

波力を利用した底層水汲上げ装置の水利特性

藤田良一*・高山錦宏*・樋江井夕紀夫*
岩瀬浩二**・吉原裕美**

1. 研究の目的

近年、東京湾・三河湾・大阪湾・瀬戸内海などの閉鎖性内湾では、生活・農業などの排水や養殖漁業により富栄養化が進み、赤潮や青潮が慢性的に発生し、魚介類の斃死などの環境問題が顕在化している。

その原因の一つとして、図-1 に示すメカニズムが考えられる。夏季に海面水温が上昇すると密度が低下し、上下の対流混合ができず、水深約 10 m 前後に水温躍層が生じ成層状態になる。この時、海底に堆積した有機物の分解等で溶存酸素が消費され、貧酸素富栄養の底層水が形成される。この状態で離岸風が吹くと、底層水が湧昇して赤潮や青潮を引起す原因となる。

この底層水を波力を利用して海面まで汲上げ、曝気散水により海域に酸素を供給し、赤潮や青潮を未然に防ぐことを目的に本装置（マリンスプリング）を開発した。

今回は、水利模型実験と実海域実証実験によって得られた水利特性について報告する。

さらに、波及効果として、底層水の富栄養分により、植物プランクトンが増殖され、それが魚介類などの餌となり、食物連鎖効果によって、海域が自然に浄化されることも期待される。

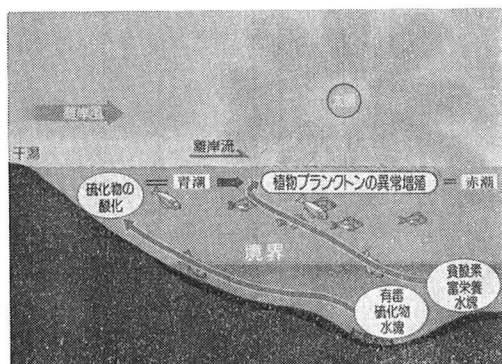


図-1 青潮発生メカニズム

2. 装置の構造と揚水原理

図-2 に装置の構造を示すが、逆上弁を内蔵した取水管の途中にフロートを取り付けた下部構造に、同じく逆止弁を内蔵した一回り大きい揚水管の先端にブイを取付けた上部構造を取水管上方に嵌め込み、取水管の下端を緊張係留し、フロートの浮力により装置全体が水中で直立し、ブイが波で動揺できるようにした。

揚水原理は以下のとおりである。波の峰が来ると、ブイは揚水管の逆止弁が閉じた状態で上昇し、底層水は取水管の逆止弁を押開け管内に吸込まれる。次に波の谷が来ると、ブイは取水管の逆止弁が閉じた状態で降下し、内部の水は揚水管の逆止弁を押開け、揚水管の先端から水が溢れ出て、曝気散水する。

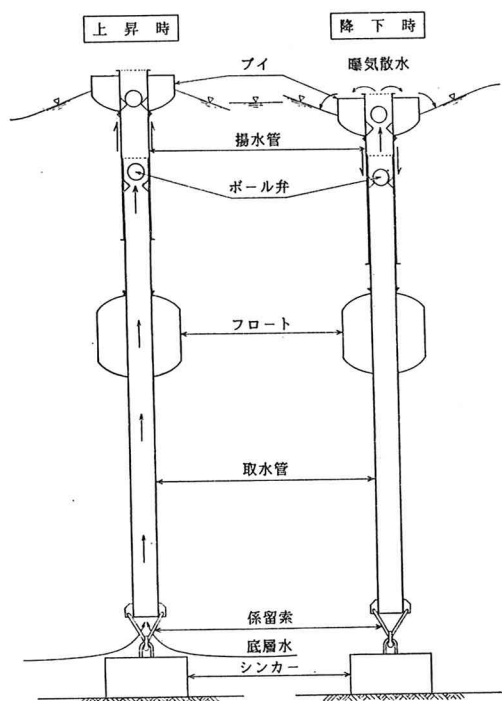


図-2 本装置の構造と揚水原理

* 正会員 工修 鹿島 土木技術本部 海洋開発室

** 正会員 鹿島 技術研究所

ロック長 2.5 m + 最小ラップ長 1 m = 3.5 m, プイは計器の取り付けと 2 人の作業員が搭載可能な大きさ, フロートの大きさは水深 20 m に設置する場合と同等の浮力を持つ等を条件として決定した。

図-4 にモデルの形状と寸法を示す。φ 50 cm × l 4.6 m 揚水管の上端に, φ 160 cm × h 90 cm のプイを取り付けた上部構造物と, φ 45 cm × l 6.5 m の取水管中程に φ 160 cm × h 180 cm のフロートを取り付けた下部構造物, および, 樹脂系材料で製作した 2 基の弁ユニットで構成され, 本体は鋼製で総重量 2 t である。

1992 年 1 月, 本体の下端にシンカーを取付け, 図-5 に示す多摩川河口, シーコムフェリー桟橋の前面海域に設置して, 約 2 か月間の実海域実証実験を実施した。

写真-1 に本装置マリンスプリングの揚水状況を示す。

波高と揚水量およびその時のプイの動揺特性を把握す

るため, 波浪～揚水量～動揺量の同時計測を実施した。アクセス, 電源等の制約により, 次のような計測計画となった。

(1) 波 浪

磁気記録式超音波高計 (SSW-II) を本装置から 15 m 離れた沖側海底に設置し, 2 時間毎に 8 分間連続の計測を行った。

(2) 揚 水 量

プイ上の計器箱に超音波流量計 (UFP-1000, サンプル間隔: 1 秒) と鉛蓄電池 (HP8-6 P) 2 コを収納し, センサーを揚水管の上端に取り付け, 1 分間毎の積算流量を約 4 時間連続記録した。

(3) 動 揺 量

本装置に対して約 70° の角度で, 690 m と 635 m 距離の岸壁上に 2 台のビデオカメラを設置して, プイの上部に取付けた 4 つのマーカボールを同時に撮影し, カラーセレクトでマーカの赤色のみを検出し, 超音波波高計に合せて録画し, これを基に, 後日, ビデオトラッカーにて 3 次元動揺解析を行った。

5. 実海域実験の結果

超音波波高計のデータが, 2 時間毎の 8 分間連続計測であるため, 8 分間の波浪統計値を求め, 同じ時間帯の超音波流量計による実測揚水量を対応させて整理した。

プイの動揺量は, 波浪に準じて, 同じ時間帯の 8 分間の動揺統計値を求めて対応させて整理した。

なお, ビデオカメラの撮影は, 風・雨・船舶の通行の他, プイの回転による左右両側のマーカの識別不可等の原因で, データ取得率は下がったものの, 10 コの解析可能な有効データが得られた。表-1 に取得したデータの一覧表を示す。

本装置の設置地点の予定水深は 10 m であったが, 設置水深は 9.5 m となり, 50 cm 浅くなった。このため, 潮位が +50 cm 以下になると, 下方への運動が影響を受け, 揚水量が減少する一因となると考えられる。

以下, 相互関係について, 考察を行う。

(1) 波浪と揚水量

図-6 に 8 分間の有義波高 ($H_{1/3}$) と揚水量の関係を示す。



図-5 実海域実証実験の位置

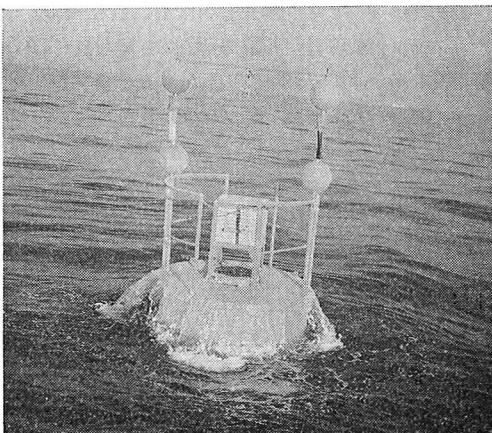


写真-1 マリンスプリングの揚水状況

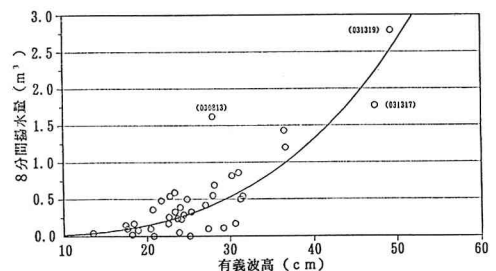


図-6 8分間の揚水量と有義波浪

表-1 取得データ一覧表

Data No. (月日時)	潮位 (cm)	揚水量 (ℓ)	波 浪				ヒ ー プ			
			H_{mean} (cm)	T_{mean} (s)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	D_{mean} (cm)	T_{mean} (s)	$D_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)
020811	149	360	13.561	2.469	20.655	2.897	3.906	2.404	7.860	3.736
020813	125	540	14.025	2.579	22.739	3.276	7.183	2.878	14.442	3.875
021311	83	690	17.987	2.445	28.163	3.070	7.795	2.497	15.405	3.497
021313	121	390	15.416	2.575	23.951	2.936	8.346	3.184	15.079	3.660
021411	69	100	13.361	2.308	20.391	2.673				
021413	100	170	12.223	2.402	18.432	2.677				
030211	38	20	11.888	2.489	18.244	2.973				
030213	41	170	14.553	2.485	22.531	2.887	7.679	3.186	12.210	3.299
030411	59	860	20.958	2.795	31.055	2.898	9.122	3.113	15.432	3.053
030413	20	0	14.009	2.530	20.772	2.795				
030511	77	110	18.070	2.495	29.195	2.793				
030513	26	0	16.196	2.524	25.128	2.820				
030611	95	170	19.475	2.835	30.614	3.235				
030613	41	80	12.276	2.579	18.912	2.824				
030811	125	1430	23.578	2.622	36.463	2.825				
030813	82	1620	18.115	2.388	27.990	2.696				
031113	131	330	14.980	2.457	23.346	2.758				
031115	122	590	14.898	2.302	23.322	2.613				
031117	93	500	20.000	2.300	31.242	2.673				
031119	57	330	16.822	2.132	25.311	2.618				
031121	45	240	14.904	2.122	23.649	2.626				
031123	70	290	15.149	2.201	24.387	2.702				
031201	113	150	11.664	2.224	17.450	2.521				
031203	146	40	8.866	2.024	13.489	2.427				
031211	111	820	19.408	2.649	30.276	3.048	8.048	2.999	16.629	3.701
031213	136	260	14.730	2.482	22.591	2.920	5.560	3.082	11.198	4.323
031215	142	50	14.793	2.540	23.825	2.954				
031217	114	550	18.146	2.660	27.952	3.008				
031219	65	420	16.903	2.693	27.038	3.163				
031221	45	100	11.185	2.434	17.647	2.716				
031311	91	500	16.450	2.446	24.804	2.772	7.099	2.994	13.091	3.739
031313	131	100	17.389	2.310	27.347	2.536				
031315	158	1200	23.966	2.314	36.616	2.544	10.718	3.229	19.501	3.243
031317	138	1770	29.831	2.542	47.354	2.826				
031319	81	2790	31.669	2.636	49.293	2.982				
031321	31	540	21.579	2.433	31.555	2.602				
031411	68	480	13.910	2.385	21.681	2.828				
031413	117	230	15.516	2.230	24.089	2.682				

注) 潮位の基準面は平均水面下 120cm

示す。表-1 と図-6 から以下のことが言える。

a) 有義波高が 30 cm 以下では、ばらつきが目立つが、比較的小さな波高でも、揚水することがわかる。

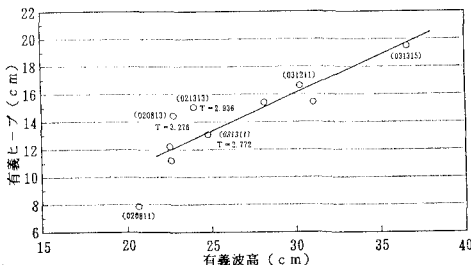


図-7 8分間の有義波浪と有義ヒープ

b) データ番号 (031319) のように、有義波高が 50 cm であれば、8分間で 2.7 m^3 (1時間相当で約 20 m^3) の揚水量が期待できる。3月13日の 18:00~19:00 の時間での積算流量を見ると、 18.5 m^3 の揚水量が実測された。この時の有義波高は約 50 cm となる。

(2) 波浪とヒープ

図-7 に 8 分間の有義波高 ($H_{1/3}$) と有義ヒープ ($D_{1/3}$) の関係を示す。有義ヒープとはヒープの大きい順番から、1/3 までの平均値を意味している。表-1 と図-8 から、以下のことが言える。

a) 有義波高と有義ヒープは、全体として高い相関性を示す。(相関係数=0.866)

c) 有義波高 30 cm の場合、有義ヒープは 16 cm であり、応答率は 53% となる。

c) データ番号 (020811) に見られるように有義波高が約 20 cm 以下になると、有義ヒープ量は急激に低下する。

d) データ番号 (021313) と (031311) を比べると、波高が比較的低くても、周期が比較的長ければ、ヒープも増大する。この現象は、水理模型実験でも見られた。

e) 室内実験と現地実験との関連を鉛直動揺量で評価する。

ポテンシャル接続法による数値解では、規則波高 30 cm、周期 3 秒の場合、動揺量は 27.3 cm である。実測値データ番号 (031211) の有義ヒープは 16.6 cm、効率約 60%

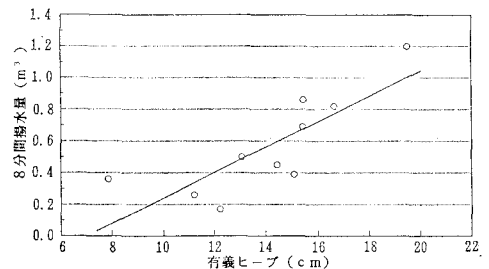


図-8 有義ヒープと揚水量の関係

になる。水利模型実験での効率約 70% に比べると、やや低下している。その原因は、両者の構造的相違（使用材料、ブイ形状、止水法、揚水管と取水管の摩擦）および波浪場の相違等が考えられる。

(3) ヒープと揚水量

図-8 に有義ヒープと揚水量の関係を示す。

有義ヒープと揚水量は、全体として直線的関係になっている。（相関係数=0.808）

(4) 水平動揺量

ブイの占有面積を把握するため、3 次元動揺解析を行っている、水平動揺量を求めた。表-2 に動揺量 (D) と動揺周期 (T) の一例を示す。

なお、この値は 4 つのマークボールの中心動揺量で、ブイ中心より 2m 高いため、水平動揺量は約 1.25 倍に拡大されている。ブイ本体の水平動揺量（有義値）は、約 20 cm となり、有義波高と同程度となった。

表-2 次元動揺解析の一例

Data No. (020813)	$H_{\max}$ (cm)	$T_{\max}$ (sec)	H_{mean} (cm)	T_{mean} (sec)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)
WAVE	43.503	5.197	14.025	2.579	22.739	3.276

Data No. (020813)	$D_{\max}$ (cm) (deg)	$T_{\max}$ (sec)	D_{mean} (cm) (deg)	T_{mean} (sec)	$D_{1/3}$ (cm) (deg)	$T_{1/3}$ (sec)
SURGE	39.335	9.829	10.871	1.999	19.997	3.796
SWAY	43.786	8.911	14.595	2.764	25.293	4.131
HEAVE	18.669	5.201	6.907	2.930	11.484	3.333
ROLL	6.543	5.614	1.306	0.763	2.163	1.256
PITCH	1.905	6.465	0.546	1.264	0.984	2.518
YAW	5.975	14.139	1.083	1.866	2.082	4.294

注) ROLL, PITCH, YAW の動揺単位は deg.

6. 結 論

以上の実海域実験の結果をまとめると、下記の結論が得られる。

- 比較的小さな波高 ($H_{1/3}=20$ cm 程度) でも揚水することが確認できた。
- 有義波高が 50 cm の場合、毎時 20 m^3 の揚水が

期待できる。

c) 波の周期にもよるが、ブイの鉛直動揺量は波高のほぼ 53% である。

d) ブイの水平動揺量は、ほぼ波高と同程度である。

7. 利用構想と今後の課題

当装置は、以下の特長を有しているため、湾内の浚渫跡や航路浚渫および養殖漁場等で、海底付近に形成され易い貧酸素水塊を揚水し、曝気を行うことで海域の浄化に利用できる。図-9 に当装置の利用構想概念図を示す。

a) 一点緊張係留のため、水平動揺が比較的小さく、供用時の占有面積も小さい。また、設置・移設・撤去が容易である。

b) 波エネルギーを利用するため、ランニングコストが不要である。

c) 標識灯を取付けると、航路標識にも兼用できる。

なお、今回の実海域実験は、揚水性能の把握を主眼においたものである。今後の課題としては、浚渫跡等での実機による実験で、水質環境や海中生物に与える効果を検証することが考えられる。



図-9 当装置の利用構想概念図

参 考 文 献

- 今井貫爾・吉田幸三・岩瀬浩二・高橋俊彦 (1988): 波動ポンプの揚水能力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 35 巻, pp. 832-836.