みんなでふたたび木星へ,そして氷衛星へ その10 ~JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計GALA の 性能モデルシミュレーション~

荒木 博志^{1,2}, 塩谷 圭吾^{3,2}, 小林 正規⁴, 野田 寛大^{1,2}, 並木 則行^{1,2}, 木村 淳⁵, 押上 祥子³, リンゲナウバー カイ⁶, スターク アレクサンダー⁶, フスマン ハウケ⁶

(要旨) 2023年4月14日, ギアナ宇宙センターから打上げられた木星氷衛星探査機(JUICE)にドイツ, 日本,スイス,スペイン間の国際協力によって開発されたガニメデレーザ高度計(GAnymede Laser Altimeter; GALA)が搭載されています.GALAは氷衛星の定量的な地形データを世界で初めて取得 し,氷衛星の表層テクトニクスや内部海の有無などの研究を大きく進展させることが期待されています. 極限的な性能が要求されるGALAの開発では,レーザの発生から送受信,距離情報への換算までの全 体を通じた「性能モデルシミュレーション」が特に重要です.このシミュレーションは当初はドイツチームを 中心として行われていましたが,日本側からの提案により,日本チームでも独立に行うこととなりました. その主な狙いは,①決定的に重要なシミュレーションのダブルチェック,②日本側でのハードウエア開発に おける活用,③日本側での科学研究の構想・提案等での活用,です.その結果GALAサイエンス要求は木 星近傍の放射線環境においても達成できることを確認できました.本稿ではその概要を解説します[1].

1. はじめに

2023年4月14日,木星氷衛星探査機(JUICE)が ギアナ宇宙センターから打上げられ2031年の木星 系到着を目指して現在も順調に飛行を続けていま す[2]. JUICEは欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)主導で開発され、その搭載機 器の一つにドイツ、日本、スイス、スペイン間の国 際協力によって開発されたガニメデレーザ高度計 (GAnymede Laser Altimeter; GALA)がありま す.GALAは波長1064 nmの赤外線レーザパルス を軌道上から氷衛星表面に向けて発射して反射パル スを受信し、その往復時間を正確に測定して距離情 報に換算します.木星氷衛星においてGALAはレー

1.国立天文台 2.総合研究大学院大学 3.宇宙航空研究開発機構 4.千葉工業大学 5.大阪大学 6.ドイツ航空宇宙センター araki.hiroshi@nao.ac.jp ザ測距にもとづく定量的な地形データを世界で初め て取得する予定です.特に極周回観測を予定してい るガニメデでは世界初の氷衛星全球地形データを取 得予定で,氷衛星の表層テクトニクスや内部海の有 無についての詳細な研究につながると期待されてい ます[3-6].

極限的な性能を目指す科学機器としてのレーザ高 度計の開発では、レーザの発生・照射から天体表面 での反射特性、そして反射波の受信・距離情報への 変換までの信号とその誤差の正確なシミュレーショ ンが特に重要です.この「性能モデルシミュレーショ ン」は、当初はドイツチームを中心になされていまし た.しかし日本側の開発が本格化した初期の段階 で、日本チーム側からの提案により、日本チームにお いても性能モデルを開発してシミュレーションを行う こととなりました.その主な狙いは以下の通りです.

- 事の重要性に鑑み、是非ともダブルチェックを行いたい.
- ②日本側のハードウエア開発において,設計上の選 択やテストデータの特性がGALA全体の性能に

どう影響するかを,性能モデルのソフト内に手を 入れつつ日本側で迅速に高頻度でチェックできる ようにしたい.

③日本側での科学研究の構想や提案・推進の際に、 性能モデルのソフト内に手を入れるところまで踏 み込んで、GALAのデータやその精度をシミュ レーションで再現できるようにしたい。

ダブルチェックのためには,性能モデルシミュレー ションはドイツ側とは基本的に独立に行うことが不 可欠です.一方日本チームとドイツチームは良好な協 力関係にあり[2],日本チームでも性能モデルを開発 したことによって,結果の照合や派生する技術面・科 学面での議論が可能になっています.日本側のハー ドウエアの開発の傍ら,性能モデルシミュレーション にも自主的に取り組むのは大変でしたが,遂行した 価値は大いにあったと考えています.本稿では,我々 の性能モデルシミュレーションについて解説します [1].

2. GALAサイエンス要求と性能設計

GALAサイエンス要求と性能設計の整合性確認 は以下のような流れで行いました[1].

- 〈1〉サイエンス要求からGALA測距精度と その精度を満たす検出確率(Detection Probability; DP)を決める.
- (3) GALAの性能モデルを使って現実的なS/ N(C_SNR)を計算する.
- 〈4〉 R_SNR<C_SNRをもって実現可能性を判断. 必要に応じて⟨3⟩→⟨4⟩をくり返す.</p>

レーザ高度計の性能を規定するのは〈1〉の"測距 精度+DP"ですが、これは受信パルスのS/Nで決 まります。日本チームはGALAの受光光学系及び 受光素子アバランシェフォトダイオード(Avalanche Photo Diode; APD)を含むアナログ信号処理部な ど受信パルスのクオリティを左右するパートの設計 製作を担当していました[1].特にC_SNR計算で不 可欠な木星近傍環境を模擬する放射線照射実験を 主導しAPDの特性劣化を明らかにしたことは重要 で、これによりC_SNRの現実的な計算とR_SNR との比較検討を円滑に進めることができました.サ イエンス要求と機器性能("測距精度+DP")の整合 性を確認するのに適した立場にあったと言えます.

3. GALA性能設計の進め方と結果

日本チームではGALAの観測を以下の4種に分 け、それぞれの観測における要求事項を測距精度 と誤測距確率(Probability of False Detection; PFD)で以下のように整理しました(ここでは PFD=1-DPとします).

- 【A】エウロパのフライバイで高度1300 km以下かつ PFD0.2未満
- 【B】高度500 kmのガニメデ周回軌道(GCO500) で測距精度10 m未満かつPFD0.2未満 (GCO500最悪条件)
- 【C】GCO500で測距精度2 m未満かつPFD0.1未満(GCO500標準条件)
- 【D】GCO500で測距精度1 m未満かつPFD0.1未満(GCO500最良条件)

以下3.1節ではR_SNRを数値計算から導き,3.2 節でGALA性能モデルの概要を紹介します.3.3節 では木星近傍環境下で劣化したAPD特性を考慮し GALA性能モデルからC_SNRを計算し、「C_SNR > R_SNR」をもってサイエンス要求が満たされている かを確認します.S/Nは「信号のピーク値の二乗」と加 えた「ガウシアンノイズの分散」の比と定義しました.

3.1 GALA適合フィルター出力のシミュレーション

GALAは正確な距離測定のため、APD等で発生 するノイズが混入した入力信号のS/Nを最大化する 適合フィルター機能(式(1)と(2))を組み込んでいま す.この機能のGALAへの実装はスイスチームが行 いましたが、GALAサイエンス要求検証のため日本 チームでもシミュレーションを行いました.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t')x(t-t') dt', \qquad (1)$$

$$h(t) = kx(t_0 - t),$$
 (2)

ここでt₀は信号のピーク時刻,(t)は適合フィルター 入力(ノイズを含む反射パルス),y(t)は同じく出力,

2 simu, waveform filter out 18 signal wave 1.6 1.4 12 1 0.8 0.6 0.4 0.2 0 300 400 500 600 700

図1: 青線は HAYABUSA-2 LIDAR 地上実験で得られた反射 レーザ信号例. ピーク値は 505 nsec で 1 とした. 赤線は 青線+正規ランダムノイズで模擬されたGALA 適合フィル ターへの入力信号で,見やすさのためグラフを縦軸方向にず らした. 緑線はGALA適合フィルターの出力. 時間分解能は5 nsec. 文献[1]のFig.1を転載.



図3:図2と同じくS/Nが39.63から122.19の場合を示す. 条件 C(測距精度<2 m, PFD<0.1)の達成にはS/N=43以上, 条 件D(測距精度<1 m, PFD<0.1)には122以上が必要(表1参 照). 文献[1]のFig.3を転載.

h(t)は適合フィルターの応答関数です.GALAで はh(t)をガウス関数としており、そのFWHM(Full Width Half Maximum;半値全幅)は地上からコ マンドで変更することができます.理想的なGALA 適合フィルターは各リターンパルスの時間反転した関 数ですが、ガウス関数でもFWHMを適切に設定す ることでy(t)のS/Nを大幅に改善することができま す.ここでは観測【A】の要求距離精度を10 m未満と します.

図1はGALA適合フィルターの入出力信号のシ ミュレーション例です.入力信号として,はやぶさ2搭



図2:GALA適合フィルターの出力信号のS/Nが18.62から23.26 の場合,検出確率(DP:縦軸)は測距精度(横軸)に従って増え る.A,Bの条件(測距精度<10 m,PFD<0.2)の達成にはS/ N=22以上が必要(表1参照).文献[1]のFig.2を転載.

表1: GALA観測要求とR_SNR(文献[1]のTable 1を改変).

	Mission phase	Height	Accuracy	PFD	R_SNR
[A]	Europa flyby	1300 km	<10 m	< 0.2	>22
[B]	Ganymede orbiter (I)	500± 50 km	<10 m	< 0.2	>22
[C]	Ganymede orbiter (II)	500± 50 km	<2 m	< 0.1	>43
[D]	Ganymede orbiter (III)	$500\pm$ 50 km	<1 m	< 0.1	>122

載レーザ高度計(LIDAR)の地上実験中に得られた レーザ反射信号にBox Muller法で生成したガウシ アンノイズを加えたものを使いフィルター応答関数の FWHMを60 nsecとしました[1].

この疑似入力信号をGALA適合フィルターへ入 力させる試行を1000回行い,計算された出力信号の ピークタイミングが設定した時間幅(測距精度)内に 入る検出確率(DP=1-PFD)を調べました. 観測【A】 と【B】の結果を図2に、【C】と【D】の結果を図3に示し ます. DPは出力信号のS/Nとともに増加する(PFD は逆に減少する)ことがわかります.表1に【A】~【D】 の結果をまとめました.

3.2 GALA 性能モデルによるC_SNR

R_SNRの達成可能性を確認するためESAの水 星探査機Bepi-Colomboに搭載されているレーザ 高度計(Bepi-Colombo Laser Altimeter (BELA)) の数値性能モデルにGALAの仕様と観測条件を適 用してGALA出力信号のS/N(C_SNR)を計算し R_SNRと比較します. サイエンス要求を満たすには C_SNR > R_SNRが必要です.

氷衛星の表面で反射されたレーザパルスは GALA受信望遠鏡に入り、アバランシェフォトダイ オード(APD)で検出され、APDユニットのトランス インピーダンスアンプ(TIA)で電圧に変換されます. 電圧信号は離散化されてGALA適合フィルターに入 力されます.適合フィルターからの最終出力信号の等 価電流パワーSIは以下の式で表されます[7-10].こ こで、qは素電荷、n_{y_in}はAPDに入射する光子数、 n_{y_out}は出射レーザパルスに含まれる光子数、 σ_{tz} は受信パルスの時間幅(半値半幅)、 σ_{p} はTIAの帯 域幅(B₀)と等価な時間、 σ_{0} は出射レーザパルスの時 間幅(半値半幅)です.他のパラメータは表2にまとめ ました.

GALAのノイズは主にAPDで生じ, 受信光信号と 独立した成分(N_1)と依存する成分(N_{II})に分けられま す. N_I はガニメデ表面からの太陽反射光や黒体輻射 のような背景光ノイズとAPDの暗電流ノイズで決ま り、 N_{II} は $n_{y_{-in}}$ に比例するショットノイズと $n_{y_{-in2}}$ に比 例するスペックルノイズに分けられ, それぞれ以下の (9)~(13)式で表されます[9,10].

ここで*ň*_{sun}は太陽放射の散乱による単位時間当 たりの検出光子数, W_{sun}は太陽放射のパワースペク トル, *ň*_{BB}は氷衛星表面からの黒体放射による光子 数, W_{BB}は黒体放射のパワースペクトルです. *ň*_{BB}は *ň*_{sun}に比べて無視できます. I_{DS}は表面暗電流, I_{DB}は バルク暗電流, I_{NF}はノイズフロア, δĨ_D²は APDにお

$$S_{1} = \frac{(qMn_{\gamma,in}\varepsilon_{QE})^{2}}{2\pi(\sigma_{t,z}^{2} + \sigma_{p}^{2} + \sigma_{p}^{2})} \exp\left(-\frac{\Delta\tau^{2}}{\sigma_{t,z}^{2} + \sigma_{p}^{2} + \sigma_{f}^{2}}\right),$$
(3)

$$n_{\gamma_{-}in} = n_{\gamma_{-}out} \frac{\alpha_N}{\pi} \pi \sin^2 \left(\tan^{-1} \frac{r_R}{H} \right) \varepsilon_{RO} \varepsilon_{RF}, \tag{4}$$

$$n_{\gamma_{-}out} = \frac{\lambda_T E_T}{hc} \varepsilon_T , \qquad (5)$$

$$\sigma_{t,z} = \sqrt{\sigma_0^2 + \left(\frac{H\tan\theta_T \tan\theta_R}{c}\right)^2 + \left(\frac{2\operatorname{Var}(\Delta\xi)}{c}\right)^2} , \qquad (6)$$

$$\sigma_{\rm p} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}B_0} , \qquad (7)$$

$$\sigma_0 = \frac{FWHM}{2\sqrt{2ln2}} \quad , \tag{8}$$

$$N_{I} = \frac{q^{2}M^{2+x}\varepsilon_{QE}(\dot{n}_{Sun} + \dot{n}_{BB}) + \delta\tilde{I}_{D}^{2}}{2\sqrt{\pi}\sqrt{\sigma_{p}^{2} + \sigma_{f}^{2}}},$$
(9)

$$N_{II} = \frac{q^2 M^{2+x} n_{\gamma_in} \varepsilon_{QE}}{2\sqrt{2}\pi \left(\sigma_{t,z}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_f^2\right)} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\Delta \tau^2}{\sigma_{t,z}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_f^2}\right) + \left(\frac{\lambda_T}{2\pi r_R \tan \theta_T}\right)^2 S_1 , \qquad (10)$$

$$\dot{n}_{Sun} = \frac{\lambda_T W_{Sun}(\lambda_T)}{hc} \left(\frac{1}{4.952}\right)^2 \frac{\alpha_N}{\pi} \sin^2 \left(\tan^{-1} \frac{r_R}{H}\right) \cdot \pi^2 (H \tan \theta_{FOV})^2 \varepsilon_{RO} \varepsilon_{RF} \varepsilon_{QE} \Delta \lambda_{RF}, \tag{11}$$

$$\dot{n}_{BB} = \frac{\lambda_T W_{BB}(\lambda_T)}{hc} \sin^2 \left(\tan^{-1} \frac{r_R}{H} \right) \cdot \pi^2 (H \tan \theta_{FOV})^2 \varepsilon_{RO} \varepsilon_{RF} \varepsilon_{QE} \Delta \lambda_{RF},$$
(12)

$$\delta \tilde{I}_D^{\ 2} = q I_{DS} + q M^{2+x} I_{DB} + \delta \tilde{I}_{NF}^{\ 2}/2 , \qquad (13)$$

$$C_{SNR} = \frac{S_1}{N_I + N_{II}} \tag{14}$$

ける暗電流のスペクトル密度です. その他のパラメー タは表2にまとめました. C_SNRは, S_I, N_I, N_Iで次 のように表されます.

3.3 木星近傍におけるC_SNRとR_SNRの比較

GALA性能モデルによるC_SNRは,式(14)によ り計算できますが,そこで使うAPDのパラメータは 木星近傍の厳しい放射環境により劣化した現実的な 値を使用する必要があります[11].ここではこれらの 劣化を実験的に求め,その結果をもとに現実的なモ デルシミュレーションを行った結果を紹介します.

我々はAPDが木星近傍でさらされる放射線環 境を模擬するため2 MeV電子ビームと50 MeV 陽子ビームのAPD照射実験を行い,供試体の光 電流と暗電流の測定することでゲイン(gain, M), 量子効率(quantum efficiency, ϵ_{QE}),応答性 (responsivity, Res(M)),過剰ノイズ指数(x),表面 暗電流(surface dark current, I_{DS}),バルク暗電流 (bulk dark current, I_{DB})の劣化を評価しました.

まず木星磁気圏におけるJUICE-GALA内 部にあるAPDが受ける放射線量をGeant4. FASTRAD, GRAS などの専用ソフトウェアを用 いて1次放射線だけでなく衛星内部の2次放射線 も考慮して安全係数2で推定し、JUICEミッショ ン終了時のTID (Total Ionized Dose)および TNID (Total Non-Ionized Dose)基準はそれ ぞれ30 kradおよび108 MeV/g (マージン20%)と 見積もりました[11]. 日本チームはこの結果をもと にAPD供試体への放射試験を計画し、はじめに 2016年4月18日から22日にかけてフランス国立航空 宇宙局(National d'Études et de Recherches Aérospatiales, ONERA)の施設で2 MeV電子 ビームの照射実験を行いました. 続いてAPD放射 線検査によく用いられる50 MeV陽子線を用いて, 2016年5月11日に放射線医学総合研究所(NIRS) の施設で陽子線放射試験を行いました.いずれ もAPD供試体はGALAフライト品と同一ロットの APD, C30954E-TC (Excelitas Technologies Corp.) を用い、実機と運用条件を揃えるため約350 Vのバイアス電圧を印加して試験しました.

ONERAにおける照射実験後,APD供試体12 サンプルの光電流と暗電流の測定からTID基準30 kradに対しては I_{DS} =241 nA, I_{DB} =100 pA, 同様 にAPD供試体15サンプルの電流測定からTNID基 準10⁸ MeV/gに対し I_{DB} =170 pA, 総合してミッショ ン終了時のAPDノイズパラメータは I_{DS} =241 nA, I_DB=170 pAと評価されました[1]. 表2にその他 パラメータの評価値及びC_SNR, R_SNRを掲載 します. C_SNR > R_SNRであること, すなわち GALAはミッション終了までサイエンス要求を満た すデータを取得できることがわかりました.

4. おわりに

本稿はJUICE搭載ガニメデレーザ高度計(GALA) のサイエンス目標が木星近傍の過酷な放射線環境で も達成できることを[1]に従って解説しました.この 論文は2019年に発表したものですが,JUICE打上 げを翌月に控えた2023年3月1日~3日,ドイツ航空 宇宙センター(DLR)でGALA開発チーム全体会合 があり久しぶりに本稿の内容を紹介しました.日本 チームの代表である塩谷氏と小林氏からは日本の開 発担当グループ(GALA-Japan)の貢献や担当箇所 の開発経緯と結果が紹介されています[12].40人程 が参加したこのような全体会は2014年5月に東工大 で開かれて以来であり,関係者一同久々の再会でし た.

日本側のハードウエアの開発の傍ら,性能モデル シミュレーションにも自主的に取り組むのは大変で した.とは言えその甲斐あって,日本チームでも性能 モデルを開発したことによって,結果の照合や派生 する技術面・科学面での議論が可能になっています. 開発した性能モデルは今後も実際のデータを扱い終 えるまで,目的に応じて手を加えつつ活用して行くも のであり,本件を遂行した価値は大いにあったと考 えています.

JUICEの打上げ後,2023年5月15日に軌道上初 期チェックがありGALAは非常に良好な結果でし た[2]. 今年8月には地球一月フライバイを予定して おり,月をターゲットとした測距実験も計画されてい ます.GALAの実測距性能を確認できるまたとない チャンスになるはずです.JUICEはこれを含め地球 に3回,金星に1回のフライバイを計画しており2031 年7月の木星周回軌道投入までの道のりはまだ先が

表2:GALA仕様, 観測条件, R_SNRとC_SNR. 2 MeV電子ビームと50 MeV陽子ビームを用いた放射線試験により, '[#]'で指定されたパラメー タを再評価した. 文献[1]のTable 2を改変.

Parameters	Symbols [unit]	Case A	Case B	Case C	Case D				
GALA specification									
Laser output Energy	E_T [J]	0.017	\leftarrow	←	\leftarrow				
Pulse width	FWHM [sec]	5.50E-09	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Wavelength	λ[m]	1.06E-06	\leftarrow	\leftarrow	←				
Beam spreading $(1/e^2)$	θ_T [rad]	5.00E-05	\leftarrow	←	←				
Throughput of laser collimator	ε_T	1.0	\leftarrow	\leftarrow	←				
Aperture radius of receiving telescope	r_R [m]	0.125	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Half field of view of the receiving telescope	θ_{FOV} [rad]	2.75E-04	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Throughput of receiving telescope	ε_{RO}	0.85	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Transmittance of band pass filter (BPF)	ε_{RF}	0.8	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Bandwidth of BPF	$\Delta\lambda_{RF}$ [m]	3.00E-09	\leftarrow	\leftarrow	←				
Avalanche photodiode (APD)									
Quantum efficiency of APD [#]	ε_{QE}	0.40	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Gain of APD [#]	Μ	150	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Responsivity [#]	Res(M) [V/W]	2.25E + 06	\leftarrow	←	\leftarrow				
Excess noise index [#]	x	0.25	←	←	\leftarrow				
Surface dark current [#]	I_{DS} [A]	2.4E-07	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Bulk dark current [#]	I_{DB} [A]	1.7E-10	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Noise floor	$\delta I_{NF} \left[\mathrm{A/Hz^{1/2}} \right]$	1.00E-12	←	←	\leftarrow				
Trans impedance amplifier (TIA)	B_0 [Hz]	2.50E + 07	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Sampling rate	$\Delta \tau \left[1/2 \tau_{ADC} \right] [s]$	6.25E-09	\leftarrow	\leftarrow	\leftarrow				
Time width of matched filter	σ_f [s]	2.00E-08	6.00E-08	1.00E-08	1.00E-08				
Observation conditions									
Surface temperature	T [K]	103	113	←	←				
Height	<i>H</i> [km]	1300	500	500	500				
Surface albedo	α_N	0.67	0.2	0.44	0.7				
Surface Slope	θ_R [deg]	5	20	3	0				
Surface roughness	$Var(\Delta\xi)$ [m]	3	10	1	0				
Solar radiation @1064nm	$W_{sun} [W/m^2/m]$	3.09E+07	3.09E+07	3.09E+07	0				
Results									
Returned energy	E_r [J]	7.13E-17	1.12E-16	3.18E-16	6.24E-16				
Returned power	P_r [W]	1.02E-09	5.99E-10	1.45E-8	7.03E-08				
Returned photon number	$n_{\gamma in}$	382	601	1700	3344				
APD-HIC	$V_1 [mV]$	3.14	1.81	50.1	272				
Equivalent signal power	S_1 [A ²]	2.42E-15	8.25E-16	2.17E-13	1.08E-12				
Signal independent noise power	N_I [A ²]	5.35E-17	1.52E-17	8.12E-17	6.44E-17				
Signal independent noise power	N_{II} [A ²]	5.09E-17	1.08E-17	1.36E-15	4.11E-15				
S/N by GALA performance model (C_SNR)	$S_1/(N_I + N_{II})$	23.2	28.8	202	357				
S/N necessary for science requirements (R_SNR)	-	22	22	43	122				

長いです.しかし行く先は氷衛星という地球型惑星 とは異質かつ非常にデータの乏しい新世界です.氷 衛星の地形・地質,あるいは衛星系の力学,測地学, 内部構造,進化に関心がある方にとってはまさにフ ロンティアへの旅ではないでしょうか?未知の氷衛 星の世界に切り込んでみたい方は老若問わずご連絡 ください.今後もJUICE-GALAにご注目いただけ れば幸いです.

参考文献

- Araki, H. et al., 2019, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan 17, 150.
- [2] 塩谷圭吾ほか, 2023, 遊星人 32, 302.
- [3] Kimura, J. et al., 2019, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan 17, 234.
- [4] Hussmann, H. et al., 2019, CEAS Space J. 11, 381.
- [5] 塩谷圭吾ほか, 2020, 遊星人 29, 153.
- [6] Enya, K. et al., 2022, Adv. Space Res. 69, 2283.
- [7] Thomas, N. et al., 2007, Planet. Space Sci. 55, 1398.
- [8] Gunderson, K. et al., 2006, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 44, pp. 3308.
- [9] Santovito, M. et al., 2006, Planet. Space Sci. 54, 645.
- [10] Gunderson, K. and Thomas, N., 2010, Planet. Space Sci. 58, 309.
- [11] Kobayashi, S. et al., 2016, JpGU Meeting abstract, PPS11-P08.
- [12] https://www.miz.nao.ac.jp/rise/node/683.html

著者紹介

荒木 博志



自然科学研究機構国立天文台 助教.東京大学大学院理学系研 究科地球惑星科学専攻博士課程 修了.博士(理学).1996年より 現職.専門は月惑星測地学,衛星 レーザ測距など.日本惑星科学

会、日本測地学会に所属.

塩谷 圭吾



宇宙科学研究所 准教授. GALA Japanプロジェクトマネージャー. 宇宙用機器開発およびプロジェク ト推進により新しい科学研究を目 指す.太陽系探査と系外惑星科 学の両分野で活動する.主な科

学目標は氷衛星の地下海,宇宙における生命関連環 境・物質および宇宙生命そのものの探究.

野田 寛大

自然科学研究機構国立天文台助教.東京大学大学 院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了. 博士(理学).オーストリア科学院宇宙科学研究所 PDを経て2003年より現職.専門は惑星測地学など.

並木 則行



自然科学研究機構国立天文 台 教授/RISE月惑星探査 プロジェクト長.総合研究大 学院大学 天文科学コース 教 授. Massachusetts Institute of Technology, Department

of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences,Geophysics専攻, Ph.D.取得. 九州大学 理学部地球惑星科学科 助手, 同助教, 千葉工業大 学 惑星探査研究センター副所長を経て2014年4月よ り現職.専門は惑星科学. 日本惑星科学会に所属. 日本惑星科学会長を務める. 木村 淳



大阪大学大学院理学研究科助 教.東京大学大学院理学系研究 科博士課程修了.博士(理学).東 京大学地震研究所研究員,宇宙 航空研究開発機構招聘研究員, 北海道大学博士研究員,東京工

業大学地球生命研究所研究員を経て,2016年10月よ り現職.専門は惑星物理学,惑星進化学.日本惑星 科学会,日本天文学会,生命の起原および進化学会 などに所属.

押上 祥子

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 月惑星探 査データ解析グループ研究開発員.九州大学大学院 理学府地球惑星科学専攻 博士後期課程修了.博士 (理学).名古屋大学大学院環境学研究科地球環境 科学専攻研究員,国立天文台RISE月惑星探査検 討室研究員,工学院大学学習支援センター講師,国 立天文台天文シミュレーションプロジェクト研究支 援員などを経て2019年5月より現職.専門はリモート センシングデータ解析,惑星地質学.日本惑星科学 会,日本地球惑星科学連合,日本リモートセンシング 学会に所属.