宇宙総合学研究ユニット NEWS 2017 年 7 月号

開催報告：宇宙天気と惑星ハビタブルゾーンに関する国際シンポジウム

平成 29 年 6 月 27 日・28 日に、宇宙総合学研究ユニット・大学院総合生存学館（思修館）・理学研究科附属天文台の主催で「宇宙天気と惑星ハビタブルゾーンに関する国際シンポジウム」を東一条館にて開催し、太陽フレアや恒星フレアが、惑星の進化や生命の誕生にどのような影響を与え、かつフレアの発生予測や評価を今後どのように進めてゆくかについて広く議論を行いました。

シンポジウムでは、Faint Young Sun paradox（暗い若い太陽のパラドックス）を、初期太陽からの高エネルギー粒子や電磁波による初期地球大気での温室効果ガス生成メカニズムによって説明した NASA/GSFC (ゴダード宇宙飛行センター）の Vladimir Airapetian 博士が記念講演を行いました。博士は、「宇宙天気の影響を受けるハビタブルゾーン」と題して、現在行われている様々な恒星観測や数値計算結果の紹介と、恒星風の影響を考慮した新たなハビタブルゾーンの定義について紹介し、会場を巻き込んで広く議論を行いました。

本シンポジウムでは宇宙総合学研究ユニットから、山敷庸亮 教授（副ユニット長）による系外惑星データベース ExoKyoto およびフレア影響評価モジュールの紹介がありました。さらに、柴田一成 教授（副ユニット長/花山天文台長）によるスーパーフレアに伴うコロナ質量放出と地球への影響に関する最新研究の紹介、磯部洋明 准教授による歴史文献による過去の太陽巨大フレアの解析の研究紹介、佐々木貴教 助教による水惑星形成シミュレーションの紹介などがありました。そのほか、前原裕之 国立天文台専門研究員らによる太陽型星のスーパーフレアと巨大黒点との関係などに関する発表がありました。

Airapetian 博士とは、今後の NASA との様々な観測活動における研究協力と、系外惑星データベースの改良や協力について議論し、継続的に連携してこれらの活動を進めてゆくこととなりました。

シンポジウムのフライヤーと V. Airapetian 博士（NASA/GSFC）による記念講演の様子（6 月 27 日）

「宇宙科学コミュニケーション論研究会」の新設

宇宙ユニットでは広い分野の研究者と協力し、研究者・大学生・大学院生の自由な発想からボトムアップ的に様々な研究グループを立ち上げ、独自の思想を大切にしつつ、研究会同士の連携協力も行い宇宙研究を広げています。これまで、有人宇宙計画研究会・宇宙人文学研究会・BBT 宇宙天気予報研究会・宇宙倫理学研究会・歴史文献天文学研究会・京都宇宙人類学研究会・環境災害研究会・宇宙生物学研究会・宇宙木材利用研究会の９つの研究会が活動を行ってきました。今回、新たに「宇宙科学コミュニケーション論研究会」を設置いたしました。宇宙科学コミュニケーション論研究会の趣旨・活動内容は次の通りです。

宇宙科学コミュニケーション論研究会

巨大なリソースを要するビッグサイエンスでありながら社会にとってどんな利益をもたらすかが見えにくい宇宙科学にとって、社会との関係を考えることは常に重要です。特に基礎研究への投資の是非を巡って議論がなされている近年の状況を顧みれば、宇宙科学が発展を続けていくためには、それが社会の中で占める位置を再考し、新しい関係を築いていくことが不可欠とも言えるでしょう。そこで本研究会は、宇宙科学に関する世論を調査し、宇宙科学と社会の間の新しい形のコミュニケーションを開拓し、さらには長期的な視点に立って両者の望ましい関係性を構想することに取り組んでいきます。文系／理系を問わず、宇宙と社会、科学と社会の関係に関心をもつ様々な方の参加を歓迎します。

暫定的アジェンダとしましては、2017 年 3 月に実施した宇宙開発に関する世論調査の結果分析を行うと同時に、理論的側面では宇宙科学コミュニケーションの現状の調査と課題の分析、実践的側面では新しい科学コミュニケーション形態の考案と実践に取り組んでいく予定です。

※ 参加希望者は呉羽（kureha.makoto.7r@kyoto-u.ac.jp）までご連絡ください。

宇宙ユニットが関係する講義・セミナー・イベント情報等

日時	内容	場所など
7月5日（水） 16:30—18:00	第 5 回宇宙学セミナー（主催） 吉永大祐 氏（早稲田大学 博士課程） 「ファンか、市民か、消費者か—— ソーシャルメディア時代の宇宙科学と公衆」	会場：京都大学 東一条館 1 階 121 号室 学生・研究者対象
7月6日（木） 19:00～	第 21 回 お寺で宇宙学（共催） 内田裕之 氏（理学研究科 助教/宇宙ユニット） 「星の死と生命」 菅原信顕 氏（真宗大谷派 澄江寺 住職） 「仏教の力の話」	会場：真宗大谷派 小野山 浄慶寺（中京区） 一般向け
7月 13 日（木） 16:00—17:30	第 6 回宇宙学セミナー（主催） 中串孝志 氏（和歌山大学 准教授） 「観光からみた宇宙—— 南紀熊野ジオパーク、お月見カフェ、超小型衛星 UNIFORM-1」	会場：京都大学 理学研究科 4 号館 127 号室 学生・研究者対象

惑星磁気圏 MHD シミュレーション研究の紹介

深沢　圭一郎　准教授
（京都大学　学術情報メディアセンター）

惑星磁気圏

固有磁場を持つ惑星では、太陽や恒星からの吹き出している磁場を伴ったプラズマ（太陽風や恒星風）と固有磁場が相互作用して、磁気圏という領域を形成しています。この相互作用により宇宙嵐や地磁気嵐が引き起こされています。そのため、惑星磁気圏の研究は私たちが生きる宇宙を理解するために非常に重要です。磁場は目に見えないので、想像図となりますが、図 1 のような構造をしていると考えられています。

地球、木星、土星の電磁気的特徴を表 1 に示していますが、木星や土星には地球と同様に固有磁場が存在し、その周辺に磁気圏が形成されています。また自転周期が木星は 10 時間、土星は 10.65 時間と短く、地球と比べて高速に回転しています。さらに、木星はイオ、土星はエンケラドスという月を持っており、そこから大量のプラズマが磁気圏に供給されています。このような特徴により、地球、木星、土星はそれぞれ異なった磁気圏を構成していると考えられています。木星や土星においても、探査機により観測が多数行われており、木星では Galileo 探査機、土星では Cassini 探査機が数年にわたって惑星を周回観測したことで、観測データも比較的あり、精力的な研究が行われています。

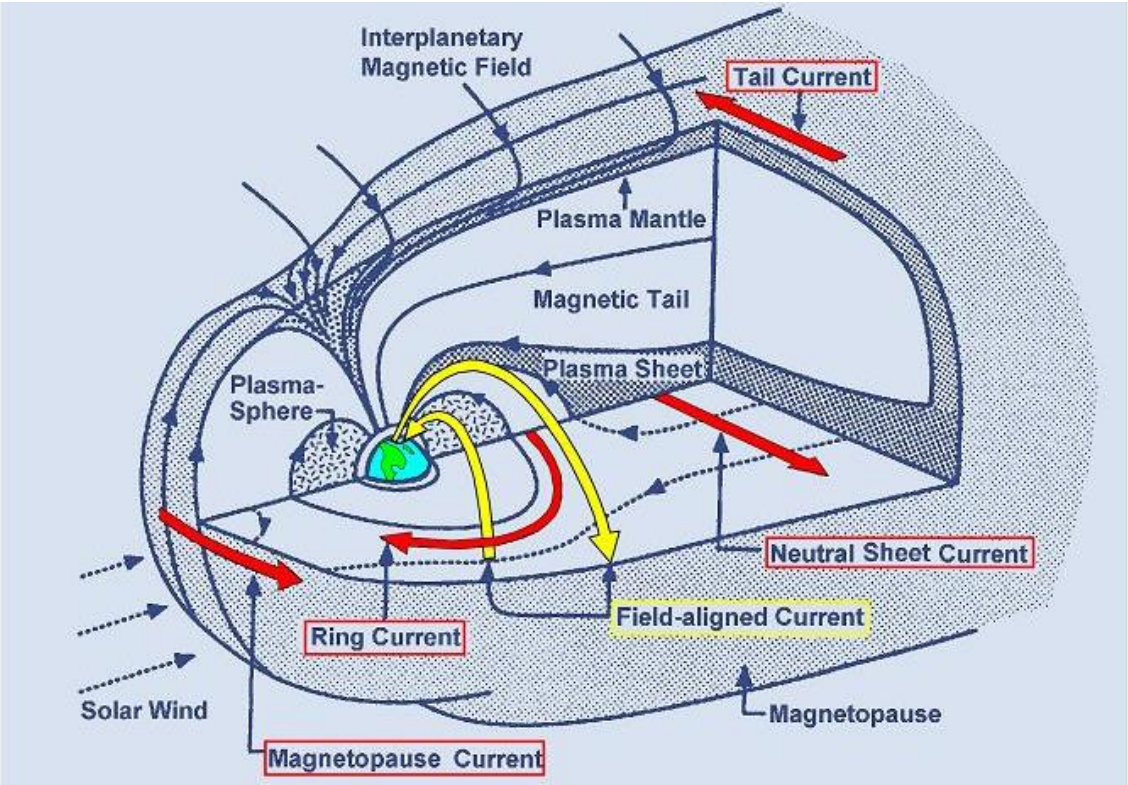

図 1. 磁気圏構造 (modified from Kivelson and Russel [1995])

表 1　地球、木星、土星の特徴

	固有磁場 [nT]	磁極	自転周期 [hr]	プラズマ源	赤道半径 [km]	太陽からの距離 [A.U.]
地球	31,000	N 極が南	24	電離圏	6,378	1
木星	420,000	N 極が北	10	イオ、電離圏	71,492	5.2
土星	21,000	N 極が北	10.65	エンケラドス、電離圏	60,268	9.55

MHD シミュレーション

探査機による観測では、3 次元構造や時空間変動分離が難しいこともあり、数値シミュレーションによる磁気圏研究も行われています。物理シミュレーションを行うためには、その場で起きる現象の支配方程式が必要となりますが、宇宙プラズマの振る舞いを記述する方程式として Vlasov-Maxwell 方程式があります。これは、無衝突 Boltzmann 方程式と Maxwell 方程式から成る方程式系で、宇宙プラズマの振る舞いを正確に記述できます。しかし、Vlasov 方程式は速度分布関数を解く時間発展方程式で、計算機を利用しても磁気圏スケールでその方程式を解くことは困難です。そこで、Vlasov 方程式のモーメントをとることで求められる電磁流体力学（MHD）方程式が、磁気圏のようなグローバルなプラズマ構造を調べるときには使用されています。簡単に言うと MHD 方程式は Vlasov 方程式の運動論的効果を無視することで得られ、以下のような形となっています。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{v}\rho) + D\nabla^2 \rho$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} - \frac{1}{\rho}\nabla P + \frac{1}{\rho}\vec{J} \times \vec{B} + g + \frac{\mathbf{\Phi}}{\rho}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla)P - \gamma P \nabla \vec{v} + D_P \nabla^2 P$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B}$$

$$* \vec{J} = \nabla \times (\vec{B} - \vec{B}_d)$$

上から、連続の式、運動方程式、圧力変化の式(エネルギーの式)、最後が磁場の誘導方程式です。ここで ρ はプラズマの密度、$\vec{v}$ は速度、P はプラズマ圧力、$\vec{B}$ は磁場、$\vec{J}$ は電流密度、$D = D_p$ は拡散係数、g は重力加速度、$\mathbf{\Phi} \equiv \mu\nabla^2\vec{v}$ は粘性、$\gamma = 5/3$ は 3 次元の比熱定数、η は電気抵抗を示します。$\vec{B}_d$ は惑星の固有磁場です。

このMHD方程式を計算機で解くための数値計算法はいくつかありますが、私はModified Leap Frog法と呼ばれる中心差分数値解法を使用して、シミュレーションを行っています[Fukazawa *et al.*, 2006]。磁気圏という巨大な構造全体を高精細に計算する必要があるので、計算にはスーパーコンピュータが利用され、1 年間かけて計算することも珍しくありません。

図 2 に地球磁気圏の MHD シミュレーション結果の例を載せています。ここでは磁力線を緑、黄、ピンクの線で、カラーはプラズマの圧力を示しています。左側から太陽風が吹いてきており、地球から見て反太陽側にある磁力線の色が緑からピンクに変わる領域で磁気リコネクションと呼ばれる現象が起きています。

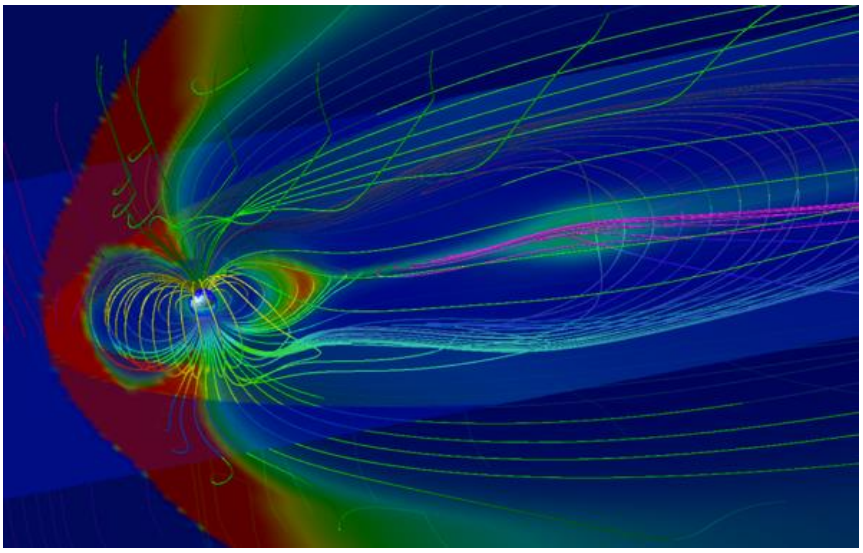

図 2. 地球磁気圏の MHD シミュレーション結果

また、図 3 には土星磁気圏 MHD シミュレーションから計算された極域での電流分布を載せています。赤色は土星に入る電流、青色は土星から出て行く電流を示していますが、この青色部分がオーロラの輝きに関連があると考えられています。土星では図 4 のような Cassini によるオーロラの撮像があり、そこに斑点状の構造が見えてい

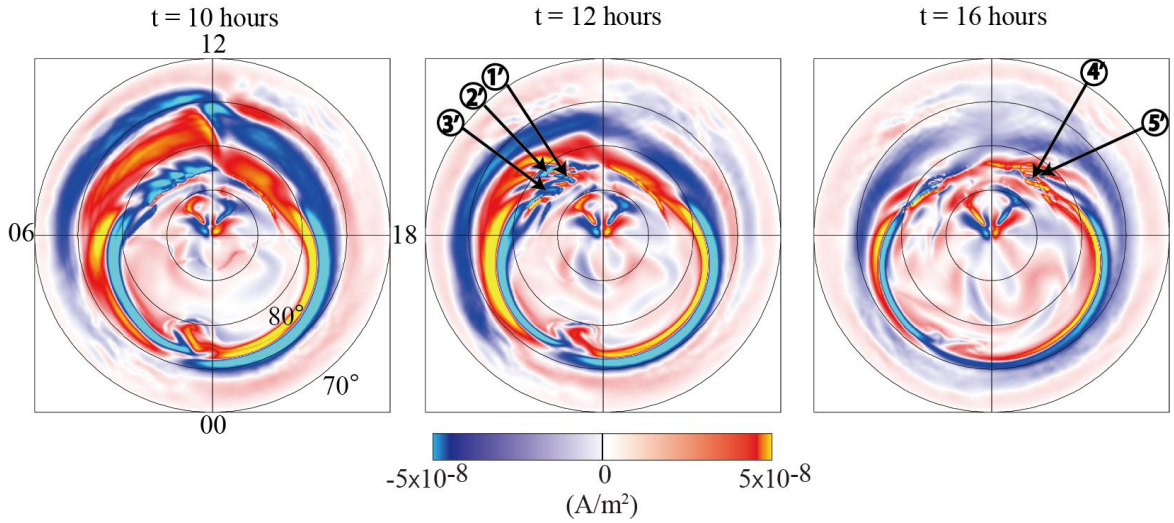

図 3. 土星磁気圏 MHD シミュレーションから計算された極域沿磁力線電流構造[Fukazawa *et al.*, 2012].

ます。図 3 のシミュレーション結果でも番号が振られている箇所に斑点状の構造が現れており、観測の斑点構造を表していると思われます。観測ではこの構造がどこから来るのか、解析が難しいですが、シミュレーションでは磁気圏の 3 次元構造、時間変化も分かるため、解析が行えます。詳しい説明は省きますが、図 4 に示してある赤道面の土星磁気圏で見える磁気圏界面沿いのプラズマ渦構造が、この斑点構造の原因であることが分かっています。

このように MHD シミュレーション研究は磁気圏研究において強力なツールとなっています。現象の再現だけで無く、予測もシミュレーションは行えますので、研究が進むことで、高精度な宇宙天気予報にも繋がることが考えられます。磁気圏シミュレーションについてご興味がある方は、是非お知らせください。

[1] Margaret G. Kivelson , Christopher T. Russell 編 , 『Introduction to space physics』, Cambridge University Press, 1995.

[2] Fukazawa, K., T. Ogino, and R.J. Walker, "The Configuration and Dynamics of the Jovian Magnetosphere", J. Geophys. Res., 111, A10207, 2006.

[3] Fukazawa, K., T. Ogino, and R. J. Walker (2012), A magnetohydrodynamic simulation study of Kronian field-aligned currents and auroras, J. Geophys. Res., 117, A02214, doi:10.1029/2011JA016945.

[4] Grodent, D., J. Gustin, J.-C. Gérard, A. Radioti, B. Bonfond, and W. Pryor (2011), Small-scale structures in Saturn's ultraviolet aurora, J. Geophys. Res., 116, A09225, doi:10.1029/2011JA016818.

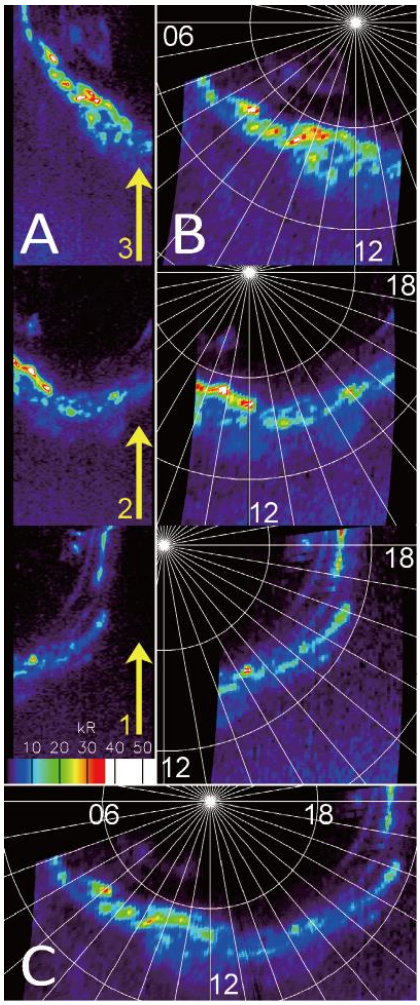

図 4. Cassini 探査機による土星極域 FUV 画像（UVIS spectro-imager on DOY 239 of 2008）[Grodent *et al.*, 2011].

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 403 号室

Tel＆Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp