

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03780

研究課題名（和文）誘導結合磁化プラズマ中の電磁界配位由来非対称指向性電子輸送と部分共鳴の計算機解析

研究課題名（英文）Computational analyses on asymmetric directional electron transport and partial resonance originating in the arrangement of electric and magnetic fields in inductively coupled magnetized plasmas

研究代表者

菅原 広剛（SUGAWARA, HIROTAKE）

北海道大学・情報科学研究院・准教授

研究者番号：90241356

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：材料処理用磁化プラズマ中の電子のエネルギー獲得過程の一種である部分共鳴現象に着目し電子運動を計算機解析した。

励磁コイルと励起源アンテナの配置、磁界強度を変えながら電子エネルギー利得分布を求め、部分共鳴の条件依存性観察を通じて実機設計制御のための基礎知見を得た。電子エネルギー増減や電磁界配位由来の電子流非対称性に対する複数の効果を重み付けした定量評価指標を導入し部分共鳴発現に適する条件の探索を容易にした。電子エネルギー増減や電子輸送指向性に直接関わる実気体中の平均電子速度ベクトル交流電界応答の解析を任意電磁界交差角に拡張して行いその基礎特性を一定衝突周波数モデル近似理論式との比較で検証確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不均一磁界下高周波プラズマ中で起こる一時的電子サイクロトロン共鳴により電子がエネルギーを得る部分共鳴現象には多くの変数が関わり、その発現機構の詳細解明と適した条件の探索は学術と技術の両面で興味深い課題である。部分共鳴を電磁界配位由来の電子流非対称性と関連付ける本研究のような試みは希で、新論点を提起したものである。

部分共鳴が励起源アンテナから離れた領域でも生じた解析結果はプラズマによる材料処理等の産業技術において遠隔領域の制御性や広範囲一様化など新機能の種となる可能性を示唆している。解析で得た条件依存性と交流電界応答特性は磁化プラズマに関する基礎知見として実機の設計制御に資するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：Electron motion in magnetized plasmas for material processing was simulated focusing on the partial resonance as a process of the electron energy gain (EEG). Fundamental understanding for design and control of practical plasma reactors was obtained by evaluation of the EEG under various arrangements of the magnetic coils, the power-source antenna and the magnetic field strengths. New measures for the EEG and the asymmetry of electron flow caused by the arrangement of the electric and magnetic fields were introduced as weighting various effects of the parameters determining the electron motion. This simplified the seeking task for desirable conditions for the partial resonance. The ac response of the average electron velocity vector, that governs the EEG and the directional electron flow, was analyzed under field conditions extended to arbitrary angles between the electric and magnetic fields. Its basic features were validated by a theory based on a constant-collision-frequency model.

研究分野：プラズマエレクトロニクス

キーワード：電子エネルギー利得 電子サイクロトロン共鳴 部分共鳴 平均電子速度 交流電界応答 非対称性 指向性

1. 研究開始当初の背景

磁界にはプラズマ中の電子の運動を束縛したり電子流を誘導したりする効果があり、これを利用した磁気シャッター・フィルタなどの応用が提案されていた。半導体集積回路、MEMSなどの微細加工、平面ディスプレイ、太陽電池パネルなどの大面積表面処理など、産業利用されているプロセスプラズマを変調することでプラズマ中の電子温度や電子流を制御し、過度なプラズマ曝露による材料損傷の回避や、不均一の解消、プラズマ駆動条件の低気圧化に伴うプラズマ維持の困難の克服など、諸問題解決のために磁界の新たな機能性の探求が求められていた。

本研究計画開始までに研究代表者は材料プロセス用低気圧誘導結合磁化プラズマの計算機シミュレーションを通じ磁界形状や電磁界配位に依存する諸効果の基礎特性を解析してきた。その中で電磁界配位に起因する電子流の指向性、プラズマ応答の非対称性と、それらが電子への電力投入過程に及ぼす効果を見出し、磁界下の電子流について理解を深めてきた。プラズマへの磁界印加はイオン選別などの利用例があるが、電子に対しては、実験現場で試行錯誤により永久磁石/電磁石を配置することも多く、確立された理論に基づくプラズマへの磁界の効果の予見や裏付けがあることは希で、磁界の効果を経験的に俯瞰し合目的な利用を可能とすることは学術・技術の両面で必要かつ有意義と考えられた。また、応用の観点から着目されたのがプラズマ維持と効率の面から重要な電力投入に対する電子流指向性・非対称性の影響であるが、これに重点を置いた電力投入機構の解析や測定、議論などの例は稀であった。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ研究代表者は、それまであまり認識・注目されず理解も断片的だった材料プロセス用弱電離プラズマの諸特性に及ぼす次の磁界の効果に焦点を当てた。

- ・電子輸送の指向性・非対称性：電磁界配位に起因する電子移流特性の方向別の差異
- ・部分共鳴電子加熱：不均一磁界下において特定磁界強度領域で一時的に生じる電子サイクロトロン共鳴（部分共鳴）による電子のエネルギー獲得

これら効果の観察を主題に据え、電磁界下の電子運動の計算機シミュレーションを通じた電子輸送係数など評価指標の算出と解析により、これらの現象とその効果を技術シーズとする利用法の提案のため、磁化プラズマの安定駆動や機能的制御に資する系統的な知見を得ることを目的に掲げた。諸現象発現機構とともに、その制御性、可測性などに関する理解の深化を目指した。また、これに付随・関連するシミュレーション技法の開発も併せて行うこととした。

3. 研究の方法

実機系のモデルとしては、以前から解析経験のある内径と高さが40cmの円筒形プラズマ容器を備える誘導結合型磁化プラズマ駆動装置を想定した(図1)。この容器径は直径12インチ(約30cm)のウエハ基板を収める設定である。磁界は容器外部に配置した上下2つの同軸コイルに逆向きの直流電流を10~100A程度通じて印加し、磁界強度は強い所で数mT程度となる。上下領域の境界には磁力線が背き合う分界面が生じ、この分界面を電子が容易に通過し得ないことから閉じ込めなどの効果を発現する。電界は容器天井に置いた平面螺旋型アンテナ(同心円電流で模擬)または容器側壁外周に巻いた1巻ループ型アンテナにラジオ周波数(rf)13.56MHzの正弦波交流電流を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。一方、電磁界下電子輸送の基礎理論に関する解析では境界のない無限空間を想定し、正弦波交流電界と静磁界は一樣と仮定した。電磁界交差角はまず実機系に即して直交と仮定し、後に基礎理論解析では任意交差角に拡張した。

電磁界下の微視的電子挙動が本研究対象である非対称性や部分共鳴現象の根源と考え、電子運動解析には粒子モデルに属するモンテカルロ法を用いた。電磁界を予め計算し地図化したデータを位置の関数として電子運動シミュレーションプログラムに与え電子の運動方程式を数値的に解き、電子の飛行中に確率事象として起こる電子-気体分子間の衝突の生起、衝突発生時の散乱角、電離時の一次・二次電子間エネルギー分配割合などは乱数により選択決定するものである。ここで、実機系の電磁界は不均一であり、さら

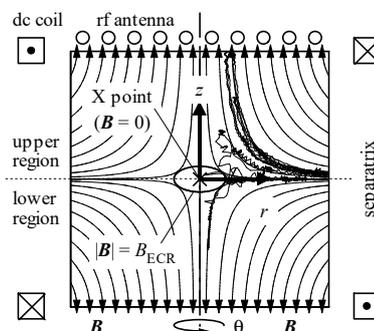


図1. 誘導結合磁化プラズマ装置の構成と対向発散磁界(本課題研究計画調書より。H. Sugawara: 18. Int. Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics TLP9 p. 14 and 19. Int. Symp. on Electron-Molecule Collisions and Swarms Proc. TLP9/TLE9, 7/17-20, 2015, Lisboa, Portugal)

に交流電界は時間変化を伴うため、電子の運動方程式の計算にはルンゲークッタ法を用いた。また、衝突確率はガス媒質毎に測定・構成されている電子衝突断面積セットから算出した。

ガスは主にAr（プラズマ装置やプラズマ自体の基本特性評価ベンチマークに頻用される代表的な希ガス）、他にはエッチング用のF₂ないしCF₄（両者ともハロゲンであるフッ素を含む分子性ガス）を用いた。また、理論解析ではガスの個性である電子衝突周波数の電子エネルギー依存性を簡素化した一定衝突周波数（CCF: Constant Collision Frequency）モデルガスも用いた。気圧は低気圧磁化プラズマの運転条件を参考に300Kにおいて0.67Pa（5mTorr）を基本とした。

初期電子は平均エネルギー1eVのマクスウェル分布から無作為に選んだ速度で、実機系の場合はrfアンテナ付近の強電界領域から、基礎理論解析の場合は座標原点から出発させた。解析条件として選んだ気圧下においては、実機系では百～数百rf周期程度の追跡の間に電子がプラズマ容器内に概ね行き渡り、基礎理論解析では数～数十rf周期で周期的定常状態に至る。両系とも初期条件の影響が残る初期緩和過程を除いて追跡期間の終盤で電子の位置、速度、エネルギー等を観察した。電子輸送係数の統計を取る際は、追跡電子数は数万～数十万とし、さらに終盤の複数rf周期に渡る重ね合わせで統計変動を抑制した。

電子のサンプリングに当たり特に電子のエネルギー変化に注目した。ある空間領域内で一電子が単位時間当たり得るエネルギーを「電子エネルギー利得」（EEG: Electron Energy Gain, 電力の物理次元を持つ）として定量化し、位置分解および交流電界位相分解したサンプリングにより電子がエネルギーを得るのに適したプラズマ容器内の位置（rfアンテナや励磁コイルとの位置関係）、磁界強度、電界位相を観察した。

部分共鳴の観察では、対向発散磁界下で部分共鳴が観察される領域として「共鳴域」を共鳴磁界強度 B_{ECR} の1～2倍ないし0.5～1.5倍の範囲と定め、共鳴域での電子挙動をつぶさに観察した。ここで、 B_{ECR} は電子サイクロトロン共鳴（ECR: Electron Cyclotron Resonance）が生じる磁界強度である。交流電界角周波数 ω に対応して $B_{\text{ECR}} = (m/e)\omega$ （ e/m は電子の電荷質量比、rf周波数13.56MHzにおいて $B_{\text{ECR}} = 0.4844$ mT）と決まるのに対し、共鳴域範囲には一般的な定義はなく任意設定である。

4. 研究成果

(1) 電子加熱が生じる領域

rfアンテナ近傍強電界域に加え、磁界強度が B_{ECR} となる領域の付近、ならびに器壁での電子反射の効果が現れる側壁近傍の三域で高いEEGが観察された（図2（c）、成果論文：Nakashima他2019, JJAP 58(11), 116001）。これら高EEGの成因の説明としてはそれぞれ異なる電子加熱機構が考えられており、第二、第三の領域について以下の(2)、(3)で述べる解析結果が得られた。また、(4)、(7)でこの観察結果を踏まえた発展的解析を行った。

(2) 部分共鳴域での電子加熱の特徴

高EEG領域のうち、対向発散磁界中の零磁界X点の周囲に生じる共鳴域では、電子の周方向速度成分の周期変化には位相差が少ない状態で交流電界に追従する傾向が強く現れた。EEGをプラズマ装置外部から見た有効電力と考えると力率が高いことに相当すると解釈された（図2（c）、図3（a）、成果論文：Nakashima他2019, JJAP 58(11), 116001）。

(3) 器壁近傍での電子加熱の特徴

本課題の基となった先行研究において、器壁で起こる電子反射で電子の指向性が生じ誘導電界による加速方向と一致した電子に顕著な電子加熱が起こる仕組みが示された。本課題では新たにプラ

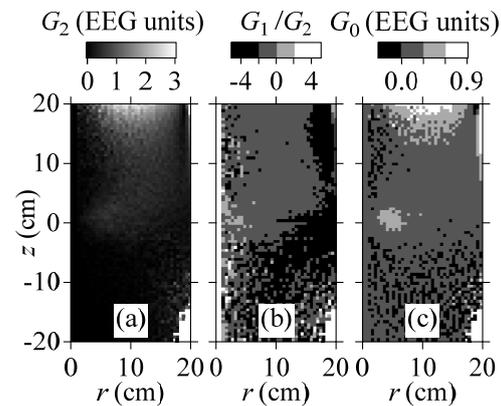


図2. 電子エネルギー利得 G の成分分解。(a)電界2倍波同期成分 G_2 （電界絶対値同期成分）、(b)電界同期成分 G_1 （ G_2 との相対比）、(c)直流成分 G_0 （非対称指向性成分）（成果論文：Nakashima他2019, JJAP 58(11), 116001より）。

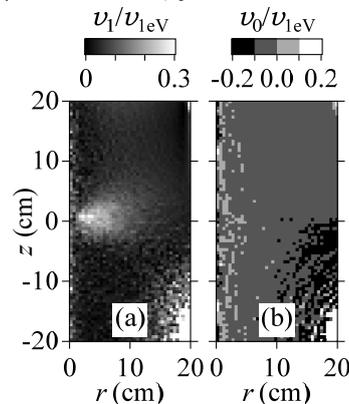


図3. 電子速度周方向成分の位相分解。(a)電界同期成分 v_1 、(b)直流成分 v_0 （非対称指向性成分）（成果論文：Nakashima他2019, JJAP 58(11), 116001より）。

ズマシース電界がある場合を考慮した。シース電界にはシースに進入した電子をプラズマ内部方向へと押し戻すと同時に器壁沿いの指向性を与える働きがあり、その結果電子は誘導電界からエネルギーを得ることが示された。シースに進入した電子が無衝突のままシースを脱するとエネルギー増減（増が先、減が後）は相殺され易いが、電子がシースから遠ざかる段階で電子-分子衝突により散乱が生じ電子の旋回軌道が変わると、後段のエネルギー減が発現しない場合があるため確率的に電子エネルギー増の側に偏るとの統計的電子加熱機構が示された（図4，成果論文：Takahashi and Sugawara 2020, JJAP 59(3), 036001）。

(4) 部分共鳴の装置形状依存性

実機形状設計の試みとして、励磁コイル間隔を狭め共鳴域を広げた系で磁界強度とrfアンテナ位置を変えつつEEGを観察した。共鳴域がアンテナから離れても部分共鳴による電子加熱が起こることを示した。また、アンテナ配置と磁界強度に依存したEEG分布の基本的な変化傾向を得た（学会発表：岡崎，菅原2021～2022）。

(5) 電子輸送の指向性に関する基礎特性

電子流の方向を示す平均電子速度ベクトル $\mathbf{W} = (W_x, W_y, W_z)$ の交流電界応答を解析した。電子衝突周波数 ν 一定を仮定し、直交電磁界下の \mathbf{W} の近似理論式を解析的に導いた（成果論文：Sugawara 2019, JJAP 58(10), 108002）。 \mathbf{W} が電界交番と同期して楕円軌跡を描くことを示した（図5）。近似とはいえ初等関数による表示で \mathbf{W} の交流電界応答特性の基本的条件依存性が明確になった。同近似理論式はさらに任意の電磁界交差角 θ の場合に一般化され次の式を得た（成果論文：Sugawara and Nakata 2022, EPJD 76(2), Art. Num. 32, $\theta = \pi/2$ が前述の直交電磁界の場合）。

$$\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z) = (E \sin \theta \sin(\omega_E t + \phi), 0, E \cos \theta \sin(\omega_E t + \phi)), \quad E = |\mathbf{E}|, \quad \mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z) = (0, 0, B), \quad B = |\mathbf{B}|$$

$$W_x(t) = +(E/B) \sin \theta \omega_E \omega_B (\omega_E^2 - \omega_B^2 + \nu^2)^{-1} \cos(\omega_E t + \phi) - (E/B) \sin \theta \nu \omega_B (\omega_E^2 + \omega_B^2 + \nu^2)^{-1} \sin(\omega_E t + \phi)$$

$$W_y(t) = +(E/B) \sin \theta \omega_B^2 (\omega_E^2 - \omega_B^2 - \nu^2)^{-1} \sin(\omega_E t + \phi) + (E/B) \sin \theta 2\nu \omega_E \omega_B^2 \Omega^{-1} \cos(\omega_E t + \phi)$$

$$W_z(t) = +(E/B) \cos \theta \omega_E \omega_B \Xi^{-1} \cos(\omega_E t + \phi) - (E/B) \cos \theta \nu \omega_B \Xi^{-1} \sin(\omega_E t + \phi)$$

$$\Omega = [(\omega_E - \omega_B)^2 + \nu^2][(\omega_E + \omega_B)^2 + \nu^2], \quad \Xi = (\omega_E^2 + \nu^2), \quad \omega_B = eE/m \quad (e/m \text{は電子の電荷質量比})$$

この結果から \mathbf{W} ベクトル軌跡を含む平面（電子流が向き得る方向を表す）も電磁界交差角 θ に依存して傾くことが示された。実ガス中の \mathbf{W} をモンテカルロ法により計算したところ、磁界強度変化に対する基本的な楕円ベクトル軌跡の変化傾向は上記近似理論式とよく一致し、特に F_2 中の \mathbf{W} はある範囲内で定量的にも近似理論式がよくあてはまった（図5(右)，成果論文：Nakata他2021, IEEE-TPS 49(1), 83-90）。実機系でしばしば行われる流体シミュレーション解析では、計算に必要な参照データが限定的なため磁界による電子流偏向の反映は必ずしも容易ではなかったが、この近似理論式により根拠のある電子流偏向の考慮が可能になると期待される。

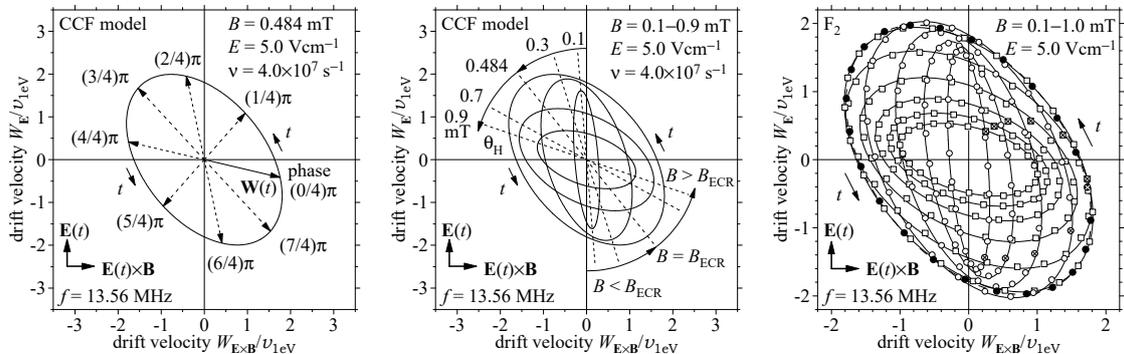


図5. 直交電磁界下平均電子速度ベクトル \mathbf{W} の交流電界応答。(左) 電子流の方向を表す \mathbf{W} は交流電界交番と同期して楕円を描く；(中央) 磁界を強めると楕円の軸が傾く（ホール偏向に対応）とともに楕円は膨らみ共鳴磁界強度付近で最大となる；(右) F_2 ガス中の \mathbf{W} には一定衝突周波数（CCF）近似理論モデルがよくあてはまる（成果論文：Nakata他2021, IEEE-TPS 49(1), 83-90）。

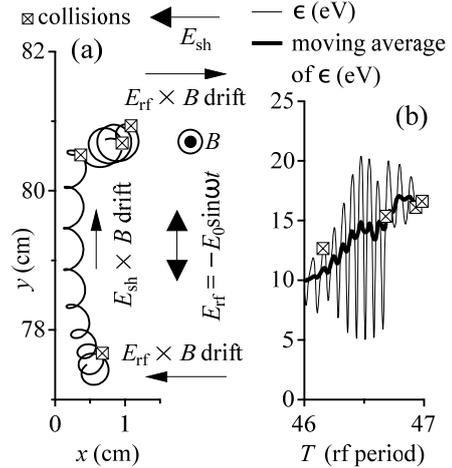


図4. プラズマシース電界影響下のプラズマ容器内壁 ($x = 0$) 近傍の電子運動と、衝突散乱に伴う電子エネルギー増加優勢傾向（成果論文：Takahashi and Sugawara 2020 JJAP 59(3), 036001より）。

(6) 長期緩和過程計算に対応可能な電子速度分布関数計算手法の開発

電子速度分布関数緩和過程計算法であるプロパゲータ法をプロパゲータ行列 \mathbf{P} を用いた行列形式で表現し、行列の自乗計算の反復により高次の累乗(\mathbf{P} の 2^n 乗)を求めることで、初期状態から長期の緩和過程に渡って電子速度分布関数の変化を観察可能な手法を開発した(成果論文: Sugawara and Iwamoto 2021 JJAP **60**(4), 046001)。電子速度分布関数はプラズマ中の電子の諸過程(電子-分子衝突および電子輸送)を定量的に表す電子輸送係数等の導出の基となる基礎情報である。 \mathbf{P} は電子速度分布関数緩和の単位シミュレーション時間経過分に対応する。 \mathbf{P} の累乗の次数(2の冪)は経過時間に対応するため、線形に増加する計算負荷により指数関数的に伸びる時間の追跡が可能である。現有計算機の能力の制限から同手法の基本動作実証と計算結果妥当性確認は無磁界条件でなされたが(図6)、原理的には磁界下の電子速度分布関数にも適用可能であることを論じた。磁界は電子運動を束縛し電子エネルギー増加を抑えるため、また、磁化プラズマの運転条件となる低気圧では衝突緩和の進行が遅いため、磁界下の電子速度分布関数の緩和は長時間に及ぶことがある。指数関数的時間尺度での緩和過程観察が可能な本手法はこの点で有望と考えられる。大規模行列計算能力は計算機科学では一種の性能評価指標となっており、新型計算機開発導入の際はよく行列計算能力向上や利用環境整備が図られることを踏まえると、一般性のある行列積の計算だけを用いる本手法の磁界下電子速度分布関数緩和過程観察への適用可能性・有用性は将来の計算機能力向上とともに高まると期待される。

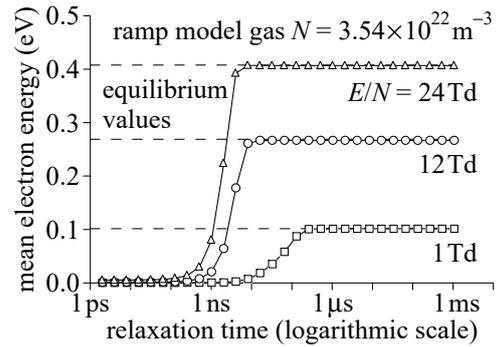


図6. プロパゲータ行列 \mathbf{P} の自乗の反復で求めた長期に渡る電子速度分布関数の緩和過程(成果論文: Sugawara and Iwamoto 2021, JJAP **60**(4), 046001より)。時間進行は指数関数的なため、低気圧・磁界下など緩和時間が長い系に適用可能。

(7) 複数の条件の重みを考慮した電子エネルギー利得および周方向変位の定量評価指標の導入

部分共鳴に適した電磁界下電子運動の条件の探索や非対称・指向性電子流の評価に当たり、電子運動の初期条件は多元的で変数(電子位置・速さ・方向, 交流電界強度・位相など)の多さが網羅的な評価を困難にしていた。そこで、複数の条件に対しその発現確率を反映した重みを付け一つの指標量で表す手法を考案した。部分共鳴が起こる共鳴域を注目域とし、注目域内における電子の自由飛行中のエネルギー変化および周方向変位の期待値を指標量として取った。これら指標量の計算では、注目域内に位置を定めた電子源から全方位に等方的に放出される電子に対して電子出発方向の立体角の重みを考慮した。また、電子-分子衝突による自由飛行中断について衝突周波数を基に無衝突(自由飛行継続)確率の重みを考慮した。シミュレーションの結果、単電子運動の観察では特に磁界強度 B_{ECR} の領域を通過して注目域を脱する電子にエネルギー増の傾向が見られたとともに、電子エネルギーの指標量には初期電子放出位置や初期電界位相など異なる初期条件に対して有意な差異が観察され(図7)、この指標量が初期条件間比較に利用できることが示された(成果論文: 野原, 菅原2022, 電気学会論文誌 **142-A**(6), 掲載と掲載号まで決定, 頁未定)。また、電子の周方向変位は不均一磁界下のgrad-Bドリフトの方向と一致し、その指標量には電子移流方向が分界面上下領域で逆になる非対称性も適正に現れた(学会発表: 林, 菅原2021; 林, 野原, 菅原2022)。重み付き期待値を指標量とする評価は条件探索対象の変数を減らすのに有効であり、条件間比較が簡便になった。ここで考案された同指標量による評価方法は本課題に続く関連解析でも利用可能と期待される。

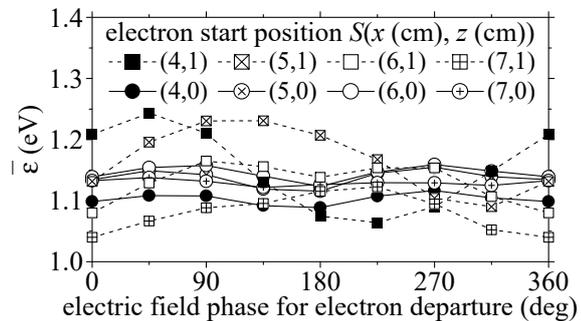


図7. 定量評価指標を用いて求めた電子エネルギー利得の電子供給位置および電界初期位相への依存性(成果論文: 野原, 菅原2022, 電気学会論文誌 **142-A**(6) (掲載決定, 頁未定)より)。電子出発方向の立体角と気体分子との衝突による電子自由飛行中断確率を考慮。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Sugawara Hirotake, Nakata Yuya	4. 巻 76
2. 論文標題 Elliptic vector loci of average electron velocity of electron swarm in constant-collision-frequency model gas under ac electric and dc magnetic fields crossed at arbitrary angles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 32-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/s10053-022-00346-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 野原直人、菅原広剛	4. 巻 142
2. 論文標題 誘導結合磁化プラズマ中の共鳴磁界域近傍部分共鳴による電子エネルギー利得の評価指標	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 288 ~ 289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.142.288	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 Nakata Yuya, Sato Takeshi, Sugawara Hirotake	4. 巻 49
2. 論文標題 Elliptic Vector Loci of Average Electron Velocity in Real Gases Under AC Electric and DC Magnetic Fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 83 ~ 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2020.3010315	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sugawara Hirotake, Iwamoto Hikaru	4. 巻 60
2. 論文標題 A technology demonstration of propagator matrix power method for calculation of electron velocity distribution functions in gas in long-term transient and succeeding equilibrium states under dc electric fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 046001-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abe8a7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sugawara Hirotake	4. 巻 58
2. 論文標題 Derivation of the electron drift velocity vector in gas under crossed ac electric and dc magnetic fields assuming constant-collision-frequency models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 108002-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3e5d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakashima Katsuhiro, Takahashi Hironori, Sugawara Hirotake	4. 巻 58
2. 論文標題 Phase-resolved profiles of electron energy deposition in inductively coupled radio-frequency plasmas driven under confronting divergent magnetic fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 116001-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4481	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Hironori, Sugawara Hirotake	4. 巻 59
2. 論文標題 Stochastic electron energy gain under sheath electric field near sidewall of chamber to drive inductively coupled magnetized plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 036001-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab71d2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 H. Sugawara and Y. Nakata
2. 発表標題 Periodic Response of the Average Electron Velocity Vector of an Electron Swarm in a Constant-Collision-Frequency Model Gas under AC Electric and DC Magnetic Fields Crossed at Arbitrary Angles
3. 学会等名 POSMOL 2021 at-present XXII International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎凌大, 菅原広剛
2. 発表標題 共鳴磁界域を拡張した対向発散磁界下誘導結合プラズマ中の電子エネルギー利得分布観察
3. 学会等名 令和3年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田裕也, 菅原広剛
2. 発表標題 任意交差角RF電界直流磁界下のF2中電子平均速度ベクトル周期応答
3. 学会等名 令和3年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野原直人, 菅原広剛
2. 発表標題 交流電界直流磁界下共鳴磁界域における電子滞在時間と電子エネルギー利得の関係
3. 学会等名 令和3年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田裕也, 菅原広剛
2. 発表標題 任意交差角RF電界直流磁界下のF2中平均電子速度ベクトル楕円軌跡長軸半径と平均電子エネルギーの相関
3. 学会等名 令和3年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野原直人, 菅原広剛
2. 発表標題 交流電界直流対向発散磁界下共鳴磁界域からの電子脱出傾向と電子エネルギー利得の関係
3. 学会等名 令和3年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林秀虎, 菅原広剛
2. 発表標題 交流電界・直流対向発散磁界下共鳴磁界域付近における電子流の非対称性
3. 学会等名 令和3年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎凌大, 菅原広剛
2. 発表標題 対向発散磁界下誘導結合プラズマ中の異なる共鳴磁界域形状における電子エネルギー利得分布観察
3. 学会等名 令和3年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎凌大, 菅原広剛
2. 発表標題 シース電界を考慮した誘導結合プラズマ中の対向発散磁界共鳴域における電子エネルギー利得解析
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林秀虎, 野原直人, 菅原広剛
2. 発表標題 対向発散磁界分界面上下領域における誘導結合磁化プラズマ中の周方向電子流の指向性
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅原広剛、中田裕也
2. 発表標題 RF電界・直流磁界下のCF4中電子ドリフト速度ベクトル軌跡(2)電子ドリフト速度指向性に対する電子衝突散乱の影響
3. 学会等名 令和2年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野原直人、菅原広剛
2. 発表標題 交流電界・直流磁界下共鳴磁界域付近の電子エネルギー利得機構の解析
3. 学会等名 令和2年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田裕也、菅原広剛
2. 発表標題 RF電界・直流磁界下実ガス中の電子ドリフト速度ベクトル楕円軌跡の軸傾斜特性
3. 学会等名 令和2年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田裕也、菅原広剛
2. 発表標題 RF電界・直流磁界下実ガス中電子ドリフト速度電界応答位相観察
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野原直人、井越冬弥、菅原広剛
2. 発表標題 交流電界・直流磁界下共鳴磁界域における高エネルギー利得電子の挙動解析
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅原広剛、岩本耀
2. 発表標題 プロバゲータ行列累乘法による気体中電子速度分布関数の長期緩和過程計算
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Sato and H. Sugawara
2. 発表標題 Evaluation of electron drift velocity vector in gas under RF electric and DC magnetic fields
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Takahashi and H. Sugawara
2. 発表標題 Electron energy gain mechanisms near chamber wall in inductively coupled magnetized plasmas
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Ozawa and H. Sugawara
2. 発表標題 Quantification of electron confinement effect under confronting divergent magnetic fields considering mutual electron transfer across separatrix
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sugawara
2. 発表標題 Response of Average Electron Velocity Vector under AC Electric and DC Magnetic Fields in a Constant-Collision-Frequency Model
3. 学会等名 72nd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sugawara, T. Sato, Y. Nakata
2. 発表標題 Vector loci of average electron velocity in gases under ac electric and dc magnetic fields
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Takahashi and H. Sugawara
2. 発表標題 Electron Energy Gain Mechanisms near Chamber Wall in Inductively Coupled Magnetized Plasmas under Different Gas Pressures
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小澤良輔、菅原広剛
2. 発表標題 モンテカルロシミュレーションによる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の制御条件依存性の解析
3. 学会等名 令和元年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋宏徳、菅原広剛
2. 発表標題 誘導結合型磁化プラズマ容器側壁近傍における電子エネルギー利得機構(2) - シース電界形状と磁界印加方向が利得機構に及ぼす影響のモンテカルロ解析 -
3. 学会等名 令和元年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤壮、菅原広剛
2. 発表標題 モンテカルロ法によるRF電界DC磁界下電子輸送係数解析 - 電子サイクロトロン共鳴条件近傍の電子輸送係数の特性 -
3. 学会等名 令和元年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋宏徳、菅原広剛
2. 発表標題 誘導結合型磁化プラズマ容器側壁近傍シース電界下の電子無衝突加熱機構 - 電子速度およびrf電界位相依存性に関する粒子モデル解析 -
3. 学会等名 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤壮、中田裕也、菅原広剛
2. 発表標題 交流電界・直流磁界下電子速度分布の時間変化
3. 学会等名 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田裕也、佐藤壮、菅原広剛
2. 発表標題 交流電界・直流磁界下のF2ガス中電子ドリフト速度ベクトルの評価
3. 学会等名 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田裕也、佐藤壮、菅原広剛
2. 発表標題 RF電界・直流磁界下のCF4中電子ドリフト速度ベクトル軌跡
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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