みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へその4 ~電波・プラズマ波動観測器RPWIの飛翔へ~

笠羽 康正¹, 三澤 浩昭², 土屋 史紀², 笠原 禎也³, 井町 智彦⁴,
木村 智樹⁵, 加藤 雄人¹, 熊本 篤志¹, 小嶋 浩嗣⁶, 八木谷 聡³,
尾崎 光紀³, 石坂 圭吾⁷, 垰 千尋⁸, 三好 由純⁹, 阿部 琢美¹⁰,
Baptiste Cecconi¹¹, 諸岡 倫子¹², Jan-Erik Wahlund¹²,
JUICE-RPWI日本チーム

(要旨) 欧州宇宙機関(ESA)木星探査機JUICEに搭載される電波・プラズマ波動観測器RPWI(Radio Plasma Wave Instruments)は、欧州チームにとり米土星探査機カッシーニ搭載のRPWS、日本チームにとり月探査 機かぐや・ジオスペース探査衛星ERG・日欧水星探査機BepiColombo搭載の電波・プラズマ波動・レーダ ー観測器群からの発展展開となる。木星・衛星周回軌道への初投入となる低温電子・イオンおよびDC電場 観測機能、電磁場三成分のプラズマ波動観測機能、電波の方向探知・偏波観測機能、および高度オンボード 処理によるパッシブ表層・地下探査レーダー機能や波動-粒子相互作用検出機能により、木星磁気圏の構造・ ダイナミクスおよびガリレオ衛星群との相互作用、氷衛星の大気・電離圏および氷地殻・地下海へのアクセ スを狙う、2016年7月に仙台で行われた「RPWIチーム会合」での最新状況を踏まえ、1970年代に遡る本チ ームの経緯・目標・展望を述べる。

木星システム電磁圏 ~最強かつ複雑 な巨大惑星-衛星結合系への挑戦~

木星は、全惑星の7割に達する質量・角運動量を持ち、 太陽系惑星システムを代表する.こうした巨大ガス惑 星は宇宙に溢れており、その理解は「宇宙に遍在する 惑星」の理解へ直結する.木星が伴うガリレオ衛星群 は「大きな天体を巡る小さな天体群」として発見者ガ リレオに地動説への確信をもたらしたものだが、巨大 惑星からの潮汐による継続的なエネルギー投入を伴う

東北大学理学研究科地球物理学専攻
 東北大学惑星大気・プラズマ研究センター
 金沢大学自然科学研究科電子情報科学専攻
 金沢大学総合メディア基盤センター
 理化学研究所仁科加速器研究センター
 頭都大学生存園研究所
 富山県立大学工学部情報システム工学科
 情報通信研究機構電磁波研究所
 名古屋大学宇宙地球環境研究所
 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
 11. LESIA, Observatoire de Paris, France
 IRF-Uppsala, Sweden
 kasaba@pat, gp. tohoku, ac, jp

氷衛星(エウロパ・ガニメデ・カリスト)・火山衛星(イ オ)として特異である.イオ火山ガスは電離して木星 磁場に錘として付加され、これが木星自転から巨大な 電磁エネルギーを引き出す導火線ともなる.こうした 惑星-衛星間相互作用は、恒星近傍を周回する系外惑 星群の理解の母体ともなる.

地球の約2万倍に達する磁気双極子モーメントを擁 する高速回転天体(自転周期:約10時間)が火山衛星・ 氷衛星群を振り回すこのシステムは、外惑星へのアク セス能力を持つ唯一の国アメリカによって挑戦を受け た、パイオニア・ボイジャー・ユリシーズ・カッシー ニ・ニューホライズン等によるフライバイ接触、また 1995-2003年にはガリレオ探査機の周回探査による挑 戦を受けてきた.ガリレオ探査機の周回探査による挑 戦を受けてきた.ガリレオ探査機はアンテナ・レコー ダ故障から通信量が限定された(160 bps.予定の3桁 減)が、氷衛星フライバイ時の磁場擾乱から、地下の 導電層、おそらくは「塩水の地下海」を示唆するなど 新たな問題を示した.

日本では、東北大等による木星電波観測(~20

MHz帯)が1970年代に開始.惑星到達能力を持つ前 から木星探査は嘱望された.この野心が火星探査機の ぞみ、月探査機かぐや、金星探査機あかつきに至る「日 本の惑星への道」の源流だが、木星への挑戦は小型科 学衛星シリーズ初号機「ひさき」の打ち上げ(2013)に よって一部実現を見た. 我々も中核メンバーを形成す るこの極端紫外線・紫外線宇宙望遠鏡は、小規模な地 球周回軌道からの遠望とはいえイオ噴出ガス(イオト ーラス)・オーロラ全輝度の初の継続観測を実現.ハ ッブル宇宙望遠鏡やJAXAすざくなどX線望遠鏡群 との国際キャンペーンにも成功し、ガリレオ衛星群か らの物質放出と木星電磁圏からのエネルギー放出の時 空間変動とその間の因果関係研究に新境地を開きつつ ある(例えば[1]). 2016年7月にはNASA探査機ジュ ノーが木星に到達し、人類は13年ぶりに木星周回機 を得た、この探査機は初めて極周回軌道に入り、雲層 下に至る対流圏深部の大気組成や極域-磁気圏結合の 解明に挑戦する. 日本側チームも, ひさき望遠鏡およ び光赤外・電波地上望遠鏡による継続観測によってジ ユノーを支える国際連携チームを形成しており、これ に要するデータアーカイブ構築の渦中にある(例えば 東北大-パリ天文台「SAKURA計画」[2]).

隣の巨大惑星・土星には、米探査機カッシーニが 2004年の「南半球の夏」に到着.ほぼ完璧に機能し、 2017年9月の土星突入"Grand Finale"に向け、最後の 「北半球の夏」を熱く過ごしている.欧州研究者は長 年米探査機群観測装置チームに参画し、カッシーニで もRPWS(Radio Plasma Wave Science)[3]の中核をな す.土星は木星と地球の中間の磁気双極子モーメント (地球の約600倍)を持ち、双方の中間的な性格をもつ. RPWSセンサー群の1つ「3軸モノポールアンテナ」は、 南北電波源の偏波による分離能力によって「南北半球 で異なる磁気圏自転周期」の発見など土星系の電磁天 体としての性格に新知見をもたらした(例えば[4]).

また氷衛星の1つ,エンセラダスはその地下海から大 量の水を周辺空間へ噴き出している(プルーム).

RPWSセンサー群の1つLangmuir Probeはこのプル ーム中ダストの研究で傑出した成果をあげた(例えば [5]).折しもエウロバでも、地下からの水噴出の兆候 がハッブル宇宙望遠鏡による表層紫外線発光観測に伴 って確認され[6],ガニメデでも同様の観測で得られ た紫外線発光分布変動から「塩水の地下海」の存在が 示唆される[7].高速自転,強力な固有磁場,大量の 水/氷噴出で供給される低温衛星・磁気圏プラズマ, 太陽系外縁の弱い太陽風等の諸要素に支配される土星 での新発見現象・過程の多数が,木星システムでも期 待されうる(例えば[8]).

RPWS欧州側チームを構成する2つの主要機関、パ リ天文台(フランス)とIRF ウプサラ(スウェーデン)は. 我々のPI-ship下で開発を進めてきた日欧水星探査計 画 BepiColombo · MMO(2018年打上予定)に搭載され る PWI (Plasma Wave Investigation) [9]の主要メンバ ーでもあり、またこの成立前から頻繁な往来がある. 長年の木星・太陽電波観測におけるパリ天文台との同 志関係, 2000年のBepiColombo計画正式スタートか ら綿々と続く、我々のパリ・ウプサラ長期滞在、欧州 の面々の京都・相模原長期滞在,諸岡・Wahlund (IRF ウプサラ)の仙台長期滞在、カッシーニ等を舞台とし た探査機データ解析の共同研究や数々の国際会議。こ れらに伴う無数の昼食・夕食・漫談、月探査機かぐや 搭載のLRS(月レーダーサウンダー)[10]の成果. 打ち 上げ迫るジオスペース探査衛星 ERG 搭載 PWE(プラ ズマ波動観測器)からの展開・・・・互いのモチベー ションと能力を持ち寄り噛み合わせ、ESA 探査機に (乗り込むいや同乗させて頂くこの「欧日横断物語」は 生まれ出た.

2. RPWIの目標: "If it is electrified & wiggles – It is ours !"

木星磁気圏・衛星電離圏には、様々な時間・空間ス ケールを持つ電磁界が存在する.数100 Hz以下の遅 い変動は電場によるプラズマ大規模輸送・加速を引き 起こし、kHz以上の速い変動はプラズマ密度・組成・ エネルギー分布情報、および無衝突プラズマの最重要 エネルギー過程「波動-粒子相互作用」による粒子加 速・加熱を特徴づける.In-situ観測される低周波「プ ラズマ波動」は、粒子・磁場観測とともに活動域の現 場情報を我々にもたらす.Remote観測される高周波 「電波」はこの現場群から飛来し、赤外線・可視・紫 外線・X線観測とともに「高エネルギー粒子加速・加 熱域」の時間・空間変動および全活動量の情報をもた らす.電波はまた伝搬・反射経路の情報を含み、衛星 電離圏の密度情報や氷衛星の表層・地下構造情報をも たらす.

木星周回した先行機器, ガリレオ探査機PWI (Plasma Wave Instrument) [11]とジュノー探査機 Wavesは以下の制約を抱える.(A) Langmuir Probe:搭載せず.火山・氷衛星に由来する低温プラ ズマ(~数eV)へのアクセス能力がない.(B) 電場計 測:1軸観測(Tip-to-Tip長:ガリレオ 6.6 m, ジュノ -4 m)に留まり,方向探知・偏波観測能力が欠如.米・ ユリシーズ(とカッシーニ:flyby距離は137木星半径 [R_j])は,三軸電場観測機能を有したが,フライバイ観 測であったため期間・位置(緯度・経度)が限られる. またDC電場観測機能がなく(下限周波数:ガリレオ 5.6 Hz,ジュノー 50 Hz),プラズマ輸送・加速の探 知が困難である.

土星探査機カッシーニ搭載のRPWS[3]では 「Langmuir Probe」「3軸電場モノポールアンテナ(10 m長)」で取り除かれ、1章に掲げた「南北非対称性」 や「衛星エンセラダス噴出プラズマ」などの発見を生 んだ.RPWIの基本構想はこの機器を基礎とし、ジュ ノー探査機がカバーしない木星の中低緯度磁気圏およ び氷衛星フライバイ・周回観測に要するIn-situ・ Remote観測能力を持つ.近年のデジタル部の大規模 化・高速化の恩恵による高度オンボードデータ処理機 能も盛り込まれ,木星-火山・氷衛星結合システムの 電磁構造・変動とそのプロセス解明における基盤機器 の1つとして,JUICE計画において磁場・粒子(insitu)や紫外・可視・赤外・高速中性粒子(remote sensing)とともに,「木星およびガリレオ衛星環境観 測」に枢要な位置を占める.DCから45 MHzに至る全 電磁擾乱が我々の世界である.PIのJan-Erik Wahlud曰く, "If it is electrified & wiggles – It is ours!"

RPWIは、日本チームにとり以下2つの合流点に位 置する.(1)外惑星研究:稼働中の紫外線・極端紫外 線望遠鏡衛星ひさきによる木星系長期継続観測、日本 側も解析参加するカッシーニ(土星)・ジュノー(木星)、 そして長期蓄積で両者を支援する地上観測(東北大ハ レアカラ40 cm/60 cm望遠鏡・飯館IPRT-31 m電波 望遠鏡[12]や建設途上にあるハレアカラ惑星・系外惑 星専用望遠鏡2 mおよび東大アタカマ望遠鏡TAO 6 mなどによる継続モニターや、公開利用のSubaru 8 m・IRTF 3 m・インドGMRT電波干渉計など大中望



図1:JUICE RPWI高周波受信機(HF)の計測範囲に入る木星電波源群([22] Fig.2を改定).

遠鏡によるキャンペーン観測). (2)地球・月・水星研 究:稼働中のGeotail衛星, 2016年度打ち上げ予定の ERG衛星など地球磁気圏探査, かぐや探査機による 月環境・地下電波サウンダー探査, これらの成果を展 開するBepiColombo水星探査. 平行して行いつつあ る系外惑星システム観測やこれらを横断・包含する数 値モデル研究も含め, これらが我々および次世代研究 者の問題意識をJUICE探査に向け深化させていく.

2.1 木星電離圏-磁気圏システム ~高速回転 天体による巨大磁気圏の駆動~

木星は、中性大気と力学結合する「電離圏」が沿磁 力線電流を介して「磁気圏」につながる結合系を介し、 惑星本体の自転エネルギーを運び出すことで磁気圏の 巨大な活動エネルギーを賄う. RPWIは、3軸DC電 場情報を木星衛星圏・磁気圏(高密度域)で初観測し、 この機構を支えるプラズマ運動・輸送の情報をもたら す. またポインティングフラックスの観測から、木星 -磁気圏結合を支える磁力線上エネルギー交換の方向・ 量の評価につなげる.

木星電波源の位置を図1に示す. 電磁結合を担う沿 磁力線電流は、磁気圏の高エネルギー粒子によって賄 われる. これらは木星極域大気へ衝突して電波~X線 に広がる 「オーロラ」を生む (衛星でも同様の発光が見 られる). 電波域では数10 kHz~40 MHzにわたる非 熱的放射を生むが、この励起周波数は磁場強度・プラ ズマ密度すなわち「電波源の高度」を示し、またその 空間分布・強度は「沿磁力線電流の分布・強さ」を示す。 また2.2項で述べる内部-外部磁気圏結合に伴い、内 部磁気圏へ進入する高エネルギー粒子がイオトーラス へ衝突して別の電波放射も放つ. JUICEの観測は赤 道面近傍から行われるため、南北両極・赤道域に広が るこれら電波活動を概ね連続モニタ可能である.3軸 性を生かす方向探知能力・偏波解析能力で電波源位置 を求め、紫外・赤外リモート観測と共に活動域のの空 間構造・変動を長期トレースし、磁気圏-電離圏結合 系とそれが駆動する巨大磁気圏ダイナミクスの探索を 行う.

近年のひさき衛星や地上光学観測は、「硬い」と思 われた内部磁気圏域への太陽風影響の浸透を示唆して いる[13].地球の場合、極域電離圏へ投影された太陽 風電場情報が中低緯度にダクト伝搬し、そこから磁力 線沿いに内部磁気圏へ戻る例が知られる[14]. 干渉計 電波観測では, さらに内側に位置する放射線帯にも太 陽紫外線応答を示し, 同様の結合が示唆される[15, 16]. RPWI電場・電波観測は, より外側の磁気圏に 加わる In-situ 情報を捉え, 軌道望遠鏡・地上観測と も結合させ「自転駆動型磁気圏」のレスポンス機構と その経路情報も提供しうる.

2.2 木星磁気圏のエネルギー開放 ~巨大磁 気圏による粒子加速・加熱の解明~

木星周辺空間は数十MeVに達する高エネルギー粒 子に溢れ、一部は惑星間空間へ放出され地球近傍にも 届く. RPWIは、DC域に始まる広帯域プラズマ波動 の電場・磁場3軸成分全域で、磁気圏赤道域~中緯度 域(Inclination:最大約25度)の広大な領域を初カバー する.「磁気リコネクション」「プラズマインジェクシ ョン」「交換型不安定性」・・・といった内部-外部磁 気圏間を跨ぐ大規模変動は地球でもホットな研究対象 だが、ひさき衛星観測で「極域オーロラ発光(遠方磁 気圏活動を反映)」と「イオトーラス発光(内部磁気圏 加熱を反映)」の相関およびその時間差として一端を 垣間見せた[17]. RPWIはPEP(粒子)・JMAG(磁場) と共に、2.1項で述べたオーロラ遠隔観測がもたらす 全体情報と併せて、プラズマ輸送と粒子加速・加熱の 結合を観測の俎上にのせる.

ERG衛星では、こうした「プラズマ波動電場成分に よる 粒子加速・ 加熱」 を 検証 する 「Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer : S-WPIA」[18]を 搭載しその定量解明を目指している。惑星探査機はよ り通信量の制約がきつく、IUICEでも同様のオンボ ード相関を取ることができれば強力な手段となる. 幸 い、ERGで目指した電子波(kHz帯)よりも容易なイ オン波(Hz帯)によるプラズマ加熱に的を絞った 「RPWI版S-WPIA」の実装はRPWI以外を含む全関係 者によって合意された。ガリレオ衛星周囲ではイオン サイクロトロン波が観測され, 衛星大気からピックア ップされたイオンの加熱およびトーラスの形成に重要 な役割を果たしていると考えられる. PEP(粒子)・ IMAG(磁場)との連携・試験を要するためハードルは 高いが、ERG衛星に引き続き、さらに太陽系最大の 惑星加速器を対象にそのメカニズム調査を展開する.

2.3 木星-ガリレオ衛星結合システム ~ 電磁結合バイナリ ~

木星システムの特徴は、「木星-衛星間の電磁結合」 である.最も顕著な影響を及ぼすのがイオが噴出する 大量の火山ガスで、プラズマトーラスを形成して共回 転系に錘として加わる.ひさき観測はこのイオ起源重 イオンプラズマが惑星電離圏 – 磁気圏結合の駆動源と なることを実証しつつある[19].この過程は太陽風が 駆動源の「地球型」とは異なる「電磁結合バイナリ」シ ステム特有のもので、重イオンが遠心力で磁力線を引 き延ばしていく機構が2.2項で述べた「内部-外部磁気 圏間結合」を生む.RPWIは、in-situ観測でこの低温 成分の動態とこれに伴う電場・波動-粒子相互作用を 調べる機会を提供する.

ガリレオ衛星は、電離大気を引きずって木星磁場を 横切るため、巨大な起電力を生んでその磁力線の足元 に「フットプリントオーロラ」をもたらす。JUICEは 放射線リスクを避けイオ軌道までは進入しないが、現 計画では2029~2032年にエウロパ(2回)・ガニメデ (11回)・カリスト(13回)フライバイを経たのち、ガ ニメデ周回を行い2033年にミッション終了となる. エウロパ・ガニメデ・カリストは氷地殻から揮発した O₂・O大気・電離圏を持つことがガリレオ探査機で確 認されている。特にガニメデでは木星と結合する電流 系の横断機会もあるため、木星-衛星間の(a) 沿磁力 線電流量,(b) ポインティングフラックスによるエネ ルギー交換方向・量,(c) 沿磁力線加速電場の観測に よる初の「木星-衛星結合システム解剖」を行う.こ れらの情報は24項の基礎ともなる。

ガニメデはまた、「有意な磁場を有する天体(磁気双 極子モーメント:~10¹³ Tm³.水星よりやや強)」と いう点で特異である.公転運動中に上流の木星プラズ マ流のプラズマ β は<1から>1に変化し、異なる性 質のプラズマ流との相互作用も期待できる.木星プラ ズマ流は亜音速であるため、衝撃波を形成せず木星磁 気圏プラズマが直接ガニメデ磁気圏界面に接触すると いう点も関心を呼んでいる.

2.4 ガリレオ衛星:希薄大気・磁気圏および 表層・内部との結合

RPWIは、衛星大気In-situ・Remote 観測および表層・

地下Remote 観測も行う.

(a) 氷衛星起源低温プラズマの掌握:Langmuir Probe・プラズマ波動観測は、衛星電離圏から磁気圏 へと広がる低温(数eV)電子の密度・温度および低温 イオンの密度・温度を掌握し、各衛星の大気放出(噴 出・脱ガス活動等)・流出(磁気圏プラズマ流・電流と の相互作用等)とその変動を捉える.また衛星近傍で の木星電波掩蔽を利用し、伝搬経路上に位置する電離 圏密度の高度分布も提供する[20].

(b) 火山・氷衛星起源ダストの掌握:カッシーニ RPWSは、Langmuir Probeで衛星エンセラダスプル ームに起源を持ち内部磁気圏へと広がる大量の負帯電 ダストを検出した[5].活発なイオ火山、可能性が指 摘されるエウロパからの水噴出に伴う同様の発見可能 性がある.また電場アンテナでダストの探査機衝突で 発生するプラズマが作るパルス(10s msec幅)を計測 し、そのサイズ・数をカウントする[3](BepiColombo/ MMO PWIでも水星で予定している[9]).

(c)衛星電離圏及び地下海電流の検証:電離圏密度・磁場からは電気伝導度・電流量が推定できる.「これ以外」の部分,すなわち氷衛星表面・地下の電気伝導は,深さ数10~150 km程度の氷地殻下にある導電性塩水地下海」に由来するとされるが,この分離は「惑星-衛星結合電流」全体から電離圏寄与分を引き算して初めて現れる.

(d) 衛星の表層・地下のリモートセンシング:木星電 波(数百kHz~数十MHz)は,氷衛星表層・地殻およ び氷地殻-地下海境界で反射されうる(図2).「オーロ ラ電波の反射波」は月探査機かぐや搭載LRS(Lunar Radar Sounder)でも見られた[10]. JUICEにはLRS同 様の「アクティブレーダー」RIME(Radar for Icy Moon Exploration:9 MHzを放射)も搭載され、主に 木星電波が遮蔽される反木星側半球で狙う. RPWIの 「パッシブレーダー機能」は木星側半球を狙い,相補 的な機能発揮を期待する.

3. RPWIの機器構成

RPWIは、「5本の伸展ブーム上の3種のセンサー群 が、3つのレシーバー群に結合」される複雑なシステ ムである(図3、図4、図5). センサー群は、打ち上げ 後すぐに展開する4本のLangmuir プローブ用LPブー



図2: Passive Sub-Surface Radar (PSSR)の原理.

ム(3 m長)と, JMAG(磁場チーム)センサー3つに加 えてRPWI サーチコイル(SCM)・RPWI電波アンテ ナ(RWI)が相乗りするMAGブーム(10.5 m長)に載っ て探査機外に晒され、この状態で複数回の地球フライ バイ時での校正観測を行い、金星フライバイ時の高温 環境に耐え(現時点では "電源OFF")、木星軌道上の 低温・高放射線環境下でのフル観測にミッション終了 まで耐え抜く.これらのセンサーは、探査機内の RPWI-EBOX(共通box)の中に配されるLPレシーバ ー、低周波レシーバー(LP)、高周波レシーバー(HF) に接続、データはDigital Processing Unit(DPU:H/ WはCBK(Poland)、S/WはIRF他)で処理された後 にSystemを介して地球へ送られ、**表1**に示す観測・ 目標を達成する。

(1) 電子・イオンの密度・温度およびDC電場観測 [LP-PWI(センサー)・LP-MIME(レシーバー):IRF-ウプサラ(Sweden)] Langmuir プローブ(LP-PWI)は、 プローブ電位sweepに伴うプラズマ流入・流出電流 量変動から電子・イオンの密度・温度を導出,また定 バイアス電流を与えてプローブ間電位差から3軸電場 導出を行う.これは,非平行に伸展する4本の3-mブ ームを持つ,という惑星探査機史上初の豪快な方式で 初めて実現する(カッシーニRPWSは1本のみ).粒子 系計測器では観測が難しい氷衛星由来の低温プラズマ や帯電ダストを含むプラズマの観測によって,プラズ マ運動・加速,ポインティングフラックス,氷衛星電 離圏の密度・電気伝導度の掌握を可能とする.



図3: 現時点のJUICE探査機形状案および調整中の伸展センサー群配置(courtesy: Airbus DS). 3m長のLP boom(LP-PWI)x4, 10.5m長のMAG boom(RWI, SCM, および3つのJMAGセンサー),及び16m長のRIMEアンテナが見える.

(2) プラズマ波動観測 [LP-PWI(低周波電場センサー)・SCM(磁場センサー):LPP(France), LFレシーバー: IAP(Czech)] 低周波レシーバー(LF)は,

電場3軸をLP-PWIから,磁場3軸をSearch Coil Magnetometer (SCM)から受け,木星圏初のプラズマ波動 電場・磁場6成分観測をfew - 20 kHzの広帯域で実現



図4: RPWIを構成するH/W群(EM2仕様):探査機内に置かれるEBOX(LP-MIME・LF・HFの3レシーバ群, DPU, 電源部を内蔵) と3種のセンサー群(LP:Langmuir Probe, SCM: Search Coil, RWI: Radio Wave).

計測項目	計測性能要求
低温プラズマ	電子: 10 ⁻⁴ - 10 ⁵ cm ⁻³ , 0.01 - 100 eV
密度・温度	イオン: $1 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$, $0.02 - 20 \text{ eV}$
(LP + LP-PWI)	衛星ポテンシャル: +100 ~ -100 V
	標準時間分解能: <1 Hz
低周波電場	* DC電場: 3成分
(LF + LP-PWI)	< 7 mV/m @ 磁気圏
	<1 mV/m @ 衛星flybys
	< 0.1 mV/m @ ガニメデ電離圏
	* プラズマ波動: 0.1 Hz - 20 kHz, 3成分
	$2 \mu V/m/\sqrt{Hz}$ @ > 500 Hz
低周波磁場	* プラズマ波動: 0.1 Hz - 20 kHz, 3成分
(LF + SCM)	8, 0.6, 0.06, 0.02 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1, 10, 100, < 500 Hz
高周波電場	* 電波(電場): 80 kHz - 45 MHz, 3成分
(HF + RWI)	感度: 10 nV/m/√Hz @ 10 MHz
	到来角分解能: ~1° @ 10 MHz
	偏波角分解能: ~ 10% @ 10 MHz
	標準時間分解能: 30 sec - 2 min

表1: RPWI センサー・レシーバの目標性能(EM2仕様).



図5: RPWIの構成(EM2仕様).

し、プラズマ加熱の現場、すなわち波動-粒子相互作 用の種類・強度解明の主役となる.またPEP(イオン 観測)・JMAG(磁場観測)と結合させ、ERG計画で実 証予定の「S-WPIA」を展開して波動-イオン間エネル ギー交換の方向・量のオンボード検出を実現し、通信 量制約の中でイオン加熱現場を統計的かつ直接に掌握 可能とする.

 (3) 電波観測 [RWI(高周波電場センサー) - アンテ ナ:CBK(Poland), Preamp:東北大, HFレシーバー: 東北大(FPGA: IRFウプサラ(Sweden))] 木星圏で 3軸電場アンテナRadio Wave Instrument(RWI: 2.5mダイボール3対)を初展開し, 放射線帯シンクロト ロン放射(>100 MHz)を除く全ての木星電波活動(80 kHz - 45 MHz)に対する方向探知・偏波解析能力を得 る. 他のリモート観測手段(赤外・紫外・高速中性粒子) 観測とともに南北極域・赤道域に連なる活動源の探査 を行うとともに, 電波掩蔽による衛星電離層電子密度 の高度分布観測,電波反射による氷衛星の表層・地下 探査といった「電波を駆使するリモートセンシング」 を実現する.

RPWIは、メンバー全体で検討・開発・運用される. 以下、日本側が開発を主担当するRWI部・HF部、お よびDPU搭載S/WのうちHF制御機能・パッシブレ ーダ機能・S-WPIA機能について述べる.

3.1 3軸高周波電場センサー Radio Wave Instrument(RWI)

80 kHz - 45 MHzの3軸高周波電場成分を検出する RWIは, MAGブーム(10.5 m長)上で, JMAGセンサ ー群(先端に2つ, 探査機から7.5 m先に1つ)から約1 m, RPWI-SCMセンサー(探査機から8.5 m先)から約 0.3 m離れて置かれる. 伸展アンテナは3つのDipole (2.5 m tip-to-tip長)で, CBK(ポーランド)が提供する. AO提案時にはカッシーニを踏襲した「モノポールア ンテナ3本(許容されたのは2.5 m長, カッシーニの 1/4) を探査機表面に装着」だったが、G. Fischer (IWF, Austria)によるアンテナパターン解析の結果。導体で ある巨大な「探査機本体+太陽電池パネル」(総幅約 20 m)に平行な電場成分を受信できないことがわかっ た. 原子力電池を有し探査機が小さなカッシーニ(と はいえ7 mはある)に対し、JUICEの大きさはアンテ ナ長を圧倒する.このためブーム上に移動して探査機 本体からやや離れ、またついでに「ダイポールアンテ ナ化|した。探査機起源電磁ノイズが軽減するという 効果もあったものの、巨大な太陽電池パネル、MAG ブーム,および隣接するLPブーム(全て導電体)が依 然としてアンテナパターンへ影響する. この評価は Austria組によるアンテナシミュレーションおよびレ オメトリ実験(衛星導電模型を水中に沈めて行う電波 伝搬のスケールモデル実験:日本では井町(金沢大)ら が実施)で予測を試みるが、地上検証すなわち「太陽 電池パネル・全ブームを伸展し、探査機を空に浮かべ ぐるぐる回す」ような受信パターン模擬試験は不可能 である.このため「地球フライバイ(3回を予定)時に 探査機姿勢を回していただき、地球オーロラ電波を使 ってアンテナパターンを確認」することを要請し、 ESA と Airbus (System: 旧EADS · Astrium, 欧州側 のBepiColombo担当メーカー)からいろいろ言われつ つ調整中である.

CBKにはアンテナ3ペアを支える「Chassis」も担当 いただき、我々はこの中に入る「RWI Preamp」を開 発する. BepiColomboおよびERG向けの設計をベー スに2010年度から検討・試作に着手し、カッシーニ RPWSの1/4のアンテナ長でも同等感度を達成すべく 奮闘していたが、突如としてブームの上に載せられて 宇宙空間に暴露されることとなり、我々の頭痛の種は 増した. この状況に陥った2013年から耐放射線(Al-3 mm厚に囲まれても2 Mrad)・耐低温(単純予測で通 常~130 K. 日陰時~80 K)への耐久法を検討. 前者 は放射線シールドの追加、後者は試作基板の液体窒素 投入試験とCBK共同でのChassis設計改善で目処を立 てた. ただしMAGブームの担当メーカー選定が遅れ (2015年末決定:SENER), 2016年末を待たないと我々 乗客の環境は定まらない.またRWI-HF間ハーネスも 暴露されるため、Preampからの熱流出パスとなって しまうことと、高放射線による材料劣化が問題である. 後者は2016年7月にAirbusの各種材料耐環境試験結 果を精査の結果,やや愁眉を開きつつある.

MAGブーム上に同居するJMAG(DC磁場),SCM (低周波磁場),RWI(高周波電場)は「電磁干渉にしつ こい」曰く付きの面々である.普通の衛星・探査機で は3-5m離れて棲み分けるが,今回の相互距離は1m - 30 cmしかない.互いに疑惑の念を抱くのも当然で, 2016年10月に各試作モデルをChambon(フランス)へ 持ち寄り,共同電磁ノイズ計測試験を実施して互いを 叩き合う予定である.

3.2 3軸高周波電場レシーバー High Frequency receiver (HF)

RPWI-EBOXに入る, RWIの高周波電場3ch出力を 受ける RPWI唯一のレシーバーである. ERG衛星搭 載PWEのHigh Frequency Analyzerと極力設計を共 通させ,高放射線環境下を飛翔する ERGの経験を踏 襲可能とした. Digital部はADコンバータ(90 MHz, 14bit)で電場3成分を捉え,80 kHz - 45 MHzを222 kHz幅,202ステップ(各11 msec,総計2.2 sec)でダ ウンコンバート波形を生成しつつ1-2回/分の割合で スキャンしながら木星磁気圈・衛星電離圏全域をサー ベイする. デジタル側設計・試作は2015年までIRF ウプサラが行い2016年に日本側へ引き継がれたが, FPGA は対 DPU-I/Fを含むためSweden 側が引き続き 担当する. 原子力電池を有さない JUICE は電力にう るさく,高電力消費品は不使用時にスタンバイ状態に 入れることで,木星でのエコライフを追求する.

HFが生成するダウンコンバート波形情報はRPWI-DPUに送られ、日本側(東北大・金沢大)が開発する 「HF制御タスク」によってノイズ除去処理を経たのち 電波スペクトル情報・伝搬方向情報・偏波情報へ転換 され、TLMバンド幅に応じた周波数・時間平均処理 を施したのち、探査機SystemのData Recorderを経 て地球へ伝送される、鍵を握る「方向探知機能」は、 エウロパ(9.6 R_J)・ガニメデ(15.3 R_J)・カリスト(26.9 R_J)近傍から各電波源を空間分解すべく、角度分解能 1°を目指す、HFから同相校正信号をRWI-Preampの 各入力へ供給することで、観測周波数全域でオンボー ド位相校正を可能とする。

3.3 DPU : Passive Sub Surface Radar (PSSR)機能

氷衛星近傍では、木星電波は「直達波」に「衛星表面・ 氷地殻内・地殻-地下海境界からの反射波」(高度~ 500 kmで直下反射波を見る場合、約3 msecの遅延を 伴う)が加算されうる.玄武岩の場合、低周波ほど導 電率が低く伝搬損失が低い.木星電波の広帯域性を用 いると、1 MHz近傍(波長300 m. 半波長アンテナ搭 載は不可能)から下では「氷地殻-地下海境界」の反射 波を検出可能?という期待が出る.氷地殻と溶融部の 想定比誘電率はそれぞれ約3 (80-270 K)と約90(月地 殻:4-11).後者が桁違いに大きく、地殻-地下海境 界では高い反射率が期待できる.

残念ながら、物事はそう簡単ではない、「かぐや LRSによる月地下探査 | [10]との違いは、「氷の導電率 は、融点付近では周波数によらず一定、かつチタン含 有率の高い玄武岩並に高く(10⁻⁴~10⁻⁵Ω⁻¹m⁻¹), 伝搬 損失が大きい」ことにある。氷地殻の想定導電率[21]は、 80 Kでは $\sim 10^{-29}$ Ω⁻¹m⁻¹だが、270 Kでは $\sim 6 \times 10^{-5}$ Ω⁻¹m⁻¹に達する.減衰は低温の表層近傍では無視で きるが、270 Kに近づくと-50 dB/kmに達することに なるため、地下海境界面への到達は困難、という推測 が成り立つ.とはいえ、氷地殻の温度分布が内部海と の境界近傍で急激に融点に遷移する場合や、浅い低温 域に大きな不連続がある場合には可能性を残す. 実際 JUICE・RIME(アクティブレーダー:9 MHzでレー ダー波送信)の探査目標深度は9 km, 目標として「氷 地殻内の液体水ポケット」「地殻構造そのもの」とし ている、木星電波はRIMEにとって雑音であり、運用 は反木星半球側が望ましい。一方PSSRにとっては信 号であり、運用は木星半球側で行う. Galileo 衛星は 公転・自転が同期し木星側半球が固定されており, PSSRはRIMEによるアクティブレーダ観測への相補 的な機能となりうる。表面・氷地殻の電気伝導度特性 をより広い周波数・空間スケールで取得可能、また地 殻表面の凹凸に起因する [クラッターエコー]も低周 波ではより低減される、というメリットもある.

銀河背景電波(HF noise フロアよりやや大.木星電 波に対し, Europaで1 × 10⁻⁵, Ganymedeで3 × 10⁻⁴ 強度 [22])を上回る反射波がある場合.木星電波の強 度・位相が ≫3 msecで一定であれば「電波スペクト

ル上での直達波-反射波干渉」が検出されうる(スペク トル検出方式).継続時間が ≪3 msecでパルスと見 なせる場合は、「反射パルス波形の検出」(パルス検出 方式)となる.木星電波のmsec order以下の高速変動 の観測情報はなく(20 MHz帯のS-burst波の継続時間 は数msec [23] だが、10 MHz以下は情報なし)、この 選択は木星到着まで確定しない、このため双方の機上 処理モードを準備する、「スペクトル検出方式」では、 周波数方向の干渉縞が信号となる(月探査機かぐや搭 載LRSでの地球オーロラ電場の反射成分検出[10]と同 方法). 電波源からの光路長が異なるパスを経由した 2つの電磁波が重畳する場合、周波数方向の干渉縞の 幅 [Hz]は「光速 [3 × 10⁸ m/s] / 光路長差 [m]」で表せ る. 高度500 kmで直下を観測する場合, 直達波と直 下地表反射波(光路差は往復1,000 km)および表層反 射波と地下0.7 kmの反射波(光路差は往復1.4 km)の 干渉は、300 kHz、220 Hzの幅を持つ干渉縞となる。 HF標準データ出力仕様は「周波数幅222 kHz, 周波 数分解能2 kHz」のため、周波数分解能が一桁足らない。 このため、より長時間の波形を取得した高周波数分解 能モード(周波数分解能:100 Hz, 往復の最大光路差: 3.000 kmに相当)を設け、衛星フライバイ・周回時に 活用する、この方法は「周波数方向干渉縞 | の幅と振 幅を伝送すれば足りるため、テレメトリ圧縮にもつな がる.一方,パルス検出方式ではダウンコンバート波 形の自己相関解析を基礎とし、直達波に対する表層・ 地下反射波の伝搬時間差(・方向)から反射面の深さ (・位置)を導出する.これは「通常のレーダーデータ 処理」と同手法であり、解析には遅延時間(数 msec) を超える長さのダウンコンバート波形データを地球に 伝送する必要がある.このため機上で自己相関係数を 評価し、電波強度と併せた機上データ選別を行い、必 要伝送データ量を削減する検討を行っている. この方 法は波形処理のため、光路差分解能が450mまで改善 する.

3.4 DPU: Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer(WPIA)機能

ERG搭載のS-WPIAは、波動-電子相互作用によ る相対論的電子の生成・加速過程解明を目標とし、電 子スケール(時間分解能:10 µsec)の相関処理を要した. Payload間通信・専用H/Wといった衛星設計そのも のをこれに最適化する必要があるため、欧州探査機で あるJUICEへの単純な適用は無理である.このため、 ガニメデ等の氷衛星周辺でのイオンサイクロトロン波 による衛星起源イオン加熱・加速に焦点を当て、LF が取得する低周波電磁波動とPEPが取得するイオン 速度分布関数を時間分解能0.1 sec程度で相関処理す ることとした.地球周回衛星のような高速通信が可能 であれば地上処理できるがJUICE(>~160 kbps)では 困難であり、この機能により初めてイオン加熱・加速 の場所・量・性格を統計処理する道を拓くことになる.

本機能はRPWI共通資源「RPWI-DPU」 搭載ソフト ウェアへの「RPWI-PEP相関処理機能」の追加となる. このため、開発はRPWI-DPUソフトウェアチーム $(IRF \neg \neg \neg \neg \neg, Sweden) \cdot LF \not= \neg (IAP, Czech)$ との共同作業となる. また、PEP/JDCチーム(低中エ ネルギーイオン観測: IRF キルナ, Sweden)からの同 時スナップショットデータの取得と伝送が必要となる. Systemから双方へ「起動CMD」を仕掛け、一定周期 でPEP側がイオン分布関数データ(8 sec 長)をRPWI-DPUへ伝送し、これをRPWI-DPU内でLF電場・磁 場3成分128 Hz波形と相関処理する方式とすること を、2016年5月に全関係者が同意した、今後、具体的 なプロトコル・試験方法・検証方法の策定へと進む. 実装にご協力頂くRPWI DPU・LFメンバー, PEPメ ンバー(特にPIのStas Barabash およびJDCメンバ ー), JMAGメンバー, Airbus · ESAメンバーに感謝 を申し上げたい.

4. おわりに:始まった長旅の車窓から

IRFゥプサラにおける試作機同士の初結合・統合試 験に目処がついた2016年4-7月,我々は欧州側での ESA審査(Instrument Preliminary Design Review: I-PDR)と、日本側でのJAXA審査(プリプロジェクト 審査,EM設計審査)の双方に忙殺された.「海外探査 機への観測装置の提供」という形態は,現時点では我々 の観測装置を載せた日本の探査機を提供する "BepiColombo型"よりロードが重く,先が思いやられ る.とはいえ,この渦中に開いたRPWIチーム全体会 合(仙台:7月11-15日)では,旅費不足で欧州になか なか足が延びない多くの日本側メンバー,初来日にニ コニコ顔の欧州側若手研究者・技術者,双方の活発な 議論と生き生きした顔が実に印象的で報われた.本チ ームは2016年度に最終的にはESAまで出て行くEM2 (Engineering Model),2017年度にフライト準拠の QM(Qualification Model)・熱構造モデルをそれぞれ 開発して設計・検証を確立,2018年度にはいよいよ FM(Flight Model)を開発し,2019年からの探査機レ ベル統合試験を経て2022年の打ち上げに向かう.本 当のリターンが戻って来るのは2030年代であり、メ ンバー個々の人生に並走する長丁場である.

この実現に至る数々の布石を敷かれた先人の皆様に 深謝するとともに、RPWIチームを構成するIRFウプ サラ(Sweden), CBK(Poland), IAP(チェコ), パリ 天文台・LPP(France), IWF(Austria), ICL(UK), 国内開発を支える明星電気をはじめとする全ての同行 者達の、2033年(予定)まで続くご健勝を祈る. 特に 日本のコアメンバーは、誰が欠けても大変ですよ. ま たの若手の皆さまのご活躍に期待するところ大です.

JUICEはジュノーによる木星内部・大気・極域観 測を引き継ぎ、リモートセンシングとその場観測(電 磁場・プラズマ)を統合したカッシーニ型の巨大惑星-衛星系探査となる。米も多数回フライバイを軸とする 「エウロパ探査計画」を起動し、JUICEとの同時活動 可能性もある。巨大惑星・衛星の磁気圏・電離圏分野 に関わる世界中の研究者は、国際ワークショップ 「Magnetospheres of Outer Planets」に2年に一度参集 する。次回は2017年夏、開催地ウプサラはカッシー ニとジュノーの成果で溢れるだろう。この会合はかつ て2011年夏の仙台開催が予定され、我々は3月11日 まで準備に忙殺された。断念に至る日々の軌跡は記憶 に焼きついている。「再招致はしないのか?」と国内 外で聞かれ続けており、ひさき衛星の活躍で厚みが増 した仲間の皆様と共に再招待検討を行いたい。

最後に、本連載を企画いただいた木村淳氏(東京工 業大学地球生命研究所)に御礼を述べる。

参考文献

- Kimura, T. et al., 2015, Geophys. Res. Letters 42, 1662.
- [2] http://c.gp.tohoku.ac.jp/sakura/
- [3] Gurnett, D. A. et al., 2004, Space Sci. Rev. 114, 395.
- [4] Kimura, T. et al., 2013, J. Geophys. Res.,

doi:10.1002/2013JA018833.

- [5] Morooka, M. W. et al., 2011, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2011JA017038.
- [6] Roth, L. et al., 2014, Science 343, 171.
- [7] Saur, J. et al., 2015, J. Geophys. Res. 120, 1715.
- [8] 笠羽康正ほか, 2014, プラズマ・核融合学会誌 90, 769.
- [9] Kasaba, Y. et al., 2010, Planet. Space Sci. 58, 238.
- [10] Ono, T. et al., 2009, Science 323, 909.
- [11] Gurnett, D. A. et al., 1992, Space Sci. Rev. 60, 341.
- [12] 東北大PPARC [http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/ observatory.html]
- [13] Murakami, G. et al., Geophys. Res. Letters, submitted.
- [14] Nishimura, Y. et al., 2010, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2010JA015491.
- [15] Miyoshi, Y. et al., 1999, Geophys. Res. Lett. 26, 9.
- [16] Kita, H. et al., J. 2015, Geophys. Res., doi:10.1002/ 2015JA021374.
- [17] Yoshikawa, I. et al., Geophys. Res. Letters, submitted.
- [18] Katoh, Y. et al., 2013, Ann. Geophys., doi: 10.5194/ angeo-31-503-2013.
- [19] Tsuchiya, F. et al., 2015, J. Geophys. Res., doi:10.1002/2015JA021420.
- [20] Kurth, W. et al., 1997, Geophys. Res. Letters 24, 1171.
- [21] Chyba, C. F. et al., 1998, Icarus 134, 292.
- [22] Cecconi, B. et al., 2012, Planet. Space Sci., doi:10.1016/j.pss.2011.06.012.
- [23] Ryabov, V. B. et al., 2014, Astron. Astrophys., doi:10.1051/0004-6361/201423927.