# 惑星探査機で観測された木星 DAM 波・HOM 波の研究

今井 雅文\* 今井 一雅\*

\*京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 <sup>†</sup>高知工業高等専門学校·電気情報工学科

## 1. 緒 言

木星デカメートル (DAM) 波とヘクトメートル (HOM) 波は、木星の固有磁場とプラズマの相互作用によるサイ クロトロンメーザー理論<sup>D</sup>で放射されると考えられてい る自然電波放射である.表1に先行研究で明らかとなっ た木星 DAM 波・HOM 波の特徴をまとめたものを示す.

この木星 DAM 波・HOM 波は地上観測や衛星観測に より,幅広く研究がなされているが,これらの電波の複 雑な放射特性や観測の制約により,未だに全貌が明らか となっていない<sup>3), 0</sup>.地上観測では,地球の電離層の影 響により,観測可能な周波数は15 MHz 以上である.一 方,惑星探査機での観測はそれぞれの探査機に搭載され ている波動観測機器の性能(機器の分解能,サンプリン グ時間,アンテナの長さ等)に依存する.今まで唯一, 惑星探査機ボイジャーに搭載された Planetary Radio Astronomy (PRA)機器<sup>9</sup>が木星 DAM 波・HOM 波を 連続的に観測しているが,他の機器からの電波干渉や高 周波・低周波受信機の感度の違いにより,この二つの電 波放射源の関係は十分理解されていない.

本研究の目的は、惑星探査機カッシーニとボイジャー 1・2 号が木星接近時に観測した木星電波データをもとに、 木星 DAM 波・HOM 波の関係性を統計解析により明ら かにすることである.また、それらの結果から、木星電 波のビーム構造や電波源の位置に関しても考察する.

#### 2. 惑星探査機の観測データ

木星 DAM 波・HOM 波が発見されて以来,地上観測 や地球近傍の衛星で観測が行われている<sup>3),6)</sup>が,それぞ れの観測で得られた木星電波データの周波数範囲は異な る.例えば,惑星探査機カッシーニ,ボイジャー1号・2 号で観測された木星電波のデータは高い SN 比を有し, 観測周波数 16 MHz 以下で直接比較することができる. 本研究では,主に周波数 25 MHz 以下の木星 DAM 波・ HOM 波構造に絞って解析を行った.

# 2.1 惑星探査機カッシーニの観測装置 RPWS

 Table 1
 Some characteristics of DAM and HOM

惑星探査機カッシーニに搭載されている Radio and

	DAM		HOM
Io effect 2)	Yes	No	No
Classification	Io-DAM	non-Io-DAM	HOM
Upper frequency	$39.5{ m MHz}^{3)}$	38 MHz <sup>3)</sup>	$3^{3}$ or $7{ m MHz}^{4)}$
Lower frequency	a few MHz <sup>3)</sup>		300 kHz <sup>3)</sup>
L-shell	≈5.9 5)	≈5.9 <sup>5)</sup> or ≥7 <sup>6)</sup>	≥10 7)

 Table 2
 Cassini and Voyager spacecraft collection summary

Spacecraft	Observations	Spacecraft	#Rotations
	Used in this	Jovigraphic	of Jupiter
	Study	Latitude	
Cassini	2-Oct-00-	+3.7° –	339
	21-Mar-01	-3.7°	
Voyager 1	6-Feb-79-	+3.2° –	133
	7-Apr-79	-5.3°	
Voyager 2	8-Jun-79 –	+7.3° –	122
_	30-Jul-79	+5.2°	

Plasma Wave Science (RPWS) 機器 <sup>10</sup>は5 つの受信機 で構成されており,1 Hz から16 MHz までの波動デー タを観測する装置である. RPWS の受信機の1 つである High Frequency Receiver (HFR) は3本のモノポール アンテナを用いて,3.5 kHz から16 MHz まで観測でき る. この3本のアンテナはいずれも長さが10 m あり, Eu, Ev, Ew と呼ばれている. Eu と Ev は平行に120° 離れた所に位置し,それらにほぼ直行する形で Ew が配 置されている.本研究では,HF1 (0.325 MHz から4.075 MHz まで50 kHz 毎の全76 チャンネル)と HF2 (4.025 MHz から16.025 MHz まで200 kHz 毎の全61 チャン ネル)の32 秒間隔でサンプリングされた観測モードを 用いる.

#### 2.2 惑星探査機ボイジャーの観測装置 PRA

惑星探査機ボイジャーに搭載された PRA 機器は, 1.2 kHz から 40.2 MHz までの波動データを観測する装置で, 2 つの受信機で構成されている. PRA の受信機の 1 つで ある High Band Receiver (HBR) は 2 本の直行した長 さ 10 m のアンテナにより, 1.3 MHz から 40.2 MHz ま で観測できる受信機である.本研究では, HBR を 307.2 kHz 毎 (128 チャンネル) に, 42 秒平均でサンプリング された観測モードを用いる.

# 2.3 解析データ

探査機で観測された木星 DAM 波・HOM 波のデータ による変化を直接比較するため,惑星探査機カッシーニ, ボイジャー1 号・2 号で観測されたデータを解析する. 本研究で解析した幾何学的パラメータを表 2 に,探査機 の軌道と太陽との位置関係を示す Local Time,木理緯度 を図1に示す.ただし,探査機が木星最接近時に急激に 距離,Local Time,木理緯度が変化したため,カッシー ニは 200 RJ (木星の半径の 200 倍の距離)以上,ボイジ ャー1 号・2 号は 25 RJ以上のデータだけ用いている.



Fig. 1 Trajectories of Cassini, Voyager 1, and Voyager 2.

# 3. 解析方法

先行研究では、惑星探査機ボイジャーで観測された木 星 DAM 波のデータカタログが作成され、既に公開され ている<sup>11),120</sup>が、各々の観測周波数では解析されていない. しかし、木星 DAM 波はダイナミックスペクトラム(時 間対周波数)上では、円弧のような構造<sup>3),60</sup>をしている ため、同じ時間に観測しても、各々の観測周波数で電波 強度が異なる.本研究では、惑星探査機カッシーニとボ イジャー1号・2号によって観測された各々の電波の周 波数に対して、木星発生頻度の導出を行う.

#### 3.1 木星電波発生頻度の計算方法

惑星探査機カッシーニとボイジャーで観測された波動 データを周波数毎に、100 R<sub>J</sub>において距離補正を行う. 次に、木星の磁場自転毎に、個々の電波強度の平均値( $\mu$ ) と標準偏差( $\sigma$ )を計算する.本解析では、Voyager/PRA と Cassini/RPWS の受信機の感度がそれぞれ異なるた め、カッシーニとボイジャーの場合は、発生頻度を決め るため、閾値を $\mu$  + 0.2 $\sigma$  と $\mu$  + 1 $\sigma$  とする.出現回数 A は、観測データが閾値以上の場合にカウントし、観測回 数 B は受信機が動作している場合にカウントし、観測回 数 B は受信機が動作している場合にカウントする. A と B は 2°の木星磁場経度 CML と 5°の衛星イオの位相 角 Io Phase の bin 毎に整理する.したがって、この方法 では強い電波も弱い電波も同じ重みで比較することとな る.これは、強い電波成分しか解析できない電波強度の 平均プロットと比べて、CML において周期的で弱い電 波を解析することに優れている<sup>3,6,9</sup>.

木星電波発生頻度 *OP*は bin 毎に 0 から 1 の値である *AIB* で計算される. さらに,衛星イオに関係しない領域 (80°  $\leq$  lo Phase  $\leq$  100°及び230°  $\leq$  lo Phase  $\leq$  260° を除く領域)の範囲を抽出して,各々の周波数毎に CML (4.1 参照) に整理する. カッシーニの場合,全体の発 生頻度 *OP*は (1) 式で導出される.

$$OP = \left\{ \frac{A(E_U)}{B(E_U)} + \frac{A(E_V)}{B(E_V)} + \frac{A(E_W)}{B(E_W)} \right\} / 3$$
(1)

この方法は、アンテナの指向性パターンによる影響を 軽減できる統計的な解析方法である.この一連の作業を 周波数毎に行う.

## 4. 解析結果

本章では、惑星探査機カッシーニとボイジャーで観測 された木星 DAM 波・HOM 波の発生頻度を木星磁場経 度 CML 対周波数で描画した図を用いて議論する.本章 の最後では、惑星探査機カッシーニの接近前と後で観測 された non-Io-B と non-Io-A の特徴から木星電波放射モ デル及び電波源の位置に関しても議論する.

# 4.1 惑星探査機カッシーニとボイジャーで得られた 木星電波発生頻度マップの比較

衛星イオに関係しない木星 DAM 波と HOM 波の木星 磁場経度依存性を調べるため,惑星探査機カッシーニ, ボイジャー1 号・2 号が木星に最接近した前・後のデー タを用いて,描画した CML 対周波数の木星電波発生頻 度マップを図2に示す.ボイジャーのデータは25 MHz までの周波数を示している.ボイジャーとカッシーニで 共に観測した周波数帯は白の横線で上・下限を示してい る.図2の複雑な構造から"non-Io-B", "non-Io-A", "non-Io-C", "non-Io-D", "HOM"のように,発生頻度 の高いところをラベルを振って,分類している<sup>3,6</sup>.そ れぞれの成分を説明する前に,3つの大きな雑音領域に 関して以下に述べる.

・探査機自体からの雑音により、特定の周波数に連続 的な電波干渉がある(特に図2aと2bの15 MHz付近).

・ボイジャーの木星接近前の図2cと2eで,探査機に
 搭載された他の機器による縦縞の周期的な雑音がある<sup>9</sup>.

・解析で用いた閾値が雑音を出現回数に数えたため, ボイジャー1号の木星接近後とボイジャー2号の木星接 近前後の周波数22MHz以上で,解析雑音が生じている.

以上の3つの雑音領域が一部の木星電波本来の構造を 隠してしまう場合がある.

惑星探査機カッシーニとボイジャー1 号の木星接近前 の軌道が非常に近いため、これらの木星発生頻度マップ である図 2a と 2c を用いて、Cassini/RPWS と Voyager/PRA の受信機の感度を比較する.前述した雑音 により、一部隠されている部分もあるが、顕著な non-Io-B や低い周波数部分の HOM 波の構造は共通し た特徴が見られる.しかし、例えば、図 2a の 16 MHz は non-Io-A と non-Io-C の構造がはっきりと現われてい るが、図 2c では、ほとんどそれらしき特徴が見受けられ ない.これは、RPWS が PRA より、距離補正をしてい るにもかかわらず、約2桁受信感度が優れているためで あると考えられる<sup>13</sup>.



Fig. 2 Occurrence probability of non-Io-DAM and HOM shown as a function of Jovian System III CML. The data taken from Cassini, Voyager 1, and Voyager 2 using (a) 187, (b) 152, (c) 64, (d) 69, (e) 74, (f) 48 planetary rotations before and after Jovian encounter.

周波数 16 MHz から 25 MHz の non-Io-A の構造を示 した図 2e は地上観測データにより示された構造によく 似ている<sup>3)</sup>. また,一部 Local Time 効果<sup>9</sup>により,図 2eの non-Io-A は240°から300° CMLの範囲で存在し ている.一方,惑星探査機ボイジャー1号と2号の軌道 が似ているにもかかわらず,周波数 16 MHz 以上の non-Io-A が図 2c で顕著に現われてない.これは,縦縞 の干渉雑音が木星電波放射の強度より強く,発生頻度が 局所的に高くなったためであると考えられる.

その他の non-Io-A の特徴としては、図 2a より、2 つ の 異 な る 領 域 (sub: 210°  $\leq$  CML  $\leq$  260°, main: 260°  $\leq$  CML  $\leq$  330°)に発生頻度が高くなっている.前 者は non-Io-B の端と周波数 9 MHz の 210° CML あた りで繋がっているように見られ、後者は独立して、周波 数 12 MHz の 270° CML 付近まで続いている.一方、 図 2b では、周波数 16 MHz において、 non-Io-A の領域 は230°  $\leq$  CML  $\leq$  250°となっている. 図 2a の sub と main を含む non-Io-A の方が図 2b より広範囲に分布し ている理由は、観測した Local Time の違いや木理緯度 の違いにより生じた結果であると考えられる.木理緯度 による変化を緯度効果、または D<sub>E</sub>効果<sup>3</sup>と呼び、地上観 測データより、特に non-Io-A で顕著な現象である.また、本研究により、non-Io-A に sub と main の成分が存 在することが明らかとなった.

図2で得られた non-Io-A&C と HOM の周波数構造か ら, non-Io-A&C が HOM に独立しているかを議論する. 図 2b の周波数 5 MHz に, non-Io-C と HOM の間に発 生頻度が低く,狭い領域 (316°  $\leq$  CML  $\leq$  322°) が見ら れる.これは, HOM が non-Io-C から独立していると支 持する事例である.故に, non-Io-A&C と HOM が重な った構造は観測木理緯度に依存する可能性を示唆する.

低い周波数帯の木星 HOM 波に関しては、図2に矢印



Fig. 3 Occurrence probability of (a) Cassini inbound, at 3.7, and (b) outbound, at -3.7, transformed from Figure 3a and 3b. The black horizontal

で示す CML 方向に幅の広い領域が 2 か所ある. 多くの 先行研究では、高い周波数の HOM 波が低い周波数の non-Io-DAM であるか独立した放射であるかが議論され ており <sup>3),4</sup>, HOM 波の最高周波数は 3 MHz<sup>3</sup>と 7 MHz<sup>4</sup> と報告されている. しかし、観測周波数 5 MHz から 16 MHz までの観測事実が欠如しているため, HOM 波の最 高周波数は十分理解されていない. 本研究では、受信感 度の高い Cassini/RPWS により, 初めて、図 2 中で HOM 波(100°  $\leq$  CML  $\leq$  170°)の上限周波数が 10 MHz 程 度までであることが分かった. もう片方の HOM 波

(270°  $\leq$  CML  $\leq$  310°)に関しては、その強度が、周波数が高くなるにつれて弱くなると考えられるため、最高周波数が $6 \,$  MHz までしか現われていないと考えられる.

最後に、図 2b では、周波数 7 MHz から 11 MHz まで の50° CML付近の領域で発生頻度が高くなっていること が明らかとなった. この領域は、先行研究では報告され ていない領域で、本研究で新しく発見された成分であり、 この領域を non-Io-D と名付けた. この non-Io-D は、他 の成分と独立しており、Local Time 効果や緯度効果が起 因していると考えられる.

# 4.2 木星電波放射モデル

図 2 のカッシーニ探査機が木星に接近した前と後の non-Io-B と non-Io-A の特徴に着目して、木星電波放射 モデルを提案する. Imai et al. [2008]<sup>14</sup>では、惑星探査 機カッシーニで観測された全ての木星電波データを用い て non-Io-B と non-Io-A の周波数 9 MHz から 16 MHz までの間のV字型の特徴を木星電波発生頻度マップによ り明らかにした. 観測結果を説明するために、放射角シ ミュレーションを行い、放射周波数が減少するに従い、 放射角が小さくなるモデルを提案した.本研究では、V 字型特性をもとに、このモデルを応用して説明できるモ デルを提案する.提案する木星電波放射モデルは以下の5つの前提条件をもとに考える.

・電波源はジャイロ周波数に近い領域の磁力線に沿っ
 て存在する<sup>3)</sup>.

・対象周波数が高いため、周りのプラズマ環境に作用 されず、電波源から放射された電波は直線伝搬する.

・木星磁場 VIP4 モデル <sup>15)</sup>を用いる.

・観測位置を木星接近前と後では、緯度3.7°と-3.7°で、 共に木星からの距離 100R」にする(Imai et al. [2008] <sup>14)</sup> では観測位置を緯度0°とし距離は同じ 100R」).

・木星電波のビームは中空のコーン状に放射され、厚
 さは2°以下<sup>10</sup>である.

図3は、図2a, bの惑星探査機カッシーニで観測した 木星電波発生頻度マップ(4 MHz~16 MHz)である. L-shell=5.9の経度198°の磁力線に沿って、シミュレー ションを行った場合、白色の線はImai et al. [2008]<sup>14)</sup> のモデルでの結果で、赤色の線は本研究で改良したモデ ルでの結果である.この図から、赤色の線の方が白色よ り、観測結果によく一致している.それぞれの線の幅は コーンの厚さ±1°の部分を示す.カッシーニの木星接近 前後を合わせた木星電波発生頻度マップからモデルを導 出した Imai et al. [2008]<sup>14)</sup>では、図3より、木星接近前 と後の木星電波発生頻度マップの結果を説明できないこ とが分かった.そのため、本解析では、木星接近前と後 で異なるV字型特性に着目して、モデルを導出した.

図 3a の木星接近前の場合,周波数 16 MHz の放射角 49°では、2 ヶ所の領域(System III 167°±2°,237°± 2°)で交差している.周波数が9 MHz に減少すると, 放射角34°は1 ヶ所である188° ≤ System III ≤ 214°の 間で交わっている.

一方,図 3b の木星接近後の場合,周波数 16 MHz の 放射角60°では、2 ヶ所のところ(System III 159°±



Fig. 4 The best fitting cone half-angle of the V-shape pattern versus frequency from 9 to 16 MHz for 1 MHz intervals at L-shell = 5.9 (upper plot) and 10 (lower plot).

2°,245°±2°)で交差している.周波数が12 MHzに 減少すると,放射角54°はまだ2ヶ所の領域 (System III 166°±2°,237°±2°)で交わっている. 図3bより,観測周波数12 MHz以下では木星電波発生 頻度が急激に減少しているため、木星電波構造がはっき りしていない.そのため、本解析ではそれ以下の放射角 シミュレーションは行えなかった.この発生頻度の減少 は、木星電波の周波数によって、電波源の位置や電波源 付近のプラズマ環境が変化することにより木星電波のビ ーム構造が変化したためであると考えられる<sup>3</sup>.

L-shell=10 の場合は、放射角がそれぞれ異なるが、前 述の L-shell=5.9 の場合と同様な放射特性がシミュレー ションで得られた. 今回のシミュレーションで求めた周 波数 9 MHz から 16 MHz までの 1 MHz 毎の放射角を 周波数に対してプロットしたグラフを図 4 に示す. この 結果より、以下の 2 つの結論が導き出される. ・放射角は周波数 16 MHz から 9 MHz にかけて、減少すること

・観測緯度-3.7°の放射角(図5a広い円錐)の方が観 測緯度3.7°の放射角(図5a狭い円錐)より、大きいこと

前者は、先行研究でも同様の特徴を示すことが分かっ ているため<sup>14),17</sup>,それらを支持する結果である.一方, 対称的な放射モデルで仮定している限り、後者の結果を 導き出すことはできない.そのため、この放射角度は Local Time 効果に起因していると考えられる.惑星探査 機カッシーニの観測範囲は、接近前で Local Time 10.6 時から 12.8 時の方向を、接近後で 19.2 時から 21.4 時の 方向を、それぞれ観測している.木星が太陽に面してい る場合は、プラズマ密度が高くなり、一方、木星が夜に 面している場合は、プラズマ密度が低くなる傾向を示す. 電波放射の成長率は、プラズマ周波数とサイクロトロン 周波数に大きく影響している <sup>18</sup>ため、放射角度も Local Time により変化すると考えられる.

さらに本解析で改良した木星電波放射モデルをもとに、 non-Io-Bの発生頻度の高い領域(接近前148°  $\leq$  CML  $\leq$  182°,接近後140°  $\leq$  CML  $\leq$  170°)から、木星 non-Io-B と non-Io-Aの電波源を推定する.その結果、non-Io-B と non-Io-Aの電波源がSystem III(木星表面)180° ± 10°(L-shell = 5.9) と System III(木星表面)180° ± 5°(L-shell = 10)に局所的に集中して存在することが分 かった.図5に本解析で用いた電波放射モデルと電波源 の位置を3次元コンピュータグラフィックスで示す.

# 5. 結 言

本研究では、惑星探査機カッシーニとボイジャー1 号・2 号で観測した木星 DAM 波・HOM 波の周波数 0.3 MHz から 25 MHz までの周波数範囲で、複雑な電波周 波数構造の特徴を明らかとした. さらに、得られた V字 型 (non-Io-B と non-Io-A) 特性をもとに、木星電波放 射モデルの提案と電波源の範囲をシミュレーションによ り、定量的に見積もることができた.本解析で得られた 主な結果を以下に示す.

・惑星探査機カッシーニの木星接近後のデータより, 木星HOM 波の最大周波数が10 MHz までであることが 分かった.

・周波数 16 MHz 以下の non-Io-A で2つの異なる構造 (sub: 210° ≤ CML ≤ 260°, main: 260° ≤ CML ≤ 330°) が明らかとなった.

・周波数7 MHz から 11 MHz までの50° CML付近に
 新しい構造(non-Io-D と命名した)が出現していた.

・V 字型 (non-Io-B と non-Io-A) 特性の木星電波放 射モデルより,放射角度が観測緯度ではなく,むしろ Local Time 効果により,変化することが示唆された.

最後に, Imai et al. [2011a, 2011b] 19,20)には, さらな



Fig. 5 3D computer graphic (CG) images of the geometry of the emitting cones and the source locations based on VIP4 model.

る木星電波の統計解析結果と Cassini/RPWS を用いた 木星 HOM 波の偏波解析結果が議論されているため, 興 味のある方は,参照されたい.

# 謝 辞

本研究を進めるにあたり,木星発生頻度マップの作成 方法をご指導して頂いた Middle Tennessee State University の Charles A. Higgins 博士,論文執筆や研究 成果に有意義なご助言して頂いた NASA Godard Space Flight Center の James R. Thieman 博士に深く感謝致 します.

# 参考文献

- Wu, C. S., and L. C. Lee: Astrophys. J., 230, (1979), pp.621-626.
- 2) Bigg, E. K.: Nature, 203, (1964), pp.1008-1010.
- Carr, T. D., M. D. Desch, and J. K. Alexander: in Physics of the Jovian Magnetosphere, edited by A. J. Dessler, Cambridge University Press, New York, (1983), pp.226-284.
- Barrow, C. H., and M. D. Desch: Astron. Astrophys., 213, (1989), pp.495-501.
- Imai, K., J. J. Riihimaa, F. Reyes, and T. D. Carr (2002): J. Geophys. Res., 107(A6), 1081, (2002).
- Clarke, J. T., et al.: in Jupiter: the Planet, Satellites, and Magnetosphere, edited by F. Bagenal, W. McKinnon, and T. Dowling, Cambridge University Press, Cambridge, (2004), pp.639-670.
- Menietti, J. D., et al.: Planet. Space Sci., 51, (2003), pp.533-540.
- Warwick, J. W., J. B. Pearce, R. G. Peltzer, and A. C. Riddle: Space Sci. Rev., 21, (1977), pp.309-327.
- Alexander, J. K., T. D. Carr, J. R. Thieman, and J. J. Schauble, A. C. Riddle: J. Geophys. Res., 86, (1981),

pp.8529-8545.

- Gurnett, D. A., et al.: Space Sci. Rev., 114, 1, (2004), pp.395-463.
- Barrow, C. H.: Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 46, (1981), pp.111-114.
- 12) Aubier, M. G., and F. Genova: Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 61, (1985), pp.341-351.
- Zarka, P., and W. S. Kurth: Space Sci. Rev., 116, (2005), pp.371-397.
- 14) Imai, M., K. Imai, C. A. Higgins, and J. R. Thieman: Geophys. Res. Lett., 35, L17103, (2008).
- 15) Connerney, J. E. P., M. H. Acuña, N. F. Ness, and T. Satoh: J. Geophys. Res., 103, pp.11,929-11,939, (1998).
- 16) Kaiser, M. L., P. Zarka, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, and D. A. Gurnett: J. Geophys. Res., 105, (2000), pp.16,053-16,062.
- Ray, L. C., and S. Hess: J. Geophys. Res., 113, A11218, (2008).
- Wong, H. K., C. S. Wu, F. J. Ke, R. S. Schneider, and L. F. Ziebell: J. Plasma Phys., 28, (1982), pp.503-525.
- Imai, M., K. Imai, C. A. Higgins, and J. R. Thieman: J. Geophys. Res., 116, A12233, doi:10.1029/2011JA016456, (2011a).
- 20) Imai, M., A. Lecacheux, K. Imai, C. A. Higgins, and J. R. Thieman: in Planetary Radio Emissions VII, edited by H. O. Rucker, W. S. Kurth, P. Louarn, and G. Fischer, Austrian Acad. Sci. Press, Vienna, (2011b), pp. 167–175.