

修士論文

題目

Himawari/AHIを用いた  
カリマンタン島における火災検出  
～時変閾値の導入による精度向上～

指導教員

松岡 真如 准教授

令和5年度

三重大学 工学研究科 情報工学専攻  
データサイエンス研究室

佐藤 諄 (422M517)

# 目次

|          |                   |           |
|----------|-------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>はじめに</b>       | <b>3</b>  |
| 1.1      | 研究背景              | 3         |
| 1.1.1    | カリマンタン島における森林火災   | 3         |
| 1.2      | 関連研究              | 3         |
| 1.2.1    | リモートセンシングによる火災検出  | 3         |
| 1.2.2    | 極軌道衛星による火災検出      | 4         |
| 1.2.3    | 静止軌道衛星による火災検出     | 4         |
| 1.2.4    | GOES-R/ABIによる火災検出 | 5         |
| 1.2.5    | 輝度温度の日中と夜間の差      | 5         |
| 1.3      | 本研究の目的            | 6         |
| <b>2</b> | <b>使用データ</b>      | <b>7</b>  |
| 2.1      | 研究対象地             | 7         |
| 2.2      | Himawari/AHI      | 8         |
| 2.2.1    | 使用したバンド           | 8         |
| 2.2.2    | 使用したデータの範囲と期間     | 9         |
| 2.3      | その他のデータ           | 10        |
| <b>3</b> | <b>手法</b>         | <b>11</b> |
| 3.1      | 火災検出アルゴリズムの作成     | 11        |
| 3.1.1    | データの作成と変換         | 11        |
| 3.1.2    | 不要画素の除去           | 13        |
| 3.1.3    | 周辺画素領域の作成         | 14        |
| 3.1.4    | 非火災画素の決定          | 15        |
| 3.1.5    | Dozier 法による誤検出の除去 | 16        |
| 3.1.6    | 火災画素の決定           | 17        |
| 3.1.7    | ここまでの検出について       | 19        |
| 3.2      | 時間変移閾値の作成         | 21        |
| 3.2.1    | 雲の時間変移閾値の作成       | 22        |
| 3.2.2    | 火災の時間変移閾値の作成      | 23        |
| 3.3      | 時間変移閾値の導入         | 24        |
| <b>4</b> | <b>結果と考察</b>      | <b>25</b> |
| 4.1      | 火災検出結果の例          | 25        |
| 4.2      | 検出結果の比較           | 26        |
| 4.3      | 時間変移閾値導入の比較       | 27        |
| 4.4      | 画素単位での推移          | 29        |
| <b>5</b> | <b>総括</b>         | <b>30</b> |
|          | 参考文献              | 31        |

## 目 次

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | 泥炭地での消火活動 [1]                            | 3  |
| 1.2 | 黒体放射のスペクトル [6]                           | 6  |
| 2.1 | カリマンタン島 [7]                              | 7  |
| 2.2 | Band 7 と Band 14 の差                      | 9  |
| 3.1 | 開発したアルゴリズムのフローチャート                       | 11 |
| 3.2 | 周辺画素領域の拡張例                               | 14 |
| 3.3 | 夜間における火災検出                               | 19 |
| 3.4 | ある火災画素とその周囲の Band 7 の輝度温度の推移             | 19 |
| 3.5 | 時間変移閾値の作成フローチャート                         | 21 |
| 3.6 | 雲の時間変移閾値の作成                              | 22 |
| 3.7 | 火災の時間変移閾値の作成                             | 23 |
| 4.1 | 火災検出結果 (2018 年 9 月 28 日 UTC 1:00)        | 25 |
| 4.2 | 火災検出結果の拡大 (2018 年 9 月 28 日 UTC 1:00)     | 26 |
| 4.3 | 検出結果の比較 (2018 年 8 月 18 日 UTC 2:30)       | 26 |
| 4.4 | 検出結果の比較 (2018 年 9 月 28 日 UTC 2:30)       | 27 |
| 4.5 | 画素単位での分類の推移 (2018 年 9 月 20 日から 9 月 29 日) | 29 |

## 表 目 次

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Himawari/AHI のバンドと波長帯 . . . . .         | 8  |
| 3.1 | 周辺画素領域から求める統計値 . . . . .                | 15 |
| 4.1 | 検出結果の色の分類 . . . . .                     | 25 |
| 4.2 | 時間変移閾値導入前後の比較 2018 年 9 月 22 日 . . . . . | 28 |
| 4.3 | 値の分類 . . . . .                          | 29 |

## 概要

カリマンタン島では森林火災が問題となっている。森林火災の対策の1つとして早期検出が必要である。極軌道衛星による観測は行われているが、1日に2回しか観測できないという問題がある。静止軌道衛星 Himawari に搭載された Advanced Himawari Imager (AHI) は東南アジアを含む半球を10分間隔で観測できるため、早期発見に適している。衛星による火災検出では輝度温度に閾値を設定して高温部を検出するが、これまでの研究では、輝度温度の日内変動を考慮できておらず、検出精度が下がるという問題があった。また、火災検出の障害となる雲の判定についても、固定の閾値を用いることで誤判定が生じていた。本研究では、Himawari/AHI による火災検出の精度向上を目的として、時間とともに変化する閾値を用いた火災検出アルゴリズムを開発した。

基本となる火災検出アルゴリズムは Geostationary Operational Environmental Satellites-R Series (GOES-R) に搭載された Advanced Baseline Imager (ABI) のものを参照した。このアルゴリズムは、中心画素の反射率や輝度温度を、周辺画素の値と比較することで火災を検出する。アルゴリズムの概要は以下の通りである。まず、雲や水域など不要な画素を除去する。次に、十分なサンプル数が確保できるまで領域を広げながら、周辺画素の反射率や輝度温度の統計値を計算する。この統計値と中心画素の値とを用いた閾値テストによって、中心画素の火災の可能性を判定する。また、火災の可能性がある場合には、火災の温度と面積を推定する。最後に、求められた火災温度や中心画素の輝度温度、周辺画素の統計値を用いた閾値テストによって火災の判定する。

このアルゴリズムの問題点として、夜間の雲と火災の検出が上手くできなかった。原因は、輝度温度は時間帯によって変化するが、閾値は固定されていることであった。そこで、雲と火災の判定に、時間によって変移する閾値を導入した。まず、雲の閾値を作成す

るために、水域を除いた画素の、同じ観測時刻の一ヶ月分のデータを用いて輝度温度のヒストグラムを作成した。このヒストグラムの 10%ごとのパーセント点の時間推移をもとの閾値と比較して、雲の閾値を決定した。次に、火災については、上述の時変閾値を用いて雲を除去した陸域の画素を用いて時間ごとにヒストグラムを作成し、上位 0.2 パーセント点を閾値とした。

本研究の結果を Sentinel-2/MSI の高解像度衛星画像を援用しながら、極軌道衛星に搭載された MODIS の火災プロダクトと比較した。その結果、MODIS では検出できていない火災を、本研究では検出できていた。加えて、火災の位置も MODIS のプロダクトより正確であった。また、数日間続いた火災を検出した結果、固定閾値の場合は日中のみ火災と判定され、夜間は検出されなかった。一方、時変閾値を用いた場合、昼夜を問わず発生から鎮火まで連続的に火災と検出した。したがって、本研究で作成した火災検出は、検出精度と検出位置の点での点で MODIS の火災検出よりも優れており、時変閾値を導入したことで導入したことで特に夜間の検出精度が向上した。

# 1 はじめに

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 カリマンタン島における森林火災

東南アジアにあるカリマンタン島では，乾季に火災が多数発生している．WWF ジャパン [1] によると，カリマンタン島には炭素が多く含まれている泥炭地が広がっており，この土地における火災は乾燥時には非常に燃えやすく，土の中にまで火が入ると完全に消化することが極めて困難となるという深刻な問題がある．また，長時間火災が続くことや，通常の火災の 20 倍を上回る二酸化炭素が排出されることで，地球温暖化を加速させる原因にもなる．このため，火災が発生してから速やかな消火活動が求められる．



図 1.1: 泥炭地での消火活動 [1]

## 1.2 関連研究

### 1.2.1 リモートセンシングによる火災検出

藤村ら [2] によると，熱赤外リモートセンシングでは，人工衛星や航空機に搭載したセンサーで地表対象物からの熱放射を観測するが，この場合，地表対象物の温度に関する不可

視情報が、広域にわたり、きわめて短時間のうちに非接触で得られるという特長がある。また、竹内 [3] は、地球に存在する森林の面積は非常に広大であるため、効率性・安全性・即時性・費用対効果などの観点から、森林火災監視には、熱赤外のリモートセンシングが有効であると述べている。

### 1.2.2 極軌道衛星による火災検出

極軌道衛星を利用した火災検出において、現在は Terra 衛星と Aqua 衛星に搭載された Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) などが使用されているが、その運用上の制約からくる問題が存在している。具体的には、地球の極軌道を周回するため、一度の通過で得られる観測データが非常に限られている。この制限により、1日にわずか数回しか特定の地域を観測することができない。そのため、火災の発生や進行を迅速に把握することが難しく、極軌道衛星による火災検出の効率が低下している。従って、極軌道衛星を活用した火災検出の際には、これらの制約を克服するための新たなアプローチや技術の導入が必要とされている。

### 1.2.3 静止軌道衛星による火災検出

静止軌道衛星は常にある地点の上空に位置しているため、観測頻度が高い。Nakazono et. al [4] によると、静止軌道衛星 Himawari に搭載された Advanced Himawari Imager (AHI) の Band 7 が火災の発生初期から消火までの 10 分ごとの変動を追跡できる。この研究では Band 7 の 1 時間平均値と短期変動幅の 2 つの指標を使用し、火災域と森林域を判定することが可能であることが示された。火災域の平均値が常に森林域の平均値よりも

高いことから、この指標を使用して火災域を特定できることが確認された。しかし、泥炭地での火災は従来の指標や閾値では捉えにくく、特に煙の影響が大きいことが指摘されている。火災地域と非火災地域の特徴的な差異を明確に捉えるためには、泥炭地においては新たな指標やアプローチが必要であることが示唆された。

#### 1.2.4 GOES-R/ABI による火災検出

AHI と同等の性能を有している GOES-R の Advanced Baseline Imager (ABI) を利用した火災検出として、Schmidt et.al [5] による火災検出アルゴリズムがある。このアルゴリズムは、Band 7(3.9  $\mu$  m) と Band 14(11.2  $\mu$  m) の放射輝度を用いて、火災画素と周囲の非火災画素を比較することで火災を検出する。プランクの放射則から、温度が高いほど放射輝度のピークは短波長側にシフトし、放射輝度は大きくなる。つまり、Band 7 と Band 14 の放射輝度の差を見ることで火災を検知できる。この差を周囲の画素と比較すると、火災は背景の非火災領域とは異なる輝度温度と分光放射輝度を持つため、火災を検出することができる。

#### 1.2.5 輝度温度の日中と夜間の差

気象センター [6] によると、Himawari/AHI の Band 7 が観測している波長領域は地球放射と太陽放射の裾野で、僅かながら重なる領域となっているため、日中は、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を観測することになるとされている (図 1.2)。

つまり、日中と夜間では Band 7 の波長帯における輝度温度に大きな差が表れる。この

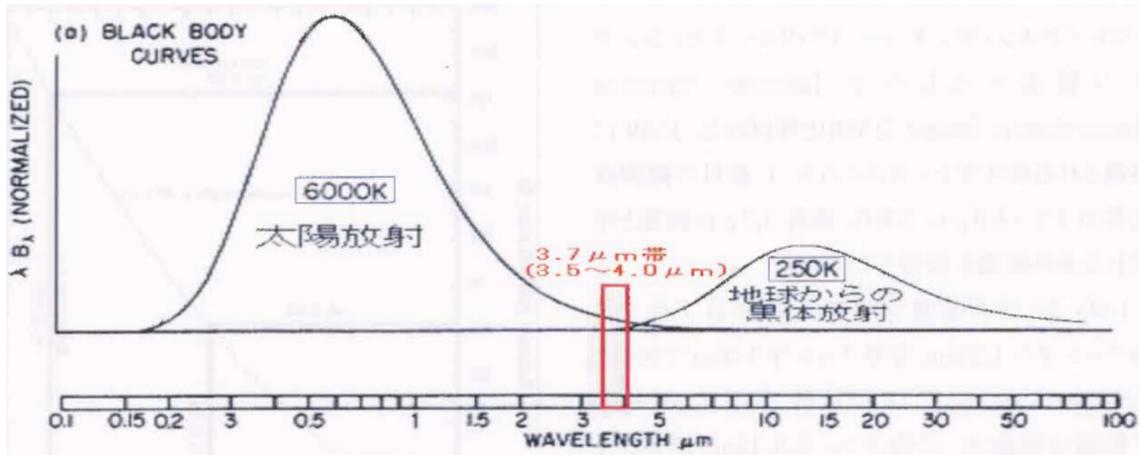


図 1.2: 黒体放射のスペクトル [6]

ことから、特に Band 7 において雲や火災の判定基準を時間に応じて変化させる必要がある。

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的は Himawari/AHI のデータを利用した、カリマンタン島全域における火災検出アルゴリズムの開発である。特に、時間とともに変移する閾値を使用して、1日を通して高精度に火災を検出することである。

## 2 使用データ

### 2.1 研究対象地

カリマンタン島（図 2.1）は、インドネシア、マレーシア及びブルネイの3カ国の領土がある島で、赤道付近に位置し、その面積は約73万km<sup>2</sup>である。季節の変化は乾季と雨季の2つの主要な季節が存在している。雨季は通常11月から4月まで続き、乾季は5月から10月まで続く。



図 2.1: カリマンタン島 [7]

## 2.2 Himawari/AHI

Himawari 8号・9号は、日本の静止気象衛星である。Himawari 8号は2014年10月7日に打ち上げられ、軌道上で機能の確認試験を実施した後、2015年7月7日からMTSAT-2に代わり正式運用を開始した。また、Himawari 9号は2023年12月13日からHimawari 8号と交代し、正式運用を開始した。Himawari 8号・9号はAHIを搭載している。先代のMTSAT-2と比較して、観測バンド数の増加（表 2.1）と時空間分解能の向上などの性能が向上している。

表 2.1: Himawari/AHI のバンドと波長帯

|                      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|----------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Band                 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     |
| 波長 ( $\mu\text{m}$ ) | 0.47 | 0.51 | 0.64 | 0.86 | 1.61  | 2.26  | 3.89  | 6.24  |
| 水平解像度 (km)           | 1    | 1    | 0.5  | 1    | 2     | 2     | 2     | 2     |
| Band                 | 9    | 10   | 11   | 12   | 13    | 14    | 15    | 16    |
| 波長 ( $\mu\text{m}$ ) | 6.94 | 7.35 | 8.60 | 9.64 | 10.41 | 11.24 | 12.38 | 13.28 |
| 水平解像度 (km)           | 2    | 2    | 2    | 2    | 2     | 2     | 2     | 2     |

### 2.2.1 使用したバンド

本研究ではHimawari/AHIの可視波長域ではBand 3、赤外波長域ではBand 7、Band 14、Band 15の計4つのバンドのデータを使用した。主な火災検出にはBand 7とBand 14を用いた。これはプランクの放射法則から、対象の温度によって波長ごとに放射輝度の差があり、Band 7とBand 14の二つの差は対象の温度が高いほど大きくなることからこの二つを主に使用している。図 2.2 を見ると、南部と東部に周囲の画素に比べて白くなっている画素がある。Band 7とBand 14との差が大きいことから、これらは火災の可能性が高い。また、すべてのバンドは雲の除去や、火災でない画素（非火災画素）の判別に使

用している。また雲の検出に対して、Band 7と Band 14, Band 15, 日中のみ Band 3 のデータを使用した。

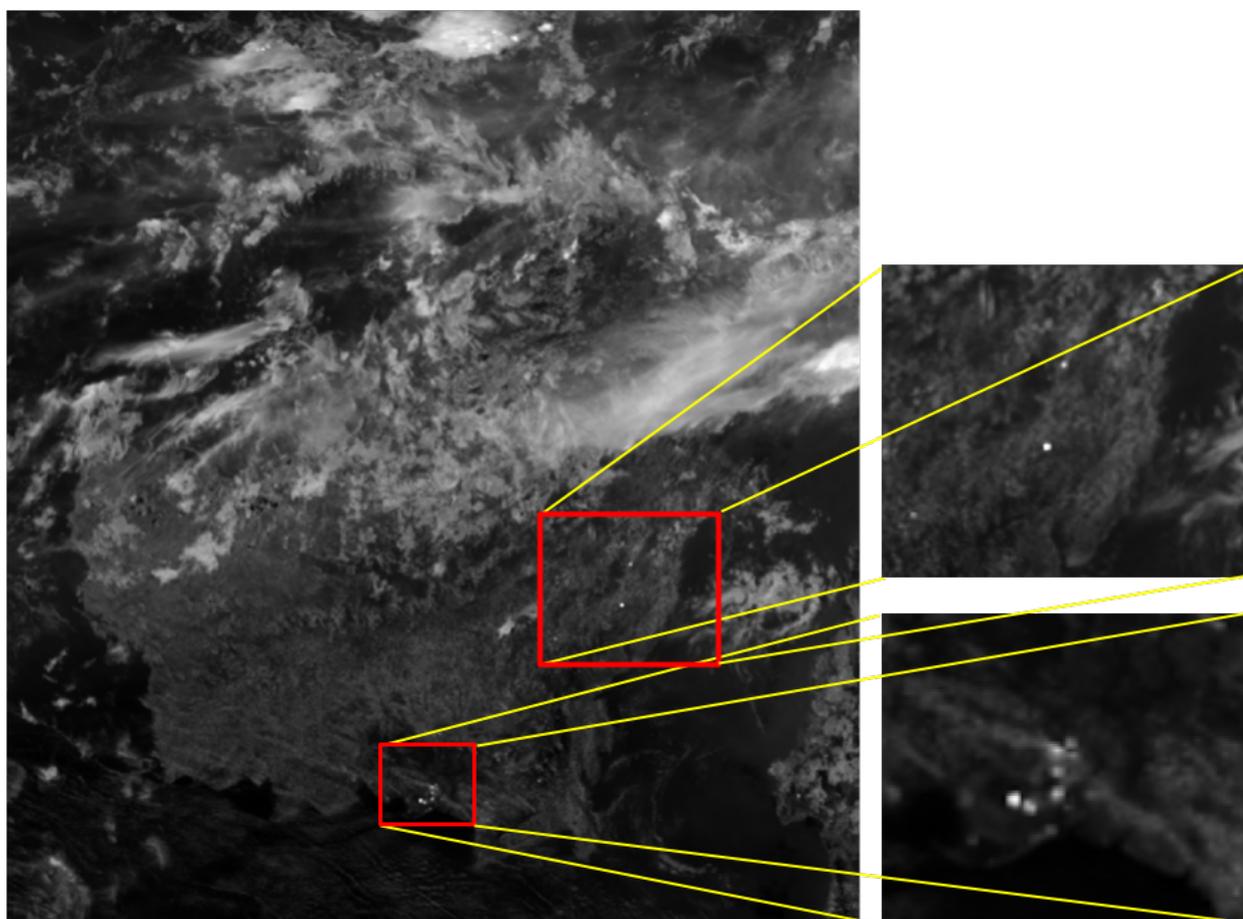


図 2.2: Band 7 と Band 14 の差

### 2.2.2 使用したデータの範囲と期間

本研究では、Himawari-8 の 10 分毎の全球画像からカリマンタン島を含む東経 108 度から 120 度，北緯 5 度から南緯 8 度の範囲を抽出した。また，対象とした期間は 2018 年の 1 年間のデータである。

## 2.3 その他のデータ

海や川などの水域では火災が起きない。このような地域は事前に除去する必要がある。そのため、MODISの土地被覆分類マスクプロダクトであるMODIS Land Cover Type Product (MCD12Q1) [8]を用いて水域の除去を行った。

加えて、検出結果の比較として極軌道衛星であるMODISの火災検出プロダクトであるThermal Anomalies/Fire Daily L3 Global 1kmのMOD14A1とMYD14A1の二つを利用した[9]。さらに、実際に火災が発生しているのか確認するために高解像度衛星画像であるSentinel-2の衛星画像を利用した。

### 3 手法

#### 3.1 火災検出アルゴリズムの作成

本研究では，Schmidt et. al による GOES-R/ABI の火災検出アルゴリズム [5] を参考として作成した．図 3.1 は開発したアルゴリズムのフローチャートである．

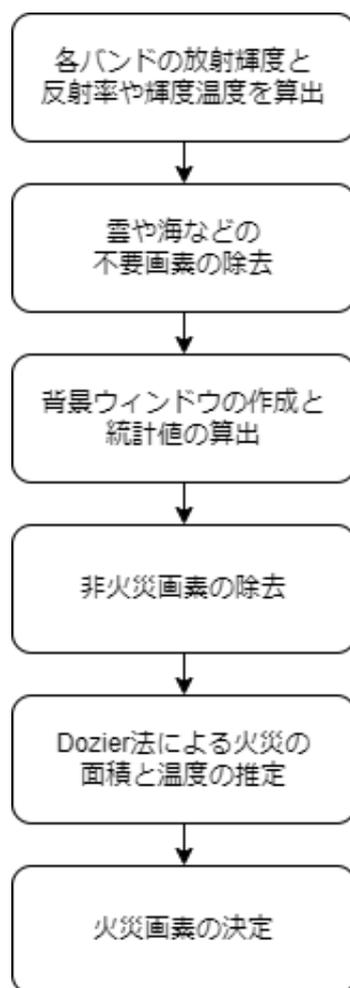


図 3.1: 開発したアルゴリズムのフローチャート

##### 3.1.1 データの作成と変換

本研究では主に Himawari/AHI のデータを使用した．このデータは NICT サイエンスクラウド [10] からデータのダウンロードを行った．ダウンロードしたデータから対象となる地域のデータを切り抜いた．取得したデータは分光放射輝度や反射率，輝度温度といっ

た物理量への変換が必要である。それぞれの変換式は気象庁が提供しているひまわり 8・9号 ひまわり標準データ 利用の手引き [11] に記されている。

分光放射輝度は波長での単位面積あたりの単位立体角あたりのエネルギーの放射強度の事で、地表の特性や状態を推定することが可能である。分光放射輝度の変換式は式 (3.1) に従う。

$$rad = a \cdot C + b \quad (3.1)$$

$rad$  : 分光放射輝度 ( $W/(m^2 sr \mu m)$ )

$a$  : 変換の一次係数 ( $W/(m^2 sr \mu m count)$ )

$b$  : 変換の定数項 ( $W/(m^2 sr \mu m)$ )

$C$  : カウント値 (count)

これをすべてのバンドデータに対して行い、分光放射輝度を求める。求められた分光放射輝度をもとに Band 3 であれば反射率に、それ以外のバンドは輝度温度に変換する。

反射率は、物体が入射した光をどれだけ反射するかを示す指標で、通常、明るくて反射が強い物体ほど高い反射率を持っている。地球の表面や大気特定の波長における反射率の情報をを用いることで、地表の種類や植生、大気の状態などを把握することが可能である。反射率への変換式は式 (3.2) に従う。

$$ref = rad \cdot c' \quad (3.2)$$

$ref$  : 反射率 (無次元)

$rad$  : 放射輝度 ( $W/(m^2 sr \mu m)$ )

$c'$  : 反射率への変換係数 ( $(m^2 sr \mu m)/W$ )

輝度温度は、物体が放射する電磁波の強度として捉えられる温度で、実際の温度とは異なり、物体が放射するエネルギーの分布を表す指標である。衛星が観測した放射輝度から、輝度温度を計算することができ、これによって地表の温度や気象条件などを評価することが可能である。輝度温度への変換式は以下 (3.3) 及び (3.4) である。

$$T_e(\lambda, rad) = \frac{hc}{k\lambda} \frac{1}{\ln\left(\frac{2hc^2}{\lambda^5 rad} + 1\right)} \quad (3.3)$$

$$T_b = c_0 + c_1 T_e + c_2 T_e^2 \quad (3.4)$$

$T_e$  : 有効輝度温度 (K)

$\lambda$  : 中心波長 ( $\mu\text{m}$ )

$rad$  : 放射輝度 ( $\text{W}/(\text{m}^2 \text{sr } \mu\text{m})$ )

$h$  : プランク定数 (Js)

$c$  : 光速度 (m/s)

$k$  : ボルツマン定数 (J/K)

$c_0, c_1, c_2$  : 変換関数の補正係数

### 3.1.2 不要画素の除去

太陽の海面反射が大きい領域、欠損値、水、雲は火災の誤検出の原因となるため、これらの画素はあらかじめ除いておく必要がある。太陽光反射は太陽天頂角から、水域はMCD12Q1を用いて除去した。また、Band 7, Band 14, Band 15の輝度温度、日中のみBand 3の反射率を用いた閾値テストにより雲を除去した。

### 3.1.3 周辺画素領域の作成

このアルゴリズムでは中心の画素と周囲の画素を比較して火災であるか判定するため、周囲にある画素の平均値や標準偏差といった統計値が必要となる。ここでは周囲の統計値を求めるための周辺画素領域の作成を行っている。まず、対象の画素を中心として上下左右に5画素ずつ拡大した範囲を領域とした。作成した領域のうち20%以上が有効画素（陸地または火災）であれば周辺画素領域のサイズを決定する。もし20%に満たなければさらに5画素ずつ拡大した範囲で20%以上が有効画素であれば周辺画素領域のサイズを決定する。これを一度でも20%になる、または拡大を20回行うまで続ける（図3.2）。20回の拡

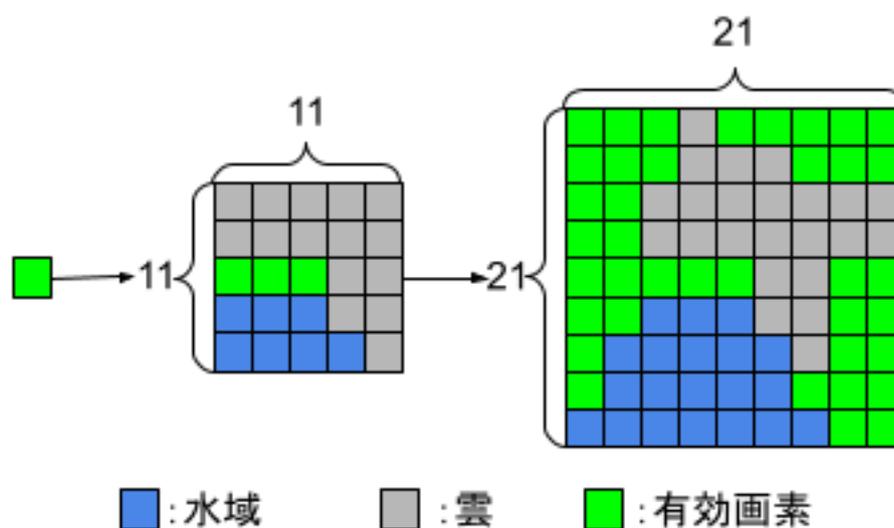


図 3.2: 周辺画素領域の拡張例

大後、有効画素が十分でなかった場合は、アルゴリズム失敗として、その画素の火災判定は行わない。周辺画素領域の作成に成功した場合は、表 3.1 に示された輝度温度や反射率の平均値や標準偏差などの統計量を求める。ここまでの周辺画素領域の作成と統計値の算出を全ての有効画素に対して行い、求められた統計値を用いて今後の火災判定を行った。

差分ヒストグラムアプローチは、作成された周辺画素領域の中で Band 7 と Band 14 の差のヒストグラムを作成し、最頻値とその  $\pm 1K$  ずつの Band 7 と Band 14 の差を持つ画

表 3.1: 周辺画素領域から求める統計値

|   |
|---|
| 周辺画素領域の拡大回数                               |
| Band 3 の可視輝度値の平均                          |
| Band 7 の輝度温度の平均                           |
| Band 7 の輝度温度の標準偏差                         |
| Band 14 の輝度温度の平均                          |
| Band 7 と Band 14 の輝度温度差の標準偏差              |
| Band 7 と Band 14 の放射輝度差の標準偏差              |
| 差分ヒストグラムアプローチから求められた<br>Band 7 の輝度温度の平均   |
| 差分ヒストグラムアプローチから求められた<br>Band 7 の輝度温度の標準偏差 |
| 差分ヒストグラムアプローチから求められた<br>Band 14 の輝度温度の平均  |

素から平均値や標準偏差を求めた。

### 3.1.4 非火災画素の決定

周辺画素領域の作成と統計値の算出によって中心画素と周囲の比較を行うことが可能となった。続けて火災画素の決定を行う前に、非火災と判定できる画素の除去を行う必要がある。ここでは残されている有効画素に対して、求められた周辺の統計値と元の輝度温度を閾値と比較して非火災画素として判定し除去した。また、雲が火災として誤検出された画素を除去するために、対象画素のアルベドと輝度温度をそれぞれ周辺画素の統計量と比較し、雲画素や太陽光画素を決定して除去した。以下はそれぞれ実際のテスト条件の一部である。

- Band 7 と Band 14 の放射輝度の差が周辺の標準偏差未満かつ Band 7 の輝度温度が  
280K 未満  
⇒ 非火災

- (Band 7 と Band 14 の放射輝度の差が周辺の標準偏差未満かつ Band 7 の輝度温度が 280K 未満) または Band 7-14 の輝度温度が 0 未満または Band 7 の輝度温度と周辺のヒストグラムアプローチの輝度温度の差が 0 未満  
⇒ 非火災
- Band 7 と Band 14 の輝度温度の差が周辺の標準偏差未満かつ Band 7 と Band 14 の放射輝度の差が周辺の標準偏差未満または (Band 7 と Band 14 の放射輝度と左右二つ先の放射輝度の差が周辺の標準偏差以上かつ Band 7 の輝度温度が閾値以上)  
⇒ 非火災

### 3.1.5 Dozier 法による誤検出の除去

Dozier[12] は、二つの異なる波長で観測された放射輝度を用いた非線形連立方程式を解くことで、火災の面積と温度を推定できることを示した。Dozier 法を用いることで、1 画素内 (約 1 km<sup>2</sup>) の火災の規模を計算することができる。計算された火災の規模をもとに火災の判別と誤検出の除去を行った。以下はそれぞれ実際のテスト条件の一部である。以下はそれぞれ実際のテスト条件の一部である。

- Band 14 の輝度温度が 285K 未満または Band 7 の輝度温度が 300K 未満  
⇒ 次のテストへ
- Band 14 の輝度温度とヒストグラムアプローチから求められた周辺の平均輝度温度の差が 0.25 未満
- \* Band 3 の反射率が 0.15 より大きいかつ Band 7 の輝度温度と周辺のヒストグラムアプローチから求められた Band 14 の輝度温度の差が 10 より大きい  
⇒ 雲と判定して次のテストへ

\* 他

⇒ 次のテストへ

- 太陽に照らされているかつ背景との反射率の差が0.07以上かつ推定された火災温度が400未満

⇒ 次のテストへ

- 太陽に照らされているかつ背景との反射率の差が0.07以上かつ推定された火災温度が400K以上

⇒ 雲の端または霧の判定のテストへ

- (太陽に照らされていないまたは背景との反射率の差が0.07未満)かつ推定された火災温度が400未満

⇒ 次のテストへ

### 3.1.6 火災画素の決定

ここまでの処理を通して残された火災の可能性のある画素に対して、最後の火災判定の閾値テストを行った。このテストでは、残された画素に対して、各バンドの輝度温度や放射輝度と周辺統計値や閾値と比較することで火災画素を決定した。以下はそれぞれ実際のテスト条件の一部である。

- Band 7と周辺のヒストグラムアプローチから求められた平均輝度温度の差が2未満かつ [Band 7-14の放射輝度と周辺の放射輝度の差が標準偏差未満または (Band 7とBand 14の放射輝度と左右二つ先の放射輝度の差が周辺の標準偏差以上かつ Band 7の輝度温度が閾値以上)]

⇒ 火災画素として決定

- Band 7の輝度温度が310より大きいかつBand 7と周辺のヒストグラムアプローチから求められた平均輝度温度の差が10未満かつ [Band 7-14の放射輝度と周辺の放射輝度の差が標準偏差未満または (Band 7とBand 14の放射輝度と左右二つ先の放射輝度の差が周辺の標準偏差以上かつBand 7の輝度温度が閾値以上)]

⇒ 火災画素として決定

- Band 7の輝度温度が310未満かつ周辺のヒストグラムアプローチから求められたBand 7の平均輝度温度が300未満かつ周辺領域の拡張回数が10回以上かつ [Band 7-14の放射輝度と周辺の放射輝度の差が標準偏差未満または (Band 7とBand 14の放射輝度と左右二つ先の放射輝度の差が周辺の標準偏差以上かつBand 7の輝度温度が閾値以上)]

⇒ 火災画素として決定

加えて、雲の端や霧のテストもここで行われている。それぞれテストの条件は以下の通りである。

- (Band 3の反射率が0.25または反射率と周辺の平均反射率の差が0.1以上) かつBand 7の輝度温度が312.5未満

⇒ 雲の端や霧として判定

- ヒストグラムアプローチから求められたBand 7の平均輝度温度とヒストグラムアプローチから求められたBand 14の平均輝度温度の差が8.5より大きいかつBand 7の輝度温度と周辺のヒストグラムアプローチから求められたBand 7の平均輝度温度の差が4以下

⇒ 雲の端や霧として判定

### 3.1.7 ここまでの検出について

ここまでの火災検出の結果，日中の火災の検出はできていたが，夜間における火災の検出をすることができなかった．図 3.3 は Band 7 と Band 14 の差と火災として判定された画素である．この原因として，輝度温度を用いて雲や火災を判別するテストの閾値が一定の値となっていることが考えられる（図 3.4）．

Band 7 では太陽放射の影響を大きく受けてしまうため，日中は輝度温度が高くなり，

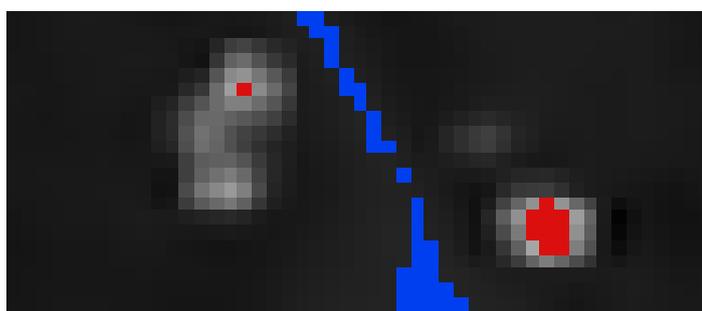


図 3.3: 夜間における火災検出

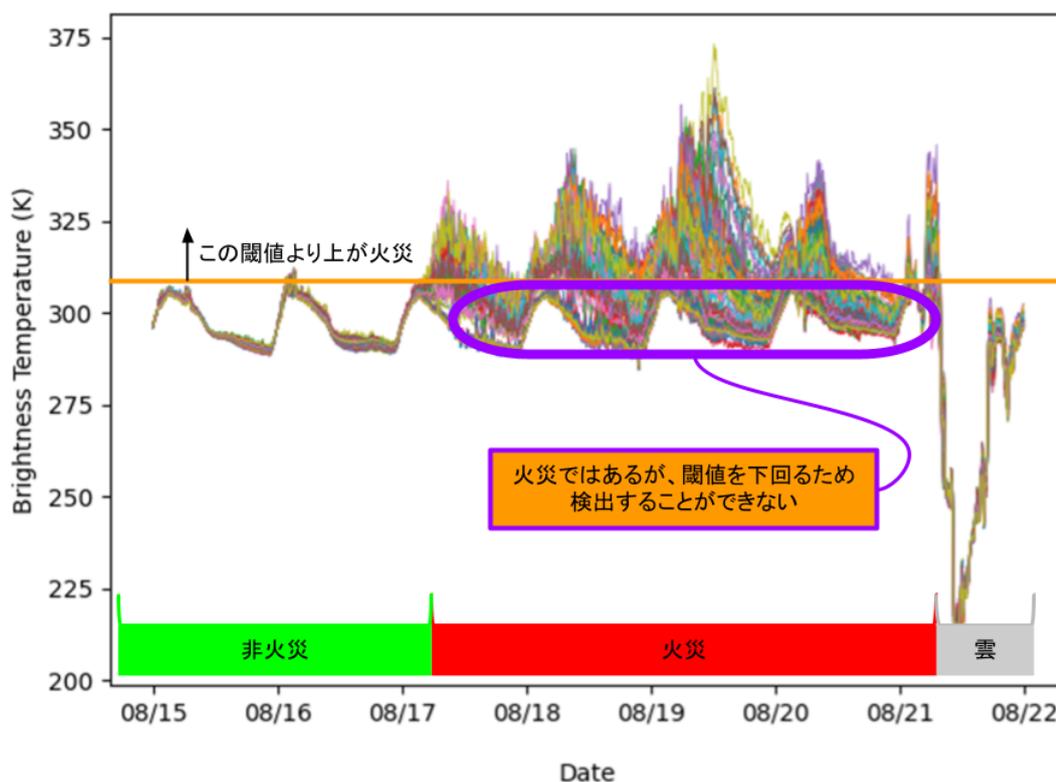


図 3.4: ある火災画素とその周囲の Band 7 の輝度温度の推移

夜間に低下する傾向が見られる。閾値が一定の値となっている場合，日中は火災と検出することができるが，夜間の火災を検出することができない。そのため，時間に応じて値が変化する閾値を作成する必要がある。

### 3.2 時間変移閾値の作成

本研究では雲と火災の新しい閾値として、時間とともに推移する閾値を作成した。この閾値はひと月ごとに作成を行った。図 3.5 は時間変移閾値作成とその閾値をアルゴリズムに適用するフローチャートである。

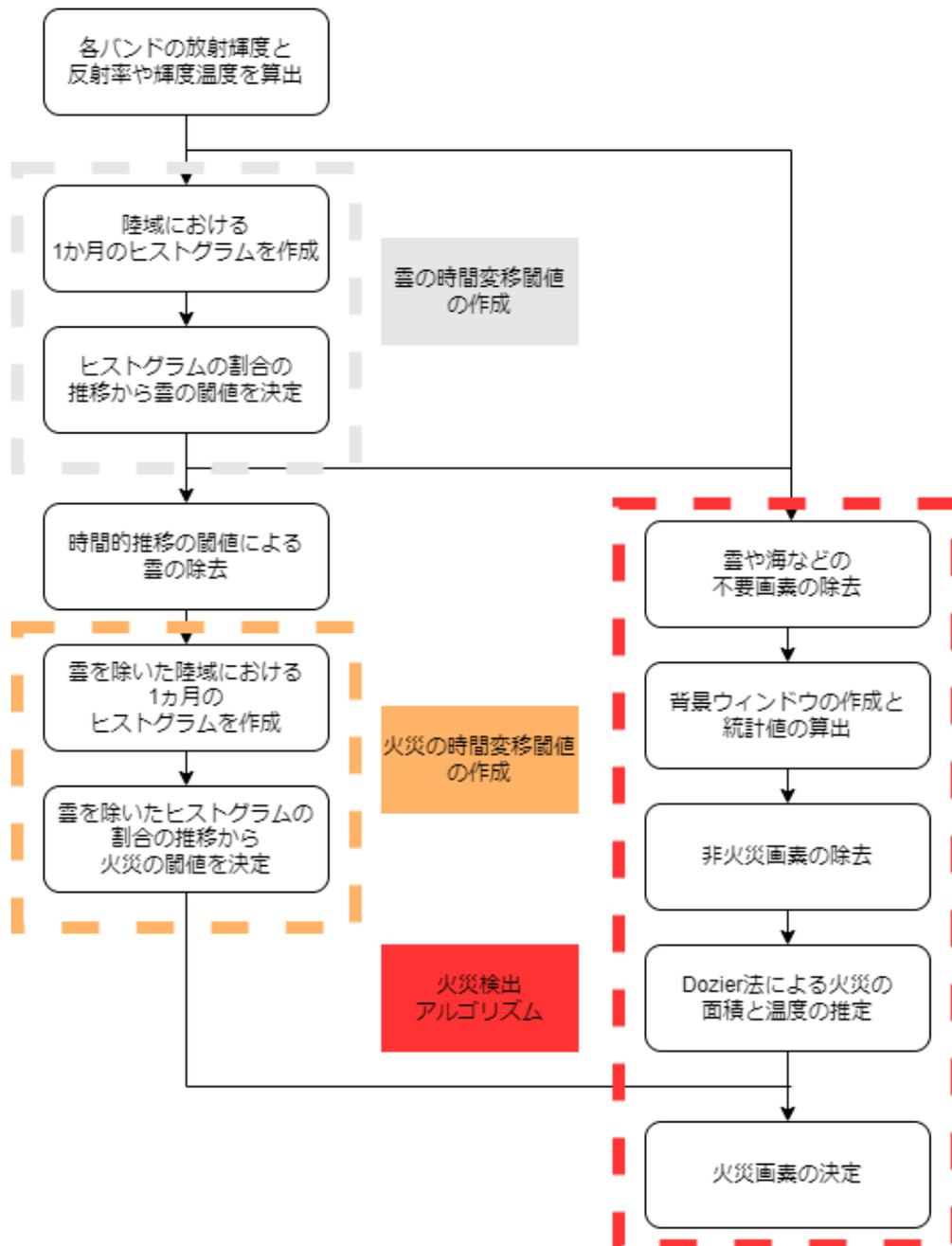


図 3.5: 時間変移閾値の作成フローチャート

### 3.2.1 雲の時間変移閾値の作成

火災の閾値を作るためには地表面の値が必要となる。そのため、雲を除くための時間変移閾値を先に作成する必要がある。まずは雲の閾値の作成を行った(図 3.6)。最初に、異なる日の同じ時間帯のデータから水域を除いた全ての画素のヒストグラムを作成した。このヒストグラムを 10%ごとの間隔で値を記録し、10 分ごとの割合の推移を記録した。続いて、1日の割合の推移の中から、昼の時間に元の閾値に最も近い割合を見つけ、それを雲の閾値とした。図 3.6 であれば 30%の割合を閾値とした。

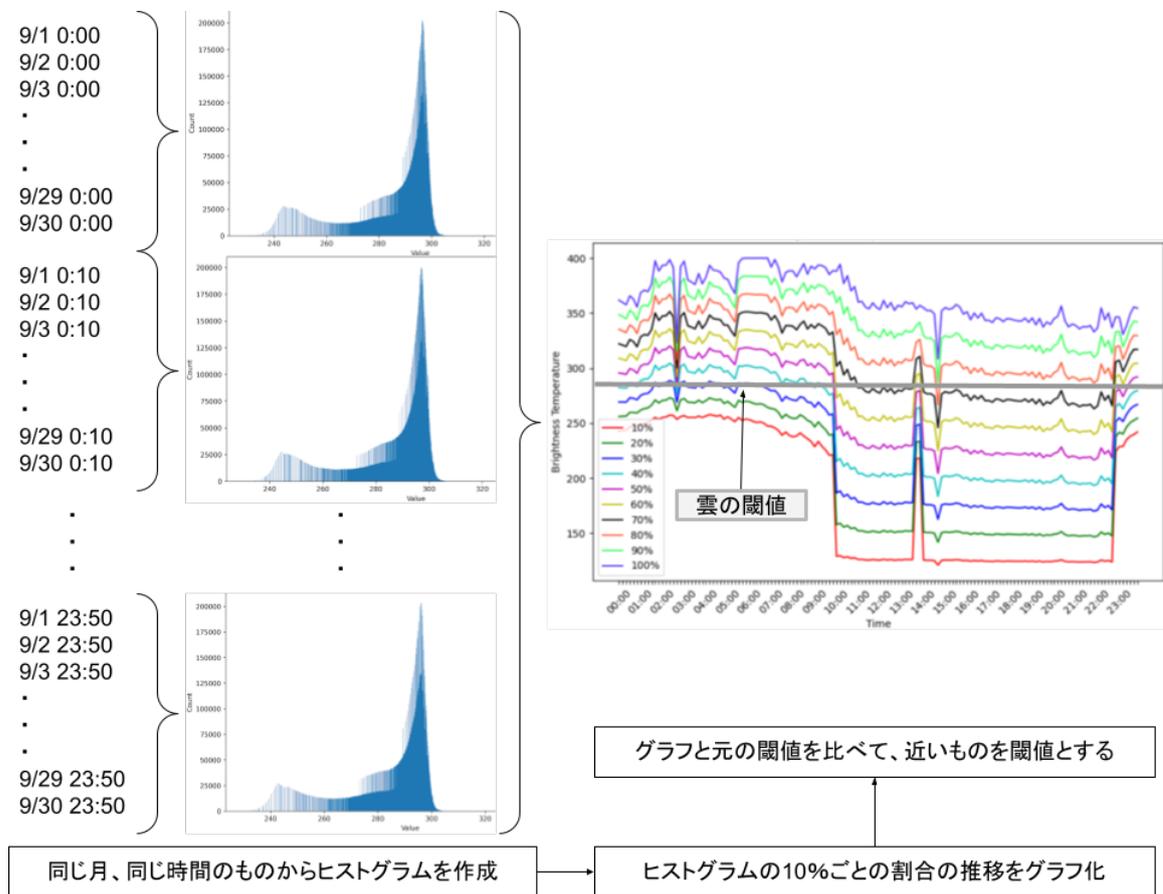


図 3.6: 雲の時間変移閾値の作成

これを Band 7 と Band 7 と Band 14 の差の 2 つに対して雲の時間的な推移の閾値を作成した。この後に続く火災の閾値を作成する為、作成された雲の時間変移閾値を利用して、雲の画素を除去した。

### 3.2.2 火災の時間変移閾値の作成

次に火災の時間変移閾値を作成した(図 3.7)。雲を除いた陸域において先程と同様に同じ月における異なる日付で同じ時間帯のデータからヒストグラムを作成した。先程と異なる点として火災の画素数は少ないため、作成されたヒストグラムのうち上位1%の値を0.1%刻みで記録を行った。作成された割合の推移をグラフにし、グラフの形が大きく変わる割合の下を火災の閾値となる割合とした。図 3.7 であれば、99.9%のグラフが他と形が異なるため、その一つ下の 99.8%を火災の時間変移閾値とした。

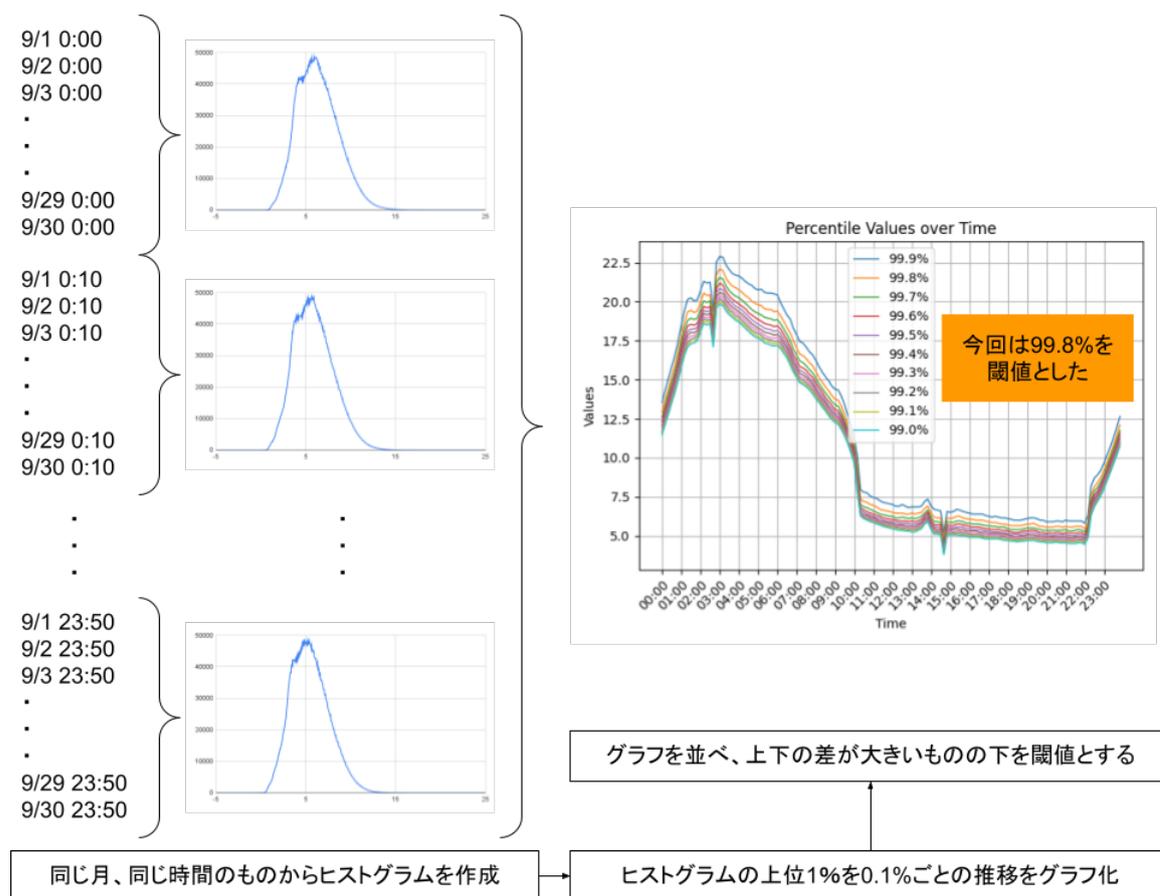


図 3.7: 火災の時間変移閾値の作成

これを火災検出で使用している Band 7, Band 14, Band 7 と Band 14 の差の三つに対して行い、各バンドにおける火災の時間的推移の閾値を作成した。

### 3.3 時間変移閾値の導入

作成された時間変移閾値をそれぞれ対応する閾値テストに導入する。この際、元の閾値とは多少の前後が見られるため、調整が必要となる。現地時間で正午の時の閾値と元の固定閾値が同じになるように時間変移閾値に少し調整をした。

## 4 結果と考察

### 4.1 火災検出結果の例

図 4.1 は時間変移閾値導入前のアルゴリズムによって得られた 2018 年 9 月 28 日 UTC 1:00（現地時間で午前 8 時）の検出結果である。出力で得られた結果の画像は表 4.1 のように色によって分類されている。図 4.2 は図 4.1 の南部で発生した火災の部分を拡大した

表 4.1: 検出結果の色の分類

| 色 | 分類         |
|---|------------|
| 赤 | 火災         |
| 緑 | 陸地         |
| 白 | 雲          |
| 青 | 水域や太陽の鏡面反射 |
| 黒 | エラー        |

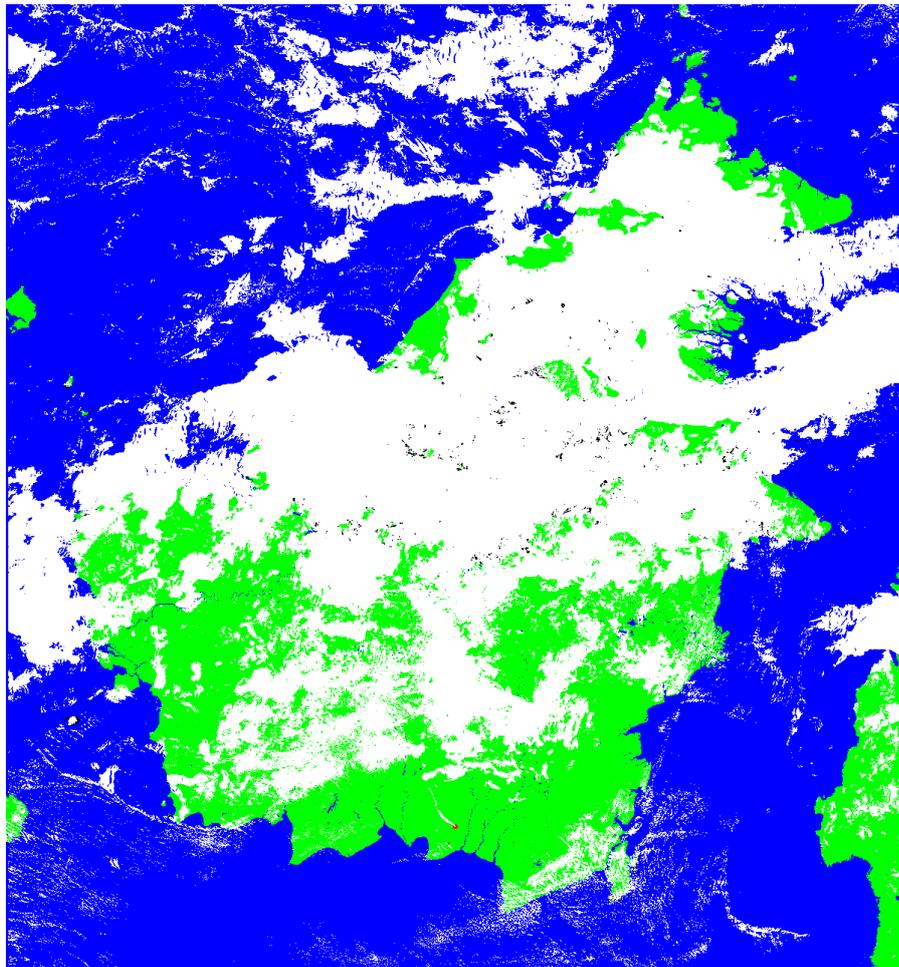


図 4.1: 火災検出結果（2018 年 9 月 28 日 UTC 1:00）

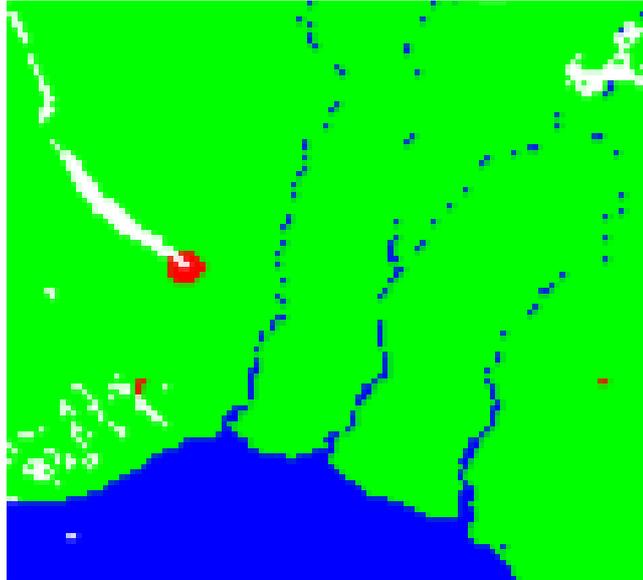


図 4.2: 火災検出結果の拡大 (2018 年 9 月 28 日 UTC 1:00)

ものである。現場から煙が広がっていることを確認することができる。

## 4.2 検出結果の比較

本研究で得られた AHI による検出結果の比較を行った。極軌道衛星 Terra/MODIS や Aqua/MODIS による火災検出 MOD14A1 と MYD14A1 を比較の対象に、Sentinel-2 の高解像度衛星画像を延焼地域の確認に使用した。図 4.3 と図 4.4 はそれぞれ同じ地理における同一時刻に検出された結果と画像である。

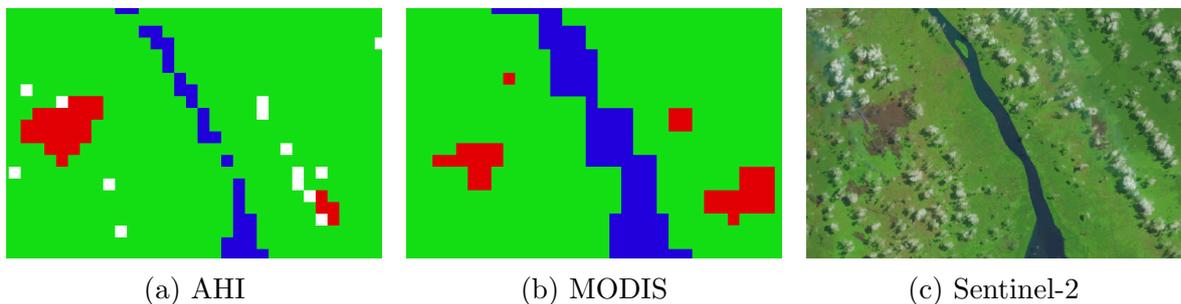


図 4.3: 検出結果の比較 (2018 年 8 月 18 日 UTC 2:30)

図 4.3 では、AHI と MODIS 共に同じような位置を検出することができた。Sentinel-2 の画像を確認すると左に大きく焼けた跡が見える。MODIS に比べて AHI の方が精度が良いと言える。雲や煙についても部分的ではあるが検出された。

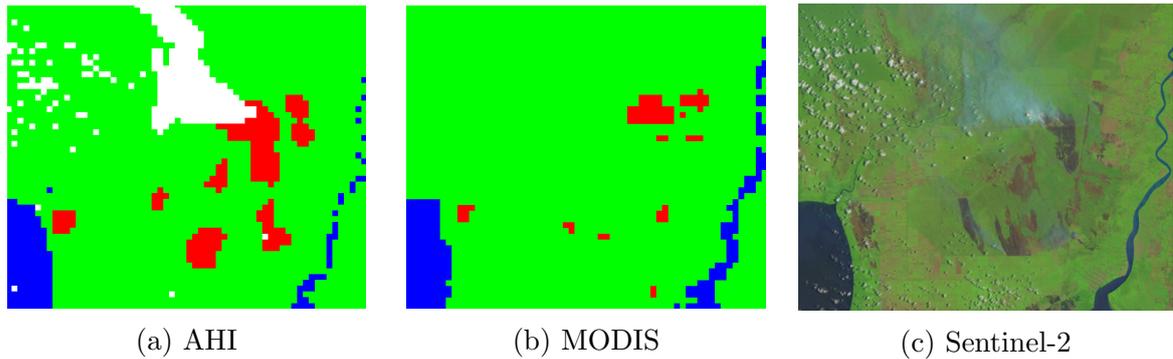


図 4.4: 検出結果の比較 (2018 年 9 月 28 日 UTC 2:30)

また図4.4の Sentinel-2の画像では、広い範囲で焼けた跡が見られた。この時でも MODIS と比べて AHI の方が多くの火災を検出することができていた。このことから、本研究で開発した火災検出アルゴリズムは Terra/MODIS や Aqua/MODIS に比べて時間分解能だけでなく検出精度の面でも優れていると言える。

### 4.3 時間変移閾値導入の比較

表 4.2 は 2018 年 9 月 22 日に検出された火災の固定閾値と時間変移閾値の検出の比較である。UTC との時差はおよ 8 時間であるため、23 : 00 から 10:00 までは日が昇っており、10 : 00 から 23:00 までは夜間である。

表 4.2: 時間変移閾値導入前後の比較 2018 年 9 月 22 日

|          |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 固定閾値     |       |       |       |       |       |       |
| 時間変移閾値   |       |       |       |       |       |       |
| 時刻 (UTC) | 0:00  | 1:00  | 2:00  | 3:00  | 4:00  | 5:00  |
| 固定閾値     |       |       |       |       |       |       |
| 時間変移閾値   |       |       |       |       |       |       |
| 時刻 (UTC) | 6:00  | 7:00  | 8:00  | 9:00  | 10:00 | 11:00 |
| 固定閾値     |       |       |       |       |       |       |
| 時間変移閾値   |       |       |       |       |       |       |
| 時刻 (UTC) | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
| 固定閾値     |       |       |       |       |       |       |
| 時間変移閾値   |       |       |       |       |       |       |
| 時刻 (UTC) | 18:00 | 19:00 | 20:00 | 21:00 | 22:00 | 23:00 |

表 4.2 では固定閾値時間変移閾値ともに左上のあたりで検出されている。6:00 の画像は太陽の鏡面反射の影響を広い範囲で受けているため、青になっている。10:00 から夜間になるが、固定閾値では検出がほとんどできていないが、時間変移閾値を導入したことにより同じような位置で火災を検出することができていた。この結果から、時間変移閾値を導入することで固定閾値よりも夜間における火災検出の精度を向上させることができた。

#### 4.4 画素単位での推移

ここでは画素単位での分類がどのように変化しているか調べた。図 4.5 は 2018 年 9 月 20 日から 9 月 29 日の 10 日間のある画素がどのように分類されているか表したグラフである。縦軸の値は表 4.3 を参照している。9 月 25 日から火災が発生し、9 月 29 日あたりで鎮火されたことが分かる。固定閾値では夜間に陸地として判定されているが、時間変移閾値を導入した場合は陸地に分類されていることはほとんどなく、火災を継続的に観測することができていた。このことから時間変移閾値を導入することは継続的な火災の検出をすることにも有用である。

表 4.3: 値の分類

| 値 | 分類 |
|---|----|
| 0 | 火災 |
| 1 | 陸地 |
| 2 | 雲  |

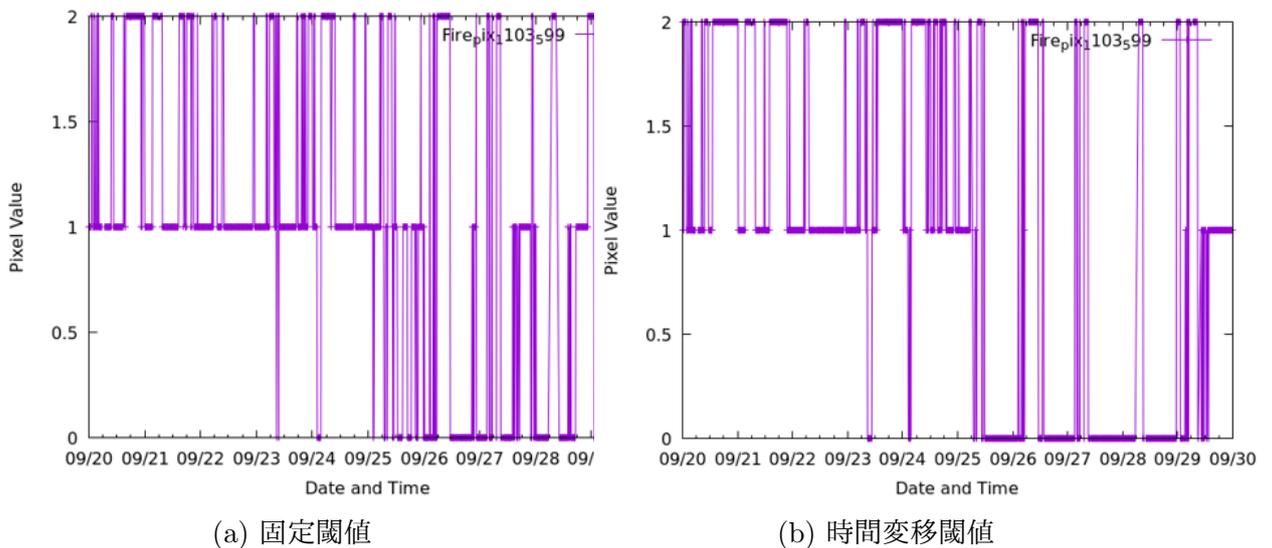


図 4.5: 画素単位での分類の推移 (2018 年 9 月 20 日から 9 月 29 日)

## 5 総括

本研究では Himawari/AHI のデータを利用した火災検出アルゴリズムを開発した。本研究で作成した火災検出結果は Terra/MODIS や Aqua/MODIS と比較して、観測頻度だけでなく火災の検出精度も優れていた。また、このアルゴリズムに時間変移閾値を導入することで、特に夜間において検出精度を向上させることができた。

今後の展望として、時間変移閾値のより詳細な設定やフーリエ変換等によるノイズの除去、時間分解能の高さを活かした前後のデータを比較して誤検出を減らすことが考えられる。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 JP20K20487 および JP22H05004 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] WWF ジャパン, 緊急報告: インドネシアで泥炭・森林火災が多発  
<https://www.wwf.or.jp/activities/activity/4103.html>  
(2024/1/24 閲覧)
- [2] 藤村貞夫, 花泉弘, 熱赤外リモートセンシングによる温度推定, 計測と制御, Vol.21, No.11, 1982  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicejl1962/21/11/21\\_11\\_1020/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicejl1962/21/11/21_11_1020/_pdf)  
(2024/1/24 閲覧)
- [3] 竹内渉, 宇宙からの森林火災の監視, 計測と制御, 第 47 巻, 12 号, 2008  
[https://wtlab.iis.u-tokyo.ac.jp/wataru/publication/pdf/rs\\_fire.pdf](https://wtlab.iis.u-tokyo.ac.jp/wataru/publication/pdf/rs_fire.pdf)  
(2024/1/24 閲覧)
- [4] E. Nakazono, W. Takeuchi and M. Moriyama, Duration time detection of Forest Fire by Advanced HIMAWARI-8 Imager (AHI) for Indonesian peat fires in 2015., 「写真測量とリモートセンシング」VOL.61, NO.2, p.22, 2022  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsprs/61/2/61\\_66/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsprs/61/2/61_66/_pdf/-char/ja)  
(2024/1/24 閲覧)
- [5] C. Schmidt, J. Hoffman, E. Prins, S. Lindstrom, GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Fire / Hot Spot characterization, 2012  
<https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/docs/ATBD/Fire.pdf>  
(2024/1/24 閲覧)

- [6] 気象衛星センター, 「気象衛星画像の解析の利用」 3.7  $\mu$  m 帯画像の解析と利用編, p23-p24, 2005 年  
[https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/prod/pdf/book/book\\_sn\\_37.pdf](https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/prod/pdf/book/book_sn_37.pdf)  
(2024/1/24 閲覧)
- [7] Google, Google Map カリマンタン島  
<https://www.google.co.jp/>  
(2024/1/25 閲覧)
- [8] NASA, MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m SIN Grid  
<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v061/>  
(2024/1/25 閲覧)
- [9] NASA, MODIS Thermal Anomalies/Fire  
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod14.php>  
(2024/1/25 閲覧)
- [10] NICT サイエンスクラウド, ひまわり衛星プロジェクト  
<https://sc-web.nict.go.jp/himawari/himawari-archive.html>  
(2024/1/24 閲覧)
- [11] 気象庁, ひまわり 8・9号 ひまわり標準データ 利用の手引き  
[https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/info/pdf/HS\\_D\\_users\\_guide\\_jp\\_v13.pdf](https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/info/pdf/HS_D_users_guide_jp_v13.pdf)  
(2024/1/24 閲覧)

[12] J. Dozier, A method for satellite identification of surface temperature fields in sub-pixel resolution. *Remote Sensing of Environment*, 11, p221-p229, 1981

[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(81\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(81)90021-3)

(2024/1/25 閲覧)