高分解能光学衛星データを利用した中分解能火災プロダクトにおける Fire Radiative Power の検証データ作成手法の提案

Proposing of a Method to Obtain Validation Data for the Moderate-Resolution-Sensor-Derived Fire Radiative Power Products from the High Spatial Resolution Satellite Data

三浦 高史*・森山 雅雄*

Takashi MIURA and Masao MORIYAMA

Abstract : We propose a method for obtaining validation data for the moderate-resolution-sensor-derived Fire Radiative Power (FRP) products from the high spatial resolution satellite data. This method uses two shortwave infrared channels (1.6 [μm] and 2.2 [μm]) to retrieve FRP validation data. Although fire-contaminated high spatial resolution pixels are mostly saturated because of intense fire radiation, our method exploits the saturated fire pixels for FRP validation data retrieval and as the result, an estimation width is obtained as FRP validation data. In this study, FRP validation data was constructed using the ASTER high resolution data and was evaluated by comparing the simultaneous observed MODIS FRP products. The correlation coefficients between our method derived FRP validation data and the MODIS FRP were approximately between 0.7 and 0.9. The corresponding rates between our method derived FRP validation data and the MODIS FRP were approximately between 0.7 and 0.8.

1. 序 論

2017年12月に打ち上げられた JAXA の地球環境変動衛星「しきさい」(GCOM-C)は2019年初頭より常運用に入り、現在 GCOM-C/SGLI (Second-generation Global Imager) による観測データが日々取得され、プロダクトが産出・配布されている。

我々は今までに、SGLI 向けの林野火災からの放射エネルギー (Fire Radiative Power: FRP) 推定アルゴリズムを開発した(三浦ら, 2018)。FRP とは、衛星観測データから推定される林野火災からの放射エネルギーのことであり、林野火災に付随して起こる様々な現象の解明に有用な物理量とされる。例えば、FRP は火災による植生の焼失量、および火災からの煙の放出率と比例関係にあることが報告されている (Roberts et. al., 2005; Jordan et. al., 2008)。また、強度が高く FRP が高い火災では、放出された煙が高高度に達し、境界層を超えて自由対流圏まで輸送されることが

あり、FRP は放出される煙の到達高度と関連があるという報告もある (Val Martin et. al., 2010)。

今後、開発したアルゴリズムによる SGLI FRP プロダクトの推定精度の検証とアルゴリズムの改良を進めていくためには、FRP の検証データが必要となる。一般的に、検証データは対象とする衛星の通過と同期した地上観測により得られるが、林野火災の場合、地上観測によって検証データを取得することは現実的ではない。

そこで本研究では、同期観測された高分解能光学衛星データを利用することにより、FRP の検証データを作成する方法を提案する。画素分解能が数十[m]である高分解能衛星データは火災を明瞭に捉えることができ、SGLI のような中程度分解能(数百[m]~1[km])画素の領域内に広がる火災の様子を詳細に把握できるため、FRP 検証データの作成に適している。また、高分解能衛星データでは火災を観測している画素が飽和しやすく、画素の飽和は一般的に解析の弊害となると見なされているが、本研究で提案する方法では、高分解能火災画素の飽和を利用することにより、FRP 検証値の推定幅、すなわち不確かさを明示した FRP 検証値を提供できる点に特徴がある。

*長崎大学大学院工学研究科
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 58, NO. 5, 2019

本論文の構成を以下に示す。まず2章では、本研究においてFRP検証データの作成に使用した高分解能衛星データについて述べる。続いて3章では、高分解能衛星データを用いたFRP検証データの作成手法について詳述する。続く4章では、提案する手法により得られたFRP検証値をMODIS火災プロダクトと比較することにより、提案手法により得られるFRP検証値の妥当性を検証した結果を述べる。最後に5章において、本研究のまとめと今後について記述する。

2. 使用した衛星データ

本研究では、高分解能衛星データとしてASTER (the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer) が取得した林野火災シーンをを用いて、FRP検証データ作成法を構築した。表1に、今回使用したASTER林野火災シーンの概要を示す。シーンa, b-1, b-2およびcはそれぞれCanberra bushfire, Old fire, Cedar fireおよびWillow fireとして知られている林野火災であり、いずれも灌木・森林地帯において夏の乾燥期に発生した大規模火災である。

提案手法における解析には、短波長赤外領域の2チャンネル (band4 (1.6 [μm]) および band6 (2.2 [μm])) により観測されたデータを使用する。ASTERの短波長赤外放射計 (SWIR) は、冷却器の経年劣化に伴い2008年以降運用を停止しており、今後の使用が見込めないが、今回ASTERデータを用いた理由を以下に示す：(1) MODIS (the MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) と同じ衛星プラットフォーム Terra に搭載されており、MODIS とほぼ同期観測を行っているため、信頼性が高いとされる

MODIS火災プロダクトとの比較によるFRP検証データの妥当性の検証が行える；(2) 今後のSGLI FRPの検証に使用することを見込んでいる Landsat8/OLI (Operational Land Imager) および Sentinel-2/MSI (Multi Spectral Imager) といった高分解能センサは、短波長赤外帯域に ASTER と同一の観測チャンネル (1.6 [μm] 帯と2.2 [μm] 帯) を有しているため、今回ASTERで構築したFRP検証データ作成手法は、今後 Landsat8/OLI および Sentinel-2/MSI データにも適用可能であると考えられる。

3. FRP 検証データ作成手法

本研究において提案するFRP検証データの作成手法では、検証対象である中分解能火災画素 (1 [km] 分解能) の領域内に、そのサブピクセル単位で広がる高分解能データの火災画素 (ASTERを用いる今回は30 [m] 分解能) を解析することにより、その中分解能火災画素に対するFRPの検証値を得る。FRP検証データの作成の流れの概要を図1に示す。まず、検証対象の中分解能火災画素の領域内から高分解能データの火災画素 (以下、高分解能火災画素と定義する) を抽出する。続いて、抽出した個々の高分解能火災画素に対して、これらのFRP (以下、高分解能FRPと定義する) を推定する。最後に、推定された個々の高分解能FRPを中分解能火災画素の領域内において積算し、この積算結果を中分解能火災画素に対するFRP検証値とする。以下、3.1節において高分解能火災画素の抽出方法について、3.2節において高分解能FRPの推定方法について、そして3.3節において高分解能FRPを積算することにより中分解能FRPの検証値とする方法について、それぞれ詳述する。

表1 使用したASTER林野火災シーンの概要

ASTER scene	観測日時	位置
a	2003/01/23 00:07 UTC	(-35.699391, 149.103195) Ganberra
b-1	2003/10/26 18:35 UTC	(34.211980, -117.235811) San Bernardino
b-2	2003/10/26 18:35 UTC	(33.149892, -117.525825) San Diego
c	2004/07/03 18:20 UTC	(34.051163, -111.509428) Phoenix

図1 FRP 検証データ作成の流れ

3.1 高分解能火災画素の抽出

ASTER データから高分解能火災画素を抽出するために、ASTER 向け火災検知アルゴリズム (Giglio et. al., 2008) を適用した。このアルゴリズムは、ASTER 高分解能データから MODIS 火災プロダクトの検証データを作成するために開発され、MODIS 火災プロダクトの検証に利用されている (Schroeder et. al., 2008)。図2に、ASTER 近赤外チャンネル (band8) により観測された火災画像、および ASTER 向け火災検知アルゴリズムを適用し抽出された高分解能火災画素の一例を示す。

図2 高分解能林野火災データ：(a) ASTER band8 (2.3 [μm]) が観測した林野火災画像；(b) ASTER 火災検知アルゴリズムによる高分解能火災画素の抽出結果

3.2 高分解能 FRP の推定

高分解能 FRP は、ステファン・ボルツマンの法則に基づき推定する。本手法における高分解能 FRP の推定式を以下に示す。

$$\phi_{FRP}(P_f, T_f) = \sigma A_p P_f T_f^4 \times 10^{-6} \quad (1)$$

FRP の単位は [MW] である。ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4]$)、 A_p は高分解能火災画素の面積 [m^2]、 P_f および T_f はそれぞれ高分解能火災画素中に占める火災の面積比率および火災温度 [K] である。この推定式の中で、 σ および A_p は既知であり、 P_f および T_f は未知である。したがって、高分解能 FRP の推定のためには、まず高分解能火災画素内の火災面積比率 P_f と火災温度 T_f を推定し、その後、式(1)によって高分解能 FRP を推定するといった一連の解析の流れとなる。この解析過程のフローチャートを図3に示す。 P_f および T_f は、短波長赤外領域の2チャンネル (1.6 [μm] および 2.2 [μm]) により得られる高分解能火災画素の観測輝度値から、bi-spectral method (Dozier, 1981) に基づく連立方程式を解くことにより求める。この際、高分解能火災画素の観測輝度値が飽和しているか・飽和していないかの状況に応じて、(P_f , T_f) の推定から高分解能 FRP の推定までの一連の解析の流れを3つのパターンに切り替える。以下、3.2.1節において bi-spectral method の原理について述べ、3.2.2節において画素の飽和状況に応じた3パターンの高分解能 FRP 推定手法についてそれぞれ具体的に述べる。

図3 高分解能 FRP の推定過程における解析の流れ

3.2.1 Bi-spectral method の原理

短波長赤外領域の1.6 [μm] および2.2 [μm] チャンネルにおける高分解能火災画素の観測輝度値 $L_{1.6}$ および $L_{2.2}$ は, bi-spectral method に基づくとそれぞれ, P_f および T_f を未知数とした以下の式(2)(3)により表現され, この連立方程式を (P_f, T_f) について解く。

$$L_{1.6} = P_f B_{1.6}(T_f) + (1 - P_f) L_{b1.6} \quad (2)$$

$$L_{2.2} = P_f B_{2.2}(T_f) + (1 - P_f) L_{b2.2} \quad (3)$$

ここで, $B_{1.6}$ および $B_{2.2}$ はそれぞれ1.6 [μm] および2.2 [μm] チャンネルにおけるプランク関数, $L_{b1.6}$ および $L_{b2.2}$ はそれぞれ, 1.6 [μm] および2.2 [μm] チャンネルによる高分解能火災画素の観測輝度 $L_{1.6}$ および $L_{2.2}$ のうちの, 火災ではない領域からの放射成分 (以下, 背景放射と定義する。単位は $[\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}]$) である。ASTER データを用いた今回は, $L_{1.6}$ および $L_{2.2}$ はそれぞれ band4 および band6 が観測した高分解能火災画素の観測輝度値に対応する。

(P_f, T_f) 推定に1.6 [μm] と2.2 [μm] チャンネルを採用する理由は, 第一に火災からの放射に敏感な観測帯域であり (三浦ら, 2018), 第二に今後の検証において使用を見込んでいる Landsat8/OLI および Sentinel-2/MSI にも搭載されている観測帯域であるから

である。

(P_f, T_f) 推定においては, 大気補正は実施せず, 火災温度 T_f は輝度温度ベースで推定する方針をとる。この理由としては, 第一に火災から放出される煙やガスの構成は複雑であるため, これを正確に見積もることが困難であり, 第二に, 一般的に輝度温度は波長帯により異なるが, 1.6 [μm] と2.2 [μm] チャンネルにおいては火災の輝度温度は一定であると見做せる (三浦ら, 2018) ことから, 連立方程式(2)(3)が解ける形になるためである。

また, (P_f, T_f) 推定において, 本来は未知数である高分解能火災画素の背景放射 $L_{b1.6}$ および $L_{b2.2}$ は, 検証対象とする中分解能火災画素の領域内における, 火災ではない高分解能画素の輝度値の算術平均値をもってそれぞれ事前に推定しておくことにより, 連立方程式(2)(3)は (P_f, T_f) について解くことが可能となる。

3.2.2 画素の飽和状況に応じた高分解能 FRP の推定

1.6 [μm] と2.2 [μm] チャンネルによる高分解能火災画素の観測輝度値 $L_{1.6}$ および $L_{2.2}$ の飽和・未飽和の状況には, 3つのパターンがある。ここでは, まずこれらの状況を数値シミュレーションにより明らかにした後, (P_f, T_f) の推定から高分解能 FRP の推定までの一連の解析の流れを, これらの3パターンの飽和・未飽和状況の別にそれぞれ詳述する。

(P_f, T_f) 空間上において、2チャンネルによる高分解能火災画素の観測輝度値 $L_{1.6}$ および $L_{2.2}$ が飽和する領域、および飽和しない領域をそれぞれ数値シミュレーションにより明らかにした上で、これらの領域の重なり合いを見ることにより、2チャンネルの飽和状況の組み合わせを明らかにする。以下に、数値シミュレーションの条件を示す。1.6 [μm] および2.2 [μm] チャンネルが飽和する最大観測輝度値 $L_{1.6}^{\text{max}}$ および $L_{2.2}^{\text{max}}$ は、それぞれ $L_{1.6}^{\text{max}}=55.0$ および $L_{2.2}^{\text{max}}=15.8$ とする (単位は $[\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}]$)。これらの値は、それぞれ ASTER band4 (1.6 [μm] 帯) および band6 (2.2 [μm] 帯) における normal gain 観測時の最大輝度値である。背景放射 $L_{b1.6}$ および $L_{b2.2}$ は、放射伝達コード 6S により、以下の条件により算出した。

- ・ 大気モデル：US standard
- ・ エアロゾルモデル：Biomass burning model
- ・ 視程：5 [km]
- ・ 背景領域の被覆：Vegetation
- ・ チャンネル応答関数：ASTER band4, band6
- ・ 太陽天頂角：20 [deg.]
- ・ 観測角：直下

以上の条件に基づき、 (P_f, T_f) 空間上における 1.6 [μm] および2.2 [μm] チャンネルの観測輝度値の飽和・未飽和の境界をそれぞれ以下の式(4)および(5)により求め、それらを (P_f, T_f) 空間上に重ね合わせた結果を図4に示す。

$$L_{1.6}^{\text{max}} = P_f B_{1.6}(T_f) + (1 - P_f) L_{b1.6} \quad (4)$$

$$L_{2.2}^{\text{max}} = P_f B_{2.2}(T_f) + (1 - P_f) L_{b2.2} \quad (5)$$

図4 (上) (中) はそれぞれ、 (P_f, T_f) 空間上における 1.6 [μm] および2.2 [μm] チャンネルによる火災画素の観測輝度値の飽和・未飽和の領域を示している。

図4 (下) は、これらを同一 (P_f, T_f) 空間上に重ねたものである。この結果から、2チャンネルによる高分解能火災画素の観測輝度値 $L_{1.6}$ および $L_{2.2}$ の飽和・未飽和の状況には、次の3つがあることを示している。

- I. $L_{1.6}$ 未飽和 and $L_{2.2}$ 未飽和
- II. $L_{1.6}$ 未飽和 and $L_{2.2}$ 飽和
- III. $L_{1.6}$ 飽和 and $L_{2.2}$ 飽和

以下では、 (P_f, T_f) 推定から高分解能 FRP の推定までの一連の解析の流れを、3パターンの画素の飽和状況 I. ~ III. の別にそれぞれ詳述する。

図4 (P_f, T_f) 空間上における1.6 [μm] および2.2 [μm] 観測チャンネルによる高分解能火災画素の観測値の飽和・未飽和領域

I. $L_{1.6}$ 未飽和 and $L_{2.2}$ 未飽和の場合の高分解能 FRP 推定

この状況の場合、bi-spectral method における連立方程式(2)(3)を解いてまず (P_f, T_f) を推定し、その後式(1)により高分解能 FRP を算出するという解析の流れとなる。以下に、具体例を挙げてこの解析の流れを詳述する。

図5 (上) は、状況 I. において、bi-spectral method の連立方程式を解くことにより (P_f, T_f) を推定する

図5 高分解能火災画素内の火災の面積比率・輝度温度 (P_f , T_f) 推定過程の模式図：(上) 飽和状況Ⅰ.の場合；(中) 飽和状況Ⅱ.の場合；(下) 飽和状況Ⅲ.の場合

過程 (図3のⅠ-(i)) を模式的に示したものである。図中の (P_f , T_f) 空間上における実線および点線はそれぞれ、式(2)および(3)を満たす曲線を示しており、連立方程式を同時に満たす解は一点 S_1 に定まる。そこで、この解 S_1 を (P_f , T_f) の推定値として式(1)に代入することにより、状況Ⅰ.の場合の高分解能 FRP の推定値 FRP_{S_1} を得る (図3のⅠ-(ii))。これを定式化すると以下ようになる。

$$FRP_{S_1} = \phi_{FRP}(P_f, T_f); \text{ where } (P_f, T_f) = S_1. \quad (6)$$

Ⅱ. $L_{1.6}$ 未飽和 and $L_{2.2}$ 飽和の場合の高分解能 FRP 推定

この状況の場合、bi-spectral method においてこれを連立不等式とみた上で、まず連立不等式を満たす

(P_f , T_f) の領域を求める。その後、求めた (P_f , T_f) 領域の内でも最小および最大の高分解能 FRP をそれぞれ式(1)により求め、これを高分解能 FRP の推定幅とするといった解析の流れとなる。以下に、具体例を挙げてこの解析の流れを詳述する。

図5 (中) は、状況Ⅱ.において、bi-spectral method を連立不等式と見た上で、これを満たす (P_f , T_f) の領域を推定する過程 (図3のⅡ-(i)) を模式的に示したものである。2.2 [μm] チャンネルの観測輝度値 $L_{2.2}$ は飽和しているため、求める解は (P_f , T_f) 空間上において $2.2[\mu\text{m}]$ チャンネルが飽和する領域、すなわち $L_{2.2}^{\text{max}} \leq P_f B_{2.2}(T_f) + (1-P_f)L_{b2.2}$ に存在する。かつ、1.6 [μm] チャンネルの観測輝度値 $L_{1.6}$ は飽和していないため、求める解は (P_f , T_f) 空間上において式(2)を満たす曲線 (図5 (中) の実線) 上にある。さらに、(P_f , T_f) 空間上における解領域を現実的な範囲に制限するために以下の条件を加える： $0 < P_f \leq 1$; $600 [\text{K}] \leq T_f \leq 1200 [\text{K}]$ 。 T_f に関する条件において設定した値は、一般的な林野火災の温度とされる値である (Kaufman et. al., 1998)。以上を定式化すると、次の連立不等式となる。

$$\begin{cases} L_{1.6} = P_f B_{1.6}(T_f) + (1-P_f)L_{b1.6} \\ L_{2.2}^{\text{max}} \leq P_f B_{2.2}(T_f) + (1-P_f)L_{b2.2} \\ 0 < P_f \leq 1 \\ 600 [\text{K}] \leq T_f \leq 1200 [\text{K}] \end{cases} \quad (7)$$

状況Ⅱ. では、求める解は (P_f , T_f) 空間上において連立不等式(7)を満たす曲線 S_2 上に存在することとなる。この S_2 を状況Ⅱ.における (P_f , T_f) の推定領域として、 S_2 上における最小の FRP ($FRP_{S_2}^{\text{min}}$) および最大の FRP ($FRP_{S_2}^{\text{max}}$) を求め、これを状況Ⅱ.における高分解能 FRP の推定幅 [$FRP_{S_2}^{\text{min}}$, $FRP_{S_2}^{\text{max}}$] として求める (図3のⅡ-(ii))。この過程を定式化すると以下ようになる。

$$FRP_{S_2}^{\text{min}} = \min_{(P_f, T_f) \in S_2} \phi_{FRP}(P_f, T_f) \quad (8)$$

$$FRP_{S_2}^{\text{max}} = \max_{(P_f, T_f) \in S_2} \phi_{FRP}(P_f, T_f) \quad (9)$$

Ⅲ. $L_{1.6}$ 飽和 and $L_{2.2}$ 飽和の場合の高分解能 FRP 推定

この状況の場合もⅡ.の状況の同様に、まず連立不等式を満たす (P_f , T_f) の領域を求めた後、高分解能 FRP の推定幅を求めるという解析の流れとなる。以下に、

具体例を挙げてこの解析の流れを詳述する。

図5(下)は、状況Ⅲ.において、連立不等式を満たす (P_f, T_f) の領域を推定する過程(図3のⅢ-(i))を模式的に表したものである。1.6[μm]チャンネルの観測輝度値 $L_{1.6}$ は飽和しているため、求める解は (P_f, T_f) 空間上において1.6[μm]チャンネルが飽和する領域、すなわち $L_{1.6}^{\max} \leq P_f B_{1.6}(T_f) + (1 - P_f) L_{b1.6}$ に存在する。かつ、2.2[μm]チャンネルの観測輝度値 $L_{2.2}$ も飽和しているため、求める解は (P_f, T_f) 空間上において2.2[μm]チャンネルが飽和する領域、すなわち $L_{2.2}^{\max} \leq P_f B_{2.2}(T_f) + (1 - P_f) L_{b2.2}$ に存在する。さらに、 (P_f, T_f) 空間上における解領域を現実的な範囲に制限するための条件を加えて、以上を定式化すると、次の連立不等式となる。

$$\begin{cases} L_{1.6}^{\max} \leq P_f B_{1.6}(T_f) + (1 - P_f) L_{b1.6} \\ L_{2.2}^{\max} \leq P_f B_{2.2}(T_f) + (1 - P_f) L_{b2.2} \\ 0 < P_f \leq 1 \\ 600 \text{ [K]} \leq T_f \leq 1200 \text{ [K]} \end{cases} \quad (10)$$

状況Ⅲ.では、求める解は (P_f, T_f) 空間上において連立不等式(10)を満たす領域 S_3 上に存在することとなる。この S_3 を状況Ⅲ.における (P_f, T_f) の推定領域として、 S_3 上における最小のFRP($FRP_{S_3}^{\min}$)および最大のFRP($FRP_{S_3}^{\max}$)を求め、これを状況Ⅲ.における高分解能FRPの推定幅 $[FRP_{S_3}^{\min}, FRP_{S_3}^{\max}]$ として求める(図3のⅢ-(ii))。この過程を定式化すると以下のようになる。

$$FRP_{S_3}^{\min} = \min_{(P_f, T_f) \in S_3} \phi_{FRP}(P_f, T_f) \quad (11)$$

$$FRP_{S_3}^{\max} = \max_{(P_f, T_f) \in S_3} \phi_{FRP}(P_f, T_f) \quad (12)$$

3.3 高分解能FRPの積算

中分解能火災画素の領域内における個々の高分解能FRPの推定値(FRP_{S_1})または推定幅($[FRP_{S_2}^{\min}, FRP_{S_2}^{\max}]$ もしくは $[FRP_{S_3}^{\min}, FRP_{S_3}^{\max}]$)を、中分解能火災画素の領域内において積算することにより、中分解能火災画素に対するFRP検証値の推定幅 $[FRP_{valid}^{\min}, FRP_{valid}^{\max}]$ を得る。ここで、対象の中分解能火災画素の領域内にある、状況Ⅰ., 状況Ⅱ.および状況Ⅲ.の高分解能火災画素の画素数をそれぞれ N_1 , N_2 および N_3 と定義する。その上で、高分解能FRPの積算過程を定式化すると、以下のようになる。

$$FRP_{valid}^{\min} = \sum_i^{N_1} (FRP_{S_1})_i + \sum_j^{N_2} (FRP_{S_2}^{\min})_j + \sum_k^{N_3} (FRP_{S_3}^{\min})_k \quad (13)$$

$$FRP_{valid}^{\max} = \sum_i^{N_1} (FRP_{S_1})_i + \sum_j^{N_2} (FRP_{S_2}^{\max})_j + \sum_k^{N_3} (FRP_{S_3}^{\max})_k \quad (14)$$

4. MODIS火災プロダクトとの比較によるFRP検証値の妥当性の検証

提案した手法により得られたFRP検証値を、同期観測されたMODIS火災プロダクトと比較することにより、提案手法の妥当性を検証した。この検証では、MODISにおけるFRP推定値は信頼性が高いという前提のもと、両者の一致度合いを評価することにより、本手法で得られるFRP検証値の妥当性を評価することとした。本章では、4.1節において、比較データとして使用したMODIS火災プロダクトについて、4.2節において、3章で提案したFRP検証値の作成手法に則りASTER高分解能データから得られたFRP検証データとMODIS火災プロダクトとを比較する具体的方法について、4.3節においてASTERデータから得られたFRP検証値をMODIS火災プロダクトのFRPと比較した結果について、それぞれ述べる。

4.1 MODIS火災プロダクト

本研究において使用するASTER火災シーン(表1参照)と同期観測されたMODIS火災プロダクト(Collection 6 MODIS/Terra Thermal Anomalies/Fire 5-Min L2 Swath (MOD14))(Giglio et. al., 2016)が提供するFRP推定値を、提案手法の妥当性検証のための比較データとして用いた。図6および表2に、比較データとして使用したMODIS火災プロダクトの概要を示す。

MODIS火災プロダクトを比較データとして選んだ理由としては、第一にMODIS火災プロダクトは解析精度の信頼性が高いとされているからである。例えばMODIS火災プロダクトにおけるFRP推定データは、他衛星によるFRPプロダクト開発における参照データとして利用されている(Wooster et. al., 2015)。そして第二に、MODISはASTERと同期観測しているため、相互の観測時間ずれの影響が無い理想的な条件下において比較ができるからである。

図6 FRP 検証データの妥当性検証に使用した MODIS・ASTER 同期観測データセットの観測領域

表2 FRP 検証値の妥当性検証に使用した MODIS・ASTER 同期観測データセットの概要

同期観測 Dataset #	MODIS scene	MODIS 観測日時	ASTER scene (表1参照)
1	A	2003/01/26 00:05 UTC	a
2	B	2003/10/26 18:35 UTC	b-1 b-2
3	C	2004/07/03 18:20 UTC	c

MODIS 火災プロダクトが提供する 1 [km] 分解能火災検知画素 (以下, MODIS 火災画素と定義する) には, 各々に検知の信頼度 (Confidence) が付与されている。MODIS 火災検知アルゴリズムにおいて, 検知信頼度は火災観測チャンネル (4 μm 帯) における観測値が大きい, つまり火災からの熱放射がはっきりと観測されている程, 高い値となるように設計されており, 検知の信頼度が高い順にそれぞれ以下の 3 つにクラス分けされている: high confidence (80-100%); nominal confidence (30-80%); low confidence (0-30%)。本研究では, 最も検知信頼度の高い high confidence である MODIS 火災画素の FRP 推定値 (以下, MODIS FRP と定義する) を比較データとした。

4.2 検証方法

比較データである high confidence MODIS 火災画素 (1 [km] 分解能) の領域内にある ASTER 高分解能火災画素 (30 [m] 分解能) を, 提案手法に則り解析することにより FRP 検証値を算出する。そして, これを対象の high confidence MODIS 火災画素の FRP 推定値と比較することにより, 本手法により得られる FRP 検証値が妥当であるかを検証する。以下, 順を追って検証方法を述べる。

まず, 比較対象である MODIS 火災画素の 1 画素の

領域を定義する。このために, 対象の MODIS 火災画素の 4 隅の緯度経度座標を MODIS Geolocation Fields プロダクト (Collection 6 MODIS/Terra Geolocation fields 5-Min L1A Swath (MOD03)) が提供する MODIS 1 [km] 分解能画素の中心緯度・経度座標を用いて算出し, MODIS 火災画素の領域を定義した。具体的には, 対象の MODIS 火災画素における各隅の周囲 4 つの中心座標を平均することにより, 対象の MODIS 火災画素の 4 隅の座標を決定し, これらの 4 隅の座標により定まる方形領域を対象の MODIS 火災画素の領域と定義した (図 7)。以上の方法により定義した MODIS 火災画素領域と, 同期観測された ASTER データから抽出された高分解能火災画素とを重ね合わせたデータの一例を図 8 に示す。

続いて, MODIS 火災画素の領域内にある ASTER 高分解能火災画素を提案手法に則り解析し (高分解能火災画素の抽出→高分解能 FRP の推定→高分解能 FRP の積算), 対象の MODIS 火災画素領域内における FRP 検証値を得る。

最後に, 対象の MODIS 火災画素の FRP と, その MODIS 火災画素領域内において得られた FRP 検証値を比較することにより, 提案する FRP 検証データ構築法が妥当であるかを評価する。

図7 MODIS 火災画素の画素領域の決定方法

図8 同期観測されたMODIS・ASTERデータセットにおけるMODIS火災画素の領域（白いグリッド）とASTER高分解能火災画素（白い画素）

4.3 検証結果と考察

得られた FRP 検証値と MODIS FRP との一致度合いを評価するために、以下に示す 2 つの評価指標を算出した。1 つめとしては、提案手法により得られた FRP 検証値と MODIS FRP との間の相関係数を算出した。具体的には、提案手法による FRP 検証値は推定幅 $[FRP_{valid}^{min}, FRP_{valid}^{max}]$ として得られるため、推定幅における中央値 $(FRP_{valid}^{min} + FRP_{valid}^{max})/2$ と MODIS FRP との間の相関係数を算出することとした。2 つめとしては、全てのデータの内、MODIS FRP が FRP 検証値の推定幅 $[FRP_{valid}^{min}, FRP_{valid}^{max}]$ 内に収まっているものの割合 (Corresponding rate) を算出した。

同期観測された MODIS と ASTER のデータセットに対して、それぞれ相関係数および Corresponding rate を算出し、FRP 検証値 $[FRP_{valid}^{min}, FRP_{valid}^{max}]$ および MODIS FRP (FRP_{MODIS}) を 1 対 1 プロットにした結果を図 9 に示す。これらの結果より、両者は全体的に良い一致を見せていることが確認できるものの、推定幅を持たない FRP 検証値は MODIS FRP と比較して大きく過少に見積もられる傾向が確認された。これについての考察を以下に述べる。

提案手法において FRP 検証値の推定幅が出ない場合とは、対象の MODIS 火災画素の領域内にある ASTER 高分解能火災画素がすべて飽和状況 I. にある場合である。この場合では、bi-spectral method における連立方程式を厳密に解くことにより高分解能 FRP を推定する (図 3 の I-(i)~I-(ii))。Bi-spectral method における連立方程式は火災画素のモデル化が簡易的であるため、連立方程式を構築する際に立てた様々な仮定に起因する誤差に敏感である。このため、これを厳密に解いた場合、適切な解が得られない (三浦ら, 2018)。このことが原因で、全て飽和状況 I. である高分解能火災画素から得られた FRP 検証値は、MODIS FRP から乖離した値が得られてしまう結果となったと考えられる。しかしながら、今回用いた 3 つの同期観測データセットを通して、両者の相関係数はおおよそ 0.7~0.9, Corresponding rate はおおよそ 0.7~0.8 であり、提案手法により得られる FRP 検証値と MODIS FRP は全体的に良い一致を見せた。この結果より、本研究において提案した検証データ構築法により得られる FRP 検証値は妥当であると結論づけた。

図 9 提案手法により得られた FRP 検証値と MODIS FRP との比較結果：(上) Data set #1；(中) Data set #2；(下) Data set #3

5. まとめと今後

本研究では、SGLI FRP プロダクトの検証データを取得することを目的として、高分解能光学衛星データを利用した中分解能 FRP の検証データ作成手法を提案した。解析に短波長赤外領域の観測帯域 (1.6 [μm] および 2.2 [μm] 帯) を用いることにより、現行の主な高分解能衛星データ (Landsat8/OLI および Sentinel-2/MSI) に対して適用可能な手法を構築した。提案手法では、高分解能データの火災画素が飽和しているという状況を一つの情報として利用することにより、推定幅をもった FRP 検証値を提示することができる。

提案手法により得られた FRP 検証値を MODIS FRP と比較した結果、両者は良い一致を見せ、提案手法による FRP 検証値は妥当であることが確認された。

今後は、提案手法を Landsat8/OLI および Sentinel-2/MSI データに適用することにより、SGLI FRP プロダクトの検証作業を進め、SGLI FRP プロダクトの精度評価と SGLI FRP 推定アルゴリズムの改良を実施していく予定である。

謝 辞

本研究は、JAXA 気候変動ミッションの支援をうけて実施された。ここに記して謝意を表する。

(受付日 2019.2.22, 受理日 2019.9.5)

参考文献

- 三浦高史, 森山雅雄, 2018. 短波長赤外チャンネルを利用した SGLI 向け Fire Radiative Power 推定アルゴリズムの開発. 写真測量とリモートセンシング, 57(6), 277-288.
- Dozier, J., 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. Remote Sensing of Environment, 11, 221-229.
- Giglio, L., Csiszar, I., Restás, Á., Morissette, J.T., Schroeder, W., Morton, D., Justice, C.O., 2008. Active fire detection and characterization with the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). Remote Sensing of Environment, 112, 3055-3063.
- Giglio, L., Schroeder, W., Justice, C.O., 2016. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. Remote Sensing of Environment, 178, 31-41.
- Jordan, N.S., Ichoku, C., Hoff, R.M., 2008. Estimating smoke emissions over the US Southern Great Plains using MODIS fire radiative power and aerosol observations. Atmospheric Environment, 42, 2007-2022.
- Kaufman, Y.J., Justice, C., 1998. MODIS FIRE PRODUCTS Algorithm Technical Background Document, Version 2.2. MODIS Science Team (Nov. 10, 1998).
- Roberts, G., Wooster, G.L., Perry, W., Drake, N., 2005. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery. Journal of Geophysical Research, 110, D21111.
- Schroeder, W., Prins, E., Giglio, L., Csiszar, I., Schmidt, C., Morissette, J., Morton, D., 2008. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. Remote Sensing of Environment, 112, 2711-2726.
- Val Marin, M., Logan, J.A., Kahn, R.A., Leung, F.Y., Nelson, D.L., Diner, D.J., 2010. Smoke injection heights from fires in North America: Analysis of 5 years of satellite observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 1491-1510.
- Wooster, M.J., Roberts, G., Freeborn, P.H., Xu, W., Govaerts, Y., Beeby, R., He, J., Lattanzio, A., Fisher, D., Mullen, R., 2015. LSA SAF Meteorological FRP products—Part 1: Algorithms, product contents, and analysis. Atmospheric Chemistry and Physics, 15, 13217-13239.