

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：52605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700878

研究課題名(和文)ものづくり宇宙工学教育に関する研究

研究課題名(英文)Research on space engineering education for students satellite

研究代表者

石川 智浩(Ishikawa, Tomohiro)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授

研究者番号：30369954

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：(1)最近の宇宙工学教育の実態調査を行った。(2)衛星開発に特化したシラバスの作成(衛星通信関係(8項目) 衛星C&DH関係(13項目) 衛星電源関係(12項目) 衛星宇宙環境試験関係(13項目) 衛星熱・構造関係(7項目)の座学・実験用の教育コンテンツを作成)(3)衛星製作用の教材開発と指導書作成(座学用では各分野の指導書を8種類製作。実験用では電源・通信・振動・熱・構造組立評価など30種類製作)(4)モデル衛星用教材製作(ものづくり初心者用にモデル衛星1指導書を製作。ある程度のものづくり経験がある学生用にモデル衛星2指導書を製作)(5)教育効果検証を行い良好な成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：(1)I investigated the latest space engineering education.(2) I devised the plan of the space engineering education for satellite development.(3) I created the teaching materials and teachers' manual for satellite development.(4)I made two teaching materials which can experience satellite development.(5)I checked the education effect of the created teachers' manual, and the good result was obtained.

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学

キーワード：宇宙教育 宇宙工学教育 ものづくり 小型衛星 超小型衛星

1. 研究開始当初の背景

宇宙教育は小学生から大学生まで幅広く実施される人気のある複合的工学教育である。様々な指導者の努力により今ではペットボトルロケット教育に始まり、高等教育では空き缶サイズのモデル衛星 CANSAT 教育が生まれ、そして一部の大学・高専では人工衛星の製作にまで至っている。

一方で、学生が作った人工衛星の運用成功確率はまだ低い。その原因として注目したのは「衛星関連の工学教育」の経験不足である。本研究を行うことでいまある宇宙教育過程にプラスする形で「ものづくり宇宙工学教育」という新しい宇宙工学教育過程を製作したいと考えた。

2. 研究の目的

学生が完成度の高い人工衛星を作るのに必要な知識と経験を積むため、ものづくりに特化した最適な宇宙工学教育手法・教材製作を行う。

3. 研究の方法

本研究で実施した研究方法を以下に示す。

- (1) 宇宙教育の実態調査
- (2) ものづくり宇宙工学教育手法の確定
- (3) 教材開発と指導書作成 (座学・実験用)
- (4) モデル衛星の指導書作成 (PBL 用)
- (5) 教育効果検証 (学生アンケート集計)

4. 研究成果

(1) 宇宙教育の実態調査

衛星を製作する各大学の学生総計 53 名からあるアンケートの回答が得られた。アンケートの内容は複数あるが特に以下の 3 点を報告する。

- 1) CANSAT 製作前にもものづくり経験はありましたか? (回答は 65%が未経験)
- 2) 衛星製作前にもものづくり経験はありましたか? (回答は 43%が未経験)
- 3) CANSAT から衛星バス開発までの技術レベルを 1~10 で表すとすると、CANSAT 製作で到達できるレベルはどのレベルだと感じますか? (回答は技術レベル3付近、図 4-1)

3. CANSATから衛星バス開発までの技術レベルを1~10で表すとすると、CANSAT製作で到達できるレベルはどのレベルだと感じますか?

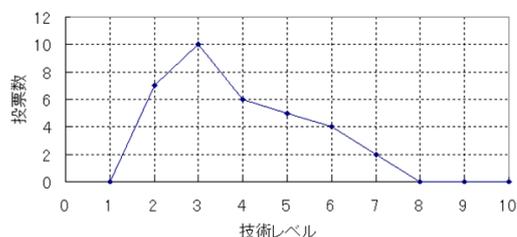


図 4-1 CANSAT 技術レベルは?

この結果、学生らは衛星製作段階で技術不足を感じていることがわかった。また衛星開発を行う大学に CANSAT 技術レベルについて調査を行ったが、概ね衛星開発には

CANSAT 以上の教育が必要であることがわかった。以下は指導を行っている教員からの聞き取り調査結果をまとめたものである。「CANSAT はものづくりをしたことのない学生がある技術レベルまで到達するという点で期待できる。しかし、衛星を作る段階での意識は CANSAT よりもちょっと良いという感じで衛星を作っていた。衛星では品質を維持する。書類を作る。厳しい目で物を作るということが必要。CANSAT と衛星では技術的に隔たりを感じている。」、「CANSAT はチーム力を試す場ともものづくり創意工夫の技術鍛錬の場を与えられる。それを乗り越えられないチームは衛星開発に至らない。」、「CANSAT は熱・構造はあまり考えて設計はしてないため、CANSAT と衛星開発は違いがある。」

(2) ものづくり宇宙工学教育手法の確定

ものづくり宇宙工学教育のシラバスを 1) ~ 5) に示す。衛星バス開発に必要な基本知識・経験を座学・実習に照らして指導書作成を行った。

1) 衛星通信関係の指導内容

- 衛星回線設計基礎 (PowerPoint 座学)
- 通信回線設計計算 (Excel 実技)
- アンテナ SWR 測定・調整
- 無線電波の観測 (スペアナ使用)
- アンテナ指向性測定 (ネットアナ使用)
- 地上局のセッティング・運用方法
- ダイポールアンテナの性能解析
- 地上局製作

2) 衛星熱・構造関係の指導内容

- 衛星構造の安全余裕計算 (Excel 計算)
- 熱収支シミュレーション (Excel 計算)
- 太陽電池やバッテリー、配線の発熱
- 断熱材、伝熱材の効果
- トルク管理
- 手書きで衛星構造設計
- 3DCAD で衛星構造設計
- 3D プリンタによる衛星部品生成
- 手作りによる衛星構造製作
- CNC フライス加工
- 計装系 (配線引き回し)
- 衛星キルスイッチ
- 部品固定・熱拡散目的の充填剤

3) 衛星電源関係の指導内容

- 電力収支シミュレーション (Excel)
- 太陽電池 IV と高温実験
- バッテリー充電・放電曲線測定
- インヒビット回路
- シャントデジペータ回路
- バッテリーのバイパスダイオード
- 太陽電池のバイパスダイオード
- バッテリーの高温・低温環境下実験
- 構造影による太陽電池セルの不発電
- 宇宙放射線による SEL 発生時
- 定期的衛星電源 OFF
- バッテリー自己放電

4) 衛星 C&DH 関係の指導内容

C&DHの役割とデータ伝送の必要性
 画像データ容量と通信速度見積り計算
 誤り検出検査 CRC の計算方法
 衛星搭載部品や測定器の抵抗測定
 部品個体差測定
 基板から発生する電波の観測
 電子部品に対して過大電圧・電流入力
 Vref 基準電圧による A/D 変換精度向上
 基板 CAD、基板加工
 コマンド・テレメトリ
 市販デジタルカメラの真空試験
 マイコンの高温環境動作試験
 太陽センサの高温環境動作試験

- 5) 衛星宇宙環境試験関係の指導内容
 物体固有値測定システムの構築
 振動スピーカーによるネジ回転
 振動試験方法
 衝撃試験方法
 熱真空試験方法
 残留磁気測定 (バッテリーなど)
 磁気トルカの磁気測定

(3) 教材開発と指導書作成

シラバス作成後、その教材開発および指導書作成を行った。1)~5)各種一部のみ結果を提示する。

1) 衛星通信関係の指導内容

衛星通信の基礎を身に着けるため、Power Point で計 101 ページの衛星回線設計指導書を製作(図 4-3-1-1)。Excel を用いて無線機電力や周波数などから回線マージンを計算する座学 + 実習となっている。

超小型衛星でよく用いられるダイポールアンテナ製作からアンテナ SWR 評価およびアンテナ指向性評価を行う指導書を作成(図 4-3-1-2)。アンテナアナライザやネットワークアナライザ、スペクトラムアナライザを用いて測定。モノポールアンテナの場合、衛星構造もアンテナになることも指導内容に含まれる。

既に打ち上げられたアマチュア衛星の衛星追尾を行う管制装置として地上局整備実習を作成した。クロスハムアンテナは設置が高価であるため、QFH アンテナや GP アンテナでも可能である。無線機 IC910 とパソコンで簡単に衛星の自動追尾が可能な指導内容とした。

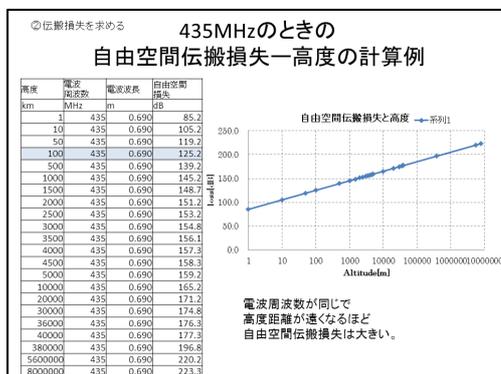


図 4-3-1-1 衛星回線設計の指導書 (一例)

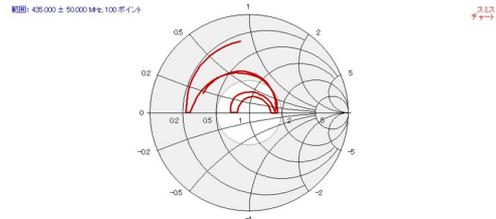
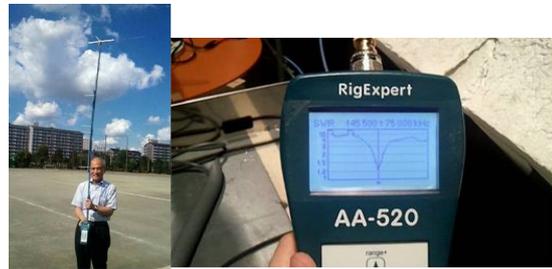


図 4-3-1-2 アンテナ製作と性能評価

2) 衛星熱・構造関係の指導内容

衛星熱・構造の基礎を身に着けるため、Power Point で計 154 ページの衛星構造の安全余裕計算と熱収支シミュレーションを行う座学 + Excel 実習の指導書を作成 (図 4-3-2-1 および 4-3-2-2)。

衛星構造ある部位のみ終局MS計算					
材料にかかる荷重計算	アルミ7075-T6引張り強さ	x	560	N/mm ²	
	ばねによる準静的加速度	Sg	15.11	m/s ²	1.54G
	振動による準静的加速度	Vg	167	m/s ²	17G
	衛星重量	m	3.1	kg	
	重力加速度	g	9.8	m/s ²	
	荷重	F	594	N	F=ms(Sg+Vg+g)
最大曲げモーメント計算	モーメント長さ	x	4	mm	
	モーメント	M	2376	Nmm	M=Fx
断面係数計算	断面辺	b	10	mm	
	荷重側辺	h	5.5	mm	
	断面係数(長方形として)	Z	50.42		Z=bh ² /6
最大曲げ応力計算	最大曲げ応力	Q	47.12	N/mm ²	Q=M/Z
	終局安全率	Tb	1.5	定数	
	終局MS	FMS	3.58		
備考					

図 4-3-2-1 衛星構造の安全余裕計算(Excel)

衛星構造を 3DCAD で設計した後、3D プリントによる衛星構造製作を行い構造的な不備がないか確認(図 4-3-2-3)、最終的に金属加工をボール盤、シャーベンダー、ニブラー、高速切断機、タップ、CNC フライス盤などで行うための実習指導内容を考えた。

また衛星振動試験前にはトルク管理が必要であるためその練習実習も指導書に組み入れた(図 4-3-2-4)。

衛星はロケット搭載時にコールドロンチとするため機械的なスイッチで主電源を OFF にしなければならないそのためのスイッチは電子機器だが衛星構造にもかわるため、そのための指導書も用意した。

衛星の熱構造の受動的制御のため、アルミにはアルマイト塗装(黒ペイント)を行うことがある。その効果を体感できるような教材を製作した。図 4-3-2-5 はハロゲン灯に黒色

塗装された市販のアルミ板と普通の無垢のアルミ板との温度分布をサーモグラフィで撮影したもので、同じ距離・同じ時間光を照射したにもかかわらず、アルマイト塗装したほうは 70 まで上昇したが、無垢材は 40 ほどしか上昇しない。黒塗装の特性を把握させる指導となっている。

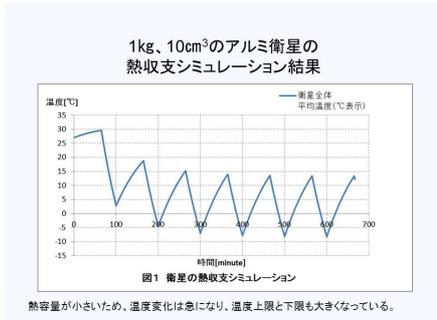


図 4-3-2-2 熱収支シミュレーション (Excel)

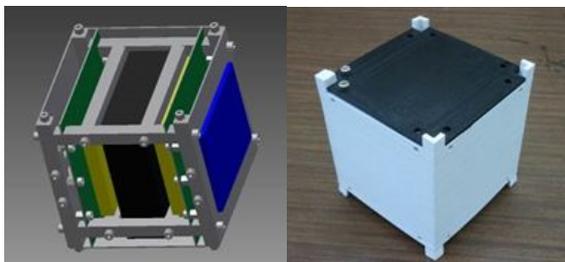


図 4-3-2-3 3D プリントによる衛星モデル

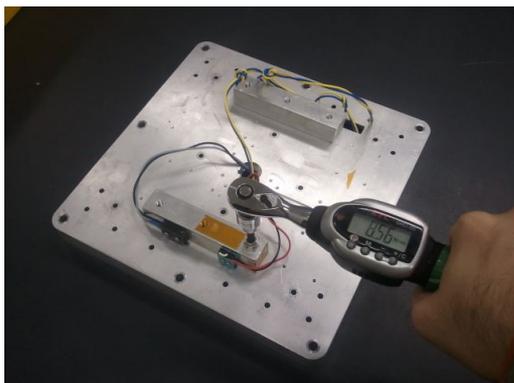


図 4-3-2-4 トルク管理の実習

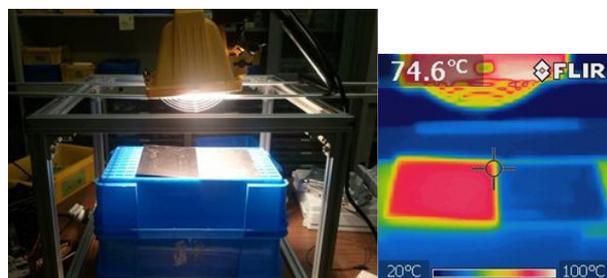


図 4-3-2-5 黒塗装アルミと無垢アルミの違い

3) 衛星電源関係の指導内容

衛星電源関係の基礎を身に着けるため、PowerPoint で計 96 ページの衛星電源に関する座学と衛星電力収支シミュレーションを行う座学 + Excel 実習の指導書を作成 (図 4-3-3-1)。

図 4-3-3-2 は 3 つのマイクロスイッチとインヒビット回路である。衛星のコールドロッチやハザーダスな電子機器を制御するためのインヒビット回路を電源回路に搭載する機会が多いため実習化した。

太陽電池 I-V 特性、Ni-MH バッテリ充放電プロファイル測定、太陽電池やバッテリーのバイパスダイオード効果確認、バッテリー・配線発熱観測などの実習指導を作成 (図 4-3-3-3)

バッテリーの高温下での動作を知るため図 4-3-3-4 のようなグラフを測定する実習を用意した。

④沿磁力線制御を行う衛星のバッテリー残量のシミュレーション結果 (C面の太陽電池なし、通信以外の消費電力を 0.22A→0.13Aに電流値変更)

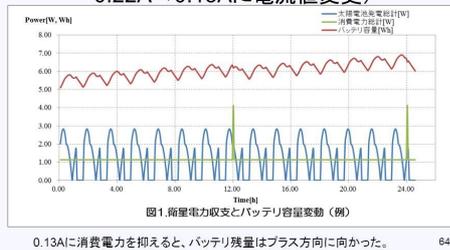


図 4-3-3-1 衛星電源に関する指導書 (Excel)



図 4-3-3-2 インヒビット動作測定実習

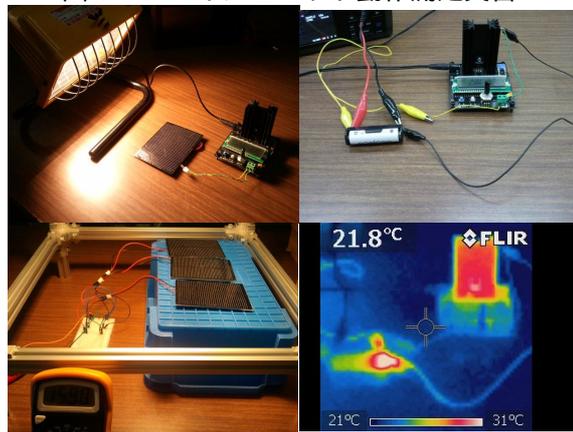


図 4-3-3-3 太陽電池 I-V 特性やバッテリー充放電測定、バイパス効果、バッテリー発熱観測

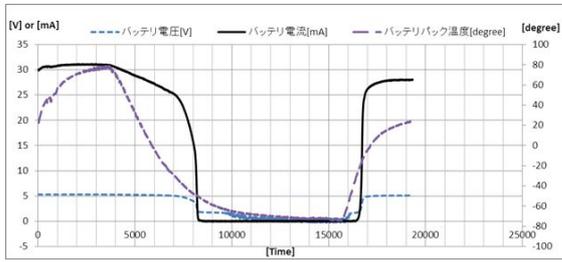


図 4-3-3-4 バッテリー高低温実験結果 (-60 以下になると電流が出なくなる)

4) 衛星 C&DH 関係の指導内容

衛星 C&DH 関係の基礎を身に着けるため、PowerPoint で計 103 ページの衛星 C&DH に関する座学と CRC 計算を行う座学 + Excel 実習の指導書を作成 (図 4-3-4-1)。

太陽センサの製作と温度特性測定の実習化 (図 4-3-4-2)。その他、衛星 C&DH 系に關係する指導書を作成した。

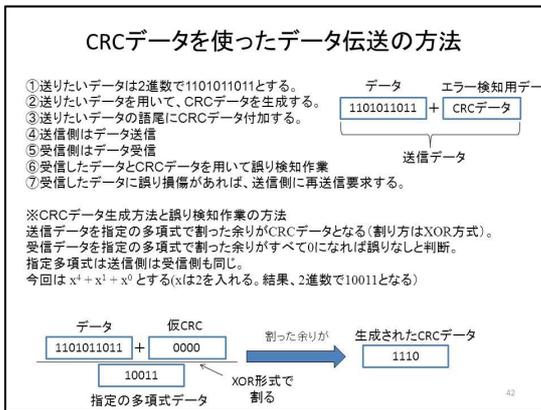


図 4-3-4-1 衛星 C&DH に関する指導書

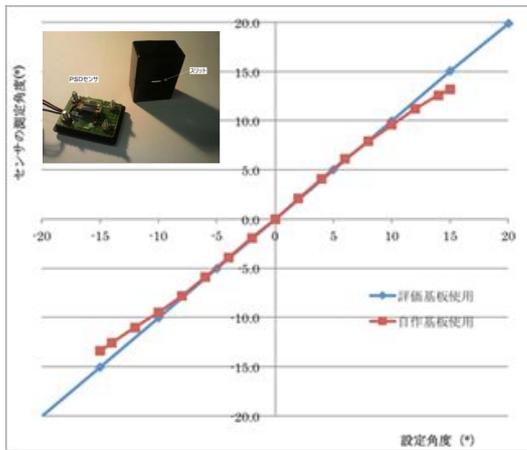


図 4-3-4-2 太陽センサの製作と温度測定

5) 衛星宇宙環境試験関係の指導内容

衛星宇宙環境試験関係の基礎を身に着けるため、PowerPoint で計 76 ページの衛星宇宙環境試験に関する座学の指導書を作成。この他に物体固有値測定システム (図 4-3-5-1) この装置で振動により衛星のねじが回る現象も見れる。簡易残留磁気測定回路や振動試

験手順書、衝撃試験手順書、熱真空試験手順書の作成を行っている。特に残留磁気はスマートフォンの磁気センサを用いてもある程度の精度で知ることができることを磁気シールド試験実施でわかった。



図 4-3-5-1 物体固有値測定システム

(4) モデル衛星の指導書作成 (PBL 用)

1) PreSatellite-1 模擬衛星製作

(3)のものづくり宇宙工学教育の基礎指導を受けた後、最初にする衛星教材モデルとして PreSatellite-1 模擬衛星を考案した (図 4-4-1-1)。本モデルのミッション内容は地上局 (パソコンと無線機) からの命令で衛星内部の JPEG カメラの画像や衛星内部のセンサ情報を受信までを行う。無線機はアマチュア無線免許が不要な Xbee 通信機 (通信距離は 800m 程度) を用いて通信するが、太陽電池からの充電回路が搭載されており常に電力収支が保たれるよう設計されている。開発後には熱真空試験や恒温槽試験も体験することができる。生徒・学生は回路製作・構造製作・プログラム製作に分かれ、グループで本モデルの製作に取り組むことができる。東京都立荒川第 3 中学校パソコン部では本指導書を用いて 1 年間かけて図 4-4-1-2 のような模擬衛星を製作した。

ボール盤やシャーペンダーなどの設備があれば、製作にかかるコストは 3 万円程度であり、基板もエッチングを利用すればどの学校でも製作できる。

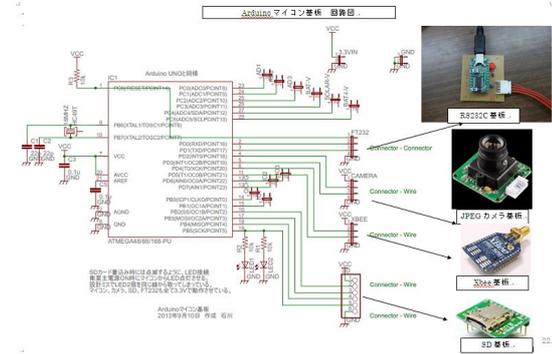


図 4-4-1-1 PreSatellite-1 模擬衛星図面

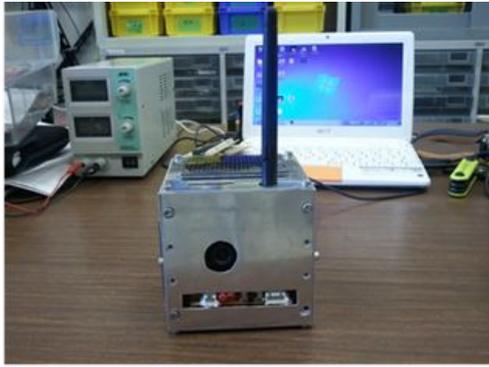


図 4-4-1-2 PreSatellite-1 模擬衛星完成

2) PreSatellite-2 模擬衛星製作

本モデルは Cubesat というバス機能とほぼ同等の機能があるため、衛星開発前段階のレベルとなる。PreSatellite-1 と違う点は市販無線 DJ-C7 等を動作させるため、アマチュア無線免許取得が必須であることである。モジュール信号発信、FM 双方通信、アンテナ SWR 調整、磁気トルカ動作、各種モーションセンサ動作などの教育として盛り込まれている(図 4-4-2-1 例)。本モデルは本高専同好会学生が製作し、筑波山山頂と高専屋上との 60km 間中距離 FM 通信に成功している(図 4-4-2-2)。コスト面は 1 機あたり、5 万円程度であるため研究室の予算範囲で練習ができるだろう。

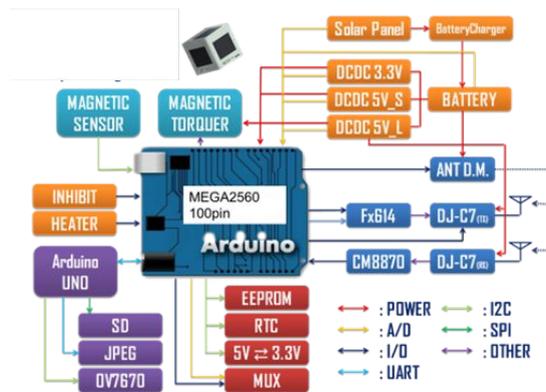


図 4-4-2-1 PreSatellite-2 模擬衛星図面



図 4-4-2-2 PreSatellite-2 と遠距離通信実験 (筑波山 産業技術高専間 60km)

(5) 教育効果検証(アンケート・口頭調査)

本教材は最終年度に完成したため、まだ検証人数は少ないが一部教育実践の結果が得られた。まず座学授業では実技があり良いと答えた学生が 100% (回答人数 n=10) となった。実験系はクラブ活動学生が教育を受け、100% (n=3) の学生が「衛星製作に必ずつながる」という結果となった。

PreSatellite-1 モデル衛星は荒川区立第 3 中学校のクラブ生徒らが製作した。アンケート結果で「衛星開発(次段階)に興味を持った」生徒が 100% (n=8) であった。一方 PreSatellite-2 モデル衛星は本校学生らで製作し、60km 間の FM 通信に製作した。アンケートと口頭質問の結果 (n=2)、「衛星製作前にこうした経験は自信につながる」との結果が得られた。

本研究で用意した実験・製作は、少し手間がかかるが低コストでも実現は可能であることがわかった。例として、通信で使用したネットワークアナライザは通常数百万円するがアンテナアナライザなら数万円で購入可能。疑似太陽光として普通は人工太陽照明灯 100 万円なのがハロゲン灯 1000 円(日時を選ばなければ太陽下で行えばよい)。サーモも 9 万円。恒温槽はドライアイスでも同様の結果を確認しているため、湿度と水のみ気にすれば実験が可能。データロガーは 3 万円、電子負荷も 8000 円である。3D プリントは外注でも数千円でできてしまう。磁気センサもスマートフォン内蔵センサが高精度で、データロガー機能もあるため実用性もある。

今後作成した指導書を用いて多くの教育実践を行い、データ収集することでより高精度に教育効果を確認しつつ、指導書改良のフィードバックがかけられると考えられる。授業・実験への取り入れや学内事業の発足、指導書の大学・高専への頒布作業、学会発表や論文などが普及の鍵となるだろう。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

(1)石川智浩, ものづくり宇宙工学教育に関する研究, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 2012, 1112

〔その他〕ホームページ等

<http://www.metro-cit.ac.jp/~t-ishikawa/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

石川 智浩 (Tomohiro Ishikawa)

東京都立産業技術高等専門学校、ものづくり工学科、航空宇宙工学コース、准教授

研究者番号: 30369954