

波浪エネルギーを利用した水質浄化 施設周辺の流れに関する研究

STUDY ON FLOW AROUND WATER QUALITY PURIFICATION FACILITIES USING WAVE ENERGY

押村嘉人¹・岡本壮平²・黒岩正光³・松原雄平⁴・永瀬恭一⁵・島多義彦⁶
Yoshihito OSHIMURA, Sohei OKAMOTO, Masamitsu KUROIWA, Yuhei MATSUBARA,
Kyouichi NAGASE and Yoshihiko SHIMADA

¹正会員 (株) フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

²学生会員 鳥取大学大学院 工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 博(工) 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

⁴正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

⁵正会員 博(工) (株) フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

⁶正会員 (株) フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

Various technologies are developed about the improvement of seawater property in the closed water such as the inner bay and lakes and marshes. The seawater exchange tends to stagnate in the closed water because flow is small. Therefore, even if the effective technology to the improvement of seawater property is set up, the effect becomes limited. Then, flow is caused by using the energy of the small-scale wind waves generated in the closed water, and it proposes effective use of the water quality purification facilities. Additionally, the hydraulic model experiment and the numerical simulation of the facilities are executed, and the effectiveness is confirmed.

Key Words : Water quality purification facilities, Waves energy, 3D numerical simulation

1. はじめに

内湾や湖沼など閉鎖性水域の水質確保について、様々な技術が開発されている。一般にこのような水域では、流動が小さく海水交換も滞りがちであり、浄化に有効な技術を投入しても効果が限定的になりやすい。そこで、閉鎖性水域で発生する小規模な風波のエネルギーを活用して、計画時に流動を誘発し、水質浄化施設を効果的に活用する技術を提案する。水質浄化技術としては、カキ殻フィルターを用いる。本技術は、水産業から排出されるリサイクル材を用いた技術で、カキ殻に付着する微生物等により有機物を分解し、フィルターによる物理的濾過・沈降作用により浮遊懸濁物質を効率よく除去するなどの水質浄化機能が確認されている¹⁾。この浄化施設について、水理模型実験ならびに数値解析を実施して、水質浄化機能を向上させるために、波浪エネルギーを活用する技術の有効性を確認した。

2. 水質浄化方法

(1) 浄化施設の概要

閉鎖性水域では、一般的に波浪は小さく、潮汐以外の大きな流動はみられない。開発した施設に十二分な浄化能力があったとしても、貯留水の流動が少なく浄化された水が滞留したままで汚濁した水との交換がなければ、その機能を十分に発揮できない。本来の浄化能力を活用するには、施設外の汚濁した水を何らかの形で供給してやらなければならない。

地上の浄化施設を想定すると、浄化能力に見合った汚濁水をポンプで供給することでその能力を活用している。しかし、広域な水域の中央部に浄化施設を設置して、電力などのエネルギーを与え強制的に流れを発生させることはコストや環境面などから困難である。そこで、波のエネルギーを利用して汚濁した水を施設に継続的に供給して、カキ殻フィルターを通過させることによって、半強制的に浄化機能を確保する方法を検討する。

(2) 浄化施設の構造

人工リーフ上での海水流動性を参考(海岸施設設計便覧²⁾)に、図-1, 2のような構造物を提案する。貯留水交換のメカニズムは以下のとおりである。

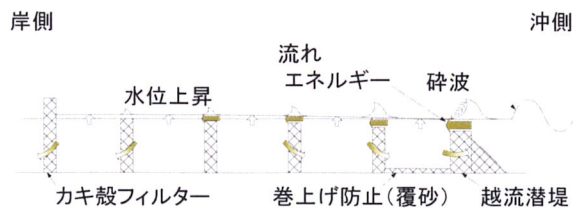


図-1 水質浄化施設

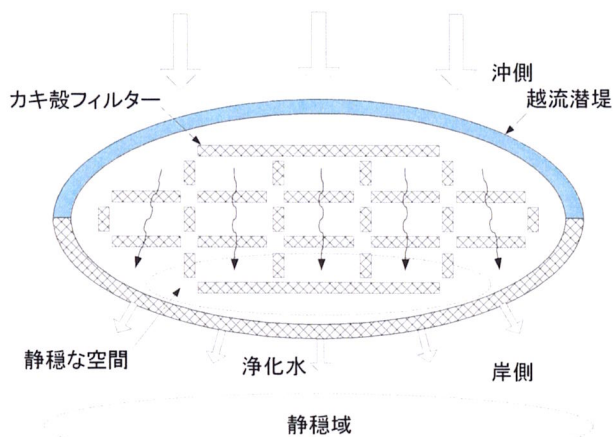


図-2 施設の流動概念図

- ①カキ殻フィルターの天端を水面より少し低くして、波浪を天端上で強制的に砕波させる。沖側から岸側に向かい天端水深を順次小さくして波高が減衰しても連続的に砕波を発生させるとともに、入射波浪が小さい場合や水位低下時の機能を確保する。
- ②砕波によって潜堤上では岸向きの流れが発生し水位が上昇する。
- ③上昇した水位と施設外の水位差によりカキ殻フィルターを浸透する流れを発生させ、浄化機能を活用して水質浄化を図る。浄化された水は、外縁のカキ殻フィルターから水域に排出される。
- ④施設内は、静穏であり、浮遊懸濁物質の沈降効果が期待できる。
- ⑤施設全体の消波機能が期待でき、水域全体の静穏度の向上に活用することができる。

3. 水理模型実験

(1) 実験方法

浄化施設周辺の水理現象を確認するため、水理模型実験を行った。図-3 に、実験の概要図を示す。平面水槽は、長さ 7m×幅 3m で、図の右側に造波機が設置されている。左端部には、造波機から発生された波浪が端部で反射しないように消波工が設置されている。模型の縮尺は 1/5.4 で、フルードの相似則に従っている。カキ殻フィルターの天端部における水深は、沖側で 0.05m、岸側で 0.04m となるように設置して、フィルター幅は沖側 0.4m、岸側 0.2m とし、両者の間隔は 1.8m とした（写真-1）。

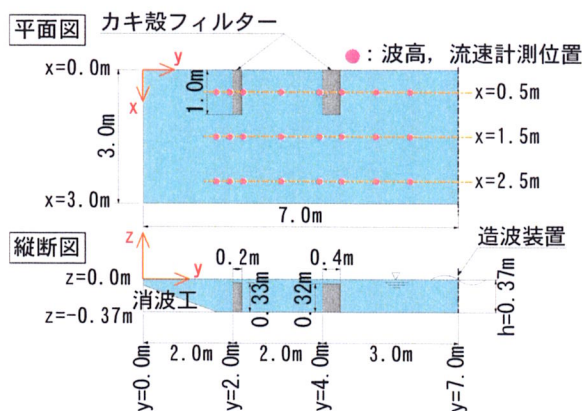


図-3 実験の概要



写真-1 実験状況

表-1 波浪条件

現地スケール			模型スケール ($\lambda=1/5.4$)		
h (m)	H (m)	T (s)	h (m)	H (m)	T (s)
2.0	0.5	2.5	0.37	0.09	1.00

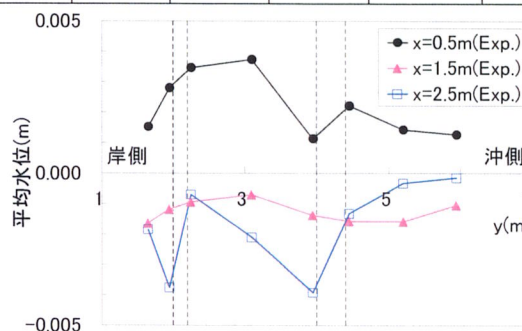


図-4 平均水位（実験結果）

実験時には、図-3 に示す $x=0.5\text{m}$, 1.5m , 2.5m 測線に容量式波高計および 3 成分超音波ドップラー流速計を配置し、水位および流速を調べた。計測時間は流れが安定した時点から 60 秒間とし、サンプリング周波数は 20Hz である。

波浪条件は、 $h=2\text{m}$ 、吹送距離 $F=4\text{km}$ 、風速 $8\sim 10\text{m}$ と仮定し、風波の予知曲線から表-1 に示すとおりとした。水質悪化が生じるような閉鎖性水域で 0.5m の波高が継続的に出現することは低頻度であると考えられるが、浄化施設周辺の流動を明確にするため、大きな波高を与えた。

(2) 実験結果

図-4 に、 $x=0.5$, 1.5 , 2.5m の測線で計測した平

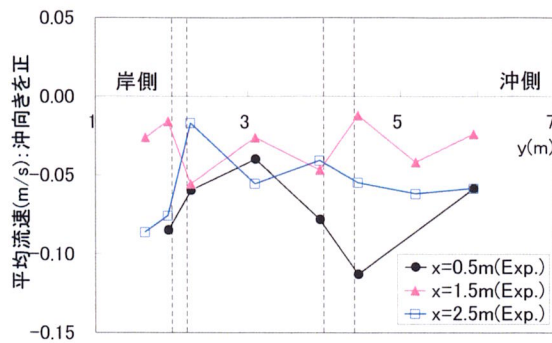


図-5 岸沖方向平均流速（実験結果）

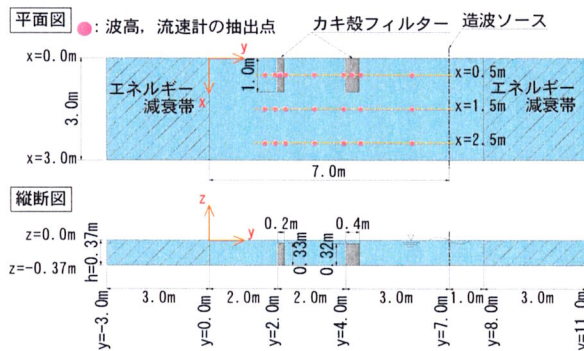


図-6 計算モデル

均水位を示す。図中の破線はカキ殻フィルターの位置を示している。x=0.5m では平均水位が上昇し、x=1.5, 2.5m では減少している、カキ殻フィルター側の平均水位が上昇している様子が確認できる。

図-5 は水位と同じ測線で計測した表層付近 ($z=-0.05\text{m}$) における岸沖方向の平均流速を示している。全測点で岸向き ($-y$ 方向) の平均流速となっているが、特に、沖側のフィルター部分で岸向き流速が 0.12m/s と大きく、碎波により岸向きの流れが発生していることが確認できる。

4. 模型実験の再現計算

(1) 数値波動水槽

a) 解析概要

模型実験を再現するため、功刀³⁾が開発した MARS (Multi interface Advection and Reconstruction Solver) 法を組み込んだ流体直接解析法を基にした数値波動水槽を用い、透水性を考慮したカキ殻フィルター周辺の状況を解析した。この解析手法では、気液二相流の解析が可能で、水面形や波圧が精度良く解析できる⁴⁾。

図-6 に計算モデルを示す。解析領域は、平面図に示すとおり浄化施設構造物の 1/2 領域のみとし、側方境界を Free-Slip (鏡面境界) とした。波浪は、造波ソースより入射させ、領域の両端にはエネルギー減衰帯を設置し、波浪が解析領域境界で反射するのを防止した⁵⁾。カキ殻フィルター部分で発生する浸透流は、Dupuit-Forchheimer 則を用い、直径 5cm の礫材と同等の圧力損失を付加した。

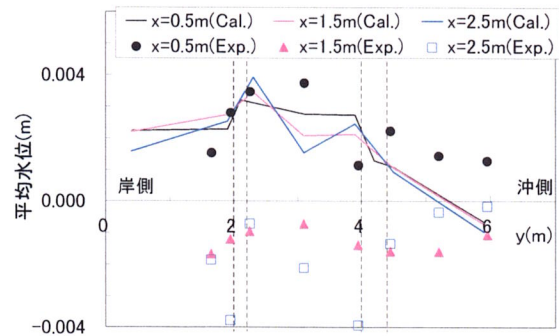


図-7 平均水位（数値波動水槽）

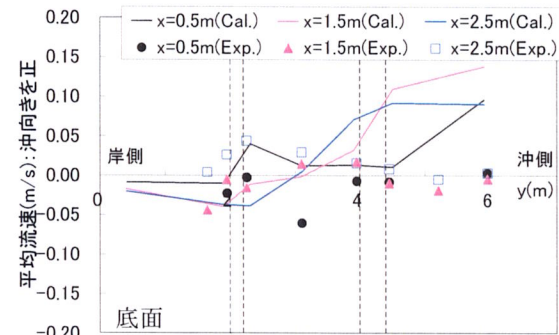
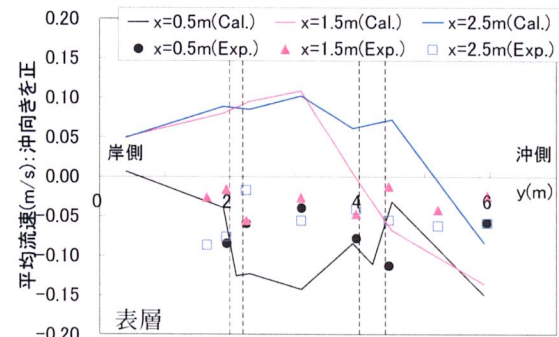


図-8 岸沖方向平均流速（数値波動水槽）

計算条件は、表-1 に示す波浪条件を模型スケールとして与えた。波高、流速の時系列データは、図-6 に示す x=0.5, 1.5, 2.5m 測線で抽出した。

b) 解析結果

図-7 に、x=0.5, 1.5, 2.5m における平均水位を示す。図中には実験結果もあわせて示している。全測線ともに、沖側カキ殻フィルター前面で数 mm 程度平均水位が上昇し、通過後もさらに上昇し、岸側フィルター通過後はやや減少している。カキ殻フィルターに挟まれた範囲での水位上昇がみられ、x=0.5m では、実験値との整合性が高い。他の測点では実験値が小さくなっているが、いずれもわずかな変動であり、境界条件等の影響が大きいと考えられる。

図-8 に、表層 ($z=-0.05\text{m}$) および底面 ($z=-0.33\text{m}$) における同測線での岸沖方向の平均流速を示す。また、図-9 は、解析時間 $t=55\sim 60\text{s}$ 間 (5 周期分) の平均流速ベクトルを示したものである。これらの図から、表層においては、x=0.5m で、岸向きの流れが発生し、フィルター間では 0.15m/s と大きな流速がみられ、実験値と比較するとフィルター中央部で

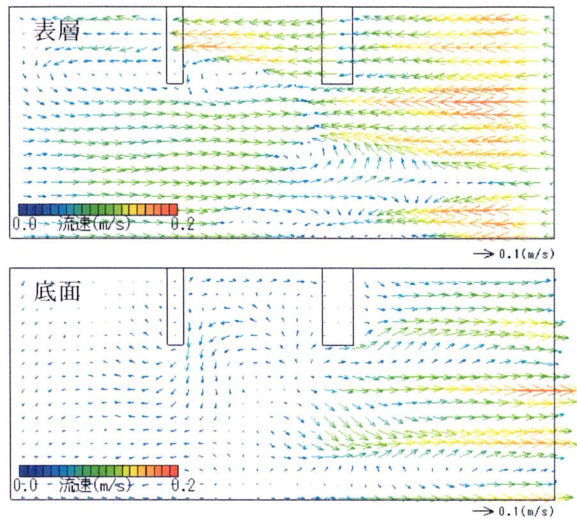


図-9 流速ベクトル（数値波動水槽）

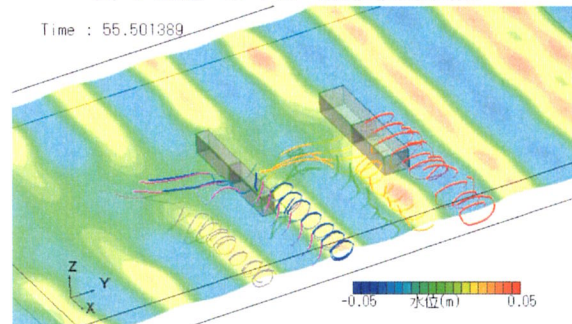


図-10 解析結果

の流速が大きい。x=1.5, 2.5m の表層では、フィルターから岸側の範囲(y=0.0~4.0m)で冲向きの流れとなり、沖側(y=6.0m)では岸向き流れとなっている。底面については、沖側では冲向きの流れで、フィルター間でも、冲向きに0.01~0.04m/sの流速が見られ、岸側フィルター通過後は0.01m/s程度で岸向きに流れる。以上のように、フィルター部の表層付近で碎波により岸向きの流れが発生し、岸側フィルター通過後、岸向きから冲向きの流れに推移しフィルター外を流れ、沖側では下層部を冲向きに流れるような循環流が再現されている。

図-10は、カキ殻フィルター周辺において粒子追跡法によって求めた流線と水位コンターである。フィルター外では波動による水粒子の楕円運動の軌跡が再現されている。また、フィルター部では碎波による岸向きの流れが再現されていて、透水性を考慮したカキ殻フィルター周辺の流動を詳細に確認できる。

(2) 海浜流モデル

a) 解析概要

ここでは、多方向性と構造物による回折波を考慮できる間瀬ら⁶⁾のエネルギー平衡方程式を用いて波浪場について算定し、次に、海浜流場について準3次元海浜流モデル^{7), 8)}を用いて計算を行った。

カキ殻フィルター部分は、構造物を設定し水深を浅くして波浪場を計算し、海浜流の計算では水深を

表-2 C_D , C_M , γ_h , γ_v

case	C_D	C_M	γ_h	γ_v
1	0.5	0.5	0.4	0.4
2	1.0	1.0	0.4	0.4

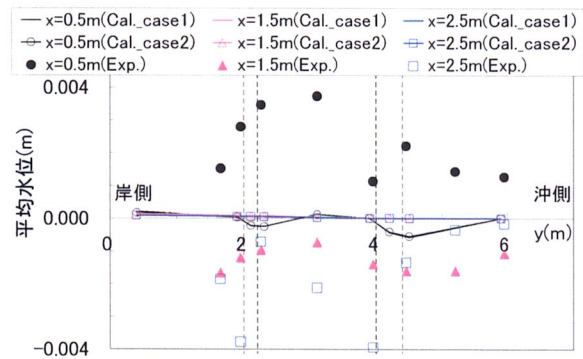


図-11 平均水位（海浜流モデル）

一定として、フィルターがある部分でボーラスモデル⁹⁾を適用した。運動方程式をUについてのみ示せば、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \lambda \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial \lambda_x U}{\partial x} + V \frac{\partial \lambda_y U}{\partial y} + W \frac{\partial \lambda_z U}{\partial z} \\ &= -g \gamma_x \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} - \gamma_x \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} - \gamma_y \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x v_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_y v_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z v_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) - R_x \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\zeta}$ ：平均水位、 v_h , v_v ：水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数、 γ_x , γ_y , γ_z ：x, y, z 方向の面積透過率（ $=\gamma_h$ とする）、 R_{xx} , R_{xy} ：波の存在による過剰運動量フラックス項であり、 γ_v ：空隙率、 C_M ：慣性力係数とすると、

$$\lambda = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \quad (2)$$

$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \gamma_h + (1 - \gamma_h) C_M$$

である。また、 C_D ：抵抗係数とすると、抵抗力 R_x は次のようになる。

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_h) U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (3)$$

計算領域は、図-6に示す範囲のうちエネルギー減衰帯を除いた範囲とし、表-1に示す模型スケールの波浪条件を与えた。計算格子間隔は、 $\Delta x = \Delta y = 0.1m$ 、水深方向の分割数は5とした。また、海浜流計算における C_D , C_M , γ_h および γ_v は、表-2に示すとおりとし、 C_D , C_M を変化させて2ケース実施した。

b) 解析結果

図-11に、x=0.5, 1.5, 2.5mにおける平均水位を、実験結果をあわせて示す。case1, 2ともに、x=1.5, 2.5mではほとんど水位の変動が見られず、x=0.5mでは微量ではあるが沖側および岸側カキ殻フィルターの前面で水位が減少し、フィルター通過後は $z=0m$ となっている。

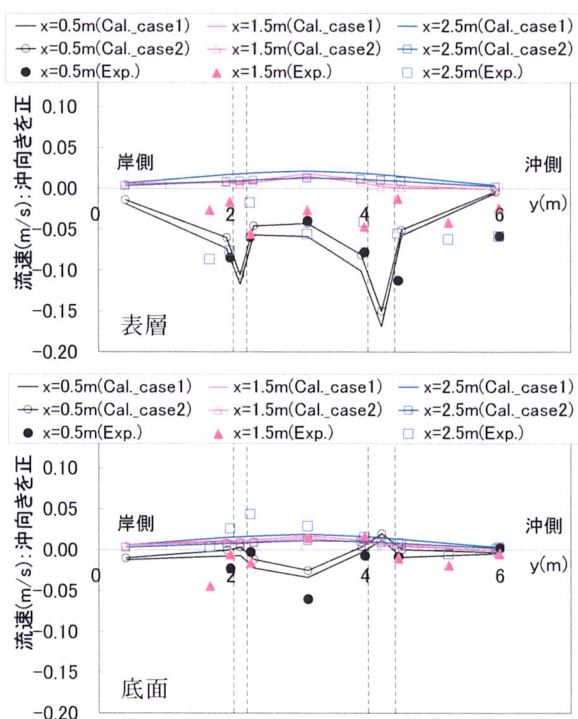


図-12 岸沖方向海浜流速

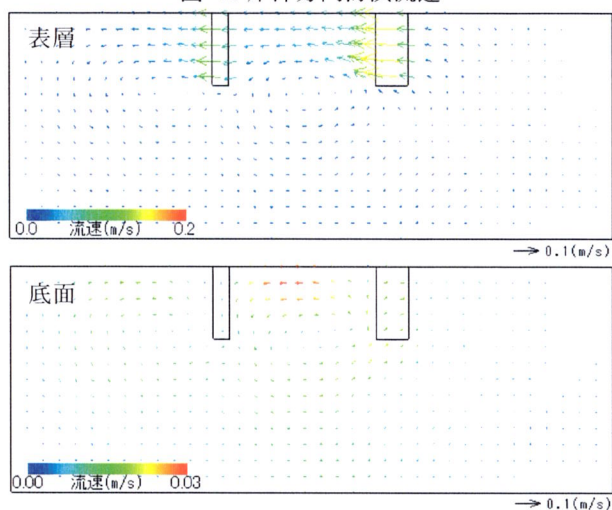


図-13 海浜流速ベクトル(case2)

図-12 に、表層および底面における同測線での岸沖方向海浜流速を示す。また、図-13 に、case2 の海浜流速ベクトルを示す。これらの図から、 $x=0.5\text{m}$ では、フィルター間で、表層、底面ともに岸向きの流速が増加し、特に、表層フィルター部では砕波による流速の増加が再現されていて、実験値との整合性も良好である。case1, 2 を比較すると、 C_D 、 C_M が大きい case2 の方が、岸向き流速が小さく、実験結果に近い値が得られた。一方、 $x=1.5\text{m}$ 、 2.5m では、表層、底面とも 0.01m/s 程度の沖向き流速となる。図-9 と比較すると、フィルター外での流速が小さいが、フィルターを循環する流れが再現できている。

(3) 考察

カキ殻フィルターを用いた水質浄化施設周辺の状

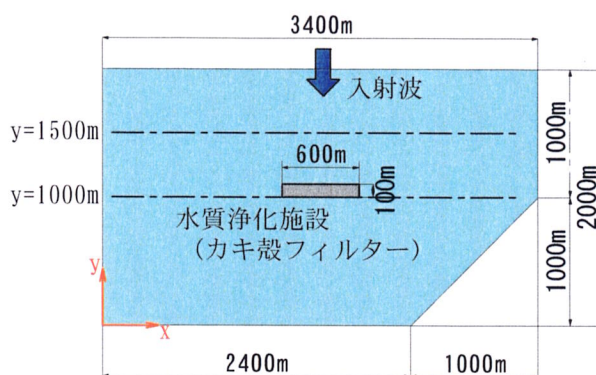


図-14 計算領域

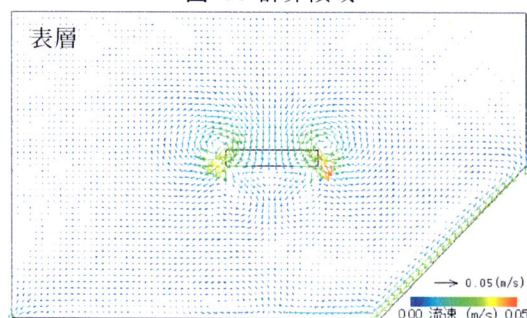


図-15 海浜流速ベクトル

況を解析し、砕波による岸向きの流れや radiation stress の影響により、カキ殻フィルターを浸透する流れや浄化施設へ水を取り込むような循環流を促進できることが確認できた。また、数値波動水槽、海浜流モデルとともに、フィルター付近の流速については水理模型実験との整合性が高く、透過性を考慮した構造物周辺の計算が再現できる。

5. 実水域への適用

(1) 海浜流モデル

a) 解析概要

ここでは、実水域規模の水域にカキ殻フィルターを設置した場合について、流動予測の適用性を確認するための検討を行う。広域を計算領域とするため、計算機能力の問題などから、海浜流モデルのみで計算を試みた。

計算領域は、図-14 に示すような閉鎖性水域を想定し、水域の中央部にカキ殻フィルターを設定した。カキ殻フィルターは岸沖方向に 100m 、沿岸方向に 600m とし、フィルター天端部の水深は 0.5m とした。計算格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 20\text{m}$ で、水深方向の分割数は 5 とし、表-1 に示した現地スケールの波浪条件を用いた。また、海浜流計算における各係数は、4 章の結果から、 $C_D = C_M = 1.0$ 、 $\gamma_h = \gamma_v = 0.4$ と設定した。

b) 解析結果

図-15 に、表層における海浜流速ベクトルを示す。カキ殻フィルター部で流速が増加し、フィルター通過後は施設の両端部を中心とした循環流が見られる。

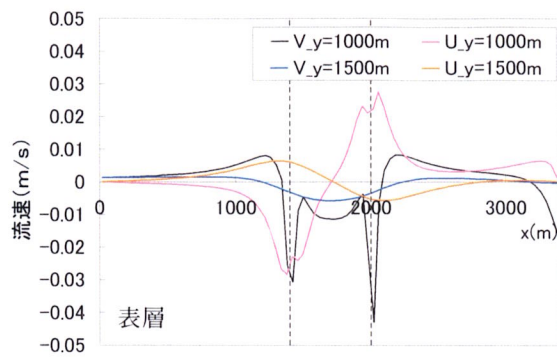


図-16 海浜流速

y=1000, 1500m における表層の海浜流速分布を図-16 に示す。y 方向流速 V については、破線で示したカキ殻フィルター部では流速が増加している。また、フィルター外側では冲向き流速となる。一方、x 方向流速 U は、y=1000m ではフィルターから外側へ向かう流れとなり、y=1500m ではフィルターへ向かう流れとなる。このように、水域全体でフィルターを通過する循環流が促進されている。

(2) 3次元潮汐流シミュレーションモデル

a) 解析概要

次に、黒岩ら¹⁰⁾の3次元潮汐流シミュレーションモデルを用いて、透過性構造物を考慮した場合の潮汐流について計算を行った。フィルター部の計算には、海浜流モデルと同様に、ポーラスモデルを適用した。

計算条件は、図-14 に示す入射境界に振幅 0.5m、 $T=12\text{hour}$ の潮汐波を設定した。計算格子間隔は、 $\Delta x = \Delta y = 40\text{m}$ 、水深方向の分割数は 5 とした。また、抵抗係数、慣性力係数および空隙率は、 $C_D = 20.0$ 、 $C_M = 2.0$ 、 $\gamma_h = \gamma_v = 0.4$ と設定した。

b) 解析結果

図-17 に、上げ潮最強時の断面平均流速ベクトルを示す。カキ殻フィルター部で流速が減少している様子が再現されている。ここでは、フィルターの影響による潮汐流を明確に確認するため、抵抗係数を $C_D = 20.0$ と大きく設定したが、これらの係数については検討が必要である。

6. おわりに

本研究では、波浪エネルギーを利用した水質浄化施設の効果的な活用について提案し、まず、水理模型実験と数値解析を実施して、施設周辺の水理現象を確認した。数値波動水槽および海浜流モデルを用いて計算を行った結果、フィルター付近の流速については模型実験との整合性は高く、砕波による岸向

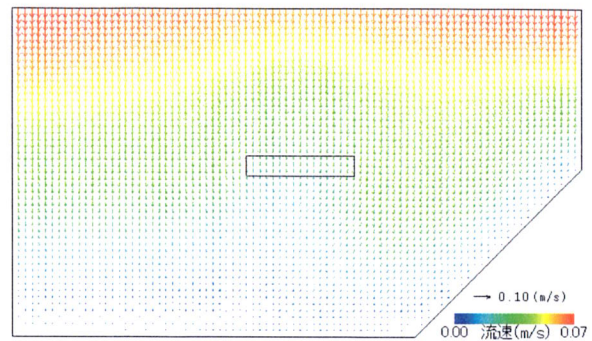


図-17 断面平均流速ベクトル（上げ潮時）

き流れの発生が再現でき、浄化施設へ水を取り込むような循環流を促進できることが確認できた。

次に、本浄化施設を実水域規模のモデル領域に適用した場合について検討した。海浜流モデルで計算した結果、浄化施設を通過する循環流が再現できた。流動の小さい閉鎖性水域でも、波のエネルギーを利用して、水の循環を促進し、浄化施設の持つ機能を有効に活用できることが分かった。今後、現地での波浪条件を用いた計算を実施し、浄化施設の有効性を評価する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 袋昭太，島多義彦：生物の付着基質としてのカキ殻の適用と着生する生物群集による水質浄化能力，日本水環境学会講演集，第 39 回，pp.133, 2005.
- 2) 土木学会編：海岸施設設計便覧，pp.449-450，土木学会，2000.
- 3) 功刀資彰：自由界面を含む多相流の直接数値解析法，日本機械学会論文集 B 編，63 巻 609 号，pp.1576-1584, 1997.
- 4) 永瀬恭一，島田昌也：MARS 法を用いた数値波動水槽に関する研究，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.46-50, 2000.
- 5) 磯部雅彦，余 錫平，梅村幸一郎，高橋重雄：数値波動水路の開発に関する研究，海岸工学論文集，第 46 巻，pp.36-40, 1999.
- 6) 間瀬 肇，高山知司，国富将嗣，三島豊秋：波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究，土木学会論文集，第 628 号，II-48，pp.177-187, 1999.
- 7) 黒岩正光，野田英明，芳地康征：準 3 次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究，海岸工学論文集，第 44 巻，pp.151-155, 1997.
- 8) 黒岩正光，口石孝幸，加藤憲一，松原雄平，野田英明：多方向不規則波浪場における準 3 次元海浜流場と海浜変形予測に関する研究，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.491-495, 2002.
- 9) 榊山 勉，阿部宣行，鹿島遼一：ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析，海岸工学論文集，第 37 巻，pp.554-558, 1990.
- 10) 黒岩正光，中平順一，松原雄平：冠水・干出を考慮した 3 次元潮汐流シミュレーションに関する研究，海洋開発論文集，第 21 巻，pp.623-628, 2005.