R7-618

CubeSat 衛星に対する技術的規制 (Global Technical Regulation)案の提案

一般財団法人 日本宇宙フォーラム
宇宙利用推進グループ長　高木　俊暢

1. 調査研究の概要

昨今、急増する CubeSat 衛星に対する技術的規制は何もなく、LEO 軌道に於ける衛星同士、衛星とデブリの衝突リスクが高まり、安全・安心な宇宙利用に CubeSat が脅威になりつつあるため、衝突リスク軽減のため、「CubeSat に対する技術的規制案」等を提案する。

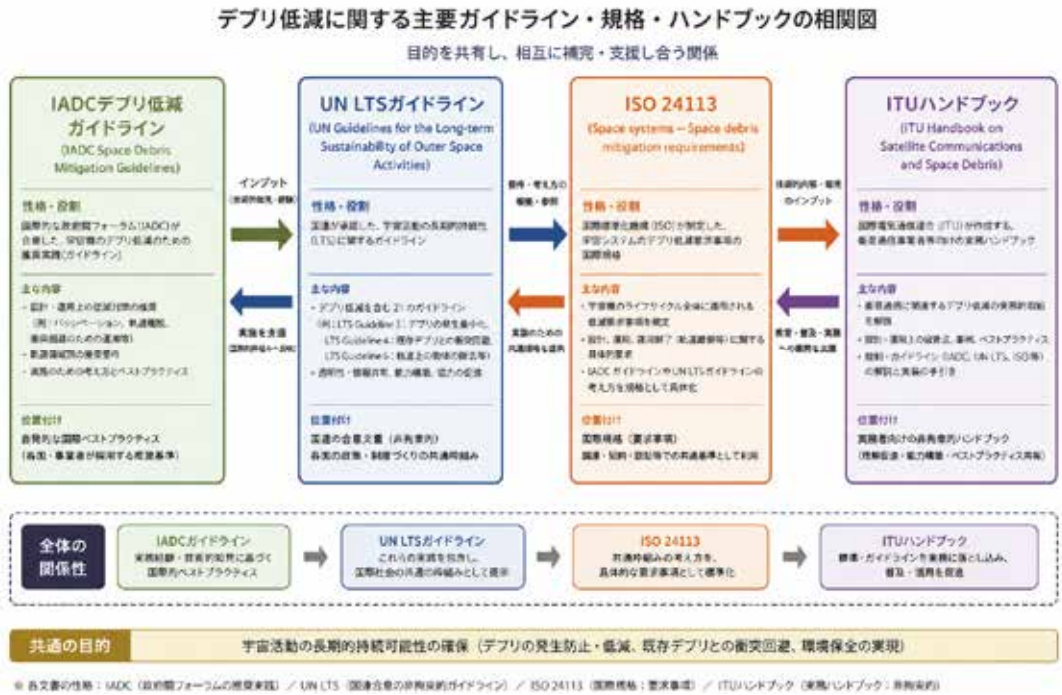
2. 調査研究の目的

2.1 調査目的

1999 年、カリフォルニア工科州立大学(Cal Poly)の教授らが、CubeSat の仕様を策定。その仕様に基づいて世界で初めて1U サイズ CubeSat(10X10X10 ㎝)を東大と東工大が打上げた。2014 年以降、新たに配備された CubeSat のほとんどが商業またはアマチュアプロジェクト向けとなった。また、“ISS きぼう“ロボットアームを利用した CubeSat 衛星放出は、CubeSat 開発に拍車をかけたと言っても過言ではない。2012 年 10 月、”きぼう“から1U 及び2U(10X10X20 ㎝)衛星各 1 機が放出されて以降、2024 年 12 月までの間に合計 89 機の CubeSat、主に1U、2U、及び3U 衛星が放出された。これらの衛星は超小型であるがゆえに、軌道制御機能は保有せず、また高度約 400 ㎞に放出されることから、ほぼ 1 年以内には大気圏に落下するため問題視されていなかった。しかし、2019 年後から始まった”Mega Constellation 衛星”がLEO軌道に配置され始め、特に、SpaceX社のStarlink衛星は高度 550km帯に既に 7,000 機以上が打上げられた。今後、第 2 世代として、ISSよりも低い高度 340 ㎞から 614km帯に約 3 万機を打上げる計画をSpaceX社は米国FCC(連邦通信委員会)に申請中で”きぼう”から放出する衛星はこの Starlink 衛星第 2 世代が飛行する軌道を横切ることとなり、軌道制御機能を保有しない CubeSat は、これら衛星との衝突リスクが極めて高くなるものと予想されることから、CubeSat に軌道制御機能付加等の技術的規制(Global Technical Regulation)の検討が急務である。

2.2 関連情報の収集、及び分析

2.2.1 現存のグローバルな規制やガイドライン



3 日本における CubeSat 向け新技術規制（Technical Regulation）の提案 （※下記規制案中の“数値は暫定値”）

(1) 軌道離脱

①軌道飽和の防止

近年のLEO軌道混雑化が更に加速した状況において、以下を要求する。

1) 処分義務

a) 宇宙システムは、運用段階終了後に以下の処分行動を行うように設計、製造、実装されるものとする

- 制御有無にかかわらず大気圏再突入

②非制御型宇宙物体の軌道制限

推進装置を備えておらず軌道を変更できないシステムは、最高高度 400 km 未満（ISS軌道以下）の軌道で設計、製造、実装されるものとする。

- 推進システムを備えていない衛星は 400 km 以上での運用を禁止することを目的とする。これらの衛星は衝突回避機動を行うことができない。
- 抗力増加装置は推進装置とはみなされない。
  - この要件は寿命終了後の再突入期間に関する要件と重複するものではない。

LEO における残存軌道寿命は、運用期間が 1 年未満のシステムでは 3 年を超えてはならず、または運用期間の 3 倍を超えてはならず、いずれの場合も最大 25 年を超えてはならない。

(2) 衝突防止

①データ共有

運用者は、軌道投入後可能な限り早く、遅くとも 3 日以内に、遭遇する可能性のある登録済み宇宙物体との衝突リスクを監視するために必要な最新情報を、関連する関係者または団体と共有するものとする。この情報には少なくとも、軌道要素（TLE）、軌道変更計画、共分散を含むものとする。

- 同時に「宇宙物体の軌道に関する知識」と「データ共有の必要性」を含む。
- 提供されるデータの品質（特に共分散行列）を確認する必要がある。
- データは外部機関によって認証される場合がある。
- データ提供の頻度は理想的には 1 日 1 回。

②宇宙物体との衝突確率

打ち上げ前に計算された、宇宙運用全体の寿命期間における、10cm を超える宇宙物体との偶発的衝突の発生確率を評価し、最小化するものとする。

- 10cm を超えるいかなる物体との衝突確率を最小化する必要性の導入

③衝突回避操作

米宇宙軍提供カタログに載っている宇宙物体との衝突警報（米宇宙軍が発出する“衝突アラート”）が発生した場合、衝突回避措置はミッションより優先されるものとする。

④二つの操縦可能な宇宙物体の運用者間での衝突警報時の調整

既知の衝突警報（米宇宙軍が発出する“衝突アラート”）が二つの操縦可能な宇宙物体の間で発生した場合、運用者は他の運用者と調整を行い、少なくとも一方の物体の操縦に至る操縦戦略を決定しなければならない。

⑤打ち上げ装置またはディスペンサー（ロケットやISSからCubeSat放出装置）からの分離時の衝突防止

各投入物体は、投入後少なくとも 5 日間、または宇宙物体が衝突回避機動を行うことが可能になるまで、打ち上げ装置/ディスペンサーや他の投入物体との衝突を引き起こさない軌道上にあること。

各投入物体は、投入後少なくとも 3 日間、または宇宙物体が衝突回避機動を行うことが可能になるまで、有人物体との衝突を引き起こさない軌道をたどること。

・ 各物体および有人物体との間の距離を確保する分離戦略を管理すること。

⑥衝突回避機動の利用可能性

制御可能な宇宙物体のシステムは、軌道投入後最大 5 日以内に衝突回避制御（Collision Avoidance Maneuver :CAM）を実行できるように設計・実装されるべきである。また、複数の衛星を同時に打ち上げる場合は、軌道投入後できるだけ早く、衝突回避能力の利用不可期間を最小化する戦略を提示すること。

・ 5 日間は、衝突回避サービスとの運用ループを開始するのに十分な時間とみなされる。

・ 複数の軌道投入（例えばコンステレーションの場合）では、通常 1 週間の遅延が許容される。

(3) 破片化の防止

①不動体化（パッシベーション）

いかなる宇宙物体も、運用終了段階の後において、次のようになるように設計、製造、実装されなければならない。

・ 搭載されている全てのエネルギー資源は永久に消費されるか、破片生成のリスクを生じない状態であること。

・ 搭載されている全てのエネルギー生成手段は永久に無効化されるか、またはそのエネルギー生成手段によって直接動作する全ての装置が破片生成のリスクを生じない状態に置かれること。

・ 全てのプラットフォームまたはペイロードの無線電波送信能力は永久に無効化されること。

本条の規定は、制御された再突入には適用されない。

②故意の破壊

事業者は、軌道上のいかなる宇宙物体の故意の破壊も避けなければならない。

③意図的な破片の放出

運用者によって実施される宇宙システムは、通常通り運用されている際に破片を発生させないように設計、製造、実装されなければならない。

上記の規定は次の場合には適用されない。

・ 火薬システム。ただし、これにより最大寸法が 1mm 以上の生成物は発生させてはならない。

・ 固体ロケットまたはハイブリッドロケットモーター。ただし、保護域 A および B において、1 mm 以上の燃焼破片を発生させてはならない。

(4) コンステレーションの衛星処分後の軌道上最大存在

①低軌道（LEO）のコンステレーション衛星

残留軌道寿命は以下のように制限されるものとする。

・ 総衛星数が 1000 未満の大規模コンステレーションでは 5 年。

・ 総衛星数が 1000 以上の大規模コンステレーションでは 2 年。

②コンステレーションのミッション運用終了後の信頼性

各コンステレーションの衛星は、以下の規則に従って処分運用（パッシベーション運用および処分マヌーバーを含む）を無事に実行できる確率を持つこと。

－ 衛星数（N）が 50 未満のコンステレーション：$P > 0.9 + N \times 0.001$

－ 衛星数（N）が 50 以上のコンステレーション：$P > 0.95$

以上