

波によりオイルフェンススカート部で形成される剥離渦の挙動に関する可視化実験

VISUALIZATION OF VORTEX SHEDDING AROUND THE SKIRT OF OIL BOOM BY WAVES

石田 啓¹・斎藤武久²・池田祥規³

Hajime ISHIDA, Takehisa SAITOH and Yoshinori IKEDA

¹正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)

²正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)

³石川県土木部 (〒920-8580 金沢市広坂2-1-1)

In order to make clear the feature of vortex shedding which is generated from the edge of oil boom's skirt by waves, velocity vector and vorticity fields around the skirt have been measured by using PIV. For the first step to develop a new oil boom which is possible to use under strong weather in waves, the oil boom has been simulated by fixed thin plate in present experiments. In the typical case that the draft of thin plate is 6.5cm which is 1.5 times comparing with the draft of D type oil boom, it was found that there was a difference of vortex formation between the front region and the back one separated with the plate. Especially, in the range of high frequent incident wave, the vortex shedding which is formed in the front region approaches to water surface.

Key Words : Oil boom, vortex formation, PIV, velocity field, vorticity field, periodic waves

1. 緒 論

1997年1月に発生したロシア船籍ナホトカ号による日本海重油流出事故を契機として、沿岸海域における重油災害軽減防止のため、さまざまな検討課題が提起されてきている。これらを大別すると、1) 重油の漂流予測、重油回収装置の開発などのハード面での検討課題、2) 防災基本計画、海洋法の見直などのソフト面での検討課題、3) ボランティア活動などの人的面での検討課題となる^{1),2)}。このなかで、荒天時に流出重油の囲い込みや特定地点への重油の誘導が可能な耐高波浪用オイルフェンスの開発は、ハード面での検討課題のなかでも急務な課題の一つに挙げられている。

従来の研究より、オイルフェンスの滞油特性に関しては、一様な水流に伴う油塊の運動特性、例えば、水流の流速の増加に伴う油塊の変形特性および滞油限界速度などが実験的に明らかにされている³⁾。また、オイルフェンスに作用する張力特性に関しては、一様流を対象に静的な張力特性⁴⁾および波・流れ共存場を対象にオイルフェンス展張時の衝撃的な張力の発生に関する研究が行われている⁵⁾。

しかし、荒天時に限らず、水面の上下運動および主流の反転といった波動場に特有な状況下でのオイ

ルフェンス周辺の流況特性および滞油特性に関しては、未解明な点が多く残されている。

本研究では、耐高波浪用オイルフェンスの開発に必要な不可欠となる、波によるオイルフェンス周りの流況特性の解明を目的とし、その第一段階として、剛な固定オイルフェンスを対象に基礎実験を行う。具体的には、PIV(Particle Image Velocimetry)⁶⁾を用いて、波によるオイルフェンススカート部周りの速度ベクトル場と渦度場の時間変化を計測し、特にオイルフェンススカート下端より発生する剥離渦の挙動特性を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

図-1に実験装置の概要を示す。実験には長さ14m、幅80cm、高さ1mの両端に吸収式造波装置を有する2次元造波水槽を用いた。剛な固定オイルフェンスの模型には、水槽上部で固定した厚さ3mm、幅80cmのステンレス製の平板(以後、フェンスと略記する。さらに、フェンス中で水面下に没した部分をスカート部と略記する。)を用いた。入射波は、波高Hが2.0cm~8.0cm、周期Tが1.2s~5.0sの規則波を用い、静水時喫水深dを水深h=45cmに対してd=6.5および18.5cmと変化させ、合計48ケースについて実験を

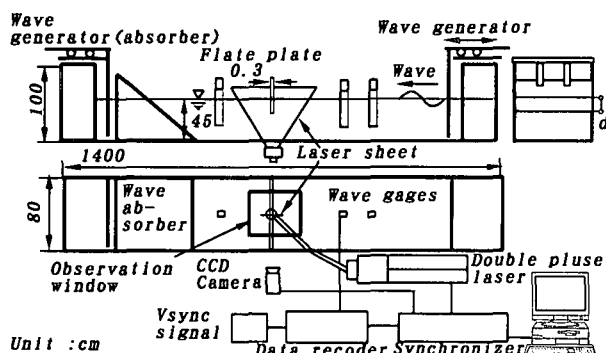


図-1 実験装置

行った。なお、本研究で用いたPIVシステム(TSI社製)の主構成は、12mj×2のダブルパルスYAGレーザー、1008×1018画素のCCDカメラおよびタイミング制御装置である(図-1参照)。計測の際、ダブルパルスレーザーシートの先発および後発の照射時間の遅れを2msとし、それぞれのレーザーシートの照射に合わせて取得された2枚の画像データの輝度に関する相互相関から速度ベクトルの空間分布を算定した。計測時間は、レーザーの発光間隔を7.5Hz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。トレーサーには中央粒径が86 μm で比重1.02のナイロン粒子を用いた。

3. 実験結果および考察

(1) 喫水深 $d=6.5\text{cm}$ の場合

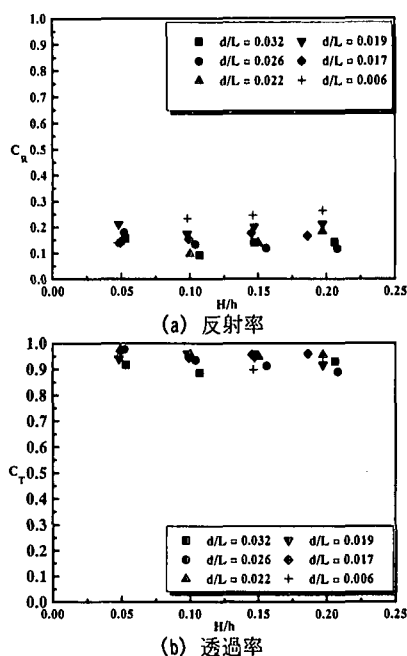
a) フェンス周りの反射波および透過波の特性

図-2に、喫水深 $d=6.5\text{cm}$ の場合に対するフェンス周りの反射波および透過波特性を示す。図中、横軸が波高水深比 H/h 、縦軸がそれぞれ反射率 C_R および透過率 C_T を表す。さらに、図中の記号の違いは、喫水深 d を入射波の波長 L で除した d/L の違いを表す。なお、 $d=6.5\text{cm}$ の場合、対象とする d/L の値の範囲は約 $0.006\sim 0.03$ である。

図より、全ての実験条件に対して反射率は0.3を下まわっている。さらに、透過率はほぼ0.9に達していることから、反射波が波動場に与える影響は極めて小さいと考えられる。また、反射率および透過率ともに、波高水深比の違いによるそれぞれの値の変化は極めて小さいことが分かる。

b) フェンススカート部周りの速度ベクトル場
および渦度場の特性

フェンス周りの反射波および透過波特性から、喫水深が6.5cmの場合、波高水深比の違いによる反射率および透過率の値の変化は小さいことが明らかになった。そこで、ここでは、我が国における法定規格外オイルフェンスD型の許容波高が1.5mであることを参考にして^{7),8)}、幾何縮尺1/20を想定し、入射波高が約6~7cmの場合を対象に、周期の違いによるフェンススカート部周りの速度ベクトル場および渦度場の特性について考究する。なお、本研究で想定する幾何縮尺の場合、喫水深6.5cmはD型オイル

図-2 フェンス周りの波浪特性 ($d=6.5\text{cm}$)

フェンスの水面下長さ（実スケールで0.8～1.0m）
の1.5倍を超える値に相当する。

図-3(i)に、入射波の波高が6.6cm、周期が1.2sの場合に対するフェンス周りの速度ベクトル場の時間変化を示す。なお、波の進行方向は図の右から左方向であり、図中央の固定フェンスに対して右側および左側をそれぞれ反射側（フェンス前面側）および透過側（フェンス後面側）と呼ぶこととする。また、 t/T は実時間 t を周期 T で除した無次元位相を表し、 $t/T=0.0$ が反射側のフェンス前面水位がゼロアップクロスする位相、 $t/T=0.25$ が波峰の位相、 $t/T=0.5$ がゼロクロスダウンする位相、 $t/T=0.75$ が波谷の位相をそれぞれ表す。さらに、図中の水平線は静水位の位置を示す。

図より、透過側では $t/T=0.0$ 以降にフェンス下端から渦が形成され始め、 $t/T=0.5$ 付近において渦径が最大となっている。なお、透過側で形成される渦は、 $t/T=0.0$ 以降のフェンス後面における上向きの水位変動、続く $t/T=0.25$ 以降の下向きの水位変動に対応してフェンス下端近傍の側部に位置していることが分かる。さらに、透過側で形成された渦は、 $t/T=0.5$ 以降にフェンス後面の下向きの水位変動と共に反射側に押し流されていることが分かる。この時、透過側フェンス後面での水位変動では、フェンス前面での水位変動に対して若干の位相の遅れが生じている。また、反射側では $t/T=0.5$ 以降にフェンス下端から新たな渦が形成され始め、この渦はフェンス前面における下向きの水位変動と共にフェンス下端から反射側斜め下方に向かって成長している。この際、透過側で形成された渦と対をなしていることが分かる。ただし、反射側で形成される渦の位置は、フェンス下端から反射側斜め下方となるが、形成され始める位相が $t/T=0.5$ 以降であるため、その位置は水表面に接近している。このため、 $t/T=0.0$ 以降の進行波

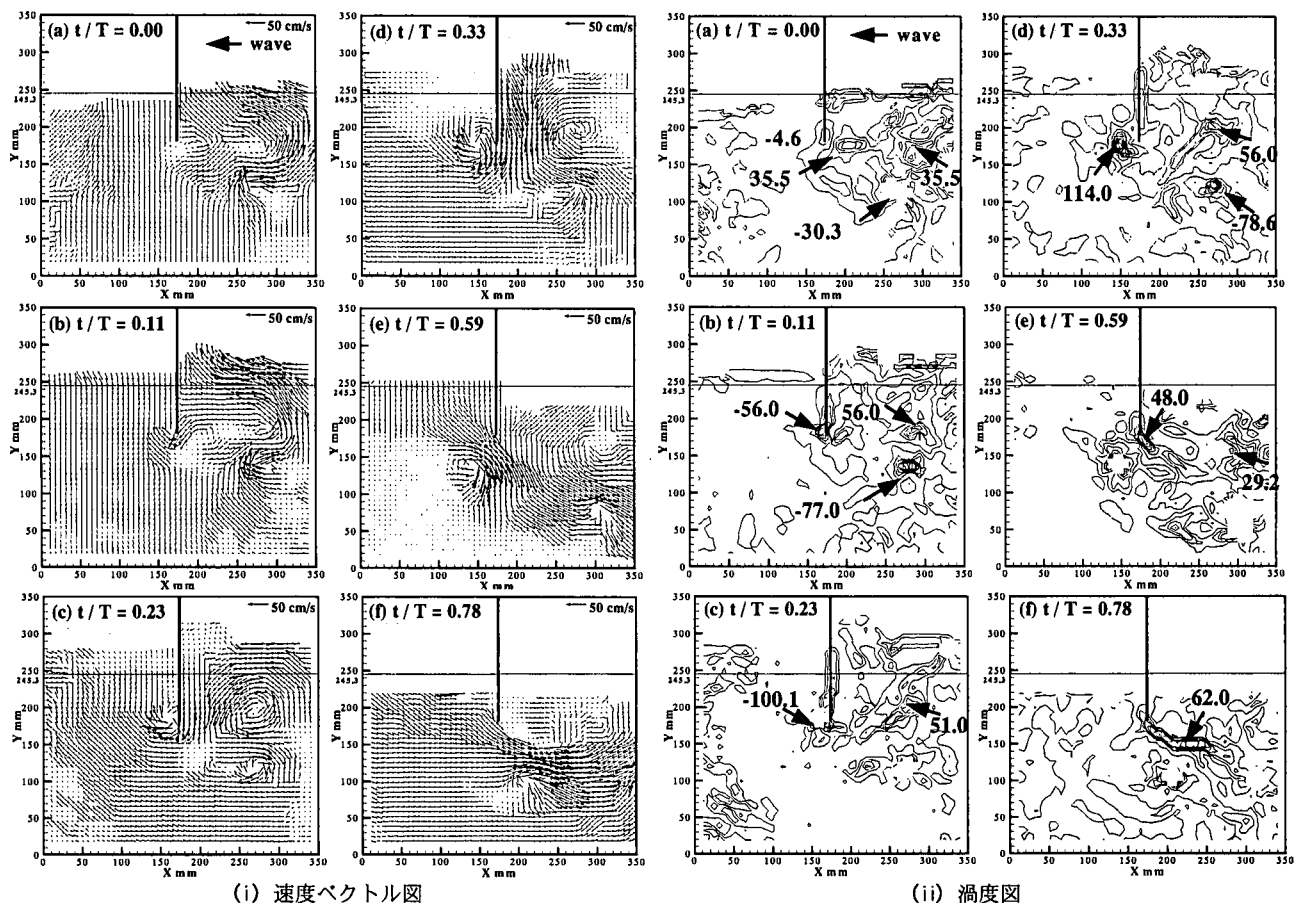


図-3 フェンス周りの速度ベクトル場と渦度場の時間変化 ($d=6.5\text{cm}$, $H=6.6\text{cm}$, $T=1.2\text{s}$)

による水粒子速度に誘起され、特に $t/T=0.23$ ではフェンス前面の水表面付近において大きな渦が再形成されている。このとき、 $t/T=0.23$ での水表面付近における水粒子速度が線形波の最大水粒子速度の1.3倍を越え、続く $t/T=0.33$ ではフェンス前面に沿った強い下向き流速が生じていることが分かる。

上述の図-3(i)で計測された速度ベクトル場から計算された渦度の時間変化を図-3(ii)に示す。図中の数値は渦度の値(1/s)を示し、反時計回りの渦度の値を正で記述している。

図より、ベクトル図で示された渦の形成過程が、渦度の値の変化によって明確に捕らえられている。特に、透過側で $t/T=0.0$ 以降にフェンス下端より形成された渦の渦度は $t/T=0.5$ 以降に反射側で形成される渦の渦度よりもその値が大きくなっている。さらに、反射側で形成された渦の渦度は、 $t/T=0.0$ のゼロアップクロス時まで一旦半減するものの、以降に水表面における大きな渦の形成に伴って渦度の値が再び増加し、 $t/T=0.0$ に比べ $t/T=0.23$ において渦度の値は1.6倍に達している。以上のような反射側での剥離渦を伴う流況特性は、フェンス前面における油層からの油滴の剥離、さらにフェンスからの漏油を促進する可能性を示唆するものと考えられる。

図-4(i)に、図-3(i)に対して入射波が長周期となる、波高6.5cm、周期2.0sの場合のフェンス周りの速度ベクトル場の時間変化を示す。

図より、透過側の渦の形成過程および位置は周期

1.2sの場合と同様であるが、周期1.2sの場合に比べて周期2.0sの場合、透過側の最大渦径は1.4倍を超える大きな値となっている。さらに、反射側で形成される渦は、透過側で形成された渦と対をなしているものの、周期1.2sの場合に比べてフェンス下端部からさらに斜め下方で形成されていることが分かる。このため、周期2.0sの場合、周期1.2sの場合に見られた $t/T=0.0$ 以降におけるフェンス前面の水表面付近での大きな渦径の形成は確認できない。

上述の図-4(i)で計測された速度ベクトル場から計算された渦度の時間変化を図-4(ii)に示す。

周期1.2sの場合と同様に、透過側で $t/T=0.0$ 以降にフェンス下端より形成された渦の渦度が $t/T=0.5$ 以降に反射側で形成される渦の渦度よりもその値が大きくなっている。しかし、 $t/T=0.0$ のゼロアップクロス以降に反射側水表面付近では、周期1.2sの場合に確認されたような渦度の増加は確認できない。

以上より、入射波の周期の増加に伴い、フェンス下端から反射側に形成される渦はフェンス下端からさらに斜め下方に形成されることが明らかになった。このため、入射波の周期の増加に伴い、オイルフェンススカート下端から生じる剥離渦がフェンス前面の油層に対して及ぼす影響は小さくなるものと考えられる。ただし、潮汐などの極めて周期の長い波動運動の場合には、油層に対して剥離渦が与える影響は小さくなるものの、一様流速の変化および風外力が油層の運動特性を支配することになる³⁾。

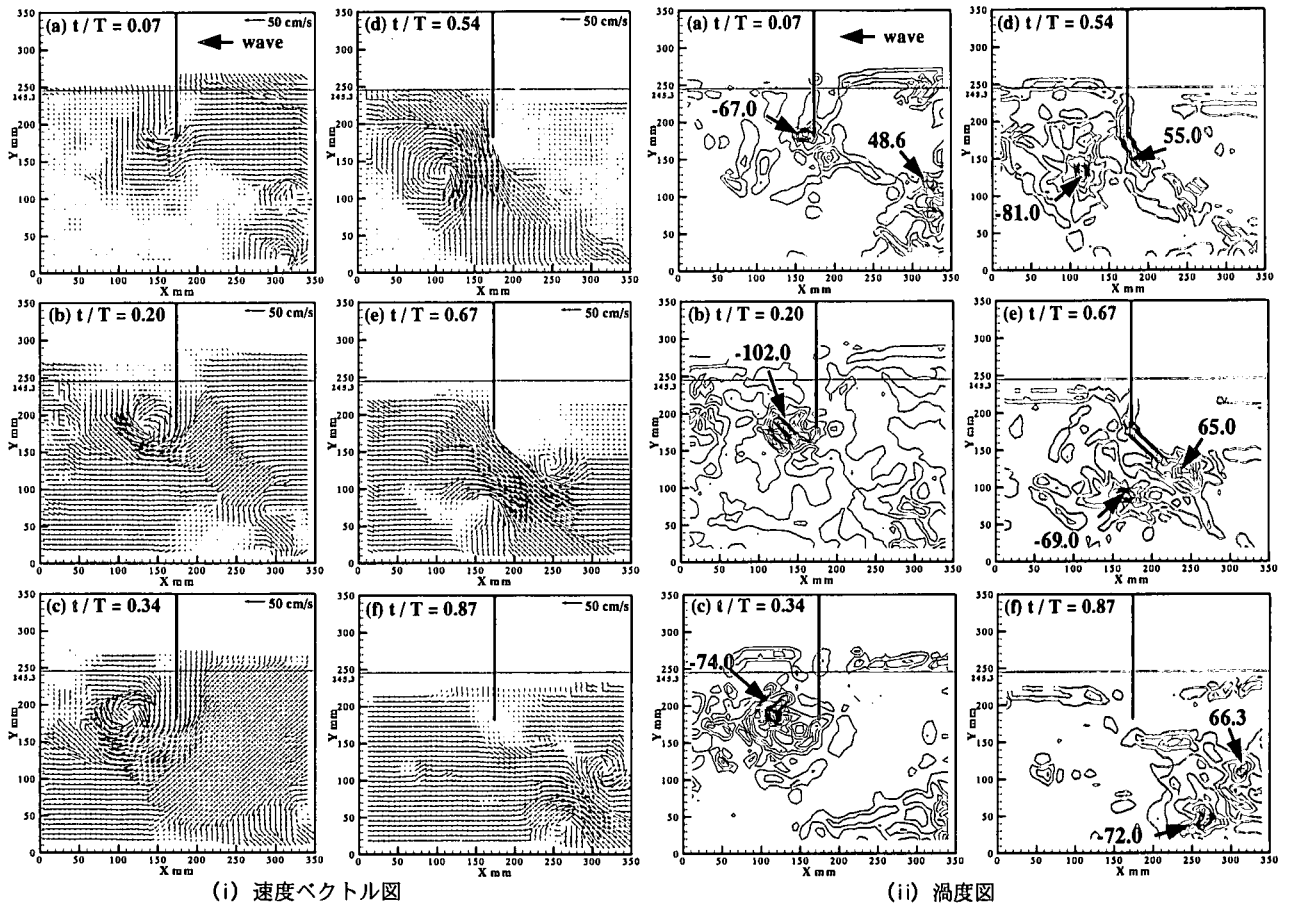


図-4 フェンススカート部周りの速度ベクトル場と渦度場の時間変化 ($d=6.5\text{cm}$, $H=6.5\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$)

(2) 喫水深 $d=18.5\text{cm}$ の場合

a) フェンス周りの反射波および透過波の特性

図-5に、喫水深 $d=18.5\text{cm}$ の場合に対するフェンス周りの反射波および透過波特性を示す。なお、喫水深が $d=18.5\text{cm}$ の場合、対象とする d/L の値の範囲は約 $0.018\sim 0.09$ となる。

図より、喫水深 6.5cm の場合と同様に、反射率および透過率ともに、波高水深比の違いに伴うそれぞれの値の変化は小さいことが分かる。ただし、 d/L が 0.03 を超える範囲では、反射率が 0.3 を上回り、 d/L の増加と共に反射率が増加する傾向が見られる。このとき、透過率は 0.9 を下まわり、 d/L の増加と共に透過率が減少している。喫水深が大きな場合、反射波が波動場に対して与える影響は無視できないことが分かる。

なお、喫水深 $d=18.5\text{cm}$ の場合の計測は、(1)で対象とした $d=6.5\text{cm}$ の場合に対して、喫水深の違いが流況特性の変化に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。その際、喫水深の値は、カーテン防波堤を対象とした既往の研究例⁹⁾で用いられている d/L 値を参考にし、 $d=18.5\text{cm}$ に定めた。

b) フェンススカート部周りの速度ベクトル場および渦度場の特性

図-6(i)に、入射波の波高が 7.6cm 、周期が 1.2s の場合に対する速度ベクトル場の時間変化を示す。この場合、 d/L は 0.092 であり、本研究で対象とした実験範囲において最大値となる。

図より、フェンス前面の水位がゼロアップクロスする $t/T=0.0$ において、既に反射側フェンス前面の側部において渦が形成されており、 $t/T=0.25$ に至る上向きの水位変動および以降における下向きの水位変動に対応して渦の位置が移動し、続く $t/T=0.5$ 以降の下向きの水位変動と共に、透過側へ渦は押し流されている。透過側では、フェンス前面の水位が下向き

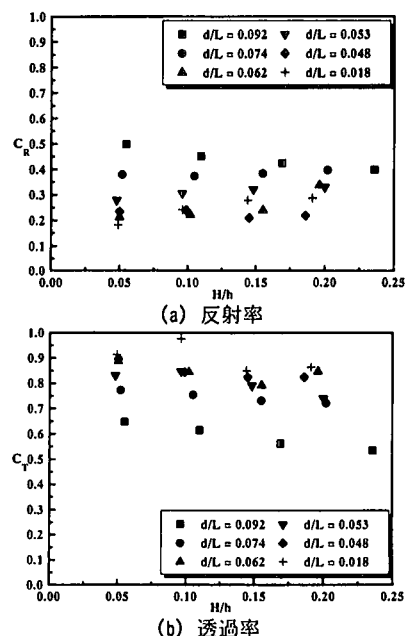


図-5 フェンス周りの波浪特性 ($d=18.5\text{cm}$)

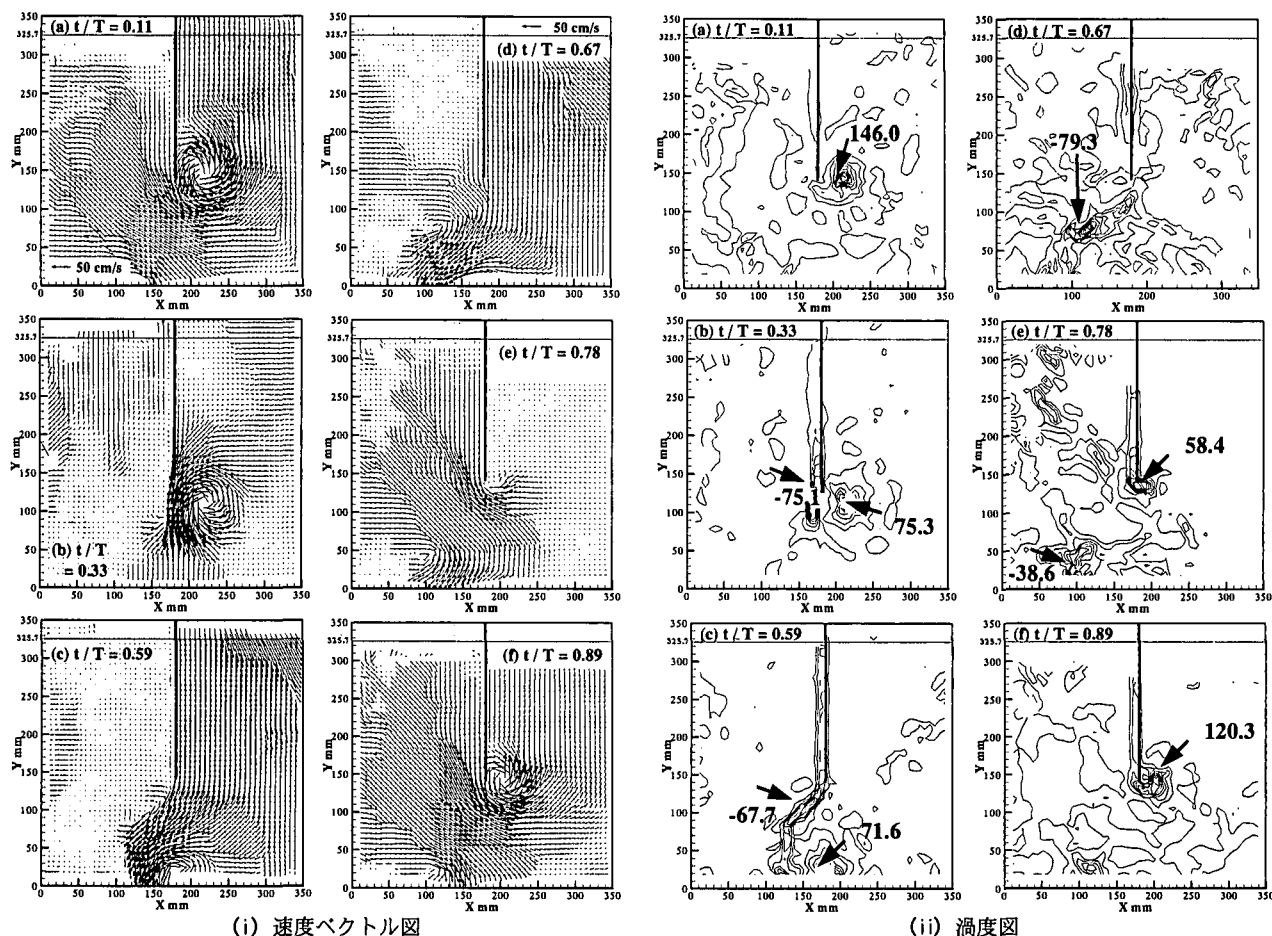


図-6 フェンススカート部周りの速度ベクトル場と渦度場の時間変化 ($d=18.5\text{cm}$, $H=7.6\text{cm}$, $T=1.2\text{s}$)

に転じる $t/T=0.25$ 以降にフェンス下端より渦が形成され始め、下向きの水位変動と共に透過側斜め下向きに渦が成長している。また、 $t/T=0.5$ 以降には、反射側で形成された渦と対をなして、フェンス斜め下方に成長していることが分かる。なお、反射側での渦の形成は、フェンス前面の水位が上向きに転じる $t/T=0.75$ 以降となっている。

透過側斜め下向きに渦対が成長する渦の形成過程は、喫水深 18.5cm かつ周期 1.2s の場合に特有な現象であった。この理由の一つとして、 d/L の増加に伴い反射率が増加し、反射側での流体運動が重複波の場合と同様な運動に近づくことが考えられる。なお、喫水深 6.5cm の場合に計測された、水表面付近における大きな渦径の形成は、反射側および透過側のどちらにおいても確認できなかった。

上述の図-6(i) で計測された速度ベクトル場から計算された渦度の時間変化を図-6(ii) に示す。図より、反射側で $t/T=0.75$ 以降にフェンス下端より形成された渦の渦度が $t/T=0.25$ 以降に透過側で形成された渦よりもその値が大きくなっていることが分かる。

図-7(i) に、図-6(i) に対して入射波が長周期となる、波高 6.5cm 、周期 2.0s の場合の速度ベクトル場の時間変化を示す。

この場合、渦の形成過程は喫水深が 6.5cm の場合と同様であり、透過側では $t/T=0.0$ 以降にフェンス後面側部で渦が成長し、反射側では、 $t/T=0.5$ 以降に、透過側で形成された渦と対をなして、フェンス下端

から斜め下方へ向かって渦が成長している。ただし、フェンス下端付近の水粒子速度が喫水深 6.5cm の場合に比べ大きくなっており、これに伴い透過側で形成される渦径が図-4(i) の場合と比較して大きく、さらに、反射側で形成される渦の位置は、図-4(i) の場合と比較してフェンス下端から離れ、より下方となっていることが分かる。この理由の一つとして、喫水深の増加に伴う遮蔽効果が考えられる。なお、喫水深 6.5cm の場合と同様に、反射側水表面付近における大きな渦の形成は確認できない。

上述の図-7(i) で計測された速度ベクトル場から計算された渦度の時間変化を図-7(ii) に示す。

図-4(ii) の場合と同様に、透過側で $t/T=0.0$ 以降にフェンス下端より形成された渦の渦度が $t/T=0.5$ 以降に反射側で形成される渦の渦度よりもその値が大きくなっている。また、 $t/T=0.0$ のゼロアップクロス以降に反射側水表面付近で渦度の増加は確認できない。

4. 結 論

本研究では、耐高波浪用オイルフェンスの開発に必要な不可欠となる、波によるオイルフェンス周りの流況特性の解明を目的とし、その第一段階として、剛な固定オイルフェンスを対象にPIVを用いた可視化実験を行い、特にフェンス下端より発生する剥離渦の挙動特性について考究した。以下に本研究で対象とした実験範囲により得られた結論をまとめる。

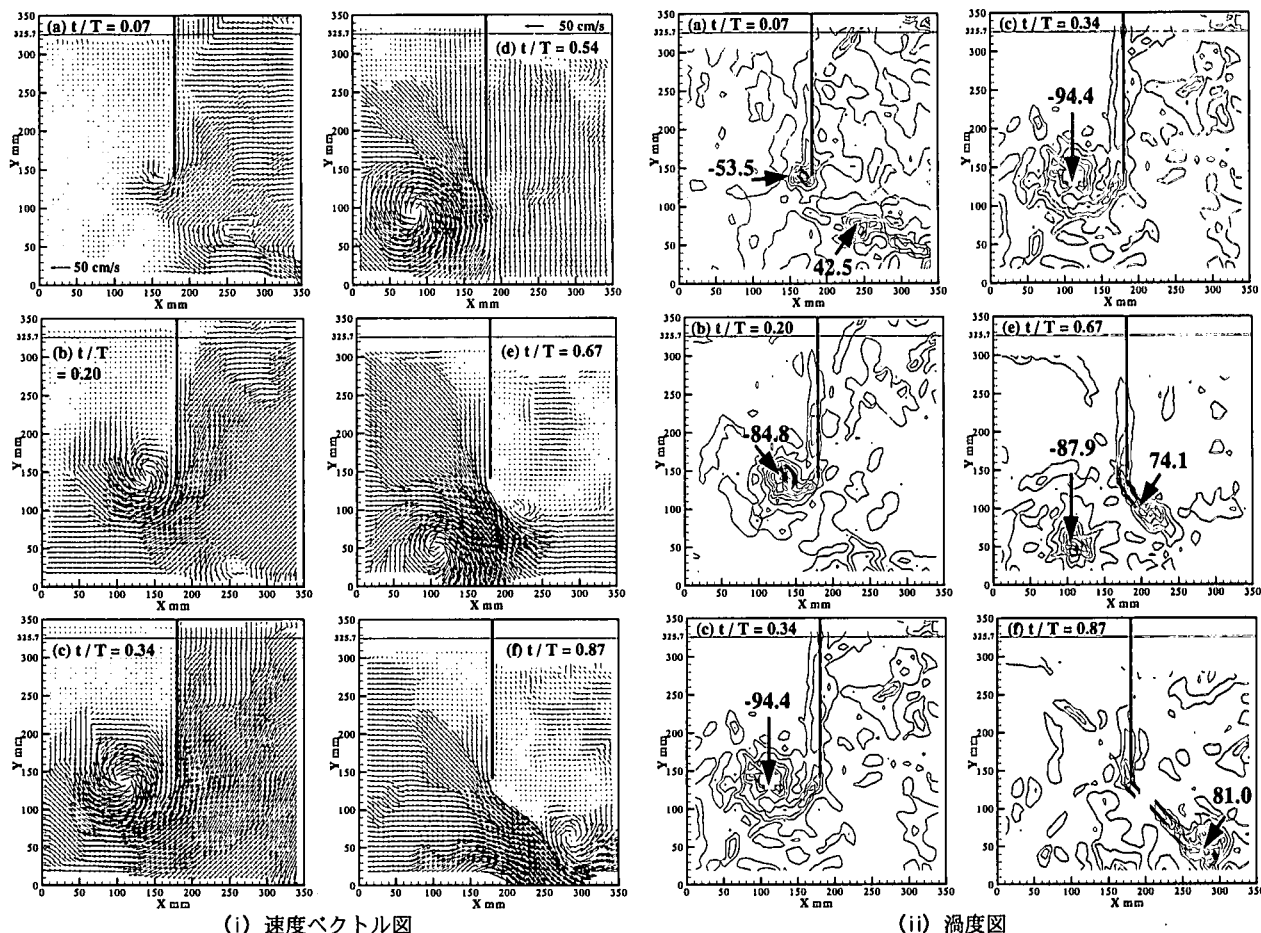


図-7 フェンススカート部周りの速度ベクトル場と渦度場の時間変化 ($d=18.5\text{cm}$, $H=6.5\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$)

フェンス周りの波浪特性として、波高水深比の変化に伴う反射率および透過率の変化は極めて小さいことが明らかになった。

フェンス下端より発生する剥離渦の代表的な形成過程として、1) 透過波側では、フェンス前面水位のゼロアップクロス時以降、フェンス側部において剥離渦が形成され成長すること、2) 反射波側では、フェンス前面水位のゼロダウンクロス時以降、フェンス下端斜め下方に剥離渦が形成され、透過側で形成された剥離渦と対をなして成長することが明らかになった。この場合、透過側で形成される剥離渦の渦径および渦度は、反射側で形成される剥離渦に比べ、渦径および渦度の値が大きくなる。

喫水深 $d=6.5\text{cm}$ で入射波が短周期の場合の特徴として、反射側に形成された剥離渦は、フェンス前面水位のゼロアップクロス時以降に、進行波の流速を伴い水表面付近において大きな渦径を再形成し、この際、渦度の値の変化はそれまでの減少傾向から増加に転じることが明らかになった。

謝辞：本研究を進めるにあたって、助力を惜しまなかった高浜雄作君（金沢大学大学院），および実験装置作成に当たりご協力頂いた金沢大学技術支援センター職員諸氏に謝意を表す。また、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（奨励研究A，課題番号11750453，代表者 斎藤武久）によること

を記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 石田 啓，斎藤武久，由比政年：ナホトカ号の日本海重油流出事故と今後の防御対策，海岸工学論文集，第45巻，pp.946 - 950, 1998.
- 2) 石田 啓，斎藤武久，由比政年：ナホトカ号C重油流出災害と日本海的环境回復，金沢大学日本海域研究所報告，第29巻，pp.13 - 32, 1998.
- 3) Robert Schulze edit. : *World Catalog of Oil Spill Response Product*, seventh edition, Port City Press Baltimore, Maryland, 1999.
- 4) Milgram, J. H. : Forces and motions of flexible floating barrier, *J. Hydronautics*, Vol. 5, No.2, pp.41 - 51, 1971.
- 5) 安 成模，榎木 亨，青木伸一，葛藤 満：波流れ共存場に設置されたオイルフェンスに発生する衝撃展張力及びフェンスの挙動，海岸工学論文集，第40巻，pp.921 - 925, 1993.
- 6) Adrian, R.J.: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annu.Rev.Fluid Mech.*, Vol.23, pp.261-304,1991.
- 7) 近藤五郎：排出油防除材について (I)-オイルフェンス，環境技術，Vol. 9, No.4, pp.26 - 31, 1980.
- 8) 月野良久：流出油防除資機材の現状と問題点，第16回海洋工学パネル，海洋工学連絡会，pp.30-127, 1997.
- 9) 中村孝幸，久保達郎，福島隆史：カーテン防波堤まわりのはく離流れと作用波力の特性について，海岸工学講演会論文集，第34巻，pp.556-560, 1987.