

# 学生による超小型人工衛星プロジェクトのための衛星地上局ソフトウェアの開発

浅井 文男

Development of Satellite Ground Station Softwares for Student CubeSat Project

Fumio ASAI

学生による超小型人工衛星プロジェクトではプロジェクトサポーターによるデータの受信と提供が衛星の運用や実験に極めて重要な役割を果たしているが、プロジェクトサポーターのために最適設計された衛星地上局ソフトウェアは提供されていなかった。本研究では科学研究費補助金の支援を得て2006年度からプロジェクトサポーターのための実用的な衛星地上局ソフトウェアを設計開発し、提供している。本稿では2006年度から2009年度までの研究経過と研究成果を報告する。

## 1. 2006年度の開発ソフト

### 1.1 研究背景

学生チームによる超小型人工衛星 CubeSat の開発プロジェクトは実践的な工学教育として有効であるばかりでなく、産学官連携の活性化や斬新な宇宙ビジネスの創出を実現する可能性を秘めている。そのため世界中の大学の学生チームがチャレンジングなミッション機器を搭載した CubeSat の設計・製作・打ち上げ・運用にしのぎを削っている。我が国においてもすでに東京大学が XI-IV と XI-V、東京工業大学が CUTE- I、日本大学が SEEDS、創価大学が Negai をそれぞれ開発・打ち上げ・運用に成功し、九州工業大学などが精力的な開発を進めている。

これらの CubeSat はどれも高度約 600 ~ 800km の低軌道を周回するので、各管制局が衛星のデータを受信したり衛星にアクセスできる時間は 1 パスあたり最長でも 15 分程度に限られる。この問題を克服するため世界各地に展開する管制局や地上局をインターネットで接続し、CubeSat の遠隔操作やダウンリンクデータの共有などを実現する地上局ネットワーク (GSN) が構築されている。

### 1.2 研究内容

本研究では XI-V が送信するパケットデータを受信・取得し、ステータスデータをリアルタイムで解読するための地上局ソフトウェア (XI5RealTimeDecoder) を開発する。XI-V 開発チームはすでにパケットデータ受信ソ

フトウェア「つなたーむ」とステータスデータ解読ソフトウェア StatusDecoder を作成し、公開している。これらのソフトを使用すれば XI-V のステータスデータを取得・解読することができる。しかし、StatusDecoder にはリアルタイム解読機能が実装されていない。よって、ステータスデータの解読により衛星搭載機器の動作状況や動作環境を知るためには、まず「つなたーむ」でパケットデータを受信してファイル保存した後、ステータスデータを手作業で切り出して StatusDecoder に入力するという手間のかかる作業が必要になる。これでは XI-V の短い可視時間を有効に利用することができない。XI-V の可視範囲に入った地上局がパケットデータを受信すると同時にステータスデータを解読できれば、管制局は直ちに XI-V の動作状況や動作環境がわかり、画像データのダウンロードの可否などを素早く判断して地上局を遠隔制御することができるようになる。

本研究のおもな目的は XI5RealTimeDecoder の開発であるが、解読機能の部分を修正するだけで XI-V 以外の CubeSat のパケットデータ受信やテレメトリ解読にも対応できる汎用性と拡張性に富むソフトウェアの開発を試みる。そのため XI5RealTimeDecoder は標準的なユーザインターフェイスを備えた Windows アプリケーションとして作成する。開発環境には Microsoft 社の Visual Studio 2005 Professional を、また、開発言語には Visual C# を使用する。これにより .NET Framework 2.0 が提供するシリアル (COM ポート) 通信機能が容易に実装でき、また、可読性が高くバグが少ない良質のコーディングが可能になる。本研究の成果は

XI-V の効率的な運用の実現のみならず CubeSat/GSN プロジェクトの推進に大きく貢献できるものと期待される。

### 1.3 研究成果

ほぼ設計どおりに XI5RealTimeDecoder を開発することができ、実装した各機能について正常動作を確認した。XI5RealTimeDecoder は CubeSat 開発チームや CubeSat プロジェクトサポーターに提供して利用を図っている。

## 2. 2007 年度の開発ソフト

### 2.1 研究背景

2006 年度に開発した XI5RealTimeDecoder の実用性や操作性は XI-V 開発チームや CubeSat プロジェクトサポーターから高い評価を得た。しかし、以下のような問題点が課題として残されており、XI5RealTimeDecoder の汎用性や実用性を阻害している。

- ①受信データの表示が遅い
- ②バイナリデータのファイル保存ができない
- ③受信データや解読結果を直接、衛星管制局に送れない
- ④ハードウェア TNC が必要である

問題点①は XI-V のデータレートが 1200bps なので、ロースペックなパソコンを使わない限り大きな欠点ではない。しかし、2008 年に打ち上げられた東大の PRISM などは 9600bps のデータレートを採用しているため、XI5RealTimeDecoder のような地上局ソフトウェアをこれらの衛星に対応させるためには受信データの表示速度を高速化する必要がある。また、問題点②は 16 進ダンプ機能を実装し、テキストデータに変換することで暫定的に回避しているが、XI-V 以外の CubeSat はテレメトリや画像データのようなミッションデータをバイナリフォーマットで送信するので、地上局ソフトウェアの実用性を向上させるためにはバイナリデータをそのままダウンロードやファイル保存できるようにする必要がある。

問題点①は TNC から送られてくるシリアルデータを 1 バイトずつ取得し、バイト型配列に格納し、これを文字型キャラクタと 16 進数に変換し、更にこれらをファイル保存用の文字列型変数にそれぞれ追加してから表示するという冗長なアルゴリズムにある。問題点②は受信したシリアルデータバイトを文字型に変換することである。よって、これらの問題点を解決するためには、

- ⑤シリアルデータ受信、テキスト表示、テレメトリ解読、ファイル保存を分離し、並列処理する

⑥シリアルデータを文字型や文字列型に変換しないでバイト型のままでファイルに保存する  
 ようなアルゴリズムに改良すればよい。しかし、それには以下の問題を解決しなければならない。

一般に CubeSat と地上局間の無線データ通信には AX.25 プロトコルの UI フレームを使用したパケット通信方式が採用されている。パケットデータを構成するビット列は必ず最初と最後をフラグ (0x7E) で囲まれているので、フラグを検出すれば個々のパケットを分離・識別できる。パケットデータは TNC で調歩同期方式 (非同期方式) のシリアルデータに変換されてパソコンに送られる。フラグは TNC で取り除かれるのでシリアルデータには含まれていない。よって、TNC から送られてくるシリアルデータのどのバイトからどのバイトまでが 1 つのパケットデータを構成するのか、シリアルデータのどこまでがヘッダ (: より前の部分) でどこからがテレメトリや画像データ (: より後ろの部分) なのか、それぞれ識別することが一般的には難しい。

XI5RealTimeDecoder はシリアルデータに含まれる特定のバイトデータを検出することでこの問題に対処している。すなわち、XI-V のパケットデータは必ず最後が 0x0D または 0x0A であり、かつ、それ以外に 0x0D(0x0A) は含まないので、0x0D(0x0A) を検出したら 1 つのパケットデータをすべて受信したと判断して解読処理などを実行する。しかし、AX.25 のパケットは仕様上、任意のビット列を含むことができるので、0x0D(0x0A) が含まれるか否かやどこに含まれるかは決まっていない。また、XI5RealTimeDecoder は TNC の動作モードを COVERSE MODE に設定して使用するが、このモードで動作する TNC は 0x0A やタイムスタンプなどをパケットデータに追加することがある。この場合、TNC から送られてくるシリアルデータに含まれる特定のバイトデータをパケットの分離・識別などに使用することは一般に不可能になる。そのため、たとえば「つなたーむ」ではユーザーが設定可能な時間間隔パラメータでパケットデータを分離・抽出できるようにしている。

CubeSat は高度約 800km 程度の軌道を周回するので、可視時間 (コマンドの送信やデータ受信ができる時間) は 15 分/パス程度に限られる。この問題に対処するため世界規模で GSN の構築が進められている。GSN に参加する地上局はインターネットで接続され、無線設備の遠隔操作や受信データの配信が可能となり、衛星の可視時間を飛躍的に増大させることができるようになる。しかし、TNC とのシリアル通信機能に加えてインターネット通信機能を備えたソフトウェアは「つなたーむ」などに限られている。XI5RealTimeDecoder の活用を図るた

めには TCP/IP 通信機能を実装して GSN に対応させることが必要不可欠である。

一般に CubeSat と地上局間の無線データ通信のデジタル変調方式には 1200bps の AFSK 方式または 9600bps の GMSK 方式が採用される。よって、XI5RealTimeDecoder や「つなたーむ」などの通信端末ソフトを使用して CubeSat の送信データを受信・取得するためには、これらの変調方式に対応した TNC が必要になる。しかし、すでに TNC を製造販売する国内のメーカーはなく、また、自作するとしてもデジタル信号処理 (DSP) によるソフトウェアモデムが業界標準となった今、取り扱いの容易なモデム IC の入手が難しくなっている。こうした状況に対応するため、浅井研究室では PIC マイコンを使用した TNC を設計・開発し、CubeSat 開発チームや CubeSat プロジェクトサポーターに提供してきた。PIC TNC は安価で容易に製作できるが、FX614 のようなモデム IC を必要とすることに変わりはない。

この問題を解決する方策の一つにソフトウェア TNC の利用が挙げられる。ソフトウェア TNC とはパソコンのサウンド機能を使用して TNC の機能を実現するソフトウェアのことである。ソフトウェア TNC はハードウェア TNC に比べて復調性能は劣るが、だれでも容易に導入して CubeSat が送信する AX.25 パケットデータを受信・取得することができる。XI5RealTimeDecoder の普及と活用を図るためにはソフトウェア TNC にも対応させることが望ましい。

## 2.2 研究内容

XI5RealTimeDecoder や「つなたーむ」などの通信端末ソフトで CubeSat の送信データを受信・取得する場合、TNC は COVERSE MODE に設定して使用する。しかし、すでに述べたように COVERSE MODE はテキストデータの送受信を前提にした動作するので画像データのようなバイナリデータの受信には適していない。そこで本研究では KISS MODE と呼ばれるモードで動作する TNC に対応させたソフトウェア (XI5KissDecoder) を開発する。

KISS MODE は以下のような特徴をもつ。

- ① TNC はプロトコル処理を PC の通信ソフトに委ね、自らはモデム機能と PAD 機能だけを行う
- ② TNC と PC の間で送受信されるシリアルデータは KISS フレームと呼ばれるフォーマットに従う

KISS フレームでは 1 つのパケットデータに対応するシリアルデータの前後にデリミタ (FEND) と呼ばれる特別なバイトデータ (0x0C) がパケットの前後に付加されて

いる。また、パケットのフラグと FCS は取り除かれ、かつ、KISS SUBSTITUTION と呼ばれる特別なコード変換が行われている。KISS フレームのシリアルデータの場合、パケットデータは必ず FEND で区切られているので通信端末ソフトは容易にパケットデータを分離・抽出できる。分離されたパケットデータのフォーマットはわかっているため、パケットデータに対する各種の処理が容易にできる。そのかわり、通信端末ソフトには AX.25 プロトコル処理を実装しなければならないが、ARQ による誤り制御を行わない UI フレームの送受信だけならばビットシフトや FCS の計算など、比較的簡単な処理の実装だけで済む。

開発環境は Visual Studio 2005 を使用し、開発言語には Visual C# を使用する。実装するおもな機能やユーザーインターフェイスは XI5RealTimeDecoder に準拠する。ただし、KISS MODE 対応の有効性を検証するため、テレメトリ解読の対象とする CubeSat はテキストフォーマットの XI-V ではなく、バイナリフォーマットの SEEDS とする。SEEDS は日本大学の学生チームが開発した CubeSat で、2008 年 9 月に打ち上げられ正常稼働している。

KISS MODE はほぼすべてのハードウェア TNC がサポートしている。KISS MODE TNC はバイナリデータの送受信や衛星地上局の自動運用に適しているため、それに対応した XI5KissDecoder は CubeSat プロジェクトの進展に大きな役割を果たすものと期待される。

XI5RealTimeDecoder を GSN に対応させるためには「つなたーむ」のように TCP/IP 通信機能を追加実装すればよい。しかし、この方法ではシリアルデータの受信と表示、テレメトリの解読と解読結果のファイル保存に加えて、TCP/IP 通信のプロトコル処理を並列的に行う必要が発生し、受信データの表示が遅いという問題点をより深刻化させてしまう可能性がある。そこで本研究ではクライアント・サーバ型の地上局ソフトウェア (XI5NetworkDecoder) を開発する。すなわち、サーバソフトにはシリアルデータの受信とネットワークデータへの変換だけを担当させ、受信データの表示、テレメトリの解読、受信データの加工や解読結果のファイル保存などはクライアントソフトに担当させる。これにより負荷の分散と低減が行われ、高速な動作が実現できる。

ソフトの開発環境は Visual Studio 2005 を使用し、開発言語には Visual C# を使用する。サーバにソフトにはシリアル通信とソケット通信のインターフェイス機能だけを実装する。クライアントソフトに実装するおもな機能やユーザーインターフェイスはサーバ接続機能を除いて XI5RealTimeDecoder に準拠する。

パソコンのサウンド機能を利用するソフトウェア TNC の一つに AGW Packet Engine (AGWPE) がある。AGWPE はパソコンのオーディオ端子を入出力インターフェイスとして使用するサーバタイプのソフトウェアで、モデム機能、AX.25 プロトコル処理および TCP/IP 通信機能を備えている。AGWPE の特徴はフリーソフトであることに加えて、クライアントソフトを開発するために必要なソフトウェア開発キット (AGW SDK) が提供されていることである。AGW SDK は Win32 API の一つである Winsock Interface を使用してサーバ (AGWPE) とクライアント間で TCPIP 通信 (ソケット通信) を行うため、AgwSock と呼ばれるインターフェイスを提供している。AgwSock を利用すればさまざまな用途に応じたクライアントソフトが容易に開発できる。そこで本研究では AgwSock を利用して AGWPE に対応した地上局ソフトウェア (XI5AgwDecoder) を開発する。

### 2.3 研究成果

XI5KissDecoder は当初の設計どおりに開発でき、KISS MODE TNC と組み合わせて使用することで完全自動で XI- V のステータスデータの受信・解読・保存ができることを確かめた。XI5NetWorkDecoder に関してはサーバおよびクライアントとも動作が不安定で、実用性に不可欠な機能も幾つか実装できなかった。XI5AgwDecoder は AGWPE と組み合わせて使用することで XI- V のステータスデータを受信・解読することができることを確かめた。

## 3. 2008 年度の開発ソフト

### 3.1 研究背景

2006 年度の研究では XI- V のステータスデータをリアルタイムで取得・解読するための XI5RealTimeDecoder を開発した。2007 年度の研究では XI5RealTimeDecoder の問題点の解消と実用化を図るため、3 種類の地上局ソフトウェアを開発した。第 1 は KISS MODE TNC に対応させた XI5KissSDecoder で、地上局の自動運用を実現することを目的としている。第 2 はクライアント・サーバ型の XI5NetworkDecoder で、GSN への対応を目指したソフトである。第 3 はソフトウェア TNC (AGWPE) のクライアントとして動作する XI5AgwDecoder である。

XI5AgwDecoder は以下のような利点と欠点をもつ。  
①ハードウェア TNC がなくても XI- V のステータスデータを取得・解読することができる

- ②サーバの AGWPE と TCP/IP 通信するので、ネットワークに接続された任意の PC で利用できる
- ③ XI- V のテレメトリしか解読できない
- ④バイナリデータ取得機能が未実装である  
XI5NetworkDecoder は以下のような利点と欠点をもつ。
- ⑤クライアント・サーバ両方のソフトウェアで構成されるので、AGWPE のようなソフトを必要としない
- ⑥リスト形式で受信データが表示され、必要なフレームを選択して解読できる
- ⑦ XI- V のステータスデータしか解読できず、XI- V 以外の CubeSat に対応させるのが難しい仕様になっている
- ⑧バイナリデータの取得機能や解読結果の保存機能などが実装されていない

### 3.2 研究内容

本研究では XI- V と SEEDS が送信する AX.25 パケットデータを取得し、テレメトリを含む各種データを解読するためのソフト TNC 対応型地上局ソフトウェアを開発する。具体的には XI5AgwDecoder のユーザーインターフェイス (UI) を XI5NetworkDecoder の UI に改良し、かつ、これらのソフトに未実装であった受信データのファイル保存機能や、これらの CubeSat が送信する各種データの解読機能を実装した地上局ソフトウェア (AgwDecoder) を Visual Studio 2008 C# を使用して開発する。

また、本研究では XI- V と SEEDS に加えて東京工業大学の CUTE-17+APD II が送信する AX.25 パケットデータを取得し、テレメトリを含む各種データを解読するためのサーバ・クライアント型ソフトウェアを開発する。具体的には XI5NetworkDecoder の UI とクライアント・サーバによる分散処理手法は踏襲しつつ、問題点の解消と機能強化を図った地上局ソフトウェア (NetworkDecoder) を Visual Studio 2008 C# を使用して開発する。

### 3.3 研究成果

AgwDecoder に関してはほぼ設計どおりのソフトウェアが開発でき、XI- V と SEEDS のテレメトリデータを受信・解読・保存できることも確かめられた。しかし、AGWPE は 0x00 を 0x2E に変換してクライアントに送信することが判明したので、接続するサーバを AGWPE からクライアント・サーバ型ソフト (NetworkDecoder) のサーバに変更したクライアントソフトとして完成させた。

NetworkDecoder についてはサーバのバグフィックス

と基本的な機能強化を図り、実用性を向上させることができた。クライアントもバグフィックスと未実装であった解読結果保存機能などを実装し、XI-VとSEEDSのテレメトリ解読は実現できた。しかし、CUTE-17+APD IIのテレメトリ解読への対応も試みたが、動作が不安定になる問題が発生し、今後の課題として残った。

## 4. 2009年度の開発ソフト

### 4.1 研究背景

2007年度の研究においてKISS MODE TNCに対応したXI5KissDecoderを開発した。これにより、地上局の自動運用が可能になるとともに、バイナリ形式のデータも正常に取得できるようになった。しかし、XI5KissDecoderはXI-Vのステータスデータしか解読できず、それ以外のCubeSatに対応させるにはソースコードに記述された解読関数などを書き換える必要があった。

また、2007年度と2008年度でNetworkDecoderも開発した。NetworkDecoderはサーバを地上局設備で稼働させておけば、ネットワークで接続された複数のクライアントで準リアルタイムにテレメトリデータを受信・解読・保存することができるので、可視時間が短いCubeSatの効率的な運用を可能にする。さらにNetworkDecoderではテレメトリデータの解読情報をソースコードではなく、外部ファイルに記述する方式(プラグイン方式)を採用し、外部ファイルを作成・追加するだけで複数のCubeSatのテレメトリデータを解読できるという汎用性を実現した。しかし、以下の課題が未解決のままであり、さらにNetworkDecoderはKISS MODE TNCには対応していないので地上局の自動運用には使用することができない。

- ①サーバの受信データログ機能の実装
- ②サーバのセキュリティ機能の実装
- ③クライアントの外部ファイル作成ツールの開発
- ④クライアントのエクスポート機能の実装
- ⑤クライアントとサーバの連携機能の実装

### 4.2 研究内容

本研究では地上局の自動運用を目的とした汎用性のある地上局ソフトウェア(KissDecoder)の開発を行う。具体的にはXI5KissDecoderに実装されたテレメトリ解読情報を外部ファイル化(プラグイン化)することで、複数のCubeSatに対応させることを試みる。これが実現できれば現在稼働しているCubeSatのみならず、今後新たに開発されるCubeSatのテレメトリデータも地上

局の完全自動運用で容易かつ効率的に受信・解読・保存できるようになり、CubeSatプロジェクトの推進に大きく貢献できるものと考えられる。

NetworkDecoderの外部ファイルの記述形式は分かりにくく作成するのが難しいので、テレメトリの解読と解読結果の保存機能をKissDecoderから切り離して別のソフトとして独立させ、KissDecoderが終了時にそのソフトを起動して、テレメトリが解読・保存されるようにする。この方法だと個々のCubeSatの解読情報を内蔵した解読・保存専用ソフト(プラグインソフト)を各CubeSatごとに作成する必要があるが、外部ファイルを作成する手間と外部ソフトを作成する手間はあまり変わらない。また、この方法だとKissDecoderにはCubeSatのコールサインを識別し、それに対応したプラグインソフトを呼び出す機能を実装するだけで済む。

また、本研究では上記の①と⑤の機能をそれぞれ実装して実用性を更に向上させたNetworkDecoderを開発する。上記の5つの課題のうち、これら2つの課題に取り組む理由は他の課題と比較して必要性が高いからであるが、具体的な必要性と意義はそれぞれ以下の通りである。

CubeSatはテレメトリ(ハウスキーピング:H.K.)データとともにミッションデータも送信している。テレメトリデータは衛星搭載機器の動作状況や動作環境の計測データで、ミッションデータはリモートセンシングのような衛星独自のミッション機器のデータである。テレメトリデータは衛星の運用に不可欠の情報源であり、迅速に解読する必要があるため、NetworkDecoderのクライアントにはテレメトリデータの解読機能が実装された。一方、ミッションデータは必ずしもリアルタイムに解読する必要はなく、一定量のデータを蓄積した後に衛星開発チームに提供するか、開発チーム提供の解析ソフトで処理すればよい。よって、NetworkDecoderのクライアントはもちろん、サーバにもミッションデータの取得を意図した受信データログ機能は実装されなかった。そのため、NetworkDecoderのサーバを衛星管制局やサポーター地上局で稼働させてもクライアントを接続しなければ、テレメトリデータを含め、サーバが受信したデータはすべて無駄になってしまう。サーバに受信データログ機能を実装すれば、クライアントの接続の有無にかかわらず、サーバが起動中に受信したCubeSatのデータをすべてファイルに保存することができ、ミッションデータの解析などに利用できるようになる。

NetworkDecoderのクライアントとサーバはTCP/IP通信をするが、それらの操作と動作は独立している。すなわち、利用者はまずサーバを立ち上げた後、クライア

ント接続監視モードにする。次にクライアントを起動してサーバを選択した後、接続する。サーバの起動と同時にクライアント接続監視モードにする機能は実装されているが、それ以外の操作は手動で行う必要がある。そこで、以下のようなクライアントとサーバの連携機能をそれぞれ実装し、サーバを起動するだけでクライアントの起動とサーバへの接続などが自動的に行えるようにする。

- ①サーバの起動でクライアントも自動的に起動する機能
  - ②クライアントの起動でサーバに自動的に接続する機能
- これにより衛星管制局やサポーター地上局の運用者は、ローカルな環境ではサーバを起動するだけで、また、リモートの環境ではクライアントを起動するだけでテレメトリデータが受信・解読できるようになり、衛星の効率的な運用や効果的なサポートが可能になる。

#### 4.3 研究成果

プラグインソフト方式を採用した KissDecoder を開発した。メインソフト (KisstTerm) と SEEDS および CUTE-17+APD II 用のプラグインソフトが設計通り連携動作することを含めた実用性に関する動作検証を行い、正常動作を確認できた。NetworkDecoder に関しては受信データログ機能の実装はできたが、クライアントとサーバの連携機能については、サーバによるクライアントの自動機能の実装のみを完了した。

#### 謝 辞

本研究は平成 18 年度科学研究費補助金 (課題番号 16500570)、平成 19-20 年度科学研究費補助金 (課題番号 19500772) および平成 21 年度科学研究費補助金 (課題番号 21500854) の支援を受けた。また、ソフトウェアの開発には円子武、河野匡宏、佐藤直樹、寺坂武紘、上窪善裕、染川貴仁、田村典久、松田涼代の各氏の協力を得た。これらの支援と協力に感謝します。