



ScienceDirectで入手可能なコンテンツ リスト

極端な気象と気候

ジャーナルのホームページ: www.elsevier.com/locate/wace



ERA5 大規模変数を使用したイタリア上空のひょう災害のモデル化

ベロニカ・トラルバ^{a,1}、リカルド・エナン^{a,1}、アントニオ・カンテッリ^{a,b}、エンリコ・スコッチマロー^c、ステファノ・マター^c、アゴスティーノ・マンザト^c、シルヴィオ・グアルディ

^a気候シミュレーションおよび予測部門、カンピアメンティ気候財団 (CMCC)、ボローニャ、イタリア
^bAssicurazioni Generali SpA、トリエステ、イタリア
^cAgenzia Regionale Per l'Ambiente (ARPA) Friuli Venezia Giulia – OSMER、パルマノバ、イタリア

記事情報

キーワード:
あられモデル
イタリア
遺伝的アルゴリズム
ERA5
極端な

抽象的な

ひょうは、農業、再生可能エネルギー、保険などの複数の社会経済分野に悪影響を与える気象現象です。しかし、ひょうの形成に好ましい環境条件と、これらの現象を表現するモデルの不十分さについての理解は、ひょう観測の時間的および空間的範囲が不足しているために制限されています。これは、ヨーロッパで最も雹が発生しやすい地域の一つであるイタリアなど、影響を受けやすい地域における雹関連のリスクを軽減する上で大きな懸念事項となっている。この研究では、イタリア上空のひょうの危険性を説明するために開発されたひょうモデルを紹介し、このモデルは、Prein and Holland (2018) に記載されている統計手法に従って組み合わされた、いくつかの ERA5 大規模気象変数と対流指数に依存しています。ひょうモデルの予測変数として使用される最適変数セットの特定は、遺伝的アルゴリズムに基づく体系的な機械学習手順によって実行されます。ひょうモデルは、ERA5 空間グリッド解像度(約 30 km)に基づいて、1979 年から 2020 年の期間にイタリア上空で降るひょう確率を推定します。ひょうモデルの出力は、イタリアにおけるひょう現象の季節性と長期変動性を特徴付けるために使用されています。さらに、フリウリ・ヴェネツィア・ジュリア地域におけるひょう確率のカテゴリカルな検証により、ひょうモデルがイタリアの特定地域におけるひょうの発生を効果的に推定できることが明らかになりました。

1.はじめに

ひょうは、いくつかの産業セクターに影響を与える気象災害です (Martius et al., 2018; Changnon et al., 2009)。例えば、農業産業は大きなひょう石による作物の破壊に苦しんでおり (Sánchez et al., 1996)、ひょうの予防と抑制技術の開発が促進されました (Rogna et al., 2021; Rivera et al., 2020)。同様に、電力供給市場は、雹による風力タービンやソーラーパネルの浸食の可能性や、送電システムへの損傷の影響を受ける (例: Teule et al., 2019; Muehleisen et al., 2018; Macdonald et al., 2018)。したがって、さまざまな社会経済分野に影響を与える雹リスクにより、不動産 (屋根、窓、車など) の雹による損害を補償するために保険市場が提供する商品やサービスの増加が促進されています。さらに、保険金請求データは、雹による被害を定量化し、関連する損失の可能性を評価するためにも使用されています (Pú ik et al., 2019; Brown et al., 2015)。

ひょう現象とそれに関連する影響を正確に記述し監視するために必要な、包括的で均質な長期観測データセットを持つことが難しいことが判明したひょうの特性

(Mohr et al., 2015b)。ひょう現象は主に、局所的範囲と短期間の対流性嵐によって発生するため、標準的な観測ネットワークでは不十分なことがよくあります (例: Mohr and Kunz, 2013)。さらに、ひょうの形成と成長は、微小物理パラメータ化と対流スキームによって導入された制限により、数値モデルによってある程度の不確実性を伴って再現されます (Allen et al., 2015)。さらに、これらのプロセスのシミュレーションにはかなりの計算リソースが必要です (Gagne et al., 2017)。ただし、ひょうの検出にはすでにいくつかのアプローチが採用されています。ひょうデータは、トップのオーバーシュート (Punge et al., 2017)、マイクロ波散乱 (Laviola et al., 2020)、レーダー反射率 (Fluck et al., 2021; Nisi et al., 2016)および雹パッドの地上ネットワーク (例: Eccel et al., 2012; Palencia et al., 2009; Dessens and Fraile, 1994)および保険業界からのレポート (Pú ik et al., 2019)から。多種多様なデータソースがありますが、異なる地域のひょうの特徴を比較することは依然として困難です。たとえば、ひょう嵐に関連する典型的な総観パターンは、ポルトガル (サントスおよびペロレイラ, 2019)、北東部などのヨーロッパ地域で調査されています。

対応著者。
電子メール アドレス: veronica.torralba@cmcc.it (V. Torralba)、riccardo.henin@cmcc.it (R.エナン)。
1この作品にも同様に貢献しました。

スペイン (García-Ortega et al., 2011)、フランス南西部 (Merino et al., 2019)、ドイツ (Mohr and Kunz, 2013)、ポーランド (Czernecki et al., 2019)。この点に関して、Punge and Kunz (2016) は、ヨーロッパのいくつかの地域で使用されているさまざまなひょう統計と利用可能なデータセットの包括的なレビューを提供しています。

イタリア北部はヨーロッパでひょうの発生頻度が最も高い地域の一つとして特定されている^g (例: Pú ik et al., 2019; Punge et al., 2017; Mohr et al., 2015b)、ひょうの危険性を評価する包括的な研究の数は少ない。イタリア上空はまだ限られている。全国的な監視ネットワークが存在しないため、アディジェ川流域 (Eccel et al., 2012) やフリウリ・ヴェネツィア・ジュリア地域 (マンツァートなど) など、イタリア北東部の特定地域の雹状況の特性評価には地域データが使用されてきました。、2012年; Giaio tti a、2003年) およびトスカーナ州 (Piani a、2005年)。さらに、Baldi ら。(2014) は過去のひょう嵐の頻度を推定するために線形重回帰モデルと組み合わせた欧州重症暴風研究所 (ESSL) データを採用することにより、国家ひょうデータベースへの第一歩を踏み出しました。

ただし、この研究は限られた期間 (2001 年から 2009 年) に基づいており、イタリア上空で発生した雹の気候学をほとんど表していません。

観測がまばらであるという問題を克服するために、長期のひょう変動の研究は伝統的に、ひょう嵐の形成の推進力として大規模な変数を使用することによって行われてきました (Mohr and Kunz, 2013)。これは、たとえばひょう現象が局所的な影響を及ぼしたとしても、ひょう嵐の発達は大規模な環境条件によって制御できるため (Brooks et al., 2003)、したがって、大規模と局所的規模の間の関連性はすでに利用されているからです。雹モデルの開発。いくつかの例は、米国 (例、Tang et al., 2019; Allen et al., 2015) およびヨーロッパ諸国 (例、Madonna et al., 2018; Punge et al., 2017) の両方で見つけることができます。

同様に、Prein と Holland (2018) は一連の大規模変数を調査して、米国全土に被害を与えるひょうの頻度を推定すると同時に、地球規模でのアプローチの適切性もテストしました。

ひょうモデルは、熱力学的側面を含む対流嵐の発達に必要な特定の環境条件 (例えば、強さを供給し維持するために必要な対流エネルギー) を考慮に入れるために、予測変数のさまざまな組み合わせ (つまり、多変量アプローチ) を使用することによって構築されています。上昇気流)、運動学的 (例: 対流嵐を組織するための垂直ウィンドシアー)、大気的不安定性 (例: 境界層での対流阻害を克服するための場力メカニズム (Santos and Belo-Pereira, 2019))。これらの条件の相対的な重要性また、地形、熱地形風システム、水域の存在などの地域的要因にも依存し (Mohr et al., 2015a)、ひょう嵐の応答における空間的不均一性をもたらします (Raupach et al., 2021)。。2018) ランダム フォレスト (Czernecki et al., 2019) およびニューラル ネットワーク (Manzato, 2013; Marzban と Witt, 2001) など。

この研究の主な目標は、1979 年から 2020 年の期間におけるイタリア上空の雹の確率を提供するモデルを開発することです。このモデルは、Prein and Holland (2018) で説明されている多変量手法に基づいていますが、イタリアの領域の雹の状況をより適切に説明するためにいくつかの修正が加えられています。我々は、欧州悪天候データベース (Groenemeijer et al., 2017) からの雹に有利な条件の潜在的な予測因子として、ERA5 大規模環境変数 (Hersbach et al., 2020) を考慮しました。私たちは、遺伝的アルゴリズムを使用して最適な予測子のセットを客観的に特定することにより、Prein and Holland (2018) の方法論を拡張しました。さらに、一般ひょうモデル (GHM) と重大ひょうモデル (SHM) という 2 つの独立したモデルが作成されています。これらは、モデルのキャリブレーションに使用されるひょう観測のサブセットによって異なります。これらのモデルは、毎日の頻度で等間隔の情報を提供するため、イタリア全土のひょう災害の変動性を特徴付けるための適切な枠組みを提供します。検証は独立した観測データソースに対して実行されました。

イタリア北東部に位置する小さな地域であるフリウリ・ヴェネツィア・ジュリア上空 (補足資料の図 S1 を参照)。

原稿は次のように構成されています。セクション 2 では使用したデータセットについて説明し、セクション 3 ではひょうモデルについて詳しく説明し、セクション 4 では論文の主な結果を示します。結果には、イタリア上空でのひょうの観測 (セクション 4.1)、ひょうの発達に対する大規模変数と対流指数の影響 (セクション 4.2)、モデルから得られたひょう確率の記述 (セクション 4.3) が含まれます。、およびフリウリ・ヴェネツィア・ジュリア地域でのモデルの検証 (セクション 4.4)。セクション 5 では、この作業の主な成果について説明します。最後に、主な結論をセクション 6 で説明します。

2. データの説明

2.1. 欧州悪天候データベース (ESWD) の雹データ

ヨーロッパの悪天候データベース (ESWD、<https://www.eswd.eu/>) は、ヨーロッパで発生した激しい対流性暴風雨に関する詳細かつ品質管理された情報を収集し、提供します。このデータベースは欧州激風研究所 (ESSL) によって維持管理されていますが、ボランティアの観測ネットワーク、気象愛好家、ニュースとメディア、および国家の水文気象サービスに大きく依存しています。したがって、ESWD の雹レポートの大部分は人口密集地域で収集されます。極端な気象現象や技術の進歩に対する一般の関心の高さにより、ESWD に貢献するボランティアの数が近年増加しています。これらのボランティアは、段階的な品質管理システムでチェックされた雹の観察を報告しています (Groenemeijer et al., 2017; Dotzek et al., 2009)。ただし、これらの報告は本質的に大規模な雹や人口密集地域に偏っており、雹現象がより重要で人口の意識が高いため、空間的不均一性の影響を受ける可能性があります。さらに、ひょうのサイズ情報は、主観的な推定値および/または間接的な測定のために大きな不確実性の影響を受けることがよくあります (Punge and Kunz, 2016; Allen et al., 2015)。ESWD に含まれる悪天候の種類には、雪崩、竜巻、突風前渦、小規模な旋風、落雷、着氷、雪、激しい突風、ひょうなどがあります。特に、ESWD はヨーロッパで最も広範な雹レポートのアーカイブであり、雹発生の日付、時刻、雹の規模、場所に関する情報が含まれています。この研究では、2000 年から 2020 年の期間のイタリア領域 [6–19°E, 36–48 °N] の ESWD ひょうデータを検討しました。合計 2,074 件のレポートが利用可能で、そのうち 1,159 件にはひょうの直径に関する情報が含まれていました (図 1a)。

GHM の構築には観測値のセット全体が使用されますが、SHM には 729 個の観測値のサブセット (ひょう石の直径が 2.5 cm を超えるもの) が使用されます。2021 年と 2022 年の雹シーズンの ESWD 雹観測は含まれていませんでした。

この原稿を作成した時点では利用できなかったため、トレーニング セットを使用しました。したがって、これらはトレーニング データから独立したデータセットと見なされ、この 2 年間でイタリア全領域にわたるひょうモデルのパフォーマンスを評価するために使用されました (補足資料、セクション S1 を参照)。

2.2. ARPA フリウリ・ベネチア・ジュリア州の雹データ

Agenzia Regionale Per l'Ambiente (ARPA) フリウリ・ヴェネツィア・ジュリア州のひょうデータベース (ARPA FVG、<https://www.meteo.fvg.it/grandine.php>) は、イタリアの北東縁にあるフリウリ・ヴェネツィア・ジュリア州の平野部に位置するひょうパッドのネットワークに基づいた、ひょう現象の地域データセットです (図 2)。このデータセットは最近利用できるようになりましたが、ネットワークは 1988 年に設立され、一部のボランティアの関与の度合いは時間の経過とともに減少している可能性があります。この研究で考慮されたデータベースは、1988 年から 2016 年の期間の雹の季節 (4 月から 9 月) をカバーしており、240 か所に分散された約 6600 個の個々のパッドが含まれています (図 2a)。

ARPA FVG データベースのひょうデータの収集は、直後に人間がパッドを制御することを意味するため、簡単ではありません。

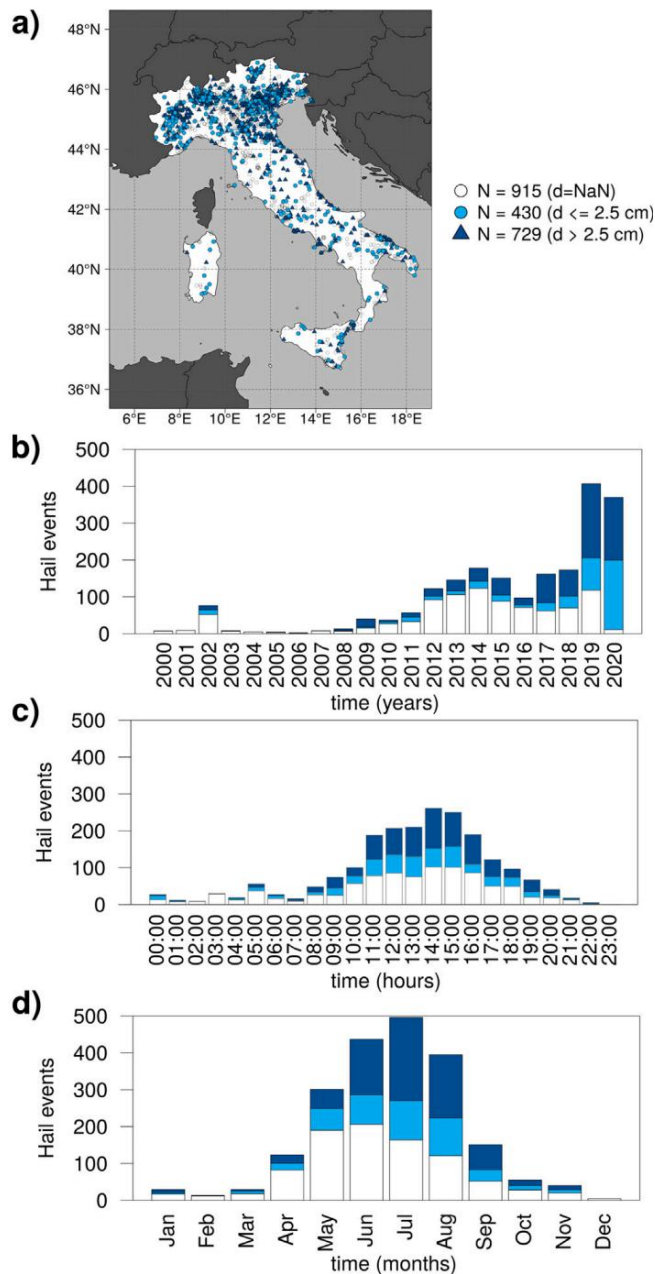


図 1. (a) 2000 年から 2020 年の期間にイタリア地域で発生したヨーロッパ悪天候データベース (ESWD) の雹現象。 (b) イタリア全土で集計された ESWD の雹イベントの年々数 (c) その日の 1 時間 (UTC) あたりの ESWD の雹イベントの数 (d) 1 か月あたりの ESWD 雹イベントの数。ひょう現象は、直径情報のないひょう現象 (白)、直径 2.5 cm 以下のひょう現象 (水色)、および直径 2.5 cm を超えるひょう現象 (青) の 3 つの異なるカテゴリに分類されています。(この図の凡例における色の参照の解釈については、この記事の Web バージョンを参照してください。)

行事。この作業のほとんどはボランティアによって行われていますが、その数、利用可能性、経験は長年にわたって変動しています。これらの問題により、パッドを交換せずに 2 回以上のひょうが発生した場合など、イベント数が過小評価される可能性があります。もう 1 つの潜在的な人為的エラーは、誤った時間割り当てによって発生します。パッド上のひょうの直径とヒット密度の測定では、TITAN ソフトウェアによる半自動分析が行われます (Manzato et al., 2020; Dixon and Wiener, 1993)。

それでも、パッド自体は、取り扱い、鳥、落下物、その他の独立した状況によって損傷したり変形したりする可能性があります。しかし

ARPA FVG 観測は、この地域のさまざまな研究で使用されています (例: Manzato, 2012; Giaioti et al., 2003, 2001)。

ARPA FVG データベースは、ひょうパッドに基づくひょうレポートの高い時間および空間解像度と、データを集約することによって得られるひょう情報の十分な信頼性の必要性との間のトレードオフです。したがって、観測は時間 (毎日、協定世界時 00 時から協定世界時 24 時まで) と空間 (4 つのドメイン、約 30 × 45 km の大きさ) で集約されます。4 つのドメインは時系列全体を通じて均等に表され、平均して同じ数のステーションを占めます (図 2b)。各ひょうイベントは、各日および領域ごとの特定のひょうレポートに対応しており、日付、領域内のヒットパッドの数、直径の中央値と最大値、ヒットの密度、および運動エネルギーフラックスが含まれます。

23. ERA5 データ

ERA5 再解析は、ひょう現象を引き起こす大規模な大気状態の特性評価に使用されています。ERA5 は、2016 年に運用された ECMWF 大気モデル (統合予報システム、サイクル 41r2) のバージョンに基づいた、最新の欧州中期天気予報センター (ECMWF) 大気再解析 (Hersbach et al., 2020) です。データ同化のための四次元変分解析 (4D-Var)。この再解析は、約 30 km の空間分解能、137 の垂直レベル、および 1 時間の時間分解能を備えているため、局所スケールでのひょう現象につながる大規模な大気の状態を特徴付けるのに特に役立ちます。この研究では、1979 年から 2020 年までの ERA5 データを使用しました。

この作業で考慮された ERA5 変数を表 1 に示します。

これらの変数の一部は再解析 (地表および圧力レベル) から直接抽出されていますが、その他の変数 (嵐に対する相対ヘリシティ、ウィンドシア、温度および相対湿度の勾配) は ERA5 出力変数から導出されています。特に、嵐に対する相対ヘリシティは、2 つの異なる公式を使用して計算されています (Prein and Holland, 2018; Bunkers et al., 2000)。

潜在的なひょう予測因子の初期セットの選択は、主に文献でテストされたさまざまなオプションに触発されています (例: Czernecki et al., 2019; Prein and Holland, 2018; Eccel et al., 2012)。これらのセットには通常、必須の気候変数、対流指数、および大気の垂直構造に関連する変数が含まれます (Allen et al., 2015; Brooks et al., 2003)。さらに、Prein and Holland (2018) との一貫性を保つために、対流利用可能位置エネルギー (CAPE) と凍結レベル高度 (FLH) の間の結合分布が含まれています。潜在的な予測因子間のすべての異なる組み合わせの評価は関連する可能性があります。必要な計算リソースと同様にひょうモデルの複雑さが大幅に増加するため、テストされていません。したがって、潜在的な予測因子に関する最終決定は、ある程度主観的なものになります。

3. 方法論

3.1. あられモデル

この研究では、Prein and Holland (2018) で説明されている多変量アプローチに従って、毎日のひょう確率 (PH) をシミュレートし、それを 4 月から 10 月の季節にイタリアの領域に適用しました。この方法は、統計モデルの構築のための予測変数として使用される一連の大気変数と対流指数に依存しています。Prein and Holland (2018) の方法論は、その柔軟性により選択されました。予測子の特定の分布や変数間の関係は想定されており、重み付けや正規化も必要ありません。この方法論の主なステップは図 3 にまとめられています。

この研究では、一般ひょうモデル (GHM) と重大ひょうモデル (SHM) の 2 つの異なるモデルを開発しました。前者はすべてを使用します

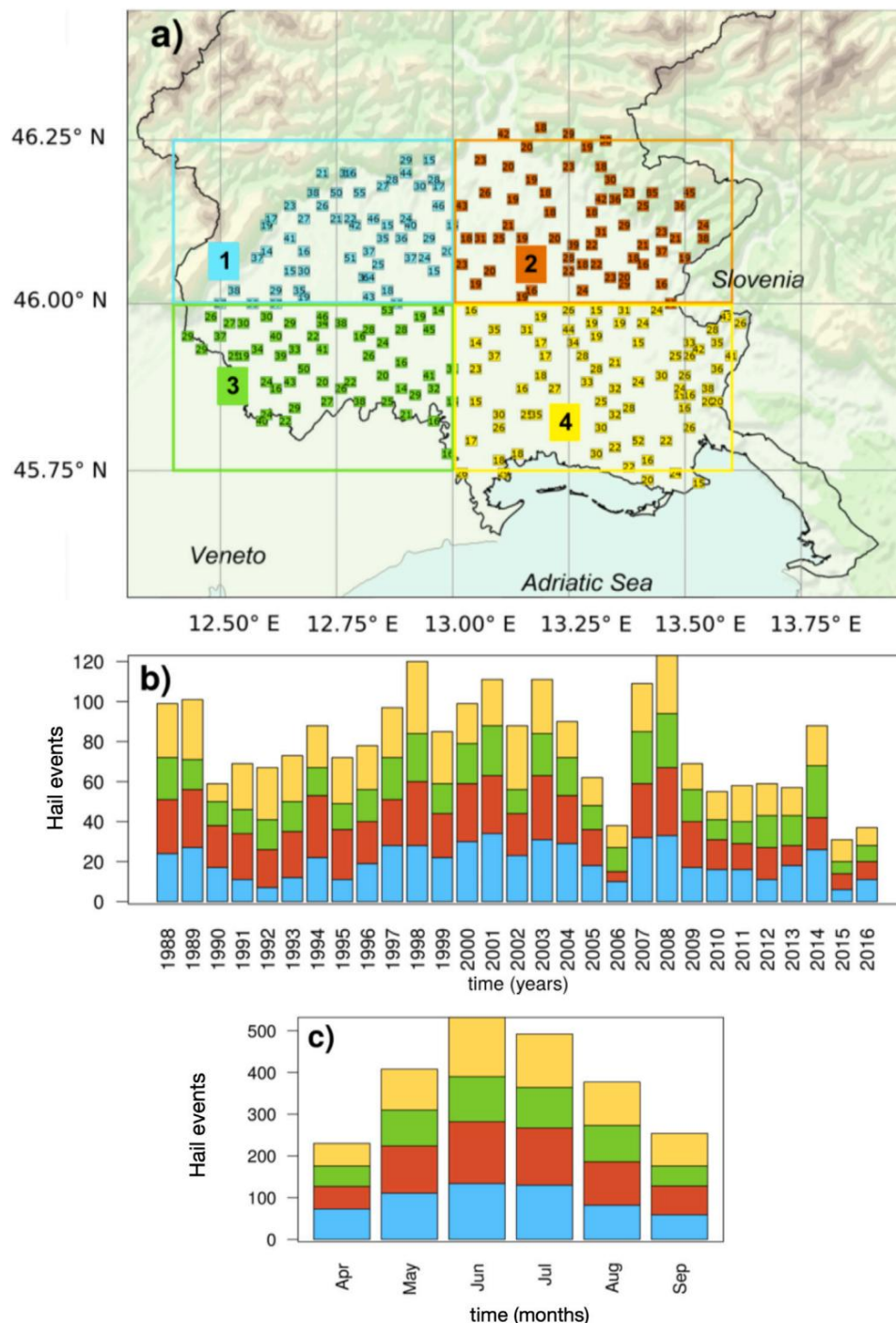


図 2. (a) 4 つのドメイン (1-青、2-オレンジ、3-緑、4-黄色) に集約された ARPA フリウリ ベネチア ジュリア のひょうデータセットに使用される 240 の ARPA フリウリ ベネチア ジュリア (ARPA FVG) 観測点の位置。 (b) 1988 年から 2016 年までの各ドメインで集計された ARPA FVG 雹イベントの年ごとの分布。 (c) 月あたりの ARPA FVG の雹イベントの数。(この図の凡例における色の参照の解釈については、この記事の Web バージョンを参照してください。)

雹の日を条件とした確率分布の計算に利用可能な ESWD 観測。後者は、ひょう石の最大直径が 2.5 cm を超えるこれらの観測結果のサブセットを考慮しているため、このモデルは激しいひょうに有利な環境条件を有する確率を提供すると期待されます。

ERA5 再解析から 18 個の潜在的な予測因子のセットを選択しました(表 1)。すべての ERA5 変数は時間単位の時間分解能で利用できますが、日単位の値は対流利用可能位置エネルギー (CAPE) が最大になる時間ステップで選択されます。最大 CAPE はひょう嵐の形成に必要な高い不安定性に強く関係しているため、この選択は正当化されます(Prein と Holland、

2018)。さらに、最大 CAPE の瞬間は、他の大気変数と対流指数におけるひょう形成の典型的な条件を表していると仮定しました。この選択の意味については、補足資料で説明します (セクション S3 および図 S3 を参照)。ERA5 予測子は、ひょう観測の場所に最も近いグリッド ポイントで選択されました。さらに、ひょう観測値の周囲の ±2 格子点の領域は、現在のひょう環境と再解析フィールドの間の潜在的な空間的不一致を説明すると考えられています(Prein and Holland、2018)。したがって、各 ERA5 変数の条件付き確率分布の構築には 9 つのグリッド点を使用されます。

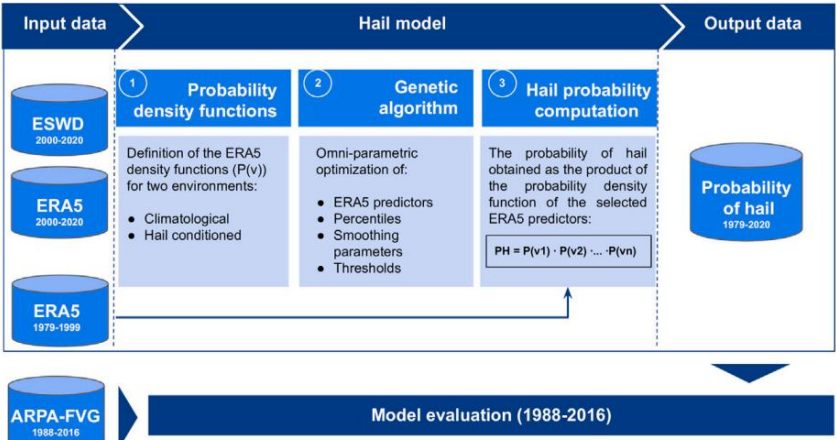


図 3. ひょうモデルの実装で実行される主な手順をまとめたワークフロー。モデルは ESWD のひょう観測と ERA5 で校正されています。2000 年から 2020 年の期間の変数。このメソッドは、1979 年から 2020 年までの長期にわたる雹シーズン (4 月から 10 月) の雹確率データセットを日単位の解像度で生成します。ひょうモデルのパフォーマンスは、ひょうの確率を観測 ARPA FVG データセットと比較することによって評価されています。

表1

この研究ではERA5変数が考慮されています。1979年から2020年まで使用されてきました。時間単位の解像度の期間。頭字語の上付き文字は、それが特定のものであるかどうかを示します。変数は、一般化 (G) ひょうモデルおよび重度 (S) ひょうモデル。これらの予測因子については、補足資料で説明されています。(セクションS2)。

頭字語	変数	ユニット
BLH	境界層の高さ	m
ケープ、	対流の利用可能な位置エネルギー	J kg ⁻¹
CBH、	雲底の高さ	m
CIN	対流阻害	J kg ⁻¹
FLH、	凍結レベルの高さ	m
K.I.	K インデックス	K
RH500~700	相対湿度勾配 (500 ~ 700 hPa)	m ⁻¹
T500~700	温度勾配 (500 ~ 700 hPa) 露点温度 2 m 温度 2 m	Km ⁻¹
Td2M		K
T2M		K
TCWV	塔内の総水蒸気量	kg m ⁻¹
トタリ、	合計合計インデックス	K
SSHf	瞬間的な表面感応熱流束	Wm ⁻¹
SRHBU	嵐の相対ヘリシティ パンカーサ	m2秒 ⁻²
SRHPR	ストーム相対ヘリシティ プレイナ	m2秒 ⁻²
VIDMF	水分発散の垂直積分	kg m2 s ⁻¹
WSH3	バルクウィンドシア 0 ~ 3 kma	m s ⁻¹
WSH6	バルクウィンドシア 0 ~ 6 kma	m s ⁻¹

a変数はERA5出力変数から派生しています。

各予測子の条件付き確率分布 () は、Prein and Holland (2018) のように定義されます。双曲線を使用しましたにに関連付けられた値の範囲をカバーすることを目的とした関数気候学と比較して、雹に有利な環境条件 (図3のステップ1)。関数の方程式は次のようになります。

$$\begin{aligned} &0.5 + 0.5 \frac{\frac{+1-2}{-2}}{\left(\frac{1-2}{-2}\right)} < \frac{+2-3}{2} \\ &() = \frac{+3-4}{-2} \geq \frac{+2-3}{2} \\ &1 - [0.5 + 0.5 \left(\frac{-3-4}{-2}\right)] \end{aligned} \tag{1}$$

どこ 予測子によって想定される実際の値です () は th パーセンタイルに対応し、遷移の滑らかさを制御する正の定数である平滑化パラメータです。雹に有利な環境と不利な環境の間、つまり関数の昇順分岐と降順分岐の滑らかさ。

パーセンタイルは、次の式から直接取得できます。

$$\begin{aligned} &= \\ &= \frac{2}{4} - \frac{1}{1} \\ &= 100 - \frac{1}{1} \\ &= \frac{3}{4} - \frac{1}{1} \end{aligned} \tag{2}$$

と p は、切り捨てて使用されるパラメータです。雹環境。ひょう環境を切り捨てるために使用されます確率密度関数は両側で等しく、p は達成するために使用されます。雹が降っている環境から雹が降っていない環境への移行も同様にスムーズです分布の両端にあります。したがって、確率の定義は、各予測子の関数は最終的に 3 つのパラメーターに依存しますのみ: p、および平滑化係数。Prein と Holland (2018) は、最適化メトリクスを通じてこれらのパラメーターを取得しました。一方、この作業では最適化は遺伝学によって実行されます。アルゴリズム (GA、図3のステップ2) を使用すると、最適化プロセス。PH は確率分布の積として計算されます。選択された予測子の値は次のように計算されます (図3のステップ3)。

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{4} \cdot \dots \tag{3}$$

追加のパラメータが GA 最適化 () によって提供され、最終的な PH (式(3))を、ひょうを表すバイナリ フィールドに変換します。発生。パラメータは PH のしきい値で構成され、は次のように使用されます。

$$= \begin{cases} 1 & \geq \\ 0 & < \end{cases} \tag{4}$$

3.2.遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (GA) は、次の翻訳に基づいた手法です。機械に対する生物の自然選択に関するダーウィンの評価学習領域 (例: Haupt および Haupt、2004 年、Mitchell、1998 年、Goldberg およびオランダ、1988)。この方法論は、次のような強力な可能性を示しています。雹モデルの開発。GA は、平滑化係数、および客観的に18のERA5指標の中から最適な予測因子のセットを特定する考慮された。この点で、GA は合計 162 のパラメーターを最適化しました。(18 の ERA5 の潜在的予測因子とひょうの周囲の 9 つのグリッド ポイント イベント)。GA の入力データには、ESWD 観測から導出されたひょう現象と非ひょう現象の両方が含まれます。

V. トラルバラ。

対応するERA5変数。まず、ひょう観測値は ERA5 グリッドに集約されます。これは、複数のレポートが同じ事象を参照している場合、それらは 1 回だけカウントされていることを意味します。 GHM (SHM) については、2074 (729) 件の入手可能な報告により、2000 年から 2020 年の期間に 1250 (474) 件のひょう現象が発生しました。ひょうイベントと非ひょうイベントは、それぞれ、正規の不均衡データ学習プロセスの少数クラスと多数クラスを表します。極端なイベントの発生の場合と同様に、少数派のクラスが一般に関心のあるクラスですが、学習アルゴリズムは、より頻繁に発生する多数派のクラスに偏る傾向があります (つまり、過剰予測)。クラス間の不均衡は機械学習におけるよく知られた問題であり、さまざまなアプローチで対処されています (レビューについては、 [Fernández et al., 2018](#)を参照してください)。この研究では、特定の場所での雹以外の現象は、雹の報告と対流降水がないことによって定義されます。

したがって、多数派クラス (非ひょう現象) には 2 つの異なるセットが追加されています。(1) ひょう現象と同じ日に異なる場所で発生する (対流降水量がゼロに等しい) 非ひょう現象。(2) ひょうが降っていない日に発生し、対流降水量がゼロに等しい非ひょう現象。

次に、これらのサブセットにわたるランダムな選択は、各月の雹が降っていない日の表現を保証することによって得られます (つまり、月ごとの階層化)。各セットは、不均衡率が 1/4 に設定されるように、それぞれのモデルのひょうイベント数の 2 倍をカウントします。極端に不均衡なデータセットに関する包括的な研究がまだ不足しているにもかかわらず、この値は同様の問題と一致しています[Krawczyk、2016]。したがって、GA は GHM (SHM) の 6250 (2370) イベントを処理します。そのうち 1250 (474) はヘイル イベントで、5000 (1896) は非ヘイル イベントです。

GA を適用するためのワークフローは、選択、進化、適応度関数の計算という 3 つの主要なステップに要約できます(Katoch et al., 2021)。最初のステップは、ランダムな母集団の選択です。進化フェーズでは、アルゴリズムは 2 つの遺伝的演算子 (交叉と突然変異) を使用して、初期集団から第 2 世代の解の集団を導き出します。交叉は交叉確率によって制御され、これは 2 人の個体がその部分の一部を交換できる確率を定量化します (1 はすべての子孫が交叉によって作られることを示し、0 は新しい世代が古い集団のコピーであるかどうかを示します)。交叉確率は 0.5 です(表2)。集団の多様性を保証し、早期の収束を回避するために、集団に追加される新しい子孫に突然変異ステージが適用されます。突然変異は0から1までの突然変異確率によって制御されており、本作では0.15に設定されている。最後のステップでは、結果として得られる新しい母集団が GA 適応度スコア (式(5)) によって評価されます。最高の GA 適応度スコアを持つ個体 (エリート) が次世代に維持されます。この研究では、個人の 10% がエリート ソリューションとして保持されています(表2)。

このプロセスは、最小の GA 適合性スコア値を持つ母集団と最適解を取得するために、特定の反復回数にわたって適用されます。これらのパラメーターは、以前の研究 (例: Hassanat et al., 2019) の推奨事項に従って選択されています。

この作業で使用される反復の最大数は 175 で、母集団のサイズは 150 です(表2)。 SHM の構築に使用される GA パラメータは補足資料 (表 S1) にあります。

GA パラメーターの中で、反復回数と初期母集団サイズは最も重要なものであるため(Mills et al., 2015) 。GA 適応度スコアに対するそれらの影響を定量化するために感度テストが実行されました。これらの感度テストを GHM と SHM に対応するサンプルに個別に適用し、125 ~ 225 の反復値と 25 ~ 150 の母集団サイズが考慮されました。 GA 最適化スコアの確実な推定値を取得するために、各テストが 20 回反復されました。パラメーターの値の範囲も、計算コストと、反復数と母集団サイズの両方の増加による付加価値を考慮して選択されています。

母集団の各メンバーの適応度を評価するために、次のように定義される適応度関数を採用しました。

= 1 −

(5)

極端な気象と気候 39 (2023) 100535

表 2 一般

的なひょうモデルの遺伝的アルゴリズムのパラメーター。

反復回数	175
初期集団サイズ	150
突然変異の確率	0.15
交叉確率	0.5
エリートの割合	10%

表 3 一般ひ

ょうモデル (= 0.0049) の選択された変数と対応するパラメーター。 CAPE-FLH は、CAPE と FLH の同時確率から得られる二変量予測子です。 GA はランク付けされた予測子を提供しないため、これらの変数はアルファベット順にリストされていることに注意してください。

c			
BLH	1.9	25	0.31
ケーブ	0.99	13	0.3
ケーブフロリダ州	3.02	19	0.26
C.B.H.	5.89	7	0.32
トタリ	3.5	5	0.31
VIDMF	1.12	29	0.32
WSH6	1.25	8	0.27

ここで、J は GA 適応度スコアであり、マッシュズ相関係数 (MCC) に依存します。

=

$$\sqrt{(+)(+)(+)(+)}$$

(6)

MCC (Boughorbel et al., 2017) は、分割表の結果を考慮します: 真陽性/ヒット (a)、偽陽性/誤警報 (b)、偽陰性/ミス (c)、真陰性/正しい陰性 (d)。 MCC 係数に依存する GA スコアは、不均衡なデータセット (つまり、ひょうの正と負の発生の割合が異なる) に対してバランスの取れたモデル精度評価を提供し(Chicco and Jurman、2020) 。最適なサブセットを保証するため、この作業に特に役立ちます。 162 個のパラメーターのうち、さらに、MCC は他の潜在的な適応度関数よりも有用である可能性があります(Chicco et al., 2021)。MCC は [-1,1] で変化します。ここで、 -1 は実際の値と推定値が完全に不一致であることを示し、1 は完全に一致していることを示します。

GA 最適化の結果は、 GHM については表 3に、SHM については補足資料に含まれる表 S2 に含まれています。 GA 最適化の出力は、ERA5 の潜在的候補の初期リストからの最良の予測子のセットで構成されます(表 1)。さらに、GA は、これらの選択された予測子の確率分布の構築に必要なパラメーターも提供します(図4)。GA は予測子のランキングを提供しません。

GA 解は、GA スコアを最小化する変数とパラメーターの組み合わせに対応します (式(5))。

3.3. モデルの評価指標

一般的なひょうモデルのパフォーマンスは、ARPA FVG 観測データセットを参照として使用して、イタリア北東部の地域で評価されました。 GHM の評価には、すべての ARPA FVG ひょう観測が使用されていますが、SHM の性能は、直径 1.25 cm を超える ARPA FVG ひょう観測を使用して評価されています (図 S2 を参照) 。 Manzato et al.で議論されているように、雹パッドによってもたらされる最大雹直径は、通常、近くで観察される最大雹石のサイズの半分 (つまり 2.5cm) であるため、この直径が選択されました。(2022a)およびその中の参考文献。ひょうモデルの評価のために、いくつかの指標を採用しました。ピアソンの相関係数(Wilks、2011) は、月平均 PH と月ごとに観察された発生総数の間の一致を測定するために使用されています。この指標を使用すると、ひょう現象の年ごとの変動を表すモデルの能力を定量化できます。これらの相関関係の統計的有意性は、95% の信頼水準の t 検定によって決定されています。

V. トラルバラ。

極端な気象と気候 39 (2023) 100535

バイナリーひょうイベントの評価は、2 × 2 分割表 (Joliffe および Stephenson, 2012 およびその参考文献) に基づくさまざまなパフォーマンス測定を使用して実行されました。カテゴリメトリクスに関連する方程式は補足資料に含まれています (表 S3)。このカテゴリ分析では、ターゲット ドメインにおけるひょうの最大確率が、GA 最適化によって与えられた確率しきい値を使用してひょうの発生に変換されました (つまり、表 3 に含まれるように、 $PH > \text{and} = 0.0049$ の場合にひょうの日が考慮されます)。次に、分割表を使用して、雹の日を特定するための雹モデルの精度を測定する検出確率 (POD) を計算しました。POD は 0 から 1 まで変化し、POD = 1 は降雪日の完全な推定を示します。POD は、正しく検出されなかった雹日の割合を測定するミス率 (MR) で補完できます。誤警報率 (FAR) は、推定された降雪日数のうち実際に発生しなかった割合を定量化するため、FAR = 0 は完全なモデルを指します。パース スキル スコア (PSS、パース、1884) は、ひょうモデルが「ひょう」の日と「ひょうが降っていない」日を正しく区別するかどうかを調査するために使用されており、特にひょうなどのまれなイベントに役立ちます (2000 年から 2020 年の期間で 1,250 件のイベント)。PSS = 1 は、ひょうモデルがイベントの発生につながる状況を完全に区別していることを示します。

そうでないものと PSS = 0 は、ひょうモデルが次のことを実行できないことを示します。「あられ」の日と「あられのない」日を区別します。

4. 結果

4.1. イタリア上空で雹の観測

ESWD のひょうデータの空間分布は、主にイタリア北部と沿岸地域に集中しています (図 1a)。これらの地域には貴重なインフラと農業活動があるため (Baldi et al., 2014)、ひょうの危険に対して非常に脆弱になっています。

図 1b は、2000 年から 2020 年の期間に登録された ESWD イベントの数を示しています。近年の記録数の増加は、ひょうの発生頻度の傾向よりも、これらの出来事の報告におけるボランティアの関与が高まった結果である可能性が高い (Groenemeijer et al., 2017)。登録されたひょう現象の増加は 2009 年から始まりましたが、例外もいくつかあります。たとえば、2002 年には 24 件以上のひょう現象が報告されました。ただし、ここで使用されるひょう現象の 50% 以上が 2019 年と 2020 年にのみ集中していることに言及することが重要です。深刻度に関しては、年ごとの変動も観察されます。たとえば、2009 年には、25 件中 18 件で直径 2.5 cm を超えるひょうが発生しました。ARPA FVG 地域のひょう観測数は 1988 年から 2016 年にかけて均一に分布しており、記録数の最大値は 1998 年と 2008 年、最小値は 2006 年、2015 年、2016 年でした (図 2)。

イタリアの ESWD 観察では、他のヨーロッパ諸国と同様に、ひょうは主に午後に発生することが示されています (図 1c) (Fluck et al., 2021; Nisi et al., 2016)。ただし、ひょう現象はすべての時間帯間で識別されます。特に、最大値は UTC の 14:00 から 15:00 に得られます。これは、毎日の対流サイクル、地表近くの温度、およびその結果としての潜在気温低下率の増加に関連しています (Punge and Kunz, 2016)。

イタリアでのほとんどの現象は 4 月から 10 月の間に発生し (図 1d)、最も頻度が高いのは 6 月と 7 月です (ひょう現象の約 40% がこの 2 か月間で発生します)。同様の変動パターンは、さまざまなデータソースを通じて他のヨーロッパの近隣諸国でも観察されています (例: Jeli et al., 2020; Kunz et al., 2020; Pú ik et al., 2019)。気温が高く大気的不安定性が高まるため、ひょうの活動は主にこれらの月に集中します。

これらの結果は、ARPA FVG データにおける雹報告の分布とも一致しており (Manzato et al., 2022b; Giaiotti et al., 2003)、ピーク月は 6 月で、次に 7 月、5 月が続きます (図 2c)。

4.2. イタリア上空での雹降雨の環境条件

GA が選択した予測変数が雹環境と非雹環境で異なる能力を理解するために、ERA5 予測変数とイタリアの領域で雹が降る確率との関係を毎日分析します。この分析は、GHM と SHM の両方に対して実行されました (図 4)。CAPE と FLH の共同分布の対応する結果は補足資料に含まれています (図 S4)。これらの確率分布は、遺伝的アルゴリズム (表 3 および表 S2) および「

セクション 3.1。

赤線と黒線の間の分離によって示されるように、CAPE 分布は、ひょうに適した条件が存在する場合と存在しない場合で異なります (図 4a)。BLH と VIDMF (それぞれ図 4d と e) を除き、すべての変数は同様の挙動を示し、そのピーク値は雹環境と気候環境の両方でほぼ同一です。CAPE 値が 500 J/kg を超える場合 (図 4a の実線の青の曲線)、大気の状態は一般に雹が降るのに適しています。次に、激しいひょう雨に適した環境条件には、高い CAPE 値 (約 1000 J/kg) が必要です (図 4a、破線)。

KI インデックスと TOTALI インデックスは、20 ~ 40,000 の間の変動を示します。ひょうが発生する可能性がある場合は、それぞれ 45 ~ 60K。CBH 値は、重篤なイベントと非重篤なイベントで同様の値を示します (図 4b、それぞれ青い点線と実線)。値の範囲はどちらの場合も 200 ~ 3200 m です。0 から 400 の範囲の CIN 値 (図 4g) は、ひょう現象が発生しやすい日の指標であり、CIN 値の最も高い確率は約 200 J/kg です。実際、CIN は、CAPE を最大化し、より強力な対流をもたらすエネルギーの蓄積の確立に貢献する可能性があります (Taszarek et al., 2020)。同様に、10 ~ 25 m/s の WSH3 値 (図 4i) および 5 ~ 40 m/s の WSH6 値 (図 4f) は、ひょう嵐が発生する強い可能性を示唆しています。

図 4d は、ひょう条件の確立に適したさまざまな BLH 値を示しています。ただし、この作品のほとんどのイベントは、気候学的値に近い ≈ 200 m に関連付けられています。

4.3. イタリア上空のひょう確率の特徴付け

前のセクションで説明したように、GA は、選択した変数の個々の確率の単純な積として取得される、日次ひょう確率 (PH) を定義するために必要なすべての要素を提供します。

GHM の場合、これは次のように取得できます。

$$= \prod_{i=1}^n P_i \tag{7}$$

SHM の場合、ひょうの確率は次のように計算されます。

$$= \prod_{i=1}^n P_i \tag{8}$$

したがって、定義上、PH は [0, 1] で変化する量です。個々の予測変数のそれぞれが、その日の確率が 1 に等しいと仮定した場合、PH は 1 に等しくなります。これは統計的に雹に有利な条件に関連しています (図 4)。ただし、PH は多数の予測子の確率の積であるため、PH は一般に 1 よりもはるかに低くなります (補足資料の図 S5)。

PH インデックスは確率論的であるため、その結果を観測値に関連付けるには追加の選択が必要です。PH のしきい値は何ですか？

その日がひょうの可能性があると考えるには、それを超える必要がありますか？このタイプの値は、ベジアン事後推定によって計算されることがよくありますが (例: Matera et al., 2020; Nisi et al., 2016)、この場合、GA は直接閾値を提供します (表 3 および表 S2 を参照)。次に、1979 年から 2020 年までのひょうの季節 (4 月から 10 月、図 5) および 1 か月ごと (図 6 および 7) の平均発生数が推定されました。

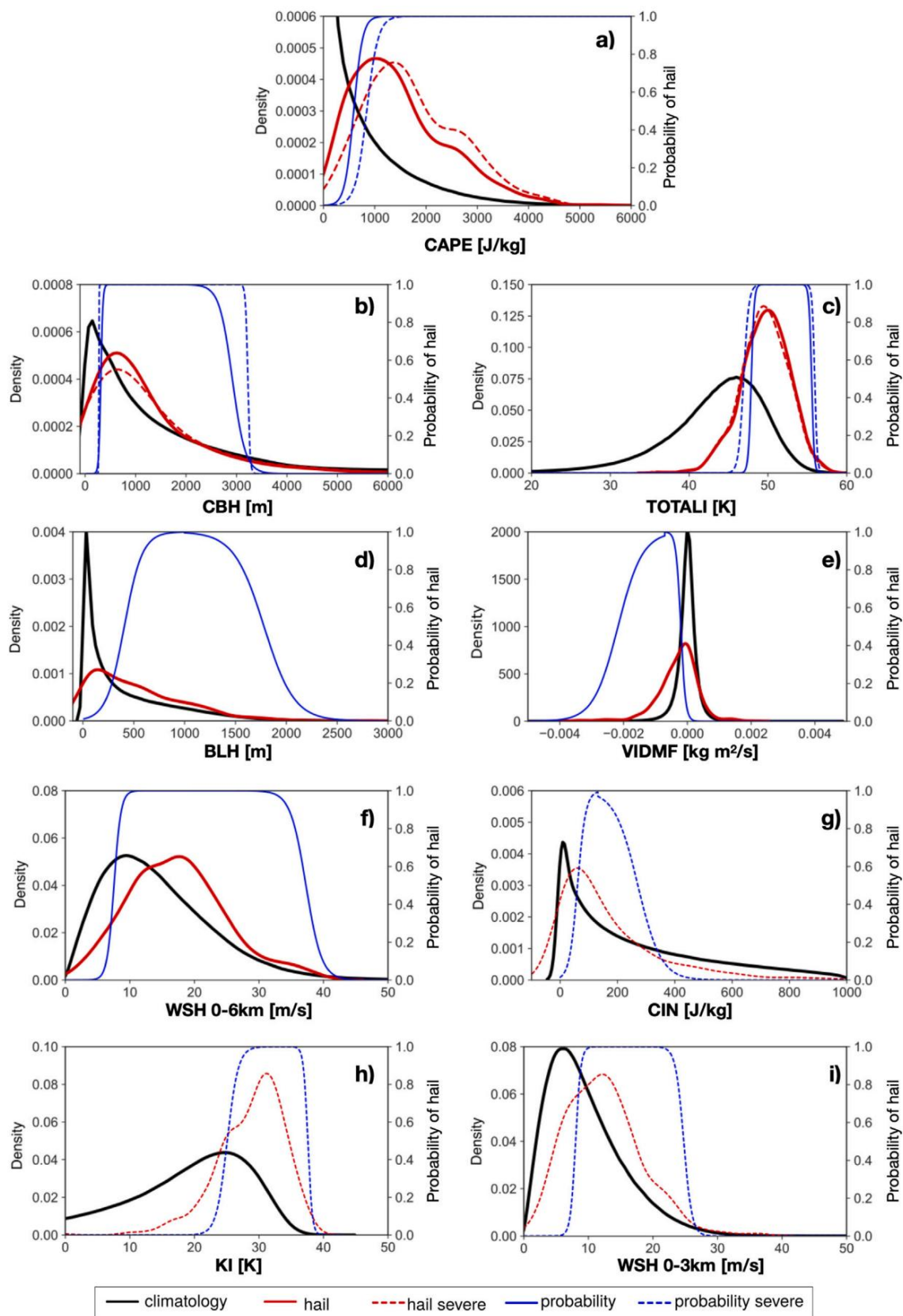


図 4. (a) 対流利用可能位置エネルギー (CAPE)、(b) 雲底高さ (CBH)、(c) 合計指数 (TOTALI)、(d) 境界レベル高さ (BLH) の確率密度関数、(e) 発散水分フラックスの垂直積分 (VIDMF)、(f) 0 ~ 6 km の間の WSH (WSH6)、(g) 対流障害 (CIN)、(h) K 指数 (KI)、および (i) バルク0 ~ 3 km のウィンド シアー (WSH3)。黒線は気候分布に対応し、赤線はひょう条件付き確率に対応します。GA アルゴリズムから得られたモデル化された確率を表す双曲線関数は、青い線 (実線 - GHM、破線 - SHM) で表されます。これらのプロットは、GHM および SHM の生成のために GA によって選択された変数について、2000 年から 2020 年 (4 月から 9 月まで) のイタリア全土の集計データに対応しています。(この図の凡例における色の参照の解釈については、この記事の Web バージョンを参照してください。)

V. トラルバラ。

極端な気象と気候 39 (2023) 100535

全体的に見て、PH とそれに関連するひょうの発生頻度が最も大きい (年間 20 回を超える) のはイタリア北部の平野です。ヴェネツィアの低地とポー渓谷下流、ロンバルディア州のアルプスの麓、そしてピエモンテ平野の 3 つの主要なスポットが区別できます。 GHM モデルと SHM モデルの両方によると、アルプスでは雹の危険性は非常に低く、GHM に関してはトレンティーノ - アルト アディジェ (TAA) 地域でわずかな信号しかありません。この信号は年間約 5 件のイベントに相当し、アディジェ渓谷(北緯 46 度〜東経 11 度) 沿いで検出可能です。

イタリア中部では、アドリア海沿岸および隣接する内陸部でひょうの発生頻度が高くなります (年間最大 15 回)。周波数は、空間分布がより不規則であるティレニア海岸に沿ってわずかに低く、海岸、特に GHM に非常に局所的なピークがあります(図5a)。実際、年間の雹発生頻度は、GHM モデルと SHM モデルの間で最大 4 日異なり、最も大きな違いはイタリア中部に影響を及ぼしました(図5c)。イタリア南部で最も雹が発生しやすい地域には、プーリア州 (特に SHM、図5b) とシチリア島の東端が含まれており、その頻度は年間 10 回に達します。アルプスに関しては、どちらのモデルでもアペニン山脈に沿って雹の発生頻度は低いです。山に関連するこの特定の空間パターンは、「考察」セクションでさらに詳しく調査されます。

雹の降る日の月ごとの変動は、両方のモデルで非常に顕著です (GHM - 図 6 および SHM - 図 S6)。比較を容易にするために、GHM と SHM の違いを図 7 に示します。GHM では、4 月に雹が降るのに適した条件が見られるのは数日だけですが (SHM ではイベントはありません)。5 月には特にイタリア北東部で雹の発生頻度が増加し、危険度が高い 6 月に最高値に達します。アドリア海沿岸の北部および中部でも検出されています。

7 月には、アルプスの麓に沿って GHM によっていくつかの潜在的なイベントが依然として観測されていますが、8 月にはその頻度がわずかに減少します。9 月と 10 月には、ひょうの発生頻度パターンが変化し、イタリア北部では潜在的な降雨量が急激に減少し、南部では急激に増加します。

イタリア南部におけるPH由来のひょう危険信号は、主に沿岸地域に限定されており、そこでは海熱容量により、夏の数ヶ月を超えて温暖な気温が続き、大気圏の不安定性が促進されている(Khodayar et al., 2016)。さらに、地中海盆地南部では、夏の間、水循環とサイクロンの活動が最小となり、対流が起こりにくいため (Lionello et al., 2016; Kelley et al., 2012)、北緯に関しては雹の季節。

GHM は、4 月、5 月、10 月に SHM よりも高い雹の頻度をもたらします(図7)。6 月と 9 月では、違いがほとんどないため、2 つのモデルはほぼ同等です。SHM は、主にポー渓谷で 7 月と 8 月に高い頻度を示します。

4.4. ひょうモデル評価: フリウリ・ヴェネツィア・ジュリア地域

ひょうモデルのパフォーマンスを評価するために、ひょう観測の独立したソースとして ARPA FVG データセットを採用しました。過剰適合を避けるためには、独立したデータ ソースを使用することが重要です。このサブセクションでは GHM 評価に焦点を当てますが、SHM の対応する結果は補足資料に記載されています (図 S10 および S11)。雹の発生における年々変動を検出する GHM の能力は、1988 年から 2016 年までのさまざまな月 (4 月から 9 月) について、すべての単一ドメインについてだけでなく、ドメイン全体 (つまり、での雹の日) についても調査されました。この分析は、FVG 地域でひょう発生数が最も多い 6 月、7 月、8 月 (図 8) に焦点を当てています。4 月、5 月、9 月の対応する数値は、一貫性を保つために補足資料 (図 S7 および図 S8) に含まれていますが、これらの月のひょう記録の数が限られているため、慎重に解釈する必要があります。

図8は、各年および各月のひょう現象の観測数と推定ひょう確率 (PH)を示しています。変動性

2 つの指標のうち、特に領域全体を考慮した場合、良好な年ごとの一致を示しています(図8.5 行目のパネル)。PH とひょうの観測値がよく一致した特定の月は、たとえば、1989 年 6 月、2007 年 7 月、または 1994 年 8 月です。この結果は、相関関係の観点からも定量化されており、それらの月については正の有意な値が示されています。数か月。結果は、好ましくないひょう環境でも一貫しています。低い PH 値は、特定の月および年 (例: 2000 年 6 月、2006 年 7 月、または 2015 年 8 月) に検出されたひょう現象の数が少ないことに対応します。したがって、ひょうモデルは、特定のボックスおよび月におけるひょう発生数の年々変動、特に通常よりも多いまたは少ない特定の年のひょう発生数をシミュレートすることができます。ただし、イベント数が少ないのに PH が高い月もあります (たとえば、2012 年 6 月)。

相関関係が最も高い月は 7 月で、すべての個別ドメインで正の有意な相関関係が見られます (最大 0.7)。6 月において、有意でない相関を示しているのはドメイン 4 だけです。8 月のほとんどのドメインで相関値は約 0.3 ですが、これらの相関は有意ではありません。これは、6 月と 7 月に比べて今月のひょうの記録が少ないためである可能性があります。ただし、完全なドメインを考慮すると (レコード数も増加します)、他の夏の月と同様に、相関関係はより高く重要になります。

ひょうモデルのカテゴリ評価は、GA によって与えられた確率しきい値 () を超えるひょうの確率に従って、検出確率 (POD)、誤警報率 (FAR)、およびバース スコア (PSS) を使用して実行されました。これらの指標は、「ひょう」の日と「ひょうが降っていない」日を区別するためのひょうモデルの可能性を評価するため、に、以前の研究ですでに使用されています (例: Nisi et al., 2016; Mohr et al., 2015a) ;万里, 2012) 。

図9は、6月のPOD値が7月と8月よりも高いことを示しています。最高の POD は、6 月にドメイン 3、7 月にドメイン 4、6 月にドメイン 1〜4 で得られます。すべての個々のドメインで、FAR は POD よりも高く、これは GHM がひょうの発生を過大評価していることを示唆しています。逆に、ドメイン 1〜4 の結果は、ひょう観測が集約された場合に POD が FAR よりも高いことを示しており、考慮されたドメインが大きい場合、ひょうモデルが識別を保持している (モデルの出力は観測結果に応じて異なります) ことを示唆しています。FVG ドメイン内の地域的な変動は、さまざまなドメインの個別の評価を通じて分析されています。最良の PSS 値は、ドメイン 3 で得られます。

6 月と 8 月、ドメイン 4 は 7 月です。FAR 値は個々のドメインでは非常に高いですが、ドメイン全体を考慮すると 0.5 を下回ります。分割表の具体的な値と各ケースの指標は補足資料 (表 S4) に含まれています。

5. ディスカッション

5.1. PH から導き出される雹の頻度の評価

この研究では、雹の確率に基づいてイタリアの領土上での雹の状況が調査されました。これまでの研究では、アルプス以南の地域がヨーロッパで最も大規模なひょう現象が発生しやすい地域であることが示唆されている (例: Punge and Kunz, 2016; Mohr et al., 2015b) 。この研究で提示された雹の気候の空間パターンは、他の研究で得られたものと似ています (例: Prein and Holland, 2018; Baldi et al., 2014)。ただし、GHM と SHM によって与えられる絶対周波数は高くなります (同様に)。それは空間解像度です)。逆に、Punge et al. (2014) は、0.1 でのひょう発生頻度を提供しました。ホットスポットと関連するひょう発生頻度は両方とも、GHM および SHM (年間最大 20 件) とよく一致しています。

これらのホットスポットは、ラビオラの論文のように文献で議論されているいくつかの雹のエピソードに関連しています。(2020)およびManzato et al. (2020) (イタリア北部)、Montopoli et al. (2021) (アドリア海沿岸)、

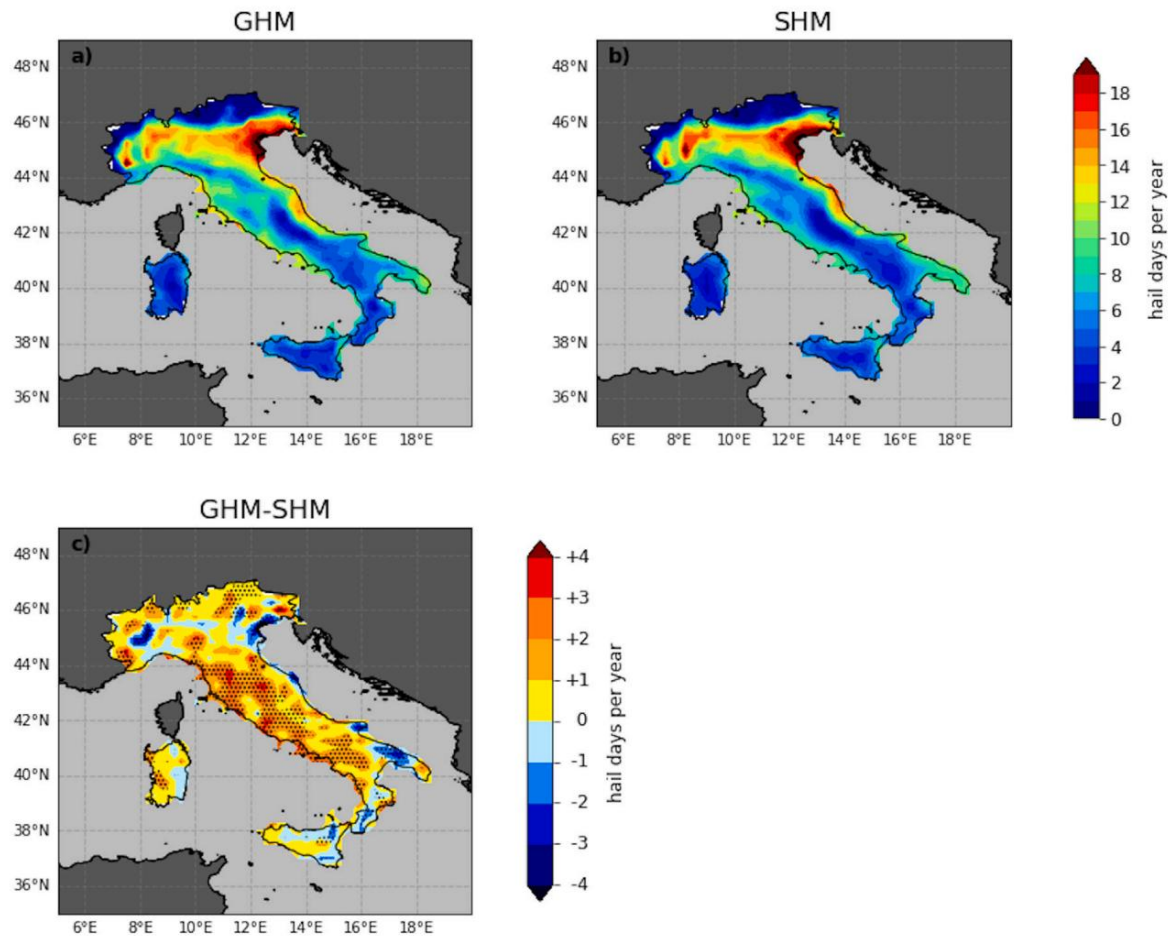


図 5. (a) GHM および (b) SHM に基づく推定電日数の平均と、推定された (c) GHM-SHM 電日数の差。電の日数は、1979 年から 2020 年までの電の季節 (4 月から 10 月) に対応します。点描は統計的に有意な差を示しています ($p < 0.05$)。

Roberto et al. (2016) および Marra et al. (2017) (ティレニア海岸) および Vulpiani et al. (2015) (シチリア島東部)。

両方のモデルの結果は、山岳地帯と隣接する平地または海岸地帯との間の勾配を示しています。地形誘発メカニズムは、対流の不安定性を助長することが知られています。ただし、モデルの出力によると、山の上で電の条件が良好な日数は少ないです。たとえば、イタリア北東部のトレンティーノ - アルト アディジェ (TAA) 地域は特にひょうの危険がありやすいことが知られています (Eccel et al., 2012)。実際、この地域は典型的なリンゴ園に被害を与える雷雨やひょう嵐でよく知られており、広範なひょうよけネットシステムを含む軽減策や予防手段が大部分導入されている (Rogna et al., 2021; Baiaumont et al., 2016)。作物や果樹への影響は、小規模から中規模のひょう石であっても劇的な影響を与える可能性があります (Pú ik et al., 2019)。これにより、これらの地域でのひょう現象に対する脆弱性がさらに高まります。セクション 4.3 で指摘したように、TAA はモデルではひょうホットスポットとして機能しません。この矛盾には主に 2 つの説明があります。まず、ERA5 などの再解析製品の複雑なトポグラフィが平滑化されます。以前の再解析と比べて ERA5 の水平解像度が高くなっているにもかかわらず、アルプスの谷の複雑なパターンはまだ完全には表現されていません (Muñoz Sabater et al., 2021)。下位のモデル レベルと対応する気象フィールドは平滑化された地形に関連しているため、PH 自体を反映する CAPE や CIN (Markowski および Dotzek, 2011) などの一部の予測変数の信頼性に影響します。第二に、ESWD データベース内の山岳地帯に関する報告の数は一般に少ない。これは、自主ベースのひょう報告が人口密集地や都市部に偏っているためである。したがって、GA は以下を適切にカバーしていない可能性があります。

山ひょう現象を気象予測子の最適な選択に使用します。

5.2. GHM と SHM の比較

すでに述べたように、GHM は TAA を含む山地でのひょうの発生頻度を高めます (図 5c)。また、ドメイン 3 で検証された場合、検証マトリクスの点でわずかに優れた結果が得られます。

および 4 をドメイン 1 および 2 と比較しました (図 9)。ドメイン 1 と 2 には高標高の観測点が含まれており、そこでのひょう嵐は主に地形過程に関連しています (Manzato, 2012; Giaiotti et al., 2003)。

検証マトリクスの値の差は非常に小さいですが、それらは月を通して一貫しています。一方、ポー渓谷とアドリア海沿岸に沿った、いくつかの有名な電害ホットスポット上の SHM では、より高い頻度 (年間最大 3 回のイベント) が観察されています。変動性という点では、SHM の電の季節は GHM に比べて夏の終わりにシフトしています。イタリアのドメイン全体を考慮すると、SHM と比較して GHM のパフォーマンスがわずかに優れていることが 2021 年と 2022 年にも見られます (補足資料、セクション S1)。2 つのモデル間のこれらすべての違いは、(1) キャリブレーションに使用されたイベントの異なるセット、および (2) 結果として GA によって選択された変数の異なるセットに起因します。

たとえば、CAPE、ジョイント CAPE と FLH、CBH および TOTALI は 2 つのモデル間で共有されます。ウインドシアも共有ですが、

異なるレベル内で、GHM の場合は 0 ~ 6 km、SHM の場合は 0 ~ 3 km。

次に、SHM には、GHM 予測子のリストに属する BLH と VIDMF の代わりに、CIN と KI が含まれます。選択された予測変数が示唆するのは、

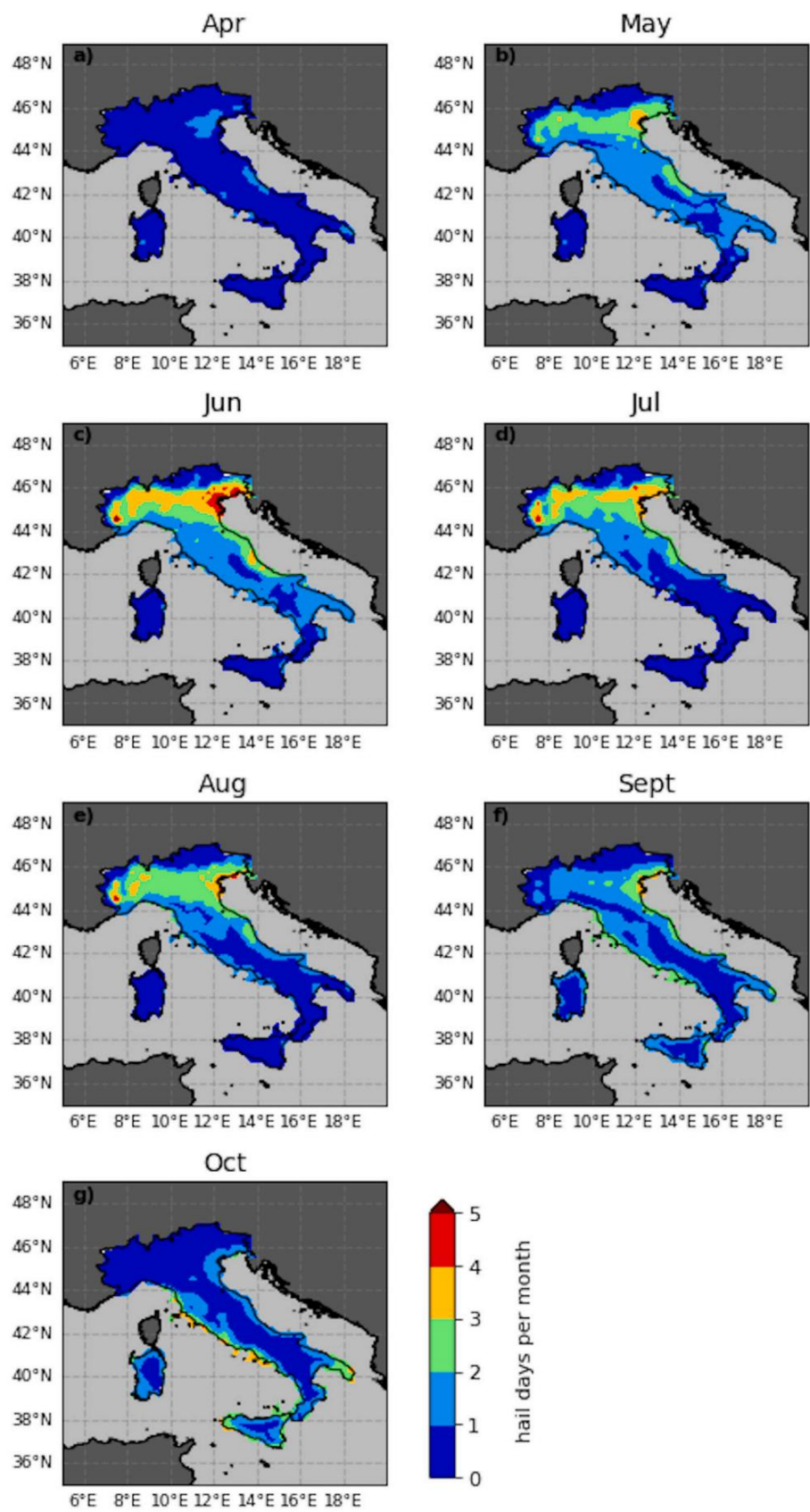


図6. 1979年から2020年のGHMIに基づく推定降雹日数の月平均。

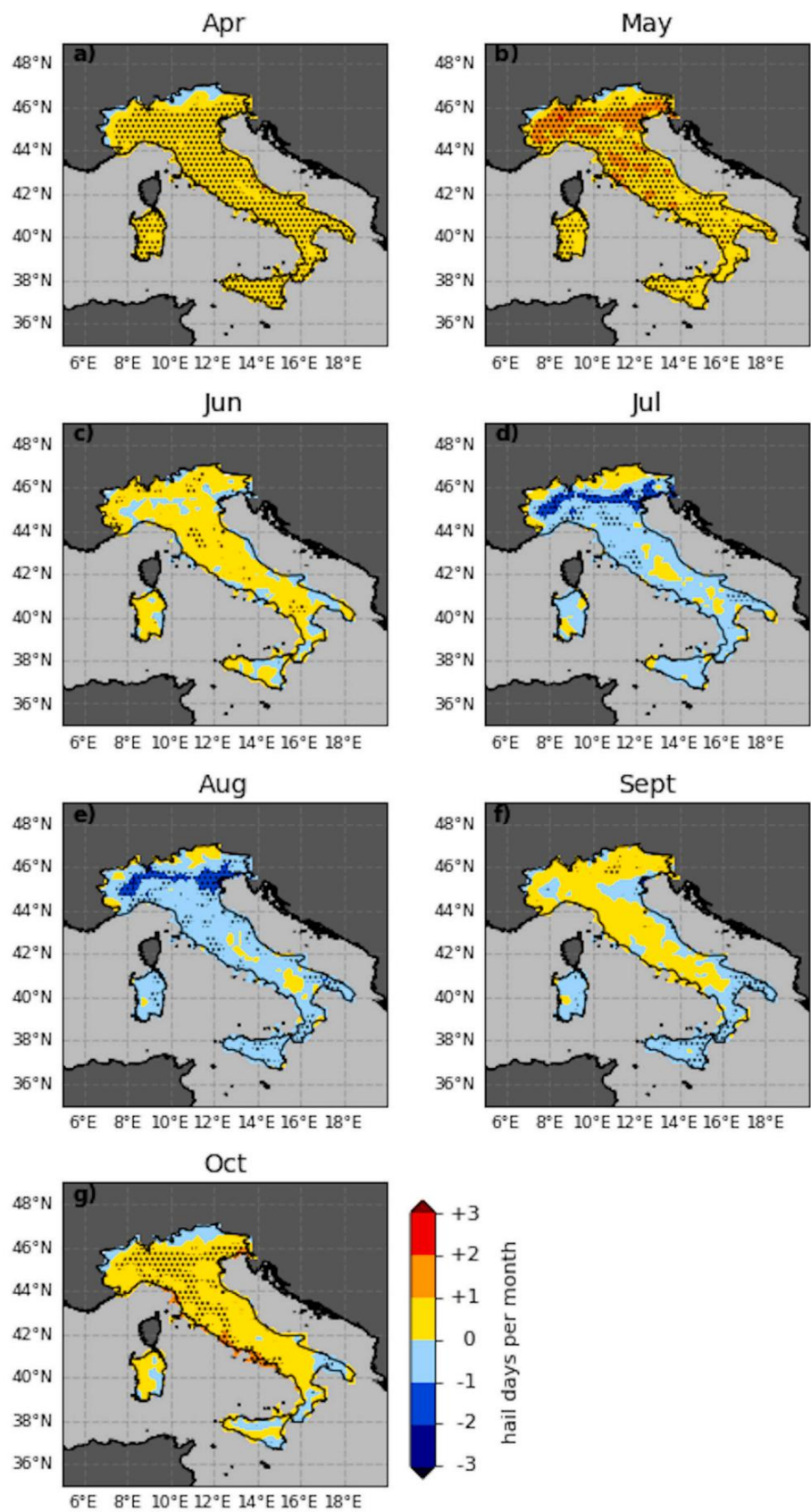


図 7. 1979 年から 2020 年の推定降雹日数の月平均に対応する GHM-SHM の差。赤 (青) の陰影は、雹の日数が SHM よりも GHM の方が高い (低い) ことを示します。点描は統計的に有意な差を示します ($p < 0.05$)。 (この図の凡例における色の参照の解釈については、この記事の Web バージョンを参照してください。)

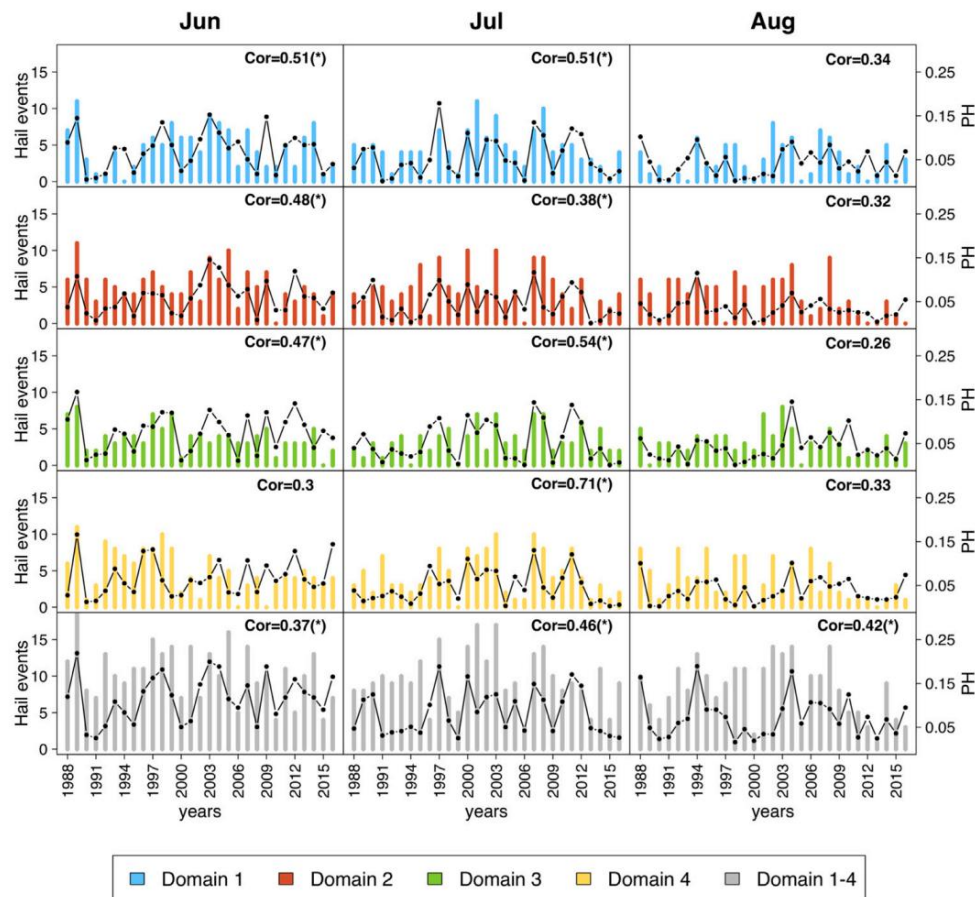


図 8. 単月および年ごとの ARPA FVG ひょうイベントの数 (バー) および GHM の日最大 PH の月平均 (ドメインの位置については図2aを参照)。PH とひょう観測数の相関関係が右上隅に表示されます。95% の信頼水準での有意な相関値にはアスタリスクが付けられます。

SHM は対流の可能性が高い状況に対してより敏感であることがわかります。対流の不安定性は通常、地表近くの太陽加熱が大きくなる最も暖かい月に陸上でより高くなります (Lolis, 2017; Holley et al., 2014)。暖かく湿った空気の上昇により、CAPE およびその他の対流指数が極端な値に達し (Taszarek et al., 2018)、それに応じて PH が増加します。さらに、CIN は対流の開始を遅らせるため、エネルギー放出 (CAPE) が大きくなります。

CIN と CAPE の両方の値が高い環境は、大きなひょうが発生する可能性がある孤立したスーパーセルと関連していることが多いため、最も破壊的です (Calvo-Sancho et al., 2022; Taszarek et al., 2020)。実際、激しいひょう現象の大部分は7月と8月に発生し、SHMは主にそれらのデータに基づいて校正しています (図1d)。最後に、ウィンドシアの計算に使用されるさまざまな垂直レベルは、SHM (WSH03 を使用) が GHM (WSH06) よりも平滑地形問題の影響をより強く受けていることを示唆しており、これは、電を再現する能力が乏しいことのもう 1 つの潜在的な説明です。山の可能性。

5.3. GA が選択した予測子のモデル出力への影響

前のセクションで説明したように、ひょうモデルのパフォーマンスは、GA によって示される予測子のセットに依存します。予測子の判別力は、図4の気候曲線 (黒) と電条件付き曲線 (赤) がどの程度重なるかによって収集できます。CAPEは、電環境の最良の代用として一般に認識されています。たとえば、CAPE は雷雨とひょうを伴う雷雨を区別する能力を示しました (Czernecki et al., 2019)。さらに、CAPE はひょう石のサイズと正の相関があることが示されています (Taszarek et al., 2020)。ひょう条件付きの値

この研究で得られたCAPEは、ヨーロッパに焦点を当てた他の研究 (例、Taszarek et al., 2018; Brooks, 2009) と非常に似ていますが、米国のCAPEよりも低くなります (Prein and Holland, 2018)。このような違いは、電環境の既知の地域依存性を反映しています (Allen et al., 2020; Taszarek et al., 2020)。CAPE を超えて、ウィンドシアは、地表から 3 km までおよび地表から 6 km までのいくつかの電研究でも良い候補と考えられています (それぞれ、Prein and Holland, 2018 と Brooks, 2009)。ヨーロッパについては、Taszarek et al. (2020) は、WSH03 (WSH06) が 15(20) m/s を超えると悪天候と関連があることを発見しました。WSH03およびWSH06の電条件付きPDFのピーク (それぞれ図4iおよびf) は、それらの値に等しくなります。対流指数に関しては、Mohr and Kunz (2013) および Kunz (2007) で参照されているものが標準的な選択肢です。表 1 で考慮されたすべての対流変数は、最終的に GHM または SHM、あるいはその両方で選択されています。Kunz (2007) における TOTALI と KI (ドイツを参照) のひょう条件付き値は、5 と比較してわずかに高くなります。

一方、Manzato (2012) は、電発生時の FVG 地域での測深から CIN 値を導き出し、CIN > 50 J/K が電の日の検出の PSS を最大化することを発見しました。この閾値は、図5gに示すように、ESWD 観測から導出されたひょう条件付きPDFのピークに等しくなります。最後に、測深由来のパラメーター、湿度および温度パラメーターなどの他の典型的なひょう予測因子が文献で検討されています (Czernecki et al., 2019)。

5.4. 検証アプローチと指標

GA は、キャリブレーションに使用されるひょう現象に応じて予測子を選択します。あらゆるイベントはモデル出力を検証するためにも必要であり、キャリブレーションおよび検証データセットの選択は次のとおりです。

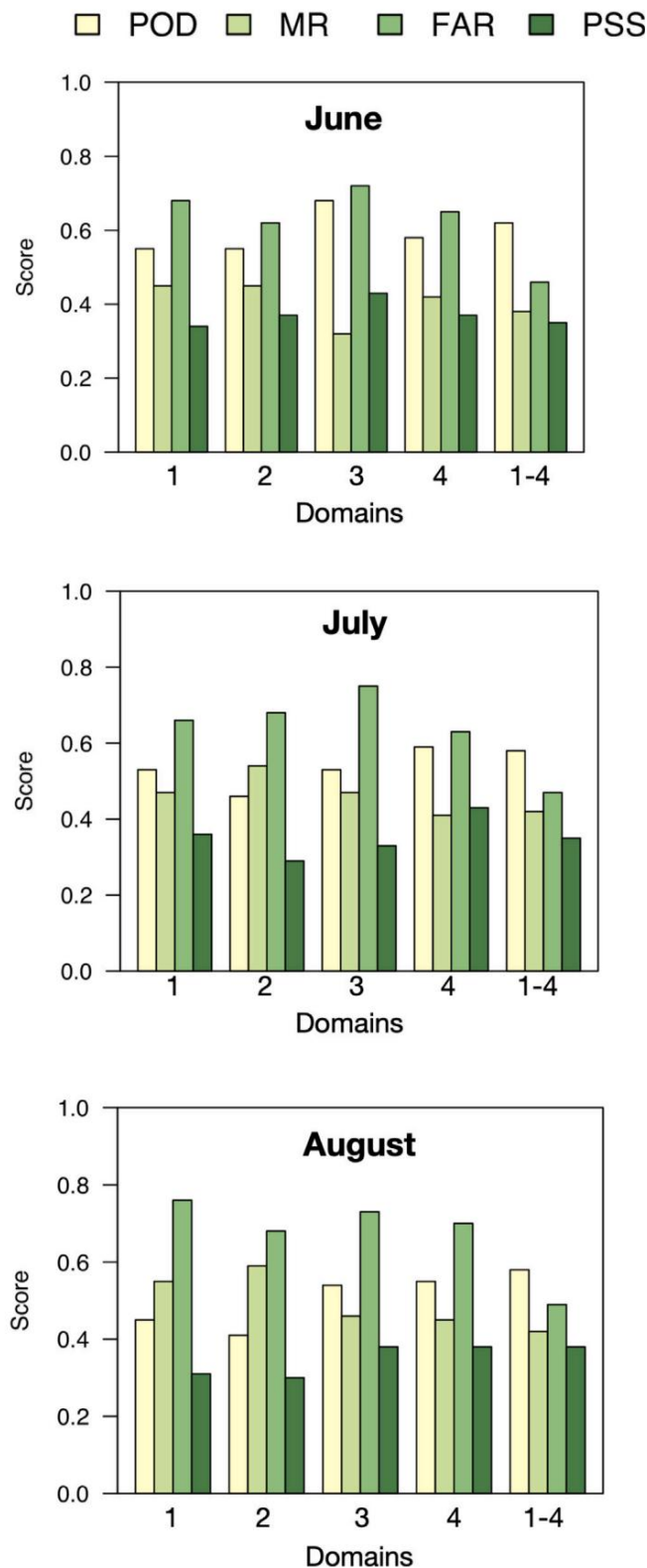


図 9. 検出確率 (POD)、ミス率 (MR)、誤報率 (FAR)、およびバース スキルスコア (PSS)。GHM からの PH 値は、二値のひょう発生に変換されました (ひょうの日とは、確率しきい値 0.0049 を超える PH を持つ日です)。ARPA FVG データセットは観測基準です。スコアは 1988 年から 2016 年の期間の 6 月、7 月、8 月について計算されました。

重要なこと。この研究では、2 つの異なるひょう観測データセットが使用されました。ESWD レポートは GA の入力データとして機能し、ARPA FVG データベースは地上ベースのデータとして使用されました。

独立した検証のための参照。もちろん、2 つのデータセットは補完的です。ESWD は 2000 ~ 2020 年の期間をカバーし (図 1b)、ARPA FVG データセットは 1988 ~ 2016 年まで利用可能です (図 2b)。ESWD データセットにはひょう現象が含まれているため、キャリブレーションにより適しています。

イタリア全土に広がるため、モデルがイタリアの雹の変動を再現するために必要な、ある種のさまざまな雹の環境条件を説明します。セクション 4.4 で説明したように、雹が降っていない日を正確に選択することで、このキャリブレーション データセットのバランスが良くなりました。一方、ARPA FVG 雹パッド ネットワークは、良好な時間的連続性イベントと、雹と非雹の適切な表現 (雹パッド測定システムによって保証される) を備えた、雹イベントの客観的かつ均質なデータセットで構成されています。パフォーマンスメトリクスを計算します。

検証プロセスに関連するいくつかの欠点が、特にイタリアにおけるこれまでのひょう研究で特定されています。Ec-celらの研究では、(2012) では、ERA40 気象変数は、非常に局所的な雹パッド ネットワークと比較されていますが、イタリアの北東部全体をカバーする 6 つのグリッド点 (空間解像度 2.5°) にわたって考慮されています。バルディら。(2014) は全国規模の研究を開発しましたが、結果は 6 つの気候マクロ地域で集計されており、これは全国的なひょう監視システムの欠如に関連しています。さらに、検証は、原稿には示されていませんが、その時点で利用可能な ARPA FVG データを使用して、FVG 上でのみ実行されます。したがって、この研究で示されている FVG 地域におけるイタリアの雹モデルの検証 (セクション 4.4) は、イタリアで入手可能な現在の情報と比較して大幅な改善を示しています。

欧州レベルでは、保険金請求やレーダー反射率などのさまざまな独立したデータソースを使用して検証が行われています (例: Madonna et al., 2018; Nisi et al., 2016; Mohr et al., 2015a)。非常に優れた空間カバー率。ただし、イタリアに関しては、出力は特定のサイズ (100 × 100 km) のボックス、気候地域、または国のいずれかの非常に大きな領域にわたって集約されます。それにもかかわらず、パフォーマンスの指標がここで示した GHM の指標を超えることはほとんどありません。

たとえば、GHM モデルにおける雹の頻度の年々変動の相関係数は、FVG ドメイン全体で最大 0.5 のスコアを記録し、特定の月やサブドメインではさらにスコアが高くなりました。マドンナら。(2018) は、ボックスのサイズが FVG で使用されている検証ドメインの 2 倍であるにもかかわらず、最大 0.8 の相関を達成しました。

この作品。アレナら。(2015) 米国の大規模ドメインにわたってモデルを検証し、特定の過剰パフォーマンスの月および地域での対応する相関スコアは平均 0.5 でした。通常、最高のスコアは、検証に利用できるデータがより多くある雹のピーク月に達成されます。

ひょうモデルの設計方法、つまり、その発達に潜在的に有利な環境条件に基づいてひょうの発生を推定する方法により、ひょう現象のある程度の過剰予測が予想されます。実際、高い FAR 値は、厳しい嵐環境に関する同様の研究ですでに報告されているよく知られた問題です (例: Czernecki et al., 2019; Allen et al., 2015; Mohr and Kunz, 2013; Allen et al., 2019; Allen et al., 2015; al., 2011)。これは、稀で局所的かつ急速な現象 (雹など) の検出に伴う困難が原因であり、そのため観測のサイズが限られ、均一性が低くなります。したがって、実際には、POD と FAR の両方が文字通り 0 から 1 まで実行されるわけではないと予想されます (Hitchens et al., 2013)。Prein と Holland (2018) では、特定の検証指標は提供されていませんが、年間数件のイベントの過剰予測が観察されています。完全な FVG ドメインについて、GHM によって取得される最良の POD (FAR) 値は約 0.6 (0.45) です。これは、たとえば Mohr et al. の内容と同等 (改善) です。(2015b) および Czernecki et al. (2019) 国規模の検証のために取得。ブルマンらでは、(2019) では、POD は約 0.5 ですが、FAR は約 0.3 まで低下し、検証ドメインは FVG に匹敵します。ただし、モデルは衛星データを使用して構築されているため、観測バイアスの影響を受けません。最後に、Manzato (2012) では、POD と FAR の両方がより高く、PSS は GHM によって得られたものと類似しています。

要約すると、検証ドメインのサイズの増加はスコアの向上につながる可能性があります。しかし、ひょうハザード情報の品質と有用性も低下します。最適なサイズを定義するのは簡単ではありません。これは、データの可用性と必要な出力精度との間のトレードオフとして行う必要があります。

6. 結論

イタリアはヨーロッパで最も雹の危険にさらされている国の一つです。しかし、ひょう観測ネットワークが不足しているため、この国のひょう状況を体系的に特徴付けることができません。この制限を克服するために、大規模な大気変数と対流指数を、ひょう確率を推定するための予測因子として使用できます。この概念はいくつかの研究を促進し、主にさまざまな気候帯やひょう形成の環境条件を含む非常に大きな領域に取り組んできました。本研究では、大規模なERA5変数とイタリア上空のひょう発生との関連性が調査された。この分析により、特定の大気変数がひょう現象に及ぼす影響の違い（値と時間的変化の観点から）が特定されます。

この研究では、ERA5 再解析で利用可能な大量の情報を活用して、空間解像度 30 km でイタリア領域にわたる雹の確率の長期時系列 (1979 ~ 2020 年) を提供するモデルを開発しました。文献にある雹モデルのほとんどは、激しい雹現象（通常、雹の直径が 2 ~ 3 cm を超える現象として定義されます）に焦点を当てています。これらは、本研究で開発された SHM に似ています。この研究の革新的な側面は、ひょう石のサイズに制限を設けずに、利用可能なすべてのひょう観測を使用してトレーニングされた一般ひょうモデルも開発されていることです。両方のアプローチの長所と短所を調査するために、SHM との比較が含まれています。

開発されたモデルは、現在利用可能なひょうモデル(Prein and Holland、 2018)からインスピレーションを得ており、遺伝的アルゴリズムとの統合によって柔軟性と適用性を向上させることを目的としています。GA 法の主な利点は、最適な予測子のセットを系統的に特定できることです。ただし、これらの予測子は、特定の設定（キャリブレーションに使用される領域や観測データセットなど）によって異なる場合があります。さらに、この GA アプローチは、降雹日を定義するための最小 PH 閾値などのパラメータを提供します。これらは、客観的な方法で雹の危険性を確立するために不可欠です。

両方のひょうモデルの結果は、ひょう確率の最高値が初夏（晩夏）にイタリア北部（南部）に影響を与えることを示しました。特に、GHM は、ひょうの発生頻度が低く、通常は弱い夏の季節（4 月、5 月、9 月）を超えて役立つ可能性があります(Pú ik et al., 2019)、山岳グリッドポイント上でも役立ちます。この論文で示された結果は、 Prein and Holland (2018)に比べてより高い空間解像度 (0.25対1) で提供されており、ひょうの危険性の新しいサブ地域評価を可能にします。Preinと Holland (2018)モデルはもともと米国向けに開発され、いくつかの制限があるにもかかわらずヨーロッパで検証されました。逆に、この研究で開発された GHM と SHM はイタリア向けに設計され、検証されています。ひょう観測のアンダーサンプリングには依然として注意が必要であるため、検証は FVG 領域の特定のドメインに対して実行されます。特にほとんどのイベントが開催される夏の間、パフォーマンス指標は満足のいくものです。ただし、ひょうモデルにはある程度の過剰予測が発生します。これは、同様の確率的アプローチに共通する特徴です。

したがって、GHM と SHM の両方に改善の余地があります。まず、使用されている ESWD データと比較して、訓練用ひょう観測値がより均一に分布することで、理想的なキャリブレーションを実現できます(図1)。時間的スケールでは、ボランティアの参加が増えたおかげで、ひょうの報告数は近年増加しています。より堅牢なモデル設定には長期的な観察も重要であるため、これは有望です。

第二に、ひょうモデルは山岳地帯でさらに改善できる可能性があります。

グリッド点、現段階では、最下位のモデル レベルにおける ERA5 の平滑化地形の影響による制限が 1 つあります。再解析結果の解像度を向上させると、複雑な地形上で発生する大気プロセスをより適切に表現できるようになります。したがって、ひょうモデルにそれらを使用すると、これらよりもひょうの危険性をより正確に特徴付けることが可能になります。

地域。イタリアの領域は主に複雑な地形構造と陸海境界によって特徴づけられるため、これは準地域規模に対するひょうモデルの適用可能性を高めるために重要な側面です。 MERIDA (Bonanno et al., 2019)や ERA5-Land (Muñoz Sabater et al., 2021)など、ERA5 よりも空間解像度が高い再解析データが現在利用可能ですが、これらのデータセットの使用は簡単ではありません。十分な時間的範囲があり、出力される大気変数はかなり制限されています。

今後の研究では、相対的な寄与を評価できるように、予測因子の傾向計算を含め、過去数十年にわたるひょう災害の歴史的分析をカバーする予定です。最後に、大気変数の網羅的なセットを提供する、運用上の天気予報へのこの方法論の実装にさらなる努力が注がれる予定です。これにより、雹の予測を作成したり、季節、十年、気候変動シナリオの観点を含む複数の時間範囲で将来の雹の変動を調査したりすることが可能になります。

CREdIT著者寄稿文

Verónica Torralba: 概念化、データキュレーション、形式分析、方法論、執筆 - 原案、執筆 - レビュー。リッカルド・エナン: 概念化、データキュレーション、形式分析、方法論、執筆 - 原案、執筆 - レビュー。アントニオ・カンテッリ: 概念化、方法論、ソフトウェア、データキュレーション。 Enrico Scoc-cimarro: 執筆 - 原案、レビュー、方法論。 Stefano Ma-teria: 執筆 - 原案、レビュー、方法論。アゴスティーン・マンザト: 執筆 - 原案、レビュー、データキュレーション、方法論。

シルヴィオ・グアルディ: 執筆 - 原案、レビュー、方法論。

競合利益の宣言

著者らは、この論文で報告されている研究に影響を与えた可能性がある既知の競合する経済的利益や個人的関係を持っていないことを宣言します。

データの可用性

データはリクエストに応じて提供されます。

謝辞

著者らは、欧州過酷気象データベース (ESWD) で利用可能な雹データを提供してくださった欧州過酷嵐研究所 (ESSL) チームに感謝したいと思います。我々はまた、コペルニクス気候変動プログラムに基づいてERA5再分析を作成したECMWFにも感謝する。最後に、ひょうパッドのデータの収集と処理に協力してくださったフリウリ・ヴェネツィア・ジュリアのひょうパッドネットワークのボランティア全員と、OSMER - ARPA FVG のチーム (特にアンドレア・チコーニヤとマッシモ・センター) に感謝したいと思います。

付録 A. 補足データ

この記事に関連する補足資料は、オンライン <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100535> でご覧いただけます。

V. トラルバラ。 極端な気象と気候 39 (2023) 100535

参考文献

Allen,JT,Giammanco,IM,Kumjian,MR,Punge,HJ,Zhang,Q.,Groenemeijer,P.,Kunz,M.,Ortega,K.,2020年,地球システムにおけるひょうを理解する,地球物理学教師。 58。 <http://dx.doi.org/10.1029/2019RG000665>。

Allen, JT,Karoly, DJ,ミルズ,ジョージア州,2011年,オーストラリアの厳しい雷雨気候学および関連する雷雨環境。 8月,メテオロール。 海洋学者。 J。 61 (3),143,http ://dx.doi.org/10.22499/2.6103.001。

Allen, JT,Tippett, MK,Sobel, AH,2015年,米国の毎月の雹の発生と大規模な気象環境を関連付ける経験的モデル。 J.Adv.モデリング地球システム7、 <http://dx.doi.org/10.1002/2014MS000397>。

Baiaomonte, I.,Raffo, A.,Nardo, N.,Moneta, E.,Peparaio, M.,D'Aloise, A.,Kelderer, M.,Casera, C.,Paoletti, F.,2016年,コドリングググ(Cydia pomonella) に対するひょうよけネットの使用と,アルト アディジェ地方 (イタリア北部)で栽培されるリンゴ (cv. Braeburn) の官能品質についての研究。 J。 S c i。 96 (6),2025 ~ 2032 年。 <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.7131>。

Baldi, M.,Ciardini, V.,Dalu, JD,De Filippis, T.,Maracchi, G.,Dalu, G.,2014年,イタリアにおける雹の発生: 国家データベースと気候学に向けて,アトモス,解像度 138,268–277。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.012>。

Bonanno, R.,Lacavalla, M.,Sperati, S.,2019,新しい高解像度気象再解析イタリア データセット: MERIDA。 QJRメテオロール,学会 145 (721),1756 ~ 1779 年。 <http://dx.doi.org/10.1002/qj.3530>。

Boughorbel, S.,Jarray, F.,El-Anbari, M.,2017,Matthews 相関係数メトリックを使用した不均衡データの最適な分類器。 PLoS One 12 (6),e0177678。 <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0177678>。

Brooks, H.E.,2009,再解析データからのヨーロッパと米国の激しい対流の近接音,アトモス,解像度 93 (1),546 ~ 553。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.005>,第4回激しい嵐に関する欧州会議。

Brooks, HE, Lee, JW, Craven, JP, 2003 年,地球規模の再解析データから得た激しい雷雨と竜巻環境の空間分布,アトモス,解像度67、 73–94。 [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00045-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00045-0)。

Brown, TM, Pogorzelski, WH, Giammanco, IM, 2015 年,損害保険請求データを使用したひょう被害の評価,天気予報,学会 7 (3),197–210。 <http://dx.doi.org/10.1175/WCAD-D-15-00111>。

バンカース,MJ,クリモフスキー,学士,ザイトラー,JW,トンプソン,RL,ワイズマン,ML,2000年。
新しいホドグラフ技術を使用してスーパーセルの動きを予測します,天気予報。 15 (1),61–79。 [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(2000\)015<0061:PSMUAN>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015<0061:PSMUAN>2.0.CO;2)。

ガルボ＝サンチョ,C.,ディアス＝フェルナンデス,J.,マルティン,V.,ボルジャーニ,P.,サストレ,M.,ゴンサレス＝アレマン,J.J,サントス＝ムニョス,D.,フアラシ,J.,マルティン,ML、 2022年,ERA5に基づくスペインのスーパーセル対流環境 :雹と非雹の違い。

天気予報,ディン。 3 (3),1021–1036。 <http://dx.doi.org/10.5194/wcd-3-1021-2022>。

チャンソン S.A.,チャンソン D.,ヒルバーク S.D.,2009 年,全国のひょう嵐: ひょうとその被害に関するアトラス。 URL: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/15156>。

Chicco, D.,Jurman, G.,2020,バイナリ分類評価における F1 スコアおよび精度に対する Matthews 相関係数 (MCC) の利点。 BMCジエノム。 21 (1),1–13。 <http://dx.doi.org/10.1186/s12864-019-6413-7>。

Chicco, D.,Tötsch, N.,Jurman, G.,2021。 マッシュウ相関係数 (MCC) は2 クラスの混同行列評価におけるバランスの取れた精度,ブックメーカーの情報,および顕著性よりも信頼性が高くなります。 BioData 最小 14 (1),1 ~ 22。 <http://dx.doi.org/10.1186/s13040-021-00244-z>。

Czernecki, B.,Taszarek, M.,Marosz, M.,Pó rolniczak, M.,Kolendowicz, L.,Wys-zogrodzki, A.,Szturc, J.,2019。 大規模ひょう予測への機械学習の応用 - 重要性ERA5から導出されたレーダー反射率,雹の発生および対流パラメータ,アトモス。 Res. 227、 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.010>。

Dessens, J.,Frailé, R.,1994 年,フランス南西部のひょう石のサイズ分布,アトモス。
解像度 33 (1 ~ 4),57 ~ 73。 [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095\(94\)90013-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095(94)90013-2)。

Dixon, M.,Wiener, G.,1993 年,TITAN: 雷雨の識別,追跡,分析,およびナウキャストिंग - レーダーベースの方法論。 J。アトモス,海,テクノロジ。 10 (6),785–797。 [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(1993\)010<0785:TITANA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TITANA>2.0.CO;2)。

Dotzek, N.,Groenemeijer, P.,Feuerstein, B.,Holzer, AM, 2009 年,ヨーロッパの厳しい気象データベース ESWD を使用した ESSL の激しい対流性嵐研究の概要,アトモス,解像度 93、 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.020>。

Eccel, E.,Cau, P.,Riemann-Campe, K.,Biasioli, F.,2012 年,高山地域におけるひょうの定量モニタリング: 35 年間の気候学と大気変数との関連,内部。
J。C l i m a t o l。 32。 <http://dx.doi.org/10.1002/joc.2291>。

フェルナンデス,A.,ガルシア,S.,ガラル,M.,ブラティ,R.C.,クラウチック,B.,エレーラ,F.,2018年。
不均衡なデータセットから学ぶ,第 10 巻,Springer。

Fluck, E.,Kunz, M.,Geissbuehler, P.,Ritz, S.P.,2021,ヨーロッパにおけるひょう発生頻度のレーダーベースの評価,ナットハザードアースシステム科学 21 (2),683–701。 <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-21-683-2021>。

Gagne, DJ,McGovern, A.,Haupt, SE,Sobash, RA,Williams, JK,Xue, M.,2017 年,対流を許容するアンサンブルに適用された機械学習による嵐ベースの確率的ひょう予測,天気予報。 32 (5),1819 ~ 1840 年。 <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-17-0010.1>。

García-Ortega, E.,López, L.,Sánchez, J.,2011 年,スペインのエプロ渓谷における雹嵐の日に関連する大気パターン,アトモス,解像度 100 (4),401 ~ 427。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.08.023>。

Giaiotti, D.,Gianesini, E.,Stel, F.,2001 年,フリウムヴェネツィア・ジュリア州の平野におけるひょう石のサイズ分布に関するヒューリスティックな考察,アトモス,解像度 57 (4),269 ~ 288。 [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095\(01\)00080-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095(01)00080-1)。

Giaiotti, D.,Nordio, S.,Stel, F.,2003 年,フリウムヴェネチア・ジュリア州の平原における雹の気候学,アトモス,解像度67,247–259。 [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00084-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00084-X)。

デラウェア州ゴールドバーク,オランダ,ホーランド,1988 年,遺伝的アルゴリズムと機械学習。

Groenemeijer, P.,Pú ik, T.,Holzer, AM,Antonescu, B.,Riemann-Campe, K.,Schultz, DM,Kühne, T.,Feuerstein, B.,Brooks, HE,Doswell III, CA,他al.,2017,ヨーロッパの激しい対流性嵐: ヨーロッパの激しい嵐の研究所での 10 年間の研究と教育,ブルームテオロールです。 Soc. 98、 <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0067.1>。

Hassanat, A.,Almohammadi, K.,Alkafaween, E.,Abunawas, E.,Hammouri, A.,Prasath, VS, 2019 年,遺伝的アルゴリズムの突然変異と交差率の選択 - 新しい動的アプローチによるレビュー,情報 10 (12),390,http ://dx.doi.org/10.33

V. トラルバラ。

極端な気象と気候 39 (2023) 100535

Manzato, A., 2013 年。イタリア北東部での雹: サウンディング由来のインデックスを使用したニューラル ネットワーク アンサンブル予測。天気予報。 28 (1), 3–28。 <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-12-00034.1>。

Manzato, A., Cicogna, A., Centore, M., Battistutta, P., Trevisan, M., 2022a。 29 年間の雹データから得たイタリア北東部の雹の特徴。 J. Appl. 気象学 気候学 61 (11), 1779–1795。 <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0251.1>。

Manzato, A., Riva, V., Tiesi, A., Marcello Miglietta, M., 2020, イタリア北東部における激しいひょう嵐の観測分析とシミュレーション。 QJRメテオロール学会 146 (732), 3587–3611。 <http://dx.doi.org/10.1002/qj.3886>。

Manzato, A., Serafin, S., Miglietta, M., Kirshbaum, D., Schulz, W., 2022b, 雷と対流の開始に関する汎高山気候学。月Weather Rev. <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-21-0149.1>。

Markowski, P.M., Dotzek, N., 2011 年。スーパーセルに対する地形の影響に関する数値研究。アトモス。解像度 100 (4), 457 ~ 478。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.027>。第5回激しい嵐に関する欧州会議。

マラー A., ボルク F., バルディーニ L., ペトラツカ M., カゼッタ D., ディートリッヒ S., ムニャイ A., サノ P., グルビアニ G., バネグロッシ G., 2017。地中海地域で発生した非常に激しいひょう嵐の観測分析: GPM 中核観測所の役割。アトモス。解像度 192, 72–90。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.019>。

マルティウス, O., ヘリング, A., クンツ, M., マンザト, A., モール, S., ニシ, L., トレファルト, S., 2018 年。ひょう研究における課題と最近の進歩。ブルメテオロールです。 Soc. 99, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0207.1>。

Marzban, C., Witt, A., 2001 年。激しいひょうのサイズを予測するためのペジアン ニューラル ネットワーク。天気予報。 16 (5), 600–610。 [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016<0600:ABNFS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016<0600:ABNFS>2.0.CO;2)。

マテリア, S., ムニョス, Á.G., アルバレス, カストロ, M.C., メイソン, S.J., ヴィタート, F., グアルディ, S., 2020 年。春の寒波のマルチモデルサブシーズン予測。ヘーゼルナッツアグリビジネスの潜在的価値。天気予報。 35 (1), 237–254。

Merino, A., Sánchez, J., Fernández-González, S., García-Ortega, E., Marcos, J., Berthet, C., Dessens, J., 2019 年。南西ヨーロッパの降雨: 特定のための EOF 分析概要パターンとその傾向。アトモス。解像度 215, 42–56。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.006>。

ミルズ, クアラルンブル, フィリピン, J.J., ヘインズ, アラバマ州, 2015 年。伝伝的アルゴリズム制御パラメーターの相対的な重要性と効果的な設定を決定します。進化。計算します。 23 (2), 309–342。 http://dx.doi.org/10.1162/EVCO_a_00137。

Mitchell, M., 1998 年。伝伝的アルゴリズムの概要。

Mohr, S., Kunz, M., 2013 年。ドイツとヨーロッパにおける雹現象に関連する対流パラメータの最近の傾向と変動性。アトモス。レス 123, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.016>。

Mohr, S., Kunz, M., Geyer, B., 2015b, 地域気候モデルの結果に基づいたヨーロッパでのひょうの可能性。地球物理学。レス。 42, <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL067118>。

Mohr, S., Kunz, M., Keuler, K., 2015a, ドイツにおける過去および将来の雹の可能性を推定するための物流モデルの開発と応用。 J. Geophys. 回答: アトモスです。 120 (9), 3939–3956。 <http://dx.doi.org/10.1002/2014JD022959>。

モンターポリ, M., ビッチョッティ, E., バルディーニ, L., ディファビオ, S., マルツァーノ, F., グルビアニ, G., 2021 年。巨大な雹を降らせる地中海のスーパーセルの内部を二重偏波ドップラー気象レーダーで観察。アトモス。解像度 264, 105852。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105852>。

Muehleisen, W., Eder, G.C., Voronko, Y., Spielberger, M., Sonleitner, H., Knoeb, K., Ebner, R., Ujvari, G., Hirsch, C., 2018。屋外の検出と視覚化太陽光発電所の雹による被害について。更新します。エネルギー 118, 138–145。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.010>。

ムニョス, サパテル, J., ドットラ, E., アグスティ/パナレダ, A., アルベルゲル, C., アルドウィーニ, G., バルサモ, G., プセッタ, S., チョルガ, M., ハリガン, S., ハースバツハ, H., Martens, B., Miralles, D.G., Piles, M., ニュージーランド州ドリグス, フェルナンデス, Zsoter, E., Buontempo, C., テボー, J.-N., 2021。 ERA5-土地: 州。陸上用途向けの最先端のグローバル再解析データセット。

地球システム科学データ 13 (9), 4349–4383。 <http://dx.doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>。

Nisi, L., Martius, O., Hering, A., Kunz, M., Germann, U., 2016 年。アルプス地域におけるひょう嵐の空間的および時間的分布: 長期、高解像度、レーダーベースの分析。QJRメテオロール学会 142 (697), 1590–1604。 <http://dx.doi.org/10.1002/qj.2771>。

Palencia, C., Castro, A., Giaotti, D., Stel, F., Vinet, F., Fraile, R., 2009 年。Hailpad ベースの研究: 書籍学的レビュー。アトモス。解像度 93 (1–3), 664–670。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.025>。

Peirce, C.S., 1884 年。予測の成功の数値的尺度。科学 (93), 453–454。 <http://dx.doi.org/10.1126/science.ns-4.93.453.b>。

Piani, F., Crisci, A., De Chiara, G., Maracchi, G., Meneguzzo, F., 2005 年。トスカーナ州とイタリア中部におけるひょう嵐の頻度と強度に関する最近の傾向と気候の見通し。ナットハザード・アセスメント科学 5 (2), 217–224。 <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-5-217-2005>。

ブレイン, A.F., オランダ, G.J., 2018 年。有害なひょうの危険性の世界的な推定。天気予報。極値 22, 10 ~ 23。 <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.004>。

Pú ik, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kühne, T., Rädler, A.T., Antonescu, B., Faust, E., 2019 年。ヨーロッパ全土における大規模なひょう発生とその経済的および社会的影響。月気象 Rev. 147 (11), 3901–3916。 <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-19-0204.1>。

ブルマン M., グリン I., マスキー M., ラマチャンドラン R., クリストファー S.A., 2019 年。ひょう検出への深層学習の適用: ケーススタディ。 IEEE トランス。地理学。 Remote Sens. 57, <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2019.2931944>。

Punge, H., Bedka, K., Kunz, M., Reinbold, A., 2017 年。オーバーシュートのトップ検出と ERA の暫定再解析の組み合わせに基づく、ヨーロッパ全土のひょう発生頻度の推定。アトモス。解像度 198, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.025>。

Punge, H.J., Bedka, K.M., Kunz, M., Werner, A., 2014。新しい物理ベースの確率論ヨーロッパの雹に関するイベントカタログ。ナットハザード 73, 1625–1645。

Punge, H., Kunz, M., 2016 年。ヨーロッパにおけるひょう観測とひょう嵐の特徴: レビュー。アトモス。解像度 176–177, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.012>。

Rasmussen, E.N., Blanchard, D.O., 1998 年。測深由来のスーパーセルと竜巻予測パラメータのベースライン気候学。天気予報。 13 (4), 1148–1164。 [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<1148:ABCO&D>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCO&D>2.0.CO;2)。

Raupach, T.H., Martius, O., Allen, J.T., Kunz, M., Lasher-Trapp, S., Mohr, S., Ras-mussen, K.L., Trapp, R.J., Zhang, Q., 2021。ひょう嵐による気候変動。 Nature Rev. 地球環境。 <http://dx.doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>。 12.11.35; LK01。

Rivera, J.A., Otero, F., Naranjo Tamayo, E., Silva, M., 2020, アルゼンチンのメンドーサでの 60 年間のひょう和動誌: 不確実性、知識のギャップ、将来の展望。フロント。環境。 Sci. 8, <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2020.00045>。

Roberto, N., Adirosi, E., Baldini, L., Casella, D., Dietrich, S., Gatlin, P., Panegrossi, G., Petracca, M., Sanò, P., Tokay, A., 2016。 HyMeX SOP 1.1 中のイタリア中部の対流活動のマルチセンサー分析。アトモス。測定。技術 9 (2), 535–552。 <http://dx.doi.org/10.5194/amt-9-535-2016>。

Rogna, M., Schamel, G., Weissensteiner, A., 2021 年。リンゴ生産者の雹保険と雹防除ネットの選択。農業。 Finance Rev. (25.06), <http://dx.doi.org/10.1108/afr-08-2020-0131>。

サンチェス, J.L., フライレ, R., デラマドリッド, J.L., デラフエンテ, M.T., ロドリゲス, P., カストロ, A., 1996 年。農作物被害: ひょうの大きさの要因。 J. Appl. メテオロール。 35, [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<1535:CDTHSF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<1535:CDTHSF>2.0.CO;2)。

サントス, J.A., ベロレイラ, M., 2019。ポルトガルにおける雹現象の包括的分析: 気候学と大気循環との一貫性。 Int. J. Climatol. 39, <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5794>。

Tang, B.H., Gensini, V.A., Homeyer, C.R., 2019。米国の大規模なひょう環境の傾向と観察。 NPJクライム。雰囲気科学 2, <http://dx.doi.org/10.1038/s41612-019-0103-7>。

Taszarek, M., Allen, J.T., Pú ik, T., Hoogewind, K.A., Brooks, H.E., 2020。ヨーロッパと米国で激しい対流嵐。パート II: 雷、大雹、強風、竜巻に関連する ERA5 環境。 J. Climate。 33 (23), 10263–10286。 <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0346.1>。

Taszarek, M., Brooks, H.E., Czernecki, B., Szuster, P., Fortuniak, K., 2018 年。ヨーロッパの対流/パラメータの気候学的側面: ERA-interim データとサウンディングデータの比較。 J. Climate。 31 (11), 4281–4308。 <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0596.1>。

Teule, T., Appeldoorn, M., Bosma, P., Sprenger, L., Koks, E., de Moel, H., 2019。雹に対するソーラーパネルの脆弱性: 水と気候のリスク。

Vulpiani, G., Baldini, L., Roberto, N., 2015 年。運用可能な偏角 X バンド レーダーを使用した地中海の雹を伴う嵐の特性評価。アトモス。測定。技術 8 (11), 4681–4698。 <http://dx.doi.org/10.5194/amt-8-4681-2015>。

Wilks, D.S., 2011 年。大気科学における統計的手法。Vol. 100。プレス。