

木星磁気圏における宇宙塵の経年変化 —福井工業大学木星デカメータ電波干渉計の成果—

大 家 寛*

Time Dependent Variation of the Cosmic Dust in the Jovian Magnetosphere — Results of the interferometer system developed in Fukui University of Technology

Hiroshi Oya

An interferometer system for observation of the Jovian decameter radio waves has been achieved at Awara Campus of Fukui University of Technology. The system consists of three 100m-class baselines with three components of log-periodic Yagi antennas. After continuous works of system establishment during three years, the system has finally been completed in November 2002. By utilizing the newly developed interferometer system observations of the Jovian decameter radio emissions have been carried out; as results of the observations, typical radio emissions from the Io related A and B radio sources and emissions from the Non-Io related sources have clearly been detected with excellent coincidence between fringes of the interferometer, which have been analyzed for the possible radio sources at Jupiter. A few radio emission events related to the special sources caused by the dust groups which are circulating around Jupiter being ejected from broken nuclei of Shoemaker-Levy 9 comet have been identified. Investigating the trend of the occurrence of the dust related decameter radio emissions it has been concluded that the cosmic dust groups circulating around Jupiter have almost been diffused in space during 8 year since July 1994.

1.序

1935年, Jansky (1) によって発見された銀河からの短波 (デカメータ) 電波を皮切りに電波天文学が始まった。そしてこのデカメータ電波は木星からも放射されていることが 1955年 Burke と Flanklin (2) によって発見されている。これらに関連し、宇宙デカメータ電波研究の最近の情勢とその重要性についてはすでに著者によって福井工業大学研究紀要に記されている (3)。1970年代に入ると地球周辺の宇宙空間物理学、特にプラズマ物理学の急速な発展を受け、木星をつつむ宇宙空間プラズマ及び電磁気過程の究明と直結した新しい研究領域に入ってきた。

1974年から東北大学のグループ (この研究には著者も直接関わってきた) は木星電波を木星周辺の宇宙空間での電磁気とプラズマの活動状況を究明するプローブとして活用する目的を持って研究を開始し、100km級長距離基線干渉計で木星電波源を10秒角精度で分解することを目指し、着実な研究成果をあげている。

* 宇宙通信工学科

これとは対照的に、100m級の短基線干渉計は木星電波源位置の詳細を問題にするのではなく、電波源が木星にあることの確認を重要事項とする一方、安定的に電波放射出現の検出を行い、電離層変動に敏感な長距離干渉計とは相補的な関係にある。したがって木星デカメータ電波を大局的にコントロールする原因となるエネルギー源を追求する研究に適した特徴を持っている。こうした背景にあつて、福井工業大学では2000年4月より芦原校地に、主として木星デカメータ電波の観測を目指して100m級干渉計の設立に着手し(3)、2002年まで、3ヵ年計画で各年一基のアンテナに対応するシステムを実現し、2002年11月中旬、3基線よりなる基線長100m級の短基線デカメータ電波干渉計を完成させた。その結果、質の高いデータが継続的に得られるようになった。特に当面の研究目的の一つとしては、木星デカメータ電波のエネルギー源として新たに登場した木星磁気圏中を周回する宇宙塵による発電効果について、その活動の経緯を追及してきた。すなわち、1994年7月に起こったシューメーカー・レビー第9彗星の木星衝突に関連し、すでに分裂していた彗星核から撒き散らされたおびただしい量の彗星塵が木星を周回する宇宙塵となり、その効果が電波エネルギー源となることが考えられるが、その宇宙塵の消滅過程を追跡することに繋がるものである。

2. 木星デカメータ電波のエネルギー源

1970年代以降、発見された、地球や土星が宇宙に向かって放射するキロメートル電波と並び、木星デカメータ電波放射は惑星から放射されるコヒーレント性電波放射として、認識され、その原因の解明は重要となっている。この電波放射機構の解明は、電波源に供給されるエネルギーがどのようなメカニズムによるかを究明しようとするマクロな問題と、エネルギー供給の結果どのようなプラズマ・電磁相互作用が有効に働くかという点を究明するミクロな問題がある。マクロな問題に対しては従来の研究を通じ3つの要因が指摘されている。すなわち、

- 1) 太陽風エネルギーの木星磁気圏への注入
- 2) 木星中心より42万km離れて木星の磁場中を周回する衛星イオ(Io)による発電効果
- 3) 木星磁気圏プラズマの共回転からのずれ運動による発電効果

本研究はこれら全ての電波からの電波放射を対象にするのに加え、1994年7月シューメーカー・レビー第9彗星の木星衝突に際し磁気圏に残した宇宙塵による発電効果という第4のエネルギー源の存在を問題としている。宇宙空間プラズマ中にたゞよう宇宙塵はその相対速度がイオンより40倍近く速い電子によって先に占拠され、負に帯電する。そしてその周辺にプラスのイオンすなわちプロトンがとりまく形となり、宇宙塵の集合体はあたかも+のキャリアを持つ金属雲のようにふるまう。このため一群の宇宙塵が木星磁力線を横切って運動するとき巨大な発電雲となつて、その発電効果は磁力線を通じデカメータ電波源にエネルギーを供給する。この現象は、1994年7月、著者等が東北大学時代に観測、しかも2000年まで継続的に発生していた。しかし、その後この宇宙塵は、はたして永続的に発電効果を示すか否かが問題となつて来ている。

3. 福井工業大学・三基線デカメータ干渉計システム

3.1 干渉計アンテナと配置

芦原校地に設置された干渉計システムと配置は計画段階として 2002 年度福井工業大学紀要に述べ

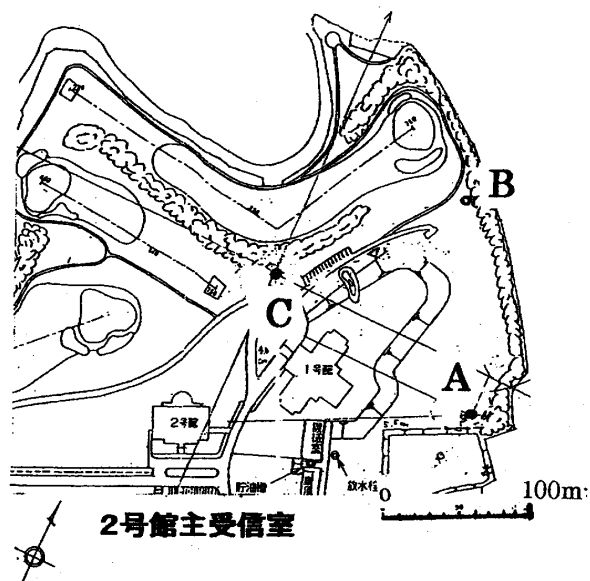


図1 芦原キャンパスにおけるデカメータ電波3基線干渉計
アンテナ配置 A、B、および C 点がアンテナ位置

考慮し、20dB の増幅器を持ち、Noise Figure 2dB の低雑音前置増幅器を配置している。A、B 及び C 各点での前置増幅部では、2系統の素子が直交するクロスログペリオディック・アンテナを用い、90° 位相偏移器を併用して、受信信号は右回り(R)、左回り(L)偏波を分離される。信号は、したがって、R 及び L の二系統として主受信機に伝送される(3)。主受信機は日本無線製 RD545 を用い、セットノイズレベル -130dBm となっている。これは、20MHz-40MHz の周波数帯で実施するデカメータ電波受信に際し、宇宙電波成分の主となる銀河電波雑音レベルが示す -120~-110dBm 以上の宇宙電波を充分受信可能としている。RD545 は帯域幅が狭(500Hz)、中(1kHz)及び広(10kHz)と選択可能であるが、観測は中帯域幅を用い三段スーパーヘテロダイン方式による総増幅率 110dB となり、各受信機からの最終段出力は中心周波数 1000Hz の LSB(下側帯波)信号として位相検出器に入る。

3.3 干渉計

干渉計は掛算型干渉方式をとっている。なお三段スーパーヘテロダインの各局部発信機は基準となる親機の局部発信機からの信号を配分することにより受信機内で発生する位相変動を全て解消している。すなわち、掛算型位相検出器では α 系の入力及び β 系入力信号の振幅、周波数変換後の角周波数、周波数変換後の位相をそれぞれ $E_{\alpha 0}$ 、 $E_{\beta 0}$ 、 $\omega - \omega_{1\alpha}$ 、 $\omega - \omega_{1\beta}$ 、 $\phi_{1\alpha} + \phi_{\alpha}$ 、 $\phi_{1\beta} + \phi_{\beta}$ とするとき

$$\text{出力は } D_{\alpha\beta} = E_{\alpha 0} E_{\beta 0} \cos[(\omega_{1\beta} - \omega_{1\alpha})t + (\phi_{1\alpha} - \phi_{1\beta}) + (\phi_{\alpha} - \phi_{\beta})] \quad (1)$$

となるが、 α 、 β 系で用いられる局部発信信号を共通にすることにより $\omega_{1\beta} = \omega_{1\alpha}$ 、 $\phi_{1\alpha} = \phi_{1\beta}$ で

$$D_{\alpha\beta} = E_{\alpha 0} E_{\beta 0} \cos(\phi_{\alpha} - \phi_{\beta}) \quad (2)$$

ている(3)が、ここで図1に再録する。三基線を作る三つのアンテナは、9素子広帯域クロスログペリオディックアンテナで、鉄塔上全高 15m に配置され、周波数 20MHz-40MHz に対し半値幅 60° の広角性をもたせている。それぞれのアンテナは図1に示すように、A、B 及び C 点に配置されている。

3.2 受信システム

干渉計のフロントエンド部は、中心心部となる位相検出器の置かれる 2 号館 (図1参照) と 350m のケーブルで結ばれ

るため、-28~-15dB に至るケーブル減衰を

となり、目的となる位相差 $\phi_\alpha - \phi_\beta$ に対するフリッジ出力が得られる。

4. 観測例

観測される電波バーストが木星起源であることを確認する最も確かな方法は、電波源位置を木星とした時に得られる受信電波の位相変化を予め解析し、観測される電波の位相変動との対比のうえ、完全な一致性を検証することにある。

図2に、12月18日04時07分から05時30分まで観測された木星デカメータ電波の観測例を示す。ここにはL系についてはAC基線の干渉計出力を、また右旋偏波(R系)に対し三基線の観測結果を示すが各基線について、木星を電波源と仮定した場合に生ずる干渉計フリッジ(細い一定振幅の偽正弦波で示す)を対比して示す。ここには激しく息づく電波の様相が示されるが、

(2)式に対応して理解できるように、変動する電界が示す E_{α_0} と E_{β_0} の積の成分とフリッジの基本をなす

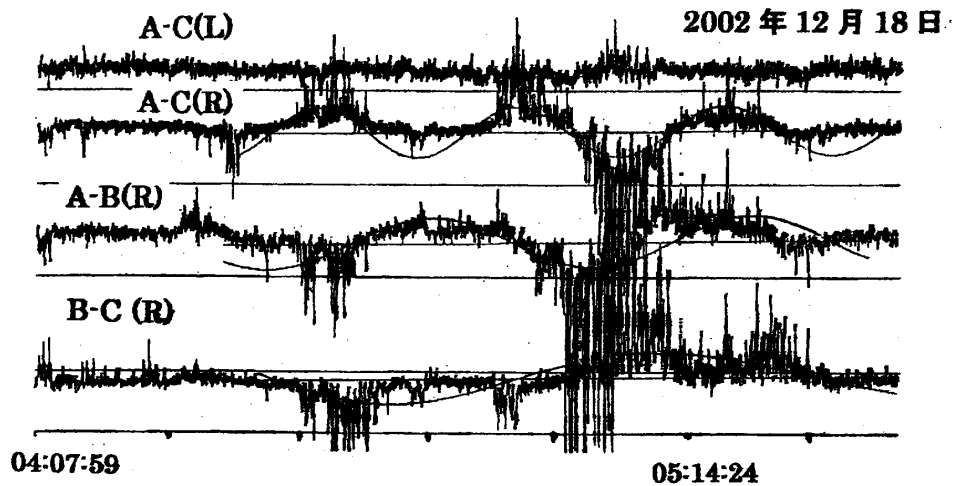


図2 2002年12月18日に観測された木星デカメータ電波・非Io-A電波源より放射の例

$\cos(\phi_\alpha - \phi_\beta)$ の成分の積として表れ、明確に木星デカメータ電波バーストであることを示している。この現象は、Io衛星と木星の中央子午線(CML)との位置関係から、従来の研究結果との対比に基づくとき、非イオ関連電波源すなわちNon Io-A電波源からの放射の例であることが確認される。非イオ関連電波源からの放射としては極めて強いバーストの例として注目に値する。

図3には、その観測時点での木星CMLとIo衛星の位置関係から典型的なIo-A電波源から放射されていることが確認される木星デカメータ電波バーストの例を2002年12月23日02時58分から04時04分の観測結果について示す。ここには右旋(R)偏波に対し上から順次A-C基線、A-B基線、C-B基線に対する干渉計出力として示されるが、各基線に対し木星に電波源を置いた場合に出現する計算フリッジと、観測されたバーストの位相変動の完全な一致が示され、明確に木星電波バーストであることが確認される。

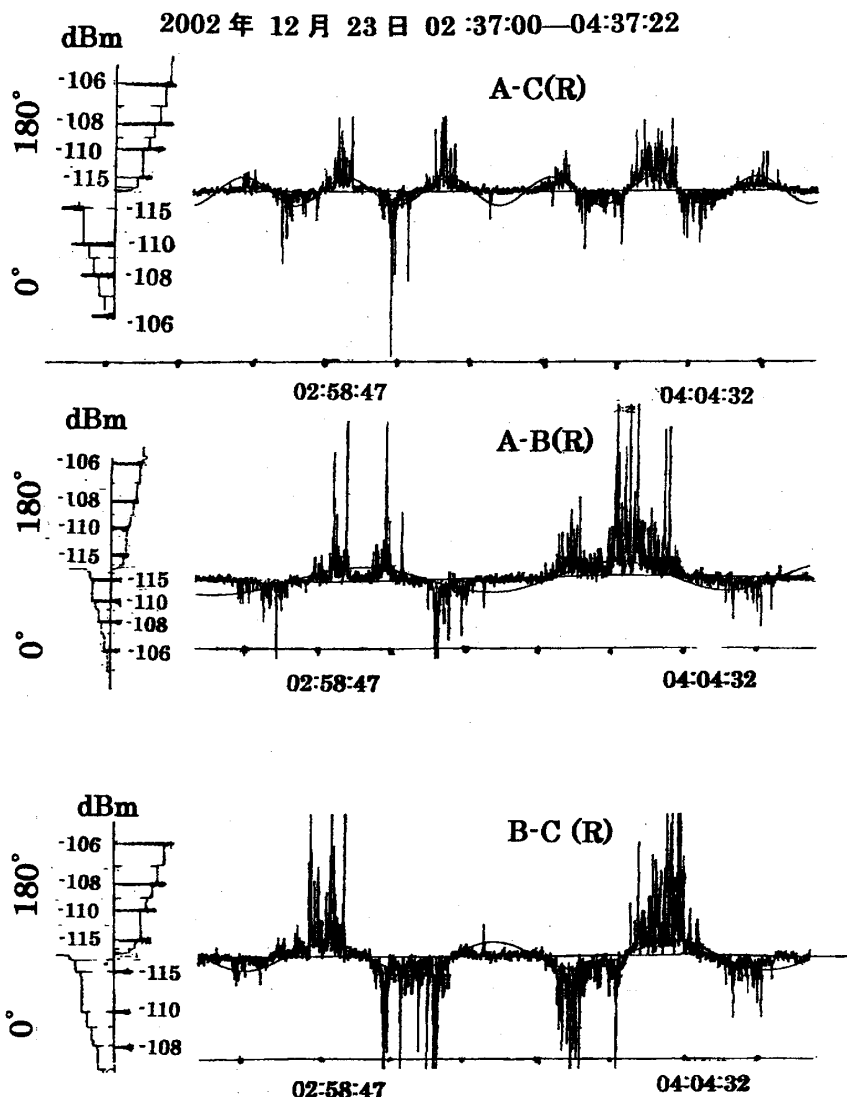


図3 木星デカメータ電波・Io-A 電波源より放射されたパーストの例 (2002年12月23日観測)。上から順にA-C, A-B, およびB-C 基線で検出された結果を示す。対比する計算フリッジは細い偽正弦波で示す。

5. 宇宙塵に基づくマルチ・コヒーレント放射

すでに述べた Io-A, 非 Io-A といった典型的な木星電波放射と異なり短いパルス性を示す特異な電波放射が観測されている。図4は2002年11月30日02時27分から03時33分の観測例で、ここに示されるパルス性の電波現象は通常局地的な雷放電現象として頻発する。しかし、図4に示す現象が通常の雷放電と異なる特殊性を示すのは木星を電波源として求める干渉計フリッジと一致する成分がかなり明確に見られる点である。

この特殊性は1994年7月木星にシューメーカー・レヴィー第9彗星が衝突した時期、一連の電波放射異常現象と同じ性格を示す。当時の異常電波現象はOya等(4)によりマルチ・コヒーレント性放射として提言されたもので、コヒーレント放射を行う電波源が近傍に複数個所、同時に

存在するときに発生する。この現象の理解のためここでは最も単純なモデルをたてて検討する。

いま、全体で N 個の発信源があるときそれが 1 群であるとき干渉計出力 P を考えると

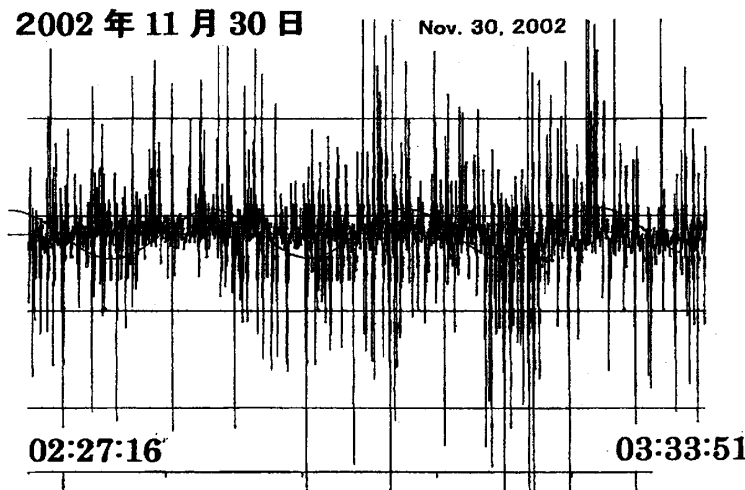


図 4. 2002 年 11 月 30 日の観測例

木星を周回している宇宙塵が木星磁気圏磁場と相互作用して発電することが、電波のエネルギー源となる。通常フリンジから逸脱する、多数のパルス性成分はマルチ・コヒーレント電波源の点滅による。

$$P = (N^2 / 2) E^2 \cos(\vec{k}(\vec{r}_A - \vec{r}_B)) \quad (3)$$

となる。ただし、それぞれの放射素子から到来する電場強度を同一の E と仮定し、 \vec{k} 、 \vec{r}_A および \vec{r}_B はそれぞれ、木星より到来する電波の波数ベクトル、および干渉計 A アンテナおよび B アンテナの位置ベクトルである。 \vec{k} ベクトルは地球の自転により方向を変え、対応して (3) 式は通常のフリンジを示す。一方、マルチ・コヒーレントの場合、 M 群に分かれて、激しく点滅する電波源に対し、干渉計出力 P_M は

$$P_M = ((N/M)^2 / 2) \left\{ \sum_{i=1}^M E_i(t - T_i) \right\} \left\{ \sum_{j=1}^M E_j(t - T_j) \right\} \cos \left[\vec{k}(\vec{r}_A - \vec{r}_B) \right] \quad (4)$$

となる。 $E_i(t - T_i)$ 、 $E_j(t - T_j)$ はそれぞれ i 、 j 電波源からの電波の電界であるが、 T_i および T_j はそれぞれ点滅している電波源の発生時刻である。したがって $T_i = T_j$ のとき (2) 式は通常のフリンジを示すが、 T_i および T_j が激しく変動している場合フリンジから逸脱する成分が発生する。この場合を理解する最も単純なケースとして ($N/3$) 個づつ 3 群の放射源が存在するとき P_M は

$$P_M = (N^2 / 18)(E_1^2 + E_2^2) \cos(\vec{k}(\vec{r}_A - \vec{r}_B)) \\ + (N^2 / 9) \{ E_1 E_2 \cos(\Phi_1 - \Phi_2) + E_1 E_3 \cos(\Phi_1 - \Phi_3) + E_2 E_3 \cos(\Phi_2 - \Phi_3) \} \cos(\vec{k}(\vec{r}_A - \vec{r}_B))$$

(5)

となる。これは、第三の電波源が、第一および第二電波源が A,B 両アンテナに到来し続けている中で、突然 B アンテナに到来した場合で (4) 式で $E_3^2 = 0$ となる。ここで $\Phi_i - \Phi_j$ は $i (=1,2,3)$ の電波源群と i とは異なる $j (=1,2,3)$ の電波源群の平均的位相差でありコヒーレント放射の生起する特性時間 (数秒程度と判断される) は、ほぼ一定値を示すが、その値は -1 から 0 を経て $+1$ との間のランダムな値をとる。このように、図 4 の結果が理解されるが、実際のマルチ・コヒーレント放射源の群数は 3 よりはるかに多く、第 i 群と第 j 群の位相差 $\cos(\Phi_i - \Phi_j)$ が全ての i, j の組み合わせに対して加わる。その群数が多い程 (3) 式で表される通常フリンジからの逸脱成分は激しく現れるようになる。

6. 木星磁気圏を周回する宇宙塵効果の消長

1994 年 7 月のシューメーカー・レヴィー 9 彗星衝突期に木星磁気圏中を周回する軌道に捕捉された彗星塵の木星磁場との相互作用に基づく発電効果の結果として放射される木星デカメータ電波成分として存在することが確認されている (4) が、この現象は 2000 年に至るまで、継続が確認されてきた。この電波放射発生の特徴としてマルチ・コヒーレント性の他さらに、本来微弱なため観測されていない非イオ B 電波源位置に新たな強い電波バーストとして出現してくる。

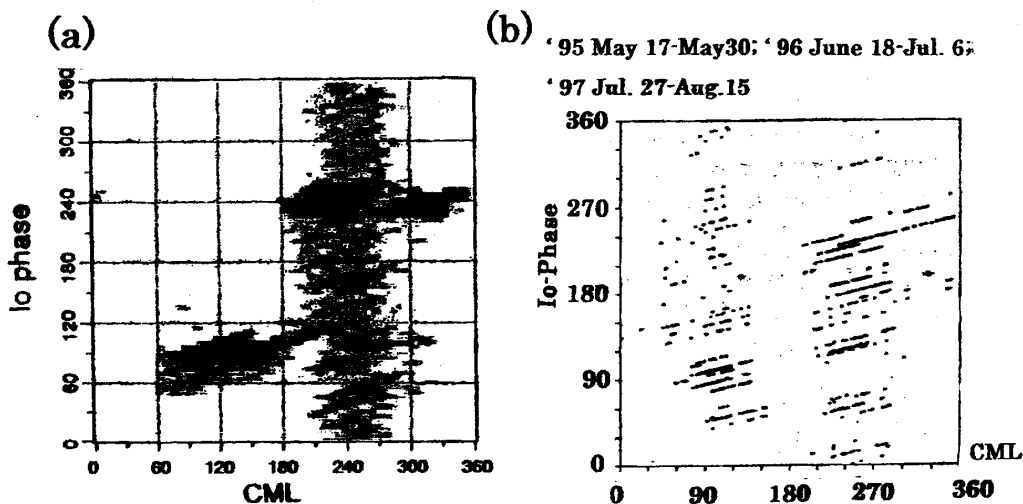


図 5 東北大学・蔵王木星電波観測施設による木星デカメータ電波 CML-Io 図：
(a) 1994 年以前 (b) 1995-1997 年データ

このことは、図 5 (a) および(b)に示すように、東北大学蔵王観測所で得られた木星電波の出現に関する Io-CML ダイアグラムに見ることができる。同図 (a) および(b)図はそれぞれ宇宙塵効果の現れなかった以前の通常の場合と宇宙塵効果の出現するようになった 1994 年から 1997 年までの場合を示すが、これらの図で CML、 90° から 180° の間、Io 位相角 180° から 360° の領域に出現する木星デカメータ電波現象が対象としている宇宙塵に関連する電波成分である。

本研究を通じ 2001 年および 2002 年に得られた Io-CML ダイアグラムを図 6 (a)および(b)に示すが、この結果はマルチ・コヒーレント性を示す電波放射成分が極端に少なくなりつつあることを示している。これらからも、1994 年 7 月以降、一時はリング状に木星周回軌道にあった彗星

起源の宇宙塵は8年間でその大部分が拡散され、一部に残留塵の雲が存在していると結論される。

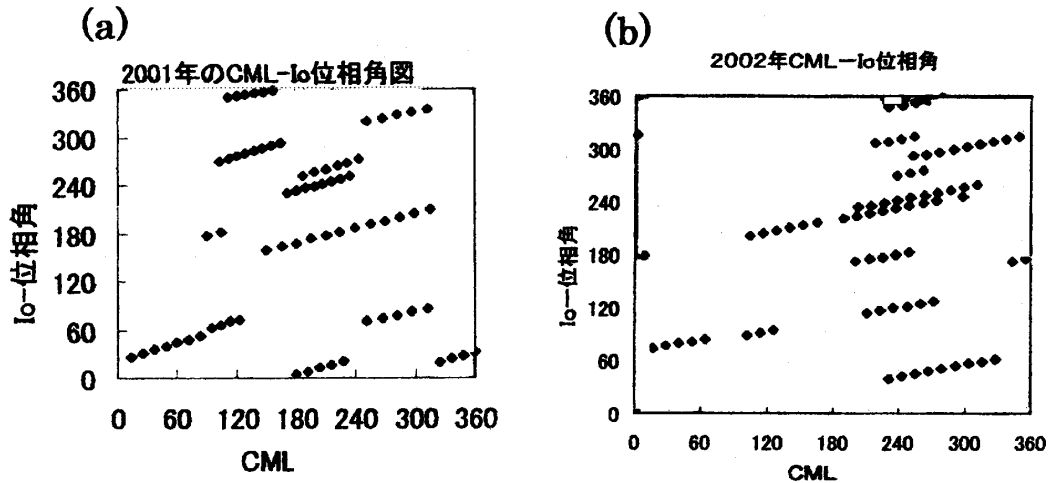


図6 本研究によって得られた木星デカメータ電波放射・CML-Io ダイアグラム
 (a) 2001年11月-12月の結果 (b)2002年11月-12月の結果

7. 結論

2000年4月にスタートした福井工業大学・宇宙短波電波100m級基線・干渉計設置の計画は2002年11月3日基線の設立をもって完成し、木星デカメータ電波が明確なフリッジを示す、良質な観測データとして取得される様になった。

観測結果は、典型的なIo関連A,B,およびC電波源からの電波放射とともに、1994年7月以降観測されるようになった、マルチ・コヒーレント電波放射の存在も示した。この特異な電波放射は木星磁気圏中を周回する彗星塵を起源とする宇宙塵の木星磁場との相互作用にもとづく発電現象をエネルギー源とするもので、この電波の検出は木星周回の宇宙塵の消長を究明するものとなる。本研究に於いて得られた結果からはこの宇宙塵起源の電波現象の発生頻度が、かなり少なくなったことが結論される。木星磁気圏を周回していた多量の宇宙塵は発生以来8年間でその大部分が宇宙空間に拡散し幾つかの限られた宇宙塵の集合塊が残される状況と判断される。

謝辞

本研究は、本学・学内特別研究費および、日本私立学校振興・共済事業団、大学改革推進特別経費「高等教育研究改革推進経費」にて推進された、そのご支援を深く感謝する。

文献

- (1) Jansky, K.G. Electrical disturbances apparently extraterrestrial Origin, Proc. IRE, **21**, 1387-1398, 1935
- (2) Burke, B.F., and K.L. Franklin, Radio emission from Jupiter, Nature, **175**, 1074, 1955
- (3) 大家 寛, 宇宙デカメータ電波干渉計システムの開発とその初期成果—福井工業大学芦原校地に於ける木星電波観測システム、福井工業大学研究紀要、**32**, 373-380、2002
- (4) Oya, H., and M. Iizima, M. Morioka, and H. Muraio, Extremely large enhancements of the Jovian decameter radio bursts caused by the magnetosphere-plasmasphere passage of Shoemaker-Levy 9 Comet fragments—Evolution of Jovian decametric radiation feature into the state of intense decametric pulsar, J. Geomag. Geoelectr., **49**, s49-s66, 1997

(平成15年12月3日受理)