

ひまわり 8 号・AHI の 16 バンド画像の特性 Image characteristics of the 16 bands of Himawari-8's AHI

志水 菊広*¹ 齋藤 幸太郎*¹ 山本 幹人*¹
SHIMIZU Akihiro SAITOU Koutarou YAMAMOTO Mikito

Abstract

Meteorological Satellite Center creates educational materials and conducts various types of training on the use of RGB composite imagery, and works to raise awareness of how to effectively utilize the 16-band imagery provided by the AHI on board Himawari-8. These efforts have produced tangible results to date. In this area, proper understanding of the RGB composite technique requires knowledge of the image characteristics of each component band. There is a significant body of literature on multiband imagery in Europe and North America, but such references in Japanese are not abundant. This report is intended to contribute to further utilization of Himawari imagery in individual fields, including that of operational forecasting.

要旨

気象衛星センターは、これまで RGB 合成画像の利用方法に関する各種研修・資料作成等を実施し、ひまわり 8 号に搭載された AHI の 16 バンド画像の効果的な利用方法の啓発に努め、今まで一定の成果をあげてきた。ここでさらに RGB 合成画像技術をより深く正確な理解を得るためには、合成要素である各バンドの画像特性の知識が不可欠である。欧米では多種類のバンドの画像特性に関する文献が豊富にある一方、我が国ではこういった解説資料に乏しいのが現状である。本報告の内容は予報現場をはじめとする各分野におけるひまわり画像の利活用に資することを目的とする。

1. はじめに

平成 27 年(2015 年)7 月 7 日からひまわり 7 号に代わり正式運用を開始したひまわり 8 号には最先端の観測機能を有する可視赤外放射計 (AHI) が搭載されている。ひまわり 8 号は米国や欧州などの他の次世代静止気象衛星に先駆けて運用を開始したことから、国際的にも大きな関心・期待が寄せられてきた (気象衛星センターウェブサイト, 2016)。

AHI ではひまわり 7 号の放射計に比べて大幅に観測機能が向上し、特に観測バンドは 5 種類から 16 種類に増加した (ひまわり 7 号 (MTSAT-2) 以前では「チャンネル」と呼称されてきたが、8 号では一般的に「バンド」の用語が使われる)。各バンドが持つ特性を利用することで、衛星画像による雲解析技術等の画像利用技術の向上が期待される。

多種類の観測バンドによる衛星画像の利用はすでに欧州を中心に予報現場などで普及・定着しており、欧州の静止気象衛星 Meteosat (第二世代 Meteosat、以下 MSG と表記) では 12 種類の画像が活用されている (Schmetz et al., 2004)。なかでも複数の画像を色付けして重ね合わせて表示する RGB 合成画像技術は多バンドの画像を効率的に利用できるため

(WMO, 2007 および WMO, 2012)、気象衛星センターにおいても多バンド化を見越して当技術の考察・検討を進めてきた (志水, 2008)。

多帯域のバンドの画像特性の資料については前述の MSG を運用している欧州のほか、様々な観測バンドの放射計やサウンダを搭載した NOAA や Suomi-NPP などの極軌道衛星を運用している米国には比較的多くの調査研究や文献¹があり、気象衛星センターではそれらを参考に一連の調査を行ってきた。一方、国内には日本語による纏まった資料が少なく²、特にリモートセンシング技術を背景とした画像利用の資料に関しては初心者でも理解しやすいものが乏しい状況にある。このため気象衛星センターでは平成 27 年度より部内向けに各種研修用資料を作成し、公開している。

本報告はこれらの資料に記載されている内容をまとめ、気象予報や火山噴煙監視など各分野においてひまわり画像利用の手引きとなるよう、AHI から得

¹ 例えば ABI Bands Quick Information Guides (GOES-R Program Office (NOAA Satellite and Information Service), 2015-2016) を参照。

<http://www.goes-r.gov/education/ABI-bands-quick-info.html>

² 例えば VIS and IR bands of Himawari-8/AHI compatible with those of MTSAT-2/Imager (Murata et al., 2015) を参照。

られる画像の特性と利用方法を包括的に解説する。なお気象衛星画像による雲解析の基本については、気象衛星センター発行の「気象衛星画像の解析と利用」一般気象編をご覧ください。

まず本報告では画像特性の概要について解説し AHI 画像の基本的な特性と利用法を紹介する。次に各バンドの画像特性を紹介する。最後に複数種類のバンドを利用した「差分画像」や「RGB 合成画像」を紹介する。

2. 画像特性の概要

2.1 AHI の観測機能およびバンド

前節で述べたように、ひまわり 8 号に搭載された放射計 (AHI) は、従来の放射計よりも観測バンド数が大幅に増加した。ひまわり 6 号・7 号搭載の放射計は可視 1 バンド、赤外 4 バンドの計 5 バンドで構成されていたのに対し、AHI では可視 3 バンド、近赤外 3 バンド、赤外 10 バンドの計 16 バンドから構成される。AHI 各バンドの応答関数 (Spectral Response Function) を図 1 に示す (気象衛星センター, 2016)。

可視域の 3 バンドは可視光の青、緑および赤の波長帯に対応している。赤外バンドでは赤の実線が応答関数を示し、黒の実線は 1976 年の米国標準大気により放射伝達モデル LBLRTM (Line-By-Line Radiative Transfer Model) を用いて算出された晴天時の大気上端の放射輝度から求められた輝度温度を示す (横田・佐々木, 2013)。大気中の分子による吸収の影響を受けて観測される輝度温度が低い波長帯

が見られる。

AHI は米国の新世代衛星 GOES-R 搭載の放射計 (ABI) とほぼ同等の機能を有しており、観測バンドもほぼ同等である (AHI のみ可視 0.51 μm バンド搭載、ABI のみ近赤外 1.37 μm バンド搭載)。各観測バンドは極軌道気象衛星や地球観測衛星に搭載された放射計で使用実績があり、様々な分野で成果を上げていることから採用された (横田・佐々木, 2013)。

表 1 にひまわり 8 号・9 号の観測バンドと他の衛星に搭載されている類似の観測バンドの対応を示す。「バンド名 (SATAID)」の列にはひまわり 8 号などの衛星画像を表示する内製ツール「SATAID」上で用いられているバンド名の識別名を記載した。表の最右列には各バンドの観測データの用例が記載されている。

本章ではバンドの画像特性のうち可視域、近赤外域、赤外域の各概要について述べる。

ひまわり8号・9号				ひまわり6号・7号			MSG	GOES-R	MODIS	Suomi-NPP	用途の例
バンド番号	バンド名 (SATAID)	水平解像度 [km]	中心波長 (μm)	バンド名	水平解像度 [km]	中心波長 (μm)	中心波長 (μm)	中心波長 (μm)	中心波長 (μm)	中心波長 (μm)	
1	V1	1	0.47	-	-	-	-	0.47	0.47	0.488	エアロゾル
2	V2	1	0.51	-	-	-	-	-	0.56	0.555	エアロゾル
3	VS	0.5	0.64	VIS	1	0.68	0.64	0.64	0.64	0.672/0.64	下層雲・霧
4	N1	1	0.86	-	-	-	0.81	0.86	0.86	0.865	植生, エアロゾル
5	N2	2	1.6	-	-	-	1.64	1.61	1.64	1.61	雲相判別
6	N3	2	2.3	-	-	-	-	2.26	2.13	2.25	雲粒有効半径
7	I4	2	3.9	IR4	4	3.7	3.92	3.9	3.96	3.74/3.7	下層雲・霧, 自然火災
8	WV	2	6.2	IR3	4	6.8	6.25	6.19	-	-	上層水蒸気量
9	W2	2	6.9	-	-	-	-	6.95	6.78	-	上中層水蒸気量
10	W3	2	7.3	-	-	-	7.35	7.34	7.34	-	中層水蒸気量
11	MI	2	8.6	-	-	-	8.70	8.5	8.55	8.55	雲相判別, SO ₂
12	O3	2	9.6	-	-	-	9.66	9.61	9.72	-	オゾン全量
13	IR	2	10.4	IR1	4	10.8	10.8	10.35	-	10.76	雲画像, 雲頂情報
14	L2	2	11.2	-	-	-	-	11.2	11.0	11.45	雲画像, 海面水温
15	I2	2	12.4	IR2	4	12.0	12.0	12.3	12.0	12.01	雲画像, 海面水温
16	CO	2	13.3	-	-	-	13.4	13.3	13.3	-	雲頂高度

表 1. 「ひまわり 8 号・9 号」の観測バンドと他の衛星に搭載されている類似の観測バンドの比較。水平解像度は、衛星直下点での解像度。Suomi-NPP は類似のバンドを複数記載。

図 1. AHI 各バンドの応答関数 (Spectral Response Function) (気象衛星センターウェブページ, 2016 に一部追加)

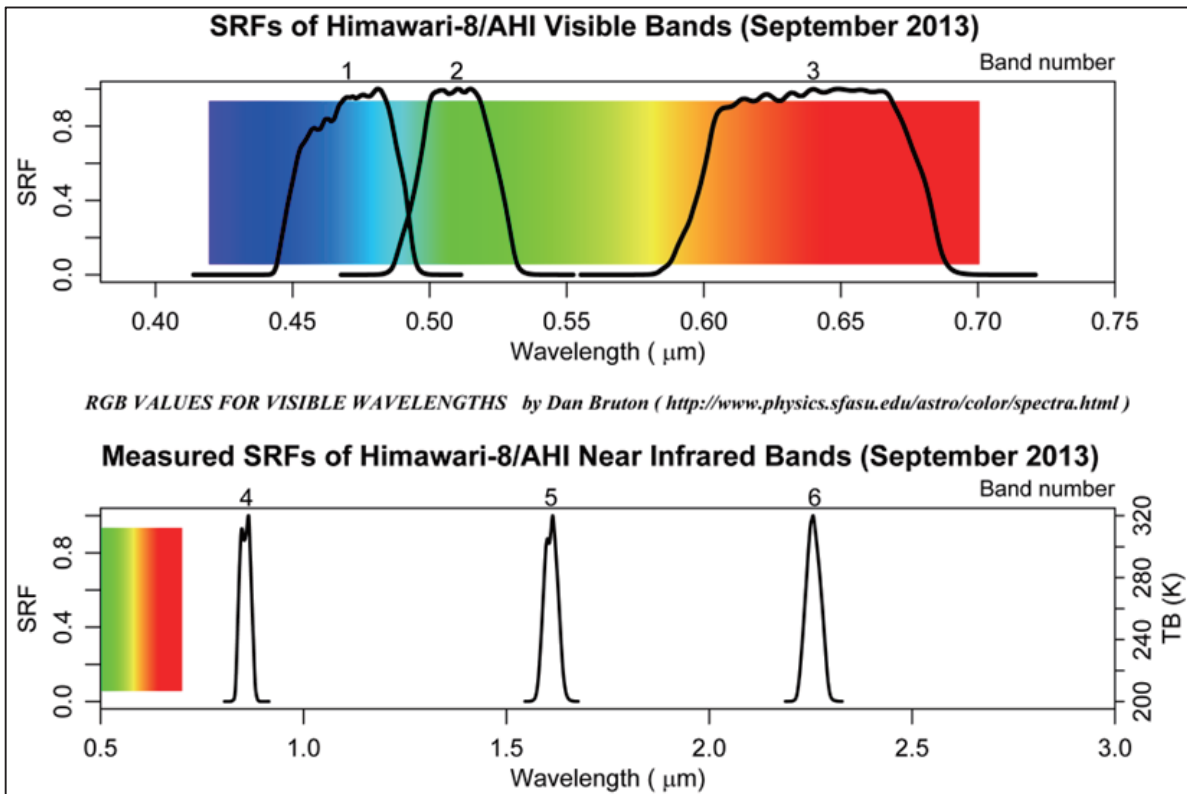


図 1a: 可視・近赤外領域における応答関数

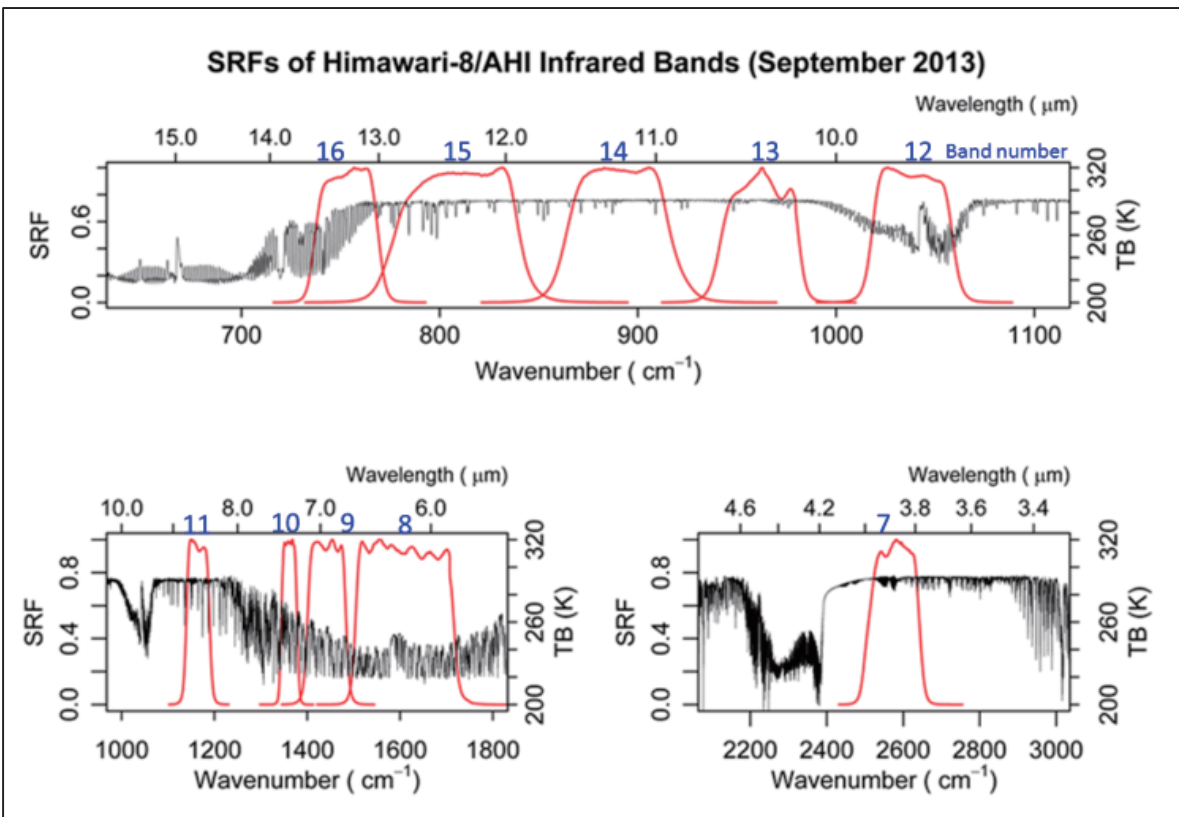


図 1b: 赤外領域における応答関数。青字はバンド番号を示す。赤の実線は応答関数、黒の実線は 1976 年の米国標準大気により放射伝達モデル LBLRTM (Line-By-Line Radiative Transfer Model) を用いて算出された晴天時の大気上端の放射輝度から求められた輝度温度を示す (横田・佐々木, 2013)。

2.2 可視画像

太陽光のうち、可視光の波長帯(およそ下限 0.36 μm から上限 0.76 \sim 0.83 μm) の反射強度を画像化したものを可視画像と呼ぶ。可視画像では反射の大きいところは明るく、小さいところは暗く画像化される。一般に鉛直方向に厚みのある雲³や雪面などは反射が大きく、画像では明るく見える。地面は相対的に反射が少ないため暗く、海面は最も暗い。なお、観測地点の太陽高度の違いによって観測対象の見え方が違ってくことに注意が必要である。観測地点が朝や夕方時間帯や太陽光が低緯度の地域に比べてより低い仰角から入射する高緯度の地域では、単位面積当たりの入射量が少なく反射量も少なくなると、太陽高度の高い時間帯や低緯度での観測よりも暗く表示される(気象衛星センター, 2000)。

また、鉛直に発達した積乱雲などの影によって雲がある場所も暗く表示される場合がある。図 2 は積乱雲の影に入り、観測が困難になった下層雲の例(赤丸付近)である。太陽光のあたらない夜間は真っ暗な画像となる。

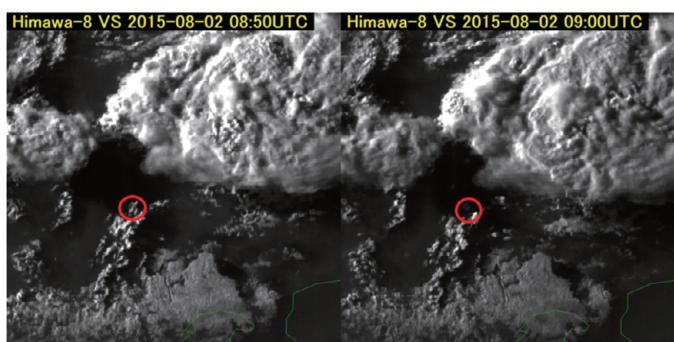


図 2. 可視画像における太陽高度による見え方の影響の例。下層雲(赤丸付近)が積乱雲の影に入り、見かけ上観測が困難になった例。

ひまわり 7 号では可視画像は観測バンドが一種類(中心波長約 0.68 μm)であったが、ひまわり 8 号では三種類(中心波長約 0.47 μm : バンド 1、0.51 μm : バンド 2、0.64 μm : バンド 3)となった。可視光域のうちバンド 1 は肉眼で青色、バンド 2 は緑色、バンド 3 は赤色に対応する波長帯となっている。このため、バンド 1 \sim 3 の画像を光の三原色である青緑赤にそれぞれ着色して合成すると、肉眼で宇宙から地球を見た場合に似た「カラー画像(True color RGB

³可視バンドの反射率は雲に含まれる雲粒子の量や密度に依存することから厚い雲と薄い雲の識別ができる。一般に下層の雲は多くの雲粒を含むので、上層の雲より明るく見える。積乱雲のように、鉛直方向に発達した厚い雲は多くの雲粒を含むので明るく見える。薄い上層雲の場合は、下が透けて下層雲や陸地・海面の状態が分かることがある。(気象衛星センター, 2000)

合成画像)」を作成することができる。

可視バンドおよび近赤外バンド観測波長帯の反射特性を図 3 に示す。同じ可視領域でも、観測波長帯の違いによってそれぞれ異なる反射特性を示している。詳細については次節以下にて述べる。

2.2.1 地表面の識別

図 4 に可視画像観測波長帯での地表の状態に対応する反射率(都市部コンクリート: 赤線、砂地: 茶線、広葉樹林: 緑線、牧草地: 黄緑線、積雪: 水色線)を示す(出典は図 3 に同じ)。

- ・図中の応答関数のうち、もっとも左側がバンド 1 のものである。地表面の反射特性に注目すると、積雪に対する反射が特に大きいことがわかる。
- ・バンド 2 (図 4 中央の応答関数) については同時刻のバンド 2 画像(図 5)を単独で示すと、オーストラリア大陸内陸のやや明るい領域(砂漠等に対応)などを除き、陸地に対応する領域の反射が概ね少なく暗く見える。図 4 から、中心波長 0.51 μm 付近では植生からの反射が非常に小さいことがわかる。この波長領域付近では植生からの反射のピークは 0.55 μm 付近にあるが、観測バンドの応答関数の幅は狭くほぼ外れている。
- ・図 4 の 0.64 μm 付近の反射特性をみると、可視波長帯の中では砂地に対する反射が比較的大きいことがわかる。

以上の特性を理解しやすい例として可視 3 バンドを合成した True color RGB 合成画像(図 6)を示す。

- ・オーストラリア大陸中央部の砂漠等では、青色のバンド 1 と緑色のバンド 2 の反射の寄与が赤色のバンド 3 に比べ相対的に少ないため、赤茶色で表示される。
- ・前述のように植生からの反射はバンド 2 において少ないため、熱帯雨林等の植生がある領域でも緑色の色調が見られない。

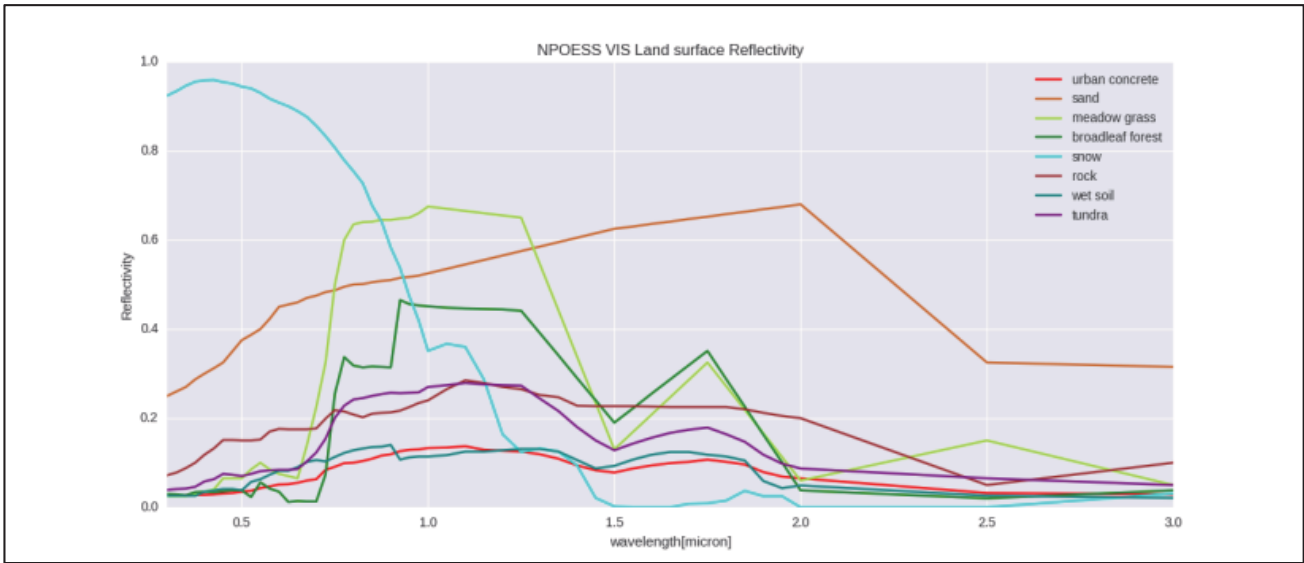


図 3. 可視バンドおよび近赤外バンド観測波長帯の反射特性 (CRTM (Delest P and Han Y, 2008) で使用している地表面の反射率)。データ元は NPOESS (National Polar-orbit Operational Environmental Satellite System)。

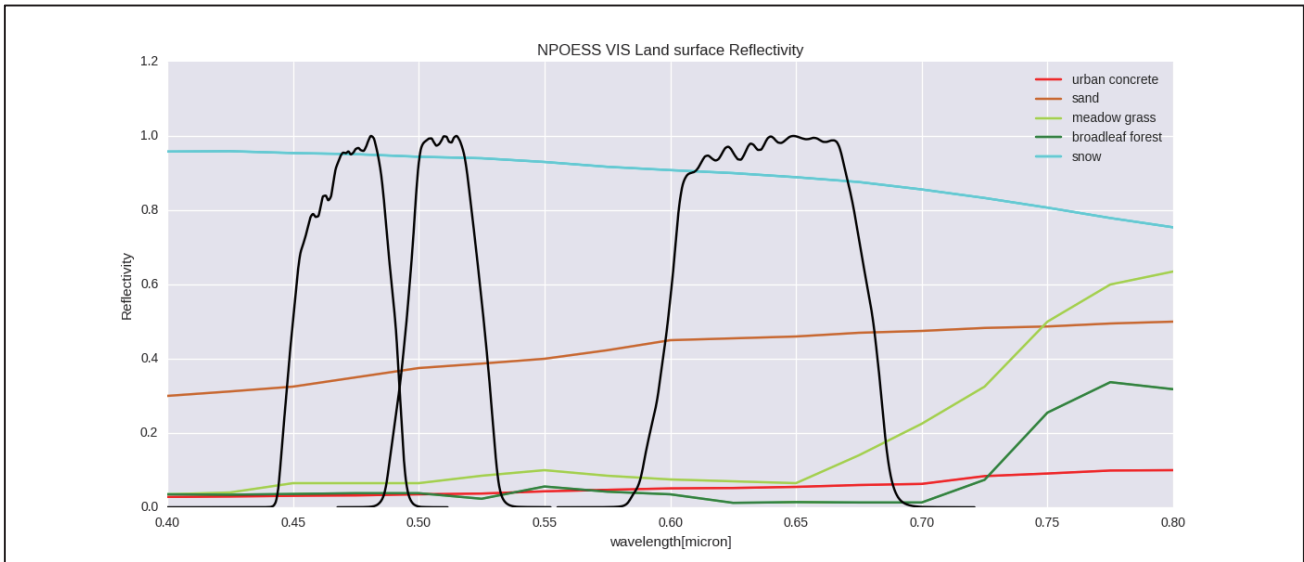


図 4. 可視画像の観測波長帯における様々な地表の状態に対応する反射率 (都市部コンクリート: 赤線, 砂地: 茶線、広葉樹林: 緑線、牧草地: 黄緑線、積雪: 水色線) (CRTM (Delest P and Han Y, 2008) で使用している地表面の反射率, データ元は NPOESS)。

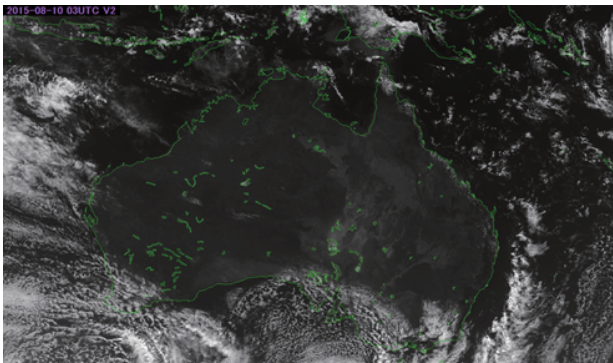


図 5. オーストラリア大陸付近のバンド 2 画像の例

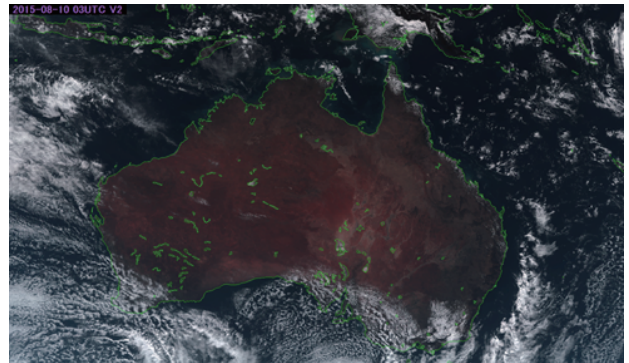


図 6. オーストラリア大陸付近における「True color (トゥルーカラー)」合成画像の例。

2.2.2 エーロゾルの識別

観測波長が最も短いバンド1では比較的小さい粒径をもつエーロゾルも明瞭に識別できるが、これは光の波長と粒子が同程度の大きさの場合に起こる現象であるミー散乱による散乱光が観測されるためである。図7は日本海から北日本にかけて大陸の森林火災による煙が見られる事例である。バンド3よりも、中心波長がより短いバンド1の画像のほうが比較的明瞭に煙を識別できる。

2.3 近赤外画像

近赤外バンドはひまわりシリーズでは8号になって初めて搭載された観測波長帯である。近赤外域は可視光の赤色波長領域よりも波長が長く、肉眼では通常確認できないが、隣接する赤色の可視光の性質に近い。光通信や家電のリモコン、生体内酸素量モニターなど身近なところで利用されている波長領域である。

衛星画像では可視画像と同様に観測された放射エ

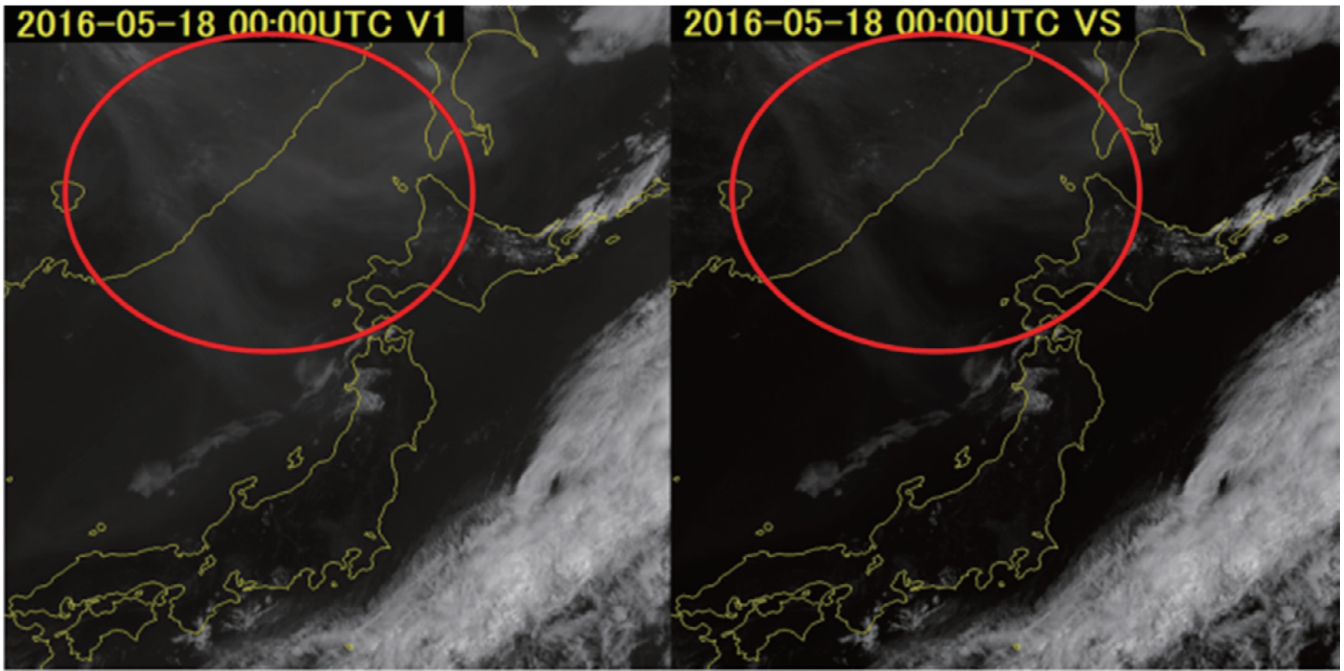


図7. 日本海から北日本にかけて大陸の森林火災による煙（エーロゾル）が見られる事例。左のバンド1とバンド3の画像を比較すると、バンド1で煙が明瞭。

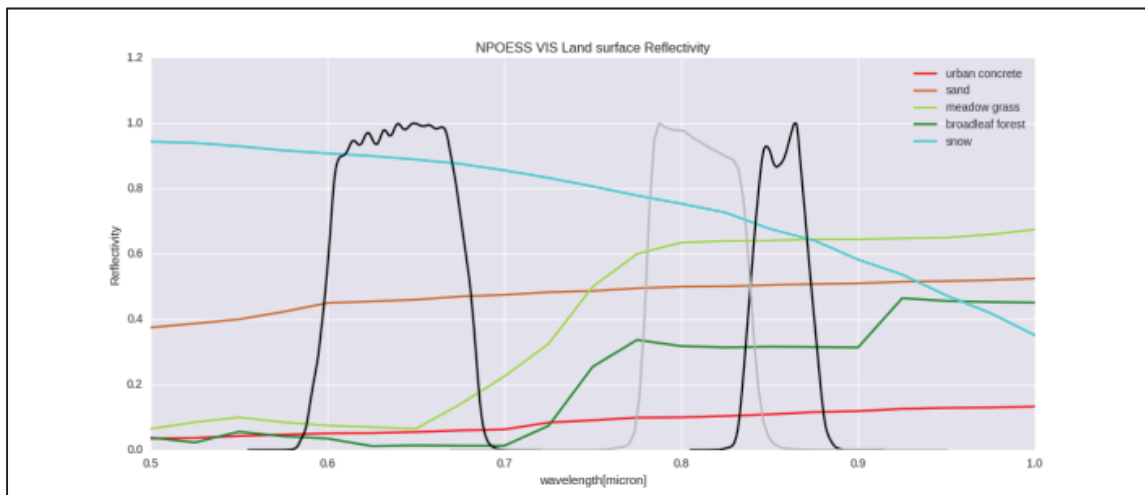


図8. バンド4およびバンド3付近の観測波長帯における地表の状態別の反射率（CRTM（Delest P and Han Y, 2008）で使用している地表面の反射率、データ元はNPOESS。（都市部コンクリート：赤線、砂地：茶線、広葉樹林植生：緑線、牧草地：黄緑線、積雪：水色線）。

エネルギーを反射強度に変換して画像化している。そのため、画像の利用方法としては可視画像と同様に日中（太陽光の当たる領域）で利用できる。一方、地表面の状態や雲に含まれる氷晶などに対してそれぞれ特徴的な反射の性質を有しているため（図3）、それぞれのバンドの画像は可視画像と大きく異なる。

・バンド4画像は特に植生に対して高い反射率を示す特徴がある。バンド4およびバンド3付近の観測波長帯における地表の状態別の反射率を図8に示す。バンド4の観測波長付近では植生（牧草・広葉樹）からの反射率が高いことがわかる。

図9. バンド1から6の応答関数と可視・近赤外領域における複素屈折率の波長依存性。実部（real）は屈折率、虚部（imaginary）は消衰係数（吸収に関わる）と呼ばれる。

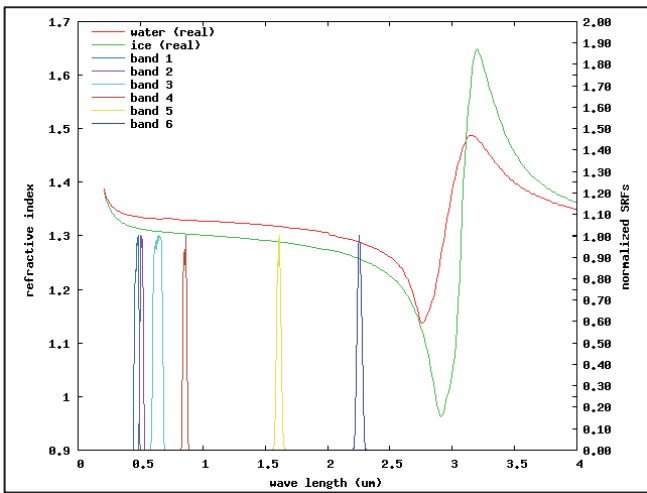


図9a：複素屈折率の実部（real）

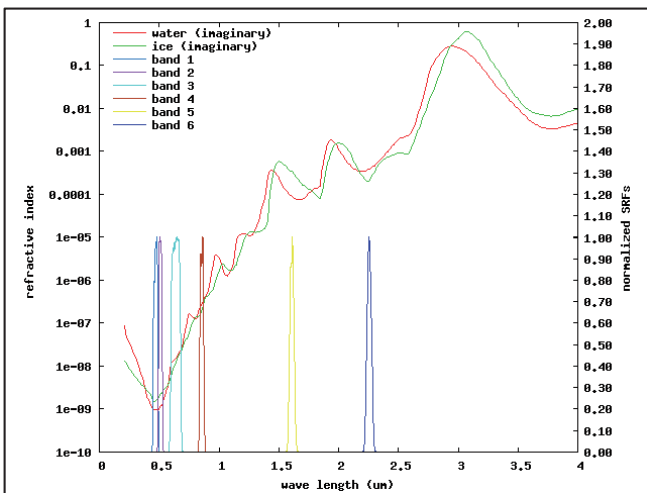


図9b：複素屈折率の虚部（imaginary）

・バンド5、6は雲（雲頂）の粒子の相（液体・固体）によって反射率が異なる。ここで反射率Rは屈折率 n_1 の媒体から屈折率 n_2 の物質の表面を光が垂直に入射する場合、屈折率との関係は以下の式で表される。

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

バンド5、6における粒子の相による反射率の違いは、屈折率を光の吸収が起こる物質に対して拡張した複素屈折率で図9のように示される。ここではバンド1から6の応答関数と可視・近赤外領域における複素屈折率の波長依存性が示されている。

図のうち、実部（real）は屈折率、虚部（imaginary）は消衰係数（吸収に関わる）と呼ばれる。消衰係数においてバンド5とバンド6の観測波長付近では水滴と氷晶それぞれの消衰係数値の大小関係に違いが見られる。バンド5では氷晶に対する値が大きく、バンド6では水滴に対する値が大きい。以下、バンド5、6の特性についてそれぞれ説明する。

・バンド5：図10に示すように水滴からなる中下層雲の反射はバンド4と同様に大きいのにに対し、上層雲など（図中赤い楕円内付近）氷晶を含む雲頂からの反射は小さく観測される。この性質から、雲域に氷晶が含まれる（高度の高い）雲域と、それ以外の雲域の判別が容易になる。

また、下層雲と雪氷域との判別も同様に容易である。地表面からの反射については先述の図3からわかるようにバンド4が積雪からの反射が大きいのに比べて、バンド5付近の波長領域では積雪からの反射が小さく観測される。地面（砂地・岩地）からの反射率は大きく、植生についても比較的大きい。

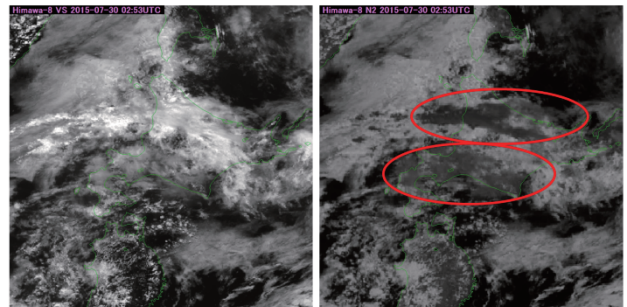


図10. 各衛星画像（左：バンド3、右：バンド5）における雲（雲頂）の反射の違いの例。バンド5では水滴からなる中下層雲の反射が大きく明るいのにに対し、上層雲など（図中赤い楕円の領域付近）氷晶を含む雲頂からの反射は小さいため暗く観測される。

・バンド6：図11にバンド6とバンド3における雲（水滴および氷晶）の光学的厚さ（ τ ）および有効半径（ r_{eff} ）の違いに伴って大気上端（TOA）反射率がどう変化するかを示す（Hayashi (personal communication)）。どちらのバンドも光学的厚さが大きいほど反射率が大きいことのほか、バンド6（ここでは $2.25\mu\text{m}$ ）反射率は粒径の大きさに依存し、粒径が小さいほど反射率は高くなることわかる。またバンド6では光学的厚さが増すにつれ、粒径が同じであれば水滴よりも氷晶の場合のほうが高い反射率になる傾向にある。実際の雲画像を見ると（図12）、厚い雲域にある氷晶からなる上層雲（図中赤い楕円内付近）においてバンド3で明るく反射している領域がバンド6画像では反射率が低く暗い領域として表示されているが、これはバンド6の反射率は雲粒子の相だけでなく雲粒子の粒径にも依存する（この場合は粒径が大きい）ためであり、バンド6画像単独で雲粒子の状態を見極めることは難しい。

地表面の反射に対しても特徴がある。図13にバンド6の観測波長帯付近の応答関数と地表面の各状態（白色（石膏）の砂：薄茶色、植生：緑色、積雪：薄青色、青色の応答関数はGOES-R/ABIのバンド6のもの）に対する反射率を示す（GOES-R Program Office, 2015）。

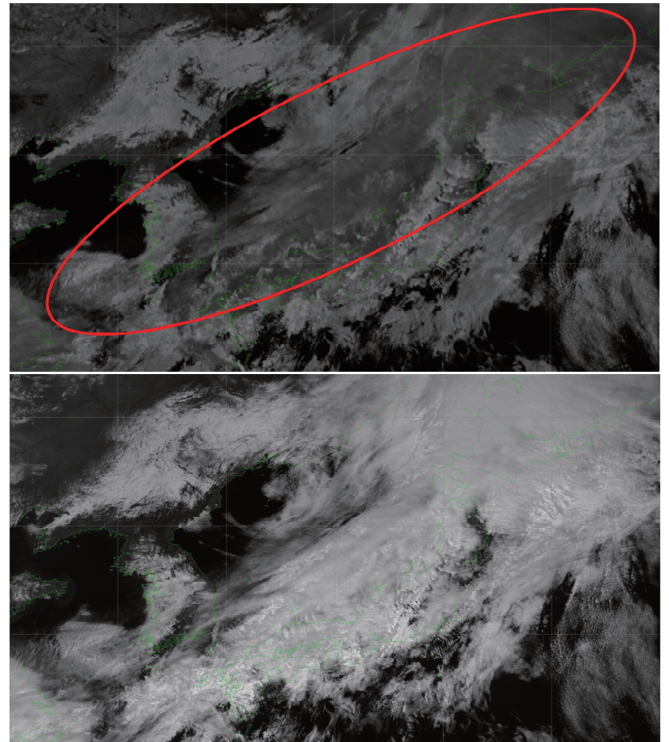


図12. バンド6（上）とバンド3（下）画像における上層雲の見え方の比較。厚い雲域にある氷晶からなる上層雲（図中赤い楕円内付近）においてバンド3で明るく反射している領域がバンド6画像では反射率が低く暗い領域として表示されているが、これはバンド6の反射率は雲粒子の相だけでなく雲粒子の粒径にも依存する（この場合は粒径が大きい）ためであり、バンド6画像単独で雲粒子の状態を見極めることは難しい。

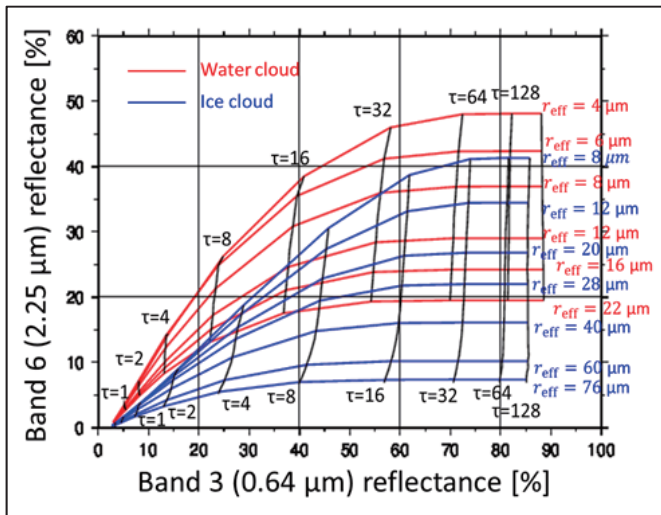


図11. 雲（水滴および氷晶）の光学的厚さ（ τ ）および有効半径（ r_{eff} ）とバンド6とバンド3のそれぞれの大気上端（TOA）反射率との関係（Hayashi (personal communication)）。

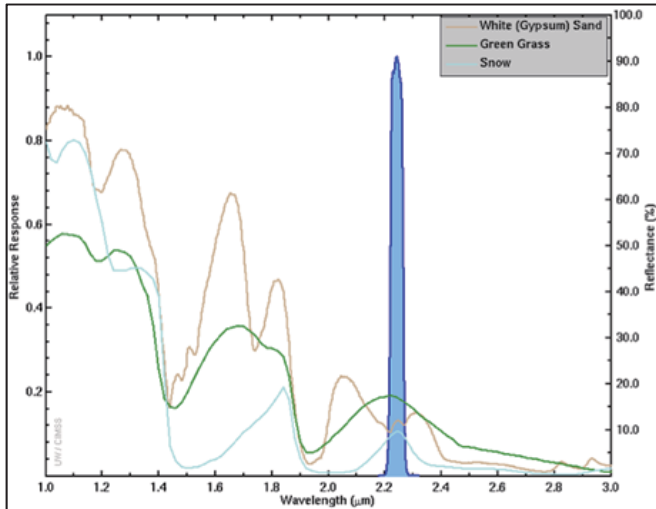


図 13. バンド 6 の観測波長帯付近の応答関数と地表面の各状態に対する反射率。(白色(石膏)の砂:薄茶色、植生:緑色、積雪:薄青色、青色の応答関数は GOES-R/ABI のバンド 6 のもの) (GOES-R Program Office, 2015-2016: ABI Bands Quick Information Guides, GOES-R ABI Fact Sheet Band 6 (“Cloud Particle Size” near-infrared))。

2.4 赤外画像

ひまわり 8 号・AHI の 16 種類の観測バンドのうち赤外バンドは 10 種類を占める。赤外画像は観測された放射エネルギーをほぼ黒体放射であるとみなして輝度温度に変換し、温度分布を画像化したものである。一般に赤外画像を雲解析に用いる場合は、温度が低いほど明るく(白く)画像化しており、雲域は明るく地表や海面は暗く見える。また、二種類の画像の各ピクセル値の差を画像化したものは差分画像と呼ばれ、それぞれの画像の性質の違いを強調してみることができる。各赤外バンドの大気中に含まれる気体分子による吸収特性を図 14 に示す (Clerbaux et al., 2011)。

また、各赤外バンドの荷重関数 (Weighting function: センサが主にどの高度に感度があるかを示す関数) を図 15 に示す。以下に大気中の水蒸気による吸収を大きく受ける赤外バンド画像 (水蒸気画像) とそれ以外の画像に分けて説明する。

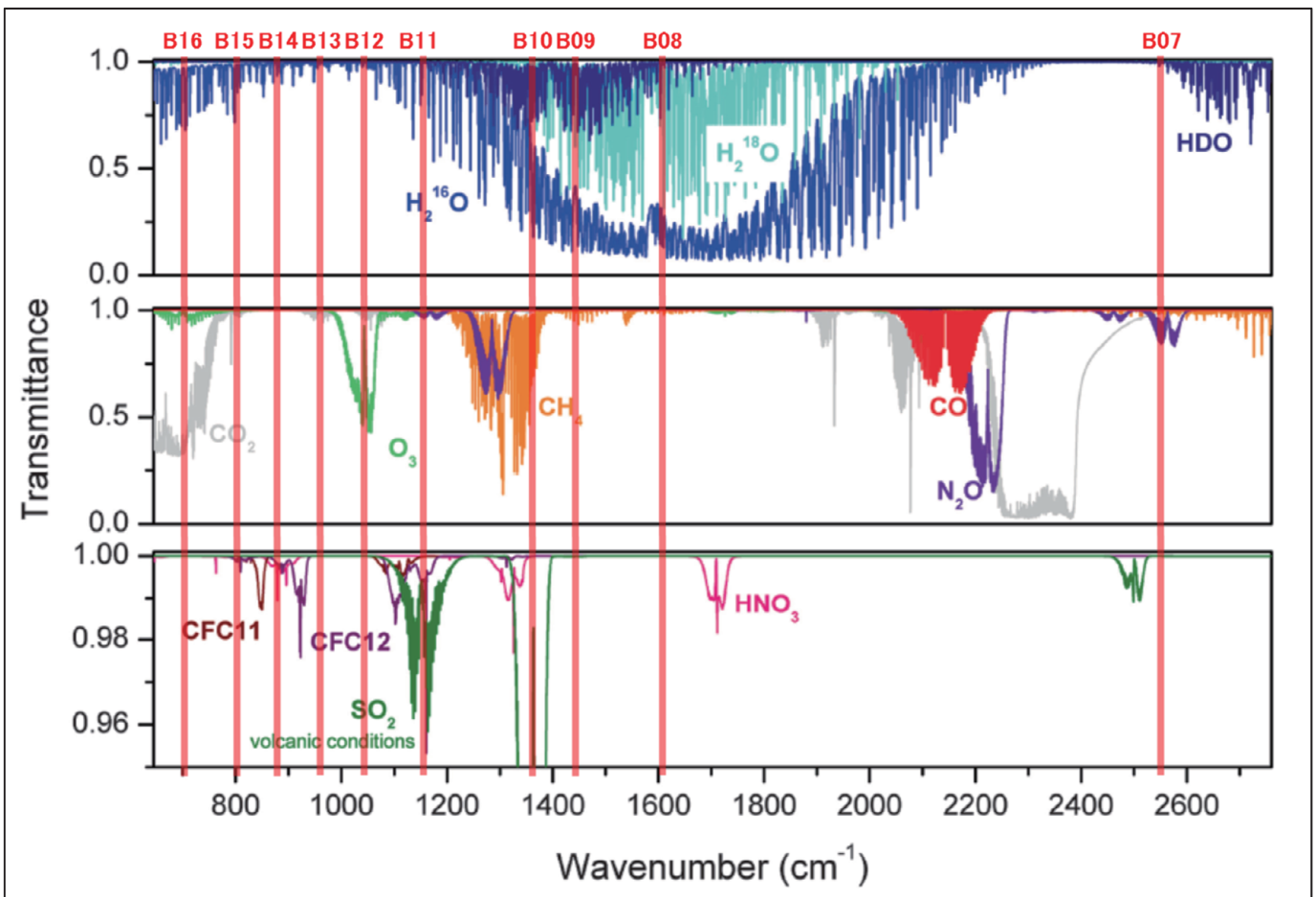


図 14. 赤外バンド波長(波数)帯における大気中の気体分子による吸収特性。縦軸は透過率、横軸は波数、赤線と最上段の赤字はひまわり 8 号の観測バンドを示す (Clerbaux et al., 2011 に一部追記)。

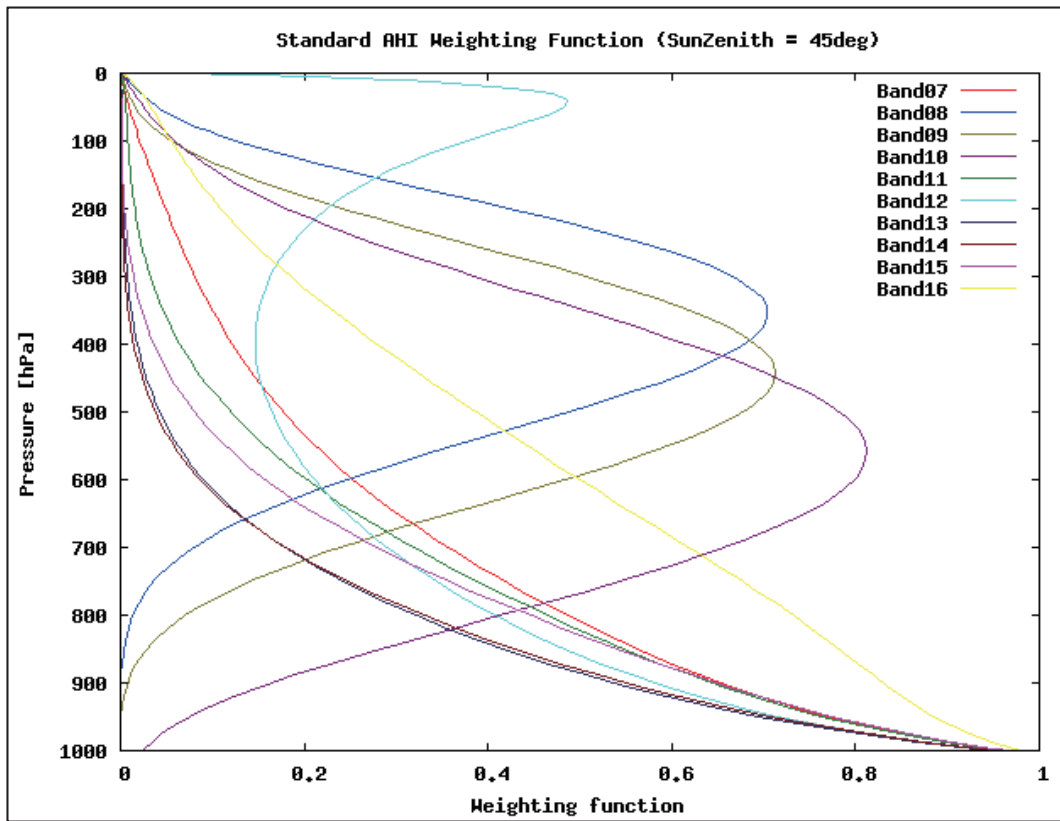


図 15. 各赤外バンドの荷重関数 (縦軸：気圧、横軸：荷重関数)。

2.4.1 水蒸気画像

大気中の気体分子による吸収特性の図 14 を見ると、赤外領域の中で特に水蒸気の吸収を受ける領域がある。AHI の観測バンドではバンド 8 (6.2 μm)、バンド 9 (6.9 μm)、バンド 10 (7.3 μm) が対応する。これら三つのバンドの画像は特に水蒸気画像と呼ばれる。水蒸気画像も他の赤外画像と同じく輝度温度の分布を表しており、温度の低いところを明るく、温度の高いところを暗く画像化しているが、大気中の水蒸気による吸収が支配的であるために、画像での明暗が対流圏上～中層の水蒸気の多寡に対応することが特徴である。三つのバンドの荷重関数を見ると

(図 15)、それぞれ違った高度にピークを持っており、観測される水蒸気の高度もそれぞれ異なっていることが示唆される。ただし、荷重関数にあるようにピークのある特定の高度の水蒸気分布を示しているのではなく、衛星から見てある程度の深さを持った分布を示していることに注意が必要である(隈部, 2006)。

これらのバンドの特徴は以下のとおりである。

- ・大気中の水蒸気をトレーサとして上～中層の大気の流れを可視化することができ、水蒸気画像で現れ

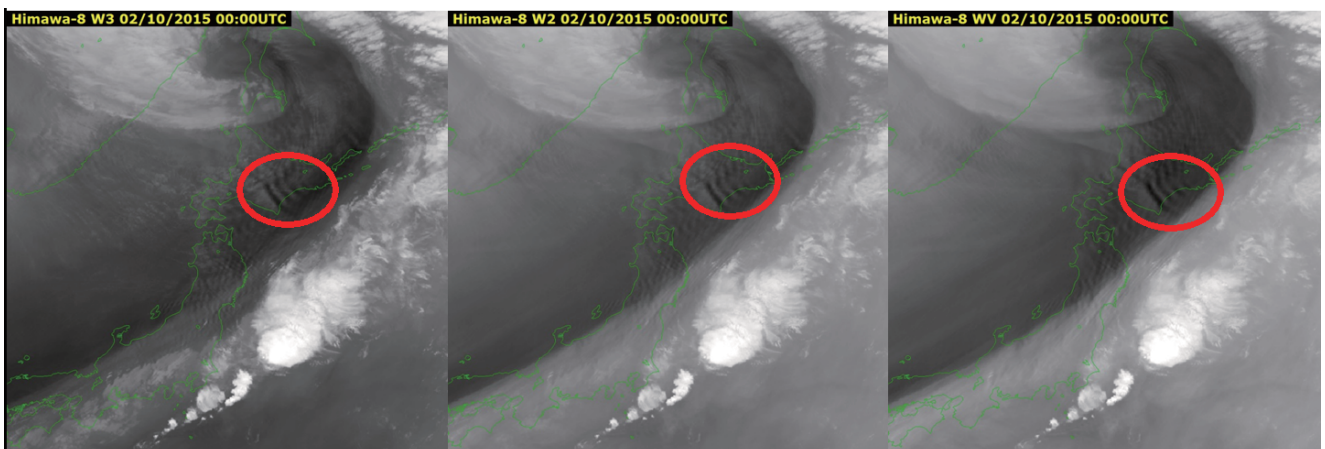


図 16. 水蒸気画像における波状パターン (山岳波) の事例 (図の赤丸付近)。左からバンド 10、バンド 9 およびバンド 8 の画像。

る明・暗域の分布から、上～中層のトラフ・リッジや渦、ジェット気流の位置を推定、明・暗域の時間変化からみた上～中層トラフの深まり、乾燥域の沈降の強さの推定等ができる。

・ひまわり 8 号では解像度が従来の 4km から 2km(衛星直下点)に向上したことで識別が容易となった現象もある。たとえば図 16 に示すように水蒸気画像において波状パターン(図の赤丸付近)がたびたび見出されるようになった。これは山岳波に対応する波動であると考えられる。山岳波は航空機の運航にとって重要な情報となりうるため(気象衛星センター, 2002)、今後の詳細な調査が期待される。

・これらの水蒸気画像を比較して大気中の水蒸気の鉛直構造を解析できる。以下にその実例を記載する。バンド 9 は荷重関数(図 15)では、標準大気で 400～500hPa 付近にピークが見られ、バンド 8 のピークに対応する高度よりやや低い。このような特性からバンド 9 画像ではバンド 8 画像よりやや低い対流圏上中層の水蒸気の多寡を捉えることができる。

図 16、17 に画像の例を示す。画像の全体的な明暗を比較すると上層の水蒸気の影響をより多く受けるバンド 8 のほうが明るく(輝度温度が低く)、相対的にバンド 9 の画像は暗い(輝度温度が高い)。各観測波長帯の水蒸気に対する透過率(図 14)を見るとバンド 8 よりも相対的にバンド 9 は水蒸気透過率が高い。

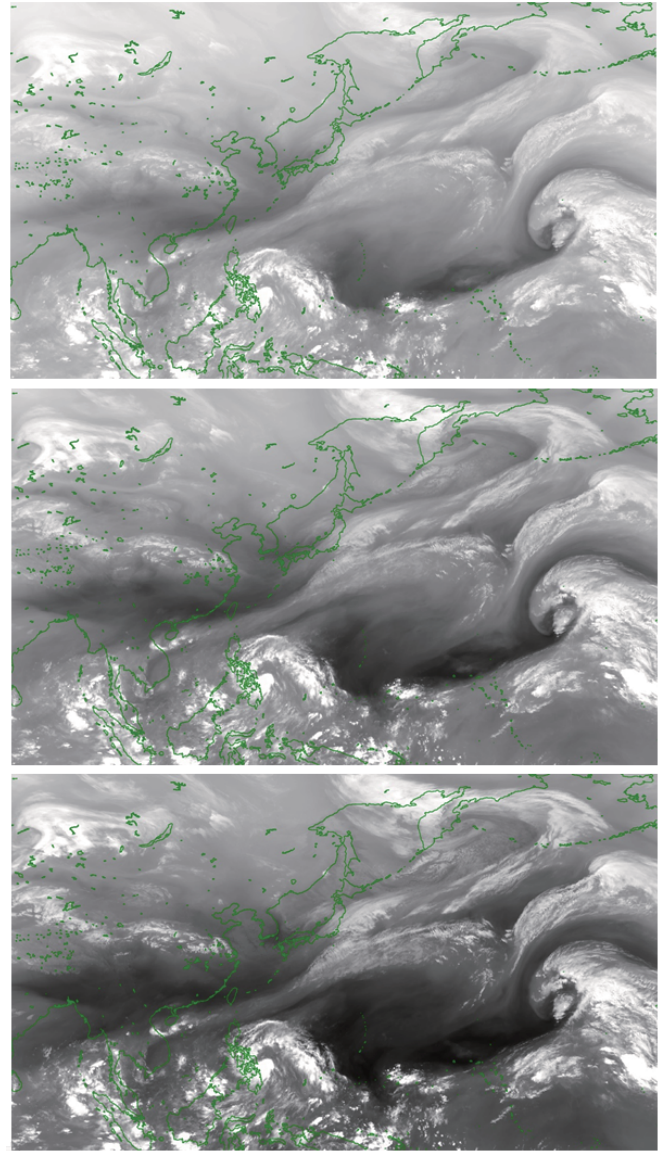


図 17. バンド 8 (上)、バンド 9 (中)、バンド 10 (下) の画像例。

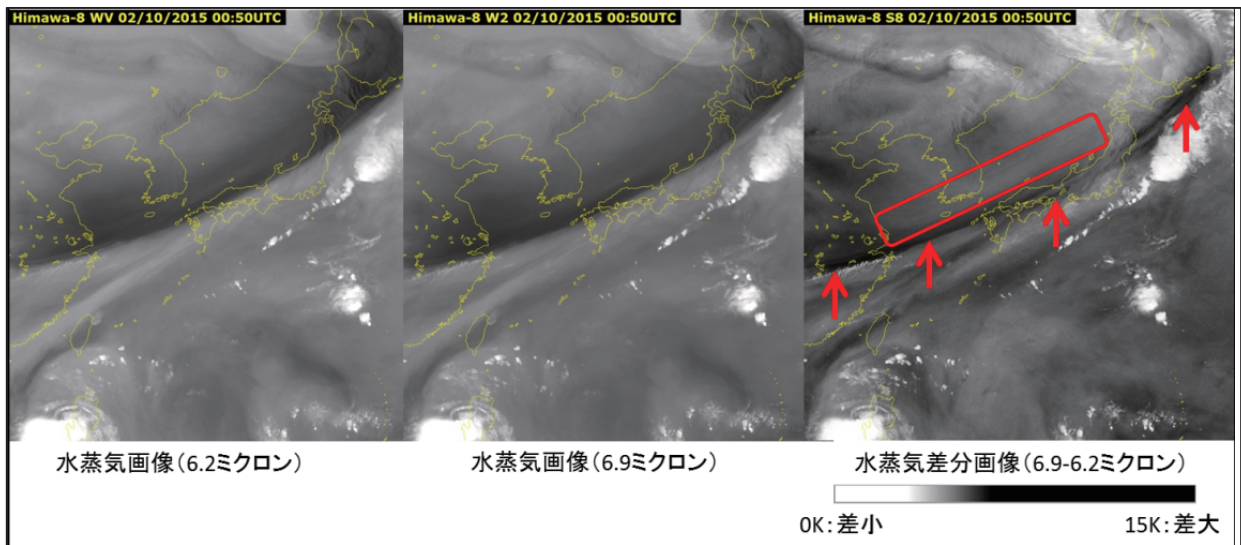


図 18. バンド 8 (左)、バンド 9 (中央) 画像および水蒸気差分(バンド 9-バンド 8) (右) 画像の例。

図 18 にバンド 8、9 の画像と差分画像（バンド 9-バンド 8）を示す。

バンド 8 とバンド 9 の水蒸気画像のどちらも前線付近の明域とその北西側にある暗域、その間にあるバウンダリー（明暗パターンの長く伸びる境目付近）が明瞭である。これらの差分画像では各バンドが感度を持つ高度の違いによる水蒸気分布の差を見ることができる。差分画像では、バンド 8 とバンド 9 の画像の明域・バウンダリー付近に並行する暗く帯状の領域（赤の矢印）がある。また赤の四角で囲った領域は、バンド 8 とバンド 9 の画像の両方（上中層）では暗域（乾燥域）となっている領域で、差分画像上では明るく差分値が小さい。

なお差分画像では差分値が小さい領域が明るい色に対応している。その低緯度側にある暗い帯状の領域は差分値が大きく、かつバンド 8 とバンド 9 の画像の明域にあたることから、上層は湿潤でより低い高度で乾燥していることが示唆される。

水蒸気差分画像（バンド 9-バンド 8）と 400hPa MSM（メソモデル：日本及びその近海の大気を対象とした気象庁の数値予報モデル）の湿数（気温（T）と露点温度（T_d）の差）の重ね合わせ（図 19）と差分画像における A-B の MSM 湿数の断面（図 20）を示した。差分画像の暗い帯状領域を断面で確認すると、上層が湿潤かつ低い高度（400～500hPa）で乾燥している領域に対応しており、バンド 8 画像から中層付近の乾燥空気が侵入・もぐりこんでいることが示唆される。

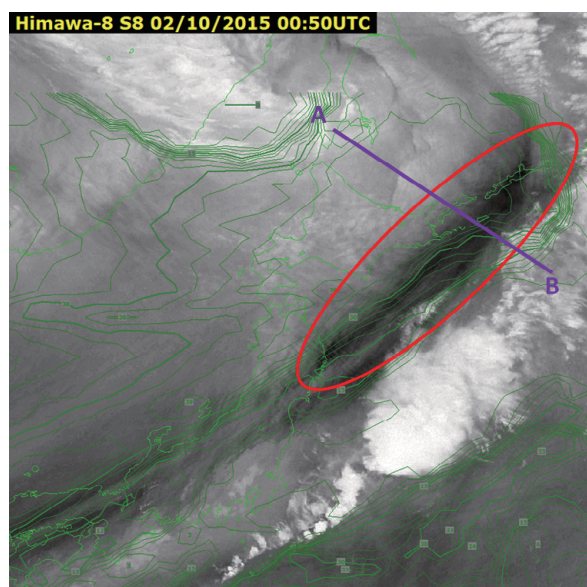


図 19. 水蒸気差分画像（バンド 9-バンド 8）と 400hPa MSM 湿数（T-T_d）の重ね合わせ表示。

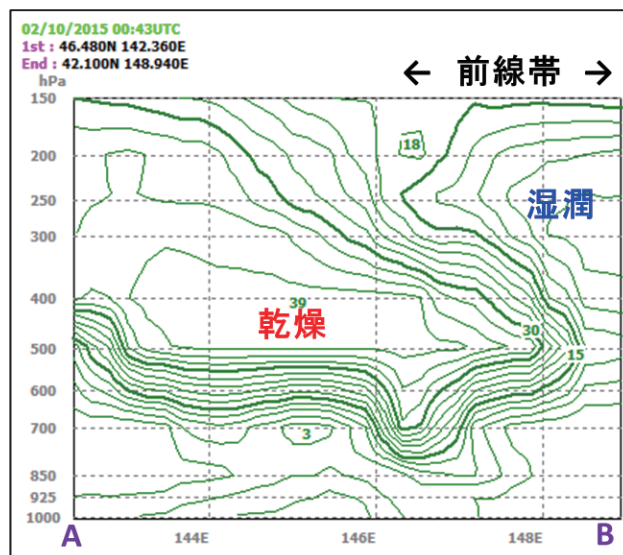


図 20. 水蒸気差分画像（6.9-6.2 μm）における A-B の MSM 湿数の断面図。

バンド 10 は荷重関数（図 15）では、標準大気で 500～600hPa 付近にピークが見られ、水蒸気画像のなかでは最も低い。そのためバンド 10 画像ではバンド 9 よりもさらに低い対流圏中層付近の水蒸気の多寡を捉えることができる。図 16、17 の画像の例で明暗を比較するとバンド 8、9 のほうが明るく（輝度温度が低く）、相対的にバンド 10 の画像は暗い（輝度温度が高い）。そしてバンド 8、9 とは異なる高度の水蒸気の状態がわかることから、バンド 8、9 と併せて利用することで水蒸気の立体的な分布をある程度考察することができる。

2.4.2 「大気の窓」およびその他の赤外画像

図 14 の吸収特性にみられるように、赤外領域のうち大気中の水蒸気による吸収の影響が少ない波長領域は「大気の窓」といわれ、雲域や地表面付近の観測に適している。AHI の観測バンドではバンド 7（3.9 μm）、バンド 11（8.6 μm）、バンド 13（10.4 μm）、バンド 14（11.2 μm）、バンド 15（12.4 μm）が大気の窓領域に対応する。また、二酸化硫黄（SO₂）の吸収の影響を受けるバンド 10 およびバンド 11（8.6 μm）、オゾン（O₃）による吸収の影響を受けるバンド 12（9.6 μm）、そして二酸化炭素（CO₂）の影響を受けるバンド 16（13.3 μm）がある。

各赤外画像には多くの特徴がある。しかし、複数の吸収の効果が重複しているため、一枚の画像のみからでは着目する情報・要素を抽出するのは困難である。この問題を解決する手法として次節で説明する『差分画像』がある。

2.5 赤外差分画像

前述のとおり差分画像は二種類の画像の各ピクセル値の差を画像化したものであり、それぞれの画像の性質の違いを強調してみることができる。気象庁では赤外バンドを複数搭載したひまわり 5 号から利用されてきた。AHI には 16 バンドの観測波長帯があるため多数の差分の組合せが考えられるが、本報告では欧州等においてすでに普及している RGB 合成画像（後述）で利用されている差分画像や、従来から利用されてきたものを中心に 3.2 節で取り扱う。

3. 各バンドの画像および差分画像の特性

3.1 各バンドの画像特性

3.1.1 バンド 1 (0.47 μm)

バンド 1 は 0.47 μm に観測の中心波長を持っている。先に述べたようにバンド 1、2 および 3 は「可視バンド」と称される。バンド 1 は三種類の可視バンドのうちの一つで最も観測波長が短く、従来利用されてきた可視画像 (0.68 μm 帯) よりも波長が短い。中心波長である 0.47 μm は人間の肉眼で感じる可視光のうち、青色として感じる波長領域である。静止気象衛星としては初めて搭載された観測バンドである。

3.1.2 バンド 2 (0.51 μm)

バンド 2 は 0.51 μm に中心波長を持っている。0.51 μm は人間の肉眼で感じる可視光のうち、緑色として感じる波長域である。バンド 1 と同様に従来利用されてきた可視画像よりも波長が短く、静止気象衛星としては初めて搭載された観測バンドである。ほぼ同等の性能を持つ米国の GOES-R/ABI にはこの観測バンドは搭載されていない。

3.1.3 バンド 3 (0.64 μm)

バンド 3 は 0.64 μm に中心波長を持つ。可視光のうち人間の肉眼では赤色として感じる波長である。ひまわり 6 号・7 号における可視センサの観測波長 0.68 μm と中心波長が三種類の可視バンドの中で最も近く、画像としての特性がよく似ている。このため従来の可視画像と同様に太陽光の当たる領域での雲解析や雪氷域の識別や気象庁ウェブページなどでは「可視画像」として公開されている。また、バンド 3 は全 16 バンドの中で最も高い水平解像度を持ち、衛星直下点で 500m である (バンド 1 およびバンド 2 の水平解像度は 1km)。このため、従来の可視画像よりも雲域の表面の様子や形状が明瞭に識別できる。

3.1.4 バンド 4 (0.86 μm)

先述のとおり、バンド 4、5 および 6 は近赤外バンドと称される。バンド 4 の中心波長は 0.86 μm である。欧州の衛星機関、EUMETSAT が運用している MSG (搭載放射計 SEVIRI) にも中心波長・特性に近い観測バンドが搭載されているため、すでに活用されている波長領域である。この画像からは植生の分布がわかるほか、森林火災などの焼け跡がわかる場合もある (図 21) (GOES-R Program Office, 2015)。

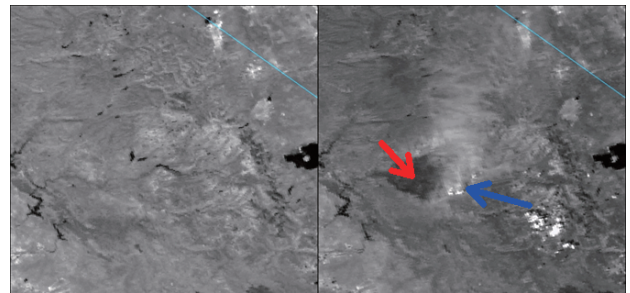


図 21. S-NPP/VIIRS の M7 バンド (0.865 μm) による画像 (カリフォルニアで発生した山火事) の例。左側に山火事発生前の 2013 年 8 月 13 日、右側に山火事発生後の 2013 年 8 月 30 日の画像を示す。右側の画像中央付近に焼け跡の暗い領域 (赤い矢印) があり、領域のふちに沿って火災による煙と「火災積雲 (火災や火山活動に伴って生ずる濃密な積雲) (青い矢印) が見られる (GOES-R Program Office, 2015-2016: ABI Bands Quick Information Guides, GOES-R ABI Fact Sheet Band 3 (The “vegetation” near-infrared band))。

図のうち左側は山火事発生前の 2013 年 8 月 13 日、右側は山火事発生後の 2013 年 8 月 30 日の画像である。また可視画像と同様に海面からの反射率が小さいため、反射率の大きい陸地とのコントラストが大きく、海岸線を明瞭に識別できる (図 22)。この特性を活用して、海岸浸食や洪水、津波被害の監視に利用できる可能性がある。このほか可視画像と同様に太陽光の当たる領域での雲域や霧、雪氷域を識別できる。

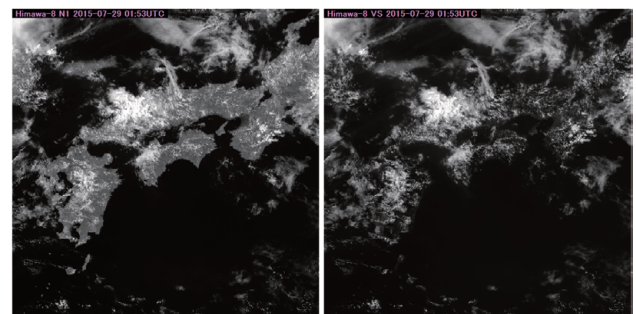


図 22. 各衛星画像における海陸のコントラストの違いの例。バンド 3 (右) に比べてバンド 4 (左) の海岸線が明瞭。

3.1.5 バンド5 (1.6 μm)

バンド5は1.6 μm に中心波長を持つ。バンド4と同様にEUMETSATのMSG/SEVIRIにも同等の観測バンドが搭載されている。2.3節で述べたとおり、粒子の相によって反射の性質が異なるのが特徴である。

3.1.6 バンド6 (2.3 μm)

バンド6は2.3 μm に中心波長を持ち、三種類の近赤外画像のうちで一番波長が長い。また、反射だけでなく、高温の熱源が画像上に現われる場合がある。図23では2.2 μm 帯応答関数とプランク曲線が示されており(GOES-R Program Office, 2015)、1200Kの黒体の放射輝度のピーク付近に対応していることから、火災などの熱源がホットスポットとして検知されることがわかる(バンド5ではより高温の熱源がホットスポットとして検知される場合もある)。図24に

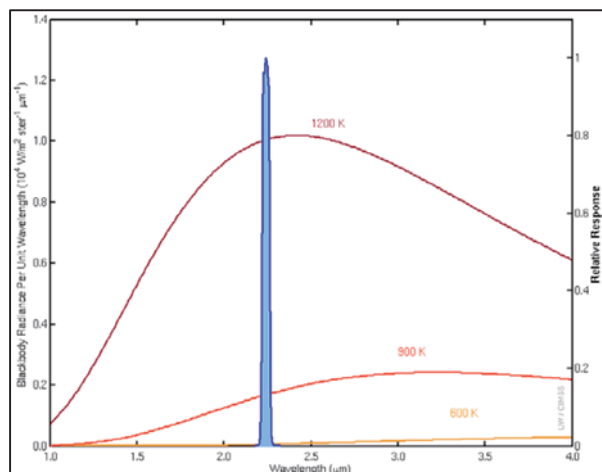


図 23. 2.2 μm 帯における応答関数とプランク曲線。青色はGOES-R/ABIのバンド6の応答関数(GOES-R Program Office, 2015-2016: ABI Bands Quick Information Guides, GOES-R ABI Fact Sheet Band 6 (“Cloud Particle Size” near-infrared))。

2015年11月4日の森林火災の事例を示す。ホットスポットについての詳細は「3.2.1 バンド7差分画像」にて説明する。

3.1.7 バンド7 (3.9 μm)

バンド7は赤外領域の短波長側の3.9 μm に中心波長を持つ。ひまわり6号・7号の3.8 μm (赤外4)の後継として利用されている。3.9 μm 帯の観測波長では地球の放射と太陽放射の両方が寄与する領域であるため、日中は太陽放射の反射の影響も大きく受ける(図25)(Goody and Yung, 1989 および気象衛星センター, 2005)。そのため、日中(太陽光の当たる領域)は地球表面や雲からの放射と太陽光の反射の両方の合算が画像化される。夜間の領域では太陽光反射エネルギーの寄与はないため、地球表面や雲からの放射のみの赤外画像としての特徴を持つ。ここでは日中のバンド7画像の反射特性についてとりあげる(バンド7画像の夜間の射出特性については差分画像の項「3.2.1 バンド7差分画像」を参照)。

日中の3.9 μm の観測波長帯では、地球表面や雲から直接射出されるエネルギーと太陽光の反射の両方が観測される。3.9 μm 帯における水雲と氷晶雲の反射特性を図26に示す。3.9 μm 帯の反射率は雲粒子のサイズ(粒径)と相(水相/氷相)に大きく依存する。粒径については小さいほど反射率が大きい傾向を持つ。

同じ粒径の水滴・氷粒では水滴の反射率が大きい。このような性質のため、小さな水滴を含む下層雲は氷晶雲(上層雲)よりも暖かく(暗く)観測される。同じ下層雲でも海上の下層雲(粒径大)は陸上の下層雲(粒径小)より冷たく(明るく)観測される。

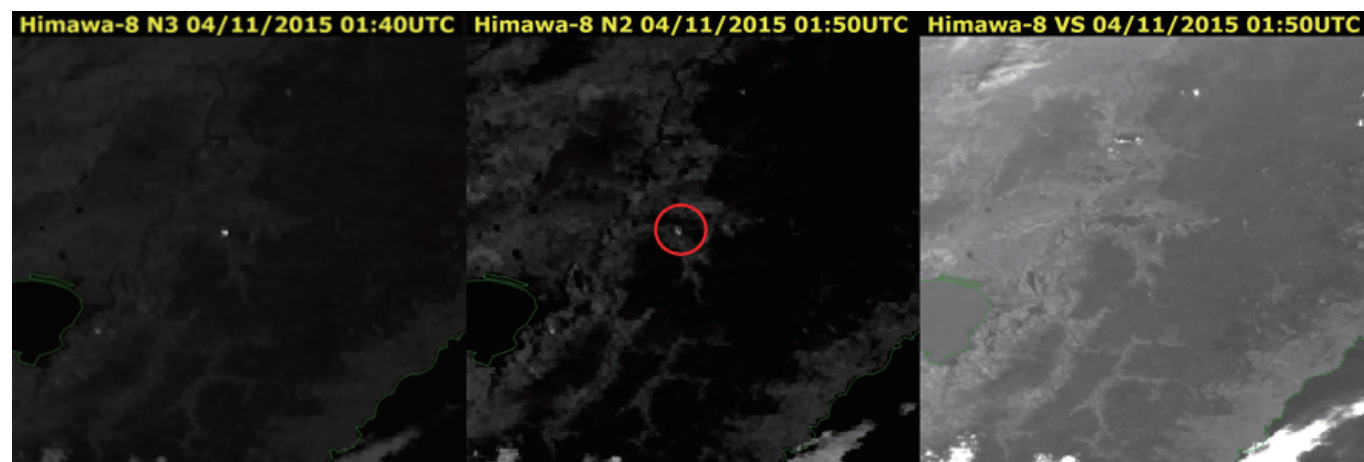


図 24. 近赤外画像によるホットスポットの例(2015年11月4日の森林火災の事例)。

バンド5画像(中央)、バンド6画像(左)におけるホットスポットの例。バンド5画像中央付近(赤丸)に明るいドット状の領域があるが、バンド3画像(右)では見られないことから、高温の熱源(火災)によるホットスポットと考えられる。

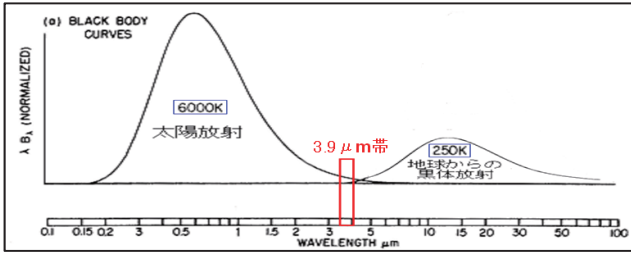


図 25. 黒体放射のスペクトル (Goody and Yung, 1989 および気象衛星センター, 2005)。

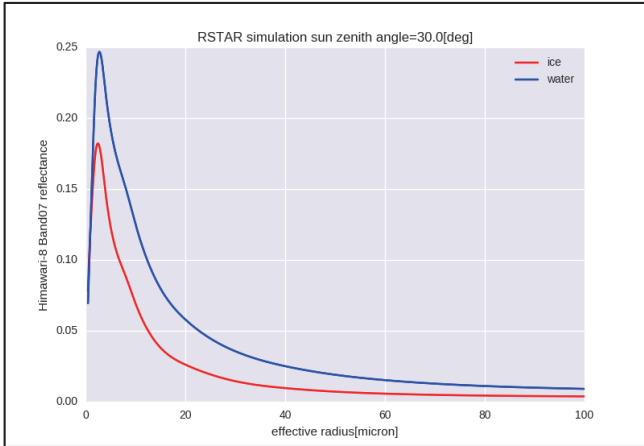


図 26. 3.9 μm 帯での水雲と氷晶雲の反射特性 (横軸：粒子半径 縦軸：反射率) (放射伝達モデル RSTAR (Nakajima and Tanaka (1986), Nakajima and Tanaka (1988), Stamnes et al. (1988)) によるシミュレーション)。

このように 3.9 μm 帯の反射特性を利用し、雲粒子の組成を判別することが可能である。しかし、先に述べたように日中は反射エネルギーのほか、地表面・雲などの放射の合算値が観測されるため画像のみからでは判別が難しい。この問題を解決するため、10 μm 帯などの窓領域観測データを利用して 3.9 μm 帯のデータから太陽光反射成分を近似的に抽出する手法が開発され MSG 画像で利用されている (Kerkmann, 2004)。

図 27a に日中のバンド 7 と EUMETSAT の手法を適用したバンド 7 太陽光反射成分の画像を示す。可視画像・近赤外画像と同様に反射強度に変換して画像化しており、反射の大きいところは明るく表示される。図 27b には参考として雲域の分布を示すバンド 3 と赤外画像の例としてバンド 13 の画像を示す。バンド 7 画像では氷晶からなる上層雲 (図中赤い楕円) は温度が低く明るく観測され、下層雲 (図中青い楕円) は海面よりも暖かく、暗い領域として表示される。同時刻の反射成分を画像化すると、氷晶からなる上層雲からの反射が弱いため暗く、下層雲からの反射が強いため海面よりも明るい。

バンド 7 太陽光反射成分を抽出した画像は、後述する RGB 合成画像でも活用される。

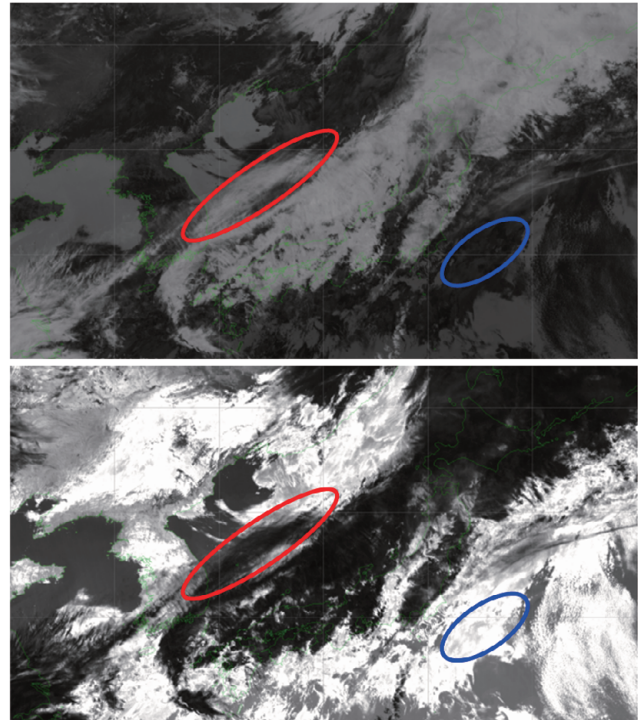


図 27a. 日中のバンド 7 (上) と EUMETSAT の手法を適用したバンド 7 太陽光反射成分 (下) の画像例。

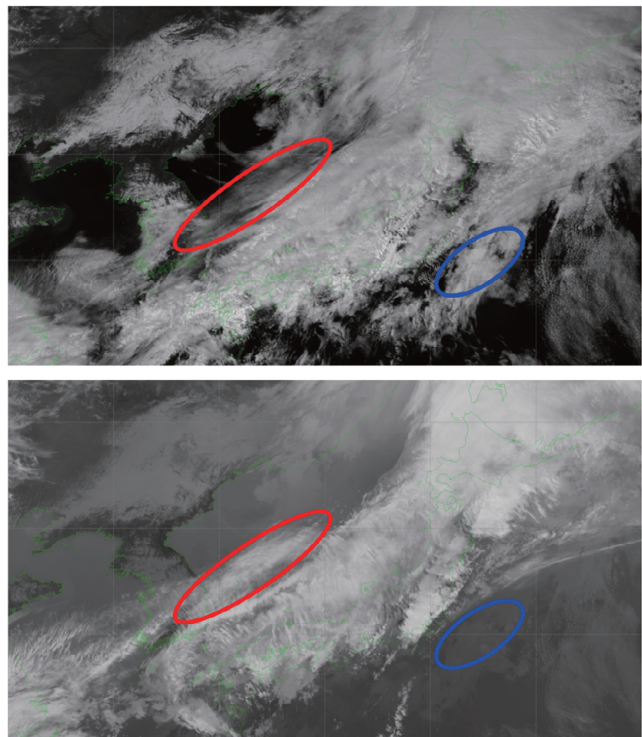


図 27b. 図 27a の各画像と同時刻のバンド 3 (上) とバンド 13 (下) の画像例。

3.1.8 バンド 8 (6.2 μ m)

バンド 8 は 6.2 μ m に中心波長を持ち、水蒸気バンドのうちもっとも短い中心波長をもつ。先述の荷重関数 (図 15) では、標準大気で 300~400hPa 付近にピークが見られる。2.4.1 節で述べたようにバンド 8、バンド 9 および 10 は水蒸気による吸収が多い特性を持つことから水蒸気画像と呼ばれ、画像における明暗がバンド 8 では主に対流圏上層 (ただし先述のように特定の高度のみではない) の水蒸気の多寡に対応する。また AHI 搭載の水蒸気バンドのうち、従来利用されてきたひまわり 6 号・7 号における水蒸気センサの観測波長 (6.8 μ m) ともっとも特性がよく似た波長域であり (Murata et al., 2015)、従来からの水蒸気画像の利用者はバンド 8 画像を後継の水蒸気画像として利用している。

3.1.9 バンド 9 (6.9 μ m)

バンド 9 は 6.9 μ m に中心波長を持つ。先述のバンドの荷重関数 (図 15) では、標準大気で 400~500hPa 付近にピークが見られ、バンド 8 のピークに対応する高度よりやや低い。このような特性からバンド 9 画像ではバンド 8 画像よりやや低い対流圏上中層の水蒸気の多寡を捉えることができる。

3.1.10 バンド 10 (7.3 μ m)

バンド 10 は 7.3 μ m に中心波長を持つ、水蒸気バンドのうちもっとも長い中心波長を持つ。先述の荷重関数 (図 15) では、標準大気で 500~600hPa 付近にピークが見られ、水蒸気画像のなかでは最も低い。そのためバンド 10 画像ではバンド 9 よりもさらに低い対流圏中層付近の水蒸気の多寡を捉えることができる。

また、バンド 10 は大気中の水蒸気だけでなく、二酸化硫黄による吸収の影響があるため、二酸化硫黄が含まれる火山性ガスの識別と追跡にも用いることができる (図 14)。

図 28 にカムチャツカ半島のツパノフスキー火山の噴煙の事例 (2016 年 2 月 9 日 10UTC) を示す。バンド 10 画像 (図 28a) で噴火に由来すると考えられる噴煙が確認できる。バンド 8 画像 (図 28b) でも噴煙が見られるが不明瞭である。

バンド 8 とバンド 10 の差分画像 (図 28c) ではバンド 10 の二酸化硫黄による吸収の影響が寄与するため噴煙が明瞭である。また、次節で述べるバンド 11 (8.6 μ m) (図 28f) でも二酸化硫黄による吸収があり、画像で噴煙が明瞭である。しかし、他の赤外バンドや後述するバンド 13 とバンド 15 の差分画像 (図 28e) でも噴煙が確認できることから、この事例の噴

煙はすべて二酸化硫黄ガスというわけではなく、水蒸気 (または水蒸気が冷却された水滴や氷晶) や火山灰が含まれると推測される。

図 28. カムチャツカ半島のツパノフスキー火山 (赤丸付近) の噴煙の事例。噴煙が東方へ流されていることがわかる。

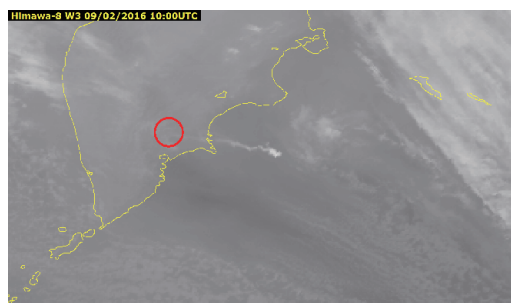


図 28a : バンド 10 画像

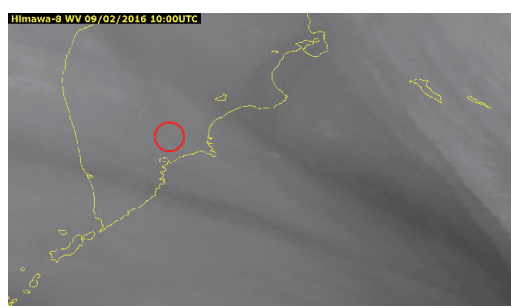


図 28b : バンド 8 画像

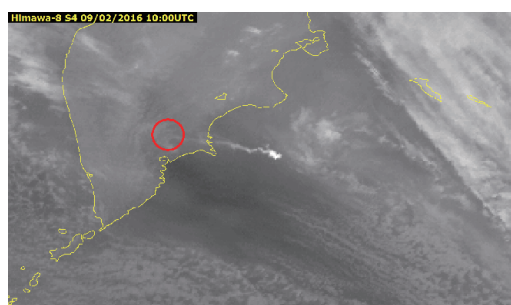


図 28c : バンド 10 とバンド 8 の差分画像
(バンド 10-バンド 8)

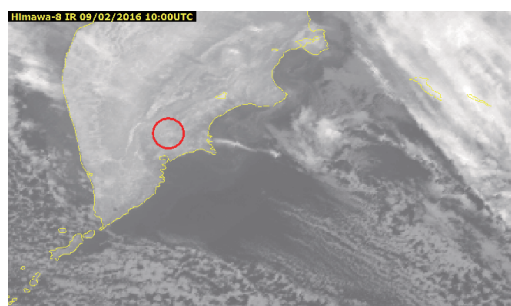


図 28d : バンド 13 画像

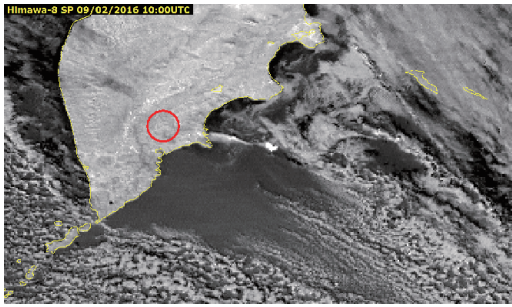


図 28e : バンド 13 とバンド 15 の差分画像
(バンド 13-バンド 15)

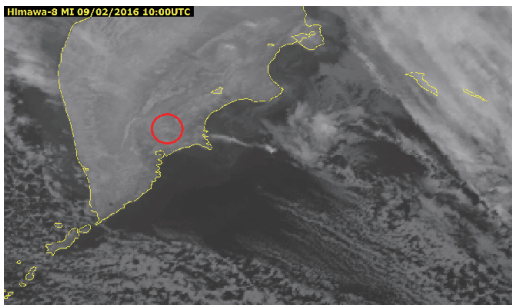


図 28f : バンド 11 画像

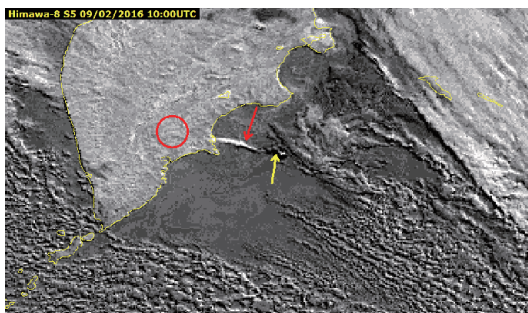


図 28g : バンド 13 とバンド 11 の差分画像
(バンド 13-バンド 11)

3.1.11 バンド 11 (8.6 μm)

バンド 11 は 8.6 μm に中心波長を持つ。図 14 に示したように大気中の水蒸気の吸収の影響を受けにくい窓領域であるが、従来用いられてきた 10 μm 帯などよりも水蒸気の影響を受けるため、海外の資料などでは「汚れた (dirty)」窓領域などと表現される。さらに雲域の水・氷の相や、二酸化硫黄に対して特徴的な性質を持つ。雲粒子の相については後述する主な差分画像「3.2.2 バンド 11 差分」にて説明する。

バンド 11 は二酸化硫黄による吸収の影響を受ける。このため前節のバンド 10 と同様に火山性ガス拡散の識別と追跡にも用いることができる。射出率についても他の赤外バンドに比べて小さく特徴的である (図 29) (Lucey, 2009)。

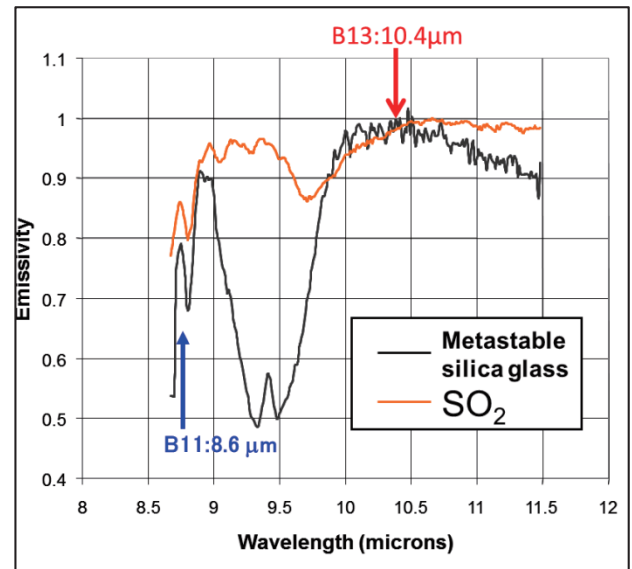


図 29. 赤外波長領域におけるケイ素および二酸化硫黄の射出率 (縦軸: 射出率、横軸: 波長) (Lucey, 2009 より一部改変)。

前に示した図 28 のカムチャツカ半島のツパノフスキー火山の噴煙の事例を再び確認すると、バンド 11 画像 (図 28f) で噴火に由来すると考えられる噴煙が見られる。同じく赤外窓領域のバンドであるバンド 13 (図 28d) でも比較的明瞭に噴煙が見られることから水蒸気 (または水蒸気が冷却された水滴や氷晶) が含まれると考えられる。それに加えて、バンド 11 とバンド 13 の差分画像 (図 28g) では、噴煙に対応する領域が白く (差分値が小さく) 表示され (図中赤色の矢印)、噴煙の先端付近 (図中黄色の矢印) は黒い (差分値が大き) ことから、先端付近では二酸化硫黄が多く含まれると推測される。

3.1.12 バンド 12 (9.6 μ m)

バンド 12 は9.6 μ m に中心波長を持つ。

このバンドは前章の図 14 に示したように大気中の水蒸気の吸収の影響を受けにくい窓領域であるほか、成層圏に多く存在するオゾンの吸収を受けるため、通称オゾンバンドとも呼ばれている。荷重関数を見ると (図 15)、他の赤外窓領域バンドと同様に対流圏下層にピークがあるほか、100hPa 以上の高度にも第二のピークがみられるのが特徴で、オゾンに対する感度が示唆される。

オゾンは低緯度で生成されたのち、成層圏下部における大気循環 (子午面循環)、いわゆるブリューワー・ドブソン循環によって極域へ輸送されると考えられている。例として月平均オゾン全量の世界分布図 (図 30) を見るとオゾン全量は季節ごとに変動があるが概ね極側に多く、低緯度側は少ない分布となっている。バンド 12 の画像例 (図 31) を示すと、大気中の水蒸気等の影響の少ない赤外窓領域のバンド 13 画像に比べ、特に高緯度側が全体的に明るく (輝度温度が低く) 見える (輝度温度の範囲はどちらも 220~300K)。ただし高緯度の輝度温度の低さは地表温度の影響なども考えられるので、オゾンによる吸収が全ての原因とは限らない。

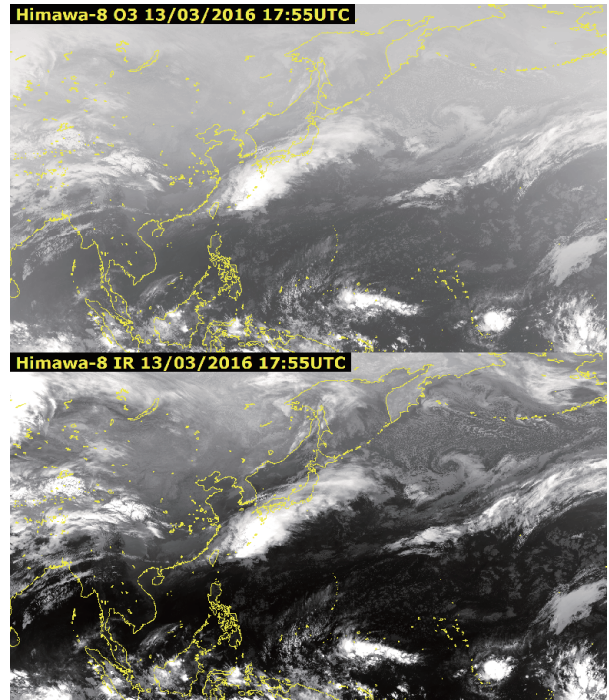


図 31. バンド 12 の画像例 (上 : バンド 12、下 : バンド 13)。輝度温度の範囲はどちらも 220~300K。

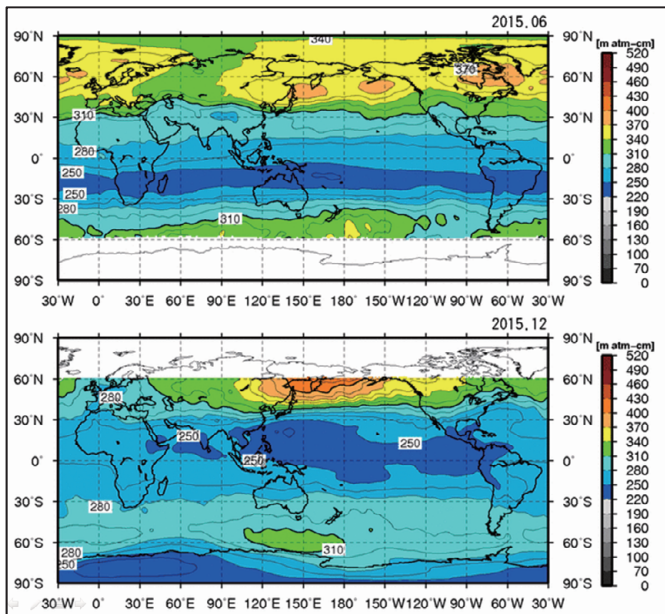


図 30. 月平均オゾン全量(m atm-cm) (上 : 2015 年 6 月、下 : 2015 年 12 月) (気象庁ウェブページより)

3. 1. 13 バンド 13 (10.4 μm)

バンド 13 は 10.4μm に中心波長を持つ。このバンドは図 14 に示すように大気中の水蒸気の吸収の影響を受けにくい窓領域であり、その中でも特に水蒸気による吸収が少ない。バンド 13 と他の赤外窓領域の差分画像を作成することで様々な情報を得ることができ、雲解析においてもっとも基本的な画像として重要である。

また、ひまわり 7 号および 8 号の擬似観測データによる調査 (Murata et al., 2015) の結果、バンド 13 は MTSAT に搭載された従来からの赤外 (赤外 1) 画像と相関が最も強く性質が近いため、従来の赤外衛星画像の後継として利用されている。図 32 にバンド 13 と MTSAT-2 の赤外 1 (IR1 : 10.8μm) の応答関数を示す (NASA, 2016)。重なり合う部分もあるが、バンド 13 のほうが中心波長は短く幅も狭い。

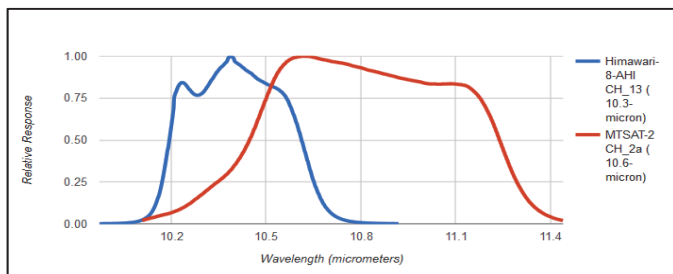


図 32. バンド 13 とひまわり 7 号の赤外 1 (IR1 : 10.8 μm) の応答関数 (縦軸 : 相対応答、横軸 : 波長) (NASA Spectral Response Function Database より作成 : <http://cloudsgate2.larc.nasa.gov/cgi-bin/site/showdoc?mnemonic=SPECTRAL-RESPONSE>)。

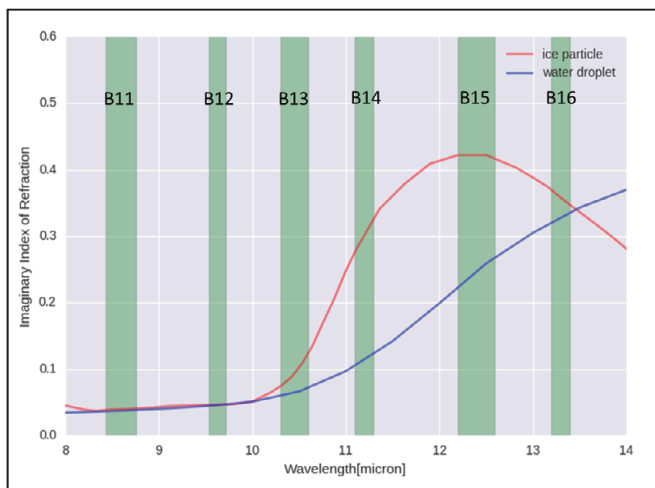


図 33. 赤外域の各観測波長帯 (緑色の波長帯) における水滴・氷晶それぞれの吸収に関わる複素屈折率虚部 (消衰係数) (縦軸 : 消衰係数、横軸 : 波長) (Hale and Querry, 1973 (water) および Warren, 1984 (ice)より作成)。

水滴・氷晶に対する吸収については (図 33)、より波長の長い他の赤外窓領域と比較すると水滴・氷晶ともに吸収の影響が小さいことが示されている (Hale and Querry, 1973 および Warren, 1984)。

このように水蒸気や水滴・氷晶による吸収の影響が小さいため、画像から放射温度を見積り、解析者による主観的な雲解析を行うことに適している (GOES-R Program Office, 2016)。

なお、荷重関数 (図 15) では地表付近に感度のピークがあり、大気の低い層の温度の情報が得られる。衛星プロダクトでは観測データが大気追跡風や高分解能雲情報の算出などで利用される。

ただし少ないとはいえ下層の水蒸気、その他の気体分子による吸収の影響があるため、観測される輝度温度が必ずしも地表面等の温度そのものに対応するわけではないことに注意が必要である。

先述の水蒸気画像 (2.4.1 節) と同様、バンド 13 を含む赤外面像では水平解像度 (衛星直下点) が 4km から 2km に向上了ることにより、従来の赤外面像では見られなかった微細な構造を見ることができるようになった。たとえば火山の火口で従来の解像度では捉えられなかったホットスポット (ホットスポットについての詳細は後述の「3.2.1 バンド 7 差分画像」参照) が、ひまわり 8 号・バンド 13 で確認できる例を示す (図 34)。



図 34. 水平解像度の向上による微細な構造 (火山火口のホットスポット) が識別できる例。矢印の先端付近の黒い点がホットスポット。上がひまわり 7 号の IR1 (10.8μm) 画像、下がひまわり 8 号のバンド 13 画像。

3.1.14 バンド 14 (11.2 μm)

バンド 14 は 11.2 μm に中心波長を持つ。図 14 に示すように大気中の水蒸気の吸収の影響を受けにくい窓領域であり、バンド 14 とバンド 13、ひまわり 7 号の赤外 1 (10.8 μm バンド) の応答関数を比較すると (図 35)、ひまわり 7 号の 10.8 μm バンドの応答関数はバンド 13、バンド 14 の中間に位置しており、これら三つのバンドは画像特性もよく似ている。

バンド 13、バンド 14 の画像を比べると (図 36a) 人間の見た目では区別がほとんどつかないが、性質がわずかながら異なる。図 14 を細かく見るとバンド 13 に比べてバンド 14 の中心波長付近は若干低い透過率であることがわかる。また水滴・氷晶に対する吸収の影響を見ると (図 33)、バンド 13 に比べてバンド 14 は特に氷晶による影響が大きい。

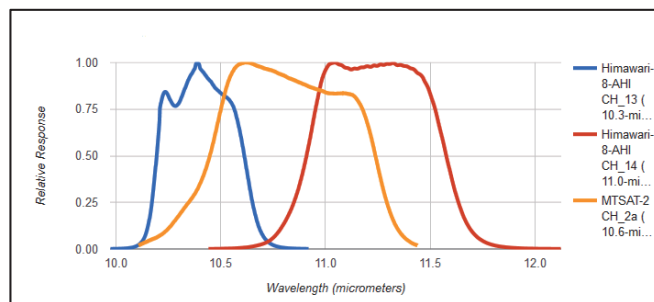


図 35. バンド 14 とバンド 13、およびひまわり 7 号の赤外 1 (10.8 μm バンド) の応答関数 (縦軸: 相対応答、横軸: 波長) (NASA Spectral Response Function Database より作成: <http://cloudsgate2.larc.nasa.gov/cgi-bin/site/showdoc?mnemonic=SPECTRAL-RESPONSE>)。

図 36. バンド 13 と 14 における観測輝度温度の比較。バンド 14 ではバンド 13 よりも観測される輝度温度が低い。

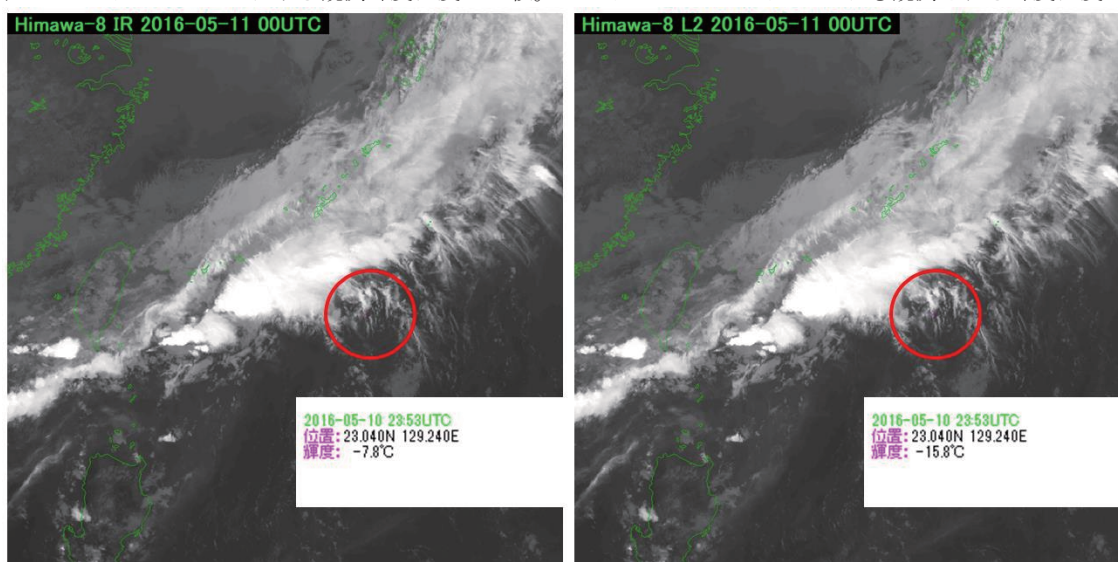


図 36a : 左 : バンド 13 (観測輝度温度 : -7.8°C)、右 : バンド 14 (観測輝度温度 : -15.8°C)

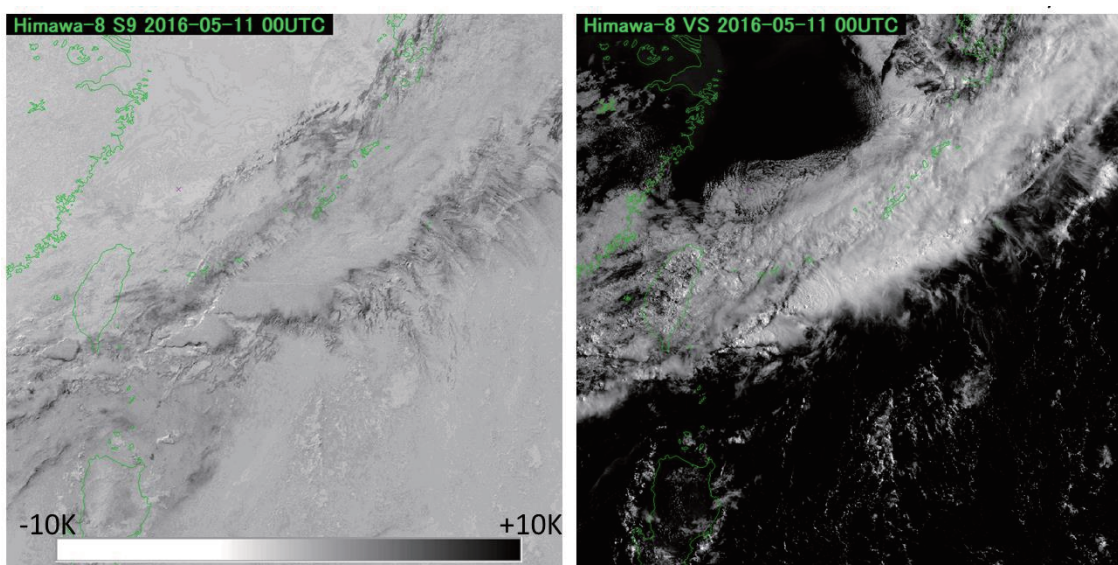


図 36b : 左 : バンド 13 と 14 の差分画像 (バンド 13-バンド 14)、右 : バンド 3 (参考)

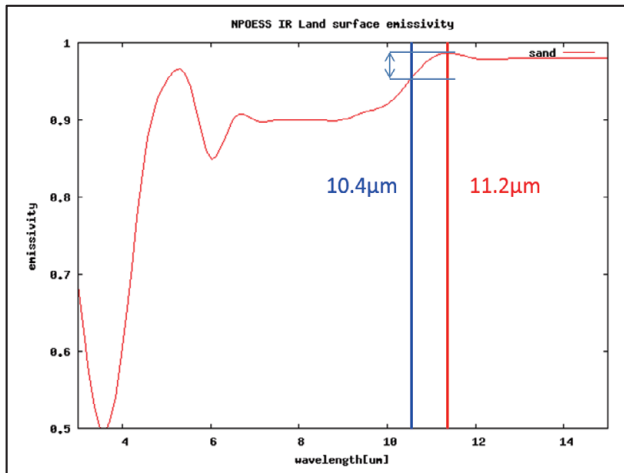


図 37. CRTM（放射伝達モデル）で使用している地表面の射出率（砂地の例）。

射出率についても差異があり、たとえば放射伝達モデルで利用されている射出率を見ると（図 37）、地表が砂地の場合の比較ではバンド 14 の射出率が大きいことがわかる。

実際の画像をあらためて比較すると（図 36a、図 36b）、輝度温度に大きな差異はなく、上層雲に含まれる氷晶による吸収の影響で薄い上層雲については輝度温度が低く観測される。両バンドの差分画像を作成するとよりそのことがより明瞭である。

このようにわずかな特性の差はあるが、バンド 13 とバンド 14 はどちらも従来の赤外画像（赤外 1）の後継として利用できる。気象庁ではバンド 13 を、衛星画像や多くの衛星プロダクトの入力データのため標準的に利用している。これはひまわり 7 号および 8 号の疑似観測データによる調査（Murata et al., 2015）の結果、バンド 13 のほうがわずかに赤外 1 との相関が強いこと、ひまわり 7 号の赤外 1 と赤外 2 の差分画像の比較でバンド 13 とバンド 15 の差分が最も相関が強いことが示されたためである。

3.1.15 バンド 15 (12.4 μm)

バンド 15 は、12.4 μm に中心波長を持ち、赤外窓領域の長波長域に対応する（図 14）。MTSAT に搭載された従来からの赤外（赤外 2）画像とバンド 15 画像は性質が近い（Murata et al., 2015）、従来の赤外 2 衛星画像の後継として利用されている。

図 38 にバンド 15 と MTSAT-2 の赤外 2 (IR2: 12.0 μm) の応答関数を示す。応答関数が重なっているが、細かく見るとバンド 15 のほうがやや長波長側にある。大気中の水蒸気による透過率を見ると（図 14）、バンド 13 に比べてバンド 15 の中心波長付近は透過率が低いことがわかる。

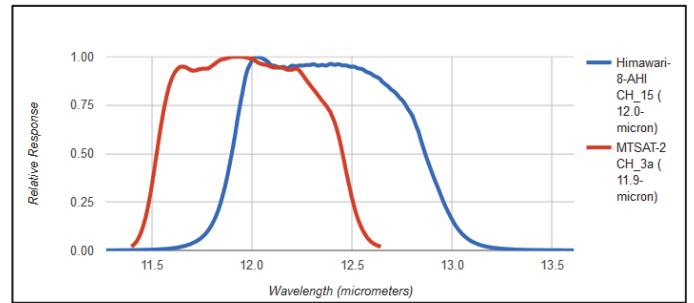


図 38. バンド 15 と ひまわり 7 号の IR2 (12.0 μm) バンドの応答関数（縦軸：相対応答、横軸：波長）（NASA Spectral Response Function Database より作成：
<http://cloudgate2.larc.nasa.gov/cgi-bin/site/showdoc?mnemonic=SPECTRAL-RESPONSE>）。

水滴・氷晶に対する吸収の影響については（図 33）、他の窓領域に比べてバンド 15 は氷晶と水滴の影響が大きく、それぞれの差異も大きい。

また、火山灰や黄砂などに含まれるケイ素に対しても特徴があり、ケイ素の射出エネルギー（赤外放射エネルギー）はバンド 13 よりバンド 15 の方が大きくなる。

以上のようなバンド 15 の性質はバンド 13 との差分画像を用いると明瞭となり利用しやすい。差分画像については後述の「3.2.4 バンド 15 差分」にて説明する。

3.1.16 バンド 16 (13.3 μ m)

バンド 16 は、13.3 μ m に中心波長を持つ。このバンドは図 14 に示したように大気中の二酸化炭素の吸収の影響を受けるのが特徴である。他の衛星に搭載されている類似のバンド帯を含め通称 CO₂ バンドとも呼ばれている。バンド 16 の画像をバンド 13 の画像と同じ輝度温度の範囲で比較すると (図 39)、一様に輝度温度が低いいため、画像全体が白みをおびている。これは前述のように 13.3 μ m 帯は大気中の二酸化炭素 (と水蒸気) による吸収の影響を受けるためである。

図 40 にバンド 13 とバンド 16 画像の輝度温度の比較を示す。積乱雲 (Cb) などの厚い雲域ではバンド 13 とバンド 16 画像の輝度温度の差は小さいが、下層雲や雲のない海面などはバンド 16 画像の輝度温度は低く、バンド 13 との差が大きい。

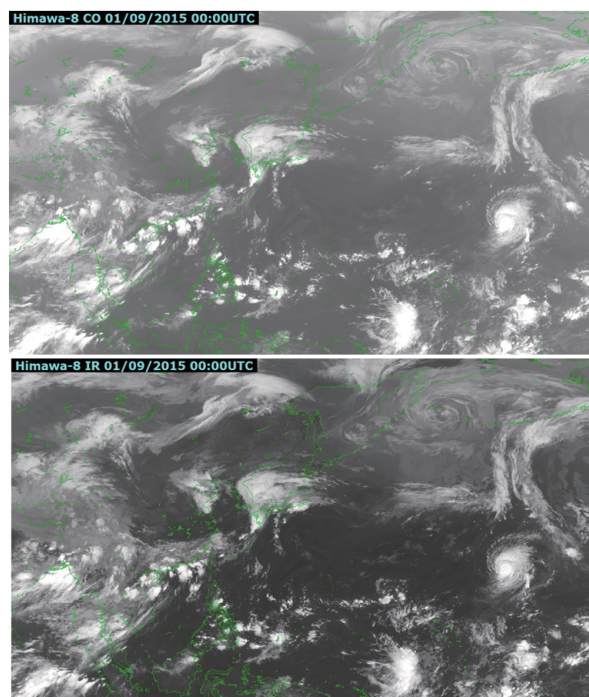


図 39. バンド 16 (上) とバンド 13 (下) の画像比較。

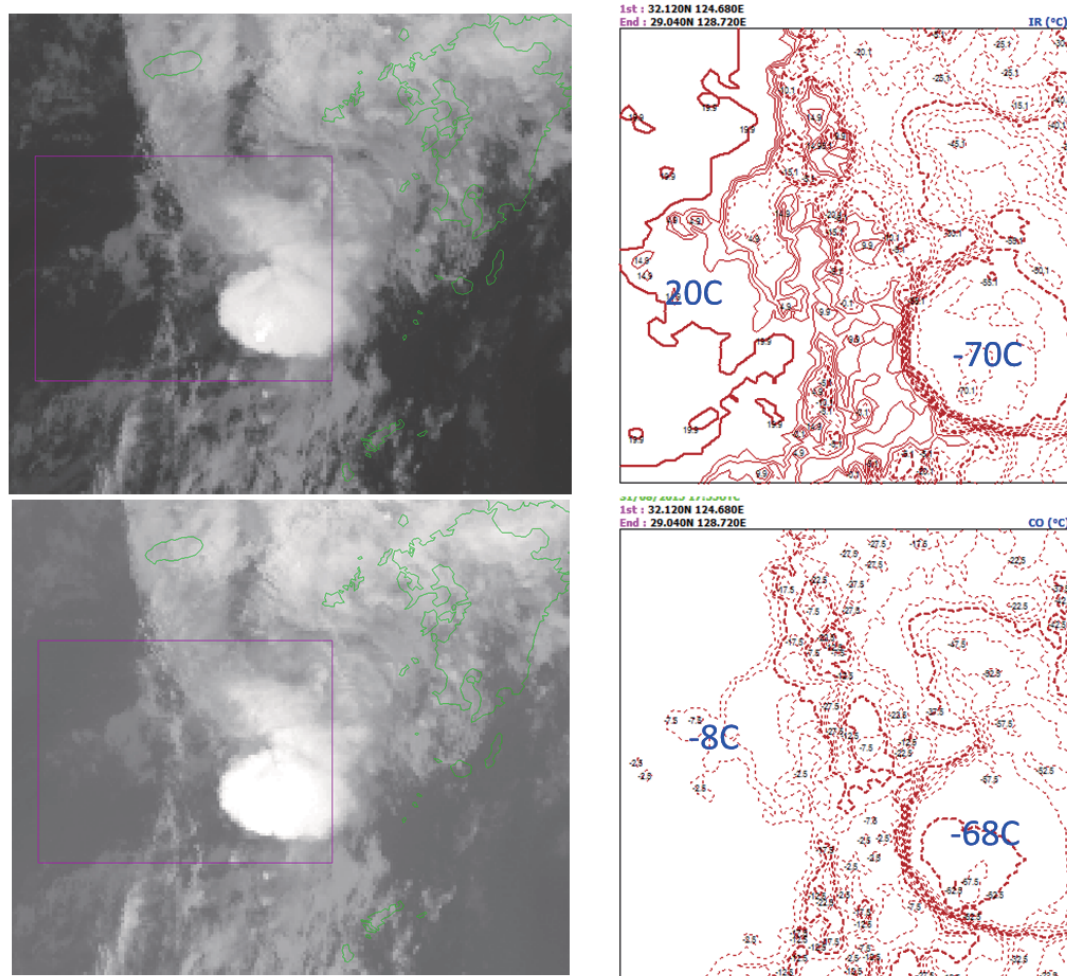


図 40. バンド 13 (上) とバンド 16 (下) の画像・輝度温度の比較。右側の輝度温度の等値図は左側の画像の一部をそれぞれ拡大したもの。

これは下層雲や雲のない海面などは、途中経路にある下層大気中の二酸化炭素等の吸収を受け輝度温度がより低く観測されるためである（図 41）。

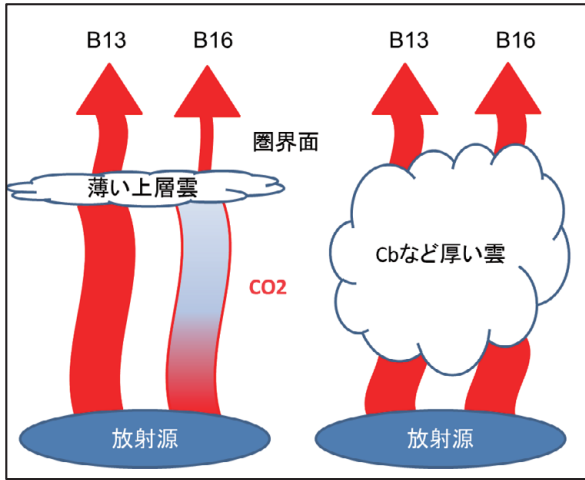


図 41. バンド 16 画像とバンド 13 画像の輝度温度の違い。

二酸化炭素は対流圏におおよそ均質に分布しているが、対流圏では鉛直の気温構造や水蒸気の分布が絶えず変動しており、画像ではもちろんバンド 16 の情報のみで二酸化炭素の分布を正確に（定量的に）算出することは困難である。

3.2 主な差分画像の特性

3.2.1 バンド 7 差分画像

図 42 に層積雲（雲水量 0.1gm^{-3} ）の雲厚と射出率の関係を示す（Ellrod, 1995）。水滴からなる厚い下層雲などでは $10.4\mu\text{m}$ 帯（バンド 13）や $11.2\mu\text{m}$ 帯（バンド 14）などの赤外窓領域のバンドより $3.9\mu\text{m}$ 帯（バンド 7）の射出率が小さい⁴。

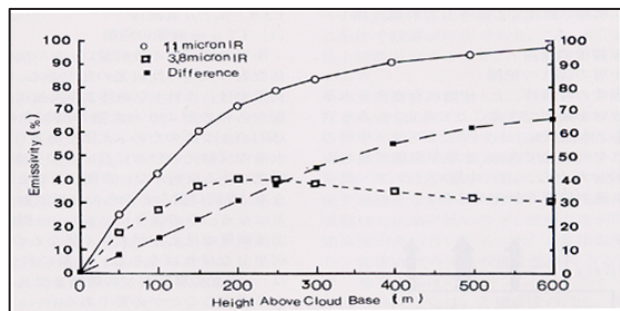


図 42. 層積雲（雲水量 0.1gm^{-3} ）の雲厚と射出率の関係（Ellrod, 1995）。

⁴キルヒホッフの法則およびエネルギーの保存則から、ある波長における射出率、反射率、透過率の総和は 1 となる。水滴からなる十分に厚い雲域の場合、透過率は 0 とみなせ、射出率、反射率の総和が 1 となる。すなわち反射率が大きければ射出率が小さい。バンド 7 では水滴に対して反射率が比較的大きく、バンド 13 などの赤外窓領域では反射率が小さいため、バンド 7 の射出率がより小さい。

このためバンド 7 では赤外窓領域のバンドよりも観測される輝度温度が低く、バンド 7 の輝度温度からバンド 13 の輝度温度の差を取ると負の値になる。負の値の領域が明るく、正の値の領域が暗く表示されるよう画像を作成すると、ある程度の厚さを持ち水滴からなる雲域や霧域は明瞭に見えるため夜間の霧の監視に有効である。図 43 に瀬戸内海一帯に広がる霧または下層雲の事例を示す。下段のバンド 13 の赤外面像からは霧または下層雲を識別することは困難だが、地上観測では瀬戸内海周辺の各地で霧が観測されている。上段のバンド 7 画像では瀬戸内海周辺に滑らかで縁が明瞭な明るい領域があり、これが霧または下層雲に対応すると考えられる。

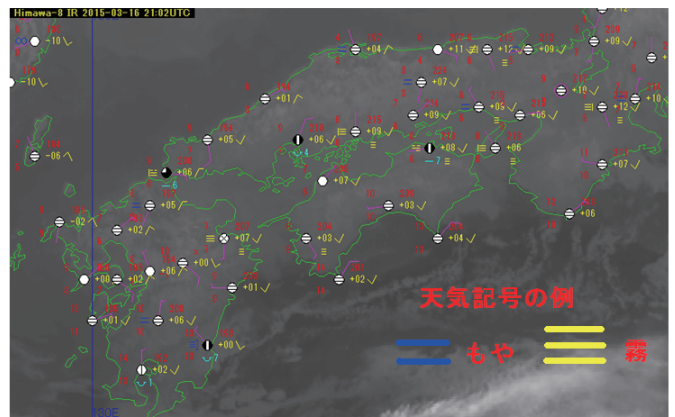
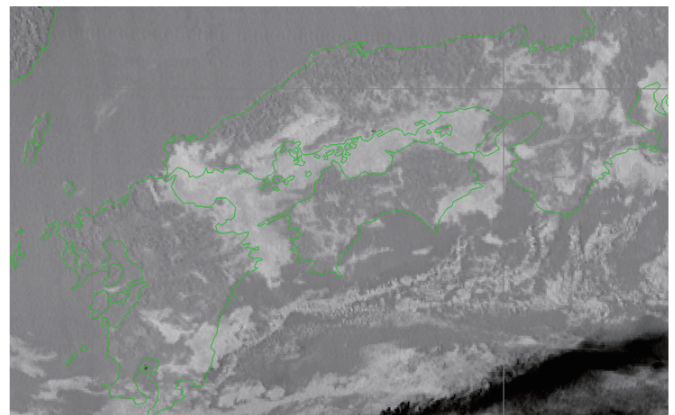


図 43. バンド 7 とバンド 13 の差分画像（バンド 7-バンド 13）（上）による霧の事例。下の画像は同時刻のバンド 13 画像と地上観測。瀬戸内海沿岸を中心に各地で霧・もやが観測されている。

一方、上層雲に対しては厚さによって画像上の見え方が異なる。薄い上層雲では下からの放射が透過するため、輝度温度は実際の雲頂温度よりも暖かく観測される。これはバンド 13、14 などの赤外窓領域よりもバンド 7 の方が、透過率が高く射出率が低い⁴ためバンド 7 ではバンド 13 の画像よりも暖かく（暗く）観測されるからである（図 44）（気象衛星センター, 2005）。

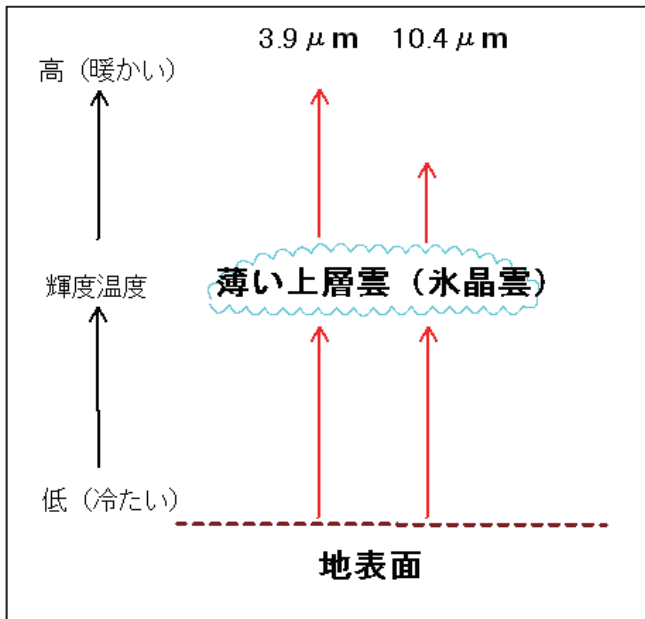


図 44. バンド 7 とバンド 13 における薄い上層雲からの放射 (気象衛星センター, 2005)。

厚い上層雲は下からの放射の影響を受けずに雲頂の輝度温度は低くなるが、バンド 7 のセンサの温度特性 (後述) により画像上ではノイズのある領域として見える。これにより薄い上層雲の雲域と、厚い上層雲や多層構造を伴う雲頂高度の高い雲域を判別できる。

また、バンド 7 は地表面の地質により特徴的な輝度温度を示す場合がある。図 37 に示されるとおり $3.9\mu\text{m}$ 帯では砂漠に対して射出率が低く、特に夜間ではバンド 13 よりも輝度温度が低い。図 45 にゴビ砂漠付近の夜間の差分画像 (バンド 7-バンド 13) を示す。画像では砂漠の領域 (赤丸付近) が明るく表示されている。

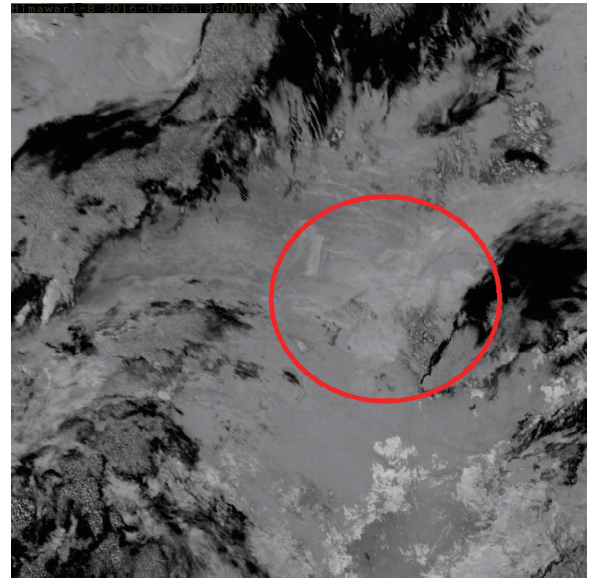


図 45. ゴビ砂漠付近の夜間のバンド 7 とバンド 13 の差分画像 (バンド 7-バンド 13)。砂漠の領域 (赤丸付近) が明るく表示されている。

図 46、47 にそれぞれひまわり 8 号のバンド 13 とバンド 7 の輝度温度と放射の関係を表す。バンド 13 では放射量 (縦軸) と輝度温度 (横軸) がなだらかな曲線を示し、観測される放射量から得られる輝度温度の高温域から低温域まで精度良く得られる。一方、バンド 7 の輝度温度と放射の関係では、放射量が少ないところではわずかな変化で輝度温度が大きく変化するため、放射量のわずかな観測誤差が輝度温度へ大きな誤差として伝播する。特に 230K 以下の低温域では輝度温度の精度が低下する。バンド 7 画像では、この精度の低下により積乱雲や厚い上層雲などが、ドット状のノイズが混じった雲域として表現される (図 48)。

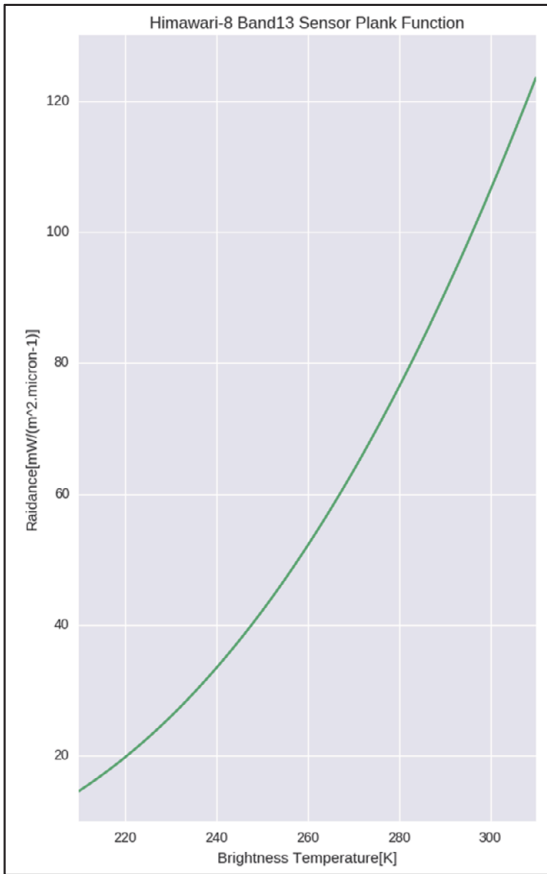


図 46. 10.4 μ m 帯の温度と放射の関係 (縦軸=放射、横軸=輝度温度)。

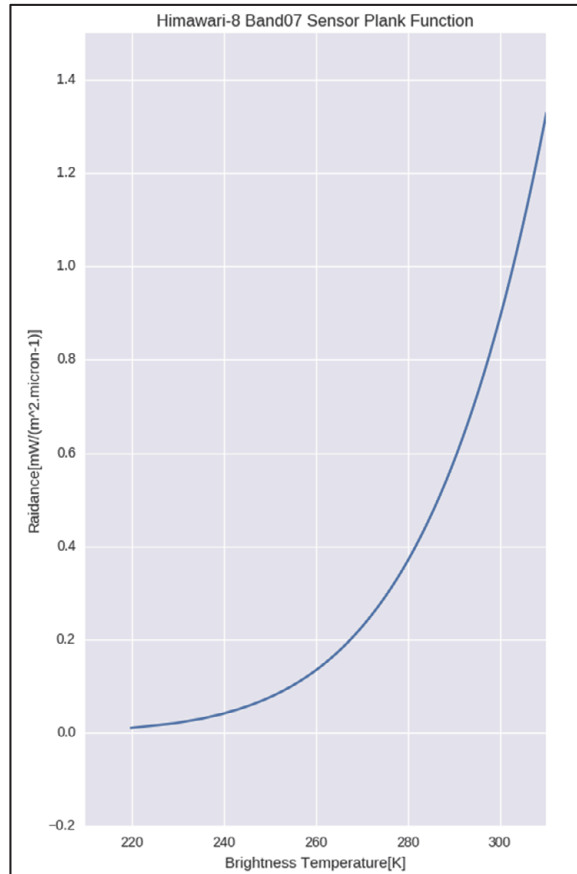


図 47. 3.9 μ m 帯の温度と放射の関係 (縦軸=放射、横軸=輝度温度)。

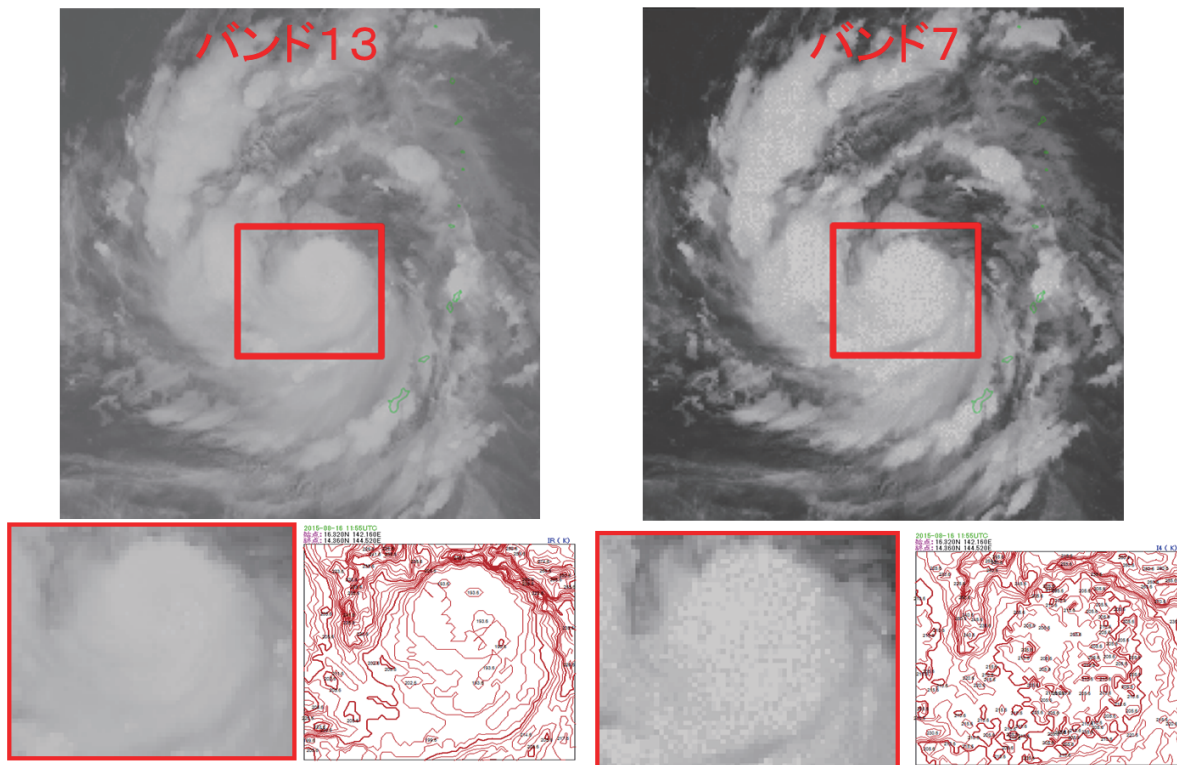


図 48. 3.9 μ m 帯画像の低温域 (2015 年台風 15 号の中心付近) のノイズの例。左側がバンド 13、右側がバンド 7。

次に高温域の場合について図 49、50 にそれぞれ赤外波長域において放射源の温度による違いを示す。バンド 13 のような $10\mu\text{m}$ 帯付近では温度上昇に伴って、放射量は線形に近い増加を示すが、 $3.9\mu\text{m}$ 帯では温度とともに非線形に大きく増加する。すなわち $3.9\mu\text{m}$ 帯では、放射量は温度の大小に非常に敏感である。図 51 に示すように画素(衛星画像の最小単位)の領域のうち一部が特に高温(高い放射エネルギー)である場合、衛星が観測する温度は画素内の温度の単純平均にはならず観測波長によって異なり、 $3.9\mu\text{m}$ 帯では $10\mu\text{m}$ 帯と比べ高温を示す。このことにより、火災などの高温の熱源があれば狭い領域でも画素に反映されるため、画像で確認することができる。

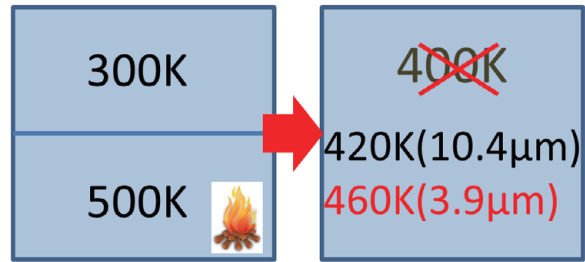


図 51. $3.9\mu\text{m}$ 帯と $10\mu\text{m}$ 帯における画素中の高温領域の観測温度の違い。

図 52 にバイカル湖周辺における森林火災の事例を示す。火災が発生していると推測される領域付近が黒い(すなわち温度が高い)ドット状の「ホットスポット」領域が現われている。ホットスポットは火山の噴火口や冬季の工業地帯で見られる場合がある。

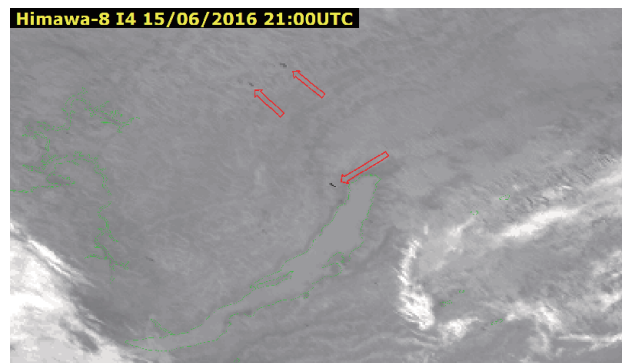


図 52. バイカル湖周辺における森林火災によるバンド 7 のホットスポットの事例。

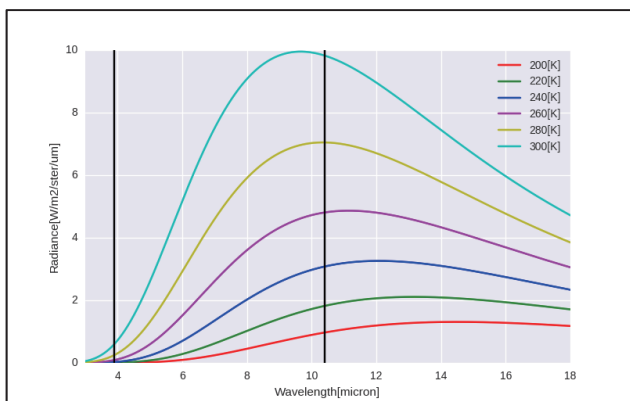


図 49. 赤外波長帯における放射と温度の関係(縦軸=放射、横軸=波長)。

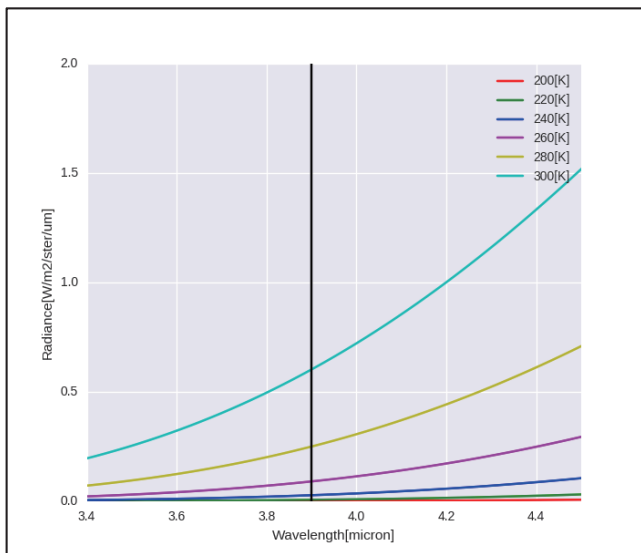


図 50. $3.9\mu\text{m}$ 帯付近における放射と温度の関係(縦軸=放射、横軸=波長)。

3.2.2 バンド 11 差分画像

前述の「3.1.11 バンド 11 (8.6 μ m)」で触れたように、バンド 11 は雲粒子の相 (水・氷) について特徴的な性質を持っているが、バンド 11 による差分画像でこれを確認しやすい。

図 53 に雲頂が水滴または氷晶の雲域における輝度温度の差分 (バンド 13-バンド 15 : 10.4-12.4 μ m、バンド 11-バンド 13 : 8.6-10.4 μ m) の比較散布図を示す。青色のプロットは雲粒の相が水滴、赤色が氷晶を表す。このように雲粒の相によって温度分布が異なるために相判別できることが示唆される。

実際の衛星画像で雲域の輝度温度を確認した例を図 54 に示す。同じ赤外窓領域のバンド 14 (11.2 μ m) との比較で見ると、氷粒子を含む雲域 (図中×印) では相対的にバンド 11 の射出率が高い (観測される輝度温度が高い)。いっぽうバンド 11 では下層の水蒸気の吸収の影響をより受けるため、下層雲 (水雲) (図中星印) や海面 (図中十字印) で観測される輝度温度が低い。

このような性質を用いて雲域の相を判別する情報となり得る。気象衛星センターで作成されている衛星プロダクト、高分解能雲情報で雲粒の相の算出時にバンド 11、14 の輝度温度が利用されている。

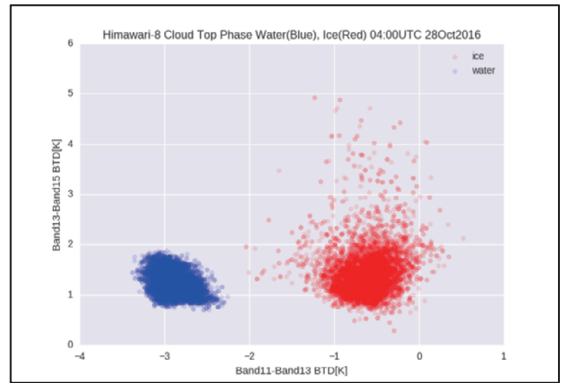


図 53. 雲頂が水滴 (青色) または氷晶 (赤色) の雲域における輝度温度の差分の比較散布図 (縦軸 バンド 13-バンド 15 : 10.4-12.4 μ m、横軸 バンド 11-バンド 13 : 8.6-10.4 μ m)。

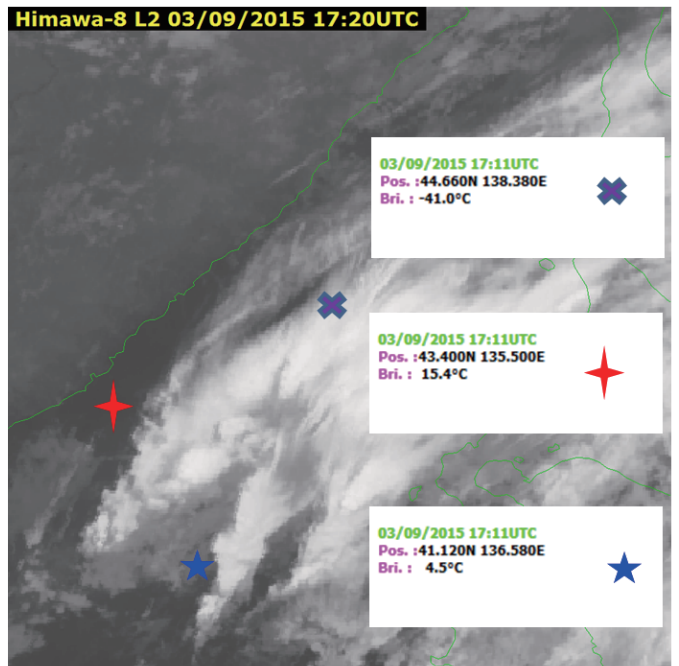
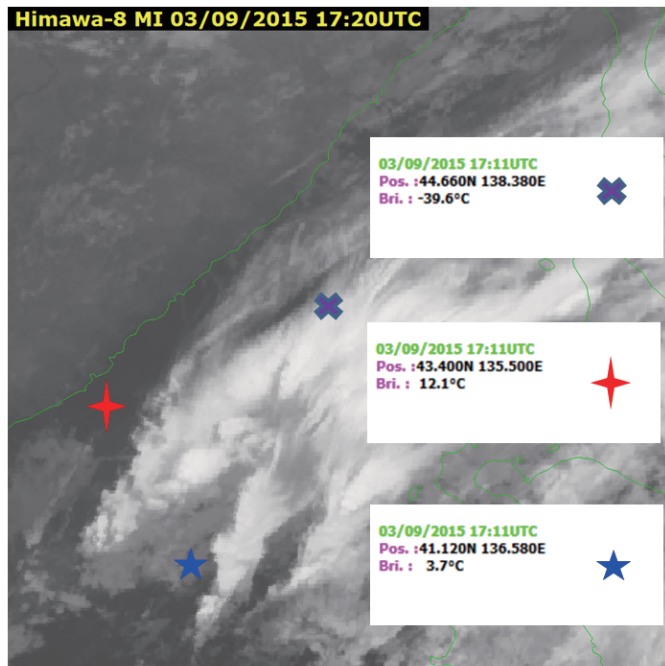


図 54. バンド 11 (左) とバンド 14 (右) の輝度温度比較の例。図中×印は上層雲、星印は下層雲、十字印は海面の輝度温度に対応。

3.2.3 バンド 12 差分画像

バンド 12 画像では、水蒸気画像の暗域のある領域に、白色の筋 (White stripes) が見られることがある (Zwatz-Meise, 2004)。画像例 (図 55a、図 55b) を示すと、水蒸気画像バンド 8 で上層トラフ付近の暗域の見られるところにバンド 12 画像で暗域に沿う形状で不明瞭な白い帯状の領域が見られる。赤外窓領域のバンド 13 との差分画像では黒い帯状の領域が見られ、バンド 12 で輝度温度が低くなっている領域に対応する。これは高濃度のオゾン領域に対応していると考えられ、画像と GSM (全球モデル: 地球全体の大気を対象とした気象庁の数値予報モデル)

の 300hPa における渦度の表示を重ね合わせると、おおよそ正の渦度域と対応している。

そのほか上層風の収束域など、対流圏界面付近の大気に関わるパラメータと白い帯状の領域との相関が見られることから、圏界面が低い領域にある高オゾン領域が可視化されていると推測できる。米国 NOAA 等の調査では、衛星データから算出した「オゾン量の勾配が大きな領域」で、調査用航空機により乱気流が観測されている (Li J. et al., 2001)。今後、バンド 12 のデータを用いたオゾンプロダクトによる調査が期待される。

図 55. バンド 12 画像における白色の筋 (White stripes) の例

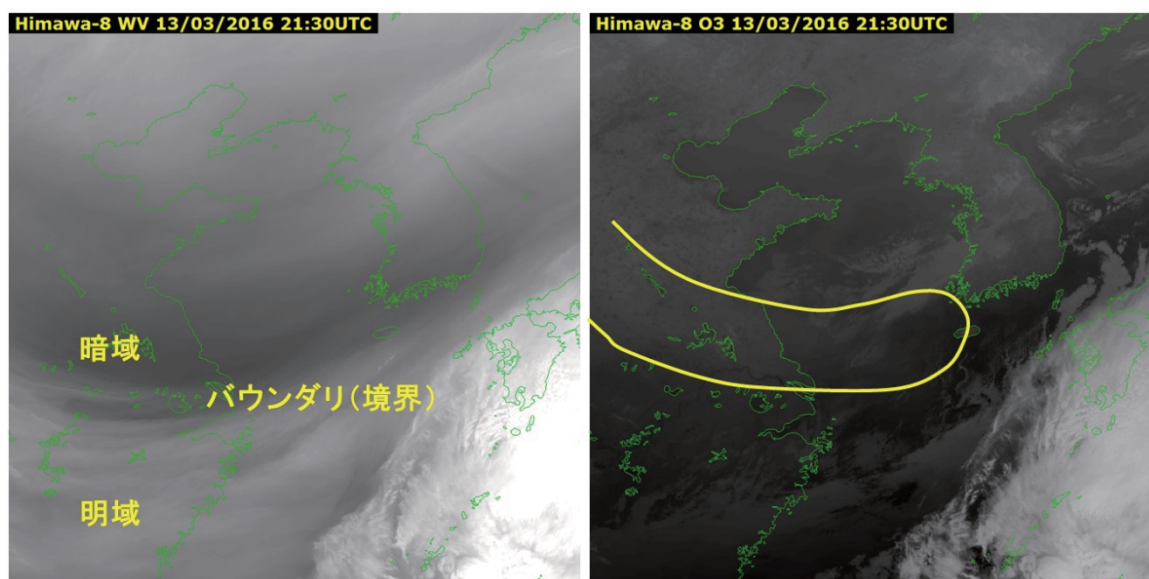


図 55a: 左: バンド 8、右: バンド 12

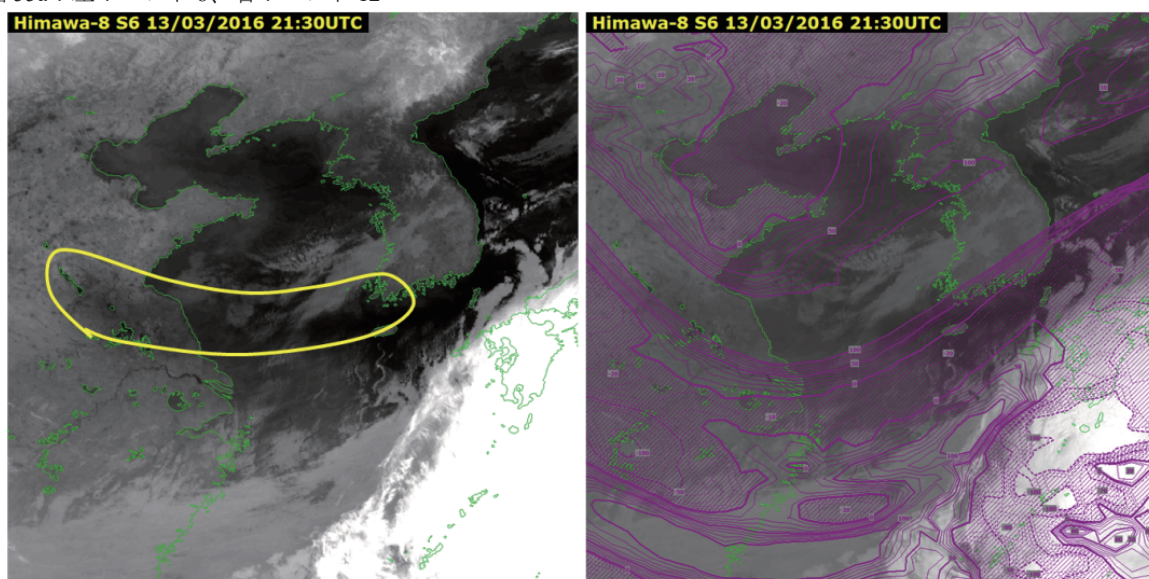


図 55b: 左: バンド 13 と 12 の差分画像、右: バンド 12 に GSM (全球モデル: 地球全体の大気を対象とした気象庁の数値予報モデル) の 300hPa 渦度を重ね合わせて表示、コンターの無い領域が正の渦度域に対応。

3.2.4 バンド 15 差分画像

図 56. 各バンド画像における上層雲の事例。

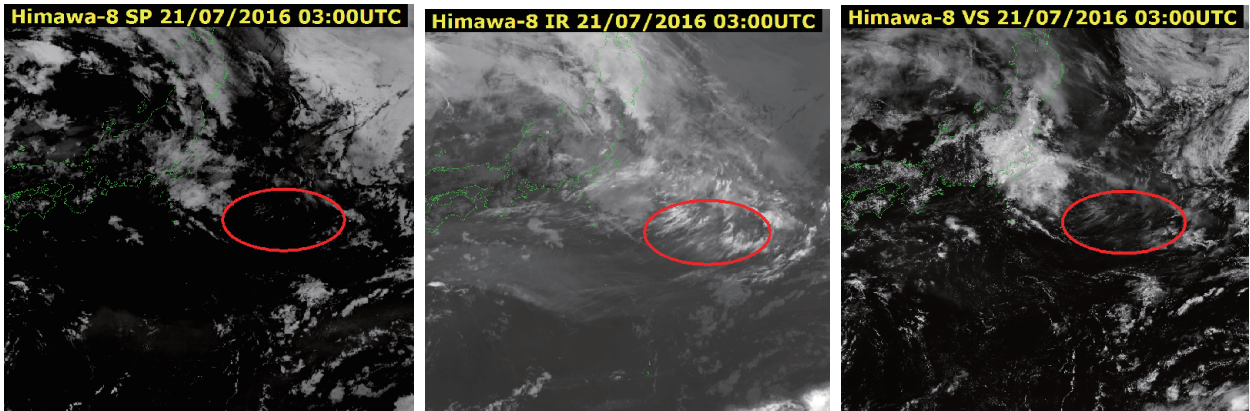


図 56a : バンド 13 とバンド 15 の差分画像

図 56b : バンド 13 画像

図 56c : バンド 3 画像

前述したように、バンド 15 ではバンド 13 に比べて大気中の水蒸気に対する透過率が低い (図 14)。また他の窓領域に比べて氷晶と水滴の影響が大きい (図 33)。この特性により、薄い上層雲では氷晶による吸収により輝度温度が低く観測される。バンド 13 との差分画像を差分値が大きいところを暗く、小さいところを明るく表示されるように作成すると (図 56a)、薄い上層雲に対応する雲域が暗く (黒く) 表示されている。雲域の確認の参考として赤外画像 (バンド 13) (図 56b) および可視画像 (図 56c) を示す。

バンド 15 は火山灰や黄砂などに含まれるケイ素に対しても特徴がある。ケイ素の射出エネルギー (赤外放射エネルギー) はバンド 13 よりバンド 15 の方が大きくなる。地表ではあるが黄砂と同様なケイ素を含む砂地の場合の射出率 (図 37) を比較すると、バンド 13 に比べてバンド 15 の射出率が若干大きいことがわかる。こうした特徴を利用した火山灰や黄砂の判別が可能である。

図 57 のバンド 13 とバンド 15 の差分画像において、赤い丸で囲まれた明るい (白い) 領域が中国大陸内陸部で発生した黄砂に対応すると推定され、低気圧性循環に巻き込まれるような形で移動している。実際に大陸内陸の各地で黄砂が観測されている (気象庁ウェブページ, 2016)。

図 58 は 2016 年 5 月の桜島の噴火事例で赤い丸で囲まれた白い領域がケイ素を含む火山灰に対応する。可視画像 (バンド 3) と比較すると付近の上層雲は差分画像では黒い領域として表示されるため識別が容易である。また可視画像と異なり太陽光のあたらない夜間の領域でも利用できるため、差分画像で 24 時間監視することができる。

このようにバンド 15 画像は特に差分画像として火山灰や黄砂の識別に有用である。

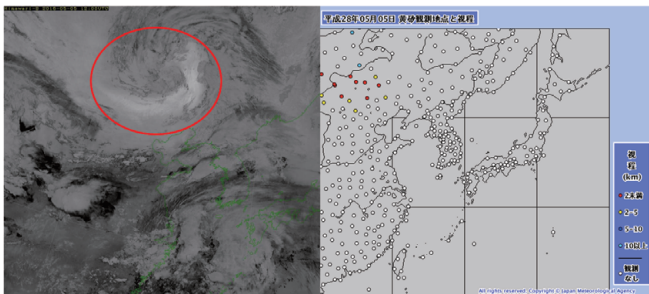


図 57. 差分画像による黄砂の判別の例。赤い丸で囲まれた明るい (白い) 領域が中国大陸内陸部で発生した黄砂に対応。実際に大陸内陸の各地で黄砂が観測されている (右図観測地点と視程は気象庁ウェブページより。観測値は当日その地点での黄砂等の観測通報の中の最小の視程。)

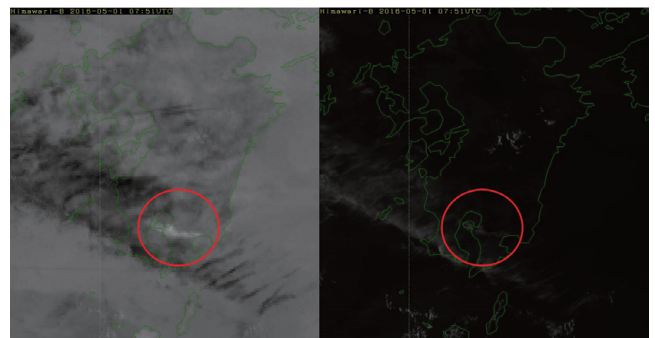


図 58. 桜島の噴火事例 (2016 年 5 月) の事例。左図は差分画像 (10.4μm-12.4μm)、右図はバンド 3 可視画像。赤い丸で囲まれた白い領域がケイ素を含む火山灰に対応。

4. RGB 合成画像 (概要)

前章までに紹介した、16 種類のバンドを持つ特性を効率的に抽出する手法として「RGB 合成画像」がある。RGB 合成画像は光の三原色の性質 (図 59) を応用し、複数の種類の衛星画像にそれぞれ赤 (Red)、緑 (Green)、青 (Blue) の色をつけて三枚三色の衛星画像を重ね合わせ、複数の画像が持つ情報を画像利用者が識別しやすい色に着色する手法である。

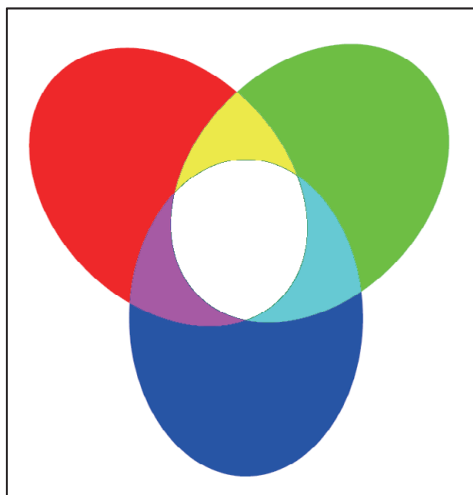


図 59. 光の三原色 (赤・緑・青)

すでに 12 種類のバンドを搭載した静止気象衛星である MSG を運用している欧州を中心に活用されている。RGB 合成画像に含まれる複数種類の画像の情報により、各バンドの単独画像や差分画像それぞれを見ただけでは識別が難しい雲域や現象も、欧州で提唱された標準的な色調の解釈によって容易になる事例もある。

ただし、緯度や季節、衛星搭載の放射計の違いなどの条件によって標準的な色調から外れた表示となる場合があり、色調だけでは解釈が難しい例もある。そのため色調の解釈には、合成に使用するバンドの各特性を理解することが重要である。ここでは広く利用されている欧州 (EUMETSAT) 設定の RGB 合成画像を各バンドの画像特性と関連付けて紹介する⁵。なお「2.2 可視画像」で紹介した「True color」画像も RGB 合成画像の一種である。

⁵ 欧州の設定を用いた RGB 合成画像の基本については気象衛星センター技術報告 第 51 号「EUMETSAT における MSG/SEVIRI (回転式高度可視・赤外イメージャ) の RGB 合成画像技術の紹介と MTSAT-1R 衛星画像への適用」を参照。

図 60 は「Natural color (日中自然色) RGB」⁶と呼ばれる RGB 合成画像で、二種類の近赤外画像バンド 5 (赤) およびバンド 4 (緑) と可視画像バンド 3 (青) を重ねて表示している。氷晶を含む雲と水滴で構成される雲の判別や、雪氷域や植生など地表面の状況の識別に有効である。図 61 に Natural color RGB で表示される色調の解釈を示す。

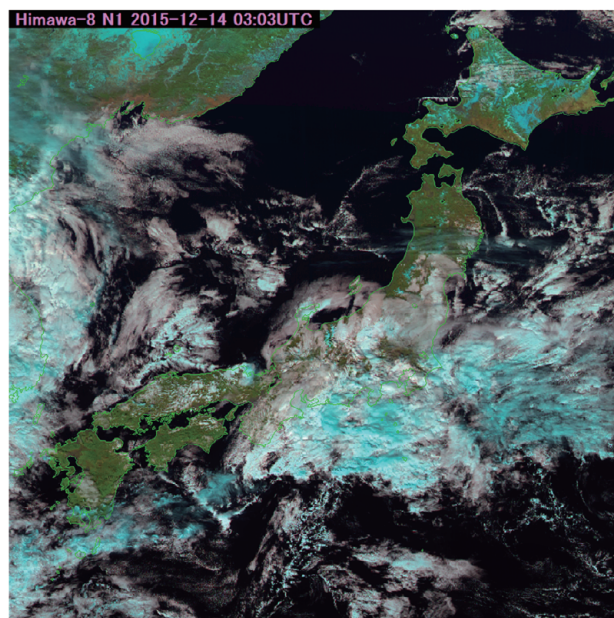


図 60. Natural color (日中自然色) RGB 合成画像の例。

雲頂の高い氷雲	
雲頂の低い氷雲	
砂漠	雪氷域
海	植生

図 61. Natural color RGB の色調解釈。

色調解釈にあるように、画像で氷晶を含む上層雲や雪氷域がシアン色 (明るい水色のような色) に表示されている。これは赤色の成分に寄与するバンド 5 が、前節で説明したように氷晶や雪氷域に対して反射率が低いことに起因する。その結果、氷晶を含む上層雲や雪氷域に対して主に反射率が大きいバンド 4 とバンド 3 の寄与が合わさり、光の三原色の図 59 にあるような青と緑が合わさったシアン色の領域として表示される。

霧や下層雲など水滴からなる雲域に対しては白色もしくは明るい灰色で表示される。三種のバンドが水滴に対して高い反射率を示すため、赤・緑・青の三色が合成された白色または明るい灰色で表示され

⁶ 日中利用できることから、欧州等では「Day natural colors」と呼称される場合もある。

る。

植生については緑色のバンド 4 が特に植生に対して反射率が高く、バンド 5 およびバンド 3 は反射率が低いいため、植生が緑色で表示される。

このように前節までの各バンド特性を理解することで、RGB 合成画像で表示される様々な現象に対応した色調の解釈を理解できる。

5. まとめ

本稿ではひまわり 8 号/AHI の観測バンド 16 種類のそれぞれの画像特性についての説明を述べた。従来の 5 種類の観測バンドに相当するバンドを含め、3 種類の可視バンド、3 種類の近赤外バンド、高度の観測ピークの異なる 3 種類の水蒸気バンド、大気中の様々な気体の吸収の影響を受ける赤外バンドなどそれぞれのバンドが持つ特性をどのような現象の解析に活用できるかを紹介した。また、差分画像や RGB 合成画像を用いて各バンドが持つ特性を際立たせ、利活用が容易になることを紹介した。

今後は、本稿で紹介した各バンドの特性に基づいた事例解析・プロダクト開発により、ひまわり 8・9 号のデータ利用の更なる促進が期待される。

謝辞

気象衛星センター・データ処理部システム管理課の林昌弘氏より図 11「雲（水滴および氷晶）の光学的厚さ（ τ ）および有効半径（ $reff$ ）とバンド 6 とバンド 3 のそれぞれの大気上端（TOA）反射率との関係」を提供いただいた。また本稿作成にあたり関係諸氏より多くのご協力・ご指摘をいただいた。これらの方々に感謝の意を表します。

略語表

ABI: Advanced Baseline Imager

AHI: Advanced Himawari Imager

EUMETSAT: European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (欧州気象衛星開発機構)

GOES: Geostationary Operational Environmental Satellite (ゴーズ: 米国海洋大気庁運用の静止気象衛星シリーズ)

GSM: Meso-Scale Model (全球モデル: 地球全体の大気を対象とした気象庁の数値予報モデル)

MSG: Meteosat Second Generation (第二世代メテオサット: 欧州気象衛星開発機構にて共同運用の静止気象衛星シリーズ)

MSM: Meso-Scale Model (メソモデル: 日本及びその近海の大気を対象とした気象庁の数値予報モデル)

MTSAT: Multi-functional Transport Satellite (運輸多目

的衛星)

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (米国海洋大気庁) および米国の極軌道気象衛星の名称

SEVIRI: Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
Suomi NPP: Suomi National Polar-orbiting Partnership (スオミ NPP: 米国海洋大気庁運用の極軌道気象衛星)

WMO: World Meteorological Organization (世界気象機関)

参考文献

気象衛星センター, 2000: 「気象衛星画像の解析と利用」一般気象編, 1-12.

気象衛星センター, 2002: 「気象衛星画像の解析と利用」航空気象編, 27-28.

気象衛星センター, 2005: 「気象衛星画像の解析の利用」3.8 μ m 帯画像の解析と利用編, 23-24.

隈部良治 (編集), 2006: 衛星からわかる気象 - マルチチャンネルデータの利用-, 気象研究ノート 第 212 号, 51-54.

志水菊広, 2008: EUMETSAT における MSG/SEVIRI (回転式高度可視・赤外イメージャ) の RGB 合成画像技術の紹介と MTSAT-1R 衛星画像への適用 気象衛星センター技術報告 第 51 号, 1-23.

横田寛伸, 佐々木政幸, 2013: 静止地球環境観測衛星「ひまわり 8 号及び 9 号」の紹介 気象衛星センター技術報告 第 58 号, 121-138.

Clerbaux C., Drummond J.R., Flaud J. and Orphal J., 2011: Remote Sensing of Tropospheric Composition from Space, Chapter 3 Thermal Infrared: Absorption and Emission - Trace Gases and Parameters, 137, available at http://www.iup.uni-bremen.de/materials/remensingbook/03_Remote_Sensing_Thermal_IR.pdf

Delest P. and Han Y., 2008: CRTM Technical Subgroup Report, 2, available at https://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/itsc/itsc16/presentations/04_13_CRTMWG.pdf

Ellrod G.P., 1995: Advance in the Detection and Analysis

- of Fog at Night Using GOES Multispectral Infrared Imagery, *Weather and forecasting*, 10, 606-619.
- GOES-R Program Office (NOAA Satellite and Information Service), 2015-2016: ABI Bands Quick Information Guides, available at <http://www.goes-r.gov/education/ABI-bands-quick-info.html>
- Goody R. M. and Yung Y. L., 1989: *Atmospheric Radiation Theoretical Basis Second Edition*, Oxford University Press, 4.
- Hale G. M. and Querry M. R., 1973: Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- μ m Wavelength Region, *Appl. Opt.* 12, 555-563.
- Kerkmann J., 2004: Applications of Meteosat Second Generation (MSG) meteorological use of the SEVIRI IR3.9 channel, 80-81, available at http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/PowerPoints/Channels/Channel_IR39.ppt
- Li J., Schmidt C.C., Nelson J. P., Schmit T. J., and Menzel W. P., 2001: Estimation of total atmospheric ozone from GOES sounder radiances with high temporal resolution, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 157-168, available at https://www.researchgate.net/publication/240685572_Estimation_of_Total_Atmospheric_Ozone_from_GOES_Sounder_Radiances_with_High_Temporal_Resolution
- Lucey P. G., University of Wisconsin GIFTS MURI, 2009, 19, available at https://www.google.co.jp/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwjLk4y629vQAhVDuhoKHT8bAgwQFggtMAI&url=http%3A%2F%2Fcimss.ssec.wisc.edu%2Fmuri%2Fdocuments%2Fpresentations%2Fworkshop2%2Flucey_muri_may02.ppt&usq=AFQjCNHQxI7GIZ1MZGkqLHX574u-3hwTqw&bvm=bv.139782543.d.d2s&cad=rja
- Murata H., Takahashi M. and Kosaka Y., 2015: VIS and IR bands of Himawari-8/AHI compatible with those of MTSAT-2/Imager, *Meteorological Satellite Center technical note*, No.60, 1-18.
- Nakajima, T. and Tanaka M., 1986: Matrix formulation for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 35, 13-21.
- Nakajima T. and Tanaka M., 1988: Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 40, 51-69.
- Schmetz J., Govaerts Y., Marianne K., Lutz H., Ratier A. and Tjemkes S., 2004: A short introduction to METEOSAT Second Generation (MSG) , 1-9, available at http://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=ZIP_MSG_GUIDE_C&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Renderition=Web
- Stamnes K., Tsay S.-C., Wiscombe W., and Jayaweera K., 1988: Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media, *Appl. Opt.*, 27, 2502-2509.
- Warren S. G., 1984: Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave, *Appl. Opt.* 23, 1206-1225.
- WMO, 2007: RGB composite satellite imagery workshop final report (5-6 JUNE 2007 Boulder, CO, U.S.A.), available at http://www.wmo.int/pages/prog/sat/documents/RGB-1_Final-Report.pdf
- WMO, 2012: WMO/EUMETSAT workshop on RGB satellite products final report (17-19 SEPTEMBER 2012, Seeheim, Germany), available at http://www.wmo.int/pages/prog/sat/documents/RGB-WS-2012_FinalReport.pdf
- Zwatz-Meise V., 2004: Introduction into the Absorption Channels: Description of characteristics and content of the Ozone channel: Ch08: 9.7, 12-27, available at http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/PowerPoints/Channels/O3guide.ppt

参考ウェブサイト

気象庁, 2016: 気象庁ウェブページ, (ひまわり 8 号のサンプル画像の公開について)

http://www.jma-net.go.jp/sat/data/web89/himawari8_sample_data.html,

(月平均オゾン全量の世界分布図)

http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/totozone_glbsat_monthave.html

(黄砂実況図) <http://www.jma.go.jp/jp/kosa/>

最終閲覧日 2016 年 9 月 7 日.

気象庁気象衛星センター, 2016: 気象衛星センターウェブページ, (ひまわり 8・9 号)

<http://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/himawari89/index.html>,

(バンド)

http://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/himawari89/space_segment/spsg_ahi.html,

最終閲覧日 2016 年 9 月 7 日.

NASA, 2016: Spectral Response Function Database,

<http://cloudsgate2.larc.nasa.gov/cgi-bin/site/showdoc?mnemonic=SPECTRAL-RESPONSE>, 最終閲覧日

2016 年 9 月 7 日.