

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01274

研究課題名(和文) 中性・電離大気相互作用の直接観測のための発展型イオン密度・ドリフト速度測定器開発

研究課題名(英文) Development of a new instrument to measure ion density and drift velocity for in-situ observation of the coupling between neutral and charged particles

研究代表者

阿部 琢美 (Abe, Takumi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：40255229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：超高層大気中の電離圏イオンに関しドリフト速度、密度、温度の推定を可能にする測定器の開発を行った。この測定器は観測ロケットや低高度衛星に搭載するという前提で各種仕様が決定された。本研究では数値シミュレーションにより、測定器内部構造や電気的仕様の詳細を決定し、試作に着手した。測定器のセンサ部および電気回路部は独立に開発を進めた後に組み上げ、真空チェンバー内に電離圏に近いプラズマ環境を生成しデータを取得し、基本性能の確認を行った。データから推定されたイオン密度、イオン温度は妥当な値で測定器の性能が確認できたが、ドリフト速度推定については今後のイオン加速装置の完成を待って確認を行うこととしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

下部電離圏には電磁場の影響を受ける電離大気と受けにくい中性大気が共存するため、電流や分極電場の発生等の中性大気のみの場合とは異なる特徴的な現象が多く存在する。この領域において中性風の観測は日本でも行われてきたが電離圏イオンのドリフト速度を測定できる機器は現在日本に存在せず、研究を進める妨げとなっている。イオンドリフトが重要な観測項目であることに鑑み、今後継続して確実に測定器を提供できるよう国内体制を構築することが必要である。中性大気風速推定法で手段を確立した日本がイオンドリフト速度観測を可能にする測定器を開発すれば、中性大気・プラズマ相互作用に関する観測的研究で世界をリードすることが出来る。

研究成果の概要(英文)：We have developed an instrument to measure a drift velocity, density, and temperature of the ionospheric ions in the upper atmosphere. The detailed specification of the instrument was determined by assuming that it is installed on sounding rocket or low-altitude satellite. In this study, internal structure and electric specification were decided by reflecting a result of numerical simulation of ion trajectory inside the instrument, and then the prototype model was developed. The instrument consisting of the sensor part and the electronics was tested inside the vacuum chamber in which the ionospheric plasma environment is generated. Ion density and temperature were calculated from the data obtained in the test. The reasonable agreement of these parameters with electron density and temperature confirmed that the basic performance was almost the same as our plan. Validity of the ion drift velocity estimation will be confirmed after completing a development of the low-energy ion source.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：電離圏 イオンドリフト速度 測定器開発 イオン密度 イオン温度 観測ロケット

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

下部電離圏（高度約 80～300 km）には電磁場の影響を受ける電離大気と影響を受けない中性大気が共存するため、電流や分極電場の発生等の中性大気のみの場合とは異なる特徴的な性質をもつことが知られている。更に、電離大気と中性大気の粒子間には衝突が起こりうることで粒子は運動量を交換しながら複雑な運動をすることになる。

この領域の研究のためにプラズマおよび希薄な中性大気の直接（その場）観測を行うプラットフォームとして低高度衛星があげられるが、大気ドラッグの影響で長期間飛行することは困難である。弾道飛行中に測定を行なう観測ロケットは衛星が飛行できない高度を観測する唯一の手段であるが観測時間が限定される。下部電離圏には中規模移動性電離圏擾乱(MS-TID)や赤道スプレッドFなど特徴的な現象が多く存在するが、残された未解明の問題を解決するために、高精度の測定器を用いて効率的な観測を行なう必要がある。

この領域に存在する大気粒子の運動である中性風の観測手段として、化学物質放出が日本でも行われてきた。これに対し電離圏プラズマ中で観測が可能なイオンドリフトの測定器は現在日本に存在せず、研究を進める妨げとなっている。これまでの観測ロケット実験では海外の研究者に提供を求めてきたが、イオンドリフトの観測要求が多い現状を鑑みると、今後継続して安定かつ確実な測定器の提供が行われるよう日本の研究者が測定器を提供できるような体制をつくる必要がある。中性大気風速推定法で手段を確立した日本がイオンドリフト速度観測を可能にする測定器を開発すれば、中性大気-プラズマ相互作用に関する観測的研究で世界をリードすることが出来る。

2. 研究の目的

本研究の目的は低高度衛星や観測ロケットに搭載可能なイオン密度・ドリフト速度測定器の開発にある。これまで海外では、測定器開口面接線方向の速度の推定が可能なイオンドリフトメータやリターディングポテンシャルアナライザが人工衛星に搭載されてきたが、本研究では小型でありながらこれら2つの機能を兼ね備え、イオン種毎の密度と、イオンドリフト速度をベクトルとして高精度に測定できる発展型測定器の開発を行う。

下部電離圏に特徴的な現象の解明には中性大気とプラズマの相互作用の理解が重要な鍵になる。この相互作用には粒子間衝突に加え電場を介した運動エネルギーの変化もあるが、理論的な予測に対し観測的な検証が不十分なのが実情である。局所的な素過程の観測は容易ではなくほとんど解明されていないために不確定な部分が多く、地球大気の大循環モデルでも相互作用の詳細な物理過程が再現されていない。

電離圏のような弱電離プラズマ中での両者の相互作用は地上での実験では測定することが出来ず、宇宙空間で観測する以外に方法は無い。本研究で開発する測定器は高精度でありながら小型であるため、観測ロケットや小型衛星に中性大気観測の計測器とともに搭載することが可能であり、両者の相互作用の直接同時観測を実現し、下部電離圏領域の現象についての定量的議論に必要な数値データを提供することができる。

3. 研究の方法

電離圏イオン密度・ドリフト速度測定器の開発計画として、まず測定器の机上設計および数値シミュレーションにより研究をスタートさせ、見通しが得られた段階で第1次設計を確定

させた。その後測定器の試作に着手し、完了後にスペースチェンバー内に設置してイオンの測定を行うことで基本性能を確認した後に、必要な改良点を洗い出す。これらの検討結果を試作品に反映させて、プロトタイプモデルの完成を目指した。3ヶ年計画は以下のように進めた。

[1年目]

前期はイオン密度・ドリフト速度測定器の基本構成に関し設計と数値シミュレーションによる検討を行うことで研究を開始した。測定器の構成として、当初の計画通りセンサ部の前段にリターディングポテンシャルアナライザ、後段には電流収集用コレクタ電極を配置するものを第1次案として考えた。数値シミュレーションでは、空間に測定器内部の電位分布を表現し、速度と温度を与えた分布関数で表現されるイオンが外部から入射した場合の各コレクタ電極の電流値の計算を行った。検討の結果、電極は平板ではなく半球の内面に設置するほうが有利で、枚数も増やして72枚にするべきであるとの結論を得た。この変更に伴い、半球の半径は約60 mm程度にすることとした。

後期には上に述べた測定器のセンサRPA部の基本設計およびコレクタ電極に関する数値シミュレーションの結果を受けて、センサ部構造を決定した。また、検討結果をもとに電極に流れる電流の増幅率、速度等のパラメータを推定するために必要なデータ送信レート等を計算し、測定器の電気回路部に要求される仕様を決定した。このようにして導いた仕様を満たす電気回路部を業者に対して発注し調達を行った。

[2年目]

計画2年目には決定した仕様に基づき測定器のセンサ部を試作、その後に組み上げを行い、測定器の基本構成を完成させた。測定器の性能評価を行うためのイオン加速装置を開発する過程で、当初の想定に反し金属メッシュの特性および配置により、電位分布が一様にならず期待通りの電位分布が実現できていないことが判明した。研究遂行上、測定器性能評価のための加速イオンの生成は不可欠なため、イオン加速装置の再設計および解析を追加して実施することとした。

[3年目]

新型コロナウイルス感染拡大の影響により所属機関に入構できない期間が生じ、予定通りに開発を進められない時期があったが可能な限り研究を進めた。測定器の基本性能を確認するため、スペースチェンバー内部に電離圏プラズマを模擬する環境を作り、開発した測定器を用いてイオンに関するデータの取得を行った。データの解析によりイオン密度とイオン温度を推定したところ、妥当な値が得られた。更に、本測定器を観測ロケットに搭載した場合の適応性について詳細に検討を行うと共に、実験データを基により精確に測定を行うための改善点について検討を加えた。

4. 研究成果

(1) 測定器の構成

1年目に行った測定器の仕様に係る数値シミュレーションの結果を基に内部構造を決定した。測定器としてはリターディングポテンシャルアナライザ(RPA)部およびコレクタ電極部から構成され、前者ではメッシュグリッドに電圧を印加することでイオンのエネルギー分析を行い、開口面法線方向のドリフト速度1成分およびイオン密度の推定が可能になる。後者では半球内面に貼り付けられた72枚のコレクタ電極の電流分布からイオンの入射角を推定し、開口面接線方向の速度とイオン温度の推定が可能になる。RPA側に設けるイオン取り込み口の面積に対して大きめに電極の範囲を設けることでイオンの入射角度が法線方向に対し大きな

角度をもった場合でも全電極でカバーできるような設計になっている。図1に開発したイオン測定器センサ部試作モデルの外観を示す。

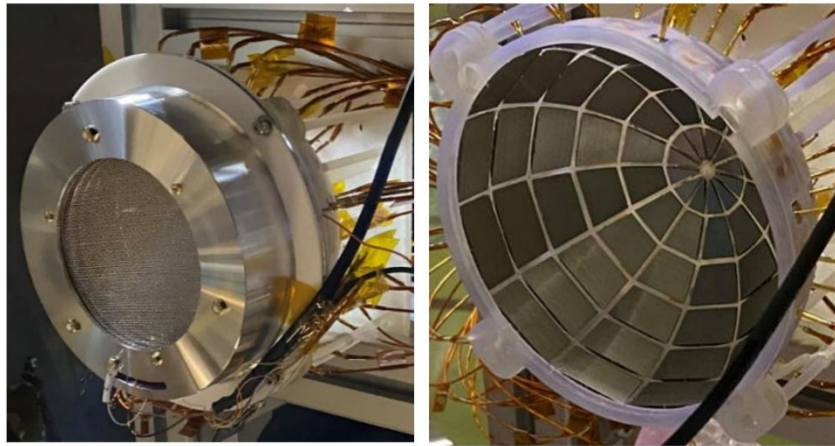


図1. 測定器センサ部の外観 (左: RPA 部、右: コレクタ電極部)

(2) 測定器の基本性能の確認

開発した測定器の基本性能を確認するためにRPA部とコレクタ電極部を含むセンサ部一式を真空チェンバー内に設置し、内部にプラズマを生成した状況で電気回路部を使用してイオン電流値データの取得を行った。この実験では後方拡散型プラズマ源を用いて電離圏と同程度の1000K程度の温度をもつプラズマをチェンバー内部に生成し、イオンが測定器に流入するようにした。RPA部のグリッドに印加する電圧はステップ状に変化させつつ、その都度コレクタ電極の各電極のイオンによる電流値を計測した。

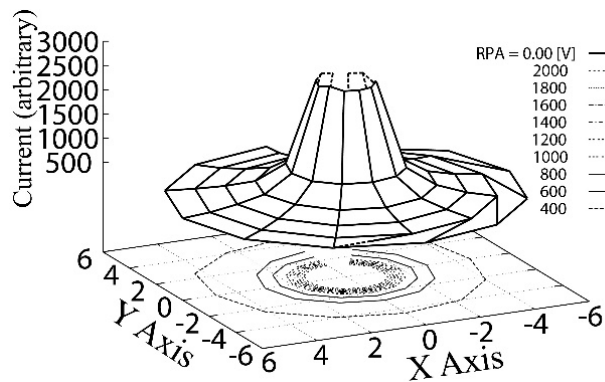


図2. コレクタ電極部で得られた電流の分布

RPA部のグリッドに印加する電圧はステップ状に変化させつつ、その都度コレクタ電極の各電極のイオンによる電流値を計測した。

図2は72枚の電極の電流値を3次元表示したものである。半球内部の電極配列をX軸およびY軸上に表現し、縦軸は電流値である。なお、このデータはRPA電圧を0Vにした状態で取得した。図から予想通り、中心付近で最も大きな電流値となっていることが確認できる。

図3はRPA電圧を変化させた時に電極により測定されたイオン電流である。縦軸の電流値

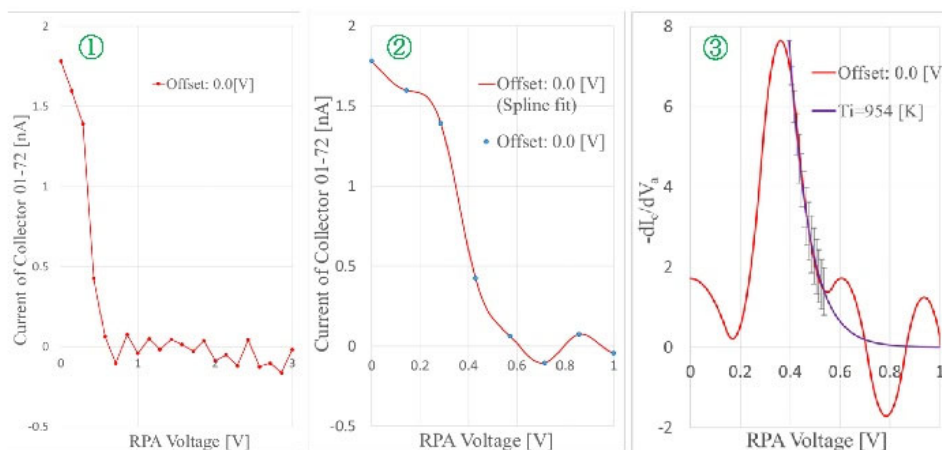


図3. ①電流積算値の平均値、②測定値(青点)および3次スプライン補間(赤線)、③補間値の微分値(赤線)および近似曲線(紫線)

は半球内部に設置された 72 枚全ての電極の電流値の積算値である。横軸は RPA 電圧であり、オフセット電圧 0 V を基準に 0 から +3 V の電圧範囲を、22 ステップで掃引した。本データの取得にあたっては電圧掃引を 10 回繰り返してデータを取得、①の赤点は各電圧ステップにおける 10 回の掃引の平均の電流値を示している。図の②は、①に示した電流積算値(青点)を 3 次スプラインで補間(赤線)し 0~1 V の電圧範囲で表示したものである。これらの値に対しマクスウェル分布を仮定した式を用いて近似すると、イオン温度として 954 ± 241 [K]、イオン密度として $5.14 \times 10^3 \pm 0.613 \times 10^3$ [/cm³] が得られた。

同様な条件で真空チェンバー内にプラズマを生成し、ラングミュアプローブにより測定を行った場合の電子温度・密度として、1386 [K]、 7.39×10^4 [/cm³] が得られている。比較してみると電子温度はイオン温度よりも約 400K 高いが、一般に低密度プラズマ中では電子温度が高い状況は生じやすく妥当である。電子密度はイオン密度よりも約 7 倍大きい、この差については今後検討する必要がある。

以上に述べたように電離圏イオンのドリフト速度、密度、温度の推定を可能にする測定器の開発は着実に進行している。ドリフト速度推定については上に述べた成果から考えて可能だと推測しているが、熱速度よりも大きな速度でドリフトするイオンの生成が未だ可能になっていないために取得データを通した確認は行われていない。今後はイオン密度推定の精度を向上させるとともに、ドリフトするイオンを生成できる加速装置を開発し更なる実験を行う事で、本研究において開発されたイオン測定器の性能を更に高め、諸現象の解明のために必要な精度の優れた測定器を完成させることができると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takumi Abe
2. 発表標題 Development of ion drift velocity analyzer for sounding rocket
3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾原咲穂, 阿部琢美, 三宅互
2. 発表標題 電離圏イオンドリフト測定器開発のための低エネルギーイオン加速装置の開発
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第150回総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾原咲穂、阿部琢美、三宅互
2. 発表標題 電離圏イオンドリフト速度測定器の開発
3. 学会等名 令和3年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齊藤昭則, 阿部琢美, 石坂圭吾, 田川雅人, 熊本篤志, 齋藤義文, 松岡彩子, 齋藤享, 西岡未知, 細川敬祐, 横山竜宏, Huixin Liu, 安藤慧
2. 発表標題 昼間ポラディックE層形成過程の中性大気とプラズマ大気の同時観測による解明
3. 学会等名 第4回観測ロケットシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾原咲穂, 阿部琢美, 三宅互
2. 発表標題 電離圏イオンドリフト速度測定器の開発
3. 学会等名 令和3年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾原咲穂, 阿部琢美, 三宅互
2. 発表標題 離圏イオンドリフト測定器開発のための低エネルギーイオン加速装置の開発
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第150回総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部 琢美、渡部 重十、齊藤 昭則、葉柴 隆斗
2. 発表標題 Development of an instrument to measure ion drift velocity and density in the ionosphere
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 葉柴 隆斗、阿部 琢美
2. 発表標題 Numerical study of the internal mesh structure for ion drift velocity analyzer on sounding rocket
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 葉柴 隆斗、阿部 琢美
2. 発表標題 観測ロケット搭載用電離圏イオン測定器の開発研究
3. 学会等名 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部琢美、渡部重十、齊藤昭則
2. 発表標題 観測ロケット搭載用イオンドリフト速度測定器の開発(1)
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2018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	渡部 重十 (Watanabe Shigeto) (90271577)	北海道情報大学・経営情報学部・教授 (30115)	
研究 分担者	齊藤 昭則 (Saito Akinori) (10311739)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	

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