

# 論文

## かぐや衛星搭載波形補そく器における高効率波形データ取得法

後藤 由貴<sup>†</sup>笠原 禎也<sup>†</sup>橋本 弘藏<sup>††</sup>

### Study on the High Performance Waveform Capture on Board the KAGUYA Spacecraft

Yoshitaka GOTO<sup>†</sup>, Yoshiya KASAHARA<sup>†</sup>, and Kozo HASHIMOTO<sup>††</sup>

あらまし 本論文では、月探査衛星かぐやに搭載された波形補そく器による効率の良い波形データ取得法について述べる。かぐや衛星の波形補そく器では、オンボードのDSP (Digital Signal Processor) を用いて観測した波形データを周波数解析し、強度の強い周波数領域を特定することで地上に送られる無駄なデータを大幅に削減する機能が実装されている。この機能は等価的に地上への伝送容量を向上させることにつながり、伝送レートの制約が厳しい衛星波動観測において重要な技術となる。本機能の有効性は、あけぼの衛星の波形データを用いて実証し、適切なパラメータ設定法について考察した。

キーワード かぐや衛星, 自然波動観測, ソフトウェア受信器, デジタル信号処理

### 1. ま え が き

セレーネプロジェクトはアポロ計画以来最大の月探査計画である[1]。「月の科学」「月での科学」「月からの科学」を目的として、10数個の高性能な観測器を載せた大型の衛星「かぐや (SELENE)」が2007年、日本のH-IIAロケットで打ち上げられ、月周回軌道に載せられる。かぐや衛星には電磁波を計測する波形補そく器 (Waveform capture: WFC) と呼ばれる受信器が搭載されており、月周辺の自然電磁波が重点的に観測される予定である。かぐや衛星と月、太陽、地球の相対的な位置関係に応じて、月ウェイク、太陽電波バースト、オーロラキロメトリック放射、静電孤立波など様々な波動現象の詳細なデータ取得が期待されている[2], [3]。

宇宙空間での電磁波動観測において、古くから行われてきた周波数スペクトルの取得だけでなく位相情報を含めた波形そのものの観測が重要な役割を果たすようになっている。しかし、広帯域で連続な波形データを地上に送るのは伝送容量の制約から難しく、あらか

じめ取得周波数帯を狭帯域に設計するか、若しくは間欠的に観測するという手法がとられてきた。このため、特徴的な波形をもつ現象の統計的な把握やプラズマ粒子観測との相関など興味深い課題が数多く残されているのが波形観測における現状である。このような問題に対し、衛星上で自律的に観測データの取捨選択を行う技術が新たな知見の獲得のために必要とされている。

科学衛星による波形観測は、従来のアナログ受信器からデジタル受信器へと移り変わり、機上にて複雑なデータ処理が実現できるようになった。あけぼの衛星 (1989年～) [4] や GEOTAIL 衛星 (1992年～) [5] では、波形の振幅に対する対数圧縮という簡便な方法で伝送容量の効率化を図ってきたのに対し、いわゆるソフトウェア受信器を搭載したのぞみ衛星 (1996年～) [6] では波形圧縮のための  $\mu$ -codec など、従来と比較して複雑な処理がオンボードに実装されるようになった。ロケットによる観測においてもデジタル受信器が使われるようになり、効率的な波形データ取得のためにサブバンド分割による圧縮アルゴリズムが実装されたという例もある[7], [8]。海外ではNASAのWIND衛星 (1994年～) [9] から波動観測器の本格的なデジタル化が進み、IMAGE衛星 (2000年～) [10]、ESA/NASA共同開発のCluster衛星 (2001年～) [11] と機上データ処理の高度化が進められてきた。特にCluster衛星では、DWP (Digital

<sup>†</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科, 金沢市

Graduate School of Natural Science and Technology,  
Kanazawa University, Kanazawa-shi, 920-1192 Japan

<sup>††</sup> 京都大学生存圏研究所, 宇治市

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto  
University, Gokasho, Uji-shi, 611-0011 Japan

wave processor) と呼ばれる専用のデジタル素子を搭載することにより、オンボードでの波形の圧縮や粒子との相関解析などが試みられている。このように波動観測器の性能は、得られる科学的成果に直接かわるため継続的な向上が図られている。

本論文では、2. でかぐや衛星搭載波動観測器の概要を示した後、3. で効率良く波形データを取得するために開発・実装した観測周波数帯域の自動選択機能について述べる。更に 4. にてあけぼの衛星で取得された連続波形データを用いて動作検証した結果を示し、同機能のパラメータ設定に関する検討を行う。ここで実現した機能は、かぐや衛星だけでなく将来の衛星による波形観測、特に伝送容量の小さな惑星探査ミッションにおいて重要な役割を果たすと考えられる。

## 2. かぐや衛星搭載波動観測器

図 1 にかぐや衛星の外観図を示す。自然波動観測のために月レーダサウンダ装置 (LRS-SDR) と共用の全長 30 m の直交 2 対のダイポールアンテナが装備されている。かぐや衛星はスピンしない三軸制御の衛星であり、アンテナ面が常に月面に平行になるように姿勢制御される。

かぐや衛星の波形補そく器 (LRS-WFC) [3] は WFC-low と WFC-high の二つのサブシステムからなる。WFC-low は 100 Hz から 100 kHz の電界波形を、WFC-high は 1 kHz から 1 MHz の電界スペクトルを取得することを目的として設計されている。従来の衛星観測と比較すると広帯域の「波形」を直接サンプルするのが LRS-WFC の特徴である。図 2 に LRS-WFC のブロック図を示す。帯域通過フィルタ (図中の HPF, LPF, BPF), 増幅器 (AMP) などアナログ回路の後段にデジタル信号処理用の素子 (PDC, FIFO, DSP, SRAM, DPRAM, FPGA) が実装されており、オンボードのデジタル信号処理により様々な機能を柔軟に実現できるようになっている。各デジタル回路素子は表 1 のとおりである。これらの素子は月周辺での放射線に対する耐性及び熱的制約を考慮して選定されたものである。

LRS-WFC では、WFC-high で 2 成分、WFC-low で 3 成分の合計 5 成分の信号を独立に取得できる。WFC-high では、図 1 の  $x, y$  軸に沿ったアンテナをそれぞれダイポールアンテナ (A1-A3, A2-A4) として用い、誘起される電界にカットオフ 1 kHz の高域通過フィルタ、1 MHz の低域通過フィルタ、20 dB のゲ

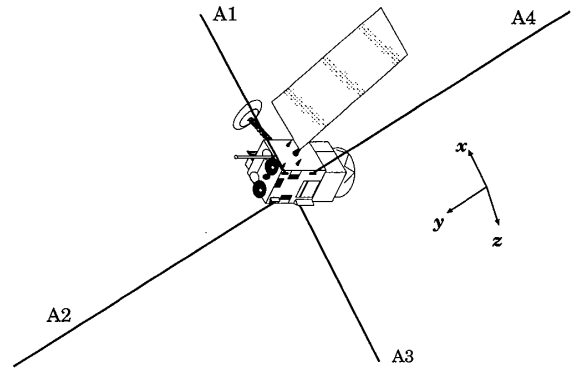


図 1 かぐや衛星の外観図

Fig. 1 Overview of the KAGUYA spacecraft.

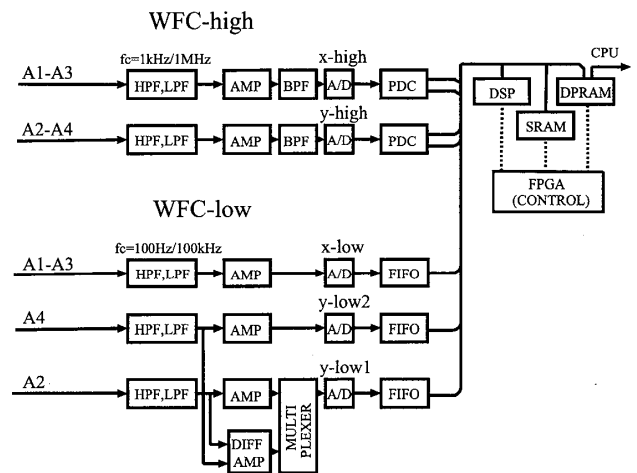


図 2 LRS-WFC のブロック図

Fig. 2 Block diagram of the LRS-WFC.

表 1 デジタル回路素子の型番

Table 1 Model of the digital ICs.

Components	Type	Company
DSP	SMJ320C31GFAM50	TI
PDC	HSP50214BVI	Intersil
SRAM	WS512K32-25G1UM	White Electronics Designs
DPRAM	IDT7024L25GB	IDT
FIFO	IDT7207L30DB	IDT
FPGA	XQVR300-4CB228M	XILINX
A/D	AD9260AS	Analog devices

インを制御できる増幅器を 2 段、更にコマンドにより制御可能な数種類の帯域通過フィルタを施した信号成分  $x$ -high,  $y$ -high が取得される。一方、WFC-low では、 $x$  軸に沿ったアンテナをダイポールアンテナ (A1-A3),  $y$  軸に沿ったアンテナを 2 本のモノポールアンテナ (A2, A4) として用い、カットオフ 100 Hz の高域通過フィルタ、100 kHz の低域通過フィルタ及び 20 dB のゲイン調整のできる増幅器を 2 段通して得られる信号成分  $x$ -low,  $y$ -low1,  $y$ -low2 が取得される。

ただし、 $y$ -low1 はマルチプレクサにより  $y$  軸に沿ったダイポール成分 (A2-A4) も選択できるようになっている。

各信号は A-D 変換器により 16 ビットのデジタル信号に変換される。各 A-D 変換器では 8 倍のオーバーサンプリングされた後、デシメーション処理が施される。出力レートは WFC-high が 2.5 MHz、WFC-low が 250 kHz または 125 kHz から選択できるようになっている。WFC-low のデジタル波形データは FIFO にいったん蓄積された後、DSP により処理が行われる。本論文では、この DSP による波形処理について詳しく述べる。WFC-high の信号は PDC のデジタル掃引及びデシメーション処理によりデータレートが下げられた後、DSP にて高速フーリエ変換処理が施される。

LRS-WFC に割り当てられる地上へのデータ伝送レートは 160 kbit/s、80 kbit/s、4 kbit/s の 3 種類であり、アンテナを共用しているレーダサウンダ装置の観測モードに応じて切り換えられる。4 kbit/s のときには WFC-low による波形観測は行われず、WFC-high のスペクトル観測のみとなる。160 kbit/s、80 kbit/s が割り当てられた場合、WFC-low の波形観測と WFC-high のスペクトル観測の両方が行われるが、そのデータ比は 8:2 とされる。通常、80 kbit/s (WFC-low に対して 64 kbit/s) 割当時は  $x$ -low、 $y$ -low1、 $y$ -low2 の中から 1 成分だけの観測、160 kbit/s (WFC-low に対して 128 kbit/s) 割当時は  $x$ -low と  $y$ -low1 (ダイポール成分選択) 若しくは  $y$ -low1 (モノポール成分選択) と  $y$ -low2 の 2 成分の観測となる。かぐや衛星は非スピン衛星であるが  $x$ -low と  $y$ -low1 の 2 成分観測により到来波の偏波面の測定を可能としている。また、 $y$ -low1 と  $y$ -low2 の観測により静電孤立波の伝搬方向・速度の測定が可能である。

### 3. 広帯域波形データの高効率取得法

#### 3.1 概要

衛星搭載波動観測器における最も重要な問題の一つは、衛星-地上間の伝送容量の制約である。一般に波動観測器で生成される生データは伝送容量に比べ非常に大きいので、すべての観測データを地上に伝送するのは難しい。LRS-WFC では、WFC-low の波形データの生成レートが 250 k サンプル/s $\times$ 16 bit $\times$ 3 成分=15 Mbit/s であるのに対し、割り当てられている最大テレメトリ容量は 128 kbit/s であり、地上に伝送

できる波形は機上生成データの 1/100 以下である。すなわち、オンボード処理でいかにデータを縮小するかが効果的な波形観測を行うための重要なポイントである。

波形観測ではハードウェアの制約条件のもと、できるだけ連続的なデータを取得することが要求される。このためリアルタイム伝送が難しい衛星観測では、連続波形をいったん機上のバッファに蓄積し、少しずつ地上に伝送する手法がとられる。LRS-WFC で実現した自動周波数帯域選択機能は、(i) 機上のバッファ中の波形データを周波数解析しどの帯域に強い波動が存在するかを調べる判定機能、(ii) 取得する周波数帯域幅を調整するデシメーション機能、そして (iii) データをひずみなく圧縮するエントロピー符号化の三つの機能からなる。これら従来の衛星観測と比べて複雑なデジタル信号処理を機上で行うことによりデータ取得効率の向上を図っている。各機能はオンボードの DSP 上で動くソフトウェアにて実現しているが、本章にてその詳細を述べる。

#### 3.2 広帯域波形データの取得

デジタル化された信号  $x$ -low、 $y$ -low1、 $y$ -low2 はそれぞれ約 4,000 サンプルのデータを保存できる FIFO に蓄えられるが、更なる連続データを取得するために SRAM 上に波形蓄積用のバッファの確保を行った。DSP の割込み機能を利用することにより、データが FIFO 容量の半分まで蓄積された時点で観測対象となる成分のみを波形蓄積バッファに転送する。これにより取得できる波形のデータ長は FIFO の容量制限を受けることなく最大で 750,000 サンプルとなった。表 2 に波形蓄積バッファに蓄積可能な最大データ長を示す。最大データ長にかかわる有効帯域上限は、観測対象や観測領域に応じた運用計画に基づき設定されることになる。

蓄積バッファの波形データは DSP による処理の後、パケット化され DPRAM 上のリングバッファを通して、前述の割り当てられたデータ伝送レートで衛星のバス機器へ送られる。波形蓄積バッファのすべての

表 2 波形蓄積バッファに蓄積できる最大データ長  
Table 2 Maximum length of waveforms stored in the buffer.

	有効帯域上限 (A-D 出力レート)	
	50 kHz (125 kHz)	100 kHz (250 kHz)
1 成分観測	6 秒	3 秒
2 成分観測	3 秒	1.5 秒

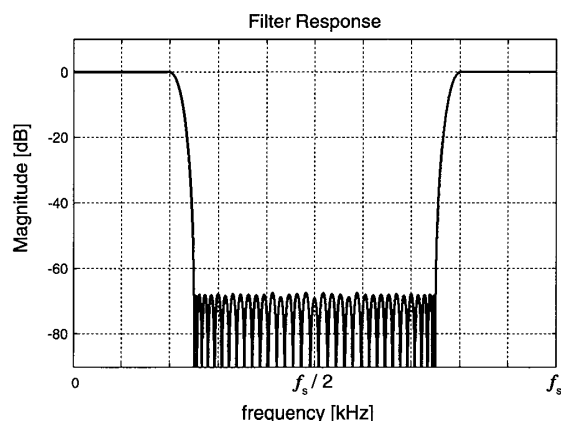


図3 デシメーションフィルタの周波数特性

Fig.3 Frequency response of a digital decimation filter.

データの packets 化が完了すると、再び FIFO をいったんリセットし次の連続波形データをバッファに蓄積する仕組みになっている。バッファへのデータ蓄積の時間に比べて、データ伝送に要する時間の方が長いいため間欠的な波形データの取得となる。つまり、観測頻度を向上させるためには、波形蓄積バッファのデータをいかに縮小してから伝送するかが課題となる。

データの取得頻度向上のため、デシメーション機能の実装を行った。これにより取得する周波数帯域幅は減少するものの観測頻度を向上させることができる。デシメーション処理は、図3の周波数特性をもったアンチエイリアシングフィルタを通した後、1/2のダウンサンプルを行うことにより実現した。複数の周波数帯域幅に対応するため3段構成とし、最終的なサンプリングを1/2, 1/4, 1/8から選択できるようになっている。フィルタはFIRにより実現し、タップ長は63、サンプリング周波数250kHzに対し通過域は50kHzに設計されている。遮断周波数帯域において-67dB以下を実現している。

実際にWFCのフライトモデルを用いてデシメーション処理のテストを行ったところ、波形蓄積用バッファの全データの伝送に要する時間は表3のようになり、ダウンサンプルの割合に応じてデータの取得間隔が1/2, 1/4, 1/8となることが確認できた。有効周波数帯域の上限を100kHzとした場合、約120秒おきに3秒間のデータ取得となるのに対し、帯域の上限を6.25kHzまで下げることで、15秒おきに6秒間と高頻度で波形データを取得できるようになる。このオンボードのデシメーション処理により、観測周波数帯域及びデータ取得頻度に関する自由度を向上させる

表3 帯域制限された波形データの取得可能頻度；表中の最大データ長は1成分観測時の値

Table 3 Transmission time of the waveform data.

A-D の出力レート 250 kHz (最大データ長 3 秒)		
ダウンサンプル	データ取得間隔	有効帯域上限
なし	117 秒	100 kHz
1/2	59 秒	50 kHz
1/4	29 秒	25 kHz
1/8	15 秒	12.5 kHz

A-D の出力レート 125 kHz (最大データ長 6 秒)		
ダウンサンプル	データ取得間隔	有効帯域上限
なし	117 秒	50 kHz
1/2	59 秒	25 kHz
1/4	29 秒	12.5 kHz
1/8	15 秒	6.25 kHz

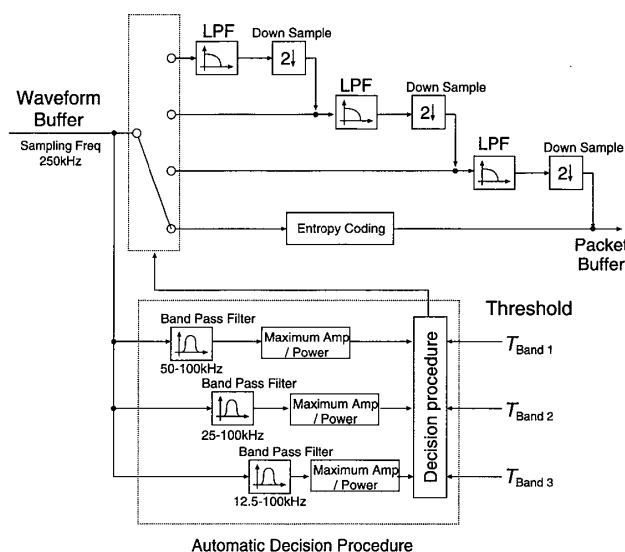


図4 自動周波数帯域選択機能のブロック図

Fig.4 Block diagram of an automatic filter selection.

ことが可能となった。

### 3.3 自動帯域選択機能

自動帯域選択機能は、波形蓄積バッファのデータを周波数解析することで、帯域ごとに強い強度の波動が受信されているかどうか判別し、前節のデシメーション処理を自動的に行う。これにより高周波の波動が観測されていない場合に不要なデータ伝送を大幅に減少させることが可能となる。

図4に同機能のブロック図を示す。ブロック図の上半分がデシメーション処理、下半分が自動判定機能である。自動判定機能では、Band 1: 50~100kHz, Band 2: 25~100kHz, Band 3: 12.5~100kHzの3種類の通過域特性をもった帯域フィルタ (BPF 1,2,3) を利用することにより、各帯域の波動のエネルギー若しくは波形の最大振幅の二つのパラメータのどちらか

により波動の有無を判定できるようになっている。ただし上記の通過域は A-D 出力レートが 250 kHz のときの値であり、125 kHz のときには各値がすべて 1/2 となる。波動のエネルギーで判定を行う場合、蓄積バッファの波形データを BPF  $j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) に通した後の系列  $E_i$  に対して

$$E_{\text{Band}j} = \log \sum_i E_i^2 \quad (1)$$

にてエネルギーを定義し、その大きさにより判定を行う。一方、波形の最大振幅で判定を行う場合、同じく BPF  $j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) に通した後の系列  $E_i$  の振幅の最大値

$$E_{\text{Band}j} = \max_i \{|E_i|\} \quad (2)$$

を判定に用いる。

判定機能のフローチャートを図 5 に示す。判定は Band 1, 2, 3 の順に行う。BPF 1 の出力判定値  $E_{\text{Band}1}$  があらかじめ設定したしきい値  $T_{\text{Band}1}$  より大きければこの範囲に有意な波動が存在すると判断し、デシメーション処理は行わない。 $E_{\text{Band}1} < T_{\text{Band}1}$  の場合、すなわち Band 1 に波動が存在しない場合は Band 2 における判定を同様に進行。Band 2 の判定で波動が存在すれば 0~50 kHz の帯域選択を行い、波動が存在しない場合は Band 3 における判定を同様に進行。Band 3 の判定で有意な波動が存在すれば 0~25 kHz、存在しなければ 0~12.5 kHz の帯域が選択される。判定に用いるデータ系列は、波形蓄積バッファの 10 箇所から取得し、全データの 1/60 を用いている。

### 3.4 波形データの可逆圧縮

自動帯域選択処理において波形のデシメーション処理を行わない場合には、処理能力の余裕を生かしてデータに圧縮を施すようにした。ここではレンジコードと呼ばれるエントロピー符号化に基づく可逆圧縮法を用いている。波形の振幅値のヒストグラムの偏りに応じて、割り当てるビット系列を最適化し符号化する手法であり、計算負荷が軽くかつ実装が容易であるという特徴が挙げられる。

あけぼの衛星で取得された波形データ 20 観測パス分に対し本圧縮機能を適用した結果、すべてのケースにおいて圧縮後のデータサイズは圧縮前の 70~80% となることが確認された。検証に用いたデータは LRS-WFC と同じ 16 bit で量子化されたデータである。実際には、A-D のアナログ入力レベルが圧縮率に大きく

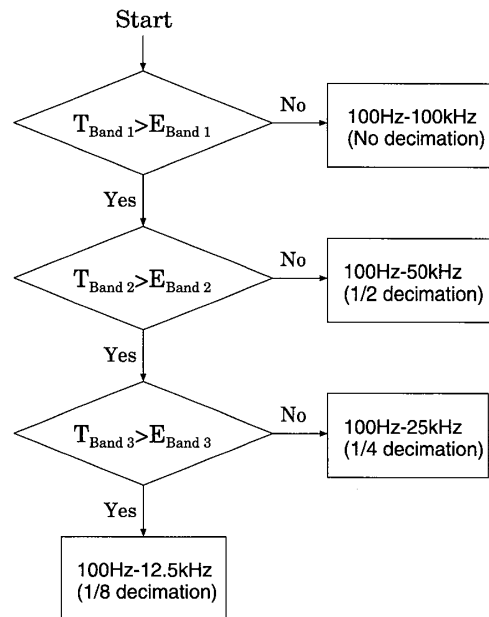


図 5 帯域選択のためのフローチャート

Fig. 5 Flowchart to determine the number of decimation.

影響するが、LRS-WFC でも、A-D 変換器前段の増幅器のゲイン調整によりあけぼの衛星と同程度の A-D 入力レベルにて運用され则认为される。

## 4. 実観測データを用いた機能検証

### 4.1 背景雑音に対するしきい値の設定

自動帯域選択機能を有効に動作させるためには、背景雑音レベルより少し大きな適当なしきい値  $T_{\text{Band}j}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) を設定する必要がある。ただし背景雑音のエネルギーや振幅分布は自動帯域選択ルーチン内の帯域フィルタを通過することにより変化するため、その変化量に応じた差を考慮してしきい値を設定しなければならない。背景雑音は通常周波数の関数となるが、ここでは一般的な雑音系列の周波数特性として  $1/f^\alpha$  ( $f$  は周波数) を仮定して、その変化量を見積もる。ただし、かぐや衛星で得られたデータがこの関数で表せなかった場合でも、適当な関数により同様の手順でしきい値の決定が可能であることに注意する。

各帯域のエネルギーで判定を行う場合、しきい値  $T_{\text{Band}j}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) に与えるべき差異は、パラメータ  $\alpha$  に応じた周波数特性の雑音系列を各帯域フィルタに通したときのエネルギーの変化量から求められる。ここではフィルタと雑音系列の周波数特性を掛け合わせるにより算出した。背景雑音の周波数特性を表すために他の関数を用いる場合には、その関数とフィル

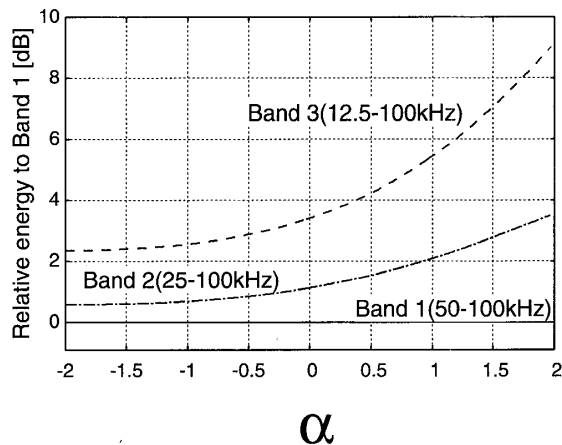


図 6 各帯域の波動のエネルギーで判定する場合にしきい値に与えるべき差異

Fig.6 Energy variation for various noise series due to the bandpass filters.

タの特性と掛け合わせることで同様に変化量の算出ができる。図 6 にパラメータ  $\alpha$  に対する雑音系列のエネルギー変化を示す。BPF 1 を通したときのエネルギー変化を基準として BPF 2, BPF 3 を通したときのエネルギー変化を  $\alpha$  に対して描いている。例えば、 $\alpha = 0$  の雑音系列の場合、しきい値  $T_{\text{Band1}}$  に対してしきい値  $T_{\text{Band2}}, T_{\text{Band3}}$  をそれぞれ 1.2 dB, 3.5 dB だけ大きな値に設定する必要があることが分かる。帯域フィルタが理想フィルタではないため、帯域幅から単純にエネルギーを算出した値とは異なっている。 $\alpha$  が大きくなるにつれ低周波の背景雑音のエネルギーレベルが上がるため  $T_{\text{Band1}}$  と  $T_{\text{Band2}}, T_{\text{Band3}}$  に与えるべき差が大きくなる事が分かる。

一方、最大振幅で判定を行う場合に各しきい値に与えるべき差異は、各雑音系列を帯域フィルタに通したときの振幅分布の標準偏差の変化をもとに設定するのが妥当である。この場合、 $\alpha$  に対する標準偏差の変化量は図 6 の縦軸の対数値を実数値に変換したものとなる。例えば、背景雑音が白色系列の場合には、しきい値  $T_{\text{Band1}}$  に対してしきい値  $T_{\text{Band2}}, T_{\text{Band3}}$  をそれぞれ 1.15 倍、1.5 倍にした値に設定する必要がある。

#### 4.2 実観測データへの適用

あけぼの衛星で取得された波形データを用いて LRS-WFC に実装した自動帯域選択機能の有効性を検証した結果を示す。ただし同機能のみを評価するために、汎用計算機上で動作するシミュレータを用いた。あけぼの衛星の低周波波動観測装置 (VLF) のサブシステム一つである広帯域 VLF 受信器 (WBA) では 10 数 kHz までの周波数帯域の連続波形データが取得され、

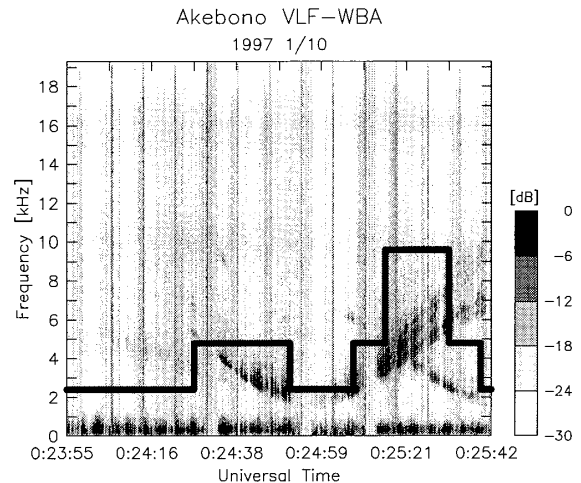


図 7 検証に用いたテスト波形の周波数スペクトル (その 1)

Fig.7 Spectrum of test waveform data 1.

アナログテレメトリにより地上に伝送される。観測データは地上の受信設備にて復調の後、48 kHz/16 bit でデジタル化されている。ただし本検証では、機上処理をシミュレートするためにアンテナやアナログ回路の校正処理を行っていないデータを用いた。

図 7 に機能検証に利用した電界波形の周波数スペクトルを示す。縦軸が周波数、横軸が時刻、スペクトル強度が濃淡で表されている。およそ 100 秒間のデータである。図中で、0:24:24 以降に 5 kHz から 2 kHz までいったん周波数が下降したあと再び周波数が上昇するように見えるのがソーサー、1 kHz 以下に連続的に観測されているのが極域低周波ノイズと呼ばれる現象でともにあけぼの衛星の観測対象とされてきた自然波動現象である。各現象は、衛星のスピン周期 (8 秒) の影響で 4 秒の周期で強度変動している。また、データは地上へアナログ伝送されるが、伝送に起因する広帯域のスピン周期雑音がスペクトル上に縦線として現れている。

このあけぼの衛星による観測波形を LRS-WFC への入力として自動帯域選択機能を施した結果を以下に示す。ただし、衛星のスピンの影響をできるだけ無視できるように、波形蓄積バッファの大きさを 8 秒間分のサンプル点数 (48 kHz×8 秒=38,400 点) として処理を行った。また、自動帯域選択機能のみの検証を行うために、伝送レートの制約による時間間引きは行っていない。判定は、アナログ伝送に帰因する広帯域雑音が判定に影響しないように、式 (1) にて計算されるエネルギーを用いた。データのサンプリング周波数が

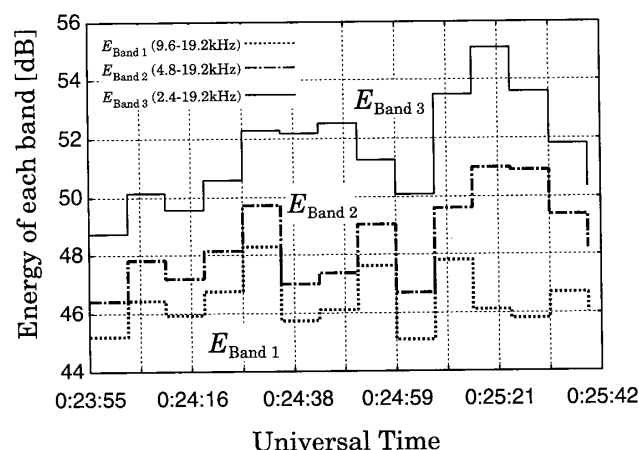


図 8 帯域フィルタ通過後のエネルギー

Fig. 8 Transition of the energy  $E_{\text{Band1}}$ ,  $E_{\text{Band2}}$  and  $E_{\text{Band3}}$ .

48 kHz であるため、判定ルーチンの帯域フィルタの周波数帯域は Band 1: 9.6~19.2 kHz, Band 2: 4.8~19.2 kHz, Band 3: 2.4~19.2 kHz となる。

検証データに対し、エネルギー  $E_{\text{Band1..3}}$  の時間変化を図 8 に示す。図より、ソーサーが観測され始めた時刻において  $E_{\text{Band3}}$  だけが增加しているのが分かる。これは、 $E_{\text{Band3}}$  でだけ考慮されている 2.4~4.8 kHz の帯域のエネルギーが増えたことを表している。またその後、ソーサーの周波数の上昇に伴い、4.8~9.6 kHz の帯域のエネルギーが増加することから  $E_{\text{Band2}}$  の値も大きくなっている。

検証データと同一観測パスで、自然波動現象が受信されていない時間帯から背景雑音強度を  $1/f^\alpha$  にてフィッティングしたところ  $\alpha = -0.7$  が得られた。機上の処理ではアンテナやアナログ回路の特性の校正前のデータを用いることになるため、 $\alpha$  値が負になることもある。図 6 の結果をもとにしきい値の差異を  $(T_{\text{Band1}}, T_{\text{Band2}}, T_{\text{Band3}}) = (49.0 \text{ dB}, 49.8 \text{ dB}, 51.7 \text{ dB})$  として設定し、自動帯域選択処理を施した結果を図 7 に黒太線にて示す。黒太線より下側が選択された周波数領域である。波動の受信強度の弱い領域が削除され、ソーサーを含む波動強度の強い部分だけが選択できているのが分かる。しきい値に適切な差を与えない場合、このような適切な選択が行われないのは図 8 から明らかである。この処理では全帯域データの 75% を無駄な領域として削減しているため、実質的に 4 倍の伝送容量を割り当てたのと等価である。あけぼの衛星とかぐや衛星では観測周波数帯域が異なるため定量的な評価はできないが、定性的には本機能により

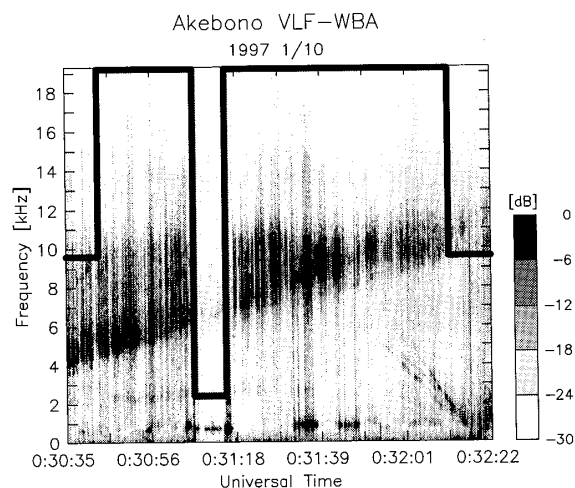


図 9 検証に用いたテスト波形の周波数スペクトル (その 2)

Fig. 9 Spectrum of test waveform data 2.

地上に伝送されるデータに含まれる有効な波形データの割合を増加させることができると考えられる。

同一観測パスで少し後の時刻のデータを同様に処理した結果を図 9 に示す。しきい値は前例と同じである。図 7 と同様に黒太線より下側が受信強度の強い部分として選択されたことを示している。この例では、強度の強い波動の周波数が時間とともに上昇しているが、それに追従するようにデータ取得領域が選択できているのが分かる。ただし、データの削減は全体の 28% であり、等価的な伝送容量は 1.4 倍にしかない。これは、本機能では低域通過フィルタによる帯域選択しか実装していないため、高周波の波動が受信されているときにはデータ縮小の効果がないためである。

#### 4.3 考 察

前節の検証では後段のデータ伝送レートを考慮せず連続観測可能であると仮定して、等価的に伝送レートを向上させることを示した。これは観測開始のタイミングが無作為に選ばれと想定した場合、すなわち十分に長い時間の観測を考えた場合の統計的な評価であるといえる。通常、所望の波動の観測確率は波動の継続時間にのみ依存するが、本機能によりしきい値以下の不要なデータ伝送を減少させることができるため、結果的に所望波動の観測頻度を向上させることが可能となる。ただし本機能の利用に先立って、背景雑音の周波数特性を把握するために、観測条件に応じた雑音の周波数特性を全帯域観測により取得しておく必要がある。

あけぼの衛星のデータによる検証から、エネルギー

による評価では十分な判定ができることが分かった。エネルギー法は、波動のコヒーレンシーの有無にかかわらず汎用性が高い判定が可能である。ただし、低頻度（単発性）の波動の場合、エネルギー法だけでは感度的に不十分な可能性がある。本機能ではこうした波動に対しても、最大振幅による判定が可能な仕様となっている。ここで LRS-WFC では、EMC 試験により他機器からのインパルス性の干渉が十分に低いレベルに抑えられていることを確認している。

今回はあけぼの衛星の WBA データを擬似的に使用したが、かぐやによる実観測データが得られたら二つの判定基準で両者の得失を評価することが今後の検討課題として挙げられる。WBA データは比較的周波数帯域の広い連続波形データであるため検証に用いるのに適していたが、衛星のスピンの強度変動やアナログ伝送が原因の干渉があり、また地球の高度数 1000 km を観測するあけぼの衛星と月周回のかぐや衛星とでは観測される波動も異なる。このような条件の違いが、どのように影響するかも今後明らかにしていく必要がある。

## 5. む す び

本論文では LRS-WFC に実装した高効率な波形データ取得機能について述べてきた。従来の衛星と比較して広帯域の波形データを取得する LRS-WFC では、機上でのデータ縮小処理が重要な課題であった。これに対しオンボードの DSP を用いて、観測した波形を周波数解析し、波動強度の弱い周波数領域を削減する機能を実装することにより、等価的に地上への伝送容量を増加させるのと同じ効果が得られることを示した。また、あけぼの衛星のデータを用いた検証から、エネルギーによる判定により波動の有無の判定がほぼ十分に機能することが示された。

本機能の特徴として、周波数解析に帯域フィルタを用いた点が挙げられる。これにより波動の有無の判定にエネルギーに加えて波形の最大振幅も使用できるようになっており、かぐや衛星の実観測データへの適用が期待される。帯域フィルタ通過後のエネルギー及び最大振幅の変化量を背景雑音の周波数特性に対して算出することにより、各しきい値に与えるべき差異を定量的に示した。本機能の一部である帯域通過フィルタ及び波形圧縮処理は、自動帯域選択機能を用いない場合でも独立に利用することができ、観測領域に応じて固定した観測モードでデータ取得を行うことが可能で

ある。

衛星搭載受信器のデジタル化に伴いソフトウェアによる複雑な信号処理が可能となったが、波形の選択的取得や圧縮など様々な処理に対して計算資源をどのように割り振るかが将来的な課題となる。伝送レートの制約が厳しい衛星観測において、優先的に有意な波形を選択取得する機能は特に重要な役割を果たすと考えられる。LRS-WFC で実現した周波数解析に基づく波形取得機能に対して、波動の有無の判定、帯域選択の手法を更に高度化することで、より伝送レートの小さい惑星探査など将来ミッションへの応用が期待される。

**謝辞** セレーネプロジェクトは宇宙航空研究開発機構 (JAXA) による月探査計画です。かぐや衛星搭載波形補そく器 (LRS-WFC) のオンボードソフトウェアの開発にあたり、月レーダサウンダ装置 (LRS) 開発チームの代表 (PI) の小野高幸先生及び熊本篤志先生、井町智彦先生、WFC 開発グループの皆様には多大なる御協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。LRS-WFC のハードウェアは、(株) 明星電気により製造されました。本研究では機能検証のため、宇宙科学研究本部 (ISAS) のあけぼの衛星の VLF 波動データを利用しました。

## 文 献

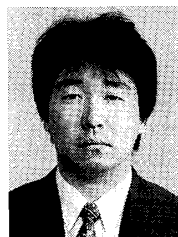
- [1] SELENE プロジェクト,  
<http://www.selene.jaxa.jp/ja/index.htm>, 2007.
- [2] T. Ono, A. Kumamoto, A. Yamaguchi, A. Yamaji, T. Kobayashi, Y. Kasahara, and H. Oya, "Observation target and data analysis of the Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft," *Earth, Planets and Space*, vol.60, (in press), 2007.
- [3] Y. Kasahara, Y. Goto, K. Hashimoto, T. Imachi, A. Kumamoto, T. Ono, and H. Matsumoto, "Plasma wave observation using waveform capture in the Lunar Radar Sounder on board the SELENE spacecraft," *Earth, Planets and Space*, vol.60, (in press), 2007.
- [4] K. Hashimoto, I. Nagano, M. Yamamoto, T. Okada, I. Kimura, H. Matsumoto, and H. Oki, "EXOS-D (AKEBONO) very low frequency plasma wave instruments (VLF)," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.35, no.2, pp.278-286, 1997.
- [5] H. Matsumoto, I. Nagano, R.R. Anderson, H. Kojima, K. Hashimoto, M. Tsutsui, T. Okada, I. Kimura, Y. Omura, and M. Okada, "Plasma wave observations with GEOTAIL spacecraft," *J. Geomagn. Geoelectr.*, vol.46, no.1, pp.59-95, 1994.
- [6] H. Matsumoto, T. Okada, K. Hashimoto, I. Nagano,



S. Yagitani, M. Tsutsui, K. Kasaba, K. Tsuruda, H. Hayakawa, A. Matsuoka, S. Watanabe, H. Ueda, I. Kimura, Y. Kasahara, Y. Omura, M. Matsumura, T. Imachi, K. Ishisaka, and Y. Tateno, "Low frequency plasma wave analyzer (LFA) onboard the PLANET-B spacecraft," *Earth, Planets and Space*, vol.50, no.3, pp.223-228, 1998.

- [7] 上田義勝, 小島浩嗣, 岩井宏徳, 藤原亮介, 橋本弘藏, 松本紘, 長野 勇, 岡田敏美, "北極ロケット実験搭載用デジタル制御型プラズマ波動受信器の開発," *信学論 (B)*, vol.J84-B, no.10, pp.1808-1818, Oct. 2001.
- [8] K. Hashimoto, H. Iwai, Y. Ueda, H. Kojima, and H. Matsumoto, "Software wave receiver for the SS-520-2 rocket experiment," *IEEE Trans, Geosci. Remote Sense.*, vol.41, no.11, pp.2638-2647, 2003.
- [9] J.-L. Bougeret, M.L. Kaiser, P.J. Kellogg, R. Manning, K. Goetz, S.J. Monson, N. Monge, L. Friel, C.A. Meetre, C. Perche, L. Sitruk, and S. Hoang, "WAVES: The radio and plasma wave investigation on the wind spacecraft," *Space Sci. Rev.*, vol.71, pp.231-263, 1995.
- [10] B.W. Reinisch, D.M. Haines, K. Bibl, G. Cheney, I.A. Galkin, X. Huang, S.H. Myers, G.S. Sales, R.F. Benson, S.F. Fung, J.L. Green, S. Boardsen, W.W. L. Taylor, J.-L. Bougeret, R. Manning, N. Meyer-Vernet, M. Moncuquet, D.L. Carpenter, D.L. Gallagher, and P. Reiff, "The radio plasma imager investigation on the IMAGE spacecraft," *Space Sci. Rev. IMAGE Special Issue*, vol.91, pp.319-359, 2000.
- [11] L.J.C. Woolliscroft, H.St.C. Alleyne, C.M. Dunford, A. Sumner, J.A. Thompson, S.N. Walker, K.H. Yearby, A. Buckley, S. Chapman, M.P. Gough, and The DWP Co-Investigators, "The digital wave-processing experiment on cluster," *Space Sci. Rev.*, vol.79, pp.209-231, 1997.

(平成 19 年 9 月 25 日受付)



笠原 禎也 (正員)

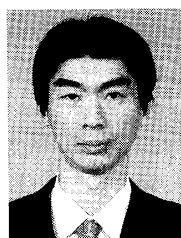
平元京大・工・電気第二卒。平 3 同大学院修士課程了。現在, 金沢大・自然科学准教授。博士(工学)。地球電磁気・地球惑星圏学会, 情報処理学会, 米国地球物理学会連合各会員。



橋本 弘藏 (正員)

昭 44 京大・工・電気卒。昭 46 同大学院修士課程了。昭 49 同博士課程単位取得退学。現在, 京大・生存圏研究所・教授。工博。IEEE シニア, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 米国地球物理学会連合各会員。昭 59 地球電磁気・地球惑星圏学会田中館

賞受賞。



後藤 由貴 (正員)

平 10 京大・工・電気第二卒。平 12 同大学院情報・通信情報修士課程了。平 15 同大学院博士後期課程了。現在, 金沢大・自然科学助教。博士(情報学)。地球電磁気・地球惑星圏学会会員, 平 14 国際電波科学連合若手研究者賞受賞。