

海外の先進的なリスク分析・アセスメント手法の情報収集と整理

研究分担者 高杉 友（浜松医科大学医学部健康社会医学講座 助教）

研究要旨：

本研究ではオールハザードのリスクアセスメントの先進的な事例として、米国のナショナル・リスク・インデックス（National Risk Index：NRI）のリスク分析およびリスク構成要素について整理した。NRIは郡レベルで18種類の自然災害リスクを視覚化したもので、社会的脆弱性、コミュニティのレジリエンス、被害による年間予想損失額の3つの因子で構成されている。年間予想損失額は、曝露度、年間発生頻度、過去の損失率の因子に基づいている。社会的脆弱性は29の社会経済的指標、コミュニティのレジリエンスは社会、経済、地域資本、組織力、住宅・インフラ、環境の6種類のレジリエンスを表す49の指標を用いている。年間予想損失額は災害毎に関連する結果タイプ（建物、人口、農産物）の損失額を定量化する。年間予想損失額には自然災害への年間発生頻度、曝露量、過去の損失額のデータが組み込まれている。用いられたデータソースは、米国の海洋大気庁、地質調査所、陸軍工兵隊、農務省等である。日本では、オープンソースデータを用いて、地盤工学会関東支部が自然災害に対する安全指標（Gross National Safety for natural disasters：GNS）の開発を行っている。

A. 研究目的

本研究ではオールハザードのリスクアセスメントの先進的な事例として、米国のナショナル・リスク・インデックス（National Risk Index：NRI）のリスク分析およびリスク構成要素について整理することを目的とした。

B. 研究方法

米国連邦緊急事態管理庁（Federal Emergency Management Agency：FEMA）が公表した「ナショナル・リスク・インデックス（NRI）技術文書（2021年11月）」をレビューし、自然災害リスク指標であるNRIのリスク分析、リスク構成要素、年間予想損失係数の項目ごとに主な所見を整理した。

（倫理面への配慮）

本研究は個人情報を取り扱わない文献レビューのため、倫理審査委員会による審査を受けていない。

C. 研究結果

1. 米国のナショナル・リスク・インデックス（NRI）

NRIは郡レベルで自然災害リスクを視覚化したもので、総合的な視点を持ち全国的な基準値である。NRIは社会的脆弱性、コミュニティのレジリエンス、被害による年間予想損失額の3つの因子で構成されている。対象となった自然災害は18種類である（表1）。NRIを活用することで、緊急時対応計画の更新、災害軽減計画の強化、地域資源の優先順位付け、コミュニティレベルにおけるリスクコミュニケーションの促進等の意思決定を支援できる。

表1 対象となった18種類の自然災害

| | | |
|-----------|----------|----------|
| 1. 雪崩 | 7. 熱波 | 13. 強風 |
| 2. 沿岸氾濫 | 8. ハリケーン | 14. 竜巻 |
| 3. 寒波 | 9. 暴風雪 | 15. 津波 |
| 4. 干ばつ | 10. 地すべり | 16. 火山活動 |
| 5. 地震 | 11. 雷 | 17. 山火事 |
| 6. 雹(ひょう) | 12. 河川氾濫 | 18. 冬型天候 |

自然災害リスクに影響を与える環境的、社会的、経済的な因子は多岐にわたる。FEMAは2017~2019年にかけて、多数の連邦、州、地方政府、学術機関、非営利団体、民間企業とともに、リスク評価の基本アプリケーションとしてNRIを共同で開発した。FEMAはデータセットを作成するための方法論と手順を開発し、ウェブサイトとアプリケーションを構築した。生のソースデータをNRIに入力するための自然災害リスク因子に変換する方法論について議論し、決定した。

1) リスク分析

リスクは自然災害の結果、負の影響を受ける可能性と定義されている。NRIのリスク方程式には、自然災害リスク因子、結果増強(増悪)因子、結果低減因子の3つが含まれる。NRIのスコアは社会的脆弱性、コミュニティのレジリエンス、年間予想損失額という3つの因子に基づく。社会的脆弱性は、結果増強(増悪)因子であり、自然災害の悪影響に対する社会集団の感受性を測定するために、人口統計学的特性を分析するものである。コミュニティのレジリエンスは、結果低減因子であり、人口統計学的特性を用い、自然災害の影響に備え、それに適応し、耐え、回復するコミュニティの能力を測定するものである。年間予想損失額は、自然災害によって毎年予想される建物価格、人口、農産物価格の損失を測定するものである。これらの3つの構成要素は、方程式「リスク=年間予想損失額×社会的脆弱性×1/コミュニティのレジリエンス」を用いて1つのリスク値にまとめられる。各因子は、他のコミュニティとの相対的なスコアを示すインデックススコアで表される。3

つのスコアから、18種類の災害すべてに対するコミュニティのリスクを測定するために、複合リスク・インデックス・スコアが計算される。スコアは、0(可能な限り低い値)から100(可能な限り高い値)の範囲で示す。社会的脆弱性が高いほど、コミュニティのレジリエンスが低いほど、年間予想損失額が高いほど、全体的なリスクは高くなる(図1)。

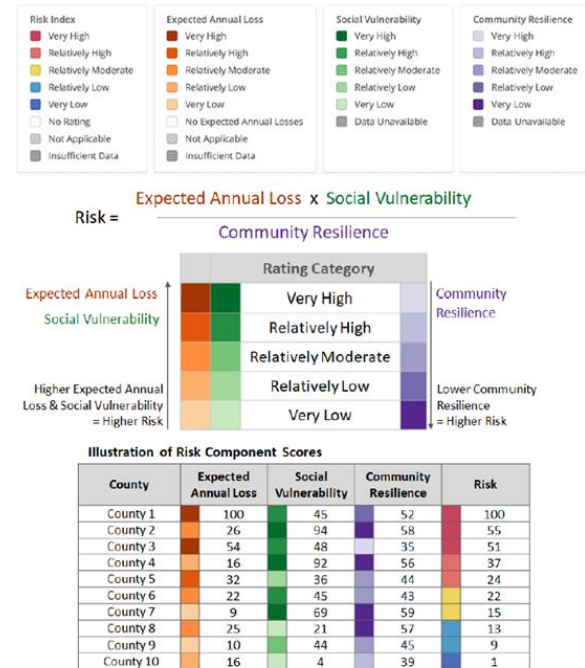


図1 ナショナル・リスク・インデックス定性的評価凡例とリスク構成因子スコア

出典: FEMA. National Risk Index: Technical Documentation (2021)

2) リスク構成要素

NRIのスコアは社会的脆弱性、コミュニティのレジリエンス、年間予想損失額という3つの因子に基づいて算出される。年間予想損失額は、曝露度、年間発生頻度、過去の損失率の因子に基づいており、NRIのスコアは合計5つのリスク因子で構成される。各リスク因子は、リスクの可能性または結果のいずれかの側面に寄与し、地理的位置に基づくリスク、または自然災害の性質と過去の発生に基づくリスクの2つのリスクタイプのいずれか

に分類される。

a. 社会的脆弱性

社会的脆弱性は災害に対する準備、対応、対処、回復、適応の能力に影響を与えるコミュニティの社会的、経済的、人口統計的、住宅に関する特性を考慮する。社会的脆弱性が高いほどリスクは高くなり、地理的なリスク因子である。

サウスカロライナ大学災害・脆弱性研究所の社会的脆弱性インデックス (Social Vulnerability Index : SoVI) の推奨を決定した。SoVI は地域特有の社会的脆弱性の評価であり、コミュニティの災害への備え、対応、回復の能力を低下させると考えられる 29 の社会経済的指標を用いている。一人あたり所得、失業者数の割合、健康保険に加入していない人口の割合、12 年未満の教育を受けている人口の割合、社会保障給付を受けている世帯の割合、アジア人・アフリカ系アメリカ人・ヒスパニック系の各人口の割合 (%) 等である。

b. コミュニティのレジリエンス

コミュニティのレジリエンスは、米国立標準技術研究所によって予測される自然災害に備え、状況の変化に適応し、混乱に耐え、迅速に回復するコミュニティの能力として定義されている。コミュニティのレジリエンススコアは結果低減因子で地理的なリスク因子である。

サウスカロライナ大学災害・脆弱性研究所のコミュニティのレジリエンス指標のベースライン (Hazards and Vulnerability Research Institute Baseline Resilience Indicators for Communities : HVRI BRIC) インデックスの推奨を決定した。社会、経済、地域資本、組織力、住宅・インフラ、環境の 6 種類のレジリエンスを表す 49 の指標が含まれる。ある場所と別の場所を比較し、レジリエンスの要因を

特定できる。HVRI BRIC スコアが高いほど、より強く、よりレジリエンスの高いコミュニティであることを示す。HVRI BRIC のコミュニティのレジリエンスの正規化スコアは 41.1 ~ 64.7 の範囲である。

c. 年間予想損失額

年間予想損失額は自然災害による年間の平均経済損失額である (単位: ドル)。年間予想損失額は災害毎に計算され、関連する結果タイプ (建物、人口、農産物) の損失を定量化する。例えば、多くの災害は建物と人口にのみ大きな影響を与えるため、農産物への損失は計算に含まない。しかし、干ばつに対する年間予想損失額では、農産物 (作物と家畜) に対する損失のみを計算する。人口損失は統計的生命価値 (Value of Statistical Life : VSL) アプローチを用いて人口等価値に換算され、死亡者 1 人または負傷者 10 人を経済損失 760 万ドルとして処理する。

18 種類の災害による年間予想損失額をドル換算するためには、すべての災害において複数の分析技法を用いる必要がある。処理用データベースとして SQL Server データベース環境を構築し、空間解析を実行した。年間予想損失額は、国勢調査区、国勢調査対象地域、郡の 3 つの異なる行政階層で計算するため、国勢調査局の 2017 TIGER/Line シェイプファイル等を使い、データセットを構築した。特定の災害が発生しにくい、または発生したことがない地域と、災害が発生しない地域を区別した。災害年間予想損失額は災害が発生する可能性があるコミュニティに対してのみ計算される。

NRI の強みの一つは、適切と思われる地理的レベルの年間予想損失額を決定することである。年間予想損失額は、特定のコミュニティの年間災害発生頻度と、それが発生した場合に関連する結果 (例えば、その地域で河川

氾濫がどのくらいの頻度で発生し、どのような建物、人口、農産物が影響を受ける可能性があるか)を組み合わせて評価することにより決定される。多くの災害において、年間発生頻度と曝露量は、非常に局所的である可能性がある。年間発生頻度と曝露量を連携させてモデル化することで、最適な年間予想損失額が得られる。各災害に対する年間予想損失額値は、各州および各結果タイプのすべての災害による年間予想損失額として、結果タイプ別に提供される(表2)。人口が多く建物価格の高い州は高いパーセンタイルに位置し、人口が少なくまばらな州は低いパーセンタイルに位置している。

表2 雹(ひょう)に対する郡レベルの年間予想損失額の計算例

| 年間予想損失額 | 建物価格 | 人口及び人口等価 | 農産物価格 |
|---------|-------------|---------------------|--------------|
| 曝露量 | 282.1億ドル | 310,235人または2,360億ドル | 77,030,000ドル |
| 年間発生頻度 | 3.9 件/年 | 3.9件/年 | 3.9件/年 |
| 過去の損失率 | 3.1e-5 | 1.3e-8 | 3.2e-6 |
| 年間予想損失額 | 3,470,000ドル | 0.016人または121,600ドル | 968ドル |

出典：FEMA. National Risk Index: Technical Documentation (2021)

3) 年間予想損失係数

年間予想損失額には自然災害への年間発生頻度、曝露量、過去の損失額のデータが組み込まれている。データソースは、米国の海洋大気庁、地質調査所、陸軍工兵隊、農務省等が挙げられる。

a. 年間発生頻度

年間発生頻度は一定期間に毎年記録された災害発生数、または毎年災害が発生するとモデル化された確率のいずれかから算出される。NRIは自然災害がまだ記録されていない場所

で発生する可能性を考慮している。そのため、NRIには特定の地理的地域や、ハリケーン、暴風雪、地すべり、竜巻、津波などの災害に対する年間発生頻度の最小値が組み込まれている。

b. 曝露量

曝露量は、自然災害の発生にさらされる可能性のある建物、人口、農産物の代表的な値である。各災害について、入手しやすい全国レベルのデータを持つデータソースが選択され、空間分析が行われ、曝露領域が計算される。

c. 過去の損失率

過去の損失率は、1回の災害発生によって失われると予想される曝露結果タイプ(建物価格、人口、農産物価格)の割合の地域固有の推定値である。概念的には、過去の災害発生に関連する損失率の平均値であり、将来の災害発生の潜在的な影響を推定するために使用される。

2. 日本のリスク指標

わが国においては、地盤工学会関東支部が自然災害に対する安全指標(Gross National Safety for natural disasters: GNS)の開発を行っている。GNSは複数の自然災害への遭遇度合(災害曝露量)と社会の脆弱性(ハード対策とソフト対策の進捗状況)を掛け合わせて計算する。

2015年に都道府県レベルのGNS、2019年に関東地方の市町村レベルのGNSを公開した。当初は統計データが豊富な都道府県単位でリスク評価を行っていたが、自然災害が狭い範囲で発生することを懸念し、より細かい市町村単位でリスク評価を行うことにした。

GNSは定期的に更新され、信頼性の高いオープンソースの統計データを使用している。GNSの脆弱性に関する指標として、食

料・水の備蓄、10万人当たりの医師数、ハザードマップ公開率等を用いている。これらのデータを含め、活用できそうな統計データを整理した（資料1）。

D. 考察

既存の自然災害リスク指標として、World Risk Report で世界各国の自然災害に対するリスク指標 World Risk Index (WRI) が公表されており、自然災害の発生頻度や程度を表す曝露量と社会・政治・経済・環境的因子がもつ脆弱性を掛け合わせて算出している。WRI は全世界的な自然災害リスクの比較が可能だが、適用範囲や精度には限界があると考えられる。日本の WRI は曝露量が高く、脆弱性が低いという特徴があり、37位である（2022年）。

NRI の社会的脆弱性やコミュニティのレジリエンスの指標の数は GNS より多く、わが国の新たな自然災害リスク指標の開発や精度をより高めるために参考になるかもしれない。

GNS で想定した自然災害は地震、津波、高潮、火山活動、洪水の6種類だが、米国の NRI では18種類を想定していた。GNS は2019年版から洪水を追加した経緯もあり、今後、想定する自然災害の種類の追加も考えられる。

NRI は政府機関、研究機関、民間組織など様々な機関の知見を集結し開発され、産学官連携が重要だと考えられた。

E. 結論

米国の NRI は郡レベルで18種類の自然災害リスクを視覚化したもので、社会的脆弱性、コミュニティのレジリエンス、被害による年間予想損失額の3つの因子で構成されている。年間予想損失額は、曝露度、年間発生頻度、過去の損失率の因子に基づいている。社会的脆弱性は29の社会経済的指標、コミュニティ

のレジリエンスは49の指標を用いている。年間予想損失額は災害毎に関連する結果タイプ（建物、人口、農産物）の損失額を定量化する。年間予想損失額には自然災害への年間発生頻度、曝露量、過去の損失額のデータが組み込まれている。

日本では、地盤工学会関東支部が GNS の開発を行っている。

F. 研究発表

1. 論文発表
特になし

2. 学会発表

- 1) 高杉友、森下佳穂、尾島俊之：「災害発生を想定した際の地域住民が持つ共助実行意思の研究：インターネット調査」第81回日本公衆衛生学会総会、2022年10月9日（甲府）
- 2) 高杉友、辻大士、大塚理加、宮國康弘、近藤克則、尾島俊之：「個人・地域レベルのソーシャル・キャピタル(SC)は避難訓練参加増を説明するか：JAGES3年縦断研究」第33回日本疫学会学術総会、2023年2月1~3日（浜松）

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
特になし
2. 実用新案登録
特になし
3. その他
特になし

【参考文献】

Federal Emergency Management Agency (FEMA). National Risk Index: Technical Documentation. 2021.

<https://hazards.fema.gov/nri/> (2023年5月1日アクセス可能)

Bündnis Entwicklung Hilft, Ruhr University Bochum. WorldRiskReport 2022. 2022.

<https://weltrisikobericht.de/weltrisikobericht-2022-e/> (2023年5月2日アクセス可能)

自然災害に対する安全性指標 (GNS) の開発とその利活用に関する研究委員会. グループ活動状況. <https://jibankantou.jp/group/gns.html> (2023年5月2日アクセス可能)

資料1 日本のオープンソースデータ等

| No | データベース・ウェブサイト名 | 機関名 | 項目 | NRI指標のリスク構成要素 | URL |
|----|------------------------------------|-----------------------------------|---|----------------------|---|
| 1 | e-Stat | 総務省統計局 | 国勢調査（年齢、国籍、世帯構成、就業状態、教育等） | 社会的脆弱性、コミュニティのレジリエンス | https://www.e-stat.go.jp/stat-search?page=1&toukei=00200521 |
| 2 | 最新の将来推計人口・世帯数の結果 | 国立社会保障・人口問題研究所 | 将来推計人口 | 年間予想損失額 | https://www.ipss.go.jp/svoushika/tohkei/Mainmenu.asp |
| 3 | 災害事例データベース | 防災科学技術研究所 | 自然災害種別（地震、火山、風水害、斜面、雪氷、その他）、発生日時・場所、被害（人的、建物、インフラ、農地、金額）、出典 | 年間予想損失額 | https://dil.bosai.go.jp/de/db/ |
| 4 | ハザードマップポータルサイト～身のまわりの災害リスクを調べる～ | 国土交通省 | ハザードマップ（市町村）、洪水・土砂災害・高潮・津波のリスク情報、道路防災情報、土地の特徴・成り立ち等 | 年間予想損失額 | https://disaportal.gsi.go.jp/index.html |
| 5 | 地震本部 | 地震調査研究推進本部事務局（文部科学省研究開発局地震・防災研究課） | 地震予測地図等 | 年間予想損失額 | https://www.jishin.go.jp/database/portal/ |
| 6 | 国土地盤情報検索サイト KuniJiban | 一般財団法人国土地盤情報センター | 地盤情報 | 年間予想損失額 | https://ngic.or.jp/ |
| 7 | 国土数値情報ダウンロードサイト | 国土交通省 | 浸水想定区域データ、土砂災害危険箇所データ、 | 年間予想損失額 | https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/ |
| 8 | 水害統計調査 | 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課経済係 | 一般資産（家屋、家庭用品、農漁家資産、事業所資産、農作物）の被害額等を把握するため、浸水深別被害建物棟数、被災世帯数、被災事業所数等を調査 | 年間予想損失額 | https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/suigaitoukei/index.html |
| 9 | 被害調査 | 農林水産省 | 気象災害等を受けた全作物の災害種類別の被害面積及び被害量等 | 年間予想損失額 | https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/higai/ |
| 10 | 各種データ・資料 | 国土交通省気象庁 | 過去の気象データ、災害をもたらした気象事例等 | 年間予想損失額 | https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html |
| 11 | Emergency Events Database (EM-DAT) | ルーベン・カトリック大学災害疫学研究所（ベルギー） | 1900年以降の12,000件以上の災害情報（被害額等） | 年間予想損失額 | https://www.emdat.be/ |
| 12 | NatCatSERVICE | ミュンヘン再保険会社 | 1980年以降の12,000件以上の自然災害情報（発生日時、災害名、経済損失額、保険損害額等） | 年間予想損失額 | https://www.munichre.com/en/solutions/for-industry-clients/natcatservice.html |
| 13 | sigma | スイス再保険会社 | 1970年以降の7,000件以上の自然災害情報 | 年間予想損失額 | https://www.swissre.com/institute/research/sigma-research.html |

資料2 ナショナル・リスク・インデックス 技術文書（2021年11月） 概要

1. 序文

ナショナル・リスク・インデックスは、18種類の自然災害に対して最もリスクの高い米国のコミュニティを説明するためのデータセットとオンラインツールであり、ユーザーが自分たちのコミュニティの自然災害リスクをより良く理解することを目的としている。想定される利用者は、地方、地域、州、連邦レベルのプランナーや緊急事態管理者、その他の意思決定者や関心のある一般市民などである。緊急時対応計画の更新、災害軽減計画の強化、資源の優先順位付けと配分、コミュニティレベルでのリスクコミュニケーションと関与の促進のような意思決定を支援することができる。

表1：対象となった18種類の自然災害

| | | |
|-----------|----------|----------|
| 1. 雪崩 | 7. 熱波 | 13. 強風 |
| 2. 沿岸氾濫 | 8. ハリケーン | 14. 竜巻 |
| 3. 寒波 | 9. 暴風雪 | 15. 津波 |
| 4. 干ばつ | 10. 地すべり | 16. 火山活動 |
| 5. 地震 | 11. 雷 | 17. 山火事 |
| 6. 雹（ひょう） | 12. 河川氾濫 | 18. 冬型天候 |

2. 背景

ナショナル・リスク・インデックスの本格的な開発は2017年に始まり、2019年末まで進められた。ナショナル・リスク・インデックスは、自然災害に対するベースラインリスクの全国的で総合的な評価という、これまでにないものである。ナショナル・リスク・インデックスは、リスク評価分野における広範な研究とベストプラクティスに基づくものであるが、本方法論は、狭域および広範囲な地理的スケールにおける自然災害リスク評価の特定のニーズを満たすために、独自かつ慎重に構築されたものである。ナショナル・リスク・インデックスの最も重要かつ中心的な構成要素である年間予想損失額（Expected Annual Loss : EAL）は、毎年自然災害によって予想される経済的損失をドルで定量化する強固な測定法である。EALは、国や地域にとって重要な18種類の災害について、入手可能な最善のデータセットで構成されており、ソースデータは各災害の特徴に合うように処理されている。開始時に設定された方向性に従って、データセットには社会的脆弱性とコミュニティのレジリエンスの測定値も含まれ、全体的なリスクを定量化している。

それぞれのコミュニティの自然災害に対するリスクに影響を与える環境的、社会的、経済的な因子は多岐にわたる。米国連邦緊急事態管理庁（Federal Emergency Management Agency : FEMA）は、多数の連邦、州、地方政府、学術機関、非営利団体、民間企業とともに、リスク評価の基本アプリケーションとして、ナショナル・リスク・インデックスを共同で開発した。その目的は、広範で総合的な視点を持ち、自然災害リスクの全国的な基準値を作成することであった。FEMAはデータセットを作成するための方法論と手順を開発し、ウェブサイトとアプリケーションを調査、設計、構築した。生のソースデータをナショナル・リスク・インデックスに入力するための自然災害リスク因子に変換する方法論について議論し、決定した。FEMAが承認した少なくとも半分の州計画に含まれている、あるいは地域的に重要である

と判断された自然災害が選ばれた（図1）。

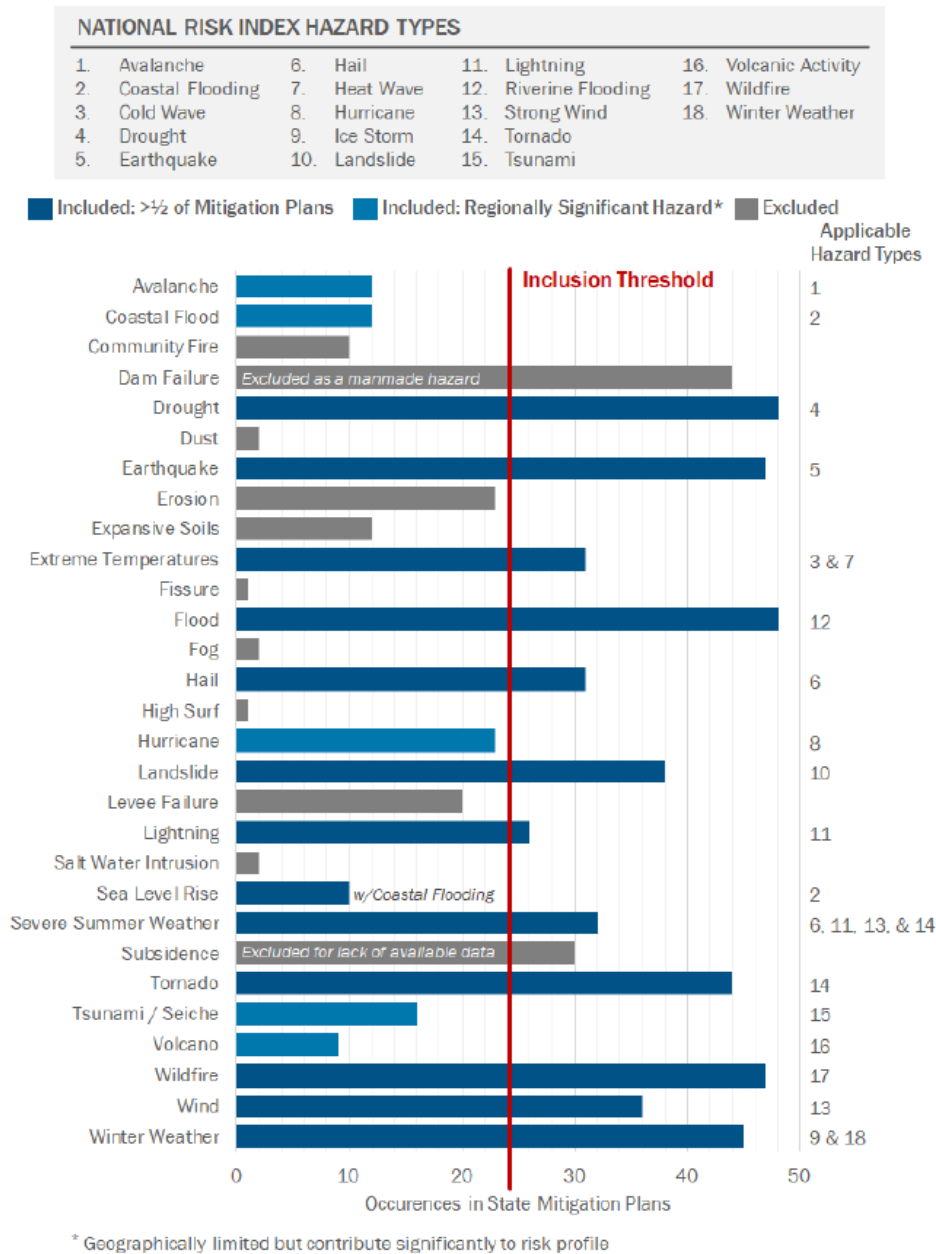


図1：2016年1月以降の州災害軽減計画に基づく災害包含の判断

3. リスク分析の概要

ナショナル・リスク・インデックスにおいて、リスクは自然災害の結果、負の影響を受ける可能性と定義されている。ナショナル・リスク・インデックスの背後にあるリスク方程式には、自然災害リスク因子、結果拡張因子、結果低減因子の3つが含まれる。EALは自然災害リスクの構成要素であり、自然災害によって毎年予想される建物価格、人口、農産物価格の損失を測定するものである。社会的脆弱性は、結果向上構成要素であり、自然災害の悪影響に対する社会集団の感受性を測定するために、人口統計学的特性を分析するものである。コミュニティのレジリエンスは、結果削減の因子であり、人口統計学的特性を用いて、自然災害の影響に備え、

それに適応し、耐え、回復するコミュニティの能力を測定するものである。これらの3つの構成要素は、方程式1を用いて1つのリスク値にまとめられる。

方程式 1：一般化されたナショナル・リスク・インデックスリスク方程式

$$Risk = Expected Annual Loss \times Social Vulnerability \times \frac{1}{Community Resilience}$$

リスク方程式において、各構成要素は、同じレベルの他のすべてのコミュニティとの相対的なスコアを示す無単位のインデックススコアで表される。方程式1の3つのスコアから、18種類の災害すべてに対するコミュニティのリスクを測定するために、複合リスク・インデックス・スコアが計算される。すべてのスコアは、0（可能な限り低い値）から100（可能な限り高い値）の範囲となる。EALが高いほど、社会的脆弱性が高いほど、および/またはコミュニティのレジリエンスが低いほど、全体的なリスクは高くなる。標準的な配色は、EAL、社会的脆弱性、コミュニティのレジリエンス、リスクのスコアとレーティングカテゴリーのいくつかの例とともに図2に示されている。

EALが0であるコミュニティは、建物価格、人口、農産物価格のいずれもが災害にさらされることがない。EALがゼロの地域は、その災害にさらされる建物、人口、農産物価格がないか、またはその災害の年間発生頻度がゼロであるかのいずれかである。専門家の協力により、災害のリスクが存在しない場所と災害が発生しないとみなされる場所を区別するために、災害の適用性に関する先験的定義が適用されている。例えば、雪崩のEALは、山岳地形がない地域では計算されない。

最新のソースデータセットには、2019年までの記録期間しか含まれていない。ほとんどの災害は、EALを決定するために年間発生頻度モデルを使用している。特定の稀な災害（地震、ハリケーン、津波、火山活動など）は、長期間にわたる災害発生の可能性を推定し、それを年率換算する確率的モデルを使用することが有益である。これらのうち、地震だけは、EALを正確に推定するために十分な確率的なソースデータを持っている¹。ナショナル・リスク・インデックスとその構成要素は、自然災害リスクを決定するための基本的な測定値およびガイドラインとみなされるべきであるが、リスクの絶対的な測定値として使用されるべきではない。

4. リスク構成要素の概要

リスクインデックスのスコアは社会的脆弱性、コミュニティのレジリエンス、EALという3つの因子に基づき、EALは曝露度、年間発生頻度、過去の損失率（Historic Loss Ratio : HLR）の因子に基づいており、合計5つのリスク因子で構成されている。各リスク因子は、リスクの可能性または結果のいずれかの側面に寄与し、地理的位置に基づくリスク、または自然災害の性質と

¹ 連邦緊急事態管理庁(FEMA) (2017)。米国における地震損失の年間予想損失。FEMA 出版第 366 号：https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-07/fema_earthquakes_hazus-estimated-annualized-earthquake-losses-for-the-united-states_20170401.pdfから抜粋。

過去の発生に基づくリスクの2つのリスクタイプのいずれかに分類される（表2）。

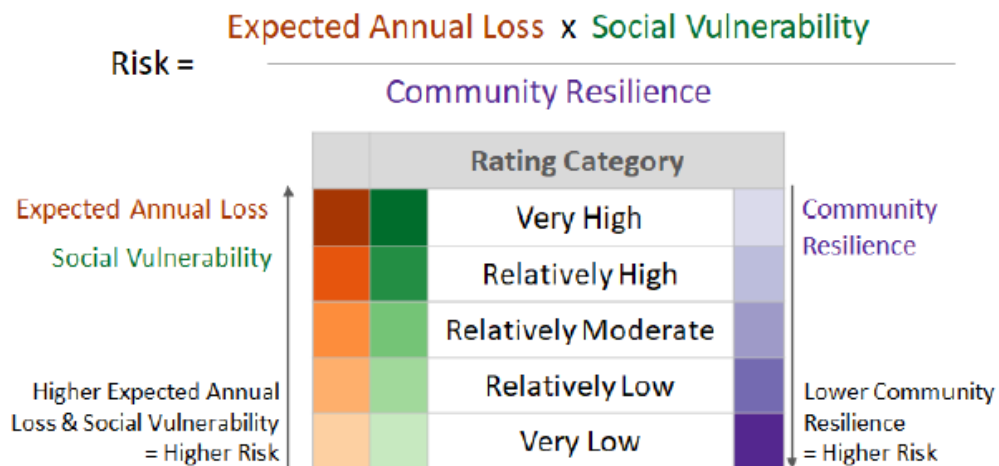


Illustration of Risk Component Scores

| County | Expected Annual Loss | Social Vulnerability | Community Resilience | Risk |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|------|
| County 1 | 100 | 45 | 52 | 100 |
| County 2 | 26 | 94 | 58 | 55 |
| County 3 | 54 | 48 | 35 | 51 |
| County 4 | 16 | 92 | 56 | 37 |
| County 5 | 32 | 36 | 44 | 24 |
| County 6 | 22 | 45 | 43 | 22 |
| County 7 | 9 | 69 | 59 | 15 |
| County 8 | 25 | 21 | 57 | 13 |
| County 9 | 10 | 44 | 45 | 9 |
| County 10 | 16 | 4 | 39 | 1 |

図2：ナショナル・リスク・インデックス定性的評価凡例とリスク構成要素スコア

表2：リスク構成要素と因子

| リスク構成要素 | リスク因子 | リスク因子の詳細 | リスクの寄与度 | リスクタイプの割当 |
|---------|--------|----------|---------|-----------|
| 社会的脆弱性 | 社会的脆弱性 | 結果を重篤化 | 結果 | 地理的リスク |

| | | | | |
|---------------|---------------|-------------|-------|---------|
| | | させるもの | | |
| コミュニティのレジリエンス | コミュニティのレジリエンス | 結果を低減化させるもの | 結果 | 地理的リスク |
| 年間予想損失 | 曝露 | 見込まれる結果 | 結果 | 自然災害リスク |
| 年間予想損失 | 年間発生頻度 | 発生確率 | 見込まれる | 自然災害リスク |
| 年間予想損失 | 過去の損失率 | 見込まれる結果 | 結果 | 自然災害リスク |

4.1 社会的脆弱性

社会的脆弱性とは、広義には不釣り合いな死亡、負傷、損失、生計の途絶を含む自然災害の悪影響を社会集団が受けやすいことである。社会的脆弱性は、環境災害に対する準備、対応、対処、回復、適応の能力に影響を与えるコミュニティの社会的、経済的、人口統計的、および住宅に関する特性を考慮する。社会的脆弱性のスコアは、同じレベルの他のすべてのコミュニティと比較して、ある郡または国勢調査対象地域の社会的脆弱性の相対的なレベルを表すものである。社会的脆弱性が高ければ高いほど、リスクは高くなる。社会的脆弱性は地理的な場所に特有のものであるため、地理的なリスク因子となる。

サウスカロライナ大学（USC）災害・脆弱性研究所の社会的脆弱性インデックス（**Social Vulnerability Index: SoVI**）の推奨を決定した。SoVIは地域特有の社会的脆弱性の評価であり、コミュニティの災害への備え、対応、回復の能力を低下させると考えられる29の社会経済的変数を用いている。一人あたり所得、失業者数の割合（%）、健康保険に加入していない人口の割合（%）、12年未満の教育を受けている人口の割合（%）、社会保障給付を受けている世帯の割合（%）、アジア人・アフリカ系アメリカ人・ヒスパニック系の各人口の割合（%）等である。郡と国勢調査対象地域の社会的脆弱性スコアは、k-meansクラスタリングを用いて「非常に低い」から「非常に高い」までの5つの定性的カテゴリーに分類された。

4.2 コミュニティのレジリエンス

コミュニティのレジリエンスは、米国立標準技術研究所によって、予測される自然災害に備え、状況の変化に適応し、混乱に耐えて迅速に回復するコミュニティの能力として定義されている²。コミュニティのレジリエンススコアは、結果低減化リスク因子である。コミュニティのレジリエンスは地理的な場所に特有のものであるため、地理的なリスク因子である。

サウスカロライナ大学災害・脆弱性研究所のコミュニティのレジリエンス指標のベースラ

² アメリカ国立標準技術研究所 (NIST). (2020). コミュニティのレジリエンス: <https://www.nist.gov/topics/community-resilience>. から抜粋。

イン (Hazards and Vulnerability Research Institute Baseline Resilience Indicators for Communities: HVRI BRIC) インデックスの推奨を決定した。社会、経済、地域資本、組織力、住宅・インフラ、環境の6種類のレジリエンスを表す49のインデックスが含まれる。ある場所と別の場所を比較し、レジリエンスの特定の要因を特定するために使用することができ、HVRI BRICスコアが高いほど、より強く、よりレジリエンスの高いコミュニティであることを示す。HVRI BRICのコミュニティのレジリエンスの正規化スコアは41.1~64.7の範囲である。コミュニティのレジリエンススコアは、k-meansクラスタリングを用いて、「非常に低い」から「非常に高い」までの5つの定性的カテゴリーに分類された。

4.3 年間予想損失額 (EAL)

EALは自然災害による年間の平均経済損失額である(単位:ドル)。EALは災害毎に計算され、関連する結果(建物、人口、農産物)の損失のみを定量化する。例えば、多くの災害は建物と人口にのみ大きな影響を与えるため、農産物への損失は計算に含まない。しかし、干ばつに対するEALでは、農産物(作物と家畜)に対する損失のみを計算する。人口損失は統計的生命価値(Value of Statistical Life:VSL)アプローチを用いて人口等価値に換算され、死亡者1人または負傷者10人を経済損失760万ドルとして処理するため、FEMAが用いるインフレ調整後のVSL³となる。

EALは、18種類の災害について、自然災害曝露の結果リスク因子、HLRおよび自然災害の年間発生頻度の尤度リスク因子を考慮した乗法方程式を用いて計算される。各結果タイプのEAL値は、ある地域の曝露値に推定年間発生頻度とHLRを乗じることによって計算される(方程式2を参照)。EAL値は、関連する結果タイプ毎に国勢調査区レベル(またはいくつかの災害では国勢調査対象地域レベル)で計算され、各災害のEALの合計を算出する。複合EALも、コミュニティのすべての災害EAL値から合計される(方程式2を参照)。

各コミュニティの災害EAL値に立方根変換を適用し、偏りを解消する。変換後の値は、最小-最大正規化(0.00-100.00スケール)され、各災害のEALスコアが生成される(方程式3を参照)。複合EALスコアは、方程式3で示したのと同じ立方根変換と最小-最大正規化プロセスを使用して計算される。郡と国勢調査対象地域のEALスコアは、k-meansクラスタリングにより、「非常に低い」から「非常に高い」までの5つの定性的カテゴリーに分類された。

表3は、雹に対する郡レベルのEAL計算を簡略化した例である。3種類の結果タイプを雹のEALの計算に含めている。各影響の種類に対する郡の影響度、年間発生頻度、特定のHLRを乗じることによって、その種類のEAL値が決定され、各影響の値を合計して、郡の雹のEAL値の合計が算出される。各影響の値を合計して、その郡の雹のEAL値の合計を算出する。この合計EAL値は、その郡の災害のEALスコアを算出するために使用される。雹のEALの合計値は、他の17の災害のEALの合計値と合計され、同じ方法でスコアリングされた複合EALが計算される。

³ 連邦緊急事態管理庁(FEMA)(2016)。ベネフィット・コスト・サステイナメントとエンハンスメント:ベースライン標準経済価値手法レポート。<https://www.caloes.ca.gov/RecoverySite/Documents/Benefit%20Cost%20Sustainment.pdf>から抜粋。

方程式 2 : 年間予想損失額

$$\begin{aligned}
 \text{Expected Annual Loss}_{\text{Hazard Type Consequence Type}} &= \text{Exposure}_{\text{Hazard Type Consequence Type}} \times \text{Annualized Frequency}_{\text{Hazard Type}} \\
 &\times \text{Historic Loss Ratio}_{\text{Hazard Type Consequence Type}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Expected Annual Loss}_{\text{Hazard Type Total}} &= \text{Expected Annual Loss}_{\text{Hazard Type Building Value}} \\
 &+ \text{Expected Annual Loss}_{\text{Hazard Type Population Value}} \\
 &+ \text{Expected Annual Loss}_{\text{Hazard Type Agriculture Value}}
 \end{aligned}$$

$$\text{Expected Annual Loss}_{\text{Composite}} = \sum_{i=1}^{18} \text{Expected Annual Loss}_{\text{Hazard Type Total } i}$$

方程式 3 : 年間予想損失額スコア

$$\text{EAL Cube Root}_{\text{Hazard Type Total}} = \left(\sqrt[3]{\text{Expected Annual Loss}_{\text{Hazard Type Total}}} \right)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Expected Annual Loss Score}_{\text{Hazard Type Total}} &= \frac{\text{EAL Cube Root}_{\text{Hazard Type Total}} - \text{Min}(\text{EAL Cube Root}_{\text{Hazard Type Total}})}{\text{Max}(\text{EAL Cube Root}_{\text{Hazard Type Total}}) - \text{Min}(\text{EAL Cube Root}_{\text{Hazard Type Total}})}
 \end{aligned}$$

表 3 雹に対する郡レベルの EAL の計算例

| EAL 因子 | 建物価格 | 人口及び人口等価 | 農産物価格 |
|-----------------|-------------|-------------------------|--------------|
| 曝露 | 282.1億ドル | 310,235人または 2,360億ドル | 77,030,000ドル |
| 年間発生頻度 | 3.9 件/年 | 3.9件/年 | 3.9件/年 |
| 過去の損失率 | 3.1e-5 | 1.3e-8 | 3.2e-6 |
| 年間予想損失 (EAL) | 3,470,000ドル | 0.016人または 121,600ドル | 968ドル |

<分析技法>

郡と国勢調査対象地域における18種類の災害によるEALをドル換算するためには、すべての災害において複数の分析技法を利用する必要がある。処理用データベースとしてSQL Serverデータベース環境を構築し、空間解析を実行した。EALは、国勢調査区、国勢調査対象地域、郡の3つの異なる行政階層で計算するため、国勢調査局の2017 TIGER/Lineシェイプファイル等を使い、データセットを構築した。各災害が発生する可能性のある場所を指定するデータベース

内の管理表を使用し、特定の災害が発生しにくい、または発生したことがない地域と、その災害が発生しない地域を論理的に区別した。災害EALは、その災害が発生する可能性があるコミュニティに対してのみ計算される。

ナショナル・リスク・インデックスの強みの一つは、適切と思われる最も低い地理的レベル、主に国勢調査区レベルで地域のEALを決定することである。EALは、特定のコミュニティの年間発生頻度と、それが発生した場合の関連する結果（例えば、その地域で河川氾濫がどのくらいの頻度で発生し、どのような建物、人口、農産物が影響を受ける可能性があるか）を組み合わせることで評価することにより決定される。多くの災害において、年間発生頻度と曝露は、非常に局所的である可能性がある。年間発生頻度と曝露を連携させてモデル化することで、最適な評価が得られる。

データは、州レベルで集計されている。各州内のすべての国勢調査区の曝露度とEAL値を合計し、各災害の結果別にその州の値を算出する。雪崩、沿岸氾濫、地震、竜巻を除くすべての災害について、州レベルの曝露度とEALの集計がこの方法で行われる。雪崩、沿岸氾濫、竜巻の被害とEALの値は、郡レベルから集計される。

各災害に対するEAL値は、各州および各結果タイプのすべての災害によるEALとして、結果タイプ別に提供される。人口が多く建物価格の高い州は高いパーセンタイルに位置し、人口が少なくまばらな州は低いパーセンタイルに位置している。

各災害のEAL因子は、空間的な災害情報の1つ以上の情報源から導き出される。これには、過去の災害発生の時空間記録、および災害発生による経済損失の郡全体の記録などが含まれる。空間ソースデータの形式は、災害によって異なる。年間発生頻度と曝露の計算には、通常、過去の災害発生の時空間記録か確率的モデリングが必要である。均一な精度を得るために空間的災害ソースデータをベクトルポリゴン形式に変換し、国勢調査区または国勢調査対象地域に交差させた。

5. 自然災害の年間予想損失係数

ナショナル・リスク・インデックスでは、自然災害をEALで表し、これには自然災害の年間発生頻度、曝露、HLRのデータが組み込まれている。18種類の災害に一貫性を持たせるため、EAL係数の計算ではすべての方法論的プロセスを通じて単一の「メンタルモデル」が活用された。

5.1 年間発生頻度

自然災害の年間発生頻度は、1年あたりの災害発生の予想頻度または確率として定義される。年間発生頻度は、一定期間に毎年記録された災害発生数、または毎年災害が発生するとモデル化された確率のいずれかから導かれる。ナショナル・リスク・インデックスは、自然災害がまだ記録されていない場所で発生する可能性があり、記録されていない場所で災害が発生した可能性があることを考慮している。そのため、ナショナル・リスク・インデックスには、ハリケ

ーン、暴風雪、地すべり、竜巻、津波など、特定の地理的地域や災害に対する代表的な年間発生頻度の最小値が組み込まれている。

選択されたデータソースとしては、米国立気象局（National Weather Service : NWS）、米国海洋大気庁（National Oceanic and Atmospheric Administration : NOAA）、米国地質調査所（U.S. Geological Survey : USGS）、米国陸軍工兵隊（U.S. Army Corps of Engineers : USACE）、スミソニアン・データベース、米国農務省（U.S. Department of Agriculture : USDA）が挙げられる。

年間発生頻度は、与えられた災害に対する予想頻度である。過去の災害発生数は、発生した明確な災害事象の数（例：地域を襲ったハリケーン）または災害が発生した日数（例：熱波事象が報告された日数）を定量化したものである。

5.2 曝露度

曝露度は、自然災害の発生にさらされる可能性のある建物、人口、または農産物の代表的な値として定義される。各災害について、入手しやすい全国レベルのデータを持つデータソースが選択され、空間分析が行われ、曝露領域が計算される。

各災害のソースデータの最初の空間処理は、曝露地域を特定するために使用される。データソースは、災害毎に、入手可能な最良の全国レベルのデータに基づいて、その正確さ、長期の記録期間、および空間的な構成要素のために選択された。曝露データの提供者は以下の通りである。

- ・米国海洋大気庁（NOAA）
- ・USC 災害・脆弱性研究所
- ・米国空間災害事象および損失データベース（SHELDUS）
- ・米国陸軍工兵隊（USACE）
- ・米国地質調査所（USGS）
- ・米国農務省（USDA）
- ・米国国立気象局（NWS）
- ・連邦緊急事態管理庁（FEMA）

国勢調査対象地域および郡レベルに曝露が集計される。曝露をモデル化するための一般的なアプローチは以下の通りである。

1. **広範な災害の発生曝露**：管理区域全体が曝露されていると見なされる。このアプローチは範囲が行政区域全体に及ぶ可能性が高く、境界が明確でない災害に活用される。
2. **開発地域/農業地域密度集中型曝露**：行政区域と交差する決定された曝露範囲に行政区域の開発された土地内の人口または建物価格のいずれかの密度を乗じ、災害に対する結果のワーストケース濃度を算出する。農産物については、行政区域内の農地における作物および畜産物の密度を用い、曝露度を算出する。
3. **事前に定義された代表的な曝露**：専門家が代表的な曝露度や地域をあらかじめ定義してお

く方法。

曝露度は、国勢調査区レベルで計算され、その後、親国勢調査区または親郡内の国勢調査区の曝露度を合計することにより、国勢調査対象地域および郡レベルに集約される（ただし、雪崩、干ばつ、地震および竜巻は、まず、国勢調査対象地域レベルで計算される）。

5.3 自然災害の過去の損失率（HLR）

HLRは、1回の災害発生によって失われると予想される曝露結果タイプ（建物価格、人口、農産物価格）の割合の地域固有の推定値である。概念的には、過去の災害発生に関連する損失率の平均値であり、将来の災害発生の潜在的な影響を推定するために使用される。この値の決定を開始するために、ベース（事象または事象発生日）あたりの損失率（LRB）は、過去の損失の原因となる災害発生ごとに、損失の値に関連する結果の種類ごとに曝露した値で割ったものとして計算される。

次に、HLRの精度と地理的特性のバランスをとるために、複数の地理的レベル（郡、周辺地域、地域、全国）で個々のLRBを用いてベイズ信頼度分析を実施する。結果として得られるHLR（結果の種類別）は、災害に関連する地理的レベルの結果（Loss Ratio per Basis:LRB）の様々な地理的グループの重み付け平均の合計であるベイズ信頼度調整後比率となる。郡、災害の種類、結果の種類を組み合わせごとに計算されたこのベイズ信頼度調整後HLR値は、1回の災害発生で予想される曝露結果タイプの値に対する損失の比率の予測として機能する。

HLRの計算では、ベイズ信頼度空間モデリング分析を行う前に、いくつかの災害についてゼロ損失の災害発生も考慮する。これにより、EAL値を過大評価することなく、HLRにEAL式内の年間発生頻度を乗じることができるようになる。

<ソースデータ：SHELDUS>

アリゾナ州立大学（ASU）の米国空間災害事象・損失データベース（SHELDUS）の損失データは、ほとんどの災害についてHLRを計算するために使用されている。SHELDUSは、ほぼすべての災害に対応する郡レベルのデータを提供している。SHELDUSは災害の発生を危険タイプ別および災害別に特定することで、より詳細な情報も提供する。SHELDUSは、建物、人口、農産物の損失に関する全米で入手可能な最も優れたデータセットである。ASUはウェブサイトを通じて、1960年以降、月、年、郡ごとに危険による物的損失、農産物の損失、負傷、死亡を集計したSHELDUSの要約データを提供している（表4）。

表4：SHELDUSの危険発生データの例

| SHELDUSのID | 災害発生日 | 災害終了日 | 郡FIPS | 死亡 | 負傷 | 物的損失 (ドル) | 農産物損失 | 危険 |
|------------|-----------|-----------|-------|----|----|--------------|-------|----|
| 25773 | 1/22/1999 | 1/22/1999 | 01033 | 0 | 0 | 5000 | 0 | 雹 |

| | | | | | | | | |
|---------|------------|------------|-------|---|-----|-----------|---|------------------|
| 26427 | 9/14/1999 | 9/14/1999 | 04013 | 0 | 2 | 7,000,000 | 0 | 激しい暴風雨/雷を伴う暴風雨/風 |
| 9884227 | 12/17/2010 | 12/20/2010 | 06003 | 0 | 0.5 | 100,000 | 0 | 冬型天候 |
| 9884228 | 12/17/2010 | 12/20/2010 | 06017 | 0 | 0.5 | 100,000 | 0 | 冬型天候 |
| 27491 | 9/18/1999 | 9/18/1999 | 12099 | 0 | 0 | 1,000 | 0 | 雹、風 |

損失データソースにある結果タイプは、曝露について測定された結果タイプに直接的に付随するものとして扱われる。建物損失は、SHELDUSが報告した災害発生による財物損失のドル建てと定義される。人口損失は、SHELDUSが報告した災害による死亡者数および負傷者数と定義される。死亡と負傷を組み合わせるために、負傷は死亡の10分の1として数える。農産物損失は、SHELDUSが報告した災害発生による農作物と家畜の損失額（単位：ドル）と定義される。

<過去の損失率手法>

HLR は、個々の災害発生損失率（ここではLRBと呼ぶ）の平均値として計算することができる。SHELDUSから取得した期間中に損失の原因となる災害発生を経験していない多くの郡は、同様の特性を持ち、災害による損失を経験した郡と近接している可能性がある。ベイズ信頼度空間行列を適用して損失率データを空間的に平滑化し、異常な災害発生がデータを歪めることなくHLRが合理的に表現されるようにすれば、HLRのよりよい近似が達成される。

<ゼロ損失災害の発生>

災害は、建物、人口、農産物に記録的な損失をもたらすことなく発生することがある。例えば、雷は高い頻度で落ちるが、損失の原因となるような発生はほとんどない。ほとんどの災害ソースデータの記録期間は2017年までしかないが、SHELDUSのデータの記録期間は2019年までである。このギャップを考慮し、災害ソースデータから、災害の総発生数を災害記録期間で割った郡レベルの年率を算出した。この率をSHELDUSの記録期間内の年数に乗じることで、予想される災害発生件数を推定する。ゼロ損失記録を含めずに損失率の平均と分散を計算すると、ゼロ損失記録を含めた場合とは全く異なる結果が得られる。

出典：Federal Emergency Management Agency (FEMA). National Risk Index: Technical Documentation. 2021.

<https://hazards.fema.gov/nri/> (2023年5月1日アクセス可能)