

静止気象衛星による雲解析と RGB 合成画像

志水菊広 (気象庁 気象衛星センター データ処理部解析課)

1. はじめに

気象庁は静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号を運用し、日本国内をはじめアジア・西太平洋地域の常時観測を行っている。ひまわり 7 号以前に比べて観測可能な波長帯 (バンド) や空間分解能、観測頻度が格段に向上し、得られる情報量も飛躍的に多くなった。

衛星画像を利用する技術の例として、可視・赤外画像を解釈し必要な情報を抽出する雲解析がある。雲解析を気象現象の実況監視に活かすためには、衛星画像の特性や見方の理解が重要である。

本講義では衛星による雲解析の入門として、ひまわりに搭載されている観測センサ (「可視赤外放射計 (AHI)」) の主なバンドのそれぞれの特徴、雲型と例、そして多バンド画像を活用した RGB 合成画像による雲解析について概要を解説する。

2. ひまわりによる衛星観測について

2.1 ひまわり 8 号・9 号の概要

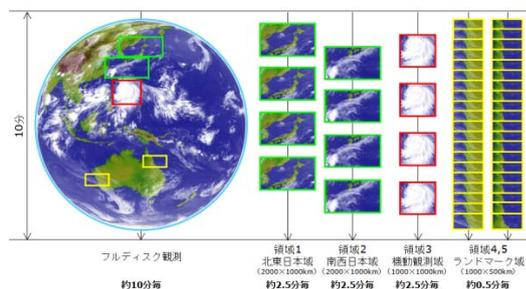


図 1. AHI の観測領域と観測頻度

ひまわり 8 号はひまわり 7 号の後継衛星として 2015 年 7 月に観測を引継ぎ、ひまわり 9 号は 2017 年 3 月に待機運用を開始した。これら 2 機により 2029 年度まで 15 年間運用を行う予定である。高性能の AHI を搭載し、ひまわり 7 号に比べて観測バンド数は約 3 倍、空間分解能は約 2 倍で可視画像が 0.5~1km、赤外画像が 2km、全球 (フルディスク) の観測頻度は 1 時間毎 (北半球は 30 分毎) から 10 分毎となり、観測機能は大きく向上している。

2.2 衛星観測

気象衛星は地球から放射される電磁波を観測

している。可視・近赤外波長帯では地球の表面や雲からの太陽光の反射量、赤外波長帯では地球の表面や雲および大気からの放射量が観測される。地表や雲から放射された電磁波は衛星に到達されるまでの間に、大気によって放射エネルギーの一部が吸収される。吸収の影響は観測される電磁波の波長帯 (バンド) によって異なり、大気による吸収が少ないバンドは「大気の窓」と呼ばれる。大気の窓のバンドでは地表面付近や大気下層を観測することができる。一般に赤外画像と呼んでいるのは、赤外領域の大気の窓に相当する画像のことである。一方で大気中の水蒸気やオゾンなどに強く吸収されるバンドも、AHI で観測することができる。

表 1. ひまわり 8・9 号および 6・7 号の観測バンド

バンド	ひまわり8・9号	ひまわり6・7号	おもな用途	
1	0.47 μm		エアロゾル	可視
2	0.51 μm		エアロゾル	
3	0.64 μm	0.68 μm	下層雲・霧	
4	0.86 μm		植生、エアロゾル	近赤外
5	1.6 μm		雲相判別	
6	2.3 μm		雲粒有効半径	赤外
7	3.9 μm	3.7 μm	下層雲・霧、自然火災	
8	6.2 μm	6.8 μm	上層水蒸気	
9	6.9 μm		上・中層水蒸気	
10	7.3 μm		中層水蒸気	
11	8.6 μm		雲相判別、二酸化硫黄	
12	9.6 μm		オゾン	
13	10.4 μm	10.8 μm	雲画像、雲頂情報	
14	11.2 μm		雲画像、海面水温	
15	12.4 μm	12.0 μm	雲画像、海面水温	
16	13.3 μm		雲頂高度	

可視や近赤外のバンドは太陽光の反射を観測するため日中 (太陽光の当たる領域) のみ利用可能だが、特に可視画像は赤外画像に比べて分解能が高く詳細な解析ができる。また、特に近赤外画像では観測バンドに応じて反射特性が異なることを利用して地表面や雲頂などの様々な状態を知ることができる。

以上のように観測バンドそれぞれに有用な特徴があり、バンド数が増強されたひまわり 8 号・9 号となってからは得られる情報が飛躍的に多くなった。その反面、それぞれの画像を個別に確認するには時間と労力を必要とする。その解決手法として後述する RGB 合成画像がある。

次節では RGB 合成画像を理解するために代表

的な各バンドの画像の特性について説明する。

3. 各バンドの特性

3.1 可視

ひまわりの AHI には可視領域に青、緑、赤に対応する 3 つのバンド (バンド 1、2、3) がある。このうちバンド 3 の画像は従来から利用されている可視画像にもっとも観測特性が近いいため、特に「可視画像」といえばバンド 3 画像を示す場合が多い。

可視画像では太陽光の反射の大きい所は明るく (白く)、小さい所は暗く (黒く) 画像化している。例えば積乱雲などの厚い雲域では明るく、薄い巻雲ではやや暗く、海面は暗い。大気中のエアロゾル等によって散乱されるため、例えば火山灰や黄砂なども可視画像で確認できる。特に波長の短いバンド 1、バンド 2 は散乱の効果が大きいので、エアロゾル観測に適している。

3.2 近赤外

AHI の近赤外の観測バンドは、ひまわりシリーズでは 8 号以降に初めて搭載され、3 つのバンド (バンド 4、5、6) がある。近赤外画像は可視画像と同様に太陽光の反射の大きい所は明るく、小さい所は暗く画像化されるが、陸面・海面などの地表面の状態や、雲頂の雲粒子の組成などによってバンド毎に反射特性が大きく異なるのが特徴である。

バンド 4 は地表面、特に植生からの反射が強い特性を持つ。そのため、可視画像では陸面と海面との境界が不明瞭な一方、バンド 4 画像は明瞭である。雲域からの反射に対しては可視画像と同様である。

バンド 5 は氷と水からの反射の強さが大きく異なる。雲頂付近に氷粒子 (氷晶) を含む氷雲 (上層雲や積乱雲など) からの反射は弱く、雲頂付近に水粒子 (水滴) を含む水雲 (下層雲、中層雲など) からの反射は強い。この雲粒の相の違いの特性により、雲域の組成を識別できる。

バンド 6 は雲粒の大きさ (粒径) で反射の強さが大きく異なる。小さな雲粒ほど反射が強い。また、雲粒の相の違いも反射の強さに影響するが、同じ粒径であれば氷晶のほうが水滴よりも反射が強く、バンド 5 とは逆の特性を持つ。

3.3 赤外

ひまわりの AHI には 10 種類の赤外バンド (バンド 7~16) が搭載されている。あらゆる物質はその温度に応じたエネルギーを電磁波として放射する。赤外画像は観測された地球の表面や雲および大気からの放射量を温度 (輝度温度) に

変換して画像化したもので、輝度温度が低いところは明るく、高いところは暗く表示される。一般に雲のある大気 (対流圏) は上層ほど温度が低いので、赤外画像では上層雲は明るく、下層雲は暗く表示され、海面はほぼ黒色に見える。日中の太陽光の影響を受けるバンド 7 を除き、昼夜に関係なく観測ができるため、常時観測に適している。

バンド 7、13、14、15 は大気吸収の影響が少ない窓領域のバンドで、地表面付近や大気下層を観測するのに適している。日中のバンド 7 画像以外はどれも画像としては見分けがつかないほど違いは見られないが、雲粒の大きさや相 (水・氷) などに対して僅かながら放射されるエネルギーや吸収・透過するエネルギーの割合がバンドごとに異なる。

バンド 7 は短波長赤外領域の $3.9\mu\text{m}$ に中心波長を持ち、赤外放射に加えて太陽放射の反射エネルギーも観測される。すなわち日中においては、観測される地球表面や雲からの放射と太陽光の反射の両方のエネルギーを合わせたものが画像化される。大気中の水蒸気の吸収を特に受けるバンド (バンド 8、9、10) の赤外画像は水蒸気画像と呼ばれる。バンド 8 画像は従来のひまわり搭載の水蒸気画像の性質に近いので、単に水蒸気画像と言えばバンド 8 画像を示す場合が多い。バンド 8 では大気上層の水蒸気の吸収を主に受けるため下層雲は不明瞭となり、雲を直接詳細に解析するには適さないが、雲のないところでも上層の水蒸気の流れやパターンを見ることができるため、上層の気圧の谷や尾根、低気圧の発達などを画像から把握するのに有用である。

バンド 11 は火山ガスなどに含まれる大気中の二酸化硫黄、バンド 12 は成層圏下部に多く存在するオゾン、バンド 16 は大気中の二酸化炭素の吸収の影響をそれぞれ受ける。

赤外差分画像は、2 種類の異なる赤外画像の輝度温度を画素毎に差し引いて画像化したものである。2 種類の画像には様々な組み合わせがあるが、特にバンド 13 と 15、およびバンド 7 と 13 の画像の差分画像が夜間の雲域の識別等でよく利用される。

観測波長、バンド毎にそれぞれ性質が異なるが、人間の目では衛星画像を並べてみてもほとんどわからない程度の差異であっても、差分画像では明瞭に表示できる。例えばバンド 13 と 15 では、薄い上層雲や水蒸気、火山灰・黄砂に対してそれぞれ微妙に異なる性質を持つ。薄い上層雲の例では、赤外画像においては厚い雲域と識別しづらい場合がある。バンド 13 と 15 差分

画像を見ると、バンド 15 のほうが薄い上層雲に対して輝度温度が低く観測される。このため薄い上層雲では差分画像において正の値となり暗く表示されるため、容易に識別できる。

4. 衛星画像による雲型判別

ひまわり 8 号以降、高解像度の画像を得られるようになったが、それでも衛星画像で上空から判別できる「雲型」は地上観測における詳細な雲形判別とは異なる。衛星画像では地上観測に準じ、類似した雲パターンに分類している。一般的には Ci (上層雲)、Cm (中層雲)、St (層雲または霧)、Cb (積乱雲)、Cg (雄大積雲)、Cu (積雲)、Sc (層積雲) の 7 種類に分類する。雲型判別には可視画像と赤外画像を利用し、他の画像は補助的に用いるのが基本である。

可視画像においては雲水量が多く厚い雲ほど反射が強い。Cb など対流雲は層状性雲と比べると雲粒が多く厚いので、明るく見える。

赤外画像では、雲頂高度の高い雲は明るく、低い雲は暗く見える。ただし薄い雲では雲の下方からの放射が雲層を透過するため、実際の雲頂温度より高温に（暗く）見える。そのため薄い上層雲などでは雲頂高度を低く見積もってしまう可能性がある。

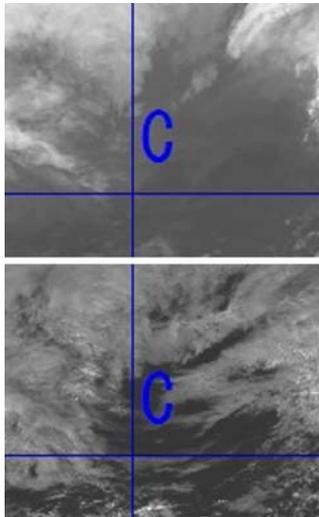


図 2. 雲型判別（霧・下層雲）の例。上段と下段はそれぞれ赤外画像と可視画像。

そのほか雲の「形状」「雲頂（衛星から見た雲の表面）の滑らかさ」「時間変化」も判別に使える。雲の「形状」では地形に沿って広がる低い St あるいは霧や、羽毛状の Ci、塊状の対流雲といった特徴的な形状で判別できる。「雲頂の滑らかさ」では、特に可視画像において雲頂の状態から判別できる場合があり、滑らかな層状雲お

よび凹凸が明瞭な対流雲の判別が有効である。「時間変化」では雲域の動きで上層の強風に流される Ci や、雲域自体のライフサイクルが短い対流雲を動画などで判別できる。

図 2 は雲型判別（霧・下層雲）の例である。上段の赤外画像（図中 C 付近）では海面の同じ温度に近い周囲の雲域と比べ黒く、ほとんど区別がつかない。下段の可視画像では明灰色に見え、雲域の表面は滑らかである。このような特徴からこの雲域は霧または層雲と考えられる。

表 2. 気象衛星で判別される雲型と地上から観測される雲形

層	雲型(衛星画像)	略語(衛星画像)	雲形(地上観測)		略語(地上観測)
			雲形	略語	
上層	上層雲	Ci	巻雲	Cirrus	Ci
			巻積雲	Cirrocumulus	Cc
			巻層雲	Cirrostratus	Cs
中層	中層雲	Cm	高積雲	Alto cumulus	Ac
			高層雲	Altostratus	As
			乱層雲	Nimbostratus	Ns
下層	層積雲	Sc	層積雲	Stratocumulus	Sc
	層雲/霧	St	層雲	Stratus	St
	積雲	Cu	積雲	Cumulus	Cu
(対流雲)	雄大積雲	Cg			
	積乱雲	Cb	積乱雲	Cumulonimbus	Cb

5. RGB 合成画像

5.1 RGB 合成画像とは

先述のように、ひまわり 8 号以降利用できるようになった特徴の異なる 16 バンドの画像および差分画像をすべて詳細に解析するのは現実的ではない。そこで用いられるのが、多様な衛星画像から用途に応じて複数の種類を用いて重ね合わせて表示する RGB 合成画像は、複数バンドから得られる情報を有効利用できる手法である。複数の画像を光の三原色である赤 (Red)、緑 (Green)、青 (Blue) に割り当てて合成することから RGB 合成画像と呼ばれる (図 3 参照)。

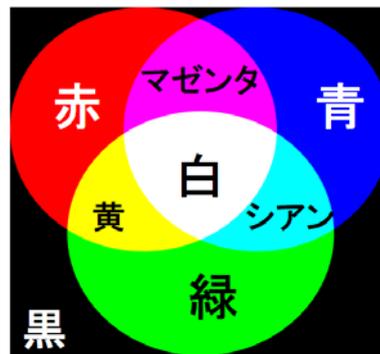


図 3. RGB 合成の原理

各色の画像の寄与（輝度温度や反射率）によって、様々な色調が合成画像上に表示される。赤色と緑色の画像の寄与が大きい画素であれば黄色、緑色と青色であればシアン色といった具合である。RGB合成画像の利点として、①画像の重ね合わせなので作成が比較的容易、②色調の違いによって着目する雲域や現象の識別が容易、③衛星画像そのままの見た目が保たれている、といったことが挙げられる。このため、従来の衛星画像解析に慣れた利用者に限らず比較的使用しやすい。この技術は特に欧州地域で積極的に現業利用されてきたが、人員や資材に限られるアフリカなどの途上国で利用・普及が進められてきた。重ね合わせる画像の種類・組み合わせは、欧州および米国で用途に応じて利用されているものを中心に世界気象機関（WMO）によって標準とされている。本講義では標準的な RGB 合成画像を中心に紹介し、気象庁で独自に開発された合成画像も一部紹介する。本稿では以下に主な RGB 合成画像の概要をいくつか取り上げ解説する。

5.2 Natural Color (日中自然色) RGB

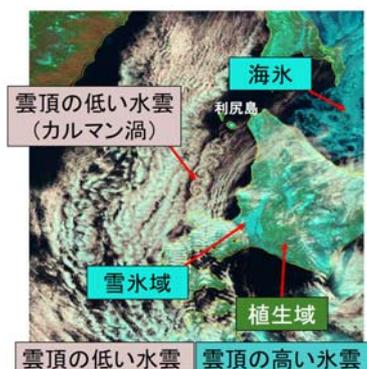


図4. Natural Color RGB 合成画像の例 (2019年1月29日10時 (日本時間))

Natural Color RGBはバンド5、バンド4、バンド3の画像をそれぞれ順に赤・緑・青色の画像に適用した合成画像である。雲域の相（水・氷）や地表の植生、積雪域を識別するのに有用な画像である。

赤色の近赤外のバンド5は、先に述べたように氷と水で反射率が大きく異なり、氷雲では反射が弱いので、残りの緑色のバンド4と青色のバンド3の反射の寄与によりシアン色で表示される。水雲ではバンド5の寄与も加わるので、白色に近い表示となる。

地表に関しては、バンド4による植生からの強い反射の寄与により、植生のある陸地は緑色

で表示される。積雪域や海氷は上記の氷雲と同様にバンド4とバンド3の反射の強い寄与によりシアン色で表示される。

5.3 Night Microphysics (夜雲解析) RGB

Night Microphysics RGBはバンド13とバンド15の赤外差分画像、バンド7とバンド13の赤外差分画像、バンド13の反転画像（通常とは逆に輝度温度が高い画素は明るく、温度が低い画素は暗いグレースケールの画像）をそれぞれ順に赤・緑・青色の画像に当に適用した合成画像である。可視画像や近赤外画像が利用できない夜間の雲解析に有用で、特に霧・下層雲の識別に有効なRGB合成画像である。図5にあるように霧・下層雲域では赤・緑・青色の各画像の寄与が大きく明るい表示となる。特に緑色の赤外差分画像と青色の赤外画像の寄与が大きいのでシアン系の色調で表示されることが多い。ただし霧・下層雲は地表近くの温度に近いので、季節や緯度により色調が変動し、特に冬季や高緯度では下層雲以外の雲域との識別が比較的しづらくなることもある。

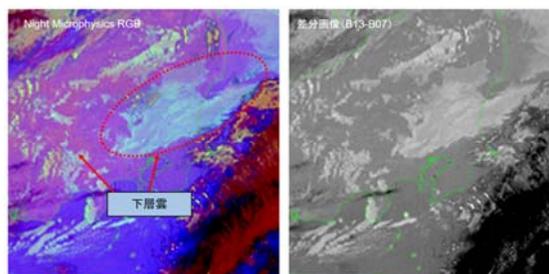


図5. Night microphysics RGB 合成画像の例 (2019年11月25日1時40分 (日本時間))

5.4 Day Convective Storms (対流雲) RGB

Day Convective Storms RGBはバンド10とバンド8の差分画像、バンド13とバンド7の差分画像、バンド3とバンド5の差分画像をそれぞれ順に赤・緑・青色の画像に適用した合成画像である。日中のシビアな現象を伴う積乱雲の識別に有用で、画像上では黄色く表示されているところが特に対流の活発な領域であると考えられる。黄色い領域は、赤色の水蒸気画像差分画像の寄与が大きい領域（厚い雲域）と緑色の差分画像の寄与が大きい領域（強い対流によって雲頂まで達した小さい氷粒子）、そして青色の差分画像の寄与が小さい領域（氷雲）が重なったところに対応している。6種類の画像の情報が含まれ、一見複雑に感じられるが、利用上は主にこの黄色い領域に着目すればよい。

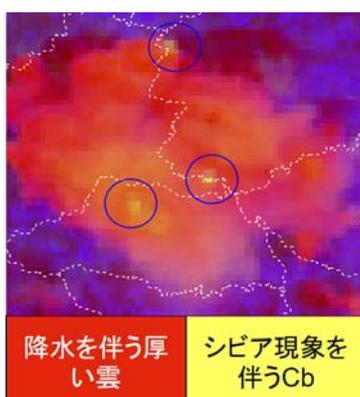


図 6. Day Convective Storms RGB 合成画像の例
(2019 年 8 月 14 日 12 時 50 分 (日本時間))

5.5 Cloud Phase Distinction (雲相判別) RGB

Cloud Phase Distinction RGB はバンド 13 赤外画像、バンド 3 可視画像、バンド 5 近赤外画像をそれぞれ順に赤・緑・青色の画像に適用した合成画像である。日中の雲の厚さ、雲頂の高低および雲粒の組成(相)を一度に解析することができる。例えば上層の高い(輝度温度の低い)氷雲は赤色の赤外画像と緑色の可視画像の寄与が大きく、青色の近赤外画像は寄与が小さい(反射率が小さい)ので黄色の表示となる。この RGB 合成画像は気象庁・気象衛星センターで開発されたもので、米国の気象機関等でも利用されている。

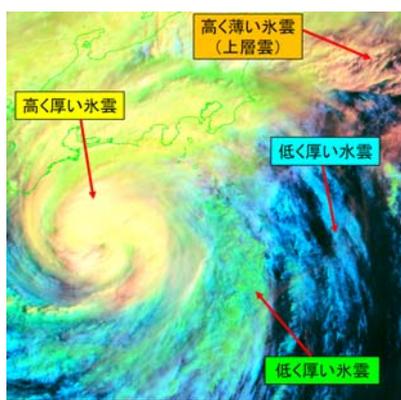


図 7. Cloud Phase Distinction RGB 合成画像の例
(2019 年 10 月 12 日 9 時 20 分 (日本時間))

5. おわりに

ひまわり 7 号に比べて観測機能が大きく向上したひまわり 8 号・9 号では、得られる情報が格段に多くなった。衛星画像の解析には基本となる可視・赤外画像をはじめとする画像の特性や

見方の理解が必要だが、それぞれに特徴的な性質を持つ画像を効率的に活用するには複数種類の画像を重ねて合成表示した RGB 合成画像が有効である。RGB 合成画像は夜間の雲解析など、用途に応じて様々な合成設定が考案されており、現在も改良や新たな合成設定について世界の利用コミュニティなどで議論されている。気象庁においても、ひまわりによる RGB 合成画像を含めた衛星画像やプロダクトの利用・普及を引き続き進めていくとともに、国外の気象衛星の観測バンドの画像を調査し、さらに有用な画像プロダクトの開発を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 尾関一頼, 佐々木政幸, 2018: ひまわり 8 号及び 9 号の概要. 気象研究ノート, (238), 11-21.
- 気象衛星センター, 2000: 気象衛星画像の解析と利用, (財) 気象業務支援センター, 2-25.
- 長谷川隆司, 上田文夫, 柿本太三, 2006: 気象衛星画像の見方と使い方, オーム社, 4-20.
- 志水菊広, 2018: RGB 合成画像. 気象研究ノート, (238), 59-70.
- 志水菊広, 齋藤幸太郎, 山本幹人, 2017: ひまわり 8 号・AHI の 16 バンド画像の特性. 気象衛星センター技術報告 第 62 号, 39-71.
- WMO, 2017: RGB Experts and Developers Workshop 2017 final report (7-9 November 2017, Tokyo, Japan), 30-33.
- <https://community.wmo.int/meetings/rgb-experts-and-developers-workshop-2017>
(2020. 7. 7 閲覧)