

自然力利用の振り子式波力水車による圧縮空気 自動製造に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON AUTOMATIC PRODUCTION OF COMPRESSED
AIR WITH WAVE FORCE TURBINE FOR EXPLOITING NATURAL ENERGY

大貝秀司¹・榎田真也²・石田啓³
Shuji OGAI, Shinya UMEDA and Hajime ISHIDA

¹LWJ株式会社 常務取締役 (〒555-0001 大阪府大阪市西淀川区佃3丁目16番22号)

²正会員 博(工) 金沢大学講師 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

³フェロー 工博 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (同上)

This paper presents the experimental study on the compressed air production with a pendulum-type wave power conversion system. The system consists of a pendulum, a wave turbine and an air compressor. The wave turbine is so devised that a pivot rotates toward only one way for wave motion by using a pair of one-way ratchet gears. The air compressor has a liner crank mechanism for converting a rotating motion into a reciprocating motion through a connecting rod moving straightly. The compressed air automatically produced from wave energy is available for water aeration in order to restore the water quality in coastal area. The system performance tests were carried out for the effects of wave conditions on the amount of compressed air and the swing of the pendular plate. The experimental results show that the system is able to produce about 19 L/min air when the wave period is at three seconds. The amplitude of the pendular plate for wave motion increases with increasing wave period and wave height until three seconds of the wave period. Over three seconds, the center of the swing of the pendular plate move onshore due to mass transport under high waves. As a result of that, both the amplitude of the pendular plate and the volume of the produced air decrease. It was found that the system works best under unbreaking large waves on a three-second cycle.

Key Words : Wave energy, wave turbine, pendulum, compressed air, liner crank, natural energy

1. 序論

環境負荷の少ない再生可能なエネルギー資源の一つに海岸波浪の持つエネルギーがある。波浪エネルギーは、海に囲まれた我国では約 3500 万 kW¹⁾と豊富なことから、その有効利用が大いに期待され、特に冬季波浪の激しい日本海域において波力発電に関する現地実験が実行されてきたが、現在でも実用化の域に達しているとは言いがたい。

波浪エネルギー利用システムは従来から様々な方式が研究され、その主な方式は渡部ら²⁾によって詳しく分類されている。その中で海面の上下運動の位置エネルギーを空気タービンで抽出する方式^{3~7)}および波浪による水粒子の運動エネルギーを水車や波受け板で抽出する方式^{2,8~12)}に関する研究成果が数多く蓄積されている。前者は空気室の建設に多大な費用を要する割には空気タービンによるエネルギー変換効率が低く、得られるエネルギーは大きくない。

一方、波浪の運動エネルギーの抽出を目指した近藤らの研究^{8,10,12)}では、波力を受けて振り子運動する波受け板が、消波効果を発揮すると同時に、板の

運動を動力とした波力発電が可能になるという極めて合理的な装置を開発している。ただし、この装置では、油圧ポンプを用いて板の往復運動を一方向回転力に整流し、この回転力で発電機を駆動する構造になっているため、油圧ポンプのエネルギー変換効率や、不安定性の高い電力の実用化などに課題を残しているように推察される。

一般に、波力発電は波浪の不規則性の影響を受けるため、安定性の面で課題がある。したがって、波浪エネルギーは電力に変換することを目指す一方、多様なエネルギー形態での利用方法を追求することも重要である。例えば、得られた波浪エネルギーを電力化しないで直接にコンプレッサなどの動力に使用する効率的なシステムを開発することは、港湾や沿岸地域における省エネや水質環境改善などに大いに役立つと期待できる。

以上の観点から、著者らは、振り子式の波力エネルギー抽出装置を基本構造にし、波受け板の往復運動を一方向回転に変換するためのギア構造を開発した¹³⁾。この装置を波力水車と命名するが、その構造はギアを簡潔に組み合わせたものであり、往復運

動を無駄なく回転力に換えることができる。この回転力を発電に利用することも可能であるが、本研究では発電機の水に対する脆弱さを考慮し、波力水車にコンプレッサを組み込むことで、水質改善などのためのエアレーションに利用可能な圧縮空気を生産するシステムを構築した。そして本システムの基本性能を把握するために水理模型実験を行い、波の条件と空気生産量の関係および波と波受け板の運動特性について考察した。

2. 圧縮空気生産システム

図-1 は、波浪による波受け板の往復運動から圧縮空気を生産するシステムの構成を示す。波受け板の往復運動は波力水車を用いて一方向の回転運動に変換され、コンプレッサを駆動して空気を圧縮し、エアタンクを通じて圧縮空気を水中に放出する。波力水車の内部機構は図-2(a)に示すように、一方向回転だけを伝えるラッチギヤを2個用い、1つのラッチギヤには回転を反転させるためのダミーの補助ギヤを挟み込むことによって、第1ギヤの回転が左右どちらの方向であっても、弾み車は一方向の回転力を伝達するよう設計されている。コンプレッサは往復・ピストン形式であり、図-2(b)に示すようにピストン軸が直線軌道を描くリニアクランク式の

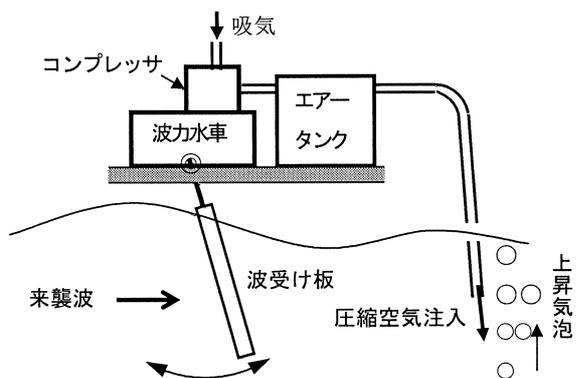
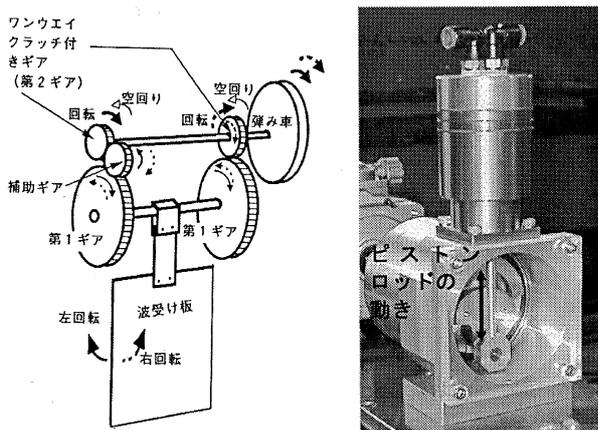


図-1 波浪エネルギーを利用したエアレーションシステム



(a) 波力水車 (b) コンプレッサ
図-2 波力水車とコンプレッサの内部構造

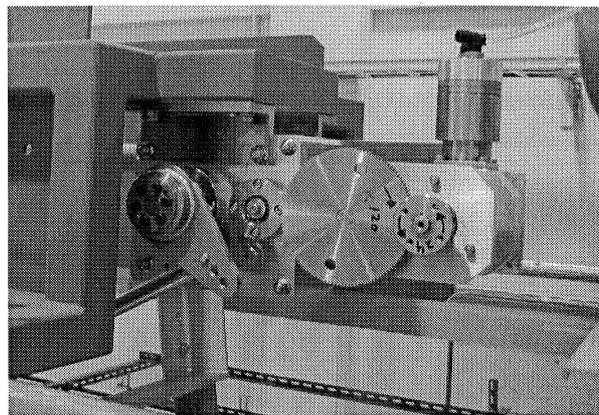


写真-1 波力水車とコンプレッサの動力伝達機構

ものを採用した。リニアクランク式の圧縮空気機は、ピストン側面に作用するトラスト力がないため、シリンダー内の潤滑油がほとんど不要で、摩擦熱の大幅な低下や振動が小さい等の利点がある。実験に使用した波力水車とコンプレッサを写真-1に示す。コンプレッサの気筒の容量は約 75cm^3 である。

3. 圧縮空気生産実験

(1) 実験方法および実験条件

実験は金沢大学自然科学研究科にある長さ約 22m、幅 1m、深さ 1.8m の造波水槽に空気生産システムを設置して行なった。図-3 に示すように、水槽の一端には吸収式造波機、他端には消波用のヘチマロンを設置し、波受け板は水槽の岸側端部より $B=3.14\text{m}$ 沖側に設置した。水深は 60cm、波受け板には幅 90cm、高さ 100cm、厚さ 6mm のジュラルミン製の平板を用い、静水状態では板の下方約 50cm が没水する状態で設置した。波受け板の水槽の底からのクリアランスは 11cm、水槽側壁からは両岸とも約 5cm とした。

表-1 に示す周期 $T=1$ 秒～5 秒の規則波を作用させ、周期毎に入射波高 H は砕波限界付近の最大波高を含む 6～9 種類を与えた。波高は $H=1.2\text{cm} \sim 19\text{cm}$ 、水深波長比は $h/L=0.05 \sim 0.39$ 、波形勾配は $H/L=0.001 \sim 0.1$ の範囲である。水槽端部に消波材を設置したものの、周期 1 秒の波は反射率 0.2 程度、周期 2 秒以上の波は反射率 0.6～1.0 の重複波が形成された。波受け板は周期 $T=2$ 秒と 5 秒の場合は重複波の節の付近に、 $T=3$ 秒の場合は腹付近に、 $T=4$ 秒の場合は中間に位置する。写真-2 は圧縮空気生産システムとエアレーションの状況を示す。波受け板の両端部では、後流渦が形成され、波受け板には入射波の水圧による慣性力と共に、後流渦による抗力も作用していると考えられる。空気発生量は流量計 (KEYENCE・FD-100V) を用いて測定し、時系列データを得た。同時に波高を波受け板の沖側 2 点で計測し、波の条件と空気生産量および波受け板の岸沖振幅との関係を調べた。測定結果は波受け板や空気流量が周期的に安定する時間帯 (造波開始約 1 分後) に得られたものである。

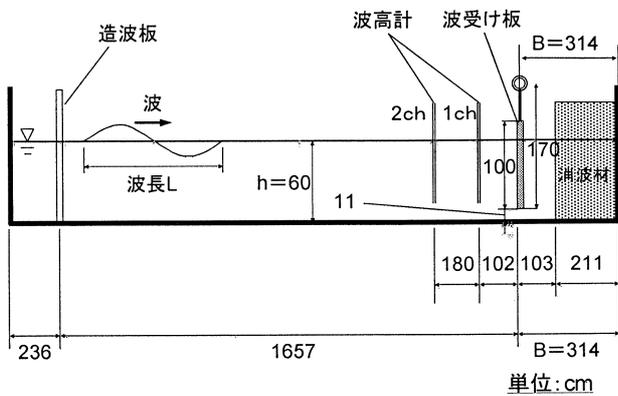


図-3 圧縮空気生産のための造波実験の概要

表-1 規則波による空気生産実験の条件および結果

波の周期 T (s)	入射波高 H (cm)	波のエネルギーフラックス W (N/s)	波受板と水槽壁面の距離/波長 B/L (-)	波長水深比 h/L (-)	波形勾配 H/L (-)	平均空気流量 Q_m (L/min)	最大空気流量 Q_{max} (L/min)	最小空気流量 Q_{min} (L/min)
1.0	12.06	14.69	2.04	0.39	0.078	0.00	0.04	0.00
	14.74	21.95			0.096	0.26	3.82	0.00
	15.90	25.51			0.103	1.05	4.52	0.00
	16.99	29.16			0.111	2.96	5.21	0.00
	17.77	31.89			0.116	3.97	5.94	0.00
	18.03	32.84			0.117	4.66	6.69	0.00
2.0	3.22	2.27	0.72	0.14	0.007	0.21	3.85	0.00
	5.03	5.52			0.012	3.76	5.96	0.00
	7.19	11.29			0.017	6.64	8.79	4.62
	7.38	11.88			0.017	8.69	10.30	6.57
	13.39	39.09			0.031	11.30	13.03	9.58
	16.58	59.95			0.038	13.84	15.40	12.21
19.31	81.36	0.044	16.05	17.83	14.00			
3.0	2.64	1.81	0.45	0.09	0.004	0.24	3.80	0.00
	4.04	4.23			0.006	3.12	6.08	0.00
	5.47	7.76			0.008	6.49	8.72	3.59
	6.56	11.16			0.009	9.21	11.46	6.34
	7.37	14.08			0.011	12.02	14.18	9.16
	8.68	19.52			0.012	15.06	17.19	12.36
10.10	26.44	0.015	17.81	19.43	15.45			
10.19	26.95	0.015	19.07	20.52	16.86			
4.0	1.6	0.71	0.33	0.06	0.002	0.09	3.52	0.00
	2.9	2.37			0.003	2.62	6.56	0.00
	3.8	4.02			0.004	5.87	9.36	0.00
	8.0	17.72			0.008	8.13	11.69	4.46
	13.2	48.00			0.014	12.05	15.87	7.59
	13.9	53.26			0.015	13.90	17.89	9.36
5.0	1.2	0.38	0.26	0.05	0.001	0.30	3.65	0.00
	1.8	0.97			0.002	2.97	7.45	0.00
	3.1	2.77			0.003	5.75	9.77	0.00
	4.6	5.96			0.004	8.12	12.72	3.87
	5.7	9.13			0.005	10.06	14.88	5.48
	7.4	15.32			0.006	11.84	16.75	6.60
	9.5	25.64			0.008	14.09	18.37	8.41
	11.3	36.33			0.009	16.24	20.28	10.00
	11.9	39.77			0.010	17.20	21.49	10.60

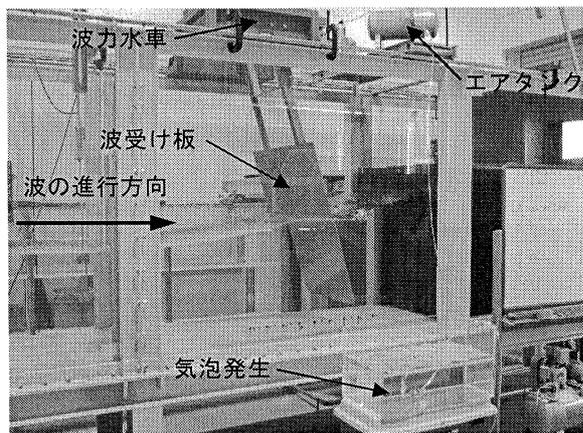
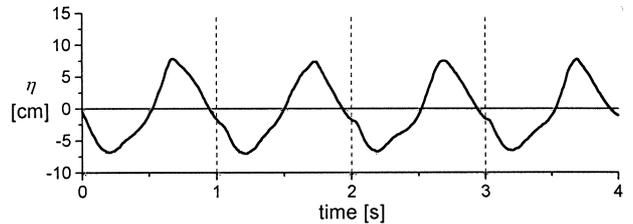


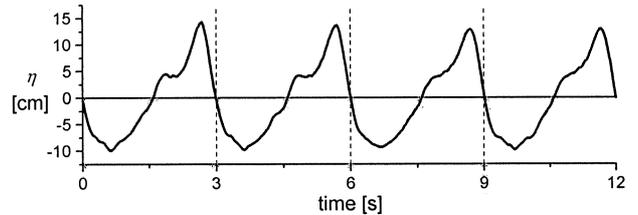
写真-2 圧縮空気生産システムとエアレーションの状況

(2) 波と空気生産量に関する実験結果

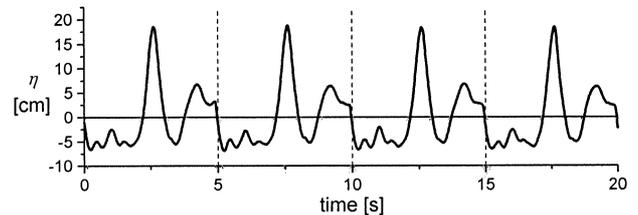
波の条件の異なる3つの水面の時間変動を図-4に、対応する条件下における空気生産量の時間変化を図-5示す。水面変動は波受け板から1.02m沖側における値であり、空気生産量Qは20°、1気圧に換算した体積流量の値である。



(a) 周期 T=1 秒, 入射波高 H=15.9cm (反射率 0.23)

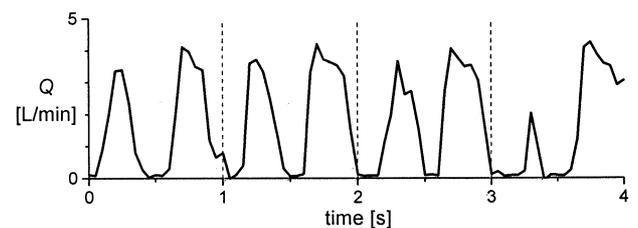


(b) 周期 T=3 秒, 入射波高 H=10.1cm (反射率 0.92)

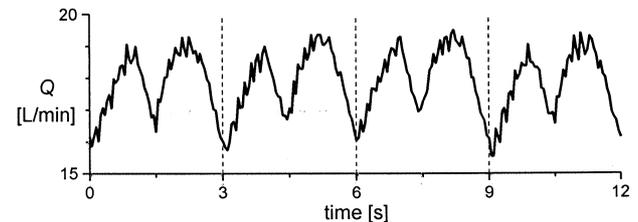


(c) 周期 T=5 秒, 入射波高 H=9.5cm (反射率 0.93)

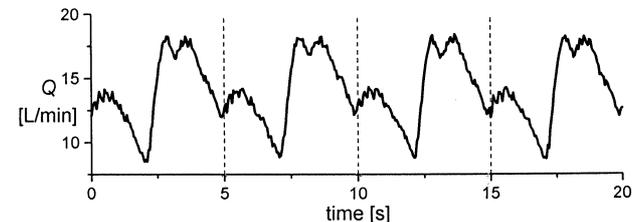
図-4 水面の時間変動 (波受け板から 1.02m 沖側)



(a) 周期 T=1 秒, 入射波高 H=15.9cm



(b) 周期 T=3 秒, 入射波高 H=10.1cm



(c) 周期 T=5 秒, 入射波高 H=9.5cm

図-5 空気生産量の時間変化

(a)周期 $T=1$ 秒の場合、静水面上下方向に比較的対称な進行波が形成され、生産される空気量は水面波の山と谷の両位相で増加し、各位相間で空気量はほぼゼロになる。(b)周期 $T=3$ 秒の場合、水槽の岸側端部壁面における水面波の反射および水面波の高次波峰の形成が顕著になる。対応する空気量は常に毎分 15L 以上で、水面波の山谷の両位相で同程度の空気流量を比較的安定して発生させることができる。(c)周期 $T=5$ 秒の場合、 $T=3$ 秒と同様に重複波が形成されるが、主波峰が鋭く高まり、水面波の有限振幅性が顕著に現れるとともに、主波峰に重なった高次波峰が形成され、波受け板付近において波峰の一部が時折砕けて複雑な水面変動になる。また、波による水粒子の運動は水面付近で大きく水底付近で小さくなるが、本システムの波受け板の往復振動はそれとは逆であるため、両者の運動の相違に起因する波も発生している。空気量は主波峰と高次波峰の発生する時間帯で増大し、高次波峰と主波峰の間の時間帯で波受け板は一時的に静止し、空気量は毎分 10L 未満まで減少する。

図-6 に、周期 $T=5$ 秒で入射波高 $H=1\text{cm}\sim 12\text{cm}$ の規則波より生産した空気量の時間最大・最小および平均値 Q_m の変化を示す。波高の増加に伴い空気生産量の最大値と平均値は増加する。特に、砕破限界付近の波高 $H=12\text{cm}$ の波では、平均的に毎分約 17L の空気が生産される。同一波に対する空気生産量の最大・最小の範囲は波高 3cm 以上において毎分約 10L でほぼ一定である。ただし、この空気生産量の最大・最小値の差は波の周期 T とともに減少し、周期 $T=4$ 秒で約 8.5L/min、周期 $T=2$ 秒で約 4L/min になる。

次に、波の周期毎に入射波高 H を増加させた場合の空気生産量の時間平均値 Q_m と波高 H および波のエネルギーフラックス W との関係を図-7(a)および(b)に示す。空気生産量 Q_m は概して W の増加に伴って増加傾向を示すが、波の周期によっては、波受け板や水槽沖側端部壁面からの波の反射や波受け板からの越波状況が複雑になるため、空気生産量 Q_m と H や W の関係は単純ではない。周期 2 秒以上の波に対する空気生産量は周期 1 秒の波のものより数倍大き

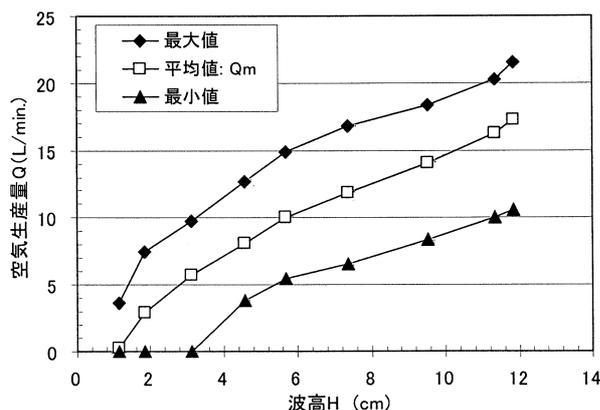
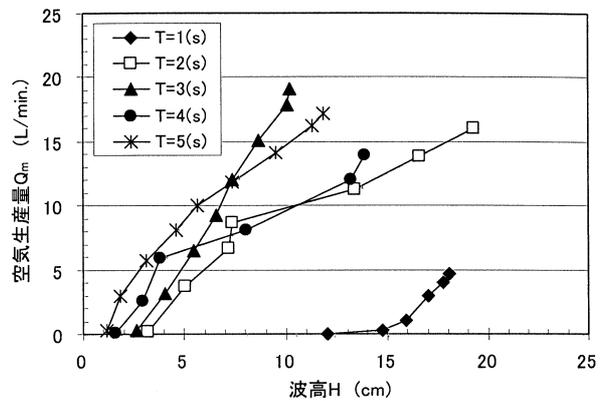
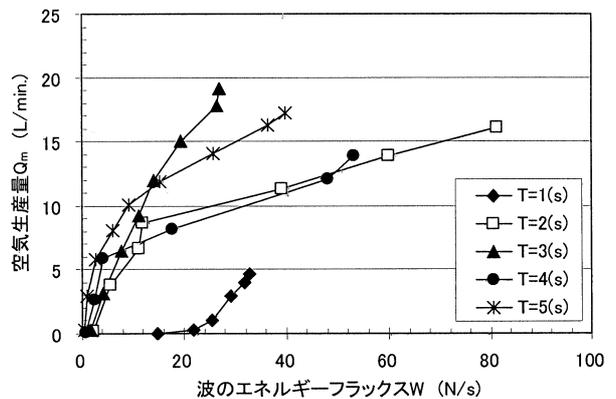


図-6 入射波高による空気生産量の変化 (周期 $T=5$ 秒)



(a)波高と空気生産量の関係



(b)波のエネルギーフラックスと空気生産量の関係
図-7 周期の異なる波による空気生産量の変化

い。これは、周期 1 秒の波 (波長水深比 0.4) は、水底に近付くほど水が動かない深海波のような波であるため、波受け板が振動し難いのに対し、周期 2 秒以上の波 (波長水深比 0.05~0.14) は、水粒子の水平移動距離が水面から水底まで比較的大きい長波的な波であるため、波受け板の振幅も大きくなることに原因がある。波のエネルギーフラックス W が比較的小さい範囲 ($W < 10\text{N/s}$) においては波が長周期になるにつれて空気生産量は増加する傾向を示すもの、 W が比較的大きい範囲 ($W > 15\text{N/s}$) になると周期 3 秒の波による空気発生量が最大になる。また、 W が大きくなるにつれて空気生産量に与える波の周期の影響が大きくなる傾向が見られる。

(3) 波と波受け板の運動に関する実験結果

以下では波受け板の岸沖方向の振り子運動について図-8 に示す波受け板の振れ幅の角度 θ を用いて水面波の条件との関係を検討する。図-9 は周期・波高の異なる波に対する波受け板の振れ幅両端の角度 θ_1 と θ_2 の変化を示すものである。周期 $T=1\sim 3$ 秒の波の場合、波高が増大するにつれて波受け板の岸方向と沖方向の振れ角は共に増加するのに対して、周期 $T=4$ 秒では、沖方向の振れ角は波高 $H=4\text{cm}$ 付近までは減少して、さらに波高が増大すると振れ角は沖方向に増加する。図-10 は波受け板の振幅を示すものであるが、波受け板の振幅は、どの周期でも、

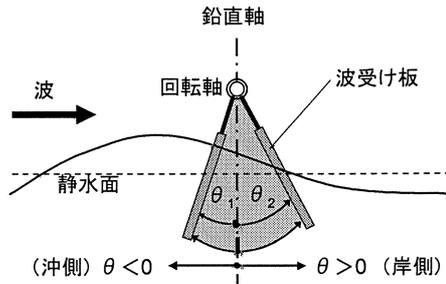
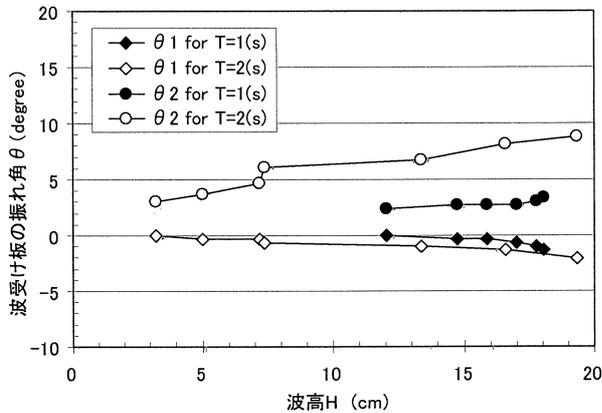
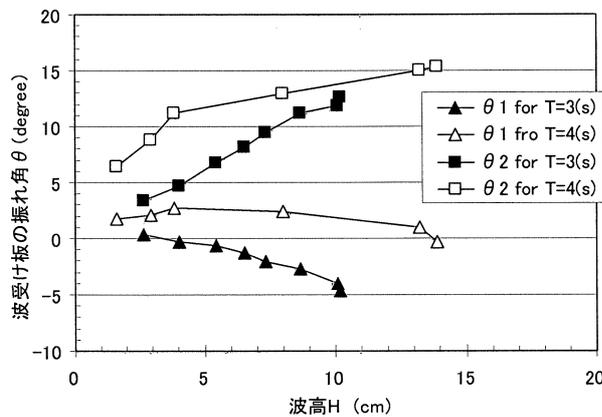


図-8 波受板の振れ角 θ の定義



(a) 波の周期 $T=1$ 秒および $T=2$ 秒の場合



(b) 波の周期 $T=3$ 秒および $T=4$ 秒の場合

図-9 波による波受板の振れ幅の変化

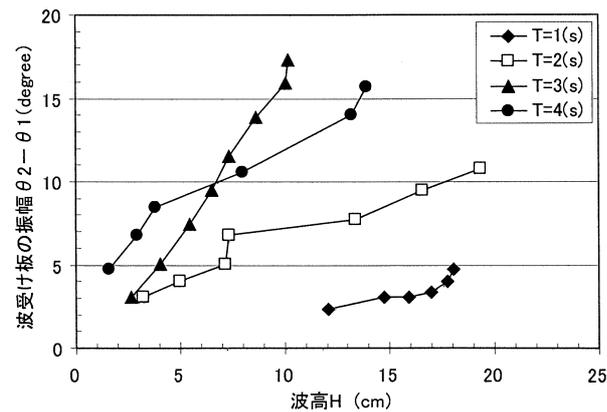


図-10 波による波受板の振幅の変化

波高とともに増加傾向を示すことが分かる。長周期になるに従って波受け板の振幅は大きく、波高の増加に対する波受け板の振幅の増加割合も大きくなる。しかし、周期 $T=4$ 秒で波高が比較的高くなる場合、周期 $T=3$ 秒の同一波高の波より波受け板の振幅は小さくなる。この主な理由として、波受け板の振れ角が大きくなるほど斜めになるため、波力を受けにくくなること、主波峰に重なった高次波峰の発生（図-4(c)参照）により波受け板の沖側への振れ幅が減少したこと等の影響が考えられる。なお、波力水車の固有振動はほとんど発生しなかった。

図-11 は波による波受け板の振動中心の位置の変化を示す。周期 $T=1$ 秒の場合、振動中心は波高に依らずほぼ定位置であるものの、周期 $T=2$ 秒以上になると波高の増大とともに波受け板の振動中心は岸側に移動し、波による質量輸送の影響が現れる。また、同じ波高でも長周期の波ほど波受け板の振動中心は岸側に寄っている。本実験では同一波高でも入射波が長周期の方が有限振幅性を示す傾向にあり、かつ高次波峰も出現することから（図-4参照）、長周期の場合（ $T=4, 5$ 秒）、主波峰通過時に板は岸側に大きく押し込まれ、その後、板が沖側に戻る際にも高次波峰によって岸側に一旦少し押し込まれるため、波受け板が沖側にあまり振れない状態にある。特に周期 $T=4$ 秒の波受け板の振動中心位置の移動が大きく、最大で 8° 岸側に傾く。波受け板の振動中心の位置が大きく偏ると、波受け板の投影面

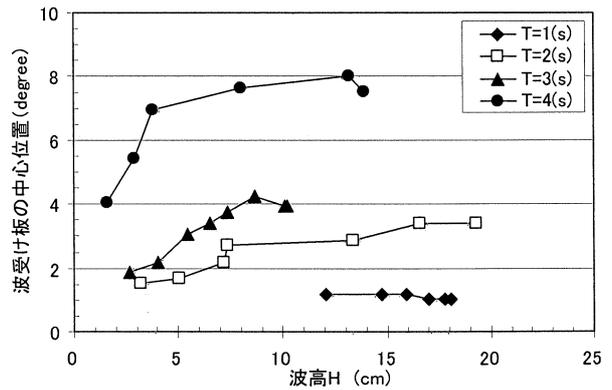


図-11 波による波受け板の振動中心の位置の変化

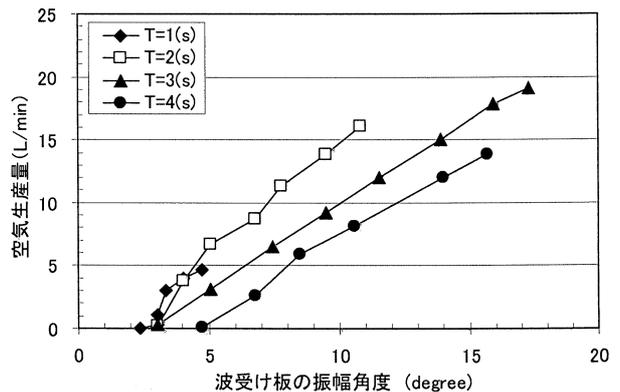


図-12 空気生産量と波受け板の振動振幅の関係

積が相対的に小さくなり、波力を受けにくくなる。この影響は空気生産量の値からも読み取れる。なお、波受け板の岸側壁面からの距離は $B/L=0.25$ が最適値であることが知られているが^{2,9)}、長周期の高波浪時には波受け板の振幅中心の岸側への移動を考慮することも必要であろう。次に、図-12 に、波受け板の振動振幅角度と空気生産量の関係を示すが、各周期の空気生産量は波受け板の振幅角度にほぼ比例すること、および振幅角度が同一の条件下においては短周期の方がより多く空気を生産することができることが分かる。

4. 結論

波力発電の試みは古くより幾つか行われてきたが、十分実用化されているとは言えない。その理由の一つに、発電機は一般に高価であるにもかかわらず、波浪場においては維持管理が難しいこと、即ち発電機と波浪場との相性が悪いことが考えられる。また通常の波浪は不規則であり、そこで発電された電力は、複数の発電機器や特別な蓄電機が無い限り、不安定なものになる。この事を勘案し、本研究では、波力エネルギーを直接に圧縮空気の製造エネルギーに変換するという“波力水車によるエアレーションシステム”を開発した。

本実験では、規則波中の波受け板の往復運動を波力水車とリアクランク式コンプレッサを用いて圧縮空気を生産した。周期 $T=1\sim 5$ 秒、波高 $H=1\sim 12$ cm の波の範囲では最大 $19\text{L}/\text{min}$ の空気を周期 $T=3$ 秒の時に発生し、波高によるが、周期 $T=2$ 秒以上の波で $10\text{L}/\text{min}$ 以上の空気を発生することが可能であることが分かった。なお、空気量が最大となった $T=3$ 秒の波の平均エネルギーフラックスは約 27W である。波受け板の岸沖振幅は、周期 $T=3$ 秒の波までは周期と波高の増加にほぼ比例するものの、周期 $T=4$ 秒で波高がある程度高くなると、波受け板の振動中心が岸側に傾き、振動振幅が増加しにくい状態になるため、空気生産量は単調には増加しない。周期 $T=3$ 秒においては波受け板は水面変動とともに岸沖方向に幅広く振動するため、本実験の範囲では最も効率良く空気を生産することができることが分かった。

本システムを現地に適するよう大型化することで、海水中の溶存酸素量を増加させるという海水浄化や、養殖場でのマイクロバブルの発生あるいは圧縮空気を利用する水循環システムの構築が期待できる。今後は、波受け板の岸沖位置の変化、水深の変化および不規則波を考慮した室内実験を進めるとともに、

現地試験も進める計画である。

謝辞：本研究の実験を進めるにあたり、金沢大学の齋藤武久准教授、当時水工学研究室の大学院生の三輪貴史君、山崎達夫君および学部生の下畑謙人君にご協力頂いた。また、本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究 C）の補助を受けたものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋重雄：日本周辺における波パワーの特性と波力発電，港湾技術研究資料，No.654，1989.
- 2) 渡部富治，近藤淑郎，谷野賢二，竹田英章，黒井昌明：防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究(2)―振り子式―，第29回海岸工学講演会論文集，pp.486-490，1982.
- 3) 宮崎武晃，益田善雄，長崎作治：波力発電装置“海明”の研究開発，第26回海岸工学講演会論文集，pp.660-664，1979.
- 4) 小島朗史，鈴木諭司，合田良実：波力発電ケーソンの空気出力に関する理論および実験，第30回海岸工学講演会論文集，pp.638-642，1983.
- 5) 堀田平，鷺尾幸久，石井進一，益田善雄，宮崎武晃，工藤君明：沿岸固定式波力発電装置の開発，海洋開発論文集，第1巻，pp.83-88，1985.
- 6) 高橋重雄，小島朗史，鈴木諭司：不規則波に対する波力発電ケーソンの空気出力に関する理論と実験，第32回海岸工学講演会論文集，pp.712-716，1985.
- 7) 橋本敦，佐藤英資，佐藤栄司，沢本正樹：水弁式波力発電ケーソンの連成による集約効果，海岸工学論文集，第42巻，pp.1006-1010，1995.
- 8) 近藤淑郎，谷野賢二，高橋幹夫，渡部富治，奥田教海：防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究―波力水車方式―，第28回海岸工学講演会論文集，pp.381-385，1981.
- 9) 玉置春夫，阿部守，阿河俊夫：可動受波板式波力発電装置のエネルギー変換効率に関する研究，海洋開発論文集，第3巻，pp.29-34，1987.
- 10) 近藤淑郎，渡部富治，谷野賢二：防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究(5)―システムの最適化―，第35回海岸工学講演会論文集，pp.842-846，1988.
- 11) 谷野賢二，水野雄三，遠藤宣世，高橋哲美：斜め入射波に対する振り子式波エネルギーの吸収装置の出力特性，海岸工学論文集，第39巻，pp.876-880，1992.
- 12) 近藤淑郎，谷口史一，渡部富治，浜田和哉：新型振り子式波浪発電の現地性能試験，海岸工学論文集，第46巻，pp.1261-1265，1999.
- 13) 石田啓，高地健，大貝秀司：波力水車とリアクランク気筒による海中エアレーション装置の開発，海洋開発論文集，第16巻，pp.105-110，2000.