

NOAA/AVHRR画像の自動GCP生成

Automatic GCP Generation in NOAA/AVHRR images

原本 欽朗 (Yoshiaki HARAMOTO)*、中野 正務 (Masanori NAKANO)*、
工藤 純一 (Jun-ichi KUDOH)**

キーワード：AVHRR、GCP、時系列解析、幾何補正

Abstract

Time series analysis is one of the important methods for understanding the change of phenomenon. But, the geographical gaps are generally included among satellite image. Therefore, geometric correction of these gaps is needed. Up to now, many discussions about the accuracy of geometric correction have been held and many geometric correction algorithms about NOAA/AVHRR images have been proposed. However, most of them use GCP (ground control point) where a user is required to specify GCP by hand. In this research, special attention is given to this point and automatic GCP creation method is proposed. Required inputs of this method are only an AVHRR image and a digital map. First, a binary image which expresses land and a water area is created by calculating NDVI of an AVHRR image. Next, the boundary of land and a water area is detected from the binary image, and GCP are created from the binary image. Finally, the boundary of AVHRR image and GCP are compared and the AVHRR image is executed geometric correction used the result. No manual process is needed by this proposed method. Therefore, processing time is shortened and a user's labor is mitigated. The result of the geometric correction algorithm using this proposed method shows the mean errors are less than 1 pixel.

1. はじめに

近年特に温暖化や大気汚染、さらには森林火災などにより、地球環境が大きく変化しようとしている¹⁾。

* 東北大学大学院情報科学研究科

** 東北大学東北アジア研究センター

環境問題の対策のためには現状を正確に把握することが必要であり、そのため、地球規模の調査を行う必要がある。しかし、航空機等を用いて調査を行うにはその規模の大きさから莫大な費用がかかるため、非現実的である。そのため、環境評価では、広大な範囲を定期的に効率的に観測することが可能でかつ費用も比較的安価な衛星を用いたリモートセンシングが不可欠となっている。

衛星から得られたデータを時系列的に解析するなら、環境の変化やその特徴を捉えることができる。そのため、時系列解析はリモートセンシングでは重要な手法となっている^{2,3,4)}。

気象衛星 NOAA は、アメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration : NOAA) によって運用されている気象衛星である。この衛星は、雲分布や地表面の温度分布などの観測を目的とする改良型超高分解能放射計 (Advanced Very High Resolution Radiometer : AVHRR) センサを搭載しており、全地球を観測するのに適している。

これまでに、NOAA/AVHRR 画像を使った地球観測の研究がなされてきた。しかし、長期にわたり同一地点の観測を行う場合、観測精度が大きな問題となってきた。特に、気象衛星 NOAA は、毎日公表されている基準位置の情報から衛星の位置を推測しているが、基準位置の情報に誤差が含まれていたり、衛星の姿勢に関する情報がないため、観測位置にずれが生じてしまう。そのため、幾何補正の手法とその精度に関して活発な議論がなされてきた。その多くは、地上基準点 (GCP : Ground Control Point) を用いる方法であり、NOAA の軌道情報 TBUS と GCP を用いて、より正確な衛星軌道パラメータを算出し、軌道補正を用いることでより高精度な幾何補正を実現している。

Bachmann ら⁵⁾は、D. Ho ら⁶⁾によって提案された衛星軌道による方法と GCP とを組み合わせることで、より高速・高精度な方法を実現した。しかし、画像毎に GCP を利用者が指定しなければならず、大量の画像を扱う時系列解析では処理時間が非常に長くなってしまいう問題があった。

Parada ら⁷⁾はこの問題に着目し、テンプレートマッチングによる GCP 自動決定アルゴリズムを提案し、処理時間の短縮を試みた。この方法は同じエリアの画像を大量に処理する場合には、1つの GCP テンプレートを準備するだけで良く、時間の短縮が可能となる。しかし、異なる複数のエリアの画像を処理する場合には、テンプレートをエリア毎に作成する必要があるため、処理時間はさほど短縮されない。

この様に、これまでのGCPを用いた幾何補正法では、利用者が手作業でGCPを指定する必要があった。これは時系列解析を行うには膨大な時間と労力を必要とすることを意味し、現在までに蓄積された過去十数年分の AVHRR 画像データを十分有効活用することは困難である。

本稿では、この点に着目し利用者の手作業を必要としない AVHRR 画像を用いた GCP 自動決定アルゴリズムを開発する。そして、それを利用した自動幾何補正アルゴリズムを提案する。その有用性については、AVHRR 画像に適用して検証する。

2. 提案方法

提案方法は図1に示す流れで行われる。以下、各項目について説明する。

2.1 AVHRR画像

本研究ではNECの受信システム⁸⁾を用いて観測データの受信を行う。観測データは自動的に輝度温度補正をかけられ、画像はメルカトル図法に幾何補正される。しかしこの時点での幾何補正の精度は悪く、異なる期間の画像間で同じ地点が10ピクセル以上ずれている場合があり、時系列解析には適していない。本研究では、この画像を出発点とする。

2.2 衛星天頂角によるデータの選別

AVHRR 画像の分解能は、衛星直下付近で1.1kmである。しかし、衛星天頂角が大きくなるほど分解能は低くなり、衛星天頂角が最も大きくなる観測地点においては走査線方向の分解能は6.5kmと非常に悪くなる。また、衛星天頂角が大きくなると、大気の影響による観測値の誤差が大きくなる。ところが、衛星天頂角が非常に小さい高分解能のデータのみを利用する場合、衛星の直下のデータしか利用できなくなり、地球環境をモニタリングできる NOAA の特性を生かせなくなる。そこで、本手法では大気の影響による誤差が小さく、また、分解能が2 kmとあまり悪くならない衛星天頂角 45° 以内の AVHRR 画像を利用する。これにより、大気の影響による誤差をおさえることができ、分解能のばらつきを小さくする

2.3 海岸線検出

本研究では、地形的特徴を捉えやすい海岸線をGCPとして用いる。しかし、多くのAVHRR画像には雲が含まれており、雲を観測している地域では地表面の観察ができないために、海岸線の検出

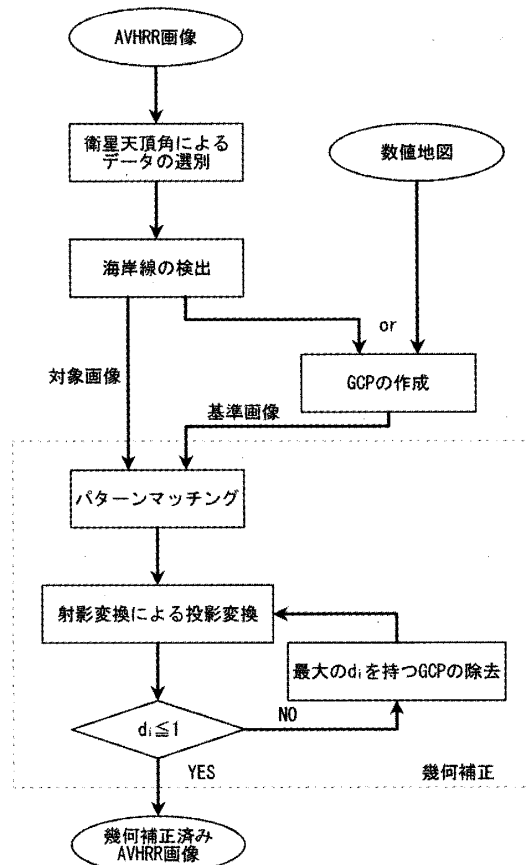


図1 GCPを用いた幾何補正のフローチャート

ができなくなる、そのため、前処理として R. W. Saunders⁹⁾の方法により AVHRR 画像から雲域を除去する。

次に、海岸線の検出を行う。海岸線の検出を行うために、陸域と水域の検出を正規化植生指数標 (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI) を用いて行う。正規化植生指数は式 (1) であらわされる。

$$NDVI = \frac{Ch2 - Ch1}{Ch2 + Ch1} \quad (1)$$

NDVI は、植生の盛んな地点ではチャンネル 2 の分光反射率がチャンネル 1 の分光反射率と比べて非常に大きくなることから、NDVI は大きくなる。反対に海や湖などの水域ではチャンネル 2 の分光反射率が大きくなるため、負の値となる。個々のピクセルの NDVI を計算し、以下の条件で陸域と水域の検出を行い、海岸線画像を作成する。

$$\begin{cases} \text{陸 } NDVI \geq 0.02 \text{ のとき} \\ \text{海 } NDVI \leq -0.1 \text{ のとき} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $NDVI = -0.1 \sim 0.02$ の値を使わないのは、雲域除去で取れなかった煙や霧、また、海水や雪の影響を避けるためである。

最後に、(2) の条件で作成した陸水画像から海岸線検出を行う。検出では、陸のピクセルを探し、隣接するピクセルに水のピクセルが存在している場合、そこを海岸線とした。そして、海岸線を 1、その他を 0 とした 2 値画像を作成する。

2.4 GCP自動生成

幾何補正に使用する GCP を、以下に述べる一連の処理から自動的に生成する。GCP はよく晴れた AVHRR 画像から 2.3 の方法により作成した海岸線の 2 値画像か、数値地図から作成した海岸線の 2 値画像を用いる。

本研究の特徴は、より正確に AVHRR 画像上の位置を特定することができるように GCP には海岸線画像中でもより複雑な形状をした部分を選ぶことができることである。海岸線が複雑な形状であるほど、一定範囲内に含まれる海岸線の長さは長くなる。つまり、一定範囲内に含まれる海岸線の長さがより長い部分ほどより複雑な形状を有し、GCP として適当であると考えられる。こうした特徴部を GCP として登録し、後述する幾何補正を行う AVHRR 画像の海岸線との間で、パターンマッチングが行われる。

GCP は下記のようにして生成される。

1. 海岸線画像中で、一辺の長さ r の正方形の範囲を順に走査する。各範囲において、次の値 P を計算する。

$$P = \sum_{k=0}^{r-1} \sum_{l=0}^{r-1} C(i+k, j+l) \quad (3)$$

ここで、 i, j はそれぞれ正方形の左上の x 座標、 y 座標を表し、 k, l はそれぞれ左上からの x 座

標、 y 座標の変移量を表す。また、関数 C は座標 x 、 y の海岸線画像の値を返す関数である。計算結果の中で最も大きい P の値を持つ場所を GCP とする。

2. 次の GCP を探す前に、GCP が重複することによる幾何補正精度の低下を防ぐため、1 で決定した GCP の範囲を走査範囲から除く。
3. 1、2 の手順を新たな GCP が生成できなくなるまで繰り返す。

以上により GCP の自動生成を行う。GCP 作成の基となった海岸線画像を基準海岸線画像として登録する。

2.4.1 AVHRR画像の GCP 生成例

図2に GCP 生成結果例を示す。(a) はロシア連邦のバイカル湖、(b) は日本の北海道の画像である。これらの画像には、検出した海岸線と GCP を描画している。画像から GCP が海岸線を覆うように画像全外に生成されていることがわかる。

2.5 幾何補正

生成した GCP を用いた幾何補正を以下の手順で行う。

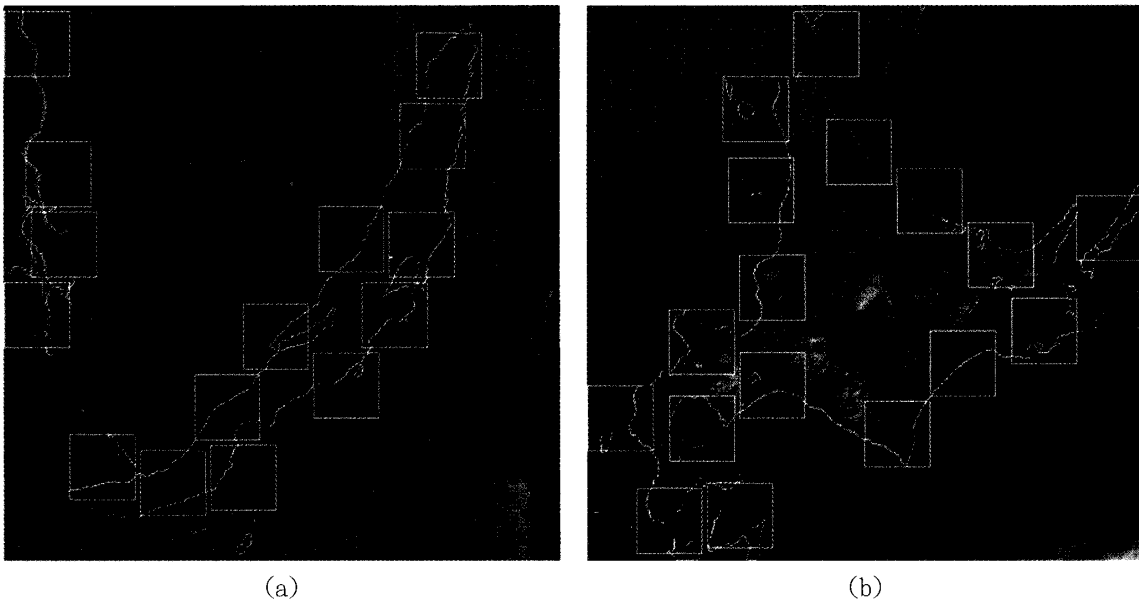


図2 AVHRR画像の GCP 生成例 (a) バイカル湖 NOAA16号 2002年7月22日
(b) 北海道 NOAA16号 2003年6月5日

2.5.1 パターンマッチング

幾何補正する AVHRR 画像から 2.3 を用いて海岸線画像（以下対象海岸線画像）を作成する。その 2 値画像を 2.4 で作成した基準海岸線画像と GCP 付近でパターンマッチングを行う。パターンマッチングは、以下のように行う。

1. GCPとして記録したところで一辺の長さ r の正方形を GCP ウィンドウとする。
2. 対象画像中で GCP ウィンドウの周りの一辺の長さ $2r$ (r は 2.3 と同じ) の正方形の範囲を、一辺の長さ r の走査ウィンドウで順に走査していく (図3)。

3. 走査ウィンドウ内の対象海岸線画像と、基準海岸線画像の GCP ウィンドウが一番よくマッチする部分を探す。
4. マッチングがよかった走査ウィンドウと GCP ウィンドウとの変移量を記録する。
5. 各 GCP について、1～4を行う。

従来パターンマッチングは海と陸の2値画像を用いて行う⁷⁾。しかし、そうした方法では、ウィンドウ内に雲などがかかっていた場合、変移量を計算することが難しい。本研究では境界線をパターンマッチングの対象としているため、走査ウィンドウ内に多少の雲があっても境界線が検出されていれば、効率よく変移量を検出することができる。

2.5.2 投影変換

衛星画像の観測位置のずれは、主に観測した時刻の衛星の位置や向きのずれによるものが大きい。その場合、画像のずれの補正は平行移動や回転では精度の高い幾何補正結果が得られない。そのため、今回は幾何補正の投影変換として2次元射影変換式を使用する。2次元射影変換は、ある平面L上の点P(x, y)が投影中心Oにより、平面L'上の点P'(u, v)として投影される変換をいい、式(4)で表される。

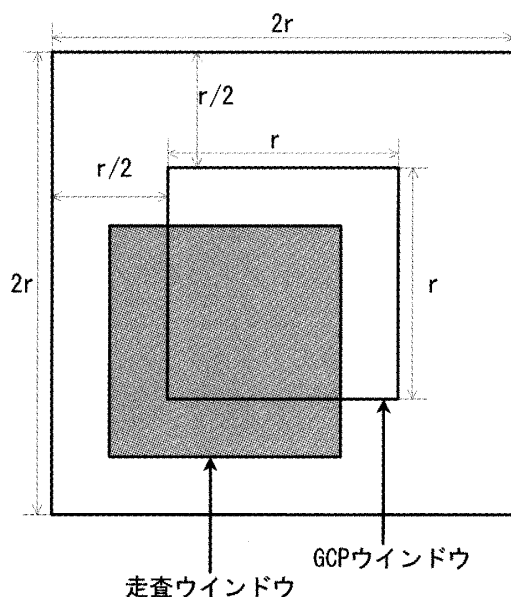


図3 パターンマッチング時の走査ウィンドウと GCP ウィンドウ

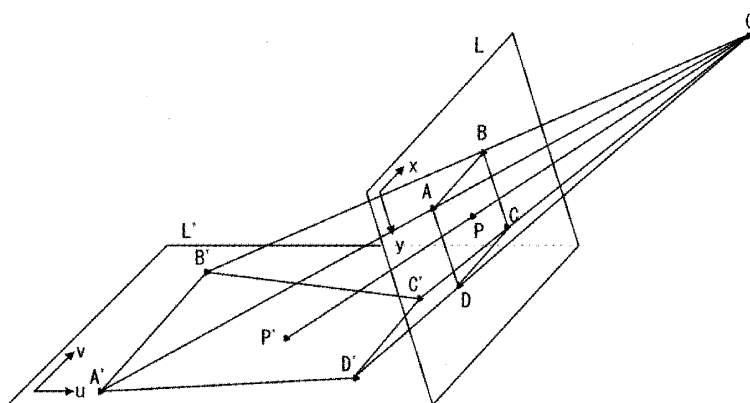


図4 2次元射影変換

$$\begin{cases} f(x, y) = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_7x + a_8y + 1} \\ g(x, y) = \frac{a_4x + a_5y + a_6}{a_7x + a_8y + 1} \end{cases} \quad (4)$$

2. 5. 2 から求めた各 GCP の対象画像における変移量から最小 2 乗法により 2 次元射影変換式のパラメータを算出する。算出したパラメータを用いて各 GCP に射影変換式を適用する。

2. 5. 3 最大誤差を持つ GCP の排除

変換後の対象画像の座標と GCP の座標を比べ、その変移量を (x_{di}, y_{di}) とする。各 GCP について、以下の式を適用する。

$$d_i = \sqrt{(x_{di})^2 + (y_{di})^2} \quad (5)$$

この時点で変移量 d_i が大きい GCP は、画像全体のずれの傾向と異なった方向のずれを持っており、パラメータの精度を低下させている。そこでパラメータ精度改善のため、最も変移量の大きい GCP を除外し、再度射影変換のパラメータを計算する。これを各 GCP の変換後の距離が 1 以下になるまで繰り返す。

最終的に得られたパラメータを用いて画像全体に 2 次射影変換を行う。これにより、基準画像に合わせた AVHRR 画像が作成される。

3. 評 価

提案した幾何補正アルゴリズムの評価を行った。NOAA 16号により観測された、2002年のロシア連邦のバイカル湖を中心とする画像と、2003年の日本の北海道を中心とする画像を使用した。画像サイズは 512 pixel×512 pixel とした。

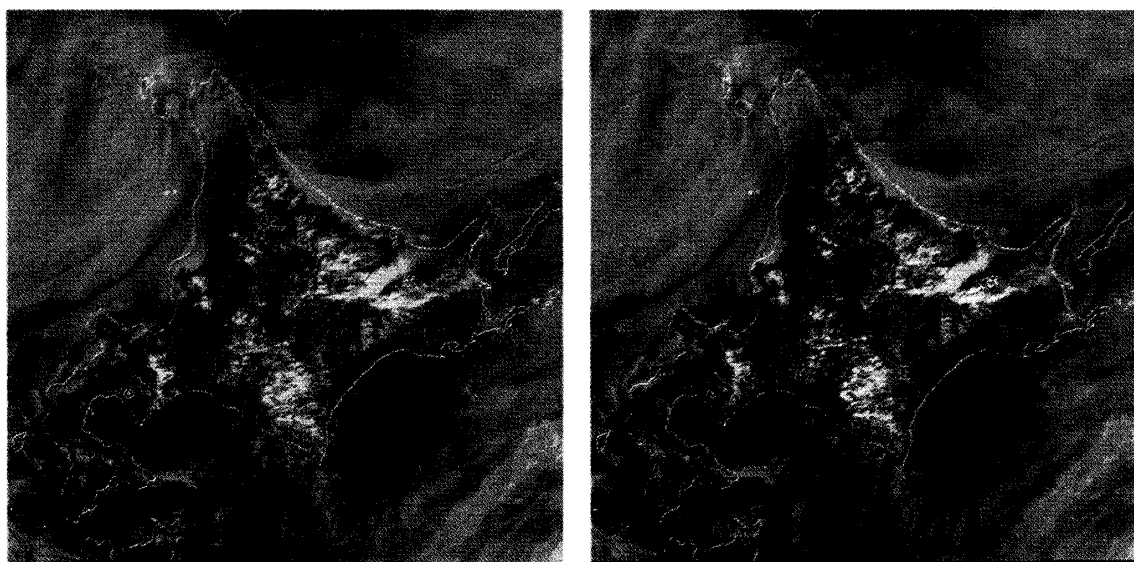
図 5 に GCP を用いた幾何補正例を示す。(a) は GCP を用いる前、(b) は GCP を用いたときである。(a) では画像全体が基準海岸線からずれていることがわかる。(b) では基準海岸線に対して画像上の海岸線が一致していることがわかる。

3. 1 位置評価

各ピクセルの補正精度の検証として、GCP を用いた評価を行った。バイカル湖に関しては 2002年 6 月から 2002年 9 月までのデータを使用し、北海道に関しては 2003年 6 月から 2003年 9 月までのデータを使用した。基準海岸線画像は、2. 4. 1 で作成したのものを使った。位置評価の結果を表 1 に示す。バイカル湖では、平均誤差 0.85、標準偏差 0.43であった。北海道では、平均誤差 0.81ピクセル、標準偏差 0.45であった。以上から、GCP に関しては平均誤差 1 ピクセル以下の非常に高い精度で幾何補正が行われていることが確認された。

表1 幾何補正による位置評価の結果

	登録した GCP の数	有効な GCP の平均	平均誤差	標準偏差	シーン数
バイカル湖	15	9.29	0.85	0.43	119
北海道	17	9	0.81	0.45	85



(a)

(b)

図5 幾何補正例 (a) GCP を用いた幾何補正前 (b) GCP を用いた幾何補正後

3.2 形状面積評価

画像からバイカル湖と北海道の面積を求めることで、幾何補正画像の検証を行った。バイカル湖に雲の全くかかっていない2002年7月から9月の5シーンと、北海道に雲の全くかかっていない2003年6月から8月の4シーンを使用した。

3.2.1 バイカル湖

始めにバイカル湖の面積を解析した結果、得られた面積は31,237.36~31,489.04km²であった。最大面積と最小面積の差は251.68km²であり、この差が求めたバイカル湖の面積に占める割合は1%以下とよい精度が得られている。また、Lake Baikal HOMEPAGE によるとバイカル湖の面積は約31,504km²であり、この数値と比較しても誤差が1%以内に収まっている。

3.2.2 北海道

次に北海道の面積は、解析の結果78,969.44~79,772.88km²で、最大面積と最小面積との差は803.44km²であった。この差が求めた北海道の面積に占める割合も約1%以下とよい精度が得られている。国土地理院発行の全国都道府県市区町村別面積調¹⁾によると北海道の面積は、78,418.38km²であり、この数値と比較しても誤差が1%以内に収まっている。

4. まとめ

本稿ではGCP自動決定アルゴリズムを開発し、それを利用した幾何補正アルゴリズムを提案した。よく晴れたAVHRR画像から海岸線を検出し、それを用いてGCPを自動決定した。また、海岸線のデータを数値地図から得ても、同じアルゴリズムによりGCPを自動決定することができる。そして、作成したGCPを基に、他のAVHRR画像を自動的に幾何補正することができた。

提案したアルゴリズムはGCPを自動的に生成することができる。そのため、利用者がGCPを指定したり、テンプレートを作成したりする必要がない。これにより、処理時間や手間の大幅な効率化が期待される。また、本手法は、平均誤差1 AVHRR以下と高い精度を実現していることも確認できた。以上からGCP自動生成は、大量のNOAA/AVHRR画像を時系列的に処理する上で非常に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 環境庁編, “環境白書(各論)平成12年度版”, ぎょうせい, 2000
- 2) Barbosa, P.M., Gregoire, J., and Pereira, J.M.C., 1999, An Algorithm for Extracting Burned Areas from Time Series of AVHRR GAC Data Applied at a Continental Scale, *Remote Sensing of Environment*, 69, 253-263
- 3) Tucker, C.J., Slayback, D.A., Pinzon, J.E., Los, S.O., Myneni, R. B., and Taylor, M.G., 2001, Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999, *International Journal of Biometeorology*, 45, 184-190
- 4) Lucht, W., Prentice, I.C., Myneni, R.B., Sitch, S. Friedlingstein, P., Craner, W., Bousquet, P., Buermann, W., and Smith B., 2002, Climatic Control of the High-Latitude Vegetation Greening Trend and Pinatubo Effect, *Science*, 2002, 296, 1687-1689
- 5) Bachmann, M., and Bendix, J., 1992, An improved algorithm for NOAA-AVHRR image referencing. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 16, 3205-3215
- 6) Ho, D., and Asem, A., 1986, NOAA AVHRR image referencing. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 895-904
- 7) Parada, M., Millan, A., Lobato, A., and Hermosilla, A., 2000, Fast coastal algorithm for automatic correction of AVHRR image. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 11, 2307-2312
- 8) NEC, 衛星データ受信装置 取り扱い説明書(ソフトウェア編), 1996
- 9) Sanders, R. W., 1996, An automated scheme for the removal of cloud contamination from AVHRR radiances over western Europe. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 7, 867-886

- 10) Tucker, C. J., Justice, C. O., and Prince, S. D., 1986, Monitoring the grasslands of the Sahel 1984–1985. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1571–1581
- 11) 国土地理院, 全国都道府県市区町村面積調, 2003