

# 極軌道気象衛星におけるナビゲーション補正 Navigation Adjustment for Polar Orbital Satellites

亀川 訓男\*  
KAMEKAWA Norio\*

## Abstract

The Meteorological Satellite Center (MSC) introduced ANA (Automatic Navigation Adjustment), which has been developed by MeteoFrance, into AAPP (ATOVS and AVHRR Processing Package) in the navigation processing system for the polar orbital satellites in April 2010. ANA processed 983 out of 1673 orbits (about 59% orbits) by verifying the navigation errors of NOAA-19. In addition, before processing with ANA the average deviation in navigation was 4.87 km; on the other hand, the average deviation in navigation after ANA processing fell to 0.91 km. Therefore, the accuracy of the adjustment of the navigation errors for polar orbital satellites was improved by the implementation of ANA. This article outlines the algorithm used on ANA and reports on the results of navigation adjustment on NOAA-19 data over a 12-month period.

## 要旨

気象衛星センターでは、2010年4月に極軌道気象衛星におけるナビゲーション補正処理において、フランス気象局（MeteoFrance）で開発されたANA（Automatic Navigation Adjustment）をAAPP（ATOVS and AVHRR Processing Package）に導入した。NOAA-19で検証したところ、1673軌道のうち約59%の983軌道でANA処理がなされ、このうち処理前におけるずれ量の平均が4.87km、処理後におけるずれ量の平均が0.91kmとなり、ナビゲーション精度の向上を確認した。本稿では、ANAのアルゴリズムの概要と12ヶ月間におけるNOAA-19のナビゲーション補正結果について報告する。

## 1. はじめに

気象衛星センターでは、米国海洋大気庁が運用するNOAAと欧州気象衛星開発機構が運用するMetopの極軌道気象衛星のデータを直接受信し、処理を行っている。極軌道気象衛星に搭載されている改良型超高分解能放射計(AVHRR: Advanced Very High

Resolution Radiometer)の画像は、海氷解析などのプロダクトや火山灰の監視等で利活用されている。このためAVHRRがもつ高分解能（衛星直下点で約1.1km）な利点を最大限に活かし、ナビゲーション精度を向上させることは、これらのプロダクトの精度向上につながる。

従来の極軌道気象衛星のナビゲーション補正では、

---

\*気象衛星センターデータ処理部システム管理課  
(2011年3月3日受領、2011年8月26日受理)

CMS(Centre de la Meteorologie Spatiale)で開発された Brunei (1991) のランドマーク自動抽出方法をもとに地形データを平行移動する方法(木川, 1993)や、緯度経度からラインピクセルに変更する際の逐次計算手法の変更(吉崎, 2002)などの手法を用いてきた。

しかし、これらの方法は、画像のずれを示すベクトルが1シーン(軌道)内でほぼ同じ傾向をもつことを前提としている。例えば、ある1シーン内において、回転ずれや歪みが原因で北側の領域が東側に、南側の領域が西側にずれているような場合には、従来の方法では精度よく補正することはできない。なぜなら、北側の領域を西側に平行移動してナビゲーション補正すると、南側の領域はさらに西側にずれてしまうことになるからである。また、静止気象衛星のMTSATについても、伊達(2008)は回転ずれや歪みがある場合に位置ずれが残ることを指摘している。

そこで、極軌道気象衛星のナビゲーション精度を向上させるため、フランス気象局(MeteoFrance)で開発されたANA(Automatic Navigation Adjustment)をAAPP(ATOVs and AVHRR Processing Package)に導入した。AAPPの詳細については、村田(2005)を参照されたい。今回導入したANAは、限られた領域のランドマークから衛星の姿勢誤差を推定し、それを衛星画像の投影処理に反映させることで、画像の位置ずれや歪みを補正するソフトウェアである。それゆえ、ANAは、幾何学的な平面補正をする従来の方法と比べ、衛星の姿勢に起因する物理的な変形・歪み・回転を考慮するという点で、より本質的なナビゲーション補正の方法といえる。

本稿ではまず、ANAの特徴とAAPPへの実装にかかる全体の処理の流れを第2章で説明する。ANAのアルゴリズムの概要は第3章で、第4章ではNOAA-19に関するANAのナビゲーション補正結果について紹介する。最後に第5章のまとめと議論にて今後の課題を取り上げる。

## 2. ANAの特徴と全体の処理の流れ

MeteoFranceで開発されたANAバージョン3(Brunei and Marsoin, 2002)の特徴を下記に挙げる。

- バージョン3(執筆時点で最新版)より、AAPPと互換性を有するようになった。ユーザー登録することで無償で利用することが可能である。
- レベル1BのAVHRRデータを入力とする。
- ナビゲーションの計算には、AAPPのモジュールを使用する。
- プログラムはFortran77で記述され、実行モジュールはKorn-shellによって制御される。

上記のように、ANAはAAPPに導入することを前提として配布されている。気象衛星衛星センターでは2010年4月19日に、すでに導入されているAAPPにANAを実装し、ナビゲーション補正処理を開始した。

次に、ANAを実装したAAPP全体の処理の流れを図1に示す。極軌道気象衛星から直接受信したHRPTデータをセンサ別に抽出したあと、以下の処理を行なう(下記の(a)から(d)は、図1の(a)から(d)の処理に対応する)。

- AVHRRデータをレベル1Bに変換(a)
- ANAで衛星の姿勢誤差を算出(b)
- 姿勢誤差から、ナビゲーション補正を行なう(c)
- 位置ずれの量に関する品質チェックを行なう。品質に問題がなく有効であれば、姿勢誤差を反映したナビゲーション補正をレベル1Bデータに上書きする(d)

算出した姿勢誤差は、AVHRRだけでなく、後続のATOVs(AMSU-A, AMSU-B, HIRS, MHS)のナビゲーション補正にも用いられる。ANAで衛星の姿勢誤差が算出できなかった場合や、(d)の品質チェックで有効性がないと判定された場合は、(a)で作成されたレベル1Bデータがそのまま後続の処理で利用されることになる。

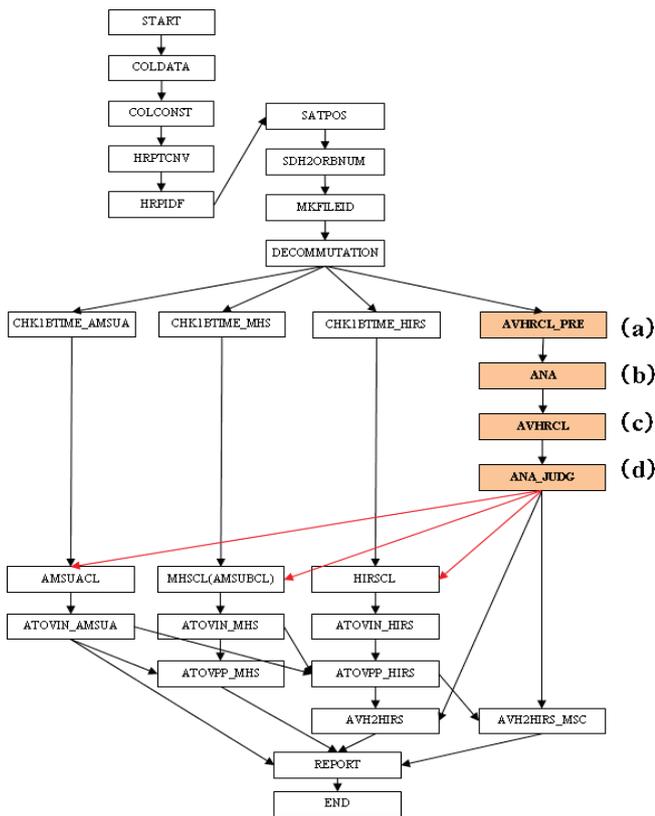


図 1 気象衛星センターにおける AAPP のジョブフロー図  
ジョブ(a)から(d)は、ANA を AAPP に実装する際に改修または追加したジョブである。

### 3. アルゴリズム

#### 3.1 ランドマークの生成

海岸線の地図データから、海岸線上のランドマークを選定する。

AVHRR データと比較する海岸線の地図データには、アメリカ国家地球空間情報局で作成された、25 万分の 1 の分解能を持つ世界ベクトル岸線データ (World Vector Shoreline) を使用した。図 2 に選定した 161 地点のランドマークを示す。気象衛星センターにおける直接受信の範囲内で、おもに岬・湾・島に相当する特徴的な海岸線から、可能な限り多くの地点を選定した。

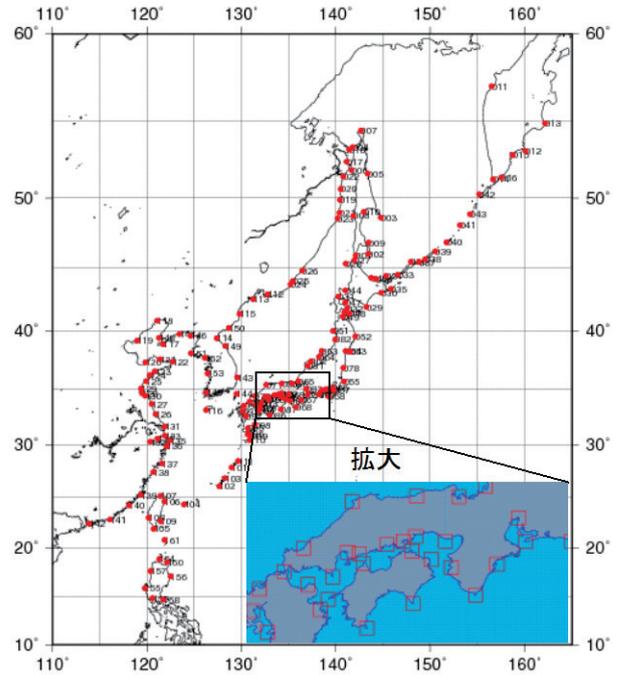


図 2 ANA で参照するランドマーク

気象衛星センターにおける直接受信の範囲内で選定した、161 地点のランドマーク。アメリカ国家地球空間情報局で作成された、25 万分の 1 の分解能を持つ世界ベクトル岸線データ (World Vector Shoreline) を使用して選定した。

#### 3.2 晴天判別

晴天判別には、AAPP で使用している雲マスク処理スキームである Mask AVHRR for Inversion ATOVS 2 (Ardouin et al., 1999) を用いる。

選定したランドマークを中心とする 41×41 画素の領域において、雲量が 30%未満のとき晴天として判別しランドマークを検出する。ランドマークが検出できたこの領域を晴天ランドマーク領域と呼ぶ。図 3 に晴天判別で検出されたランドマークの例を示す。

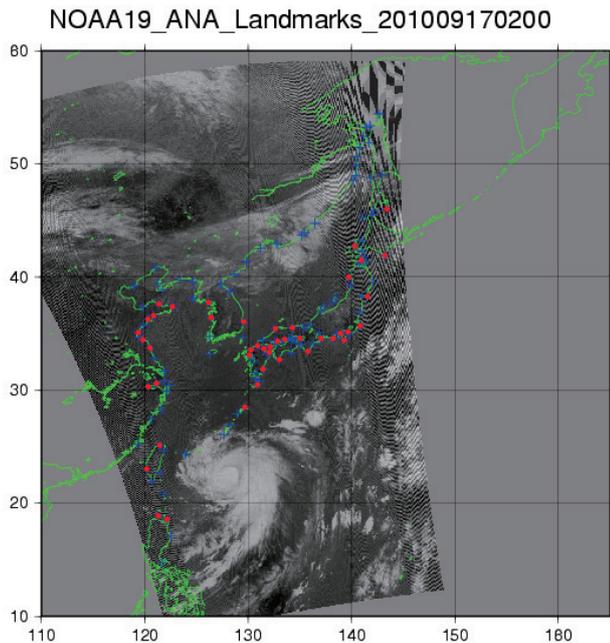


図3 晴天判別で検出されたランドマークの例

晴天判別で検出されたランドマーク地点（44 地点）を赤丸で、検出できなかった地点を青十字で示す。

2010年9月17日のNOAA-19の例で、重ねている画像はAVHRRのチャンネル4（ $10.8\mu\text{m}$ ）の赤外画像である。

### 3.3 海陸画像の作成

晴天ランドマーク領域（ $41 \times 41$  画素）において、二値の画像（陸または海岸線を1とし、海上を0とする）を作成する。

二値画像作成にはAVHRRデータを用いる。昼間は $0.7\mu\text{m}$ 帯（以下R1と記述）と $0.9\mu\text{m}$ 帯（以下R2と記述）の可視・近赤外のアルベドデータを、夜間は $11\mu\text{m}$ 帯（以下T4と記述）と $12\mu\text{m}$ （以下T5と記述）の赤外の輝度温度データを使用する。昼夜判別には太陽天頂角 $\theta$ の値を参照し、以下に海陸判別の詳細を記す。

#### (1) $\theta \leq 83.5^\circ$ (daytime)

指数として下式のとおりNDVIを定義する。

$$\text{NDVI} = (R2 - R1) / (R2 + R1)$$

NDVIの値は陸ほど高く、海で低い。このことから下記の閾値を設定して海陸判別を行なう。

$$\text{陸} : \text{NDVI} \geq -0.1$$

$$\text{海} : \text{NDVI} < -0.1$$

#### (2) $90^\circ \leq \theta$ (nighttime)

輝度温度T4、T5の差分値を求め、陸・海それぞれの観測値の一様性をもとに閾値を設定し、海陸判別を行なう。

$$\text{陸} : T4 - T5 \leq \text{閾値}$$

$$\text{海} : T4 - T5 > \text{閾値}$$

ただし、 $T4 - T5$ のヒストグラム算出時に、陸と海を示すピークが明瞭に二つに分割できなかった場合は、この海陸判別処理は棄却される。

#### (3) $83.5^\circ < \theta < 90^\circ$ (twilight)

(2)を実行して棄却した場合、(1)の処理を行なう。

### 3.4 姿勢誤差の見積もり

ランドマークからのずれを示すベクトルから、衛星の姿勢誤差を見積もる。

主に、AVHRRのナビゲーションのずれは衛星時刻、衛星位置・速度、衛星姿勢、放射測定器の特性に依存(Bordes et al., 1992)し、それぞれの誤差がナビゲーションのずれの原因となる。そして、リアルタイムで行なう直接受信の場合は、常に精度良く算出できるとは限らない。ただし、これらのパラメータのうち、衛星時刻は独立したクロック補正により校正され、衛星位置・速度に関しては観測にもとづいた軌道予測により計算される。また、放射測定器の特性も衛星の打ち上げ前に十分に精査されている。したがって、残りのパラメータである衛星姿勢

を精度よく推定することができれば、ナビゲーションの精度が向上することになる。

晴天ランドマーク領域において海陸画像データと地図データを標本とし、1 画素毎にずらしながら最も相関係数が高い場合の、晴天ランドマーク領域中心からの位置のずれを示すベクトル（以下、ずれベクトルと記す）を算出する。ここでは、ずれベクトルが算出できたランドマークを有効なランドマークと呼ぶ。複数の有効なランドマークから、ずれベクトルを成分ごとに二乗平均平方根で平均し、一軌道全体で衛星の姿勢誤差を一つ決定する。

一つの有効なランドマークから姿勢誤差の 2 成分が求まるので、理論的には有効なランドマークを二つ検出できれば、姿勢誤差が求まることになる。しかし、より広範囲かつより多くの有効なランドマークの検出を行なうことで、特定の地点のずれベクトルの影響に引きずられるのを防ぐことができ、より信頼度の高い姿勢誤差を算出することができる。

姿勢誤差の成分である Yaw、Roll、Pitch を図 4 に示すようにそれぞれ X 軸、Y 軸、Z 軸の座標に対して右方向への回転を正として設定する。衛星固有である姿勢の既定値を衛星座標へ反映させる行列式  $A$  は、下式で表せる (Brunel and Marsoin, 2000)。

$$A = \begin{vmatrix} 1 & pitch & -roll \\ -pitch & 1 & yaw \\ roll & -yaw & 1 \end{vmatrix}$$

$A$  が正則行列のとき、つまり複数の有効なランドマークによって姿勢誤差が算出できたとき、 $A$  の逆行列を乗じることで、姿勢誤差を反映した AVHRR のレベル 1B データを得ることができる。

このように複数の有効なランドマークによって姿勢誤差を求めることで、画像全体にわたって位置ずれ・歪みを適正に補正することができる。

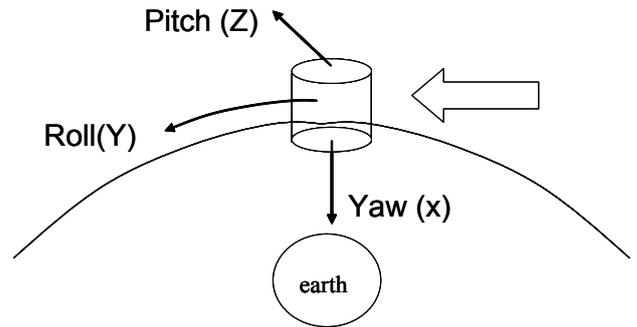


図 4 姿勢誤差

Yaw、Roll、Pitch をそれぞれ X 軸、Y 軸、Z 軸に対して右方向への回転を正とする。白抜き矢印は衛星の進行方向を表す。

## 4. 結果

### 4.1 ランドマーク検出率

姿勢誤差を算出するためには有効なランドマークを検出しなければならない。2010 年の 1 年間について、NOAA-19 のデータをもとに調査を実施した。NOAA-19 の 1673 軌道のうち、約 59% の 983 軌道で有効なランドマークを検出し、ANA によるナビゲーション補正が施された。

そして、有効なランドマークの検出率を昼夜別に区分すると、日中通過する Ascending 軌道では 74%、夜間通過する Descending 軌道では 43%であった。このことは、夜間時の赤外センサ輝度温度 T4、T5 の差分値による閾値調整において、階調差があまりなかったり、海岸線付近が雲に汚染されるなど、理想的に海陸二分割ができなかったことが理由として考えられる。さらに、季節別にみると、夏期（4 月から 9 月）では 52% の検出率で、冬期（10 月から 3 月）では 66% の検出率であった。このことは、アジア域の気候的特徴から、ランドマーク周辺が雲に覆

われている事の多い夏期よりも冬期のほうがランドマークの検出がしやすいためと推察できる。

まとめると、NOAA-19 の有効なランドマークの検出率は、夜間に通過する Descending 軌道より日中に通過する Ascending 軌道のほうが高く、夏期より冬期のほうが高いという結果を得た。

#### 4.2 姿勢誤差の時系列

まず ANA で算出した姿勢誤差の各成分の変動結果を時系列で示し、さらに、その姿勢誤差を利用したナビゲーション補正処理が、実際にライン・ピクセル上でどの程度のずれを補正しているのかを示す。

ANA で算出した NOAA-19 の姿勢誤差 (Yaw, Roll, Pitch) の時系列を図 5 に示す。単位は mrad で、10mrad は約  $0.57^\circ$  に相当する。姿勢誤差の各成分における平均、標準偏差はそれぞれ、

- ・ Yaw 方向      1.67, 2.33
- ・ Roll 方向      0.80, 0.55
- ・ Pitch 方向     -6.14, 2.95

であった。

図 5 から、Pitch 方向の誤差 (青) は他の 2 方向と比べて大きく、軌道ごとの分散も大きいことがわかる。また、各成分の姿勢誤差の自己相関係数は低く、姿勢誤差は軌道帯や時期に依らないことがわかった。つまり、NOAA-19 における姿勢誤差は、調査期間を通じて周期的な変動はなく、Pitch 方向の姿勢誤差がもっともナビゲーション補正に影響していることがわかった。

図 6 は、ライン (緑) とピクセル (赤) のずれの量について、ナビゲーション補正前 (左図) と ANA によるナビゲーション補正後 (右図) の時系列を示したものである。補正前と補正後を比較すると、補正後はライン、ピクセルともにずれの量の平均が Y 軸のゼロ付近にあり、ナビゲーション補正によって補正前よりずれの量が小さくなっていることがわかる。

また、補正前のラインずれの量に着目すると、大部分の軌道に負のラインずれがあることから、ずれは衛星の進行方向とは反対の方向であることがわかる。このことは、Pitch 方向の姿勢誤差がラインずれを引き起こす主因であることを示唆している。

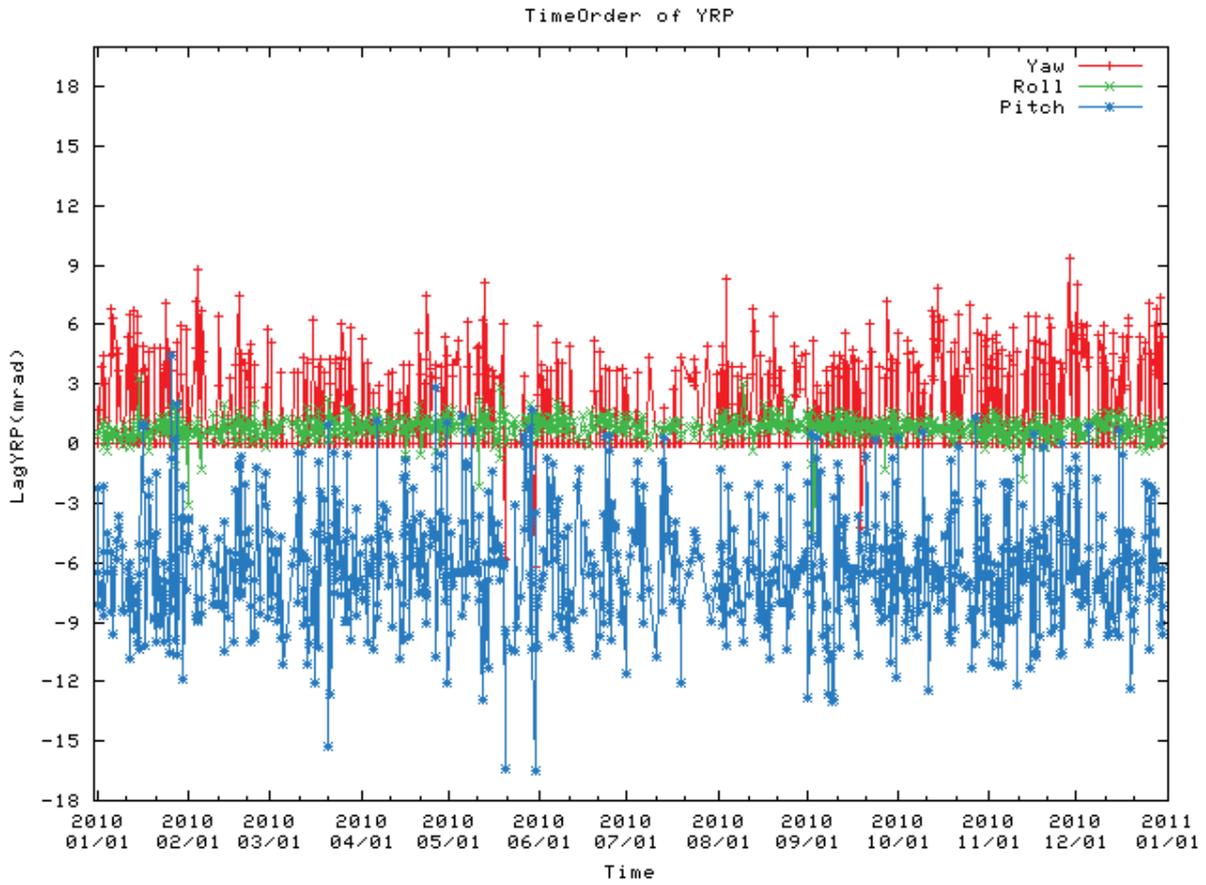


図5 ANAで算出したNOAA-19の姿勢誤差 (Yaw, Roll, Pitch) の時系列

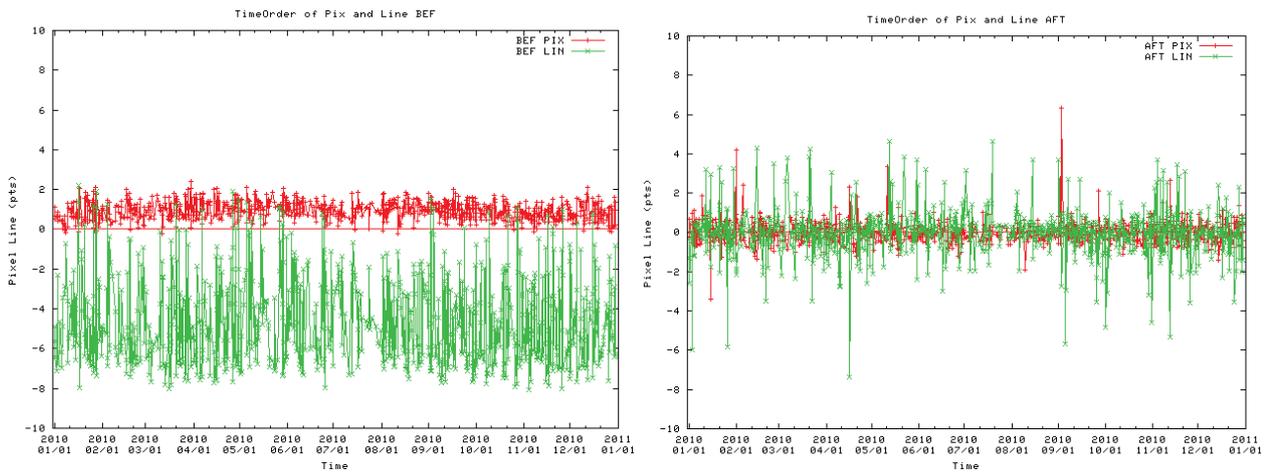


図6 ANAによるナビゲーション補正前 (左図) と補正後 (右図) のライン (緑)・ピクセル (赤) のずれの量の時系列

### 4.3 ナビゲーション補正量

AVHRR とサウンダについて、ナビゲーション補正前と補正後における画像全体のずれの大きさを比較した。

図 7 は、ANA によるナビゲーション補正前（横軸）と補正後（縦軸）の全体のずれベクトルの大きさ(km)をプロットした図である。全体のずれベクトルの大きさは、海陸画像データと地図データの相関係数が最大となる各晴天ランドマーク領域毎のずれベクトルの大きさの平均である。傾きが 45 度の線より下部に分布する青いプロットは、ANA により

ナビゲーションが改善した軌道に相当する。補正前に 3km 以上のずれがある軌道が約 78%を占め、補正後はそのうちの約 67%の軌道が 1km 未満のずれになった。さらに、補正前におけるずれの大きさの平均は 4.79km、補正後におけるずれの大きさの平均は 0.94km であった。

したがって、ANA によるナビゲーション補正により、AVHRR のナビゲーション精度が大幅に改善しているといえる。なお、図 7 の赤色のプロットは、品質チェックで棄却され、姿勢誤差が反映されなかった軌道である。

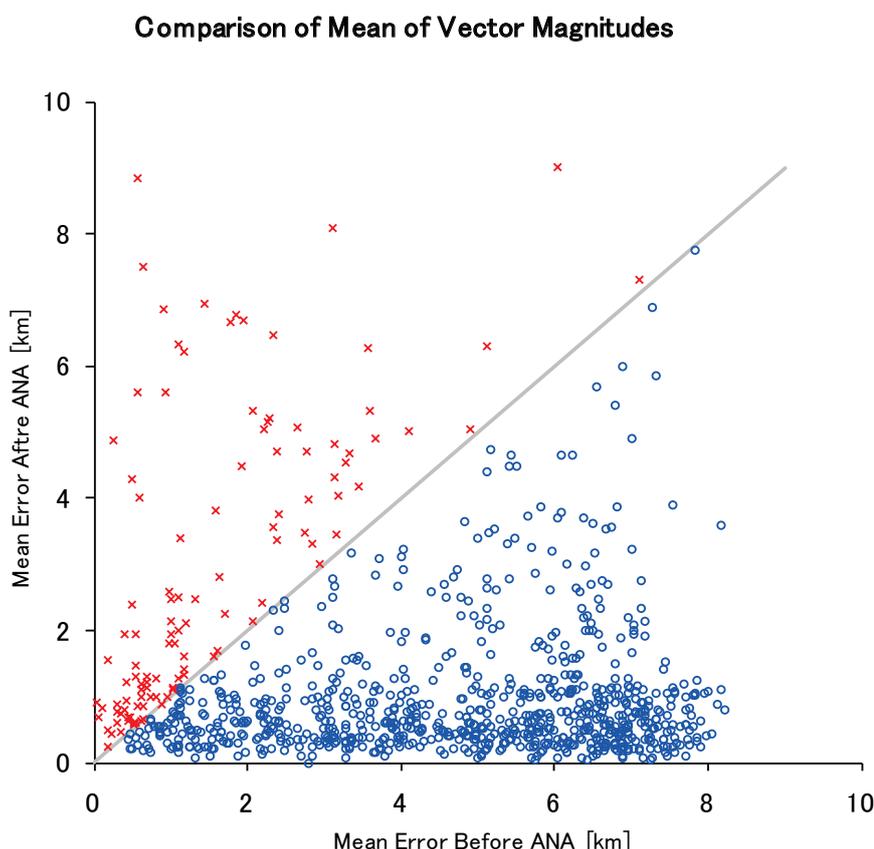


図 7 ANA によるナビゲーション補正前（横軸）と補正後（縦軸）のずれベクトルのノルム(km)

青印は ANA によるナビゲーション補正が施された軌道を示す。赤印は品質チェックで棄却され、姿勢誤差が反映されなかった軌道を示す。

さらにサウンダデータに対しても、姿勢誤差を入力データとしてナビゲーション補正を行なった。NOAA-19/MHS について、数値予報課がインターネット回線で NOAA から取得している全球のレベル 1B データ（以降、単に全球データと記す）と比較を行なった。気象衛星センターで直接受信したデータと全球データについて、瞬時視野角の中心の差 (km) を取り、時系列にしたものを図 8 に示す。ANA によるナビゲーション補正処理を開始した 2010 年 4 月 19 日以降、NOAA によってナビゲーションが施された全球データとの差が小さくなる軌道

があることが確認できる。

以上のことから、AVHRR データから ANA で算出した姿勢誤差が、サウンダデータにおいても全球データと大差ない精度でナビゲーション補正を施すことが可能であることがわかった。また、気象衛星センターではナビゲーションの品質管理を目的に、AP-RARS（村田，2007）に参加している国々が直接受信したサウンダデータに対して、全球データとの比較を行ない、その結果をインターネットで公開している。

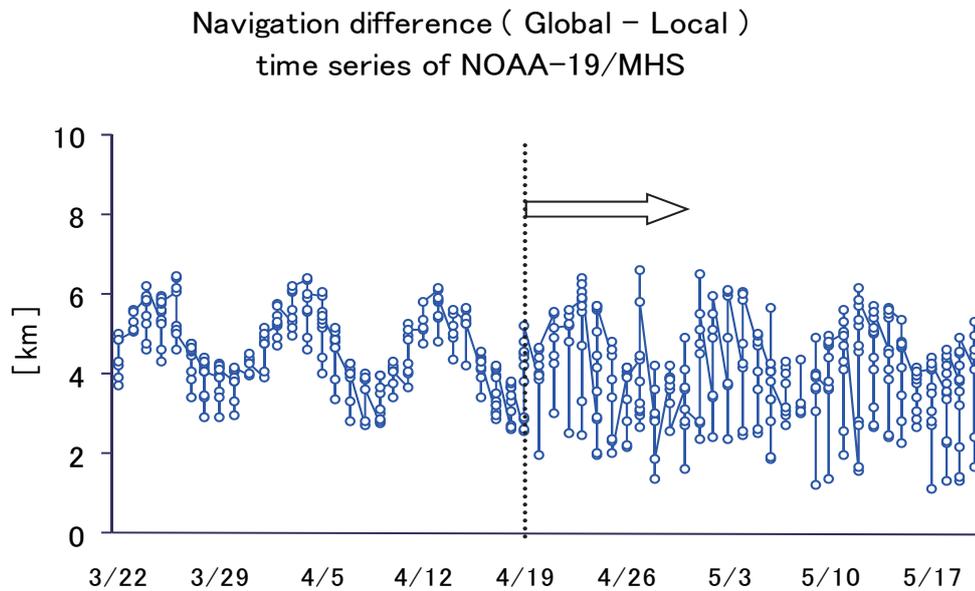


図 8 NOAA-19/MHS における全球データと直接受信データのナビゲーションの差の時系列

#### 4.4 事例

ANA によるナビゲーション補正で AVHRR 画像の位置ずれが減少し改善された事例を挙げる。図 9 は、2010 年 9 月 17 日 0428UTC の NOAA-19 Ascending 軌道における周防灘、瀬戸内海周辺の赤外画像である。図 3 と同じ事例であり、検出した有効なランドマークは 44 地点で、概ね広範囲に分布しているのがわかる。

算出した姿勢誤差は、Yaw 方向で 0.01、Roll 方向で 0.98、Pitch 方向で -6.33 (mrad)であった。ずれの量は、補正前ではライン方向で 0.76、ピクセル方向で -4.40、ずれの大きさは 4.46 (km)であった。そして補正後はライン方向で 0.05、ピクセル方向で -0.54、ずれの大きさは 0.55 (km)であった。周防灘、広島湾の海岸線に着目すると、赤外画像の位置ずれが正しく補正されていることがわかる。

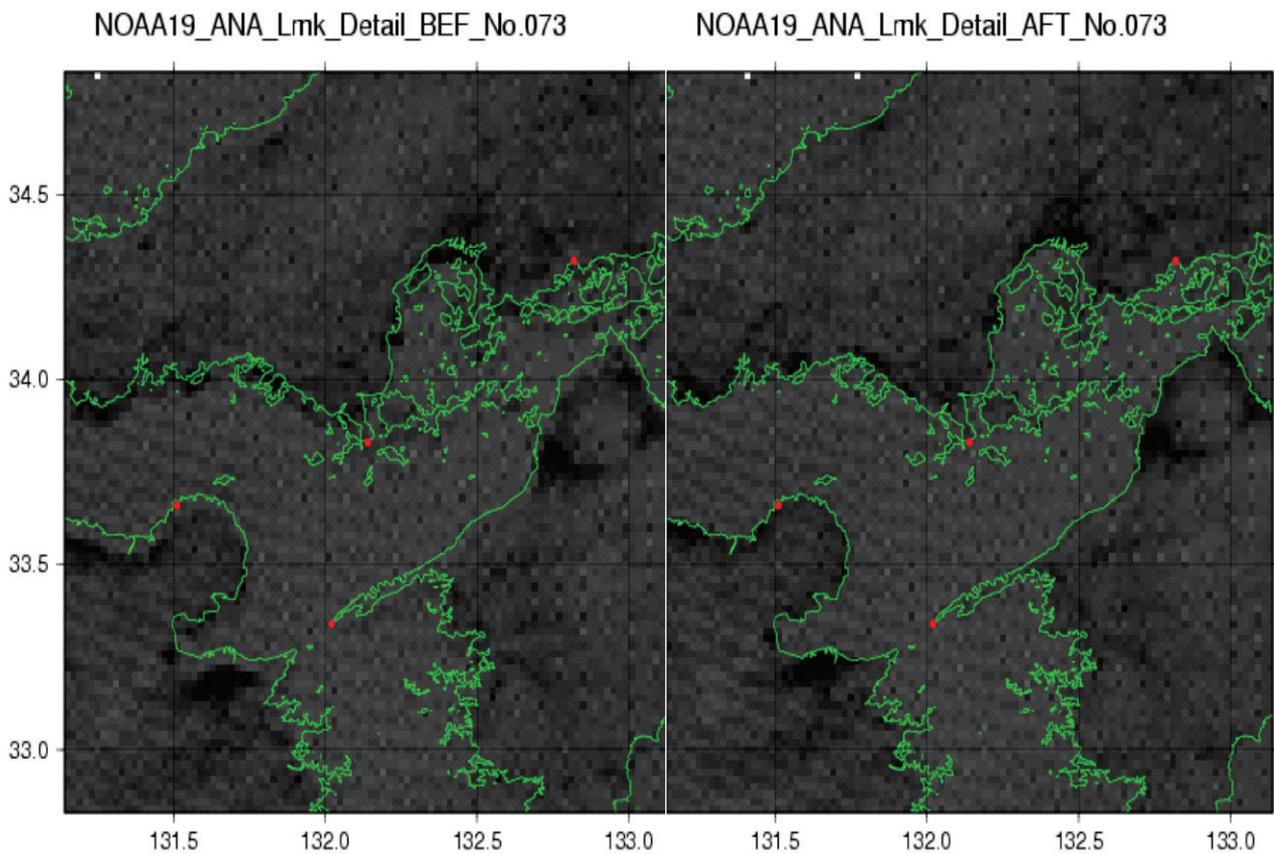


図 9 NOAA-19 Ascending 軌道における 2010 年 9 月 17 日 0428UTC での ANA による補正前 (左図) と補正後 (右図) 赤印は有効なランドマーク地点を示す。図 3 と同じ事例であり、チャンネル 4 ( $10.8 \mu\text{m}$ ) の赤外画像である。

## 5. まとめと議論

極軌道気象衛星のナビゲーション補正において、ANA を AAPP に導入した。その結果、AVHRR のナビゲーション精度が従前より大幅に改善し、さらにサウンダのナビゲーション精度についても改善することが確認できた。これは、AVHRR やサウンダのデータから算出するプロダクトの精度向上にもつながる。

今後の課題としては、ランドマーク選定時における新しい地点の追加や既存の地点の見直しを行ない、有効なランドマークの検出率を高くすることが挙げられる。また、海岸線が少ない洋上や中国大陸上を通過する軌道の場合は、有効なランドマークの検出数が少ないという問題点がある。このような問題点も含め、有効なランドマーク検出できず、姿勢誤差が算出できなかった場合について、過去の履歴から統計的な手法を用いて姿勢誤差を推定することを検討している。

また第 3 章第 4 節において、ANA によるナビゲーション補正では、衛星姿勢の既定値からどの程度の誤差があるかは不明であるものの、他の全てのパラメータが精度よく推定されているとすれば、ランドマークによるナビゲーション誤差は衛星の姿勢誤差に起因していると述べた。実際には、衛星位置・速度の軌道情報であるパラメータに関しては、TBUS bulletin より TLE (Two Line Element) の方がより正確にナビゲーションできる (Marsouin and Brunel, 2006) ことから、気象衛星センターでは TLE を使用することによって、ナビゲーション精度の保持を行なっている。さらに、TLE の軌道情報には閏秒 (2008 年 12 月 31 日) が反映されないにもかかわらず、ANA によるナビゲーション補正が適切に施された。つまり、ANA の姿勢誤差には、時刻誤差も考慮されている。このため、ANA で算出する「姿勢誤差」は、その他のパラメータの誤差を衛星の姿勢誤差に帰着させた、包括的な誤差であることに留意する必要がある。

## 参考文献

- Ardouin L., G. Monnier, L. Lavanant, 1999: Adjustment, validation and implantation of MAIA2 in AAPP software, Technical report
- Bordes P., Brunel P., Anne Marsouin, 1992: Automatic Adjustment of AVHRR Navigation, JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANTIC TECHNOLOGY volume9, 15-27
- Brunel P., 1991: Automatic adjustment of AVHRR navigation, 5TH AVHRR DATA USERS' MEETING PROCEEDINGS, EUMETSAT, EUM 09, 41-46
- Brunel P., Marsouin A., 2000: Operational AVHRR navigation results, International Journal of Remote Sensing, Vol. 21, No. 5, 951-972
- Brunel P., Marsouin A., 2002: Meteo France, ANA-3 User's Manual
- Marsouin A., Brunel P., 2006: AAPP DOCUMENTATION ANNEX OF SCIENTIFIC DESCRIPTION AAPP
- 木川誠一郎, 1993: NOAA 衛星の画像位置合わせの精度向上, 気象衛星センター技術報告, 第 27 号, 1-6
- 伊達謙二, 2008: ランドマーク解析を用いた HRIT データの位置補正, 気象衛星センター技術報告, 第 50 号, 31-50
- 村田英彦, 2005: AAPP による直接受信 NOAA/ATOVS データ処理, 気象衛星センター技術報告, 第 46 号, 33-49
- 村田英彦, 2007: アジア太平洋地域における ATOVS

データ再配信サービス，気象衛星センター技術報告，  
第 49 号，33-53

吉崎徳人，2002：NOAA 衛星用座標変換の変更，気象  
衛星センター技術報告，第 41 号，15-19