小型衛星を用いた電離層観測における 衛星電位変動問題と解決手法の提案 Investigation of Electrical Potential Change on Microsatellite for Ionospheric Observation and Its Solutions

2017年1月

千葉大学大学院融合科学研究科 情報科学専攻 知能情報コース 宮崎 貴大

小型衛星を用いた電離層観測における 衛星電位変動問題と解決手法の提案 Investigation of Electrical Potential Change on Microsatellite for Ionospheric Observation and Its Solutions

2017年1月

千葉大学大学院融合科学研究科 情報科学専攻 知能情報コース 宮崎 貴大

概要

電離層観測は長距離通信や衛星による測位の高品質化,及び宇宙物理科学の観点からも 重要性が高く、日本では古くから研究が行われてきた.近年では比較的大きな地震発生前後 に電離層の変動が確認され、電離層変動と地震との関連性が注目されている.関連性の解明 には地球規模での電離層状態の詳細なデータが必要で、当研究室では、小型衛星 GAIA-I 及 び GAIA-IIによる電離層観測を計画している.しかし、大型衛星で用いられている従来の 観測手法を小型衛星に搭載する際には、いくつかの問題があり、特に大きな問題となるのが 衛星電位の変動である.これは電離層中の電子が衛星の構体に飛び込むことで、衛星構体の 電気的な中性が崩れ不安定になり、測定器や観測プローブの電圧の上昇に伴ってより負の 方向へ衛星電位が変化する現象である.この現象は小型衛星に顕著にみられる現象で衛星 構体の面積が大型衛星に比べて小さいことが原因である.

本研究では、小型衛星 GAIA-I で電離層観測を行うにあたり、はじめに衛星電位の変動 を制御する方法として電子銃による電位の制御手法について実験を行った.電子銃を用い た電位の制御では、衛星構体にたまった電子を熱電子として放出することで衛星構体内の 電子の量を制御し衛星電位を保つ.この電子銃を小型衛星模型に取り付け、電離層を模した プラズマを生成できるスペースプラズマチェンバー内に設置し、電子銃を使用した場合と 使用しない場合を比較した.この結果、電子銃を用いると衛星電位がわずかに改善され、電 子銃による衛星電位の制御手法の有効性を確認した.改善の度合いは、観測するプラズマの 状態や、衛星構体の面積によって変化し、条件によっては電子銃に流す電流を増加させる必 要があり電源系の条件によっては小型衛星に搭載できない.

本件研究で想定している小型衛星 GAIA-I は、50kg 級超小型衛星に分類され衛星構体の 面積も極めて小さい.このため,電子銃による衛星電位の制御手法は適さない.よって2つ 目の提案として,衛星電位変動の影響を受けない小型衛星用の電離層観測器として開発さ れた Electron Density and Temperature Probe (EDTP)の使用を提案・検討する.EDTP は ロケット実験や小型衛星搭載の実績があるが,電子密度の測定時に地球磁場による影響が 現れる.これは,地球磁場によって電離層内の電子が影響を受け電子サイクロトロン運動を 行い,磁力線に巻きつくように移動することで密度の偏りが生まれ,衛星の姿勢によって変 化する観測プローブ面と地球磁場の方向によっては測定する電子密度に差がでる.本研究 では,EDTP についてプローブ形状の違い及びプローブ面に対する磁場の方向が与える測 定結果への影響について実験をおこない,EDTP のもつ円板状プローブのプローブ面に進 入する磁場方向では,球状のプローブに対して約 1.4 倍高い電子密度が測定されることが分 かった.この実験で用いたスペースチェンバーでは,生成されるプラズマの分布に偏りがあ ることが分かっているため今後はプローブの位置や角度を変更し,プラズマの偏りによる 影響を除いた磁場の方向とプローブ形状や角度などによる電子密度への影響を明らかにし ていきたい.

目次

1. 序論	1
1.1. 研究背景	1
1.1.1. 電離層変動と地震の関連性	2
1.1.2. 超小型衛星 GAIA- I	5
1.2. 研究内容	.11
1.2.1. 解決すべき問題	.11
1.2.2. 問題の解決方法の提案	. 12
2. 電離層観測の基礎知識	. 14
2.1. 電離層観測	. 14
2.1.1. 電離層観測の歴史	. 14
2.1.2. 電離層の観測手法	15
2.1.3. プローブ法についての基礎知識	21
2.1.4. プローブ法の種類	24
2.2. 小型衛星を用いた電離層観測について	35
2.2.1. QSAT	. 35
2.2.2. ELMOS 衛星群計画	35
2.2.3. Formosat-3/COSMIC	. 36
 小型衛星の衛星電位制御手法の提案 	37
3.1. 衛星電位変動	. 37
3.1.1. 変動のメカニズム	37
3.1.2. ラングミュアプローブ使用時の衛星電位の変動	. 39
3.2. 解決方法の提案	41
3.2.1. 電子銃による電子の放出を用いた衛星電位制御	. 41
3.2.2. 実現方法	. 42
3.2.3. 熱電子銃の熱電子放出能力	43
3.3. 衛星電位制御実験	. 47
3.3.1. 実験内容	. 47
3.3.2. 実験で用いた制御システム	. 48
3.4. 実験結果	51
3.4.1. 結果	51
3.4.2. 考察	. 54
4. 新たな電離層観測手法の評価実験	55
4.1. Electron Density and Temperature Probe	55
4.1.1. 概要	55

4.1.2. 利点
4.2. 観測システム
4.2.1. 基本回路
4.2.2. 実験用測定システム
4.3. 評価実験
4.4. 実験① 従来手法との比較61
4.4.1. 実験内容
4.4.2. 結果
4.4.3. 考察
4.5. 実験② 磁場による影響の調査 69
4.5.1. 実験内容
4.5.2. 結果
4.5.3. 考察
4.6. 実験③ プローブ形状による影響
4.6.1. 実験内容
4.6.2. 結果
4.6.3. 考察
5. まとめ
謝辞
参考文献

図目次

义	1 太陽観測衛星「ひのとり」 [5]より	3
汊	2 小型衛星 GAIA- I で搭載される電離層観測機器	. 6
叉	3 小型衛星 GAIA- I の概観図	. 7
汊	4 GAIA- I のシステムブロック図	. 8
汊	5 午前軌道	. 9
义	6 午後軌道	. 9
义	7各電離層の名称と特徴	14
义	8 イオノグラムの例	17
义	9 GAIA-I と各衛星との位置関係	20
汊	10 各層で見られる特徴的な電子密度分布	24
汊	11 ラングミュアプローブ法の測定回路	25
汊	12 電流(I)-電圧(V)特性図	26
汊	13 I-V 特性の片対数プロット	27
义	14 ラングミュアプローブの基本回路	28
义	15 等価回路	30
义	16 UHR 周波数の決定	31
汊	17 使用したインピーダンスプローブの回路図と概観(参考文献 [46]より)	31
汊	18 印加電圧の増加による浮遊電位の変化	33
汊	19 ETP の基本回路	34
汊	20 ELMOS 衛星群([65]より)	35
汊	21 FORMOSAT-3/COSMIC ([69]より)	36
汊	22 電離層飛行時の衛星電位	37
义	23 ラングミュアプローブ使用時	38
汊	24 ラングミュアプローブの電圧を更に上昇させた場合	39
汊	25 実験で得られた衛星電位の変動	40
汊	26 電子銃による衛星電位制御	41
汊	27 電子銃の回路図	42
义	28 作成した電子銃の概観	42
义	29 熱電子放出量の測定回路	44
义	30 使用した真空チェンバーと測定中の様子	45
义	31 熱電子放出量の測定結果	46
义	32 使用した衛星模型と実験の様子	47
义	33 作成したラングミュアプローブのブロック図	49

义	34 作成したラングミュア回路を含む測定システム	. 49
义	35 衛星グラウンド切り替え回路と無線モジュール	. 50
义	36 リレー制御システム	.51
义	37 衛星構体とチェンバー壁を接続した場合	. 52
义	38 衛星構体がフローティングの場合	. 52
义	39 電子銃を作動させた場合	. 53
汊	40 衛星電位の比較	. 53
汊	41 実験で得られた電流・電圧特性	. 54
义	42 EDTP のエンジニアリングモデル	. 55
汊	43 EDTP の基本回路	. 58
叉	44 プローブへの印加電圧(上)と測定時に得られる波形の例(下)	. 58
义	45 測定用の EDTP のブロック図	. 59
义	46 使用したスペースプラズマチェンバーの概観	. 60
义	47 各プローブの取り付け位置	. 61
义	483つの測定方法で得られた電子温度及び電子密度	. 63
义	49 熱プラズマ状態とみられる観測波形	.65
义	50 測定結果の比較(追加)	. 68
义	51 電子サイクロトロン運動	. 69
义	52 ヘルムホルツコイルと磁場の方向	. 70
义	53 測定に用いたプローブと磁場の方向	. 70
义	54 インピーダンスプローブと EDTP で測定された電子密度の結果	. 72
义	55 測定に使用した観測システム	. 73
义	56 球状プローブと円板状プローブの電子密度の結果	.74
义	57 球状プローブの場合に測定されるプラズマの様子	. 76
义	58 円板状プローブの場合に測定されるプラズマの様子	. 76

表目次

表	1	各機器の消費電力一覧
表	2	通信で使用する周波数帯10
表	3	通信機の仕様10
表	4	計算で用いる記号と定数
表	5	EDTP のスペック表
表	6	プラズマの生成条件(実験①)
表	7	チェンバーの環境(実験①)62
表	8	実験①の測定結果
表	9	測定結果の比較(追加)
表	1() Z 軸及び-Z 軸の条件時の電子密度

1. 序論

1.1. 研究背景

地球大気の上層部が太陽からの紫外線やエックス線によって電離したプラズマ状態の気 体の層を電離層と呼ぶ.この電離層は、下層部よりも上層部のほうがより電離が起こりやす いため、電子密度が高いことが知られているが太陽活動や、磁気嵐、超高層大気のゆらぎに よってさまざまに変化している.この電離層変動は、現代社会に必要不可欠な無線通信回線 や、GPS 衛星などの測位衛星を用いた精密な測位システムへ影響を及ぼすため、電離層を 常にモニタリングし、変動を予測する宇宙天気予報が行われており、質の高い電離層観測が 必要とされている.加えて、近年では震度 5 以上の巨大地震の前後で震源上空の電離層の 局所的な変動が確認され、盛んに研究されるようになった.今後、電離層変動と地震の関連 性の解明が進むと思われるが、多くの観測データが必要になると考えられる.

日本では、南極の昭和基地において 50 年以上にわたり高品質の電離層観測を維持し、長 期変動を知る上での貴重なデータを世界中に提供している.加えて、日本が初めて打ち上げ た実用人工衛星である"うめ"は電離層上部の空間におけるプラズマ特性と正イオン密度を 観測する電離層観測衛星であり、日本の宇宙開発は電離層観測と共に歩んできたと言って も過言ではない.この流れを受け継ぎ、従来のように高コストで開発期間の長い大型衛星に 変わって小型衛星郡による地球規模の電離層観測網が計画されている.小型衛星は大型衛 星に比べ数十分の一のコストで運用が可能であるため、複数の小型衛星を用いる観測網の 構築には最適である.

所属するヨサファット研究室でも、小型衛星を用いた地球の地殻変動を観測する計画を 行っている.この計画では、複数の観測方法を用いて地殻変動を観測するため小型衛星 GAIA シリーズの打ち上げを予定している.これらの GAIA シリーズのうち、電離層観測を 主なミッションとしている衛星が、50kg 級の超小型衛星 GAIA-1 である.この衛星は1辺 が 500mm の立方体で、一般的な小型衛星よりも更に小さい衛星である.GAIA-I には電離 層を観測するために EDTP と呼ばれる電子密度及び電子温度測定器を搭載する.この測定 器は小型衛星ように作成されており、従来手法であるラングミュアプローブで問題となる 衛星電位の変動による影響を受けずに測定が可能である.

ラングミュアプローブはこれまでの電離層観測で使用されてきた大型衛星に搭載されて いる電子密度及び電子温度を測定する測定器で,古くからプラズマの測定方法として使用 されており,プラズマ中に挿入した電極に印加した電圧と流れる電流の関係から電子密度 及び電子温度を計算することが可能である.比較的回路構成が簡単かつ小型化が可能なの で小型衛星への転用も考えられているが,衛星の小型化によっておこる衛星電位の影響を 受けることが分かっている.電離層内を飛行する衛星の電位は,衛星の進行方向前方から衛 星構体(衛星グラウンド)に電子や正イオンが飛び込むが,電子の移動速度は正イオンより も速いため多くの電子が飛び込み,衛星は負の電位を持つ.この状態で,ラングミュアプロ ーブのように衛星構体と電極間に電圧を加えるような機器を使用した場合,衛星の電位が 不安定になり機器に悪影響を及ぼす現象が起きる.

本研究では、小型衛星による電離層観測で問題となる衛星電位変動の影響を改善するた めの方法について研究を行った.

続く本章では、電離層変動と地震の関連性や超小型衛星 GAIA・I について述べる.加え て解決すべき問題とその解決手法についてまとめる.2章では、電離層観測の基礎知識や電 離層の観測手法、特にプローブ法について述べる.3章では、はじめに提案する電子銃を用 いた小型衛星の衛星電位制御手法について作成したシステムや実験結果を合わせて述べる. 4章では、小型衛星 GAIA・I に搭載予定の EDTP と呼ばれる観測器と従来手法の比較、磁 場中のプラズマを測定した場合に起きる影響について行った実験及び結果を述べる.最後 に5章では、今回の研究についてまとめ、今後の展望について述べる.

1.1.1. 電離層変動と地震の関連性

日本は地質学上,地震の発生件数が多く,周期的に大きな地震が発生し大きな被害を及 ぼしてきた.このため地震に関する研究が盛んであり,特に地震の前兆を検知することで地 震の発生を事前に予測する研究については多くの研究者が挑戦している.地震の前兆とし て近年有力視されている現象に電離圏の擾乱がある.この現象は,地震発生前に震源付近の 上空において電離層の変動 [1]が起きるもので,現象の影響として放送波の散乱 [2]や CNES の地震電磁気観測衛星 DEMETER による電波強度の減少 [3]が報告されている.

旧宇宙開発事業団宇宙利用推進本部システム技術開発部では、「将来宇宙利用ミッションの研究」の一環として 2003 年から 2006 年まで地震発生前に地震が電離圏へ及ぼす影響を 見出す試みを実施した.この研究では、1981 年に宇宙科学研究所(ISAS)が打ち上げた太 陽観測衛星「ひのとり/ASTRO-A」(図 1)の観測データを使用して地震前兆電離圏擾乱の 存在を立証した.[4]

ひのとりは、太陽硬 X 線フレアの 2 次元像、太陽粒子線、X 線バーストなどの観測をミ ッションとした大型衛星 [6] [7] [8]で鹿児島宇宙空間観測所(内之浦)より 1981 年 2 月 21 日 9 時 30 分に M-3S ロケット 2 号機を用いて打ち上げられた.高度 600km をほぼ円軌道 を描いて飛行し、1991 年 7 月 11 日まで太陽フレアやコロナに浮かぶ光速電子の雲などを 発見した.また、電離層を観測するためのプラズマ電子密度測定器(IMP)とプラズマ電子 温度測定器(TEL)を搭載している.これらの測定器は日本が開発したもので高精度に赤道 及び低緯度の電子温度密度を系統的に測定した.





図 1 太陽観測衛星「ひのとり」 [5]より

観測期間中にフィリピンで発生したマグニチュード 6.5 以上の 3 つの地震に伴う電離圏 電子温度の変化について研究が行われ,高度 600km において,地震 5 日前から震央上空周 辺の電子温度が通常の状態(経験モデル温度)から低下し始め,地震発生日には差が最大に なり,地震後 5 日をかけて回復することが見出された.また,電子密度は地震後に鈍く変化 するとまとめている [6].

地震によっては、震源が地中深くの場合や海岸より遠く離れた場所である場合、電離圏 に影響が見られないこともある.また、磁気嵐と地震による影響が区別できないなど現時点 では、すべての地震に適応できる前兆現象ではないとされている.現在、電離圏で発生する 前兆現象の信頼性を向上させるために、小型衛星を複数用いて観測網を構築し地球規模で 観測データを収集する ELMOS 衛星群が計画 [7]されている.

地震発生の前兆と電離層変動の関連性については, Davis と Baker によって初めて 1965 年のアラスカ地震の前兆として電離層の擾乱が発見 [8]されて以来,多くの地震で前兆と見 られる電離層擾乱が報告されている.近年では,衛星による直接観測に加え,全地球測位シ ステム (GPS)を用いた電離圏全電子数 (TEC)による電離層変動観測についても報告され ている.この観測手法は,国土地理院が設置した GPS 稠密観測網 (GEONET)によって測 定される GPS のデータのうち 2 つのキャリア信号の位相差より全電子数を計算する方法である.この方法では、地震発生前及び地震発生直後の電離圏擾乱を測定できる.

1.1.1.1. 東北地方太平洋沖地震における地震発生前電離圏擾乱

近年観測された日本での地震発生前電離圏擾乱として有名なものに、2011年3月11日 に発生した東北地方太平洋沖地震における電離層の異常が挙げられる.この地震は、日本の 観測史上最大規模の地震であり,マグニチュード Mw9.0 を記録し,最大震度 7 を観測して いる. 地震の被害だけでなく, 引き起こされた津波によって東日本に甚大な被害をもたらし た. Tsu Fuying と Wu Yun [9]は,地震前の電離層 TEC の時間変化を調べ,2011 年 3 月 5 日と8日に TEC の異常な増加を発見した. Chen Biyan ら [10]は地震発生 21 日前から電 子密度を検証し太陽活動や地磁気活動の影響を除いた計算結果から電離層の密度が一度 2 月28日に減少し、2011年3月2日から4日に増加したことを発見し、この電子密度の異 常変動が東北地震の前兆である可能性が高いと結論付けた. Kosuke Heki は GPS-TEC を 用いて地震発生約 40 分前に震源を中心とした TEC の値の上昇が観測されたことを報告し ている [11]. Dimitar らは複数の電離層観測方法において GPS-TEC による観測から 3 月 8 日に電子密度が大幅に変動し増加したことや、イオノゾンデによる観測から 3 月 3 日か ら11日かけての電子密度の大幅な上昇が見られたことを報告している[12]. Yang Jian ら は、日本の GEONET ではなく中国の地殻変動観測網 CMONOC を用いて東北地方太平洋 沖地震の電離層の変化を解析しており,3月8日に顕著な電離層異常があることを発見して いる [13]. らも地震に先行する電離圏異常について、2次元時空間 TEC 変動解析と3次元 トモグラフィー解析を行い,地震発生3日前に震央上空250km付近の局所的な電子密度の 減少と高度300~400km付近の日本上空全体に広がる電子密度の増加を確認している. [14]

1.1.1.2. 海外での地震発生前電離圏擾乱の例

海外とくにアジア圏での地震発生前電離圏擾乱の例が多く報告されている. 1999 年 9 月 20 日に台湾で発生した集集地震(Mw7.6)では発生の前日及び 3-4 日前に電離圏電子数の日 変化の振幅が急に減少したことが報告されている [15] . 2008 年 5 月 12 日に発生した中 国四川大地震(Mw7.9)では,4-6 日前の 3 日間の深夜に震源上空において TEC 値の異常な 減少が得られている [16].2010 年 2 月に発生したチリ地震(Mw8.8)は,東北地方太平洋沖 地震と同規模かつ同様の海溝型地震に分類されるが,GPS-TECによる観測で地震発生約 40 分前に異常が始まっていることが報告されている [17].2015 年におきたネパールの地震 (Mw7.8)やチリの地震(Mw8.3)でも TEC による地震発生前の異常が 20 分前から確認され ている [18]. Mohamad H.J らは 2007 年 3 月 6 日のスマトラ沖地震(Mw8.5)を GPS-RO によって解析し,地震の数時間前に TEC の異常を検出することが可能であると報告してい る [19].

1.1.2. 超小型衛星 GAIA- I

現在,ヨサファット研究室では,いくつもの小型衛星を用いた地球観測を計画しており, その中でも超小型衛星 GAIA-I では地殻変動と電離層変動の関連を調査するために電離層 観測をミッションとしている [20] [21].近年日本では,周期的に発生している巨大地震の 発生確率が上昇し,防災に対する関心が高まっている.また超巨大地震とされる東北地方太 平洋沖地震以降,マグニチュード 5 以上の地震が多発しており地震に対する研究の重要性 についても高まっている.特に,電離層の変動と地震発生の関連性を示す研究結果が東北地 方太平洋沖地震において注目されており,巨大地震発生の予測を実現するための一歩とし て期待されている.

計画している小型衛星 GAIA シリーズによる地球観測では,主に GAIA-I において電離 層の変動を観測し,大陸規模の地殻変動と電離層の変動の関連メカニズムの解明を目指し ている.そのほかの GAIA シリーズでは,合成開口レーダによる震災後の被害状況の把握 や日々の地形変動を観測し災害軽減と安心安全な社会の実現を目的としている [22].

GAIA-Iでは、電離層の状態を観測するために電子密度及び電子温度を測定可能な電子 密度温度プローブ(EDTP)と GNSS 衛星からの信号の電離層遅延を掩蔽法によって観測し、 電離層の全電子数を測定する GNSS-RO センサーを搭載予定である.これらの測定器は、 高品質で詳細な観測データを得ることが可能であり、大型地震発生のメカニズム解明に対 してデータの提供が期待されている.図 2に EDTP 及び GNSS-RO センサーを示す.EDTP 及び掩蔽法を用いる GNSS-RO センサーの詳細については第2章で詳しく述べる.

衛星の外形寸法は1辺を500mmとする立方体であり、質量は50kgを予定している. 概観図を図3に示す.主要構造方式は、角筒シリンダとアルミ板を用いたハイブリッド構 造方式であり、展開パドルを側面に持っている.下面には打ち上げロケットとのインターフ ェースとなるアダプタや展開パドルのヒンジ等を搭載する部分は機械加工による削りだし とし、その他の部分は板金加工によるアルミ板での構成を予定している.

展開パドルには太陽電池を搭載し、打ち上げ後展開することで機器を搭載する表面積を 増やしている. 衛星の側面には、GNSS-RO センサーのアンテナ、電子密度温度プローブ (EDTP)のプローブ、スターセンサー、太陽センサー磁気センサー、各種通信用アンテナが 取り付けられている. 図 4 にシステムブロック図を示す.



GNSS-R0 センサ受信機(MOOG 社)



電子密度温度測定器 (EDTP)

図 2 小型衛星 GAIA- I で搭載される電離層観測機器



図 3 小型衛星 GAIA-I の概観図



図 4 GAIA-I のシステムブロック図

各機器の消費電力を表 1 に示す. GAIA-I は相乗り衛星での打ち上げを予定しており, 打ち上げ軌道及び,打ち上げ時刻は現在のところ未定である.このため,電力サイジングは 図 5 に示す午前軌道及び図 6 の午後軌道の 2 つを前提として各機器の消費電力を目標仕様 として設定し電力を解析した結果,常時運用は難しく 1 日のうち 3 分の 1 程度の運用が前 提となる.両翼の展開パドルに設置された太陽電池に要求される発生電力は 100W 以上, バッテリー容量は 5.8Ah 以上が必要である.バッテリーセルには Ni-MH,Ni-Cd の使用を 予定している.

名称	電力ノミナル	最大電力
GNSS-RO センサー	$25~\mathrm{W}$	30 W
EDTP	3 W	3 W
データ処理装置	$5~\mathrm{W}$	10 W
電源系	$5~\mathrm{W}$	$5~\mathrm{W}$
通信系	10 W	$45~\mathrm{W}$
データ処理系	$5~\mathrm{W}$	10 W
姿勢制御系	$15 \mathrm{W}$	23 W
合計	68 W	126 W

表 1 各機器の消費電力一覧









図 6 午後軌道

地上局との通信には2つの周波数を用いて衛星の制御,データの受信を行う.周波数としては表2のようになる.また,通信器の仕様を表3にまとめる.

衛星から地球への通信			
テレメトリ用 S バンド	$2{,}025{\sim}2{,}120~\mathrm{MHz}$		
ミッションデータ用 X バンド	$8,025{\sim}8,400~\mathrm{MHz}$		
地球から衛星への通信			
制御コマンド用 S バンド	2,200~2,300MHz		

表 2 通信で使用する周波数帯

表 3 通信機の仕様

S バンド受信機(コマン	ド信号の受信・復調)
コマンド変調方式	FSK 方式
データレート	9,600bps
ダイナミックレンジ	$-105{\sim}50\mathrm{dBm}$
ビットエラー率	1x10 ⁻⁵ 以下
出力信号タイプ	RS422

Sバンド送信機(テレメ	トリ信号の変調・送信)
コマンド変調方式	FSK 方式
データレート	38.4kbps
ビットエラー率	1x10 ⁻⁵ 以下
出力信号タイプ	RS422

Xバンド送信機(Xバント	ドデータ伝送処理)
コマンド変調方式	QPSK 方式
データレート	20Mbps
出力電圧	1W以上
ビットエラー率	1x10 ⁻⁶ 以下
出力信号タイプ	RS422

1.2. 研究内容

ここでは、本論文で解決すべき問題を明らかにし、その解決手法について述べる.

1.2.1. 解決すべき問題

電離層を飛行する衛星は、電離層内の電子や正イオンの影響を受け電位が常に変化して いる.これは、飛行している衛星の前面部分の衛星構体(衛星グラウンド)に電子や正イオ ンが飛び込むためにおきる.一般的に電子と正イオンの移動速度を比較すると電子の方が はるかに速いため衛星電位は負の電位をとる.この衛星電位は電離層の状態によって変化 する、つまり昼夜や太陽周期のような周期的な変化や局所的な変化によってさまざまな衛 星電位に変動する [23].

大型衛星では、衛星の帯電による衛星電位の変動を抑制する研究が進められており、衛 星の設計時に行われる衛星帯電解析ソフト(MUSCAT) [24][25]による設計の検証や対策 が行われている.この理由として多くの大型衛星は、太陽光パネルや測定装置の凹凸が大き く、各部分の面積などにより局所的な電位差が生まれ放電を発生させる.この放電によって 金属の溶融や絶縁破壊、太陽電池セル間の破壊が引き起こされるだけでなく、放電による放 電パルスが衛星内部の電子機器に影響を及ぼすこともある [26].

この対策としては、衛星表面の物体間を導体で接続し電位を均等にする方法のほかにイ オンエンジンの中和器による能動帯電制御方法がある [27].

イオンエンジンはアーク放電やマイクロ波などを利用し推進剤を電離させることでプラ ズマを生成し、プラズマ中の正イオンを加速してビーム状に噴出することで推進力を得る 装置である.しかし、正イオンを噴出する衛星は短時間で負に帯電するため、イオンビーム が逆流し推進力が得られなくなる問題を持っている.この問題を解決する方法として中和 器より電子を放出し、イオンビームを中和する方法がとられている.

また,受動的電界電子放出素子による静止軌道衛星帯電防止法の開発も行われている [28] [29]. これは,衛星の帯電に対し,自動的に電子を放出する受動型の電子放出素子で, 銅とポリイミドの積層フィルムにマイクロエッチングを施し実現している.原理としては, 一種の電界放出素子であり,積層フィルムが帯電すると銅とポリイミドの境界付近の電界 が高まり空間に露出した炭素系接着剤より電子が放出されることが発見されており実用化 が期待されている.

これまでの電離層の観測には測定器としてラングミュアプローブが用いられてきた.2 章で詳しく説明するがラングミュアプローブによる電離層観測では衛星構体を基準として プローブ電極に電圧を印加し、プローブの電圧に対してプラズマから流れ込むプローブの 電流の関係から電子温度及び電子密度を計算している.電極よりプラズマ中の電子を取り 入れるためプローブ電圧の上昇とともに衛星の電位は負の方向へ更に沈むことが報告され ている. 大型衛星では、衛星構体の面積が大きく、ラングミュアプローブによる衛星電位の変動 が起こりにくく、観測に影響を与えにくい.また2本の電極を使用し、電極に電圧を印加す る際の基準電位を衛星構体ではなくもう一方の電極を基準電位として使用することでラン グミュアプローブを用いることでおこる衛星電位の変動の影響を受けないように工夫した ダブルプローブ法も研究されている [30] [31].

小型衛星では、大型衛星に比べて衛星自体が小さく衛星の表面がほとんど測定器や太陽 光パネルで覆われており衛星構体として使用できる面積が狭くなる.このため大型衛星の ようにラングミュアプローブを使用した場合には、衛星電位の変動が容易に起こり、衛星電 位が負の方向へ減少する.相対的にプローブの電圧が上昇しないため、電離層の観測が行え ない問題が発生する.大型衛星で用いられているイオンクラスタの中和器による衛星電位 変動の抑制方法は、機器の大きさの観点から小型衛星では使用できない.加えて、ダブルプ ローブなどラングミュアプローブ以外の電離層観測手法の使用についても検討したが、ダ ブルプローブでは 2 つのプローブを搭載する必要があること、他の手法では電子密度及び 電子温度のどちらか片方の測定しか行えないこと、観測精度における観点などから小型衛 星に最適であるとはいえない.また、根本的な問題にある衛星電位の変動を抑制できないた め放電等による観測機器の破壊等については解決できない.

特に当研究室が打ち上げを予定している超小型衛星 GAIA-Iは, 50kg 級の衛星であり 一辺が 500mm の立方体の衛星である.このため衛星構体の面積が狭く,衛星電位の変動が 起こりやすいと考えられる.

よって本研究では小型衛星を用いた電離層観測において問題となる、衛星電位の変動そのものを抑制する方法及び衛星電位の変動による影響を受けない新たな電離層観測手法の2つに焦点をあて研究を行った.

1.2.2. 問題の解決方法の提案

まず、衛星電位の変動そのものを抑制する方法について本論文では、衛星構体内の中和 されずにたまっている電子を電子銃から熱電子として放出する方法を提案する.本手法で は、金属に電流を流すことによって加熱し、この熱エネルギーによって電子をプラズマ中へ 放出する.本手法ではタングステンをコイル状に巻いて作成した数センチほどの熱電子源 を用いるため回路が単純で小型化が容易である.

次に、衛星電位の変動による影響を受けない新たな電離層観測手法として、本論文では EDTP を超小型衛星 GAIA-I に搭載することを提案・検討した. EDTP は小型衛星用に開 発され、半円板状の2つの電極を組み合わせた円板状のプローブを用いて測定を行い、2つ のプローブで得られた電圧の差を測定しているため測定結果は衛星電位の変動による影響 を受けない.また、電子密度及び電子温度の測定が可能でありながら 100mm×100mm× 50mm と小型かつ軽量な測定器となっている. EDTP では得られた観測データから電子密 度を計算する際に地球磁場の影響を考慮する必要がある.これは,磁場によって電離層内の 電子が影響を受け,サイクロトロン運動を行い,電子の分布に偏りが出来るからである.大 型衛星で用いられてきたラングミュアプローブでは球状のプローブを電極として使用して いるためプローブ面に対する磁場の方向はプローブ全体を見ると変化しない.しかし, EDTP は円板状のプローブを持つため衛星の飛行時の姿勢によってプローブ面と磁場の方 向が変化する.つまり,サイクロトロン運動を行い移動する電子の方向に対する円板プロー ブ面の方向が,衛星の姿勢の変化に伴って変わり,電子密度の測定に影響を与えることが考 えられる.

そこで本論文では, GAIA-1 への搭載に先立って, 既存の観測手法との比較や磁場の方向とプローブ面の方向及び形状について実験をおこなった.

2. 電離層観測の基礎知識

2.1. 電離層観測

2.1.1. 電離層観測の歴史

地球電離層の存在は1925年にイギリスのアップルトン(Appleton),バーネット(Barnett) 及び、アメリカのブライト(Breit)、チューブ(Tuve)によって実証された.これより前に上空 大気の電気伝導層の存在を多くの研究者が予言し、18世紀には既にガウス(C.F.Gauss)、ト ムソン(W.Thomson:ケルビン卿)、ステュワート(Balfour Stewart)らは、地球の磁場変動を 説明するために、電離層のような電気伝導度の高い層の存在について議論している.これら の層は、その性質の違いから図 7 のように E 層、D 層、F 層などと呼ばれる.レーダの先 駆者である R.ワトソン・ワット(R. Watson-Watt)はこれらの層を総称してイオノスフィア (ionosphere)と呼んでいる.日本語では、電離圏及び電離層と呼ばれるが、各電離層の総称 を電離圏と呼ぶのが一般的であるが、本研究では、多くを電離層と表記する.この理由とし ては、本研究が対象とする小型衛星による観測が電離圏全体ではなく、衛星が飛行する高度 に対応した各層を対象として行われるからである.





電離圏は、太陽からの放射と、中性大気、化学過程及び、プラズマの輸送との相互作用 の結果として生じたものであるという理解が一般的で今日受けいれられるようになってい る.電離圏は、熱エネルギーを持つ荷電粒子(イオンと電子)が存在する上昇大気領域であり、 これらの荷電粒子は太陽からの紫外線である電磁波と高速粒子によって中性大気が電離さ れてできたものである.電離圏の一番下にある境界線は、最も大気深くまで入り込める放射 (一般的には宇宙線)がラジオ電波の伝播に影響を与えるのに十分なイオン、電子対を作る領 域(D 領域)である.夜間には、太陽による影響が緩和され、電離圏は遠くまで尾状に伸び太 陽風の影を作る.

電離圏は、まず地上からの電波によって観測され、その後、宇宙開発が進むにつれ衛星 による観測によって研究されてきた.長年の研究によって電離圏物理学が宇宙科学へと移 った.また、地上観測も進歩し、ここ数十年で電離圏に関する知識は、中層大気に始まり、 太陽放射及びそれから生じる荷電粒子の分布、その組成と温度など驚異的に増加した.これ により、電離圏のふるまいを支配している物理、化学が総合的に研究されるようになった.

2.1.2. 電離層の観測手法

電離層の観測手法には、大きく分けて次の4つに分類できる.

- 地上から電離層の観測を直接行う方法の例(イオノゾンデ)
- 地上から電離層の観測を間接的に行う方法の例(GPS-TEC)
- 人工衛星を用いて電離層の観測を直接行う方法の例(プローブ法)
- 人工衛星を用いて電離層の観測を間接的に行う方法の例(GPS-RO法)
- ここでは、4つの手法について簡単に紹介する.

2.1.2.1. 地上での直接観測法・イオノゾンデ

電離層定常観測で,歴史が長く重要な方法としてイオノゾンデ(ionosonde)がある.イオノゾンデは、周波数が1Hzから30MHzのパルス電波を垂直に発射し、電離層によって反射してきた信号を調べるレーダであり、電離層サウンダーとも呼ばれる.現在は南極昭和基地,稚内,国分寺(東京)、山川(鹿児島)、沖縄の5箇所で定常的な観測を行っている.

イオノゾンデから発射される電波は、デルタループ型アンテナによって送受信され、電 波の遅延時間から反射波の見掛けの高さを得ることができる. NICT の Web ページ [32]で は、15 分毎に更新されるイオノグラムを見ることができる.

イオノゾンデの送信パルスとエコーパルスの間の遅延時間 rから式 1 を用いて見かけの 距離P'が求められる.

$$\mathsf{P}' = \frac{1}{2}c\tau\tag{1}$$

ここで、 cは真空中の光速であり、電離圏では、光の速度は群速度で表され次式で表せる.

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \tag{2}$$

このため、上記の行路は真の値ではない.ここで、屈折率と同様に群屈折率は次式となる.

$$n' = \frac{c}{v_g} = n + \omega \frac{dn}{d\omega} \tag{3}$$

この屈折率はコールドプラズマの分散関係より導くことができる. 反射された信号の全時間遅れは

$$\tau = 2 \int_0^R \frac{dR}{v_g} \tag{4}$$

で表され、測定された距離 P'は真の距離 R と次の関係がある.

$$P' = c \int_0^R \frac{dR}{v_g} = \int_0^R n' dR \tag{5}$$

電波には、臨界周波数が電子プラズマ周波数と一致する正常波モードと呼ばれるものと 磁場の影響で電子プラズマ周波数よりも高い異常波モードと呼ばれるものがある.異常波 モードの電波は、電子プラズマ周波数と等しくなる高度に達する前に反射される.

イオノゾンデでは、周波数をスイープしながらパルス電波が発射され、各周波数に対応 する電子密度の高度からのエコーが得られる.エコーの遅延時間を周波数fと見かけの反射 高度P'の関係を表したものをイオノグラム(図 8)と呼ぶ.イオノグラムからは直接、正常波 モードと異常波モードに対応した F2 層の臨界周波数や正常波モードの見掛けの反射高度 の最低値が読み取れる.昼間には、F1層および E 層の臨界周波数や見掛けの反射高度の最 低値なども読み取ることが出来る.D層については電子密度が低いため、イオノゾンデでは 観測することができない.

イオノゾンデには2つの欠点がある.1つは観測地点が限られることである.特に地球 の大部分を海洋が占めるため、地球規模の地上観測網の構築が困難である.もう1つは、地 上からパルス電波を発射するため、最初に反射される電子密度の高度情報しか得られない ことである.電離層は、各層や観測地点においてさまざまな電子密度を持っている.このた め観測地点の上空では同じ電子密度の層が複数存在することがある.しかし、パルス電波が 反射されるのは一番下の層であり、それより上に存在する同じ電子密度の層の高度は得る ことが出来ない.この問題を解決するために、人工衛星にもイオノゾンデを搭載し、上空よ り測定することで欠点を補う方法があるが、衛星の飛行軌道や周回周期によって常に観測 することは困難である.



図8イオノグラムの例

2.1.2.2. 地上での間接観測法-GPS-TEC

近年,地上観測方法として,広く研究されている観測方法に GPS-TEC と呼ばれるもの がある [33] [34]. この方法では,全地球測位システム (Global Positioning System, GPS) 衛星が発射する L バンドの 2 つの搬送波を地上の受信機で受信し,電離層を通過する際に 生じる信号の電離層遅延から全電子数 (Total Electron content, TEC) を求める方法である. この TEC とは GPS 衛星と受信機との間の経路上にある電子の数の合計を表しており,単 位は el/m² や TECU(=10¹⁶ el/m²)である.

ここで、TECの計算方法を以下に示す.

GPS 衛星から発射される 2 つの電波は電離層を通過する際に影響を受け遅延が起きる. この電離層内の電子による屈折率Nは電子密度 n_e と搬送波の周波数fを用いて次式で近似できる.ここでaは定数である.

$$N = 1 - \frac{an_e}{f^2} \tag{6}$$

また、**TEC**の定義より、**TEC**は衛星(sat)から受信機(rec)までの経路(s)に沿った電子密 度の積分値なので、次式で表される.

$$TEC = \int_{rec}^{sat} n_e(s) ds \tag{7}$$

加えて、電離層によっておきる電波の遅延ムtは屈折率Nを用いて次式のようになる.

$$\Delta t = \int_{rec}^{sat} (N-1) \, ds \tag{8}$$

上記3つの式より伝搬遅延Δtは

$$\Delta t = -\frac{a}{f^2} TEC \tag{9}$$

となる.ここで衛星から受信機までの直線距離と光速から求められる時間をtとすると,GPS 衛星からの 2 つの搬送波の周波数 $f_1 = 1.57542$ GHz, $f_2 = 1.22760$ GHzを用いて各搬送波が 受信器に到達する時間 t_1 ,及び t_2 は次式で表せる.

$$t_1 = t - \frac{a}{f_1^2} TEC$$
 (10)

$$t_2 = t - \frac{a}{f_2^2} TEC$$
 (11)

よって、次式を用いて TEC を算出できる.

$$TEC = \frac{t_1 - t_2}{a} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$$
(12)

日本では、地殻変動の測定を目的とした観測網を国土地理院がGEONET (GNSS Earth Observation Network)として展開している.現在は、GPS 衛星だけでなく他の測位衛星 にも対応したシステムに更新されており、全国 1300 ヶ所に設置されている.観測データは 公開されており [35] [36]、このデータを元に地殻変動だけでなく、電離圏擾乱の研究が行われている.

先にも述べたように,2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震における研究 では,地震発生前の前兆と見られる電離層変化とは別に,地震発生後に地震の振動が大気を 伝わり,電離層に影響を与えたことが多くの研究によって報告されている[37].

GPS-TEC は、イオノゾンデと比べて地上での観測点が圧倒的に増加しているが、海洋 での観測点の設置が困難である欠点がある.また、観測される TEC は衛星と受信機を結ぶ 経路に沿った積分値であるため、経路外の部分については測定できない.加えて、電離圏の 各層ごとの情報である電離層電子密度の高度分布は得ることが出来ない欠点を持つ.

2.1.2.3. 人工衛星による直接観測法-プローブを用いた観測

地上で行う電離層観測では,地球全体の電離層観測データの取得はできない.地球規模の観測には,人工衛星による観測が適している.この観測方法では,電離層内を飛行する人工衛星に金属で出来た電極(プローブ)を取り付け直接観測するプローブ法が一般的である.

このプローブ法には、プローブの形状や測定原理などによってさまざまな手法があるため次項 2.1.3 で詳しく説明する.

2.1.2.4. 人工衛星による間接観測法-GPS-RO

人工衛星を用いた間接的な電離層観測手法として掩蔽法がある.特に GPS 衛星の信号 を用いるものを GPS-RO (GPS-Radio Occultation)と呼ぶ.掩蔽とは日食や月食のように 対象物が天体に隠れる現象を指すが、GPS-RO では、観測衛星から見て GPS 衛星が地球の 影に隠れることを指している.このとき、GPS 衛星からの電波が地球の大気や電離層をか すめて観測衛星に到達する.電波が通過するさいに大気や電離層の影響でわずかに屈折す ることが知られている.この屈折の状態から大気や電離層の構造及び電子密度を推定する 方法である.現在では、GPS 以外の測位衛星である Galileo、準天頂衛星 QZS、O3B など の信号を用いる GNSS-RO 法が用いられている.

掩蔽観測法では,得られるデータから屈折率のプロファイルを求めることで,大気の気温, 水蒸気量,電子密度など目的とするパラメータを導出するが,複雑であるためここでは,電 子密度についてのみ説明する.

ある高度での屈折率Nは次式で表せる.

$$N = (n - 1) \times 10^{6}$$

= 77.6 $\frac{P}{T}$ + 3.73 × 10⁵ $\frac{P_{W}}{T^{2}}$ + 4.03 × 10⁷ $\frac{n_{e}}{f^{2}}$ + 1.4W (13)

ここで、気温T、大気圧P、水上気圧Pw、電子密度ne、搬送波の周波数f、大気中の微粒子の密度Wである.電子の影響はTECと同様にGPS衛星の2つの搬送波を用いて2つの周波数における屈折率の差から次式で求められる.

$$n_e = \frac{N_2 - N_1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \tag{14}$$

ここで, 定数A = 4.03 × 10⁷である.

この方法では,観測点が GPS と観測衛星の相対位置で変化し,衛星軌道に沿って一定幅 の領域のみの観測となる.そのため,観測したい地点のデータを必ずしも得られるわけでは ない.この改善方法としては,複数の観測衛星による観測網の構築が不可欠である.

現在, FORMOSAT-3/COSMIC による GPS-RO で得られた観測データは公開されており [38]気象関係で研究・利用できる.

当研究室で打ち上げを予定している小型衛星 GAIA-Iへの GNSS-RO センサーの搭載 も検討されている. GAIA-Iと各測位衛星の位置関係は図 9 のようになる.



図 9 GAIA-Iと各衛星との位置関係

2.1.3. プローブ法についての基礎知識

ここでは、プラズマに関する知識及び衛星を用いた電離層の直接観測で使用されるプロ ーブ法について知っておくべき基礎知識について述べる.

2.1.3.1. プラズマと電離層

電離層は大気が太陽からのエネルギーによって正イオンと電子に電離したプラズマ状態 であることは既に説明した.プラズマの身近な例としては、蛍光灯やネオン管など、一対の 電極を設けたガラス管内部に低圧の気体を封入したものが挙げられる.電極間に電圧を印 加し、電圧を上昇させると突然大きな電流が流れ、ガラス管内部で発光が起きる.この現象 を気体放電と呼ぶ.この状態では、気体は電離し、正イオンと電子に分かれている.電離気 体の荷電粒子数密度はきわめて大きくなる.また正イオンと電子は互いに吸引力を及ぼし あうため全体として電気的中性が保たれている.ラングミュアは、静電探針法(プローブ法) を考案し、低気圧放電における発光気体内部の電子温度、電子数密度などの測定 [39]、陰 極から放出される電子がマクスウェル分布に近いこと [40]を発見している.そして、発光 している電離気体をプラズマ(Plasma)と名づけている.

2.1.3.2. シースについて

プラズマの周囲には発光しない薄い層があり、この層はプラズマを包んでいるように見 えることからシース(Sheath)と呼ばれている.プラズマを生成するプラズマチェンバーのよ うな実験室プラズマでは、プラズマを空間内に生成する.このため、プラズマとチェンバー 壁とが接することになるが、チェンバー壁表面までプラズマが一様に満たされることは通 常ありえない.これは、電子が正イオンに比べはるかに早く移動しており、チェンバー壁に 到達する.しかし、実際には電子の過度な流入を防ぐように壁表面に電場が形成され電子を 追い返し、正イオンを引きこもうとする.このため、電荷の中性が崩れている.また、プロ ーブ法で使用される電極をプラズマ中に挿入した際にもシースが現れる.

2.1.3.3. 粒子の速度

プラズマ中の電子や正イオン、中性粒子はさまざまな速度で熱運動をおこなっており、 また、運動の方向もさまざまである. n個の粒子のうち、速度の x 成分が $v_x \ge v_x + dv_x \ge 0$ 間にある粒子数を dn_x とすると、 dv_x に比例し、次のように表せる.

$$\frac{dn_x}{n} = f(v_x) \cdot dv_x \tag{15}$$

ここで、マクスウェルにより、熱平衡状態での $f(v_x)$ は次式で与えられることが示されている.

$$f(v_x) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{m}{2kT}v_x^2\right)$$
(16)

また、 v_y 、 v_z も同様に表すことができ、速度の絶対値 $v \ge v + dv$ 間にある粒子数をdnとすると、次式のように表せ、

$$\frac{dn}{n} = F(v) \cdot dv \tag{17}$$

同様に,速度分布関数F(v)は次式で与えられる.

$$F(v) = 4\pi n \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$
(18)

この式よりマクスウェル分布またはマクスウェル・ボルツマン分布と呼ばれる分布になる. ここで、x軸に垂直な、単位面積の断面を方向を問わず x の正方向に横切る単位時間当た りの粒子の数 Γ_x を考える.この Γ_x は乱雑粒子束や分子流密度と呼ばれる量で、単位は個/(m²s) である. Γ_x は次式で表される.

$$\begin{split} \Gamma_x &= \int_0^\infty v_x dn(v_x) = n \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} \int_0^\infty v_x \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv_x \\ &= n \left(\frac{kT}{2\pi m}\right)^{1/2} = \frac{1}{4} n \langle v \rangle \end{split}$$
(19)

ここで、(v)は乱雑速度であり、次式から得られる.

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \tag{20}$$

この乱雑粒子束は、プローブ法で重要となる考え方で、粒子を電子と置き換えると乱雑電 子束つまり電子電流密度を次式のように表すことが出来る.

$$j^{-} = \frac{1}{4} e n_{se} \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e}\right)^{1/2} \exp\left(\frac{e\phi_f}{kT_e}\right)$$
(21)

ここで、**φ**_fはシース端電位を基準とした固体表面の浮遊電位である.

2.1.3.4. 電子温度

プラズマ内では、常に電子と正イオンが移動している.電子の質量は、9.109×10⁻³¹gと 正イオンの質量 1.672×10⁻²⁷g よりも桁違いに軽いため、電子の移動する速度は、イオンの 速度よりも速くなる.電子と正イオンは移動する際に互いに衝突する.電子とイオンは、気 体分子の熱運動により電界から運動エネルギーを得ることができるが、衝突する際にエネ ルギーの受け渡しを行うため、ある定常状態になる.また、気体分子運動論では、温度と粒 子の速度分布関数の広がりは同じマクスウェル分布である.この状態において、温度と電子 の平均運動エネルギーとの関係式は、次式で表される.

$$\frac{1}{2}m\langle v_e^2\rangle = \frac{3}{2}kT\tag{22}$$

また,正イオンや電離していない気体の原子,分子にも同様の関係式が定義できるが,電子 との衝突による運動エネルギーの交換は少なく,また,電離層のように圧力の低い場合には, 衝突回数が少ないため,電子の平均運動エネルギーが他の粒子に比べて高くなる.

プラズマの理論式において,絶対温度Tはボルツマン定数kと結合して表されることが多い. このkTはエネルギーの次元を持っており,プラズマ工学においてエネルギー単位の温度又は単に温度と呼ぶことが多い.単位は, eV (electron volt)が用いられ,1[eV]は1個の電子が1V電位差によって加速された場合に得るエネルギーに等しく,1[eV]=1.602×10⁻¹⁹[J]である.また次式で温度の単位であるKに変換できる.

$$1[eV] = \frac{1.602 \times 10^{-19} [J]}{1.38066 \times 10^{-23} [J/K]} = 11600[K]$$
(23)

ここで、エネルギー単位の温度を T_E とすると、

$$T_E = kT = \frac{1.38066 \times 10^{-23} \text{ [J/K]} \times T}{1.602 \times 10^{-19} \text{ [J]}} = 0.861 \times 10^{-4} T \text{ [eV]}$$
(24)

となる.

2.1.3.5. 電子密度

電離層中には、イオン、電子及び中性子が存在する.イオン密度、電子密度はそれぞれ 平衡状態になっており、2つをまとめてプラズマ密度と呼ぶ.電離層では、プラズマ密度が 比較的低い弱電離プラズマの状態である.高度約 300 km を最も電子密度が最大となる領 域とし、それよりも上空では、高度の上昇と共に比較的単調に減少するが、低空では、いく つかの高度において図 10 のように特徴的な電子密度分布が見られる.



図 10 各層で見られる特徴的な電子密度分布

電離層の大きな特徴である短波帯域の電波を反射する性質は電子密度によって決定される.電離層に垂直に電波が入射した場合,磁場の影響がない場合には,送信周波数とプラズマの持つプラズマ周波数が共鳴した高さで,電波が反射される.電離層の電子密度が変化すると反射する電離層の高さが変化し,地上での無線通信の品質に影響する.電離層の密度は,太陽活動によって周期的に変化することが知られている.これによって,あらかじめ電離層の状態を予想し,無線通信の品質維持に役立てている.

2.1.4. プローブ法の種類

2.1.4.1. ラングミュアプローブ

ラングミュアプローブを用いた電離層の直接観測は歴史が古く,1947年に Reifman と Dow らによって行われた V-2 ロケット実験 [41]で初めて搭載され,電離層の電子密度及び 電子温度の測定が行われた.ラングミュアプローブ法は 1924年ごろ Langmuir と Mott-Smith により考案され [42],静電プローブ(探針)と呼ばれるプラズマ計測の基本的計測手 法の一つである.利点としては,測定装置の設計が簡単であり,プローブ付近の局所的なプ ラズマ測定が可能であることがあげられる.しかし,直接プラズマ中にプローブを挿入し測 定するため,プラズマに対して外乱を与えることや,得られたデータの定量的な考察が複雑 になるという欠点がある [43].また,衛星による電離層観測に用いた場合,電極がプラズ マによって汚染され測定できないことがわかっている.この問題の解決方法としては,プロ ーブをガラス管に封入し,打ち上げ後,電離層観測時に割ってプローブを露出することで汚 染を抑える方法や,プローブに高電圧をかけ,汚染を除去する方法がある.

ラングミュアプローブ法の測定回路を図 11 に示す.



ラングミュアプローブでは、プラズマ内にプローブと呼ばれる電極を挿入する. この電極に は、電圧を印加するが、電圧の印加には基準電極が必要である. 実験用のプラズマ生成チェ ンバーでは、一般的にチェンバーの外壁を基準電極として使用し、この基準電極の電位を OV としてプローブに電圧を加える. この電圧をプローブ電圧V_pという. プラズマは電離し た気体なので、プラズマ内の電子によって基準電極とプローブの間に電流が流れる. この電 流をプローブ電流I_pと呼び、印加する電圧、プラズマの状態から、3 つの領域にまたがって 変化することが知られている. プローブ電流は、プラズマ中のイオンによるイオン電流I_iと 電子による電子電流I_eの 2 つから成り、式 6 で表される. 一般的に電子による電流が増加す る方向をプラス方向にとる.

$$I_p = I_e + I_i \tag{25}$$

ラングミュアプローブでは、印加する電圧とプローブ電流の関係からプラズマの電子温度 及び電子密度を計算する.印加電圧とプローブ電流の関係及び,3つの領域を図 12に示し、 各領域について説明する.また、表4に計算に用いる定数や記号についてまとめる.

名称	記号	値	単位
電荷	е	1.602×10^{-19}	С
イオン密度	n _i	-	m ⁻³
プローブ表面積	S	-	m ⁻³
ネピア定数	ε	2.718	
ボルツマン定数	k	$1.380 imes 10^{-23}$	J/K
電子温度	T _e	-	Κ
イオンの質量	m_i	$1.672 imes 10^{-27}$	kg
電子密度	n _e	-	m ⁻³
電子の質量	m _e	9.109×10-30	kg

表 4 計算で用いる記号と定数



図 12 電流(I)-電圧(V)特性図

領域 A イオン飽和領域

プローブに基準電位よりも大きくマイナスの電圧を加えた場合,図 12の領域 A のように 電流が流れる.この時,プローブに流れる電流はすべてイオンによるものであり,電子によ る電流は流れない.この電流をイオン電流といい,十分に大きいマイナスの電圧を加えると 漸増する.このときのイオン電流をイオン飽和電流*I*_{is}という.イオン飽和電流*I*_{is}は,次式で 表される.

$$I_{is} = e n_i S \varepsilon^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{k T_e}{m_i}}$$
(26)

領域 B

プローブ電圧をプラス方向に増加させると、図 12 のV_fのようにプローブ電流が流れな くなる電圧が現れる.この電圧を浮遊電位、又はフローティングポテンシャルと呼ぶ.浮遊 電位では、イオンによる電流と電子による電流が等しくなり、プローブ電流が流れない.浮 遊電位から更に電圧を増加させる図 12 の領域 B のように電子による電子電流*I_eがプロー* ブに急激に流れる.このときの電子電流*I_e*は式で表される.

$$I_e = en_e S \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} exp\left[-\frac{e(V_s - V_p)}{kT_e}\right]$$
(27)

ここで、*V*sはプラズマ電位と呼ばれ、この電位よりもプローブ電圧が小さい場合に電子電流が流れる.

電子温度*T_e*は、イオン飽和電流を基準、つまり 0A としてプローブ電流と電圧を片対数で プロットすると、図 13 のようになり、そのグラフの傾きより求めることができ、次式より 計算できる.



$$\frac{d(\ln I_e)}{dV_p} = \frac{e}{kT_e} \ln(\varepsilon)$$
(28)

領域 C 電子飽和領域

プラズマ電位よりも大きな電圧をプローブに印加すると、領域 C のように、それ以上プ ローブ電流が流れなくなる.この領域 C を電子飽和領域といい、イオンによる電流はプロ ーブに流れなくなる.この電流を電子飽和電流*I*esと呼び、式 10 で表される.

$$I_{es} = e n_e S \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}}$$
(29)

ここで、電子温度が既知の場合、電子密度neを次式より求めることができる.

$$n_e = \frac{I_{es}}{eS\sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}}}.$$
(30)

しかし、電子飽和電流もイオン飽和電流と同様に漸増するため、計算に用いる際にはどの値 を用いるか明確にする必要がある.一般的には、図 13のように各領域の曲線の接線をとり、 その交点の値を電子飽和電流とすることが多いが、他の論文によっては、領域 B の曲線と その接線が離れだした点や領域 C の曲線と接線が交わりだした点を電子飽和電流としてい るものもあるため、参考にする際には十分留意する必要がある.本研究では、一般的である 各接線の交点の値を電子飽和電流とした.

測定回路

ラングミュアプローブ法で使用する一般的な回路を図 14 に示す.

プローブに印加する電圧には、三角波を利用することが多い.この電圧には、信号発生装置 のシグナルジェネレータを使用する. 波形の周波数は、1Hz から 10Hz 程度のゆっくりと した電圧の上昇及び減少が望ましい. 高周波の場合には、後に説明するようにプラズマと共 振し測定ができない.シグナルジェネレータで生成された三角波はバッファ及びフィルタ を兼ねた, 増幅器で適切な電圧に増幅される. (a)の部分は, プローブに流れる数 µ A の電 流を増幅し、これ以降の回路で扱いやすいように電圧に変換する電流電圧変換回路である. 増幅の倍率は一般的に 5×105から 106程度で, ADC で測定できる範囲に収まるように設計 する. プローブには, 三角波が印加されるが, 図では直接接続されていないように見える. しかし、各オペアンプの入力端子の電圧は仮想短絡、イマジナリショートの考え方が適用さ れるため、プローブにはシグナルジェネレータからの信号が印加される. また、(a)の回路 で得られる電圧には, 印加した電圧も含まれており, 変換されたプローブ電流のみを取り出 すために、印加電圧を差し引く必要がある. 一般的には、差動増幅回路を用いるが、プロー ブ電流による変化は微量であるため、精度よく測定結果を得るために計装アンプと呼ばれ るオペアンプを用いた. 計装アンプでは、オペアンプ内に差動増幅回路が設計されており、 回路で使用されている抵抗の誤差等が少なく, 高精度に信号の引き算が可能である. また, 製品によっては抵抗一個で自由に増幅率を設定できるものもあり、回路の小型化、高精度化 の観点から本研究の回路で使用した.

2.1.4.2. インピーダンスプローブ [44]

インピーダンスプローブは、大家らによって開発され、40年以上にも渡り多くの観測ロ ケットや人工衛星に搭載されるといった実績がある [45]. インピーダンスプローブはラン グミュアプローブ同様に電極をプラズマ内に挿入し、高周波を印加する. この印加されたプ ローブの等価容量値を広帯域で取得することでプラズマの高域混成共鳴(Upper Hybrid Resonance: UHR)周波数を決定し、次式を用いてプラズマの電子密度を測定する.

$$N_e = \frac{4\pi^2 m_e \varepsilon_0}{e^2} \left[f_{UHR}^2 - \left(\frac{eB}{2\pi m_e}\right)^2 \right]$$
(31)

高域混成共鳴:Upper Hybrid Resonance

電離層のようなプラズマは、縦波である静電波(electrostic wace)と、横波の電磁波 (electromagnetic wave)の2つの波を伝播できる特性を持っている.電子の振動が高周波か つ静電的で磁場に対して垂直に伝播する場合、次のように表される.

$$\omega_{UHR}^2 = \omega_P^2 + \omega_c^2 \tag{32}$$

この時、 ω_{UHR} を高域混成周波数と呼び、磁場を横切る静電電子波はこの周波数を持っている.

また、磁場に沿うように移動するものは普通のプラズマ振動であり、熱運動が無視できる限り、群速度は0となる.上記の分散関係式において、 ω_p はプラズマ周波数で、 ω_c はサイクロトロン周波数であり、それぞれ次式で表される.

$$\omega_c = \frac{eB}{m_e} \tag{33}$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \varepsilon_0}} \tag{34}$$

ここでBは磁場[**T**], m_e は電子の質量[kg], ε_0 は真空中の誘電率である. プラズマ周波数は電子密度の関数であり、サイクロトロン周波数は磁場の関数である.

高域混成共鳴周波数の決定

プラズマ中のプローブに高周波電界を印加すると、プローブは、プラズマのインダクタ ンス:L_p、プローブの静電容量:C_a、シース容量:C_sをもちいて図 15 のような LC 共振回 路と等価となり、2 つの並列共振周波数が等価容量の最小値として図 16 のように検出され る.この並列共振周波数はプローブ周辺のプラズマの UHR 周波数と等価となるため、プラ ズマの UHR 周波数が決定できる.





図 16 UHR 周波数の決定

測定器

今回の実験では、JAXA のスペースプラズマチェンバーに備え付けられているインピー ダンスプローブを使用した.このインピーダンスプローブは、若林らが作成したものである [46].ここでは、若林らが作成したインピーダンスプローブの測定器について簡単に紹介す る.プローブの等価容量を正確に計測するためには、回路内部の浮遊容量の影響を取り除く 必要があり、インピーダンスプローブでは図 17 のようにコンデンサブリッジ回路を用いて 浮遊容量の影響を打ち消す工夫がされている.



図 17 使用したインピーダンスプローブの回路図と概観(参考文献 [46]より)

このコンデンサブリッジ回路は、プローブの手前でバランスが取れるように調整されており、スイープ信号の周波数が UHR 周波数と一致する点では、プローブの等価容量が0となる.

2.1.4.3. 電子温度プローブ

電子温度プローブは、1970年代前半に Hirao と Miyazaki によって Resonance Rectification Probe として提案され [47], その後, Oyama らによって多くの改良がなされ Electron Temperature Probe (ETP)として発表された [48]. ETP は、電離層の電子温度に ついて高精度で測定が可能で、小型かつ軽量、シンプルな測定器として利用されている. 1980年以降は日本の 50 機以上の観測ロケットに搭載され電離層の観測を行った実績があ る.また、日本の5つの人工衛星、たいよう(1975)[49], ひのとり(1982)[50], きょ っこう(1984)、おおぞら(1987)[51]、あけぼの(1994)に搭載された他、ドイツ、イ ンド、カナダ、アメリカ、ブラジル、韓国、台湾でもロケットや人工衛星への搭載及び電離 層観測実験が行われた.また、土星の電離層観測についてものぞみと呼ばれる衛星に搭載さ れた実績 [52]がある.

電子温度測定の原理 [53] [54] [55]

プラズマ中へ挿入した電極(プローブ)と基準電極との間に直流電圧を印加するとき,加えた電圧に対して得られる電流の特性から局所的なプラズマの電子温度*T_e*[K]を求められる.プローブに流れる電流は,次式で表せる.

$$I_p = S \cdot J_e exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) - J_i \cdot S \tag{35}$$

ここで、プローブ電流 I_p 、プローブ面積S、電子電流密度 J_e 、電子の電荷e、プローブ電dV、ボルツマン定数k、電子温度 T_e 、イオン電流密度 J_i である.浮遊電位は

$$V_f = -\frac{kT_e}{e} \cdot \ln\left(\frac{J_e}{J_i}\right) \tag{36}$$

となる.このプローブに $\alpha \sin \omega t$ の高周波電圧を重畳したときの電圧電流特性は、次のようになる.

$$I_{dc} = \langle S \cdot J_e \cdot exp\left[\frac{e(V + \alpha \sin \omega t)}{kT_e}\right] > time \, AV$$
$$= S \cdot J_e \cdot exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) I_0\left(\frac{ea}{kT_e}\right) - J_i \cdot S$$
(37)

ここで、 $I_0(ea/kT_e) \ge 0$ は第一種ゼロ次の変形ベッセル関数である.

このとき、浮遊電位を基準とし、電極と直列につながれたコンデンサを通して正弦波を 印加すると、電極へ流れ込む電流が零になる浮遊電位が定常時の浮遊電位よりも負の方向 へシフトする.この変化量は、図 18のように交流電圧の振幅aの増加に伴って大きくなる.



よって、高周波の正弦波を印加した電極の浮遊電位 V_{fa} [V]と定常時の浮遊電位 V_{f} [V]の差 ΔV_{fa} [V]は次の式で表される.

$$\Delta V_{fa} = V_{fa} - V_f = -\frac{kT_e}{e} \ln\left[I_0\left(\frac{ea}{kT_e}\right)\right] \tag{38}$$

また,更に異なる2つの振幅a1,a2(ただし,a2 = 2a1)を印加した際の電位差の比Rを 使用し,次式からも同様に電子温度を求めることができる.

$$R = \frac{\Delta V_{fa2}}{\Delta V_{fa1}} = \frac{\ln \left[I_0 \left(\frac{ea_2}{kT_e} \right) \right]}{\ln \left[I_0 \left(\frac{ea_1}{kT_e} \right) \right]}$$
(39)

ETP のシステム

図 19に ETP の基本回路を示す. ETP はプローブに正弦波を加えた場合と加えない場合に 測定される浮遊電位の差を利用して電子温度を求める. それぞれのプローブで測定された 浮遊電位は, バッファを通して差動アンプで引き算され, 正弦波を印加したために起こる浮 遊電位のシフトを得る.

この手法では2つのプローブが必要であり、片方のプローブにのみ正弦波を加えること で2つの場合の浮遊電位を測定している。2つのプローブの面積は等しくかつ、イオンの 運動にたいして2つのプローブの方向性が同じであることが望ましい。このため、同一平面 上にあり、同じ形であることが重要である。ETP は円を2つに分けたような半円板状のプ ローブを採用している [56]. このプローブの利点は、上記の条件に加えプローブ同士の位置を近づけることで測定誤差を小さくし、円板状にすることで衛星の表面に実装しやすくしている.



2.1.4.4. プローブ法のまとめ

大型衛星で使用されてきたラングミュアプローブ,インピーダンスプローブ, ETP では, 観測手法ごとに次に示すような問題や欠点を抱えている.

- ラングミュアプローブ
 - プラズマによるプローブ表面への汚染が測定に影響する [57]ため測定時に汚染を 除去する機構が必要.一般的には高電圧をかけ,加熱する方法やガラス管内に封入 し測定時に割って測定する方法がある [58] [59].
 - ▶ プラズマの状態によって I-V 特性の曲線の傾きを求めることが困難.
 - ▶ 電子密度及び電子温度の計算を行う場合,地上へ測定値を送信する必要がある.
- インピーダンスプローブ
 - ダミーケーブルやコンデンサブリッジなどで回路内の浮遊容量を打ち消す必要がある.
 - ▶ 電子密度が低い場合には、測定精度が悪くなる.
 - ▶ 電子密度のみの測定となる.
- ETP
 - ▶ 電子温度のみの測定となる.

2.2. 小型衛星を用いた電離層観測について

ここでは、小型衛星 GAIA- I と同様に小型衛星をもちいた電離層の観測をミッションと する衛星について述べる.

2.2.1. QSAT

オーロラ帯磁化プラズマ観測衛星 QSAT(Kyushu Satellite) は、九州大学、九州工業大 学、福岡工業大学の3大学が共同で開発を行っている 50kg 級の小型人工衛星で、ミッショ ン機器として、衛星電位を測定するためのラングミュアプローブとプラズマ密度を測定す るための高周波プローブを搭載しており、地球極軌道におけるプラズマ環境の観測、衛星帯 電状況の計測、磁場観測を主なミッションとしている [60]. しかし、後の QSAT-EOS プロ ジェクトに引き継がれた際、ミッションが変更となりプラズマの観測や衛星の帯電につい てのミッションが削除されている [61] [62].

2.2.2. ELMOS 衛星群計画

2006年に提案された地球電磁環境モニター衛星の ELMOS は 2010年に改めて 5 つの 衛星による電子密度,電子温度,GPS 掩蔽観測が提案された.ELMOS 衛星群は世界初の 電子温度・電子密度・GPS 掩蔽同時観測を目標としており,大気圏から電離圏にわたる広 域のデータを取得することによって,多岐に渡る分野における貢献を目的としている. ELMOS 主衛星に搭載される観測機器には,電子密度・温度測定器,GPS 掩蔽受信器に加 え,低周波電磁波受信器,三成分電場測定器,二次元フォトメーター,高エネルギー粒子ア ナライザ,トップサイド・サウンダー,イオン・中性ガス質量分析計,中性風測定器,プラ ズマドリフトメータなど多くの機器の搭載を予定している [63] [64].



図 20 ELMOS 衛星群([65]より)

2.2.3. Formosat-3/COSMIC

2006年に打ち上げられた米台共同による小型衛星群であり、6機の衛星によって GPS 掩蔽観測を実施している. Formosat-3/COSMIC の目的は気象予報の精度改善や電離圏の 研究であり、現在観測データは気象予報精度の改善に利用されている [66] [67] [68].衛星 は全球の大気及び電離層を対象とし、1日あたり 2500 個以上の観測データを取得している. これらの観測データは 90分ごとに更新されるのに合わせ、世界の気候情報の収集及び分析 を 3時間で完了させることができる.6つの衛星は高度 700km、軌道傾斜角 72度で 6 つの 軌道面に配置される.衛星の大きさは直径 1m、厚さ 16cm の円柱状で図のように軌道上で 太陽電池パネルを開き、二枚貝のような形をしている.重さは 62kg となっている.



図 21 FORMOSAT-3/COSMIC ([69]より)

3. 小型衛星の衛星電位制御手法の提案

この章では、小型衛星が電離層内を飛行する際におこる衛星電位の変動を制御する手法 について提案する.

3.1. 衛星電位変動

3.1.1. 変動のメカニズム

地球上で電源をもちいた何らかのシステムを使用する場合,必ず基準となる基準電位が存在する.一般的に,地球の電位を基準電位とするためグランド又はグラウンドと呼ばれGNDと表示される.また,航空機や人工衛星など地球と接地できない場合には,構体グラウンドと呼ばれる機体の側面など面積の一番大きな部分を基準とする.この理由は,構体グラウンドと回路間に電圧を加えた場合,面積が小さいと導電性が損なわれるため電位が変動するからである.低軌道を飛行する人工衛星は地球の大気が太陽からのエネルギーによって電離したプラズマの内部を移動する.このプラズマを電離層と呼び,電離の状態によっていくつもの層を形成している.電離層内には,マイナスの電荷を持った電子とプラスの電荷を持った正イオンが同量存在している.電子や正イオンは飛行する人工衛星の前面にいくつも当たり構体グラウンドへと進入するが,一般的に構体内部では電子の方が正イオンよりも多くなる.これは,電子の熱速度が正イオンの熱速度よりも速いため,人工衛星の前面に到達する電子が多くなるからである.よって,電離層内を飛行する人工衛星の電位は図22のように通常の状態で負電位となる.



図 22 電離層飛行時の衛星電位

これまで大型の電離層観測衛星に搭載されてきたラングミュアプローブでは構体グラウ ンドとプローブ間に 5V 程度の電圧をかけ, プローブに流れる電流を測定することで電子温 度,電子密度を測定している.この状態を図 23 に示す.プローブに電圧が加えられ始める と,プラズマ内から電子がプローブの表面に引き寄せられプローブへと進入する.この電子 はプローブから構体グラウンドへと流れる.つまり,構体グラウンドへと蓄積される.これ によって衛星の電位は通常の状態よりも更に負の方向へと変化するが,構体グラウンド面 に集まる正イオンによって電気的に中和され通常の電位状態を保つことができる.



図 23 ラングミュアプローブ使用時

プローブに加える電圧を更に上昇させた場合の状態を図 24 に示す.プローブ電圧の上 昇に伴って、プローブに集まる電子は増加し、流れる電流も増える.構体グラウンド内の電 子の蓄積も増加するため、構体グラウンド面に集まる正イオンも増加する.大型衛星の場合 では、構体グラウンドが十分に確保できるために、衛星電位を保つのに十分な正イオンを収 集することが可能でるが、小型衛星では、電力を確保するために衛星の側面のすべてを太陽 光パネルで覆う事が多く、構体グラウンドの面積を大きく確保することが困難となる.構体 グラウンドの面積が小さい場合には、プローブからの電子を中和し衛星電位を一定に保つ ための正イオンを十分に収集できなくなる.このため、構体グラウンド内の電子が増加し、 電気的な中性を保つことができなくなり、通常の衛星電位よりも負の方向へ沈むことにな る.この結果、プローブに電圧を加えても一定の電圧以上になると衛星電位が負の方向へ沈 み、プローブの電圧は上昇しなくなる現象が発生する.この現象によって従来手法であるラ ングミュアプローブは小型衛星で使用することが難しい.



図 24 ラングミュアプローブの電圧を更に上昇させた場合

3.1.2. ラングミュアプローブ使用時の衛星電位の変動

図 25 は 1 辺が 200mm のアルミ製の小型衛星模型を用いて得られた衛星電位の変動の 様子である.図 25(上段)では、回路の GND 及び衛星の構体グラウンドを地球と接地して いるため、プローブの電圧を上昇させても衛星電位は一定で変化しないことがわかる.図 25(下段)では、回路の GND 及び衛星の構体グラウンドを地球と接地せず、実際の宇宙空間 と同じように基準点が宙に浮いた状態(フローティング)の場合の結果である.この状態では、 プローブ電圧の上昇に伴ってある値まで上昇するとそれ以上プローブ電圧が上昇しないこ とがわかる.また、衛星の電位も負の方向へ沈んでいることがわかる.ラングミュアプロー ブによる電離層観測では、電流と電圧の関係から電離層の状態を測定しているため、衛星電 位が変化すると正常に測定できない.



図 25 実験で得られた衛星電位の変動

3.2. 解決方法の提案

この現象の解決方法としては、次のようなものが考えられる.

- 1. 衛星の構体グラウンドの面積を増加させる.
- 2. 衛星の構体グラウンド内の電子を減らすことで電気的な中性を保つ.
- 3. 衛星電位の変動の影響を受けない新たな観測手法を採用する.

解決方法1については、構体グラウンドの面積を増やすために導電性の板などを搭載し ておき、宇宙空間で展開する方法が考えられるが、小型衛星の利点である軽量化、小型化の 観点から採用することは難しい.本研究では、解決方法2及び3について実験を行い問題 の解決に有効であるか検証を行った.本章では、解決方法2について、次章では解決方法3 について述べる.

3.2.1. 電子銃による電子の放出を用いた衛星電位制御

本研究では、衛星の構体グラウンド内の電子を減らす方法として、熱電子によって電子 を放出する方法を提案する.熱電子の放出とは、金属などが熱せられた場合に熱エネルギー によって金属中の電子が外に放出される現象である.この熱電子の放出によって図 26 のよ うに構体グラウンドにたまった電子を放出することで正イオンとのバランスをとり、衛星 電位が変動しないように制御することが可能である.プローブに流れる電流は、数μA程度 であるため、同程度の熱電子を放出すれば衛星電位の変化を制御できると考えられる.





3.2.2. 実現方法

熱電子を放出する電子銃の放出源には、熱電子を放出しやすく、高温にも耐えることができるタングステン線で作成されたタングステンコイルを使用する.また、コイルの加熱には、電熱線のように電流を流すことで高い温度まで加熱する方式を採用した.図 27 に電子銃の回路図及び、図 28 に実際に作成した電子銃を示す.電子銃は電源とタングステンコイルに流す電流を一定にするための制御部分、タングステンコイルの3つか構成されている. タングステンコイルには線径が 0.15mm のタングステン線を使用しコイル径が 0.8mm となるように長さが 150mm のタングステン線を 20 回巻いたものを使用した.



図 27 電子銃の回路図



図 28 作成した電子銃の概観

3.2.3. 熱電子銃の熱電子放出能力

熱電子の放出量は次のリチャードソン・ダッシュマンの式で表される.

$$J = AT^2 exp^{\frac{-eW}{kT}} \left[A/m^2 \right]$$
(40)

ここで, J は熱電子放出量 [A/m²], A はリチャードソン定数 1.2×10^6 [A/m²K²], T は絶対 温度 [K], k ボルツマン定数 1.38×10^{-23} [J/K]である. W は仕事関数でタングステンの 場合には 4.53 [eV]である. e は電荷で 1.6×10^{-19} C である.

絶対温度Tはタングステンの抵抗率 ρ から計算することができる.抵抗率 ρ は絶対温度 による非線形特性を持っているため各温度に対する抵抗率をあらかじめ測定する必要があ る.しかし、タングステンは従来、電球のフィラメントとして利用されてきたため、1000K 以上の高温領域における近似式が導出されている.ここではこの近似式を使用して絶対温 度Tを求める.

$$\rho = 1.77 \left(\frac{T}{1000}\right)^2 + 26.52 \left(\frac{T}{1000}\right) - 3.44 \left[10^{-8} \Omega m\right]$$
(41)

タングステンの抵抗値Rは次式で表される.

$$R = \frac{\rho l}{S_c} \tag{42}$$

今回作成したタングステンコイルの抵抗値は 4.53Ωである. よって絶対温度Tは次式のよう に求められる.

$$1.77 \left(\frac{T}{1000}\right)^2 + 26.52 \left(\frac{T}{1000}\right) - 3.44 = \frac{RS_c}{l}$$
(43)

$$T = 1900 \,[\text{K}]$$
 (44)

この絶対温度Tをリチャードソン・ダッシュマンの式に代入すると、

$$J = AT^2 exp^{\frac{-eW}{kT}} = 4.44 \tag{45}$$

$$I_{anode} = J \times S$$

= 3.14 × 10⁻⁴[mA] (46)
= 314 [µA]

となり,熱電子の放出量が計算できる.

熱電子銃を使用するに当たり、タングステンコイルの熱電子放出能力を実験によって確認した.熱電子放出は金属の種類のほかに、大きさや加える熱エネルギーによっても変化する.これを調べるために、熱電子放出実験を行った.実験では、タングステン線の太さ、巻き数、加える熱エネルギーの3つを変化させ、放出する熱電子を測定した.

図 29 は測定回路である.測定システムとして熱電子を放出する電子銃と熱電子を収集 して測定する陽極を真空チェンバー内に設置する.真空チェンバー内の空気を抜き,電子銃 の電流を少しずつ増加させタングステン線を加熱する.このとき陽極には電圧を加えてお き放出される熱電子を収集できるようにしておく.タングステンコイルに流れる電流は数A となるため対応した電流計及び電源が必要になる.



図 29 熱電子放出量の測定回路

図 30 は使用した真空チェンバーと測定時のタングステンコイルの様子である. タングス テンコイルに流れる電流が増加すると,熱電子が放出され,電球のフィラメント同様,強い 光を放つ様子が分かる.加熱されたタングステンコイルから熱電子が放出され始めると陽 極につながれた電流計に電流が流れる.この電流は微弱であるため,マイクロアンペアが計 れる電流計を使用する.実験結果を図 31 に示す.



図 30 使用した真空チェンバーと測定中の様子

図 31 の下段は陽極電圧の低い領域を拡大したグラフである. 横軸は, 縦軸は, である. 熱電子の放出は 100 µ A 程度で一定になることがわかる. しかし, リチャードソン・ダッシ ュマンの式から計算した熱電子の放出量とは異なることがわかる. ここで, 熱電子の飽和電 流からタングステンの温度を次式より計算する.

$$\log_{10}\left(\frac{I_{sc}}{T^2}\right) = -\frac{1}{2.303} \frac{We}{k} \frac{1}{T} + \log_{10}\left(\frac{4\pi e m_e k^2 S}{h^3}\right)$$

$$T = 1840 \, [\text{K}]$$
(47)

ここで、hはプランク定数 6.626×10⁻³⁴ [J·s]である.実験から得られた飽和電流を用い て計算したタングステンコイルの温度は 1840 K であり、タングステンコイルの抵抗値など から求めた温度 1900 K と近いことがわかる.よって作成したタングステンコイルの熱電子 の放出量は、最大で 314 µ A 程度であり、実際にはこれよりも低い値であることがわかる. これまでの実験から、必要な熱電子放出量は電子を受け取る陽極つまりプラズマの電位が 5V の場合に放出される電子が 7 µ A 程度必要であると想定し、コイルに流す電流は 1.7A と 決定した.





3.3. 衛星電位制御実験

小型衛星模型と作成した電子銃を用いて,実際に衛星の電位を制御できるか実験を行った.

3.3.1. 実験内容

電離層の状態を再現できるスペースプラズマチェンバーを使用してラングミュアプロー ブによって電子密度及び電子温度を測定した際,衛星電位が負の方向へ変化する現象が本 研究で制御できるか実験を行った.小型衛星の模型として,200mm×200mmのアルミニ ウム板を用いて立方体を作成した.アルミニウム板には絶縁のためにカプトンテープを貼 り付けている.衛星の構体グラウンドとして200mm×200mmの銅板を使用した.この銅 板をプラズマ発生装置の方向へ向け,実際の飛行と同様にプラズマが衛星の前面に飛び込 む状態を再現した.実験に使用した衛星模型及び実験の様子を図 32 に示す.



図 32 使用した衛星模型と実験の様子

衛星の構体グラウンドはリレー回路を用いてチェンバーと接続されており、チェンバー の外から、チェンバーの外壁と接続した場合、チェンバーの外壁と接続しない場合を切り替 えることができる。チェンバーの外壁はアースとして地球と接続されており、チェンバー外 壁と構体グラウンドを接続した場合には、構体グラウンドの面積が無限大と同じになる。ま た、チェンバー内部と外部をつなぐフランジと呼ばれるコネクタはチェンバーと接続され ているため、使用できない。よって本研究では、無線通信を用いることでチェンバー内部と 外部を完全に切り離した状態つまり、宇宙空間に衛星が飛行している状態を再現した。

電子銃の有効性を確認するために、3つの状態について実験を行った.

- 1. 衛星模型の構体グラウンドをチェンバーと接続し、構体グラウンドの面積が無限大 に大きい状態
- 衛星模型の構体グラウンドをチェンバーと接続せず、実際の宇宙空間と同じく構体 グラウンドが限られている状態

 2の場合において、本研究で作成した電子銃を作動させ、衛星電位を制御した状態 本実験で使用したプラズマの状態は、窒素ガスで作成され電子温度は1600K、電子密度 は2.34×10-5 cc/mm³であった。チェンバー内の気圧は1.88×10⁻² Pa で窒素ガスの流量は 35 sccm であった。

3.3.2. 実験で用いた制御システム

ここでは、衛星電位制御実験で使用した電子銃及び、ラングミュアプローブを搭載した 小型衛星模型について説明する.小型衛星内には、大きく分けて次の3つのシステムが搭載されている.

3.3.2.1. 電子銃

電子銃は、熱電子を放出するタングステンコイル、タングステンコイルに一定の電流を 流す定電流回路、電源となるバッテリー及び電源スイッチから構成されている.タングステ ンコイルは、先の実験より直径 0.15mm のタングステン線を直径 0.8mm のコイル状に 20 回巻いたものを用いた.定電流回路では、比較的大きな電流を扱うため、3 端子レギュレー タと高電流にも耐えられる抵抗を用いて作成している.電源スイッチも同様に高電流を扱 うため、リレー回路を使用した.電源となるバッテリーには、市販の単三型ニッケル水素電 池(1 本当たり 1.2 V, 2500 mAh)を直列に 8 本、並列に 2 列使用し、9.6V、5000mAh の電 源を作成した.真空中では、一般的な乾電池の多くが、内部で発生するガスで破裂し、電解 液の液漏れなどが発生し利用することができない.また、携帯電話などに利用されており、 小型かつ高電流高電圧を得られるリチウムイオン電池は、特に危険で爆発し、大きな事故を 引き起こすことがある.今回使用したニッケル水素電池の真空中での安全性については、明 確な検証報告は無いが、各大学が主体となって行っている小型衛星の打ち上げにも使用さ れているものであり、チェンバー管理者の監視の下、本実験で使用した.

3.3.2.2. ラングミュアプローブ回路と衛星グラウンドの切り替え回路

ラングミュアプローブの回路は図 33のようになっている.また作成した回路を図 34に 示す.



図 33 作成したラングミュアプローブのブロック図



図 34 作成したラングミュア回路を含む測定システム

衛星グラウンドの切り替え回路は図 35 のようになっている.切り替え部分には,電源のスイッチ同様,大きな電圧がかかるため,リレー回路を用いている.



図 35 衛星グラウンド切り替え回路と無線モジュール

3.3.2.3. システムの制御及びチャンバー外との通信システム

搭載したシステムの制御は、ARM マイコンボードを用いて制御されている. このマイコ ンボードに、Xbee と呼ばれる無線通信のボードを接続し、制御命令はチェンバー外の PC より送信している.当然ながら、チェンバー壁は内外を遮断しているため、フランジを通し てチェンバー内のアンテナより無線通信を行う.本実験では、衛星模型は実際の衛星同様に 電気的に宙に浮いている必要がある.よって、有線によるシステムの制御はできないため、 無線通信を利用している.

図 36 に作成したリレー制御システムの概観を示す.また,次に制御できる機能を示す.

- チェンバー壁と衛星構体の接続切り替え
- 電子銃の電源の ON, OFF
- 衛星模型内に設置した測定システム全体の電源の ON, OFF これらの制御は, リレー制御用スイッチによって切り替えることが可能である.



図 36 リレー制御システム

3.4. 実験結果

3.4.1. 結果

図 37 から図 39 に 3 つの状態から得られた実験結果を示す.

構体グラウンドをチェンバー外壁と接続した状態1の場合には、プローブに印加する電 圧を上昇させても衛星電位は変化せず、プローブ電圧はプローブに印加させる電圧と等し く上昇することがわかる.

構体グラウンドをチェンバー外壁と接続しない状態2の場合には、プローブに印加する 電圧を上昇させると、2.25Vまではプローブ電圧が上昇する.しかし、それ以上電圧を上昇 させるとプローブ電圧は上昇しなくなる.衛星電位は、印加する電圧を上昇させると2.25V 付近で負の方向へ変化し始める.また印加電圧が減少し始めると衛星電位は上昇し2.25V 付近で 0V に戻る.

電子銃を作動させた状態3の場合には、プローブに印加する電圧を上昇させると、2.5V 程度までプローブ電圧が上昇することがわかる.また、衛星電位も同様に2.5Vまで変化す ることがない.図 40に各状態の衛星電位を比較したグラフを示す.

電子銃を使用した状態3の衛星電位は、使用しない状態2の衛星電位よりも約0.22V改善していることがわかる.







図 38 衛星構体がフローティングの場合







図 40 衛星電位の比較

3.4.2. 考察

電子銃を使用すると衛星電位の変動を改善できることがわかったが、想定していたよう に完全に制御することはできなかった.この原因について、今回実験に使用したプラズマの 電流・電圧特性を図 41 に示し、説明する.



図 41 実験で得られた電流・電圧特性

測定したプラズマ電位は約 1.45V でプローブ電流は 8.7 μA であった. 電子銃の放出す る熱電子は,衛星の構体グラウンドと比べて 1.45V のプラズマ電位を持つプラズマに放出 されることになる. つまり熱電子放出実験で例えると放出された熱電子が 1.45V の電圧が 加えられた陽極に収集されることと同じといえる.よって,衛星の電位を保つために必要な タングステンコイルの熱電子放出能力は,今回の場合,陽極にプラズマ電位と同じ 1.45V の 電圧が加えられた状態で 8.7 μA の熱電子の放出能力を持つタングステンコイルが必要であ ることも示している.

熱電子の放出量を増加させるためには、コイルを作成する材質の変更や巻き数、コイル 径、加熱するための電流の増加などが考えられ最適なものを探す必要がある.技術的には白 熱球で用いられている効率化の手法を取り入れることで可能であると考える.

本手法による衛星電位の制御は、回路が簡単かつ小型なのでペイロードの少ない小型衛星には有用であると考えられ、電離層観測用衛星だけでなく、小型衛星全般で利用できる.

4. 新たな電離層観測手法の評価実験

4.1. Electron Density and Temperature Probe

この章では,新たな電離層観測手法として提案されている Electron Density and Temperature Probe (EDTP) について述べる.

4.1.1. 概要

Electron Density and Temperature Probe (EDTP) は小山によって小型衛星や超小型衛星による電離層観測ミッションのために開発された観測機器で,電離層の状態を知るために必要な電子密度と電子温度の2つの測定を,電極に印加する正弦波の周波数を変化させることで,1つの回路で測定することを可能としている. EDTP 電子密度測定には,インピーダンスプローブと同様にプローブに印加された高周波とプラズマの高域共振(Upper H:UHR)周波数を用いている.電子温度測定には,これまでに小山らが提案してきたElectron Temperature Probe (ETP)が使用されており,高精度の電子温度観測が可能である.図42に小型衛星 GAIA-I用に作成したエンジニアリングモデルの EDTP を示す.



図 42 EDTP のエンジニアリングモデル

4.1.2. 利点

EDTPでは、電子密度観測にはインピーダンスプローブが、電子温度観測には ETP の手 法を用いているため、インピーダンスプローブの利点や ETP の利点である高精度な電子密 度及び電子温度観測機能を備えている.更に、2 つの測定は共通の回路で測定可能であるた め、表 5 のように回路の小型化・軽量化が可能で小型衛星に適した測定器となっている. これは、FPGA や高性能の DDS を使用し周波数ジェネレータを1つにまとめることで実現 している.また、測定データに関してもラングミュアプローブで測定する電流電圧特性のよ うに連続したデータは必要ないため、高速な観測レートや大きな保存領域を必要としない. このため小型衛星のように処理能力やデータの保存領域、地上局へのデータ転送などが非 力な場合でも十分に測定ができる.

名称	値	単位
重量	500	g
寸法	-	mm
電子温度測定範囲	$500 \sim 4000$	Κ
電子密度測定範囲	$10^3 \sim 10^6$	個/cm ³
電圧	+28	V
電流	max 50	mA
電子温度測定時間	0.8	秒
電子密度測定時間	1	秒

表 5 EDTP のスペック表

加えて、一般的なプラズマ測定器であるラングミュアプローブでは、電子密度及び電子 温度の両方を1つの回路で測定可能であるが、測定データはプラズマによる電極汚染の影響を受けている.更に、第3章でも述べたように、プラズマ中で電極と基準電極(衛星構体)間に電圧を加えると構体グラウンドと呼ばれる衛星構体の電位が変化することが知ら れている.大型衛星の場合、構体グラウンドの広さを十分に確保できるため、大きな問題と はならないが、小型衛星や超小型衛星のようにでは、十分確保できず、衛星構体を基準電極 とする観測方法では電位変化の影響を受け測定することができない.これに対して、EDTP では、衛星構体の電位変化に依存せず、ラングミュアプローブのように電極汚染の影響を受 けないため、電離層観測を行う小型衛星への搭載に最適である.

4.2. 観測システム

ここでは, EDTP の基本回路及び, 評価実験にあたり作成した実験用回路について説明 する.

4.2.1. 基本回路

EDTP の基本回路のブロック図を図 43 に示す. EDTP は直径 100mm の円板を 10mm の間隔を置いて 2 つに分かれた半円板状のプローブを持っている. 一方の半円プローブで は、高周波の正弦波を印加し得られた浮遊電位V_{fa}を測定する.正弦波の周波数選択には電 子を加熱する恐れのある特徴的な周波数は避け、電子プラズマ周波数よりも低く、イオンプ ラズマ周波数よりも高い周波数を選択する.本研究で作成した EDTP では,観測する電離 層の電子密度が約 10³ els/cm³程度であると想定し、印加する高周波の周波数を 200kHz と した.印加される正弦波は、直流成分を除去するために直列に接続されたキャパシタを通し て、プローブへ印加される.もう一方の半円プローブは正弦波を印加しない定常時の浮遊電 位V_fを測定する. 正弦波の生成には Field Programmable Gate Array : FPGA によって制御 された Direct Digital Synthesizer: DDS を用いており、正弦波の振幅aは、電子温度測定 時には, 200 ミリ秒毎に 0V, 0.5V, 0.25V, 0V と順番に変化し, 異なる 2 つの振幅による V_{fa1}, V_{fa2} を得る. その後の電子密度測定では周波数スイープで使用される 0.5 Vの振幅と なる. 電子密度測定モードでの周波数スイープは 100kHz から 10MHz まで 100kHz ごと に 10 ミリ秒毎に変化する. これらの正弦波は、キャパシタを通ることで直流成分を除去し てプローブに印加される.2 つのプローブによって得られた電圧Vfa及びVfは、高インピー ダンスのバッファに入力され,その後差動アンプによって差ΔV_{fa1}, ΔV_{fa2}を得る. 差動アン プの CMRR (Common-Mode Rejection) は 40dB 以上が必要である. これにより浮遊電位 測定時に生じる誤差成分である誘起電圧, 空間電荷変化分, 雑音等を除去することができ, 純粋な信号成分のみを取り出すことが可能である.得られたシフト電圧と通常の浮遊電位 はアナログ値なので,アナログ・デジタルコンバータでデジタル値に変換され, FPGA に送 られる. FPGA では, 各測定モード, 振幅, 周波数の目印を観測データに追加し, データを 出力する. 各測定モードでプローブに印加される正弦波は図 44 の上段ようになり, その信 号によって得られた出力例を下段に示す.



図 43 EDTP の基本回路



図 44 プローブへの印加電圧(上)と測定時に得られる波形の例(下)

4.2.2. 実験用測定システム

今回の実験では、測定システムとして第3章の衛星電位制御手法で使用した衛星模型内 に外部から周波数の変更やモードの切り替えなどができるように機能を追加した実験用の EDTP システムを新たに作成した(図 45).また、JAXA にある電離層を模したプラズマの 生成が可能なスペースプラズマチェンバーを利用した(図 46).このチャンバー内に実験用 の測定システムを設置し、実験を行った.



図 45 測定用の EDTP のブロック図



図 46 使用したスペースプラズマチェンバーの概観

4.3. 評価実験

評価実験では,次の3つの実験を行った. 実験① 従来手法との比較 実験② 磁場による影響の調査

実験③ プローブ形状による影響

4.4. 実験① 従来手法との比較

4.4.1. 実験内容

EDTP と従来手法であるラングミュアプローブ,インピーダンスプローブの3つをチェンバー内に設置し,同条件で生成されたプラズマを測定した.理論的には,3つの方法で測定された電子密度及び電子温度は一致するはずである.特に EDTP の電子密度測定法とインピーダンスプローブの測定方法は同じ理論であるため測定される結果は同じになるはずである.測定時の各プローブの取り付けは図47のようになっている.



図 47 各プローブの取り付け位置

実験では、プラズマの密度を変化させるためにグリッド電圧を変化させて測定を行った.この条件を表 6 に示す.また、プラズマを生成したスペースチェンバーの環境についても表7 に示す.チェンバー内に各プローブを設置後、チェンバーを閉め、一度 3.65×10⁻⁵ Pa 程度まで内部の空気を抜きその後、電離層環境を再現するために窒素ガスを用いてプラズマを生成した.

グリッド電圧 [V]	グリッド電流[A]	プレート電圧[V]	プレート電流[A]
65	0.10	220	0.10
60	0.08	220	0.08
45	0.06	220	0.06
36	0.04	220	0.04

表 6 プラズマの生成条件(実験①)

表 7 チェンバーの環境(実験①)

名称	値	単位
チェンバー内気圧(窒素ガス有)	1.88×10^{-2}	Pa
プラズマ源のヒーター電圧	4	V
プラズマ源のヒーター電流	32	А

4.4.2. 結果

測定結果を図 48 及び表 8 に示す. 3 つの方法で測定した電子密度及び電子温度は大き く異なる値を示している.

4.4.2.1. EDTP とラングミュアプローブの比較

EDTP とラングミュアプローブの電子温度の比較では、ラングミュアプローブのほうが 数倍以上高い値を示している.また、ラングミュアプローブでは、グリッド電圧を減少させ チェンバー内部のプラズマが減少すると電子温度が高く測定されることが分かる.

電子密度を比較すると、電子温度の値を用いて計算するラングミュアプローブの電子密 度は EDTP やインピーダンスプローブよりもかなり低い値を示している. ラングミュアプ ローブの電子温度は、第2章でも説明したように、電流・電圧特性の傾きを用いて計算して いる. 測定データによっては、傾きを求めることが困難な場合や、プラズマの状態によって はプローブの電圧を上昇させても図 12 の C 領域へ到達せず、計算することが出来ない場 合もあった.

4.4.2.2. EDTP とインピーダンスプローブの比較

EDTP とインピーダンスプローブの電子密度の結果は、プラズマ生成装置のグリッド電 圧を増加、つまりプラズマの生成量を増加させると測定結果の差が大きくなることが分か る. EDTP のほうが 1.6 倍ほど高くなる結果が示された.



図 483 つの測定方法で得られた電子温度及び電子密度

EDTP の測定結果		
グリッド電圧 [V]	電子密度[個/cm ³]	電子温度 [K]
65	$1.54\! imes\!10^5$	1196.25
60	$1.41 imes10^5$	774.975
45	$8.75\! imes\!10^4$	809.65
36	$3.04 imes10^4$	719.475

表8実験①の測定結果

ラングミュアプローブの測定結果		
グリッド電圧 [V]	電子密度[個/cm ³]	電子温度 [K]
65	$3.59\! imes\!10^4$	2261.68
60	$3.11 imes 10^4$	1951.86
45	$1.68\! imes\!10^4$	2566.58
36	1.40×10^{4}	2810.54

インピーダンスプローブの測定結果		
グリッド電圧 [V]	電子密度[個/cm ³]	
65	$1.06 imes10^5$	
60	$9.48\! imes\!10^4$	
45	$6.82\! imes\!10^4$	
36	$3.53 imes10^4$	

4.4.3. 考察

3 つの測定手法で測定された結果が異なっている原因について、いくつか考えられる要因がある.

1 つ目は、チェンバー内に生成されるプラズマが均一でなく場所によってさまざまな状態であることが挙げられる.この問題については若林らがインピーダンスプローブを用いてチェンバー内の電子密度分布を測定した結果からも明らかである [70].原因としては、プラズマの作成方法とチェンバーの構造に理由がある.プラズマの生成は、グリッドと呼ばれる多シグステンフィラメント部分で生成された電子をプレートと呼ばれる高電圧をかけた板によってチェンバー内に拡散する後方拡散方法によって作成されている.このため、プラズマの発生部分を中心としてビーム状にプラズマの高い部分が現れる.また、チェンバーは密封状態ではなく、高真空状態を保つために常にポンプによって内部の空気を排出して
いる. さらにチェンバー内部は電離層を再現するためにわずかに窒素ガスを注入している. 窒素ガスの注入はチェンバーの後方から行われており,排出ポンプの位置は,チェンバーの 前方にある. このためチェンバー後方から前方に流れるようにプラズマの偏りが発生し,ま た,排出ポンプ部分では,プラズマが排出されるため少なくなる. この要因の解決には,完 全に同じ位置でプラズマの測定を行う必要がある. 方法としては,回転台を利用し,プロー ブ位置を入れ替える方法が考えられる.

2つ目は、そもそもの測定方法、測定器の違いによるものである.理論的には、どの手法 も電子密度、電子温度を測定できるが、多くの前提条件によって成り立っている.例えば、 "コールドプラズマにおいて"といったものである.これらの条件は厳密にはチェンバー内 部のプラズマの条件によっては成り立たない.この実験時にも、プラズマの生成条件の変化 や、チェンバー内の気圧と窒素ガスの割合の変化によって熱プラズマと呼ばれる状態にプ ラズマが変化することがあった.この状態では、電子や正イオンの分布がボルツマン分布に 従わない.また、コールドプラズマの場合には、電子と正イオンは弾性衝突によってエネル ギー交換を行っており、電子温度と正イオンの温度がほぼ等しいのに対して、熱プラズマで はその関係が崩れ、熱的非平衡性が現れる.本実験でも熱プラズマ状態の特徴とされる図 49 のような共鳴がいくつも起きることが確認された.更に、測定回路では回路作成者が工 夫し、外来ノイズの影響を除去するフィルタ回路や、回路の浮遊容量を打ち消す回路など基 本回路にはない回路が含まれているため、これらの有無によっても測定結果に差が出るも のと考えられる.





よって、測定時のプラズマ条件に起因する影響については、各測定方法及びプラズマの 状態に熟知する必要があり、また測定方法を工夫する必要があるため、今後の課題としたい.

3 つ目はプローブの形状や大きさ,材質等も異なるためこれらについても影響を考慮す る必要がある.得にラングミュアプローブ及びインピーダンスプローブは球状のプローブ を使用しているが,EDTP は円板状のプローブを使用している.このプローブの形状の違 いによる影響については,実験③で検証を行っている.

ここで、特に EDTP とラングミュアプローブの測定結果に差が見られたため、別の実験 で得られた EDTP とラングミュアプローブデータを比較する.この比較には、EDTP の回 路中のフィーディングキャパシタの値を変更した場合の影響を調べた際のデータを用いた. 比較結果を図 50 測定結果の比較(追加)図 50 と表 9 にしめす.この実験では、グリッド電 流をプラズマの生成条件の目安としている.窒素ガスの流量やチェンバー内の気圧、ヒータ 一電圧・電流などは実験①と同様である.

比較結果は、実験①と同様にチェンバー内部のプラズマ生成量が少なくなるとラングミ ュアプローブでは電子温度が上昇する傾向がある.また、電子密度についてもプラズマの生 成量の減少にともなって EDTP との差が大きくなることがわかる.しかし、実験①よりは 少し望ましい結果に近づいたように見える.実験①との条件の違いとしては、実験①の場合 には、測定に使用したプローブを小型衛星模型に取りつけたのに対して、この実験では、プ ローブのみを 3 軸移動装置に取り付け測定を行っている.また、プラズマ源のフィラメン トを交換しておりプラズマの生成に何らかの影響を与えていることも考えられる.これら の結果から、3 つの手法の比較については、チェンバー内の環境や測定機器、プローブ位置 を整えて再度測定を行いたい.

EDTP の測定結果				
グリッド電流 [A]	電子密度[個/cm ³]	電子温度 [K]		
0.1	$2.26\! imes\!10^5$	1452.8		
0.09	$2.15\! imes\!10^5$	1424.7		
0.08	$2.04\! imes\!10^5$	1396.6		
0.06	$1.38\! imes\!10^5$	1281.8		
0.04	$8.29\! imes\!10^4$	1163.5		
0.02	$3.29 imes10^4$	1176.4		

表 9 測定結果の比較(追加)

ラングミュアプローブの測定結果				
グリッド電圧 [A]	電子密度[個/cm ³]	電子温度 [K]		
0.1	$2.13\! imes\!10^5$	1802.7		
0.09	$1.20\! imes\!10^5$	2099.3		
0.08	$8.90 imes10^4$	2427.4		
0.06	$6.07\! imes\!10^4$	2998.7		
0.04	$4.98\! imes\!10^4$	2465.3		
0.02	4.64×10^{4}	2019.5		



4.5. 実験② 磁場による影響の調査

4.5.1. 実験内容

電離層は地球の磁場の影響を受け、地球の中心を基準として綺麗な同心円状に広がって はいない.プラズマ中の電子は、磁場によって影響を受けることがわかっている.これは、 電子サイクロトロン運動と呼ばれ、図 51のように磁場に並行に移動する電子は影響を受け ないが、垂直方向へ移動する電子は影響を受ける.小型衛星が地球上を移動する際に EDTP のような平板プローブでは、衛星の姿勢によってプローブ面と磁場の方向が変化する.本実 験では、プラズマが受ける磁場の影響について調査した.この実験では、EDTP とインピー ダンスプローブを用いてプラズマの状態を測定した.



図 51 電子サイクロトロン運動

チェンバー内の磁場は、図 52 のようにチェンバー周りに設置されているヘルムホルツ コイルを使用することでさまざまな方向の磁場を生成できる.本実験では、地球磁場を打ち 消し磁場のない状態の0磁場や地球磁場、各x,y,z軸に正方向及び負方向の磁場の8つ の磁場を生成し、それぞれの磁場が測定にどのような影響を与えるかを調べた.



図 52 ヘルムホルツコイルと磁場の方向

チェンバー内には,図 53 のように各プローブを設置した.また,プローブ面に対する 磁場の方向も合わせて示している.この実験では,電子密度の測定方法にUHR 周波数を用 いる EDTP とインピーダンスプローブを用いて電子密度の測定を行った.



図 53 測定に用いたプローブと磁場の方向

4.5.2. 結果

図 54 に EDTP 及びインピーダンスプローブで測定した結果を示す.

EDTP 及びインピーダンスプローブの電子密度を比較した場合,インピーダンスプロー ブよりも EDTP のほうが 1.6 倍程度高く測定される結果となった.この原因については先 の実験①で考察しているようにいくつかの要因が考えられるが,EDTP では回路の浮遊容 量を打ちけす対策を行っていないため,インピーダンスプローブの結果よりも電子密度が 高くなったと考えられる.

また,この実験で注目すべきは, z 軸方向及び-z 軸方向に磁場を加えた場合である.こ こで 表 10 に z 軸及び-z 軸の磁場を加えた場合に得られた結果を示す. EDTP では, z 軸 方向の磁場と-z 軸方向の磁場の場合を比べると,-z 軸方向の磁場を加えた場合の電子密度 が高くなっているのに対し,インピーダンスプローブでは, z 軸方向の場合のほうが高く-z 軸方向の磁場においては電子密度が低くなっている.

電子密度[個/cm3]の比較結果				
(EDTP)				
グリッド電流 [A]	z 軸	-z 軸		
0.1	$4.67 imes10^5$	$5.66 imes10^5$		
0.05	$2.98 imes10^5$	$3.24\! imes\!10^5$		
0.03	$1.54\! imes\!10^5$	$1.64 imes10^5$		

表 10 z 軸及び-z 軸の条件時の電子密度

電子密度[個/cm3]の比較結果					
(インピーダンスプローブ)					
グリッド電流 [A]	z 軸	-z 軸			
0.1	$3.74 imes10^5$	$2.63 imes10^5$			
0.05	$2.44 imes10^5$	$1.38 imes10^5$			
0.03	$1.43 imes10^5$	8.80×10^{4}			



図 54 インピーダンスプローブと EDTP で測定された電子密度の結果

4.5.3. 考察

z 軸方向及び-z 軸方向に磁場を加えた場合を比較した際,EDTP とインピーダンスプロ ーブの結果が大きく異なることがわかった.今回,EDTP とインピーダンスプローブでプ ラズマを測定した際,2つの測定条件の違いは,測定場所が違うことと,プローブ形状及び 大きさが違うことである.測定場所の違いについては,磁場方向をz軸方向及び-z軸方向 以外に設定した場合では,どちらの測定方法も同じような電子密度変化をしていることか ら,大きく影響していないことがわかる.つまり,プローブ形状及び,プローブの大きさや プローブ面の面積等の違いに原因があると考えられる.

4.6. 実験③ プローブ形状による影響

4.6.1. 実験内容

実験②では、さまざまな磁場を加えたプラズマを測定した.この測定では.EDTP は円板プローブをインピーダンスプローブでは球状プローブを使用していた.このため、実験② で x 軸方向及び-x 軸方向に磁場を加えた場合に見られた現象の原因にプロープ形状の違い が疑われた.実験③では、プローブ形状の違いがプラズマ測定、特に磁場を加えられたプラ ズマにおける測定に影響を及ぼすか検証を行った.この実験では、図 55 のように EDTP の 回路のみを利用し、円板プローブと球状プローブを切り替え、プラズマを測定した.このた め、測定方法の違いや、測定回路の違いによる影響は無い.つまり、この実験では、プロー ブの形状と測定位置の違いのみが影響として現れることになる.プラズマの生成条件はこ れまでと同様、チャンバー内気圧を 1.88×10⁻² Pa 程度になるよう窒素ガスを流入した.



図 55 測定に使用した観測システム

4.6.2. 結果

図 56 に測定した電子密度の結果を示す.



図 56 球状プローブと円板状プローブの電子密度の結果

やはり,円板状プローブでは, z 軸方向と-z 軸方向を比べた場合に,-z 軸方向の場合の 電子密度が高くなっているのに対し,球状プローブでは, z 軸方向の場合のほうが高くなっ ている.また,他の磁場の条件では,2つのプローブによる測定結果は一致しているか同じ ように増減していることから実験②での測定結果の違いにはプローブ形状の違い以外にも 測定結果に影響を与えている要因があることが分かる.

4.6.3. 考察

ここでは、図 57 及び図 58 を用いて磁場を加えたプラズマの様子を考察する.

z 軸方向の磁場を加えた場合,プラズマ生成装置から出るプラズマのうち z 軸と平行に 移動する電子はプローブに到達するがそれ以外の方向へ移動する電子は電子サイクロトロ ン運動によってプラズマ生成装置の周囲に集まる.このため,電子密度の高いプラズマがプ ローブ前面に集まるようになる.球状プローブの場合には,プローブの周囲すべての電子の 密度を測定することになるためプローブの後方の電子に対しても測定することになり,そ の結果今回測定をおこなった 8 つの磁場の状態で一番高い電子密度が測定される.円板状 プローブの場合には,プローブ後方の電子は測定に含まれないため,球状プローブの結果よ りも,電子密度が低く測定される.

-z 軸方向の磁場を加えた場合には、プラズマ生成装置から出る多くの電子が電子サイク ロトロン運動によってプローブのある方向へ向かって移動する.このためプラズマ生成装 置を中心にビーム状に電子密度が高くなる.球状プローブでは、プローブ後方の電子が電子 サイクロトロン運動によってプローブから離れるように移動する.このため、プローブ後方 の電子密度は低くなり、プローブ全体で測定された電子密度が低くなる.これに対して、円 板状プローブでは、後方の電子は測定に含まれないため、プローブ前面に受けるビーム状の プラズマのみを測定することになり、球状プローブで測定された電子密度よりも円板状プ ローブで測定された電子密度が高くなる.



図 57 球状プローブの場合に測定されるプラズマの様子



図 58 円板状プローブの場合に測定されるプラズマの様子

5.まとめ

本研究では、地震発生の前兆と電離層変動の関連性を研究するために当研究室で打ち上 げを予定している超小型衛星 GAIA-I での電離層観測において、大きく問題となる衛星電 位の変動について解決方法の提案・検討を行った.宇宙空間を飛行する衛星は電子によって 負の電位に帯電しており、測定機器の使用、特に電離層観測で用いられるラングミュアプロ ーブを使用した場合、衛星電位が変動することが知られている.この衛星電位の変動は、大 型衛星に比べ衛星構体の小さな小型衛星では容易に発生し、太陽光パネルや測定器の破壊 を起こすことがあるため対策が必要である.

第1章では,研究背景として電離層観測で観測された地震の前兆とみられる電離層変動の例や,当研究室の超小型衛星 GAIA-I について紹介した.また,本研究の内容について述べた.

第2章では、電離層観測の基礎として、各観測手法や小型衛星を用いた電離層観測の例 について述べた。

第3章では、まず初めに問題となる衛星電位の変動のメカニズムを説明し、衛星電位の 変動そのものに対する対策として、タングステンコイルで作成した電子銃を用いた解決手 法を提案した. この手法では, 電子銃を用いて衛星構体に中和されずにたまった電子を衛星 の側面に取り付けたタングステンコイルから熱電子として放出することで、衛星の電位が 負の方向へ変化することを防ぐ.実験では, JAXA の大型スペースプラズマチェンバーを使 用し、電離層と同じ環境下で、衛星電位の変動をわずかに抑制することが確認できた. 衛星 電位の変動の抑制がわずかにとどまった原因としてプラズマの電位に対して熱電子の放出 量が少なかったことが考えられる.熱電子の放出量を増加させる方法としては、タングステ ンコイルを加熱するための電流を増加させる方法があるが、小型衛星では使用できる電源 に制限があるため、タングステンコイルを用いている白熱球のフィラメントでの効率化の 技術を流用して,熱電子放出源に使用する金属の種類や,コイルの巻き数,金属の線径を変 化させ熱電子放出源の最適化によって熱電子の放出量を増加させることを今後の課題とす る. 本研究で行った電子銃による電位変動の制御は, 回路やタングステンフィラメントも小 さく, ペイロードの少ない小型衛星に適しており, ラングミュアプローブを用いた電離層観 測衛星での利用だけでなく, 技術的には衛星の帯電防止についても応用でき, 太陽光パネル の破損や衛星の側面に取り付けた機器の保護に役立てることが可能である.

続く第4章では、小型衛星 GAIA-Iに搭載を予定している Electron Density and Temperature Probe (EDTP)について大型衛星で使用されてきたラングミュアプローブ及 びインピーダンスプローブと比較した. この EDTP は小型衛星用に開発されており、衛星 電位変動の影響を受けない電離層観測器である.3手法の比較実験では、各測定器の測定結 果にばらつきが見られた. EDTP とインピーダンスプローブによる電子密度では、チェン バー内のプラズマを増加させると測定結果に差が出ることが分かった. EDTP とラングミ

ュアプローブの電子密度および電子温度の比較では、電子温度の測定結果において大きく 違いが見られた.また、別のこれらの原因については、チェンバー内のプラズマ環境が不均 ーなことに加え、プローブの形状や大きさの違いの影響などいくつかの原因が考えられる ため、今後、実験環境を整え改めて実験する必要がある.EDTP がラングミュアプローブや インピーダンスプローブと正確に比較できれば、電極汚染による影響で測定結果の信頼性 が低いラングミュアプローブと置き換えることができ、衛星電位の変動の影響を受けない 画期的な測定方法として小型衛星へ搭載が可能である.

加えて,実際の電離層は地球磁場の影響を受け,電離層内の電子密度に偏りが見られる. また、小型衛星が飛行する際、測定器のプローブ面が受ける磁場の方向は飛行姿勢によって さまざまに変化する.特に,EDTPでは円板状のプローブを使用しているため,球状のプロ ーブよりも磁場の方向による影響が大きくなり,電子密度の測定結果が変化すると考えら れる. 本研究では, EDTP とインピーダンスプローブを用いて, 磁場の影響を受けたプラズ マの電子密度が測定器に与える影響を調べた.この実験によって,測定器に接続されている プローブの形状とプローブ面に対する磁場の方向によって測定結果に差が出ることがわか った.特に EDTP の円板状プローブのプローブ面に進入する磁場方向では、球状のプロー ブに対して約1.4倍高い電子密度が測定されることが分かった.この実験で用いたスペース チェンバーでは、生成されるプラズマの分布に偏りがあることが分かっているため今後は プローブの位置や角度を変更し、プラズマの偏りによる影響を除いた磁場の方向とプロー ブ形状や角度などによる電子密度への影響を明らかにしていきたい.プローブ面と磁場の 方向からなる角度の影響が明らかになれば,電子密度観測の高精度化が期待でき,電離層の わずかな変動の観測やデータの解析によって地震発生の前兆と電離層変動の関連性の解明 及び, 地震発生の予測が可能となり, 早期の避難指示や防災への備えによって社会への貢献 が期待できる.

謝辞

本研究は,千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用(平成 26 年度,平成 27 年度)の支援およびプラズマチェンバーの実験に JAXA の「宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同利用設備」を利用し実現した.

電離層観測及び EDTP について小山孝一郎氏に多くのご教授をいただいた.また,スペ ースチェンバーの実験では,JAXA の阿部琢美准教授にラングミュアプローブについてご 教授頂いた.また,株式会社エイ・イー・エスの中園智幸氏には,スペースチェンバー設備 の使用や実験に関してご助力をいただいた.そして,研究活動そのものを強力に支援して頂 いた指導教官のヨサファット氏にはこの場を借りて厚く御礼を申し上げる.

参考文献

- J. Y. Liu, Y. J. Chuo, S. J. Shan, Y. B. Tsai, Y. I. Chen, S. A. Pulinets, S. B. Yu, "Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements," *Ann. Geophys*, 22, pp. 1585-1593, 2004.
- H. Fujiwara, M. Ikeda, J. Y. Liu, H. Sakata, Y. I. Chen, H. Ofuruton, S. Muramatsu,
 Y. J. Chuo, Y. H. Ohtsuki, "Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences," *Geophys. Res. Lett.*, 31, p. 17110, 2004.
- [3] F. Nemec, O. Santoli ´ k, M. Parrot, J. J. Berthelier, "Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity," *Geophys. Res. Lett.*, 35, p. 05109, 2008.
- [4] K.-I. Oyama, Y. Kakinami, J.-Y. Liu, M. Kamogawa, T. Kodama, "Reduction of electron temperature in low-latitude ionosphere at 600 km before and after large earthquakes," J. Geophys. Res., 113, p. 11317, 2008.
- [5] [オンライン]. Available: http://www.isas.ac.jp/j/enterp/missions/hinotori.shtml.
- [6] 小山 孝一郎, クチエフ イワン, 鴨川 仁, 児玉 哲哉,泉田 利行, "地震に伴う太陽 観測衛星「ひのとり」の電子温度データについて(宇宙応用シンポジウム-災害監視衛 星特集・)," 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス, 105, pp. 97-98, Jun 2005.
- [7] 哲. 児玉, 晴. 松本 , 孝. 小山, "ELMOS 小型衛星群の現状と展望," 第 12 回宇宙 環境シンポジウム講演論文集, pp. 291-292, 2016.
- [8] K. Davies, D. Baker, "Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964," J Geophys Res., 70, p. 1251-1253, 1965.
- [9] Zhu Fuying, Wu Yun, "Anomalous variations in ionospheric TEC prior to the 2011 Japan Ms9.0 earthquake," *Geodesy and Geodynamics*, 2, p. 8-11, 3, 2011.
- [10] Chen Biyan, Dai Wujio, Cai Changsheng, Kuang Cuilin, Liu Ying, "Ionospheric anomaly detection before Japan Ms9.0 earthquake by use of ionospheric tomography technology," *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31, p. 11-14, 6, 2011.
- [11] K. Heki, "Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku Oki earthquake," *Geophys. Res. Lett.*, 38, p. 17312, 2011.
- [12] Dimitar Ouzounov, Sergey Pulinets, Alexey Romanov, Alexander Romanov,

Konstantin Tsybulya, Dmitri Davidenko, Menas Kafatos , Patrick Taylor, "Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space-borne and ground observations: Preliminary results," *Earthquake Science*, 24, pp. 6, 557-564, December 2011,.

- [13] Yang Jian, Zhou Yiyan, Su Fanfan, "Ionospheric anomaly before the 2011 Tohoku Mw 9.0 earthquake," *Geodesy and Geodynamics*, 3, p. 17-22, August 2012.
- [14] 廣岡 伸治, 市川 卓, 服部 克己, 韓 鵬, 吉野 千恵, 劉 正彦, "2011 年東北地方太 平洋沖地震 (Mw9.0) に先行する電離圏異常の時空間分布," *IEEJ Trans. FM*, 136, 5, pp. 265-271, 2016.
- [15] J. Liu, Y. I. Chen, Y. J. Chuo, H. F. Tsai, "Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake," *Geophys. Res. Lett.*, 28, pp. 1383-1386, 2001.
- [16] J. Y. Liu, Y. I. Chen, C. H. Chen, C. Y. Liu, C.Y. Chen, M. Nishihashi, J. Z. Li, Y. Q. Xia, K. I. Oyama, K. Hattori, C.H Lin, "Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake," J. Geophys. Res., 114, p. 04320, 2009.
- [17] K. Heki, K. Matsuo, "Coseismic gravity changes of the 2010 earthquake in Central Chile from satellite gravimetry," *Geophys. Res. Lett*, 37, p. L24306, 2010.
- [18] Christina Oikonomou, Haris Haralambous, Buldan Muslim, "Investigation of ionospheric TEC precursors related to the M7.8 Nepal and M8.3 Chile earthquakes in 2015 based on spectral and statistical analysis," *Natural Hazards*, 83, p. 97-116, October 2016.
- [19] Mohamad Huzaimy Jusoh, Norsuzila Ya'acob, Hasnida Saad, Ahmad Asari Sulaiman, Noor Hasimah Baba, Robi'atun Adayiah Awang, Zuhani Ismail Khan, "Earthquake prediction technique based on GPS dual frequency system in equatorial region," *RF and Microwave Conference, 2008. RFM 2008. IEEE International*, pp. 372 - 376, 2008.
- [20] Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Nobuyoshi Imura, "Development of GNSS-RO and EDTP sensors onboard microsatellite for ionosphere monitoring," *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International,* pp. 4886 - 4889, 2015.
- [21] ヨサファット テトォコ スリ スマンティヨ,井村 信義,"地球環境観測用マイクロ 波センサ搭載無人航空機と小型衛星の開発," 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス, 114, 322, pp. 1-6, 2014.

- [22] ヨサファット・テトォコ スリ・スマンティヨ, "合成開口レーダ搭載地球診断用小形 衛星の実現への道のり," 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, 5, 4, pp. 304-308, 2012.
- [23] 三宅 弘晃,渡邉 力夫,田中 康寛,"衛星帯電現象の解明と信頼性向上に資する対策," *宇宙科学技術連合講演会講演集*, 59, p. 5, 2015.
- [24] 八田 真児,金 正浩, "数値シミュレーションによる宇宙機帯電解析," J. Plasma Fusion Res, 88, pp. 92-95, 2012.
- [25] 古賀 清一, 五家 建夫, 上田 裕子, 細田 聡史, 村中 崇信, 趙 孟祐, 八田 真児, 金 正浩, "衛星帯電解析ソフト(MUSCAT)の開発," *電子情報通信学会技術研究報告.* SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス, 107, 112, pp. 53-56, 2007.
- [26] "衛星帯電," 宇宙環境技術ラボラトリー年次報告書 第8号, pp. 1-3, 2013年3月.
- [27] K. e. a. Torkar, "Active Spacecraft Potential Control for Cluster Implementation and First Results.," Annales Geophysicae, 19, pp. 1289-1302, 2001.
- [28] 井川 秀幸, 原口 裕樹, 増井 博一, 岩田 稔, 豊田 和弘, CHO Mengu, 藤田 辰人, 久 田 安正, 佐藤 哲朗,八田 真児, "静止軌道衛星の帯電・放電抑制電界放出素子の研 究," 宇宙科学技術連合講演会講演集, 51st, 2007 年.
- [29] IWATA Minoru, KHAN Arifur R., IGAWA Hideyuki, OYODA Kazuhiro, CHO Mengu, FUJITA Tatsuhito, "Development of Electron-Emitting Film for Spacecraft Charging Mitigation," J Spacecr Rockets, 49, 3, pp. 546-552, 2012 年.
- [30] 松村 昭作, "複探針により電子の密度と温度を測る," *The Japan society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research*, pp. 944-949, 1993.
- [31] J.D. Swift, H. Schwar, "Electrical Probes for Plasma Diagnostics," J. Electrochem. Soc., 118, 3, p. 94, 1971.
- [32] NITC., "イオノゾンデ・イオノグラムについて," NICT., [オンライン]. Available: http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/Ionogram.html.
- [33] Y. Otsuka, T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, S. Miyazaki, "A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan," *Earth Planets Space*, 54, pp. 63-70, 2002.
- [34] 日置 幸介, 菅原 守, 大関 優, 岡崎 郁也, "GPS-TEC 法による地球物理学," *測地 学会誌*, 56, 4, pp. 125-134, 2010.
- [35] NICT, "GEONET 準リアルタイム GPS 全電子数マップ," http://segweb.nict.go.jp/GPS/QR_GEONET/.
- [36] NICT, "日本上空における最新6日間のTEC 値," http://segweb.nict.go.jp/GPS/FC_GEONET/LAT-TEC/index_jp.html.

- [37] E. Balcerak, "Tohoku earthquake shook the ionosphere," EOS Transactions, 92, pp. 296-296, Aug 2011.
- [38] "CDAAC: COSMIC Data Analysis and Archive Center," [オンライン]. Available: http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html.
- [39] I. Langmuir, G.E. Rev, 26, p. 731, 1923.
- [40] I. Langmuir, Phys. Rev. 26, p. 585, 1925.
- [41] Reifman. A, W. G. Dow, "Dynamic probe measurements in the ionosphere," *Physical Review*, Vol 76, p. pp.987-988, 1949.
- [42] I. Langmuir, H.M. Mott-Smith, "Studies of electric discharges in gas at low pressures," *General Electric Review*, No 27, p. pp. 616, Sept 1924.
- [43] K. Oyama, "DC Langmuir Probe for Measurement of Space Plasma: A Brief Review," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 32, pp. pp. 167-180, 2015.
- [44] M. Wakabayashi, T. Suzuki, J. Uemoto, A. Kumamoto, T. Ono, "Impedance probe technique to detect the absolute number density of electrons on-board spacecraft," *An Introduction to Space Instrumentation*, pp. 107-123, 2013.
- [45] 寛. 大家 , 辰. 大林, "インピーダンスプローブによる超高層プラズマ探測," 東京大 学宇宙航空研究所報告, 2, 3, pp. 1065-1079, 1996.9.
- [46] M. Wakabayashi, T. Suzuki, J. Uemoto, A. Kumamoto, T. Ono, "Impedance probe technique to detect the absolute number density of electrons on-board spacecraft," *An Introduction to Space Instrumentation*, p. 107-123, 2012.
- [47] K. Hirao, S. Miyazaki, "Rocket-borne ionospheric direct-sounding instruments," *Radio Res. Labs.*, 12, p. 357-380, 1965.
- [48] K. Hirao, K. Oyama, "An improved type of electron temperature probe," J. Geomag. Geoelectr., 22, p. 393-402, 1970.
- [49] K. Oyama, K. Hirao, "Electron temperature probe experiments on the satellite "Taiyo,"" J. Geomag. Geoelectr., 27, p. 321-330, 1975.
- [50] K. Oyama, K. Hirao, C. S. Coray, T. Kato, H. Oya, "Electron temperature probe on board Japan' s 7th scientific satellite 'Hinotori'", Proceedings of the 13th International Symposium on Space Technology and Science, pp. 1515-1523, 1812.
- [51] K. Oyama, K. Hirao, F. Yasuhara, "Electron temperature probe onboard Japan" s 9th scientific satellite OHZORA," J. Geomag. Geoelectr, 37, p. 413-430, 1985.
- [52] Koh-ichiro Oyama, Takumi Abe, Kristian Schlegel, Andrew Nagy, Jhoon Kim, Katsuhide Marubashi, "Electron temperature probe onboard Japan' s Mars

orbiter," Earth, Planets and Space, 51, pp. 1309-1317, 1999.

- [53] K.-I. Oyama, C. Z. Cheng, "Electron temperature probe," An Introduction to Space Instrumentation, pp. 91-105, 2013.
- [54] Koh-ichiro OYAMA, "Techncal information of Electron temperature probe (ETP)," 2008.
- [55] Koh-ichiro OYAMA, "Instruction Manual to check Electron temperature probe (ETP)," 2008.
- [56] 平尾 邦雄 , 小山 孝一郎, "電子温度測定器の改良, 小型化について," *東京大学宇 宙航空研究所報告*, 5, 4, pp. 495-505, 1969 年.
- [57] K. Oyama, Kunio Hirao, "A systematic investigation of several phenomena associated with contaminated Langmuir probes," *Planet. Space Sci*, 183, 24, 1976.
- [58] 平尾 邦雄,小山 孝一郎,三留 重夫,"ラングミュアプローブによる電子温度測定の 信頼性について(プローブ表面の汚れについて)," 東京大学宇宙航空研究所報告,3, 7, pp. 709-721, 1971.
- [59] Koh ichiro Oyama, Kunio Hirao, "Application of a glass sealed Langmuir probe to ionosphere study," *Review of Scientific Instruments*, 47, pp. 101-107, 1976.
- [60] NOMURA MASAYUKI, SONODA KAORU, SUMIDA TAKAHIRO, FUJIWARA YOSHIHIKO, NINOMIYA SHUN'ICHIRO, CHO MENGU, "小型衛星 Qsat ミッ ションであるプラズマ測定機器開発について," *日本航空宇宙学会西部支部講演会講 演集*, pp. 29-30, 2008.
- [61] "QSAT-EOS Official Website," http://www.qsat-eos.com/.
- [62] 麻. 茂, "第 18 回 小型衛星の特徴や利点について," Journal of The Remote Sensing Society of Japan, 34, pp. 33-35, 2014.
- [63] 児. 哲哉, "ELMOS 衛星群計画: GPS 掩蔽・電子密度・電子温度同時観測衛星群が 拓く多分野横断的観測," 第 54 回宇宙科学技術連合講演会.
- [64] 児玉,小山,鈴木,芳原, "ELMOS とマイクロ衛星群による電子温度・電子密度・ GPS 掩蔽観測の提案," 第10回宇宙科学シンポジウム,2010年1月.
- [65] "地球電磁環境モニター衛星群: ELMOS Constellation," http://www.geocities.jp/ELMOS_WG/.
- [66] Yen, "Earth Observation Mission Planning Beyond," *JAMSTEC* セミナー, 2009 年 8 月 27 日.
- [67] 小澤, 多田,青山, "GPS 掩蔽観測の気象庁全球数値予報モデルへの同化の試み," 日本地球惑星科学連合大会, 2004 年.

[68] 竹内, "数値天気予報における衛星データ利用の現状," AMSR/GLI Workshop, 2007.

- [69] "COSMIC-1," http://www.cosmic.ucar.edu/satStatus/index.html.
- [70] 若林 誠, 小野 高幸, 鈴木 朋憲, "インピーダンス・プローブを用いた大型スペー スチェンバー内の電子密度分布," スペース・プラズマ研究会, pp. 72-75, 2007 年 6 月.
- [71] Katsumi Hattori, Shinji Hirooka, Mayuka Kunimitsu, Takashi Ichikawa, Peng Han, "Ionospheric anomaly as an earthquake precursor: Case and statistical studies during 1998-2012 around Japan," *General Assembly and Scientific* Symposium (URSI GASS), 2014 XXXIth URSI, October 2014.
- [72] 奥平 清昭, 吉森 正人, 平島 洋, 近藤 一郎, Evans W.D., Klebesadel R.W, "ひのと りによる宇宙ガンマ線バーストの観測," *年会講演予稿集*, 1, p. 82, Sep 1982.
- [73] 田中 靖郎, "太陽フレア観測衛星「ひのとり」," *日本物理學會誌*, 3, pp. 189-192, Mar 1982.
- [74] 大木 健一郎, "「ひのとり」が見た太陽フレアの硬 X 線像," 日本物理学会誌, 9, pp. 733-736, 1983.