

Comet Interceptor Mission 搭載の彗星水素コロナ撮像器の 光学性能評価

御任勇成¹, 吉岡和夫², 鈴木雄大³, 山崎朝¹

¹東京大学 理学系研究科, ²東京大学 新領域創成科学研究科, ³ISAS/JAXA

水素コロナ撮像器 (Hydrogen Imager: HI) は ESA 主導の長周期彗星探査ミッション Comet Interceptor に搭載される紫外線撮像装置である。本研究では HI の光学性能、特に結像性能の環境耐性・紫外線の検出効率に焦点を当て、実験的にこれを評価する。

本ミッションの探査対象である彗星は氷とダストでできた小天体で、大きな軌道離心率を持ち、ほとんどの場合公転軌道は雪線と交差する。地球は雪線の内側のため、海を形成している大量の水は小惑星や彗星が有機物とともにもたらしたと考えられている (O' Brien et al. 2018)。しかし、地球の水起源に対する彗星の寄与の程度はいまだ理解されておらず、彗星の水の性質 (特に D/H 比) と彗星の形成場所を対応付けることが地球水起源理解への重要な一歩となる (Mandt et al. 2024)。

彗星の起源は近日点前後での水生成率変化から分類可能である。彗星は太陽に近づくにつれて揮発性物質の放出率は高くなるが、水生成率 (放出率) は冪乗則に従う太陽-彗星間距離の関数として表すことができ、この冪乗指数と彗星起源の関係が示されている (Combi et al. 2019)。水生成率を同定する手段としては Ly- α 撮像による水素原子空間分布の測定があり、Combi et al. (2019) でも水素が発した Ly- α を全天観測する SOHO/SWAN のデータを用いている。

彗星周囲の水素原子の空間分布と水生成率を繋げるためにはモデル計算が必要となる。彗星の核から放出された水分子は光解離反応によって H と OH、さらに OH から O と H に分かれ、この 2 回の反応で生成した水素はそれぞれ異なる初速度で核から広がる。また、彗星核からの水放出はアウトバーストなどの局所的・経時的現象によって起こることが知られている (Kaneda et al. 1986)。そのため、水素の空間分布は水素の広がり方をシミュレーションするモデルによって計算され、境界条件として核から供給される水の量すなわち彗星の水生成率が定められている。逆にこれは、彗星周囲の水素原子空間分布の観測から彗星核の水生成率を同定可能であることを意味している。

一般に光学的に薄い状況では視線方向の水素柱密度は g-factor で Ly- α の輝度に変換されるため、Ly- α で撮像した画像の輝度分布から水生成率が計算可能である。しかし、彗星核近傍では水素柱密度が高く光学的に厚いために輝度と水素柱密度は比例関係ではなくなる。このような領域は”多重散乱”領域と呼ばれ、太陽から来た Ly- α が複数回共鳴散乱したのちに観測者へ到達するために輝度と水素密度が比例しなくなると考えられている (Suzuki 2022)。同研究によれば比較的活動度の高い彗星において多重散乱領域は核から $\sim 10^4$ km の距離まで広がっており、より正確な水生成率推定のためには光学的に厚い領域と薄い領域を分別可能な空間解像度が必要である。

HI は Comet Interceptor Mission に搭載され、目標の彗星から 10^7 km の距離で観測を行う。本ミッションは史上初の詳細な長周期彗星のその場観測であり、HI による始原的な長周期彗星の水生成率測定は彗星起源を同定する上で重要な情報となる。このような要求から HI は核から $10^6 \sim 10^7$ km まで広がるコマを視野に収め、かつ 10^4 km 以下の構造を解像する光学性能を有する必要がある。

HI の開発は EM (試作品) を用いた性能評価の段階にある。光学性能としては、彗星から 10^7 km の観測地点から光学的に厚い 10^4 km の領域を解像するだけの結像性能をもち、 10^7 km 以上離れたコマの暗い領域も捉えられるような紫外線検出性能を持っていることを確認しなければならない。HI は彗星コロナを Ly- α (121.6 nm) で撮像し 2 次元画像を得るためにカセグレン式の反射望遠鏡を持ち、その後段には H と D の存在比を測定するためのガラスセルフィルター 2 つ・水素原子以外の種由来の光をカットするためのバンドパスフィルター (BPF) が続き、ディテクターに至る。そのため本研究では、まず望遠鏡部の結像性能評価のために点光源の撮影から点像サイズを測定し、振動や衝撃・熱などの環境試験前後での結像性能も比較することで宇宙環境に対する頑強さを評価した。紫外線検出性能については望遠鏡での 2 回の反射と 5 枚の MgF₂ の透過による減衰を評価するため、Ly- α に対する鏡の反射率および MgF₂ の透過率を実験的に測定した。本発表ではこれらの結果について示し、HI の光学性能について結像性能・Ly- α 検出効率を評価・議論する。

Comet Interceptor Mission 搭載の彗星水素コロナ撮像器の光学性能評価

Optical Performance Evaluation of the Comet Hydrogen Corona Imager onboard the Comet Interceptor Mission

御任 勇成¹⁾、吉岡 和夫²⁾、山崎 朝¹⁾、鈴木 雄大³⁾

¹⁾ 東京大学 理学系研究科、²⁾ 東京大学 新領域創成科学研究科、³⁾ ISAS/JAXA

背景

- 地球の海を形成する大量の水の起源は小惑星や彗星の可能性 O'Brien+2018
- 地球上の水起源への彗星の寄与の程度に対する理解は不完全
- 天体の形成場所と水の性質を結びつけることが肝要 Mandt+2024
 - 特にD/H比は天体に含まれる水の追跡子となる
- 彗星は近日点前後の彗星核の水生成率変化から分類可能 Combi+2019 (長周期 or 短周期、軌道的に新 or 古 など) HIは「多重散乱領域を解像」 & 「水生成率導出可能な精度でH原子空間分布を撮像」

- 彗星周囲のH原子の空間分布はモデルを用いて水生成率から計算可能
- Ly- α (波長 121.6 nm) で撮像することでH原子の空間分布を取得可能
- H原子は共鳴散乱によりLy- α を放ち光量は視線方向柱密度に比例
- 光学的に厚い領域ではLy- α 光量と柱密度が比例せず
- 光学的に厚い「多重散乱」領域
- 彗星から $\sim 10^4$ kmほどまで広がる

することが要求されている

目的

- EM品での「水素コロナ撮像器 (Hydrogen Imager: HI)」性能評価
- HIは「反射式望遠鏡+光学フィルター+検出器 (MCP)」の構成

1. 結像性能および安定性

- 点を点として写す性能
- 点光源を写した際のスポットサイズ
- 環境耐性
- 振動・衝撃による影響評価

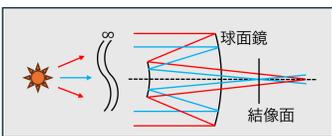


図1 球面収差

球面鏡を用いた光学系では完全な1点に集光できない

2. 紫外光の検出効率

- Ly- α は減衰しやすい
- 反射・透過 etc. により減光

→ 望遠鏡の鏡の反射率、MgF₂・BPFの透過率を測定 & 減衰の程度を評価

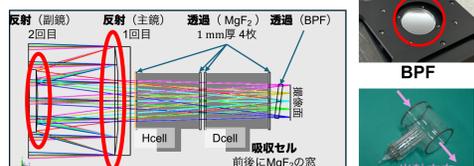
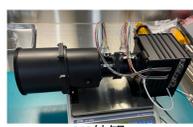
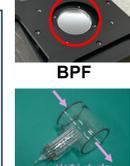


図2 HIの光路図

入射したLy- α は各部の反射・透過により減衰する



HI外観



BPF

光軸方向吸収セル

実験方法

1. 結像性能

- 平行可視光を入射しCMOSカメラで撮影・スポットサイズ評価
- 画面内9点(3行×3列)に結像 & 各入射角ごとの結像性能を評価
- 振動試験・衝撃試験・熱試験の前後で比較

光学試験 (PSF測定) → 振動試験 → 光学試験 (PSF測定)

比較

光源: 鉄塔の赤色灯 距離: 3.9 km EcE 80%で評価 (En-circled Energy)

HI鏡筒+CMOSカメラ

民生カメラ

Hydrogen Imager

面積 80%

EcE 80% : 156 μ m

2. 鏡の反射率 & MgF₂・BPFの透過率測定

- 反射率: 入射角ごとに測定
 - 透過率: 厚み既知のMgF₂およびBPFを測定
- 望遠鏡および光学フィルターでの光の減衰を評価

図2 反射率測定の様子

Ly- α 入射口

分光器

サンプル鏡

MCP(Detector)

図3 測定方法

(a) 直達光測定 (b) 反射光測定 (c) 直達光測定 (d) 透過光測定

今後の展望

I. 光学性能評価

- 解像性能は要求を満たし環境耐性も示されたが評価すべき項目は他にもある
- 視野角
- 構造 (副鏡支持部材や鏡筒側面) が紫外光減衰・迷光に与える影響
- 最適入射角の異なる球面鏡の反射率
- 鏡面汚染の影響・対策

II. 科学的成果の検討

- 本研究の最終的な目標はHIが科学的成果を得られるだけの光学性能を持っているかの評価
- Comet Interceptor が探査する彗星は未定ゆえ活動度毎の各パラメータを予測する研究あり
- それらを用いてHIが取得するデータを予測
- 水生成率を同定: 水素の空間分布測定精度の見積もり
- “多重散乱”領域を分別: ノイズによる画像への影響の見積もり

実験結果

1. 結像性能および安定性

- いずれの環境試験前後でもEcE80% 直径は 110 μ m ~ 160 μ m
- 各種環境試験によりEcE80% 直径は0 μ m ~ 20 μ m変化

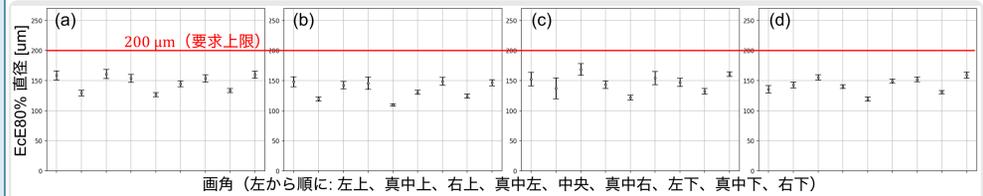


図4 各画角におけるEcE80% 直径 (a) 組み立て後 → (b) 単体振動試験後 → (c) システム振動・衝撃試験後 → (d) 単体熱試験後

2. 紫外光の検出効率

波長 121.6 nm のLy- α を使用し測定

反射率 (図5)

- 入射角 10 deg. ~ 50 deg. で測定、40% ~ 60%
- 入射角が減少 → 反射率は低下
- エタノールで2回の超音波洗浄の結果、反射率が改善

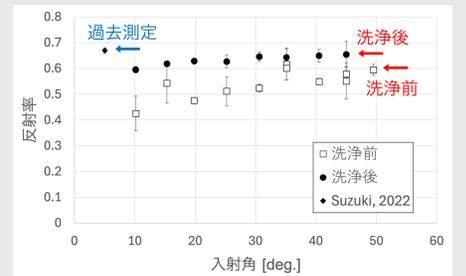


図5 入射角ごとの反射率

洗浄で反射率が改善。過去測定(Suzuki, 2022)はUVSORにて実施。

透過率

- MgF₂: セル1つ (前後に1 mm厚のMgF₂) を用いて測定、(36.3 ± 0.5)%
- BPF: 入射角0度で測定、(11.1 ± 0.3)%

考察

1. 結像性能および安定性

- 検出器上でのスポット径は要求点像径 $\sim 200 \mu$ mを満たす
- 200 μ m: 撮影条件時に“多重散乱”領域を解像可能な点像径
- 各種環境試験により結像性能に有意な変化はなかった
- 望遠鏡部の結像性能安定性は高い

焦点距離設計値: ~ 260 mm

Hydrogen Imager: HI

接近段階距離: $\sim 10^7$ km

“多重散乱”領域: $< 10^4$ km

光学的に厚い

2. 紫外光の検出効率

反射率 (図5)

- HIの各鏡に対する代表的な光線入射角は主鏡: 7.5 deg. / 副鏡: 10.5 deg. → 洗浄後の反射率はそれぞれ 59.7%、63.4%
- 望遠鏡部で光量は37.8%に減少
- 洗浄前は主鏡: 42.7%、副鏡: 43.9% (図6) → 望遠鏡で光量は18.8%
- 洗浄により光学フィルターに達する光量が倍増

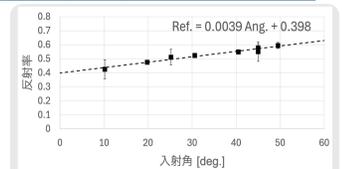


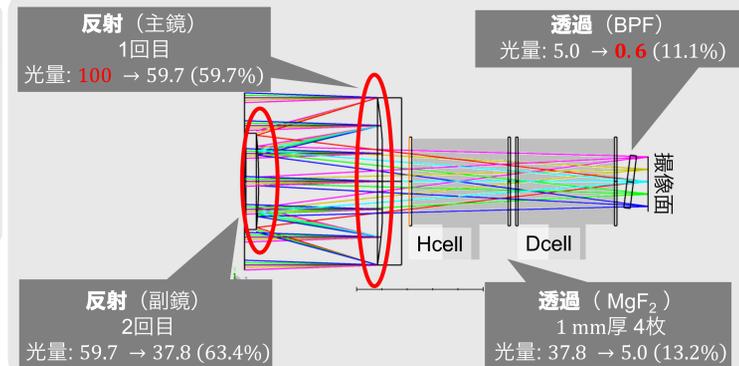
図6 洗浄前の反射率フィッティング

局所高反射率は省いて線形フィットし入射角10度未満の反射率を外挿

透過率

- 吸収セル1つ (MgF₂厚さ計 2 mm) で測定、HIは2つ搭載 → 2つのセルのMgF₂計 4 mm により光量は(13.2 ± 0.3)%に減少
- BPFは光軸に対して7 deg. 傾いているが、透過率に有意な入射角依存性なし
- HIの光学素子によってLy- α の光量は0.6%に減少
- 百武彗星(C1996/B2)は水放出率 $\sim 10^{29}$ /sで輝度は $\sim 10^4$ Rayleigh だった → 仮にHIで観測すると検出器に達する光子は 1.7×10^5 cps

MCPの量子効率 ($\sim 1\%$)の影響もある。また、HIの画素数は256×256なので1pixあたりの計数率は $\sim 2.5 \times 10^{-2}$ cps/pixとなる。



反射 (主鏡) 1回目

光量: 100 → 59.7 (59.7%)

透過 (BPF)

光量: 5.0 → 0.6 (11.1%)

反射 (副鏡) 2回目

光量: 59.7 → 37.8 (63.4%)

透過 (MgF₂) 1 mm厚 4枚

光量: 37.8 → 5.0 (13.2%)

参考文献

- O'Brien, D. P., Izidoro, A., Jacobson, S. A., Raymond, S. N., & Rubie, D. C. (2018). The delivery of water during terrestrial planet formation. *Space Science Reviews*, 214, 1-24.
- Mandt, K. E., Lustig-Yaeger, J., Luspay-Kuti, A., Wurz, P., Bodewits, D., Fuselier, S. A., ... & Trattner, K. J. (2024). A nearly terrestrial D/H for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science Advances*, 10(46), eadp2191.
- Combi, M. R., Mäkinen, T. T., Bertaux, J. L., Quémerais, E., & Ferron, S. (2019). A survey of water production in 61 comets from SOHO/SWAN observations of hydrogen Lyman-alpha: Twenty-one years 1996-2016. *Icarus*, 317, 610-620.
- Suzuki, Y. (2022). The study on the relationship between the surface bounded exosphere and the surfaces of celestial body. *Dr. Theses*.
- Yoshioka, K., et al. (2024). Small UV Imager for Hydrogen Lyman-alpha Onboard Ultra-Small Spacecraft. In *Space Telescopes and Instrumentation 2024: Ultraviolet to Gamma Ray* (Vol. 13093, pp. 921-926). SPIE.