

SIC 有人宇宙学研究センター News Letter 2022年4月号

DMG 森会長のご挨拶

京大思修館 SIC 有人宇宙学研究センター

「News Letter」ご挨拶文

昨年6月のSIC有人宇宙学研究センター開講以降、セミナーやスペースキャンプの実施等、様々な研究活動を展開されていることを大変喜ばしく思っております。これもひとえに山敷教授や土井宇宙飛行士をはじめとする先生方と学生の皆さんのたゆまぬ努力の賜物と存じます。

当社が製造している工作機械は別名「マザーマシン」と呼ばれ、あらゆる産業で活用いただいています。2000年頃はお客様の約40%が自動車産業でしたが、ここ20年程で航空宇宙産業が飛躍的に拡大し、現在はヴァージンオービット社をはじめ数多くの欧州・米州の航空宇宙産業でご利用いただいています。今後ますます当社と航空宇宙産業との結びつきが強まると考えていますので、様々なご要望にお応えできるよう不断の努力を重ねて参ります。

また、われわれは工作機械の製造販売のみならず、トータルソリューションプロバイダとしてお客様のあらゆる課題を解決し、「工程集約・自動化・デジタル化」を積極的に推進しています。当社が長年培ってきた経験と最先端の技術を更にご活用いただき、航空宇宙分野において大きなイノベーションを生み出す一助となれば大変光栄です。

今後も皆様と共に成長し、持続可能なより良い宇宙社会の構築を目指していきたいと考えています。SIC有人宇宙学研究センターのますますのご発展と皆様のご活躍を心よりお祈り申し上げます。

特定助教着任のご挨拶

三木健司先生

(京都大学大学院総合生存学館特定助教)

この度総合生存学館に着任することになりました、三木健司です。京都大学農学部出身で、京都大学大学院農学研究科で博士（農学）を取得しました。博士論文では大気中の花粉粒子の動きを計算して、どのようにサンプルすれば花粉の大気中濃度や影響評価をできるかを研究していましたが、博士取得後、ポスドク時代に東京工業大学地球生命研究所で研究対象を花粉から微生物やウイルスを含めた生物粒子全般に広げ（時に鳥や虫も対象とします）、今も大気生物学者として研究しています。現在最も力を入れて研究しているテーマは、成層圏への生物粒子の輸送過程と成層圏環境におけ

る生物活性の安定性です。成層圏というのは上空約 20km から 80km の大気層のことですが、要は、宇宙と地球の間では、生物は存在しているのか？また、生物学的に安定して存在していられるのか？という研究です。これは専門である大気生物学としても重要ですが、なにより宇宙生物学的な意味合いを持った研究です。研究の詳細もついでには今回は割愛しますが、花粉を研究していた人間が、どうして宇宙生物学に取り組んでいるのかをご紹介しますので、自己紹介に代えさせていただきます。

宇宙との出会いは 2013 年、2 回生から 3 回生に上がろうかという頃です。当時交換留学でイギリスのマンチェスター大学で、私以外全員白人のイギリス人というなかなか今日日出会うことがない環境で、1 人受けていた大気物理の授業で JAXA のデータが使用されているのを見た時、宇宙科学への日本の貢献を知り、宇宙関連で頑張れば自分も日本から何か貢献できるかも！と、浅く考え、そのころから宇宙と付くものには全て触れてみるという学部生時代を過ごしました。その後、修士課程時代にオックスフォード大学で研究奨学生として砂嵐により比較的高所に吹き上げられた砂の研究をすることで、高いところに粒子が舞い上がることに興味を持ち始めるきっかけを得ました。さらに、博士進学してすぐの頃 – 唐突ですが、この頃に土井隆雄先生から月に鳥居を建てたいとご相談を受けたのを、宗教的建築物を月に建てるのはよろしくないという理由から人工衛星に変えたのが現在の LignoSat の始まりです –、当時理学部准教授の磯部洋明先生とウイルス・再生医科学研究所准教授の宮沢孝明先生から、成層圏における宇宙線の DNA 影響が及ぼす DNA 突然変異の研究に誘っていただいたことが決定打となり、宇宙×粒子=成層圏の微生物 という式が自分の中で成立し（これは公に成立する式ではありません）これこそが自分にしかできない研究テーマなのだと信じて取り組むことになりました。この式が成立してからは、成層圏の微生物の研究をしていた NASA Ames Research Center で訪問研究員をした後、博士を取得後は、東京工業大学地球生命研究所においてポストドクをすることで、成層圏において生物は物理学的・生物学的にどのような挙動を示すのかを専門的に解析するための土壌を構築することを目指して、現在も成層圏の生物粒子を研究する大気生物学者として研究を続けています。



3 月の活動

MHI-京大宇宙関連協力セミナー

MHI-京大宇宙関連協力セミナーが京都大学北部キャンパス 小林・益川記念室と Zoom を用いたハイブリッド形式で、2022/03/26（土）の 13：00～16：30 にて開催された。「現代社会課題の解決を図ると同時に深宇宙探査・低軌道商業化への貢献を目指す宇宙活動を考える」を目標に、MHI からは高村昭裕さん、京都大学からは寺田昌弘先生、山敷庸亮先生、曾



東元喜さんの合計 4 人の登壇者がそれぞれ、医学、科学、工学の観点から「社会課題×宇宙 to 低軌道利用促進」「宇宙探査時代の宇宙医学」「宇宙放射線」「木造人工衛星」といったテーマで発表し、今後あるべき宇宙開発体制や宇宙医学の目標、宇宙実験のテーマ間のつながりの見直しなど、様々な興味深い議題がディスカッションで取り扱われた。

この場に参加していた著者も、学生の身でありながら実際の大企業が宇宙に期待する未来や、宇宙開発に対するプロとしての強い信念などに触れることができ、自身の宇宙への思いと社会が見ている宇宙とが繋がった貴重な経験となった。現在携わっている木造人工衛星の意義や期待する人達の気持ちに改めて触れ、今後の活動に身が引き締まる思いである。(菊川祐樹 記)

2022 年前期講義のご紹介

水惑星地球

(科目名)水惑星地球 (英 訳) Earth, the Water Planet

担当 総合生存学館教授 山敷 庸亮

(分野(分類)) 複合領域系 (使用言語) 英語 (日本語)

(単位数) 2 単位 (週コマ数) 1 コマ (授業形態) 講義

(開講年度・開講期) 2022・前期 (配当学年) 大学院生 (対象学生) 全学向

(曜時限) 水 3

(教室) 東一条館 201 大講義室

(授業概要) 本講義においては地球が水惑星として誕生した地球惑星科学的条件について焦点をあて、他の地球型惑星との比較、放射平衡温度(黒体温度)と惑星探査機による惑星表面温度との比較からそれぞれの惑星の大気による温室効果の比較、また暴走温室効果や雪玉地球形成条件から水惑星として存在しうる条件について学ぶ。また地球史の学習を通じて海洋と大気の形成条件と、海洋循環や水文循環プロセスがもたらす気候安定効果について学び、そのシステムが機能しなくなった際の極端事象について学ぶ。また大量絶滅事象を学習することにより、地球生態システムを維持するための要因について学ぶ。また同時に、地球と類似の環境を持ちうる太陽系外惑星についてその分類方法とハビタブルゾーンの定義について太陽系外惑星データベース ExoKyoto を用いて学ぶ。

(授業計画と内容)

【第 1~2 回】 地球型惑星それぞれの比較を通じて水惑星地球の形成について学ぶ。地球型惑星それぞれについての太陽定数・惑星アルベドを利用した放射平衡温度(黒体温度 Blackbody Temperature)算定を通じて、各惑星における大気の組成比較とその温室効果の違いについて学ぶ。

【第 3~4 回】 海洋形成の条件 1 -金星を例にとり暴走温室効果(Runaway Greenhouse Effect)と射出限界(Critical Flux)について学ぶ。同時に、太陽の影響についても学ぶ。

【第 5 回】 海洋形成の条件 2 -雪玉地球(Snowball Earth)を例にとり、水文プロセス形成条件について学ぶ。

【第 6 回】 大気海洋相互作用-エルニーニョ南方振動(ENSO)とインド洋ダイポールモード(IOD)について学ぶ。

【第 7 回】太陽面活動現象が地球に与える影響(宇宙天気)について学ぶ

【第 8 回】太陽の長期変動が地球気候に与える影響(宇宙気候)について学ぶ

【第 9～10 回】地球惑星形成の歴史 1 -月誕生過程について、ジャイアント・インパクト説をもとに解説する。

【第 11 回】地球惑星形成の歴史 2 -雪玉地球(Snowball Earth)時代の証拠とその大気組成への影響(過酸化水素の生成による酸素濃度増加説)、海洋凍結による海洋循環停止の影響について学ぶ。

【第 12 回】地球惑星形成の歴史 3 -ペルム期末大量絶滅(P-T 境界事変)と海洋無酸素事変(Oceanic Anoxic Events - OAEs)について学ぶ。

【第 13 回】地球惑星形成の歴史 4 -白亜紀末大量絶滅(K-Pg (K-T) 境界事変)と隕石衝突説、またその証拠とされる K-Pg(K-T)境界層のイリジウムについて学ぶ。

【第 14 回】地球惑星形成の歴史 5 -新生代・完新世の大量絶滅の可能性について学ぶ。

【第 15 回】ExoKyoto を利用して太陽系外惑星、ハビタブルゾーンについて学び、水惑星を守り、生命を維持してゆくための仕組みについて学ぶ。

【第 16 回】フィードバック

講義期間中の晴天日の夜に、望遠鏡や双眼鏡を用いた太陽系の惑星および天体観測を行っている。場所は大学キャンパス、大学周辺および花山天文台である。(山敷庸亮 記)

今後の宇宙関連イベントなど

日時	内容	開催方法
4月17日 13:00~14:30	火星に住もう！(住友林業 鹿島建設 present) 「有人宇宙活動」講師：土井隆雄 詳細： https://www.oybc.co.jp/mananto	教室 & オンデマンド

LignoSat 紹介

木造人工衛星学生開発チーム

3月号では超小型人工衛星 LignoSat 開発チームのうちの一つ、STRUC 班の活動紹介をいたしました。今月は、EPS 班の活動紹介をいたします。

EPS 班では、LignoSat の電力系の統括を行い、バッテリーセルの選定から、太陽光パネルの発電量確認、衛星全体の電力収支の計算などを担当します。また、電力系についての安全審査に関わる検証試験、解析等を担当します。

○木材と PCB 基板のせん断接着力試験

LignoSat では、木造構体と太陽光パネルを直接接着するのではなく、二つの間に PCB 基板を接着します。しかし、宇宙環境における木材と PCB 基板との接着は前例がありません。そのため、木材と PCB 基板の接着評価を行ってきました。

具体的には、接着剤を木材と PCB 基板のどちら側に塗ると接着力が強くなるのか、などの条件を分けて試験体を作成し、写真にある機械でせん断接着力を計測しました。そして、実験結果から大まかな接着方法を確立することができました。今後は宇宙環境を模擬した条件に試験体を晒すことで、実際に宇宙の過酷な環境下でも木材と PCB 基板の接着力が保たれることを目指します。

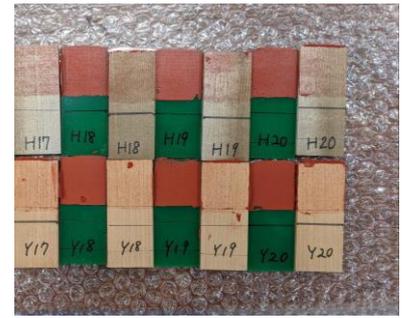


図 1 せん断後の試験体

○セルスクリーニング

LignoSat のバッテリーは市販の二次電池から構成されています。バッテリーに使用する電池の性能を評価し、同一製品の中でもより適した電池をバッテリー用として選定するため、私たちの班ではセルスクリーニングを実施してきました。

セルスクリーニングは宇宙空間を想定した環境試験と電池の性能評価から成り、そこで得られたデータをもとに電池の選定を行います。私たちは環境試験として振動実験、高真空曝露実験を、またその前後で電池の充放電による性能評価を計 3 回実施して機体に搭載するバッテリー用電池を選定しました。



図 2 性能評価試験環境

○太陽光パネル用基板（PCB 基板）作成

LignoSat の電力は、太陽光パネルで発電したものでまかないます。そのため太陽光パネルを外壁に設置し、電力を内部に供給するために基板を製作する必要がありました。

九工大のものを参考に、よりサイズや素子の位置等に制約がある中、電力を適切に供給できるように工夫し、3D モデルなどを駆使して物理的、電気的確認を他班ととりながらデザインしました。（EPS 班 福王悠星 記）

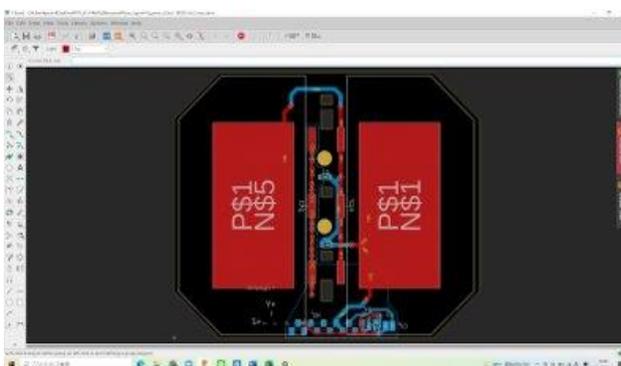


図 3 太陽光基板の配線図

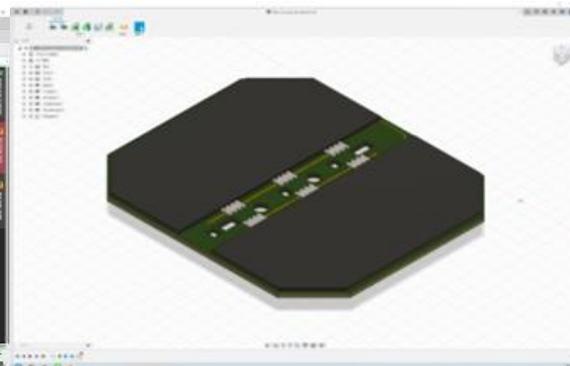


図 4 太陽光基板の 3D モデル

低圧下樹木育成プロジェクト紹介

樹木育成学生チーム

一定低気圧に維持した密閉チャンバー内での育成実験により樹木の低大気圧下での成長特性の究明に向け取り組む本研究について、前回に引き続きご説明します。

今回は本研究の新規性について冒頭に説明いたしましたが今回はなぜ樹木に注目して研究を行っているのかということについて説明したいと思います。近年公的機関に加えて企業などが参入することにより活発な宇宙開発が行われるようになっていきます。それに伴って将来的に研究や資源、土地の獲得のために月や火星における社会を実現させようという動きも次第に強まっています。本研究は火星における樹木育成に関する研究ですが、ただ単に火星に行くだけなら地球から資源を輸送すればよいので樹木を育成する必要はまったくありません。しかし火星において社会を実現することによって目を向けた場合現地で酸素を賄い、資源を調達する必要があります。そこで大きな役割を果たすのが樹木です。樹木、そして森林においてそれが極相に達するまではしばしば酸素の放出量が吸収量を超えます。すなわち全体を見れば酸素を放出していることとなります。これは人間の生存に重要な役割をもつということは自明であり、いかに樹木の育成が重要かということがわかつていくと思います。また樹木は建築材料や各種素材として利用することができるとともに地球外環境下で樹木の育成に成功することによって資源の輸送コストの削減にもつながります。そのため火星における樹木育成は非常に意義のあることであるといえるでしょう。

こうした樹木利用の可能性を広げていくために前回に引き続き3月から0.3気圧における樹木育成実験をスタートさせました。二酸化炭素濃度調節システムに問題が起こっていたためシステムを改善し、実験を行っています。0.1気圧以上1.0気圧以下の気圧環境においては1.0気圧よりも成長速度が高いということが分かっているため、この現象が起こるメカニズムについても追加検証を行い、考察を行っていきたくと考えています。

また研究以外の取り組みとして植物に対する理解を深めるためにゼミを行っています。2週間に1回程度植物生理に関する本や論文を学生が読み、それをまとめてチーム内で発表する形式や、先生からの解説を聞くという形式で実施します。各回のテーマに沿って様々な質問や議論を行うことによって自分の視点では気づかなかったことに気づき、新たな知識を得たりすることができるため、非常に有意義なものとなっています。研究を行うにあたって知識がかなり必要になる場面も多いためこれからも引き続きゼミを行い、植物に対する理解を深めていきます。(豊西悟大 記)



図1 0.5気圧下のポプラ



図2 1.0気圧下のポプラ

研究紹介

金属製宇宙機の再突入が中層大気環境に与える影響の考察

曾東元喜（京都大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻）

三木健司（京都大学大学院総合生存学館）

土井隆雄（京都大学大学院総合生存学館）

1. 目的および背景

これまでの人類の宇宙活動において、アルミニウムなどの金属をはじめとした人工材料が宇宙機や国際宇宙ステーションの主要な構造体材料として利用されてきた。これらの構造体の中でも、超小型人工衛星をはじめとした低軌道上を周回する宇宙機や、宇宙空間でのミッションを終えた多段ロケットの残骸などは、運用終了後スペースデブリの発生源にならないように大気圏に再突入させられることが一般的である。このような再突入時、これらの宇宙機は地上落下前に完全に燃え尽きるようにすることや、たとえ破片が残った場合でも海洋などへ安全に落下させることが要求される。しかし、中層大気内で燃焼したこれらの宇宙機は、燃焼後は微細なアルミナ粒子を発生させる。中層大気に滞留している微小粒子は長期間中層大気にとどまることで、環境汚染を引き起こす可能性が指摘されてきており、例えば、固体ロケット燃料から生じた粒子の成層圏における長期間の滞留の影響などが先行研究では調べられている⁽¹⁾⁽²⁾。今後、人工衛星をはじめとした宇宙機の利用の頻度が急増すれば、このアルミナ粒子による大気汚染問題はますます顕著になることが予測される。しかしながら、金属製宇宙機の再突入が地球大気環境にもたらす悪影響について詳細に調査した研究はこれまで行われていない。

本研究では、宇宙機の中でもとりわけ人工衛星に着目し、それらの再突入によって発生したアルミナ粒子が高度 15~70km の中層大気環境に及ぼす影響について、数値シミュレーションの結果を用いて考察することが目的である。中層大気に蓄積しているアルミナ粒子数のオーダーを求めるのに先立ち、まず中層大気間にアルミナ粒子がどれほどの期間滞在することができるのかを数値シミュレーションにより求めた結果を紹介する。そして、その解析結果を元に中層大気に滞在している全アルミナ粒子数のオーダーを算出し、それらが地球アルベドをどの程度変化させうるかを考察する。さらに、今後の宇宙機利用の拡大により大気中のアルミナ粒子がどれほど増加すれば地球平均気温に有意な影響が生じてくるかを、アルベドと平均気温の関係式をもとに考察した結果を示す。

2. 中層大気での粒子の滞留時間の推算

中層大気下に蓄積しているアルミナ粒子数のオーダーを求めるため、本研究グループはまず中層大気に存在する一般のエアロゾル粒子に対する力学的方程式から粒子の鉛直方向の上昇/下降終端速度を算出し、その結果を元に中層大気に粒子が滞留することのできる時間を求めるシミュレーション理論を作成した。以下にその解析理論及びシミュレーションの結果を簡単に紹介する。

2.1 解析理論

エアロゾル粒子の鉛直方向の運動の終端速度 V の計算には、粒子と周辺空気の密度の差により生じる浮力項、Stokes の抵抗則より導かれる空気抵抗項、地球及び太陽による重力項、太陽からの放射圧 P_S 及び太陽光による光泳動の効果 $F_{\Delta T}, F_{\Delta\alpha}$ による寄与を考慮した⁽³⁾。ここで、光泳動とは粒子及び周囲の気体分子に太陽光が照射される際、それらの温度に勾配が生じることで粒子が周囲の分子から運動量を受け取り移動する現象のことである。特に、成層圏内では太陽の方向に粒子が移動する光泳動(negative photophoresis)が生じることが確認されている。成層圏内の粒子が光泳動によって鉛直上方向か下方向のいずれに運動するかは、粒子の種類や形状などの様々な要素に起因する。以下では先行研究における条件と同様に、アルミナ粒子には下方向の力 $F_{\Delta T}$ と上方向の力 $F_{\Delta\alpha}$ が働くと仮定した。また、ここでは成層圏及び中間圏での対流による大気の運動は考慮しないものとし、静圧下における粒子の終端速度を求めた。粒子に関する運動方程式は次のように表される。

$$\frac{4\pi r^3}{3}(\rho_p - \rho_f)g + P_S\pi r^2 - G_S - 6\pi\mu rV + F_{\Delta T} - F_{\Delta\alpha} = 0 \quad (1)$$

ここで、太陽による重力項は地球の公転によってその力の向きが時事刻々と変わることから、1年間での重力項による寄与の期待値は 0 と見なすことができ、 $G_S = 0$ の仮定が成り立つ。したがって(1)式により終端速度 V は

$$V = \frac{\frac{4\pi r^3}{3}(\rho_p - \rho_f)g + P_S\pi r^2 + F_{\Delta T} - F_{\Delta\alpha}}{6\pi\mu r} \quad (2)$$

と求められる。

各項についての詳細は Miki (2020)⁽⁴⁾を基にした。

2.2 解析結果

表 1 に今回の解析で用いたアルミナ粒子に関する各種パラメータ及び初期高度をまとめて示す。

表 1 本解析で用いた各種パラメータ

Name	Value
Density of the particle	3,950kg m ⁻³
Radius of the particle	5.0×10 ⁻⁷ m
Thermal conductivity of the particle	30.0 W m ⁻¹ K ⁻¹
Initial altitude	70,000 m

シミュレーション結果を以下の図 1 に示す。70km 上空に存在する粒子が徐々に落下することでその高度を下げていく様子が確認される。解析の結果から、高度 70km の位置から落下を始めた直径 1 μ m のアルミナ粒子が中層大気層に滞留できる年数 t_{ret} はおおよそ 42 年程度であることがわかった。

成層圏内の粒子に働く光泳動の効果 $F_{\Delta T}, F_{\Delta\alpha}$ の向きは粒径にはほぼ依存しないが、それらの大きさは粒径（粒子表面積）に依存する。数値シミュレーションによれば直径 0.1 μ m のアルミナ粒子につい

ては、静止圧下においては光泳動効果のために地上に落下せず、上昇する力が優位となった。直径 $10\mu\text{m}$ のアルミナ粒子は、地球重力の効果により落下速度が大きくなり、中層大気に滞留する時間は約 50 日となった。以上の事から、アルミナ粒子の粒径によって中層大気に滞留する時間が大きく異なることがわかる。以下の議論では、アルミナ粒子径を $1\mu\text{m}$ と仮定して解析を進めることにする。

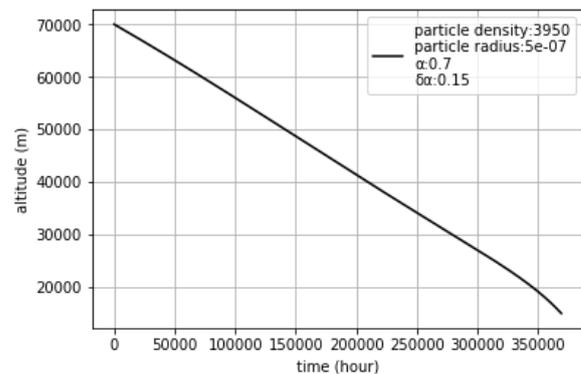


図 1 アルミナ粒子落下のシミュレーション

3. 中層大気における滞留アルミナ粒子数の概算

上で求めたアルミナ粒子の中間大気層における滞留時間 t_{ret} をもとに、中層大気において滞留している全アルミナ粒子数 N の推算を行うことを考える。ここで、本研究では人工衛星の再突入により発生するアルミナ粒子のみを扱うことを先に述べたが、通常、中型～大型の人工衛星は運用期間が数年～数十年と長く最終的には墓場軌道へと軌道変更させて処理されたり、あるいはスペースデブリとなってその生涯を終えることが多いため、今回の議論の対象からは除外した。したがって、今回の研究では運用後大気圏再突入処理をされることが多い質量 50kg 以下の超小型衛星を対象とした。

人工衛星の 1 年間あたりの総打ち上げ数を f 、人工衛星の平均質量を m_{ave} とし、人工衛星の材料組成の 80% がアルミニウムであると仮定する。この時、アルミニウムの完全燃焼反応における Al 原子及び Al_2O_3 分子のモル質量比の関係を用いて、1 年間で打ち上げられる全人工衛星により発生するアルミナ粒子数 n を以下のように求めることができる。

$$n = f \cdot \left(\frac{17}{9} \cdot 0.8 m_{\text{ave}} \right) / \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_p \right) \quad (6)$$

打ち上げられた衛星の質量や軌道要素にはばらつきが存在するため、再突入するまでにかかる時間は半年～数年と衛星によって幾分幅があることが考えられる。しかしここでは簡単のため、1 年間で打ち上げられた衛星により将来的に発生するアルミナ粒子数が、1 年間の衛星打ち上げによってその年内で発生するアルミナ粒子数に等しいとして考えている。以上より、中間大気層に滞留している全アルミナ粒子数は $N = n t_{\text{ret}}$ と求められる。

日本国内における統計調査によると、2018 年度に世界で打ち上げられた Micro クラス以上（質量 10kg 以上）及び Nano クラス（質量 10kg 以下）の衛星数の合計はおよそ 450 機程度であった⁽⁵⁾。このことから仮に $m_{\text{ave}} = 25\text{kg}$ 、 $f = 450$ とし、先述の通り衛星のアルミニウム組成比を 0.8 と仮定して、これらの衛星全てが理想的に再突入によって完全燃焼するとした場合に生成されるアルミナ粒子数を考えると、2.2 の解析結果と表 1 のパラメータ及び式(6)を用いて、 $N = 3.5 \times 10^{20}$ と見積もることができる。

4. アルミナ粒子層による地球アルベド変化量の推定

以下では、上記で算出したアルミナ粒子数から得られる中層大気中でのアルミナ粒子密度を元に、アルミナ層により生じる地球アルベドの変化量を見積もる。

4.1 計算理論

ここでの議論で扱うエアロゾル粒子の粒径は $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$ 程度を想定しているため、太陽光の散乱を考える際には Mie 散乱の理論を用いることができる。Mie 理論では散乱効率 K_{scat} の値は粒子のサイズパラメータ及び屈折率のみに依存し数値的計算によって算出される (Penndorf, 1957⁽⁶⁾)。この時、粒子の散乱断面積 $\sigma = \pi r^2 K_{\text{scat}}$ 及び中層大気中での数密度 n_p を用いて、消散係数 b は $b = \sigma n_p = \pi r^2 K_{\text{scat}} n_p$ と表される。エアロゾルの粒子層の光学的深さ τ は、積分区間を任意の高度 $z\sim z'$ として以下のように定義される。

$$\tau = \int_z^{z'} b dz = \int_z^{z'} \pi r^2 K_{\text{scat}} n_p dz \quad (7)$$

天頂から入射する直射太陽光がエアロゾル粒子層に進入し散乱・吸収・反射の作用を受ける時、地球アルベドの変化量 ΔA は地表面アルベド A を用いて無限級数的計算から以下のように求められる。

$$\Delta A = \left\{ f_{\text{up}} + \frac{f_{\text{down}}^2 A}{1 - A f_{\text{up}}} \right\} - A \quad (8)$$

ここで、 f_{up} と f_{down} は光の粒子層上空への反射率及び地表への放射率を表す。これらは、粒子層の単一散乱アルベド ω 及び上方散乱率 β を用いて以下のように表される。

$$f_{\text{up}} = \omega \beta (1 - e^{-\tau}) \quad (9)$$

$$f_{\text{down}} = e^{-\tau} + \omega (1 - \beta) (1 - e^{-\tau}) \quad (10)$$

中層大気におけるアルミナ粒子の数密度は高度 z に依らず一様であると仮定して、アルミナ粒子層によって生じるアルベド変化量の計算を式(8)を用いて行なった結果を以下に示す。

4.2 計算結果

アルミナ粒子の散乱効率 K_{scat} を決定するため、粒子のサイズパラメータを可視領域における光の波長 (約 $0.5\mu\text{m}$) 及び粒子半径 ($0.5\mu\text{m}$) の値を用いて見積ると、約 6.3 となった。アルミナの屈折率がおよそ 1.77 であることから、van de Hulst (1957)⁽⁷⁾ による文献値から、 $K_{\text{scat}} = 2.3$ という値が得られた。また、3 の議論で得られた滞留アルミナ粒子数 N の値及び中層大気層の体積の値を用いることで、アルミナ粒子数密度 n_p を計算することができる。ここで、数密度 n_p は大気中の鉛直方向の高度 z に依存しないため、(7)の被積分関数は変数 z に関して独立に計算される。

以下の表 2 に、アルベド変化量 ΔA の計算に用いた各種パラメータをまとめて示す。ただし、(7)の積分において積分区間は高度 $z = 15\sim 70 \text{ km}$ の中層大気範囲とした。

表 2 アルベド変化量計算に用いた各種パラメータ

Name	Value
Scattering efficiency of the particle	2.3
Number density of the particles	12.2 m^{-3}
Extinction coefficient of the particle	2.2×10^{-7}
Optical depth	1.2×10^{-6}
Albedo of the underlying surface	0.33
single scattering albedo of the layer	1.0

up-scatter fraction	0.8
---------------------	-----

以上より、表 2 の各パラメータ及び式(8)-(10)を用いてアルベド変化量 ΔA を求めた結果、 $\Delta A = 4.3 \times 10^{-7}$ と求められた。この結果から、現状世界で打ち上げられている人工衛星によって生じるアルミナ粒子層は、地球アルベドの変化量にほとんど影響を及ぼしていないと考えられる。

以下の図 2 は、式(7)-(10)を用いてアルミナ粒子数密度 n_p と地球アルベド変化量 ΔA の関係性を示した片対数グラフである (n_p を対数プロットしている)。ただし、計算に用いた各種パラメータは表 2 と同様である。図 2 から、粒子数密度 n_p が現状の 10^4 倍程度以上($n_p \geq 10^5$)になると、アルミナ粒子数の増加のアルベド変化量に対する影響がより顕著になることがわかる。今後さらに宇宙機利用の機会が増加し大気中のアルミナ粒子数が急増すれば、前述の通り地球の太陽エネルギー収支が変化し地球大気環境に様々な二次的影響が生じる可能性がある。そこで以下では、アルミナ粒子による地球アルベド変化が地球の平均気温の低下にどれほどの影響を与えるかについて考察する。

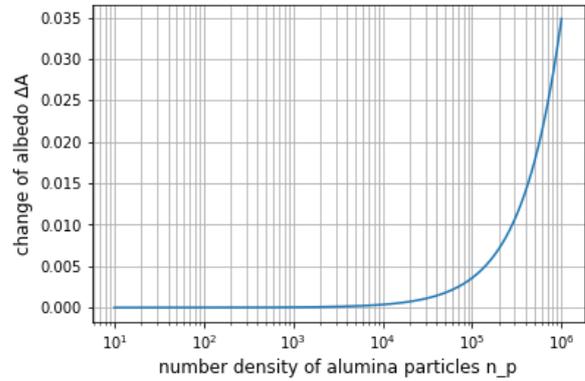


図 2 粒子数密度とアルベド変化量の関係

5. 地球アルベド変化と平均気温変化の関係

太陽-地球間の距離を d (m)とする時、地球により吸収される太陽エネルギー量及び地球からの輻射エネルギー量の釣り合いを考えることにより、以下の式が成り立つ。

$$\frac{F_0}{4\pi d^2} (1 - A) \pi R^2 = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4 \quad (11)$$

すなわち、地球表面温度 T とアルベド A の間に次の関係が成り立つ。

$$T^4 = \frac{F_0}{16\pi d^2 \sigma} (1 - A) \quad (12)$$

表面温度及びアルベドがそれぞれ ΔT , ΔA だけ変化したとすると

$$(T + \Delta T)^4 = \frac{F_0}{16\pi d^2 \sigma} (1 - A - \Delta A) \quad (13)$$

が成り立つので、式(12)及び(13)から

$$\left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)^4 = 1 - \frac{\Delta A}{1 - A} \quad (14)$$

となる。 ΔT が微小であると仮定すれば

$$1 + 4 \frac{\Delta T}{T} = 1 - \frac{\Delta A}{1 - A} \quad (15)$$

であるから、

$$\Delta T = -\frac{1}{4} \frac{T}{1 - A} \Delta A \quad (16)$$

と計算でき、 $\Delta T \propto \Delta A$ であることがわかる。地球の黒体温度 $T \approx 250$ (K)及び地表アルベド $A = 0.33$ の値を代入すると $\Delta T \approx -93\Delta A$ となるから、地球アルベドの値が約 0.01 増加すると地球の平均気温が 1

度低下するという結果が得られる。

6. 結言

成層圏に滞留する粒子の数は、人工衛星の地球再突入の頻度と粒子の成層圏への滞留時間の関係に依存する。今回の解析は、太陽光がもつ光泳動の力を最大限に考慮した結果であり、粒子は数十年単位で成層圏に滞在する可能性が示唆された。このため、仮に人工衛星の再突入時に生じた粒子すべてにこのような力がかかった場合、成層圏に滞留する粒子の数は今後の宇宙開発が進むにつれて深刻な増加を見せることが予想されるが、先行研究の実測などでは、成層圏における粒子の大部分がおおよそ 2 年で成層圏から対流圏に落下することも示されており、今回の結果は、実際よりも深刻なケースを考慮していると考えるのが妥当である。

また、上述の一連の計算では、代表的な宇宙材料であるアルミニウムに着目したが、地球環境への影響も粒子の物理的特性に大きく依存する。成層圏における粒子が太陽光を単純に遮る場合は粒子の増加が太陽光を遮ることで気温の低下を引き起こすことが示されたが、例えば成層圏にすすなどの黒鉛粒子が増えるとアルベドが下がる一方で、黒鉛粒子が持つ吸熱効果により温度の地球が持つ黒体温度の上昇を引き起こす可能性も考えられる。また、成層圏において黒鉛粒子が存在する場合、粒子が成層圏を通して全地球的に輸送され、最終的に極域に沈着することが考えられる。この場合、極域の氷上の吸熱効果が上昇し、北極や南極の氷が溶けて海面上昇につながる恐れもある。

以上のように、成層圏への宇宙開発の影響は、まだほとんど取り組まれていない研究課題ではあるが、様々な影響を及ぼす可能性が考えられ、今後重要性を増すと考えられる。

参考文献

- 1) Hanning-Lee, M. A., Brady, B. B., Martin, L. R., and Syage, J. A.: Ozone decomposition on alumina: Implications for solid rocket motor exhaust, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 23, 1961-1964, 1996.
- 2) Danilin, M.Y., Shia, R.L., Ko, M.K.W., Weisenstein, D.K., Sze, N.D., Lamb, J.J., Smith, T.W., Lohn, P.D., and Prather, M.J.: Global stratospheric effects of the alumina emissions by solid-fueled rocket motors, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 106, 12727-12738, 2001.
- 3) Wurm, G. and Krauss, O.: Experiments on negative photophoresis and application to the atmosphere, ATMOSPHERIC ENVIRONMENT, 42, 2682-2690, 2008.
- 4) Miki, K.: Preliminary analysis of aerosol particle deposition in the middle atmosphere, EAROZORU KENKYU (in press).
- 5) 寺嶋明尚: 世界の宇宙産業動向, 日本航空宇宙工業会 ; 工業会活動, 789, 14-22, 2019.

京都大学大学院総合生存学館

SIC 有人宇宙学研究センターロゴ募集

募集要項

2022年1月より、SIC 有人宇宙学研究センターでニュースレターを発行することとなりました。それに伴い、SIC 有人宇宙学研究センターのロゴの募集をいたします。SIC 有人宇宙学研究センターは、以下のように、五つの研究領域があり、各々が研究活動をしています。



これらを踏まえたロゴを募集いたします。その後、募集したロゴをニュースレター編集会議にて決定いたします。

応募期日：2022/5/31(火)

応募方法：tsutsui.ryosuke.26e@st.kyoto-u.ac.jp まで、氏名、所属とともにお願いします。

結果発表：SIC 有人宇宙学研究センターの公式 Twitter にて発表いたします。

問い合わせ：tsutsui.ryosuke.26e@st.kyoto-u.ac.jp

木造人工衛星学生開発チーム 菊川祐樹 筒井涼輔

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター
<https://space.innovationkyoto.org/>

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 吉田キャンパス本部構内 総合研究 16 号館 208 号室

編集人：菊川祐樹 筒井涼輔

Tel&Fax: 075-753-5129 Email: spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp