

高専生のための簡易型受信機による 衛星通信講座の実施と教材評価

An Evaluation of Satellite Communication Lectures with a Simple Receiver Kit for KOSEN Students

徳光 政弘**、浅井 文男***、高田 拓****、若林 誠*****
Masahiro TOKUMITSU, Fumio ASAI, Taku TAKADA, Makoto WAKABAYASHI

概要

高専の学生が人工衛星からの電波を受信できるように、自作した簡易型受信機を用いた衛星通信講座を設計し、教材等の整備を行った。衛星通信講座は、宇宙工学に興味のある全国の高専生を対象に、2018年度に計2回実施した。講座1では、衛星通信の概要と簡易型受信機の組み立て・動作試験を中心とし、講座2では、講座1を発展させつつ、デジタル方式の衛星通信や受信データから衛星の状態を推測する実習を中心に実施した。2回の講座の結果や学生からのアンケート回答から、講座レベルが適切で、学生にとって衛星通信への理解が深まる内容だったことを確認できた。今後、講座の回数を重ね、より理解しやすい教材に仕上げると共に、衛星通信によるコンテストの実施に繋げるような取り組みを行う予定である。

1. はじめに

本稿では、高専生を対象とした、簡易型受信機を用いた衛星通信講座の実施と教材評価について報告する。衛星通信講座は、全国から宇宙工学に関心がある高専生が集まるイベントの中で実施した。具体的には、2018年1月7-8日に開催された高専スペースアカデミアのキックオフミーティングの際に、15名の学生を対象に1回目の講義を実施し、2018年8月30日-9月2日に開催された高専スペースキャンプの際には、40名の学生を対象に2回目の講義を実施した。

高専スペース連携¹⁾は、宇宙工学の教育研究に関心がある高専教員が集い、宇宙工学に関する教育研究を進めているグループである。高専スペース連携の有志教員らによって、文部科学省の実践的若手宇宙人材育成プログラムが2014年からは3年間実施された²⁾。このプログラムの中で、2015年に愛媛県新居浜市で高専スペースキャンプが開催され、全国から宇宙工学に興味・関心がある高専生が参加し、好評を得た³⁾。その後、2018年に至るまで予算をやりくりしながら5回のスペースキャンプを

実施してきた。2017年からは、同じく文部科学省の宇宙航空人材育成プログラムが3年間実施されている⁴⁾。このプログラムでは、ネットワークを利用した宇宙工学を学ぶ仕組み「高専スペースアカデミア」が企画され、2018年1月7-8日には、キックオフミーティングを山口県周南市で行った。

2つの宇宙人材育成プログラムでは、技術的あるいは研究的な目標として、国立高専初の高専連携衛星の開発を目指してきた。その中で、高専スペース連携の提案した人工衛星は、JAXAの革新的技術実証衛星2号機に採択され、2020年の打ち上げ予定が決まっている⁵⁾。現在、高知高専・群馬高専を中心に高専連携衛星KOSEN-1の開発を進めているが、衛星打ち上げ後の衛星運用においては、全国各地の高専に協力してもらう必要がある。そのため、地上局を利用した衛星電波の受信や地上からのコマンド送信などを自立的に行える人材の育成が急務となっている。

実施した2回の講座に関しては、講座1では、簡易型受信機の組み立てを中心に実施し、講座2では、デジタル通信方式の衛星通信を中心に実施した。いずれの講座も衛星通信に関する事柄を初めて学ぶ学生が多く、衛星通信と無線技術の概要を理解してもらえるように配慮して教材を作成した。また、2回の講座に参加する学生が複数名いたことから、実習内容の重複は少なくしつつ、より実践的で発展的な内容へ展開できるように段階的に

* 原稿受理 平成31年1月11日

** 米子工業高等専門学校 電子制御工学科

*** 米国アマチュア衛星通信協会 会員

**** 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科

***** 新居浜工業高等専門学校 電気情報工学科

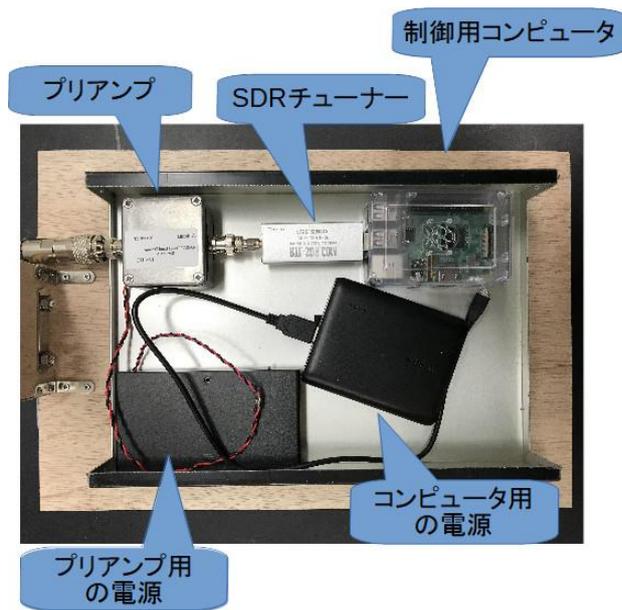


図1 簡易型受信機の部品構成



図2 簡易型受信機の外観

教材のレベルを上げるように意識して作成を試みた。本稿では、2回の講座を高専生に実施した結果を踏まえて、今後の教材開発の問題点を考察し、改善案を検討する。

2. 簡易型受信機について

今回、講座で利用した簡易型受信機の部品構成と外観を図1と図2に示す⁶⁾。受信機は、材料費やその後の活用を考慮して、受信機全体のシステム構成を検討した上で、実用に耐えうる性能の部品が選定されている。受信部には、価格を抑えつつ任意の周波数の受信が可能なSDR (Software Define Radio) 技術が活用されている。SDRでは、アンテナで受信した信号をソフトウェアで復調して、伝送データを処理する。Raspberry PiをSDRの制御用コンピュータに用いることで、受信した信号の処理だけでなく、軌道計算ソフトウェアや予約受信等の各種機能を活用し、柔軟な運用が可能である。

また、アンテナにはQFHアンテナが採用されている。QFHアンテナは無指向性で、全方向から電波を受信できる。一方で、テレビ受信で使われている八木アンテナに代表される指向性アンテナとは異なり、受信性能は劣る側面がある。これを補うために、プリアンプがアンテナ直下に挿入されており、アンテナで受信した微弱な信号が増幅されるように構成されている。Raspberry Piとプリアンプの動作にはそれぞれ5Vと12Vの電源が必要であるため、Raspberry Piにはモバイルバッテリーを、プリアンプには12Vのバッテリーが接続されている。

3. 簡易型受信機の組み立て講座

3.1 講座内容

講座1では、衛星通信に使われる無線機の構成、衛星通信の概要を理解することを目的に、実習形式の講座を実施した。衛星通信は、宇宙空間を航行する人工衛星と地球側の地上局で行われる通信の方式を想定した。人工衛星の種類は、大学、高専等で活発に開発されている超小型衛星を対象として、主にこの種類の衛星で使われているアマチュア無線帯を使った衛星通信を題材としている。スペースアカデミア参加学生は、将来的に全国の国立高専が連携して進めている超小型衛星の開発に参加する可能性が高く、有用な体験となることが期待される。

衛星通信の学習では、通信の端点である衛星側と地上局の両方を理解する必要がある。衛星は、地上局へ伝送する情報を変調して、電波に乗せて地上局へ向けて送信し、地上局側では受信した信号を復調し元の情報に復元する。講座では、衛星通信のしくみの理解を促すために、実習教材では衛星側の送信と地上局側の受信の両方を扱うことが望ましい。しかし、電波法の関係で無線機の操作は法的な登録手続き及び、無線従事者の資格を有する必要がある。実際には、参加者の多くがアマチュア無線等の無線従事者の資格を有していないため、講座1では、アマチュア無線通信の受信のみを扱うことにした。

講座は前半と後半の2部構成とし、全体で3時間の時間で行った。最初の前半1時間は座学を行い、講座のガイダンスと衛星通信の概要を説明した。残りの後半2時

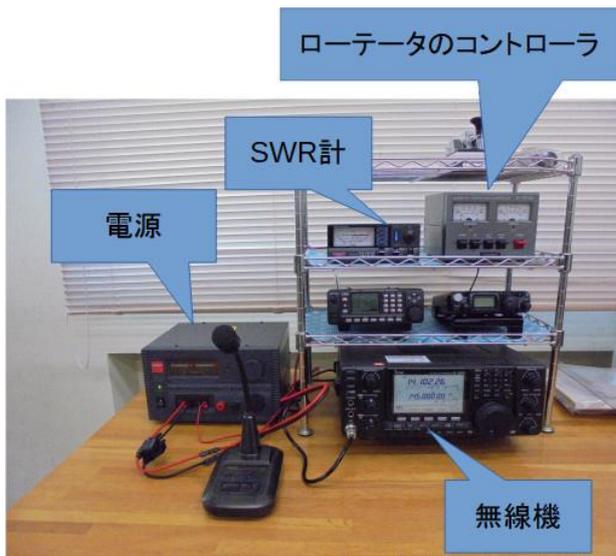


図3 無線設備の一般的な構成



図4 衛星通信向けのアンテナ

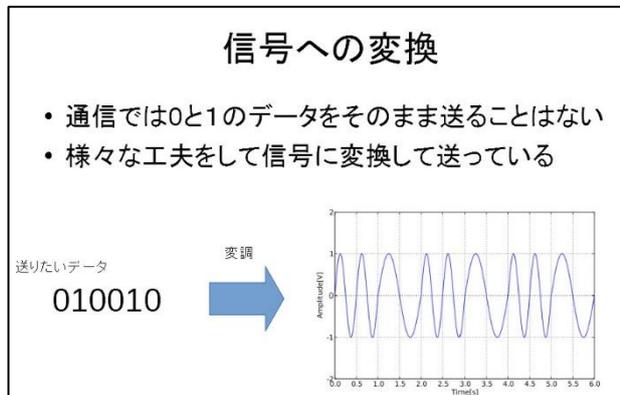


図5 デジタル変調の原理の説明



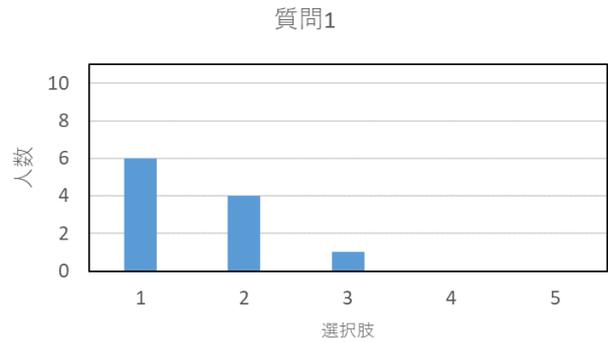
図6 講座の様子（無線機の説明）

間では、学生が受信機の組み立てと動作試験を行った。前半では、衛星通信の概要を紹介した。実社会で使われている人工衛星の種類、人工衛星・地上局の通信機の構成、デジタル通信の原理を紹介した。参加した学生の所属学科・学年は多岐にわたるため、衛星通信の概要を理解できるように配慮した。座学の中で、実際に使われている無線設備の構成を紹介した。図3は、衛星通信に使われる無線設備の例である。無線機、衛星を追尾するためのローテータのコントローラ、安定化電源等含まれている。また、図4は衛星通信向けのアンテナ設備で、2つの周波数帯に対応したアンテナ、衛星を追尾するためのローテータが含まれている。無線機やアンテナ、安定化電源、ローテータは会場に持ち込み、実物を参加学生に見てもらった。図5は、デジタル通信の原理を説明するための資料の一部で、

デジタルデータをアナログ信号の変化に対応付けて衛星・地上局間が通信していることを説明した。図6は、講座で実際の無線機の説明を行っている様子である。講座の後半では、簡易型受信機の組み立てと動作試験を中心に行った。簡易型受信機の組み立てはグループワークとし、異なる学科に所属する学生同士が互いの得意な知識・技術を持ち寄って進める形式にした。グループは3~4人の人数になるようにグループ分けした。受信機の組み立ては、最初に組み立て済みの見本を提示し、組み立て上の注意点を確認した後、各グループで作業順番を決めてもらい、進めてもらった。組み立ての途中でプリアンプとバッテリーを接続する半田付けが必要な箇所があり、他の部分が組み上がった段階で、全体に半田付けの作業手順を説明し、半田付けを行ってもらった。

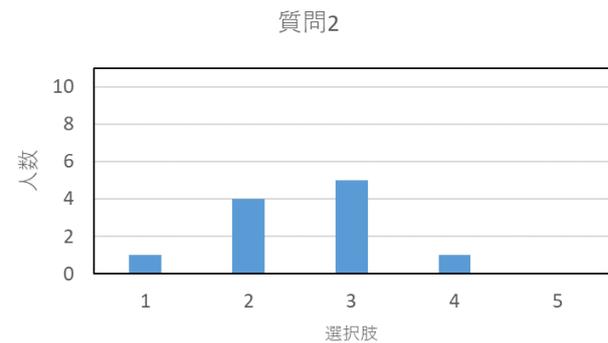
質問1 講座は興味ある内容だったか。

- 1 とても興味が湧いた
- 2 やや興味が湧いた
- 3 ふつう
- 4 やや興味が湧かなかった
- 5 興味が湧かなかった



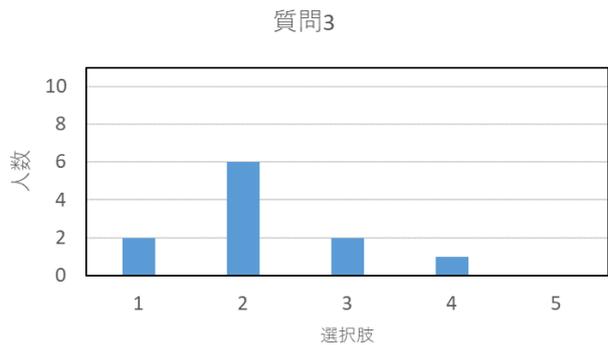
質問2 講座のレベルはどうだったか。

- 1 難しい
- 2 やや難しい
- 3 適切
- 4 やや簡単
- 5 簡単



質問3 衛星通信への理解が深まったか。

- 1 とても深まった
- 2 深まった
- 3 どちらでもない
- 4 あまり変わらない
- 5 わからなくなった



質問4 製作した簡易型受信機を学校に持ち帰った後も、衛星信号の受信を試みてみたいか。

- 1 とてもやりたい
- 2 やりたい
- 3 検討している
- 4 どちらもでない
- 5 やらない

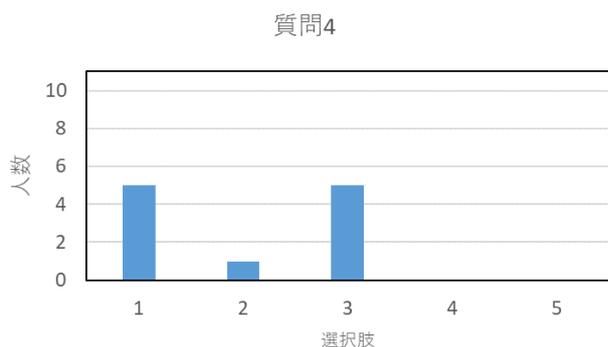


図7 アンケート結果 (簡易型受信機の組み立て)

組み立て作業終了後に、動作試験を行うためにノートPCを使ってRaspberry PiにSSHクライアントで接続してもらい、起動確認を行った。次に、USBスピーカーをRaspberry Piに接続してもらい、音声出力ができることを確認してもらった。音声出力の確認は、無線通信の

受信動作の確認目的に、音声通話を録音して再生するために行った。

音声出力の確認後、アマチュア無線の通信を簡易型受信機で受信する動作試験を行った。アマチュア無線の音声通話を受信対象に、簡易型受信機で通信を受信できる

人工衛星の通信仕様を読んでみる

- FUNcube-1
- ダウンリンク 145.935MHz 1200bps BPSK
 - 30mW~300mW
- トランスポンダ(中継器)
 - 435.150-435.130MHz アップリンク
 - 145.950-145.970MHz ダウンリンク

図8 通信仕様の読み方の説明

データ本体部分の使い方

- データ本体部分の使い方が衛星通信で大事なる
- せっかく記録した観測データを地上局へ送りたい

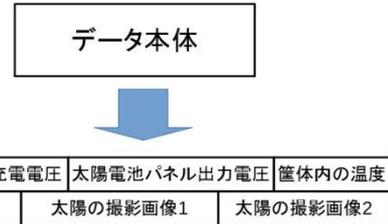


図9 フレームデータの構成 (メッセージ部分)

CSVデータへ変換

- CSV形式に変換することでExcelで開くことができる。

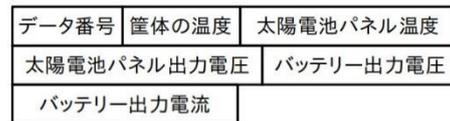
```
pi@raspberrypi:~$ chmod 755 decode.sh
pi@raspberrypi:~$ ./decode.sh
pi@raspberrypi:~$ cat output_frame.csv
31,-.40,-1.00,0,8190.00,140.00
61,3.20,2.90,4440.00,8190.00,215.00
121,8.90,8.60,4140.00,8190.00,209.00
151,1.70,1.10,4080.00,8190.00,212.00
362,5.90,5.30,4440.00,8190.00,212.00
392,10.10,9.50,4380.00,8190.00,209.00
452,2.60,3.20,4440.00,8190.00,215.00
782,12.50,12.20,4380.00,8190.00,209.00
```

データ本体部分だけ取り出せた

図10 受信データのデコード手順の説明

シナリオ1 受信実験のデータ書式

- パケットデータを受信して、見てみる
- 実際の衛星(超小型衛星)では、断続的にデータが送られてくる



データを並べる

117, 20, 19.87, 4348, 8292, 224

図11 受信実験のデータフレーム構成

かどうかを実験した。簡易型受信機で受信するために、各グループで Raspberry Pi を使って、SDR 経由でコンピュータに取り込まれた信号を録音(記録)し、受信終了後に音声再生ソフトウェアを使って音声が聞き取れるかどうか確認した。各グループで受信した音声の内容を確認して、動作試験を終えた。

3.2 アンケート評価

講座実施後に、参加学生にアンケートを回答してもらった。アンケート内容は、講座の進行速度、作業の難易度、参加者本人の理解等であり、5段階での回答とし、講座を終えての感想を自由記述形式で回答できるようにした。図7にアンケートの質問と、質問に対する回答を度数分布に整理したものを示す。

質問1は、講座に対する興味を尋ねたものである。講座の参加学生は、スペースアカデミアに参加している学生であるため、母集団としては宇宙工学に関心がある学生である。そのため、この質問の回答分布は、選択肢1と選択肢2の回答者が多くなった。宇宙工学に関心があ

る学生ではあるが、アンケートでは、参加学生の人工衛星と地上局を結ぶ衛星通信に対する関心の高さが伺える結果となった。

質問2は、講座のレベルを質問したものである。選択肢2と選択肢3を選択する回答者が主で、講座内容は難しすぎることもなく衛星通信を初めて学ぶ学生にとって消化不良が少なかったと考えることができる。

質問3は、講座を通して衛星通信への理解度の変化を質問したものである。半数以上の参加学生が講座を受ける前よりも衛星通信に対する理解が深まったことを回答している。

質問4は、今回の講座を受けて、さらに所属校で発展的な活用をしたいかどうか質問した。その結果、選択肢1か選択肢3を選択しており、今後の活用方法について分かれている。これは、スペースアカデミア参加学生の所属学科が機械系、情報系、電気・電子系等、様々なため、今後の活用に関しては各自の興味によって活用したかどうか回答が分かれたと考えることができる。

以上より、講座1の満足度についてまとめると、アン



図 12 講座の様子（受信実験の様子）

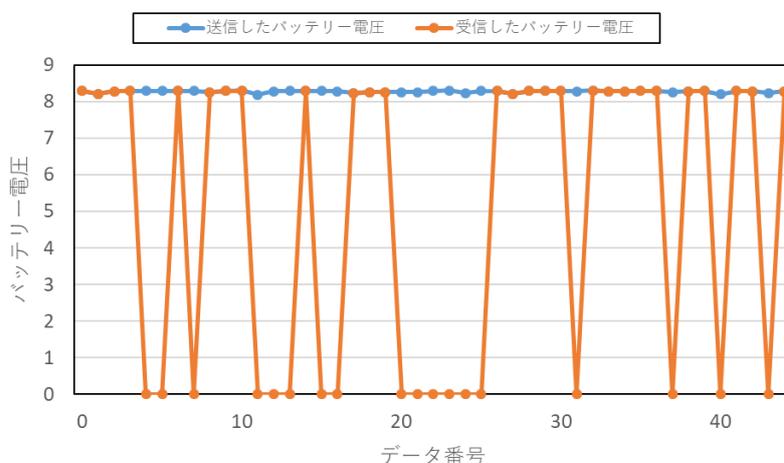


図 13 送信データと参加者が受信したデータの比較 (バッテリー出力電圧)

ケート結果からは参加者は衛星通信の理解が深まり、衛星通信に興味を持ってもらえたと考えられる。

4. 衛星通信のしくみ講座

4.1 講座内容

講座 2 では、講座 1 の内容を踏まえて、衛星通信におけるデジタル通信方式の理解と受信データから衛星の稼働状態を把握する実習を行った。講座 2 は、高専スペースキャンプで講座の一部として実施し、キャンプの参加者が受講した。参加学生が衛星通信に使われる無線機の構成の概要を理解することを目的に実習形式の教材を開発した。講座 2 の教材は、講座 1 と同じ衛星通信の想定を用いて作成した。

講座は前半と後半の 2 部構成とし、全体で 1 時間とした。前半 30 分は座学で、講座のガイダンスと衛星通信の概要を説明し、後半 60 分で受信機の動作試験と受信実験、受信データの考察を行った。

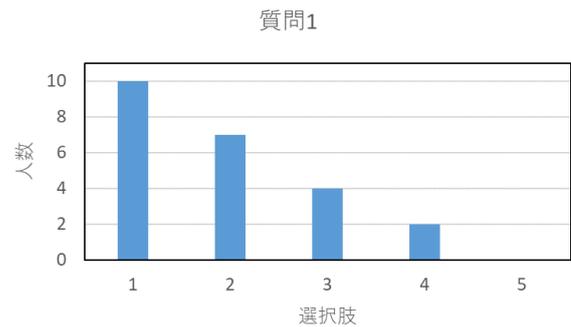
前半では、講座 1 と同様に衛星通信の概要を紹介した。

講座 1 に参加せず、講座 2 から初めて参加した学生が参加者の多くを占めた。講座 1 と同様に参加した学生の所属学科・学年は多岐にわたるため、衛星通信の概要を理解できるように配慮した。講座の後半では、最初に簡易型受信機の動作方法と、動作確認の試験を行った。この手順では、Raspberry Pi へのコマンド入力やアマチュア無線の通信が受信できるかどうかを実際に操作してもらいながら確認した。実験作業はグループワークとし、講座 1 と同様に分け、1 グループあたりの人数は 3~4 人とした。

講座 2 ではデジタル通信方式の理解を目的としているため、図 8 に示すようにデジタル通信に関する人工衛星の通信仕様の読み方を紹介した。人工衛星は、地上局から衛星へ命令を送って制御するための周波数（アップリンク周波数）と、衛星から地上局へ情報を送信するための周波数（ダウンリンク周波数）が通信チャンネルとして設けられている。そして、周波数上でどのような通信方式で情報をやり取りするかが問題になるが、これに

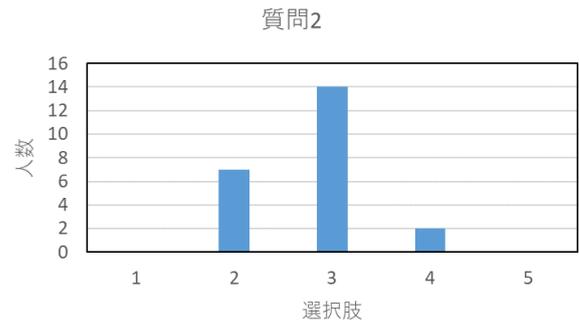
質問1 講座は興味ある内容だったか。

- 1 とても興味が湧いた
- 2 やや興味が湧いた
- 3 ふつう
- 4 やや興味が湧かなかった
- 5 興味が湧かなかった



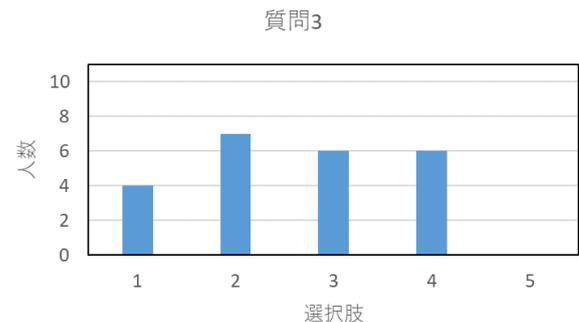
質問2 講座のレベルはどうだったか。

- 1 難しい
- 2 やや難しい
- 3 適切
- 4 やや簡単
- 5 簡単



質問3 衛星通信に使われる送信データのフレーム (形式) について、理解は深まったか。

- 1 とても深まった
- 2 やや深まった
- 3 理解できた
- 4 すこしわからなかった
- 5 まったくわからなかった



質問4 受信した人工衛星の稼働状態を表すデータから、衛星の状態を推測できることがわかったか。

- 1 よくわかった
- 2 すこしわかった
- 3 どちらでもない
- 4 少しわからなかった
- 5 まったくわからなかった

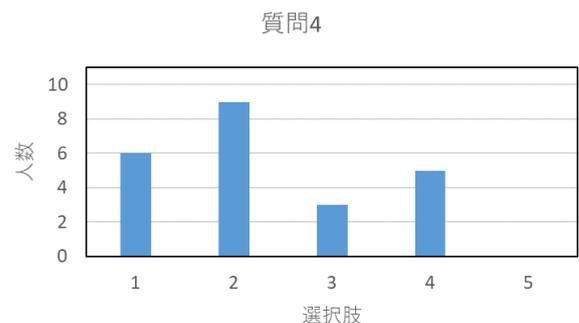


図 14 アンケート結果 (衛星通信)

関しても通信速度や変調方式が決められている。実際のデータ受信では、これらの通信仕様を把握し、使用する通信機器を設定し、受信する必要がある。説明に使用した衛星の通信仕様は実際に運用されている FUNcube-1[®]で、多くのアマチュア無線家が受信し、衛星の稼働状態 (ハウスキーピングデータ) が集められ、ウェブサイト

上に公開されている。

図 9 は、デジタル通信方式のフレームデータの構成例である。衛星から地上局へデータが送られる際、予め決められた順番にデータを並べ、送信データ (フレームデータ) を構成して送信する。フレームデータのメッセージ部分は、複数の個別データから構成されている。この

メッセージ部分には、衛星の稼働状態を知る手がかりとなるバッテリーの出力電圧や、例えば衛星に搭載されているカメラで撮影した画像データ等が含まれている。

図 10 は、講座後半の受信実験で使用した、受信したフレームデータから元データに変換する手順の例である。図 10 の手順は、講座の中で参加学生が受信データから元データを復元するために使用した流れになっている。受信データから元データに変換するプログラムはスクリプトになっており、各データは CSV 形式でファイルに出力される。スクリプトが出力するデータの順番は予め決められているため、観測数値がどのように変化しているか検証できる。

図 12 は、講座の様子を示したものである。1 グループにつき 1 テーブルに着席してもらい、1 セットの簡易型受信機を共同で操作してもらった形である。図 12 は受信実験を行っている際のもので、ノート PC に受信しているデータが表示されている。

図 13 は、アマチュア無線の packets 通信を受信し、送信されたデータと参加学生が受信したデータについて比較をしたものである。テストデータは、FUNcube プロジェクトの FUNcube-1⁸ のテレメトリデータを元に作成した。図 11 に示すように受信実験用のフレームデータは、複数種類の異なるデータにより構成されている。図 13 はバッテリー出力電圧のデータに対して比較したものととなっている。元の送信データと受信データを比較すると、ところどころ受信に失敗しており、受信に失敗した電圧は 0V として表示している。送信していたバッテリー出力電圧は 8V 程度の値であった。受信実験の際、学生は受信が行えるようにアンテナの位置や向きを随時調整し、試行錯誤を行っていた。受信できていた時間に空白があったのは、アンテナの調整を行っていたと考えることができる。

4.2 アンケート評価

講座 2 でも、講座実施後に、参加学生にアンケートを回答してもらった。アンケート内容は、講座に対する興味、講座の進行速度、デジタル通信方式への理解、ハウスキーピングデータの有効性について 5 段階で、講座の感想を自由記述形式で、各々回答してもらった。図 14 にアンケートの質問と回答、及び度数分布グラフを示す。

質問 1 は、講座に対する興味を質問したものである。講座 2 は、スペースキャンプ参加学生が回答しており、母集団としては宇宙工学に関心がある学生が参加していることになる。この質問の回答分布は、選択肢 1 と選択肢 2 の回答者が多くなった。宇宙工学に関心がある学生

が参加しているが、全員が衛星通信への興味がある回答者が半数を占めた。

質問 2 は、講座のレベルを質問したものである。選択肢 2 と選択肢 3 を選択する回答者が主で、講座は難しすぎることもなく衛星通信を初めて学ぶ学生にとって消化不良が少なかったと考えることができる。

質問 3 は、デジタルデータを伝送する際のデータフレーム構成について質問したものである。理解できた学生や、より理解が深まった回答者がいる一方で、6 名が選択肢 4 を選択した。参加者全体で考えると約 1/4 の回答者がフレーム構成を理解できなかったため、今後教材の改善が必要である。

質問 4 については、受信したデータを考察することで、衛星の状態を把握できたかどうかを質問したものである。ハウスキーピングデータに関する講義や、データ受信が成功したグループは表計算ソフト等での視覚化により衛星状態に対する考察が深まったと考えることができる。一方で、約 1/5 の回答者が、衛星の状態を知る情報であるハウスキーピングデータの有効性について理解できなかったため、質問 3 と同様に受信実験の改善が必要である。

5. 講座総括と今後の課題

講座 2 回分のアンケート回答から、どちらの講座も宇宙工学に関心が高い学生を対象にしていたが、講座のレベルは適切な難易度だったことが確認できた。また、衛星通信に関する講座の内容への関心は高く、今回 2 回の講座を踏まえて、さらに発展的な内容に展開することが可能だと考えている。

例えば、さらに発展的な内容としては、人工衛星の信号受信に創意工夫が必要となる長期間にわたる受信コンテストなどである。今回の講座では短時間で、人工衛星からの信号ではなく、講師がアマチュア無線の通信を行い、参加者は限定的な環境下での受信実験を行った。実際の人工衛星の信号受信では、衛星の軌道や、運用周波数、通信方式等も考慮して受信プランを立て、広範な知識と実践的な受信システムの運用力が必要となる。長期間にわたる受信コンテスト実施することで、高専生が受信機の運用力を身に付ける機会を提供できる可能性がある。

高専スペース連携の研究グループでは、国立高専初の人工衛星打ち上げを目指して KOSEN-1 の開発を進めている。衛星が打ち上げられ、衛星の運用段階では衛星への指令や状態監視のために地上局システムを運用できる人材が必要である。今後は、コンテストを通じて実践的

な地上局システムを運用できる人材を育成できる教育教材の開発が必要である。

6. まとめ

高専生のための簡易型受信機を用いた衛星通信講座の教材を開発し、講座で実践し、教材の有効性を評価した。その結果、講座のレベルは適切な難易度だったことを確認した。また、参加学生からは衛星通信への理解が深まったという回答が多かった。今後は、より実践的な環境下で受信機を活用し、衛星通信の学習ができるように受信コンテストの実施などを計画している。

謝辞

本研究の遂行にあたって徳山工業高等専門学校 教授北村健太郎氏、高専スペース連携の研究者から多大なご支援、ご助言をいただき感謝申し上げます。また本研究は、文部科学省・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」(研究代表者 徳山工業高等専門学校 北村健太郎)の支援を受けて実施した。

参考文献

1. 高専スペース連携、<http://space.kochi-ct.jp/> (2018 年 1 月 23 日閲覧)
2. 文部科学省、平成 26 年度宇宙航空科学技術推進委託費・実践的若手宇宙人材育成プログラムで「国立高専超小型衛星実現に向けての全国高専連携宇宙人材育成事業」(研究代表者 高知工業高等専門学校 今井一雅)、2014 年.
3. M. Wakabayashi, T. Takada, K. Imai, Y. Kajimura, J. Nakaya, K. Kitamura, Y. Murakami, F. Asai, M. Tokumitsu, M. Shinohara ,and K. Shimada, "Education in Aerospace Engineering: A Report on the 2016 KOSEN Space Camp," The ISTS Special Issue of Transactions of JSASS Aerospace Technology Japan (出版処理中)
4. 文部科学省、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」(研究代表者 徳山工業高等専門学校 北村健太郎)、2017 年.
5. 宇宙航空研究開発機構、「革新的衛星技術実証 2 号機のテーマ公募」選定結果について、http://www.jaxa.jp/press/2018/12/20181212_ka

kushin_j.html (2019 年 1 月 23 日閲覧)

6. M. Tokumitsu, F. Asai, M. Kusakabe, S. Ogura, S. Aoki, T. Takada, M. Wakabayashi and Y. Ishida, "A Prototype of an Integrated Telemetry Receiving System with Volunteers: Designs of a Simple Receiver, a Protocol, and an Intelligent Information Processing," The 21st International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems, In: Procedia Computer Science Volume 112, 2017, Pages 2445-2454, Elsevier, 2017. (KES 2017)
7. The FUNCube project, Welcome to the FUNCube Web Site, <https://funcube.org.uk/>. (2018 年 1 月 11 日閲覧)