油流出事故対策に関する基礎的研究—Ⅳ. —流出油拡散防止膜展張時の流況シミュレーションについて—

久保雅義*・浅木健司**・山本一誠**・沖 剛志***

Basic Research on Countermeasure for Oil Spill—Ⅳ. —Numerical Computation of Two Dimensional Flow Field Enclosed with Hull and Curtains for Preventing Spilt Oil Diffusion—

Masayoshi KUBO, Kenji ASAKI,
Kazusei YAMAMOTO and Tsuyoshi OKI

Abstract

A discrete vortex method is applied to the two dimensional flow field enclosed with a hull and curtains for preventing spilt oil diffusion. The effects of the applied conditions such as a time interval, a treatment for viscous vortices and the number of separation points are investigated. The strength of a vortex to be shed into a shear layer, Γ_s , oscillates with time. In order to decrease the amplitude of the oscillations and make the flow steady, the following conditions must be considered.

- (1) The shorter the time interval of a vortex shedding is, the less the amplitude of the oscillations decreases.
- (2) When proper separation points are selected by try and error, the flow pattern becomes steady.
- (3) When some vortices are replaced by an equivalent single vortex and a vortex which approaches too close to the body face is eliminated, the flow pattern becomes steady.

1. 研究の目的

船舶からの油流出事故に対する新たなシステムとして、著者らは、船体全周を薄膜で包囲し、流出油の拡散を防止する方法を提案してきた。そしてこれまでに実用化の可能性や滯油性能に関する基礎的研究を行い、従来のオイルフェンスに比較して、大略有効であることが確認できた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。今後は、種々の外力影響下における膜姿勢や流出油の挙動に関するデータを蓄積し、それらを基に詳細な検討を行う必要があるが、そのためには、船体及び膜周りの流況を把握することが重要となる。著者らは、以前にトレーサーとして大鋸屑を用いた流れの可視化実験を行い、概略の流況については知り得たが、詳細については把握しておらず、十分な検討を行うためには、数値計算が不可欠となる。

今回、一様流中において膜を展張した場合の流れを、二次元の離散渦法によりシミュレーションを行った。当該手法は、計算手順が比較的簡単で、物体表面に特異点分布法を用いることにより、任意形状の物体周りの流れを再現できるため、これまでに様々な解析が試みられており、計算手法に関しても多くの報告例⁽⁴⁾がある。しかしそれらは一義的にあらゆる状況において適用できるものではなく、対象とする物体形状及び計算条件毎に、最適な方法を見つける必要がある。そこで、本研究では、船体及び膜周りの流れを再現するため、離散渦法に用いられる種々の手法を適用し、その場合の問題点等を調査した。その結果若干の知見が得られたので報告する。

* 正会員 神戸商船大学 (〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** 正会員 海技大学校 (〒659 芦屋市西蔵町12-24)

*** 正会員 シンバタ工業株式会社 (〒674 明石市魚住町中尾1058)

2. 船体と膜まわりの流況

一様流中における膜姿勢は、以前実施した模型実験結果より、二次元的には図1に示した状態となることが確認されているが⁽¹⁾、今回はこれをさらに単純化したものを用いた。

図2は、小型回流水槽壁面にタフトを取り付けて行った可視化実験の結果を示したものである。本実験では膜姿勢を一定に保つため、厚さ5mmの亚克力板を疑似膜として使用し、図1の膜姿勢を模擬した。なお本研究では、実験及びすべての計算において、レイノルズ数は $Re=3 \times 10^4$ としている。

領域Aには反時計回りの大きな渦が形成されているが、これまでの実験結果からも、この渦が本システムの重要なファクターになると考えられる。したがって本研究においても、主に領域Aの渦につき検討を行った。

以前に行ったトレーサーとして大鋸屑を用いた実験⁽¹⁾では、領域Aの渦はその中心が変動するものの、ほぼ定常的に存在しており、その規模に関しても顕著な変化は観測されなかった。しかし今回の実験においては、総体的には渦が存在するもののその中心は移動し渦が崩れる場合がある。このように両実験において観察結果が相違している原因としては、前回観測された流れには三次元的な要素が含まれるのに対し、今回は二次元ながら水槽壁面における境界層の影響が関係していると考えられる。したがってさらに実験方法等を改良し詳細な流況を把握する必要があるが、いずれにしても、領域Aにおける渦の存在とその中心が変動する事については両実験により確認された。さらに領域Aの渦は旋回速度は遅く、領域Cの流れと比較した場合緩慢な動きをする事がわかった。

3. シミュレーションの方法

図3に示すように、船体及び膜表面、水面、水底（以下、物体表面という。）を多数の線要素に分割して、要素の各節点に単位長さ当たりの強さが γ_B の渦を特異点として分布させる。分布間隔は均一ではなく、船体と膜周りの流れをできるだけ詳細に再現するために、船体近傍については密に、船体から距離が離れた箇所では粗に分布させた。境界条件の精度を上げるため、渦強さを渦点に集中させるのではなく、各要素内で線形変化するように渦を分布させている⁽⁵⁾。

図4に示すように、A、B、C、Dの各角部において流れが剥離し、剥離点から後流中に剥離せん断層がでると考えられるが、それらを強さ Γ_s の離散化された渦点列で近似すると、流れ場の複素速度ポテ

図1 一様流中における膜姿勢

図2 実験による流況

図3 物体表面上の渦配置

図4 剥離渦と剥離せん断層

ンシャルは式(1)にて表される。

$$f(z) = U \exp(-i\alpha) \cdot z + \int_B \frac{i\gamma_B(s)}{2\pi} \log(z - z(s)) ds + \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{j=1}^m \frac{i\Gamma_s}{2\pi} \log(z - z_{sj}) \quad (1)$$

ここに、 U は一様流速、 α は一様流速の迎角、 B は物体表面に沿う積分路、 N_s は剥離点の個数である。よって、一様流、物体表面上の渦分布および剥離離散渦により、流れ場中の任意の点 z に生ずる誘起速度を u とすると、その共役複素速度 $\bar{u}$ は式(2)により表される。

$$\bar{u} = U \exp(-i\alpha) + \frac{i}{2\pi} \int_B \frac{\gamma_B(s)}{z - z_B(s)} ds + \sum_{s=1}^{N_s} \frac{i}{2\pi} \sum_{j=1}^m \frac{\Gamma_{sj}}{z - z_{sj}} \quad (2)$$

いま物体表面の各線要素の単位法線ベクトルを n_{Bk} 、各線要素の midpoint に生ずる誘起速度の共役複素速度を $\bar{u}_k$ とすると、 γ_B は、流れが物体表面に沿うための条件式(3)と、物体上流側遠方で流れが水面に平行である場合の条件式(4)、および流れ場全体で渦度の総和が0という式(5)のケルビンの循環定理から求めることができる。

$$\operatorname{Re} [\bar{u}_k \cdot n_{Bk}] = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{Im} [\bar{u}_\infty] = 0 \quad (4)$$

$$\int_B \gamma_B(s) ds + \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{j=1}^m \Gamma_{sj} = 0 \quad (5)$$

4. 計算結果と考察

4.1 物体表面上の渦分布 γ_B を求めるための連立方程式

式(3)に式(2)を代入し、式(4)を加味すると、 γ_B を決定する連立方程式が得られる。

$$\sum_{j=1}^n A_{kj} \gamma_{Bj} = B_k \quad (k=1 \sim n) \quad (6)$$

ここに、 n は物体表面の分割数、 A_{kj} は影響係数、 B_k は Γ_s により決まる既知ベクトルである。

本研究では水面及び水底を、流れ場に平行に置かれた非常に薄い1枚の板とみなしている。この場合、上流及び下流側両端部付近で各境界の上下面における流れは境界に対しほぼ平行で、流速は船体及び膜から遠く離れている場合にはほぼ等しくなるはずである。したがって両端の渦度は0でなければならない。しかしながら予備計算を行ったところ、水面及び水底の端部に分布させた渦は、ポテンシャル流れにおいても $\gamma_B = 0$ とはならず、以後の計算を続行した場合にも非現実的に大きな値をとることが明らかとなった。この原因については不明であるが、本研究においては、これを回避するため、式(4)及び(5)に加え、水面と水底の両端部4箇所分布させた渦に対して強制的に $\gamma_B = 0$ の条件を付加した。この場合、未知数 n 個に対し方程式が $n+4$ 個となるので、以下に示す最小自乗法を用いた⁽⁶⁾。すなわち、

$$F = \sum_{k=1}^{n+4} \left(\sum_{j=1}^n A_{kj} \gamma_{Bj} - B_k \right)^2 \quad (7)$$

を考え、 F が最小となるように γ_B を決定する。 F が最小となるのは

$$\frac{\partial F}{\partial \gamma_{Bj}} = \sum_{k=1}^{n+4} 2 \left(\sum_{j=1}^n A_{kj} \gamma_{Bj} - B_k \right) A_{kj} = 0 \quad (8)$$

よって、 γ_B を決定する連立方程式は、

$$\sum_{k=1}^{n+4} \sum_{j=1}^n A_{ki} A_{kj} \gamma_{Bj} = \sum_{i=1}^n A_{ki} B_k \quad (i=1 \sim n) \quad (9)$$

となる。

4.2 剥離渦の強さ Γ_s と導入点について

本研究では、船体及び膜を単純化し、二次元長方形柱がそれらの形状に合うように、流れ場中に複数配置されたものとみなして、適当な角部から流れが剥離すると考えた。長方形柱を対象とした Γ_s の決め方については、これまで様々な報告例があるが、本報では永野らの方法⁽⁷⁾を用いた。

即ち、剥離せん断層は、物体表面上の剥離点から境界層が剥がれたものであるから、境界層外縁における流速を u_s とすると、 Γ_s は式(10)により表される。

$$\Gamma_s = \frac{1}{2} u_s^2 \Delta T \quad (10)$$

ここに、 ΔT は渦の導入時間間隔である。境界層外縁の位置は、流れが非定性的な場合、時間と共に変化するが、ここではその代用として、以下に述べるように各角部毎に適当な固定点を選び、その位置での流速を u_s とした。剥離渦の導入点に関しても同様に適当な固定点を選択した。図5に u_s の算出点と剥離渦の導入点の関係を示す。

a) 剥離点A

剥離点Aにおいては、図5の辺AEに沿う境界層が剥離するので、 u_s の算出点としては、 $z_P = (x_A - \delta, y_A)$ とする。 δ は辺AEから固定点までの距離である。本研究ではすべての剥離点に対し δ は一定とした。渦の導入点については、辺AEに沿う境界層が剥離することから、AEの延長線上の固定点 $z_{SP} = (x_A, y_A + \delta)$ を導入点とした。

b) 剥離点B

剥離点Bについては、辺BFまたは辺B'F'のいずれの面に沿う境界層が剥離するかにより、剥離渦の回転方向を決定する必要がある。そのため点Bの近傍 $z = (x_B, y_B + \delta)$ における流速ベクトルを求め、それが上流側を向いていれば、辺B'F'に沿う境界層が剥離するとみなして時計回りの渦を導入し、下流側を向いていれば、辺BFに沿う境界層が剥離するとみなして反時計回りの渦を導入した。 u_s の算出点は、時計回りの渦に対しては $z_P = (x_B' + \delta, y_B)$ とし、反時計回りの渦に対しては、 $z_P = (x_B - \delta, y_B)$ とした。渦の導入点はいずれの場合も、点Bの直下 $z_{SP} = (x_B, y_B + \delta)$ である。

c) 剥離点C

剥離点Cに関しては、まず点Cの近傍 $z_P = (x_C + \delta, y_C + \delta)$ における速度ベクトルを求め、それが上流側を向いていれば、辺CGに沿う境界層が剥離するものとして、その延長線上 $z_{SP} = (x_C, y_C + \delta)$ に時計回りの渦を導入し、下流側を向いていれば、辺F'Cに沿う境界層が剥離するとみなして、その延長線上 $z_{SP} = (x_C + \delta, y_C)$ に時計回りの渦を導入した。

d) 剥離点D

剥離点Dについては、大鋸屑を用いた可視化実験の結果を踏まえ、辺HDに沿う境界層が剥離するものとして、同辺の延長線上の点 $z_{SP} = (x_D + \delta, y_D + \delta)$ に、反時計回りの渦を導入した。 u_s の算出点は、 $z_P = (x_D - \delta, y_D + \delta)$ とした。

Γ_s は、式(10)から明らかなように、 u_s と ΔT に依存する。したがって u_s に直接影響を及ぼす δ をいくにするかは重要である。これまでも二次元長方形柱周りの流れ解析において、 u_s を過小に見積もった場合には、渦点の巻上がり度合いが小さくなり、物体後方にカルマン渦が形成されないとの報告がある⁽⁷⁾。これと同様に、本研究においても、領域Aに形成される渦は、 u_s に大きく依存すると思われる。

図6及び図7は、 δ と Γ_s の関係を示したものである。図6は計算開始後の経過時間に対する時系列を、図7はその平均値を示す。図中 h は水面から膜下端B点までの距離である。図6から明らかなように、いずれの場合も Γ_s は時

図5 流速算出点と剥離渦の導入点

図6 流速算出点と Γ_s (時系列)

図7 流速算出点と Γ_S (平均値) 図8 Γ_S の標準偏差

間に対し激しく振動しているが、図7でみた場合、 δ が小さくなるに従い Γ_S は大きくなる傾向にあることが分かる。特に剥離点Cにおいてはその傾向が顕著である。図8は、 Γ_S のばらつきを調べるため、その標準偏差を示したものである。図6及び図8から、 $\delta/h < 0.01$ では Γ_S のばらつきが急激に増大することが分かる。可視化実験においては、流れに若干の周期的な変動はあるものの急激的な変化は観察されておらず、したがってシミュレーションにおいても、激しい振動要素は抑制すべきであると考えられる。よって以下の計算においては、 Γ_S の強さ及びその安定性を勘案し、 $\delta/h = 0.01$ を採用した。

4.3 剥離渦の粘性影響

流れ場に導入された渦同士が互いに接近したり、物体至近に近づいた場合に、非現実的な速度が誘起される。これを回避するために以下の2通りの方法⁽⁸⁾について検討を行った。

a) 渦の合成、消去を行う

粘性渦の半径よりも互いに接近した場合には渦の合成を、物体至近に接近した場合には渦の消去を行った。合成後の渦の位置は式(11)で、渦強さは式(12)で求めた。

$$Z_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^N x_{Si} |\Gamma_{Si}|}{\sum_{i=1}^N |\Gamma_{Si}|}, \frac{\sum_{i=1}^N y_{Si} |\Gamma_{Si}|}{\sum_{i=1}^N |\Gamma_{Si}|} \right] \quad (11)$$

$$\Gamma_{Se} = \sum_{i=1}^N |\Gamma_{Si}| \quad (12)$$

ここに、 N は合成、消去する渦の個数である。

b) 強制的な旋回速度を誘起する粘性渦モデルを用いる

a)で述べた渦の合成、消去は行わず、粘性渦の半径よりも互いに接近した場合には、渦による誘起速度は式(13)から求まる旋回速度 v_θ を用いた。

$$v_\theta = \frac{r}{2\pi\sigma^2} \Gamma_S \quad (13)$$

ここに、 r は渦中心からの距離である。なお、粘性渦の半径 σ は、式(14)より求めた。

$$\sigma = 2.24 \sqrt{\nu t} \quad (14)$$

ここに、 t は渦の導入後の経過時間、 ν は動粘性係数である。

図9は、上記a) b)の違いが Γ_S に及ぼす影響を示したものである。図より明らかなように、a)の方法を用いた場合、 Γ_S の振動がかなり抑制されることが分かる。したがって、4.2で述べたのと同様の理由から、本研究ではa)の方法を採用した。

4.4 剥離点の選択

シミュレーションにおいては、計算時間の短縮及び解析の簡潔さから、できるだけ現象を単純化した方が望ましく、その一つの方法としてすべての点を剥離対象とするのでは

図9 粘性渦の処理が Γ_S に及ぼす影響

なく、重要な点にのみに着眼することが考えられる。

図10は点A、B、C、Dすべての点から渦点を放出した場合の渦分布を示したものである。図中○、×、◇、□の各点は、それぞれ剥離点A、B、C、Dから放出された渦であるこ

とを示す。図より、Aからの渦はほぼB点至近を通り、B点通過後はほとんどB点からの渦と同様の挙動をすることが分かる。即ちA点からの剥離せん断層はB点からの剥離せん断層とほとんど一致していることになる。図11はすべての点から渦を放出した場合とB点のみから放出した場合の Γ_s を比較したものである。図中の点線は、A点とB点からの Γ_s の和を、実線はB点からのみ放出させたときの Γ_s を示している。両者の平均値はほぼ一致しており、さらにA、B两点から放出させたときより、B点のみから放出させたときの方が、 Γ_s も安定することが分かる。C点から放出した渦は、図7から明らかなように、その Γ_s も他に比べて極めて小さく、また渦のほとんどがC点近傍に滞留する傾向にあることが図10から分かる。長方形柱を対象とした解析においても、物体後角部からの剥離を無視しても比較的良好な結果が得られており、本研究においてもC点は剥離点として無視できると考えられる。D点からは可視化実験においても強い剥離せん断層がでることが観察され、さらに図7においてもそれが明らかであるので、無視できない。以上より、領域Aの流れについては、対象とすべき剥離点は、B点及びD点のみとすることができると考えられる。

4.5 剥離渦の時間的移動について

流れ場に導入された渦点の移動は、式(15)に示す一次差分式を用いた。

$$z_{sj}(t + \delta t) = z_{sj}(t) + u(t) \delta t \quad (15)$$

ここに、 $z_{sj}(t)$ は時刻 t における渦点の位置、 $u(t)$ は $z_{sj}(t)$ における誘起速度、 δt は渦の微小移動時間間隔で、すべての計算において $\delta t = 0.5 \Delta T$ とした。 δt 及び ΔT を決める定説はなく、実験といくつかの予備計算結果とを比較しな

がら、適切な値を選択する必要がある。本研究において、 $\delta t U/h = 0.1$ として計算を行ったところ、領域Aにはポテンシャル流れが卓越して渦が形成されにくい状況となり、実際の流れにそぐわない結果となった。また図12は、 $\delta t U/h = 0.05$ のときの渦分布を示したものであるが、剥離点Dから放出された渦が、D点より上流側に移動して領域A内に入り、非現実的な状態となっている。これらは、式(15)により計算された移動後の渦点の位置が、移動前の位置に対して物体表面を横切るような場合には、鏡像渦の原理及び4.3a)の渦と同様に物体至近に接近したものとして扱い、当該渦点を消去したことに起因するもので

図10 剥離渦の分布 (剥離点A、B、C、D)

— 剥離点Aを加味しない場合 ··· 剥離点Aを加味する場合

図11 剥離点Aの有無の影響

図12 剥離渦の異常な挙動

図13 導入時間間隔 ΔT が Γ_s に及ぼす影響

あると考えられる。即ち、物体至近に接近した場合も含めて、渦を消去する場合、消去された渦点の個数が多いほど、さらにはその Γ_s が大きいほど、流れ場に及ぼす影響は大きく、式(5)からポテンシャル流れが卓越することが分かる。本研究で対象としたように、閉塞された流れ場の場合は、無限の流れ場の場合よりも物体至近に接近して消去される渦点が多くなる。したがって、流れの非現実的な変動を避けるためには、単位時間内に導入される Γ_s の総和は同じでも、個々の渦点の強さはできるだけ小さい方が望ましい。この観点からも、 ΔT 及び δt を決定すべきである。図13は ΔT が Γ_s に及ぼす影響を示したものである。実線は $\Delta TU/h=0.1$ とした場合を、破線はその半分の0.05とした場合である。図より明かなように、 Γ_s の変動を抑制する上からも ΔT は小さい方が好ましいことが分かる。

しかし、適切な流れ場を再現するためには、 ΔT 及び δt が小さいほど精度が向上するものではなく、これらの最適値は一定の範囲内にあることが報告されている⁽⁹⁾。本研究においてもそれが該当するかは不明であるが、今回の解析結果から以下のように推察される。すなわち、4.3および4.4においては、流れ場中の渦点の数が少ない方が、導入される Γ_s はばらつきが少なく安定することを意味している。しかし、上述のように ΔT 及び δt を小さくすると、渦点が消去されたときに流れ場に与える影響は少なくなり、 Γ_s そのものの変動も抑制されるが、その反面、流れ場中における渦点の数は増加することになる。よって最適な ΔT 及び δt は、導入される個々の渦の Γ_s と個数の双方の関係により決まると考えられる。

図14 剥離の様子

5. シミュレーション結果

図14から図16はシミュレーション結果を示したものである。剥離点はB及びDの2箇所とし、 $Re=3 \times 10^4$ 、 $\delta t U/h=0.025$ とした。計算の手順としては、まずポテンシャル流れを得て、その後順次剥離点から渦を放出させることになる。その場合、計算開始時から所定の一様流速 U を与えた場合、計算開始直後では流れが時間に対して急速に変化するので、剥離点から放出される渦強さも急激に変化し、計算初期には非常に強い渦が放出されることになる。これを回避するため、計算開始後10 ΔT の間は、流速を徐々に線形変化させた。

図14(a)に示すように、各剥離点から放出された渦点は、時間の経過と共に上方へ巻上がりながら下流へ移動する。この段階では異なる剥離点から放出された渦同士が、他の剥離点からの渦塊に及ぼす影響は少なく、比較的配列良く渦点列は並び、各剥離点から剥離せん断層が形成される様子が分かる。図14(b)はこのときの流速ベクトルを示したものであるが、船底下には反時計回りの渦が生じているのが分かる。時間が経過すると、物体表面及び剥離された渦点同士の影響により、渦点

図15 渦点の分布

の配列は剥離点から遠ざかるにつれ崩れてくるが、剥離点 B からの渦点が領域 A 内に巻上がり、同領域には船体付近に反時計回りの大きな渦が形成される。図15及び図16は、計算開始後ほぼ定常状態に達したときの渦点の分布とそれに対応する流速ベクトルを示したものである。船体付近の渦は時間と共に成長し、やがては領域 A 全体にわたるようになる。さらに時間が経過すると、渦の中心は下流側に移動し、これにともない渦の半径も減衰し、領域 A においては徐々にポテンシャル流れが卓越するようになることが分かる。しかし、すぐに船体付近に新たな渦が形成され、以後、同領域においては、渦は周期的に移動、成長、減衰、消滅の脈動を繰り返すこととなる。

前述のとおり、可視化実験においても領域 A には渦が形成されており、この点に関しては計算結果は実際の流れを良く再現している。しかし、渦の脈動に関しては、今回の実験からはシミュレーションで得られたほど、顕著なものは観測できなかった。また渦の規模に関しても同様で、今後、実験と数値計算の双方から詰める必要がある。

6. 結 語

- 離散渦法を用いて、船体と膜、水面、水底により閉塞された流れ場を対象に、流況シミュレーションを行い、その場合の問題点につき検討を行った。本研究により得られた結果を要約すると以下の通りである。
- (1) 今回行った計算の範囲では、流速算出点を物体に近づけるにしたがい Γ_s は大きくなるが、その変動も激しくなる。
 - (2) シミュレーションにおいて流れの非現実的な変動を避けるためには、 Γ_s の振動を抑制すべきである。そのためには以下の点を考慮する必要がある。
 - (3) 流れ場に導入された渦同士が互いに接近したり、物体至近に接近した場合には、渦を合成、消去した方が、 Γ_s は安定する。
 - (4) すべての剥離点から渦を放出させるより、対象とする流れが再現できるのであれば、剥離点を限定した方が Γ_s は安定する。
 - (5) 本研究で対象としたような閉塞された領域における流れのシミュレーションにおいては、 ΔT 及び δt は、導入される個々の渦の強さ Γ_s とその安定性及び流れ場中の剥離渦の個数を考慮して、決定する必要がある。

本研究においては、可視化実験と計算結果とを比較して、詳細な検討をするには至らなかったが、シミュレーションを行う場合の問題点、特に流れと Γ_s の安定性に関してはある程度の指針を得ることができた。今後は実験方法に改良を加えると共に、流体力の面からも数値計算の妥当性を検討していく必要がある。

参 考 文 献

- (1) 久保雅義・浅木健司・小野田忠弘・柴田充喜：油流出対策に関する基礎的研究－Ⅰ，日本航海学会論文集，第85号，pp.71～81，1991。
- (2) 久保雅義・浅木健司・小野田忠弘・沖剛志：油流出対策に関する基礎的研究－Ⅱ，日本航海学会論文集，第87号，pp.21～29，1992。
- (3) 久保雅義・浅木健司・山本一誠・沖剛志：油流出対策に関する基礎的研究－Ⅲ，日本航海学会論文集，第90号，pp.175～184，1994。

図16 領域 A における渦の脈動

- (4) 土木学会：風工学における流れの数値シミュレーション法入門，1992.
- (5) 水野明哲：流れの数値解析入門，朝倉書店 pp.87～92，1990.
- (6) 稲室隆二：渦点法による剥離流れの数値シミュレーション，ながれ7，pp.104～122，1988.
- (7) 永野三郎・内藤政彦・高田浩之：うず点法による長方形柱まわりの流れの解析，日本機械学会論文集（B編），47巻443号，pp.32～43，1981.
- (8) 日本機械学会：流れの数値シミュレーション，コロナ社，pp.242～243.
- (9) 新井紀夫・田口勝彦・谷 喬：離散渦法による並列2角柱まわりの流れの解析，日本機械学会論文集（B編），53巻486号，pp.363～370，1987.

質 疑 応 答

天下井 清（北海道大学）：シミュレーションに用いた流速の設定はどのようにされたのですか。

浅木健司：前回行った滞油性能に関する実験結果を基にして、領域Aにおける油水界面に碎波現象が生じる速度を設定しました。