

## 環境シミュレーションにおける 2, 3 の課題

お茶の水女子大学人間文化研究科

河村哲也 (Tetuya Kawamura)

菅牧子 (Makiko Kan)

岩川麻紀 (Maki Iwagawa)

諸星ゆき (Yuki Morohoshi)

### 1 はじめに

地球温暖化や酸性雨、砂漠化などといわれるいわゆる地球環境問題が最近深刻化しており、早急な対策が望まれている。地球環境問題の特徴として、非常にスケールの大きな現象であることや原因の発生から結果として起こる被害の間に大きな時間的な差があることがあげられる。したがって、被害が現われる前にあらかじめ影響を予測し対策を講じる必要がある。このような場合には数値シミュレーションによる予測が大きな役割を果たすものと期待できる。われわれは環境問題に数値シミュレーションを応用することに興味を持っているが、ここでは風による砂の移動、煙突の移流拡散および現実の砂丘上の流れの解析の3つの話題について最近得られた結果を報告する。

## 2 砂の上に立てられた円柱まわりの流れ

観測のため砂丘に立てられた杭が強風のあと常識に反して風上側に倒れることがある。この現象は物体が風圧のために倒れるのではなく、別の原因があることを示している。平面上に立

てられた円柱まわりの流れでは、Fig.1のように円柱を風上側から取り囲むU字型の馬蹄形渦と呼ばれる渦ができることが知られている。物体が風上側に倒れる原因は、この渦が物体前面の砂を掘り起こすため、物体がバランスをくずして地面のへこんだ側に倒れるのではない

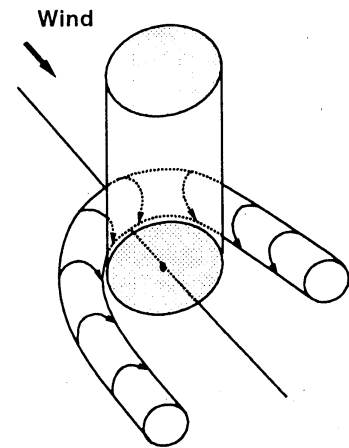


Fig.1 : Schematic figure of the horseshoe vortex

かと考えられている<sup>1)</sup>。本研究では、砂の移動を計算に取り入れ、この現象の解析を行なった。subsection 計算方法風による砂面形状の変化の計算は次の3段階にわけて行なう: (i) 砂面上に立てられた円柱まわりの流れの計算,  
 (ii) 表面摩擦の計算および砂輸送量の推定,  
 (iii) 砂の輸送による砂面形状の変化の計算  
 ステップ (iii) により流れの領域形状が変化するため、上の3段

階を時間ステップごとに繰り返す必要がある。以下、各ステップについて説明する。

### 2.0.1 円柱まわりの流れ場の計算

本研究では、簡単のため、流れは層流と仮定した。このとき、流れは以下に示す非圧縮性 NS 方程式に支配される：

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \mathbf{u} \quad (2)$$

3次元の計算であるため、計算法として標準的な MAC 法を用いた。さらに、複雑な砂面形状を取り扱うため、方程式は一般座標で表現した。

初期条件は、全領域において  $u = 1.0\text{m/s}$  の一様流とした。境界条件は、砂面上、円柱上では粘着条件、上方境界ではすべり壁条件、遠方境界では一様流の条件を用いた。なお、円柱の直径は  $0.5\text{m}$ 、上方境界、遠方境界はそれぞれ砂面、円柱の中心から  $5.0\text{m}$  離れた位置にとっている。

NS 方程式の非線形項は 3 次精度上流差分、それ以外の空間微分は中心差分を用いて近似している。また、時間積分にはオイラー陽解法を用いた。

### 2.0.2 砂輸送量の推定

砂輸送量  $q$  (kg/m·s) と風による表面摩擦速度  $u_\tau$  の関係として、 $u_\tau$  が十分大きい場合には  $q = cu_\tau^3$  が成り立つ<sup>2,3)</sup>。ここで、定数  $c$  は粒子の直径や砂面の状態によって定まる定数である。本計算では、 $c = 900$  (kg·s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>) として砂輸送量ベクトル  $\mathbf{q}$  を推定した。また、摩擦速度  $\mathbf{u}_\tau$  は、

$$|\mathbf{u}_\tau| = \sqrt{\nu \frac{d|\mathbf{U}|}{dZ}}, \quad \mathbf{u}_\tau \parallel \mathbf{U} \quad (3)$$

で定めた。ここで  $\mathbf{U}$  は地表面に沿った速度ベクトル、 $Z$  は地表面に垂直な方向に測った距離である。

### 2.0.3 砂面形状の計算

砂の質量保存を考慮すると、砂面に垂直方向の高さ  $h$  の時間変化は

$$\rho_s \frac{dh}{dt} = -\text{div } \mathbf{q} \quad (4)$$

で表わされる。ここで  $\rho_s$  は砂の密度であり、右辺の  $\text{div}$  は砂面に沿った方向にとられる。この(5)で得られる  $h$  をもとの高さに加え、新しい砂面を計算する。ただし、砂面がとりうる傾斜角には最大値(およそ 30°)があるため、この角を越えた場合は、砂の質量保存を考慮しながら強制的に角度を修正する。

## 2.1 計算結果

はじめに、砂を移動させずに平面上に立てられた円柱まわりの流れの計算を行なった。 $\nu = 0.001\text{m}^2/\text{s}$ の場合について、 $\Delta t = 0.0025\text{s}$ で10000ステップ計算したところ、円柱を取り囲むU字型の馬蹄形渦が見られた。このときの地表面近くの渦度ベクトルをFig.2に示す。

次に、これを初期条件として、(i)~(iii)のステップを繰り返して、砂面形状の変化を調べた。Fig.3は $t = 112.5\text{s}$ における円柱近くの地形をななめ上空から見た等高線の図である。Fig.4は、円柱の中心を通る一様流に平行な面での速度ベクトルと地形の時間発展の図である。これらの図から、円柱前部と側面の砂が掘られ、円柱後流部に砂が堆積している様子が見られる。

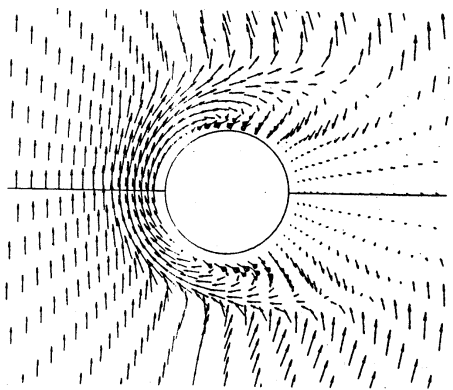


Fig.2 : Vorticity vectors  
( $z = 0.07\text{m}$ )

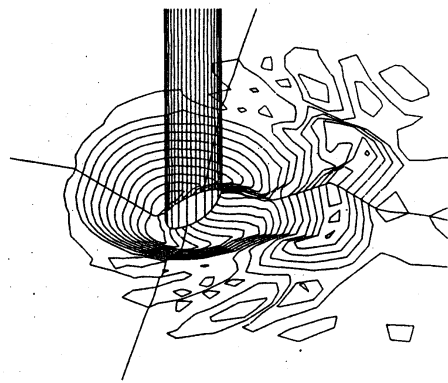


Fig.3 : Surface contours  
( $t = 112.5\text{s}$ )

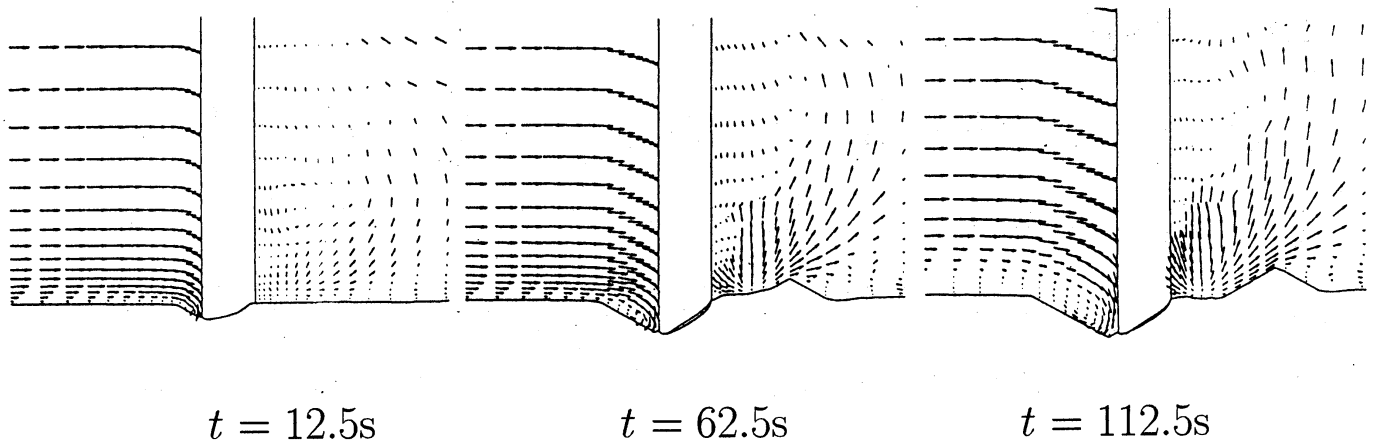


Fig.4 : Time development of velocity vectors

さらに、円柱を風上側、風下側に $30^\circ$ 傾斜させて砂の移動に与える影響を調べた。Fig.5に砂が動き始めてから112.5s後の結果を示す。この図から、風上側に倒した場合、円柱前面の砂がより深く掘られることがわかった。

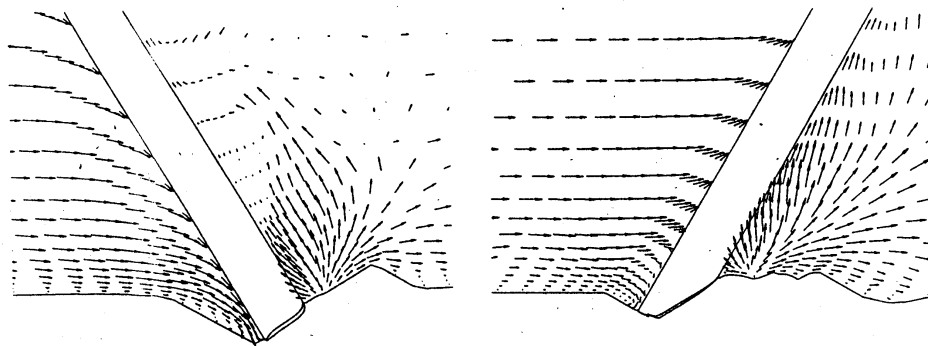


Fig.5 : Velocity vectors and ground surface  
(yawed circular cylinder)

まとめ本研究では、砂の上に立てられた円柱まわりの層流計算を、流れによる砂の移動を考慮して行ない、このような流れを取り扱う一つの方法を示した。今後の課題として、新しい砂面形状の計算法を実験結果と比較しながら改良すること、乱流モ

デルを取り入れること等を予定している。

#### 参考文献

- 1) T. Hayashi, R. Waka and M. Kamichika: The 1994 MIE International Forum & Symposium (1994) 385.
- 2) 長島: ながれ 10 (1991) 166.
- 3) F. K. Wippermann, G. Gross: Boundary-Layer Meteorol. 36 (1986) 319.

### 3 煙突から出る煙のふるまいの数値シミュレーション

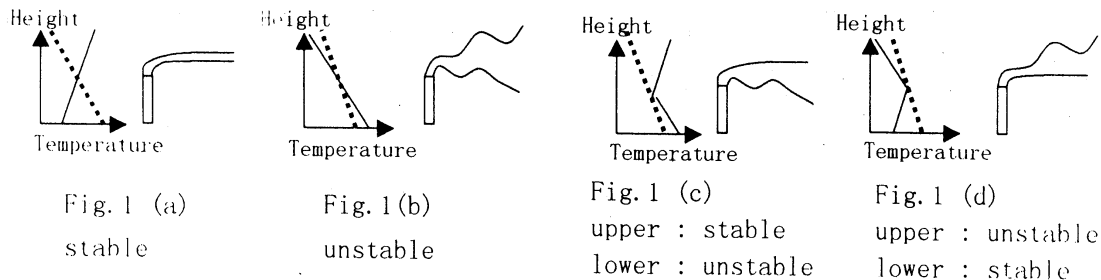
現在、われわれが抱えている環境問題の一つに大気汚染の問題がある。その主な原因は工場などの煙突から排出される煙が、有害な物質を伴って広範囲にわたって拡散することがあげられる。煙の移流と拡散は、種々の気象条件によって変化するが、特に、大気の温度分布によって大きな影響を受けることが知られている。すなわち大気の温度分布によって形成された密度成層の状態により、煙の移流と拡散はいくつかの典型的なパターンを持つ。

本研究では、煙の定性的なふるまいを調べるため、煙突噴流の3次元数値シミュレーションを行った。

#### 3.1 大気の状態と煙

地上で温められた空気塊が上昇すると、断熱膨張して、空気塊の温度が下がる。この空気塊と周囲の大気の温度差によって空気塊が上昇したり、下降したりする。したがって周囲の温度

分布によって、大気の密度成層の状態が安定であったり、不安定であったりする。Fig.1において実線は大気の温度、破線は乾



燥熱減率を示している。またこれらの2つの場合の組み合わせによって、Fig.1(a)は大気が安定な状態、(b)は不安定な状態を示している。煙突より上層が安定・下層が不安定な場合 (Fig.1 (c)) と上層が不安定・下層が安定 (Fig.1(d)) が考えられる

### 3.2 モデル化

横150m、高さ70m、奥行き50mの直方体の領域を考え、その中に高さ30mの煙突を配置した。煙突は奥行き方向の中央に、流入口から20m離れてあるものとした。流入口から風が吹き込み、煙突からは鉛直方向に煙が噴き出しているものとした。ただし、煙の温度は周囲の空気と同じであるとした。格子数は横120×高さ40×奥行き50で、格子は煙突の吹き出し口に近づくほど細くなるような不等間隔格子を用いた。



### 3.3 計算方法

流れは非圧縮性を仮定し、基礎方程式として非圧縮性ナビエ・ストークス方程式(1),(2)を用い、MAC法で解いた。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \rho g \quad (2)$$

密度は、(3)式のように、基準密度と偏差の和として表し、密度偏差は密度の時間発展の方程式(4)から定めた。

$$\rho = \rho_B + \rho' \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho' + v \frac{\partial \rho_B}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

基準密度  $\rho_B$  は空気を理想気体と考えたので状態方程式と静力学の基本式から温度の関数として式(5)のように表される。

$$\rho_B = \frac{p_0}{R(T_0 - \gamma y)} \left( \frac{T_0}{T_0 - \gamma y} \right)^{\frac{\gamma}{R\gamma}} \quad (5)$$

密度成層を表現するため式(5)を用いて温度分布から基準密度分布を定めた。また煙の濃度は拡散を考慮して式(6)を用いて決めた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)c = k \Delta c \quad (6)$$

$\mathbf{u}$ :速度ベクトル     $\mu$ :粘性率     $p$ :圧力     $g$ :重力     $\rho$ :密度

$\rho_B$ :基準密度     $\rho'$ :基準密度からの偏差

$k$ :煙の拡散係数     $c$ :煙の濃度

初期条件は以下のように設定した。

速度：水平方向に  $u=1\text{m/s}$  の一様な風

鉛直方向に煙突から  $v=1\text{m/s}$  の噴流

密度：全計算領域内で基準密度

煙の濃度：煙突の噴出部分で  $c=1$ 、他は0

境界条件は以下のように課した。

速度：流入口・上空・地表で  $u=1\text{m/s}$  の一様な風

遠方境界は  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

(煙突から鉛直方向に  $v=1\text{m/s}$  の噴流)

密度：流入口・上空・地表は基準密度

遠方境界は  $\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$

煙の濃度： $\frac{\partial c}{\partial x} = 0$

### 3.4 計算結果

計算は次の4つの場合について行った。

- (1) 安定条件 (Fig.2(a),(b),(c))
- (2) 不安定条件 (Fig.3(a),(b),(c))
- (3) 煙突より上層安定・下層不安定条件 (Fig.4(a),(b),(c))
- (4) 煙突より上層不安定・下層安定条件 (Fig.5(a),(b),(c))

それぞれの場合について流れ場および、煙突噴流の移流と拡散の様子を調べた。(a)はモデルの奥行き方向中央の断面図で



### 3.5 まとめ

本研究の計算により以下のことが確かめられた。安定条件の場合、煙は垂直方向にはあまり乱れることなく流れ、水平方向には扇形のように広がる。不安定条件の場合、煙は上下に大きく波打ちながら流れ、4つの場合の中で最も広い範囲にわたって拡散する。煙突より上層安定・下層不安定条件の場合は、煙は煙突より上層には広がりやすく、下層で拡散した。また、煙突より上層不安定・下層安定条件の場合は、逆に上層に煙が大きく拡散した。今後の課題として煙に温度を与えることや乱流モデルの検討を行うことが挙げられる。

#### 参考文献

- 1) R.S.Scorer Environmental Aerodynamics ELLIS HORWOOD LIMITED (1978)

## 4 鳥取砂丘上の流れと防風林の影響の数値シミュレーション

鳥取砂丘は高さ方向に一様でなく、海岸線にほぼ平行な丘状の起伏があったり、窪地があったりして複雑な形状をしている。これらの地形は上空を吹く風の影響を多分に受けて形成されたものと思われるが、実際に鳥取砂丘など広大な地形において風速を測定することは非常に困難である。

本研究では複雑な形状をした鳥取砂丘上を吹く風による流れ場を数値シミュレーションによって明らかにし、現在の地形

との関連を考える上での基礎データを得ることを目的とした。さらに砂丘西側にある防砂林の風速場に及ぼす影響を調べるため、植生による空気抵抗を考慮した計算も行い観測データとの比較も行った。

## 4.1 計算方法

### 4.1.1 支配方程式

流れ場は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式に支配されているものとし、ナビエ・ストークスを解く場合に標準的なMAC法[1]を用いた。そして、砂丘形状は複雑であるため、3次元の一般の座標変換を用いて、複雑な幾何形状の領域を直方体の領域に写像した上で方程式を差分化して解く[2]。

計算格子については、まず地形データを用いて砂丘表面上の格子を生成した。砂丘面の傾斜が大きいところでは格子点の密度が大きくなるようにした。格子数は横50、縦30で縦方向の最小格子幅は50cmである。またもっとも外側の格子は上空100mのところにあるとした。計算に用いた格子は、上の手続きで得られた格子をx方向に積み重ねたものである。このときx方向の格子は40m間隔で、格子数は49である。

計算の初期条件としては、全領域で一定方向の風が吹いているとした。ただし風向としてはいくつかの典型的な場合を想定

した。境界条件は以下のようにした。砂丘面上では粘着条件を課した。上空の境界では圧力を一定値(=0)とした。速度は内部格子点から外挿して決めた。風上側の境界では初期条件と同じく一定方向の風が吹き込むものとした。風下側の条件は速度は内部点の値から外挿した。

## 4.2 計算結果および考察

### 4.2.1 3次元計算

ここでは典型的な場合として海岸に $45^\circ$ 、および $135^\circ$ の角度をなして風が吹き込む場合の計算結果を示す。計算でのレイノルズ数は875である。Fig.4-1は海岸に $45^\circ$ の角度をなして風が吹き込む場合の計算結果で、砂面にそって砂面上0.5mの位置での速度ベクトルを示す。領域の多くの部分において流れは $45^\circ$ の角度を保っているが、砂丘列の後ろやスリバチ近くでは特徴的な流れになっている。

風が海岸に $135^\circ$ の角度で吹き込んだ場合についてFig.4-1に対応する結果をFig.4-2に示す。このような風向の風が吹くことはまれであるが、流れ場はFig.4-1と比べ大きく変化していることがわかる。

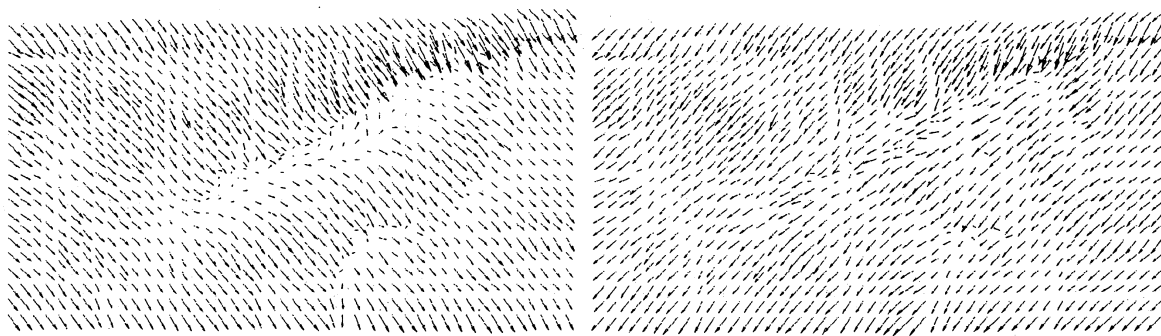


fig.4-1 海岸線に  $45^\circ$  の角度で風が吹き込んだ場合の砂丘表面近くの速度分布      fig.4-2 海岸線に  $135^\circ$  の角度で風が吹き込んだ場合の砂丘近くの速度分布

### 4.3 植生の影響

鳥取砂丘の防砂林が流れ場に及ぼす影響を調べるため、植生領域に植生を配置した計算を行った。植生がある場合に得られた速度ベクトルから植生がない場合の速度ベクトルを差し引いたベクトルで示したものが Fig.4-3 である。ただしこの場合は砂面に沿って砂面から 0.5m の位置での速度差ベクトルを示している。植生の風下側に減速領域が見られるが、減速のされ方は、植生の東端と平行な直線に沿ってほぼ一定である。そしてその大きさは植生から離れるにつれて急激に小さくなっていることがわかる。

Fig.4-4 は鳥取大学乾燥地研究センターにおいて観測された、砂丘表面の砂の中央粒径分布 [3] を示す。砂粒は大きいほど移動しにくいと考えられるため、海岸近くであっても小さい粒径の砂が分布している部分では、風速は小さいと考えられる。Fig.4-

4で特徴的なことは粒径の等高線が防砂林近くでは、東縁に平行になっていることである。これはFig.4-3で見られた風の減速のされ方と矛盾しない結果になっている。すなわち、植生の東縁に近いほど減速のされ方が大きいため風速は小さくなり、また減速のされ方は上述のとおり東縁に平行な直線に沿ってほぼ一定であるため等値線も平行になっていると考えられる。

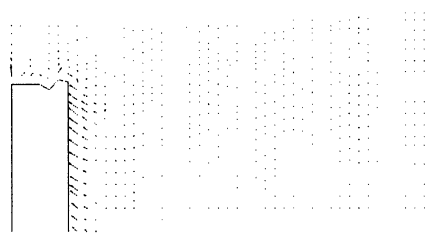


fig.4-3 砂丘の両側に植生がある場合とない場合との砂面近くの速度差

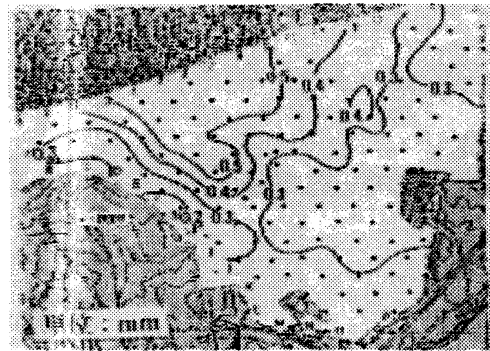


fig.4-4 砂丘上の砂の粒径分布の観測値

#### 4.4 まとめ

本研究では鳥取砂丘上を吹く風による風速場を数値シミュレーションを用いて調べ、あわせて防砂林の風速場に及ぼす影響も調べた。今後の課題としては砂面上の境界条件の工夫や乱流モデルの検討があげられる。



## 参考文献

- [1] Harlow, F.H Welch, J.E.: "Numerical calculation of time-dependent viscos flow of fluid with free surface" ,Phys, Vol.8, pp.2182-2189, 1965
- [2] 数値流体力学編集委員会：非圧縮性流体解析、東京大学出版会、1995
- [3] 松原由佳、岡田周平、大槻恭一、神近牧男：鳥取砂丘における地形と砂の粒径の関係について、日本砂丘学会第44回全国大会講演要旨集、pp22-23, 1997