

GOSAT-2 TANSO-CAI-2 L2 雲識別処理アルゴリズム基準書

2020年5月

国立環境研究所 GOSAT-2 プロジェクト

大石 優^{1)*}
石田 春磨²⁾
中島 孝¹⁾

1) 東海大学 情報技術センター

2) 気象研究所 気候研究部

* 現所属：農業・食品産業技術総合研究機構 農業情報研究センター

目次

1	はじめに.....	1
1.1	適用範囲.....	2
1.2	関連文書.....	3
2	背景.....	4
2.1	CAI-2の概要.....	5
3	入出力データ.....	6
3.1	入力データ.....	6
3.1.1	CAI-2 L2 事前処理結果.....	6
3.1.2	CAI-2 L1B プロダクト.....	6
3.2	出力データ.....	7
4	雲識別処理アルゴリズム.....	12
4.1	雲識別処理アルゴリズムの概要.....	12
4.2	雲識別処理.....	14
4.2.1	CLAUDIA1.....	18
4.2.2	CLAUDIA3.....	22
5	アルゴリズム検証.....	24
6	前提条件・制約事項.....	25
	参考文献.....	27

1 はじめに

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT:Greenhouse gases Observing SATellite)は、CO₂やCH₄の大気中濃度の全球分布を捉えることなどを目的として2009年1月23日に打ち上げられた日本の人工衛星である。その後継機として2018年10月29日に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星2号「いぶき2号」(GOSAT-2)には、温室効果ガス観測センサ2型(TANSO-FTS-2:Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer 2)と雲・エアロソルセンサ2型(TANSO-CAI-2:TANSO-Cloud and Aerosol Imager 2)という2つのセンサが搭載されている。GOSAT-2では、FTS-2を用いて温室効果ガスの濃度推定などを行っているが、その精度を下げる要因の1つとして雲の存在がある。FTS-2の観測視野内に雲があると、誤った濃度を推定する可能性があるため、雲の有無の識別が必要となる。そのため、CAI-2の最も重要な役割の1つとして雲識別がある。一般的に、多波長イメージセンサによる雲識別には、可視域から熱赤外域までの十数以上のバンドで観測された輝度値から雲の有無を識別するアルゴリズムが用いられている。しかし、CAI-2は前方視・後方視それぞれ近紫外域から短波長赤外域にかけての5バンドのみなので、雲識別の精度には限界がある。本文書では、少ないバンド数を最大限活用して雲識別を行うCAI-2レベル2(L2)雲識別処理アルゴリズム[Ishida et al., 2009, 2018]について説明する。

1.1 適用範囲

システム全体の処理フローを図 1.1-1 に示す。図中の黄色く示した部分が、本アルゴリズム基準書の適用範囲である。

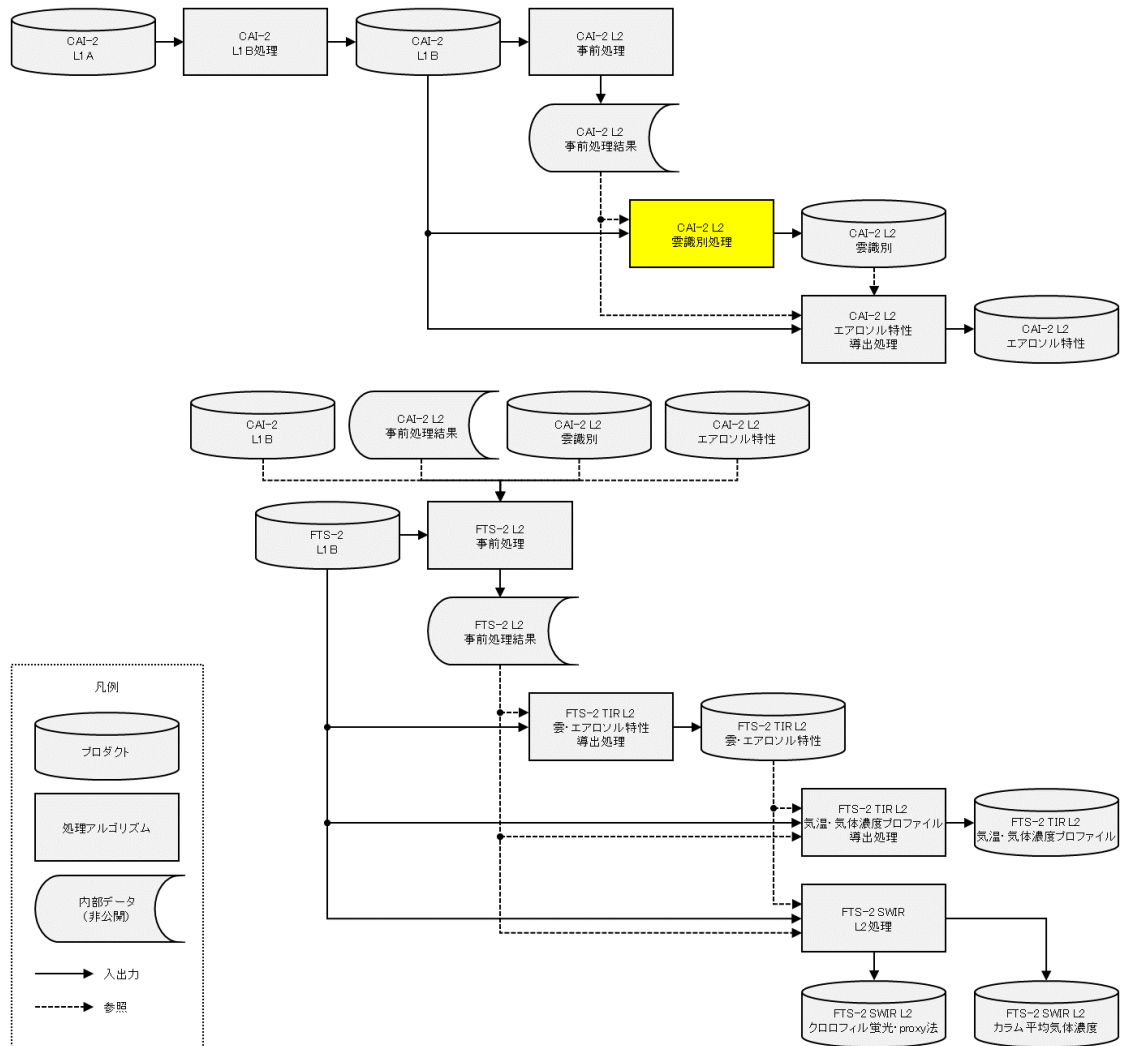


図 1.1-1 システム全体の処理フローにおける本アルゴリズム基準書の適用範囲

1.2 関連文書

CAI-2 L2 雲識別処理では、CAI-2 レベル 1B (L1B) プロダクトに対して CAI-2 L2 事前処理を施した、CAI-2 L2 事前処理結果および大気補正前反射率*を用いる。したがって、

- 1) GOSAT-2 TANSO-CAI-2 L1B 処理アルゴリズム基準書
- 2) GOSAT-2 TANSO-CAI-2 L2 事前処理アルゴリズム基準書

を併せて参照する必要がある。また、CAI-2 L2 雲識別処理結果である CAI-2 L2 雲識別プロダクトは、CAI-2 L2 エアロソル特性導出処理および FTS-2 L2 事前処理に用いられるため、GOSAT-2 の定常処理において CAI-2 L2 雲識別プロダクトがどのように利用されているかを知るために、以下の文書を併せて参照する必要がある。

- 3) GOSAT-2 TANSO-CAI-2 L2 エアロソル特性導出処理アルゴリズム基準書
- 4) GOSAT-2 TANSO-FTS-2 L2 事前処理アルゴリズム基準書

* 大気補正前反射率: CAI-2 L1B データ(分光放射輝度) 11 回帰分から最小の有効反射率の画素を抽出することで最小反射率を求め、雲影除去処理を施して作成されたもの

2 背景

CAI-2 L2 雲識別処理アルゴリズムは、GOSAT CAI L2 雲フラグ算出処理アルゴリズムと同様の設計となっており、衛星観測データからの全球雲マスクに関する既存研究を基に開発されている。本章では、雲マスクに関する既存研究について説明する。International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)における雲検出アルゴリズムは、可視(0.6 μm)と赤外(11 μm)それぞれの晴天コンポジット画像を作成し、晴天コンポジット画像の放射輝度と各シーンの可視・赤外の放射輝度を比較することで雲判定を行っている[Rossow and Garder, 1993]。AVHRR Processing scheme Over cLOUDs, Land and Ocean (APOLLO)は、Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)の0.58-0.68 μm 、0.725-1.00 μm 、3.55-3.93 μm 、10.30-11.30 μm 、11.50-12.50 μm のチャンネルを用いて、反射率や観測輝度温度の閾値テスト、2チャンネルの観測輝度温度の差や反射率比のテスト、空間的コヒーレンステストを行い、雲マスクを作成している[Kriebel et al., 2003]。CLouds from AVHRR (CLAVR)は、極軌道衛星 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)に搭載されている AVHRR を用いた晴天／曇天分類アルゴリズムで、APOLLO に夜間の雲検出用のテストなどが追加されている[Stowe et al., 1999]。MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 雲マスクアルゴリズムは、36バンドのうち22バンドを用いた複数の雲判定テストを行い、各テストから得られた Confidence Level (晴天信頼度)を統合することで雲マスクを作成している[Ackerman et al., 1998, 2010]。GOSAT では、アメリカ航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration: NASA)の Atmospheric CO₂ Observations from Space (ACOS)チームが独自のプロダクトを作成している。この ACOS プロダクト処理では、CAI を使用せずに FTS の (O₂) A-band を用いた、A-Band Oxygen cloud screening algorithm (ABO2) が用いられている。(O₂) A-band から地表面気圧やアルベドなどのパラメータを推定することができるが、晴天を仮定して衛星データからこれらのパラメータをリトリーブし、それらが現実的な値でない場合に雲やエアロゾルが混入していると判定する[Taylor et al., 2012]。このアルゴリズムは、Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2)にも用いられている[O'Dell and Taylor, 2014]。

2.1 CAI-2 の概要

CAI-2 は大気中の雲やエアロゾルを測定するイメージセンサで、前方視・後方視(±20 度)それぞれ 5 つのバンドを持つ。CAI-2 の主な仕様は表 2.1-1 のとおりである。各バンドの中心波長は、前方視:343 nm、443 nm、674 nm、869 nm、1630 nm、後方視:380 nm、550 nm、674 nm、869 nm、1630 nm である。Band 5 と 10 を除いて、空間分解能 460 m、観測幅 920 km である。Band 5 と 10 は、空間分解能 920 m、観測幅 920 km である。このうち雲識別処理アルゴリズムに使用するのは前方視(Band 3~5)、後方視(Band 8~10)であり、前方視・後方視それぞれで雲識別を行う(使用バンドについては今後追加する可能性がある)。

表 2.1-1 CAI-2 の主な要求仕様

	バンド	波長[nm]	空間分解能[m]	観測幅[km]
前方視	1	343	460	920
	2	443		
	3	674		
	4	869		
	5	1630	920	
後方視	6	380	460	920
	7	550		
	8	674		
	9	869		
	10	1630	920	

3 入出力データ

本章では、CAI-2 L2 雲識別処理における入出力データについて説明する。雲識別処理において参照データは必要としない。

3.1 入力データ

入力データは、(Ia) CAI-2 L2 事前処理結果、(Ib) CAI-2 L1B プロダクトに格納されている観測付随情報に分けられる(表 3.1-1)。

表 3.1-1 CAI-2 L2 雲識別処理アルゴリズムにおける入力データ一覧

入力データ	説明
(Ia) CAI-2 L2 事前処理結果	有効反射率、大気補正前反射率
(Ib) 観測付随情報	視線方向(前方視・後方視)、 飽和フラグ、欠損フラグ、陸水マスク、 太陽天頂角[deg.]、衛星天頂角[deg.]、 太陽方位角[deg.]、衛星方位角[deg.]、 WGS84 世界測地系における撮像点緯度・経度[deg.]、 撮像時刻(YYYY/MM/DD/hh:mm:ss at UTC)

3.1.1 CAI-2 L2 事前処理結果

雲識別処理アルゴリズムでは、CAI-2 L2 事前処理によって作成された有効反射率と大気補正前反射率の差を利用する。大気補正前反射率は、以下の処理が行われているものを想定している。

- 1) 11 回帰分(処理したいデータの観測日の前後 1 ヶ月)の CAI-2 L1B プロダクトを用いて、雲やエアロゾルの除去のために大気上端での最小反射率をとる
- 2) 雲影除去処理

3.1.2 CAI-2 L1B プロダクト

CAI-2 L1B プロダクトに格納されている、視線方向(前方視・後方視)、飽和フラグ、欠損フラグ、陸水マスク、太陽天頂角、衛星天頂角、相対方位角(太陽方位角と衛星方位角から求める)、世界測地系 1984(WGS84)における撮像点緯度・経度、撮像時刻(YYYY/MM/DD hh:mm:ss at UTC)も利用する。陸水マスクは、15 秒メッシュを想定しており、±60 度より高緯度ではアメリカ合衆国地質調査所(United States Geological Survey:USGS)が提供している 1 km 海陸マスクを 15 秒メッシュに加工して適用し、±60 度より低緯度については Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) の海陸マスクの利用が考えられる。

天頂角と方位角の定義を図 3.1.2-1 に示す。

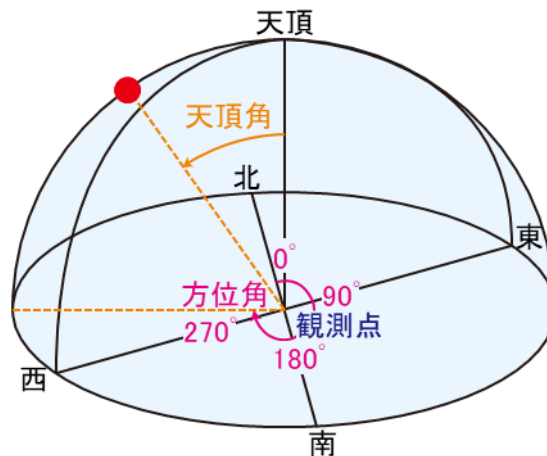


図 3.1.2-1 天頂角と方位角

天頂角は観測点の天頂と対象物のなす角。

方位角は観測点から見た対象物の方向の水平成分(北を0度として時計回り)。

3.2 出力データ

出力データは、画素ごとの総合晴天信頼度に加え、誤識別しやすい事例に対するフラグなどを格納した雲識別ビットフィールドである。

(a) 総合晴天信頼度の算出

CLAUDIA1 では、各識別テストにおける晴天信頼度から総合晴天信頼度を求める。算出された総合晴天信頼度は、4 バイト実数でファイルに格納する。

CLAUDIA3 でも、雲識別結果を総合晴天信頼度の形で出力し、同様に 4 バイト実数でファイルに格納する。

(b) 雲識別処理結果の出力

雲識別処理アルゴリズムからの出力情報として、総合晴天信頼度などを全てビット表示した雲識別ビットフィールドを作成する。1 つの画素において 32 ビットを使用する。雲識別ビットフィールドを表 3.2-1 に示す。ここで表 3.2-2 のように、総合晴天信頼度は 4 ビットで表現し、Cone Angle は 3 ビットで表現してファイルに格納する。

雲識別ビットフィールドは、雲識別処理が行われた際の補助情報として出力されるものである。したがって、雲識別処理が行われなかった場合、bit 0(雲識別 実行/非実行フラグ)、bit 5(日中/夜間フラグ)、bit 6-8(Cone Angle)、bit 14-18(飽和フラグ)以外のフラグ結果は保証しない。

総合晴天信頼度以外の主なフラグについて説明する。

(i) 雲識別の実行/非実行フラグ

何らかの原因により雲識別が実行されなかった場合に、本フラグは 1 となる。この場合、日中/夜間フラグ・Cone Angle・水域/陸域フラグ・飽和フラグ・バンドの異常フラグ以外のフラグ結果は保証しない。

(ii) 日中/夜間フラグ

太陽天頂角が 85 度以上の場合には夜間と判定し、本フラグは 1 となる。この場合、雲識別は実行しない。太陽天頂角が無効値の場合は計算できないため、フラグ結果は保証しない。

(iii) Cone Angle

Cone Angle の定義については式(4.2-1)参照。太陽天頂角・太陽方位角・衛星天頂角・衛星方位角の4つのうち1つでも無効値の場合、結果は保証しない。

(iv) 積雪面可能性フラグ

可視域において高反射率の場合に、雲ではなく積雪面である可能性がある。積雪面は短時間で消長するため、積雪面データベースなどから判断することは難しい。積雪面識別のためには、以下のような0.674 μmと1.630 μmでの反射率(それぞれ $r(0.674 \mu\text{m})$ 、 $r(1.630 \mu\text{m})$)と記す)から導出される指標として、正規化土壌指数(Normalized Difference Soil Index: NDSI)が提唱されている [Hall et al., 1995]。

$$\text{NDSI} = \frac{r(0.674 \mu\text{m}) - r(1.630 \mu\text{m})}{r(0.674 \mu\text{m}) + r(1.630 \mu\text{m})} \quad (3.2-1)$$

これは、積雪面では可視域に比べて短波長赤外域の反射率が小さい(図 4.2-3)ことを利用しており、NDSI の値が大きければ積雪面の可能性が高くなる。ただし、密生した森林における積雪の場合は NDSI の値は小さくなるため、雪と識別されない恐れがある。また、NDSI のみの識別では、巻雲を積雪面と識別してしまう可能性がある。正確な積雪面識別のためには、熱赤外チャンネルによる観測から地表面の温度を推定し、高温域を除外するなど、複数の波長の組み合わせが必要になる。このように NDSI を用いた識別は、確実な積雪面識別を保証するものではなく、利用するときには注意を要する。CAI-2 の積雪面可能性フラグでは、NDSI が 0.4 以上に加えて 0.869 μm の反射率が 0.11 以上という条件を加えている。0.674 μm・0.869 μm・1.630 μm のいずれかが使用できない場合、フラグ結果は保証しない。

(v) 水域/陸域フラグ

USGS 海陸マスクなどを元に、雲識別処理において水陸どちらで処理したかを示す。基本的には USGS 海陸マスクに一致するが、USGS 海陸マスクが無効値であっても、それ以外の有効反射率などに異常がない場合は水域として処理する。この場合、CAI-2 L2 雲識別プロダクト ImageGeometry グループ内の landWaterMask は無効値でも、本フラグは水域(00)となる。

(vi) Heavy Aerosol 可能性フラグ

総合晴天信頼度が 0.99 以上かつ、以下の条件を満たすときに Heavy aerosol の可能性があるとしている(ただし、 $r(\text{wavelength})$: 有効反射率、 $R_{min}(\text{wavelength})$: 大気補正前反射率)。

$$\text{前方視: } Dif_1 = r(0.343 \mu\text{m}) - R_{min}(0.343 \mu\text{m})$$

$$\text{後方視: } Dif_1 = r(0.380 \mu\text{m}) - R_{min}(0.380 \mu\text{m})$$

$$Dif_2 = r(0.674 \mu\text{m}) - R_{min}(0.674 \mu\text{m})$$

$$\text{Rat} = \frac{(Dif_1 - Dif_2)}{(Dif_1 + Dif_2)}$$

$$\text{Rat} < 0.1 \text{ or } 0.3 < \text{Rat}$$

前方視では 0.343 μm・0.674 μm、後方視では 0.380 μm・0.674 μm のいずれかが使用できない場合、フラグ結果は保証しない。

(vii) 巻雲可能性フラグ

短波長赤外域と近赤外域の反射率比が

$$0.3 < \frac{r(1.630 \mu\text{m})}{r(0.869 \mu\text{m})} < 0.6 \quad (3.2-2)$$

のとき、巻雲の可能性があるとしている。0.869 μm ・1.630 μm のいずれかが使用できない場合、フラグ結果は保証しない。

(viii) 輝度の不飽和／飽和フラグ

CAI-2 の各バンドの輝度が飽和値に達したことを示すフラグである。飽和値に達すると、本フラグが 1 になる。

(ix) バンドの異常フラグ

データ欠損の有無や有効反射率に無効値が入っていないかなどの情報を元にして、異常があると、本フラグが 1 になる。例えば(極域を除く)水域では、0.869 μm 以外のバンドが利用できなくても、太陽光反射率テストのみ実行可能である[特徴量のうち太陽光反射率のみ利用可能である](4章参照)。この場合、太陽光反射率テストのみ[特徴量のうち太陽光反射率のみ]を用いた総合晴天信頼度が出力されるため、バンドの異常フラグを併せて確認する必要がある。

(x) 各識別テスト結果のフラグ[CLAUDIA1 使用時のみ]

4 つの各識別テスト個別の雲域／晴天域の識別結果を格納する。識別のための閾値(各識別テストにおける晴天信頼度の閾値)は、4.2.1 項(b)に示した t_1 と t_2 の平均値を使用する。ただし、各識別テストに必要なバンドが利用できない場合、その識別テストのフラグ結果は保証しない。

表 3.2-1 CAI-2 L2 雲識別処理アルゴリズムの出力ファイルビットフィールド

ビット位置	内容	ビット	使用波長、データ
0	雲識別の実行／非実行	0:実行 1:非実行	
1～4	総合晴天信頼度	表 3.2-2	
5	日中／夜間	0:日中 1:夜間	太陽天頂角(85度以上は夜間)
6～8	Cone Angle	表 3.2-3	太陽・衛星天頂角、 太陽・衛星方位角
9	積雪面可能性	0:無 1:有	0.674 μm、0.869 μm、1.630 μm
10～11	水域／陸域	00:水域 01:未使用 10:未使用 11:陸域	USGS 海陸マスクなどを元に、雲識別処理において水陸どちらで処理したかを示す
12	Heavy Aerosol 可能性	0:無 1:有	前方視:0.343 μm、0.674 μm、 後方視:0.380 μm、0.674 μm
13	巻雲可能性	0:無 1:有	0.869 μm、1.630 μm
14～18	輝度(Band 1～5[6～10])の不飽和／飽和	0:不飽和 1:飽和	飽和フラグ(CAI-2 L1B プロダクトのフラグが格納される)
19～23	Band 1～5[6～10]の異常	0:無 1:有	データ欠損の有無や有効反射率に無効値が入ってないかなど
24	各識別テスト結果 (太陽光反射率) [CLAUDIA3 では未使用]	0:雲域 1:晴天域	0.674 μm(極域・陸域)、 0.869 μm(水域)
25	各識別テスト結果 (太陽光反射率比) [CLAUDIA3 では未使用]	0:雲域 1:晴天域	0.674 μm、0.869 μm(極域以外)
26	各識別テスト結果(NDVI) [CLAUDIA3 では未使用]	0:雲域 1:晴天域	0.674 μm、0.869 μm
27	各識別テスト結果(沙漠域) [CLAUDIA3 では未使用]	0:雲域 1:晴天域	0.869 μm、1.630 μm(陸域のみ)
28～31	未使用		

表 3.2-2 総合晴天信頼度のビット表示

総合晴天信頼度	ビット
0.00 以上 ~ 0.10 未満	0000
0.10 ~ 0.16	0001
0.16 ~ 0.22	0010
0.22 ~ 0.28	0011
0.28 ~ 0.34	0100
0.34 ~ 0.40	0101
0.40 ~ 0.46	0110
0.46 ~ 0.52	0111
0.52 ~ 0.58	1000
0.58 ~ 0.64	1001
0.64 ~ 0.70	1010
0.70 ~ 0.76	1011
0.76 ~ 0.82	1100
0.82 ~ 0.88	1101
0.88 以上 ~ 0.94 未満	1110
0.94 以上 ~ 1.00 以下	1111

表 3.2-3 Cone Angle のビット表示

Cone Angle[deg.]	ビット
40 以上 ~	000
35 ~ 40	001
30 ~ 35	010
25 ~ 30	011
20 ~ 25	100
15 ~ 20	101
10 ~ 15	110
0 以上 ~ 10 未満	111

4 雲識別処理アルゴリズム

雲識別処理には CLAUDIA1 と CLAUDIA3 という 2 つのアルゴリズムが用意されており、切り替えが可能となっている。CAI-2 L2 雲識別処理では基本的に CLAUDIA3 を使用する。本章では、両アルゴリズムについて説明する。

4.1 雲識別処理アルゴリズムの概要

CLAUDIA1 のフローチャートを図 4.1-1 に示す。

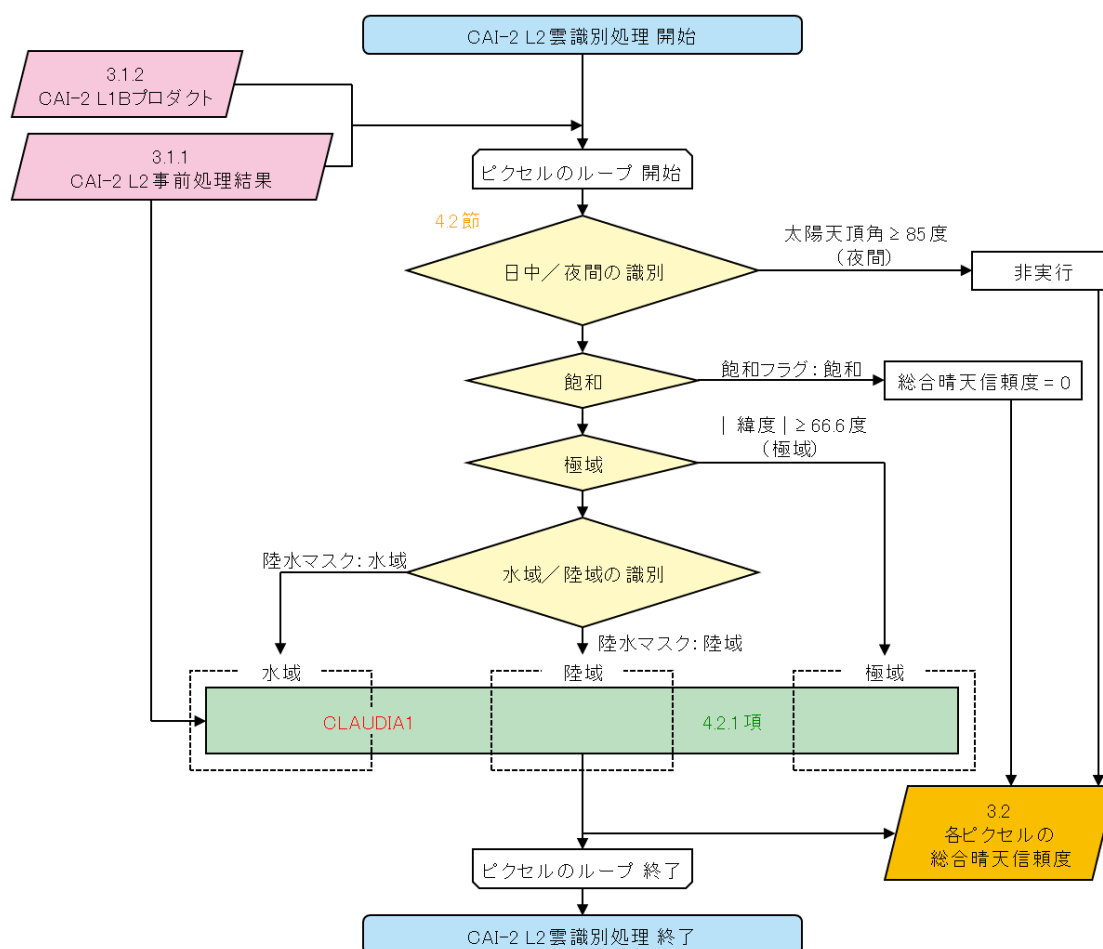


図 4.1-1 CLAUDIA1 の処理フロー

次に、CLAUDIA3 のフローチャートを図 4.1-2 に示す。

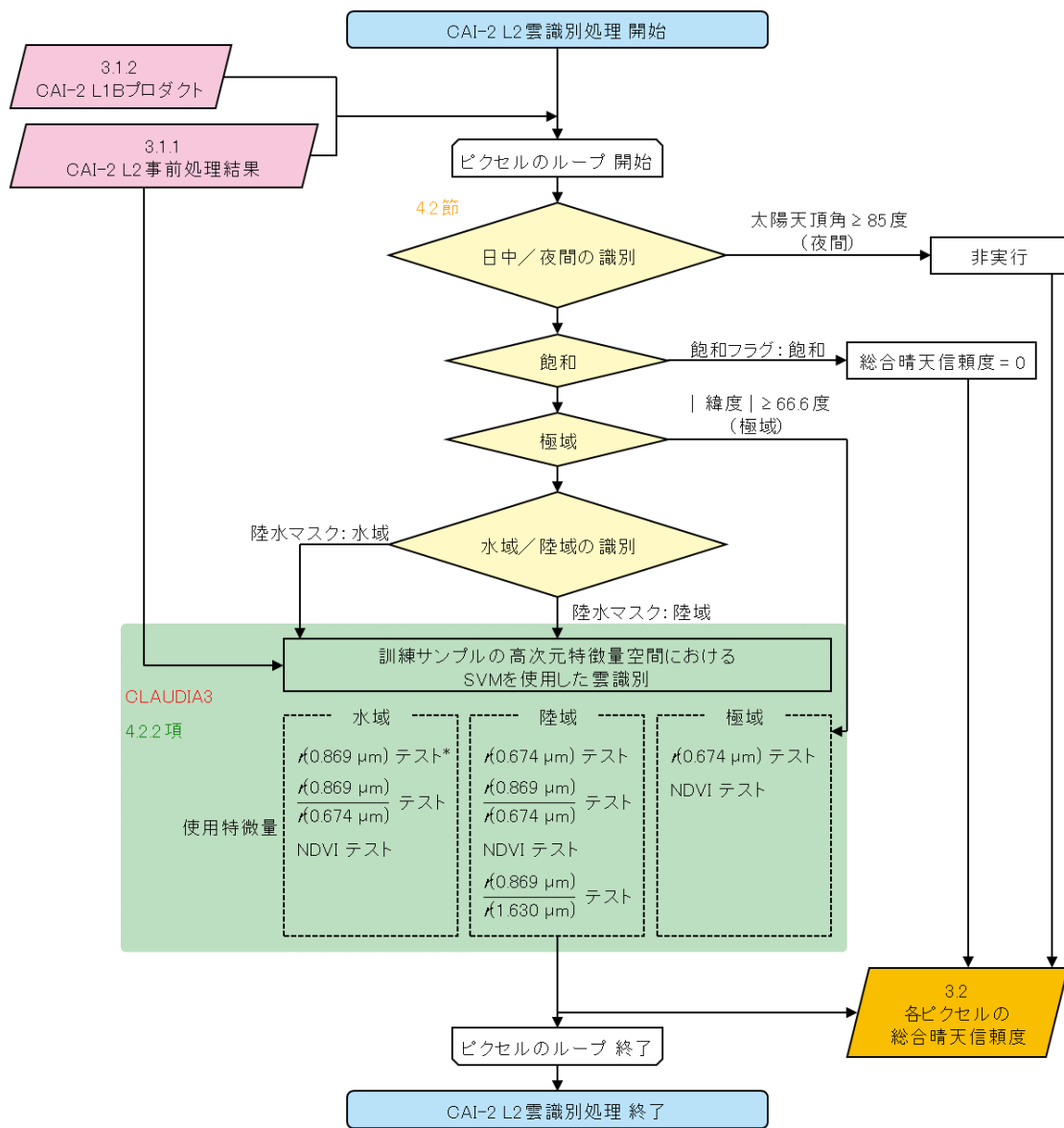


図 4.1-2 CLAUDIA3 の処理フロー。

$r(\text{wavelength})$ は、当該波長の有効反射率を表す。

* 水域で用いている特徴量の 1 つである太陽光反射率については Cone Angle (式 (4.2-1)) を考慮している。

4.2 雲識別処理

(a) 雲識別の前処理

まず始めに、雲識別の前処理について説明する。

入力データから、画素ごとに日中／夜間の識別、飽和フラグ、欠損フラグ、極域の識別、水域／陸域の識別、そして極域を除く水域の場合はサングリント領域の識別を行う。

日中／夜間の識別は太陽天頂角から行い、太陽天頂角が 85 度以上の場合は雲識別を実施しない。各バンドの飽和フラグが 1 つでも飽和を示している場合は、雲によって輝度が飽和していると判断して、識別結果を雲とする。緯度が北緯または南緯 66.6 度以上の場合は極域とする。極域以外においては、陸水マスクを用いて水域／陸域の識別を行う。その際、水域においては、太陽天頂角、衛星天頂角、相対方位角から Cone Angle (図 4.2-1) を計算し、Cone Angle が 35 度以下である場合をサングリント領域と見なす。また、CAI-2 観測輝度と太陽放射照度データなどから有効反射率を計算し、識別テストに使用する。Cone Angle は、太陽天頂角 (z_{a1})、衛星天頂角 (z_{a2})、太陽方位角 (a_{a1})、衛星方位角 (a_{a2}) を用いて以下の式で表される。

$$\text{Cone Angle} = \cos^{-1}\{\cos(z_{a1}) \cdot \cos(z_{a2}) - \sin(z_{a1}) \cdot \sin(z_{a2}) \cdot \cos(aa_1 - aa_2)\} \quad (4.2-1)$$

Cone Angle は、図 4.2-1 に示すように太陽光の鏡面反射光直線と衛星視線直線のなす角である。

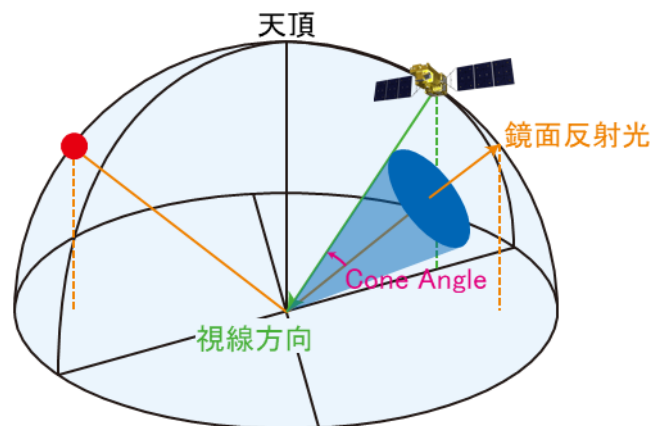


図 4.2-1 Cone Angle。太陽の鏡面反射方向を円錐の軸とし、衛星視線方向が円錐の母線と接する際の、円錐の軸と母線のなす角。

雲識別に用いるテストは、

- (i) 太陽光反射率テスト
極域および陸域: $r(0.674 \mu\text{m})$
水域: $r(0.869 \mu\text{m})$ 、サングリント識別
- (ii) 反射率の波長依存性テスト
(極域を除く) 水域および陸域: $r(0.869 \mu\text{m})/r(0.674 \mu\text{m})$
- (iii) NDVI テスト
全領域: NDVI
- (iv) 沙漠域における雲識別テスト
(極域を除く) 陸域: $r(0.869 \mu\text{m})/r(1.630 \mu\text{m})$

である。

(b) 雲および地表面の太陽光反射特性と雲識別

次に、雲識別処理アルゴリズムで用いる雲および地表面の太陽光反射特性について説明する。

(i) 太陽光反射率

一般的に、ある程度光学的に厚い雲は地表面よりも高反射率なので、大気分子による吸収の影響が比較的小さい可視域および短波長赤外域において反射率が大きければ、雲である可能性が高い。そのため、雲・エアロゾルフリーを仮定できる大気補正前反射率に比べて当該帯域の反射率が高い場合、雲と識別することができる。

水域の場合は、レイリー散乱の影響が小さい近赤外域の Band 4[9] ($0.869 \mu\text{m}$) の反射率を使用する。それに対して陸域では、可視域の Band 3[8] ($0.674 \mu\text{m}$) を使用する。Band 3[8] に比べて Band 4[9] は、植生の反射率が高く季節変動も大きいので陸域の雲識別に適さないためである。反射率だけを使った場合は、雪氷や沙漠などの反射率が高い場所を雲と誤識別する可能性があるため、他の識別法と組み合わせる必要がある。また、サングリント領域においては、閾値を増加させることで対応している。

(ii) 反射率の波長依存性

一般的に、雲の反射率は波長によってあまり変化しないので、雲は白く見える。それに対して地表面の反射率は波長依存性を持つため、様々な色を伴って見える。この原理を利用して、近赤外域の Band 4[9] ($0.869 \mu\text{m}$) と可視域の Band 3[8] ($0.674 \mu\text{m}$) の反射率比をとることで雲識別を行う。

$$\frac{r(0.869 \mu\text{m})}{r(0.674 \mu\text{m})} \quad (4.2-2)$$

この場合、雲は反射率比の値が 1 付近になり、地表面は 1 から離れた値をとることが多いので、雲を識別することができる(図 4.2-2)。

(iii) 植生域における雲識別

植生の活性度の指標として正規化植生指数 (NDVI (Normalized Difference Vegetation Index))

$$\text{NDVI} = \frac{r(0.869 \mu\text{m}) - r(0.674 \mu\text{m})}{r(0.869 \mu\text{m}) + r(0.674 \mu\text{m})} \quad (4.2-3)$$

が用いられることが多い。NDVI は植生域では大きな値をとるが、雲があると値が小さくなって植生の識別ができない。逆にこのことを利用して、NDVI を用いて雲識別を行う (図 4.2-2)。

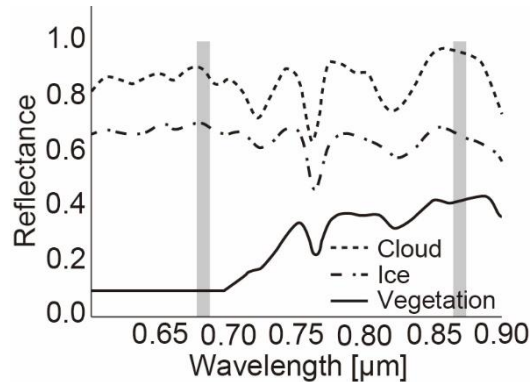


図 4.2-2 植生と雲の分光反射率 [Griffin et al., 2005]。雲は 0.674 μm と 0.869 μm での反射率が同じくらいなのに対し、植生では 0.674 μm に比べて 0.869 μm での反射率が高い。

(iv) 沙漠域における雲識別

明るい沙漠上では、近赤外域の Band 4 [9] (0.869 μm) と可視域の Band 3 [8] (0.674 μm) の反射率比は、雲と同様に 1 に近い値になる場合が多いため、晴天域を雲域と誤識別しやすい。そこで、近赤外域の Band 4 [9] (0.869 μm) と短波長赤外域の Band 5 [10] (1.630 μm) の反射率比

$$\frac{r(0.869 \mu\text{m})}{r(1.630 \mu\text{m})} \quad (4.2-4)$$

も参照する。これは沙漠域では短波長赤外域における反射率が、波長が長くなるにつれて増加傾向であることを利用している (図 4.2-3)。

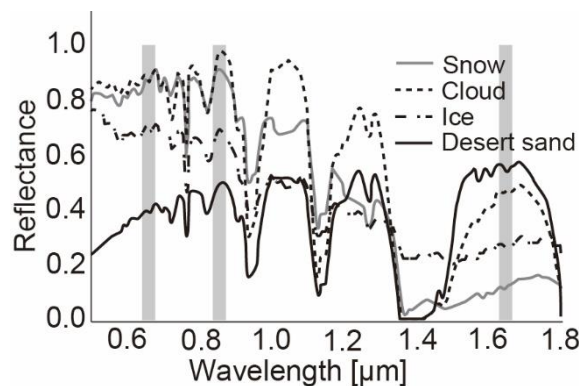


図 4.2-3 沙漠の砂と雲の分光反射率 [Griffin et al., 2005]。雲は 0.869 μm に比べて 1.630 μm での反射率が低いのにに対し、沙漠の砂では 0.869 μm に比べて 1.630 μm での反射率が高い。

(c) 総合晴天信頼度の算出処理

雲や地表面の太陽光反射特性に基づいて、CAI-2 での有効反射率と閾値を比較し、画素ごとに雲の識別を行う。しかし、ここで問題になるのは、雲の光学的厚さが滑らかに変化するために閾値を厳密に決めるのは難しく、雲であるかどうかの決定が難しいケースが存在することである。これまでの雲識別アルゴリズムでは、状況に応じて晴天域または雲域と見なすことが多かった。しかし、晴天域とした場合は、FTS-2 を用いた濃度推定の誤差の増大につながる恐れがあり、一方で雲域とした場合は、濃度推定可能な FTS-2 データ数を減少させる可能性がある。そのため、どちらにも偏らない中立的な識別結果を得られるようにするため、晴天信頼度 [Ishida and Nakajima, 2009; Ishida et al., 2018] という指標を導入して雲識別の曖昧さをある程度、定量化する。以下、総合晴天信頼度を算出するための 2 つのアルゴリズムについて説明する。

4.2.1 CLAUDIA1

CLAUDIA1 [Ishida and Nakajima, 2009]では、図 4.2.1-1 のように t_1 と t_2 の 2 つの閾値を設定し、校正済み観測輝度から算出した有効反射率や反射率比との比較によって晴天信頼度 (晴天域である可能性が高いほど値が大きいように定義している) を決定する。

(a) 晴天信頼度と総合晴天信頼度

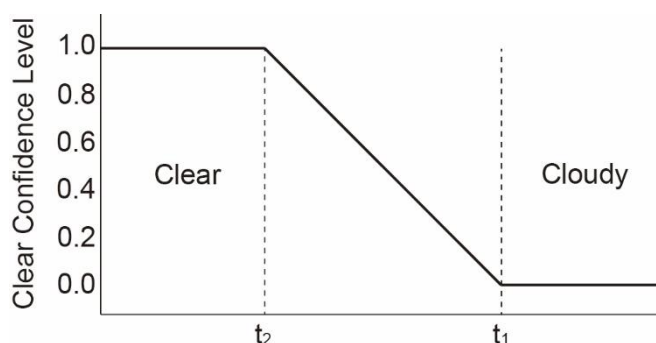


図 4.2.1-1 雲識別における晴天信頼度の決定。横軸は識別に用いる有効反射率や反射率比などの値、縦軸は晴天信頼度。 t_1 と t_2 の 2 つの閾値を設けて、その間の晴天域か曇域か曖昧なところを 0 から 1 の間の数値で表わす。

晴天信頼度は晴天域を 1、曇域を 0 とし、その間の晴天域か曇域か曖昧なところを線形補間して 0 から 1 の間の数値で表す。前述の式 (4.2-2) の近赤外域と可視域の反射率比のように、ある値の付近が曇 (もしくは晴天) と設定した場合は、図 4.2.1-2 に示すように、その値より大きいところでの境界と小さいところでの境界それぞれに閾値を 2 つずつ設定する。すなわち、合計で 4 つの閾値が存在することになる。

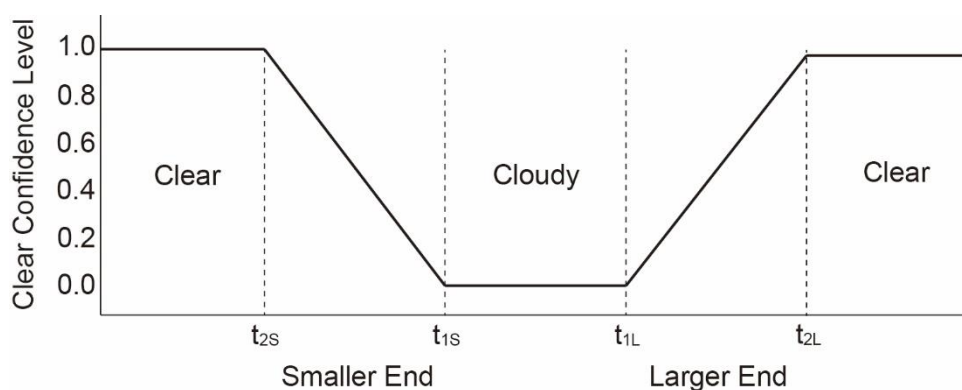


図 4.2.1-2 図 4.2.1-1 と同様。ただし、曇域を挟んで晴天域が領域に広がっている場合。

以上の晴天信頼度の識別テストを行い、陸域については 4 つの識別テスト、水域では 3 つの識別テスト、極域では 2 つの識別テストによる晴天信頼度 (F_k) を算出する。各識別テストにおける晴天信頼度 $F_1 \cdots F_n$ (n : 陸域では 4、水域では 3、極域では 2) から、以下の式によって「総合晴天信頼度 (Q)」を求める。ただし、何らかの原因で使用できないバンドがあった場合、そのバンドを用いる識別テストを除いた晴天信頼度を用いて総合晴天信頼度 (Q) を求める。

$$Q = 1 - \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (1 - F_i)} \quad (4.2.1-1)$$

この式は CAI-2 観測において利用できる識別テストが、いずれも「晴天域を雲域と間違いやすい」ことを受けてこの形になっている。この式に当てはめると、識別テストのうちの 1 つでも晴天域 ($F_k = 1$) と識別されれば、他の識別テストの結果に係わらず $Q = 1$ となる。一方、全ての識別テストにおいて、雲域 ($F_k = 0$) と識別されなければ $Q = 0$ とはならない。このように個別の識別テストが雲域と識別しやすいことと、式(4.2.1-1)が雲域と識別しにくいことを組み合わせて、総合的には中立的な晴天信頼度を確保している。

(b) 閾値

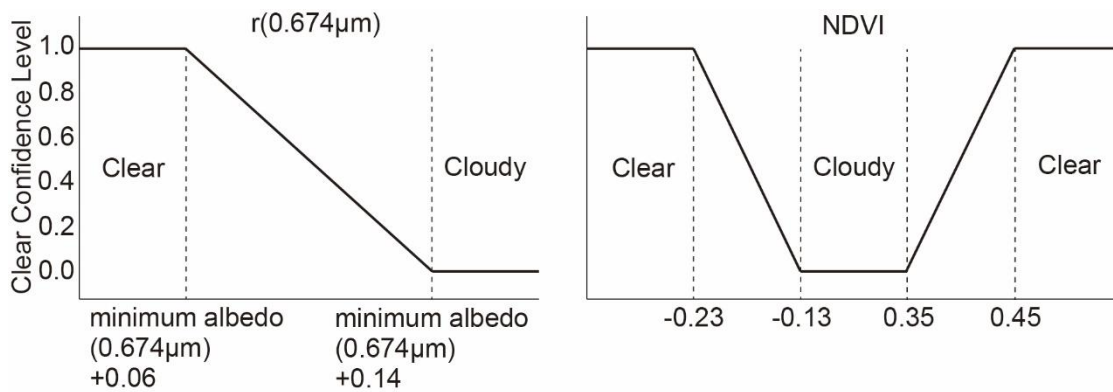
CLAUDIA1 における衛星打ち上げ時の閾値の設定を表 4.2.1-1 に示す[石田ほか, 2011] (ただし、今後変更の可能性はある)。

太陽光反射率テストの閾値は、画素位置の R_{min} に応じて変動させる。また、水域においては、サングリント識別を行い、Cone Angle (式(4.2-1)) によって閾値をさらに増加させる。Cone Angle と閾値増加量の関係を表 4.2.1-1 (ii) に示す。

表 4.2.1-1 CAI-2 L2 雲識別処理における閾値の設定

(i) 極域(緯度が北緯または南緯 66.6 度以上)

閾値テスト		t_1	t_2
$r(0.674 \mu\text{m})$		minimum albedo +0.14	minimum albedo +0.06
NDVI	Smaller End	-0.13 (t_{1S})	-0.23 (t_{2S})
	Larger End	0.35 (t_{1L})	0.45 (t_{2L})



(ii) 水域(極域を除く)

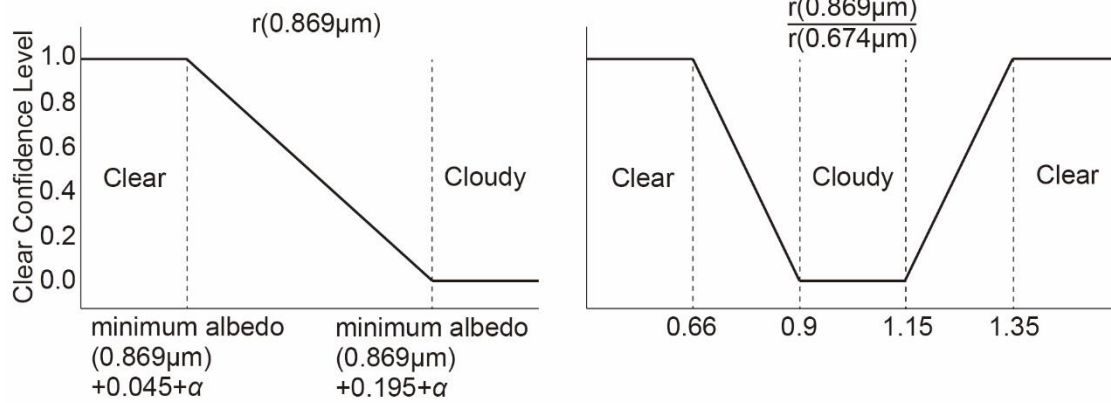
閾値テスト		t_1	t_2
$r(0.869 \mu\text{m})^*$		minimum albedo +0.195	minimum albedo +0.045
$r(0.869 \mu\text{m})$	Smaller End	0.90 (t_{1S})	0.66 (t_{2S})
$r(0.674 \mu\text{m})$	Larger End	1.15 (t_{1L})	1.35 (t_{2L})
NDVI	Smaller End	-0.10 (t_{1S})	-0.22 (t_{2S})
	Larger End	0.22 (t_{1L})	0.46 (t_{2L})

* サングリント領域では、さらに閾値を増加させる

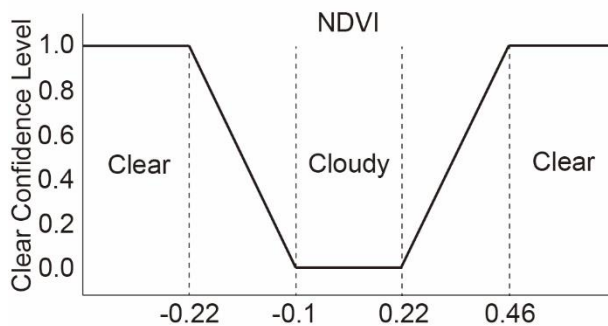
サングリント領域での太陽光反射率テストの閾値増加量。

Cone Angle が表中の角度の間にある場合は、線形補間によって増加量を求める。

Cone Angle [deg.]	閾値増加量
35	0.00
30	0.01
25	0.02
20	0.10
15	0.15
10 以下	0.20

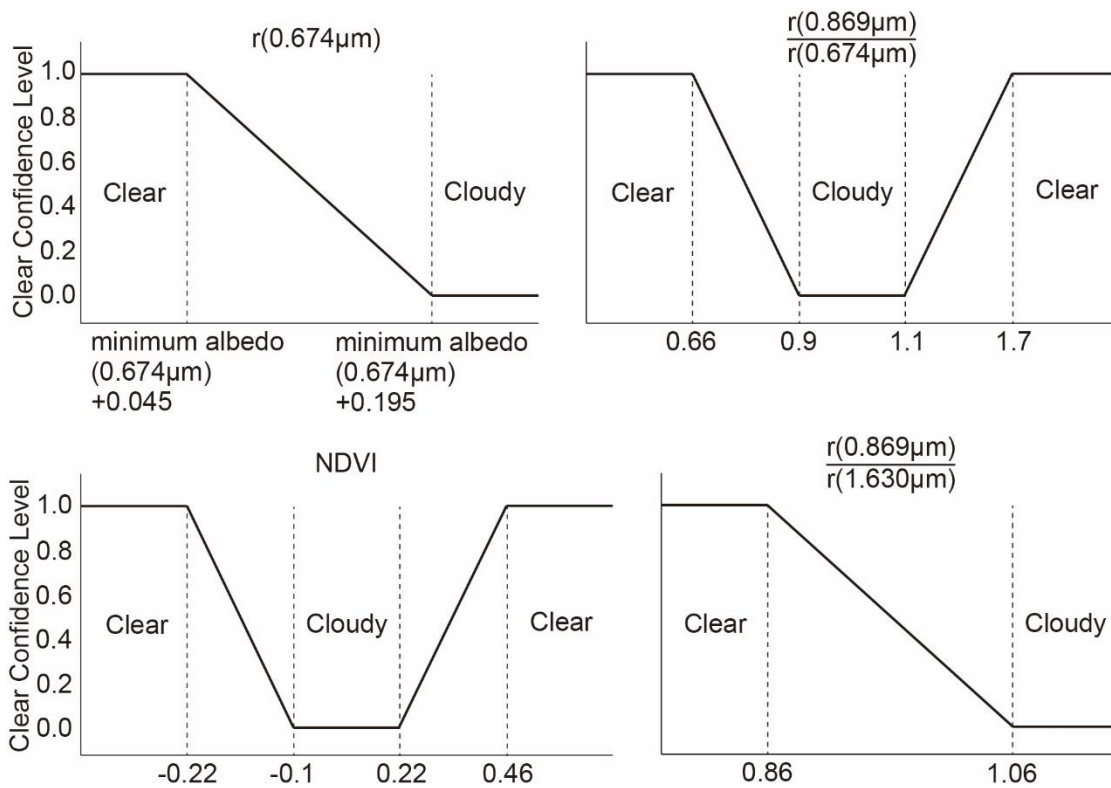


α is the degree of increase of the threshold according to the Cone Angle.



(iii) 陸域(極域を除く)

閾値テスト		t_1	t_2
$r(0.674 \mu\text{m})$		minimum albedo +0.195	minimum albedo +0.045
$r(0.869 \mu\text{m})$	Smaller End	0.90 (t_{1S})	0.66 (t_{2S})
$r(0.674 \mu\text{m})$	Larger End	1.10 (t_{1L})	1.70 (t_{2L})
NDVI	Smaller End	-0.10 (t_{1S})	-0.22 (t_{2S})
	Larger End	0.22 (t_{1L})	0.46 (t_{2L})
$r(0.869 \mu\text{m})$		1.06	0.86
$r(1.630 \mu\text{m})$			



4.2.2 CLAUDIA3

これまで CLAUDIA1 では、経験で得られた閾値を設定することで雲識別を行ってきた。CLAUDIA3 では、多変量解析を用いて客観的に閾値を決定するために、サポートベクターマシン(SVM)による雲識別を行う。

(a) CLAUDIA3 における SVM の利用

(i) 決定関数と総合晴天信頼度

CLAUDIA3[Ishida et al., 2018]では、ソフトマージン SVM に対してカーネルトリックを適用している。カーネルは、

$$K_{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}} = \frac{\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x} + 1}{2}$$

の2次多項式を用いる(ただし、カーネルは適宜、変更の可能性がある)。したがって、識別関数は、

$$y = \text{sign} \left(\sum_{i \in S} \alpha_i^* t_i \frac{\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x} + 1}{2} - h^* \right) \quad (4.2.2-1)$$

であるが、ここで $t_i = 1$ を晴れ、 $t_i = -1$ を曇りとし、以下に示す分離超平面からの距離(決定関数)によって晴れ/曇りの識別を行う。

$$D_{\mathbf{x}} = \sum_{i \in S} \alpha_i^* t_i K_{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}} - h^* \quad (4.2.2-2)$$

すなわち、決定関数 $D(\mathbf{x})$ の値によって、

$$\begin{cases} D_{\mathbf{x}} > 0 & \text{晴れ} \\ D_{\mathbf{x}} < 0 & \text{曇り} \\ D_{\mathbf{x}} = 0 & \text{判定不能} \end{cases}$$

と識別する。SVM では個別の識別テストを行わず、各識別テストを特徴量とした多次元空間において分離超平面を決定するため、CLAUDIA1 における個別の識別テストの晴天信頼度にあたるものは存在しない。しかし、式(4.2.2-2)に示した決定関数の絶対値をとることで、総合晴天信頼度を得ることができる。

(ii) 使用する特徴量

極域、水域(極域を除く)、陸域(極域を除く)において使用する特徴量を表 4.2.2-1 に示す。これは CLAUDIA1 の表 4.2.1-1 と同様である(ただし、今後、特徴量を追加する可能性もある)。

表 4.2.2-1 使用する特徴量

	水域	陸域	極域
雲 濃 度	NDVI	NDVI	NDVI
	$r(0.869 \mu\text{m})^{*1*2}$	$r(0.674 \mu\text{m})^{*1}$	$r(0.674 \mu\text{m})^{*1}$
	$\frac{r(0.869 \mu\text{m})}{r(0.674 \mu\text{m})}$	$\frac{r(0.869 \mu\text{m})}{r(0.674 \mu\text{m})}$	
		$\frac{r(0.869 \mu\text{m})}{r(1.630 \mu\text{m})}$	

*1 大気補正前反射率を使用している。

*2 Cone Angle を考慮している。

(iii) CLAUDIA3 特有の入力情報

式(4.2.2-2)の決定には、以下の事前処理が必要である。

- 1) 雲識別に必要な訓練サンプルの取得
- 2) 訓練サンプルを用いて式(4.2.2-2)のサポートベクトルやパラメータを算出

1)の処理は夏と冬それぞれについて、2)の処理は水域、陸域、極域の3領域に分けた、計6通りについて行うことを想定している(ただし、今後変更の可能性もある)。

よって、2)の処理で得られたサポートベクトルやパラメータが、CLAUDIA3 特有の入力情報である。

5 アルゴリズム検証

本章では、CAI-2 L2 雲識別処理で用いられているアルゴリズム CLAUDIA1 と CLAUDIA3 の検証結果および検証方法について説明する。

(a) CLAUDIA1

CLAUDIA1 については、MODIS 雲マスクアルゴリズム[Ackerman et al., 1998, 2010]との比較による精度評価[Taylor et al., 2012; Ishida et al. 2011]と、目視判読[大石ほか, 2014]との比較による精度評価が行われている。それらの結果、裸地や半植生および陸と内陸水境界の水域側において晴れていても曇りと判定される傾向があることや、雲の縁や薄い巻雲を見落とす傾向があることが報告されている。

(b) CLAUDIA3

CLAUDIA3 については、アルゴリズム概要[Ishida et al., 2018]および初期結果[Oishi et al., 2018]について報告されている。今後は、熱帯雨林における目視判読と CLAUDIA1 との比較による検証と、全球レベルでの CLAUDIA1、MODIS 雲マスクアルゴリズム、Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) 衛星搭載の Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) などとの比較による検証などが考えられる。CLAUDIA3 は現在改良中だが、現時点では CLAUDIA1 に比べて雲識別精度が高いことが報告されている。一方、濁った河川において晴れていても曇りと判定されることや、雲を過剰判定する傾向も報告されている [Oishi et al., 2018]。

打ち上げ後は、実データを用いて同様の検証を行うことが考えられる。

6 前提条件・制約事項

(a) 総合晴天信頼度の利用方法

CLAUDIA1 における総合晴天信頼度は雲域を 0、晴天域を 1 とし、雲域か晴天域か曖昧なところを 0 から 1 の数値で表している。ユーザは雲域と晴天域の境目を 0 から 1 の間の数値から決めて、それより小さい場合は雲域、大きい場合は晴天域として雲識別を行うことができる。閾値を 0 に近づければ晴天域と識別される領域が大きくなり、1 に近づければ晴天域と識別される領域は小さくなる。参考までに、GOSAT-2 の定常処理において CAI-2 L2 雲識別プロダクトを利用する際には 0.33 を閾値としている(ただし、今後変更の可能性がある)。

CLAUDIA3 における総合晴天信頼度も同様に、雲域を 0、晴天域を 1 とし、0.5 は分離超平面上であったことを表す。参考までに、CAI-2 L2 雲識別プロダクトを利用する際には 0.5 を閾値としている(ただし、今後変更の可能性がある)。

CAI-2 L2 雲識別プロダクトには、総合晴天信頼度を 4 ビット(16 段階)で表したものが格納されているので、これを使って閾値を決めて雲識別を行うこともできる。CAI-2 L2 雲識別プロダクトは、ユーザが総合晴天信頼度を使って雲域と晴天域の閾値を調整して雲識別を行うことができる。

(b) FTS-2 を用いた雲判定

CAI-2 には熱赤外チャンネルが搭載されていないので、雲頂温度による雲識別ができない。そのため日陰域では識別できず、日中でも薄い雲は晴天域と誤識別してしまう恐れがある。また、太陽天頂角が大きい場合にも、正確な識別が困難になると考えられる。巻雲については、水蒸気吸収帯を含んだ複数の熱赤外チャンネルにおける観測値から識別するのが一般的であり、したがって、CAI-2 単独での巻雲の識別は困難である。

FTS-2 には水蒸気の飽和吸収域を含む 2 μm のバンドや熱赤外バンドがあるので、CAI-2 L2 雲識別プロダクトに加え、それらを用いた雲判定を行うことで巻雲なども取り除けると考えられる[Yoshida, 2020]。

一方、主に CAI-2 を用いて解析する場合、対象領域に FTS-2 データがあるとは限らない。したがって、巻雲が含まれないデータを用いる必要がある場合、FTS-2 を用いた巻雲除去に比べて精度は劣るが、雲識別処理アルゴリズムの出力ファイルビットフィールド(表 3.2-1)の巻雲可能性フラグを併せて参照する必要がある。

(c) 雲識別が比較的困難なケース

(i) 雪氷域

3.2 節(b) (iv) で記したように、CAI-2 には熱赤外チャンネルが搭載されていないので、雪氷域での雲識別が比較的困難である。そのため、雲識別処理アルゴリズムの出力ファイルビットフィールド(表 3.2-1)の積雪面可能性フラグを併せて参照する必要がある。

(ii) サングリント領域

CLAUDIA1 においては、Cone Angle の大きさによって閾値を変化させることで、CLAUDIA3 においては、Cone Angle を考慮した特徴量を用いることで対応しているが、サングリント領域については反射率が高く、雲識別が比較的困難である。そのため、雲識別処理アルゴリズムの出力ファイルビットフィールド(表 3.2-1)の Cone Angle を併せて参照する必要がある。

(iii) その他の高反射率地域

雪氷域・サングリント領域以外でも、乾塩湖・都市域などの高反射率地域での雲識別は、比較的困難である。

(iv) 大気補正前反射率の影や雲

4.2 節(a)(i)で記したように、太陽光反射率テストは、衛星の校正済み観測輝度から算出した有効反射率と大気補正前反射率の比較によって雲識別を行っている。この大気補正前反射率作成処理において雲影や雲を取り除く処理が行われるが、雲影や雲が残ってしまうことがある。大気補正前反射率に(雲影を含む)影が残っていた場合、雲がなくても高反射率と判定されるため、雲がなくても雲と識別されやすくなる。一方、大気補正前反射率に雲が残っていた場合、雲があっても高反射率と判定されないため、雲があっても雲なしと識別されやすくなる。

参考文献

- Ackerman, S. A., K. I. Strabala, W. P. Menzel, R. A. Frey, C. C. Moeller, and L. E. Gumley (1998), Discriminating clear sky from clouds with MODIS, *J. Geophys. Res.*, **103**, 32141-32157, <https://doi.org/10.1029/1998JD200032>.
- Ackerman, S., R. Frey, K. Strabala, Y. Liu, L. Gumley, B. Baum, and P. Menzel (2010), Discriminating Clear-Sky from Cloud with MODIS Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35); Version 6.1, 入手先: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod06.pdf [閲覧日: 2020年4月30日].
- Griffin, M. K., S. M. Hsu, H. K. Burke, S. M. Orloff, and C. A. Upham (2005), Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis, *Lincoln Lab. J.*, **15**, 271-298, 入手先: https://archive.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol15_no2/15_2-08.pdf [閲覧日: 2020年4月30日].
- Hall, D. K., G. A. Riggs, and V. V. Salomonson (1995), Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data, *Remote Sens. Environ.*, **54**, 127-140, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P).
- Ishida, H. and T. Y. Nakajima (2009), Development of an unbiased cloud detection algorithm for a spaceborne multispectral imager, *J. Geophys. Res.*, **114**, D07206, <https://doi.org/10.1029/2008JD010710>.
- Ishida, H., T. Y. Nakajima, T. Yokota, N. Kikuchi, and H. Watanabe (2011), Investigation of GOSAT TANSO-CAI Cloud Screening Ability through an Intersatellite Comparison. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1571-1586, <https://doi.org/10.1175/2011JAMC2672.1>.
- Ishida, H., Y. Oishi, K. Morita, K. Moriwaki, T. Y. Nakajima (2018), Development of a support vector machine based cloud detection method for MODIS with the adjustability to various conditions, *Remote Sens. Environ.*, **205**, 390-407, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.003>.
- Kriebel, K. T., G. Gesell, M. Kästner, and H. Mannstein (2003), The cloud analysis tool APOLLO: Improvements and validations, *Int. J. Remote Sens.*, **24**, 2389-2408, <https://doi.org/10.1080/01431160210163065>.
- O'Dell, C. W. and T. E. Taylor (2014), OCO-2 Algorithm Theoretical Basis Document Oxygen-A Band Cloud Screening Algorithm (ABO2), 入手先: https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/OCO/oco2_abo2_atbd_prelaunch_4.pdf [閲覧日: 2020年4月30日].
- Oishi, Y., H. Ishida, T. Y. Nakajima, R. Nakamura, and T. Matsunaga (2018), Preliminary verification for application of a support vector machine-based cloud detection method to GOSAT-2 CAI-2, *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 2863-2878, <https://doi.org/10.5194/amt-11-2863-2018>.
- Rossow, W. B. and L. C. Garder (1993), Cloud Detection Using Satellite Measurements of Infrared and Visible Radiances for ISCCP, *J. Clim.*, **6**, 2341-2369, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<2341:CDUSMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<2341:CDUSMO>2.0.CO;2).
- Stowe, L. L., P. A. Davis, and E. P. McClain (1999), Scientific Basis and Initial Evaluation of the CLAVR-1 Global Clear/Cloud Classification Algorithm for the Advanced Very High Resolution Radiometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 656-681, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<0656:SBAIEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<0656:SBAIEO>2.0.CO;2).

- Taylor, T. E., C. W. O'Dell, D. M. O'Brien, N. Kikuchi, T. Yokota, T. Y. Nakajima, H. Ishida, D. Crisp, and T. Nakajima (2012), Comparison of Cloud-Screening Methods Applied to GOSAT Near-Infrared Spectra, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **50**, 295-309, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2160270>.
- 石田 春磨, 中島 孝, 菊地 信行 (2011), GOSAT TANSO-CAI L2 雲フラグ算出処理アルゴリズム基準書, 入手先: https://data2.gosat.nies.go.jp/doc/documents/ATBD_CAIL2CLDFLAG_V1.1_ja.pdf [閲覧日: 2020年4月30日].
- 大石 優, 亀井 秋秀, 横田 康弘, 開 和生, 松永 恒雄 (2014), アマゾンにおける目視判読との比較による GOSAT TANSO-CAI L2 雲フラグプロダクトの精度評価及び TANSO-FTS の視野サイズ変更に伴う影響評価, *日本リモートセンシング学会誌*, **34**, 153-165, <https://doi.org/10.11440/rssj.34.153>.
- 吉田幸生 (2020), GOSAT-2 TANSO-FTS-2 SWIR L2 処理アルゴリズム基準書 [準備中].