

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01646

研究課題名(和文) 振動水柱型波力発電装置の空気室容積や形状の違いによる非線形影響と縮尺影響の究明

研究課題名(英文) Nonlinear Effects due to Variations of Volume and Configuration and Scale Effects of Airchamber of OWC Type WECs

研究代表者

居駒 知樹 (IKOMA, Tomoki)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：50302625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：振動水柱(OWC)型波力発電装置の空気室について、実験用の縮尺模型と実機モデル間に生じる縮尺影響の程度と原因を調べた。27体の模型による水槽実験と理論計算を実施した。その結果、空気圧が増大するOWC形状で縮尺影響が表れた。しかしながら、空気室の体積設定のための相似比に、実機と模型で変化しない大気圧の影響を考慮した場合と一般的なフルード則による相似比を適用した場合の模型で、結果に大きな差はなかった。このことは圧縮性による縮尺影響が大きいとは言えないことを示唆する。さらに理論計算においても空気圧縮に伴う空気室体積変動と圧力の位相差の影響が一次変換性能にほとんど見られなかったことから推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動水柱型波力発電装置における空気室の体積設定は、少なくとも模型実験ではその大きさが顕著に結果に影響しない。また、高周波数域で高速に空気室体積が変化するとき空気の圧縮影響が数パーセント程度であることが実験と理論計算から定量的に示された。理論的なモデル化とスケール影響の考慮が最も困難だと言われる振動水柱型システムの広範な波周波数域での最適化精度を向上できるなど、実機モデル製作の前段階で発電システムをより正確に再現した実験モデルの設計やそれを用いた実証実験のレベル向上が見込まれる。このことはTRL 5、6レベルの実験をより優位に実施できることに貢献する。

研究成果の概要(英文)：Regarding an airchamber of oscillating water column type wave energy converters, degree of scale effects between a small-scaled model and a full-scale model and their reasons were investigated. The study performed forced-oscillation tests in a still water and theoretical calculations based on the linear potential theory. From a result, configurations of OWC models with large air pressure made the scale effect to be strong. However, the pressure and the variation were affected little by the homothetic ratio to set airchamber-volume of the models in both cases when it was considered or not that the atmosphere is always same for model scale and full scale. The things suggest that the scale effect due to the compressibility of the air affected to the results little. Besides, it was suggested that small phase difference between the pressure and the volume variation due to the air compressibility influenced the primary conversion performance of the OWC models little from the calculations.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：振動水柱 縮尺影響 波力発電 圧縮性 空気室 粘性 ポテンシャル理論 強制動揺実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

振動水柱型波力発電システムの縮尺影響を考えるにあたり、空気流を作る空気室の存在は問題を難しくしている。空気挙動の取り扱い方法は幾つもあるが、厳密には粘性や圧縮性をもつ空気(流体)挙動をどこまで効率的に扱えるか、あるいは縮尺に対する影響を知る必要がある。このことは振動水柱型の装置の一次変換評価に大きく影響する。一次変換は空気パワーを作り出すまでの過程であり、この評価が高ければ基本性能は高いといえるため一次変換までの縮尺影響を定量的に論じられることに意味がある。

一次変換特性に関する研究は結局、その装置の形状における理想値をどこまで追求できるかを考えるものである。そのため、PTO (Power Take-Off: 最終出力) までの全ての発電負荷をオリフィスなどによって簡易的に再現すればよい。その負荷に対応するだけのシステム内の負荷を与えられれば高効率な一次変換は達成されて、そのパワーで空気タービンを駆動して電力を得られる。しかし、実際のシステムではタービンに空気のパワーを伝えるために、空気室からダクトを通す必要がある。オリフィスの面積によって評価される流量は現実には管内での様々なエネルギー損失現象によって減少する。このような空気流のエネルギー損失はダクトの形状や空気室からタービンへ流入させる管路を絞り込む状態によって大きく変動するはずである。しかしながら、これらについての具体的かつ定量的な研究はこれまでほとんど実施されていない。

著者は、多くの研究者が指摘する空気の圧縮の程度¹⁾が模型スケールと実機スケールで異なるという理由付けに強い疑念をもっている。圧縮性の程度を知るマッハ数を考慮すれば OWC の上下運動程度の速度で圧縮性を考慮する必要はない。実機では空気が伸縮される以上に渦になってしまうはずである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、前述した課題を解決し、振動水柱 (OWC) 型波力発電装置の波パワー変換性能に対して、波・空気・構造物とさらに浮体システムの場合には構造物の運動・挙動の相互影響に含まれる“不確かさ=空気室の縮尺影響”を明らかにすることである。また、その成果を実設計に反映させる方法を提示することである。

本研究では縮尺影響を粘性、空気の圧縮性の観点から模型実験と空気挙動の理論モデルの取り扱いの違いによる一次変換性能の差から調査した。

3. 研究の方法

(1) 静水中強制動揺実験

本研究での基準となる寸法の空気室模型 (type A) を設定し、それに対して 1/2 スケール (type B) と 1/4 スケール (type C) の 3 タイプの縮尺模型を製作した。type A は 3 タイプの空気室高さ、type B, C は 4 タイプの空気室高さを有する計 11 体の底面開口箱型空気室模型と、空気室の形状は底面開口箱型空気室模型と同様であるが、水線面以下の形状は底面を取り付け側面に開口部を設けた前面開口箱型空気室模型も 11 体製作した。また、空気室形状の違いによる影響を調査するために、マニホールド形状を有する形状の異なる空気室模型を 3 体製作し、合計 25 体の縮尺と形状の異なる空気室模型を使用して静水中強制動揺実験を行った。強制動揺のための信号は正弦波形とした。図 1, 2 に模型写真、表 1 に模型諸元と実験条件を示す。模型内壁に 2 点設置した圧力センサーで空気室内空気圧力、くし形容量式波高計で空気室内部の平均相対水位を計測し空気の流量を算定した。圧力と流量からパワーの変換量を算出する。計測されたデータはサンプリング周波数 100 Hz で A/D 変換してパソコンに記録した。データ解析には離散フーリエ (DFT) 解析を適用し、一次振幅と二次振幅およびゼロアップクロスによるトータルの振幅を得た。

(2) 理論計算

本研究では、線形ポテンシャル理論を適用したラディエーション問題に対応する計算を実施し、実験結果と比較した。グリーン関数法による計算²⁾では、空気室内の空気を断熱変化と仮定した場合の状態方程式を適用していた。本研究では、新たに等温変化を仮定して線形化した状態方程式を導入した。実験結果と計算結果を比較し、空気室の縮尺影響や、使用する状態方程式によっての結果の差異を評価した。

座標系を図 3 に示す。z 軸は上向きに正となる右手系直交座標系を適用した。

4. 研究成果

(1) 縮尺の影響

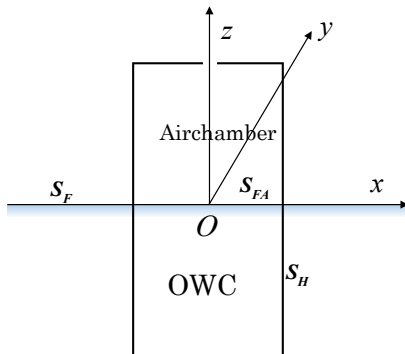
図 4 に底面開口型箱型空気室模型、図 5 に前面開口型空気室模型における縮尺の違いが空気室内圧力変動量、空気室内想定水位、一次変換効率に与える影響を示す。横軸は模型長さ L と重力加速度 g によって無次元化された周波数で示されており、縦軸は強制動揺振幅 ξ によって無次元化されている。無次元周波数が 0.85 のとき圧力変動量と相対水位は極小値をとるが、これは振動水柱の固有周波数であり、水柱が最も振動する周波数であるため空気室内部相対水が小さくなり圧力変動が生じにくいためである。空気室内圧力変動量は底面開口型と前面開口型のいずれにおいても縮尺が最も大きい type A が最大となる。空気室内圧力変動量がピークとなる無次元周波数 0.65 の点における type A と type C の値の差は底面開口型で約 9% であり、前面開口型では約 12% である。このことから縮尺の違いが空気室内圧力変動量に与える影響は底面開口型よりも底面開口型でより顕著に現れることが確認される。



図1 底面開口箱型空気室模型



図2 前面開口箱型空気室模型



S_H Structure surface
 S_F Free water surface
 S_{FA} Free surface within air cushion

図3 座標系

表1 模型諸元と実験条件

	Type A			Type B			Type C		
Scale: 1/S	1/1			1/2			1/4		
Draft d [mm]	400			200			100		
Height of body H_A [mm]	L_H	400		L_H	200		L_H	100	
	M_H	300		M_H	150		M_H	75	
	S_H	200		S_H	100		S_H	50	
				H_{A400}	400		H_{A400}	400	
Amp. of forced oscillation ζ [mm]	S_ζ	M_ζ	L_ζ	S_ζ	M_ζ	L_ζ	S_ζ	M_ζ	L_ζ
	40	60	80	20	30	40	10	15	20
Period of forced oscillation T [second]	1.10 to 3.63			0.78 to 2.56			0.55 to 1.81		
Orifice ratio $\varepsilon = A_O / A_{OWC}^{*1}$	1/50, 1/100, 1/150								
Water depth [mm]	1000								
*1 A_O : area of orifice, A_{OWC} : area of OWC surface									

(2) 空気室容積の影響

図6, 図7はそれぞれ底面開口型と前面開口型空気室における空気室容積の違いによる影響を示している。底面開口型空気室では容積の違いによる影響はほとんど現れないが、前面開口型空気室では無次元周波数0.65より高い周波数で縮尺が最も大きいtype Aで空気室内部相対水位、空位室内部圧力変動ともに値の低下が確認される。本ケースで使用した模型の水線面積は等しく、空気室の高さだけが異なる模型を用いて比較を行ったもので、この結果から前面開口型空気室では空気室の容積によって空気室特性に影響があることが確認された。

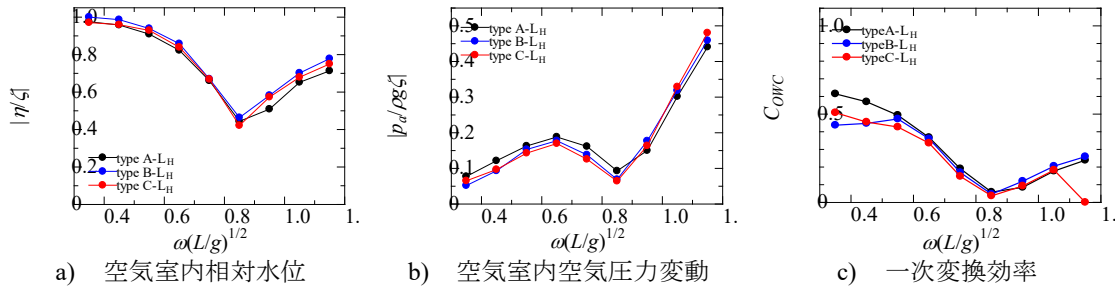
(3) 流速の二乗項を考慮した計算

図8に実験値と理論値との比較を示す。点でプロットされた実験値は底面開口箱型空気室模型 (type A- L_H) において強制動揺振幅を3パターン変化させて比較したものを示し、理論値は線で示す。空気室内空気が断熱変化すると仮定した線形の範囲での結果を実線で示し、ノズルを通る空気流速の二乗項を乗じて非線形性を考慮した結果を破線で示す。まず断熱変化を仮定した線形計算では、低周波数で空気室内圧力変動量の実験値を定性的に再現できていることが確認できる。しかしながら、振動水柱の固有周波数である無次元周波数0.85より高周波数では実験値との差が大きくなり、このとき空気室内部相対水位の値は1.0を超えている。線形計算と非線形性を考慮した計算を比較すると、ノズルを通過する空気流速の二乗項を考慮することにより、空気室内圧力変動量は線形計算よりも低下し、空気室内部相対水位は線形計算よりも増加することが確認される。空気室内圧力変動量はピークを迎える無次元周波数0.65のときに線形計算と非線形性を考慮した計算との差は約6%であるが、無次元周波数1.15の点ではその差は約15%であった。このことから、空気流速の二乗の影響は動揺速度が速くなる高周波数程大きく現れることが確認できる。

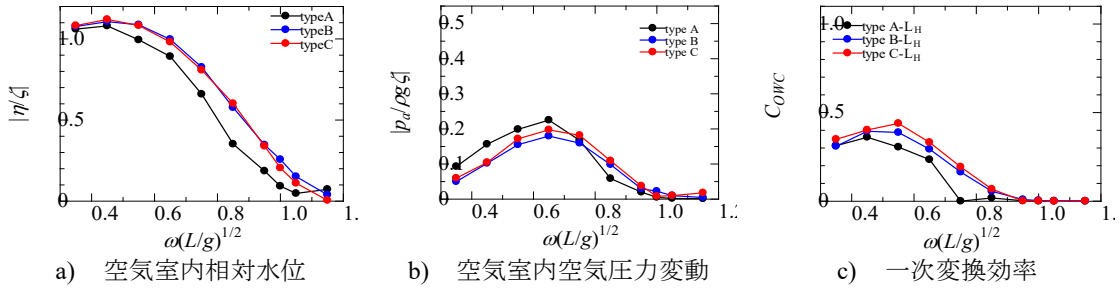
(4) 空気室空気の状態方程式の違いによる影響

Kinoshita et al.³⁾ にならって、状態方程式の違いの影響を調べた。図9は空気室内空気を断熱変化 (adiabatic) と仮定した場合と等温変化 (isothermal) と仮定した場合の計算結果を示している。(16)式の等温変化と仮定した場合の状態方程式でも断熱変化の場合と同様に空気室内の自由表面への負荷を与える係数として複素係数 α を与えている。また、(16)式の θ は水柱上下揺れ速度と圧力変動との位相差であるが、ここでは空気室内空気の圧縮の影響は考慮しないため90°として計算を行った。結果として、空気室内空気が等温変化であると仮定すると、空気室内圧力変動は無次元周波数が0.85~1.0以外の周波数で断熱変化を仮定した場合よりも低下することが確認された。特に、圧力変動量がピークを迎える無次元周波数0.65のとき等温変化と仮定した場合は断熱変化と仮定した場合より約25%程度低下することが確認された。無次元周波数1.15のとき

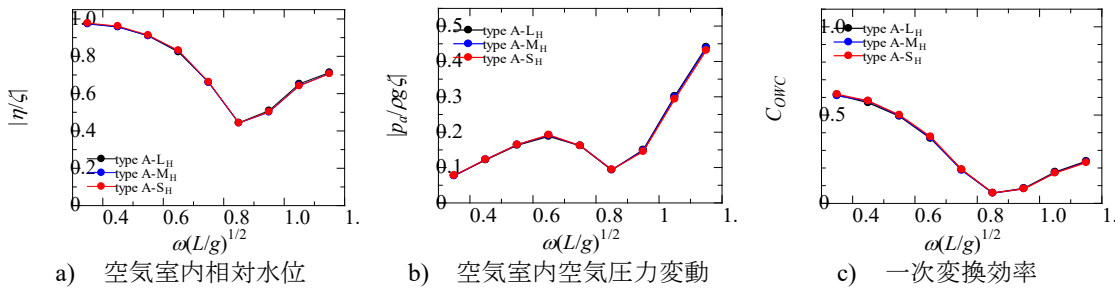
の両者の差は約 17%程度であるため、断熱変化と仮定した場合と等温変化と仮定した場合の違いは振動水柱の固有周波数よりも低周波数でより顕著に現れる



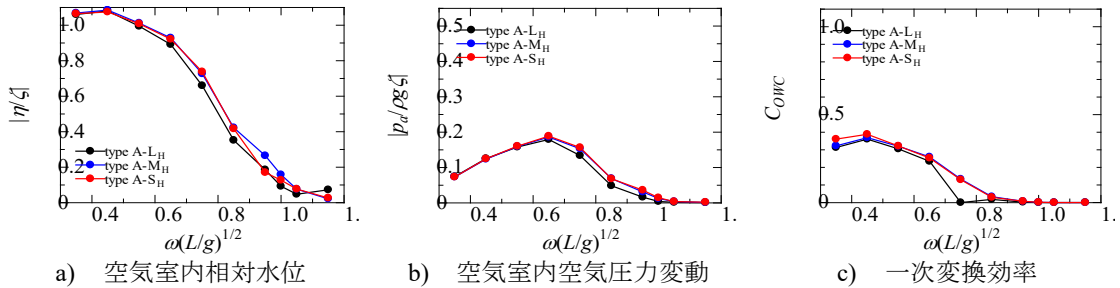
a) 空気室内相対水位 b) 空気室内空気圧変動 c) 一次変換効率
 図4 縮尺の影響 (type A, B, C- L_H -50- L_C) 底面開口型



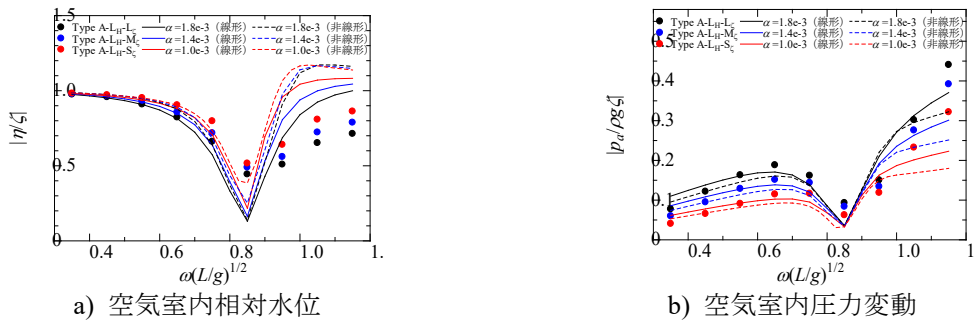
a) 空気室内相対水位 b) 空気室内空気圧変動 c) 一次変換効率
 図5 縮尺の影響 (type A, B, C- L_H -50- L_C) 前面開口型



a) 空気室内相対水位 b) 空気室内空気圧変動 c) 一次変換効率
 図6 空気室高さの影響 (type A-50- L_C - L_H , M_H , S_H) 底面開口型



a) 空気室内相対水位 b) 空気室内空気圧変動 c) 一次変換効率
 図7 空気室高さの影響 (type A-50- L_C - L_H , M_H , S_H) 前面開口型



a) 空気室内相対水位 b) 空気室内圧力変動
 図8 断熱圧縮モデルでの速度項の非線形影響

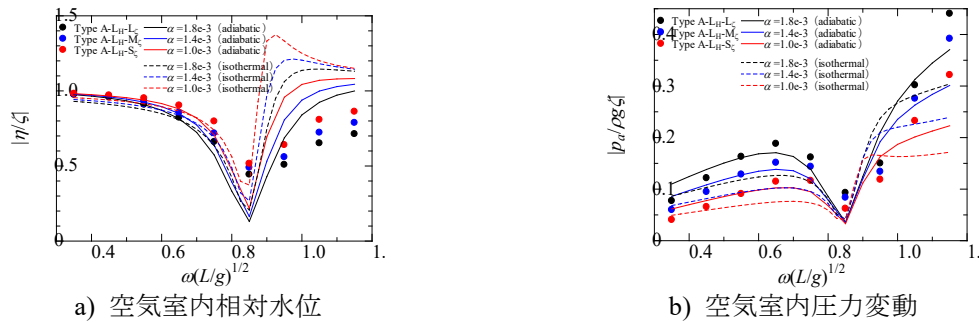


図9 空気室内空気の状態方程式の違いの影響

(5) 水面変動と圧力変動との位相差の影響

図10に実験により得られた type A, B, C- L_H - $\varepsilon=1/50-L_c$ における空気室内相対水位と空気室内圧力変動量との位相差を示す。縦軸は π で除しているため0.5は 90° の位相のずれがあることを表している。本来、空気の圧縮を考慮しなければ水面変動と圧力変動は 90° となる。しかし実験値からは周波数が低いときは0.5であるが周波数が高くなるにつれて0.5からずれていることが確認される。最も周波数の高い無次元周波数1.15のとき、位相差は約 85° である。

図11に空気室内空気が断熱変化(adiabatic)と等温変化(isothermal)と仮定した場合の圧縮性を考慮した計算結果を示す。空気室内空気が断熱変化であると仮定した場合には相対水位と圧力変動量のいずれも圧縮性による影響はほとんど現れない。一方、等温変化と仮定した場合には圧縮性の影響が現れる。相対水位と圧力変動は圧縮性を考慮することにより、無次元周波数が0.85より低周波数では値が低下し、高周波数では増加する。無次元周波数が0.35~0.85の範囲では圧縮性による影響はほとんど無いが、周波数が高くなるにつれて影響が現れて位相差が 80° の場合、 90° の場合より最大で約15%程度増加する。

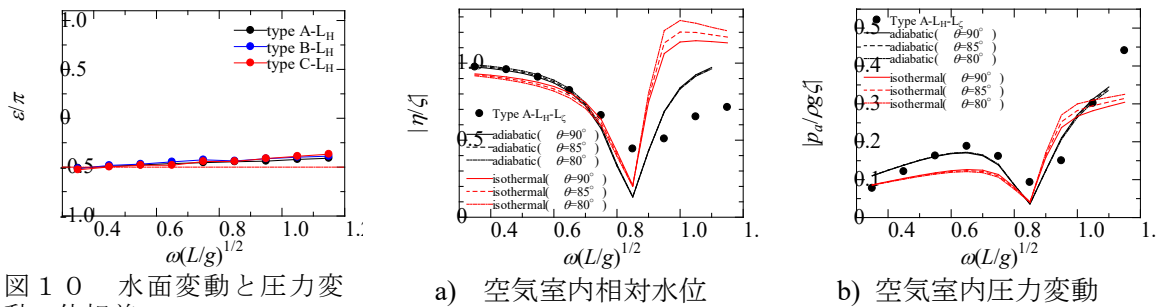


図10 水面変動と圧力変動の位相差
(type A, B, C- L_H - $\varepsilon=1/50, L_c$)

図11 位相差を考慮した計算

(6) 成果のまとめ

本研究では複数の縮尺模型を用いた水槽実験と理論的取り扱いによる空気室内圧力変動等の違いを定量的に比較、考察することによって以下の結論を得た。

- 1) 縮尺の違いが空気室内相対水位および空気室内圧力に与える影響は底面開口型より前面開口型で大きく現れ、その差は最大で約12%程度あることが確認された
- 2) 空気室内空気が断熱変化であると仮定した場合に、ノズルを通過する空気流速の二乗項による非線形性を考慮した場合としなかった場合の計算から、非線形性を考慮すると空気室内圧力変動量は低下し、空気室内相対水位は上昇する。その差は周波数が高くなるほど大きくなり、最大で約15%であった。
- 3) 空気室内空気が断熱変化と仮定した場合と等温変化と仮定した場合では、等温変化のほうが断熱変化よりも空気室内圧力変動量が低下することが確認された。両者の差は振動水柱の固有周波数よりも低周波数でより顕著に現れる。
- 4) 断熱変化を仮定した場合と等温変化を仮定した場合の空気の圧縮性を考慮すると、断熱変化では空気の圧縮性の影響は線形化された本計算には顕著に現れないが、等温変化とした場合には、圧縮性を考慮しなかった場合と比較して最大で15%程度の差が現れる。

参考文献

- 1) Falcao A.F. and Henriques J.C., 2014, "Model-prototype similarity of oscillating-water-column wave energy converters," International Journal of Marine Energy 6, pp.18-34
- 2) Ikoma T., Masuda K., Eto H. and Shibuya S. 2018, "Basic Characteristics of the Primary Conversion of an OWC Type WEC Installed on a Wave Dissipating Double-Caisson," Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on OMAE2018, ASME, OMAE2018-77020.
- 3) Kinoshita T., Masuda K., Miyajima S. and Kato W. 1985, "Effects of air compressibility in an air-chamber on a performance of a fixed O.W.C. Type Wave Energy Absorber," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.157, pp.211-216.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomoki Ikoma, Yoshiyuki Kihara, Shota Hirai, Yasuhiro Aida, Koichi Masuda, Hiroaki Eto	4. 巻 -
2. 論文標題 A Basic Study on Influence of Airchamber Volume on OWC Models to Power Conversion Performance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/OMAE2019-95925	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tomoki Ikoma, Shota Hirai, Yasuhiro Aida, Koichi Masuda, Hiroaki Eto	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of Scale and Configuration of Air Chamber of OWC Type WECs on Air Chamber Characteristics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/OMAE2020-18762	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tomoki Ikoma, Shoichiro Furuya, Yasuhiro Aida, Koichi Masuda, Hiroaki Eto	4. 巻 -
2. 論文標題 Characteristics of OWC Type WEC Dampers Installed on a Very Large Floating Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/OMAE2020-19002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tomoki Ikoma, Shota Hirai, Yasuhiro Aida, Koichi Masuda	4. 巻 -
2. 論文標題 SCALE AND CONFIGURATION EFFECTS OF AN AIRCHAMBER ON PTO OF OSCILLATING WATER COLUMN TYPE WAVE ENERGY CONVERTERS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2021	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 平井翔太, 居駒知樹, 増田光一, 相田康洋
2. 発表標題 振動水柱型を有する空気室の容積の縮尺影響に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 巢河香里, 居駒知樹, 増田光一, 相田康洋
2. 発表標題 水深と壁厚さがPW-OWC型波力発電装置の一次変換し慧能に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古矢祥一朗, 居駒知樹, 恵藤浩朗, 相田康洋, 増田光一
2. 発表標題 Behaviours of OWC Devices Installed on a Large Floating Structure and PTO Performance
3. 学会等名 PACON International (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井翔太, 居駒知樹, 恵藤浩朗, 相田康洋, 増田光一
2. 発表標題 Effects of the Scale and Airchamber Volume of OWC Type WECs on Air Pressure and Flow Rate
3. 学会等名 PACON International (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木原禎之, 居駒知樹, 平井翔太, 相田康洋, 増田光一, 恵藤浩朗
2. 発表標題 振動水柱型波力発電装置の空気室特性に与える縮尺影響に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaori Sugo, Tomoki Ikoma, Koichi Masuda, Yasuhiro Aida and Hiroaki Eto
2. 発表標題 Effects of Projecting-Wall Thickness on Primary Conversion Performance of PW-OWC Type WECs
3. 学会等名 PACON International (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井翔太, 居駒知樹, 相田康洋, 増田光一, 恵藤浩朗
2. 発表標題 振動水柱型波力発電装置の空気室特性に与える縮尺影響に関する基礎的研究 - その2
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古矢祥一郎, 居駒知樹, 相田康洋, 恵藤浩朗, 増田光一
2. 発表標題 大型浮体に搭載したOWC型波力発電装置のダンパー効果による運動特性について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平井翔太, 居駒知樹, 相田康洋, 増田光一
2. 発表標題 OWC型波力発電装置の空気室の縮尺や容積の違いが空気室特性に及ぼす影響に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平井翔太, 居駒知樹, 相田康洋, 増田光一
2. 発表標題 振動水柱型波力発電装置の空気室の縮尺及び形状が空気室特性に与える影響に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本海洋工学会, 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古川景菜, 居駒知樹, 相田康洋, 増田光一
2. 発表標題 PW-OWC型波力発電装置の共振特性
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平井翔太, 居駒知樹, 芦田康弘
2. 発表標題 振動水柱型波力発電装置の空気室の縮尺影響と非線形影響に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	相田 康洋 (AIDA Yasuhiro)	日本大学・理工学部・助教 (32665)	
連携研究者	恵藤 浩朗 (ETO Hiroaki) (90360510)	日本大学・理工学部・准教授 (32665)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------