宇宙技術教育のための CubeSat 地上モデルの開発と活用実践：2. 競技設計と実践

Development and Application of a CubeSat Ground Model for Space Technology Education :
2. Design and Implementation of the Competition

中谷 淳^{*1}
Jun NAKAYA

高田 拓^{*2}
Taku TAKADA

梶村 好宏^{*3}
Yoshihiro KAJIMURA

北村 健太郎^{*4}
Kentarou KITAMURA

上田 真也^{*2}
Shinya UETA

土屋 華奈^{*1}
Hana TSUCHIYA

上園 波輝^{*2}
Namiki UEZONO

笹岡 由唯^{*2}
Yui SASAOKA

For space technology education, we performed the first CubeSat ground model competition for KOSEN (National Institute of Technology) students in Japan, using a newly developed Model CubeSat. Based on the actual operation of the satellite, the events of the Model CubeSat competition were designed to focus on three important subsystems—the electrical power, attitude control, and communications systems. In this paper, we outline the results of the Model CubeSat competition for KOSEN students and discuss the educational merits and further improvements to spread the Model CubeSat competition nationally.

Keywords : Space Education, Educational Materials, Practical Education, Satellite, National Institute of Technology

キーワード：宇宙教育，教材，実践教育，人工衛星，高等専門学校

1. はじめに

従来、宇宙開発は国家的なプロジェクトであったが、世界初の CubeSat が東京大学と東京工業大学によって成功裏に打上げられたことを契機に小型衛星開発が大学、民間でも盛んに行われるようになった。また、国際的な宇宙ビジネス拡大の流れを受けて、2016年には宇宙活動法が成立し、国内における宇宙産業の裾野の拡大が期待されている。このような状況の中、国内の産業界からは宇宙産業を担う若い世代の育成が求められている。技術者を育成するために設立された高等専門学校（高専）においても、宇宙産業を担う人材育成は重要な課題である。草の根的な教員の集まりである高専スペース連携は、2014年頃からモデルロケット教材、人工衛星教材の開発などを通して、宇宙実践教育を展開している^{1) - 3)}。

宇宙教育の一例として、人工衛星を題材にした競技会が国内外を問わず開催されている。実際の衛星開発では、定められた打上日までに所定のミッションを達成する人工衛星を開発する。人工衛星は様々な分野を統合したシステムであるため、異なる分野の専門家がチームを組んで開発、運用にあたる。人工衛星関係の競技会は、予算

規模、マンパワー、開発期間などは異なるが、実際の人工衛星開発のエッセンスを凝縮したものであり、課題解決型学習（Project Based Learning, PBL）のテーマにもなりうる。表1に学生が参加できる人工衛星関係の競技会の例を示す。

人工衛星に関係したコンテストや大会は、主に衛星設

表1 人工衛星関係の競技会（学生向け）

競技会名	参加対象	開催地	特徴
種子島ロケットコンテスト (2005年～)	高校生、高専生、大学(院)生、社会人	鹿児島県南種子町	書類審査+本戦 パイロット部門カムバック競技
缶サット甲子園 (2008年～)	高校生、高専生 (3年生以下)	日本国内	地方大会+全国大会 モデルロケット打上によるミッション競技
能代宇宙イベント (2005年～)	高専生、大学(院)生	秋田県能代市	ミッション競技とカムバック競技
ARLISS (1999年～)	高専生、大学(院)生	アメリカ	アマチュアロケット打上によるカムバック競技
C'space (1963年～)	高校生、高専生、大学(院)生	フランス	アマチュアロケット打上によるミッション競技、カムバック競技
衛星設計コンテスト (1993年～)	高校生、高専生 (ジュニアの部は2年生まで参加可)、大学(院)生	日本国内	書類審査+本審査 ジュニアの部、アイデアの部、設計の部

2018年11月14日受付

*1 岐阜工業高等専門学校

*2 高知工業高等専門学校

*3 明石工業高等専門学校

*4 徳山工業高等専門学校

計を実施するコンテストと、模擬人工衛星を開発・製作して競技する大会の2系統に分かれる。模擬人工衛星としては、飲料缶サイズのCanSatが想定されており、衛星開発の導入教材として世界中で利用されている⁴⁾。安価で高性能な市販品の電子部品を組み合わせることで、高度な機能を有するCanSat製作が可能である。近年では、CanSatキットが準備され、製作講座が開催されており^{3), 5)}、CanSat製作のハードルは相当低くなっている。

しかしながら、CanSatに習熟した学生であっても、人工衛星開発を進める際には、多くの困難に直面する。困難を生み出す要因のひとつは、CanSatとCubeSatが動作する環境の違いである。CanSatの機能の多くはCubeSatと共通であるが、CanSatは宇宙環境（真空、微小重力、放射線、熱負荷）での動作に不可欠な要素⁶⁾を必ずしも必要としていない。一方、CubeSatでは、太陽光発電を有する電源系、軌道上と地上とのデータ通信を行う通信系、宇宙環境から衛星を守る構造系が必須であり、これらの要素がCubeSat開発初心者にとって高いハードルとなっている。そこで、初心者でも取り組みやすいCubeSat地上モデル（以下、モデルCubeSat）を開発し、実際の衛星運用の中で重要なポイントに的を絞った競技会を開催することで、将来に向けた宇宙人材育成に大きく寄与できると考えた。

本報告では2018年8月30日から9月2日にマリナパーク新居浜（愛媛県新居浜市）で開催された高専生向けの宇宙教育イベントである高専スペースキャンプ2018において、新しく開発したモデルCubeSatを利用したモデルCubeSat競技会について、概要および実施結果を述べる。なお、モデルCubeSatの開発、および製作講座については、別稿を参照されたい⁷⁾。

2. モデルCubeSat 競技について

2.1 競技の概要

競技に用いるモデルCubeSatの大きさは一辺約12cmの立方体に近い形状であり、メインコンピュータにはRaspberry Pi Zero Wを採用している。人工衛星のシステムは、サブシステムと呼ばれるいくつかの機能からなるが、モデルCubeSatにおいても図1に示すような複数のサブシステムから構成される。電源系は太陽電池パネル3枚と充電電池3本を用いて、快晴時の日中であれば、

システム全体に必要な電源を供給できる。姿勢系は9軸センサモジュール、GPSセンサモジュール、気圧・温湿度センサモジュールからなり、取得データから、モデルCubeSatの姿勢を決定できる。通信系はZigBee規格の無線装置を内蔵したMONOSTICK（10mW級）を用いて地上系と見立てたノートPCなどへデータ送信できる。地上系はノートPCにMONOSTICK（10mW級）をUSB接続して使い、シリアル通信された受信データを「Tera Term」などで表示する。モデルCubeSatの外観を図2に示す。

モデルCubeSat競技は、学生が実際の人工衛星の運用を模擬でき、特に重要なサブシステムの役割を理解しやすい内容とした。人工衛星は少なくとも高度数百km以上の軌道上で運用されるため、半自律的な動作が求められる。予め計画された通りのミッションを遂行する必要がある。今回のモデルCubeSat競技においては、自律的な動作を保証する電源系、人工衛星側で得られたデータを地上側へ送るための通信系、撮像などのミッションで必要となる対象物を捉えるための情報を提供する姿勢系の3つのサブシステムに注目した。サブシステム毎に課題を設定し競技を行うこととした。具体的な課題は、①機体が長時間正常に動作するための太陽電池システムによる電力管理、②限られた時間における地上局との確実なデータ通信、③カメラから目標物への位置関係を認識した姿勢決定、である。競技内容の概略を表2に示す。各々の競技内容の詳細は次項以降で述べる。

図2 モデルCubeSatの外観

図1 モデルCubeSatの構成図

表2 モデルCubeSat 競技の内容

	電源系	通信系	制御系
狙い	衛星の安定動作	滞りない通信	撮像した目標物の位置決定
動作時間	4～5時間	5分程度	5分程度
設置場所	屋外（雨天時は室内）	係留気球からつるす（雨天時は室内）	係留気球からつるす（雨天時は室内）
データ取得	microSD	無線通信	microSD 無線通信
判定項目	CPU使用率×時間	指定されたデータの受信	画像処理した撮像画像

2.2 電源系競技

電源系競技では、太陽電池パネルからの給電量に合わせた動作計画を立て、長時間のデータ取得状況を競うこととした。競技時間は4～5時間程度とし、全参加グループによる一斉開始、一斉終了とする。効率的な運用計画が実施できたかを判断するために、3秒毎に取得したCPU使用率のデータを足し合わせた量(CPU使用率の時間積分値)を報告してもらう。また、使用する充電電池は、快晴時には放電終止電圧の電池を、曇天時には満充電の電池を使用することとした。放電終止電圧の状態は、運営側が放電器を利用して、全ての充電電池が同じ状態となるように準備した。

2.3 通信系競技

通信系競技では、モデルCubeSatをつるした状態でMONOSTICKによるデータ通信量を競う。競技はグループ毎に実施し、競技時間は5分程度とする。データを受信する地上局はMONOSTICKをノートPCに接続した状態で、送信機の発信地点から見通し200～300m程度(雨天時は、5～10m程度)離れた地点に設置する。モデルCubeSat側は、規定の文字列(時刻、気圧、GPS座標の緯度、経度、高度)を3秒毎に送信し、受信側で受け取ったログを保存する。アンテナは基本的には無指向性であるが、MONOSTICKの棒状の方向への伝播放射は弱く、モデルCubeSatへMONOSTICKを取り付ける向きや、地上側での待ち受け時のMONOSTICKの向きが重要となる。

2.4 姿勢系競技

姿勢系競技では、モデルCubeSatをつるした状態で、センサデータから姿勢を決定し、撮像した目標物の姿勢決定精度を競う。目標物として、5つの目標地点などが含まれる画像を撮像し、画像上に×印や線を書き込むようにした。オンボード上での処理を推奨するが、原則としてプログラムによる一括処理で実施できれば、実験後の書き込みを可としている。5つの目標地点は下記である。

- (1) 画像に水平方向の線を引く
- (2) 東西南北のいずれかの方位を線または×印で示す
- (3) 太陽の方位を線で示すか、或いは、太陽の中心位置を×印で表す
- (4) 事前に緯度、経度、高度が与えられた多目的広場の特定の場所のいずれかを×で示す
- (5) 多目的広場内に置かれたカラーコーン(4箇所)のいずれかが含まれる画像を撮像し、その位置を×印で示す

目標地点に関する課題は、単一のセンサデータで実施できるものから、複数のセンサデータを組み合わせて実施するものまでを準備しており、今回使用した姿勢系のセンサの役割を認識できているかを測れるような課題となっている。

実際の競技では、競技時間の節約のため、姿勢系競技と通信系競技は同時に行う。晴天時は、高度40m程度に上げた係留気球からつるすことにし、雨天時は、室内でのつり下げとする。室内でのつり下げの場合は、揺れや

回転がないため、CubeSatモデルを固定した台を人為的に回転させる指示を出す。

3. CubeSatモデル競技の実施結果と考察

3.1 実施内容

高専スペースキャンプ2018において、モデルCubeSat製作講座と競技会(事後プレゼン含む)を実施した。実施スケジュールを表3に示す。参加した学生は全国の国立高専11校から5年生9名、4年生1名、3年生11名、2年生9名、1年生7名の計37名であった。グループ分けは、所属学科、学年のバランスを考慮しつつ1グループ4人から5人とした。

初日(8月30日)のモデルCubeSat製作講座は、モデルCubeSatの部品、予め作成したテキストを配布し、講師となる教員と学生が必要に応じて解説しながら、グループ毎に1機を製作した。図3に製作講座の様子を示す。

2日目(8月31日)は、競技前に各グループがモデルCubeSatの最終調整を行った。当日は晴天に恵まれたため屋外の競技会場にてモデルCubeSatを置き、電源系競技を開始した。図4に競技時の写真を示す。図5にサーモグラフィカメラで撮像したモデルCubeSatの温度分布の写真を示すが、モデルCubeSatが置かれた台、および太陽電池表面は直射日光の影響により50℃程度以上と非常に熱くなっている。一方で、モデルCubeSat内部は30℃から40℃程度と比較的、熱の上昇が抑えられていることが分かる。開始から4時間後にモデルCubeSat競技を終了し、各グループによるデータ解析、通信系・姿勢系競技のための準備が行われた。

3日目(9月1日)は、雨天であったため室内で通信系・姿勢系競技を実施した(図6参照)。室内で吊り下げられたモデルCubeSatの様子を図6(右)に示すが、格子

表3 モデルCubeSat競技会のスケジュール

8/30	製作講座(15:00～18:00, 延長～21:00)
8/31	製作・調整(8:30～11:30)
	電源系競技(11:30～16:00) 製作・調整(16:30～18:30, 延長～21:00)
9/1	製作・調整(14:30～15:30)
	姿勢系・通信系競技(15:30～17:30) プレゼン資料作成(～21:00)
9/2	事後プレゼン(9:00～11:00)
	審査、表彰(11:00～12:00)

図3 モデルCubeSat製作講座の様子

状のプラスチック板に、マジックテープで固定してもらい、競技時間中に短時間ほど水平回転させてもらった。通信系・姿勢系競技終了後は、グループ毎に得られたデータの解析を行い、事後プレゼンの準備を進めた。

4日目（9月2日）は各グループが作成したスライド資料によるプレゼンテーションを実施した。プレゼンテーションは発表10分、質疑応答4分とした。低学年生から高学年生までを含むグループであるため、できるだけ全員が発表に参加するように、製作講座内ではお願いしたが、全てのグループで全員がプレゼンテーションに参加してくれた。プレゼンテーションの後、審査員長1名を含む審査員4名による審査が行われ、最優秀賞1グループ、優秀賞2グループ、電源賞、通信賞、姿勢賞各1～2グループ、審査員特別賞1グループを表彰した。

図4 電源系競技の様子

図5 サーマグラフィカメラで見たモデルCubeSatの温度分布（電源系競技中）

図6 通信系・姿勢系競技の様子：（左）全景、（右）つり下げられたモデルCubeSat

3.2 各グループの競技結果

本項では、競技に参加した8グループの結果について詳細を述べる。まず、各グループには、自分たちの製作したモデルCubeSatのアピールポイントを200字程度で作成してもらった。アピールポイントの要点を表4に示すが、特に内容や書式は指定していないため、各グループが技術的な部分、あるいはグループ運営に関する部分などを各々自由に記述した。

各グループのデータ取得状況を表5に、評価のポイントを表6に示す。なお、本競技で用いたモデルCubeSatは全てのグループで同一のものである。全てのグループが期間内にモデルCubeSatを完成させて競技に臨めた点、そして1つ以上の競技で良好なデータが得られた点は評価すべきである。グループ間で差が生じた要因としては、グループメンバーの所属学科や学年が異なることに加え、個々が持っている知識と技能の差、そして課題解決力によるものと推察される。

最優秀賞、優秀賞のグループは、全ての競技で安定したデータ取得ができていた点が評価された。姿勢賞に関しては、取得した9軸センサモジュールのデータ、および

表4 各グループのアピールポイント

A	MONOSTICKを内側に配置してコンパクトにした 写真撮影を10秒間隔とすることで、CPU負荷を抑える
B	地上局側のMONOSTICKの指向性を考慮して配置
C	解像度を小さくし、60秒間隔で撮像した
D	リーダー中心のグループマネジメント 子機にアンテナを接続
E	データ分析をしっかりとやる
F	トラブルを乗り越える中でCubeSatモデルの理解度が 向上
G	MONOSTICKにアンテナを接続
H	グループメンバー丸となって諦めずにやっていく

表5 各グループのデータ取得状況

	電源系	通信系	姿勢系
A	データ有 (2h)	データ有 (GPS除く)	データ有 姿勢・方位考察
B	データ無	データ有 (200行) 受信データ保存	データ有 加速度、角速度3D グラフ
C	データ無	データ有	データ有 姿勢・方位決定
D	データ有	データ有	データ有 緯度・経度決定
E	データ無	データ有 (12行)	データ有 姿勢・方位決定
F	データ無	データ有 (GPS除く) アンテナ工夫	データ有 姿勢・方位推定
G	データ有 (1.5h)	データ有 (GPS除く) アンテナ工夫	データ有
H	データ有	データ有 (GPS除く)	データ有 姿勢・方位推定

表6 各グループの評価ポイント

A	動作時間は2時間であったが、充電電池と太陽電池パネルからRaspberry Piに共有された電圧のグラフをまとめていた点、途中で動作しなくなった原因をまとめていた点（電源賞）
B	通信系競技において十分なデータが取得できており、MONOSTICKのアプリケーションIDを変更して、混信を防ぐ工夫をした点、地上系のMONOSTICKの指向性を考慮して配置した点（通信賞）
C	加速度データから姿勢の傾きを導出した点、加速度データから機体の回転を読み取った点、そして地磁気データから方位を決定した点（姿勢賞）
D	全ての競技で多くのデータが取得できていた点、電源系競技において消費電力削減の事前準備を行った点、CPU使用率を適切にまとめていた点、太陽電池パネルからの取得電流・電圧を的確に評価していた点（最優秀賞）
E	姿勢競技で得られたデータから機体の姿勢と方位を決定した点、特に画像に線を引いて説明した点（図7参照）（姿勢賞）
F	優秀賞には至らなかったが、電源競技を除いて比較的良好なデータが得られており、結果をしっかりと考察していた点（審査員特別賞）
G	電源系競技では1.5hのデータ取得に留まっていたことや取得したGPSデータにおかしい点があったものの、全ての競技でデータを取得しており、得られたデータの考察がなされていた点（優秀賞）
H	不十分ではあるが全ての競技でデータを取得できていた点、電源系競技でCPU使用率が得られていた点（優秀賞）

図7 姿勢系競技の撮像データの例

画像データから適切に機体の傾きと方位を決定している点が評価された。図7に姿勢賞を獲得したEグループの画像データを示す。横線は水平線を示しており、画像の水平面から約2.3°傾いている。縦線は正面の方位を示しており、北から173°の方位である。9軸センサモジュールから妥当な値が得られており、適切に画像処理がなされていた。画像処理するプログラムに関しては、OpenCVモジュールを利用した簡易なサンプルプログラムを講師側で用意した。通信賞に関しては、多くのグループがデータの混信に苦戦する中、MONOSTICKの設定を適切に変更して混信を防ぎ、十分なデータ量をノートPC（地上系）へデータ通信している点が評価された。特に、Dグループの最優秀賞は、人工衛星の運用に欠かすことのできない電力管理を上手くやり遂げ、電力競技の結果データのまとめや考察の面でも、他のグループより優れていた点が決め手となった。

図8 アンケート結果：(上)モデルCubeSat 競技に対する興味の割合、(下)イベント毎の面白さの回答割合

3.3 アンケート結果

高専スペースキャンプ2018に参加した学生（37名）に対して行ったアンケート結果のうち、モデルCubeSat 競技（電源系、および通信系・姿勢系）に対する興味の割合を図8(上)に示す。各々の競技ともに75%を超える学生が興味を示しているが、通信系・姿勢系に興味を持っている学生の割合が多い。

一方、スペースキャンプ全体のイベントの中で面白かったものを複数選択してもらった結果を図8(下)に示す。イベント全体の中では、モデルCubeSat 製作講座を面白いと感じた学生が約70%いる。一方で、モデルCubeSat の競技を面白いと感じた学生は50%以下に留まっている。これは、モデルCubeSat 競技がモデルロケットの打ち上げやCanSatの投下などと比較して、地味であることがひとつの要因と推察している。今後、ダイナミックで見映えのする競技となるよう、改善策を検討したい。

3.4 モデルCubeSat 競技の今後

今回の競技では、開発したモデルCubeSat の仕様に合わせて3つのサブシステム（電源系、姿勢系、通信系）の競技を完遂できたことが大きな成果と考えている。電源系のデータ取得グループが少なかった点に関しては、2日目に実施した初めての競技であったことに加え、充電残量が少なすぎた影響が大きいと考えている。次回以降は、一定残量の充電電池を利用することで、多くのグループがデータ取得できるようになると考えている。今後は、構体系など他のサブシステムの機能を活かす競技や、実際のCubeSatで行われている試験項目（振動試験や熱真空試験など）を競技化することなどを検討する。

今回は、モデルCubeSat 競技自体が初めての試みであ

ったため、全てのグループが同じ仕様でモデルCubeSat競技に臨んだ。ただし、開発したモデルCubeSatは、ブレッドボード上に電子部品を追加して配置できるため⁷⁾、センサ類やアクチュエータを追加するなどして、各グループでミッションに自由度を持たせることが可能である。最終的には、CanSat競技などで行われているように、ミッション考案型のモデルCubeSat競技会を実施できるよう、モデルCubeSat開発と競技会の設計の両面で、改良に取り組んでいく。

4. まとめ

本研究では、開発したモデルCubeSatを用いた競技種目を検討し、国内初となるモデルCubeSat競技会（電源系、通信系、姿勢系）を実施した。実施の結果、全てのグループがモデルCubeSatを完成させ競技に臨むことができた。1つ以上の競技で良好なデータを取得することができた。開発したモデルCubeSatの完成度が十分高く、競技設計に関しても最低限の設計ができたものと考えている。

また、アンケート結果からモデルCubeSat競技に対して興味を持った学生が75%以上いることが示された。結果として、宇宙への興味という名目で集まった、さまざまな学校、専門分野、学年の学生が、各々の得意分野を活かし、協力して目的を成し遂げることができた。人工衛星などで必要となってくるプロジェクトマネジメントの実践教育を模擬できたと考えている。

今後、より多くの学生に、モデルCubeSat競技に興味を持ってもらうために、モデルCubeSat自体の改良を進め、モデルCubeSat競技会を継続して開催する中で、競技種目や運営方法などを検討していく。全国各地でモデルCubeSat競技が開催されることを期待している。

謝 辞

モデルCubeSat製作講座、および競技会の実施に際し、高専スペース連携の高知高専今井一雅名誉教授、香川高専村上幸一准教授、米子高専徳光政弘准教授、徳山高専清水菜美氏には多くのご協力を頂いた。また、鹿児島高専篠原学教授には資料となる写真を多数提供頂いた。そして、新居浜高専若林誠講師には、会場設営に多大なご尽力を頂いた。最後に、都立航空高専島田一雄名誉教授には審査委員長を務めて頂き厳正な審査を行うことがで

きた。本研究にご協力頂いた皆様に心から謝意を表す。

本研究は文部科学省の平成29年度宇宙航空科学技術推進委託費・宇宙航空人材育成プログラム「超小型衛星開発を通じた高専ネットワーク型宇宙人材育成」の委託を受けて実施されたものである。本研究はJSPS科研費JP17K01005の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 高田 拓, 若林 誠, 村上幸一, 今井一雅, 益岡 葵, 上田真也: 宇宙人材教育のための連動型「缶サット講座・缶サット大会」の実施成果, 工学教育, 65-2, pp.26-30, 2017
- 2) 梶村好宏, 高田 拓, 篠原 学, 若林 誠, 中谷 淳, 今井一雅: 宇宙人材教育のための連動型「モデルロケット講座・モデルロケット大会」の実施成果, 工学教育, 65-3, pp.26-30, 2017
- 3) 坪内麟太郎, 中平凱斗, 下村克樹, 上田真也, 平社信人, 高田 拓: 学生グループ教育のためのミッション立案型缶サットの開発・講座設計・実践, 工学教育, 66-2, pp.79-84, 2018
- 4) 秋山演亮: 宇宙教育研究所の役割と活動方針, 和歌山大学宇宙教育研究所紀要, 1, pp.1-9, 2012
- 5) 大学宇宙工学コンソーシアム: i-CanSat, Webページ, <http://unisec.jp/service/icansat.html>, 2018, 参照日2018-11-13
- 6) 宮崎康行: 人工衛星をつくるー設計から打ち上げまでー, オーム社, 2011
- 7) 上園波輝, 笹岡由唯, 中谷 淳, 土屋華奈, 梶村好宏, 北村健太郎, 上田真也, 高田 拓: 宇宙技術教育のためのCubeSat地上モデルの開発と活用実践: 1. 機体開発と製作講座, 工学教育, 67-2, pp.95-100, 2019

著 者 紹 介

中谷 淳
2003年 室蘭工業大学大学院修士
学 位 博士(工学)
現 在 岐阜工業高等専門学校
専 門 航空宇宙工学
所属学会 日本航空宇宙学会
連絡先 nakaya@gifu-nct.ac.jp