

ASTRO-H 衛星搭載機器における 時刻決定精度の地上較正試験

中谷創平

平成 28 年 2 月 5 日

概要

2016 年打ち上げ予定の次世代 X 線天文衛星 ASTRO-H は高分光能力を持つマイクロカロリメータと 0.3 ~ 600 keV という広帯域での高感度観測を通じ、宇宙空間の超高エネルギー現象の解明を目指す人工衛星である。科学目標のひとつに中性子星パルサーなど時間変動の早い天体の放射メカニズムの解明というものがあり、この科学目標を達成するためには観測した光子イベントに 30 マイクロ秒以上の高い時刻精度が要求されている。

ASTRO-H には GPS 受信機が搭載され、信号処理系の中央処理部 (Satellite Management Unit : SMU) では高い精度の時刻を受信することができる。ASTRO-H は GPS 受信信号を TimeCode と呼ばれる信号で搭載機器へ配信することで同期を行っている。しかし、実際に光子を検出する搭載機器が持つ時刻精度は SMU から時刻情報が配信される際に悪化してしまう。そのため、GPS 受信信号から搭載機器までの時刻配信や、光子検出時の時刻ラッチ、および、光子についての時刻情報の解析に至るまで、各ステップでの時刻精度を落とす要因をリストし、科学要求値である 30 マイクロ秒を振り分け、エラーバジェットとして管理している。その中でも SMU と観測機器とのタイミング同期の精度が重要となる。ASTRO-H の搭載機器間の通信には、科学衛星標準組み込みネットワーク SpaceWire (SpW) が用いられ、特に時刻に関するタイミング同期は SpW の最優先コードである TimeCode が使用される。機器間のタイミング同期に関連するエラーバジェットには「ネットワークでの TimeCode 配信時に発生するジッタと遅延補正精度」や「周期的信号の検出精度」がある。本論文ではネットワークでの TimeCode 配信時のジッタと遅延補正精度、さらに、周期的信号の検出精度を取り上げ、エラーバジェット検証を完了させることが目的である。

まず我々は実際のネットワーク構成をもとに、GPS 受信器から各搭載機器へ TimeCode が配信、ラッチされるまでに発生する遅延とジッタの理論値を推定し、その後 ASTRO-H 衛星搭載品を用いて実測試験を行った。試験ではすべての経路の実測は難しかったため、最も伝搬時間の長い機器について遅延と揺らぎを実測し、推定値と誤差の範囲で一致することが確かめられた。また、発生する遅延の補正精度は遅延と推定値の比較から エラーバジェット要求値を満たすことを確認した。さらに、各搭載機器の時間分解能に応じた不定性の検証においては疑似的に中性子星パルサーを観測した場合の疑似データを作成、時系列解析をすることで見積もりを行った。見積もりでは様々なフラックス、パルス周期をもつパルサーを搭載機器である軟 X 線分光装置 (SXS) および硬 X 線撮像装置 (HXI) で観測したときの周期検出精度を確認した。その結果、ミリ秒パルサーを SXS, HXI 各機器で 20 ksec 観測した場合、周期が 100 ms 以下の疑似イベントに対しては要求値 20 μ s 以内であることが確認された。続いて、Exposure time : 2 Msec の観測時間で疑似イベントを観測した場合、10 s 以下の周期のパルサーで周期検出精度が 20 μ s 以内であることが確認された。

目 次

1	次世代X線天文衛星 ASTRO-H	7
1.1	X線天文学	7
1.2	ASTRO-H 衛星概要	7
1.3	ASTRO-H の時刻精度目標	9
2	ASTRO-H 時刻配信システム	11
2.1	SpaseWire	11
2.1.1	パケット構成要素	13
2.1.2	ネットワークトポロジーおよびアドレッシングの方法	14
2.2	ASTRO-H 時刻付けシステム	16
2.2.1	ASTRO-H ネットワーク	16
2.2.2	衛星時刻 (TI)	17
2.2.3	LocalTime	18
3	時刻精度悪化要因とエラーバジェット	19
3.1	時刻付けシステムで発生する時刻精度悪化要因の管理	19
3.1.1	TimeCode 揺らぎ発生原理	20
3.2	ASTRO-H ネットワーク試験に関する先行研究	21
3.2.1	衛星搭載同等品を用いた機器単体試験およびネットワーク試験	21
3.2.2	SMU 固定遅延およびジッタの測定	21
4	ASTRO-H 主要経路における遅延および TimeCode 揺らぎ	23
4.1	ネットワーク試験実測値と予想値の比較	23
4.2	推定結果	25
5	ASTRO-H ネットワーク試験 @ TKSC	27
5.1	試験内容	27
5.2	測定結果	28
5.3	考察	30
5.3.1	エラーバジェット項目 (C), (D) の評価	30
6	各検出機器の周期的信号に対する時刻決定精度の評価	32
6.1	検証目的	32
6.2	検証方法	32
6.2.1	疑似観測の入力天体	32
6.2.2	検出器・データ解析模擬	34
6.2.3	評価方法	35
6.3	評価結果	38
6.3.1	SXS, HXI 周期検出精度 (Exposure time 20 ksec)	38
6.3.2	SXS, HXI 周期検出精度 (Exposure time 20 Msec)	39

6.3.3 SXS グレード付けを考慮した周期検出精度	41
---------------------------------------	----

7 まとめ	42
-------	----

A 付録：周期検出精度結果ヒストグラム	43
---------------------	----

A.1 SXS Exposure 20 ksec	44
A.2 HXI Exposure 20 ksec	46
A.3 SXS Exposure 2.0 Msec	48
A.4 HXI Exposure 2.0 Msec	50
A.5 SXS グレード付け Exposure 20 ksec	52

目 次

1	ASTRO-H 完成予想図	7
2	すざく搭載「HXD」が観測した「かにパルサー」の光度曲線	9
3	OSI 参照モデルと SpaceWire プロトコルとの比較。RMAP[10] とは SpW 上位レイヤ「遠隔メモリアクセス通信規約」の総称である。	12
4	Data Character フォーマット P = parity bit , LSB = Least Significant Bit , MSB = Most Significant Bit	13
5	Control Character フォーマット	13
6	Control Code フォーマット	14
7	バス型ネットワークと SpaceWire 比較	14
8	バスアドレッシングで Node A から Node B への経路の指定方法	15
9	ロジカルアドレッシングで Node B を指定する方法	15
10	spacecube2 [15]	16
11	ASTRO-H ネットワーク	17
12	TI 内訳	18
13	時刻精度悪化要因のリスト	19
14	TimeCode 配信タイミングにより発生する TimeCode 揺らぎの例	20
15	SMU 遅延のヒストグラム (試験 1)	22
16	SMU 遅延のヒストグラム (試験 2)	22
17	SWR (50 MHz) - SWR (25MHz) - で発生する固定遅延予想値のヒストグラム	24
18	ASTRO-H ネットワーク主要経路での通過機器および配信時リンクレート	25
19	ネットワーク試験セットアップ図	27
20	[1] 測定経路 1 遅延時間ヒストグラム	29
21	[2] 測定経路 2 遅延時間ヒストグラム	29
22	[1] 測定経路 1 遅延時間ヒストグラム	29
23	[2] 測定点 1 と測定点 3 (SMU A 窠 SGD1-DE) の間の遅延時間ヒストグラム	29
24	パルス周期とパルス周期の減衰率空間における中性子星パルサー分布図 ([14]	34
25	SXS グレード付けにおける各グレードの定義	35
26	周期 10 s のパルサーを P = 10 s で畳み込む場合の操作。ライトカーブを P = 10s で区切り、区間ごとに存在するイベントをすべて重ね合わせる。すると、右上図のように 10 s 周期で変動するパルサーの周期性が明らかになる。	36
27	efsearch での 100 ms パルサーの周期検出の出力ヒストグラム	37
28	efsearch でのヒストグラムをガウシアンでフィッティングしたプロット	38
29	efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	44
30	efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	45
31	efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	46
32	efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	47
33	efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	48
34	efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	49
35	efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	50

36	efsearch を用いた周期探査出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	51
37	efsearch を用いた周期探査出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	52
38	efsearch を用いた周期探査出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図	53

表 目 次

1	ASTRO-H 搭載機器の性能 ([4] ~ [6] および ASTRO-H 内部資料	9
2	各観測機器の Local Time の時間分解能	18
3	エラーバジレットの内訳	19
4	SMU 時刻配信精度試験の測定結果	22
5	岩瀬修論における衛星搭載同等品を用いた単体試験の結果	23
6	SWR で発生する固定遅延の予想値	24
7	ASTRO-H SpW network における遅延 TimeCode 揺らぎの推定値	26
8	SWR1-A Port Map	28
9	SGD-DE Port Map	28
10	ネットワーク試験結果チェック表	30
11	ネットワーク試験結果チェック表	31
12	疑似観測の入力天体のパラメータ	33
13	レスポンスファイル名	33
14	Period、flux 空間における周期検出精度 (SXS, Exposure time 20 ksec)	39
15	周期、flux 空間における周期検出精度 (HXI, Exposure time 20 ksec)	39
16	周期、flux 空間における周期検出精度 (SXS, Exposure time 2 Msec)	40
17	周期、flux 空間における周期検出精度 (HXI, Exposure time 2 Msec)	40
18	周期、flux 空間における周期検出精度 (SXS grading)	41

1 次世代 X 線天文衛星 ASTRO-H

1.1 X 線天文学

X 線は波長が $10^{-11} \sim 10^{-8} \text{ m}$ ほどの電磁波のことを指しており物質を透過する力が強いいため、一般的にはレントゲン写真などへ応用されている。天文学の分野における X 線天文学の歴史はまだ浅く、50 年ほど前に始まったとされる。地球の大気は非常に厚く、X 線の透過性をもってしても透過することができないため、宇宙空間から飛んでくる X 線を観測するためには地上からではなく宇宙空間から観測を行わなければならず、ロケットの登場を待たなければならなかった。

1962 年、米国マサチューセッツ工科大学のロッシ、ジャッコーニらは観測ロケットの側面にガイガーカウンターとコリメーターを搭載し、ロケットの自転に合わせて走査するという観測方法で X 線の観測を行った。結果は、測定時間が 10 分程度であったにもかかわらず、予想をはるかに超える強度の X 線が検出された。1970 年にはジャッコーニの主導のもとアメリカの NASA によって世界初の X 線天文衛星「ウフル (Uhuru)」が打ち上げられた。日本でも 1979 年初の X 線天文衛星「はくちょう」が打ち上げられ、小田稔先生の発明した X 線天体観測機「すだれコリメータ」を用いて X 線バースト源を発見するなど、日本での X 線天文学を切り開く大きな功績を残した。

今日、X 線天文学の分野ではブラックホールや銀河団などの超高エネルギー状態にある天体の構造や性質が研究され、日々理解が進んでいる。これら高エネルギー天体は観測できる物質の 80 % が X 線でしか観測できない高温状態にあるとされており、X 線天文学は電波や可視光と並んで天体現象の解明に必要不可欠な分野となっている。

1.2 ASTRO-H 衛星概要

ASTRO-H は、2015 年度打ち上げ予定の日本で開発された「はくちょう」「てんま」「ぎんが」「あすか」「すざく」に続く第 6 番目の X 線天文衛星である。JAXA が中心となり、合計 25 の大学の研究グループが協力し開発が進められている。

科学目標として、「銀河団の運動エネルギー、非熱的エネルギーの全体像を明らかにし、ダイナミックな銀河団の進化過程を観測する」、「遠方の巨大ブラックホールを「すざく」[1] の約 100 倍の感度で測定し、その進化と銀河形成に果たす役割を解明する」「高エネルギー粒子がエネルギーを獲得する現場を測定し、重力や衝突・爆発のエネルギーが宇宙線を生み出す過程を解明する」「距離の異なる銀河団内のダークマター分布と総質量の測定から、銀河団の進化に果たすダークマターとダークエネルギーの役割を解明する」などが挙げられている。

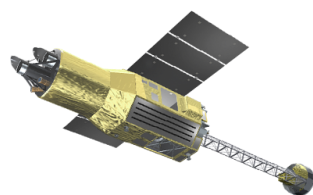


図 1: ASTRO-H 完成予想図

この科学目標を達成するために ASTRO-H には 2 つの望遠鏡と 4 つの検出器が搭載されている。望遠鏡は軟 X 線望遠鏡：Soft X-ray Telescope (SXT) と硬 X 線望遠鏡：Hard X-ray Telescope (HXT) の 2 つ、観測装置は、軟 X 線分光検出器：Soft X-ray Spectrometer (SXS)、軟 X 線撮像検出器：Soft X-ray Imager (SXI)、硬 X 線撮像検出器：Hard X-ray Imager (HXI)、軟 γ 線検出器：Soft γ -ray Spectrometer (SGD) の 4 つである。望遠鏡と検出器の性能を表 1 に示す。

軟 X 線分光システム：SXS (Soft X-ray Spectrometer)[4] + SXT-S (Soft X-ray Telescope)

大面積かつ軽量の軟 X 線望遠鏡と、50 mK という極低温技術によって超高分解能分光が可能な X 線マイクロカロリメーターとの組み合わせである。7 eV という非常に高いエネルギー分解能を持つ。焦点距離は 6 m である。

軟 X 線撮像システム：SXI (Soft X-ray Imager) [5] + SXT-S (Soft X-ray Telescope)

軟 X 線望遠鏡と広い視野を持つ X 線 CCD カメラの組み合わせである。背面照射型 CCD を用いることで低エネルギー帯域の X 線光子への感度を上げ、p チャンネルを採用することで電荷損失を防ぐとともに、高エネルギー帯域の X 線光子への感度も上げている。軟 X 線撮像システムの光学系には軟 X 線分光システムと同様の軟 X 線望遠鏡が使用され、焦点距離は 6 m である。

硬 X 線撮像システム：HXI (Hard X-ray Imager) [6] + HXT (Hard X-ray Telescope)

硬 X 線望遠鏡にはブラッグ反射を利用した多層膜スーパーミラー望遠鏡が使用され、5 ~ 70 keV の X 線の集光結像を行う。また、4 層の Double-sided Silicon Strip Detector (DSSD) と 1 層の CdTe を重ねた構造の撮像半導体検出器を使用し硬 X 線帯域の観測を行う。撮像半導体検出器に X 線光子が入射し、半導体でコンプトン散乱され検出されることで光子のエネルギーと到来方向を計測することができる。焦点距離は 12 m である。

軟 γ 線分光システム：SGD (Soft γ -ray Spectrometer)

「狭視野 Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ」を用いて軟 γ 線帯域での世界最高感度の測定を実現するとともに、コンプトン散乱を用いた偏光観測を行う。

表 1: ASTRO-H 搭載機器の性能 ([4] ~ [6] および ASTRO-H 内部資料

	SXT-S + SXS	SXT-I + SXI	HXT + HXI	SGD
焦点距離	6 m	6 m	12 m	
有効面積	225cm ² (@6keV)	360cm ² (@6keV)	300cm ² (@30 keV)	20cm ² (@100 keV)
エネルギー帯域	0.3 - 12keV	0.4 - 12keV	5 - 80keV	40 - 600keV
画素数	6×6 pixel	1024×1024 pixel	6×6 pixel	
視野	3.05×3.05(@6keV)	35×35(@6keV)	9×9(@30keV)	33×33(@<150keV) 600×600(@>150keV)
角分解能	1.3 arcmin	1.3 arcmin	<1.7 arcmin	N/A
エネルギー分解能	5eV(@6keV)	<150eV(@6keV)	1 - 2keV (@60keV)	4keV(@40keV)
時間分解能	~80μsec	4 sec	~10μsec	~10μsec
動作温度	47mK	-120 °C	-20 ± 5 °C	-20 °C

1.3 ASTRO-H の時刻精度目標

ASTRO-H の科学目標を達成するためには衛星の時刻精度と観測装置の時間分解能が重要になってくる。図 2 は「すざく」の HXD [2][3] が検出したかに星雲の中心部分に存在する中性子星パルサー「かにパルサー」の光度曲線である。縦軸は X 線の毎秒のカウント数を示し、横軸はパルス位相 (Phase) を示している。右の図は X 線強度のピークを抜き出したものであり、青い線は電波観測から得られた同じパルスにおける電波のピークである。このピークに注目すると、かにパルサーから放出される X 線と電波ではピークがずれていることがわかる [13]。ここで、このピークの構造をはっきりと見るために必要な時間分解能を考える。例えば、中性子星パルサーの中でもっとも早く自転するパルサーである「ミリ秒パルサー」では自転周期 2 msec という速さのパルサーが観測されている。そのため、周期 2 msec のパルサーを 100 分の 1 程度で見たいとすると 200 ビンで分解して光度曲線を描くことが要求される。この時、ASTRO-H に要求される時間分解能は $2 \text{ ms} \div 200 \text{ bin} = \sim 10 \text{ } \mu\text{sec}$ 程度となり、ASTRO-H ではこの値を元に時間分解能を設定している。

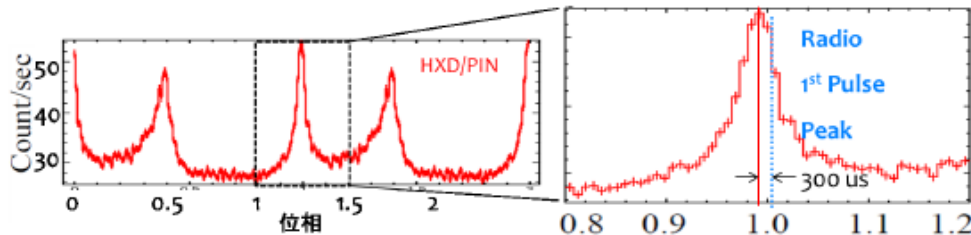


図 2: すざく搭載「HXD」が観測した「かにパルサー」の光度曲線

また、かにパルサーから到来する放射線の光度曲線で X 線と電波のピークがずれる要因として、パルサー内での放射線の発生機構の違いがあると考えられる。そこで、ASTRO-H ではこのパルスのピークのずれを高い精度で測定し、パルサーの電磁波発生機構の解明を目指している。このとき重要となってくるのが、ASTRO-H における時刻精度 (衛星内時刻と絶対時刻とのずれ) である。かにパルサーを例にとると、X 線と電波のピークのずれは $200 \mu\text{sec} \sim 300 \mu\text{sec}$ であるとされている [13]。したがって、これよりも 1 ～ 2 桁ほど高い精度でずれを測定したい場合、数十 $\mu \sim$ 数 $\mu \text{ sec}$ の時刻精度が必要となってくる。そこで、ASTRO-H では時刻精度の目標値を $30 \mu \text{ sec}$ としている。

これまで、ASTRO-H の時刻精度目標を達成するために、衛星時刻システムの妥当性を検証する試験が行われ、時刻決定制度に対する要求を満たすことが示されてきた。本論文の目的は、これまで積み重ねられてきた衛星用データ通信 I/F である SpaceWire を用いた時刻付けシステムで時刻精度が目標値を満足するものであるかどうかを検証することである。

2 ASTRO-H 時刻配信システム

本論文の研究対象である ASTRO-H は科学衛星内ネットワークの標準規格である SpaceWire を採用している。この章では SpaceWire について説明すると共に ASTRO-H 内部のデータ通信における通信プロトコルについて触れ、SpaceWire ネットワークを用いた ASTRO-H がどのようにして観測した X 線イベントに時刻情報を付けていくかという ”時刻配信システム” について説明する。

2.1 SpaseWire

今日まで各国で様々な科学衛星が開発・運用され、天文学の発展に貢献してきた。その発展につれて、要求されるサイエンスは多種多様になり、科学衛星には最新技術を駆使した機器が搭載され、行われる実験もより高度なものとなってきた。このような現状で高い信頼性を維持したまま科学衛星を開発・運用するためには莫大な費用と労力が掛かる。SpaceWire は、このような現状の改善策として提案された科学衛星内ネットワークの標準規格であり、欧州宇宙機関 ESA を初めとし、NASA、JAXA、ロシア連邦宇宙局 ROSCOSMOS などが標準化作業を行っている。科学衛星内ネットワーク規格の統一、つまり通信プロトコルの規格を決め I/F を統一することは技術や検証データの継承や、開発費用の削減、期間の短縮などのメリットをもたらすこととなる。

SpaceWire ネットワークは ASTRO-H 以外にも科学衛星への搭載および運用が開始されており、平成 25 年 9 月 14 日にイプシロンロケット試験機により打ち上げられた惑星分光観測衛星「ひさき」(SPRINT-A) では SpaceWire 技術を導入した観測システムで運用が開始されている。NASA、ESA でも SpaceWire を採用した衛星の開発が進んでいる。主な科学衛星として、赤外線観測用宇宙望遠鏡 JWST (2018 年以降打ち上げ予定)、月周回衛星 LRO (2018 年以降打ち上げ予定)、ESA と JAXA 共同開発の地球観測衛星 EarthCARE、水星探査計画 BepiColombo などがある。

SpaceWire で決められている通信プロトコルの特徴 [7], [8] を見るために ASTRO-H 衛星内の通信プロトコルとネットワーク機器やコンピュータを接続する際の通信プロトコルである OSI 参照モデルと比較する (図 3)。

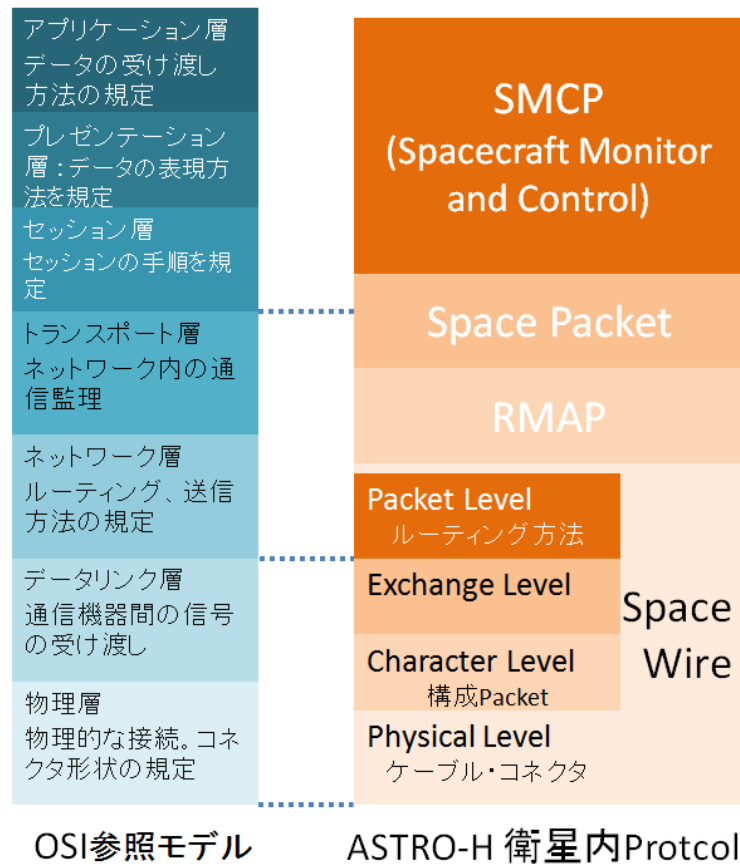


図 3: OSI 参照モデルと SpaceWire プロトコルとの比較。RMAP[10] とは SpW 上位レイヤ「遠隔メモリアクセス通信規約」の総称である。

ASTRO-H 内部のデータ通信に関するプロトコルの上層レイヤである SMCP (Spacecraft Monitor and Control) は搭載機器を監視制御するためのコマンド及びテレメトリの実質的なデータの中身 (メッセージと呼ぶ) の構成と伝送シーケンスを規定する。定常状態における観測データと HK データ (検出器に搭載されているカウンタによって定期的にラッチされる時刻データ) の周期的な取得、指定したテレメトリの取得、機器に対する操作、搭載機器からの通知、メモリの書き込みと読み出しに関するメッセージについて規定されている。

下位レイヤにおいてコマンドメッセージ・テレメトリメッセージの伝送を規定しているのが Space Packet Protocol [9] であり、コマンドメッセージ・テレメトリメッセージは Space Packet と呼ばれるパケットに格納され、伝送される。Space Packet はメッセージにヘッダを付けた形をしており、コマンドメッセージには Primary header を、テレメトリメッセージには Primary header, Secondary header のふたつのヘッダが付いた形で格納されている。Primary header は厳密に構成が規定されており、搭載アプリケーション Application Process ID (APID) を識別する部分を含んでいる。Secondary header はこれとは逆に、システムごとに自由な構成を規定できる。

衛星～地上でのコマンド・テレメトリの送受信に関しては SpaceWire とは異なった Physical Layer Protocol, Data Link Protocol におけるレイヤの規定に従っている。SpaceWire におけるプロトコルでは数階の Level が存在する。Physical Level ではネットワーク内でデータのやり取りを行う際に使用する信号線の形状や素材・コネクタの規格などが規定されている。Character Level では信号送受信時の電圧値やクロックの表し方から、信号送受信に用いるパケットの構造を定義している。さらに Packet Level では SpaceWire ネットワークトポロジーに関する規定などが行われている。

このうち、Character Level におけるパケットの構成要素、Packet Level から理解できる SpaceWire ネットワークを用いた際の特徴的なネットワークトポロジーおよびアドレッシングの方法について詳しく説明する。

2.1.1 パケット構成要素

SpaceWire で送信される情報は Data Character と Control Character というパケットの組みで成り立っている。Data Character は先頭の parity bit (1 bit) と data-control bit (1 bit) (Data Character では 0)、それに続くデータ部 (8 bit) から構成される (図 4)。

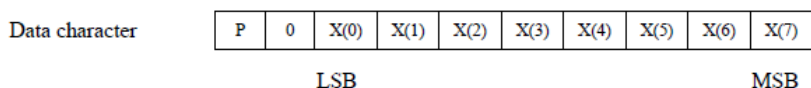


図 4: Data Character フォーマット P = parity bit , LSB = Least Significant Bit , MSB = Most Significant Bit

Control Character は parity bit (1 bit) と data-control bit (1 bit) (Control Character では 1)、それに続く 2 bit の制御コードから構成される。制御コードは値によって、FCT (Flow Control Token : フロー制御トークン)、EOP (End Of Packet : 正常パケット終端)、EEP (Error End of Packet : 以上パケット終端)、ESC (Escape Character : エスケープ) の 4 種類に分類される (図 5)。

Control character				
FCT (Flow Control Token)	P	1	0	0
EOP (End of Packet)	P	1	0	1
EEP (Error End of Packet)	P	1	1	0
ESC (ESCAPE)	P	1	1	1

図 5: Control Character フォーマット

また、これらを組み合わせた Control Code というものがあり Data を配信していない状態を示す NULL Code と時刻情報を表す TimeCode がある。NULL Code は FCT と ESC の組み合わせであり、TimeCode は Data Character と ESC との組み合わせで構成される (図 6)。

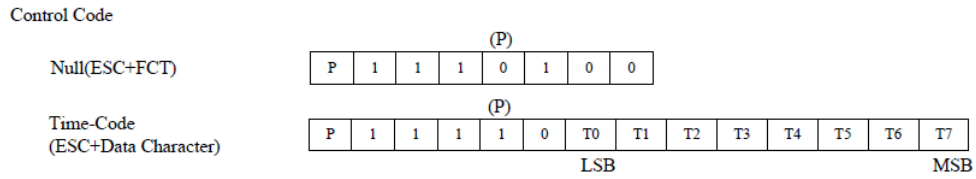
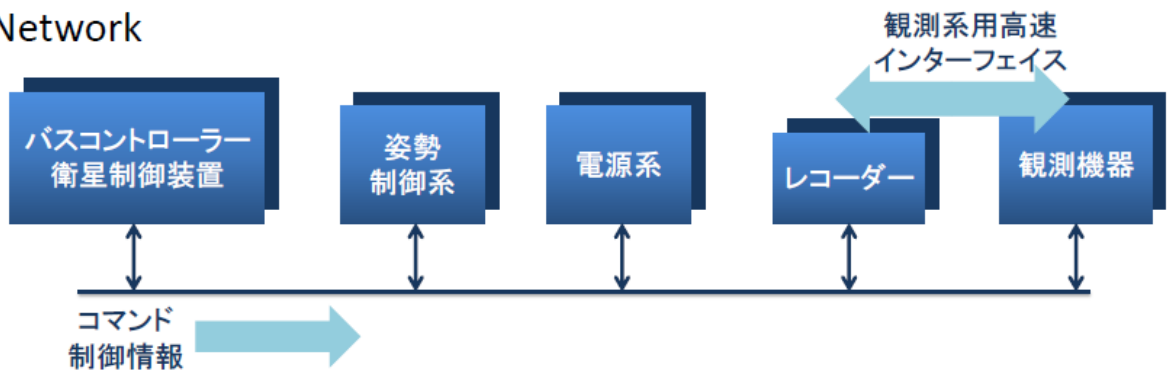


図 6: Control Code フォーマット

2.1.2 ネットワークトポロジーおよびアドレッシングの方法

SpaceWire ネットワークの特徴は SpaceWire Router (SWR) と呼ばれる SpaceWire I/F 専用のルーターを用いた自由なネットワークトポロジーと幅広い冗長系の構成である。ここで、従来の衛星システムと SpaceWire を用いた衛星システムを図 7 に示す。

Bus Network



SpaceWire

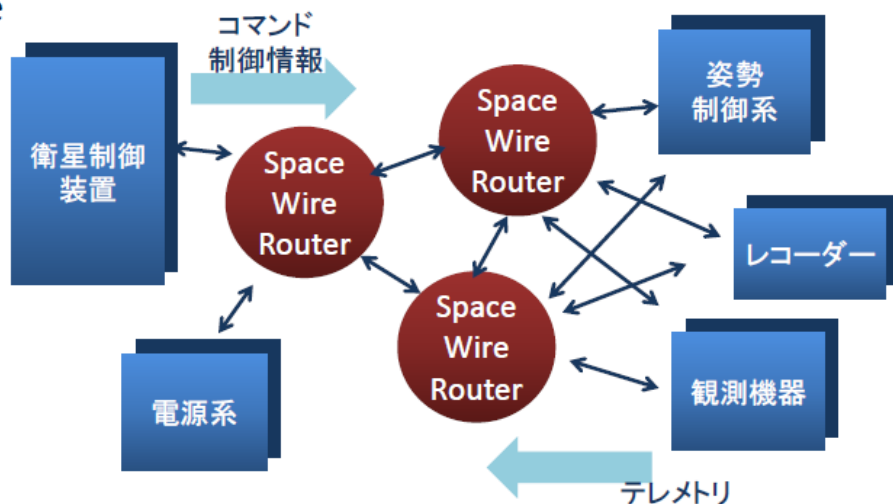


図 7: バス型ネットワークと SpaceWire 比較

従来の衛星システムはバス型と呼ばれる形をしており、ひとつの大本となる接続線がデータ処理を担うノードと観測系を繋いでいる。そして、そこに姿勢制御系、電源系、GPS レシーバーな

どが接続されており、コマンドや制御情報はこの接続線を介して送信される。バス型の利点としては、機器同士の干渉等を考える必要がなく、これまでの衛星で用いられてきた分高い信頼性がある点である。しかし、その反面衛星専用の I/F が必要となるため費用と労力が掛かってきてしまう。また、バス型では機器の不具合に備え、冗長系の詳細な構築が不可欠である。

これに対し、SpaceWire を用いた衛星システムでは SWR を用いて衛星を司る計算機から観測機までを接続するため、冗長系を不具合に合わせて構成することができる。また、SpaceWire ネットワークでは目的地までの経路を指定する ”パスアドレッシング” とノードに付けられた固有なアドレスで経路と指定する ”ロジカルアドレッシング” の 2 つの packets の伝達方法によりノード同士を 1 対 1 で接続することが可能となる (図 8, 図 9)。さらに、データの転送速度が 2 ~ 200 Mbps と低速から高速まで対応しているという特徴がある。

次に前節で紹介した TimeCode について詳しく見てみる [11]。TimeCode は時刻コードであり、時刻情報に対する信頼度の重要性から SpaceWire ネットワークの中での最優先コードとして定義されている。このため TimeCode は配信されている packet 信号に割り込んで配信することができる。TimeCode は Data Character と ESC から構成されており、Data には 0 ~ 63 の情報がある。つまり、TimeCode = 0 ~ 63 があり、64 個の信号で 1 秒間の時刻情報を配信している。この 64 Hz の信号を上位ノードから下位ノードに配信し、時刻の同期を行っている。

また、時刻情報の抜け落ちによるエラーを回避するため TimeCode の配信方法には規定がある。あるノードが TimeCode を受信し、次のノードに向けて TimeCode を配信する場合を考えると、このノードはひとつ前に受信した TimeCode より 1 だけ時刻情報の大きい場合のみ次ノードへの TimeCode の送信を行うことができる。つまり、TimeCode = 10 を受信したノードは次に TimeCode = 11 を受信した場合のみ次ノードへの配信が可能であるということである。TimeCode = 11 をオーバーして TimeCode = 12 を先に受信した場合、受信ノードは TimeCode = 12 を送信するのではなく TimeCode = 11 を受信し、送信が完了するまで TimeCode = 12 の配信を保留しておくのである。

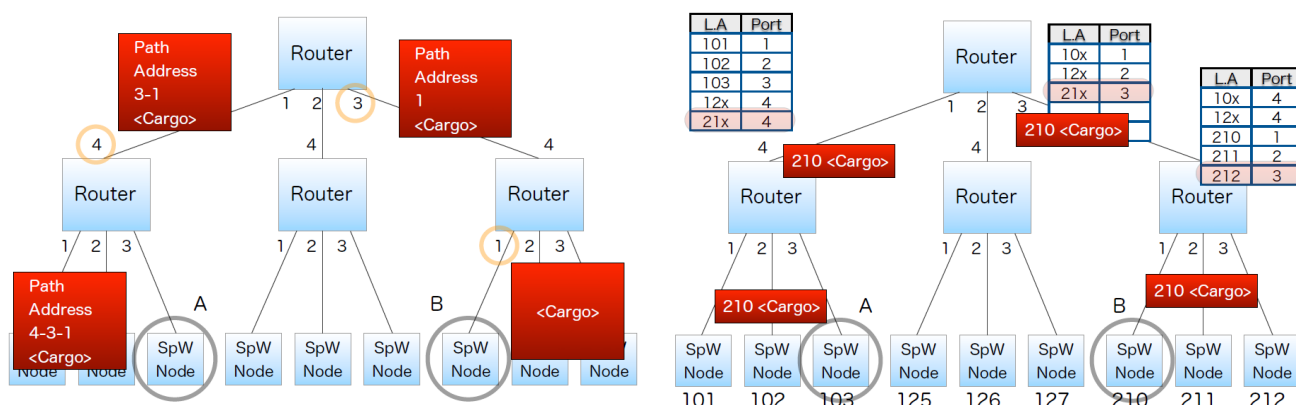


図 8: パスアドレッシングで Node A から Node B への経路の指定方法

図 9: ロジカルアドレッシングで Node B を指定する方法

2.2 ASTRO-H 時刻付けシステム

ASTRO-H では SpaceWire 通信の品質を保証するために TimeCode ですべての機器の通信を同期させて、タイムスロット内で通信が終わるように制御されている。さらに、ASTRO-H では各検出器に必要なだけの時間分解能を備えたカウンタを搭載がされている。実際の観測では、このカウンタを基に時刻情報を検出された各イベントに付けてゆく。この ASTRO-H で使用されているプロトコルは SpaceWire-D として世界標準規格となっている [12]。この章では SpaceWire を利用した ASTRO-H ネットワークの特徴と、ネットワーク内でどのように時刻付けを行っているかを説明する。

2.2.1 ASTRO-H ネットワーク

ASTRO-H トポロジは SMU を頂点とする Tree 状の構造をとる。SMU には SpaceCube2 と呼ばれる衛星制御用計算機を用いる (図 10)。



図 10: spacecube2 [15]

SpaceCube2 とは JAXA と NEC が共同開発した SpaceWire I/F の宇宙用計算機であり、ミッションデータの一時的な保存を目的としたデータレコーダ (1GB) を内蔵している。最上位ノードである SMU は下位ノードと SpW ネットワークで繋がっており、ノード間のデータ通信を決定するとともにメモリの読み書きを行う RMAP を用いて、コマンド送信およびテレメトリ受信を行っている。ネットワーク構成の概略図を図 11 に示す。

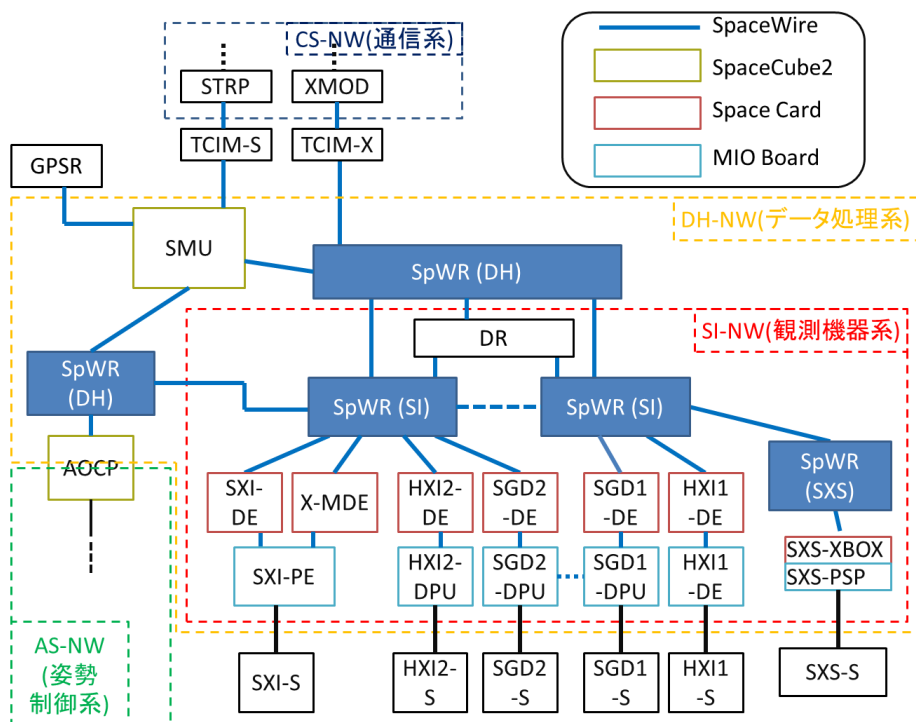


図 11: ASTRO-H ネットワーク

衛星内ネットワークは衛星の向きを制御する姿勢制御系と、データ処理系からなる。ネットワーク内の各機器は SpaceWire I/F を搭載した 5 つの SWR で接続されており、衛星の生死を決めることのある姿勢制御系は、AACP (Attitude and Orbit Control Processor) を介してデータ処理系とは別のローカルな SpaceWire ネットワークで接続されている。データ処理系には、SMU や観測機器系が含まれる。観測機器系は主に DR (Data Recorder) と SXS や SXI などの検出器のデジタル処理を行うノードから構成される。デジタル処理を行うノードは CPU を搭載しソフトウェア処理が可能なノード (インテリジェントノード) と、CPU 非搭載でハードウェア処理が可能なノード (ノンインテリジェントノード) に分けられる。インテリジェントノードには Space Card という基盤が搭載されており、RMAP レイヤで読み出しを行い、SMU との通信を行う。ノンインテリジェントノードには MIO ボードという基盤が載されており、検出器のセンサー (SXS-S, SXI-S 等) で検出されたイベントに画像処理や時刻付けなどのデジタル処理を行う。この他に、地上との通信を行うノードからなる通信系、ASTRO-H 駆動用電力を太陽電池パドルから生成しネットワーク内に送信・管理するノードからなる電源系がある。

2.2.2 衛星時刻 (TI)

ASTRO-H の特徴は搭載されている GPS 受信機 (GPSR) から協定世界時 (UTC) の情報を、GPS クロックとして受信している点である。衛星内の基準となる時刻を "衛星時刻 (TI)" と呼んでおり、日本が打ち上げた第 5 番目の X 線天文衛星「すざく」では衛星内の自走クロックを基

に TI を生成していた。そして、地上のセシウム時計の時刻情報を一日 5 回ほど受信することで TI の較正を行っていた。しかし、周回衛星では地上と常に交信することは難しく、地上と交信を交わすことのできない時間帯は必然的に時刻精度が低下してしまう。それに対して ASTRO-H では常に GPS 衛星から時刻情報を受信し、それを基に TI を生成するため、高い時刻精度を保つことができるのである。TI は秒以上と秒以下とで配信方法が異なり、秒以上 TI (上位) 32 bit として RMAP レイヤを通して SMU から各検出器に書き込まれ、秒以下は TimeCode と呼ばれる 14 bit の信号で配信される。

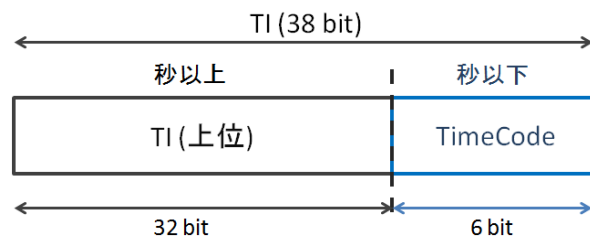


図 12: TI 内訳

2.2.3 LocalTime

秒以下の時刻情報は TimeCode で配信されているというのは上記の通りであるが、この方法では時間分解能は $1 / 64 \text{ s} = 0.0156 \text{ s}$ であり、ASTRO-H の科学目標が要求する時間分解能を満たすことができない。そのため、各検出器には高時間分解能を備えたカウンタを搭載がされている。実際の観測ではカウンタを基に時刻情報を検出した各イベントに付けてゆく。このイベントに付けられるイベントデータをここでは概念的に "LocalTime" と呼ぶことにする。

観測機器搭載カウンタは TI とは非同期であるため、定期的に TI と照合、時刻情報をラッチする仕組みになっている。LocalTime はこのラッチのタイミングで 2 種類に分けられており、定期的にラッチされるのを "ハウスキーピング (HK) データ"、イベントを検出したタイミングでラッチされるのを "イベント (event) データ" と呼んでいる。各検出器の LocalTime の時間分解能を表 2 に示す。定期的にラッチされる HK データは、そのタイミングでの TI データと組み合わせて RMAP レイヤを通り、メモリに書き込まれ地上に送信される。イベントデータは光子イベントの情報と Local Time が含まれる Space Packet で RMAP レイヤを通り、送信される。

表 2: 各観測機器の Local Time の時間分解能

	SXS	SXI	HXT	SGD-cc	SGD-WAM
LocalTime(HK) 時間分解能	$80 \mu\text{s}$	なし	$0.8 \mu\text{s}$	$0.8 \mu\text{s}$	$0.8 \mu\text{s}$
LocalTime(HK) bit 数	32	なし	32	32	32
LocalTime(event) 時間分解能	$5 \mu\text{s}$	4 s (@normal)	$25.6 \mu\text{s}$	$25.6 \mu\text{s}$	$16 \mu\text{s}$
LocalTime(event) bit 数	16	32	32	32	32

3 時刻精度悪化要因とエラーバジェット

3.1 時刻付けシステムで発生する時刻精度悪化要因の管理

前章で説明したように ASTRO-H には GPS 受信機 (GPSR) が搭載され、信号処理系の中央処理部 SMU では高い精度の時刻を受信することができる。SMU は GPS 受信機が受け取った時刻情報を TimeCode として 1/64 秒ごとに搭載機器へ配信する。そして、各検出器に搭載されている高時間分解能のカウンタによって光子イベントに付けられる時刻情報 LocalTime と合わせてラッチされ、時刻付けが行われる。

しかし、ASTRO-H が GPS 衛星から時刻情報を受信してから搭載機器が TimeCode をラッチするまでにはさまざまな要因により時刻情報に遅延と揺らぎが発生してしまう。そのため、我々は GPS 受信信号から搭載機器までの時刻配信や、光子検出時の時刻ラッチ、および、光子についての時刻情報の解析に至るまで、各ステップでの時刻精度を落とす要因を 7 つの項目に分け、各項目に時刻精度要求値を割り振ることで最終的な時刻精度目標 30 マイクロ秒を達成しようとしている (図 13)。

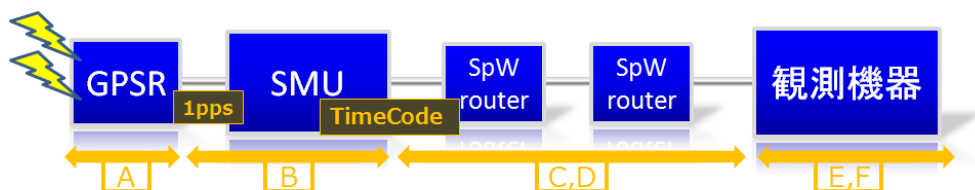


図 13: 時刻精度悪化要因のリスト

図 13 で示されている (A) ~ (F) 7 つの時刻精度悪化要因に ASTRO-H 軌道精度を加えたものが ASTRO-H の時刻精度を劣化させるすべての要因であり、システム要求値である 30 usec をそれぞれの要因に割り当て、そのエラーバジェットを個々で管理することで、システム全体の時刻精度を保証している。エラーバジェットの具体的な項目と要求される時刻精度の値を表 3 にまとめる。

表 3: エラーバジェットの内訳

ID	Component	検証項目	値
(A)	GPSR	TAI と GPSR からの 1 pps のジッタ	$< 0.02\mu\text{s}$
(B)	SMU	GPSR と TimeCode 間のジッタ	$< 0.5\mu\text{s}$
(C)	SpaceWire network	TimeCode 揺らぎ	$< 2.0\mu\text{s}$
(D)	SpaceWire network	TimeCode 配信遅延の補正精度	$< 1.0\mu\text{s}$
(E)	SpaceWire network (DE)	各検出器での TimeCode 受信処理	$< 1.0\mu\text{s}$
(F)	SpaceWire network (DE)	周期的信号の検出精度	$< 20.0\mu\text{s}$
(G)	Ground System	軌道精度	$< 3.0\mu\text{s} (= 1 \text{ km})$

エラーバジェット項目 (A) は GPSR が GPS 衛星から受信する TAI (国際原子時) の時刻と、それを基に GPSR が SMU に向けて配信する 1 pps 信号間のジッタ、項目 (B) はその 1 pps 信号を基に SMU が TimeCode を生成、配信する際に発生してしまう TimeCode 揺らぎである。項目 (C) は、複数のノードを通過し、SMU から観測機器まで配信される TimeCode に関する誤差であり、我々はこの項目 (C) を見積もるために ASTRO-H 衛星搭載品 (FM 品) を用いて、最終的なネットワークが組まれた状態にて測定試験を行った。項目 (D) は ASTRO-H ネットワークにおいて、SMU が TimeCode を各観測機器に配信するまでに発生する遅延を、計算より求めたときの実測値とのずれである。項目 (C), (D) についての詳細は第 5 章で説明する。項目 (G) は ASTRO-H の軌道を決定する際の系統誤差であり、ASTRO-H 設計時の保障値として時刻精度要求値を満たしていることが確認されている。

3.1.1 TimeCode 揺らぎ発生原理

時刻精度を悪化させる要因のひとつに TimeCode 揺らぎと呼ばれるものがある。TimeCode 揺らぎはジッタ (一般的に送信した信号の波形の時間的な揺らぎのことを意味する) の一種と見ることもできるが、TimeCode の性質から引き起こされる確率的な揺らぎであり、TimeCode が通過するノードの数で揺らぎの値が決定する。そのため、本論文では狭義として TimeCode 揺らぎと呼ぶことにする。第 2 章で述べた通り、SpaceWire ネットワークは以前までの衛星で使用されていた時刻配信専用線を使用せず、TimeCode を配信することで時刻情報の同期を行っている。SpaceWire ネットワークでは配信されるコードにおいて時刻の同期の重要性から TimeCode のみが最優先コードとして配信されるように設定されている。つまり、TimeCode は配信されている Data Character 間に割り込んで送信が可能ということである。しかし、TimeCode は Data Character や NULL Code が配信された後にしか割り込むことができないため、TimeCode の配信にはランダムに (Data Character ならば 10 bit、NULL Code ならば 8 bit 分) 待ち時間が生じてしまう。

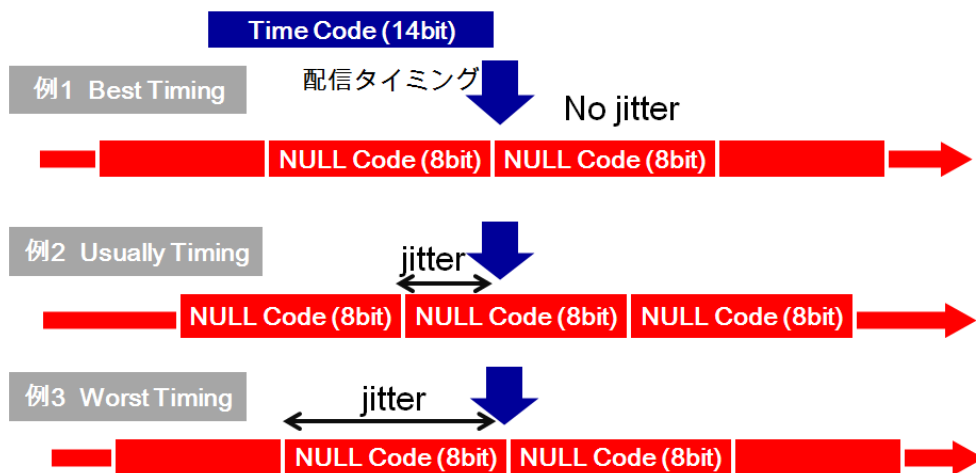


図 14: TimeCode 配信タイミングにより発生する TimeCode 揺らぎの例

図 14 はルーターが一段の 1 hop の場合に配信されている NULL Code に割り込ませて TimeCode

を配信する際に発生する TimeCode 揺らぎの例であり、TimeCode 配信タイミングが NULL Code 間である場合は TimeCode 揺らぎは発生しない (例 1)。しかし、TimeCode 配信タイミングが、8 bit ある NULL Code の途中であれば最大で 8 bit 分の遅延が発生してしまう (例 2, 3)。その結果、TimeCode はノードを通過するごとに、確率的な遅延を発生させる。TimeCode 揺らぎは発生要因が、TimeCode の配信方法によるランダムな値であるため、キャリブレーションを行うことができず、時刻精度を悪化させる要因となっている。

3.2 ASTRO-H ネットワーク試験に関する先行研究

ASTRO-H には科学目標より要請される時間分解能を達成するために、各検出器に高時間分解能のカウンタが搭載されている。観測の際は、このカウンタにおける時刻 Local Time と衛星時刻 TI の組み合わせから、時刻情報を検出された各イベントに対し付けてゆく。しかし、この時刻付けシステムは ASTRO-H の前身であるすざく衛星とも異なる新しいシステムであることから、正しく機能するかを確認する必要があった。そのため、これまでにこの時刻付けシステムが機能するかどうかを民生品で構築された単純な SpaceWire ネットワークで検証され、正しく機能することが確かめられてきた。

3.2.1 衛星搭載同等品を用いた機器単体試験およびネットワーク試験

ASTRO-H 衛星内ネットワークは複数の SWR で接続され、複数のリンクレートで配信が行われる複雑なネットワークである。岩瀬修論 [18] では FM 品を用いた検証の事前試験として、衛星搭載同等品を用いたセットアップでの確認試験が行われた。試験では SWR, インテリジェントノード基盤である SpaceCard (SpC), ノンインテリジェントノード基盤である MIO Board, MIO Board と同様の基盤および I/F を兼ね備えた信号処理基盤 DIO Board について固定遅延およびジッタを各リンクレートで測定した。さらに、模擬的な ASTRO-H ネットワークを再現し、各地点での時刻情報の到達時刻を測定することでネットワーク内を通過する TimeCode の遅延および TimeCode 揺らぎの値を測定した。測定試験の結果、遅延の値は単純に各機器単体の固定遅延の値を足すことで推定できると結論づけられた。

3.2.2 SMU 固定遅延およびジッタの測定

この測定試験はキャリブレーション用データとなる SMU 固定遅延とエラーバジェット項目 (B) 「SMU における GPSR と TimeCode 間のジッタ」を測定することを目的とし 2013 年に JAXA 筑波宇宙センターにて行われた (中谷卒論, 2013)。測定方法は GPSR から配信される 1 pps 信号と、それを受信した SMU が TimeCode を生成・配信したことを示す信号の二種類の信号をオシロスコープで測定、差を求めることで固定遅延とジッタを見積もった。試験は 2 回行い、それぞれ SGD1-DE, SGD1-DPU 立ち上げ前 (試験 1) と SGD1-DE, SGD1-DPU 立ち上げ後 (試験 2) に行った。

結果を図 15 と図 16 に、結果を表 4 に示す。

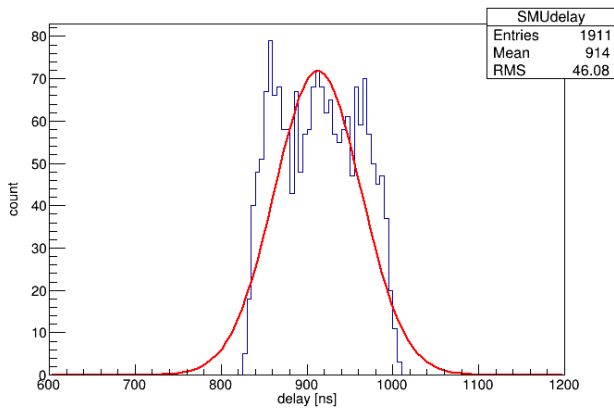


図 15: SMU 遅延のヒストグラム (試験 1)

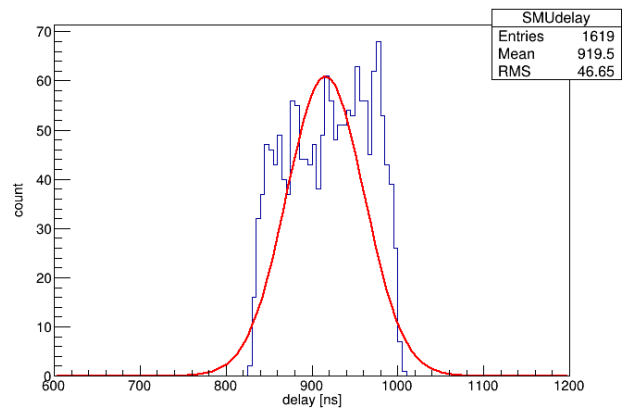


図 16: SMU 遅延のヒストグラム (試験 2)

表 4: SMU 時刻配信精度試験の測定結果

	遅延の平均値	σ	ジッタ (3σ)
試験 1	539 ns	50 ns	150 ns
試験 2	541 ns	45 ns	135 ns

取得したデータの解析から遅延時間のヒストグラムを作成し、ガウシアンでフィッティングした結果、標準偏差は SGD1-DE, SGD1-DPU 立ち上げ前 (試験 1) で $\sigma = 50$ ns、SGD1-DE, SGD1-DPU 立ち上げ後 (試験 2) で $\sigma = 45$ ns であった。エラーバジェットにおける時刻精度の定義をガウシアンでフィッティングしたときの 3σ の値とすると、今回の試験において試験 1 では $3\sigma = 150$ ns、試験 2 では $3\sigma = 135$ ns であり、 $< 0.5\mu\text{s}$ という精度を満たす結果となった。さらに、エラーバジェット項目 (B) の時刻精度要求値は $< 0.5\mu\text{s}$ であり、測定結果はこの要求を満たすものであることが検証された。

4 ASTRO-H 主要経路における遅延および TimeCode 揺らぎ

我々は ASTRO-H ネットワーク試験の最終目的である ASTRO-H FM 品を用いた検証試験のために模擬的に再現したネットワークでの検証試験 (岩瀬修論 [18]) を行ってきた。しかし、ASTRO-H 衛星ネットワークは複数の SWR を用いた複雑な構造をとっており、FM 品を用いた検証試験でネットワーク内部で発生する遅延および TimeCode 揺らぎを各信号経路すべてにおいて測定することは容易ではない。そのため、我々は ASTRO-H ネットワーク主要経路において発生する遅延および TimeCode 揺らぎの予想値を推定し、推定経路のうち一経路について実測試験を行った。本章では、この ASTRO-H ネットワーク主要経路における遅延および TimeCode 揺らぎの計算方法と見積もり結果について報告する。

4.1 ネットワーク試験実測値と予想値の比較

岩瀬修論 [18] より、ネットワークにおいて発生する遅延は各コンポーネントの固定遅延を単純に足し合わせた値で表せることが確かめられた。そのため、我々もこれに倣い計算を行う。岩瀬修論 [18] では模擬的に再現した ASTRO-H ネットワークにおける遅延および TimeCode 揺らぎの値だけではなく、各コンポーネント単体での固定遅延および TimeCode 揺らぎの値も測定されている。結果を表 5 に示す。TimeCode 揺らぎの理論値とは TimeCode の配信時に発生する最大の待ち数である 8 bit 分を各リンクレートで割り算した値である。また、SWR の固定遅延および TimeCode 揺らぎの値はリンクレートが 50 MHz の場合のみ FM 品に関して NEC により測定が行われており、結果は固定遅延：694 ns, TimeCode 揺らぎ：160 ns である。

表 5: 岩瀬修論における衛星搭載同等品を用いた単体試験の結果

リンクレート	固定遅延			TimeCode 揺らぎ		
	50 MHz	25 MHz	20 MHz	50 MHz	25 MHz	20 MHz
SWR	680 ns			162 ns		
SpaceCard			1590 ns			390 ns
MIO Board			1600 ns			400 ns
SPW DIO Board	460 ns	850 ns	1020 ns	170 ± 20 ns	350 ± 20 ns	410 ± 20 ns
理論値				160ns	320 ns	400 ns

この固定遅延の値から各リンクレートでの SWR の固定遅延および TimeCode 揺らぎを見積もる。固定遅延を発生させる要因にはバッファや TimeCode の処理、配信にかかる時間などが考えられるが、このうちリンクレートに依存する要因は 14 bit の信号である TimeCode を配信するためにかかる待ちが支配的であると仮定する。

すなわち、14 bit の TimeCode を 50 MHz で配信するには 280 ns の待ち、25 MHz で配信するには 560 ns の待ちが発生するとする。この仮定より測定および計算から予想される SWR 固定遅延の値は表 6 となる。

表 6: SWR で発生する固定遅延の予想値

	SWR 固定遅延予想値			
リンクレート	50 MHz	25 MHz	20 MHz	10 MHz
SWR	694 ns	974 ns	1114 ns	1814 ns

SWR の各リンクレートにおける固定遅延が見積もられたため、この値を基にネットワークにおいて発生する遅延および TimeCode 揺らぎを計算によって再現する。計算にはシェルスクリプト言語 Python を使用する。

ネットワークにおいて発生する遅延は TimeCode が通過する機器で発生する固定遅延の単純な足し算で表すことができることが確認されたため、通過する機器の配信時リンクレートを考慮した固定遅延を個別に足し上げていくことで求める。TimeCode 揺らぎは理論的に TimeCode 配信時の待ちは 0 ～ 8 bit の確率的な値であるため、0 ～ 8 の整数の乱数を発生させ、その整数を機器の配信時リンクレートで割り算することで再現する。この計算方法では、例えば SWR (50 MHz) - SWR (25MHz) - の 2 hop での結果ヒストグラムは図 17 である。

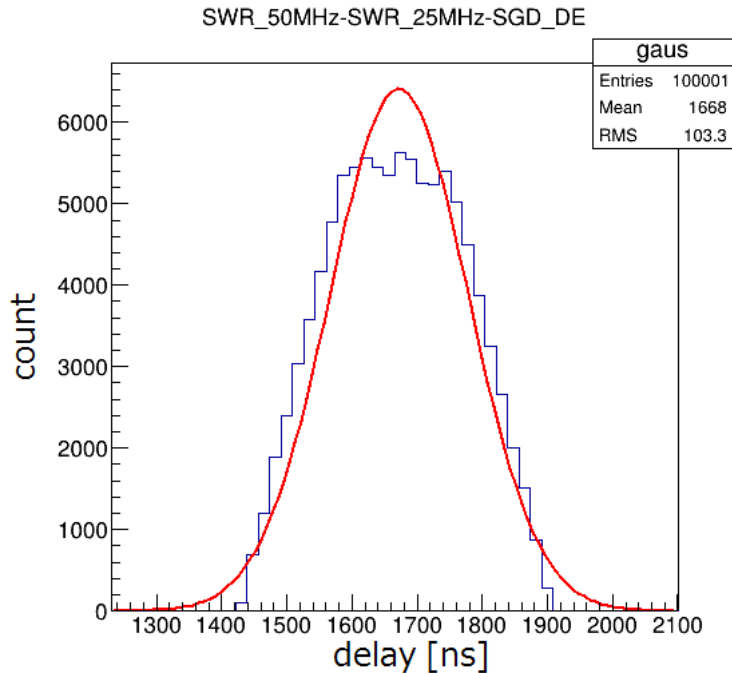


図 17: SWR (50 MHz) - SWR (25MHz) - で発生する固定遅延予想値のヒストグラム

ヒストグラムをガウシアンでフィッティングした時の中央値を遅延、 3σ の値を TimeCode 揺らぎと定義すると、計算結果は、遅延：1668 ns, TimeCode 揺らぎ：310 ns となる。また発生する TimeCode 揺らぎは 50MHz, 25 MHz の 2 hop であるため、理論的には 160 ns + 320 ns = 480 ns となる。前節で説明した計算方法を用いて ASTRO-H ネットワークにおける主要経路において SMU が GPSR からの 1pps 信号を受信してから、各観測機器 DE 部分での TimeCode

ラッチタイミングまでの遅延および TimeCode 揺らぎを計算より見積もる。計算する主要経路は図 18 で示した 8 通りである。このうち、HXI1/2 -DE, DPU 間のケーブルの長さは約 6 m あるため、ケーブル長さにより発生する遅延 30 ns (ケーブル長 6 m 当たり) を考慮する。

機器名	通過する機器と配信時linkrate							
SXS-PSP	SMU	SRW1-DH	SWR1-SI	SXS-SWR	PSP-SpC_FPGA	PSP-SpC_CPU	PSP-MIO_FPGA	
SXS-FEW					SXS-FEW			
HXI1				HXI1_DE_FPGA	ケーブル6m	HXI1_DPU_MIO1	HXI1_DPU_MIO2	
SGD1				SGD1_DE-FPGA	SGD1_DPU_MIO1			
AMS			SWR1-SI	AMS-LD				
SXI			SRW3-DH	SWR3-SI	SXI_DE_FPGA	SXI_PE_MIO1		
HXI2					HXI2_DE_FPGA	ケーブル6m	HXI2_DPU_MIO1	HXI2_DPU_MIO2
SGD2					SGD2_DE-FPGA	SGD2_DPU_MIO1		
配信時 linkrate (MHz)								
		50						
		25						
		20						
		10						

図 18: ASTRO-H ネットワーク主要経路での通過機器および配信時リンクレート

SMU が GPSR からの 1pps 信号を受信してから TimeCode を配信するまでに発生するジッタは中谷卒論 [19] での測定結果 (固定遅延 : 540 ns, ジッタ : 143 ns (3σ)) を使用する。

各観測機器における LocalTime と TI のラッチは MIO Board で行われている。
SXS において SXS - SWR - A 配信された信号は PSP - SpC (FPGA) と PSP - SpC (CPU) を通過し、PSP - MIO へ配信される。そのため、SXS では内部ルーター 2 hop 分を考慮しなければならない。SpC の FM 品、または EM 品を用いた単体試験は行われていないため、岩瀬修論 [18] で配信時リンクレート 20 MHz の場合のみ測定されている SpC 単体での固定遅延および TimeCode 揺らぎの値を使用する。しかし、岩瀬修論 [18] で求められている SpC の固定遅延および TimeCode 揺らぎは内部ルーター 1hop であるため、SXS での内部ルーター 2 hop 分を再現することができない。そのため、SpC (FPGA) と SpC (CPU) の固定遅延および TimeCode 揺らぎの値が等しいと仮定し、実測値の 2 倍を 2 hop 分の固定遅延および TimeCode 揺らぎとして計算する。

前節同様の計算方法で、ネットワーク主要 8 経路 (図 18) で発生する遅延および TimeCode 揺らぎを計算を行う。ただし、SXI.DE ~ DPU 間の固定遅延は、三菱重工により FM 品を用いた測定試験が行われており、試験結果は (固定遅延) = 1000 ± 680 ns であった。そのため、計算では試験実測値 1000 ns を SXI.DE ~ DPU 間の固定遅延、680 ns の 68.3 % を $\pm 1\sigma$ としたときの 3σ を TimeCode 揺らぎとして使用した。

4.2 推定結果

計算の結果求めたネットワーク主要 8 経路で発生する遅延および TimeCode 揺らぎの値を表 7 にまとめる。遅延および TimeCode 揺らぎの定義は、それぞれヒストグラムをガウシアンでフィッティングした時の中央値および 3σ の値とする。

表 7: ASTRO-H SpW network における遅延 TimeCode 揺らぎの推定値

機器名	遅延	TimeCode 揺らぎ [3σ]
SXS-PSP	6082 ns	767 ns
SXS-FEW	2902 ns	270 ns
HXI1	5418 ns	745 ns
SGD1	3798 ns	476 ns
AMS	3048 ns	717 ns
SXI2	3902 ns	701 ns
HXI2	6112 ns	766 ns
SGD2	4492 ns	493 ns

求まった遅延は時刻情報の補正を行うためのキャリブレーション用のデータとして使用する。また、発生する TimeCode 揺らぎはキャリブレーションにより取り除くことができない値であるため、時刻精度としてエラーバジェットでの要求値との比較を行う。

5 ASTRO-H ネットワーク試験 @ TKSC

この章ではエラーバジェット項目 (C) 「SpaceWire network における TimeCode 揺らぎ」および項目 (D) 「TimeCode 配信遅延の補正精度」の測定を目的に筑波宇宙センターにて行われた ASTRO-H ネットワーク試験について、その試験内容と測定結果を説明する。前章で説明した、ASTRO-H ネットワークにおいて発生する遅延および TimeCode 揺らぎの予想値と実測値の比較検証の結果を説明する。

5.1 試験内容

試験は筑波宇宙センターにて、一次噛み合わせ試験中の ASTRO-H FM 品を用いて行われた。試験は 2 回行い、それぞれ SGD1-DE, SGD1-DPU 立ち上げ前 (試験 1) と、SGD1-DE, SGD1-DPU 立ち上げ後 (試験 2) に行った。SGD1 立ち上げ前後で測定を行うことで疑似イベントデータが発生していることの影響を確認する。

試験のセットアップを図 19 に示す。

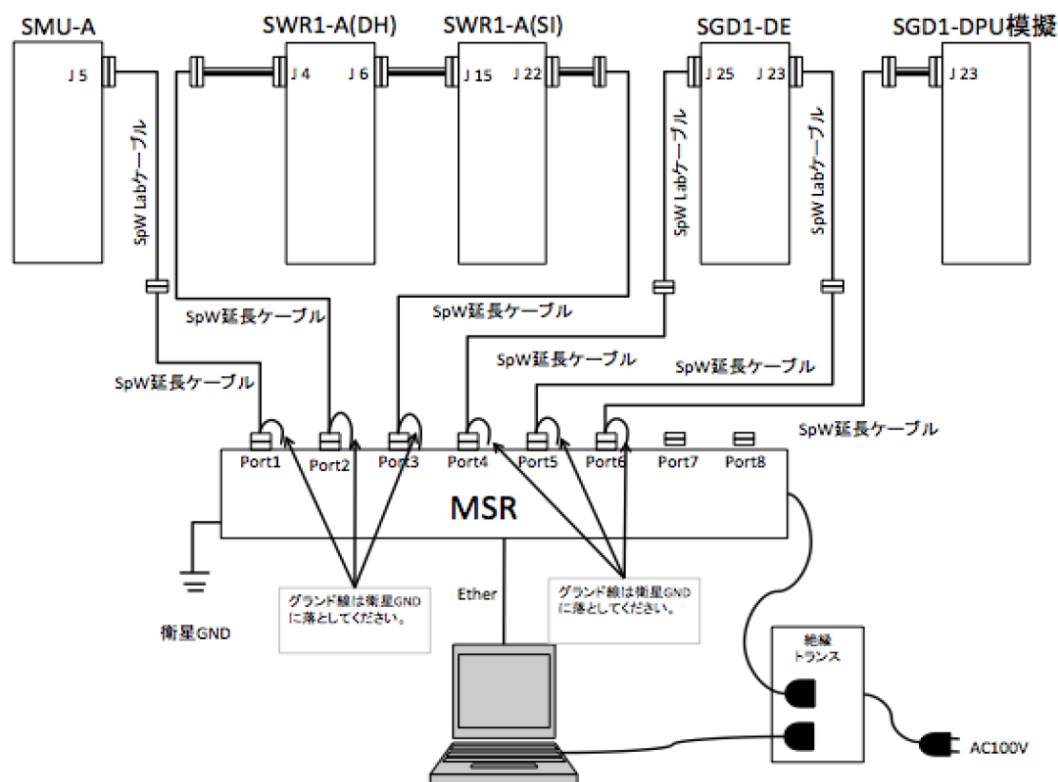


図 19: ネットワーク試験セットアップ図

SMU-A と SWR1-A (DH) の間を測定点 1、SWR1-A (SI) と SGD1-DE の間を測定点 2、SGD1-DE と SGD1-DPU 模擬の間を測定点 3 とする。TimeCode のモニターには MRS (Multi SpW Recoder) と呼ばれる通過するパケットの通過時間を記録することができる装置を使用した。MSR には SpW I/F の口が 8 つ搭載されており、各測定点での TimeCode の遅延時間を記録す

る。測定時間は共に 10 分間である。また、SWR1-A , SGD-DE の Port Map は以下の様である (図 8, 9)。

表 8: SWR1-A Port Map

Port		接続機器	Tx[MHz]	Rx[MHz]
DH Port	4	SMU-A	50	50
	6	SWR-A-SI	50	50
SI Port	1	SWR-A-DH	50	50
	8	SGD1-DE	25	20

表 9: SGD-DE Port Map

Port			接続機器	Tx[MHz]	Rx[MHz]	備考
SGD1-DE	FPGA	1	SGD1-DE(CPU)	※ 50	20	※ SGD1-DE の CPU リセット解除 前は 10MHz
		2	SWR1-A	※ 20	25	
		3	SGD1-MIO	※ 20	20	

ここで試験 1, 2 共に SGD-DE CPU リセット解除後の測定のため SGD-DE からのリンクレートは変化していないことに注意する。測定試験は測定点 1 と測定点 2 (SMU A SWR1-A) 間 (測定経路 1)、測定点 1 と測定点 3 (SMU A SGD1-DE) 間 (測定経路 2) について計測を行った。

5.2 測定結果

測定経路 1, 2 における遅延時間ヒストグラムをガウシアンフィットした結果とフィッティング結果のパラメーターを表 20, 21 に示す。

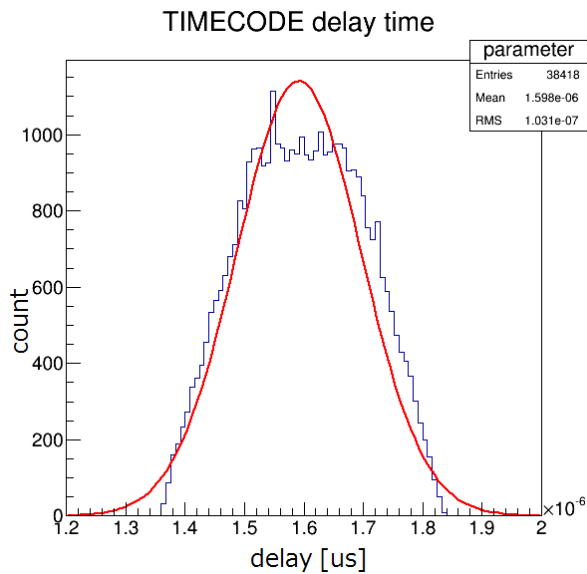


図 20: [1] 測定経路 1 遅延時間ヒストグラム

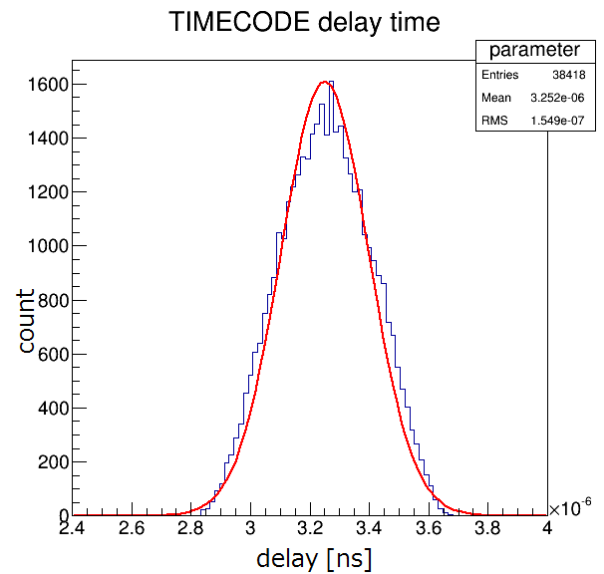


図 21: [2] 測定経路 2 遅延時間ヒストグラム

以上の結果より遅延および TimeCode 揺らぎは測定経路 1 で遅延 : 1592 ± 0.6 ns、TimeCode 揺らぎ (3σ) : 315 ns、以上の結果より測定経路 2 で遅延 : 3252 ± 0.8 ns、TimeCode 揺らぎ (3σ) : 444 ns となった。

同様に試験 2 における測定経路 1, 2 の結果ヒストグラムをガウシアンフィットした結果とフィッティング結果のパラメーターを図 22, 23 に示す。

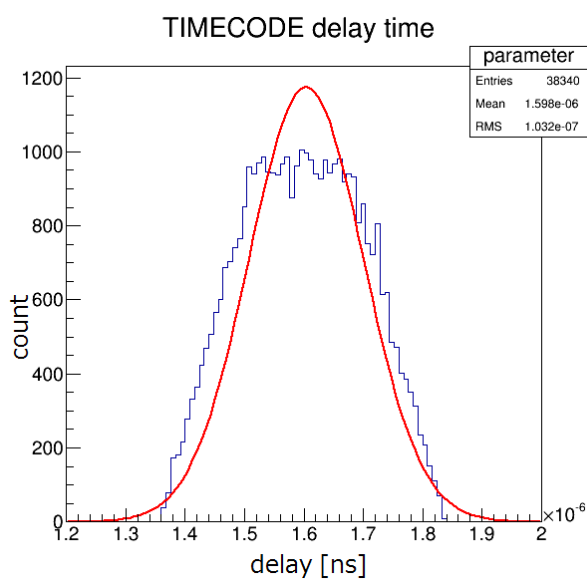


図 22: [1] 測定経路 1 遅延時間ヒストグラム

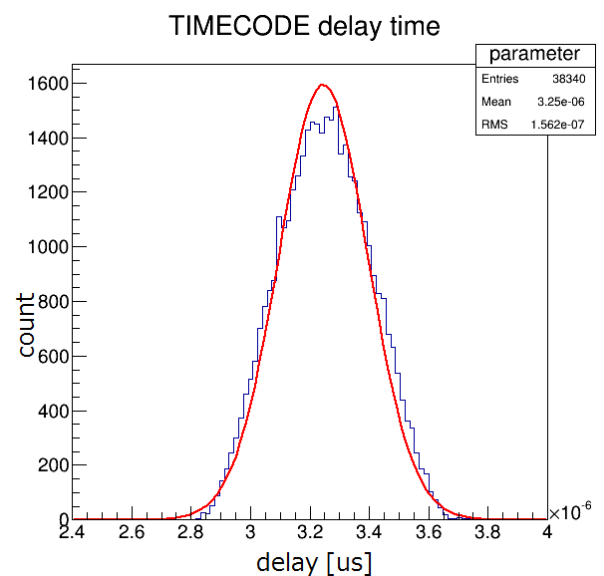


図 23: [2] 測定点 1 と測定点 3 (SMU A SGD1-DE) の間の遅延時間ヒストグラム

以上の結果より、遅延および TimeCode 揺らぎは測定経路 1 で遅延：1604 ± 0.5 ns、TimeCode 揺らぎ (3 σ)：288 ns、以上の結果より、測定経路 2 で遅延：3246 ± 0.8 ns、TimeCode 揺らぎ (3 σ)：444 ns となった。

遅延および TimeCode 揺らぎ予想値の推定は前章の ネットワーク主要経路における遅延およびジッタの予想値の計算方法で、測定経路 1, 2 における遅延および TimeCode 揺らぎ予想値を求めたものである。試験結果を表 10 にまとめる。

表 10: ネットワーク試験結果チェック表

	測定経路	予想値		測定結果	
		遅延	TimeCode 揺らぎ	遅延	TimeCode 揺らぎ
試験 1	SMU-A ~ SWR1-A	1668 ns	310 ns	1529 ± 0.6 ns	315 ns
	SMU-A ~ SGD1-DE	3258 ns	496 ns	3252 ns ± 0.8 ns	444 ns
試験 2	SMU-A ~ SWR1-A	1668 ns	310 ns	1604 ± 0.5 ns	288 ns
	SMU-A ~ SGD1-DE	3258 ns	496 ns	3246 ns ± 0.8 ns	444 ns

5.3 考察

5.3.1 エラーバジェット項目 (C), (D) の評価

発生する TimeCode 揺らぎは試験 1, 2 で共に 444 ns であり、エラーバジェット項目 (C) 要求値を満たすことを確認した。

続いて、実測値と予想値を比較する。試験 1 について、発生する遅延の実測値は、予想値と比較して、測定経路 1：91.7 %、測定経路 2：99.8 % であり、発生する TimeCode 揺らぎは、予想値と比較して、測定経路 1：98.4 %、測定経路 2：89.5 % で一致した。試験 2 について、発生する遅延の実測値は、予想値と比較して、測定経路 1：96.1 %、測定経路 2：99.6 % であり、発生する TimeCode 揺らぎは、予想値と比較して、測定経路 1：92.9 %、測定経路 2：89.5 % で一致した。試験 1, 2 両試験において、実測値が予測値に収まる値となっており、発生する遅延は 10 % 以内で一致している。そのため、SWR において固定遅延を発生させる要因のうち、リンクレートに依存した要因は TimeCode の配信にかかる待ちが支配的であると考えられる。

さらに、エラーバジェット項目 (D) 「TimeCode 配信遅延の補正精度」とは SMU から TimeCode が配信され各検出器にラッチされるまでに発生する遅延の真値と予想値とのずれであり、要求値は 1.0 μ s 以内と決まっているため、この要求値を満たしているかを確認する。すべての経路について発生する遅延の真値を確認することは難しいため、エラーバジェット項目 (D) の評価ではネットワーク試験で実測を行った SMU - SGD1-DPU で発生する遅延の実測値と予想値のずれを TimeCode 配信遅延の補正精度と定義し、要求値を満たしているかを確認する。発生する遅延の予想値と実測値のずれを表 11 にまとめる。

表 11: ネットワーク試験結果チェック表

	遅延予想値	遅延実測値	予想値と実測値とのずれ
試験 1	3258 ns	3252 ns $\pm$ 0.8 ns	6 ns $\pm$ 0.8 ns
試験 2	3258 ns	3246 ns $\pm$ 0.8 ns	11 ns $\pm$ 0.8 ns

表 11 より、試験 1, 2 とともにずれの値がエラーバジェット項目 (D) 要求値の $1.0 \mu\text{s}$ を満たすことが確認された。そのため、エラーバジェット項目 (D) はクリアとする。

6 各検出機器の周期的信号に対する時刻決定精度の評価

前章までに ASTRO-H が GPS 衛星から時刻情報を受信し、各検出機器に配信、ラッチされるまでに発生する遅延およびジッタの値が検証してきた。しかし、ASTRO-H が高い時刻精度で観測を行うためには、さらに検出器における時間分解能の影響を考慮する必要がある。これまでに説明してきたとおり、ASTRO-H では各検出機器に搭載されている高時間分解能のカウンタを用いてイベントに時刻情報を付加していく。したがって、検出イベントに付加する時刻情報には検出機器の LocalTime 時間分解能に応じた不定性が存在する。エラーバジェットではこの不定性を項目 (F) 「周期的信号の検出精度」として扱っている。そのため、パルサーなど早い時間周期を持つ天体を観測する場合、この不定性の影響を検証する必要がある。

この章では、LocalTime 時間分解能の限界のために時刻情報に生じる不定性を検証し、エラーバジェットの要求値である $20\ \mu\text{s}$ を検証するために行ったシミュレーションおよび検証結果についてまとめる。

6.1 検証目的

各検出器では高時間分解能のカウンタを用いて検出した光子イベントに到来時刻を付けていく。ここで、各検出器における時間分解能とはカウンタの発生させるクロックの値であり、観測したイベントはクロックの一周期ごとにラッチされていく。そのため、検出イベントに付加される時刻情報には最大で 1 クロック分のずれが発生することとなり、時刻精度を悪化させる要因のひとつとなっている。エラーバジェットではこの不定性を項目 (F) 「周期的信号の検出精度」としてまとめており、時刻精度 $20\ \mu\text{s}$ が要求値として決まっている。LocalTime はハウスキーピング (HK) データとイベント (event) データの 2 種類のうち、X 線光子を検出したタイミングでラッチされる event データの時間分解能は、SXS で $5\ \mu\text{s}$ 、HXI で $25.6\ \mu\text{s}$ である。よって、1 光子ごとの到来時刻にはそれぞれ対応する時間分解能の不定性が生じる。しかし、中性子星パルサーの観測のように入力信号が周期的であることが分かっている場合、複数の光子を統計的に処理することで、入力された周期を時間分解能以上の精度で計測することが可能である。例えば、パルサーを 10^5 秒間観測した場合、 10^5 秒間にパルスが 100000 個到来するか 99999 個到来するかを判別できれば、観測したパルスが $1.00000\ \text{s}$ 周期であるか $1.00001\ \text{s}$ 周期であるかを見分けることができる。この場合、 $1 / 100000$ の精度でパルスの検出を行うことができるため、周期検出精度は $10\ \mu\text{s}$ オーダーとなる。すなわち、周期的信号の検出には観測対象のパルサーの周期に対してどの程度の時間観測を行うかが重要となってくる。この章では、さまざまな周期 (Period [s])、flux $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}$ のパルサーの疑似観測を再現し、各パルサーの周期決定精度を推定、エラーバジェット要求値を満たすことを確認することが目的である。

6.2 検証方法

6.2.1 疑似観測の入力天体

シミュレーションを行う上で必要となるパルサーの疑似イベント作成には ASTRO-H Software Calibration Team (SCT) が作製した heasim Version 0.2 を使用する。heasim とは ASTRO-H の

各検出器ミッションを再現する数値解析ツールであり、観測機器、観測天体に関する情報を入力することでモンテカルロ法を用いて観測結果の再現を行うことができる。検証では高い時間分解能で観測を行うことができ、さらに heasim を用いてパルサーの疑似イベント作成が可能な SXS および HXI について検出精度を評価する。

シミュレーションでは 人工衛星打ち上げ後キャリブレーション用のデータ取得のために観測されることの多い ”かにパルサー” を観測天体とした。かにパルサーのパラメータを表 12 にまとめる。

表 12: 疑似観測の入力天体のパラメータ

Parameter	値
観測帯域	0.3 ~ 12.0 keV (SXS) 5.0 ~ 80.0 keV (HXI)
Exposure (ks)	20, 2000
RA, Dec	83d63'32", 67d98'55"
spectral model	powerlaw
PhotonIndex	2.1
$N_{\text{H}}^{\text{Galactic}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ *	0.34×10^{-22}

さらに、heasim でのサンプル作成時に必要となる SXS, HXI の有効面積、バックグラウンドを指定する。今回は周期の検出精度を見積もるため、バックグラウンドは 7 eV の None X-ray Background (NXB) のみを考える。有効面積およびバックグラウンドのデータは heasim パッケージ内同封のファイルを使用した。使用したデータファイル名を表 13 にまとめる (レスポンスファイルのダウンロード先: ASTRO-H SCT team wiki <http://www.astro.isas.jaxa.jp/next/astroh-sct/wiki/index.php?cmd=read&page=response&word=response>)。

表 13: レスポンスファイル名

Instrument	response file	data name
SXS	arf file	sxt-s_140505_ts02um_intallpxl.arf
	rmf file	ah_sxs_7ev_20130806.rm -H-res primary, 7eV resolution (requirement)
	response file	sxs_psfimage_20140618.fits
	background	sxs_nxb_7ev_20110211_1Gs.pha -nxb 7eV background
HXI	arf file	sxt-s_140505_ts02um_intallpxl.arf
	rmf file	ah_hxt_flat_vig30_20150618.arf
	background	ah_hxi_nxb_30x30mm2_20150618.pha

SXS では観測天体からの光量の調整を行うシールドはオープンとしている。以上の入力パラメータおよびレスポンスファイルで疑似イベントを作成する。

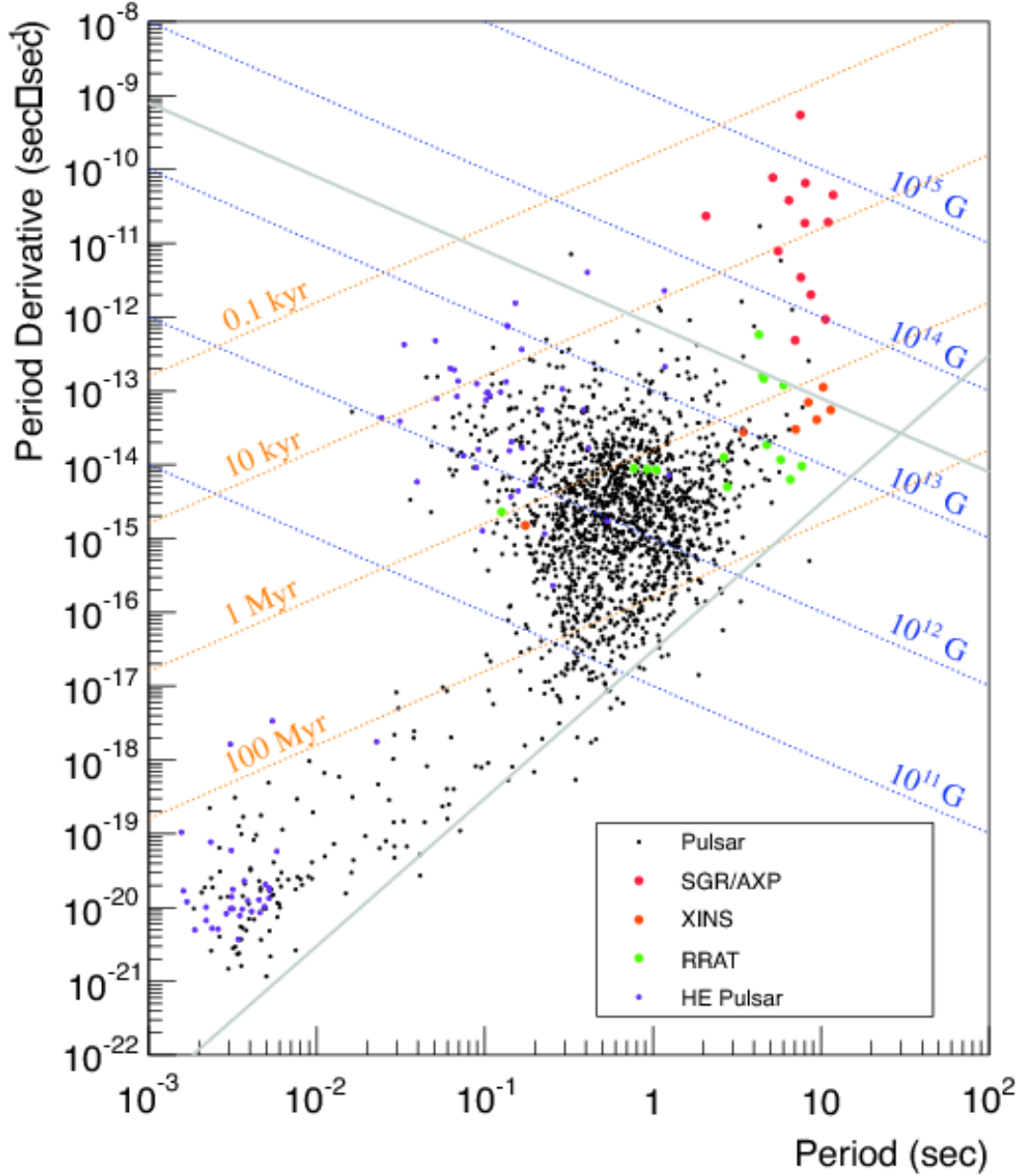


図 24: パルス周期とパルス周期の減衰率空間における中性子星パルサー分布図 ([14])

また、パルサーの flux および Period は、より現実的な観測を再現するため、図 24 の PPdot 図と呼ばれるパルス周期とパルス周期の減衰率空間におけるパルサーのプロット参照し、疑似的に再現するパルサーの周期を 1 ms - 10 s とした。また、flux はかにパルサーの flux 1.0×10^{-10} から 3 桁小さい $1.0 \times 10^{-13} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ とした。

6.2.2 検出器・データ解析模擬

今回の heasim を用いての数値計算では各観測機器の LocalTime 時間分解能および光子検出を行うことができない時間 (Dead time) の影響を再現することができない。実際の観測では SXS で

は $5\ \mu\text{s}$, HXI では $25.6\ \mu\text{s}$ の時間分解能が存在する。そのため、今回の数値計算では 各観測機器の Localtime 時間分解能の影響を考慮し、周期検出精度の見積もりを行った。また、SXS カロリメータの波形は時定数が長いため、イベント入射直後に次のイベントが入射するとエネルギーの計算精度が下がってしまう。そのため、イベントのトリガの前後の時間間隔によってイベントにグレードを付けることでイベントの選別を行っている。このイベント選別の仕組みは ” グレード付け ” と呼ばれており、イベントの選別時間幅 (δt) の定義は図 25 で示されている t_p, t_n であり、この δt によって各イベントに High primary (Hp), Medium-primary (Mp), Medium-secondary (Ms), Low-primary (Lp), Lowsecondary(Ls) の 5 つのグレードを付加する。

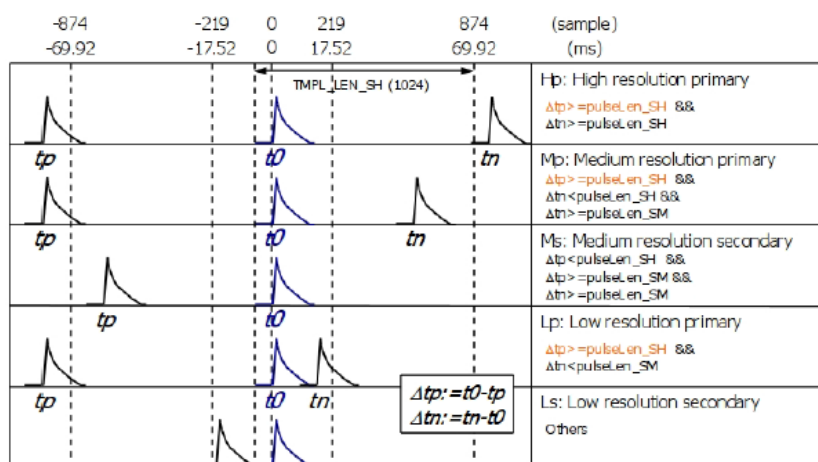


図 25: SXS グレード付けにおける各グレードの定義

解析ユーザーはエネルギー分解能をあげてスペクトル解析を行いたい場合、周期検出精度は低下してしまうが、Lp, Ls を消去することで必要なエネルギー分解能を得ることができる。そのため、イベントを消去する仕組みを模擬し、その影響を考慮した上での周期検出精度の見積もりを行う必要がある。

6.2.3 評価方法

再現した疑似的な観測状態において、疑似イベントの周期性を項目 (F) の要求値である $20\ \mu\text{s}$ 以内に検出可能であるかを評価する方法について説明する。この評価では、時間周期を持ったイベントを任意の周期でライトカーブを畳み込み、 χ^2 検定を用いて評価していく。ライトカーブの畳み込みとは、ライトカーブをある周期 P で区切り、区間ごとに存在するイベントデータを足し合わせて $0 \sim P$ までの時間幅で足しあわされたライトカーブを作成する操作である。例えば、周期が $10\ \text{s}$ のパルサーを任意の周期 $P = 10\ \text{s}$ で区切り、畳み込むとすると、図 26 のようになる。

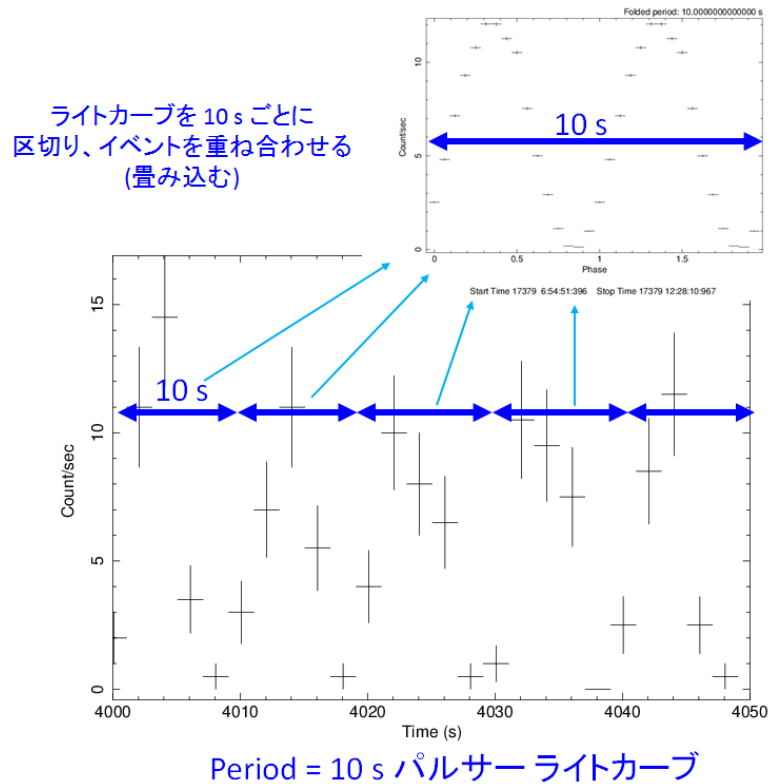


図 26: 周期 10 s のパルサーを $P = 10$ s で畳み込む場合の操作。ライトカーブを $P = 10$ s で区切り、区間ごとに存在するイベントをすべて重ね合わせる。すると、右上図のように 10 s 周期で変動するパルサーの周期性が明らかになる。

続いて、この畳み込みライトカーブを直線フィッティングし、 χ^2 値の比較を行う。フィッティングには畳み込みライトカーブの縦軸：count / sec の平均値を切片とした直線を選択する。畳み込んだライトカーブに周期性が検出されれば χ^2 値は高くなり、周期が検出されない場合畳み込みライトカーブは縦軸の平均値を切片とした直線に近づくため χ^2 は低くなる。

そして、この χ^2 検定を任意の時間範囲 search region [個]、調査する分解能 search resolution [s] で行うことで、最も良く周期検出が行われている周期を探していく。そのため、出力は横軸に調査する分解能 (search resolution[s]) $\times$ 時間範囲 (search region[個]) で表される探索範囲 [s]、縦軸 χ^2 値のヒストグラムとなる (図 27)。

この周期決定精度の評価には efsearch (ver. 1.1) と呼ばれる NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) から配布されている周期検出用解析ソフトを使用する。

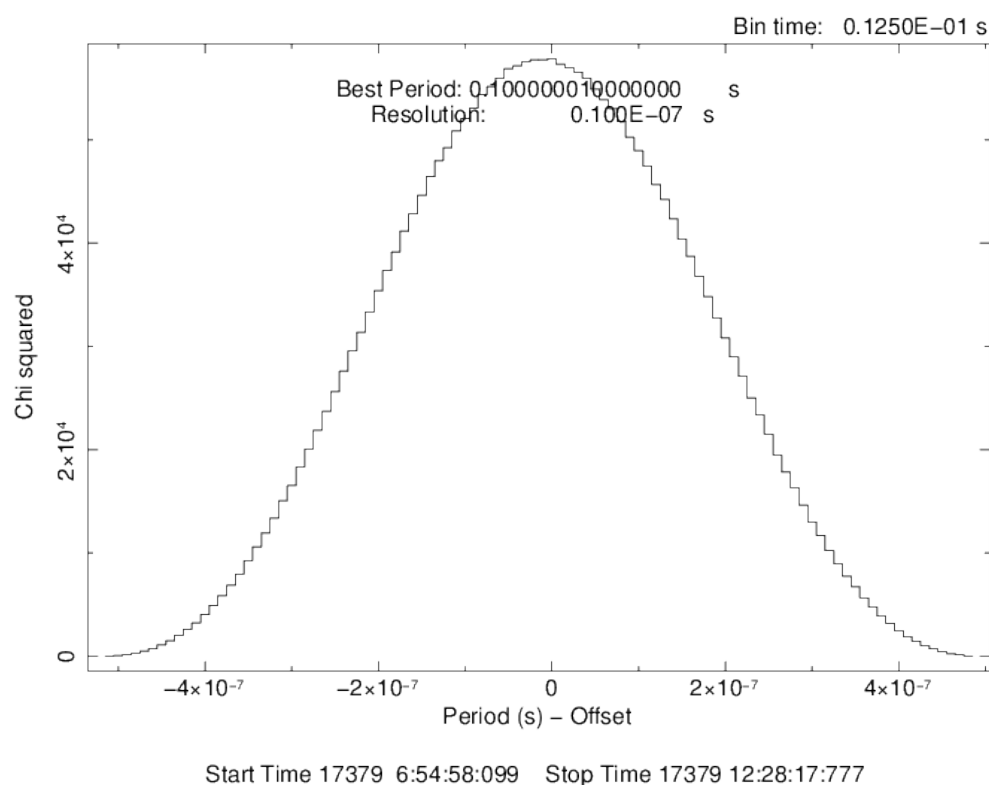


図 27: efsearch での 100 ms パルサーの周期検出の出力ヒストグラム

ここで、結果ヒストグラムの裾の広がりや周期性信号の検出精度によって起こる不定性が要因である。疑似イベント作成時に指定した周期からずれが少ないほど χ^2 の値が高くなり、周期の判別を行うことが難しくなっている。そのため、この結果ヒストグラムをガウシアンでフィッティングし、周期性信号の検出精度を評価する。図 28 は図 27 のヒストグラムをガウシアンでフィッティングした結果である。

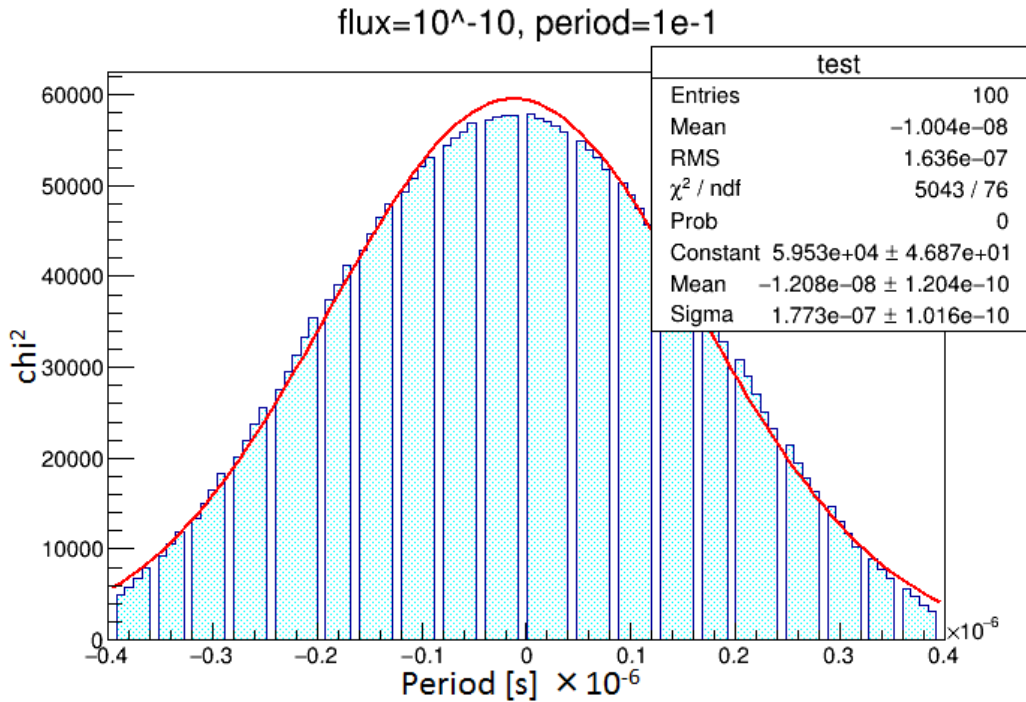


図 28: efsearch でのヒストグラムをガウシアンでフィッティングしたプロット

ヒストグラムをガウシアンでフィッティングしたときの半値全幅 (FWHM) の値を周期的信号の検出精度と定義する。

今回の評価では観測時間 (Exposure time) によって周期精度が変化することが期待されるため、20 ksec, 2 Msec ふたつの観測時間で疑似イベントを作成している。

6.3 評価結果

6.3.1 SXS, HXI 周期検出精度 (Exposure time 20 ksec)

efsearch で周期探索を行った出力ヒストグラムをガウシアンでフィッティングし、FWHM の値を各検出器の周期的信号の検出精度として評価していく。はじめに SXS, HXI 両検出器で Exposure time : 20 ksec で疑似パルサーを観測した場合の周期検出精度をまとめる (表 14, 表 15)。疑似パルサーは flux がかにパルサーと同程度の $10^{-10}\text{erg/cm}^2/\text{s}$ から 1000 分の 1 の明るさである $10^{-13}\text{erg/cm}^2/\text{s}$ まで一桁刻みで 4 種類、周期が 10 s から 1 ms まで一桁刻みで 5 種類の計 20 種類のパルサー疑似イベントに対し評価を行った。

表 14: Period、flux 空間における周期検出精度 (SXS, Exposure time 20 ksec)

周期検出精度 (FWHM 値)				
	flux, count rate			
	$1.0 \times 10^{-10} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-11} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-12} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-13} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$
Period	6.0 count/s	0.6 count/s	0.07 count/s	0.02 count/s
10 s	4.17×10^{-3}	4.24×10^{-3}	4.10×10^{-3}	6.01×10^{-3}
1 s	4.16×10^{-5}	4.22×10^{-5}	4.08×10^{-5}	5.35×10^{-5}
100 ms	4.18×10^{-7}	4.24×10^{-7}	4.12×10^{-7}	5.79×10^{-7}
10 ms	4.15×10^{-9}	4.22×10^{-9}	4.03×10^{-9}	5.79×10^{-9}
1 ms	4.14×10^{-11}	4.21×10^{-11}	4.07×10^{-11}	4.56×10^{-11}

表 15: 周期、flux 空間における周期検出精度 (HXI, Exposure time 20 ksec)

周期検出精度 (FWHM 値)				
	flux, count rate			
	$1.0 \times 10^{-10} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-11} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-12} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-13} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$
Period	6.0 count/s	0.6 count/s	0.07 count/s	0.02 count/s
10 s	4.16×10^{-3}	4.16×10^{-3}	7.21×10^{-3}	5.27×10^{-2}
1 s	4.16×10^{-5}	4.27×10^{-5}	4.89×10^{-5}	3.63×10^{-4}
100 ms	4.20×10^{-7}	4.19×10^{-7}	4.84×10^{-7}	2.21×10^{-6}
10 ms	4.16×10^{-9}	4.31×10^{-9}	6.76×10^{-9}	1.85×10^{-8}
1 ms	4.13×10^{-11}	4.21×10^{-11}	5.81×10^{-11}	6.17×10^{-11}

結果より、周期が 1 桁大きくなると FWHM 値が 2 桁高くなる。つまり、周期検出精度が 2 桁悪くなっていくことがわかる。ここで、エラーバジェット項目 (F) での要求値は、周期検出精度として定義している FWHM 値が $20 \mu\text{s}$ 以下であるため、この要求値を満たしているかを確認すると SXS, HXI 共に周期が 1s 以上の疑似イベントに対し FWHM 値が $40 \mu\text{s}$ 秒以上と精度が悪くなってしまっている。それに対し、図 24 における「ミリ秒パルサー」に対してはエラーバジェット要求値 $20 \mu\text{s}$ 以内の精度で検出を行うことが確認できた。

6.3.2 SXS, HXI 周期検出精度 (Exposure time 20 Msec)

続いて、Exposure time を 20 Msec とし、数値計算を行い疑似イベントを作成した場合の周期検出精度を評価する (表 16, 表 17)。

表 16: 周期、flux 空間における周期検出精度 (SXS, Exposure time 2 Msec)

周期検出精度 (FWHM 値)				
	flux, count rate			
	$1.0 \times 10^{-10} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-11} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-12} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-13} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$
Period	6.0 count/s	0.6 count/s	0.07 count/s	0.02 count/s
10 s	4.14×10^{-5}	4.14×10^{-5}	4.14×10^{-5}	4.29×10^{-5}
1 s	4.17×10^{-7}	4.17×10^{-7}	4.17×10^{-7}	4.31×10^{-7}
100 ms	4.14×10^{-9}	4.14×10^{-9}	4.14×10^{-9}	4.14×10^{-9}
10 ms	4.14×10^{-11}	4.14×10^{-11}	4.14×10^{-11}	4.19×10^{-10}
1 ms	4.14×10^{-12}	4.14×10^{-12}	4.14×10^{-12}	4.71×10^{-12}

表 17: 周期、flux 空間における周期検出精度 (HXI, Exposure time 2 Msec)

周期検出精度 (FWHM 値)				
	flux, count rate			
	$1.0 \times 10^{-10} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-11} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-12} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-13} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$
Period	6.0 count/s	0.6 count/s	0.07 count/s	0.02 count/s
10 s	3.72×10^{-5}	7.39×10^{-6}	7.39×10^{-6}	7.39×10^{-6}
1 s	4.21×10^{-7}	4.73×10^{-7}	7.94×10^{-7}	5.70×10^{-7}
100 ms	4.14×10^{-9}	6.99×10^{-9}	9.70×10^{-9}	5.35×10^{-9}
10 ms	4.50×10^{-11}	6.12×10^{-11}	6.99×10^{-11}	1.13×10^{-10}
1 ms	4.50×10^{-12}	1.43×10^{-11}	4.97×10^{-12}	6.48×10^{-12}

結果より、Exposure time が 20 ksec のとき同様、周期が 1 桁大きくなると FWHM 値が 2 桁高くなる。ただし、Exposure time が 20 ksec のときと比較して周期検出精度が向上している。このことから、章始めで説明したとおり周期的信号の検出には観測対象のパルサーの周期に対してどの程度の時間観測を行うかが重要であると分かる。

Exposure time = t , Period = P , 観測時間全体に含まれるパルス数 N は $N = t / P$ の関係がある。そして、 t が 20 ksec から 100 倍の 2 Msec へ上がったとき、 N も 2 桁高くなる。すると、観測時間全体にいくつパルスが存在するかを $1 / N$ 個まで見分けることができる。したがって、Exposure time が 20 ksec のときと比較して FWHM 値が 2 桁ほど高くなっているのである。最後に本論文の目的であるエラーバジェット要求値と比較すると周期が 1 s 以下のパルサーでは FWHM 値が 20 μs 以内であることが確認された。

ここで、flux = $10^{-10} \text{ erg}/\text{cm}^2/\text{s}$, Period = 10 s の疑似イベントを Exposure time 20 ksec で検出した時の周期検出精度は 4.17×10^{-3} であったが、Exposure time を 2 Msec で数値計算した

場合、周期検出精度は 4.17×10^{-5} まで上がることが分かった。そのため、実際の観測で 10 s 周期のパルサーを数 $10 \mu\text{s}$ オーダーの精度で検出したい場合、2 Msec の観測が必要となる。

6.3.3 SXS グレード付けを考慮した周期検出精度

最後に SXS グレード付けを考慮した場合の周期検出精度を評価する。この評価では SXS で行われるグレード付けの内、 δt が 17.52 ms 以内のイベントを消去し、周期検出精度の評価を行う。Exposure time は 20 ksec で数値計算を行った。

表 18: 周期、flux 空間における周期検出精度 (SXS grading)

	周期検出精度 (FWHM 値)			
	flux, count rate			
	$1.0 \times 10^{-10} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-11} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-12} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$	$1.0 \times 10^{-13} [\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$
Period	6.0 count/s	0.6 count/s	0.07 count/s	0.02 count/s
10 s	4.17×10^{-5}	4.24×10^{-6}	4.07×10^{-6}	6.01×10^{-6}
1 s	4.16×10^{-7}	4.22×10^{-7}	4.03×10^{-7}	5.35×10^{-7}
100 ms	4.17×10^{-9}	4.24×10^{-9}	4.12×10^{-9}	7.18×10^{-9}
10 ms	4.16×10^{-11}	4.22×10^{-11}	4.08×10^{-11}	5.70×10^{-11}
1 ms	4.15×10^{-12}	4.21×10^{-12}	4.10×10^{-11}	4.56×10^{-12}

結果はグレード付けを行わなかった場合と比較し変化が無く、周期検出精度への影響が無いことが確認された。

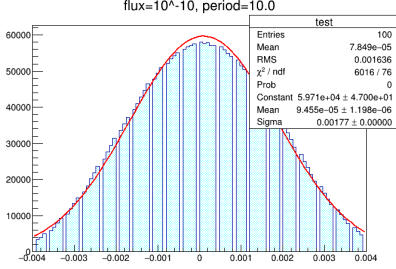
7 まとめ

エラーバジェット検証を完了させることを目的として、検証が終了していない「ネットワークでの TimeCode 配信時に発生する TimeCode 揺らぎ」、「TimeCode 配信遅延補正精度」および「周期的信号の不定性」の 3 項目の検証を行った。ネットワークでの TimeCode 配信時に発生する TimeCode 揺らぎでは、ASTRO-H FM 品を用いて遅延と揺らぎを実測した。結果は、推定値と誤差の範囲で一致するとともに発生するジッタがエラーバジェット要求値を満たすことを確認した。また、ネットワーク TimeCode 配信遅延補正精度に関しては、SMU から TimeCode が配信され各検出器にラッチされるまでに発生する遅延の実測値と予想値とのずれを評価することで、エラーバジェット項目 (D) の要求値 $1.0 \mu\text{s}$ を満たすことを確認した。周期的信号の検出精度については、疑似的に中性子星パルサーを観測した場合の疑似データを作成、時系列解析をすることで見積もりを行った。見積もりでは様々な flux、パルス周期を持つパルサーを SXS, HXI で観測したときの周期検出精度を確認した。efsearch で周期探索を行った出力ヒストグラムをガウシアンでフィッティングし、FWHM の値を各検出器の周期的信号の検出精度として評価していく方法を用いて SXS, HXI 両検出器で Exposure time : 20 ksec の観測時間で疑似パルサーを観測した場合、周期が 1s 以上の疑似イベントに対し FWHM 値が $40 \mu\text{s}$ 秒以上となっていた。それに対し、周期が 100 ms 以下の疑似イベントに対しては要求値 $20 \mu\text{s}$ 以内であることが確認された。続いて、Exposure time : 2 Msec の観測時間で疑似イベントを観測した場合、10 s 周期の検出イベントで FWHM 値が $20 \mu\text{s}$ 以内であることが確認された。そのため、10 s 周期のパルサーを数 $10 \mu\text{s}$ 以上の精度で検出したい場合、数 10 Msec の観測が必要となることが分かった。最後に SXS グレード付けを考慮した場合の周期検出精度を評価については、グレード付けを行わなかった場合と比較し変化が無く、周期検出精度への影響が無いことが確認された。

A 付録：周期検出精度結果ヒストグラム

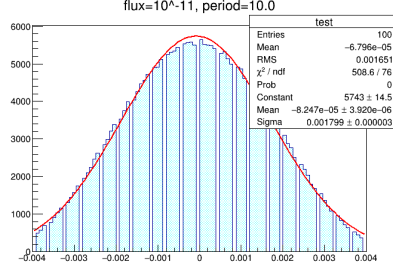
第 6 章で評価を行った efsearch 出力ヒストグラムを添付する。

A.1 SXS Exposure 20 ksec



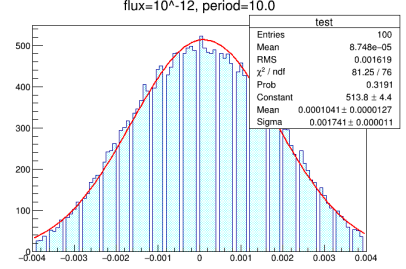
[1] flux = 10^{-10} erg/cm²/s

Period = 10 s



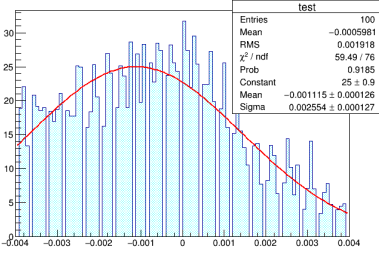
[2] flux = 10^{-11} erg/cm²/s

Period = 10 s



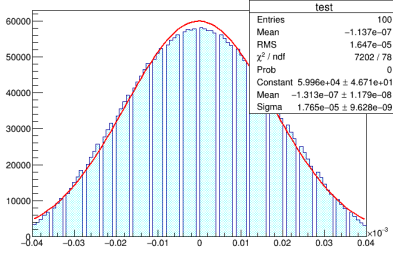
[3] flux = 10^{-12} erg/cm²/s

Period = 10 s



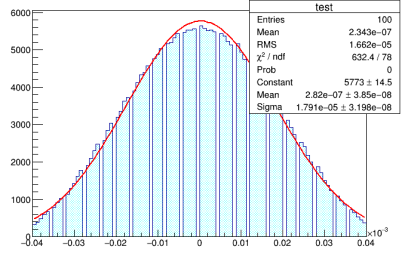
[4] flux = 10^{-13} erg/cm²/s

Period = 10 s



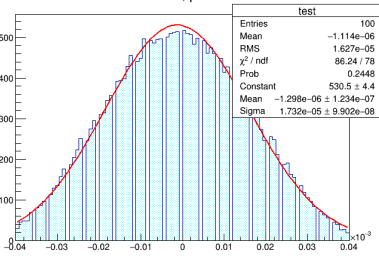
[5] flux = 10^{-10} erg/cm²/s

Period = 1 s



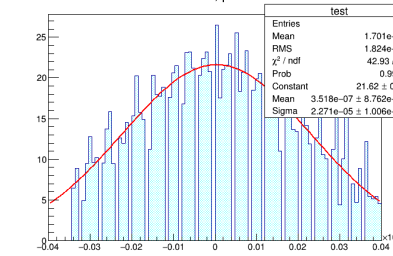
[6] flux = 10^{-11} erg/cm²/s

Period = 1 s



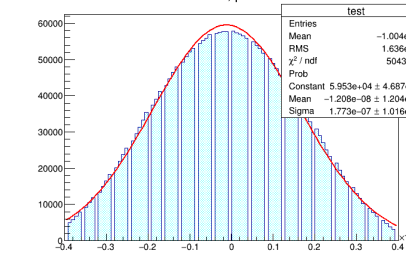
[7] flux = 10^{-12} erg/cm²/s

Period = 1 s



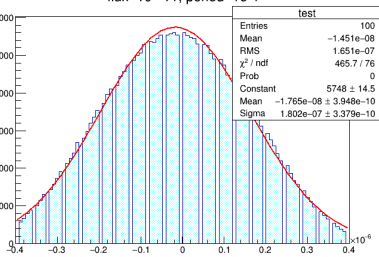
[8] flux = 10^{-13} erg/cm²/s

Period = 1 s



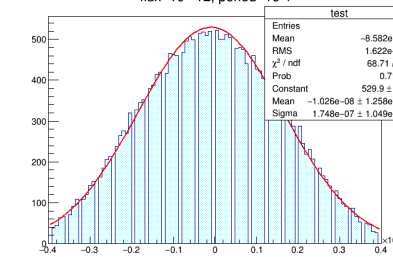
[9] flux = 10^{-10} erg/cm²/s

Period = 100 ms



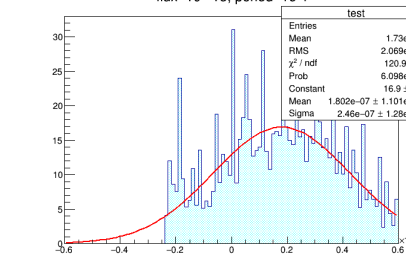
[10] flux = 10^{-11} erg/cm²/s

Period = 100 ms



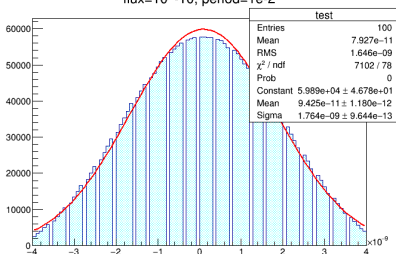
[11] flux = 10^{-12} erg/cm²/s

Period = 100 ms

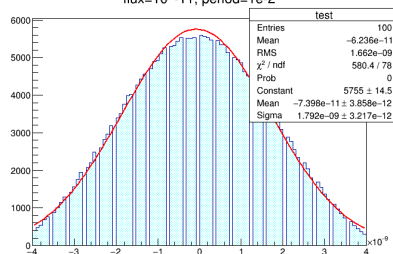


[12] flux = 10^{-13} erg/cm²/s

Period = 100 ms



[13] flux = 10^{-10} erg/cm²/s



[14] flux = 10^{-11} erg/cm²/s

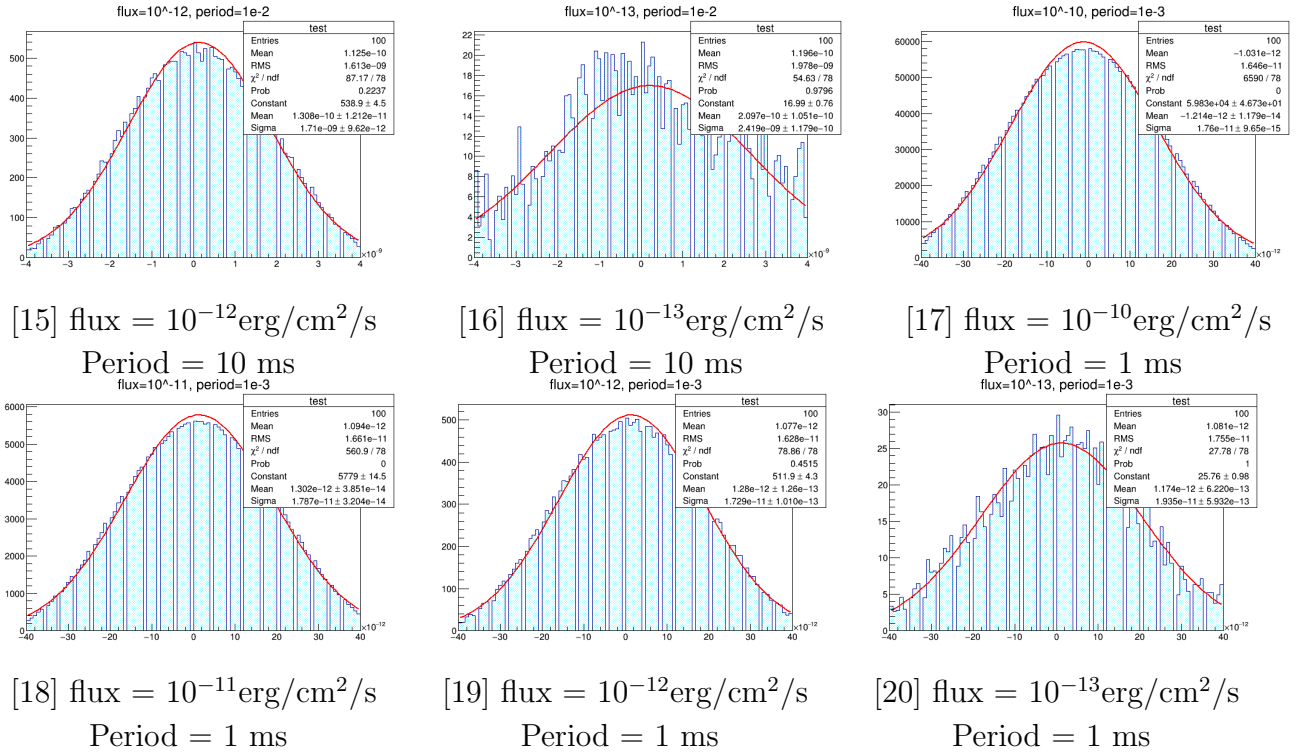
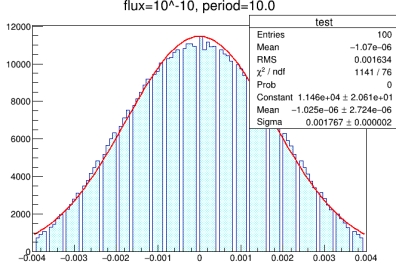


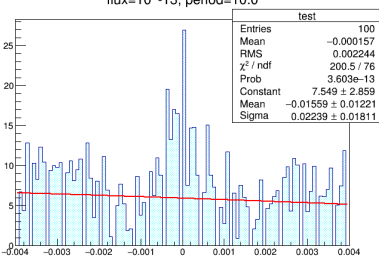
図 30: efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図

A.2 HXI Exposure 20 ksec



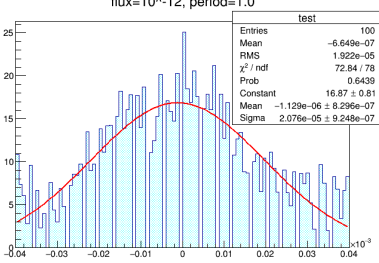
[1] flux = 10^{-10} erg/cm²/s

Period = 10 s



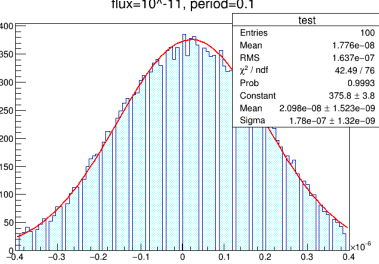
[4] flux = 10^{-13} erg/cm²/s

Period = 10 s



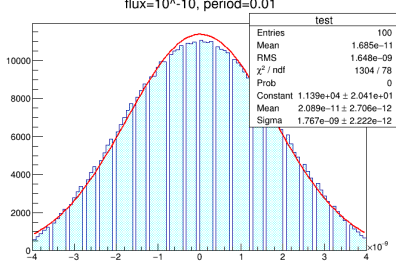
[7] flux = 10^{-12} erg/cm²/s

Period = 1 s

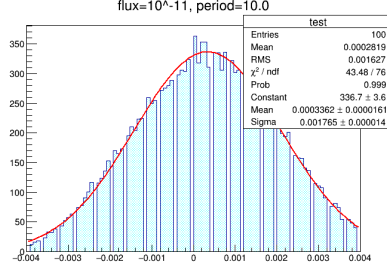


[10] flux = 10^{-11} erg/cm²/s

Period = 100 ms

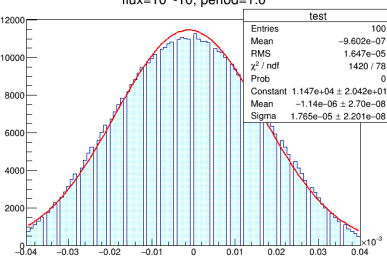


[13] flux = 10^{-10} erg/cm²/s



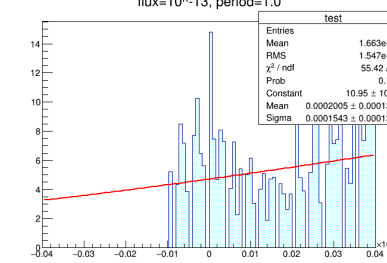
[2] flux = 10^{-11} erg/cm²/s

Period = 10 s



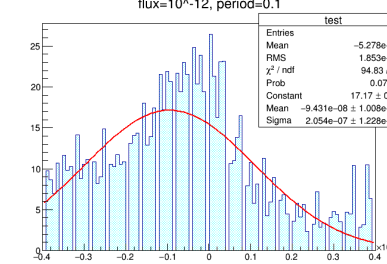
[5] flux = 10^{-10} erg/cm²/s

Period = 1 s



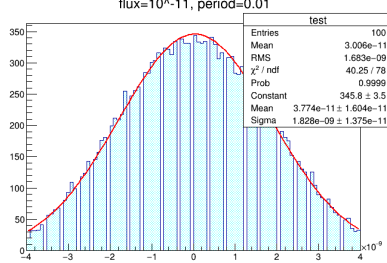
[8] flux = 10^{-13} erg/cm²/s

Period = 1 s

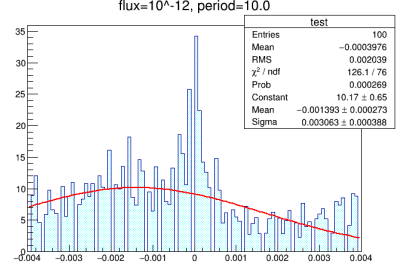


[11] flux = 10^{-12} erg/cm²/s

Period = 100 ms

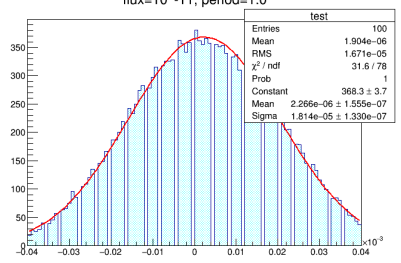


[14] flux = 10^{-11} erg/cm²/s



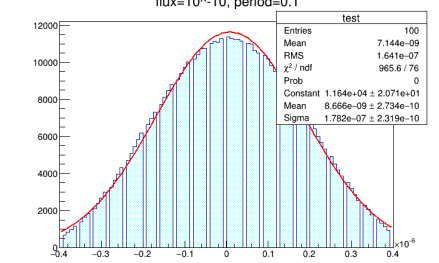
[3] flux = 10^{-12} erg/cm²/s

Period = 10 s



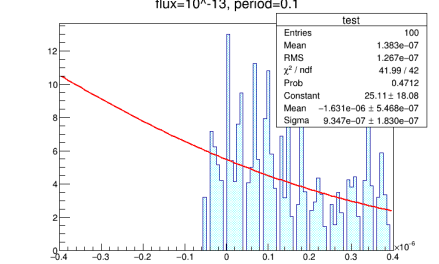
[6] flux = 10^{-11} erg/cm²/s

Period = 1 s



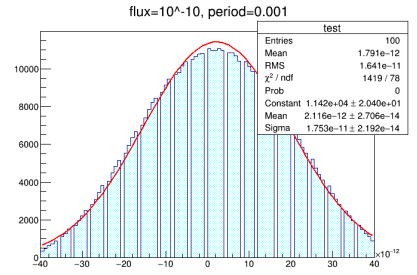
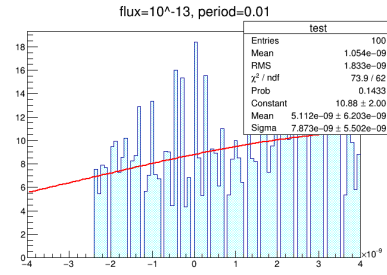
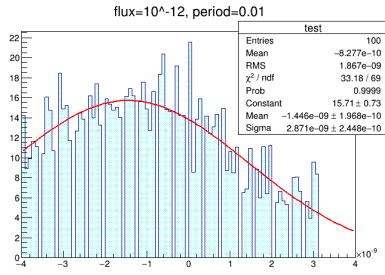
[9] flux = 10^{-10} erg/cm²/s

Period = 100 ms

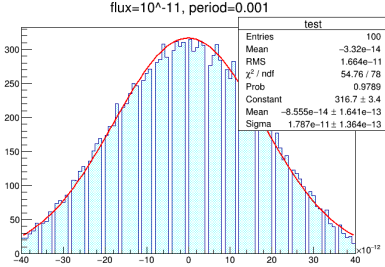


[12] flux = 10^{-13} erg/cm²/s

Period = 100 ms

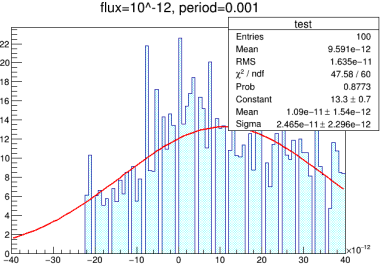


[15] flux = 10⁻¹²erg/cm²/s
Period = 10 ms



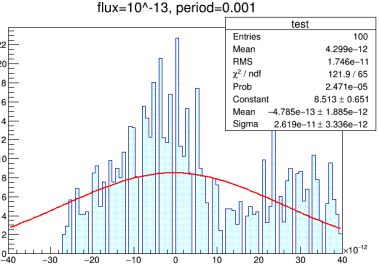
[18] flux = 10⁻¹¹erg/cm²/s
Period = 1 ms

[16] flux = 10⁻¹³erg/cm²/s
Period = 10 ms



[19] flux = 10⁻¹²erg/cm²/s
Period = 1 ms

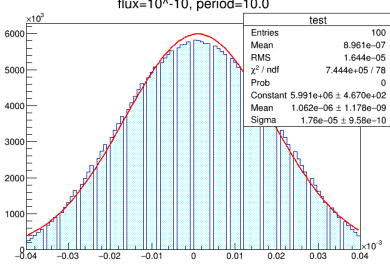
[17] flux = 10⁻¹⁰erg/cm²/s
Period = 1 ms



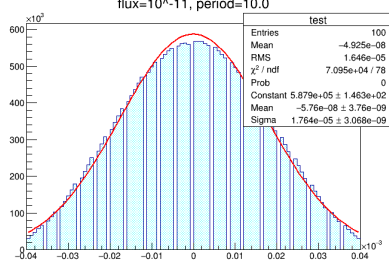
[20] flux = 10⁻¹³erg/cm²/s
Period = 1 ms

図 32: efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図

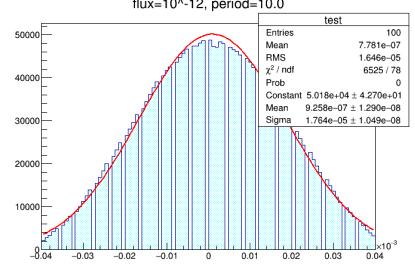
A.3 SXS Exposure 2.0 Msec



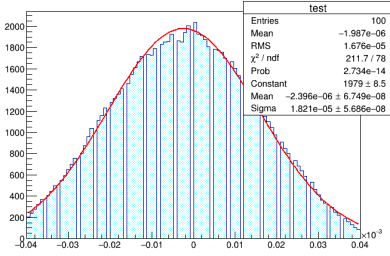
[1] flux = 10^{-10} erg/cm²/s
Period = 10 s



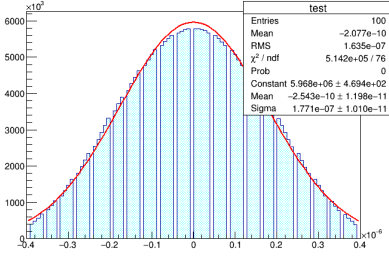
[2] flux = 10^{-11} erg/cm²/s
Period = 10 s



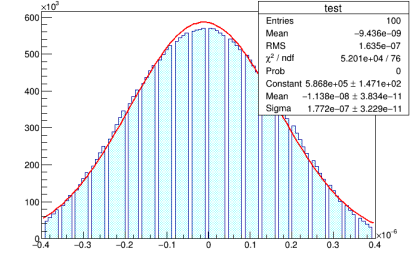
[3] flux = 10^{-12} erg/cm²/s
Period = 10 s



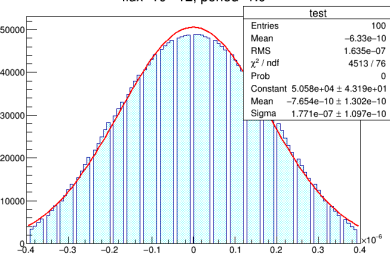
[4] flux = 10^{-13} erg/cm²/s
Period = 10 s



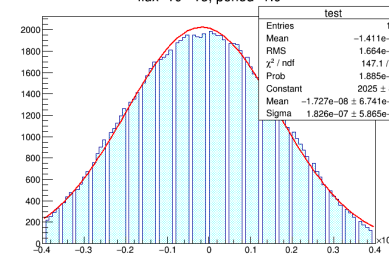
[5] flux = 10^{-10} erg/cm²/s
Period = 1 s



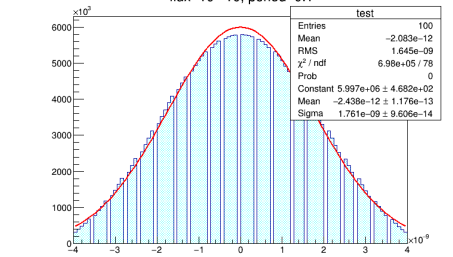
[6] flux = 10^{-11} erg/cm²/s
Period = 1 s



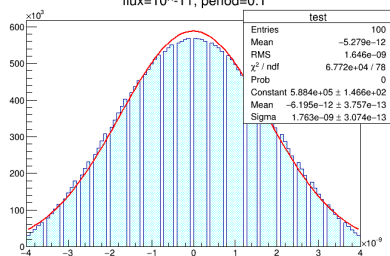
[7] flux = 10^{-12} erg/cm²/s
Period = 1 s



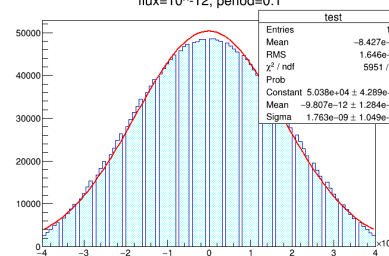
[8] flux = 10^{-13} erg/cm²/s
Period = 1 s



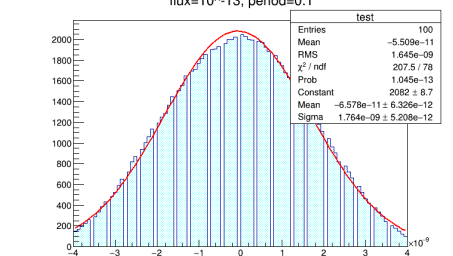
[9] flux = 10^{-10} erg/cm²/s
Period = 100 ms



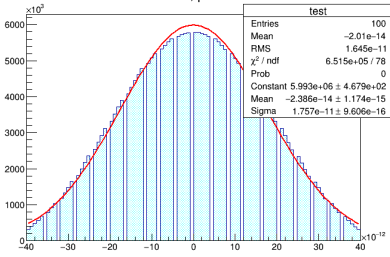
[10] flux = 10^{-11} erg/cm²/s
Period = 100 ms



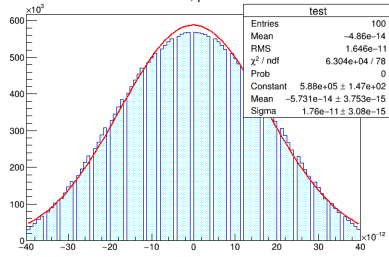
[11] flux = 10^{-12} erg/cm²/s
Period = 100 ms



[12] flux = 10^{-13} erg/cm²/s
Period = 100 ms



[13] flux = 10^{-10} erg/cm²/s



[14] flux = 10^{-11} erg/cm²/s

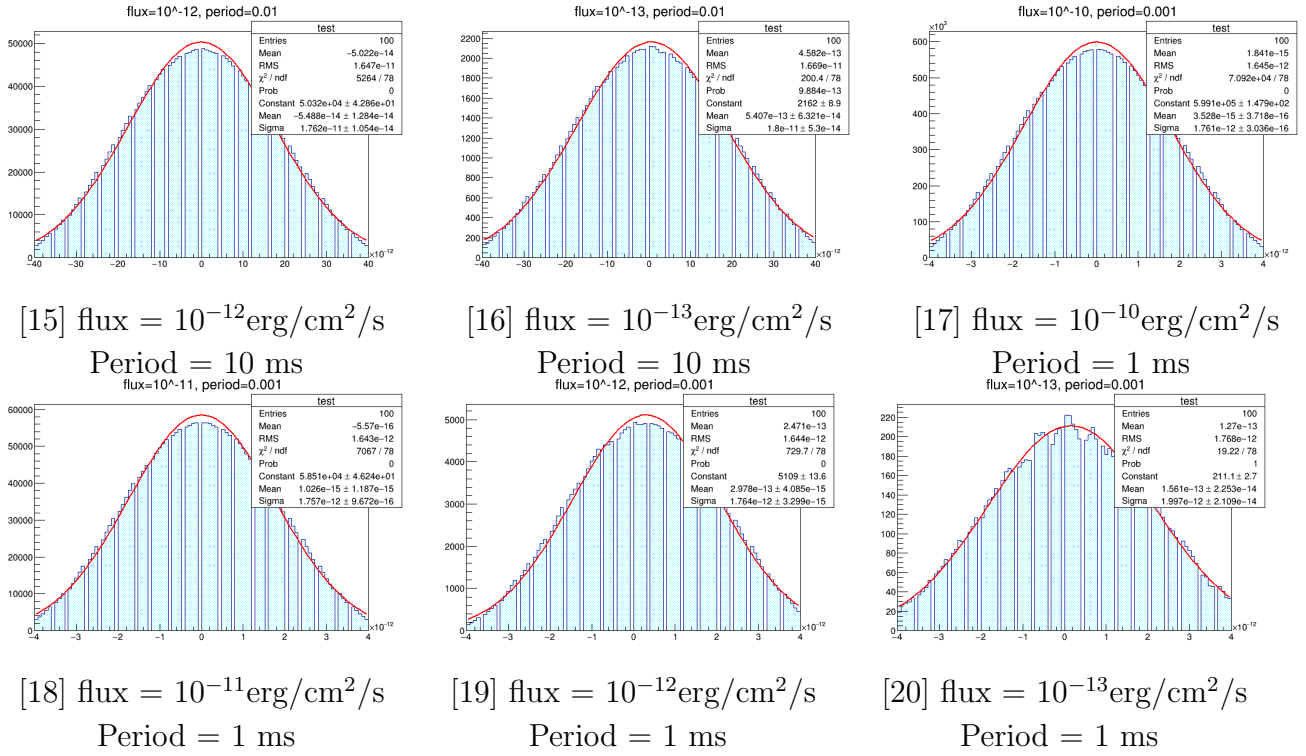
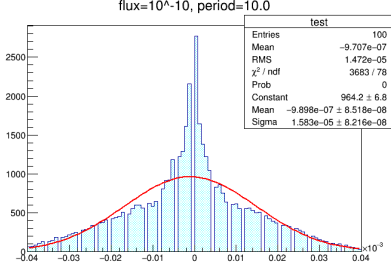


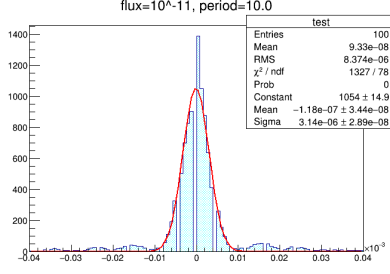
図 34: efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図

A.4 HXI Exposure 2.0 Msec



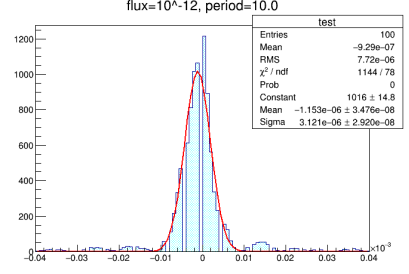
[1] flux = 10⁻¹⁰erg/cm²/s

Period = 10 s



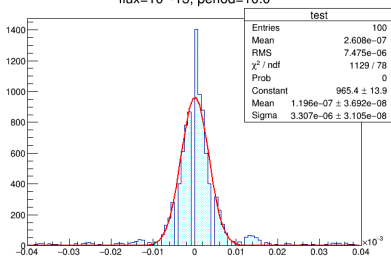
[2] flux = 10⁻¹¹erg/cm²/s

Period = 10 s



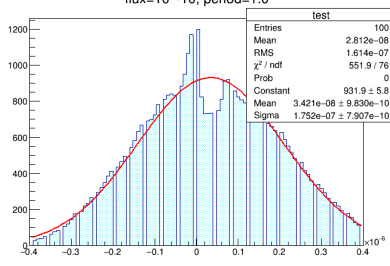
[3] flux = 10⁻¹²erg/cm²/s

Period = 10 s



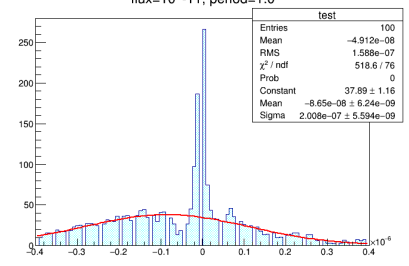
[4] flux = 10⁻¹³erg/cm²/s

Period = 10 s



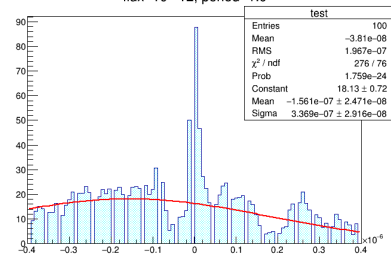
[5] flux = 10⁻¹⁰erg/cm²/s

Period = 1 s



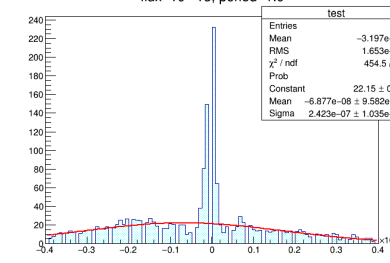
[6] flux = 10⁻¹¹erg/cm²/s

Period = 1 s



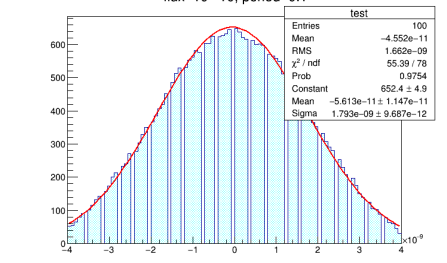
[7] flux = 10⁻¹²erg/cm²/s

Period = 1 s



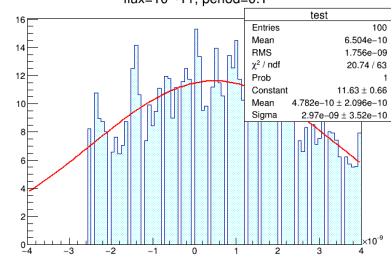
[8] flux = 10⁻¹³erg/cm²/s

Period = 1 s



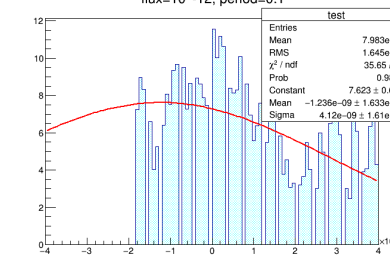
[9] flux = 10⁻¹⁰erg/cm²/s

Period = 100 ms



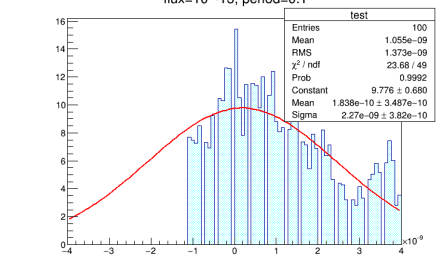
[10] flux = 10⁻¹¹erg/cm²/s

Period = 100 ms



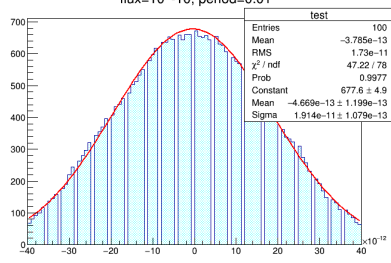
[11] flux = 10⁻¹²erg/cm²/s

Period = 100 ms

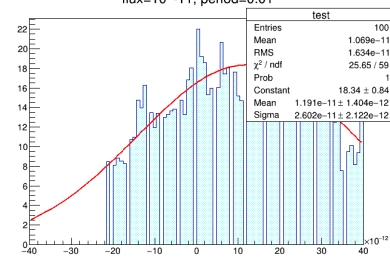


[12] flux = 10⁻¹³erg/cm²/s

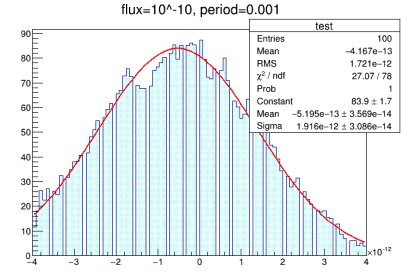
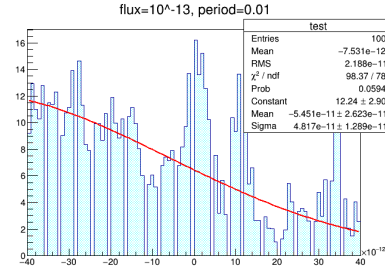
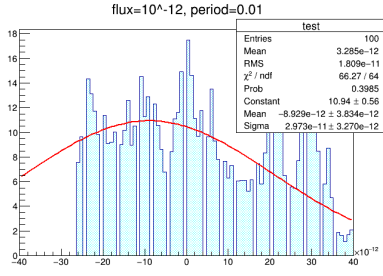
Period = 100 ms



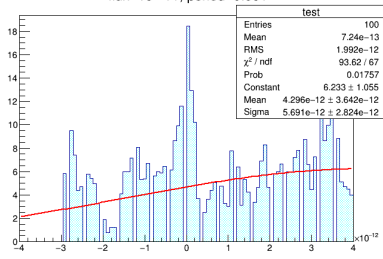
[13] flux = 10⁻¹⁰erg/cm²/s



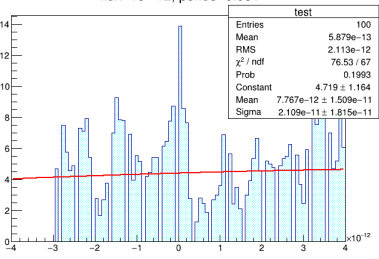
[14] flux = 10⁻¹¹erg/cm²/s



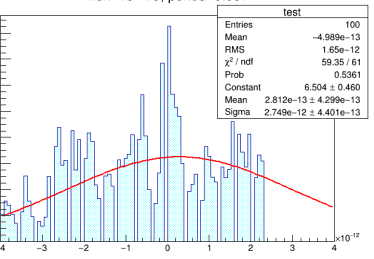
[15] flux = 10⁻¹²erg/cm²/s
Period = 10 ms



[16] flux = 10⁻¹³erg/cm²/s
Period = 10 ms



[17] flux = 10⁻¹⁰erg/cm²/s
Period = 1 ms



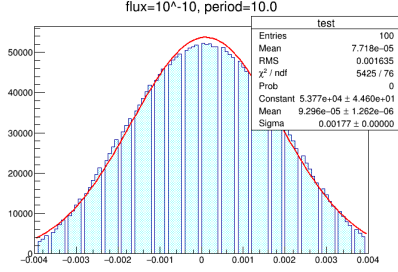
[18] flux = 10⁻¹¹erg/cm²/s
Period = 1 ms

[19] flux = 10⁻¹²erg/cm²/s
Period = 1 ms

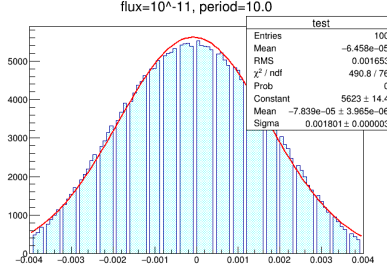
[20] flux = 10⁻¹³erg/cm²/s
Period = 1 ms

図 36: efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図

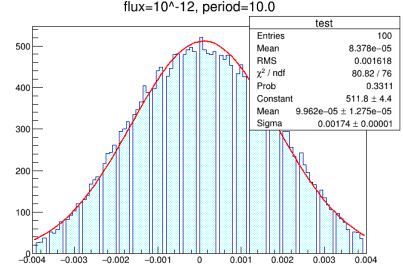
A.5 SXS グレード付け Exposure 20 ksec



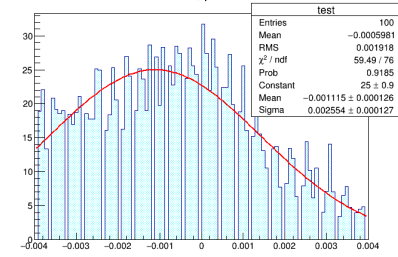
[1] flux = 10^{-10} erg/cm²/s
Period = 10 s



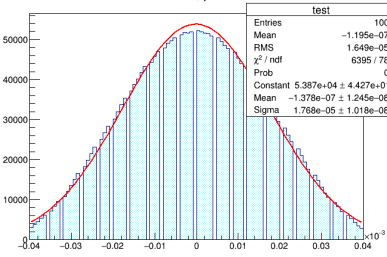
[2] flux = 10^{-11} erg/cm²/s
Period = 10 s



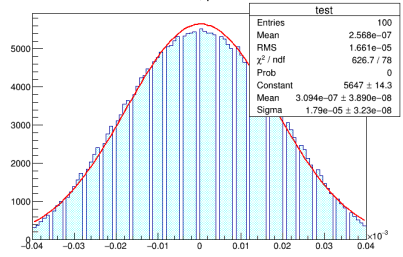
[3] flux = 10^{-12} erg/cm²/s
Period = 10 s



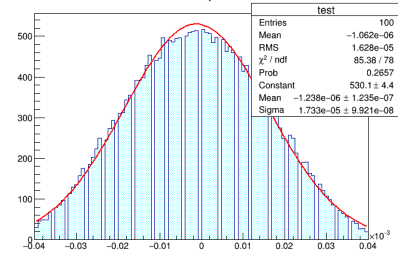
[4] flux = 10^{-13} erg/cm²/s
Period = 10 s



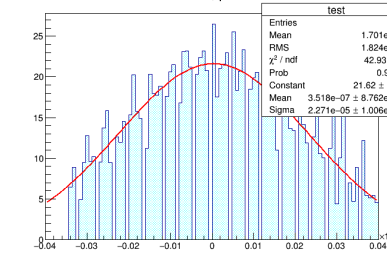
[5] flux = 10^{-10} erg/cm²/s
Period = 1 s



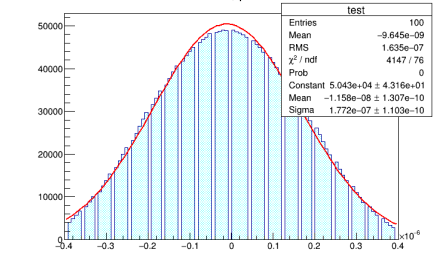
[6] flux = 10^{-11} erg/cm²/s
Period = 1 s



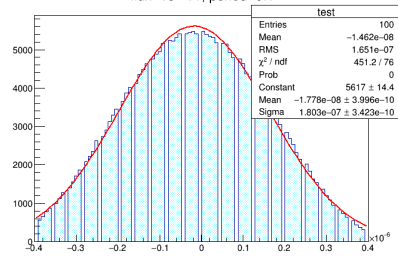
[7] flux = 10^{-12} erg/cm²/s
Period = 1 s



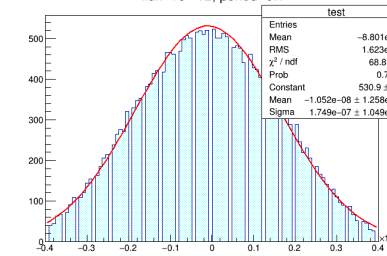
[8] flux = 10^{-13} erg/cm²/s
Period = 1 s



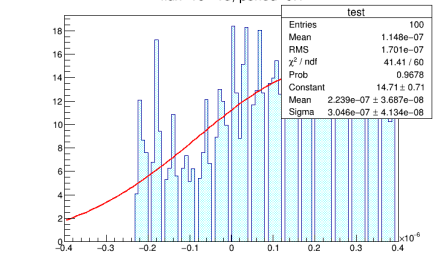
[9] flux = 10^{-10} erg/cm²/s
Period = 100 ms



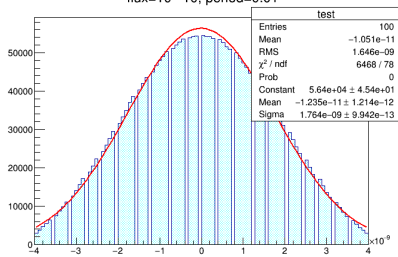
[10] flux = 10^{-11} erg/cm²/s
Period = 100 ms



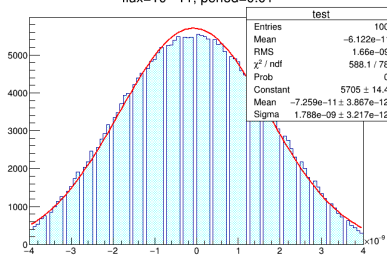
[11] flux = 10^{-12} erg/cm²/s
Period = 100 ms



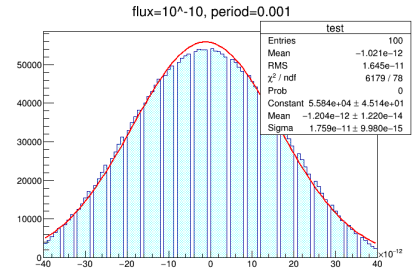
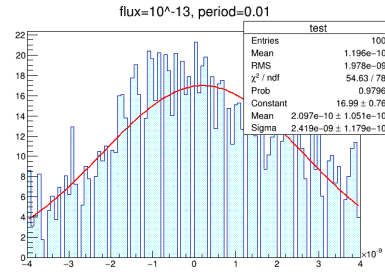
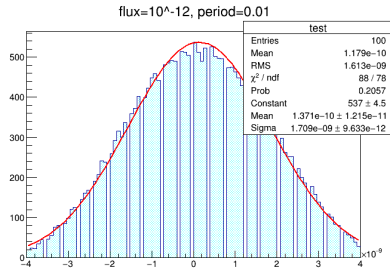
[12] flux = 10^{-13} erg/cm²/s
Period = 100 ms



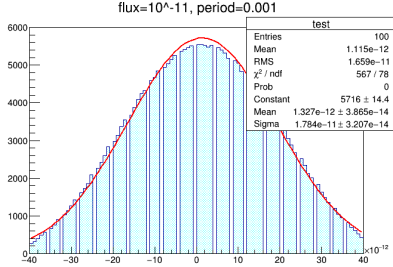
[13] flux = 10^{-10} erg/cm²/s



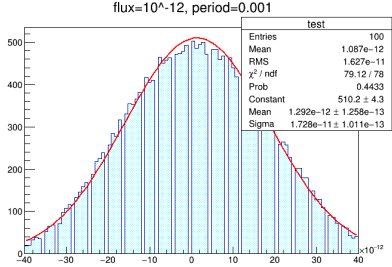
[14] flux = 10^{-11} erg/cm²/s



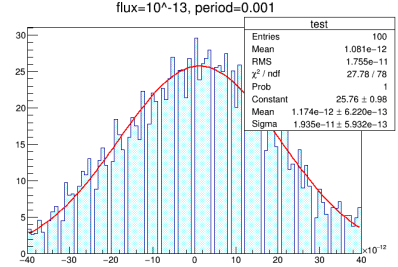
[15] flux = 10^{-12} erg/cm²/s
Period = 10 ms



[16] flux = 10^{-13} erg/cm²/s
Period = 10 ms



[17] flux = 10^{-10} erg/cm²/s
Period = 1 ms



[18] flux = 10^{-11} erg/cm²/s
Period = 1 ms

[19] flux = 10^{-12} erg/cm²/s
Period = 1 ms

[20] flux = 10^{-13} erg/cm²/s
Period = 1 ms

図 38: efsearch を用いた周期探索出力ヒストグラムをガウシアンフィッティングした図

参考文献

- [1] Mitsuda, K., et al. 2007, PASJ, 59, S1
- [2] Takahashi, T., et al. 2007, PASJ, 59, S35
- [3] Kokubun, M., et al. 2007, PASJ, 59, S53
- [4] Mitsuda, K. 2009, High Resolution X-ray Spectroscopy
- [5] Takagi et al. 2007, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A
- [6] Kokubun, M., et al. 2008, Proc. SPIE, 7011, 21
- [7] Parkes, S., et al. "Space Wire - Links, nodes, routers and networks, " European Cooperation for Space Standardization, Standard No. ECSS-E- 50-12A, Issue I, 24 January 2003
- [8] IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Heterogeneous InterConnect (HIC) (Low-Cost, Low-Latency Scalable Serial Interconnect for Parallel System Construction)," IEEE Standard 1355-1995, IEEE, June 1996
- [9] Consultative Commitee for Space Data System, "Space Packet Protocol," CCSDS 133.0-B-I, September 2003
- [10] Parkes, S., et al. "RMAP Protocol Specification", European Cooperation For Space Standardization, ECSS-E-50-11 Draft F, 4th December 2006
- [11] Parkes, S., "The Operation and Uses of the SpaceWire TimeCode," International SpaceWire Seminar, 4-5 November 2003, ESTEC Noordwijk, The Netherlands
- [12] Parkes, S., Ferrer, A., "SpaceWire-D: Deterministic Data Delivery with SpaceWire" International SpaceWire Conference, St. Petersburg, Russia, June 2010.
- [13] Y.Terada et al.,In Orbit Timing Calibration of the Hard X-Ray Detector on Board Suzaku
- [14] ASTRO-H White Paper - Accreting Pulsars, Magnetars, and Related Sources ASTRO-H Science Working Group Collaboration (Kitamoto, S. et al.) arXiv:1412.1165
- [15] 宇宙科学技術連合講演会「SpaceWire に適合したスケーラブルな衛星搭載機器の開発」
- [16] 高橋忠幸, 水本好彦, 2008 年出版, 宇宙の観測 ～高エネルギー天文学～, 日本評論社, 268p
- [17] 神頭知美, 「ASTRO-H 衛星における時刻付けシステムの開発」, 埼玉大学理工学研究科物理機能系専攻物理学コース 修士論文, (2010)
- [18] 岩瀬かほり, 「ASTRO-H 衛星における SpaceWire を利用した時刻決定方法の検証と確立」, 埼玉大学理工学研究科物理機能系専攻物理学コース 修士論文, (2012)

- [19] 中谷創平,「ASTRO-H 衛星搭載中央制御コンピュータにおける時刻決定性能の検証」, 埼玉大学理学部物理学科 学位論文, (2014)
- [20] 日本電気株式会社宇宙システム事業部,ASTRO-H SpaceWire ネットワーク User ' s Manual
- [21] Takayuki Yuasa and SpaceWire User Group Japan,SpaceWire/SpaceCube Tutorial

謝辞

修士論文を書くにあたり、田代寺田研究室の皆様には本当にお世話になりました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

特に、三年間という長い間ご指導頂きました田代先生と寺田先生には、公私ともに本当にたくさんのことを学ばせて頂きました。人工衛星開発の最前線で開発に携わり、優秀な研究者の皆様と実験を行うことができたことは非常に貴重な経験であり、これからも忘れることのできない思い出となっております。

研究室学生メンバーのみなさまにも大変お世話になりました。

厳しくも優しく御指導くださった小山さん、解析の相談にのってくださったり DVD を貸してくれた安田先輩、SNR の解析など丁寧に教えて下さった武田先輩、研究の枠を超えて非常に鋭い意見を下さった永吉先輩、実験の作法から日本酒まで様々な知識を下さった井上先輩、良い先輩方に恵まれたこと、感謝しております。

そして、埼玉大学時刻付けチームとして共に実験を行ってきた矢部君と大清水君、プレッシャーのある衛星開発の現場で実験を進めてくれたのもふたりの支えがなければできなかったと思います。嫌な顔一つせず、丁寧に作業を進めてくれてありがとう。

久保田に榎本、藤沼と松岡、この同期 4 人とは学会や夏の学校など、研究活動から就職活動まで励まし合ったり足を引っ張り合ったり、多くの思い出を作ることができました。榎本、いつもとなりのデスクで僕のくだらない話を聞いてくれてありがとう。いつかゲームいっしょに作れたらいいなと思っています。同じ ASTRO-H チームで仕事を続けてきた久保田は、いつもマイペースで、それでもいつの間にか作業を終わらせている姿にはいつも驚かされていました。藤沼とは、研究の話はほとんどしなかった気がします。でも、四階でいつも遅くまで作業を続けている真面目さには感心されてばかりでした。僕の趣味について悪く言うのはやめましょう。松岡とは就職活動で一緒の企業に内定をもらった時はふたりで南極基地かとヒヤヒヤしたものです。グーグルマップを駆使して実家を僕以上に把握していたのが怖かったです。

それから、研究室をいつも明るくしてくれたゆるキャラ加藤さん、PC まわりについて手を貸してくれた八重幡君、イベントごとに楽しく盛り上げてくれた B4 のみなさん、充実した研究室生活をありがとうございました。

他にも OB や他大の方など、さまざまな方々に支えられ研究を行うことができました。この場をお借りして心より、感謝申し上げます。