dominated and it showed flipping mode which was strongly related to arch formation. Analysis of the kinetic energy history gave the identical duration of oscillation to the duration of flipping. And this analysis suggested the existence of the independent two different density wave propagations which were complicated with arch stability.

1. 序 論

粒状体のアーチングは、サイロに貯蔵された穀物のホッパー流動や輸送など農業工学上の重要な問題である。また、土質工学における砂質土の扱い—特にグラウンドアーチや立て坑の埋め戻し等、また機械工学におけるセラミックなどの塑性加工、さらに医学における毛細血管の目詰まりなど、至るところで問題となる現象である。

ところで粒状体は、その内部にアーチ構造が形成されると、アーチの外側から焦点に向かう方向の力に対して非常に強い抵抗を発揮する。このことは、歴史上の数多くの重要な建造物に石積みアーチの工法が用いられていることが示すように、古くから自明の理として知られてきた。ここで扱う粒状体のホッパー流動についても、穀物などがアーチングによる目詰まりを起こしやすいことは一般的によく知られてきた。そして、実際のホッパー流動では、このアーチングを防止するために、ホッパーに振動を加えたり、ホッパー自信の内部構造に工夫を加えるなどの手法で、この問題に対処してきた。

このように粒状体のアーチングは、経験的には当たり

前のこととして扱われているが、この現象を力学的に取り扱うことは非常に難しい問題の一つである。ただ単にサイロなどの容器内における粒状体の静力学についてさえも、古典的なJanssenの式⁵⁾の域を越える理論は事実上まだほとんど見あたらないのが現状である。まして、流動状態にある粒状体が、アーチ構造を自らの内部に形成し安定して止ってしまう、といった動的な状態変化を説明するような理論などは皆無に近い。既に何らかの理由でアーチが形成されたものと仮定して、アーチ近傍やホッパーそのものに作用する力を、静的な力学に基づいて説明する理論は幾つか代表的な論文に表されているが^{10, 11)}、問題を流動状態から内部の状態遷移として扱う研究は見当たらない。

近年、物理学の分野でも粒状体の力学が取り扱われるようになってきた^{1, 2)}。これは粒状体の挙動が、これまで基礎物理の力学体系を支配してきた古典的な連続体力学では記述しきれない物理として考えられるようになったからである。もちろん粒状体の動的なアーチングの問題もこの一つであることは言うまでもない。このような新しい研究は、計算物性物理の分野で発展し、コンピュータのめざましい発展に伴い、コンピュータという新しい実験装置を用いて未知の物理量を覗き、説明がなされる

* 土地利用工学研究室

ようになった。

筆者らもこれまでに、分子動学的なアプローチで個々の粒子の運動を追跡し、流動状態にある粒状体がアーチングに至るまでのメカニズムを調べてきた。その結果、均一粒径で規則配置された粒状体の流動パターンは、非常に不安定で、流れのパターンにはフリッピングモードを持っていることが分かった。^{6, 7, 8, 9)} さらに、この結果は、フリッピングモードとアーチ形成との深い関係を示唆するものであった。ここでは、粒子の運動を、その運動エネルギーで表現し、運動エネルギーの時間的な変化を調べることにより、このフリッピングモードの周期とアーチの発生が深く関係していることを示す。さらに結果として流動が継続しているように見えるが、ある周期を伴い瞬間的に形成されているテンポラリーアーチと、その強度について考察を与える。

2. シミュレーションモデル

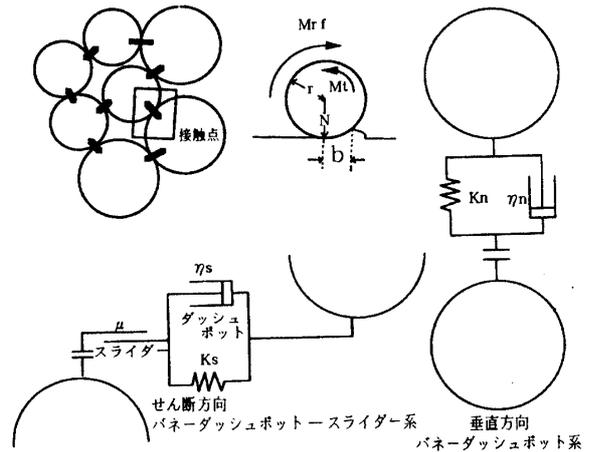
現象を統計的ではなくdeterministicに調べるためには、個々の粒子についてそれぞれ独立にNewtonian dynamicsを解く分子動学的手法が適している。その中でも、あるセル内のmicroscopicな物理量を代表値としてマクロな情報を得る方法ではなく、計算量は膨大になるが、対象とするすべての粒子の運動を調べる手法が最も地味ではあるが確かである。この研究では、粒子の運動が、自重と慣性力その他、接触している粒子から受ける力だけで決まるようなモデルを考えることにする。これには本来土木工学の分野で、岩盤の破壊のシミュレーションに用いられたCundallのDEMモデル^{3, 4)}が最も適していると考えられる。

CundallのDEMモデルは、基本的に粒子間接触にオーバーラップを考え、法線方向にバネ-ダッシュポットの並列振動系、接線方向にはこれに摩擦スライダを加えたモデルを考えるものである。また、回転方向の運動についても、接線方向力と粒子の半径から定まるモーメントから角加速度を回転に関する運動方程式を解いて求める。ここで用いたモデルは、CundallのDEMモデルに、円形要素の過剰な回転を抑制するために転がり摩擦項^{8, 9)}を加えたモデルを用いる(図-1参照)このモデルの詳細については文献の8) または9)を見られたい。

シミュレーションはできる限り問題をシンプルにするため2次元で行った。図-2にその概要を示す。縦横30cmの平底ホッパーに、直径1cmの円形粒子を約1000個の最密状態の規則配置させる。ホッパー底部には4.2cm(こ

こで扱う系に対して、アーチが形成されたりされなかったりする中間的な大きさ)のスリットが設けられ、これを開けると粒子は重力によって排出し、内部の粒子が流動する。

表-1に計算に用いたDEMパラメタのリストを掲げる。計算の時間増分 Δt については、計算機の精度の限



並進 (u) $m\ddot{u} + \eta\dot{u} + Ku = 0$
 回転 (ϕ) $I\ddot{\phi} + \eta\dot{\phi} + K\phi = 0$
 ころがり摩擦 $Mrf = \alpha \times b \times N \times \text{SIGN}(Mt)$
 (ただし $|M_{r,t}| \leq |M_t|$)

図-1 DEM概念図

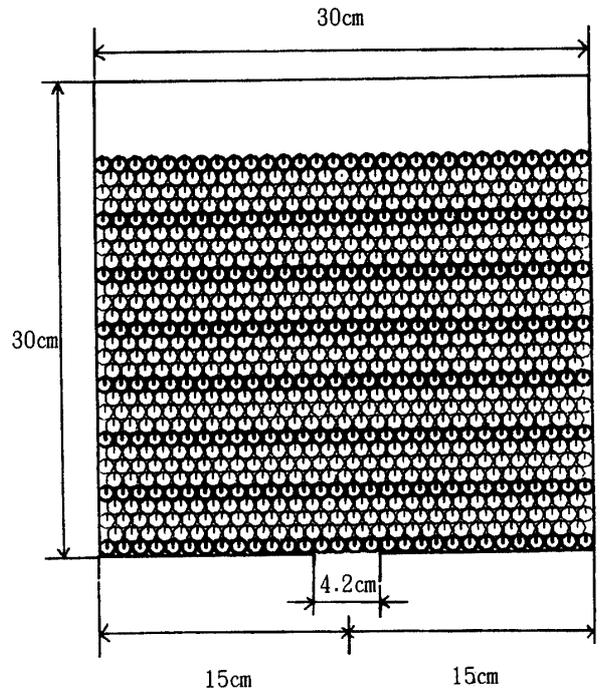


図-2 シミュレーションモデル概要

表-1. 計算に用いたDEMパラメタ

Parameter	Unit	Value
Radius of Element r	mm	5.0
Time Step Δt	μs	50.0
Unit Weight ρ	kg/m^3	1190.0
Normal Spring Constant K_n	$N \cdot m/s$	1.0×10^6
Shear Spring Constant K_s	$N \cdot m/s$	1.0×10^5
Normal Damping Constant η_n	$N \cdot s/m$	220.0
Shear Damping Constant η_s	$N \cdot s/m$	1.0
Element Friction Constant ϕ_μ	deg.	21.87
Wall Friction Constant ϕ_ω	deg.	15.87
Width of silo	mm	300.0
Width of Slit	mm	42.0

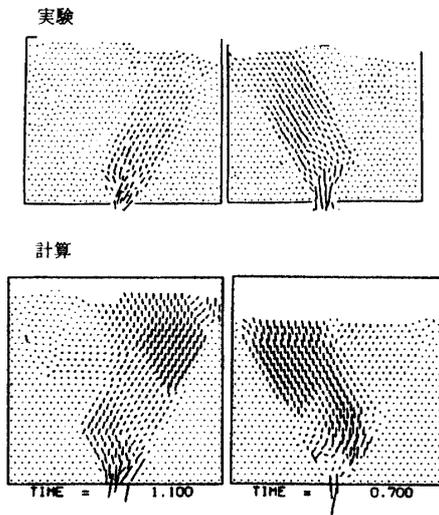


図-3. 基本的な流動パターン

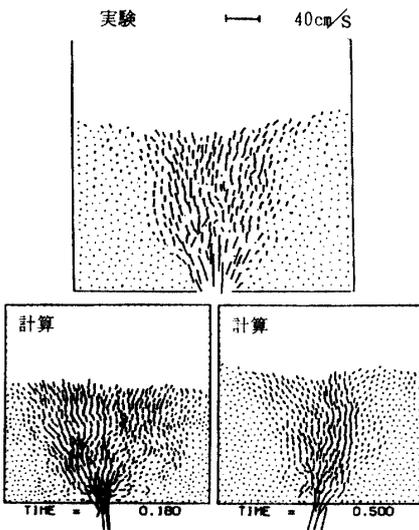


図-4. 混合粒径で排出を行ったときの流動パターン

界と計算時間の効率から最適な値 5.0×10^{-5} 秒とした。粒子や境界の物性については、検証実験に用いたアクリル棒及びアルミ板について行なった予備実験から求めた。また、減衰のパラメタについては、1粒子の衝突問題及び粒子と境界との衝突問題をVoigtモデル振動系について解析的に解き、同じ問題を、所与の時間増分を用いてDEMで解くときに、答えが解析解に見合うように定めた。

3. 検証実験

本手法によるシミュレーションの妥当性を検証するために、シミュレーションと同じ条件でアクリル棒を用いた2次元模型実験を行なった。図-3に基本的な流動パターンについて、実験とシミュレーションの比較を示す。図-3はある同じ時刻の速度ベクトルの分布である。明らかに両者には良い一致が見られ、本手法の妥当性を示している。また、参考のために混合粒径で排出を行なったときに形成される流動パターンについて、実験結果と本研究で用いたDEMのシミュレーション結果を図-4で比較する。混合粒径にすると不安定な流動が安定し、いわゆるマスフローの様子を呈することが両者で一致した。よって、このシミュレーションは実際の現象を忠実に表現しうるものと判断される。

4. 流動パターンと運動エネルギー

排出を開始してからアーチができるまでの約1.5秒間の流動を図-5に示す。図-5の上段は各時刻のスナップショット、下段はその時刻の粒子の瞬間の速度ベクトルの分布である。一連のスナップショットを連続的に見る限り、粒子はスリットを中心線とした線対称で安定した流動パターンを示しているものと考えられる。しかし速度ベクトルの分布を細かく見ると、実際には流動パターンは非常に短い周期で複雑に変動していることがわかる。各ベクトルの大きさが速度の大きさを示すことから、線分の大きなベクトルが並ぶ領域はいわゆる高速流動域と定義できる。一連の速度ベクトル分布図から、高速流動域は左右非対称に現われ、時間と共に左右に振っていることがわかる。ここではこの現象を、フリッピングモード(Flipping mode)と呼ぶ。このシミュレーションでは1つのフリップ(右から左又は左から右への移行)に要する時間は約0.12秒である(図-6参照)。

次に、図-7に流動している全ての粒子の運動エネルギーの総和の時刻歴を示す。この図から粒子の運動は活発-不活発な状態を周期的に繰り返していることがわか

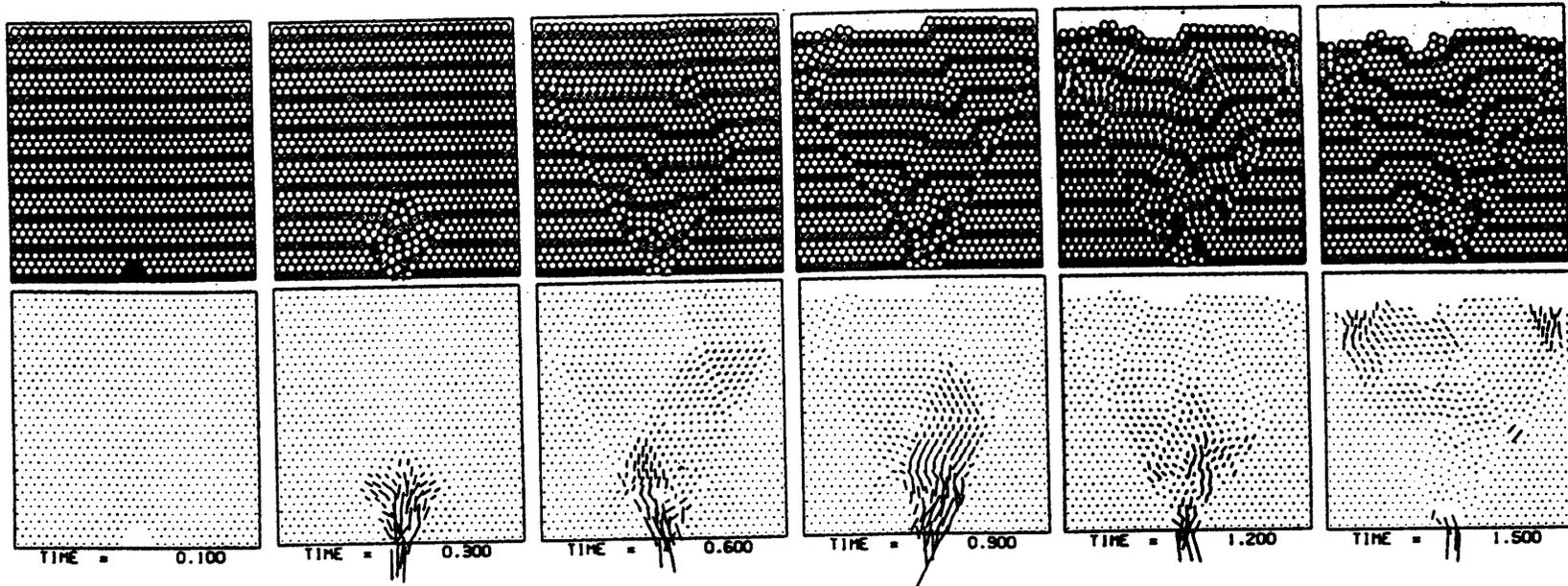


図-5. アーチができるまでの一連の流動

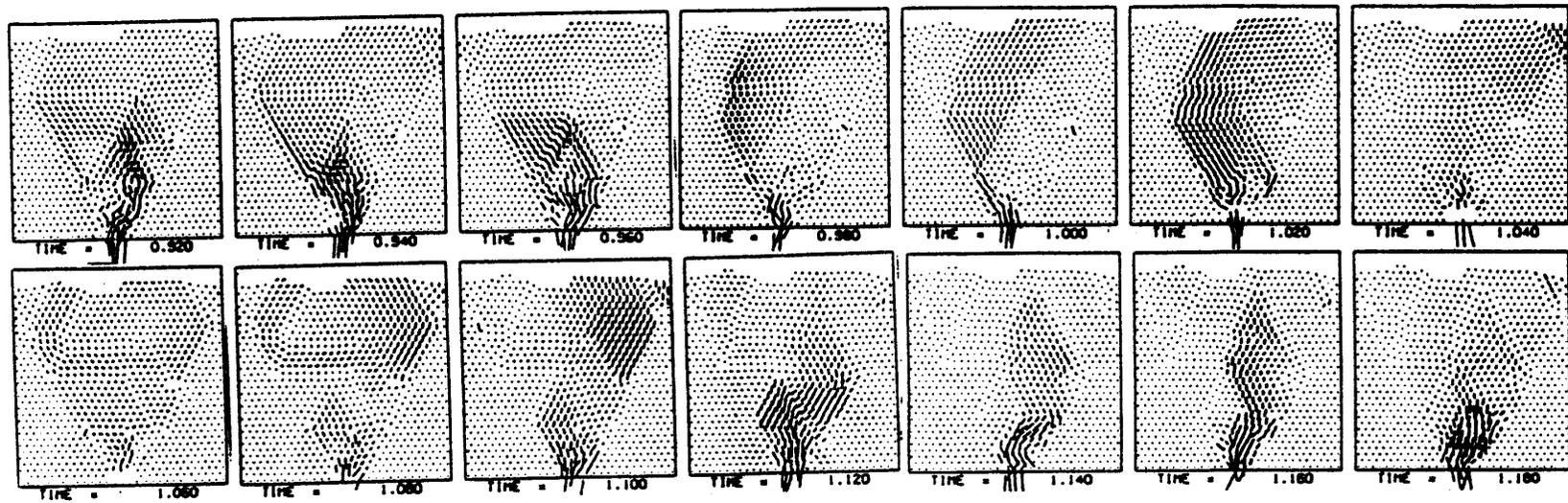


図-6. 一連の速度ベクトル分布(フリッピングモード)

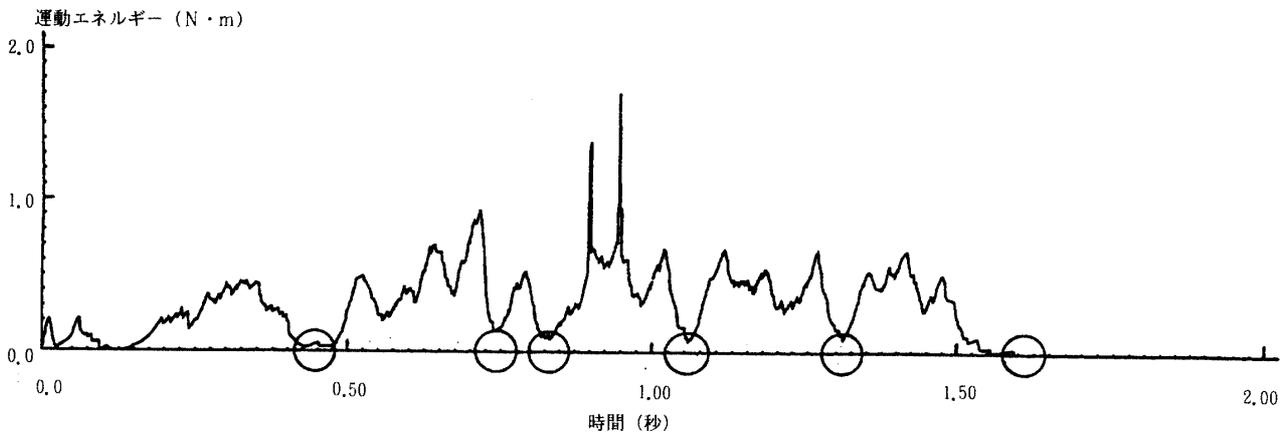


図-7. 粒子の運動エネルギーの総和の時刻歴

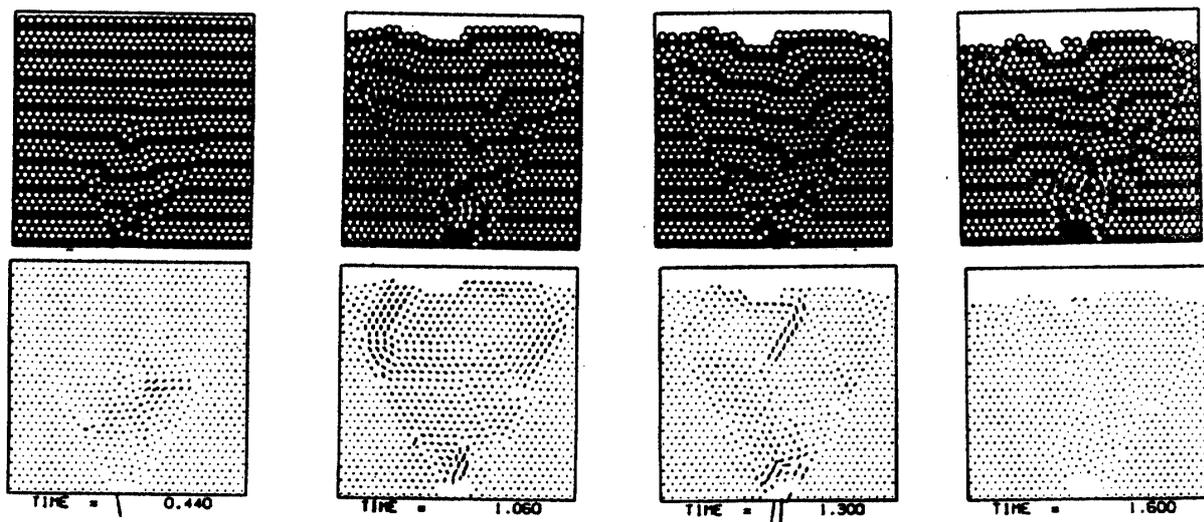


図-8. テンポラリーアーチのときのスナップショットと速度ベクトル

る。グラフのピークが現われる周期はほぼ0.1秒から0.12秒で前述の1フリップの時間とほぼ同じである。ピークとピークの間である谷の部分は、非対称フローパターンの1フリップの遷移つまりセンターフローに相当している。このことから非対称の遷移状態で瞬間的に左右対称な流動パターンを示すときには、粒子全体の流動が不活発になることがわかる。

図-7のグラフの谷に当たる部分の中で、特にその値が0に近いものに○印を記してある。この○印を打った時刻の運動エネルギーは非常に小さい。ここでは何が起こったのであろうか？これらの時刻に相当するスナップショットと速度ベクトルの分布を図-8を見ると、不安定なアーチが形成されていることが分かる。ここではこ

の不安定なアーチをテンポラリーアーチと呼ぶことにする。実は、このテンポラリーアーチの発生にもある程度の周期性が見られる。ここでのテンポラリーアーチの発生周期 f_t は約0.3秒である。最後のテンポラリーアーチは安定し、ここで流れが停止した。以後これをパーマネントアーチと呼ぶ。

5. 流動パターンとテンポラリーアーチについて

図-7、図-8で示したテンポラリーアーチの発生については、以下のように説明できる。

まず、平底ホッパーには、その排出口のスリット幅とすべり面の形状、粒子の表面摩擦特性などから決まる単

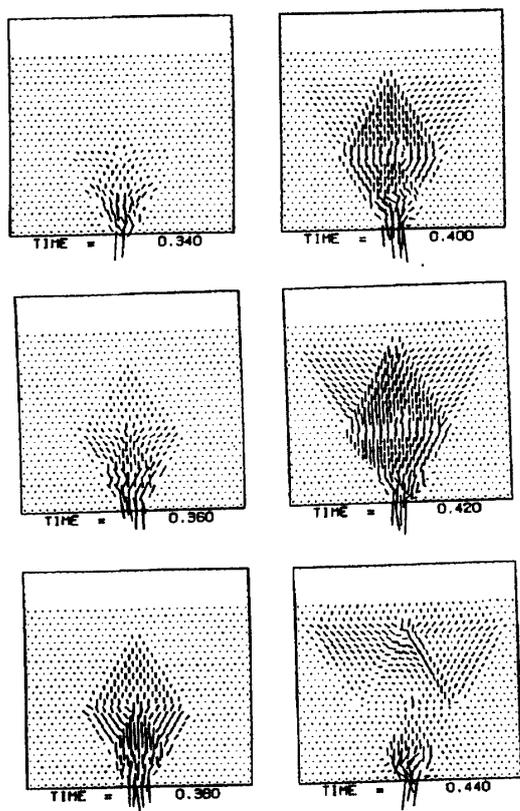


図-9. 拡大していくフローパターン

位時間当りの粒子の通過量の上限、Discharging capacity (排出能) があるものと仮定できる。

このDischarging capacityが、ホッパー内部から排出口付近に供給される量を上回っているときは、フローパターンに関係なく流動域は拡大してゆく(図-9)。流動域の拡大に伴い、排出口付近では漏斗状に流れが集中するため粒子数密度がどんどん高くなり、ついにはDischarging capacityを越えた量が流れ出ようとする。粒子数密度が高くなると、粒子群の中に偶発的に鉛直上向きのアーチ状に粒子が並ぶ確率が高くなる。この状態で、さらに上部から粒子が供給されるときに、その流動パターンがテンポラリーアーチを作る鍵となる。つまり序論で述べたように、アーチはその焦点に向かうような力に対しては、幾何学的な抵抗力が発揮されるからである。従って、全ての粒子が放射状に出口に向かうような流動パターンは、偶発的にできたアーチを強くするが、図-5に見られるような、左右非対称の流れにはもろいことが理解できる。このことを念頭に、テンポラリーアーチが形成される前後の時刻の速度ベクトル分布を調べると(図-10: 流れが再開したケース及び図-11:

パーマネントアーチに発展したケース)、いずれもテンポラリーアーチの直前はセンターフローが卓越していることが分かる。

6. テンポラリーアーチの安定性

テンポラリーアーチは、排出口付近の粒子数密度と流動パターンによって形成条件が整えられることが前節までに確認できた。つまりテンポラリーアーチは、Discharging capacityに対する流動域の拡大による供給過多と、粒子数密度の上限、フリッピングの遷移によるセンターフローが原因であった。では、このテンポラリーアーチは、どのようにしてパーマネントアーチへと発展するのであろうか?

この問題に対しては、ホッパー内部全体の粒子に伝播する密度波や衝撃力の波動解析が必要となるので、ここでは速度ベクトルの分布から判断できることからのみ考察を与える。

テンポラリーアーチが崩れたケースとパーマネントアーチへと発展したケースの最も大きな違いは、上方の流動状況である。テンポラリーアーチが形成されてから広まる停止領域の密度波が、表層の自由表面にまで行き渡ってしまうと、テンポラリーアーチはもはやこれを壊す力がなくなりパーマネントアーチへと発展する。これに対して、停止領域の密度波と流動の拡大領域の密度波が領域内で交錯すると、流動域の運動エネルギーが停止領域を伝わってテンポラリーアーチを叩き潰すエネルギーとして変換され、流動が再開されるのではないかと考えられる。

7. 結 論

今回のシミュレーションから均一粒径の粒状体のホッパー流動には不安定なフリッピングモードが存在し、このモードの遷移状態つまり対称なセンターフローが発生するときに全体の流動性が悪くなっていることがわかった。また、流動域の拡大縮小をもたらす2種類の密度波が領域内を複雑に伝播しており、この密度波とフリッピングモードの周期性がアーチングの発生に大きく関与していることが確認された。従って、今後は流動パターンの振動と運動エネルギーのスペクトル解析とあいまって流動域と停止領域の密度波の波動伝播解析が必要となる。

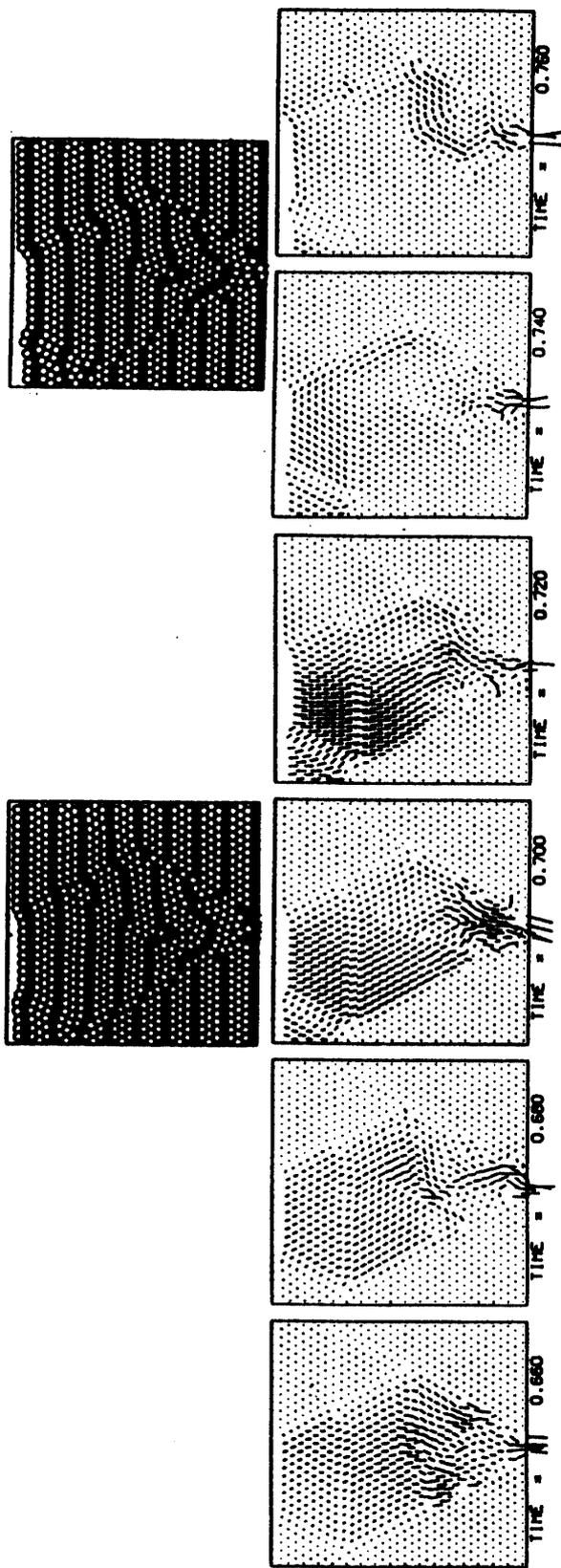


図-10.流れが再開したケース

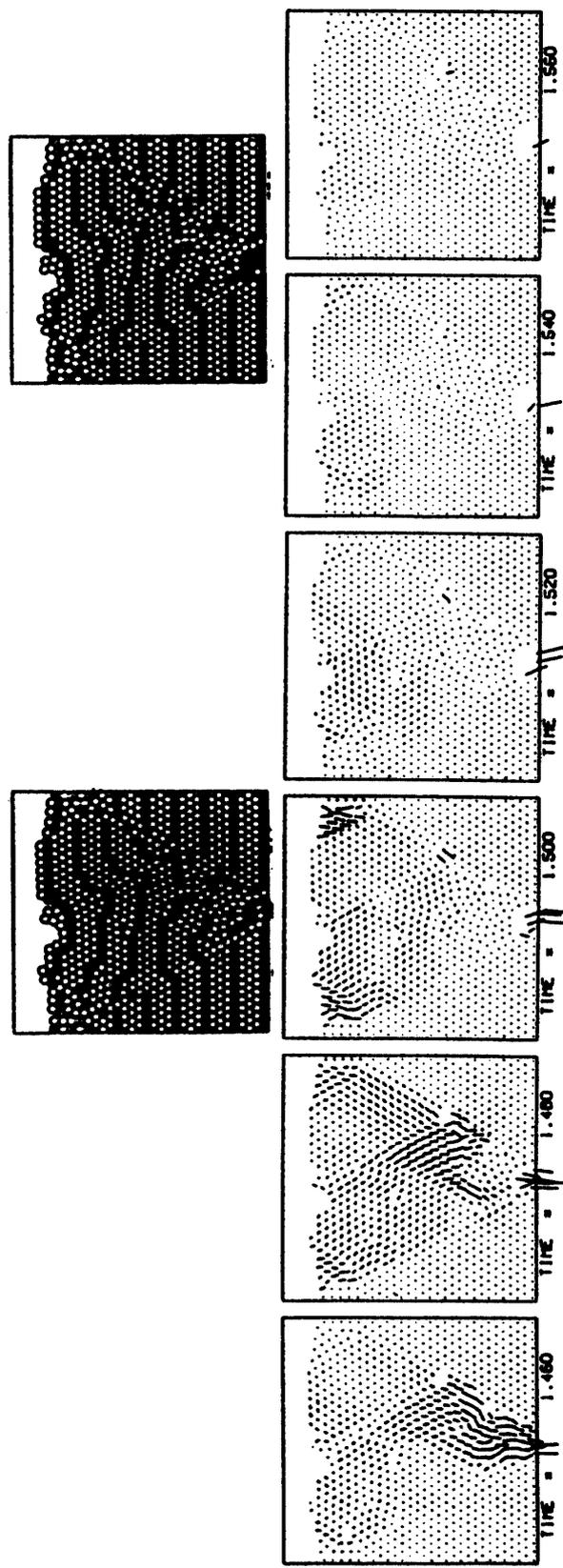


図-11.パーマネントアーチに発展したケース

8. 参考文献

- 1) BIDEAU, D. and DODDS, J.: *Physics of Granular Media*, Nova Science Publishers, New York, 1992.
- 2) BIDEAU, D. and HANSEN, A. : *Disorder and granular Media* North-Holland, 1993.
- 3) CUNDALL, P. A. : *Int. Symp. of ISRM, Nancy, France*, 1971.
- 4) CUNDALL, P. A. : *Ph. D. Thesis*, Imperial College, London, 1971.
- 5) JANSSEN, H. A. : *Zeit. Ver. Dtsch. Ing.*, **39**, 1045, 1895.
- 6) SAKAGUCHI, H. and OZAKI, E.: in *Powders & Grains 93*, ed. by Thornton, C., pp. 351-356, Balkema, 1993.
- 7) SAKAGUCHI, H. and OZAKI, E.: *Proc. 2nd Int. Conf. DEM*, pp. 153-163, 1993.
- 8) SAKAGUCHI, H. and OZAKI, E., Igarashi, T. : *Int. J. Modern Physics B*, Vol. **7**, Nos. 9 & 10, pp. 1949-1963, 1993.
- 9) 阪口 秀・尾崎毅司: 粉体工学会誌, Vol. **30**, 3, pp. 183-187, 1993.
- 10) WALKER, D. M. : *Powder Tech.*, **1**, 228, 1967.
- 11) WALTERS, J.K. : *Chem. Eng. Sci.*, **28**, 779, 1973.