

# 特集 ライダー技術 I

# 月・惑星探査用ライダー

加瀬 貞二<sup>1</sup>, 水野 貴秀<sup>2</sup>, 荒木 博志<sup>3</sup>, 千秋 博紀<sup>4</sup>

<sup>1</sup>日本電気株式会社(〒183-8501 東京都府中市日新町1-10)
 <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所(〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1)
 <sup>3</sup> 国立天文台(〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1)
 <sup>4</sup> 千葉工業大学 惑星探査研究センター(〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

Lidar for Lunar and Planetary Exploration

Teiji KASE<sup>1</sup>, Takahide MIZUNO<sup>2</sup>, Hiroshi ARAKI<sup>3</sup>, and Hiroki SENSHU<sup>4</sup>

 <sup>1</sup>NEC Corporation, 1–10 Nisshin Fuchu, Tokyo 183–8501
 <sup>2</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3–1–1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252–5210
 <sup>3</sup>National Astronomical Observatory of Japan, 2–21–1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181–8588
 <sup>4</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2–17–1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275–0016

(Received February 15, 2021)

Light Detection and Ranging (LIDAR) has become an indispensable technology for lunar and planetary exploration. LIDAR for lunar and planetary exploration in Japan starts with "HAYABUSA" and leads to "Martian Moons eXploration (MMX)" via "KAGUYA" and "HAYABUSA2". Here are some of the LIDAR technologies that have been developed so far.

キーワード: ライダー,レーザ高度計,月惑星探査 **Key Words**: LIDAR, Laser altimeter, Lunar and Planetary Exploration

## 1. はじめに

2020年12月6日,小惑星「リュウグウ」のサン プルを格納したカプセルがオーストラリアのウーメ ラ管理区域の地面に着地した.「はやぶさ2」が2 回のタッチダウン成功後,無事地球へ帰還しミッ ションを完了した瞬間である<sup>†1</sup>.初代「はやぶさ」<sup>1)</sup> を始め,世界各国で深宇宙探査ミッションが競うよ うに立ち上がっている中,月・惑星探査に必須の技 術となっているのがライダー (Light Detection and Ranging: LIDAR)である.GPS等の航法支援が得ら れず,地球からのリアルタイムの制御が効かない遠 い深宇宙で,探査機を自律的に機能させるために は,直接距離を計測できるライダーの役割が大き い.アポロ計画<sup>2)</sup>以降,ライダーは探査機の高度情 報を取得し様々な天体の地形観測に利用されてい る. 日本では月探査の「かぐや」<sup>3)</sup>や,現在進行中 の「火星衛星探査(Martian Moons eXploration: MMX)」<sup>4)</sup>,米国では月探査のLunar Reconnaissance Orbiter<sup>5)</sup>,小惑星探査のOSIRIS-REx<sup>6)</sup>,欧州では現 在水星探査中のBepiColombo<sup>7)</sup>,インドや中国では それぞれ月探査のChandrayaan-1<sup>8)</sup>やChang'E-1<sup>9)</sup>等, 各国の様々な探査機にライダーが搭載されている。

近年活発になっている月・惑星探査のライダー技 術を以下に紹介する.

## 2.「はやぶさ」LIDAR

初号機「はやぶさ」は 2003 年 5 月に打ち上げら れた小惑星探査機である.2005 年に小惑星「イト カワ」にタッチダウン後,2010 年 6 月に地球へ帰 還し「イトカワ」のサンプルを含むカプセルを投下 後,大気圏に再突入した.LIDAR は「イトカワ」 近傍から運用開始し,高度約 50 km から「イトカ ワ」を捉え,全球マッピングやタッチダウンまでの

<sup>&</sup>lt;sup>†1</sup>http://www.hayabusa2.jaxa.jp/



月・惑星探査用ライダー(加瀬 貞二)



Fig. 1 HAYABUSA LIDAR.



Fig. 2 Rendezvous and touchdown sequence for HAYABUSA.

#### 航法支援を行った<sup>10)</sup>.

「はやぶさ」LIDARから得られた知見は、その後の日本の月・惑星探査ミッションに大きく貢献している。厳しいシステム制約と耐環境性要求の中で3.7 kgという装置質量を実現するため、レーザ、光 学系及び電気回路の様々な点で工夫されている。

「はやぶさ」LIDAR の外観を Fig. 1 に, 探査機と 小惑星のランデブー及びタッチダウンシーケンスを Fig. 2 にそれぞれ示す.

Fig. 2 のようなタッチダウンまでの航法支援に利 用される装置の特徴には、高高度から天体表面付近 の至近距離までカバーする広いダイナミックレンジ 要求がある.「はやぶさ」LIDAR の観測範囲は 50 m-50 km であり、受信パワー換算にして 60 dB 変化 する中で、自律的にゲインを制御して測距精度を維 持しなくてはならない.「はやぶさ」LIDAR では、 光検出器の Avalanche Photodiode(APD)のゲイン と複数のチャージアンプゲインの組み合わせを FPGA による制御で切り替え Automatic Gain Control (AGC)を実現している. レーザ発振器はパルスエネルギー 8 mJ, パルス 幅 14 ns, 繰り返し 1 Hz のQスイッチ Nd: YAG レー ザであり, Qスイッチ素子には LiNbO<sub>3</sub> を使用して いる. 受信望遠鏡は材料に Silicon carbide (SiC)を 使用した口径 126 mm のカセグレン望遠鏡である.

「はやぶさ」LIDAR の軌道上でのレーザショット 数は,約3か月間のミッション期間で約400万 ショットである.

# 3.「かぐや」レーザ高度計 (Laser Altimeter: LALT)

「かぐや」は 2007 年 9 月に打ち上げられた月探査 機である. 定常運用と後期運用の約 1 年半の観測を 終え 2009 年 6 月に月面へ制御落下した.

「かぐや」のレーザ高度計(Laser Altimeter: LALT)はノミナル高度100km(重力の影響で50 kmから150kmの範囲で変化する軌道を定期的に約100kmの高度に修正)から月面までの距離や反 射率を観測し,月の詳細な地形図の作成に貢献した.それまで得られていなかった月の極域データ取 得に成功し,月の正確な重心推定なども行われた<sup>11,12)</sup>.

「かぐや」LALT は 2 つのユニットに分かれてい る (Fig. 3). 合計の質量は 19.1 kg, 消費電力 44.2 W, 距離分解能は 1 m である. 光の送受信を行う レーザ送受信部 (LALT-TR) の内部構造を Fig. 4 に 示す.



LALT-E LALT-TR Fig. 3 KAGUYA LALT (Control electronics: LALT-E, Laser transmitter/receiver: LALT-TR).



LALT の特徴は 100 mJ クラスのレーザ出力であ る.「かぐや」の初期計画では傾斜角を持つ周回軌 道であったことから,科学的に重要な極域を観測す るため,LALT はミラーを可動させて斜めから測距 する計画であった.このため高いレーザ出力と可動 ミラーが必要であったが,「かぐや」の軌道が極軌 道に見直されたことでミラーは 45 度に固定となっ た.レーザ出力は 100 mJ の設計を維持し,斜面や 凹凸によって低下する受信パルスの波高値を補い, 起伏の激しい月面高度データの取得率向上に貢献し ている<sup>13,14</sup>.

レーザの送受信を行う LALT-TR は Fig. 4 に示す ように 2 階建構造になっている. 熱歪を回避したい 光学系を上段に集め,下段に発熱する各種ドライバ 回路を設置している.上段と下段の結合や,レーザ 発振器及び送受信望遠鏡の設置にはキネマティック マウントを使用し.熱分布による歪みの影響を最小 限にしている<sup>15,16)</sup>.

レーザ発振器はパルスエネルギー 100 mJ, パル ス幅 17 ns, 繰り返し 1 Hz のQスイッチ Nd:YAG レーザである. レーザ発振器の光学レイアウトを Fig. 5 に示す.

励起モジュールは強度分布の均一性を図るため YAG ロッドの側面 8 方向にレーザダイオード (LD)を設置している.真空中で動作させることか ら,大気中評価時とのコーティングの特性変化を懸 念し,無コーティングのポラライザを使用した.Q スイッチ素子には「はやぶさ」LIDARと同様に LiNbO<sub>3</sub>を使用し,1/4 波長板とポッケルスセルの 1/4 波長電圧動作の組合せで行うアクティブ方式で ある.レーザ発振器の寸法は150×170×83 mm, 質量は約1.6 kg である.

送受信望遠鏡は炭素繊維強化プラスチック (CFRP)製の鏡筒で一体化し、受信系は口径110 mmのカセグレン望遠鏡、送信系は10倍のガリレ オ式望遠鏡を採用している.カセグレンの材料は石 英である.

「かぐや」LALTの軌道上でのレーザショット数



Fig. 5 LALT laser oscillator optical layout.

は、18 か月間のミッション期間で約 2,200 万ショットである.

### 4. 「はやぶさ 2」 LIDAR

「はやぶさ2」は2014年12月に打ち上げられ, 2020年末にカプセルを分離し,一連のミッション 完了後,次の目標に向かった.初号機と同様に「は やぶさ2」LIDARもタッチダウン直前までの航法支 援と科学観測の両面で使用された<sup>17)</sup>.観測範囲は 30 m-25 km,装置全体の質量は3.52 kg,消費電力 18 W,距離分解能は0.5 m である.

「はやぶさ 2」LIDAR の外観を Fig. 6 に示す.

レーザ発振器はパルスエネルギー 15 mJ, パルス 幅 7 ns, 繰り返し 1 Hz の Q スイッチ Nd: YAG レー ザである.「はやぶさ」、「かぐや」の経験を踏まえ、 真空中の熱歪に起因する LiNbO<sub>3</sub> の焦電効果の影響 を避けるため、Q スイッチにはパッシブ方式を採用 した<sup>18-20)</sup>.また、レーザ媒質とパッシブ Q スイッ チ素子をボンディングしたコンポジット結晶を使用 し、1 つの光学素子で共振器を構成した(Fig. 7). この共振器構成により、ミスアライメントや光学ダ メージのリスクの低減に成功した.レーザ発振器の 寸法は 66×90×40 mm、質量は 190 g である.レー ザ発振器の外観を Fig. 8 に示す.

受信系のダイナミックレンジの確保は,初号機で 苦労したゲイン切り替えの校正作業を避けるため,



Fig. 6 HAYABUSA2 LIDAR.



Fig. 7 Stricture of resonator.



月・惑星探査用ライダー(加瀬 貞二)



Fig. 8 HAYABUSA2 LIDAR laser oscillator (Engineering model).

光学系を2つに分けてそれぞれの検出器でゲイン調整を行う方式とした.遠距離系と近距離系の光学系には1345:1の面積比をつけ,APDの逆バイアス 電圧を2段階に切り替える.これにより受信系のゲインを4段階に可変でき,30mから25kmの観測 範囲で測距精度を確保した.ゲイン切り替えは、受 信レベルを検出してAGCにより自律的に行った.

遠距離系の受信光学系は開口 127 mm (遮蔽ロス を考慮した有効開口で 110 mm)のカセグレン望遠 鏡である. 材料には宇宙用に開発された New-Technology Silicon Carbide (NT-SiC)<sup>21)</sup>を使用した. 送信 系には 3 倍のエキスパンダを設置し透過後のビーム 拡がり角は 2.4 mrad である.

運用モードには通常の測距モードの他,科学観測 を目的としたダストカウントモードと,地球の衛星 レーザ測距(Satellite Laser Ranging: SLR)局と光リ ンク実験を行う光リンクモードがそれぞれある.

「はやぶさ 2」LIDAR の軌道上でのレーザショッ ト数は 2021 年 1 月現在で約 711 万ショットである.

### 5. 火星衛星探査(MMX)用 LIDAR

MMX は現在開発中の探査機であり,2024 年の打ち上げが計画されている.火星衛星(フォボス)に 着陸機を降しサンプルリターンを行う計画である. MMX LIDAR の観測範囲は 100 m から 100 km であり,「はやぶさ2」と同程度の 60 dB のダイナミックレンジが要求されている<sup>22)</sup>.

MMX LIDAR は「はやぶさ2」LIDAR の設計を 流用しつつ,レーザ出力の増大と受信回路の改良を 行っている.上述の通り「はやぶさ2」では2系統 の光学系としたが,JAXA で開発中であった広ダイ ナミックレンジの専用 IC(集積回路)LIDARX<sup>23)</sup> が完成し,1系統化が実現した.

LIDARX のベアチップの外観を Fig. 9, 回路構成 を Fig. 10 にそれぞれ示す.



Fig. 9 Bare chip of LIDARX (Prototype).



LIDARX は Divider, Integrator, Timing detector 及び Time-to-analog converter (TAC) circuit で 構成 され る. Divider は測距距離で変わる APD 出力の電荷量 を適切な容量を選択して分割する. 入力電荷は Integrator で電流-電圧変換され Leading wave を生成 する. Leading wave は Timing detector の微分回路で Differential wave に変換され, そのゼロクロス点が 信号タイミングとして検出される. 検出されたタイ ミングは TAC circuit でアナログ信号に変換され, 距離がアナログレベル信号として出力される. TAC circuit を使用することで,宇宙用デバイスでは扱い が困難な高速のクロックを使用することなく,高い 距離分解能を実現できる.

MMX LIDAR は「はやぶさ 2」LIDAR 同様にパッ シブQスイッチ方式のNd:YAG レーザである. レーザ出力 20 mJ 以上, 10 ns 以下, 繰り返し1 Hz であり,装置質量 4.7 kg 以下,距離分解能 0.1 m 以 下を目標としている.

現在,クリティカル部の部分試作評価を終え,フ ライトモデル製作の前に行う技術評価用のエンジニ アリングモデルの開発を進めている<sup>24)</sup>.

# 6. おわりに

「はやぶさ」から始まり「かぐや」,「はやぶさ2」 を経て「MMX」につながる日本の月・惑星探査用 ライダーについて,培われた技術の一部を紹介し た.探査機のバス機器として,また科学観測の観測 機器として,月・惑星探査にライダーが不可欠な技 術になっている.これらの技術が,今後広がる様々 な宇宙観測ミッションに活用されることを期待す る.

#### 参考文献

- S. Abe, T. Mukai, N. Hirata, O. S. Barnouin-Jha, A. F. Cheng, H. Demura, R. W. Gaskell, T. Hashimoto, K. Hiraoka, T. Honda, T. Kubota, M. Matsuoka, T. Mizuno, R. Nakamura, D. J. Scheeres, and M. Yoshikawa: "Mass and Local Topography Measurements of Itokawa by Hayabusa", Science **312** (2006) 1344.
- W. M. Kaula, G. Schubert, R. E. Lingenfelter, W. L. Sjogren, and W. R. Wollenhaupt: "Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure", Proceedings of the Fifth Lunar Conference, 3 (1974) 3049.
- 3) H. Araki, S. Tazawa, H. Noda, Y. Ishihara, S. Goossens, S. Sasaki, N. Kawano, I. Kamiya, H. Otake, J. Oberst, and C. Shum: "Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry", Science **323** (2009) 897.
- 4)川勝康弘,倉本圭,大嶽久志,今田高峰,馬場肇:
   "火星衛星探査計画 MMX の探査シナリオと概要",第64
   回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2020) 3D01.
- 5) L. Ramos-Izquierdo, V. S. Scott III, J. Connelly, S. Schmidt, W. Mamakos, J. Guzek, C. Peters, P. Liiva, M. Rodriguez, J. Cavanaugh, and H. Riris: "Optical system design and integration of the Lunar Orbiter Laser Altimeter", Applied Optics 48 (2009) 16.
- 6) M. G. Dalya, O. S. Barnouin, C. Dickinson, J. Seabrook, C. L. Johnson, G. Cunningham, T. Haltigin, D. Gaudreau, C. Brunet, I. Aslam, A. Taylor, E. B. Bierhaus, W. Boynton, M. Nolan, and D. S. Lauretta: "The OSIRIS-REx Laser Altimeter (OLA) Investigation and Instrument", Space Sci Rev. **212** (2017) 899.
- R. Kallenbach, E. Murphy, B. Gramkow, M. Rech, K. Weidlich, T. Leikert, R. Henkelmann, B. Trefzger, B. Metz, H. Michaelis, K. Lingenauber, S. DelTogno, T. Behnke, N. Thomas, D. Piazza, and K. Seiferlin: "Space-qualified laser system for the BepiColombo Laser Altimeter", Applied Optics 52 (2013) 36.
- J. A. Kamalakar, K. V. S. Bhaskar, A. S. Laxmi Prasad, R. Ranjith, K. A. Lohar, R. Venketeswaran, and T. K. Alex: "Lunar ranging instrument for Chandrayaan-1", J. Earth Syst. Sci. 114 (2005) 6.
- 9) Q. Huang, J. S. Ping, M. A. Wieczorek, J. G. Yan, and X. L. Su: "Improved global Lunar topographic model by Chang'E-1 laser altimetry data", Proc. 41st Lunar and Planetary Science Conference, (2010) 1265.
- 10) T. Mizuno, T. Katsuhiko, E. Okumura, and M. Nakayama:

"Evaluation of LIDAR System in Rendezvous and Touchdown Sequence of Hayabusa Mission", Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences **53** (2010) 179.

- 11) H. Noda, H. Araki, S. Goossens, Y. Ishihara, K. Matsumoto, Tazawa, N. Kawano, and S. Sasaki: "Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA (SELENE) laser altimeter", Geophysical Research Letters 35 (2008) L24203.
- 12) K. Matsumoto, S. Goossens, Y. Ishihara, Q. Liu, F. Kikuchi, T. Iwata, N. Namiki, H. Noda, H. Hanada, N. Kawano, F. G. Lemoine, and D. D. Rowlands: "An improved lunar gravity field model from SELENE and historical tracking data: Revealing the farside gravity features", Journal of Geophysical Research 115 (2010) E06007.
- 13)田澤誠一,加瀬貞二,荒木博志: "かぐや搭載レーザ高 度計 (LALT)のレーザ出力変化",第53回 宇宙科学技 術連合講演会講演集 (2009) 3D01.
- 14)田澤誠一,荒木博志,野田寛大,石原吉明,坪川恒也, 河野宣之,佐々木晶,加瀬貞二,村田茂:"かぐや搭載 レーザ高度計の初期運用報告",第26回レーザセンシン グシンポジウム予稿集 (2008) 124.
- 15)田澤 誠,荒木博志,野田寛大,石原吉明,坪川恒也, 河野宣之,浅利一善,右田恵美子,佐々木晶,加瀬貞 二,村田茂,國森裕生,大嶽久志: "かぐや (SELENE) 搭載レーザ高度計による観測",測地学会誌 55 (2009) 2.
- 16)加瀬貞二,椎名哲男,倉田賢一,神原文博,堀田智充, 村田茂:"かぐや搭載レーザ高度計の地上試験結果", 第26回レーザセンシングシンポジウム予稿集 (2008) 122.
- 17) T. Mizuno, T. Kase, T. Shiina, M. Mita, N. Namiki, H. Senshu, R. Yamada, H. Noda, H. Kunimori, N. Hirata, F. Terui, and Y. Mimasu: "Development of the Laser Altimeter (LIDAR) for Hayabusa2", Space Science Reviews 208 (2017) 33.
- M. E. Kushina, M. G. Grote, C. E. Wiswall, D. A. Hall, and J. B. Russek: "Clementine: Diode-pumped laser Qualification", Proc. SPIE 2379 (1995) 137.
- 19) 中山通雄:"宇宙用半導体レーザ励起 YAG レーザ",東 芝レビュー 56 (2001) 6.
- 20) 加瀬貞二,黛 克典,川原章裕,卯尾匡史,大島 武,椎 名哲男,秋山哲夫,水野貴秀,三田 信,並木則行,野 田寛大,山田竜平,千秋博紀,國森裕生:"「はやぶさ 2」LIDARの開発",第64回 宇宙科学技術連合講演会講 演集(2014) 3C17.
- K. Tsuno, K. Oono, H. Irikado, T. Ueda, S. Suyama, and Y. Itoh: "NT-SiC (new-technology silicon carbide) : application for space optics", Proc. SPIE 5868 (2005).
- 22) 千秋博紀,水野貴秀,小西晃央,梅谷和弘,名倉 徹, 松本晃治,野田寛大,生瀬裕之,黛 克典,加瀬貞二, 樫根久佳:"火星衛星探査計画 MMX LIDAR 開発状況報 告",第64回 宇宙科学技術連合講演会講演集(2020) 3D13.
- 23) T. Mizuno, H. Ikeda, and K. Kawahara: "Pulse Detection IC for a Laser Altimeter Using CMOS Technology", Proc. The 28th International Symposium on Space Technology and Science (2011) d-77.
- 24) 生瀬裕之,黛 克典,加瀬貞二,川原章裕,千秋博紀, 水野貴秀,小西晃央,梅谷和弘,名倉 徹:"火星衛星探 査機 (MMX) 用レーザ高度計 (LIDAR)の部分試作評 価",第63回 宇宙科学技術連合講演会講演集 (2019) 2B09.



月・惑星探査用ライダー(加瀬 貞二)



加 瀬 貞 二 1992 年岩手大学工学部電子工学科卒 業. 同年, 日本電気(株)入社から現 在(同社電波・誘導事業部)まで レーザ装置開発に従事.近年は、「か ぐや」、「はやぶさ2」等の月・惑星 探査用ライダーを始め, 衛星レーザ 測距 (SLR) や宇宙機器のランデブ ドッキング用センサ等の宇宙用ライ

ダー開発に携わる. レーザセンシング学会会員, 応用 物理学会会員.