

宇宙物体の大気圏再突入と地上被害に 対処する法的・政治的枠組みについて

坂口 滉季

はじめに

I 宇宙物体の再突入をめぐる問題

- (1) 宇宙空間の混雑化の問題
- (2) 宇宙物体の再突入による脅威

II 宇宙物体の再突入による被害の事例

- (1) 大質量宇宙物体の再突入
- (2) 毒性のある物質の地上への飛散
- (3) 高耐久の物質の再突入

III 宇宙物体の再突入に対する政策的・法的な対処と枠組み

- (1) 予防措置
- (2) 宇宙状況監視による被害の予測と迎撃による被害の防止
- (3) 宇宙損害責任条約による事後措置

おわりに

はじめに

2021年5月9日、打ち上げに失敗し、地球軌道上へ到達したものの制御が失われ、宇宙ごみ（スペースデブリ）となった中国の大型ロケット「長征5号B」が大気圏に再突入し、インド洋上に落下した¹⁾。中国政府はロケットの大部分は大気圏再突入時に燃え尽きたとしているが、米国防総省は再

1) 朝日新聞，2021年5月10日，朝刊。

突入の前に、ロケットが完全な形で落下してくるのではないかと懸念を表明していた²⁾。この長征5号Bロケットはかなりの質量を持ち、落下時の破片もかなりの大きさになったため、もし陸地、特に人口密集地などに墜落したならば甚大な被害も予想された³⁾。特にこの再突入では、ロケットが地球の人口の大部分が住む北緯41.5°～南緯41.5°の間に落下することが想定されたため、注目を集めた⁴⁾。ロケットは運よく海上に落下したが、落下地点は制御出来ておらず、地上被害が発生する可能性はあった。

このように地球上から打ち上げられた物体が、一度宇宙空間に到達した後、再び地上へと戻ってくることを、再突入（reentry）という。本論文は、再突入してきた宇宙物体について、①どのような宇宙物体の再突入が地上にとっての脅威となるのか、②これまでに宇宙物体の再突入が地上にどのような被害を及ぼし、その際にどのような措置が取られてきたのか、③地

2) 朝日新聞、2021年5月7日、朝刊。

3) アメリカ合衆国連邦航空局の資料によれば、長征5号Bロケットの長さは約57mブースターを含めて約879tにもなる。ただし、打ち上げの途中でブースターは切り離されていくので、これよりも重量は少なくなる。CNNの報道によれば、落下時の重量は約22tである。また、Space Newsの報道によれば、地上に落下した破片は長さ約30m、幅約5mとされている。打ち上げ時の重量に関しては、以下を参照。Federal Aviation Administration, *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2018*, 2018, pp. 180-181. 落下時の重量については、以下を参照。CNN, "Pentagon tracking out-of-control Chinese rocket that could reenter Earth's atmosphere", <https://edition.cnn.com/2021/05/04/politics/chinese-rocket-earth-scn/index.html>, Accessed on May 24, 2021. 落下時の破片の大きさについては以下を参照。Space News, "After Chinese rocket reentry, DoD calls for countries to 'behave responsibly'", <https://spacenews.com/after-chinese-rocket-reentry-dod-calls-for-countries-to-behave-responsibly/>, Accessed on May 24, 2021.

4) Aerospace, "SPACE DEBRIS EXPERT DISCUSSES LONG MARCH 5B REENTRY", <https://aerospace.org/article/long-march-5b-rocket-debris>, Accessed on July 24, 2021.

上への脅威となりうる宇宙物体の再突入について、どのような政策的・法的な対処の枠組みがあるのか、を明らかにする。

先行研究として、加藤明の『スペースデブリ：宇宙活動の持続的発展をめざして』(地人書館, 2015年)があり、スペースデブリの再突入による地上被害の防止について検討を行っている⁵⁾。ただし、この研究はデブリ問題が主題である。そのため、再突入に関してはその物体の脅威に焦点が当てられおり、再突入をめぐる法的・政策的な枠組みについての検討が不十分である。また事例についても、幾つかの重要な事例が説明・検討されていない。

本論文はⅠ～Ⅲの3つの部分で構成される。

Ⅰでは、宇宙物体の地球への再突入による脅威について、その背景にある宇宙空間の混雑化の問題も含めて検討する。また、どのような宇宙物体の再突入が脅威となるのかを検討する。

Ⅱでは、宇宙物体の地球への再突入による被害の事例、および被害が見込まれた事例について、大質量宇宙物体の再突入、毒性のある物質の飛散、高耐久の物質の再突入、の3つに分けて検討する。それぞれの検討においては、どのような物体が再突入し、どのような被害が出たのか、あるいは出る可能性があったのか、それに対してどのような対処がなされたのか、という点に注意する。

Ⅲでは、宇宙物体の再突入をめぐる政策的・法的な枠組みについて予防措置、宇宙状況監視と迎撃、宇宙損害責任条約による事後措置の3つを検討し、それぞれがどのように機能しており、またどのような問題があるのかを他の宇宙開発上の問題に対処するための政策的・法的な枠組みと比較しながら考察する。

おわりに、ではⅠ～Ⅲの検討を踏まえた上で、本研究の結論を述べるとともに、本研究の限界と問題点について検討する。

5) 加藤明(2015)『スペースデブリ：宇宙活動の持続的発展をめざして』地人書館, 114-126頁。

I 宇宙物体の再突入をめぐる問題

(1) 宇宙空間の混雑化の問題

地球を周回する軌道である地球周回軌道（以下、地球軌道）上には多くの物体が存在し、そのほぼ全てが人類の宇宙開発の過程で発生したものである。それらの地球軌道上の宇宙物体は宇宙ステーションを含む稼働中の人工衛星（宇宙機）と、それ以外とに大別され、後者のほとんどがスペースデブリである。これらの地球軌道上の宇宙物体の数は、近年になって急速に増加している。軌道上の宇宙物体の増加は宇宙物体相互の衝突の危険を拡大し、ひいては人類の宇宙利用全体に対する脅威となっている。この、「軌道上の物体が増加し、それらの相互の衝突の危険が拡大する問題」を「宇宙空間の混雑化の問題」と定義する。

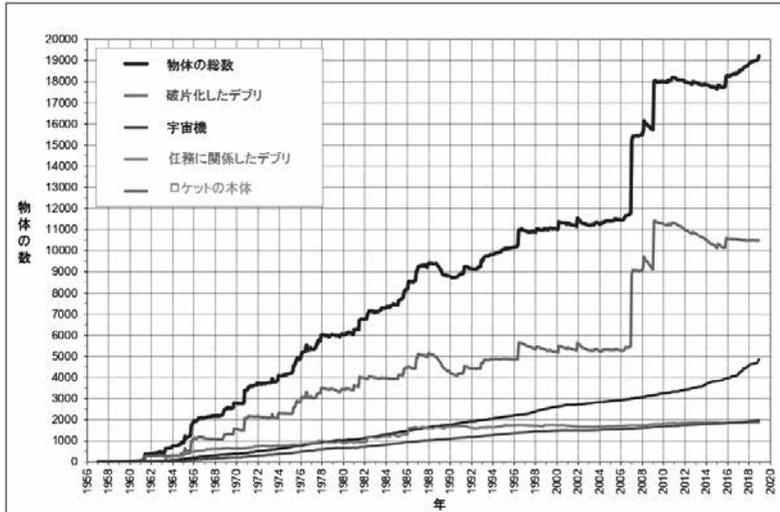
「宇宙空間の混雑化の問題」の現状を、以下の図1から確認する。

図1で宇宙物体は破片化したデブリ、宇宙機、任務に関係したデブリ、ロケットの本体の4つに分類されており、宇宙機は人工衛星を指す。軌道上に残存したロケットの本体も軌道上では機能を持っておらず、地上からの制御も受け付けていないため、スペースデブリと見なすことができる。

まずスペースデブリの増減を検討すると、2000年代後半の2度にわたって破片化したデブリの数が急激に増加していることが読み取れる。これは2007年の中国のASAT実験、2009年の米露の衛星衝突事故（イリジウム＝コスモス衛星衝突事故）の影響によるデブリの増加である⁶⁾。また、任務に関係したデブリ、ロケットの本体は宇宙開発の黎明以来、増加を続けている。破片化したデブリは地上への再突入による自然減があるため、2010年代以降は細かな増加があるものの、横ばいあるいは減少の傾向にある。し

6) 前者は、中国の衛星迎撃実験によるデブリの拡散であり、後者は使用中の衛星とデブリとなっていた衛星とが衝突した事件である。

図1 月別の物体の種類による地球軌道上の物体数



(出典) Orbital Debris Quarterly News, Volume23, Issue1&2, p.13 を筆者が翻訳
(原注) 月別の地球軌道上のカatalog化された物体の数を、物体の種類別に示している。この図は、アメリカ SSN が公式にカatalog化した地球軌道上のすべての物体の概要を示している。「破片化したデブリ」は衛星分解デブリと異常事象デブリを含み、「任務に関連したデブリ」は計画された任務の一部として放出、分離、投下されたすべての物体を含む。

かし依然として10,000個以上の多くのデブリが軌道に残存している⁷⁾。スペースデブリの制御は不可能であり、その増加は衝突リスクの増大に直結する。

7) この数字は、図1から読み取れる数であり、アメリカの宇宙監視網 (Space Surveillance Network: SSN) でカatalog化されているデブリの数である。スペースデブリの総数については、10cm以上のデブリが2万3,000個、1cm以上10cm未満のデブリが90万個、1mm以上1cm未満のデブリが1億2,800万個ほどあると考えられている。以下を参照。橋本靖明「宇宙ゴミ (スペースデブリ) への対応: 状況認識から総合的な宇宙利用政策へ」『海外事情』68巻2号, 2020年, 58-59頁。

次に宇宙機の増減について検討すると、2000年以降、特に2016年以降に急速に増加しており、しかも増加のスピードも加速しているのが見て取れる。この増加はデブリの減少分を上回り、軌道上の物体の総数の増加に寄与している。これは宇宙開発の活発化によるものであり、特にメガコンステレーションの構築が進んだことが大きな要因である⁸⁾。このグラフは2019年までのものであり、同年以降もスペースX社のコンステレーション、スターリンクの建設が進んでいるため、宇宙機の増加は更に進んでいる⁹⁾。宇宙機は推進能力を持っていたり、地上からの制御を受けていたりするため、衝突リスクの増大についてデブリよりも脅威は少ない。しかし、宇宙機の総数が著しく増加した場合には、衝突のリスクも増大する¹⁰⁾。

宇宙空間の混雑化は、有用性が高い地球低軌道（Low Earth Orbit:LEO）と地球静止軌道（Geostationary Orbit:GEO）で深刻化している¹¹⁾。LEOは

-
- 8) 「コンステレーション（Constellation）」とは、全地球規模で人工衛星を多数基配置したシステムのことを指す。地球が球体であるため、地球全体を単一の衛星でカバーするのは不可能なために構築される。定義は存在しないが、特に多数の衛星で構成されるコンステレーションをメガコンステレーションという。
- 9) 2020年にスペースX社は14回のスターリンク衛星の打ち上げを行い、総計で840個の衛星を打ち上げた。スターリンクは衛星通信によるインターネットの提供を目指している。同社はアメリカの連邦通信委員会から12,000基の衛星打ち上げの許可を取得しており、更に最大30,000基を打ち上げる書類を提出している。以下を参照。Space.com, “SpaceX’s very big year: A 2020 filled with astronaut launches, Starship tests and more”, <https://www.space.com/spacex-astronaut-starship-launches-2020-milestones>, Accessed on May 24, 2021.
- 10) メガコンステレーションであるスターリンクの構築は、宇宙物体の5 km以内の接近の可能性を約100%、1 km以内の接近の可能性を約50%増大させた。
- 11) 地球周回軌道は地上からの高度によって分類されており、明確な定義はないもののおおむね高度1,000km～2,000km以下がLEOに分類されている。欧州宇宙機関は高度1,000km以下をLEOとしており、NASAやJAXAなどは高度2,000km以下をLEOとしている。GEOは地球の自転周期と軌道周回周期とが一

地球からの距離が近いために、それを生かした高速度の通信、詳細なりモーター・センシングなどで使われる。GEOは地球赤道上の特定の場所の上空にとどまることが出来る軌道であり、気象観測や通信などで有用である。LEOは地球との距離が近いので、強い引力が働いており、LEO上の物体は最終的には地球へ落下する¹²⁾¹³⁾。

推進力を失って制御不可能となった人工衛星が軌道上に残存し、デブリとなるのを防ぐため、各宇宙機関や国際連合はスペースデブリの発生を防止するためのガイドラインを作成している。例えば、2007年に採択された国連スペースデブリ低減ガイドラインでは、LEO上の人工衛星の処分について、ガイドライン6で2つの方法を推奨している。1つは「管理された方法で軌道から除去すること」、もう1つは「LEO領域への長期的滞在を避ける軌道に廃棄すること」である。ただし、「LEOから物体を除去する」際には、「残存して地表に到達するデブリ」が環境汚染や、人的・物的被害を引き起こさないように配慮する義務がある¹⁴⁾。また国連スペースデブ

致する軌道であり、高度約35,786kmの軌道である。各機関のLEOの定義については以下を参照。European Space Agency, “LEO”, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Low_Earth_orbit, Accessed at July 19, 2021. NASA, “LEO Economy FAQs”, <https://www.nasa.gov/leo-economy/faqs>, Accessed at July 19, 2021. JAXA研究開発部門, “スペースデブリに関してよくある質問 (FAQ)”, <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/debris/deb-faq.html#:~:text=A3%3A%20E5%9C%B0%E7%90%83%E8%A6%B3%E6%B8%AC%E8%A1%9B%E6%98%9F%E7%AD%89,%E7%95%AA%E6%B7%B7%E9%9B%91%E3%81%97%E3%81%A6%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82>, Accessed at July 19, 2021.

12) 地球の引力と、後述する摂動のため、LEOにある人工衛星は頻繁に軌道を修正する必要があり、燃料を他の軌道よりも多く消費する。このため、人工衛星の寿命が他の軌道に比べて短くなる。

13) GEOの物体は多少の変動はあるものの、同じ線上を同速度で移動し続けるため、相対的な位置関係は変わらず、衝突の危険性が比較的低いものに対して、LEOの宇宙物体は多様な軌道を取っているため、衝突のリスクが相対的に高い。

り低減ガイドラインの作成に先立って、各国の宇宙機関で構成される国際機関間スペースデブリ調整委員会 (The Inter-agency Space Debris Coordination Committee: IADC) は2002年にスペースデブリ低減ガイドラインを作成している。

LEOにおける宇宙物体の増加は、人工衛星などの宇宙機であれば処分のために、デブリであれば地球の重力のために、宇宙物体の再突入の可能性を増大させている。宇宙空間の混雑化の問題は、軌道上の宇宙物体の総数の増加を通して、地球上へ宇宙物体が再突入し、地上へ落下する可能性を増大させた。

(2) 宇宙物体の再突入による脅威

ロケットや人工衛星など地上から打ち上げた物体が、一度大気圏を抜けて宇宙空間に到達した後に地球の大気圏へ再び突入することを、「大気圏再突入 (Atmospheric Reentry)」という¹⁵⁾。

この大気圏再突入は、意図的に行われる場合と、そうでない場合とがある。前者を制御再突入 (controlled reentry)、後者を非制御再突入 (uncontrolled reentry) という。制御再突入は、地球上から制御を受けており、かつ軌道を変更するための推進能力を持つ宇宙物体でのみ可能であり、なるべく地上への被害が出にくい場所を選んで再突入させることが一般的である。推進能力を持たない、あるいは地球上からのコントロールを何らかの形で失った宇宙物体が再突入する場合は非制御再突入となり、いつどこで大気圏に再突入するのかを制御できない。また軌道上では摂動が働き、計算上の再突入地点と実際の再突入地点が相違する場合がある¹⁶⁾。

14) 青木節子・小塚荘一郎編 (2019) 『宇宙六法』 信山社、75頁。

15) 「再突入 (reentry)」は、地球上から打ち上げられ、再び地球の大気圏へと戻ってくる場合のみを指す。そのため、飛来した小惑星の地球への墜落などは、本論文の検討の対象としない。

16) 「摂動 (perturbation)」は数学、物理学、天文学による用語であり、「主要

宇宙物体は再突入の際、高速で地球大気圏内に進入するため、その衝撃によって物体は破碎¹⁷⁾、「超高速で大気圏に突入した衛星の周囲は希薄な大気であるが先端部は超高压で圧縮されるために空気の壁が出現する。空気の壁は断熱圧縮により1万度以上に加熱され¹⁸⁾、それが衛星に伝わり千数百度まで昇温し¹⁹⁾」、再突入物は融解し、液体となって飛散する。そのため、通常の大気圏再突入で地球上に脅威がもたらされることは少なく、ほとんどの再突入は、地上にとっては無害である。しかし、幾つかの条件下での再突入は、地球上へ脅威をもたらす²⁰⁾。

まず大質量の物体が大気圏に突入した場合、全体が破碎・融解しきることなく、地上に脅威となる程度の質量を維持したまま、落下する可能性がある。更に、再突入の過程で生じた破片すらも地上に脅威を与えるほどの

部分に付加項による小さい補正が加わったものとみなして、全体の問題を近似的に解く場合」の付加項を指す。理論的には、地球軌道上を周回する物体は、1つの天体の周りにおける物体の運動についてのケプラーの法則に基づいたケプラー軌道を取る。このケプラーの法則とケプラー軌道とが主要部分であり、これ以外のもは全て摂動となる。より具体的には、他の天体（地球軌道上ならば月や太陽など）の引力、地球が真球ではなく歪んでいるために発生する理論とのズレ、宇宙空間に存在する微量な大気の抵抗、光（子）による圧力などが実際の宇宙空間においては作用しており、これらが摂動である。これらの摂動によって、宇宙物体の軌道がケプラー軌道から逸れることになる。摂動の具体的事例について、以下を参照。八坂哲雄『宇宙のゴミ問題：スペース・デブリ』裳華房、1997年、20-21頁。

- 17) 大気圏に高速で突入するため、真空中から大気の壁に打ちつけられて、破碎する。突入の角度によっては破碎されない場合もある。
- 18) 「断熱圧縮 (adiabatic compression)」は、熱力学の用語であり、外部との熱のやり取りを遮断 (断熱) した上で圧力を掛けることである。物体に対して断熱圧縮が起こると、通常、温度は上昇する。宇宙物体の大気圏再突入の場合には、瞬間的に高い圧力が掛かることになり、この現象が発生する。
- 19) 加藤 (2015)、114頁。
- 20) 以下の、再突入に地上への脅威となる宇宙物体の要素については、加藤 (2015) を参考にした。

質量を維持しながら再突入する可能性がある。

融解しても、脅威を維持し続ける物体も存在する。宇宙ロケットや人工衛星の動力源として使用される物質は有毒性があるものも多く、再突入による融解の後も、その有毒性が失われない場合がある。特に、原子力エネルギーを動力源とする人工衛星等が再突入した場合には、広範囲にわたって被害が出る可能性がある。

再突入する物体が、融点が高い物質、例えばチタン（融点1668℃）、タングステン（融点3422℃）などの金属、あるいは様々な合金が使用されていた場合、再突入の過程で十分に溶解せず、脅威を維持したまま、地上へと落下する危険性が高くなる²¹⁾。打ち上げや宇宙空間での人工衛星などの活動には相当の強度が必要なことも多く、チタンやタングステン、ステンレス合金などの融点が高い物質が一般的に使われている。

以上のように、再突入によって地球上へ被害をもたらす可能性がある宇宙物体は前述の3条件、大質量、毒性のある物質、高耐久の物質のうち、1つ以上の要素を有している²²⁾。これに加えて、非制御落下の場合、落下地点を制御できないがために被害がより大きくなる可能性が高まる。次節では、そのような地上に対して脅威となる宇宙物体の再突入について、具体例を挙げながら詳しく検討する。

Ⅱ 宇宙物体の再突入による被害の事例

(1) 大質量宇宙物体の再突入

大質量の宇宙物体としては、大型の無人衛星、宇宙ステーション、打ち上げに失敗した大型ロケット、それらから分離した部品などが存在し、こ

21) 金属の融点については以下を参照。国立天文台編『理科年表2021』丸善出版、2020年、419頁。合金の場合には、その金属の配合によって融点に変化する。

22) 再突入ではなく、「突入」する宇宙物体、つまり地球大気圏へ突入する小惑星なども、地上に脅威をもたらす場合は同様の要素を備えている。

れらは100t以上にも達する場合がある²³⁾。宇宙ステーションなど有人で運用が行われる人工衛星などは、緊急時の避難と往來の利便性を考慮してLEO、しかもかなり低い高度に存在することが多く、最終的には再突入する可能性が非常に高い。また、大質量の宇宙物体は総じて重要性が高く、地上からの観測も容易であって、その再突入は注目を集めやすい。

大質量の宇宙物体を制御再突入させる際には基本的には地上から離れた海上が選択され、特に到達不能極 (Pole of inaccessibility) と呼ばれる領域が選ばれることが多い。到達不能極とは、地上でも最も海から遠い点、もしくは海上で最も陸から遠い点を指す。特にポイント・ネモ (Point Nemo) といわれる最も近い地上から約 2,700km離れた太平洋上の到達不能極は大質量の宇宙物体の再突入によく使用されてきた²⁴⁾²⁵⁾。多くの大質量の宇宙物体の再突入は制御下で行われ、前述した到達不能極のような、地上被害が発生しない場所へと落下させられている。

しかし制御再突入の場合であっても、予期せぬ事態の発生や計算の間違いによって、地上被害が生じる可能性がある。その一例として、アメリカの宇宙ステーション、スカイラブ4号の再突入を検討する。

スカイラブ4号はアメリカが建造した科学実験用の宇宙ステーションであり、質量は約69,000kg、1979年7月11日に大気圏に再突入した²⁶⁾。この再突入はある程度まで制御されており、地上被害を避けるためにインド洋

23) ただし、再突入による融解のため、地上に到達した時の質量は大きく減じられる。

24) ポイント・ネモは南緯48度52分、西経123度23分の地点。以下を参照。Garcia-Castellanos D, Lombardo U (2007). "Poles of Inaccessibility: A Calculation Algorithm for the Remotest Places on Earth", *Scottish Geographical Journal* 123 (3): pp. 227-233.

25) ポイント・ネモに再突入した大型の宇宙物体としてソ連邦の宇宙ステーションであるサリュート、ロシアの宇宙ステーションであるミール、中国の宇宙ステーションである天宮1号の一部などがある。

26) 加藤 (2015), 115頁。

上で再突入する予定だったが、再突入による崩壊が計算よりも遅れたために墜落場所に誤差が生じた²⁷⁾。結果として本体は南太平洋上に墜落したが、地上への再突入の過程で生じた「デブリ」がオーストラリア西部に飛散した²⁸⁾。それによる被害は報告されていない。

スカイラブ4号は、その落下時期が正確に予期されており、軌道上での操作によって人口密集地の上空に再突入するのを避けるように意図されていた。それにも関わらず、破片が飛散することになり、地上被害が生じる可能性があった。このように地上への脅威を避けることが意図された制御再突入の場合でも、摂動や計算の誤り、予期せぬ事態の発生によって、地上への脅威となりうる。

更に非制御再突入の場合は、落下場所を特定できない場合があり、地上被害の可能性は高まる。

はじめに、でも紹介した、2021年5月9日の中国の大型ロケット、長征5号Bの再突入は非制御再突入の一例である。同ロケットは2021年4月29日に打ち上げられ、中国の新型宇宙ステーション、天宮3号を建設するための資材を運搬する予定だった²⁹⁾。この長征5号Bの墜落は、既に2021年5月5日の段階で米国防総省から懸念を表明されていたが、正確な落下地点についてはこの時点では不明であった³⁰⁾。2021年5月8日、米宇宙軍はインド洋上空で再突入するという予測を行い、5月9日にその予測通りに

27) NASA, “40 Years Ago: Skylab Reenters Earth’s Atmosphere”, <https://www.nasa.gov/feature/40-years-ago-skylab-reenters-earth-s-atmosphere>, Accessed at July 23, 2021.

28) NASA History Division, “SP-4208 LIVING AND WORKING IN SPACE: A HISTORY OF SKYLAB 19 WHAT GOES UP . . .”, <https://history.nasa.gov/SP-4208/ch19.htm>, Accessed at July 23, 2021.

29) CNN, “China successfully launches first module of planned space station”, <https://edition.cnn.com/2021/04/29/world/iss-future-china-space-station-russia-us-intl-scn/index.html>, Accessed on May 24, 2021.

30) 注2)を参照。

宇宙物体の大気圏再突入と地上被害に対処する法的・政治的枠組みについて(坂口)

落下した。この事件の場合は、落下場所が公海上であり、被害は報告されていない。

このように再突入する宇宙物体の落下位置の予測は難しく、現在の技術をもってしても、非制御再突入の場合にはその直前まで落下位置が不明である場合がある。後述するコスモス954の再突入も非制御再突入の事例であり、再突入地点が不明だったために、事後の即応的な措置が対策の中心となった。

現在、人工衛星は小型化・多量化の傾向が続いているが、宇宙ステーションや打ち上げロケットなど大型の宇宙物体の需要は依然として存在している。しかも今後は宇宙開発の活性化が预期されており、これからも大質量の宇宙物体は運用され続けると考えられる。そのため、大質量の宇宙物体の再突入は、これからも問題であり続けるだろう。

(2) 毒性のある物質の地上への飛散

宇宙ロケットや人工衛星の燃料には、しばしば様々な有害な物質が使われている。ロケットの代表的な推進剤の1つであるヒドラジンなどは強い有毒性を持っているほか、原子力電池や原子炉を利用した原子力電源衛星が地上に落下した場合は著しい脅威となる。

宇宙物体の大気圏への再突入に伴って、有毒性の物質が地上や大気圏へ拡散した最大の被害として、1978年のソ連のコスモス954の再突入に伴う核物資の拡散がある。

1977年9月18日に打ち上げられたソ連の海洋偵察衛星コスモス954は軌道上で制御を失い、1978年1月24日にカナダ北部上空へと再突入した。コスモス954は原子力電池を動力源とする原子力電源衛星であった。この衛星の再突入について、事前に米ソ間で情報共有が行われており、落下位置については不明であったが、アメリカはNATOおよびOECD諸国へ同衛星の落下を警告し、除染への協力を申し出ていた。再突入の過程でコスモス954は分解し、4,000を超える放射能を帯びた破片がカナダ国内の広範囲に

わたって拡散した。直接の被害は確認されなかったが、カナダ政府はアメリカ政府の支援を受けつつ、約1,400万カナダドルを費やして回収・除染作業を行った。またソ連からも情報提供と除染の支援の申し出があったが、カナダはこれを拒否した。その後、宇宙損害責任条約と国際法の一般原則に基づいて、カナダ政府はソ連邦政府へ600万ドルを要求した。しかし外交交渉による解決は一度失敗し、最終的に1981年4月2日、ソ連邦とカナダ間で協定が結ばれ、ソ連邦がカナダに対して「1978年1月のソ連の人工衛星『コスモス954』の崩壊に関連するすべての問題の完全かつ最終的な解決のために」300万カナダドルを支払うことで決着した³¹⁾。

このコスモス954事件を契機として、国連では原子力電源衛星を規制するための議論が始まり、1992年に「宇宙空間における原子力電源の利用に関する原則」が国連総会決議として採択され、ソフトローではあるが、宇宙空間での大型原子炉の利用が制限された³²⁾。

原子力電池は長期間にわたって出力を維持できるため、現在でも外惑星探査など長期間にわたるミッションを遂行する人工衛星などに搭載される場合がある³³⁾。アポロ月探査機や地球軌道を周回する気象衛星などにも搭載されていた過去があり、上述のコスモス954の再突入以外にも、打ち上げの失敗や再突入の失敗などで地上に放射性物質が拡散された事例が存在する³⁴⁾。これらの事例では、いずれも明確な人的・物的損害は出なかった。

31) 小塚莊一郎、佐藤雅彦編著(2018)『宇宙ビジネスのための宇宙法入門』第2版、有斐閣、55-57頁。

32) 小塚・佐藤(2018)、78頁。

33) 近年では、2020年に打ち上げられたアメリカの火星探査機が二酸化プラトニウムを動力源として利用している。以下を参照。NASA Science, “Power Source”, <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/electrical-power/>, Accessed at July 19, 2021.

また、著名な外惑星探査機であるボイジャー1号も原子力電池を搭載している。以下を参照。NASA Jet Propulsion Laboratory, “Spacecraft”, <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/>, Accessed at July 19, 2021.

現在でも軌道上には原子力電池を利用した衛星が残存しており、再突入の危機は存在している³⁵⁾。しかし、原子力電源の有用性が高いため、この規制に関する議論は難航しており、2009年に国連総会で採択された「宇宙空間での予定されたまたは現在予想が可能な原子力電源応用の安全のための目標と勧告に関する国際的な技術枠組み」も、政治的規範性を持たない技術標準文書にとどまっている³⁶⁾。

また後述するUSA-193の事例のように、燃料が高耐久の金属で出来たタンクに残存している場合などは、地上に再突入した後に、その内容物が拡散することになりうる。そのため、その前にタンクを破壊して、再突入による無力化を円滑に進める選択肢が出てくる。

(3) 高耐久の物質の再突入

人工衛星などの宇宙物体には、強度を高めるために、しばしば融点の高い金属が使用されていることがある。これらの物質は、再突入の過程で融解しきらず、その原型を保ったままで地上に落下する可能性がある。高耐久の金属として前述したチタンやタンゲステン、様々な合金が人工衛星などの部品に使われてきた。ロケットなどの圧力タンクは代表的な落下物であり、地上で多くの発見例がある³⁷⁾。

このような高耐久の物質の落下については、そのような物質の使用を極力控えさせる形での設計上の予防措置が対策の中心となっている。大質量

34) 1964年の米の軍事衛星トランジット 5-BN-3 の打ち上げ失敗、1970年のアポロ13号の再突入など。以下を参照、山中龍夫「宇宙用原子力動力源の安全技術」『日本航空宇宙学会誌』29巻327号、日本航空宇宙学会、1981年、175-176頁。

35) ただし、現在軌道上に存在する原子力衛星のほとんどは、数百年以上は地球に再突入しない軌道に存在しているため、リスクは低い。ただし、不測の事態（デブリや他の衛星との衝突など）によって、軌道が変更されて、再突入する可能性はある。山中（1981）、175-178頁を参照。

36) 小塚・佐藤（2018）、78-79頁。

37) 加藤（2015）、115-120頁。

の宇宙物体の一部として再突入する場合、あるいは有毒性のある物質を内包している場合、高耐久の金属物質の使用はそれらの被害を拡大させる可能性がある。

Ⅲ 宇宙物体の再突入に対する政策的・法的な対処と枠組み

(1) 予防措置

宇宙物体の再突入による被害を避けるための予防的措置として、前述したスペースデブリ低減ガイドラインは「LEOから物体を除去する解決案を決断する際には、残存して地表に到達するデブリが、ハザードな物質による環境汚染を含む、人間や財産に不当なリスクを課さないことを保証するために十分な配慮が払われなければならない(ガイドライン6)」としている。これに従って各国の宇宙機関などが独自に、再突入に関しての安全基準を策定している³⁸⁾。

日本では、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) の内部基準として「再突入機の再突入飛行に係る安全基準」が2009年に制定されており、また「スペースデブリ発生防止標準」「スペースデブリ発生防止対策 設計・運用マニュアル (宇宙機編)」などスペースデブリ低減のための基準でもデブリの発生防止措置の一環としての宇宙機の再突入と、それに関する基準が定められている。

「スペースデブリ発生防止対策 設計・運用マニュアル (宇宙機編)」には、再突入地上安全に関する対策フローとして「予防措置」「リスク検知」「適用処置」の3つの管理項目が挙げられており、また大分類として「予防措

38) 国連スペースデブリ低減ガイドラインは、IADCによって制定されたスペースデブリ低減ガイドラインの「技術的内容と基本的定義に基いて」いる。このため、JAXAによるスペースデブリ対策は国連のガイドライン以前から行われている。スペースデブリ低減ガイドラインについては以下を参照。青木・小塚(2015), 74-75頁。

宇宙物体の大気圏再突入と地上被害に対処する法的・政治的枠組みについて(坂口)

置」は「被害の予測」と「設計対策」を、「リスク検知」は「落下通報」と「制御機能のモニタ」を、「適用措置」は「緊急処置」を含んでいる。

「リスク検知」と「適用措置」は、再突入の危機が迫った段階で実行される措置であり、「予防措置」は、再突入が行われる前にその脅威を減ずるために行うべき措置である。ただし、このような対策フローを事前に定めておくこと自体が、再突入による被害を防止するための措置である。

予防措置としての「被害の予測」は、事前の計算を通して地上被害の可能性を確認し、再突入に伴って生じる破片の分散範囲を居住者のいない区域に制御することを求めている。「設計対策」は宇宙機の材質や形状、構造壁の厚さ、内部の機器の配置などを再突入によって溶解しやすいように設計するように求めており、高耐久の材料の使用も控えるのが望ましい、とされている³⁹⁾。

また、アメリカ政府による軌道上デブリ低減実施基準 (Orbital Debris Mitigation Standard Practices) は、宇宙物体を再突入させる場合、人的被害の可能性を1万分の1以下に抑えることを求めている⁴⁰⁾。

このように、宇宙物体の再突入の予防の枠組みは、スペースデブリ低減の枠組みの一部として形成されており、国連スペースデブリ低減ガイドラインと、それに基づいた各宇宙機関の安全基準が1つの流れの上にある。しかしスペースデブリ対策の原則を定めた国連スペースデブリ低減ガイドラインは政治的な規範性を持たない技術標準文書であり、各宇宙機関が定める安全基準も法的な裏付けが必ずしもあるわけではない。このため、再突入の予防措置は各国・各宇宙機関が自主的に行う活動に過ぎず、しばしば拘束力を持たないのが現状である。

国際法による規制が少なく、またそれらも規制がソフトローであり、そ

39) 宇宙航空研究開発機構『スペースデブリ発生防止対策 設計・運用マニュアル (宇宙機編)』2015年、13-15頁。

40) U.S. Government, *Orbital Debris Mitigation Standard Practices, November 2019 Update*, 2019を参照。

の規制に従って各国・各宇宙機関が自主的に規制を定めているため、規制の実効性が担保されていない、というのは宇宙開発全体に共通する問題でもある。再突入被害の防止やスペースデブリ低減以外の宇宙開発に関する問題においてもソフトローによる規制が中心であり、また国際法も整備されていない。

（2）宇宙状況監視による被害の予測と迎撃による被害の防止

現在、地球軌道上の物体は宇宙状況監視（Space Situational Awareness：SSA）の対象になっている。SSAとは地球軌道上の物体の軌道を、光学望遠鏡やレーダーによる監視によって把握する活動であり、これによって事前に衝突の危険性を判断し、地球軌道上の物体間の衝突を避けることに貢献している⁴¹⁾。このSSA活動の中で、再突入する宇宙物体の軌道の観測も行われており、再突入評価が行われている。

再突入する宇宙物体がどこの上空で再突入するかが早くに明白となり、かつ地上にとって脅威であることが確実ならば、大気圏突入前にこれを破壊し、小さな破片に分割することで、再突入による融解と無力化を円滑に進めることができる。

軌道上の衛星に対して攻撃を行うことを対衛星攻撃（Anti-Satellite Attack：ASAT）というが、そのうちのキネティック（kinetic）な攻撃手段⁴²⁾、特に直接上昇型（direct-ascent）ASATは再突入する物体の迎撃に応用することができる⁴³⁾。またミサイル防御（Missile Defense：MD）に使われる、大気

41) アメリカ宇宙軍は世界最大規模のSSAの実施主体であり、SSNを運用している。SSNは宇宙状況データを提供している他、衝突の危険性が高い場合には、その衛星の運用主体へ衝突注意報を発している。

42) 「キネティック」は力学的な物体の運動を指す。キネティックなASATとは、運動エネルギーによる衛星の破壊であり、具体的には標的の衛星に対して何かを衝突させることで、衛星を破壊する攻撃を指す。

43) 直接上昇型ASATとは、地上から打ち上げた物体、具体的にはミサイルを、

宇宙物体の大気圏再突入と地上被害に対処する法的・政治的枠組みについて(坂口)

圏外を飛行する弾道ミサイルへの迎撃能力はASAT能力に転用することが可能であり、ひいては衛星の迎撃に使用できる。MD能力の衛星迎撃への転用の事例として2008年のアメリカによるUSA-193衛星の迎撃を検討する。

2008年2月21日、アメリカは不具合によって通信不能になった自国の偵察衛星USA-193が、地球に落下した場合に有害物質である燃料のヒドラジンおよびベリリウムが飛散する恐れがあるとして、同衛星を高度247kmで撃墜した。撃墜は米軍のミサイル巡洋艦から発射されたSM-3巡航ミサイルによって行われ、MDのためのプログラムを書き換えて実行された⁴⁴⁾。この撃墜により、有毒物質は軌道上で拡散し、人工衛星の破片は再突入によって融解するとされた。これに対して、中国政府は情報提供など「国際的な義務」を果たすよう求めた。また、ロシア政府はアメリカのASATないしMDの実験ではないか、と批判した⁴⁵⁾。

このように、大気圏外を飛来する物体を迎撃する能力はMDで重要であるが、衛星の迎撃にも転用することが可能である。

USA-193の撃墜の事例では、アメリカは自国が保有する衛星を破壊した。これは国際法上、合法である。しかし、宇宙条約8条および宇宙物体

標的の衛星に直接ぶつけることで目標を破壊するASATを指す。これ以外のキネティックなASATとして、軌道上に事前に配置しておいた衛星を標的の衛星に衝突させる、共軌道 (co-orbital) ASATが存在する。

44) Reuters, "U.S. shot raises tensions and worries over satellites", <https://www.reuters.com/article/us-satellite-intercept-vulnerability-idUSN2144210520080222>, Accessed at July 19, 2021.

45) CNN, "Navy missile hits dying spy satellite, says Pentagon", <https://edition.cnn.com/2008/TECH/space/02/20/satellite.shootdown/index.html>, Accessed on May 23, 2021.

同事件に対する中国の反応については、以下を参照。朝日新聞、2008年2月22日、朝刊。同事件に対するロシアの批判については、以下を参照。BBC, "US missile hits 'toxic satellite'", <http://news.bbc.co.uk/2/hi/7254540.stm>, Accessed at July 20, 2021.

登録条約によって宇宙物体への国家の管轄権が定められており、他国が管轄権を持つ宇宙物体を破壊することは、差し迫った脅威がない限りは国際法上、違法となる。そのため、地上に脅威をもたらすからといって、無差別に再突入する宇宙物体を迎撃することは難しい。

またSSA技術も含めて、再突入する宇宙物体を迎撃する技術は、軌道上の衛星を撃墜する技術と共通する点が多い。このため、前述のUSA-193の迎撃の事例でもあったように、再突入物体の撃墜は外部からはASATやMDの実験とみなされる可能性がある。

まずSSAに関しては、自国のロケットや衛星の情報公開にもつながるために、その情報を明らかにしない可能性がある。宇宙開発を行う国家は多くはSSAを行っているが、前述の長征5号Bロケットの再突入においては、中国政府はその再突入に関する情報を公にせず、アメリカ国防総省が落下場所などの発表を行っていた。

また衛星の迎撃は、地上被害を最小限に抑える可能性があることから、再突入被害の防止に直接に役立つ。しかし、再突入する宇宙物体の迎撃技術はMDやASATの技術と共通性（デュアルユース性）を持つため、技術開発や実験、実際の迎撃などを行うには政治的なリスクがある。軌道上の物体を監視するSSAも、軌道上の衛星の軌道を正確に把握し、予測するという点でASATに必要な前提技術であり、これもデュアルユース性を持つ。

再突入物体の迎撃のための国際的なルール作りを進め、どのような場合に合法的な迎撃を行えるのかの基準を定める必要があるが、迎撃のための技術開発が安全保障上のリスクを持っているために難しくなっている。このようなデュアルユース性は宇宙開発技術全体に存在しており、平和的宇宙利用の技術が軍事的に転用できるために、軍事的・政治的な対立関係が持ち込まれやすくなっている。

(3) 宇宙損害責任条約による事後措置

再突入した物体が地球上および航空機に被害を及ぼした場合、宇宙損害

宇宙物体の大気圏再突入と地上被害に対処する法的・政治的枠組みについて(坂口)

責任条約に従って補償を請求することができる。宇宙損害責任条約は「打上げ国は、自国の宇宙物体が、地表において引き起こした損害又は飛行中の航空機に与えた損害の賠償につき無過失責任を負う。(2条)」と定めている⁴⁶⁾。

この損害賠償の規定は、再突入による被害が出ないようにと、宇宙開発を行う各国にインセンティブを与える効果がある。これに従って、宇宙開発を行う各国は、損害賠償に関する措置を国内法で定めている場合もある。例えば日本では、「人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律」(宇宙活動法)が「国内に所在する人工衛星管理設備を用いて人工衛星の管理を行う者は、当該人工衛星の管理に伴い人工衛星落下等損害を与えたときは、その損害を賠償する責任を負う。(53条)」と定めている。

しかし、前述したコスモス954の事例では、カナダ政府がソ連からの援助を拒否したこと、また宇宙損害責任条約が定義する「損害」が生じたと主張するために必要な物理的損害が生じていないことを理由に、ソ連は損害賠償を拒んだ⁴⁷⁾。これには、一定の正当性があり、最終的に議定書による「損害賠償」ではない300万カナダドルの支払いで決着したのは前述の通りである。そのため、現在まで、宇宙損害責任条約に従って、損害賠償がなされた事例はない。

スペースデブリ問題など他の宇宙問題に関係する枠組みと、再突入する宇宙物体に対処する枠組みとの最大の差異は、この条約に基づいた損害賠償制度が存在するかどうか、という点にある。例えば、スペースデブリは地球上に落下して被害を及ぼさない限りは、国際法による賠償責任は存在せず、損害賠償の制度も存在してない。

46) 青木・小塚(2019), 51頁。

47) 小塚・佐藤(2018), 55頁。

おわりに

本論文では、まず再突入物体の増加の遠因としての宇宙空間の混雑化の問題を検討し、どのような再突入物体が地上への脅威となるのかを確認した（Ⅰ）。その上で、具体的な再突入による脅威を、大質量宇宙物体の再突入、高毒性宇宙物体の再突入、高耐久宇宙物体の再突入に分類し、それぞれの被害の実例を検討するとともに、それぞれでどのような措置が取られたのかを分析した（Ⅱ）。そして、宇宙物体の再突入に対応した取り組みと枠組みについて分析した（Ⅲ）。

再突入に対応した取り組みと枠組みについては、それぞれに問題点が存在することが明らかとなった。まず、再突入への予防措置については国際的合意が存在するが、政治的な規範性が存在しておらず、履行が各国に任されているがために実効性に疑問がある、宇宙状況監視による観測と、再突入時の迎撃は技術的には可能であるが、デュアルユース技術であるために政治的リスクがある。宇宙損害責任条約による損害賠償制度は整備されているが、今までに実際に損害賠償がなされたことはない。

宇宙開発の他の問題に対処するための枠組みと、宇宙物体の再突入に対処するための枠組みとを比較すると、宇宙物体の再突入の枠組みは基本的にはスペースデブリに対処するための枠組みの中で形成されてきた。しかし、地上被害を防止するための迎撃措置という緊急処置の技術と方法が明確に存在していること、そして国際法に基づいた損害賠償制度が存在している、という点に特徴がある。宇宙開発に関する枠組み全体の中では、最も対応能力や制度が整っている。

本論文は再突入する宇宙物体の脅威への対応に検討の対象を限定し、他の宇宙開発上の問題との関係を検討しなかった。宇宙開発は1つの総体として捉えられるべきであり、再突入する宇宙物体への対応の問題も、宇宙開発という広い全体の中で位置づける必要があった。以下に、本論文と関

係して検討するべき、他の宇宙開発上の問題を簡単に見ていく。

まず地球近傍天体 (Near-Earth Object: NRO) の地上落下の問題が存在する。NROとは地球軌道に近傍する可能性がある天体を示し、人工の宇宙物体を含まない。これらのNROは地球上に落下する場合も多く⁴⁸⁾、各国の宇宙機関には対応のための専門部署が存在している。大気圏に突入するものとして人工物体か自然の物体かの違いしかなく、対応のための枠組みも比較しながら考える必要がある。

次にロケットの打ち上げに伴う周辺被害の問題がある。ロケットの打ち上げはリスクが大きく、しばしば打ち上げの失敗や部品の剝離などが起こる。これによって発生した残骸は、射場の周囲に落下し、被害を及ぼし、毒性のある物質が周辺地域に影響を及ぼす場合さえある⁴⁹⁾。このようなロケット打ち上げの失敗は、宇宙開発が地上被害をもたらす、という点で宇宙物体の再突入と類似している。本論文で検討した宇宙物体の再突入への対処の枠組みを援用できる可能性がある。

また本論文で検討した再突入による地上被害を抑えるための措置と、宇宙の軍事利用との関係も、より詳細に検討する必要がある。宇宙開発に関

48) 近年だと、2013年2月15日にロシアのチェリャビンスク州に隕石が飛来し、1,500名近い負傷者が出た。また、飛来した隕石が空中で光を放つ火球はしばしば各地で観測されている(厳密には、空中で消失せずに地表まで到達した場合を隕石という)。

49) 例として、カザフスタンにあるバイコヌール宇宙基地周辺での環境汚染の問題がある。同基地はソ連邦の中心的な宇宙開発拠点の1つであったが、ソ連邦の崩壊に伴ってカザフスタン領内となり、現在までロシアが使用料を支払い、同基地を利用している。2007年および2013年に、プロトンM型ロケットの打上げ失敗に伴い、有毒な推進剤が周辺に飛散した。バイコヌール周辺の環境汚染と、それに伴う健康被害の概況については以下を参照。Jim Giles, 「ロシアのロケット発射基地周辺の健康被害調査」『Nature Digest』Vol. 433 6-7頁。プロトンロケットの打上げ失敗に伴う有毒物質の飛散については以下を参照。BBC, “Russians say space rocket debris is health hazard”, <https://www.bbc.com/news/world-europe-19127713>. Accessed at July 19, 2021.

する技術はデュアルユース性を有していることが多く、特に宇宙物体の大気圏再突入に対応するためのSSAの技術と迎撃の技術が、安全保障上で重大な意義を持っていることは本論文でも述べた。これは、宇宙開発技術のデュアルユース性という大きな問題の一部であり、より包括的に検討を進める必要がある。

構築が進むメガコンステレーションと、地上への再突入被害の可能性との関係の検討も行わなかった。この関係については近年に自然科学分野からの研究が盛んである⁵⁰⁾。既にスペースX社が1万2,000基級のスターリンク＝コンステレーションの構築を始めており、同規模、あるいはこれ以上の規模のコンステレーションの構想も複数存在している。激変する軌道環境が再突入被害の可能性を拡大するのかどうかの検討は喫緊の課題である。

本論文での検討を通して、宇宙物体の再突入への対処という問題もまた、宇宙開発に関する根本的な問題、つまり国際法の形成の遅れ、各国の強い自主性、技術のデュアルユース性などを共有していることが、本研究から分かった。他の宇宙開発に関する問題を検討するに際して、本研究の成果を役立てていきたい。

(本学大学院法学研究科博士課程後期課程在籍)

50) 例えば、ボーレイとバイヤーの研究など。以下を参照。Nature Scientific Reports, "Satellite mega-constellations create risks in Low Earth Orbit, the atmosphere and on Earth", https://www.nature.com/articles/s41598-021-89909-7#disqus_thread, Accessed at July 20, 2021.