MODIS データを用いた合成画像作成手法の開発

Development of compositing algorithms for MODIS data

Abstract: This paper will focus on the evaluation of compositing algorithms of MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). The atmospheric effects of channel 1-7 were investigated by radiative transfer simulation using 6S code over variety of aerosol and climatic conditions. As a result, blue wavelength (channel 3) was found to be the most subject to atmospheric effects and its apparent reflectance values were higher than other channels. However, this method were subject to select cloud shadows as a optimum values. To avoid this problem, the combination of minimum blue constrained with thermal channel criteria was newly developed based on the assumption that the cloud shadow is cooler than normal pixels. These two approaches, to say, the minimum blue criterion (MinB) and the minimum blue and maximum thermal criteria (TMinB) were tested along with five approaches including the maximum NDVI criterion (MaxN), the maximum temperature criterion (MaxT), the NDVI criteria followed by minimum scan angle (NMinS), the thermal criteria followed by minimum scan angle (TMinS) and the NDVI and thermal criteria followed by minimum scan angle method (NTMinS), to improve on the heritage of Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Then the 10-day composite images over Japan main islands were generated using the above mentioned seven approaches. The comparative performances of these seven methods were judged from five criterion including cloud screening, satellite zenith angle, smoothness of the image, snow/ice identification and cloud shadow. It is concluded that the TMinB method produces fairly consistent results with possible refinements and more sophisticated methods to escape from cloud shadows.

1 はじめに

1.1 MODIS データにおける合成画像の必要性

MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) は，米国航空宇宙局 (NASA) が中心となって進めている地球観測システム計画 (EOS) の旗艦衛星 Terra および Aqua に搭載されているセンサで，高度 705km の軌道を周回しながら地球環境を観測している．MODIS は，約 2,330km の走査幅を持ち，1 日に 2 回の頻度で同一地点を観測するという点で NOAA AVHRR シリーズの後継機として位置づけられており，空間分解能，スペクトル分解能，軌道情報，衛星上での輝度校正，における性能が向上している (Justice, 1998)．陸域分野では，洪水の監視，農作物の生育状況，森林伐採，雪氷の監視などに期待が寄せられている．しかし，雲や広域の観測に起因する観測条件の不均一性などが障害となって，地上の情報を高頻度に得ることは困難である．これらの影響をできるだけ回避する方策の一つとして，Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) を中心として行われてきた合成画像作成がある．これは，1 週間から 1ヶ月程度の比較的短いある一定期間を設定し，その間での最適観測画素を代表値として選び出す考え方である (雷, 2001).

1.2 既存の合成画像作成手法とその問題点

代表的な合成画像作成手法には次のようなものがある．(Holben, 1986) らは，Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) が雲や起伏に起因する影の値を常に低下させる効果を持つことに着目し，候補データのうち最大の NDVI をもつ画素を代表値とする最大 NDVI 法 (MaxN) を提案した．この手法は NDVI が応用範囲の広い植生指標であり，適用が容易であることからよく用いられている．しかし，この方法は観測角の大きい画素を検出する傾向が見られるため，実質的な空間分解能が低下してしまうばかりか，代表画素に含まれる大気効果は相対的に大きくなる問題がある．(Cihlar, 1994) らは，雲の温度は地表面が見えている正常な画素よりも温度が低いという事実に着目し，候補データのうち熱チャンネルにおいて最大の温度を有する画素を代表値とする最大温度法 (MaxT) を提案した．この手法は MaxN と比較して海域においても良好な結果を与えるが，観測角が大きい画素を選択し，砂漠や雪氷で雲除去が正常に行われないという問題がある．(Cihlar, 1997) らは，衛星の観測角が小さいときには地表の空間分解能の劣化が抑制され，植生における二方向性反射の影響が小さいという事実に着目し，候補画素の最大 NDVI の 0.8 倍以上の値を持つものを選び出し，その中で衛星観測角

が最小となる画素を最適値として選択する NDVI 制約付き最小走査角法 (NMinS) を提案した．(Stoms, 1997) らは同様の考え方を熱チャンネルに適用し，候補画素のうち温度が一定条件を満たすものを選び出し，その中で衛星観測角が最小となるものを選択する温度制約付き最小走査角制約法 (TMinS) を提案した．(雷, 2001) らは，これらすべてを組み合わせ，NDVI と温度値がある一定条件を満たすものを選び出し，そのなかで衛星観測角が最小となるものを選択する NDVI ならびに温度値制約付き最小走査角法 (NTMinS) を提案し，東京 (東大)，モンゴル (千葉大)，沖縄・黒島 (国立環境研)，タイ・バンコク (アジア工科大学院) で受信した全東アジアを網羅する合成画像作成に利用した．

MaxN および MaxT に代表される合成画像作成手法は，AVHRR において開発されてきたため，赤，近赤外の 2 チャンネルおよび熱赤外チャンネルを利用している．一方，MODIS は可視赤外の空間分解能が 250 m から 500 m と高く，赤，近赤外，熱赤外に加えて，青，緑，短波長赤外にも観測チャンネルを有している．従って，AVHRR と同様の合成画像作成手法をそのまま引き継ぐことができると共に，これら以外のチャンネルを有効に活用した新しい手法が利用できる可能性がある．MODIS データの提供元である NASA では，MOD09 シリーズにおいて可視赤外の合成画像が提供されているが，全地球的に評価および検証がなされているわけではない．

1.3 本研究の目的

本研究では，日本周辺における MODIS データを用いた合成画像作成手法の開発を行い，データセットを作成することを目的とする．まず，陸域観測用のチャンネル 1 から 7 における大気放射伝達シミュレーションを行い，様々な大気条件における大気効果を調べる．その結果から，青チャンネルが最も大気効果を受けやすい事実に着目し，最小青チャンネル法 (MinB) を導く．さらに，この手法の欠点であると考えられる雲の影を選択する可能性を防ぐため，同時に温度に拘束条件を与えた温度拘束条件付き最小青チャンネル法 (TMinB) を導く．次に，これら 2 つの手法に加えて，現在でも AVHRR を中心として最もよく用いられている 5 手法を用いて合成画像データセットを作成する．最後に，複数の判断基準に従って各手法の評価を行い，本研究で提案する手法の有用性を検討する．

2 解析手法

2.1 合成画像作成の要件および評価基準の設定

合成画像を作成するためには，処理画像が適切に幾何補正されており，時系列データとして重ね合わせる必要がある．筆者らはこれまで MODIS の幾何補正精度に関する検討を加えた結果，500 m空間分解能で 1 画素以内の精度が得られることを確認した (竹内, 2003a)．陸域観測に有効な空間分解能と計算処理可能なデータサイズを考慮した結果，全チャンネルを 500 m の解像度で合成画像を作成した．

同一地点を一定期間に観測した候補データの中から，最適値となるデータが満たす用件は，次に示すようなものがある．まず，雲，雲の影，受信に伴う局所的なノイズが除去されている必要がある．次に，衛星天頂角が小さく直下に近い状態で観測されていることが好ましい．衛星天頂角が大きくなると空間分解能が劣化するため，ミクセル化および植生における二方向性反射の影響で，地表面の土地被覆情報の信頼性が低下するのみならず，幾何補正精度にも影響を及ぼすことが指摘されている (Van Leeuwen, 1999)．また，AVHRR では難しいとされてきた雲と雪氷の判別が達成されている必要がある，以上の理由から，雲除去，衛星天頂角の大きさ，画像の滑らかさ，雪氷と雲の判別，雲の影，の 5 点を合成画像作成の評価基準とした．

2.2 放射伝達モデルによる放射伝達過程の解析

光学センサで取得されたデータにおいて避けることのできない大気効果について検討を行った．大気効果は，大気モデル，エアロゾルモデル，太陽-観測点-センサの相対的な位置関係，標高などで大きく変動する．本研究では，衛星の可視赤外の放射伝達過程を解析するプログラムとして 6S コードを用いた．6S は，太陽-観測点-センサ間の光の放射伝達過程をトラッピング効果を考慮して詳細にモデル化しており，標高についても考慮さ

表 1 6S コードを用いた放射伝達シミュレーションに必要な入力変数の一覧.

項目	変数
日時	6 月 15 日午前 11 時 (日本時間)
太陽天頂角・方位角	14.85 度・144.91 度
衛星天頂角・方位角	0 度から 50 度まで 5 度間隔・180 度に固定
センサーの種類	MODIS のチャンネル 1, 2, 6
視程	0 から 50km まで 5km 間隔
大気モデル	中緯度夏型
エアロゾルモデル	大陸型，海洋型，都市型
標高	0 から 5000m まで 500m 間隔
地表での反射率	0 から 0.5 まで 0.1 間隔

れている (Vermote, 1999)．また，代表的な衛星搭載センサ (HRV, MSS, TM, AVHRR, MODIS, POLDAR, SeaWiFS など) の応答関数があらかじめ登録されており，可視近赤外の放射伝達過程をコード化したものとしては現在最も広く用いられている．

6S コードに必要な入力変数は，観測日時，太陽天頂角・方位角，衛星天頂角・方位角，センサの種類，大気の光学的厚さ，大気モデル，エアロゾルモデル，対象物の標高，地表での反射率，の 9 点である．表 1 に，本研究で用いた変数の具体的な値を示した．日時は，一年のうちで太陽高度が最大となる時期を選び，東大生研の緯経度 (35.65N, 139.67E) から太陽の位置を算出した．なお，6S コードは二方向性反射関数を与えることにより，複数のモデルをシミュレートすることができるが，本研究ではそれを考慮せず，地表面は均一なランベルト面であるという条件の下で計算を行った．

2.3 MODIS のデータ処理

使用した MODIS データは，2001 年 5 月から 2002 年 6 月に東大生研で受信した日データ合計約 600 シーンである．International MODIS/Airs Processing Package (IMAPP) ソフトウェアにより処理したレベル 1b データ (HDF フォーマット) を使用した．まず，走査角の大きな画素に見られる bow-tie と呼ばれる画素の補正を行った (橋本, 2002)．次に，レベル 1b データ内に格納されている変換係数を用いて，チャンネル 1 から 7 は大気上端反射率 (%) に，チャンネル 31 と 32(10-12μm のスプリットウィンドウに相当する熱赤外チャンネル) は温度値 (Kelvin) に変換し，太陽天頂角，衛星天頂角，太陽と衛星の相対方位角を算出した．最後に，最近隣画素法を用いて等緯度経度座標系に再配列を行い，北緯 30 度から 50 度，東経 124 度から 146 度の領域 (4800x4800 画素に相当) を切り出した．なお，一連の処理は，東大生研が提供する Web サービスにて行った (竹内, 2003a).

次に，AVHRR で培われた MaxN, MaxT, NMinS, TMinS, NTMinS および, 後に導く MinB, TMinB を加えた計 7 種類の手法を用いて合成画像を作成した．候補画素から最適値の選択は次のように行った: 1) 一連の画像データを観測日時順に並べる．2) 先頭の画像と次の画像のふたつを比べ，各選択基準により最適値を選択し，最適画像を作成する．3) 最適画像と次の画像を比べ，最適値を更新する．4) 3) の過程を最後の画像までくり返し，最終的な最適画像を得る．観測日時で隣接する 2 つの画像を遂次比較する利点としては，1) 経時変化が少ないため土地被覆以外の変化要因 (大気状態，衛星-対象-太陽の位置関係) を選択基準とすることができる，2) アルゴリズムのコード化が容易である，3) 不慮に計算が終了しても途中から続けることができる，等が挙げられる．

3　解析結果

3.1　放射伝達モデルによる放射伝達過程の解析

まず，放射伝達モデルによる放射伝達過程シミューレーションの解析結果を示す．図 1 は，横軸に衛星天頂角を，縦軸に大気上端での見かけ反射率と地表面反射率との差を示している．地表面反射波の大気中での反射過程は，波長と衛星天頂角の特徴から次のようにまとめることができる．

3.1.1　波長依存性

衛星上での見かけの反射率と地表面反射率との差は，波長帯によって異なり，MODIS のチャンネル 1 から 7 のうちでは，チャンネル 3(青) における差が最も大きい．大気がみかけの反射率を増大させる効果をもつ範囲は，波長によって異なり，チャンネル 3 では地表面反射率が 0.4 までは見かけの反射率を増大させる効果を持つ．これは，光の波長よりも散乱粒子の方が十分に小さい場合に起こるレイリー散乱を空気分子が行っていることを示している．レイリー散乱は，波長について連続的に起こり、波長の短い光ほど強く散乱されその強さは波長の 4 乗に反比例することが知られている．この散乱過程によって短波長の青い光が最もよく散乱され，見かけの反射率が大きくなったことが確認された．

3.1.2　衛星天頂角依存性

衛星天頂角が大きくなると相対的に大気の厚さが大きくなるため，見かけの反射率と地表面反射率との差が大きくなり，大気効果は増大する．大気効果の最も大きいチャンネル 3 において，見かけの反射率が地表面反射率の大きさを下回るのは 0.4 の時であった，筆者らは，陸域を構成すると考えられる代表的な 12 の土地被覆を選定し，MODIS の陸域観測チャンネルにおける反射率を算出した (竹内, 2003b)．その結果，チャンネル 3 において最も高い反射率を持つのはコンクリートでありおよそ 0.3 であった．従って，これらに含まれる通常の土地被覆を考える上では，大気効果は見かけの反射率を常に増大させ，チャンネル 3 において最大値を持つと考えてよい．一方，地表面での反射率が 0.1 以上の土地被覆においては，見かけの反射率が小さくなるほど衛星天頂角も小さくなった．しかし，地表面での反射率が 0.1 以下の土地被覆においては，見かけの反射率と地表面反射率との差が最も小さくなるのは，衛星天頂角がおよそ 22 度であった．従って，反射率が 0.1 より小さい画素においては，大気効果の小さい画素を選択しても，衛星天頂角が必ずしも 0 度に近づくことにはならないことに留意されたい．

3.2　青チャンネルと熱チャンネルを併用した最適画素選択法の導出

以上のシミュレーション結果から，最も大気効果を受けやすいチャンネル 3 が最小値を取るとき，その画素における大気効果は最も小さいと考えることができる．また，地表面での反射率が 0.1 以上の土地被覆については，空間分解能の劣化を抑制する効果も同時に期待できる．以後この手法を最小青チャンネル法 (MinB) と呼ぶ．この考え方は，衛星上で観測される分光放射輝度が，直達日射照度，天空日射照度，周囲の反射による放射照度，背景放射輝度，パスラディアンス，の 5 点から構成されているという通常の反射過程の下に成立する (Sandmeier, 1997)．しかし，地表面の起伏あるいは雲に遮られることにより，観測点が影になっているときは直達日射による反射過程が存在しない．この時，影画素の反射率は，観測点の代表値として本来与えられるはずの反射率よりも大幅に低くなる．従って，MinB を用いて合成画像を作成すると，影が最適画素として選択される可能性が高いと考えられる．一方で，観測画素が雲によって全体もしくはその一部分が覆われているときは，本来選択すべき雲のない地表面状態より大きな反射率を示すと考えられるため，青チャンネルの最小値を選択することにより雲の影響を回避することができる．

ところで，MaxT や TMinS のように熱チャンネルを利用することにより，衛星天頂角が大きい画素が選択されやすくなるものの，影を効果的に取り除くことができると報告されている (Cihlar, 1994)．これは，観測点で本来選択されるべき画素の温度は，影のときの温度よりも高いからであると考えられる．従って，MinB と MaxT とを併用することにより，衛星天頂角が大きい画素が選択される可能性が高まるものの，影を除去

する効果を取り込むことができると考えられる．以後，この手法を輝度温度拘束条件付き最小青チャンネル法 (TMinB) と呼ぶ．

3.3 合成画像の評価

MaxN, MaxT, NMinS, TMinS, NTMinS に加えて，先に導いた MinB, TMinB の計 7 手法を用いて 1 年分の 10 日間合成画像 (36x7=252 枚) を作成した．以下では，1 年間の合成画像のうち，3 月，6 月，9 月，12 月をそれぞれ春夏秋冬の代表結果として考え，これらについて，雲除去，衛星天頂角の大きさ，画像の滑らかさ，雪氷と雲の判別，雲の影，の各判断基準について検討を行った．各評価基準ごとに，7 種類の画像に対して相対的な順位をつけ，最も評価が高いものから評価が低いものの順に 7 点から 1 点をそれぞれ与えた．

3.3.1 雲除去

まず，雲除去について考察した．作成した合成画像のうち，2001 年 6 月 1 日から 10 日の観測データの解析結果を図 2 に示した．これによると，NDVI を用いた MaxN, NMinS, NTMinS による合成画像では，海域において雲処理が正しく行われなかったことが直ちにわかる．これは，水域における NDVI が負の値となり，雲の NDVI 値よりも小さかったため，雲除去機能が喪失したものと考えられる．同様の傾向が，3 月，9 月，12 月の画像においても確認された．一方，陸域では，俯瞰的にはどの手法を用いた解析結果においても，おおむね良好な結果が得られたが，局所的には，大きな違いが見られた．それは，水田のように植生や土壌に対して水の構成比率が卓越している地域であった．

そこで，2001 年 6 月の合成画像から水田を多数含んでいる利根川流域を切り出して図 3 に示した．目視による判読の結果，利根川沿いに見られる比較的規模の小さい湖水，水の張った水田，河川と陸域の境界，における雲の判別が最も良好に行われていたのは MinB であった．3 月，9 月，12 月の画像においては，水田に水は張っていないため，6 月の画像とは判断基準が異なっていたが，MinB は他の手法と比較して年間を通じて良い結果を与えた．次に良好な結果を示したのは，青チャンネルと熱チャンネルの両方を使用した TMinB であった．これは，熱チャンネルを用いたため，その分だけ雲除去の性能が低下したものと考えられる．次に，良い結果を与えたのは，熱チャンネルを用いた MaxT，これに衛星天頂角の制限を与えた TMinS であった．これら熱チャンネルを用いた手法では，衛星天頂角が大きい画素や水域で雲が誤って選択されていた．NDVI を用いた NTMinS, NMinS, MaxN では，青チャンネルや熱チャンネルを用いた手法と比較して，雲除去の性能は大きく低下した．NTMinS は，水の張った水田における雲の除去が NDVI を用いた 3 手法の中では良好であった．これは，熱チャンネルを用いているため，その分だけ雲除去の性能が向上した結果であると考えられる．NMinS は，水田における雲の除去は NTMinS に劣るものの，霞ヶ浦周辺の雲除去が MaxN に比べて正しく行われていた．MaxN は，水の張っている水田での雲除去が機能しておらず，他の季節においても水域全般で雲除去の能力が低いこととから，評価としては最低の 1 点を与えた．

3.3.2 衛星天頂角の大きさ

次に，衛星天頂角の大きさについて考察した．衛星天頂角の増加とともに画素の大きさは指数関数的に増加することが知られている (Van Leeuwen, 1999)．直下の画素に対する相対的な大きさ (スキャン方向 × 衛星進行方向) は，15 度で 1.08×1.04 倍，30 度で 1.40×1.14 倍，45 度で 2.44×1.52 倍，60 度で 4.34×2.38 倍となる．従って，衛星天頂角がおよそ 40 度に達すると，直下点と比較して空間分解能が半分に低下するため，選択される画素の衛星天頂角は，この角度以下であることが望ましい．

そこで，解析範囲全体に渡って衛星天頂角の頻度分布を算出して図 4 に示した．全季節を通して衛星天頂角が小さい画素を選択したのは TMinS であった．また，NMinS は 3 月と 12 月の観測データにおいて TMinS より劣っていたものの次に良好な結果を示した．これは，どちらの手法も衛星天頂角に拘束条件を設けたためであり，当然の結果であると考えられる．次に，良い結果を示したのは MinB であった．放射伝達シミュレーションで導いた結果によると，反射率の低い土地被覆において衛星天頂角が必ずしも大きくならないことが示されたが，それと整合するように，反射率の低い海域において衛星天頂角が大きい画素が選択される傾向にあった．次に，良い結果を示したのは TMinS であった．これは，青チャンネルに加えて熱チャンネルを併用することが，衛星天頂角の大きい画素を選択する作用を及ぼしたものと考えられる．次に良い結果を示したの

は熱チャンネルを用いた MaxT であったが，海域において衛星観測角が大きい画素を選択する傾向にあった．NTMinS は，衛星天頂角に拘束条件を設けたにも関わらず，全季節において衛星天頂角が大きい画素を選択した．MaxN は，陸海全域において衛星天頂角が大きい画素を選択しており，全季節において最低の 1 点を与えた．これは，(Cihlar, 1997) らが指摘しているのと同様の結果であった．

3.3.3 画像の滑らかさ

次に，画像のなめらかさについて考察した．画像の滑らかさは，データ取得時のセンサ-対象物-太陽の位置関係，大気の状態，データ取得時期の違いにより大きく影響される．目視判読によると，NDVI を用いた MaxN, NMinS, NTMinS を用いて作成した合成画像全般において，周辺の画素から推測して明らかに不自然なばらつきが認められた．取得日時の異なるデータから合成画像を作成した場合，なるべく同一のシーンから取得された画像のほうが，不自然なばらつきが少なく画像が滑らかであった．このことから，画像の滑らかさは，衛星天頂角の分布とほぼ一致していると考えた．そこで，画像の滑らかさに最も顕著な違いが見られた 2001 年 9 月の合成画像における衛星天頂角の空間分布を図 5 に示した．

画像全体に渡って最も滑らかであったのは，青チャンネルを用いた MinB であった．図 5-(f) に示した画像の左半分は，同一のシーンから選ばれており，シーン間の連結部においては，衛星天頂角が比較的近いデータが選択された．これは，全季節を通して同様の結果であった．次に，良好な結果を示したのは熱チャンネルを用いた TMinB であり，画像左下部の海域において大きく不連続の部分が見られた他は，連続的な画像が得られた．次に，良好な結果が得られたのは熱チャンネルを用いた MaxT であった．画像右上部の陸海の境界領域において不連続な部分がみられた．NDVI を用いた MaxN, NMinS, NTMinS では，画像全体に渡ってゴマ粒状の不連続領域やパッチ状の領域が多数確認された．これら 3 手法の中でも，NMinS は陸域において比較的不連続領域が少なかった．MaxN は，海域において不連続な領域が多発していた．NTMinS は，全 7 手法のうちでは最も多くパッチ上の領域が確認されたため，最低の 1 点を与えた．

3.3.4 雪氷と雲の識別

次に，雪氷と雲の識別について考察した．雪氷を含む領域として図 2 の北海道およびオホーツク海に着目した．雪氷においては，チャンネル 6 の反射率は雲のおよそ倍程度にまで大きくなることが知られている (Hall, 2001)．従って，雪氷と雲の識別には，チャンネル 6 画像を用いた目視判読を行った．なお，9 月の解析結果においては，雪氷があると考えられる北海道や中央アルプス地域が，いずれの合成画像においても雲で覆われていたため，評価からは除外した．目視による判読の結果，9 月を除く全季節において雲と雪の区別が良好に行われていたのは TMinB と MinB であり，これらの 2 手法の間にほとんど差は見られなかった．次に良好な結果が得られたのは NTMinS と MaxT であった．これらの 2 手法は，陸域においては TMinB および MinB と大差がなかったものの，海上の雪氷の判別において劣っていた．次に良い結果を示したのは TMinS であった．これは，雪氷が識別されている画素は衛星観測角が大きい傾向にあったが，衛星観測角の制約条件により本来選択されるべき画素が除外されてしまったものと考えられる．NMinS は，ほとんどの領域において雲と雪氷の判別ができておらず，画素が雲に覆われていた．最も雲に覆われている割合の高かった手法は MaxN であり，雪氷と雲の識別能力は全手法の中で最も低かった．

3.3.5 雲の影

最後に，雲の影について考察した．雲の影も雲と同様に決定的な誤差要因になるにも関わらず，これまでに低空間分解能データ (250m から 1km 程度) における雲の影について検討を加えた報告は少ない (Simpson, 2000)．AVHRR や MODIS のように低空間分解能のデータにおいては，雲の大きさが 1 画素内に収まる程度である場合も多数存在すると考えられる．この場合，雲と雲の影が画素内で相殺されるために着目する画素の反射率は大きくなり，結果的に雲の影を認識することが難しい．従って，本研究で検討することのできる雲の影は，1 画素よりも大きなものに限ることを明記しておく．作成した合成画像のうち，雲の影が認められた韓国の釜山市付近の画像を図 6 に示した．

図 6-(d) の右上から左下にかけて周囲の画素よりも暗く見える細長い領域が雲の影である．他の手法と比較して，雲の影が最も正常に除去されていたのは，熱チャンネルを用いた MaxT であった．これは，雲の影の温

度は本来選択されるべき影のない画素よりも低く，温度の最大値を選択することで雲の影が除去されたものと考えられる．次に良好な結果を示したのは TMinB であった．これは，熱チャンネルの拘束条件を取り入れたことにより，MaxT の長所を反映して，雲の影を選択することなく合成画像が作成されたものと考えられる．次に良好な結果を示したのは TMinS であった．TMinS では，6 月の画像においては正常に影が除去されていたが，他の季節においては影が残っていた．この理由としては，熱チャンネルを用いると衛星天頂角の大きい画素を選択する傾向にあるが，一定値以上の衛星天頂角を持つデータは除外されたため，結果として影の画素が代表値として選択されたと考えられる．次に良好な結果を示したのは，NDVI を用いた MaxN, NMinS, NTMinS であった．これらは，比演算値である NDVI が影を除去する効果を有するため，影を選択することはなかった．しかし，パッチ状の領域や衛星観測角の大きい画素が見られたため低い評価であった．MinB は，どの季節の画像においても雲の影が取りきれておらず，7 つの手法の中では最も低い評価の 1 点を与えた．以上から，TMinB は，季節および地表の土地被覆が異なると完全に雲の影を取り除くことはできない画素も存在するが，MinB に比べて大きく結果が改善することが明らかとなった．

3.3.6 総合評価

以上 5 種類の評価基準に従って判定された合成画像作成手法の総合評価を Table 2 に示した．各評価基準ごとに，7 種類の合成画像に対して相対的な順位をつけ，最も評価が高いものから評価が低いものまで 7 点から 1 点を与えた．なお，9 月の画像では，雪氷域を判読することができなかったため，評価から除外した．

これによると，総合的に判断して最も評価が高かったのは，TMinB であった．熱チャンネルを使用することで海域における雲除去が低下し，衛星天頂角が大きくなる欠点があったが，MinB の最大の欠点である影の除去が正確に行われた．次に評価が高かったのは，MinB であった．影の除去が全く行われないことが最大の欠点であったが，その他の評価項目では最高に近い評価を与えられた．次に良好であったのは TMinS であった．衛星天頂角の小さい画素を選択したため，空間分解能の低下が抑制されている点が注目すべき点である．次に良好であったのは MaxT であった．パッチ上の領域や不連続領域は少なく，全体的に滑らかな画像が得られたが，海域での雲除去に難があり，衛星天頂角が大きくなる傾向があった．次に良い結果を与えたのは，AVHRR では最高の評価を与えられていた NTMinS であった．AVHRR と異なり MODIS において低い評価に終わった理由としては，センサの感度特性の違いにより NDVI の値が AVHRR と MODIS との間で異なることや，雲の NDVI の値が水域のそれより大きくなっていたことが考えられる．同様の傾向が NMinS にもみられた．NMinS は，衛星天頂角に制限を設けたため，空間分解能の低下が抑制されていたが，熱チャンネルを使用しなかったために不連続の領域が多く見られた．全手法の中で最も評価の低かったのは MaxN であり，MODIS の合成画像作成手法として使用することは不適切であると考えられる．

4 まとめ

本研究では，MODIS データの合成画像作成手法に関して検討を行った．まず，MODIS の可視近赤外の 7 チャンネルについて 6S コードを用いた放射伝達シミュレーションを行った結果，青チャンネルが最も大気の影響を受けやすいことがわかった．この結果に基づいて，MODIS 用の合成画像作成手法として最小青チャンネル法 (MinB) を提案した．また，この手法に熱チャンネル (チャンネル 31) に拘束条件を与えた温度拘束条件付き最小青チャンネル法 (TMinB) を提案した．これら 2 つの手法に加え，同様のセンサである AVHRR において実績のある最大 NDVI 法 (MaxN)，最大温度法 (MaxT)，NDVI 制約付き最小走査角法 (NMinS)，温度制約付き最小走査角制約法 (TMinS)，NDVI ならびに温度値制約付き最小走査角法 (NTMinS) の 5 つを加えた合計 7 つの手法を，東大生研で受信された 1 年分の MODIS データに適用し，雲の除去，衛星天頂角，画像の滑らかさ，雪氷と雲の識別，雲の影について検討を加えた．その結果は，次のようにまとめることができる．

- **雲除去** MinB > **TMinB** > MaxT > TMinS > NTMinS > NMinS > MaxN
- **衛星天頂角** TMinS > MinB > NMinS > **TMinB** > MaxT > MaxN > NTMinS
- **滑らかさ** MinB > **TMinB** > TMinS > MaxT > NMinS > NTMinS > MaxN
- **雪氷の識別** **TMinB** > MinB > NTMinS = MaxT > TMinS > NMinS = MaxN

- **影の除去 TMinB** > MaxT > MaxN > TMinS > NTMinS > NMinS > MinB
- **総合評価 TMinB** > MinB > TMinS > MaxT > NMinS > NTMinS > MaxN

7つの合成画像作成手法のうち，総合的に判断して本研究で提案したTMinB法が最も優れた手法であることが示された．なお，TMinB法を用いて作成した10日間合成画像は，2001年6月からの全受信データについて定常的に作成されており，東大生研のWebサイトにおいて無料で配布している (http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/Japan/).

謝辞

本研究を進めるに当たり，弘前大学の飯倉善和教授と丹波澄雄助教授には，放射伝達のメカニズムおよび6Sを用いた解析法について議論する貴重な時間を与えて頂いた．ここに深く感謝するものである．

参考文献

Cihlar, J., Manak, D., and D'Iorio, M., 1994. Evaluation of compositing algorithms for AVHRR data over land. *IEEE Trans. on GeoSci. and Remote Sens.*, 32(2), 427-437.

Cihlar, J., Ly, H., Li, Z., Chen, J., Pokrant, H., and Huang, F., 1997. Multitemporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies - artifacts and corrections. *Remote Sens. Environ.*, 60, 35-57.

Hall, D. K., Riggs, G. A., and Salmonson, V. V., 2001. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms, 15-24.

橋本俊昭, 2002. MODISの幾何補正について. 写真測量とリモートセンシング, 41(3), 23-27.

Holben, B. N., 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 15(1), 145-161.

Justice, C., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., Privette, J., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R., Knjazihhin, Y., Running, S., Nemani, R., Wan, Z., Huete, A., Van Leeuwen, W., Wolfe, R., Giglio, L., Muller, J. -P., Lewis, P., and Barnsley, M., 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 36(4), 1228-1249.

Van Leeuwen, W. J. D., Huete, A.R., and Laing, T.W., 1999. MODIS Vegetation Index Compositing Approach: A Prototype with AVHRR Data. *Remote Sens. Environ.*, 69(3), 264-280.

雷 莉萍, 横山隆三, 2001. 全アジア地域NOAA/AVHRR 10日間モザイク画像の合成法 (II). 日本リモートセンシング学会誌, 21(2), 168-178.

Moody, A., and Strahler, A. H., 1994. Characteristics of composited AVHRR data and problems in their classification. *Int. J. Remote Sens.*, 23(15), 3473-3491.

Sandmeier, S., and Itten, K. I., 1997. A Physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. *IEEE. Geosci. and Remote Sens.*, 35(3), 708-717.

Simpson, J. J., McIntire, T., Jin, Z., and Stitt, J. R., 2000. Improved Cloud Top Height Retrieval under Arbitrary Viewing and Illumination Conditions Using AVHRR Data. *Remote Sens. Environ*, 72(1), 95-110.

Stoms, D. M., Bueno, D. M., and Davis, F. W., 1997. Viewing geometry of AVHRR image composites derived using multiple criteria/ *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 63(6), 681-689.

竹内 渉, 根本利弘, Baruah, P. J., 越智士郎, 安岡善文, 2003. WWW を利用した Terra MODIS データ処理システムの構築. 写真測量とリモートセンシング, 42(2), 21-27.

竹内 渉, 安岡善文, 2003. MODIS データにおける大気補正効果の検討. 日本写真測量学会 平成 *15* 年春期学術講演会論文集, 45-48.

Vermote, E. F., and Vermeulen, A., 1999. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09), 32-34.

目 次

1 はじめに **1**
1.1 MODIS データにおける合成画像の必要性 1
1.2 既存の合成画像作成手法とその問題点 1
1.3 本研究の目的 2

2 解析手法 **2**
2.1 合成画像作成の要件および評価基準の設定 2
2.2 放射伝達モデルによる放射伝達過程の解析 2
2.3 MODIS のデータ処理 3

3 解析結果 **4**
3.1 放射伝達モデルによる放射伝達過程の解析 4
3.1.1 波長依存性 4
3.1.2 衛星天頂角依存性 4
3.2 青チャンネルと熱チャンネルを併用した最適画素選択法の導出 4
3.3 合成画像の評価 5
3.3.1 雲除去 5
3.3.2 衛星天頂角の大きさ 5
3.3.3 画像の滑らかさ 6
3.3.4 雪氷と雲の識別 6
3.3.5 雲の影 6
3.3.6 総合評価 7

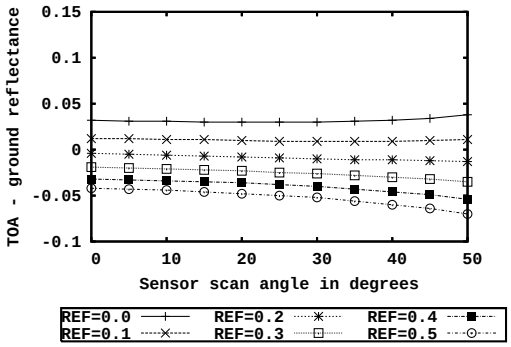
4 まとめ **7**

表 目 次

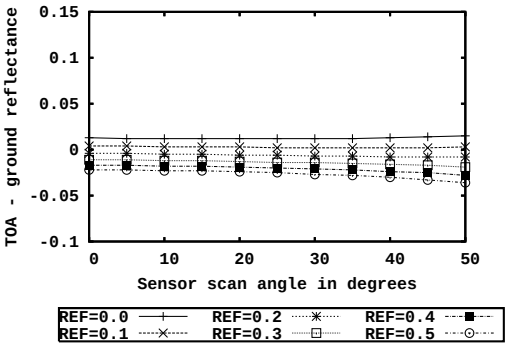
1　6S コードを用いた放射伝達シミュレーションに必要な入力変数の一覧. 3
2　5 つの評価基準に従って判定された合成画像作成手法の成績表．各評価基準ごとに 7 種類の合成画像に対して相対的な順位をつけ，最も評価が高いものから評価が低いものまで 7 点から 1 点を与えた． 19

図 目 次

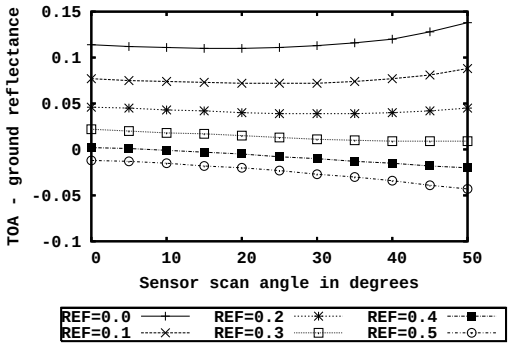
1 衛星天頂角の増加に対する大気上端の見かけ反射率と地表面反射率との差の変化. 13
2 MODIS から作成した 7 種類の合成画像の比較 (2001 年 6 月 1 日-10 日). 14
3 水田地帯における雲除去の観点からみた 7 種類の合成画像の比較 (2001 年 6 月 1 日-10 日). . . . 15
4 7 種類の合成画像作成手法における衛星天頂角の大きさの比較. 16
5 7 種類の合成画像作成手法における画像の滑らかさの比較 (2001 年 9 月 1 日-10 日). 17
6 7 種類の合成画像作成手法における雲の影の比較 (2002 年 3 月 1 日-10 日). 18



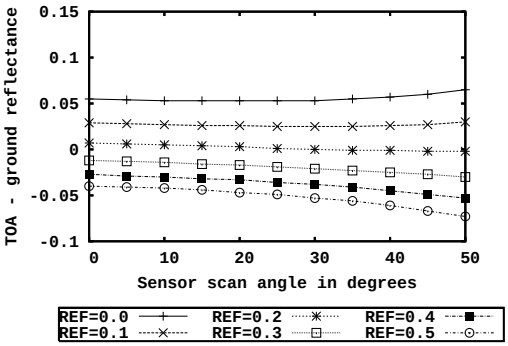
(a) チャンネル 1 (645 nm)



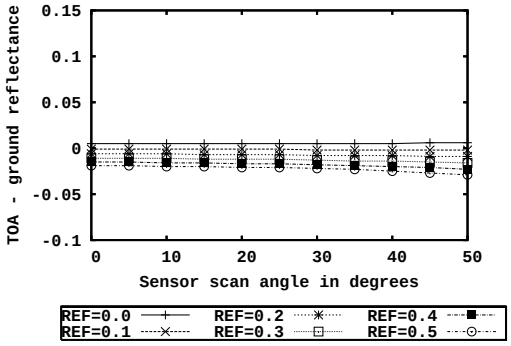
(b) チャンネル 2 (856 nm)



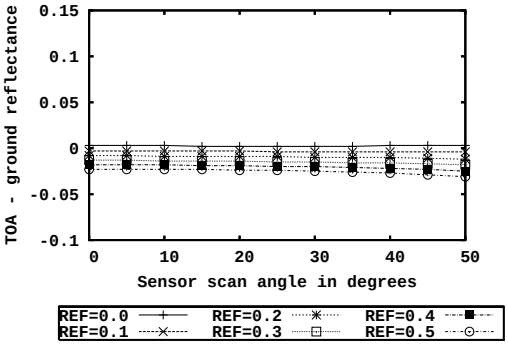
(c) チャンネル 3 (468 nm)



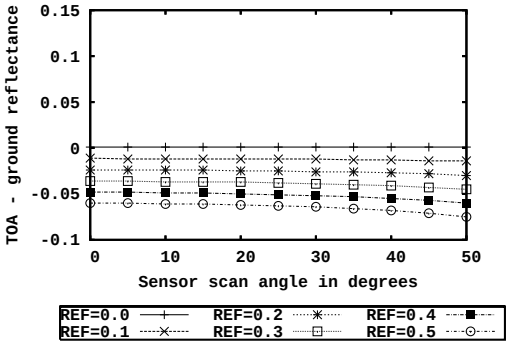
(d) チャンネル 4 (555 nm)



(e) チャンネル 5 (1240 nm)

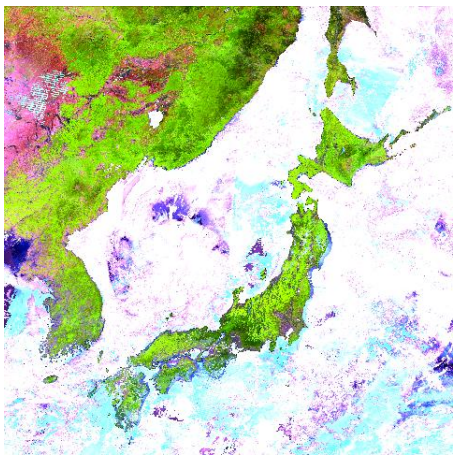


(f) チャンネル 6 (1640 nm)

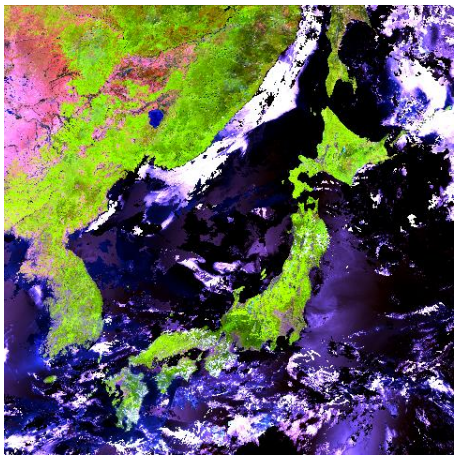


(g) チャンネル 7 (2130 nm)

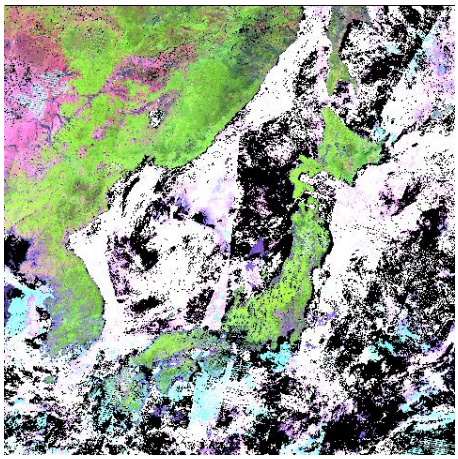
図 1 衛星天頂角の増加に対する大気上端の見かけ反射率と地表面反射率との差の変化.



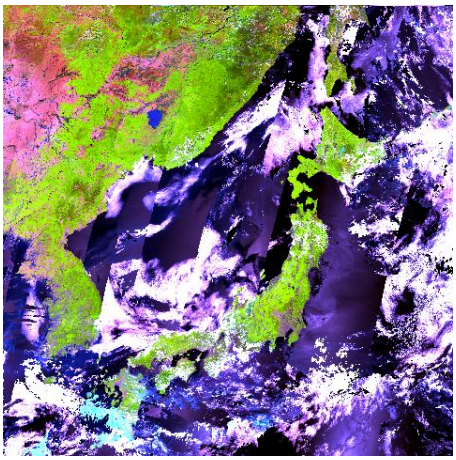
(a) MaxN



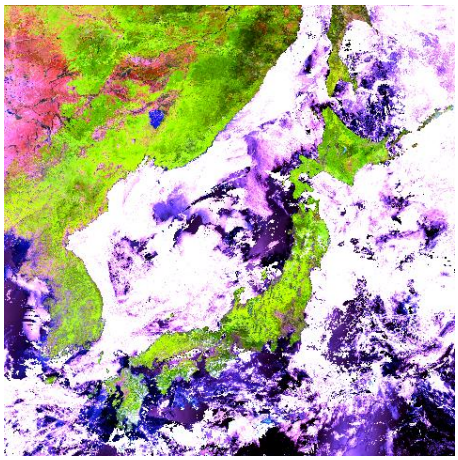
(b) MaxT



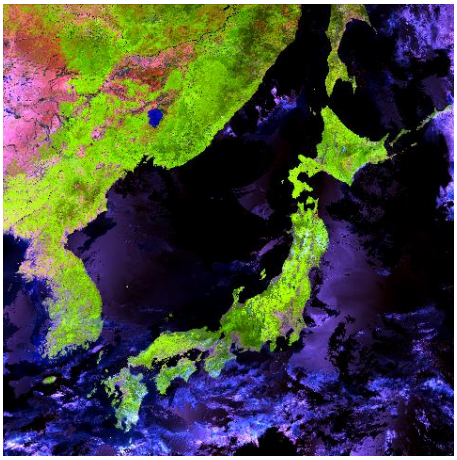
(c) NMinS



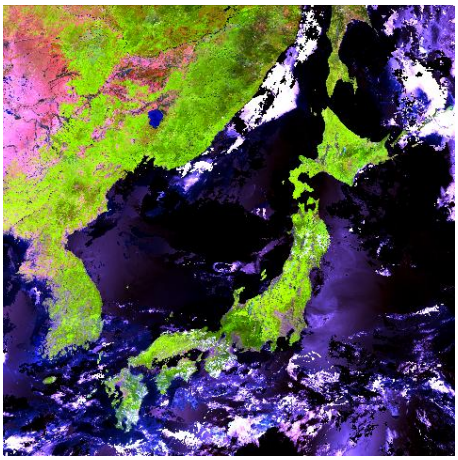
(d) TMinS



(e) NTMinS

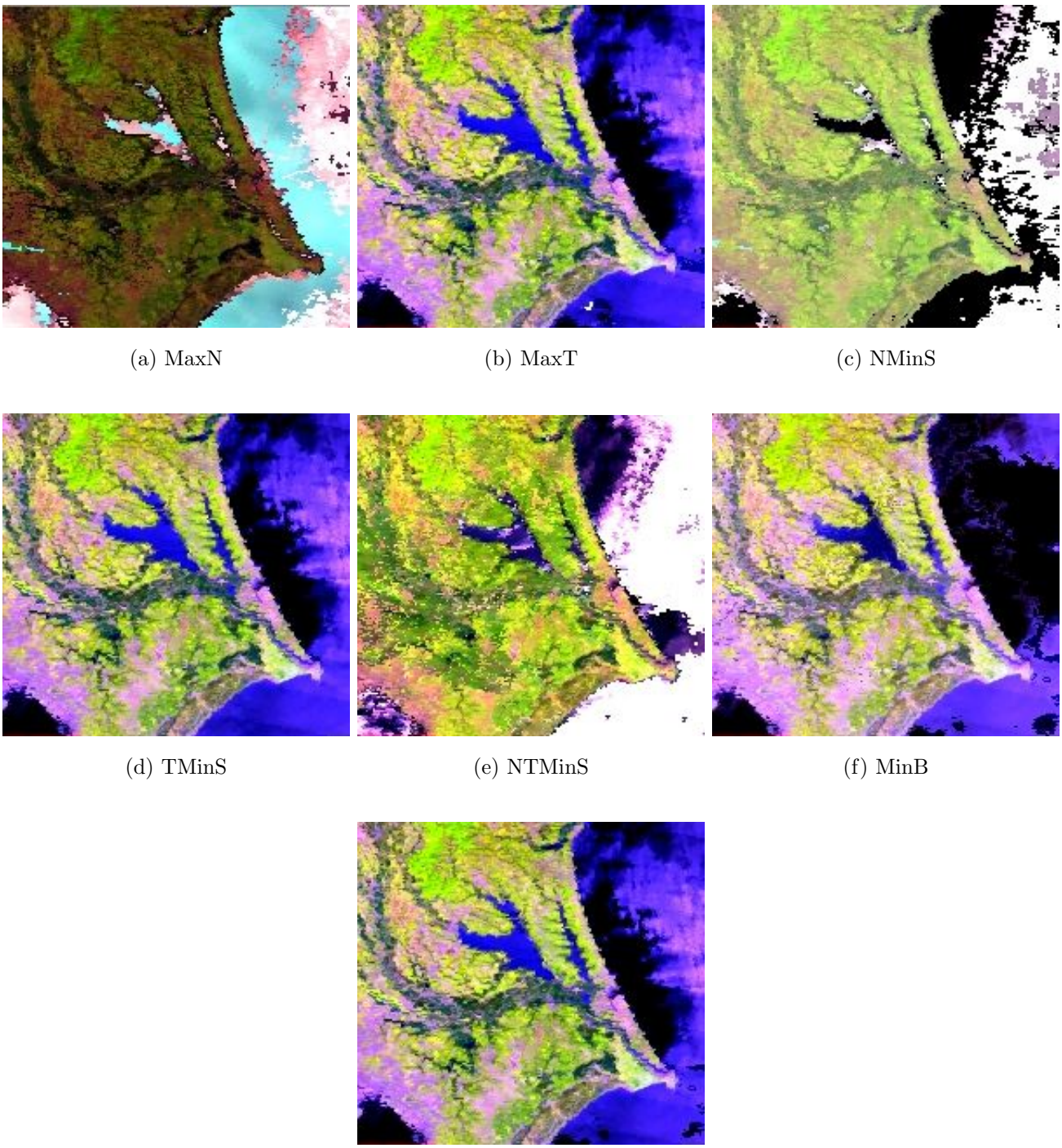


(f) MinB



(g) TMinB

図 2 MODIS から作成した 7 種類の合成画像の比較 (2001 年 6 月 1 日-10 日).

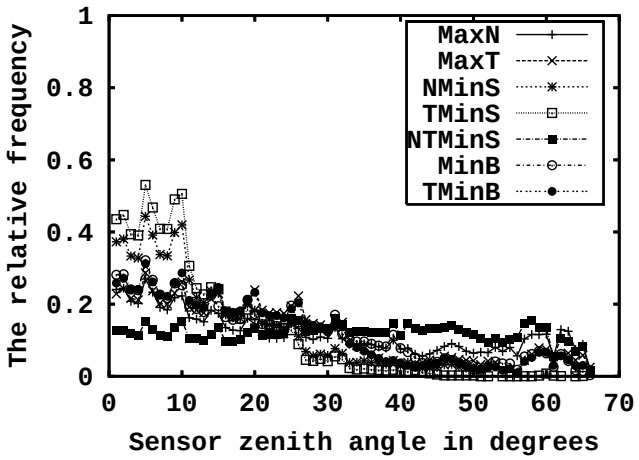


(a) MaxN (b) MaxT (c) NMinS

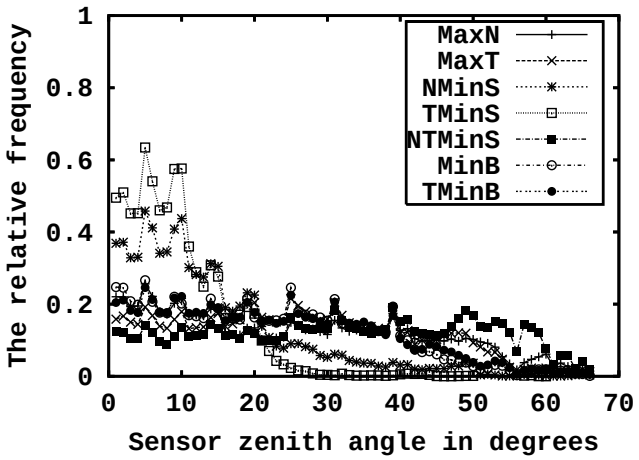
(d) TMinS (e) NTMinS (f) MinB

(g) TMinB

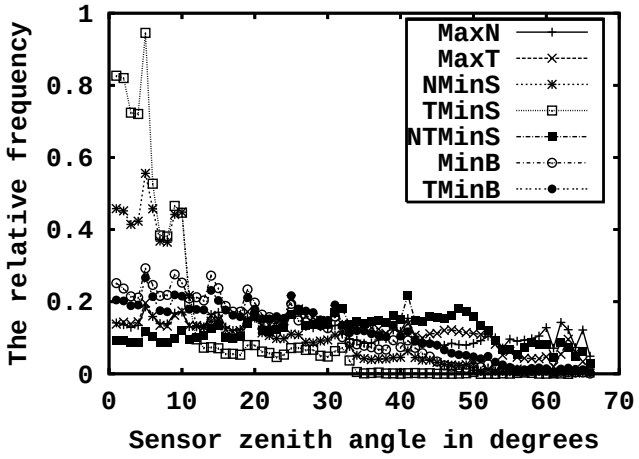
図 3 水田地帯における雲除去の観点からみた 7 種類の合成画像の比較 (2001 年 6 月 1 日-10 日).



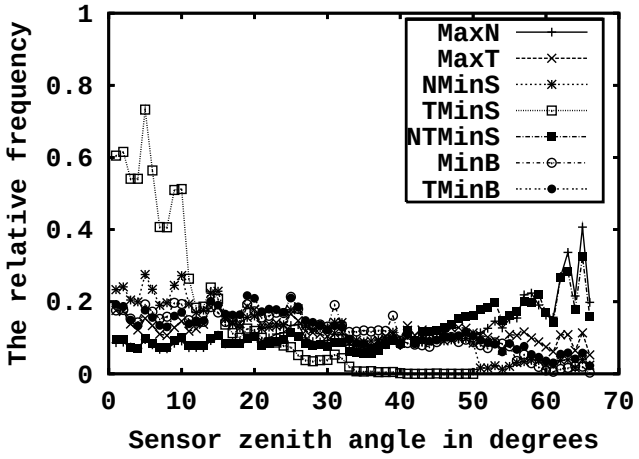
(a) 2001 年 6 月 1 日-10 日



(b) 2001 年 9 月 1 日-10 日



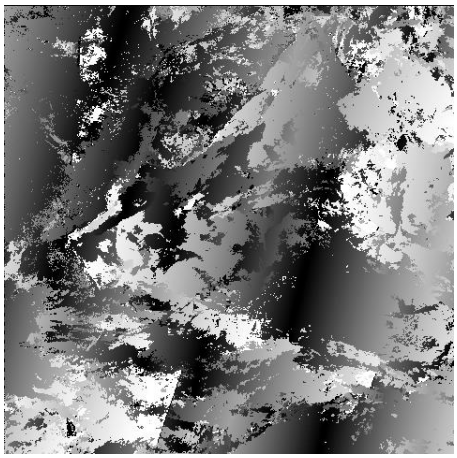
(c) 2001 年 12 月 1 日-10 日



(d) 2002 年 3 月 1 日-10 日

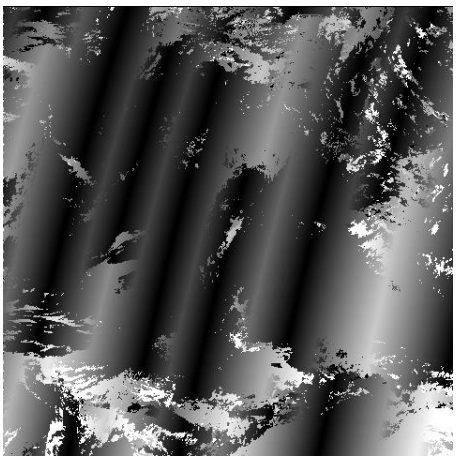
図 4 7 種類の合成画像作成手法における衛星天頂角の大きさの比較.

(a) MaxN

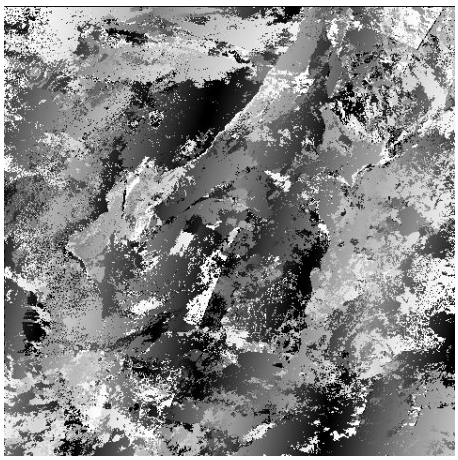


(b) MaxT

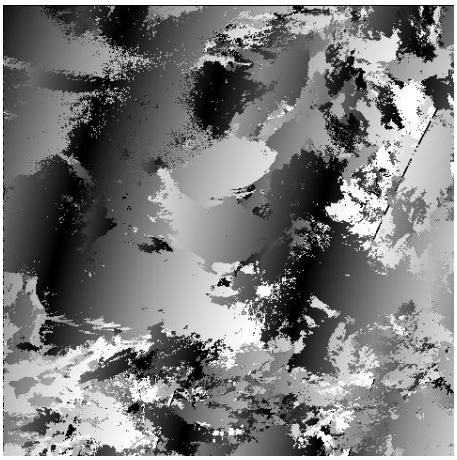
(c) NMinS



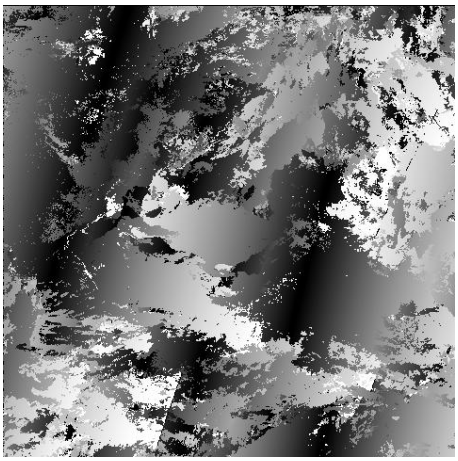
(d) TMinS



(e) NTMinS

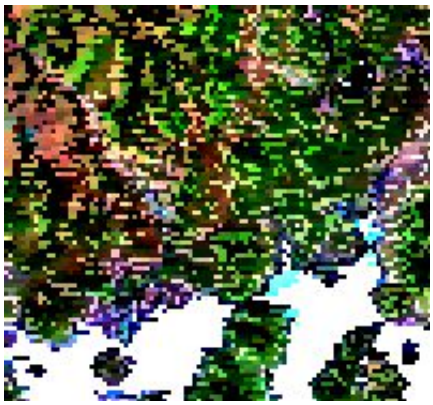


(f) MinB



(g) TMinB

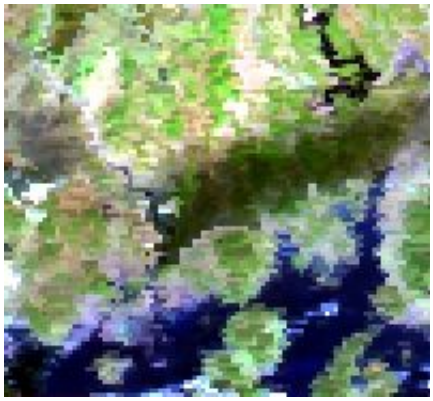
図 5 7 種類の合成画像作成手法における画像の滑らかさの比較 (2001 年 9 月 1 日-10 日).



(a) MaxN

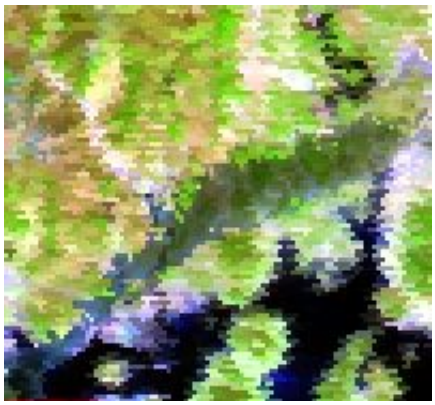
(b) MaxT

(c) NMinS



(d) TMinS

(e) NTMinS



(f) MinB

(g) TMinB

図 6 7種類の合成画像作成手法における雲の影の比較 (2002年3月1日-10日).

表 2 5 つの評価基準に従って判定された合成画像作成手法の成績表．各評価基準ごとに 7 種類の合成画像に対して相対的な順位をつけ，最も評価が高いものから評価が低いものまで 7 点から 1 点を与えた．

	MaxN	MaxT	NMinS	TMinS	NTMinS	MinB	TMinB
雲除去 (3 月)	1	5	2	4	3	6	**7**
衛星天頂角 (3 月)	1	3	6	**7**	2	5	4
滑らかさ (3 月)	1	4	3	6	2	5	**7**
雪氷の識別 (3 月)	1	4	3	2	5	**7**	6
影除去 (3 月)	5	6	3	2	4	1	**7**
3 月の合計	9	22	17	21	16	24	**31**
雲除去 (6 月)	1	6	2	4	3	**7**	5
衛星天頂角 (6 月)	2	3	6	**7**	1	5	4
滑らかさ (6 月)	1	5	3	4	2	**7**	6
雪氷の識別 (6 月)	2	4	1	3	5	6	**7**
影除去 (6 月)	3	5	4	**7**	2	1	6
6 月の合計	12	23	16	25	13	26	**28**
雲除去 (9 月)	1	5	2	4	3	**7**	6
衛星天頂角 (9 月)	4	2	6	**7**	1	5	3
滑らかさ (9 月)	2	3	4	6	1	**7**	5
雪氷の識別 (9 月)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
影除去 (9 月)	5	6	4	2	3	1	**7**
9 月の合計	12	16	16	19	8	20	**21**
雲除去 (12 月)	1	5	2	4	3	**7**	6
衛星天頂角 (12 月)	2	3	6	**7**	1	5	4
滑らかさ (12 月)	1	4	3	6	2	**7**	5
雪氷の識別 (12 月)	2	5	1	4	3	6	**7**
影除去 (12 月)	3	**7**	2	4	5	1	6
12 月の合計	9	24	14	25	14	26	**28**
全体の合計	38	85	63	90	51	96	**108**