

# 小型深宇宙探査実験機における自動制御システムの設計手法

○黒岩史登, 奥山圭一, BENDOUKHA Sidi Ahmed (九州工業大学),  
西尾正則 (愛知工科大学), 森田大貴 (鹿児島大学)

Auto System Control Method for the deep space probe

Fumito Kuroiwa, Kei-ichi Okuyama, BENDOUKHA Sidi Ahmed (Kyushu Institute of Technology),  
Masanori Nishio (Aichi Institute of Technology), Hiroki Morita (Kagoshima University)

Key Words: Space Engineering, Deep Space small probe, radiation tolerance

## Abstract

A small, deep-space probe, Shinen2, was developed under collaboration with the Kyushu Institute of Technology and Kagoshima University. The Shinen2 was launched by an H2-A rocket as a piggyback space probe with the JAXA's asteroid probe, Hayabusa 2, in 2014. The outer shape of the Shinen2 has a quasi-spherical diameter of 50 cm, and a mass of approximately 18 kg. An example of a deep-space probe to explore beyond the moon beyond has not been developed by any university, and no private companies exist. This paper describes the methods of the total system control of Shinen2 and compares measurement data and received data for checking the system. Besides, it shows result of radiation testing for measurement of radiation tolerance.

## 1. 緒言

九州工業大学は2014年の12月にJAXAの小惑星探査機「はやぶさ2」の相乗り副ペイロードの一つとして深宇宙通信実験機「しんえん2」を開発した。しんえん2では、ミッションの一つに月以遠での深宇宙通信がある。「しんえん2」の制御系では、この深宇宙通信を安定させるために各Unitへの健全性確認を行い、また、HK(House Keeping) dataを地上へ送信することでシステム全体が正常に機能しているかを評価、確認することを行った。本稿では、「しんえん2」の制御系手法について、「しんえん2」の電気基板における放射線耐性について、そして、受信データより「しんえん2」の宇宙での動作結果を報告する。

## 2. しんえん2

しんえん2は九州工業大学と鹿児島大学の共同開発により開発中の超小型深宇宙探査機である。図1にしんえん2の外観図を示す。

この探査機には、アマチュア無線帯を用いた深宇宙通信の実証を目的としており、3つの通信システムを持つ。そして、WSJT(Weak Signal communication, by K1JT)通信方式を基にした通信を行い、超小型探査機の深宇宙通信を行う。

また、探査機の軽量化を図るため、構造材料にCFRTP(Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics)を一次

構造として使用し、宇宙機としては世界で初めての  
実利用を試みる。



図1 しんえん2の外観図

しんえん2は超小型の宇宙機であることから多くの機器を搭載できる質量の余裕がない。このため、熱制御方式は完全受動型とし、また、熱制御のためのヒータも搭載していない。

宇宙機が深宇宙を飛行するとき、その宇宙機の主な熱源は太陽と自身の発熱である。この宇宙機が回転するとき、太陽熱流束はほぼ均一化でき、表面温度を平均化できる<sup>1)</sup>。この熱制御を実現するため、しんえん2の外形はできる限り球形に近づけた。

3. 「しんえん2」の深宇宙通信形式

「しんえん2」には,WSJT<sup>2-3)</sup>をベースとした通信方式を採用した.図2に WSJT 通信方式の概要を示す.

200Hz から 1.4 kHz において 200Hz ステップで 7 本のスペクトルのスロットを用意し,このうち最も低周波を常時出力する.ここでは,200Hz にあたる.残りの 6 本のスペクトルを 0 から 9 までの数字および制御符号に割り当てる.送信電力を一定にするため,また,スロットあたりの送信電力をなるべく大きくするために,6本のうち2本が1,残りが0となるようスペクトルの組み合わせを選ぶ.これにより,スペクトル線1本あたりの電力は $0.8W/3 \approx 0.2W$ となる.スペクトルの本数は,常時出力する本数を含めて必ず 3 本となることから,これをデータのエラー検出に用いる.

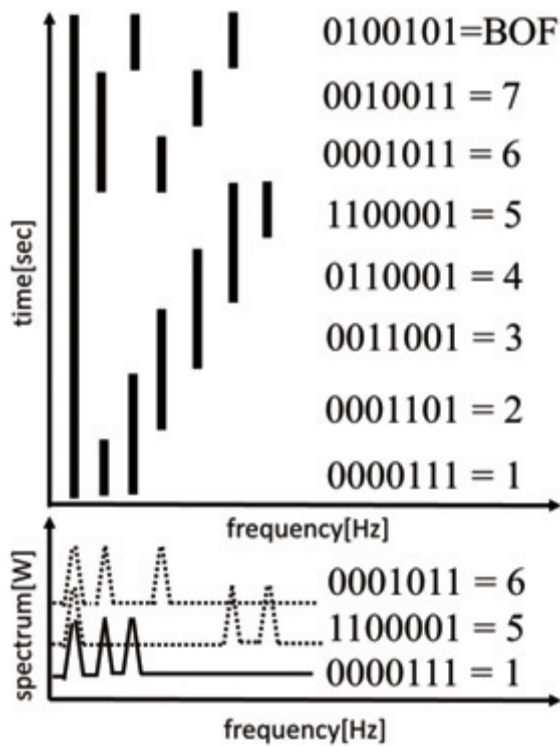


図 2 WSJT 通信方式

図3にしんえん2における WSJT 通信方式について示す.しんえん2では,各周波数それぞれに 4 つの信号を対応するようにした.

図3の左グラフにおいて,縦軸は周波数,横軸はスペクトル.右のグラフにおいて,横軸は時間を表す.図3のように 3 つの数字の並びを解析することでデータを得る.表1に解析における対応コードを示す.

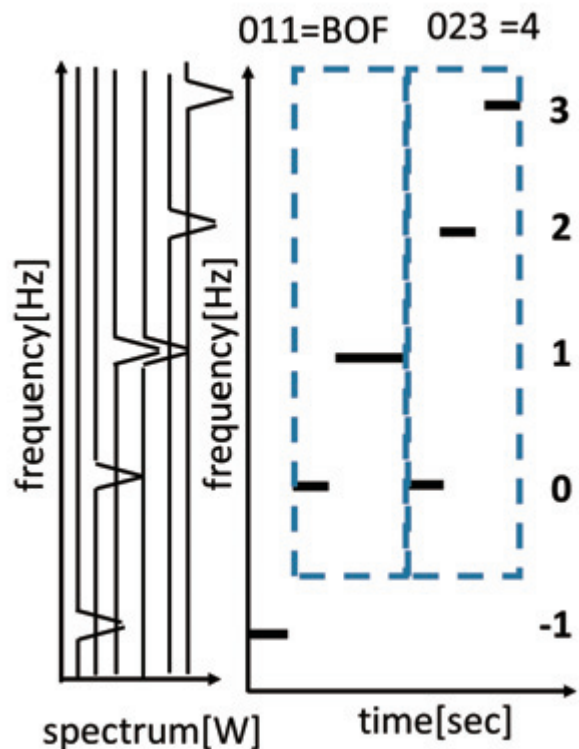


図 3 しんえん2における WSJT 通信方式

表 1 データ解析における対応コード表

コード	文字	コード	文字
011	BOF	023	4
012	0	031	5
013	1	032	6
021	2	033	7
022	3		

例えば,図3において,地球局が”011”を受信した際,それは”Beginning of Flame”を示す.さらに,”023”を受信した際には”4”を示す.このダウンリンクデータは,13 bytes で構成される.表2にダウンリンクデータの構成表を示す.シンクロコードは 2bytes, BOF が 1/3 byte, クラスコードが 2/3 byte, そして,それぞれのデータが 1 byte ずつあり,最後に解析用コードが 2 bytes で構成されている.

さらに,しんえん2の WSJT における通信速度は 1 bps であり,13 bytes を受信するのに 2 分必要である.これはしんえん2における放出後の回転について考慮したためである.

表 2 ダウンリンクデータの構成

1	2	3	4	5	6
Sync1	Sync2	BOF+ Class	DATA1	DATA2	DATA3
7	8	9	10	11	
DATA4	DATA5	DATA6	DATA7	DATA8	
12	13				
CRC1	CRC2				

4. しんえん2制御系

図4にしんえん2電気機器ブロックダイアグラムを示す。SAPは、Solar Array Panel, Txは送信機,Rxは受信機である。しんえん2は、主に3つのUnitで構成されている。電力を供給するPCU(Power Control Unit),通信を行うCCU(Communication Control Unit),そして、それらのUnitを管理、監視するSCU(Shinen2 Control Unit)がある。このSCUは、”God SCU”と”Slave SCU”の2つのCPUで構成される。

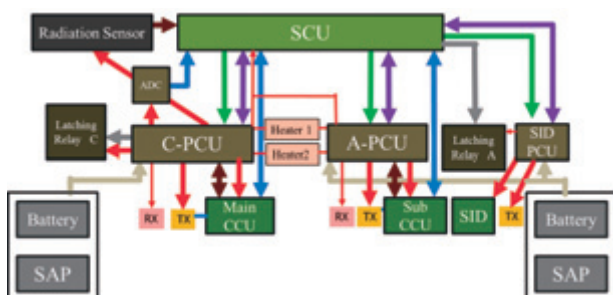


図 4 しんえん2電気機器ブロックダイアグラム

< God SCU >

“God SCU”には主に2つのタスクがある。

- PCUの制御
- Slave SCU,各PCUへの健全性の確認

“God SCU”は生存確認信号を各基板へ送り,各基板はその信号を受信するとフィードバック信号を”God SCU”へ返すことでその基板の健全性,並びに,生存を確認する。

< Slave SCU >

“Slave SCU”には主に3つのタスクがある。

- HK data, 放射線測定データの測定,並びに,EEPROMへの保存
- CCUへHK data,放射線測定データを送信する。
- 深宇宙通信対策として,距離によって送信データの繰り返し回数を変化させる。

この繰り返し回数は,地球から月までは6 slotsのデータを2回ずつCCUへ送信する。月以遠では,2 slotsのデータを12回ずつCCUへ送信する。この深宇宙通信を考慮した対策を講じることで後のデータ解析の際にデータの整合性を高めることが可能となる。

以上のように”God SCU”, ”Slave SCU”で構成されるSCUに関しては生存確認,CCUへの送信回数の変化など「しんえん2」のミッションに大きく影響の出るUnitだということがわかる。

5. しんえん2電子基板における放射線耐性

しんえん2の核ともいえるSCUのCPUにはPIC16F877を使用している。この度,放射線下においてSCUの健全性確認システムの放射線耐性を測定した。今回行った試験はSingle Event Effect(SEE)試験である。Single Eventとは1個の重イオンが入射し,電離作用により高度の電荷が生成されることにより引き起こされる現象である。生成された電荷が半導体素子中を流れることによって,一時的もしくは定常的な故障が発生する。

今回の放射線試験における環境は表3に示す。また,試験イメージを図5に示す。素子の表面を溶かしより放射線環境を再現しやすいデギャップという処理をPIC16F877に加える。そして,放射線源を上下に移動させることで低い放射線環境から厳しい放射線環境まで再現している。

表 3 SEE試験の放射線環境

Radiation type	Cf-252
Pressure	1.0*10 <sup>2</sup> [Pa]
Irradiation time	1800 [sec]
Irradiation device	PIC16F877

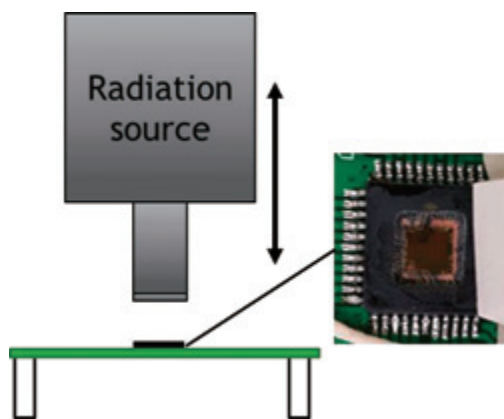


図 5 SEE試験イメージ図

測定の結果を図 6 にそれぞれ示す.低い放射線環境下においては健全性確認信号の他素子への送信間隔が変化したが,システムの動作不全に繋がる現象ではなかった. 厳しい放射線環境下にて健全性確認信号が送信されない現象を確認し,その後,Single Event Latch up 現象を確認した.Single Event Latch up とは CMOS 集積回路の中に存在する PNPN 接合である寄生サイリスタ構造の部分に電荷が発生すると,電極間が導通状態なり,過電流が流れる現象のことである.ブレーカーにより再起動がかかっているが,その後も健全性確認信号が送信されない現象を確認した.

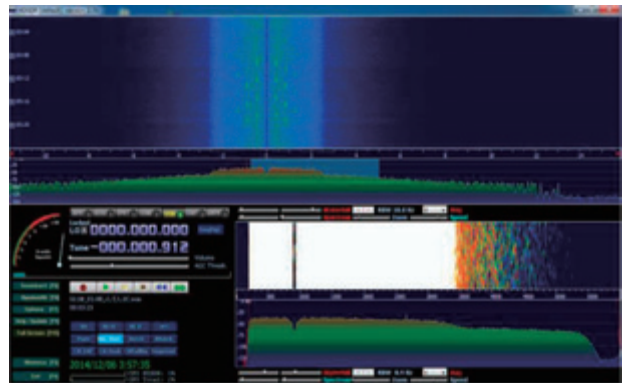
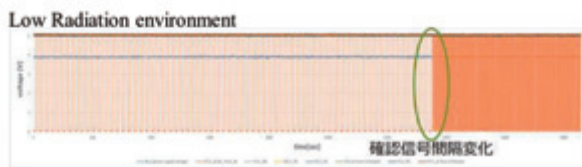
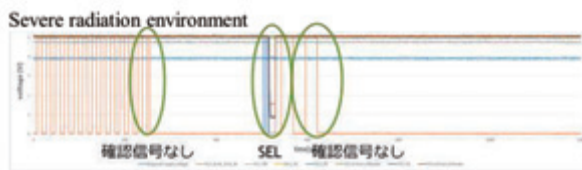


図 7 しんえん2受信データ



(a) Low Radiation environment



(b) Severe radiation environment

図 6 SEE 試験結果

送信データの出力部においては,どの放射線環境下においても動作不全を起こすことはなかった.また,再度,厳しい放射線環境下での SEE 試験を行った際には健全性確認信号の動作不良はごくわずかであり,SEL 現象も発生しないことが確認されている.

6. しんえん2受信データ解析

しんえん2のデータは,はアマチュア無線家によって開発されたフリーソフトウェアである HSDR(High Definition Software Defined Radio)<sup>4)</sup>を使用してデータ受信を行われた.しんえん2の実際の受信データを図7に示す.図7のように,WSJT のシグナルで送られており,データを解析した.受信し解析できた HK data を表5に示す.

表 5 2014/12/3-2014/12/5 までの解析データ

Type C battery Voltage	3.88 [V] to 4.06 [V]	Type A bus voltage	3.88 [V] to 4.02 [V]
Type C Battery Current	0.14 [A] to 0.25 [A]	Type A Bus Current	0.65 [A] to 0.88 [A]
Type A Bus Voltage	3.88 [V] to 4.04 [V]	Type C Battery Voltage	-
Strain Gage 1	0.01 to 0.0139	Strain Gage 1	0.145 to 0.146
Strain Gage 2	0.01 to 0.0139	Strain Gage 2	0.0137
Type A Battery Thermal	15.92 [°C] to 22.32 [°C]	Type C Battery Thermal	13.2 [°C]
Type A Battery Top thermal	18 [°C] to 23.2[°C]	Type A Battery Top thermal	23.78 [°C]
Surface Z + thermal	15.14 [°C] to 19.2 [°C]	Surface Z thermal	17.86 [°C] to 31.6 [°C]

Message-1	-	SAS_A_I	0.05 [A] - 0.833 [A]
Message-2	-	SAS_B_I	0.07 [A] - 0.14 [A]
Message-3	-	SAS_C_I	0.43 [A] - 1.64 [A]
Message-4	-	SAS_D_I	0.06 [A] - 1.196 [A]
Message-5	-	SAS_E_I	0.402 [A]
Message-6	-	SAS_F_I	0.010 [A] - 0.68 [A]
Type A Battery Thermal	13.57 [°C] to 23 [°C]	SAS_G_I	0.039 [A]
Type A Bottom thermal	14 [°C] to 31.6 [°C]	Surface Z thermal	19 [°C] - 21.8 [°C]

Type C	1.343 [V]	Type A	0.78 [A]
--------	-----------	--------	----------



RX-RSSI	to 1.6 [V]	Bus Current	to 1.74 [A]
Type C RX-I	0.022 [A] to 0.026 [A]	Main Tx I	0.554 [A] to 0.71 [A]
Type C RX-NSQ	0.02[V] to 0.14 [V]	MAIN NASA I	0.45 [A] to 0.71 [A]
Type A RX-RSSI	0.62 [V] to 0.64 [V]	SUB-Tx-I	0.397 [A] to 0.8 [A]
Type A RX-I	0.025 [A] to 0.03 [A]	Type A Bus Current	0.42 [A] to 1.58 [A]
Type A RX-NSQ	0.02 [V]	NASA Top thermal	19.45 [°C] to 22.9 [°C]
Tx- main Thermal <-Y>	27 [°C] to 36 [°C]		
Tx- sub Thermal <-Z>	21.4 [°C] to 33.9 [°C]		

しんえん2は打ち上げ後6日目にあたる231万kmが最長距離となった。しかし、3日間のみ解析が可能であるデータを所得し、その後は解析困難であった。3日間のデータからバッテリー電圧、電流、温度ともに安定している。そして、特に変わった値を示すものもないことから深宇宙でも正常に動作していることがわかる。

次に、搭載してある放射線測定機器の受信データを図8に示す。縦軸は放射線強度を表し、横軸は距離を示す。

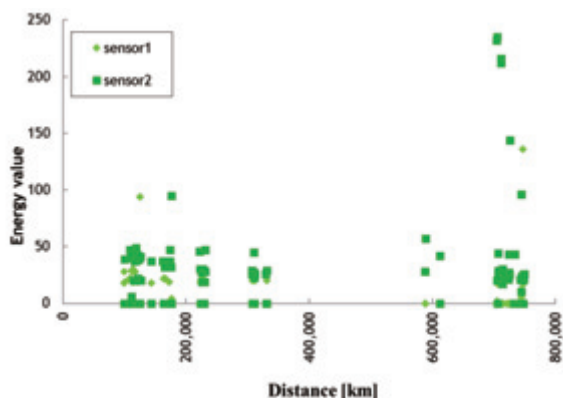


図 8 放射線測定機器受信データ解析結果

図8からもわかるように月以遠である38万km以上の距離における放射線量は月以内に比べて倍以上の放射線が照射されたことがわかる。

これらの解析データからしんえん2はデータを各々測定し地球へ送信できているため正常に動作していると考えられる。

### 7. まとめ

しんえん2は深宇宙通信をミッションの一つとして掲げており、その通信方式はWSJTである。その通信を行うためにSCUによって探査実験機自体を制御し、各電子基板の健全性、生存を確認し、地球へデータの送信を行っている。また、深宇宙通信をより遠い距離で行い、データの解析の精度を上げるために、SCUからCCUへの通信の回数を変化させている。

SEE放射線試験の結果からCPUにあたるPIC16F877による健全性確認信号にて放射線環境が過酷な場合に意図しない現象を確認されたが、データ送信部においては動作不全を起こすことなく送信され続けた。

データ解析値の結果からバッテリーの電圧、電流、温度ともに正常値を示しており、他の受信データも特に変わった値を示すものはなかったために深宇宙においても正常動作をしていくことが受信結果よりわかる。

### 参考文献

- 1) 伊藤浩司, 岩上敏男, 日比野茂, 奥山圭一, 中須賀真一: ガンマ放射線を照射された PEEK/CFRP の機械的特性, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2011.
- 2) Joe Taylor, WSJT6 User's Guide and Reference Manual, August 10, 2006
- 3) Joe Taylor, WSJT: New Software for VHF Meteor-Scatter Communication, QST, December 2001, pp. 36-41.
- 4) HDSDR home page, available form <http://www.hdsdr.de/>