

論 文

# 多関節平板周りの流れ場の三次元数値解析

山岸真幸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka National College of Technology)

## THREE DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS ON THE FLOW AROUND A MULTI-ARTICULATED FLAT PLATE

Masaki YAMAGISHI<sup>1</sup>

### Abstract

Numerical simulation is useful for the analysis of a complex flow field. In this study, three-dimensional numerical simulation and moving overlap meshes were applied to the flow around the oscillating articulated flat plate. The results of the calculation were compared with those which were conducted in two-dimensional calculation. Furthermore the results of the calculation are good agreement with the results of the visualization experiments. From the results of the three-dimensional simulation, it was clearly seen that the longitudinal vortices were generated at both sides of the plate. Those longitudinal vortices indicate the separated flow to the flat plate surface.

**Key Words :** *numerical simulation, moving coordinate system, moving overset grid method, oscillating body*

### 1. 緒言

時として機器の破損を引き起こすほどの振動現象は、逆に有効利用できればまったく新しいエネルギー源として活用できる。近年、この振動エネルギー利用方式の発電システムの研究が行われるようになってきた<sup>1,2)</sup>。振動をエネルギー源として考えた場合、安定かつ制御が容易な振動が求められる。振動源として、流体振動を用いる研究も行われているが、構造体の弾性を復元力として利用している例が多く、長期間振動させた場合、破損が懸念される。一方著者らが考案した多関節平板<sup>3)</sup>は、構造体の弾性を復元力としておらず、振動に要するエネルギーはすべて流体から受ける。このような振動体に関する研究は現在のところ見当たらない。類似の研究として、シートのばたつきに関する研究<sup>4)</sup>、旗のはためきに関する実験<sup>5)</sup>などが挙げられるが、いずれも連続的に変形する柔軟なシート状の物体に関するものである。この

多関節平板の振動形態および原理を明らかとするためには、周囲の流れの性情を調査する必要がある。これまで流れの可視化によって、多関節平板周りの流れ構造を調査してきた<sup>6)</sup>が、三次元構造を形成するため、得られる可視化画像から流れの詳細な構造を調査することは極めて困難である。これに対し数値計算によるシミュレーションは、同時刻の空間情報が得られるため、このような振動体周りの調査には有用である。そこで一様流中で振動する多関節平板周りの数値計算を行ってきた<sup>7)</sup>。

前報では、運動座標系における流れの基礎式を導出し、二次元において3軸3枚の多関節平板周りの流れの数値解析を、移動重合格子法を用いて行った。しかし多関節平板周りの流れは三次元構造を持ったため、計算も三次元で行うべきである。そこで本論文では三次元計算を行い、二次元計算結果と比較すると共に実験結果とも比較する。さらに流れ構造について考察を行うことを目的とする。

## 2. 数値解析法

### 2. 1 移動重合格子法

本研究では前報<sup>7)</sup>同様、一様流を主格子とし、自励振動する多関節平板周りに補助格子を生成する、移動重合格子法<sup>8,9)</sup>を用いた。補助格子は平板の運動に合わせ移動する。主格子では平板近傍の計算は行わず、定められた領域に補助格子の計算値を埋め込んでいる。同様に補助格子では、主格子と重複する領域に主格子における計算値を与えている。両格子間での物理量の授受は前報と同様である。なお今回三次元計算を行うにあたり、平板スパン方向 ( $z$  方向) が加わるが、スパン方向に関しては主格子、補助格子ともに格子幅は同一とし、格子面を一致させている。

本研究では、多関節平板周りの流れを対象とする。多関節平板は複数軸で連結された平板群のことで、一様流中で自励振動する。図-1に示すように、平板周りを運動座標系、主流域を固定座標系で計算する移動重合格子法で計算を行う。対象とする多関節平板は、一辺の長さが  $B$  の正方形平板を 3 枚連結したものである。このため、各平板を別々の運動座標系において計算する。なお各平板を上流側より第 1 平板、第 2 平板、第 3 平板と呼称する。

### 2. 2 流れの基礎式と数値解法

計算アルゴリズムは前報<sup>7)</sup>と同様である。ただし多関節平板の回転軸を  $z$  軸方向に取り、三次元において計算を行う。この場合、平行移動しつつ  $z$  軸に平行な軸周りに角度  $\theta$  回転したときの運動座標系への座標変換は、

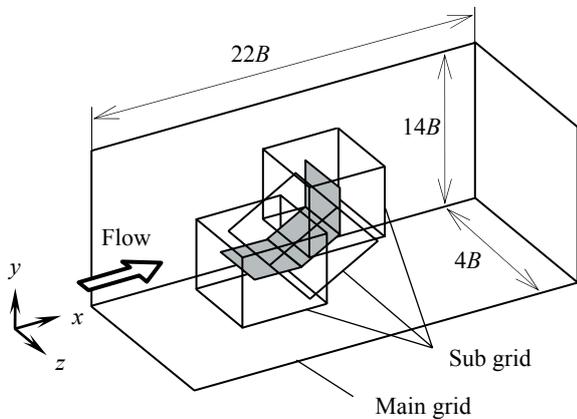


図-1 重合格子法による多関節平板周りの格子形成

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_A \\ y - y_A \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$

で表される。ここで  $\mathbf{r}_A = (x_A, y_A, 0)$  は固定座標系に対する運動座標系の位置ベクトルである。

計算で用いる流れの支配方程式は、以下の三次元非圧縮のナビエ・ストークス方程式と連続の式である。

・固定座標系

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

・運動座標系

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} + (\mathbf{v}' \cdot \nabla) \mathbf{v}' + \frac{d\mathbf{v}_A}{dt} + \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r}' \\ + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}' + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}') \\ = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{v}' \end{aligned} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}' = 0 \quad (5)$$

いずれの式も、一様流速  $U_0$  および一枚の平板の辺の長さ  $B$  で無次元化しており、以後数値計算に関する記述において変数・物理量はすべて無次元とする。なお式(2)~(5)において、 $\mathbf{v} = (u, v, w)$  は固定座標系における速度ベクトル、 $\mathbf{v}' = (u', v', w')$  は運動座標系における相対速度ベクトルである。また、 $\mathbf{v}_A = (u_A, v_A, 0)$  は固定座標系に対する運動座標系の移動速度ベクトル、 $\boldsymbol{\omega} = (0, 0, \omega_z)$  は固定座標系に対する運動座標系の角速度ベクトルである。回転軸を  $z$  軸方向に取った場合、これらの速度ベクトルの間には

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u - u_A \\ v - v_A \\ w \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$- \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & 0 \\ \omega_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

の関係がある。

計算は MAC 法 (Marker And Cell Method) に基づいて行った。時間前進の離散化には、2次精度の Adams-Bashforth 法を適用し、空間離散には、対流

項に3次精度風上差分，粘性項に2次精度中心差分，圧力項に2次精度中心差分を用いた．空間刻みは主格子においては  $\Delta x = \Delta y = 0.1$ ， $\Delta z = 0.05$ ，補助格子においては  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.05$  とした．主格子の計算領域は  $x$ ， $y$ ， $z$  方向にそれぞれ  $22B$ ， $14B$ ， $4B$ ，補助格子は  $X$ ， $Y$ ， $Z$  方向いずれも  $2B$  である．時間刻みは  $\Delta t = 0.001$  とした．一様流速  $U_0$  および平板の1辺の長さ  $B$  を基準としたレイノルズ数は，実験<sup>1)</sup>に合わせ  $Re = 7200$  とした．

多関節平板は一様流中で自励振動するが，これを数値解析で行うためには流体力による変位の運動方程式を解き，平板の変位量を算出する必要がある．本論文では前報<sup>7)</sup>同様，変位量を直接与える強制振動で計算を行った．なお本報では角振動の振幅の最大値  $a_1$ ， $a_2$ ， $a_3$  および基本角振動数  $f_0$  は実験値を与えている．各平板の変位角  $\theta$  および角速度  $\omega$  は，表-1の通りである．

初期条件は，流れ場全体に一様流速  $u = 1.0$ ， $v = 0.0$ ， $w = 0.0$  を与えた．固定座標系の流出条件は，自由流出とした．多関節平板は，各運動座標系格子上に滑り無し条件を与えることで再現している．

計算は，デルタ(株)ワークステーション Precision 380 (CPU : HT テクノロジ Pentium4 3.6GHz，メモリ : 1GB 667 MHz) を用いて行った．コンパイラには富士通(株) Fortran & C Package (Ver.4.01) の Fortran コンパイラを使用した．流れ場の観測は，初期条件が計算領域から流出し，多関節平板が1周期振動した 25000 step 後に行った．

表-1 各平板変位量

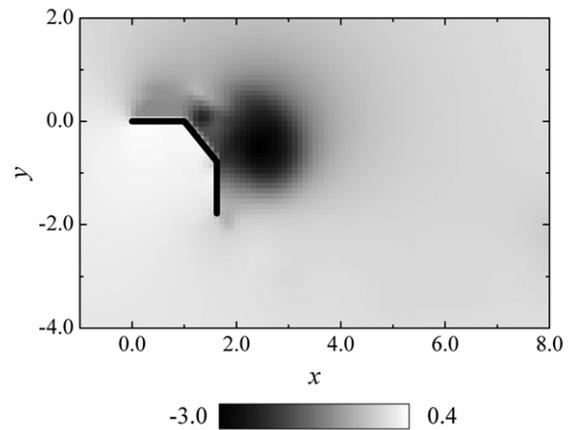
	変位角 角速度
第1平板	$\theta_1 = a_1 \sin(\omega_0 t)$ $\omega_1 = a_1 \omega_0 \cos(\omega_0 t)$
第2平板	$\theta_2 = a_2 \sin(\omega_0 t - 0.4\pi)$ $\omega_2 = a_2 \omega_0 \cos(\omega_0 t - 0.4\pi)$
第3平板	$\theta_3 = a_3 \sin(\omega_0 t - 0.5\pi)$ $\omega_3 = a_3 \omega_0 \cos(\omega_0 t - 0.5\pi)$
$a_1 = 0.15\pi$ ， $a_2 = 0.3\pi$ ， $a_3 = 0.5\pi$ $\omega_0 = 2\pi f_0$ ， $f_0 = 0.04$	

### 3. 計算結果および考察

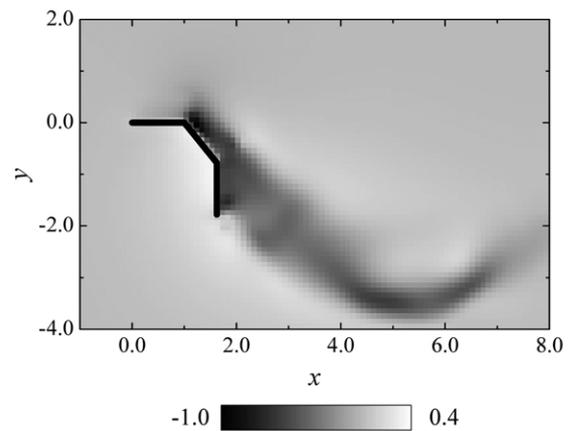
#### 3. 1 二次元計算との比較

図-2，3 に三次元計算の結果と，同一アルゴリズムで行った二次元計算の結果を示す．図-2 は同時刻における  $x$ - $y$  平面の圧力分布であり，図-3 は流線である．なお三次元計算の結果はスパン方向中央断面の結果を示している．各図において左から右方向が主流方向である．

図-2 の圧力分布において，低圧部分は流れのはく離領域，または渦が存在する領域である．図より二次元計算と三次元計算では明らかに平板背後の流れ構造が異なり，二次元計算では大規模な渦構造が形成されている．これに対し三次元計算では，第3平板が流れに垂直であるにもかかわらず，渦構造が見られないばかりか，はく離領域が小さい．これは後述の縦渦による流れの収斂作用によるものであり，二次元計算ではこの縦渦のような三次元構造が計算



(a) 二次元計算

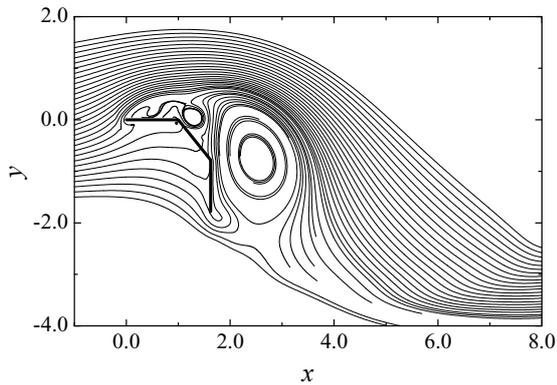


(b) 三次元計算

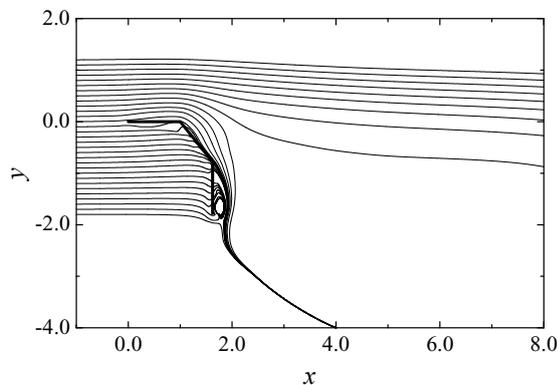
図-2 計算次元による結果の差異 (圧力分布)

できないため、現実の流れを評価できないことが分かる。さらに三次元計算では多関節平板から低圧の後流が蛇行しながら伸びているのが見られる。

図-3の流線は、速度ベクトルを疑似時間で追跡する方法で得られたものである。流線においても、圧力分布同様二次元計算と三次元計算で結果が大きく異なる。二次元計算において、平板背後に見られる円状の流線ははく離域中の渦構造を示すものであり、個別に計算して求めている。第3平板背後に見られる大規模渦は、図-2(a)の低圧部分とも対応している。三次元計算においては多関節平板背後に空白領域が見られるが、これは流線の間隔が広がっているもので、流速が遅い領域、すなわち後流域を表している。二次元計算では大規模なはく離・渦構造が形成され、流線が大きく湾曲しているものの、後流域は狭い。一方三次元計算では多関節平板凸面側の流線に湾曲は見られず、主流とほぼ平行である。第1, 2平板背面側の流線は平板に沿っており、流れははく離していないが、第3関節でははく離し、第



(a) 二次元計算



(b) 三次元計算

図-3 計算次元による結果の比較 (流線)

3平板上に小規模のはく離・再循環領域を形成している。

以上の結果より、多関節平板周りの流れ構造は三次元性が強く、二次元計算では不適切であることが分かる。

### 3. 2 可視化実験との比較

三次元計算で得られた結果が、現実の流れ現象を考察するに妥当かを確認するため、実験結果との比較を行った。スモークワイヤ法により得られた可視化写真<sup>9)</sup>との比較を図-4, 5に示す。いずれも第3平板が垂直となった位相を示しており、数値計算の結果は流脈である。図-4は平板中央断面上流からスモークまたは流脈を注入した場合であり、図-5は平板側縁断面上流から注入した場合の結果である。

図-4(a)の中央断面上流でスモークを発生させた場合の流れを見ると、平板背面でスモークラインが平板に引き寄せられている。また第3平板背面に平板長規模の再循環領域が形成されている。数値計算結果(図-4(b))を見ても、その様子が得られている。図-5の側縁断面の可視化結果では、第2, 第3平板側縁から平板中央に巻き込む流れが見られ、縦渦が形成されていることが分かる。数値計算結果(図-5(b))においても、同等の位置から巻き込みが発生している。これらの結果より、本数値計算による結果は強制振動で計算をしているものの、実現象と同等の結果が得られている。

### 3. 3 多関節平板周りの流れ構造

三次元計算による流れの三次元構造の計算結果を図-6に示す。図は $Q$ 定義法<sup>10)</sup>によって得られた渦の強さであり、

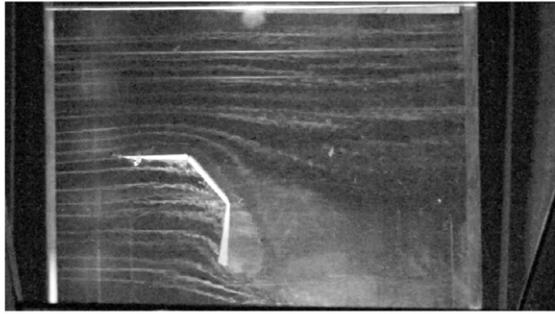
$$Q = -\frac{1}{2} u_{ij} u_{ji} = \frac{1}{2} (\|\omega\|^2 - \|s\|^2) \quad (7)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

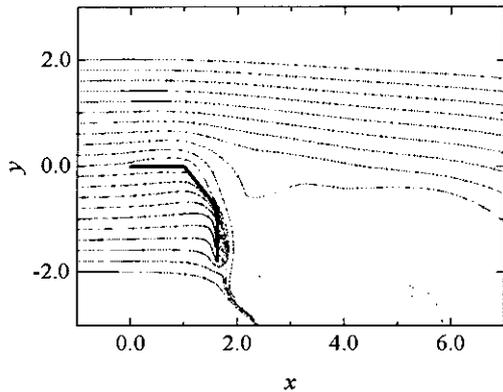
$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$(i, j = 1, 2, 3)$$

で求められる。 $Q$ は速度勾配テンソルの第2不変量であり、式(7)のように渦度テンソル $\omega_{ij}$ 、変形速度テンソル $s_{ij}$ となる。この $Q$ 値が正の領域が渦と定義され、管状渦の検出に良く用いられる。図-6の各図は $Q = 0.1$ の等値面を表し、多関節平板の角振動半周

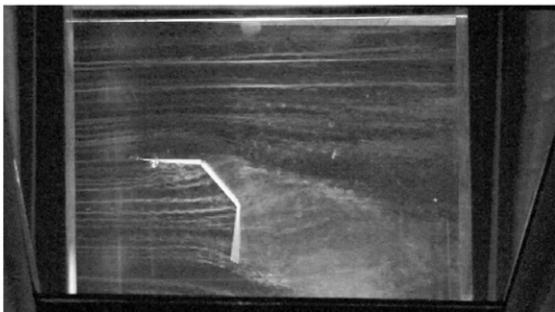


(a) 実験結果

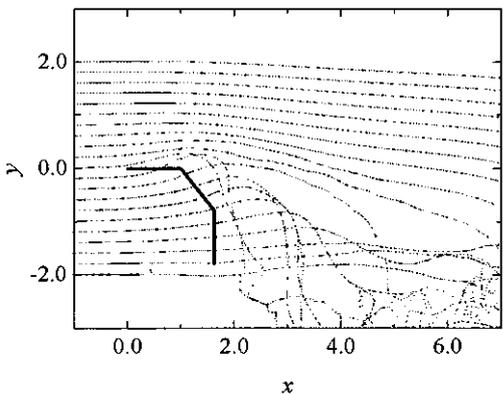


(b) 計算結果

図-4 実験結果と計算結果の比較（中央断面）



(a) 実験結果



(b) 計算結果

図-5 実験結果と計算結果の比較（側面断面）

期 ( $= T/2$ ) の変化を示す. なお図-6(a)にのみ多関節平板を示した.

図より, 多関節平板の両側端から対になった縦渦が形成されていることが分かる. この縦渦は, 多関節平板の振動により平板背面に巻き込む方向に回転しているが, 平板の振動方向が逆転すると回転方向が逆向きの縦渦が新たに形成される. この縦渦は第1平板前縁の角部に先端を持つが, 振動の進行に伴い先端部が第2関節, 第3関節へと移動し, やがて脱落する. 放出された縦渦対は, 多関節平板の振動に同期して蛇行しながら流下する. またこの縦渦対とは別に, この縦渦を包み込むような渦構造が見られる (図中A). この渦構造は先行する縦渦の外縁で逆向きの回転方向をもって形成され (図-6 (b)), 多関節平板が中央を通過する際に大きく成長している (図-6 (d)). この渦構造については, 形成過程を含め詳細は明らかではない. さらに多関節平板後縁からU字型の渦構造 (図中B) が放出され, 縦渦対に巻きついた状態で流下する様子が見られた.

#### 4. 結論

移動重合格子法により, 一様流中で振動する多関節平板周りの流れの三次元数値解析を行った. 結果をまとめると以下の通りである.

- (1) 三次元計算により, 二次元計算では得られなかった平板側縁からの縦渦などの三次元構造が計算された.
- (2) 可視化実験により見られた流れ構造と同等の流れ構造が数値計算により得られた.
- (3) 多関節平板の振動においては, 縦渦が流れ構造の大勢を占めている. また多関節平板後縁からU字型の渦構造が形成され, 縦渦対に巻きついて流下する.

謝辞: 本研究は著者が高専間人事交流派遣期間中に, 派遣先の長野工業高等専門学校において行ったものである. 研究環境を手配していただいた長野高専機械工学科の皆様へ感謝申し上げます.

#### 参考文献

- 1) 鈴木昭宏, 神谷恵輔, 松本敏郎: 発電装置, 特開2006-226221 (P2006-226221A).
- 2) 吉川覚, 田中生馬, 廣田輝直, 保坂寛: 平面型風力発電のためのEHL自励振動解析, 精密工学会春季大会学

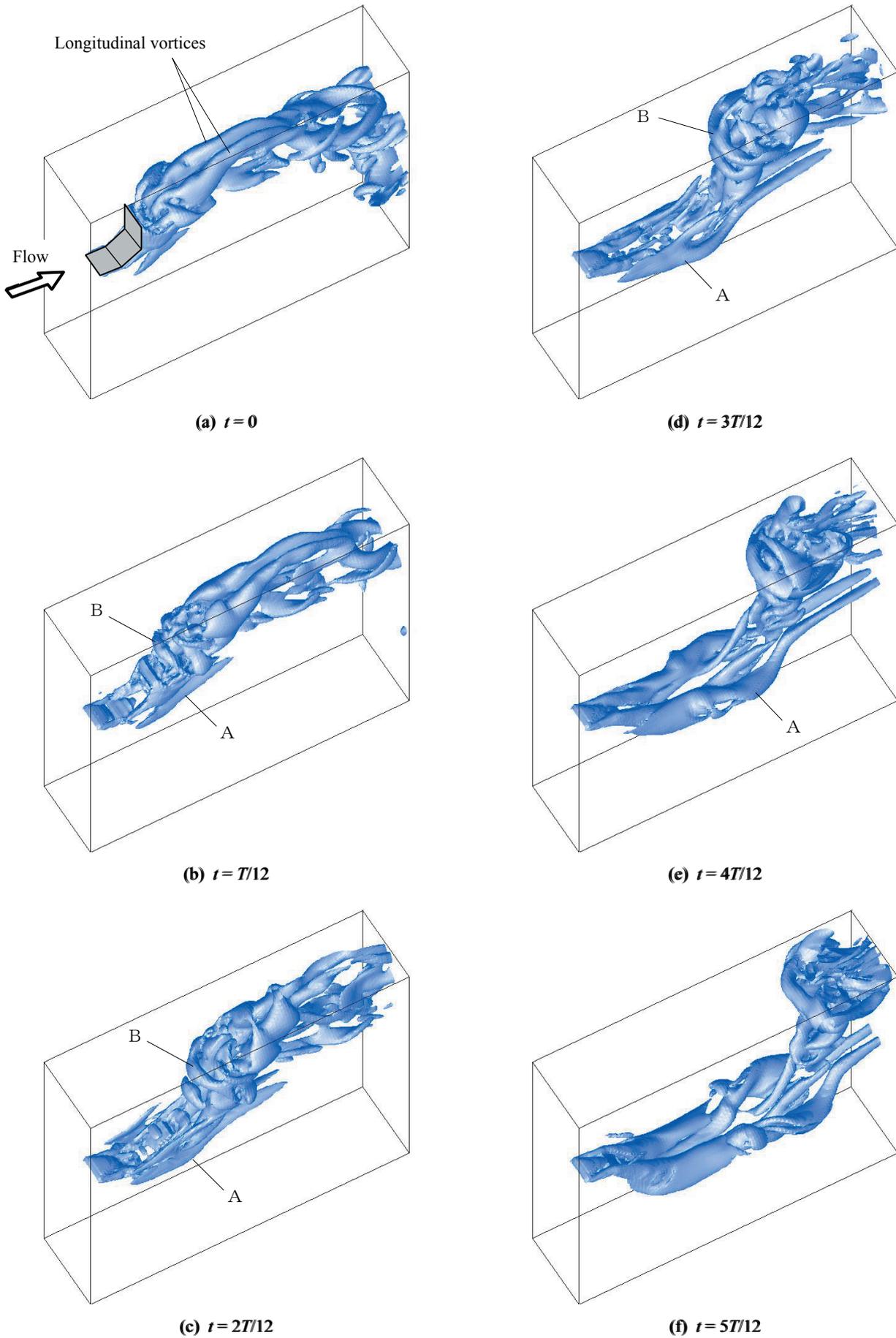


図-6 多関節平板周りの渦構造の時間変化

術講演会論文集, 2007.

- 3) 山岸真幸, 吉野貴文, 前田龍: 関節を有する平板の一樣流中における振動特性の解明, 長岡工業高等専門学校紀要, Vol.43, No.1, pp.11-16, 2007.
- 4) 山口信行, 関口徹, 横田和彦, 辻本良信: 柔軟で薄いシートの高速気流中における挙動に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.65, No.632, pp.1232-1239, 1999.
- 5) 佐藤浩, 斎藤博之助, 中村宏: 風の中のはためき, 「境界層遷移の解明とその制御」研究会講演論文集, JAXA-SP-05-012, pp.23-26, 2006.
- 6) 山岸真幸, 吉野正信, 小林悠太, 前田龍: 一樣流中で自励振動する多関節平板周りの流れ構造, 日本機械学会流体工学部門講演会, No.07-16, pp.50, 2007.
- 7) 山岸真幸: 運動座標系における流れの支配方程式の導出と移動重合格子法による流れ場の数値解析, 長岡工業高等専門学校紀要, Vol.43, No.1, pp.17-25, 2007.
- 8) 奥田和也, 徳永宏: 移動重疊格子と渦度・流れ関数法による容積形ポンプ内流れの数値計算, 日本機械学会論文集, Vol.68, No.670, pp.1737-1744, 2002.
- 9) 小笠原和也, 黒田成昭: 重合格子法を用いた振動する円柱周りの流れの解析, 第14回数値流体力学シンポジウム, C01-2, 2000.
- 10) J. Jeong and F. Hussain: On the identification of a vortex. *J. Fluid Mech.*, vol.285, pp.69-94, 1995.

(2008. 8. 28 受付)