

同心二重円筒内の定常粘性流による砂漣形成

東京農工大学・工・物理 大城 悠葵 (Yuki Oshiro)
東京農工大学・院工・物理 堀 七菜子 (Nanako Hori)
佐野 理 (Osamu Sano)
Dept. Appl. Phys., Tokyo Univ. Agri. Tech

1. はじめに

1.1 砂面形状の分類

砂面の形状は, 主にその空間スケールによって分類される[1]. 波長が数 cm~1m のものは「砂漣(sand ripple)」, 1m~1km のものは「砂丘(dune)」, それ以上のものは「dune」と呼ばれる. 本実験では, 砂漣(sand ripple)について行った実験結果を報告し, 考察する.

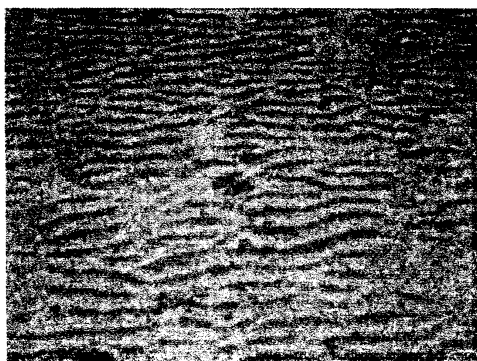


図 1.1 干潟に形成された砂漣
(撮影：大城)



図 1.2 街に迫る砂丘
(週刊朝日 12/2 号(2005)より)

1.2 砂漣と干潟 ～泡瀬干潟の紹介～

干潮時の干潟に行くと容易に砂漣を見ることができる。また、干潟は様々な生き物が棲息しており、生命のゆりかごとして海の生態系を支えている場所でもある[2]。しかし、遠浅で陸地化し易いために、埋め立て工事を行っている(または行われた)干潟が全国各地にあり、環境の悪化が懸念されている。その一つが沖縄県にある「泡瀬干潟」で、ここには世界でも珍しい動植物が生息している。この代表例がクビレミドロと呼ばれる藻の仲間で、日本国内では沖縄本島のみで確認されている。その繁殖地の少なさ故、国の絶滅危惧種にも指定されている。また、藻類の進化を探る上で生物学的にも重要であるために、この種の保護が叫ばれている。干潟の埋め立て工事による影響を避けるため、クビレミドロの移植事業が展開されており、生育条件としては「砂漣が形成されない程度の移砂量」というのが報告されている[3]。しかし、現状ではこの移植事業は成功していない。

本実験のように砂漣の形成に関する研究が、環境問題への適切な対応へ役立つことを期待する。



図 1.3 クビレミドロ写真

(いであ株式会社環境関連の情報サイトより)

2. 実験装置

2.1 実験装置概略図

本実験で用いた装置の概略図を以下に示す。

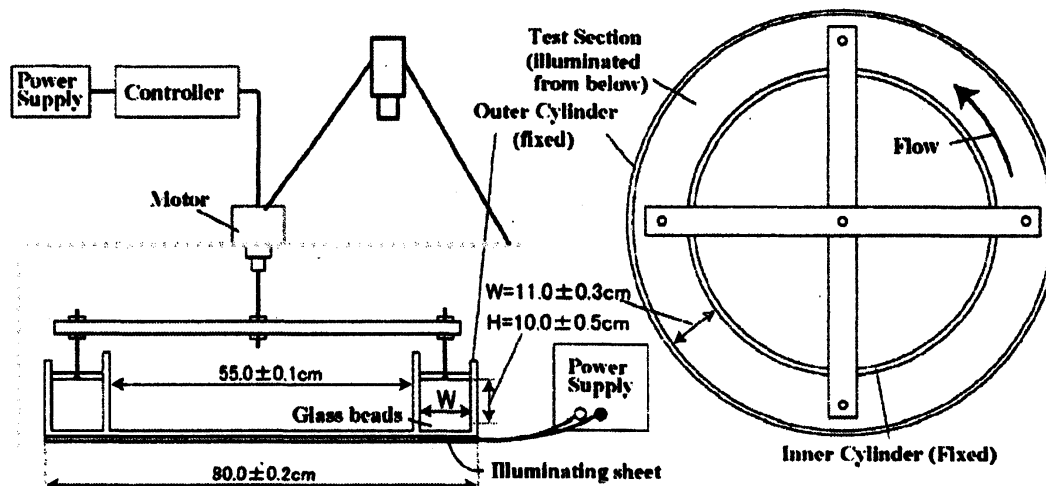


図 2.1 実験装置概略図

直径が $80.0 \pm 0.2 \text{ cm}$, $55.0 \pm 0.1 \text{ cm}$ の二つの円筒を中心軸を一致させて重ね、その間をテストセクションとする。テストセクション内は水で満たし、上面のアクリル円環を反時計回りに回転させることで流れを作る。この円環の回転はモーターによって制御し、与えた回転数に対応した流速が得られる。砂澱形成時にテストセクション内に敷いた粒状体はガラスビーズで、その平均粒径は 0.06 cm である。

2.2 実験装置の特性、テストセクション内の流速分布

実験装置の特性を知るためにテストセクション内の流速分布を測定した。測定には LDV(レーザードップラー流速計)を用い、アクリル円環の回転数は 14 rpm とした。なお、測定はガラスビーズを敷いてない場合、ガラスビーズを敷いた場合(層厚 1.5 cm)について行った。

水平面内の流速分布は、内側から外側へいくほど速くなっている(図 2.2a)。鉛直面内の流速分布は、鉛直方向に一定の流速を示している(図 2.2b)。いずれの場合も壁付近には境界層が存在しているが、テストセクションの中心付近はほぼ一様な流速が得られることがわかる。ガラスビーズを敷いていない場合、敷いた場合共に同様の傾向が見られる(図 2.3a, 図 2.3b)。

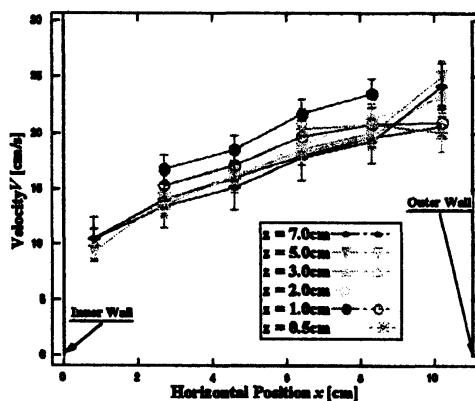


図 2.2a 周方向流速分布
(ガラスビーズ無)

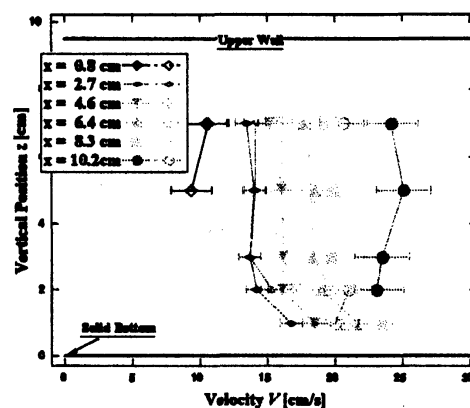


図 2.2b 鉛直方向流速分布
(ガラスビーズ無)

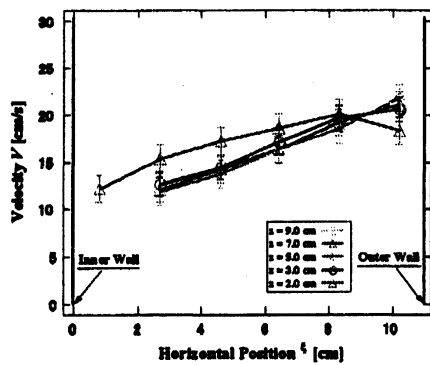


図 2.3a 周方向流速分布
(ガラスビーズ有)

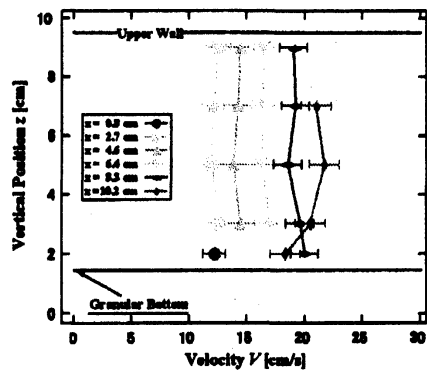


図 2.3b 鉛直方向流速分布
(ガラスビーズ有)

2.3 形成される砂漣について

本実験では、初めに窪みをつけることで初期位置を設定し、そこから砂漣が形成された順に ripple1, ripple2, ripple3... と名前をつける(図 2.4 参照).

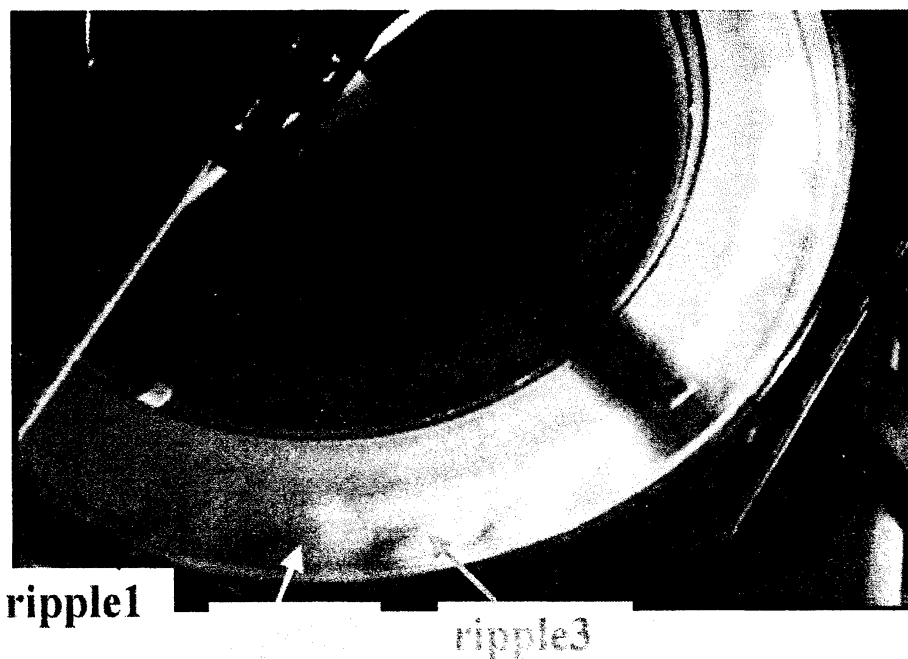


図 2.4 砂漣の名前付け

3. 砂漣の体積測定

3.1 実験方法

- ① 水槽の下に有機 EL パネルを設置する.
- ② テストセクション内にガラスビーズを敷き, 水を入れ, 平にならす.
(ここで初期位置設定のため, 窪みをつける)
- ③ 円環を取り付け, パネルを点灯させる.
- ④ 円環を回し砂漣を形成させ, その様子をビデオカメラで撮影する(60 分).
- ⑤ 画像をパソコンに取り込み, 透過光の強度分布から体積を測定する.
- ⑥ ①~⑤を回転数が $\omega=16.0, 16.5, 17.0, 17.5, 18.0$ rpm について行う.

3.2 実験条件

ガラスビーズ : 粒径 0.06 cm, 層厚 2.0 cm

深さ(流体層の厚さ): 8.0 cm

3.3 実験結果

以下のような透過光の画像および等高線分布が得られた(図 3.1a,b).



図 3.1a 透過光による砂漣



図 3.1b 等高線の様子

(1 間隔:2~3mm)

これを 3.1 方法⑥の回転数で測定し, 体積の時間変化をプロットする(図 3.2)

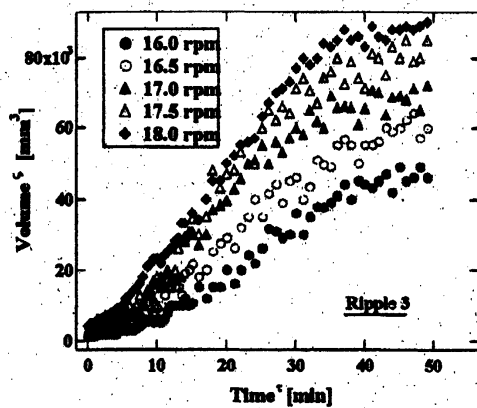


図 3.2a 各回転数における
体積の時間変化

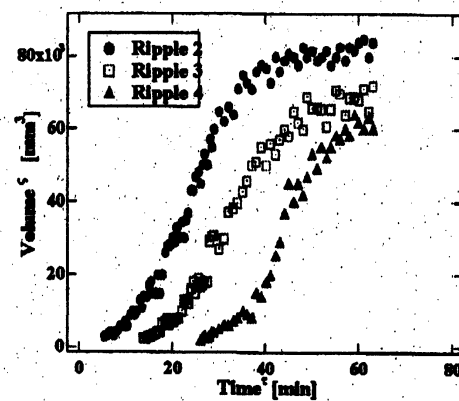


図 3.2b $\omega=17\text{rpm}$ における
体積の時間変化

3.3 近似式の導出

時刻 t が小さいとき

$$\frac{\delta}{\delta t} \ln S = \frac{1}{S} \frac{\delta S}{\delta t} = \alpha \quad (\text{一定}) \quad (1)$$

$$\therefore S(t) = S(0)e^{\alpha t} \quad (2)$$

つまり, V は指数関数的に増加する.

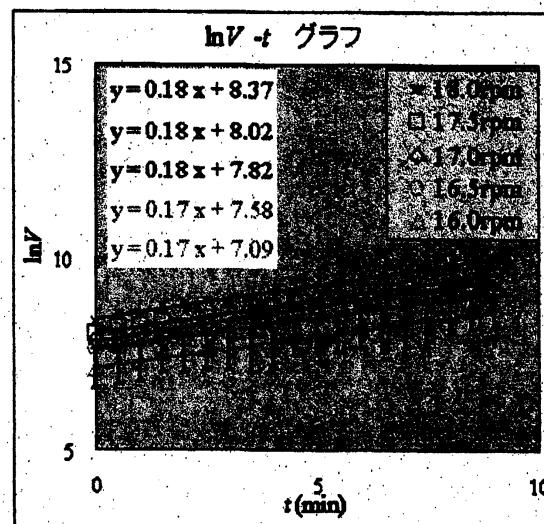


図 3.3. 体積と時間の片対数グラフ

しかし, 図3.2にみられるように t が大きくなると, ある一定の値に近づくことから,

$$\frac{1}{S} \frac{\delta S}{\delta t} = \alpha - \beta \Leftrightarrow \frac{\delta S}{\delta t} = \alpha S - \beta S^2 \quad (3)$$

と修正する.

この微分方程式はロジスティック・モデルと同じであり, その解は

$$\zeta(\tau) = \frac{\beta \alpha^2}{\frac{\beta \alpha^2}{\alpha} + \zeta(0) - \frac{\beta}{\alpha}} \quad (4)$$

で与えられる。この解を実験値にあてはめると、各定数は表 1 が得られる。このようにして求めた近似曲線を重ねたのが図 3.4 である。

ω	$\times 10^3 V(0)$	α	$\times 10^4 \alpha/\beta$		$\times 10^3 V(0)$	α	$\times 10^4 \alpha/\beta$
18.0	4 ± 1	0.18	9.0 ± 0.3	②	3 ± 1	0.18	8.0 ± 0.3
17.5	3 ± 1	0.18	8.0 ± 0.3	③	3 ± 1	0.18	7.0 ± 0.3
17.0	3 ± 1	0.18	7.0 ± 0.3	④	2 ± 1	0.17	6.0 ± 0.3
16.5	2 ± 1	0.17	6.0 ± 0.3				
16.0	1.2 ± 0.5	0.17	5.0 ± 0.3				

表 1 各定数の値

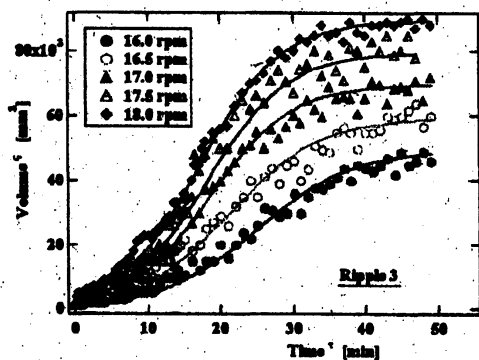


図 3.4a 各回転数における
体積の時間変化
(近似曲線を追加)

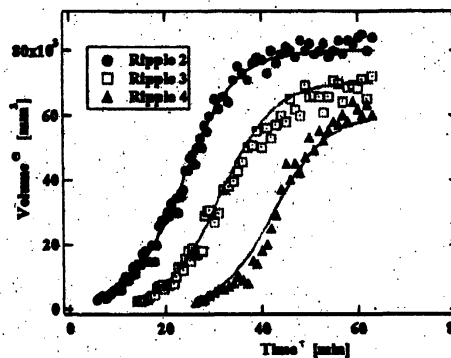


図 3.4b $\omega=17\text{rpm}$ における
体積の時間変化
(近似曲線を追加)

4. 砂漣の位置, 波長測定

4.1 実験方法

- ① テストセクション内にガラスビーズを敷き, 平にならす.
(ここで初期位置設定のため窪みをつける)
- ② 円環を取り付ける.
- ③ 円環を回して砂漣を形成させ, その様子をビデオカメラで撮影する(60 分).
- ④ 画像をパソコンに取り込み, 位置, 波長を測定する.
(窪みから窪みを波長と定義した)

4.2 実験条件

ガラスビーズ : 粒径 0.06 cm 層厚 1.5 cm

深さ(流体層厚) : 8.0 cm

円環回転数 : 16 rpm

4.3 実験結果

位置, 波長のそれぞれについて得られた結果を図 4.1, 図 4.2 に示す. 図の横軸は時間, 縦軸は周方向の位置である.

図 4.1 を見ると, ripple1 が進行し, その後方に ripple2 が形成されるのではなく, ripple1 が形成され, その前方に ripple2, ripple3... と形成されていくことがわかる.

図 4.2 の横軸は時間, 縦軸は波長である. 各 ripple とも形成初期には成長が速く, 時間が経つにつれてある一定の値に近づいていく様子がわかる. さらに, ripple の番号が増えるに従い, 波長は短くなる傾向がある. しかし, 図 4.3 より, さらに長時間の観測を続けても ripple が形成されなくなる(波長が 0 になる)のではなく, 十分後の ripple では波長は一定の値に近づいていく傾向が見える. 実際, 60 分以上観測を続け, 砂漣が進行して円周内を一周しても, 新しい砂漣が古い砂漣の上に重ねて形成される様子が見られた.

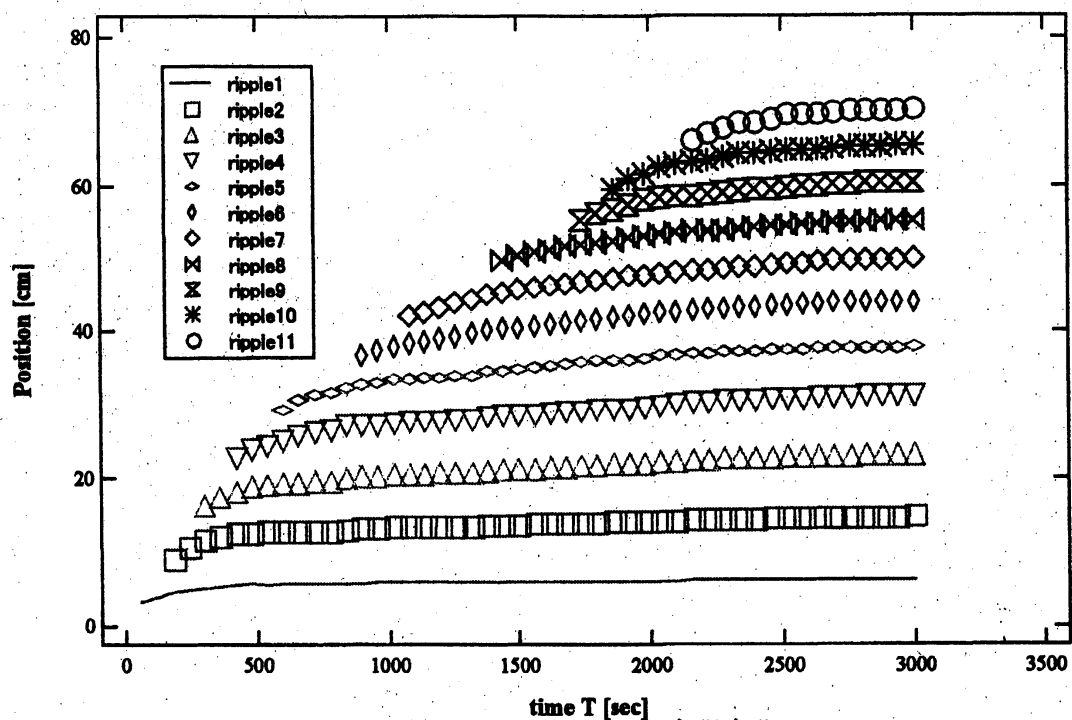


図 4.1 砂漣の位置の時間変化

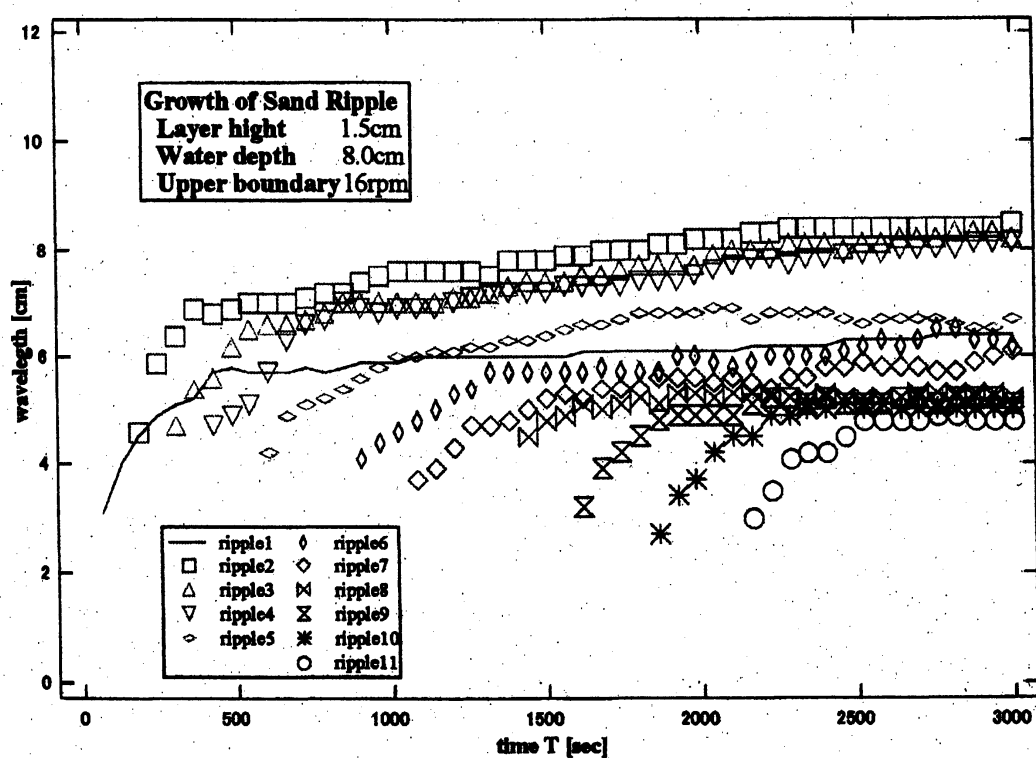


図 4.2 砂漣の波長の時間変化

波長に関して、さらに深さ(流体層厚)を変えた測定を試みたが、近似式の導出には至らなかった。

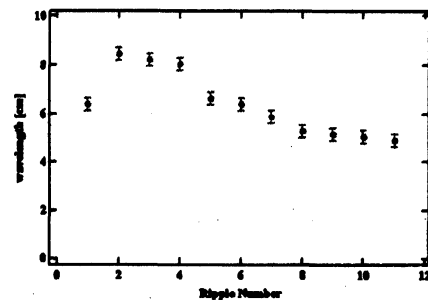


図 4.3 時間経過後の
各砂漣の波長

5. おわりに

今回の実験では、

1. 砂漣の体積の成長は $\frac{\delta \zeta}{\delta \tau} = \alpha \zeta - \beta^2$ というロジスティック・モデルで近似できる
2. 砂漣の波長は形成初期に成長が速く、時間が経つにつれ一定値に近づく
3. ripple の番号が増すにつれ、波長は短くなるが、後に一定値に近づく傾向にある

という結論が得られた。

今回は波長を「窪みから窪みまで」と定義したが、形成初期の成長が速いため、形成開始時刻を決定するのに任意性が残されている。このため、波長に関しては実験式の導出まではできなかった。今後も検討が必要である。また、今回の実験では、60 分間の測定をし、砂漣の形成初期の様子をグラフ化することを目的とした。類似した実験として、チャンネル幅の狭い小型の装置を使い、長時間観測した報告がある[4][5]。より幅の広い本実験装置でも長時間観測を行い、比較検討していきたいと考えている。

6. 参考文献

- [1] 長島 秀樹: 砂漠における砂丘の形状と砂の移動, ながれ 10 (1991) 166.
- [2] 田久保 晴孝: 干潟の学校 三番瀬から考える環境問題, 新日本出版 (2003).
- [3] 中城湾港泡瀬地区環境保全・創造検討委員会 第4回 海藻草類専門部会: ク

ピレミドロの保全について, 内閣府沖縄総合事務局開発建設部, 沖縄県土木建築部, (財)港湾空間高度化環境研究センター (2006).

<http://www.dc.ogb.go.jp/nakagusukuwankou/pdf/20060222/gijiroku.pdf>

[4] A.Betat, V.Frette and I.Rehberg: Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 88.

[5] A.Betat, V.Frette and I.Rehberg: Eur. Phys. J. E 8 (2002) 465.