

火星超高層電離大気光学観測用の機器設計検討

山崎 敦、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

【研究目的】

惑星誕生から現在・そして未来にわたる惑星大気の進化の研究において重要な課題のひとつである超高層電離大気と太陽風の相互作用領域における大気流出の物理プロセスを理解するために、相互作用領域の二次元光学観測を検討している。火星の場合、超高層電離大気の主成分である O_2^+ の二次元分布観測が可能となれば科学的意味が大きい。紙上検討では観測が不可能ではないという結果を得ているが、観測対象の発光は非常に微弱であるため、火星ディスクでの反射光をいかに除去するかが課題であり、「離角 0.5~2 度以上において 6 桁以上のコントラスト」の光学性能を持つ観測機器の設計することが成功に導くカギである。我々の考案・試作したガウシアン形状の微細構造を有するバッフル(図1)は、要素試験の結果、要求される高コントラスト性能を満足することがわかった [Enya et al., 2018]。本研究課題では、取得済みの測定結果を基礎データとして、サイエンス要求を満足する火星超高層電離大気光学観測機器の設計検討を実施し、サイエンス要求を深化させることを目的とする。

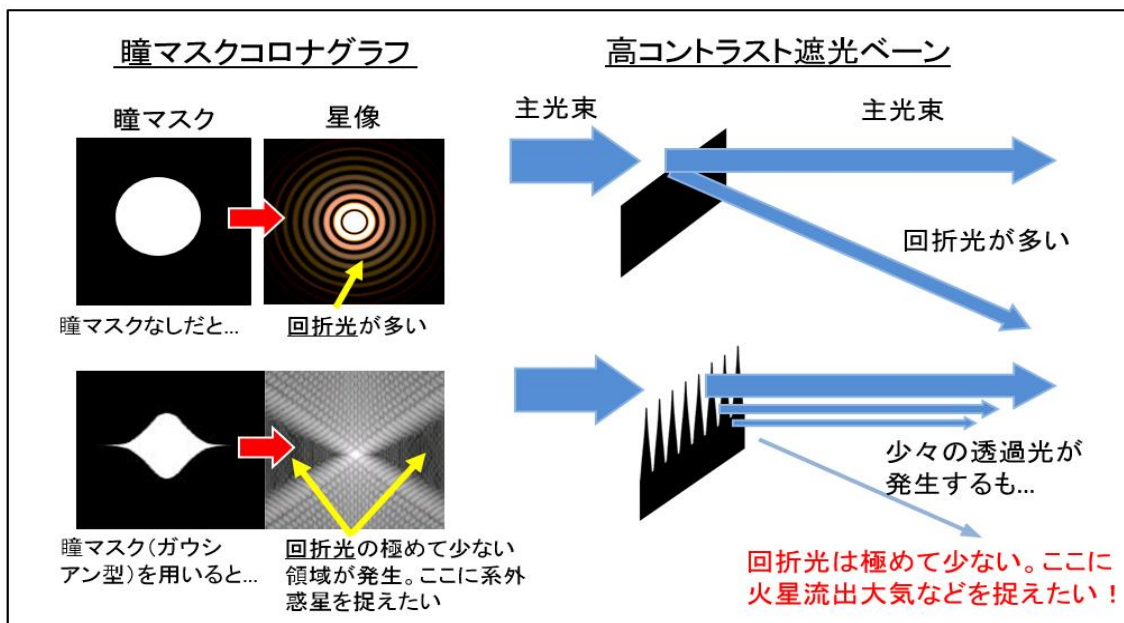


図1. ガウシアン構造バッフルの機能を示す概念図。左側に系外惑星用コロナグラフの瞳マスクでの機能を、右側にそれを応用した遮光バッフルの機能を示す。上段、下段はそれぞれ標準的な設計方針、高コントラスト化のガウシアン構造バッフル設計方針を示す。

【研究方法と研究結果】

昨年度までに、標準的なストレート構造バッフルとガウシアン構造バッフルを試作、回折角に対する回折光強度を二次元的に計測し、一次元的な評価を完了した。今年度は、測定結果を二次元的に評価することから開始した。特に、試験で確認されたバッフル端面に平行方

向（図1の紙面垂直方向）への回折について解析を進めた。

まず、二次元データを取得位置に合わせて数値シミュレーション解析を実施し、測定結果と比較して大きな相違がないことを確認した。ガウシアン構造バッフルの1度の回折角の位置で、コントラストが 10^{-8} を達成できることを確認したことは、ガウシアン構造バッフルがコントラスト向上に優位に働き、火星超高層大気の光学観測にとって有効な遮光技術であることを確認できた。

次に、高コントラスト撮像機器の設計案を検討した。大きく分けると、集光後に光学系内部で迷光除去する方法と、集光前に迷光除去し光学系に観測光のみを導入する方法の2種類考えられる。前者は系外惑星観測に応用されていて、迷光除去のキー技術としてコロナグラフを使用する（図1の左下図）。メリットは光学系サイズ・機器全体サイズとも小型化できることである。一方デメリットは、観測光・迷光の両成分を光光学系内に導入することになるため、光学面の表面粗さを超高精度に研磨する技術が必要となること、光学系内での乱反射成分を際限なく除去する必要があるため光学系内を超低反射率コーティングが必要となることである。後者の設計案での迷光除去のキー技術は、高コントラストバッフルである（図1の右下図）。メリットは、集光光学系内に迷光が混入しないため標準の光学系設計でよく、光学面の研磨や光学系内塗装などの光学技術が既存技術の応用範囲内にあることである。一方デメリットは、バッフルサイズである。光学系とバッフルの距離を長く取ることが、高コントラストを達成する唯一の方法だからである。火星超高層大気観測機器を例に計算すると1m以上の距離を確保する必要がある。

本件とは異なる課題であるが、日本の小型科学衛星クラスでの火星探査を検討している。この検討結果によれば搭載機器の長さを1m級に抑える必要がある。この検討結果は、我々の提案する高コントラストバッフルを利用した観測器が標準技術で設計・製作できる集光光学系を採用できれば搭載が可能であることを示している。本研究課題で議論したことを考慮し、高コントラスト撮像機器設計案のトレードオフを実施した(表1)。目標とする「離角 0.5~2 度以上において 6 桁以上のコントラスト」の光学性能を有する観測器は、ガウシアン構造の外部バッフル+標準精度の集光光学系が適している。

表1. 高コントラスト撮像機器設計案のトレードオフ表

機器設計案	A. コロナグラフ		B. 外部バッフル (ストレート構造)		C. 外部バッフル (ガウシアン構造)	
バッフルサイズ	小	○	大	×	大	×
光学面粗さ精度	超高精度	×	超高精度	×	標準	○
光学系内塗装	超低反射率	×	超低反射率	×	低反射率	○
機器全体サイズ	小	○	大	×	中 (1m級)	△
総合評価	△		×		○	

【考察】

今回確認できたことは、ガウシアン構造バッフルを使用することにより、後置集光光学系の設計制約を厳しくすることなく機器設計ができることである。これは、集光光学系を折り返して機器サイズを短くすることが可能となることを示し、機器の小型化に弾みをつけた

こととなる。小型科学衛星での火星探査を実現する条件では、「離角 0.5～2 度以上において 6 桁以上のコントラスト」の光学性能を有する観測器を、ガウシアン構造バッフル+集光光学系が適している。今後の課題は、ガウシアン微細構造を有したバッフルの自立化で、金属エッチングを主軸に、材料検討から進める必要がある。

【成果発表】

1. 関 華奈子, 渡部 重十, 中本 泰史, 寺田 直樹, 山崎 敦, 松岡 彩子, 臼井 寛裕, 関根 康人, 藤田和央, 横田 勝一郎, 笠原 慧, 齊藤 義文, 中川 広務, 熊本 篤志, 前澤 裕之, 火星宇宙天気・気候・水環境探査計画検討チーム, 戦略的火星探査：周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画, 日本地球惑星科学連合2019年大会, 幕張メッセ, 2019.
2. 関 華奈子, 寺田 直樹, 山崎 敦, 臼井 寛裕, 関根 康人, 藤田 和央, MACO計画検討チーム, 戦略的火星探査：周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査(MACO)計画, 第20回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 2020.

【謝辞】

本研究の実施に際し多大なるお力添えを頂きました、東北大学の中川広務氏、宇宙航空研究開発機構の塩谷圭吾氏、アストロオプト社の藤代尚文氏に深い感謝の意を表します。

和文課題名（先頭列、行中央）

（1行スペース）

代表者、所属機関・部局（行右揃え）

（2行スペース）

【作成要領】

- ①形式は自由ですが、研究目的、研究方法（使用した共同利用装置・施設等を含む）、研究結果、考察、成果発表（当該年度に行った口頭発表を含む）等をお書き下さい。
- ②A4サイズを使用してください。
- ③いただいた原稿をそのままWeb掲載に利用しますので、次のサイズ内でお書きください。
 - ・ 上端マージン＝20 mm
 - ・ 下端マージン＝20 mm
 - ・ 左端マージン＝15 mm
 - ・ 右端マージン＝15 mm