

令和5年度林野火災発生危険度予測システム 構築業務報告書

令和6年2月

発注機関: 林 野 庁

実施機関: 株式会社ウェザーニューズ

目次

第1章 本業務の概要本業務実施の背景と目的	2
1.1 本業務実施の背景・目的	2
1.2 本業務の実施内容	2
1.2.1 本業務の全体像	2
1.2.2 本業務の実施体制	3
1.2.3 実施スケジュール	4
1.2.4 本年度の実施内容と主な成果	5
第2章 森林現況反映のための樹冠密度データ定期更新システムの検討・構築	9
2.1 定期更新システムの構成	9
2.2 定期更新システムに係る経費	12
2.3 入力データ	13
2.4 出力データ	14
第3章 土壌水分量の影響(積雪・融雪の影響)把握の検討	15
3.1 積雪の影響について	15
3.2 検証(青森県十和田市の事例)	17
第4章 強風時における林野火災延焼危険度の検討	20
4.1 強風時の林野火災への影響について	20
4.2 検証(栃木県足利市の事例)	25
4.3 強風時における林野火災延焼危険度の設定	29
第5章 人口密度による林野火災指標の検討	31
5.1 人口密度が林野火災に及ぼす影響	31
5.2 人口密度による林野火災指標の作成	41
第6章 運用に向けての課題	44
第7章 まとめ	46
【参考文献】	47

第1章 本業務の概要本業務実施の背景と目的

1.1 本業務実施の背景・目的

林野火災は、一度発生すると、育成に長期を要する森林が瞬時に失われるだけでなく、建物への延焼や人身への被害につながる恐れがあるほか、鎮火後も土砂流出などの二次災害等、森林の多面的機能へ甚大な影響をもたらす。加えて、我が国の森林は急傾斜で林道等の到達アクセスが貧弱であり、消防水利が未整備である場合が殆どである。このため、強風等により空中消火が不可能となった場合には対処が困難となる。

面的な広がりをもつ森林においては、入林者等に対する一般的な注意喚起だけでは限界があり、危険な時期と場所を特定した重点的な警戒活動が可能となるような手法を考案する必要がある。令和4年度林野火災発生危険度予測システム構築業務(以下「令和4年度業務」という。)において、特定地域における日射量や無降雨期間等の気象条件と樹冠密度等の森林の現況から、林野火災発生危険日の予測可能性が確認できた。

令和5年度林野火災発生危険度予測システム業務(以下「本業務」という。)では、この成果を踏まえ、林野火災発生危険度を予測するシステム(以下「林野火災発生危険度予測システム」という。)の構築等を行う。

なお、本業務は林野庁が株式会社ウェザーニューズ(以下「ウェザーニューズ」という。)に委託して実施した。

1.2 本業務の実施内容

1.2.1 本業務の全体像

本業務の最終目標は、林野火災発生危険度予測システムを構築し、林野火災発生危険度を一般に広く普及させることである。本業務は、(国研)森林総合研究所がとりまとめた「林野火災発生危険日予測モデル」を活用して、特定の地域における日射量や無降雨期間等の気象条件と森林の現況から、林野火災発生危険度を予測するシステムを構築する。構築にあたっては、将来的に全国の各地域における林野火災発生予

測ツールとして活用することを念頭におき、予測に用いるデータの検討・選定を行うとともに、予測結果については過去の林野火災の事例等に照らし合わせて検証を実施する。

1.2.2 本業務の実施体制

ウェザーニューズは気象サービスを通じて自然災害による生命・財産の損失を回避することを目的に約37年間事業を行っている。森林は水源涵養機能や二酸化炭素の吸収など多面的な機能をもっており、自然災害の軽減や気候変動の緩和において我が国の重要な自然資源である。本業務では、これまで培ってきた気象サービスのノウハウや世界最大規模の気象データベースを活用して、林野火災の発生予防方法の検討など林野火災の課題に取り組む。当社は、林野火災のリスクを事前に回避することで森林資源の損失を回避し、自然災害の軽減や気候変動の緩和を通じて生命・財産の損失を回避することで社会への貢献を目指す。

本業務は、ウェザーニューズに所属する管理者、技師A、技術員で構成されるプロジェクトメンバーで実施した。

表1.1 プロジェクトメンバー一覧

役割		名前	業務
管理者	主任技師	日置江 桂	管理監督者
担当者	技師A	吉川 真由子	主任技術者 本業務に関わる主たる調査業務
担当者	技術員	杉山 紀元	本業務に関わるロジックの開発等の業務

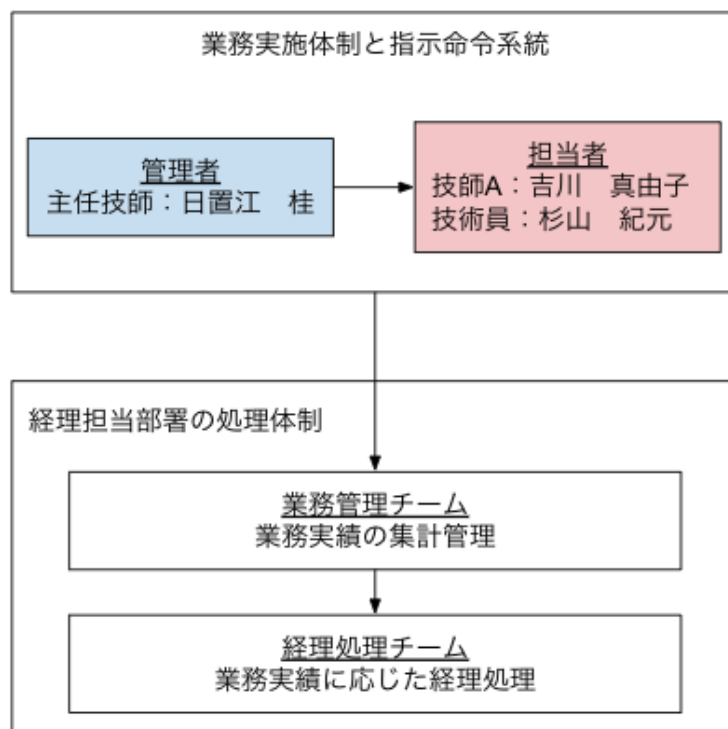


図1.1 業務実施体制と指示命令系統

1.2.3 実施スケジュール

本業務の作業計画概要を表3に示す。

表1.2 作業計画概要

作業計画概要

	8月				9月				10月				11月				12月				1月			
項目	1w	2w	3w	4w	1w	2w	3w	4w	1w	2w	3w	4w	1w	2w	3w	4w	1w	2w	3w	4w	1w	2w	3w	4w
入札申請書提出、改札結果通知																								
委員会(契約締結後と終了時に実施)																								
1.樹冠密度Cloudでの自動更新システムの構築・検証																								
2.積雪時の発生危険度指数の検証																								
3.周辺人口密度によるリスク重みづけロジックの検討、検証																								
4.強風時のリスク重みづけロジック検討、検証																								
5.運用化への検討																								
6.報告書作成																								
7.報告書提出、完了																								

1.2.4 本年度の実施内容と主な成果

①委員会の設置

林野庁と協議の上、選定した外部有識者等2名で構成する委員会を設置し、本業務に対する委員からの助言等を取りまとめ、反映させた。本年度の委員会は本業務着手後と終了前の2回開催し、技術的な評価を受けた。

[林野火災発生危険度予測システム構築業務推進委員会委員]

玉井幸治 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

安成哲平 北海道大学 北極域研究センター

(五十音順)

②本業務に使用するデータの検討と選定

本業務に使用するデータを検討の上、選定を行った。気象データについては、ウェザーニューズの1kmメッシュの解析雨量および解析日射量を利用した。樹種は、環境省が発表している植生図の最新版を用い、樹冠密度には、欧州宇宙機関(EESA:European Space Agency)が保有している光学衛星のSentinel-2¹から推定を行った。土壌水分量の影響把握の検討では、気象庁が作成・配信している5kmメッシュの解析積雪深を、強風時における林野火災延焼危険度の検討については、ウェザーニューズの解析風向・風速を使用した。

¹Sentinel-2:ヨーロッパの地球観測光学衛星で、同一仕様の2機の衛星Sentinel-2AとSentinel-2Bから構成される。土地被覆変化の把握や環境モニタリングをはじめ、自然災害、農業(作物)の生育状況の把握など、リモートセンシングの広い分野で活用されている。

表1.3 選定したデータ一覧

気象データ

データ種別	概要	データ元	空間解像度	時間解像度
解析雨量	地上雨量データと気象庁レーダーによる解析雨量値	ウェザーニューズ	1kmメッシュ	1時間
解析日射量	衛星ひまわりから解析した日射量値(全天日射量)	ウェザーニューズ	1kmメッシュ	1時間
解析風向・風速	ウェザーニューズが所有する予測モデル値と観測値から作成した解析風向・風速値	ウェザーニューズ	1kmメッシュ	1時間
解析積雪深	気象庁が配信している解析積雪深	気象庁	5kmメッシュ	1時間

森林データ

データ種別	概要	データ元	空間解像度
樹種	1/2.5万現存植生図(平成11～整備)から樹種を判別する。 データが不足しているところはSentinel-2のデータを用いて推定する。	1/2.5万現存植生図(平成11～整備):環境省自然環境局 人工衛星Sentinel-2:欧州宇宙機関(ESA:European Space Agency)	10mメッシュ
樹冠密度	Sentinel-2 のL2A B03,04,08 から算出する。 閾値を設定し、それらを用いて分類する	人工衛星Sentinel-2:欧州宇宙機関(ESA:European Space Agency)	10mメッシュ

人口データ

データ種別	概要	データ元	空間解像度
人口密度	2020年現在の空間解像度500mの人口データ	500mメッシュ別将来推計人口データ(H30国政局推計)	500mメッシュ

地形データ

データ種別	概要	データ元	空間解像度
数値標高モデル(DEM)	標高	国土地理院	10mメッシュ

③森林現況反映のための樹冠密度データ定期更新システムの検討

令和4年度業務において、樹冠密度データの開発をGoogle Earth Engine を用いて行い、2019年～2022年までの月平均値のデータを作成した。運用化を想定し、実際の森林状況を反映するために定期的に自動で樹冠密度データを更新するシステムを構築する必要があるため、この樹冠密度データの自動更新システムの構築を行った。

④土壌水分量の影響（積雪・融雪の影響）把握の検討

令和4年度業務で構築した林野火災発生危険度予測システムでは、1時間の日射量と降水量から、林床可燃物含水比を算出している。この時、積雪がある場合には、林床可燃物含水比が低くても林野火災は発生しないと考えられ、実運用に際しては全国の積雪分布のデータが必要になる。このことから、気象庁から配信されている解析積雪深(5km メッシュ)を適応し、積雪を考慮する場合としない場合の林野火災発生危険度予測の検証を行った。

⑤強風時における林野火災延焼危険度の検討

令和4年度業務においては林野火災発生危険度を算出し、検証したが、実際に林野火災が延焼し被害が拡大する主要な要因として風の影響が挙げられる。令和4年度業務で検証をおこなった2021年の栃木県足利市の林野火災事例では、火災が拡大した2月23日に強風注意報が出されていた。足利市に隣接する佐野のアメダスの観測では、2月23日の日平均風速は5.3メートルに達し、2月の平年値2.4メートルを上回り、最大瞬間風速は17.3メートルであった。この強風にあおられて火は燃え広がり延焼が拡大したとみられることから、風による林野火災への影響の評価について実施するべく、Rothermel (1972)^[1]の延焼速度予測式(以下Rothermelモデル)²を用いて延焼拡大速

² Rothermelモデル:リチャード・ローサーメル(Richard Rothermel)によって開発された山火事の延焼速度予測モデル。山火事の延焼速度予測モデルとして最も一般的に使用されている。

度から延焼リスクを考慮した危険度の重み付けを行った。

⑥人口密度が林野火災に及ぼす影響

林野火災発生危険度の予測は、気象データと樹冠密度・樹種から求めて全国一様に算出している。一方で、海外の先行事例では、人口密度や居住区の近い場所や道路沿いなどで、着火そのもののリスクや着火した際の被害リスク等も加味して示すモデル(例:LPJmL4-SPITFIRE³)がある。運用化に際しては、広く一般に伝わりやすくするために、被害の規模がどの程度になるのか、人口密度などによりどの程度差があるか、重みが考慮できるようなロジックの検討が望ましく、運用化の際に考慮するのに必要な項目になり得ることから、本業務においては人口密度によるリスクの算出を行った。

⑦システム実用化に向けた課題の整理

林野火災発生危険度予測システムを実用化する上での課題を抽出し、整理した。また、予測結果の効果的な周知方法や持続的な林野火災発生危険度予測システムの運用の形態等についても、本業務で明らかになった範囲をとりまとめた。

³LPJmL4-SPITFIRE:動的全球植生モデルであるLPJmL(Lund-Potsdam-Jena managed Land)とそれに使用される火災モジュールSPITFIRE(SPRead and InTensity of FIRE)のこと。

第2章 森林現況反映のための樹冠密度データ定期更新システムの検討・構築

2.1 定期更新システムの構成

樹冠密度を定期更新するにあたり、樹冠密度の定期更新システム(以下「定期更新システム」という。)生成サーバーはクラウドサービスを利用する方法を採用した。クラウドサービスのメリットは主に、

- ①導入にあたり初期設備投資が必要ない
- ②サーバーの操作が全てオンラインで完結し、どこからでも利用可能
- ③必要に応じて計算機台数を増やすといったようなスケーラブルな対応を取り易い

などが挙げられる。

クラウドサービスは、Amazon社が提供するAmazon Web Services (AWS)を利用した。AWSは現在提供されている中で代表的なクラウドサービスであり、多くの企業や公共機関などでの利用が進んでいる。

樹冠密度の算出は、前年度と同様Rikimaru, A. (1996)^[2]が用いた方法を採用した。Multi-Spectral Imager (MSI)⁴の各バンドから算出したAVI⁵(Advanced Vegetation Index)、BI⁶(Bare soil Index)、SSI⁷(Scaled Shadow Index)、VD⁸(Vegetation Density)、FCD⁹(Forest Canopy Density)を組み合わせ樹冠密度を算出した。この際、雲や雪が入っているピクセルを除去するため、雪・雲のマスキング処理を行った。本業務では、1ヶ月に1度、これらの手法を用いて樹冠密度の算出、更新するシステムを構築した。定期更新システム構築には、AWSのAmazon Elastic Compute Cloud (以下EC2)という、LinuxやWindowsなどの仮想サーバーを作成できるサービスを利用し、EC2上で稼

⁴ Multi-Spectral Imager, MSI: 多波長イメージャ。可視～赤外域に7つの感度チャンネルをもつ受動型センサで、大気を含めた地球表面から反射・放射される電磁波を計測する。それぞれのチャンネルにおける観測データからは、雲やエアロゾルなどの性質や分布に関する情報が得られる。

⁵ AVI: 植物の状態を示す植生指数の一つで、時間の経過に伴う作物や森林の変化を研究するために使用される。

⁶ BI: 露出土壤指数。植生指数と露出土壤指数の両方を組み合わせることにより、高植生状態から露出した土壤状態までの連続体で森林地の状態を評価できる。

⁷ SSI: 0-100にスケールされた、植生の立体構造によって生じる影の割合を、光の波長特性から推定した影指標。

⁸ VD: 植生の疎密度を表す指標。

⁹ FCD: 樹冠の疎密度を表す指標。

働するサーバー (EC2インスタンス) を選定、更新する時だけ立ち上げるように設定し、コストの最適化を測った。

インスタンスはCPU、メモリ、ネットワーク帯域がサイズにより変わり、当然サイズの大きいほうが高スペックとなるが、料金も高額となるため選択には注意が必要となる。最初は小さいサイズを選択しておき、性能テストなどで必要なサイズを後から決定するほうが最適なサイズを選ぶことができる。

オンプレミス環境では機器選定のため事前にマシンスペックを決定する必要があるが、クラウド環境では作成後のスペック変更が容易である。そのため、構築やテストをしながらインスタンスタイプを決定していき、運用開始後も適宜見直すことが可能である。

下記に本業務で構築したシステムの概要とコストを示す。

林野火災危険度予測指標予測システム

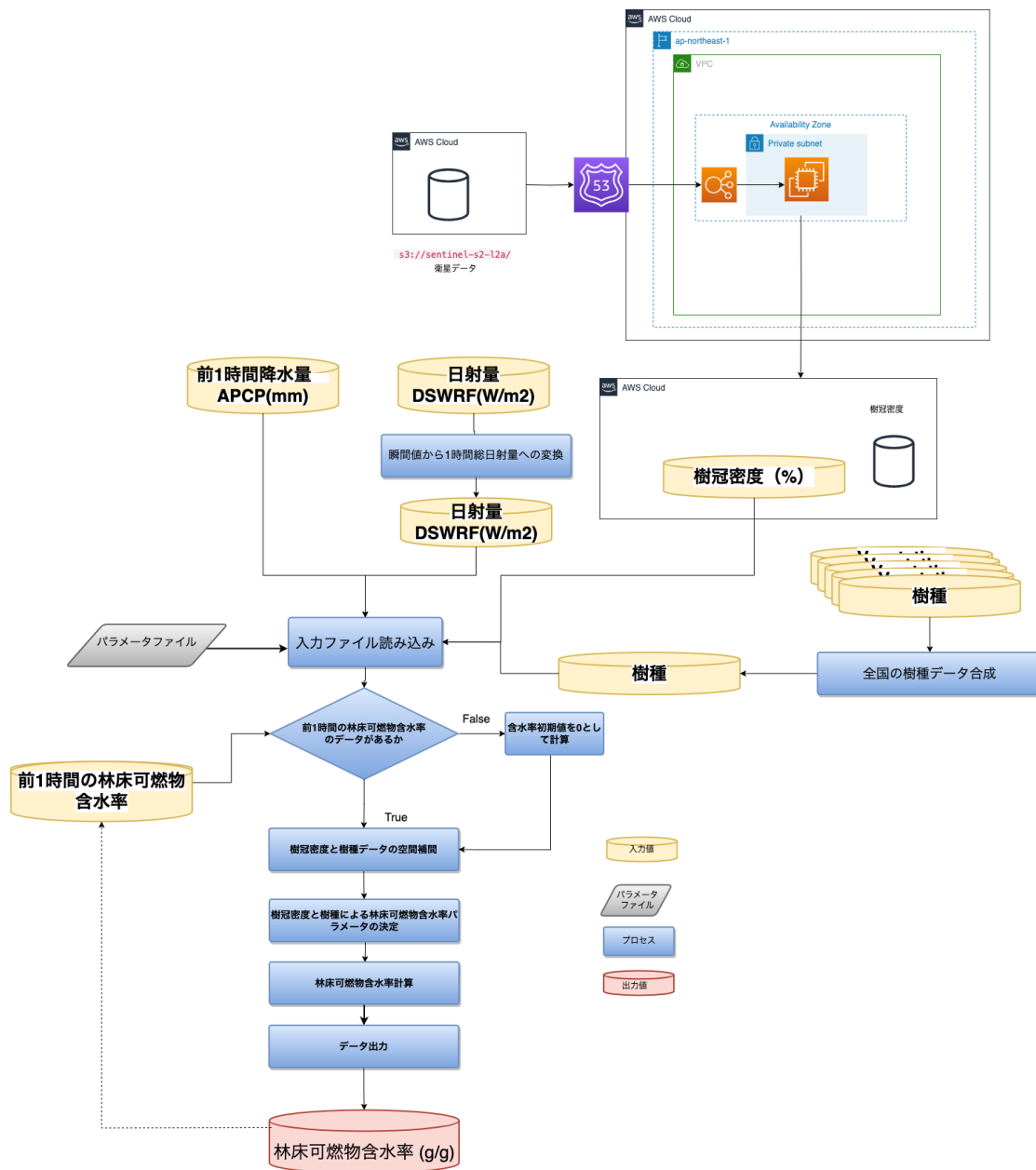


図2.1 システム概要

表2.1 使用したAmazon EC2 m5インスタンスのスペック

インスタンス名	m5.2xlarge
CPU	2 nd Intel Xeon Scalable Processors Intel Xeon Platinum 8000 Series
vCPU	8
CPUコア数	4
メモリ	32 GB
ストレージ	400 GB NVMe SSD
I/O	最大10 Gbps
その他詳細: https://aws.amazon.com/jp/ec2/instance-types/m5/	

2.2 定期更新システムに係る経費

AWSの課金プランにはいくつかの選択肢があるが、本業務では利用した分だけ費用が発生する、従量課金プランを利用した。表 2.2に、利用したクラウドリソースに係るコストの概要を示す。各コストは物理的なリソースの置かれる地域によって異なるが、本業務においてはアジアパシフィックリージョン(東京)のリソースを利用した。

定期更新システムの稼働時間は1ヶ月に1度、1～2時間程度であり、100G程度S3というAmazonが提供するストレージサービスに保存される。この時、月当たりの総コストは $0.384 \times 2 + 0.025 \times 100 = 3.268[\$]$ となり、年間で $3.268 \times 12 = 39.216 [\$]$ となる。

表2.2 AWSサービス従量課金プランの利用単価(アジアパシフィックリージョン(東京)リソース利用)

サービス名	利用内容	利用単位	単価 [\$]
Amazon EC2	計算機利用	時間 × 台数	0.384
Amazon S3	ストレージ容量	GB × 月	0.025
	データリクエスト	1,000リクエスト	0.0 ~ 0.00037 ^{*1}
	データ転送(イン)		0
	データ転送(アウト)	GB	0 ^{*2}

*1 リクエストタイプ(PUT, COPY, LIST, GET, SELECT, 等)により異なる

*2 東京リージョン同士で転送する場合

2.3 入力データ

sentinel-2 のデータについては、AWS のopen dataで、可用性が高いSentinel-2 Cloud Optimized Geotiff(COG)を使用した。本データは、データフォーマットがCOGになったことを除き、sentinel-2のオリジナルデータと同一であり、クラウド環境でより効率的なワークフローを可能にする内部組織を備えた GeoTIFF ファイルであり、HTTP GET 範囲リクエストを発行するクライアントの機能を活用して必要な部分のみの抽出が可能である。また、必要な領域、期間のデータ検索にはEatrh Search と呼ばれるSTAC API を使用した。STAC (SpatioTemporal Asset Catalogs) は2021年5月に v1.0.0 がリリースされた時空間データ提供のためのオープンな規格であり、Earth Setch STAC APIを使用することでCOGの検索を容易に行うことができ、対象範囲・期間を容易に検索・解析することができる。

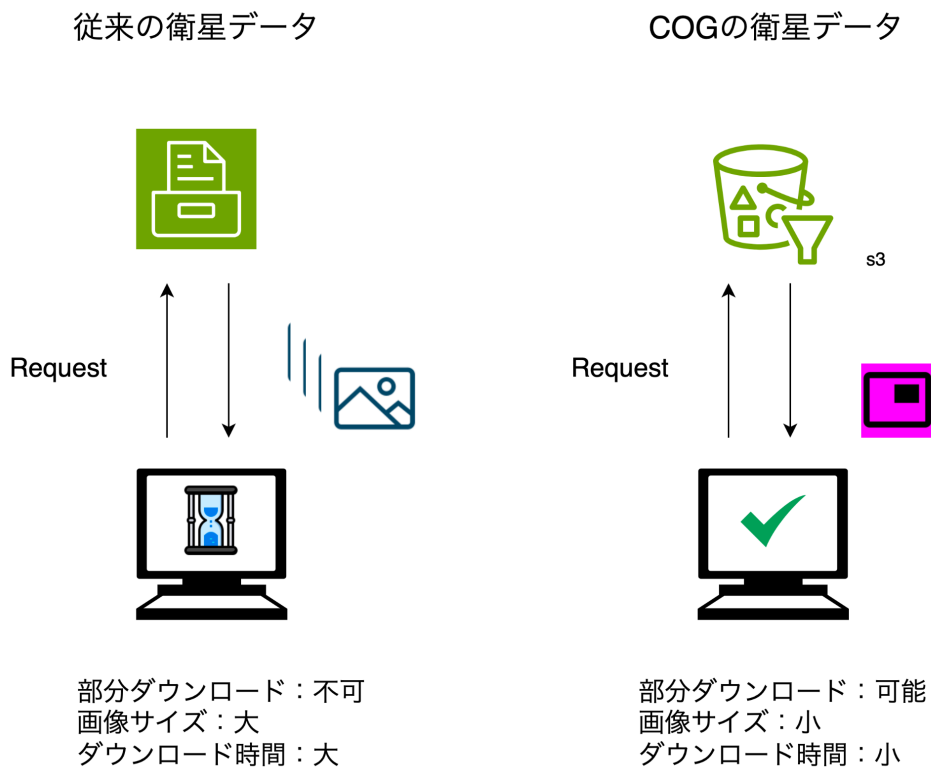


図2.2 従来の衛星データとCOGの衛星データの概念図

2.4 出力データ

樹冠密度のデータは、データ変換モジュールによって整形され、空間的データ、気象データを扱う際に広く利用されている標準的なフォーマットとして、NetCDF形式で出力するようにした。

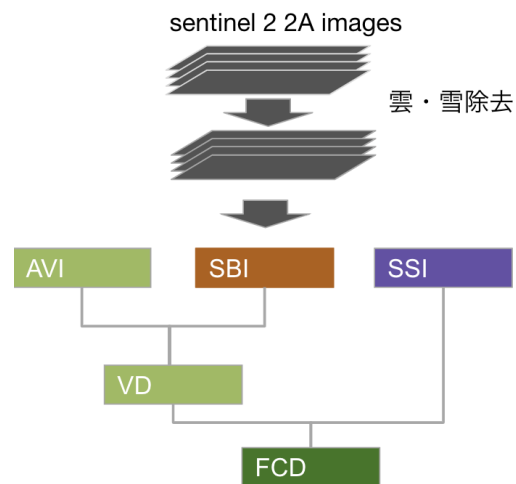


図2.3 樹冠密度データ作成フロー図

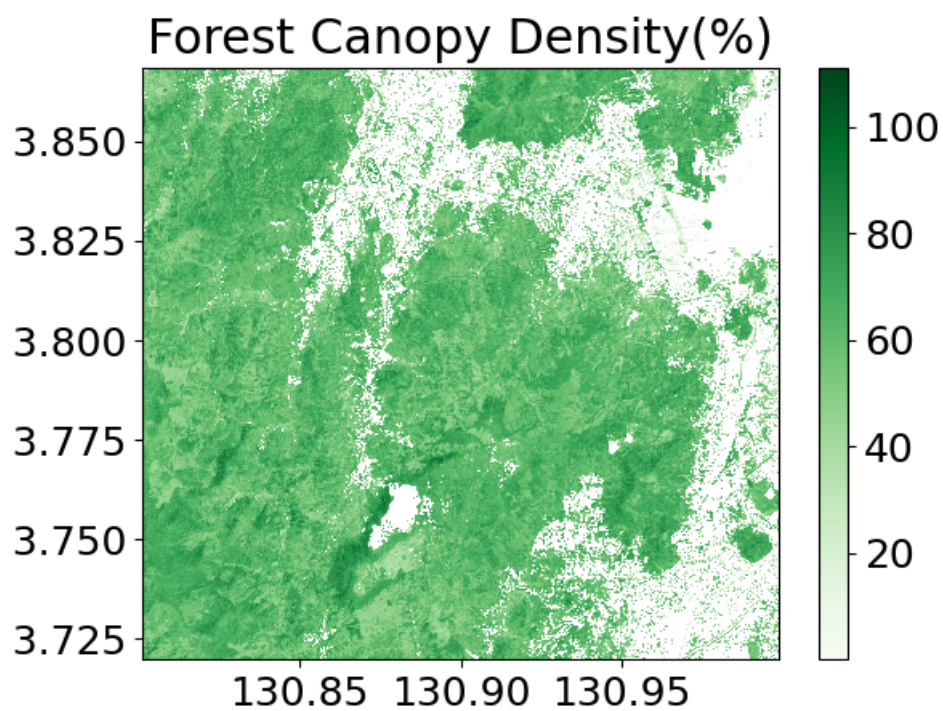


図2.4 作成された樹冠密度データ

第3章 土壌水分量の影響(積雪・融雪の影響)把握の検討

3.1 積雪の影響について

林床可燃物含水比への土壌水分量の影響把握について、本業務においては積雪の影響の把握を実施した。林床可燃物含水比は、日射量と降水量に影響を受ける。降水量が少ない冬季に林床可燃物含水比の値が下がる傾向があり、令和4年度業務のモデルでは降水量の季節変化に伴った林床可燃物含水比の季節変化を把握することができた。

一方で、冬季においては、日本海側を中心に降雪・積雪が生じ、林床可燃物含水比が低くとも、積雪に覆われた場所においては林野火災が発生する危険性は低くなる。この影響を定量化するために、気象庁が配信している解析積雪深のデータを用いて、冬季の林床可燃物含水比の変動と積雪がある場合とない場合での日数の変化を調査した。

積雪の影響についての解析フローを図3.1に示す。本業務では、気象庁の解析積雪深において、0.05m以上が解析されたエリアを積雪ありのエリアと仮定し、玉井ら(2019)^[3]にあるように林床可燃物含水比を2.0g/gとして解析し、その後の林床可燃物含水比の変動を算出した。図3.2に2022年1月における積雪深が0.01m,0.05m,0.10m以上の場合、林床可燃物含水比が2.0g/g以上あると仮定した林床可燃物含水比を示す。図3.3に2022年4月における積雪を考慮しない林床可燃物含水比と積雪を考慮した場合の林床可燃物含水比を示す。

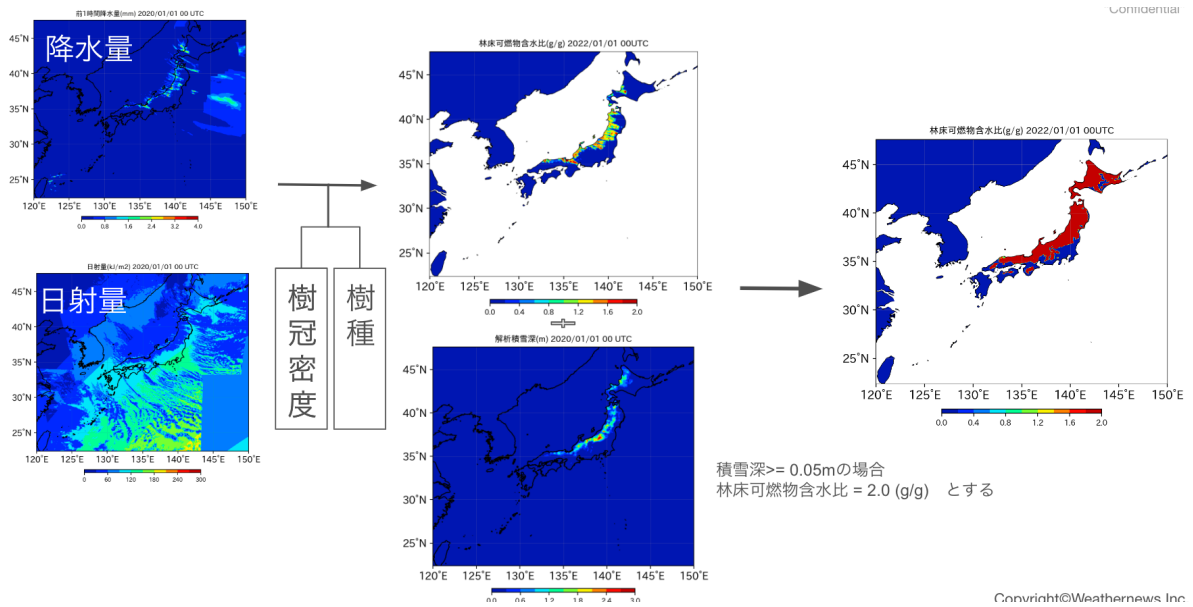


図3.1 積雪影響解析フロー

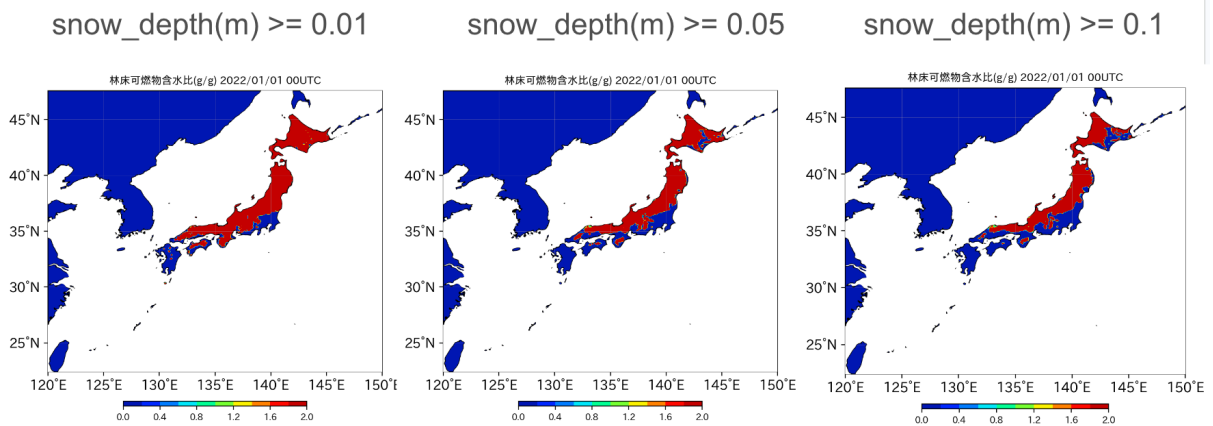


図3.2 2022年1月1日の積雪深別の林床可燃物含水比

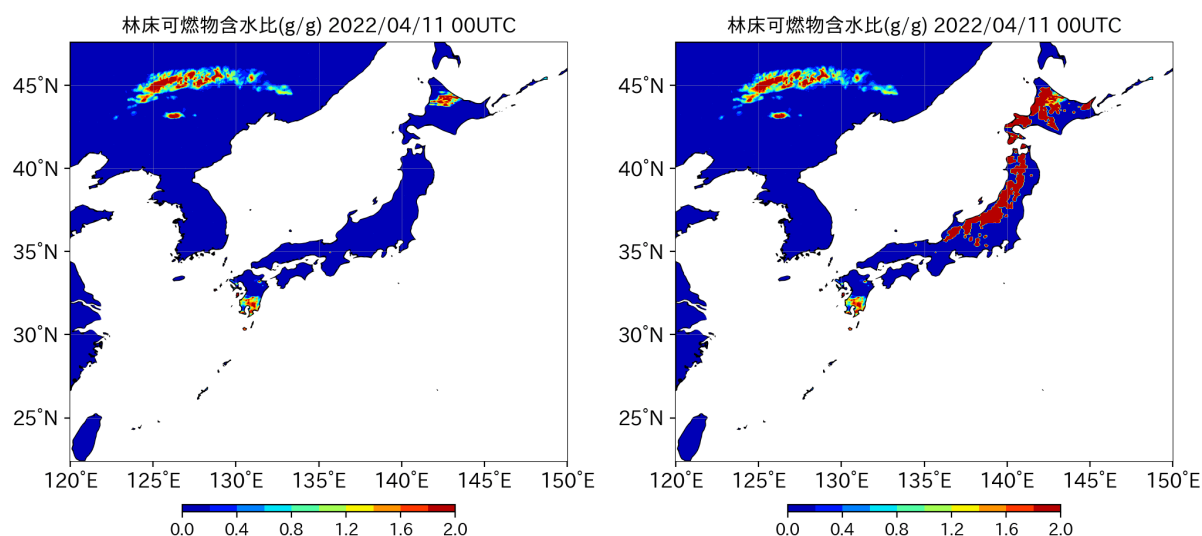


図3.3 2022年4月における林床可燃物含水比。令和4年度業務のモデル(左)に積雪深の影響を加味(積雪0.05m以上の場合に林床可燃物含水率0.2g/gとする)した場合が本業務で作成したモデル(右)

3.2 検証(青森県十和田市の事例)

3.1で作成した本業務のモデルの有効性を確かめるため、2022年5月9日に青森県十和田市法量において発生した林野火災(焼損面積27ha)^[4]を例に検証した。

延焼した周辺の樹種は植生図より常緑樹であり、樹冠密度は47%であった。さらに令和4年度業務で作成した樹種と樹幹密度による相対日射率の区分表(表3.1)により、相対日射率を20%と仮定して林床可燃物含水比を算出した(解析期間は2022年1月1日～5月31日、図3.5の黒実線)。令和4年度業務と同様に、林床可燃物含水比が0.2g/gを下回った場合、林野火災危険日であるとし解析を行った。その結果、林野火災可燃物がこの解析期間の日数151日のうち、林床可燃物含水比が0.2g/gを下回った日は92日間と、解析期間中の61%であった(表3.2)。

積雪を考慮した本業務の結果、林野火災が発生した5月9日、および発生日より1週間前の5月2日から発生日までの間に積雪はなく、かつ本地域では林床可燃物含水比が0.2g/gを下回り、乾燥していた日が続いていたことがわかった(図3.5の青点線)。林床可燃物含水比が0.2g/gを下回った日は39日であり、解析期間中の26%であった(表3.2)。令和4年度業務と比較すると、林床可燃物含水比が0.2g/gを下回った日数は92日から39日に減少し、解析期間中の割合でいうと61%から26%となり、約35%減少した。

林野火災（大字法量夏間沢地区）の状況写真(5月12日 早朝)
 十和田地域広域事務組合消防本部撮影

資料3

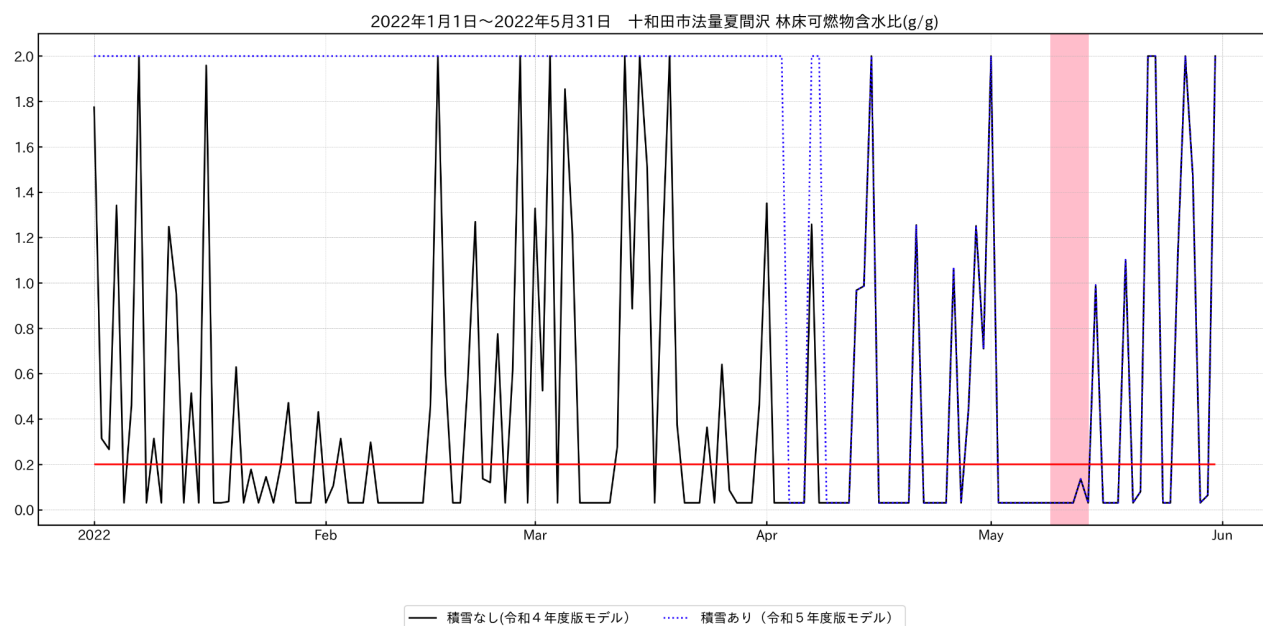


図3.4 青森県十和田市法量の林野火災の様子

出典:「第4十和田市災害警戒対策本部会議」本部会議資料 <files/0512-siryou.pdf>

表3.1 樹冠密度と樹種による相対日射率の区分

樹冠密度	樹種	相対日射率
50%以上	常緑樹	7%
	落葉樹	40%
	その他	100 - 樹冠密度 %
50%未満	常緑樹	20%
	落葉樹	40%
	その他	100 - 樹冠密度 %



林野火災発生期間

図3.5 林野火災事例における林床可燃物含水比の変動

※ 4月3日以降は、令和4年度業務のモデルを使用した場合と本業務のモデルを使用した場合とで林床可燃物含水比に差はない結果となった。

表3.2 林床可燃物含水比の比較

	含水比0.2g/g以下の日数割合	含水比0.2g/gより大きい日数割合
積雪考慮なし (令和4年度版モデル)	61 % (92/151日)	39 % (59/151日)
積雪考慮あり (令和5年度版モデル)	26 % (39/151日)	74 % (112/151日)

第4章 強風時における林野火災延焼危険度の検討

4.1 強風時の林野火災への影響について

令和4年度業務における課題で、運用化を想定し、広く一般に伝わりやすくするためには、リスク評価を行うことが重要であることが示唆された。本章では、リスクの一要因である風による林野火災の延焼拡大を考慮することを目的とし、強風時の林野火災延焼危険度の検討を実施した。強風と林野火災の延焼については、リチャード・ローサーメル (Richard Rothermel) によって開発された林野火災の延焼速度予測式で定式化されている。この予測式は林野火災や山火事の延焼速度予測モデルとして最も一般的に使用されているため、本業務でもこの予測式を用いて検討を実施した。

Rothermelの延焼速度予測式を下記に示す。

$$R = \frac{\text{火線より放出される熱量}}{\text{可燃物の着火に必要な熱量}} = \frac{IR\xi(1+\phi W+\phi S)}{\rho b \epsilon Q_{ig}} \quad (1)$$

また、Rothermel の延焼速度予測式全体を表4.1 に、計算に必要なパラメータを表4.2 にそれぞれ示す。表4.2 に示した可燃物の性状に関するパラメータのうち、可燃物の燃焼特性を示すパラメータは、あらかじめ実験などで調べておく必要があり、可燃物の種類ごとの固定値となる。本業務においては、これらのパラメータについて、後藤ら(2005)^[5]の文献を参考にして入力値を決定した。具体的な入力値については、表4.3に示したとおりである。

本業務では、入力値のうち、国土地理院の数値標高モデル(Digital Elevation Model:DEM)から作成した傾斜角度(図4.1)と、風速はウェザーニューズ保有の解析風速データ(図4.2)をそれぞれ使用した。式(1)から算出した、延焼速度と風速・斜面の傾斜角の関係を図4.3に示す。この結果では、風速が大きくなるほど、延焼速度は大きくなることが示されている。これは風に乗って火の粉が広がりやすくなり、延焼域が拡大することを表現した結果であると思われる。また、傾斜角が大きくなると延焼速度も増加する。これは、傾斜が急であるほど、火の勢いが強くなり上昇しやすくなるということを表していると考えられる。加えて、傾斜が大きい場合、火が上方に急激に広がりやすくなり、その結果として延焼速度が増加することを表しているものとも考えられる。

表4.1 Rothermel の延焼速度予測式

式	説明	単位	式番号
$R = \frac{\text{火線より放出される熱量}}{\text{可燃物の着火に必要な熱量}}$ $= \frac{I_R \xi (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$	延焼速度	m min^{-1}	(1)
$I_R = \Gamma' w_n h \eta_M \eta_S$	燃焼による単位時間当たりの放出熱量 (火炎輻射強度)	$\text{kJ min}^{-1} \text{m}^{-2}$	(2)
$\Gamma' = \Gamma'_{max} \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^A \exp \left[A \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{op}} \right) \right]$	理想熱分解速度 (絶乾状態の α セルロースの熱分解速度)	min^{-1}	(3)
$\Gamma'_{max} = 168.28 \sigma^{1.5} (495 + 9.9956 \sigma^{1.5})^{-1}$	最大熱分解速度	min^{-1}	(4)
$\beta_{op} = 0.20395 \sigma^{-0.8189}$	熱分解速度が最大となるときの β	—	(5)
$A = \frac{1}{6.7187 \sigma^{0.1} - 7.27}$	定数	—	(6)
$\eta_M = 1 - 2.59 \frac{M_f}{M_x} + 5.11 \left(\frac{M_f}{M_x} \right)^2 - 3.52 \left(\frac{M_f}{M_x} \right)^3$	可燃物中の水分による熱分解速度減少係数	—	(7)
$\eta_S = 0.174 S_e^{-0.19}$	可燃物中の無機物による熱分解速度減少係数	—	(8)
$\xi = (192 + 7.9096 \sigma)^{-1} \exp[(0.792 + 3.7597 \sigma^{0.5})(\beta + 0.1)]$	隣接する可燃物の加熱に消費される放出熱量の割合	—	(9)
$\phi_W = C(196.85U)^B \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}$	風による割増し係数	—	(10)
$C = 7.47 \exp(-0.87108 \sigma^{0.55})$	定数	—	(11)
$B = 0.15988 \sigma^{0.54}$	定数	—	(12)
$E = 0.715 \exp(-0.010942 \sigma)$	定数	—	(13)
$w_n = \frac{w_o}{1 + S_T}$	可燃物中の有機物量	kg m^{-2}	(14)
$\phi_S = 5.275 \beta^{-0.3} (\tan(\phi))^2$	傾斜による割増し係数	—	(15)
$\rho_b = \frac{w_0}{\delta}$	可燃物の堆積密度	kg m^{-3}	(16)

式	説明	単位	式番号
$\varepsilon = \exp\left(\frac{-4.5276}{\sigma}\right)$	炎によって着火温度まで加熱される可燃物の割合	—	(17)
$Q_{ig} = 581.42 + 2595.5M_f$	単位重量当たりの可燃物が着火するまでに必要な熱量	kJ kg^{-1}	(18)
$\beta = \frac{\rho_b}{\rho_p}$	可燃物の堆積密度と比重の比	—	(19)

表 4.2 Rothermel の延焼速度予測式計算に必要なパラメータ

パラメータ	説明	単位
h	可燃物の低位発熱量	kJ kg^{-1}
ρ_b	可燃物の真の密度	kg m^{-3}
σ	可燃物の表面積－体積比	cm^{-1}
M_x	限界含水量	—
S_e	可燃物中のシリカ以外の無機含有量	—
S_T	可燃物中の無機含有量	—
w_0	単位面積当たりの可燃物量	kg m^{-2}
M_f	可燃物の含水率	—
δ	可燃物の堆積深	m
ϕ	傾斜角度	°
U	炎の中央部の高さの風速	m s^{-1}

表4.3 Rothermel の延焼速度予測式計算に使用した具体的な入力値

パラメータ	説明	パラメータ値	単位	備考
h	可燃物の低位発熱量	19958	kJ kg^{-1}	後藤ら(2005) より引用
ρ_b	可燃物の真の密度	516.19	kg m^{-3}	
σ	可燃物の表面積－体積比	70.44	cm^{-1}	
M_x	限界含水量	0.31	—	
S_e	可燃物中のシリカ以外の 無機含有量	0.024	—	
S_T	可燃物中の無機含有量	0.031	—	
w_0	単位面積当たりの可燃物 量	0.5	kg m^{-2}	
M_f	可燃物の含水率	0.01	—	
δ	可燃物の堆積深	0.02	m	
ϕ	傾斜角度		°	入力条件
U	炎の中央部の高さの風速		m s^{-1}	

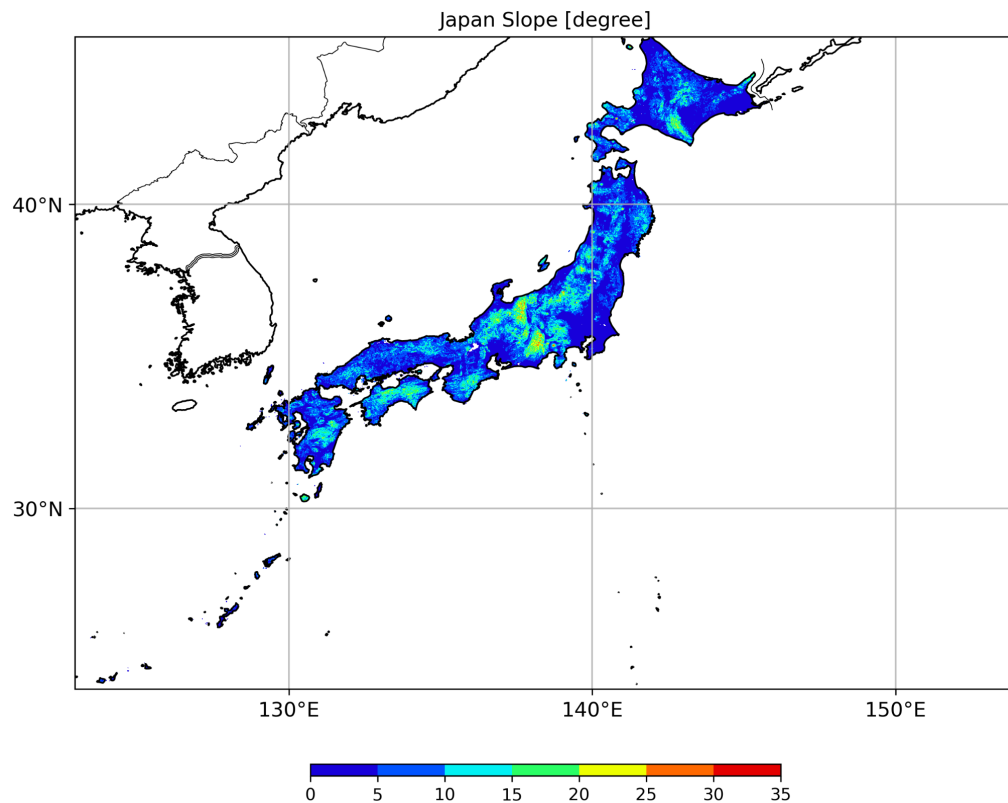


図4.1 DetitalElevationModel(DEM) から作成した日本の傾斜角度

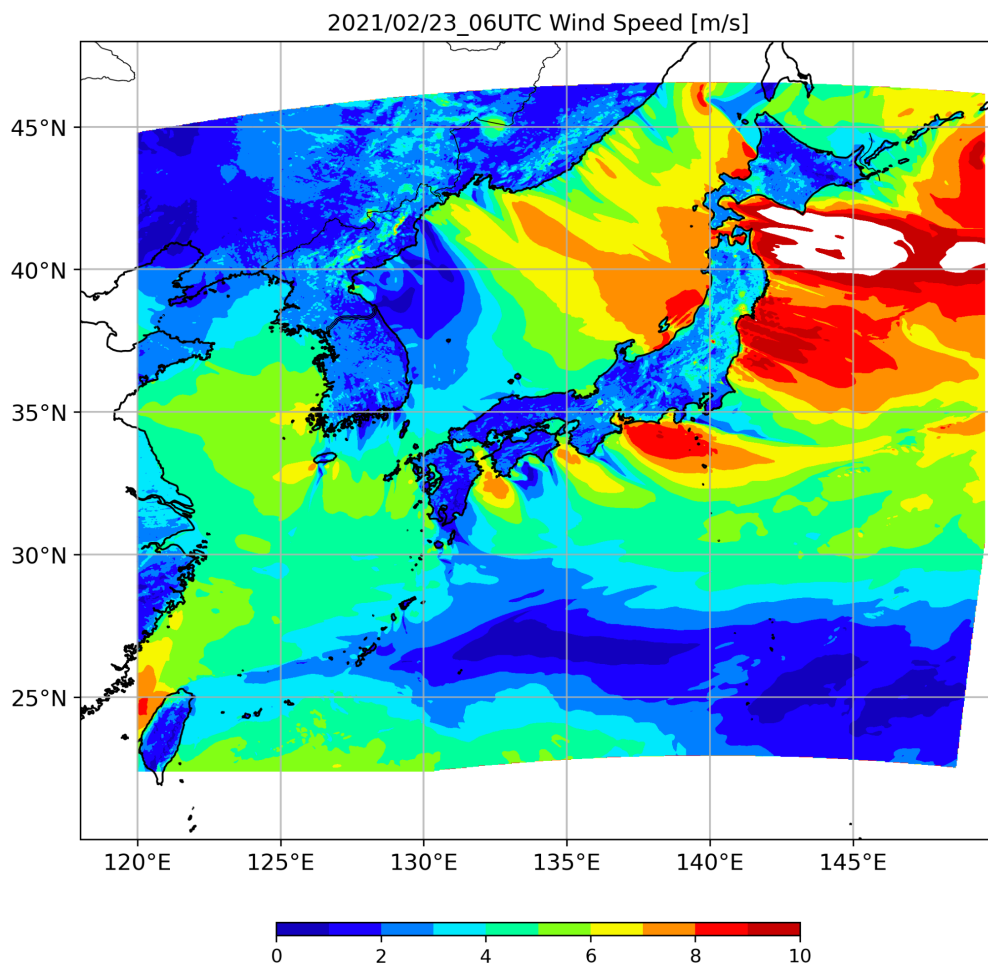


図4.2 日本時間 2021年2月23日15時の1km 解析風速

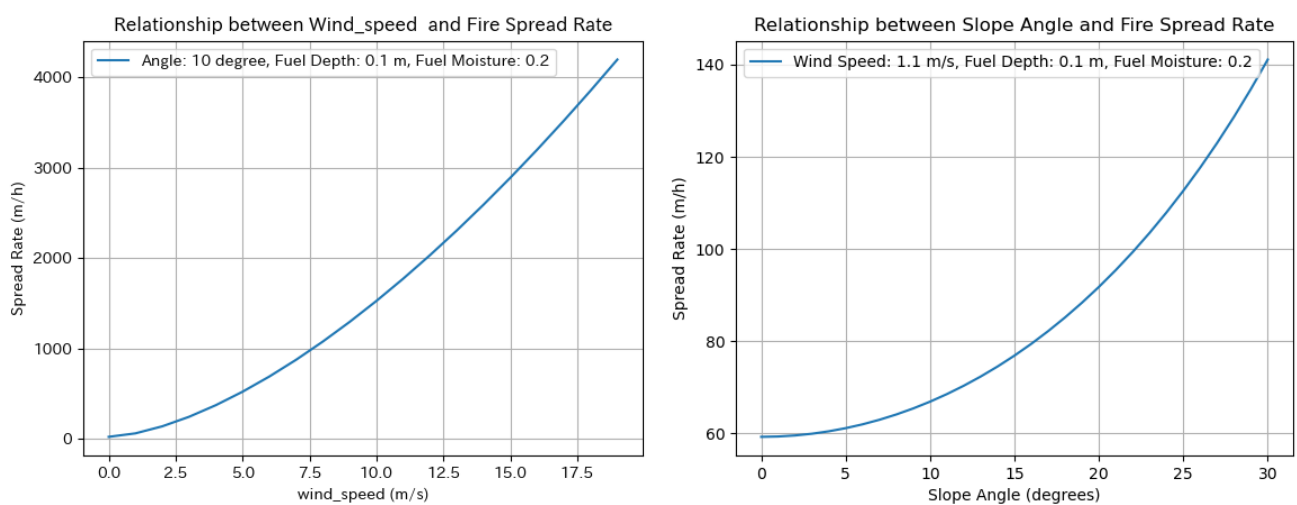


図4.3 Rothermelの延焼速予測式における風速(左)、傾斜角度(右)と延焼速度の関係

4.2 検証(栃木県足利市の事例)

4.1で示した方法を用いて、2021年2月21日に栃木県足利市で発生した林野火災(焼損面積167ha)の事例を検証した。

足利市が発表している記録^[6]によると、2021年2月21日午後、足利市西宮町の両崖山の山頂付近から林野火災が発生し、2月23日に強風によって延焼範囲が拡大、県内外の消防局・本部や他都県の防災ヘリ、自衛隊ヘリなどの応援を得て発生23日目の3月15日に鎮火した。この林野火災により、一時は市内の305世帯に避難勧告が発令され、近くの中学校や高校が休校したほか、北関東自動車道足利インターチェンジから太田桐生インターチェンジ間が通行止めとなった。

本事例を選定した理由は、足利市に隣接する佐野市の観測(アメダス佐野)によると、2月23日の日平均風速は5.3メートルに達し、2月の平年値2.4メートルを上回り、最大瞬間風速は17.3メートルであり、この強風に煽られて火は燃え広がり延焼が拡大したと考えられるためである。なお、解析対象エリアについては、図4.4の範囲とし、解析対象エリアの傾斜角度を図4.5に示す。

延焼速度を算出するにあたり、本業務では足利市が発表している記録から、風が強く延焼したとされる2021年2月23日を含む2021年2月22日～28日までの解析を実施した。

2月23日における平均風速とRothermelの延焼速度予測式による延焼速度(以下「延焼速度」という。)の解析結果を図4.6に、2月22日～2月28日までの1時間ごとの平均風速と延焼速度の変動を図4.7に示す。火災が発生した2月22日は比較的風速が小さく、延焼速度も小さいが、延焼が進んだとされる2月23日、24日においては、平均風速が5m/sをこえる時間もあり、他の日に比べて風が強いことが確認できた。また、これに応じて延焼速度も大きく上昇し、特に2月23日は延焼速度が800m/hを超える時間もあった。解析対象エリアで延焼が拡大したとされる2月23日の最大平均風速は6.9m/sであり、最大延焼速度は861.7m/hであった。

後藤ら(2005)の研究結果によると、1990年代に生じた山火事の推定延焼速度は、平均で81～5914m/hであった(表4.4)。これらの値はRothermelモデルを用いて推定した延焼速度の範囲内に入っており、本事例で算出した延焼速度の値も許容範囲であるといえる。

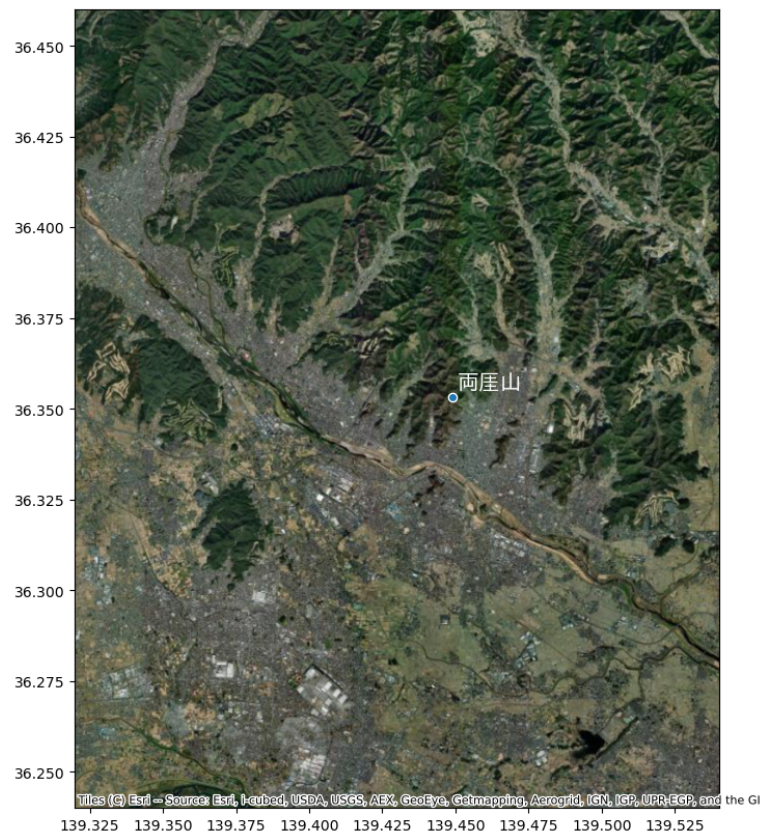


図4.4 解析対象エリア

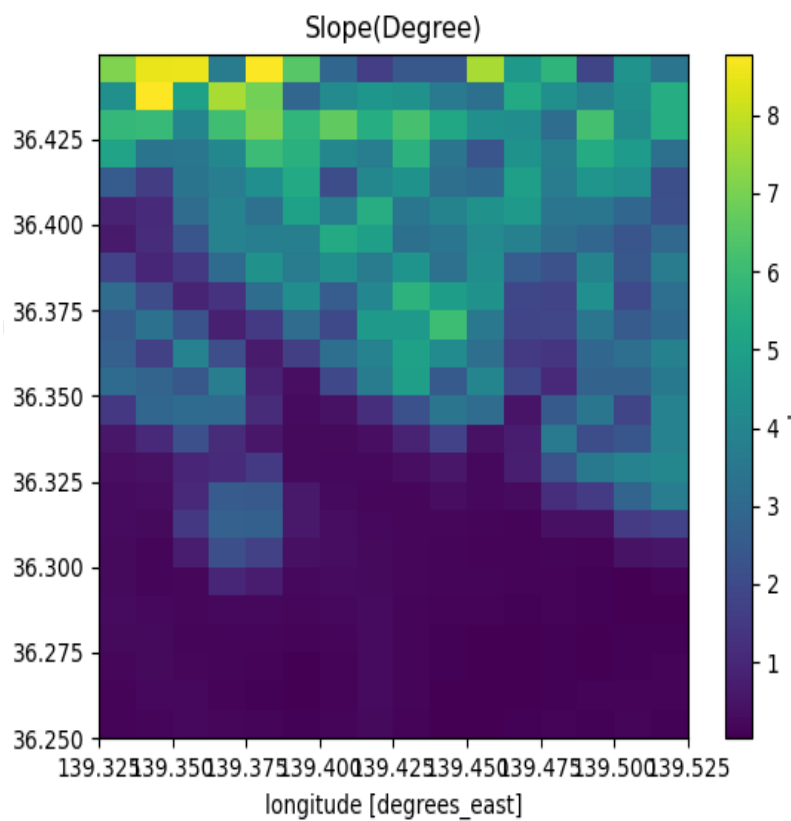


図4.5 足利市両厓山近辺の傾斜角

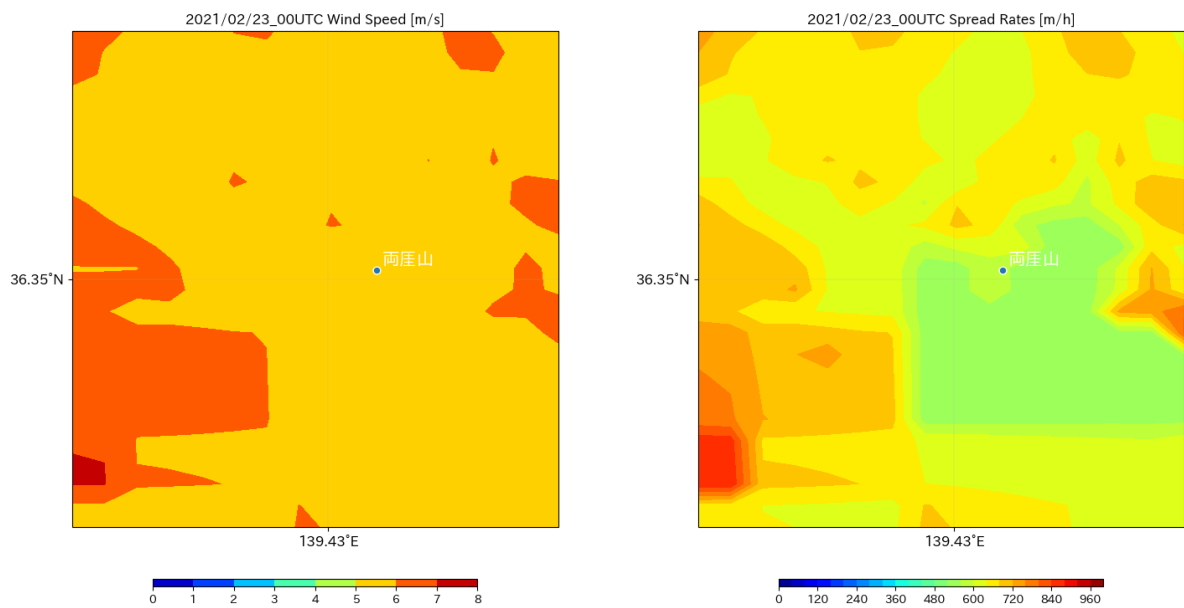


図4.6 足利市両厓山近辺の平均風速(左)と延焼速度(右)

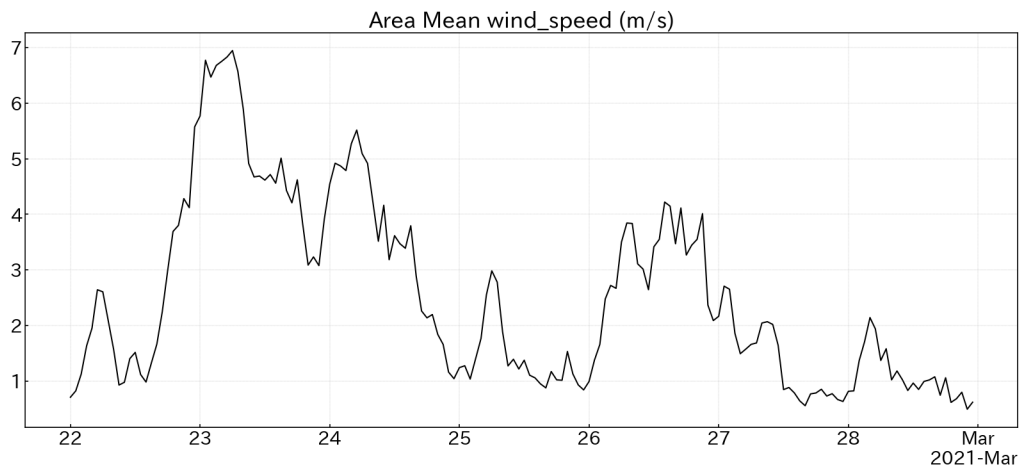


図4.7 22日～28日にかけての足利市両厓山近辺の1時間ごとの風速値の変動

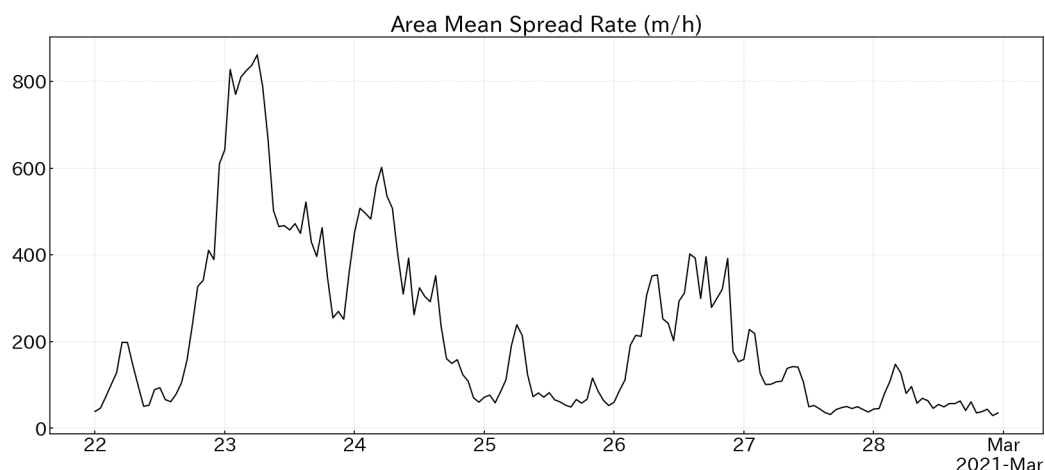


図4.8 22日～28日にかけての足利市両厓山近辺の1時間ごとの延焼速度の変動

表4.4 後藤ら(2005)による日本で発生した山火事における延焼速度と火線強度推定値

表-5. 日本で発生した山火事における延焼速度と火線強度推定値

発生場所	発生年月日	焼損面積 (ha)	焼損域の主な植生	調査対象林分	林床の主な可燃物
京都市山科区	1994年8月11日	1	アカマツ・落葉・常緑広葉樹林	アカマツ・常緑・落葉広葉樹林	アカマツ・広葉樹の落葉
茨城県筑波山	1986年3月9日	3	スギ人工林, 落葉広葉樹林	スギ人工林	スギの落葉
茨城県日立市	1991年3月7日	218	スギ人工林, ヒノキ人工林, アカマツ・落葉広葉樹林等	アカマツ・落葉広葉樹林	アカマツ・落葉広葉樹の落葉
岡山県玉野市	1994年8月11日	338	アカマツ・クロマツ・落葉広葉樹林, コシダ草地, ウラジロ草地等	アカマツ・クロマツ・落葉広葉樹林, コシダの密生したアカマツ林	マツ類・落葉広葉樹の落葉, 枯死したコシダ, 生きたコシダ

¹⁾ 炎中央部の高さの平均風速。本研究では Rothermel (1983) に従い、尾根・斜面上部では 0.4, 斜面中部では 0.3, 斜面下部・谷では 0.2 を上空の風速に

平均傾斜 θ (°)	平均風速 ¹⁾ U (m s ⁻¹)	可燃物質量 w_0 (kg m ⁻²)	可燃物堆積深 δ (m)	推定延焼速度 ²⁾ R (m h ⁻¹)	推定火線強度 ²⁾ I (kW m ⁻¹)	炎の長さ ²⁾ L (m)
13	1.1	0.20~0.68	0.02~0.03	66~95 (81)	68~279 (178)	0.5~1.0 (0.8)
30	0.3	0.08~0.24	0.03~0.10	94~314 (201)	41~413 (204)	0.4~1.2 (0.8)
0	1.1	0.33~0.78	0.03~0.07	81~218 (135)	139~830 (409)	0.8~1.7 (1.2)
5	3.4	0.83~1.07	0.02~0.03	70~127 (108)	313~731 (592)	1.1~1.6 (1.4)
		0.32~0.70	0.50~0.60	5602~6593 (5914)	8670~22204 (14668)	5.0~7.7 (6.3)

※推定延焼速度と推定火線強度の括弧内の数字は平均を示す

4.3 強風時における林野火災延焼危険度の設定

足利市が発表している記録^[6]によると、2月23日に風速の増加とともに延焼拡大が進んだ。この時の解析風速、延焼速度を調べると(図4.7、図4.8)、4.2で示したとおり、2月22日の午前中は風速1~3m/s(延焼速度200m/h未満)であったものが、午後遅くより風速4m/s以上となり、23日未明には最大風速7m/s(延焼速度861m/h)となり、その後、2月23日夜には風速3m/s(延焼速度300m/h程度)まで徐々に弱まっていることがわかった。また、26日は、1日を通じて風速が4m/s程度、延焼速度が400m/h程度の時間が長かったが、風速による延焼拡大は報告されていない。従って、延焼拡大の危険度が増す閾値が、上記の風速4m/s程度、延焼拡大400m/h程度よりも大きい可能性が

高い。

以上のことから、本調査では、延焼リスクを把握するため、延焼速度400m/hを閾値として用いることとした。なお、延焼速度と風速は線形でないので、理論的背景のある延焼速度を閾値として用いた方がより良いと考えられる。

この閾値は、足利の事例のみから設定したものであり、消火活動の進展が延焼速度に影響を及ぼす可能性もあることから、数多くの事例から検討した方が良いと考えるが、これらは次年度以降の課題としたい。

なお、2021年2月23日の全国における延焼速度が400m/h以上のエリアを図4.10に示す。2021年2月23日は、冬型の気圧配置が卓越し、北日本から東日本にかけて風速が強く、延焼速度が400m/h以上と解析されたエリアが多く見られることがわかる。

これらの結果、実運用の際には、林床可燃物含水比が0.2g/g以下の乾燥している地域と延焼速度を合わせて注意喚起をすることが望ましいと考えられる。

運用を想定した強風リスクの適用については、第6章で述べる。

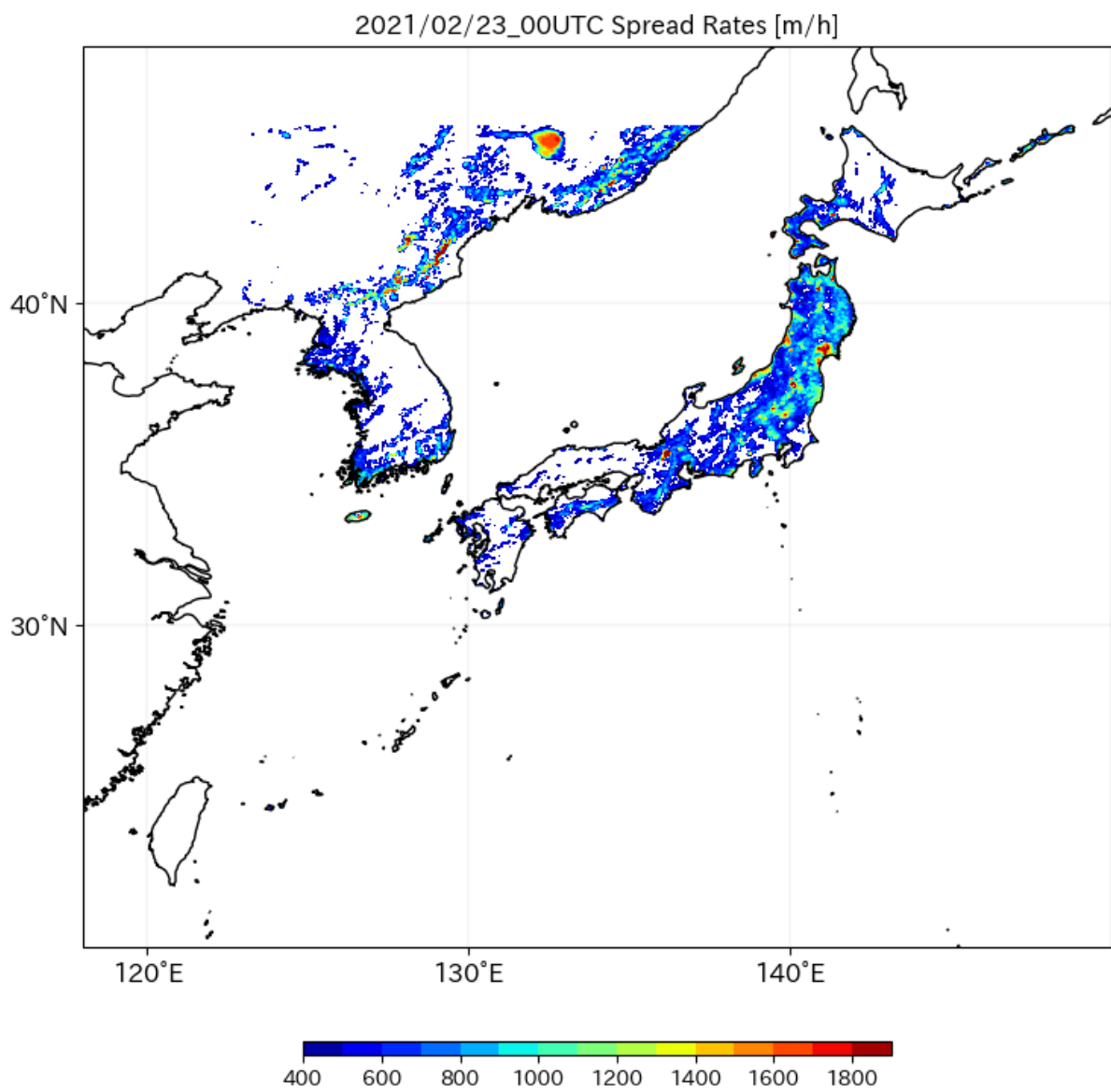


図4.10 日本時間 2021年2月23日9時の延焼速度が400m/h 以上のエリア

第5章 人口密度による林野火災指標の検討

5.1 人口密度が林野火災に及ぼす影響

本章では、人口密度を林野火災の発生頻度及び延焼リスクの一要因として考慮することを目的とし、人口密度による林野火災指標の検討を実施した。

林野庁ホームページ^[7]によると我が国の林野火災の原因は、割合の多い順に、焚き火(約32%)、火入れ(約18%)、放火(8%)、タバコ(約5%)であり、人為的な原因が大半で、落雷など自然現象によるものは稀である。このため、林野火災と人の存在には関連性があると考えられる。林野火災と人の存在(例えば人口密度など)の関連性に関する研究は複数存在するが、人が存在しない場合林野火災の発生頻度が低くなる一方で、人口が増加すると森林そのものが減少するため、林野火災の発生頻度は人口の増加とともにある一定値を超えると減少すると考えられる。このことから、本節では、

①林野火災と人間との関連性に関する先行研究の調査

②先行研究に基づいた、日本における林野火災の発生頻度と焼損面積の計算式の導出

③採用した手法の評価・検証

の3つを実施した。

以下に詳細を述べる。

①林野火災と人間との関連性に関する先行研究の調査

人口密度と林野火災の発生の関連性について、幾つか研究結果が報告されている(Syphardら(2007)^[8]、Syphardら(2009)^[9]、Archibaldら(2009)^[10]、Archibaldら(2010)^[11])。

図5.1、図5.2 に人口密度と年間の林野火災の発生件数に関するArchibaldら(2010)とSyphardら(2007)の調査結果を示す。これらによると、人口密度の増加に伴い、林野火災の発生頻度は増加する傾向にある。一方で、ある一定の人口密度に到達すると、林野火災の発生頻度が減少に転じる。発生頻度が減少に転じる理由としては、人口密度が増加すると、その地域の森林面積は減少し、林野火災が発生する環境が整わなくなるためであると考えられる。

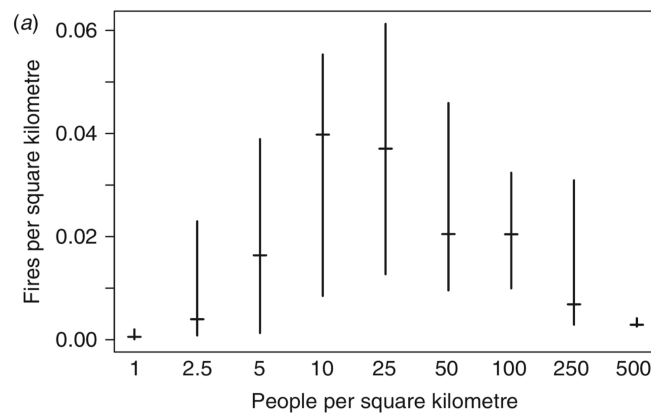


図5.1 Archibaldら(2010)によるアフリカ南部の2001～2008年年間の人口密度と林野火災の発生件数

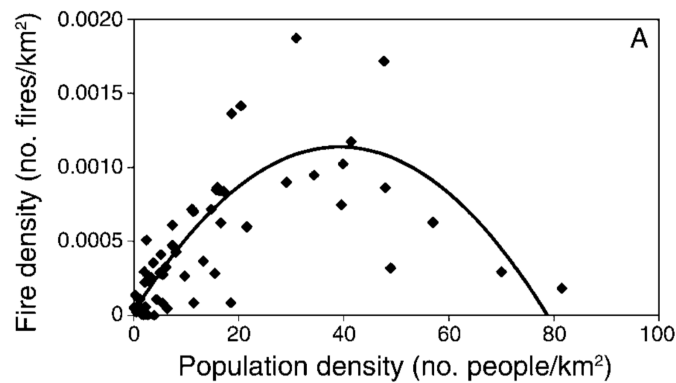


図5.2 Syphardら(2007)によるアメリカ合衆国カリフォルニア州の2000年の人口密度と年間の林野火災の発生件数

また、Archibaldら(2010)は、人口密度と焼損面積の関係も調査している。図5.3にアフリカ南部(2001～2008年)の人口密度と一件あたりの林野火災の焼損面積の関係を示す。これによると、人口密度が増加するにつれて、林野火災の焼損面積は減少していることがわかる。これらにおいても、人口密度が増加するに従い、森林が減少し、林野火災が延焼する環境が整わなくなることで、結果として焼損面積が減少するためであると考えられる。

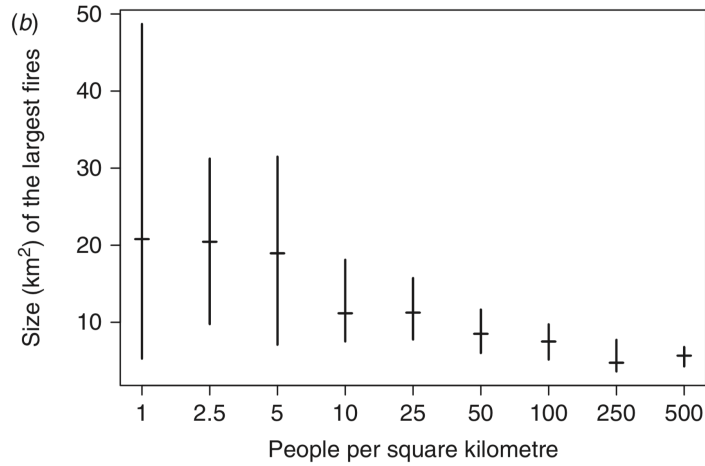


図5.3 Archibaldら(2010)によるアフリカ南部(2001～2008年)の人口密度と林野火災の一件あたりの焼損面積。林野火災のうち焼損面積が大規模なもの(焼損面積が上位5%)を対象

②先行研究に基づいた、日本における林野火災の発生頻度と焼損面積の計算式の導出

これまで調査した先行研究に基づき、人口密度から林野火災の発生頻度と焼損面積を求めるための計算方法について、それぞれ検討を行った。人口密度から林野火災の発生頻度を求める算出式(2)と、人口密度から林野火災の焼損面積を求める算出式(3)を以下に示す。

$$y = \begin{cases} 0.0001 & \text{if } x < 1 \\ 0.0001 + 0.0001 \times (x - 1) / 1.5 & \text{if } 1 \leq x < 2.5 \\ 0.0002 + 0.0002 \times (x - 2.5) / 2.5 & \text{if } 2.5 \leq x < 5 \\ 0.0005 + 0.0005 \times (x - 5) / 5 & \text{if } 5 \leq x < 10 \\ 0.0010 + 0.0002 \times (x - 10) / 15 & \text{if } 10 \leq x < 25 \\ 0.0012 & \text{if } 25 \leq x < 50 \\ 0.0012 - 0.0004 \times (x - 50) / 30 & \text{if } 50 \leq x < 80 \\ 0.0008 - 0.0004 \times (x - 80) / 70 & \text{if } 80 \leq x < 150 \\ 0.0004 - 0.0002 \times (x - 150) / 350 & \text{if } 150 \leq x < 500 \\ 0.0002 & \text{if } x > 500 \end{cases} \quad (2)$$

$$z = \begin{cases} 2.0 & \text{if } x < 5 \\ 1.5 & \text{if } 5 \leq x < 10 \\ 1.2 & \text{if } 10 \leq x < 25 \\ 1.0 & \text{if } 25 \leq x < 50 \\ 0.8 & \text{if } 50 \leq x < 100 \\ 0.6 & \text{if } 100 \leq x < 250 \\ 0.5 & \text{if } x \geq 250 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 x は人口密度[人/km²]、 y は単位面積あたりの年間の発生頻度[件/km²/年]、 z は火災一件あたりの焼損面積[km²/件]をそれぞれ表す。なお、式2と式3に示す数値は、図5.1～図5.3から読み取り設定した。

発生頻度については、日本に適用することを考慮し、気候が類似するSyphardら(2007)のアメリカ合衆国カリフォルニア州の事例に基づいた(図5.2と図5.3)。図5.2の読み取り位置を図5.4に示す。まず、図5.4の⑤のとおり、発生頻度のピーク値を縦軸より読み取り0.0012件/km²/年に設定、対応する人口密度の範囲を横軸より読み取り25～50人/km²と設定した。そして1人km²の値を⑤のピーク値の12分の1、0.0001件/km²/年に設定した(図5.4の①)。図5.4の②・③・④については、人口密度2.5、5、10人/km²に対応する発生頻度の値をグラフより読み取り、それぞれ0.002、0.005、0.001件/km²/年に設定した(表5.2)。一方で、人口密度が80km²以上の範囲については、図5.4にはデータが1点あるのみで、値の設定ができないため、Archibaldら(2010)のアフリカ南部の事例を参考に値を設定した。具体的には、図5.1の人口密度80人/km²に対応する発生頻度の値は、同図の発生頻度のピーク値0.04件/km²/年に対して3分の2であると設定した。次に、この3分の2の割合が、図5.2や図5.4においても適応できると仮定し、先に設定した図5.4の⑤のピーク0.0012件/km²/年に乗じて人口密度80人/km²に対応する発生頻度の値を0.008と求めた(図5.4の⑥)。150、500人/km²に対応する発生頻度の値は、図5.1よりピーク値0.04件/km²/年に対する割合を、それぞれ3分の1、6分の1と設定し、図5.4のピーク値0.0012件/km²/年に乗じて求めた(表5.2)。

焼損面積に関しては、図5.3から読み取り値を設定した。図5.3の値の読み取り位置を図5.5に示す。なお、図5.3はアフリカの焼損面積であり、日本の事例に比べ値が大きいと考えられる。日本の大規模山火事の事例(表5.1)と図5.3

のArchibaldら（2010）のアフリカの焼損面積と比較すると、概ね10分の1であったことから、図5.5の位置で読み取った値を10分の1とした値を人口密度に応じた林野火災1件あたりの焼損面積に設定することとした（表5.3）。

表5.2、表5.3に最終的に使用したx、y、zの値を示し、本業務で作成した人口密度と林野火災の発生頻度の関係を図5.6、人口密度と焼損面積の関係を図5.7に示す。これらから、実際の人口密度のデータを用いて日本における林野火災の発生頻度と焼損面積を推定した。人口密度のデータとして、国土交通省の500mメッシュ別将来推計人口データ(H30国政局推計)のうち、2020年の推計人口データを使用した。この500mメッシュの人口密度データから3次メッシュ(約1km²)の平均値を求め、その値をxとして式2、式3に代入することで、3次メッシュの林野火災発生頻度と焼損面積を計算した。計算した結果を図5.8に示す。

表5.1 平成14年以降に発生した大規模な山火事(林野庁HPより)

出典: https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/yamakaji/con_1.htm

平成14年以降に発生した"住民避難勧告等が発令された大規模な山火事"			
発生場所	発生日～鎮火日	焼損面積(ha)	避難勧告等人数
茨城県水府村	平成14年3月12日～3月15日	69	12世帯38人
宮城県丸森町	// 3月17日～3月19日	144	4世帯20人
兵庫県宝塚市	// 3月19日～3月21日	32	241世帯718人
長野県松本市	// 3月21日～3月23日	170	60世帯338人 2施設
岡山県備前市	// 4月4日～4月4日	30	75世帯185人
岐阜県岐阜市・各務原市	// 4月5日～4月6日	410	1, 160世帯 3, 613人
香川県丸亀市	// 8月20日～9月3日	160	15世帯22人
広島県尾道市・三原市	// 12月3日～12月4日	30	4世帯8人
香川県直島町	平成16年1月13日～1月19日	122	283世帯650人
広島県瀬戸田町・因島市	// 2月14日～2月23日	391	17世帯40人
愛媛県今治市	平成20年8月24日～8月29日	107	52世帯
東京都三宅村	平成24年11月16日～11月25日	156	85世帯約146人
栃木県足利市	平成26年4月23日～5月2日	72	約40世帯90名
岩手県盛岡市	平成26年4月27日～5月5日	78	87世帯277名
岩手県釜石市	平成29年5月8日～5月22日	413	136世帯348名
栃木県足利市	令和3年2月21日～3月15日	167	305世帯610人
群馬県桐生市	令和3年2月25日～2月28日	13	4世帯6名
群馬県みどり市	令和3年4月22日～4月26日	46	24世帯32名
長野県諏訪市・茅野市	令和5年5月4日～5月5日	166	144世帯（避難指示）

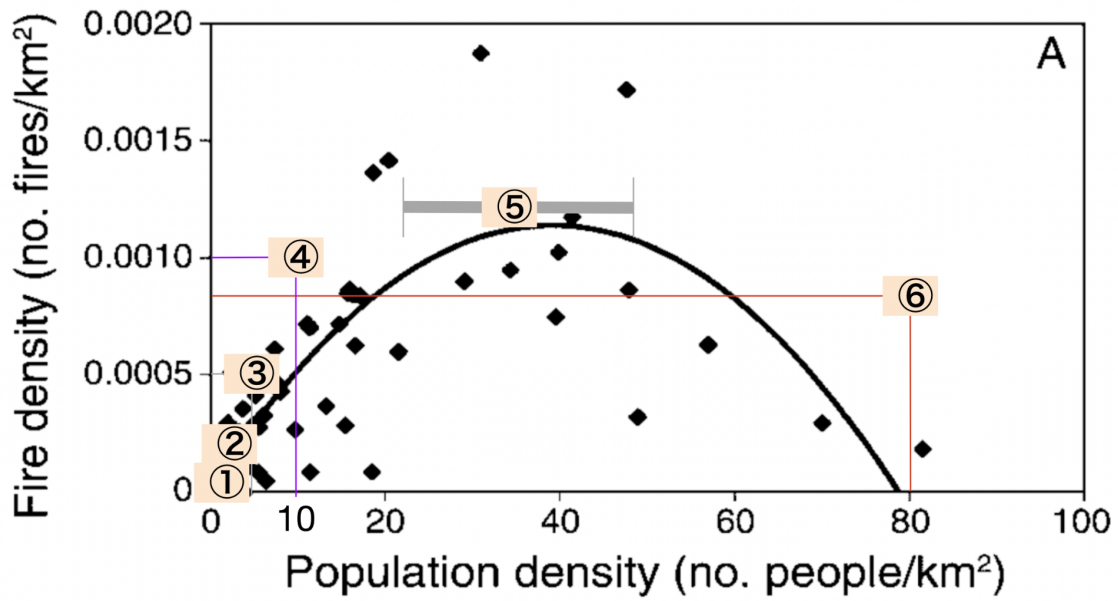


図5.4 Syphardら(2007)による林野火災の発生件数
①～⑤の番号は本業務で採用した人口密度と発生頻度の座標

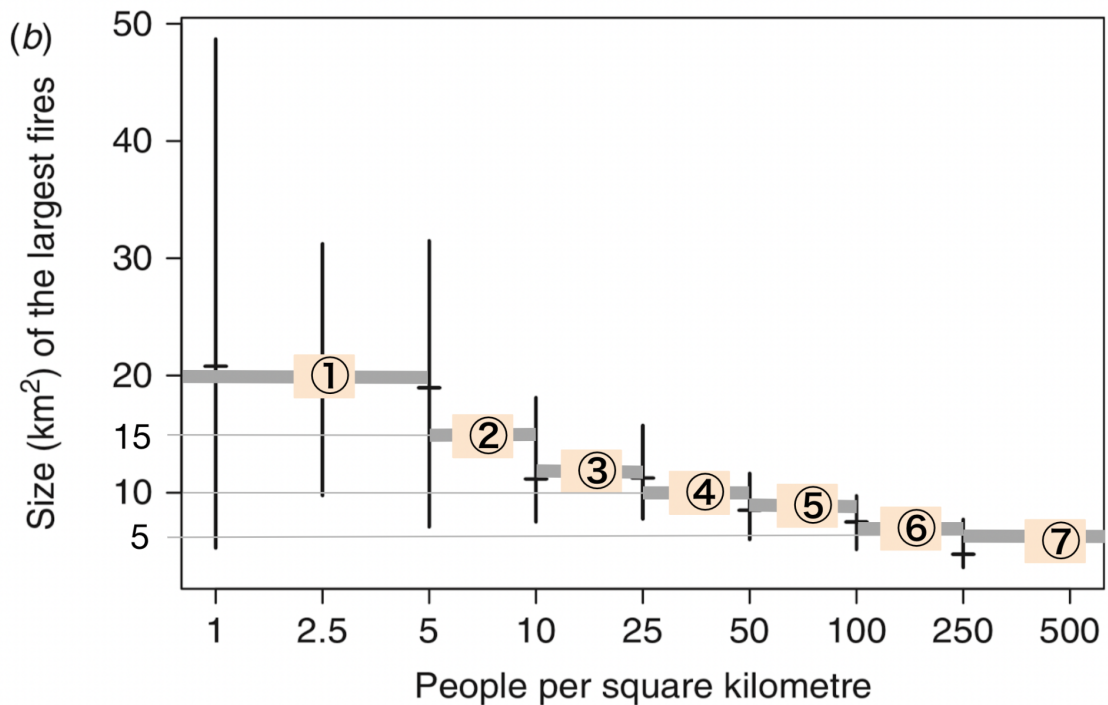


図5.5 Archibaldら(2010)による焼損面積の林野火災の焼損面積の上限値
①～⑦の番号は本業務で採用した人口密度と焼損面積の座標

表5.2 林野火災の年平均発生頻度の推定値
(図5.4の読み取り値)

人口密度 (人/km ²)	林野火災の年平均発生頻度 (件/km ²)	図5.4で該当する 点の番号
1	0.0001	①
2.5	0.0002	②
5	0.0005	③
10	0.0010	④
25～50	0.0012	⑤
80	0.0008	⑥
150	0.0004	図5.4の枠外
500	0.0002	図5.4の枠外

表5.3 林野火災の焼損面積の推定値
(図5.5の読み取り値、日本の焼損面積を考慮して1/10としている)

人口密度 (人/km ²)	林野火災の焼損面積上位5%の中央値 の推定値	図5.5で該当する 点の番号
～5	2.0	①
5～10	1.5	②
10～25	1.2	③
25～50	1.0	④
50～100	0.8	⑤
100～250	0.6	⑥
250～	0.5	⑦

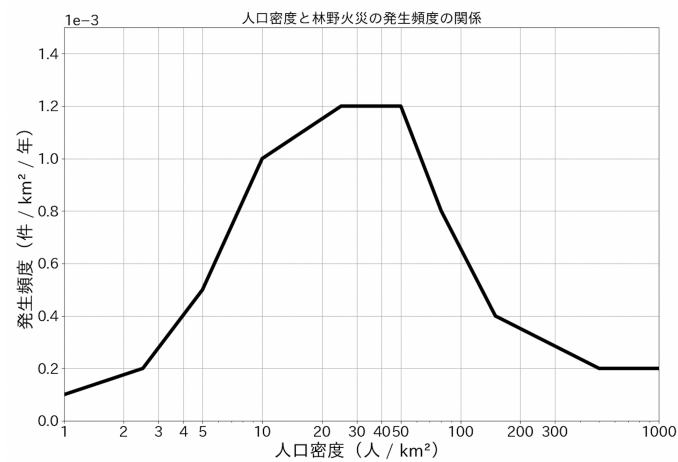


図5.6 本業務で作成した人口密度と林野火災の発生頻度の関係
(図5.4の読み取り値(表5.2)をプロット)

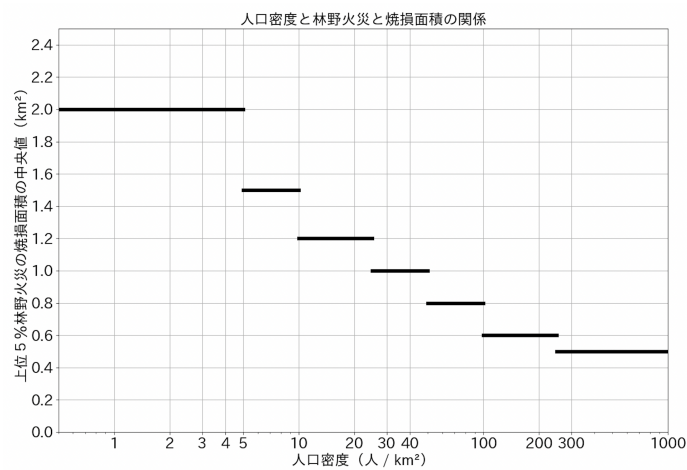


図5.7 本業務で作成した人口密度と林野火災と焼損面積の関係
(図5.5の読み取り値(表5.3)をプロット)

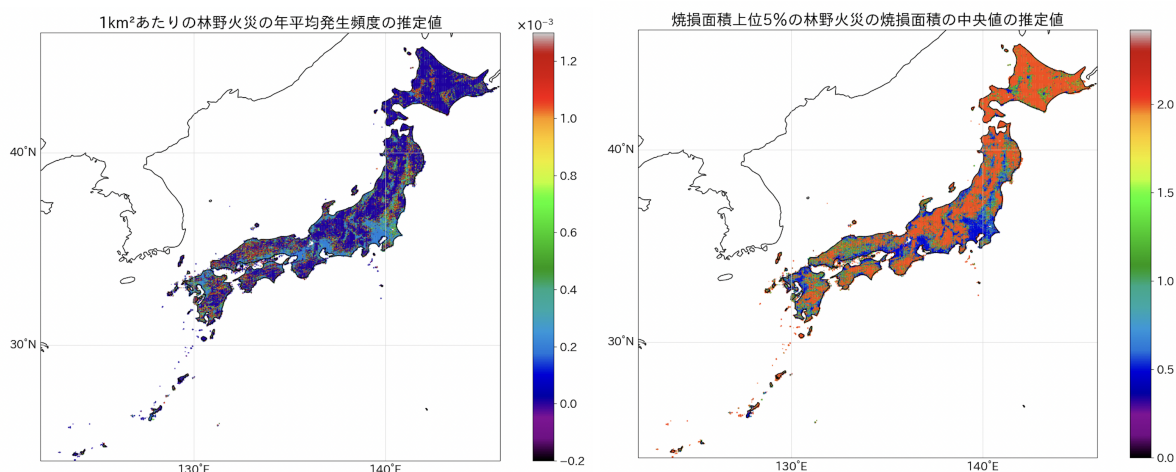


図5.8 人口密度から推定した1kmメッシュの林野火災の発生頻度(左)と焼損面積(右)

③採用した手法の評価・検証

本業務で作成した人口密度から林野火災の単位面積あたりの発生頻度を算出する式と、人口密度から林野火災の焼損面積を算出する式の評価を実施した。評価は、作成した式から算出された林野火災の発生頻度と、焼損面積を都道府県ごとに平均し、Tougeら(2024)^[12]が発表している都道府県ごとの日本の林野火災の発生件数の割合と、焼損面積との比較を実施した。その結果を図5.9、図5.10に示す。

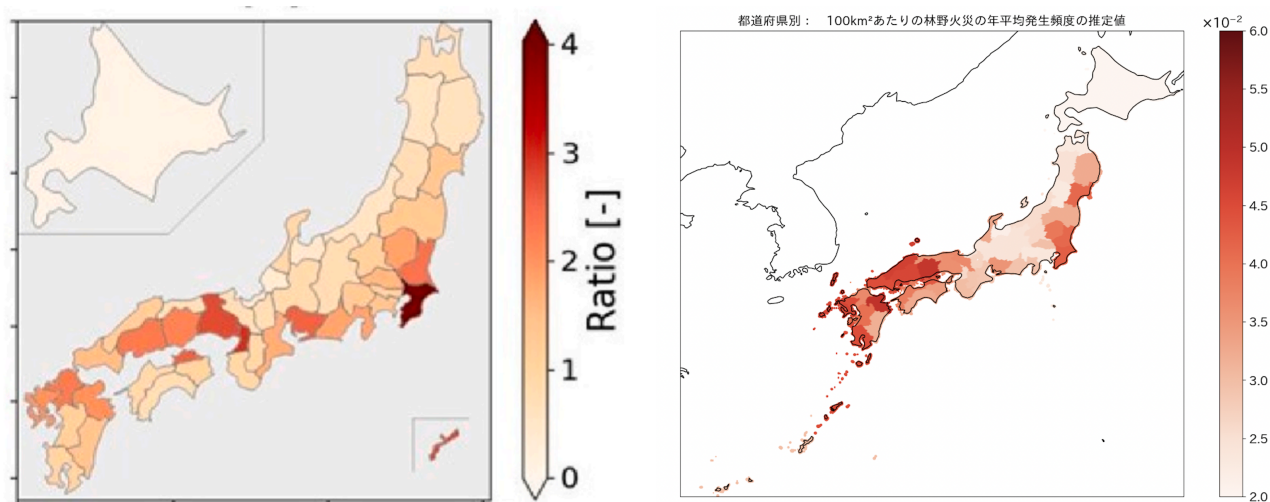


図5.9 林野火災の都道府県別、年平均発生件数(1995～2020年、100km²あたり) 左: Tougeら(2024)の結果、右:本調査の計算結果

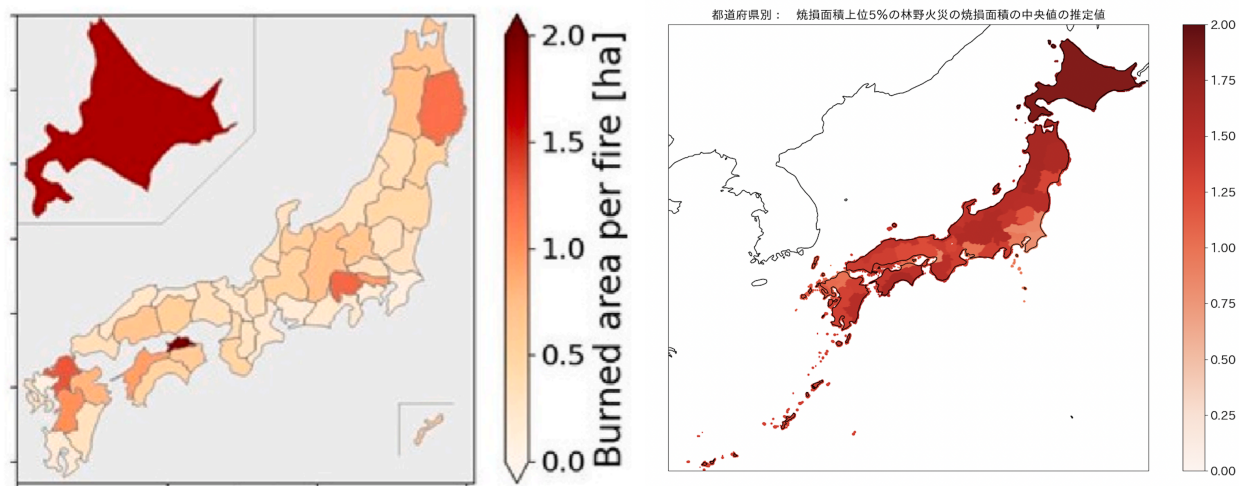


図5.10 林野火災の都道府県別、一件あたりの年平均焼損面積(1995～2020年)
 左:Tougeら(2024)の結果、右:本調査の計算結果

林野火災の発生件数の割合については、関東地方の千葉県、茨城県において周囲と比較して高いこと、また近畿地方の兵庫県、中国地方の岡山県、広島県が周囲と比較して高いという傾向に類似が見られた。一方で、中国地方の鳥取県、島根県においては、推定した林野火災の発生件数の割合は過大に出ていることがわかった。これは、年積算降水量の1990～2020年の平均値(図5.11)によると、中国地方の島根県、鳥取県においては、年積算降水量の平均値が高いため、林野火災が発生しにくい気象条件であったのが理由と考えられる。また、千葉県、茨城県は、年積算降水量の傾向が、関東地方の他の県と変わらないにもかかわらず、発生頻度の割合は周囲と比較して高い県であることがわかった。これらは、人口密度による林野火災発生件数割合と傾向が類似していることから、気象要因だけでは表すことができない人口による発生件数の傾向を推定できていると言える。

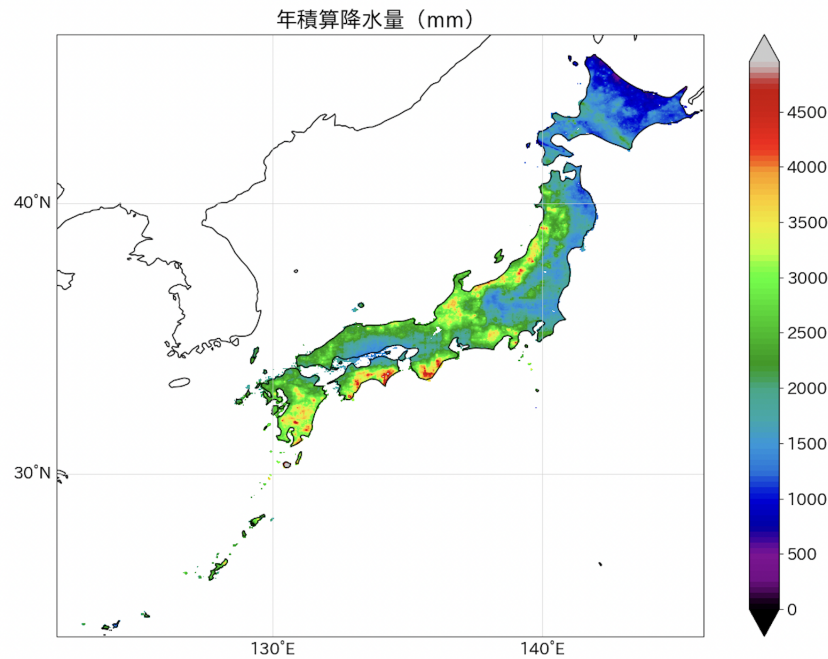


図5.11 1990～2020年の気象庁解析雨量¹⁰から算出した年積算降水量の平均値

林野火災の焼損面積については、関東地方の千葉県において周囲と比較して小さい、北海道が周囲と比較して大きいという類似が見られた。一方で、東日本の日本海側や九州・四国地方の南部など降水量の比較的多い地域においては、算出した林野火災の焼損面積はやや過大に出ていること、岩手県、香川県、福岡県、山梨県においては過小であったことがわかった。岩手県、香川県においては、平成29年に413ヘクタール焼失した岩手県釜石市の林野火災や、平成14年に160ヘクタール焼けた香川県丸亀市の林野火災、平成16年に122ヘクタール焼けた香川県直島町の林野火災などの数件の大規模火災に平均値が影響を受けたためであると思われる。

5.2 人口密度による林野火災指標の作成

これまで、人口密度から林野火災の発生頻度、焼損面積について議論してきたが、運用を考慮して人口密度による総合的な影響を示す人口密度による林野火災指標が必要である。5.1で作成された人口密度による林野火災の発生頻度、焼損面積を推定する式を用いて、人口密度による林野火災指標を下記のように作成した。

¹⁰ 気象庁解析雨量:気象庁・国土交通省が保有する気象レーダーの観測データに加え、気象庁・国土交通省・地方自治体が保有する全国の雨量計のデータを組み合わせて、1時間の降水量分布としたもの。業務では、提供されている期間で最も細かい空間解像度である1km四方となるように内挿したものを使用した。

$$k = y \times z \quad (4)$$

ここで k は林野火災指標、 y は単位面積あたりの発生頻度[件/ km^2 /年]、 z は一件あたりの焼損面積[km^2 /件]を示す。単位面積 1km^2 の区域を考えたとき、年平均で y という頻度で林野火災が区域内に発生することが推測され、また発生した林野火災1件の焼損面積の目安は z である。加えて、発生地点が区域内の林野火災でも区域外まで焼損が広がる可能性がある。そういった可能性も含めて、 k の解釈として、林野火災1件の焼損面積の目安である z に頻度 y を乗じることによって、単位面積 1km^2 の区域内で発生した林野火災の年平均焼損面積の指標と見なすことができる。また、 k に都道府県の面積をかければ、都道府県の年平均総焼損面積の目安を算出することができる。図5.12に作成した人口密度による林野火災指標を示す。

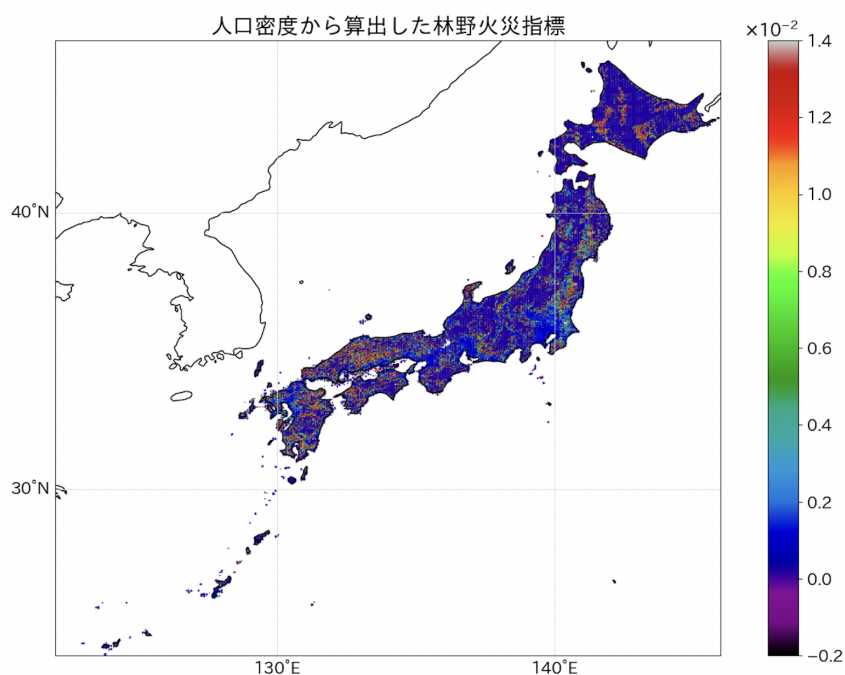


図5.12 人口密度から算出した林野火災指標

作成した指標を検証するために、実際の1年間の総焼損面積と比較を実施した。図5.13に各都道府県の林野火災の1995～2020年の年平均焼損面積と作成した林野火災指標を示す。

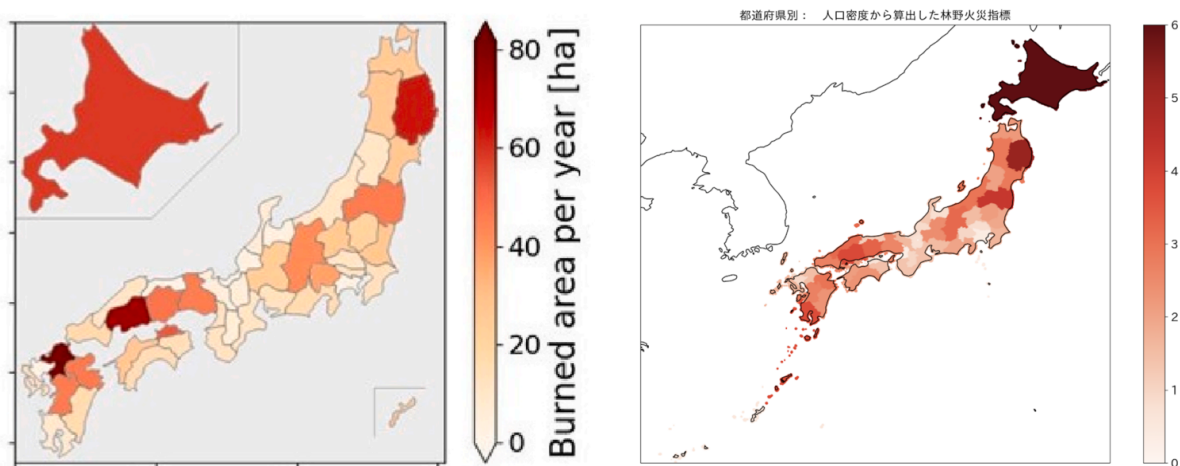


図5.13 Tougeら(2024)による各都道府県の林野火災の1995～2020年の年平均焼損面積(左)と人口密度から算出した林野火災指標

その結果、北海道、岩手県、福島県、長野県、広島県においては、年平均焼損面積と人口密度による林野火災指標はどちらも値が大きく類似性が見られた。一方、降水量が多い新潟県や四国南部、九州南部は実際よりも過大に、降水量が少ない香川県は実際よりも過小に出ていることが確認できた。

これらのことから、人口密度による林野火災指標は有用であり、実際の気象状況を含めた林野火災危険度指標と組み合わせて運用することが重要であることがわかった。

人口密度による林野火災指標と林床可燃物含水比から作成した林野火災発生危険度指標とを組み合わせる方法においては具体的な検討ができなかったため、次年度への課題としたい。

第6章 運用に向けての課題

本業務において、運用化への課題として挙げられた項目は下記のとおりである。

1. 強風時の延焼速度の閾値の最適化
2. 人口密度による林野火災指標の適用方法の検討
3. 広く一般に分かりやすい「危険度Index」の作成
4. 「危険度Index」の運用方法の検討

それぞれについて詳細を記載する。

1. 強風時の延焼速度の閾値の最適化

第4章において、強風時における林野火災延焼危険度の設定を実施し、足利の事例から延焼速度が400m/h 以上のところを林野火災危険度とした。本来であれば、数多くの事例から検討し、閾値の最適化を行うのが望ましい。これらは次年度への課題とする。

2. 人口密度による林野火災発生・拡大リスクの閾値の設定

第5章において、人口密度による林野火災指標の作成・検証を実施した。一方で、実運用を想定し、どのように林床可燃物含水比と組み合わせるかの検討・実火災事例での検証が実施できていないため、次年度への課題とする。

3. 広く一般に分かりやすい「危険度Index」の作成

本業務の最終目標は、林野火災発生危険度を予測するシステムを構築し、林野火災発生危険度を一般に広く普及させることである。今年度の業務を通じ、強風時における林野火災延焼危険度の設定や人口密度による林野火災の発生・拡大リスクの指標化を行った。一方で、課題1、2にも挙げたとおり、これらの危険度の検証が必要であり、最終的に全リスクを統合した危険度indexの作成が重要である。これについては次年度への課題とする。

危険度indexの作成案を図6.1に示す。ここでは、林床可燃物含水比による林野火災発生危険度指標、強風による延焼危険度指標、人口密度による林野火災指標をそれぞれindex化したのち合算し、総合的な林野火災発生危険度指標を算出している。合

算する際には、林床可燃物含水比から求められた林野火災発生危険度指標に最も重みがつくようにしている。普及に向けた危険度indexの適当な更新頻度の検討も含め、具体的な検討は次年度への課題とする。

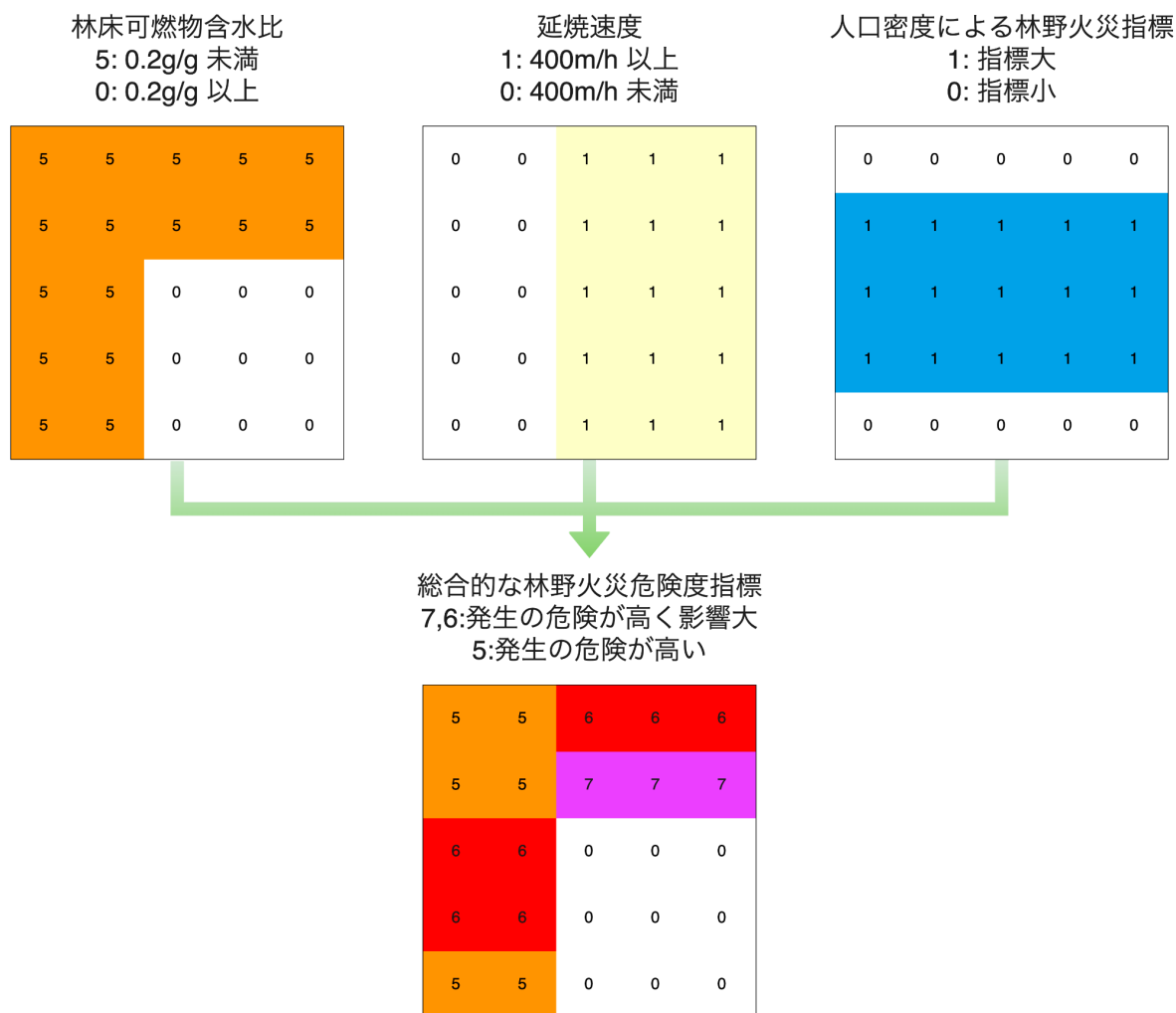


図6.1 危険度indexの作成案

4. 「危険度Index」の運用方法の検討

林野火災発生危険度を一般に広く普及させるためには、誰もがシステムを構築・運用できる形を取らなければならない。よって、本業務で構築したシステム・ソースコード全体を公開し、コードを入手した機関においてシステムの再現が容易に可能であるものにすることが重要である。一方で、第2回委員会においては、本業務で構築したシステムで作成した林野火災発生危険度のみを開示・運用してほしいとの意見もあった。これらは今年度検討することはできなかったもので、効果的な運用体制の検討や、円滑に運用するための手順書の作成を含め、次年度への課題とする。

第7章 まとめ

本業務においては、令和4年度業務において課題となっていた下記4項目について実施した。

1. 森林現況反映のための樹冠密度データ定期更新システムの検討・構築
 2. 土壌水分量の影響(積雪・融雪の影響)把握の検討
 3. 強風時における林野火災延焼危険度の検討
 4. 人口密度による林野火災指標の検討
-
1. 森林現況反映のための樹冠密度データ定期更新システムの検討・構築では、クラウドサービス(AWS)を用いて、可用性が高くランニングコストが低い自動更新システムを構築した。
 2. 土壌水分量の影響(積雪・融雪の影響)把握の検討では気象庁の解析積雪深データを用いて、積雪なし・ありでの林床可燃物含水比の変動を、過去の火災事例で検証を実施した。
 3. 強風時における林野火災延焼危険度の検討では、Rothermelの延焼速度予測式から、延焼速度を推定し、過去事例での検証を実施した。また、林野火災危険度指標の閾値を設定した。
 4. 人口密度による林野火災指標の検討では、人口密度より林野火災発生頻度、焼損面積を推定する式を作成・検証し、両者を掛け合わせた総合的な人口密度による林野火災指標の検討を行った。

また、本業務を通じて、実用化する上での課題を抽出・整理を行い、次年度取り組むべき事項を明確にした。

【参考文献】

- [1]Rothermel, R.C. (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-115 : 1-40
- [2]Rikimaru, A. (1996) LANDSAT TM Data Processing Guide for Forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model. ITTO Workshop on Utilization of Remote Sensing in Site Assessment and Planning for Rehabilitation of Logged-Over Forests, Bangkok, 30 July-1 August 1996, 1-8.
- [3]玉井幸治・吉藤奈津子・高橋正義・勝島隆史・後藤義明(2019), 林床可燃物含水状態の推定モデルによる森林林野火災発生危険日出現日数の算出, 水利科学62巻6号, p.84-98
- [4]林野火災発生情報(林野庁)
(https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/yamakaji/con_5.htm)
- [5]後藤義明, 玉井幸治, 深山貴文, 小南裕志(2005), 日本で発生する山火事の強度の検討, Rothermelの延焼速度予測モデルを用いたByramの火線強度の推定, 日本森林学会誌 87巻3号 p.193-201
- [6]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/manage/contents/upload/633fc645d8380.pdf>)
- [7]林野庁 原因別出火件数(平成29年～令和3年の平均)
(https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/yamakaji/con_3.html)
- [8]Syphard, A. D., Radeloff, V. C., Keeley, J. E., Hawbaker, T. J., Clayton, M. K., Stewart, S. I., Hammer, R. B. (2007). Human influence on California fire regimes. *Ecol. Appl.*, 17(5), 1388-1402.
- [9]Syphard, A.D., Radeloff, V.C., Hawbaker, T.J., Stewart, S.I. (2009). Conservation threats due to human-caused increases in fire frequency in Mediterranean-climate ecosystems. *Conserv. Biol.* 23, 758-769.
(<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01223.x>)
- [10]Archibald, S., Roy, D. P., van Wilgen, B. W., & Scholes, R. J. (2009). What limits fire? An examination of drivers of burnt area in southern Africa. *Global Change Biology*, 15(3), 613-630. (<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x>)
- [11]Archibald, S., Scholes, R. J., Roy, D. P., Roberts, G., Boschetti, L. (2010). Southern African fire regimes as revealed by remote sensing. *Int. J. Wildl. Fire* 19, 861-878.
(<https://doi.org/10.1071/WF10008>)
- [12]Touge, Y., Shi, K., Nishino, T., Sun, C., Sekizawa, A. (2024). Spatial-temporal characteristics of more than 50,000 wildfires in Japan from 1995 to 2020. *Fire Safety J.* 142. (<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104025>)