



応
般

小惑星探査機「はやぶさ2」 —深宇宙のための自律化技術—

大島 武 (NEC 宇宙システム事業部プロジェクト推進部)
津田雄一 (宇宙航空研究開発機構)

はやぶさ2のミッションと自律性

小惑星探査機はやぶさ2¹⁾(図-1)は、2014年12月3日に種子島宇宙センターからH2Aロケットにより打ち上げられた。はやぶさ2の目的は、電気推進航行によって近地球型小惑星にランデブし、その場観測/サンプル採取を行い、地球にサンプルを持ち帰ることであり、2010年に地球帰還を果たしたはやぶさ1(初号機)の技術を継承し、発展させたミッションである。

はやぶさ2のような小惑星探査機には、主として以下の観点から高度の自律性が要求される。

- (1) 地球探査機間距離が長いため、地上からの指令ベースの運用が成立しない。
- (2) 探査機と地上局が常に通信回線で結ばれてはいない一方、任意の時刻指定で実施すべきタスク(コマンド列)が多数存在する。
- (3) 小惑星着陸のような小惑星相対の運用は時間を

確定的に扱えず、イベントドリブンのシーケンス設計となる。

(1)については、はやぶさ2の小惑星近傍運用時の地球距離は最大3.6億kmであり、電波の往復伝播時間に換算すると、およそ40分に相当する。これは小惑星に近接するタッチダウンのような運用のダイナミクス時定数(秒オーダー)に比してきわめて長いため、機上の自律判断が必須となる。

(2)については、海外局を使用しない場合の1日あたりの可視時間は8時間程度である。電気推進運用や小惑星相対航法誘導等、可視/非可視にかかわらず環境変化や探査機の状態変化を監視し適応する運用ができることが必須である。

(3)については、小惑星の微小重力環境では、探査機の制御誤差や小惑星表面の凹凸等の不確定性等が、降下/着陸の運用シーケンスの時間をばらつかせるため、高度判定/姿勢収束判定等のイベントを探査機が自律的に検出してシーケンスを進行させる、イベント検出に基づく状態遷移が必須となる。

本稿は、以上のようなはやぶさ2に求められる自律性を、いかに深宇宙探査機のコマンド処理機能として一般化/単純化し、信頼性を有する汎用機能として搭載したかについて詳述する。

深宇宙探査機の自動化自律化としては、小惑星/彗星探査機Deep Space 1の例²⁾があるが、はやぶさ2は、複数の機器がイベントドリブンで協調的に動作するところに特徴がある。

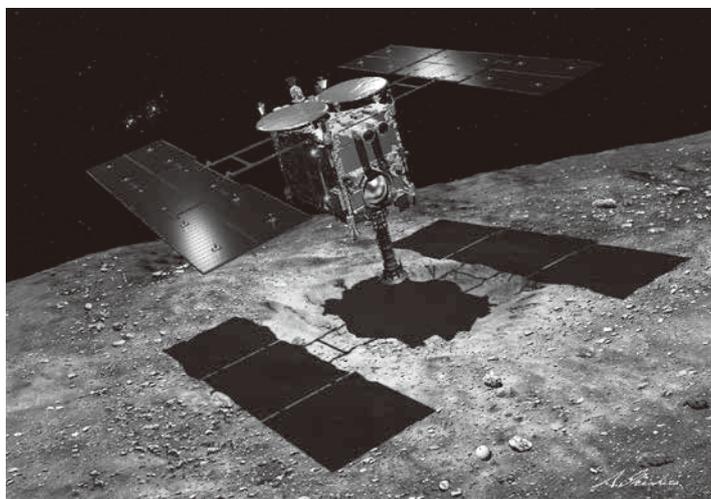


図-1 小惑星探査機はやぶさ2 (イラスト: 池下章裕氏)
(本特集 (p.652) にてカラー画像掲載)

自動化自律化機能

はやぶさ2の、自動化自律化にかかわるブロック図を図-2に示す。

はやぶさ2に実装されている自動化自律化機能について、まずは①自律化運用の土台となる自動化、次に②自動化機能を活用した自律化、について解説する。

◆ DHU 自動化（運用の省力化）

SMC（Short Macro Command）

複数の機器に対する複数のコマンドを、1コマンドで実行できると便利である。このための機能として、はやぶさ2では、DHU（Data Handling Unit）内に SMC を用意している。このコマンドにより、たとえば、RF（Radio Frequency, 電波）を OFF してから複数の RF スイッチを切り替え、アップリンク/ダウンリンクで使用するアンテナを選択する。運用者は、細かいコンフィギュレーションは気にせず、「やりたいこと」に対応する SMC を実行すれば良い（図-3）。

LMC（Long Macro Command）

SMC は、ある「やりたいこと」を実現する一連のコマンドを、（基本的には時間を空けずに実行するよう）パッケージ化したものであるが、コマンドによっては、実行後に待ち時間が必要なものがある。たとえば、CPU を ON してからコマンド受信できるようになるまでの待ち時間などである。そのような場合にも対応できるよう、コマンド間隔を相対時間で指定し、一連のシーケンスを実行するものとして LMC がある。LMC により、はやぶさ2は、1コマンドで「一連の運用シーケンス」を実行できる。LMC は複数（最大 32）の同時動作が可能である（図-4）。

ST（System Timer）

探査機運用では、周期的に何かを実行したいときがある（たとえば、10分に1回撮像したい等）。また、

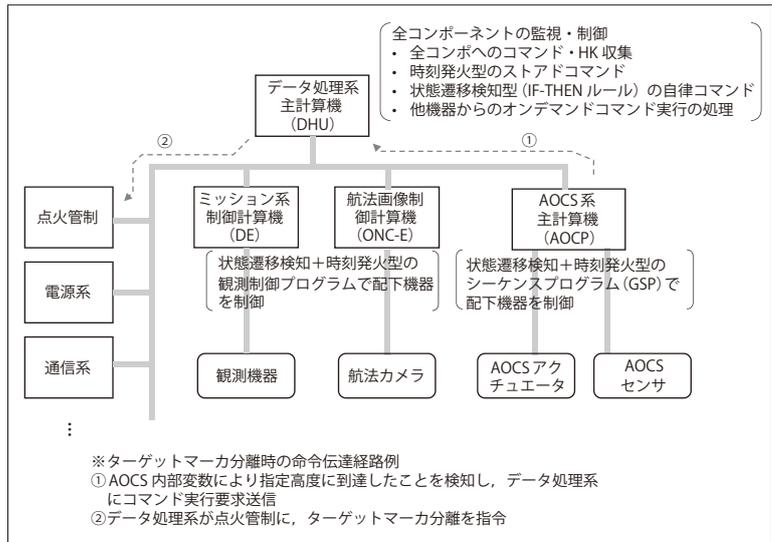


図-2 自動化自律化関連ブロック図

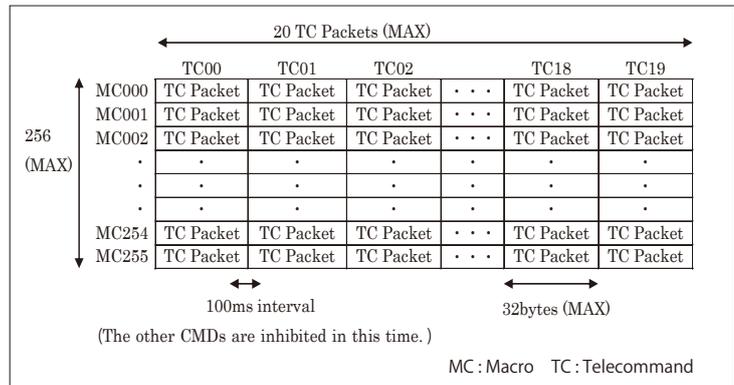


図-3 DHU SMC (Short Macro Command) 機能

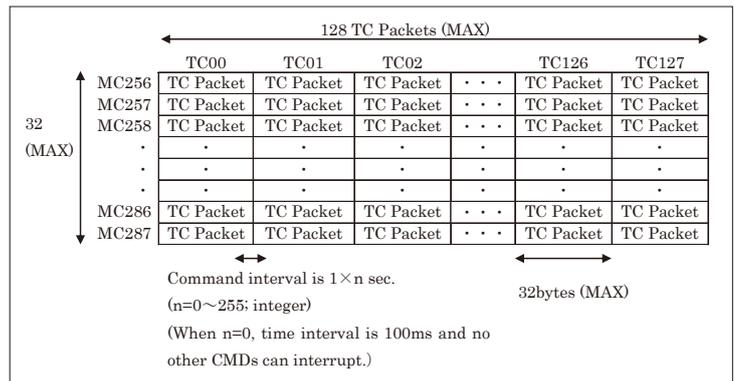


図-4 DHU LMC (Long Macro Command) 機能

多くの機器で実装している Watch Dog Timer 機能を、探査機としても持ちたいときがある（たとえば、10日間地上からのコマンドを受信しない場合、受信機を切り替える等）。このような用途のために用意しているのが ST である。

ST は時限タイマであり、コマンドでタイマリセット

されなければ、あらかじめ設定された時間でタイムアップし、あらかじめ設定されたコマンドを実行する(図-5)。

TL (Time Line Command)

非可視運用対応としては、時刻付コマンドであるTLがある。これにより、指定時間にあらかじめ設定したコマンドを実行する(図-6)。

◆ DHU 自律化

前節で述べた自動化を下敷きとして、はやぶさ2は以下に述べる自律化機能を持つ。

AT (Autonomous Command)

ATは、DHUが持つ機能である。探査機全体の状態を示すHK (House Keeping) データを基に、あらかじめ設定した条件が成立した場合に、あらかじめ設定したコマンドを実行する(たとえば、温度が上がり過ぎた場合に当該機器をOFFする等)。これにより、長い伝搬遅延時間や非

可視時間帯のため、リアルタイムで状況が把握できない場合でも、探査機に自分で判断させ、危険を回避できる(図-7)。

REQ (User Request Command)

ATは集中制御であったが、はやぶさ2は分散制御の仕掛けREQも持つ。REQ機能により、DHU-PIM (Peripheral Interface Module) バスに接続された任意の機器からのトリガで、あらかじめDHU内に登録したコマンド(主にトリガ源以外の機器に対するコマンド)を実行できる(図-8)。

◆ AOCS 自動化自律化 (GSP)

前項で述べたREQは機器間協調制御の仕掛けであるが、これが生きるためには、DHU以外の機器での自動化自律化が必要である。まずは、AOCS (Attitude & Orbit Control System) の自動化自律化機能について述べる。AOCSの主計算機の搭載ソフト (ACFS : Attitude Control Flight Software) にて、

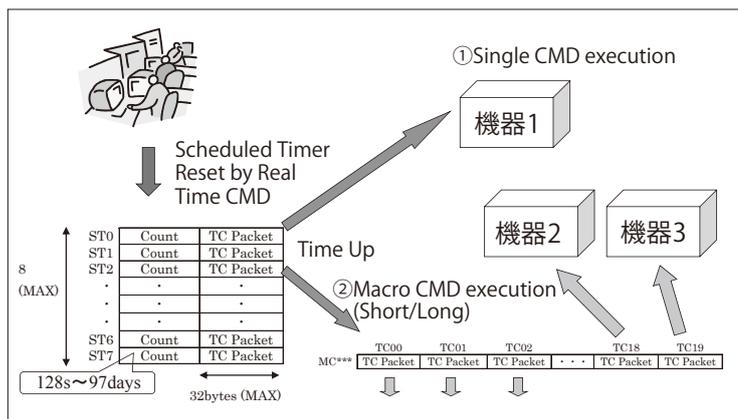


図-5 DHU ST (System Timer) 機能

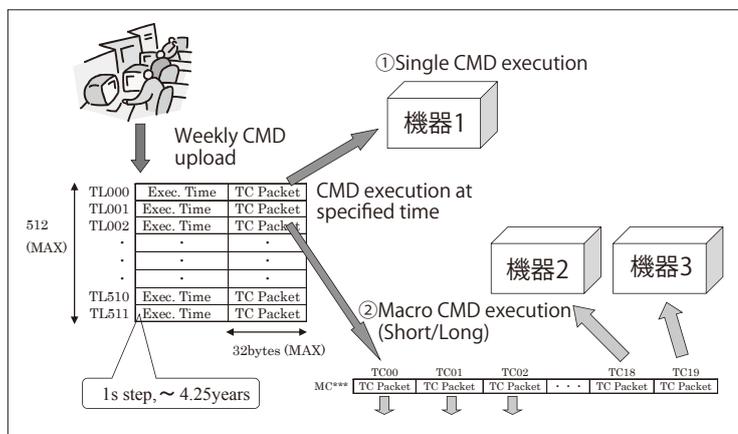


図-6 DHU TL (Time Line command) 機能

姿勢制御、軌道制御、各種 FDIR (Failure Detection, Isolation and Reconfiguration) の機能を持つが、アプリオリで設定されている上記機能に加えて、軌道上でプログラミング可能な GSP (Guidance Sequence Program) 機能を持つ。ここでは、本 GSP 機能について解説する。

GSP では、条件判定テーブル CBT (Condition Branch Table) を 8 ページ持っており、運用フェーズごとに、その中の 1 ページを使用する。それぞれのページにおいて、"状態" を最大 256 個定義できる。各 "状態" には、その状態で実行すべきコマンド (タイマ操作、DE (Sensor Digital Electronics) 観測プログラム実行、ACFS へのコマンド (REQ 発行含む) や、状態遷移条件が紐づけされている。GSP を起動すると、探査機のイベントに対応して、CBT で定義された状態遷移が実行され、必要なコマンドが順次実行される。

◆ DE 自動化自律化 (観測プログラム)

次に、DE の自動化自律化機能 (観測プログラム：観プロ) について述べる。観プロは DE 配下にある 4 つのセンサ (ONC : Optical Navigation Camera, TIR : Thermal Infrared Imager, NIRS3 : Near Infrared Spectrometer, DCAM3 : Deployable Camera) へのコマンド送出, テレメトリデータ受信, 各種画像処理, DR (Data Recorder) への記録をプログラムするためのものである (はやぶさ2 で新たに導入)。1 step ごとに、センサ制御を行うための「センサマクロコマンド」と、DE が画像処理をするための「演算マクロコマンド」が指定できる。この2つは1step 内で同時に動作し、両者とも終了した時点で次の step に進む。センサマクロコマンド側には実行時間間隔も指定でき、これにより、相対時刻指定の一連のシーケンスを実行することができる (図-9)。

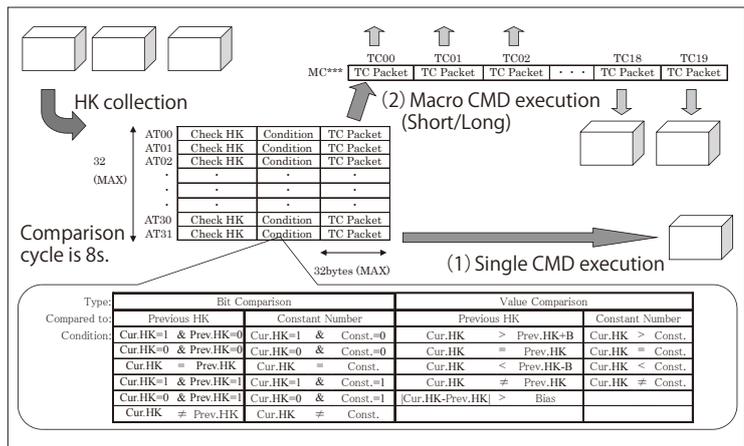


図-7 DHU AT (Autonomous command) 機能

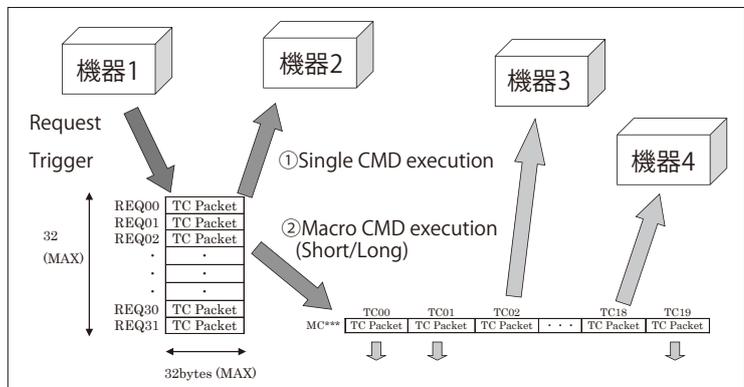


図-8 DHU REQ (User Request Command) 機能

自動化自律化運用の実際

これまでに述べた自動化自律化機能は、それぞれが単独でも動作するが、個々の自動化自律化機能の Enable/Disable を介して相互に影響し合い、全体として高度で複雑な機能を実現していく。自動化自律化の、はやぶさ2 としての活用例を以下に示す。

図-10 は、タッチダウンシーケンスである。

①では、高度 20km の HP (Home Position) から小惑星に向かって降下していく。このとき、水平方向については、ONC 画像に基づき、特徴点を人間の目で判断して誘導する方法 (GCP-NAV : Ground Control Points Navigation) をとるが、垂直方向は ACFS による自動制御である。

②以降は 6 自由度とも自動制御となり、③で TM (Target Marker) を分離、④で小惑星表面にならい、

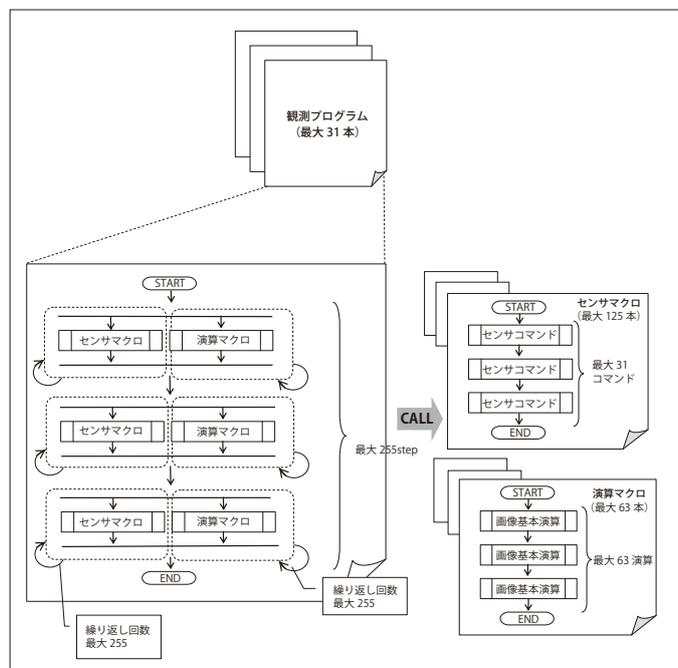


図-9 DE 観測プログラム機能

⑤でタッチダウン (TD). TD 検知後は自動で離脱 (⑥) する。このシーケンスを実現するのに、メイ

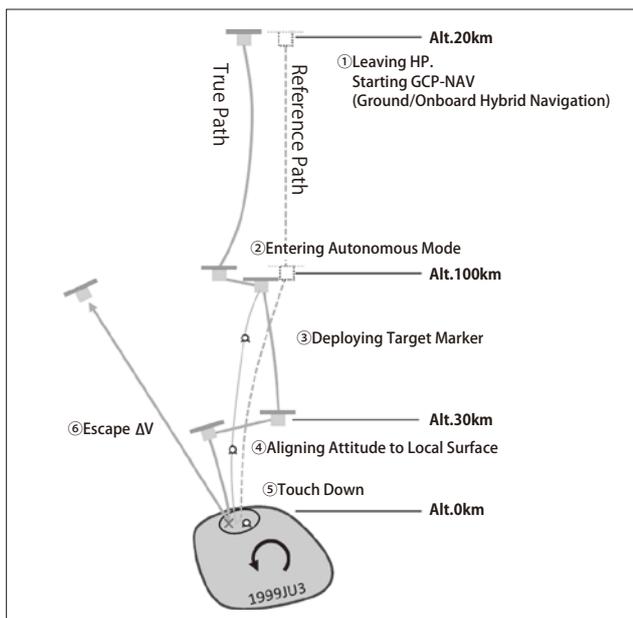


図-10 自動化自律化を活用したタッチダウン

ンのシーケンスは AOC (Attitude & Orbit Control Processor) の ACFS と GSP, 各種安全処置は DHU の AT, AOC から他機器へのコマンドは DHU の REQ 経由, 各種観測は DE 観測プログラムを使用する。

今後の予定

はやぶさ 2 は, 2015 年 12 月に地球 swing-by し, 2018 年 6 月~7 月ごろに小惑星 1999JU3 とランデブ。そこで, 本稿で述べた自由度の高い自動化自律化機能を駆使して, タッチダウン等の複雑なミッションを実施。その後は, 2019 年 11 月~12 月ごろに小惑星を出発, 2020 年 11 月~12 月ごろに地球に帰還する予定である。

参考文献

- 1) Tsuda, Y., Yoshikawa, M., Abe, M., Minamino, H. and Nakazawa, S.: System Design of The Hayabusa 2 – Asteroid Sample Return Mission To 1999 JU3, Acta Astronautica, Vol.90, pp.356–362 (2013).
- 2) Riedel, J. E., et al.: Navigation for the New Millennium: Autonomous Navigation for DEEP SPACE 1, ESA SP, No.SP-403, pp.303–320 (1997).

(2015 年 4 月 17 日受付)

大島 武 ■ t-ohshima@ab.jp.nec.com

1990 年東京大学工学系大学院電子工学専攻修士課程修了。同年 NEC 入社。衛星搭載用デジタル機器開発を経て, 1996 年小惑星探査機はやぶさシステムマネージャ, 2007 年金星探査機あかつきプロジェクトマネージャ, 2010 年小惑星探査機はやぶさ 2 プロジェクトマネージャ, 2015 年ジオスペース探査衛星 ERG プロジェクトマネージャ。

津田雄一 ■ tsuda.yuichi@jaxa.jp

2003 年東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年宇宙航空研究開発機構助教。2014 年同准教授。2007~08 年ミシガン大学およびコロラド大学客員研究員, 軌道工学・誘導制御, 宇宙機システムの研究開発教育に従事。現在, 小惑星探査機はやぶさ 2 プロジェクトマネージャ。

