

MTSAT-2 (ひまわり 7号) 赤外面像のストライプノイズ除去手法 Method of Eliminating Stripe Noise from MTSAT-2 Infrared Images

傍嶋 明*
SOBAJIMA Akira

Abstract

Stripe noise along the direction of the scan performed by an imager appears in infrared images obtained from MTSAT-2. This noise may degrade the quality of satellite products such as volcano ash monitoring images created by computing image differentials from two infrared channels, atmospheric motion vectors (AMVs), and sea surface temperature data. This stripe noise is caused by fluctuations in the MTSAT-2 onboard imager's sensitivity, which is itself affected by several kinds of noise.

This report proposes a new method of mitigating stripe noise, which has a shorter cycle than the intervals of the space observations used for calibration. In this method, the calibration coefficient b is adjusted using observation data obtained from over a smooth, level area. By applying this method, we were able to confirm that the stripe noise contained in both infrared and water vapor images was mitigated and that the quality of the AMV data was improved.

This method was employed in the MTSAT-2 infrared calibration process (except for with the 3.8 μm channel) before MTSAT-2 entered operation in July 2010.

要 旨

MTSAT-2 (ひまわり 7号) の赤外面像には縞状のノイズ (ストライプノイズ) が現れ、赤外差分画像を用いた火山灰監視画像や大気追跡風、海面水温分布などの各種プロダクトに影響を及ぼすことが懸念されていた。このストライプノイズは、MTSAT-2 搭載のイメージャセンサーの感度がさまざまな周波数と大きさを持って変動することに起因する。

本報告は、校正で利用する宇宙区間観測の間隔より短い周期のストライプノイズを軽減する手法を提案する。提案手法は、観測値が一様な領域のデータを抽出し、ノイズによる変動量を推定することで校正係数 b を補正する。本手法を適用することで、赤外面像と水蒸気画像、赤外差分画像のストライプノイズが軽減されることを確認すると共に、水蒸気画像から作成する大気追跡風プロダクトにおいても効果を確認した。

本手法は、MTSAT-2 の定常運用開始 (2010年7月) 前に、IR4 (3.8 μm) を除く全赤外面像の校正処理に適用された。

*気象衛星センターデータ処理部システム管理課
(2010年8月23日受領、2011年4月1日受理)

1. はじめに

MTSAT-2（ひまわり7号）は2006年2月に打ち上げられ、気象ミッションについては同年9月より軌道上待機運用衛星となった後、2010年7月より定常運用を開始した。その間、MTSAT-1R（ひまわり6号）の保守や障害に伴うバックアップ運用を2007年から2009年にかけて3度実施したほか、MTSAT-2の保守と画像品質向上を目的とした数日間にわたる連続撮像を年に数回実施した。また、2008年にはT-PARC 2008の特別観測の一つとして、台風をターゲットとした小領域高頻度観測を行った。

MTSAT-2の赤外画像には、イメージャの東西のスキャン方向に沿って縞状のノイズ（ストライプノイズ）が発現することが軌道上試験時に明らかになった。このストライプノイズは、IR1（ $10.8\mu\text{m}$ ）とIR2（ $12\mu\text{m}$ ）の差分画像、及びIR3（ $6.8\mu\text{m}$ ：水蒸気）画像で顕著に現れる（図1）。これにより、IR1/IR2差分画像に代表される画像プロダクトのみならず、IR3画像を用いた大気追跡風（AMV）やIR1/IR2差分を用いる海面水温等の物理プロダクトへの影響が懸念されていた。

本稿はこのストライプノイズへの対処法を記述す

る。続く2章ではMTSAT-2赤外画像のストライプノイズの特徴と要因を分析する。それを受けて3章でストライプノイズの軽減手法、4章でその効果について述べる。

2. MTSAT-2 赤外画像のストライプノイズの特性

2-1. MTSAT-2 の赤外キャリブレーション

MTSAT-2赤外画像のストライプノイズの特徴と要因、対処法を論じる上で、赤外キャリブレーション（校正）方法の理解が必要となる。以下に記述する手法は、従来の赤外キャリブレーション手法⁽¹⁾及び本稿で述べる新たな手法の基本となっているものである。

赤外キャリブレーションとは、RAWデータに含まれ無次元量であるデジタルカウント値と、放射輝度・輝度温度とを関連付ける処理である。放射輝度に変換された後、ユーザーに衛星画像として配信するHRIT画像が生成される。MTSAT-2では、衛星に搭載された黒体の観測値が高温（高放射輝度）側の基準として、宇宙空間の観測値が低温（低放射輝度）側の基準として用いられる。以下に赤外キャリブレーションの基本式を示す⁽¹⁾。

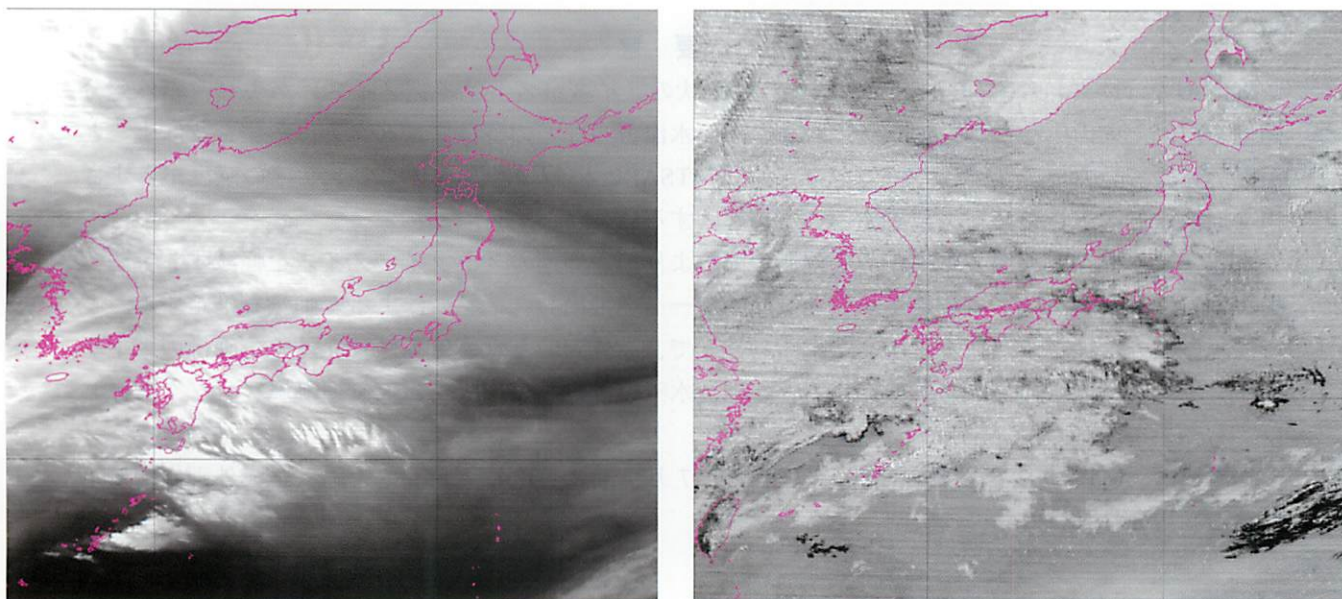


図1 MTSAT-2 2009年3月5日 05:32UTC 赤外画像例（ストライプノイズ除去前）
（左）IR3 （右）IR1/IR2 差分 差分はIR1輝度温度からIR2輝度温度を引いたもの。

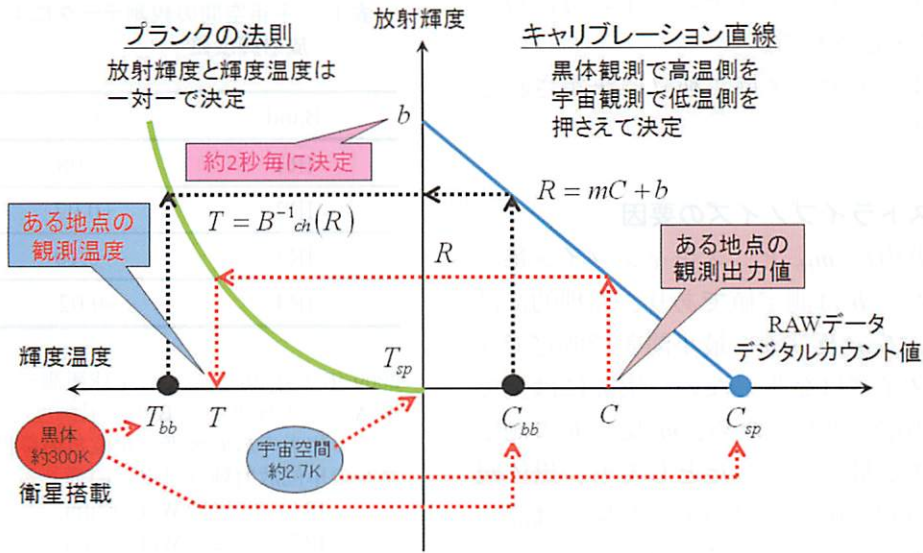


図2 MTSAT-2 赤外キャリブレーション概念図

宇宙空間と黒体の観測データからキャリブレーション直線(式(3)に相当)が求められ、その上でキャリブレーション定数項(bias:式(2)に相当)がスキャン毎に更新される宇宙観測データにより求められる。厳密には式(1)の通り放射輝度とRAW デジタルカウント値の関係は非線形であるが、二次係数の寄与は小さいので、この図において2次の項は省略している。放射輝度と輝度温度はプランクの法則により一対一で決定される。

$$R = \frac{q \cdot C^2 + m \cdot C + b - \varepsilon(\theta) \cdot R_m}{1 - \varepsilon(\theta)} \quad (1)$$

$$b = -m \cdot C_{sp} - q \cdot C_{sp}^2 + \varepsilon(sp) \cdot R_{msp} \quad (2)$$

$$m_{bb} = \frac{r_{bb} - q \cdot (C_{bb}^2 - C_{sp}^2)}{C_{bb} - C_{sp}} \quad (3)$$

$$r_{bb} = [1 - \varepsilon(ndr)] \cdot R_{bb} + [\varepsilon(ndr) - \varepsilon(sp)] \cdot R_{mbb} \quad (4)$$

ここで、 R はイメージャが観測すべき放射輝度、 C はイメージャ内のディテクタが捉えた放射の出力値(RAW デジタルカウント値)、 R_m はスキャンミラーの放射輝度、 $\varepsilon(\theta)$ はスキャンミラーの射出率である。式中の sp は宇宙空間を、 bb は黒体を、 ndr は衛星直下点を観測した時の値を示す。 m 、 b 、 q はキャリブレーション係数と呼ばれる。赤外センサーはイメージャの温度環境により感度に変化する。この変化に追従するため、観測中に m 、 b を随時決定・更新する。概念図を図2に示す。

MTSAT-2 イメージャの赤外センサーは、南北方向に2つのディテクタを持ち、東西方向1スキャンでRAW 画像2ライン分の観測を行う。全球・半球観測は、このスキャンを繰り返すことで行われる。 C_{sp} はRAW 画像の西端または東端の宇宙空間でライン毎に決定され、 C_{bb} は約30分毎に実施される黒体観測により決定される。

m は、基本的には黒体観測による C_{bb} と、その直近の C_{sp} から求められる(式(3))。実際の m の決定では式(3)の m_{bb} を直接使用せず、直近72時間内に得た m_{bb} とイメージャ内の主鏡温度の関係から得る2次の回帰式を用いる(以下、この方法をRegression法とする)。この回帰式の係数の更新は黒体観測ごとに行う。

$$m = \sum_{n=0}^2 c_n T^n \quad (5)$$

ここで、 T はイメージャ主鏡温度、 c_n は回帰係数である。Regression法は、黒体観測に含まれる誤差を低減し、かつ主鏡温度の変動にも追従することを目的に導入されている。

b は零点補正項であり、スキャンライン毎に得られる C_{sp} を用いて決定される。

なお、 m 、 b はディテクタ毎に独立に決定される（後述の 2-3 参照）。

2-2. MTSAT-2 ストライプノイズの要因

黒体校正時に求めた m_{bb} と、スキャンライン毎の宇宙観測時に求めた b は測定値であり、原理的には全ての画素において m 及び b を最小誤差で測定できればストライプノイズは発生しない。実際には全ての画素において測定できないため、 m 及び b の測定値に含まれる誤差が最小であったとしても、黒体観測及び宇宙観測の間に値に変化が生じた場合は測定値からの乖離が生じ、その変化量が隣り合うライン間で異なるとストライプノイズとして発現すると考えられる。また、 m 及び b の値はディテクタ毎に独立して求めるため、値に含まれる誤差がストライプノイズとして現れる可能性もある。

ここでは、2-1 で述べた m 及び b の算出過程と、ストライプノイズの関係を分析した結果を示す。

2-2-1. ディテクタ間の差

はじめに、各赤外チャンネルの画像において、観測対象として一様と見なせる画像北端と南端の宇宙空間（地球の外側）のデータを抽出し、2つのディテクタ間の差を評価した。評価にあたっては、RAW データから 2-1 に示すキャリブレーション処理と同一の処理を施した画像（以下校正済み RAW 画像と呼ぶ）を用いた。ここでは 2009 年 5 月 26 日の 1 日分のデータから 2つのディテクタの放射輝度の差（平均値・標準偏差）を求め、さらに配信画像の最小階調である HRIT 1 カウント分に相当する放射輝度で規格化した（表 1）。平均値は各チャンネルとも 0 に近く、系統的な差は殆ど無いことが分かる。しかし、標準偏差は IR2 と IR3 で相対的に大きく、このことはディテクタ間の差が局所的に顕在化することを意味する。

次に、 m の決定方法（Regression 法）とディテクタ間の差について考える。両ディテクタ（A 及び B）について黒体観測で求められた値を m_{bbA} 、 m_{bbB} とし、Regression 法により求められた値を m_A 、 m_B

表 1 宇宙空間の観測データによるディテクタ間の放射輝度差

Band	平均	標準偏差
IR1	-0.08	1.75
IR2	+0.07	2.78
IR3	+0.10	3.51
IR4	-0.02	1.79

2009 年 5 月 26 日全ての全球観測データを使用。ディテクタ A の放射輝度から B の放射輝度を引いた後、HRIT 1 カウント相当の放射輝度（単位放射輝度）で規格化。各チャンネルの単位放射輝度は以下の通り。

$$\begin{aligned} \text{IR1} &: 0.01419 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1} \\ \text{IR2} &: 0.01268 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1} \\ \text{IR3} &: 0.006882 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1} \\ \text{IR4} &: 0.000978 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1} \end{aligned}$$

とする。例えば $m_{bbA} < m_A$ かつ $m_{bbB} > m_B$ のように逆の位相を持つ場合など測定値からの差が両者で異なる場合、ディテクタ間の差が大きくなり、ストライプノイズの原因となり得る。そこで、以下の方法により Regression 法の検証を行った。

- (1) 両ディテクタ間の m の差を Dm と定義し、 m_{bb} をそのまま用いる方法と Regression 法それぞれにおいて Dm を求め、更に Dm の差を求める (Dm_diff とする)。

$$Dm_diff = (m_A - m_B) - (m_{bbA} - m_{bbB}) \quad (6)$$

- (2) (1)に対応する観測の画像北端と南端の宇宙空間において、ディテクタ A と B それぞれで観測された画素の放射輝度の差（平均値）を求め、さらにその差を求める (DR_diff とする)。ここで、 R 及び R_c はそれぞれ Regression 法及び m_{bb} をそのまま用いる方法により求められた画素の放射輝度、 $mean$ は平均、添字 A 及び B はディテクタ A または B を表す。

$$DR_diff = (mean(R_A - R_B)) - (mean(R_{cA} - R_{cB})) \quad (7)$$

- (3) Dm_diff と DR_diff の相関を調べる。

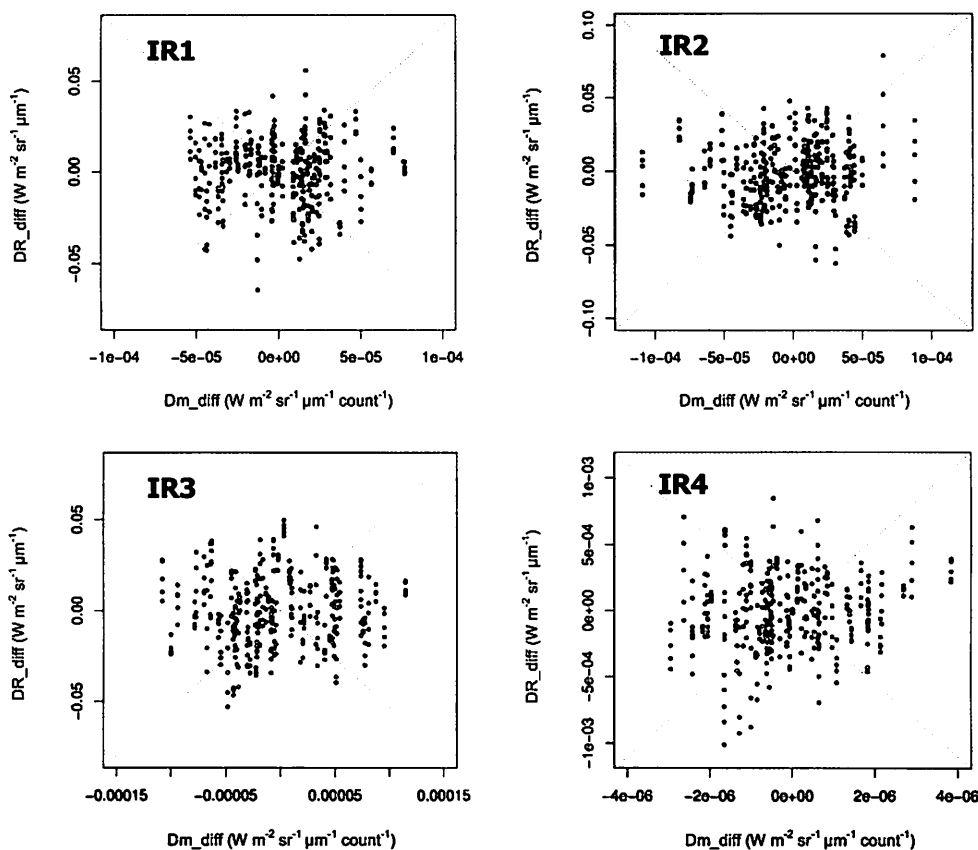


図3 m の決定方法による差とディテクタ間の放射輝度差の関係

式(6)及び式(7)で定義される Dm_diff と DR_diff の関係を示したものである。2009年5月26日、2009年9月10日、2009年11月25日の全球観測。各観測における北端10ライン分(各ディテクタ5ライン分)のデータを用いた。

式(6)の右辺第2項は測定値の両ディテクタ間の差、式(7)の右辺第2項は測定値に基づいて求められた放射輝度の両ディテクタ間の差である。したがって、Regression法によりディテクタ間の差が拡大する傾向がある場合、 Dm_diff と DR_diff の間には相関が見られると考えられる。図3に2009年の3日分のデータを用いた検証結果を示す。全チャンネルにおいて、 Dm_diff と DR_diff に明瞭な相関は見られないことから、Regression法による m の決定を通じて両ディテクタ間の差が顕在化している可能性は低い。

以上から、ディテクタ間の差は m の決定方法に依存しないと考えられる。

2-2-2. ノイズによるキャリブレーション誤差

図4に、RAW画像北端の宇宙空間におけるRAWデジタルカウント(space count)の東西方向1ライ

ン分の分布例を示す。全てのチャンネルにおいて同一ライン内でも変動が見られ、特にIR1~IR3にはさまざまな周期のノイズの存在が示唆される。このノイズが C_{sp} と C_{bb} に混入し、式(2)及び式(3)による m と b の誤差、つまりキャリブレーション誤差が生じ、ストライプノイズの要因となる可能性がある。

図5に、校正済みRAW画像を用いた画像北端の宇宙空間における放射輝度分布の一例を示す。図中の矢印は宇宙観測による b の決定を行う場所を示し、この宇宙観測をスペースクランプ(または単にクランプ)と呼ぶ。2-1の定義から、宇宙空間における放射輝度は理想的には一様に0となるべきである。図5の例では、スペースクランプ場所付近では放射輝度がほぼ0であるが、クランプ場所以外では同一ライン内においても0の周辺で変動しており、ライン間の差も大きい。この差は画像上ではストライプ

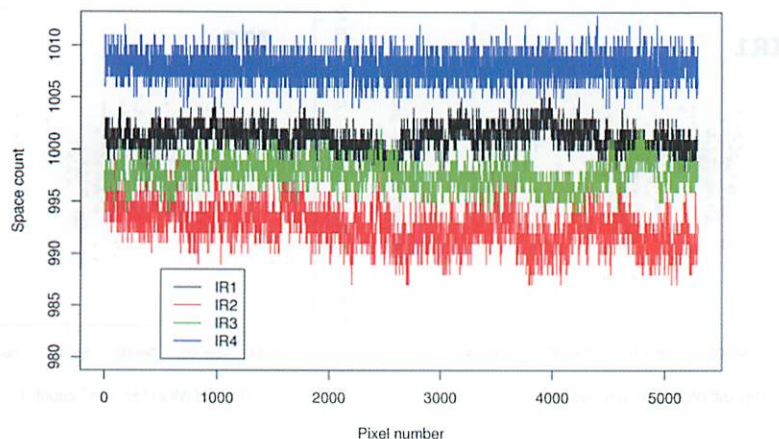


図4 宇宙空間のRAWカウント値 (space count) の変動

2009年5月26日 02:32UTC。画像北端から2ライン目の分布例。IR2は作図の便宜上、実際のカウント値から7カウント減じている。横軸は0が画像上の西端に、5300付近が東端に相当する。

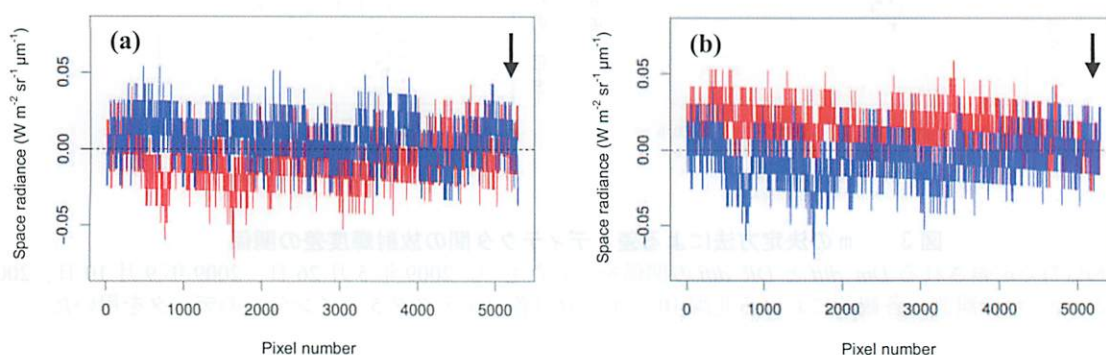


図5 隣り合うライン間の放射輝度の分布例

2009年5月26日 02:32UTCのIR3のデータを使用。

- (a) 同一ディテクタ (この例はB) の隣り合うラインの分布 (北端から2スキャン目 (赤) と3スキャン目 (青))
- (b) 異なるディテクタの隣り合うラインの分布 (画像全体で北端から3ライン目 (赤: detector-A) と4ライン目 (青: detector-B))

MTSAT-2 赤外はそれぞれ2つのディテクタを持つので、RAW画像の解像度で見た場合北端から奇数ライン目はdetector-A、偶数ライン目はdetector-Bの観測値となる。図中の矢印は、宇宙観測 (スペースクランプ) の場所を示す。

ノイズとなって現れる。このことは、スキャンごとに行われる m 及び b の決定では、図4に現れるようなノイズによる短時間変動に追従できないことを示す。また、図5(b)に示す同一ライン内で見られるディテクタ間の差も、2-2-1で述べたディテクタ間の差が局所的に現れることと矛盾しない。

先述の通り、ノイズの影響は m の決定にも及ぶ。ノイズによるRAWデジタルカウントの変動を dC_{bb} 、 dC_{sp} とし、それに伴うキャリブレーション係数の変動量を dm_{bb} 、 db とすると、式(3)及び式(2)から、

$$dm_{bb} = \frac{\partial m_{bb}}{\partial C_{bb}} \cdot dC_{bb} + \frac{\partial m_{bb}}{\partial C_{sp}} \cdot dC_{sp} \quad (8)$$

$$db = \frac{\partial b}{\partial m_{bb}} \cdot dm_{bb} + \frac{\partial b}{\partial C_{sp}} \cdot dC_{sp} \quad (9)$$

なお、ここでは式(2)において近似的に $m=m_{bb}$ としている。式(9)から、 db は dm_{bb} (dm) を包含したものと解釈できる。式(8)と式(9)から、

$$db = -C_{sp} \frac{\partial m_{bb}}{\partial C_{bb}} \cdot dC_{bb} + \left(\frac{\partial m_{bb}}{\partial C_{sp}} + \frac{\partial b}{\partial C_{sp}} \right) \cdot dC_{sp} \quad (10)$$

式(10)から、 db は C_{sp} と C_{bb} の変動により生じることが分かる。

また、式(1)と式(2)から m を消去することにより、 db に対する放射輝度の変化量 dR が求まる。

$$dR = \frac{1}{1-\varepsilon(\theta)} \cdot \left(1 - \frac{C}{C_{sp}} \right) \cdot db \quad (11)$$

式(11)から、 C が小さいほど（観測対象物の温度が高いほど）、 db の影響が放射輝度に大きくなる現れることが予想される。

2-3. ストライプノイズへの対処

以上から、MTSAT-2 のストライプノイズは C_{sp} 及び C_{bb} に現れるノイズがキャリブレーション係数（主に b ）の決定を通じて影響することが大きな要因であり、これは同一ディテクタ内、ディテクタ間を問わず発生すると考えられる。図4の space count 分布に見られる通り様々なノイズが含まれており、その代表的なものとして、 $1/f$ ノイズ等が挙げられる⁽⁵⁾。しかし、ノイズの機械的な原因は不明であり、ノイズの周期や振幅等の特性を正確に把握するのは難しい。したがって、ノイズに起因するキャリブレーション誤差とそれによるストライプノイズを完全に除去することは困難である。

他の地球観測衛星においてもストライプノイズを抑えることが課題となるケースがある⁽⁶⁾⁽⁷⁾。例えば MTSAT-2 のイメージャとほぼ同様の機構を持つ米国海洋大気庁 (NOAA) の GOES シリーズでも $1/f$ ノイズを想定したキャリブレーション手法が導入されている⁽⁸⁾。また、過去にはディテクタ間の感度差補正に関して、経験的に得られた複数のディテクタの傾向から相対補正する手法も考案されている⁽⁶⁾。MTSAT-2 においても類似した機能があり⁽¹⁾、キャリブレーション係数 m 及び b を特定のディテクタを基準として相対決定することも可能である。しかし、図4でも示す通り短周期のノイズの影響が大きく両ディテクタ間の関係を適切に算出することが困難で

あること、及び観測開始直前の限られたサンプルから算出された関係式を観測全体に適用するのは難しいことが判明しており、相対決定法は使用していない。

また、キャリブレーション後の画像に対して、フィルター処理を適用してノイズの除去を行う方法もある⁽²⁾。しかし、フィルター処理により雲や地表面、海面の観測情報が変化することで、4章で述べる AMV など物理プロダクトの精度が低下する懸念がある。

2-2-2 の議論から、 b 及び m の変動を推定できればキャリブレーション誤差及びストライプノイズの除去が可能である。 m の変動推定は Regression 法を用いていることもあり困難であるが、 m の変動を包含する b の高密度の決定が可能であれば、ストライプノイズの軽減に有効であると考えられる。この点を踏まえ、3章ではストライプノイズ除去の手法について述べる。

3. ストライプノイズ除去法

3-1. ストライプノイズ除去法の概略

b は、図2に示す通り画像西端または東端の宇宙観測データを用いて決定する。しかし、2章で述べた通り、 b は地球からの放射の観測中でも変動するため、本来ならばその間も b を求める必要がある。このため、宇宙空間のみならず画像上のあらゆる観測画素において b の変動を推定する処理を導入した。まず各ディテクタ別に、スペースクランプごとに得る b の測定値を時間的に線形内挿する処理を導入し (Step-1)、次に周辺の観測情報から b の変動量を推定し補正する処理を実施する (Step-2)。その後、Step-2 で用いる b の補正法と同様の手法による、両ディテクタの補正済みデータを結合させる処理を導入する (Step-3)。基本的な処理の流れを図6に、Step-1 から Step-2 の概念図を図7に示す。

今回の除去法検討は、画像作成処理を行う現業システム⁽¹⁾⁽³⁾への実装を目的としている。そのため、画像作成処理に遅延を発生させないために複雑な処理を用いることなくストライプノイズを軽減することを目指した。また、衛星画像から作成される物理量プロダクトへの品質低下を回避するには、観測情

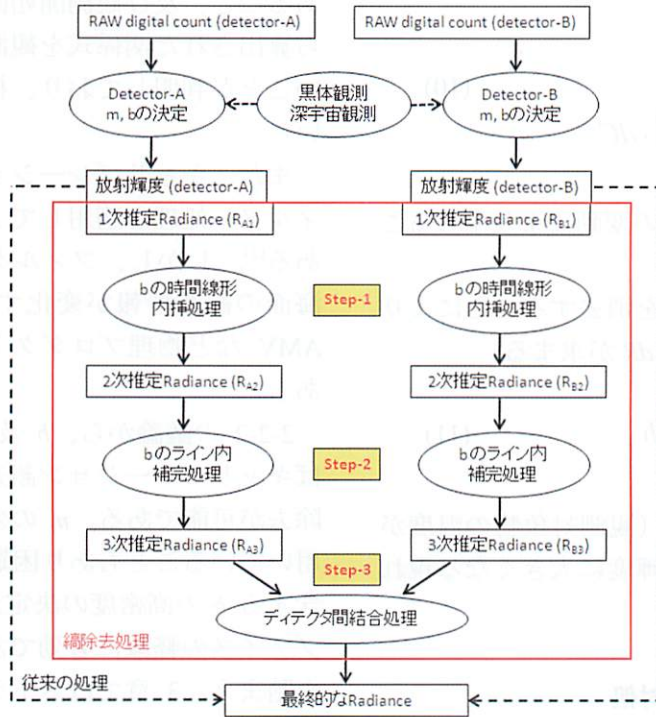


図6 MTSAT-2 縞除去処理を追加したキャリブレーション処理フロー

従来の処理では最終的な Radiance として HRIT 作成に使用された Radiance を 1 次推定 Radiance とし、3 段階の補完処理 (Step-1~Step-3) を追加する。

報は極力保存される必要がある。この観点から、周辺の観測情報を用いた b の補正において、利用する時間・空間的範囲を限定するなどの対処が必要となる。次節以降に、具体的な補正方法を述べる。

3-2. b の時間線形内挿処理 (Step-1)

本処理は、主に周期が 1~2 スキャン (数秒) 程度のノイズによる変動に b を追従させることを目的としている。スキャンごとのスペースクランプで求められた b の測定値を線形時間内挿して画素毎に b の値を決定する。この処理により画素毎に求められた b を 2 次推定 bias (以下 b_2 と記述) と定義し、処理適用前の b (以下 b_1 と記述) によって求められた放射輝度を 1 次推定 Radiance と定義する。なお、本処理とほぼ同様の手法が GOES のキャリブレーション処理にも導入されている⁽⁸⁾。

ここで、2 つのディテクタの一方のみについて考える。式(2)を用いて画像の北端から i スキャン目、西端から j 画素目の b_2 は以下ようになる。なお、スペースクランプの場所は観測時間帯により RAW

画像の西端または東端に変更になるため、それに対応して処理がそれぞれ異なる。

- (1) スペースクランプ場所が西側の場合：
 i が奇数の場合：

$$b_2(i, j) = [b_1(i) - b_1(i-1)] \cdot [(2p_n - dn - j) \cdot \Delta t + \Delta t_i] / \Delta T + b_1(i-1) \quad (12)$$

- i が偶数の場合：

$$b_2(i, j) = [b_1(i+1) - b_1(i)] \cdot [(j - dn) \cdot \Delta t] / \Delta T + b_1(i) \quad (13)$$

- (2) スペースクランプ場所が東側の場合：
 i が奇数の場合：

$$b_2(i, j) = [b_1(i+1) - b_1(i)] \cdot [(p_n - dn - j) \cdot \Delta t] / \Delta T + b_1(i) \quad (14)$$

- i が偶数の場合：

$$b_2(i, j) = [b_1(i) - b_1(i-1)] \cdot [(p_n - dn + j) \cdot \Delta t + \Delta t_i] / \Delta T + b_1(i-1) \quad (15)$$

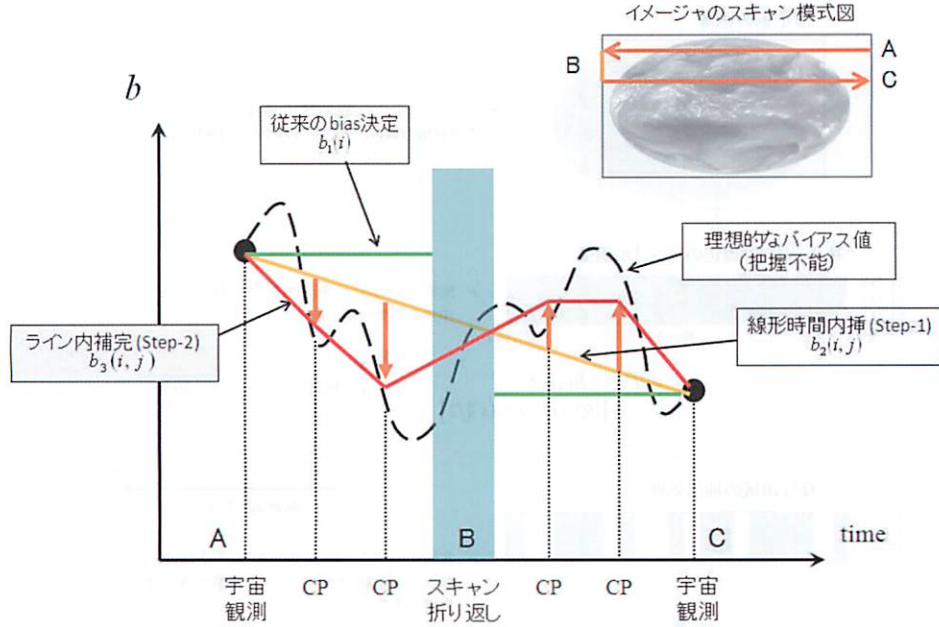


図7 MTSAT-2 bias 項補正による縞除去処理概念図

右上の A から C は一連のイメージャスキャンの模式図であり、A と C は宇宙観測（スペースランプ）の場所を、B はスキャンの折り返し場所を示す。また、横軸は A から C に至るまでの時間を示しており、CP とはライン内の補正ポイントを示す（3-3 参照）。

ここで、 p_n は 1 ライン当たりの画素数、 dn はスペースランプで用いる画素数の半分、 Δt は 1 画素の観測時間、 Δt_i はスキャン折り返しにかかる時間、 ΔT は図 7 の A から C まで（両宇宙観測間）の時間である。 b_2 を用いて式(1)により求められる放射輝度を 2 次推定 Radiance と定義し、以後 R_2 と表す。

3-3. b のライン内補完処理 (Step-2)

本処理は、周期が 1 スキャン未満の比較的短周期のノイズ変動に b を追従させることを目的に、ディテクタごとに独立して行う。本処理では宇宙空間以外でも b の決定・補正を行う必要があるが、宇宙観測による測定はできない。そこで、各観測画素において、周辺の放射輝度 (R_2) 分布から相対的にノイズによる変動量を推定し、 b の決定にフィードバックする処理を導入した。

R_2 分布を得るために参照する範囲として、対象となる画素から東西方向に $\pm N_s$ 画素以内、南北方向に $\pm N_l$ スキャンライン分で構成される画像をサンプル画像と定義する (図 8)。サンプル画像内で、空間的に変化の大きい画素を除去した上でスキャンライン

毎に R_2 の平均を求め、各スキャンライン間の差を補正量とするのが本補完処理の基本である。全観測画素でサンプル画像を用いた補完処理を行うと、リアルタイム処理に遅延を生じさせる可能性がある。そのため、本処理ではスキャンライン内で等間隔に b の補正量推定ポイント（以下 CP）を設定し、CP においてサンプル画像を用いた b の補正量算出を行う。各 CP 間の補正量は線形内挿により画素毎に決定する (図 7)。

N_l を大きくすると、観測時間の離れた観測値を同一のサンプル画像で使用するにより、算出した b の補正量の信頼性が低くなる可能性がある。さらに、参照するデータ量が多くなることで処理の遅延も懸念される。そこで、本処理においては $N_l=1$ とし、南北方向 3 スキャンライン分を b の補正量推定に使用する。また、各スキャンライン間の放射輝度差を求める際には、後段の抽出処理のため N_s をある程度大きく設定する必要がある一方で、 N_s を過大にすると画像の東西端でサンプル数を確保できなくなる。 N_s の値はこの両面とストライプノイズ除去の効果を考慮した上で決定する。

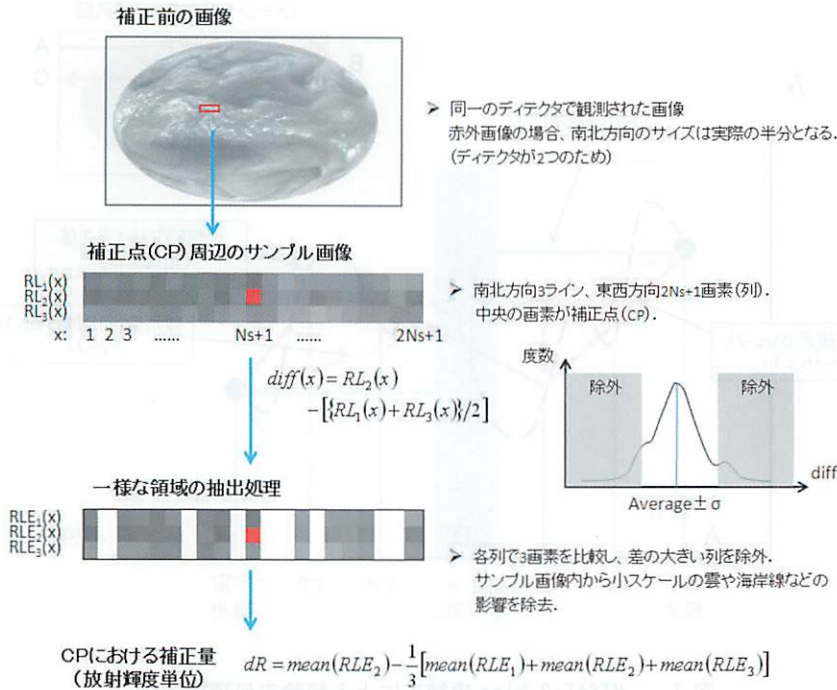


図 8 MTSAT-2 ライン内補完処理概略図

(1) 変化の大きい観測画素の除去

宇宙空間以外の観測値を用いて b の補正量を算出するためには、スケールの小さい積雲や海岸線などを除去し、比較的一様な観測画素を抽出する必要がある。そこで、上下のスキャンの観測値からの偏差を算出し、この偏差を用いて画素を抽出する。

サンプル画像内で、 $i-1$ スキャン (ライン) 目、 i スキャン目、及び $i+1$ スキャン目の 2 次推定 Radiance をそれぞれ $RL_1(x)$ 、 $RL_2(x)$ 、 $RL_3(x)$ とする (図 8)。

$$RL_l(x) = R_2(i+l-2, cp - N_s + x - 1) \quad (16)$$

ここで、 $1 \leq x \leq 2N_s+1$ 、 $1 \leq l \leq 3$ である。 $RL_2(x)$ と、その上下のスキャンに当たる $RL_1(x)$ と $RL_3(x)$ の平均値との差を $diff(x)$ と定義する。

$$diff(x) = RL_2(x) - \frac{1}{2} \{RL_1(x) + RL_3(x)\} \quad (17)$$

東西方向の $2N_s+1$ 個の $diff(x)$ のうち、その平均値 $\pm \sigma$ (標準偏差) 内に入る画素番号 x と x における $RL_l(x)$ を抽出し、抽出した画素数を N_e 、画素

の集合を $RLE_l(y)$ とする。ここで、 $1 \leq y \leq N_e$ である。

(2) 3 次推定 Radiance の算出

(1)において抽出した画素について、対象となるスキャンライン (i スキャン目) とその上下のスキャンラインに残存する放射輝度の差を Radiance 補正量 (dR_2) とする。

$$dR_2(i, cp) = \frac{A}{N_e} \left[\sum_y^{N_e} RLE_2(y) - \sum_y^{N_e} \frac{RLE_1(y) + RLE_2(y) + RLE_3(y)}{3} \right] \quad (18)$$

$dR_2(i, cp)$ から、 $j=cp$ における b_2 の変動量 $db_2(i, cp)$ を求める。式(1)から、

$$db_2(i, cp) = dR_2(i, cp) \cdot \{1 - \varepsilon(cp)\} \quad (19)$$

ここで、 $\varepsilon(cp)$ は CP ($j=cp$) におけるイメージャスキャンミラーの射出率である。各 CP で求めた db_2 を用いて、線形内挿により画素毎に変動量 db_2 を求める。例えば $j=cp$ から $j=cp+dcp$ (dcp は CP 間の画素数) までの各画素における $db_2(i, j)$ は、

(i) detector-A i スキャン目を結合

RL ₁ (x)	R ₃ detector-B i-1 スキャン目
RL ₂ (x)	R ₃ detector-A i スキャン目
RL ₃ (x)	R ₃ detector-B i スキャン目

(ii) detector-B i スキャン目を結合

RL ₁ (x)	R ₃ detector-A i スキャン目
RL ₂ (x)	R ₃ detector-B i スキャン目
RL ₃ (x)	R ₃ detector-A i+1 スキャン目

図9 MTSAT-2 デテクタ間結合処理

図8に示すサンプル画像の取り方を変更。その後の処理は bias 項ライン内補完と同様。

$$db_2(i, j) = [db_2(i, cp + dcp) - db_2(i, cp)] \cdot (i - cp) + db_2(i, cp) \quad (20)$$

となる。b₂ を db₂ により補正した値を 3 次推定 bias (b₃) とし、b₃ を用いて算出する放射輝度を 3 次推定 Radiance (R₃) と定義する。式(1)から、

$$R_3(i, j) = R_2(i, j) - \frac{db_2(i, j)}{1 - \varepsilon(\theta)} \quad (21)$$

を得る。

なお、式(18)における係数 A (Adjustment Factor) は、抽出されたサンプルから求められた Radiance 補正量を調整するための係数である。これは、(1)の抽出処理によりストライプノイズに起因する成分を完全に抽出することが難しいために生じる、補正量の過不足を補う目的で導入した。Adjustment Factor は、宇宙空間及び地球上の CP で求められた Radiance 補正量の比からオフラインで経験的に決定し、適用する (3-5 で後述)。

3-4. デテクタ間結合処理 (Step-3)

本処理は、デテクタ間の差を補正することを目的に、3-3 のスキャン内補完処理と同様の手法により b を補正し、デテクタ毎に求められた 3 次推定 Radiance データを整合させる。特に断りが無い限り、ここから先は各デテクタ別の 3 次推定 Radiance をそれぞれ R_{3A}, R_{3B} と表す。

MTSAT-2 の赤外画像では、データの並びは画像の北端からデテクタ A、デテクタ B の繰り返しとなるため、デテクタ A・B それぞれの i スキャン目の上下のスキャンは図9に示す通りとなる。ここで、各ラインの Radiance を以下のように定義する。

(1) デテクタ A の i スキャン目に注目する場合 (図9(i)) :

$$\begin{aligned} RL_1(x) &= R_{3B}(i-1, cp - N_s + x - 1) \\ RL_2(x) &= R_{3A}(i, cp - N_s + x - 1) \\ RL_3(x) &= R_{3B}(i, cp - N_s + x - 1) \end{aligned} \quad (22)$$

(2) デテクタ B の i スキャン目に注目する場合 (図9(ii)) :

$$\begin{aligned} RL_1(x) &= R_{3A}(i, cp - N_s + x - 1) \\ RL_2(x) &= R_{3B}(i, cp - N_s + x - 1) \\ RL_3(x) &= R_{3A}(i+1, cp - N_s + x - 1) \end{aligned} \quad (23)$$

3-3(1)と同様に、一様な観測値を持つ画素を抽出した集合を RLE_l(y) (1 ≤ l ≤ 3)、それぞれに含まれる画素の数を N_e とする。このとき、画素毎に R₃ 及び b₃ の補正量 dR₃, db₃ を、CP ごとに以下のように求める。

$$\begin{aligned} dR_3(i, cp) &= \frac{B}{N_e} \left[\sum_y^{N_e} RLE_2(y) \right. \\ &\quad \left. - \sum_y^{N_e} \frac{RLE_1(y) + RLE_2(y) + RLE_3(y)}{3} \right] \end{aligned} \quad (24)$$

$$db_3(i, cp) = dR_3(i, cp) \cdot \{1 - \varepsilon(cp)\} \quad (25)$$

式(18)の A と同様に、式(24)の係数 B はデテクタ間結合処理における Adjustment Factor であり、経験的に決定する。ライン内補完処理と同様に、CP 間は db₃(i, cp) を用いて、線形内挿により画素毎に db₃ を求める。db₃ により 3 次推定 Radiance を補正したものが、全ての補正が行われた後の放射輝度値 (R) となる。

$$R(i, j) = R_3(i, j) - \frac{db_3(i, j)}{1 - \varepsilon(\theta)} \quad (26)$$

3-5. Adjustment Factor と各種設定値

図10に、Step-2における各CPのサンプル画像内

平均放射輝度と、算出された Radiance 補正量の分布の一例を示す。IR3 を除き、平均放射輝度の小さい CP に比べ大きい CP の方が Radiance 補正量の絶対値及びばらつきが大きいことが分かる。前者は主に宇宙空間の CP の算出結果、後者は主に地球上の CP の算出結果から構成され、これは 3-3 で述べた変化の大きい画素の除去（一様な画素の抽出）に限界があるためと考えられる。そのため、式(18)及び式(24)の A 及び B で示す Adjustment Factor を導入し、宇宙空間の CP で求められた補正量を用いて地球上の CP で求められた補正量を規格化する。これにより、観測対象として不均質な地球上の CP においても、均質な宇宙空間の CP で求める場合とほぼ同等の精度で補正量を求めることができると考えられる。

Step-2 及び Step-3 で用いられる Adjustment Factor を以下の手順により決定する。

(1) Step-2 において、各 CP において Radiance 補正量とサンプル画像内の平均放射輝度を求め、各

結果を評価用サンプルとする。

- (2) 評価用サンプルのうち、平均放射輝度が小さいサンプルを宇宙空間の観測結果の集合、一定の放射輝度より大きいサンプルを地球上の観測結果の集合とする（図 10）。前者の標準偏差を σ_S 、後者の標準偏差を σ_E とし、 $\sigma_S/\sigma_E (=A)$ を求める。
- (3) (2)で求められた比をライン内補完処理に適用した後、ディテクタ間結合処理において各 CP で求められた補正量から、同様の手順で標準偏差の比を求め、 B を決定する。

Adjustment Factor をはじめとした、ストライプノイズ除去処理を定義・調節するパラメータを表 2 に纏めた。一部のパラメータ値はチャンネル及び処理毎に経験的に決定・適用される。

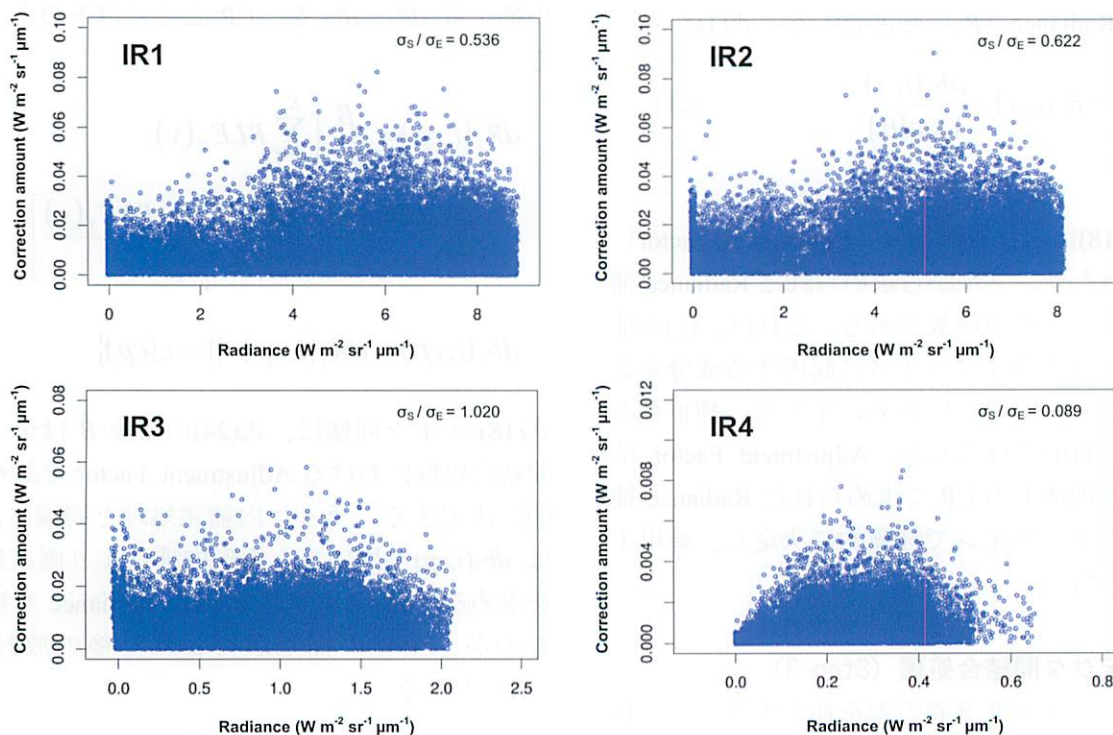


図 10 ライン内補完処理における CP の Radiance 補正量分布 (Step-2 (ライン内補完処理) の一例)

使用データは 2009 年 11 月 25 日の全ての全球観測。横軸は各 CP におけるサンプル画像内の平均放射輝度、縦軸は Radiance 補正量。宇宙空間の CP と地球上の CP は平均放射輝度から区別される。

宇宙空間の CP : $R < 0.1 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ (IR1~IR3) , $R < 0.01 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ (IR4)

地球上の CP : $R > 1.0 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ (IR1・IR2) , $R > 0.3 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ (IR3) , $R > 0.1 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ (IR4)

表2 ストライプノイズ除去を定義・調節するパラメータ

要素	概要
処理適用範囲	ストライプノイズ除去処理の適用・非適用を規定。Off, Step-1のみ、全処理適用のいずれかを選択可。
Adjustment Factor	CPで求められたbの補正量を、バックグラウンドが一樣な宇宙空間で求められた補正量を基準として規格化する。式(18)及び式(24)における係数A, Bに相当する。Step-2及びStep-3で独立に設定。
CPの西端・東端	各ラインの中で、西端及び東端のCPの場所を規定する。西端を1とした相対要素数で規定し、両端の間のCPの位置は等間隔になる。
CPの数	各ライン中のCPの数を設定。西端・東端の定義と合わせてCPの位置が決まる。
サンプル画像の幅	Step-2/Step-3におけるサンプル画像の定義であり、3-3におけるNsを設定。
サンプル画像のライン数	Step-2/Step-3におけるサンプル画像の定義であり、ライン数を設定。当該ラインが中心になるように設定する。リアルタイム処理においては処理の遅延も考慮し、通常は3(当該ラインと直前・直後のラインで構成)に設定する。
一樣な領域抽出の調整	3-3(2)の変化が大きい要素の除去において、閾値として用いる標準偏差 σ を調整する係数。平均値 $\pm C \cdot \sigma$ の係数Cを設定する。Step-2及びStep-3で独立に設定。

表3 ストライプノイズ除去の品質チェック項目

設定値は放射輝度 ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$) 単位で与えられる。

要素	概要
σ の上限	サンプル画像内で一樣な領域を抽出する処理において求められた dif (式(17)) の標準偏差。サンプル画像内に海岸線や地球の端、小さいスケールの積雲などが入る場合には σ が大きくなり、一樣な領域抽出の効果が低くなる。これによる影響を除くため、 σ がこの値を上回った場合には無効と判定する。
抽出要素数の下限	サンプル画像内で抽出された要素数の下限値。この下限値を下回った場合には無効と判定する。
算出された db の上限・下限	各 CP で求められた db の上限値及び下限値。db の値がこの範囲を外れた場合には無効と判定する。

3-6. 品質管理

本手法では、例えば Step-2 及び Step-3 の抽出処理において地球の端やスケールの小さい雲の影響を受けやすいなどの限界があり (3-7 で後述)、それに伴い補正量が過大もしくは過小に算出される可能性がある。その場合画像品質に影響を与える可能性があることから、Step-2 以降については表 3 に示す品質管理項目を設けている。3 項目のうち 1 つでも満たさない場合、当該 CP で b の補正量算出は実施せず、CP 間の線形内挿処理は有効と判定された CP との間で行う。また、Step-2 と Step-3 の品質管理はそれぞれ独立であり、例えば Step-2 が有効で Step-3 が無効

となる CP も存在しうる。

3-7. ストライプノイズ除去処理の限界

本手法はリアルタイムのキャリブレーション処理への実装を目的としているため、使用するのは平均、標準偏差といった基本統計量に限り、各 CP における処理で使用される観測情報も制限している。しかし実際に観測値に含まれる情報は複雑であり、雲の分布などによっては効果に差が出る可能性がある。

以下に、本処理を適用した画像 (HRIT) を利用する上で注意すべき項目を挙げる。

表4 ストライプノイズ除去の適用範囲

○は適用、△は適用されるが一部不完全、×は適用されないラインを示す。Nは観測全体のライン数を示す。Nの値は通常、固定値である。

北端からのライン数	スペーススキャンの方向					
	西側			東側		
	Step-1	Step-2	Step-3	Step-1	Step-2	Step-3
1ライン目 (det-A 1スキャン目)	×	×	×	○	×	×
2ライン目 (det-B 1スキャン目)	×	×	△	○	×	△
3ライン目 (det-A 2スキャン目)	○	△	△	○	○	△
4ライン目 (det-B 2スキャン目)	○	△	△	○	○	○
5ライン目 (det-A 3スキャン目)	○	○	△	○	○	○
6ライン目～N-5ライン目	○	○	○	○	○	○
N-4ライン目 (det-B (N/2)-2スキャン目)	○	○	△	○	○	○
N-3ライン目 (det-A (N/2)-1スキャン目)	○	△	△	○	○	○
N-2ライン目 (det-B (N/2)-1スキャン目)	○	△	△	○	○	△
N-1ライン目 (det-A N/2スキャン目)	×	×	△	○	×	△
Nライン目 (det-B N/2スキャン目)	×	×	×	○	×	×
処理が完全に適用されないライン数と観測全体のライン数に対する割合	計10 (北端5, 南端5) 0.4% (全球観測) 0.7% (半球観測)			計6 (北端3, 南端3) 0.2% (全球観測) 0.4% (半球観測)		

- (1) Step-2 以降は、宇宙空間観測を用いて得られた測定値に基づく補正ではなく、誤差が残り得る。
- (2) 本処理の適用により観測情報が平滑化される。
- (3) 画像の南北端の一部では、処理が非適用となる。

(1)に関しては、3-6 で述べた品質管理を導入することで、本処理により画像品質低下が発生する可能性は極力排除されるが、補正された b は推定値であり、周期が 1~2 スキャン以下の短周期ノイズによる誤差を完全に除去するのは不可能である。また、Step-2 及び Step-3 の処理は周辺の観測情報を用いた平滑化を含むため、(2)及び(3)もある程度は避けられない。なお、(3)については、表4に示す通り非適用範囲は画像全体の1%未満である。

4. ストライプノイズ除去処理の効果

本章では、本提案手法の効果を検証する。IR4 については実用上問題となるストライプノイズは発生しないため、検証は行わない。

4-1. 画像レベルでの効果

一例として、2009年5月26日の画像を用いてオフラインで HRIT 相当の画像を作成した結果を図11

に示す (IR3 強調画像及び IR1/IR2 差分画像)。両者とも、ライン毎に現れるストライプノイズが軽減できており、実況監視のみならず物理量プロダクトにおいても改善が期待できる。

4-2. 指標による bias 項ライン内補完の効果

ストライプノイズを量的かつ客観的に表すため、本節では画像の各ライン間の放射輝度差から求めた指標 (Stripe Index : 以下 SI) を新たに導入し、ストライプノイズ除去の効果を検証した。以下に SI の算出手法を述べる。

- (1) キャリブレーション済み画像のうち、東西方向7画素、南北方向4ラインの計28画素で構成される小領域に分割し、各小領域を単位要素 (grid) とする。
- (2) grid 内の放射輝度の標準偏差が、HRIT カウント換算で3カウント以内の grid を抽出する。この処理は、例えば不均質な雲や小スケールの積雲が含まれる grid では、各ラインの放射輝度差がそのままストライプノイズによる差とならないため、SIを算出する上でこのような grid の除去を目的とする。
- (3) 抽出した grid について、ライン間の平均放射輝

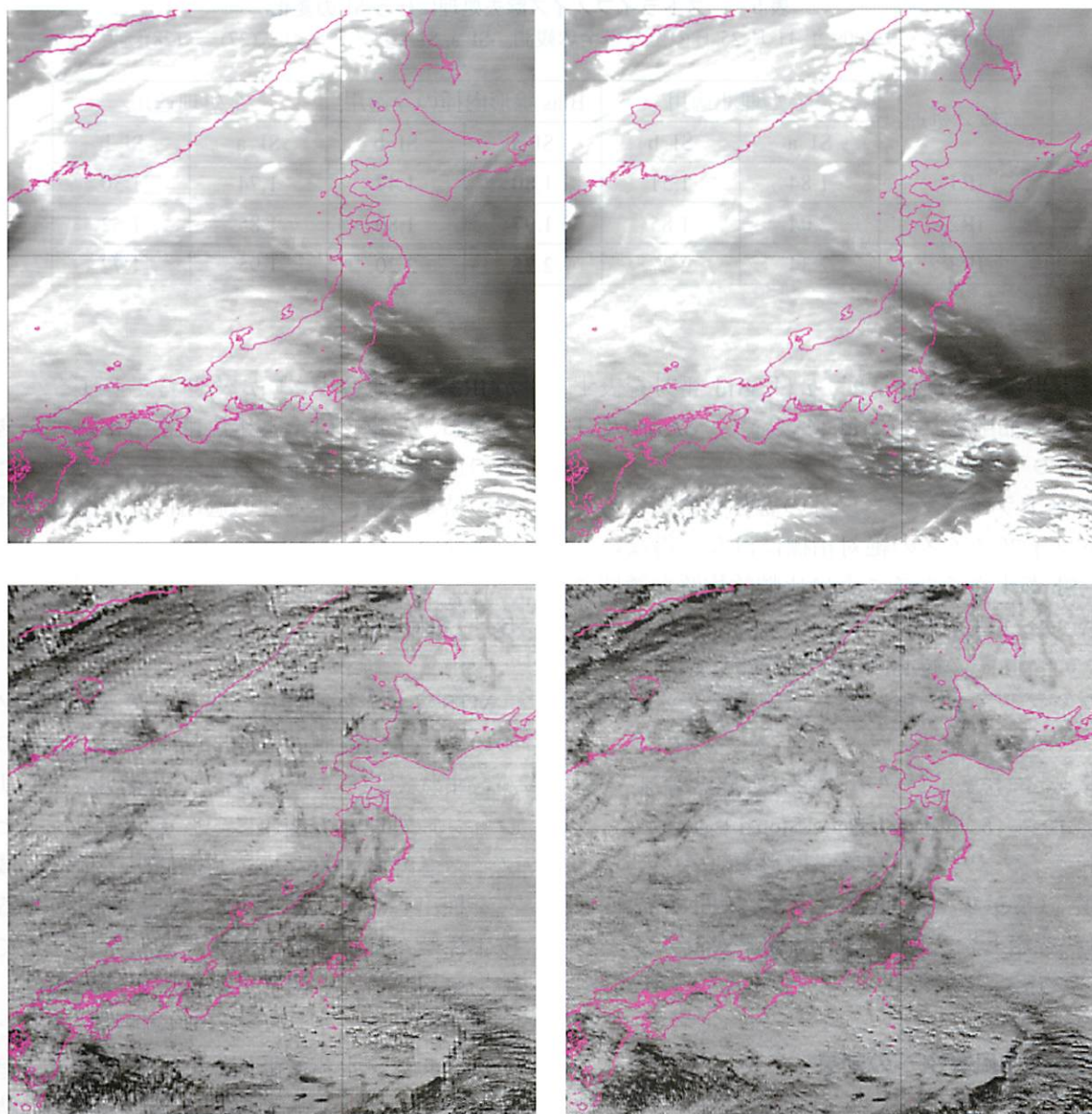


図11 ストライプノイズ除去処理済み画像の例

2009年5月26日 05:01UTC。ライン当たりのCP数は7に設定し、オフラインでHRIT相当の画像を作成。

(左上) IR3強調・処理非適用 (右上) IR3強調・処理適用

(左下) IR1/IR2差分・処理非適用 (右下) IR1/IR2差分・処理適用

度差を求める。grid内の1ライン目から4ライン目までの平均放射輝度(7画素平均)を RM_1 , RM_2 , RM_3 , RM_4 とし、次の式(27)及び式(28)で示す SI_a 及び SI_b を定義する。 SI_a は同一ディテクタ内でのライン間の放射輝度差を、 SI_b はディテクタ間の放射輝度差を表す指標となる。

$$SI_a(i) = [abs(RM_1 - RM_3) + abs(RM_2 - RM_4)] / 2Rad_hrit \quad (27)$$

$$SI_b(i) = [abs(RM_1 - RM_2) + abs(RM_3 - RM_4)] / 2Rad_hrit \quad (28)$$

ここで、 abs は絶対値を、 Rad_hrit はHRIT1カ

表5 ストライプノイズ除去処理に伴う SI の変化

使用データは 2009 年 11 月 25 日の全ての全球観測。SI_a, SI_b はそれぞれ式(27), 式(28)による。

画種／処理	全処理非適用		Bias 線形内挿のみ適用		全処理適用	
	SI _a	SI _b	SI _a	SI _b	SI _a	SI _b
IR1	1.84	1.51	1.80	1.47	1.74	1.30
IR2	2.04	1.85	1.97	1.80	1.85	1.52
IR3	2.34	2.27	2.25	2.20	1.95	1.72

ウント当たりの放射輝度、 i は grid 番号を表す。

- (4) 1 観測で抽出された grid について、SI_a(i)及び SI_b(i)の平均を求める。

SI にはストライプノイズ以外の寄与も含まれるため、ストライプノイズの絶対指標にはなり得ない。しかし、SI が小さくなることは比較的均質な領域において隣り合うライン間の差が小さくなることを意味するため、同一の観測画像を用いた比較においてはストライプノイズの指標として使用できると考える。

表 5 に、ストライプノイズ除去処理の有無と SI の変化を示す。 b の線形内挿 (Step-1) のみでも一定のストライプノイズ軽減効果は得られるが、ライン内補完 (Step-2) 及びディテクタ間結合処理 (Step-3) を施した方がより軽減効果が高く、その傾向は特に IR3 で大きい。

4-3. 大気追跡風算出への効果

4-1 と同じ 2009 年 5 月 26 日のオフライン作成画像を用いた大気追跡風⁽⁴⁾ (AMV) の算出結果を、物理プロダクトにおけるストライプノイズ除去の評価例として記載する。表 6 は算出数の変化を、図 12 はストライプノイズの影響が大きい IR3 画像を用いた例 (水蒸気風) を表す。

ストライプノイズは観測画像に実際の雲の形状とは異なるパターンを作り出すため、雲の追跡処理において影響が大きく、その結果算出精度の低下が懸念される。表 6 及び図 12 に示す通り、本処理を導入することで、水蒸気風では品質指標 QI⁽⁴⁾が 0.85 より大きい高品質の風データの算出数が増加した。IR1 画像を用いた赤外風は大きな変化は見られない。これは、IR1 はストライプノイズが IR3 に比べ小さいことから、ストライプノイズ除去処理による変化

が IR3 等に比べ小さいためと考えられる。

なお、3 章では、本手法は平滑化処理を含むため雲の追跡精度が低下する懸念について述べたが、上記の結果から、本処理の適用による品質低下は確認できない。

5. おわりに

MTSAT-2 赤外画像に含まれるストライプノイズについて、宇宙観測の観測間隔より短い周期のノイズが含まれていることを確認し、校正 (キャリブレーション) 処理との関連について分析を行った。このノイズを軽減するため、観測値が一様な領域のデータを抽出し、ノイズによる変動量を推定することで校正係数を補正する手法を提案した。そして、本手法を適用することで赤外画像と水蒸気画像、赤外差分画像のストライプノイズが軽減されることを確認すると共に、水蒸気画像から作成する大気追跡風プロダクトにおいても効果を確認した。この結果を受け、本手法を MTSAT-2 の定常運用開始 (2010 年 7 月) 前に、IR4 (3.8 μ m) を除く全赤外画像の校正処理に適用した。

将来予定される静止地球環境観測衛星においても、MTSAT-2 の赤外画像と同様にストライプノイズが発生する可能性がある。それを未然に防ぐには、整備段階においてハード・ソフト両面での対策が必要であろう。

謝辞

今回の方法を検討する上で多大な助言を頂いた気象衛星センターシステム管理課の伊達謙二調査官、

表6 2009年5月26日06:00UTCの例による大気追跡風(AMV)の算出結果

IR上層及び中下層はIR1を用いた算出結果、WVはIR3を用いた算出結果。

	除去処理の有無	北半球(60N~EQ)			南半球(EQ~60S)		
		指定点	全算出数	算出数 QI > 0.85	指定点	全算出数	算出数 QI > 0.85
IR上層	有	4917	4200	2381	3745	3184	1771
	無	4910	4218	2381	3744	3178	1748
IR中下層	有	2664	1608	660	4572	3154	1654
	無	2644	1598	655	4570	3138	1660
WV	有	13585	8650	4611	12964	6273	2991
	無	14543	7954	4136	14054	5720	2578

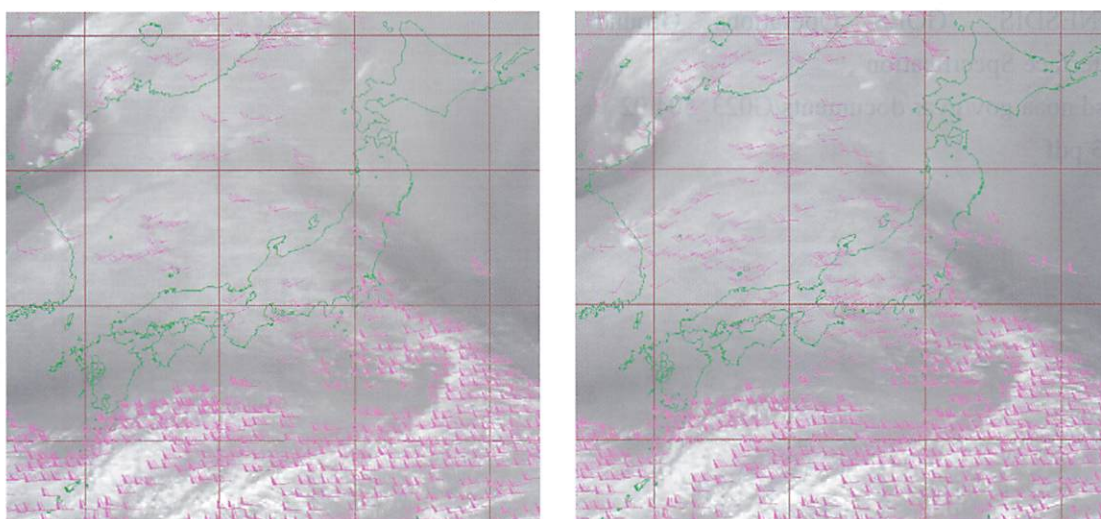


図12 IR3画像を用いた大気追跡風(AMV)の算出例

2009年5月26日06:00UTCの日本付近。矢羽はQI⁽⁴⁾が0.85より大きい算出点を表す。

(左) 除去処理非適用画像を用いた結果 (右) 除去処理適用画像を用いた結果

並びにオフラインでの評価用画像作成への協力及び物理プロダクトの評価をして頂いたシステム管理課の皆様、MTSAT-2画像前処理装置への実装に協力頂いた気象衛星センターの皆様へ感謝致します。

参考文献

(1) 木川誠一郎, 1999: 運輸多目的衛星画像前処理アルゴリズム, 気象衛星センター技術報告第37号, 1-18.

(2) 尾崎弘, 谷口慶治, 小川秀夫: 画像処理—その基礎から応用まで, 共立出版株式会社

(3) 田原基行, 2007: MTSAT-2地上システム, 気象衛星センター技術報告第49号, 59-80.

(4) 大河原望, 今井崇人, 隈部良司, 2004: 高密度衛星風プロダクトの開発, 気象衛星センター技術報告第45号, 1-16.

(5) Haines, S. L., R. J. Suggs, and G. J. Jedlovec: Inter-

comparison of GOES-8 imager and sounder skin temperature retrievals,

<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/24278.pdf>

(6) Weinreb, M. P., J. X. Johnson (nee R. Xie), J. H. Lienesch, and D. S. Crosby, 1989: Destriping GOES images by matching empirical distribution functions, *Remote Sens. Environ.*, **29**, 185

(7) Yoshida, M., N. Sekio, Y. Mitomi, and GLI cal 4th group, 2005: RESTEC reports of GLI stripe noise correction in 2000-2004 (in Japanese) .

(8) NOAA/NESDIS: 'GOES Operations Ground Equipment Interface Specification',

http://www.osd.noaa.gov/gvar/documents/G023_504.02_DCN3_Sect_3.pdf