



安全保障に係る成層圏の利用をめぐる動向と 課題等

3等空佐 門之園 峻伍

はじめに

2023年2月、中国の高高度気球が米国領空へ侵入したことにより気球がにわかに注目された。気球はモンゴルフィエ（Montgolfier）兄弟による熱気球の開発以来、南北戦争における偵察や爆撃等軍事的な用途において活用された実績があり、決して新しい手段ではない。しかしながら、この昔からある軍民共用で利用される気球が警戒監視の十分に行き届いていない成層圏を飛行したことで、注目を集めることとなった。

成層圏は対流圏とは異なり警戒監視や領空侵犯措置といった領域保全や航空安全に係る取組みが十分でなく、不可侵領域として航空機や統合防空組織（IADS: Integrated Air Defense System）がほぼ存在せず航空優勢がどの国によっても獲得されていない空間である¹。例えば、高高度の低速で浮遊する気球を監視することは技術的に可能ではあるものの、警戒監視レーダーの特性上、レーダー反射断面積が小さく速度変化量の小さな目標を遠方で探知し、物体の種類等を特定するには運用上の課題がある。防衛省は主権の侵害に備え情報収集・警戒監視を実施しているものの、2019年11月、2020年6月及び2021年9月に日本領空内で確認された高高度を飛行する飛行物体に関して2023年2月になってようやく中国の無人偵察用気球と強く推定され公表に至った²。対する気球の放球側も、気球の成層圏到達には多くの技術的な課題の克服が必要であり、限定された国しか当該空間の活用はできていない。しかし、科学技術の発展と商業や安全保障での様々なニーズの高まりに対応して成層圏の活用が現実味を帯びてきている。

こうした時流の中、成層圏をはじめとする高高度を飛行するシステムは体系的に整理されることなく様々な呼称で呼ばれている。代表的なものとして、通信電子分野や地球観測分野においては、成層圏周辺を飛行するプラットフォーム全般を高高度プラットフォームまたは疑似衛星プラットフォーム（HAPS/HAPs: High Altitude Platform System/Station）と呼び、このようなプラットフォームのうち飛行船や気球に限定した呼称として高高度飛行船

¹ James P. Lake, “Continuously available battlefield surveillance,” April, 2007, p.27.

² 防衛省・自衛隊「過去に我が国領空内で確認されていた特定の気球型の飛行物体について」、2023年2月14日。

(HAA: High Altitude Airship) や高高度気球 (HAB: High Altitude Balloon) がある。また、高高度を長時間滞空する無人航空機 (UAS: Unmanned Aircraft System) における分類として高高度長時間滞空 (HALE: High Altitude Long Endurance) がある。さらに、航空工学における航空機の分類として重航空機 (HTA: Heavier Than Air airplane)³と軽航空機 (LTA: Lighter Than Air airplane)⁴を用い、ソーラープレーンや飛行機等を HTA、気球や飛行船を LTA とそれぞれ呼称している。

日本における成層圏の活用に関する取組みは平成におけるミレニアムプロジェクトとして総務省や文部科学省を中核として研究開発された成層圏プラットフォーム (SPF: Stratospheric Platform) や、2020 年から政府が推進している Beyond 5G/6G⁵の商業での利用に向けた民間での技術開発を中心とした取組みがあるものの、安全保障面での活用機会は限定的である。本研究メモは、成層圏に係る基本的事項について整理するとともに、近年の各国の動向及び今後の課題等を紹介し、安全保障に係る成層圏利用に関する検討の資とすることを目的とする。

1 成層圏活用の変遷

(1) 成層圏への到達

人類は 1783 年のモンゴルフェ兄弟による熱気球での飛行以来、新たな高地である空において気球等を用い、偵察や通信、爆撃等多様な任務を遂行してきた⁶。そして、飛行機が発明されて以降、世間の注目が飛行速度や距離に注がれる中、人類未踏の空間への探検や科学研究を目的として 1931 年にスイス人物理学者オーギュスト・ピカール (Auguste Piccard) が人類で初めて有人のガス気球 FNRS-1 によって高度 15,800m の成層圏に到達した^{7,8}。成層圏への到達以降、第一次世界大戦から第二次世界大戦の間において、米国、ソ連、ドイツ、イギリス、フランス及びイタリアが最高到達高度の記録更新を狙い、軍による気球及び与圧キャビン等の開発競争が行われた⁹。第二次世界大戦までの間に米陸軍の ExplorerII (最高高度 22,066m) やソ連軍の USSR-1 (最高高度 19,300m) に代表されるガス気球や、イタリアによるプロペラ式複葉機による挑戦が行われ、計 40 名の成層圏飛行士が誕生した^{10,11}。

(2) 高高度の軍事的活用等

³ 空気の動的な圧力により得られる揚力を利用して浮く航空機を指す (室津義定『航空宇宙工学入門』森北出版、2020 年、17 頁。)。対流圏の航空機等も HTA に該当するが本稿では便宜上、主に成層圏で活動するものに限定して使用する。

⁴ 空気よりも比重の小さいヘリウムや水素による浮力を利用して浮く航空機を指す (同上、17 頁。)

⁵ 総務省「『Beyond 5G 推進戦略 -6G へのロードマップ-』の公表」2020 年 6 月 30 日。

⁶ 日本航空学術史編集委員会編『日本航空学術史 1910-1945』三樹書房、1990 年、201 頁。

⁷ M. von Ehrenfried, *Stratonauts: Pioneers Venturing into the Stratosphere*, Springer Praxis Books, 2014, p.43.

⁸ 無人気球については、1893 年までに高度 16,150m まで上昇できることが確認されていた。

⁹ Ehrenfried, *Stratonauts: Pioneers Venturing into the Stratosphere*, p.51

¹⁰ 角川和男『世界の翼・別冊 写真で見る航空史・下』朝日新聞社、1975 年、82-83 頁。

¹¹ Ehrenfried, *Stratonauts: Pioneers Venturing into the Stratosphere*, pp.177-178.

第二次世界大戦中、航空分野に求められたのは速度や機動性であって、高度に対する関心は専ら敵の作戦可能範囲に限定されていた¹²。その一方で、高高度は、気球とロケットによる特別な軍事的用途に活用された。気球においては、高層天気の特徴、気球の持つペイロードの柔軟性、構造の簡素さ、製造コストの低さ、無人ならではの手軽さ、長時間浮遊可能な飛行特性といった固有の特性が着目され、例えば特殊兵器としての風船爆弾のように、高層気象に関する知見の獲得と低温でも動作する機構の開発によって兵器として完成するに至った¹³。日本のふ号（風船爆弾）作戦は、敵の妨害がなく偏西風の吹く高層約 12,000m に爆弾を積載した直径 10m のガス気球を多数飛ばし、風によって渡洋した気球が無誘導で米本土爆撃を行う試みであった。この作戦は大きな戦果を得ることができなかったものの、高層気象を利用した作戦として兵器開発や気球運用に関する教訓を残した¹⁴。また、当時、高高度に対する対処能力を保有していなかった米国は日本から飛来する気球に対し報道統制を敷き民衆の動揺を防ぐとともに、被害の拡大防止のため各所に防火隊を組織したほか、有毒細菌に備えるため、防疫計画の策定及び数千名規模の細菌学者等の動員を行うこととなり¹⁵、対処療法的に多くの労力を投入せざるを得なかった。時を経た 2023 年 2 月、中国の気球が米国領空に侵入し、その後戦闘機により撃墜された事案でも、追跡、迎撃、回収及び分析に軍や連邦捜査局（FBI: Federal Bureau of Investigation）を投入するとともに、領空侵犯した中国を強く批判する姿勢を情報発信する等外交問題に発展しており¹⁶、高高度を飛行する気球への対処が難しいことも相まって、高高度の軍事的活用が国際社会や民衆に与える衝撃は依然として大きいものとなっている。

高層気球の放球については、他にも気象精度向上を目的としたラジオゾンデによる高層気象観測が古くから行われてきた。日本では 1944 年から毎日 2 回、全国 16 か所の気象官署で気球を高度 30km 程度まで飛ばし、数値予測モデルや気候変動・地球環境の監視及び航空機の運航管理に利用している¹⁷。

1940 年代、ドイツが成層圏を高速で飛行し長距離爆撃が可能な V-2 (A-4) を開発した。V-2 (A-4) は、液体燃料ロケットの理論確立とロケットエンジン等の開発成功によって生み出された積載量 1,000kg、最大射程 350km を誇る対地攻撃兵器であり¹⁸、1942 年のデモフライトでは高度 172.2km に到達した¹⁹。大戦直後の 1945 年 9 月に打ち上げされた米国の気

¹² 成層圏付近の高度ではないため割愛したが、日本の戦闘機が高高度性能不足のため高度約 10,000m を飛行する長距離戦略爆撃機 B-29 に対する迎撃が困難であった事例はあった（吉村昭『零式戦闘機』新潮社、2013 年、332-333 頁。）。

¹³ 肥田木安「風船爆弾の思い出」『水利科学』22 巻 2 号、1978 年 6 月、96 頁。

¹⁴ 同上、106 頁。

¹⁵ 肥田木、風船爆弾、104 頁。

¹⁶ 「米本土飛行の中国気球を撃墜 残骸回収し解明へ」日本放送協会、2023 年 2 月 6 日。

¹⁷ 「高層気象観測（GPS ゾンデ観測）」気象庁高層気象台、

https://www.jma-net.go.jp/kousou/obs_second_div/sonde/sonde01.html、アクセス日 2024 年 1 月 22 日。

¹⁸ Janes, <https://customer.janes.com/display/jsws0565-jsws>, accessed March 5, 2024.

¹⁹ William R. Corliss, *NASA Sounding Rockets, 1958-1968 Historical Summary*, U.S. Government Printing Office, 1971, p.12.

象観測ロケット Wac Corporal は 11kg のペイロードを高度 70,000m まで運搬するのが限界であった²⁰ことから、当時のミサイルに関する技術力が高かったことがわかる。第二次世界大戦後、米国はドイツの高いロケット技術を基に、弾道ミサイルや人工衛星打ち上げ用ロケットを始めとした各種ロケットを開発していくこととなる。日本では戦後の航空禁止の時代を経て、1950年代、弾道飛行しながら落下するまでの間に観測や実験を行う小型観測ロケット K (カップ) シリーズを開発し、1958年には K-5 型が高層気象観測を実施している²¹。

(3) 高高度における活動領域と用途の拡大

第二次世界大戦後、米国を中心に新たな航空技術を用いて航空機による飛行速度と高度の記録更新が図られると、この能力を活用して高高度巡航する実用的な偵察機等が開発された。米国は、航空諮問委員会 (NACA: National Advisory Committee on Aeronautics)²² のラングレー研究所において、大戦期に国内外で開発されたジェットエンジンやロケットエンジンといった新技術を基に、飛行領域の拡大のため X-1 や X-15 に代表される試験機 X シリーズを開発した²³。米国はこれら試験機によって最高速度及び最高高度の記録を次々と更新し、高高度超音速飛行に関する知見を獲得した。また、この頃には、ズーム上昇飛行²⁴ といった航空機動作により NF-104A 等一部の戦闘機が一時的にはあるものの成層圏を飛行できるようになった²⁵。

1950年代の米国では戦闘機、ミサイル及び警戒監視レーダーといった脅威等を回避しつつソ連や中国の能力と意図を偵察することを目的として、20,000m を超える高高度を飛行可能な偵察機の開発に取り組んだ。まず、1950年代初期にイギリスの高高度爆撃機を基に開発した RB-57 キャンベラがジェット推進で成層圏である高度 19,800m を飛行した²⁶。RB-57 は米軍が翼長の延伸と構造強度の強化等の改造を加え、高高度偵察機として派生させたものであった²⁷。

次に開発されたのが 1955 年に運用開始され現在でも運用されている U-2 である。F-104 をベースに高高度偵察に適した高アスペクト比の翼を備えた²⁸U-2 は、冷戦期のソ連、中国、北朝鮮及びキューバに対する諜報活動として IMINT (Imagery intelligence) や SIGINT (Signal

²⁰ Corliss, NASA Sounding Rockets, pp.17-18.

²¹ 玉木章夫、斎藤成文「観測ロケットの研究開発」『生産研究』21 巻 5 号、1969 年 5 月、46 頁。

²² 1915 年に設立された米国航空宇宙局 (NASA: National Aeronautics and Space Administration) の前身となる機関であり、米国で開発される全ての航空機を統括的に監督する権限を有していた。

²³ Ehrenfried, Stratonauts: Pioneers Venturing into the Stratosphere, p.55.

²⁴ 水平飛行で一気に加速し、運動エネルギーを得た上で、高角度での機体の引き起こし動作により、高高度まで上昇する飛行方法。

²⁵ 浜田一穂『より速く！より高く！未完の計画機 3』イカロス出版、2019 年、172-177 頁。

²⁶ Ehrenfried, Stratonauts: Pioneers Venturing into the Stratosphere, p.179.

²⁷ Ibid., p.116.

²⁸ Janes, https://customer.janes.com/explorer/Equipment_4852?bc=3bcb0727-d1de-4f97-ac8a-f19e6dcf35ed, accessed March 5, 2024.

intelligence) の偵察任務で活躍した²⁹。ベトナム戦争や中東戦争では、ミサイルサイトのマッピング等の任務を遂行し³⁰、高高度偵察の有用性を明らかにした。他方で、U-2 は任務中、IADS によって何度も撃墜されている。1960 年 5 月 1 日、ソ連上空を偵察飛行する U-2 に対し、複数の S-75 (NATO コードネーム : SA-2 ガイドライン) 部隊から計 31 発のミサイルが発射されるとともに、戦闘機 2 機による要撃が行われ 1 機が撃墜された。1962 年 10 月 27 日のキューバ危機の際には、S-75 から 2 発のミサイルが発射され 1 機が撃墜された。この他、1958 年から 1974 年までの間、台湾に供与された U-2 のうち 5 機が S-75 により撃墜されている。U-2 は外国領空での偵察という高リスクの任務を担ったほか、科学プログラムとして ER-2 (Earth Resources) が運用された。半世紀以上運用された U-2 ではあるが、米空軍において 2026 年をもって退役することとされている³¹。

U-2 の後継機として開発された高高度偵察機 SR-71 は、被撃墜を回避するためステルス性及び高速性に優れた高度 26,000m を飛行することができる航空機として開発された。この SR-71 は、チタン合金等の新素材及び接着剤による軽量化、制御用コンピュータの発達及び与圧服の改良等航空機開発に関連する科学技術の発展によって実現し、1958 年から 1999 年までの運用された期間に一度も撃墜されることがなかったものの、中東及び北朝鮮の新たな脅威に対抗するための予算確保等のため退役することとなった³²。

民間航空の分野でも 1950 年代から超音速旅客機の開発が進められ、商業面での輸送手段として初めて成層圏の活用が注目された。高度 18,300m をマッハ 2 で飛行することで大西洋を 3 時間半で横断できるコンコルドは、英仏独立の超音速輸送機 (SST : Super Sonic Transport) 開発計画の流れの中で最終的に共同開発に至り、1969 年の初飛行後、試験を経て 1976 年から 2003 年までの 27 年間運航された。しかし、経済性³³と環境適合性³⁴の課題のため商業面での成功に至らず退役することとなった³⁵。なお、同時期、ソ連はコンコルドに酷似した超音速旅客機 Tu-144 を開発し、短期間就航させている。

高高度偵察機の運用及び人工衛星の打ち上げが盛んであった 1960 年代においては、1962 年の核実験での被害を基に、地上 30~400km ほどの高高度核爆発 (HANE: High Altitude Nuclear Explosion) による電磁波 (HEMP : High altitude Electromagnetic Pulse) に関する EMP (Electromagnetic Pulse) 攻撃対策研究が米軍及びソ連軍にて本格的に開始され研究が取り組まれた。HEMP とは、核爆発により発生するガンマ線が大気圏内の分子と衝突することで放出される電子 (コンプトン効果) が地球の地磁気によってらせん状に高速で移動する

²⁹ Ehrenfried, *Stratonauts: Pioneers Venturing into the Stratosphere*, p.79.

³⁰ *Ibid.*, p.81.

³¹ Air Force, *Department of Defense Fiscal Year 2024 Budget Estimates*, March, 2023.

³² Ehrenfried, *Stratonauts: Pioneers Venturing into the Stratosphere*, pp.107-108.

³³ 乗客一人当たり 5.5km/燃料 1ℓ の燃費であり、ボーイング 747 と比較して運航コストが 3.5 倍であった。

³⁴ 巡航時のソニックブームに加え、離陸時の騒音はボーイング 747 の 100 倍以上であった。

³⁵ 吉田憲次「次世代超音速旅客機の空力技術に関する研究動向」第 44 回流体力学講演会、2012 年 7 月、1 頁。

ことを繰り返し、3つの波形の電磁界を広域に発生させ、電子機器に悪影響を及ぼす現象をいう³⁶。EMPに関する研究を踏まえ、東西の両陣営それぞれが電磁波対策のための標準規格（MIL規格やNATO規格等）を作成した³⁷。HEMPの出現により、成層圏は偵察機等による戦略的な監視及び情報収集の場並びにミサイルの経路としてだけでなく、地表から宇宙に至る各種システムに対する攻撃の場となり得ることが明らかとなった。

1960年代後半になると、低速での高高度偵察の可能性を検証する技術実証のために制作された米海軍のHigh PlatformIIが、飛行船としてはじめて成層圏に到達した³⁸。しかしながら、飛行船関連のプロジェクトは運用コンセプトが複雑になる傾向にあり、コンセプト実現のためには姿勢制御や定点滞空等に係る技術的な課題が多くなり、ほとんどのプロジェクトが中断された³⁹。

ソ連は1978年、1950年代以降飛来してくる米国の無人偵察気球⁴⁰の迎撃のため、高高度迎撃機M-17（NATOコードネーム：Mystic-A）の開発を開始した。M-17は1982年に運用開始されたものの、運用開始されるまでの間に既に米国は偵察気球の放球を終了しており、対抗手段として役立つことはなかった。その後、M-17を改良した高高度偵察機M-55（NATOコードネーム：Mystic-B）が開発され、気象調査に利用された。2024年、ロシアはM-55をベースとして地上配備兵器システムの精密攻撃支援のため高高度偵察機システムを開発中である^{41,42}。

（4）有人機から無人機への移行

1960年代にはU-2の被撃墜を受け、有人機による長距離偵察任務の人的・政治的リスクが問題視されたことを背景に、米国は防空レーダーをかいくぐる低空侵攻や、長距離飛行可能な無人偵察機の開発に力を入れるようになった⁴³。米国は巡航高度17,000m、航続距離1,930kmの高い飛行能力を持つFire Fly実験機を経て、ドップラー航法装置を搭載したLightning Bugシリーズを開発し運用した。その中のBQM-34ファイアビーは、1950年代に

³⁶ 富永哲欣「高高度核爆発による電磁波攻撃脅威とその防護」『EMC』NO.373、2019年5月、30-31頁。

³⁷ 同上、28-29頁。

³⁸ High PlatformIIは積載量2.3kg、蓄電池未搭載の飛行船であり、高度約20kmを約2時間デモ飛行した（Michael Smith, L. Rainwater, “Applications of Scientific Ballooning Technology to High Altitude Airships,” November, 2003.p.1.）。

³⁹ Smith, Ballooning Technology, pp.1-6.

⁴⁰ U-2の開発以前、米国はホワイトクラウドと呼ばれる気象気球計画の一環として1956年沖縄、ハワイ、アラスカからカメラを備えた高高度気球を展開するモビーディックプログラムを開発し、U-2が開発されるまでの6か月間、250機以上の気球を中国やソ連上空に向け放球していた。偵察の成果として中ソ領土の8%程度を観測したが、外交論争となり、プログラムは終了となった（Benjamin Staats, “Mind the Gap:Space Resiliency Advantages of High-Altitude Capabilities,” National defense university press, May 4, 2023, p.76.）。

⁴¹ Ehrenfried, Stratonauts: Pioneers Venturing into the Stratosphere, pp.129-131.

⁴² 「ロシア、ミサイル部隊支援へ高高度偵察機システムを開発中」『米ディフェンスポスト・コム』、2023年11月16日。

⁴³ 浜田、未完の計画機3、8頁。

無人高速標的機として開発され、自衛隊においても一時期運用されていたが、1960年代になると、訓練標的としてだけでなく母機である C-130 から切り離された後、高度 22,900m を数時間滞空し戦略偵察や電子戦（チャフ散布）を担う航空機発射型の長時間滞空型偵察 UAS として活躍した⁴⁴。1969 年には慣性航法装置（INS: Inertial Navigation System）を搭載した超音速・高高度偵察 UAS の D-21B が運用され、段階的に航法精度を向上させた。その後、UAS に求められる任務の変化や UAS 需要の低下といった情勢の変化を経て、1993 年、GPS 衛星群が 24 機体制に移行し航法システムとして完成したことにより、GPS 航法を搭載した RQ-1 プレデターが登場した。この RQ-1 が現代の大型 UAS の基本形となり、2001 年には U-2 の後継機として開発された自動オペレーションが可能な HALE UAS である RQ-4 グローバルホークが運用開始された⁴⁵。RQ-4 は陸海における広域情報収集・監視・偵察任務のほか、SIGINT、通信中継、捜索救助及び研究に活用でき、恒常的な飛行空域の飛行に関する米国連邦航空局（FAA: Federal Aviation Administration）の承認が初めて得られた UAS であり⁴⁶、高度 18,300～19,800m を 42 時間飛行し、各種任務を遂行できる。ただし、RQ-4 は巡航高度が成層圏下層であるため、悪天候下で飛行する可能性があるにもかかわらず、除氷装置といった装備は搭載されていない⁴⁷等の不具合も内在している。また、RQ-4 のような化石燃料を用いた動力付き UAS は、燃料効率の改善が難しく、空中給油なしに長期間飛行することは不可能である。さらには、潤滑油の補給が困難であるため、空中給油を受けたとしても依然として飛行可能時間には限界がある。

2000 年代に入ると、宇宙空間や対流圏では得られない局地での長期間滞空といった成層圏の特性に着目し、主に次世代通信網の構築や長期定点観測の観点から商業面での注目が集まった。Value Market Research 社のレポートによると将来的な HAPS 市場の世界需要は、2032 年に 57 億 8,000 万米ドルにまで達すると見込まれており、気球やソーラープレーンといった様々な種類のプラットフォームの開発が進められている。既に顕著な実績を残しているものとして米 Alphabet 傘下の Loon 社が開発した気球がある。この気球はネットワークで接続された複数の自律飛行する気球群であり、高度 18,300m の一定の範囲内を 300 日以上の長期間滞空し、見通し線内約 5 万 m² の地域に対して約 19Mbps の通信サービスを提供するものであった⁴⁸。既にプロジェクトとしては終了しているものの、通信インフラが不十分なケニア、2017 年にハリケーンで被災したプエルトリコ、2019 年ペルー・ロペト地震で被災したペルーにそれぞれサービスを提供した⁴⁹。こうした技術は材料科学やナビゲーション

⁴⁴ マーティン・J・ドアティ『世界の無人航空機図鑑』原書房、2016 年、151-154 頁。

⁴⁵ 久保大輔「無人航空機システム（ドローン）の歴史と技術発展」『計測と制御』第 56 巻第 1 号、2017 年 1 月、14 頁。

⁴⁶ Akshara Parakala, “Janes All the World’s Aircraft: Unmanned 2022-2023,” JANES, 2022, p.349.

⁴⁷ ドアティ、無人航空機図鑑、141-144 頁。

⁴⁸ HAPS Alliance 「Diving the potential of the stratosphere 成層圏の可能性を切り開く」、2021 年、313 頁。

⁴⁹ MIT テクノロジーレビュー「グーグルの『ルーン』がペルーで気球インターネット提供へ」、2019 年 12 月 2 日。

ョン技術の発展によってもたらされている⁵⁰。

ロケット開発においては、X プライズ財団が民間による有人ロケット開発を目指して開催した 2004 年のアンサリ・X プライズにおいて、Scaled Composites 社の有人宇宙飛行が成功したこと⁵¹を皮切りに、宇宙旅行を狙う民間企業を中心にサブオービタル機の機体開発が加速している⁵²。例えば、Virgin Galactic 社の Space Ship Two が 2023 年に高度約 80km 以上のサブオービタルでの宇宙旅行を開始している。サブオービタル機は現状、宇宙旅行を目的とした同一基地からの離発着による運用が主流であるものの、将来的には遠く離れた二地点間を高速飛行して人や物を輸送する高速二地点間輸送の手段としての活用が期待されている。

一般的な航空機では到達し得ない成層圏は、気球での到達以来、軍事用途での活用が始まり、より高高度へ活動領域を広げてきた。2000 年以降、科学技術の発達と成層圏の潜在的な価値に対する期待によって民間参入の機会が増加し、監視や情報収集といった国家レベルの戦略的な用途だけでなく一般ユーザ向けの通信サービスの提供や観光利用等、より一般的な用途へ活用の幅が広がっている。

2 成層圏の価値

(1) 空領域の拡大としての成層圏

地球の大気は気温の高度分布を基にして複数の層に区分され、下層から対流圏、成層圏、中間圏及び熱圏と呼ばれている⁵³。成層圏では高度約 18~50km までの、高度が上がるにつれ気温が上昇する範囲を指す。宇宙空間の定義については諸説あり、宇宙空間の境界線として 80~200km ほどの範囲で議論されており、一義的に定まっていなかったが、国際航空連盟 (FAI: Federation Aeronautique Internationale) では高度 100km 以上を宇宙と定義している。成層圏は議論中の境界線の範囲よりも低い高度であることから、空に属する空間となる。また、領域を「戦う（戦闘する）ための物理的 2 次元、3 次元、または仮想的な空間」⁵⁴とすると、成層圏は、U-2 等の軍用機とその対抗手段との攻防が始まって以降、空領域に属した空間となっていると考えられる。従来は限られた国家が特定の用途でしか活用できなかった空間ではあるものの、前項で見てきたように航空工学、とりわけ材料・構造の軽量化、操縦者のリスクや生理的課題を克服する無人化、さらには GPS を用いた航法技術の発展により、安全保障面や商業面の活用の場として注目を集めている。

⁵⁰ Anthony Tingle, “When the Balloon Goes Up High-Altitude for Military Application,” *Military Review*, 2019, p.70.

⁵¹ ANSARI XPRIZE, *Launching a new space industry*, <https://www.xprize.org/prizes/amsari>, accessed January 4, 2024.

⁵² 永井希依彦、内富素子「宇宙旅行と法・政策」第 60 回宇宙科学技術連合講演会、2016 年 9 月、1 頁。

⁵³ 矢島信之、井筒直樹、今村剛、阿部豊雄『気球工学—成層圏および惑星大気に浮かぶ科学気球の技術』コロナ社、2004 年、76 頁。

⁵⁴ 坂梨弘明、杉山公俊、南賢司、志津雅啓、坂田靖弘、栗秋健士「宇宙」『エア・アンド・スペース・パワー研究』第 7 号別冊、航空自衛隊幹部学校、2021 年、7 頁。

(2) 空間特性

成層圏は、一般的な航空機が飛行する対流圏とは異なる特性をもっている。成層圏は空気密度が地表の 10 分の 1 から 1000 分の 1 程度と小さく⁵⁵、気温は対流圏と成層圏の境界である対流圏界面（成層圏下層）で最も低温（赤道域で -80°C 以下）である⁵⁶。対流運動が起りにくく、大気が非常に乾燥しており雲が発生しづらいことから活発な気象現象もほとんど発生しないものの、定常風が吹いている⁵⁷。気温の緯度高度分布は夏の極が最も暖かく、冬の極が最も冷たく、季節の気温変化と地衡風により、春夏秋は東風（西向き）、冬は西風（東向き）が生じる⁵⁸。そして、電波伝搬に大きな影響をもたらす電離層よりも低層にあり⁵⁹、対流圏には到達しない強い紫外線が降り注いでいる空間である。

また、成層圏を含む高高度は、民間航空機が飛行する実用高度限界が約 15,500m である⁶⁰ことから航空機がほとんど存在せず、航空管制が行われていない空白の空間である。成層圏を含めた高高度の国際的な制度も十分に定まっておらず、2023 年 12 月、高高度空域における民間航空機の運航に関する規則整備について、日本、米国、英国、カナダ及び欧州連合（EU: European Union）による共同ステートメントが発表されている状況にある⁶¹。

そして、成層圏は地球の重力と大気の影響をともに大きく受ける空間である。軌道運動するには大気抵抗が大きすぎるため、人工衛星のように地球を周回することはできない⁶²。そうしたことから、この空間での滞空や巡航のためには空気密度の小ささを克服しつつ大気を活用して揚力または浮力を得るか、推力を用いることになる⁶³。

(3) プラットフォーム

成層圏で活動するプラットフォームには、それぞれ固有の特徴がある。揚力を得て巡航する HTA、浮力で滞留する LTA、そして、燃焼ガスの噴出による反作用によって推力を得るロケットがある。これらプラットフォームは飛行速度の区分により、低速から中速域で巡航または滞留するものと、大気抵抗の小ささを活かし超音速または極超音速⁶⁴のような高速域で巡航するものに大別できる。前者は LTA である気球や飛行船と HTA であるジェツ

⁵⁵ 秋吉英治「成層圏からの気候・環境研究」『国立環境研究所地球環境研究センターニュース』第 276 号、2013 年 11 月。

⁵⁶ 矢島、気球工学、76 頁。

⁵⁷ 森幹彦「成層圏プラットフォームとは」『電気学会誌』122 巻 8 号、2002 年、526 頁。

⁵⁸ 日本の上空（北緯 39 度）では、6 月中旬に風向が変わり、7 月下旬に東風が極大となる。9 月中旬には再び東風が西風となる。

⁵⁹ 矢島、気球工学、77、83 頁。

⁶⁰ Jennifer Gentry, “Introduction to Higher Airspace Operations,” MITRE, March, 2021, p.3.

⁶¹ 外務省「高高度空域における民間航空機の運航に関する規則整備についての共同ステートメントの発表」、2023 年 12 月 18 日。

⁶² VLEO (Very Low Earth Orbit) での飛行については、JAXA の超低高度衛星技術試験機つばめ (SLATS: Super Low Altitude Test Satellite) が高度 167.4km にて 7 日間の軌道保持を達成し、ギネス記録に認定されている。

⁶³ 恩田昌彦「成層圏ソーラー飛行船-高層広域観測プラットフォーム-」『計測と制御』第 32 巻第 2 号、1993 年 2 月、138 頁。

⁶⁴ 一般に、マッハ数 1 を越える速度を超音速、マッハ数 5 程度以上の速度を極超音速という。

トエンジン付きの UAS やソーラープレーンである。後者はコンコルドに代表される SST や、地球の周回軌道への投入には至らない軌道で飛行するサブオービタル機（ロケットやスペースプレーン等）である。

ア 低速から中速域のプラットフォーム

(ア) LTA

航空法上、無人自由気球として扱われる⁶⁵気球は、維持・運用を含めたコストがプラットフォームの中で最も低く、1t を上回る大型・大重量ペイロードを搭載可能である。迅速な配置やペイロードの回収・再利用も可能であり、ペイロードに対する構造面及び環境面での要件が比較的緩やかであり短期間で開発が可能であるほか、海上を含め放球場所の選択可能性が大きく⁶⁶、数か月程度の長期滞空性に優れる。風船のようなレーダー反射断面積の小さな低速物体は、太陽の反射により赤外線センサーで探知可能だが、レーダーでは物体を鳥等と識別され除外処理される可能性が高い⁶⁷。成層圏まで到達可能な気球の種類には、ゼロプレッシャー気球とスーパープレッシャー気球の 2 種類がある。ゼロプレッシャー気球は、気球の内圧と外圧（大気圧）が等しくなるよう排気弁から浮力ガスを排出して浮力を維持する気球である。スーパープレッシャー気球は、気球を密閉し圧力をかけることで一定の浮力を得る気球である。排気弁からの浮力ガスの排気による浮力の低下が起きないため、長期間での滞空が期待できる⁶⁸。

飛行船は、浮力ガス（ヘリウム及び水素）への依存と動力確保のためにソーラー電池用の大きな表面積を持つ構造的特徴がある。長時間の滞空性能はもちろんのこと、低速性、操縦性、輸送能力に優れ、積載重量数百 kg、出力 10kW 以上となる⁶⁹。また、長大な滑走路が必要なく、対流圏での飛行実績が豊富で安全性が高い⁷⁰。他方で、構造面や制御面等で技術的な課題が多く実用化には時間がかかるとされている。これら LTA は、垂直方向への移動において浮力を用い、水平方向の移動は異なる風向が吹く高度へ遷移し風を利用して移動するか、動力を使うことになる。

(イ) HTA

成層圏を巡航する HTA は一般にサイズが比較的小さく、抗力も小さいため操作性が高く、一般的な航空機の運用と同様に滑走路等航空設備を必要とする。HTA を代表する HALE UAS は、人工衛星よりも低い高度で自由に機動できるため高分解能での連続観測や配置の即応性に優れる。従来、HTA は IADS の回避のため、U-2 や SR-71 のような特別な機体を用い、高高度を高速で巡航するものが主流であったが、近年、特定地点の上空に留まり局

⁶⁵ 矢島、気球工学、9 頁。

⁶⁶ 同上、12-13 頁。

⁶⁷ David Hambling, “Why These Badass Balloon Are the Pentagon’s New Secret Weapon,” November 11, 2021, p.6.

⁶⁸ 矢島、気球工学、10 頁。

⁶⁹ GSMA, “High Altitude Platform Systems Towers in the Skies,” February 2022, p.59.

⁷⁰ 渡邊裕之「世界における飛行船の現状と将来性」第 47 回飛行機シンポジウム、2009 年 11 月、6、16 頁。

地通信や定点観測するため、グライダーのような高アスペクト比（縦横比）の翼をもつ長時間滞空可能な機体が開発されている⁷¹。このような HTA の中には、化石燃料で作動するジェットエンジン等を動力源とするもの、太陽光と蓄電池を動力とするソーラープレーン型のものである。これら HTA は航空機や人工衛星では実現不可能な長期間滞空能力を活かし、単機での FMV（Full Motion Video）による常続監視や高速大容量通信中継ミッションを担うことができる⁷²。

他方で、ソーラープレーン型の HTA の課題の 1 つとして積載量の問題がある。例えば、ソーラープレーンのヘリオスは翼に荷重を分散させることでペイロードを積載している。将来、積載能力は 100kg 以上、発電量は数 kW 以上に増加する見込みであり、パッシブリーダーや光学カメラの搭載が可能と考えられている⁷³。

イ 高速域のプラットフォーム

高速域のプラットフォームには、代表的なものとして超音速機とサブオービタル機があり、これらプラットフォームは運用や保守に際し特別な設備や離発着場が必要であるとともに、他のプラットフォームと比較すると燃料効率が悪いため、コストが高くなるといわれている。

（ア）超音速機

超音速機は 1950 年代に軍用機及び民間航空機としてそれぞれ実用化されおり、空気密度が小さくても十分に作動するラムジェットエンジン等のエンジンによって高速巡航する飛行機として運用実績は豊富であるが、燃料消費量が多く、運用コストが大きくなる傾向にある。また、超音速での飛行により衝撃波が発生し、この衝撃波が地上に到達することでソニックブーム（騒音）を引き起こすことから環境適合化が必要となる。

（イ）サブオービタル機

サブオービタル機はロケット等の推力を得て超音速で成層圏を横断し地上から宇宙空間に至る高度を飛行し、再び地上へ短時間で戻ってくるものである。サブオービタル機は、回収が可能であり、加速度による負荷が宇宙輸送ロケットよりも小さく、ペイロードの柔軟性がある。また、サブオービタル機は成層圏を超えた高高度を飛行することになるが、飛行する高度 50km 前後において対抗手段となる兵器はほぼ存在していない⁷⁴。現状、宇宙旅行に利用されているが、将来的には人員や貨物の高速二地点間移動を実現することが期待されている⁷⁵。

⁷¹ Anthony Colozza, “Initial Feasibility Assessment of a High Altitude Long Endurance Airship,” NASA, Dec 2003, pp.2-4.

⁷² 久保大輔「航空システム：高高度滞空型無人航空機システムによる新しいミッション能力」GOS シンポジウム、2013 年 12 月、10 頁。

⁷³ GSMA, High Altitude Platform Systems, p.59.

⁷⁴ Daniel J. House, John Tiller, “John Rushing, Suborbital Strike!,” *Air & Space Power Journal*, Vol.30 No.4, December, 2016, p.39.

⁷⁵ 大貫美鈴「有人サブオービタル機の利用における期待と課題」第 57 回宇宙科学技術連合講演会、2013 年 10 月、3-4 頁。

ウ その他

この他にも各プラットフォームを組み合わせることで、成層圏を起点とした新たな宇宙輸送システムとして、成層圏に滞留させた高層気球を用いた空中発射システム（Rockoon）や航空機空中発射システムといった柔軟な打上げ機会を提供するプラットフォーム ALP/S（Aerial Launch Platform/System）等がある⁷⁶。

（4）成層圏の優位性

成層圏のプラットフォームは他の空間のものと比較すると持続性、即応性及び残存性の点で強みがあり、この強みを生かすことで、隣接する対流圏及び宇宙領域の能力・機能の増強及び補完や脅威に対する強靱化での貢献が期待できる。

ア 成層圏の強み

（ア）持続性

成層圏では安定した気象、交通量の少なさ、滞空するために必要なエネルギーの少なさにより、他の空間では実現困難な長期間滞空し続けられる優れた持続性がある。対して対流圏では気象の影響による飛行の制約や飛行可能時間の制約があり、空間の占有と持続的な活動のために複数の航空機によるローテーション運用が必要となる。宇宙領域では大気のない中で慣性運動を行う人工衛星等の飛しょう体は軌道運動に従うため、静止軌道を除き地球上の特定のエリアの上空に留まることができない。

（イ）即応性

成層圏のプラットフォームは LTA、HTA に関わらず大気的作用によって高度を得ることができるため、対流圏の航空機ほどではないものの、高高度への上昇及び展開先への機動を含め数日で機能提供でき、宇宙領域の人工衛星より即応性が高いと考えられる。人工衛星が打上げから運用開始までの間だけでも数か月のチェックアウト期間を要し、即応性に乏しいこと⁷⁷に対し、成層圏のプラットフォームは人工衛星と類似した能力を数日で提供可能である。代表例として、Loon 社の気球は、ペルーでの地震において、地震発生から 48 時間以内に展開して LTE（Long Term Evolution）サービスを提供している⁷⁸。

（ウ）残存性

成層圏には対流圏及び宇宙空間と同様、サイバー攻撃、電子戦、指向性エネルギー兵器及び電磁パルス⁷⁹といった脅威が存在する。しかし、とりわけ成層圏のプラットフォームは、

⁷⁶ 山田哲哉、丸祐介、佐藤哲也、千葉一永「持続的な将来宇宙輸送の開発に向けた Aerial Launch Platform/System」第 60 回宇宙科学技術連合講演会、2016 年 9 月、1-2 頁。

⁷⁷ JAXA の制定する「運用準備標準」（2020 年 3 月 31 日）によると標準的な作業スケジュールでは、衛星打上げ後、初期段階 3 か月及び定常運用移行審査を経て、定常運用に移行するとしている。運用組織、運用文書、作業環境等を標準化することで短縮することは可能であろうが、打上げ機関、衛星開発機関、運用機関等が異なるのであれば、平素からの密接な連携なくして即応性を担保することは困難であろう。

⁷⁸ X company, <https://x.company/projects/loon>, accessed February 6, 2024.

⁷⁹ 吉武宣之「ドローンの対抗手段と対処装備品について」『防衛技術ジャーナル』第 43 巻第 5 号、2023 年 5 月、4-5 頁。

固有の飛行高度に加え、ステルス性の高さ及び特徴的な飛行速度により、IADS のキルチェーンである監視、火器管制、ミサイル誘導及び対処完了の 4 つのプロセスのうち、監視、火器管制及びミサイル誘導でのプロセスを途絶させることで、キルチェーンを破綻できる可能性が高い⁸⁰。さらに、対抗手段がペトリオット・システム、S-400 (NATO コードネーム : SA-21) 及び S-500 のような一部の長距離地対空誘導弾や、対中国気球で使用されたとされる赤外線シーカの AIM-9X や同等の PL-10 といった空対空ミサイルのような高性能な手段に限られるため、迎撃に係るコストの高さ⁸¹により、費用対効果は見込めない。対する対流圏においては、飛翔体への対抗手段として、対空砲、空対空ミサイル及び地対空誘導弾が存在し、そのバリエーションや配備数も豊富なことから、費用対効果の高い最適な手段によって迎撃される危険性が高い。宇宙空間は、対衛星兵器 (ASAT: Anti-Satellite weapon) のほかデブリや複合宇宙放射線⁸²の環境上のリスクがある。このようなことから成層圏では高い残存性が期待できる。

イ 他の空間の増強・補完

成層圏は対流圏と宇宙空間の狭間の空間であり、地表と宇宙空間を結ぶ経路、多層防衛のための新たな空間⁸³として注目されている。一方で、既存の空領域における多様な任務を全て請け負うことはできないため、前述の強みを生かし、各空間がもつ能力・機能の増強や補完をする場として期待される。例えば、衛星通信の補完、情報・監視・偵察 (ISR: Intelligence, Surveillance and Reconnaissance) の増強、超音速飛行による突破能力の増強がある。

(ア) 通信

成層圏では衛星通信を補完し、広範囲に安定した高速通信サービスを提供できる。RQ-4⁸⁴が初めて実戦投入された不朽の自由作戦 (OEF: Operation Enduring Freedom) では、通信量が初めての宇宙戦争と言われた湾岸戦争 (砂漠の嵐作戦) の 5 倍相当へ増大した結果、通信所要に対し通信衛星による供給が追いつかず、通信連絡や UAS による ISR に制約が生じた⁸⁵。空領域、海領域及び固定のインフラのない地域において、情報ネットワーク化された装備品を運用するためには宇宙空間の通信衛星は必須であるが、通信量の増大に伴い、通信衛星だけで需要を賄うだけの供給は困難であり、不足する能力・機能の補完が必要となる。成層圏は地上との見通し線が広く、地表での仰角を 22 度とした場合、高度 20km で

⁸⁰ Lake, battlefield surveillance, p.45.

⁸¹ High Altitude (HA), USASMDC, p.1.

⁸² 人工衛星は、複合宇宙放射線の影響を大きく受け、通信障害や測位・観測精度の劣化を引き起こす (情報通信研究機構「太陽フレアなど宇宙天気による社会への影響を評価」2020 年 10 月 7 日)。

⁸³ Lake, battlefield surveillance, p.7.

⁸⁴ RQ-4B block-30 は 1 機で 500Mbps ほどの通信帯域が必要であり、これは宇宙戦争といわれた 1991 年の湾岸戦争において米軍全体が使用した通信帯域の 5 倍に相当する (鈴木真二「小型無人機による『空の産業革命』への期待とその課題」日本 UAS 産業振興協議会、2015 年 5 月、https://www.soumu.go.jp/main_content/000364450/pdf、アクセス日 2023 年 12 月 26 日)。

⁸⁵ 福島康仁「宇宙の軍事利用における新たな潮流 米国の戦闘作戦における宇宙利用の活発化とその意義」『慶應 SFC ジャーナル』vol.15 No.2、2015 年、65 頁。

水平距離 50km と、高度 10km の場合に比べ見通し線は約 2 倍となる。そして、端末とプラットフォーム間の往復伝搬遅延は、静止軌道、低軌道がそれぞれ、約 250 ミリ秒、約 20 ミリ秒であるのに対して高度 20km の HAPS は 1 ミリ秒以下の低遅延を実現できる^{86,87}。また、静止軌道上の通信衛星では、1 つの電波のビームで広範囲をカバーした場合、通信の遅延に加え、1 ユーザあたりの通信容量も小さくなる⁸⁸。さらに、マイクロ波の高域及びミリ波周波数を使用する人工衛星では、全大気圏の通過により通信信号の大気減衰は極めて大きくなってしまふ⁸⁹。このような衛星通信の不利点に対し、成層圏は通信距離の短さと大気減衰及び擾乱の抑制により高信頼低遅延通信（URLLC: Ultra Reliable and Low Latency Communication）⁹⁰を提供する点で有望である。

（イ）観測

成層圏では時間的・空間的な情報空白を埋める全天候の持続的な ISR によって、敵対者の能力と意図に関する情報提供が可能である⁹¹。低軌道衛星による ISR を実施する場合、軌道によって観測機会は 1 日あたり数回に限られるとともに、高精度観測の範囲は、搭載するカメラの視野の中の一部の範囲をストロボ観測することしかできない。また、高精度な大型のセンサーパッケージの搭載が必要となる⁹²。さらに、撮像の指令、撮像、撮像画像の地上への伝送や処理に半日程度を要するとともに、気象条件によって期待する画像が必ずしも取得できない。対流圏の航空機は、活動範囲と機会が限定されるとともに、気象状況、投入可能な機数等で得られる情報の量や質に差異が生じる。他方、成層圏を活用する場合、低軌道衛星と比べて 10 倍以上も近い距離から広域を高精度に観測することができ、撮像した画像伝送も早い。こうしたことから、情報が不足する現場の作戦部隊にいち早く情報を提供し続けられる点で有望である。

ウ 機能保証

成層圏のプラットフォームには即応性と持続性があり、宇宙機などと異なりプラットフォームに対するメンテナンスが可能であるため、宇宙システム全体の機能保証（Mission Assurance）⁹³の強化に有効である。成層圏の活用は、宇宙システム自体の抗たん性強化において、「多様化」による手段の冗長化や、「代替」による機能回復として、脆弱な宇宙システム全体の機能保証を強化する上で役立つ。さらに、成層圏に他の空間の一部機能を重複

⁸⁶ 長手厚史、太田喜元、星野兼次「迅速な災害復旧に向けた HAPS 移動通信システムの研究開発」『通信ソサイエティマガジン』No.59、2021 年、213 頁。

⁸⁷ 同上、213 頁。

⁸⁸ GSMA, High Altitude Platform Systems, p.11.

⁸⁹ デビッド・アダミー『電子戦の技術 基礎編』東京電機大学出版局、2020 年、15 頁。

⁹⁰ URLCC とは、データを誤りなく送受信し、かつ、遅延が 1 ミリ秒程度以下の通信をさす。

⁹¹ 日本学術会議「高高度滞空型無人航空機システム技術基盤確立と利用分野創成」2017 年 2 月 8 日。

⁹² Lake, battlefield surveillance, p.60.

⁹³ 宇宙に係る脅威・リスクが顕在化した状況においても、脅威・リスクの探知・回避、システム自体の抗たん性強化、早期の機能回復等により、継続的かつ安定的に当該システムの目的を達成する能力の保証（宇宙政策委員会宇宙安全保障部会「宇宙システム全体の機能保証（Mission Assurance）の強化に関する基本的考え方」平成 29 年 2 月 16 日。）。

して分散させ、対流圏を含めた各空間を相互にネットワークで連結することによって、宇宙空間だけでなく各空間が重層的に相互補強され、空領域から宇宙領域までの全体システムの強靱化に貢献できる。

3 各国の動向

(1) 米国

米国は近年、成層圏の活用に関して、過去の研究開発を踏まえつつ、大国間競争での勝利に向け能力の拡充に取り組んでいる。21世紀になり、空軍はイラクの自由作戦（OIF: Operation Iraqi Freedom）と OEF において作戦上の能力不足を受け、宇宙軍団（AFSPC: Air Force Space Command）に対し戦術面及び作戦面で即応性のある高高度を含む宇宙能力の開発等を命じた。しかし、この取組みによって成層圏を含む高高度に関する潜在的な有用性を見出すことはできたものの、当時、高高度能力を獲得するための努力が十分になされなかったとの指摘がある⁹⁴。そしてこの後も、作戦上の能力のギャップを埋めるための様々な取組みが図られたが、不当な要求、未熟な技術及び一貫性のない開発プロセスにより多大な費用を費やし失敗に終わった⁹⁵。現在、米国は中国及びロシアによる対宇宙兵器の装備によって宇宙システムの能力の低下または喪失を危惧しており、宇宙アーキテクチャの回復力の強化を宇宙政策の重要な目標としている⁹⁶。地上部隊等に対する高高度能力の提供を担う米陸軍宇宙ミサイル防衛司令部（USASMD: U.S. Army Space and Missile Defense Command）等は、関係機関と連携し、2030年代以降、気球、飛行船及び長時間滞空 UAS の開発と運用に向けた評価を実施している⁹⁷。開発例としては、ボーイング社の技術実証用 UAS ファントム・アイが、ターボチャージャーと水素エンジンにより高高度飛行を低燃費で実現しており、高度 19,800m を 4 日間滞空飛行した。さらには、後継のファントム・レイが 10 日間の滞空飛行を目指している⁹⁸。UAS の開発としては他にも、探知されるリスクを低減することができる新たなステルス型 HALE UAS RQ-180 が開発中とみられている⁹⁹。

シンクタンクにおいても HALE UAS の活用について議論されている。例えば、米国戦略予算評価センター（CSBA: Center for Strategic and Budgetary Assessment）が提唱している Deterrence by Detection¹⁰⁰では、既存の非ステルス機である RQ-4B を平素から A2/AD（Anti-Access/Area Denial）圏内で運用し、警戒監視及び侵攻兆候の察知に活用することを提言している。

⁹⁴ Benjamin Staats, “Mind the Gap: Space Resiliency Advantages of High-Altitude Capabilities,” National defense university press, May 4, 2023, p.76.

⁹⁵ Ibid., p.76.

⁹⁶ Staats, Mind the Gap, p.77.

⁹⁷ High Altitude (HA), USASMD, p.2.

⁹⁸ ドアティ、無人航空機図鑑、164-167 頁。

⁹⁹ Rebecca Hersman, Reja Younis, Bryce Farabaugh, Bethany Goldblum, Andrew Reddie, “Under the Nuclear Shadow: Situational Awareness Technology & Crisis Decisionmaking,” CSIS, 2020, p.13.

¹⁰⁰ Thomas G. Mahnken, Travis Sharp, Grace B. Kim, “Deterrence by Detection: A key role for unmanned aircraft systems in great power competition,” CSBA, 2020.

さらに米軍では移動物体の見通し線外（BLOS: Beyond Line-Of-Sight）通信、継続的な敵軍追跡等の指揮、統制、通信、コンピュータ、情報、監視及び偵察（C4ISR: Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance）に関する能力不足に関する認識と宇宙システムの機能保証の観点から成層圏のプラットフォームの必要性を認識しており、現在、いくつかのプロジェクトが進められている。例えば、米海兵隊は、人的リスクの低減、気象や修理による器材の運用中断の頻度低減及び大量の器材確保を図り作戦部隊に対して安定した通信を提供するため、低高度と高高度の2種類の通信用気球で構成される SKYSAT を開発している。高高度気球は、高度 18,300~26,000m を 16 時間滞空し、約 500NM の範囲において衛星通信を補強または補完する通信サービスを提供する。この他、米海軍研究所等において、気球に使い捨て式ドローン CICADA（Close-in Covert Autonomous Disposable Aircraft）を搭載し、気球本体が通信ノードとなり、放出した CICADA を目標へ誘導する研究や、戦略爆撃や航空阻止のための母機としての民間の有翼型サブオービタル機の活用¹⁰¹、誘導爆弾 GBU-28 や SDB（Small Diameter Bomb）といった位置エネルギーを利用してグライド飛行できる精密誘導爆弾やスタンド・オフ・ミサイル Joint Air-to-Surface Standoff Missile（JASSM）のようなミサイルのキャリアとしての活用¹⁰²といったアイデアベースの研究にも取り組んでいる¹⁰³。こうした成層圏のプラットフォームに関心が集まる一方で、米軍は各プラットフォームの実用化に向けた技術的な課題として、機体の軽量化、蓄電、飛行船の熱制御、低高度帯での航行、システム信頼度の向上があり、実用の段階へ移行するためには、段階的な投資と忍耐が必要であると慎重な姿勢も示している¹⁰⁴。

米国では、商業における成層圏の活用が盛んに進められており、機体の開発だけでなく、離発着のための宇宙港の建設も同時に進められている。サブオービタル機について、アンサリ・X プライズの成果を引き継いだ Virgin Galactic 社の SpaceShipTwo はパイロット 2 名を含む 8 人乗りの有翼の機体（HTHL: Horizontal take-off and horizontal landing）がある。高度約 15km までは母機の White Night Two に牽引された後、切り離され、ロケットエンジンによりサブオービタル飛行する¹⁰⁵。2023 年 11 月時点で 5 回の商業飛行に成功している¹⁰⁶。また、Blue Origin 社の New Shepard は 6 人乗りの有人カプセルを搭載した再使用可能な垂直離発着型（VTVL: Vertical take-off and vertical landing）のサブオービタル機を開発しており、2021 年 7 月に初の商業飛行を成功させている。前述の Loon 社の気球はケニア、ペルー、プエルトリコの数十万人のユーザに通信ネットワークを提供したが現在は事業を終了

¹⁰¹ Suborbital Strike!, p.41.

¹⁰² Lake, battlefield surveillance, pp.20-21.

¹⁰³ David Hambling, “Why These Badass Balloon Are the Pentagon’s New Secret Weapon,” November 11, 2021, p.8.

¹⁰⁴ Tingle, the Balloon Goes Up, p.73.

¹⁰⁵ 日本宇宙フォーラム「我が国の民間参入に資する有人宇宙飛行の法整備に関する調査」、2020 年 6 月 13 日、8-9 頁。

¹⁰⁶ Jeff Fourt, “Virgin Galactic carries researchers on fifth commercial suborbital flight,” SPACENEWS, November 2, 2023.

し、その成果と技術が他の HAPS 開発に生かされている。この他、Sceye 社は、150kg 以上のペイロードを積載して 10~15m/s で飛行可能な飛行船型のプラットフォームを開発し、米国環境保護庁とパートナーシップを締結し、資源開発の観測や通信接続のサービス提供の実証を進めている¹⁰⁷。このような商業における成層圏の活用は、宇宙領域でのそれと同様に、成層圏アセットや成層圏サービスの低価格化をもたらし、安全保障分野での活用をより一層加速化させる可能性を持っている。

(2) 欧州

英国は、HAPS に関して大きな関心を寄せている。2015 年 11 月、戦略防衛レビューにおいて、デーヴィッド・キャメロン首相 (David Cameron) は高高度での ISR 能力の向上を表明した¹⁰⁸。そして、国防省が AETHER プロジェクトを立ち上げ、気球やソーラープレーン等の常続的に成層圏を飛行するプラットフォームによる通信と ISR 能力の実証に取り組んでいる¹⁰⁹。具体的には、HAPS 運用コンセプトデモンストレーター (OCD: Operational Concept Demonstrator) としてエアバス社の無人ソーラープレーン Zephyr を用い、戦略軍と協力して実証を進めている¹¹⁰。今後、ISR 機能の強化のため Zephyr を 3 機取得する予定である¹¹¹。この他、BAE システムズ社とプリスマテック社が共同で無人ソーラープレーン PHASA-35 を開発しており、英国国防省が既に同機を発注している模様である¹¹²。エアバス社が開発する Zephyr は、RQ-4B や通常の航空機のような高速応答性のよい機体ではなく、55km/h と低速であり、高高度への到達に 1 日を要するものの、最大 3 か月も滞空し続けることができる。この機体は最大積載量が約 20kg、電力出力も低出力に限られるため、アクティブレーダーのような高性能な器材等は搭載できないものの、一定の範囲に滞空することで地上レーダーサイトのように特定の監視範囲から継続して情報が得られる利点がある¹¹³。また、Zephyr は、HAPS 用に設計されたペイロードだけでなく FMV と IMINT 機器の搭載といった柔軟なペイロードの変更も検証している¹¹⁴。センシングと通信を目的としたもう一つの機体 PHASA-35 も、Zephyr と同様、高度 18,300m での巡航を既に達成している。

その他の欧州での取組みとしては、チェコ、フランス、ドイツ、ハンガリー、イタリア及びスペインの各国防省からの支援を受けた EuroHAPS 実証プロジェクトとして、多様な任務を担う HAPS に向けたタレス・アレニア・スペース社とレオナルド社との共同研究開

¹⁰⁷ HAPS Alliance 「成層圏航空機が挑むデジタルデバインド解消」2021 年 12 月、22 頁。

¹⁰⁸ “A look at the Zephyr 8, Britain’s new surveillance aircraft,” UKDJ, August 16, 2016.

¹⁰⁹ “UK launches Project Aether for stratospheric global comms, ISR,” JANES, December 10, 2021.

¹¹⁰ UKGov, “Joint Forces Command Operational Concept Demonstrator flies for over 25 days,” August 10, 2018.

¹¹¹ 生天目、ゲームチェンジングテクノロジー、39-40 頁。

¹¹² 同上、40 頁。

¹¹³ 最大 18cm 解像度の光学画像 (最新の商用衛星でも最大 30cm 程度)、70cm 解像度の赤外線画像、高品質映像の取得や各種電波の受信が可能 (AIRBUS, “Zephyr,” <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/uas-solutions/zephyr>, accessed February 10, 2024.)。

¹¹⁴ Andrew White, “Connected Military SATCOM Enables Navies to Share Common Picture,” Naval Forces, 2016, p.34.

発が始まっている¹¹⁵。

(3) 中国

中国空軍 (PLAAF: People's Liberation Army Air Force) は統合航空宇宙能力「空天一体」を推進する¹¹⁶とともに、「中国軍事戦略の科学」において、技術の発展によって活動範囲が近宇宙¹¹⁷及び深宇宙に拡大しているとしている¹¹⁸。具体的なプロジェクトについては、不明な点が多いものの、既に成層圏を含む高高度での活動として WZ-7 等の HALE UAS を用いた台湾周辺海域等における運用¹¹⁹や気球による気象観測や情報収集が確認されている。PLAAF は、気象観測用気球やその他の成層圏飛行船が人民解放軍の航空宇宙戦略にとって重要であるとして「大規模な監視プログラム」を推進しているとみられている¹²⁰。こうした技術の開発は、軍と研究機関が密接に連携している。例えば、長期滞空が可能なスーパープレッシャー気球の運用は、人民解放軍、中国科学院 (CAS: Chinese Academy of Sciences) 及び中国気象局 (CMA: China Meteorological Administration) の 3 つの機関が実施しており、CAS 及び CMA は軍民融合施策により中国人民解放軍に協力しているとみられている。他のプロジェクトとしては、中国航天科技集团有限公司による長距離通信中継のためのソーラー発電式無人機「Cai Hong」の開発や、ISR 及び通信のための軍民共用の近宇宙飛行船「Yuanmeng」のほか、長時間飛行できるステルス無人機や高度 20km 以上を飛行できる HALE UAS を開発しているといわれている¹²¹。その他、中国は極超音速技術の開発にも注力しており、中国航天科技集团有限公司が超音速機や超音速兵器に必要な極超音速飛行に不可欠な要素技術の確認のため極超音速飛行実験機「Xing Kang-2」を開発し、最高高度 30km での飛行試験を実施している^{122,123}。この他にも、スペースプレーン「騰雲プロジェクト」や近宇宙無人機による統合ネットワークを構築する「飛雲プロジェクト」が進められている模様である^{124,125}。

(4) 日本

政府における成層圏活用の取組みとして、総務省 (旧郵政省) 及び文部科学省 (旧科学技術庁) が主体となり、成層圏での通信・放送及び地球観測等に利用するシステムの構築

¹¹⁵ “European Commission invests in high-altitude platforms,” JANES, March 9, 2023.

¹¹⁶ 防衛省防衛研究所『中国安全保障レポート 2016』、2016 年、20 頁。

¹¹⁷ 近宇宙とは地表から 20~100km に位置する空域を指す。

¹¹⁸ China Aerospace Studies Institute, Science of Military Strategy2020, January, 2022, p.394.

¹¹⁹ 統合幕僚監部「中国軍機の動向について」2023 年 1 月 1 日。

¹²⁰ “US says Chinese Military behind vast aerial spy program,” Military.com, February 9, 2023.

¹²¹ 生天目、ゲームチェンジングテクノロジー、40-42 頁。

¹²² China Aerospace Studies Institute, “Science of Military Strategy2020,” January, 2022, p.36.

¹²³ 生天目、ゲームチェンジングテクノロジー、185 頁。

¹²⁴ 「次世代天地往復飛行機『スペースプレーン』を中国が開発中」科学技術振興機構、2018 年 3 月 8 日、https://spc.jst.go.jp/news/180301/topic_6_04.html、アクセス日 2024 年 3 月 10 日。

¹²⁵ 「太陽光無人機、宇宙 LAN の建設で段階的な成果」科学技術振興機構、2019 年 3 月 19 日、https://spc.jst.go.jp/news/190303/topic_2_02.html、アクセス日 2024 年 3 月 10 日。

を目指し、平成10年度から平成16年度にかけて研究開発された飛行船型のSPFがある¹²⁶。SPFについては、太陽光発電と再生型燃料電池を動力源として開発されていたものの、当時、要求エネルギー密度が350Wh/kgと最高レベルのリチウムイオン電池の理論値に近く適用が困難と判断され実証が終了している¹²⁷。宇宙航空研究開発機構（JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency）における研究開発においては、防災や安全保障に貢献すべく高度16.5km以上で72時間以上飛行できる高高度滞空型無人機の研究が進められている¹²⁸。また、JAXAでは宇宙科学研究所の大気球実験グループが1971年以来、10kg程度の軽量観測器による50km以上の高高度での科学観測等のため大気球を開発し、運用実績を有しており¹²⁹、大樹航空宇宙実験場（TARF: Taiki Aerospace Research Field）において継続的に多様なミッションペイロードを搭載した実験をし得る気球の開発・運用を実施している¹³⁰。

防衛省・自衛隊は、情報機能強化のため中期防衛力整備計画（平成26年度～平成30年度）（平成25年12月17日）において滞空型無人機の取得に着手し¹³¹、2022年12月にRQ-4Bを運用する偵察航空隊を新編している¹³²。また、防衛装備庁において、戦略的に重要な分野における技術的優越を確保するため中長期的な研究開発の方向性を示す「研究開発ビジョン」として「将来無人装備に関する研究開発ビジョン～航空無人機を中心に～」を策定し、無人装備の研究開発のロードマップを示している¹³³。さらに、防衛力整備計画（令和4年12月16日）において、重層的な警戒監視態勢の構築等を目的として滞空型無人機（UAV）を導入するとしている。

日本においても商業通信分野及び観光（レジャー）・輸送分野での研究開発が進んでいる。日本電信電話株式会社とスカパーJSAT株式会社は合弁企業を設立し、宇宙統合コンピューティング・ネットワークの取組みを推進しており、その中の宇宙RAN（Radio Access Network）¹³⁴事業において、人工衛星に加え、Zephyrを開発するエアバス社と提携しHAPSを用いた

¹²⁶ 文部科学省「成層圏プラットフォーム研究開発の概要」、2005年7月21日。

¹²⁷ 新エネルギー・産業技術総合開発機構「『次世代衛星基盤技術開発プロジェクト（衛星搭載用リチウムイオンバッテリー要素技術開発に係るもの）』事後評価報告書」、2009年9月、270頁。

¹²⁸ 野口恵理子、原田正志、高寄浩一、久保大輔、平林大輔、原田賢哉「高高度滞空型無人機のためのハイブリッド推進システム」日本航空宇宙学会第46期年会講演会、2015年10月、1頁。

¹²⁹ 山上隆正「高度50km以上を目指す気球の研究」『宇宙科学研究本部ISASニュース』No.271、2003年10月、1頁。

¹³⁰ 福家英之「2022年度の大気球実験概要」2022年度大気球シンポジウム、2022年11月、1-4頁。

¹³¹ 国家安全保障会議「中期防衛力整備計画（平成26年度～平成30年度）について」、2013年12月17日。

¹³² 航空自衛隊「偵察航空隊の新編について」、2022年12月15日。

¹³³ 防衛装備庁「将来無人装備に関する研究開発ビジョン～航空無人機を中心に～」、2016年8月。

¹³⁴ 第5世代の移動通信システム5Gの次の世代の情報通信インフラBeyond5G（6G）におけるコミュニケーション基盤であり、空・海・宇宙等のあらゆる場所での通信エリアの拡張が期待できる非地上系ネットワークNTN（Non-terrestrial Network）として低軌道及び静止軌道の人工衛星やHAPSを基地局として活用するもの。

モバイル基地局によるアクセスサービスの提供について研究が進められている^{135, 136}。ソフトバンク株式会社は、AeroVironment Inc.と共にソーラープレーン SunGlider の開発及び実用化を進めている。観光（レジャー）・輸送分野は、2021年6月に文部科学省が公表した「革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会中間取りまとめ」において、2030年のサブオービタル飛行を含む宇宙旅行の需要予測が約3,400億円の市場となることを見越し、高速二地点間輸送等を想定した「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」の研究開発を進めるとしている¹³⁷。2019年6月26日には「サブオービタル飛行に関する官民協議会」が設立され、サブオービタル機の往還飛行について、安全性を確保するとともに、民間事業者の計画的な技術開発に資するよう、必要な環境整備に関する検討を進めている¹³⁸。既にPDエアロスペース社及びSPACE WALKER社が有翼型宇宙飛行機を、宇宙輸送システム社及びSpace Transit社が単段式ロケット（宇宙往還機）をそれぞれ開発中であり、これら企業は2022年12月にJAXAとの「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」に係る事業コンセプト共創活動として覚書を締結している¹³⁹。サブオービタル飛行は、法制度面において、国内法上、飛行する物体が宇宙活動法第2条に規定する「人工衛星」に該当しないため、同法の対象外になるとされ、既存の枠組みでは対応できないことに鑑み、法整備の検討が行われている¹⁴⁰。

4 課題等

(1) 制度面

成層圏での飛行については、現段階において成層圏を活用するプラットフォームに特化して定められた規則が存在しておらず、法規・基準整備が必要である¹⁴¹。現状として、国内においては既存の航空法、航空機製造事業法並びに国際周波数管理及び電波法での対応になる。ソーラープレーン等は航空法における無人航空機に該当すると考えられており、飛行には同法に定める国土交通大臣の許可と承認を受けることが必要である¹⁴²。無操縦者航

¹³⁵ 鈴木耕世、堀茂弘、兼清知之「宇宙統合コンピューティング・ネットワークの取り組み概要」『NTT技術ジャーナル』Vol.34、2022年10月、10-12頁。

¹³⁶ 岸山祥久、外園悠貴、小原日向、深澤賢至「5G Evolution & 6Gに向けたHAPS研究開発の取り組み」『電子情報通信学会誌』Vol.106No.5、2023年5月、410頁。

¹³⁷ 笹子正成「我が国における宇宙輸送システムの現状と課題」『宇宙空間の利用をめぐる動向と課題 科学技術に関する調査プロジェクト報告書』国立国会図書館調査資料、2023年3月27日、39頁。

¹³⁸ ドアティ、無人航空機図鑑、147-149頁。

¹³⁹ JAXA「『高頻度往還飛行型宇宙輸送システム』に係る事業コンセプト共創活動を開始しました」2022年12月5日。

¹⁴⁰ 宇賀克也『逐条解説宇宙二法—人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律衛星リモートセンシング記録の適正な取扱いの確保に関する法律—』弘文堂、2019年、24頁。

¹⁴¹ 原田賢哉、村岡浩治、河野敬、久保大輔、石川和敏「JAXAにおける無人航空機システムの研究開発」日本航空宇宙学会第46期年会講演会、2015年10月、1頁。

¹⁴² 石川大輝「成層圏ドローンを日本の上空で飛行させる場合の法規制はどうなっているのか」『Nikkei Robotics』2020年5月号、2020年、31頁。

空機（RPAS: Remotely Piloted Aircraft System）¹⁴³については、同法による国土交通大臣の許可が必要であるとともに、飛行において関係管制機関との個別調整を実施している¹⁴⁴。成層圏気球であれば、航空法第99条2項に基づく届け出、電波法令、海上交通安全法及び放球点の利用届により実施される¹⁴⁵。加えて、一般的な航空機とは異なる考慮が必要となるため、別途許認可に関して検討する必要がある¹⁴⁶。

国際機関の状況については、18,300m を超える高度での運用を管理する概念が模索と議論の段階にあり、まだ定義されていない¹⁴⁷。例えば、国際民間航空機関（ICAO: International Civil Aviation Organization）がRPASの国際運航を対象に、国際民間航空条約の付属書を改訂してRPASに関する規則を国際基準化するため、遠隔操縦航空機システムパネル（RPASP: Remotely Piloted Aircraft System Panel）を設置している。このパネルでRPASを既存の国際航空システムに統合する方向で検討が進められ^{148,149}、2021年7月に国際基準の採択に至っている¹⁵⁰。しかしながら、高高度空域における有人・無人の航空交通に係る国際的な概念及び指針は定まっていない¹⁵¹。また、常時自動で自律運航する航空機や操縦者のいない自由気球は、航空管制と独立している点において、ICAOの取組み対象とはなっていない¹⁵²。

電波管理についてはHAPSのサービスの余地を拓げるための働きかけを民間主導で進められている。HAPSが使用する電波の使用について、ソフトバンク社は電波干渉の調整及びシステムデザインのための国際標準化¹⁵³や携帯電話基地局向け周波数帯の追加¹⁵⁴等を実

¹⁴³ 無人航空機（UA）の一形態として、遠隔地において操縦され、当該航空機に搭乗する操縦者が存在しない運航形態の航空機及びそのシステム全体をいう。

¹⁴⁴ 池内秀宜「気球に関する航空法の手続きについて」2021年度大気球シンポジウム、2021年11月、4頁。

¹⁴⁵ 秋山演亮「安心・安全な成層圏気球実験環境の構築を目指して」第14回UNISEC WG、2015年12月、4頁。

¹⁴⁶ 石川、成層圏ドローンの法規制、31頁。

¹⁴⁷ GSMA, High Altitude Platform Systems, p.7.

¹⁴⁸ 飯塚秋成、鈴木真二「無人航空機の安全確保に関する制度設計の動向について国際民間航空機関（ICAO）における議論を中心に〜」『日本航空宇宙学会誌』第61巻第12号、2013年12月、394頁。

¹⁴⁹ ICAOは2007年に設置の無人航空機スタディグループ（UASSG）で無人航空機に関する国際規則等について議論。2014年、UASSGは遠隔操縦航空機システムパネル（RPASP）へと改組し、遠隔操縦航空機に関連する付属議定書の改正等について議論している。また、「無人機システムの規則に関する航空当局間会議」（JARUS: Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems）において、ICAOで検討対象外のもの（自律システム、気球等）を含めた無人機システムに関する国際的規則が検討されている（国土交通省航空局安全部安全企画課「無人機に関する現状と課題」、2015年4月）。

¹⁵⁰ ICAO, “ICAO Council makes progress on new remotely piloted aircraft system(RPAS) standards,” March 1, 2021.

¹⁵¹ 外務省「高高度空域における民間航空機の運航に関する規則整備についての共同ステートメント（仮訳）」、2023年12月18日。

¹⁵² 飯塚、無人航空機の制度設計の動向、394頁。

¹⁵³ ソフトバンク株式会社「ITU-RでHAPSの『システムデザイン用電波伝搬推定法』のモデルが国際標準化を達成」、2023年10月26日。

¹⁵⁴ ソフトバンク株式会社「2023年世界無線通信会議（WRC-23）においてHAPSの携帯電話基地局向け周波数帯の追加が正式決定」、2023年12月28日。

施している。今後、ガバナンスが不足している部分に対応するため、国内外での検討が進み、段階的に制度が整備されていくことが期待される。

サブオービタル飛行については一義的な定義が困難であり、各国法制の統一も図られていない状況にある¹⁵⁵。現時点では国内で完結する飛行のため国内法での対応となる。しかし、国内法では民間事業者による有人宇宙飛行を法的に定義する規定が存在しておらず、サブオービタル機の打ち上げが宇宙活動法により規制されるのか定かになっていない。日本の環境整備がサブオービタル法制を整備している米国、英国及びニュージーランドに比べ十分でないことにより、民間事業者の事業展開の足枷となっている。こうした状況に鑑み、宇宙基本計画行程表（平成30年12月改定）が改訂された。民間の取組状況や国際動向を踏まえつつ、航空法及び宇宙活動法の両方の適用による課題への対応等必要な環境整備の検討が開始され¹⁵⁶、前述の「サブオービタル飛行に関する官民協議会」では、制度整備に係る検討を進めている¹⁵⁷。ICAOは国際機関の立場として、サブオービタル飛行に関するワーキングペーパーを公表し、ロケットエンジンで推進するサブオービタル機は国内法によって規律すべきとしており、将来的な高速二地点間輸送の場合にあっては国際航空運送に該当するという見解を示している。その一方で、サブオービタル機の飛行が航空交通に与える影響等に鑑み、ICAO/OOSA（the Office for Outer Space Affairs of the Secretariat）Space Learning Group（SLG）において商業宇宙輸送に関する議論が行われている¹⁵⁸。

（2）運用面

運用面については、プラットフォームの展開に係る制約と安全の確保が重要な課題となる。まず、展開に際して打上げ、機動及び回収に係る制約を克服することが必要となる。LTAは浮力ガスを注入した後、浮力と地表付近の風により不安定な状態となる。既存の気球であれば最小限の設備で済むものの¹⁵⁹、大型化した機体を使用する場合は、安全に放球するための設備が必要となる。また、HTAであれば、60mを超える翼長の大きな機体の離着陸に適合した広い滑走路幅の滑空場及びメンテナンスのための特別な設備を確保する必要がある¹⁶⁰。さらに、24時間飛行するソーラープレーンであれば、発電と蓄電の都合上、日照時間を十分に確保できる緯度40度より低緯度でしか運用できない制約を理解した上で飛行させなければならない¹⁶¹。運航の信頼性と安全性の確保も重要である。米国では、2006年にRQ-4がFAAから500件もの耐空条件を満たした上、安全性と将来性に関する検

¹⁵⁵ 日本宇宙フォーラム「我が国の民間参入に資する有人宇宙飛行の法整備に関する調査」、2020年6月30日、8頁。

¹⁵⁶ 内閣府「サブオービタル飛行に関する官民協議会について」、2019年6月26日。

¹⁵⁷ 日本宇宙フォーラム「我が国の民間参入に資する有人宇宙飛行の法整備に関する調査」、2020年6月30日、13-14頁。

¹⁵⁸ 日本宇宙フォーラム「我が国の民間参入に資する有人宇宙飛行の法整備に関する調査」、2020年6月30日、47頁。

¹⁵⁹ Staats, Mind the Gap, p.78.

¹⁶⁰ GSMA, High Altitude Platform Systems, p.59.

¹⁶¹ Harry Lyon, Gokhan Inalhan, Daniel Bourne, Antonios Tsourdos, “High-Altitude UAS Pseudo-Satellites Architecture for End-to-End Military Communication,” 2021, p.16.

証を完了して初めて国内で運用開始している¹⁶²。成層圏のプラットフォームの多くが UAS となることから UAS に係る制度面における規制への適応と合わせ、衝突防止のための機構、航空安全、海洋安全及び地上安全の観点から関係機関に対する事前連絡及び協議も必要となる¹⁶³。また、運用時の各種安全対策として、上昇下降時において晴天無風であること及び風速が穏やかな高度を飛行することが求められる¹⁶⁴ため、高精度な気象予測も重要となる。加えて、見新しい成層圏のプラットフォームの運用において、教育訓練も行う必要がある。運用者に対する取扱いに係る教育と慣熟訓練を十分に実施することが重要であり、特に、プラットフォームの種類に応じたメンテナンスや運用要領にも留意しなければならない¹⁶⁵。

(3) 技術面

今日の HAPS 等の開発は、耐久性、コスト及び重量に優れた新たな材料、太陽光、水素及び電池といったエネルギー並びに人工知能等の特定の技術の発展により実現しているものの、未だ克服すべき技術的課題がある。具体的には、耐久性のある軽量構造、蓄電、熱管理、システムの信頼性、ナビゲーション技術等が挙げられている¹⁶⁶。例えば、機体は地上と上空での温度差、直射日光、昼夜のサイクル等により $-50\sim 40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲に耐える必要がある。そして、揚力または浮力を得るための機体構造が長大となるが、滞空性能（航空機の高効率化）及び空域統合／安全性（衝突防止等）¹⁶⁷を確保しつつ、軽量かつ紫外線や突風に対する耐久性をもたせる必要がある¹⁶⁸。成層圏のプラットフォームの構造上の課題については、高高度の大気が薄いことから紫外線の影響を強く受けるため、機体表面の劣化防止を施さなければならない。他方で、反射コーティング等の処置によってレーダー反射断面積が大きくなり、ステルス性は低下する。上昇及び下降に受ける負荷に耐え得る構造的な強度を強化することにより機体重量が増加し、ペイロード重量が減少してしまう。そのため、用途に応じたプラットフォームの適合も必要である¹⁶⁹。用途によっては、ペイロードの増大、機体サイズや必要電力の増大となり、プラットフォームへの適合により多くの困難が伴う可能性がある。例えば、太陽光発電技術においては、ペイロードの消費電力によっては最も有利な緯度帯であっても、操縦のための電力として効果的な供給ができる可能性は低くなる¹⁷⁰。こうした技術的課題等の解決のためには開発コストが膨張する傾向

¹⁶² 神田英宣「UAV の開発・運用動向と日本の安全保障」『防衛研究所紀要』第 15 巻第 2 号、2013 年 2 月、47 頁。

¹⁶³ 矢島、気球工学、132 頁。

¹⁶⁴ 武藤隆一、弓削信子、堀込淳一「成層圏プラットフォーム 風観測・予測システム」『東芝レビュー』vol.60 no.11、2005 年、12 頁。

¹⁶⁵ GSMA, High Altitude Platform Systems, p.59.

¹⁶⁶ Ibid., p.58.

¹⁶⁷ 原田賢哉、村岡浩治、河野敬、久保大輔、石川和敏「JAXA における無人航空機システムの研究開発」日本航空宇宙学会第 46 期年会講演会、2015 年 10 月、1 頁。

¹⁶⁸ GSMA, High Altitude Platform Systems, p.58.

¹⁶⁹ Ibid., p.58.

¹⁷⁰ Tingle, the Balloon Goes Up, p.70.

があり、現に実用化できている事業は一部に限定される。特に、大型で機動力のある飛行船の開発では、多くのリソースをかけて技術的課題を克服する必要があり、多くのプロジェクトが中断している。飛行制御については、動力装置を付けた場合、重量増加と放熱により、ペイロード重量の減少や赤外線による被探知の可能性がでてくるため、設計段階での検討が重要である。このようにプラットフォームの開発におけるトレードオフが多いため、ユーザの要求の明確化が求められる。現状のところ、これらの課題に対して、HTAによる商業通信インフラの提供を狙う通信事業者、宇宙旅行や衛星打ち上げサービスの提供企業が業界横断的に協力しつつ、実績のある技術の継承や新たな技術の導入等の試みによる課題解決が継続されている。

(4) その他

成層圏に係る各プロジェクトは、過去の軍や政府主導の研究開発において、成果に結びつかなかった事例や、採算をとることができず撤退したコンコルドのような事例があった。成層圏の活用が実用化の途上にあるプラットフォームによる新たな取り組みであることを踏まえ、適切な事業管理が必要である。他方で、成層圏は商業面だけで事業が成り立つことは難しい¹⁷¹ため、次世代通信に向けた取り組みやサブオービタル機等の打ち上げコストの推移¹⁷²といった民間での開発動向に注視しつつ、安全保障上必要な施策は政府による事業投資を積極的に行う必要がある。

また、成層圏に関する理解の不足に起因する組織的抵抗も課題となる。宇宙領域がもたらす能力に対する関心が高まるにつれ、より宇宙システム全体の機能保証の重要性は大きくなる。米国南北戦争において、気球運用を担う陸軍航空隊が保守勢力の組織的抵抗¹⁷³によって解散させられた事例に鑑み、成層圏の活用がもたらす機能保証面の利点を認識し¹⁷⁴、変化に対する組織的抵抗の克服が重要となる¹⁷⁵。

おわりに

成層圏に係る基本的事項として成層圏活用の変遷、成層圏の価値、各国の動向、今後の課題について紹介した。成層圏は、安全保障面において過去に何度も注目を集めてきたものの、技術的な障害や、宇宙能力の発展によるニーズの変化等を受け、研究開発は下火となった時期があった。しかし、近年の科学技術の発展、商業的利用の進展、宇宙の機能保証に係るニーズの高まり等を受け、再び脚光を浴びている。ウクライナ戦争に関する報道

¹⁷¹ Staats, Mind the Gap, p.83.

¹⁷² サブオービタル機の単価は現在のファーストクラスの価格である 600 万円/人程度まで低コスト化することでマーケットが確立するといわれている（浅川恵司、長谷川敏紀「サブオービタル宇宙旅行の現状と将来」第 60 回宇宙科学連合講演会講演集、2016 年 9 月、2 頁。）。

¹⁷³ 南北戦争において、アブラハム・リンカーンは、作戦支援のための気球の使用を支持し、気球を運用する航空隊を設立したものの、運用上の制約、精度にばらつきがある情報伝達に関して軍隊内の官僚組織内での理解が進まず、戦争途中で解散することとなった（Hannah Chan, “Civil War Ballooning: The First U.S. War Fought on Land, at Sea, and in the Air,” FAA history intern.）。

¹⁷⁴ Staats, Mind the Gap, p.76.

¹⁷⁵ Ibid., p.80.

では、現代の戦争において、新興技術を積極的に作戦に取り入れることで有利に戦いを進めていると言われている。数年後、成層圏を活用するプラットフォームが多くの国で活用されているかもしれない。安全保障に係る成層圏利用に関し、周辺国との能力上の均衡が崩れることがないように、引き続き、成層圏を取り巻く動向に注目していく必要がある。

かどのその しゅんご

門之園 峻伍 3等空佐

(防衛大学校理工学研究科・元運用理論研究室研究員)

防衛大学校航空宇宙工学科卒業、米宇宙軍宇宙導入課程修了。

航空自衛隊入隊後、航空幕僚監部運用支援・情報部運用支援課、幹部学校航空研究センターなどを経て現職。

本レポートにおける見解は、航空自衛隊幹部学校航空研究センターにおける研究の一環として発表する執筆者個人のものであり、防衛省又は航空自衛隊の見解を表すものではありません。