

宇宙開発に伴う大気汚染評価
Investigation of Air Pollution Associated with Space Developments

持田陸宏，名古屋大学 宇宙地球環境研究所
市原大輔，九州工業大学 工学研究院

■ 研究の目的

本融合研究では運用終了後の人工衛星など「宇宙ゴミ」を起源としたエアロゾルを研究対象とする(図1参照)。具体的には、衛星コンステレーションの実装に伴う宇宙ゴミの爆発的増加に注目し、高度40-90 kmにて排出される宇宙ゴミ由来のエアロゾルを研究対象とする。エアロゾル粒子の基本特性(粒径分布や形態など)を把握し、その情報を組み込んだ気候モデル計算で宇宙ゴミ起源のエアロゾルの全球大気への影響を推定することを視野に、予備的な成果の獲得や研究指針の具体化を目指している。将来的には、打上げロケット由来の環境影響の議論と組み合わせることによる宇宙開発に係る複合的な環境影響評価への展開や、自然起源の隕石微粒子の影響評価、成層圏エアロゾル注入によるジオエンジニアリングへの波及も期待できる。

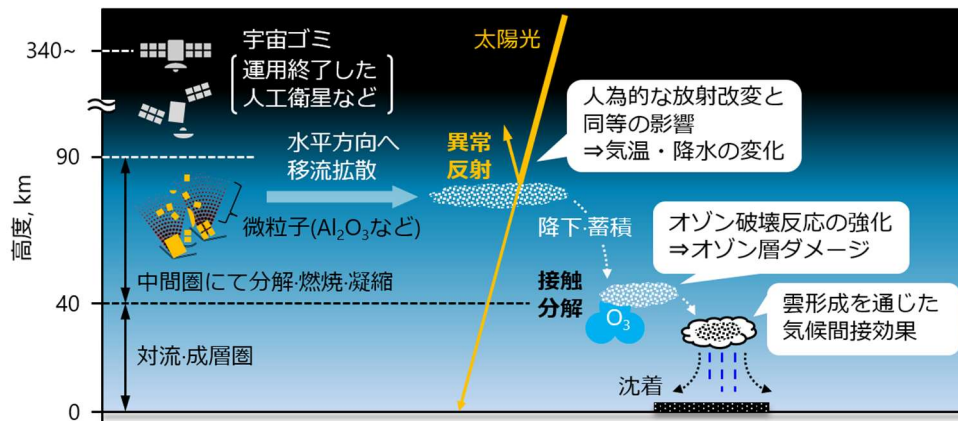


図 1 宇宙ゴミ由来のエアロゾル粒子と地球大気との相互作用

■ 研究会の開催

前年度までに計画した研究の発展について検討するため、本課題に関連する研究に取り組む研究者の話題提供に基づく研究会「宇宙開発時代における大気環境の新視点」を3月19日に宇宙地球環境研究所において開催した。この研究会では、宇宙ゴミ由来の微粒子発生とその影響の解明に向け、共通のメカニズムを持ち得る現象として、自然現象である流星物質の大気突入と、開発が進む観賞用人工流星の生成を取り上げることとした。そして、これらの現象に関わる大気観測や技術開発の取り組みを踏まえ、本融合研究のアプローチや波及について視野を広げること、さらには宇宙開発時代における大気環境に対する新たな視点を見出すことを目的とした。研究会では、本課題のメンバーである持田、市原によりそれぞれ趣旨説明と本課題の概要の紹介がなされた後、気象研究所の足立光司博士による講演「流星物質を起源とする大気微粒子の電子顕微鏡分析」、株式会社ALEの石井宏宗氏による講演「人工流れ星技術と大気観測の取り組み」と、これらの講演に対する質疑が行われた。参加者は16名であった。本研究会の後に、本課題のメンバー(持田、市原、須藤、長濱、上田)、2名の招待講演者、ほか関係者や名古屋大学教員によりクローズドの会合を開き、本課題の取り組み等について情報交換を行った。

■ 地上実験

昨年度に引き続き地上実験1および2に注力した。主要な成果を以下に示す。

九州工業大学内に構築した大気圏再突入環境模擬装置および高エンタルピー気流生成部の概要をそれぞれ図2と図3とにそれぞれ示す。大気圏再突入時に生じる加熱環境を模擬すべく直径1 m、直胴部長さ2.6 mの真空チャンバーにおいて上流端フランジにアークプラズマ源を設置した。コンプレッサーよ

り供給された作動ガス（空気，流量30 slm）はノズル型陽極とハフニウム陰極との間で生じるアーク放電（投入電力1.9 kW）により加熱され，設計Mach数5.7の超音速ノズル（出口直径20 mm）を介して加速・排気される．宇宙ゴミを模した供試体（純アルミ製球体，直径6 mm）はノズル出口から下流5 mmの位置にノズルと同軸上となるよう設置した．アークプラズマ源作動時のチャンパー内圧力および供試体表面温度はピラニ真空計と放射温度計とでそれぞれ測定した．発生した粒子は供試体下流端より10 mmに設置した銅板（実効捕集面積38 mm²，厚さ0.2 mm）にて捕集し，電子顕微鏡観察およびエネルギー分散型X線分光法による元素分析を行った．

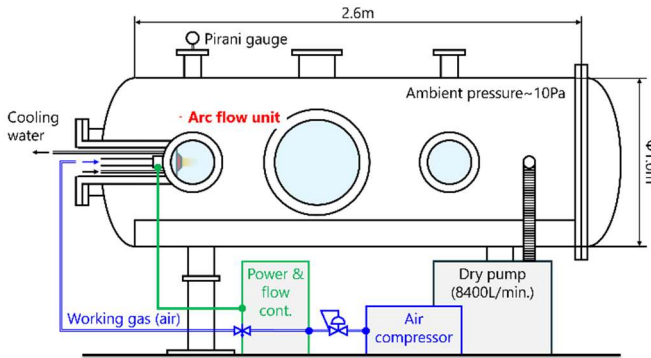


図 2 真空チャンパー及び排気・冷却・供給系の概要図

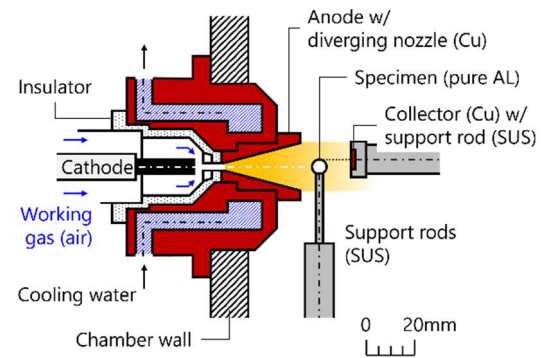


図 3 アーク源及び供試体・捕集板の概要図

アークプラズマ源自身の作動特性を取得すべく，雰囲気気圧～100 Paにおいて作動ガス流量と放電電流とを変化させた際の放電電流を測定し気流の最大比エンタルピーとアーク抵抗値との関係を取得した．その結果を図4に示す．放電電流の増加と共に作動ガスの電離が促進された結果アーク抵抗値も低下し比エンタルピーは最大8.3 MJ/kgまで到達可能であることを確認した．今年度より新たに導入した分光器（PMA-12，浜松ホトニクス株式会社製）によるアーク気流の発光分光結果を図5に示す．低压空気プラズマ特有の窒素・酸素原子および分子が検出される一方でイオン種に対応する発光は微弱であった．これより排気プルームからの発光は励起元素の脱励起反応に起因していることも明らかとなった．

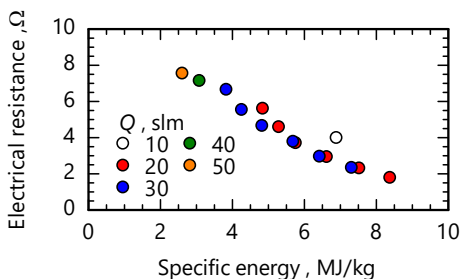


図 4 アーク気流特性

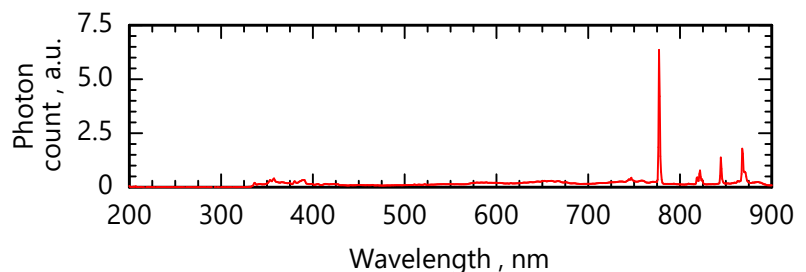


図 5 アーク気流からの発光スペクトル

■ まとめ

研究会の開催により，本課題の発展・波及としての観測研究への展開や，民間企業と連携した研究推進の可能性について，今後の議論の足掛かりを作ることができた．また，地上実験においては，大気圏再突入環境の模擬・気流評価に要する主要な機器の導入をすべて完了することができた．実験では今後，発光分光及び高速度カメラ撮影を通じて超音速流れ場中での金属粒子生成過程を解明するとともに，粒子捕集効率の向上に取り組むたい．その後は各種加熱条件下での粒子特性を反映させた気候シミュレーションを通じて宇宙ゴミ再突入に起因する金属エアロゾル粒子と高層大気，特にオゾン層との相互作用を明らかにすることを目指す．

■ 成果発表

市原大輔，宇宙ゴミ再突入に伴うエミッション粒子測定，日本航空宇宙学会西部支部講演会，KDDI 維新ホール，2025年11月21日