

4.7 木星シンクロトロン放射強度 短期時間変動の観測

三好 由純^{*1} 三澤 浩昭^{*1} 森岡 昭^{*1} 近藤 哲朗^{*2}
小山 泰弘^{*3} 中島 潤一^{*2}

4.7 Observations of Short Term Variation of Jovian Synchrotron Radiation

By

Yoshizumi MIYOSHI, Hiroaki MISAWA, Akira MORIOKA, Tetsuro KONDO,
Yasuhiro KOYAMA, and Junichi NAKAJIMA

The detailed observation of Jovian decimetric radiation (DIM) from relativistic electrons in the Jovian radiation belt has been carried out using the Kashima 34-m antenna to seek the existence of its short-term variation. In the observation, the terrestrial atmospheric extinction effect was corrected using the sky-tipping method. Moreover, the background confusion, which was the serious problem of the past observations, was also evaluated. As a result, the DIM flux enhancement having lasting a few days in November 1996 was identified. The data also showed the changes of the magnetic latitude beaming curves during the flux enhancement. These results showed that the relativistic electrons in the Jovian radiation belt, which had been thought to be stable, have short-term variations.

[キーワード] 木星シンクロトロン放射, 惑星電磁圏

Jovian synchrotron radiation, Planetary magnetosphere

1. はじめに

木星は、強い固有磁場を持ち高速で自転する太陽系最大の惑星である。木星は、また様々な波長の電磁波を放射する電波源であるが（例えば文献(1)），そのなかでデシメートル帯 (DIM: 0.1–10GHz) の非熱的電波は、木星放射線帶中の相対論的電子からのシンクロトロン放射に起因することが知られている。1950年代末に木星シンクロトロン放射の存在が同定されて以来⁽²⁾，40年にわたり total flux, 偏波等, 様々な観測が行われ, DIM の基本的な性質については明かにされてきている（文献

(3), (4)参照）。近年では、電波干渉計による放射領域のイメージング観測から、トモグラフィの手法を応用しての放射源の3次元構造の推定が可能となり（例えば、文献(5)），探査機による直接探査が困難である木星内部磁気圏の電磁環境の解明の上で、多くの情報を提供している。

それらの観測の中で DIM の強度の時間変動は、その放射粒子である木星放射線帶粒子フラックスの増減、分布の変化を直接反映するものであり、木星放射線帶粒子の時間変化、すなわち生成・消滅・加速過程の物理を明かにする上で、重要な情報を提供する。DIM 強度の時間変動特性については、現在までのところ 2つの時間スケールの変動の存在が同定されている。一つは、木星の自転周期（10 時間）の変動であり、木星 1 自転の間に ‘beaming curve’ と呼ばれる sinusoidal な強度変動を示す。これは、シンクロトロン放射をしている相対論的

*1 東北大学大学院 理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター
*2 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室

*3 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室
(2001年1月より内閣府技官に併任)

電子が木星磁気赤道面付近に集中していること、並びに木星の磁軸と自転軸とが傾いているために木星1自転の間に地球から見た木星の磁気緯度が変化することに起因した beaming 効果で説明されている⁽⁶⁾。もう一つは長期の時間変動であり、米国JPLにおいて1970年代から実施されている1ヶ月に1回程度のパトロール観測によって、DIM強度が約11年で10%程度変化している様相が同定されている⁽⁷⁾。この長期変動のメカニズムについては、太陽の11年周期の変動に伴って木星の放射線帶電子のフラックスが変動しDIMの強度が変化するとする考え方と⁽⁸⁾⁽⁹⁾、木星の1公転周期(約12年)の間の木星の自転軸と黄道面とのなす角の変化によって見かけの放射強度が変わるとする考え方⁽¹⁰⁾の2通りが提唱されている。

これらの時間変化に対して、数日から数週間での短期強度変動が存在するか否かについては、今まで明かにされていない(但し、特異な例として、1994年7月にShoemaker-Levy 9彗星(SL-9)が木星に衝突した際に、世界各地の電波望遠鏡で集中的な観測が行われ、電波強度は短期間に増大したという結果が得られている⁽¹¹⁾)。DIMの短期強度変動が観測的に同定されていないのは、大型電波望遠鏡を用いた電波強度のdayオーダーでの連続観測がほとんど実施されていないこと、及び、DIMの電波強度が微弱(数Jy)なため、観測された電波強度変動がDIMの強度変動によるものなのか、受信機感度の時間変動や背景銀河電波の混入効果によるもののかの評価が困難であることなどが挙げられる((3)参照)。過去、Gerard⁽¹²⁾⁽¹³⁾は、フランス・ナンセーの電波望遠鏡での観測から、DIMに短期時間変動が存在することを指摘するとともに、太陽の波長10.7cmの電波強度(F10.7電波)とDIM強度の間に有意な相関関係があることを指摘した。一方、Klein⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾は、米国・DSNの電波望遠鏡による観測から、DIMには観測誤差を越えるような有意な短期強度変動はないことを指摘した。最近では、SL-9の衝突後の観測結果から、いくつかのグループがSL-9彗星衝突とは関連性のないDIMの短期強度変動が存在するとの報告を行っている^{(16)~(20)}。

木星放射線帶の起源は、太陽風起源の電子が外部磁気圏から内部磁気圏へと向かうradial diffusionと呼ばれる断熱的加速過程によって輸送された結果、木星に近い内部磁気圏に相対論的電子の粒子帯が形成されたものと考えられている。粒子輸送が拡散過程であるため、外部磁気圏での電子フラックスが短期間で変動したとしても、DIMの放射領域である内部磁気圏では相対論的電子のフラックスはきわめてゆっくりとしか変動しないことが予想されている。理論的な研究からは、仮にDIM強度に短期時間変動が存在する場合、電波強度の時間変動を生むためには、木星放射線帶内部での電子フラックスの

急激な変化もしくは木星方向へのradial diffusionの拡散係数の時間的な変化が必要であることが指摘されている⁽⁹⁾。このような変動をひきおこす物理過程はまだ理解されておらず、DIM短期強度変動の同定は惑星内部磁気圏の電磁環境を研究する上で重要な情報を与えることが期待される。

本研究グループは、木星放射線帶における粒子ダイナミクスの解明を目的として、DIM強度の時間変動の観測を国内の大型電波望遠鏡を用いて複数の周波数領域で行うとともに、木星シンクロトロン放射観測専用の電波望遠鏡の開発を独自に行っている⁽²¹⁾。さらに、DIMの観測から木星放射線帶電子の分布や輸送に関する物理を究明するための木星シンクロトロン放射モデルならびに放射線帶電子の輸送に関する数値計算コードの開発もあわせて行っている。本稿では、1996年11月に通信総合研究所鹿島宇宙通信センター34mアンテナを用いて、未だ同定されていないDIM強度の短期時間変動についての観測を行った結果を示すとともに(2節、3節)、モデル計算を援用することでDIMの短期強度変動を引き起こす相対論的電子ダイナミクスについて考察した結果について述べる(4節)。

2. 観 测

本研究では、通信総合研究所鹿島宇宙通信センター(CRL, KSRC)の34mパラボラアンテナを用いて、周波数2290MHzでDIMの観測を行った。この周波数でのDIM観測は、主として放射中心領域(1.7木星半径)で約20MeVの電子からのシンクロトロン放射を見ていることに相当する。観測は、1996年11月12~14, 16, 18, 23, 24日に1日あたり約5時間行った。

今回の観測では、DIMならびに較正用電波源強度の観測方法として、対象電波源を中心としてアンテナを方位角方向に移動させていくazimuthal scanを採用した。1回のscanの結果、アンテナのビームパターンを反映した強度出力が得られるが、この出力をGaussian関数でfittingし、方位角方向のアンテナポインティングエラーの較正も含めて、バックグラウンドに対するDIM放射強度を導出した。また、観測期間中は、1時間に1回、仰角方向にも同様の観測を行い、仰角方向のアンテナのポインティングエラーを評価した。また、観測されたDIM強度を絶対値に換算するために、観測期間中、1時間ごとに標準較正電波源3C286, 3C295, 3C48, 3C309.1の強度観測を行った。これら標準較正電波源の強度は、Ott *et al.*⁽²²⁾によった。さらに、従来のDIM観測ではほとんど考慮されてこなかった、地球大気による電波強度の吸収効果についても較正を行った。地球大気による吸収効果は、 τ_0 を天頂方向での光学的厚さ、Zを天頂角としたときに、 $\exp(-\tau_0 \sec(Z))$ で与えられ

る⁽²³⁾. ある天頂角 Z にアンテナを向けた時のアンテナのシステム雑音温度は、 T_{RX} を受信機の雑音温度、 T_{atm} を平均的な地球大気の温度として、 τ_0 を係数とした、

$$\begin{aligned} T_{sys}(Z) &= T_{RX} + (1 - e^{-\tau_0 \sec(Z)}) \cdot T_{atm} \\ &\approx T_{RX} + \tau_0 \sec(Z) T_{atm} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (1)$$

で与えられるので、ある方位角において、いくつかの天頂角 Z について T_{sys} を測定し、式(1)で fitting を行うことで、その方位角の光学的厚さ τ_0 を求めることができる (sky tipping method, 文献(24)参照). 本観測では、2時間ごとにこの測定を行い、観測された DIM、較正電波源強度の地球大気による吸収効果の補正を行った. さらに、受信機の安定性を評価するために、適宜 Y-ファクター法で受信機雑音温度を導出し、受信機ゲインの時間変動を較正した. 上記の手続きで得られた DIM 強度を、木星-地球の距離が 4.04AU の場合での値に変換した後、木星ディスクからの熱放射成分に相当する強度 (2.02Jy)⁽²⁵⁾ を差し引いて、木星シンクロトロン放射の成分のみを導出した.

本研究では、DIM の短期強度変動の導出を目的としているため、木星の自転に伴う見かけの強度変動 (beaming curve) から、その平均強度を評価する必要がある. しかしながら、今回の観測では1日あたりの観測時間が約5時間であるため、木星1自転すべてにわたってのデータを取得することができない. そこで、観測された値をリファレンスとなる beaming curve で fitting することによって、その木星1自転での DIM の平均強度を導出した. リファレンスの beaming curve として、以下のような CML (System III の中央子午線経度) に対する Fourier 級数が提唱されており⁽⁷⁾、本研究においてもこの表式を使用した.

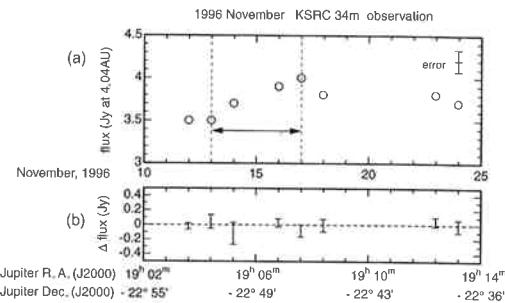
$$S(\text{CML}) = A_0 \left[1 + \sum_{i=1}^3 A_i \sin(i(\text{CML} + \phi_i)) \right] \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 S は観測時の CML における電波強度、 A_0 はその自転での平均電波強度である. A_i 及び ϕ_i ($i=1 \sim 3$) は、それぞれ D_E (declination of the Earth) の関数となっており、本研究では周波数 2290MHz の beaming curve での経験的な値として(文献 7)によって与えられているものを使用した.

3. 結 果

第1図に、観測日ごとの DIM 強度 (式(2)の A_0) を示す. DIM 放射強度は 1996 年 11 月 13 日から 17 日にかけて増大し、11 月 17 日には 11 月 12 日に対して 14% の強度増大を示した.

この観測期間において、木星は天球上を赤経 $19^{\text{h}}04^{\text{m}} \sim 19^{\text{h}}14^{\text{m}}$ (J2000)、赤緯 $-22^{\circ}55' \sim -22^{\circ}44'$ (J2000) の

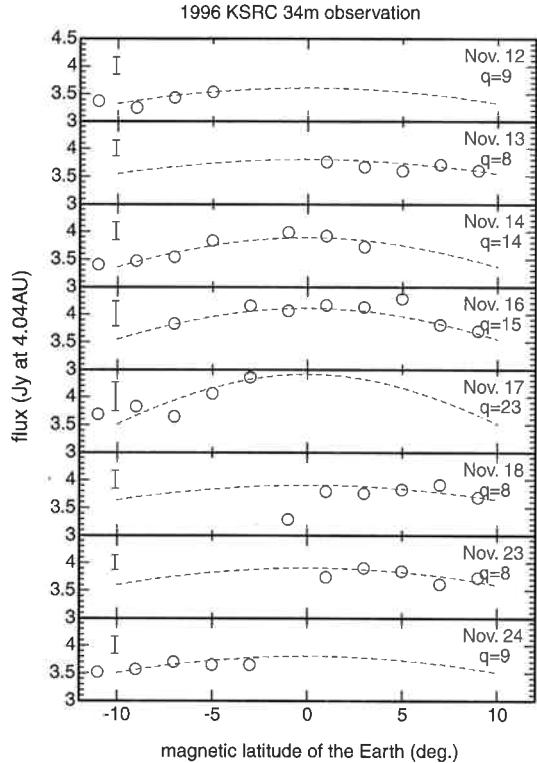


第1図 (a)通信総合研究所鹿島宇宙通信センター 34m アンテナで、1996年11月に観測されたDIM放射強度の1日平均. (b)宇宙科学研究所臼田宇宙空間観測所64m アンテナで、(a)の観測期間中の木星の天球上の位置に対応する領域の背景電波強度を測定した結果、縦軸の Δ flux は、鹿島での azimuthal scan において木星方向と木星から外した方向とに対応する領域の背景電波強度の違いを示す

領域を移動した. 仮に天球上のこの領域に未知の電波的な構造が存在する場合、アンテナは背景構造による電波強度を検出することになる. このため、DIM 強度が一定であっても、その観測結果に見かけの変動が生じることになる. 過去の DIM 強度変動の観測においてもこの背景電波の混入は重要な問題であり、これまで短期強度変動の同定を困難としてきた一因となっている. そこで、本研究ではこの背景電波の混入に関する評価観測を行った. 評価観測は、宇宙科学研究所臼田宇宙空間観測所 64m パラボラアンテナを用いて、木星が鹿島での観測時 (1996年11月) の天球上の位置から充分に移動した1997年10月に行った. 背景強度の評価観測結果を図1(b)に示す. 臼田の観測結果からは、1996年11月に木星観測を行った天球上の位置に有意な背景電波の構造は確認されず、鹿島で観測された DIM の強度変動は木星シンクロトロン放射自身の強度変動に起因することが示された.

第2図は、第1図で示した各観測日の木星シンクロトロン放射強度を地球から見た木星磁気緯度に対してプロットしたものである. beaming 効果を反映して、木星の磁気赤道面が地球方向を向いた時 (磁気緯度が 0 度) に放射強度が最大となり、高緯度が地球方向に向いた時に放射強度が減少するが、そのカーブの形状が日毎に変化している様子が見てとれる. 平均放射強度が最大となった 11 月 17 日には、磁気赤道面が地球方向を向いた時と外れた時との放射強度の差が特に大きくなっている.

このカーブの形状の変化を評価するために、本研究では木星放射線帯の相対論的電子の空間分布とエネルギースペクトルから、地球で観測される木星シンクロトロン放射を計算するモデルを開発し、観測結果との比較を行った. 背景磁場強度 B [Gauss] の場所において、エネルギー E [MeV]、ピッヂ角 α を持つ電子 1 個による、あ



第2図 DIM の地球から見た木星磁気緯度に対する beaming curve. 各点は観測された DIM 強度を表し, 破線は木星シンクロトロンモデル計算から木星放射線帯電子のピッチ角分布を変化させて得られた観測を再現する beaming curve を表す. 各図中の q は, モデル計算から見積もられた観測された beaming curve を再現するような放射線帯電子の異方性のパラメータ

る周波数 ν でのシンクロトロン放射強度 $P(E, \nu)$ [W/Hz] は,

$$P(E, \nu) = 2.34 \times 10^{-29} B \sin \alpha F(\nu/\nu_c) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

となる. ここで, ν_c [MHz] は臨界周波数, F は変形ベッセル関数 $K_{5/3}$ の積分形であり, それぞれ

$$\nu_c = 16.08 E^2 B \sin \alpha \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

$$F(x) = x \int_x^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

と表される (例えば, (26)). したがって, 木星放射線帯全粒子によるある周波数 ν での放射 $W(\nu)$ [W/Hz] は, 動径方向を r , 経度方向を ϕ , 緯度方向を θ とすると, 空間のある点 (r, θ, ϕ) のあるエネルギー E の粒子数 $N(E, r, \theta, \phi)$ を用いて,

$$W(\nu) = \int dE \int dr \int d\theta \int d\phi N(E, r, \theta, \phi) P(E, \nu) \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

と表される. ここから, 電波源の広がり等を考慮して, 地球から木星を観測した場合の電波フラックスを計算し

た. これらの式を用い観測周波数 2290MHz において地球で観測されるシンクロトロン放射の計算を行い, 特に電子の空間分布の変化が DIM の beaming 効果に与える影響を定量的に評価した. 計算に必要となる放射領域の磁場及び粒子分布に関する情報は, Pioneer による過去の直接観測の結果から導出された経験的な磁場モデル⁽²⁷⁾及び粒子分布モデル⁽²⁸⁾を使用した. 一般に, カーブの形状の変化は, シンクロトロン放射をしている相対論的電子のピッチ角分布の変化を反映すると考えられている. そこで, このモデル計算においては, 磁気赤道面上の粒子のピッチ角 α_{eq} の分布は $\sin^q \alpha_{eq}$ で与えられるものとし, 粒子分布の異方性のパラメータ q を変化させながら, 地球で観測されるシンクロトロン放射強度を計算し, 観測されたカーブを再現しうる q を導出した. 第2図の破線は, モデル計算から得られた観測値に best fit するカーブを表している. 観測とモデル計算の比較から導出されたピッチ角分布の異方性 q の値は, DIM 強度増大中の 11月 13日から 17日にかけて 8 から 23 に大きく変化し, その後 11月 18日に再び 8 に変化した. このことは, 木星シンクロトロン放射強度の増大中に, 木星放射線帯の相対論的電子が磁気赤道面に集まるような空間変化を起こしたこと示している.

4. 考 察

1節でも述べたように, 現在の木星放射線帯相対論的電子に関する理論においては, 今回観測されたような DIM 強度の数日スケールの短期時間変動を引き起こすためには, 木星放射線帯内部で相対論的粒子フラックスを増大させるか, 拡散係数の時間変化が必要であることが指摘されている. ここでは, 後者に着目し, 拡散係数の時間変化によって観測されたような DIM の強度変化が可能であるかどうかを数値計算を用いて検討した.

数値計算においては, 惑星放射線帯の radial diffusion を記述する式として広く用いられている Fokker-Planck 方程式 (例えば, (29))を解くことで, 粒子の位相空間中での運動を追跡した.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) - \sum_{i=1}^4 \frac{f}{\tau_i} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

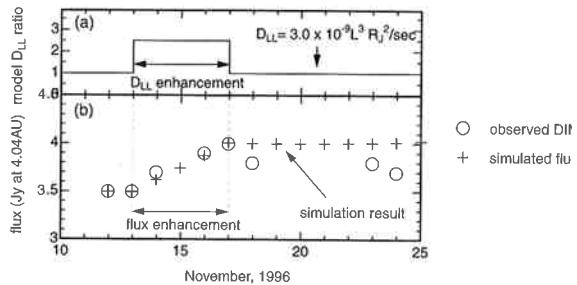
ここで, f は phase space density, t は時間, L は McIlwain の L と呼ばれるフラックスチューブの惑星からの距離を表すパラメータである. 右辺第2項は, radial diffusion 過程での粒子の消失過程をライフトайムで評価したものである. τ_1, τ_2 はそれぞれ木星のリング ($L = 1.7 - 1.8$), 衛星 Amalthea ($L = 2.4 - 2.7$) との相互作用による消失過程を表し, それらのライフトайムは 20MeV の電子に対して 10^6 [s] である⁽¹⁰⁾. τ_3 は, 電子がシンクロトロン放射を行うことによって電子自身のエネ

ルギーを失う過程で、 $\tau_3[\text{s}] \simeq 1/c_1 B^2 E^2$ で与えられる⁽¹⁰⁾。ここで、 c_1 は、電子の電荷 e 、静止質量 m_e 、光速 c を用いて、 $c_1 = (2e^4)/(3m_e^4 c^7)$ として与えられる。 τ_4 は、木星放射線帯中でプラズマ波動によって相対論的電子が散乱されて、磁気圏から大気中に降下して消失する過程を表しており、過去の Pioneer, Voyager の直接探査の結果より、 $\tau_4[\text{s}] \simeq 4.6 \times 10^9 E/L^3$ と見積もられている⁽³⁰⁾。

実際の計算過程においては、Pioneer の直接観測結果から導出された拡散係数の値⁽³¹⁾ $D_{LL} = 3.0 \times 10^{-9} L^3 R_J^2 \text{ s}^{-1}$ を用い、まず定常状態の粒子分布を作成した。定常状態を作り出した後、DIM 強度増大期間である 11 月 13 日から 17 日にかけて、radial diffusion の過程が強化されたとの仮説のもとで、拡散係数の値をステップ的に 2.5 倍に変化させた。第 3 図(a)に、モデル計算で与えた拡散係数 D_{LL} の時間変化を示す。なお、モデル計算での f の境界条件は、Pioneer が観測した $L = 6$ のエネルギースペクトル⁽³²⁾から導出した値を外部境界として用い、近年の Galileo 探査機の観測結果⁽³³⁾⁽³⁴⁾を考慮して、 $L = 1.3$ で $f = 0$ を内部境界として用いた。

第 3 図(b)に、観測された DIM 強度の日変化と、 D_{LL} を変化させて粒子分布の時間発展を計算し、得られた粒子分布から算出される DIM 強度を合わせて示す。図では、観測結果と計算結果とを比較するために、計算された DIM の強度を 11 月 12 日の観測値で規格化している。図からわかるように、計算結果は観測された DIM 強度の増大をよく再現しており、DIM 強度の増大が、相対論的電子の木星方向への拡散効率の増大というモデルで説明できることを示している。

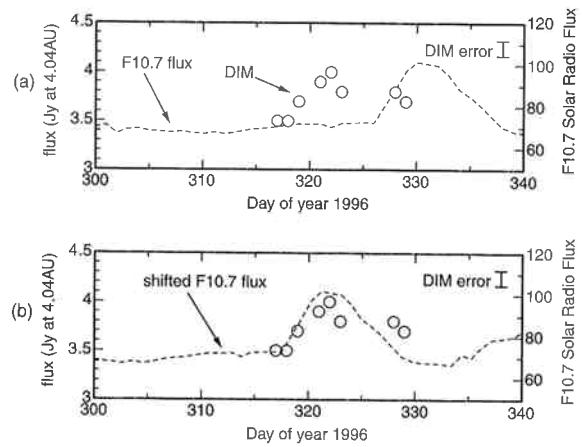
惑星放射線帯において相対論的電子を radial 方向に輸送する力は、一般にその場の電磁場のゆらぎと考えられている。地球の場合は、内部磁気圏での場のゆらぎの原因として、地球電離圏のダイナモ電場に起因する変動よりもむしろ、主として太陽風の変動に起因する変動が支



第 3 図 (a)radial diffusion の数値実験において与えた拡散係数 D_{LL} の時間変化。横軸は鹿島での観測日を、縦軸は定常状態を 1 としたときの拡散係数の比を表す。(b)鹿島での DIM 強度の日変化（丸）と radial diffusion の数値実験から得られた木星放射線帯電子分布を変化させた時に地球で観測される DIM 強度の変化（実線）

配的である。一方、木星の場合は固有磁場が強大であるので、太陽風の変化が内部磁気圏に及ぼす電磁場の変動は比較的小さく、逆に電離圏ダイナモ電場の変動が磁気圏に投影されて磁気圏の電磁場の変動を作り出す過程が支配的であると考えられている⁽³⁵⁾。この電離圏ダイナモ電場は木星電離圏中の中性風に起源を持つので、中性風の風速に変化が生じれば、木星磁気圏中の電磁場の揺らぎが大きくなり拡散係数を変化させることが期待される。今回のモデル計算からは、観測された DIM 強度の上昇を説明するためには、radial diffusion の拡散係数が 2.5 倍増大すればよいことが示されたわけだが、Brice and McDonough⁽³⁵⁾ の理論に基づくと、定常状態の拡散係数を 2.5 倍増大させるには、 $L = 2$ に対応する磁力線上での電離圏高度において中性風の風速が 95m/s から 150 m/s に変化すればよいことが導かれる。

それでは、このような中性風風速の変化は、何が原因となって起こるのであろうか？Brice and McDonough⁽³⁵⁾ は、太陽の UV/EUV の強度が増大すると、木星電離圏の加熱プロセスが促進し、木星電離圏中の中性風風速が変化する可能性があることを指摘している。太陽の UV/EUV 強度は、太陽の F10.7 電波強度と極めて相関が高いことが知られており、Brice and McDonough⁽³⁵⁾ は、太陽の F10.7 電波強度と DIM との間に相関関係が存在する可能性を予言している。そこで、1996 年 11 月の DIM 観測期間中の DIM 強度と地上で観測された F10.7 電波の強度を第 4 図(a)に示す。1996 年は太陽活動極小期ということもあり、DIM 観測期間およびそれ以前の 2 太陽自転周期にわたって F10.7 電波はほぼ安定な強度を示していたが、DIM 強度増大から 9 日後に F10.7 電波の強度に増大が確認された。この期間、太陽面では活動領域 NOAA 7999 が太陽とともに共回転し



第 4 図 (a)鹿島で観測された DIM 強度（丸）と、地球で観測された F10.7 電波強度（破線）の日変化。(b)鹿島で観測された DIM 強度（丸）と 1996 年 11 月の地球-太陽-木星の位置関係を考慮し、木星での位置に焼き直した F10.7 電波強度（破線）

ており、SOHO や野辺山電波ヘリオグラフなどによる太陽面の観測結果も、この活動領域から広い周波数域にわたって強い放射が起こっていたことを示している。これらのデータは、また、地上で太陽 F10.7 電波の強度が最大となった 1996 年 11 月 25 日に、この活動領域が地球の正面に来ていたことを示している。以上の観測結果から類推すると、1996 年 11 月末に地球で観測された大きい F10.7 電波もこの活動領域から放射されており、活動領域が地球の正面に来たことによって、地上で観測された F10.7 電波強度が増大した可能性が考えられる。

そこで、今回観測された DIM の強度増大を説明するための次のような作業仮説を設定し、その妥当性について検討を行った。もし、フラックス密度の大きい F10.7 電波（すなわち、UV/EUV）が、空間的に比較的小さい活動領域からある立体角内に指向性をもって放射されているならば、地球と木星の太陽に対する経度の違いから、木星方向に強い F10.7 電波が放射されている時に地球ではまだ大きい F10.7 電波は観測されないことになる。1996 年 11 月の鹿島での観測期間において、地球-太陽-木星のなす絶対角は 116.5° から 128.4° であり、地球から見て木星は太陽の西側に位置した。したがって、木星方向に F10.7 電波が照射しその結果として DIM の増大が地球で観測された時には、地球では F10.7 電波の増大はまだ観測されない。その後、太陽の活動領域が地球方

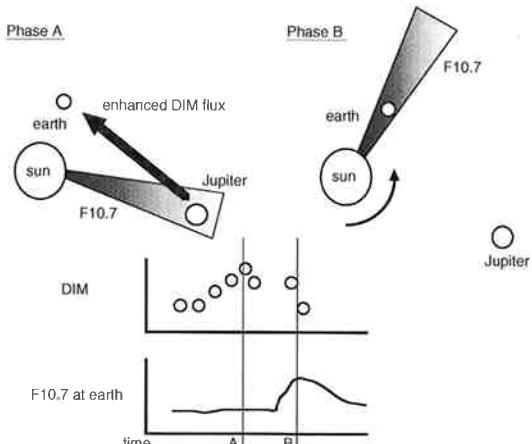
に向いた時に、はじめて地球で F10.7 電波の増大が観測される（第 5 図参照）。この仮説にもとづくと、地球で DIM 強度の増大が観測された後、時間遅れをもって太陽 F10.7 電波の強度の増大が観測されることが説明される。この仮説を評価するために、地球で観測された F10.7 電波の時間変化をもとに上記の地球-太陽-木星の位置関係を考慮にいれて、木星に対する時間変化に焼き直したのが第 4 図(b)である。図からわかるように、DIM の強度増大と木星の位置での F10.7 電波の強度増大の変化の傾向はよく一致している。以上の考察から、1996 年 11 月に観測された DIM の強度増大は、それまで静穏であった太陽 UV/EUV に強度の増大が起こり、それによって木星放射線帯における radial diffusion の過程が強化したことによる可能性が示された。

5. む す び

1996 年 11 月に通信総合研究所鹿島宇宙通信センターの 34m アンテナを用いて、木星シンクロトロン放射の観測を行い、これまで同定されていなかった数日間での強度上昇を確認した。beaming curve の観測結果に対するモデル計算に基づく評価により、この強度上昇中にシンクロトロン放射をしている木星相対論的電子に、磁気赤道面付近に集中するような空間変化が生じたことを示した。シンクロトロン放射強度の上昇のメカニズムとして enhanced radial diffusion を検討し、そのシナリオのもとで数値実験をおこなったところ、radial diffusion の拡散係数が通常よりも 2.5 倍上昇すれば観測されたシンクロトロン放射の強度増大を説明できることが示された。さらに、観測時の地球-太陽-木星の位置関係を考慮し、地球で観測された太陽 F10.7 電波強度の時間変化を検討したところ、シンクロトロン放射強度増大中に木星に強い太陽 UV/EUV が照射していた可能性が示唆された。このことは、Brice and McDonough⁽³⁵⁾ が予言していた、太陽 UV/EUV による木星超高層大気の加熱によって木星放射線帯の radial diffusion の過程が強化するとのシナリオを支持するものである。この結果は、地球に比して強大な磁場をもつ木星磁気圏において、惑星の大気圏に起因する電磁場の擾乱が内部磁気圏の電磁場に影響を与えていることを指摘する結果であり、惑星の大気圏-磁気圏のカップリング過程が磁気圏ダイナミクスを研究する上で重要であることを強く示唆するものである。

謝 辞

通信総合研究所鹿島宇宙通信センターでの観測においては、同センター宇宙電波応用研究室のスタッフの方々に、宇宙科学研究所臼田宇宙空間観測所での観測においては、国立天文台の藤沢健太博士、宇宙科学研究所の向



第 5 図 (上図) 鹿島での木星 DIM 観測時の地球-太陽-木星の位置関係の模式図。ハッチしてある領域は、太陽 F10.7 電波 (UV/EUV) の放射ビームに対応する。Phase A は、鹿島で DIM の強度増大が観測された時に、Phase B は、地球で F10.7 電波の強度増大が観測された時にそれに対応する。(下図) 上図のシナリオから予想される地球で観測される DIM と F10.7 電波の強度増大の時間関係の模式図。Phase A で強い太陽 F10.7 電波 (~UV/EUV) が木星方向に向いた時に地球で DIM の強度増大が観測され、その後 Phase B で太陽 F10.7 電波 (~UV/EUV) の放射域が地球を向いた時に地球で F10.7 電波の強度増大が観測される。

井利典教授、斎藤宏氏、山田三男氏に大変お世話になりました。厚くお礼申し上げます。太陽F10.7電波データは、米国NOAA宇宙環境センターより提供されたものを用いました。

参考文献

- (1) Kaiser, M. L., "Time variable magnetospheric radio emissions from Jupiter", *J. Geophys. Res.*, 98, E10, 18757-18765, October 1993.
- (2) Sloanaker, R. M., "Apparent temperature of Jupiter at a wavelength of 10cm", *Astron. J.*, 64, 346, 1959.
- (3) Carr, T. D., M. D. Desch, and J. K. Alexanger, "Phenomenology of magnetospheric radio emissions", *Physics of Jovian magnetosphere* (Edited by A. J. Dessler), pp.226-284, Cambridge Univ. Press, 1983.
- (4) de Pater, I., and M. J. Klein, "Time variability in Jupiter's synchrotron radiation", *Time variable phenomena in the Jovian system* (Edited by M. J. S. Belton, R. A. West, and J. Rahe), pp.139-150, NASA Spec. Publ., SP-494, 1989.
- (5) Sault, R. J., T. Oosterloo, G. A. Dulk, and Y. Leblanc, "The first three-dimentional reconstruction of a celestial object at radio wavelengths: Jupiter's radiation belts", *Astron. Astrophys.*, 324, pp.1190-1196, 1997.
- (6) de Pater, I., "21cm maps of Jupiter's radiation belts from all rotational aspects", *Astron. Astrophys.*, 88, No.1-2, pp.175-183, August 1980.
- (7) Klein, M. J., T. J. Thompson, and S. J. Bolton, "Systematic observations and correlation studies of variations in the synchrotron radio emission from Jupiter", *Time variable phenomena in the Jovian system* (Edited by M. J. S. Belton, R. A. West, and J. Rahe), pp.151-155, NASA Spec. Publ., SP-494, 1989.
- (8) Bolton, S. J., S. Gulkis, M. J. Klein, I. de Pater, and T. J. Thompson, "Correlation studies between solar wind paramters and the decimetric radio emission from Jupiter", *J. Geophys. Res.*, 94, A1, pp.121-128, January 1989.
- (9) de Pater, I., and C. K. Goertz, "Radial diffusion models of energetic electrons and Jupiter's synchrotron radiation, 2. time variability", *J. Geophys. Res.*, 99, A2, pp.2271-2287, February 1994.
- (10) Hood, L. L., "Long-term changes in Jovian synchrotron radio emission: Intrinsic variations or effects of viewing geometry?", *J. Geophys. Res.*, 98, A4, pp.5769-5783, April 1993.
- (11) de Pater, I., C. Heiles, M. Wong, R. J. Maddalena, M. K. Bird, O. Funke, J. Neidhoefer, R. M. Price, M. Kesteven, M. Calabretta, M. J. Klein, S. Gulkis, S. J. Bolton, R. S. Foster, S. Sukumar, R. G. Strom, R. S. LePoole, T. Spoelstra, M. Robinson, R. W. Hunstead, D. Campbell-Wilson, T. Ye, G. Dulk, Y. Leblanc, P. Galopeau, E. Gerard, and A. Lecacheux, "Outburst of Jupiter's synchrotron radiation after the impact of comet Shoemaker-Levy 9", *Science*, 268, pp.1879-1883, 1995.
- (12) Gerard, E., "Long term variations of the decimeter radiation of Jupiter", *Radio Sci.*, 5, No.2, pp.513-516, February 1970.
- (13) Gerard, E., "Variation of the radio emission of Jupiter at 21.3 and 6.2cm wavelength", *Astron. Astrophys.*, 50, No.3, pp.353-360, August 1976.
- (14) Klein, M. J., S. Gulkis, and C. T. Stelzried, "Jupiter: new evidence of long-term variations of its decimeter flux density", *Astrophys. J.*, 176, pp.L85-L88, September 1972.
- (15) Klein, M. J., "The variability of the total flux density and polarization of Jupiter's decimetric radio emission", *J. Geophys. Res.*, 81, A19, pp.3380-3382, July 1976.
- (16) Galopeau, P. H. M., E. Gerard, and A. Lecacheux, "Long-term monitoring of Jupiter's synchrotron radiation with the Nançay radio telescope including the collision with comet P/Shoemaker-Levy 9", *Icarus*, 121, pp.469-478, 1996.
- (17) Galopeau, P. H. M., E. Gerard, and A. Lecacheux, "Modifications of the synchrotron radiation belts of Jupiter two years after the collision with comet SL9", *Planetary Radio Emissions IV* (Edited by H. O. Bucker, S. J. Bauer, and A. Lecacheux), pp.225-232, Austrian Academy Sci., 1997.
- (18) Galopeau, P. H. M., E. Gerard, and A. Lecacheux, "Modifications of the synchrotron radiation belts of Jupiter: evidence for natural variations in addition to SL 9 effects", *Planet. Space Sci.*, 45, No.10, pp.1197-1202, 1997.
- (19) Klein, M. J., S. Gulkis, and S. J. Bolton, "Jupiter's synchrotron radiation: observed

- variations before, during and after the impacts of comet SL-9", Planetary Radio Emissions IV (Edited by H. O. Bucker, S. J. Bauer, and A. Lechacheux), pp.217-224, Austrian Academy Sci., 1997.
- (20) Misawa, H., and A. Morioka, "Observations of Jovian decimetric radiation at a frequency of 327 MHz", *Adv. Space Res.* 26, No.10, pp.1537-1540, 2000.
- (21) Misawa, H., Y. Miyoshi, A. Morioka, T. Kondo, M. Kojima, Y. Koyama, J. Nakajima, "Investigation of Jupiter's inner-magnetosphere with the observations of Jovian decimetric radiations", *Proc. 29th ISAS Lunar Planet. Symp.*, pp.193-196, 1996.
- (22) Ott, M., A. Witzel, A. Quirrenbach, T. P. Krichbaum, K. J. Standke, C. J. Schalinski, and C. A. Hummel, "An updated list of radio flux density calibrators", *Astron. Astrophys.*, 284, pp.331-339, 1994.
- (23) Kraus, J. D., *Radio Astronomy*, 2nd edition, Cygnus-Quasar Books, 1986.
- (24) Ulich, B. L., J. H. Davis, P. J. Rhodes, and J. M. Hollis, "Absolute brightness temperature measurement at 3.5-mm wavelength", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, AP-28, No.3, pp.367-377, May 1980.
- (25) Klein, M. J., S. Gulkis, and S. J. Bolton, "Changes in Jupiter's 13cm synchrotron radio emission following the impacts of Comet SL-9", *Geophys. Res. Lett.*, 22, No.13, pp.1797-1800, July 1995.
- (26) Jackson, J. D., "Classical Electrodynamics", John Wiley and Sons, Inc., 1975.
- (27) Smith, E. J., L. Davis, Jr., and D. E. Jones, "Jupiter's magnetic field and magnetosphere", *Jupiter* (Edited by T. Gehrels), pp.788-829, University of Arizona Press, 1976.
- (28) Divine, N., and H. B. Garrett, "Charged particle distribution in Jupiter's magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, 88, A9, pp.6889-6903, September 1983.
- (29) Schulz, M., and L. J. Lanzerotti, "Particle diffusion in the radiation belts", Springer-Verlag, 1974.
- (30) de Pater, I., and C. K. Goertz, "Radial diffusion models of energetic electrons and Jupiter's synchrotron radiation, 1, Steady state solution", *J. Geophys. Res.*, 95, A1, pp.39-50, January 1990.
- (31) Goertz, C. K., J. A. Van Allen, and M. F. Thomsen, "Further observational support for the lossy radial diffusion model of the inner Jovian magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, 84, A1, pp.87-92, January 1979.
- (32) Baker, D. N., and J. A. Van Allen, "Energetic electrons in the Jovian magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, 81, A4, pp.617-632, May 1976.
- (33) Fischer, H. M., E. Pehlke, G. Wibberenz, L. J. Lanzerotti, and J. D. Mihalov, "High-energy charged particles in the innermost Jovian magnetosphere", *Science*, 272, pp.856-858, 1996.
- (34) Mihalov, J. D., H. M. Fischer, E. Pehlke, and L. J. Lanzerotti, "Energetic trapped electron measurements from the Galileo Jupiter probe", *Geophys. Res. Lett.*, 27, No.16, pp.2445-2448, August 2000.
- (35) Brice, N., and T. R. McDonough, "Jupiter's radiation belts", *Icarus*, 18, pp.206-219, 1973.