

Artificial meteor entry: sensitivity analysis and brightness computation

木村菜摘, 佐原宏典 (首都大学東京)

○Lemal Adrien, 蒲池康, 岡島礼奈 (株式会社 ALE)

Artificial meteor entry: sensitivity analysis and aerothermodynamics

Natsumi Kimura, Hironori Sahara (Tokyo Metropolitan University)

○Adrien Lemal, Koh Kamachi, Lena Okajima (ALE Co.,Ltd.)

Key Words: Artificial Meteors, Reentry Aerothermodynamics, Sensitivity Analysis

Abstract

This paper presents the computation of the trajectory features of the artificial meteor released from the satellite during its entry into Earth's atmosphere. We developed a hybrid simulation framework which computes the orbit, the mass and velocity evolution, the flow and spectral properties. The drag, heat transfer and mass-shape coefficients, as well as the heat of ablation were varied within reasonable ranges taken from the literature and their influence on the trajectory profile, mass loss rate, heating and brightness were discussed and highlighted. The shooting star ablation and brightness were shown to be complete at altitude above 60 km and to reach magnitude of -1.4 for some materials, thus demonstrating the safety, performance and relevance of the mission for the public.

1. 研究背景

Astro Live Experiences 社 (以下, 株式会社 ALE) は, 様々な色で明るく光る流れ星を人工的に発生させ, 世界初の天体ショーを世界中で実現することを目指している. この目的を達成するため, 株式会社 ALE と首都大学東京は人工流れ星の軌道及び大気圏突入時に流れ星が発する明るさを計算するシミュレータを開発した. 流れ星の明るさはその運動エネルギーの一部が空気力学的・熱的な効果によって光に変換されることで決定付けられるが, これは流れ星の粉碎や融解, 蒸発など複雑なメカニズムを含むため未だ詳細な知見は得られていない. その支配パラメータとしては抗力係数, 熱伝達係数, 幾何学的質量係数が挙げられるが, これらには大きな不確実性が残されており, これが流れ星の軌道や発光強度に及ぼす影響は極めて重要なものとなる^{1,2)}. そこで本論文では, 軌道シミュレータにおける支配方程式を示し, 抗力係数及び熱伝達係数のモデルが人工流れ星の再突入とその発光強度に対して及ぼす影響について述べる.

2. シミュレータ概要

2.1. 軌道計算

先行研究にて, 流れ星の軌道及び質量損失を表す支配方程式が示されている³⁾. ここで, 抗力係数 C_d ,

単位時間あたりに流星に供給されるエネルギーのうちアブレーションによる質量減少に要するエネルギーが占める割合を表す熱伝達係数 C_h , アブレーション現象を起こすために単位質量当たりが必要となる熱量 L^* の3つのパラメータが特に重要なパラメータであった.

2.2. 大気モデル

地球近傍で運動する物体は大気中に含まれる原子や分子が衝突することによって抵抗力を受け, これは低軌道を周回する衛星や再突入物体の軌道に大きな影響を及ぼす. 本シミュレータでは大気モデルとして, 米軍海軍研究所 (the U.S. Naval Research Laboratory) が公開している NRLMSISE-00 を使用した⁴⁾. このモデルから取得した大気密度及び大気温度の高度分布を図 1 及び図 2 に示す.

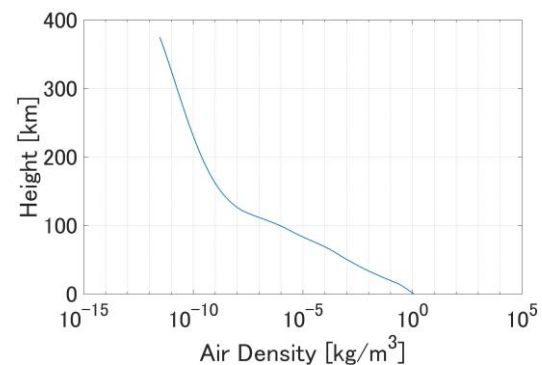


図 1 大気密度の高度分布

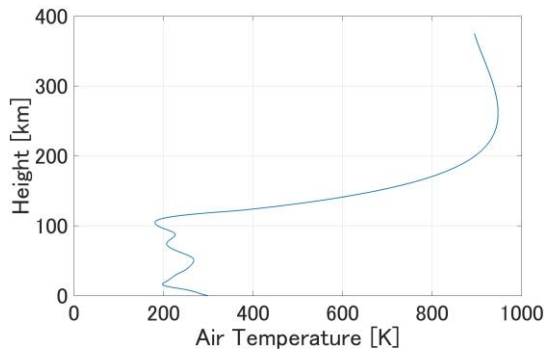


図 2 大気温度の高度分布

さらに、Sutherland の式を用いて求めた大気粘度の高度分布を図 3 に示す。

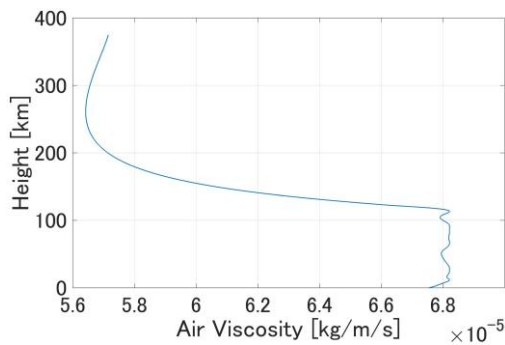


図 3 大気粘度の高度分布

2.3. 空力計算

本研究では、2次元ナビエ・ストークス方程式に関する CFD ソルバである JONATHAN (JAXA Optimized Nonequilibrium Aerothermodynamic Analysis) を適切な境界条件のもとで用いることで、質量、運動量、全エネルギー及び振動エネルギーに関する流体方程式の計算を行った⁵⁾。

2.4. 発光強度計算

物質が気相として存在するときのスペクトル特性は NIST のデータベースを用いて計算した⁶⁾。ここで、可視範囲では光学的に薄いと仮定し、地上に到達する光の強度とその等級は放射輸送方程式によって算出した⁷⁾。

2.5. 解析条件

本研究では、まず流星源のアブレーションによる質量減少を無視したモデルに対して解析を行い、その後質量減少を考慮に入れた、より複雑なモデルに対して解析を行った。本研究で定義した 5 通りの解析条件について表 1 にまとめる。Model A, Model B, Model C では質量減少を無視し、運動方程式のみを解

く。この場合に唯一の支配パラメータとなる抗力係数について、これが定数であるケースとして Model A と Model B を、モデル式を用いて表されるケースとして Model C を定義した。一方、Model D, Model E では質量減少を考慮し、運動方程式と質量減少の方程式を連立させて解く。抗力係数はモデル式を適用するものとし、さらに熱伝達係数について、定数であるケースとして Model D を、モデル式を用いて表されるケースとして Model E を定義した。

表 1 解析条件²⁾

Model	A	B	C	D	E
C_d	0.1	2	モデル式	モデル式	モデル式
C_h	n/a	n/a	n/a	1	モデル式
L^* , J/kg	n/a	n/a	n/a	10^6	10^6
ν	n/a	n/a	n/a	0.66	0.66

本研究で定義した初期条件を表 2 に示す。ここで、流星源の表面温度は大気温度と等しいものと仮定した。

表 2 流星源の諸元と初期条件

時刻	2020 年 1 月 1 日 0:0:0 (UTC)
初期位置	W43° N60° 高度 375 km
初期速度	7.33 km/s
流星源密度・形状	5,000 kg/m ³ ・球 (Ø10 mm)

3. 解析結果

3.1. 基本特性

2.5 節で述べた条件について、流星源の軌道パラメータと発光強度を解析した。図 4 に軌道速度の高度変化を示す。抗力係数として比較的小さい値を仮定した Model A では、その弾道係数が大きいため軌道速度の減速が起きにくい。また、同じ抗力係数モデルを使用した Model C と Model D, Model E を比較すると、質量減少を考慮した場合の方が急激に減速することがわかる。これは質量を減じたことで弾道係数が小さくなったことに依る。図 5 に流星源質量の高度変化を示す。ただし、Model A, Model B, Model C では質量損失を考慮していないため高度変化はみられない。モデル式を実装した Model E では高高度での熱伝達係数が高く、定数を仮定した Model D との差が大きい。そのため、Model E では軌道上の早い段階から質量減少を起こしていることがわかる。

3.2. 材料密度特性

流星源の材料密度が 1,000 kg/m³ から 10,000 kg/m³ までの値をとる場合について、これが発光強度に与

える影響を見積もった。材料密度が変化したときの発光強度の最大値 I_{\max} と、その値をとる高度 h_{\max} の関係はそれぞれ図 6 と図 7 に示す通りとなった。密度が大きい材料ほど運動エネルギーが高くなるため必然的に発光強度も高くなる。また、弾道係数の議論から、最大発光強度をとる高度が低くなることも確認できる。

3.3. 流れ星の等級

図 8 では、軌道上で最大加熱率に達した際の流れ星の明るさを 4 種類の材料について示している。そのうちのひとつの材料を用いた場合には発光が-1.4 等級に達していることがわかる。

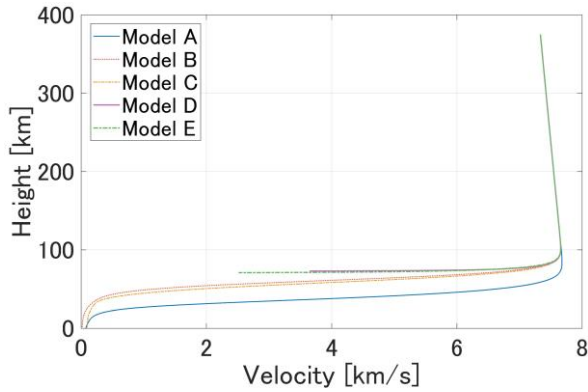


図 4 軌道速度の高度変化

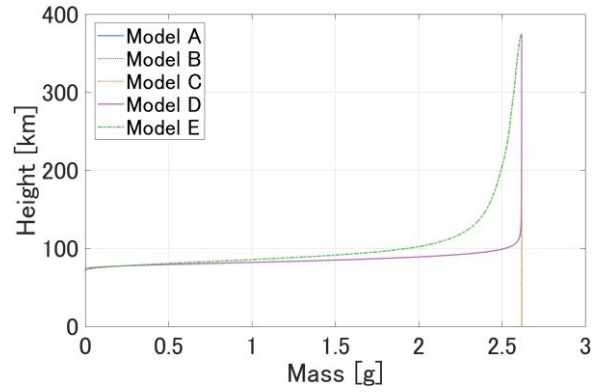


図 5 流星源質量の高度変化

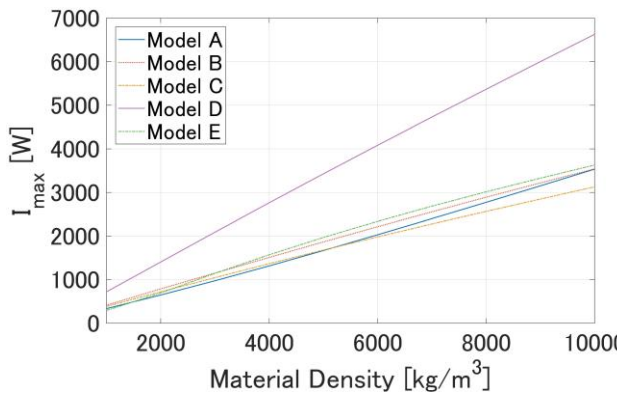


図 6 最大発光強度の材料密度依存

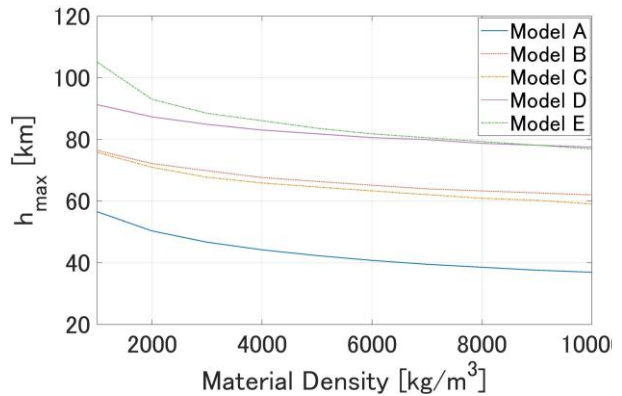


図 7 最大発光高度の材料密度依存

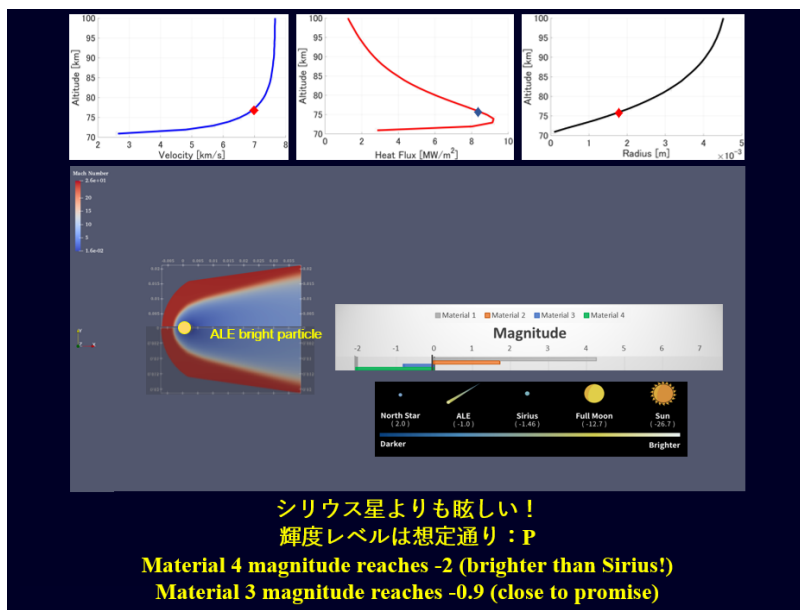


図 8 最大加熱率に達したときの流れ星の等級

4. 結論

本論文では、成功すれば世界初となる人工流れ星の実証に向け、その軌道パラメータと発光強度の解析を行った。質量減少を無視したモデルとこれを考慮したモデルのそれぞれに対して支配パラメータを定義し、5通りの条件で解析を行うことでパラメータの感度の評価を行った。

質量減少を無視したモデルと考慮したモデルの決定的な違いはその弾道係数の変化である。質量減少を考慮したモデルでは弾道係数が小さくなり、大気抗力の影響を大きく受けて減速する。結果として、高い高度で最大加熱率に至り、最大発光強度に達することになる。また、質量の減少は、マッハ数やレイノルズ数の低下を引き起こすなど、流星源のおかれる流れ場にも影響を及ぼす。これらは支配パラメータに直接影響を及ぼすため、特に注意が必要である。質量減少を無視したモデルの解析は、抗力係数の影響を独立して検証できた点で有意義であった。さらに、パラメータを増やして質量減少を考慮したより現実的なモデルと比較することによって、流れ星のアブレーションが引き起こす空気力学的・熱的な影響を定性的に認めることができた。本研究を通して、軌道上加熱率や発光強度、それに達する高度などの流れ星の性能を決定づけるパラメータは少なからず抗力係数や熱伝達係数などの支配パラメータの影響を受けることが確認された。

現在は流星源の表面温度の上昇及び融解現象の反映と、それが軌道へ与える影響の検証に取り組んでいる。今後の研究では、シミュレーション結果と観測値、理論値との比較や、アーク加熱風洞で行われる実験の運転条件の定義を行う。さらに、将来的には空力計算とアブレーション計算を結合することで後流における固体粒子の運動を再現し、シミュレーションの高精度化を図る。

参考文献

- 1) D. K. Prabhu et al., “Thermophysics issues relevant to highspeed Earth entry of large asteroids”, AIAA Scitech conference, 2016.
- 2) C. O. Johnston et al., “Radiative heating of large meteoroids during atmospheric entry”, *Icarus*, 309, 2018, pp: 25-44.
- 3) N. Kimura et al., “空気力学的・熱的パラメータが人工流れ星の軌道とその発光強度に及ぼす影響”, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, Oct. 24-26 2018.
- 4) J. M. Picone et al., “NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues”, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A12), 1468.
- 5) K. Fujita et al., “Development of JAXA Optimized Nonequilibrium Aerothermodynamics Analysis Code,” Japan Aerospace Exploration Agency TR915, Chofushi, Tokyo, 2009 (in Japanese)
- 6) NIST: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/>.
- 7) C. Park, “Radiation phenomenon for large meteroids”, AIAA conference 2016.