

ウォーターカーテンの消波特性と浅海域の環境創造支援への応用

Wave Damping by a Water Curtain and its Application to a
Support System for Environmental Creation in Coastal Zones

中井正則¹

前田陽子²

Masanori Nakai

Yoko Maeda

ABSTRACT: Damping of wind-induced waves by a water curtain (a two-dimensional upward water jet) was experimentally investigated being based on the concept of deformation of a propagating wave in the presence of a mean flow. When a water curtain discharges under wave motion with an angle of 60 degree from the horizontal plane to the direction of wave propagation in a flat field, a wave height largely decreases in its downstream side (coastal side) and slightly increases in the opposite side (offshore side). This situation was thought to be best for the wave control by a water curtain. In a mildly sloping field, a water curtain with the same angle can work more effectively in wave damping and will also promote water exchange. Then, it was suggested that this method has a possibility to be a support system for environmental creation in coastal zones.

KEYWORDS: water curtain, wave damping, coastal zone, environmental creation

1. はじめに

浅海域は多様な生態系が形成されている空間であり、なかでも藻場・干潟は生物の生息場・産卵場であると同時に水質浄化の役割をも果たす重要な場である。しかしながら、近年、沿岸域における埋め立て、海岸構造物の設置などによってこうした場が消失し、浅海域の生態系破壊・水質悪化がさまざまな形で生じている。その一方で、このような問題を背景にして、浅海域の環境保全が叫ばれ、最近では保全のみならず、より積極的な環境創造へと発展している。その代表例として、広島県五日市市の人工干潟や羽田沖の浅場などが挙げられ¹⁾、その他にも全国スケールで数多くの環境創造が試みられている。しかし、こういった環境創造を実施する際に波浪がしばしば大きな障害となる。近年は、波浪対策として離岸堤・潜堤がよく用いられるが、この工法には費用が高いこと、構造物が大規模化するために環境への影響が大きいことなどの欠点があり、より簡易な消波システムが求められている。

以上の点を踏まえて、著者らは簡易消波システムとしてウォーターカーテン（二次元上向き放出噴流、以下ではW.C.と称する）を用いる方法を選定し、その消波特性について実験的に考察した。また、このシステムの水質浄化効果について考察し、両者の結果を踏まえて、浅海域の環境創造を支援するシステムとしての可能性について検討した。なお、類似の消波システムに岩垣ら^{2)~7)}によるエアーカーテンを用いる方法があるが、本研究の新規性は媒質を空気から水に変更した点ではなく、波高低減に対する物理的な考え方に岩垣らと異なる視点を導入した点にある（これについては、本文中で述べる）。

¹ 東京電機大学理工学部建設環境工学科 Dept. of Civil and Environ. Engineering, Tokyo Denki University

² (株) 大建情報システム Daiken Information System Corporation

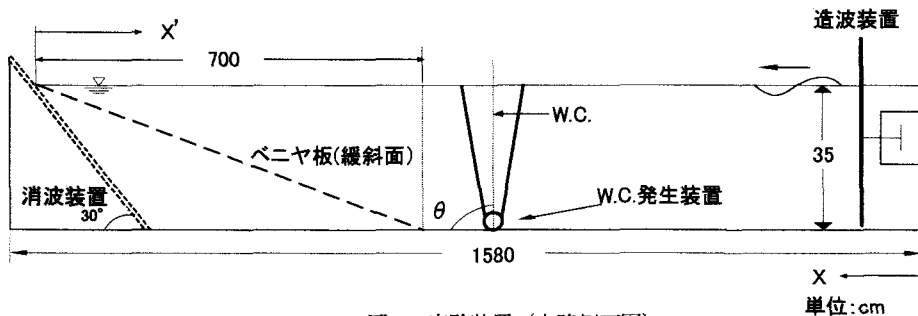


図1 実験装置（水路側面図）

表1 実験ケースの一覧

シリーズ	ケース	周期T [s]	波高H [cm]	角度θ [°]	流量Q [cm³/s]	W.C.の位置 [cm]	播種 の密度*1	碎波地点 [cm]±2
予備実験 (周期の検討)	P-1	0.8	10.87	90	500	X=910	-	-
	P-2	1.04	10.54	90	500	X=910	-	-
	P-3	1.28	8.47	90	500	X=910	-	-
	P-4	1.64	6.02	90	500	X=910	-	-
	P-5	2.03	4.49	90	500	X=910	-	-
A (放出角度の検討)	A-1	0.80	10.87	30	300	X=910	-	-
	A-2	0.80	10.03	45	300	X=910	-	-
	A-3	0.80	10.12	60	300	X=910	-	-
	A-4	0.80	10.69	90	300	X=910	-	-
	A-5	0.80	10.81	120	300	X=910	-	-
B (緩斜面上)	B-1	0.80	7.25	60	300	X'=325	-	X'=210
	B-2	0.80	7.34	60	300	X'=325	密	X'=35
	B-3	0.80	7.37	60	300	X'=325	中	X'=90
	B-4	0.80	7.58	60	300	X'=325	稀	X'=145

*1) 播種の密度
 ① 密・・・アマモの模型: 288本、配置: 4cm × 4cm 格子状
 ② 中・・・アマモの模型: 133本、配置: 8cm × 4cm 格子状
 ③ 稀・・・アマモの模型: 76本、配置: 8cm × 8cm 格子状
 *2) W.C.がない場合の碎波位置を示している。

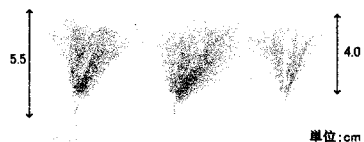


図2 アマモの模型

2. 実験装置と実験方法

実験には、図1に示すような長さ1580 cm×幅30 cm×高さ50 cmの二次元水路を用いた。同水路の上流端にはピストン式の造波装置が設置されており、下流端には傾斜角30°の多孔体が消波装置として取り付けられている（周期T=0.80sの入射波に対する反射率は約6%であった）。また、後述のシリーズBの実験ケースは緩斜面上で実施されたが、これらのケースでは厚さ1.5 cmのベニヤ板を用い、斜面勾配1/20の緩傾斜領域を汀線より700 cmにわたって設定した。W.C.発生装置には、直径1.3 cm、長さ28 cmのアルミニウム管に直径0.30 cmの穴を3.0 cm間隔で8個開けたものを用いた。同装置への送水は貯水槽内に設置した水中ポンプによっており、塩化ビニール管とビニールホースを用いて配管した（配管系の途中にフロート式流量計とゲートバルブを取り付けた）。また、実験中の水深を一定値（35 cm）に保つために、造波装置の後方から水中ポンプを用いてW.C.の放出流量とほぼ同じ流量で排水した。

実験手順は以下の通りである。造波装置を作動させ、最初に波動のみの場合のデータを収録した。その後、波動中にW.C.が放出された状態でデータを収録した。測定項目は波高と流速であり、波高計測には容量式波高計を、流速計測には直径5 mmのプロベラ式流速計を使用した（波高データの解析には、ゼロアップクロス法を採用した）。さらに、必要に応じて流況をデジタルビデオカメラにより撮影した。

実験は、予備実験、シリーズA、Bの三つに大別される（表1参照）。予備実験では、W.C.が有効に働く波の周期の検討を行った。また、シリーズAでは水平床上一様水深場におけるW.C.の消波特性について検討した。ここでの目的は、W.C.の放出角度による消波特性の変化を把握することである。W.C.はエアーカーテンと異なり、放出方向が鉛直方向に限定されないため、この利点を最大限に活用することを試みた。さらに、シリーズBでは緩斜面上におけるW.C.の消波特性について検討した。これは浅海域を想定した実験であり、環境創造の例として人工藻場（アマモ場）の造成を念頭に置いている。なお、アマモの模型にはポリプロピレン製のひもを束ねたもの（高さ4 cm）を用いた（図2参照）。

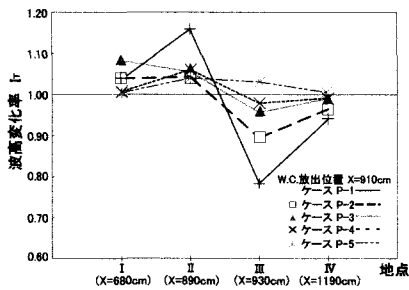


図3 波の周期による波高変化率の違い (予備実験)

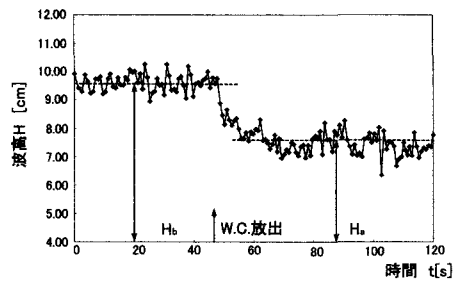


図4 波高の時系列の例 (ケース P-1)

3. 実験結果と考察

3. 1 予備実験の結果

図-3に予備実験の結果を示す。同図は、W.C. が水面に衝突する点の20cm 沖側(地点Ⅱ)・20cm 岸側(地点Ⅲ)および280cm 沖側(地点Ⅰ)・280cm 岸側(地点Ⅳ)における波高変化率 I_T を示している。ここで、 I_T はそれぞれの地点における W.C. 放出後の波高(H_a)/W.C. 放出前の波高(H_b)で定義されており(図4 参照)、また、 X は水路上流端からの距離である。図4は一例として、ケース P-1 における地点Ⅲの波高の時系列を示したものである。同図より、W.C. の放出によって波高が大きく低減していることがわかる。

図3より、ケース P-1 (周期 $T=0.80s$) の波が W.C. の影響を最も顕著に受けていることが明らかである(同ケースでは、地点Ⅲの波高が W.C. によって約20%低減しているものの、地点Ⅱでは約15%増大している。このメカニズムについては、シリーズAの結果と併せて考察する)。この結果より、W.C. は従来から研究がなされている浮防波堤や空気防波堤(エアーカーテン)などと同様に、周期が一定値以上の波に対しては消波効果が表れにくいと考えられる²⁾。以上の結果を踏まえて、シリーズA, Bの実験では、W.C. の消波特性をより明確に示すために周期 $T=0.80s$ の波を用いることにした。

3. 2 シリーズAの結果

図5はW.C. の放出角度 θ (図1 参照) を $30^\circ \sim 120^\circ$ の範囲で変化させ、波高変化率 I_T を比較したものである。同図には、シリーズAの結果に加えて、ケース P-1の結果も挿入されている(ケース P-1とケース A-4の結果を比較することによって、流量の違いによるW.C. の消波特性の変化を評価できる)。なお、地点Ⅰ～Ⅳの定義は先の予備実験の場合と同じであるが、この場合にはケースによってW.C. の放出角度が異なる(W.C. の水面衝突点が異なる)ため、地点Ⅰ～Ⅳの位置はケースごとに異なっている。全ケースに共通して見られる特徴として、地点Ⅱの波高がW.C. によって増大し、地点Ⅲの波高が減少していることが挙げられる。また、地点Ⅳの波高はW.C. によってほとんど変化していない。

この結果について物理的に考察する。W.C. が波動に与える影響は、主として①水面衝突時の慣性抵抗、②水面衝突後の表面流としての影響、の二つである。②の表面流については、冲向きの流れ(逆流)と岸向きの流れ(順流)の二つがあり、これらの表面流により入射波の波高に変化が生じる³⁾。具体的に言えば、逆流は波高を増大させ、順流は低減させるが、その変化率は表面流の流速が速いほど大きい。このことを念頭におくと、図5の地点Ⅱ、Ⅲの波高変化は定性的に妥当な結果となっている。

図5を定量的に見ると、地点Ⅱ、Ⅲの波高ともにその変化の程度はケース A-4 ($\theta=90^\circ$) で最も大きく、次いでケース A-3 ($\theta=60^\circ$) であり、ケース A-1, A-2 ($\theta=30^\circ, 45^\circ$) ではかなり小さくなっている。これは、ケース A-1, A-2 では θ が小さいために W.C. が水面に衝突するまでの距離が長くなり、その間の噴流としての特性(周囲水の連行など)によって表面流に転じた時の流速が小さくなるためである。また、ケース A-3, A-4の結果を比較すると、ケース A-3 では地点Ⅲの波高低減がケース A-4 とあまり変わらないのに

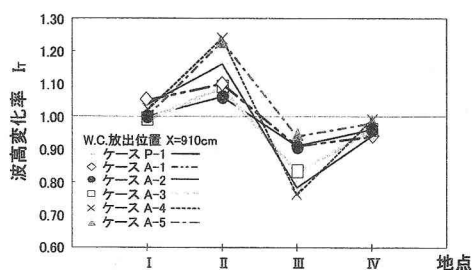


図5 W.C.の放出角度による波高変化率の違い
(シリーズ A)

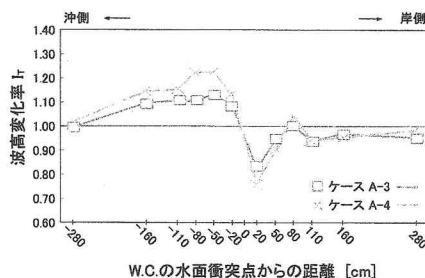
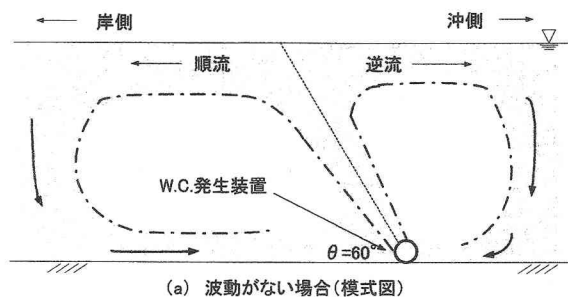
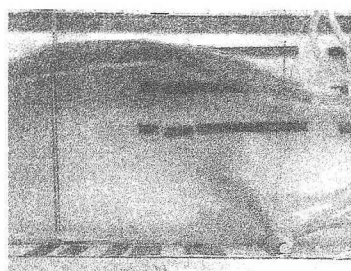


図7 波高変化率の縦断分布
(ケース A-3, A-4)



(a) 波動がない場合(模式図)



(b) 波動がある場合

図6 W.C.の流れ ($\theta=60^\circ$)

対し、地点Ⅱの波高増大がケース A-4 より大幅に抑えられている。これは、ケース A-3 における W.C. の流況が図6 のようであり、W.C. が水面に衝突した後の順流と逆流への流量配分が前者の方が大きくなるためと考えられる。さらに、ケース A-5 では地点Ⅱの波高増大が激しく、地点Ⅲの波高低減が小さいが、これはこの場合の W.C. の流況が図6 を左右反対にしたものになることを考えれば理解できる。

つぎに、先の①水面衝突時の慣性抵抗について考察する。これによって、入射波の持つエネルギーが消散し、波高が低減する。この効果を見るには地点Ⅳの波高変化を検討すればよいが、図5によれば全ケースともに波高がほとんど低減していない。これより、これらのケースにおいて W.C. の慣性抵抗による消波効果はほとんどないと言える。これは、W.C. の放出流量が少ないためである。

図7 は、W.C. によって地点Ⅱ、Ⅲで明確な波高変化が現われたケース A-3, A-4 の波高を細かく測定し、波高変化率 I_T の縦断分布を求めた結果である。なお、横軸の W.C. からの距離は沖側を一、岸側を+としていいる。W.C. の影響が現われる範囲は、ケース A-3, A-4 ともに $-160 \sim +80 \text{ cm}$ の 240 cm の領域に限定されている。また、 $+160 \text{ cm}$ 地点より岸側では波高はほとんど入射波高に戻っている。つまり、ケース A-3, A-4 ともに W.C. の慣性抵抗による消波効果はほとんどなく、順流による波高の一時的低下のみが生じていることを確認できる。

最後に、図7より W.C. の放出角度 θ の最適値について考察する。W.C. から $+80 \text{ cm}$ までの領域の波高低減はケース A-4 の方がケース A-3 より大きい、それほど大きな差があるわけではない。これに対して、W.C. から -160 cm までの領域の波高増大はケース A-4 がケース A-3 の2倍程度になっている。W.C. を浅海域の環境創造に利用する際には、波高増大は大きな障害となると考えられ、本研究ではケース A-3 の W.C. の放出方法、つまり放出角度 $\theta = 60^\circ$ を θ の最適値と判断した。

以上のように、本研究では W.C. が水面に衝突した後の順流による波高低減に注目している。これに対して、岩垣ら²⁰⁻⁷⁾はエアーカーテンを用いた消波システムを提案し、エアーカーテンの沖側における(その水面衝

突後の) 逆流に伴う波高増大に注目して、波高増大→碎波→波高低減を目指した。つまり、著者らの注目点と岩垣らのそれは根本的に異なっている。本研究の新規性は「順流による波高低減」に期待している点であり、シリーズ A ではこれを最大限に活用するために W.C. の放出角度について検討を行った。

3. 3 シリーズ B の結果

シリーズ B の実験では、先のシリーズ A の結果を踏まえて、W.C. を放出角度 $\theta = 60^\circ$ で浅海域 (緩傾斜領域: $X' = 0 \sim 700\text{cm}$, 斜面勾配 1/20) へ向けて放出した。なお、ここでは模型縮尺を 1/30 とし、現地海域との対応を考慮し、諸量を決定した。すなわち、人工藻場 (アマモ場) 領域は $X' = 100 \sim 250\text{cm}$, W.C. の放出位置は $X' = 325\text{cm}$ (緩斜面上) とし、また、緩傾斜領域より沖側 ($X' > 700\text{cm}$) の水深は 35cm とした。さらに、入射波の波高は 7.5cm 程度とし、現地海域のやや荒天時の波に対応させた (諸量の現地海域換算値の詳細については、表 2 を参照されたい)。

最初に、図 9 に示したケース B-1 の波高変化率 I_T について検討する。このケースは藻場想定領域にアマモがない場合であり、放出角度 $\theta = 60^\circ$ で放出した W.C. の緩斜面上における消波特性を示している。なお、このケースにおいて、W.C. を放出しない場合の入射波の碎波点は $X' = 210\text{cm}$ 付近であり、藻場想定領域内に位置している。W.C. の放出に伴って同図のように、 $X' = 175\text{cm}$ (藻場想定領域の中間点) では波高が約 25% 低減しており、W.C. の消波効果が顕著に現われている。これに対して、 $X' = 375\text{cm}$ (W.C. の水面衝突点より 20cm 沖側: 藻場想定領域の沖側) での波高増大はごくわずかに抑えられている。また、一様水深場におけるケース A-3 の結果と比較すると、W.C. による波高低減領域が岸側に大幅に延びている。これらの結果は、W.C. によって入射波の碎波が促進され (碎波点が $X' = 210\text{cm}$ から $X' = 270\text{cm}$ 付近まで沖側へ移動した)、藻場領域内に碎波変形後の波が入射したこと起因している。なお、実験時の観察より、この場合の碎波促進の主原因は (W.C. の水面衝突後の) 逆流による波高増大ではなく、W.C. の持つ慣性抵抗による波形変形と推察される。

以上のように、浅海域 (緩傾斜領域) において W.C. を利用する場合には、W.C. は水面衝突後の順流による波高低減効果のみならず、慣性抵抗による碎波促進効果をも発揮するため、一様水深場の場合よりも利用価値が高い。

次に、藻場想定領域にアマモの模型を設置したケース B-2~B-4 の結果について述べる。図 8 は、藻場の存在が波浪に与える影響を把握する目的で、W.C. を放出しない場合の波高変化率 I_T を求めたものである。ここで、 I_T はそれぞれの点の波高とケース B-1 の同地点の波高 (W.C. を放出しない条件下での値) との比として定義されている。同図より、藻場自身の消波効果は予想外に大きく、アマモの密度が大きいくほど藻場領域での波高低減が激しいことがわかる。また、碎波点は 3 ケースともに (ケース B-1 に比べて) 岸側に移動し、ケース B-2, B-3, B-4 においてそれぞれ $X' = 35, 90, 145\text{cm}$ であった。なお、 $X' = 305, 345\text{cm}$ の I_T が 1.0 よりややずれているが、これは藻場が沖側の波・流れに影響を与えていることを意味している。

図 9 のケース B-2~B-4 の結果は、藻場想定領域にアマモが存在する場合の W.C. による消波効果を表している。なお、3 ケースともに W.C. によって碎波点が $X' = 270\text{cm}$ 付近まで沖側に移動した。また、同図より、3 ケースともに $X' = 175\text{cm}$ (藻場領域内)、310cm (藻場領域より沖側) で 15% 程度の波高低減が生じていることがわかる (この場合の波高変化率 I_T は、藻場によって低減した波高 (図 8 参照) に対して求めたものである)。この結果は、アマモの密度に関係なく、W.C. によってほぼ同程度の消波効果が得られることを意味している。ここで、ケース B-4 の結果についてやや詳しく述べる (このケースでは、W.C. を放出しない場合の碎波点 ($X' = 145\text{cm}$) が藻場領域内にあり、波浪が藻場に与える影響は非常に大きい)。碎波点付近 ($X' = 140\text{cm}$) の波高変化率 I_T は、同図よりわかるように 0.68 であり、波高が 30% 以上低減している。また、図 10 に同ケースにおける $X' = 140\text{cm}$ 付近の流況を W.C. がある場合とない場合の両方について示す。同図からも、W.C. による大きな波高低減が確認できる。なお、この大きな波高低減は、この点の波高が W.C. によって

表 2 諸元の一覧 (シリーズ B)

		実験	現地海域
海域	浅海域(緩傾斜領域)の範囲(X')	0 ~ 700 [cm]	0 ~ 210 [m]
	沖側水深	35 [cm]	10.5 [m]
藻場	範囲(X')	100 ~ 250 [cm]	30 ~ 75 [m]
	水深	5.0 ~ 12.5 [cm]	1.50 ~ 3.75 [m]
入射波	波高	7.5 [cm]	2.25 [m]
	周期	0.80 [s]	4.38 [s]

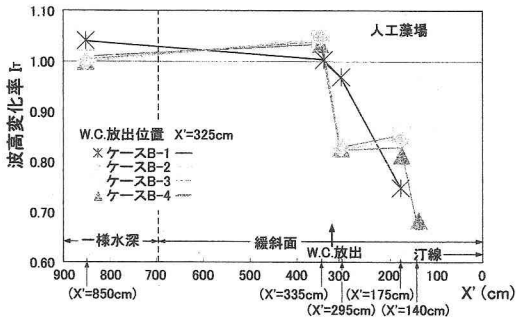


図 9 波高変化率 (シリーズ B)

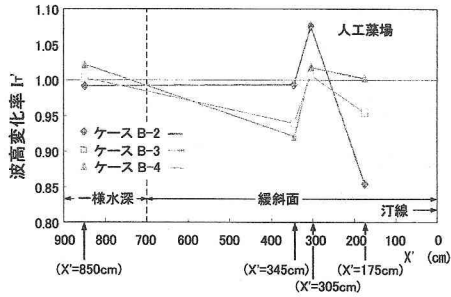


図 8 藻場による波高変化

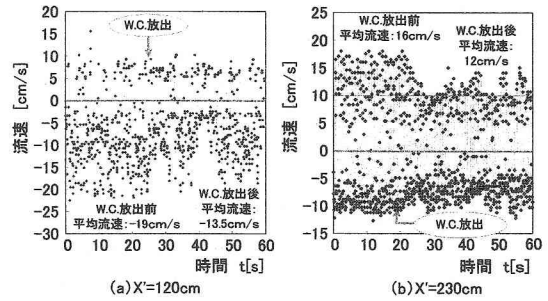
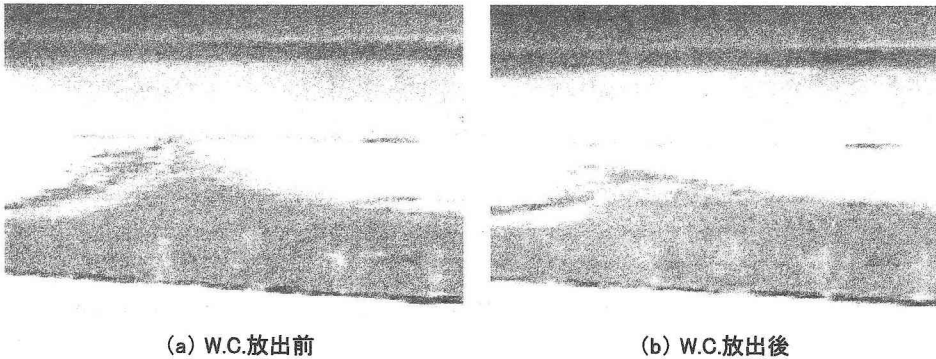


図 11 底層流速の時系列の例 (ケース B-1)



(a) W.C.放出前

(b) W.C.放出後

図 10 W.C.の消波効果 (ケース B-4 : $X'=140$ cm 付近)

碎波波高から碎波変形後の波高に変化したことに起因している。

最後に, W.C. による底層流速の変化について検討する. 図 11 にケース B-1 (人工藻場がないケース) における $X' = 120, 230$ cm (ともに藻場想定領域内) の底層流速 (水底面より 2.0cm 上) の時系列を示す (+は岸向き流速を, -は沖向き流速を示している). 同図より, 両地点ともに W.C. によって最大流速 (絶対値) が約 30% 低減していることがわかる. 底層流速は後述のようにアマモの流失に直接関わるものであり, これが大幅に低減することの意義は大きいと考えられる。

4. W.C. の環境創造支援への応用可能性

現地浅海域において人工藻場(ここではアマモ場を想定している)を造成する場合, 成功の鍵は植え付けたアマモが十分成長する前に波・流れ (特に底層流速が重要) によって流失しないことである. そのためには,

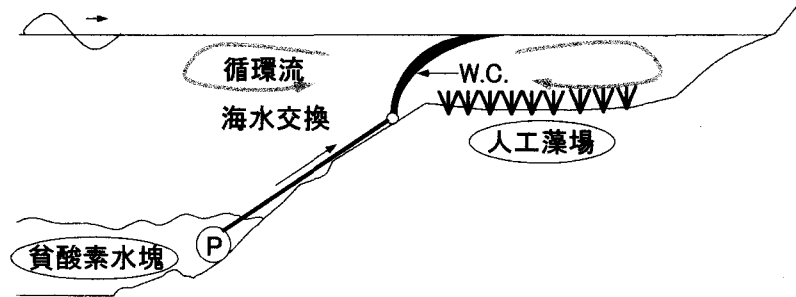


図 12 W.C.を用いた水質浄化（概念図）

荒天時の波浪を何らかの方法によって制御する必要がある、本研究ではその手段として W.C. を利用することを考えている。

先のシリーズ B の結果において、アマモの密度が密および中のケース(ケース B-2, B-3)では、藻場の強い抵抗によって波浪が一定程度低減し、入射波の碎波点が藻場の岸側に位置していた。このような状況において藻場の沖側から W.C. を放出すると、藻場内の波高および底層流速がさらに一定程度低減する。これは、藻場造成を支援する状況であるが、藻場内の流況は W.C. を放出する前から(藻場自身によって)かなり静穏化していたため、W.C. の必要性はそれほど高くないかもしれない。一方、アマモの密度が粗のケース(ケース B-4)では藻場の抵抗は小さく、藻場内で入射波が碎波し、藻場造成に対して不利な状況が出現していた。このような場合に、藻場の沖側から W.C. を放出することによって、入射波の碎波点を藻場の沖側に移動させ、藻場内の波高および底層流速を大幅に低減させることは、藻場造成にとって好ましい状況を創り出すことになる。

以上のように、藻場の沖側から W.C. を放出することは、多くの場合に藻場造成にとって有利な状況を創り出すが、なかでも、藻場内での碎波を回避できる場合にその効果が大きいと推察される。また、W.C. によって波浪を低減させることは、藻場の岸側の流況を静穏化することにもつながり、この領域に人工干潟を造成するなど、より総合的な環境創造への可能性を示すものと考えられる。

最後に、W.C. の持つ水質浄化効果について考察を加え、このシステムの価値を評価することを試みる。図 12 に示すように、W.C. の放出によって水深スケールの循環流が誘起され、浅海域全体の海水交換が促進される。また、沖側の底層に停滞している貧酸素水塊を取水し、W.C. として放出する場合には、貧酸素水塊が藻場へ大量に流入する。その結果、藻場の生産活動(光合成)の恩恵により、同水塊中の溶存酸素が増大し、貧酸素化の解消へとつながるだろう。このように、W.C. を用いるシステムは波浪低減機能を持つだけでなく、浅海域全体の水質浄化機能をも合わせ持っていると考えられ、浅海域の環境創造支援システムとして十分な役割を果たすことを期待できるだろう。

5. まとめ

本研究では、W.C. の消波特性について実験的に詳しく考察し、さらに、これを利用した浅海域の環境創造の可能性について検討した。その結果、W.C. の消波特性は放出角度 $\theta = 60^\circ$ の場合に最適となること、浅海域(緩傾斜領域)においては碎波促進効果が現れ、消波効果がさらに高まること(最大 30% 程度の波浪低減効果)などが明らかになった。さらに、W.C. を適切に用いることにより、浅海域の水質浄化をも同時に実現できると考えられ、W.C. を用いるシステムは浅海域における環境創造支援システムの有力候補の一つになる可能性を持っている。ただし、ここでの検討ではその可能性を示したに過ぎず、このシステムを確立するためには、入射波の特性に応じた W.C. の取り扱い方の検討はもとより、生態系の視点など、多方面からの追加検討が必要である。

参考文献

- 1) 港湾環境創造研究会：よみがえる海辺，「環境創造」21，山海堂，pp. 86-103，1997.
- 2) 岩垣雄一・安井誠人：空気防波堤に関する研究(第1報)，「一空気防波堤の基本的性質」，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 563-569，1975.
- 3) 岩垣雄一・石田啓・本田勉・須藤雄二：空気防波堤に関する研究(第2報)，「一潜堤との併用効果」，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 158-163，1976.
- 4) 岩垣雄一・浅野敏之・間瀬肇：空気防波堤に関する研究(第3報)，「一浮防波堤との併用について」，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 290-294，1977.
- 5) 岩垣雄一・浅野敏之：空気防波堤に関する研究(第4報)，「一空気防波堤の消波理論」，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 295-299，1977.
- 6) 岩垣雄一・浅野敏之・須藤雄二・山中庸彦：空気防波堤に関する研究(第5報)，「一空気防波堤の消波護岸への応用」，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 412-415，1978.
- 7) 岩垣雄一・浅野敏之：流れが空気防波堤の消波効果に及ぼす影響，「一空気防波堤に関する研究(第6報)」，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 413-417，1982.
- 8) M. S. Longuet-Higgins and R. W. Stewart：The changes in amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents., J. Fluid Mech., Vol. 10, pp. 529-549, 1961.