

渦輪の粒状体平面への衝突

東京農工大学・院・工・物理

伊東 木 (Boku Ito)

佐野 理 (Osamu Sano)

Department of Applied Physics,
Tokyo University of Agriculture and Technology

1 はじめに

1.1 研究背景

火星表面にはランパートクレーターと呼ばれるクレーターが存在する,これは円錐状の凹部の外側に花びらのような凹凸模様を伴っている(図1左). このクレーターは, 大気が存在しない, あるいは存在していなかったと思われる他の惑星には見ることのできない形状であり, その形成には大気存在から受けるなんらかの流体力学的な作用が関わっている可能性がある. その1つの候補として, ここでは渦輪と粒状体層との衝突を考えていく.

現在までに, 粘性流体中で境界に接近する渦輪の運動では, 渦輪の並進速度の減少や2次渦輪の発生, 半径の増大, 境界付近でのリバウンドなどのような現象が多数報告されている. これらの現象は境界壁とそこに接近する渦輪の相互作用が原因で引き起こされていると考えられている. [1][2]

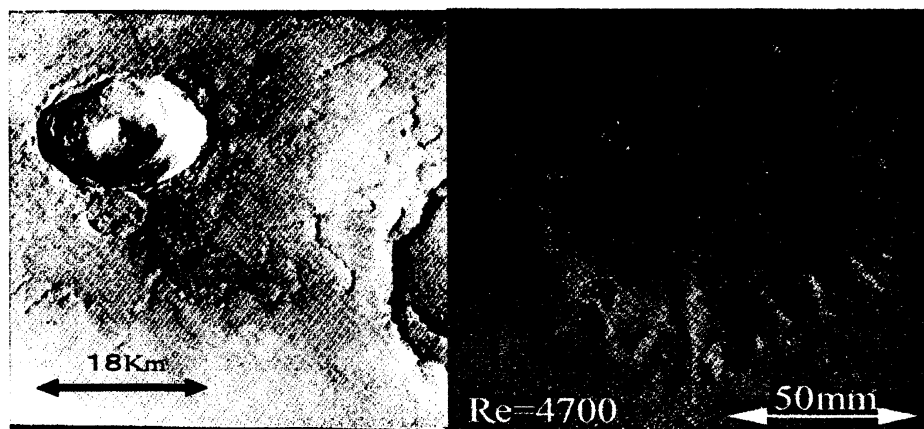


図 1: ランパートクレーター [7](左) と実験画像 (右)

1.2 研究目的

固体壁や自由表面に渦輪を衝突させる実験はこれまで数多くあったが、粒状体平面のような「流体と固体の間のように振る舞う境界」に対してはほとんど研究されていない。そこで本研究では、粒状体平面に衝突する渦輪の運動を実験的に調べ、固体、流体の境界に衝突する場合と比較することを目的とする。

2 実験

2.1 実験装置および座標系

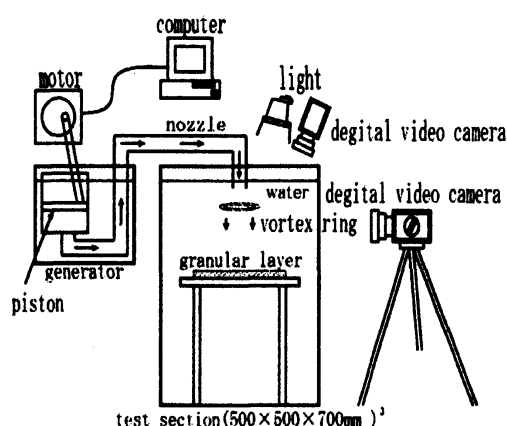


図 2: 実験装置概略図

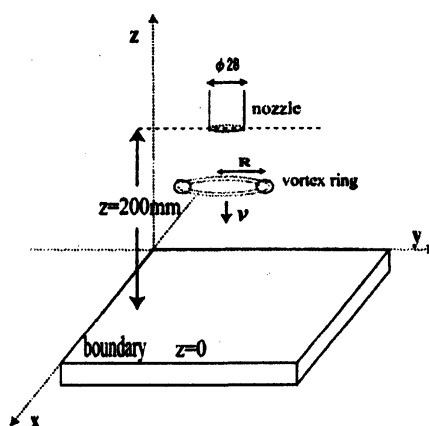


図 3: 座標系

実験装置の概略を図2に示す。渦輪を発生させるためにはノズルから衝撃的に流体を放出させノズルの境界付近に速度勾配を生じさせる必要がある。そのために、モーターを回転させてピストンを瞬時に移動し流体を押し出す。モーターの回転はコンピュータにより制御し、ピストンの押し出し速度と流体の押し出し量を設定する。

可視化にはトレーサー法を用いた。渦輪が発生する時にノズル出口に塗ったトレーサー粒子を巻き込み可視化することができる。本実験では、合成糊(主成分はポリビニルピロリドン)とウラニン(フルオレセインナトリウム)の混合物を使用した。合成糊を用いることで渦芯が鮮明に可視化され、渦芯の形状の変化などを容易に観測することができる。[5] 発生させた渦輪を境界壁(固体壁、流体層および粒状体平面)に垂直に衝突させる。その様子をデジタルビデオカメラで撮影し、画像解析することにより渦輪の挙動を観測する。座標系は図3のように定めた。渦輪の並進運動の方向を z 軸、境界壁の上端面を $z=0\text{mm}$ とし、ノズルの出口を $z=200\text{mm}$ に固定した。

2.2 実験条件

境界壁として、アクリル板(固体壁), 蜂蜜(流体層), 平均粒径 0.1mm のガラスビーズ(粒状体平面)を用いた。粒状体はアクリル製の枠(300mm×300mm×20mm)の内に敷き詰めた。境界条件をそろえるため, 試行する毎に平面を均した。粒状体層厚 h は 3mm, 6mm, 9mm, 12mm, 15mm の 5 種類である。粒状体層厚を変化させた時もノズル出口と境界までの距離は一定(200mm)にした。また, 渦輪のレイノルズ数 Re は 1750, 2200, 2800, 3600, 4100, 4700 の 6 通りである。本実験で, レイノルズ数は

$$Re = 2v_0R_0/\nu$$

と定義した。ここで, v_0 および R_0 は渦輪の初期並進速度(渦輪の形成が観測された時の速度)と渦輪の初期半径である。実験は水温 20℃で行ったため水の動粘性率 ν は $1.038[\text{mm}^2/\text{s}]$ とした。渦輪のレイノルズ数は v_0 を変えることにより変化させた。

3 実験結果および考察

渦輪が境界層に接近する時の挙動を以下に示す。縦軸は境界面から渦芯の中心までの距離 z を, 横軸には渦輪の半径 R をそれぞれ渦輪の初期半径 R_0 で割った無次元量 z/R_0 , R/R_0 で示している。

3.1 渦輪と固体壁および流体層の衝突

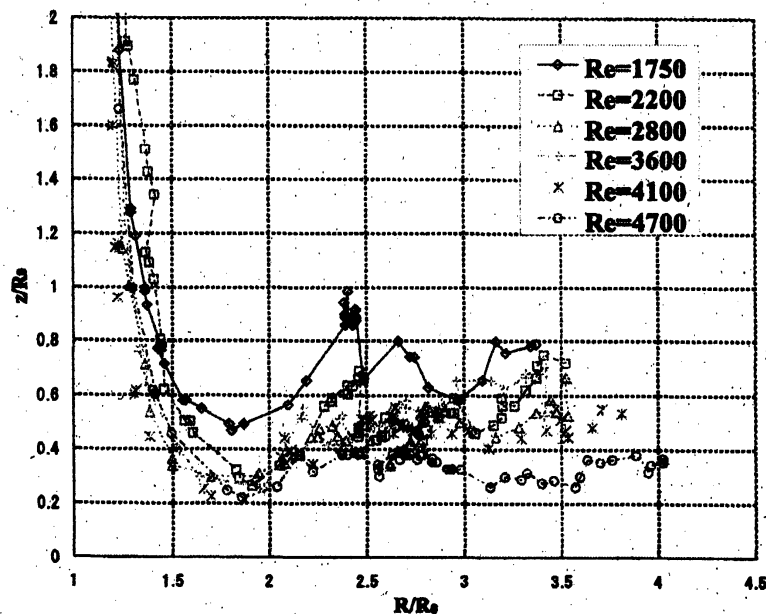


図 4: 固体壁付近での渦輪の挙動

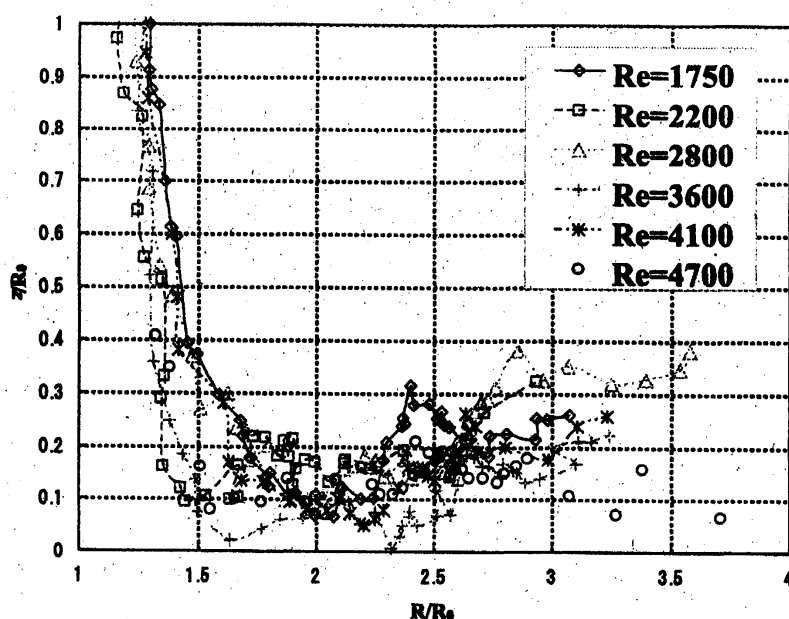


図 5: 流体層付近での渦輪の挙動

渦輪が固体壁(アクリル板)に接近する様子を図 4 に, 流体層(蜂蜜)に接近する様子を図 5 に示した。

図 4 から, 渦輪が固体境界に接近するにしたがって渦輪半径の増大およびリバウンドする様子が見られる。また, レイノルズ数が高くなるにしたがって渦輪は境界壁に接近することがわかる。

これに対して, 流体層の場合には, 渦輪は境界のごく近くまで接近している。流体層のときは境界が自由に変位するので固体壁が境界の時に比べ速度勾配が小さくなり 2 次渦の発生などによるエネルギーの散逸を抑えるためこの結果につながっている。それによって渦輪の半径が増大し始めるのがより境界に近くなり, リバウンドも小さくなることがわかった。さらに詳しく見ると, 渦輪の半径が増大を始める位置はレイノルズ数が大きくなるにつれて境界に近づいているが, 最接近距離はほとんど変わらなかった(ほぼ 1mm 程度であった)。これは, 渦芯の最外部が流体層上面に接した時にエネルギーを一瞬にして散逸させるためと考えられる。

3.2 渦輪と粒状体平面の衝突

図 6 は, 渦輪が固体壁(アクリル板)および粒状体平面(ガラスビーズ)に接近する時の挙動を示している。渦輪は z/R_0 が 1 程度まで境界に接近すると半径を増大し始める。そして, さらに境界に接近した後に渦輪はリバウンドをする。渦輪が境界に接近する過程で Re による違いが見られた。 $Re = 1750$ では渦輪が粒状体平面を変形させることはなく, 固体壁でも粒状体平面でも大きな違いは観測できなかった。そのため境界からの距離が同程度までしか接近しない。他方, $Re = 2200 \sim 4700$ の場合, 渦輪が境界に接近すると粒状

体平面のガラスビーズを吹き飛ばして変形させる。この過程でエネルギーを失ってしまうため、固体壁の場合より境界から離れたところでリバウンドをされると考えられる。

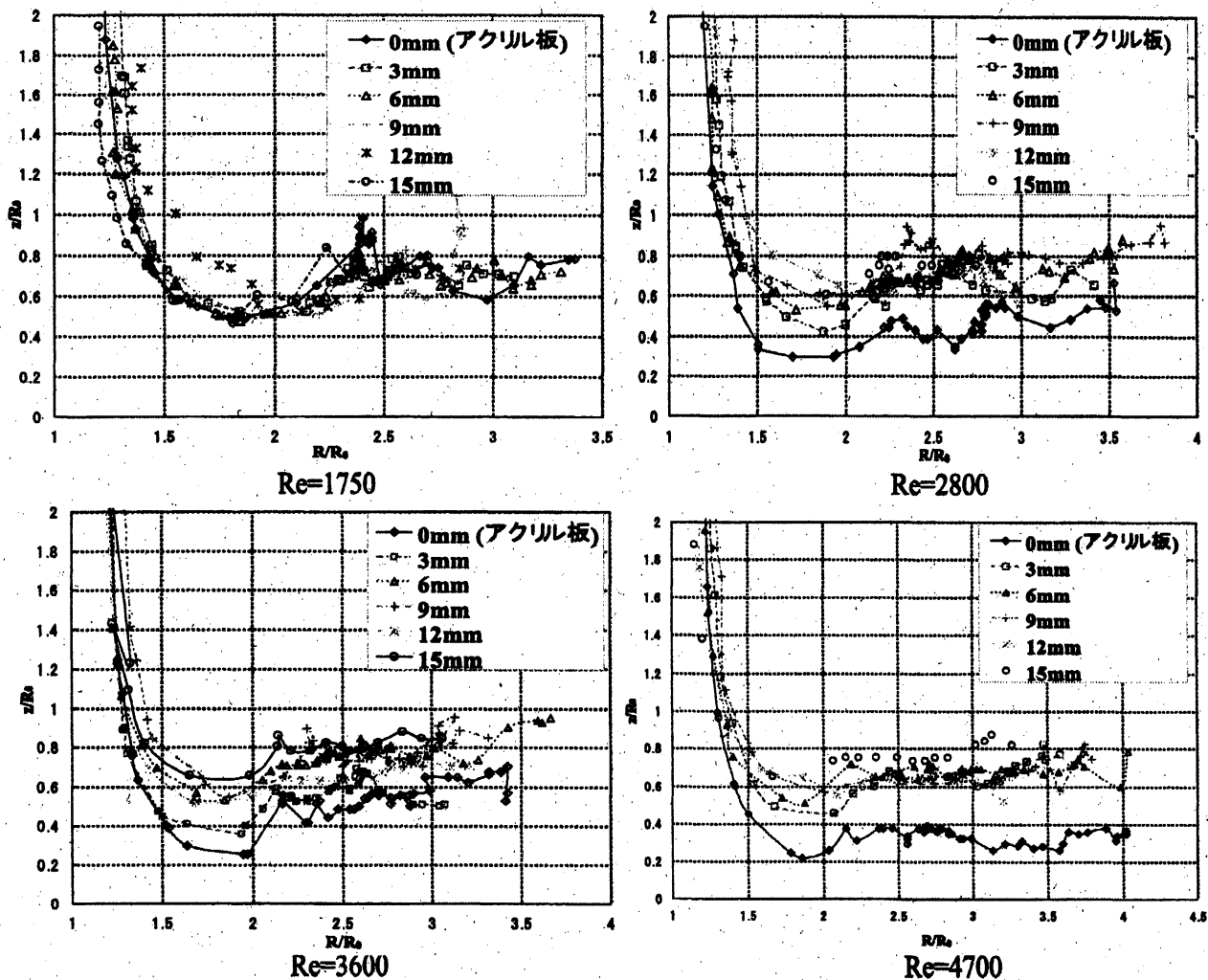


図 6: 渦輪の挙動の層厚依存性

それぞれのレイノルズ数に対して渦輪がもっとも境界に接近した距離 z_{min} を層厚に対してプロットすると図7となる。ただし $h = 0\text{mm}$ は境界が固体壁の場合である。これにより粒状体が敷き詰められた境界の方が固体の境界の場合より渦輪は接近しにくいということがわかる。 z_{min} は $h = 3\text{mm}$, 6mm と増加し、粒状体層厚 h が $6\text{mm} \sim 9\text{mm}$ に達すると、最接近する距離はほぼ一定値に近づく。

次に、境界が固体(図4)、液体(図5)と粒状体(図6)の場合を比較する。粒状体層厚が小さい場合は、レイノルズ数の増加に伴って境界に接近する距離が小さくなる傾向があった。これは固体の場合と類似している。他方、粒状体層厚がある程度以上になるとレイノルズ数に関係なく一定の距離まで境界に近づく。この点は流体層の場合と似ている。これらの点で、粒状体層は固体境界と流体境界の中間の振舞をしていると考えられる。

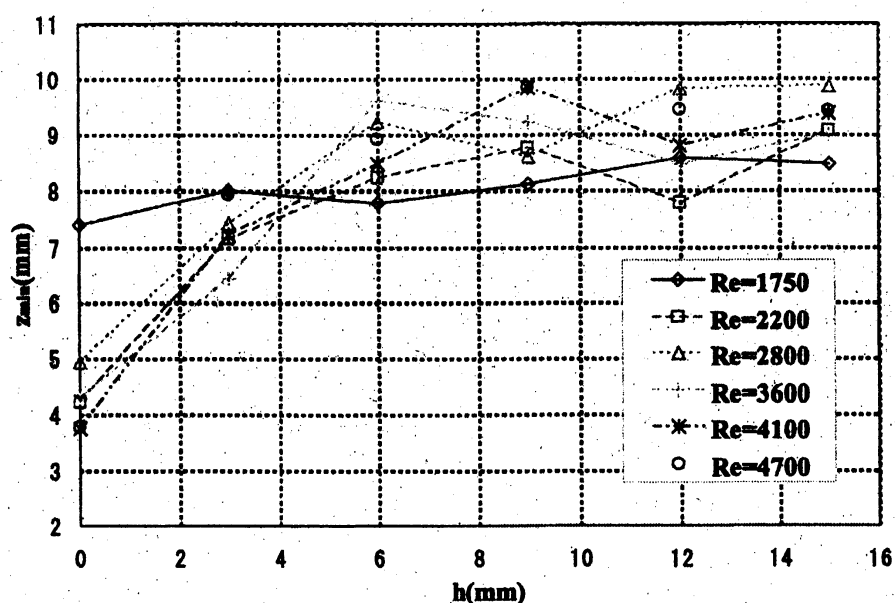


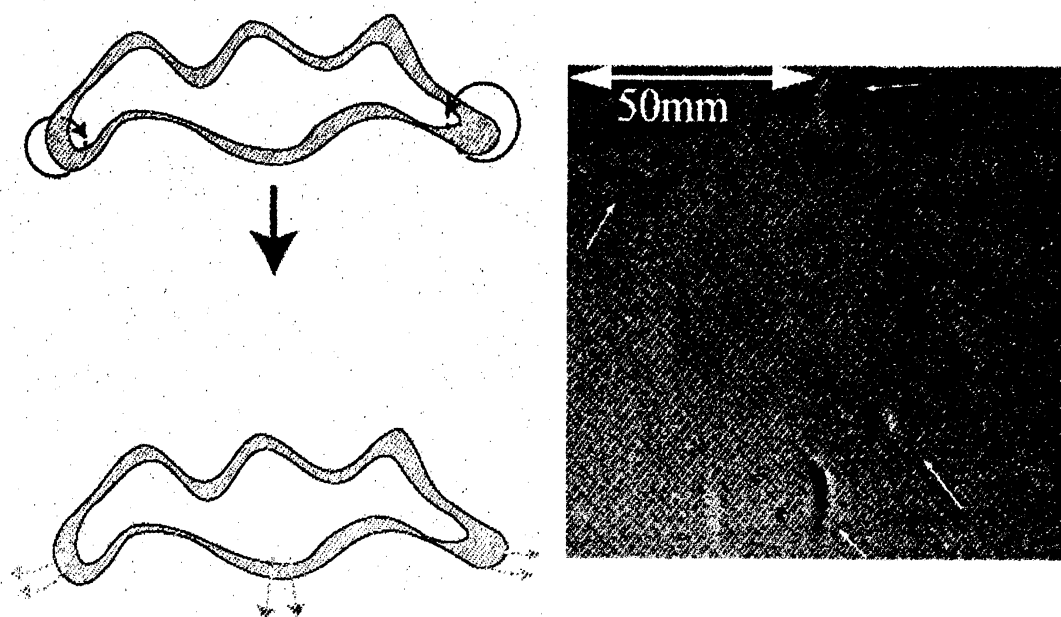
図 7: z_{min} の層厚依存性

3.3 粒状体表面にできるパターン

渦輪が粒状体平面に接近することによってできる模様をレイノルズ数ごとに図 8～図 10 に示した。これらの実験画像は粒状体層厚 $h=6\text{mm}$ における結果である。レイノルズ数が高くなればなるほど、より明確な模様が出る様子がうかがえる。前述したように $Re=1750$ の時は模様が確認できなかったが $Re=2200$ より高い時にはさまざまな模様を見ることができた。これらの模様は、渦輪の不安定性が関係しているのではないかと考えられる。渦輪の一部分に着目するとそこには渦輪の遠方から誘導される速度場が生じている。そのために、渦輪は自身が作る速度場によって自ら移動することができる。渦芯が完全な円形からずれたとき、そのずれを増大させる作用が働き、さらに変形を加速させることが知られている。この変形の過程の中で渦輪は周方向および進行方向に波状に変形し、波の振幅が増大した後に渦輪は崩壊する。

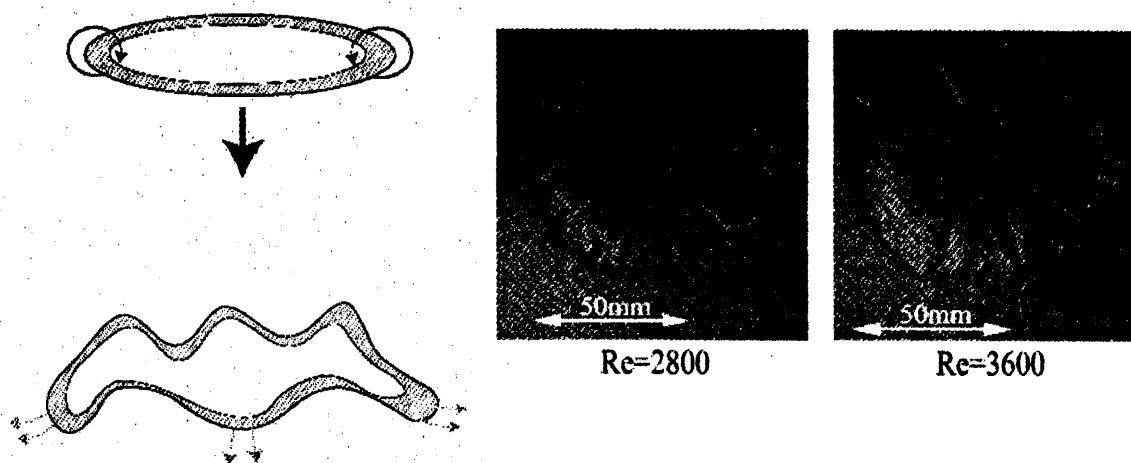
3.3.1 $Re=2200$ のときのパターン

$Re=2200$ の時は、図 8 のように境界に最接近するより手前から渦輪は不安定になってしまっていたため、渦輪の渦度が強いところにスジのような模様ができる。

図 8: $Re = 2200$ の場合

3.3.2 $Re = 2800$ および $Re = 3600$ のときのパターン

$Re = 2800, 3600$ の時は、図 9 のように安定した状態で境界に接近してきた渦輪は、最接近したところで境界による影響で不安定になる。そのため同心円状に広がり、その後不安定化した渦輪による放射状のスジ模様が現れる。その後、渦輪は崩壊・消滅する。

図 9: $Re = 2800$ および $Re = 3600$ の場合

3.3.3 $Re = 4100$ および $Re = 4700$ のときのパターン

$Re = 4100, 4700$ では, $Re = 2800, 3600$ の時と同様に最接近した後に不安定になるが, まだ十分なエネルギーが残っているためさらにもう1つ放射状の模様を残すことができるのではないかと考えられる.

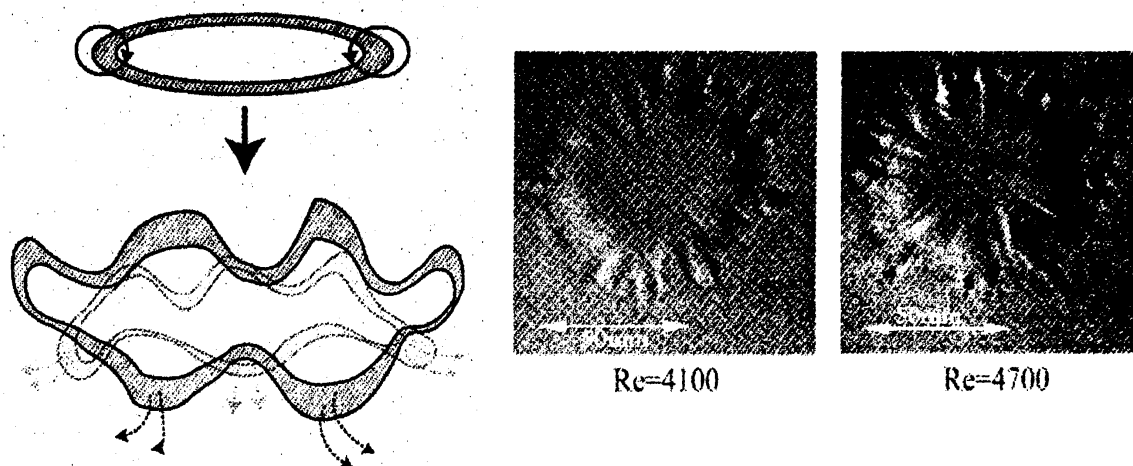


図 10: $Re = 4100$ および $Re = 4700$ の場合

図6および図7の結果より, 粒状体層厚 $h = 3\text{mm}$ と 6mm を比べれば衝突後のパターンに h による依存性が現れてもよいと考えられるが, 今回はそのようなことは観測できなかった. しかし, レイノルズ数が同じでも粒状体の層厚が小さい領域 (特に h が 6mm 程度以下) では, 異なる模様が見られる可能性は充分にあると思われる.

4 終わりに

渦輪は Re がある程度の大きさにならないと粒状体面を変形させることができず, 固体壁の場合と同じように振舞う. 粒状体面を変形させることができる渦輪が粒状体面に接近する時は, エネルギーの散逸があるため渦輪の減衰が固体や液体が境界の場合よりも速く起こり, 境界に接近することができない. また, 今回は流体層として蜂蜜を使用した, 糖分が徐々に溶解して境界があいまいになってしまった. 固体境界の場合に比べ不確定であるのでより正確な実験が必要である. 今後は, 境界が固体, 液体の場合と粒状体の場合とを比較してエネルギーの散逸の程度を調べ, 粒状体層厚の変化による渦輪の挙動を定量的に導きたい. そのためには, 粒状体が薄いとき (h が 6mm 程度以下) を中心に層厚の依存性をさらに詳しく調べることや, 粒状体の粒径を変えた実験を行うこと, さらに渦輪が接近する時に吹き飛ばす粒状体の体積を測定し, 実際にどの程度エネルギーの散逸があるかを調べることなどを考えている.

参考文献

- [1] U.Boldes and J.C.Ferreri: “ Behavior of vortex rings in the vicinity of a wall ”, *Phys.Fluids* **16** (1973) 2005.
- [2] H.Yamada *et al.*: “ Flowfield Produced by a Vortex Ring near a Plane Wall ”, *J.Phys.Soc.Jap.* **51** (1981) 1663.
- [3] 高木隆司:物理学最前線 21 「渦糸の理論」, 共立出版 (1988).
- [4] P.Orlandi and R.Verzicco: “ Vortex rings impinging on walls:axisymmetric and three-dimensional simulations ”, *J.Fluid Mech.* **256** (1993) 615.
- [5] 浅沼強編:「流れの可視化ハンドブック」, 朝倉書店 (1988).
- [6] 古屋隆善:「渦輪の粒状体表面への衝突」, 東京農工大学修士論文, 2005.
- [7] http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/redplanet2/slide_27.html