

## 彗星探査機 Comet Interceptor における人工磁場ノイズを利用した磁力計センサアライメント推定手法の開発

#久連松 良温<sup>1)</sup>, 松岡 彩子<sup>1)</sup>, 村田 直史<sup>2)</sup>, 原田 裕己<sup>1)</sup>, 笠原 慧<sup>3)</sup>, 佐藤 泰貴<sup>2)</sup>, 宮崎 康行<sup>2)</sup>, 白鳥 弘英<sup>2)</sup>, 中島 晋太郎<sup>2)</sup>, 船瀬 龍<sup>2)</sup>

(<sup>1</sup> 京都大学理学研究科, (<sup>2</sup> 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, (<sup>3</sup> 東京大学理学系研究科

## Examination of the Method to Estimate the Magnetometer Sensor Alignment on Comet Interceptor Using Artificial Magnetic Noise

#Yoshiharu Kurematsu<sup>1)</sup>, Ayako MATSUOKA<sup>1)</sup>, Naofumi Murata<sup>2)</sup>, Yuki HARADA<sup>1)</sup>, Satoshi KASAHARA<sup>3)</sup>, Yasutaka Satoh<sup>2)</sup>, Yasuyuki Miyazaki<sup>2)</sup>, Hirohide Shiratori<sup>2)</sup>, Shintaro Nakajima<sup>2)</sup>, Ryu Funase<sup>2)</sup>

(<sup>1</sup> Graduate school of Science, Kyoto University, (<sup>2</sup> Japan Aerospace Exploration Agency, (<sup>3</sup> Graduate school of Science, University of Tokyo

Comets are samples of small celestial bodies retaining the characteristics at the early era of the solar system and providing essential information to understand the origin and evolution of the solar system. Previous missions to explore the comets have targeted short-period ones with orbital period of less than 200 years. However, these comets have approached the Sun many times, making it difficult to distinguish whether their surface features are original or affected by the solar illumination. The European Space Agency (ESA) and Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) are planning the Comet Interceptor mission, the first-ever mission to explore a long-period comet whose characteristics have not been affected by the solar illumination. In this mission three spacecraft will be launched to observe a comet simultaneously, aiming to gain new insights into the formation and evolution of the solar system and the interaction between the solar wind and the comet. The spacecraft are scheduled to launch in 2029; ESA provides the main spacecraft (A) and one of the daughter spacecraft (B2), while JAXA provides the other daughter spacecraft (B1).

All these three spacecraft are equipped with magnetometers. On Spacecraft B1, to prevent artificial magnetic noise generated by the spacecraft itself from degrading the precise measurement of natural magnetic fields, the magnetometer sensor is mounted at the tip of a 1.5-meter-long boom. The boom, which is compactly stored at the launch, will be deployed after the launch. However, there are concerns that the magnetometer sensor might not be correctly aligned as designed, because the boom could be distorted after the deployment. Since this alignment error directly impacts the accuracy of magnetic field data, the boom distortion is a significant issue. In previous missions such as the Selenological and Engineering Explorer (SELENE) and the Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE), two coils are implemented inside the spacecraft to generate a known magnetic field for the calibration of the magnetometer sensor alignment (Shimizu et al., 2008; Takahashi et al., 2009). However, for the Comet Interceptor mission, it is not realistic to install coils since the weight restraint is the high priority. Therefore, we are aiming to develop an alternative method to estimate the magnetometer sensor alignment using magnetic noise generated by the instruments originally installed.

In this study, we use artificial magnetic noise from the spacecraft, which is normally a hindrance to measurements of natural magnetic fields, for the estimation of the sensor alignment after boom deployment. For the calibration, we treat the three reaction wheels used for spacecraft attitude control as noise sources, and extract only the magnetic field variations induced by their rotation for the alignment estimation. In this estimation, it is also necessary to determine the exact displacement of the magnetometer sensor. This is because the boom distortion may shift not only its alignment but also its location, and this positional uncertainty can degrade the accuracy of alignment estimation. The outline of the proposed procedure is as follows: First, before launch, we conduct a ground experiment to construct a model to calculate the magnetic field generated by the reaction wheels at any position around the wheels. After launch and the boom deployment, we compare the magnetic field variations generated by the wheels with the pre-constructed model and estimate the position and alignment of the sensor. To validate this approach, we conducted an experiment in the Magnetic Shielding Room at ISAS/JAXA to measure the magnetic field generated by the flight-model reaction wheels. Based on the acquired magnetic field data, we constructed a model in which the magnetic potential generated by the wheels is represented by a spherical harmonic expansion of the dipole term. The time variations of the Gauss coefficients are assumed to follow sinusoidal functions having the rotational frequencies of the wheels. Using this model, we carried out the alignment estimation procedure. We will discuss the achievable alignment estimation accuracy based on the results.

彗星は太陽系の形成初期における微小天体のサンプルであり、太陽系の起源や進化を理解するための重要な手がかりである。これまでの探査ミッションでは、周期が 200 年未満の短周期彗星がターゲットであったが、それらは太陽に何度も接近しているため、表面の特徴が元々のものか、太陽に接近する過程で変化したものかを見分けるのが難しいという問題がある。このため、ESA と JAXA により、史上初めて長周期彗星の探査を目指す Comet Interceptor ミッションが計画

されている。このミッションでは、3機の衛星を用いて彗星を同時に観測することにより、太陽系の形成や進化、太陽から吹き出す荷電粒子である太陽風と彗星との相互作用について、新しい知見が得られることが期待されている。衛星は2029年に打ち上げ予定であり、ESAが親機（A衛星）と子機の一つ（B2衛星）を、JAXAが残りの子機一つ（B1衛星）を提供する予定である。

JAXAが担当するB1衛星では、探査機本体が発する人工的な磁場ノイズが自然界の磁場の観測に影響を与えることを防ぐため、長さ1.5mの「ブーム」と呼ばれる棒状の伸展物の先に磁力計のセンサが設置される。打ち上げ時にはブームは小さく収納されているが、打ち上げ後にセンサが衛星本体から離れる方向に伸ばされる。しかし、保管時のブームの経時特性変化や機構部ガタ、熱変形などに起因した不確定性によりセンサの方向（アライメント）が変化することが懸念されており、そのアライメント誤差が磁場データの誤差に直結するため、重要な課題となっている。従来の磁力計を搭載した探査ミッションのうち、月周回衛星「かぐや」や木星氷衛星探査衛星「JUICE」などでは、アライメントを正確に推定するために、衛星本体内部に既知の磁場を発生させるコイルを装備し、その磁場をセンサで計測することでアライメントのずれを検証していた(Shimizu et al., 2008; Takahashi et al., 2009)。しかし、今回のミッションでは探査機の小型化の優先度が高いため、アライメント較正磁場を生成するコイルを搭載することができず、新たな較正手法の開発が求められている。

そこで本研究では、通常は自然磁場観測の妨げとなる探査機由来の人工磁場ノイズを逆に利用し、ブーム伸展後の磁力計センサのアライメントを推定する手法の開発を目指す。本手法では、較正に用いる磁場ノイズの発生源として衛星の姿勢制御に使用される3つのアクションホイールを想定しており、ホイールの回転によって生じる磁場変動成分のみを抽出して利用する。なお、アライメント推定の際にはセンサの位置も同時に推定する必要がある。これはブームの歪みにより、センサのアライメントだけでなく位置も変化する可能性があり、その位置の不確かさがアライメント推定精度に大きく影響を及ぼすためである。アライメント推定の基本的な流れは以下の通りである。まず、打ち上げ前の地上試験において、ホイールが任意の位置に生成する磁場をモデル化する。打ち上げ後、ブームが伸展された状態で取得されるアクションホイール由来の磁場変動と、この事前に構築したモデルとを比較することで、磁力計センサの位置およびアライメントを同時に推定する。この手法の検証のため、実際に衛星に搭載されるアクションホイールを用いて、JAXA宇宙科学研究所の磁気シールドルームにて磁場測定実験を実施した。得られた磁場データに基づき、ホイールが発する磁場ポテンシャルをダイポール成分までの球面調和関数で表現し、各ガウス係数の時間変動がホイールの回転数に対応した周期的な正弦波で記述できると仮定してモデルを構築した。このモデルを用いてアライメント推定処理を一連で実施し、得られた結果をもとに、本手法によって達成可能なアライメント推定精度について議論する。