4　衛星画像の実利用における大気・地形効果補正の必要性とその課題

Atmospheric and Topographic Effect Correction for Practical Use of Satellite Images

飯倉善和・岩手大学工学部
Yoshikazu IIKURA・Fac. Eng、Iwate University
TEL & FAX 019-621-6481
E-MAil iikura@cis.iwate-u.ac.jp

概要：宇宙開発事業団から提供される衛星データは、システム補正以上の処理はほとんど行われていない。応用分野での研究者にとって、各種補正が行われていない衛星データの利用価値は低く、かといって高次の処理は負担が大きい。これが、衛星データの利用を制約する大きな要因になっている。本論では、大気・地形効果の補正に不可欠な数値標高モデルを用いた精密幾何補正と放射伝達モデル（６Ｓ）の利用方法を説明するとともに、簡便で再現性のある大気・地形効果補正法（修正コサイン法）を紹介する。さらに、太陽入射照度が小さい場合の取り扱い、ヘイズや雲などの大気の擾乱の補正、センサーに起因する絶対校正やスキャンストライプの補正などの課題についても検討を加える。

1. はじめに

応用分野における定量的な解析に耐えうる情報を衛星データから取り出すためには大気補正を含めた放射量補正などの前処理をできるだけ精密に行う必要がある[1,2]。

放射量補正において検討すべき問題には、（１）センサーの感度（校正係数）[3]、（２）センサーの系統的雑音[4]、（３）大気の影響（エアロゾルや雲の影響を含む）[5]、（４）地形の影響[6]などが考えられる。この中で、（３）、や（４）に関する問題は、精密な幾何補正（地形起伏による歪みの除去などを含む）を行った上でないと、評価できない[7]。また我が国のように地表面の起伏が大きい場合には地形の影響と大気の影響は不可分な関係にある。

これらの問題の多くは古くから知られており[8]、標高データや大気の放射伝達特性などの情報が得られれば、原理的には解決することが不可能ではない。しかし、数値標高モデル（ＤＥＭ）[9]や放射伝達シミュレーション（６Ｓ）[10]などが手軽に利用できるようになったのはごく最近のことであり、多くの衛星画像処理では考慮されていないのが現状である。

本論文では、性能の高さと継続性から現在最もよく利用されているランドサットTMについて、これらの問題を指摘し、具体的な解決方法を検討する。

２．現状における幾何補正とその問題点[11]

幾何補正では、系統的な誤差を取り除くためのシステム補正と地上との対応を正確なものとするための精密幾何補正の２つの段階が必要となる。

システム補正[12]では、衛星の軌道、ミラーによる走査、地球の自転の影響などが取り込まれるだけでなく、地図座標系への投影も行われる。ただし、この時の幾何補正の精度は保証されていないため、実用上はさらにＧＣＰ（地上制御点）を用いた精密幾何補正が必要となる。衛星の姿勢、ミラー走差の非線形性、往復スキャンのプロファイルの違いなどは専門的な知識と細部にわたる情報を必要とする。我が国では、宇宙開発事業団がシステム補正後のデータを標準処理データとしてユーザに提供している。

標準処理データで補正されない系統的な誤差要因の中に、大気中の光の屈折や地形の起伏がある。前者については、ランドサットTMの場合、その影響が非常に小さい（観測の両端で約３０cm）。

地形起伏の影響は正射投影画像を作成する場合に問題となる。ランドサットＴＭでは、観測の両端で走査方向に起伏１０００ｍに対して約１４０ｍ生じる。

正射投影画像を作成するには、適切な空間解像度の数値標高モデル（座標変換と内挿法の問

題）と対象とする画素の衛星直下点からの距離が必要となる。衛星直下点からの距離は、本来システム補正の際に計算された値を使うべきものであるが、現在のところ一般には利用できない。そこで著者は原画像における欠損データの軌跡の特徴を利用することを提案している。

精密幾何補正に必要なGCPの地図座標の同定[15]にはディジタイザーが用いられる。５万分の１の地図を用いる場合、５ｍに相当する0.1mm程度の入力誤差は避けられない。制御点の入力誤差も考えれば、地図座標の誤差は１０ｍ程度となる。画像座標は、ディスプレイ上に画像を拡大表示することにより同定する。画素単位に同定する場合には、最善を尽くした場合の最悪で0.5画素であり、TMの場合には１５ｍになる。

岩手県を対象に行ったランドサットTMの精密幾何補正では、標高を考慮しない場合、ライン方向の標準誤差が0.659画素、ピクセル方向の標準誤差が0.927画素であった。また、標高を考慮した場合のピクセル方向の標準誤差は0.710となった。これらの値は、推定した誤差とほぼ一致している。

ところで、人手を利用したGCPの取得には、この様な誤差が避けられないだけではなく、再現性が保証されないという問題もある。また、大量のデータを処理する場合には時間的・経済的な問題も生じる。したがって、精密幾何補正の自動化は衛星データの実利用にとって避けられない問題であると考えられる。著者らは数値標高モデル[14]や海岸線データ[15]を用いたＧＣＰの自動マッチング方法を検討中である。

３．センサーの特性に起因する誤差[16]

ランドサットTMは機械走査型の放射計で、熱赤外を除く各バンドに１６個の検知素子が使われている。標準処理データでは検知素子間の感度の違いによるストライプノイズを避けるため、検知素子毎のヒストグラムを利用した相対補正が適用されている[12]。

検知素子に入射した光はその強さ（放射輝度）に応じて電気的な信号を発生する。この信号が８ビットのディジタル信号（DN）にAD変換されて記録される。したがって、物理量（放射輝度）を求めるには、検知素子の感度（校正係数）を知る必要がある。

ランドサットＴＭでは、打ち上げ前に衛星データと放射輝度値の関係（校正係数）が調べられて公表されている。しかし、打ち上げ後にはセンサーの劣化のため校正係数に変化が生じる。このため、標準のランプ（３個）を組み合わせて点灯したときのディジタル値（校正用データ）も衛星データの合間に記録されている。これが参照信号である。点灯しているランプの組み合わせから放射輝度がわかる[17]。

標準処理データでは、参照データを用いた補正が行われ、宇宙開発事業団による打ち上げ前の校正係数から放射輝度が計算できるようになっている。しかし、標準ランプの劣化や集光部の汚れの変化などは考慮されていない。また１９９６年以前のデータに対してはオンボードの校正データによる補正が取り込まれている保証はないため注意が必要である[18]。

さらに校正係数の求め方としては、反射率が既知の地表面対象物の放射輝度値とＤＮから推定する方法がある。これには大気などの影響の補正が必要となるなど課題も多く、どの程度信頼できるかは検討を要する[19]。

センサーが輝度の高い雲などの上を走査したとき、走査線上の両側にスキャン単位の横縞状の模様が現われる。検知素子（ＡＤ変換器の電源コンデンサ？）の過渡応答特性が原因であるといわれているが[20]、その性質はいまだ明らかにされていない。応答特性の解析には検知素子毎の解析が必要となるため、未補正のデータを使用する必要がある。

過渡応答が原因であるとすれば、雲のあるなしにかかわらずに衛星データはその影響を受けていることになる。昼間のデータにおいて、ＤＮがスキャン方向にたいして減少(droop)し、夜間のデータではわずかに増加（rise)する傾向が見られることが報告されている[21]。また、ゼロレベルの変動もストライプノイズの原因であるが、これについてはバックグランドレベル（校正ランプ輝度データの直前あるいは直後）の測定データを利用することで解決される[22]。しかし、宇宙開発事業団から提供される標準処理データにこの補正が組み込まれているかどうか明らかではない。

この他にセンサーに起因する雑音には、量子化ノイズや周期性ノイズなどが指摘されている[23]。

これらの系統的雑音については、ランドサッ

ト5号の打ち上げ直後に多くの論文で解析され、レベルシフトなど一部の問題に対しては有効な対策が示された。しかし、スキャンストライプについては、有効な対策が示されないまま、多くの研究プロジェクトが終了してしまったようだ。１９８６年以降に、画像処理ではなく、計測に係わる問題としてこの問題を解析した論文は発表されていない。

４．　大気・地形効果の補正[24)]

衛星に達した光の強度(放射輝度)には地表面の情報（地形や反射率など）だけではなく、大気の影響も含まれている。大気と光の関係には空気分子によるレイリー散乱、エアロゾルによるミー散乱、水蒸気やオゾンによる吸収があり、放射伝達方程式を用いて定式化することができる。しかし、雲や濃いヘイズがある場合には地表面の観測ができないため、地域によっては利用可能な光学センサーのデータは著しく制限される。

可視・反射近赤外の光に対する放射伝達方程式から、衛星上の放射輝度値Ｌｓは、対象ピクセルへの放射照度Io、パスラディアンスLpおよび背景放射輝度Lbを用いて、次のように定式化することが出来る。

$$Ls = Ts(z)\,\rho(x,y) Io + Lp(z) + Lb(z)$$

ここでｚは標高、ρは地上物体の反射率Ｔsは対象から衛星までの透過率、sはセンサー天頂角を表わす。さらにIoは次のように分解できる。

$$Io = EoT\,\theta(z)\cos\beta + Ed + Ee$$

Ｔθは太陽から対象物までの透過率、θは太陽天頂角、βは太陽の直達光線と地表面の法線ベクトルのなす角度(太陽入射角)、Eoは大気圏外における太陽放射照度である。すなわち、(２)式の第１項は太陽からの直達日射照度、第２項Ｅｄは天空日射照度Edであり、地表の反射率が０の場合の値とする。地表面で反射された光の一部は、大気中で散乱され地表面に戻る(トラッピング効果)。トラッピング効果は再帰的であり、無限級数で定式化（Chandrasekhar's relation）される。したがって、平坦で均一な反射率をもつ地表面を対象とする場合、直達日射照度と天空日射照度に加えて、次の環境放射照度Eeを考慮する必要がある。

$$Ee = (EoT\,\theta(z)\cos\beta + Ed)\ \rho\ /\ (1-\rho S)$$

ここで、Ｓは地表からみた天空の反射率である。

6Sは可視・反射赤外に特化した放射伝達方程式を用いて、衛星データの大気効果を計算するコンピュータプログラムである。代表的なセンサーの応答関数や標準大気モデル（エアロゾルモデルを含む）が組み込まれているため、非常に使いやすいものとなっている。上記の衛星センサーでの放射輝度や透過率を成分毎に計算してくれる。さらに、平坦な地形に対しては、衛星の放射輝度を地表の分光反射率に変換する簡単な方法も提供されている。著者らはNOAA/AVHRRに対してLOOKUP Table を用いた標準的な大気補正方法を開発している[25)]。

地形に起伏がある場合には、さらに問題が難しくなる。すなわち、標高によるパスラディアンスや透過率の変化、地形効果（太陽入射角の変化)、周囲の地表面からの光の反射、天空放射が遮られる効果などを考慮する必要がある[6)]。すなわち標高が高くなれば、透過率は増加し、パスラディアンスは減少する。さらに太陽入射角βが画素毎に異なる。ただし、太陽高度が高い場合には後の２つの要因の影響はそれほど大きくはない。ただし、ＤＮから放射輝度値への変換（校正係数）やエアロゾルの設定（視程やタイプ）などには、標準的な方法は確立されていない。

著者らが提案する方法（修正コサイン法）[24)]では、パスラディアンスや透過率を標高の一次関数として表し、かつ天空放射照度や環境放射照度を無視した以下の定式化に従う。

$$DN' = (DN - (a + b \times 標高))\ /\ T\cos\beta$$

ただし　透過率　$T = c - d \times 標高$

係数は６Ｓのシミュレーション結果だけからではなく、衛星画像の影の部分や補正の結果をフィードバックしながら求める。これは、絶対校正やエアロゾルの不確定性をさけるために必要である。これまで、夏期の大気の状態がクリアな岩手県のランドサットＴＭに適用したところ満足すべき結果が得られている。

５．大気の擾乱に対する対策

光学センサを用いた衛星リモートセンシングは、地上が雲におおわれている場合役に立たない。雲がどの程度あるかは、クイックルックによって調べることができるが、薄い雲（巻雲や飛行機雲）や薄いヘイズはクイックルックでは識別できない。したがって、せっかく入手した

衛星データは、それらの補正を行わなければ利用できないということがある。

5．1　高層雲の影響の解析[26]

衛星画像における雲の存在は、気象学的な見地からは重要な情報源となる。とくにランドサットＴＭは高い分解能と熱バンドの存在により、雲の高さや形状を計測する手段として有効であることが報告されている[27]。しかし、地表面を計測する立場からは雲の存在は外乱であり、できればその影響を取り除きたい[28]。とくに巻雲や飛行機雲のような薄い雲の場合には地上からの反射光の一部は雲を透過して衛星センサに達していることが画像から確認できる。

高層雲の影響の除去に関して重要な点が２つある。一つは高層雲の存在や厚さが温度バンドから推定できるということである。２つめは高層雲の影響はそれ自体が衛星画像にあらわれるだけではなく、影を作ることによっても影響を与えるという点である。影を正確に補正するには、雲の高度、影の部分の標高、太陽入射角など、衛星画像の精密な幾何補正と適切な数値標高モデルが必要となる。

以上の点を考慮することにより、高層雲や飛行機雲の影響をかなり除去することができる。

5．2　ヘイズの除去

ヘイズを同定するのに、タセルドキャップ[29]が有効であることが報告されている。Richter[30]はタセルドキャップの第４因子をヘイズ領域の同定に利用しているが、補正を行うにあたっては、ヘイズ領域とそれ以外の領域とのDNのヒストグラムを同一化させる方法を用いている。一方、Lavreau[31] はタセルドキャップを直接用いた補正法を提案している。

著者が精密に幾何補正を行った岩手県のランドサットＴＭ合成画像にLavreauの方法を適用したところ、視覚的にはヘイズのとれた良質の画像を得ることができた。

現在、６Ｓを用いて、この方法の妥当性を大気の放射伝達特性から検討している[32]。これまで、土地被覆により、補正の度合いがかなり異なることが分ってきた。したがって、定量的な補正を行うためには、放射伝達モデルの利用を含むより厳密な解析が必要と考えられる。なお。６Ｓではエアロゾルの鉛直分布が固定され、標高の影響を取り入れることができないため、その部分のプログラムを書き換えた。

６．まとめ

本論文では、衛星データの実利用における各種補正の重要性とその対策を検討した。とくに精密幾何補正は、大気・地形効果補正（太陽入射照度など）や各種主題図との重ね合わせにとって必要不可欠である。精密幾何補正済みのデータが利用者に提供されることが望まれるが、ＧＣＰの自動取得や座標変換や内挿法の標準化が必要となろう。

大気・地形効果補正において解決すべき問題には幾何補正に加えて

(a) DNから放射輝度値への絶対校正
(b) センサーに起因する雑音
（スキャンストライプなど）
(c) 大気モデル（エアロゾルを含む）、
(d) 放射伝達シミュレーション
（環境放射照度の計算を含む）、
(e) 地表面における反射特性のモデル化
（BRDFを含む）

等があり、多くの未解決な問題を含んでいる。

しかし、未解決な問題があるからと言って、大気・地形効果補正なしに衛星データを利用するのは、起伏の大きい地域では意味をなさない。できる範囲で良質の衛星データあるいは標準的な処理方法を提供していくことが、実利用を促進する上で重要と考えられる。

なお、太陽高度が高い季節で大気の状態が安定している場合には、オフセット成分（パスラディアンスなど）の除去と太陽入射照度の補正の組み合わせ（修正コサイン法）により、相対的にはかなりの補正が現在でも期待できる。

７．参考文献

1) 角田、飯倉，白沢、横山（1997）北上高地における風食被害地の環境特性の解析，日本リモートセンシング学会第22回学術講演会論文集、pp.99-100
2) 佐藤、飯倉，横山（1998）修正コサイン法を用いた衛星画像の地形効果補正による土地被覆分類の改善，日本リモートセンシング学会第25回学術講演会論文集、pp.109-112
3) K.Thome et al. (1997) Radiometric Calibration of Landsat, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.63, No.7, pp.853-858

4) H.H.Kieffer et al. (1985) Intraband Radiometric Performance of the Landsat Thematic Mappers, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.51, No.9, pp.1331-1350
5) D.Tanre et al. (1979) Atmospheric Modeling for Space Measurements of Ground Reflectance, including Bidirectional Properties, APPLIED OPTICS, Vol.18, No.21, pp.3587-3594
6) C.Proy et al. (1989) Evaluation of Topographic Effects in Remotely Sensed Data, Remote Sensing of Environment, Vol.30,pp.21-32
7) K.I.Itten and P.Meyer (1993) Geometric and Radiometric Correction of TM Data of Mountainous Forested Areas, IEEE Trans. onf Geoscience and Remote Sensing, Vol.31, No.4, pp.764-770
8) A.P.Colvocoresses (1970) ERTS-A Satellite Imagery, Photogrammetric Engineering, Vol.35, pp.79-86
9) 村上広史 (1995) 国土地理院数値地図の精度に関する考察、情報地質、Vol.6, No.2, pp.59-64
10) E.F.Vermonte et al. (1997) Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S; An Overview, IEEE Trans. onf Geoscience and Remote Sensing, Vol.35, No.3, pp.675-686
11) 飯倉、横山 (1998) ランドサットTM画像の正射投影とその評価、写真測量とリモートセンシング、Vol.37, No.4, pp.12-22
12) 宇宙開発事業団 (1986) 『地球観測データ利用ハンドブック－ランドサット編・改訂版－』、リモートセンシング技術センター
13) R.Welch and E.L.Usery (1984) Cartographic Accuracy of LANDSAT-4 MSS and TM Image Data, IEEE Trans. onf Geoscience and Remote Sensing, Vol.32, No.3, pp.281-288
14)飯倉、横山 (1999) 数値標高モデルを用いた衛星画像の地上制御点の同定、写真測量とリモートセンシング、Vol.37, No.6, pp.12-22
15)飯倉、杉田、横山 (1999) 海域の画素内占有率を用いた衛星画像の幾何的精度の評価、写真測量とリモートセンシング　(投稿中)
16) 飯倉、横山 (1998) 衛星画像のラジオメトリックな外乱に関する考察、日本リモートセンシング学会第２４回学術講演会論文集、pp.65-68
17) K.R.Castle et al. (1984) In-Flight AbsoluteRadiometric Calibration of the Thematic Mapper, IEEE Trans, Vol.-22, No3, pp.252-255
18)土田ほか(1998) 北海道・雪原域を用いた可視・近赤外域センサの Reflectance-Based Method による放射輝度軌道上絶対校正、日本リモートセンシング学会誌，Vol.18, No.1, pp.12-31
19) P.N.Slater et al. (1986) Absolute Radiometric Calibration of the Thematic Mapper, SPIE, Vol.660, pp.2-8
20) W.A.Malila et al. (1984) Characterization of LANDSAT-4 MSS and TM Digital Image Data, IEEE Trans, Vol.GE-22, No3, pp.177-191
21)M.D.Metzler and W.A.Malila (1985) Characterization and Comparison of Landsat-4 and Ladsat-5 Thematic Mapper Data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.51, No.9, pp.1315-1330
22) J.M.Murphy et al. (1984) Revised Radiometric Calbration Technique for LANDSAT-4 Thematic Mapper Data, IEEE Trans, Vol.GE-22, No3, pp.243-251
23) R.Burnstein et al. (1984) Analysis and Processing of LANDSAT-4 Sensor Data Using Advanced Image Processing Technique and Technologies, IEEE Trans, Vol.GE-22, No3, pp.192-221
24) 飯倉，横山 (1999) ランドサットTM画像の大気および地形効果の補正，日本リモートセンシング学会誌　(印刷中)
25)雷、小出、飯倉、横山 (1998) 6Sコードによる AVHRR画像データの大気効果補正の検討，日本リモートセンシング学会誌、Vol.18, No.2, pp.51-64
26)飯倉，佐藤、横山 (1999) 熱バンドを用いた衛星画像における薄い巻雲の影響の除去，日本リモートセンシング学会誌　(印刷中)
27) Y.Inomata et al. (1996) Estimation of Cirrus and Stratus Cloud Heights using Landsat Imagery, J. Applied Meteorology, Vol.35, pp.483-502
28) B.Chanda and D.D.Majumder (1991) An Iterative Algorithm for Removing the Effect of Thin Cloud Cover from LANDSAT Imagery, Mathematical Geology, Vol.23, No.6, pp.853-860
29) E.P.Crist and R.C.Cicone (1984) A Physically Based Transformation of Thematic Mapper Data-TM Tasseled Cap, IEEE Trans, Vol.GE-22, No3, pp.256-2263
30) R.Richter (1996) Atmospheric Correction of Satellite Data with Haze Removal including a Haze/Clear Transition Region, Computers & Geosciences, Vol.22, No.6, pp.676-681
31) J.Lavreau (1991) De-Hazing Landsat Thematic Mapper Images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.57, No.10, pp.1297-1302
32)飯倉，佐藤、横山 (1998) 衛星画像におけるヘイズの影響の解析，日本リモートセンシング学会第25回学術講演会論文集、pp.127-130