

同心二重円筒内の定常流による砂漣の形成

Formation of sand ripples due to steady viscous flow between
two concentric cylinders

東京農工大学大学院工学教育部物理システム工学専攻

堀 七菜子 (Nanako Hori)

佐野 理 (Osamu Sano)

1 背景

砂漠や海岸などの表面には、さまざまな波状の縞模様が見られる。これらの砂面形状は、たとえば砂漠、砂丘、海底、さらに地球以外の惑星の表面形状などどこであっても、砂の移動が起こる環境にさえあれば類似のパターンが生じる可能性があり、それが形成された環境を反映したものである。

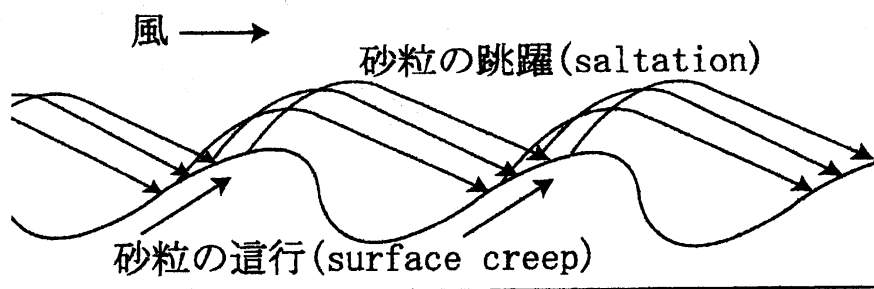


図 1: sand ripple の形成機構

Bagnoldによれば、砂の移動機構には、砂面を這う (surface creep, 這行)、飛び跳ねる (saltation, 跳躍)、空中を漂う (suspension, 浮遊) の3種類に分類される^[1]。図2は砂浜にできる砂漣(風紋)の例であり、砂が砂に衝突してはじきとばす“跳躍”が重要である。他方、引潮後に砂浜にできた砂漣 (sand ripple) の例を図3に、火星地表面の形状の例を図4に示す。海底や引潮時に砂浜に残される砂漣 (sand ripple) は、水の流れによって砂が運ばれることが原因で生じると考えられ^[2]、“這行”が重要と考えられる。Bagnoldは野外実験と風洞実験により、砂の移動形態、砂面上の風の分布と摩擦応力、saltationの砂の跳ぶ軌道、砂の移動量、砂漣の水平スケール、砂のえり分け作用などに数多くの知見を得ている。Bagnoldに続いて日本では河村龍馬が砂漣の発生に関する不安定論、砂輸送理論を研究し高く評価されている^[3]。東京農工大学の佐野研究室では飯寺亮介により、直線水路を用いた砂漣 (sand ripple) の形成実験が行われた(1997年度)。この実験装置では水路の長さが有限であるため、rippleの形成は観測されたがその移動と共に粒状体も下流へ移動してしまい、長時間の観測はできなかった^[4]。



図 2: sand ripple 写真提供:鳥取県商工労働部観光課

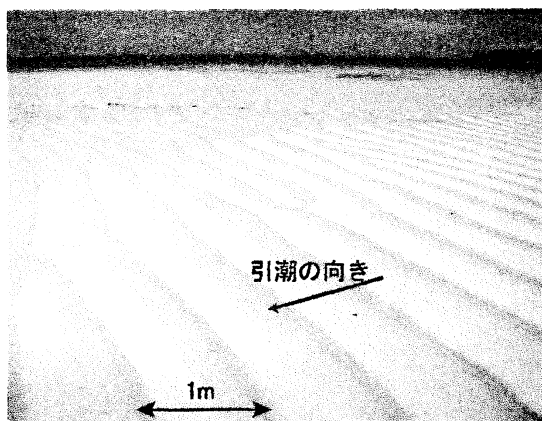


図 3: 与論島百合ヶ浜



図 4: 火星地表面の形状の例
<http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect19/>

2 目的

本実験ではテストセクションが有限な長さに制限されていた旧実験装置を同心二重円筒水槽に改良し、砂漣 (sand ripple) の発生から成長の過程を長時間にわたり観測することを目的とする。

3 実験

3.1 装置図

本実験で用いた装置の主要部分の写真を図5に、概略図を図6に示す。水槽は同心二重円筒部分とその上面に沿って回転する円環から構成されている。実験条件は下記の通りである。

- 粒状体：ガラスビーズ (直径:0.05cm, 層の厚さ 2cm)
- 水路の水深 $H=10.0 \pm 0.5\text{cm}$
- 水路の幅 $W=11.0 \pm 0.3\text{cm}$

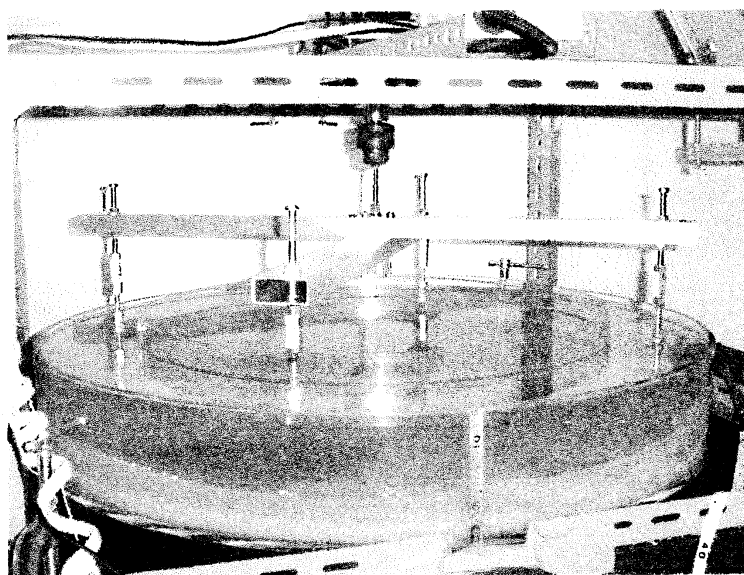


図 5: 実験水槽

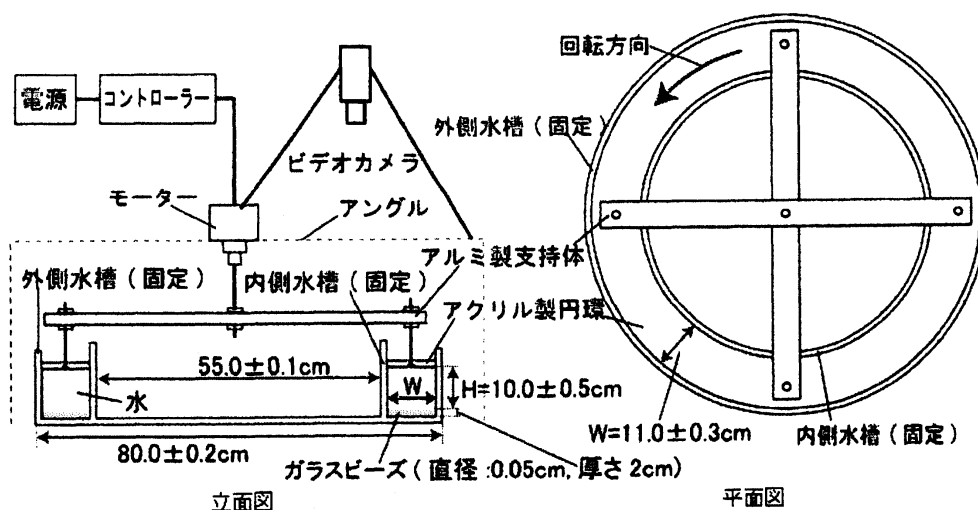


図 6: 装置概略図

- 円環回転数 $V=18.0, 17.5, 17.0, 16.5, 16.0$ rpm
(水路中央の上壁面速度はそれぞれ 63.6, 61.9, 60.1, 58.3, 56.5, cm/s である)

3.2 実験方法

1. 水路内に水とガラスビーズを入れ、ガラスビーズ層の表面上の1個所に小さなくぼみをつくる(初期位置制御)。
2. 円環を回転させて水流をつくり、粒状体表面の形状を上方から撮影する(1時間)。
3. 砂漣 (sand ripple) の波長 λ と幅 L を画像から測定する。ここで、ripple ①～④、波長 λ 、幅 L^* を図7のように定義した。ripple の番号は、それが発生した順を表す。

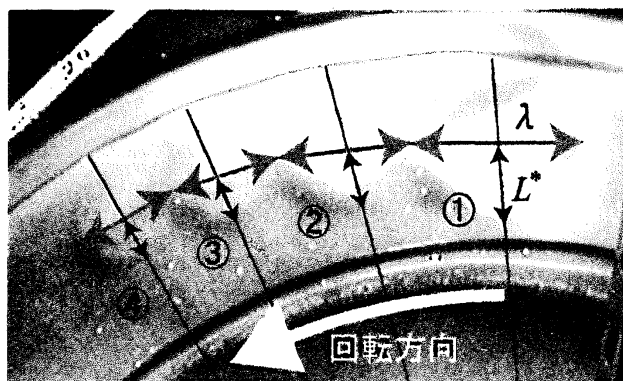


図 7: 実験画像および波長 λ 、幅 L^* の定義

4 結果と考察

4.1 rippleの様子

観測した砂面形状の一例を図8、図9に示す。水路が曲率を持っていることにより、砂面付近では図10のように内向きの2次流^[5]が発生している。



図 8: 上から見た図 ($V=17.0\text{rpm}$, 実験開始から50分後)

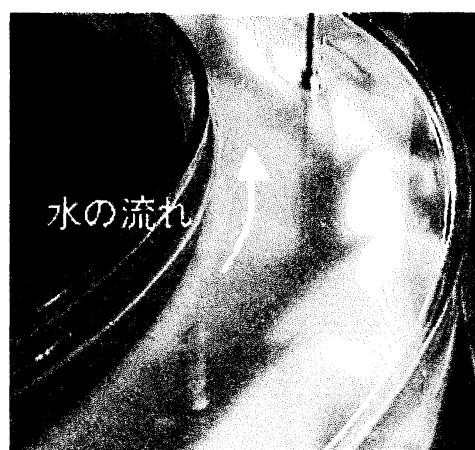


図 9: 斜め上から見た図

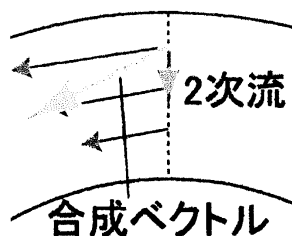


図 10: 2次流

4.2 ripple ①～④の成長の様子

$V=18.0, 16.0\text{rpm}$ のときの、砂漣の先端の座標の時間変化を図 11、図 12 に示す。なお、初期に設定したくぼみの位置を座標の原点とした。円環回転数 V が大きいほど ripple ②～④が発生する時間は短くなっている。

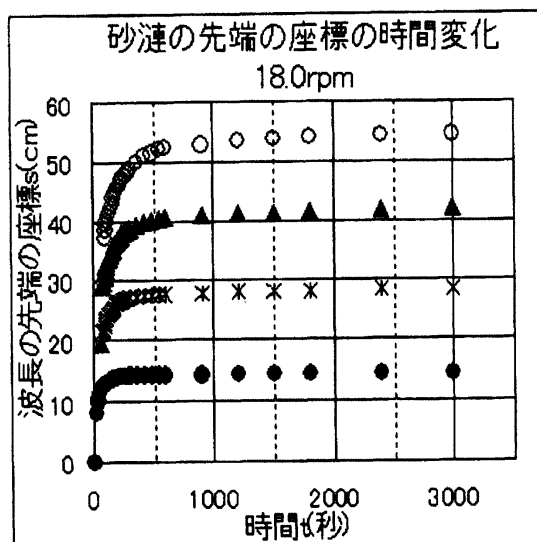


図 11: $V=18.0\text{rpm}$ の場合

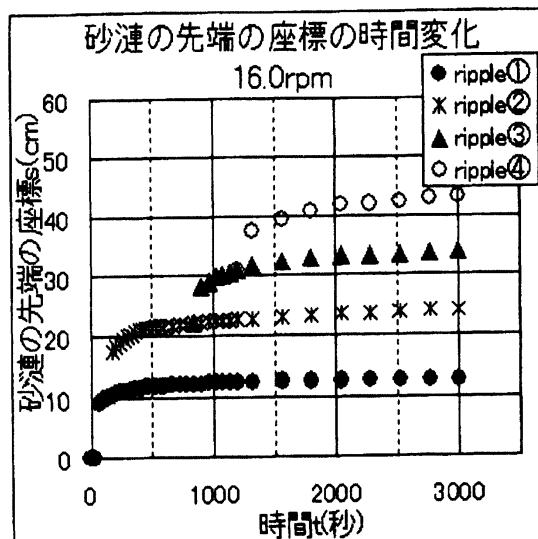


図 12: $V=16.0\text{rpm}$ の場合

4.3 ripple の波長 λ の時間変化

$V=18.0, 16.0\text{rpm}$ のときの、波長 λ の時間変化を図 13、図 14 に示す。これらより、時間が経つと波長は一定値に近づき、回転数が小さいほど波長 λ は短くなる。

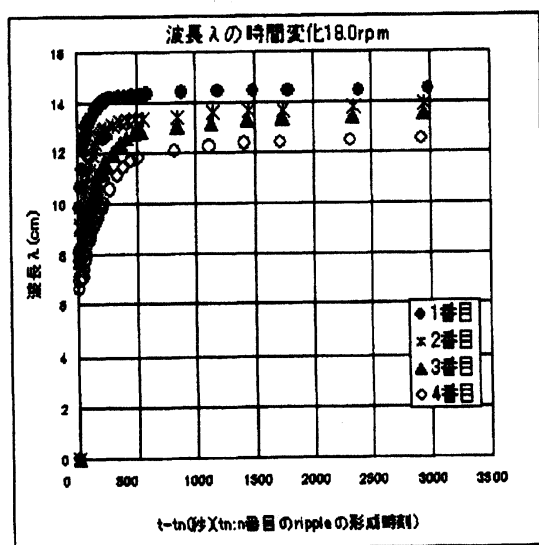


図 13: $V=18.0\text{rpm}$

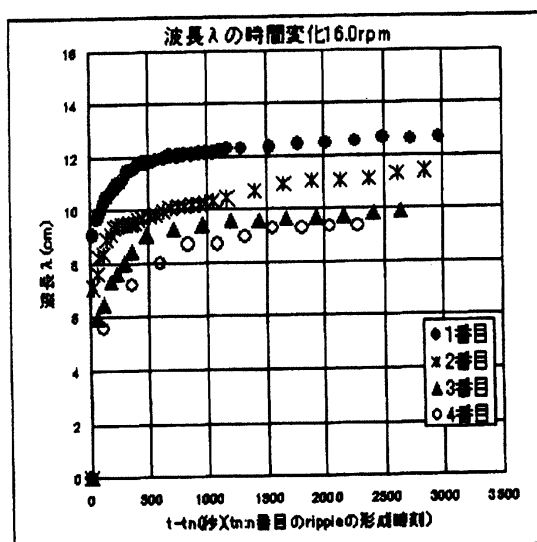
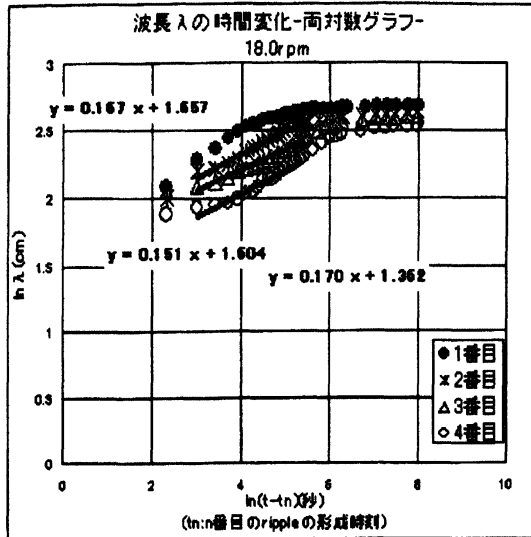
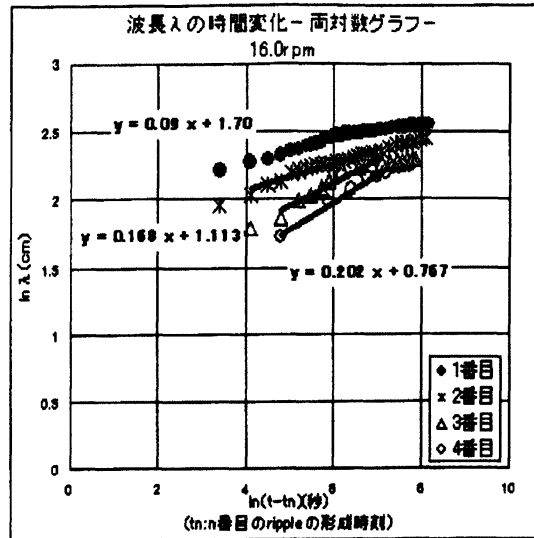


図 14: $V=16.0\text{rpm}$

次に $V=18.0, 16.0\text{rpm}$ での波長 λ の時間変化の両対数グラフを図 15、図 16 に示す。

図 15: $V=18.0\text{rpm}$ の場合図 16: $V=16.0\text{rpm}$ の場合

ripple 形成における波長と時間の関係を

$$\ln \lambda = a \ln(t - t_n) + b_n \iff \lambda \propto t^a \quad (1)$$

の関数形で近似すると

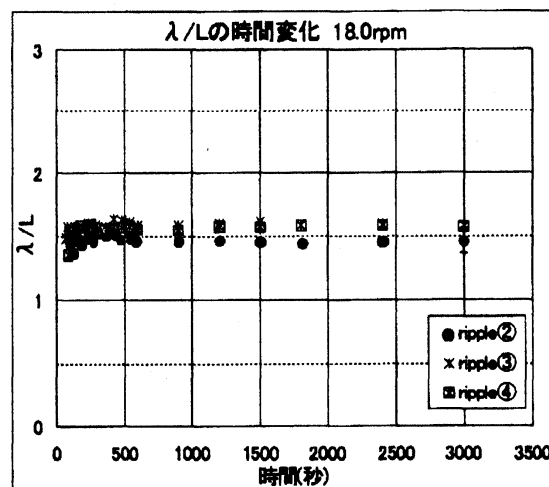
$V = 18.0 \sim 16.5\text{rpm}$ では $a = 0.14 \sim 0.18$

$V = 16.0\text{rpm}$ では $a = 0.14 \sim 0.23$

の結果を得た。指数 a は $V=18.0 \sim 16.5\text{rpm}$ のときより 16.0rpm の方がばらつきが大きくなっている。

4.4 ripple の形成過程

流速の条件を固定し、次々に形成される ripple についてその波長 λ と幅 $L = 2L^*$ の比 λ/L の時間変化を図 17 に示す。どの ripple についてもこの比はほぼ一定値(この場合には $\lambda/L \approx 1.5$)を取ることがわかった。

図 17: λ/L の時間変化 ($V=18.0\text{rpm}$)

$V=17.0\text{rpm}$ のときの、波長 λ の時間変化を図 18、その両対数グラフを図 19 に示す。

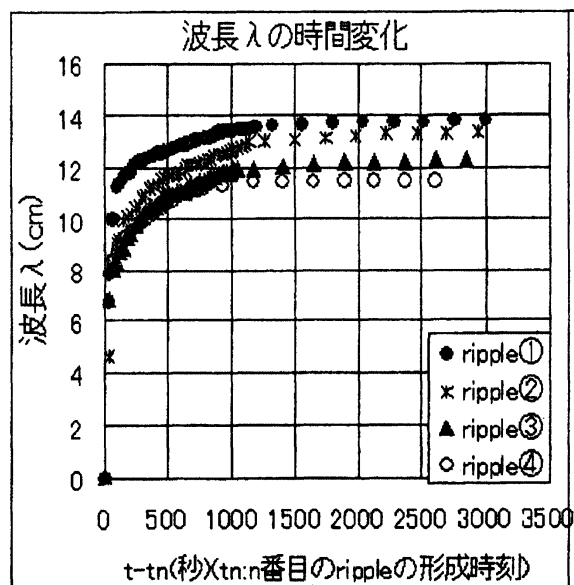


図 18: $V=17.0\text{rpm}$ の場合

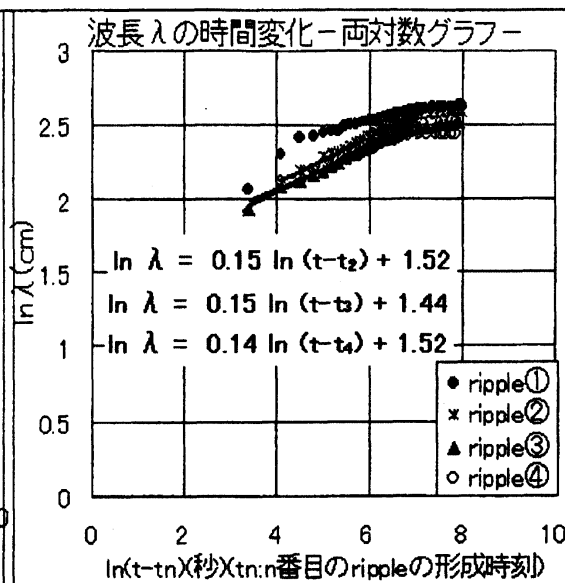


図 19: $V=17.0\text{rpm}$ の場合

これらより、 $V = 17.0\text{rpm}$ では $a = 0.14 \sim 0.15$ となる。砂漣が形成された領域の先端の座標 s' の時間変化と、 $t=900$ 秒のときの幅と形成領域の関係を図 20 に示す。

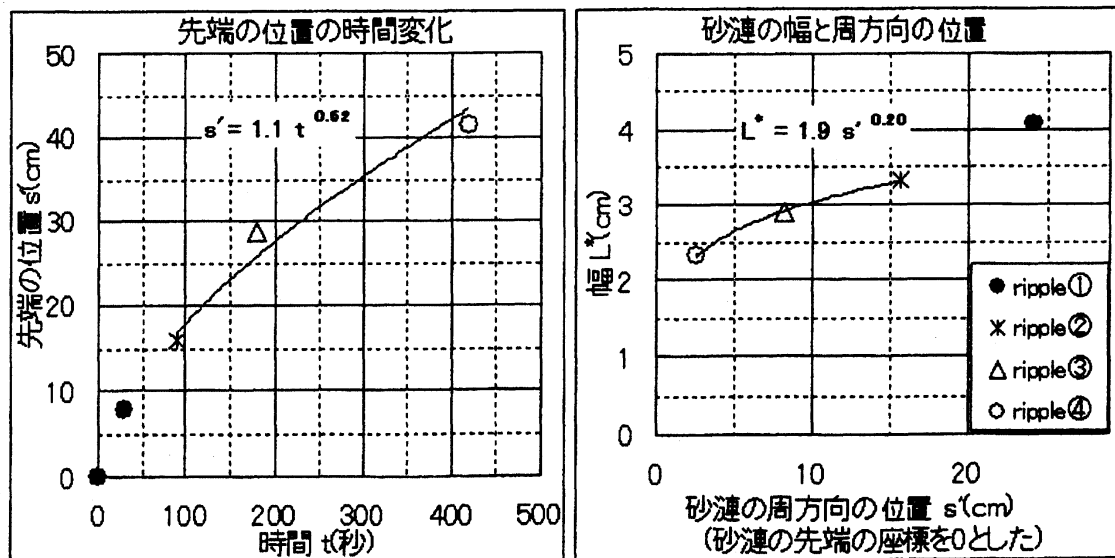


図 20: s' の時間変化、 L^* と領域 s' の関係 ($V=17.0\text{rpm}$)

前節より λ/L が一定であることと、図 20 より以下の関係式が導き出せる。

$$\begin{aligned}
 s' &= 1.1t^{0.62} \\
 L^* &= 1.9s'^{0.20} \\
 L^* &= 1.9t^{0.12} \\
 \therefore L^* &\propto \lambda \propto t^{0.12}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

上記より $a = 0.12 \pm 0.03$ 、画像からの直接測定は $a = 0.14 \sim 0.15$ となっている。いずれにしても、このパターンの成長はフラクタルな次元になっている。

5 結論

本実験装置で直径 0.05cm のガラスビーズを粒状体として用い、円環回転速度 $V = 18.0, 17.5, 17.0, 16.5, 16.0$ rpm で実験と解析を行った結論を以下に挙げる。

- 円環を回転させてから十分時間が経つと、波長 λ は一定値に近づく。
- 円環回転数 V が大きいほど新たな ripple が形成される時間は短く、波長 λ は大きくなる。これは、円環回転数 V が大きければ流速も大きくなり、単位時間当たりに流れによって供給される粒状体の量が増加するためと考えられる。
- 波長と幅の比 λ/L はほぼ一定値を取った ($V = 18.0$ rpm では $\lambda/L \simeq 1.5$)。

6 今後の課題

本実験結果を踏まえ、今後この研究をさらに発展させるための方策について挙げておく。

- 初期条件をそろえる。
- ripple の波長 λ の測定方法を、上方からだけでなく横からも同時にビデオ撮影をする、など工夫をして精度を上げる。
- ripple の高さを測定し、波長や幅との関係を調べる。
- テストセクション内の流速分布を調べる。
- テストセクション内の水の流れに対して、外壁による影響を少なくする工夫をする。
- (2) 式を説明できる形態形成モデルを考える。
- テストセクションの高さ H 、粒状体の種類や大きさ、円環回転数 V などの条件を変えて砂面形状の形成過程を調べる。
- 観測をさらに長時間 (2～3 時間) 行う。

参考文献

- [1] R.A.Bagnold (金崎 肇, 訳): 飛砂と砂丘の理論, 創造社 (1963) 42-43.
- [2] 佐野 理 (高木 隆司, 編): かたちの事典, 丸善 (2003) 670.
- [3] 長島 秀樹: 砂漠における砂丘の形状と砂の移動, 日本流体力学会誌「ながれ」
10 (1991) 167.
- [4] 飯寺 亮介: 風紋水紋の実験的研究, 東京農工大学卒業論文, (1998).
- [5] 佐野 理: 連続体の力学, 裳華房 (2000) 163-165.