

## 「はやぶさ2」の準リアルタイム高精細可視化

三浦 昭\*<sup>1</sup>, 井藤 良幸\*<sup>2</sup>, 内野 康司\*<sup>2</sup>, 中澤 哲明\*<sup>2</sup>, 筒井 芳典\*<sup>2\*3</sup>, 北野 和宏\*<sup>2\*4</sup>, 松尾 建\*<sup>2</sup>,  
武井 悠人\*<sup>5</sup>, 尾川 順子\*<sup>6</sup>, 横田 康弘\*<sup>1</sup>, 生田 ちさと\*<sup>1</sup>, 吉川 真\*<sup>1</sup>, 津田 雄一\*<sup>1</sup>

### Semi-Realtime and High-Definition Visualization of Hayabusa2

MIURA Akira\*<sup>1</sup>, ITOU Yoshiyuki\*<sup>2</sup>, UCHINO Koji\*<sup>2</sup>, NAKAZAWA Tetsuaki\*<sup>2</sup>, TSUTSUI Yoshinori\*<sup>2\*3</sup>,  
KITANO Kazuhiro\*<sup>2\*4</sup>, MATSUO Ken\*<sup>2</sup>, TAKEI Yuto\*<sup>5</sup>, OGAWA Naoko\*<sup>6</sup>, YOKOTA Yasuhiro\*<sup>1</sup>,  
IKUTA Chisato\*<sup>1</sup>, YOSHIKAWA Makoto\*<sup>1</sup>, TSUDA Yuichi\*<sup>1</sup>

#### ABSTRACT

We have been studying high-definition visualization of behaviors of the space probe HAYABUSA2. A purpose of the study is to serve visualization tools into the operation of space probes by visualizing behaviors of such probes. Technical aspects of visualizing HAYABUSA2 with semi-real time high-definition rendering are described in this paper. Also, applications such as live streaming and issues to be solved are described.

**Keywords:** HAYABUSA2, Visualization, high definition, real time

#### 概 要

筆者らは小惑星探査機「はやぶさ2」の挙動を高精細に映像化する研究を行っている。この研究は、探査機の挙動を可視化することにより、将来的に、探査機の運用に役立てることを目指している。本稿では「はやぶさ2」の挙動を準リアルタイムの高精細映像として可視化した際の技術的側面について述べる。併せて同手法のライブストリーミング等の関連分野への応用や、今後の課題等について記す。

#### 1. はじめに

2014年に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ2」は、2015年12月に地球スイングバイを実施し、2018年6月に小惑星リュウグウから20kmの位置に到着した。「はやぶさ2」は、その後約1年半に渡ってリュウグウの観測やタッチダウンによるサンプル採取等を行った後、2019年11月に地球帰還運用に入った。2020年12月にはカプセルの分離と地球スイングバイに成功し、その後は拡張ミッションに移行している。

JAXA およびその前身である文部科学省宇宙科学研究所においては、「はやぶさ2」の先代機である「はやぶさ」の時代から、小惑星の近接運用や地球帰還等、主要なイベントに際して、特設サイト等を設けて実況中継等を行ってきた。その手法は時代とともに変化しているが、「はやぶさ2」においては、以下のような取り組みが行われた。

\* 2021年11月30日受付 (Received November 30, 2021)

<sup>1</sup> 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science)

<sup>2</sup> 日本放送協会 (Japan Broadcasting Corporation)

<sup>3</sup> 株式会社NHK エデュケーショナル (NHK Educational Corporation)

<sup>4</sup> 株式会社NHK エンタープライズ (NHK Enterprises, Inc.)

<sup>5</sup> チーフエンジニア室 (Chief Engineer Office)

<sup>6</sup> 国際宇宙探査センター (JAXA Space Exploration Center)

「はやぶさ2」の地球スイングバイ時には、軌道の予測データ等が公開された [1] ことにより、これらの予測に基づいた軌道予測の動画 [2] や軌道の可視化ツールが JAXA のみならず、有志の方々からもリリースされた [3] [4]。これら可視化ツールは、公開された予測軌道情報に基づいて、3D CG でリアルタイムに「はやぶさ2」の現在位置を表示するものであった。また 2018 年からは「はやぶさ2」に関連する時々刻々の主要ステータスが専用の Web サイトから公開されており [5]、世界中から閲覧可能となっている。このような可視化ツールが容易に実現できるようになった背景には、近年の Web 関連の規格や CG 技術、GPU 等の進歩も寄与していると考えられる。

一方で探査機運用の過程で得られるテレメトリデータは、管制室等でモニタされているが、それらのデータの多くは数値データやグラフで表示されたものであり、熟練者でないと把握することが難しいものも多く含まれている。また探査計画立案時に生成される予測データや訓練用データ等も、必ずしも即時に可視化できるものばかりではない。

このような状況に鑑み筆者らは、将来的には探査機の運用に役立てることを目指し、テレメトリデータに基づいて「はやぶさ2」の挙動を高精細映像化することを試みた。このような可視化手法は、探査機運用への寄与にとどまらず、広く一般への広報・アウトリーチ手段としても応用が見込まれるものである。

本研究の概要は宇宙科学情報解析シンポジウムにて発表 (6) したところであるが、本稿では、その詳細について述べるものとする。また本稿で述べる手法は、リアルタイムレンダリングの手法を用いているが、後述のようにテレメトリデータの取得やデータ処理・伝送に際して、探査機時刻における状態を可視化するには 20~30 分程度の遅延が発生するため、システム全体としては「準リアルタイム」と表記することとした。

また「SHV はやぶさ2可視化システム」として公表されている (7) ものは本研究による成果であり、本稿ではそれら成果も踏まえながら紹介することとする。

## 2. システム概要

本研究で検討したシステムは、探査機に関するデータ取得から可視化までの一連の機能を包含するものであり、単一機能の装置で構成されるものではない。そのため、本研究を進めるにあたっては、小惑星探査や係る運用、データ処理、映像化等、関連する分野の専門家が相互に知見を交換しつつ検討を進めた。そのシステム概要を図 1 に示す。探査機の軌道や姿勢等のデータは、一連の処理が施された後、配信サーバから可視化装置に配信される。可視化装置は、配信されたデータに基づいてリアルタイムに映像を生成する。本研究で検討した可視化装置は、管制室設置用途の他に、プリレンダリング用途やストリーミング用映像生成、オフラインでの展示用途等、多岐に及んだ。この内、管制室設置とストリーミング用途のものについては、時々刻々得られる配信データに基づいて映像を生成するものである。それ以外の用途については、過去の配信データの再生や予測データの映像化等も含まれる。

これらを構成する各要素について、次節以降に記す。

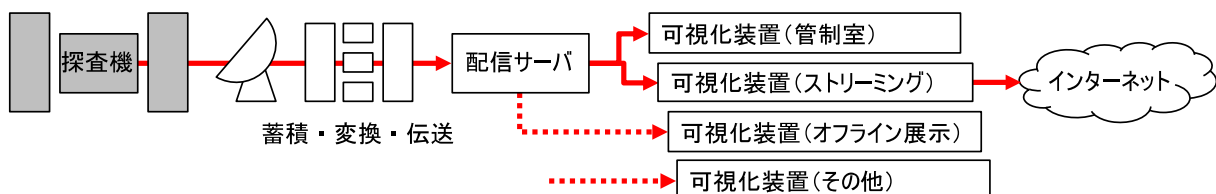


図 1 システム概要

### 3. データ伝送

本節では、図 1 に示した内、探査機から可視化装置に至るデータ授受に係る事項について述べる。

#### 3.1. 先行事例

「はやぶさ 2」のテレメトリデータの一部は、2018 年から「はや 2NOW」 [5] と呼ばれる Web サイト (<http://haya2now.jp>) で随時公開されている。その画面例を図 2 に示す。図中の上部が「はやぶさ 2」の各種ステータスを示している。下部には、各地上局のアンテナに係るステータスが表示される。このサイトは JAXA 外でサービスされているものであり、JAXA 側のデータ配信サーバと「はや 2NOW」サイトとの間には、各種のアクセス制限や暗号化を併用することで通信が保護されている。



図 2 「はや 2NOW」 (2018 年公開当時) [5]

本研究においても、この通信の枠組みを踏襲しつつ、可視化に必要なデータを配信サーバから可視化装置に伝送することとした。

#### 3.2. 基本構成

探査機に係るデータが加工されて可視化装置に伝送されるまでの流れを図 3 に示す。図中、赤矢印がデータの伝送方向を示している。橙色網掛け部分は、主に可視化装置に関連するアクセス制限の在処を示している。探査機に係るデータを蓄積・変換・伝送する装置群は、衛星管制およびそれに関連する運用等のためのネットワーク（以下、「衛星運用ネットワーク」と記す）に置かれている。一方、本研究で検討した可視化装置は研究目的のものであり、衛星管制やそれに関連する運用業務に位置付けられるものではないため、汎用ネットワークに置かれた。可視化装置が管制室内に置かれる場合も、その例外ではない。可視化装置が直接アクセスする配信サーバも汎用ネットワーク上に置き、そこには配信すべきデータのみを蓄積する。またセキュリティ対策の観点で、配信サーバ側の認証の他に、ネットワークレベルのアクセス制限等が施されている。

データの流は一方通行であり、可視化装置から配信サーバへのフィードバック等の経路は設定されていない。

将来的にこのようなシステムが衛星運用の一部として検討される際には、かような可視化装置を接続するネットワーク等の選定も変わると思われ、ここに記したような通信上のセキュリティ条件は変更される可能性がある。

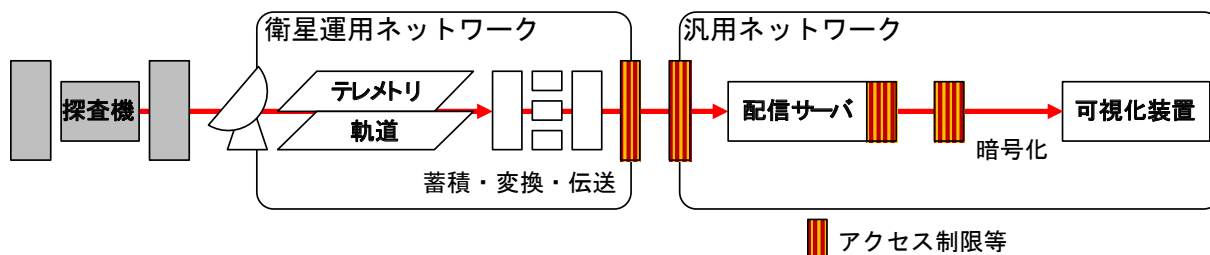


図 3 可視化装置までのデータ伝送

### 3.3. 配信データ

配信サーバから可視化装置に伝送されるデータは以下の構成である。配信サーバ上で係るデータを更新する間隔は原則として5分とした。

- ・軌道推定ファイル: 各時点における「はやぶさ2」の推定位置・速度情報を、可視化装置の処理に適したテキスト形式に変換して記録する。探査機の挙動を可視化する上で位置推定の精度は重要な要素となるが、そのための処理には相応の時間を要する。同一探査機時刻の推定情報であっても、後続の配信データ更新の際に、さらに高精度の値に変更されることがあり、それら処理段階の目安となる記号も併せて記録することとした。
- ・テレメトリデータ: 「はやぶさ2」から取得されたテレメトリ情報を、可視化装置の処理に適したテキスト形式に変換して記録する。この中には、「はやぶさ2」の姿勢情報の他に、LIDARの高度情報や各種のステータス等が含まれる。

### 3.4. 伝送等に関連する遅延

例えばリュウグウ近接運用の可視化を行う時期の地球とリュウグウの位置関係においては、テレメトリ受信まで概ね18分程度要する状況であった。さらにデータの蓄積や変換等の処理時間に鑑みて、概ね10分程度の遅延が追加されると見込まれた。可視化にあたっては、これらの遅延を考慮しつつ、可視化の時間差（現在時刻と、可視化対象となる探査機時刻との差）を選定する必要がある。

### 3.5. データが新規に取得されない期間

タッチダウンに係る主要なシーケンスは、地上局との通信を行わず、探査機の自律的な判断で実行される（以下、「最終降下フェーズ」と記す）。最終降下フェーズへの切替は運用者の判断で行われるが、その後は、一連のタッチダウンシーケンスから復帰するまでの間、「はやぶさ2」に係るテレメトリデータは参照できなくなる。

## 4. 可視化

本節では、配信されたデータに基づいた可視化に係る事項について記す。

### 4.1. 小惑星のモデリング

本研究は「はやぶさ2」運用に係る正式な構成要素ではなかったため、研究に利用できるテレメトリデータ等は限られていた。そのような制約の一つが、リュウグウの観測画像や形状モデル等の利用が制限されていたことである。そのため本研究においては、「はやぶさ2」プロジェクトが制作するリュウグウの推定形状モデルとは別に、CG制作用の形状推定を行った。

まず「はやぶさ2」のリュウグウ近接運用に先立って、訓練用に制作された仮想小惑星リュウゴイド [8] を用いて形状推定を試行した。図4に、その試行例を示す。

続いて、「はやぶさ2」の観測画像に基づいたリュウグウの立体視像 [9] が公開されたのに伴い、リュウグウの形状推定を試みた。この時点で公開されたデータは実際の観測データと比べて、総ピクセル数比で16:1の低解像度データであった。図5(a)は、公開データの解像度で裸眼立体視画像を作成したものである（組版の過程で解像度が変更される可能性があること、ご承知願いたい）。同図(b)は、初期的な形状推定の段階である。同図(c)は最終的に可視化システムに組み込まれた形状モデルのレンダリング例である。この最終モデルは、特定のアルゴリズムで完成されたものではなく、種々の手作業によって岩石の分布や質感等を調整したものである。結果として作成された形状モデルは、「はやぶさ2」プロジェクトが推定した形状モデルとの間に最大10m程度の相違があった。また軌道履歴データやLIDAR値を用いた比較

では 5m 程度の相違が見られた。これはリュウグウの直径が約 0.7km とすると、概ね 1% 程度の相違となる。本研究の主目的が形状推定ではないことと、5m~10m の誤差が影響すると考えられるタッチダウン前後の時間帯は、本研究が可視化の源泉と想定しているテレメトリデータが取得できない期間に該当することから、これ以上の形状モデル精度向上は見送ることとした。

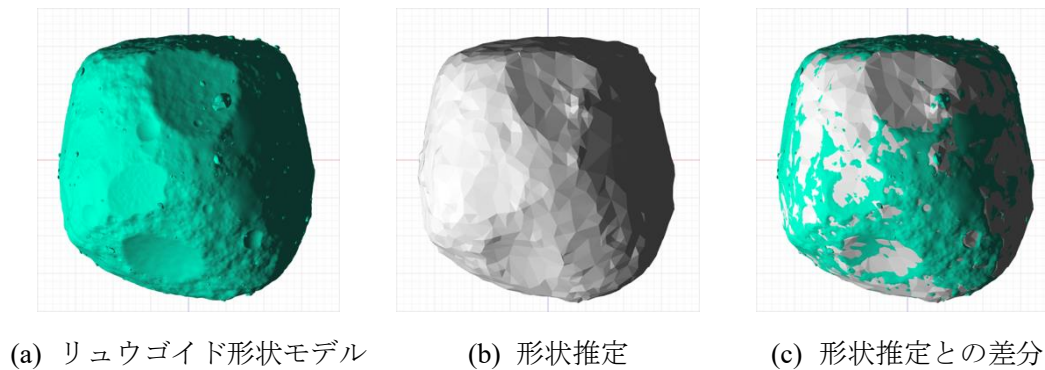
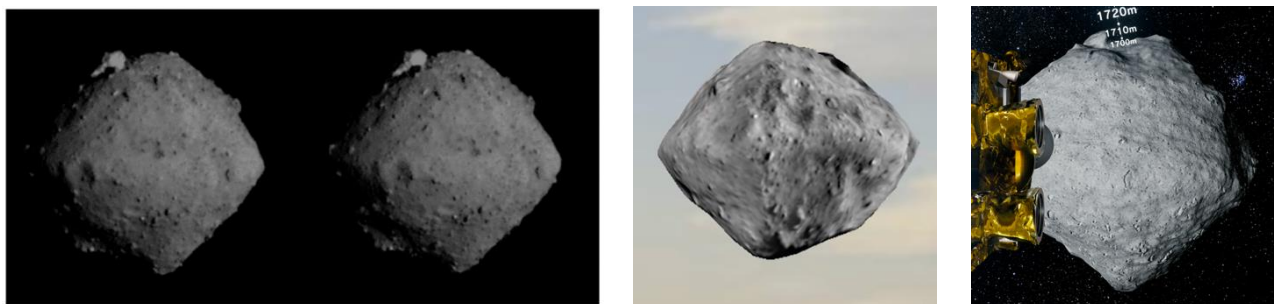


図 4 リュウゴイドを用いた形状推定の試行



(a) 裸眼立体視画像

(b) 初期推定形状

(c) 最終モデル

図 5 リュウグウの形状推定

#### 4.2. 探査機のモデリング

「はやぶさ 2」の形状や表面材質については、JAXA が保有する形状モデルを基に、実機や各部品等の映像記録と比較検討しつつ詳細の作り込みを行った。その確認手段としては、ディスプレイ上での検分の他に、A3 用紙への拡大印刷や VR デバイス等を用いた。検討時に用いた VR デバイスは、同時に 1 人しか使用できない制約はあったが、視点や注視点の自由度の高さから、形状モデルの詳細確認には有力な手段となった。

#### 4.3. 表面材質、効果

本研究で扱う CG については、小惑星や探査機の表面材質を検討する他に、見た人が「リアル」に感じることも想定して検討を進めた。

CG のリアリティを検討するにあたっては、模型などを用いて、実際のカメラ撮影による表面材質や視覚効果の検討も行った。その中には、レンズフレアやハレーションの類も含まれている。本研究でのレン



図 6 試作モデル印刷例

ダリングは物理的なカメラを模擬するものではないため、レンズフレアやハレーションの類を描写する必要はないが、人が見るものであることを前提として考え、日常の映像で目にしている効果も含めて再現することを検討した。図 7 に、模型等を用いた実験の例を示す。

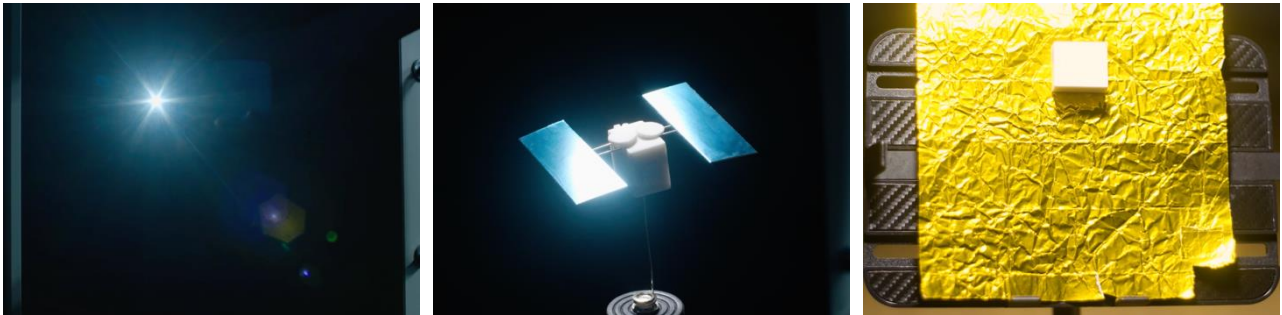


図 7 表面材質，映像効果の検討

またリュウグウの近接運用にあたって、真にその光景を描写すると、却って視認性の低下を招く恐れがある。例えばリュウグウの反射率は数%程度であり、反射率を忠実に映像化すると、リュウグウの視認は困難となり、またリュウグウからの照り返しが殆ど届かない探査機の底面も、公開されている CG やイラストのように明るくはならない。本研究の目的はこれらの反射特性等を忠実に描写することではなく、探査機の挙動を描写することにあることから、反射率や陰影等は、対象物を明確に視認できるように適宜調整することとした。

#### 4.4. 開発環境

可視化にあたっては、統合開発環境のひとつである Unreal Engine [10] に探査機関連の要素技術を適用した。可視化ソフトが取得したデータについては、リアルタイムにレンダリングし、自動再生もしくは、キーボードやコントローラ等の入力デバイスの操作に応じた再生ができるものとした。

#### 4.5. 探査機関連の要素技術

探査機関連の要素として、ホームポジション座標系、クォータニオン、SPICE カーネル等の処理を実装した。

「はやぶさ 2」のリュウグウ近接運用にあたっては、「ホームポジション座標系」(HP 座標系) と呼ばれる座標系が使われた。その定義を図 8 に示す。HP 座標系の Z 軸はリュウグウから見て地球方向を向いており、X 軸と Z 軸がなす平面上に太陽が存在する。

また「はやぶさ 2」のテレメトリデータにおける姿勢情報は、クォータニオンで表現されている。クォータニオンの記述方法やクォータニオンを用いた座標系の解釈はそれぞれに複数存在しており、本研究においては、その原理を解釈するのみでなく、実際の姿勢が正しくレンダリングされているか確認しながら実装を進めた。

リュウグウの諸要素、一般の天体の諸要素、時刻(閏秒)計算等のパラメータは、それぞれ該当する SPICE カーネルを参照した。

#### 4.6. システム構成

図 9 に、可視化装置を中心としたシステム構成を示す。配信サーバから取得されたデータは、その都度保存データ領域に記録される。可視化は、この保存されたデータに基づいて行われる。そのため、新規の配信データのみならず、過去に保存されたデータや予測データ等を再生することも可能である。

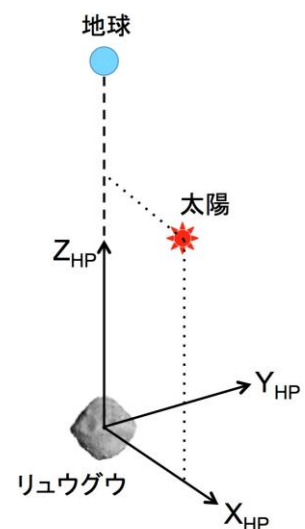


図 8 HP 座標系 (11)

可視化にあたっては、SPICE カーネルに保存されたリュウグウや地球等のパラメータを参照しつつ、保存データから与えられる探査機の軌道・姿勢情報等に基づいて各種座標計算が行われる。これらの値と、形状モデルや星空のテクスチャからリアルタイムレンダリングで高精細ディスプレイに時々刻々の映像を表示する。

視点・注視点の設定や各種ステータス情報表示は、入力デバイス（キーボードやコントローラ等）を用いて制御可能である。それらデバイスからの指示が無い場合は、視点・注視点等は、予め定められたシーケンスに従って自動計算される。

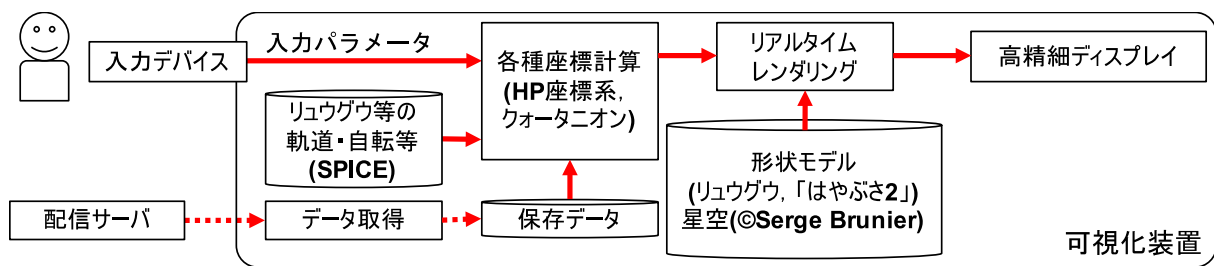


図 9 可視化装置の概要

#### 4.7. 画面表示

図 10 は、可視化ソフトウェアの起動画面（左）とデータ取得画面（右）である。

起動画面において、「Realtime Data」欄は、再生対象のデータが格納されるフォルダを指定するものである。過去のイベントを再生する場合も、この欄で該当データを格納したフォルダを指定する。

「Now Offset」欄は、再生時刻とテレメトリ時刻の差分を秒単位で指定するものである。「はやぶさ2」のリュウグウ近接運用時の場合、前節に述べたようなテレメトリ取得やデータ伝送等の遅延に鑑みて、30分（1800秒）程度を基本とした。実際には、探査機と地上局との相対距離やテレメトリ受信以降の処理時間等に応じて適切な値を設定する必要がある。過去のイベントを再生する際には、「Define Start Time」にて再生開始時刻も併せて設定する。また必要に応じて「Limit Range First」、「Limit Range Last」にて再生範囲を指定することも可能である。

データ取得画面は、データ取得プログラムの実行状況を表示するものである。配信サーバとのセッションが成立しなかった場合等は、この画面にエラーが表示される。

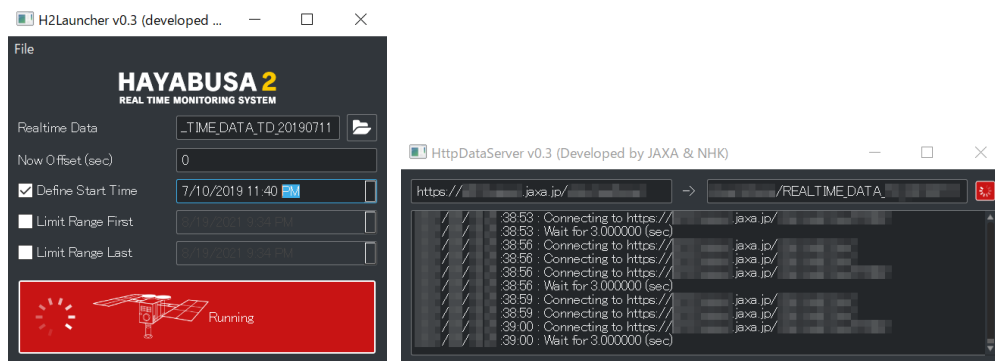


図 10 可視化に係る GUI(左: 起動画面, 右: データ取得画面)

図 11 に主画面の例を示す。画面全体に表示される探査機やリュウグウの映像の他に、画面左下に時刻

情報 (UTC もしくは JST), 画面左上に位置・姿勢・距離 (LIDAR) 情報を表示するエリアがある。また探査機の表示時刻に至るまでの軌道や、探査機近傍の高度 (小惑星までの距離) 情報を表示することができる。図中の各画面は、デバイス等による視点等の指示入力が無い場合の自動シーケンスを表している。上段が一連のシーケンスの最初に挿入されるカメラワークを表している (左から右に順に「見上げ」, 「Top」, 「Star Wars」。これらの中から1つ選ばれる)。中段は探査機の軌道をフォローする視点で描かれるシーンである。下段は、左がオンボードの視点, 中が遠景での探査機位置表示, 右が軌跡表示である。

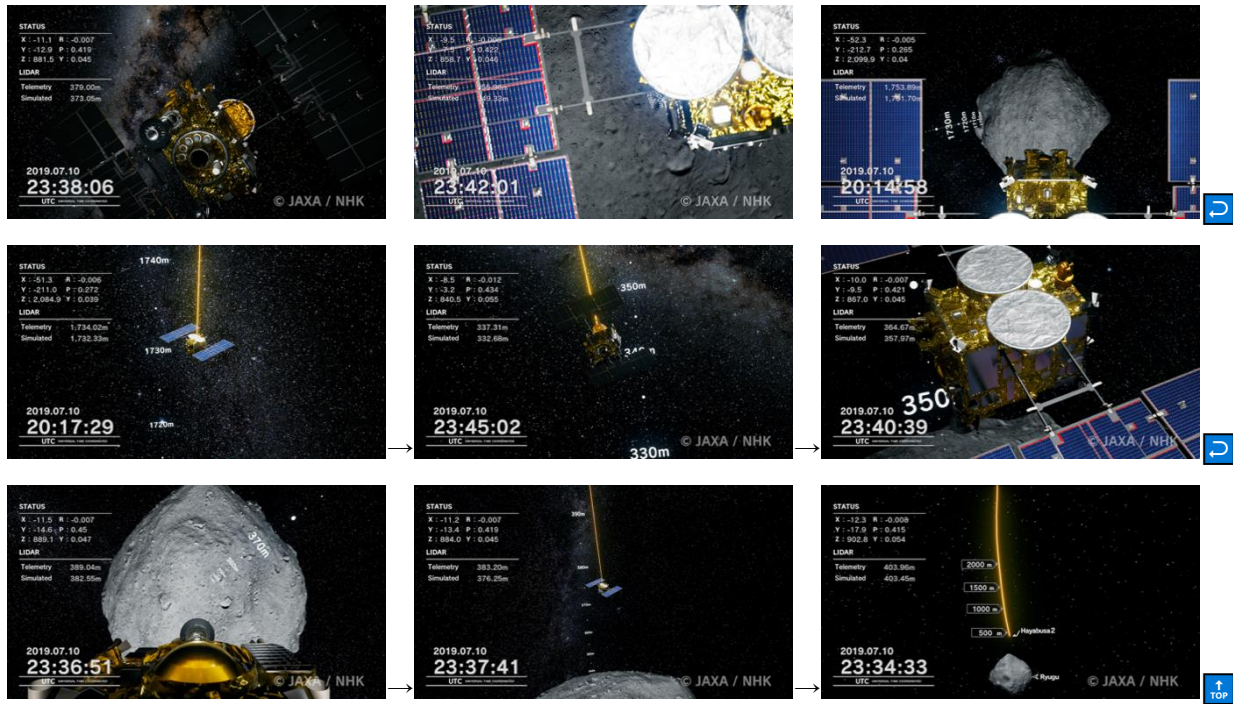


図 11 可視化主画面

#### 4.8. 映像配信

図 12 に、ライブストリーミングの事例について概略を示す。左端の可視化装置 1・2 が、それぞれ図 9 の装置に該当する。万が一に備え可視化装置は冗長化されており、装置の障害等があれば、健全な可視化装置に切り替えることが可能な構成となっている。また双方の可視化装置の障害やデータ配信の問題等で映像に不具合が生じた場合には、別途用意された障害時用の画面に切り替える等、映像切替器での操作ができる構成となっている。

この手法によって、2019年2月のタッチダウン時、最初のライブ配信が行われた。また「はやぶさ2」カプセルの地球帰還の際にも、この手法を活用した映像配信が行われた。係る映像配信は、YouTube (12) の他に、NHK のニュースサイト [13] (14) や特設サイト (15)、ニュース・防災アプリ (16) 等にも展開された。いずれも 2021年11月時点では映像配信を終了しているため、参考として、図 13 に地球帰還当時の係る Web サイトのスナップショットを示す。

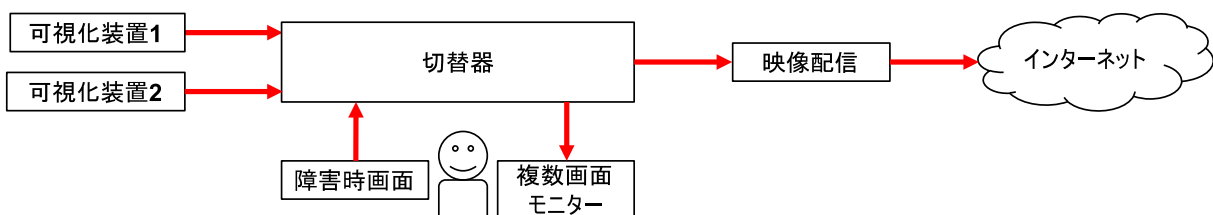


図 12 ライブストリーミングの事例



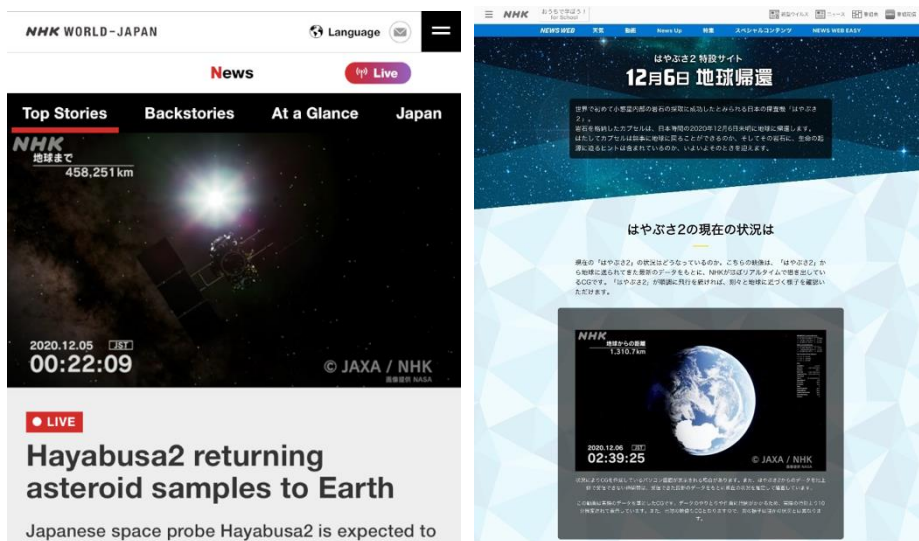


図 13 Web サイトでの活用事例 (2021 年 12 月当時)

#### 4.9. データが新規に取得されない期間の対応

3.5 節に示したように、最終降下フェーズでは配信データを新規に取得できなくなる。

そのためこの期間に関しては、予測データに基づく推定 CG を事前に作成しておき、リアルタイムレンダリングから推定 CG への表示切替を行った。また推定 CG であることを通知するための画面 (図 14) を用意した。



図 14 推定 CG の通知画面 (開発環境から抜粋)

#### 4.10. オフラインでのレンダリング・展示

前述のように、可視化するためのデータは、配信サーバから得られるデータの他に、事前に蓄積されているデータも参照可能である。そのため、任意の予測データを可視化することや、保存済みデータを事後に再生することも可能である。

タッチダウン 1 リハーサル (17)時には、取得データに基づいて、本システムを用いた映像制作を行った。これは、本研究に基づいて公開された最初の映像となった (18) (7)。以後、この手法は番組制作等 (19) も含めて、多岐に活用された。

図 15 は、オフラインのデモンストレーション用に準備した展示用端末の例である。表示されている画面は、保存データを用いて過去のイベントを再現したものである。



図 15 オフライン展示の例

#### 4.11. ハードウェア構成

本研究で用いたハードウェアは、GPU の観点から大きく 2 種類に分けられる。

映像制作・配信等の用途では、4K (3,840×2,160)画質で 60FPS のレンダリングに加え、各種視覚効果のための余力を想定して、CPU は Intel Core i9、GPU は Quadro RTX6000×2 SLI の構成で臨んだ。

一方で管制室設置端末や展示用端末は、GeForce GTX 1080×1 の構成で賄った。管制室設置端末の解像度は 1920×1080、展示用端末の解像度は 3,840×2,160 であった。映像制作や配信の用途ではないため、フレームレートに特段の要求は設けなかったが、レンダリング時に明らかなフレーム欠落が生じるような現象は見受けられなかった。

### 5. おわりに

本研究を通じて、小惑星探査機を可視化する上での制約や表現の可能性等、知見やノウハウを反映することができた。またこのたびのデータ伝送や可視化システムの枠組みを用いることで、管制室向けの高精細可視化に止まらず、映像制作や、映像配信、再生データによる展示等、様々な分野で実用的な用途があることが明らかになった。同手法は「はやぶさ 2」カプセルの地球帰還や、関連する映像制作・広報活動等に至るまで活用されており (20) (21)、今後の応用も見込まれるものである。また探査計画や運用訓練等においても、予測データや計画データ等に基づいた迅速な可視化が可能であると見込まれる。

運用者の立場としては、直感的に探査機の状況を把握できることが利点として挙げられるが、本研究においては、リアルタイムレンダリングの手法を用いた高精細可視化に主眼を置いたため、テレメトリデータの大多数については表示を省略した。将来的に運用システムの一環として検討されるとするならば、今回取り入れなかったデータ等の可視化も含めて検討の余地があると考えられる。

本文中でも述べたが、リアルを追求しすぎると却って分かり難くなる要素もあり、正しく伝えることと分かり易く伝えることとのトレードオフは今後に残された課題である。またリアリティが高すぎると、そこに表示されたもの全てが真実であると誤解される恐れも少なくないと考えられる。データ取得や伝送、表示等、発生しうるエラーの種類や原因は様々であり、自動的に例外処理できるものとそれ以外のものとを弁別しつつ、エラーの状況を適切に表示に反映することとも、今後の検討課題のひとつである。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、「はやぶさ 2」プロジェクトおよびその関係各位から多大なるご支援を賜ったことに感謝する。

### 参考文献

1. はやぶさ 2 プロジェクト。「はやぶさ 2」の地球スイングバイについての 情報を公開します！ (オンライン) 2015 年 10 月 14 日。(引用日: 2021 年 11 月 2 日。) <https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20151014/>.
2. 「はやぶさ 2」地球スイングバイ解説 CG. JAXA デジタルアーカイブス。(オンライン) 2015 年 11 月。(引用日: 2021 年 11 月 2 日。) <http://jda.jaxa.jp/result.php?lang=j&id=80e646c4b3dbffa6d76ea3ed9524dd5f#>.
3. はやぶさ 2 プロジェクト。はやぶさ 2 スイングバイ軌道 3 次元表示の 公開について。(オンライン) 2015 年 11 月 27 日。(引用日: 2021 年 11 月 2 日。) <https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/soft/>.
4. 柏井勇魚, 宮崎剛. WebGL による「はやぶさ 2」「あかつき」のリアルタイム軌道可視化. 宇宙科学

情報解析論文誌第6号：JAXA-RR-16-007, 2017.

5. はやぶさ2 プロジェクト. 「はや2NOW」公開.(オンライン)2018年4月20日.(引用日:2021年11月2日.) <https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180420/>.
6. 三浦昭, 井藤良幸, 内野康司, 中澤哲明, 筒井芳典, 北野和宏, 松尾建, 武井悠人, 尾川順子, 横田康弘, 生田ちさと, 吉川真, 津田雄一. リュウグウ近接運用における「はやぶさ2」の準リアルタイム・高精細可視化. 相模原市: 宇宙科学情報解析シンポジウム, 2020.
7. 宇宙航空研究開発機構. NHK と JAXA の共同開発「SHV はやぶさ2 可視化システム」.(オンライン)2018年10月3日.(引用日:2021年11月2日.) <https://fanfun.jaxa.jp/topics/detail/13077.html>.
8. 三浦昭, 山口智宏, 本田理恵, 横田康弘, 千秋博紀, 北里宏平, 山本幸生, 中村智樹, 野口高明, 本田親寿, 山田学, 和田浩二, 佐伯孝尚, 田中智. はやぶさ2 着陸地点選定運用訓練のための仮想 Ryugu データ作成. 日本惑星科学会秋季講演会予稿集: 日本惑星科学会, 2017.
9. はやぶさ2 プロジェクト. トピックスこれがリュウグウ・3D で見る全体像.(オンライン)2018年7月10日.(引用日:2021年11月2日.) <http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180710je/index.html>.
10. Epic Games. 最高にパワフルな 3D 制作プラットフォーム・Unreal Engine.(オンライン)(引用日:2021年11月2日.) <https://www.unrealengine.com/ja/>.
11. はやぶさ2 プロジェクト. 「トピックス 高度約6km から撮影したリュウグウ」.(オンライン)2018年7月25日.(引用日:2021年11月2日.) <http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180725je/index.html>.
12. 宇宙航空研究開発機構. はやぶさ2 タッチダウン運用: NHK と JAXA の共同開発「SHV はやぶさ2 可視化システム」.(オンライン)2019年2月21日.(引用日:2019年2月22日.) [https://www.youtube.com/watch?v=8kzr\\_C4u9pw](https://www.youtube.com/watch?v=8kzr_C4u9pw).
13. 日本放送協会. NHK NEWSWEB.(オンライン)(引用日:2021年11月2日.) <https://www3.nhk.or.jp/news/>.
14. 日本放送協会. NHK WORLD.(オンライン)(引用日:2021年11月2日.) <https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/>.
15. 日本放送協会. はやぶさ2 特設サイト.(オンライン)(引用日:2021年11月2日.) <https://www3.nhk.or.jp/news/special/hayabusa2/>.
16. 日本放送協会. NHK ニュース・防災アプリ.(オンライン)(引用日:2011年11月2日.) [https://www3.nhk.or.jp/news/news\\_bousai\\_app/index.html](https://www3.nhk.or.jp/news/news_bousai_app/index.html).
17. はやぶさ2 プロジェクト. タッチダウン1リハーサル1 (TD1-R1) のスケジュール.(オンライン)2018年9月11日.(引用日:2021年11月2日.) <https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180911/>.
18. 宇宙航空研究開発機構. 平成30年9月理事長定例記者会見.(オンライン)2018年9月18日.(引用日:2021年11月2日.) [https://www.jaxa.jp/about/president/presslec/201809\\_j.html](https://www.jaxa.jp/about/president/presslec/201809_j.html).
19. 日本放送協会. ドキュメント「スペース・スペクタクル」シリーズ.(オンライン)(引用日:2021年11月2日.) <https://www.nhk.or.jp/special/space/>.
20. 日本放送協会. 「はやぶさ2」リアルタイム可視化システム～3億km離れた「はやぶさ2」の“今”をリアルタイムCGでライブ配信!～.技研公開2021.(オンライン)2021年6月1日.(引用日:2021年11月2日.) <https://www.nhk.or.jp/str/open2021/tenji/16/1.html>.
21. 宇宙航空研究開発機構. 宇宙科学データとリアリティ. 宇宙科学研究所.(オンライン)2020年3月2日.(引用日:2021年11月2日.) <https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/200302.html>.