

## VUリサーチポータル

### 太陽光パネルは雹に弱い

トウレ、ティルザ。アッペルドールン、マーカス。ボスマ、ブリシラ。シュブレンガー、ローラ。コック、エルコ。モエルさんから、ハンス

2019年

### [VU Research Portal の出版物へのリンク](#)

#### 出版版の引用 (APA)

Teule, T., Appeldoorn, M., Bosma, P., Sprenger, L., Koks, E., および de Moel, H. (2019). 太陽光パネルの雹に対する脆弱性。

#### 一般的な権利/パブリック

ク ポータルでアクセスできる出版物の著作権および著作者人格権は、著者および/または他の著作権所有者によって保持されており、ユーザーがこれらの権利に関連する法的要件を認識し、遵守することが出版物にアクセスする条件となります。

- ユーザーは、個人的な学習や研究の目的で、公開ポータルから出版物を 1 部ダウンロードして印刷することができます。
- マテリアルをさらに配布したり、営利活動や商業的利益のために使用したりすることはできません。
- 公開ポータルで出版物を識別する URL を自由に配布できます。

#### 削除ポリシーこの文書が著作

権に違反していると思われる場合は、詳細を提供して当社までご連絡ください。当社はただちに作品へのアクセスを削除し、お客様の申し立てを調査します。

#### 電子メール アドレス:

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

太陽光パネルの雹に対する脆弱性。

---

## 太陽光パネルの雹に対する脆弱性。

気候-KICプロジェクト: 「2023年に100万軒のほぼゼロエネルギー住宅」

Teule,T.S.,Appeldoorn,M.,Bosma,P.,Sprenger DD,Koks,E.,De Moel,H.

---



(ボルダーPV,2019)



Climate-KIC is supported by the  
EIT, a body of the European Union

---

このレポートは、EIT Climate-KIC の委託を受けて作成されました。

IVM

環境研究所

アムステルダム自由大学

デ・ボエラン 1087

1081 HV アムステルダム

オランダ

電話 +31-20-598 9555

F +31-20-598 9553 E

info.ivm@vu.nl

無断転載を禁じます。著作権所有者の事前の書面による許可がない限り、本書のいかなる部分も、電子的、機械的、写真コピー、録音などの形式や手段によって複製、検索システムに保存、送信することはできません。

コンテンツ

謝辞	4
まとめ	5
1 導入	7
1.1 2023 年に 100 万戸のほぼゼロエネルギー住宅	7
1.2 太陽光パネルの雹に対する脆弱性	7
1.3 報告書の概要	8
2 方法	9
2.1 ヨーロッパでのひょう雨による被害	9
2.2 ソーラーパネル	9
2.3 ケーススタディ: ひょう嵐 2016 年 6 月 23 日	9
3 ヨーロッパでのひょう雨による被害	13
3.2 オランダの歴史的なひょう嵐と被害	16
4 ソーラーパネル	19
4.1 ソーラーパネルの基礎	19
4.2 ソーラーパネルの種類	20
4.3 ソーラーパネルに関する規格、ガイドライン、認証	20
4.4 太陽光パネルと雹の保険	23
4.5 ソーラーパネルの損傷	24
5 太陽光パネルの雹に対する脆弱性 (ケーススタディ: 2016 年 6 月 23 日)	28
5.1 ひょう雨による被害	28
5.2 雹による太陽光パネルの損傷	29
5.3 ソーラーパネルの損傷に影響を与える変数の回帰	33
6 ディスカッション: 今後の方向性	37
6.1 必要な政策変更	37
6.2 太陽光パネルのリサイクル	39
6.3 太陽光パネルの保護対策	41
6.4 今後の研究	41
6.5 太陽光パネルの損傷による将来のリスク	42
7 結論	44
参考文献	46
付録	
	53
付録 A インタビュー対象者リスト	53
付録 B オランダにおけるソーラーパネルの保険	54
付録 C 追加情報 55 のソーラーパネルの規格とガイドライン オランダ	
付録 D ソーラーパネルの損傷とそれが出力電力に及ぼす影響を検出するために初期の研究者が使用した方法 (以下で説明) 表3)	59

## 謝辞

このレポートは、EIT Climate-KIC プログラム「2023 年に 100 万戸のほぼゼロエネルギー住宅」の一部です。この報告書の研究は、アムステルダムの VU 大学が保険会社 Achmea およびオランダ王立気象研究所 KNMI と協力して実施しました。

まず最初に、この研究に貢献してくれたアクメアとその従業員全員に感謝したいと思います。研究を促進し、エクメアからすべての情報と人材を入手するのに協力してくれた Gijs Kloek と Rob Vermunt に特別に感謝します。エクメアがこの研究のために提供してくれたデータに感謝します。また、有用なデータを取得するために協力してくれたアクメアのすべての人々、そして保険とソーラーパネルの現状について時間を割いて説明してくれた専門家にも感謝したいと思います。

また、KNMI とこのデータの入手に協力してくれたチームから提供されたデータにも感謝しています。

最後に、新しいアイデアや情報を得るのに協力し、多くの質問に時間を割いてくださった外部関係者に感謝します。私たちが感謝したい企業および団体は、Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV)、SCOR、Gothaer、Solar Clarity、Solar Tester & Stichting Zonne-energie Recycling Nederland (ZRN) です。

## まとめ

この研究は、EIT Climate-KIC プログラム「2023 年に 100 万戸のほぼゼロエネルギー住宅」に関連しています。ソーラーパネルはカーボンニュートラル社会への移行において重要な役割を果たします。ただし、ひょう嵐やその他の異常気象により、ソーラーパネルが損傷し、この移行プロセスが遅くなる可能性があります。特に、ヨーロッパのほとんどの地域で気候変動によるひょう雨の増加が予想されているため、ひょうとニアゼロエミッション対策への被害との関係はさらに興味深いものになっています。

この研究では、ひょう嵐に対するソーラーパネルの脆弱性を調査し、定量化する初めての試みを行います。文献レビューと専門家へのインタビューを利用して、ヨーロッパとオランダでのひょう嵐による被害、ソーラーパネルとその潜在的な被害、基準と規則、保険について概要を説明します。脆弱性を定量化する最初の試みとして、2016 年 6 月 23 日にオランダで発生した最も激しいひょう嵐についてケーススタディが行われました。このケーススタディでは、

保険損害データとモデル化されたひょう石のサイズを使用して、ソーラーパネルの損傷、ひょう石のサイズ、およびソーラーパネルの特性の関係を評価します。

この研究は、ヨーロッパとオランダでのひょう嵐の被害だけでなく、ひょう嵐の頻度も増加していることを示している。ソーラーパネルなどの露出した物体がより脆弱になる可能性があることを示します。ソーラーパネル市場は比較的新しい市場であるため、ソーラーパネルの品質と設置に関する基準や規則は十分に規制されていません。これにより、設置中にソーラーパネルが損傷する可能性があります。火災の危険性も高まり(Achmea, 2019b)、ひょう嵐などの極端な現象に対してソーラーパネルがより脆弱になる可能性があります。オランダとヨーロッパでは太陽光パネルにどのように保険をかけるべきかについて保険会社の間で一般的な合意が得られていないため、太陽光パネルの保険にも改善の余地があります。

ソーラーパネルは脆弱なオブジェクトであり、(i) 環境要因、(ii) 設置要因、(iii) 生産要因など、さまざまな要因が性能に影響を与える可能性があります。これらの要因により、ソーラーパネルの前面ガラスに亀裂が生じる可能性があります。

直接目に見えるため、歩留まりが低下します。ただし、より小さな亀裂(マイクロクラック)も形成される可能性があります。これは前面ガラス層ではなく、より壊れやすいシリコンに形成されます。通常、マイクロクラックによって初期歩留まりが低下することはありません。ただし、数か月後、損傷した領域で出力が急速に低下し始め、約 1 年後にはパネルの外側にも微小な亀裂が目立つようになります。すべての損傷はソーラーパネルの寿命を縮めることが予想されます。

このケーススタディは、ソーラーパネルと雹の関係を示しています。

- ソーラーパネルへの損傷は、主に最大サイズのひょう石によって発生します。  
3cm以上のもの。大きなひょう石(4 cm 以上)は、小さなひょう石よりも平均して大きな被害を引き起こしますが、ソーラーパネルへの被害の程度もさまざまです。
- 損害のない申し立て、つまり申し立ての半分は、ひょうの大きさに最もばらつきが見られます。  
さまざまな場所でのより多くの主張は、より広範囲のひょうの大きさを示す可能性があることを示しています。
- 3 cm からは目に見えない損傷と目に見える損傷の両方が発生する可能性があります。4 cm を超えると目に見える損傷の割合が大幅に増加します。

- ひょう嵐（およびそれに伴う卓越風）の方向に関する屋根の向きは、太陽光パネルへのひょうによる被害にかなりの影響を与える可能性があり、ひょうの大きさそのものよりも決定的になる可能性があります（ひょう嵐から遠ざかる方向が被害を軽減します）かなり）。
- ソーラーパネルが立つ角度（平らな屋根では低い角度、傾斜屋根では高い角度で表される）もソーラーパネルの損傷に影響を与える可能性があるという指標があります（角度が低いほど損傷が大きくなります）が、結果はそれほど重要ではありません。
- 雹のサイズが大きくなるとダメージの量も増加しますが、雹のサイズが大きくなると、追加のダメージの増加は減少します。

この脆弱性を軽減するには、ソーラー パネルの特性を検討するだけでなく、ソーラー パネルの基準、規制、保険を改善（施行）することによって、いくつかのオプションを検討できます。ソーラーパネルのカバーなどの具体的な対策の開発も、この脆弱性を軽減するのに役立つ可能性があります。他の種類の異常気象に対する他の NZE 対策の脆弱性や、微小亀裂の影響については、さまざまなデータ ソースを使用してさらに研究を行う必要があります。最後に、雹のリスクと雹に対する太陽光パネルの脆弱性をリスクモデルと気候適応戦略に組み込む必要があります。

## 1 導入

2013 年 7 月下旬、低気圧アンドレアスによりドイツで 28 億ユーロの保険損害が発生しました。これは、同年に世界で最も高額な保険損害が発生した事故です (Punge & Kunz, 2016)。

2016 年 6 月、オランダはひょう嵐を経験し、ひょうによる国内でのこれまで測定された最大の被害をもたらしました。2017 年の異常気象により、ドイツでは住宅建築セクターへの雹による被害総額 29 億ユーロの被害が発生しました。雹はドイツとオランダで多大な被害をもたらしているだけでなく、世界中に影響を及ぼし、毎年数十億ドルの被害を引き起こしています (Pucik, et al., 2019)。

この損害は、危険性、暴露、脆弱性が組み合わさったひょうのリスクによって引き起こされます。気候変動によるひょう現象の頻度の増加により、ひょう嵐の危険性が増加すると予想されています (MunichRe, 2019)。危険が増大しているだけでなく、雹にさらされる要素も増大しています。雹のリスクとこのリスクによる被害を軽減するには、これらの露出した要素の脆弱性を軽減する必要があります。

### 1.1 2023 年に 100 万戸のほぼゼロエネルギー住宅

このレポートで示された分析は、「2023 年にエネルギー/炭素ゼロに近い住宅 100 万戸」というプログラムに関連しています。このプログラムは EIT Climate-KIC の一部です。EIT Climate-KIC は、気候変動への対処と回復力のあるネットゼロカーボン社会の構築に焦点を当てたヨーロッパの官民パートナーシップです。地球温暖化を 1.5 °C に抑えるには、2050 年の排出量を現在より 80 ~ 90% 削減する必要があります。この目標を達成するには、すべての新しい建物をカーボンニュートラルにし、既存の建物を少なくとも年率 4% で調整する必要があります。これにより、5 年以内に 100 万戸のニア・ゼロ・エネルギー (NZE) 住宅を建設するという目標が達成されました (EIT Climate-KIC, 2018)。

NZE の建物を作るために取れる対策としては、例えば外壁断熱やソーラーパネルの設置などがあります。しかし、異常気象などの影響により、

やあ、これらの対策は損傷したり、破壊されたりする可能性があります (MunichRe, 2019)。気候変動によるひょう災害の増加と、これらの脆弱な対策への曝露の増加が予想されるため (Achmea, 2019a)、NZE 対策に対するひょうリスクの増加が予想されます。このリスクの増大は、そのような対策の採用の低下をもたらし、気候中立社会への移行を妨げる可能性があります。

### 1.2 太陽光パネルの雹に対する脆弱性

この研究の目的は、太陽光パネルが雹に対してどの程度脆弱かを判断することです。ソーラーパネルは現在、エネルギー転換を実現するために取られる最も一般的な手段の 1 つです。

同時に、ヨーロッパでは、これらのパネルへの雹による被害の可能性について入手可能な情報は限られています。2016 年 6 月 23 日にオランダ南東部に降ったひょう嵐の際、多くの太陽光パネルが雹により損傷する事態が発生した。被害総額は 7 億ユーロを超え、そのうち 5 億ユーロが損害保険で支払われました (National kennisen innovatieprogramma: Water & Klimaat, 2019)。広範囲に影響を与えるため、このイベントは、太陽光パネルのさまざまな脆弱性の側面についての理解を深めるためのケーススタディとして選ばれました。



太陽光パネルの損傷の影響や、雹のリスク全般についてはいくつかの研究が行われていますが、雹被害と太陽光パネルの組み合わせについてはほとんど研究されていません。実験環境での太陽電池モジュールのテストに関する 70 年代の 2 つの研究が入手可能です (Moore & Wilson, 1978; Hoffman, Arnet & Ross, 1978)。しかし、新しいソーラーパネルが絶えず開発されているため、これらの研究は時代遅れになっています。より最近では、Muehleisen ら。(2018) は、パネルへの目に見えない損傷をどのように検出できるかを示しています。グプタら。(2019) は、雹がソーラーパネルの性能に及ぼす影響に関する最新の研究をレビューし、雹嵐の形成と、雹嵐の影響により出力電力とソーラーパネルの寿命が減少することを示しています。国際エネルギー機関は、雹が太陽光発電 (PV) モジュールに及ぼす影響について、実験室で管理された試験を実施しました (Mathiak, et al., 2015)。これらの研究からの貴重な側面は、この研究の結果と組み合わせられます。しかし、雹と太陽光パネルの損傷との関係に関する最近の学術研究は他にありません。そこで本研究では、太陽光パネルの損傷やその特性と雹との関係を調べようとしている。

### 1.3 報告書の概要

この研究は、太陽光パネルの雹に対する脆弱性を判断することを目的として、太陽光パネルの保険損害データと太陽光パネルの特性、雹の大きさの関係を分析する初めての試みです。このレポートの残りの部分は次のように構成されています。第 2 章では、適用された手法について説明します。第 3 章では、ヨーロッパとオランダにおけるひょう雨と被害の分析を示します。第 4 章では、文献や専門家へのインタビューから得た情報を使用して、太陽光パネルの基礎と太陽光パネルの損傷について概説します。第 5 章では、雹と太陽光パネルの損傷との関係を示すケーススタディの結果を紹介します。

第 6 章では、結果について議論し、ソーラーパネルへの損傷のリスクを軽減するための今後の方法についてアドバイスしています。最後に、第 7 章では、主要な調査結果を強調してレポートを締めくくります。

## 2 方法

本章では、本研究で適用した手法を3部に分けて説明します。

最初の部分では、ヨーロッパとオランダでのひょう雨による被害に関する情報がどのように得られるかについて説明します。後半では、太陽光パネルに関する情報がどのように収集されるかについて説明します。3番目の部分では、ケーススタディがどのように行われるか、取得したデータや情報を組み合わせて分析する際にどのような方法が使用されるかを説明します。

### 2.1 ヨーロッパにおけるひょう雨による被害

まず、ヨーロッパにおけるひょう雨の被害に関する文献を収集し、それらと組み合わせる。

オランダの雹と悪天候による損害に関するアクメアの保険請求データ。保険金請求データの記録は 1990 年から 2017 年までの範囲に及びます。このデータは機密性が高いため、すべての悪天候による保険損害額の合計に対する、雹による保険損害額のみを取得しました。このデータを使用して、月別、年別、および州ごとの悪天候による被害総額のうち、ひょうによる被害の平均割合を分析します。このデータセットは、ひょうによる被害が最も多かった日の上位 10 日と、オランダで最も被害が発生した地域を作成するためにも使用され、エクメアの市場シェアについても補正されています。

### 2.2 ソーラーパネル

この研究の後半では、ソーラーパネルの基礎とその仕組みに焦点を当てます。

潜在的な損害。そのために、ソーラーパネルの専門家とのさまざまな会議やインタビューが実施されます。太陽光パネルの分野の専門家であるAchmea (re-)insuranceのさまざまな人々との対話が行われます。その他のインタビューは、ソーラー パネルのサプライヤー、ソーラー パネルの品質検査を行う会社、ソーラー パネルのリサイクルに焦点を当てている組織に対して行われます。すべての面接は半構造化されており、一連の準備された質問が用意されていますが、新しい情報を入手したり、必要に応じて面接中に質問を追加したりする広い心を持つ必要があります (Bryman, 2012)。

すべての利害関係者から少なくとも 3 人の異なる個人がインタビューされ、合計 18 名になります (参考インタビュー対象者リスト、付録 A を参照)。

現状の理解。

インタビューは、現在のプロセスと実施されているガイドラインに関する情報を収集し、ソーラーパネルの損傷に関する詳細情報を収集するために使用されます。インタビューに含まれる関連する側面には、生産品質、保証措置、輸送措置、設置措置、損傷判定方法などがあります。ソーラーパネルの基礎、種類、規格、保険および損害の概要を補足するために、文献からの情報が追加されています。

### 2.3 ケーススタディ: ひょう嵐 2016 年 6 月 23 日

次のステップは、ケーススタディを通じてソーラーパネルの脆弱性を掘り下げることです。このケーススタディでは、最近の歴史の中で最大の被害をもたらしたひょう嵐である 2016 年 6 月 23 日のひょう嵐を使用します。このケーススタディを通じて、その関係を見ていきます。

太陽光パネルの損傷とひょう雨と角度の特性の間  
そして屋根の向き。

## 雹の日

ひょう嵐データは、数値気象モデル (Hirnam) のデータを補足したレーダー データを使用して取得された、オランダ全土のひょう石のサイズで構成されています。

KNMI (KNMI,2019) から取得し、Wouters et al. (2019) から取得しました。データセットの詳細については、Wouters et al. (2019) を参照してください。このケーススタディでは、このデータセットから郵便番号ごとの 1 日あたりの最大ひょう量 (PC4) を使用しました。

## 請求データ

郵便番号ごとのこれらの最大ひょう量は、各地域の太陽光パネルの損傷と連動しています。

郵便番号エリア。ソーラー パネルに関する請求データは Achmea から取得されます (Achmea data,2019)。これらのクレームは、Achmea が使用する 2 つの異なるファイリング システムから取得されます。

ファイル システムにはソーラー パネルの損傷に関する具体的な情報が保存されないため、これらの請求項のテキスト ボックスで、ソーラー パネル、ソーラー パネル、パネルなどの用語を手動で検索します。これらの単語のいずれかを含むが、雹以外の原因による損傷を示している主張は、データセットから削除されます。このアプローチにより、住所、損傷の種類 (損傷なし、視覚的損傷、目に見えない損傷、またはその両方)、損傷したソーラー パネルの数、および建物の種類 (農業用、商業用) に関する情報を含む 249 件の保険請求のデータセットが生成されます。、またはプライベート)。

## 屋根の特徴

このデータセットには、最大ひょう石のサイズと屋根の特性が追加されています。ソーラーパネルの特性は、航空写真を手動で分析することで得られます。この分析に使用された航空写真は、解像度 25 cm の 2016 年のオルソ写真です (PDOK,2016)。請求項ごとに、太陽光パネルの数、パネルの向き (東、南東、南、西、西、北西、北、北東)、屋根の種類 (傾斜屋根または平屋根) が取得されます。屋根の種類については、平らな屋根のソーラー パネルは、傾斜屋根よりも平均して角度が低いと想定されます。特性ごとに、平均ダメージが決定され、t 検定を使用して、異なるグループ間のダメージの差に関する仮説がテストされます。

## 統計分析

ひょうの最大サイズ、ソーラーパネルの損傷、損傷の種類、ソーラーパネルの特性の関係を判断するために、通常最小二乗法 (OLS) を使用した重回帰分析が実行されます。テストされる従属変数は、ソーラー パネルの総数に対する損傷したソーラー パネルの割合です。

この従属変数が選択されるのは、破損したソーラー パネルの絶対数を使用する代わりに、パーセンテージを合計のソーラー パネルの他の数を備えた屋根に簡単に変換できるためです。

独立変数の 1 つは、最大推定ひょう量 (MEHS) です。データ準備の最初のステップは、MEHS がゼロである 3 つの観測値を削除することです。これらの観測値を含めると、ひょうは観測されないものの、被害がゼロより大きいという結果が生じる可能性があるためです。これらの観測のうち 2 つは商業ポートフォリオから、もう 1 つは農業ポートフォリオからのものです。ひょうサイズ 0 と組み合わせた損害は、被保険者の住所と損害の場所の不一致、または単にモデルがその地域のひょうを捕捉しなかったことによって引き起こされる可能性があります。

他の変数を考慮できるようにするには、一部の変数をダミー変数に変換する必要があります。まず、屋根の角度を取得するダミー変数を作成します。

考慮に入れてください。非傾斜屋根と傾斜屋根の 2 つのカテゴリに区別されます。

次に、屋根の向きも考慮されます。これにより、観測された方位 (南東、南、南西、西) ごとに 4 つの追加のダミー変数が生成されます。陸屋根の場合、ソーラー パネルの向きが日射に関して最適であると仮定します。南を向く方向。

ひょうのサイズがゼロより大きい場合にのみ損傷が発生する可能性があるため、切片は省略されます。これは、モデルが原点を通過することを意味します。非線形性を考慮するために、MEHS の 2 乗と MEHS の自然対数も独立変数として使用されます。ソーラーパネルへの雹による被害が特定の雹サイズ以降でのみ発生したかどうかを確認するために、MEHS が 2 cm 以上の変数のみを使用して回帰も実行されます。回帰には交互作用効果も含まれています。これは、新しい交互作用変数が使用されることを意味します。これは、(私たちの研究では) ダミーに連続変数を乗算したものです。これにより、ダミー変数が 1 つである場合、連続変数の追加の影響に関する情報が得られます。このようにして、たとえば、MEHS が陸屋根よりも傾斜屋根に大きな影響を与えるという事実を説明できます。回帰の標準誤差は不均一分散性が強く、これは回帰の結果を示す表の HC3 で示されています<sup>1</sup>。

さまざまなモデルを比較するために、次の情報基準が使用されます。<sup>2</sup>、調整された R<sup>2</sup>、対数尤度値、赤池情報量基準 (AIC)、およびベイズアン情報量基準 (BIC) が含まれます。R<sup>2</sup>値は、回帰が data2 にどの程度適合しているかを示します。これは回帰を比較するための単純な基準ですが、回帰変数の数、つまり独立変数は補正されません。回帰内の回帰変数が多いほど、回帰の適合性が高くなります。ただし、多数の追加リグレッサーを含めると過剰適合が発生しますが、R<sup>2</sup>値は比較的高くなります。

多くのリグレッサーが追加されるときに R<sup>2</sup> が高くなるのを防ぐために、調整された R<sup>2</sup> が使用され、回帰内のリグレッサーの数にペナルティが課されます<sup>3</sup>。R<sup>2</sup>と調整済み R<sup>2</sup>の両方の場合、値が大きいほど、モデルのパフォーマンスが「良く」なります。さらに、ログは、回帰出力には尤度値が含まれます<sup>4</sup>。この基準の相対値が高いほど、モデルのパフォーマンスが向上します。最後に、2 つの情報基準が使用されました。

<sup>1</sup> MEHS データは直接等分散性であると仮定することはできず、損傷の分散は正確ではない可能性があります。

推定されるすべてのひょうのサイズについても同様です。これは通常、データ内の外れ値に起因すると考えられますが、残差の条件付き分布の分散がすべてのオブジェクトに対して一定である OLS 仮定。

観察、不均一分散がある場合は、それに応じて標準誤差を調整する必要があります。

不均一分散性のロバストな標準誤差は、MacKinnon と White (1985) で説明されているロバストな共分散行列を使用して計算できます。この共分散行列は、で説明した共分散行列よりも優先されます。

White (1980) は、サンプルが小さいほどパフォーマンスが優れているためです。

<sup>2</sup> R<sup>2</sup>基準は、総二乗和 (SStot) でスケールされた残りの二乗残差和 (SSres) に基づいて回帰にペナルティを与えます。それは次のように定義されます: 回帰 = 1 - (データによく適合するほど、残差二乗和は小さくなり、合計 R<sup>2</sup>値は大きくなります。これは、回帰を比較するための簡単な基準で

<sup>3</sup>  $R^2_{adj} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 1}$

n は観測値の数を示し、k はモデル内のリグレッサーの数を示します。R<sup>2</sup>両方の場合

そして調整された R<sup>2</sup>、値が大きいほど、モデルのパフォーマンスが「良く」なります。

<sup>4</sup> OLS を使用する以外に、最尤法を使用して線形回帰を推定することもできます。名前が示すように、この推定器は、推定されたモデルによって真のモデルが説明できる確率を最大化しようとします。

最尤法を使用してモデルを推定した結果の尤度値も回帰出力に含まれます。

予測誤差、AIC および BIC<sup>5</sup> についてのアイデアを与えようとしています。調整されたRと同じように

<sup>2</sup>、この基準は、多くのリグレッサーを持つモデルにペナルティを与えます。BIC は、モデルの適合に使用される観測値の数に応じて、リグレッサーの数にさらにペナルティを課します。AIC と BIC の両方で、最小 (相対) 値は、そのモデルが最良のモデルであることを示します。

これらすべての基準が満場一致で 1 つの回帰を最もパフォーマンスの良い回帰として示すことは期待できませんが、1 つの回帰が最もパフォーマンスが良いことを示す基準の大部分を得ることができる可能性があります。使用した方法の結果は、セクション 3、4、および 5 に記載されています。

---

<sup>5</sup>  $= 2 - 2$

$= 2 \ln() - 2$

LL は回帰の対数尤度値を示します。

## 3 ヨーロッパにおけるひょう雨による被害

この章では、ヨーロッパにおけるひょう嵐による被害に関する文献レビュー (3.1) と、オランダにおけるより具体的な被害データ分析 (3.2) を提供します。

### 3.1 ヨーロッパにおけるひょう雨による被害

#### 3.1.1 ヨーロッパにおけるひょうに関する調査

雹に関する情報を入手できるのはヨーロッパ内に限られています。気象観測所はほとんどの場合、ひょうのサイズを記録しておらず、特定の場所でのひょう嵐の発生確率が低いいため、ひょうの頻度と強さに関する情報を入手するのは困難です (Punge & Kunz, 2016)。

利用可能なデータは、欧州過酷気象データベース (ESWD, 2019) などの経験的でクラウドソーシングされた観測データベース、または雹が降りやすい地域の雹パッドのネットワーク (Pucik, et al., 2019) から得られます。これらのデータベースでは、最大のひょう石は、誰かが見つけて報告する前に部分的に溶けてしまう可能性があるため、欠けている可能性があります。また、これらのデータベースは人口密集地域に偏っている可能性があります。

そして、特定のエリア内で「ひょう発見者」が利用できるかどうか。ただし、レーダー観測からのひょうの代理を検証するために使用できます (Punge & Kunz, 2016)。これは Wouters らによってオランダでも行われています。(2019)、この種のデータに関する詳細は、その研究で見つけることができます。

雹に関するその他の情報源は、各国の雹気候学研究で見つけることができます。Punge & Kunz (2016) は、これらの研究のほとんどをレビューしました。2019 年に Pucik らは、ヨーロッパ全土での大規模なひょうと経済的および社会的影響に関する新しい研究を実施した。Pucik ら (2019) は、ヨーロッパ悪天候データベースに基づいて、以下のセクションに示すように、雹の発生頻度が最も高い地域の概要を示しています。

#### 3.1.2 ヨーロッパにおける雹の特徴

Pucik ら (2019) は、図 1 に見られるように、大きなひょう ( $\geq 2$  cm) が同様の空間パターンで発生するが、非常に大きなひょう ( $\geq 5$  cm) よりも発生頻度が低いことを示しています。最も高い頻度は南東部で見られます。オーストリア。この地域では、年に 3 ~ 4 日ほど大きなひょうが降り、2 年ごとに非常に大きなひょうが降ります。他にひょうの頻度が高い地域は、ドイツ南西部、イタリアのポー渓谷、チェコとドイツの国境にあるエルツ山脈越え、チェコとポーランドの国境などである。(Pucik 他, 2019)。Punge & Kunz (2016) は、ヨーロッパにおける雹の発生頻度の概要も示しています。その研究によると、ドイツ、スイス、オーストリアなどの中央ヨーロッパはひょうの危険に非常にさらされています。



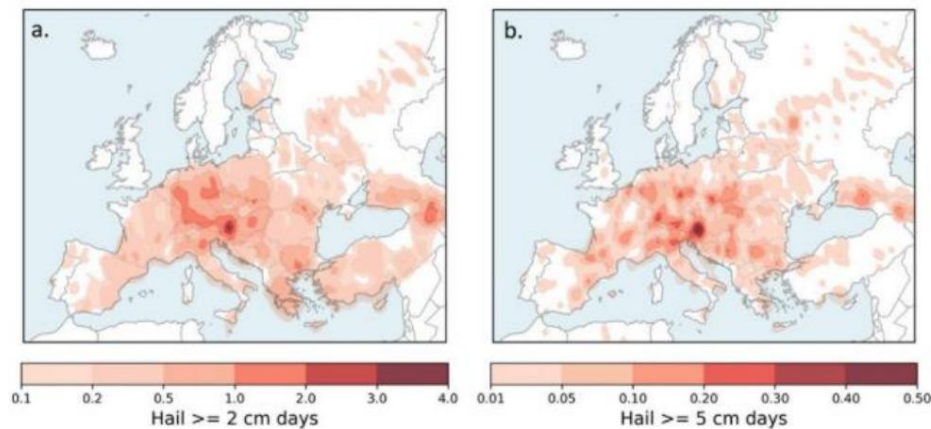


図 1: (a) 大量の雹および (b) 非常に大量の雹が降った年間平均日数 (研究による) プチクラ。(2019年) )。

これらの研究の結果は、中央ヨーロッパの雹に関する Suwala & Bednorz (2013) の研究と一致しており、ドイツ南部のような山岳地帯ではおそらく地形のため雹の発生頻度が最も高いと述べています。オーストリアでは、ひょうの頻度と強さはアルプスの地形にも影響されます。

最大の被害をもたらす最も強力なひょう嵐は、ハンガリー国境に近いアルプスの麓、および低地に近い丘陵地帯に沿って発生します (Svabik et al., 2013)。図 2a (Punge & Kunz (2016) から入手) は、2015 年 9 月までに欧州悪天候データベースで報告されたひょう石の最大サイズの発生を示しています。報告に偏りがある可能性にもかかわらず、最大値は中央ヨーロッパで見つかり、最大値は南西に向かって減少しています。北東、南東。

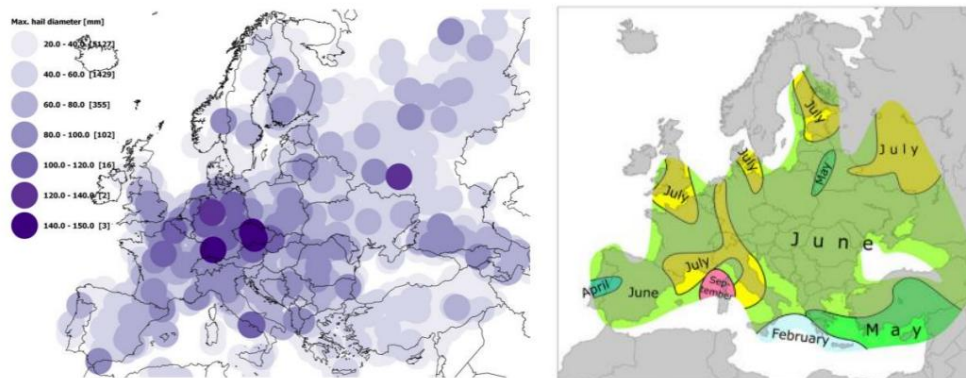


図 2: (a) 2015 年 9 月までに ESWD によって報告されたひょうの最大サイズ (mm) (Punge & Kunz (2016) の研究より)。 (b) 大規模なひょうが最も頻繁に発生した月 (Pucik et al. (2019) の研究より)。

プチクラ。(2019) は、図 2b に見られるように、大量のひょうは主に夏に報告され、ヨーロッパのほとんどの地域で 6 月または 7 月がピークであることを確認しています。南部地域では、ピークの月はポルトガルの 4 月からイタリア南部とギリシャの 2 月まで異なります。これは、大陸地域では暖房がピークとなる月に雷雨のピークが発生し、それに伴って大量の雹が発生するためです。イタリアやギリシャなどの沿岸海域では、大西洋の亜熱帯尾根が南に移動し、地中海で深い低気圧が発達するため、秋から冬にかけてピークを迎えます (Pucik, et al., 2019)。Suwala & Bednorz (2013) は、中央ヨーロッパではほとんどの雹現象が暖かい季節の前半 (4 月から 4 月まで) に発生すると述べました。

6月)、Pucik et al.によると6月とは対照的に、5月がピーク月となります。(2019年)。

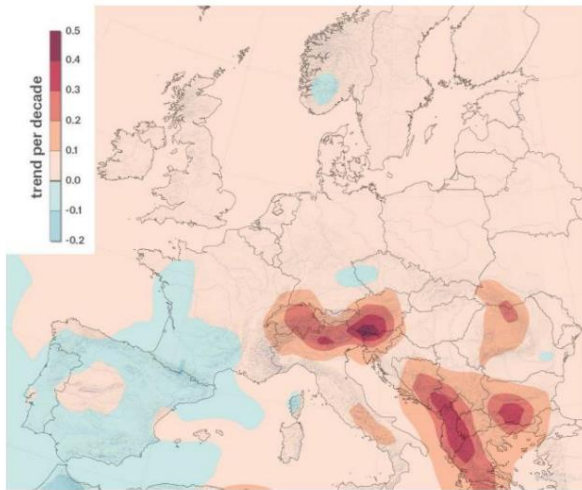


図 3: 1979 年から 2015 年までのひょう現象の変化の傾向 (MunichRe の調査 (2019) より)。

ヨーロッパでは、1979 年から 2015 年までの 37 年間にひょうの発生数が大幅に増加しました (MunichRe, 2019)。ただし、こうした変化はヨーロッパ全体で均一ではありません。ひょうの発生数が最も増加したのは、山のある地域と前アルプス地域でした (EEA, 2017)。図 3 に見られるように、最大の増加はイタリア北部とアドリア海沿岸で観察されます。中央ヨーロッパ、フランス、ベネルクス三国、ドイツではより小さな増加が見られました。フランス南西部とイベリア半島の一部ではわずかな減少が見られます (MunichRe, 2019)。

大規模な嵐はまれであり、小規模な嵐は地球規模および地域的な気候モデルで表現することが難しいため、将来のひょう現象のプロジェクトには大きな不確実性が伴います。しかし、ほとんどのモデルベースの研究によると、中央ヨーロッパではひょう雨の頻度が増加すると予想されています (EEA, 2017)。KNMI (2016) は、これはオランダの予測でもあると説明しています。暖かい気候により、空気はより多くの水を保持できるようになり、これにより空気の垂直方向の動きが増加し、その結果、気温の変化が大きくなる可能性があります。

強風を伴う雷雨と大規模なひょう。

### 3.1.3 ヨーロッパにおけるひょう雨の被害

雹はヨーロッパのいくつかの地域で最も被害の大きい異常気象の一つであり、農作物、車両、建物、インフラへの被害をもたらします (EEA, 2017)。暴露と脆弱性ととともに、一部の地域では危険が増大するパターンが見られます。

ひょう雨やそれに関連する損害のリスクが高まります。プチクラ。(2019) は、ヨーロッパ全土での大規模なひょうの社会的および経済的影響と、ひょうの規模と被害の関係を調査しています。彼らは、アーカイブされた雹レポート、雹損失保険データ、および確率的雹モデルを使用します。プチクラ。(2019) は、1980 年から 2018 年の間にヨーロッパ全土でひょうに関連した 669 件の損失事故を発見しました。損失事件のほとんどはドイツ、オーストリア、スイスで発生しています。表 1 は、ひょうによりヨーロッパで発生した最大の (正規化された) 損失と、この現象中に最大の損失が発生した場所を示しています。このイベントでは、平均最大ひょうサイズが 8.5 cm であることが示されています。8 件のイベントで 10 億ドルを超える損失が発生しています。このリストに含まれる出来事のうち 6 件はドイツで発生しました。損失データベースは、非常に大規模なひょう災害の発生率がドイツ南部と同様である国々での多数の災害を過小評価している可能性があります。



しかし、損失イベントの数ははるかに少ないです。これは、ひょうに関する報告が均等に分布していない可能性があり、一部の地域では過小報告される可能性があるためです。

表 1: ヨーロッパ全土で発生した雹関連の被害件数上位 10 件 (Pucik et al. の調査より)  
(2019))

Date	Country	Location	Loss (in millions USD)	Maximum hail size (cm)
27–28 Jul 2013	Germany	Reutlingen	4689	8
12 Jul 1984	Germany	Munich	4330	10
7–10 Jun 2014	France/Belgium	Île de France	2301	11
28 May–2 Jun 2008	Germany	Krefeld	1987	8
23–24 Jul 2009	Switzerland/Austria	Romont	1856	10
22–24 Jun 2016	Netherlands	Someren	1783	10
19–21 Jun 2013	Germany	Lohmar	1295	7
4 Jul 1994	Germany	Köln	1032	5
19–24 Jun 2002	Germany	Hochstetten	834	10
11 Jul 1984	France	Epinal	782	6

2009 年 7 月にスイスで発生したこの事故は、物的損害、エンジン、作物への被害を広範囲に引き起こしました。この出来事は、スイスにおける雹による被害としては最近の歴史の中で最大のものとなった。この国では夏の間、定期的に激しいひょう嵐が発生します (GCCapitalideas, 2009)。プチクラ。(2019) は、ドイツにおけるひょう損失の年間傾向は前向きであるように見えるが、統計的に有意ではないことを示しました。1990 年から 1999 年までの年間平均雹損失は 5 億 2,770 万ドル (米ドル)、2006 年から 2018 年までは 1 億 3 億 9,824 万ドル (米ドル) でした。このひょう損失の増加傾向は、暴露、脆弱性、および危険の変化に起因すると考えられます。都市部の人口増加と資産の脆弱性の増大により、潜在的なひょうリスクが増大しています。

### 3.2 オランダの歴史的なひょう嵐と被害

オランダはヨーロッパの中でもひょう雨による被害に取り組んでいる国の一つです。図 4 は、オランダにおける悪天候による保険損害総額のうち、雹による保険損害が占める割合の概要を示しています。

(エクメア データ, 2019)。ひょうによる被害が被害総額に大きな影響を及ぼしている年が数年あることが分かります。たとえば、2016 年には、異常気象による保険損害全体の 73% がひょうによるものですが、平均すると、異常気象による損害全体の 19% を占めています。ただし、2007 年以前のデータには保険会社からの損害データがすべて含まれていないわけではないので注意が必要です。したがって、このグラフは、これも 2007 年以前のひょう被害の割合の概要を示していますが、正確な被害割合は示していません。

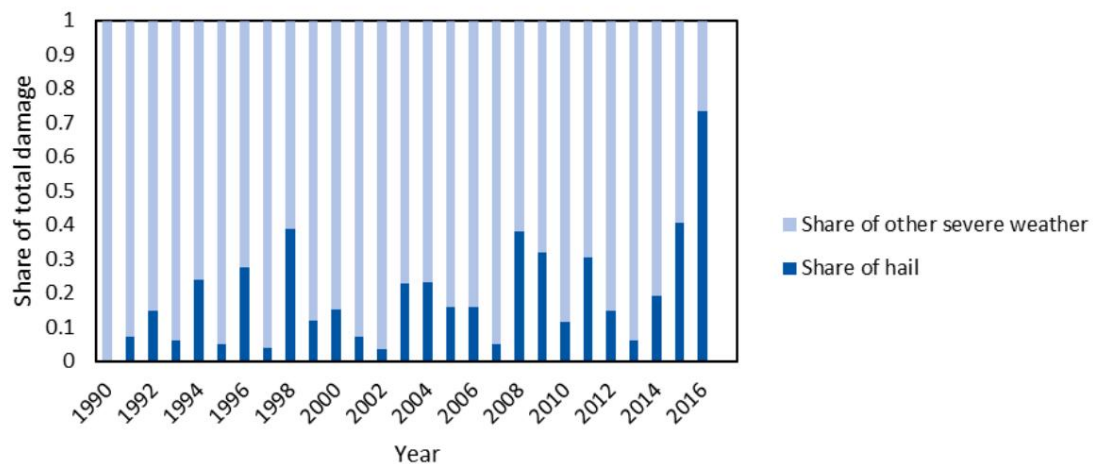


図 4: 1990 年から 2016 年までの悪天候による年間のすべての保険損害のうち、雹による保険損害の平均割合 (Achmea データ (2019) によるデータ)。

図 5 は、1990 年から 2017 年の平均で、月あたりの雹による保険損害の最大割合を示しています。雹による損害は、5 月から 8 月の夏季に最も多く発生します。これは Pucik らの発見とも一致します。 (2019)誰

オランダでは 6 月と 7 月に最も多くの雹嵐が発生することがわかります。これは、Wouters らの研究で読み取れるように、最大のひょう石が発見されるのは夏でもあるため、被害がひょう石のサイズに関係していることを示しています。 (2019年) )。

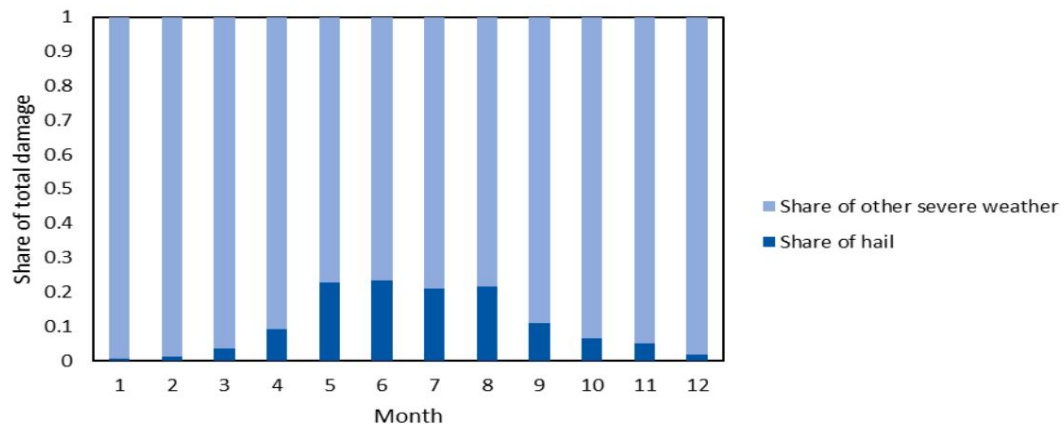


図 5: 1990 年から 2016 年までの月ごとの悪天候によるすべての被害のうち、ひょうによる被害の平均割合 (Achmea データ (2019) によるデータ)。

このデータは、2007 年から 2016 年までの悪天候による被害総額のうち、ひょうによる被害がオランダ南東部で最も大きく、国の北西部で最も小さいことも示しています。これは Wouters らの研究と一致しています。 (2019年) :オランダ南東部でも最大規模のひょうが観測されました。

表 2 は、雹により最も多くの保険損害が発生した 10 件の雹災害と、その日に記録された最大の被害を示した地域を示しています。図 7 は、表の領域を示すために北、東、南、西に分割された郵便番号レベル 1 の番号を備えたオランダの地図を示しています。表 2 は、トップが

このトップ 10 の災害によって引き起こされた被害額の半分以上がこの災害によるものであり、1990 年から 2017 年までの最大のひょう災害となっています。トップ 10 の被害額の合計は、ひょうによる保険損害全体の 70% を説明します。この期間。また、

ひょう現象のトップ 3 はオランダ南部 (郵便番号 5 と 6) で発生し、ひょう被害全体の 59.3% を引き起こしたことがわかります。これらの出来事はすべて国の南部または西部で起こりました。

表 2: 1990 年から 2017 年までにオランダで最も被害が大きかった雹災害トップ 10 (Achmea (2019) のデータ)。

トップ10	日付	相対ダメージ /イベント (%)	面積当たりの相対ダメージ (%)			
			N	...	...	W
1	2016 年 6 月 23 日	62.56	0	0	98	2
2	30/31-2015 年 8 月	14.68	1	1	70	28
3	2008 年 6 月 22 日	7.42	16	16	55	13
4	1998 年 6 月 6 日	3.00	二十	3	4	73
5	2009 年 5 月 26 日	2.66	17	1	4	78
6	2011 年 6 月 28 日	2.47	1	1	8	90
7	2016 年 6 月 24 日	2.38	1	1	95	3
8	2011 年 9 月 10 日	2.28	4	1	1	94
9	2010 年 7 月 10 日	1.55	1	0	93	6
10	2015 年 2 月 7 日	1.00	0	1	78	21



図 6: オランダの郵便番号番号 ((Geoinformatie bronnen op から調整  
インターネット,2009))。

ひょう嵐の頻度と強度が増加しているため、露出した要素は将来、ひょう嵐によって損傷を受けるリスクが高くなります。冒頭で説明したように、これらの露出した要素の 1 つはソーラー パネルです。雹に弱く、太陽光パネルの数が増えているため、その影響がますます強くなっています。ヨーロッパでは雹の発生が増加すると予想されており、太陽光パネルの損傷のリスクも高まっています。次の章では、ソーラーパネルとその仕組みについて説明します。

潜在的な損害。

## 4 ソーラーパネル

この章では、ソーラーパネル、ソーラーパネルの種類、ソーラーパネルの規格とガイドライン、およびソーラーパネルの保険について簡単に説明します。

### 4.1 ソーラーパネルの基礎

ソーラーパネルは太陽電池の基板です。太陽電池は光エネルギーを使用して電気エネルギーを生成します。この変換の背後にあるメカニズムは、光起電力エネルギー変換と呼ばれます (Soga, 2006)。太陽電池に使用される材料は異なりますが、太陽電池の構造は同じです (Fonash, Ashok, および Fonash, 2018)。ソーラーパネルとセルの構造を図 8 に示します (Fonash et al., 2018)。

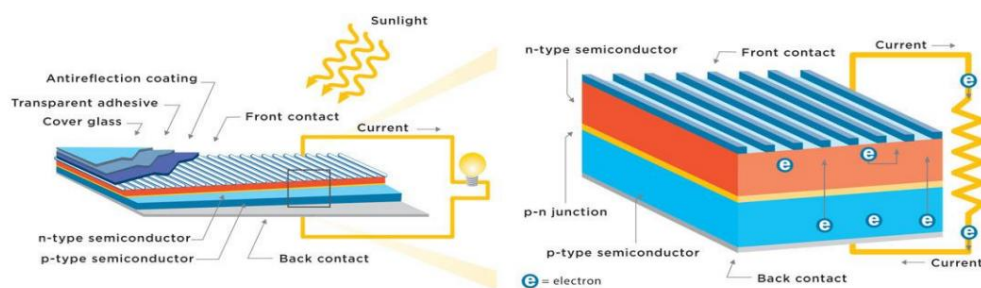


図 7: ソーラーパネルと太陽電池の基礎 (Alpine Solar, 2019)。

太陽光は最初に反射防止層に当たります。この層には光学コーティングが施されており、光の損失を最小限に抑え、光を可能な限り保持するように作られています。これを行うために、後続の層への光の伝達が促進されます。後続の層はエネルギーを変換します。これらは、トップジャンクション層、吸収層、バックジャンクション層で構成されます。これら 3 つの層は、反射防止層とともに、2 つの電気接触層の間に位置します。前面の電気接触層は、非常に薄く、間隔の広いグリッド線で構成されます。光の遮断を最小限に抑えるために、これらのグリッド線は可能な限り小さく作られています。裏面電気接触層には表面積に制限がないため、太陽電池の裏面全体を覆います (Fonash et al., 2018)。

太陽電池の吸収層は、スペクトルの可視範囲からの放射線をできるだけ吸収しようとします。これは、この範囲には太陽光と人工光のエネルギーの大部分が含まれているためです。太陽光は半導体に吸収されます。放射線が太陽電池に当たるとすぐに、吸収層内の電子が励起されます。これらの電子は、基底状態 (固体内の原子に結合している状態) からより高い励起状態に励起されます。この状態では、動き回ることができます。2 つの接合層により電場が誘導され、光起電力効果が発生します。これにより、電子が外部回路に渡されるようになります。電気エネルギーは電気化学蓄電池に保存できます (Fonash et al., 2018)。

その後、ソーラーパネルがチェーン状にまとめられます。それらは一連のパネルで接続されています。これは、ストリング内のソーラーパネルの 1 つの出力が (影などにより) 低下した場合、ソーラーパネルのストリング全体がこの低下の影響を受けることを意味します。この問題の解決策はマイクロインバーターです (Consumentenbond, 2019a)。マイクロインバーターはパネル 1 枚の出力を扱うため、1 枚のパネルの出力が下がってもすべてのパネルの出力が下がるわけではありません。マイクロインバータのもう 1 つの利点は、ソーラーパネルの出力を監視できることです。

(Consumentenbond, 2019a)。これは、ソーラーパネルの損傷を特定しやすくなることを意味します。ただし、これらのマイクロインバーターは比較的高価であり、すべての屋根にインバーターが搭載されているわけではないという欠点があります。

## 4.2 ソーラーパネルの種類

ソーラーパネルは、単結晶ソーラーパネル、多結晶ソーラーパネル、薄膜ソーラーパネルなどのいくつかのカテゴリに分類できます。最初の 2 つはシリコンベースの太陽電池です (Hussain, 2018)。これらは半導体の材料にちなんで命名されており、現在オランダで最大の市場シェアを保持しています (Consumentenbond, 2019b)。

単結晶ソーラー パネルは、現在最も効率的なタイプのソーラー パネルです (Consumentenbond, 2019b)。多結晶ソーラーパネルは単結晶ソーラーパネルより効率が劣りますが、安価でもあります。単結晶パネルは、オールブラックのソーラーパネルにすることもできます。これらのパネルは審美的に優れたデザインで、外観はオールブラックです。ただし、オールブラックのパネルは反射防止層の周囲の部分でより多くの熱を吸収するため、パネルの効率が低下します。



図 8: 3 つの異なるタイプのソーラー パネル (Solarmarket.com.au, 2019)。

別のタイプの太陽電池は、薄膜太陽電池です。これらのセルは結晶シリコンではなく、アモルファスシリコンで作られています (Burgess, 2018)。このタイプの太陽電池の効率は結晶セルに比べてまだ遅れていますが、薄膜パネルのコストは結晶タイプのものよりも低くなります。薄膜太陽電池は柔軟性があるため、曲面にも設置できます。これは薄膜太陽電池の利点であり、製造コストの低さと相まって、薄膜太陽電池が結晶セルを追い越す理由である可能性があります (Ramanujam et al., 2019)。

## 4.3 ソーラーパネルに関する規格、ガイドライン、認証

ソーラーパネル市場は比較的新しい市場であるため、ソーラーパネルに関して強制される法律や規則はあまりありません。ただし、いくつかの規格、認証、保証が使用されています。

### 4.3.1 ガイドライン

国際 IEC 規格は、ソーラー パネルに関するヨーロッパおよび国内の規格およびガイドラインの基礎です (VKG, 2019)。IEC 規格は太陽光発電を示します。



パネルは直径 25 mm の雹石に耐えることができません (Mathiak, et al., 2015)。国際電気標準会議 (IEC) は、コンセンサスに基づいた国際規格を発行し、電気技術分野の適合性評価システムも管理する世界的な組織です (IEC, 2019)。これらの国際規格の採用は任意ですが、国内の法律や規制で言及されることがよくあります。

オランダでは、IEC 国際規格に基づく規格を NEN 規格と呼んでいます。このような NEN 基準は市場関係者間の自主的な合意であり、法的地位はありませんが、一般に適用可能です (Roofs, 2019; KSN, 2019)。

太陽光発電システムに関する NEN 規格は、一般基準および建築基準、製品基準、設置基準、実務ガイドラインおよび技術協定の 4 つのカテゴリに分類できます (Castenmiller, 2019)。オランダで適用されるソーラーパネルに関する最も重要な規格の概要は、付録 C1 に記載されています。

### 4.3.2 認証

オランダでは、市場にあるすべてのソーラーパネルは IEC および NEN の基準に従う必要がありますが、これらの基準は必須ではないため、ソーラーパネルのメーカーはこれらの要件を満たすかどうかを自分で決定できます (Achmea, 2019a)。これらの規格は必須ではないという事実にもかかわらず、オランダには、太陽光発電システムのコンポーネントとこれらのシステムの設置の品質と安全性を保証するための複数の特徴と認証があります (Zonnekeur, 2013; Stichting Garantiefonds Zonzeker 2019b; Achmea, 2019a) )。Kwaliteitsborging Installatiesector (Kiwa) は、有効で信頼性の高い太陽光発電コンポーネントの登録を管理しています (NEN, 2013a)。技術基準は信頼されているにもかかわらず、その遵守状況の監視は不十分です。

オランダ市場で最も一般的なホールマークは、CE ホールマーク、TÜV ホールマーク、RoHS 認証、および IEC ホールマークです (Stichting Garantiefonds Zonzeker, 2019b; Zonnepanelengids.com, 2019)。CE ホールマーク (Conformité Européenne) は太陽光発電システムの必須のホールマークであり、ソーラー パネルが安全、健康、環境に関する (ヨーロッパ) 法の基準を満たしていることを証明します (Stichting Garantiefonds Zonzeker, 2019a; Zonnepanelengids.com, 2019; RVO, 2019a;

欧州委員会, 2019)。ただし、他の特徴は必須ではありません (NVA, 2019)。太陽光発電システム自体を対象とした証明のほかに、設置会社や太陽光パネルの製造者に関するさまざまな認証や証明も存在します。これらのシステムの設置者は、専門知識を保証するために Cito から認定を受けることができます (NEN, 2013a)。ISO 認証 (国際標準化機構) は、ソーラー パネルの製造業者が安全性、信頼性、品質に関する特定の要件を満たしていることを保証する証明書のもう 1 つの例です (Zonnepanelengids.com, 2019 年; Stichting Garantiefonds Zonzeker, 2019b)。オランダで使用されている他の特徴についての詳細は、付録 C2 を参照してください。結論として、オランダでは認証と品質マークは珍しいことではありません。ただし、IEC および NEN 規格に関しては、これらの認証と特徴のほとんどは必須ではないため、実際にはあまり使用されません (Achmea, 2019a)。

ドイツにも同様のことが当てはまりますので、必須の認証と品質マークを持たない国はオランダだけではありません。ドイツでも実際の認証プロセスは実施されていませんが、前述の IEC 規格に従った国際試験手順は存在します (GDV, 2019)。さらに、ドイツ工学会は太陽光発電システムの設置に関する出版物を所有しています。この出版物は、以下について説明する技術ガイダンスで構成されています。

特定の風速や雹に耐えるためにソーラーパネルが満たさなければならない要件を示し、太陽光発電システムの設置要件のガイドラインを提供します。この出版物の存在にもかかわらず、これらの要件も必須ではありません。

### 4.3.3 保証

フィルムパネルに関係なく、太陽電池パネルの平均寿命は、システムの材質と設置条件に応じて 25 ～ 30 年と推定されます (Atama Solar Energy, 2016; Energysage, 2019; Green Coast, 2019; Verbond van Verzekeraars, 2019年)。比較的寿命の長い多くの技術製品や設備と同様に、太陽光発電システムにも保証があります (Consumentenbond, 2019c)。太陽光発電システムに関する保証は、製品保証、電力保証、設置保証、システム保証、および発電量保証のいくつかのカテゴリに分類できます (Consumentenbond, 2019c; Sungevity, 2019)。これらの特定の種類の保証の詳細については、付録 C3 を参照してください。

ガイドラインや認証が不足していると、ソーラーパネルの設置が不十分になったり、製造中や設置中にパネルが損傷したりする可能性があります。これにより、最終的には、ひょう嵐の後など、他の原因による損傷に対してソーラーパネルがより脆弱になる可能性があります (Achmea, 2019a)。

## 4.4 太陽光パネルと雹の保険

ソーラーパネルの所有者を損害から経済的に守るために、保険は重要な役割を果たします。一般に、オランダではソーラーパネルは、火災、誘導、雷やひょう嵐などの自然によって引き起こされる損傷に対して保険をかけられています (Verbond van Verzekeraars, 2019年)。保険は農業、商業、民間で異なります

セクター。

民間部門では、ソーラーパネルに対する個別の保険はなく、住宅保険に自動的に加入します。これは、太陽光パネルも屋根瓦と同様に保険が適用されることを意味します。その結果、一部の保険会社では、個人はソーラーパネルを所有しているかどうかを保険会社に知らせる必要がありません (Achmea, 2019b)。付録 B に示すように、このソーラー パネルの保険は保険会社によって異なります (Solar Magazine, 2019)。オランダのほとんどの保険会社は、雹による目に見える損害を補償します。目に見えない損傷（微小な亀裂）が補償されるかどうかは保険会社によって異なります。一部の会社では、この損傷は保険に含まれていませんが、他の会社では、損傷が雹によって引き起こされたものであり、他の原因（設置中や生産時など）によって引き起こされたものではないことが証明できる場合にのみ、微小亀裂に対して保険が適用されます。これらの規則は、2016 年のひょう嵐の後に設定されました。このひょう嵐では、多くのソーラーパネルが初めてこのような規模で損傷し、請求の処理中に多くの問題が発生しました (Solar Magazine, 2019 年)。

2016 年 6 月のひょう嵐後の保険金請求の処理時に保険会社が気づいた問題 (Achmea, 2019a; Achmea, 2019b):

- 目に見えない損傷への対処方法に関する具体的なルールはありませんでした。
- 多数のパネルが微小亀裂により損傷した。ただし、これは出力作品では直接見ることはできません。
- 壊れたソーラー パネルを顧客が実際に交換しなければならないという規則はないため、理論上は損傷したソーラー パネルが再び市場に戻される可能性があり、保険会社は同じパネルの代金を複数回支払わなければならない可能性があります。
- 目に見えない損害が発生した場合の保険金支払いの決定については、必ずしも合意が得られたわけではありません。



- ソーラー パネルのサプライヤーとテスターは、ソーラー パネルの所有者に書簡を送り、ソーラー パネルの微小亀裂をテストさせるべきだと指摘しました。これにより、保険会社に対する不当な請求が発生しました。

商業分野では、方針をどのように変更する必要があるかはまだ決まっていない

雹や目に見えない被害について。2016年のひょう嵐の前、アクメアがソーラーパネルが損傷した企業に支払った金額は、ソーラーパネルの再建価値/修理費用、またはソーラーパネルの市場価値の下落に基づいていた。

(エクメア、2019d)。個人の保険契約者と企業の請求の処理におけるもう1つの違いは、企業の場合、アクメアは損害を請求した保険契約者に専門家を派遣して、太陽光パネルが損傷していないかどうかを常に確認していることです。個人保険契約者の場合、すべての損害賠償請求に対してこれが起こるわけではありません。ソーラーパネルが損傷していると判明した後は、損傷したソーラーパネルを新しいパネルに交換することが意図されています。ただし、これであるかどうかは確認されていません

実際に完了しました。

農業分野では、顧客がひょうによる損害を保険に含めるかどうかを選択できる場合があります。したがって、加入している保険の種類に応じて、雹による損害は保険が適用されるかどうかが決まります。全体として、オランダの保険会社の間では、ソーラーパネルにどのように保険をかけるべきかについて実際にはコンセンサスがありません (Achmea、2019a; Achmea、2019b)。

ヨーロッパのその他の国については、ソーラー パネルの保険に関する具体的な情報はありません。オランダとドイツの太陽光パネルの保険を比較すると、一般的な取り決めは同じであると言えます。ドイツでは、太陽光パネルも建設保険契約に含まれているため (GDV、2019)、太陽光パネルに対する個別の保険は存在しません (Gothaer、2019)。ドイツでは、太陽光パネルの保険ではそれほど多くの利益が得られないため、保険に関する雹のリスクと損害にはあまり焦点が当てられていません ((GDV、2019); (Gothaer、2019))。したがって、ソーラーパネルの保険を規制する特定の法律は制定されていません (GDV、2019)。しかし、ドイツでもひょうリスクを別個の保険として保険に組み込むべきかどうかの議論が始まっている。

## 4.5 ソーラーパネルの損傷

ソーラーパネルはさまざまな方法で損傷し、さまざまな問題を引き起こす可能性があります。ソーラーパネルが最高の効率でエネルギーを生成できるようにするには、パネルがどのように損傷する可能性があるか、および損傷の影響がどのようなものかを調べることが重要です。このセクションではこれらのトピックについて説明します。

### 4.5.1 ソーラーパネルの損傷につながる可能性のある要因

Gupta らによって提案されているように。(2019) 太陽光パネルの性能に影響を与えると予想される現在の要因は、環境要因と設置要因の2つのカテゴリに分類されます。この研究では、インタビューを受けた関係者全員が、現在、セルの生産から設置までのサプライチェーンの規制が不十分であると述べた (Achmea、2019a; Achmea、2019b; SolarClarity、2019)。これは、サプライチェーンのどこかで発生する可能性のある損害につながり、損害要因の3番目のカテゴリである生産要因につながります。図10は、これら3つのカテゴリと対応する係数を示しています。これは、多くの要因がソーラーパネルに損傷を与える可能性があり、雹などの環境要因によって発生するだけでなく、製造および設置のプロセス中にすでに発生する可能性があることを示しています。

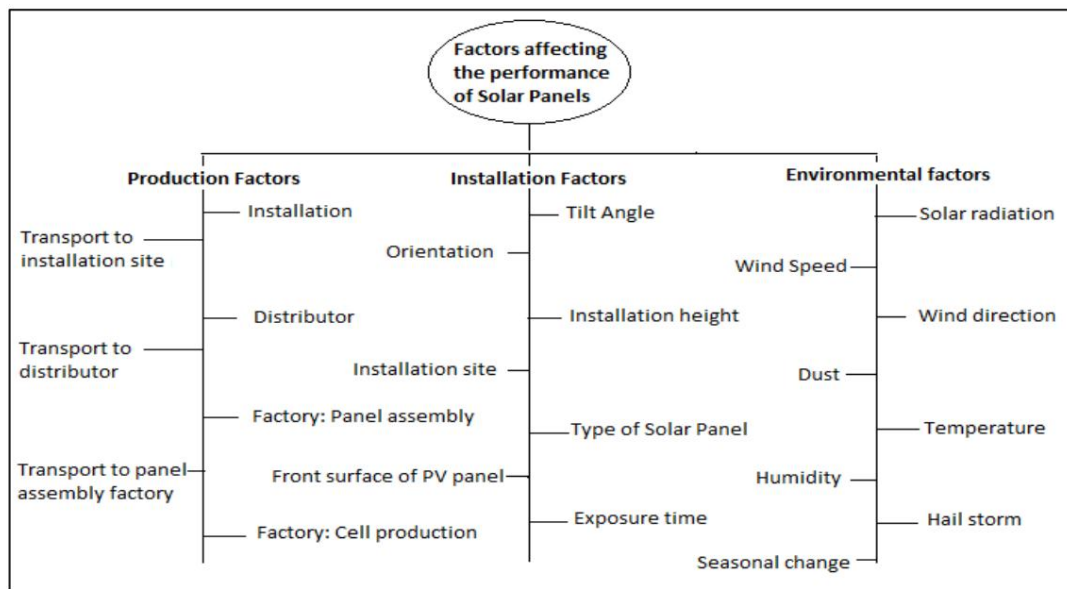


図 9: Gupta らの研究を基にした、ソーラー パネルの性能に影響を与える要因。(2019年)

図 10 は、これら 3 つのカテゴリの概要を示しています。生産中のソーラーパネルは、輸送中、設置中、またはすでに工場

で損傷する可能性があります。

設置要因は、ソーラー パネルの種類の選択、パネルの向き、傾斜角度などによって、パネルの性能にも影響を与える可能性

#### 4.5.2 破損した太陽光パネルの影響

上記の要因は、さまざまな方法でソーラーパネルに損傷を与える可能性があります。物体が衝突すると、ソーラー パネルの前面ガラス表面に亀裂が入る可能性があります。このタイプの亀裂は直接目で見ることができます。亀裂は太陽電池に直接入る日射量を減少させ、その結果、歩留まりが低下します (Gupta et al., 2019)。前面ガラス層ではなく、より脆弱なシリコン層に形成される小さな亀裂は、マイクロクラックと呼ばれます (Solar Tester, 2019)。これらの微小亀裂は、エレクトロルミネッセンス試験などの特別な試験を使用してのみ確認できます。このテストでは、光出力が電圧とともに増加するため、亀裂のある領域が暗いスポットとして表示されます。

したがって、この試験は亀裂の形状を示し、亀裂の原因を示すことができます。たとえば、星型の微小亀裂は、ひょう石などの小さな物体の衝撃を示している可能性があります。通常、マイクロクラックは最初は収量の低下を示しませんが、数か月後には低下します (Solar Tester, 2019)。図 11 に、目に見える損傷と目に見えない損傷の簡単な例を示します。設置された太陽光パネルの損傷を検査できるその他の方法

この分野のモジュールは、サーモグラフィー技術と UV 蛍光イメージング法です。サーモグラフィー技術は、モジュールやストリング間の断線などを示す熱ホットスポットを検出できるポータブルカメラを使用して、現場で最も一般的に使用されています (Gupta et al., 2019)。

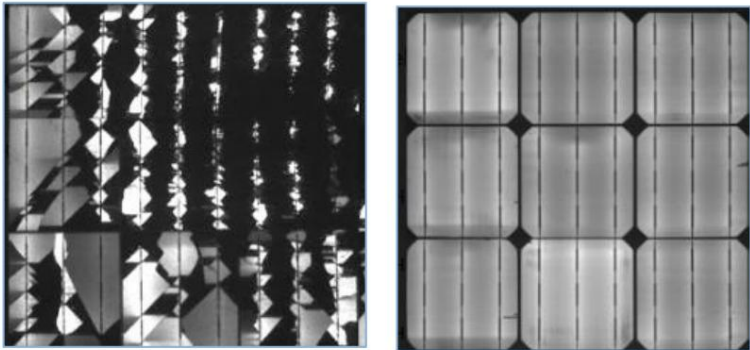


図 10: ソーラー パネルの (a) 可視および (b) 目に見えない (微小亀裂) 損傷のエレクトロルミネッセンスの結果 (Solar Tester Nederland (2019) 提供)。

いくつかの研究 (Gupta et al., 2019; Moore & Wilson, 1978; Berardone et al., 2014; Dimish et al., 2017; Kajari-Schroeder et al., 2012; Morlier et al., 2015; Paggi et al., 2013 ) は、太陽電池パネルの性能に対する損傷の影響を定量化するための経験的方法を提案しました。太陽光/パネルの損傷の進行は複雑な性質を持っているため、損傷の影響を測定することは非常に複雑です。

Solar Tester (2019) が述べているように、マイクロクラックによって最初はエネルギー収量が低下するわけではありません。温度変化により、亀裂が成長する可能性があります (Achmea,2019a)。亀裂の数や大きさ、パネルの向きや種類にもよりますが、数カ月後、損傷した部分は出力の急速な低下を示し始め、約 1 年後には微細な亀裂がパネルの外側に見えるようになります。パネルも。これらの微小な亀裂がパネルの外側に見えるようになると、それらはしばしばカタツムリの痕跡と呼ばれ、太陽電池表面の一部の変色になります (Meyer, et al., 2013)。

すべての損傷はソーラーパネルの寿命を縮めると予想されます (Gupta et al., 2019)

現在、科学研究では、さまざまな損傷が寿命の短縮に及ぼす定量的な影響についての知識が不足しています。ただし、既存の学術文献 (Mathiak et al.,2019; Gupta et al.,2019; Dimish et al.,2017) 、灰色の文献 (Solar Edge,2017; Solar Tester,2019)およびインタビュー結果 (Achmea,2019a; Solar Tester,2019 年,SolarClarity,2019 年) 、表 3 に示すように、損傷したソーラーパネルの影響に関する現在の知識の概要が作成されました。

表 3: ソーラーパネルの損傷の種類とそれが出力に及ぼす影響 (本文で説明されている複数の研究者による)。

ダメージ	亀裂の種類	出力電力に大きな影響を与えるために必要な損傷領域 (パネルあたり)	科学文献 (1)	群れ文献 (2)
目に見えるダメージ	斜めブレイク (+45°)	>85.85 mm2	バツ	
	斜めブレイク (-45°)	>85.85 mm2	バツ	
	バスバーと平行に破断	>82.00 mm2	バツ	
	バスバーに垂直に破断	>79.40 mm2	バツ	
	多方向ブレイク	>46.20 mm2	バツ	
目に見えないダメージ	マイクロクラック	>1 % のセルが切断されました (> 20 % 非常に重大な影響)		バツ

この表は、目に見える損傷と目に見えない (微小亀裂) 損傷、破損の種類、およびパネルの出力に大きな影響を与える最小サイズを示しています。マイクロの場合、

クラックが重大であるためには、少なくとも 1% のセルがクラックによって切断される必要があります。最後の 2 列は、使用されたソースを示します。この表の結果に貢献した研究はすべて、出力に大きな影響を与えるために必要な損傷をテストするためにさまざまな方法を使用しました。付録 D ではメソッドの概要を説明します。

これらの研究で使用されています。

### 4.5.3 太陽光パネルへの雹の影響

ブチクラ。(2019) は、植生 (作物や樹木) への被害は 3 cm のひょうが降ったときに最も多く発生することを示しました。車両の車体、住宅の窓、屋根への被害は、5 cm のひょうが降った場合に最も多く発生し、7 cm のひょうが降った場合には車両の窓が発生しました。傷害は主に 5 cm のひょうで報告されましたが、場合によってはそれより小さなひょうで傷害が記録されました。雹が特にソーラーパネルに与える影響についてはあまり多くの研究が行われていませんが、以下に説明するようにいくつかの実験室研究が行われています。

国際エネルギー機関 (Mathiak 他、2015) は、雹の影響を受けた 2 つの屋根の設置に関する研究を行いました。彼らは、雹による典型的な細胞損傷は星の亀裂であり、亀裂が入った細胞だけのパワーはほとんど変化していないことを発見しました。直径 6 cm の雹が降った屋根では、モジュールの 42% に目に見える損傷が見られました。直径 4 センチの雹が落ちたもう一方の屋根では、パネルの約 3% だけが目に見える損傷を示しましたが、90% には星型の微小亀裂が発生しました。この研究では、図 10 で説明したのと同じ損傷を引き起こす可能性のある要因について説明しました。ただし、研究室でのテストでは、パネルの雹に対する耐性を高める可能性があるいくつかの要因も特定しました。

- ガラス箔パネルの代わりにガラス-ガラスパネル。
- 厚いガラス (3.2 mm ガラスは 5 cm の氷球によって破壊される可能性があります。4.0 mm ガラスには微小な亀裂のみが見られます)。
- 輸送や雪による初期の亀裂がないこと。
- パネルを取り付けるクランプが強化されました。

ムーアとウィルソンの実験 (1978) は、ひょう嵐の影響を実証しました。

ソーラーパネルの性能は主に前面層に使用される素材によって決まります。前面層として透明なシリコンポッティングを使用すると、細胞が破壊されずに 1 インチ (約 2.5 cm) の模擬雹に耐えられないことが実証されました。前面層としてのアニールガラスは、1 インチから 1-1/4 インチ (2.5 ~ 3.2 cm) までの雹に耐えるのに適していました。強化ガラスを使用すると、1-1/2 インチ (3.8 cm) の氷球には耐えられますが、2 インチ (5 cm) の氷球の影響で割れてしまいました。Moore と Wilson の研究 (1978 年) では、前面のシリコン ポッティングが最も弱く、次にアニール ガラスと強化ガラスが雹に最もよく耐えられるという同じ種類の研究が行われました。

ソーラーパネルの損傷にはさまざまな原因が考えられます。特に直接目に見えない微細な亀裂の場合は、特別な試験を行わない限り、原因を特定することが困難です。微小な亀裂は、長期的には出力の低下につながる可能性があります。次の章では、ソーラーパネルへの被害をひょうの大きさとソーラーパネルの特性と関連付けてみたいと思います。

## 5 太陽光パネルの雹に対する脆弱性 (ケーススタディ: 23) 2016年6月)

### 5.1 ひょう雨による被害

2016年6月23日、激しい雷雨が発生し、大規模な水、風、ひょうの被害が発生しました。特にオランダ南東部はひょう嵐に見舞われた。6月23日は、最高気温が摂氏30度以上の暑い日で、非常に湿った空気により、オランダでこれまでに測定された最高の露点温度が記録されました (Sluijter, 2016)。午後8時前、オランダ南部の北ブラバント州に激しいひょう嵐が到来した。北ブラバント州の南東部では、嵐の1つがスーパーセルに発展しました。このスーパーセルは北北東方向に移動し、大きなひょう石による大きな被害をもたらしました。各地で直径4〜6センチのひょうが観測された。局地的には7〜10cmのひょうも観測され、オランダで過去25年間に観測された最大のひょうとなった (Sluijter, 2016)。

これは、郵便番号 (PC4) ごとのひょう石の最大推定サイズをセンチメートル単位で示した図 12 でも確認できます。実際、Woutersらのデータセットによると、オランダ南東部の北ブラバント州とリンブルグ州で最大のひょうが発生したことがわかります。(2019年)。右側の地図は、郵便番号内の全住宅に占める被害を受けた住宅の割合として被害を示しています (Achmea データ, 2019 年)。一般に、最大のひょうが観測された同じ地域では最大の被害も見られ、ひょう嵐により家屋の20%以上が被害を受けた地域も出ています。

ただし、ひょうの規模が大きかった地域では、被害がそれほど大きくないこともわかる。これは、例えば、人口がまばらな農業地域や、ひょうは非常に局地的な現象であるため、一部の郵便番号地域で最大ひょうのサイズが非常に大きかったとしても、これが直接的にその地域でそれほど大きかったことを意味するものではないことが考えられます。全域。

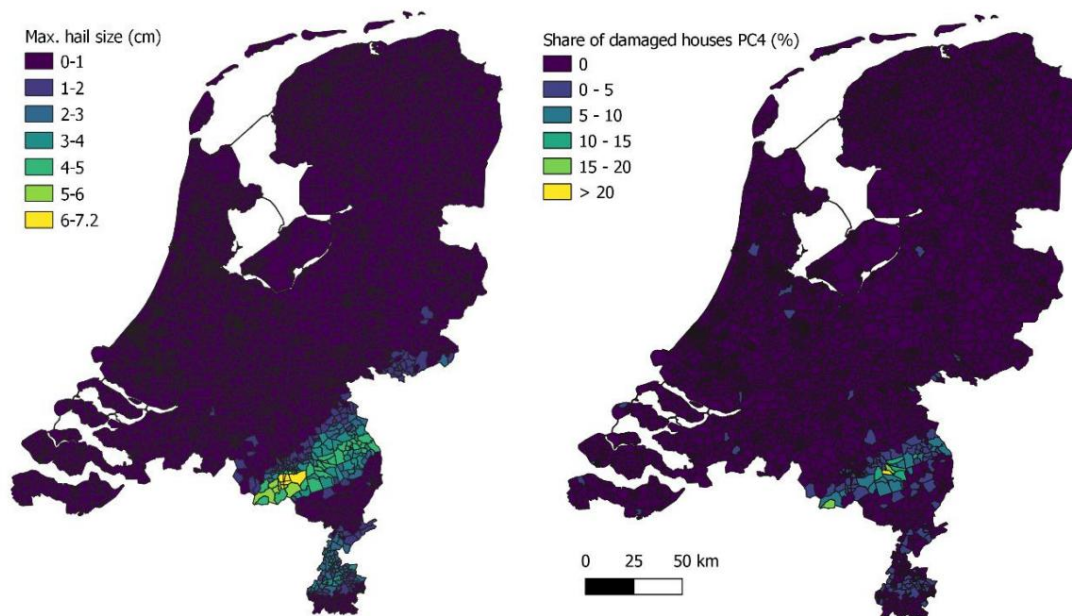




図 11: 2016 年 6 月 23 日にオランダで発生したひょう嵐 (a) 最大値。郵便番号でのひょうの大きさ (cm) (KNMI (2019))。  
(b) 郵便番号別の被保険住宅総数に占める被害を受けた住宅の割合 (Achmea (2019) のデータに基づく)。

図 13 は、郵便番号の保険対象住宅の総数からの被害を受けた住宅の数を、その郵便番号の最大ひょう石サイズとの関係でプロットしたものです。このデータには機密情報が含まれているため、y 軸の数字は図から省略されています。この図は、小さなひょうでも被害が発生する可能性があることを示していますが、ひょうの大きさが 3 cm になると、物的被害が大幅に増加します。また、ひょう石のサイズが大きくなると、被害が再び減少しているように見えることもわかります。

ただし、このような大きな雹が発生した地域は非常に限られており、おそらく建物が存在しないため、これは事実である可能性があります。

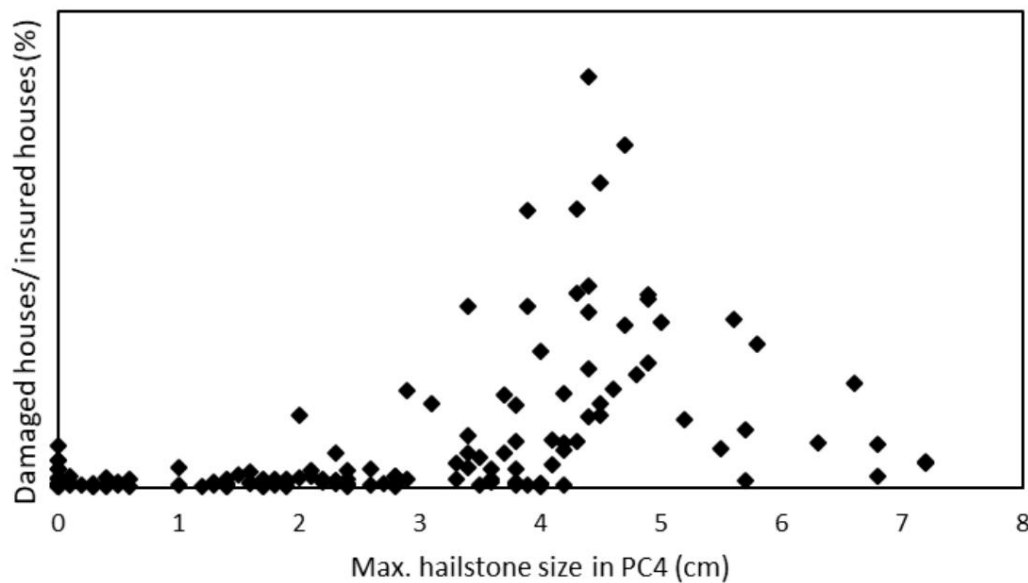


図 12: 保険対象住宅全体に占める被害を受けた住宅の割合に対応する郵便番号でのひょうのサイズ (Achmea (2019) および KNMI (2019) のデータに基づく)。

## 5.2 雹による太陽光パネルの損傷

6 月 23 日のひょう雨によって引き起こされた、特に太陽光パネルへの被害も分析されています。このケーススタディでは、雹によるソーラーパネルの損傷を含む 249 件の保険金請求が使用されています (Achmea データ、2019 年)。これらの申し立ては、損傷なし、目に見えない損傷、目に見える損傷、またはその両方のタイプに分類されます。図 14 は、損害の種類ごとに、保険金請求があった郵便番号におけるひょう石の最大サイズを示しています。損傷のないクレームの場所では、ひょうの大きさの最大のばらつきが観察されます。これは、すべての申し立ての半数以上がソーラーパネルに損傷を与えていないという事実によって引き起こされている可能性があります。したがって、さまざまな場所でより多くの主張があれば、より広範囲のひょうの大きさを示す可能性があります。また、被害カテゴリーでは、ひょうの大きさ 2 cm、3 cm が目に見えない損傷から目に見える損傷に減少し、ひょうの大きさ 4 cm が増加していることがわかります。ただし、大きなひょうのサイズも若干減少していることもわかります。これもまた、雹が非常に局地的であり、郵便番号の最大雹サイズが、請求のあった場所での正確な雹サイズであることを意味しないという事実によって引き起こされる可能性があります。これは、4 cm 以上の雹の衝撃により、太陽光パネルが目に見えて損傷しやすくなる可能性があることを示しています。

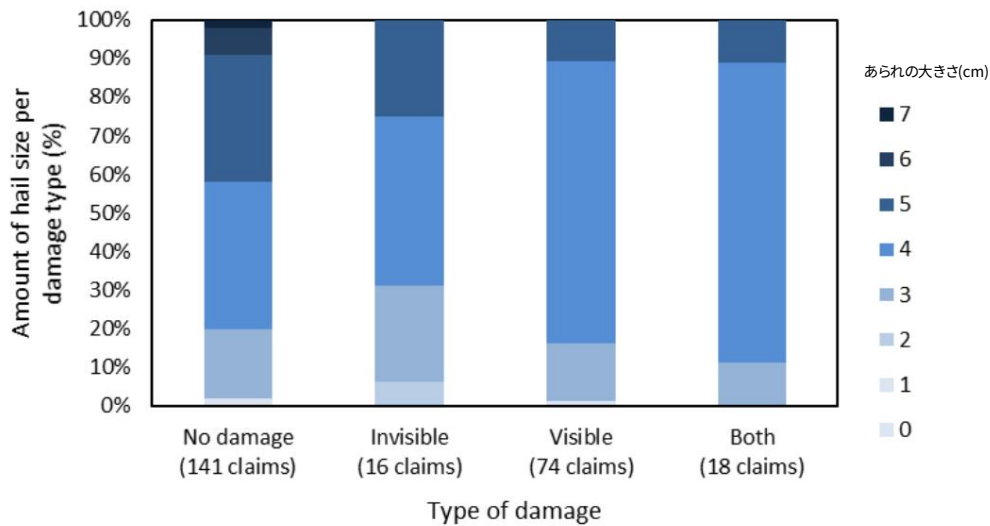


図 13: 最大のシェア被害の種類ごとのひょうの大きさ (cm) (Achmea (2019) および KNMI (2019) のデータに基づく)。

図 15 は、建物上のソーラー パネルの総数に占める破損したソーラー パネルの割合を、請求があった郵便番号の最大ひょう石サイズとの関係で示しています。太陽光パネルへのほとんどの被害は、最大サイズが 3 cm 以上のひょうから始まります。また、レーダーによって検出されたひょうのサイズは 0 cm であったが、何らかの損傷があったという 2 つの主張があることもわかります。これはおそらく、ひょう石のサイズ推定における不確実性に関連しています (つまり、レーダー画像により気象数値モデル データが強化されました)。)。ひょうの最大サイズが 3 cm を超えると、より大きな被害が発生します。雹により、太陽光パネルの数パーセントだけが損傷する場合もあれば、屋根上のすべてのパネルが損傷する場合もあります。最大サイズが 6 cm 以上のひょうが降った郵便番号地域ではクレームがあまりないため、低い被害率要因が全体的な脆弱性を示すものとみなされるべきではありません。

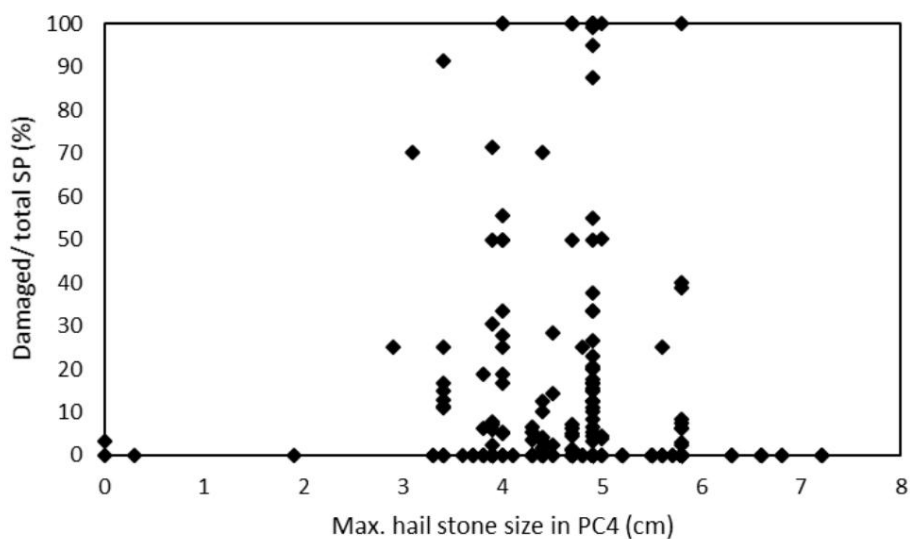


図 14: 最大請求額に対する、請求ごとのソーラー パネルの総数に占める破損したソーラー パネルの割合ひょうの大きさ (cm) (Achmea (2019) および KNMI (2019) のデータに基づく)。

図 16 は、最大ひょうサイズが 3 ～ 4 cm、4 ～ 5 cm、および 5 ～ 6 cm の損傷を伴う保険金請求の 3 つの箱ひげ図を示しています。より低い雹のサイズは、これらは 2 つの主張にすぎないため、考慮されていません。4 ～ 5 cm のひょう石は、3 ～ 4 cm のひょう石よりも平均して大きな被害を引き起こしますが、被害の範囲もより広がります。仮説は、4 ～ 5 cm のひょうが当たったソーラー パネルの方が、3 ～ 4 cm のひょうが当たったソーラー パネルよりもダメージが大きいという仮説を検証します。t 検定 (片側) の結果は、これが実際に当てはまることを示しました ( $p$  値 = 0.063、片側)。ただし、この図は、5 ～ 6 cm のひょう石の方が平均被害が少ないことも示しています。これは、ひょうの最大サイズが大きい地域では、ひょう石の種類が多いためである可能性があります。実際にこのような大きなひょうが太陽光パネルに直撃する可能性はそれほど高くありません。t 検定では、これら 2 つのグループ間に有意差がないことが示されています ( $p$  値 = 0.250、片側)。

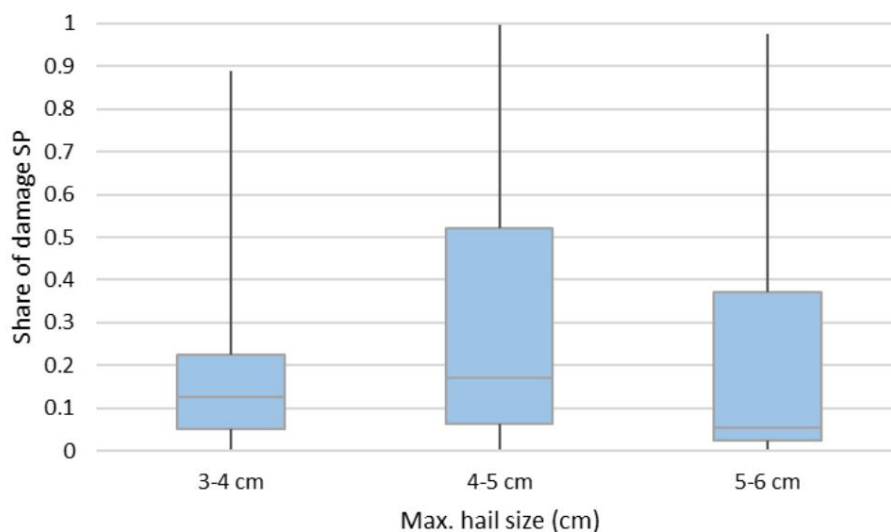


図 15: 最大被害額に対するクレームごとの損傷した SP の割合あられの大きさ (cm) 3～4cm、5～6cm以上

損傷はひょう石の大きさだけでなく、損傷につながる要因のセクションで説明したように、屋根上のソーラーパネルの特性にも依存する可能性があります。この研究では、傾斜屋根と平屋根の間に違いがあり、平屋根のソーラーパネルの傾斜角は傾斜屋根よりも小さいと想定されています。オランダにおけるソーラーパネルの最適な角度は 36 度であるため、平らな屋根上のソーラーパネルの角度は約 36 度であると想定されます (Zonnepanelen.net, 2019c)。オランダでは、平均して、ほとんどの傾斜屋根の角度は 45 度です (Demalux, 2019)。表 4 は、平屋根と傾斜屋根の請求の平均損害額を示しており、平屋根の建物の方が、傾斜屋根 (12.6%) よりも太陽光パネルへの損害が平均して大きい (太陽光パネルの平均 18.1% が損傷) ことを示しています。両グループのひょうの大きさは平均してほぼ同じで、それぞれ 4.8 cm と 4.7 cm でした。平らな屋根は傾斜屋根よりも平均的な損傷が大きいという仮説が検証されました。これをテストしたところ、 $p$  値 (片尾) は 0.059 となり、結果が 94% で有意であることが示されました。



表 4: 屋根タイプ別のソーラー パネルの総数のうち、破損したソーラー パネルの平均数 (Achmea (2019) のデータと PDOK (2016) の航空写真に基づく)。

	Average damaged / total SP (%)	Average mean hail size (cm)	% of claims
<i>Flat</i>	18.1	4.8	29
<i>Pitched</i>	12.6	4.7	71

考慮されるもう 1 つの特性は、ソーラー パネルの向きです。屋根は、N、NE、E、SE、S、SW、W、NW の 8 つのグループに分類されます。ただし、太陽電池パネルが北または北東の向きを持っていたクレームが見つかり、東向きのクレームは 4 つだけ、北西向きのクレームは 2 つだけでした。したがって、表 5 ではこれらの方向は考慮されていません。ただし、他の 4 つの方向は、各グループのクレームごとに破損したソーラー パネルの平均割合を示しています。たとえ平均のひょうのサイズが小さくなかったとしても、南東方向は他の方向よりも破損したソーラーパネルの割合が低いことがわかります。これは、ひょう嵐が南西方向から来たという事実によって引き起こされた可能性があります (Buienradar, 2019)。他の 3 つの方向のソーラー パネルはひょうに対してより脆弱になっています。これにより、南東方向に配向されたソーラーパネルは他の配向のソーラーパネルよりも損傷が少ないという仮説が生まれました。

S 方向と SE 方向の損傷を除き、一方の方向の損傷が他方の方向よりも高いことに大きな違いはありません。S 方向の屋根上のソーラー パネルへの損傷は、SE 方向のソーラー パネルよりも大幅に高くなります (p 値 = 0.014、片尾)。SE の損傷を S、SW、および W を組み合わせた損傷と比較すると、2 つのカテゴリ間にも同様に有意な差があります (p 値 = 0.016、片尾)。

表 5: 向きごとのソーラー パネルの総数のうち、破損したソーラー パネルの平均数 (Achmea (2019) のデータと PDOK (2016) の航空写真に基づく)。

	Average damaged / total SP (%)	Average mean hail size (cm)	% of claims
<i>S</i>	17.0	4.7	48
<i>SE</i>	8.4	4.9	18
<i>SW</i>	13.6	4.5	25
<i>W</i>	15.7	4.9	9
<i>S, SW, W</i>	15.8	4.7	81

最後に、屋根上のソーラー パネルの総数が考慮されます。私たちは、屋根に太陽光パネルの数が多いほど、平均して被害が大きくなると仮定します。これは、あるパネルから他のパネルへのひょう石の跳ね返り効果の可能性があるため予想されていました (Achmea, 2019a)。しかし、屋根に設置される太陽光パネルの数に明確な傾向は見られません。最小のカテゴリでは、損傷したソーラー パネルの平均割合が高く (39.6%)、1 つの屋根に 100 枚を超えるソーラー パネル (SP) がある最大のカテゴリでも、損傷は比較的高くなります (25.7%)。最初のグループ (1 ~ 6 SP) と最後のグループ (>100 SP) の間、および 2 番目のグループ (7 ~ 15 SP) の間を除き、すべてのグループは互いに有意性が 95% ~ 99% の範囲で大きく異なります。第 3 グループ (SP 16 ~ 50) では、差は有意ではありませんでした。全体として、太陽光パネルの総数に傾向は見られません。

表 6 :ソーラーパネルの総数当たりのソーラーパネルの総数の平均損傷したソーラーパネル (Achmea (2019)のデータと PDOK (2016)の航空写真に基づく)。

	Average damaged/ total SP (%)	Average mean hail size (cm)	% of claims
1-6 SP	39.6	4.6	4
7-15 SP	13.6	5.0	29
16-50 SP	10.6	4.7	50
50-100 SP	3.5	4.3	6
>100 SP	25.7	4.6	11

これらの表は、ソーラー パネルへの損傷に影響を与える可能性のあるものについての第一印象を与えますが、変数を相互に結び付けるものではありません。どの変数がダメージに最も大きな影響を与えるかを知ることも重要であるため、回帰が実行されます。その結果については、次のセクションで説明します。

### 5.3 ソーラーパネルの損傷に影響を与える変数の回帰

このセクションでは、8 つの回帰分析の最も興味深い結果を示します。次のページの表 7 は、さまざまな回帰の回帰出力を示しています。従属変数は破損したソーラー パネルの数であり、個々の請求ごとのソーラー パネルの総数のパーセンテージとして表されます。この方法で説明されているように、複数の基準を使用して、最もパフォーマンスの高い回帰が選択されます。

回帰 1 は基本モデルで、MEHS と傾斜屋根のダミー変数のみが含まれます。基準を見ると、この回帰は調整済みR<sup>2</sup> が最も低く、対数尤度が回帰 6 の 1 つです。

パフォーマンス。 R から判断すると<sup>2</sup>、

ソーラー パネルの向きと MEHS の変更がない場合、3 番目に優れたパフォーマンスを発揮します。

この回帰は、ソーラー パネルの向きを含めると、ひょうのサイズがソーラー パネルの損傷に影響を及ぼさないことを示しています。この回帰は、ソーラー パネルが南、南西、または南の方向を向いているときにソーラー パネルへの損傷が最も大きくなることも示しています。これは、2016 年 6 月 23 日の嵐の風向きが南西で、主に南西の角度で屋根に影響を与えたという事実によって説明されるかもしれません。ひょう石が南東方向を向いた屋根に衝突する速度は、ひょう石が南西方向を向いた屋根に衝突する速度よりもはるかに遅いと予想されます。これは、この回帰によれば、嵐の方向、つまり風が太陽光パネルの損傷に大きな影響を与えることを意味します。

R<sup>2</sup>とは対照的に、調整された R<sup>2</sup>、対数尤度、AIC および BIC は、この回帰が最良の回帰の 1 つであることを示していません。これらの基準は、この回帰で導入された追加のリグレッサーにさらにペナルティを与えます。AIC の場合、この回帰 (6) のパフォーマンスは依然として比較的良好ですが、BIC の場合、この回帰のパフォーマンスは最悪です。BIC は、2 乗 MEHS を使用した回帰 (回帰 4、7、および 8) が最も優れたパフォーマンスを発揮することを示しています。回帰 6 と 8 ではそれぞれ 7 つと 5 つであるのに対し、この回帰には 3 つの回帰変数しか含まれていないため、BIC は回帰 4 を支持します。

回帰 4 では、相互作用変数は考慮されていません。

対数変換された MEHS を含む回帰 2 を見ると、この回帰は AIC を観察する場合は良好に実行され、BIC を観察する場合は比較的良好に実行されます。調整された R<sup>2</sup>と対数尤度は、このモデルが平均的に実行されることを示しています。

R<sup>2</sup>、

被害がひょうの大きさと直線的に関連するとは予想されないため、対数変換は直感的に理にかなっています。ただし、小さな雹は太陽光パネルに損傷を与えることはないとは予想されます。

一方で、モデルは、特定のしきい値を超えると、ひょうのサイズが増加しても、被害に対する相対的な影響がますます小さくなるという事実によって支配される可能性もあります。これは

二乗 MEHS、回帰 4、5、7、および 8 を含む回帰によってモデル化されます。

回帰 5 には通常の MEHS が含まれていないため、パフォーマンスはあまり良くありません。これは、この状況では MEHS の係数がゼロに設定されていることが原因である可能性があります、これは意味がありません。R<sup>2</sup>を見ると、他の 3 つのモデルが最高のパフォーマンスを発揮します。

、調整されたR<sup>2</sup>、対数尤度および AIC。

MEHS、二乗 MEHS (回帰 4)、およびピッチ変数のみを含むモデルも、BIC を見た場合に比較的良好なパフォーマンスを示します。BIC は、回帰 7 に多くのリグレッサーがあると重くペナルティを課します。この回帰では、屋根の向きに関するすべての係数がゼロと推定されていることがわかります。これらすべてのリグレッサーを含めると、大きな影響はありませんが、調整されたR<sup>2</sup>によってペナルティが課されます。

、AIC、BIC。このモデルには最高のR<sup>2</sup>

が搭載されていますが、

、他の基準は、これが追加のリグレッサーによってのみ発生することを示しています。最後に、交互作用変数が含まれ、二乗 MEHS と組み合わせられます (回帰 8)。これには、交互作用変数を使用しないモデルと比較して追加の説明力はありません。

破損したソーラーパネルの割合								
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
メース	0.031***			0.124***		-0.015	0.089***	0.137***
	(0.007)			(0.022)		(0.011)	(0.024)	(0.032)
傾斜屋根	-0.022	-0.035	0.150	-0.067	0.027	-0.019	-0.048	-0.144
	(0.041)	(0.041)	(0.138)	(0.042)	(0.036)	(0.042)	(0.045)	(0.251)
メース*								0.011
投げた								(0.108)
ログ(MEHS)		0.103***	0.112***					
		(0.024)	(0.025)					
ログ(MEHS) *			-0.130					
投げた			(0.091)					
MEHS2				-0.017***	0.004***		-0.014***	-0.020***
				(0.003)	(0.001)		0.003	(0.005)
MEHS2 *								0.001
投げた								(0.012)
彼						0.042***	0.029	
						(0.058)	(0.046)	
他						0.253***	0.093**	
						(0.058)	(0.049)	
S.W.						0.221***	0.069	
						(0.058)	(0.045)	
W						0.217**	0.077	
						(0.085)	(0.073)	
共分散	HC3	HC3	HC3	HC3	HC3	HC3	HC3	HC3
タイプ								
観察	249	249	249	249	249	249	249	249
他								
R <sup>2</sup>	0.185	0.196	0.205	<u>0.232</u>	0.154	0.222	<u>0.239</u>	<u>0.233</u>
調整済みR2	0.178	0.189	0.195	0.223	0.148	0.203	0.216	0.217
ログ可能性	-36,387	-34,718	-33,354	-29,038	-40,921	-30,652	-27,980	-28,865
AIC	76.77	73.44	72.71	<u>64.08</u>	85.84	73.30	69.96	67.73
ビック	83.79	80.46	83.24	<u>74.60</u>	92.86	94.36	94.53	85.28
注記：p<0.1(*); p<0.05(**); p<0.01(***)								

表内のすべての回帰から導き出される結論は次のとおりです。

- すべての回帰において、MEHS は非常に有意であり、損傷にプラスの影響を与えます。回帰 6 を除き、ダメージに悪影響を及ぼしますが、重大ではありません。この状況では、ソーラーパネルの向きが損傷に重要な役割を果たします。
- ダミーの可変傾斜屋根は損傷に重大な影響を与えませんが、すべての回帰 (1 つを除く) で損傷に悪影響を及ぼします。• ログ MEHS を追加しても、回帰結果は増加しません。ただし、2 乗 MEHS を追加すると、回帰結果が増加し、損傷との有意な関係も示されます。
- 相互作用変数は、損傷に対して有意な影響を示しません。
- 方向は損傷に非常に大きな影響を与える可能性があります、MEHS の 2 乗が考慮される状況では、その影響は重要ではなくなります。

5 つの比較基準を組み合わせると、回帰 4 のパフォーマンスが最も優れていると言えます。 MEHSと角型MEHSを搭載したモデルです。このモデルは、屋根の方向も追加したモデル (回帰 7) よりも優れています。

ただし、追加のリグレッサーにペナルティを与えない基準が考慮されている場合に限り、これにより、ひょうの量が減少した場合の被害を軽減できます。これは当然のことであり、雹が小さければ小さいほど、被害は小さくなります。この状況では、可変傾斜屋根は大きな影響を及ぼさず、方向は考慮されません。

表 8 は、回帰 4 に従って、ソーラー パネルの総数からどれだけのソーラー パネルが損傷すると予想されるかを示しています。これはまた、ひょう石が大きくなると損傷の増加が減少するが、サイズが小さくなると損傷の増加が急激に増加することを示しています。  
実際には、ソーラー パネルには 2 cm 以上のひょうによる損傷のみが表示されるため、1 cm のひょうが発生した列は括弧の間にあります。

表 8: 回帰 5 によって予想される損害

最大ひょうの大きさ (cm)	屋根上の全パネルのうち、破損が予想される太陽光パネル
(1cm)	(8.8%)
2cm	15.4%
3cm	19.8%
4cm	22.0%
5cm	22.0%

全体として、ほとんどの状況では、損傷を引き起こす上で最大ひょうサイズが最も重要ですが、一部の回帰では方向がひょうサイズよりもさらに重要になる場合があります。屋根が傾斜しているかどうかは損傷にほとんど影響しません。

以前の仮説とは対照的です。回帰 4 によると、二次関数は損傷と変数の間の関係を最もよく表しており、雹石が大きくなると損傷の増加が減少することを示しています。

## 6 ディスカッション: 今後の方向性

前の章では、ソーラー パネルの特性と雹に対する脆弱性について説明しました。ソーラーパネルが損傷するリスクを軽減するために、この章では、パネルの脆弱性を軽減するために実装できる適応オプションの概要を説明します。また、ソーラーパネルの損傷方法に関するより詳細な情報を得るために、さらに調査を行うようアドバイスします。

### 6.1 必要な政策変更

第 4 章に記載されているように、ソーラー パネルの品質に関していくつかの基本的な要件があります。ただし、パネルの設置と品質要件、および保険に関しては、多くの点で改善の余地があります。

IEC によって確立された太陽光発電システムに関する規格とガイドラインの基礎である国際規格の採用には自主的な根拠があります (IEC, 2019)。同じことは、法的地位を持たない市場当事者間の自主協定であるオランダにおける IEC 標準の実装である NEN 規格にも当てはまります ((Roofs, 2019); (KSN, 2019))。ソーラーパネルの生産者は、これらの基準を満たしているかどうかを自分で決定できます (Achmea, 2019a)。

この結果、太陽光発電システムが品質と安全性の面でリスクを伴う IEC および NEN の規格やガイドラインを必ずしも満たしていない可能性があります。太陽光発電システムに関するどの基準やガイドラインが適用されるのかが明確でなく、一律に義務付けられている性質がないことも、政策立案を複雑にし、この分野に関わる関係者を混乱させています。たとえば、保険会社は、保険契約者が損害を請求する前に、太陽光発電システムが特定の基準を満たさなければならないことを要求することはできません。これらの要件は必須ではないためです。必須要件に基づいた保険契約は、保険会社と被保険者の両方にとってより明確になります。オランダでこの問題に関する問題をさらに複雑にしているのは、保険部門の自由市場です。ある保険会社が、太陽光発電システムが IEC および NEN ガイドラインに準拠した基準を満たすよう要求することで、太陽光発電システムに関する保険契約を調整した場合、保険契約者が補償金を受け取ることがより困難になるため、顧客の喪失につながります。システムは基準を満たしていません (Achmea, 2019a)。

したがって、保険会社は顧客を維持するために方針を変更することはありません。

保険のもう 1 つの選択肢は、保険料を引き上げることであり、これによりソーラー パネルの削減につながる可能性があります。この問題の解決策は、独立した組織による必須の IEC および NEN 規格の実装です (Achmea, 2019a)。したがって、太陽光発電システムが IEC および NEN 規格を満たすことを政府に義務付けることが推奨されます。

オランダには、品質を保証するための複数の特徴と認証があり、必須ではありません。この理由の 1 つは、ソーラー パネル市場が非常に低迷していることと、ほとんどのソーラー パネルがアジアから輸入されているという事実である可能性があります (GDV, 2019)。アン

検査は義務ではないため、設置後にすべてのソーラーパネルが検査されるわけではありません。

これは、太陽光発電システムの市場にいくつかの問題を引き起こします。まず第一に、ソーラーパネルが有効で信頼できるコンポーネントで構成されていることが常に保証されているわけではありません。

さらに、一部のソーラーパネルが安全ではなく、正しく設置されていない可能性もあります。

さらに、義務的な品質マークが不足しているため、中古のソーラーパネルが再販される可能性があります (Achmea, 2019b)。このようにして、火災を引き起こすなどの危険な状況につながる可能性がある、すでに損傷しているソーラーパネルを解決することができます。



パネル設置の認証の自主原則にも同じ問題が残っている。認定設置会社であることが必須ではないため、設置業者の専門知識は不明です。その上、太陽光パネルの設置は設置業者に依頼せずに行うことができると記載されており、結果的には自分たちで設置することになります。

太陽光発電システム ((Sun-solar,2012); (Duurzame zonnepanelen,2019); (Essent,2019); (Zonnepanelen.net,2019a))。そのため、太陽光パネルの設置経験のない人でも設置が可能となり、設置が不十分な場合には危険な状況が生じる可能性があります。品質ホールマークと認証の自主的な性質がもたらす影響に関する問題に対処するには、政府のような独立した機関による必須の品質ホールマークと認証を導入することが推奨されます。

#### 6.1.1 保険

現在、ソーラーパネルに関して個別の保険契約は存在しません(Achmea,2019b)。

しかし、ドイツでは最近、ひょうリスクを別個の政策とするべきかどうかの議論が始まった(GDV,2019)。オランダでも同様の議論が始まり、太陽光パネルの損傷登録に関する改善が進められている。たとえば、エクメアでは、太陽光パネルの損害に関する具体的な請求登録はありませんでした。

(GDV,2019)。2019年以降、これが変更され、現在では太陽光パネルの損害に関する請求は個別に登録されるようになりました。これは、太陽光パネルの損害と建物の損害を区別するための第一歩ですが、太陽光発電システムに関連する別の保険を契約することは、保険会社にとってさらに有益です。

(エクメア,2019a)。

まだ個別の保険契約がないため、個人はソーラーパネルを所有しているかどうかを保険会社に知らせる必要はありません(Achmea,2019b)。契約者の観点からすると、住宅保険に太陽光パネルが自動的に組み込まれると、別途保険に加入する必要がなくなり、メリットが得られます。

保険会社にとっては、太陽光発電システムに関して別の保険を導入する方が有益かもしれません(Achmea,2019a)。このような保険が存在する場合、保険契約者は太陽光発電システムに関する情報を保険会社に提供する必要があります。このようにして、保険会社は顧客によるソーラーパネルの所有を通知します。太陽光発電システムに関する別のポリシーにより、保険会社と保険契約者との間の透明性が高まり、保険会社は、顧客がどの太陽光パネルを所有しているか、設置されている太陽光パネルの数、および設置されている太陽光パネルの種類に関する洞察を得ることができます。これは、ソーラーパネルが損傷した場合のリスクを推定し、保険料を計算するための貴重な情報です。

太陽光パネルの設置に対する適切な規制の欠如は、保険会社にとっても問題となる可能性があります。ソーラーパネルが高品質で正しく設置されているかどうかを示す公式の品質ラベルはありません。これは、微小な亀裂によって損傷したソーラーパネルのクレームを処理する際に問題を引き起こす可能性があります。微小亀裂の処理方法については決定的な規則はありません(Solar Magazine,2019)。たとえ微小亀裂がテストで視覚化できたとしても、亀裂は電力損失を直接示すものではありません(Koentges,Kunze,Kajari-Schroeder,Breitenmoser,およびBjorneklett,2011)。したがって、屋根上の複数のパネルに微小な亀裂があったとしても、すべてのパネルを取り外す必要があるというわけではありません。保険会社は、これらの微小な亀裂がどのようにして生じたのか必ずしも正確に把握しているわけではなく、パネルの設置中に発生した可能性もあります。これは、保険に含まれる損害ではなく、サプライヤーが提供する保証の一部として損害が返金されることを意味します。

これらはすべて、クライアントが非現実的な主張をする状況につながります。保険会社は保険対象となる太陽光パネルの数を見積もることができないため、大規模な雹が降った際のリスクを見積もることができません。

もう1つの問題は、損害が登録された後に保険会社がソーラーパネルを交換したかどうかを必ずしも確認するとは限らないことです。このため、パネルが再びひょう嵐に見舞われた場合、保険会社にとって問題は複雑になります。理論的には、同じソーラーパネルを使用していても、誰かが再び損害賠償を請求する可能性があります（Achmea, 2019d）。その後、会社が再度損害を請求した場合、保険会社は同じソーラーパネルに対して 2 回の支払いを行うことになります。

## 6.2 太陽光パネルのリサイクル

第一世代のソーラーパネルのライフサイクルはほぼ終わりに近づいており、その結果、ソーラーパネルから大量の廃棄物が発生する可能性があります。設置後のソーラーパネルの耐用年数は 25 年と推定されており、パネルが廃棄される心配はほとんどありません。しかし現在、ソーラーパネルの最初のバッチが廃止され、廃棄物管理が重要な環境問題になりつつあります（Aman, et al., 2015）。2014 年 2 月以降、ソーラー パネルはオランダの AEEA 法に含まれています。この法律は、欧州版の法律である「電気電子機器廃棄物 (WEEE) 法」に由来しています。この法律は、ソーラーパネルを市場に出す当事者（生産者と呼ばれる）に、耐用年数が終了したソーラーパネルの回収とリサイクルの責任を課します（Staatscourant, 2014）。

AEEA 法案は市場構造が複雑であるため施行が難しく、市場関係者のみが持つ多くの深い知識が必要となります。さらに、オランダ当局が利用できるリソースは限られています。これは、必要な平等な競争条件を得るには全体的な施行が不十分であることを意味します。その結果、太陽電池パネルの回収とリサイクルに参加しない生産者が多すぎるという異質な市場が形成されます（ZRN, 2019）。ソーラーパネルの正確な数に関する十分なデータベースが不足しているため、これはまだ大まかな指標ではありますが、状況の緊急性は高まっています。この登録の欠如は、おそらく政府による取り締まりの欠如によるものと考えられます。2018 年に市場に投入されたパネルの総数は、(W)EEE に登録されているものよりもはるかに多く、将来の潜在的な問題の規模が明らかになりました（全国 WEEE 登録, 2019 年）。リサイクルされているソーラー パネルの数ははるかに少ないですが、これは、市場に出ていくソーラー パネルよりも市場に参入するソーラー パネルの方が多いという事実も一因である可能性があります。

ソーラーパネルの長期的な持続可能性は、(W)EEE登録の施行がどれだけ成功するか、そして将来予想される多数のソーラーパネルをリサイクルするために採用されるプロセスソリューションの有効性の両方に依存します。

（フラヴィア、アルティマリ、パニャネッリ, 2019）。(W)EEE 登録は、登録されたソーラー パネルの 77% がオランダでリサイクルされていることを示しています。サントスらによる研究。（2018）は、2050 年には太陽電池パネルの製造に必要な原材料の 75% が回収可能になると予想しています。経済的には、シリコンの製造には太陽電池パネルからシリコンを回収するよりも 3 倍のエネルギーとコストがかかるため、追加のインセンティブが提供されます（Choi & Fthenakis, 2013）。いくつかの探索的な学術研究

（Fiandra, Sannino, Andreozzi, & Graditi, 2018; Nevalaa, et al., 2019; Flavia, Altimari, & Pagnanelli, 2019）は、機械廃棄物、熱廃棄物、および化学廃棄物のリサイクルを評価しました。環境の観点から技術を検討し、金属の最適化された循環経済の観点から利用可能な最良の技術を選択しました。リサイクル技術は最適化され続けていますが、非常に価値のあるリサイクル方法がいくつかあります。



すでに。このため、オランダだけでなく世界的にリサイクルのプロセスを規制し強制する必要があります。

### 6.3 太陽光パネルの保護対策

雹およびそれに関連する被害のリスクが高まる中、ソーラーパネルの脆弱性を軽減することが重要です。場所ごとに、どのような対策が最適であるかを判断する必要があります。最も簡単な対策の1つは、雹に最も強いソーラーパネルを選択することです。これはガラス-ガラス パネルで、パネルの前面と背面が (強化) ガラスで作られています (Mathiak, et al., 2015)。

ただし、このタイプのソーラーパネルはより重く、より高価です。これは、豪雪地域では、この種のパネルが屋根に厚い雪の塊と組み合わせると、屋根がさらに運ぶには重すぎる可能性があることを意味します。大量の雪が降らない他の地域では、ガラス同士を組み合わせたパネルを使用することが、ひょうの危険を軽減する簡単な方法となりえます。パネルは一般に高価ですが、損傷が少ないため寿命が長くなり、最終的には価格の高さと釣り合う可能性があります。

ソーラーパネルを設置する際に考慮すべきもう1つの側面は、ソーラーパネルを設置する向きと屋根のタイプです。平らな屋根上のソーラーパネルは、傾斜屋根よりも平均してより多くの損傷を受けます。これは、おそらくその角度と向きが原因と考えられます。パネルの向きも損傷に影響を与える可能性があります。最も多くの (ひょう) 嵐が来る方向にパネルを設置すると、より大きな被害が発生する可能性があります。

オーストリアやスイスなど、豪雪が発生し、ひょうも問題となっている地域では、他の対策を検討する必要があります。これは以下にも当てはまります

小屋のような頑丈な構造を持たない建物。大きな変化をもたらす可能性があるものの、まだ広く開発されていない対策の1つは、ソーラー パネルのカバーの解決策です。カバーを使用することで、軽量のソーラーパネルを雹から守ることができます。文献調査の結果、特許出願されたソーラーパネルのカバーのアイデアに関するテキストが見つかりました (North, 2011)。提案されたカバーは、雪、雹、風に吹き飛ばされた破片などの気象影響からソーラーパネルを保護するだけでなく、日射量が非常に多く長時間にわたる期間中のソーラーパネルの過熱からも保護します。

この保護カバーはまだ開発されていないことが判明しているため、不必要に屋根に登る必要がなく、これらのカバーを離れたところから制御できれば便利であると提案します。もう1つのアイデアは、天気予報に自動的にリンクすることで、ひょうが予想される場合、または日射量が測定されない場合に、カバーが自動的に作動するようにすることです。残念ながら、このソリューションはまだ開発されていませんが、今後の増加を目指しています。

ひょうの頻度、その他の気象現象、ソーラーパネルの数などにより、このような開発は大きな違いを生む可能性があります。このような保護カバーのコストが、それによって救われる損害のコストと釣り合うかどうかを考慮する必要があります。

しかし、この調査中に、たとえ数枚のパネルだけが損傷したとしても、屋根上のすべてのソーラーパネルが交換されることが多いため、損傷したパネルを交換するコストが非常に高くなる可能性があることがわかりました。

### 6.4 今後の研究

このレポートのケーススタディは、現場のケーススタディで雹によって何枚のソーラーパネルが損傷したかについての最初の適切な指標を提供しましたが、それは限られた数の請求で1回の雹発生に対して行われたにすぎません。研究を改善するには、他の雹現象やより多くの保険金請求データを使用して研究を拡張し、ソーラーパネルのさまざまな特性の脆弱性の違いをより信頼できるものにする必要があります。

ソーラーパネルの損傷に関する将来の研究のための追加のデータ源は、マイクロインバーターによって測定されたソーラーパネルの出力である可能性があります。インバータは屋根上の全パネルの出力を計測することが多いですが、パネルごとに出力を計測するインバータもあります (ソーラーエッジのインバータなど)。前後の出力を測定する

ひょう嵐は、目に見えない被害も考慮できる非常に貴重なデータを含む、はるかに大規模なデータセットを作成する可能性があります。これにより、パネルの性能に対する微小亀裂の影響、ひいてはその脆弱性の定量化において、より多くの洞察が得られます。

このケーススタディでは、限られた数の請求が利用できましたが、ソーラーパネルの種類に関するデータも不足していたことに留意する必要があります。これを将来の研究に含めるためには、保険会社がソーラーパネルなどの個々の物体の損傷データを体系的に追跡することが重要です。これは、将来的にこれらのオブジェクトのリスクをより正確に推定できるようにするのにも役立ちます。この研究のもう 1 つの制限は、1 x 1 km グリッドのモデル ラスター データから得られる郵便番号 (PC4) の平均値または最大値の形式で利用可能なひょうサイズ データでした。ただし、ひょうは非常に局所的に発生する可能性があるため、同じ郵便番号地域内の別の場所ではひょうが降っていなかったとしても、地域によっては平均または最大のひょうの大きさが非常に大きくなる場合があります。

これらの制限は回帰分析でも観察されます。より多くの主張が利用可能であり、ひょうのサイズのデータがより詳細であれば、回帰の信頼性はより高くなります。

特にひょうのサイズが小さい場合は、請求できる件数が少なくなります。このため、回帰で損傷が発生する前に特定のしきい値があるかどうかを判断することができなくなりました。ただし、2 cm 未満のひょう石のサイズについてはほとんどクレームがなかったため、それ以下のサイズでは損傷は（ほぼ）発生しないと仮定できます。

すべての回帰から最適な回帰を選択することは、最も重要な基準として考慮されるものに依存するため、使用される基準によって結果が異なる場合があります。すべての回帰を考慮する必要があり、唯一の正解はないことに留意する必要があります。

この研究はソーラーパネルについてのみ行われていますが、異常気象によって被害を受ける可能性のあるNZE対策は他にもあります。したがって、カーボンニュートラル社会への移行の速度を高めるためには、極端な状況を乗り切るための他の NZE 対策の脆弱性も調査する必要があります。ただし、このケーススタディで使用された方法は、さまざまな物体やさまざまな種類の極端な気象に対して同様の研究を実行するために使用できます。

異常気象のリスクをマッピングするための取り組みは数多くありますが、ひょうのリスクについては広く行われていません。この研究では、異常気象による総被害の一部としてひょうが被害に大きく寄与する可能性があることが示されたため、ひょうリスクを気候リスクモデルと戦略に組み込む必要があります。雹のリスクを説明することに加えて、この研究のソーラーパネルなどの異常気象に対する物体の脆弱性もリスクモデルに組み込むことができます。太陽光パネルの脆弱性に関するより詳細な情報を含めることにより、ひょうのリスクをより正確に推定できます。これは保険会社や銀行にとって有益であるだけでなく、たとえば地域の適応戦略にも使用できます。

極端な天候に対する NZE 対策の脆弱性に関するさらなる研究の次に、NZE 対策を保護し、脆弱性を軽減する方法について研究を行うことも重要です。たとえば、環境条件が変化する中での極端な気象に対する耐性を高めるために、ソーラー パネルを開発し続ける必要があります。

## 6.5 太陽光パネルの損傷による将来のリスク

事例研究の結果が示したように、太陽光パネルは一般的に 2 cm 以上のひょうによって損傷を受けます。より大きなひょうは、より大きな被害をもたらす可能性があります。気候変動による気温の上昇により、ひょう現象が発生すると予想されています

より頻繁に発生するため、ソーラーパネルへの損傷がさらに増えることが予想されます。2018年には前年と比較して、オランダではソーラーパネルの出力が1500メガワットから4400メガワットに増加し、2倍以上に増加しました（CBS、2019年）。今後数年間でこの数はさらに増加すると予想されます。したがって、カーボンニュートラル社会への移行を実現するには、雹などの異常気象に対する太陽光パネルの脆弱性を認識し、その脆弱性を最小限に抑えるよう努めることが重要です。

## 7 結論

雹はヨーロッパの大部分で発生しており、一度の雹の発生により数十億ドルの損失が発生する可能性があります。過去 37 年間にヨーロッパのほとんどの地域で雹の降雨量が増加しており、今後さらに増加すると予想されています (MunichRe, 2019)。大きな雹は主に夏に発生します。オランダでは、ひょうによる被害が最も多くなるのは 6 月です。オランダ南東部では雹による被害が最も多くなっています。オランダでの雹害は 2016 年 6 月 23 日に発生し、その年の極端な最大の天候によって引き起こされた保険損害の 73% が雹によるものでした。たとえソーラーパネルがカーボンニュートラル社会への移行において重要な役割を果たすとしても、雹の危険はソーラーパネルのような脆弱な露出要素に損傷を与える可能性を秘めています。

ソーラーパネルは、単結晶、多結晶、薄膜ソーラーパネルの 3 つのカテゴリに分類できます。単結晶ソーラー パネルは、現在最も効率的なタイプのソーラー パネルです (Consumentenbond, 2019b)。多結晶ソーラーパネルは単結晶ソーラーパネルより効率が劣りますが、安価でもあります。薄膜は効率は劣りますが、柔軟性があり、曲面にも取り付けことができます。ソーラーパネル市場は比較的新しい市場であるため、ソーラーパネルに関する十分な法律や施行規則がありません。いくつかの (国際) 国家基準はありますが、国内の法律や規制ではしばしばそれらの基準が参照されていますが、その採用は任意です。この基準と規則の欠如は、ソーラーパネルの品質と設置に問題を引き起こし、潜在的に危険な状況を引き起こすだけでなく、ソーラーパネルが雹などの他の原因による損傷に対してより脆弱になることもあります。また、太陽光パネルの保険に関しては、オランダの保険会社間で太陽光パネルにどのように保険をかけるべきかについて全体的な合意がありません。また、同じ保険会社であっても、顧客のタイプに応じて保険内容が異なります。しかし、2016 年のひょう嵐の後、保険会社は、ひょうによる被害に太陽光パネルが大きな役割を果たしている可能性があることに気づきました。

ソーラーパネルは脆弱な物体であり、さまざまな要因がソーラーパネルの性能に影響を与える可能性があります、これらの要因は環境要因、設置要因、生産要因の 3 つのカテゴリに分類できます。これらの要因はフロントの亀裂につながる可能性があります

太陽電池パネルのガラスは直接目に見えるため、太陽電池に直接入る日射量を減らすことができ、その結果、収量が低下します。ただし、より小さな亀裂 (マイクロクラック) も形成される可能性があります。これは前面ガラス層ではなく、より壊れやすいシリコンに形成されます。通常、マイクロクラックによって初期歩留まりが低下することはありません。ただし、数か月後、損傷した領域で出力が急速に低下し始め、約 1 年後にはパネルの外側にも微小な亀裂が目立つようになります。星型の微小亀裂は、ひょう石などの小さな物体の衝撃を示している可能性があります。すべての損傷はソーラーパネルの寿命を縮めることが予想されます。

どのような大きさの雹でこれらの亀裂がどのように発生するかをテストするために、ケーススタディを使用してソーラーパネルの脆弱性を調査します。2016 年 6 月 23 日のひょう嵐の際、オランダ南東部を大規模なひょう嵐が襲い、7 cm を超えるひょうが降りました。

模型から得られた大きな雹が降った地域では、多額の保険損害も確認された。ひょうの大きさは約 3 cm から、物的損害はますます大きくなり始めます。

## 太陽光パネルの雹に対する脆弱性。4つ。

---

ケーススタディによると、太陽光パネルの雹に対する脆弱性を調べると、次のことがわかります。

- 損害のない申し立て、つまり申し立ての半分は、ひょうの大きさに最もばらつきが見られます。  
さまざまな場所でのより多くの主張は、より広範囲のひょうの大きさを示す可能性があることを示しています。
- 目に見えない損傷と目に見える損傷の両方が 3 cm から発生する可能性があります、4 cm から発生する可能性があります。  
それ以降、目に見える損傷の割合が大幅に増加します。
- ひょう嵐（およびそれに伴う卓越風）の方向に関する屋根の向きは、太陽光パネルへのひょうによる被害にかなりの影響を与える可能性があります、ひょうの大きさそのものよりも決定的になる可能性があります（ひょう嵐から遠ざかる方向が被害を軽減します）かなり）。
- ソーラーパネルが立つ角度も示すインジケーターがあります  
（平らな屋根では低い角度、傾斜屋根では高い角度で表されます）は、ソーラーパネルの損傷に影響を与える可能性があります（角度が低いほど損傷が大きくなります）が、結果はそれほど重要ではありません。
- 雹のサイズが大きくなるとダメージの量も増加しますが、雹のサイズが大きくなると、追加のダメージの増加は減少します。

全体として、ソーラーパネルは雹に対して脆弱であり、その脆弱性は主に雹の大きさに依存します。この脆弱性を軽減するには、ソーラーパネルを設置する際にその特性を考慮するなど、いくつかのオプションがあります。太陽光パネルの基準、規制、保険（の施行）を改善することができます。

ソーラーパネルのカバーなどの具体的な対策の開発も、この脆弱性を軽減するのに役立つ可能性があります。他の NZE 対策の脆弱性、他の種類の異常気象との関係、およびマイクロクラックの影響については、さまざまなデータソースを使用してさらに研究を行う必要があります。最後に、雹のリスクと雹に対する太陽光パネルの脆弱性をリスクモデルと気候適応戦略に組み込む必要があります。



## 参考文献

- エクメア。 (2019a,9月17日)。保険用ソーラーパネル。 (聞き手・TTS)
- エクメア。 (2019b,9月24日)。保険用ソーラーパネル。 (T・トゥレ、聞き手)
- エクメア。 (2019c,10月1日)。データソーラーパネルの破損。 (T・トゥレ、聞き手)
- エクメア。 (2019d,10月15日)。データソーラーパネルを請求します。 (T・トゥレ、聞き手)
- エクメアの日付。 (2019年)。 NatCat の被害データ (1990 ~ 2017 年)。
- アルパインソーラー。 (2019年)。ソーラーパネルの仕組み。 alpinesolar.asia から取得: <http://alpinesolar.asia/how-solar-panels-work/>
- アマン,M.,ソランギ,K.,ホサイン,M.,バダルディン,A.,ジャスモン,G.,モクリス,H.,。カジ,S. (2015年)。太陽エネルギーシステムの安全、健康、環境問題のレビュー。再生可能で持続可能なエネルギーのレビュー、 1190-1204。
- アタマ太陽エネルギー。 (2016年)。太陽光発電 (pv) 設置のチェックリストと会議。 Atama Solar Energy から取得: <https://atama.nl/wp-content/uploads/2016/09/meting-en-beproevingchecklist-Photovoltaïsche-pv-installaties.pdf>
- Berardone, I.,Corrado, M.,Paggi, M. (2014)。亀裂やランダム欠陥が存在する単結晶シリコンおよび多結晶シリコンの一般化された電気モデル。エネルギープロセス、 22-29。
- Botzen, W.,Bouwer, L.,および van den Berg, C. (2010)。気候変動とひょう嵐被害:実証的証拠と農業と保険への影響。資源エネルギー経済学、 341-362。
- ブリュージュ,T.,ペイガン,A. (1979)。不均一分散性とランダム係数変動の簡単なテスト。エコノメトリカ、 1287-1294。
- ブライマン,A. (2012)。社会調査の方法。オックスフォード: オックスフォード大学出版局。
- ブエンレーダー。 (2019年11月28日)ブエンレーダー・テルグキケン。 Buienradar.nl から取得: <https://www.buienradar.nl/nederland/neerslag/buienradar-terugkijken/archief/201606232100>
- バージェス,D. (2018)。薄膜太陽電池。ブリタニカ百科事典から抜粋: <https://www.britannica.com/technology/thin-film-solar-cell>
- カステンミラー,P. (2019)。太陽光発電設備に関する NEN 1010。から取得 [http://download.hager.com/Hager.nl/presentation/201503\\_Presentatie\\_PV-installaties\\_en\\_normen.pdf](http://download.hager.com/Hager.nl/presentation/201503_Presentatie_PV-installaties_en_normen.pdf)
- CBS。 (2019年4月26日)。 Vermogen zonnepanelen meer dan de helft toegenomen。 cbs.nl から取得: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/17/vermogen-zonnepanelen-meer-dan-de-helft-toegenomen>
- Choi, J.,Fthenakis, V. (2013)。結晶シリコン太陽光発電リサイクル計画: マクロとミクロの視点。クリーナー生産ジャーナル、 443-449。
- 消費債。 (2019a,10 31)。インストールパネル: 操作を続けますか?取得しました Consumentenbond より: <https://www.consumentenbond.nl/zonnepanelen/zonnepanelen-installeren>

- 消費債。 (2019b,10 31) 。ズワルテ・ゾンネパネレンのブラウウェ ?から取得  
消費者保証: <https://www.consumentenbond.nl/zonnepanelen/blauwe-of-zwarte-zonnepanelen>
- 消費債。 (2019c) 。ゾンネパネレンを保証します。 Consumentenbond.nl から取得: <https://www.consumentenbond.nl/zonnepanelen/garantie-zonnepanelen>
- 消費債。 (2019d) 。アーンベタリン・ゾンネパネレン。 Consumentenbond.nl から取得: <https://www.consumentenbond.nl/zonnepanelen/aanbetaling-zonnepanelen#no2>
- デマラックス。 (2019年) 。ヘリングフック。 demalux.nl から取得:  
<http://www.demalux.nl/w/dakkapellen/hellinghoek.html>
- Dhimish, M., Holmes, V., Mehrdadi, B., Dales, M. (2017) 。太陽光発電の性能に対する亀裂の影響。先端材料とデバイス、 199-209。
- Dimish, M., Holmes, V., Mehrdadi, B., Dales, M. (2017) 。亀裂の影響  
太陽光発電の性能。先端材料とデバイス、 199-209。
- ドゥルザメ・ゾンネパネレン。 (2019年) 。インストーラー zelf zonnepanelen。 duurzame-zonnepanelen.nl  
から取得: <http://www.duurzame->
- EEA。 (2017年1月5日) 。電の評価。 eea.europa.eu から取得:  
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/hail/assessment>
- EIT気候-KIC。 (2018年) 。 100万戸のほぼゼロエネルギー/カーボンニュートラル住宅。ブダペスト: 欧州イノベーション  
&テクノロジー研究所。
- エネルギーセージ。 (2019年) 。ソーラーパネルの寿命はどのくらいですか。 energysage.com から取得:  
<https://news.energysage.com/how-long-do-solar-panels-last>
- 本質。 (2019年) 。 Zelf zonnepanelen plaatsen - 作業はどうですか? essent.nl から取得: <https://www.essent.nl/kennisbank/zonnepanelen/zonnepanelen-op-uw-dak/zonnepanelen-zelf-installeren>
- ESWD。 (2019年) 。データベース。ヨーロッパ悪天候データベースから取得:  
<https://www.eswd.eu/>
- 欧州委員会。 (2019年) 。 CE マーキング - メーカー。 ec.europa.eu から取得: [https://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking/manufacturers\\_en](https://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking/manufacturers_en)
- フィアンドラ、V.、サンニーノ、L.、アンドレオツィ、C.、グラディティ、C. (2018) 。シリコンPVの寿命終了  
パネル: 持続可能な材料回収プロセス。廃棄物管理、 91-101。
- Flavia, C., Altimari, P., Pagnanelli, F. (2019) 。寿命を迎えた太陽光発電パネルのリサイクル: プロセス開発に関する化  
学的展望。太陽エネルギー、 746-  
761。
- フォナシュ、S.、アショク、S.、フォナシュ、R. (2018) 。太陽電池。百科事典から抜粋  
ブリタニカ: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell>
- Fouad, M., Shihata, L. & Morgan, E. (2017) 。要因の統合的なレビュー  
のパフォーマンスに影響を与えます。再生可能および持続可能なエネルギーのレビュー、 1499-1511。
- GCcapitalideas。 (2009年10月10日) 。 7月のスイスのひょう嵐の影響と影響  
2009。ggcapitalideas.comから取得:

<https://www.gccapitalideas.com/2009/10/10/impact-and-implications-of-swiss-hailstorms-in-july-2009-link-index-2/>

GDV。 (2019年9月27日)。保険用ソーラーパネルドイツ。 (T・トゥレ、聞き手)

インターネットで地理情報を入手できます。 (2009年11月)。インターネットで地理情報を入手できます。

Opendata-forum.nl から取得: <https://www.opendata-forum.nl/t/geo-infomatie-bronnen-op-internet/239/87>

ゴター。 (2019年10月18日)。ドイツの太陽光パネルの損傷データ。 (R. ヴァームント、T. トゥーレ、インタビュー)

緑の海岸。 (2019年)。ソーラーパネルの寿命ガイド: どれくらい長持ちしますか? [greencoast.org](https://greencoast.org/solar-panel-lifespan) から取得: <https://greencoast.org/solar-panel-lifespan>

Gupta, V., Sharma, M., Pachauri, R., Babu, K. (2019)。ひょう嵐が PV モジュールのパフォーマンスに与える影響: レビュー。エネルギー源、 1556-7230。

ホフマン、A.、アーネット、J.、ロス、R. (1979)。陸上環境用の平板太陽光発電モジュールのテスト。第 2 回 EC 太陽光発電会議の議事録、 (pp. 978-986)。ベルリン。

IEC。 (2019年)。IEC について - ビジョンと使命。 [iec.ch](https://www.iec.ch/about/) から取得: <https://www.iec.ch/about/>。

IEC-IECRE。 (2019年)。IECRE とは何ですか。 [iecre.org](https://www.iecre.org/about/what-it-is.htm) から取得: <https://www.iecre.org/about/what-it-is.htm>

インストールジャーナル。 (2018年)。ゾンネパネレン & NEN7250。 [installatiejournaal.nl](https://www.installatiejournaal.nl/) から取得: <https://www.installatiejournaal.nl/energie/nieuws/2018/11/zonnepanelen-nen-7250-1018883>

ISO レジスタ。 (2019a)。フォーラム認定? [isoregister.nl](https://isoregister.nl/waarom-) から取得: <https://isoregister.nl/waarom->

ISO レジスタ。 (2019b)。認証。 [iso.org](https://www.iso.org/certification.html) から取得: <https://www.iso.org/certification.html>

カダー氏はアドバイスします。 (2017a)。ISO 認証取得。 [kader-advies.nl](https://kader-advies.nl/iso-certificering/) から取得: <https://kader-advies.nl/iso-certificering/>。

カダー氏はアドバイスします。 (2017b)。ISO9001 とは何ですか? [kader-advies.nl](https://kader-advies.nl/) から取得: [https://kader-](https://kader-advies.nl/)

カダー氏はアドバイスします。 (2017c)。ISO14001 とは何ですか? [kader-advies.nl](https://kader-advies.nl/kennisbank/faqs/wat-is-iso-14001/) から取得: <https://kader-advies.nl/kennisbank/faqs/wat-is-iso-14001/>

Kajari-Schroeder, S., Kunze, I., Koentges。 (2012年)。太陽光発電モジュールの亀裂の重大度。エネルギープロセス、 658-663。

キフBDA。 (2019年)。Zonne-energie op daken, bouwkundige acten (Presentatie POV Preventiedag)。

KNMI。 (2019年)。レーダーデータとハーラムモデルからの雹石のサイズ。

Kentges, M., Kunze, I., Kajari-Schroeder, S., Breitenmoser, X., Bjorneklett, (2011)。微小亀裂による結晶シリコンベースの太陽光発電モジュールの電力損失のリスク。太陽エネルギー材料と太陽電池、 1131-1137。

KSN。 (2019年)。太陽光発電設置の作業。 [KeuringServiceNederland.nl](https://www.keuringsservicenederland.nl/pv-installatie-keuring) から取得: <https://www.keuringsservicenederland.nl/pv-installatie-keuring>

マッキノン, J., ホワイト, H. (1985). 不均一分散性の一貫した共分散

改善された有限サンプル特性を備えた行列推定器。計量経済学ジャーナル、 305-325。

Mathiak, G., Sommer, J., Reil, F., Althaus, J., Kontges, M., および Nusperling, M. (2015). 雹による PV モジュールの信頼性への影響。ミュンヘン: 国際エネルギー機関。

Meyer, S., Richter, S., Timmel, S., Glaser, M., Werner, M., Swatek, S., および Hagendorf, C.

(2013年)。カタツムリの足跡: 根本原因の分析とテスト手順。エネルギープロセディア、 498-505。

ムーア D., ウィルソン A. (1978). 模擬雹に対する太陽光発電ソーラー パネルの耐性。

バサデナ : カリフォルニア工科大学。

Morlier, A., Haase, F., Koentges, M. (2015). 多結晶体における亀裂の影響

フィールドデータに基づいた太陽電池モジュールパワーダ上のシリコン太陽電池のシミュレーション研究。

IEEE 太陽光発電ジャーナル、 1735 ~ 1741 年。

Muehleisen, W., Eder, G., Voronko, Y., Spielberger, M., Sonleitner, H., Knoebl, K., . . .

ヒルシュル, C. (2018). 太陽光発電所の雹雨被害を屋外で検出および可視化します。再生可能エネルギー、 138-145。

ミュンヘン (2019年10月25日)。雹 - 過小評価され、増大するリスク。MunichRe.com から取得: <https://www.munichre.com/topics-online/en/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/hail.html>

国家革新プログラム: 水とクリマート。 (2019年10月24日)。ゾメルズ語

ピエクブイエー ジン モエイリーク テ フォールスペレン。Waterrenklimaat.nl から取得: [https://](https://waterrenklimaat.nl/nl/onderzoekslijnen/klimaatbestendige-stad/kenniskrant-voor-een-klimaatbestendige-stad/natte-krant/zomerse-piekbuien-zijn-moeilijk-te-voorspellen/)

[waterrenklimaat.nl/nl/onderzoekslijnen/klimaatbestendige-stad/kenniskrant-voor-een-klimaatbestendige-stad/natte-krant/zomerse-piekbuien-zijn-moeilijk-te-voorspellen/](https://waterrenklimaat.nl/nl/onderzoekslijnen/klimaatbestendige-stad/kenniskrant-voor-een-klimaatbestendige-stad/natte-krant/zomerse-piekbuien-zijn-moeilijk-te-voorspellen/)

全国 WEEE 登録。 (2019年)。ラポルターージュ。nationaalweeeregister.nl から取得:

<https://www.nationaalweeeregister.nl/nederlands/rapportage.html>

ねん。 (2013a)。標準の PV 設置。nen.nl から取得:

<https://www.nen.nl/NEN-Shop/Elektrotechniek-Nieuws/PVinstallatie-en-de-normen.htm>

ねん。 (2016b)。規格 NEN-EN-IEC 62446:1-2016。nen.nl から取得:

<https://www.nen.nl/NEN-Shop/Norm/NENENIEC-6244612016-ja.htm>

ねん。 (2019c)。NEN、ノルメンの正規化。nen.nl から取得: <https://www.nen.nl/Over-NEN.htm>

Nevalaa, S., Hamuyuniad, J., Junnilaa, T., Sirviö, T., Isert, S., Benjamin, P., . . .

ルンドストローム, M. (2019)。太陽光発電パネルの電気油圧による破碎と従来の破碎 - リサイクルへの影響。廃棄物管理、 43-

五十。

ノース, R. (2011)。アメリカ合衆国メイン州ネーブルズ ソーラー用特許番号カバー

パネル。

NVWA。 (2019年)。Wanneer keuring en CE-marketing verplicht です。。nvwa.nl から取得: [https://www.nvwa.nl/](https://www.nvwa.nl/onderwerpen/keuringsinsellingen-consumentenproducten/wanneer-keuring-en-ce-markering-verplicht-is)

[onderwerpen/keuringsinsellingen-consumentenproducten/wanneer-keuring-en-ce-markering-verplicht-is](https://www.nvwa.nl/onderwerpen/keuringsinsellingen-consumentenproducten/wanneer-keuring-en-ce-markering-verplicht-is)

オメガの検査です。 (2019年)。ゾンネパネレンを調べます。omegainspectie.nl から取得: [https://omegainspectie.nl/](https://omegainspectie.nl/technische-inspecties/inspectie-zonnepanelen)

[technische-inspecties/inspectie-zonnepanelen](https://omegainspectie.nl/technische-inspecties/inspectie-zonnepanelen)

- パッジ M., コラード M., ロドリゲス M. (2013)。マルチフィジックスとマルチスケール太陽光発電モジュールの微小亀裂と電力損失に対する数値的アプローチ。複合構造、 630-638。
- PDOK。 (2016年) 。ルヒトフォト 2016 オルソ 25cm RGB。 pdok.nl から取得: <https://www.pdok.nl/introductie/-/article/luchtfoto-pdok>
- ポルダーPV。 (2019年6月23日) 。ハーゲルシャード PV ZO オランダ。 polderpv.nl から取得: [http://www.polderpv.nl/Hagelschade\\_PV\\_ZO\\_Nederland.htm](http://www.polderpv.nl/Hagelschade_PV_ZO_Nederland.htm)
- Pucik, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kuhne, T., Rädler, A., Antonescu, B., & ファウスト, E. (2019)。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。アメリカ気象協会、 3901-3916。
- ブンゲ, H., クンツ, M. (2016)。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。大気研究、 159-184。
- ラマヌジャム, J., ビショップ, D., トドロフ, T., グナワン, O., ラス, J., ネコヴェイ, R., 。 。ロミオ, A. (2019)。フレキシブル CIGS, CdTe, および a-Si:H ベースの薄膜太陽電池: レビュー。材料科学, 出版中。
- 屋根。 (2019年1月26日) 。 NEN 7250 ヘルツイン語。 Roofs.nl から取得: <https://www.roofs.nl/editie/roofs-2019-01-26-nen-7250-wordt-herzien>
- RVO。 (2019a) 。 EU 諸国: CE マーキング。 rvo.nl から取得: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/tools/wet-en-regelgeving/eu-wetgeving/ce-marking>
- RVO。 (2019b)。電子装置の Gevaarlijke stoffen。 rvo.nl から取得: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/internationaal-ondernemen/kennis-en-informatie/eu-wetgeving/ce-marking/overzicht-van-ce-richtlijnen/elektronische-apparatuur/gevaarlijke>
- サントス, J., アロンソ ガルシア, M. (2018)。 2050 年までのスペインにおける太陽光発電廃棄物の予測。クリーナー生産ジャーナル、 1613 ~ 1628 年。
- サイオス。 (2019a) 。 Gecertificeerde bedrijven。 scios.nl から取得: <https://www.scios.nl/Aangesloten->
- サイオス。 (2019b)。サイオスを超えて。 scios.nl から取得: <https://www.scios.nl/Over-Scios>
- Seabold, S., Perktold, J. (2010)。 Statsmodels: Python を使用した計量経済的および統計的モデリング。第9回 Python in Scienceカンファレンス。
- セシャン, K. (2001)。薄膜蒸着のハンドブック。 Science direct から取得: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/thin-films>
- Sluijter, R. (2016 年 6 月 24 日)。 Zware onweersbuien op 22 en 23 juni vol Extremen。 KNMI から取得: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/zware-onweersbuien-op-22-en-23-juni-vol-extremen>
- 曾我哲也 (2006) 。太陽エネルギー変換用のナノ構造材料。 Science direct から取得: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/solar-cell>
- ソーラーエッジ。 (2017年) 。ケーススタディ: ヘーゲルストームを分析する必要があります。ソーラーエッジ。
- ソーラーマガジン。 (2019年9月) 。ヴェルゼケラールのストッパーが会いました。ソーラーマガジン、 pp. 77-79。

- ソーラーマガジン。 (2019年)。 Verzekeraars stoppen meets vergoeden onzichtbare hagelschade aan zonnepanelen。 Solarmagazine.nl から取得: <https://solarmagazine.nl/u/magazine/sm4-2019.pdf#page=40>
- ソーラーテスター。 (2019年)。 MBJ ソーラーモジュール判定基準 - モバイルラボ/モバイル PV テストセンターでのソーラーモジュールテストの分析基準。 MBJパートナーネットワーク。
- 太陽の透明度。 (2019年10月11日)。太陽光パネルの損傷制作/設置。 (T.トウーレ、M.アップルドールン、インタビューアー)
- ソーラーマーケット.com.au。 (2019年)。さまざまな種類のソーラーパネル。 Solarmarket.com.au から取得: <https://www.solarmarket.com.au/residential-solar/Different-types-of-panels/>
- 州立裁判所。 (2014年2月3日)。 Regeling van de Staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu, nr. IENM/BSK-2014/14758、膨大な情報を収集するレーゲルは、電子機器を使用したトレッキングを行っています (Regeling afgedankte elektrische en elektronische apparatuur)。州立裁判所、 p. 2975年。
- 環境インフラストラクチャー長官。 (未確認)。 Egeling van de Staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu、2014年 2 月 3 日、nr. IENM/BSK-2014/14758、膨大な情報を収集するレーゲルは、電子機器を使用したトレッキングを行っています (Regeling afgedankte elektrische en elektronisch。
- スティッチング・ガランティフォonds・ゾンネエナジー。 (2019a)。うわー保証します。 sgze.nl から取得: <https://www.sgze.nl/uw-garanties/>>
- スティッチング・ガランティフォonds・ゾンゼカー。 (2019a)。 Zonnepanelen en keurmerken, hoe zit dat? zonzekerzonderzorgen.nl から取得: <https://www.zonzekerzonderzorgen.nl/stichting-garantiefonds-zonzeker-is-gestart/>
- スティッチング・ガランティフォonds・ゾンゼカー。 (2019b)。スティッチング・ガランティフォonds・ゾンジーカーがスタート! zonzekerzonderzorgen.nl から取得: <https://www.zonzekerzonderzorgen.nl/zonnepanelen-keurmerken-hoe-zit-dat/>>
- スングビティ。 (2019年)。保証はありますか? 保証はありますか? sungevity.nl から取得: <https://www.sungevity.nl/faq/rendement-en-salderen/garantie-zonnepanelen>
- 太陽、太陽。 (2012年)。 Zonnepanelen zelf plaatsen。 sun-solar.nl から取得: <https://www.sun-solar.nl/index.php/zonnepanelen-zelf-plaatsen/>
- Suwal, K., Bednorz, E. (2013)。中央ヨーロッパにおける電の気候学。質問地理、 99-110。
- Svabik, O., Meyer, V., Tuchler, L., Zenkl, G. (2013)。 1971 年から 2011 年の報告書に基づくオーストリアのひょう危険地域と。第7回激しい嵐に関する欧州会議。ヘルシンキ: 気象学・地球力学中央研究所。
- テュフ ラインランド。 (2019年)。太陽光発電モジュール。 tuv.com から取得: <https://www.tuv.com/netherlands/nl/fotovoltaïsche-modules.html>
- ヴェルボンド・ファン・ヴェルゼケラールス。 (2019年)。予防パンフレット Zonnepanelen。 verzekeraars.nl から取得: <https://www.verzekeraars.nl/publicaties/actueel/verbond-presenteert-preventiebrochure-zonnepanelen>
- フェルボウコステン。 (2019年)。保証期間 / 25 年中 20 年。から取得 [verbouwkosten.nl](https://www.verbouwkosten.nl): <https://www.verbouwkosten.com/zonnepanelen/garantie>



- VKG。 (2019年)。 Kwaliteitseisen とアドバイス。 vkgkwaliteitseisen.nl から取得: <https://vkgkwaliteitseisen.nl/vkg-kwaliteitseisen-en-adviezen/milieuaspecten/zonne-energie/zonnepanelen>
- ホワイト、H. (1980)。不均一分散性の一貫した共分散行列推定器と不均一分散性の直接テスト。エコノメトリカ、 817-838。
- Wouters, L., Boon, M., Van Putten, D., Van't Veen, B., Koks, E., De Moel, H. (2019)。オランダの気候学、あられ。アムステルダム :IVM。
- Xu, Y., J., L., Tan, Q., Peters, A., および Yang, C. (2018)。廃棄物のリサイクルに関する世界的な状況ソーラーパネル :レビュー。清華大学環境学部、環境シミュレーションおよび汚染制御の国家重点共同実験室、北京100084、中国。
- ゾンネ・エネルギー・ギッド。 (2019年)。ゾンネパネレンには保証はありますか? zonne-energiegids.nl から取得: <https://www.zonne-energiegids.nl/krijg-ik-garantie-op-zonnepanelen>
- ゾンネクール。 (2013年)。ゾンネクール。 zonnekeur.nl から取得: <http://www.zonnekeur.nl>
- ゾンネパネレン.net。 (2019a)。 omvormer で zonnepanelen の保証を取得するにはどうすればよいですか? zonnepanelen.net から取得: <https://www.zonnepanelen.net/garantie/>
- ゾンネパネレン.net。 (2019b)。 Zonnepanelen plaatsen: インストール方法は何ですか? Zonnepanelen.net から取得: <https://www.zonnepanelen.net/zonnepanelen-plaatsen>
- ゾンネパネレン.net。 (2019c)。 Zonnepanelen plat dak。 Zonnepanelen.net から取得: <https://www.zonnepanelen.net/zonnepanelen-plat-dak/>
- Zonnepanelengids.com。 (2019年)。証明書のクールメルケン。 zonnepanelengids.com から取得: <https://www.zonnepanelengids.com/informatie/keurmerken-en-certificaten>
- ゾンネプラン。 (2019年)。保証。 zonneplan.nl から取得: <https://www.zonneplan.nl/kenniscentrum/garanties>
- ZRN, S. (2019年11月26日)。太陽光パネルのリサイクル。(M. アペルドールン、L. シュブレンガー、インタビュー)

## 付録

### 付録 A インタビュー対象者リスト

表 9: 実施されたインタビューのリスト。

Organisation	Date	Topic interview
Achmea 1	17 September 2019	Product management fire insurance
Achmea 2	24 September 2019	Achmea insurances
GDV	27 September 2019	Data solar panels insurance Germany
Achmea 3	1 October 2019	Data solar panels damage insurance Achmea
SCOR	1 October 2019	Data solar panel damage insurance Europe
Solar Tester	11 October 2019	Testing damage to solar panels
Solar Clarity	11 October 2019	Damage solar panels during production and installation process
Gothaer	15 October 2019	Data solar panel damage insurance Europe
Achmea 4	15 October 2019	Claim data solar panels case study
Stichting Zonne-energie Recycling Nederland	26 November 2019	Recycling solar panels

付録 B 太陽光発電パネルの保険  
オランダ

表 10: さまざまな保険会社の太陽光パネルの保険の概要 (翻訳)  
ソーラーマガジンより、2019年)

保険会社	保険	償還額	標準保険はありますか？	見えない損害保険？	調査費用は保証されますか？
中央ベヘール (の一部) エクメア)	住宅保険 (建物とガラス、家財)	現在の価値が 40% 未満になるまでの購入価格	フォーク	いいえ	適用できない
インターポリス (の一部) エクメア)	オールインワン政策 / 住宅建築	現在の価値が 40% 未満になるまでの購入価格	フォーク	いいえ	適用できない
FBTO (の一部) エクメア)	住宅保険	現在の価値になるまでの購入価格 40パーセント未満	フォーク	フォーク	はい、保険者によって損害が証明された場合にのみ原因
アベロ・エクメア (の一部) エクメア)	住宅用建物 – 拡張された追加および家庭用効果	までの購入価格 現在の値は 40パーセント未満	フォーク	いいえ	適用できない
ナショナルオランダ (デルタロイド)	住宅用建物 (住宅保険基本 + 住宅保険オールイン)	現在の価値	フォーク	フォーク	はい、ダメージは与えられます 被保険者による証明 原因
エイゴン	住宅保険	現在の価値が 40% 未満になるまでの購入価格	フォーク	フォーク	はい、ダメージは与えられます 保険が適用された理由によって証明される
ASR	住宅保険 基本 + オールリスク	現在の価値が 40% 未満になるまでの購入価格	いいえ (報告する必要があり、政策スケジュールに記載されています)	フォーク	はい、損害が保証された原因によって証明されている場合にのみ原因
王立 (ビバット)	住宅保険	エネルギー収量の減少のみ	フォーク	部分的には、	損害が被保険者によって証明された場合にのみ原因
今行く (ビバット)	住宅保険 アウウェア + / 住宅保険 アウウェア	エネルギー収量の減少のみ	フォーク	部分的には、	損害が被保険者によって証明された場合にのみ原因
ユニベ	住宅保険	購入金額	フォーク	フォーク	はい、保険者によって損害が証明された場合にのみ原因
ABN アムロ	住宅保険	現在の価値が 40% 未満になるまでの購入価格	フォーク	フォーク	はい、保険者によって損害が証明された場合にのみ原因
北オランダ チェゴ-1816 シャード (NH1816)	住宅保険 最適/住宅保険エクストラ  拡張された	現在の価値が 40% 未満になるまでの購入価格	フォーク	いいえ	適用できない

ユニガラント (ANWB/UVM)	ハウジングパッケージ プラス+	復興 価値/修理費用	フォーク	フォーク	はい、保険者によっ て損害が証明 された場合に限りま す 原因
オーラ	住宅保険	現在の価値になるまでの購入 価格 40パーセント未満	フォーク	フォーク	はい、保険者によっ て損害が証明 された場合に限りま す 原因

付録 C オランダのソーラーパネルに関する追加情報の 基準とガイドライン

C.1 規格

表 11: オランダの太陽光パネルに関する規格の概要 (VKG、未確認)

標準 について	標準	説明
パネル	EN-EN-IEC 61215	地上用結晶シリコン太陽光発電モジュール アプリケーション – 設計分類と型式承認。
	EN-EN-IEC 61646	地上用薄膜太陽光発電 (PV)モジュール アプリケーション – 設計認定と型式承認。
	EN-EN-IEC 61730-1	太陽光発電 (PV) モジュールの安全性認定 – パート 1: 建設の要件。
インバータ	EN-EN-IEC 62109-1	太陽光発電システムに使用されるパワーインバータの安全性 – パート 1: 一般要件。
公共送電網	ネン 11727	光電システム – ユーザー インターフェイスの機能。
インストール	ねん1010	低電圧設備に対する安全規定。
	国税庁 8493	送電網に接続された小型太陽光発電システム。
	NPR-IEC/TS 62257-1	再生可能エネルギーに関する推奨事項 – パート 1: 概要 分散型電力ネットワークの導入。
	NPR-IEC/TS 62257-7-1 再生可能	再生可能エネルギーに関する推奨事項 – パート 7-1: 発電機 – 太陽光発電機

もう 1 つの重要な NEN 規格は NEN 7250 です。これは、建築物の建物外壁に太陽光発電システムを設置する際の建築的側面に関する技術要件と決定方法に関係しています (Installatie Journaal、2018 年)。より具体的には、NEN 7250 規格は、建築用途における太陽光発電システム、耐風性と耐火性の試験方法、および評価の側面に関するものです (Kiwa BDA、2019)。評価の側面は、構造安全性、耐水性、内部結露、空気抵抗、温度の影響、音響/音響、耐火性、延焼性、持続可能性、屋根の適合性などで構成されます。現在の NEN 7250 は、東西指向システム、フルルーフシステムおよび統合システム (BIPV) の開発などの太陽光発電システムの開発により、改訂および拡張する必要があります (Kiwa BDA、2019; Roofs、2019)。



## C.2 オランダの特徴

テュフ ホールマークは、オランダでも適用されるドイツの認証マークです (Zonnepanelengids.com,2017; Stichting Garantiefonds ZonZeker,2016-2019; TÜV Rheinland,2019)。対応する検査は、寿命、安全性、性能、発電量など、ソーラーパネルのあらゆる側面に関係します。これらの検査は、IEC 規格および国家規格 (テュフ ラインランド,2019) に従って実施されます。RoHS 認証 (有害物質の制限) は、ソーラー パネルでの有害物質の使用が制限されている場合に取得できます (Zonnepanelengids.com,2017; Stichting Garantiefonds ZonZeker,2016-2019; RVO,n.d.-b)。このガイドラインは欧州連合によって実施されました (Zonnepanelen.com,2017; RVO,nd-b)。IEC ホールマークは、ソーラー パネルが IEC 規格に適合していることを保証します (Zonnepanelengids.com,2017; Stichting Garantiefonds ZonZeker,2016-2019)。検査には、信頼性、長期間にわたる効率、持続可能性、および雹や風などの気象条件に対するソーラーパネルの耐性が含まれます。再生可能エネルギー用途で使用する機器に関する規格に関する IEC 認証システム (IECRE システム) がこれらの認証を発行します (IEC-IECRE,2019)。

上記のようなホールマークは、太陽光発電システムが対応するホールマークの要件をすべて満たしている場合にのみ取得できます (Stichting Garantiefonds ZonZeker,2016-2019; KSN,nd; Omega,nd)。独立した検査会社は、ソーラーパネルがホールマークの要件を満たしているかどうかを確認するために必要な検査を実行できます。オランダで事業を展開しているそのような企業の例としては、テュフ ラインランド、キューリング サービス ネーダーランド (KSN)、オメガ (Achmea,2019a、テュフ ラインランド,2019、KSN、未確認、オメガ、未確認) があります。KSN とオメガは、NEN 1010、NTA 8013、および NEN-EN-IEC 62446-1:2016 規格に基づいて太陽光発電システムの検査を実施しています (KSN、未確認、オメガ、未確認)。NEN 1010 では、低電圧設備の一般検査について説明しています (Atama Solar Energy,2016 年、Verbond van Verzekeraars,2019 年)。

NTA 8013 は NEN 1010 への追加であり、系統接続された太陽光発電設備の検査手順について説明しています (Atama Solar Energy,2016)。国税庁第 8013 号に基づく検査は、システムの書類検査、建物検査、引渡し検査から構成されます。NEN-EN-IEC 62446-1:2016 規格は、試運転テスト、検査基準に関する要件を含む追加のガイドラインを提供し、太陽光発電システムの安全な設置と正しい動作を検証する文書を定義しています (NEN,2016; Verbond van Verzekeraars,2019)。この規格は太陽光発電システムの生産者および設置者を対象としており、定期的な再テストのガイドラインも提供します。

太陽光発電システム自体を対象とした証明のほかに、設置会社や太陽光パネルの製造者に関するさまざまな認証や証明も存在します。これらのシステムの設置者は、専門知識を保証するために Cito から認定を受けることができます (NEN,2013)。ISO 認証 (国際標準化機構) は、ソーラー パネルの製造業者が安全性、信頼性、品質に関する特定の要件を満たしていることを保証する証明書のもう 1 つの例です (Zonnepanelengids.com,2017; Stichting Garantiefonds ZonZeker,2016-2019)。ISO 自体は国際規格を開発するだけであり、これらの規格の認証は発行しません (ISO,nd.d.)。これは外部企業である認証機関によって行われます (Kader-advies,2017a; ISO Register,2019)。ISO 9001 と ISO 14001 は、特に太陽光発電システムに適用されます (Zonnepanelengids.com,2017)。ISO 9001 認証はマネジメント システムの品質に関するものであり、ISO 14001 は環境マネジメント システムに関する要件に関するものです (Kader-advies,2017b,c; Zonnepanelengids.com,2017)。検査会社向けの認証の一種に SCIOS 認証があります。KSN と Omega は SCIOS 認定を受けています (SCIOS,2019a; KSN、



nd)。SCIOS 認証の取り決めは、技術設備、電気設備、燃焼設備の検査および保守活動に関係しています (SCIOS、2019b; KSN、未確認)。

これらの取り決めは、設置および検査会社の教育と経験に関する要件で構成されています (SCIOS、2019b)。

### C.3 保証

製品保証には、ソーラーパネル自体とインバーターの両方が含まれます (Zonne-energie gids、2017-2019; Consumentenbond – Van der Wilt、2019a)。太陽光発電システムの供給者または製造者は製品保証を発行し、太陽光発電システムを販売する会社または卸売業者/輸入業者 (Sungevity Nederland, nd) が保証します。製品保証は、破損したソーラーパネルおよび/またはインバーターのみに適用されます。発電量が徐々に低下するという保証はありません。システムに適用される製品保証の年数は、サプライヤーによって異なります。最も一般的な製品保証期間は 10 年 (Consumentenbond – Van der Wilt、2019a; Sungevity Nederland、nd; Zonnepanelen.net、nd-a; Zonneplan、nd;) ですが、一部のサプライヤーは 30 年の製品保証を提供しています (Consumentenbond – Vanデア・ウィルト、2019a)。インバータに関しては、保証年数はこれより若干短く、通常は最低 5 年から 10 年まで異なります (Zonneplan, nd; Consumentenbond – Van der Wilt, 2019a)。

電力保証は、発電量の段階的な減少による収益の損失に関するものです (Consumentenbond – Van der Wilt、2019a)。一般に、太陽光発電システムの発電量または容量は時間の経過とともに減少します (Interview Solar Clarity、2019; Sungevity Nederland、ND)。時間の経過とともに発生する発電量の極端な低下、つまり収益の極端な損失を補償するために、電力保証が設けられています。このタイプの保証により、設置後 20 ～ 25 年後に太陽光発電システムの発電量が元の性能の 80% であることが保証されます (Zonne-energie gids、2017-2019; Interview Solar Clarity、2019; Verbond van Verzekeraars、2019; Consumentenbond – Van der Wilt、2019a、Sungevity Nederland、ND)。電力保証のもう 1 つの一般的な形式は、システムの設置後 10 年間で 90% の発電量を保証することです (Zonne-energie gids、2017-2019; Sungevity Nederland、ND)。電力保証によれば、発電量が 10 年後に 90% 未満、または 25 年後に 80% 未満になった場合、修理/再建費用と収益の損失が補償されます (Zonne-energie gids、2017-2019; Interview Solar Clarity) 、2019年。

設置に関する保証は、太陽光発電システムの設置の欠陥をカバーします (Zonne-energie gid、2017-2019; Consumentenbond – Van der Wilt、2019a; Sungevity Nederland、nd; Zonnepanelen.net、nd-a)。保証期間は最低でも2年ですが、5年や10年の保証期間も一般的になってきています。

システム保証は、設置および取り付け材料に関するものです (Consumentenbond – Van der Wilt、2019a)。設置が適切に行われ、取り付け部品、ソーラーパネル、インバーターの組み合わせが互いに適切に調整されていることを保証します。そうでない場合、サプライヤーは問題を解決し、修理費と輸送費を支払う責任があります。このタイプの保証がシステムに適用されるかどうかは、太陽光発電システムの供給元によって異なります。

発電量保証の付与も供給者 (Sungevity Nederland、ND) によって異なります。多くの要因がソーラーパネルの性能に影響を与えます (Fouad et al., 2017)。これらの要因は、環境要因、設置要因、太陽光発電システムに直接関係する要因、およびコスト要因の 4 つの主なカテゴリに分類できます。

これら 4 つの主要なカテゴリは、サブカテゴリに分割できます。環境要因のサブカテゴリには、太陽放射照度、モジュール温度、塵埃などが含まれます。

蓄積とシェーディング。ケーブルの特性と傾斜角度は、設置要因のサブカテゴリの例です。太陽光発電システムに関連する要因としては、パネルとバッテリーの効率、インバーター、パネルの材質が太陽光発電システムの性能に影響します。これらの要因が発電量に影響を与えるため、同じタイプの太陽光発電システムでも場所によって性能が異なります (Sungevity Nederland, ND)。したがって、一部のサプライヤーは、設置されたソーラーパネルの期待される性能を計算しています。発電量保証により、発電量が期待されるパフォーマンスよりも低い場合に、この差が確実に補償されます。保証期間は 2 年間です (Solar Clarity へのインタビュー、2019 年)。

## 付録 D ソーラーパネルの損傷とそれが出力電力に及ぼす影響を検出するために初期の研究者が使用した方法 (以下で説明) 表3)

目に見える損傷 (表 3)については、次の方法が使用されました。

1. 時速 110 マイルで移動する 2 インチの氷球の衝撃を 3 つの異なるソーラー パネルで比較しました。それぞれ異なる材質 (例 :アクリルシート、シリコンゴムシート、アニールガラスシート)を表層として使用します。この報告書では、定性的な観察は、テストの効果の前後の定量的な検出力推定値によって裏付けられています (Moore & Wilson、1978)。
2. パフォーマンス指標を使用して斜めブレークの効果を測定します (+45、-45)、10 個の多結晶モジュール (220Wp) および 35 個の多結晶モジュール (130Wp) の出力電力におけるバスバーの破断に平行、バスバーの破断に垂直、および複数の方向の破断 (Dhimish、Holmes、Mehrdadi、および Dales、2017)。
3. ひょうの大きさに関して現場の既知の状況下で形成された損傷を比較し、これらの状況を実験室で再現して、それらがどのように正確に形成されたかを調べる研究 (Mathiak et al.、2015)。

目に見えない損傷 (表 3)については、次の結果が使用されました。

1. ソーラーパネルのシリコン層の微小亀裂の重大なサイズと方向の分析。エレクトロルミネセンス試験は、損傷を特定し、それによって出力が大幅に低下するかどうかを判断するために使用されます (Solar Tester、2019)。