

温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (GOSAT-2)

アルゴリズム基準書

FTS-2 編

V200

初版 2020 年 10 月

宇宙航空研究開発機構

改訂記録

符号	承認年月日	改訂箇所	改訂内容、理由等
初版	R2.10.30	-	-

## 目次

1. 概要.....	4
1.1 概要.....	4
1.2 関連文書.....	4
1.2.1 適用文書.....	4
1.2.2 参考文書.....	4
1.3 GOSAT-2 の概要.....	5
1.3.1 GOSAT-2 衛星.....	5
1.3.2 温室効果ガス観測センサ 2 型 (TANSO-FTS-2).....	5
2. TANSO-FTS-2.....	7
2.1 TANSO-FTS-2 の概要.....	7
2.1.1 TANSO-FTS-2 の主要特性.....	7
2.1.2 TANSO-FTS-2 の運用概要.....	7
2.1.3 観測計画における留意点.....	8
2.2 TANSO-FTS-2 のデータ概要.....	8
2.2.1 TANSO-FTS-2 のデータフロー.....	8
2.3 TANSO-FTS-2 L0 データとその処理.....	10
2.3.1 FTS-2 L0 処理概要.....	10
2.4 TANSO-FTS-2 L1 データとその処理.....	10
2.4.1 FTS-2 L1 処理概要.....	10
2.4.2 等時間サンプリングインタフェログラムから等距離サンプリングインタフェログラムへの変換 処理.....	11
2.4.3 Band1-3 スペクトル変換処理.....	16
2.4.4 Band4-5 スペクトル変換処理.....	23
2.4.5 品質確認.....	38
2.4.6 観測データの時刻付け.....	40
2.4.7 視線角度の計算.....	40
2.5 TANSO-FTS-2 略語集.....	41
2.6 TANSO-FTS-2 参考文献.....	42

## 1. 概要

### 1.1 概要

本技術資料は、宇宙航空研究開発機構(以下「機構」と称す)が開発する温室効果気体温室効果ガス観測技術衛星 2 号(Greenhouse gases Observing SATellite-2)(以下「GOSAT-2」と称す)に搭載される温室効果ガス観測センサ 2 型(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation - Fourier Transform Spectrometer -2) 以下「TANSO-FTS-2 または FTS-2(チャンネル名などの略称時)」と称す))と衛星システムのデータ処理の概要、地上処理のレベル 1 処理アルゴリズムの概要に関して記述する。

### 1.2 関連文書

#### 1.2.1 適用文書

なし

#### 1.2.2 参考文書

なし

### 1.3 GOSAT-2 の概要

#### 1.3.1 GOSAT-2 衛星

GOSAT-2 は 6 日間で地球全体の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) とメタン (CH<sub>4</sub>) の気柱量の観測を行うため、613km の太陽同期軌道を採用した。降交点通過地方時は、夜間の CO<sub>2</sub> の変化の影響をうけない(上下層の CO<sub>2</sub> が混合されていると考えられる)13 時を選択している。図 1.3.1-1 に GOSAT-2 及び搭載センサ概要図を示す。

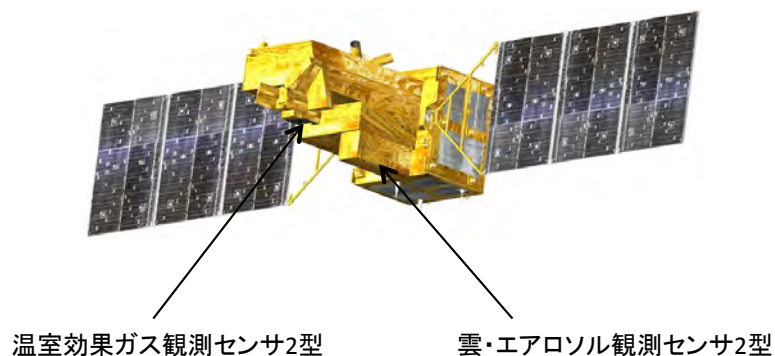


図 1.3.1-1 GOSAT-2及び搭載センサ

GOSAT-2 の定常軌道を表 1.3.1-1 に示す。GOSAT-2 の軌道は 6 日間/89 周回を回帰条件とする軌道高度 613km の太陽同期軌道(フローズンオービット)である。降交点における赤道上で直下点位置を± 2.5km の範囲に収めるように数年に一度面外制御を行う。

表 1.3.1-1 GOSAT-2の軌道

項目		諸元	備考
軌道	種類	太陽同期準回帰軌道	
	降交点通過地方太陽時	13 時±15 分	
	高度	612.98 km	(周回中の高度変動は含まない)
	傾斜角	97.84 度	
	離心率	0.00106	(フローズンオービットとする。)
	近地点引数	90 度	
	周期	約 98.1 分	
	回帰日数	6 日(89 周回)	
	降交点経度	36.6N, 97.5W を直下に通過する軌道	
	交点経度保持範囲	±2.5 km	(衛星軌道制御頻度による)

#### 1.3.2 温室効果ガス観測センサ 2 型(TANSO-FTS-2)

温室効果ガス観測センサは、地球大気を透過し、地表面で反射した太陽からの短波長赤外光と地球大気からの熱赤外光を分光観測する。0.76 μm 帯の酸素を基準とし、1.6 μm 帯、2.0 μm 帯、2.3 μm 帯から CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 及び CO の気柱量を導出する。また、熱赤外波長域を用いて CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> の高度分布を導出する。分光には広い波長範囲を高い分光分解能で観測できるフーリエ干渉計を採用し、4.024 秒で1インタフェログラムを取得する運用を行う。2 軸のポインティング機構を用いて1インタフェログラム取得中に同一地点をポイ

ンティングするとともに、クロストラックの走査、黒体・深宇宙校正を行う。フーリエ干渉計はダブルコーナークューブ型を採用し、サンプリングレーザには  $1.31\ \mu\text{m}$  の半導体レーザを用いる。検出器には、Si及び放射冷却器で冷却を行う HgCdTe 検出器を用いる。検出器光学系に偏光ビームスプリッタを用いて、 $0.76$ 、 $1.6$ 、 $2.0$ 、 $2.3\ \mu\text{m}$  帯は 2 偏光の同時観測を行う。

軌道上では拡散板で短波長赤外の太陽照度校正を行い、黒体及び深宇宙を観測することで熱赤外の感度校正を行う。また月1回程度の頻度で、月校正を行う。さらに  $0.768\ \mu\text{m}$  および  $1.543\ \mu\text{m}$  の半導体レーザ光を用いて軌道上で装置関数の校正を行う。また電気回路部の特性を評価するために、アナログ及びデジタル電気回路部校正を行う。

図 1.3.2-1 に TANSO-FTS-2 センサ部外観図および図 1.3.2-2 に TANSO-FTS-2 取付け配置図を示す。

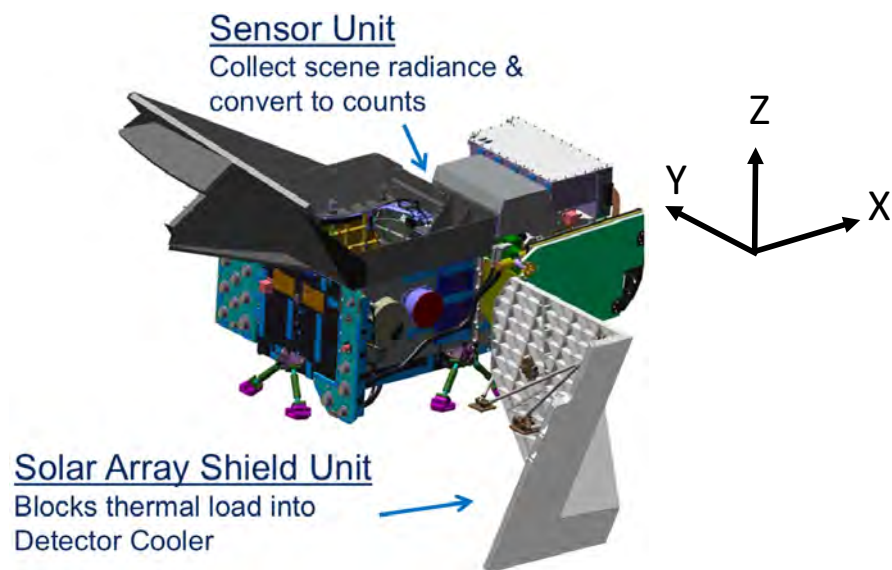


図 1.3.2-1 TANSO-FTS-2外観図

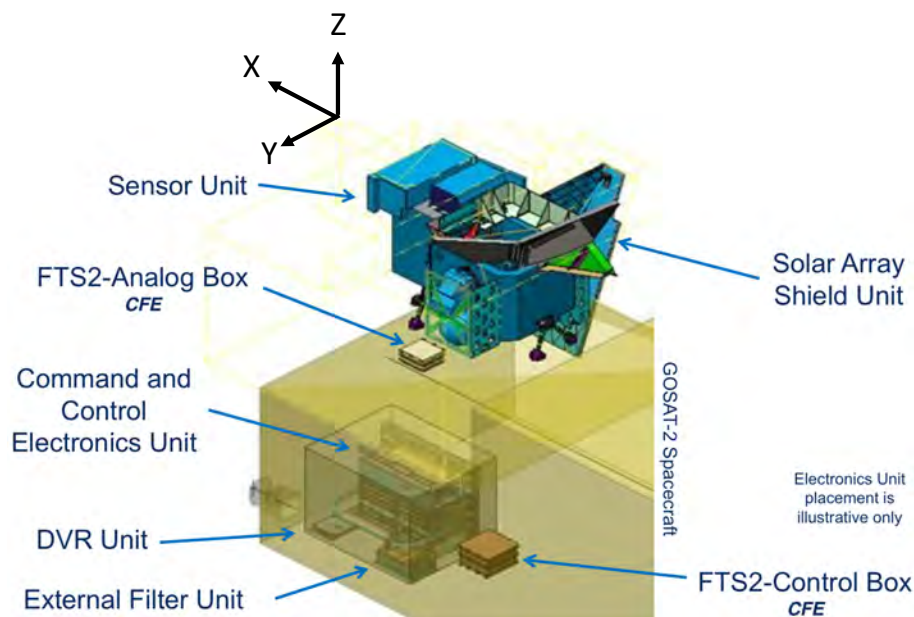


図 1.3.2-2 TANSO-FTS-2取付け配置図

## 2. TANSO-FTS-2

### 2.1 TANSO-FTS-2 の概要

TANSO-FTS-2 は、短波長赤外 (SWIR) から熱赤外 (TIR) 領域を観測するフーリエ干渉計であり、機械的走査により地心方向の大気観測を行う。

#### 2.1.1 TANSO-FTS-2 の主要特性

TANSO-FTS-2 の主要特性は以下の通りである。

表 2.1.1-1 各バンドの波数範囲と分光分解能

	バンド 1 P,Sとも	バンド 2 P,Sとも	バンド 3 P,Sとも	バンド 4	バンド 5
偏光観測	有	有	有	無	無
波長範囲	12950- 13250 $\text{cm}^{-1}$	5900- 6400 $\text{cm}^{-1}$	4200- 5200 $\text{cm}^{-1}$	1188- 1800 $\text{cm}^{-1}$	700- 1188 $\text{cm}^{-1}$
サンプリング 間隔	0.2 $\text{cm}^{-1}$ 以下	0.2 $\text{cm}^{-1}$ 以下	0.2 $\text{cm}^{-1}$ 以下	0.2 $\text{cm}^{-1}$ 以下	0.2 $\text{cm}^{-1}$ 以下
有効サンプリ ング点数	153090	76545	76545	38250	38250
装置関数の 半値全幅	0.4 $\text{cm}^{-1}$ 以下	0.27 $\text{cm}^{-1}$ 以下	0.27 $\text{cm}^{-1}$ 以下	0.27 $\text{cm}^{-1}$ 以下	0.27 $\text{cm}^{-1}$ 以下

#### 2.1.2 TANSO-FTS-2 の運用概要

ミッションシステムの周回中の運用概要を図 2.1.2-1 に示す。なお、海上でのサングリント観測は、サングリントが発生する大洋上空にて、アロングトラック方向 $\pm 40^\circ$  クロストラック方向 $\pm 35^\circ$  にて追従できる範囲で行う。校正運用等を含めた TANSO-FTS-2 の典型的な運用例を図 2.1.2-2 に示す。

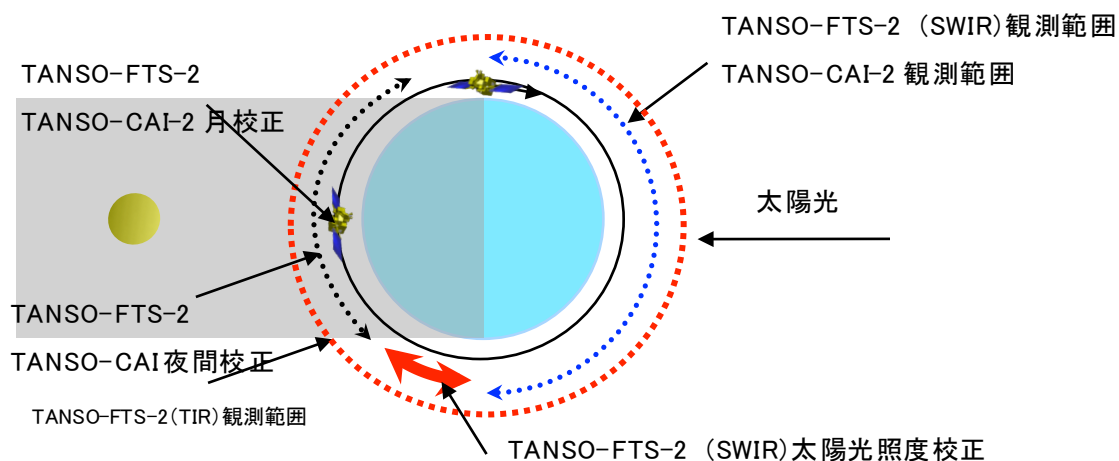


図 2.1.2-1 TANSO-2の運用概要

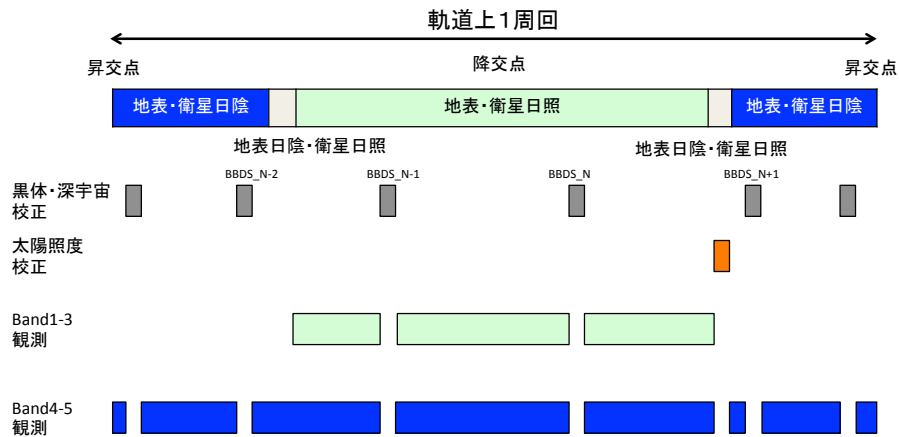


図 2.1.2-2 TANSO-FTS-2軌道上1周回運用例

### 2.1.3 観測計画における留意点

軌道 1 周回を 1246 点に等分割された各観測点において観測を行う。任意の  $n$  点から  $n+1$  点に移行させる際には、AT 軸、CT 軸共に  $25.5^\circ$  以内の指向軸変動量(モータ角では無く、指向軸の角度変動量)とする。この範囲を逸脱する場合、スキャナの静定が間に合わず、観測モードから診断モードに遷移する。TANSO-FTS-2 では機体側に AT 軸が固定されているため、指向軸変動とモータ角度変動の関係が TANSO-FTS とは異なる。図 2.1.3-1 に AT/CT モータ角度と指向角度の関係を示す。

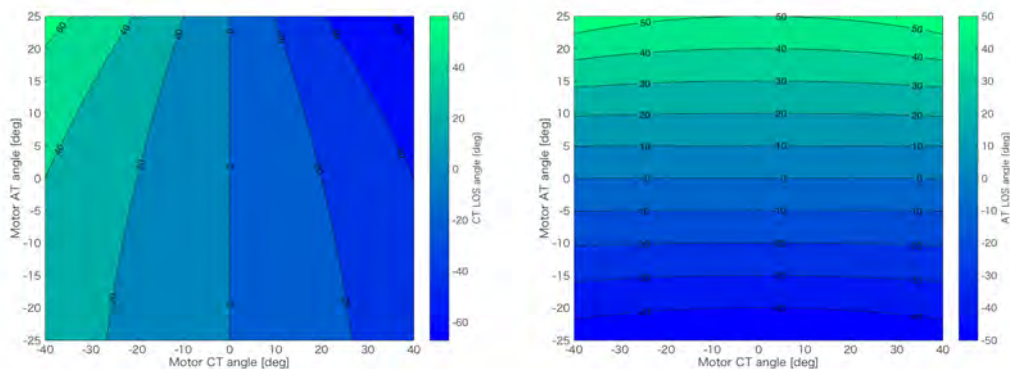


図 2.1.3-1 CT軸視線角度(左)、AT軸視線角度(右)

## 2.2 TANSO-FTS-2 のデータ概要

### 2.2.1 TANSO-FTS-2 のデータフロー

TANSO-FTS-2 で取得されるデータのデータフロー概念を表 2.2.1-1 に示す。各プロダクトの定義は GOSAT-2 プロダクト定義書による。



表 2.2.1-1 TANSO-FTS-2 データレベル

項目	概念図	補足説明
観測光の光電変換		<p>観測光は、フーリエ干渉計で変調され、検出器で光電変換され（光子→電流）、初段アンプで電圧に変換される。</p>
等時間インタフェログラム L1A/UTS		<p>内部クロックに同期された時刻にてバンド毎に電圧が記録される。そのため、横軸：時刻、縦軸：電圧となる。またこのとき、同時に測距レーザのゼロ点通過時刻を記録する。これらのデータが地上に伝送される。</p>
等距離インタフェログラム L1A		<p>地上にて、等時間で取得されたインタフェログラムから等距離インタフェログラムに変換を行う。この処理後、横軸：光路差、縦軸：電圧のインタフェログラムが生成される。</p>
スペクトル L1B		<p>(FTS-2 SWIR) 感度校正前(<math>V/cm^{-1}</math>)および感度校正後(<math>W/cm^2/str/cm^{-1}</math>)の観測スペクトル</p> <p>(FTS-2 TIR) 黒体・深宇宙校正データを用いた感度校正後スペクトル(<math>W/cm^2/str/cm^{-1}</math>)および有効視野補正を適用したスペクトル(<math>W/cm^2/str/cm^{-1}</math>)</p>
気体濃度 L2	<p>(SWIR)  <math>X_{CO_2} = 400.0</math> ppm (例)  <math>X_{CH_4} = 1.90</math> ppm (例)</p> <p>(TIR)  <math>CO_2@500hPa = 400.0</math> ppm (例)  <math>CH_4@500hPa = 1.95</math> ppm (例)</p>	<p>(SWIR)          観測スペクトルから導出した導出したカラム平均気体濃度</p> <p>(TIR)          観測スペクトルから導出した導出した気体濃度高度分布</p>
気体濃度全球分布図 L3 (TBD)		<p><math>CO_2, CH_4</math> の全球分布</p>
全球吸収排出量 L4A		<p><math>CO_2, CH_4</math> の正味の吸収排出量</p>

L0 データから L1B データまでの処理フロー概要を図 2.2.1-1 に示す。

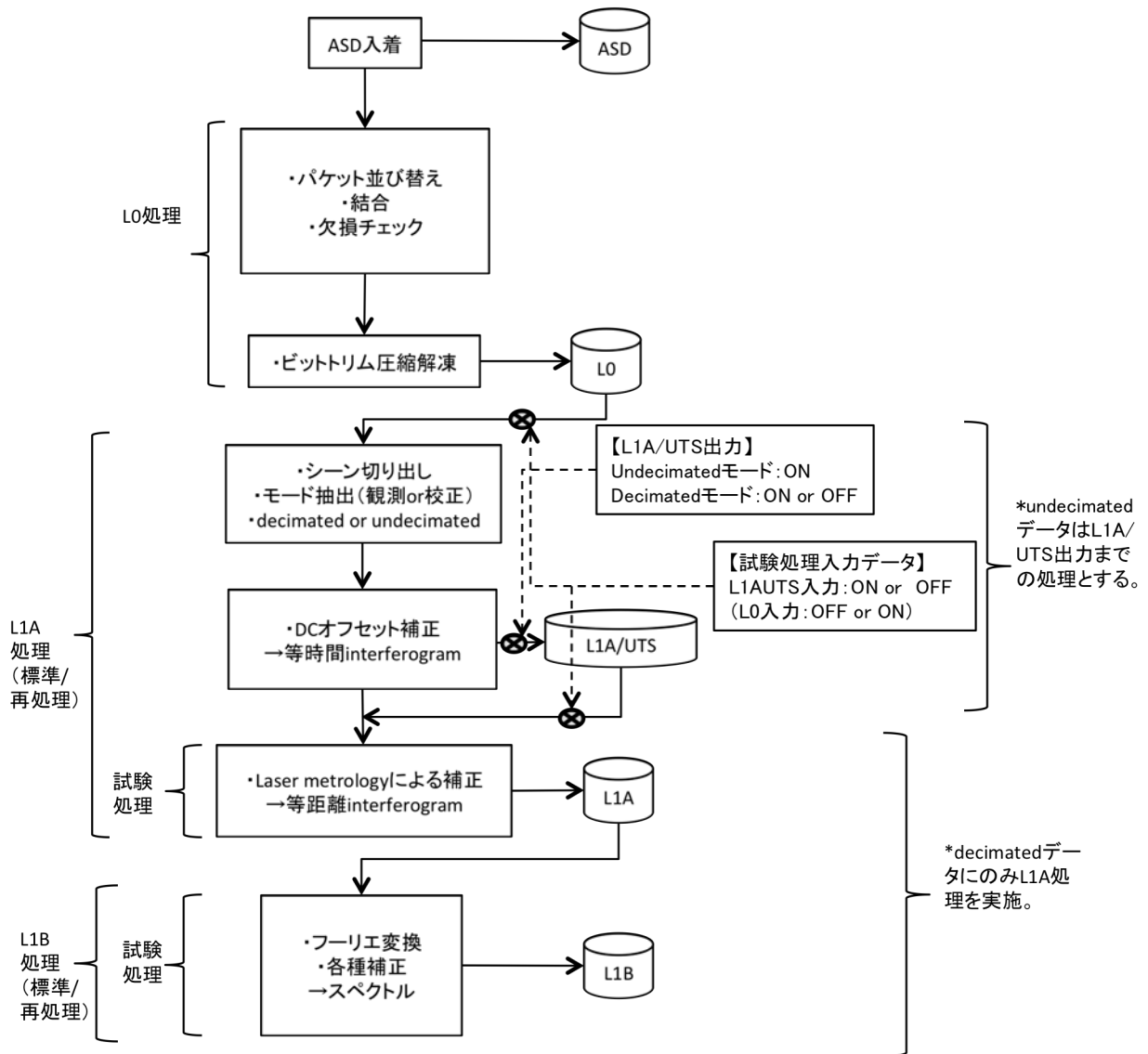


図 2.2.1-1 L0からL1B処理までのフロー概要

## 2.3 TANSO-FTS-2 L0 データとその処理

### 2.3.1 FTS-2 L0 処理概要

TANSO-FTS-2 の L0 データは、図 2.2.1-1 に示されるとおり、到着データからパケット並び替え、結合、欠損確認を行い、ダイナミックビットトリム圧縮を解凍し、非圧縮データとして記録したデータとする。

## 2.4 TANSO-FTS-2 L1 データとその処理

### 2.4.1 FTS-2 L1 処理概要

FTS-2 のデータ処理は大きく以下の 5 つの要素から形成されている。ただし、以降の処理は decimated モードデータを対象とする。Undecimated モードデータについては、L1A/UTS への記録までとし、定常処理では L1B 処理は実施しないものとする。通常は decimated モードのデータが地上に伝送される。

- a. 等時間サンプリングインタフェログラムから等距離サンプリングインタフェログラムへの変換処理
- b. SWIR インタフェログラム (Band1, 2, 3) からスペクトルへの変換処理
- c. TIR インタフェログラム (Band4, 5) からスペクトルへの変換処理

軌道上にて、観測開始前の DC 成分を計測し、その成分を除去した信号が、等時間でサンプリングされる。サンプリングされたインタフェログラムは、ダイナミックビットトリム圧縮され、地上にダウンリンクされる。

ダイナミックビットトリム圧縮解凍は L0 処理において実施され、L1 処理においては、等時間サンプリングインタフェログラムから等距離サンプリングインタフェログラムへの変換を行った後、各種スペクトルを導出する。以降で、各処理について詳説する。

#### 2.4.2 等時間サンプリングインタフェログラムから等距離サンプリングインタフェログラムへの変換処理

測距レーザの出力零点を通過するタイミング(フリンジ)間隔を、 $Clock_{master}$  (66MHz, 1pulse=15.1515nsec) を源振とするパルスをカウントすることにより、時刻を導出する、時刻タグ情報と、観測信号(インタフェログラム)間は、サンプリングウィンドウ信号の開始時刻に同期している。つまり、二つの信号の開始時刻を一致させ、時刻の基準とすることで、2 者の信号間の関係を導くことができる。等距離サンプリングインタフェログラムは、等時間サンプリングインタフェログラムと測距レーザのフリンジ間隔の時間を基に、距離の次元に変換する操作となる。

##### STEP\_TO1: 等時間サンプリングインタフェログラムの生成と飽和判定

圧縮解凍されたインタフェログラムから、DC オフセット、ゲイン補正を施し、等時間サンプリングインタフェログラムを生成する。各観測データには、観測開始時の DC オフセット値が付加され、また観測条件からゲイン値を求めることができる。バンド別、走査方向別、観測シーン別の非線形補正前の等時間サンプリングインタフェログラムは、Eq. 2.4.2-1 にて表される。

$$I_{amp,b,d}^X = \frac{ADC\_scale_b}{PGA_{gain}_b^X} \cdot DN_{b,d}^X \cdot + DAC_{scale}_b \cdot DC_{offset}_{b,d}^X + V_{offset,b}$$

Eq. 2.4.2-1

このとき

$b$ : 各バンド(バンド 1P, 1S, 2P, 2S, 3P, 3S, 4, 5)

$d$ : 走査方向(Forward=1, Backward=0)

$X$ : 観測ターゲット(地心観測、黒体校正、深宇宙校正、太陽照度校正、月校正、装置関数校正、夜間校正)

$I_{amp,b,d}^X$ : DC オフセット、ゲイン補正を行った等距離サンプリングインタフェログラム

$ADC\_scale_b$ : ADC のスケール係数

$DN_{b,d}^X$ : L0 に保存されている各バンドのインタフェログラム(ダイナミックビットトリム圧縮解凍後)

$PGA_{gain}_b^X$ : バンド毎のゲイン係数

$DAC\_scale_b$ : バンド毎の DAC のスケール係数

$DC\_offset_{b,d}^X$ : 観測開始前にクランプされたバンド別、走査方向別 DC オフセット

この際、14bitADC 出力の最大値/最小値が、しきい値を越えている場合、飽和と判定し、判定結果をプロ

ダクトに格納する。

#### STEP\_TO2: スパイク信号判定及び補正

宇宙線影響等によりインタフェログラムの一部にスパイク上の信号が含まれる場合、フラグによる識別を行う。宇宙線影響等によるスパイク上の信号は、通常、不連続な信号を形成するため、インタフェログラムに不連続部分が含まれる場合に、スパイク信号が混入したと判断する。判定はAC成分のみを対象とする。Eq. 2.4.2-1 で示される、 $I_{amp,b,a}^x$  から DC 成分を除去した後、バンド毎のデータを  $N_{spike}$  サンプル点毎の領域に区切り、サンプル内の平均値を除去後、領域内における最大・最小値を求め、Eq. 2.4.2-2 に示す通り、それぞれの振幅比が  $spike_{b,max}$  倍もしくは  $spike_{b,min}$  倍よりも大きい場合、スパイク上の信号が混入していると考え、スパイク信号と判定する。スパイク信号検出のイメージを図 2.4.2-1 に示す。

$$\frac{abs\left(\max\left(DN_{b,a}^x(n:n+N_{spike})\right)\right)}{abs\left(\min\left(DN_{b,a}^x(n:n+N_{spike})\right)\right)} > spike_{b,max}$$

Eq. 2.4.2-2

$$\frac{abs\left(\min\left(DN_{b,a}^x(n:n+N_{spike})\right)\right)}{abs\left(\max\left(DN_{b,a}^x(n:n+N_{spike})\right)\right)} > spike_{b,min}$$

Eq. 2.4.2-3

このとき、 $n = 1:N_{spike}$ : Sample size

サンプル点のみに影響するスパイク信号は FFT 後、高周波ノイズを誘引する成分となる。この高周波ノイズを抑えることを目的に、スパイク信号に対し補正を施す。Eq. 2.4.2-2 でスパイクと判定されたサンプル  $N$  点を検出した場合、 $N - 1$  点及び  $N + 1$  点のデータの平均値と置き換える。この際、インタフェログラムの両端 ( $N = 1$  or  $N = end$ ) でスパイク信号を検出した際にはそれぞれ、 $N = 2$  or  $N = end - 1$  のデータで置き換える物とする。また、補間点  $N$  点と検出結果を格納する。スパイクは区間内の信号絶対値が最も大きく、且つ設定された閾値よりも大きいデータとして定義する。

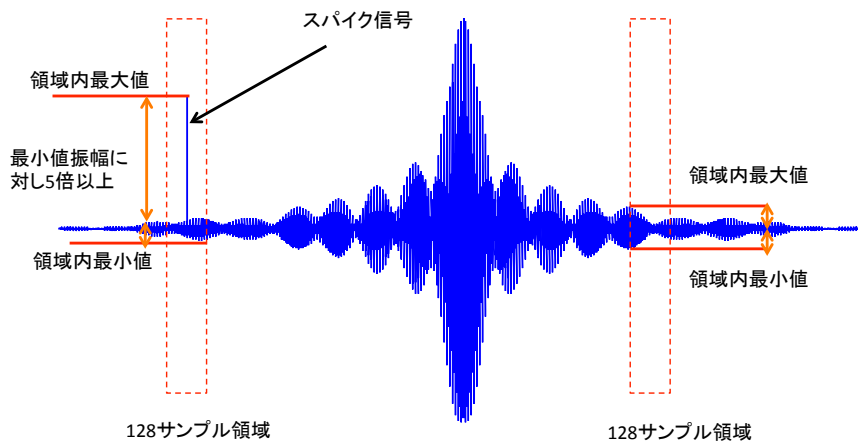


図 2.4.2-1 スパイク信号検出イメージ

### STEP\_TO3: 時刻タグデータの生成

等時間サンプリングインタフェログラムから等距離サンプリングインタフェログラムへの変換は、同時に取得される時刻タグ情報を基に行う。時刻タグは、測距レーザ信号がゼロ点を通る際(信号レベルが-から+側及び+から-側の両方向)の時刻が記録されている。そのため、この時刻タグは 655nm 間隔(1.31  $\mu\text{m}$  のレーザを使用している場合)で記録され、走査速度が一定であれば時間間隔は一定となるため、時間間隔のばらつきを見ることで、走査安定度も評価可能である。時刻タグは干渉計内の  $Clock_{master}$  源振を元にしたカウント値として配信される。なお、時間分解能は  $15.1515\text{ns}=1/66\text{MHz}$  となる。図 2.4.2-2 に測距レーザとインタフェログラムサンプリングの関係を示す。

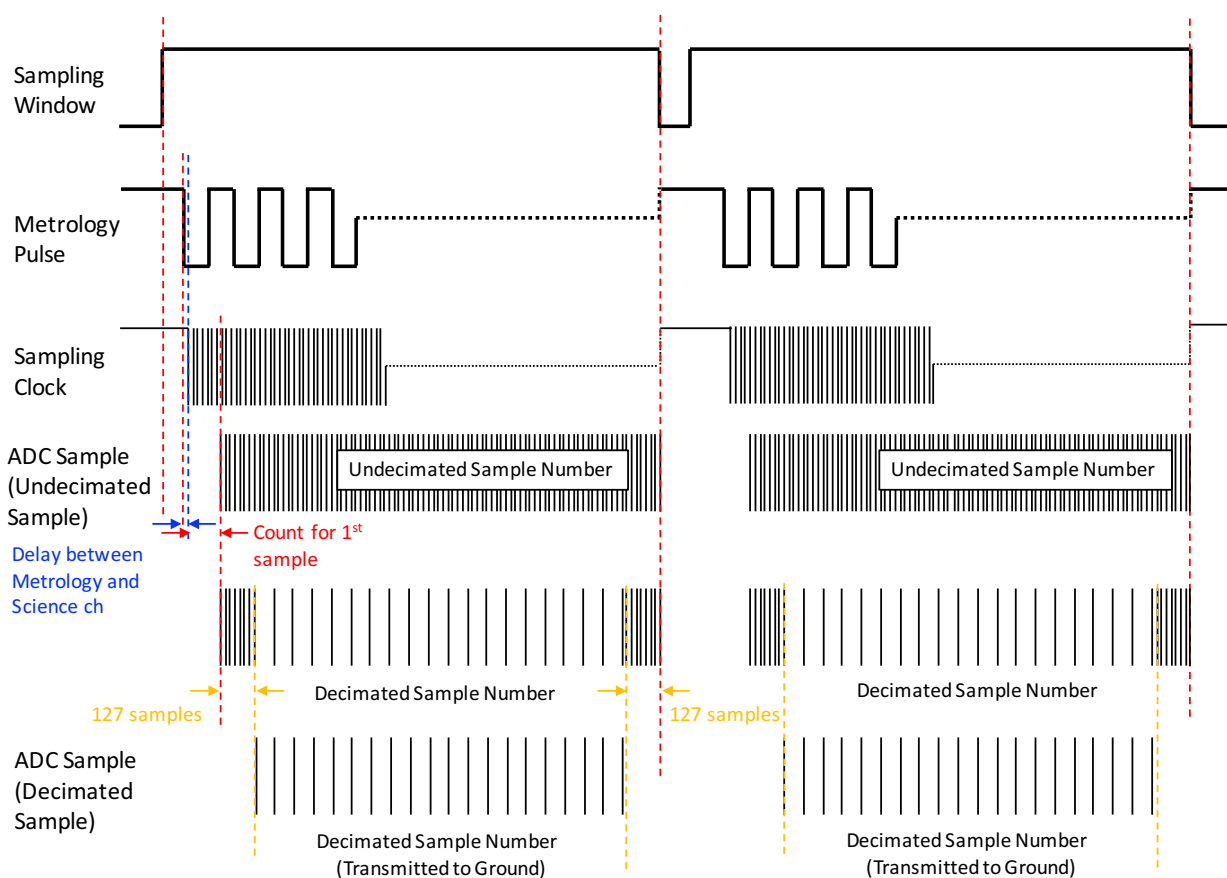


図 2.4.2-2 測距レーザとインタフェログラムサンプリングの関係

図 2.4.2-2 に示す通り、干渉計のターンアラウンド終了後、サンプリングウィンドウが立ち上がると、Metrology Pulse (時刻タグ)の配信が始まる。配信されるパルス On/Off ステータスの間、FTS-2 から配信される Master Clock のパルス数をカウントし、この間の時刻(パルス数)を計測する。Master Clock が 66MHz であることから、ノミナルの Metrology Pulse のパルス間隔は 3458 カウントとなる。Sampling Clock は Master Clock を分周し生成され、ノミナルサンプリング周波数は 117kHz となる。

Sampling Clock に同期した ADC が、観測信号(干渉光信号)を AD 変換する。軌道上では 8.547us で AD 変換される(Undecimated Sample)。この際、Sampling Clock を介して、Metrology Pulse と ADC Sample が同期されている必要がある。しかし、Metrology Pulse を検出するアナログ回路と観測信号を検出するアナログ

回路(ADC 込み)では、回路特性が異なるため、この 2 者間に時刻遅延が発生する。そのため、時刻を同期するためには、2 者間の遅延量(Delay 量)を考慮する必要がある。

地上に伝送する際には、FIR フィルタが適応され、Undecimated でサンプルされたデータが設定された Decimation Factor で間引かれて伝送される。ただし、FIR フィルタの特性上、フィルタを適応するデータの両端 127 点分はフィルタの影響により信号が歪む。そのため、この領域のデータは使用できない。Undecimated データに対しフィルタが適応される場合、データの両端 127 点は処理できないデータとなるため、軌道上でこの部分が削除される。最終的には、図 2.4.2-2 の最下段で示されるデータが地上に伝送される。

地上に伝送される時刻タグ情報は 76789 点となる。地上に伝送されるデータは、FRINGE間のカウント値であるため、FRINGE n 点における時刻とするためには、1 カウントあたりの時間を掛け合わせ、Eq. 2.4.2-4 で表される。

$$T_{met\_t}[n] = \sum_{k=1}^n T^{met\_raw}[k] \cdot \frac{1}{Clock_{master}}, n = 1 \dots N$$

Eq. 2.4.2-4

バンド1については、ナイキストサンプリング理論に従うために、等時間サンプリングにおけるサンプリング間隔を1/4波長としアップサンプリングし、バンド4,5については、1波長としダウンサンプリングする。それに伴い、バンド毎にサンプリング時間間隔が異なる。バンド毎のサンプルn点における時刻はEq. 2.4.2-5となる。バンド1では2点間の midpoint で新たな時刻を生成し、バンド4,5では1点間引く。またこのとき、元の時刻タグのサンプル点数をnとすると、Band1:  $2 \times n = 153578$  点, Band2:3:  $n = 76789$  点, Band4,5:  $\frac{n}{2} = 38394$  点 となる。

$$\begin{aligned} T_{met}^b[n] &= \text{interp1}(1:N, T_{met\_t}[N], 1:2N) \quad n = 1, \dots (2 * N), \text{ for } b = \text{Band } 1 \\ T_{met}^b[n] &= T_{met\_t}[n], n = 1, \dots N \quad \}, \quad \text{for } b = \text{Band } 2, 3 \\ T_{met}^b[n] &= T_{met\_t}[2n - 1], n = 1, 2, 3, \dots \left(\frac{N}{2}\right) \quad \}, \quad \text{for } b = \text{Band } 4, 5 \end{aligned}$$

Eq. 2.4.2-5

#### STEP\_TO5: 等距離サンプリングインタフェログラムの生成(前処理)

等時間サンプリングインタフェログラムから等距離サンプリングインタフェログラムに変換するためには、時間の次元から距離の次元に変換する必要がある。時刻タグと等時間サンプリングインタフェログラムが取得されるタイミングは異なるため、等時間サンプリングインタフェログラムのサンプリング時間に対して補間を行い、その際のインタフェログラム強度を導出する必要がある。ここでは、デジタルフィルタを適応し、リサンプリングを行う。

等時間サンプリングの場合、インタフェログラムの取得は  $Clock_{master}$  を分周した周波数で行われる。バンド毎のサンプリング周波数(分周後)およびFIRフィルタによる間引きに伴うノミナルの実行的サンプリング周波数を表 2.4.2-1に示す。

Decimatedデータの場合、表 2.4.2-1に示す通り、ノミナルの実行サンプリング間隔は22usから103usとなる。また、各観測信号チャンネルと測距レーザ信号間の信号遅延時間  $Delay_{b,side}$  はバンド及びサイドに依存するが、3usから20us程度となる。

Band1のサンプリングにおいても、Band2-5と共通のサンプリング周波数を使用した場合、Band1のデータを処理するためのデータ点数が不足する。(ナイキストサンプリング周波数を満足できない。)そこで、Band1においては、分周率をBand2-5の1/2とし、サンプリング点数を2倍とする。そのため、UpsamplingFactorはバンド1で2、他のバンド1となる。

表 2.4.2-1 サンプリング周波数およびデシメーション後の実行サンプリング周波数

バンド	サンプリング周波数	デシメーション	実行サンプリング周波数	実行サンプリング間隔
B1P/S	234.5kHz	5	46.8kHz	2.1326E-05 sec
B2P/S	117.2kHz	5	23.4kHz	4.2651E-05 sec
B3P/S	117.2kHz	6	19.5kHz	5.1282E-05 sec
B4	117.2kHz	12	9.77kHz	10.2364E-05 sec
B5	117.2kHz	12	9.77kHz	10.2364E-05 sec

等時間サンプリングインタフェログラムは①測距レーザバンド毎のアナログ回路間の $Delay_{b,side}$ (カウント値)及び、②1st サンプリング点までの時間遅れ(Clocks to 1st Sample)を足した①+②分遅れてサンプルが開始される。この点を考慮し、等時間で取得されるインタフェログラムを等距離インタフェログラムに変換する。

バンド毎の電氣的 ZPD と光学的な ZPD の差を $nZPD_b$  (カウント数によるパラメータ)とすると、観測したインタフェログラムに対応する測距レーザ信号の計測時刻は

$$t_b = T_{met}^b \left[ \text{floor} \left( \frac{\text{numBand}_b - \text{numF}}{2} \right) - nZPD_b; \text{floor} \left( \frac{\text{numBand}_b - \text{numF}}{2} \right) - nZPD_b + \text{numBand}_b \right] \quad \text{Eq. 2.4.2-6}$$

このとき

$\text{numBand}_b$  : バンド毎の有効サンプリング点数

$\text{numF}$  : 即距信号の観測カウント

となる。

このとき、等距離サンプリングのインタフェログラムの観測点カウント時刻を $n_b$ とすると、

$$T_{b,s} = \frac{\text{SamplingPulseAdjustment} + 448}{\text{UpsamplingFactor}}$$

$$n_b = \text{floor} \left( \frac{t_i - T_{b,0} - 127 \cdot T_{b,s} - \text{Delay}_{b,side}}{T_{b,s} \cdot \text{DecimationFactor}} \right) \quad \text{Eq. 2.4.2-7}$$

この場合、各観測点との位相差は以下となる。

$$\Delta t = t_i - T_{b,0} - 127 \cdot T_{b,s} - \text{Delay}_{b,side} - T_{b,s} \cdot n \cdot \text{DecimationFactor}$$

$$P_i = \text{floor} \left( \frac{\Delta t}{T_{b,s} \cdot \text{DecimationFactor}} \cdot P_b \right) \quad \text{Eq. 2.4.2-8}$$

このとき  $P_b$  : バンド毎のデジタルフィルタの大きさとなる。計算された index  $P_i$  を用いデジタルフィルタの

係数を決定し、基のインタフェログラムに適応することにより、等距離インタフェログラムは次式で表現される。

$$I_{opd,b,d}^x = \sum_{k=0}^{M_b-1} I_{amp,b,d,n+\frac{M_b}{2}-k}^x \cdot tap_{b,p_i,k}$$

Eq. 2.4.2-9

#### STEP\_TO6: 非線形補正

B2-5 には MCT 検出器を用いる。MCT 検出器の場合、信号強度が高くなるにつれ、2 次や高次の非線形項が発生する。フーリエ干渉計の特性として、高次の項が発生する場合、帯域以外に信号成分が発生する。等距離サンプリングインタフェログラムに変換後、非線形補正を実施する。打ち上げ前に取得された校正係数を基本とする。ただし、軌道上技術評価にて、非線形係数の最適化を実施し、変更が必要な場合にはパラメータのアップデートを行う。

$$I_{nlc,b,d}^x = I_{opd,b,d}^x + a_{nlc,b} \cdot I_{opd,b,d}^x{}^2 + b_{nlc,b} \cdot I_{opd,b,d}^x{}^3 + c_{nlc,b}$$

Eq. 2.4.2-10

ここで、 $a_{nlc,b}, b_{nlc,b}, c_{nlc,b}$ : 2 次、3 次の非線形係数及び、バンド別電圧オフセット となる。

#### 2.4.3 Band1-3 スペクトル変換処理

以降では、等距離サンプリングインタフェログラムに変換された後の処理を示す。処理概要を図 2.4.3-1 に示す。

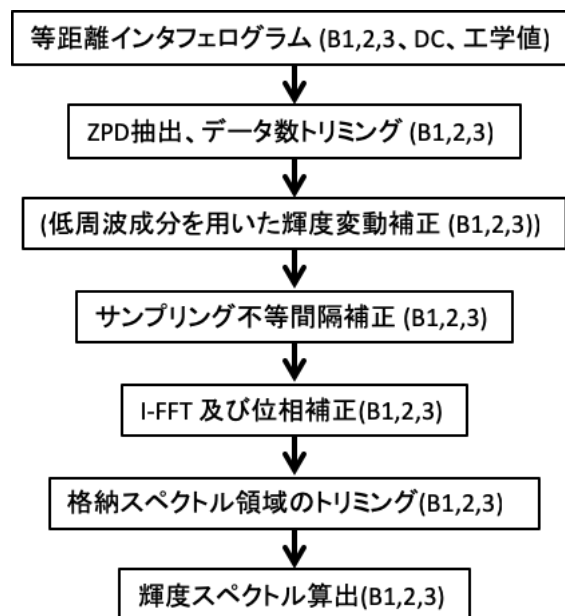


図 2.4.3-1 Band1-3スペクトル処理フロー概要



## STEP\_S1: データのトリミング

バンド毎インタフェログラムから最大信号位置を抽出し、左右対称性を考慮した ZPD 位置として、バンド毎に有効サンプリング点数の中心に ZPD 位置が来るようにデータをトリミングし、有効サンプリング点数分のデータを抽出する。この際、最大信号位置は低周波成分等により本来の ZPD 位置(中心付近)とは異なる場所が高くなる可能性がある。この状況をさけるため、最大信号位置は中心付近の N サンプルから求めることとする。最大ピークで中心点を求めた場合、電氣的・光学的信号遅延量は考慮されていないため、真のサンプリング中心からずれている可能性がある。そこで、Fringe Count Error 値(FCE 値)を計算し、左右対象性が向上するよう、ZPD 位置の微調整を行う。具体的には、 $I_{nlc,b,d}^X$  の最大信号位置を中心として、 $FCE_{b,window}$  の領域の信号を抽出したインタフェログラム  $I_{FCE,b,d}$  を作成し、FCE 値を計算し、左右対象性を評価し、必要に応じ補正する。この際、 $I_{FCE,b,d}$  の両端を結ぶように DC 成分を削除し FFT を施す。

$$S_{FCE,b,d} = FFT[fftshift(I_{FCE,b,d})] \cdot dOPD_b^{ideal} \quad \text{Eq. 2.4.3-1}$$

このとき  $dOPD_b^{ideal}$  はバンド毎のサンプリング間隔(つまり、測距レーザ波長:  $laser_{WL}$  の 1/4 倍: B1, 1/2 倍: B2-3)となる。帯域内の位相はほぼ連続的に変化することから、位相に対し、Eq. 2.4.3-2 で示される式により、一次のフッティングを施す。(この位相は unwrap しない。ただし、window 幅により unwrap することもある。)

$$fit_{S_{FCE,b,d}}^{phase} = polyfit[1: FCE_{b,window}, angle(S_{FCE,b,d}), 1] \quad \text{Eq. 2.4.3-2}$$

このとき  $fit_{S_{FCE,b,d}}^{phase}$  は一次の係数を表す。この係数を用いることにより、バンド毎の  $FCE_{b,d}$  は

$$FCE_{b,d} = round \left[ \frac{fit_{S_{FCE,b,d}}^{phase}}{2\pi} \cdot FCE_{b,window} \right] \quad \text{Eq. 2.4.3-3}$$

となる。これより、 $n_m + FCE_{b,d}$  を ZPD 位置  $ZPD_{pos,b,d}$  として、表 2.4.3-1 に示される有効サンプリング点数 N 分の抽出を行う。この際、 $n_m$  は、 $I_{nlc,b,d}^X$  の最大信号位置を表す。ZPD 調整及び有効サンプリング点数を取り出したインタフェログラムを  $I_{trim,b,d}^X$  とする。このとき  $n$  は、1 から N(バンド毎の有効サンプリング点数)を持つ整数となる。

N が奇数の時:  $ZPD_{pos,b,d} - floor\left(\frac{N}{2}\right)$  から  $ZPD_{pos,b,d} + floor\left(\frac{N}{2}\right)$

$$I_{trim,b,d}^X[n] = I_{nlc,b,d}^X \left[ ZPD_{pos,b,d} - floor\left(\frac{N}{2}\right) : ZPD_{pos,b,d} + floor\left(\frac{N}{2}\right) \right] \quad \text{Eq. 2.4.3-4}$$

N が偶数の時:  $ZPD_{pos,b,d} - \left(\frac{N}{2}\right)$  から  $ZPD_{pos,b,d} + \left(\frac{N}{2}\right) - 1$

$$I_{trim,b,d}^X[n] = I_{nlc,b,d}^X \left[ ZPD_{pos,b,d} - \frac{N}{2} : ZPD_{pos,b,d} + \frac{N}{2} - 1 \right]$$

となる。またこの際に forward と backward の間で、データの並び順が等しくなるように、backward データについてはフリップしておく。

表 2.4.3-1 バンド毎の有効サンプリング点数(SWIR)

バンド	有効サンプリング点数
B1P/S	153090
B2P/S	76545
B3P/S	76545

本処理以降、有効サンプリング点数にトリミングされた、等距離サンプリングインタフェログラムとなる。なお、何らかの理由により ZPD 位置が有効サンプリング点数の midpoint から大きくはずれて観測された場合、ZPD 位置が有効サンプリング点数の midpoint に来るようトリミングを行うと、片側で点数が不足する。その場合、不足する点をゼロ埋めるものとする。片側にゼロが埋められたインタフェログラムは、左右非対称のインタフェログラムとなり、実効的な分光分解能が低下する。そのため分光分解能の均一性の観点で好ましくない。この場合には、均一性を保つことを目的に、インタフェログラムに対し重み付けを行う処理を追加する。図 2.4.3-2 に片側ゼロのインタフェログラムと重み関数を示す。本例の場合、0 ポイント付近のインタフェログラムがゼロ埋めされたものとなる。インタフェログラムがゼロの場合、重みをゼロとする。一方、反対側(図の例では 70000 ポイント側)のインタフェログラムの同ポイント数の情報に対し重みを 2 とする。その他の重みを 1 とするが、重み関数が増加するところでは疑似信号の発生を抑えるためのフィルタを適応する。

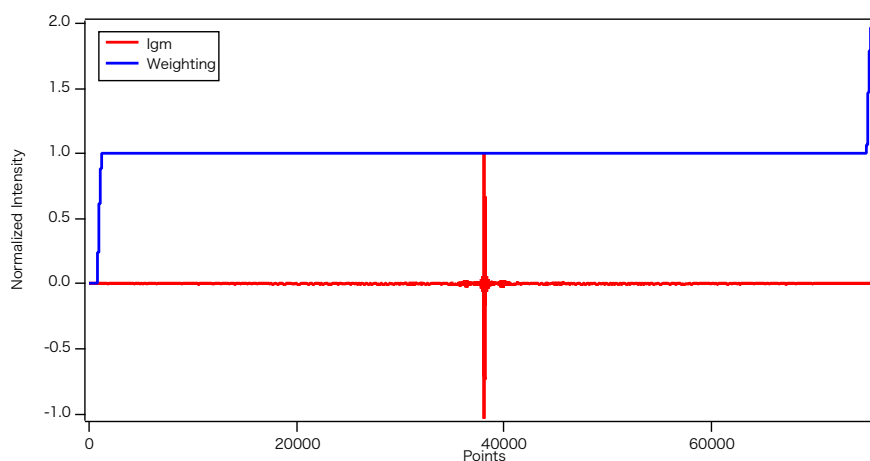


図 2.4.3-2 片側ゼロのインタフェログラムと重み関数

片側で不足する点数を  $X_{zerofill,b}$  とした場合、インタフェログラムに適応する重み関数は Eq. 2.4.3-6 となる。なお、不足点はバンド毎で異なる。なお、 $X_{zerofill,b}$  は取得したインタフェログラムから算出する。

$$\begin{aligned}
& W_{SWIR\_ZPD,b} \\
& = \begin{cases} 0 & , \quad \text{if } 0 \leq n \leq X_{zerofill,b} \\ F_{SWIR\_ZPD\_L} & , \quad \text{if } X_{zerofill,b} + 1 \leq n \leq X_{zerofill,b} + W_{smooth\_SWIR,b} \\ 1 & , \quad \text{if } X_{zerofill,b} + W_{smooth\_SWIR,b} + 1 \leq n \leq end - (X_{zerofill,b} + W_{smooth\_SWIR,b}) \\ F_{SWIR\_ZPD\_R} & , \quad \text{if } end - (X_{zerofill,b} + W_{smooth\_SWIR,b}) + 1 \leq n \leq end - X_{zerofill,b} \\ 2 & , \quad \text{if } end - X_{zerofill,b} + 1 \leq n \leq end \end{cases} \\
& F_{SWIR\_ZPD\_L} = -0.5 \times \cos\left(\frac{\pi}{W_{smooth\_SWIR,b}} \cdot (n - X_{zerofill,b})\right) + 0.5 \\
& F_{SWIR\_ZPD\_R} = 0.5 \times \cos\left(\frac{\pi}{W_{smooth\_SWIR,b}} \cdot (n - (end - X_{zerofill,b} + 1))\right) + 1.5
\end{aligned}$$

Eq. 2.4.3-6

この際、 $W_{smooth\_SWIR,b}$  は重みの遷移領域を表す。重みを付加する前に  $I_{trim,b,d}^X$  から Eq. 2.4.3-7 を用いて DC 成分を取り除く。

$$I_{trim,b,d}^{X,AC}[n] = I_{trim,b,d}^X[n] - \frac{I_{trim,b,d}^X[N] - I_{trim,b,d}^X[1]}{N - 1} \cdot (n - 1) - I_{trim,b,d}^X[1]$$

Eq. 2.4.3-7

これより、ZPD 位置が大きく動いた場合のトリミング後のバンド別、走査方向別のインタフェログラムは Eq. 2.4.3-8 で表される。

$$I_{trim,b,d}^{X,AC,W}[n] = W_{SWIR\_ZPD,b} \cdot I_{trim,b,d}^{X,AC}[n]$$

Eq. 2.4.3-8

Eq. 2.4.3-9 により DC 成分を戻す。

$$I_{trim,b,d}^{X,W}[n] = I_{trim,b,d}^{X,AC,W}[n] + \frac{I_{trim,b,d}^{X,AC,W}[N] - I_{trim,b,d}^{X,AC,W}[1]}{N - 1} \cdot (n - 1) + I_{trim,b,d}^{X,AC,W}[1]$$

Eq. 2.4.3-9

ここで改めて

$$I_{trim,b,d}^X = I_{trim,b,d}^{X,W}$$

Eq. 2.4.3-10

として定義する。

#### STEP\_S2: 輝度変動補正(低周波補正)

観測中にスキヤナのジッタ等により観測シーンの輝度に変動した場合、スペクトルに誤差を与えることになる。通常ジッタ等による輝度変動は低周波成分に現れる。そこで低周波成分から輝度変動量を推定し補正する。なお、低周波成分としては  $S_{SWIR}$   $\text{cm}^{-1}$  以下を対象とする。データトリミングされたインタフェログラムの両端の値を結ぶように DC 成分を抽出し、インタフェログラムから取り除き、両端が 0 となるインタフェログラムを形成する。このとき  $N$  は有効サンプリング点数を表す。

$$I_{DC\_off,b,d}^X[n] = I_{trim,b,d}^X[n] - \frac{I_{trim,b,d}^X[N] - I_{trim,b,d}^X[1]}{N - 1} \cdot (n - 1) - I_{trim,b,d}^X[1]$$

Eq. 2.4.3-11

このインタフェログラムに対し FFT を施す。

$$S_{b,d}^X[n] = FFT(I_{DC\_off,b,d}^X[n])$$

Eq. 2.4.3-12

FFT を施した複素スペクトルに対し、Eq. 2.4.3-13 に示すフィルタを適応し、低周波成分を抽出する。なお、 $\nu$  は波数、 $S_{SWIR}$  は SWIR 低周波補正カットオフ波数、 $N_{SWIR}$  は SWIR 低周波補正フィルタ次数を表す。なお、スペクトルは軸対象であるため、フィルタについても低周波のみならず、フリップした高周波にも適応する。Eq. 2.4.3-13 に低周波数フィルタを示す。

$$F_{SWIR} = \begin{cases} \left( \frac{1 + \cos \frac{\pi \nu}{S_{SWIR}}} {2} \right)^{N_{SWIR}}, & \text{if } \nu < S_{SWIR} \\ 0, & \text{if } \nu \geq S_{SWIR} \end{cases}$$

Eq. 2.4.3-13

抽出した低周波成分を I-FFT し、実数部を抽出することで、低周波インタフェログラム:  $I_{smooth,b,d}^X(n)$  を作成する。なお、 $I_{smooth,b,d}^X(n)$  を作成する際に先に差し引いた DC 成分を加えておく。

$$I_{smooth,b,d}^X(n) = Real\{IFFT(F \cdot S_{b,d}^X)\} + \frac{I_{trim,b,d}^X[N] - I_{trim,b,d}^X[1]}{N - 1} \cdot (n - 1) + I_{trim,b,d}^X[1]$$

Eq. 2.4.3-14

このとき、輝度変動を補正したインタフェログラム  $I_{corr,b,d}^X(n)$  は Eq. 2.4.3-15 で表される。また  $I_{smooth\_mean,b,d}^X(ZPD_{pos,b,d})$  は Eq. 2.4.3-16 で表される。なお、 $LFC_{b,window}$  は、平均化領域を表すパラメータである。 $ZPD_{pos,b,d}$  は ZPD 位置のサンプリング点を表す。

$$I_{corr,b,d}^X(n) = \frac{I_{trim,b,d}^X(n)}{I_{smooth,b,d}^X(n)} I_{smooth\_mean,b,d}^X(ZPD_{pos,b,d})$$

Eq. 2.4.3-15

$$I_{smooth\_mean,b,d}^X(ZPD_{pos,b,d}) = mean[I_{smooth,b,d}^X(ZPD_{pos,b,d} - LFC_{b,window}: ZPD_{pos,b,d} + LFC_{b,window})]$$

Eq. 2.4.3-16

#### STEP\_S4: 位相補正スペクトルの計算

位相補正を適応したスペクトルは、Mertz の方法を用い導出する。初めに帯域内の位相を導出するために、位相補正用ガウス関数半値幅  $\sigma$  [cm] のガウス関数を窓関数として、低分光分解能のスペクトル  $S_{Low,b,d}$  を算出する。ガウス関数としては以下を用いる。

$$x = \frac{n - \frac{N}{2}}{N} \cdot dOPD_b^{ideal}$$

$$Flt = e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}}$$

Eq. 2.4.3-17

$$S_{Low,b,d} = FFT[fftshift(Flt \cdot I_{SINUC,b,d})]$$

Eq. 2.4.3-18

また位相補正前のスペクトルを $S_{full,b,d}$ とすると

$$S_{full,b,d} = FFT[fftshift(I_{SINUC,b,d})]$$

Eq. 2.4.3-19

となる。これより位相補正を施した複素スペクトルは Eq. 2.4.3-20 で表される。

$$S_{b,d} = S_{full,b,d} \cdot \exp[-1i \cdot \text{angle}(S_{Low,b,d})] \cdot dOPD_b^{ideal}$$

Eq. 2.4.3-20

またこのとき波数は Eq. 2.4.3-21 で表される。

$$\delta\sigma = \frac{1}{dOPD_b^{ideal} \cdot N}$$

Eq. 2.4.3-21

$N$ : 有効サンプリング点数

上記処理を適応し、打ち上げ前に取得したデータを処理した処理スペクトルの例を図 2.4.3-3 に、位相を図 2.4.3-4 に示す。

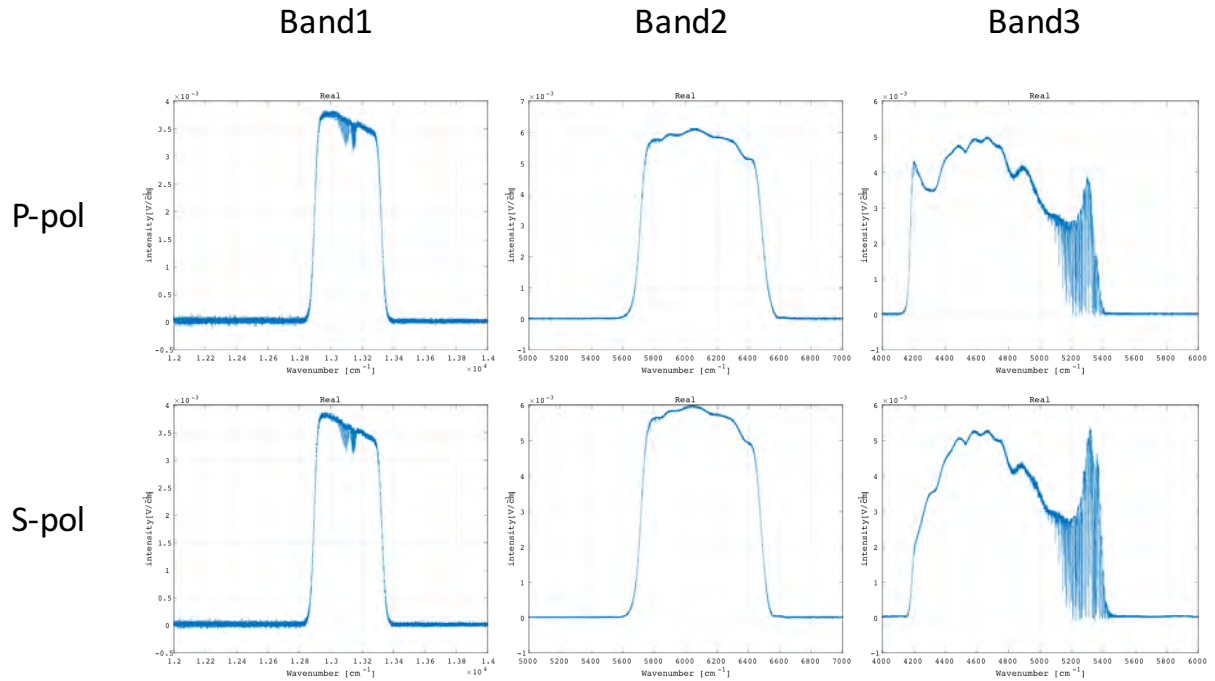


図 2.4.3-3 処理スペクトル例

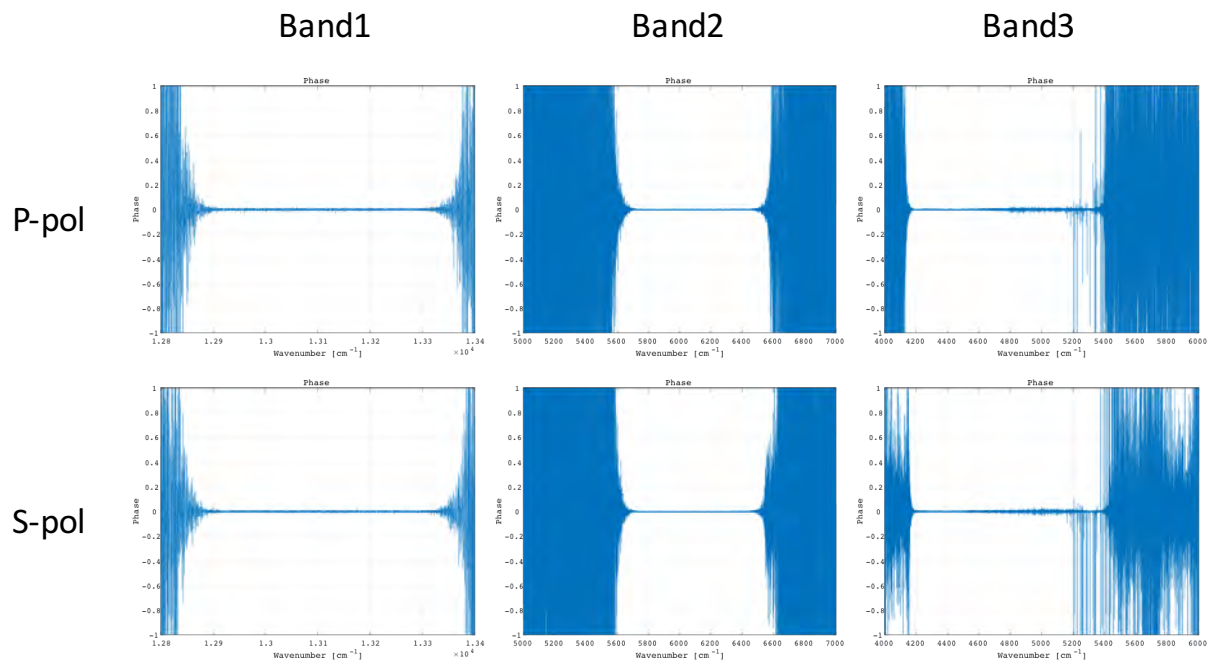


図 2.4.3-4 位相の例

#### STEP\_S6: 輝度変換

導出したスペクトルは  $\nu/\text{cm}^{-1}$  の次元であるため、このままでは輝度にはならない。輝度にするためには、輝度変換係数  $CNV_b$  を乗ずることで、輝度値を算出し格納する。輝度変換係数は波数と打上げからの時間の関数として定義する。このとき実数のみを対象とする。ある時刻  $t$  に取得されたスペクトル  $S_{b,d}(\nu, t)$  [ $V/\text{cm}^{-1}$ ] とし、軌道上劣化係数  $Y(\nu, t)$  を考慮した輝度変換は Eq. 2.4.3-22 となる。

$$Rad_{b,d}(v, t) = \frac{CNV_b \cdot S_{b,d}(v, t)}{Y(v, t)}$$

Eq. 2.4.3-22

#### 2.4.4 Band4-5 スペクトル変換処理

以降では、等距離サンプリングインタフェログラムに変換された後の処理を示す。処理概要を図 2.4.4-1 に示す。Band4-5 のスペクトルを導出するためには、地表面観測データ(Obs)のみならず、深宇宙校正データ(DS: Deep space)及び黒体観測データ(BB: Blackbody、別名 ICT:Infrared Calibration Target)を使用する。地表面観測データ観測時刻から過去方向にデータを探索し、最も近い黒体・深宇宙データを抽出し、複素感度校正に使用する。その際、連続して複数回データを取得している際には、走査方向別(Forward 方向、Backward 方向)にスペクトルを算出し、スペクトルベースでの平均化を行い、校正データとして適応する。図 1.3.1-1 に軌道上運用シーケンス例を示す。図中黒体・深宇宙校正 N, N+1 に着目する。この場合、N, N+1 の間に観測された Band4-5 のデータは時刻 N に取得された黒体・深宇宙校正データを基に処理を行う。

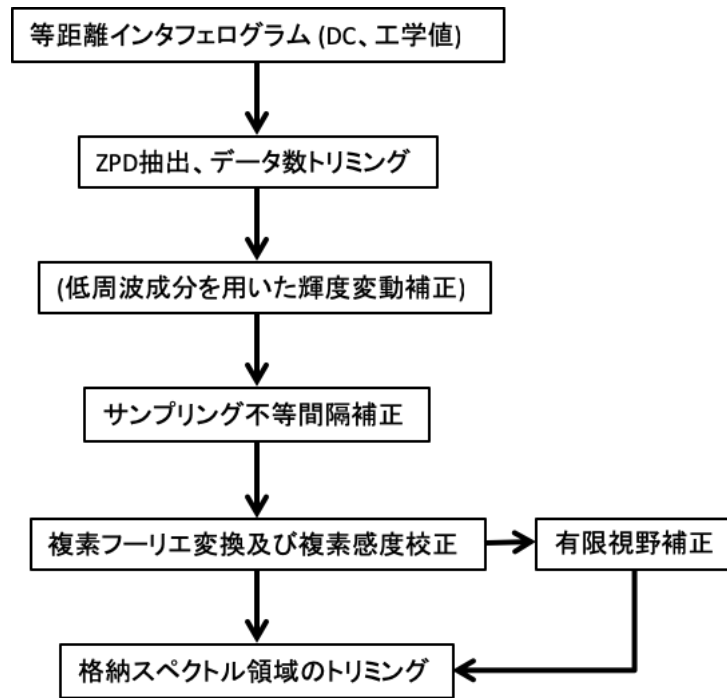


図 2.4.4-1 Band4-5スペクトル処理フロー概要

##### STEP\_T1: データのトリミング

SWIR 同様、バンド毎インタフェログラムから最大信号位置を抽出し、ZPD 位置として、バンド毎に有効サンプリング点数の中点に最大位置が来るようにデータをトリミングし、有効サンプリング点数分のデータを抽出する。最大ピークで中心点を求めた場合、電氣的・光学的信号遅延量は考慮されていないため、真のサンプリング中心からずれている可能性がある。そこで、Fringe Count Error 値(FCE 値)を計算し、左右対称性が向上するよう、ZPD 位置の微調整を行う。具体的には、最大信号位置を中心として、 $FCE_{b,window}$  の領域の信号を抽出したインタフェログラム  $I_{FCE,b,d}$  を作成し、FCE を計算し、左右対称性を評価し、必要に応じ補正する。

$$S_{FCE,b,d} = FFT[fftshift(I_{FCE,b,d})] \cdot dOPD_b^{ideal}$$

Eq. 2.4.4-1

このとき $dOPD_b^{ideal}$ はバンド毎のサンプリング間隔(つまり、測距レーザ波長の1倍:B4-5)となる。この際、帯域内の位相はほぼ連続的に変化することから、位相に対し、Eq. 2.4.3-2 で示される式により、一次のフッティングを施す。(この位相は unwrap しない。ただし、window の幅により unwrap することもある。)

$$fit_{S_{FCE,b,d}}^{phase} = polyfit[1:FCE_{b,window}, angle(S_{FCE,b,d}), 1]$$

Eq. 2.4.4-2

このとき $fit_{S_{FCE,b,d}}^{phase}$ は一次の係数を表す。この係数を用いることによりバンド毎の $FCE_{b,d}$ は

$$FCE_{b,d} = round \left[ \frac{fit_{S_{FCE,b,d}}^{phase}}{2\pi} \cdot FCE_{b,window} \right]$$

Eq. 2.4.4-3

となる。これより、 $n_m + FCE_{b,d}$ をZPD位置 $ZPD_{pos,b,d}$ として、表 2.4.4-1 に示される有効サンプリング点数N分の抽出を行う。ZPD調整及び有効サンプリング点数を取り出したインタフェログラムを $I_{trim,b,d}^x$ とする。このときnは、1からN(バンド毎の有効サンプリング点数)を持つ整数となる。

Nが奇数の時:  $ZPD_{pos,b,d} - floor\left(\frac{N}{2}\right)$ から $ZPD_{pos,b,d} + floor\left(\frac{N}{2}\right)$

$$I_{trim,b,d}^x[n] = I_{nlc,b,d}^x \left[ ZPD_{pos,b,d} - floor\left(\frac{N}{2}\right) : ZPD_{pos,b,d} + floor\left(\frac{N}{2}\right) \right]$$

Eq. 2.4.4-4

Nが偶数の時:  $ZPD_{pos,b,d} - \left(\frac{N}{2}\right)$ から $ZPD_{pos,b,d} + \left(\frac{N}{2}\right) - 1$

$$I_{trim,b,d}^x[n] = I_{nlc,b,d}^x \left[ ZPD_{pos,b,d} - \frac{N}{2} : ZPD_{pos,b,d} + \frac{N}{2} - 1 \right]$$

Eq. 2.4.4-5

となる。またこの際に forward と backward の間で、データの並び順が等しくなるように、backward データについてはフリップしておく。

表 2.4.4-1 バンド毎の有効サンプリング点数(TIR)

バンド	有効サンプリング点数
B4	38250
B5	38250



本処理以降、有効サンプリング点数にトリミングされた、等距離サンプリングインタフェログラムとなる。なお、何らかの理由により ZPD 位置が有効サンプリング点数の midpoint から大きくはずれて観測された場合、ZPD 位置が有効サンプリング点数の midpoint に来ようトリミングを行うと、片側で点数が不足する。その場合、不足する点をゼロ埋めるものとする。片側にゼロが埋められたインタフェログラムは、左右非対称のインタフェログラムとなり、実効的な分光分解能が低下する。そのため分光分解能の均一性の観点で好ましくない。この場合には、均一性を保つことを目的に、インタフェログラムに対し重み付けを行う処理を追加する。図 2.4.4-2 に片側ゼロのインタフェログラムと重み関数を示す。本例の場合、0 ポイント付近のインタフェログラムがゼロ埋めされたものとなる。インタフェログラムがゼロの場合、重みをゼロとする。一方、反対側(図の例では 70000 ポイント側) のインタフェログラムの同ポイント数の情報に対し重みを 2 とする。その他の重みを 1 とするが、重み関数が増加するところでは疑似信号の発生を抑えるためのフィルタを適応する。

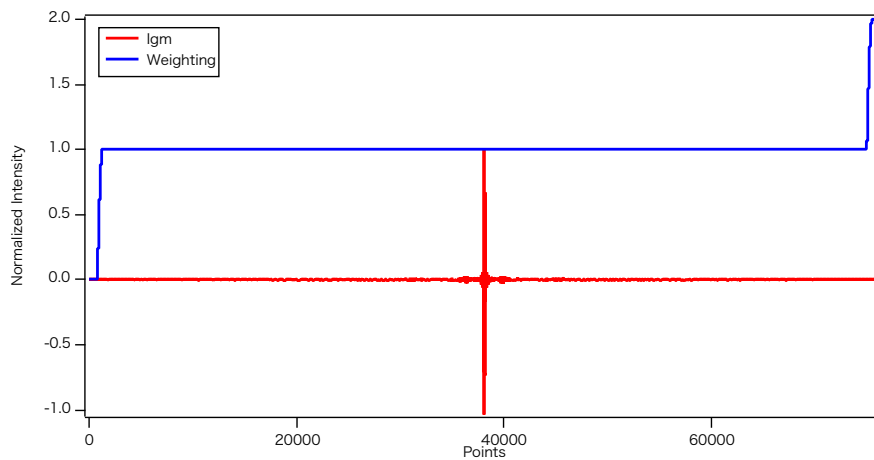


図 2.4.4-2 片側ゼロのインタフェログラムと重み関数

片側で不足する点数を  $X_{zerofill,b}$  とした場合、インタフェログラムに適応する重み関数は Eq. 2.4.4-6 となる。

$$W_{TIR\_ZPD,b} = \begin{cases} 0 & , \quad \text{if } 0 \leq n \leq X_{zerofill,b} \\ F_{TIR\_ZPD\_L} & , \quad \text{if } X_{zerofill,b} + 1 \leq n \leq X_{zerofill,b} + W_{smooth\_TIR,b} \\ 1 & , \quad \text{if } X_{zerofill,b} + W_{smooth\_TIR,b} + 1 \leq n \leq end - (X_{zerofill,b} + W_{smooth\_TIR,b}) \\ F_{TIR\_ZPD\_R} & , \quad \text{if } end - (X_{zerofill,b} + W_{smooth\_TIR,b}) + 1 \leq n \leq end - X_{zerofill,b} \\ 2 & , \quad \text{if } end - X_{zerofill,b} + 1 \leq n \leq end \end{cases}$$

$$F_{TIR\_ZPD\_L} = -0.5 \times \cos\left(\frac{\pi}{W_{smooth\_TIR}} \cdot (n - X_{zerofill,b})\right) + 0.5$$

$$F_{TIR\_ZPD\_R} = 0.5 \times \cos\left(\frac{\pi}{W_{smooth\_TIR}} \cdot (n - (end - X_{zerofill,b} + 1))\right) + 1.5$$

Eq. 2.4.4-6

この際、 $W_{smooth\_TIR,b}$  は重みの遷移領域を表す。重みを付加する前に  $I_{trim,b,d}^X$  から Eq. 2.4.4-7 を用いて DC 成分を取り除く。

$$I_{trim,b,d}^{X,AC}[n] = I_{trim,b,d}^X[n] - \frac{I_{trim,b,d}^X[N] - I_{trim,b,d}^X[1]}{N-1} \cdot (n-1) - I_{trim,b,d}^X[1]$$

Eq. 2.4.4-7

これより、ZPD 位置が大きく動いた場合のトリミング後のバンド別、走査方向別のインタフェログラムは Eq. 2.4.4-8 で表される。

$$I_{trim,b,d}^{X,AC,W}[n] = W_{SWIR\_ZPD,b} \cdot I_{trim,b,d}^{X,AC}[n]$$

Eq. 2.4.4-8

Eq. 2.4.4-9 により DC 成分を戻す。

$$I_{trim,b,d}^{X,W}[n] = I_{trim,b,d}^{X,AC,W}[n] + \frac{I_{trim,b,d}^X[N] - I_{trim,b,d}^X[1]}{N-1} \cdot (n-1) + I_{trim,b,d}^X[1]$$

Eq. 2.4.4-9

ここで改めて

$$I_{trim,b,d}^X = I_{trim,b,d}^{X,W}$$

Eq. 2.4.4-10

として定義する。

STEP\_T2: 輝度変動補正 (低周波補正):

観測中にスキヤナのジッタ等により観測シーンの輝度が変動した場合、スペクトルに誤差を与えることになる。通常ジッタ等による輝度変動は低周波成分に現れる。そこで低周波成分から輝度変動量を推定し補正する。なお、低周波成分としては TIR 低周波補正カットオフ周波数  $s_{TIR}$   $\text{cm}^{-1}$  以下を対象とする。データトリミングされたインタフェログラムの両端の値を結ぶように DC 成分を抽出し、インタフェログラムから取り除き、両端が 0 となるインタフェログラムを形成する。このとき  $N$  は有効サンプリング点数を表す。

$$I_{DC\_off,b,d}^X[n] = I_{trim,b,d}^X[n] - \frac{I_{trim,b,d}^X[N] - I_{trim,b,d}^X[1]}{N-1} \cdot (n-1) - I_{trim,b,d}^X[1]$$

Eq. 2.4.4-11

このインタフェログラムに対し FFT を施す。

$$S_{b,d}^X[n] = FFT(I_{DC\_off,b,d}^X[n])$$

Eq. 2.4.4-12

FFT を施した複素スペクトルに対し、Eq. 2.4.4-13 に示すフィルタを適応し、低周波成分を抽出する。なお、 $\nu$  は波数、 $s_{TIR}$  は TIR 低周波補正カットオフ波数、 $N_{TIR}$  は TIR 低周波補正フィルタ次数を表す。なお、スペクトルは軸対称であるため、フィルタについても低周波のみならず、フリップした高周波にも適応する。Eq. 2.4.4-12 に対し、フィルタを掛け合わせることで、低周波領域を抽出する。

$$F_{TIR} = \begin{cases} \left( \frac{1 + \cos \frac{\pi v}{S_{TIR}}}{2} \right)^{N_{TIR}}, & \text{if } v < S_{TIR} \\ 0, & \text{if } v \geq S_{TIR} \end{cases}$$

Eq. 2.4.4-13

抽出した低周波成分を I-FFT し、実数部を抽出することで、低周波インタフェログラム:  $I_{smooth,b,d}^x(n)$  を作成する。なお、 $I_{smooth,b,d}^x(n)$  を作成する際に先に差し引いた DC 成分を加えておく。

$$I_{smooth,b,d}^x(n) = Real\{IFFT(F \cdot S_{b,d}^x)\} + \frac{I_{trim,b,d}^x[N] - I_{trim,b,d}^x[1]}{N - 1} \cdot (n - 1) + I_{trim,b,d}^x[1]$$

Eq. 2.4.4-14

このとき、輝度変動を補正したインタフェログラム  $I_{corr,b,d}^x(n)$  は Eq. 2.4.3-15 で表される。また  $I_{smooth\_mean,b,d}^x(ZPD_{pos,b,d})$  は Eq. 2.4.3-16 で表される。なお、 $LFC_{b,window}$  は、平均化領域を表すパラメータである。 $ZPD_{pos,b,d}$  は ZPD 位置のサンプリング点を表す。

$$I_{corr,b,d}^x(n) = \frac{I_{trim,b,d}^x(n)}{I_{smooth,b,d}^x(n)} I_{smooth\_mean,b,d}^x(ZPD_{pos,b,d})$$

Eq. 2.4.4-15

$$I_{smooth\_mean,b,d}^x(ZPD_{pos,b,d}) = mean[I_{smooth,b,d}^x(ZPD_{pos,b,d} - LFC_{b,window}: ZPD_{pos,b,d} + LFC_{b,window})]$$

Eq. 2.4.4-16

#### STEP\_T4: 複素感度校正

観測データ、黒体データ、深宇宙データを用い(ただし、すべて走査方向は一致させる)、複素感度校正を実施し、地心方向観測データ(日照観測、日陰観測、夜間校正データ)を処理する。なお下記処理は走査方向別を実施されるため、対応する温度については走査方向別に抽出する。また、平均化が必要な場合には、走査方向別のデータを用い平均化する。

V102102 では手法 1, v200200 では手法 2 により計算する。

##### 手法 1

$$L_{b,d}^{obs} = \left[ \frac{S_{b,d}^{obs} - S_{b,d}^{ds}}{\eta S_{b,d}^{ict} - S_{b,d}^{ds}} - \frac{\varepsilon^{obs} L_{b,d}^{m\_obs} - \varepsilon^{ds} L_{b,d}^{m\_ds}}{(1 - \varepsilon^{ds}) \cdot \varepsilon^{ict} \cdot L_{b,d}^{ict} + \varepsilon^{ds} (L_{b,d}^{m\_ict} - L_{b,d}^{m\_ds})} \right] \cdot \frac{(1 - \varepsilon^{ds}) \cdot \varepsilon^{ict} \cdot L_{b,d}^{ict} + \varepsilon^{ds} (L_{b,d}^{m\_ict} - L_{b,d}^{m\_ds})}{(1 - \varepsilon^{obs})}$$

Eq. 2.4.4-17

波数 $\sigma$ は

$$\delta\sigma = \frac{1}{dOPD_b^{ideal} \cdot N}$$

Eq. 2.4.4-18

となる。このとき、

$L_{b,d}^{obs}$  : 観測光の分光放射輝度

$L_{b,d}^{ict}$  : 黒体校正温度から算出した分光放射輝度

$S_{b,d}^{obs}$  : 観測光の出力スペクトル(位相補正無、FFTによる複素数)

$S_{b,d}^{ict}$  : 黒体校正時の出力スペクトル(位相補正無、FFTによる複素数)

$S_{b,d}^{ds}$  : 深宇宙校正時の出力スペクトル(位相補正無、FFTによる複素数)

$L_{b,d}^{m,obs}$  : 地心方向観測中のスキャンミラーからの分光放射輝度(そのときのミラー温度から算出)

$L_{b,d}^{m,ds}$  : 深宇宙観測中のスキャンミラーからの分光放射輝度(そのときのミラー温度から算出)

$L_{b,d}^{m,ict}$  : 黒体観測中のスキャンミラーからの分光放射輝度(そのときのミラー温度から算出)

$\varepsilon^{obs}$  : 地心方向観測時のスキャンミラーの輻射率

$\varepsilon^{ds}$  : 深宇宙観測時のスキャンミラーの輻射率

$\varepsilon^{ict}$  : 校正黒体の輻射率

$\eta$  : 黒体校正スペクトル感度補正係数

$N$  : 有効サンプリング数

また、このとき、 $S_{b,d}^{ds}$ 、 $S_{b,d}^{ict}$ 及び $S_{b,d}^{obs}$ はそれぞれ以下で表される。

$$S_{b,d}^{ds} = FFT[fftshift(I_{b,d}^{ds})] \cdot dOPD_b^{ideal} \quad \text{Eq. 2.4.4-19}$$

$$S_{b,d}^{ict} = FFT[fftshift(I_{b,d}^{ict})] \cdot dOPD_b^{ideal} \quad \text{Eq. 2.4.4-20}$$

$$S_{b,d}^{obs} = FFT[fftshift(I_{b,d}^{obs})] \cdot dOPD_b^{ideal} \quad \text{Eq. 2.4.4-21}$$

なお、 $L_{b,d}^{ict}$  及び  $L_{b,d}^{ds}$  はプランク関数を用い Eq. 2.4.4-22 及び Eq. 2.4.4-23 で表される。輝度の単位は  $W/cm^2/str/cm^{-1}$  となる。さらに  $L_{b,d}^{m,obs}$ 、 $L_{b,d}^{m,ds}$ 、 $L_{b,d}^{m,ict}$  はそれぞれ Eq. 2.4.4-24、Eq. 2.4.4-25、Eq. 2.4.4-26 となる。

$$L_{b,d}^{ict}(\sigma, T_{ict\_ave}) = \frac{\frac{2}{100} \cdot c \cdot h \cdot (100 \cdot c \cdot \sigma)^3}{c^2 \cdot \left\{ \exp\left(100 \cdot c \cdot \sigma \cdot \frac{h}{k \cdot T_{ict\_ave}}\right) - 1 \right\}} \quad \text{Eq. 2.4.4-22}$$

$$L_{b,d}^{ds}(\sigma, T_{ds}) = \frac{\frac{2}{100} \cdot c \cdot h \cdot (100 \cdot c \cdot \sigma)^3}{c^2 \cdot \left\{ \exp\left(100 \cdot c \cdot \sigma \cdot \frac{h}{k \cdot T_{ds}}\right) - 1 \right\}} \quad \text{Eq. 2.4.4-23}$$

$$L_{b,d}^{m,obs}(\sigma, T_{m,obs}) = \frac{\frac{2}{100} \cdot c \cdot h \cdot (100 \cdot c \cdot \sigma)^3}{c^2 \cdot \left\{ \exp\left(100 \cdot c \cdot \sigma \cdot \frac{h}{k \cdot T_{m,obs}}\right) - 1 \right\}} \quad \text{Eq. 2.4.4-24}$$

$$L_{b,d}^{m.ds}(\sigma, T_{m.ds}) = \frac{\frac{2}{100} \cdot c \cdot h \cdot (100 \cdot c \cdot \sigma)^3}{c^2 \cdot \left\{ \exp\left(100 \cdot c \cdot \sigma \cdot \frac{h}{k \cdot T_{m.ds}}\right) - 1 \right\}}$$

Eq. 2.4.4-25

$$L_{b,d}^{m.ict}(\sigma, T_{m.ict}) = \frac{\frac{2}{100} \cdot c \cdot h \cdot (100 \cdot c \cdot \sigma)^3}{c^2 \cdot \left\{ \exp\left(100 \cdot c \cdot \sigma \cdot \frac{h}{k \cdot T_{m.ict}}\right) - 1 \right\}}$$

Eq. 2.4.4-26

$\sigma$  : 観測波数( $cm^{-1}$ )

$T_{ict\_ave}$  : テレメトリに格納される黒体温度 3 点の平均値(K)

$T_{ds}$  : 深宇宙窓から見ている物体の温度(K)

$T_{m.ds}$  : スキャンミラーが深宇宙窓を見ている際のミラー温度(K)

$T_{m.ict}$  : スキャンミラーが黒体を見ている際のミラー温度(K)

$T_{m.obs}$  : スキャンミラーが地心方向を見ている際のミラー温度(K)

$c$  : 光速( $2.99792458 \times 10^8$  [m/s])

$h$  : プランク定数( $6.62606876 \times 10^{-34}$  [J·s])

$k$  : ボルツマン定数( $1.3806503 \times 10^{-23}$  [J/K])

## 手法 2

$$L_{b,d}^{obs} = \left[ \frac{S_{b,d}^{obs} - S_{b,d}^{ds}}{S_{b,d}^{ict} - S_{b,d}^{ds}} \right] \cdot \left[ \frac{(p_2^2(\sigma) + q_2^2(\sigma))(p_1^2(\sigma) + q_1^2(\sigma)) - (p_2^2(\sigma) - q_2^2(\sigma))(p_1^2(\sigma) - q_1^2(\sigma))}{(p_2^2(\sigma) + q_2^2(\sigma))(p_1^2(\sigma) + q_1^2(\sigma)) + (p_2^2(\sigma) - q_2^2(\sigma))(p_1^2(\sigma) - q_1^2(\sigma))} \right] B_{b,d}^{ict} \\ + \left[ \frac{2(p_2^2(\sigma) - q_2^2(\sigma))(p_1^2(\sigma) - q_1^2(\sigma))}{(p_2^2(\sigma) + q_2^2(\sigma))(p_1^2(\sigma) + q_1^2(\sigma)) + (p_2^2(\sigma) - q_2^2(\sigma))(p_1^2(\sigma) - q_1^2(\sigma))} \right] L_{b,d}^{m.obs}$$

Eq. 2.4.4-27

$$B_b^{ict}[n] = C_b^{ict}[n] + C_b^{ict\_baffle}[n] + C_b^{SAA\_str}[n] + C_b^{OMA}[n] + C_b^{BS}[n]$$

Eq. 2.4.4-28

$$C_b^{ict}[n] = \varepsilon_b^{ict} \cdot L_b(\sigma_b[n], T^{ict})$$

Eq. 2.4.4-29

$$C_b^{ict\_baffle}[n] = (1 - \varepsilon_b^{ict}) \cdot \varepsilon_b^{ict\_baffle} \cdot A^{ict\_baffle} \cdot L_b(\sigma_b[n], T^{SSA+Y})$$

Eq. 2.4.4-30

$$C_b^{SAA\_str}[n] = (1 - \varepsilon_b^{ict}) \cdot \varepsilon_b^{SAA\_str} \cdot A^{SAA\_str} \cdot L_b(\sigma_b[n], T^{SSA-Y})$$

Eq. 2.4.4-31

$$C_b^{OMA}[n] = (1 - \varepsilon_b^{ict}) \cdot (1 - \varepsilon_b^{scanner\_mirror}) \cdot \varepsilon_b^{OMA} \cdot (A^{OMA}) \cdot L_b(\sigma_b[n], T^{IOA+Z})$$

Eq. 2.4.4-32

$$C_b^{BS}[n] = (1 - \varepsilon_b^{ict}) \cdot (1 - \varepsilon_b^{scanner\_mirror}) \cdot A^{BS} \cdot L_b(\sigma_b[n], T^{BS})$$

Eq. 2.4.4-33

$$A^{ict\_baffle} + A^{SAA\_str} + A^{OMA} + A^{BS} = 1$$

Eq. 2.4.4-34

$p_1^2, q_1^2$ : 地心観測時のスキヤナの反射率  $p_1^2 = R_p(AT_{ang}, CT_{ang})$ 、 $q_1^2 = R_s(AT_{ang}, CT_{ang})$

$R_s, R_p$ は、Eq. 2.4.4-47、Eq. 2.4.4-48 を参照。

$p_2^2, q_2^2$ : FTS-2 内部光学系の偏光別透過率  $p_2^2 = T_p$ 、 $q_2^2 = T_s$

$T_s, T_p$ は、Eq. 2.4.4-51、Eq. 2.4.4-52 を参照。

$\varepsilon^{ict}$ : 黒体輻射率(後述)。

$L_b(\sigma_b[n], T^{ict})$ : 黒体校正時の黒体温度 $T^{ict}$ 、波数 $\sigma_b[n]$ の時の輝度( $L_b$ は、プランク関数 Eq. 2.4.4-22)

$\varepsilon_b^{ict\_baffle}$ : ハツフルの輻射率(未知数) 暫定 1 とする。

$A^{ict\_baffle}$ : ハツフル視野率(未知数) 暫定 0.3 とする。

$L_b(\sigma_b[n], T^{SSA+Y})$ : 黒体校正時の SSA+Y 温度 $T^{SSA+Y}$ 、波数 $\sigma_b[n]$ の時の輝度( $L_b$ は同上)

$\varepsilon_b^{SAA\_str}$ : SAA の内壁の輻射率(未知数) 暫定 1 とする。

$A^{SAA\_str}$ : SAA の内壁をみる視野率(未知数) 暫定 0 とする。

$L_b(\sigma_b[n], T^{SSA-Y})$ : 黒体校正時の SSA-Y 温度 $T^{SSA-Y}$ 、波数 $\sigma_b[n]$ の時の輝度( $L_b$ は同上)

$\varepsilon_b^{OMA}$ : OMA の輻射率(未知数) 暫定 1 とする。

$A^{OMA}$ : OMA をみる視野率(未知数) 暫定 0 とする。

$L_b(\sigma_b[n], T^{IOA+Z})$ : 黒体校正時の IOA+Z 温度 $T^{IOA+Z}$ 、波数 $\sigma_b[n]$ の時の輝度( $L_b$ は同上)

$A^{BS}$ : BS をみる視野率(未知数) 暫定 0.7 とする

$L_b(\sigma_b[n], T^{BS})$ : 黒体校正時のビームスプリッタ温度 $T^{BS}$ 、波数 $\sigma_b[n]$ の時の輝度( $L_b$ は同上)

$\varepsilon_b^{scanner\_mirror}$ : 黒体校正時のスキヤナミラーの輻射率(後述)。

$L_b^{m\_obs}(\sigma_b[n], T^{m\_obs})$ : 地心観測時のスキヤミラー温度 $T^{m\_obs}$ 、波数 $\sigma_b[n]$ の時の輝度( $L_b$ は同上)

$B_b^{ict}[n]$  は黒体校正を実施中に、他コンポーネントからの影響が入りバイアスを持つ。そのため、本計算における他コンポーネントの温度は、黒体校正時の他コンポーネントの温度として計算する。

波数 $\sigma$ は

$$\delta\sigma = \frac{1}{dOPD_b^{ideal} \cdot N}$$

Eq. 2.4.4-35

$N$ : 有効サンプリング数

となる。

また $L_{b,d}^{obs}$ に対応する輝度温度 $T_{b,d}^{obs}$ は

$$T_{b,d}^{obs} = \frac{C2 \cdot \sigma}{\log\left(\frac{C1 \cdot \sigma^3}{\pi \cdot \text{real}(L_{b,d}^{obs})}\right) + 1}$$

Eq. 2.4.4-36

このとき

$$C1 = 3.7418e^{-12} [cm^2W]$$

$$C2 = 1.4388 [cm K]$$

で表される。

$p_1^2 = q_1^2$ 、 $p_2^2 = q_2^2$ のとき、Eq. 2.4.4-17 の式は簡略化され

$$L_{b,d}^{obs} = \left[ \frac{S_{b,d}^{obs} - S_{b,d}^{ds}}{S_{b,d}^{ict} - S_{b,d}^{ds}} \right] \cdot B_b^{ict}$$

Eq. 2.4.4-37

となる。

また、このとき、 $S_{b,d}^{ds}$ 、 $S_{b,d}^{ict}$ 及び $S_{b,d}^{obs}$ はそれぞれ以下で表される。

$$S_{b,d}^{ds} = FFT[fftshift(I_{b,d}^{ds})] \cdot dOPD_b^{ideal}$$

Eq. 2.4.4-38

$$S_{b,d}^{ict} = FFT[fftshift(I_{b,d}^{ict})] \cdot dOPD_b^{ideal}$$

Eq. 2.4.4-39

$$S_{b,d}^{obs} = FFT[fftshift(I_{b,d}^{obs})] \cdot dOPD_b^{ideal}$$

Eq. 2.4.4-40

なお、 $L_b(\sigma_b[n], T)$ はプランク関数を用い Eq. 2.4.4-22 で表される。輝度の単位は $W/cm^2/str/cm^{-1}$ となる。

$$L_{b,d}(\sigma, T) = \frac{\frac{2}{100} \cdot c \cdot h \cdot (100 \cdot c \cdot \sigma)^3}{c^2 \cdot \left\{ \exp\left(100 \cdot c \cdot \sigma \cdot \frac{h}{k \cdot T}\right) - 1 \right\}}$$

Eq. 2.4.4-41

$\sigma$  : 観測波数( $cm^{-1}$ )

$T$  : 温度(K)

$c$  : 光速( $2.99792458 \times 10^8$  [m/s])  
 $h$  : プランク定数( $6.62606876 \times 10^{-34}$  [J·s])  
 $k$  : ボルツマン定数( $1.3806503 \times 10^{-23}$  [J/K])

適応する温度としては、1 観測中の平均値つまり 4.024sec 観測間に取得されるデータを使用する。黒体温度については、402 点を平均して、1 温度とし、3 点計測をおこなっているため、3 点分を平均し、黒体温度として 1 つを採用する。スキャナミラー温度については 4 点を平均し、1 温度を採用する。手法 2 では、Eq. 2.4.4-27 計算時に、以下のオフセットで補正する。

$$T^{m\_obs} = T^{m\_obs} + \Delta T^{m\_obs}$$

Eq. 2.4.4-42

$\Delta T^{m\_obs}$  は、B4=0、B5=-140(暫定)とする。

$\epsilon^{ict}$  は打ち上げ前に測定した波数毎の黒体輻射率を用いる。黒体輻射率を図 2.4.4-3 に示す。打ち上げ前測定データは  $1\text{cm}^{-1}$  のデータとなるため、観測波数とは異なる。観測波数に準じた黒体輻射率を求めるためには、線形内挿するものとする。また、データ範囲外は 1 とする。

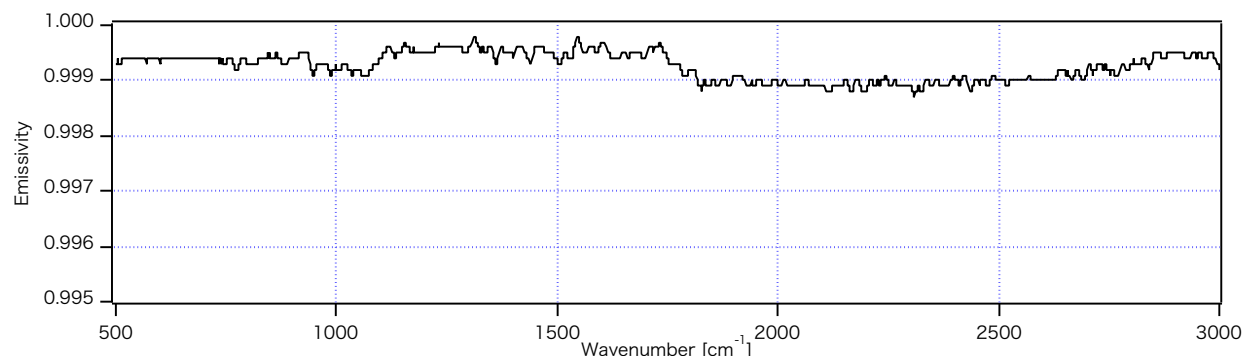


図 2.4.4-3 校正黒体輻射率

$\epsilon^{obs}$ 、 $\epsilon^{ds}$  および  $\epsilon^{scanner\_mirror}$  については、スキャンミラーの反射率から輻射率を導出する。波数毎のスキャンミラーの角度に応じた反射率の計算方法を以下に示す。スキャンミラーの反射率は、測定された波長毎の複素屈折率  $m$  を基に算出する。波長ステップ 5nm のデータとなっており、FTS-2 で観測される波数ステップとは異なる。そのため、FTS-2 の波数に対応するデータが無い場合、スプライン内挿を施し、波数に対する複素屈折率を算出し、Eq. 2.4.4-43 から Eq. 2.4.4-49 は使用し P,S 別スキャナ角度別反射率を求める。この際、テレメトリで送信される AT 及び CT のモータ駆動角度を  $AT_{ang}$  および  $CT_{ang}$  とすると、反射率  $R_p$  及び  $R_s$  は Eq. 2.4.4-47 及び Eq. 2.4.4-48 で表される。

$$\cos\theta_i = \frac{\cos(CT_{ang}) \cdot \sin(AT_{ang}) + \cos(AT_{ang})}{\sqrt{2}}$$

Eq. 2.4.4-43

$$\sin^2\theta_i = 1 - \cos^2\theta_i$$



Eq. 2.4.4-44

$$r_p(m, \theta_i) = \frac{m^2 \cos \theta_i - \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta_i}}{m^2 \cos \theta_i + \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

Eq. 2.4.4-45

$$r_s(m, \theta_i) = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

Eq. 2.4.4-46

$$R_p(AT_{ang}, CT_{ang}) = r_p(m, \theta_i) \cdot r_p^*(m, \theta_i) = \frac{|m^2 \cos \theta_i - \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta_i}|^2}{|m^2 \cos \theta_i + \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta_i}|^2}$$

Eq. 2.4.4-47

$$R_s(AT_{ang}, CT_{ang}) = r_s(m, \theta_i) \cdot r_s^*(m, \theta_i) = \frac{|\cos \theta_i - \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta_i}|^2}{|\cos \theta_i + \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta_i}|^2}$$

Eq. 2.4.4-48

$$\delta(AT_{ang}, CT_{ang}) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}[r_p(m, \theta_i)r_s^*(m, \theta_i)]}{\text{Re}[r_p(m, \theta_i)r_s^*(m, \theta_i)]} \right)$$

Eq. 2.4.4-49

ただし、

$m$ : スキャナのミラーコートの実素屈折率 (波長毎)

$\theta_i$ : 中間変数

$r_s, r_p$ : 中間変数 (複素数)

$R_s, R_p$ : s, p 偏光反射率

$AT_{ang} = 0, CT_{ang} = 0$  の場合の、 $R_s, R_p$  の値を図 2.4.4-4 に示す。

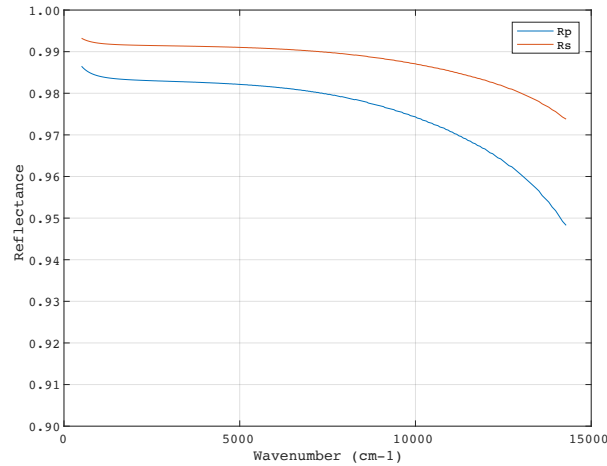


図 2.4.4-4 スキャナミラーの偏光別反射率(直下観測時)

なお、テレメトリには機械角に変換された値が格納されるため、工学値変換を実施する必要はない。偏光別反射率を元に輻射率を Eq. 2.4.4-50 で求める。

$$\varepsilon^{xx}(AT_{ang}, CT_{ang}) = 1 - \frac{1}{2} [R_p(AT_{ang}, CT_{ang}) + R_s(AT_{ang}, CT_{ang})]$$

Eq. 2.4.4-50

このとき、 $xx$ :地心方向(obs)もしくは深宇宙方向(ds) を指す。

FTS-2 内部透過率  $T_s, T_p$  は、校正パラメータの  $T_{total}$ 、 $TpsR (= T_p/T_s)$  をそれぞれスペクトルの波数で線形補間し、以下の式で算出する。

$$T_s = T_{total} / (1 + TpsR)$$

Eq. 2.4.4-51

$$T_p = TpsR \cdot T_s$$

Eq. 2.4.4-52

#### ・適応型 ZPD 補正

Eq. 2.4.4-17 のスペクトル  $S_{b,d}^{obs}$ 、 $S_{b,d}^{ict}$ 、 $S_{b,d}^{ds}$  は、STEP\_T3 の FCE 補正により左右対称に補正したインタフェログラムから導出されるが、補正量は整数に丸められるため完全な左右対称ではなく、それぞれの位相は、微小な勾配をもつ場合がある。Eq. 2.4.4-17 では、分子と分母の位相を一致させる必要があるため、以下の方法でこれらの位相を整合させる。

- (1) 深宇宙校正スペクトル  $S_{b,d}^{ds}$  と黒体校正スペクトル  $S_{b,d}^{ict}$  の調整計算を簡略化し、 $S_{b,d}^{obs} = 0$  と置いたスペクトル  $L_1$  を求める。

$$L_1 = \left[ \frac{-S_{b,d}^{ds}}{S_{b,d}^{ict} - S_{b,d}^{ds}} \right]$$

Eq. 2.4.4-53

$L_1$  の帯域内虚部 2 乗の平均値および、帯域内実部 2 乗の最大値を求め、これらの比  $r_1$  を求める。

$$r_1 = \sqrt{\frac{\text{mean}(\text{Im}^2(L_1))}{\max(\text{Re}^2(L_1))}}$$

Eq. 2.4.4-54

$r_1 < r_{adj\_ZPD\_th}$  であるとき、 $L_1$  の位相一致度は良好であり補正は行わないと判定する。ここで、 $r_{adj\_ZPD\_th}$  は、校正パラメータである。 $r_{adj\_ZPD\_th} \leq r_1$  であるとき、 $S_{b,d}^{ds}$  の ZPD を中心から  $n$  フリンジ動かして  $L_1$  を再計算し、最も小さい  $r_1$  の値を算出した  $S_{b,d}^{ds}$  を調整後のスペクトルとする。ZPD を  $n$  フリンジだけずらしたスペクトルは、以下で算出する。

$$S_{b,d}^{ds}(k) = S_{b,d}^{ds}(k) \cdot e^{-j\frac{2\pi k}{N}n}$$

Eq. 2.4.4-55

ここで  $N, k$  は、それぞれ、 $S_{b,d}^{ds}$  のサンプル数とサンプルのインデックスを示す。  
 $n$  は、 $n = [-2, -1, 0, 1, 2]$  とする。

## (2) 観測光スペクトル $S_{b,d}^{obs}$ の調整

計算を簡略化したスペクトル  $L_2$  および評価値  $r_2$  を求める。

$$L_2 = \left[ \frac{S_{b,d}^{obs} - S_{b,d}^{ds}}{S_{b,d}^{ict} - S_{b,d}^{ds}} \right]$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{\text{mean}(\text{Im}^2(L_2))}{\max(\text{Re}^2(L_2))}}$$

Eq. 2.4.4-56

$r_2 < r_{adj\_ZPD\_th}$  であるとき、 $L_2$  の位相一致度は良好であり補正は行わないと判定する。

$r_{adj\_ZPD\_th} \leq r_2$  であるとき、 $S_{b,d}^{obs}$  の ZPD を中心から  $n$  フリンジで動かして  $L_2$  を再計算し、最も小さい  $r_2$  の値を算出した  $S_{b,d}^{obs}$  を調整後のスペクトルとする。 $n$  は、 $n = [-2, -1, 0, 1, 2]$  とする。

## STEP\_T5: アポダイゼーション

地心方向観測スペクトル(日照観測、日陰観測、夜間校正データ)に対し有限視野補正を適応する。また、同時に窓関数を適応し、スペクトルをなめらかにする。窓関数としては、ガウス関数(半値幅はパラメータで指定)、Norton-Beer (weak, medium, strong)、BOX-Car(指定された範囲内で 1、それ以外では 0)を準備する。Norton-beer 関数を Eq. 2.4.4-57、係数を表 2.4.4-2 に示す。

$$NB\left(\frac{\delta}{L}\right) = \sum_{i=0}^n C_i \left(1 - \left(\frac{\delta}{L}\right)^2\right)^i,$$

$$\text{where, } \sum_{i=0}^n C_i = 1, n = 4$$

Eq. 2.4.4-57

このとき、光路差  $\delta$ は

$$-laser_{WL} \times \frac{38250}{2} \leq \delta \leq laser_{WL} \times \frac{38250}{2}$$

ステップ $laser_{WL}$ となる。また最大光路差長  $L = laser_{WL} \times 38250$  となる。

表 2.4.4-2 Norton-Beer 関数

関数	C0	C1	C2	C3	C4
Weak	0.384093	-0.087577	0.703484	0	0
Medium	0.152442	-0.136176	0.983734	0	0
Strong	0.045335	0	0.554883	0	0.399782

ガウス関数を Eq. 2.4.4-58 に示す。このとき、 $\sigma$ は半値幅、 $N$ はサンプル数となる。

$$x = \frac{n - \frac{N}{2}}{N}$$

$$Gauss = e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}}$$

Eq. 2.4.4-58

Box-Car 関数を Eq. 2.4.4-59 に示す。このとき $x$ は光路差、 $L$ は最大光路差長を表す。

$$\prod(x) = 1, \quad |x| \leq L$$

$$\prod(x) = 0, \quad |x| > L$$

Eq. 2.4.4-59

アポダイゼーション関数を $F_{apo}$ とすると、この関数には、上記のどれかが当てはまる。ベースラインとして、Boxcar 関数を採用する物とする。この場合、アポダイゼーション関数を $F_{apo} = NB, Gauss, Boxcar$ とすると、アポダイゼーションが適応されたスペクトル $S_{b,d,obs}^{apo}$ は次式で表される。

$$S_{b,d,obs}^{apo} = FFT^{-1} \left\{ F_{apo} \left[ FFT \left( fftshift(L_{b,d}^{obs}) \right) \right] \right\}$$

Eq. 2.4.4-60

ここでの観測スペクトル $L_{b,d}^{obs}$ はサンプリング点数分:38250 点分のスペクトルとなる。そのため、観測帯域以外では多くのノイズ成分が含まれる。アポダイゼーションした際に併せて不要なノイズを低減するために、ノ

イズ成分を落とすためのフィルタを適応する。

Eq. 2.4.4-61 で示されるフィルタを用いる。

$$F_{FFOV} = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq n < \nu_{L1} - F_{width} \\ \left( \frac{1 + \cos \frac{\pi(n - (\nu_{L1} - F_{width}))}{F_{width}}}{2} \right)^{N_{FFOV}}, & \text{if } \nu_{L1} - F_{width} \leq n < \nu_{L1} \\ 1, & \text{if } \nu_{L1} \leq n < \nu_{H1} \\ \left( \frac{1 - \cos \frac{\pi(n - \nu_{H1})}{F_{width}}}{2} \right)^{N_{FFOV}}, & \text{if } \nu_{H1} \leq n < \nu_{H1} + F_{width} \\ 0, & \text{if } \nu_{H1} + F_{width} \leq n < \nu_{L2} - F_{width} \\ \left( \frac{1 + \cos \frac{\pi(n - (\nu_{L2} - F_{width}))}{F_{width}}}{2} \right)^{N_{FFOV}}, & \text{if } \nu_{L2} - F_{width} \leq n < \nu_{L2} \\ 1, & \text{if } \nu_{L2} \leq n < \nu_{H2} \\ \left( \frac{1 - \cos \frac{\pi(n - \nu_{H2})}{F_{width}}}{2} \right)^{N_{FFOV}}, & \text{if } \nu_{H2} \leq n < \nu_{H2} + F_{width} \\ 0, & \text{if } \nu_{H2} + F_{width} \leq n < end \end{cases}$$

Eq. 2.4.4-61

なお、 $\nu$ は波数、 $F_{width}$ は有限視野補正用ロールオフ波数幅、 $N_{FFOV}$ は有限視野補正用ロールオフフィルタ次数を表す。インタフェログラムを生成する場合、この処理を実施した後、FFT を実施し、インタフェログラムを生成する。

Eq. 2.4.4-60 においては、 $[FFT (fftshift(L_{b,d}^{obs}))]$ の処理が、上記処理に該当する。

#### STEP\_T6: 有限視野補正

有限視野の効果により、セルフアポダイゼーションがかかり、装置関数は理論的な SINC 関数から広がりを持つ。ユーザによっては簡易的に装置関数を SINC 関数で表現したい。有限視野の影響(セルフアポダイゼーション効果)を受けたインタフェログラムは次式で表させる。

$$I_v^m(x) = \frac{1}{2\pi} \int d\nu e^{i2\pi x \nu} \frac{\sin \left[ 2\pi x \nu \left( \frac{b^2}{4} \right) \right]}{2\pi x \nu \left( \frac{b^2}{4} \right)} S_{b,d,obs}^{apo}(\nu, d)$$

Eq. 2.4.4-62

$\nu$  : 波数

$x$  : 光路差長

$d$  : 走査方向

$b$  : 瞬時視野の半角  $b = \frac{15.8}{2} \times 10^{-3} [rad]$

$I_V^m(x)$  : 有限視野補正後インタフェログラム

$S_{b,d,obs}^{apo}(v, d)$  : アポダイゼーション処理を施した観測輝度スペクトル

Eq. 2.4.4-62 をテーラー展開し、フーリエ変換を行うことにより、有限の大きさを持つ効果の補正スペクトルは Eq. 2.4.4-63、また補正項は Eq. 2.4.4-64 で表現できる。

$$I_V^m = FFT\{S(v)\} - \frac{\left[2\pi\left(\frac{b^2}{4}\right)\right]^2}{3!} x^2 FFT\{v^2 S(v)\} + \frac{\left[2\pi\left(\frac{b^2}{4}\right)\right]^4}{5!} x^4 FFT\{v^4 S(v)\} + O\left[\left(\frac{b^2}{4}\right)^6\right]$$

Eq. 2.4.4-63

$$\Delta C_V^m \cong \frac{\left[2\pi\left(\frac{b^2}{4}\right)\right]^2}{3!} FFT^{-1}[x^2 FFT(v^2 C_V^m)] - \frac{\left[2\pi\left(\frac{b^2}{4}\right)\right]^4}{5!} FFT^{-1}[x^4 FFT(v^4 C_V^m)]$$

Eq. 2.4.4-64

このとき  $\Delta C_V^m$  は有限視野補正後観測スペクトルの補正項を表す。Eq. 2.4.4-64 では、波数  $v = [0 \sim 7655; -7655 \sim 0] cm^{-1}$  に対応した光路差長を  $x = [0 \sim 2.5; -2.5 \sim 0] cm$  とする。

また、 $C_V^m$  : 観測スペクトルとする。このとき、有限視野補正を施したスペクトルは Eq. 2.4.4-65 で表される。

$$S_{b,d,obs}^{FFOV}(v, d) = S_{b,d,obs}^{apo}(v, d) + \Delta C_V^m$$

Eq. 2.4.4-65

その他 1: 輝度劣化補正係数:

打ち上げ後、軌道上での波数依存及び時間依存の感度劣化を補正するため、波数方向には 3 次関数、時間方向には exp 関数を用い、補正を行う。波数方向の感度すなわち  $a_1 = 1, a_{2 \sim 4} = 0$  とする。また、時間軸方向の感度  $d$  は次式とする。  $t$  は 2019/02/05 00:00:00 を基点とする。すなわち、同時刻を  $t=0$  とする。

波数軸

$$Y(v) = a_1 + a_2 v + a_3 v^2 + a_4 v^3$$

Eq. 2.4.4-66

時間軸

$$Y(t) = d + e \cdot \exp\left[-\frac{t}{f}\right]$$

Eq. 2.4.4-67

### 2.4.5 品質確認

スペクトルデータの品質確認を目的に、しきい値が設定されているものについては、しきい値との比較を行い、しきい値を逸脱する場合、プロダクトに品質フラグを付加する。摂氏度とケルビン温度には  $t[^\circ C] = T[K] - 273.15$  とし変換する。テレメトリの比較でなく、計算処理により品質項目を決めるものについては以下に従う物とする。

① 観測時刻

観測時刻は観測開始時の時刻(サンプリングウィンドウ立ち上がり時刻)にサンプリングウィンドウの半数つまり、2.012 秒を足した値とする。

② インタフェログラム品質判定

バンド毎に、飽和、走査速度安定度、DC レベル低周波変動から判定する。この内いずれかの項目でしきい値を超えた場合、Poor の判定とする。飽和判定は STEP\_T01 に従う。走査速度安定度評価は STEP\_T04 に従う。

DC レベル低周波変動は STEP\_S2 及び STEP\_T2 で求める  $S_{b,d}^x$  に対し、0-300 $cm^{-1}$  領域の絶対信号強度を積分し、5-300 $cm^{-1}$  の積分値との比、 $\frac{S_{b,d,5-300cm^{-1}}^x}{S_{b,d,0-300cm^{-1}}^x}$  が、 $DC_{fluct\_Low}\%$  を超える場合にフラグを付与する。

上記 3 つの判定条件において、フラグが立たない場合、Good と判定する。

③ スペクトルの品質判定

バンド毎に、帯域外の実数の平均値、虚数の絶対値の平均値を計算し、それぞれの値がしきい値を越えた場合、Poor と判定する。バンド毎の帯域外及び帯域内虚数平均領域を表 2.4.5-1 に示す。

表 2.4.5-1 スペクトル品質判定に使用する波数範囲

バンド	帯域外平均範囲 [ $cm^{-1}$ ]	しきい値	虚数平均範囲 [ $cm^{-1}$ ]	しきい値	最大値検出範囲 [ $cm^{-1}$ ]
B1	12450-12550 (Low) 13650-13750 (High)	$10^{-4}$	12950-13250	$10^{-2}$	12950-13250
B2	4800-4900 (Low) 7000-7100 (High)	$10^{-5}$	5900-6400	$10^{-2}$	5900-6400
B3	3800-3900 (Low) 5700-5800 (High)	$10^{-5}$	4200-5200	$10^{-2}$	4200-5200
B4	988-1038 (Low) 1950-2000 (High)	$10^{-4}$	1188-1800	$10^{-2}$	1188-1800
B5	500-600 (Low) 1288-1388 (High)	$10^{-6}$	700-1188	$10^{-2}$	700-1188

また、観測データの SNR を簡易的に知るために以下の定義に基づき簡易 SNR を算出する。

$$\text{簡易SNR} = \frac{\text{帯域内最大値}}{\text{average}(\text{Low側帯域外標準偏差} + \text{High側帯域外標準偏差})}$$

Eq. 2.4.5-1

④ IMC 安定度

AT、CT 角度情報は 100Hz でサンプルされるため、1 観測期間(4.024sec)中、402 点の角度情報を持つことになる。IMC が定常通りに実施される場合、CT 角度情報はほぼ一定、AT 角度情報はなめらかにおよそ

2deg 変化することになる。この動きはコマンドにより要求された値に従うかどうかとなる。そのため、上記 402 点のそれぞれに対し、コマンド値(計画値)に対して実測値の差分がしきい値:  $IMC_{stable}$  以上の場合、IMC 安定度が悪いと判定する。

### ⑥ 観測点情報

各観測点には、特定点観測、サンプリング観測等の要求に基づく観測が含まれる。FTS-2 の観測テーブルのみではこれらの観測要求は識別できない。そのため、観測パス、観測 ID を元に、観測要求と観測結果を結びつけ、各観測点の情報を付加する。この際、インテリジェントポインティングを Off で且つ、Eq. 2.4.5-2 に示される、計画点と実測点の緯度・経度・高度情報(WGS84 系での X,Y,Z)の差分の 2 乗和を計画値からのずれ量の指標として格納する。

$$Diff_{xyz} = \sqrt{(X_{obs} - X_{plan})^2 + (Y_{obs} - Y_{plan})^2 + (Z_{obs} - Z_{plan})^2}$$

Eq. 2.4.5-2

### 2.4.6 観測データの時刻付け

#### 衛星時刻

衛星時刻は、1 秒に 1 回、衛星システムより配信される。衛星時刻は、GPS 時刻と同期した時刻であり、整数秒である。衛星時刻の定義を Eq. 2.4.6-1 に示す。

$$\text{衛星時刻(s)} = \text{GPS 時刻(s)} - 1,041,033,615(\text{s})$$

Eq. 2.4.6-1

このとき、1,041,033,615 sec は 2013 年 1 月 1 日 UT00:00:00 に対応する。

### 2.4.7 視線角度の計算

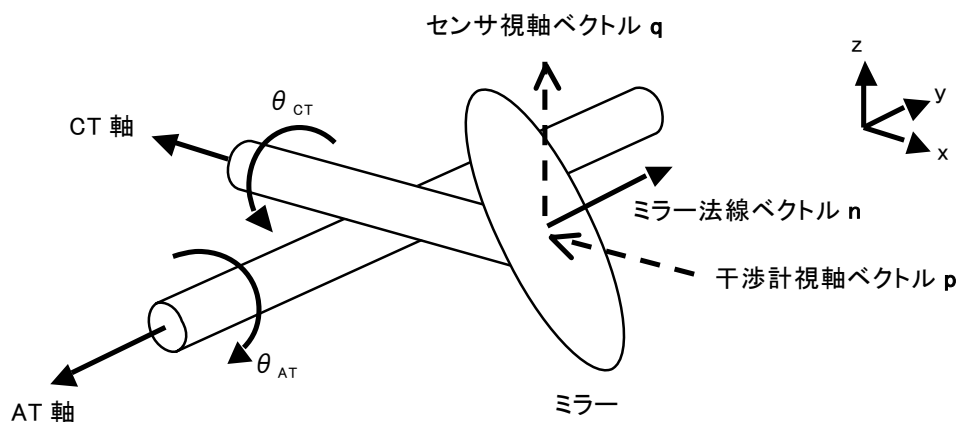


図 2.4.7-1 ジンバル駆動角の定義



スキャナのミラーの法線ベクトル $n$ は

$$n = \begin{pmatrix} \cos\theta_{AT} & 0 & \sin\theta_{AT} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{AT} & 0 & \cos\theta_{AT} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{CT} & -\sin\theta_{CT} \\ 0 & \sin\theta_{CT} & \cos\theta_{CT} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \\ 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos\theta_{AT} + \sin\theta_{AT}\cos\theta_{CT} \\ -\sin\theta_{CT} \\ -\sin\theta_{AT} + \cos\theta_{AT}\cos\theta_{CT} \end{pmatrix}$$

Eq. 2.4.7-1

となる。この場合、視線ベクトル $q$ は

$$q = p - 2(p \cdot n)n = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + (\cos\theta_{AT} + \sin\theta_{AT}\cos\theta_{CT}) \begin{pmatrix} \cos\theta_{AT} + \sin\theta_{AT}\cos\theta_{CT} \\ -\sin\theta_{CT} \\ -\sin\theta_{AT} + \cos\theta_{AT}\cos\theta_{CT} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -1 + (\cos\theta_{AT} + \sin\theta_{AT}\cos\theta_{CT})^2 \\ -\sin\theta_{CT}(\cos\theta_{AT} + \sin\theta_{AT}\cos\theta_{CT}) \\ (\cos\theta_{AT} + \sin\theta_{AT}\cos\theta_{CT})(-\sin\theta_{AT} + \cos\theta_{AT}\cos\theta_{CT}) \end{pmatrix}$$

Eq. 2.4.7-2

となる。視線ベクトルの AT 方向及び CT 方向の角度をそれぞれ、 $\phi_{AT}$ 、 $\phi_{CT}$ とする(つまり、 $x$ - $z$  面の角度と、 $y$ - $z$  面の角度)と、それぞれ以下となる。

$$\phi_{AT} = \text{atan} \left( \frac{-1 + (\cos\theta_{AT} + \sin\theta_{AT}\cos\theta_{CT})^2}{(\cos\theta_{AT} + \sin\theta_{AT}\cos\theta_{CT})(-\sin\theta_{AT} + \cos\theta_{AT}\cos\theta_{CT})} \right)$$

Eq. 2.4.7-3

$$\phi_{CT} = \text{atan} \left( \frac{-\sin\theta_{CT}}{(-\sin\theta_{AT} + \cos\theta_{AT}\cos\theta_{CT})} \right)$$

Eq. 2.4.7-4

## 2.5 TANSO-FTS-2 略語集

略語	英文名	名称
FCE	Fringe Count Error	フリンジカウントエラー
FFT	Fast Fourier Transformation	高速フーリエ変換
FTS	Fourier Transform Spectrometer	フーリエ変換分光計
IGM	Interferogram	インタフェログラム
IMC	Image Motion Compensation	イメージモーションコンペンセーション
MOPD	Maximum optical path defference	最大光路差
SPC	Spectra	スペクトル
ZPD	Zero path difference	光路差ゼロ

## 2.6 TANSO-FTS-2 参考文献

Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., and Hamazaki, T.: Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring, *Appl. Opt.*, 48, 6716–6733, 2009.

Keppel-Aleks, G., Toon, G. C., Wennberg, P. O., and Deutscher, N. M.: Reducing the impact of source brightness fluctuations on spectra obtained by Fourier-transform spectrometry, *Appl. Opt.*, 46, 4774–4779, 2007.

Kuze, A., Suto, H., Shiomi, K., Urabe, T., Nakajima, M., Yoshida, J., Kawashima, T., Yamamoto, Y., Kataoka, F., and Buijs, H.: Level 1 algorithms for TANSO on GOSAT: processing and on-orbit calibrations, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2447–2467, doi:10.5194/amt-5-2447-2012, 2012.

Suto, H., Yoshida, J., Desbiens, R., Kawashima, T., Kuze, A.: Characterization and correction of spectral distortions induced by microvibrations onboard the GOSAT Fourier transform spectrometer, *Appl. Opt.*, 52, 4969–4980, 2013

R. O. Knuteson, H. E. Revercomb, F. A. Best, N. C. Ciganovich, R. G. Dedecker, T. P. Dirx, S. C. Ellington, W. F. Feltz, R. K. Garcia, H. B. Howell, W. L. Smith, J. F. Short, and D. C. Tobin, “Atmospheric emitted radiance interferometer. Part I: Instrument design,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 21, no. 12, pp. 1763–1776, Dec. 2004.

R. O. Knuteson, H. E. Revercomb, F. A. Best, N. C. Ciganovich, R. G. Dedecker, T. P. Dirx, S. C. Ellington, W. F. Feltz, R. K. Garcia, H. B. Howell, W. L. Smith, J. F. Short, and D. C. Tobin, “Atmospheric emitted radiance interferometer. Part II: Instrument performance,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 21, no. 12, pp. 1777–1789, Dec. 2004

H.E. Revercomb, H.Buijs, H.B.Howell, D.D.LaPorte, W.L.Smith and L.A. Sromovsky, “Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the High-Resolution Interferometer Sounder,” *Appl. Opt.*, 27, 3210-3218, 1988

NASA, Joint Polar Satellite System (JPSS) Cross Track Infrared Sounder (CrIS) Sensor Data Records (SDR) Algorithm theoretical Basis Document (ATBD), 2011

Suto, H., F. Kataoka, N. Kikuchi, R.O. Knuteson, A. Butz, M. Haun, H. Buijs, K. Shiomi, H. Imai, and A. Kuze (2020): Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse Gases Observing Satellite-2 (GOSAT-2) during its first year on orbit. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/amt-2020-360>, in review.