

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02131

研究課題名（和文）進行波型直接エネルギー変換器の変調効果時間変化解析と自励発振の研究

研究課題名（英文）Studies on temporal variation analysis of modulation effect and self-excitation in a traveling wave direct energy converter

研究代表者

竹野 裕正（Takeno, Hiromasa）

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：90216929

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：ヘリウム3燃料核融合発電で利用される進行波型直接エネルギー変換器では、入射イオン束の変調によってイオン束が径方向に散乱される。本研究はこの物理機構解明を目指した。模擬実験で二次電子による現象の擾乱を防いで分析するべく、電界形成格子を排除した単一穴電極で実験を行った。入射イオン束の変調後の径方向分布では、直流電界では見られない位置で電界に応じたイオン束の増大が観測された。これは単一粒子軌道計算での偏向とも異なり、変調での集群による散乱の結果と予想される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究は、究極の脱炭素・脱放射能エネルギー源たるヘリウム3燃料核融合発電における、進行波型直接エネルギー変換器の開発に関わる一課題である。イオン束の径方向散乱は、変換元エネルギーの損失であり、変換器の効率に直結する。研究自体はまだ現象解明の段階ながら、この問題を扱うことは高効率器の開発へ向けての一步と評価できる。また、計画途中から組み込まれた変換器構造からの格子電極の廃止は重要で、これが実験研究において導入されたことも変換器開発へ向けての前進と評価できる。

研究成果の概要（英文）：In a traveling wave direct energy converter, which will be used in D-3He fusion power generation, the incident ion flux is scattered radially by modulation. The present study is aiming at the clarification of the physical mechanism. We performed simulation experiments by using electrodes for field formation with a single hole excluding mesh in order to prevent from disturbing the phenomenon by secondary electrons. The radial distribution of the incident ion flux after modulation shows an increase due to the field application at a position where no reaction was found on dc field application. This increase does not correspond to the deflection in numerical orbit calculations of a single particle, and is expected to be a result of scattering due to bunching by the modulation.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：核融合 新エネルギー 直接発電 進行波型直接エネルギー変換器

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

この研究では、ヘリウム 3 燃料核融合発電での利用が期待される直接発電システムのうち、進行波型のエネルギー変換器(TWDEC)を扱う。申請者のグループは、主として模擬実験で TWDEC の開発を進めてきた[]。最近の研究で、動作の一過程である入射イオン束の変調によって、イオン束が径方向に散乱されることが実験的に観測された[]。この散乱現象には時間変化が見られ、変化の特性時間が、以前から未解明である変調効果の時間変化のものと同程度と確認された[]。イオン束の散乱の時間変化の現象解明は、変調効果の時間変化現象の解明につながり、変調効果自体の改善、ひいては TWDEC 装置全体の自励発振[]の実現に結びつくと思われる。

2. 研究の目的

(1)研究開始当初の目的 1. の背景のもと、この研究では、TWDEC での変調効果の時間変化の要因と考えられるビームの径方向散乱を模擬実験および数値計算で解析して物理機構を解明し、それを通じて自励発振動作を実現することを目的としていた。

(2)計画途上で問題の確認 (1)の方針で一旦研究を進めたところ、TWDEC 装置内の格子状電極にイオン束が衝突して発生する二次電子[]の重要性に気づいた。イオン束の散乱は、イオン間の静電反発によると予想されるが、負電荷の電子の存在はその現象を緩和する方向に働く。模擬実験で二次電子を避けることは困難で、その結果では実機での現象を展望することが難しいと予想される。

(3)研究期間内での修正目的 (2)の二次電子の影響は、従来から直接発電システムにおける共通の問題として認識されてきた。TWDEC でこの影響を克服するには、格子状電極を排除する必要がある。そこで、本研究での最終目的として、格子状電極を使用しない TWDEC の構成で、変調による散乱効果を解析することに、目的を当初のものから変更した。途中での目的変更のため、当初目的の変調効果の時間変化現象の解析や自励発振の実現については、研究期間内にまとまった成果を得ることはできなかった。

3. 研究の方法

(1)模擬実験装置 研究方法としては、模擬実験を主体としながら、粒子軌道計算も併用する。図 1 に、本研究で用いた TWDEC 模擬実験装置の全容を示す。この装置は直接発電システムに関わる実験を総合的に扱えるもの[]で、図では本研究に関わらない部分 (omitted region) は省略してある。左端のイオン源にて、ヘリウムプラズマを高周波生成し、引出電極へ高電圧 V_{ex} を印加して高速イオン束を下流 (図右方向) に取り出す。軸方向座標 $z=400\text{mm}$ の位置に電界印加電極 (1 対の穴空き円盤電極) []があり、下流側に電圧 V_R を印加する。穴は全イオン束が通過できる程度に大きく、また印加電圧として、偏向の基本特性を調べる直流に加えて、変調動作を行わせる高周波にも切り替えることができる。最下流 ($z=990\text{mm}$) には、散乱を測定できるように、径方向に分割された捕集電極を配置している。捕集電極は図 2 に模式的に示す様に、円電極・円環電極を前後互い違いに重ねて配置した 6 枚の電極で構成されている []。中心電極から順に P1, P2, ... として、各電極の入射側から見た有効な半径も図中に示している。

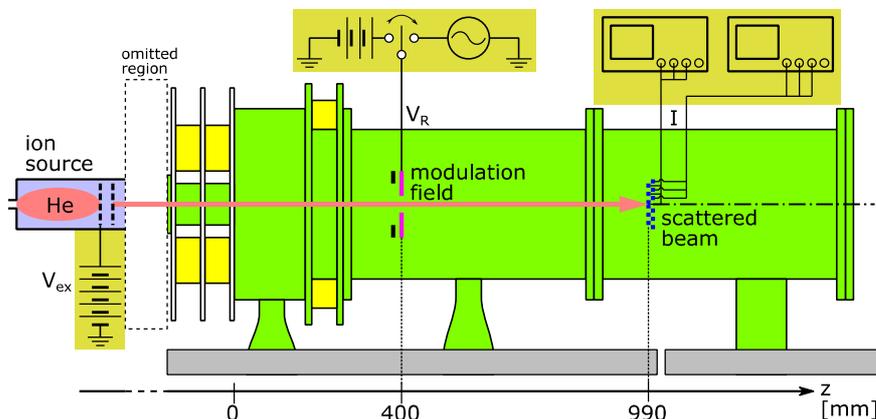


図 1 TWDEC 模擬実験装置

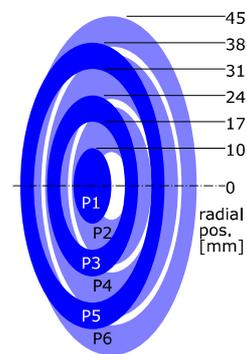


図 2 捕集電極

(2)粒子軌道計算 粒子軌道計算は、以前から使用してきたコード[]を用いる。軸対称電磁界中の単一粒子の円筒座標系での 2 次元運動を 4 次のルンゲ=クッタ法で解く。粒子の運動を決める電界は電極等の境界条件のもと、差分法で格子状に電位分布を求め、補間して求める。単一

粒子の追跡であるため、実験系で現れる他粒子から生じる電界は考慮されていない。また、コイル電流が作る磁場をビオ・サバル則による微小磁場を積分して磁場を求める。さらに、変調作用の表現のために、予め計算した直流静電位を、振幅・周波数・位相を与えた高周波で振動させて電界を計算できる。

4. 研究成果

(1)無電界下でのイオン束分布 電界印加電極の電圧がない場合のイオン束の分布を調べるために、 $V_R=0V$ での捕集電極の電流分布を測定した。図3では、捕集電極の電極毎の面積あたりの電流 I の測定値(シンボル)を、電極の中央半径値 r を横軸として示した。折線は同条件の複数の測定値の平均値を結んでいる。イオン束の実験装置本体への入射口は半径9mm(図の黄色の範囲)であり、捕集電極位置では、半径20mm程度に広がっていることがわかる。これは、イオン束自身の電荷による発散と考えられるが、 V_{ex} が大きいほど広がりが大きい原因はよくわかっていない。また、 $r=30mm$ を越える P5, P6 の測定値が負となっているが、これらは捕集電極へのイオンの入射に伴って放出される二次電子が流入したものと考えられ、いずれにしてもこれらは直接のイオン束の流入量が小さいと考えられる。

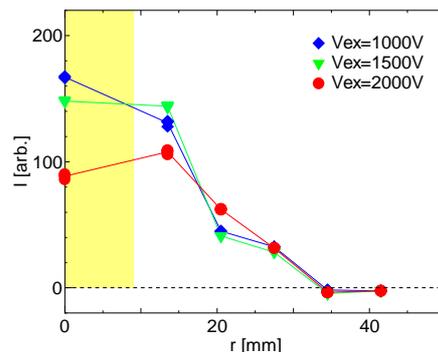


図3 $V_R=0V$ での捕集電極電流分布

(2)直流電界下でのイオン束分布 次に、電界印加電極に直流電圧を印加して、同様に捕集電極の電流を測定した。図4に、 $V_R=0V$ での測定値に対する変化割合を示す(横軸の意味は図3と同様で、以下の結果でも同様)。(1)よりP5, P6は流入量が小さいとして省いてある。図4(a)の $V_{ex}=1000V$ の結果によると、中心部(P1)で V_R の大きさに応じて増加する変化が顕著で、逆にP4 ($r=27.5mm$)に対応する周辺部では減少が顕著である。図4(b)の $V_{ex}=1500V$ になると、依然同様の傾向は見られるが、同じ条件に対する変化割合は小さくなっている。図4(c)の $V_{ex}=2000V$ では、中心部とP4の周辺部の変化はさらに小さくなり、P2 ($r=13.5mm$)の変化が中心部と同程度に増大している。直流印加の場合には電界印加電極が形成する電界は静電レンズとして作用すると考えられ、これらの実験結果は矛盾ない。すなわち、無電界の場合に、イオン束自身の電界によって発散、すなわち径方向外側に分布が広がるものが、静電レンズ作用で集束することとなり、周辺部で減少し、中心部で増加したものと考えられる。また、その変化が V_{ex} に応じて小さくなることも、静電レンズの作用と矛盾ない。

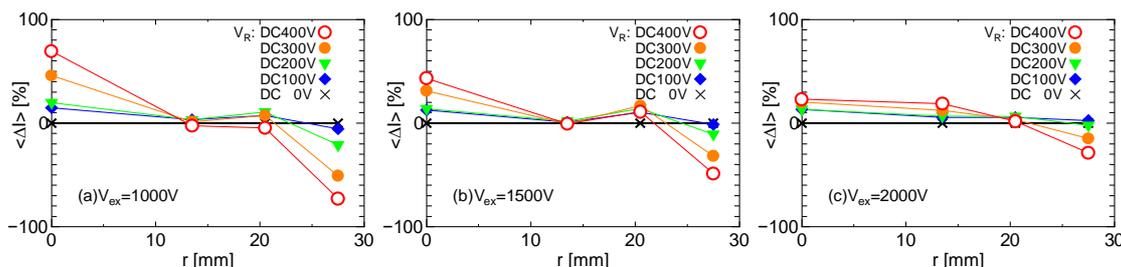


図4 V_R が直流の場合の捕集電極電流分布の変化

(3)高周波電界下でのイオン束分布 変調作用を期待して、電界印加電極に9MHzの高周波電圧を印加した結果を図5に示す。グラフは図4と同様に示しており、図4の直流の場合に比べて、同じ電圧に対する変化量は小さい。しかし、図5(a) $V_{ex}=1000V$ および(b) $V_{ex}=1500V$ において、P3 ($r=20.5mm$)の増加が顕著という特徴が見られる。静電レンズの場合は、電圧印加で増加する領域はP1~P2であったが、P3はむしろ図3で認められる自己電界に伴う発散によりイオン束の増大が現れる位置である。さらに、図5(c) $V_{ex}=2000V$ においては、この注目される特徴は見え、図4(c) $V_{ex}=2000V$ では見られない中心部が顕著に増加している。

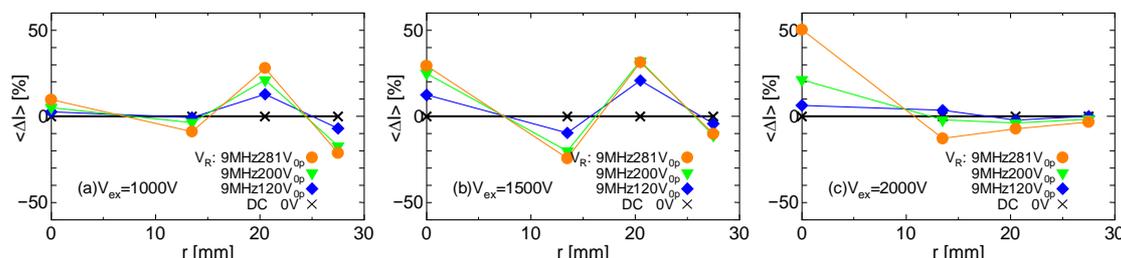


図5 V_R が高周波9MHzの場合の捕集電極電流分布の変化

(4)高周波電界による変化の周波数依存性 続いて、高周波の周波数に対する変化を調べた。図6に、 $V_{ex}=1500V$ のイオン束に対して、 V_r として(a)9MHz, (b)6MHz, (c)3MHz の高周波を印加した場合の捕集電極の電流変化を示す。9MHz の(a)は図5(b)と同じものであるが、6MHz の(b)でも P3 の増加が顕著をはじめ、P1 の増加や P2 の減少という、定性的には同じ変化が見られる。3MHz の(c)でも同様であるが、高周波印加での特徴的な P3 の変化は小さくなり、他の捕集電極の変化が大きくなっている。

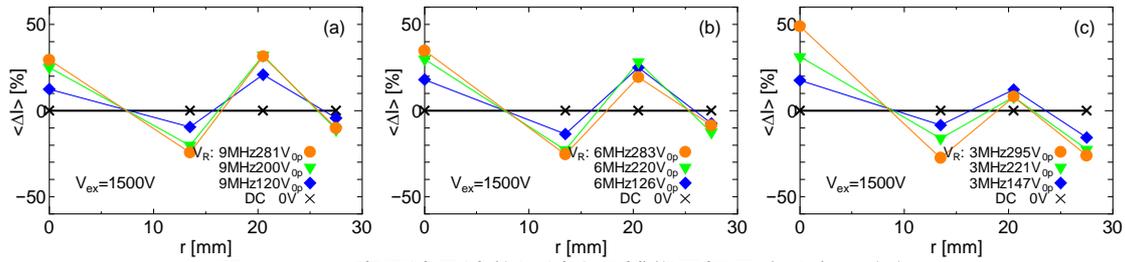


図6 V_r の高周波周波数に対する捕集電極電流分布の変化

(5)数値計算による直流電界下のイオン軌道 研究成果(1)~(2)に対応した粒子軌道計算を行った。結果の一例を図7に示す。これは、 $V_{ex}=1000V$ 相当のエネルギーで、イオン源出口を中心 ($r=0m$) から出発し、入射位置を入射口内の平均半径 ($r=0.005m$)、その間の偏向角度を入射角として、イオンの初期条件を与えており、捕集電極 ($z=0.99m$) までの軌道を計算したものである。電界印加電極 ($z=0.4m$) の電圧 V_r を直流 0~300V と変化させた場合の軌道を重ねて示している。無電界 ($V_r=0V$, 黒曲線) では、ゆるく磁場の影響を受けながらも、ほぼ入射角度で進み、P2 ($r=0.014m$) に達している。 V_r の印加に伴って、静電レンズ作用が現れ、電極位置から中心方向に偏向される。捕集電極では P1 に達するが、 V_r が大きいほど偏向が強くなり、強い作用 ($V_r=300V$) では軸を行き過ぎて P2 に達する場合もある。いずれにしても、基本的な特性である静電レンズ作用が、この粒子軌道計算で再現されている。

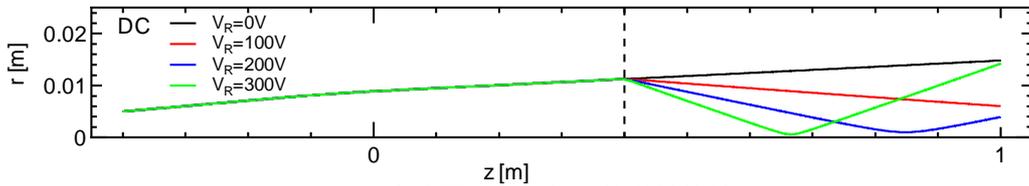


図7 直流電界下の粒子軌道計算結果

(6)数値計算による高周波電界下のイオン軌道 続いて、研究成果(3)に対応した高周波電界下の軌道を計算した。図8は、図7と同じ初期条件のイオンに対して9MHzの高周波電界を与えたものである。複数の軌跡は、イオンの出発時の高周波の位相の8種類(1周期内で等間隔変化)に対応しており、連続して入射するイオンの捕集電極位置での到達範囲を表している。直流の様な大きな偏向作用ではないが、高周波の振幅が200Vの場合(図8(a))で $r=0.013-0.017m$ であり、300Vの場合(図8(b))では $r=0.012-0.018m$ といくぶん範囲が広がるが、いずれもほぼ P2 の領域である。この計算条件は図5(a)に対応するが、実験で見られた P3 ($r=0.017-0.024m$) での顕著なイオン束増大は現れていない。計算でのイオンの初期条件が限られているが、比較的平均的な条件を選んでおり、計算での到達電極 P2 を大きく上回る P3 の測定結果は考えにくい。この差異は、粒子軌道計算で扱えない散乱の効果に対応すると考えられる。

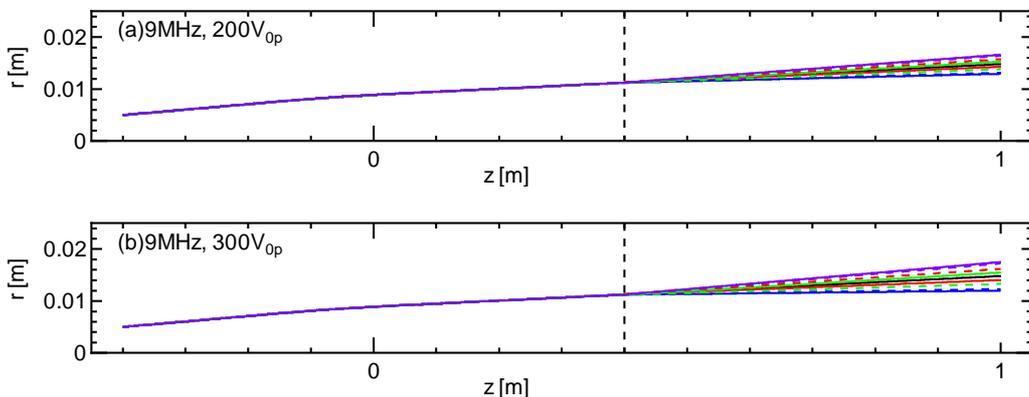


図8 高周波(9MHz)電界下の粒子軌道計算結果

(7)まとめ 模擬実験で測定した，変調作用に対応する電界印加でのイオン束の分布の変化は，単一粒子を追跡する軌道計算では見いだせなかった．これは粒子間作用に基づく散乱の現れを示唆している．模擬実験での測定は，静電レンズ作用の確認など，大局的には理論的予測に合致するが，細部の条件変化に対して疑問が残っている．また，粒子軌道計算においても，単一粒子の追跡であることから，実験条件の網羅的な再現はできていない．本来の目的に対しては，引き続き実験・計算の両面から解析を進める必要がある．一方で，計画当初には考えなかった，進行波型変換器での格子状電極の排除について，実験的な取り組みを開始し，その第一次結果を得ることができた点は，装置の実用化への一つの進歩と考えられる．

<引用文献>

H. Takeno, et al., 12th Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, PL6, 2018.

竹野他, Plasma Conference 2017, 24P-91, 2017.

H. Takeno, et al., Plasma and Fusion Res., Vol. 14, 2405013, 2019.

片山他, プラズマ・核融合学会誌, 75 巻 12 号, pp. 1396-1409, 1999.

石川他, 電気学会論文誌 B, 120 巻 6 号, pp. 851-857, 2000.

竹野他, プラズマ・核融合学会第 33 回年会, 30pP80, 2016.

竹野他, プラズマ・核融合学会第 37 回年会, 1pP100, 2020.

K. Shibata, et al., 27th Int. Toki Conf. Plasma and Fusion Res. & 13th Asia Pacific Plasma Theory Conf., P1-59, 2018.

Y. Yasaka, et al., Nucl. Fusion, Vol. 48, 035015, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------------------|
| 1. 著者名 TAKENO Hiromasa, SHIBATA Kazuhiro, NAKAMOTO Satoshi, FURUKAWA Takeru, NAKASHIMA Yousuke | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 Examination of Efficiency Dependence on Deceleration Voltage in a Traveling Wave Direct Energy Converter Simulator | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research | 6. 最初と最後の頁 2405053 ~ 2405053 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.18.2405053 | 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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 中西快, 中本聡, 古川武留, 竹野裕正, 宮澤順一, 後藤拓也 |
| 2. 発表標題 ヘリウム3燃料核融合直接発電模擬実験における高速イオンの径方向散乱についての研究 |
| 3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水悠真, 中西快, 竹野裕正, 中本聡, 古川武留, 宮澤順一, 後藤拓也 |
| 2. 発表標題 ヘリウム3燃料核融合直接発電における熱化イオンの分離軌道解析のための模擬実験 |
| 3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 H. Takeno, K. Shibata, S. Nakamoto, T. Furukawa, Y. Nakashima |
| 2. 発表標題 Efficiency dependence on deceleration voltage in a simulation experiment of traveling wave direct energy converter |
| 3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中西快, 中本聡, 古川武留, 竹野裕正, 宮澤順一, 後藤拓也 |
| 2. 発表標題 ヘリウム3燃料核融合直接発電におけるイオン-イオン分離の模擬実験II |
| 3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 H. Takeno, S. Mizuno, K. Hashiguchi, S. Nakamoto, J. Miyazawa, T. Goto |
| 2. 発表標題 Initial results of ion-ion separation experiment for advanced fusion in a unified direct energy conversion simulator |
| 3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 水野翔太, 中本聡, 竹野裕正, 宮澤順一, 後藤拓也 |
| 2. 発表標題 ヘリウム3燃料核融合直接発電におけるイオン-イオン分離の模擬実験 |
| 3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 竹野裕正, 橋口和也, 水野翔太, 市村和也, 中本聡, 宮澤順一, 後藤拓也 |
| 2. 発表標題 統合型模擬実験装置における直接エネルギー変換の研究 |
| 3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2020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 | 古川 武留 (Furukawa Takeru) (70845122) | 神戸大学・工学研究科・助教 (14501) | |
| 研究分担者 | 中本 聡 (Nakamoto Satoshi) (10198260) | 神戸大学・工学研究科・助手 (14501) | |
| 研究分担者 | 市村 和也 (Ichimura Kazuya) (20756001) | 神戸大学・工学研究科・教室系技術職員 (14501) | 削除：2020年11月6日 |

| | 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 | 宮澤 順一 (Miyazawa Junichi) | | |
| 研究協力者 | 後藤 拓也 (Goto Takuya) | | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|