

## 教育用超小型人工衛星 CANSAT の通信コンポーネント開発に関する研究

浅井文男 奈良工業高等専門学校情報工学科教授

### 1 はじめに

近年、日本や欧米諸国の高等教育機関において CubeSat/CanSat プロジェクトが注目され、活発に展開されている。CubeSat プロジェクトは 1999 年に開催された USSS (University Space Systems Symposium) においてスタンフォード大学教授 Robert Twiggs が提案した斬新なアイデアに基づく PBL スタイルの工学教育プログラムである。日本と欧米の大学を中心に、学生たちがチームを編成して一辺 10cm、重量 1kg 以下の超小型人工衛星の設計・製作・運用し、各チームが目標に定めたミッションの達成を目指す活動を展開する。東京大学と東京工業大学の学生チームが設計・開発した世界初の超小型人工衛星 CubeSat の XI-IV と CUTE-I は 2003 年 6 月に打ち上げられ、ともに所定のミッションを達成することで CubeSat プロジェクトの有効性を実証した。また、XI-IV と CUTE-I の後継機である XI-V と CUTE-1.7+APD も打ち上げおよび定常運用と初期運用にそれぞれ成功している。2006 年 7 月、日本大学の学生チームが開発した SEEDS を含む 14 機の CubeSat は残念ながらロケット打ち上げに失敗したが、9 月には北海道工業大学の学生チームが開発した HIT-SAT が成功裏に打ち上げられた。さらに 2008 年 4 月には日大の CEEDS2 と東工大の CUTE-1.7+APD II を含む 5 機の CubeSat が打ち上げられ、初期運用が行われている。現在、国内では東大の PRISM、九州大学の QSAT、創価大学の Excelsior、香川大学の STARS-I、都立産業技術高等専門学校の KKS-1 などの開発が進められており、PRISM、STARS-I、KKS-1 の 3 機は 2008 年末に H2A ロケットで打ち上げ予定の GOSAT のピギーバック衛星に選定されている。

CanSat は 1998 年の USSS において Robert Twiggs が提案した 350ml ジュース缶サイズおよび OpenCan と呼ばれる約 3 倍サイズの模擬人工衛星の総称で、CubeSat 開発のトレーニングモデルとして位置づけられている。開発チームのモチベーション向上や交流促進を図るため、CanSat を小型のロケットや気球で約 100m~5km の大気中に放出し、目標地点を目指してパラシュートやパラフォイルで落下し、走行する(ローバタイプの場合)過程でチーム独自のミッションを試み、達成記録を競い合う競技会が開催される。国際競技会としては 1999 年よりアメリカのネバダ州ブラックロック砂漠で毎年開催されている ARLISS (A Rocket Launch for International Student Satellites) が定着しているが、国内においても秋田県能代市や香川県高松市で競技会が開催されるようになり、ARLISS 参加を目指す学生チームが実践的なスキルアップを図る格好の機会となっている。また、大学とベンチャー企業との連携で CanSat のキットが開発され、高校でも CanSat の教育利用が試みられるようになり、2008 年には高校生チームによる競技会も開催される予定である。

CubeSat/CanSat には筐体、分離、姿勢制御、データ処理、通信、電源など、さまざまなコンポーネントが搭載され、主要なコンポーネントは学生チームがそれぞれ設計・開発している。創意工夫やアイデアを競うミッションコンポーネントは学生たちが独自に開発することに重要な意義があるが、筐体や通信コンポーネントなどは必ずしもオリジナリティが必要ではなく、むしろ標準的な規格や仕様に従うことが要求される。通信コンポーネントの場合、周波数割り当てや免許取得の容易さから通常、送信装置はアマチュア無線機器、データ変調方式は Bel1202、通信プロトコルは AX.25 が採用されている。Bel1202 と AX.25 プロトコルはアマチュア無線によるパケット通信の世界標準規格なので、地上局も市販の音声交信用無線機とターミナルノードコントローラ (TNC) で構築でき、エラーフリーの無線データ通信が可能になるという利点がある。しかし、Bel1202 と AX.25 プロトコルをベースにした通信コンポーネントの製作や地上局の構築は、それぞれ Bel1202 モデム IC や TNC の入手が難しいという問題点を抱えている。かつては TCM3105 や AM7910 など、Bel1202 規格のモデム IC が量産され、メーカー製の TNC も容易に入手することができた。しかし、近年ではデジタル信号処理によるソフトウェアモデムが無線データ通信の業界標準となり、これらのモデム IC や国内メーカーの TNC はすでに製造中止になっている。よって学生チームは唯一、現在でも製造・販売されている Bel1202 モデム IC である Consumer Microcircuits Limited 社の FX614 を使用して通信コンポーネントを製作することや、中古の TNC を入手して地上局を構築することを余儀なくされている。

本研究では CanSat の通信コンポーネントの開発に関する調査・研究を行い、CanSat 搭載用のターミナルノードコントローラを開発した。市販の CanSat キットは完成度や機能が高く、製作も容易であるが約 20 万円もするので気軽に利用できない。そこで、できる限り安価に CanSat の通信コンポーネントを製作できる装

置や部品を調査し、通信コンポーネントには秋月電子通商の GPS ユニットと特定省電力無線モジュールキットを使用することにした。また、マイクロコントローラにはサイプレス社の PSoC マイコン (CY8C27443-24PI) を採用し、PSoC マイコンのアナログブロックを使用してモデム機能を実現する手法を考案した。具体的には PSoC 内部にバンドパスフィルタを構成することで Be11202 規格のオーディオ信号を発生させ、1200bps-AFSK 方式の変調動作をさせる。PSoC のファームウェアには AX.25 プロトコルの UI フレーム生成機能を実装したので、PSoC マイコンだけで GPS データなどをパケット送信できる。開発した TNC に GPS ユニットと無線モジュールを接続した通信コンポーネントのプロトタイプをブレッドボード上で試作し、一定周期で送信される GPS データが市販の TNC と特定省電力無線機で構成される受信装置で正常に受信できることを確認した。しかし PSoC マイコンと異なり、GPS ユニットと無線モジュールをユニバーサル基板に取り付けることは難しく、また、専用のプリント基板を設計・製作しても、アンテナの取り付け等では専用工具を使用した金属加工が必要になるため、試作した通信コンポーネントのキット化は断念し、残りの研究期間は CanSat や CubeSat の送信データを受信し、解読や解析するための通信ソフトウェアの開発を行った。

通信ソフトウェアは Microsoft 社の Visual Studio 2008 C# を使用して開発した。 .Net Framework 対応のアプリケーションにすることで、開発者側にとってはシリアル通信や TCP/IP 通信などの機能が容易に実装でき、利用者側にとってはインストールトラブルが少なく、Windows 2000/Xp/Vista で同じソフトが使用できるというメリットが生まれる。 CubeSat/CanSat の送信データには GPS データのような ASCII データもあるが、バイナリデータも含まれることが多い。従来から使用されている汎用のシリアル通信ソフトは TNC を CONVERSE MODE で使用することを前提にしているため、バイナリデータを受信すると不具合が生じる。そこで、第 1 にバイナリデータの受信に適した KISS MODE 用の通信ソフト (Kiss\_Decoder) を作成し、KISS MODE の有効性を検証するため、CUTE-1.7+APD II と SEEDS2 が送信するバイナリデータの解読機能を実装した。

CubeSat/CanSat プロジェクトの進展とともに地上局や受信装置をネットワークで接続し、データの取得効率を向上させる試みも始まっている。そこで第 2 に、CubeSat/CanSat プロジェクトにおけるネットワーク化に対応した 2 種類の通信ソフトを作成した。ひとつはデータの受信と解読をサーバとクライアントで分散処理するクライアント・サーバ型の通信ソフト (Network\_Decoder) で、通常の TNC と組み合わせて使用する。もうひとつは AGW Packet Engine (AGWPE) と呼ばれるソフトウェア TNC に対応した通信ソフト (Agw\_Decoder) である。 AGWPE は Windows アプリケーションタイプのフリーソフトウェアで、モデム機能、AX.25 プロトコル処理機能、TCP/IP 通信機能が実装され、サーバとして動作する。 Agw\_Decoder は AGWPE のクライアントとして動作するので、AGWPE と Agw\_Decoder を使用すれば、TNC を入手しなくても CubeSat/CanSat のデータを受信・解読することができる。 Network\_Decoder と Agw\_Decoder は対応する TNC に違いがあるが、どちらもネットワークに接続した複数のパソコンでデータをほぼリアルタイムに受信・解読できるという共通点をもつ。その実用性を評価するため、Network\_Decoder と Agw\_Decoder には XI-V のテレメトリ解読機能を実装した。

## 2 ターミナルノードコントローラの開発

### 2-1 PSoC マイコン

Cypress Microsystems 社の 8 ビット汎用ワンチップマイクロコントローラ PSoC は従来のワンチップマイコンに実装されている PWM や UART などの標準的なデジタルジュールに加えて、スイッチド・キャパシタを使用しオペアンプなどのアナログモジュールも搭載している。これらのアナログモジュールを利用して、最初に Be11202 モデム用のファームウェアとハードウェアをそれぞれ作成した。具体的には Be11202 規格の変調動作をオペアンプモジュールで構成したバンドパスフィルタによるフィルタリングで実現した。ターゲットデバイスにはブレッドボード上でハード及びソフト試作が容易にできる 28 ピン DIP パッケージ CY8C27443-24PI を採用した。C 言語による開発環境は PSoC Designer とビルトインされた C コンパイラを使用した。ROM ライタには Mini Programmer を使用した。

### 2-2 モデム用ファームウェア

PSoC の PWM モジュールで発生させた矩形波をバンドパスフィルタに通過させて基本波成分を抽出した。具体的には I/O ポートにデジタル信号入力端子 (Din 端子) とアナログ信号出力端子 (Aout 端子) を設定し、Din 端子電圧レベルが High (+5V) であれば Aout 端子から出力される正弦波の周波数が 1200Hz、Low (0V) であれば 2200Hz になるようにパラメータを調整することで Be11202 規格の変調動作を実現した。図 1 にモデム用ファームウェアの動作フローチャートを示す。

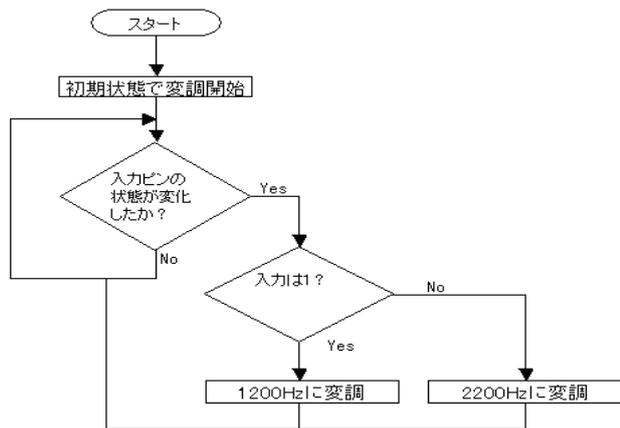


図1 モデム動作のフローチャート

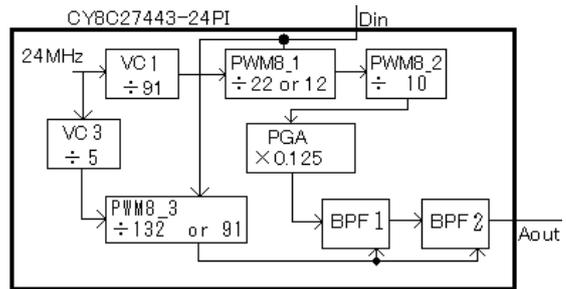


図2 モデム用 PSoC のモジュール構成

### 2-3 モデム用ハードウェア

モデム動作をさせる PSoC のモジュール構成を図 2 に示す。PWM で矩形波の分周を行い、BPF で基本波の抽出を行う。具体的には Din 端子が High ならば PWM8\_1 と PWM8\_3 の分周比は 22 と 132、Low ならば 12 と 91 にそれぞれ設定する。また、PWM8\_2 の分周比は 10 に設定する。これで Din 端子が High なら  $24\text{MHz}/91=263736\text{kHz}$  のクロック周波数を 220 で除算して 1198.8Hz の矩形が生成でき、Din 端子が Low ならクロック周波数を 12 で除算して 2197.8Hz の矩形波が生成できる。PWM8\_2 は BPF の動作周波数を生成する。Din 端子にデジタル信号が入力されると、ビット 0 (Low) と 1 (High) に対してそれぞれ 2200Hz と 1200Hz の正弦波が Aout 端子に出力され、PSoC は Bell1202 モデムと同じ変調動作を行う。

### 2-4 バンドパスフィルタの設計

PSoC Designer はアナログモジュールで構成するバンドパスフィルタ (BPF) を設計する機能をサポートしている。これを使用して図 2 のハードウェアに実装する BPF を設計した。その周波数特性を図 3 と図 4 に示す。

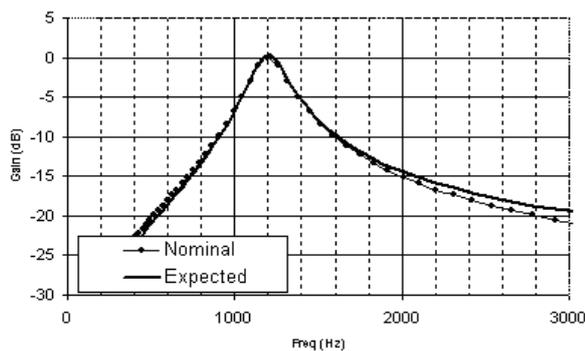


図3 1200Hz-BPF の周波数特性

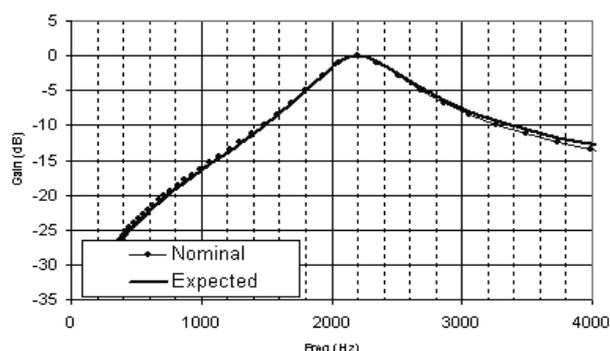


図4 2200Hz-BPF の周波数特性

### 2-5 PSoC モデムの性能

Din 端子にビット 0 (Low) と 1 (High) を入力したとき、Aout 端子に出力される信号の観測波形とスペクトルを図 5 と図 6、図 7 と図 8 にそれぞれ示す。基本波の周波数はそれぞれ 2230Hz と 1217Hz であり、第 3 高調波の振幅は基本波よりも約 -30dB である。Bell1202 モデム IC である FX614 との性能比較を表 1 に示す。

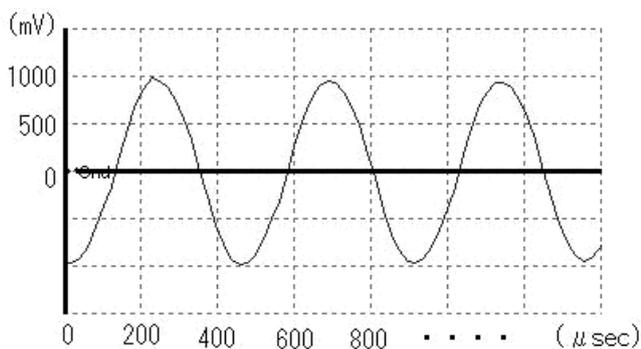


図5 ビット0入力時の出力波形

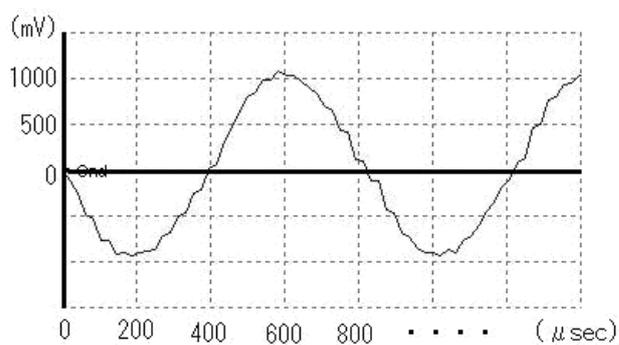


図6 ビット1入力時の出力波形

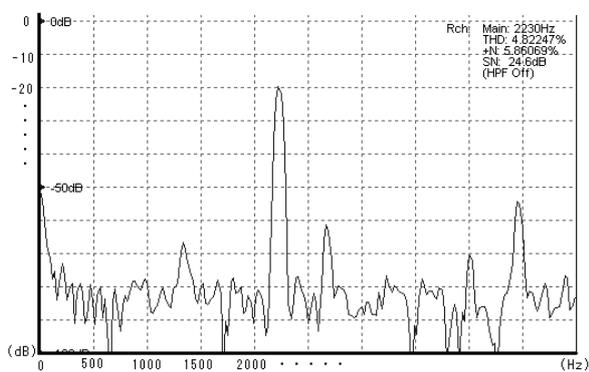


図7 ビット0入力時の周波数スペクトル



図8 ビット1入力時の周波数スペクトル

表1 PSoC モデムと FX614 の変調特性の比較

入力信号レベル	PSoC		FX614	
	High	Low	High	Low
基本波周波数 (Hz)	1217	2230	1204	2203
周波数偏差 (Hz)	+17	+30	+4	+3

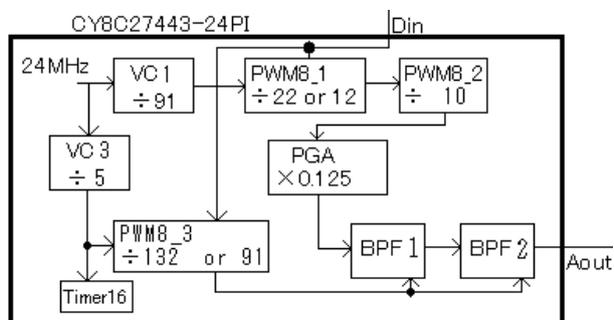


図10 TNC用PSoCのモジュール構成

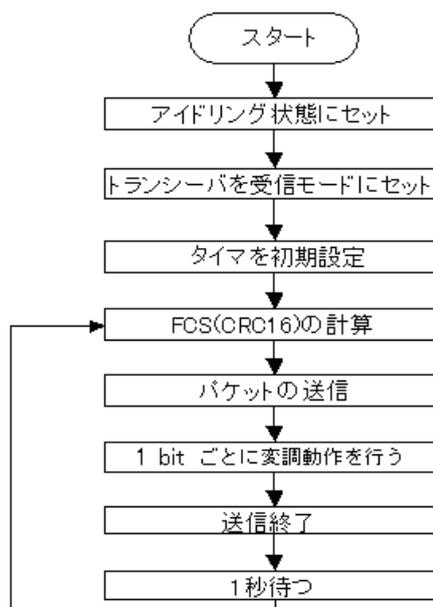


図9 送信動作のフローチャート

## 2-6 TNC 用ファームウェア

PSoC モデムに AX.25 プロトコル UI フレーム生成機能を実装し、PSoC マイコン 1 個だけでパケットデータが送信できる TNC (PSoC-TNC) を開発した。ファームウェアは先行研究 [1], [2] で完成している PIC マイコン用のパケット送信用ファームウェアを移植することで作成した。PSoC-TNC の送信動作アルゴリズムのフローチャートを図 9 に示す。図 9 において、「1 ビットごとに変調動作を行う」が図 1 の変調動作に対応している。

## 2-7 TNC 用ハードウェア

設計した PSoC-TNC のモジュール構成を図 10 に示す。Timer16 は 16 ビットのカウンタで 1200bps のデータレートを生成するのに使用している。PSoC-TNC に GPS ユニットを接続し、市販の TNC と無線機を使用した受信装置を構成して動作検証実験を行った。その結果、開発した PSoC-TNC で GPS データを一定周期でパケット送信できることを確かめた。また、送信パケットは受信装置で正常に受信・解読され、表 1 に示す周波数偏差は実用上問題ないことも確認した。

# 3 通信ソフトウェアの開発

## 3-1 KISS MODE TNC

CubeSat/CanSat が送信する AX.25 プロトコルの UI フレームを構成するパケット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 つのパケットを構成するのか識別することは難しい。送信データがすべてテキストデータで構成される場合は末尾に改行コード (0x0D) を入れてやればパケットを識別できるようになるが、バイナリデータを含む場合はこの方法は使えない。また、従来の通信ソフトは TNC の動作モードを CONVERSE MODE に設定して使用するが、CONVERSE MODE の TNC は LF コード (0x0A) やタイムスタンプなどをパケットデータに追加するので CubeSat/CanSat のデータ解析に支障をきたすことがある。こうした問題は KISS MODE で動作する TNC に対応した通信ソフトを使用することで完全に解消することができる。

KISS MODE TNC は以下のように動作するので、おもにバイナリデータの自動送受信に利用されている。

- ① TNC は AX.25 プロトコル処理を通信ソフトに任せ、自らはモデム機能と PAD 機能だけを行う
- ② TNC とパソコン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 つのパケットに対応するシリアルデータの前後にデリミタと呼ばれる特別なバイトデータ (0xC0) が付加されている。ただし、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 フレームは必ずデリミタで区切られているので通信ソフトは容易に個々のパケットを分離・識別できる。分離されたパケットのデータフォーマットはわかっているので、テレメトリデータなどの抽出・解読などの処理も容易にできる。その替わり、通信ソフトには 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 フレームの受信だけならばアドレスデータのビットシフトなど、比較的簡単な処理の実装だけで済む。

## 3-2 Kiss\_Decoder

Kiss\_Decoder は KISS MODE TNC に対応した通信ソフトである。動作検証のためバイナリデータである CUTE-1.7+APD II と SEEDS2 の送信データを解読する機能を実装した。CUTE-1.7+APD II のデータを受信・解読している動作画面を図 11 に示す。画面左下が受信データ、左上が抽出フレーム、右が解読結果をそれぞれ表示するウィンドである。動作検証により、パケットを受信すると瞬時にテレメトリフレームの抽出とテレメトリの解読が安定かつ確実に行われ、バイナリデータの受信に対する KISS MODE の有効性を確かめることができた。

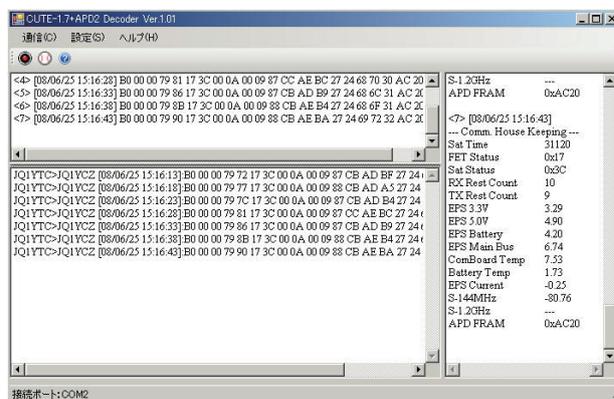


図 11 Kiss\_Decoder の動作画面

### 3-3 クライアント・サーバによる負荷分散

CubeSat 地上局ネットワークの構築に代表される衛星通信分野におけるネットワーク利用の進展に対応して、TNC とシリアル通信を行うための通信端末ソフトやテレメトリ解読ソフトにもネットワーク通信機能を実装する必要性が高まっている。シリアル通信、ネットワーク通信、テレメトリ解読などの各種機能をひとつのソフトに実装すると、処理速度が低下するなどの問題点が発生し易くなる。ネットワーク通信の部分にクライアント・サーバ型を採用すればこうした問題を防げるばかりでなく、開発環境標準のクラスライブラリが使用できるのでソフト開発も格段に容易になる。具体的にはサーバソフトに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とで負荷分散を実現することにした。

### 3-4 Network\_Decoder

Network\_Decoder はクライアント・サーバ型の通信ソフトである。図 12 に示すように、サーバを起動するとタスクトレイに登録されるアイコンをクリックすることで、動作の設定・切替やクライアント接続情報の表示などが行える。

クライアントをサーバに接続すると、サーバが TNC から受信したデータは TCP/IP 通信でクライアントに送られる。クライアントはデータを受信するとフォーマットを調べ、データの種類に対応した情報をリスト形式でウィンドに表示する。リストからテレメトリフレームをひとつ選ぶと、

解読結果が右のウィンドにリスト形式で表示される。図 13 に XI-V のデータを受信し、テレメトリを解読したクライアントソフトの動作画面を示す。色の違いで衛星やデータの種類が分かるようになっている。100BASE-TX の LAN 上で 5 台のクライアントをサーバに接続して動作検証を行い、5 台同時にデータを受信・表示されることを確かめた。インターネット上での動作検証は未実施であるが、遅延が実用性を阻害する場合は TCP ではなく UDP を使用することで問題解決が図れると考えている。

Network\_Decoder はデータの識別・解読情報をプログラムに内蔵するのではなく、外部ファイルに記述する方式を採用しているため、比較的容易に XI-V 以外の CubeSat/CanSat に対応させることができる。現在、CUTE-1.7+APD II と SEEDS2 の解読情報ファイルを作成している段階である。

### 3-5 Agw\_Decoder

Agw\_Decoder はソフトウェア TNC である AGWPE のクライアントとして動作する。Agw\_Decoder は AGWPE と TCP/IP で通信するので、基本動作や使用方法は Network\_Decoder と類似している。しかし TNC を必要としないので、高校生チームによる CanSat の製作や競技会への参加に役立つと考えている。図 14 に XI-V のテレメトリデータを受信・解読している動作画面を示す。AGWPE と Agw\_Decoder の間で送受信されるデータのフォーマットはバイナリパケットの分離・識別に適しているため、ユーザーインターフェイスを Network\_Decoder のクライアントに統一して実用性を向上させたい。



図 12 サーバによる情報提示

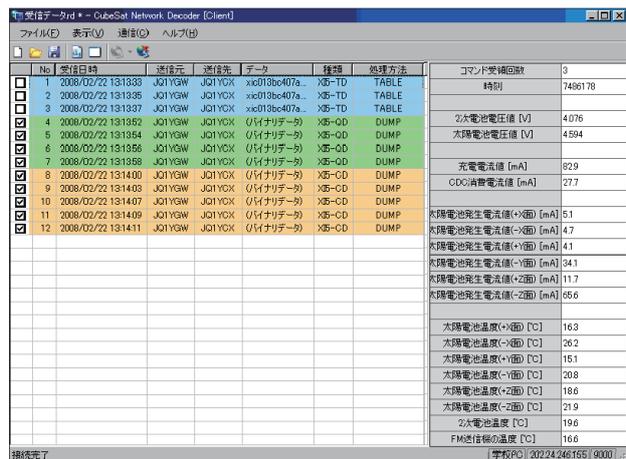


図 13 クライアントソフトの動作画面

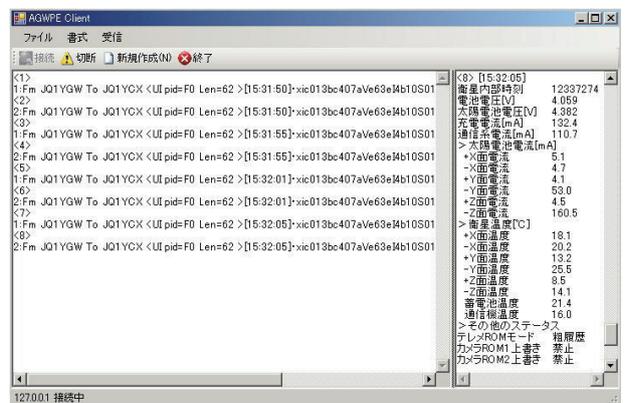


図 14 Agw\_Decoder の動作画面

## 4 おわりに

本研究では第1に教育用超小型人工衛星 CanSat の通信コンポーネントに関する調査・研究を行った。具体的には CanSat に搭載するターミナルノードコントローラを PSoC マイクロコントローラを使用して設計・開発し、性能評価を行った。その結果、1個の PSoC マイコンに Be11202 変調機能と AX.25UI フレーム生成機能の両方を実装した PSoC-TNC で市販の TNC と同等の変調特性と送信動作を実現できることが確かめた。PSoC-TNC に GPS ユニットと特定小電力無線モジュールを接続した通信コンポーネントのプロトタイプを試作して動作検証を行ったが、金属加工が不可避になるため、通信コンポーネントのキット化は断念した。

第2に CanSat/CubeSat の送信データを受信し、解読や解析するための通信ソフトウェアの開発を行った。開発環境には Visual Studio 2008 C#を使用したので動作環境として .Net Framework 2.0 以上が必要になる。しかし、配布パッケージのファイルサイズが小さくインストールトラブルが発生しにくい、標準的な Windows アプリケーションの GUI を備えるなどの利点がある。動作検証の結果、開発した3種類の通信ソフトはそれぞれ設計通りに動作し、CanSat/CubeSat のデータ受信・解読に使用できることが確かめられた。これらのソフトはバイナリデータの受信や解読、地上局(受信装置)の自動運用やネットワーク化に適した基本機能を備えているが、アプリケーションとしての機能や操作性が統一されていない。これらを統一して実用性と汎用性を向上させた通信ソフトウェアの開発が今後の課題である。

### 【謝辞】

本研究においてはマイコンのファームウェアと Windows ソフトウェアの開発に橋本一輝、円子 武、河野匡宏、寺坂武紘、佐藤直樹の各氏の協力を得ました。各氏の熱心な協力と電気通信普及財団の暖かい支援に深く感謝します。

### 【参考文献】

- [1] 浅井文男, 学校教育におけるアマチュア通信衛星を利用した電気通信教育, 電気通信普及財団 平成 14 年度研究調査報告書, No.17, pp.158-166, (2002).
- [2] 浅井文男, 学校教育におけるアマチュア通信衛星を利用した電気通信教育(継続), 電気通信普及財団 平成 15 年度研究調査報告書, No.18, pp.129-134, (2003).

### 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
XI-V RealTimeDecoder の開発	JAMSAT ニュースレター, Vol.35, No.237, p.12	2007. 6
大学発超小型人工衛星を利用した情報教育 アウトリーチ教材の開発	第 27 回高等専門学校情報処理教育 研究発表会, 論文集, pp.95-97	2007. 8
大学発超小型人工衛星を利用するアウトリーチ 教材の開発	教育システム情報学会第 32 回全国 大会, 講演論文集, pp.382-383	2007. 9
大学発超小型人工衛星を利用した情報技術 教育アウトリーチ教材の開発	平成 19 年度情報教育研究集会, 講演論文集, pp.195-196	2007.11
専攻科工学実験に学外コンテストを利用する 試み	第 13 回高専シンポジウム in 久留 米, 研究発表予稿集, pp.125	2008. 1
サーバ・クライアント型 XI-V テレメトリ解 読ソフトウェアの開発	教育システム情報学会関西支部 第 22 回学生研究発表会, 予稿集, pp.25-26	2008. 3
教育用模擬人工衛星 CanSat のための無線 データ通信ユニットの開発	奈良工業高等専門学校研究紀要, Vol.43, pp.33-37	2008. 3