

振動流中におけるブリックパターンリップルの形成シナリオ

Formation Scenario of Brick-Pattern Ripples in Oscillatory Flow

杉原裕司¹・山崎一孝²・津守博通³・松永信博⁴・竹原幸生⁵

Yuji SUGIHARA, Kazutaka YAMASAKI, Hiromichi TSUMORI
Nobuhiro MATSUNAGA and Kosei TAKEHARA

Brick-pattern ripples are three-dimensional ripple marks composed of transverse crests and longitudinal bridges. In this study, the formation process of brick-pattern ripples in an oscillatory flow is investigated experimentally by means of the visualization of sediment transport and particle tracking velocimetry (PTV). The experiments are made for the brick-pattern ripple formation over a model of two-dimensional ripple marks. The velocity distributions above brick pattern ripples are obtained from the PTV measurements. It is seen from the experimental results that three-dimensional separation vortices carry sediment to make the bridges larger and more stable. Thus, the formation of brick-pattern ripples may be accelerated by a certain kind of positive feedback due to the interaction between the separation vortices and sediment transports.

1. はじめに

海浜や河床に見られる砂の波状堆積構造（サンドリップル）の形成は、工学的に重要な移動床の底質輸送機構と密接に関わっており、典型的な固液混相流現象と捉えることができる。振動流中に形成するサンドリップルの興味深い例として、ブリックパターンリップル（Brick-pattern ripples：以下 BPR）がある。これは、図-1 に示すような、振動流中の砂面に形成する 2 次元リップルのトラフに振動方向と平行なブリッジが交互にかかった 3 次元リップル構造である（例えば Bagnold, 1946）。3 次元的な堆積構造は様々な流砂現象において普遍的に観察され、それらの多くに通底する共通のダイナミクスがあると考えられる。従って、BPR の形成機構を明らかにすることは、様々な 3 次元堆積構造のダイナミクスを理解する上でも重要な意義を持つであろう。

Sleath (1976) は、振動流中の剥離渦がある位相において崩壊し、その結果生ずる Horseshoe vortex が非定常的に形成されることで波面近傍の砂粒子が輸送され、リップル間にブリッジがかかるというモデルを提案した。

Matsunaga and Honji (1980) は、半円柱でつくられた 2 次元リップル模型の平板を微小振動させて流れ構造の可視化を試みた。その結果、2 次元リップル模型上に誘起する流れ様様が Brick-pattern 状の組織的な構造

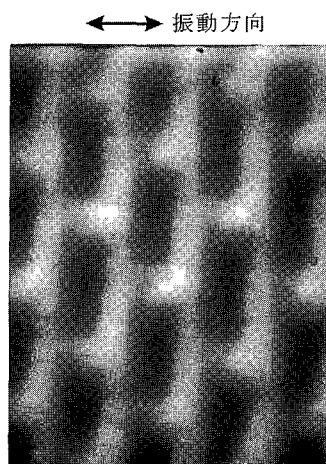


図-1 ブリックパターンリップル

（Brick-pattern streaming）を示すことを見出した。彼らは、層流中で見られたこのような流れ構造が、BPR が形成する乱流中にも内在しており、これが BPR 形成の要因であるとした。

その他の従来の研究の多くは、BPR の形成機構を理論的に論じたものであり、ほとんどが層流的な取り扱いでの検討である（例えば、Hara and Mei, 1990, Vittori, 1992, Vittori and Blondeaux, 1992）。しかしながら、BPR 形成の本質は混相乱流現象であるため、その形成機構はまず実験的に検討されるべきものであり、位相ごとの流れ構造を詳しく観察する必要があると考えられる。そこで、本研究では、BPR 上の流れ構造を実験的に把握することにより、BPR の形成・維持機構について検討する。特に、高解像度の粒子追跡流速計測法（Particle Tracking Velocimetry：PTV）による流速計

- | | | | |
|--------|------|----------|-------------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | 九州大学准教授 | 大学院総合理工学研究院
流体環境理工学部 |
| 2 | 修(工) | (株)小松製作所 | |
| 3 正会員 | 博(工) | 国立環境研究所 | 地球環境研究センター |
| 4 フェロー | 工博 | 九州大学教授 | 大学院総合理工学研究院
流体環境理工学部 |
| 5 正会員 | 博(工) | 近畿大学准教授 | 理工学部社会環境工学科 |

測結果に基づいて、BPR 上における振動乱流中の流れ構造について考察する。

2. 実験方法およびデータ解析

(1) BPR の形成領域と形状に関する実験

振動流水槽とガラスビーズを用いて実験的に BPR を形成させることにより、BPR の形成条件および、その形状について検討する。図-2 に実験装置の概略図を示す。この装置は、断面が 15×15 cm、水平流路部が 80 cm のアクリル製 U 字型振動流水槽である。水槽の底面から 40 cm の高さまで作業流体を満たした後、底質材料として密度 $\rho_s = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、平均粒径 $D = 300 \mu\text{m}$ のガラスビーズを敷きつめて、水槽の底面からの厚さが 2 cm になるように均一にならした。水槽の側面からプロジェクターのスリット光を入れてリップルのクレスト部を照らし、BPR が形成する様子を水槽上方からデジタルビデオカメラで撮影した。形成された BPR のリップル波長およびブリッジ間隔は画像データに基づいて算定した。

(2) BPR の形成過程と流れ構造の可視化実験

可視化実験に用いた振動流水槽は図-2 と同じである。ただし、完全な移動床上では可視化実験（特に PTV）の実施が困難であるため、水槽中に図-3 に示すような 2 次元リップル模型を設置し、この模型上において BPR の形成過程と流れの計測を行った。この模型のリップル形状は、振幅 $d_0 = 3.0$ cm、振動数 $f = 1.83$ Hz の振動流条件下で、密度 $\rho_s = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、平均粒径 $D = 300 \mu\text{m}$ のガラスビーズを用いた場合に形成する BPR の形状にほぼ等しい。まず、Matsunaga and Honji (1980) に倣って、2 次元リップル模型上において BPR の形成過程の可視化実験を行った。ブリッジの材料となるガラスビーズ ($\rho_s = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $D = 300 \mu\text{m}$) を、模型両側にリップルの波高と等しくなるように敷いた。その後、 $d_0 = 3.0$ cm, $f = 1.83$ Hz の振動流を発生させて、ガラスビーズの輸送とともに BPR が形成していく過程を水槽上部からデジタルビデオカメラで撮影した。

PTV の可視化用トレーサーとしてナイロン 12 ($\rho_s = 1.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $D = 80 \mu\text{m}$) を使用した。トレーサーが作業流体中に均一に分散したのを確認した後、2 次元リップル模型のトラフ間にガラスビーズ ($\rho_s = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $D = 300 \mu\text{m}$) を敷いた。 $d_0 = 3.0$ cm, $f = 1.83$ Hz で振動流を発生させて流れが発達したのを確かめた後、2 次元リップル模型のクレストから 5 mm 上の水平面にパルス間隔 10 ms の YAG レーザーのスリット光を入射した。このレーザー光と同期させた CCD ビデオカメラ（解像度：1008 × 1018 pixels）で上方から流れを撮影した。得られた画像データから、竹原ら（2000）が提唱する Super-Resolution KC 法の

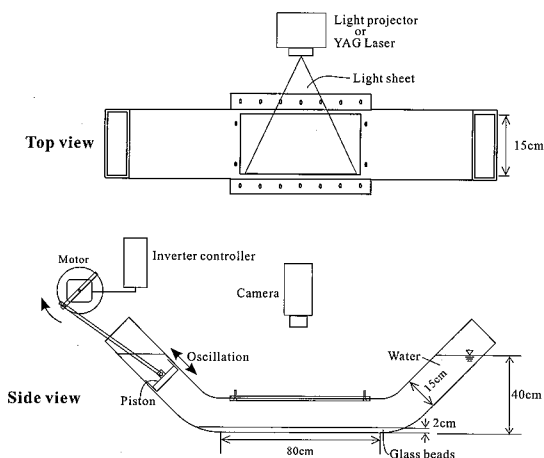


図-2 実験装置の概略図

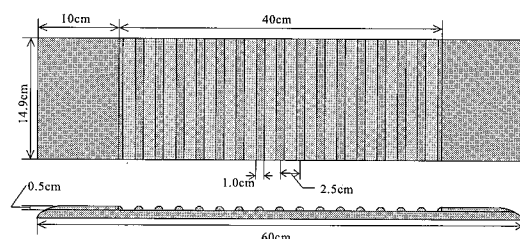


図-3 2次元リップル模型の概略図

PTV によって流速データを算出した。また、ブリッジの位置は時間的に若干変動するため、予め撮影しておいたレーザー光を当てる前後の画像からそれぞれのブリッジの中心位置を求め、両者を平均することによってブリッジの中心位置を定義した。

3. 実験結果および考察

(1) BPR の形成領域と形状

図-4 に BPR の形成領域を示す。ここで、図中の F_d および δ は、それぞれ粒子フルード数、ストークス層厚さであり、次式のように定義されている。

$$F_d = \frac{U_m}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)gD}}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \quad (1)$$

ただし、 $U_m (= 1/2 d_0 \omega)$ ； $\omega = 2\pi f$ ：振動流の最大流速、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 ν ：水の動粘性係数である。図中の実線は、Kaneko (1980) が提案したリップルの形態を区分する境界線である。本実験の結果は Kaneko が示す BPR の形成領域に全て入っており、彼の形成領域区分が妥当であることわかる。Kaneko は、 F_d および D/δ の 2 つのパラメータに基づいて形成領域を定量化しているが、Vittori and Blondeaux (1992) は、 F_d , $R_\delta (= U_m \delta / \nu)$, $R_d (= U_m D / \nu)$ の 3 つのパラメータを用いて形成領域の理論的区分を試みており、両者が

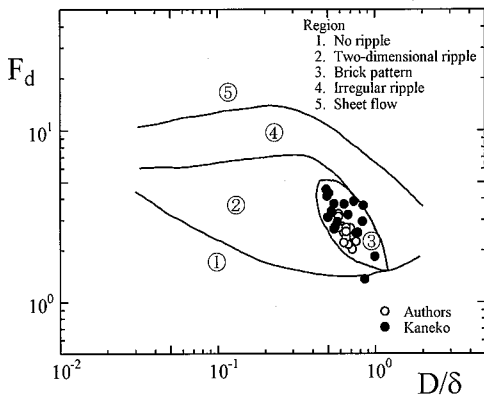


図-4 BPR の形成領域

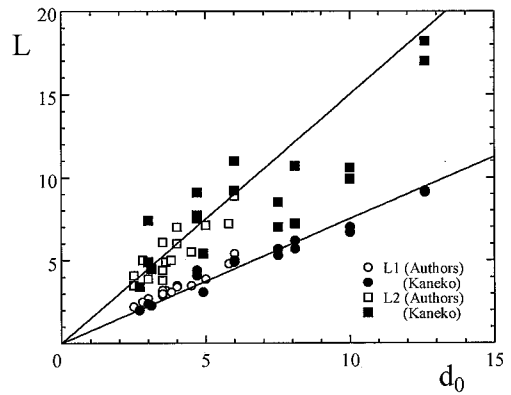
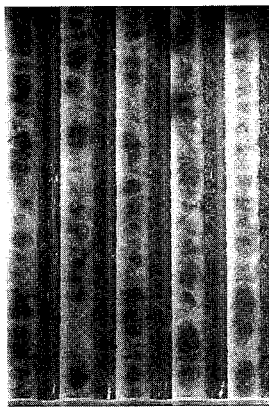
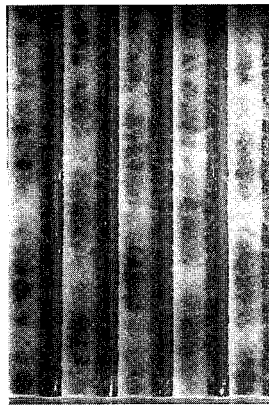


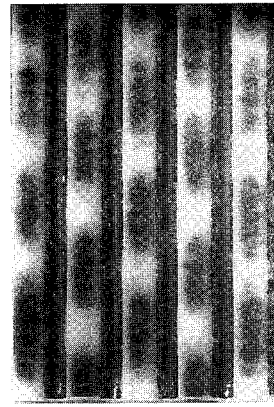
図-5 BPR の形状特性



(a)Streak 段階



(b)Developing 段階



(c)BPR 段階

図-6 2次元リップル模型上のBPRの形成過程

整合しているか否かについては不明である。リップルの形成を規定するパラメータについても今後詳細な検討が必要であると思われる。

図-5に、振幅 d_0 とリップル波長 $L1$ 、ブリッジ間隔 $L2$ の関係を示す。安定なBPRが形成するとき、 $L1$ は d_0 の約0.75倍であり、また $L2$ は d_0 の約1.5倍となっている。ただし、BPRは、まず振動条件にあった2次元リップルを振動方向に形成し、その後に峰と峰の間にブリッジを架けていくので、 $L2$ は d_0 ではなくむしろ $L1$ に規定されていると考えるべきである。また、 $L2$ のデータは $L1$ よりもバラツキが大きく、このことはブリッジがリップルよりも不安定であることを示唆している。この結果より、BPRの形成機構を説明するモデルは、 $L1:L2=1:2$ を与えるものでなければならないことがわかる。

(2) BPRの形成過程と流れ構造

図-6(a)～(c)に、2次元リップル模型上においてガラスビーズ用いて形成したBPRの形成過程を示す。全ての画像は流速がほぼ0のときの位相の場合である。可視化実験の結果、リップル模型上のBPRは、図に示すような次

の(a)から(c)の過程を経て形成されることがわかった。

(a) Streak 段階：トラフ内に振動方向に平行な無数の砂粒子の Streak が生じる段階。この段階では、砂粒子が空間的にランダムな Streak 構造を形成し、それが寄り集まって初期の不安定なブリッジになるように見える。

(b) Developing 段階：各々のブリッジは、位置が不安定ながらも、波高が次第に高くなり、より太いものに成長する段階。この段階では、振動流が反転する付近の位相でトラフ内に剥離渦が形成されており、トラフに輸送された砂粒子はこの剥離渦によってブリッジ方向へ運ばれる。

(c) BPR 段階：最終的に、太く、安定なブリッジが形成・維持される段階。この段階では、振動流の剥離渦の形成と砂粒子の移動の対応がより明瞭に観察されることから、前述した剥離渦による砂粒子の輸送機構が安定・強化されていると考えられる。また、ブリッジ間で砂粒子が相互に移動することによって、砂粒子の移動量の収支が保たれ、動的安定状態となっている。

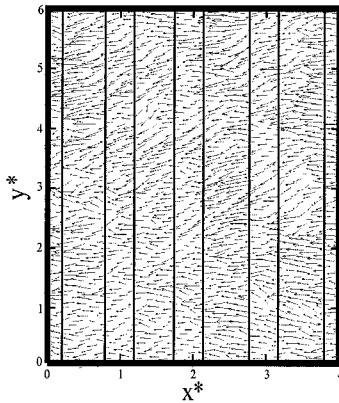
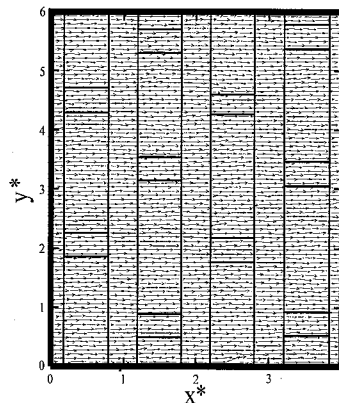
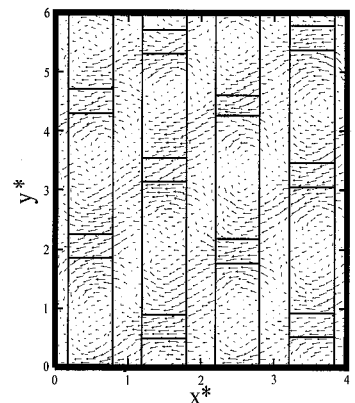
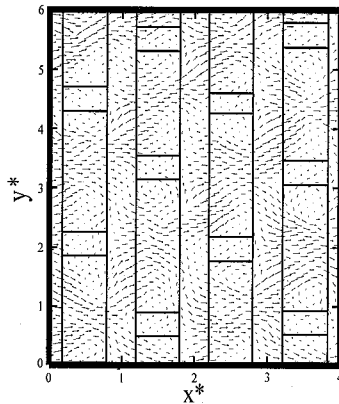
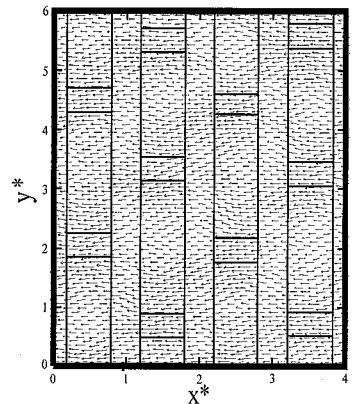
(a) 流速場: $u_m^* = 1/2$, $\theta = 1.95\pi$ (b) 渦度場: $\theta = 3.9\pi/8$ (a) $u_m^* = 1/8$, $\theta = 13\pi/32$
(最大流速時)(c) $u_m^* = 1/2$, $\theta = 33\pi/32$
(反転直後)(b) $u_m^* = 1/2$, $\theta = 31\pi/32$
(反転直前)(d) $u_m^* = 1/4$, $\theta = 35\pi/32$
(増速時)

図-7 Streak 段階の流速場および渦度場

図-8 BPR 段階の流速場

本論文では、Streak 段階と BPR 段階における PTV の計測結果を示す。Streak の条件では、振動流がほぼ 1 周期経過するまでの間の流速ベクトルを時系列として求めた。一方、BPR の条件では、同位相ではほぼ等しい流れ構造を示すものと考えられるため、同位相の複数のデータをアンサンブル平均して流れ構造を求めた。

図-7(a), (b)に、Streak 段階での 2 次元リップル模型上の流速場および渦度場を示す。ここで、 θ は振動流の位相であり、計測された振動流の空間平均流速 u を $u = U_m \sin \theta$ と表すことにより定義されている（流速は図の右向きを正とする）。また、 $u_m^* = 1/8$ は描画されている基準流速ベクトルの大きさが U_m の $1/8$ であることを意味し、 x^* , y^* はリップルの波長で無次元化された座標を示している。ここで、(a)流速場と(b)渦度場の各々において最も特徴的な位相における分布を示しており、両者の位相は同一ではないことに注意する。(a)より、振動流が反転する直前の位相では、さほど明瞭ではないが、2 次元的な流れの中に 3 次元的な構造が存在す

ることがわかる。この位相ではリップルからの剥離が観察されるため、このことは剥離渦が（組織化されていない）3 次元的な構造を有していることを示唆する。また、(b)より、ほぼ最大流速の位相ではトラフで振動方向に伸びた正負ペアとなった渦度の微細構造が分布していることがわかる。これは、振動流がクレスト上を流れる際に遠心力不安定になることで、ゲルトラー渦（例えば Saric, 1994）と呼ばれる縦渦が形成されるためと考えられる。この縦渦に沿って砂粒子が Streak 状になってトラフ内へ輸送され、これが寄り集まることで徐々にブリッジがかかり始めるものと考えられる。

次に、BPR が形成した後に、流れ構造が位相とともにどのように変化するかについて考察する。図-8(a)～(d)に、BPR 段階における(a)最大流速時、(b)反転直前、(c)反転直後、(d)増速時の各位相での流速場を示す。(a)の位相では、流速ベクトルの振動流方向成分が大きいことがわかる。このため、ブリッジからトラフへの砂の輸送が活発であると考えられる。(b)ではトラフ

内に3次元的な流れ構造が形成されている。この流れ構造は(c)の反転直後において3次元的な剥離渦になる。トラフへ輸送された砂粒子は、この剥離渦によってブリッジの側面に輸送されるであろう。また、(c)、(d)の反転後には、ブリッジから下流側の2つのブリッジへ向かうような流れ構造が形成されている。上記の流れ構造に基づく、振動流の半周期間における砂粒子の輸送モデルを図-9に示す。

4. BPR の形成・維持機構

BPR の形成過程に関する実験結果から、BPR 形成のシナリオと維持機構を次のように考える。フラットな砂面が振動流の作用を受けることによって、まず2次元リップルが形成される。2次元リップル上を流れる振動流中には遠心力不安定によってゲルトラー渦と呼ばれる縦渦が形成される。この縦渦に沿って砂粒子がStreak 状に輸送され、それらが寄り集まってリップル間に堆積する(Streak 段階)。波面形状が変化したことにより、局所的に出現していた3次元的な流れ構造は、空間的にある程度の規則性をもって点在するようになり、より強い流れを誘起する。この3次元的な流れ構造の作用によって、砂粒子が空間的に規則正しく堆積するようになる(Developing 段階)。こうして、3次元的な流れ構造と波面形状が空間的に安定すると、次の様な過程によって砂粒子はBPR の形状に輸送・堆積されていくと考えられる。

最大流速の位相において、ブリッジを形成していた砂粒子は、下流側のトラフへ輸送される。流速が減少するに伴い、これらの砂粒子はそのトラフ中に留まる。振動流が反転する位相にさしかかると、トラフ領域で一對の剥離渦が生じ、トラフ中にあった砂粒子はそのトラフの両側のブリッジへと輸送される。振動流の反転に伴い、3次元的な流れ構造は、あるブリッジから下流に近接する2つのブリッジへ分岐するようなパターンを示す。この流れ構造は、ブリックパターン状に配置された剥離渦を形成する流れ構造が合成されることによって誘起され

る(図-9の点線)。さらに、砂粒子はこの流れ構造によってブリッジから下流に近接する2つのブリッジの方へ分岐しながら輸送される。この過程によって、BPR の形成が進んでいくと、振動流中の3次元的な流れ構造も安定・強化されていく。このように、3次元的な剥離渦構造とBPR の砂面形状がポジティブフィードバックする相互作用を通して、BPR が固定化されていくものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、振動流水槽を用いた可視化実験により、BPR の形成領域・形状および形成過程について調べた。BPR は、2次元リップル上において砂粒子のStreak 状の堆積が生じる段階(Streak)から、不安定なブリッジがかかり始める段階(Developing)を経て、安定したブリッジが形成される段階(BPR)に達する。2次元リップル模型上における、Streak 段階とBPR 段階の振動乱流構造をPTVにより計測した。その結果、Streak 段階における流れ構造および、BPR 段階における各位相の流れ構造の詳細が明らかになった。PTVにより得られた流れ構造に基づいて、BPR パターンを形成する砂粒子の輸送機構が示された。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、桜木幸司君(九州大学大学院修士課程)、三木達也君(現(株)神戸製鋼所)および河津那由他君(現(株)新日本製鐵)に多大なご助力をお願いしました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 竹原幸生, R. J. Adrian, 江藤剛治(2000): KC 法を用いた新しい Super-Resolution PIV の提案, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 431-436.
- Bagnold, R. A. (1946): Motion of waves in shallow water interaction between waves and sand bottoms, Proc. Roy. Soc. London A, Vol. 187, pp. 1-16.
- Kaneko, A. (1980): The wavelength of oscillation sand ripple, Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Kyushu Univ., Vol. 28, No. 88, pp. 57-71.
- Hara, T. and C. Mei (1990): Centrifugal instability of an oscillatory flow over periodic ripples, J. Fluid Mech., Vol. 217, pp. 1-32.
- Matsunaga, N. and H. Honji (1980): Formation mechanism of brick-pattern ripples, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., Vol. 28, No. 88, pp. 27-38.
- Saric, W. S. (1994): Görtler vortices, Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 26, pp. 379-409.
- Sleath, J. F. A. (1976): On rolling-grain ripples, J. Hydraulic Res., Vol. 14, pp. 69-81.
- Vittori, G. (1992): Flow field induced by sea waves over brick-pattern ripples, J. Hydraulic Eng., Vol. 118, No. 9, pp. 1241-1259.
- Vittori, G. and P. Blondeaux (1992): Sand ripples under sea waves. Part 3. Brick-pattern ripple formation, J. Fluid Mech., Vol. 239, pp. 23-45.

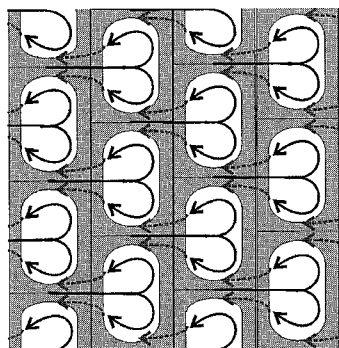


図-9 半周期間におけるBPR上の砂粒子の輸送モデル