

## PIV を用いた平板周りの後流渦の特性に関する実験的研究

石田 啓\*・斎藤武久\*\*・中林 学\*\*\*

## 1. 緒 論

海洋開発の進捗に伴い、海洋構造物は多様化し、そのため柱体断面形状の多様化が予測されることから、それらに対する波力特性を考究しておく必要がある。特に、振り子式波力発電装置の波受け板（石田ら、1997）のような平板に働く波力を算定する場合、板厚が波長に比べて極めて短いため、剝離渦の発生に伴う抗力の影響が支配的となり、従来のモリソン公式（Morison et al, 1950）による波力の算定は不適當となる。

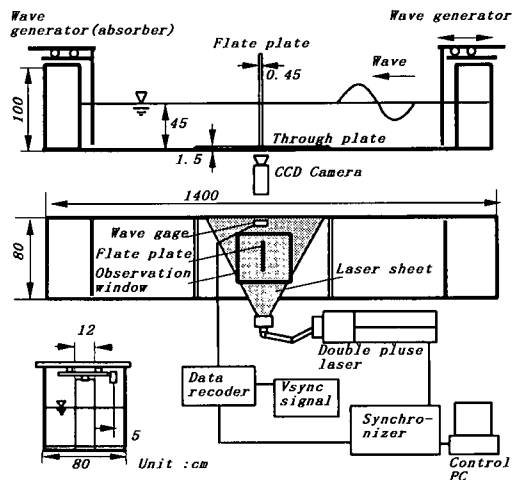
このような場合、柱体周りの後流渦の特性を正確に把握することが重要となるが、その特性の把握に不可欠である、同時刻における流速の空間分布すなわち、速度ベクトル場の計測は、従来非常に困難であった。そのため、特に後流渦の特性などは十分に解明されていなかったが、最近、可視化画像を用いた速度ベクトル場の計測装置が開発され(例えば Adrian, 1991)、有効な速度ベクトル場の解析手法が提供されたといえる(例えば Greated et al, 1992)。しかし、波動場に設置された柱体の後流域における速度ベクトル場の計測を行って、後流渦の特性を把握した研究は、ほとんど報告されてない。

そこで、本研究では、任意時刻における速度ベクトル場の計測が可能な PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて、平板周りの水平および鉛直 2 次元断面の速度ベクトル場を計測し、得られた速度ベクトル図と過度分布図から、平板周りの後流渦の形成過程、過度の時間変化および後流渦の鉛直構造について詳細に考究する。また、実験結果と著者らが既に提示した境界要素法による平板周りの水平 2 次元の流況解析結果を比較することにより解析法の有効性を検証する。

## 2. 実験装置および実験方法

図-1 に実験装置を示す。実験には両端に吸収式造波装置を有する、長さ 14 m、高さ 1 m、幅 0.8 m の両面ガラス張りの 2 次元造波水槽を用い、水槽中央部に厚さ

4.5 mm, 幅 12 cm の鋼製の板を固定した。なお, 平板の固定は平板下部の挿入が可能な溝を有する厚さ 15 mm のアクリル板の台座と水槽上部の 2 箇所で行い, 水槽底部に設けた観測窓 (50 cm×50 cm) を通してカメラの撮影およびレーザーシートの照射が可能となるようにした。使用した PIV (TSI/Aerometrics 社製) の主構成は, ダブルパルス YAG レーザー (12 mj×2), CCD カメラ (1008×1018 画素) およびタイミング制御装置である (図一 1 参照)。本研究では, ダブルパルスのレーザーシートの先発および後発の照射時間の遅れを 3 ms とし, それぞれのレーザーシートの照射に合わせて 2 枚の画像データを CCD カメラで撮影し, さらに, これらの画像データの相互相関から流速の空間分布を算定した。計測の開始は, 造波開始から 30 秒程度経過後に平板と水槽側面の間に設置した波高計の記録がゼロアップクロスする点からとし, 計測時間は, レーザーの発光間隔を 7.5 Hz とした約 2 秒間で, 画像データは, 一つの実験ケースにつき, 16 組 32 枚を取得した。入射波は, 波高  $H$  が 2.0 cm~10.0 cm, 周期  $T$  が 1.0 s~2.0 s の規則波を用い, 水深は 45.0 cm に固定した。なお, トレーサーには中央粒径が 86  $\mu\text{m}$  で比重 1.02 のナイロン粒子を用いたが, レーザーパワーが大きく, かつ CCD カメラの解像度が



図一1 実験装置

・正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科  
 ・正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科  
 …… 前田建設工業株式会社

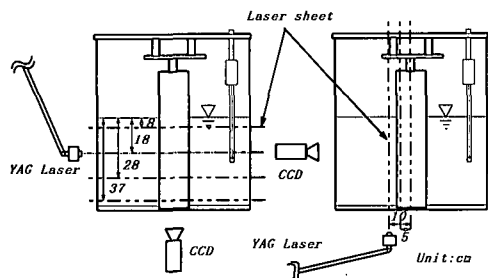


図-2 水平および鉛直計測断面位置

高いことから、撮影範囲を最大  $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$  程度としても良好な画像データが獲得できた。図-2 に計測断面の位置を示すが、本研究では、4つの水平2次元断面および3つの鉛直2次元断面を対象に計測を行った。

### 3. 実験結果および考察

実験に用いた入射波の範囲で、平板周りの水表面に形成された渦対には、対称および非対称の場合が確認されたが、本研究では、最も基本となる対称な渦対が形成された例を取り上げ、その特性について考究する。なお、PIV による計測から、今回の実験範囲では、水表面で形成された渦対がそれぞれ対称および非対称な場合は、水面下の4つの水平2次元断面においても、それぞれ対称および非対称な渦対が形成されており、渦の鉛直方向同軸性が確認された。

#### 3.1 水平2次元断面による計測

図-3 に入射波の周期が  $1.0\text{ s}$ 、波高が  $7.1\text{ cm}$  の場合で、水平2次元断面の鉛直位置が静水面下  $18\text{ cm}$  の場合の速度ベクトル図を示す。図中  $t/T$  は、実時間を入射波の周期で除した無次元時間を表わし、それぞれ、 $t/T = 0.0$  がゼロアップクロス、 $t/T = 0.25$  が波峰、 $t/T = 0.5$  がゼロダウncロスおよび  $t/T = 0.75$  が波谷の位相に対応する。なお、波の進行方向は図の右から左に向かう方向である。図より、 $t/T = 0.0$  以前に平板前方（平板から造波機側）で形成されていた渦対は、時間の経過とともに平板後方（平板から透過波側）へ押し流されていることがわかる。同時に、主流反転時  $t/T = 0.0$  から、平板後方では、新たに渦対が形成され始め、平板前方から押し流された渦対と干渉しながら成長し、主流の反転が生じる  $t/T = 0.5$  付近まで、渦対の径が成長を続けている。ところが、 $t/T = 0.5$  以降では、それ以前に平板後方で形成された渦対は、時間の経過とともに平板前方へ押し流されずに平板後方に留まり、主流反転時に平板前方で新たに形成され始めた渦対は、以前に形成された渦との干渉なしに成長していることがわかる。なお、平板前方および後方において、渦対の形成過程に違いが生じる原因の

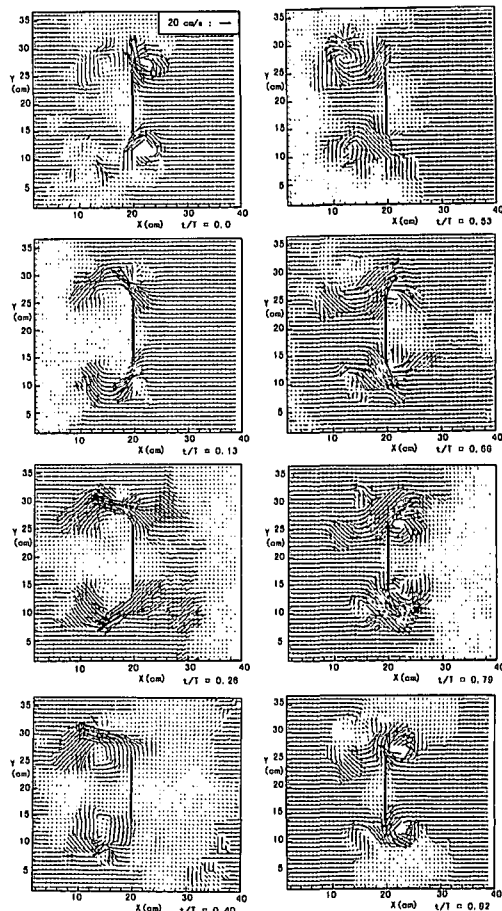


図-3 速度ベクトル図

( $T = 1.0\text{ s}$ ,  $H = 7.1\text{ cm}$ ,  $z = -18\text{ cm}$ )

一つとして、入射波が平板へ進入する際、最初に形成された渦対が後続する渦対の形成過程に影響を与えることが考えられる。さらに、形成された渦対の渦径は平板前方で形成された渦対に比べ、平板後方で形成された渦対の方が大きくなっている。以上のことは、本研究で対象とした実験範囲で対称な渦対が形成された全ての場合において確認された。

図-4 に、図-3 の速度ベクトル図に対応した渦度分布図を示す。なお、図中の数字は反時計回りを正とした渦度の値である。

図より、速度ベクトル図において見られた渦対の形成過程が渦度の値の動きとして詳細に捕らえられている。特に、平板後方において形成された渦対は、それ自身のみで平板近傍において成長を続けるのに対して、平板後方において形成される渦対は、それ以前に平板前方で形成され後方へ押し流された渦と干渉しながら、平板から斜め外側方向へ広がるように成長していることがわかる。なお、平板後方における渦度の動きは、ポテンシヤ

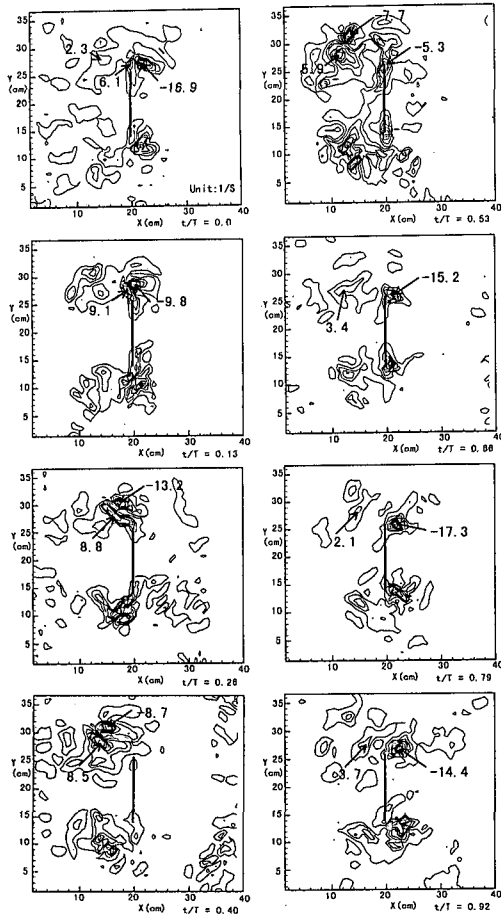


図-4 渦度分布図  
( $T=1.0$  s,  $H=7.1$  cm,  $z=-18$  cm)

ル理論における、渦度が同じで逆回転の2つの渦糸の運動で誘起される渦糸の移動状況に類似した動きとなっている。また、渦度の値の変化に着目すると、若干のばらつきはあるものの、平板後方で生成される渦対の渦度の値は  $t/T=0.0$  から増加し、 $t/T=0.25$  付近で最大値となり、以後は減少している。さらに、平板前方において形成される渦対の渦度の値は  $t/T=0.5$  付近から増加し、 $t/T=0.75$  付近で最大値となり、以後に減少していることがわかる。なお、渦度の値の最大値は速度ベクトル図で見られた渦径の大きさの場合とは逆に、平板前方において値が大きくなっている。この理由の一つとして、平板後方では渦どうしの干渉が渦度の成長を抑制し、緩やかに径の大きな渦を形成するのに対し、平板前方では渦の干渉が無いため、渦度の成長を抑制することなく急速に径の小さな渦を形成することが考えられる。

以上のような渦度の値の変化で、特に、主流反転直後の  $t/T=0.0$  から  $t/T=0.13$  および  $t/T=0.53$  から  $t/T=0.66$  で、主流反転前に生成された渦の渦度の値が

それまでの傾向をはるかに上回る割合で減少し、渦度の値がほぼ半分に近い程度まで減少していることがわかる。これは他の位相では見られない主流反転直後にのみ生じる顕著な傾向であった。

図-5に同様の入射波に対して、平板前方で渦径が最大となる  $t/T=0.0$  の速度ベクトル図を、異なる4つの水平2次元断面位置ごとに示す。図より、鉛直位置が下がるにつれて渦径の大きさは減少していることがわかるが、この減少の割合は微小振幅波理論に基づいた水粒子の最大移動径の鉛直方向に対する減少の割合と同様の傾向を示していた。このことは対称な渦対が形成される場合、渦径の鉛直方向に対する変化の割合が、入射波の特性と強く関連していることを示すものであり、例えば、離散渦法に基づいた数値解析法などで、渦のモデル化の際に、有効な指標になるものと考えられる。

### 3.2 鉛直2次元断面による計測

図-6に入射波の周期が1.0 s、波高が7.1 cmの場合で、平板側端から4.0 cm 平板外側の位置における鉛直2次元断面内の速度ベクトル図を示す。なお、この断面は後流渦の中心から平板外側へ向かう半円部を貫く位置にある。

図より、対象断面内で主流と渦の水平方向速度の向きが一致する  $t/T=0.0$  から  $t/T=0.5$  の場合に、主流の速度の方向と一致した層状の速度ベクトル場が形成されていることがわかる。さらに、主流が反転した直後の  $t/T=0.53$  において、層状とは異なった鉛直方向への速度の混合が生じているが、その直後の  $t/T=0.66$  において速度ベクトル場は再び主流方向へ一致した層状の速度ベクトル場へ変化していることがわかる。主流の反転直後、鉛直方向への速度の混合が生じるものの、短時間でこの乱

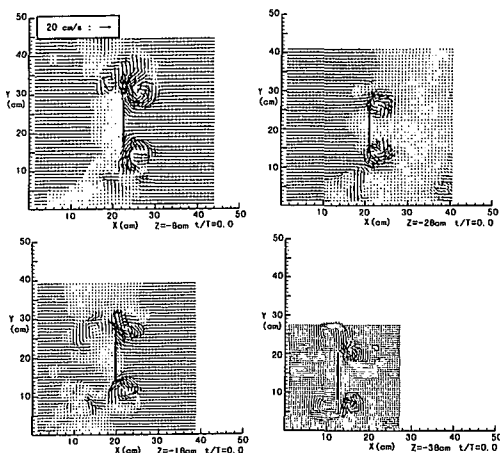


図-5 水平断面の違いによる渦径の変化  
( $T=1.0$  s,  $H=7.1$  cm)

れが消滅する理由の一つとして、主流反転時における渦度の値の大きな減少が起因するものと考えられる。

ところで、石田ら(1997)は境界要素法により水平2次元解析で計算した波力を鉛直方向に断続的に加え、渦径の鉛直方向変化を考慮した全波力の時間変化を算出し、実験結果と非常によく一致することを報告しているが、本実験の結果から、両者がよく一致する理由として、後流渦の形成に伴う鉛直方向への速度の混合は、主流反転時には顕著に現れる反面、同時に渦度の急激な減衰が生じ、この混合は主流反転直後の短い時間のみに限られるため、全波力がほぼ正確に算定されたものと考えられる。なお、渦中心から平板内側へ向かう半円内部では、主流が止水領域となるため渦の速度が卓越した層状の流速場が形成され、鉛直方向への速度場の混合は確認されなかった。

#### 4. 境界要素法による平板周りの流況解析

PIVを用いた平板周りの水平および鉛直2次元断面における速度ベクトル場の計測から、平板後流域における速度ベクトル場について、かなり有益な結果が得られたが、次に、上述した境界要素法による平板周りの水平2次元の流況解析結果と、本実験結果との比較を行い、境界要素法による数値解析法の有効性を検証する。

数値解析法の詳細は参考文献(石田ら, 1994, 1997)に譲るが、これは、主流に微小振幅波の速度ポテンシャルを用い、平板による流体場への擾乱を連続渦の速度ポテンシャルで、後流渦を離散渦の速度ポテンシャルでそれぞれ近似し、平板表面における法線方向速度をゼロとする境界条件により流況を算定する方法である。剥離点は、平板幅の数パーセント分に相当する境界層厚分だけ平板両側端から離れた点とし、離散渦の放出時間間隔は

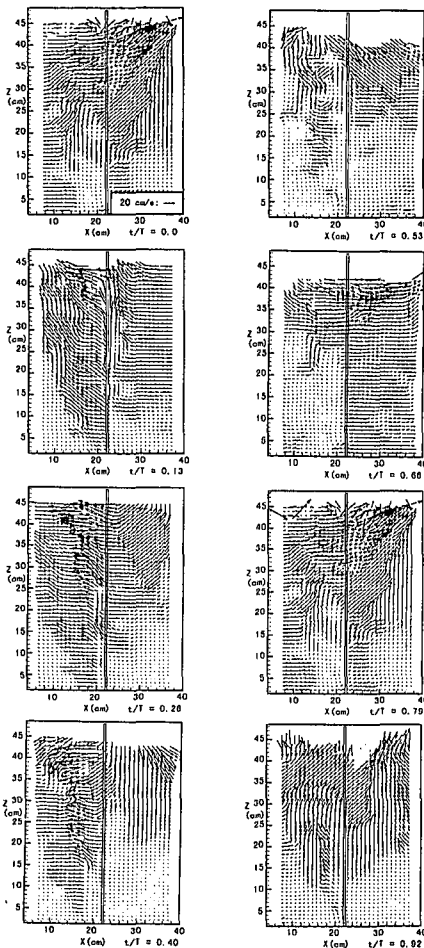


図-6 速度ベクトル図  
( $T=1.0$  s,  $H=7.1$  cm)

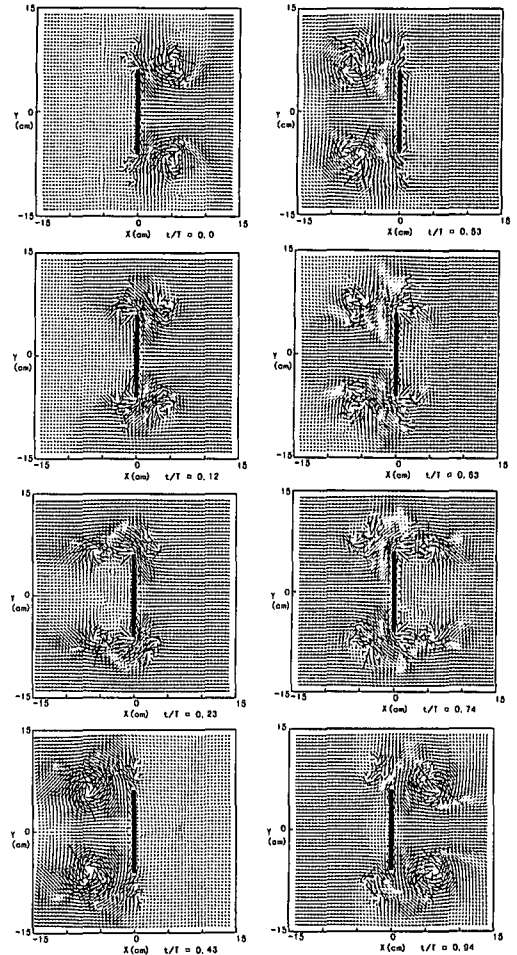


図-7 速度ベクトル図  
( $T=1.0$  s,  $H=7.1$  cm,  $z=-18$  cm)

対象とする水平断面の水粒子の最大速度に反比例させ、さらに、剥離渦の移動は対象とする渦点自身以外から誘起される速度 (Sarpkaya, 1975) によるものとした。なお、離散渦には Rankine 渦のコア半径が時間に依存して拡大する粘性渦モデルを適用し、渦の減衰拡散効果を考慮している。図-7 に、図-3 と同様の入射波に対する数値解析結果を示す。図中、ベクトルの長さは最大水粒子速度で無次元化したものであり、計算結果は計算開始から1周期経過後の2周期目に相当する。平板後方および平板前方で形成される渦対の形成過程および渦径の違いとともに、実験結果を数値解析結果がよく再現しており、流況解析に対する数値解析法の有効性が確認できる。

## 5. 結 論

波動場に設置された平板周りの速度ベクトル場を PIV を用いて計測し、本研究の実験範囲において、平板周りに形成される対称な後流渦に関する特性が、以下のようになり明かになった。1) 平板前方および平板後方における渦対の形成過程は異なり、特に、平板後方ではそれ以前に形成された渦対と干渉しながら渦対が成長し、平板前方に比べ大きな渦径となる。2) 渦度の値は、平板後方に比べ平板前方で大きな値となる。3) 主流反転直後に、それ以前に形成された渦対の渦度の値は急激に減少する。4) 渦径は水平断面の鉛直位置が下がる程小さく、その減少傾向は入射波の水粒子の最大移動径の減少傾向と同じである。5) 鉛直断面内において、渦形成

に伴う流速の鉛直方向への混合は主流反転時のわずかな期間に限られる。さらに、実験結果との比較から、著者が既に提示した解析法の有効性を検証することができた。

最後に、本研究を行うに際し、終始助力を惜しまなかった当時学部生の遠藤智史君（現在岐阜県庁）に厚く謝意を表わす。

## 参 考 文 献

- 石田 啓・斎藤武久・矢富盟祥・水谷二延 (1994): 境界要素法による波動場の柱体周りの流況および波力の解析, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 866-870.
- 石田 啓・斎藤武久・鞍田一剛・清水康輔 (1997): 側方からの剥離を伴う平板に作用する波力に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 806-810.
- Adrian, R. J. (1991): Particle-image techniques for experimental fluid mechanics, *Annu. Rev. J. Fluid. Mech.*, vol. 23, pp. 261-304.
- Greated, C. A., D. J. Skyner and T. Bruce (1992): Particle Image Velocimetry (PIV) in the coastal engineering laboratory, *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., A. S. C. E.*, pp. 212-225.
- Morison, J. R., M. P. O'Brien, J. W. Johnson and S. A. Schaaf (1950): The wave force exerted by surface wave on pile, *Petroleum Transactions, A. I. M. E.*, Vol. 189, T. P. 2846, pp. 149-154.
- Sarpkaya, T. (1975): An inviscid model of two-dimensional vortex shedding for transient and asymptotically steady-separated flow over an inclined plate, *J. Fluid. Mech.*, vol. 68, pp. 109-128.