# みんなでふたたび木星へ,そして氷衛星へその5 ~ガニメデレーザ高度計GALAで測る 氷の世界と地下の海~

塩谷 圭吾<sup>1,2</sup>, 木村 淳<sup>3</sup>, 小林 正規<sup>4</sup>, 荒木 博志<sup>5,2</sup>, 野田 寛大<sup>5,2</sup>, 並木 則行<sup>5,2</sup>, 押上 祥子<sup>1</sup>, 石橋 高<sup>4</sup>, 東原 和行<sup>1</sup>, 齋藤 義文<sup>1</sup>, フスマン ハウケ<sup>6</sup>, GALAチーム

(要旨)表面を氷に覆われた「氷天体」. その代表格である木星氷衛星において,内部に海が存在する可能性をガリレオ探査機が示唆してから約20年 – 欧州宇宙機関(ESA)が主導する木星氷衛星探査機(JUICE)は,2022年の打ち上げに向けてその開発が進められている. JUICEは2029年に木星系に到達し, エウロパ,カリストのフライバイ観測,およびガニメデでは極周回軌道からの詳細観測を行う予定である.

ガニメデレーザ高度計(GALA)はJUICEの科学観測機器のひとつであり、氷天体に適用される初めての レーザ高度計である.GALAの科学目標の柱は(1)地形情報にもとづく氷テクトニクスの理解、(2)潮汐応答 の測定を通した内部構造の理解(地下海の存否確認や特徴把握を含む)、(3)表面の小規模粗度と反射率の 理解、である.地下海を含むサイエンスは、アストロバイオロジーの観点からも意義が大きい.

これらの科学目標のため、GALAは軌道上から氷衛星表面への距離測定(測距)を高密度・高精度で繰り 返し行う.特にガニメデについては全球にわたって、地形情報だけでなくマクロな表面変位および回転変動、 さらに小規模粗度と反射率を計測する.測距においてはノミナル高度500 kmから送信レーザパルス(17 mJ, 波長1064 nm,ノミナル30 Hz/最大50 Hz)を氷衛星表面に照射し(ノミナルスポットサイズ50 m,スポット 間隔50 m)、反射パルスを受信して、送受信パルスの時間差から距離を求める.小規模粗度と反射率の情報 は、受信パルスの強度やパルス幅の時間的広がりから得る.好条件地点での測距精度は約1 mである.

GALAの開発はドイツを中心に、日本、スイス、スペインのチームによる国際協力によって進めている。日本チームは心臓部とも言える受信部の3つのモジュール(後置光学系モジュール(BEO)、焦点面機器モジュール(FPA)、アナログエレクトロニクスモジュール(AEM))を開発する重要な役割を担っている。本稿ではJUICEおよびGALAの概要、科学目標、および機器開発について解説する。

# 1. イントロダクション

#### 1.1 木星探査の歴史と氷衛星研究の重要性

木星探査の歴史は、1973年に木星に初めて接近

1.宇宙航空研究開発機構
2.総合研究大学院大学
3.大阪大学
4.千葉工業大学
5.国立天文台
6.ドイツ航空宇宙センター
enya.keigo@jaxa.jp

して撮像を行ったアメリカ航空宇宙局(NASA)の パイオニア10号にまで遡る[1]. その後パイオニア11 号,ボイジャー1号・2号,ユリシーズ,カッシーニ, ニューホライズンズと続く[2-4]. これらのミッション はNASA主導で遂行されたもので(ユリシーズ,カッ シーニでは欧州宇宙機関(ESA)の寄与も大きい), 木星系の観測はいずれもフライバイによって行われ た.その後やはりNASAの木星探査機であるガリレ オが,初めて木星系に留まって詳細な観測を行った (1995-2003)[5]. このミッションで得られた重要な 科学的知見のひとつは,木星の主要な氷衛星(エウ



図1: 木星氷衛星探査機JUICE(左)およびガニメデレーザ高度計GALA(右)の完成予想図.

ロパ,ガニメデ,およびカリスト)に対して,氷の地殻 の下に全球規模の地下海(液体水圏)を持つ可能性 が示唆されたことであった[6,7].

地球においては、海が生命の誕生や進化におい て重要な役割を果たした可能性が議論されている. しかし現時点では、海の存在が確認できている惑 星は地球の一例のみである.もし木星氷衛星の地下 という、地球と全く異なる環境に海が存在すること を実証し、かつその特徴を明らかにできれば、その 意義はアストロバイオロジー(宇宙生命論)の観点で も大きい.惑星系における海の概念は大幅に拡張さ れ、また地球外で生命が居住可能な環境の候補とし て重要な意味も持つと考えられる.

### 1.2 木星氷衛星探査ミッションJUICE

Jupiter Icy Moons Explorer(JUICE)はESA が主導し,日本やアメリカも参加する国際協力によ る木星氷衛星探査計画である(図1)[8,9].JUICE の科学目標の柱としては,以下が挙げられている.

- 巨大ガス惑星周辺における生命居住可能領域 (Emergence of habitable worlds around gas giants)
- 巨大ガス惑星の代表例としての木星系(Jupiter system as an archetype for gas giants)

JUICEは木星の主要な氷衛星の探査を主目的と して、その周回軌道に入って詳細な観測を行う初め てのミッションであり、ESAが主導する初めての木 星系探査ミッションでもある.JUICEは2012年に ESAの長期計画であるCosmic VisionのL1(大型 計画の初号機)に選出されており、2022年に予定され ている打ち上げを目指して探査機の開発が進められ ている.JUICEには11個の科学観測機器が搭載さ れる予定である.

JUICEはギアナ宇宙センターから2022年にアリ アン5ロケットによって打ち上げられた後,地球,金 星,地球,火星,そして地球の順でのスイングバイを 経て,2029年後半に木星系に到着する予定である. その後,カリスト,エウロパでの複数回のフライバイ を経て,2032年にガニメデの極周回軌道に入る.ガ ニメデでは表面からノミナル高度500 kmの極周回 軌道にて全球観測を行う.JUICEの木星系での全 観測期間は4年5か月にわたる予定である(ただしリ ソースが許容する場合,高度200 km軌道によるミッ ション延長の可能性がある).

### 1.3 ガニメデレーザ高度計GALA

Ganymedeレーザ高度計(Ganymede Laser Altimeter: GALA)は、JUICEに搭載される科学

波長	1064 nm			
レーザ出力	17 mJ			
送信パルス幅	2.9 ns (1 σ)			
サンプリング	30 Hz/50 Hz (ノミナル/最大)			
頻度				
スポット間隔	50 m(30 Hz, 高度 500 km にて)			
ビーム拡散角	100 µ rad (1/e <sup>2</sup> , 全角)			
スポットサイズ	50 m (直径. 高度 500 km にて)			
受信望遠鏡口径	25 cm			
視野	580 μ rad			
検出器	Avalanche Photo-Diode (APD)			
デジタル波形	整合フィルタ			
処理フィルタ				
総質量	24 kg			
サイズ	39 cm $ imes$ 35 cm $ imes$ 42 cm			
消費電力	51 W (30 Hz にて)			
データレート	15.84 kbit/秒 (30 Hz にて)			
距離測定精度	1 m (好条件地点にて)			

表1: GALA の主な仕様

観測機器のひとつであり、衛星表面の氷テクトニク スや地下海の調査に密接に関わる装置である[10]. GALAチームはその科学目標の柱を以下のように定 めている[10,11].

(1)地形情報にもとづく氷テクトニクスの理解

(2)潮汐応答の測定を通した内部構造の理解

(3)表面の小規模粗度と反射率の理解

これらの科学目標に向けて開発するGALAは, シングルビーム・単一受光素子のレーザ高度計であ る. その第1の機能は,軌道上から高指向性のレー ザパルス(波長 1064 nm,ノミナル周波数30 Hz)を 氷衛星の表面に照射し(ノミナルスポットサイズは直 径約50 m),反射光を受信してレーザの往復の所要 時間から距離測定(以後,測距)を行い,スポット照 射地点の高度を測定することである.これとあわせ て,反射光の強度およびパルス幅の時間的な広がり から,観測地点の反射率,傾斜,および粗さについ ても情報を得る.GALAの主な仕様を表1に示す.

JUICEの他の搭載機器と同様に、GALAはエウ ロパ,カリストに対しては複数回のフライバイ観測を 行う一方,ガニメデに対してはノミナル高度500 km の極周回軌道から継続的に観測を行う.その結果,



図2:表面変形とその位相ずれ、および経度秤動の概念図. 天体 と軌道のサイズの比は現実と異なり、また物理量は強調し て示してある.ガニメデ内部に地下海が存在する場合は表 面変位や経度秤動の大きさが増加し、位相ずれは小さくなる 傾向にあることが、理論モデルによって予測されている.

ガニメデ全球にわたる3次元的地形情報および反射 特性だけでなく、そのマクロな形状および軌道運動 の時間変化(表面変位,位相ずれ,経度秤動)につい てデータを得る.図2は表面変位,位相ずれ,経度 秤動の概念を示したものである.これらの量は潮汐 作用を通じて地下海の有無や特性を反映すると考え られる(これらの理論的な予想については第2節を 参照).このようにして得られたデータをもとに、上記 の科学目標に臨む.

GALAは氷天体に対して適用される初めてのレー ザ高度計である.また,天体のマクロな形状や軌 道運動の変化を実測して,地下海の存否を含めた 内部構造を推定するというアプローチを行うのも, GALAが初となる.

GALAの科学目標に関する詳細は第2節に,また 装置およびその開発については第3節に示す.

#### 1.4 国際協力プロジェクトとしてのGALA

GALAの開発はドイツ航空宇宙センター(DLR)を 中心として,ドイツ,日本,スイス,スペインによる国 際協力体制のもとで進めている(図3).

GALAの開発において日本チーム(GALA-J)



図3: GALAにおける機器開発の国際分担(略称の意味はLEU: レーザエレクトロニクスユニット, LHM:レーザヘッドモジュー ル, BEO:後置光学系モジュール, FPA:焦点面機器モジュー ル, AEM:アナログエレクトロニクスモジュール, RFM:レン ジファインダーモジュール, DPM:データプロセッシングモ ジュール, PCM:パワーコントロールモジュール).

は、後置光学系モジュール(Back-End Optics: BEO),高感度検出器(Avalanche Photodiode: APD)の開発を含む焦点面機器モジュール(Focal Plane Assembly: FPA),アナログエレクトロニク スモジュール(Analogue Electronics Module: AEM)の3つのハードウエアを担当する(当初はこれ らに加えて受信望遠鏡も日本が担当する国際分担で 進めていたが、全体スケジュールを最適化するため 現状の分担に変更することになった).スイスはレン ジファインダーモジュール(Range Finder Module: RFM)を、スペインはパワーコンバータモジュール (Power Converter Module: PCM)を担当する.

日本の担当部分は高感度受信検出器を含み,光 学,エレクトロニクス,機械・構造,および熱設計が 複雑に絡み合う,GALAの心臓部とも言える.その ほかに,日本が主担当ではないものの,GALA-Jで はパフォーマンスモデル(GALA全体の性能をシミュ レートするソフトウエア)を自主的に開発している.

# 2. GALAの科学目標

GALAが定める科学目標の柱は,(1)地形情報に もとづく氷テクトニクスの理解,(2)潮汐応答の測定 を通した内部構造の理解,および(3)表面の小規模 粗度と反射率の理解である.これらの科学目標につ いて2.1~2.3節にて述べる.2.4節ではJUICEに搭 載される他の科学観測機器とのシナジーおよび波 及効果について述べる.

#### 2.1 地形情報にもとづく氷テクトニクスの理解

ガニメデをはじめとする氷衛星の表面は氷から なる地殻に覆われ、そこには地球型の岩石天体に 見られる地形とは大きく異なる様式を持った構造 が、様々な空間スケールで存在する(図4.5).氷の テクトニクスに支配された天体進化を解明するため には、地形学的特徴を詳細に把握することが必須 である.

しかしながら、従来の巨大惑星系探査ではレー ザ高度計が使用されなかったこともあり、 定量的な 地形情報は過去の探査で立体視画像が得られてい るごく僅かな領域に限られる.また.過去に木星系 衛星を調査したボイジャー探査機やガリレオ探査 機の観測はフライバイによるものだったため、撮像 や分光観測領域の表面カバー率が悪く、空間解像 度にも大きな不均質がある. 特に極域については 空間解像度が著しく低いか、あるいはデータが欠 落している. そのような不十分なデータに基づいて 作られた地質図は、全表面の半分以上が地形的特 徴の判読ができない領域となっている[12]. こうし たデータの不完全性はクレータ年代学に基づく地 質年代の推定にも十億年オーダーの大きな不定性 をもたらし、進化の解明に必要な地質と時間軸の 対応づけを困難にしている.

JUICEによる極周回軌道からのガニメデ観測は、 この状況を本質的に改善する.以下に、現状で判明し ている地質学的特徴を概説し、GALAでの詳細な調 査によって期待される科学的知見について述べる.

#### 2.1.1 ガニメデ

ガニメデ表面の地質は大きく3つに分類される.



図4: ガリレオ探査機によって得られたガニメデのクローズアップ画像に,高度500 kmの極周回軌道において予想されるGALAのレーザス ポットを赤点で示した図.

Bright Terrainと呼ばれ,相対的に反射率が高 く溝状の構造が卓越する領域,Dark Terrainと 呼ばれ相対的に反射率が低く衝突クレータで飽和 した領域,そして天体衝突によって形成した構造 (Impact Structure)である.

#### (1) Bright Terrain

相対的に反射率が高い(波長~1 µmにおけるア ルベドの平均値で約0.6)この領域は、Groove(ある いはGrooveの集合体としてのSulcus)と呼ばれる 溝状の地形で特徴付けられ、ガニメデ表面の約2/3 を占める(図5). 高さ数十~数百m、波長1 km程度 の起伏を持った溝 (Groove) が帯状に束になり、皺 のような外見を作り出している.水平方向のスケール は長大で、1000 kmを超えるものも多い.

Grooveはその形成以前から存在している古い地 質を引き裂くような形態を取ることから、表面の伸 張応力によって形成した正断層の集合体と解釈され ている.応力と断層形成という地質活動が、地球に おいてはプレートの生成や移動, 消滅に特徴づけら れるいわゆるプレート・テクトニクスによって駆動さ れているのに対し, そういった運動が見られないガ ニメデでは,内部の温度変化や液体水の固化に伴う 全球的な体積膨張や,内部での固体氷対流に伴う 上昇流などが応力源として提案されている[13,14].

しかしながら,地形学的情報の不足からそのよう な応力源となるイベントの発生時期や規模は分かっ ていない.またクレータ年代学に基づいて,この Bright Terrainの典型的な年代は約20億年前と 推定されているが,データの欠如や衝突フラックス の推定における不定性によって,8億年前から40億 年前までの曖昧さがある[15].

GALAが高空間分解能で全球測定を行えば、定 量的なGrooveの形状解析を通して弾性リソスフェ アの厚さや表面拡大の全球総量を見出すことがで き,Bright Terrainの形成のために必要な体積膨 張量,すなわち内部温度の変化量あるいは地下海の 固化量などの推定に繋げることができる.これは内



図5: ガニメデにおける代表的な地質学的特徴. 左上: Bright Terrainに見られるGroove (Uruk Sulcus), 右上: Dark Terrainに見られる Fossae (Lakhmu Fossae), 左下:直径40 kmの衝突クレータ (Achelous crater), 右下:緩和が進んで起伏がなくなった古い衝突 地形 (Buto Facula, 直径245 km).

部の熱史を制約する重要な情報にもなる. Groove の起伏の波長がリソスフェアの厚さで決まる点も, 熱 進化を制約する手がかりとなる.また, JUICEの可 視光カメラ (JANUS) が得る高空間分解能の画像 データと連携して小スケールの衝突クレータを同定 すれば,地形の形成年代を高精度で推定することが 可能となる.各地質領域の形態とそれらの層序,そ して各地形が持つ年代を組み合わせた知見は,ガニ メデのテクトニクス様式の理解と進化の解明に本質 的な寄与をもたらすものと期待できる.

#### (2) Dark Terrain

相対的に反射率が低い(波長~1µmにおけるアル ベドの平均値で約0.25)この領域は、衝突クレータ で飽和した古い年代(40億年以上前)を持ち、ガニメ デ表面の約1/3を占める[15].衝突クレータに重な るように存在するFurrow(あるいはFurrowが卓 越する領域としてのFossae)と呼ばれる溝状の地形 は、その形態がGrooveに似ているが、年代の古さ を反映した大きな緩和や侵食を受け、やや丸みを帯 びた畝のような形態に近い(図5).

このFossaeの成因がGrooveと同様に表面の 拡大や伸張応力にあるのかは分かっていないが, Furrowの分布が同心円状に見えることから,巨大 な衝突イベントに伴う多重リング構造との解釈があ る[16].一方で,Grooveを形成した体積変化イベン トがDark Terrainにも構造を作り,衝突イベント 起源としてのFurrowと混在している可能性もある. 特にBright Terrainとの境界領域では,推定年代 や物質学的特徴の違いも注意深く読み取りながらそ の起源を把握することが必要となる.

#### (3) Impact Structure

ガニメデでの衝突クレータの形態は、サイズが大 きくなるに従って単純(お椀)タイプ、平底タイプ、中 央丘タイプ、中央孔もしくは中央ドーム型タイプ、そし て複雑・多重リングタイプへと変化する.こうした傾 向はカリストやエウロパにも同様に見られる.ただし クレータの個数には大きな差異があり, エウロパ, ガ ニメデ, カリストの順に少ない. また, 氷天体上のク レータのサイズと深さの関係は地球型岩石天体のそ れとは異なり, 形態が変化するサイズが月よりも小さ い(同じサイズの平底クレータは月よりも浅く, かつ 平底の中央部がやや高まっている). さらに大きいサ イズのクレータでは深さ/直径比の傾きが変わり, 大 きいほど浅くなる[17].

このような傾向は、アイソスタシーのもとではス ケールの大きい地形ほど粘性緩和が進み、形状が 長期的に変化することと対応している.粘性緩和の 度合いはリソスフェアの厚さで決まり、その厚さは熱 流量で決まる.そのためクレータの粘性緩和度は熱 進化を制約する重要な手がかりとなる.また、粘性 緩和の進行に伴う応力場の変化は断層の形成に発 展する可能性があり、クレータ内の断層構造(同心円 状か放射状か)もリソスフェアの厚さで決まる.

したがって、大きな粘性緩和度が期待できる大き なクレータに対してGALAを用いて深さ/径比の計 測を行い、あわせて高解像度画像を用いた断層構造 の解析を行うことは、ガニメデの熱進化史を理解す るために重要である、また、ほとんど緩和しないと 考えられる小さいクレータの深さ/直径比を正確に 求めることも、大きなクレータの緩和度推定に必須 である. 深さ/直径比決定のためにはクレータ内に 複数のデータ点が必須となるため、小さいクレータ はデータ密度の高い高緯度地方に存在するものに着 目すべきである. また, クレータが複数の地質ユニッ トをまたぐ場合や、クレータ形成後のテクトニクスに より変形している場合(例えば、クレータを二分する ような巨大な断層が走っている場合など)には、深さ /直径比の解釈が複雑になる. そのため単一地質ユ ニット内にあり、巨大な断層で引き割かれていないク レータについて, まず着目すべきであろう.

#### 2.1.2 エウロパ

JUICEはエウロパに対して2回のフライバイを行う.その際にGALAはエウロパ表面からの探査機の高度が1300 km以下において測距を行う.エウロパの表面にもガニメデと同様に多様な地質構造が存在するが,ガニメデよりも表面年代が総じて若い(典型的な地形形成年代として4000万年前)点が最も大

きな違いである[15]. エウロパ表面の地質は大きく3 つに分類される. 第1にLineamentと呼ばれる線状 構造, 第2にMottled Terrainと呼ばれる局所的 な崩壊地域, 第3に外来の天体衝突によって形成し た構造 (Impact Structure) である.

LineamentはガニメデにおけるGrooveと同様に 氷地殻の応力の履歴であり、画像データと連係した 地形年代の推定を通して、地殻進化の規模と時間ス ケールが対応付けられる. また近赤外分光などによ る物質化学的情報との連携は、氷地殻における物質 循環の理解にも繋がる. Mottled Terrainは氷地 殻が局所的に融解した[ホットスポット]的な領域と して注目されている. 特に, 測線上にあるTheraと Thraceと呼ばれる2つの巨大なMottled Terrain は、地形的外見の乱雑さからChaotic Terrainと も呼ばれ、その内部に局所的な融解領域、いわゆる 内部湖が存在することを示唆する領域として解釈さ れている[18].液体水は固体氷に比べて高密度(小 体積)なため、地殻浅部に液体水が存在するとその 上層が沈下し表面氷を破壊する. すなわちこうした 領域は、その起伏を計測することで地殻内部の状態 を知る窓となる。

また,ガニメデと同様にクレータの深さ/直径比の 実測から粘性緩和度を見出し,リソスフェア厚さと 熱流量の推定へと繋げることも,内部状態の理解に 有効である.

#### 2.1.3 カリスト

JUICEはカリストに対しては10回以上のフライバ イを行う.その際にGALAは探査機の高度が1000 km以下において測距を行う.従来の探査によって 得られたカリスト表面のデータは,両極域で欠落し ているなどカバー率と質のいずれも悪い.JUICEは 木星周回フェーズにおいてその軌道を木星赤道面 (衛星公転面)に対して最大22度傾けるため,カリス トへのフライバイ時は高緯度領域の観測も可能とな る.カリストの表面は一様に衝突地形が卓越し,衝 突クレータ同士が重なり合う飽和状態にあること から,推定される地質年代は40億年以上前と古い [15].こうした地形的特徴や反射率の低さはガニメ デのDark Terrainに類似していることから,クレー タの深さ/直径比の実測にもとづくリソスフェア厚さ や熱流量の推定を目指す.

#### 2.2 潮汐応答の測定を通した内部構造の理解

潮汐変形のデータは、リモートセンシングによって 地下海の存否を判断するための最も重要な情報と なる.地球-月系と同じように、木星と衛星の間にも 重力相互作用による潮汐が働き、惑星と衛星に周期 的な形状や運動の変化をもたらす(図2).その変化 量は衛星の構成成分と内部構造に依存する.特に 氷衛星に対しては、変化量が地下海の有無に依存し て有意に異なることが理論計算から予測されている [19].GALAは探査機から衛星表面への測距を継 続的に行うことで衛星全体の形状変化をモニタリン グし、潮汐に伴う衛星表面の変位(鉛直方向の変化) と回転変動(いわゆる秤動、水平方向の変化)を捉え る.

#### 2.2.1 表面変位

ガリレオ衛星のフライバイ探査を行ったガリレオ 探査機は、ガニメデ、カリスト、及びエウロパのいず れにおいても、周期変動する木星磁場に衛星が応 答して生じた衛星内部の誘導電流による二次磁場の 兆候を捉えた[7].これは衛星内部に地下海の存在 を示唆する観測結果である.ただしガニメデにおい ては、自身が固有磁場を持っていることなどから解 釈が難しく、地下海の存在を強く制約するには至っ ていない.また、ハッブル宇宙望遠鏡を用いたガニ メデのオーロラ観測からも地下海の存在が示唆され ているが、同様の理由で確定的とは言えない[20].

そこで地下海の存否について確証を得るために, GALAは従来とは異なる測地学的アプローチによっ てこれに挑む.地下海が存在しない,すなわちH<sub>2</sub>O 層の全てが固化して深部の岩石層と固着している場 合と,地下海がある場合とでは,潮汐に伴う衛星表 面の変形量が異なることが理論的に見積もられてい る[18].

ガニメデをはじめとするガリレオ衛星の内部構造 は、平均密度と慣性能率の制約のもとで組成含有率 とその内部成層度が推定されている.慣性能率が小 さいガニメデの内部は、明瞭な分化状態にあると考 えられている.そして表層が厚さ約1000 kmにおよ ぶH<sub>2</sub>O主体の層に覆われ、地下海があるとすればそ れは、低圧相の氷からなる表層の氷地殻と、高圧相 の氷からなる高圧氷マントルに挟まれて存在すると 思われる[21].

このような内部構造を仮定した潮汐変形の粘弾性 モデル計算によれば、地下海が存在する場合、表面 変位をあらわす変位ラブ数(h<sub>2</sub>)は1.0~1.7であり、 その位相ずれ(変位が最大となる軌道上の位置と近 木点とのなす角)は10度以下となる.一方で、地下海 が存在しない場合のh<sub>2</sub>は0.1~1.6であり、位相ずれ は0~60度以上に達する[19].ここで見られる不定 性は主に氷殻の厚さや粘性率、剛性率が持つ不定 性に主たる要因があり、例えば高圧氷層の粘性率が 低い場合は、地下海が存在しない場合でもh<sub>2</sub>が大き くなってしまう.これはすなわち、変位ラブ数だけで は地下海の存否を決定できないことを意味するが、 変位の位相ずれと合わせることによってこの制約が 可能となる.

エウロパにおいては、ガニメデよりも木星に近い ことから大きな潮汐変位が予想される.しかしエウ ロパに対するJUICEの2回のフライバイはエウロパ と木星との位相が同一となるタイミングで行われる ため、潮汐応答の検出が原理的に不可能である.カ リストにおいては、地下海がない場合の潮汐変位が 0.5 m程度と見積もられている一方、地下海が存在 する場合の振幅は4 m以上になると予想されている [22].カリストに対しては様々な軌道位相でのフライ バイが行われるため原理的には潮汐変位の検出が 可能だが、フライバイ回数が少ないことに加えて軌 道の交差点がほとんどないため、実際には潮汐変位 の検出はかなり困難であると考えられる.

#### 2.2.2 回転変動

エウロパ,ガニメデ,カリストはいずれも,その公 転周期と自転周期が一致した同期回転と呼ばれる 状態にある.そのため1回の公転における平均として は「常に同じ面を惑星に向ける」が,その公転の最中 に木星から受ける潮汐トルクによって自転速度は変 動する(この変動を強制秤動と呼ぶ).ガリレオ衛星 の公転面は木星の赤道面にほぼ一致しているため, 強制秤動は主に経度方向に発生する.

こうした変動があると、測距の際に衛星表面にお いてレーザ照射のスポット位置が系統的にずれるた め、GALAによる長期間観測からその大きさを検出 できる可能性がある.さらに地形のステレオ画像を 用いた相対的に精度の良い数値地形モデルが構築 されれば、GALAの観測と組み合わせることで変動 の測定精度が上がる.

強制秤動の大きさは内部構造に依存することが 理論的に示されており、ガリレオ衛星以外の天体、 例えばカッシーニ探査機による土星系衛星での秤 動の測定が、地下海の存在を判別する手段のひとつ として用いられている[23].ガニメデの秤動の大きさ は、地下海の有無も考慮した上で、ガニメデ赤道上 での位置に換算して6.5~9 m程度と見積もられてい る.一方JUICEで期待される秤動の検出精度が数 m程度であることを考えると、これをもって地下海の 存在を確定的に判別することは難しそうである.い ずれにしても、従来の理論モデルは衛星の固体層を 完全弾性体と仮定しているため、粘弾性的な振る舞 いを考慮したより現実的なモデル計算を行う必要が ある.

エウロパに対しては潮汐変位と同様に,2回のフラ イバイ時の軌道位相が同一となるために経度秤動の 検出は原理的に不可能である.またカリストの秤動 の振幅もガニメデと同程度と見積もられているが,ガ ニメデより観測数が少ないことを考えると,潮汐変位 と同様に秤動の検出自体が困難と考えられる.

#### 2.3 表面の小規模粗度と反射率の理解

地形情報の取得や潮汐応答の検出がレーザの往 復の所要時間を用いた測距に基づくのに対し、受信 レーザパルスの時間的拡がりや強度の変化によって 表面状態に関する情報を得ることも期待できる。

#### 2.3.1 表面の小規模粗度

レーザの照射スポット(高度500 kmからの測距に おけるスポットサイズは直径約50 m)中に高さ数m 以上の起伏があると,反射パルスの幅が時間的に広 がる(ピーク強度は下がる).地表面に傾斜がある場 合も同様である.氷衛星の表面は,大気のない地球 の月の表面がそうであるように,継続的な天体衝突 を経たことにより細かいレゴリス状になっていると考 えられているが,数メートル規模の起伏については 情報がなく,GALAによる測定が初となる. 衛星表面の起伏を作り出す主要因は断層運動な どのテクトニクスや天体衝突であるが、小さな空間ス ケールでは、日射に伴う氷の昇華や、木星磁気圏中 のプラズマ粒子によるスパッタリングが大きな寄与 を果たしている可能性もある.GALAがもたらす小 規模粗度の定量的な情報と、地質ユニットとの関係 や日射やプラズマ粒子などの外的要因との関係を見 出し、特にガニメデに対してはその緯度経度分布も 考察することで、外的な要因による起伏変化の素過 程と変化の時間スケール(いわゆる風化速度)の解明 を目指す.

#### 2.3.2 反射率

氷衛星の反射率は、全球平均ではエウロパ、ガニ メデ、カリストの順に高く、また地質ユニット間でも 違いがある(一般に古い地質ほど低反射率).また、 木星磁気圏中の高エネルギー粒子のスパッタリング の影響によって、公転方向の前方と後方でも有意な 違いがある.さらに、固有磁場を持つガニメデでは、 極域の反射率が高く「極冠」と呼ばれる特徴も持っ ている.

能動的にパルスを照射するレーザ高度計である GALAのデータを用いることで、全球的にほぼ同じ 条件でレーザ波長での入射強度と反射強度の比を 求めることができる.高度や表面の傾斜を補正し、 近赤外分光による観測結果との照合を通して、レー ザ波長での天体の反射率マップを求めることがで き、放射線や紫外線による反射率の変化の理解を 大きく進めることが可能となる.

#### 2.4 他機器観測とのシナジー・波及効果

GALAによる観測がもたらす氷テクトニクス,地 下海を含む内部構造,そして表面組成に関する知見 は,JUICEが他に搭載する様々な機器の観測結果 と組み合わせることで,さらに多角的に深めること ができる.

例えば可視カメラJANUSが得る画像データは, GALAの計測位置を特定し,点の情報を面的な表 面地質の理解へと繋げる最も重要な連携機器であ る.氷層を透過するレーダのRIMEや重力場測定を 行う3GMは地質の産状把握に寄与し,可視赤外撮 像分光計MAJISや紫外分光系UVS,サブミリ波 分光系SWIは様々な波長で表面の組成に関する情 報を得る.磁力計J-MAGは木星磁場の変動に伴う 衛星の電磁感応をモニターし,非熱的中性粒子観測 器PEPや電波・プラズマ波動観測器RPWIによる 観測のサポートを得て,地下海の規模や組成(電気 伝導度)を制約する.こうした複眼的なアプローチで 氷衛星,特に地下海の環境を把握することによって, アストロバイオロジーの観点での研究も進むと考え ている.

GALAをはじめJUICEに搭載される観測機器 のデータを総合して得られる氷衛星についての知見 は、木星系の理解に貢献するだけには留まらない. 太陽系形成理論と連携することによって、一般的な 惑星系・衛星系形成モデルの構築に寄与することが 期待される.

近年,数多く発見されている系外惑星系を成す天体の年齢,質量,軌道等は多様性に富んでいるが, 観測から得られる情報量には,観測対象までの距離に起因する限界がある.いっぽうGALAおよび JUICEの他の機器を用いた探査は,対象は太陽系 における木星系という特定のターゲットに限定され るが,得られる情報の詳細さでは系外惑星観測を圧 倒する.したがって両者は相補的である.GALAお よびJUICEの機器がもたらす情報は,太陽系外の 惑星系・氷衛星を研究していく上で重要なテンプレー トとなり,足掛かりになると考えている.

# 3. 機器開発

GALAの装置全体の概要,諸元および国際分担 については第1節で述べた.本節ではまずGALAの 機能と構成要素について述べ(3.1節),次に特に日本 における開発について重点的に解説する(3.2節).

#### 3.1 GALAの機能・構成

シングルビーム・単一受光素子のレーザ高度計で あるGALAの第1の機能は、軌道上から氷衛星表面 へのレーザ測距を行い、氷衛星表面におけるレーザ 照射箇所の高度を測定することである.これに加え て、受信した反射光の強度やパルス幅の時間的な広 がりから、観測地点の反射率や傾斜・粗さについて も情報を得る. GALAのハードウエアは複数のモジュールによっ て構成される(図3). 各モジュールの機能を, 測距信 号の大まかな流れに沿って以下に記す.

- <u>LHM・LEM</u>:内蔵するNd:Yagレーザによって, 波長1064 nm,出力17 mJの送信パルスを生成 する.送信パルス幅は2.9 ns,ノミナルおよび最 大サンプリング頻度はそれぞれ,30 Hzおよび50 Hzである.
- 送信望遠鏡: 生成された送信レーザパルスをガニ メデなどの観測天体表面に照射する. ノミナルの 照射スポットサイズは 50 mである.
- 受信望遠鏡: 観測天体表面で反射したレーザパルスを受信・集光し, BEOに導入する. 開口径25 cmの軸対称光学系から成る.
- <u>BEO</u>: 微弱な受信レーザパルスをできる限り高い シグナルノイズ比で受けることができるよう, 焦点 面ピンホールによる空間フィルタリング, バンドパ スフィルタによる波長フィルタリングを行う.
- <u>FPA:</u> BEOを経て導入された受信レーザパルス を、APD検出器によって光学的信号からアナロ グ電気信号へと変換する.またFPAには送信 レーザパルスの一部を導入する経路が設けてあ り、送受信レーザパルスを同一の検出器で計測す ることができる.
- <u>AEM</u>: FPAから出力されたアナログ電気信号を デジタル信号に変換する.
- <u>RFM</u>: AEMから出力されたデジタル信号を受け、送受信パルスの時間差や受信パルスの波形、 強度等を定量化する.
- <u>DPM</u>: GALAの主コンピュータであり、装置の制 御を行い探査機とのインターフェースの役割を持 つ.
- <u>PCM</u>: GALAに各種電圧の電源供給を行う.

#### 3.2 日本における開発

GALA-Jは国際協力によるハードウエア開発で BEO, FPA, およびAEMの3つのモジュールを担 当する(図3). また主担当ではないものの, GALA 全体の性能をシミュレーションするソフトウエア(パ フォーマンスモデル)の開発を自主的に行っている. 本節ではこれらの開発について述べる.

モジュール	モデル	使用目的	最終使用場所	
BEO	STM1	熱構造モデルとして使用.特殊機械 I/F,	日本(自主モデル <sup>3)</sup> )	
および		表面処理の試作等		
FPA <sup>2)</sup> STM2		熱構造モデルとして使用.	$DLR \rightarrow ESA$	
	S05 (SIM)	STM 相当シミュレータ(相手方実験用)	$DLR \rightarrow HDT^{4)}$	
	EM1-1	検出器周辺の電気モデルとして使用	$DLR \rightarrow ESA$	
	BEO 単体	光学系の試作・実証・対環境試験	日本(自主モデル)	
	試作モデル			
	EM1-2	検出器周辺の熱設計実証モデル	日本(自主モデル.	
			適宜 DLR, HDT に貸し出し)	
	EM1-3	PFM 等価設計モデル.表面処理改良・PFM 製造・	日本(自主モデル.	
		組立の経験獲得. 噛み合わせ・総合実証試験・	適宜 DLR, HDT に貸し出し)	
		特殊実験法確立の相手方として使用		
	(EM2)	FM 準拠モデル.欧州にて全体噛合せ・	ドイツ側計画変更のため廃止	
		総合実証試験		
	PFM	フライトモデル	$DLR \rightarrow ESA$	
	FS	フライトスペア	$DLR \rightarrow ESA$	
AEM	STM	熱構造モデル	$DLR \rightarrow ESA$	
	AEM SIM	シミュレータ(相手方実験用)	DLR → ベルン大学	
	EM1-1	システム試験用	$DLR \rightarrow ESA$	
	EM1-2	RFM との IF 確認用	日本	
	EM1-3	RFM との IF 確認および設計検討用	日本	
	(EM2)	FM 準拠モデル.欧州にて全体噛合せ・	ドイツ側計画変更のため廃止	
		総合実証試験		
	PFM	フライトモデル	$DLR \rightarrow ESA$	
	FS	フライトスペア	$DLR \rightarrow ESA$	

#### 表2: GALA-J における開発モデル(ハードウエア)およびその目的".

<sup>1)</sup>モジュール未満の規模の試作や,モジュールを試験するために開発した装置は含めていない.<sup>2</sup>BEO単体試作モデル以外は全てBEOとFPA のそれぞれについて製作する.<sup>3)</sup>欧州を含む公式のGALAプロジェクトでは要求されていないが,日本担当分の開発のため不可欠と判断して 開発したモデル.<sup>4</sup>HENSOLDT社(ドイツ).ドイツにおけるGALAの主契約企業.

# 3.2.1 開発モデル群(ハードウエア)とその目的: Model philosophy

宇宙用の機器開発では、段階的に複数のモデル(ハードウエア)を製作することが一般的である. GALA-Jにおける開発モデルおよびその目的 (Model philosophy)を表2に示す.

このように通常の同規模の国内プロジェクトと比 べて多くのモデルを開発する理由は幾つかある: 欧 州との「堅い」国際分担であることは、その要因の ひとつとなっている.また、GALA全体の方針とし て、多数の国・機関にわたる国際分担において、各モ ジュールの機能を模擬するハードウエア(シミュレー タ)を製作して相互交換することがインターフェース対 応の基本路線とされたことが挙げられる. あわせて, 単にGALA-Jが複数のモジュールを担当しているこ とも,開発モデルが多数になる要因となっている.

日本担当モジュールに求められる機能・性能要求 および制約条件は挑戦的で、モジュール自体の開発 のためにも試験・実証方法を確立するためにも、計 画したことを消化するだけでは不十分で、試行錯 誤が不可欠であった、そのため欧州を含む公式の GALAプロジェクトでは要求されていなくても、フラ イトハードウエアと同等の設計による自主的な実証 モデル(EM1-3)一式の開発が不可欠と判断した、こ のことも、日本で開発するモデルの数が増す要因と して寄与している.



図6: BEOの光学設計. 上段が光学系の構成, 下段が結像特性を示す

#### 3.2.2 BEO

BEO (Backend Optics)は、受信望遠鏡が集光 したレーザパルスに適用する後置光学系モジュール である.その主な役割は、微弱な受信レーザパルス をできる限り高いシグナルノイズ比で検出するため、 空間フィルタリングおよび波長フィルタリングを行う ことである.BEOの光学設計を図6に、機械的設計 を図7に示す[24].

BEO の入射開口は直径700 μmのピンホール で、受信望遠鏡の焦点面に位置するようにドイツ側 とBEO間の機械的インターフェース条件を定めてあ る.空間フィルタリングの役割はこのピンホールが担う.ピンホールを通過した受信レーザパルスは、高精度の波長フィルタリングを行うため第1レンズでコリメートされた後、バンドパスフィルタを経て、第2レンズによって再結像する.

光学系の高効率化のため、レンズ(石英製)の枚数 を最小限の2枚とし(ドイツによる当初の設計例では 4枚)、各レンズの両面に反射防止コートを施した.ま た縮小光学系(倍率0.52)にすることでBEO・FPA間 アラインメントの実現性・堅牢性を確保する方式にし た(ドイツの当初の設計例では等倍光学系).このよ うな光学系を設計制約のもとで実現するため、接着



図7: BEOおよびFPAの外観(上)および断面図(下).

剤を使わない保持構造およびそれと整合する特殊な レンズ形状を設計し,特注品として製造した(図6). その結果,実現した透過効率(バンドパスフィルタを 除いて99.8%以上)は余裕を持って要求(98%)を上 回る,理想値に近いものであった.

高性能のバンドパスフィルタの開発も重要課題で あった.入念な設計検討と試験および製造の結果, 透過帯(1064 nm帯)の全域で透過率95 %以上(要 求値は90 %), 遮蔽帯の遮蔽率6桁以上(要求は5桁) など,たいへん良い特性を実現した.

レンズおよびバンドパスフィルタについては、交渉 により欧州の規格標準と擦り合せつつ,国内で放射 線,温度,湿度等についての認定試験を遂行した. BEOの筐体はステンレス(SUS316)を母材とし, 高精度機械加工による一体材料からの削り出し部 品として設計した.その結果,筐体内のレンズやバン ドパスフィルタ等の部品は,ネジ締結で組み立てる だけで保持および内部アラインメントが自動的にで きる方式になっている.また,BEOの筐体は放射線 シールドを兼ね,その形状・肉厚が内部の光学素子 の放射線遮蔽の要求を満たすよう計算して設計して ある.さらに,BEO筐体はドイツ側との機械的イン ターフェースを兼ねている.その高精度の要求を満 たすためにも,高精度の機械加工は重要な役割を果 たした.

BEOには、打ち上げ時に筐体内部の閉空間を排

気するための系路を設けてある.迷光対策として, 筐体と内部スペーサの幾何学的形状の組み合わせ により,(長さに比べて)細い排気経路が4回の折れ 曲がりを経て,初めて外界に通じる構造にしてある (迷光が混入するために必要な反射回数はもっと多い).

設計においては、光学的アラインメントや部品の 製造精度、熱変形、物性の温度依存性等を考慮し た公差(許容誤差)解析を行い、すべての公差を決 定した.その結果、BEOについては最終的には製 造時に接着および光学的微調整を要することなくド イツ側との高精度の機械的インターフェースや厳しい 許容空間の制約、放射線遮蔽、環境条件(温度域、 振動)等の要求と光学特性を両立する設計解を得る ことができた.

いっぽうBEOとFPAの間のアラインメントについ ては、公差解析と設計検討により、光軸をZ方向と した場合におけるXY方向の面内シフトだけは光学 特性を測定しながらの微調整が必要と判断した.そ のためBEO・FPA間に機械的な調整自由度を設け た(図7).このようなシンプルな機構でじゅうぶんに 事足りるのは、前述の縮小光学系の効果で、XY面 内方向の許容度を大き目に確保できたことによる(そ の結果、Z方向のアラインメント許容度は若干、犠牲 になっているが問題にならない程度である.また、 ここでは傾きの誤差は事実上、無視できる).なお、 この部分にも迷光対策を施してあり、迷光が侵入す るためには5回の折れ曲がりを含む経路を経る必要 がある.

実験的には、このような機能・性能および制約条件への適合の全てを、複数のハードウエアモデルの 開発を経て、EM1-3にて実証することができた(表2).

#### 3.2.3 FPA

FPA (Focal Plane Assembly) は、APDセンサ を含むAPDモジュールを中心に、その周辺機器をまと めた焦点面機器モジュールである(図7). FPAの主な 役割は、光学信号(受信レーザパルスおよび送信レー ザパルスの一部)を電気信号に変換することである.

受信レーザパルスは受信望遠鏡とBEOを経て FPAに導入され、APDセンサに照射される.また FPAは送信レーザパルスの一部を導入する光ファイ バーを持ち、FPA内にて極小ボールレンズによる収 束と、極小金属鏡による2回反射を経てAPDセン サに至る. FPA内部は許容空間の制約が厳しく通 常の鏡の据え付けが困難だったため、鏡を内部に取 り付ける構造部品と一体化し、その一部を研磨して 金コートを施すことで反射光路を実現した. これら の構造により、送受信レーザパルスの時間差や強度 比、パルスの時間幅の広がり等を同一の検出器で計 測・比較することができる. APDセンサからの出力 信号はAPDモジュール内のトランスインピーダンス アンプ(帯域は100 MHz)で増幅され、AEMに出力 される.

GALAのAPDモジュールは、Excelitas Technologies 社製の民生品APDセンサおよびAPDモジュール をベースとし、JUICEミッションで要求されてい る性能要求や環境耐性要求を満たすようカスタマ イズや認定試験等を行って開発したものである。 Excelitas Technologies社のAPDセンサはYag レーザの基本波長(1064 nm)において高い検出効 率を持つことで知られており、これまで多くの宇宙 ミッションで使用された実績がある。例えば日本の 月惑星ミッションでは月探査機「かぐや」に搭載され たレーザ高度計LALTや、小惑星探査機「はやぶさ 2」のLIDARでも使用されている。

APDセンサは、微小な光信号をアバランシェ効 果によってセンサ内部で信号を増倍することができ るが、増倍率やノイズレベルが大きな温度依存性を 持つことも知られている.GALAのAPDモジュール では、プリアンプやAPD温度制御用ペルチエ素子、 温度センサなどがひとつの基板に載ったハイブリッ ドICとして、コンパクト(直径2 cm程度)な筐体中に パッケージ化されている(図7).このことが外部から のノイズ混入防止や高精度の温度制御、そしてFPA およびGALA全体のコンパクト化に寄与している.

APDモジュールの開発では、木星圏磁場中の大 強度の電子線に対するAPDセンサの性能劣化が重 要な課題であった.そのためAPDセンサの放射線 耐性を調べるための電子線照射を、フランス国立航 空宇宙研究所ONERAにて行った.さらに量子科 学研究機構放射線研究所でのプロトン照射試験や 東工大のコバルト施設での照射試験も行い、放射線 シールド設計に必要な情報を得た.また、電子線に よって引き起こされる偽信号の評価をするため、京



図8: 組 み 合 わ せ た 状 態 の AEM(角 型 の 基 板) お よ び BEO+FPA(中央部). いずれもモデルはEM1-3.



図9: DLRでのAEM-RFM間インターフェース試験.

都大学原子炉実験所(現京都大学複合原子力科学 研究所)のライナック加速器を用いた電子線照射試 験を行った.また,光ファイバーについては交渉によ り欧州の規格標準と擦り合せつつ,国内で放射線, 温度,湿度等についての認定試験を遂行した.これ らの結果をもとに,FPA筐体および内部構造体が 放射線シールドの機能を兼ねて,トータルで遮蔽に 関する要求を満たすよう設計した.

FPAの設計においては他にも多くのハードルが あった.例えば外部とのインターフェース温度が大 きく変動する環境でAPDを運用温度(25℃)に保つ 熱設計や,柔軟性と伝熱能力の厳しい要求を同時に 満たす熱ストラップを含む排熱系の実現は重要な 課題であった.また,欧州の規格標準と擦り合わせ 交渉をしながら進める特殊表面処理などに取り組ん だ.これらの要求を満たす機能・性能を,限られた 許容空間その他の条件の範囲内で実現することは 挑戦的であったが,設計解を見出すことができた(図 7).実験的には複数のハードウエアモデルを経て, EM1-3にて全ての機能・性能および制約条件への 適合を実証することができた(表2).

#### 3.2.4 AEM

AEM(Analogue Electronics Module)の第 1の役割は, APDモジュールの出力信号を受け200 Msps(Megasamples per second)のレートと12 bitの分解能でADCサンプリングを行い, スイス チームが担当するRFMにデジタルデータとして送信 することである(図8).

GALA開発の検討が始まった当初から,200 Msps,12 bitのADCサンプリングおよびRFMへ の高速通信は重要な課題であった.試作・改良を繰 り返し,最終的にはフライトモデルとほぼ同じ基板・ 部品を用いたモデル(EM1-3)をGALA-Jにて自主 的に製作して細部までの調整を行った.RFMとのイ ンターフェース試験はDLRでしか行えないため,最 終的な調整のためDLRに繰り返しEM1-3を持ち込 んで試験を行った(図9).その結果ADCサンプリン グ,高速通信,およびノイズレベルなどの性能要求を 満たせることが実証できた.

AEMのその他の役割は、APDセンサに逆バイア ス電圧として印加される高電圧(300~400 V)の供 給、APDセンサの温度コントロールを行うペルチエ 素子の駆動、およびハウスキーピングデータの収集 である.これらの機能についてもEM1-3までの開発 で実証できている.

## 3.2.5 パフォーマンスモデル (GALA全体評価ソフトウエア)

ここで言うパフォーマンスモデルとは、GALA全

ケース	ミッションフェーズ	高度(km)	測距精度 要求(m)	誤測距 確率要求	R_SNR	C_SNR
Α	エウロパフライバイ観測	1300	-	< 0.2	> 22	23.2
В	ガニメデ極周回軌道観測(I)	$500 \pm 50$	< 10	< 0.2	> 22	28.8
С	ガニメデ極周回軌道観測(II)	$500 \pm 50$	< 2	< 0.1	> 43	202
D	ガニメデ極周回軌道観測(III)	$500 \pm 50$	< 1	< 0.1	> 122	357

表3: 測距精度に関する要求および計算値

体の性能をシミュレーションするソフトウエアのこと である.パフォーマンスモデルは、ハードウエアへの 要求設定や設計、および実験結果の考察等におい て重要な役割を果たす.そのため日本はパフォーマ ンスモデル開発の主担当ではないものの、GALA-J でもソフトウエアの開発を行い、ドイツと共有してダ ブルチェックを行いつつ運用している[25].その活 用例を以下に記す.

GALAの性能要求を規定する量として,ガニメデ の極周回軌道観測およびエウロパフライバイ観測を 念頭に置いた測距精度と誤測距確率がある(表3). 実際の測距値の誤差が測距精度を逸脱する確率 は,誤測距確率以下に抑える必要がある.この要求 を満たすには,受信パルス波形のSNR (Signal to Noise Ratio)が,閾値(*R\_SNR*; Required SNR) を超えている必要がある.

そのためにまずR\_SNRを、表2に示したA~Dの 4ケースについて、GALA受信波形のシミュレーショ ンによって求めた。GALA受信模擬波形データを複 数作成し、そのピークタイミングの統計変動から誤 測距確率を得た。受信模擬波形データは{[基準波 形]+[正規分布ランダムノイズ]}の適合フィルタ処理 で作成した.次に、得られた誤測距確率が表2に示 した要求値と等しくなるように正規分布ランダムノイ ズのレベルを調整し、確定した受信模擬波形データ のSNRをR\_SNRとした(表3). ここでケースAにお ける測距精度の要求値は10 m、SNR =[基準波形 ピーク値]<sup>2</sup>/[正規分布ランダムノイズ分散値]とした [25]. さらに $R_SNR$ の実現可能性を検証するために は、GALAの機器性能や観測条件を考慮して計 算したSNR ( $C_SNR$ ; Calculated SNR)が、  $C_SNR > R_SNR$ を満たさなければならない [25,26]. ここで、木星周囲の放射線環境による APDの性能劣化の影響の度合いが重要となるが、 従来は文献データからの推定に頼っていた.そのた めGALA-Jではその環境を模擬した2 MeV電子線 及び50 MeVの陽子線をAPDに照射し、APD放 射線劣化を再評価した[25,27].この結果をGALA 性能評価モデルに組込みC\_SNRを計算した結果、 AEMのノイズの影響評価を除きA~Dの4ケースで  $C_SNR > R_SNR$ であることを確認できた(表2) [27].

# 4. 打ち上げに向けて

#### 4.1 当面のスケジュール

本稿執筆時点(2020年6月)においてBEO, FPA, およびAEMのいずれについても, EM1-3(フライト ハードウエアと同一設計の試験・実証モデル)の製作 およびそれらを統合した試験を終えている(表2). こ こに来てようやく, 開発の実現性が実証できたと言 える.

GALA-Jでは2020年度にPFMを製作してドイツ に出荷する. PFMの開発はEM1-3の実績をもとに, フライトハードウエア特有の品質保証・清浄度・段取 り・文書提出等の要求を踏まえて遂行する. 出荷に 関連する各地の審査等も経た後には、ドイツにおい て全体組立ておよび試験を行い、さらにJUICE探 査機に搭載して統合試験に臨む.JUICEは2022年 に、フランス領ギアナのクールーにあるギアナ宇宙 センターから打ち上げられる予定である.

### 4.2 GALA開発の経験・教訓と今後への応用

GALA-Jの開発は様々な面で,これまでに経験し たプロジェクトに比べて多くの労を要するものであっ た.ここで挙げやすい要因を示すとすれば,まず, 日本が3つ(も)の重要なモジュールを担当したこと, BEO・FPAおよび関連する試験装置・実証方法等を 宇宙研が責任を負って実際に開発したこと,挑戦的 な機能・性能・インターフェース要求,そして多数のモ デルを非常に限られたスケジュールで開発する必要 があったこと等は大きなハードルであった.

同様にGALA全体における国際分担の変更,X 線天文衛星「ひとみ」の不具合を受けたプロジェクト 推進方針への影響および審査・契約への影響,海 外企業との交渉,ドイツ政権に起因する予算上の問 題の影響,GALA全体におけるモデル開発ポリシー の変更,欧日における新型コロナウイルス禍,これら の相乗効果などからも,GALA-Jプロジェクトは大 きな影響を受けた(途中の変更はその時々で最適化 のためなされたことは書き添えておきたい).このよう な開発プロジェクトを,大量の文書と審査を前提と する「堅い」欧州の方式と両立して遂行することから 得られた経験や教訓は大きい.

またGALA-J内で自主開発したEM1-3一式も, スケジュール,予算,および人的リソースを圧迫した (最終的にはEM1-3はGALA-J内だけでなく日欧を 行き来して大活躍している).

宇宙機搭載レーザ高度計の重要性は今後ますま す高まり、広範な用途に適用されていくと考えられ る.既に、GALAで開発したAPD検出器モジュー ルを小型月着陸実証機SLIMで用いることが議論さ れている.また月面等の縦穴探査におけるレーザ測 距の応用に向けても、コンタクトを受け情報提供をし ている.衛星あるいは航空機からの地球観測にも、 レーザ高度計は有用である.

GALAの開発を経て得た技術と経験を他のプロ ジェクトや次世代の人材ともぜひ共有して、今後の レーザ高度計開発や、レーザ高度計に限らない本格 的な国際協力プロジェクトなどにぜひ活かして行き たい.

### 謝辞

ドイツ,スイス,スペインのチームと共同で進めて いるGALA-Jの活動は,宇宙科学研究所およびそ の他の機関,また内外の審査委員,事務の方々に支 えられております.関わっている全ての方々に深く感 謝いたします.

GALA-Jの開発は多くの企業の方々と進めてきま した. 当初は実現性も不明だった多数の課題に対し て単なる発注・請負を超えて, 直接の議論や実験等 を繰り返しご一緒に取り組んで頂いていた, 明星電 気株式会社,株式会社クリスタル光学,株式会社内 藤電誠町田製作所,夏目光学株式会社,株式会社 森川製作所,横浜プレシジョン株式会社, ジェピコ 株式会社, Excelitas Technologies,フジトク株 式会社, Materion,株式会社トプコン,株式会社オ プトクエスト,株式会社PTIJ,株式会社FAMサイ エンス,株式会社エム・アール・ジェイ,アストロオプ トの皆様に,心より感謝いたします.

# 参考文献

- [1] Opp, A. G., 1974, Science 183, 302.
- [2] Smith, E. J. et al., 1992, Science 257, 503.
- [3] Hansen, C. J. et al., 2004, Icarus 72, 1.
- [4] Stern, S. A., 2008, Space Science Reviews 140, 3.
- [5] Johnson, T. V. et al., 1992, Space Science Reviews 60, 3.
- [6] Kivelson, M.G.et.al., 2002, Icarus 157, 507.
- [7] Schubert, G. et al., 2004, in Jupiter: The planet, satellites and magnetosphere, 281.
- [8] Grasset, O. et al., 2013, Planet. Space Sci. 78, 1.
- [9] 木村淳ほか, 2013, 遊星人 22, 146.
- [10] Hussmann, H. et al., 2019, 2019CEAS 11, 381.
- [11] Kimura, J., et al., 2019, Trans. JSASS Aerospace Tech., Japan 17, 2, 234.
- [12] Global Geologic Map of Ganymede, SIM3237, https://astrogeology.usgs.gov/search/map/

Ganymede/Geology/Ganymede\_SIM3237\_ Database.

- [13] Showman, A. P. and Malhotra, R., 1997, Icarus 127, 93.
- [14] Bland, M. T. and Showman, A. P., 2007, Icarus 189, 439.
- [15] Zahnle, K. et al., Icarus 163, 263.
- [16] Hirata, N. et al., 2020, Icarus, https://doi. org/10.1016/j.icarus.2020.113941
- [17] Schenk, P., 2001, Nature 417, 419.
- [18] Schmidt, B. et al., 2011, Nature 479, 502.
- [19] Kamata, S. et al., 2016, J. Geophys. Res. Planets 121, 1362.
- [20] Saur, J. et al., 2015, J. Geophys. Res. 120, 1715.
- [21] Anderson, J. D. et al., 1996, Nature 384, 541.
- [22] Moore, W. B. and Schubert, G., 2003, Icarus 166, 223.
- [23] Cadek, O. et al., 2016, Geophys. Res. Let. 43, 5653.
- [24] Enya, K. et al., 2018, Proc. SPIE, vol.10698, 106984L.
- [25] Araki, H. et al., 2019, Trans. JSASS Aerospace Tech., Japan 17, 2, 150.
- [26] Gunderson, K. and Thomas, N., 2010, Planet, Space Sci. 58, 309.
- [27] Kobayashi, S. et al., 2016, JpGU Meeting abstract 2016, PPS11-P08.