

波力発電所をケーススタディとした振動流下の生物付着について

A CASE STUDY ON SETTLEMENT OF SESSILE ORGANISMS UNDER OSCILLATING FLOW IN A WAVE-POWER STATION

野方靖行¹・森 信人²・坂口 勇³・石澤清史⁴・木村 弘⁵・小林雄一⁶

Yasuyuki NOGATA, Nobuhito MORI, Isamu SAKAGUCHI, Kiyofumi ISHIZAWA,
Hiroshi KIMURA and Yuichi KOBAYASHI

¹ 博 (農) (財) 電力中央研究所環境科学研究所 主任研究員 (〒 290-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

² 正会員 博 (工) 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 講師 (〒 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

³ 農博 (財) 電力中央研究所環境科学研究所 上席研究員 (〒 290-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

⁴ 東北電力株式会社研究開発センター 主幹研究員 (〒 981-0952 宮城県仙台市青葉区中山 7-2-1)

⁵ 東北電力株式会社研究開発センター 室長 (〒 981-0952 宮城県仙台市青葉区中山 7-2-1)

⁶ 東北電力株式会社研究開発センター 副所長 (〒 981-0952 宮城県仙台市青葉区中山 7-2-1)

A series of experiments for understanding settlement of sessile organisms inside of caisson at the wave-power station were conducted. The mean velocity and turbulent components in the caisson were measured by Particle Image Velocimetry (PIV). The effects of oscillating velocity and pressure of the flow on the settlement of barnacle cyprids were examined by the two different series of experiments. The experimental data shows both velocity and pressure oscillations inhibit significantly larval settlement of barnacle cyprids on the floor.

Key Words: barnacle cyprids, settlement, wave-power station, oscillating flow, oscillating pressure, turbulent flow, flow visualization

1. 目的

沿岸に立地する火力・原子力発電所の海水冷却水路系ではイガイやフジツボ類の幼生が水路壁面に付着し、そこで成長を始める¹⁾。これらの付着生物を、長期間放置すると成長し、水路系を閉塞して所定の流量が確保できず、しいては発電機能に支障を来すため、定期点検時に除去作業が行われる。このため、水路系への生物付着についての知見が求められ、管路における生物の付着限界流速^{1),2)}や乱れの影響^{3),4)}についての研究が行われてきた。その結果、フジツボ類の付着は壁面流速が1.2m/s以下で多く見られ¹⁾、壁近傍の乱れ強度とシアが付着初期に重要であること³⁾が明らかにされている。一方、除去作業で発生する除去量は多い上に産業廃棄物扱いとなることもあって、その処分には多くの発電所関係者が苦慮している。そのため、現行の防汚塗料や塩素注入などの対策に加えて、物理的要因や忌避物質などを利用し、付着生物の付着を未然に防止する方法について研究が進められている^{5),6)}。

最近、この付着生物の未然防止に関係しそうな興味深い現象が観察されている。東北電力株式会社の原町火力発電所では南防波堤で水弁集約式波力発電システ

ムの実証試験を行っていたが、そのシステムの空気室(以下ケーソンと略記)と水弁室内にはフジツボ類などの付着生物が見られないことが報告されている⁷⁾。原町波力ケーソン空気室と三瀬波力発電設備跡空気室で付着生物の実態調査を実施したところ、ケーソン内外において水中における動植物プランクトン密度が変わらないにもかかわらず、ケーソン外側では非常に多く見られたフジツボ、ムラサキイガイ等の付着が、ケーソン内部では殆ど見られなかった。この波力発電所ケーソン内で見られた生物付着の特異性の要因のとして、波浪の流体運動に伴いケーソン内に生じる圧力変動の影響が考えられる。さらに、一様流に関する知見から波動運動に伴う流速振動も生物付着を抑制する可能性があり、両者の影響を考える必要がある。しかし、付着生物に及ぼす物理環境の影響については管路など一様流における知見が殆どであり、波浪など往復振動流に対するものは非常に少ない。

そこで本研究では、波力発電所ケーソンの空気室をケーススタディとして、波浪による振動流と代表的な付着生物であるフジツボ類の付着との関係について明らかにする。まず始めに、波力発電所ケーソン内を模擬した水理模型実験を行い、ケーソン内の流動特性に

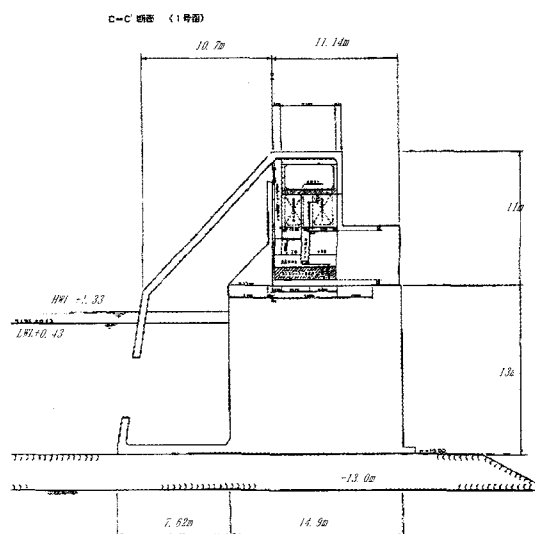


図-1 原町波力発電所のケーソンの鉛直断面図

についての把握を行う。ついで、フジツボを対象とし、波浪を模擬した振動圧力および振動流速下におけるフジツボ類の生物付着についての実験を行い、圧力変動および振動流速がフジツボの付着に与える影響を明らかにする。

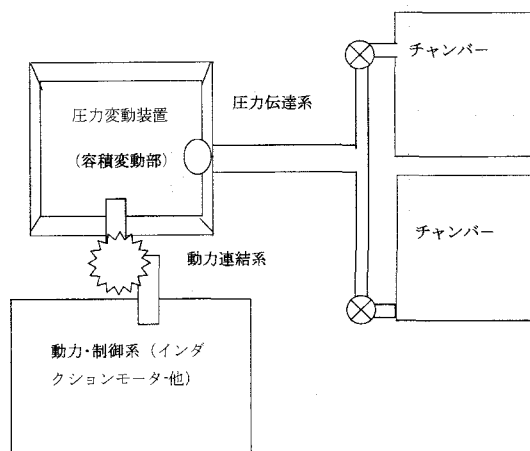
表-1 実験ケース一覧 (実機換算)

Case Number	$T[s]$	$H[m]$
1	10s	0.70m
2	10s	1.30m
3	10s	2.00m
4	8s	0.50m
5	8s	1.00m
6	8s	1.60m
7	8s	2.00m
8	7s	0.70m
9	7s	1.40m
10	7s	2.00m
11	7s	2.50m
12	5s	0.70m
13	5s	1.20m
14	5s	2.40m
15	5s	3.60m

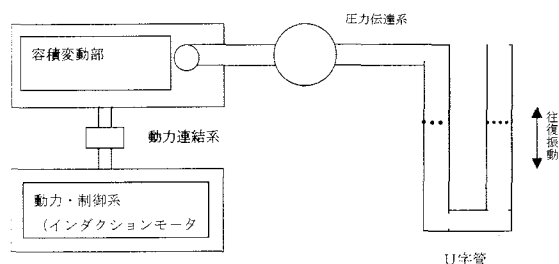
2. 実験の概略

(1) 水理模型実験

本研究では原町火力発電所における水弁集約式波力発電システムのケーソン内を想定して実験を行った。波



(a) 圧力変動実験の模式図



(b) 流速変動実験の模式図

図-2 付着生物実験の概要

力発電ケーソンは、水深 13.0m の地点において 3.0m の捨て石マウンド上に設置され、鉛直断面のほぼ中央部に約 50% の開口部があり、奥行き 9.4m、空気室を含む高さは 24.0m である (図-1)。

圧縮空気タービンを用いた波力発電所ケーソン内部の流動を推定するため、Froude 相似の仮定の下で 1/100 スケールの水理模型実験を行った。水理模型実験は、長さ 8.0m、幅 20cm、高さ 30cm の 3 面アクリル造波水路を用い、反射波吸収式造波機により規則波を造波し、入射波高と周期を変えながら合計 15 ケース行った。造波機から 5.0m の地点に図-1 を模擬したアクリル模型を設置し、ケーソン内の鉛直断面 2 次元平面流速については、ダブルパルス Yag レーザーとフレイムレート 30fps、解像度 1000×1000pixel の CCD カメラ (RedLake ES1.0) を使用して画像を収集し、PIV 法を用いた可視化実験により計測を行った。可視化実験は、中心粒径 40 μ m のアルミニウム粉末を用い、レーザーを水路底面より上方に照射し、得られた画像から階層的 PIV 法⁹⁾を用いて流速の推定を行った。以下では実機に換算した波高、周期および流速を用いて議論を進める。

(2) 生物付着実験

水理実験で得られたケーソン内の流速変動を入力条件に、波動による圧力変動および往復振動流が付着生物の付着に及ぼす影響について生物実験を行った。生物実験は図-2 に示すように圧力変動と流速変動を個別

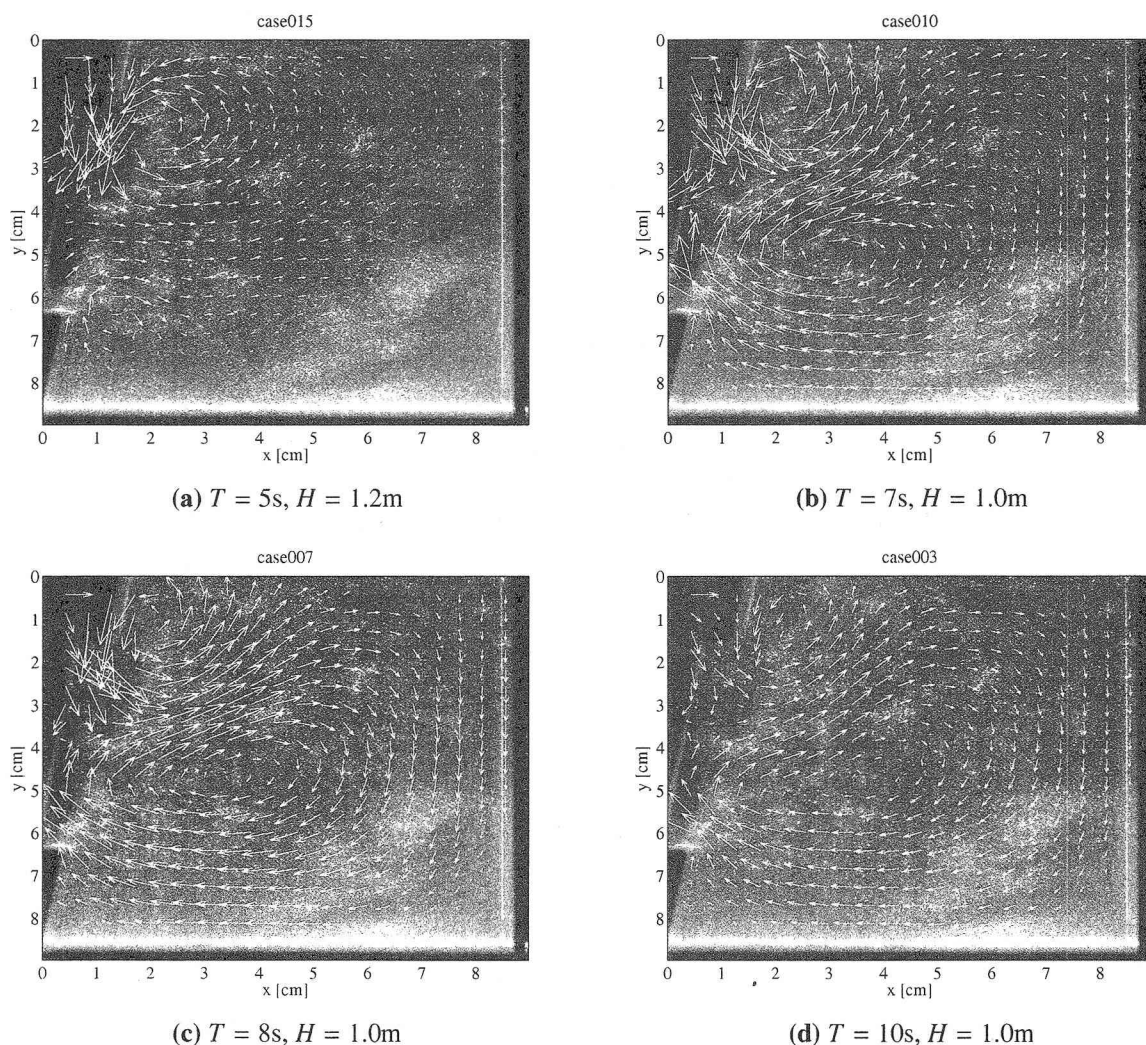


図-3 時間平均した流速分布

に取り扱い、ケーソン内における物理環境が付着生物に及ぼす影響について評価を行った。実験の供試材料には、実験室内での飼育方法が確立されており、世界的に実験動物として扱われているタテジマフジツボのキプリス幼生を用いた。一般に、タテジマフジツボは潮間帯の比較的波あたりが弱いところに生息している。

次節で詳細な説明を行うが、圧力変動装置を使った生物実験は、水理実験で壁面流速が最も大きかった周期近傍である6.7秒の周期で、 ± 0.1 および ± 0.2 気圧の圧力変動を発生させて行った。圧力変動は、図-2(a)に示すように圧力変動源として、モーターの回転をクランクを経て水平往復運動に変えて注射筒（複数並列配置）のピストンに伝え、シリンジ先端の開口部をアクリル製チューブでチャンバーと連結することにより発生させた。 ± 0.2 気圧試験については、48時間試験を4回、96時間試験を1回実施した。また、 ± 0.1 気圧試験は48時間試験を3回、96時間試験を2回実施した。実験は無処理区と圧力変動区に分けて行い、1試験当たりの試験区を2区（無処理区と圧力変動区）、1区当たり4個のピーカーを用い、キプリス幼生を15個

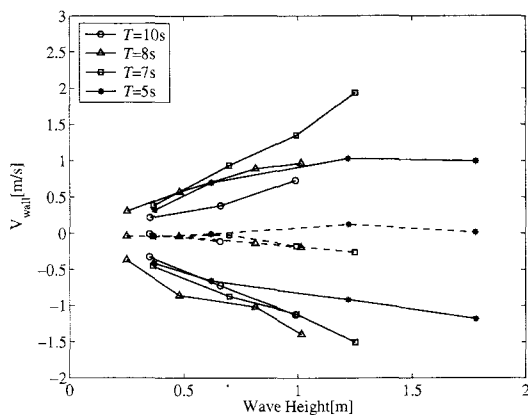
体入れたピーカーをチャンバー内に収容後に遮光して、ピーカーへの幼生の付着状況の観察を行い、両者の結果を比較した。付着率は、キプリス幼生が基質に付着している、もしくは付着後フジツボへと変態したものの割合として定義する。

フジツボ類の付着に及ぼす往復振動流の影響を調べるため、ガラス製U字管を用いた振動流発生装置を用いた実験を行った（図-2(b)）。振動流はインダクションモーターにより圧力差を作り、これを駆動力としてU字管に所定の周期と流速を得た。振動流内にも流速変動に伴う圧力変動が発生するが、発生する動圧は小さく無視する。実験はガラス製U字管内にキプリス幼生を200個体投入し、周期6.8秒の条件下で96時間試験を2回実施した。付着試験時の往復振動流の平均流速は31.8cm/s、最大流速は98.3cm/sであった。

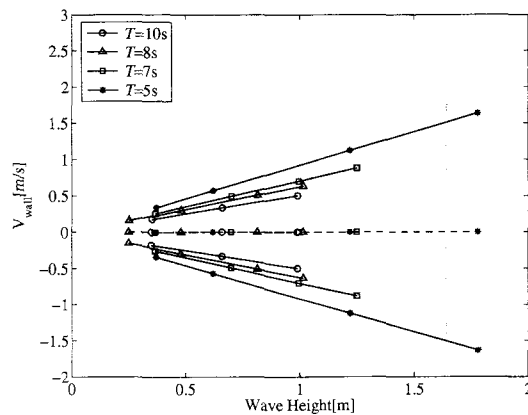
3. 結果と考察

(1) 水理模型実験結果

図-3は、計測した流速分布を時間方向に平均して得

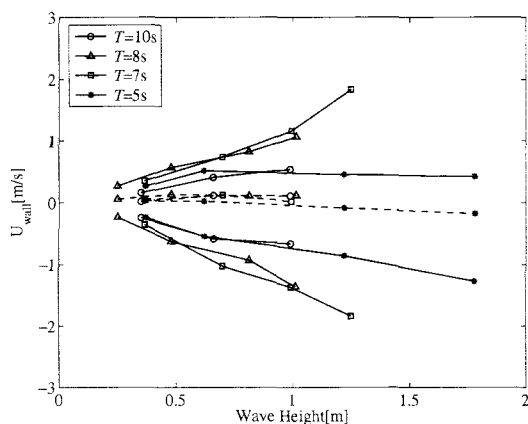


(a) 実験結果

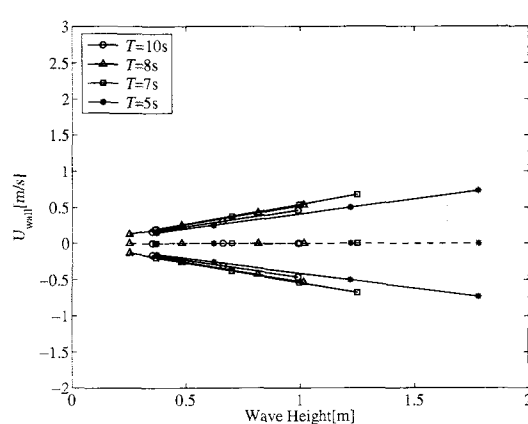


(b) 完全重複波

図-4 鉛直壁近傍における壁面に沿う流速の最大値



(a) 実験結果



(b) 完全重複波

図-5 水底近傍における水底に沿う流速の最大値

られた時間平均流速である。これより、 $T = 5\text{ s}$ の短周期の入射波では、入り口付近に渦が見られるが、周期が長くなるとケーソン内全体に時計回りの大きな循環が見られるようになることがわかる。時間平均流速場における大規模循環は、周期 $T = 8\text{ s}$ の場合がもっとも強く、 $T = 10\text{ s}$ ではやや弱くなり、これより周期が長くなると大規模な渦循環は見られず、単なる振動流に近い流況となった。また、各ケースにおける流速の鉛直方向成分の分布を調べたところ、ケーソン開口部の流入口(模型スケール $x = 10\text{ cm}$ 、実機換算 $x = 1\text{ m}$)では乱れが大きく、奥側の鉛直壁面では一様な流速分布が見られた。

付着生物の付着率には壁面近傍(キブリスの大きさに依存するが約 1 mm)流速が大きな影響を持つ¹⁾。取水路などの管路では、一様流であるため対数則が成り立ち、壁面流速が推定しやすいが、今回対象とする振動流では壁面に沿う流速分布が対数則を示しておらず、得られた流速分布から壁面流速や摩擦速度を推定することは非常に難しい。そこで以下では、計測した測点の中で最も壁面に近い測線を用いて壁面近傍の流速を代表

させることにする。まず始めに、実験で得られた壁面近傍流速の内、各ケースの鉛直壁および底面における最大値をピックアップし、入射波高と周期で分類を行った。図-4および図-5に示すのは、鉛直壁および底面に沿う壁面における最大流速と入射周期および波高の関係である。図-4より、鉛直壁に沿う流速は入射波高にほぼ比例する。この傾向は完全重複波とおなじであるが、周期依存性については両方で傾向が異なり、実験結果では $T = 7\text{ s}$ の結果がもっとも速く、 5 s では完全重複波より遅い。 $T = 5\text{ s}$ の結果より、短周期の入射波ではケーソン入り口で波高が減衰するが、 $T = 7\text{ s}$ ではケーソン内で大きな循環が生まれ流速が加速するためであると考えられる。図-5に示す底面に沿う流速についての実験結果と完全重複波の差は顕著であり、 $T = 7\text{ s}$ における底面流速の最大値は完全重複波の値を大きく上回る。さらに、完全重複波より得られる水平流速がほとんど周期に依存しないのに比べて、実験結果は明瞭な周期依存性があり、 $T = 5\text{ s}$ と 10 s の結果がほぼ同じ値を持つのと比較して、 7 s と 8 s のケースの流速は非常に速く、また波高の増加に対して単調増加の傾向が見ら

れる。紙面の関係上示さないが、ケーソン奥の鉛直壁近傍における鉛直壁に沿う方向の流速分布は、 $T = 10s$ のケースで微小振幅波理論の完全重複波とほぼ同じ分布を持ち、これより周期が短くなると実験値は完全重複波を上回り、 $T = 5s$ では再び完全重複波とほぼ同じ値を取るようになる。流速の最大値については、 $T = 7s$ の場合に水面近傍で約 $1.5m/s$ と最大値を取り、これより周期が前後すると実測流速は遅くなる傾向が見られた。一方、ケーソン内底面近傍における水底に沿う方向の流速分布には開口部で形成される渦の影響が顕著であった。このため、流速の最大値が開口部より $3\sim 4m$ の地点で生じており、これより開口部に近い場所とケーソン奥での流速はかなり遅くなっている。底面流速の最大値については、 $T = 7s$ の場合に水面近傍で約 $1.0m/s$ と最大値を取り、これより周期が前後すると実測流速は遅くなる傾向が見られた。

(2) 生物付着実験結果

生物付着に関する実験は、無処理区と圧力変動区に分けて実験を行い、両者の結果を比較した。図-6 に示すのは、フジツボ幼生に ± 0.1 気圧および ± 0.2 気圧の圧力変動を 48 時間かけた場合の付着率の平均値である。図より、タテジマフジツボの付着に対して圧力変動の影響は顕著に見られ、圧力変動が大きくなると付着抑制効果は明確に現れることがわかった。圧力変動が ± 0.1 気圧としたケースでは、圧力変動区の付着率は無処理区の半分程度である。さらに、 ± 0.2 気圧のケースでは、4 回行った 4 サンプルの無処理の場合の付着率が平均値で 35% 近いのに対し、圧力変動をかけた実験における付着率は 10% 以下に留まっていることがわかる。なお、96 時間試験では、若干変動幅が大きくなっているが、48 時間試験と同等にみなせる範囲にあった。以上の結果より、圧力変動はタテジマフジツボ幼生の付着に無視できない要因であり、6.7 秒の周期ではフジツボの付着は圧力依存的に抑制されると考えられた。

ついで、フジツボ類の付着に及ぼす往復振動流の影響を調べるため、ガラス製 U 字管を用いた振動流発生装置を用いた実験結果について議論を行う。図-7 に示すのは実験は周期は 6.8 秒、最大流速 $98cm/s$ の条件下で 96 時間振動流を起こした場合の結果である。いずれの実験においても、往復振動流区が無処理区に比べて付着率が有意なオーダーで小さくなっており、本実験の条件下では、往復振動流がタテジマフジツボキプリス幼生の付着や変態を抑制する効果が認められた。

(3) 現地観測結果との比較

最後に原町波力発電空気室内の生物付着状況について水中ロボットによる観測結果⁷⁾との比較を行う。ケーソンの外側で多数のイガイ類やワカメ等の生物の付着が見られたが、ケーソン内では、入口付近に部分的な生物の付着がみられるものの僅かであった。この結果をもとに水理模型実験で得られたケーソン内の高流速

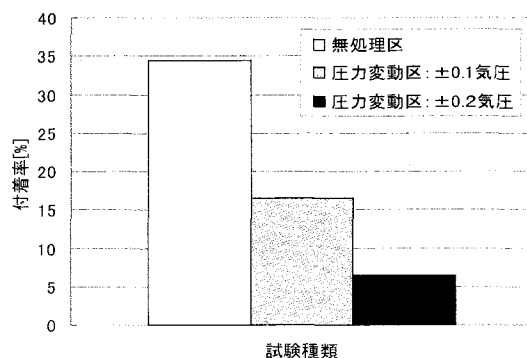


図-6 タテジマフジツボの付着率におよぼす圧力変動の影響

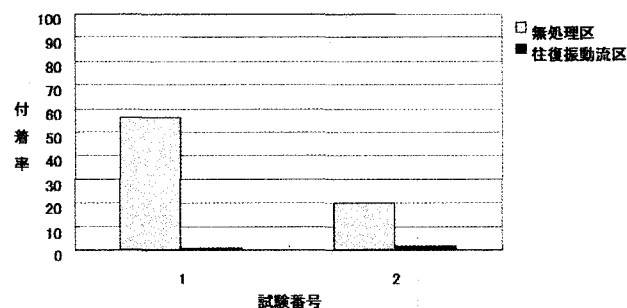


図-7 タテジマフジツボの付着率におよぼす往復振動流の影響

領域およびよどみ点と、実際の付着生物の状況をプロットしたものを図-8 に示す。図中のパッチは付着生物が観察された個所であり、長方形のグラデーションで示した領域が速い流速が計測された領域である。両者の比較より、ケーソン奥の隅角部で見られるよどみ点では付着生物が観察されていないものの、底面開口付近のよどみ点における付着状況は流況と一致していることがわかった。

4. まとめ

以上、波力発電所ケーソン内を対象に、付着生物の付着について水理実験および生物実験を行った。水理実験結果より、ケーソン壁面近傍の流速は入射波周期に大きく依存し、常時波浪に近い周期 $7s$ のケースでは、波高 $1m$ の場合に底面近くで $1.0m/s$ を越える流速が計測された。これは、完全重複波で予測される値の 2 倍を超えるものであり、ケーソン内の底面流速は外海よりかなり早いものと推測された。また、タテジマフジツボ幼生を用いた生物実験結果より、フジツボの付着に

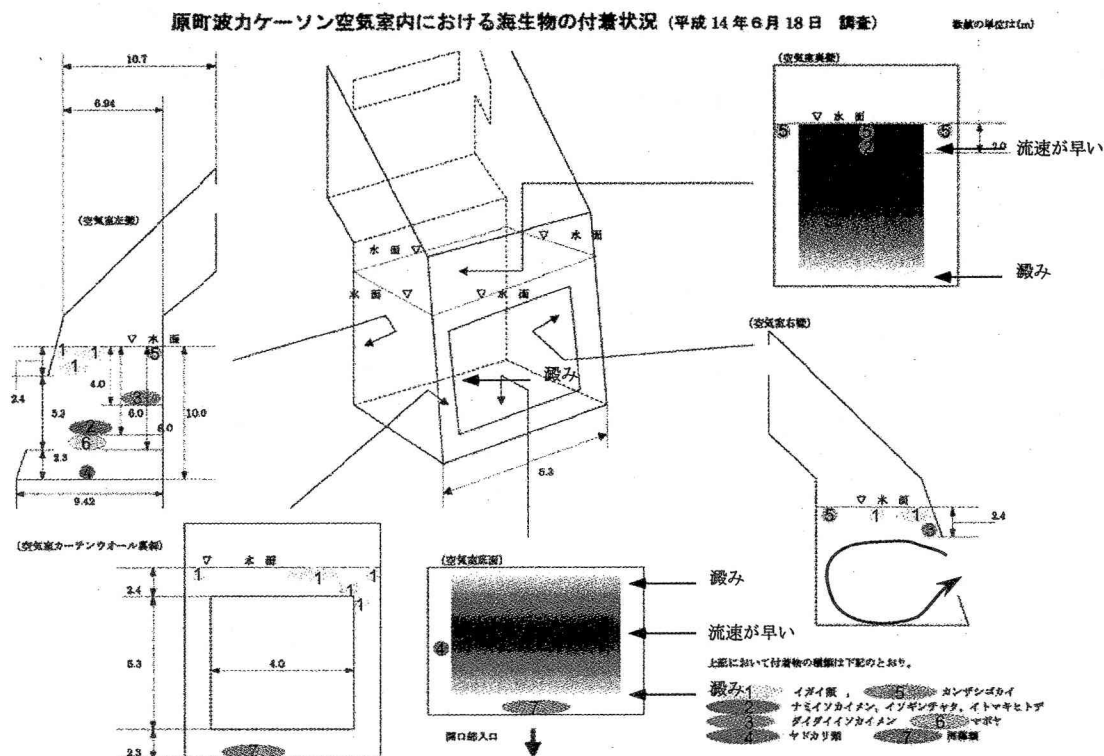


図-8 流況と付着生物分布の関係

対する圧力変動と往復振動流の影響は顕著であり、振動流がタテジマフジツボキブリス幼生の付着や変態を抑制する効果が認められた。ついで、水理実験により計測されたケーソン内の高流速領域とよどみ点の位置を現地の付着生物の状況と比較した結果、実験で高い流速が計測された領域では付着生物が見られなかった。さらに、開口部底面付近における付着状況も水理実験でられたよどみ点と一致していることがわかった。

生物付着に関する限界振動流流速、付着対象物質の材質、フィールド試験については今後の課題であり、順次実施して行きたい。

参考文献

- 1) 坂口勇, 青木敬雄, 福原華一, 安井勝美: 海水管内の流速と汚損生物付着との関係, 化学工学, 47(5), pp.316-318, 1983.
- 2) Crisp, D.J.: The behavior of barnacle cyprides in relation to water movement over a surface, *Journal of Experimental Biology*, 32, pp.569-590, 1995.
- 3) Eckman, J.E. and D. O. Duggins: Larval settlement in turbulent pipe flows, *Journal of Marine Research*, 56, pp.1285-1312, 1998.
- 4) Thomason, J.C., J.M. Hills, A.S.Clare, A.Neville and M. Richardson: Hydrodynamic consequences of barnacle colonization, *Hydrobiologia*, 375/376, pp.191-201, 1998.
- 5) Rittschof, D., R.B. Forward Jr, G. Cannon, J.M. Welch, M.

McClary Jr, E.R. Holm, A.S. Clare, S. Conova, L.M. McKelvey, P. Bryan and C.L. Van Dover: Cues and context: Larval responses to physical and chemical cues, *Biofouling*, 12, pp.31-41, 1998.

- 6) 野方靖行: 防汚剤, 海洋生物成分の利用, 伏谷伸宏監修, シーエムシー出版, pp.290-297, 2004.
- 7) 石澤清史, 木村 弘, 小林雄一, 坂口 勇, 森 信人, 野方靖行: 波力発電設備における海生物付着阻害要因の新たな知見状況, 第 23 回エネルギー・資源学会研究発表会, 2004.
- 8) 野方靖行, 新島恭二, 吉村えり奈, 佐藤 宏, 石澤清史, 木村 弘, 小林雄一, 坂口 勇: 周期的な圧力変動下におけるタテジマフジツボ幼生の付着状況について, 2005 年研究集会, 日本付着生物学会, 2005.
- 9) Mori, N. and K.A. Chang: Introduction to mpiv, <http://sauron.urban.eng.osaka-cu.ac.jp/mori/software/mpiv/>, 2004.