

経済産業大臣賞

「人工衛星を用いた人工流れ星」の生成技術

～中間圏観測による気候変動・気象予測精緻化と宇宙エンターテインメントの両立～

株式会社 ALE

代表取締役 岡島 礼奈

東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

准教授 栞原 聡文

1. 緒言

今日「宇宙利用」は急激に加速し、その形態を変えてきている。過去十数年で民間主体の宇宙ビジネスが世界的に勃興し、事業展開・投資の両面から世界各国が宇宙に進出する状況となった。この流れの中で「宇宙ベンチャー」と呼ばれる新興企業が数千社誕生しており、世界の宇宙産業は、2040年までに100兆円産業になると予想され、周辺産業も含めた広義での宇宙産業は200兆円規模まで成長するとみられている。^{1,2)} 日本の宇宙産業については、足元で約1.2兆円の市場規模がありこれを2030年代初頭までに倍の2.4兆円に成長させることを目指している。³⁾

近年のプライベート・セクターによる宇宙開発・利用の特徴はその小型化である。従来の大型宇宙機に比べて100kg以下の超小型人工衛星の台頭が目覚ましい。超小型人工衛星打上数は世界的に増加傾向にあり、超小型人工衛星を用いた新たな宇宙開発利用の促進が産業成長の鍵となっている。

株式会社 ALE が目指す「人工衛星による人工流れ星」の事業化は、人工流れ星の発光現象を観測し中間圏の大気の状態を解析・提供する気候変動・気象予測精緻化のためのデータサービス事業(図1)と、肉眼で人工流れ星そのものを"見て楽しむ"世界初の宇宙エンターテインメント事業の二つの側面から、官需に依らない民需(=市場からの資金調達を可能とする)宇宙開発利用の事業モデルを確立し、科学と工学の加速度的な発展を実現することを目指すものである。⁴⁾

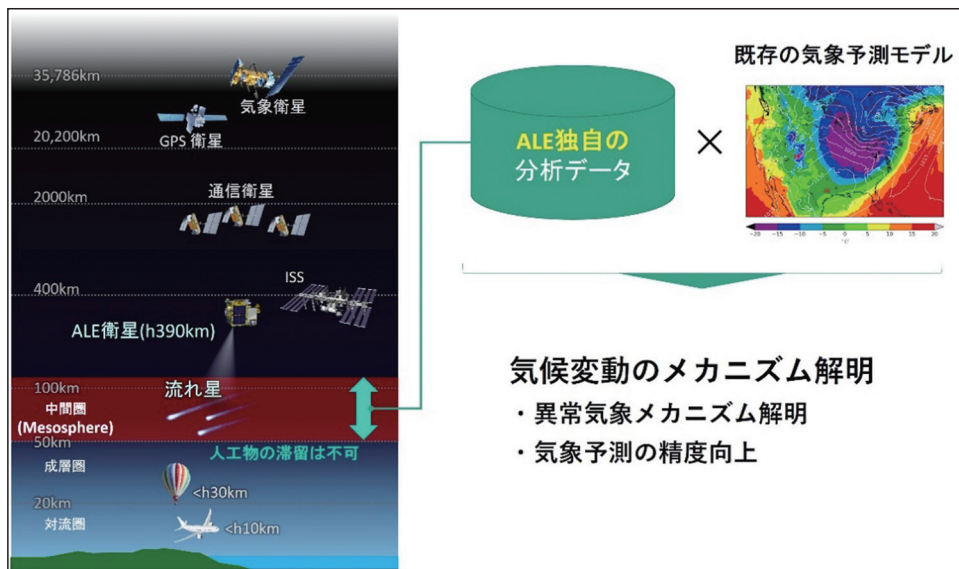


図1 人工流れ星による中間圏観測及び気候変動・気象予測精緻化への貢献

2. 人工流れ星事業の概要

株式会社 ALE は、2016年より東北大学大学院工学研究科と共同研究契約を締結し、人工衛星の研究開発を実施している。本事業は、任意の地点・時刻に人工流れ星を発生させるという非常に独創的な過去に例のない技術により、先端科学への貢献と新規宇宙エンターテインメント市場の創造・開拓を目指すものである。図2に人工流れ星を利用した事業構想を示す。ALE の掲げる将来構想を図3に示す。

この人工流れ星に関わる事業展開は、「科学を社会につなぎ宇宙を文化圏にする」をテーマに ALE 社の掲げる将来構想の最初のステップという位置付けであり、科学と工学の発展を加速させつつ、月・惑星探査、太陽系外探査といった人類のフロンティア拡大に貢献していく潜在的な可能性を秘めるものである。



図2 超小型人工衛星による人工流れ星生成技術を利用した事業展開

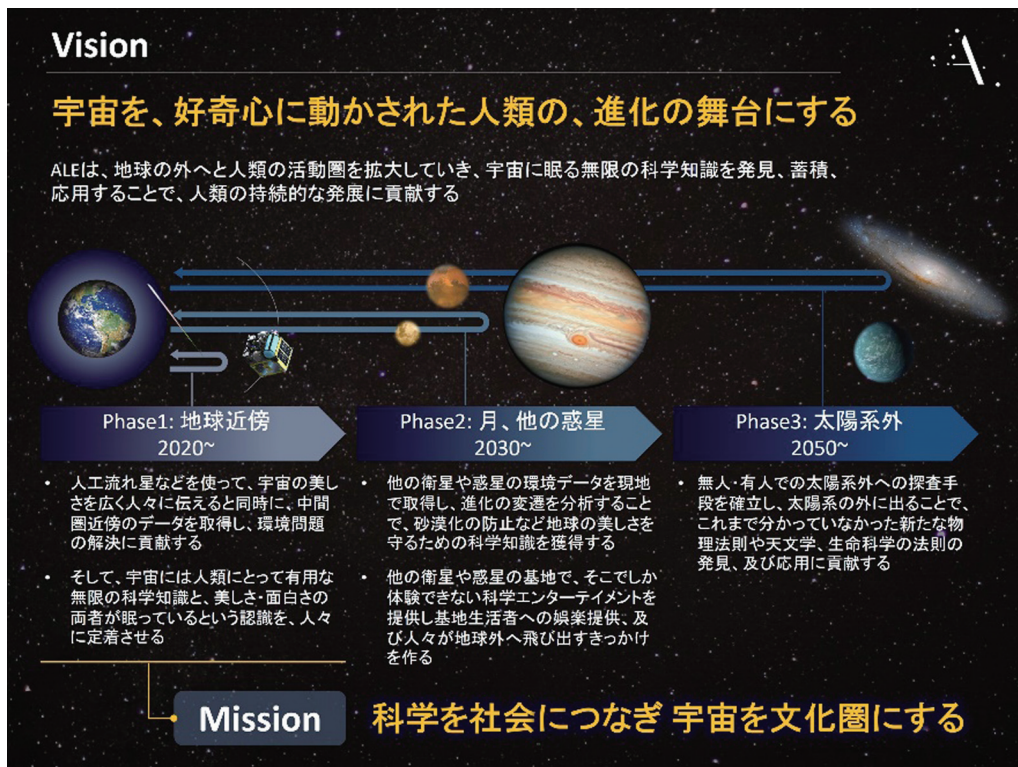


図3 株式会社 ALE の掲げる人工流れ星技術とその先の将来展望

2.1. 人工流れ星の仕組み

人工流れ星の素となる流星源を搭載した人工衛星を軌道上に配置する。放出装置を用いて、指定の時刻・角度・速度で人工衛星から流星源を放出し、その軌道を正確に制御することで目標地点上空の大気圏に突入させる。その際、人工流れ星は地球を約3分の1周回飛翔する。人工流れ星は、発生の予定地点付近の直径約200kmの範囲から観測することが可能である。人工流れ星の発生を、地上におけるイベント等に合わせて実施し、演出要素等として利用する(図4)。天然の流れ星の発光現象の解明や中間圏の大気組成に関する研究の進展というサイエンスの活性化の効果と、人工流れ星の表現力を高める(放出装置、姿勢制御、軌道計算など)研究を通じた理工学の実用発展、更には宇宙を利用した新しいビジネスの開拓を同時に実現させることができると考えている。

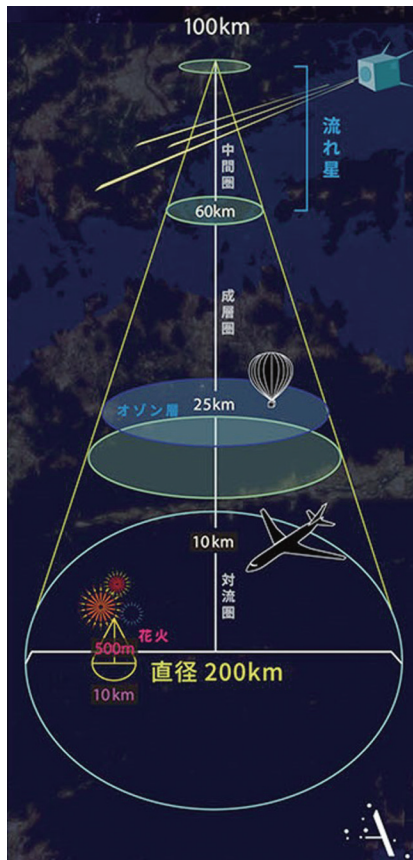


図4 人工流れ星の高度と見える範囲

2.2. 科学的意義

人工流れ星が発光する中間圏（高度50～100km）は、観測用気球には高度が高過ぎる一方、逆に人工衛星の軌道としては低く、人工物が留まることが難しい領域である。そのため、観測データを取得することが難しく、十分な研究がなされてきていない（図5）。人工流れ星の生成技術を実用化することで、これらの課題の克服に大きく貢献することが可能となる。

現状考えられる科学への貢献の主たるものは i. 中間圏の物理学、ii. 大気圏突入データ収集、iii. 流れ星のメカニズム解明の3点と考える。

i. 中間圏の物理学

中間圏の気温・密度・動きについて知ることによって、中長期的な地球の気候変動データが得られる。現在の気象予報に利用される対流圏・成層圏に中間圏が影響を及ぼしていることが従来研究者によって議論されている（図6）。取得した中間圏データを対流圏・成層圏のデータに加えることで、天気予報の精緻化、及び世界規模で問題となっている異常気象の予測が可能となる。

ii. 大気圏突入データ収集

寿命がきた衛星やスペース・デブリなどを安全に大気圏で焼却廃棄するための溶融解析モデルの構築に必要な再突入データを蓄積することが可能になる。

iii. 流れ星のメカニズム解明

天然の流れ星は、発生が予期できないため観測が容易ではない。人工流れ星の入射角・速度・成分を物差しとして利用することで、天然の流れ星の発光メカニズム解明に貢献できる。



図5 人工流れ星が流れる領域

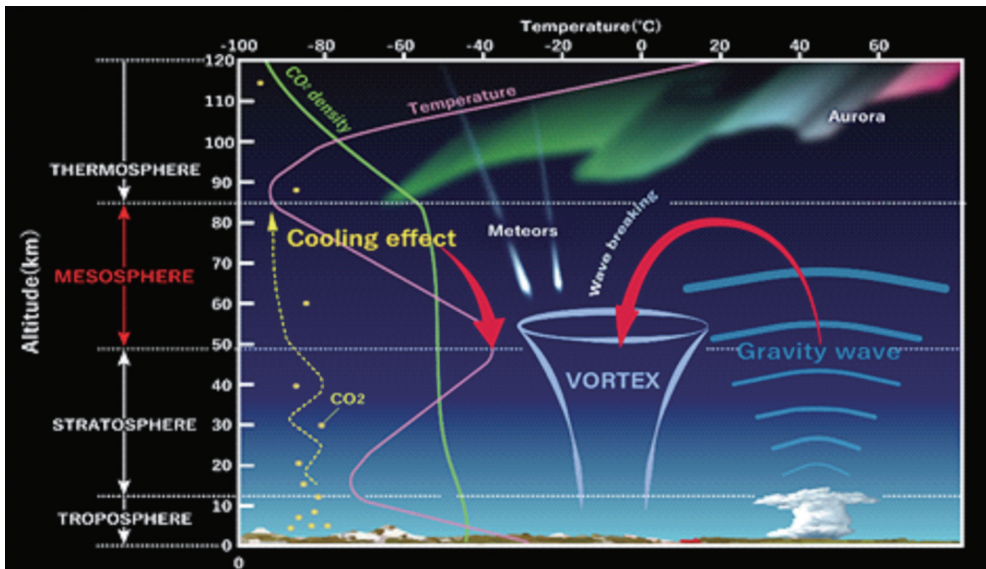


図6 中間圏が対流圏・成層圏に及ぼす影響

2.3. 事業の新規性及び市場性

人工流れ星は競合コンテンツと以下の3つの差別化のポイントを有し、非常に高い市場競争力を有する。

i. 高い地理的柔軟性

太陽同期軌道を人工衛星が周回する為、地球上どの地域に対しても人工流れ星サービスを提供可能。サービス提供が夜の時間帯に限定されるが、ナイトタイムエコノミーの機会創出を狙う市場との親和性が非常に高い。

ii. 広大な可視範囲

地上では同じ人工流れ星を直径200kmの範囲で見ることが出来る(図7)。これは東京を中心とした場合、富士山から宇都宮、千葉全域と三浦半島の付け根までを網羅する範囲で、人口に換算すると3000万人に同時にコンテンツを届けることが可能となる。花火・ドローン等との圧倒的な違いである。

iii. 低い環境負荷

人工流れ星の粒及び人工流れ星を放出する人工衛星は全て環境に無害な物質で構成されており、大気圏再突入時に完全燃焼する設計となっている。

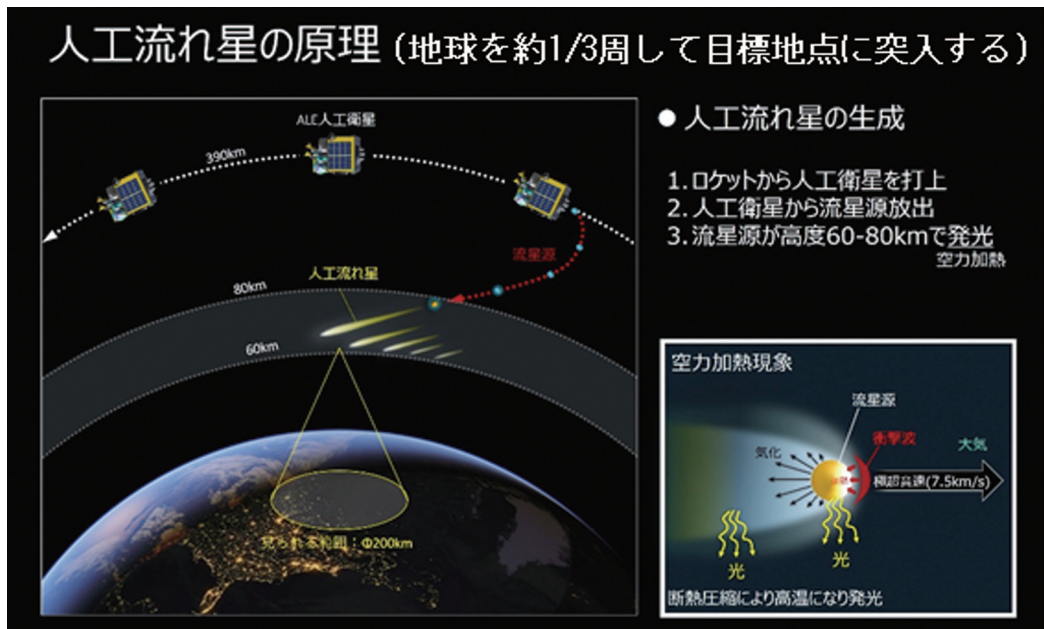


図7 人工流れ星の生成原理

2.4. 技術的課題

地上のある地点において、人工流れ星を確実に観測するためには、予定した到達位置からの誤差が約±100km以内に入っている必要がある。人工流れ星の生成実現のための技術的課題を以下にまとめる。放出の際の様子を図8に示す。

- 1) 2故障許容安全設計 … 軌道上安全を保障するため、2故障許容安全設計を適用し、運用中に2重の故障が同時に発生したとしても安全に放出動作を停止することができること。
- 2) 高精度軌道推定技術 … 人工流れ星が発光する目標地点から逆算し、放出時の人工衛星の軌道上位置を高精度に事前推定する技術。この情報に基づき放出パラメータの設定を行う。
- 3) 高精度姿勢・軌道制御技術 … 超小型人工衛星搭載姿勢軌道制御系センサ及びアクチュエータを使用し、高精度で衛星の姿勢と軌道を制御する技術。
- 4) 衝突解析技術 … 放出した人工流れ星が周囲の他の軌道上人工物と衝突しないことを保障する解析技術
- 5) 全球運用・リアルタイムモニタリング技術 … 全地球上において人工流れ星の放出を可能とする、遠隔運用と衛星の状態のリアルタイムモニタリング技術

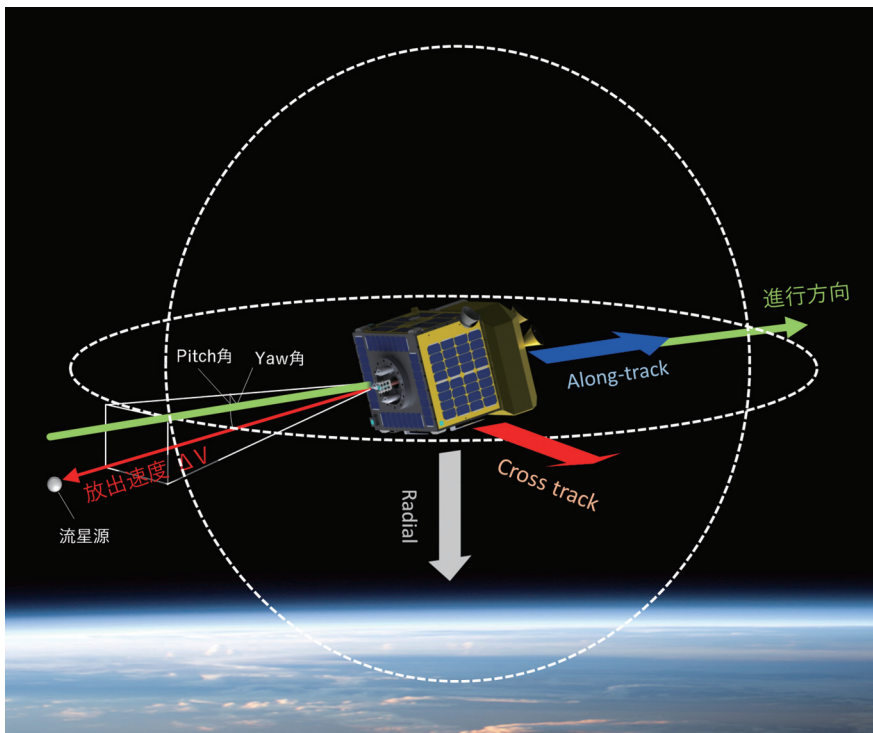


図8 人工流れ星の放出の様子

3. 超小型人工衛星を用いた人工流れ星生成技術の確立

上記の技術的課題に工学的な解決策を見出し、2台の超小型人工衛星を研究開発し、軌道上での検証試験を行った。以下にその詳細を示す。

3.1. 超小型人工衛星 ALE-1 及び ALE-2の研究開発と軌道上実証

新規研究開発を行った ALE-1 衛星を 2019 年 1 月に、ALE-2 衛星を 2019 年 12 月に打上げ、現在軌道上実証を継続的に実施している (図 9)。搭載装置と衛星熱構造システムの小型・軽量化設計を実現し、いずれも 70kg 級の超小型人工衛星としてロケットの打上げ要求を満足する設計を達成した。ALE-1 は約 1 年半、ALE-2 は約 1 年と、非常に短期間での開発評価を可能とした。⁵⁻⁸⁾

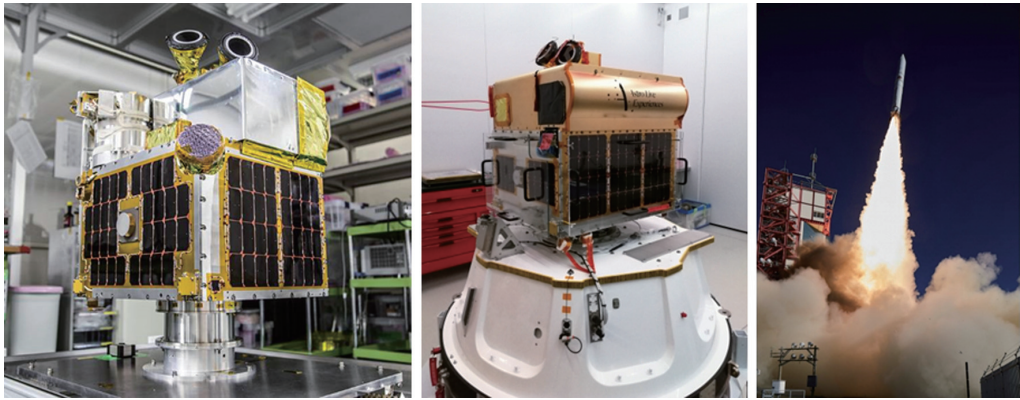


図9 研究開発を行った超小型人工衛星：(左) ALE-1、(中) ALE-2 ©ALE、(右) JAXA 革新的衛星技術実証 1 号機 (イプシロンロケット 4 号機) による ALE-1 衛星の打上げの様子 ©JAXA

3.2. 要素技術の確立

ALE-1 及び ALE-2 において確立した上記技術的課題に対する要素技術の詳細を以下に示す。

1) 2故障許容安全設計

軌道上安全を保障するために、2故障許容安全設計 (3重冗長設計) に基づく衛星システム、及び運用システムを開発した。^{9,10)} 独立した3重系統のセンサ及び電算装置によって軌道及び姿勢情報を算出する (図 10)。衛星搭載装置の小型・軽量化、及び省電力化に成功し、人工流れ星の放出機構についても3重の多数決回路により厳しい安全要求を達成した。

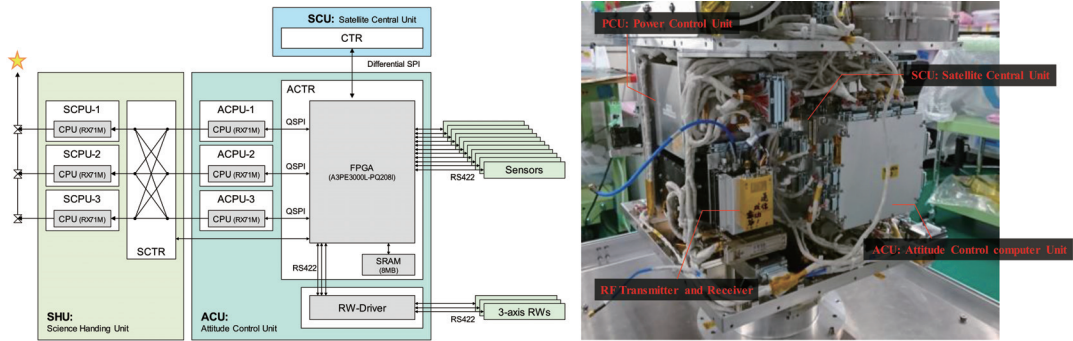


図10 2故障許容安全設計の構成(左)と衛星に搭載されたフライトハードウェア(右)

2) 高精度軌道推定技術

超小型人工衛星に搭載したGPS受信装置からのデータの地上解析を行い、人工流れ星放出の時点での軌道上位置の詳細な推定を行うアルゴリズムを開発し、実際の軌道上データを用いて実証した。¹¹⁾ 人工衛星の搭載電算装置にも実装可能なカルマンフィルタに基づく逐次推定アルゴリズムであり、人工流れ星放出地点での要求位置誤差 (Along-track: $\pm 3000\text{m}$, Radial: $\pm 150\text{m}$, Cross-track: $\pm 400\text{m}$) を満足することが確認できた(図11)。

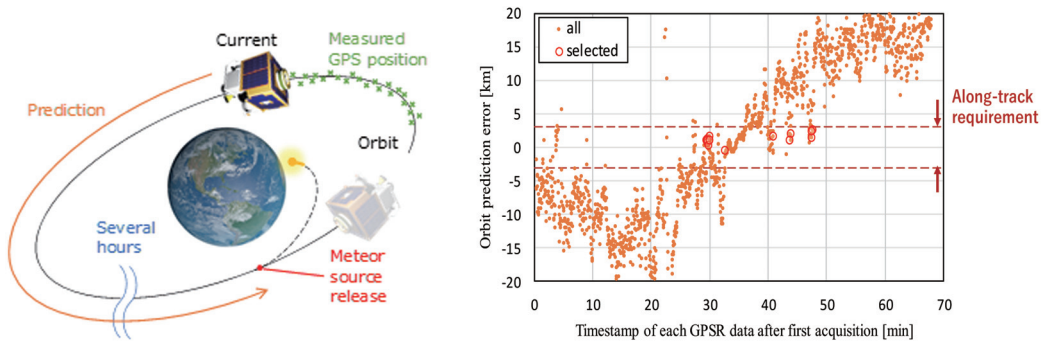


図11 高精度軌道推定の概要(左)と Along-track 成分の推定誤差の例(右)

3) 高精度姿勢・軌道制御技術

上述の2故障許容安全設計システムに高精度姿勢決定・制御アルゴリズムを搭載し、構築した地上システム評価環境でのシミュレーション解析と、軌道上での実証運用を行った(図12)。^{9,10)} 軌道、姿勢、放出のタイミングに関し冗長システムが正常に動作し、人工流れ星の放出の条件を満足することの軌道上実証に成功した。また、人工流れ星の発光地点の制御のために、ALE-2衛星に軌道制御システムを搭載し、現在軌道上実証を継続している。¹²⁾

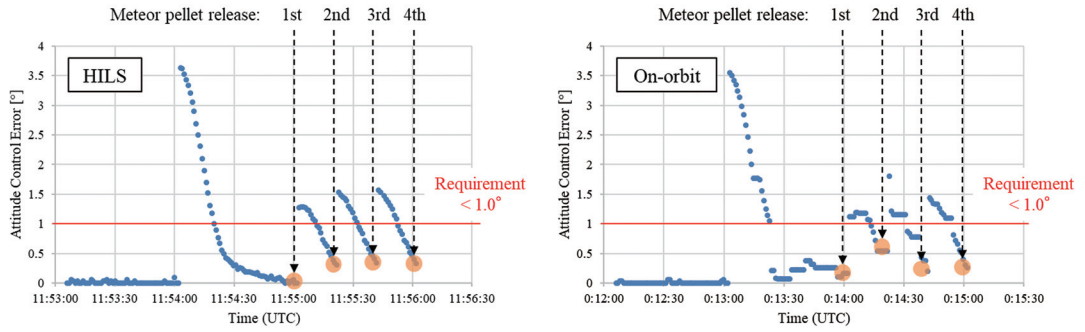


図12 衛星の姿勢制御誤差の比較：(左)人工流れ星放出運用のシミュレーション結果、(右)軌道上評価結果

4) 衝突解析技術

流星源の放出に当たっては、予想される軌道上に他の人工物(人工衛星、ロケット等)が存在しないかを確認する必要がある。そのため、軌道上の人工物の位置情報と流星源の想定軌道を用いた衝突解析シミュレーションを実施し、その衝突確立が定められた基準よりも低いことを確認した場合にのみ、流星源の放出フローに進むという解析技術、及び運用手順を確立し、JAXA、内閣府による審査にて承認を得た(図13)。¹³⁾

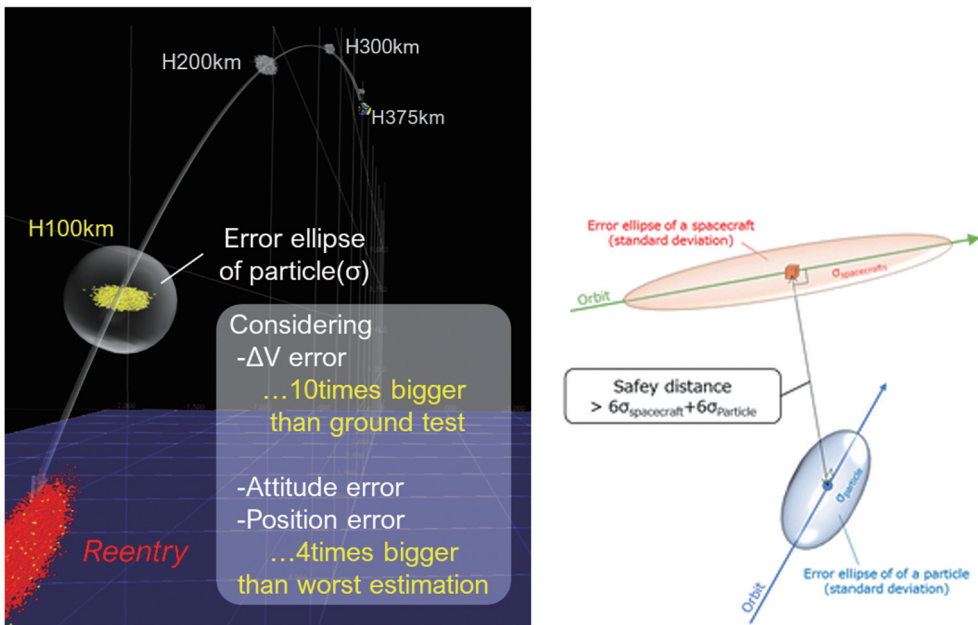


図13 (左)人工流れ星の軌道伝搬の様子と(右)2物体の近接解析の様子

5) 全球運用・リアルタイムモニタリング技術

人工流れ星生成の安全な運用を実現するために、全地球規模での運用ネットワークを構築し、ALE-1及びALE-2衛星によって実証した。^{14,15)} 極軌道を通る衛星へのコマンド送信と、放出時の状態確認のために、北極圏、及び南極圏に商用地上局を設置し、日本からの遠隔運用を可能とした(図14)。

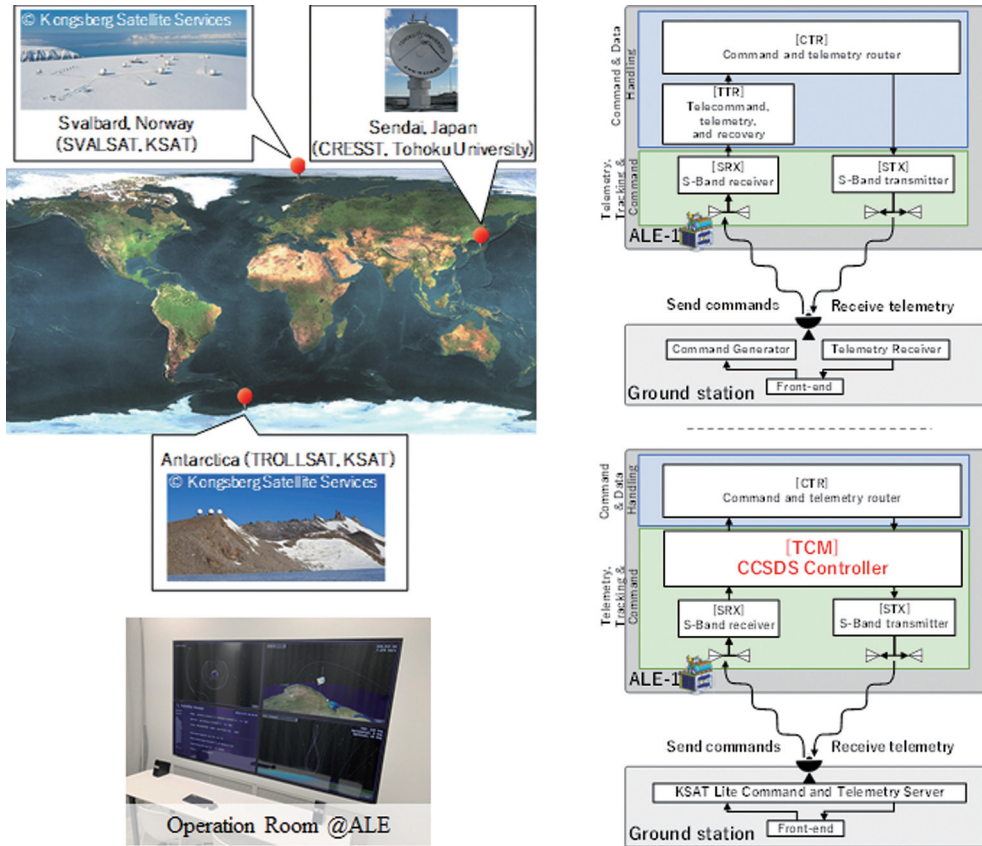


図14 全球衛星運用管制ネットワークの構築

4. 結 言

人工流れ星の生成に必要な新規要素技術の研究開発を実施し、地上シミュレーションと2台の超小型人工衛星による軌道上実証により、その実現性を世界に先駆けて示した。人工流れ星による中間圏観測と宇宙エンターテインメントの実現は他に類を見ない試みであり、今後の世界的な宇宙利用のあり方に大きな影響を与えるものと考えられる。

謝 辞

ALE 社人工衛星1号機 (ALE-1) は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の「革新的衛星技術実証プログラム1号機」に採択され、2019年1月18日に打上・軌道投入されました。

補足資料

5. 参考文献

- 1) Business Insider
<https://www.businessinsider.com/SpaceX-future-multibillion-dollar-valuation-starlink-internet-morgan-stanley-2019-9>
(2020年3月閲覧)
- 2) CNBC
<https://www.cnbc.com/2017/10/12/morgan-stanley-how-to-invest-in-1-trillion-space-industry.html>
(2020年3月閲覧)
- 3) 総務省「宙を拓くタスクフォース(第6回)資料」
https://www.soumu.go.jp/main_content/000603731.pdf
(2020年3月閲覧)
- 4) 平賀 涼子：ALE 衛星による高層待機観測の意義、第62回宇宙科学技術連合講演会、久留米、2018.
- 5) Tangdhanakanond, P., Kuwahara, T., Shibuya, Y., Honda, T., Pala, A., Fujita, S., Sato, Y., Shibuya, T. and Kamachi, K.: Structural Design and Verification of Aeronomy Study Satellite ALE-1, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* (in print).
- 6) Shibuya, T., Kuwahara, T., Tangdhanakanond, P., Shibuya, Y., Fujita, S., Sato, Y., Katagiri, H., Hanyu, K., Murata, Y., Matsushita T. and Kamachi, K.: Thermal Design and Ground Evaluation of the Microsatellite ALE-1, 32nd International Symposium on Space Technology and Science, Fukui, Japan, 2019.
- 7) Pala, A., Kuwahara, T., Honda, T., Uto, H., Kaneko, T., Potier, A., Tangdhanakanond, P., Fujita, S., Shibuya, Y., Sato, Y., Shibuya, T. and Kamachi, K.: System Design, Development and Ground Verification of a Separable De-orbit Mechanism for the Orbital Manoeuvre of Micro-satellite ALE-1, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* (in print).
- 8) Potier, A., Kuwahara, T., Pala, A., Fujita, S., Sato, Y., Shibuya, Y., Tomio, H., Tangdhanakanond, P., Honda, T., Shibuya, T., Kamachi, K. and Uto, H.: Time-of-Flight Monitoring Camera System of the De-orbiting Drag Sail for Microsatellite ALE-1, 32nd International Symposium on Space Technology and Science, Fukui, Japan, 2019.
- 9) Fujita, S., Sato, Y., Kuwahara, T., Sakamoto, Y., Shibuya, Y. and Kamachi, K.: Triple Redundant Attitude Control System for Artificial Meteor Microsatellite ALE-1, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* (in print).
- 10) Sato, Y., Fujita, S., Kuwahara, T., Honda, T., Sakamoto, Y., Shibuya, Y. and Kamachi, K.: Establishment of the Ground Evaluation and Operational Training System of Artificial Meteor Micro-satellite ALE-1, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* (in print).
- 11) Honda, T., Kuwahara, T., Fujita, S., Pala, A., Shibuya, Y., Sato, Y. and Kamachi, K.: High Precision Orbit Determination Method Based on GPS Flight Data for ALE-1, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* (in print).

- 12) Sato, Y., Fujita, S., Kuwahara, T., Shibuya, Y., Kamachi, K., Kawaguchi, J., Kubo, Y., Nada, Y., Ohashi, K.: Design and Evaluation of Thruster Control Approach for Micro-satellite ALE-2, 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, (2020), 477-482.
- 13) 蒲池 康、岡島 礼奈、栞原 聡文、藤田 伸哉、澁谷 吉彦、佐藤 悠司、山田 将二郎、飯村 紳一郎、高尾 知樹、及川 祐、有坂 市太郎：人工流れ星ミッション計画と安全設計、第62回宇宙科学技術連合講演会、久留米、2018.
- 14) Shibuya, Y., Tomio, H., Kuwahara, T., Sakamoto, Y., Fujita, S., Sato, Y. and Arisaka, I.: Ground System Network Design and Evaluation for the Safety and Mission Assurance of Microsatellite ALE-1, 32nd International Symposium on Space Technology and Science, Fukui, Japan, 2019.
- 15) Tomio, H., Shibuya, Y., Kuwahara, T., Fujita, S., Sato, Y. and Kamachi, K.: Development and Evaluation of a CCSDS-Based Communication System on Microsatellite ALE-1, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* (in print).

6. 学術的業績、特許出願、新聞発表、授賞等

6.1. 投稿論文

本開発技術に関する論文は「5. 参考文献」の(4)～(15)であり、そのうち全文査読論文は(5)、(7)、(9)～(12)、(15)の7報である。(12)を除く全文査読論文は2019年度に受理され、2020年度に公開される予定のものである。

6.2. 特許出願

- 1) 出願2019.4.3、「宇宙機、人工流れ星の発生方法、及びサービスの提供方法」 蒲池康、栞原聡文、日本、特願2019-70628

6.3. 新聞報道

- 1) 2019年1月6日 日本経済新聞 「育て宇宙産業、民間に実験機会 JAXA、17日ロケット打ち上げ 企業・大学の衛星相乗り」
- 2) 2019年1月10日 日経新聞中国版 Web 「人工流れ星」実験衛星2機、打ち上げの年 ALE の岡島 礼奈社長」
- 3) 2019年2月6日 中国新聞朝刊 「人工流れ星」盛り上げたい」
- 4) 2019年2月22日 DIGITALIST Web 「人工流れ星で宇宙や科学分野のすそ野を広げたい—ALE CEO 岡島礼奈氏に聞く」
- 5) 2019年2月25日 日本経済新聞 Web 「日本の宇宙スタートアップ 勝負の年近づく」
- 6) 2019年3月7日 ギズモード Web 「人工流れ星を降らせる株式会社 ALE に潜入！エモい秘密を探ってみた」
- 7) 2019年3月14日 日経産業新聞 「宇宙スタートアップ日本勢きらり 期待の新星見～つけた」
- 8) 2019年3月18日 日本経済新聞 Web 「地球観測や流れ星、宇宙で輝く日の丸スタートアップ」
- 9) 2019年3月27日 仏 Via Satellite Web 「ALE Brings NewSpace Closer to People」
- 10) 2019年5月1日 precio 「人工流れ星に願いを込めて」

- 11) 2019年5月4日 日本経済新聞 Web 「人工流れ星に願いを宇宙開発、小さな巨人が挑む」
- 12) 2019年6月1日 独 onlinehaendler-news Web 「STERNSCHNUPPEN AUF BESTELLUNG」
- 13) 2019年7月11日 米 Discovery Online Web 「BEST PLACES TO GO STARGAZING IN ASIA」
- 14) 2019年7月19日 電通テック公式メディア BAE Web 「さきトレ 流れ星で夜空彩る、次世代エンターテインメント「Sky Canvas」」
- 15) 2019年9月2日 朝日新聞 Web 「人工流れ星を作るベンチャー社長 岡島礼奈さん」
- 16) 2019年9月3日 Mugendai Web 「全ての根源は「好奇心」。人工流れ星プロジェクトに見る宇宙事業のこれから」
- 17) 2019年9月4日 NEXT. THE. FIRST46(ダイヤモンド社) 「宇宙を舞台とした究極のエンターテインメント 人工流れ星事業の根幹にあるのは基礎科学への貢献」
- 18) 2019年9月4日 仏 Ciel et Espace 「DES ETOILES FILANTES A LA DEMANDE」
- 19) 2019年9月7日 印 Business Line(India) 「Now, companies globally are out to pluck money from space」
- 20) 2019年9月21日 日本経済新聞ストーリー 「宇宙起業家の星 人工流れ星に願いをリーマン危機で一念発起」
- 21) 2019年10月16日 毎日小学生新聞 「やりたいことにいどもう」
- 22) 2020年11月11日 AMBI Web 「宇宙と地球の謎を解明したい」人工流れ星で宇宙のビッグデータ取得へ。ALE の挑戦
- 23) 2019年12月26日 President Woman 「女性リーダーの冷静と情熱 Vol.4」
- 24) 2020年1月1日 山陰中央新聞 「山陰から世界に未来開くカード」
- 25) 2020年1月9日 朝日新聞 Digital 「宇宙イベント、期待の一年」
- 26) 2020年1月9日 仏 Le Journal des Entreprises Web 「La start-up japonaise ALE s'implante a Toulouse」
- 27) 2020年1月10日 仏 Herault Juridique Web 「La star-up spatiale japonaise ALE installe son bureau europeen a Toulouse」
- 28) 2020年1月15日 日経産業新聞 「人工流れ星衛星軌道に」
- 29) 2020年1月17日 仏 actu.fr Web 「Une entreprise japonaise, avec son projet fou d'etoiles filantes a la demande, s'installe a Toulouse」
- 30) 2020年1月22日 経済界 「わたしの故郷「鳥取県」」
- 31) 2020年2月4日 仏 et Vie 「Le ciel deviant un ecran geant」
- 32) 2020年2月17日 amana Web 「宇宙高僧会議2050②」
- 33) 2020年2月25日 経済界 「科学を進歩へ導く 人工流れ星は春以降に初披露」
- 34) 2020年3月7日 独南ドイツ新聞 「Die Frau, die Sternschnuppen regnen lasst」

6.4. プレスリリース

- 1) 2018年12月13日 「膜展開式軌道離脱装置「DOM®」を搭載した超小型人工衛星2機がイプシロンロケット4号機によって打ち上げられます」
- 2) 2019年10月4日 「(株) ALE の人工衛星2号機が完成」

- 3) 2019年12月6日 「人工衛星2号機の打上げに成功」
- 4) 2019年12月10日 「ヨーロッパで活動を拡大し、データサービス事業を加速」
- 5) 2020年2月28日 「人工流れ星に挑戦する人工衛星初号機、軌道降下ミッション開始」

6.5. 受賞

- 1) 2018年12月1日、Porsche E-Performance 賞、「株式会社 ALE 人工流れ星事業」、JAPAN'S START-UP OF THE YEAR 2018