

超小型人工衛星教材を用いた技術継承法

Technology succession using the educational Nano-satellites.

宮崎・山崎研究室

Miyazaki・Yamazaki Laboratory

河内康輔, 黒瀬正裕, 片山純

Kousuke Kawachi, Masahiro Kurose, Jun Katayama

In recent years, the technology succession problems occur in the research organization like the university because of loss of tacit knowledge. In this research, we suggested the training program to solve these problems using simulated nano-satellite kits. We analyzed and compared simulated nano-satellite kit “HEPTA-Sat” with CubeSat and other educational satellite kits using the Design Structure Matrix method and showed usefulness of HEPTA-Sat. We investigated the refinement of the training program and gave improvement examples. Thus, it can be said that HEPTA-Sat is useful to solve the technology succession problems and we can improve the training program using real satellite data.

1. 研究背景・目的

昨今, 大学の研究室レベルでの超小型衛星「CubeSat」の開発が盛んに行われている。日本大学理工学部航空宇宙工学科宮崎・山崎研究室でも, 超小型人工衛星開発プロジェクトを行っており, 2008年4月28日にはSEEDS-IIがSatish Dhawan Space Centre (インド) から打ち上がった。SEEDS-IIで培ったバス技術をベースに, 後継機となるSPROUTの開発を行い, 2014年5月24日には, 種子島宇宙センターより, H-IIAロケットでALOS-2の相乗り小型衛星として打ち上げた。

大学など, 人の入れ替わりの激しい研究機関では, プロジェクトの重要な情報が適切に継承されず, 損失することによって技術レベルが低下するといった, 技術継承問題が発生している。

このような中で, UNISEC (University Space Engineering Consortium) では, 広く「超小型衛星の開発および利用が今後も社会に受け入れられ, 発展し続けるために, それを担える高い問題意識・啓発意識と技術・知識を有する国際人材を組織的・体系的に育成をする」^[1] ために, 平成27年10月より「持続的な超小型衛星開発・利用可能にする国際宇宙人材の体系的な教育」プロジェクトに取り組んでおり, SEEDS-II, SPROUTをベースとした模擬人工衛星教材HEPTA-Satを用いて, 超小型衛星開発の技術継承に有効なハンズオントレーニング手法の開発を実施している。近年までは, 大型衛星に比べて小型・低コスト・短期開発が可能な超小型衛星を用いて超小型人工衛星工学の教育を行うケースが多かったが, 最近ではより短期間で効率的な教育効果を求め, 様々な超小型人工衛星工学の学習教材が提案されている。例えば, 2012年度末から2014年度末までの文科省の委託事業としてUNISECが実施した「缶サット・超小型人工衛星を用いた創造的科学技术人材の育成ネットワークの構築」の一環として開発されたi-CanSat^[2]や, アメリカのArduSat^[3], オランダのT-Minus Cansat kit^[3]などがある。



Fig. 1 ArduSat, i-CanSat, T-Minus Cansat kit

本研究では, 超小型人工衛星を用いて, 技術継承問題解決に向けたトレーニングプログラムを提案する。さらに, システム要素の相互作用を可視化することができるDesign Structure Matrix法(DSM法)を用いて, 模擬超小型人工衛星HEPTA-Sat, CubeSat, その他の教育用人工衛星開発キットを解析し, HEPTA-SatとCubeSatとの一致点や, 他のキットと比較した際の有用性を示す。また, トレーニングプログラムの改善点を, 実際のCubeSat開発との相違点から洗い出し, 改善例を挙げる。

2. HEPTA-Satを用いたトレーニングプログラム

HEPTA-Sat (Fig. 2) は超小型衛星の開発プロセスを短期に経験し, 宇宙工学の基礎知識を獲得することを目指した地上利用の教育ツールである。サイズは約7cm立方で, パソコンとテーブルがあればワークショップ形式で学ぶことが可能である。学びたい内容に応じて, AI&T (Assembly, Integration, and Test) のみのレベルから, 詳細なプログラミング, 電子基板の設計・開発まで, 様々なレベルのワークショップを行うことができる。どういう考え方, 手順でこのコンポーネントに行きついたのか, 個々の部品がどういった役割を果たしているのかといったところまでも, 理解しようと思えば理解できるのが, HEPTA-Satの良い点である。

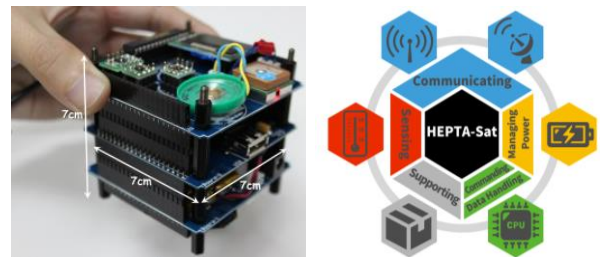


Fig. 2 HEPTA-Sat

ワークショップでは, 決定したミッションからこれらの機能を導き, それに対応したサブシステムに対する要求を明示し, 要求からどのようにシステム・サブシステム・コンポーネントが選定・設計されるのか, というシステム開発の初期に行うべきことをしっかりと学ぶことができる。

これまでに, 国内外で複数のワークショップを実施しており, 平成28年12月には, 日本大学船橋キャンパスにて, 教育者や学生向けにHEPTA-Satを用いた1日ワークショップを実施した。受講者は人工衛星についての学習の有無を問わず, 幅広い

年齢から募集を行い、16名の参加者が集まり、教員2名、学生講師4名で対応した。1日という短時間の中で衛星の役割や組み立て、全体の統合などをスライドおよび資料に基づきハンズオン形式で行い、受講生から質問があれば随時教員、学生講師で対応するという形をとった。1日のワークショップが終了後、次の項目についてアンケートを実施し、人工衛星開発に関する理解度の変化の確認を行った。

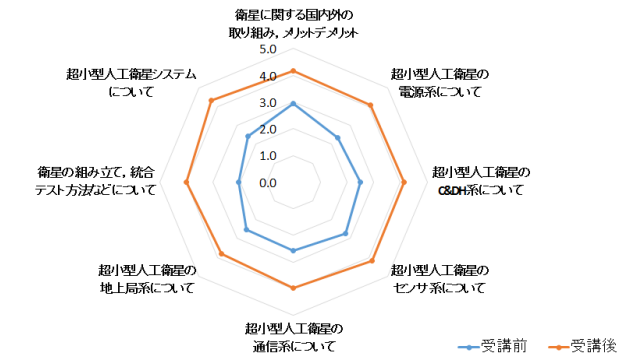


Fig. 4 アンケート結果

Fig. 4 より、HEPTA-Sat ハンズオントレーニングの前後で、受講者の衛星開発に関する理解が向上していることがわかる。

2.1 HEPTA-Sat トレーニングと他の教育教材のとの比較

ここでは、HEPTA-Sat (7cm立方, 180g) の有用性を示すために、多くの研究・教育機関で研究・開発されている、CubeSat (10cm立方, 1kg程度) と、宇宙技術の教育を目的として、小型衛星で用いられるものと類似の技術を使用して製作される空き缶サイズの模擬超小型人工衛星であるCanSat (350ml缶に収まるサイズ)、を比較する。Table 1では、HEPTA-SatといくつかのCanSatキットの例を示した。HEPTA-Satと比較すると教育用人工衛星開発キットとしてArdusatは開発元が実習コンテンツを随時更新しているため実習コンテンツが非常に豊富だが、1機あたりのコストが非常に高い。同様にi-CanSatも教育用として部品の組み立てから統合、実験など一通り学べ、ハードウェア面での実習は充実しているが、衛星の設計開発について体系化されたテキストがない。またHEPTA-Satのように、教材として繰り返し再使用することができない。一方コストの面から考えると、T-Minus Cansat kitが優位だが、こちらはCanSat競技用の入門機として作られており、組み立ての手順書等は付属するものの、衛星の設計開発についてのテキスト等は付属しておらず、教育用としては不向きである。

Table 1 HEPTA-Sat と各種 CanSat キットの比較

HEPTA-Sat	
値段	約300,000円
対象者	衛星に限らず、システム開発に携わることを目指す学生
特徴	・組み立て、統合、試験を通じて、衛星のアーキテクチャを理解することができる。 ・部品の着脱が可能で繰り返し技術教育が可能。 ・短期間での学習にも対応できるようにハード・ソフトがモジュール化。 ・はんだ付け等の組み立ての基礎から学ぶことも

	できる。 ・容易に実験モジュールを追加・変更可能。
Ardusat	
値段	約500,000円(キット代, 授業料, ライセンス)
対象者	年齢に関わらず、衛星の開発や実験を行いたい学生
特徴	・実際に軌道上を飛んでいるArdusatをベースにして作られた学習用模擬衛星(共に1Uサイズ)。 ・軌道上のArdusatを用いて実験や実証も行えるが、開発元の承認が必要であり、有償。 ・実験や授業カリキュラムが豊富に用意されており、受講者はそれを自由に選択可能。 ・専用の開発、実験データ収集・解析ツールが付属。 ・容易に実験モジュールを追加・変更可能。
i-CanSat	
値段	約90,000円
対象者	衛星開発の技術者を目指す学生
特徴	・ハンズオントレーニングを通して、はんだ付け等の組み立ての基礎から、統合、試験、フィールド実験、プロジェクトマネジメントまで一通りの人工衛星工学の基礎を学べる。 ・容易に実験モジュールを追加・変更可能。
T-Minus Cansat kit	
値段	約30,000円
対象者	CanSatを製作したい人
特徴	・CanSatの競技会用に設計されている。 ・構体と簡易的なミッション用に幾つかのセンサが内蔵されているが、衛星について学びたい場合は、自分で予め基礎知識を勉強する必要がある。
SEEDS-II	
値段	
対象者	衛星の開発や実験を行いたい学生
特徴	・実際に軌道上を飛んでいる1Uサイズの衛星。 ・六面に太陽電池, 3軸ジャイロセンサや3軸地磁気センサ, 温度センサを備えている。 ・実際の軌道上でのデータ(電圧値, 電流値, 太陽電池発電量, 地磁気, 角速度, 温度)を取得している。

3. DSM法によるCubeSat, CanSat, HEPTA-Satの比較

3.1 DSM (Design Structure Matrix) 法

DSM法とは、衛星開発などのように特に複雑なシステムを構成する要素とそれらの相互作用を可視化するために用いられるネットワークモデリングツールである⁴⁾。

DSM法では縦軸を入力とし、横軸を出力 (IR/FAD形式) として、システムの入出力の関係から図を作成していく。

Fig. 5の(a)の真ん中の図のようにAからBに入力がある場合、図のように「×」もしくは入力の強度によって値を変え「1～5」などで示す場合もある。Fig. 5の(b)左図では、あるシステムの入出力の関係を示したものであるが、この入力が対角線に近づくよう並び替え、集まった項目をまとめるとFig. 5の(b)右図のようになる。この状態になることで複雑なシステムが可視化

できる。これをパーティショニング、クラスタリングと呼ぶ。本研究ではHEPTA-Sat, i-CanSat, CubeSatの例としてSEEDS-IIについて解析を行った。

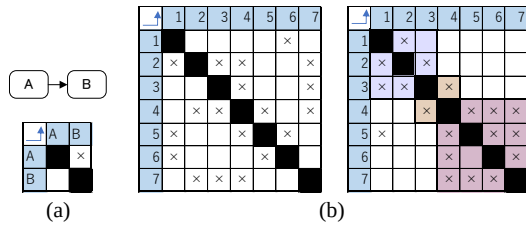


Fig. 5 Example_DSM

3.2 DSM法を用いた, HEPTA-Sat, SEEDS-II, i-CanSatの比較

HEPTA-Sat, i-CanSat, SEEDS-IIについて, システムアーキテクチャを明確にするため, 電気的な信号の入力および電力の入力を1としてDSMを作成し, そのDSM結果をもとにサブシステム毎のインタラクションを可視化したものをFig. 6に示す。

HEPTA-Sat	EPS	CDH	COMM	GS	SEEDS-II (CubeSat)	EPS	CDH	COMM	GS	i-CanSat	EPS	CDH	COMM	GS
EPS	1	6	4	1	EPS	1	13	6	1	EPS	1	9	1	1
CDH	1	1	3	1	CDH	2	1	2	1	CDH	1	1	1	1
COMM	1	1	1	1	COMM	4	3	1	1	COMM	1	1	1	1
GS	1	1	1	1	GS	1	1	1	1	GS	1	1	1	1

EPS:電源系 CDH:コマンド, データ処理系 COMM:通信系 GS:地上局系

Fig. 6 各衛星のサブシステムごとのインタラクション数

Fig. 6では, 最もインタラクションが多い部分を赤, 次に多い部分を黄色で示している。これより, SEEDS-IIとHEPTA-SatはEPS-CDH間のインタラクションが最も多く, 次にEPS-COMM間のインタラクションが多いことがわかる。またSEEDS-IIのインタラクションの数は合計で32, HEPTA-Satは18, i-CanSatは14となった。このことから, HEPTA-Satは, SEEDS-IIほどサブシステム間のインタラクションの数が少ないことがわかる。一方, i-CanSatは, EPS-CDH間のインタラクションが最も多いが, 次は他のサブシステム間が同数である。また, HEPTA-SatではSEEDS-IIのほとんど全てのサブシステム間のインタラクションが含まれていることがわかる。

次に, i-CanSat, HEPTA-Sat, SEEDS-IIについて, 重要なインタラクションの強調を行うために, Table 2の重要度の定義の元, (1)式を用いてDSMの各セルに置かれる値の計算を行い, DSMの作成を行った。

Table 2 重要度の定義

コンポーネントの重要度	重要度の定義
1	その機能が喪失しても衛星の運用に支障をきたさない。
2	その機能が喪失した場合, 数時間以内に衛星が機能を喪失する, もしくは一時的に機能を喪失する。
3	その機能が喪失した瞬間衛星の機能が喪失する。

$$\text{コンポーネントAの重要度} \times \text{コンポーネントBの重要度} \times \text{AB間の関係性} = \text{コンポーネント間の重要度} \quad (1)$$

以上から得られたDSMより, コンポーネント間の重要度が高い値を取ったコンポーネントを抜き出し, まとめたものをFig. 7, 8, 9に示す。

ELEMENT NAME	1	2	3	4	5
Battery	1				
OBC		2			
通信モジュール (衛星)			3		
通信モジュール (地上局)				4	
PC					5

Fig. 7 i-CanSatの重要度が高いコンポーネント間のDSM

ELEMENT NAME	1	2	3	4	5	6	7
FlightPin	1						
射出検知スイッチ		2					
昇圧回路			3				
Mbed				4			
通信モジュール (衛星)					5		
通信モジュール (地上局)						6	
PC							7

Fig. 8 HEPTA-Satの重要度が高いコンポーネント間のDSM

ELEMENT NAME	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
FlightPin	1																								
射出検知スイッチ		2																							
昇圧回路			3																						
リレースイッチ回路				4																					
RF-PIC					5																				
CDH-PIC						6																			
FM-PIC							7																		
CM-PIC								8																	
送信データ切り替え回路									9																
アンテナ駆動回路										10															
受信モジュール											11														
送信モジュール												12													
144MHz帯アンテナ													13												
430MHz帯アンテナ														14											
FM-CW送信機															15										
FM受信機																16									
送信アンテナ144MHz (GS)																	17								
受信アンテナ430MHz (GS)																		18							
受信機																			19						
送信機																				20					
送信機TNC																					21				
受信機TNC																						22			
送信機TNC																							23		
地上局PC (受信)																								24	
地上局PC (送信)																									25

Fig. 9 SEEDS-IIの重要度が高いコンポーネント間のDSM

Fig. 7, 8, 9より, SEEDS-IIにおける重要度の高い入出力の関係を持つコンポーネントがHEPTA-Satでも搭載されていることがわかる。Fig. 7, 8, 9の表中では, 機能に対応するコンポーネント毎に色分けしている。HEPTA-Satでは, 一つのコンポーネントがSEEDS-IIにおける複数のコンポーネントに対応していることもある。一方で, i-CanSatではSEEDS-IIの重要項目を全ては満たしていない。

4. HEPTA-SatをCubeSat, CanSatと比較して得られた考察

3章の結果より, ArduSatは衛星の設計, 組み立てといった衛星開発の基礎を学ぶ項目が少ない。i-CanSatも一通り衛星開発の基礎を体験可能であるが, モノづくりの技術に重きを置いている。一方, HEPTA-Satは, どういう考え方, 手順でこのコンポーネントに行きついたのか, 個々の部品がどういった役割を果たしているのかといったところまでもテキストで説明し, かつ, コンポーネントの振る舞いの理解, サブシステムごとに基盤の組み立て・振る舞いの理解, 統合・統合後の振る舞いの理解を行っていく。このようにシステムインテグレーションに重きを置いているため, システムをより深く学ぶのに特化していると考えられる。

また, DSM法による比較結果(Fig. 6)から, HEPTA-Satとi-CanSatを比べるとHEPTA-Satの方がSEEDS-IIに近いシステムであることがわかる。また, Fig. 6のインタラクションの数よりHEPTA-Satは, SEEDS-IIほどシステム間のつながりが煩雑でなく, また重要度の高いコンポーネントの一致も見られる。この

ことから、HEPTA-Satは、教材として利用しやすく、実際の衛星を学ぶ教材として、HEPTA-Satは優れていると考えられる。

また、Fig. 9の赤枠で囲った部分より、SEEDS-IIにおいて、EPS、CDH、FMR、CWのマイコン間のインタラクションが非常に多いことが見て取れる。このように、CubeSatのシステムではマイコン間通信の重要度が高いことがわかるが、Fig. 8のHEPTA-Satではマイコンが1つしか搭載されていないためこれを学習することができない。そこで、ユーザーボードをHEPTA-Satに追加し、マイコン等のコンポーネントを学習者が追加、学習させることを検討している。

5. CubeSatの実機データを用いた演習の提案

HEPTA-Satのトレーニングプログラムには、実際のCubeSatで実施される基本設計（電力・通信・姿勢・熱・軌道など）に関する学習内容が含まれていない。そこで、CubeSatの実機（SEEDS-II）を用いた学習方法を改善例として取り上げる。

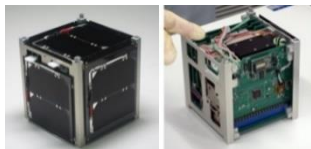


Fig. 10 SEEDS-II

10 cm×10 cm×10 cmの超小型人工衛星 SEEDS-II は、実際の軌道上でのデータ（電圧値、電流値、太陽電池発電量、地磁気、角速度、温度）を取得している。あらかじめサンプルデータとして実機から得られるデータを学習者に提供し、学習者がテレメトリフォーマットや軌道計算、姿勢計算、通信回線計算、熱、構造計算、バイナリデータの解析などの主要な設計問題を演習可能な仕組み（データベース、テキスト）を構築する。

5.1 CubeSat を用いた演習例：熱解析

演習例として SEEDS-II を用いた熱解析を取り上げる、SEEDS-II の運用からデータ解析までの流れをフローチャート化したものを Fig. 11 に示す。

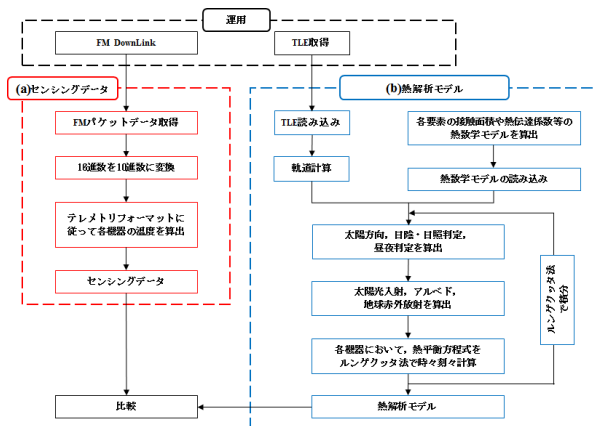


Fig. 11 熱解析の運用からデータ解析までの流れ

SEEDS-II の熱解析は、実際の温度を解析するセンシングデータ解析(Fig. 11 (a))と、理論等に基づいて熱予測を行う熱解析モデルの作成(Fig. 11(b))の二つの流れに分けられる。学習者は、(a)のセンシングデータ解析にて、SEEDS-II から取得した FM パケットデータ (1 パケット 150 桁) の温度に関する要素を取り

出し、16進数を10進数に変換した後、テレメトリフォーマットに従って解析することで、SEEDS-II の宇宙空間における温度変化を示すことができる。次に、学習者は、(b)の熱解析モデルの作成にて、TLE を用いた軌道計算(SGP4)や衛星外部からの熱入力等、衛星の様々な要素を統合していくことで熱解析モデル(熱予測)を作成することが出来る。また、センシングデータと熱解析モデルを比較することで、熱解析モデルの妥当性を確認することも出来る。

今回、2010年12月1日のデータを元に、Fig. 11のフローチャートに沿った演習を実際に行った。その結果として SEEDS-II の-X パネルの表面温度のセンシングデータ (Sensing Data) と熱解析モデル (Analytic Value) を比較したものを Fig. 12 に示す。

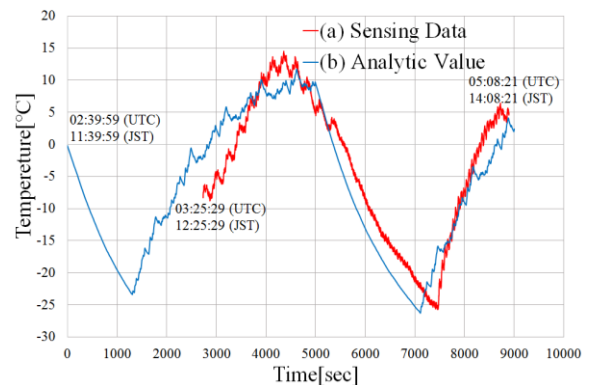


Fig. 12 熱解析例 (-X パネルの表面温度)

今回は熱解析の演習例を例に挙げたが、他にも姿勢解析や通信回線計算等の演習可能な仕組みを構築する。この演習により、HEPTA-Sat のトレーニングプログラムには含まれていない項目を、補うことが出来るため、SEEDS-II を用いた演習を改善例として提案する。

6. 結言

- HEPTA-Satにおけるハンズオン形式の授業はi-CanSatや他の人工衛星開発キットに比べ、超小型人工衛星開発の人材教育や技術継承問題の解決に有用である。

- 実際のCubesatにおいて重要なマイコン間通信や、通信系といった点がHEPTA-Satにおいて不足しているが、ユーザー基盤を用いて学習することで改善することができる。

- HEPTA-Satのトレーニングプログラムには実際の衛星を用いた学習は含まれていないため、その改善例としてCubeSatを用いた演習を採り入れることを提案する。

参考文献

- [1] UNISEC JAPAN : . At <http://www.unisec.jp/mpj/>
- [2] ARDUSAT : . At <https://www.ardusat.com/>
- [3] T-Minus Engineering : . At <http://www.t-minus.nl/products/cansat-kit/>
- [4] Steven D. Eppinger, Tyson R. Browning 著：デザイン・ストラクチャー・マトリクスDSM複雑なシステムの可視化とマネジメント. 慶應義塾大学出版会,2014年.
- [5] 茂原正道,鳥山芳夫 編：衛星設計入門. 培風館,2002年.
- [6] 大西晃,他 編：宇宙機の熱設計.名古屋大学出版会,2014年.