

超小型衛星における国際標準化

国立大学法人 九州工業大学

革新的宇宙利用実証宇宙環境技術ラボラトリー 施設長・教授

趙 孟佑 Ph.D.

<はじめに>

昨今、超小型衛星の開発・利用が急激に広まり、「ニュースペース」という言葉も宇宙業界を超えて使われるようになってきた。2012年に「超小型衛星試験の国際標準化プロジェクトの紹介」と題した寄稿を「航空と宇宙」に行なった⁽¹⁾。それからほぼ10年がすぎ、超小型衛星をめぐる状況は筆者の予想を超えた展開を見せている。本稿においては、超小型衛星の現状を述べたのち、超小型衛星に関連する国際標準化について過去10年間を振り返ると共に現在の動向について紹介する。

<超小型衛星の現状>

まず「超小型衛星とは何か」について述べたい。日本で「超小型衛星」というと、「50kg以下の衛星」とおぼろげに認識されている。これはJAXAのH2A相乗り衛星の上限が50kgであったことに由来している。英語では、Small Satellite、Micro-Satellite、Nano-Satellite、Pico-Satelliteなどと呼ばれているが、厳密な定義があるわけではない。そのために、後述するが「安く、早く」衛星をつくることを目指したLean Satellite という呼称も用いられている。Lean Satelliteでは「安く、早く」作るために、リスクをとる。そのため、大きな衛星では価格も高くリスクをとるのが難しいために必然的に衛星サイズが小さくなる。「小さい」衛星を作ることは結果であって、目的ではないということになる。

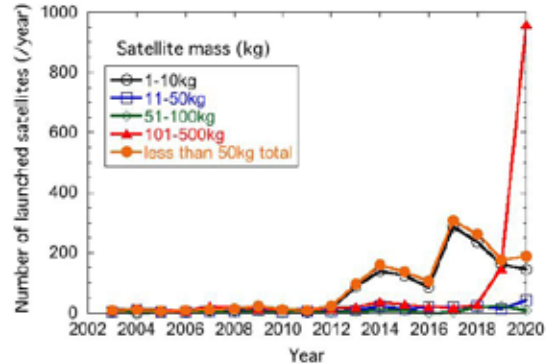


図1 500kg以下の衛星の打上げ数の推移
(出典：九州工業大学)

500kg以下の衛星の打上げトレンドを図1に示す。2019年と2020年に101-500kgの衛星の打上げ数が跳ね上がっているのは、OneWebやSpace-Xといった通信メガコンステレーションの打上げが始まったからである。10kg以下の衛星は最近ではほとんどCubeSat(10cmx10cmx10cmの立方体を基本とした超小型衛星)であるが、PlanetやSpireといった3U(10cmx10cmx30cm)サイズのCubeSatの商業コンステレーションの打上げが一段落したためにここ2、3年は若干減少傾向にあるが、長期的には増加傾向にある。

超小型衛星の現状については、文献2、3などが詳しい。文献2では、超小型衛星(50kg以下を対象)を用いた宇宙新興国の支援の検討をテーマとしているが、過去に実施された超小型衛星ミッションの成果や教訓、超小型衛星技術の動向、海外の超小型衛星政策等について幅広く調査を行なっている。文献3は

500kg以下の衛星に関連した宇宙機器産業について毎年報告を行なっている。文献3によれば、50kg以下の衛星製造の市場規模は年間170から360M\$程度である。一方、全てのカテゴリを含む衛星製造業全体は12.5B\$であり⁽⁴⁾、超小型衛星は3%程度を占めるに過ぎない。しかしながら、従来型の衛星製造業の伸び率がこの10年間はほぼゼロであった（文献5によれば、2009年は13.5B\$であった）のに対して、50kg以下の衛星は今後10年間で倍になると予想されており⁽³⁾、宇宙業界において成長著しい分野である。

超小型衛星産業は、「ニュースペース」と呼ばれる企業群の中核をなしているが、大学発ベンチャーや異業種からの参入が主流となっている。その特徴としては、先にも述べたように「無駄を省いて安く・早く衛星の価値を顧客に届ける」ことを重視している。リスクを許容した形での開発を行うので、打上げ後に不具合が発生する可能性はゼロではない。しかしながら、1機あたりのライフサイクルを短くして軌道上での教訓を次号機に反映し、経験値に基づいた衛星開発を行うことで、信頼性を高めていく手法をとっている。

超小型衛星では「安く、早く」のために地上民生品や民生技術を積極的に活用している。部品やコンポーネントの調達も、世界中からネットを通じて行われており、特に

CubeSatコンポーネントはコモデティ化が進みつつある。そのような中、CubeSatベンダーは、単なるコンポーネントの供給ではなく、衛星バスをセットで販売して宇宙ミッションのためのプラットフォームを提供するビジネスへと移行しつつある。

超小型衛星は、複数衛星を軌道上で運用するコンステレーションにおいて従来型衛星にはない強みを発揮する。PlanetやSpireといった3UのCubeSatコンステレーションは商用衛星群として実際のビジネスを展開している。両社のように100機を超えるようなコンステレーション事業者の場合、衛星を自社で全て作った方が安く、また変化に迅速に対応できる。そのため、コンステレーション事業者の多くは、水平分業（コンポーネント等を外製）から垂直分業（コンポーネント等を全て内製）に移行しつつある。超小型と言うには少々大きいSpace-XのStarlinkコンステレーションなどは、打上げも自社でおこなっており、コンステレーションの規模が大きくなるほど、垂直統合の幅を広げる傾向にある。

<ISO-19683とTS-20991について>

超小型衛星分野において、これまでに表1に示す3件の標準文書がISOで制定されている。

このうち、ISO-19683とTS-20991は筆者がPL (Project Lead) として制定活動を行なった。

表1 制定済みの超小型衛星関連ISO文書

番号	タイトル	提案国	内容	発行月
IS-17770	Cube Satellites (CubeSats)	米国	一般的要求事項 放出機構とのインターフェース	2017.6
IS-19683	Design Qualification and Acceptance Tests of Small Spacecraft and Units	日本	試験	2017.7
TS-20991	Requirements for Small Spacecraft	日本 フランス	最低限の要求事項	2018.7

ISO-19683は、超小型衛星の信頼度を向上させることを目的として、2011年度から経済産業省のアジア基準認証推進事業費補助事業の支援を受けて制定活動が行われた。プロジェクト開始の経緯については、文献2に詳述しているが、当時は年間の打上げ数が10~20機の時代で、超小型衛星の信頼度がまだまだ総体的に非常に低く商業用としては耐えられないレベルであった。そうはいつても大型衛星並に試験をすればいいというわけではなく、多くの超小型衛星が初期故障で深刻な事態に陥っていたのに鑑み、超小型衛星に相応しいレベルの初期故障の低減をまずは目指す必要があった。そのためには、システム試験が重要である。また、当時はインターネット上で超小型衛星用のコンポーネントが売られ始めていたが、玉石混濁であり、どのような試験を経て売られているのかが極めて不透明であった。また、商業用として、顧客の依頼を受けて衛星を作ろうとしても、「超小型衛星の価値にふさわしい試験とは何か？」について、メーカーと顧客の間に合意できるものがなく、契約に使えるような試験条件や試験方法を記述する文書は存在しなかった。

ISO-19683においては、ゼロから全く新しい試験標準を作るのではなく、従来型の衛星向けに50年間に亘って培われてきた試験標準（たとえばISO-15684）を超小型衛星向けにテイリングすることを考えた。ただし、むやみに試験を免除したり条件を緩めたりするのではなく、基礎研究に基づいてデータを取得しテイリングの根拠を示した上で、低価格・短納期を追求する超小型衛星にふさわしいAffordableでReliableな試験標準を作ること心がけた。その結果、ISO-19683は初期故障を低減させるための最低限の試験セットを要求として明確化することとした。言い換えれば、ISO-19683にかかっている試験をパスで

きない衛星は宇宙に行くべきではないということになる。また、熱真空や振動といった各試験項目について、Required, Optionalの別を記述し、Optionalの場合はどのような時に試験を実施すべきかを判断できる論理フローチャートを掲載した。

UNIT-QTは、ISO-15684のような従来の衛星試験標準では一品モノの衛星プロジェクトに納入するための特注品のコンポーネントの認定試験という位置付けがされてきた。しかし、ISO-19683においてはCOTS (Commercial-Off-The-Shelf) の民生部品からなる衛星コンポーネントがカタログ品としてネット販売されている状況を鑑みて、定量的な試験条件を記載した。言い換えれば、このISO-19683に記載されている試験条件をパスできないコンポーネントは宇宙用として売られるべきでないということになる。一方で、定量的な試験条件はその根拠を付録に掲載することとした。

筆者は、ISO-19683の前に衛星搭載太陽電池パネルの帯電放電試験方法 (ISO-11221, 2011年8月制定) のProject Leadを務めたことがある。その時の教訓から規格制定においては以下のことを心がけた。

- ・豊富な試験実績と基礎データを保有し、積極的にデータを開示していく
- ・専門家間の団結を保ち、よりよいものを作ろうとする気持ちを共有する
- ・旅費を出してでも、ワークショップ等に海外から人を呼ぶ
- ・議事運営を日本が握っているISOのWGで進める
- ・規格を成立させるために、妥協すべきところは妥協する

幸いなことに経済産業省の補助金による支援を受けることができたおかげで、2011年から毎年ワークショップを開催することで

表2 超小型衛星関連の国際標準を討議するための専門家ワークショップの開催実績

開催月	開催地	タイトル	参加者数	
			日本	海外
2011.12	北九州	International Workshop on International Standardization of Nanosatellite Technologies	54	36
2012.12	北九州	International Workshop on Micro/Nano Satellite Testing Standardization	29	15
2013.11	東京	International Workshop on Small-Scale Satellite Testing Standardization	37	23
2014.11	北九州	International Workshop on Small-Scale Satellite Standardization	43	45
2015.12	ローマ	International Workshop on Lean Satellite Standardization	3	42
2017.1	東京	International Workshop on Lean Satellite Standardization – 2017	48	35
2018.1	北九州	International Workshop on Lean Satellite - 2018	62	40
2019.12	東京	International Workshop on Lean Satellite - 2019	50	38
2020.11	オンライン	International Workshop on Lean Satellite - 2020	79	38

た。その一覧を表2に示す。ISO-19683制定活動の中で培った専門家のコミュニティーは現在も続いており、ISO-TS-20991や現在進行中のCubeSat Interface規格制定活動においても重要な役割を示している。これらワークショップの議事録や関連資料はWebサイト (<https://lean-sat.org/>) からダウンロードできる形になっている。

ISO-19683の制定活動の進行過程を以下に示す。

- 2013年6月 NWIP投票
(専門家が集まらずNG)
- 2014年4月 NWIP再投票通過
- 2015年3月 CD/V通過
- 2015年6月-2016年6月 活動一旦休止
- 2016年11月 DIS通過
- 2017年8月 IS発行

初回のNWIP投票こそ専門家が集まらずに否決されたが、再投票通過後は専門家ワークショップ開催と並行して進めていたこともあって比較的順調に進んでいた。しかし、

CD/Cの段階で英国から強い反発を受けた。当初のタイトルは“Design Qualification and Acceptance Tests of Small-scale Satellite and Units”としていた。それに対して、“Small-scale Satellite”は英国の小型衛星企業SSTLのSmall Satelliteを想起させる、SSTLはもっとしっかりした試験をしており、それよりも緩い試験標準を出されてはSSTLのブランドに傷がつく、と言った意見が英国から出された。

2014年11月に行われた専門家ワークショップにて、英国の意見をとりいれるべく、超小型衛星を英語で何と呼ぶべきかという議論を行った。その結果、超小型衛星とは、低コスト・短納期を追求して衛星を作り運用する哲学を言うのであって、大きさで定義するのは間違いであるという結論に至った。適当な名称について議論をかわした結果、“Lean Satellite”という名称を使うことで一致した。Lean Satelliteとはトヨタの生産方式を米国でアレンジし直したLean Manufacturingから来ている。しかし、自動車に使われるLean Productionを超小型衛星にそのまま適用することはできず、あくまでもムダを省き最小限

のチームでできるだけ低価格・短納期で信頼性の高い衛星を顧客に届ける、という意味でのLeanである。このような議論を経た結果、2014年12月に19683のタイトルを“Design qualification and acceptance tests of lean satellite and units”と変更して、CD/Vとして提出した。CD/Vは通過したが、米国はLean Satelliteという名称はまだ広く知られておらず時期尚早であるとの理由から反対票を投じた（英国は棄権）。2015年6月に米国で開催されたSC14総会にて、SC14中の英語国である米国と英国に対して、英語での適当な呼称について両国で協議した上で提案してほしいと依頼したところ、“Small Spacecraft”ではどうかと提案された。

超小型衛星の定義をめぐって19683が迷走し始めた頃、ISO/TC20/SC14のメンバー（特にフランス）からは、「試験規格を作るのもいいが、その前に超小型衛星とは何かを整理して、超小型衛星が守るべき要求条件を明確にした上位規格みたいなものが必要ではないのか？」といった意見が出された。TC20/SC14に参加しているのは概して各国宇宙機関や衛星プライムメーカー等に所属する人達であり、超小型衛星とは縁遠いところにある。2011年に初めて超小型衛星の試験規格を作りたいとISO/TC20/SC14でプレゼンして以来、ISOの場で「超小型衛星は学生のオモチャである」「ゴミばかり増やしている」といった非常に厳しい意見を聞かされた。当時は「New Space」という言葉もなく、特にフランス等は国内に有力な小型衛星企業も存在していなかったこともあって、超小型衛星に対しては非常に冷淡であった。彼らの求める上位規格を作らない限り、試験規格は受け入れられないだろうと思われ、2015年6月から上位規格作成にとりかかり、19683に係る活動は一旦休止することとした。それが、上記にあ

る2015年6月から2016年6月までの休止期間の理由である。

超小型衛星に関する上位規格を作る決断をしたものの、その規格は商業衛星のみならず大学等の教育・研究衛星にも影響を与えかねない。そのため、産業界だけでなく大学等も含めて、超小型衛星の専門家から広く意見を募るためにIAA（International Academy of Astronautics）でStudy Groupを立ち上げて、学界・新興国からの意見をとり入れる機会を設けた。IAAにおいて、“Definition and Requirements of Small Satellites Seeking Low-Cost and Fast-Delivery”というStudy Group（IAA SG4.18）を2014年の9月に立ち上げた。

IAA SG4.18ではLean Satelliteの概念をさらに明確にすべく、各衛星プロジェクトをLean Satelliteの尺度として0から100までで表す尺度を導入した。Lean Satelliteの特徴を9つのカテゴリーにわけ、各カテゴリーにそれぞれウェイトをつけた上で、16個の設問を用意した。各設問に答えることで、最終的に0から100までの尺度を計算することができる。この尺度を35の実際の衛星プロジェクトと8の仮想プロジェクトにあてはめて検証してみた。

表3 各衛星プロジェクトのLean Satelliteを測る尺度

No	カテゴリー	ウェイト
1	プログラムコスト	20
2	プロジェクトスタートからフライトモデル納入までにかかった時間	20
3	単純さ	11
4	リスク許容	12
5	リスク軽減	5
6	信頼性要求	10
7	ミッション期間	4
8	打上げ	10
9	ムダの最小化	8

その他にも、Study Groupの参加者に対して、自分達がこれまでに超小型衛星を開発・打上げた際に、どのような要求条件に従わなければならなかったかについて、調査を行った。その結果、15ヶ国18名から回答を得た。回答の中身にそれほど差はなく、デブリ防止、システム安全、周波数調整、国連登録、分離直後の電波放射等々があげられていた。それらの結果を踏まえて、ISO-20991の原案が作成された。

IAA SG4.18の結果は、Study Group Reportとして2017年に出版された。ReportではLean Satelliteの定義を以下のように記している。“A lean satellite is a satellite that utilizes non-traditional, risk-taking development and management approaches – with the aim to provide value of some kind to the customer at low-cost and without taking much time to realize the satellite mission.”従来のシステム工学は、アポロ計画に代表される宇宙システムとともに発展してきたが、その目的は、システムがどのように複雑になろうとも完璧に動くシステムをステークホルダーに届けることにあった。一方でLean Satelliteの目的は、100%常に動作が保証されることを優先しない新たなステークホルダーに対して、最小限のコストで良質な製品を届けることにある。Lean Satelliteに関する研究は、システム工学の新たな展開をもたらす可能性がある。

IAA SG4.18での議論を踏まえ、“Requirements for Small Spacecraft”というタイトルで2015年にNWIP提案を行った。提案は、上位規格の制定を強く主張したフランスとの共同提案となった。その後の経過は以下の通りである。

- 2015年10月 NWIP通過
- 2016年9月 CD/V通過
- 2017年8月 TSとして投票にかける

- 2017年11月 DTS通過
- 2018年7月 TS発行

上位規格案は、2016年9月のCD/Vは通過したものの、米国と中国から、既存の規格を束ねたものだけである、とのコメントがでた。このままの形でDIS投票へと進むのか、今後大きく改訂してオリジナルの要求事項をいれるのか、TSなどのより拘束力の弱い文書とするのか、2017年1月に東京にて開催された専門家ワークショップ（International Workshop on Lean Satellite Standardization – 2017）にて議論を行なった。その結果、文書化することを優先してTSとして提案することとし、2017年6月のSC14総会を経たのち、2017年11月のDTS投票を通過した。投票結果は、米国のみが反対し、フィンランド、インド、ノルウェー、英国が棄権した。最終的に2018年7月にISO/TS-20991 “Space systems -- Requirements for small spacecraft”として発行された。

ISO/TS-20991は、超小型衛星であろうが大型衛星であろうが、衛星である限り準拠すべき最低限の要求事項を列挙したもので、それらの要求事項を詳細に述べた別のISO規格等を参照する形になっている。要求事項については、ロンチャーインターフェース、システム安全、相乗り、デブリ防止、周波数調整、国連登録、設計・製造の検証、CubeSat、ISS放出の9つに別れており、全部で5ページの小品であるが、どれだけサイズが小さかろうと、衛星の目的がなんであろうと、守るべきことを書き記している。

TS-20991は、2018年8月のISO本部の広報で“Ready for lift-off : first international guidelines for small spacecraft just published”として、大々的に取り入れられた。超小型衛星の数が爆発的に増えている中で、とてもタイムリーなISO文書であると賞賛され、SC14委員長（米

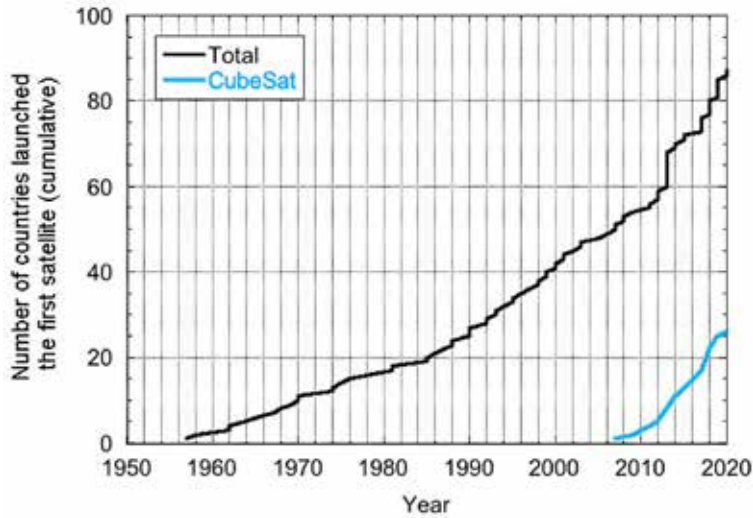


図2 人工衛星を保有した国の累計数とCubeSatが第一号衛星となった国の累計数
(出典：九州工業大学)

国) から “ISO/TS 20991 will be of great benefit to small spacecraft developers, as well as launch operators, by providing the minimum requirements to ensure their safety and debris mitigation,” “It covers everything from the design, launch, deployment, operation and disposal, which will also give newcomers to the industry a means to access space, typically the domain of large companies and governments.” という推薦の言葉も得た。

図2にこれまでに人工衛星を保有した国の累計数の推移を示している。2010年を過ぎたあたりから、国数は急激に増え始め、そのほとんどがCubeSatによる宇宙参入であることがみてとれる。このような新規参入者の増加を踏まえ、ISO/TS/20991のように宇宙空間利用に関する基本ガイドブックを作ろうという動きは広がっており、Secure World Foundationの“Handbook for New Actors in Space”というHandbookが2017年に出版されたりしている。

<CubeSatについて>

ISO-17770 “Cube Satellites (CubeSats)” (2017年6月発行) は、Stanford大学とCalifornia Polytechnic大学が2000年代初頭に作成し、それ以来維持してきたCubeSat規格をほぼそのままの形で国際標準化したものである。この規格では3UサイズのCubeSatまでPODと呼ばれる放出機構との機械的インターフェースを定めている。海上コンテナ輸送用のコンテナ規格が物流に革命をもたらしたのと同様に、衛星のサイズを規格化したことがCubeSatの普及に大きく貢献した。各ロケットそれぞれが認定するPODが存在しており、その内側の寸法は全て同じである。この規格にそった形で衛星を作ってしまうと、基本的にはどのロケットでも打上げることが可能となり、打上げ機会が飛躍的に増大した。CubeSatはロケットの余剰能力を利用した相乗りにより打上げられるので、各ロケットの余剰能力をインターネット上で売り出すブローカーも登場し、軌道さえ選ばなければ迅速に打上げることができるようになった。ま

た、2013年からは、国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟のエアロックとロボットアームを利用したCubeSat放出が始まり、軌道上への定期便が実現することでCubeSatの打上げ数がさらに伸びる一因となった。ISSから放出されるCubeSatも当然CubeSat規格に準拠することが求められている。

CubeSatがそれよりも大きな超小型・小型衛星に対してもつ利点は、一基あたりのハードウェアや打上げが安いことと、打上げ機会が多いことがある。SpireやPlanetは、3UのCubeSatコンステレーションであるが、他の超小型衛星・小型衛星コンステレーションに比べていち早く商業サービスを開始できたのは、その利点を多に活用したことが大きい。

学生の教育用として始まったCubeSatは現在ではミッションの多様化が加速化してきており、それに合わせて6Uや12Uといった大型のCubeSatも登場してきている。特に6UCubeSatの場合、3U乃至4U程度の体積をミッションペイロードに分配できるため、多種多様なミッションに使われつつある。CubeSatは単なる技術実証のテストベッドでなく、AISやIoTなどの狭帯域通信、気象デー

タなどの非画像計測、数m以上の低解像度撮影等で実利用することも可能である。CubeSatについては、製品（コンポーネント、キット）だけでなく、サービス（訓練、試験、打上げ、運用等）も含めたソリューションビジネスが世界中で始まっており、それらがインターネットを介して流通している。CubeSatは衛星としては最小クラスに属し市場規模は宇宙産業全体からしてみれば微々たるものではあるが、宇宙セクターを拡大・多様化するのに大きく貢献できる。

図3は1930年代に書かれた標準に関する古典的文献⁽⁷⁾からとった技術革新の進展と標準化を開始すべき時期の関係である。新技術が市場投入され、多くの技術的革新がなされ、成熟期に入る直前あたりが標準化活動するのに良い時期であると述べている。この図と図1に示された1-10kgの衛星（ほとんどがCubeSatである）の打上げ数の推移を見比べると、2017-2018年頃がPhase3の始まりとも見てとれる。CubeSatは、1Uから3UのサイズについてPODとのインターフェースをいち早く標準化することにより大きく成長することができた。

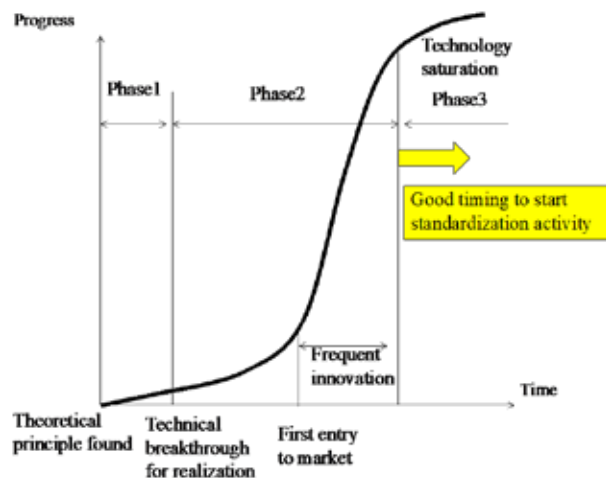


図3 技術成熟度と標準化のタイミング (文献^{6,7)})

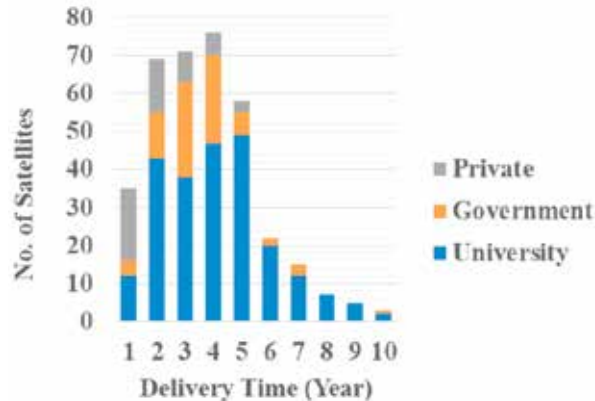


図4 超小型衛星のプロジェクト開始から衛星納入までにかかった期間の分布⁽⁸⁾

CubeSatがさらに成長していくためには多くの課題がある。単なる衛星技術の革新だけでなく、打上げ互換性の更なる拡大、デブリ防止、大量生産への対応、納期の更なる短縮、信頼性の向上等々、標準化が成長に貢献できる部分は多くある。例えば、打上げ互換性では、現在数が増えつつある6Uサイズについては打上げブローカーが提供するPODにいくつかの亜種が存在しており、更なる標準化が必要となっている。特に筆者が注目しているのが、大量生産への対応と納期の更なる短縮である。そのために、CubeSatのインターフェースの標準化に取り組んでいる。以下、それについて述べたい。

図4は2003年から2017年までに打上げられた50kg以下の衛星について、プロジェクト開始から衛星納入までにかかった時間の統計である⁽⁸⁾。なお、統計からはSpireとPlanetのコンステレーションは除いている。この図からわかるように、多くの超小型衛星（特に大学衛星と政府系衛星）が、納入までに2年以上の期間を要している。人件費がコストに直結する民間衛星では期間は短くなっているが、それでも2年を超えるものが少なからずある。この図からわかるように、超小型衛星の利点

が低コスト・短納期と言っても、短納期が必ずしも達成されているとは言い難い。

2019年12月に東京で開催した専門家ワークショップ（International Workshop on Lean Satellite-2019）において参加者にいくつかのアンケートを取った。そのうち、衛星の開発期間を短縮するためには何が必要かを自由記入で尋ねたところ、回答は表4の通りであった。なお、回答はCubeSatの開発者（Developer）と販売者（Vendor）に分けている。インターフェースや統合といった言葉が多くの回答者から得られている。衛星開発において、個々のコンポーネントの開発・調達・試験はもちろん重要であるが、全コンポーネントをシステムとして統合し、試験を行うことも重要なのは言うまでもない。その際に発生するインターフェース不適合による不具合を一つずつ解決していくのに多大な時間を要している。

CubeSatのコンポーネントについては、出来合いの製品がネット上で広く流通しており、今や衛星を全て自分で作る時代ではなくなっている。しかしながら、異なる業者からの製品を組み合わせても動かないことは多々あり、コンポーネントを複数購入する場合はできるだけ単一の業者から購入する流れがで

表4 CubeSatの納期短縮のために必要なこと、または改善すべきことについての調査結果
(表中の数字は回答数、複数回答を可としている)

Question : In your opinion, what are necessary or need to be improved to accelerate the CubeSat delivery time?	Developers	Vendors
Integration and testing	4	2
Plug & Play to accommodate variety of missions	2	0
Reducing time before first integration.	1	0
Interface	7	3
Close working environment	1	0
Mixture of standard and design pattern	1	0
Improving the information within datasheets	3	0
Improving software and clear software interface	6	1
Accelerate administrative overhead (export control by government, frequency allocation, etc.)	3	0
Better quality manufacturing	1	0
More choice of payloads with various combination of functions	1	0
Backplanes easily accessible, easily changed.	1	0
Skill-up of designers	3	0
Dedicated test jig for CubeSat (e.g. vibration)	0	1
Design to manufacturability	0	1
Integration of payload	0	3
Wholesale adoption of Ethernet as the standardized interface	0	1
Selecting an unique bus/component provider	0	1
Standardized processes for design and testing,	0	1
Improved documentation	0	1

きつつある。2019年のワークショップでCubeSatの開発者に対してコンポーネントの購入先を問うたところ、16人の回答者中6人が単一業者から購入した、そのうち3人がインターフェース上の問題を避けることが理由であったと回答している。

最近では、CubeSatのプラットフォーム化が急速に進行している。その理由としては、衛星は使いたい衛星を作ることには興味のない人が増えている、コンポーネント間のインターフェースの不適合を避けるために全て同一業者からのコンポーネントで揃えたい、

CubeSatを自前で開発するには人もノウハウも足りないのでミッションペイロードの開発に特化してバスは出来合いのもので済ます、といった流れができつつある。1UのCubeSatプラットフォームは、経験の浅い新興国や大学が調達して自分等で衛星を作るのに使われることが多い。3Uや6Uのプラットフォームは、顧客がミッションペイロードを業者に持ち込んで、バスに精通した業者が衛星の統合を行う場合が多い。また、複数の顧客からのミッションペイロードを同居させるホステッドペイロードサービスのようなものも始まっている。

CubeSatプラットフォームやホステッドペイロードを商品として売り出している業者は今や全世界で30社以上存在し、CubeSatの作り方は学生が全て手作りしていた時代から完全に様変わりした。

CubeSatコンステレーションが多数立ち上がるにつれて、同品質のものを短時間で大量に作る大量生産の思想が必要となっている。すでにPlanetやSpireといった先行するCubeSatコンステレーションではこれまでの一品モノの衛星作りからは異なる作り方をしている。CubeSatの場合、サイズが小さいので作業機が一個あれば、衛星の組み立て・統合が可能である。そこで複数の衛星を各機で同時並行に作り、複数衛星をまとめて試験をするバッチ生産、バッチ試験が可能である。図5は九工大でIUのCubeSatを5基同時並行で組み立てた際の写真である。学生が機1個あたりに3人配置されて組み立て・統合を行なった。振動試験は3機まとめて、熱真空試験は4機まとめて実施した。この例では、技術作業に熟練していない学生が組み立て・統合を行なうため、品質に差ができないよう、ハーネス類を極力排した設計としている。大量生産を可能にするためには、コンポーネント間のインターフェースを最初から大量生産に適した形に設計する必要がある。2019年12月のワーク

ショップで、CubeSatの開発経験者にフライトモデルに使われたハーネスの数を尋ねたが、表5に示すように、多くのハーネスが残っている。ハーネスを使った理由を図6に示すが、太陽電池パネルやアンビリカルなど外面とのインターフェースでハーネスを必要とし、ペイロードとバスの間でもハーネスを要している。



図5 九工大での衛星5基の同時組み立て。各機で1UCubeSatが一個ずつ組み立てられている。

表5 フライトモデルに使われたハーネス数の調査結果

ハーネスの数	RFケーブル以外なし	1~5	5~10	10~
回答数	1	4	6	8

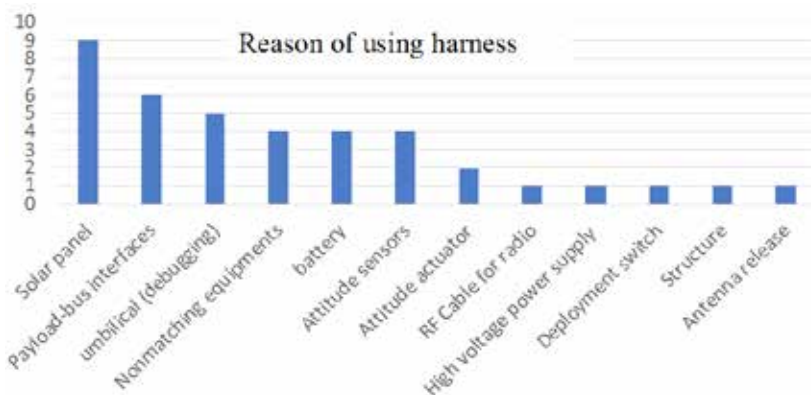


図6 ハーネスを使った理由の調査結果（縦軸は回答数。複数回答を可としている）

<CubeSat インターフェース標準>

CubeSatの納期短縮と大量生産化を進めるには、CubeSatの内部インターフェース（コンポーネント間、キューブサットバスとミッションペイロード間）の標準化が有効である。インターフェース標準はCubeSat機器（コンポーネント及びプラットフォーム）の国際貿易や国際協力ミッションを推進することにもなる。2019年度に経済産業省の省エネルギー等国際標準開発事業の一つとして「CubeSatインターフェースに関する国際標準化」が採択された。このプロジェクトのゴールは、CubeSatインターフェースのISO規格を2024年夏頃に発行させることである。プロジェクトにおいては、以下を実施することになっている

1. 超小型衛星関連国内メーカー・有識者によるプロジェクト委員会形成と規格原案の審議
2. 国際規格原案に沿った搭載機器の試験・評価
3. 宇宙新興国への国際規格の普及
4. 海外ステークスホルダーとの調整
5. 国際規格原案をISO/TC20/SC14に提案

実施体制は図7の通りであるが、プロジェクト委員会やSC14国内委員会にて国内調整をしつつ、SC14/WG1でP-Member国と調整しながら、IAAにおいてCubeSat Interfaceに関するStudy Groupを立ち上げて海外関係者の意見を反映する。Lean SatelliteのWebページを用いて、国内外と広く情報発信と情報交換を行っていくこととしている。

経済産業省の支援は2021年度までの3年間であるため、その期間中に規格原案を作成し、2021年夏にNWIPをISO/TC20/SC14に提出することを目標としている。現在想定しているISO規格の内容は以下の通りである。

- コンポーネント間のインターフェース
- プラットホーム（バス）とミッションペイロード間のインターフェース
- コンポーネントインターフェースの記述文書
- プラットホームインターフェースの記述文書
- 外部電気インターフェース（アンビリカル）

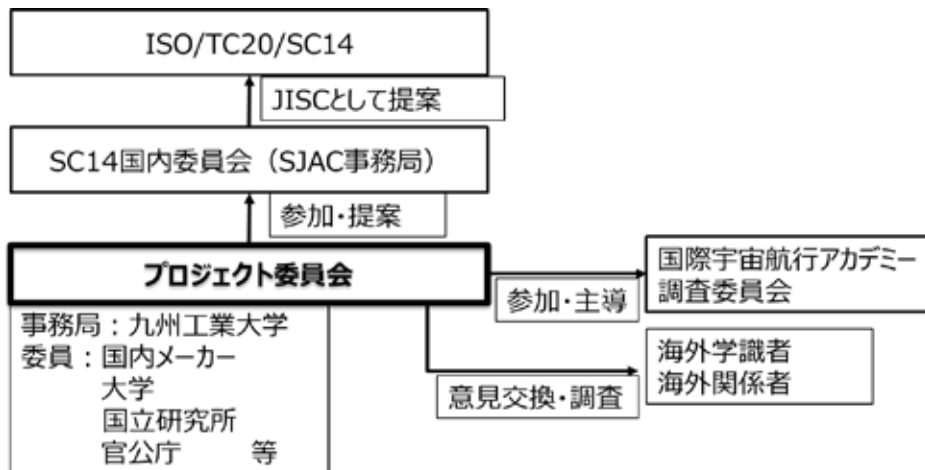


図7 CubeSatインターフェース標準化プロジェクトの実施体制

現在のところ、CubeSatの外形形状は規格で決まっているが、内部のインターフェースの規格はない。デファクトスタンダードとしては、PC-104規格（図8）が存在する。しかしPC-104は大きな問題を抱えている。PC-104は組み込みコンピュータの仕様をベースとしており、90.17x95.89mmのほぼ正方形の基板につけられた104ピンのコネクタを介して、



図8 PC-104規格のCubeSat基板の例
(Pumpkin社のWebページより)
https://www.pumpkinspace.com/store/p49/Motherboard_Module_%28MBM%29.html

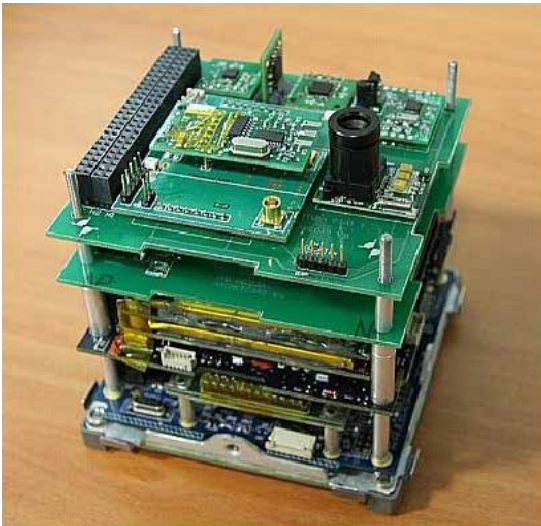


図9 PC-104基板を積み重ねた状態
(CubeSat ForumのWebページより)
<http://cubesats.wdfiles.com/local--files/start/ITUpSat1%20Cubesat%20Electronic%20Boards%20Stack.jpeg>

図9に示すように基板を積み重ねていくことができる。CubeSatにPC-104を導入したのは、CubeSatの草創期にStanford大学に協力したPumpkin社が最初で、米国の大学がPumpkin製のCubeSat基板を多く購入したことにより普及した。現在では、単体で売られているCubeSatコンポーネントの多くがPC-104を採用している。

図10に2003年以降に打上げられた397基のCubeSatについて内部構成が明らかになっているものについて、インターフェース形状を調べた結果を示す。わかっているだけで3割のCubeSatがPC-104規格を採用しており、不明のものを含めると半数以上がPC-104規格を採用していると思われる。2014年から2015年にかけて行われた調査（文献9）では、それまでに打上げられたCubeSatの35%がPC-104を採用しており、その後打上げを予定している59%のCubeSatがPC-104を採用していた。しかしながら、PC-104規格に対してユーザー側が満足しているわけではなく、文献9によると51%が104ピンコネクタが大きすぎる、17%がピン配置に自由度がありすぎるといった不満を抱いている。ピン配置の自由度は非常

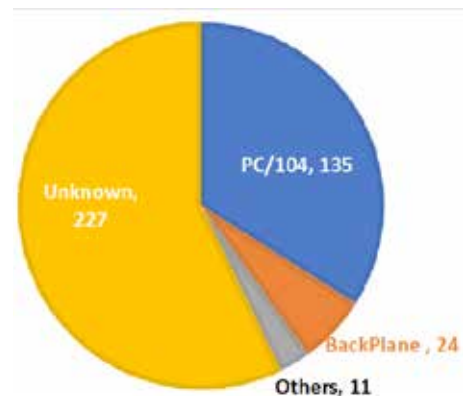


図10 2003年以降に打上げられたCubeSatの内部アーキテクチャーの分布

に問題であり、市場に流通しているPC-104準拠のCubeSatコンポーネントのうち、各社で共通するピンはわずかに10ピンしかない。104ピンのコネクタを串刺しにして基板を積層していく構成になっているため、ピン配置が基板により異なるとハーネスを介して別に接続するか、変換基板を挿入するしかない。限られた体積の中で全ての機器をおさめないといけないCubeSatでは、変換基板の挿入は余計な体積を消費するのでできるだけ避けたい。また、PC-104基板を積層すると、中間の基板を一枚だけ抜くということが不可能で、統合・試験の際の不具合対策が大変である。

もう一つのCubeSat内部アーキテクチャーとして、BackPlane方式というものがある。図11に例を示すが、基板（コンポーネント）を底面基板のコネクタソケットに挿していく構成になっている。この方式の利点は、基板間のピン配置の違いを底面基板の配線のルーティングにより吸収してしまえるのでハーネスが少なく済む（実際にRFケーブル以外はゼロにすることも可能）、基板を1枚だけ抜き挿すことができるので統合・試験時の不具合対策が容易、基板間の距離を縮められるので体積を最小化できるといった点がある。衛

星バスを自作できる企業や大学ではこの方式を採用しているところが多く、衛星プラットフォームとして製品が提供される場合にはこの方式も多い。

PC-104かBackPlaneに関わらず、CubeSat機器（コンポーネントやプラットフォーム）がインターネットを介して世界的に流通している状況において、各機器のインターフェース情報を顧客にわかりやすい形で知らせる必要が高まっている。今や、多くのCubeSat開発者がCubeSat機器を市場から調達している。CubeSatの飛行実績が蓄積され、製品に対してある程度の信頼がおけるようになったことが多い。しかし、開発者にしてみれば、衛星の初期設計段階においてどの会社の製品を使うかを判断するには、各製品のインターフェースに関する詳細な情報が必要である。衛星の統合・試験時には、ハード・ソフト（データ）のインターフェース不適合による不具合を解明する必要があるが、製品のインターフェース情報についてより詳細な情報が欲しい。CubeSat機器の場合、ベンダーと顧客が遠く離れていることがほとんどであり、直接のやりとりも難しいため、インターフェースを記述する文書の詳細化・標準化が望まれる。

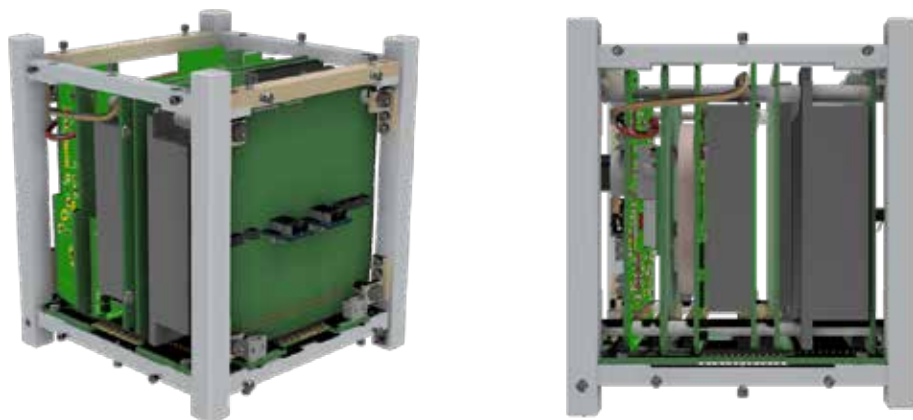


図11 BackPlane方式のCubeSatアーキテクチャーの例

2021年夏にISO/TC20/SC14にNWIPを提出する予定であるが、その際に添付予定の規格原案の目次は表6の通りである。なお、タイトルは“Space Systems – CubeSat Interface”とする予定である。

表6 ISO/TC20/SC14に提出予定の規格原案の目次

Foreword
Introduction
1 Scope
2 Normative References
3 Terms and Definitions
4 Symbols (and Abbreviated Terms)
5 Internal Interface Requirements
5.1 Unit to Unit Interface
5.2 Mission Payload to Platform Interface
6 Datasheet Requirements for CubeSat Units
6.1 General Requirements
6.2 Electrical Power System Unit
6.3 Communication Unit
6.4 Command and Data Handling Unit
6.5 Attitude Determination And Control Unit
7 Datasheet Requirements for CubeSat Platforms
7.1 Mechanical Interface
7.2 Electrical Interface
7.3 Software Information
7.4 Operation-related Information
7.5 Safety Information
7.6 Safety Information
7.7 Assembly, Integration and Testing Information
8 External Electrical Interface (Umbilical)
Annex A (Informative) Typical Digital Data Communication for CubeSats
Annex B (Informative) PC-104 Style Example

Annex C (Informative) Backplane Style Example

Bibliography

現在のところ、規格の草案は一部の付録を除いて全て埋まっており、今後さらに内部を国内外と調整していく予定である。CubeSat インターフェース標準化プロジェクトは、2019年夏に開始して以来、2019年末の東京でのワークショップに90名近くが参加するなど順調な滑り出しを見せた。しかしながら、2020年初頭からのコロナ禍により全ての国際調整がオンラインのみとなり、海外との調整に大きな支障をきたしている。国際標準作成においては、国内外ステークホルダとの直接面談による交渉が欠かせないが、その微妙な調整を実施することがないままに1年半が過ぎようとしてしまっている。コロナ禍収束後に国際調整を速やかに実施できるよう、準備を怠らないようにしている。

<おわりに>

本稿では、超小型衛星関連の国際標準化をめぐる動きを紹介した。超小型衛星は宇宙セクターの中でも成長著しい分野である。コスト低減、納期短縮、信頼性向上、利用促進等々の分野において、国際標準化が成長を更に促進させるのに役立つと思われる。筆者は過去10年間ISO/TC20/SC14の中で超小型衛星の国際標準化活動を行ってきたが、SC14の中には超小型衛星関連のメンバーが極めて少なく、日本発の国際標準を作るには絶好の場となっている。しかし、日本発の国際標準を作っても、日本企業の国際競争力強化につながらなければ、日本発で標準を作ることの意義が薄れてしまう。日本は、世界的にも超小型衛星分野で高い競争力を有しており、打上げ数も数年前に中国に抜かれるまでは米国に次い

で2位であった。その競争力は、大学での研究が盛んであること、高い技術力を有した産業基盤があること、打上げ手段をもつこと、等々に裏付けられている。一方で、超小型衛星を手がける日本企業には、国際対応力が弱い、CubeSatプラットフォームを提供できる企業がない、等の弱みがある。超小型衛星は機器にしてもサービスにしても、海外市場を視野にいたしたビジネスが必須である。国内のNew Space企業に国際標準活動の重要性を認識してもらい努力をしつつ、産業界と連携した国際標準活動を進めていくことが重要である。そのためには、国際対応力に優れた人材を宇宙業界全体で育てることが必要と思われる。

参考文献

1. 「超小型衛星試験の国際標準化プロジェクトの紹介」、趙孟佑、「航空と宇宙」698号、2012年2月
2. 「超小型衛星研究開発に係るアジア等の宇宙新興国に向けた日本の支援可能性に関する調査研究」、九州工業大学・大学宇宙工学コンソーシアム、文部科学省令和元年度地球観測技術等調査研究事業成果報告書、2020年3月
3. “Prospects for the Small Satellite Market” , EuroConsult, April, 2021
4. “2020 State of the Satellite Industry Report” , Satellite Industry Association, 2020
5. “2011 State of the Satellite Industry Report” , Satellite Industry Association, 2011
6. 『「ものづくり」の科学史 世界を変えた《標準革命》』、橋本毅彦、講談社学術文庫、2002
7. “Industrial standardization, its principles and application” , J. Gaillard, 1934
8. Kiran K. Pradhan and Mengyu Cho, “Shortening of the Delivery Time for University-Class Lean Satellite” , Journal of Small Satellites, Vol.9, No.1, pp.8810896, 2020
9. J. Bouwmesster et al., “Survey on the implementation and reliability of CubeSat electrical bus interfaces” , CEAS Space J (2017) 9 : 163–173