

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02124

研究課題名(和文) 持続可能なエネルギー基盤としてのリニア波力発電システム設計と電力量最大化制御

研究課題名(英文) System design and output energy maximization control of ocean wave linear generators as sustainable fundamental energy source

研究代表者

古関 隆章 (KOSEKI, Takafumi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：20211899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：数mの規模、1m程度の可動域を持つ強力かつ堅牢な永久磁石式横磁束形リニア同期機を発電機としてもつポイント・アブソーバ式波力発電機の試験機を、製作し、水槽実験により発電機として機能させ、その基本性能を確認した。これにより、リニア発電機の発電時の電圧、電流ベクトルの挙動を解明し発電機としての基本性能と設計の有効性が確認できた。一方、現在の装置構成で、能動制御時の可動子の想定外に強い固着力のため水晶の波力で発電機を動かさない問題を現場で解決できなかった。このため、発電電力量の制御による最大化、特に波の予測と数値計算に基づく制御法の水槽での能動制御の有効性の実証を行う目標達成には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では高性能なリニア同期機を実装し、波力発電機として水槽実験でその性能を実際に試験した点に社会的意義がある。一方、水槽に対し発電機の力が強すぎたシステム設計になっており、能動制御の損失が本来得られるはずの発電電力以上となってしまったことに試験として十分な結果が得られなかった。またダイレクト・ドライブの直動機のエネルギー変換の設備利用率は低くなりがちで、能動制御によりその性能向上を狙っても、能動制御に伴うエネルギー損失を上回る出力を得られない可能性も認識された。左記を視野においた、さらなるシステム検討、陸上での模擬試験等を併用した能動制御による発電量向上への実験的挑戦が今後の課題となる。

研究成果の概要(英文)：We have built a test model of a point-absorber type wave power generator with a strong and robust permanent magnet transverse flux type linear synchronous machine, and confirmed its basic performance by conducting tank experiments. The basic performance of the generator and the effectiveness of the design were confirmed by clarifying the behavior of the voltage and current vectors of the linear generator during power generation. On the other hand, we could not solve the problem that the generator could not be moved by the wave force of the crystal due to the unexpectedly strong sticking force of the mover during active control with the current equipment configuration. Therefore, we were unable to achieve our goal of maximizing the amount of power generated by control, and in particular, to demonstrate the effectiveness of active control in an aquarium with a control method based on wave prediction and numerical calculations.

研究分野：電気機械エネルギー変換

キーワード：リニア発電機 リニア同期機 波力発電 能動制御 電気機械エネルギー変換 海洋波 パワーマネジメント 発電量最大化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

日本は、化石燃料のほとんどを輸入に頼っている上、電力供給の3割近くを担っていた原子力発電の発電量を2011年以降長期的に削減する方針を定めた中、風力や太陽光による再生可能エネルギーによる発電を戦略的に伸長する必要性が高まっている。四方を海に囲まれた我が国において、海洋エネルギーの有効活用の重要性が認識され、様々な波力発電の検討が行われてきた。しかし、波力エネルギーは、風力以上に天候による変動が大きく設備利用率が悪くなりがちで平均電力量を確保することの困難が知られており、波力発電の経済性には大きな問題があった。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究は、日本が先進的な技術開発実績を持つリニアモータを応用した発電機による波力発電の実用化を目指し、リニア形波力システムの構成を提案し、そのシステム設計及び平均的な発電電力を大きくする制御技術を開発する。具体的には、(1) 低速往復運動を回転運動に変換すること無く、直接電力に変換できるシステム構成、(2) 上記の直接駆動に適した低速・大推力の特長をもつリニア発電機の構成・設計技術、(3) 発電機出力は一定周波数の交流にならないため出力電力を整流し、電力を平滑化する電力変換器とその制御方法、(4) 海水の力学的性質を考慮し発電機を能動駆動して平均発電電力を最大化する制御、(5) 上記のための計測データに基づく海洋波の予測とそれを反映した発電電力最大化制御を重点検討し、大型水槽での波力発電ミニシステムの実験を通じ、リニア発電機性能と不規則波のもとでの平均電力量最大化制御の有効性検証を行う。

## 3. 研究の方法

波の予想をし、出力平均電力量を大きくする能動制御法を理論的に考え、数値計算でその性能を確認するとともに、実装方法を明確にし、その性能を実験的に検証するとともに、実際の適用上の問題点を整理するために水槽実験を行う。

コロナ禍の活動制限の中で、当初計画から実験検討が遅延し、最終年度の第4四半期に試験実務が集中した。2019年度に[1]に示す考え方で高性能でかつ推力脈動の小さな堅牢な永久磁石式リニア同期機を設計し、それを発電機とするポイントアブゾーブ型の波力発電の水槽試験を目指した作業を東京大学と海上安全技術研究所が協力し、宇都宮大学後藤准教授のアドバイスを受けたながら進めた。並行して、その発電機の能動制御による発電電力の最大化とエネルギーマネジメントを志向するエネルギー蓄積装置と電力変換器の検討を、発表文献[2]-[4]に示される宇都宮大学後藤研究室が行った。以下に、2021年9月期から2022年3月まで集中的に行なった海上安全技術研究所における机上予備実験と水槽試験に絞り、その成果を報告する。

## 4. 研究成果

### 4.1 2021年度後半の海上安全技術研究所における予備机上実験および水槽試験

2021年後半に海上安全技術研究所（三鷹）1号館動揺水槽）にて、以下の水槽試験を集中的に行なった。



図1 インバータを用いた水槽試験の様子

自由振動試験の結果、固有周期 1.86 s 造波減衰力係数：90 N/(m/s) 粘性・機械減衰力係数：252.2 N/(m/s) 全減衰力係数：342.2 N/(m/s) という本発電システムの性質に関する基本測定結果を得た。しかし、この試験の仮定で可動子の固着問題を解消できないことが判明し、1/25（火）に協議の末、受動的な抵抗試験のみに試験計画を変更、負荷抵抗を手配し1/27（木）に東京大からその試験計画変更に伴う、抵抗負荷関係機材を搬入した。そして1/2/1まで 抵抗試験による発電機出力の測定を遂行した。

## 4.2 抵抗試験結果

発電機の3相出力側に1.5kΩとかなり大きめの負荷抵抗を、三相ダイオード整流器を介して接続し、発電機出力電圧を相電圧に変換した波形と線電流波形を図2に示す。これを固定し座標 $\alpha$ 軸 $\beta$ 軸上にプロットした電圧および電流ベクトル軌跡は図12のようになる。これにより、界磁位置が水の波の影響で変化し、その速度波形も振動的に変化する中でも、発電機内部の電圧、電流の時間的挙動が直感的に把握できる。三相ダイオード整流器の影響で1/6周期ごとに電圧ベクトルも円軌跡から微かな乖離をもつ変化を受け、電流ベクトル軌跡は六角形に近い挙動となっている。

電圧・電流ベクトルの内積が瞬時電力を表しているので図3のような出力電力波形を計算し、さらにその時間積分、平均値を計算することで、出力電力量、平均出力電力の評価が可能となる。

電圧、電流計の配線

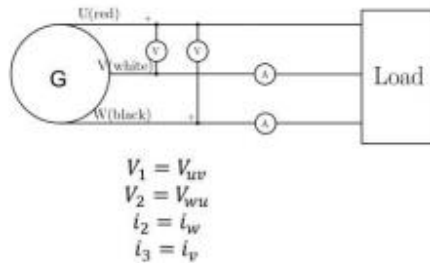


図2 抵抗試験時の電力測定回路と試験の様子

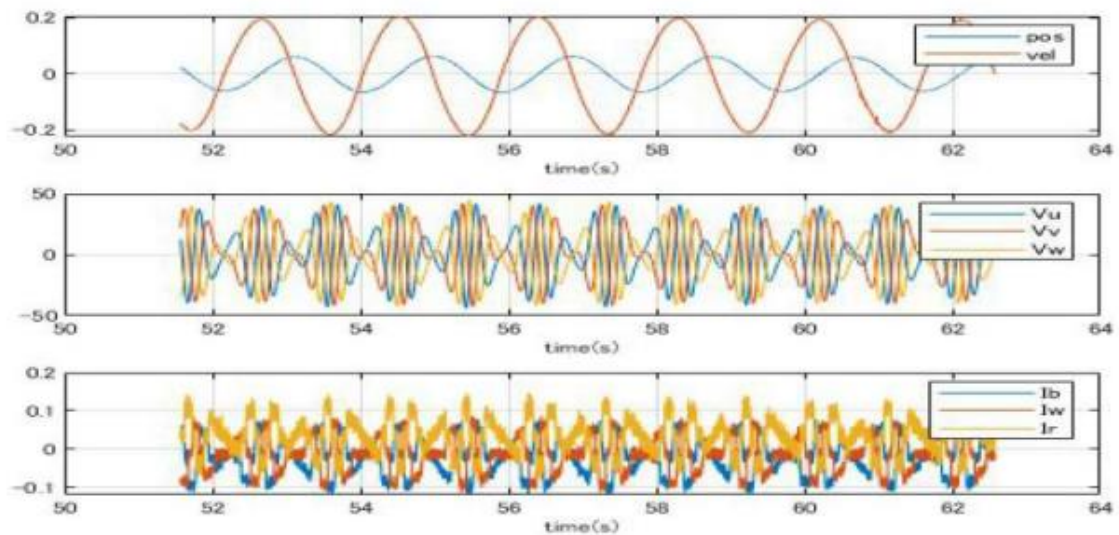


図3 2022年1月下旬に行ったある試験における座標変換後の位置[m]/速度[m/s]、相電圧[V]、相電流[A]測定波形

## 4.3 発電実験の電圧・電流測定データからの電圧・電流ベクトル軌跡の可視化、電力計算

発電機の3相出力側に1.5kΩとかなり大きめの負荷抵抗を、三相ダイオード整流器を介して接続し、発電機出力電圧を相電圧に変換した波形と線電流波形を図2に示す。これを固定し座標 $\alpha$ 軸 $\beta$ 軸上にプロットした電圧および電流ベクトル軌跡は図4のようになる。これにより、界磁位置が水の波の影響で変化し、その速度波形も振動的に変化する中でも、発電機内部の電圧、電流の時間的挙動が直感的に把握できる。三相ダイオード整流器の影響で1/6周期ごとに電圧ベクトルも円軌跡から微かな乖離をもつ変化を受け、電流ベクトル軌跡は六角形に近い挙動となっている。

電圧・電流ベクトルの内積が瞬時電力を表しているので図5のような出力電力波形を計算し、さらにその時間積分、平均値を計算することで、出力電力量、平均出力電力の評価が可能となる。

図6のように、整流器動作を考慮した電圧・電流時間波形を（電流センサからの情報を用いずに）電圧測定結果のみから理論的に計算した。これに基づき発電電力の再計算を行った。図6の三相電流時間波形をもとに固定子座標 $\alpha$ - $\beta$ 軸に座標変換した電流ベクトル軌跡は、確かに海技研の電流センサで測定した図4右上の電流ベクトル軌跡に近い、六角形となることを、理論に基

づく計算により示すことができ、試験結果と理論の整合性の確認ができた。

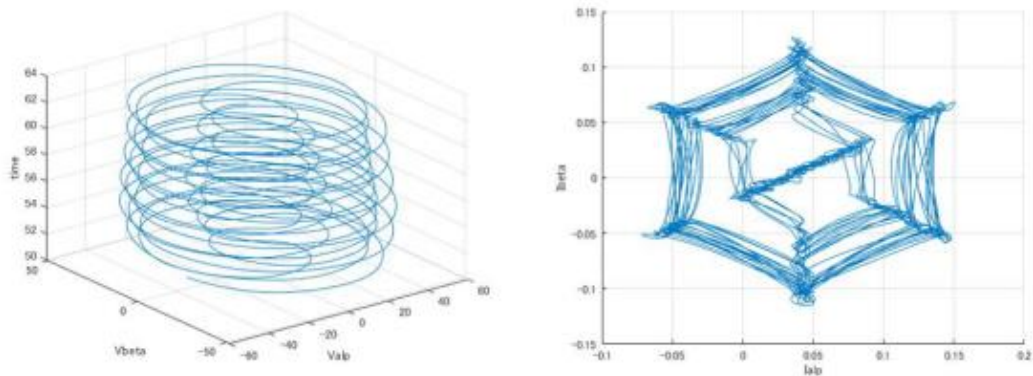


図4 3相2相変換後の電圧(左 V)・電流(右 A)の $\alpha$ 、 $\beta$ 軸上でのベクトル時間軌跡の波形

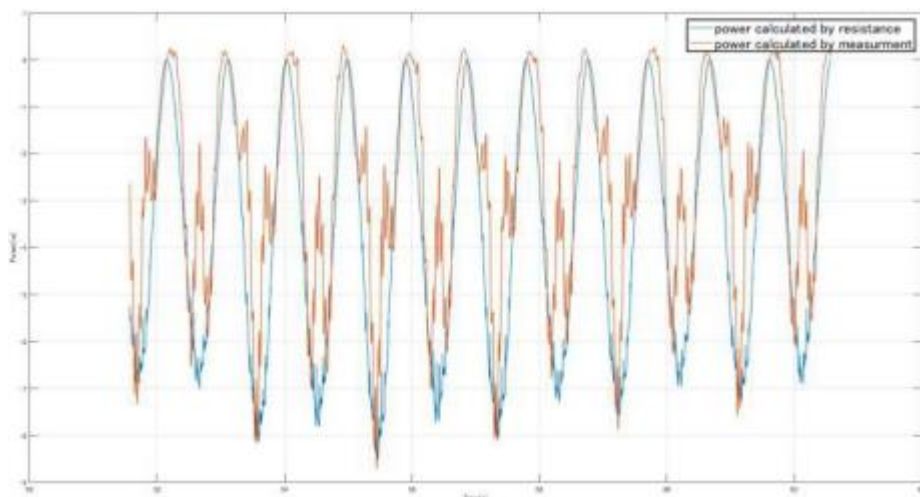


図5 整流器を用いた測定結果(橙)と三相抵抗負荷を仮定した簡易計算結果(青)との比較

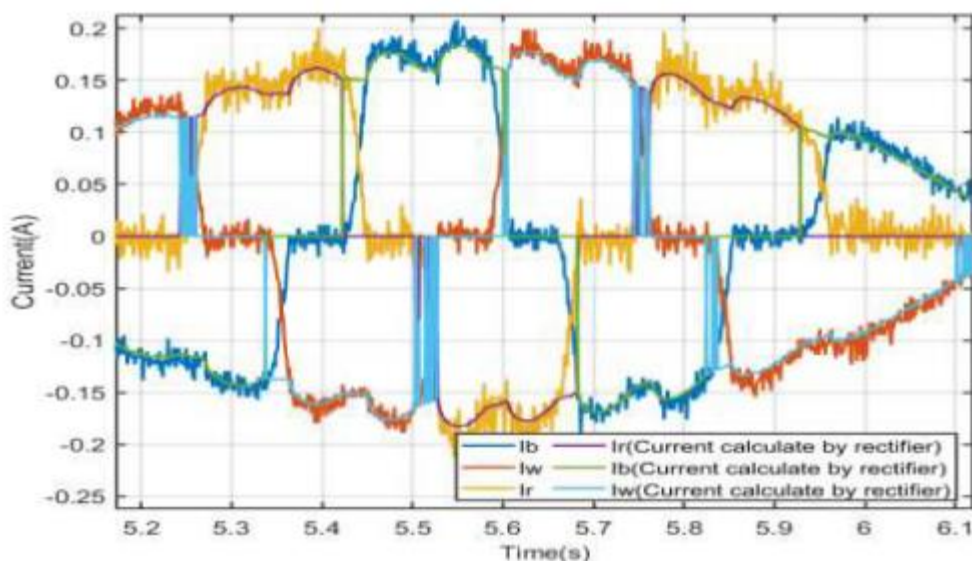
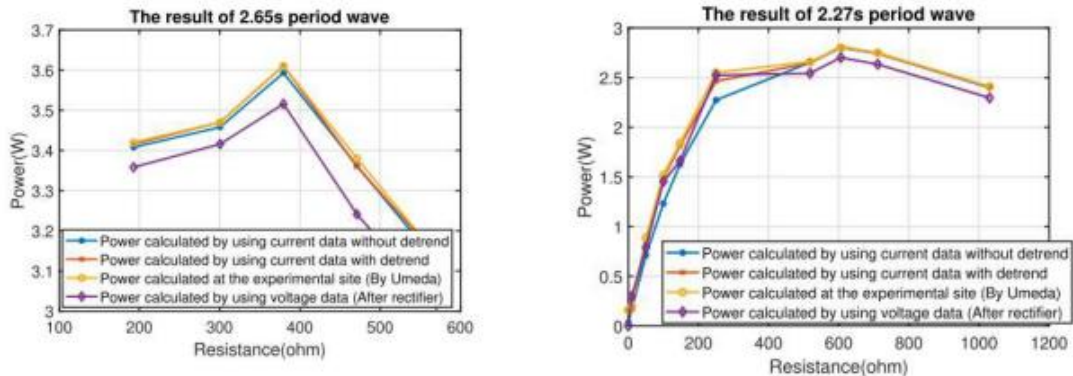


図6 規則的な水の正弦波で駆動したときの発電機電流測定値:  
整流器動作を考慮し算出した電流波形

上記のとおり、海技研側の電圧・電流測定結果に基づく2電力法による発電電力と、東京大で行った電流・電流ベクトルの内積に基づく発電電力の計算結果がよく一致することが確認された。これは理論的には当然のことだが、これにより電力計の電流測定に関して精度保証の対象外である低い周波数領域の電力測定となった今回の試験においても、その電流測定情報に基づく電力測定が正しくできていたことが確認できた。

#### 4.4 まとめと今後の課題

本研究における実験的取り組みを通じ、リニア発電機の発電時の電圧、電流ベクトルの挙動を解明できた。しかし、ここまでの装置構成で、インバータ内部での電流制御の細かな調整ができず、想定外の電源による能動制御時の可動子固着により、水槽からの力で発電機が動かなくなるという問題を現場で解決できなかった。これにより発電電力量の制御による最大化、特に海技研殿の数値計算に基づく[5]に示されるような能動制御法の水槽での実証を行うことができず、最も重要な試験の目標の達成には至らなかった。



(a) 規則波の波周期が 2.65 秒の時

(b) 規則波の波周期が 2.27 秒の時

図 7 規則波入力時負荷抵抗の値を変化させて測定した発電電力：

海技研の 2 電力計法にもとづく発電電力測定値と

ここまでの議論を反映した出力電圧測定値に基づく東京大側での発電電力再計算結果の比較

結果的に、発電機側の発生力強すぎたシステム設計になっていて、能動制御の損失が本来得られるはずの発電電力以上となってしまうことが、今回の水槽試験の能動制御不成功の本質的な要因とも理解できる。すなわち、この波力発電機試験で具体化に認識された知見として、ダイレクト・ドライブの直動機のエネルギー変換の設備利用率は低くなりがちで、能動制御によりその性能向上を狙っても、能動制御に伴うエネルギー損失を上回る出力を得られない可能性が依然としてあることを、ここに記録する。

以上を視野に置き、今後のさらなるシステム設計の最適化の検討と、能動制御による発電量向上への継続した実験的挑戦が今後の課題として重要である。

#### 上記の報告で引用した関連発表文献

[1] 光井 祐人, アーメド サルマン, 青山 康明, 古関 隆章: “2 段リニア同期モータの推力密度を保持しつつディテントカを低減する永久磁石の最適配置,” 電気学会リニアドライブ研究会資料 The papers of technical meeting on magnetics, IEE Japan 2019 (40), 43-48, 2019-06-27

[2] 増田昌弘, 後藤博樹: “波力発電の蓄電システム容量の基礎検討”, 第 10 回電気学会群馬・栃木支所合同研究発表会, 2020

[3] 増田昌弘, 後藤博樹: “波力発電用蓄電システムにおける変換器の検討”, 電気学会全国大会, 2021

[4] Akihiro Masuda, Hiroki Goto: “Control Strategy for Power Smoothing Converter with Energy Storage for Maximum Power Controlled Wave Energy Converter”, 10th International Conference on Renewable Energy Research and Applications(ICRERA2021), 2021

[5] 梅田 隼, 藤原 敏文: “強化学習によるリニア式波力発電装置の電力量最大化,” 日本船舶海洋工学会論文集 31 巻 (2020), pp. 229-238

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 光井 祐人, アーメド サルマン, 青山 康明, 古関 隆章
2. 発表標題 2段リニア同期モータの推力密度を保持しつつディテントカを低減する永久磁石の最適配置
3. 学会等名 電気学会リニアドライブ研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田昌弘, 後藤博樹
2. 発表標題 波力発電の蓄電システム容量の基礎検討
3. 学会等名 第10回電気学会群馬・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田昌弘, 後藤博樹
2. 発表標題 波力発電用蓄電システムにおける変換器の検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akihiro Masuda, Hiroki Goto
2. 発表標題 Control Strategy for Power Smoothing Converter with Energy Storage for Maximum Power Controlled Wave Energy Converter
3. 学会等名 10th International Conference on Renewable Energy Research and Applications(ICRERA2021)
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
研究分担者	藤原 敏文 (Fujiwara Toshifumi)  (10425754)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員  (82627)	
研究分担者	梅田 隼 (Umeda Jun)  (30757563)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員  (82627)	
研究分担者	國分 健太郎 (Kentaroh Kokubun)  (50358404)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員  (82627)	
研究分担者	谷口 友基 (Tomoki Taniguchi)  (80586678)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員  (82627)	
研究分担者	後藤 博樹 (Hiroki Goto)  (90374959)	宇都宮大学・工学部・准教授  (12201)	

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
---------	---------