雲に着目した気象解説に適するひまわり RGB 合成画像の考案

高 野 雄 紀*·渡 邊 正太郎**

要 旨

雲の解説に適したひまわり RGB 合成画像の作成を目的とし, R, G, B にそれぞれひまわり 8 号可視赤外放射 計のバンド 3, 4, 2 を割り当て,反射率の低い領域を強調しない色調補正を用いる Green Color RGB 画像(G 画像)を考案した.既存の手法による True Color Reproduction 画像(TR 画像)では,①エアロゾルを霧や雲 と誤認識しないよう視聴者に説明する必要がある,②雲よりも不均一な色の陸面が視聴者の注意を引くおそれがあ る,③従来の可視画像と比べて雲の厚さを区別しづらい,といった点が気象解説の際に不便である.いくつかの事 例について G 画像を TR 画像と比較したところ,エアロゾルが目立ちにくく,陸面の色が比較的一様になったほ か,雲の厚さの違いがよりはっきりと表現された.地表面・雲・エアロゾルの総合的な観点から,考案した G 画 像は,気象解説における雲の視認に有効であると考えられる.

1. はじめに

テレビやインターネットニュースの気象解説で使わ れる画面として,最も頻繁に用いられるのが天気図と 静止気象衛星ひまわりの衛星画像であろう。衛星画像 に描かれるものは馴染みのある雲であるため,気象に 関する事前知識を多く持たない視聴者にとっても比較 的理解が容易である。そのため衛星画像は気象解説に おける有用なツールである。

ひまわり 8 号が2015年7月7日に運用開始される と、第1図のような単一のバンドを使ったモノクロ画 像だけでなく、搭載された可視赤外放射計 (Advanced Himawari Imager: AHI)の可視3バン ド、近赤外3バンド、赤外10バンドを用いて様々な RGBカラー合成画像を作成できるようになった。そ の中で最も基本的な RGB 画像が可視バンドを用いた

** 株式会社ウェザーマップ。

-2017年5月2日受領--2017年10月30日受理-

© 2018 日本気象学会

True Color RGB 画像(以下 T 画像,詳細は寺坂 (2016)を参照)である. T 画像は赤,緑,青に対応 する波長のバンド3(0.64 μ m),バンド2(0.51 μ m),バンド1(0.47 μ m)を RGB に割り当てて作 成する. 色の情報を持つ T 画像は可視モノクロ画像 とは異なり,黄砂や煙などを雲と区別できるといった



第1図 2015年8月8日13時(JST)のひまわり 8号可視モノクロ画像。海陸分布図に, バンド3の見かけの反射率を白の不透明 度として上から合成している。

^{*(}連絡責任著者)東京大学大気海洋研究所. ytakano@aori.u-tokyo.ac.jp

利点がある。

観測された反射率をそのまま用いて T 画像を作成 する場合,太陽天頂角が大きい朝夕は暗くなる。画像 を明るくするために,太陽天頂角の余弦で除す補正を 行う場合,地表面の反射光だけでなく大気分子による レイリー散乱光も増幅してしまう。その結果,特に太 陽天頂角が大きい領域では,光量が過大になるのに加 え,散乱の波長依存性から青みがかる。これを目立た せないためには,太陽天頂角が大きい領域で補正の強 さを人為的に抑える必要がある。したがって T 画像 は朝夕を日中と同程度に明るくすることができない。 そのため気象庁の府県天気予報(5,11,17時)の発 表後に放送,あるいは配信されることの多い気象解説 での T 画像の利用は限定的である。

こうした状況は Miller et al. (2016) により True Color Reproduction 画像(TR 画像)が考案された ことで変わってきた.ひまわりの T 画像(例えば第2) 図)が、従来の極軌道衛星 (Suomi NPP 衛星の VIIRS センサなど)の True Color 画像と比べてややくすん だ印象を受けるのは、大気分子によるレイリー散乱の 影響を受けた反射率を,画像の作成に用いたためであ る。TR 画像では、この散乱の効果を補正し、くすみ を取る.バンド2とバンド4から0.55 µm に相当す る仮想的な緑バンドを作成した上で, 色を調整するこ とで、人が見た色合いを「再現|する. TR 画像はレ イリー散乱の効果を考慮した上で太陽天頂角補正を行 うため、太陽天頂角によらず地表面がほぼ一定の明る さで表現される。また T 画像に比べ,エアロゾルや 地表面を明瞭に視認できることから, 黄砂や紅葉など の解説に用いられる.



第2図 2015年8月8日13時 (JST) のひまわり 8号 True Color 画像. ガンマ値は1.5 とした.

しかし,雲の解説を目的とする場合には,TR画像 には以下の3つの欠点がある。①前提知識を持たない 視聴者に対して,エアロゾルを雲や霧などと誤認識し ないよう説明する必要がある。②陸面の色が不均一で あるため,雲よりも陸面が視聴者の注意を引き,解説 の妨げとなるおそれがある。③可視モノクロ画像や T画像と比べると,反射率の違いがはっきりと表現 されず,雲の厚さを区別しづらい。

本研究では、上述の TR 画像の欠点を克服し、雲 を重点的に表現することを目的とした、新たな RGB 合成画像の作成方法として、Green Color RGB 画像 (以下、G 画像)を提案する。陸面、雲、エアロゾル などの着目したい現象に応じて TR 画像と使い分け ることで、わかりやすい気象解説につながるものと期 待される。次節では、G 画像の作成方法について説明 する。第3節では地表面・雲・エアロゾルの観点か ら、G 画像の特性について示す。第4節では本研究で 得られた結果をまとめる。

2. Green Color RGB 画像の作成方法

本節では、G 画像の作成方法について解説する.ま ずG 画像とTR 画像に共通する大気分子による散乱 の効果の補正(レイリー補正)について述べる.次に G 画像とTR 画像それぞれに固有な処理として、使 用するバンドおよびトーンカーブの補正方法について 説明する.なお、本稿での RGB 合成画像の作成に は、気象業務支援センターから提供されているひまわ り標準データ(気象庁 2017)を使用した.

2.1 レイリー補正

地表面反射率 ρ_t と衛星から観測される見かけの反 射率 ρ_* の間の関係は、ランバート反射する水平一様 な地表面を考えると

$$\rho_* = T_g^{\dagger} T_g^{\downarrow} \left(\rho_a + \frac{\rho_t}{1 - \rho_t S} T^{\dagger} T^{\downarrow} \right) \tag{1}$$

と与えられる. ここで T は気体分子の散乱による透 過率, T_g は気体分子の吸収による透過率, ρ_a は大気 中の散乱による反射率, S は大気の球形アルベドであ る. また $T \ge T_g$ の上付きの↓と↑はそれぞれ下向き と上向きの透過率を表す. 簡単のため式(1)に単一散 乱近似を施し, さらに気体分子の吸収は弱く無視でき るとすると,

$$\rho_* = \rho_a + \rho_t T^{\dagger} T^{\downarrow} \tag{2}$$

となる.

式(2)に基づき,観測された反射率 ρ_* から地表面反 射率 ρ_i を推定することを考えよう.大気中にエアロ ゾルが存在する場合, ρ_a は大気分子によるレイリー散 乱成分 $\rho_a^{\ R}$ とエアロゾルによるミー散乱成分 $\rho_a^{\ M}$ の和 で表される.同様に,透過率Tは,レイリー散乱成 分 $T^{\ R}$ とミー散乱成分 $T^{\ M}$ の積として表される.散乱 の効果のうち,放射伝達計算から事前に推定可能なレ イリー散乱の効果 $(\rho_a^{\ R}, T^{\ R})$ のみを考え,地表面反射 率の推定値 ρ_i を

$$\tilde{\rho}_{t} = \frac{\rho_{*} - \rho_{a}^{R}(\theta_{s}, \theta_{v}, \phi_{s} - \phi_{v})}{T^{\downarrow R}(\theta_{s}) T^{\uparrow R}(\theta_{v})}$$
(3)

と計算する.ここで θ_s は太陽天頂角、 θ_v は衛星天頂 角、 ϕ_s は太陽方位角、 ϕ_v は衛星方位角を表す.

TR 画像とG 画像の作成には、見かけの反射率 ρ_* ではなくレイリー補正済み反射率 $\tilde{\rho}_t$ を用いる。補正 の計算には $\rho_a^R(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ と $T^R(\theta)$ のルックアッ プテーブル (LUT)を用いた。この LUT は放射伝達 モデル 6 SV (Kotchenova *et al.* 2006; Kotchenova and Vermote 2007)を用いて作成した。

2.2 使用バンドとトーンカーブ

RGB 合成画像は,使用するバンド,各バンドの反 射率(又は放射輝度)の上限値と下限値,色調の補正 方法(トーンカーブやガンマ値を用いて指定される) の三つの要素で決定される.本節ではG画像を定義 するこれら三要素について説明する.

雲の視認に主眼に置くG画像では,R,G,Bにバンド3,4,2を割り当てる.緑(G)に陸面や植生 に強く反応するバンド4を割り当てたのは,陸面の色

第1表	True Color Reproduction 画像と Green
	Color RGB 画像のトーンカーブに用いら
	れる区分線形関数.値は0-255の範囲で表
	している。

色	元の範囲	変換後の範囲
В	[0, 47]	[0, 12]
	[47, 116]	[12, 138]
	[116, 255]	[138, 255]
G	[0, 38]	[0, 13]
	[38, 107]	[13, 130]
	[107, 255]	[130, 255]
R	[0, 33]	[1, 14]
	[33, 100]	[14, 124]
	[100, 255]	[124, 255]

の不均一さを減らすためである.波長の短いバンド1 を用いないことで,TR 画像と比べてエアロゾルによ る散乱の影響が減るものと期待される.反射率の上限 値と下限値については,全てのバンドで上限値を1, 下限値を0とした.

TR 画像のトーンカーブには対数強調 (log enhancement:LE) を用いている。これは元の輝度 (反射率) $x \in 0$ から1の範囲で表すとき,強調後の輝度 y を

$$y = \log(\alpha x + 1) / \log(\alpha + 1) \tag{4}$$

と表すものである. ここで α は定数であり, α が大 きいほど明るい画像を得ることができる.本稿の TR 画像では α =20とした. TR 画像は LE を行った後, より明瞭な画像を得るために第1表で与えられる区分 線形関数 (piecewise linear function : PL) による補 正を加えている.第3回に示される LE と PL を合わ せた TR 画像のトーンカーブは,エアロゾルに概ね 対応する反射率0.1以下の部分の傾きが急である.ま た雲に概ね対応する反射率0.1~1が RGB 値で約 100~255と比較的狭いレンジで表現されている.

一方で、G画像の目的は、雲の厚さの違いを表現 し、エアロゾルの影響を減らすことである。そこで反 射率の低い(<0.1)部分でのトーンカーブの傾きを 抑え、雲を表現するレンジを広げるため、次式で表さ



れる局所対数強調 (local log enhancement:LLE) を用いることにする.

$$y = \begin{cases} y_0 \log(\alpha x + 1) / \log(\alpha x_0 + 1), & x < x_0 \\ y_0 + (1 - y_0) (x - x_0) / (1 - x_0), & x \ge x_0 \end{cases}$$
(5)

ここで、 α , x_0 , y_0 は定数である. これらの値は最終 的に出力される画像を見ながら調節し、 $\alpha = 20$, $x_0 = 0.3$, $y_0 = 0.45$ とした. G 画像でも TR 画像と同様に、 PL による補正を LLE の後に行った. ただし、RGB の 3 色全てに対して第 1 表の青(B)の関数を適用し た. 得られたトーンカーブ(第 3 図)から分かるよう に、雲 に対応 する反射率0.1~1が RGB 値で約 50~255と LE の場合よりも広いレンジで表現される. また0.05以下の領域では傾きがほぼ1であることが特 徴的である.

3. Green Color RGB 画像の特性

本節では、G 画像の特徴について、地表面・雲・エ アロゾルの見え方に着目し、TR 画像やその他の可視 画像と対比して説明する.

3.1 地表面

2015年8月8日13時のTR画像(第4図)を見る と、陸面の色が暗く海面との区別がつきづらい一方 で、植生の有無の違いが明瞭に現れている。例えば九 州地方など植生の多い陸面のRGB値は(16,28, 8)、植生の少ない陸面は(94,89,57)、周辺の海は (5,8,10)である。ここで3つ組の数字はR, G,Bの値を表す。0が最も暗く、255が最も明るく 表現される。これに対して同時刻のG画像(第5図) では、陸面と海面の区別がはっきりしている一方で、 植生による色の違いはあまり見られない。G画像で は,植生の多い陸面は(0,136,28),植生の少ない 陸面は(34,122,24),海面が(1,1,4)であ る.G画像のこのような性質は,植生や土壌に同様に 反応するが,海面での反射率が小さいバンド4を緑 (G)に割り当てたことが主に影響している.

3.2 雲

2015年8月8日13時のG画像(第5図)では、広 島・島根にある発達した積乱雲、近畿地方で発達初期 の積乱雲、関東甲信地方にかかる薄い上層雲、その下 にある積雲といった雲を容易に把握することができ る.同時刻のTR画像(第4図)では、積乱雲の見 え方はほぼ同じであるが、背の低い積雲がG画像よ りも白く目立って見える.これは、日本の南海上の積 雲についても同様である。また上層雲の透過率は、G 画像と比べると小さく、関東甲信地方の上層雲は白く 強調されて見える。一方でG画像は、従来の可視画 像(第1図)やT画像(第2図)の雲の見え方に近 く、雲の厚さを区別しやすい。

上述の TR 画像とG 画像の雲の見え方の違いは, 主に補正に用いたトーンカーブ(第3図)の違いから 説明される.2.2節で述べたように,G 画像は TR 画 像よりも雲の反射率に対応する色のレンジが大きいた め,TR 画像に比べて雲の厚さの違いをはっきり表現 できている.

3.3 エアロゾル

日本付近でエアロゾル濃度が高かった2017年3月19 日15時のTR画像(第6図)の海上では、エアロゾ ルが青白く見える領域が、日本海から日本の南の海上 にかけて広く分布している。一方で同時刻のG画像 (第7図)を見ると、濃度が特に高い領域では紫色に 見えているものの、その他の領域ではほとんど黒に近



第4図 2015年8月8日13時 (JST) のひまわり 8号 True Color Reproduction 画像.



第5図 2015年8月8日13時 (JST) のひまわり 8号 Green Color RGB 画像.

"天気"65.2.



第6図 2017年3月19日15時 (JST) のひまわり 8号 True Color Reproduction 画像.



第7図 2017年3月19日15時 (JST) のひまわり 8号 Green Color RGB 画像.

い. この紫色については、テレビ等での一般視聴者に はエアロゾルであることを説明する必要があるが、濃 度がさほど高くない場合には、G 画像は、TR 画像に 比べれば、エアロゾルが無視できるくらい目立たない という利点があることが分かる.

G画像とTR画像でのエアロゾルの見え方の違い を説明するため、まず反射率の波長依存性について見 る.2017年3月19日15時の第6図の範囲内の海上の データを用いて作成した、バンド3に対するバンド 1、2、4の2次元ヒストグラムを第8図に示す。こ こで雲の影響は陽には取り除いていないが、反射率 0.1以下のデータの多くは第6図に見られるエアロゾ ルに対応している。各バンドの反射率の間には線形に 近い関係が見られ、波長が短いほど反射率が大きい。 この関係は、第8図の黒線に示される、ミー散乱の波長 依存性から理論的に説明できる(詳細は付録を参照)。



第8図 バンド3の補正済み反射率に対する(a) バンド1,(b)バンド2,(c)バンド4 の反射率の二次元ヒストグラム。第6図 の範囲内の海上のデータから作成した。 色はカウント数の常用対数を表している。黒線は放射伝達計算から得られた関 係を表し、黒丸は550 nm エアロゾル光 学的厚さで550=0,0.1,0.2,…に対応す る点を表す(詳細は付録を参照)。

放射伝達計算から評価した波長550 nm におけるエ アロゾルの光学的厚さ τ_{550} と反射率 p_t の関係(付録) をトーンカーブ(第3図)と組み合わせることで,各 画像での τ_{550} に対する RGB 値が求まる(第9図).G 画像と TR 画像のトーンカーブ p_t の低い(<0.1)部 分の違いが,第9図に示される RGB 値に反映されて おり,同じエアロゾル量に対してG 画像は TR 画像 よりも RGB 値が小さい.例えば τ_{550} が0.2~0.3の場 合,TR 画像の RGB 値は(60,70,80)であるのに 対し,G 画像は(10,10,30)程度と黒に近い.また G 画像の緑(G)は、ミー散乱の影響が比較的小さいバ ンド4を用いているため、G 画像の赤(R)や青(B)と 比べても色の輝度が小さい.そのため、例えば τ_{550} = 0.4の場合,G 画像は(20,10,40)程度の濃い紫色 になる.

最後に,ここで得られた結果について,いくつか注 意点を述べる.第8図や第9図の関係は2017年3月19 日15時に対してのものであり,季節や時刻(太陽天頂 角)によって変化しうる.特に太陽天頂角が大きくな ると,同じ で550でもエアロゾルがより目立って見える ようになる.また,エアロゾルの種類に応じて波長依 存性が異なるため,G画像で表現される色も当然異な りうる(例えば高濃度の黄砂の場合は深緑色に見え る).しかしTR画像に比べてG画像でエアロゾルが 目立たないという特性については,時刻やエアロゾル の種類によらず共通している.



第9図 波長550 nm におけるエアロゾル光学的 厚さに対する Green Color RGB 画像と True Color Reproduction 画像の海上の RGB 値,詳細は本文を参照。

3.4 他の可視画像との比較

反射率をグレースケールで表現する可視モノクロ画 像は、気象解説をする上で海陸の区別がつきづらいこ とが問題となる。そのため気象解説には、海陸分布図 に、バンド3の反射率を白(255,255,255)の不透 明度として上から合成(アルファブレンド)した画像 (以下、 α 画像)が用いられることが多い。 α 画像は、 反射率の高い部分は白く塗られる一方、反射率の低い 領域は海陸分布図が描かれるため、地表面の上に雲が 重なる様子を擬似的に表現することができる。

 α 画像と,地表面の上にある雲を直接表現する G 画像では,雲の影の見え方が異なる.これについて第 1 図と第5 図の広島・島根にある積乱雲を例に説明す る.第1 図の α 画像では,積乱雲の影の部分は影の ない部分と同様に海陸分布が塗られるため,雲の影を 視認できない.一方で第5 図の G 画像は,積乱雲の 影は黒色であり,陸上であれば緑色の影のない領域と 容易に区別できる.

G 画像は α 画像とは異なり, 雲の影が陽に表現さ れるため, 雲の高さの違いを識別しやすい. 第5 図の G 画像では, 関東甲信地方にある巻雲とその下にある 積雲の高度の違いを容易に区別できるが, 第1 図の α 画像から高度の違いを読み取ることは難しい. G 画像 が海陸の区別をつけつつ雲の影を表現できる点は, グ レースケールの可視モノクロ画像や α 画像と比べて, 雲を解説する上で有利だと考えられる.

4.まとめ

TR 画像は, エアロゾルを雲や霧と誤認識するおそ れがあり, また, 不均一な陸面の色が注意を引くな ど, 一般視聴者に対する雲の解説には必ずしも適さな い場合が考えられる.そこで, 雲の解説に適したひま わり RGB 合成 画像の作成を目的として, Green Color RGB 画像(G 画像)を考案した.いくつかの 事例について, 地表面・雲・エアロゾルの観点からそ の特性を評価したところ, 以下のようになった.

①緑(G)にバンド4の輝度を用いたことで,陸地 がほぼ一様な明るい緑になり,海は黒く表現される.

②画像のトーンカーブの補正に局所対数強調を用い ることで,従来の対数強調を行っている TR 画像に 比べて雲の厚さを区別しやすくなった.

③エアロゾルに影響されにくいバンド4を用い,反 射率の低いエアロゾルを強調しないトーンカーブを適 用したことで,TR画像と比べエアロゾルが目立たな

"天気"65.2.

くなった.

以上の観点から,考案したG画像はTR画像など と比べて,気象解説における雲の視認に有効であると いえる.

雲について言及する場合はG画像,地表面やエア ロゾルについて言及する場合はTR画像を主に使う ことで,視聴者にとってより分かりやすい解説になる と期待される.

謝 辞

東京大学大気海洋研究所の濱田 篤特任助教および 査読者には有益なコメントをいただいた.この場を借 りて感謝する.

付録:反射率のエアロゾル光学的厚さ依存性

式(3)に式(2)を代入すると、補正済み反射率 \tilde{p}_t は

$$\tilde{\rho}_t = T^{\perp M} T^{\uparrow M} \rho_t + \frac{\rho_a^M}{T^{\perp R} T^{\uparrow R}}$$
(A1)

となる.式(A1)をエアロゾル光学的厚さの関数とし て評価するためには、ミー散乱による透過率 T^{M} 、 ミー散乱による反射率 ρ_{a}^{M} 、海面反射率 ρ_{t} を決める必 要がある.

このうち ρ_a^{m} と T^{m} については,波長550nmにおけるエアロゾル光学的厚さ τ_{550} を0から1まで0.1刻みで6SVに与えることで決定した。6SVに入力する太陽天頂角 θ_s ,衛星天頂角 θ_v ,相対方位角 $\phi_s - \phi_v$ は,第6図の範囲での中央付近の値として $\theta_s = 54^\circ$, $\theta_v = 47^\circ$, $\phi_s - \phi_v = 66^\circ$ を与えた。6SVに与えるエアロゾルの種類によって計算結果が若干変わるが,衛星 画像からはその種類は分からないため,ここでは"continental"とした。

バンド4の ρ_t は経験的に十分小さいことから0とし、バンド1、2、3の ρ_t については、第8図のヒ

ストグラムと整合するように、0.03, 0.015, 0.005と 与えた. ここで与えた ρ_t には0.005程度の不確実性が 含まれるものの、第8図で曲線の傾きが観測されたヒ ストグラムのピークの傾きと一致していることから、 ここで得られた $\rho_t \ge \tau_{550}$ の関係には一定程度の妥当性 があると考えられる.

略語一覧

- Suomi NPP: Suomi National Polar-orbiting Partnership
- VIIRS: Visible Infrared Imager Radiometer Suite
- 6SV : Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum vector code

参考文献

- 気象庁,2017:ひまわり8・9号ひまわり標準データ利用 の手引き,第1.3版.http://www.data.jma.go.jp/ mscweb/ja/himawari89/space_segment/hsd_sample/ HS_D_users_guide_jp_v13.pdf (2017.9.12閲覧).
- Kotchenova, S. Y. and E. F. Vermote, 2007 : Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II : Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. Appl. Opt., 46, 4455-4464.
- Kotchenova, S. Y., E. F. Vermote, R. Matarrese and F. J. Klemm, Jr., 2006 : Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I : Path radiance. Appl. Opt., 45, 6762-6774.
- Miller, S. D., T. L. Schmit, C. J. Seaman, D. T. Lindsey, M. M. Gunshor, R. A. Kohrs, Y. Sumida and D. Hillger, 2016 : A sight for sore eyes : The return of true color to geostationary satellites. Bull. Amer. Meteor. Soc., 97, 1803-1816.
- 寺坂義幸,2016:ひまわり8号 RGB 合成画像の基礎。平 成27年度予報技術研修テキスト,123-136.

A Proposed Method of Compositing Himawari RGB Imagery for Weather Commentary on Clouds

Yuki TAKANO* • Shotaro WATANABE**

* (Corresponding author) Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo.

(Received 2 May 2017; Accepted 30 October 2017)

^{**} Weather Map Co., Ltd.