

森林火災の被害可視化・評価方法と多地点比較分析への応用

濱野 周[†] 佐々木 史織[‡]

[†] 武藏野大学データサイエンス学部 〒135-8181 東京都江東区有明三丁目3番3号

E-mail: [†]s2122067@stu.musashino-u.ac.jp, [‡]ssasaki@musashino-u.ac.jp

あらまし 本稿では、時系列地理情報データを用いて森林火災の被災範囲と重症度を計算・可視化し、被災面積を推定する方法、および、その多地点間比較分析への応用により森林損失の地球環境への影響について評価・分析する方法について述べる。具体的には、GISと人工衛星データを用いて、第一に、森林の正規化燃焼率（NBR）、第二に、森林火災の重症度（dNBR）を計算・可視化し、第三に、それら結果から被災面積を推定し、多地点比較を行う。また、推定被災面積と実際の被災面積を比較することにより、本方式の精度を評価する。近年、深刻な森林火災が世界中で発生している中で、森林火災による影響や都市・地球環境における森林の重要性を的確に評価する方法に対して需要が高まっている。本研究ではオーストラリア、インドネシア、日本で発生した森林火災を対象とした実験により、本方式の実現可能性、および、SDG15実現に対する貢献可能性について示す。

キーワード 森林、植生、火災、SDGs、SDG15、人工衛星、GIS

1. はじめに

森林は土壤保全、水源のかん養など私たちの生活に大切な役割を果たしており、地球温暖化防止のための二酸化炭素の吸収源として期待されているにも関わらず、地球上では2019年の南米アマゾンやオーストラリア、2020年の米カリフォルニアに代表されるような大規模かつ長期的な森林火災が発生し、森林だけでなく生物多様性、生態系バランスにも影響を及ぼしている。

国土の約7割が森林である日本においては近年5年間（平成28年～令和2年）の平均で見ると1年間で約1.3千件の森林火災が発生し、焼損面積は約600ヘクタールもの被害をもたらしている[1]。また、森林は一旦火災で失われると、その重要な機能が回復するまでには何十年もの年月と多大なコストを要することになる。近年5年間においても日本の森林火災による損害額は約3.5億円となっている[1]。

本研究では、時系列地理情報データを用いて森林火災の被災面積と重症度を計算・推定し、多地点間比較分析により森林破壊の地球環境への影響について評価・分析・可視化する方法について述べる。具体的には、GISと人工衛星データを用いて、第一に、森林の正規化燃焼率（NBR）、第二に、森林火災の重症度（dNBR）を計算し、第三に、それら結果から被災面積を推定し、多地点比較を行う。また、推定被災面積と実際の被災面積を比較することにより、本方式の精度を評価する。

近年、深刻な森林火災が世界中で発生している中で、森林消失による環境への影響や都市・地球環境における森林の重要性を的確に評価する方法に対して需

要が高まっている。一方で、費用面・技術面において高精度のセンシング・解析設備の導入障壁が高い最貧国（LDCs）や地方自治体単位においては、低コストかつシンプルな分析・可視化方式が求められている。本研究では、オープンデータとオープンソースGISを利用することにより、低コストかつ比較的精度の高い被災面積の推定を行う方式を示す。本方式は、あらゆる地域・組織において、広域的な災害における迅速な被災状況の確認、直観的・大局的な被災状況の把握等に役立てられることを目指す。

本稿では、オーストラリア、インドネシア、日本において発生した森林火災を対象として検証・比較実験を行い、本方式の実現可能性、および、SDG15実現に対する貢献可能性について示す。

2. 関連研究

本研究は、主に以下の関連研究として、主に以下の先行研究を参考としている。

災害分析に関して、河邑らの研究（2006）[2]では、広域災害特性分析結果を用いた土砂災害対策支援GISを検討している。衛星データと雨量データを用いて土砂災害の分析結果を示し、その分析結果に基づく危険度評価を用いた災害対策支援GISの事例を示している。本研究では、この研究[2]で述べられている分析結果からの災害への危険度評価を参考にし、本研究においての評価方法の実現可能性について示す。

人工衛星マルチスペクトル画像を用いた森林火災の評価指標として、国連宇宙局（UNOOSA）[7]がNBRとdNBRの定義と活用法について述べている。本研究ではここで述べられているNBRおよびdNBRの定義と焼損度の分析を参考にし、本研究においての

dNBR の実験実現・評価法について示す。

村上らの研究 (2022) [3]では、森林火災後の下層植生回復について述べている。森林火災後の回復量を dNBR から求め、dNBR と緑被率から緑地面積の推定、増減率の比較を行い、森林火災後の下層植生の回復についての重要性を述べている。また、加藤 らの研究 (2021) [4]では、i-Tree での樹木測定項目を用いた森林火災の評価について述べている。焼損の重要度解析を行い、モデルを作成し、火災の可能性を評価している。本研究では、これらで述べられている NBR・dNBR の計算方法を参考にし、本研究においての NBR・dNBR の計算方法について示していく。

なお、本研究のコンセプトとアイデアは、「森林-災害-都市レジリエンス」の概念を定義・可視化・評価する方式について検討した先行研究[11]をベースとしている。その先行研究では、GIS と人工衛星データ、社会経済指標データ、自然災害データといった異種の複数パラメータを用いて「森林-災害-都市レジリエンス」を可視化している。本研究は、その一つのパラメータとして、森林そのものの損失 (Loss & Damage) を数値として計算・可視化するものである。

3. 基本方式

本研究では人口衛星データを入力として、オープンソース GIS を用いて森林火災の被災面積と重症度を計算・推定し、多地点間比較分析を行う。

図 1 に本方式の概要を示す。

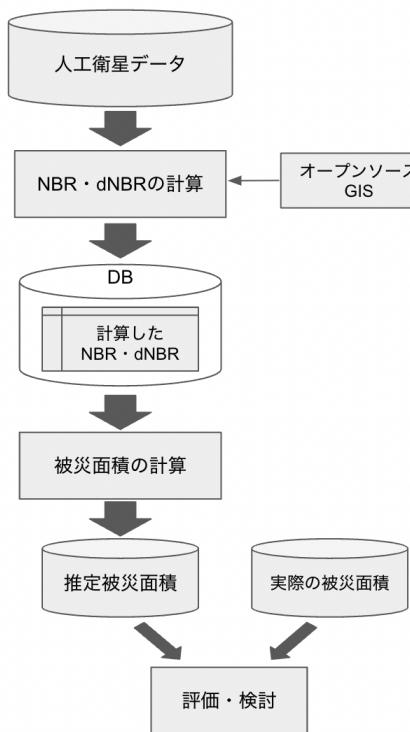


図 1 本方式の概要

本方式は、具体的には GIS を用いて以下のステップにより実現される。

STEP 1 対象地域の人工衛星マルチスペクトル画像を用いて森林の正規化燃焼率 (NBR)・森林火災の重症度 (dNBR) の計算・可視化を行う。

STEP 2 STEP 1 で作成した NBR・dNBR の値が閾値以上のピクセルをカウントし、推定被災面積を計算する。

STEP 3 STEP 2 で計算した推定被災面積と実際の被災面積との比較を行い、精度評価を行う。

以上 3 つの STEP から森林火災の被災範囲の可視化と被災面積の推定、および、その多地点分析への適用を行う。

4. 実現方式

4.1 対象データ

人工衛星マルチスペクトル画像 : Copernicus Open Access Hub[5]または USGS earth explore[12]より取得した多地点の Sentinel-2 の画像 (.tiff データ) を用いる。

以下の三地点における森林火災事象および衛星画像データを対象として、基本方式を具体的に実現する。

- 1) オーストラリア : ゴスバーズマウンテン付近 (2019 年 10 月 26 日～12 月 17 日火災発生)、取得画像 (発生前 : 2019 年 9 月 26 日、発生後 : 2020 年 12 月 15 日)
- 2) インドネシア : 南カリマンタン地方バンジエルマシン (2019 年 9 月 10 日～9 月 17 日火災発生)、取得画像 (発生前 : 2019 年 8 月 14 日、発生後 : 2019 年 9 月 28 日)
- 3) 日本 : 栃木県足利地方 (2021 年 2 月 21 日～3 月 15 日火災発生)、取得画像 (発生前 : 2021 年 2 月 6 日、発生後 : 2021 年 3 月 18 日)

4.2 使用ツール

人工衛星画像検索サイト Copernicus Open Access Hub [5], USGS earth explorer [12]より画像データをダウンロードし、オープンソース GIS である QGIS[6]を用いて分析を行う。

4.3 データ処理プロセス

森林火災の可視化分析は、以下のプロセスにより実現する。

- 1) Copernicus Open Access Hub[5] または USGS earth explore [12]の Sentinel-2 衛星画像から分析対象地域の雲量 10 の Band8a, Band12 を取得する。

- 2) Band8a (近赤外線 NIR) と Band12 (短波赤外線 SWIR) を用いて以下の式により正規化燃焼率 Normalized Burn Ratio (NBR)を計算する。

$$NBR = (NIR-SWIR) / (NIR+SWIR)$$

NBR は-1~0~1 の範囲で正規化された指標であり、高い NBR 値は健康な植生を示し、低い値は裸地と最近焼けた地域を示す。焼けていない領域は、通常、ゼロに近い値で示される。

- 3) NBR を時系列データとして用意し差分を算出する。作成した NBR を用いて以下の式により森林火災の重症度 (dNBR) を計算する。

$$dNBR = PrefireNBR - PostfireNBR$$

dNBR 値もまた-1~0~1 の範囲で正規化された指標であるが、森林火災発生前後の差分を表すため、高い dNBR 値は、変化量、すなわち火災による森林の焼損度を表している。

正規化燃焼率 (NBR) とは NIR および SWIR バンドを使用して日照の違いや大気の影響を軽減しながら、焼け跡を強調する指標である[7]。NIR は植生が強い部分で強く反射し、SWIR は水分量の有無を強調するため、傷ついた樹木や土を含む火災の傷跡を強く反射する [15][16]。これら NIR と SWIR の反射率の差を利用した指標が NBR である。

森林火災の重症度 (dNBR) とは画像から取得した燃焼前と燃焼後の NBR の差を使用してデルタ NBR (dNBR) を計算し、これを使用して火傷の重症度を推定するものである [7]。

5. 実験

本実験では、以下の実験用データと 3 種類の実験を設定し、4. 実現方式によって実現したプロトタイプを用いて、本方式の実現可能性 / 有効性について検証する。

5.1 実験方法

実験 1 : NBR の可視化

4.1 で挙げた 1), 2), 3) 各地点の NBR を 4.3 データ処理プロセスに示した方法により計算・可視化し、森林火災発生前後の比較を行う。

実験 2 : dNBR の可視化

1), 2), 3) 各地点について作成した NBR から dNBR を求め可視化する。

実験 3 : 被災面積の推定と多地点比較

作成した NBR から被災面積を推定し、ニュース記事や政府・自治体が発表している実際の被災面積との比較を行う。

実験 1 と実験 2 については、オーストラリア、インドネシア、日本（栃木県足利市）で実際に起きた森林火災を取り上げ、それぞれの可視化結果とその解釈について述べる。実験 3 については、被災面積が公表されている栃木県足利市の火災を取り上げ、本手法による推定面積と実際の面積の比較により推定の精度について検証する。図 2 に、実験 1, 2, 3 に用いるスケールと可視化色分けを示す。

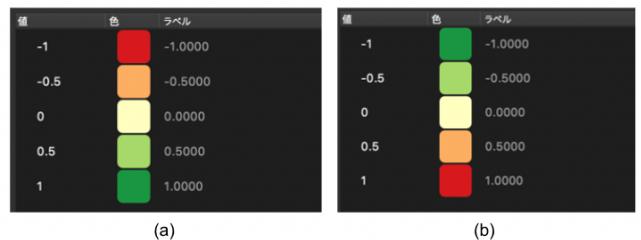


図 2 (a)NBR と(b)dNBR で用いる階級値とその色分け ((a)(b)ともに火災による被災地域を赤色で示すため、反転したカラーランプを使用)

5.2.1 実験 1-1 : NBR の時系列可視化 (オーストラリア)

本実験ではオーストラリア全域で 2019 年 7 月から 2020 年 2 月まで続いた森林火災 ("2019-20 Australian bushfire season"、推定総被災面積 24.3 million ha) [10]の中でも 2019 年 10 月 26 日から始まったゴスパーズマウンテン付近の森林火災 (推定面積 1.72million ha) [14]について、2019 年 9 月 26 日と 2019 年 12 月 15 日の南東部ゴスパーズマウンテン付近 (シドニー近郊) の衛星データを用いて時系列可視化を行った。火災部分の可視化のプロセスは 4.3 データ処理プロセスで示した通りである。

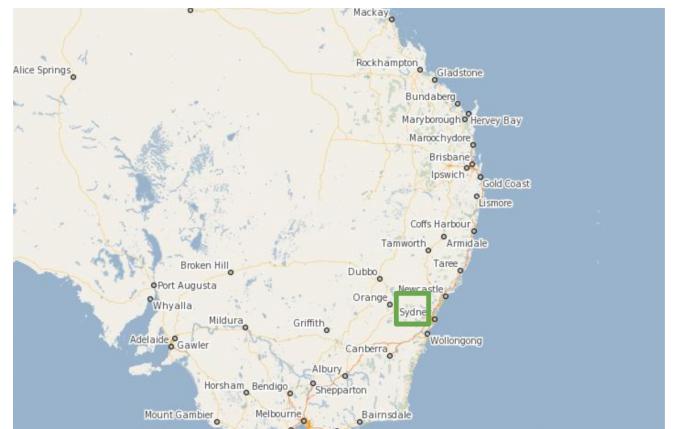


図 3 実験 1-1 オーストラリア南東部 (ゴスパーズマウンテン付近) の対象地域 (図内緑枠内) (出典 :

Copernicus Open Access Hub[5]



図 4.1 オーストラリア南東部（ゴスパーズマウンテン付近）の NBR（左：2019 年 9 月 26 日（火災前）、右：2019 年 12 月 15 日（火災後））

図 4.2 では図 4.1 の NBR 値が高い部分を対象として拡大したものを表示する。

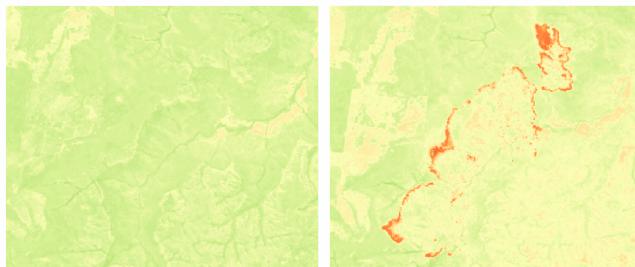


図 4.2 4.1 図の拡大部分の NBR（左：2019 年 9 月 26 日（火災前）、右：2019 年 12 月 15 日（火災後））

図 4.2 に示すように、NBR 値が高く、濃い赤色で示されている箇所を拡大すると、実際に火災が発生した箇所がピンポイントではっきりと確認できる。特に、火災が発生したと考えられる部分を枠取るように NBR 値が濃い赤色で示されていることがわかる。この地域では、全体の中心部分から外側部分に向けて火災が広がっていることが分かっている[14]。NBR は、植生の水分量が少ない部分（枯れて乾燥した樹木や土）が色濃く反応するため、より“新しい”火災があったとされる外側部分で色濃く反応していることがわかる。[15][16]

5.2.2 実験 2-1：dNBR 可視化（オーストラリア）

本実験では実験 1-1 で作成した 2 つの NBR から dNBR を作成する。dNBR の可視化のプロセスは 4.3 データ処理プロセスで示した通りである。

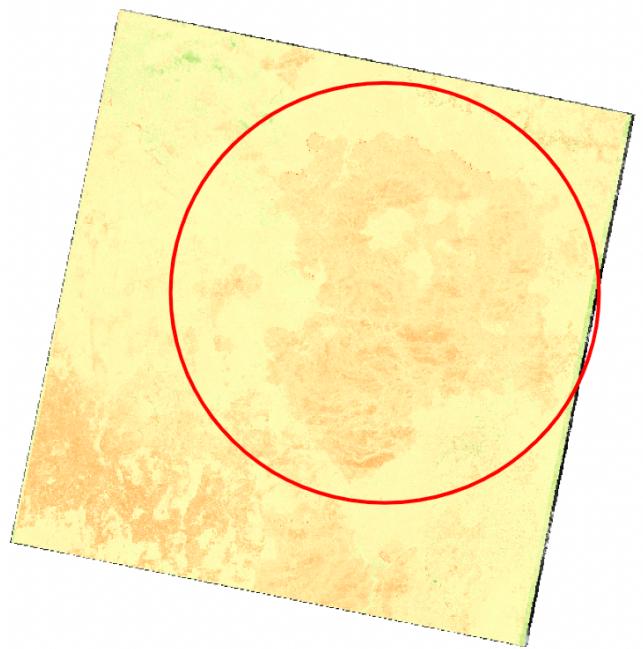


図 5 ゴスパーズマウンテン付近の dNBR（2019 年 12 月 15 日時点、範囲は図 4.1 と同じ）

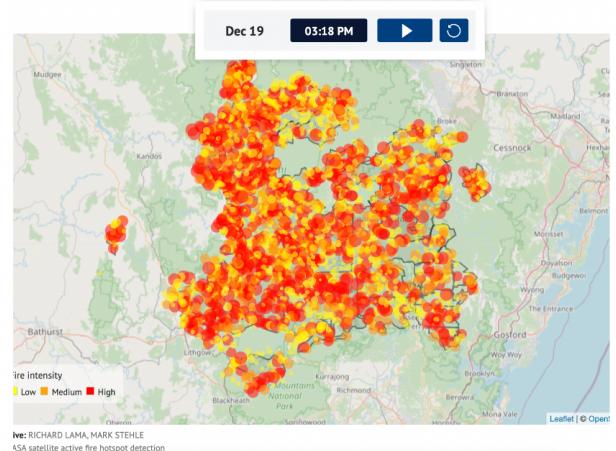


図 6 Sydney Morning Herald が報じた NASA satellite active fire hotspot detection によるゴスパーズマウンテン付近火災の延焼範囲 [14]

図 5 の赤円で囲んだ地域を見ると右大半が橙色に変化していることがわかる。図 6 と比べるとこの地域はゴスパーズマウンテン付近で発生した火災の範囲を示していることがわかる。さらに図 4.1 で示した NBR では視認することができなかった火災の範囲を dNBR で求めることによって可視化できている。また、延焼範囲を枠取るように dNBR 値が特に濃くなっている。これらの結果は、dNBR によって延焼範囲を可視化できることを示している。

5.3.1 実験 1-2：NBR の時系列可視化（インドネシ

ア)

本実験ではインドネシアのカリマンタン島で 2019 年 9 月 10 日から 2019 年 9 月 17 日までに多く発生した森林火災（推定被災面積 857,756ha）[9][13]について、2019 年 8 月 14 日と 2019 年 9 月 28 日のカリマンタン島南部バンジェルマシン付近の衛星データを用いて時系列可視化を行う。火災部分の可視化のプロセスは 4.3 データ処理プロセスで示した通りである。



図 7 実験 1-2 インドネシア・カリマンタン島南部の対象地域（図内緑枠内）（出典：Copernicus Open Access Hub[5]）

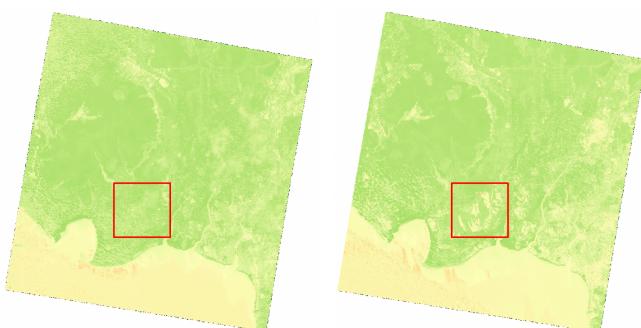


図 8.1 インドネシアカリマンタン島南部バンジェルマシン付近の NBR（左：2019 年 8 月 14 日（火災前）、右：2019 年 9 月 28 日（火災後））

図 8.1 より、火災前に比べて火災後の方が NBR 値の高い部分が増えており植生が失われていることがわかる。特に赤実線枠内で示した部分では植生の大きな被害があったと考えられる。

図 8.2 では図 8.1 の NBR 値が高い部分（赤実線枠内）を対象として拡大したものを表示する。



図 8.2 図 8.1 の拡大部分の NBR（左：2019 年 8 月 14 日（火災前）、右：2019 年 9 月 28 日（火災後））

図 8.2 に示すように、拡大してみると火災前には見られなかった地域で NBR 値が高くなっている部分があることがわかる。このカリマンタン島の森林火災については正確な被災範囲が報告されていない。しかし、火災があったと考えられる部分を枠取るように NBR が濃い赤色になっている部分があることから、本方式によって被災地域を把握できる可能性を示している。

5.3.2 実験 2-2 : dNBR 可視化（インドネシア）

本実験では実験 1-2 で作成した 2 つの NBR から dNBR を作成する。dNBR の可視化のプロセスは 4.3 データ処理プロセスで示した通りである。

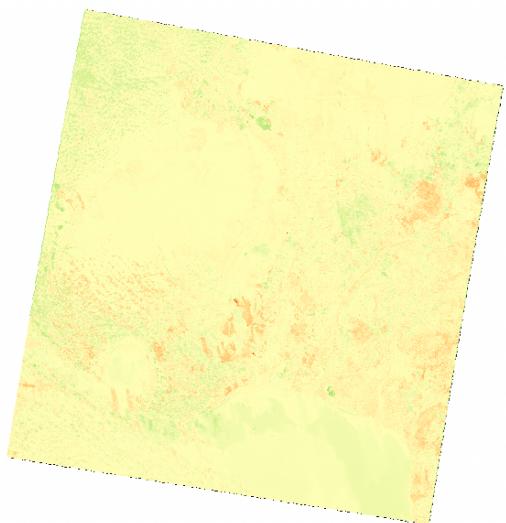


図 9.1 インドネシアカリマンタン島南部バンジェルマシン付近の dNBR（2019 年 9 月 28 日時点、範囲は図 8.1 と同じ）

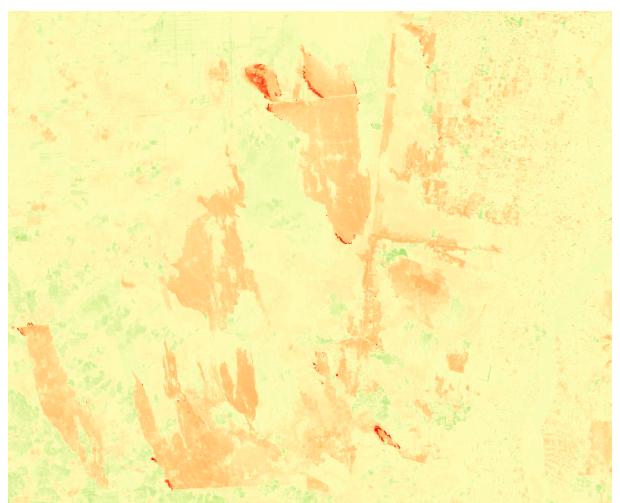


図 9.2 図 9.1 の dNBR が高い部分の拡大図

図 9.2 より、広範に dNBR が広がっていることが分かる。特に赤くなっている部分では火災前と比べて火災後に火災の重症度が高くなった部分だと考えられる。また、図 9.2 を見ると、延焼部分を枠取るようにして NBR 値が高くなっていることがはっきりとわかる。オーストラリアを対象とした実験 1 の結果からも、このカリマンタン火災のような正確な被災範囲が報告されていない事例についても、本方式により被災範囲の大局的な把握が可能であることを示している。

5.4.1 実験 1-3 : NBR の時系列可視化（栃木県）

本実験では栃木県足利市付近で 2021 年 2 月 21 日から 2021 年 3 月 15 日まで続いた森林火災（「令和 3 年足利市西宮林野火災」、推定被災面積 167ha）[8]について、災害発生前 2021 年 2 月 6 日と発生後 2021 年 3 月 18 日の衛星データを用いて時系列可視化を行う。火災部分の可視化のプロセスは 4.3 データ処理プロセスで示した通りである。



図 10 実験 1-3 栃木県足利市付近の対象地域（図内緑枠内）（出典：Copernicus Open Access Hub[5]）

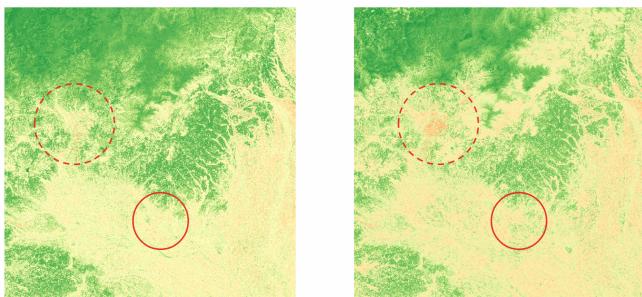


図 11 栃木県足利市付近の NBR（左：2021 年 2 月 6 日（火災前）、右：2021 年 3 月 18 日（火災後））

全体的に見てあまり大きな違いがあるようには見えない時系列の変化で少し赤みがかっている部分（赤点線で囲った箇所）もあるが、その付近は畠の地帯であり、植生の影響で出た変化だと考えられる。実際に栃木県足利市で起きた森林火災（赤実線で囲った箇所）は 167 ha とそこまで大きくないため、人工衛星の画

像データでは判別しづらく、実際に火災が起きた場所を一番クリアに捉えることができなかった。このことは、そもそも近赤外線バンド（NIR）が植生の変化を大きく捉える特徴を持っているため、NIR を用いた NBR を火災分析に用いる際の留意点として認識すべきものであるという発見となった。

5.4.2 実験 2-3 : dNBR 可視化（栃木県）

本実験では実験 1-3 で作成した 2 つの NBR から dNBR を作成する。dNBR の可視化のプロセスは 4.3 データ処理プロセスで示した通りである。

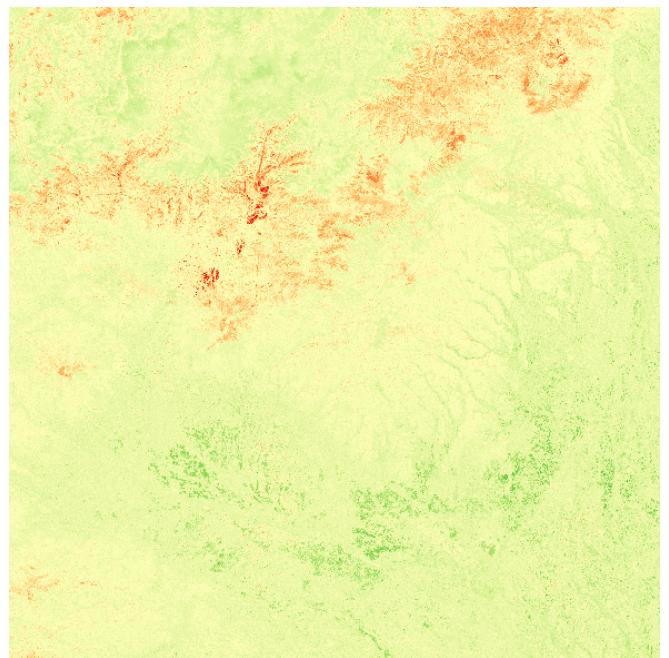


図 12.1 栃木県足利市付近の dNBR（2021 年 3 月 18 日時点）

広く dNBR 値が広がっているが中心部分は特に濃い赤色で示されている。しかしながら色が濃くなっている地域は、足利市が公表している被災地域の情報[8]と衛星画像との重ね合わせによって、実際に火災があった部分ではないことが判明した。dNBR 値が広がっている部分は畠の地帯であり、植生の影響で出た変化だと考えられる。

図 12.2 では、火災が起きた西宮地区にフォーカスして dNBR を可視化する。

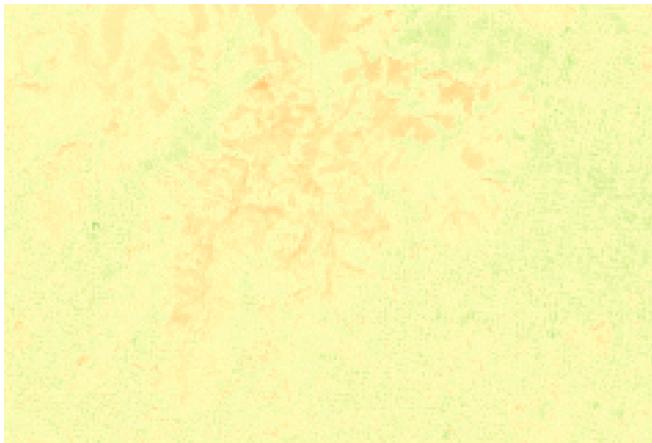


図 12.2 火災が起きた西宮地区にフォーカスした拡大図

火災が起きた部分と火災が起きてない部分を比べてもそこまで大きく違いはない。原因としては実験 1-3 で述べたようにオーストラリア・インドネシアと比べ全体の火災面積が 167 ha と比較的小規模であり、衛星画像の解像度では捉えられなかつた可能性が考えられる。実際にオーストラリアのゴスパーズマウンテン付近で発生した森林火災とは 1.7million(ha) ほどの差があった。このことから、衛星画像から分析できる事象の範囲・制限についての精査や小規模の森林火災にも対応した分析方法を検討する必要があると考えられる。また、植生の影響や実際の火災発生地域以外の NBR が強く出る原因と解決方法についても検討する必要がある。

5.5 実験 3：被災面積の推定と多地点比較

本実験では人工衛星の画像データから作成された dNBR からの被災面積の推定と多地点比較を行う。

実験 1-3, 2-3 で示したように栃木県足利市付近で dNBR が色濃く出ていた部分は植生によって影響を受けている可能性がわかった。そこで、栃木県足利市ホームページの足利市西宮林野火災の記録[8]より、延焼範囲図を参考にしながら手動で範囲を選択し、その領域内の dNBR 値の高いピクセルをカウントした。具体的には、QGIS の「ツールバー < 面積を測る」を用いて実際の被災面積の dNBR が色濃く出ている部分 (>0) を手動でなぞり、面積を測った。

表 1 : dNBR 計算から推定した被災面積と実際の被災面積との比較と精度検証

	dNBR から推定した被災面積	実際の被災面積 [8]	誤差
	171.815 (ha)	167 (ha)	0.0288 (2.88%)

栃木県 足利市西 宮地区	171.81 5 (ha)	167 (ha)	0.0288 (2.88%)
--------------------	------------------	-------------	-------------------

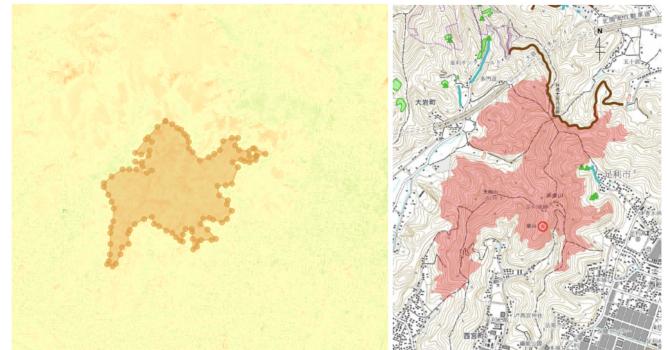


図 13 左: 実験 2-3 で作成した dNBR を元に推定被害面積を象ったもの、右: 栃木県足利市が提供する足利市西宮林野火災の記録-延焼範囲図[8]

図 13 と表 1 より、本方式によって dNBR から推定した被災面積と、公表されている実際の被害面積がかなり近い値を示していることが分かる。実際の被害面積 167ha よりも推定面積が 171.815ha と 2.88% ほど大きい理由は、推定した被害面積は dNBR が色濃くあらわれた部分の大まかな外枠を計算したものであり、実際には火災が起きていない部分も面積に含まれたためと考えられる。

この実験結果により、本方式は、可視化によって森林火災被災地域の直観的・大局的把握を助けることに加え、広範な被災地域の面積を比較的現実に近い形で推定することが可能であることを示している。

課題として、火災の重症度に応じた段階別の色分けと延焼範囲の計算を行い、可視化だけでなく重症度別の被災範囲推定をすることがあげられる。[16]

5.6 実験結果の考察

実験全体として衛星画像データを用いた森林火災の被害可視化を行うことができた。特にインドネシア・オーストラリアの NBR・dNBR は色濃く可視化できた。

実験 1-3 や実験 2-3 で示した栃木県足利市付近の火災において実際には火災が起きていない部分でも NBR 値が多く分布しているところが見られた。原因としては、NBR は人工衛星から画像データを取得して作成しているため、雲の影響や植生が多く影響したと考えられる。特にインドネシアでは雲が多く分布していたため実験に少し支障がでた部分もあった。そのため、衛星画像の正規化や画像の解像度の工夫などの対応をする必要がある。また、今回の実験で用いた

NBR・dNBR のカラーランプでは、はっきりとした実験結果が出せないことが判明したので、カラーランプ変更の検討をする必要がある。

実験 3において現段階では栃木県の小さい地域でしか被災面積の推定をすることができないので規模を拡大して実験を行う必要がある。一方で、比較的小規模の火災については、衛星画像ではなく、ドローン（小型無人航空機）搭載マルチスペクトルカメラによって撮影された航空写真を対象として解析を行うという方法も検討する。

6. 結論と今後の展開

本稿では、時系列地理情報データを用いて森林火災の被災面積と重症度を計算・推定し、多地点間比較分析により森林および地球環境への影響について評価・分析・可視化する方法について述べた。

本稿に示した実験により、オープンデータ衛星画像とオープンソース GIS を利用する低コストかつシンプルな本方式を用いて森林火災の可視化・分析・評価できる可能性を示した。本方式が、最貧国（LDCs）や地方自治体単位において導入され、広域災害における迅速な被災状況の確認等、災害対策において活用されることになれば、SDG15 の実現に貢献できる可能性がある。

今後の課題としては、第一に、実験結果の考察で述べたように人工衛星の画像データの正規化・解像度の工夫、第二に、実験 3 で示したように被災面積の推定を広域にも応用することが挙げられる。これらの実現によって森林の重要さ、森林火災防止に繋げられると考えられる。森林火災の防止は森林を守ることだけではなく、火災によって起きる二次被害、大気汚染にも影響を与える。今後は、実際の被害面積との比較・検証を行い、本方式の精度評価を実現できるシステムを構築していきたい。

参考文献

- [1] 林野庁：ホーム > 分野別情報 > 山火事予防！！
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/yamakaji/index.html>
- [2] 河邑眞・辻野和彦・大辻喜典, 広域災害特性分析結果を用いた土砂災害対策支援 GIS の検討, 自然災害科学 J.JSNDS25-135-50 (2006)
https://www.jsnds.org/ssk/ssk_25_1_035.pdf
- [3] 村上萌・加藤顕・蝦名益仁, 森林火災後の下層植生回復, 日緑工誌, J. Jpn. Soc. Reveget. Tech., 48 (1), 180-183, (2022)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsrt/48/1/48_180/_pdf
- [4] 加藤顕・三浦朋恵・蝦名益仁・早川裕式, i-Tree での樹木測定項目を用いた森林火災の評価, 日緑工誌, J. Jpn. Soc. Reveget. Tech., 47 (1), 93-98, (2021)
- [5] Copernicus Open Access Hub
<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- [6] QGIS
<https://qgis.org/ja/site/>
- [7] United Nations Office for Outer Space Affairs, UN SPIDER Knowledge Portal: Normalized Burn Ratio (NBR)/ Normalized Burn Ratio (NBR)
<https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>
- [8] 栃木県足利市 Ashikaga City Website : 災害記録誌 「足利市西宮林野火災の記録～火災の概況と本市等の対応～」
<https://www.city.ashikaga.tochigi.jp/uploaded/attachment/75259.pdf>
- [9] REUTERS : Area burned in 2019 forest fires in Indonesia exceeds 2018 – official
<https://www.reuters.com/article/us-southeast-asia-haze-idUSKBN1X00VU>
- [10] Australian Disaster Resilience Knowledge Hub : Quick Statistics
<https://knowledge.aidr.org.au/resources/black-summer-bushfires-nsw-2019-20/>
- [11] 濱野周・佐々木史織, 森林-都市-災害レジリエンスの多層的分析・可視化方法とその応用, DEIM2022 B33-1(day3 p11)
<https://proceedings-of-deim.github.io/DEIM2022/papers/B33-1.pdf>
- [12] USGS earth explore.
<https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [13] REUTERS: Indonesia 2019 forest fire destruction far worse than official estimate - study
<https://www.reuters.com/world/asia-pacific/indonesia-lost-far-more-rainforest-2019-fires-than-official-estimate-study-2022-01-14/>
- [14] The Sydney Morning Herald : ‘The monster’ a short history of Australia’s biggest fire forest
<https://www.smh.com.au/national/nsw/the-monster-a-short-history-of-australia-s-biggest-forest-fire-20191218-p5314y.html>
- [15] 近赤外線(NIR)と短波赤外線(SWIR)の特徴と使い分け
<https://leimac.jp/20220422-nir-swir/>
- [16] Earth Lab / Courses / Earth analytics / Multispectral remote sensing modis / Work with the Difference Normalized Burn Index – Using Spectral Remote Sensing to Understand the Impacts of Fire on the Landscape
<https://www.earthdatascience.org/courses/earth-analytics/multispectral-remote-sensing-modis/normalized-burn-index-dNBR/>