

0. 宇宙天気研究とは

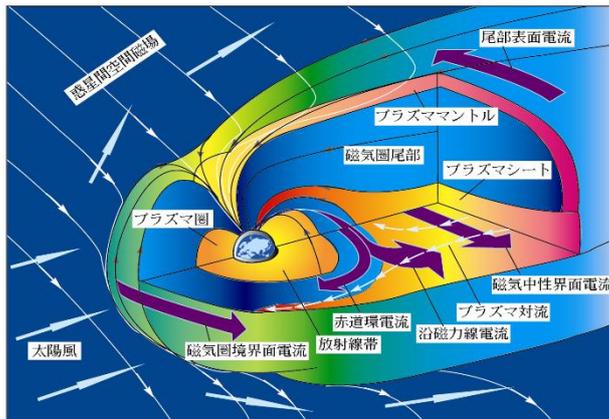
地上から高度 100 キロメートルから約 10 万キロメートルの領域は、既に多くの人工衛星が飛翔している領域であり、すでに人類の生活圏となりつつある領域です。この領域は、また、地球の磁場の勢力範囲として知られており、「宙空」とも呼ばれています。一方で、太陽からは高エネルギー粒子や、太陽風と呼ばれる高速プラズマ流が常時吹き出しており、これらのプラズマ流や太陽風中の磁場が地球の磁場と相互作用を起し、宙空には磁気圏と呼ばれる特殊な電磁環境が形成されます。特に、太陽面で爆発現象などが起きたときには、宙空では非常に強い電磁擾乱が発生する事が知られています。現在でも、このような電磁擾乱が起きたときには、宇宙飛行士には放射線被曝の危険があるため遮蔽の厚いモジュールなどへ避難する運用がされています。

このような宙空領域の電磁擾乱によって引き起こされる被害は、人体に対するものの他に、「人工衛星の帯電による故障」、「高エネルギー粒子による人工衛星のコンピュータの誤作動」、また地上でも、「高緯度地方における発電所の変圧器の故障」、「電離層擾乱による航空無線の不通」など枚挙に暇がありません。宇宙天気研究とは、このような宙空環境の電磁擾乱を地上の天気の様子に捉え、将来、宇宙天気予報を確立することを目的に、

(1) 放射線環境 (2) 電磁環境 (3) 大気プラズマ環境の変動物理過程を解明することです。

0.1 宙空環境の基本物理

宙空環境の物理学は、「太陽」「太陽風」「地球磁気圏」という3つの要素が複合しているところに特徴があります。この3つの領域を結びつけているのは、「電磁気学」と「プラズマ物理学」です。プラズマとは、物質の第4の状態と呼ばれる状態です。例えば、氷は個体ですが、温度を上げていくとやがて液体の水になり、さらに温度を上げていくと気体の水蒸気になります。これが物質の3つの状態ですが、気体からさらに温度を上げていくと、最後は電子と陽子がバラバラになった状態になります。これがプラズマという状態です。プラズマはプラスの電荷とマイナスの電荷が混在した状態を保つために、巨視的には中性気体の様な運動をしますが、同時に電荷を持つために電場や磁場に運動を支配されます。一般に、宇宙空間を構成する物質の99%以上はプラズマの状態で存在する事が知られており、「太陽」「太陽風」「磁気圏」を構成する粒子たちもプラズマの状態で存在します。



地球磁気圏の断面図

1. ニューラルネットワークを用いた静止軌道高エネルギー電子フラックスの予測に関する研究

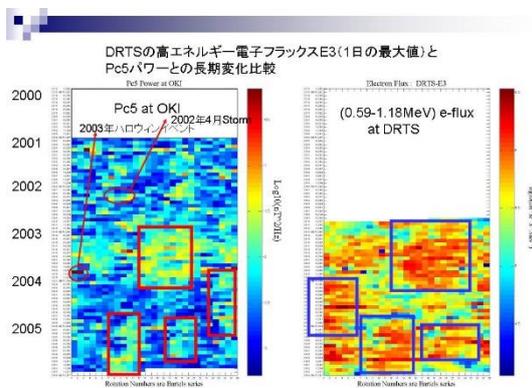
現在、地球近傍を周回する人工衛星の用途は、通信、放送、気象観測、科学観測、測地、技術試験、など多岐にわたっており、いまや社会インフラの一部として欠かせない役割を担っています。しかし一方で、静止軌道を含む内部磁気圏中では人工衛星は常に厳しい放射線環境に晒されており、特に磁気嵐の回復相では MeV 以上の高いエネルギーを持った電子（以下、MeV 電子と呼ぶ）のフラックスが大きく増加することが知られています。これらの MeV 電子は、人工衛星の内部帯電を引き起こし衛星システムに重大な障害を発生させることがあることが報告されています[趙・藤井(2003),藤井・西本（1992）等]。このような障害を未然に防ぐために、静止軌道における MeV 電子フラックスの変動を予測することは、宇宙天気予報の観点からも、国際的な宇宙開発における緊急の課題であるといえます。

MeV 電子の増加に関する研究は、1990 年代以降多くの研究がなされており、いくつかの有力な加速モデルが提唱されています。中でも周期 150 から 600 秒の Pc5 と呼ばれる地磁気脈動が MeV 電子の生成・加速機構に大きく寄与しているという報告が近年注目を集めています[Elikington et al, 1999, 2003; Summers and Ma, 2000]。観測的には、地上オーロラ帯で観測された Pc5 脈動と静止軌道上の MeV 電子フラックスの増加に良い関係があることが示されています[Mathie and Mann, 2001]。

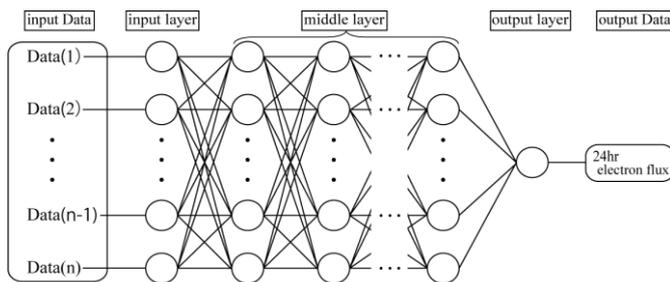
このような国際的な研究情勢のなかで、我々はこれまで、地磁気観測ネットワークのデータを用いて、周期的な地磁気微小変動である Pc5 脈動と MeV 電子フラックスの相関を調べてきました。まず、地上で観測される Pc5 変動の指数化を試み[Kitamura et al., 2007]、それらと MeV 電子フラックスの比較を行いました。その結果、中低緯度で観測される Pc5

と MeV 電子フラックスに関しても長期的な変動特性に関してきわめて良い相関を示す（図参照）一方で、原因となる太陽風擾乱の違いによって Pc5 と MeV 電子フラックスの変化との関係に違いが現れることを明らかにしてきました[北村 他(2006, 2007)]。

その一方、我々は階層型ニューラルネットワークの手法を用いて、太陽風パラメータを学習させることによって、MeV 電子フラックスの静止軌道における変動予測を行う、という試みを行ってきました。その結果、太陽風の磁場、速度、 ε パラメータ、電子フラックスの現在値、世界時、を入力として、ネットワークに 10 年分のデータを学習させることによって、24 時間先の MeV 電子フラックスの値を予測効率 0.75 以上の高い精度で予測させることに成功しました[徳光 他(2007)]。



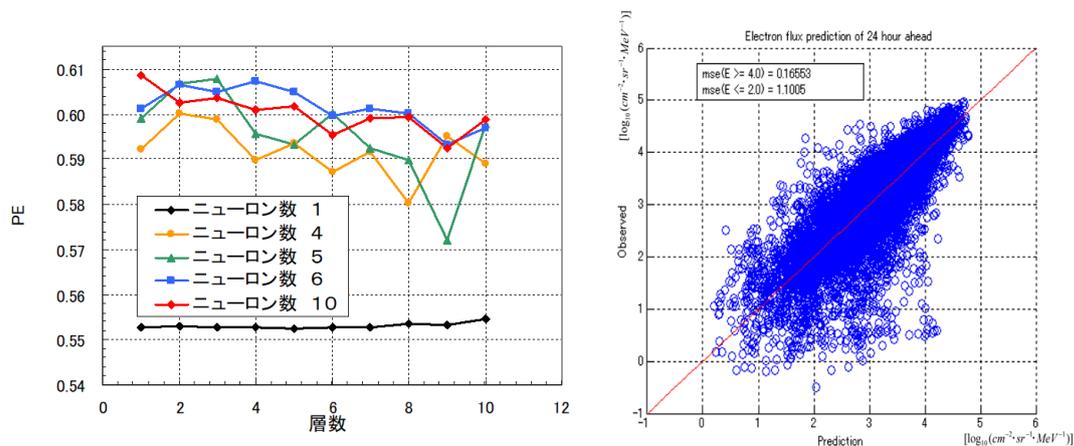
図：静止軌道上の DRTS 衛星で計測された高エネルギー (MeV) 電子フラックスと、沖縄で観測された Pc 5 地磁気脈動の強度との長期変化比較。横軸は、太陽自転周期の 27 日でソートされている。Pc5 と MeV 電子フラックスの変化は、回帰性の太陽風擾乱に対して、きわめてよい相関があることが分かる。[北村 他 (2006) より引用]



繰返し学習回数：1000
計算終了条件：E < 0.01

$$\text{二乗誤差 } E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (t_k - o_k)^2$$

図：階層型ニューラルネットワークのモデル



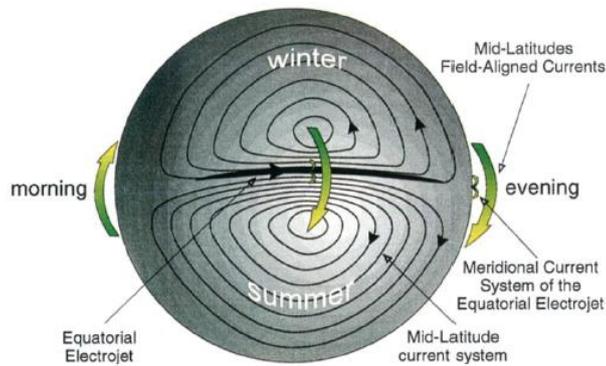
図：階層型ニューラルネットワークによる 24 時間後の静止軌道 MEV 電子フラックスの予測効率の検証

2. CubeSat による低高度電離層の観測研究

高度 100km から上空の電離層には昼側を中心に南北半球それぞれに渦を持つ電離層電流が流れています。これらの電離層電流は主に下層の中性大気の潮汐風によって励起されていますが、同時に太陽風じょう乱等による磁気圏のプラズマ変動にも大きく影響されています。この電流は、特に太陽活動の静穏時によく観測されることから、Sq (Solar Quiet) 電流と呼ばれ、宇宙空間との電磁気的な結合を担っていることから、地球のグローバルな気候システムを理解するうえで大変重要な役割を果たしていると考えられています。

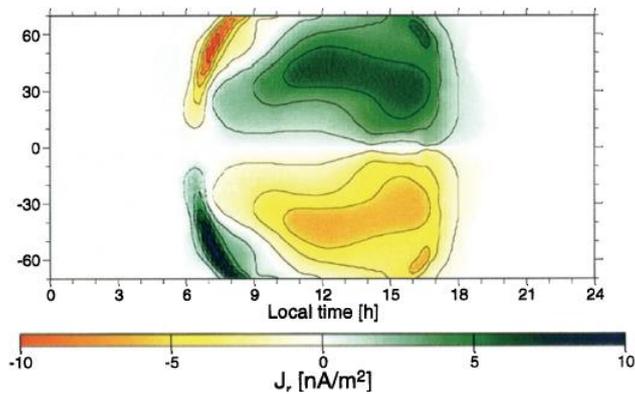
Sq 電流の研究は、磁気圏—電離圏結合の観点から古くから様々な研究者によって行われてきました。特に、南北半球ではポテンシャルに差があることが知られており、こうしたポテンシャル差は磁力線を介した南北半球間のエネルギー輸送を示唆しています。このような、南北半球間でのポテンシャル差を説明するために、南北半球をつなぐ中緯度の沿磁力線電流 (InterHemispheric Field Aligned Current: IHFAC) の存在が、理論的に予測されており (Maeda [1974] and Fukushima [1979, 1991])、地上の多点磁場観測からも、こうした存在が示唆されてきています (Takeda 1990; Stening 1989; Fukushima 1994)。しかしその一方で、低高度の人工衛星観測による IHFAC の観測は極めて例が少なく (Yamashita and Iyemori, 2002)、直接観測による電流の詳細な特性や振る舞いに関しては未だ十分な理解がされていません。

Sketch of FAC at Middle latitude
(after an idea by Fukushima [1994])



(Olsen, 1997)

Radial component of middle latitudes FAC
(redrawn after Richmond and Roble [1987])



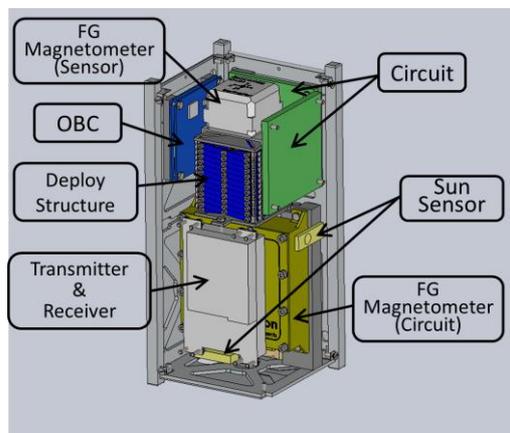
(Olsen, 1997)

図（上）：Sq 電流系に概念図

図（下）：地上観測から推定される IHFAC の分布

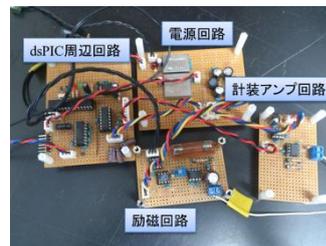
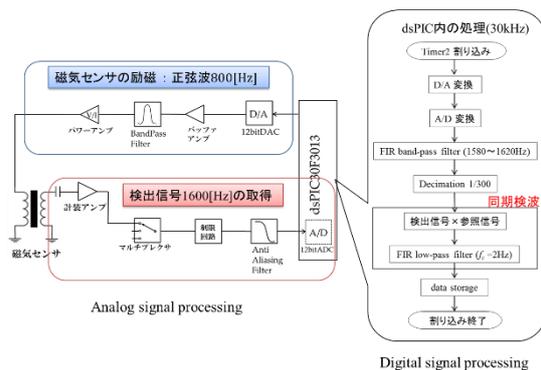
こうした課題に関して我々は2UサイズのCubeSatを用いた超低高度での電離層観測計画を立案しています。高度400km以下での衛星運用は高度維持が困難となるため運用寿命を考慮した場合採算の取れる計画を立案することは極めて難しい状況です。これに対して、CubeSatによる電離層の直接観測は通常の衛星と比べてミッション寿命を短く設定しても観測にかかるコストは大幅に削減でき、今後複数複数衛星によるクラスター観測への展開も期待できます。

我々のグループではこうした観測計画のための様々な要素技術の開発を進めています。



図： 開発中の 2U-CubeSat の概念図

デジタル磁力計の信号処理



デジタル磁力計の外観図

図： CubeSat 用デジタル FG 磁力計の BBM

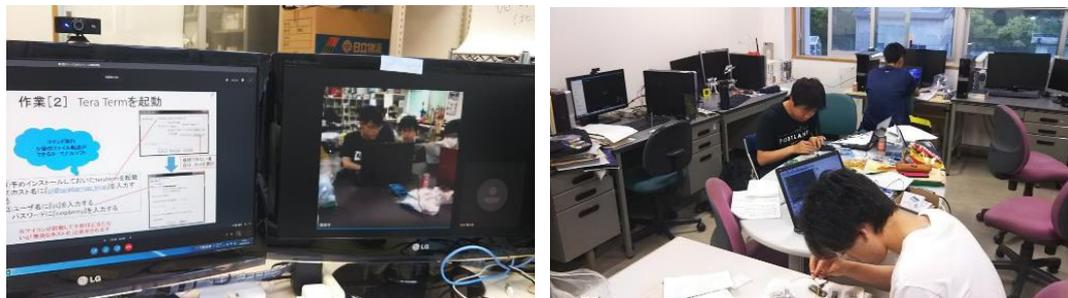
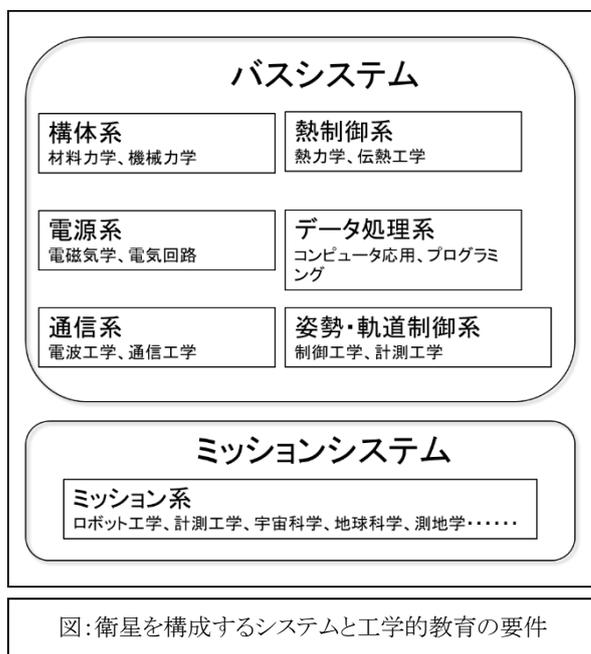
3. CubeSat 開発の基礎技術教育への応用

人工衛星開発は、科学・工学的な目的（ミッション）を達成するために、複数の要素技術（サブシステム）を複合した実践的な複合技術開発の好例です。こうした、実際の複合技術開発の具体的な取り組みをテーマに、エンジニアリング・デザイン教育のより実践的な教育プログラムを構築し、その教育の質保障システムを確立することは、国際的な競争に耐えうるエンジニア育成のための技術者教育改革において中心的課題であると考えています。

我々は、近年大学等で開発が活発化している超小型人工衛星「CubeSat」を用い、学士課程を対象とした工学系技術者教育への包括的な教育手法の開発を行っています。先行する

研究成果を踏まえて、(1) 学生が参画する実際の CubeSat 開発、(2) CubeSat 開発を題材とした学士課程のエンジニアリング・デザイン教育、(3) CubeSat を題材とした課外活動・アウトリーチ活動への展開、の3つのレベルの取り組みを試行して、それぞれのプログラムの質保障のための、参画学生の基礎的・汎用的能力、専門的应用能力の評価方法の開発、を主軸とした質保障システムまでを含むエンジニアリング・デザイン教育プログラムを構築することを目指しています。

最終的に完成したプログラムは、航空宇宙工学の専門科目としてではなく、汎用的な工学教育の PBL 科目として、任意の工学系学科での波及させることを目指します。



図：TV 会議システムを使った PBL ワークショップの様子



図：キャンプ形式の CubeSat ワークショップの様子