

令和元年5月20日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05626

研究課題名（和文）磁界分界面がプラズマ中電子に及ぼすエネルギー選択的シャッタ・フィルタ効果の解析

研究課題名（英文）Analysis of energy-selective shutter and filter effects of separatrix of confronting divergent magnetic fields on electrons in plasma

研究代表者

菅原 広剛（Sugawara, Hirotake）

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：90241356

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：誘導結合型低気圧プラズマに加えた対向発散磁界の分界面が電子を遮り閉じ込める又は通過電子をエネルギーで選別するシャッタ/フィルタ効果の機構解明と、材料表面処理用プラズマの省空間化や材料損傷低減他への応用法開拓のため、プラズマ中の電子とイオンの挙動をモンテカルロ法により計算機解析した。

閉じ込め効果の定量評価法を考案し、閉じ込めの電離への寄与を確かめた。プラズマ維持の観点から対向発散磁界下の電子へのエネルギー供給の主要な機構として三様態を詳解対比した。基板へのイオン入射の運転条件依存性観察から、装置設計と制御に資する知見を得た。また、電磁界下の電子速度分布と電子輸送係数の安定な計算技法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体集積回路や電気電子光材料の製造工程における加工の微細化に伴いプラズマ由来の損傷の回避策が求められており、本課題で解析した対向発散磁界分界面を持つ磁気シャッタ/フィルタ効果は材料の過度なプラズマ曝露を和らげる遠隔プラズマの省空間化や変調による帯電緩和に利用可能な技術の種となる可能性がある。プラズマ中の荷電粒子の誘導や閉じ込めにしばしば用いられる磁界のエネルギー選択性や逆阻止性は学術的新規性と技術的利用価値がありながら研究例は少なく評価指標也未確立のまま未利用であった。本研究の成果は未開拓分野に挑むための基礎的知見となり、計画進行中に見出された新観点も関連研究の展開に繋がることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Behavior of electrons and ions in low-pressure inductively coupled plasmas under confronting divergent magnetic fields (CDMFs) was analyzed using computer simulations based on a Monte Carlo method to reveal the mechanism of the shutter and filter effects of the separatrix of the CDMFs, that confine electrons and limit the flow of electrons by their energy and to search for their applications to downsizing of plasma reactors and damage-free material processing.

A method to quantify the confinement effect was proposed and the contribution of the confinement to ionization was confirmed. Three modes of the power deposition to electrons under the CDMFs were observed as main mechanisms to sustain the plasma. Fundamental tendencies of ion transport to the substrate were observed in various setups as informative bases for design and control of the plasma reactors. A new calculation technique for the electron transport coefficients under crossed electric and magnetic fields was also developed.

研究分野：プラズマエレクトロニクス，電磁界下気体中電子輸送理論

キーワード：磁化プラズマ 対向発散磁界 分界面 閉じ込め効果 フィルタ効果 電子運動 シミュレーション
モンテカルロ法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

半導体・集積回路、MEMS、太陽電池パネル、平面ディスプレイなどの製造工程でプロセスプラズマが利用されるが、微細化に伴いプラズマ曝露に起因する損傷が問題となり、損傷回避のためのソフトプロセス技術が求められていた。方策として、プラズマ曝露を和らげる遠隔プラズマ、帯電緩和が期待されるon/off変調や負イオンのエッチング利用などが考えられていた。本課題で解析した対向発散磁界(図1)の持つ磁気シャッタ/磁気フィルタ効果は、それら方策の技術的な種となる可能性がある。また、この効果を含め、磁界による荷電粒子の制御(保持・誘導・収斂)の知見は、陽電子トモグラフィなどの医療応用や結晶欠陥診断に用いられる陽電子線の分野でも対象物への照射前に陽電子が対消滅する損失を避ける目的に有用と考えられた。磁界はプラズマ中の荷電粒子流の誘導や閉じ込めにしばしば用いられるものの、本課題で注目するエネルギー選択性や逆阻止性などは、特徴的で潜在的な付加価値がありながら未利用のまま解析・理解されずに残されていた。これら諸機能に着目した利用研究は少なく、解析や理論に基づく定量的評価指標や制御指針なども十分に確立されていなかった。

2. 研究の目的

遠隔プラズマ装置の省空間化やソフトプロセスによる損傷低減など材料処理における高付加価値プラズマ制御に向けた磁界応用の種となる技術として、対向発散磁界分界面が持つ閉じ込め(シャッタ効果)、通過電子のエネルギー選択(フィルタ効果)、誘導・逆阻止など、用途開拓途上の機能の発現機構解明を目的とした。評価指標の定量化を通じ磁界の機能が強く現れる条件を特定し、好ましい条件から磁界の設計制御指針を提案することを目指したものである。

3. 研究の方法

解析対象の系には、誘導結合型磁化プラズマ駆動装置として内径と高さが40cmの円筒形プラズマ容器を想定した(図1)。この寸法は直径12インチ(約30cm)のウエハ基板の処理を想定したものである。磁界は容器外部に同軸状に配置した上下2つのコイルに逆向きの直流電流を数10~100A程度通じ数mT程度の対向発散磁界を印加するものとした。電界は容器天井の平面螺旋型アンテナにラジオ周波数(rf)13.56MHzの交流電流を10~30A程度の振幅で通じ、周方向成分のみの交流電界を誘起するものとした。電磁界は位置の関数として予め計算し地図化したデータを解析プログラムに与えた。また、一部の局所モデル解析では円筒容器側壁近傍領域の一部に注目した系として一様直交電磁界に簡素化したモデルを採用した。ガスは主にAr、気圧は300Kにおいて0.67Pa(5mTorr)とした。主な計算機シミュレーション技法としては粒子の運動を追跡するモンテカルロ法を用いた。粒子と気体分子の衝突の生起とその種類はArの電子衝突断面積データから算出される衝突確率を基に乱数を用いて選択し、衝突が起こった時の散乱角やエネルギーの損失割合なども乱数を用いて決定するものである。容器天井付近の強電界領域から初期電子を出発させると数百rf周期程度の追跡の間に電子はプラズマ容器内に概ね行き渡った。その間の電子の位置とエネルギーの変化を観察した。単電子運動の観察により電磁界下の電子の基本的要素的運動の特徴を掴んだ後、数万~数十万の電子の追跡により平均エネルギーや電離衝突頻度など諸量の位置分布の統計を得た。イオンについては電離衝突によるイオン生成位置分布の情報に基づきイオンの出発位置を選び、数千~数万rf周期の間のイオン運動を追跡し、器壁や基板に到達する様子を観察した。議論対象のうち特に重要なデータとして、電子の分界面通過時の諸情報(電子エネルギー、分界面通過位置・電界位相、閉じ込めから脱出するまでの時間、その他履歴)、プラズマ維持に係る電子へのエネルギー供給の様子(電子がエネルギーを得易い位置の分布、電界位相、輸送経路他)、イオンが基板へ入射する際の諸情報(入射位置、エネルギー、入射角他の分布)をサンプリングした。また、電磁界下の電子輸送係数を算出するため、プロパゲータ法による計算技法の開発も行い、電磁界依存性の観察を通じ対向発散磁界下の電子輸送基本特性を把握する基礎情報を得た。

4. 研究成果

(1) 対向発散磁界分界面による閉じ込め効果を定量評価するに当たり、閉じ込めからの脱出を判定する基準が必要であったため、アンテナ側に位置する上部領域から出発した電子が分界面を超え下部領域へ逃れたことを次の基準により判定することを考案した。即ち、電子の位置が分界面を越えるだけでなく、電子の旋回運動を導く磁力線が属する領域も考慮し、旋回中心も分界面を越えることを以て領域移行とした。また、旋回運動中に一時的に分界面を越え下部領域で衝突散乱した場合も下部領域に影響を与えたとして領域移行と見なした。この基準を用いた解析の結果、従来の電子位置のみによる判定には旋回運動に伴う一時的な見かけの領域移行が

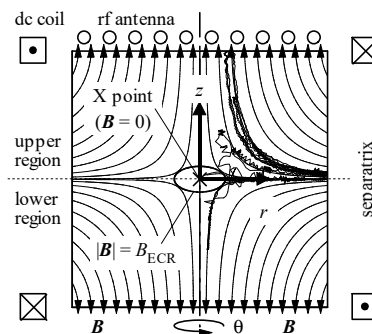


図1. 誘導結合磁化プラズマ装置の構成と対向発散磁界

(本課題研究計画調書より。出典:H. Sugawara: 18. Int. Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics TLP9 p. 14 & 19. Int. Symp. on Electron-Molecule Collisions and Swarms 合同会議 Proc. TLP9/TLE9, 7/17-20, 2015, Lisboa, Portugal)

多く含まれていたことが判り、新基準ではこれらを排除できた(雑誌論文⑥)。分界面の中でも磁界強度が強い所では低エネルギー電子が閉じ込めを受け易い傾向や、分界面中央の弱磁界域が閉じ込めからの電子脱出路となる傾向が、新判定基準の下でも観察された。その周囲の共鳴磁界域(13.56MHzでは0.48mT)を通過する電子には部分共鳴によるエネルギー増が見られた。上部領域に残る電子の数が時間経過と共に指数関数的に減少したことから、分界面の閉じ込め効果は電子の脱出時定数で表せるとの結果を得た。電子は弱磁界からは短時間で脱出できるとの経験則が脱出時定数による定量評価でも確認された。コイルを移動し分界面を容器天井に近づけると、閉じ込め領域を狭めるにつれ電子は短時間で脱出する傾向が観察された。分界面中央の弱磁界域がアンテナ直下に迫り電子エネルギーが増え易くなることと分界面自体に電子が到達し易くなり脱出の機会が増えることが主因と見られた(雑誌論文②)。共鳴磁界域位置とアンテナ配置は設計・制御で変更可能なことを踏まえ、部分共鳴のプラズマ維持への利用可能性が指摘された。脱出時定数は逆数が電離周波数と同じ物理次元となるため上部領域における電離による電子数増と閉じ込めからの脱出による電子数減とが共通尺度で比較可能になった。一般に磁界は電子を束縛し電子エネルギー増を抑制するとされるが、閉じ込めを強めたとき電離が増す様子も観察され、閉じ込め効果がプラズマ維持に寄与する場合があることが示された。(本節の論点に関する学会発表等:③, ⑤, ⑧, ⑬, ⑰, ⑲, ⑳, ㉓~㉗)

(2) 対向発散磁界下でプラズマを維持するために必要な電子へのエネルギー供給過程に関わる興味深い論点が見出されたため、実機系各部における電子エネルギー利得(電子1個が単位時間内に受け取るエネルギー、電力の単位次元)の解析を試みた。円筒形プラズマ容器内全域で電子エネルギー利得を位置と交流電界位相で分解してサンプリングした結果、交流電界交番に追従してプラズマ容器内の電子電流(中心軸に対する環状プラズマ電流)も時計回りと反時計回りに交番する様子が観察されたが、電子エネルギー利得の波形には電子流指向性の発現と見られる非対称性が見出された。即ち、電界方向が時計回り向きと反時計回り向きとでエネルギー利得に差があった(図2)。電子エネルギー利得の波形に対し、正弦波の基本波と二倍波からなる回帰式でフィッティングを行い周期変動特性を表す係数を求め、交流電界下電子の仕事率の理論式と比較したところ、利得要因を電界振幅、環状電流指向性、力率に分離できた。本課題の先行研究で観察されていた高利得三領域(アンテナ直下高電界域、零磁界点周辺共鳴磁界域、容器側壁近傍)の高利得要因は異なる特性を示し、アンテナ直下では電界振幅が大きいことが、共鳴磁界域と側壁近傍では周方向電界への応答性が高く力率が高いことが高利得に寄与していた。高利得三領域のうち容器側壁近傍では、器壁の電子反射が電子の旋回運動を一部制限し移流方向を偏らせること(図3、雑誌論文③)と、交流電界交番と衝突散乱による器壁近傍からの離脱のタイミングに応じて電子エネルギーの増減が増加側に統計的に偏ることが高利得の要因として見出された。シース電界を考慮したモデルによる解析では $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが電子流に指向性を与えシース電界が電子を壁から押し戻すように働くことが観察され、無シースで解析した際の器壁電子反射と同様の効果を及ぼし電子エネルギー利得に寄与することが見出された。

(本節の論点に関する学会発表等:②, ⑥, ⑦, ⑨~⑭, ⑯, ⑱)

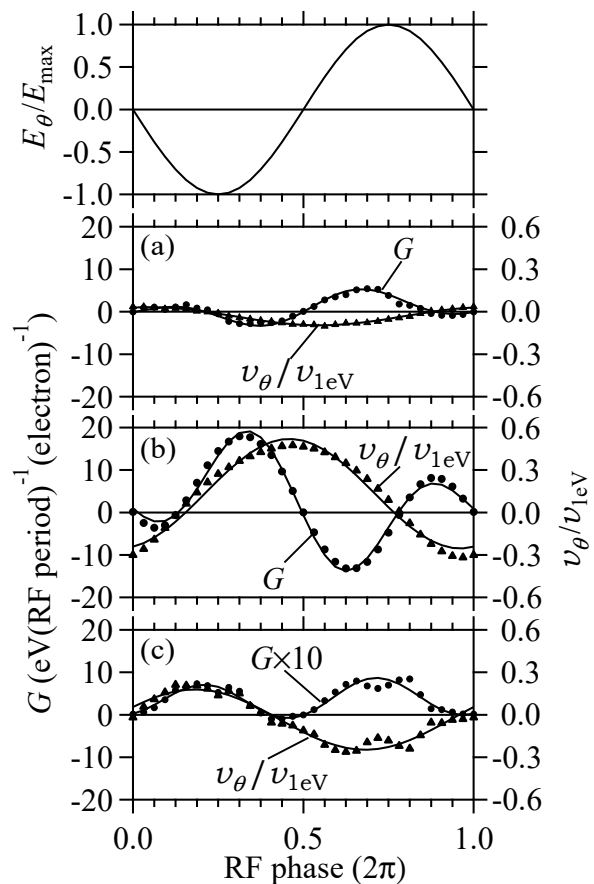


図2. 位相分解電子エネルギー利得 G と周方向速度 v_θ 。(a)励起源直下、(b)側壁近傍、(c)共鳴磁界域。(学会発表⑩)

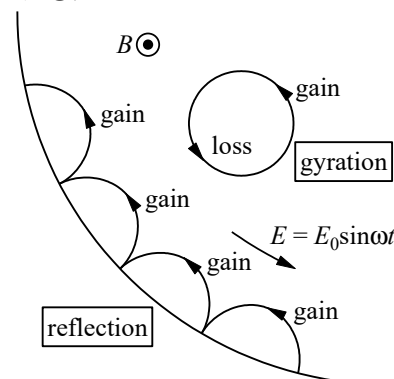


図3. 器壁における電子反射が電子流に指向性を生じさせる仕組み(雑誌論文③)

(3)電離により生じた正イオンをプラズマ容器底部に設置した基板へ導くために底部に設置した基板ホルダに負バイアス電圧を印加することを想定し、実機系プラズマ容器内の電界計算を行うとともに、基板へのイオン入射の位置分布などを観察した。

バイアス印加の範囲を基板の直径程度の範囲とすると、径方向の電界の勾配によりイオンは基板中心に向かって集中しつつ基板に入射していた。これに対し、基板ホルダ径を大きく取りバイアス印加範囲を広げた結果、基板に入射する電気力線が平行に近くなり(図4)、基板入射イオンの位置分布がより均一になる傾向が見られた。また、励起源アンテナを容器天井から容器側面に移すと、イオン生成位置が基板に近づき底部基板へのイオン入射が増えるとともに(図5)、プラズマ容器外周部からイオンが供給されることで基板中央部へのイオン入射の集中もあ

る程度緩和される様子が観察された。

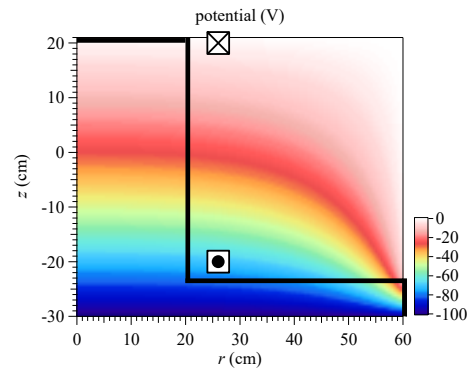


図4. 基板バイアス印加範囲拡大によるプラズマ容器内電界の均一化

(仲俣 涼平 (学会発表②, ③発表者) 北海道大学情報科学研究科2017年修士論文より)

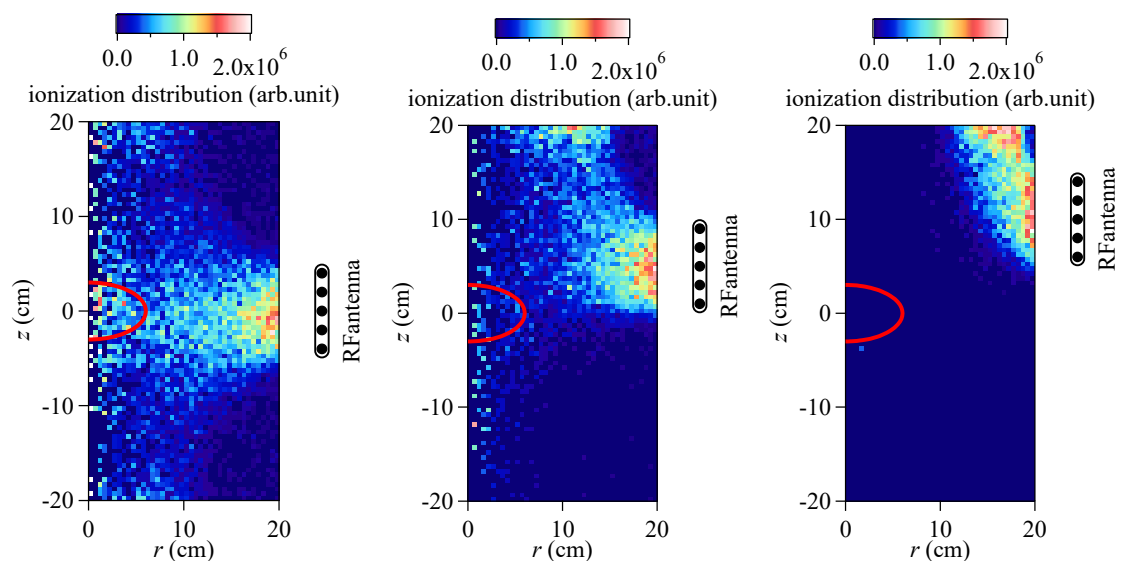


図5. イオン生成位置のrfアンテナ位置依存性 (側壁励起の試み) (学会発表③)

(4)プラズマ中の電子衝突頻度や電子輸送(移流や拡散)を定量評価するための基礎特性量である電子速度分布とドリフト速度、拡散係数他の電子輸送係数を算出するプロパゲータ法を直交電磁界下用さらに実空間用に発展させた。同手法はそれまで磁界なし電界のみの系で適用例があったが磁界下の系に初適用した。ローレンツ力の効果で電子速度分布の対称性が一部失われ電子速度分布を表す変数空間(数値計算上は配列変数)が2次元から3次元になるため必要な計算機記憶容量と計算量とが激増する(図6)。近年の計算機の記憶容量増と計算速度向上の機を捉えこの計算が実現した。電子速度分布関数を計算するためのボルツマン方程式を基に電子の位置情報を含む位置モーメント分布関数に対するモーメント方程式を磁界ありの系に拡張し、実空間における電子群重心移動速度(ベクトル)と方向別(電界Eに沿う方向、磁界

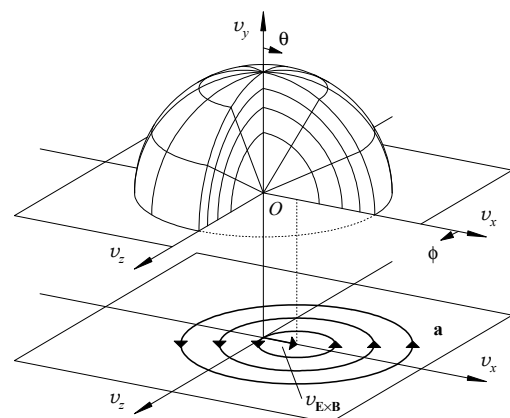


図6. 直交電磁界下の電子速度分布計算のための区画と電磁界下の電子に作用する加速度の概念図(雑誌論文④)

Bに沿う方向、両者に垂直なE×B方向)拡散係数を算出した。その妥当性をモンテカルロ法による結果と比較し確認した。モンテカルロ法は一般に膨大な数のサンプル粒子の追跡に長時間を要し統計変動を伴うため、サンプルの定期的複製によるサンプル数維持の方策も検討・導入した(雑誌論文⑤)。磁界強度の増加に伴いホール偏向が増す様子なども適正に再現され、電磁界下では電子が方向毎に異なる流れ方をすることを示す方向別電子輸送係数の安定な算出法が構築できた(雑誌論文①, ④)。(本節の論点に関する学会発表等: ①, ④, ⑬, ⑰, ⑳)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① H. Sugawara: Configuration of propagator method for calculation of electron velocity distribution function in gas under electric and magnetic fields crossed at a right angle, *Plasma Sci. Technol.* (掲載決定), 査読有 DOI: 10.1088/2058-6272/ab20e0
- ② 小澤 良輔、菅原 広剛: 「誘導結合プラズマに印加した対向発散磁界の電子閉じ込め効果の定量化とその制御条件依存性」、*電気学会論文誌A* **139**(5) 283-284 (2019)、査読有 DOI: 10.1541/ieejfms.139.283
- ③ H. Takahashi, K. Nakashima, T. Yamamoto, and H. Sugawara: Stochastic electron energy gain accompanying electron reflection at chamber wall in inductively coupled magnetized plasmas, *Japanese Journal of Applied Physics* **57**(12) 126101 (7 pages) (2018), 査読有 DOI: 10.7567/JJAP.57.126101
- ④ H. Sugawara: A computational scheme of propagator method for moment equations to derive real-space electron transport coefficients in gas under crossed electric and magnetic fields, *IEEE Transactions on Plasma Science* **47**(2) 1071-1082 (2019), 査読有 DOI: 10.1109/TPS.2018.2866187
- ⑤ H. Sugawara: Efficiency and limitation of periodic sample multiplication to reduce computational load in Monte Carlo simulations of electron swarms in gas under attachment-dominated conditions, *Japanese Journal of Applied Physics* **57**(3) 038001 (3 pages) (2018), 査読有 DOI: 10.7567/JJAP.57.038001
- ⑥ 山本 達平、菅原 広剛: 対向発散磁界下誘導結合型プラズマのシミュレーションにおける磁気閉じ込め効果評価のための電子脱出判定法について、*電気学会論文誌A* **137**(6)、363-364 (2017)、査読有 DOI: 10.1541/ieejfms.137.363

[学会発表] (計28件)

- ① 佐藤 壮 (発表者)、菅原 広剛: 交流電界・直流磁界下気体中の電子輸送係数解析、平成31年電気学会全国大会No. 1-067 (2019)
- ② 高橋 宏徳 (発表者)、菅原 広剛: 誘導結合型磁化プラズマ容器器壁近傍における電子エネルギー利得の位相分解モンテカルロ解析、平成31年電気学会全国大会No. 1-066 (2019)
- ③ 小澤 良輔 (発表者)、菅原 広剛: 対向発散磁界下誘導結合プラズマ中の電子閉じ込め効果に対するシースの影響の定性的検討、平成31年電気学会全国大会No. 1-065 (2019)
- ④ H. Sugawara (発表者): Configuration of propagator method for calculation of electron velocity distribution function in gas under crossed electric and magnetic fields, The 19th Asian Conf. on Electrical Discharge, November 24-28, 2018, Xianyang, Shaanxi, China (中国陝西省咸陽、海泉湾維景国際大酒店) (招待講演)
- ⑤ 小澤 良輔 (発表者)、菅原 広剛: 対向発散磁界下誘導結合型プラズマ中電子閉じ込め効果—電離増倍への影響—、平成30年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会No. 118 (2018)
- ⑥ 高橋 宏徳 (発表者)、菅原 広剛: 誘導結合型磁化プラズマ容器側壁近傍シーソ電界下電子エネルギー利得機構—利得分布のシーソ形状依存性に関するモンテカルロ解析—、平成30年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会No. 117 (2018)
- ⑦ 中島 克博 (発表者)、菅原 広剛: 対向発散磁界下誘導結合型磁化プラズマ中の特徴的なエネルギー利得の領域と要因、平成30年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会No. 116 (2018)
- ⑧ 小澤 良輔 (発表者)、菅原 広剛: 対向発散磁界下誘導結合型磁化プラズマ中電子閉じ込め効果の定量化—磁界強度・分界面位置依存性—、平成30年電気学会基礎・材料・共通部門大会4-A-a1-2 (2018)
- ⑨ 高橋 宏徳 (発表者)、菅原 広剛: 誘導結合型磁化プラズマ容器器壁近傍における電子エネルギー利得機構—器壁における電子反射およびシーソ電界を考慮したモンテカルロ解析—、平成30年電気学会基礎・材料・共通部門大会4-A-a1-1 (2018)
- ⑩ 中島 克博 (発表者)、菅原 広剛: 対向発散磁界下誘導結合型RFプラズマ中の電子エネルギー利得と電子周方向速度のモンテカルロ解析、平成30年電気学会プラズマ・パルスパワー研究会PPP-18-037 (2018)
- ⑪ H. Sugawara (発表者), K. Nakashima, H. Takahashi: Monte Carlo analysis of the asymmetry in azimuthal electron flow in an inductively coupled plasma driven under confronting divergent magnetic fields, XXIV Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases, July 17-21, 2018, Glasgow, Scotland, UK, Poster No. 112 (査読有)
- ⑫ H. Sugawara (発表者), K. Nakashima, H. Takahashi: Computational Study on Characteristic Mechanisms of Energy Deposition to Electrons in a Low-Pressure Inductively Coupled Magnetized Plasma, Proceedings of 20th Gaseous Electronics Meeting, Session B, No. 1 (p. 16), June 22-24, 2018, Magnetic Island, Townsville, Australia (招待講演)
- ⑬ 中島 克博 (発表者)、菅原 広剛: 対向発散磁界下誘導結合型磁化プラズマ中の電子エネルギー利得と電子周方向速度の空間分布解析、平成30年電気学会全国大会No. 1-084 (2018)

- ⑭ 高橋 宏徳 (発表者)、中島 克博、山本 達平、菅原 広剛：磁化プラズマ容器器壁における電子反射が電子エネルギー利得機構に及ぼす効果、平成30年電気学会全国大会No. 1-083 (2018)
- ⑮ H. Sugawara (発表者)：Calculation of Real-Space Electron Transport Coefficients under Crossed Electric and Magnetic Fields by a Propagator Method, 10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology, S3-01, December 15-17, 2017, Chung Yuan Christian University, Taoyuan, Taiwan (台湾桃園市、中原大学) (招待講演)
- ⑯ 高橋 宏徳、菅原 広剛、中島 克博、山本 達平：単電子追跡によるX点プラズマ容器側壁上部近傍エネルギー利得機構の解析、平成29年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会No. 123 (2017)
- ⑰ 山本 達平 (発表者)、菅原 広剛：対向発散磁界下誘導結合型プラズマ中共鳴磁界域近傍のエネルギー利得単電子運動解析、平成29年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会No. 122 (2017)
- ⑱ 中島 克博 (発表者)、菅原 広剛：対向発散磁界下誘導結合型磁化プラズマ中の電子エネルギー高利得3領域の位相分解解析、平成29年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会No. 121 (2017)
- ⑲ 中島 克博 (発表者)、菅原 広剛：対向発散磁界下誘導結合型磁化プラズマ中電子エネルギー利得の位相分解解析、平成29年電気学会基礎・材料・共通部門大会No. 19-E-a1-2 (2017)
- ⑳ 山本 達平 (発表者)、菅原 広剛：対向発散磁界下誘導結合型プラズマ中の電子エネルギー分布 (3) 一分界面近傍の位置により区別した電子エネルギー分布の比較一、平成29年電気学会基礎・材料・共通部門大会No. 19-E-a1-1 (2017)
- ㉑ H. Sugawara (発表者)：Calculation of electron velocity distribution function under crossed electric and magnetic fields using a propagator method, XXXIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases, PI-6, July 9-14, 2017, Estoril, Portugal
- ㉒ 山本 達平 (発表者)、菅原 広剛：対向発散磁界下誘導結合型プラズマ中の電子エネルギー分布 (2) 一分界面の上下および分界面通過位置により区別した電子の比較一、平成29年電気学会全国大会No. 1-067 (2017)
- ㉓ 菅原 広剛 (発表者)、松本 涼：プロパゲータ法による直交電磁界下気体中電子速度分布関数計算、平成29年電気学会全国大会No. 1-066 (2017)
- ㉔ 仲俣 涼平 (発表者)、菅原 広剛：側面励起型X点プラズマ装置におけるイオン輸送特性解析、平成28年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会No. 144 (2016)
- ㉕ 山本 達平 (発表者)、菅原 広剛：対向発散磁界下誘導結合型プラズマ中の電子エネルギー分布一分界面通過位置により区別した電子の下部領域におけるサンプリング一、平成28年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会No. 144 (2016)
- ㉖ H. Sugawara (発表者) and T. Yamamoto: On judgement of electron transfer between two regions divided by the separatrix of confronting divergent magnetic fields applied to an inductively coupled plasma, 69th Annual Gaseous Electronics Conference HT6. 00036, October 10-14, 2016, Ruhr University, Bochum, Germany
- ㉗ 山本 達平 (発表者)、菅原 広剛：対向発散磁界下誘導結合型プラズマ中の電子閉じ込め効果定量評価法一衝突事象を加えた評価一、平成28年電気学会基礎・材料・共通部門大会No. 5-D-a1-1 (2016)
- ㉘ 仲俣 涼平 (発表者)、菅原 広剛：X点プラズマ中の電子・イオン輸送特性の解析およびバイアス制御特性の検討、平成28年電気学会プラズマ研究会PST-16-064 (2016)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他] なし

6. 研究組織

- (1) 研究分担者 なし
- (2) 研究協力者 なし

※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、研究者個人に帰属されます。