

宇宙探査機 Cassini からみた惑星 Saturn の磁気圏の諸問題

Problems on Saturn's Magnetosphere Observed by Spacecraft Cassini

中 村 重 久

SHIGEHISA NAKAMURA

2010 年 8 月 9 日

2010 August 9

まえがき

Preface

京都大学では、1950 年ころに、当時の世界的事情もあって、日本における研究教育の存続の危機にありながら、なお、大学の使命である研究教育の芽を絶やすことのないようにする努力があった。当時、食糧事情のみならず国際事情などに対処するために、不在となった行政の役割の一端をになって、国民の生活の確保と国際的視野をもった政策とに、有益と考えられるあらゆることについて、問題解決に努力した。

南極観測事業は、当時の国際社会に、日本が参加した代表的なもので、事実上、人的にも、技術的にも、経済的にも、国家事業として十分なものであった。すでに、欧米による南極観測研究計画の国際会議にオブザーバーとして出席した日本は、計画参加の意思表示を強力に表明した。

そのころ、米ソの人工衛星打上の実施も近い時期であった。21 世紀には、人工衛星は、地球上の通信、観測の成果を利用して、社会生活も便利になっている。

人工衛星の技術の確立とともに、宇宙空間への知識を求めて、太陽系外の情報も要求されるようになってきた。1990 年代までには、木星探査機が活躍し、2000 年過ぎには、土星探査機が観測データを地球上の研究者にもたらした。ここに、惑星 Saturn の探査機による観測について多くの研究が現れるようになった。

本文では、表題に示したように、宇宙探査機 Cassini による惑星 Saturn のデータのうち、とくに、磁気圏の関連問題についての最近の研究例を紹介し、その問題点を明らかにし、また、今後の研究のための鍵を探ろうとするための参考としたいと考えた次第である。

Kyoto University started a new research project not only for the Japan but for the World in the early 1950. A shadow "Research Institute" had been formed in order to activate the aggressive works by the staff and the citizen people to obtain a stable citizen life as the base of the social activity not only for Japan but for World.

The project of the Antarctic Observations at the starting stage, the members were the representatives from western Europe and from the USA, where an observer from Japan declared to participate to the Project as a member after the meetings' agreements successfully.

At that time, a hot race was for launching the first artificial satellite in the world. The focused interest was "US-the first" or "the Soviet-the first" for the satellite. In this 21st century, the satellites help for communication, monitoring the earth surface, and for social activities.

After the satellite launching techniques, a new projects have been started to survey the planets in the solar system. The spacecraft Jupiter was launched in early 1990s to report about scientific news about the planet Jupiter. Following this, the spacecraft Saturn launched in early 2000s to send a set of data for the space scientists.

In this text, one of the recent scientific researches about the planet Saturn monitored by the spacecraft Cassini, is introduced in order to have an overview for promote the related researches and for finding a key to have an advanced research work.

著 者
Author

宇宙探査機 Cassini からみた惑星 Saturn の磁気圏の諸問題
Problems on Saturn's magnetosphere observed by Spacecraft Cassini

中村重久
Shigehisa Nakamura

1. はじめに

宇宙探査機 Cassini によるデータを解析して、惑星 Saturn の磁気圏についての研究成果も、多数発表されるようになってきた。ここでは、現在の惑星 Saturn の磁気圏の研究の成果があらわれるまでに、どのような経過を経てきたかについて述べる。これによって、惑星地球磁気の問題と惑星 Saturn の磁気圏の問題とのつながりが明確になるものと考えられる。

2. 惑星 Saturn の磁気圏の最近の研究

宇宙探査機 Cassini による観測記録が利用されて、惑星 Saturn の磁気圏に関連したいろいろの問題についての研究が、多数例にわたり、発表されるようになってきた。

ここでは、惑星 Saturn の関連の研究のうち、磁気圏の問題の国際的な共同研究グループの例 (cf. Rymer et al., 2009) を参考にして、ここまでの研究にいたるまでの経過を、年代的に追跡して、研究の背景と方向とについての検討をすることにしたい。

3. 惑星の磁気圏の研究経過について

ここで、一連の宇宙探査機打上計画が、主として、NASA によって推進されてきたと同時に、これに平行して、太陽系惑星のうちでも、惑星 Jupiter の衛星および惑星 Saturn の環と衛星についての観測データの解析結果についての論文や報告が多くなってきていることに注目しなくてはならない。

ちなみに、関連した年代と国際的な研究者グループの形成過程の概要をみると、以下のようになる (たとえば、ここには、参考にした資料の一部についての例を示す)。すなわち、

(1) 宇宙探査機打上以前

宇宙探査機打ち上げに先立って、地球上から、宇宙探査ロケットなどの打上計画が実施された。また、このようなロケット技術を応用して、地球周回軌道をもつ人工衛星が多数打上げられ、地球表面の観測に利用され、また、現在では、いろいろの目的で利用されている。

1957-Rosenbluth,M.N., Longmeire,C.L. (Stability of plasma confined by magnetic fields)

(2) 宇宙探査機 Galileo 打上以後

宇宙探査機 Galileo は、惑星 Jupiter の観測を主目的として、1989 年に打ち上げられた。

1983-Hill,T.W., (Longitudinal asymmetry of the Io plasma Torus)

1986-PontiusJr.,D. Hill,T.W., (Steady state plasma transport in a magnetosphere)

1989-Spacecraft Galileo-Launched (Jupiter-round/Meteorites)

1990-Pontius Jr.,D.,Wolf,R. (Transient flux tubes in the terrestrial magnetosphere)

1997-Kiverson,M.,Kuharana,K.,Russell,C.,WalkerR., (Magnetic anomalies in the Io Torus)

1997-Bolton,S.,Thorne,R.M.,Gurnett,D.,Kurth,W.,Williams,D., (the Io Torus)

(3) 宇宙探査機 Cassini 打上以後

宇宙探査機 Cassini は、土星観測を主目的として、1997 年に打上げられ、2004 年、土星到達。

1997-Cassini-(Launched and arrived in 2004 to Saturn)

-
- 2004-Gurnett,D.A., (Cassini radio and plasma wave investigation)
2004-Krimigis,S.M., et al. (MIMI-Cassini mission to Saturn/Titan-Instrumentation)
2004-Young,D.T., et al., (Cassini Plasma Spectrometer investigation)
2004-Sergeev,V., (Bursty bulk flows and their ionospheric footprints-Earth's magnetosphere)
2004-Dougherty,M.K.,Smith,E.J.,Tsurutani,B.T.,Russel,C.T., (Cassini magnetic field)
-
- 2005-Andre,N.,Dougherty,M.K.,Leisner,J.S.,Khurana,K.K., (Saturn inner magnetosphere)
2005-Burch,J.L.,Goldstein,J.,Hill,T.W.,Young,D.T.,Cray,F.J.,Coates,A.J.,Andre,N.,
2005-Hill,T.W.,Rymer,A.M.,Burch,J.L.,Cray,F.J.,Young,D.T.,Thomsen,M.F.,Delapp,D.,
Andre,N.,Coates,A.J.,Lewis,G.R., (in Saturn magnetosphere)
2005-Sittler, et al., (Saturn's inner plasmasphere)
2005-Mauk,B.H.,Saur,J.,Mitchell,D.G.,Roeluf,E.C.,Brandt,P.C.,Armstrong,T.P.,
Hamilton,D.C.,Krimigis,S.M.,Livi,S.A.,Manweiler,J.W.,Paranicas,C.P., (Saturn's)
2005-Krimigis,S.M.,Mitchell,D.G.,Hamilton,D.C.,Krupp,N.,Livi,S.,Roelof,E.C.,Cheng,A.F.,
Choo,T.,Gloeckler,G.,Hayes,J.,Hsieh,K.C.,Ip,W.-H.,Jaskulceck,S.,Keath,E.P.,
Kirsch,E.,Kusterer,M.,Lagg,A.,Lanzorotti,I.J.,LaVallee,D.,Manweiler,J.,
McEntire,R.W.,Rasmuss.W.,Saur,J.,Turner,F.S.,Williams,D.J.,Woch,J., (SaturnMIMI)
2006-Sittler, et al., (Saturn's inner plasma sphere)
-
- 2007-Andre,N., et al., (Saturn inner magnetosphere)
2007-Sittler, et al., (Saturn's inner plasmasphere)
2007-Parks, et al., (Earth's geomagnetic tail)
2007-Burch,J.L.,Goldstein,J.,Lewis,W.S.,Young,D.T.,Coates,A.J.,Dougherty,M.A.,Andre,N.
2007-Carbary,J.F.,Mitchell,D.G.,Krimigis,S.M.,Krupp,N., (Saturn magnetosphere)
2007-Leisner,J.S.,Russel,C.T.,Khurana,K.K.,Dougherty,M.K., (Saturnian magnetosphere)
2007-Paranicas,C.,Mitchell,D.G.,Roelof,A.M.,Mauk,B.H.,Krimigis,S.M.,Brandt,P.C.,
Kusterer,M.,Turner,F.S.,Vandegriff,J.,Krupp,N., (Saturn's neutral gas cloud)
2007-Rymer,A.M.,Mauk,B.H.,Hill,T.W.,Paranicas,C.,Andre,N.,Sittler Jr,E.C.,,
Mitchell,D.G.,Smith,H.T.,Johnson,R.E.,Coates,A.J.,Young,D.T., (Saturn's magne)
-
- 2008-Chen,Y.,Hill,T.W., (Saturn's inner magnetosphere)
2008-Schippers,P., (electron populations in Saturn's magnetosphere)
2008-Meniatti,J.D.,Santolik,O.,Rymer,A.M.,Hospodarsky,G.B.,Persoon,A.M.,Gurnett,D.A.
Coates,A.J.,Young,D.T., (Local injections seen in Saturn's magnetosphere)
2008-Rymer,A.M.,Mauk,B.H.,Hill,T.W.,Paranicas,C.,Mitchell,D.G.,Coates,A.J.,Young,D.T.,
2009-A.M.Rymer, B.H.Mauk, T.W.Hill, N.Andre, D.G.Mitchell, C.Paranicas, D.T.Young,
H.T.Smith,A.M.Persoon,J.D.Menitetti,G.B.Hospodarsky, A.J.Coates, M.K.Dougherty,
Cassini evidence for rapid interchange transport at Saturn,
[Planetary and Space Science, Vol.57, 1779-1784].
-

以上のように、2009年に印刷公表された論文には、1983年以來の惑星 Jupiter の Plasma Torus の研究計画関係者に、宇宙探査機(1989 年打上の Galileo および 1997 年打上の Cassini)に関与した研究開発関係者が加わり、論文の著者として多数参加していることがわかる。

ちなみに、T.W.Hill は、1983 年には、惑星 Jupiter の衛星 Io の Plasma Torus の研究後、継続して、宇宙探査機 Cassini の研究(2009)にも参加している。2007 年の Cassini 関連論文の Russel は、1997 年の Io Torus 論文の著者である。2008 年の Cassini 関連論文には、1997 年の Io Torus 論文の著者である Gurnett も研究に関与している。さらに、2004 年の Cassini の関連論文の、著者である Young および Dougherty は、2009 年の論文にも、その名を連ねている。研究計画の基本構想に関与の研究者が、その後の若い研究者とともに、25 年を超える、長期間にわたり、データ解析に携わり、研究成果のとりまとめにおける責任を果たしている。

4. 宇宙探査機 Cassini による惑星 Saturn の磁気とプラズマの研究の現在について

ここで、2009 年の A.M.Rymer らによる“宇宙探査機 Cassini からみた惑星 Saturn における電磁プラズマ現象”の要点を、紹介することにする (Ryer, et al., 2009)。

この概要は、次の通りである。すなはち、宇宙探査機 Cassini による観測では、惑星 Saturn の内側磁気圏に向かってプラズマ流入が少なからず認められることが判明している。そこで、Rymer, et al.(2009)は、Cassini が Saturn の赤道面における観測時に捉えた、“新しい” plasma-bubble について述べることにする。この bubble の一群は、Saturn の赤道面において、その半径の約 7 倍の距離に認められ、その周辺約 0.25 Rs ($R_s=60330$ km/Saturn の半径)の範囲に散らばっている。この現象が現れているときには、bubble 群の電子密度は、およそ 1/1000 程度小さくなっていて、その電子温度は、周辺よりも大きくなっている。流入する plasma の磁場(49nT)は周辺の磁場(46nT)よりも少し大きい値である。この plasma bubble 内部の pitch angle の分布および plasma drift の測定値をモデル化して、bubble の発生が認められる位置の推定を試みた。この bubble 発生は $9 < L < 11$ (単位は Rs), その中心に向かう速度は、ばらつきがあるが、およそ 260 km/s 前後である。Pontius et al.(1986)による地球の内側磁気圏の磁場における侵入速度に対応した計算例では、最大 140 km/s である。これらの速度計算値は、宇宙探査機 Galileo が、惑星 Jupiter に近い衛星の例 (IoTorus) について Thorne et al.(1997)がもとめた速度に近い。このような結果から、ここで検討の対象とした両惑星では、同様な過程が認められるものと判断できる。

(4.1)この Rymer(2009)の論文の Introduction は、以下のようになっている。すなはち、Cassini による Saturn の観測によれば、plasma injection の現象は $6 < L < 11$ の範囲にある (Hill et al., 2005; Chen and Hill, 2008)。それに、遠心力の効果も認められた。この研究の初期には、当初の想定で問題は 1 Rs (=60330 km)としていたので、実際には $< 1 R_s$, 1 eV ~ 30 keV 程度のエネルギーでは、現象継続が惑星 Saturn の一周の規模としても、小さすぎると感じた(Hill et al., 2005)。そこで、さらに大きな侵入速度(> 100 keV)ならば、現象の継続は Saturn が 1 周以上の時間となるものと考えた(Mauk et al., 2005; Paranicas et al., 2007)。この大きなスケールの plasma injection は、energetic neutral atom(ENA)を想定することによって可能となる。このような大スケールの現象は、磁気圏の tail において発生するもので、それだけ、spin-up の必要がある(Krimigis et al., 2005; Carbary et al., 2007)。

これに対して、低エネルギー($< \sim 10$ keV)の場合には、侵入という現象は局所的であり遠隔でみとめられるのみである。観測されたエネルギースペクトルにおける分散性のパターンを見ると、遠隔の侵入の現象は時間的に古いものとみなされる(Hill et al, 2005; Chen and Hill, 2008)。一方、局所的な侵入は、新鮮なものとみなされる。いずれにしても、両者において、分散は小さく、その存在は局所的 cold plasma の flux tubes においてのみ認められる(Burch et al., 2005; Andre et al., 2007)。また、Sittler et al.(2005, 2006, 2007)によれば、ion fluid parameters を導入すると、宇宙探査機 Cassini 惑星 Saturn 第 1 周において、 $L \sim 6$ の位置において観測された赤道面上の injection もその他の例と同様な取り扱いができるようである。

惑星 Saturn において認められた plasma injections は Saturn の電離層に foot print としてあらわれた flux tubes において可能であり、これは、惑星地球の磁気圏において観測された plasma bubbles によく対応している。この詳細については、たとえば、Sergeev(2004)による review paper を参考にするとよい。Sergeev(2004)の paper に紹介されている文献も、目を通すと有益であろう。また、Rosenbluth and Longmire (1957)によれば、plasma(background plasma)の存在するような場において、magnetic flux tube の両端における電荷の集積と protons および electrons の relative flows とがどのようにかわりをもっているかについての記述を残している。Hill(1983a, b, c)は、ここで、大切なことは、勾配、曲率、および遠心力

の効果としての drift であると述べている。このことの理解を助けるのは、たとえば、Figure 1 のような模式図である。この図によって、磁場 B を持っている惑星において、磁力線、電荷の蓄積のパターン、電場 E 、plasma injection の赤道面内の動きの関係が説明されることになる。このような場合には、bubble を横切る電場が形成され、ベクトル積 $E \times B$ の力によって plasma が bubble 内に収まった状態が現出する。そして、磁力線に沿ってできた flux tube が認められ、それが惑星本体のほうへと移動することになる。

これまでの研究では、たとえば、Rymer et al.(2007)の例では、Saturn の electrons のうち、 $6 < L < 11$ の範囲にあるものは、2 種類から成り立っていて、おおまかに言えば、そのいずれも Maxwell の式にしたがう成分である。ここで、electron phase density (PSD) を解析した結果によれば、100eV 以下のような低温の injected component は $L \sim 11$ から $L=5$ 付近までの範囲に local source がひろがっていて、それは、外部の磁気圏に存在する source とともに、内側へ移動し、近似的に断熱的温度上昇につながる。このことから見て、electrons の外側向きへと輸送される現象をともなった循環流の過程は、内向きの輸送によって平衡状態となるように Saturn の neutral cloud の形成として認められる。このとき、おそらく、遠心力によって生じる不安定が関与しているに違いない。

また、Burch et al.(2005)の研究、Hill et al.(2005)の研究および、Rymar et al.(2008)の研究の成果から見て、高温の electron component は drift によって形成され、小規模の inflow (Rymer et al., 2009)では、Saturn において観測された local plasma injection の現象のうちの 6 例について、その詳細を述べることにする。このために、観測と理論との両面から、ふたつの plasma の生長度および伝播速度の推定を試み、また、その起源をさぐることにする。

(4.2)Dataset- Cassini Plasma Spectrometer(CAPS)を利用すると、エネルギーが $1\text{eV}/q$ ~ $30\text{Kev}/q$ および 0.6eV ~ 30keV の範囲の近接した ion および electron の測定ができる (Young et al., 2004)。それも、区分 63 energy bins の ion energy 計測に要する時間は 4 秒で、また、電子エネルギーの範囲の計測に 2 秒程度が必要なだけである。いずれの計測にあたって、方位角を変数としてのデータは、寸法が $5^\circ \times 20^\circ$ の anodes を 8 個用いるもので、全天空の $\sim 5 \sim 6\%$ を最大視野とし、3min 余の時間で計測が可能である。また、磁気圏の画像解析用に開発された MIMI(magnetospheric imaging instrument)は、ions および electrons のうちの 30keV から 1MeV 以上までの範囲を対象として、遠隔計測画像をもとめることができる (Krimigis et al., 2004)。この MIMI を用いると、energetic neutral atoms(ENAs)の計測をして、 $7\text{keV} \sim 3\text{MeV}$ per nucleon の範囲の遠隔計測画像を求めることも可能である。磁気圏の wave activity については、宇宙探査機 Cassini 搭載の Radio and Plasma Wave Experiment (RPWS)専用装置を用いている。この装置では、周波数は、 $1\text{Hz} \sim 16\text{MHz}$ の範囲を対象としている (Gurnett et al., 2004)。Cassini 搭載の磁気計(MAG)は、その場の磁場の強さとその向きの計測にあたって、高分解能の計測が可能である (Dougherty et al., 2004)。

(4.3)Case Study- ここで、簡単な説明をするために、2005 年 10 月 30 日に、惑星 Saturn の赤道面において観測された local plasma injection の現象の 1 例について、紹介をする。この injection は、現地時間では、夜間であり、07 時 35 分 15 秒から、およそ 5 分間のあいだに観測された現象である。この injection は、空間的には、 $\sim 7 R_s$ あたりで観測されている。赤道面上の SZS 座標 $[-6.840x, 1.465y, 0.047z]$ から、 $6.995 R_s$ の $[-6.883x, 1.423y, 0.048z]$ までの区間で観測された。この injection は観測点で、あらかじめ corotating の状態のあり、その空間的な azimuthal scale の推定が可能である。この corotation speed は、 $L \sim 7$ において、 $\sim 50\text{km/s}$ (Wilson et al., 2008)であり、その現象は、およそ 300 秒間程度、観測することができた。このときの azimuthal extent はおよそ $0.25 R_s$ であった。この現象の特長は、観測点付近では、azimuthally propagating であった点である。そのとき、現象に先行して、drifted electrons が小さいながら認められ、anticoronation direction の ion counts が減少することがわかっている。この現象の観測データは、観測装置(CAPS, MIMI, RPWS, MAG)によって記録されている (Burch et al., 2007)。また、Menietti et al.(2008)は、CAPS による electron 観測のたびに、

毎回、Rymer et al.(2008)の plasma circulation model の図化を実行している。現象内で認められる electron density は、13 から 4 cm^{-3} 程度であり、electron temperature は、現象内では、 $\sim 30\text{ eV}$ から $\sim 1\text{ keV}$ の範囲の増加(上昇)が認められた。この時の、磁場の強さの増し分は、概略、 ~ 46 乃至 49 nT であり、これは、赤道面における injection events について、これまでに報告されている例(Andre et al., 2005, 2007)と同様であるものと判断されている。このときの磁場の増加は、magnetic dipolarization の兆候に対応していて、dipolar configuration の広がりにもなって生ずる磁場の変化を説明するに足るものである。

ここで、圧力のバランスは、受圧面に直角の向きであると考えていたけれども、何か観測上の制約のために、それを確認することはできなかった。観測装置のうち、CAPS は、ここでの現象で、ion moments を導く機能は用意されていない。また、Wilson et al.(2008)が示しているように、ここでの background ion population (outside the injection event) というものは、軌道によって、いろいろの値の幅をもっていて、特定の軌道がどうであるかを議論できる状態にはない。さらに、injected plasma というものは、CAPS の計測レンジでは、減少していて、そこでの水分のような、あるかないか判別さえもできない程度であるが、MIMI での計測では、判別できる程度のものである。このようなことから考えて、水分というものは、輸送される間に相当に加熱された状態となっていて、その plasma の圧力は、計測装置の対象としたエネルギーのレンジを越えた energy spectra をつくることに必要とされるものであると考えられるが、ここで、MIMI-CAPS の両計測装置での ions についての electrons 相互検定の操作により、さしあたりの問題解決をはかり、計測を可能なものとした。実際には、この問題は、現在における研究開発計画において進行中の段階の状態にあるというのが実態である。

ここに、CAPS、MAG、および RPWS の観測データを合成して図示することは可能である。しかし、本文では、文章上の説明の範囲で、紹介をする(図示例の詳細は、A.M.Rymer et al., 2010 の原著を参考とする)。

まず、この例は、宇宙探査機 Cassini の第 17 周回(2005 年 10 月 30 日)の 07 時 30 分から 07 時 50 分(UT)に関する観測記録例である。時刻表記は、地球上の経度 0 度における標準時に準拠した時刻表示(universal time)であることである。観測データでは、日付けが Day303 における記録である。

ここで、CAPS 観測装置による electron の energy-time spectrogram 観測記録について紹介する。ここでは、07 時 35 分ごろに、electron energy が、 1 keV にピークが現れ、約 3 分の間に、 $3\sim 20\text{ keV}$ の全域で energy の level が $5\times 10^6\sim 3\times 10^7$ と高くなり、07 時 40 分には、その energy の level は、07 時 35 分以前の状態にもどっている。同様な現象例は、Menietti et al.(2007)および Rymer et al., (2008)においても、紹介されている。

つぎに、CAPS によって観測された ion data を紹介する。これには、pulsed appearance of the ion count rate (p)のパターンも図示してある。07 時 35 分には、この p(KeV)の counts が peak となる時刻であるが、同時に、ion energy の level $0\sim 35\text{ keV}$ の範囲で、counts の level が、 5×10 counts から $100\sim 1000$ counts の level の spectrum となり、その spectrum peak は、07 時 36 分までには、 $0\sim 35\text{ keV}$ の範囲にわたって ion energy spectrum の高い level は広がるがその後、07 時 40 分までに、初期の ion energy level にまで減少する。第 2 次の ion energy level 300 counts 程度の peak($0\sim 5\text{ keV}$)が約 6min 間隔で認められるが、ここでの現象からの drift out とみなされる。これは、dipolar drift out とみてよいであろう。

磁場 B_{mag} は、ここで検討している現象の前後において、比較的落ち着いていて、07 時 30 分から 07 時 50 分までの間、 $42\sim 46\text{ nT}$ の程度であるが、この現象の間は、 $41\sim 50\text{ nT}$ である。しかも、現象の始まりと終わりとは、磁場の時間的変化率が急激に大きくなるので、単純な dipole の仮定が妥当かどうかの問題を考慮しなくてはならなくなる。この磁場急変のときには、

磁場勾配の符号に対応して、electron gradient drift というものは injection 現象の先端(RHS)では、惑星 Saturn の中心へ向かい、終端(LHS)では、中心から外向きとなる。これから判断すると、drifting electrons というものは、惑星 Saturn の中心へ向かう injecting plasma bubble の 'orbit' と考えてもよいのではないかなと言えるわけである。これについては、今後の問題としたい。

ここで、CAPS による観測で、生の counts としてのデータにも注目したい。減少期間内において予測される ion counter drift は、electron drift と同時期に認められる。宇宙探査機の座標軸からみた、計測状態での記録作動の方向に問題があるようである。それでも、ここで、紹介しておきたいのは、CAPS によって観測された electron density n_e (cm^{-3}) および温度 T_e (eV) の記録である。これについては、Gethyn Lewis より個人的情報を得ている(2007)。

電磁波の波形の spectrum (Hz・単位)は、RPWS によって観測記録されたものである。また、上部放射部位の影響を受けた electron density についても図示しているが、詳細については、この論文関連の Web version を参考にされることが望ましい(Rymer, et al. 2009)。

なお、ここでは、観測記録の解析の便宜上、いくつかの簡単な仮定を想定した。たとえば、(1)磁場は dipole であること、(2)大気による損失は無視できるものとした。(3)pitch angle scatter during transport は無視できるものとした。(4)plasma transport は第 1 および第 2 の断熱不変量の保存系であるものとした。(5)L~11 における angular distribution は isotropic(等方的)であるものとし、energy spectra は $F(v) \propto E^2$ が成り立っているものとした。さらに、前提として、plasma がある程度以上の距離にあるときには、その変動は、L~11 において観測される spectrum の形のものと同様であるものとする。

厳密に言えば、このような解析において、以上のような、いくつかの仮定については、その根拠を十分に明らかにしておく必要がある。現在のところ、そのようなことが実現できないという状態にあることを承知の上で、本文に目を通されることを希望している。

(4.4)Injection event の起源の推定-ここで、injection の発生源の位置を推定する方法のひとつとしては、injection の phase space density (PSD)を解析によって求めることである。この場合、Liouville's theorem によれば、PSD は保存されることがわかっている。それに、その位置の第 1 近似を求めるためには、磁気圏ないのどこに injection 起源があるかをさぐればよい。たとえば、観測によって得られた結果のうち、このような手法が適用できる例として、2005 年の観測日 (DOY) 303、DOY358 および 2006 年の DOY080 を対象として、normallized PSD vs pithangle の diagram を描くことができる。すなはち、pithangle が 90 度において、PSD が peak(normalized PSD~1.00)、pithangle が 25 度および 165 度において PSD~0.50 となるような放物線型の曲線が、観測結果の傾向を表すものとして得られる (cf. Rymer et al., 2009 原文の図を参照)。

この 3 日分の PSD がわかる観測データの傾向は、観測位置が、Rs 単位表示で、7.8、9.1、8.5 の例である。それよりもさらに外側の位置においても、同様な傾向が認められ、中心へと向かう PSD の特徴はさらに顕著となる。もちろん、PSD の観測値のばらつきは、惑星 Saturn からの距離が遠くなるほど顕著になるという点で、このような観測結果で十分満足できるというわけにはいかない。それでも、上記の傾向は、磁気圏の中程から、その外側にかけて、特徴を失っていないということは確実である。

この PSD に対する pitch angle distributions(PADs)のモデルをつくる手法として、上述の例とは異なった手法がある。その結果は、dipole の磁場における isotropic electron PAD の初期条件の場合に対する結果の特徴を具えている (詳細は、Rymer et al., 2008 を参照)。初期の electron distribution を、 $f(v)=\sin^m(\alpha)E^n$ とし、 $m=0$ (isotropic PAD)、また、 $n=-2.0$ のとき、

もしも、初期の isotropic PAD を利用しないで、初期の PAD の peak を 0 度および 180 度とし、極小値は 90 度にあられるとしたとすると、normallized PSD を小さく評価することになって、“pancake” 型の PAD になってしまうのである (cf. Schippers et al.,2008)。

(4.5)

(5)Injection Propagation Speed の推定

ここで、injection event の時期(age)の推定のためには、injected volume の内部において認められる particle drift を計測すればよい。惑星のような dipole field の赤道面については、その gradient drift (v_d)は、 $E \cdot L^2 (B_{\text{surface}} R_s)^{-1}$ に比例する。ここに、E は、energy であり、また、 B_{surface} は、惑星 Saturn 表面の磁場の強さ($\sim 2.1 \times 10^{-5} \text{T}$)である。Rymer et al.(2009)の原文に図示しているところでは、electron counts および ion counts を、対数座標ではなくて、線形

の座標によって示している。ここで、 $L=9$ における electron drift の speed を、平均の drift speed とし、1 keV の electron の drift を、観測値によって、 900 ± 60 km とすれば、ここでの injection は、 15 ± 1 min old であるということになる。

そこで、この 15 min という age を用い、また、plasma bubble の移動距離を $\sim 4 R_s$ とすると、単純計算で得られる proton の飛行距離が、injection の平均速度の推定値ということになるわけである。ここに、Rymer et al.(2009)によれば、age of injection = distance/time ($\sim 260+60/70$)km/s である。ここで、注意しておくべきことは、Sitter et al.(2005, 2006, 2007)の報告では、 $L \sim 10$ における protons については $V_r \sim 40$ km/s であり、water group ions については $V_r \sim 20$ km/s であったということである。このような赤道面上の遠隔域における観測においては、進行方向を横断する線上における small inward injection structures も考慮したことになる、このような結果が得られることになったものと考えられる。

Rymer et al.(2009)の述べるところによれば、Sitter et al.(2005, 2006, 2007)と同様な解析を、その他の観測例について試みてみても、injection 内の drift と一致しているようには見えない。この不一致の理由としては、Rymer et al.(2009)の場合には、injections が very young であったことや、drift が simple dipole drift とは異なっていたなどの要因が考えられ、それに、現象の始まりおよび終わりの時点における磁場の観測条件も関連があるのかもしれないと考えられる。

このほかに、同様な問題について解析した例として、Pontius et al.(1986)の例がある。この例においては、injection の現象に対して、次のような式による推定をしている。すなはち、

$$v_x = [L^3 \Delta \eta \Omega^2 R_s] / [\Sigma B_s] \approx 14 \text{ to } 140 \text{ km/s} \quad (1)$$

ここに、 η は mass per unit magnetic flux であり、つぎのような式であらわされる。

$$H = \int \rho ds / B \quad (2)$$

ここに、 Σ は height-integrated Pedersen conductivity であり、特に、ここでは、この条件について、 $\Sigma = 1.0$ の例と、 $\Sigma = 0.15$ の例とについて、計算を実行した。惑星 Saturn の回転角周波数は $\Omega = 1.67 \times 10^{-4}$ radians/s であり、また、惑星 Saturn の表面磁場の強さについては $B_s = 2.1 \times 10^{-5}$ T である。ここで η を求めることにするために、cold plasma scale height に沿っての積分をしなくてはならない。そこで、average mass per positive charge carrier (16 amu)の数値を用いることにし、density の値、injection の内側および外側の磁場の値としては、測定値を用いることにすると、求める η の値は、 $0.47 L^{1.8}$ ということになる (Persoon et al., 2006)。この方式は、corotation-dominated system の問題に関連して導きだされたものであるから、transport における plasma pressure の作用などは無視されていて、考慮されていないことに注意しておかなくてはならない。電離層 ionosphere の conductivity (0.1 S) という小さい数値 (low value) を用いて、Pontius et al.(1986)の推定値に対応した計算をした結果では、propagation speed は上記のデータ解析で得られた結果より 2 桁小さいことになることが判明している。

(4.6) おわりに、以上のような研究解析について論じてきたところをまとめると、以下のようなになる。すなはち、Rymer et al.(2009)は、データ解析と理論との対比検討を行って、2005 年 10 月 30 日 (DOY303) の 07 時 30 分 (UT) 頃に惑星 Saturn の $\sim 7 R_s$ の位置において観測された plasma injection の現象における age および speed の推定をし、その周辺の plasma については density drop は $\sim 13 \text{ cm}^{-3}$ であり、injection 内部では $\sim 4 \text{ cm}^{-3}$ であることが観測されていることを明らかにした。このとき、電子温度の上昇は数 10 秒の間に数 eV から数 keV となった。そこでの、磁場の強さ (z 方向) は 46 nT から 49 nT へと変化した。このような現象の、azimuthal spatial scale は $0.25 R_s$ であった。Rymer et al.(2009)は、このような状況は周辺の圧力とバランスをとって、このような物理的状況になったのであると信じている。しかし、

実際に得られたデータのなかから、本文のような議論のできる状態にすることのできる例は、いまのところ、ほかに、見つかっていない。とくに、**injected plasma** が CAPS の計測対象としている **energy** において減少して、ほとんど認められないくらいの状態となり、また、同時に、**MIMI** の **energy** 計測範囲において増大したという点は顕著である。しかし、その詳細については、ここでは、述べないこととする。それでも、上記のことから、**injection event** の内部における **transport** の間に **water group ions** は強烈に加熱されたはずであることを推測することができる。つまり、**contained pressure** を計算するためには、ふたつの観測措置が対称とした **energy ranges** を考慮して **continuous ion intensity** と **energy spectra** との関連を見出さなくてはならないということである。ところで、このようなことは、**MIMI-CAPS** 観測装置の **ions** についての **project** において、**MIMI-CAPS** 観測装置の **electrons** の **inter calibration** の目的で実施済となっているはずである。つまり、どこか理屈にあわないところがあるということになってしまう。このような事情で、研究の推進のための時間的制約などの状況もこうりよして、**pressure balance** の問題は、今後の課題として、先へ進むほかに、どうしようもない事態に陥ってしまっている状態である。

ここで着目の対象とした現象の時間的範囲のなかで観測された **electron drift** に対しては、問題とする **injection** は、近似的に **15min old** という推定値を **Rymer et al.(2009)** は示した。一定の条件下における第 1 および第 2 の断熱不変量に対して **electron PSD** の解析をして判明したことは、少なくとも **L=7.8** からの **inward transport** とここでの **contained PSD** と対応しているといえる。観測で得られた **injection** 現象における **electron pitch angle distributions** のモデルを考え、かつ、断熱的 **transport** は初期時点の **isotropic source** からであるとすれば、観測された **pitch angle distributions** が **L~11** からの **inward transport** によるものとして妥当であるということを示すことができたことになる。したがって、**injection** は **radially ~4Rs** であるということである。また、単純な **time-of-flight** の計算の結果から、**injected flux tube** の近似的値としての **260+60/-70 km/s** を推定値とすることができることになる。同様な解析を、これ以外の 5 例の **injection** 現象に対しても、**pitch angle distributions** が **3~5 Rs** の範囲内の距離からの断熱 **transport** であるといえるわけである。なお、これは、**contained phase space densities** が **transport at least 1Rs** に対応していても差し支えない。このように見てくると、**Rymer et al.(2009)** は、着目した現象における **drift** の **age** を求めれば、その他の現象での **drift** に対しても、同じ解析によって、よく対応した結果が一目瞭然で、理解できるはずであるといえることができなかったということなのである。この部分は、原著者である **Rymer et al.(2009)** の文章のなかでも表現が微妙な部分となっている。原文の英語を読み解くことが大切である。

さて、**Pontious et al.(1986)** は、遠心力の効果を考慮して **radial speed** の推定をしている。この場合、対象とする運動は **mass per unit magnetic flux between inflow and outflow regions** の差(difference)によるとしている。この手法にしたがうことにすれば、**radial velocity** としては **14~140km/s** が推定値となる。ただし、この場合には、**ionospheric conductivity** をどのように扱ったかという問題がある。

Rymer et al.(2009) の研究において、**injection speeds** の推定をするにあたり、ふたつの異なった手法による推定をこころみだが、両者の結果は、誤差を考慮したとしても、納得できるようなものではなかった。必要な設定条件に論理的に落度はないはずであるとしんじてはいるけれど、その結果には満足できない。**Rymer et al.(2009)** の結果は、**Burch et al.(2005)** が得ている結果とは対応している。この **Burch et al.(2005)** の場合には、**injection** の現象内における **6.5Rs** における **plasma dispersion** をうまく説明しているが、ここでは、**Thorne et al.(1997)** と同様にして、**9.5 Rs** を起点として **9.5 Rs** における **inward velocity** を **100km/s** としている。しかしながら、この結果は、**Cassini** が赤道面内に軌道があるときの **insertion** を考えたとしても、**maximum inward radial velocity** について、 **$V_r > 40 \text{ km/s}$** としている **Sittler et al.(2005, 2006, 2007)** の結果とは対応していない。このような結果から判断すると、**insertion orbit** というものは磁気圏の平均的な状態を表すものではないということになって、**Leisner et al.(2007)** が述べているようなものではなかったと判断される。

Rymer et al.(2009) が計算でもとめた **speed** は、惑星 **Jupiter** の観測例について、**Thorne et**

al.(1997)が、ある injection の現象に対して計算したものと同様な数値となっている。これをよりどころにして(現象は指状のこうぞうであるものとする)、inward transport speeds は、83km/s から ≥ 100 km/s 程度までの範囲内の値をとるものと推定されることになる。宇宙探査機 Cassi によって惑星 Saturn を観測した結果と、宇宙探査機 Garireo によって惑星 Jupiter を(Bolton et al., 1997; Kiverson et al., 1997)の観測例とは、物理的に見て、共通点があるといっているであろう。たとえば、空間スケールは 10^3 km の程度であり、density depletion は 2 桁程度の減少であり、field magnitude は dipolar direction に対して増大の傾向にあったし、また、ion pitch angle distributions は injection の現象内においては pancake-like であった。このように見てくると、小さな scale(1 planetary radii)において速い(~ 100 km/s)速度をもっている inward transport は、惑星 Jupiter においても惑星 Saturn においてもみとめられるものであって、そこでの magnetic flux は、上述のような条件下における高速度の inward transport によって inner magnetosphere へと回帰することになるのである。さらに言うならば、Raymer et al.(2009)の論文の introduction にも述べているように、depleted flux tubes ("bubbles")は惑星地球についても認められるものであって、惑星地球の磁気圏でも地球の中心からはるか遠くの尾の部分において認められるということなのである。これと同様なことは、数 100km/s の speeds での propagation に対して、たとえば、Pontius and Wolf(1990)が推定値を求めているし、また、plasma について認められる同様な特徴は Parks et al.(2007)により示されている。惑星 Jupiter から遠距離の衛星 Io の極めて周辺において観測される interchange というものについては、Rymer et al.(2009)の結果と、それに対応した Hill et al.(2005)および Chen and Hill (2008)の結果とから判断して、惑星 Saturn における injection は、区間が $5 < L < 11$ という範囲内において生ずるものといっているであろう。

(4.7)関連機関-Rymer et al.(2009)による論文の内容は、あらかじめ、上記のように表現されたと考えている。なお、この論文のとりまとめまでには、宇宙探査機 Cassini の企画(mission)の下、JPL(Jet Propulsion Lab)および NASA(National Agency of Space Aviation)による好意によるところが大きい。また、Cassini CAPS 開発関連機関および Johns Hopkins University の応用物理研究室で Cassini MIMI 計測装置開発に関連した各位の協力によるところも少なくないと言わなくてはならない。

(4.8)参考文献-ここで本文に関連した参考文献は、原文によっても知ることができる。

A.M.Rymer et. al., 2009 Cassini evidence for rapid interchange transport at Saturn, Planetary and Space Science, Vol.57, 1779-1784.

参考文献

References

- André, N., Dougherty, M.K., Russell, C.T., Leisner, J.S., Khurana, K.K., 2005. Dynamics of the Saturnian inner magnetosphere: first inferences from the Cassini magnetometers about small-scale plasma transport in the magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 32, L14S06.
- André, N., et al., 2007. Magnetic signatures of plasma-depleted flux tubes in the Saturnian inner magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 34, L14108.
- Bolton, S., Thorne, R., Gurnett, D., Kurth, W., Williams, D., 1997. Enhanced whistler-mode emissions: signatures of interchange motion in the Io Torus. *Geophys. Res. Lett.* 24 (17), 2123–2126.
- Burch, J.L., Goldstein, J., Hill, T.W., Young, D.T., Cray, F.J., Coates, A.J., André, N., Kurth, W.S., Sittler, E.C., 2005. Properties of local plasma injections in Saturn's magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 32, L14S02.
- Burch, J.L., Goldstein, J., Lewis, W.S., Young, D.T., Coates, A.J., Dougherty, M., André, N., 2007. Tethys and Dione as sources of outward flowing plasma in Saturn's magnetosphere. *Nature* 447, 833–835.
- Carbary, J.F., Mitchell, D.G., Krimigis, S.M., Krupp, N., 2007. Evidence for spiral pattern in Saturn's magnetosphere using the new SKR longitudes. *Geophys. Res. Lett.* 34, L13105.
- Chen, Y., Hill, T.W., 2008. Statistical analysis of injection/dispersion events in Saturn's inner magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 113, A07215, doi:10.1029/2008JA013166.
- Dougherty, M.K., Kellock, S., Southwood, D.J., Balogh, A., Smith, E.J., Tsurutani, B.T., Gerlach, B., Glassmeier, K.-H., Gleim, F., Russell, C.T., Erdos, G., Neubauer, F.M., Cowley, S.W.H., 2004. The Cassini magnetic field investigation. *Space Sci. Rev.* 114, 331–383.
- Gurnett, D.A., et al., 2004. The Cassini radio and plasma wave investigation. *Space Sci. Rev.* 114, 395–463.
- Hill, T., 1983a. Longitudinal asymmetry of the Io plasma Torus. *Geophys. Res. Lett.* 10 (10), 969–972.
- Hill, T.W., 1983b. Longitudinal asymmetry of the Io plasma Torus. *Geophys. Res. Lett.* 10 (10), 969–972.
- Hill, T.W., 1983c. Rotationally induced Birkeland current systems. In: Potemra, T.A. (Ed.), *Magnetospheric Currents*. American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 340–349 (Geophysical Monograph 28).
- Hill, T.W., Rymer, A.M., Burch, J.L., Cray, F.J., Young, D.T., Thomsen, M.F., Delapp, D., André, N., Coates, A.J., Lewis, G.R., 2005. Evidence for rotationally driven plasma transport in Saturn's magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 32, L14S10.
- Kivelson, M., Khurana, K., Russell, C., Walker, R., 1997. Intermittent short-duration magnetic field anomalies in the Io Torus: evidence for plasma interchange? *Geophys. Res. Lett.* 24 (17), 2127–2130.
- Krimigis, S.M., et al., 2004. Magnetosphere imaging instrument (MIMI) on the Cassini mission to Saturn/Titan. *Space Sci. Rev.* 114, 233–329.
- Krimigis, S.M., Mitchell, D.G., Hamilton, D.C., Krupp, N., Livi, S., Roelof, E.C., Dandouras, J., Armstrong, T.P., Mauk, B.H., Paranicas, C., Brandt, P.C., Bolton, S., Cheng, A.F., Choo, T., Gloeckler, G., Hayes, J., Hsieh, K.C., Ip, W.-H., Jaskulek, S., Keath, E.P., Kirsch, E., Kusterer, M., Lagg, A., Lanzerotti, L.J., LaVallee, D., Manweiler, J., McEntire, R.W., Rasmuss, W., Saur, J., Turner, F.S., Williams, D.J., Woch, J., 2005. Dynamics of Saturn's magnetosphere from MIMI during Cassini's orbital insertion. *Science* 307 (5713), 1270, (25 February).
- Leisner, J.S., Russell, C.T., Khurana, K.K., Dougherty, M.K., 2007. Measuring the stress state of the Saturnian magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 34, L12103.
- Mauk, B.H., Saur, J., Mitchell, D.G., Roelof, E.C., Brandt, P.C., Armstrong, T.P., Hamilton, D.C., Krimigis, S.M., Livi, S.A., Manweiler, J.W., Paranicas, C.P., 2005. Energetic particle injections in Saturn's magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 32, L14S05.
- Menietti, J.D., Santolík, O., Rymer, A.M., Hospodarsky, G.B., Persoon, A.M., Gurnett, D.A., Coates, A.J., Young, D.T., 2008. Analysis of plasma waves observed within local plasma injections seen in Saturn's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 113, A05213.
- Paranicas, C., Mitchell, D.G., Roelof, E.C., Mauk, B.H., Krimigis, S.M., Brandt, P.C., Kusterer, M., Turner, F.S., Vandegriff, J., Krupp, N., 2007. Energetic electrons injected into Saturn's neutral gas cloud. *Geophys. Res. Lett.* 34, L02109.
- Parks, et al., 2007. Solitary electromagnetic pulses detected with super-Alfvénic flows in Earth's geomagnetic tail. *Phys. Rev. Lett.* 98, 26.
- Persoon, A.M., Gurnett, D.A., Kurth, W.S., Groene, J.B., 2006. A simple scale height model of the electron density in Saturn's plasma disk. *Geophys. Res. Lett.* 33, L18106, doi:10.1029/2006GL027090.
- Pontius Jr., D., Hill, T.W., Rassbach, M.E., 1986. Steady state plasma transport in a corotation-dominated magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 13 (11), 1097–1100.
- Pontius Jr., D., Wolf, R., 1990. Transient flux tubes in the terrestrial magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 17 (1), 49–52.
- Rosenbluth, M.N., Longmire, C.L., 1957. Stability of plasmas confined by magnetic fields. *Ann. Phys.* 1 (2), 120.
- Rymer, A.M., Mauk, B.H., Hill, T.W., Paranicas, C., André, N., Sittler Jr., E.C., Mitchell, D.G., Smith, H.T., Johnson, R.E., Coates, A.J., Young, D.T., Bolton, S.J., Thomsen, M.F., Dougherty, M.K., 2007. Electron sources in Saturn's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 112, A02201.
- Rymer, A.M., Mauk, B.H., Hill, T.W., Paranicas, C., Mitchell, D.G., Coates, A.J., Young, D.T., 2008. Electron circulation in Saturn's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 113, A01201.
- Sergeev, V., 2004. Bursty bulk flows and their ionospheric footprints. In: *Multiscale Processes in the Earth's Magnetosphere: From Interball to Cluster*, Vol. 178. Springer, Netherlands, p. 289.
- Schippers, P., et al., 2008. Multi-instrument analysis of electron populations in Saturn's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 113, A07208.
- Sittler, et al., 2005. Preliminary results on Saturn's inner plasmasphere as observed by Cassini: comparison with voyager. *Geophys. Res. Lett.* 32, L14S07.
- Sittler, et al., 2006. Cassini observations of Saturn's inner plasmasphere: Saturn orbit insertion results. *Planet. Space Sci.* 54, 1197–1210.
- Sittler, et al., 2007. Erratum to Cassini observations of Saturn's inner plasmasphere: Saturn orbit insertion results. *Planet. Space Sci.* 54 (2006), 1197–1210. Sittler, et al., 2007. *Planet. Space Sci.* 55, 2218–2220.
- Thorne, R.M., Armstrong, T.P., Stone, S., Williams, D.J., McEntire, R.W., Bolton, S.J., Gurnett, D.A., Kivelson, M.G., 1997. Galileo evidence for rapid interchange transport in the Io Torus. *Geophys. Res. Lett.* 24, 2131.
- Wilson, R.J., Tokar, R.L., Henderson, M.G., Hill, T.W., Thomsen, M.F., Pontius Jr., D.H., 2008. Cassini plasma spectrometer thermal ion measurements in Saturn's inner magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 113, A12218.
- Young, D.T., et al., 2004. Cassini Plasma Spectrometer investigation. *Space Science Rev.* 114, 1–112.

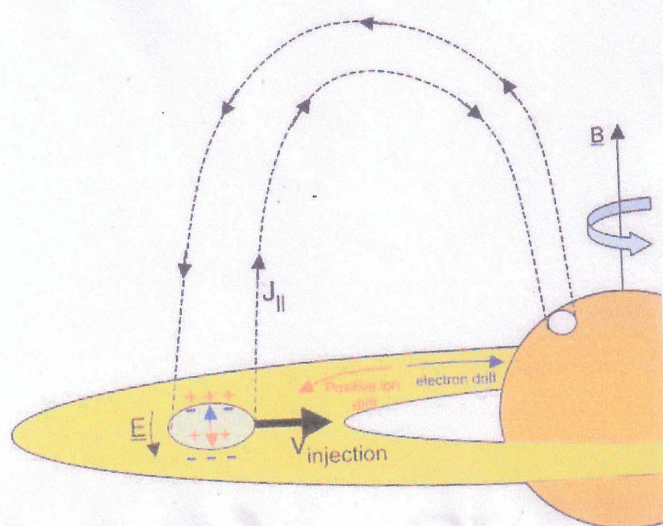


Figure 1 Model of plasma injection to Planet Saturn
 惑星 Saturn の周辺のパラズマの injection のモデル
 [courtesy of Rymer et al., 2009]

書誌資料

Documentations-

表題-宇宙探査機 Cassini からみた惑星 Saturn の磁気圏の諸問題

Title- Problems on Saturn's Magnetosphere Observed by Spacecraft Cassini

著者- 中村重久 [元京都大学教官] 元京都大学白旗海象観測所所長

Author- Shigehisa Nakamura [Kyoto University (Retired)]

キーワード- 宇宙探査機、惑星、土星、磁気圏、プラズマ

Keywords- Spacecraft, Planet, Saturn, Magnetosphere, plasma

非売品

Not to be sold

Corresponding author. Tel/Fax: +81 739 25 5691.

Email address: schnak09@power.odn.ne.jp (S.Nakamura).

Postal-address: Shigehisa Nakamura, Dr. (Kyoto Univ.-) DENG/MSc/BSc/
Famille Villa-A104, Minato-2-674, Tanabe 646-0031 Japan.