

あわらキャンパス3基線干渉計による木星デカメータ電波の出現頻度解析

柳瀬 晴代*, 小林 香寿美**, 中城 智之***

Occurrence probability analyses of Jovian decameter radiation
by using three short baselines interferometer system at Awara campus

Haruyo Yanase*, Kazumi Kobayashi ** and Tomoyuki Nakajo***

The three short baselines radio interferometer system at Awara campus in Fukui University of Technology has been used for study of Jovian decameter radiation (DAM) for 9 years since 2001. DAM is concerned with Jovian auroral phenomena and its occurrence probability reflects the activity of Jovian magnetosphere. Since the discovery, it has been well known that the occurrence probability of DAM shows a long-term time variation with nearly 12-year periodicities in the past 50 years, however, the observation results at Awara campus from 2003 have showed the observed occurrence probability has been remained below the probability expected based on traditional observation results. We have paid attention to change in the occurrence probability and report the observation result in 2009.

Keywords: Jupiter, decameter, interferometer, occurrence probability, low frequency

1. 序論

木星デカメータ電波は木星磁気圏から放射される周波数 10–40MHz の非熱的電波であり、1955 年 Burke と Franklin によって発見されて以来、デカメータ波長帯の代表的な電波放射として広く観測されてきた。福井工業大学では、あわらキャンパスの3基線短距離干渉計を用いて 2001 年から出現頻度観測を継続しているが、2003 年から従来には見られなかった出現頻度の低下が見られるようになった。木星磁気圏における大規模な環境変化を示唆する結果であり、今後の出現頻度の経過に注目している。

2. 木星デカメータ電波について

木星デカメータ電波の発生周波数は電波源における電子サイクロトロン周波数であると考えられており、電波源の磁場強度は約 10G と推定される。このような強い磁場強度は、木星の持つ双極子磁場の極域付近に限られており、それ故電波源は南北極域付近に存在するとされている[1]。また、その放射電力は図1に示されているように、周波数 100MHz 以上の高周波の成分に対して突出して大きい。これは木星デカメータ電波がコヒーレント性の電波放射であり、そのエネルギーは加速された電子から波動粒子相互作用を介して供給されるとされている。すなわち、木星デカメータ

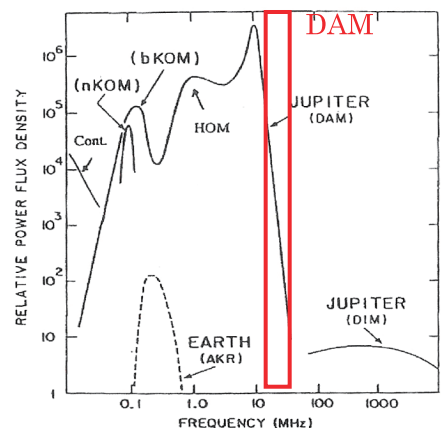


図1.木星磁気圏における電波のスペクトル[2]

* 電気工学専攻大学院生 **宇宙通信工学科学生 *** 宇宙情報科学科

電波は極域に振り込む電子により発生しており、木星オーロラの発光と強い関係のある電波放射と理解されている。木星デカメータ電波のエネルギー源となる加速電子の生成のためには木星磁気圏内部に加速電場が発生しなければならないが、その主要として、

- (1) 木星磁気圏と太陽風の相互作用
- (2) 木星の自転、即ち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
- (3) 木星磁気圏を周回する衛星イオ(Io)による発電効果

の3つが挙げられる。

(1)は、吹き付ける太陽風の息づきによって木星磁気圏の大きさが変動することによるものである。木星磁気圏の太陽側では、木星の自転による遠心力によって外部に流出しようとするプラズマ流と太陽風が衝突し衝撃波面を形成している。このような平衡状態にあるため、太陽風の速度や密度が変化した場合、平衡点が変化する。したがって、太陽風の動圧変化は木星磁気圏構造の大規模な変化を生み、結果、木星磁気圏とプラズマ流の相対速度の増加によるエネルギーの変動となって木星極域に運ばれることになる。次に(2)は、木星の自転によって外部に流出するプラズマの流れと磁場の回転との相対運動で発電作用が発生するもので、高速自転する天体の特徴として深宇宙におけるパルサーで最も卓越する要素である。最後に(3)は木星に固有の効果で、イオの火山活動により超高層まで吹き上げられた二酸化硫黄のガスが太陽の紫外線により電離され、イオ衛星を取り巻く電離層やイオ軌道上にドーナツ状に分布するプラズマのトーラスを形成する。それらがイオの公転と共に木星磁場中を運動することによって発電作用を生むものである(図2)。

このように、木星磁気圏における様々な発電作用の結果として生じた電場により加速され磁力線に沿って木星極域に振り込む電子の運動エネルギーが、木星デカメータ電波放射の直接のエネルギー源である。したがって、木星デカメータ電波は木星磁気圏内部に生じる様々なダイナミクスの反映の結果生じる放射であり、その観測は木星磁気圏の全体的な活動度をモニターする手段として非常に重要である。

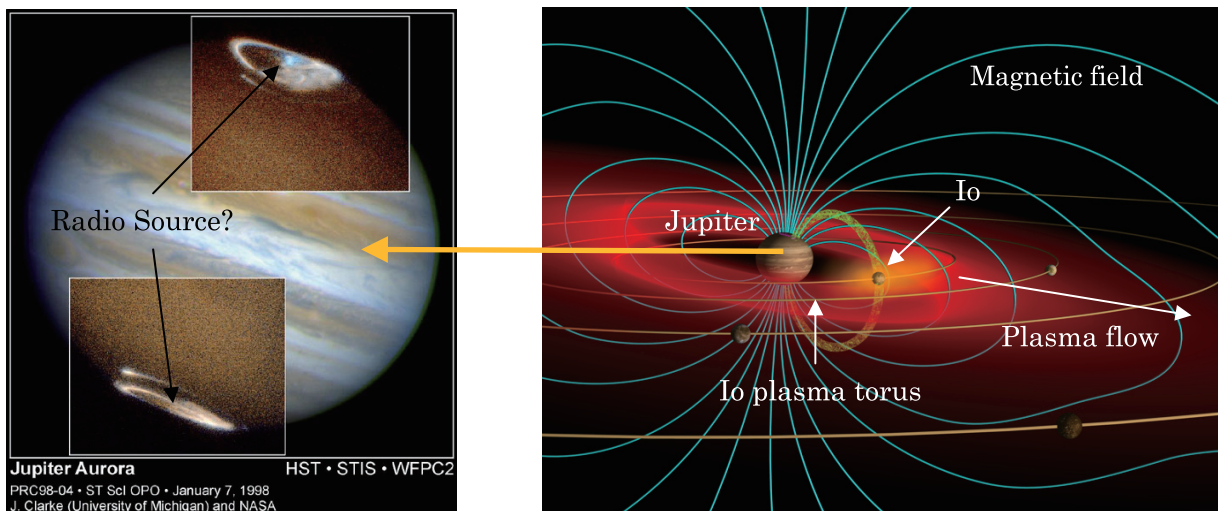


図2. (右) 木星周辺の電磁環境(John spencer's Astronomical Visualization/Lowell Observatory)。木星磁気圏における様々な発電作用の結果、加速された電子が磁力線に沿って極域に振り込む。(左) 降り込み電子によって極域に発生するオーロラ(http://hubblesite.org/gallery/album/solar_system/)。オーロラ発光と同時に木星デカメータ電波が放射される。

3. 木星デカメータ電波の出現頻度における周期変動

3.1. 短時間周期変動—10時間周期とイオ衛星によるコントローラー

木星デカメータ電波の出現頻度における比較的時間スケールの短い周期変動は中央子午線経度 (Central Meridian Longitude; CML) とイオ位相角を用いて図 3(左) に示す CML-イオ位相角図で表される。CML とイオ位相角の定義を図 3(右) に示す。CML は観測者 (地球) に面している木星の経度であり、1957 年 1 月 1 日に地球を向いていた木星 System III 経度を 0 度と定められた。System III 経度は木星の磁場に準拠した経度で、時点同期を正確に測定する度に何度か修正され、現在は 1965 年に修正されたものが使われている。

CML-イオ位相角図では、実際に木星デカメータ電波放射が観測された時点の CML 及び Io 位相角がプロットされ、色が濃くなっている部分ほど出現頻度が高いことを意味している。図 3(左) を見ると、CML が 140° および 250° 付近でデカメータ電波の出現頻度が高くなっている。この出現頻度が高くなっている CML = 140° 付近の領域を早期電波源 (B-source), CML = 250° 付近の領域を主電波源 (A-source) と呼ぶ。また、CML = 300° 付近の領域は後期電波源 (C-source) と呼ばれる。

さらに、各電波源でイオ位相角に依存して出現頻度が高くなる領域が存在する。B-source を見てみると、イオ位相角 90° 付近の領域で出現頻度が高くなっており、この領域を Io-B 電波源と呼ぶ。同様に A-source, C-source では Io 位相角 240° 付近の領域で出現頻度が高くなっており、それぞれ Io-A, Io-C 電波源と呼ぶ。これとは別に、A, B 及び C の各電波源において Io 位相角に依存しない領域は、それぞれ Non-Io-A, Non-Io-B 及び Non-Io-C と呼ばれる。Io-A, B, C 電波源のエネルギー源は衛星イオによる発電作用、Non-Io-A, B, C についてはイオ衛星の位置に直接関わらず出現頻度が高くなっているため、供給されるエネルギーは木星の自転及び木星磁気圏と太陽風の相互作用によるものが基本と考えられる。

木星は約 10 時間で 1 回自転する一方で、イオは約 1.77 日で木星を公転するため、出現の周期変動として木星の自転に伴う 10 時間周期とイオの公転に起因する約 1.77 日の周期が存在する。

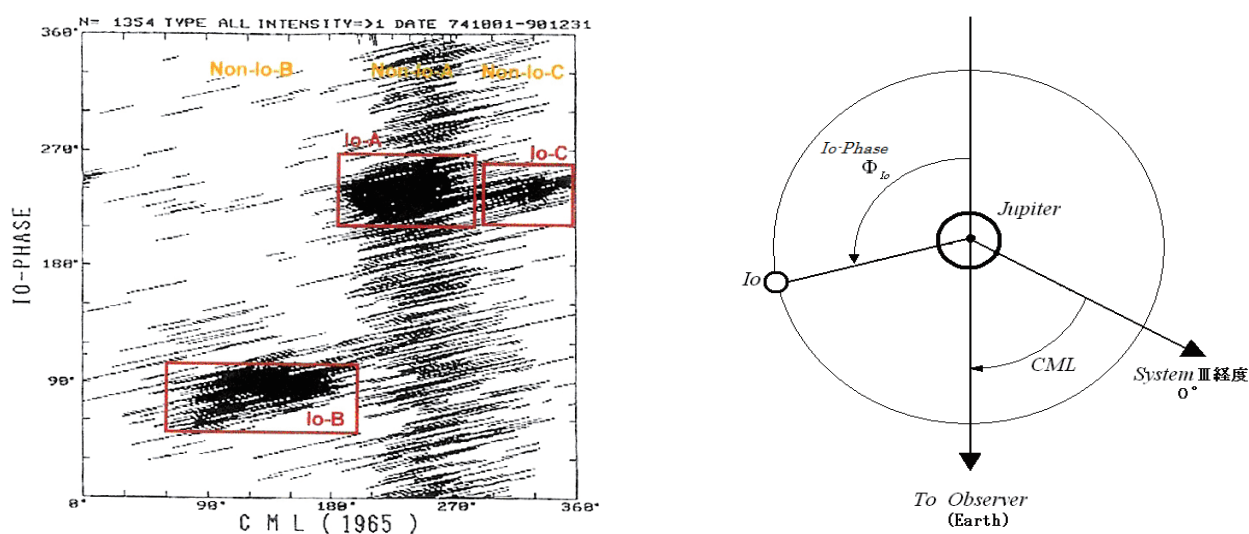


図 3. (左) 東北大学蔵王観測所における 1974 年～1991 年の 17 年間の観測結果[3] および (右) イオ位相角 Φ_{Io} と CML の定義。

3.2. 長時間周期変動—約12年の周期変動—

上記の比較的短い時間スケールでの変動と併せて、木星デカメータ電波の出現頻度は約12年という非常に長い時間スケールで変化することが早くから指摘されてきた[4]。図4（上）は、東北大学蔵王観測所における1974年～2001年の27年間の観測期間における出現頻度の月毎の変化を表したものであるが、その包絡線に11～12年の周期を持つ変動が見られる[5]。このような長期変動に関して、約11年の周期を持つ太陽黒点数と逆相関の関係があり、太陽活動度が影響を及ぼしていること[3]や約12年の周期で変化する観測者に対する木星の自転軸の傾きの影響[6]が挙げられている。

一方、2001年から開始されたあわらキャンパスでの観測結果を図4（下）に示す[7]。図4（上）の従来の12年周期の変化と比較すると、2003年以降に出現頻度が著しく低下している。このような2年間という短期間に出現頻度が著しく低下したことは過去に見られなかった現象であり、木星磁気圏に何らかの異常が発生している可能性、特に1994年に木星に衝突したSL9彗星の影響が示唆されている[7]。

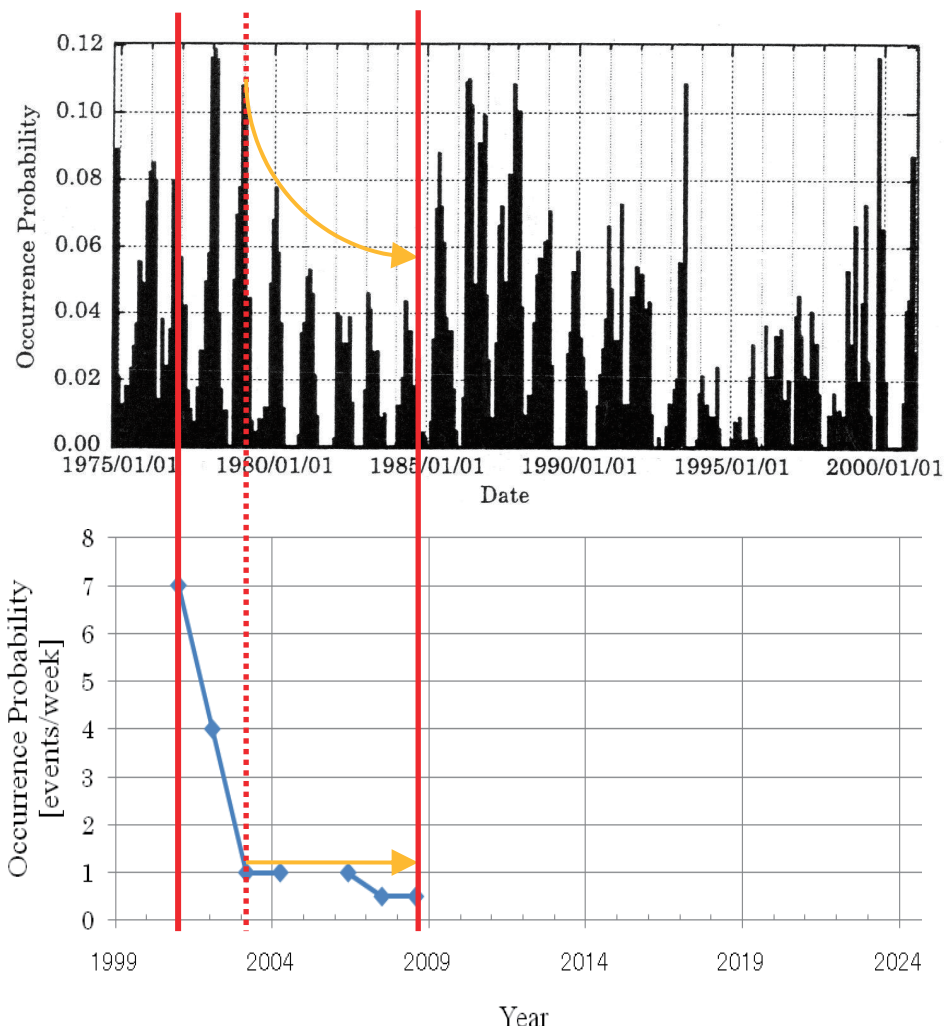


図4. （上）東北大学蔵王観測所における1974年～2001年の27年間の観測による木星デカメータ電波の長期間周期変動[4]と（下）あわらキャンパスにおける2001年～2008年の8年間の観測による木星デカメータ電波の長期間周期変動[6]の比較。従来の結果に対して、2003年以降は出現頻度が著しく低下したままになっている。

3.3. 本研究の目的

このような経緯から、私たちは木星デカメータ電波の出現頻度が今後どのように推移していくかに注目している。すなわち、木星磁気圏に何らかの異常が発生し、木星デカメータ電波の発生が抑圧されている可能性を考えている。図4（上）に示した従来の12年周期では、2009年以降、出現頻度が急激に増加していくフェイズに移行すると予想されるが、そのような抑圧現象が継続していれば予想通りには出現頻度が増加しないと思われる。このような観点から2009年の木星デカメータ電波観測を実施した。

4. あわらキャンパス・デカメータ帯宇宙電波観測システム

4.1. 3基線短距離干渉計ネットワークと干渉計の原理

福井工業大学あわらキャンパスには、周波数20–40MHzの電波を受信可能な3基のアンテナ（A、B、Cアンテナ、図5）により構成される、3基線短距離干渉計システムが設置されている。このシステムを用いて連続的に観測を行い、受信された信号が木星起源かどうかの判定を行っている。

干渉計観測の基本は2基のアンテナの組である（図6）。距離 L 離れて設置された2基のアンテナを用いて、1個の点状電波源から到来する電波を受信し、2基のアンテナの受信信号間の相互相関解析を行うことにより到来方向を決定する。すなわち、AアンテナとCアンテナの受信信号を V_A 、 V_C とすると、

$$F(t) = \langle V_A V_C \rangle = \frac{E_A(t) E_C(t)}{2} \cos \left(\frac{2\pi f}{c} L \cos \theta_{AC}(t) \right) \quad (1)$$

を求める。ここで、 $E_A(t)$ 、 $E_C(t)$ は受信信号の振幅、 f は観測周波数、 L はアンテナ間の距離である。 $F(t)$ は“フリンジ”と呼ばれ、電波源の日周運動により $\theta_{AC}(t)$ が変化していくことにより、正弦波状の波形となる。このフリンジの波形および周期が電波源の位置によって異なるため、フリンジ波形の観測結果から電波の到来方向を決定できる。すなわち、受信した電波が木星起源かどうかの判定が可能となる。

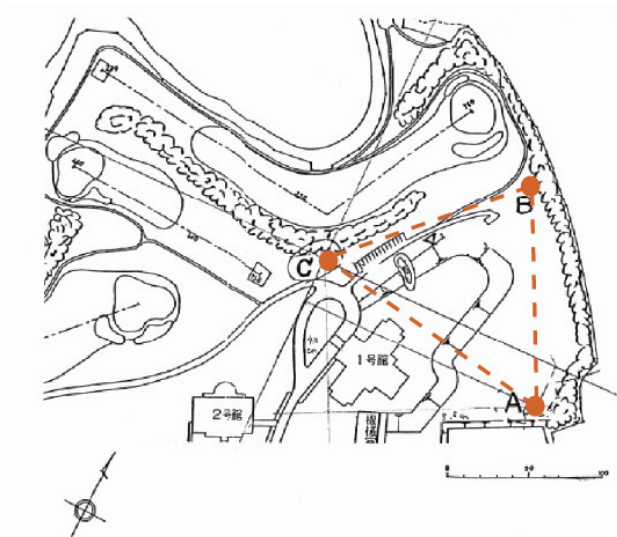


図5. あわらキャンパスにおける3基のアンテナの配置図。アンテナ間の距離はA–C基線が164.8m、A–BおよびB–C基線が130mである。

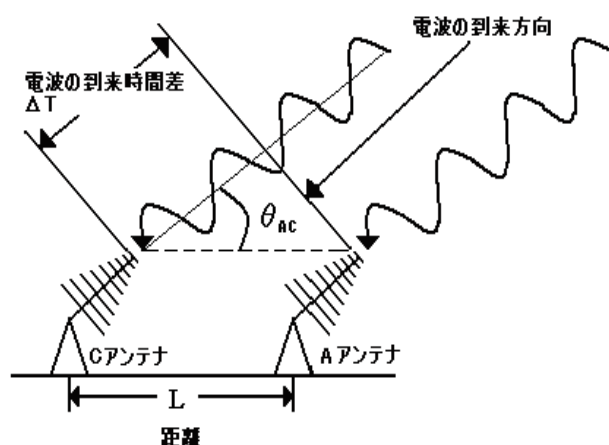


図6. 干渉計の原理

4.2 観測システム

3基線短距離干渉計観測システムのブロック図を図7に示す。基本的には東北大学蔵王観測局と等価なシステムとなっており、受信アンテナとして Creative Design 社製の同一規格の対数周期アンテナを用いている。アンテナで受信された信号は前置増幅部に入り、帯域フィルタにより 20–40MHz の周波数帯を取り出し、伝送路上の減衰を考慮して 25dB 増幅される。この初段の増幅器は観測システムの受信感度を決定する特に重要な要素で、東北大学のシステムと同じく R&K 社製の低雑音増幅器 A-11 を用いている。増幅後、さらに右旋(R)、左旋(L)の偏波の分離が行われ主受信機へ送られる。主受信機は三段スーパーヘテロダイン方式で構成され、電圧利得は 90dB である。受信信号は3段の周波数変換をへて LSB 処理後、中心周波数 1 kHz、帯域幅 2kHz の信号に変換され位相検出器に送られる。位相検出器は、信号の乗算・積分処理によってフリンジを出力する。R系、L系それぞれについて A-B、A-C、B-C の組み合わせで信号処理が行われ、フリンジ出力 6 チャンネルおよび A アンテナの R 系、L 系の検波出力 2 チャンネルの合計 8 チャンネルの信号が A/D 変換ボードにおいてサンプリング周波数 5Hz でデジタル信号に変換され、ハードディスクドライブに保存される。

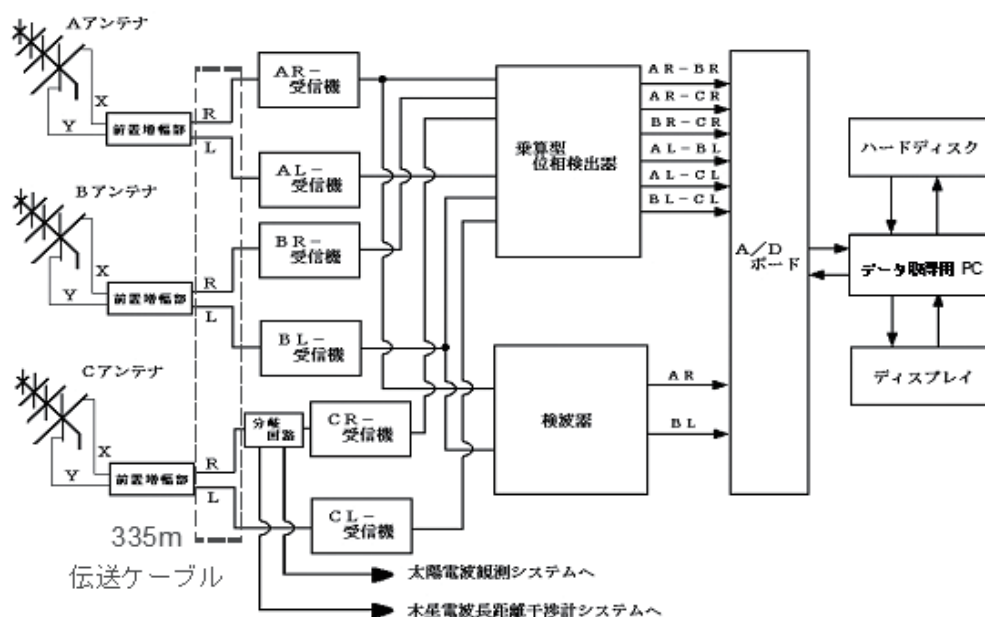


図7. あわらキャンパス宇宙デカメータ電波短距離干渉計システムブロック図

5. 2009年の観測およびデータ解析

5.1 観測状況

木星デカメータ電波の観測は、通信による混信の影響が少なくかつ太陽起源の雑音電波の影響がない夜間 19時から朝方 6 時くらいの時間帯が最も適している。2009 年は午前 0 時に南中する日が 8 月 6 日であり、3 月から 10 月が観測に適した期間であったため、試験観測も含め 2 月 1 日から 10 月 31 日までの 9 か月間とし、この期間中ほぼ連続的にデータ取得を行った。観測状況のまとめを表 1 に、木星デカメータ電波が受信された観測日時の一覧を表 2 に示す。

表 1. 2009 年の観測結果のまとめ

本観測期間	3月1日～10月31日 (32週間)
観測対象	Io-A、B、C 電波源および Non-Io-A 電波源
観測イベント総数	235 回
混信による影響を受けたイベント総数	60 回 (8.6 週間)
有効イベント総数	175 回 (=235-60)
有効観測期間	23.4 週間 (=32-8.6)
木星電波が観測されたイベント総数	26 回
出現頻度	1.1 回/週 (=26 回/23.4 週)

表 2. 2009 年に木星電波が受信された日時および電波源の一覧

月	日	時間帯	電波源	判定の信頼度
3	18	5 時 20 分～7 時	Io-B,non-Io-A	2
4	19	3 時 40 分～5 時	non-Io-A	2
5	11	3 時～3 時 20 分	non-Io-A	2
	13	2 時 40 分～4 時 40 分	non-Io-A	2
	17	6 時～7 時	non-Io-A	2
	18	2 時～4 時	Io-A	2
	22	5 時～7 時	non-Io-A	2
	26	5 時 40 分～7 時	Io-B	2
6	4	0 時 40 分～2 時	non-Io-A	2
	10	5 時 40 分～7 時	non-Io-A	2
	28	0 時 20 分～2 時	non-Io-A	2
	30	3 時～4 時	non-Io-A	3
7	3	2 時～3 時 40 分	Io-C	2
	4	2 時 20 分～7 時	Io-B,non-Io-A	3
	11	3 時～7 時	Io-B,non-Io-A	2
	18	4 時 20 分～6 時	Io-B	2
	28	21 時 40 分～23 時 40 分	Io-B	2
	29	0 時～2 時	non-Io-A	1
	4	23 時～23 時 40 分	Io-B	2
	5	0 時～3 時 20 分	Io-B,non-Io-A	1
8	8	20 時 20 分～20 時 40 分	non-Io-A	2
	11	23 時 20 分～23 時 40 分	Io-B	2
	12	0 時～1 時	Io-B	1
	12	21 時 40 分～23 時 40 分	non-Io-A	2
	13	0 時	non-Io-A	1
9	6	19 時～19 時 20 分	non-Io-A	1
	8	19 時～21 時	non-Io-A	2
	17	21 時～23 時 20 分	non-Io-A	1
	18	19 時～21 時 20 分	non-Io-A,Io-C	1
	20	19 時～20 時 40 分	non-Io-A	1

観測対象は、出現頻度の高い Io-A、B、C 電波源と Non-Io-A 電波源としている。表 2 に示されているように、1 日の観測において各電波源の観測が数時間続くが、この連続した数時間の観測時間をもって、イベント数 1 として計測している。9 ヶ月間の観測において、観測イベント総数は 235 回であったが、その内 60 回は通信や雷電波の混信によって観測が不可能な状況であった。したがって、有効イベント総数は 175 回、有効観測期間は 27.4 週間である。木星デカメータ電波と判定されたイベント総数は 26 回で、出現頻度は、1.1 (回/週) と求められる。

5.2 木星デカメータ電波の判定

受信された電波が木星起源かどうかを判定するために、観測されたフリンジ波形と電波が木星起源の場合に予測されるフリンジ波形（理論フリンジ波形）とを比較し、両者が一致するかどうかを目視で判定し、判定の信頼度を 0、1、2、3 の 4 段階に分けている（3：信頼度大、2：信頼度中、1：信頼度小、0：木星起源ではない）。信頼度 3、2、1 の代表的なフリンジ波形の比較結果を図 9(a)~(c)に示す。

図 9(a)は 7 月 4 日に観測された Io-B 電波源の例で信頼度 3 と判定したケースである。色付きで表示された波形が観測フリンジ波形、滑らかな正弦波状の波形が理論フリンジ波形である。理論フリンジ波形が、電波が常時一定の強度で受信された場合の波形であるのに対して、木星デカメータ電波の出現特性が時間的にバースト状であるため両者は一見異なる波形に見えるが、両者のフリンジの正負の変化する周期はよく一致している。したがって、受信された電波は木星起源と判定される。このように明確に判定された例は、2009 年は 2 例のみであった。

図 9(b)は信頼度 2 の場合である。矢印で示された期間にバースト状の電波が受信されている。バーストの継続時間が短いために理論フリンジ波形との比較が困難になっているが、B-C 基線で理論フリンジ波形が負から正へと変化しているのに対して、観測フリンジ波形は正から負へ逆に変化している。この逆の変化は受信システム特性により観測フリンジの位相がシフトしているために生じており、フリンジの符号が入れ替わる変化の様子は一致している。したがって、木星起源である可能性が高いと判断される。

図 9(c)は信頼度 1 の場合である。観測フリンジは全体的に混信の影響を受けて、理論フリンジと一致しない様相を示しているが、B-C 基線では矢印で示された時間帯に若干、理論フリンジと一致する変化が見て取れる。このような場合判定は非常に困難であるが、出現頻度を低く見積もることを避けるために、木星起源電波と判定した。

このように、現段階では目視で木星デカメータ電波の判定を行っているために、結果には不確実性が伴っている。今後、より客観的な判定方法を適用していく必要があるが、信頼度 1 以上の場合をすべて木星起源電波として数え上げているため、少なくとも出現頻度を低く見積もることは回避されていると考えられる。

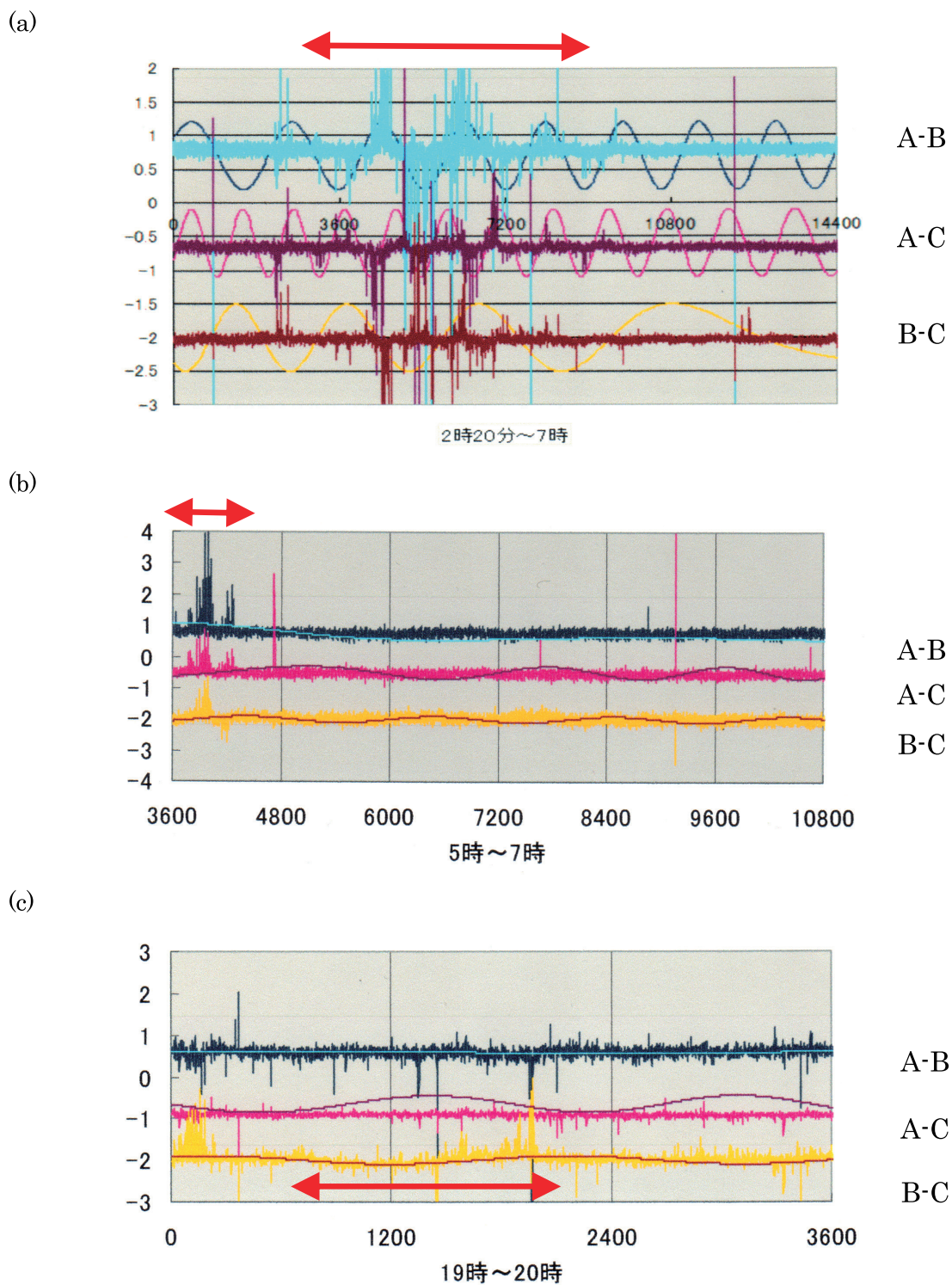


図9 代表的な観測フリンジ波形と理論フリンジ波形。(a)2009年7月4日 02:20:00～07:00:00(JST)の観測例(信頼度3)、(b)2009年3月18日 5:00:00～7:00:00(JST)の観測例(信頼度2)、(c)2009年9月6日 19:00:00～20:00:00(JST)の観測例(信頼度1)。各パネルとも、上から、A-B、A-C、B-C基線の観測結果であり、バースト状の波形が観測フリンジ波形、滑らかな正弦波状の波形が理論フリンジ波形を表す。

5. 結論と今後の展望

図 10 に 2009 年の観測結果を加えたあわらキャンパスでの出現頻度の推移と、東北大学による過去の 1975 年から 2000 年までの出現頻度の比較の結果を示す。昨年度と比較すると、2009 年は出現頻度がわずかに上昇したものの、過去のデータから期待されるほどには上昇せず、2003 年から見られた出現頻度の減少傾向は 2009 年も継続していると考えられる。2010 年以降、本来であればさらに出現頻度が上昇する時期に移行するため、今後の観測がさらに重要となる。

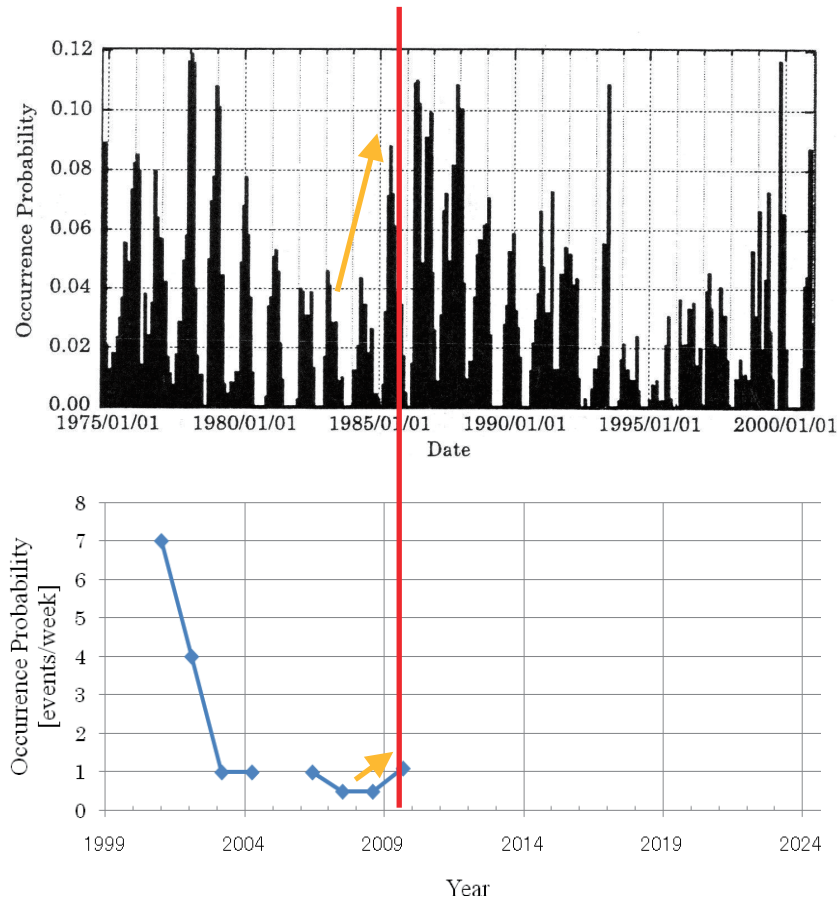


図 10. あわらキャンパスにおける 2001 年から 2009 年の木星電波出現頻度と、過去の典型的な 12 年周期との比較。

参考文献

- [1] Physics of Jovian magnetosphere, edited by A.J. Dessler, Cambridge University press, 1983.
- [2] Kaiser, M. L., Time variable magnetospheric radio emissions from Jupiter, *J.Geophys.Res.*, **98**, 18,757-18,765, 1993.
- [3] Oya, H., Data of Jovian decametric radiation observed at Zao station: Part-6, *Communication of Solar Terrestrial Activity Chart published by Japan National Committee for Geomagnetism and Aeronomy Science Council of Japan, Tohoku University, Japan*, 1995.
- [4] Carr et al., Recent decameter-wave-length observations of Jupiter, Saturn, and Venus, *Astrophys. J.*, **134**, 105-125, 1961.
- [5] 川内亜希子、小野高幸、「木星デカメートル電波の長期変動に関する研究—De 及び太陽活動変動の影響について—」、東北大学修士論文、2002.
- [6] Carr et al., The twelve-year periodicities of the decametric radiation of Jupiter, *Radio Sci.*, **5**, 495-503, 1970.
- [7] 畠山千尋、大家寛、「福井工業大学における木星デカメータ電波観測 —SL-9 彗星衝突にともなう電波放射異常の究明」、福井工業大学修士論文、2008.

(平成 22 年 3 月 31 日受理)