

## ラングミュアー循環流の形成機構に関する LES

九州大学大学院総合理工学研究科 学正会員 ○ 鶴崎 賢一  
 日本文理大学工学部土木工学科 正会員 池畑 義人  
 九州大学大学院総合理工学研究院 正会員 松永 信博

### 1. はじめに

ラングミュアー循環流については古くから数多くの研究がなされてきたが、その形成機構については未だ完全に解明されたとは言えない。今日では、波と流れの相互作用に基づく CLII 機構が広く受け入れられているが、一方で吹送流自体の不安定による説も示唆されている<sup>1)</sup>。著者らはこれまで、可視化実験ならびに流速計測実験によってこの循環流の特性を詳細に調べ、その形成機構を検討してきた<sup>2)</sup>。本研究では、水面変動を考慮しないモデルを用いて 3 次元の LES を行い、これまでの実験結果を再現してコードの妥当性を検証するとともに、この循環流の形成機構を検討するものである。

### 2. 計算方法

数値シミュレーションは、3 次元の非圧縮性 NS 方程式と連続の式を基礎式とした。また渦動粘性係数の決定は標準スマゴリンスキーモデルに基づいた LES を用いて行った。基礎方程式を以下に示す。無次元化には、水深  $h$  と水の摩擦速度  $u_{*w}$  を用いた。移流項の微分ならびに圧力項の微分には 4 次精度の中心差分、その他の空間微分項には 2 次精度の中心差分を用い、スタッガード格子上で差分近似を行った。圧力項は、ポアソン方程式を反復法で解いた。また、時間積分には 3 次精度のルンゲ・クッタ法を用いた。スマゴリンスキー定数  $C_s$  の値は、開水路流に対する推奨値  $C_s = 0.12$  を参考に、最適な計算結果が得られるよう  $C_s < 0.20$  の範囲で調節された。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{t}} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_i} + \frac{\partial}{\partial \bar{x}_j} \left\{ (\bar{v}_i + \bar{v}_j) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_i} \right) \right\} - \bar{g} \delta_{i3} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_i} = 0$$

ここで、

$$\bar{s}_{ij} = \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_i} \right), \quad \bar{l}_s = \sqrt{\Delta \bar{x} \Delta \bar{y} \Delta \bar{z}}, \quad \bar{v}_i = (C_s \bar{l}_s)^2 \sqrt{2 \bar{s}_{ij} \bar{s}_{ij}} \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

図-1 に計算領域を示す。x 軸を風上端から風下方向に、y 軸を断面中央から風の吹送方向と直角方向に、z 軸を静水面から鉛直上向きに設定した。初期条件は静止状

態とし、 $d\bar{t} = 0.001$  として解析断面内で循環流が安定するまで計算を行った。計算条件ならびに境界条件を表-1 に示す。境界条件は、流速成分に関しては壁面でノン・スリップ条件、水表面で  $\bar{u}$  については鉛直勾配をレイノルズ数で与え、 $\bar{v}$  はスリップ条件、 $\bar{w}$  はウィンド・セットアップを考慮した鉛直流速を与えた。圧力に関しては、水表面と底面で静水圧勾配、壁面ではスリップ条件で与えた。

### 3. 計算結果および考察

図-2 は実験結果との比較である。図中のプロットが実験結果であり、線で示されたものが計算結果である。図から、使用したコードが実験結果を十分良く再現していることがわかる。さらに、 $h/B$  を系統的に変化させることにより、1 対の循環流に対して最適な値  $h/B = 1.8$  を得た。図-3 はその計算結果であり、NC-2 での解析断面における流速ベクトル図である。この図から、1 対のラングミュアー循環流が明瞭に形成されていることがわかる。底面近傍では、 $y/B = 0.0$  に向かう強い流れが形成されており、この収束流により可視化実験においてトレーサーが 1 本のストリークを描くものと考えられる。図-4 は、NC-3 における流速ベクトル図である。NC-2 と比較するとやや形状が乱れるものの、断面中央で下降流となる 2 対の循環流が形成されている。底面においては 2 箇所収束流が認められる。図-5 は、NC-4 における流速ベクトル図である。断面中央で上昇流となる 3 対の循環流が形成されていることがわかる。底面においては 3 箇所収束流が認められる。図-6 は、NC-2 において側方境界を周期境界条件とした NC-5 での流速ベクトル図である。図-3 と比較して、やや乱れが大きいものの、断面中央で上昇流となる 1 対の循環流が形成されていることがわかる。

### 4. まとめ

水面変動を考慮しない 3 次元 LES によって、1, 2, 3 対のラングミュアー循環流の形成を示し、側壁を考慮しない条件においても 1 対の循環流の形成を示した。

#### 参考文献

- 1) 松永信博・植田操・草場浩平・鶴崎賢一：二次循環流を伴う吹送流の実験的研究。海岸工学講演会論文集，第 45 巻，pp.421-425，1998。
- 2) 松永信博・鶴崎賢一・浦上由紀子：吹送流中の二次循環流形成に果たす風波の役割。海岸工学講演会論文集，第 48 巻，pp.376-380，2001。

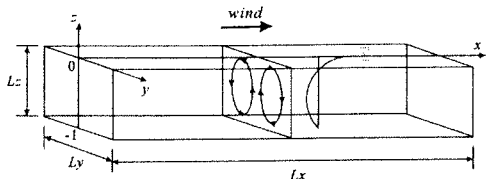
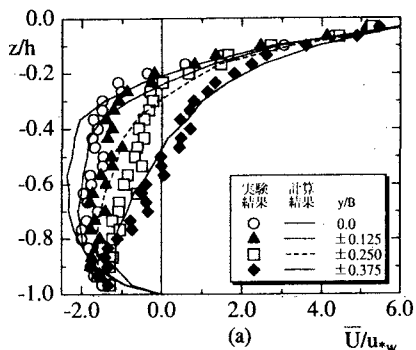
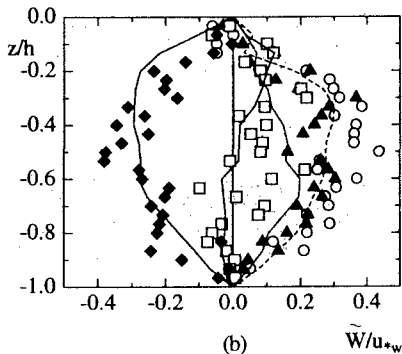


図-1 計算領域



(a)



(b)

図-2 実験結果との比較

( NC-1,  $\bar{t} = 10.0-20.0$  )

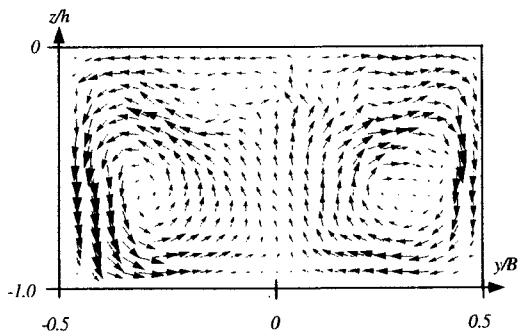


図-3 y-z断面における流速ベクトル図

( NC-2,  $\bar{t} = 12.0-20.0$  )

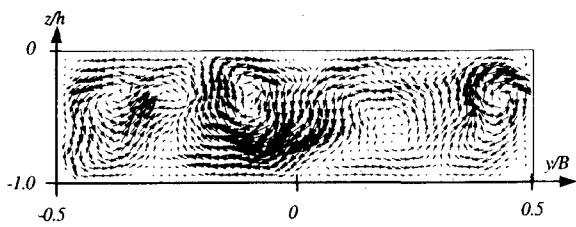


図-4 y-z断面における流速ベクトル図

( NC-3,  $\bar{t} = 28.0-36.0$  )

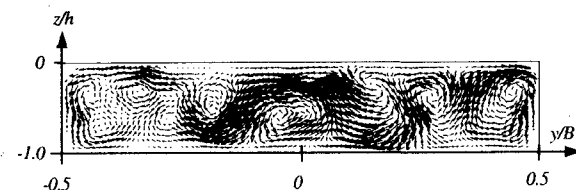


図-5 y-z断面における流速ベクトル図

( NC-4,  $\bar{t} = 28.0-40.0$  )

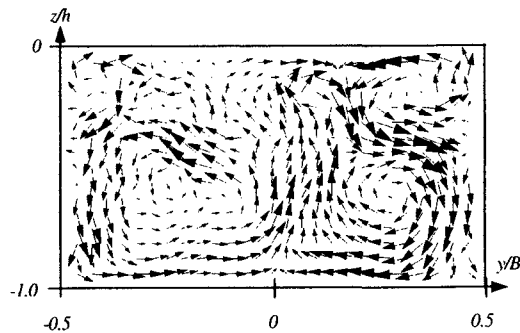


図-6 y-z断面における流速ベクトル図

( NC-5,  $\bar{t} = 12.0-20.0$  )

表-1 計算条件

Sim	Re	h/B	$\bar{L}_x$	$\bar{L}_y$	$\bar{L}_z$	$d\bar{x}$	$d\bar{y}$	$d\bar{z}$	循環流村 の数	側方境界 条件
NC 1	2187	1.00	40.0	1.00	1.00	0.133	0.0667	0.0667	1	壁面
NC 2	2187	1.80	40.0	1.80	1.00	0.133	0.0667	0.0667	1	壁面
NC 3	2187	3.60	40.0	3.60	1.00	0.133	0.0667	0.0667	2	壁面
NC 4	2187	5.40	40.0	5.40	1.00	0.133	0.0667	0.0667	3	壁面
NC 5	2187	1.80	40.0	1.80	1.00	0.133	0.0667	0.0667	1	周期