
解 説

推計気象分布への日照時間の要素追加について Addition of new element “sunshine duration” to weather analysis map

今井 崇人¹・若山 郁生¹・小林 健二¹・北村 智文¹・
塚本 暢¹・丸山 拓海¹・林 昌宏²

要 旨

推計気象分布は、アメダスや気象衛星の観測データなどをもとに推計した面的な気象実況情報で、2016年3月から天気、気温の要素について気象庁で運用開始しており、2020年9月からは日照時間の要素を加えた。この日照時間は2021年3月以降、気象台・特別地域気象観測所以外のアメダス地点における日照計観測の代替データとしても用いられている。本稿では、推計気象分布の要素として新たに追加された日照時間について、算出方法、精度、応用的な利用例を解説する。日照時間は、ひまわり8号・9号の日本域観測の2.5分ごとに日照確率を計算し、日照の有無を判定し、日照有りの時間を積算して算出する。日照確率の計算には、機械学習「勾配ブースティング木」を用いる。気象台・特別地域気象観測所における観測値を教師データ、衛星観測及び数値予報データ等を入力データとする。可視画像で雲域との区別が困難な晴天積雪域における日射の有無を判定するため、機械学習に氷晶判別に有効な近赤外バンドの衛星データも入力し、さらに機械学習とは別に移動する雲の有無の情報を用いる。また、1kmメッシュ標高データに基づいた山影検出を行う。前1時間日照時間についてアメダス観測と比較した精度は、BIASが+0.73分、RMSEが8.26分である。アメダス観測との差は主に、晴天積雪域の誤判別による過少傾向と、樹木等の局所的な障害物がもたらす日射遮断の有無の違いによる過大傾向である。

¹ 大気海洋部業務課気象技術開発室

² 気象研究所台風・災害気象研究部
(令和4年10月17日発行)

1. はじめに

推計気象分布（若山ほか，2020）は，標準地域メッシュ³の3次メッシュ（1x1 km²格子，以後「1km メッシュ」とする）毎・1時間ごとに推定した面的な気象実況情報で，地上気象観測の主要要素を扱う。2016年3月に運用を開始し，2022年9月現在，天気・気温・日照時間の要素を定常的に作成している。面的かつ広範囲な観測が可能な衛星やレーダーによるリモートセンシング観測データと，正確な観測が可能な地表の測器による直接観測データを組み合わせることで，広範囲に亘る比較的正確な面的情報を作成している。この方式は，解析雨量（宮城ほか，2013），解析積雪深，全球日別海面水温解析（栗原ほか，2006）といった気象庁の面的な実況情報でも採用されている。

本稿では推計気象分布の要素として2020年9月に追加された日照時間を紹介する。日照時間は気象・気候状況の把握に有用な情報で，その面的情報は農作物の育成支援，太陽光発電の効率化，熱中症対策等への活用が期待される。日照時間は太陽から地上に届く直達日射量が120 W/m²以上ある時間の長さで定義⁴され，アメダスのJMA-10型測器は波長帯が300-2,500 nmの放射を受光して観測している（英弘精機株式会社，2010）。地上測器による日照時間の観測は，2021年2月の時点では約900箇所のアメダス地点で行っていた。しかし，2021年3月のアメダス気象計更新の際に観測要素の見直しが行われ，日照時間は約150箇所の気象台・特別地域気象観測所（以降「気象官署等」とする）のみで観測を継続し，他のアメダス地点では推計気象分布（日照時間）が代替として提供されることとなった⁵。

日照時間は，地上での測器による観測では偏在する

雲の影響を受けるため近隣の観測点から推定することは限界があり，面的な把握には衛星観測が有効である。また，衛星観測であれば樹木の影響を心配する必要はない。しかし，静止気象衛星「ひまわり」の7号までは，観測時間間隔が10分より長く，短い期間の日照時間を算出するには頻度が十分ではなかった。ひまわり6号・7号の観測データから日照時間を算出し，国連食糧農業機関（FAO）に配信していたが，これは1時間分解能の1日当たりの値で，気候モニタリングの目的で利用されていた。他にも気象衛星に基づく日照時間データとして Good（2010）や Kothe *et al.*（2013）等があるが，これらも1日や1か月当たりの値であり，気候調査の目的で作成されていた。ひまわり8号・9号の高頻度観測によってはじめて推計気象分布（日照時間）は作成可能となった。

本稿では，推計気象分布（日照時間）に関して，第2章で情報諸元，第3章で算出方法，第4章でアメダス観測値との比較，第5章で応用的な利用例を解説する。

2. 情報諸元

算出範囲は日本国内の陸域（南鳥島，沖ノ鳥島を除く⁶）である。推計気象分布の値（以降「推計値」とする）は1kmメッシュに含まれる領域の代表的な値であるため，地上のある地点で日照計が観測する値（以降「観測値」とする）と異なることがある。

日照時間の推計値として，前1時間合計と前10時間合計を算出している（第1表）。前1時間合計は，GRIB2形式データが気象業務支援センターから配信⁷され，分布図が気象庁ホームページに掲載されている。前10時間合計は，前1時間合計の算出に使用すると

³ 総務省統計局：地域メッシュ統計について。（https://www.stat.go.jp/data/mesh/m_tuite.html，2022年9月30日参照）

⁴ 第十回 COMMISSION FOR INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION の最終報告：https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=8618（accessed 2022-9-30）による。Recommendation 16 (p.85)を参照。

⁵ 気象庁報道発表資料。（https://www.jma.go.jp/jma/press/2102/26b/press_20210226.html，2022年9月30日参照）

⁶ 主要な入力データであるひまわり8号・9号の日本域観測の領域外であるため。

⁷ 情報の仕様・利用法・注意点は配信資料に関する仕様（気象庁観測部 2020a）・技術情報（気象庁観測部 2020b）を参照されたい。

第 1 表 情報諸元

	前 10 分間日照時間 (速報値・確定値)	前 1 時間日照時間 (確定値のみ)
内容	前 10 分間に日照のある時間の長さ 品質情報	前 1 時間に日照のある時間の長さ 品質情報
算出領域	日本陸域 (南鳥島, 沖ノ鳥島を除く)	
空間解像度	地域標準メッシュの 3 次メッシュ (1x1 km ² 格子)	
算出頻度	10 分毎	1 時間毎

ともにアメダス日照計データの代替として利用される。前 10 分間合計は、地域気象観測報 (BUFR 報) として利用する速報値に加え、多少遅れて正確な確定値も算出する。また、入力データの欠落度合いを品質情報として付加している。速報値・確定値・品質情報の詳細は 3.3.2 節を参照されたい。

3. 算出方法

日照時間推計値の算出には気温推計値と同様に、地点毎の直接観測値 (以降「地点データ」とする) と面的な非直接観測データ (以降「面的データ」とする) を組み合わせる方法を採用する。時間の長さの情報である日照時間においては時間分解能が重要である。しかし日照は、上空の雲やエアロゾル等に左右され、地上を漂う空気の性質である気温ほどの空間連続性が期待できないため、地点データを水平方向に単純に内挿・外挿したデータに強く依存して推定すると誤差を生じる。このため、面的データには高い空間解像度だけでなく時間分解能も求められる。

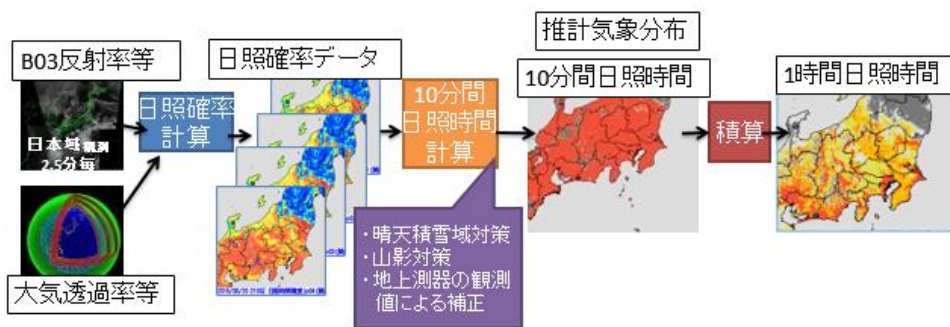
面的データは、各種データから日照時間に関係する情報を抽出したものをを用いる。日照時間の定義と太陽定数を比較して考えると、日照の有無は「大気上端における日射の約 91% が①雲・②大気・③地形に遮断されるかどうか⁸⁾」で決まる。①雲による日射の遮断は、衛星観測の可視反射率データと対応が良い⁹⁾。ひまわ

り 8 号・9 号 (Bessho *et al.*, 2016) の日本域観測は、頻度が 2.5 分間隔である。空間解像度は可視バンド B03 のデータで約 0.0075° (日本付近の値で概ね 0.75km 程度) と 1km メッシュと同程度で、ある程度の時間空間的な局所性表現を期待できる。②大気による日射の遮断 (主に水蒸気・オゾンの吸収による) は、数値モデルデータに基づいた放射伝達計算結果が利用可能である。③地形による日射の遮断は、太陽方向と標高データに基づいた幾何学計算で見積もることができる。

そこで日照時間の算出は、ひまわり 8 号・9 号の日本域観測時刻の 2.5 分ごとに日照確率 (雲・大気により日射が遮断される可能性) を計算し、これから日照有無を判定し、日照有りの時間を積算する方法をとる (第 1 図)。算出の過程で日照確率を導入することにより、地点データと面的データの融合が非常にスムーズになっている。日照時間は局所性が高くかつデータの出現頻度が上限値と下限値に集中する特性があるため、仮に気温の推計方法に倣って日照時間そのもので融合しようとする、晴れ域と曇り域がはっきり分かれている地域にあっても中間的な日照時間値の領域がだらだらと広がって、不自然な日照時間分布になってしまうことがある。晴れと曇りの中間的な領域の日照時間の算出を衛星画像から得られる雲パターンに基づいて実施するために、日照確率を導入し、確率から日照の有無を判別する閾値調節を地点データで

⁸⁾ 日照の有無の判定に用いる直達日射量は太陽方向を向いた単位面積当たりの量なので、水平面で定義される全天日射量のように日が傾いた時に幾何学的な理由で量が減ることはない。

⁹⁾ 基本的に可視反射率の値は、厚い雲域では大きく、薄い雲域では中程度で、晴天域はたいはい小さい値をとり、日照確率とおおむね逆相関にある。



第 1 図 算出処理の流れ

ある気象官署等での日照計観測値に基づいて行うこととした (3.3.1 節を参照)。

3.1 算出に利用するデータ

日照時間算出に利用するデータを第 2 表にまとめる。

ひまわり 8 号・9 号のデータは、日本付近を 2.5 分ごとに観測する「日本域観測」に基づく。可視赤外放射計 (以降「AHI」とする) による観測データのうち、B03 反射率 (以降「可視 0.64 μm 反射率」とする)、B05 反射率 (以降「近赤外 1.61 μm 反射率」とする)¹⁰、B13 輝度温度 (以降「赤外 10.4 μm 輝度温度」とする)。数

第 2 表 算出に利用するデータ

分類	データ名称	備考
静止気象衛星 ひまわり 8 号 9 号	可視 0.64 μm , 近赤外 1.61 μm 反射率	B03, B05 反射率
	赤外 10.4 μm 輝度温度	B13 輝度温度
数値予報	大気鉛直プロファイル (気温・水蒸気量・オゾン量)	全球数値予報モデル, 全球化学輸送モデルに基づく
放射伝達関連情報	赤外 10.4 μm 輝度温度鉛直プロファイル	気象衛星センタープロダクト 雲頂高度の計算に使う
定数	大気透過率テーブル	RSTAR で計算
	積雪面近赤外 1.61 μm 反射率テーブル	ARTMASS で計算
地形	標高	国土数値情報に基づく
地上気象観測	前 1 分間日照時間	気象官署等におけるデータ
	前 10 分間日照時間	

¹⁰ B03・B05 反射率データには、AHI の感度劣化に応じた補正を反映している。補正の詳細は以下 URL のページ後半「観測データの処理方法の変更履歴」を参照。 (https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/oper/event_H8.html, 2022 年 9 月 30 日参照)

値予報データは、数値モデル¹¹ (GSM) 及び全球化学輸送モデルの予報値を使う。放射伝達関連情報としては、上記数値モデルデータから気象衛星センターの放射伝達計算プロダクトが作成した赤外 10.4 μm 輝度温度鉛直プロファイル を、雲頂高度の見積りに使う。大気透過率テーブルは、波長 0.2-4.0 μm の放射¹²の大気透過率であり、可降水量・オゾン全量・太陽方向ごとに放射伝達モデル RSTAR (Nakajima and Tanaka, 1986) を用いて計算した。反射率テーブル (以降「積雪面近赤外 1.61 μm 反射率テーブル」とする)¹³は、放射伝達モデル ARTMASS (Aoki *et al.*, 1999) で計算した衛星・太陽方向毎の雪面反射率データである。日照時間算出時はこれらのテーブルから地点・時刻・大気の状態に応じたデータを取り出して使う。地形情報である標高データは国土数値情報の GIS3 次メッシュデータに基づく。地上気象観測は、気象官署等における日照時間の観測値を用いる。

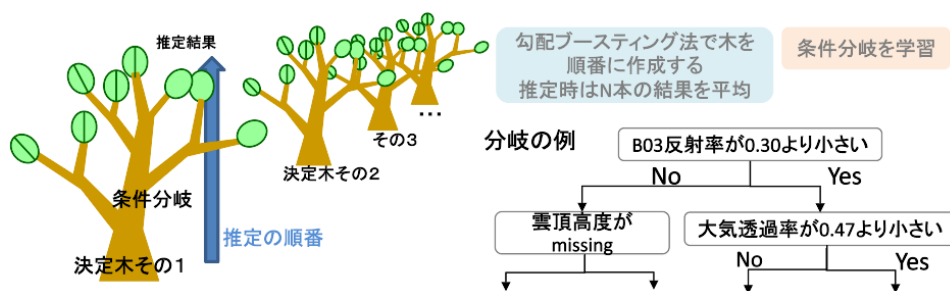
3.2 日照確率の計算

雲・大気により日射が遮断される可能性を日照確率

として求める。計算はバッチ型の機械学習 (過去の入力および教師データから作成した学習モデルを用いて最新データを推定) を基本とする。ただし、山影域 (日照確率=0) と晴天積雪域 (日照確率=1) では、通常は日射の遮断と対応の良い可視 0.64 μm 反射率が例外的に振る舞い¹⁴、かつ教師データの準備が容易でないため、別途検出を行う。

3.2.1 勾配ブースティング木による確率の計算

機械学習モデルは、勾配ブースティング木 (Chen and Guestrin, 2016)¹⁵を用いた。これは決定木型の分類器 (カテゴリーを判別する推定モデル) で、教師あり学習の推定モデルの一つである。基本構造はフローチャートに似て、これを (決定) 木の枝葉に見立てた時、枝の分岐ではどちらの枝に進むかを判断する条件として入力データの種類と閾値を、枝の先々にあたるフローチャートの到達点 (葉) では判別結果 (カテゴリーごとの確率) を、学習により設定する。学習は判別精度を最大化するように働き、1 本目の決定木では学習データ全体に対して、2 本目では 1 本目の決定木で



第 2 図 勾配ブースティング木

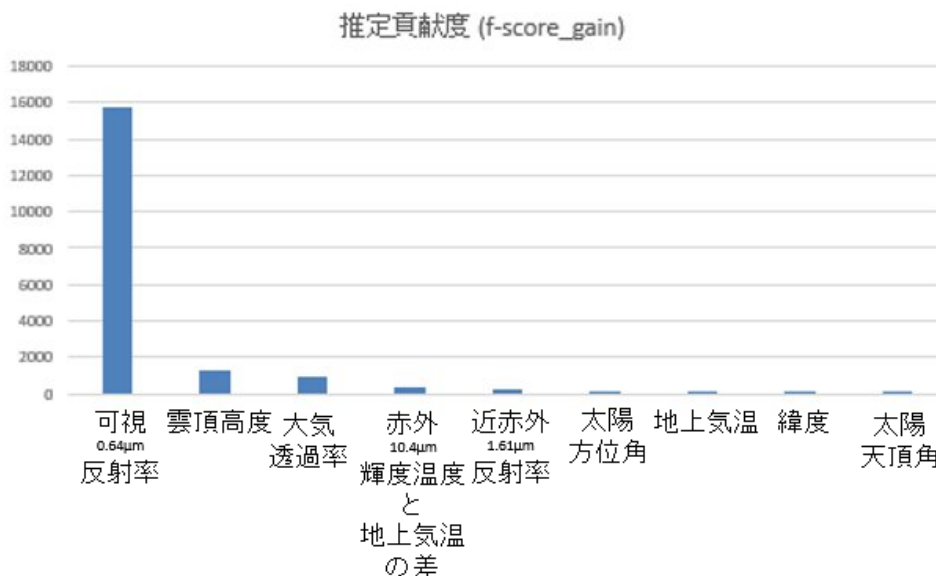
¹¹ 予報値の時間空間内挿、衛星と観測地点を結ぶ直線上における大気の大気鉛直プロファイルの見積もり、これを入力に放射伝達モデル RTTOV (Eyre, 1991) を用いた計算をしている。

¹² WMO が定義する日射の波長帯 0.29-3.0 μm やアメダス日照計の観測波長 300-2,500 nm と一致しないがその影響は少ない。太陽放射エネルギーは、可視域の 0.4-0.7 μm に 50%が、0.29-3.0 μm に 97%が集中しており、両端の波長帯では放射量が非常に小さいためである (WMO の Guide to Instruments and Methods of Observation : https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3153, accessed 2022-9-30)。

¹³ 気象庁気象研究所気象予報研究部第 4 研究室提供。

¹⁴ 可視 0.64 μm 反射率の値は日照確率と概ね逆相関 (大と小、小と大が対応) にあるが、山影域は可視 0.64 μm 反射率が小さく日照無し (小と小が対応) で、晴天積雪域は可視 0.64 μm 反射率が大きく日照有り (大と大が対応) である。

¹⁵ 使用したライブラリは xgboost バージョン 0.90 であり、学習パラメータに softprob 関数による多クラス分類を用い、その他のパラメータはいくつかの値を試行して最適なものを選び、学習率 0.1、決定木の深さ (枝分岐の深さ) は 7、反復回数 (決定木の数) は 100 とした (その他のパラメータは xgboost のデフォルト設定とした)。



第 3 図 入力データが目的変数推定の改善に貢献した度合い (gain 設定で見積もった f-score)

誤判別した事例に対してといった具合にできるだけ誤判別事例が解消されるように順次決定木を作成する(この仕組みが「勾配ブースティング」にあたる)。最終的な判別は、すべての決定木の出力の平均とする。誤判別事例(判断がむずかしい事例)にこだわらない前側の決定木で基本的な判別性能を確保し、これを補完する後ろの決定木の出力と平均することにより、安定かつ精度の高い推定を可能としている。

勾配ブースティング木は、機械学習一般に言われるように過学習を起ささないよう学習パラメータの設定には注意が必要であるが、特定の状況でのみ判別に貢献する入力データや欠測値のとり扱いをしやすく、入力データ同士の相関を多重回帰と比べて気にしないで良い特徴がある。各決定木における入力データの扱いを確認できるため、モデルの判断の根拠を調べることができる。本処理において各入力データ(後述)が目的変数推定に貢献した度合いは第3図のようになる。可視 0.64μm 反射率が最も大きく、これに雲頂高度や大気透過率が続いた。

入力データは、日照確率と対応の良い可視 0.64μm 反射率を基本に、時間や季節、大気の状態による日

射量の違いを考慮するために大気透過率・太陽天頂角を、雲域と晴天積雪域の区別のために近赤外 1.61μm 反射率・赤外 10.4μm 輝度温度・地上気温・雲頂高度・太陽方位角・緯度を用いた。但し、日照時間は直達日射量から算出する量であるため、雲の厚さ・雲頂高度に関するデータは推計地点に入射する太陽放射が雲に侵入する緯度経度におけるデータを用いた。

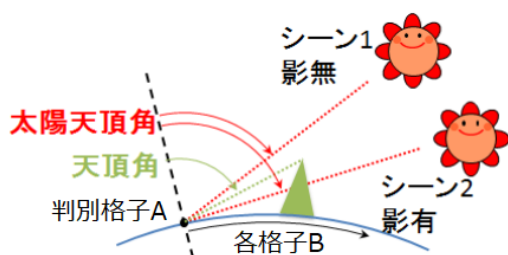
教師データには、気象官署等における前 1 分間日照時間観測値を用いた。日照時間が 30 秒以上の場合を日照有りとして扱う。

学習に用いたデータの期間は 2017 年 5 月-2018 年 4 月で、そのうち、2/3 (日付が 3 の倍数でない日) を学習に、残りを評価に使用した。ただしデータの中で、地上気象観測日照計が障害物の影に入る¹⁶・太陽天頂角が 89.5 度より大きくなる・次小節で解説する山影域に入る場合は除外している。4.2.2 節で示すように、障害物の影を推計値と観測値で整合的に扱うことが困難なためである。

¹⁶ 2012~2017 年の 6 年間で日照時間データがすべて 0 秒となった時間帯を月の 10 日ごとに集計して判別。

3.2.2 山影域の判別

山影の扱いは、機械学習による日照確率計算では考慮しないため、別途、算出時刻・格子ごとに判別を行う。第4図に判別の模式図を示す。判別格子Aから各格子Bの標高に向かう直線の天頂角よりも太陽天頂角が大きい場合に山影域と判別する。山影域は日照確率を0として扱う。



第4図 山影域の判別の模式図

3.2.3 晴天積雪域の判別

晴天時の積雪を雲域と誤って判別しないよう、機械学習による日照確率計算では積雪判別に有効な変数を入力に加えた。しかし、気象官署等は多雪地に少なく、多くの教師データを得られないため、多雪地での積雪の影響の学習が不十分であると分かった。そこで別途、移動する雲がない領域を抽出しこの中から晴天積雪域を検出する。判別した領域は、日照確率を1として扱う。

移動する雲が無い領域の抽出は、各領域の可視0.64 μm 画像パターンが5分間に移動する量¹⁷に基づく。抽出したい領域の移動量は、衛星画像全体のずれと同程度で、周辺の晴れ域と同様であることが期待される。そこで移動量の空間一様性¹⁸の高い領域の中で、日照確率が高い領域の平均移動量をまず計算し、これと同じ移動量を持つ領域を検出する。抽出結果は、当該時

刻だけでなく2.5分後、5分後の情報も利用可能な場合は用いる。これらの追加により、当該時刻まで晴れが続いた場合だけでなく、当該時刻から晴れ始める場合も検出できる。

移動する雲が無い領域の中から積雪が見込まれる条件(近赤外1.61 μm 反射率が積雪面近赤外1.61 μm 反射率より小さく、可視0.64 μm 反射率が大きく、雲頂高度が低く、地上気温が低い)をもとに晴天積雪域を検出する。この追加条件は、日照確率を1に設定する領域を積雪域に限定し、後述する日照確率閾値調節が働く余地を大きくしている。

3.3 日照時間の計算

日照時間は、日照確率が閾値よりも大きい日照有りの期間を積算して計算する。

3.3.1 日照確率の閾値

日照確率の閾値は、気象官署等を含むメッシュにおいて日照確率データから様々な閾値で前10分間日照時間を計算し、これが観測値と整合するように設定する。このため二種類の方法を用いる。

一つ目の方法では、過去の長期間のデータから平均BIASが最も0に近くなる形での整合をとる。閾値は太陽天頂角と日照確率時間変動で層別化した層ごとに計算し、利用する。これは機械学習が推定する日照確率の振る舞いが、太陽天頂角とともに変動¹⁹し、また晴れ曇り境界・小さな積雪域で挙動が変わること(4.2.1節参照)を勘案している。第5図に日照確率閾値(期間2017年5月-2018年4月のデータに基づく)を示す。

¹⁷ 移動量計算には相互相関法を用いる。林、下地(2013)に詳しく解説されている。

¹⁸ 周辺も含めた移動量データから計算したエントロピーが小さく、方向一様性指数が大きい場合に、一様性が高い。これらの扱いは宮川、松本(2010)、Matsumoto and Imai(2008)に詳しい。

¹⁹ 同じ日照有りの場合でも、太陽天頂角が小さいと日照確率は大きく、太陽天頂角が大きいと日照確率が小さい傾向がある。

太陽天頂角

日照率時間変動	太陽天頂角																		
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	
0	0.720	0.738	0.707	0.656	0.663	0.688	0.692	0.705	0.706	0.678	0.677	0.674	0.659	0.612	0.563	0.490	0.437	0.360	
0.1	0.597	0.583	0.563	0.552	0.556	0.554	0.556	0.549	0.550	0.540	0.544	0.535	0.531	0.512	0.512	0.501	0.490	0.445	
0.2	0.541	0.574	0.565	0.547	0.539	0.550	0.565	0.550	0.569	0.544	0.547	0.552	0.560	0.559	0.569	0.557	0.557	0.532	
0.3	0.690	0.517	0.633	0.526	0.530	0.542	0.541	0.549	0.559	0.534	0.552	0.564	0.573	0.598	0.595	0.598	0.567	0.555	
0.4	0.757	0.770	0.510	0.634	0.475	0.575	0.507	0.528	0.532	0.572	0.586	0.533	0.569	0.620	0.655	0.675	0.661	0.624	
0.5	0.544	0.140	0.293	0.397	0.434	0.527	0.698	0.479	0.439	0.446	0.586	0.550	0.625	0.767	0.762	0.675	0.750	0.581	
0.6	0.398	0.510	0.620	0.240	0.750	0.830	0.617	0.410	0.283	0.658	0.765	0.766	0.757	0.775	0.789	0.780	0.773	0.647	
0.7	0.454	0.496	0.476	0.137	0.533	0.387	0.913	0.680	0.770	0.257	0.645	0.190	0.843	0.872	0.846	0.807	0.772	0.828	
0.8	0.475	0.475	0.487	0.853	0.477	0.497	0.173	0.610	0.260	0.150	0.428	0.897	0.713	0.948	0.900	0.102	0.940	0.856	
0.9	0.475	0.479	0.605	0.606	0.609	0.382	0.427	0.348	0.340	0.279	0.491	0.679	0.853	0.990	0.650	0.647	0.521	0.940	

第 5 図 日照率閾値. 暖色は 0.5 より大きく, 寒色は 0.5 より小さい.

二つ目の方法では, 推計値を算出する時刻にて観測値と整合する閾値を見積もり, これと一つ目の閾値の差である閾値補正量を観測地点の近隣メッシュの閾値にも反映する. 反映は気温推計値の計算で使用している「距離重み付け法」²⁰に基づくが, ここに日照時間の局所性を勘案する追加の工夫を加える. 日照時間の局所性は, 層雲や巻雲が均一に広がる領域で低く, 積雲が散在し晴れ曇りがはっきり分かれた領域で高いことが見込まれる. そこで, 日照率分布の凸凹度合いが大きいほど補正を反映する距離が短くなるよう重みを調節する. 第 6 図に, 晴れ・積雲・巻雲それぞれが広がる場合について, 可視 0.64 μ m 画像, 日照率の凸凹度合い (変数 updown) (a, c 図), 閾値補正量の分布 (b, d 図) を例示する. 巻雲が広がる場合 (上段の a, b 図), 小さい凸凹の度合いが閾値補正を行う範囲を広げ, 巻雲域の中心にあたる岩見沢における閾値補正量は, 隣接するアメダスはもとより札幌付近における算出にまで影響を及ぼす. 一方, 晴れや積雲が分布する場合 (下段の c, d 図), 閾値補正を行う範囲は狭くなる. 晴れ域にあたる岐阜や積雲が散在する名古屋における閾値補正量が貢献する範囲は 5 km 程度で, アメダス地点 (4 要素) の平均的な間隔である 21km と比べて短い.

3.3.2 前 10 分間日照時間

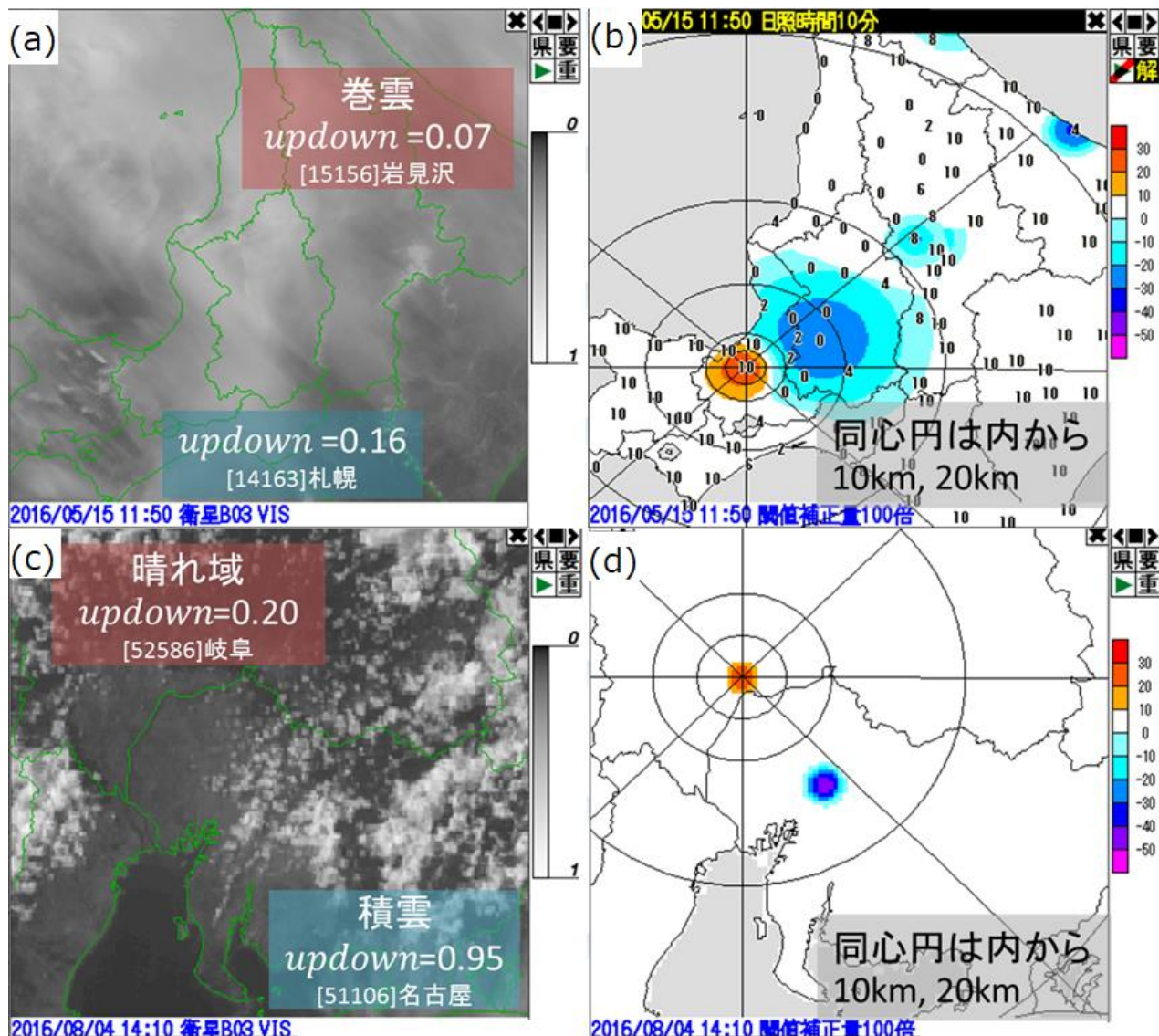
算出対象の 10 分間に含まれる 4 時刻の中で, 日照率が閾値より大きい場合に 2.5 分を加算して計算する. これは, 2.5 分の間, 日照ありもしくは日照なしの状態が継続することを仮定することになり, 算出される値は 2.5 分の倍数となる.

入力データが欠落し日照率を計算できない時刻がある場合は, 対象となる 10 分間の前後 10 分を合わせた 30 分中に存在するデータから日照率を補間したうえで, 前述の方法で日照時間を計算する. このため算出するのは常に 10 分間における日照時間である. 補間は, 前後の時刻のデータが有る場合は時間に線形な内挿で日照率を計算し, 前後どちらかにしかデータがない場合は一番近い時刻の日照率と同じ値とする. このため欠落があっても, その前後で日照率が変動しない場合には, 現実と合致した日照時間を算出できる. この状況に概ね該当する日照時間が 0 分 (常に曇り) 又は 10 分 (常に晴れ) の場合の出現頻度は, 前 10 分間日照時間データ全体の 87 %²¹を占め, この程度の割合で適切な補間の実施が期待できる.

日照時間は積算値情報であるため, 積算のもとになるデータの一部が欠落し積算する独立したデータ数が変わった場合でも, 状況によっては利用価値がある. 目的に応じた利用を可能にするため, 入力データの欠落度合いを品質情報として付加する. 前 10 分間日照

²⁰ 若山ほか (2020) の p.6 付近を参照.

²¹ 2016 年の太陽天頂角 ≤ 89.5 度である観測データにおける値.



第 6 図 (a) (c) 可視 0.64 μ m 画像と日照確率の凸凹度合い(変数 updown). (b) (d) 閾値補正量(-1 から 1 まで変動)を 100 倍した値の分布. 札幌, 岩見沢, 岐阜, 名古屋等を中心に距離とともに絶対値が小さくなる. 中心における日照時間観測値が大きい場合は閾値が下がるように補正量は負に, 逆の場合は正になる. 距離の目安として, 札幌, 岐阜を中心とした同心円を, また上段図では周辺のアメダス地点で観測した前 10 分間日照時間を重ねて示している. 上段は巻雲が拡がる場合で, 日照時間の局所性は低く (updown) は小さく, 閾値補正が広範囲にわたる. 下段は晴れ域や積雲が拡がる場合では逆に閾値補正の射程は短い.

時間の品質情報は, 第 3 表の 2 列目のように設定する. 補間処理を行わないで算出した場合は正常, 補間処理を行ったデータは準正常値, 入力データが全くなかった場合は, 資料無しとする.

前 10 分間日照時間は, ここまで説明してきた方法で算出する「確定値」のほかに「速報値」も算出する. 速報値は, 2021 年 3 月に廃止されたアメダス日照計の代替データとして, アメダス BUFR 報に格納・通報す

第 3 表 日照時間の品質情報の内容

品質情報	<前 10 分間日照時間> 日照確率のデータ数	<前 1 時間日照時間> 前 10 分間日照時間の欠落数 (6 時刻中)
正常	対象 4 時刻あり	0
やや疑わしい(準正常)	対象 4 時刻の一部なし	0-1
かなり疑わしい(資料不足)	-	2-5
値がない(資料無し)	対象・補完 12 時刻なし	6

る。アメダス BUFR 報の第一報配信時刻である観測時刻の 2 分 40 秒後に間に合うよう、前 15 分から前 5 分の時刻の日照確率データに基づき、観測値による日照確率閾値の補正は行わずに計算する。速報値は多少精度が落ちるがこれまでと同じ時刻に算出でき、気象庁ホームページの最新のアメダスページに表示される。一方、確定値は多少時刻が遅れるが正確なデータを算出しており、統計計算をして季節予報や農業などへ利用されることが見込まれる。気象庁ホームページでは「過去の気象データ検索」等の統計値に表示される。

3.3.3 前 1 時間日照時間

算出対象の 1 時間に含まれる 6 シーンの前 10 分間日照時間確定値のうち、正常値と準正常値を積算して計算する。資料不足と資料無し値は使わないため、例えば 6 時刻中 1 時刻の前 10 分間日照時間が資料不足又は資料無しの場合、算出するのは 50 分間における日照時間となる。

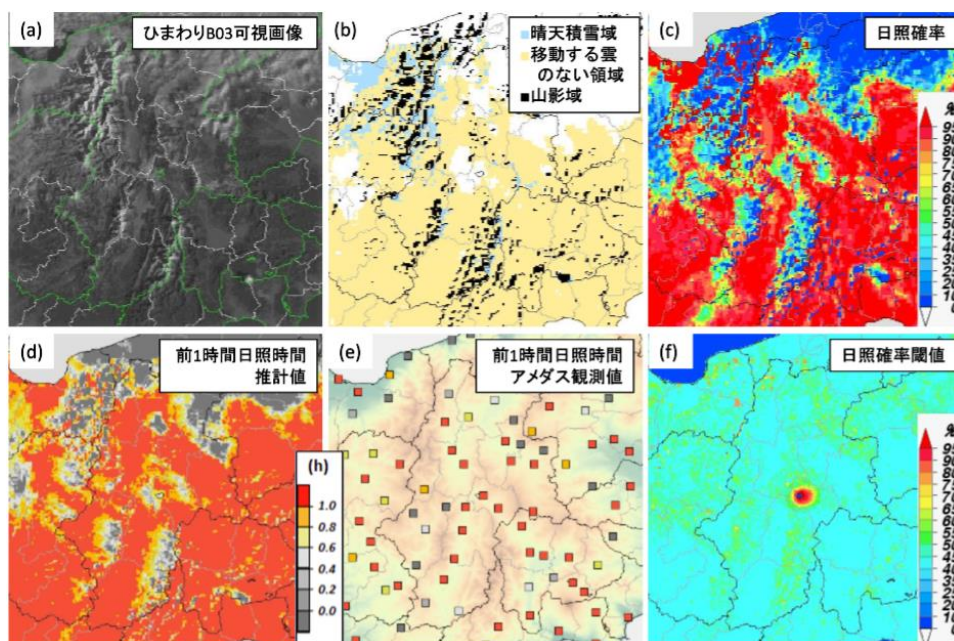
前 1 時間日照時間の品質情報は、第 3 表の 3 列目のように設定する。前 10 分間日照時間に欠落があった場合は、1 時刻ならやや疑わしい(準正常)、2-5 時刻ならかなり疑わしい(資料不足)、6 時刻なら資料なしとする²²。資料不足のデータは、気象庁では許容範囲を超えて欠けている信頼性に乏しい値として扱っている。このため、日照の有無を知る目的で利用する場

合や、長期間の積算日照時間を概算する場合には参考となるが、日照時間を定量的に把握したい場合には利用を避けることを推奨する。気象庁ホームページにおける日照時間(日照の有無でないことに注意)の分布図では、「資料不足」は「資料なし」として表示している。

3.3.4 算出例

第 7 図に算出例として、2018 年 1 月 14 日 9 時(JST)の前 1 時間日照時間と関連するデータを示す。この例は冬の朝で新潟県から長野県北部にかけて雲がかかっている。8:10 の晴天積雪域・移動する雲がない領域(積雪域を除く)・山影域 (b) で、雲がない領域は移動する雲がない領域として検出し、その中で高い山の上や富山平野は晴天積雪域として検出している。また、朝日によりできる山の西側の影を山影域として検出している。日照確率 (c) は、基本的にひまわり可視 0.64 μ m 画像 (a) の輝度(反射率)と逆相関の分布だが、晴天積雪域として検出した高い山の上や富山平野は 100 %、山影域として検出した山の西側は 0 %となっている。日照確率閾値 (f) は、日照確率時間変動が大きくなる雲域の縁辺で多少大きな値となる基本分布に、諏訪特別地域気象観測所の観測データが補正をしているが、補正を及ぼす範囲は凸凹な日照確率分布に応じて狭い。8:01-9:00 の残り 23 時刻の結果と合わ

²² 統計方法は、地上気象観測統計指針(気象庁大気海洋部, 2021)に準じる。



第 7 図 2018 年 1 月 14 日 9 時 (JST) の前 1 時間日照時間と関連するデータ。(a)ひまわり可視 0.64 μ m 画像 (輝度を強調) (8:10)。(b)晴天積雪域・移動する雲がない領域 (積雪域を除く)・山影域判別結果 (8:10)、山影域を優先して描画している。(c)日照確率 (8:10)。(d)前 1 時間日照時間推計値 (9:00)。(e)標高と前 1 時間日照時間観測値 (9:00)。(f)日照確率閾値 (8:10)。

せて見積もった前 1 時間日照時間は、(d) のようになった。新潟県から長野県北部にかけてと山影となる領域で日照時間が短く、他の領域では積雪のある地域も含めて長い日照時間を算出している。推計値はアメダス観測値と比べて (e) おおむね整合しているが山地で過大な場合がある。原因の一つとして山地に多い障害物による冬の朝の長い影が日照計にかかることが考えられる(4.2.2 節を参照)。

4. アメダス観測値との比較

4.1 統計比較

推計気象分布は、観測地点から離れた地域での気象実況を提供する情報であるため、検証は観測地点から離れた状況で行われる必要がある。しかし検証において観測値と比較すべき推計値には、通常は同地点の観測値が貢献しており不都合である。そこで、以下のことを行う。

- ・ 検証用推計値としてその最近接地点の観測値を使わずに計算した推計値を準備
- ・ 観測地点を含むメッシュにおける検証用推計値とその地点の観測値を比較

これらを行うことで、検証用推計値に寄与する最近接観測地点までの距離の平均は、観測地点間の平均程度の距離となる。なお、通常の推計値は最近接観測地点までの距離の平均が観測地点間の平均的距離の半分程度となることを考えると、検証用推計値の評価は観測地点からやや離れ過ぎた、厳しい条件での評価とも言える。日照時間では確定値の場合に観測値が推計値に寄与するが、晴れ域や積雲が散在する場合は利用する観測値が気象官署等及びその近辺のアメダス地点に限定される (3.3.1 節参照)。速報値は観測値による補正は行わないため、常に検証用推計値と推計値が同じ値となる。

2018 年 7 月から 2020 年 6 月の期間で推計値をアメ

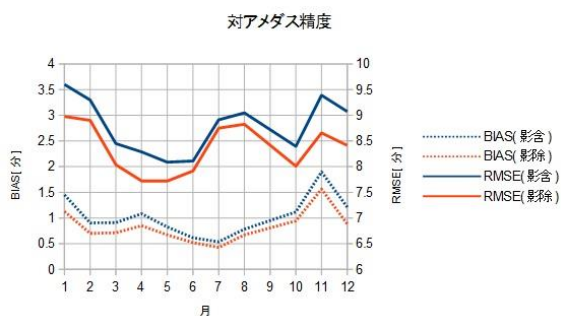
第 4 表 推計気象分布（日照時間）のアメダス観測値に対する推定精度。（影含）、（影除）の影は、アメダス付近の樹木等局所的障害物及び、3.2.2 節で見積もった山影である。

[単位：分]	BIAS（影含）	BIAS（影除）	RMSE（影含）	RMSE（影除）
前 10 分間確定値	0.16	0.10	2.15	2.09
前 10 分間速報値	0.16	0.12	2.31	2.26
前 1 時間確定値	0.91	0.73	8.65	8.26
前 1 時間速報値	0.94	0.74	8.87	8.46

ダス観測値と比較した。全アメダス地点・時刻の平均を第 4 表に示す。ここで、（影含）は全データの評価、（影除）は局所的障害物の影響下のデータをなるべく除いた評価である。局所的障害物の影響としては、3.2.2 節の山影域および観測値から推定される障害物の影を想定している（4.2.2 節の A,B,C）。

推計値はアメダス観測値と比べて過大（正 BIAS）で全時間の 1-2 %程度である。この正 BIAS は主に、1km メッシュの領域中においてアメダス地点に局所的に存在する樹木などの障害物の影がもたらす BIAS に対応しており、実際（影含）と比べて（影除）の BIAS は小さい値となっている。前 10 分間日照時間の RMSE は 2 分台で全時間の 23 %程度である。速報値と確定値の RMSE 差は確定値 RMSE の 8 %程度である。前 1 時間日照時間の RMSE は 8 分台で全時間の 15 %程度ある。

前 1 時間日照時間確定値について月ごとの BIAS と RMSE を第 8 図に示す。BIAS は夏に小さく冬に大き



第 8 図 月毎の前 1 時間日照時間確定値の RMSE.

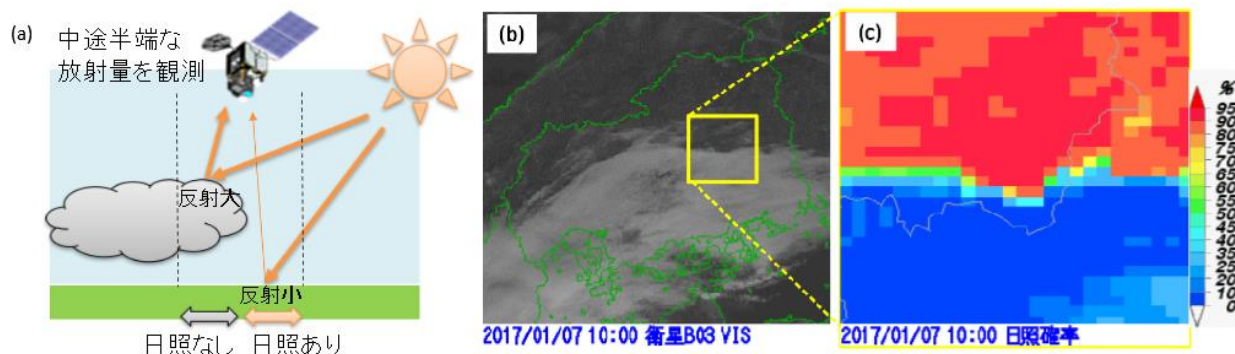
い傾向がある。（影含）と比べて（影除）の BIAS は少ない、つまり局所的障害物の影響は冬ほど大きい、季節変化をなくすほどではない。一方 RMSE は、冬だけでなく夏も大きい傾向がある。冬は局所的障害物とともに積雪の影響を受けている（4.2.3 節参照）。夏場は断片的な雲が現れやすく、晴れ曇り境界にあたる面積が多くなるため、夏に RMSE が大きくなる傾向は妥当と考えられる（4.2.1 節参照）。

4.2 特性の違いの要因

推計値は 1km メッシュの代表値として算出しているのに対し、観測値は特定の地点で観測した値であるため、空間代表性の違いによって値に差が生じる。また、推計値は可視反射率が地表面では低く雲では高いことに基づいているため、地表面の可視反射率を高くする積雪から悪影響を受ける。これらについて、本節で示す。

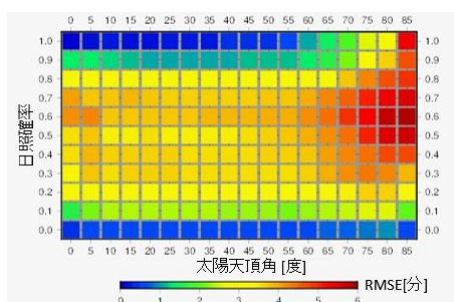
4.2.1 晴れ曇り境界、小さな積雲域の影響（空間代表性 1)

晴れ曇り境界や小さな積雲域では、1km メッシュの一部が雲に覆われ日照が無く、残りの部分では日照がある場合がある（第 9 図）。このとき、衛星観測の可視 0.64 μ m 反射率データは、曇り域の大きな値と晴れ域の小さな値が各領域の面積に応じて寄与して、中途半端な値となる。これを受けて日照確率も中途半端な値となり、1km メッシュ内の特定の地点における観測値と整合するように推定することは難しい。実際に、



第 9 図 (a) : 状況の模式図, (b) : 可視画像, (c) : 日照確率. 日照確率は, 晴域 (北側) で 90-100 %, 雲域 (南側) で 0-10 % であるのに対し, 境界ではその間の値となっている.

前 10 分間日照時間確定値 (影含) の対アメダス RMSE を, 算出期間 4 時刻の平均日照確率と太陽天頂角で層別化して計算する (第 10 図) と, RMSE は日照確率 0.2-0.8 において大きい値をとる. さらにその中で太陽天頂角が小さい場合と大きい場合に RMSE が特に大きい. 太陽天頂角が大きい場合は, 局所的な障害物がアメダス観測に及ぼす影響が大きい. 一方太陽天頂角が小さい場合は, 夏季・日中であるため, 多く発生する小さな積雲が寄与しているものと考えられる.



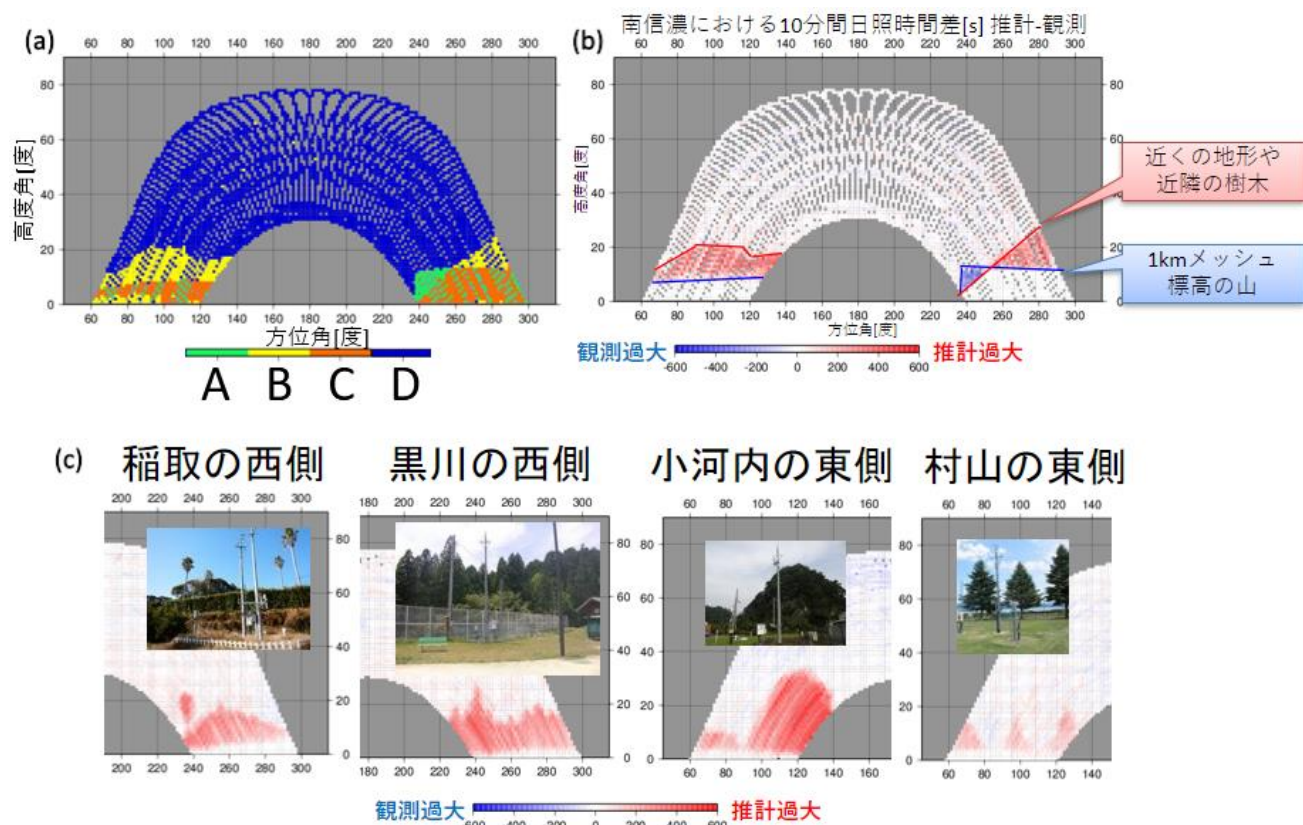
第 10 図 前 10 分間日照時間確定値 (影含) の対アメダス RMSE. 縦軸は算出期間 4 時刻の平均日照確率で横軸は太陽天頂角. 評価期間は 2018 年 7 月から 2020 年 6 月.

4.2.2 障害物の影の影響 (空間代表性 2)

当情報で勘案している山影 (3.2.2 節参照, 以降「推計影」とする) は, 1km メッシュの標高データに基づき直線の太陽光経路を仮定しているため, (1) 標高データ及び影が映りこむメッシュの解像度が低く, (2) 樹木や建物による影を表現しておらず, (3) 太陽光の大気による屈折や障害物による回折を無視しており, 実際に地上に現れる影 (以降「地上影」とする) との差を生じる.

第 11 図 a に南信濃における高度角・方位角毎の推計影・地上影²³の比較例を示す. A が推計影のみ, B が地上影のみ, C が推計影かつ地上影, D がどちらの影でもない領域で, もしも推計影の見積もりに上記問題が無く完全なら A と B は現れないことになる. A は第 11 図 b の BIAS 図における推計過小 (青色) の領域と対応し, その上端は 1km メッシュ標高データによる山入端に相当する. B は推計過大 (赤色) の領域に対応し, 上端は地点付近の地形や樹木の上端に対応する. 各地のデータで A よりも B が多い傾向があり, B の上端は樹木の形状に一致する例を確認している (第 11 図 c). 樹木の影響は 1km メッシュ代表値としての空間代表性を損ねるので, これを除いて推計値の評価をすることは有意義である.

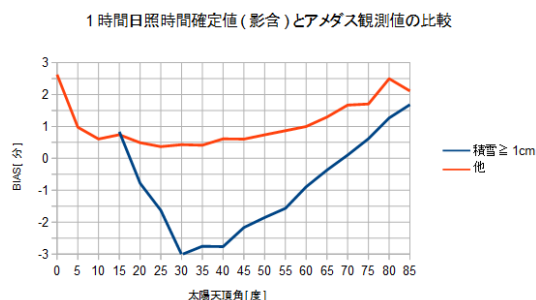
²³ 2016 年の前 10 分間日照時間データが常に 0 分であった方向. 地上影データは, 期間が長いほど障害物の時間変動に対応できない一方, 期間が短いとたまたま同じ方向に雲が出続けた場合を障害物とみなしてしまうといった問題があることに注意が必要である.



第 11 図 南信濃アメダス地点における方位毎の日照関連データ. (a) :推計影と地上影 (1 年間日照時間が 0 分の方
 向). A が推計影のみ, B が地上影のみ, C が推計影かつ地上影, D がどちらの影でもない領域. (b) :日照時間 BIAS
 推計値-観測値. 赤が推計過大 (観測値が障害物で遮断), 青が推計過少 (推計値が 1km 標高に基づく影で遮断).
 (c) :各地の日照時間 BIAS 推計値-観測値と写真.

4.2.3 地表面状態の影響

積雪の影響は、推定モデルを作成する際に積雪時の地上気象観測データによりある程度は学習し、さらに晴天積雪域検出を別途行い対応しているが完全ではない。アメダス観測の積雪深が 1 cm 以上である場合と他の場合について、前 1 時間日照時間確定値(影含)の BIAS を第 12 図に示す。積雪がある場合は平均で-0.44 分、障害物影の影響が少ない太陽天頂角 30-40 度では-3 分近くになり、他の場合と比べて日照時間が過少となる。



第 12 図 前 1 時間日照時間確定値(影含)のアメダス観測
 に対する BIAS について、積雪 (アメダス積雪深
 ≥ 1 cm)²⁴を比較。積雪データは全体的に過少だ
 が、太陽天頂角が小さく障害物影の影響が少ない
 場合にその度合いが大きい。

²⁴ 積雪観測を行っていない地点における、積雪が 1cm 以上の場合のデータを含むが、こういったデータは全体と比べて少ないことが見込まれる。

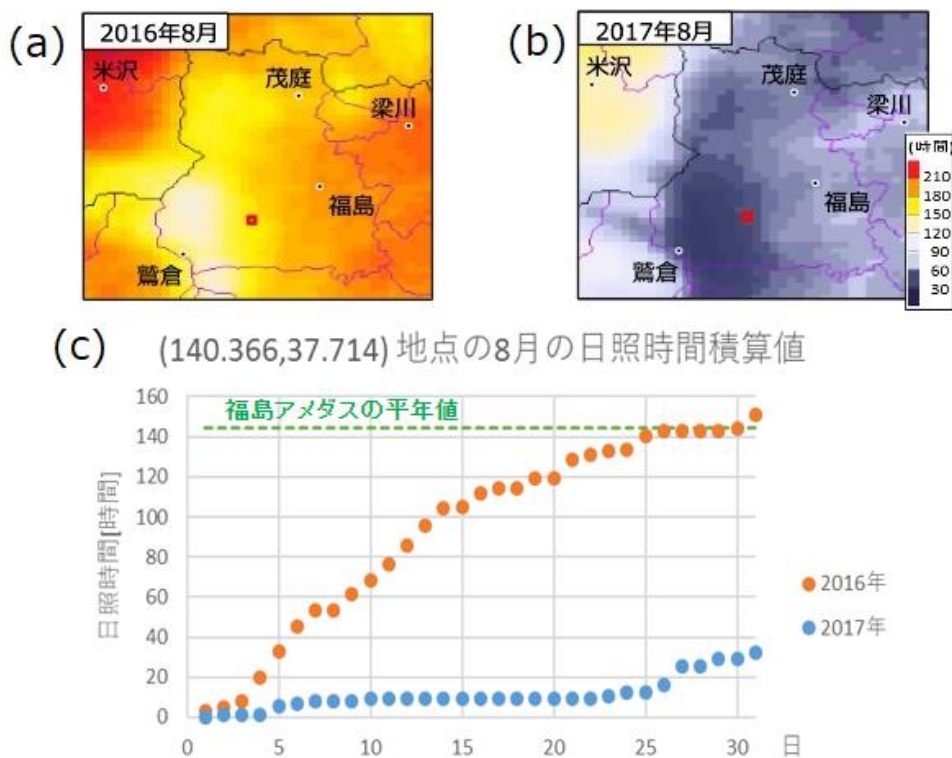
5. 応用的な利用例

推計気象分布(日照時間)データを積算することで、さらに長期間の面的な日照時間データを作成できる。

例として、第 13 図(左・中)に 1 か月間日照時間の分布を示す。例は東北地方で日照時間がかかなり少なくなった 2017 年 8 月とその前年の福島付近である。2017 年の 1 か月間日照時間の分布において、奥羽山脈の東側は全体的に日照時間が短い、その中でも特に短い領域を確認できる。右図は、左・中図の赤色の□で示した地点における日照時間の、1 日からの積算値で、参考情報として福島アメダスの平年値を掲載している。2017 年は月初めから日照が少なく、4 日過ぎから 2016 年と差が顕著になり始める。その後も日照が少なく、最終的に 2016 年と比べて 1/4 程度の日照時

間となった。

精度評価で確認したように推計値は観測値に対してバイアスが有る。近頃の気象状況を過去と比べたい場合に、推計値の積算値をそのまま過去の観測に基づく平年値と比較することは不適切となる。観測に基づくデータには、2000 年以前の平年値の全地点と 2010 年・2020 年平年値の気象官署等のデータ、及びメッシュ平年値 2010 が該当する。一方、アメダス BUFR に推計値が格納される気象官署等以外の地点について、2010 年平年値には補正が行われ、2020 年平年値は最初から推計値に合致するように作成された。メッシュ平年値 2020 も同様に作成された。このため推計値と平年値から平年比等を算出しても差し支えない。



第 13 図 推計気象分布(日照時間)の長期積算利用の例。(a): 2016 年 8 月の 1 か月間日照時間の分布。(b): 2017 年 8 月の 1 か月間日照時間の分布。(c): 左中図中の赤口地点における日照時間の経過と福島アメダスにおける日照時間の平年値。

6. 終わりに

本稿では、推計気象分布（日照時間）を紹介した。算出には、ひまわり 8 号・9 号の日本域観測の高頻度データを入力に機械学習を用いたほか晴天積雪域、山影の影響の除去、地上測器の観測値による補正などを行った。実用的な精度が確保されていると考えられるので多方面での利用を期待したい。今後も、算出に利用可能なデータの追加や新規アルゴリズムの採用など、改善にむけた開発を進めていきたい。

参考文献

- 若山郁生・今井崇人・北村智文・小林健二（2020）：
推計気象分布について。測候時報，87，1-18。
(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou/87/vol87p001.pdf>, 2022 年 9 月 30 日参照)
- 宮城仁史・入口武史・佐藤大輔・熊谷小緒里・白石瞬・木川誠一郎（2013）：解析雨量・降水短時間予報・降水ノウキャストの改善，平成 24 年度予報技術研修テキスト，気象庁予報部，102-115。
- 栗原幸雄・桜井敏之・倉賀野連（2006）：衛星マイクロ波放射計，衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析。測候時報，73，特別号，S1-S18。
- 英弘精機株式会社（2010）：回転式日照計 地上気象用 MS-094 取扱説明書
- Good, E. (2010): Estimating daily sunshine duration over the UK from geostationary satellite data. *Weather*, 65, 324-328.
- Kothe, S., E. Good, A. Obregon, B. Ahrens, and H. Nitsche (2013): Satellite-Based Sunshine Duration for Europe. *Remote Sens.*, 5, 2943-2972.
- 気象庁観測部（2020a）：配信資料に関する仕様 No.13803～推計気象分布（日照時間）～。
(<https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/shiyou/pdf/no13803>, 2022 年 9 月 30 日参照)
- 気象庁観測部（2020b）：配信資料に関する技術情報 第 538 号～推計気象分布（日照時間）の提供開始について～。
(<https://www.data.jma.go.jp/suishin/jyouhou/pdf/538.pdf>, 2022 年 9 月 30 日参照)
- Bessho, K., K. Date, M. Hayashi, A. Ikeda, T. Imai, H. Inoue, Y. Kumagai, T. Miyakawa, H. Murata, T. Ohno, A. Okuyama, R. Oyama, Y. Sasaki, Y. Shimazu, K. Shimoji, Y. Sumida, M. Suzuki, H. Taniguchi, H. Tsuchiyama, D. Uesawa, H. Yokota and R. Yoshida (2016): An Introduction to Himawari-8/9— Japan’s New-Generation Geostationary Meteorological Satellites. *J. Meteor. Soc. Japan*, 94, 151–183 doi:10.2151/jmsj.2016-009.
- Eyre, J. R. (1991): A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. ECMWF Tech. Memo., 176, 28pp.
- Nakajima, T. and M. Tanaka (1986): Matrix formulation for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 35, 13-21.
- Aoki, T., T. Aoki, M. Fukabori and A. Uchiyama (1999): Numerical Simulation of the Atmospheric Effects on Snow Albedo with a Multiple Scattering Radiative Transfer Model for the Atmosphere-Snow System. *J. Meteor. Soc. Japan*, 77, 595-614.
- Chen, T. and C. Guestrin (2016): XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785-794. doi:10.1145/2939672.2939785.
- 林昌宏・下地和希（2013）：大気追跡風算出アルゴリズム，気象衛星センター技術報告，58，1-109。
- 宮川卓也・松本隆則（2010）：海氷移動ベクトルプログラム，気象衛星センター技術報告，54，33-41。
- Matsumoto, T. and T. Imai (2008): Methodology of Extracting Sea Ice Motion Vectors from Geostationary Meteorological Satellite Data, *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 50,

15-30.

気象庁大気海洋部（2021）：地上気象観測統計指針.

(<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/kaisetu/index.html>, 2022年9月30日参照)