

Morphological Changes during Giant Ripples Formation by Long-period Oscillatory Flow in a Circular Flume

Taiki YAMAMOTO*, Fujio MASUDA**

(Received July 2, 2015)

Wave ripples observed in nature commonly have wavelengths between a few and a few dozen centimeters, while those that have wavelengths over a meter are rarely found. These large wave ripples are called “giant ripples”, and are assumed to form under extreme wave conditions. Many studies have focused on the formation of ripples in the predominant size range, but there has been little research on giant ripples. This study examined the formation of giant ripples in a circular flume. The morphological changes related to giant ripple formation from a flatbed were observed during a long-period oscillatory flow, a 50-s period, and a 25-s period. The results revealed regular patterns in morphological changes. During giant ripple formation, increased ripple size is due to slightly changing crest positions. When a small ripple disappears, the larger ripples on both sides approach each other to form equal intervals among all ripples. The changes of ripple sizes and positions during giant ripple formation may be controlled by the vortex shape of the oscillatory flow near the bed. This phenomenon was also observed in the formation of average-sized ripples.

Keywords: circular water flume, giant ripples, long-period oscillatory flow, position of ripple crest, vortex shape

キーワード: 円筒水槽, ジャイアントリップル, 長周期振動流, リップルのクレスト位置, 渦の形状

円筒水槽内の長周期振動流による ジャイアントリップルの形成過程における形態変化

山本大貴*, 増田富士雄**

1. はじめに

海岸や湖岸の浅い砂底には、波浪の振動流がつくったウェーブリップルと呼ばれるうねり模様が見られることがある。ウェーブリップルはその規則正しい美しい形から多くの科学者の関心を引き、発生過程の研究¹⁻⁵⁾や、形成過程における形態の変化に関する研究⁶⁻⁹⁾も多く報告されている。こうした研究では、リップル発生の最初期状態の解明や、

波浪条件を静穏から暴浪、暴浪から静穏への変化させた時のベッドフォームの形態変化を解明する目的で行われたものが多い。

自然界で見られる通常のウェーブリップルは、波長数 cm から数 10 cm のものが多い¹⁰⁾。但しまれに、波長 2 m、波高 23 cm になるものがあるとされている¹¹⁾。近年、アフリカやカナダなどの先カンブリア時代末の“スノーボール・アース”直

*Department of Science and Engineering Research, Doshisha University, Kyoto, Japan
Telephone:+81-774-65-6672, E-mail: dup0928@mail4.doshisha.ac.jp

**Department of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto, Japan
Telephone:+81-774-65-6685, E-mail: fmasuda@mail.doshisha.ac.jp

後の地層から、波長が 2 m を超すような“ジャイアント・ウェーブリップル”が発見された¹²⁾。これは、当時の急激な海氷の融解に伴う特異な海況下で発生した長周期の波が原因であるとされ、注目を集めた。その後、Taniguchi et al.¹³⁾は、長周期の振動流実験で、波長 1.01 m、波高 19 cm のジャイアントリップルをつくることに成功した。

本研究では、ジャイアントリップルの形態や堆積構造、粒度組成から形成時の水理条件を推定するための基礎研究の一つとして、一定の波浪条件で成長過程を調べた。パドル駆動型の円筒水槽を用いて一定の長周期振動流を与え続けた結果、平坦な砂床からジャイアントリップルが形成された。その過程で規則的な形態変化が認められ、互いのリップルが位置を微妙に変化させることで、ジャイアントリップルに成長していくことが分かった。またその過程では、底面付近の渦の形状が全体で一定になろうとする現象が重要であると分かった。

2. 実験方法

2.1 実験装置

2.1.1 パドル駆動型循環円筒水槽

実験に用いた水路は、円周 474 cm、水路幅 14 cm、深さ 45 cm のパドル駆動型循環円筒水槽¹⁴⁾である (Fig. 1)。波は、水路の上に取り付けられたパドルの反転運動によって発生させる。パドルの高さ、反転周期、回転速度を変えることで、様々な条件の振動流を再現できる。この円筒水槽の優れている点は、構造が周期的であり、一般的な直線造波水槽では発生できない 10~60 秒という時間的に長い周期の振動流を発生できることである。

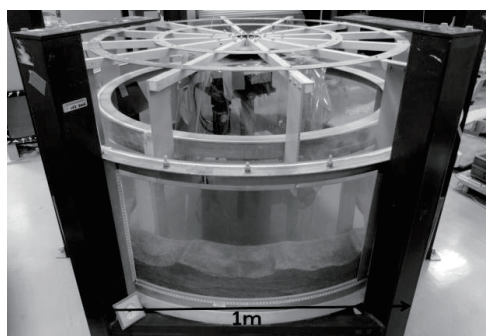


Fig. 1. Photograph of the circular flume.

2.1.2 直線造波水槽

一般的な大きさのウェーブリップルが形成される過程での形態変化を知るために、直線造波水槽での実験も行った。この水槽は、端にプランジャー型造波装置が取り付けられた、長さ 11 m、高さ 50 cm、幅 20 cm の直線水槽である。

2.2 実験条件

2.2.1 ジャイアントリップル形成

実験砂には、平均粒径 0.5 mm の混合砂を用いた。この砂は、中央粒径 0.62 mm と中央粒径 0.47 mm の 2 種類の砂を 1 : 3 の質量比で混合した。

実験は、周期 25 秒と周期 50 秒の波浪条件下で行った。実験の初期状況は、高さ 11.5 cm の平坦砂床とした。それぞれの実験における、水深、パドル高度、パドル速度、実験時間の条件は、Table 1 に示す。水理条件は、周期と流速の相図¹⁵⁾を参考にし、ジャイアントリップルが形成するとされる軌道直径 2.5 m 以上、流速 0.70 m/s 以下の条件に当てはまるように設定した。また、流速は予備実験の結果を元に算出したパドル高度と速度の関係式¹⁵⁾から求め、底面から 2 cm の軌道速度を用いた。軌道直径は、 UT/π (U は流速、T は周期である)¹⁶⁾で求めた。実験時間は、ベッドフォーム全体の形にほとんど変化が見られなくなるまでの時間とした。

Table 1. Experimental conditions.

No	Period	Water depth	Paddle height	Paddle velocity	Flow velocity	Orvital diameter	Time
1	50 s	0.315 m	0.235 m	0.5 m/s	0.184 m/s	2.93 m	26 h
2	25 s	0.24 m	0.2 m	0.9 m/s	0.465 m/s	3.7 m	10 h

2.2.2 直線水路実験

直線水路実験で用いた砂は、平均粒径が約 0.35 mm で、初期の平坦砂床高さは約 3 cm、水深は 16 cm とした。波の条件は、周期 1.10 s、波長 135 cm、波高 7.5 cm で、暴浪性の波¹⁷⁾とした。

2.3 撮影方法および解析方法

形成されたベッドフォームの撮影は、円形水槽

の場合、水槽の周り 6 方向から三脚付きのデジタルカメラを用いてインターバル撮影を行った。周期 50 秒の実験では 26 時間の間に 24 回、周期 25 秒の実験では 10 時間の間に 23 回撮影を行った。いずれの実験でも、リップルの形態の変化が激しい初期 1 時間は数分単位の短いインターバルで、その後は数十分おき、さらに数時間毎の長いインターバルで撮影を行った。直線水路の撮影は、砂床と同じ高さの水平方向 4 か所から 30 秒のインターバルで 2 時間行った。

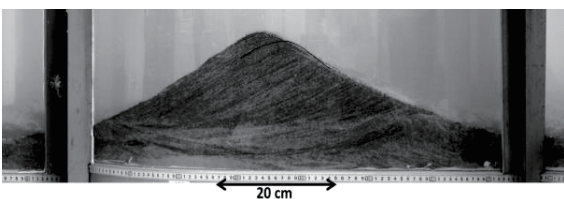
ベッドフォームの時間変化は、撮影した画像を画像処理ソフト (Adobe photoshop CS5.1) を用いて、歪み補正、角度補正などを行い、図化した。

3. 結果と考察

3.1 形成されたジャイアントリップル

円筒水槽では、周期 50 秒と周期 25 秒のどちらの実験でも平坦な砂床からジャイアントリップルが形成された。周期 50 秒の実験では 26 時間で最大波長 101 cm、最大波高 16.6 cm の、周期 25 秒の実験では最大波長 61 cm、最大波高 8.2 cm のウェーブリップルが形成された (Fig. 2)。

(a) Period 50 s



(b) Period 25 s

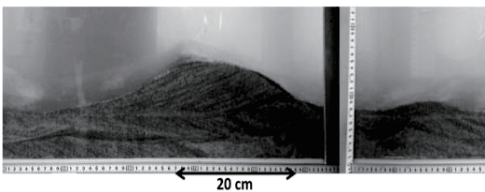


Fig. 2. Photographs of giant ripples in 50-s (a) and 25-s (b) oscillatory period experiments.

Taniguchi et al¹³⁾の実験での最大のウェーブリップルは、平均粒径 0.5 mm、流速 0.18 m/s、周

期 60 秒の条件で、波長 101 cm、波高 19 cm であった。

よって、今回の実験の最大のジャイアントリップルは、Taniguchi et al¹³⁾の実験のものと同様に、波長は同じで、波高は 2.4 cm 高いものであった。

3.2 ジャイアントリップルの形成過程での形態変化

周期 50 秒の実験では、平坦な砂床から 9 分後に平均波長 12 cm の小さなリップルが全面に形成された。それ以降は、リップルが水平方向の移動と合体を繰り返し、時間経過と共にリップルの数が減少していった (Fig. 3)。砂床全体にリップルが広がるまで (開始 9 分以前) は、部分的に小さく平坦な形のリップルが形成された。これらのリップルは、リップル間に形成される渦によってできるリップル (vortex ripple) ではなく、砂床上で砂粒子が転動することによってできるリップル (rolling-grain ripple)⁵⁾である。

リップルの峰線位置の時間変化を見ると、その峰線は水平方向に少しずつ相対的な位置を変えていることが分かった。峰線の切れる時点 (リップルが消滅する時点) では、両側のリップルが大きくなると同時に、互いに近づく方向へ移動していることが確認できた (Fig. 3)。その移動の結果、円筒水槽内のリップル同士の間隔は同じようになった。

周期 25 秒の実験でも基本的に周期 50 秒の実験と同様の現象が見られた。しかし、この実験においては、周期 50 秒の実験では見られなかった例外的な現象も確認された。周期 25 秒の実験では、開始 60 分の時点でリップルの数が 12 個から 13 個に増加した。この現象は、隣り合う大きなリップルが互いに遠ざかる方向へ移動し、そのリップル間の距離が他の 2 倍近くになったため、全体のバランスを保つために、その中間の位置に新たな小さなリップルが形成されたと説明することができる。すなわちこの場合では、間隔の広がった 2 つのリップルの中間の位置に新たにリップルを形成することが、円筒水槽内でリップル同士の間隔

を揃えるための最も小さい変化であったといえる。

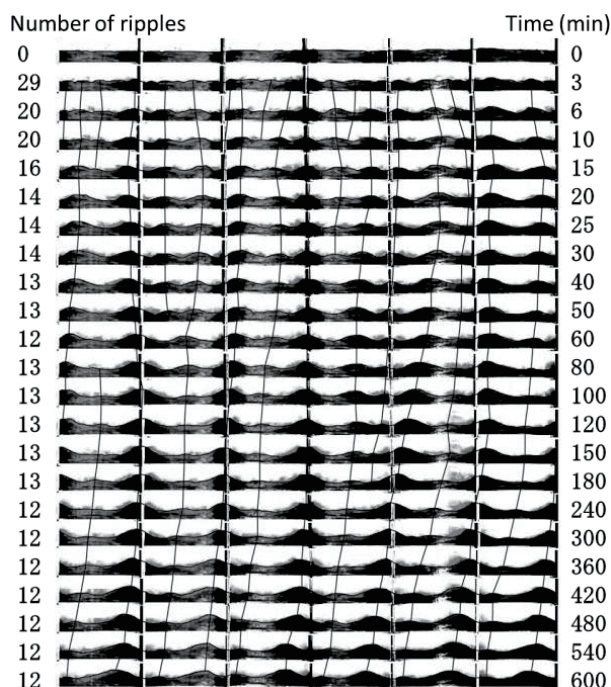


Fig. 3. Temporal changes in bedform shape during the 50-s oscillatory period experiment. Crest positions can be seen moving toward each other.

3.3 リップル波長および波高の時間変化

周期 50 秒と周期 25 秒の実験において、リップルの波長および波高はほぼ同様の時間変化を示した。リップルの波長と波高の平均値は、リップルの数が一定の時は一定で、リップルの数が減る時に急激に上昇するという、いわゆる階段状の変化を示した (Fig. 4)。こうした階段状の変化は、これまでの研究で知られており^{2,18)}、リップルは成長過程でその大きさが徐々に大きくなるのではなく、リップルの数が変化した時に全体が急激に大きくなる。

リップルの波長および波高の最高値と最低値と平均値の時間変化 (Fig. 4) をみると、リップルの成長過程では、リップル波長と波高の平均値の増加に先駆けて、最高値がまず増加している。これは、波長および波高の大きなリップルがひとつ先に出現し、次いで小さなリップルが消滅した時に、円筒水槽内の全体のリップルの大きさが揃うとい

う変化である。

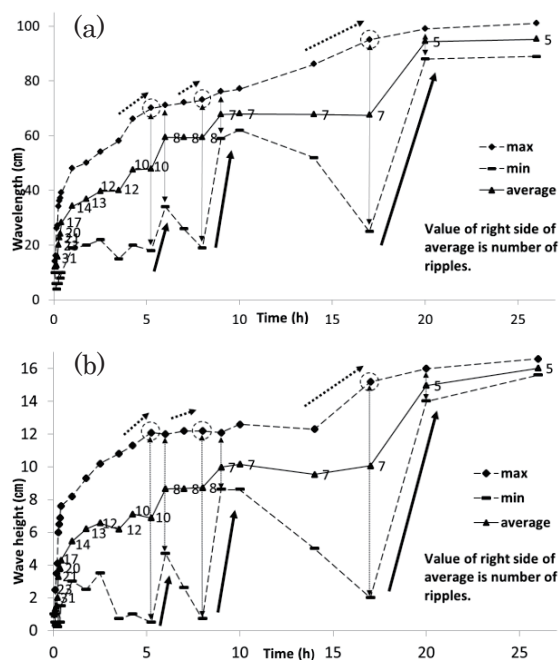


Fig. 4. Temporal variations of ripple wavelength (a) and wave height (b) in the 50-s oscillatory period experiment.

3.4 底面付近での振動流で発生する渦の形状変化

波で形成されるリップルの形態は、振動流の楕円軌道を反映することが分かっている^{19,20)}。ベッドフォームの形態からリップル上の振動流の楕円軌道の形状を考え、リップル間に発生する渦の形状の変化を想定することでリップルの形態変化を説明する。ここでは周期 50 秒の実験にて、リップルの数が 7→5 個に減る時点でのリップルの変化を例にしたモデル図 (Fig. 5) を用いて述べる。

リップル同士の大きさ (波長や波高) に差がない状態から、一つのリップルが大きく成長すると、そのリップルの両側には大きい渦が形成される。小さい渦は大きい渦に影響されてさらに小さくなり、リップルもその影響で小さくなって消滅する。そして、消滅するリップルの両隣のリップルが互いに近づくことで、全体が同じ大きさの渦になって安定する。この一連の過程を繰り返して、リップルは次第に大きく成長していくのである。

周期 25 秒の実験において、リップルの発達過

程で逆に新たなリップルが形成された現象も、底面付近の振動流の渦の変化で説明できる (Fig. 6). 乃ち、大きなリップルが互いに遠ざかるように移動すると、そこには大きな渦が形成される. リップル同士がさらに遠ざかると、他の渦と同程度の小さな2つの渦に分裂する. その結果、2つのリップルの中間の位置に砂が堆積するようになり、新たにリップルが形成されたと考えられる.

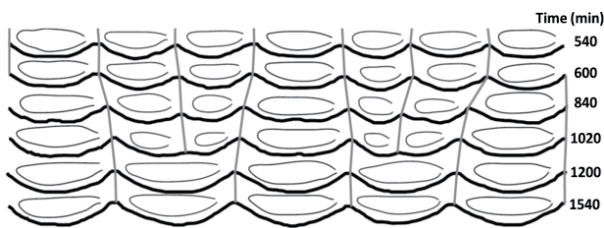


Fig. 5. Changes in ripples and vortex shape near a bed during concurrent decrease in ripple number and increase in ripple size.

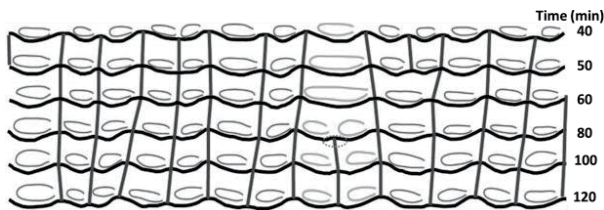


Fig. 6. Changes in ripples and vortex shape near a bed during increase in ripple size.

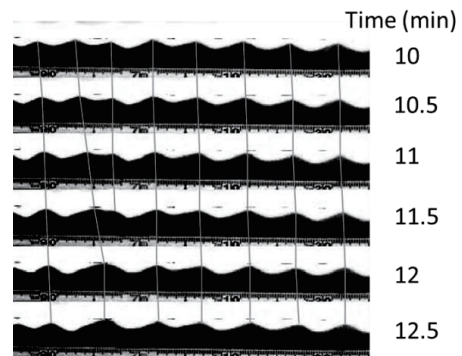
3.5 直線水路実験との比較

直線水槽を用いた一般的な周期の振動流の実験 (Fig. 7) でも、円筒水槽と同様にリップルの消滅および発生過程において相互移動の現象がみられた. 実験開始後 10~12.5 分の 30 秒毎のベッドフォームの形態変化をみると、ある一つのリップルの消滅が確認された (Fig. 7). 峰線の位置変化をみると、消滅するリップルの両側のリップルが互いに近づく方向へ移動していることが分かった.

実験開始後 36.5~39 分の 30 秒毎のベッドフォームの形態変化をみると、リップル間に新たにリップルが形成されたことが確認できる (Fig. 7). 峰線の位置変化をみると、新しく現れたリップルの両側のリップルが遠ざかる方向へ移動することが

分かった. このことから、今回確認されたジャイアントリップルの形成過程における相対的な移動や形態変化は、円筒水槽という特殊な形によるものではなく、一般的な現象であるといえる.

(a) Decreasing process



(b) Increasing process

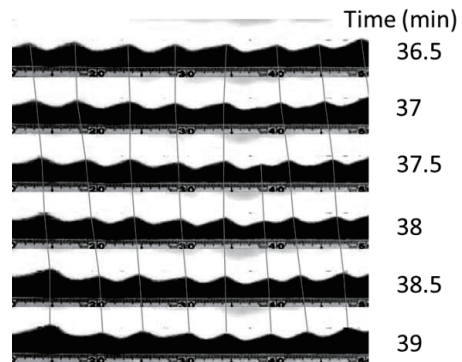


Fig. 7. Decreasing (a) and increasing (b) processes of ripple number in a straight wave flume.

4. むすび

円筒水槽を用いて周期 50 秒と周期 25 秒の長周期の波を再現した結果、砂床が平らな状態からジャイアントリップルが形成されたことを確認した.

リップルの時間変化は、初期に小さく平坦な形の **rolling-grain ripples** が形成される. リップル間に渦による浮遊砂が発生し **vortex ripples** に成長してからは、リップルは水平方向の移動と合体を繰り返してその数を減らし、ジャイアントリップルに成長していく. リップルが消滅する時には、両側の大きなリップルが互いに近づき、全体のリップル間隔が揃うように移動する.

リップル波長および波高は、時間と共に次第に

大きくなるのではなく、あるひとつのリップルが大きくなる。そして、あるリップルが次第に小さくなって消滅すると、全体のリップルが同じ大きさに揃うような形態変化をする。従って、リップル波長や波高の平均値は、リップル数が減少する時に大きく上昇する、階段状の変化を示す。

実験で見いだされたこうしたリップルの形態変化は、底面付近の振動流の渦の変化に関係すると考えられる。渦は全体で同じ大きさになるようにすることで、リップル成長過程での形態変化を説明することができる。通常サイズのリップル形成をみた直線水路での実験でも、リップルの消滅過程と発生過程で、円筒水槽実験と同様のリップルの相対的な移動現象がみられた。このことから、今回確認されたジャイアントリップルへの成長過程における形態変化の特徴は、円筒水槽という特殊な形によるものではなく、振動流によるリップル形成での一般的な現象であるといえる。

本研究に際して、参考文献をご教授して頂いた筑波大学の関口智寛氏、実験装置の操作方法をご教授して頂いた福島県の谷口圭輔氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) R. A. Bagnold, "Motion of Waves in Shallow Water: Interaction of Waves and Sand Bottom", *Proceedings of Royal Society of London, Series A*, **187**, 1-16 (1946).
- 2) A. Stegner and J. E. Wesfreid, "Dynamical Evolution of Sand Ripples under Water", *Physical Review E*, **60**, R3487-3490 (1999).
- 3) G. Rousseaux, A. Stegner and J. E. Wesfreid, "Wavelength Selection of Rolling-grain Ripples in the Laboratory", *Physical Review*, **E69**[031307], 1-6 (2004).
- 4) T. Sekiguchi and T. Sunamura, "Development of Characteristic Ripple Patterns in Response to the Change in Wave Condition: A Laboratory Experiment", *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **26**, 30-44 (2005).
- 5) 岩佐誠一郎, 宮田雄一郎, "振動リップル発生過程の実験的研究", *堆積学研究*, **44**, 9-31 (1997).
- 6) P.J. Davis and D.J. Walker, "Wave-formed Sediment Ripples: Transient Analysis of Ripples of Ripple Spectral Development", *Journal of Geophysical Research*, **109**, [C07020], 1-15 (2004).
- 7) T. Sekiguchi and T. Sunamura, "A Laboratory Study of Formative Conditions for Characteristic Ripple Patterns Associated with a Change in Wave Conditions", *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 1431-1435 (2004).
- 8) J. S. Doucette and T. O' Donoghue, "Response of Sand Ripples to Change in Oscillatory Flow", *Sedimentology*, **53**, 581-596 (2006).
- 9) 関口智寛, "ウェーブリップルの遷移過程", *地質学雑誌*, **117**, 141-147 (2011).
- 10) J. L. Alen, *Sedimentary Structures, Developments in Sedimentology*, 30A (Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1982), p.593.
- 11) J. H. Baas, "Ripple, Ripple mark, Ripple Structure", G. V. Middleton et al. (eds.), "Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks", *Kluwer Academic Publishers*, 565-567 (2003).
- 12) A. P. Allen and F.P. Hoffman, "Extreme Winds and Waves in the Aftermath of a Neoproterozoic Glaciation", *Nature*, **433**, 100523-127 (2).
- 13) K. Taniguchi, T. Takagawa and F. Masuda, "Formation of Giant Ripples in a Circular Water Flume", 558-561 (2008).
- 14) 高川智博ほか, "水路実験による堆積物挙動", *日本地質学会第 112 年学術大会, 見学旅行案内書*, N 班, 169-171 (2005).
- 15) T. Takagawa, *Experimental Study on Formative Conditions of Hummocky Cross-stratification Using Circular Flume*, (Doctor Thesis of Kyoto University, 2007), p.78.
- 16) J.F. William and N.M. Johnnie, "Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology", *John Wiley & Sons, Inc.* 206-249 (1988).
- 17) T. Sunamura, "Beach Morphologies and their Change", *Univ. Tokyo Press*, 136-157 (1988).
- 18) F. Y. Testik, "Adjustment of Sand Ripples Under Changing Water Waves", *Physics of Fluids*, **17**, [072104], 1-8 (2005).
- 19) H. E. Clifton and J. R. Dingler, "Wave-Formed Structures and Paleoenvironmental Reconstruction", *Marine Geology*, **60**, 176-177 (1984).
- 20) 増田富士雄, 牧野泰彦, "古東京湾のウェーブリップル形成の波浪条件", *地学雑誌*, **96**, 23-45 (1987) .