

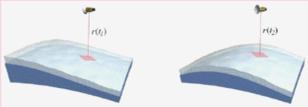


木星系探査衛星 JUICE 搭載 レーザ高度計 GALA

並木則行, 小林正規, 荒木博志, 木村淳, 佐々木晶, 田澤誠一, 野田寛大
千葉工業大学 惑星探査研究センター, 国立天文台三鷹 / 水沢, 北海道大学大学院宇宙理学専攻

01 概要

- 2022 年打ち上げ
- 2030 年木星系到着
- 2032 年ガニメデ周回軌道投入



ガニメデ内部に厚い地下海, 表面に薄い氷地殻が存在する場合, 公転における真近点離角の違いによって潮汐変形が起こる。

② レーザ高度計

人工衛星と天体表面間の測距によって, 木星から受ける固体潮汐の大きさや回転変動を測定し, 地下海の存在が推定できる(上図)。また多様な地形形態と分布が把握でき, 氷主体の地質活動様式は地球のプレート・テクトニクスに再考察にも繋がる。

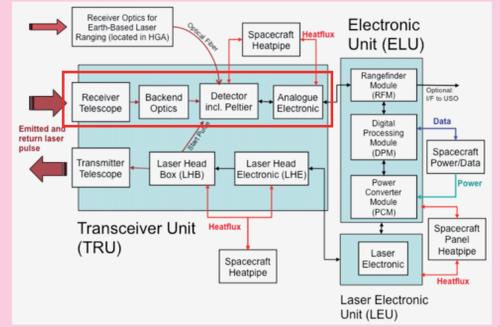
① 「地球以外に生命を宿す天体は存在するのか？」

木星系の大氷衛星では表層下に全球的な液体層“地下海”の存在が示唆されている。しかし地下海の存在は従来データの解釈や傍証にもとづく可能性に過ぎない。この存否を確認することが最重要課題である。

③ GALA レーザ高度計は, BepiColombo 搭載のレーザ高度計 BELA がベーストランシーバユニット (TRU), 制御 (制御・時間計測・インターフェース) ユニット (ELU), レーザ電子回路ユニット (LEU) の3つで構成され (下図), 日本チームは TRU 中の反射光受信部 (受信光学系および検出器) を担当する (下図の赤枠)。全体のインテグレーションは, DLR (ドイツ航空宇宙センター) が担当する。

④ 重点課題

- ・放射線環境と低温環境
- ・測距データ処理系とのインターフェース, 即ち Analogue electric 部と RFM の設計要求, の明確化
- ・ESA の検証計画, 受け入れ基準に合致させるために必要とされる予算の見積もり



02 JUICE のサイエンスへの貢献

① 定量的な表面地形情報

- ・ボイジャー探査機やガリレオ探査機は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 (右図上)。
- ・表面氷が何らかの原因で引っ張られて連続した正断層を形成し, 皺が寄ったような外見 (右図下)。
- ・地溝帯形成のために必要な体積膨張量から内部温度の変化量あるいは液体水 (地下海) の固化量などを推定。

② 表面の粗さとアルベド

- ・反射パルスの幅からフットプリント中の粗さ (高度変化で数 m 以上) を計測。
- ・過去の構造地質活動と数メートルサイズの表面の粗さとの関係を明らかにする。
- ・氷衛星のアルベドは, 全球平均ではエウロパ, ガニメデ, カリストの順に高く, 地質ユニット間で違いがある。
- ・近赤外分光との照合して, レーザ波長での天体の反射率マップを作成する。

④ 潮汐変形のデータ

- ・リモートセンシング観測によって地下海の存在を判断するために最も重要。
- ・ガニメデは固有磁場を持っているために木星磁場により誘導される二次磁場を地下海存在の証拠とは出来ない。
- ・地下海がない場合の表面の潮汐変位量は peak-to-peak で約 0.1-0.4 m。
- ・地下海が存在する場合は, 約 5-7 m。
- ・内部の熱進化シナリオにも大きな制約。

⑤ 回転変動

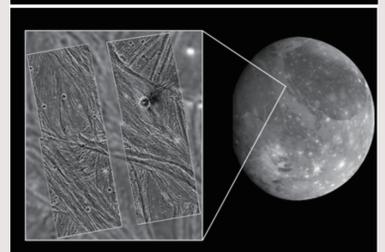
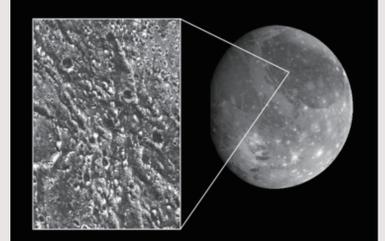
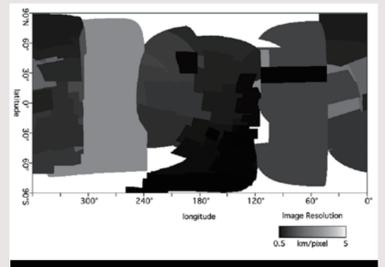
- ・離心軌道と連動した秤動の強制モードから内部構造を制約できる。
- ・内部に球殻状に地下海が存在する場合, 氷地殻とマントルは力学的に分離。
- ・秤動の振幅は氷地殻の厚さに強く依存。
- ・地下海と氷地殻の密度差が 0-400 kg/m³ の範囲では振幅は 15-355 m (氷地殻厚 500 m-25 km)。
- ・潮汐変形との同時計測が最も有効。

③ 重力場精度向上につながる軌道決定精度向上

- ・クロスオーバー点の高度データを集め, 衛星軌道精度を改善できる。
- ・低次の重力場の精度を向上させ, 慣性性能率比や潮汐ラブ数 k₂ の推定精度を上げる。
- ・地下海が存在する場合に k₂ は 0.6, 完全凍結の場合で 0.06。
- ・地下海が存在すれば氷地殻の厚みや剛性率に応じて 0.01 の桁で変化。

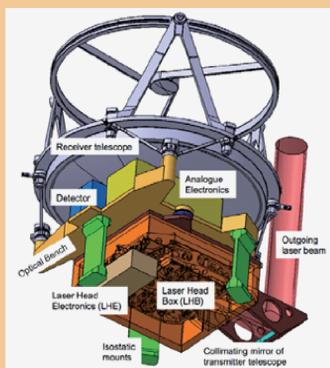
⑥ 主な設計要求

- ・高度分解能: 0.1 m 以下 (ガニメデの潮汐変形を検出するため)
- ・波形データ: デジタル処理し, 解析可能であること
- ・レーザフットプリント直径: 高度 500 km で 50 m, 高度 200 km で 20 m (表面ラフネスの測定と地質分類のため)
- ・サンプリング周波数: 高度 200 km で 75 Hz (地形プロファイルに隙がない)



(上) ガリレオ探査機搭載 Solid State Imaging system が取得したガニメデ表面画像の解像度。
(中, 下) ガニメデ表面に見られる2つの地形ユニット, dark terrain (中) と bright terrain (下)。全球画像はボイジャー探査機, close-up はガリレオ探査機撮影。

03 アライメント, キャリブレーション



- ・送受信光学系のアライメントを確保するために, 両方の光学系は TRU 内の同一光学ベンチに配置される (左図)。
- ・光学ベンチの温度は一定に保持される (検出器は Thermo-electrical Cooler により, アナログ電子回路はヒータおよびペルティエにより制御)。
- ・インテグレーション時には, DLR で製作された光学ベンチが日本に送られ, 日本分担の受信光学系を取付ける。その後光学ベンチごと受信光学系を DLR に輸送し, DLR において送信光学系を取付ける。
- ・クーリングフェーズ中に GALA を地球方向に向け, 送信されるレーザを地上局で受信した際の探査機姿勢と, 受信光学系が地球の照り返しを検知した際の姿勢から, アライメント確認を実施する。

04 インターフェース

- ・機械的, 熱的, 電氣的, および光学的インターフェースは, 原則として TRU (上図) のインテグレーターである DLR が管理する。
- ・設計のための数値解析については, 日本チームはコンポーネント単位での熱構造モデルを DLR に提供する。
 - 熱解析: ESATAN-TMS
 - 構造解析: NASTRAN
 - 放射線環境の評価: GEANT4 (ESA 指定のソフトと互換性有り)
- ・検証試験, 受け入れ試験も原則的には TRU にインテグレーションして DLR で実施される
 - 受光系コンポーネントの試験は国内で実施して, 試験結果を DLR に提出する。

レーザ発振部	
発振器	Nd:YAG
パルスエネルギー	2.8 mJ @ 200 km, 17 mJ @ 500 km
繰り返し周波数 (最大値)	75 Hz @ 200 km, 30 Hz @ 500 km,
送光ビームの広がり	100 μrad
レーザ波長	1064 nm
Q スイッチ	active
コリメータ	40 mm x 60 mm
受光部	
主鏡直径	0.25 m
焦点距離	1 m
受光視野角	450 μrad (TBC)
望遠鏡型	カセグレン
主鏡材質	SiC またはアルミニウム RSA-6061 (TBC)
バンドパスフィルタ	2 nm
検出器素子	Avalanche Photo Diode (Si or InGaAs)
デジタル分解能	8 bit
時間分解能	標準条件で < 1 ns, 最良条件で < 0.6 ns
目標測距精度	標準条件で 0.15 m, 最良条件で < 0.08 m
重量	TRU: 4.8 kg + 2.5 kg (放射線シールド) ELU: 2.8 kg + 5.8 kg (放射線シールド) LEU: 2.6 kg + 6 kg (放射線シールド) 合計: 10.2 kg + 14.3 kg (放射線シールド) (マージン, ハーネス, ヒートパイプを含まない)
体積 (x*y*z)	TRU: 330 mm * 260 mm * 310 mm ELU: 120 mm * 250 mm * 120 mm LEU: 130 mm * 340 mm * 155 mm
電力	39.5W @ 200km, 47.3W @ 500km
データレート	376 - 1219 bit/shot
データ量	163 - 530 Gbit (オービットフェーズ中)