

超小型衛星のためのアマチュア無線帯地上局の ネットワーク活用に関する検討

徳光 政弘*¹, 高田 拓*², 中谷 淳*³, 浅井 文男*⁴, 今井 一雅*⁵

Study on network utilization of amateur radio band ground stations for nanosatellite

TOKUMITSU Masahiro*¹, TAKADA Taku*², NAKAYA Jun*³, ASAI Fumio*⁴, IMAI Kazumasa*⁵

ABSTRACT

For the satellite operation of CubeSat “KOSEN-1” adopted on JAXA’s innovative satellite technology demonstration-2 scheduled to be launched in 2021, we plan to use 11 ground stations for amateur radio band in Japan as a network. It is considered useful to utilize multiple ground stations in order to efficiently carry out satellite operation of nanosatellite such as CubeSat. In this paper, the orbit calculation software was used to calculate the increase in the number of possible satellite operations and the expected communication time, based on the information of the KOSEN-1 cooperation ground stations network. When the visible time zones of multiple stations overlap, it is considered that good quality data can be obtained by changing to different polarized wave receiving antennas and also estimating missing data from the data of multiple stations received simultaneously. In order to receive multiple CubeSat data that are continuously ejected in space, an inexpensive and simple receiver specialized for data receiving is effective. Based on the result of long-term receiving experiment of the simple receiver developed in our team, it is suggested that the combination of the main control ground stations and simple receiver can be expected to increase the amount of data received.

Keywords: satellite communication, orbital calculation, nanosatellite, ground station network, CubeSat.

概要

2021年度に打ち上げ予定のJAXA革新的衛星技術実証2号機に採択されたCubeSat「KOSEN-1」の衛星運用のために、国内にあるアマチュア無線帯用の11地上局をネットワーク利用することを計画している。CubeSatなどの超小型人工衛星の衛星運用を効率よく実施するためには、複数の地上局を活用することが有用と考えられる。高専連携地上局ネットワークの情報をもとに、軌道計算ソフトウェアを利

* 2020年12月4日受付 (Received December 4, 2020)

¹ 米子工業高等専門学校 電子制御工学科

(Department of Electronics and Control Engineering, National Institute of Technology, Yonago College)

² 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科

(Department of Social Design Engineering, National Institute of Technology, Kochi College)

³ 岐阜工業高等専門学校 機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Gifu College)

⁴ The Radio Amateur Satellite Corporation 会員 (Member of The Radio Amateur Satellite Corporation)

⁵ 高知工業高等専門学校 名誉教授・客員教授 (Honorary professor and Visiting professor, National Institute of Technology, Kochi College)

用し、KOSEN-1 衛星の運用が可能な回数や通信予想時間の増大分を見積った。複数局の可視時間帯が重なる場合には、異なる偏波受信アンテナに変更することや、同時受信した複数局のデータから欠損データを推定することで、結果として、良質のデータを得られると考えている。また、可視時間の重なる複数の CubeSat データを受信するためには、受信に特化させた安価で簡易的な受信装置が有効であり、本研究で開発した簡易型受信機の長期間受信実験の結果から、管制局と簡易型受信機の組み合わせにより、データ受信量の増大が期待できることが示唆された。

1 はじめに

CubeSat などの超小型人工衛星は、衛星開発の未経験者であっても開発に取り組みやすく、衛星開発のノウハウの蓄積や、機体の開発費を抑えられることから世界各国の研究機関や大学、高等専門学校（高専）などで開発されている。近年では、超小型衛星の利用は産業界へ浸透し、超小型衛星を低軌道に配置した移動通信サービス網の構築を進めているベンチャー企業などもある。技術実証等の研究開発や産業への展開だけでなく、低予算で宇宙工学に関する研究開発が行えることから、大学・高専等においては教育教材として人材育成に活用されている。

開発した人工衛星を使った技術実証や科学観測ミッションを実施するためには、衛星を宇宙空間へ打ち上げる必要がある。超小型衛星の打ち上げ機会としては、国際宇宙ステーションからの放出や衛星打ち上げロケットへの相乗りなどがある。我が国の場合は、H-IIA/B ロケットによる相乗りや、数多くの小型衛星を搭載する革新的衛星技術実証プログラム等の機会により、打ち上げることが可能である。

衛星の運用は、通常、開発機関による衛星管制を通じて実施される。大学・高専等で開発されている CubeSat は、通信機器の流通、資格の取得しやすさ、無線局開設の煩雑さを回避するためなどの理由から、アマチュア無線帯が使われることが多い。衛星管制に使用される周波数は主に 430 MHz 帯で、アップリンクが 1200 bps・AFSK、ダウンリンクが 9600 bps・GMSK の変調方式が使用されている。より高速な通信が必要な場合には、無線局に関係する必要な手続きを経て 430 MHz 帯における 200 kbps や、より高い周波数帯の X バンドにおける高速なデジタル通信を利用する。一方で、地上局が 1 地点の場合、衛星が地上局の可視範囲にある時間帯は非常に短くなる。可視時間を増やすためには、広大な領域に多数の地上局を設置する必要があるが、1 機関だけで多数の地上局を設置し、維持するのは難しい。既存の地上局をネットワーク的に活用する試みが要望されており、いくつかの試みを実施され始めている^[1]。地上局ネットワークを活用した衛星運用は、アマチュア無線帯特有の不法無線局の混信問題による影響を緩和できる可能性がある。都心部では、アマチュア無線帯を使った不法無線局による通信が、衛星周波数の運用区分に妨害を与えることが問題になっている。複数の地上局による衛星データの同時受信が可能であれば、欠損したデータを補完することができる。地上局は、無線免許上、地球局として扱われるが、本論文では地上局と表記した。

また、特にロケットによる超小型衛星打ち上げの場合、宇宙空間への衛星放出は連続的に実施されるため、同じような軌道上を航行することが多くなる。そのため、地上から見ると、衛星と通信可能となる可視時間が重なる。可視時間の重なる複数の衛星信号を捉えるためには、地上局側は衛星ごとの信号を受信できる体制を整えておく必要がある。将来的には、超小型衛星による編隊飛行が普及していくと考えられるため、単一の地球局に複数のアンテナ設備が必要となるであろう。これを補完する手段として、受信に特化した小型で安価なアンテナ受信設備を大量に製作し設置することが考えられる。

著者らのグループは、JAXA の革新的衛星技術実証 2 号機及び 3 号機の CubeSat 搭載テーマに選定されている^[2,3]。革新的衛星技術実証 2 号機では、高知高専・群馬高専を中心とした 10 高専・1 大学により、2021 年度打ち上げを目指している木星電波観測技術実証衛星「KOSEN-1」の開発を行っている^[4]。さらに、KOSEN-1 に続く後継機を含めた複数衛星の運用、アマチュア無線の不法無線局による混信問題の解決を目的に、地上局ネットワークの構築と必要なシステム検討を行っている。本論文では、10 高専・1 大学による地上局ネットワークの現状を報告し、効率的で安定したデータ受信のための運用計画に関して、軌道計算ソフトウェアを用いた検討結果を示す。また、受信に特化させた安価で簡易的な受信装置の開発と長期間受信実験の結果を示し、管制局を補完する受信局ネットワークの可能性を考察する。

2 高専連携衛星 KOSEN-1 の開発体制と地上局ネットワーク

2.1 KOSEN-1 開発体制

KOSEN-1 は、高知高専と群馬高専を中心に 10 高専・1 大学で開発を進めている。開発には卒業研究の学生や部活動(クラブや同好会)の学生が参加し、安全管理や技術指導を行う教員が開発を支援する。装置部の開発やミッションの役割は各高専に割り当てられており、高知高専と群馬高専が衛星の組み立て、ミッション遂行の統括をしている。各高専は全国に点在しているため、拠点ごとに担当装置部の開発を行い、各種評価試験の際には部品や装置を輸送することで対応している。定期的なビデオ会議(週 1 回を目安)で情報交換を行い、非同期的な情報共有手段としてチャットやファイル共有サービスを活用している。

衛星開発に参加している学生は卒業とともに研究室を離れるため、衛星開発に携わることができる人材の継続的な育成が必要である。高専の場合、本科生は 1 年間、専攻科へ進学した場合も合わせて 3 年間の研究期間であり、ほとんどの学生が本科で卒業することから、大学・大学院にくらべて研究室などへの所属期間が短い。高専生に効率よく宇宙工学の知識や経験を積んでもらうため、2015 年から合宿形式の高専スペースキャンプを毎年夏に実施してきた。高専スペースキャンプでは、宇宙工学の識者による基調講演、2U サイズのモデルキューブサット開発講座やモデルロケット製作講座を実施し、参加学生はロケットや人工衛星について学習する^[5,6,7]。また、グループによるミッション立案やモノづくり競技を目玉にしており、衛星開発へ参加する学生への良い経験の場となっている。

2.2 地上局ネットワークの構築と運用

地上局のネットワーク構築のため、これまでに各地上局の整備や簡易型受信機の開発を行ってきた^[8,9]。また、ボランティアのアマチュア無線家から衛星データ受信の協力を得られるように、多地点受信システムの構築と試験運用を進めている。衛星からのデータ受信の基盤が整いつつあるため、現在は、KOSEN-1 に必要な衛星管制システムの開発を行っている。

KOSEN-1 の開発に参加している高専には、衛星通信に必要なアマチュア無線の設備を設置している。図 1 に示すように、北は北海道の苫小牧高専から南は鹿児島島の鹿児島高専に至る 11 箇所の地上局が整備されている。図 2 に各高専の地上局の設備の概要を示す。各地上局は、ほぼ同じ仕様の無線機、水平・仰角のローテータとコントローラ、アンテナやプリアンプ等を備えている。標準的には 430 MHz アンテナ 1 つでの運用となっているが、グループ全体として、異なる偏波に対応できるように 430 MHz の指向性アンテナを計 19 個（水平偏波を 11 箇所、垂直偏波を 8 箇所設置）、430 MHz と同様によく利用される 144 MHz 対応のクロス八木アンテナを計 2 個所有している。これらの設備とネットワーク地上局の利点を活かして、複数の地上局による運用の実施を検討している。

地上局運用のためには、無線設備を運用できる人材の育成が必要である。KOSEN-1 開発に興味をもつ学生を対象として、これまでに簡易型受信機に関する製作と運用講座や、高専テレメトリ受信コンテストを実施し、地上局設備の理解と実践的な運用訓練を進めてきた^[8]。現在、KOSEN-1 との無線通信の検証、社団局の開局申請や地上局への申請作業を進めている。

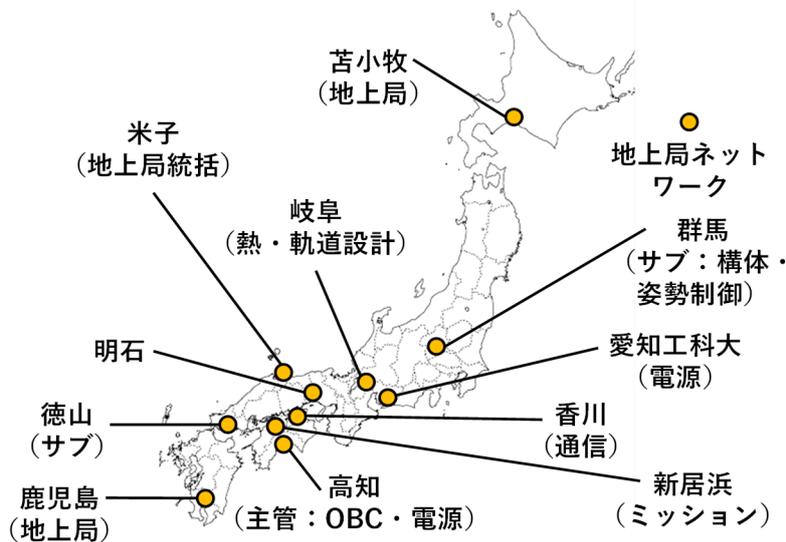


図 1 各高専・大学の開発拠点と地上局

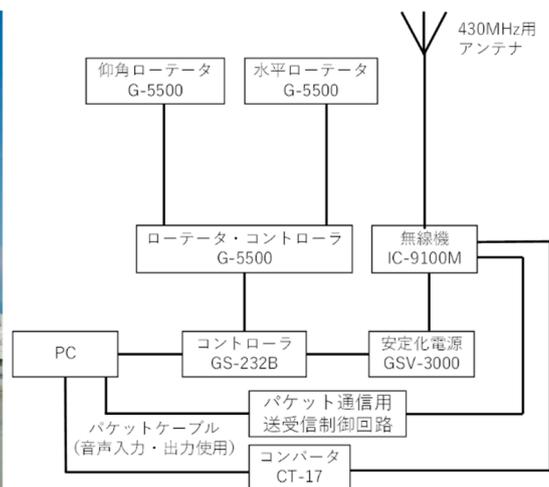


図 2 地上局設備の例（米子高専）

3 地上局ネットワーク運用に関する検討

全国 11 拠点の地上局ネットワークの利点を活かすために、テレメトリデータの受信と管制に関する検討を行った。具体的には、KOSEN-1 を対象に、地上局ネットワークの運用可能時間やダウンリンク可能なデータ量について検討する。KOSEN-1 の軌道要素については確定していないため、日本大学と日本アマチュア無線通信協会 (JAMSAT) が共同で開発し運用中の超小型衛星である NEXUS (NEXt generation X Unique Satellite) の軌道要素を利用する。NEXUS は 1U の CubeSat で、太陽同期準回帰軌道の高度約 500 km に投入されており^[10]、KOSEN-1 と類似の軌道と考えられる。

3.1 地上局ネットワークでの運用可能時間の見積り

KOSEN-1 の地上局ネットワークは、日本各地に設置された地上局により構成されている。最東端・最北端は苫小牧高専 (北海道苫小牧市)、最西端・最南端は鹿児島高専 (鹿児島県霧島市) である。全 11 局に対して、軌道計算ソフトウェアの PREDICT を使用して、シミュレーションにより運用可能時間を見積った。PREDICT^[11]は、計算アルゴリズムとして近地球域の衛星軌道計算用の計算アルゴリズム SGP4 (Simplified General Perturbations satellite orbit model 4)^[12,13]を実装している。SGP4 は衛星の軌道計算のアルゴリズムの一つで、計算モデルに衛星の位置を計算するための摂動項を含んでいる。2019 年 1 月 18 日の打ち上げ後から 2019 年 12 月 31 日までを検証対象とし、NORAD (North American Aerospace Defense Command) により 1 週間ごとに公開されている NEXUS の軌道要素ファイルを用いた。NEXUS を含む軌道要素ファイルは 2019 年 1 月 18 日に公開され、その後随時更新されている。

図 3 に、NEXUS が地上局ネットワークの端に位置する鹿児島局と苫小牧局の上空を通過するパスを示す。2 つの地上局を中心とした円は、衛星の可視範囲であり、仰角が約 22 度で、地上での距離が約 2,448 km の領域となっている。地上局ネットワークを活用することで、衛星の可視範囲が経度的にも緯度的にも広がる。ただし、地上局ネットワークの配置と衛星パスの特性から、経度方向の広がりによる効果が大きいことが予測される。また、地上局間の距離は可視範囲に比べて小さいため、衛星が地上局ネットワークの可視範囲にある場合は、複数の地上局で衛星からの電波を受信できる可能性が高い。

衛星管制に有効な仰角は 20 度以上とし、1 パス当たりの可視時間が 60 秒以上の場合を可視時間として計上した。表 1 に、各 11 拠点の 1 年間当たりの可視時間と衛星の通過回数を示す。高緯度に位置する苫小牧高専では、衛星の通過回数が多く、可視時間が最も長くなる。極軌道衛星の場合、衛星の通過回数は極域で多く、赤道側で少なくなるため、可視時間には南北差が見られる。ここで、11 拠点を 1 つの地上局として扱った場合、地上局ネットワーク全体では、1 年間に 954 回衛星が通過し、可視時間は 253,533 s (70.4 時間) である。苫小牧高専 1 局の可視時間と比較すると、1.49 倍となる。

全 11 拠点を利用した場合に、パス毎の可視時間を示したものが表 2 である。最も通過回数の多い可視時間は、1 パスあたり 300 秒から 329 秒で、4 分から 6 分 30 秒程度の可視時間のパスが多い。仰角 20 度以上では、可視時間が 4 分以上のパスが全体の 66% を占めていた。

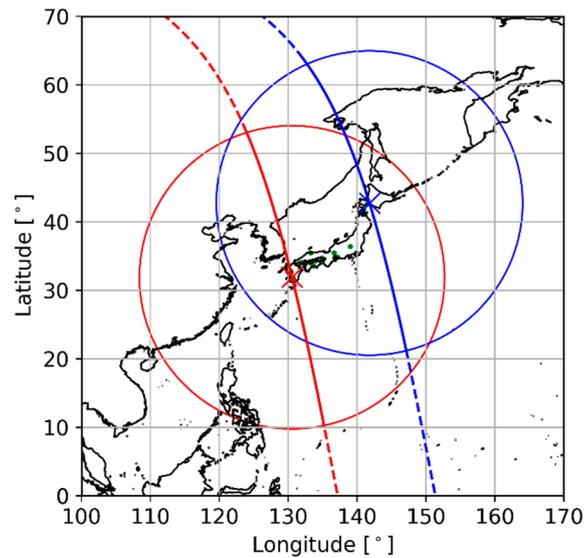


図3 NEXUS の衛星軌道と地上局からの衛星可視領域の例。衛星は南から北西へ移動しており、赤色の軌道では鹿児島局上空を最大仰角 88 度で 2019 年 11 月 22 日 12:13:02 UTC に通過し、青色の軌道では苫小牧局上空を最大仰角 87 度で 2019 年 11 月 29 日 11:18:48 UTC に通過している。実線は衛星が地上局の可視範囲にある位置、点線は可視範囲外の位置、円は地上局からの可視領域の範囲、緑色の小円は 11 箇所の地上局、×は軌道の最大仰角の位置を表す。

表1 地球局ネットワークの仰角 20 度以上のパスの可視時間と通過回数の内訳

	鹿児島高専	徳山高専	新居浜高専	米子高専	高知高専
拠点番号	1	2	3	4	5
可視時間[s]	145,476	149,886	149,989	153,041	149,476
通過回数	619	640	636	653	641

	香川高専	明石高専	岐阜高専	愛知工科大学	群馬高専
拠点番号	6	7	8	9	10
可視時間[s]	150,959	151,419	152,880	151,707	154,744
通過回数	647	647	654	647	659

	苫小牧高専
拠点番号	11
可視時間[s]	170,396
通過回数	718

	全体
拠点番号	12
可視時間[s]	253,533
通過回数	954

表2 11 拠点全体における 1 パスの可視時間ごとの通過回数

可視時間[s]	回数	可視時間[s]	回数
60-89	21	240-269	88
90-119	37	270-299	121
120-149	45	300-329	182
150-179	71	330-359	150
180-209	70	360-389	87
210-239	82		

図4は、各地上局の衛星位置の仰角変化を示しており、11 拠点全体で衛星可視となった2019年2月28日00時台の例を示している。縦軸の1から11の数字は各拠点番号であり、12は地球局ネットワーク全体を表している。ネットワーク全体では、同時刻の地上局の中から最も高い仰角を示している。本パスでは、岐阜高専と愛知工科大学の仰角が高く、本州の中央上空を衛星が通過していた。北東側に位置する11番の苫小牧高専では、最大仰角の時刻が他の局より早く、南西側に位置する1番の鹿児島高専では可視時刻が遅いため、11局全体での可視時間が長くなっている。

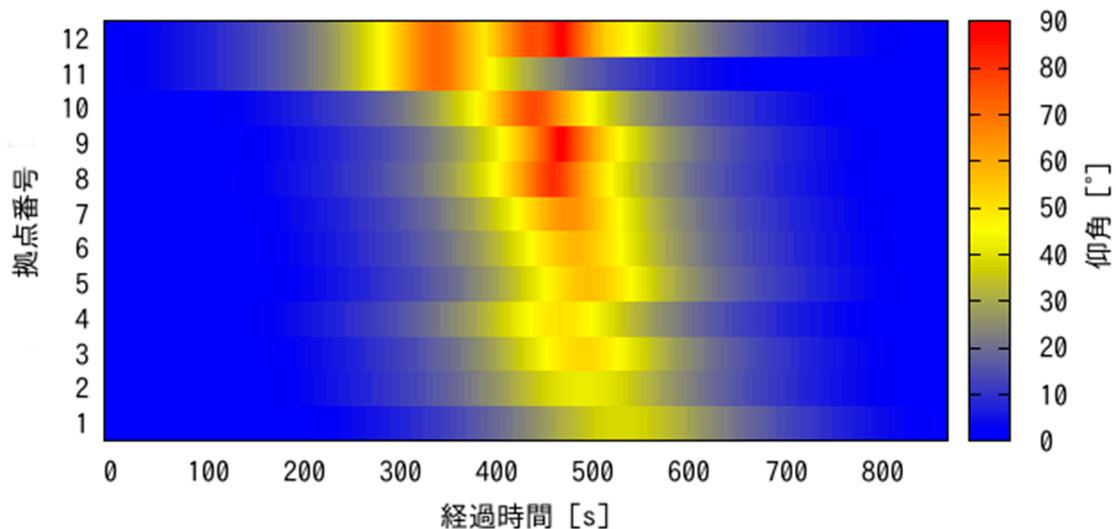


図4 各拠点の仰角変化の例。苫小牧での AOS 時刻 2019 年 2 月 28 日 00 時 33 分 25 秒 UTC を基準とし、縦軸の拠点番号は表2の番号と対応する。

運用時間の見積り結果をもとに、地球局へのテレメトリデータのデータ伝送量を検討した。KOSEN-1はパケットデータ伝送に主にアマチュア無線帯で使われている AX.25^[14]を使用する。AX.25では、受信側で巡回冗長検査(CRC-16)による受信データに含まれる誤りを検出可能である。KOSEN-1のダウンリンクのデータ伝送速度は1200 bpsと9600 bpsである。9600 bpsの回線で行った場合のデータ伝送量は、1パス当たり249.1 KiBである。全可視時間 t_a のうち衛星管制に対するアップリンク送信割合を r 、データ伝送速度を p とすると、データ伝送量 m [bit]は次式で求めることができる。

$$m = (1 - r)pt_a \quad (1)$$

$r = 0.1$ の場合、1 年間でダウンロードのデータ伝送量は約 232.1 MiB である。データ伝送時のビット誤りによるフレームの破棄があれば、有効データの伝送量はこれより減ることになる。衛星と地上局が効率的に通信を行うために、フレームに含まれる誤りを訂正できることが望ましい。AX.25 の拡張である FX.25^[15] をパケットデータ伝送に用いることによって、再送によるフレーム伝送の回数を減らすことができる。衛星-地上局間通信の効率化のための通信方式として FX.25 の使用について検討が必要である。

3.2 緯度差および経度差に対する設置地点の効果

現在の高専連携地上局ネットワークは、本州の西側に拠点局が集中している。他局と緯度差や経度差が大きいののは、苫小牧高専であり、やや小さいが南側に緯度差があるのが鹿児島高専である。地上局ネットワーク全体の可視時間に関して、緯度差と経度差による効果を確認した。苫小牧高専は緯度が高く、通過するパスが多く可視時間が長いことから、苫小牧高専に対する緯度差および経度差の効果を検証する。鹿児島高専の経度、苫小牧高専の緯度に位置する仮想的な地上局を配置し、苫小牧高専・鹿児島高専に対する東西南北方向の広がり効果をシミュレーションで計算した。鹿児島高専と同じ経度上にある仮想地上局との組合せを構成 1、苫小牧高専と同じ緯度上にある仮想地上局との組合せを構成 2 とする。

表 3 に、各局での可視時間と通過回数を示す。衛星が可視となる仰角は 20 度以上とした。1 局での単独運用の場合は、緯度が高いほど衛星パスが多くなるが、同じ緯度上であれば、可視時間はほぼ等しくなる。仮想地上局との 2 局構成の場合、構成 1 と構成 2 では、同じ緯度上の組み合わせの方がパス回数は多くなるが、可視時間はそれほど変わらない。同じ緯度上で経度の差があるとパス回数は増える一方、同じ経度上で緯度差があると 1 パスの可視時間が長くなるためと考えられる。

表 3 各局単独での仰角 20 度以上のパスの可視時間と通過回数

	鹿児島高専	苫小牧高専	仮想地上局
拠点番号	1	2	3
可視時間[s]	144,387	169,209	169,543
回数	608	708	708

	構成 1 (鹿児島高専+仮想地上局)	構成 2 (苫小牧高専+仮想地上局)
拠点番号	4	5
可視時間	212479	216752
回数	741	1000

2局構成と1局構成の可視時間を比較するために、苫小牧高専を基準とすると、構成1の同じ経度上の組み合わせでは、可視時間は1.26倍となる。これは緯度差による効果と言える。一方、構成2の同じ緯度上の組み合わせでは、可視時間は1.28倍となる。これは経度差による効果といえる。以上の計算結果から11拠点による地球局ネットワークの可視時間は苫小牧高専を単独で運用する場合の時間に比べて、緯度差の効果が1.26倍、経度差の効果が1.28倍と考えることができ、掛け合わせると1.60倍となる。この可視時間の拡大効果は、3.1節での11拠点ネットワークの拡大効果である1.48倍に比べ大きい。理由の1つは、構成2では仮想局の緯度が高いことによる効果が含まれていることがある。また、衛星パスは厳密には経度方向に対してある角度をもつため、緯度差と経度差による切り分けが十分ではないことも影響している。まとめると、KOSEN-1のような極軌道衛星の場合、緯度が高い地上局があることはパスの回数を増やす効果がある。経度差のある局の組み合わせにより、さらにパス回数の増加が見込まれる。また、緯度差のある局の組み合わせにより、1つのパスでの可視時間が長くなる。

上述した議論では、可視時間が重ならないように離れた地上局を組み合わせることが、運用時間を効率よく長くできる方法となる。一方で、高専連携地上局ネットワークの西日本エリアのように、比較的狭い領域に複数の地上局が位置する場合のメリットを考える。複数局の可視時間帯が重なる場合には、一部の局で異なる偏波の受信アンテナに変更することが考えられる。偏波面の異なるアンテナでは、受信感度が異なる場合が多く、同じ偏波面のアンテナだけで運用する場合に比べて、欠損の少ないデータ受信が可能となる。誤りを含むデータ受信に対しては、前方誤り訂正を用いた受信データの誤り訂正を用いることが有効な手段となる。また、同じ偏波面のアンテナを使った場合であっても、設置場所の異なる複数局で受信したデータを利用することで、情報処理技術を用いた欠損データ推定が可能である^[16,17]。

結果的に、高専連携地上局ネットワークでは、緯度差や経度差がある程度あり、密集した地上局が存在することで、1地上局に比べて、運用可能時間を長くできる上に、より欠損の少ないデータ受信が可能となると考えられる。

4 地上局ネットワーク支援のための簡易型受信機

4.1 簡易型受信機の概要

衛星自動追尾対応のアンテナシステムを所有する高専以外でも、KOSEN-1の衛星受信に対応できるように、簡易型受信機を開発し、各高専に配布した^[9]。図5に簡易型受信機の設置例を示すが、簡易型受信機は円偏波対応アンテナを使用した固定設置の受信システムである。アンテナは無指向性のQFHアンテナであり、固定設置できる。より感度を上げたい場合は、八木アンテナのような指向性アンテナに交換してもよい。アンテナ直下のアルミケースボックスに、制御用コンピュータ、USB接続のSDRチューナー、プリアンプ、直流電源が内蔵されている。図6に簡易型受信機の内部構成を示す。制御用コンピュータにはRaspberry Pi 3 Model B+を採用し、LinuxベースのRaspberry Pi OSで動作する。

簡易型受信機による衛星テレメトリデータの自動受信に対応するために、専用クライアントソフトウェアを開発した。専用クライアントソフトウェアは、パケットデータ処理にdirewolf^[18]を使用し、AX.25に準拠した1200 bps・AFSK、9600 bps・GMSKのパケットデータの受信に対応している。受信した衛星信号はSDRチューナーで復調し、direwolfで元データを復元する。また、専用クライアントソフトウェアは、衛星が受信地点上空を通過する時刻に合わせて起動する自動受信機能を実装した。自動受

信機能の起動時刻を求めるために、軌道計算ソフトウェア PREDICT^[11,12]を使用する。受信対象の衛星に対して、指定した仰角以上で通過するパスを選定し、受信スケジュールを登録しておくこと、指定した時刻に専用クライアントソフトウェアが起動し、衛星からのテレメトリデータを自動で受信し保存する。



図5 簡易型受信機（左が 144 MHz 帯アンテナ，
右が 430 MHz 帯アンテナ）

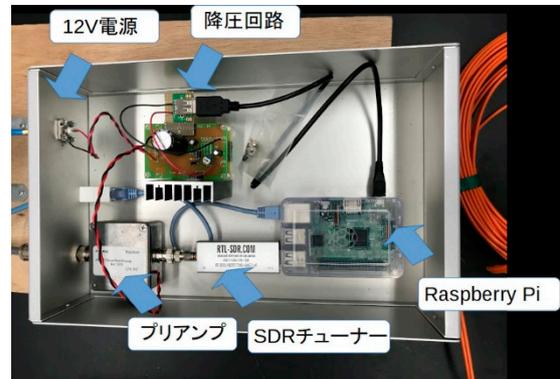


図6 簡易型受信機の内部構成

4.2 簡易型受信機の長期運用状況の分析

2021 年度に革新的衛星技術実証 2 号機，2022 年度に革新的衛星技術実証 3 号機として，小型実証衛星と複数の超小型衛星とキューブサットが共に打ち上げられる予定である。革新的衛星技術実証 2 号機には KOSEN-1 が，同 3 号機には KOSEN-2 が搭載されて放出される予定であり，両ロケットから放出された衛星の軌道はほぼ同じ高度に放出される予定である。衛星が放出される時刻によっては，KOSEN-1 と KOSEN-2 の軌道は，同時刻或いは，短時間の間隔を空けて地球局上空を通過する可能性があり，両衛星のテレメトリ受信と衛星管制に対応する必要がある。

同時刻に管制対象の衛星が複数通過する場合に備えて，複数の簡易型受信機を用いた受信システムについて検証した。簡易型受信機は設置台数を増やすことで，複数衛星に対して同時受信が可能となる^[16]。米子高専の屋上に複数の簡易型受信機を設置し，2020 年 5 月 1 日から 2020 年 9 月 3 日にかけて，衛星がパケットビーコンとして送信するテレメトリデータの受信実験を行った。設置した受信機の受信周波数帯は，アマチュア無線帯でよく使用される 144 MHz 帯と 430 MHz 帯とした。実験では，144 MHz 帯は 2 機の衛星，430 MHz 帯は 4 機の衛星を対象とした。受信用の無指向性アンテナである QFH アンテナ^[19]は，144 MHz 帯の QFH144 と 430 MHz 帯の QFH435 を各々使用した。USB 接続の SDR チューナーの受信周波数は，衛星ごとに固定した。

表 4 と表 5 に周波数帯ごとに，衛星から受信したパケット数，平均仰角とその標準偏差を示す。パス数は，3 節での検証と同様に，仰角 20 度以上でかつ可視時間が 60 秒以上のパスとした。両方の周波数帯において，受信できた平均仰角は 50 度以上で，標準偏差は最大の衛星でも 16 度以内に収まっている。衛星位置の仰角が高い場合は，簡易型受信機によりテレメトリデータを受信可能であった。仰角が 50 度以下での受信が少ない原因の 1 つは，受信周波数を固定していたため，周波数のドップラーシフトに対応できていなかったことや，衛星への仰角が低い場合に電波強度が簡易型受信機の感度以下になっていることが考えられる。

表4 簡易型受信機の衛星テレメトリデータの受信状況 (144 MHz 帯)

衛星名	パス数	受信パッケージ数	平均仰角[度]	平均仰角の標準偏差[度]
CAS-4A	1,806	2,284	69.6	10.0
CAS-4B	1,797	608	61.3	12.2

表5 簡易型受信機の衛星テレメトリデータの受信状況 (430 MHz 帯)

衛星名	パス数	受信パッケージ数	平均仰角[度]	平均仰角の標準偏差[度]
FalconsSAT-3	1,371	732	72.3	11.9
BUGSAT 1	714	101	54.8	16.0
TIGRISAT	820	163	59.4	14.5
ELFIN-A	646	927	60.2	12.3

図7に、CAS-4A衛星のデータ受信の例を示す。最大仰角70度付近の前後1分間にテレメトリ受信の時間が集中している。簡易型受信機は、固定式の無指向性アンテナを使用しているため、テレメトリ受信は仰角が高いパスに限られる。しかしながら、簡易型受信機の製作および設置コストは小さいため、仰角50~60度以上での可視範囲を考慮して、可視域が隣接するように簡易受信機の設置することができれば、高専連携地上局ネットワークを拡張でき、可視時間を延長することができる。

今後は、地上局ネットワークを補完する簡易型受信機網による運用を実現させるため、空間的な設置間隔の設計を行うと共に、ドップラーシフトへ対応するための改良や、簡易型受信機の受信性能を向上させるためにブロードな指向性アンテナの使用について検討する予定である。

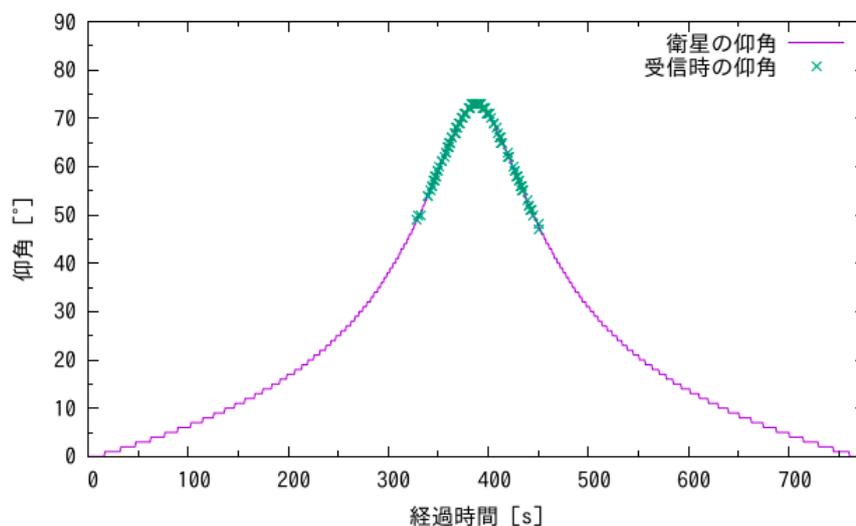


図7 CAS-4A衛星のアンテナ追尾方向の仰角とデータ受信時の仰角
(AOS時刻は2019年7月7日13時23分11秒UTC)

5 まとめ

2021年度に打ち上げ予定のJAXA革新的衛星技術実証2号機に採択されたCubeSat「KOSEN-1」の衛星運用のために、国内にあるアマチュア無線帯用の11地上局をネットワーク利用することを計画した。CubeSatなどの超小型人工衛星の衛星運用を効率よく実施するためには、複数の地上局を活用することが有用と考えられる。

本論文では、軌道計算ソフトウェア PREDICT を利用して、高専連携地上局ネットワークの情報をもとに、KOSEN-1の衛星運用が可能な衛星通過回数や可視時間を見積り、ネットワーク利用による増加効果を確認した。KOSEN-1のような極軌道衛星の場合、緯度方向に離れた地上局の効果は1回の軌道の可視時間をわずかに長くできる一方、経度方向の効果は仰角の高い軌道の回数を増やす効果がある。複数局の可視時間帯が重なる場合には、一部の局を異なる偏波受信アンテナに変更することで、良質のデータが得られる機会を増やすことができる。さらに、同時受信した複数局のデータから欠損データを推定することが可能であり、結果として、良質のデータが得られると考えられる。

また、ある地点における衛星可視時間が重なる複数の衛星データを受信するためには、受信に特化させた安価で簡易的な受信装置が有効である。開発した簡易型受信機の長期間受信実験の結果を踏まえると、拠点局と簡易型受信機の組み合わせにより、データ受信量の増大が期待できることが示唆された。今後、超小型衛星による編隊観測などの機会が増える可能性が高く、連続放出される複数のCubeSatデータを効率よく受信するための補完ネットワークとして有効と考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたって高専スペース連携の研究者に助言や支援をいただきましたので、ここに感謝の意を表します。本研究は総務省平成31年度戦略的情報通信研究開発推進事業(192208001)の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Infostellar, <http://infostellar.net> (2020年8月26日閲覧)
- [2] 宇宙航空研究開発機構, 革新的衛星技術実証プログラム 革新的衛星技術実証2号機, <http://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/kakushin02.html> (2020年8月26日閲覧)
- [3] 宇宙航空研究開発機構, 革新的衛星技術実証プログラム 革新的衛星技術実証3号機, <http://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/kakushin03.html> (2020年8月26日閲覧)
- [4] 今井一雅, 平社信人, 高田拓, 北村健太郎, 中谷淳, 村上幸一, 徳光政弘, KOSEN-1 チーム, 高専連携技術実証衛星 KOSEN-1 について, 第63回宇宙科学技術連合講演会, 2019年11月6-8日, 3K07 (JSASS-2019-4654), 2019.
- [5] Wakabayashi, M., T. Takada, K. Kitamura, J. Nakaya, Y. Kajimura, M. Tokumitsu, Y. Murakami, M. Shinohara, K. Imai, F. Asai, K. Shimada, Report on the 2017 and 2018 KOSEN Space Camps: Mission CanSat to Model CubeSat, Transactions of JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 9, No. 1, pp. 130-134, 2021
- [6] 坂本知也, 加藤樹, 中谷淳, 土屋華奈, 若林誠, 徳光政弘, 上田真也, 高田拓, 宇宙技術教育のた

- めの 2U モデル CubeSat の開発と活用実践：2. ミッション立案型の競技設計と実践, 工学教育 (事例紹介), 68-2, 66-71, 2020
- [7] 中谷淳, 土屋華奈, 坂本知也, 加藤樹, 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 2U モデル CubeSat の開発と活用実践：1. ミッション系空間を確保した機体開発, 工学教育 (事例紹介), 68-2, 60-65, 2020
- [8] Tokumitsu, M., F. Asai, T. Takada, M. Wakabayashi, K. Kitamura, Report on the Satellite Communication Lectures with Practical Training of Simple Receivers Conducted by the KOSEN Space Group, Transactions of JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 19, No. 1, pp. 123-129, 2021
- [9] Tokumitsu, M., 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, Procedia Computer Science, 112, 2445-2454, 2017
- [10] 宇宙航空研究開発機構, 革新的衛星技術実証 1 号機 小型実証衛星 1 号機 (RAPIS-1) の成果について, 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会 (第 57 回), 2020 年 7 月 21 日, https://www.mext.go.jp/kaigisiryu/mext_00090.html (2020 年 8 月 26 日閲覧)
- [11] Magliacane, J. (KD2BD), PREDICT - A Satellite Tracking/Orbital Prediction Program, <https://www.qsl.net/kd2bd/predict.html> (2020 年 8 月 26 日閲覧)
- [12] Miura, N. Z., Comparison and design of simplified general perturbation models (SGP4) and code for NASA Johnson Space Center, Orbital Debris Program Office, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2009
- [13] Vallado, David A., Crawford, P., Hujsak, R., Kelso, T. S., Revisiting Spacetrack Report #3, AIAA Astrodynamics Specialist Conference, 2006, <http://celestrak.com/publications/AIAA/2006-6753/AIAA-2006-6753-Rev2.pdf>.
- [14] Beech, W. A. (NJ7P), D. E. Nielsen (N7LEM), J. Taylor (N7OO), AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio, Version 2.2, <https://www.tapr.org/pdf/AX25.2.2.pdf> (2020 年 8 月 26 日閲覧)
- [15] McGuire, J., Ivan Galysh, I. (KB3MPL), Doherty, K. (KD4HBO), Heidt, H., Dave Neimi (N4AFL), FX.25 Forward Error Correction Extension to A X.25 Link Protocol For Amateur Packet Radio, Version: 0.01 DRAFT Date: 01 September 2006, http://www.stensat.org/docs/FX-25_01_06.pdf (2020 年 12 月 4 日閲覧)
- [16] 徳光政弘, 浅井文男, 高田拓, 若林誠, 知能情報処理を活用した多地点受信システムと自動受信スケジューリングシステムの実現へ向けて, JAMSAT Newsletter, 47 巻, 2 号 (通巻 293 号), pp.63-66, 2019
- [17] 寺西勇裕, 徳光政弘, 高田拓, 浅井文男, 若林誠, 超小型人工衛星テレメトリの元データ推定手法の開発:総当たり探索と推定値はずれ判断による評価実験, 米子工業高等専門学校, 第 55 巻, pp.45-52, 2020
- [18] Langner, J. (WB2OSZ), direwolf, <https://github.com/wb2osz/direwolf> (2020 年 8 月 26 日閲覧)
- [19] 株式会社ナガラ電子工業, QFH144/QFH435 カタログ, http://nagara-ant.com/publics/download/?file=/files/content_type/type019/176/201403110553065895.PDF, (2020 年 8 月 26 日閲覧)