

多次元世界地図システムを対象とした環境変動・災害解析のための多層的時系列リスク／レジリエンス算出方式

メタデータ	<p>言語: ja</p> <p>出版者: 武蔵野大学アジアAI研究所</p> <p>公開日: 2024-03-29</p> <p>キーワード (Ja): サイバーフィジカルシステム, CPS, SPA, オープンデータ, マルチスペクトル画像, 人工衛星画像, Landsat, 土砂災害, 地滑り, 災害対策, 防災, リスク・アセスメント, 災害レジリエンス, リモートセンシング, GIS, SDGs, SDG9, SDG11, 知識共有, リスクホットスポット, 多次元世界地図, 5D World Map System, 都市開発, 地球環境</p> <p>キーワード (En):</p> <p>作成者: 佐々木, 史織, 清木, 康, 濱野, 周</p> <p>メールアドレス:</p> <p>所属:</p>
URL	<p>https://mu.repo.nii.ac.jp/records/2000267</p>

[論文]

多次元世界地図システムを対象とした 環境変動・災害解析のための 多層的時系列リスク／レジリエンス算出方式

佐々木 史織

清木 康

濱野 周

概要

「SPA 型 5 次元世界地図システム」は、物理空間（実空間）の実データ資源を用いて環境現象を検出し、それをサイバー空間にマッピングして知識ベースや解析計算を行い、計算結果を実空間に可視化して環境現象や因果関係・影響関係を表現するサイバー・フィジカル・スペース統合を実現する。本論文では、5 次元世界地図システムと「時系列多層リスク・レジリエンス計算」方式の地球環境変動・災害解析への重要な応用例として、地球環境現象や地域環境現象に対して、短期的・長期的な変化の観点から適切かつ緊急な解決策を提示する。本方式は、過去の時系列変化の履歴と多次元的要因の重なりから、対象地域・都市の災害に対する現在のリスクとレジリエンスを算出し、近未来を予測するものである。本方式は、多次元で異質な変数を正規化により比較演算可能な形に変換することで、過去の各変数の変化量を反映した総集計値として災害に対するリスクとレジリエンスを算出する。実装と実験として、都市部における植生や森林分布の時系列変化とその関係を分析することで、都市災害レジリエンスにおける森林の役割を評価する方式に適用する。具体的には、GIS、衛星データ、人口統計データ、都市インフラデータ、災害データを用いて、①人口密度、②都市インフラ整備、③森林分布と都市災害発生の関係を分析し、「都市-森林-災害リスク/レジリエンス」を算出する。

Keywords

サイバーフィジカルシステム, CPS, SPA, オープンデータ, マルチスペクトル画像, 人工衛星画像, Landsat, 土砂災害, 地滑り, 災害対策, 防災, リスク・アセスメント, 災害レジリエンス, リモートセンシング, GIS, SDGs, SDG9, SDG11, 知識共有, リスクホットスポット, 多次元世界地図, 5D World Map System, 都市開発, 地球環境

1. はじめに

気候変動の影響により、近年、森林火災、洪水、浸水、地滑りなどの大規模災害が世界各地で頻発している。国連防災機関（UNDRR）[19]が指摘するように、持続可能な都市（SDG9、SDG11）

や災害に強いまちづくり（仙台フレームワーク[20]）の実現のためには、災害情報をリアルタイムで広域に収集し、オープンデータとして公開・アクセスし、脆弱な地域を早期に発見して対策を講じることが本質的に重要である。実際、情報やデータの不足により、正確な現状把握や災害リスクの高いホットスポットの特定が困難なケースも多く報告されている。

また、災害リスクのホットスポットを把握するだけでなく、災害に強い地域を推定することも、能力構築のための重要かつ喫緊の課題である。仙台フレームワーク[20]が示しているように、「新たな災害リスクを防止し、既存の災害リスクを軽減するための行動：(i)災害リスクの理解、(ii)災害リスクを管理するための災害リスクガバナンスの強化、(iii)レジリエンスを高めるための減災への投資、(iv)効果的な対応のための災害への備えの強化、復旧・復興における“Build Back Better”」が重要である。

これらの問題に対する解決策の一つとして、衛星マルチスペクトル画像と社会経済オープンデータを利用して、急激な環境変化や災害が発生している国の特定地域のリスクと脆弱性を検出することが考えられる。

本方式の目的は、単に可視化するだけでなく、対象地域の災害リスクに対する脆弱性と社会のレジリエンス（回復力）を算出することで、地球規模・地域規模の環境現象に対して、短期的・長期的な変化を時系列的・重層的に捉え、適切かつ緊急な解決策を講じるための価値観とすることである。

本研究では、オープンな衛星データやリモートセンシング技術を用いて、被災地（想定）のリスクやレジリエンスを推定する「多層的時系列リスク／レジリエンス計算方式」について述べる。本方式は、過去の時系列変化の履歴や多次元的な要因の重なりから、対象となる地域や都市の災害に対する現在のリスクやレジリエンスを算出し、近い将来の予測を可能にする。

実現・実装にあたっては、豪雨、洪水、地震などの自然災害と、土地利用開発、伐採、農業、建築などの人間の社会経済活動が複合して発生すると考えられる森林減少と地すべり現象に焦点を当てた。本稿では、(a)土砂災害と洪水リスク、(b)人口増加、(c)インフラ整備、(d)森林分布のデータを用いた実験により、本方式の実現可能性と有効性についてを中心に述べる（2015年と2020年の日本の茨城県）。

本研究で実現した多層的時系列リスク／レジリエンス計算方式は、5次元世界地図システム[1]-[8]への適用を想定している。

「SPA型5次元世界地図システム」[1]-[8]は、地球環境や地域環境における自然現象や災害に関する「地球環境知識・情報資源」を記憶・検索・分析・可視化するための地球環境知識統合処理システムである。本システムは、環境に関するマルチメディアデータの共有・蓄積・可視化による環境状況・現象の分析を、協調的かつグローバルな環境分析の新しいグローバルシステムアーキテクチャとして実現する。本システムは、遠隔・双方向・リアルタイムな異分野間の環境研究交流を実現する。

重要な地球環境システムとして、我々は多次元データマイニング・可視化システム「5次元世界地図システム」を提案している[1]-[8]。このシステムの最大の特徴は、「多次元意味空間」における意味論的データマイニング・可視化・解析と、意味論的機能による「意味距離コンピュ

ーティング」を実現することである。この空間は、意味的等価性、類似性、差異を距離関数として動的に計算するために作られる。

一方、リモートセンシングの分野では、衛星マルチスペクトル画像を用いて、正規化植生指標 (NDVI)、正規化水指標 (NDWI)、正規化積雪指標 (NDSI) などの環境指標を用いて、地表面の環境変化や土地利用状況を推定する研究が数多く行われている。これらのリモートセンシング技術を活用し、本研究の目的のための知識ベースを作成するために応用する。

また、オープンデータの衛星マルチスペクトル画像を利用することで、安価で簡便な推定方式により、比較的高い精度で被災面積を推定することができる。この特徴により、本方式は LDC や小規模自治体に広く適用可能である。特に、この方式は、被災地の早期評価や、被災地がどのような状況にあるのかを把握するのに有効である。

本論文では、森林伐採と地滑り災害を例として取り上げ、オープン衛星データとオープンソースの GIS ソフトウェアを用いた実装と実験を行う。さらに、本方式の多次元世界地図システムへの適用可能性についても議論する。

2.5 次元世界地図システムの概要

5次元世界地図システム[1]-[8]は、マルチメディアデータの意味的・時間的・空間的分析を可能にし、分析結果を5次元の動的歴史地図 (5D World Map) として統合する知識表現システムである。5次元世界地図の構成要素は、空間次元(3D)、時間次元(4D)、意味次元(5D)である。

単語、文書、マルチメディア、事象、現象などの「意味」は「文脈」によって異なるという概念を実現するために、意味連想検索法[9][10]が本システムに適用されている。対象となる各マルチメディアデータの、あらゆる事象、現象、トピックに関するセマンティクスは、多次元ベクトル空間上で計算され、時系列ワールドマップ空間上の1次元ランキングとして表現される。本システムの最大の特徴は、ユーザの視点や現象における文脈の多様性に応じて、文脈に依存した様々なパターンのソーシャルストーリーを動的に生成することである。

多次元データマイニング・可視化システムである5次元世界地図システム[1]-[8]は、重要な地球環境分析・知識共有システムとして提案されている。この地球環境分析システム的设计においては、環境状況や現象に関連する環境メディアデータを検索・分析するための方法論に着目している。本システムは、メディアデータのセマンティックコンピューティングと検索を実現し、キーワード、画像、センシングデータ、音声データ、文書、センシングデータ間の意味的相関を、ユーザの文脈や分析ポイントに応じて、文脈依存的に動的に計算する。本システムの最大の特徴は、意味距離関数を用いた多次元意味空間における意味計算を実現することである。この空間は、意味的等価性、類似性、差異を距離関数として動的に計算するために作られる。

5次元世界地図システム[1]-[8]は、様々なマルチメディアデータを共有・可視化するための様々な機能を提供してきた[4][5][7][8]。5次元世界地図システムのマルチメディアやリアルタイムセンシングデータの解析・可視化機能を組み合わせることで、環境解析をより豊かで深いものとし、環境知識の協創活動に貢献することが提案されている。また、国連 ESCAP では、持続可能な開発目標 (SDG14、SDG9、SDG11) のモニタリングのために、持続可能な海洋と災害に

強い社会の構築のための5次元世界地図システムの多次的・多層的な可視化とモニタリング・分析・警告機能が提案されている[7][31]。

現在、5次元世界地図システムは、地球環境セマンティックコンピューティングシステムとして、SDG14、国連 ESCAP の Closing-The-Loop プロジェクト[32]において、ローカルおよびグローバルマルチメディアデータリソース[33]を用いて海洋環境状況を観測するためにグローバルに活用されている。このプラスチックゴミ検出・削減プロジェクトでは、5次元世界地図システムに AI センシングの新機能を組み込み、SPA (Sensing-Processing-Actuation) プロセスに分析可視化機能を適用している。

3. 関連研究

3.1. 5次元世界地図システムによる多層的可視化

5次元世界地図システムの多層可視化機能とその海洋環境解析への応用[7]、災害レジリエンス・モニタリングへの応用[8]が発表されている。本稿で紹介する方式は、これらの研究成果に基づいて、グローバルビューとローカルビューの相互作用から災害回復力を分析・予測する方式である[7][8]。

3.2. 5次元世界地図システムによるマルチスペクトル画像解析

SPA を用いたマルチスペクトル画像解析[2]によるグローバル環境解析とローカル環境解析[11][13]や、サンゴの健全性モニタリングへの応用[11][13]が提案されている。また、衛星マルチスペクトル画像や SAR データ解析による森林減少解析[12][14][17]や、UAV を用いた農業モニタリング・解析のためのマルチスペクトル画像解析[16][18]が提案されている。

3.3. 災害リスク分析

マルチスペクトル衛星画像やリモートセンシングを用いた災害リスクの可視化システムや防災マップは数多く存在し、国や自治体が提供する災害に関するオープンデータプラットフォームも存在する[21][22][23][24]。一方、これらの技術を用いた実際の被災地の推定や可視化に関する研究は、GIS、防災、環境工学などの分野で局所的に散見される。しかし、災害データの分析・可視化・共有システムを備えたグローバルに集約された情報プラットフォームは、まだ研究開発段階にある[25]。

また、衛星マルチスペクトル画像やリモートセンシングを用いた災害リスク検知に関する研究も多い。例えば、高解像度の衛星画像を用いて、衛星画像から土砂災害の素因を評価し、地すべりのリスクを予測する研究が提案されている[26]。また、別の研究では、マルチスペクトル画像から可視画像と赤外面像を用いて、土砂災害リスクに大きく関連する反射率特性を抽出する方法が提案されている[27]。彼らの研究論文では、高精度な衛星マルチスペクトル画像を用いた撮影時の災害被害予測を発表している。

森林減少の因果関係については、熱帯地域における森林減少の原因を焼畑農業、人口増加、

貧困、道路建設などの側面から論じた研究がある[29]。この文献に基づき、非熱帯地域でも森林減少の原因として挙げられている人口増加と道路建設に焦点をあてて実施した。日本の関東地方（茨城県）における森林との関係を可視化し、森林の重要性とその効果・影響を示す。急傾斜地における都市化と地すべりとの関係を分析した別の研究がある[30]。本研究では、都市部の宅地開発が急傾斜地に近づきつつあり、これらの斜面に隣接する宅地で被害が発生することが多いことから、降雨要因も含めた土砂災害リスクの増大に着目した。

技術面では、オープンソースの GIS ソフトウェアである QGIS を用いた衛星画像解析手法が広く紹介されている[28][42]。本研究では、QGIS の利用・活用方法について言及し、様々なオープンデータとの統合利用の可能性を示す。

本研究では、都市部における地理システム特性、土地利用変化、地すべり災害の特性に着目し、都市部における災害と森林の関係を重層的に分析・可視化する方式を設計・実装する。

4. 環境変化・災害に対する多層的時系列リスク／レジリエンス計算方式

多層的時系列リスク／レジリエンス計算方式は、5次元世界地図システム[1]-[8]への適用を想定している。本方式を適用した災害データ多次元地図可視化システム（5次元世界地図システム）の全体構成図、システム構成図、時系列多層リスク・レジリエンス計算法の概念図については、文献[45]を参照されたい。

多層的時系列リスク／レジリエンス計算方式は、「5次元世界地図システム」と呼ばれる多次元世界地図システムのサブシステム（サブシステム1）として実現される。図3は、サブシステムの全体設計と5次元世界地図システムとの接続図は、文献[45]を参照されたい。

本システムは以下の機能から構成される。

1) 災害データベース管理機能 災害データベース管理機能：対象地域を撮影した画像やマルチスペクトル画像、環境センシングデータ、統計データ、インフラ地理データなどのメタデータを登録・管理する。

2) 多層的時系列リスク／レジリエンス計算機能（サブシステム1）

3) 被災地推定・可視化機能[34]（サブシステム2）

4) 多層可視化機能 2)、3)の機能で得られた結果を基に、1)で蓄積された環境センシングデータ、統計データ、インフラ地理データ等の他のデータを多層レイヤとして地図上に射影する。

4.1. 多層的リスク／レジリエンス計算方式

時系列多層リスク／レジリエンス計算法の多層計算部分は、以下の6つのステップで定義される。各ステップのイメージを図1に示す。このプロセスでは、多次元的、分散的、異種的な変数を格子状に正規化し、特定地域の災害リスク／レジリエンスを総合値として算出する。

STEP 1：時空間情報を持つ現象を目的変数 y とし、時空間情報を持つ複数の現象を説明変数 (x_1, x_2, \dots, x_n) とする。

STEP 2： y と x_1, x_2, \dots, x_n の地理情報データを収集する。地理情報データとしては、ベク

タデータ（点・線・多角形、シェープファイル）、ラスタデータ（画像、GeoTIFF ファイル）、メッシュデータ（AAIGrid ファイル）、点群データ、CSV テキスト、KML/KMZ が一般的である。

STEP 3: 各変数の地理情報データを地理情報システム (GIS) のレイヤ I_i として設定する。レイヤのセットは、 I_y および $I_{x1}, I_{x2}, \dots, I_{xn}$ として定義される。

STEP 4: 様々な粒度のレイヤ間でリスクやレジリエンスを計算できるように、共通のグリッド $G: \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ を設定する。各レイヤのグリッドの値（点の密度、画素値など）は、 $I_{y1} = (g_{1y1}, g_{2y1}, \dots, g_{my1})$, $I_{x1} = (g_{1x1}, g_{2x1}, \dots, g_{mx1})$, $I_{x2} = (g_{1x2}, g_{2x2}, \dots, g_{mx2})$ などの行列またはベクトルで表現される。

STEP 5: 各レイヤ I_y と $I_{x1}, I_{x2}, \dots, I_{xn}$ の正規化。

STEP 6: 各グリッド値について、算術演算子 (+, -, *, /) のパフォーマンスで合計リスク値またはレジリエンス値 g_{jX} を計算することによって、説明変数の統合レイヤ I_X を作成する。例えば、値の累積が行われ、作成されたレイヤ I_X とレイヤの各グリッドの値 g_{jX} は以下のように表される:

$$g_{jX} = \sum_{i=1}^n (g_{jXi})$$

$$I_X = (g_{1X}, g_{2X}, \dots, g_{mX})$$

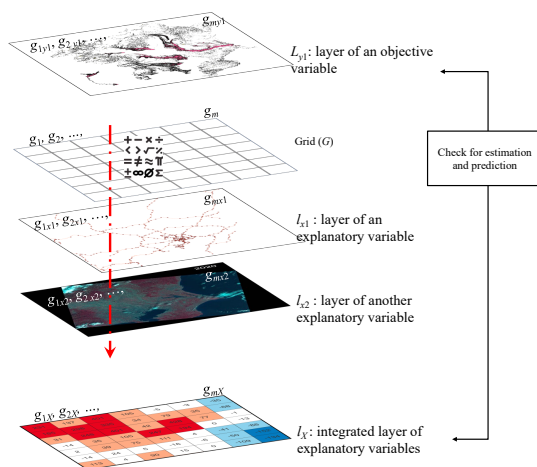


図 1. 多層的风险/レジリエンス計算方式 [45]

4.2 時系列リスク/レジリエンス計算方式

時系列多層リスク/レジリエンス計算法の時系列計算部分は、以下の 4 つのステップで定義される。各ステップのイメージ図は文献[45]に示されている。このプロセスでは、対象地域の災害リスク/レジリエンスに関する多次元的、分散的、異種的な変数集合の中から、正規化されたグリッド形式で各変数の時系列変化を計算する。

STEP 1: 時空間情報を持つ現象を目的変数 y とし、時空間情報を持つ複数の現象を説明変数 (x_1, x_2, \dots, x_n) とする。

STEP2：対象地域で災害や環境変化が発生した時刻 (t_i) の前 ($t_i - 1$) と後 ($t_i + 1$) に、 y と x_1, x_2, \dots, x_n の地理情報データを収集する。

STEP 3：各変数の地理情報データを地理情報システム (GIS) のレイヤ I_i として設定する。レイヤの集合を I_y および $I_{x_1}, I_{x_2}, \dots, I_{x_n}$ として定義する。

STEP 4: 前 ($t_i - 1$) と後 ($t_i + 1$) のレイヤ間の差を計算する。

STEP 5：災害や環境変化が発生した回数が多い場合 ($t_i \mid i=1, 2, \dots, q$)、 (t_1-1) 、 (t_1+1) 、 (t_2+1) 、 \dots 、 (t_q+1) の間でSTEP4を繰り返す。

ラスタデータ (画像、GeoTIFF ファイル) を用いた災害の影響や環境変化の検出には、正規化差分植生指数 (NDVI)、正規化差分水指数 (NDWI)、正規化差分積雪指数 (NDSI)、正規化焼失率 (NBR)、正規化差分建造物指数 (NDBI) 等の“正規化差分環境指数”を用い、特に現象発生前後の被災面積を推定する。これらの各指標は、地滑り、洪水、雪崩、広域森林火災、建物による耕作地の減少などの環境変化を検出するために使用される。

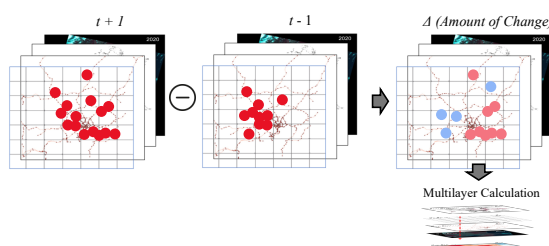


図 2. 時系列リスク／レジリエンス計算方式 [45]

5. 実現方式

本方式を実現するため、社会経済指標データ、人口統計データ、自然災害データ、都市インフラデータ、衛星画像データなどの時系列地理情報データを用いて、以下の処理を実施する。本実現では、都市部における植生や森林分布の時系列変化とその関係を分析することで、都市災害レジリエンスにおける森林の役割を評価する手法に適用する。具体的には、GIS、衛星データ、人口統計、都市インフラ、災害データを用いて、災害発生と 1) 人口密度、2) 都市インフラ整備、3) 森林分布の関係を分析する。この分析結果から、森林、都市開発、自然災害の関係 (以下、「森林-都市-災害レジリエンス」) を評価する。

本実現では、時系列多層リスク／レジリエンス計算を、GIS を用いた以下のステップにより具体的に実現する。

STEP1：対象地域の衛星マルチスペクトル画像を用いて、ベースとなる近赤外帯 (NIR) を可視化する。

STEP2：衛星マルチスペクトル画像から植生指数 (NDVI) を算出し、可視化する。

STEP3：対象地域の人口統計、都市インフラ、災害データなどのオープンな地理情報データを取り込み、仮想レイヤを作成。

STEP4：仮想レイヤを切り替え、ベースマップと重ね合わせることで、時系列多層リスク／レ

レジリエンスを算出し、「森林・都市・災害のレジリエンス」を分析する。

STEP5：対象地域のうち、大きな変化が見られる部分をズームアップし、森林・都市開発・自然災害の関係の詳細を確認する。

5.1. 対象データと使用ツール

本実施形態では、以下の4種類のデータについて、時系列多層リスク・レジリエンス計算を具体的に実現する。

1. 衛星マルチスペクトル画像を用いて植生分布を算出し、時系列変化(差分)を算出する。
2. 人口統計データとして、時系列人口データから人口増加率を計測。
3. 都市インフラデータとして、高速道路建設の地理データを用いて、植生分布ベースマップにオーバーレイする。
4. 災害リスクデータとして、土砂、洪水、浸水ハザードゾーンのデータを用いて、植生分布基盤地図に重ね合わせる。

オープンソースのGISであるQGIS[42]を用いる。実験に用いた具体的なデータについては、セクション6で紹介する。

5.2. データ処理

5.2.1 グリッドの作成

QGISの調査ツールを用いてグリッドデータ(1km²)を作成した。本実施形態では、グリッド数は13,392である。

5.2.2 線・点(ベクトルデータ)

線・点データ(交通データ等)は、シェープファイルを用いて以下の手順で計算可能な形に加工する。線と点の数を数え、各格子の値に変換する。

5.2.3 ポリゴン(ベクトルデータ)

ポリゴンデータ(災害発生状況等)は、シェープファイルを用い、以下の手順で計算可能な形に加工する。

STEP 1：各ポリゴンの重心を計算する。

STEP 2：重心点の数を数え、各グリッドの値に変換する。

5.2.4 画像データ(ラスターデータ)

衛星画像データ(森林分布など)は、以下の手順で計算可能な形に加工される。

STEP 1：LandBrowser [9]でLANDSAT8から解析対象地域のバンド2、3、4、5の雲量10を抽出する。

STEP 2：バンド5(近赤外NIR)とバンド4(可視光赤色R)を用いて正規化植生指数(NDVI)

をラスター計算機を用いて以下の式で算出する。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{R}) / (\text{NIR}+\text{R})$$

STEP 3: Band 2, 3, 4, 5 を使用して QGIS で仮想ラスターを作成します。

STEP 4: カラーランプを使用して仮想ラスターをフォルスカラーに変更する

STEP 5: ラスターデータをポリゴンデータに変換(ポリゴン化)

STEP 6: 各ポリゴンのセントロイド(点)を計算する

STEP 7: セントロイド(点)の数を数え、各グリッドの値に変換する。

5.2.5 総合リスク/レジリエンスの計算

STEP 1: データ ID を用いた「属性の空間結合」により、各変数の時系列グリッドレイヤを統合する。この実装では、“intersects”、“overlaps”、“contains”、“insin”、“crosses”、“touches”などの幾何学的関係から “equals” を選択する[35]。

STEP 2: 時系列計算では、2つの入力レイヤの差分を計算し、多層計算では、複数レイヤ間の累積を行う。

6. 実験

本多層的時系列リスク/レジリエンス計算方式の実現可能性を検証するため、関東地方の茨城県における森林関連災害の時系列データ(2015~2020年)を例として実験を行った。具体的には、都市災害レジリエンスにおける森林の役割を評価する目的で、森林、都市開発、自然災害の関係を「森林-都市-災害レジリエンス」と定義し、偏在する時系列地理データ、社会経済指標データ、自然災害データを用いて、都市部における植生・森林分布の時系列を分析・可視化する方式について述べる。

まず、災害に対する脆弱性を説明変数 y とし、1) 災害リスク・ハザード、2) 人口密度、3) 交通(高速道路)密度、4) 森林分布を目的変数 x_1, x_2, x_3, x_4 とする。第二に、2015年のデータを用いて多層計算関数を、2015年と2020年のデータを用いて時系列計算関数を検証する実験を行う。第三に、災害に対する脆弱性と、1) 災害リスク・ハザード、2) 人口密度、3) 都市インフラ整備、4) 森林分布との関係を分析するために、総合リスク値を検討する。最後に、森林の重要性とその効果・影響を正確に評価する方式の実現可能性について議論する。

実験1: 多層的リスク/レジリエンス計算機能の検証

実験2: 時系列リスク/レジリエンス計算機能の検証

実験3: 総合リスク/レジリエンス計算機能の検証

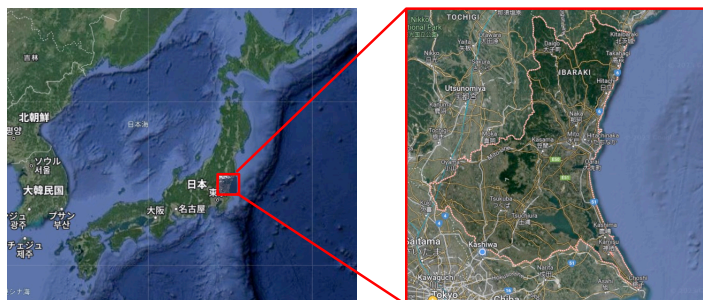


図 3. 解析対象地域（茨城県）

実験用データ

- 災害データ 1: 国土データ[13]から取得した 2015 年・2020 年土砂災害警戒区域データ（ポリゴン、シェープファイル）。
- 災害データ 2: 国土交通省国土情報[14]より入手した 2015 年・2020 年洪水浸水想定区域データ（ポリゴン、シェープファイル）。
- 人口統計データ: 国土交通省「国土調査データ」[11]（国土調査データ（H30 国局推計）の 1km メッシュによるグリッド・人口推計）より取得した 2015 年・2020 年の東京圏の人口分布データ。
- 都市インフラデータ: 2020 年高速道路時系列データ（線・点、Shape ファイル）国土交通省国土情報[12]より取得。
- 森林分布データ: USGS [36] および Copernicus Open Access Hub [41] から入手した 2015 年および 2020 年の関東地方の衛星 Landsat8 マルチスペクトル画像（GeoTiff データ）。

6.1. 実験 1: 多層的リスク/レジリエンス計算の検証

図 4 は 2015 年の茨城地域の地理情報データである。(a)災害リスク(ポリゴン、ベクトルデータ)、(b)人口分布(グリッド、ベクトルデータ)、(c)交通インフラ(ライン、ポイント、ベクトルデータ)、(d)植生分布(NDVI, ラスターデータ)を示す。

図 5 は、図 4 と同じデータを 5.2 節で説明したデータ処理方法により格子状に変換したものである。この処理により、分散した異種データが正規化され、計算可能となる。栃木県に近い山間部である北部は災害リスクが高く、比較的大きな都市（つくば市、水戸市、ひたちなか市、日立市）がある中部は人口密度が高く、東京に近い南部は交通密度が高く、西部は森林密度が高いことが把握できる。

図 6 は、4.2 節で述べた多層計算法による総合リスク計算結果である。この結果からは、図 8 からは把握できないトータルリスク分布が確認できる。図 5 からは、独立層の値や分布は観察できるが、各グリッドのトータルリスクは人間の目では推定が困難である。この計算によってのみ、総合リスク分布を評価することができる。

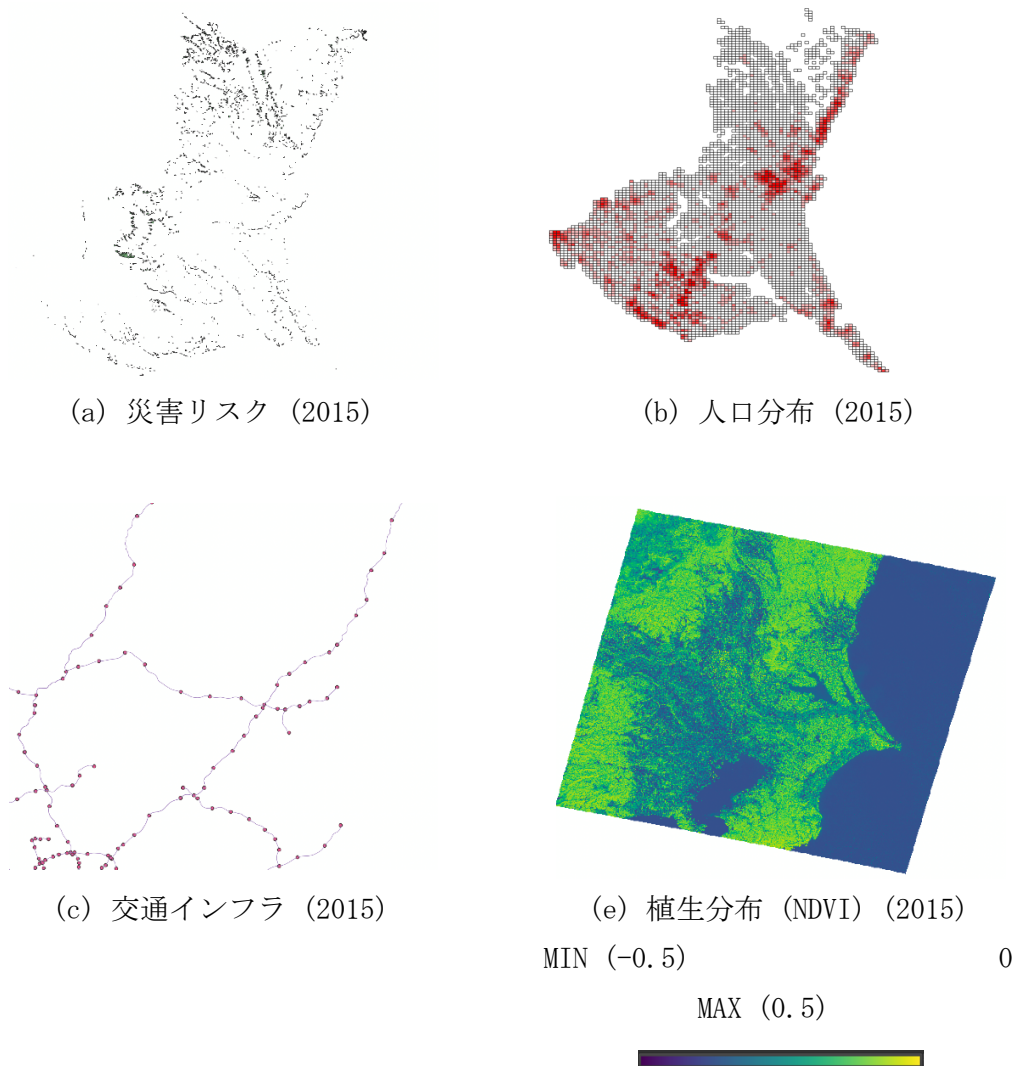


図4. 2015年茨城県の元データ：(a)災害リスク(ポリゴン、ベクトルデータ)、(b)人口分布(グリッド、ベクトルデータ)、(c)交通インフラ(高速道路)(線・点、ベクトルデータ)、(d)植生分布(ラスタデータ)

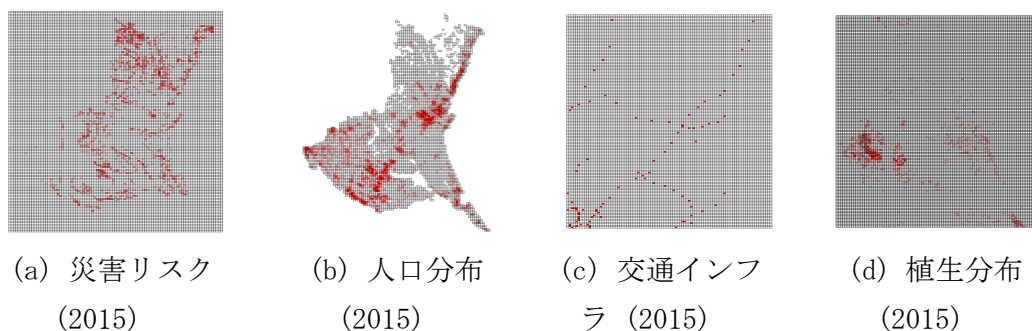


図5. 図4の2015年のデータをグリッドデータに変換したもの：(a)災害リスク、(b)人口分布、(c)交通インフラ(高速道路)、(d)植生分布(NDVI)

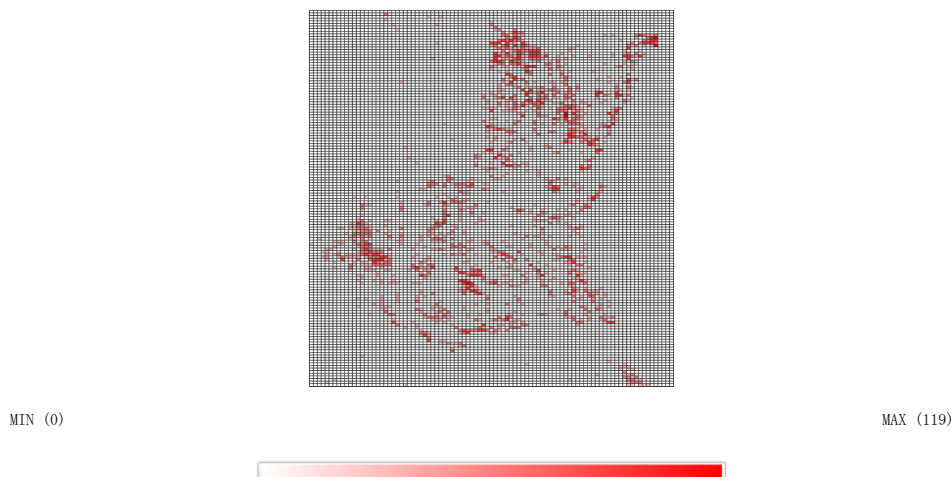


図 6. 2015 年の総合リスク計算結果（人口なし）

図 4～図 6 に示した実験 1 の結果から、本方式により、対象地域の災害に対する総合的なリスク／レジリエンスを、多次元的、分散的、異種的な変数を正規化グリッド形式で集約した値として算出できることが示された。

6.2. 実験 2：時系列リスク／レジリエンス変化計算の検証

図 7、図 8、図 9、図 10 は、それぞれ災害リスク、人口、交通、森林の地理的分布の 2015 年から 2020 年までの時系列変化計算結果である。各図の(a)2015 年と(b)2020 年からは、人間の目では違いを見つけることが難しい。これらの結果は、時系列変化計算により、時系列変化が数値で明確に表れていることを示している。また、グリッド形式を用いることで、分散した異種データが正規化され、計算・比較可能となる。

図 7 から、栃木県に近い山間部である北部で災害リスクが増加していることが把握できる。図 8 から、2011 年に大きな津波に襲われたひたちなか市周辺の北部沿岸部で人口密度が低下し、つくば市周辺の南部で人口密度が上昇していることがわかる。図 9 は、高速道路のジャンクションが東京に近い南部でわずかに増加していることを示している。図 10 を見ると、埼玉県や新興都市（下妻市、八千代市）に近い西部で森林や植生が著しく減少している。このような変化は、茨城県西部は稲作や野菜栽培が盛んであるため、農地から宅地への土地利用の変化に起因している可能性がある。

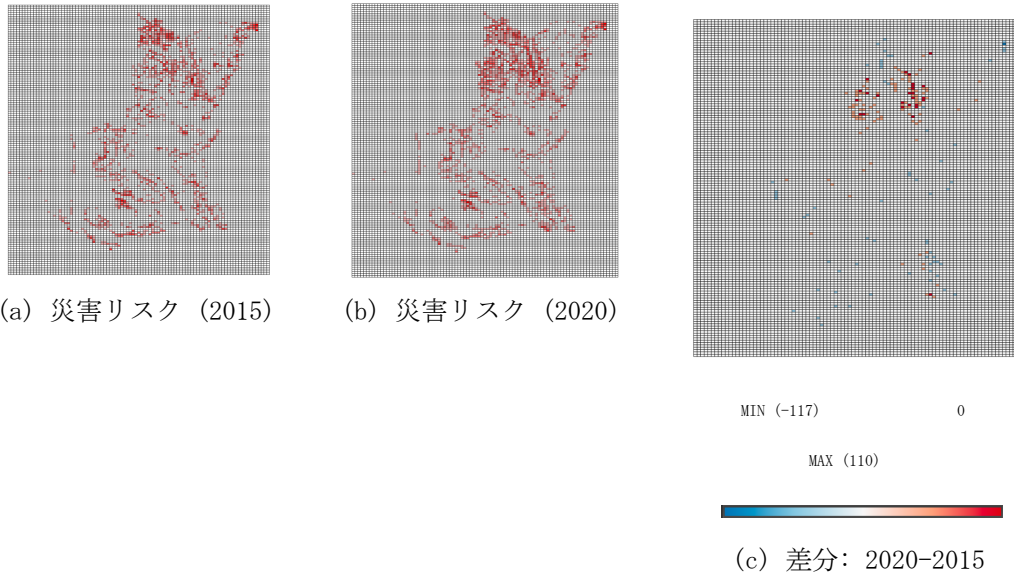


図7. 災害リスクの時系列変化計算 (2020-2015) : (a)2015年の災害リスク、(b)2020年の災害リスク、(c)災害リスク値の増減 (増加:赤、減少:青)

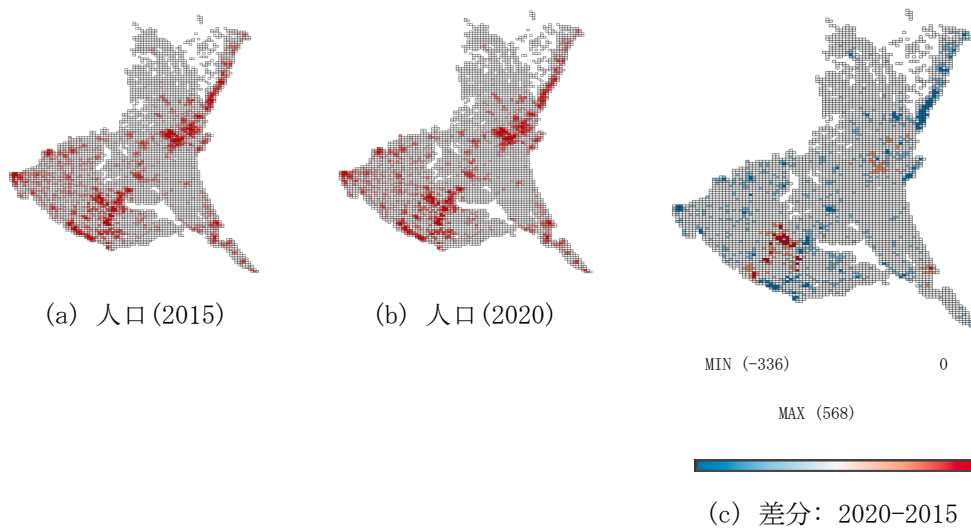


図8. 人口の時系列変化計算 (2020-2015) : (a)2015年の人口、(b)2020年の人口、(c)人口の増減 (増加:赤、減少:青)

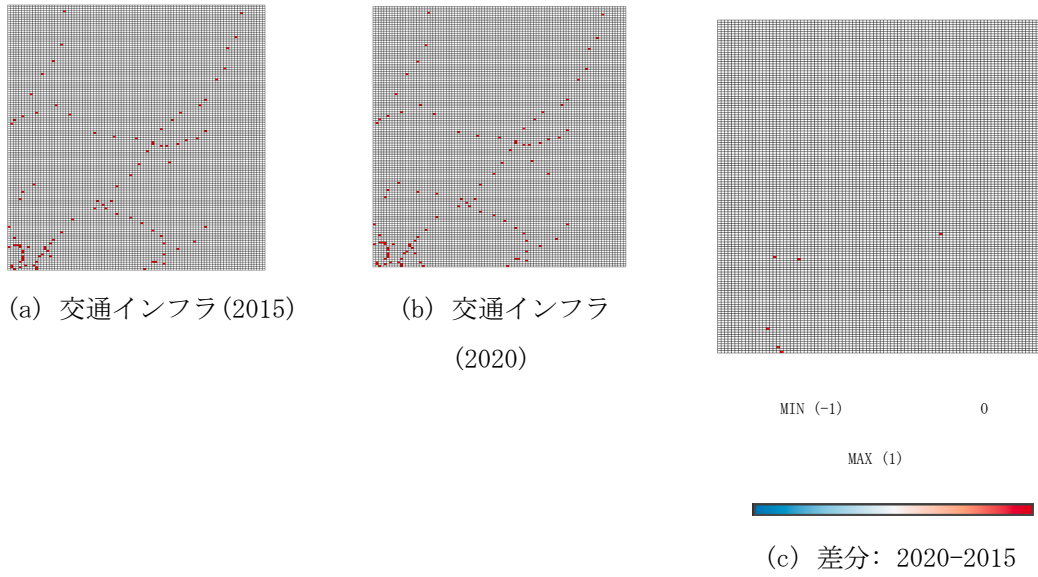


図9. 交通インフラの時系列変化計算 (2020-2015) : (a)2015年の高速道路ジャンクション、2020年の高速道路ジャンクション、(c)高速道路ジャンクション数の増減 (格子式、増加:赤、減少:青)

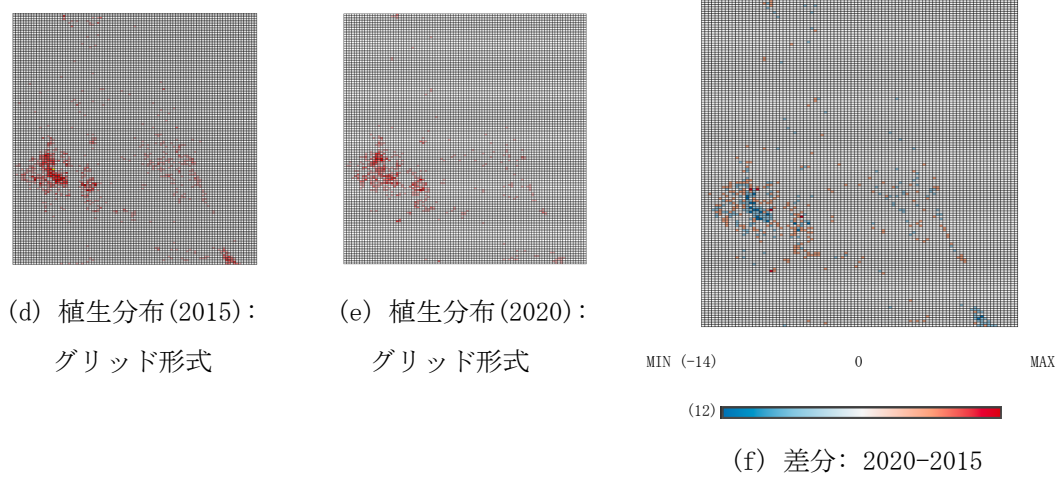
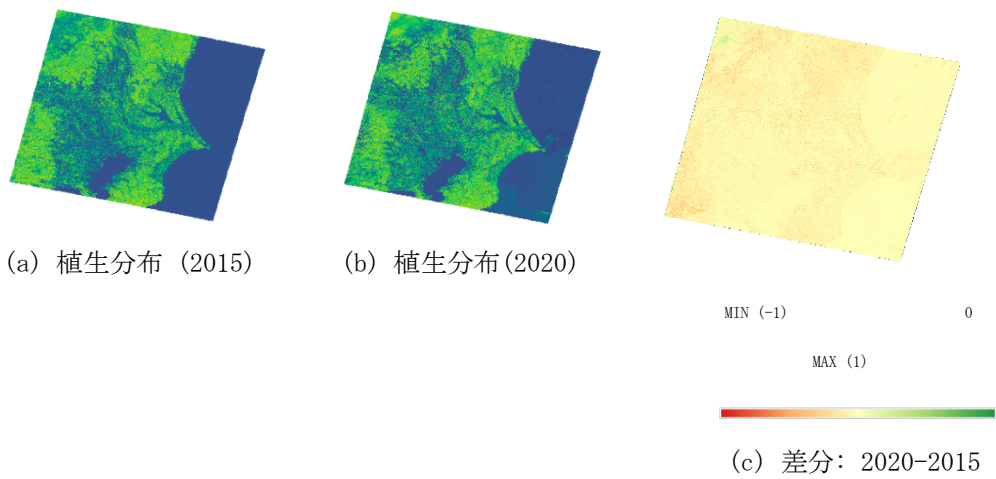
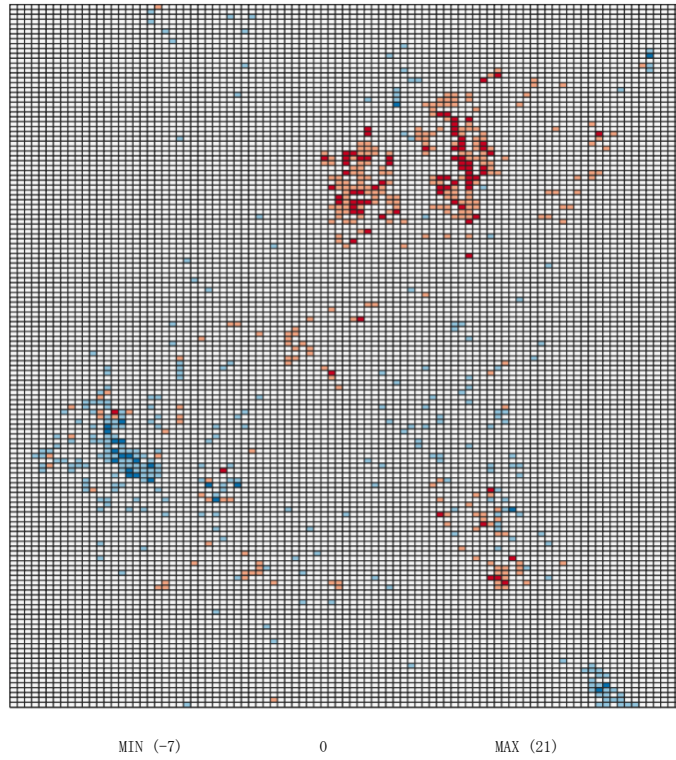


図 10. 植生分布の時系列変化計算 (2020-2015) : (a) 2015 年の植生分布 (NDVI)、(b) 2020 年の植生分布 (NDVI)、(c) 植生面積の増減 (増加: 緑、減少: 赤)、(d) 2015 年の植生分布 (グリッド表現)、(b) 2020 年の植生分布 (グリッド表現)、(c) 植生面積の増減 (増加: 赤、減少: 青)

図 7~図 10 に示した実験 2 の結果から、この方式を用いることで、対象地域の災害リスク/レジリエンスに関する多次的、分散的、異種的な変数の集合のうち、正規化されたグリッド形式で各変数の時系列変化を計算できることが示された。

6.3. 実験 3: 多層的時系列計算の総合的リスク/レジリエンスの検証

実験 3 は、実験 1 と実験 2 の結果を組み合わせであり、図 11 は、4.2 節、4.3 節で述べた多層的時系列リスク/レジリエンス計算方式における総合的なリスク/レジリエンス値の計算・可視化結果を示している。この計算では、人口の増加が災害に強いかどうかを定義することは困難であると判断し、人口密度のデータは含めていない。図 12 は、参考のため、図 4 に示した結果に茨城県ベースマップ[43]を重ね合わせたものである。図 13 は図 12 の結果を 5 次元世界地図システムで可視化・共有したものであり、図 17 は同じ結果を Google Earth で可視化したものである。これらの結果から、災害に対する脆弱性は、赤い部分 (茨城県北部) で増加し、青い部分 (茨城県西部) で減少していることがわかる。逆に、災害に対する回復力は、青色地域 (茨城県西部) で増加し、赤色地域 (茨城県北部) で減少していると解釈できる。



(f) 差分: 2020-2015

図 11. 多層的時系列リスク/レジリエンス計算方式による総合リスク/レジリエンス計算結果 (茨城県、2015-2020 年)



図 12. 茨城県ベースマップ[43]を図 11 に重ね合わせた結果

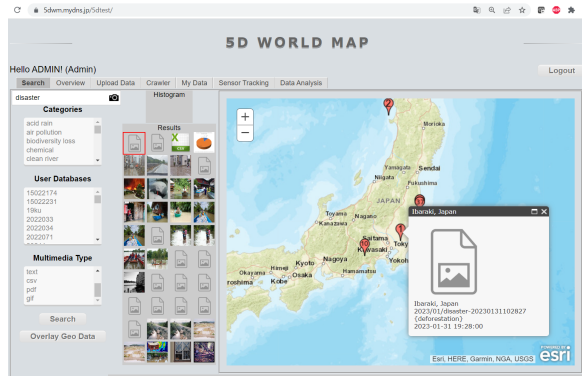
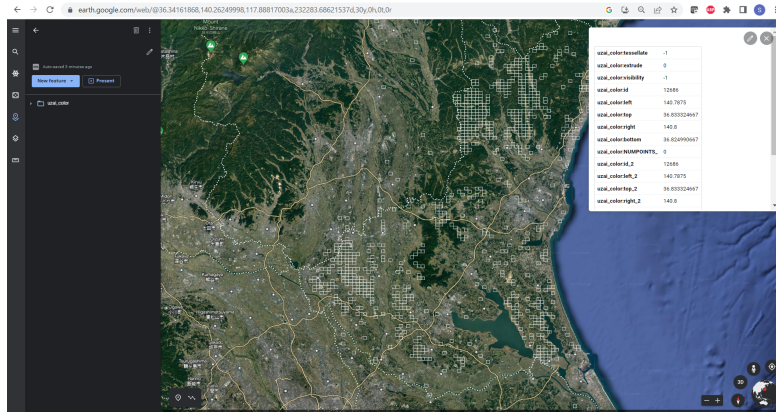
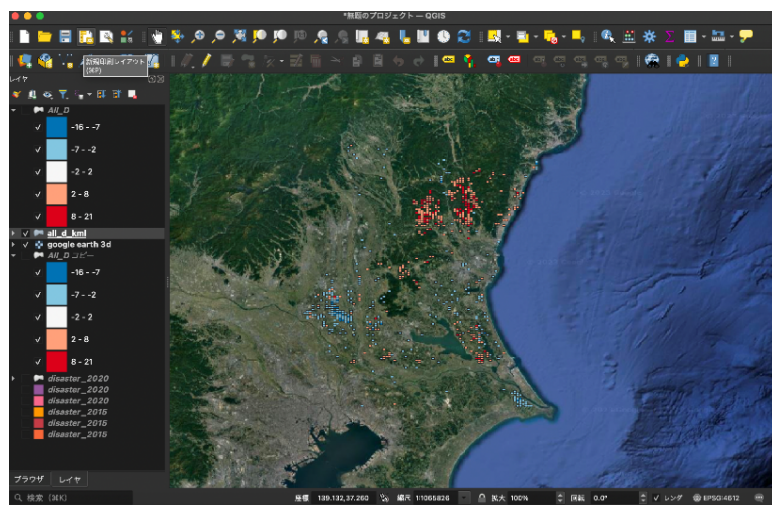


図13. 5次元世界地図システム上で可視化・共有するためのKML/KMZファイルとしての総合リスク/レジリエンス計算結果のマッピング



(a)



(b)

図 14. Google Earth[44]上での可視化と共有のための総合リスク／レジリエンス計算結果のマッピング：(a) Google Earth 上の KML/KMZ ファイルのマッピング、(b) QGIS 上の Google Earth BaseMap とシェープファイルのマッピング

図 11 および図 12 に示す実験 3 の結果から、本方式により、多次元・分散・異種の変数を正規化処理により比較演算可能な形に変換し、各変数の過去の変化量を反映させることで、特定対象地域の災害リスク／レジリエンスの総合値を算出することが可能であることがわかる。図 13、図 14 に示すように、本方式の結果は、Google Earth や 5 次元世界地図システムなどの一般的な Web アプリケーション上で共有することが可能であり、自治体における災害対策や政策設計に活用することができる。

さらに精度を上げるためには、インフラパラメータとして、住宅、農業、製造業、商業モール、発電所、ダムなどの土地利用や、社会経済パラメータを追加することが重要と思われる。また、降雨量、湿度、降雪量、大地震の発生頻度、森林火災の発生頻度などの自然パラメータも追加すべきと考えられる。

7. 結論と今後の展開

本稿では、地球環境変動・災害解析のための「時系列多層リスク・レジリエンス計算方式」を紹介した。実装と実験を通して、本方式が、多次元・分散・異種変数を正規化処理により比較演算可能な形に変換し、過去の各変数の変化量を反映させることで、特定対象地域の災害リスク・レジリエンスの総合値を算出できることを検証した。

今後の展開として、オープンデータを活用した自動災害推計・予測システムを実装し、5次元世界地図システムと連携した防災力向上システムを実現する。本研究の目的の一つには、世界の国や地域、特に高度な観測機器や技術・資金が潤沢ではない後発開発途上国（LDC）におけるSDG9、SDG13、SDG11、SDG15の実現を支援することがある。具体的には、複数の変数間の関係性の評価、災害予測などを展開する。

今後の課題としては、インフラパラメータである住宅、農業、製造業、商業施設、発電所、ダムなどの土地利用や社会経済パラメータ、自然パラメータである降雨量、湿度、積雪量、大地震や森林火災の発生頻度などの説明変数を追加し、本方式の精度や精度を向上させることである。具体的には、各研究分野に分かれた要素を統合することで、潜在的な災害発生地点や脆弱な場所を予測できるシステムを構築する方式を開発する。

参考文献

- [1] Kiyoki, Yasushi, and Xing Chen. "Contextual and Differential Computing for the Multi-Dimensional World Map with Context-Specific Spatial-Temporal and Semantic Axes." *Information Modelling and Knowledge Bases XXV 260* (2014): 82.
- [2] Yasushi Kiyoki, Xing Chen, Shiori Sasaki, Chawan Koopipat, "A Globally-Integrated

- Environmental Analysis and Visualization System with Multi-Spectral & Semantic Computing in “Multi-Dimensional World Map” ”, Information Modelling and Knowledge Bases XXVIII, pp.106-122, 2017.
- [3] Sasaki, S., Takahashi, Y, Kiyoki, Y., “The 4D World Map System with Semantic and Spatiotemporal Analyzers,” Information Modelling and Knowledge Bases, Vol.XXI, IOS Press, pp. 1 - 18, 2010.
- [4] Sasaki, S. and Kiyoki, Y., “Real-time Sensing, Processing and Actuation Functions of 5D World Map System: A Collaborative Knowledge Sharing System for Environmental Analysis” Information Modelling and Knowledge Bases, Vol. XXVIII, IOS Press, pp. 220-239, May 2016.
- [5] Shiori Sasaki, Yasushi Kiyoki, “Analytical Visualization Functions of 5D World Map System for Multi-Dimensional Sensing Data”, Information Modelling and Knowledge Bases XXIX, IOS Press, pp.71 - 89, May 2017.
- [6] Yasushi Kiyoki, Xing Chen, Chalisa Veessommai, Irene Erlyn Wina Rachmawan, Petchporn Chawakitchareon, “A SPA-based Semantic Computing System for Global & Environmental Analysis and Visualization with “5-Dimensional World-Map” : “Towards Environmental Artificial Intelligence” ” Information Modelling and Knowledge Bases XXXI, Vol. 321, pp. 285 - 305, DOI 10.3233/FAIA200021, IOS Press, 2020.
- [7] Shiori Sasaki, Yasushi Kiyoki, Madhurima Sarkar-Swaisgood, Jinnika Wijitdechakul, Irene Rachmawan, Sanjay Srivastava, Rajib Shaw, Chalisa Veessommai, “5D World Map System for Disaster-Resilience Monitoring from Global to Local: Environmental AI System for Piloting SDG 9 and 11” , Information Modelling and Knowledge Bases XXXI, Vol. 321, pp. 306 - 323, DOI 10.3233/FAIA200022, IOS Press, 2020.
- [8] Asako Uraki, Shiori Sasaki, Yasushi Kiyoki, “A Multi-dimensional Visualization Method for Disaster Analysis on 5D World Map System”, 2018 INTERNATIONAL ELECTRONICS SYMPOSIUM ON KNOWLEDGE CREATION AND INTELLIGENT COMPUTING (IES-KCIC), 139-145, 2018.
- [9] Yasushi Kiyoki, Xing Chen, “A Semantic Associative Computation Method for Automatic Decorative-Multimedia Creation with “Kansei” Information” (Invited Paper), The Sixth Asia-Pacific Conferences on Conceptual Modelling (APCCM 2009), 9 pages, January 20-23, 2009.
- [10] Xing Chen, Yasushi Kiyoki “, A Semantic Orthogonal Mapping Method through Deep-learning for Semantic Computing” , Information Modelling and Knowledge Bases XXX, Vol.312, pp.39 - 60, DOI 10.3233/978-1-61499-933-1-39, IOS Press, 2019.
- [11] Yasushi Kiyoki, Petchporn Chawakitchareon, Sompop Rungsupa, Xing Chen, Kittiya Samlansin, “A Global & Environmental Coral Analysis System with SPA-Based Semantic

- Computing for Integrating and Visualizing Ocean-Phenomena with “5-Dimensional World-Map”, INFORMATION MODELLING AND KNOWLEDGE BASES XXXII, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications 333, IOS Press, pp. 76 - 91, Dec 2020.
- [12] Irene Erlyn Wina Rachmawan, Yasushi Kiyoki, “A New Approach of Semantic Computing with Interval Matrix Decomposition for Interpreting Deforestation Phenomenon”, Information Modelling and Knowledge Bases XXX, Vol.312, pp.353 - 368, DOI 10.3233/978-1-61499-933-1-353, IOS Press, 2019.
- [13] Jinmika Wijitdechakul, Yasushi Kiyoki, Chawan Koopipat, “An environmental-semantic computing system of multispectral imagery for coral health monitoring and analysis”, Information Modelling and Knowledge Bases XXX, Vol.312, pp.293 - 311, DOI 10.3233/978-1-61499-933-1-293, IOS Press, 2019.
- [14] Irene Erlyn Wina Rachmawan. Yasushi Kiyoki, “Semantic Multi-Valued Logic for Deforestation Phenomena Interpretation”, Information Modelling and Knowledge Bases XXXI, Vol. 321, pp. 401 - 418, DOI 10.3233/FAIA200027, IOS Press, 2020.
- [15] Chalisa Veessommai, Yasushi Kiyoki, Shiori Sasaki, “A Multi-Dimensional River-Water Quality Analysis System for Interpreting Environmental Situations”, Information Modelling and Knowledge Bases XXVIII, pp.43-62, 2017.
- [16] Jinmika Wijitdechakul, Yasushi Kiyoki, Shiori Sasaki, Chawan Koopipat, “A Multispectral Imaging and Semantic Computing System for Agricultural Monitoring and Analysis”, Information Modelling and Knowledge Bases XXVIII, pp.314-333, 2017.
- [17] Irene Erlyn Wina Rachmawan and Yasushi Kiyoki,” Semantic Spatial Weighted Regression for Realizing Spatial Correlation of Deforestation Effect on Soil Degradation”, International Electronics Symposium on Knowledge Creation and Intelligent Computing (IES-KCIC), September 26, 2017, Surabaya Indonesia.
- [18] Jinmika Wijitdechakul, Yasushi Kiyoki and Shiori Sasaki, Chawan Koopipat, “UAV-based Multispectral Aerial Image Retrieval using Spectral Feature and Semantic Computing”, International Electronics Symposium on Knowledge Creation and Intelligent Computing (IES-KCIC), September 26, 2017, Surabaya Indonesia.
- [19] UNDRR, “*Implementing the Sendai Framework*”, SF and the SDGs, Accessed: Jan. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/sf-and-sdgs>
- [20] UNDRR, Sendai Framework, Accessed: Jan.30, 2023. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- [21] NIED, J-SHIS Map, Accessed: Jan. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>
- [22] UNEP, Global Risk Data Platform, Accessed: Jan. 30, 2022. [Online]. Available:

<https://preview.grid.unep.ch/>

- [23]UNDRR, Prevention Web, Accessed: Jan. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.preventionweb.net/>
- [24]UNDRR, Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, Accessed: Jan. 30, 2022. [Online]. Available: <https://gar.undrr.org/>
- [25]NICT, ARIA project , Accessed: Jan. 30, 2022. [Online]. Available: https://testbed.nict.go.jp/interview/007_1.html
- [26]M. Kawamura, K.Tsujino, Y. Ohtsuji, “Investigation of Sediment Disaster Mitigation GIS by Using Results of Large Area Disaster Characteristic Analysis,” Journal of Disaster Science and Management, Vol.25(1), 2006, pp.35–50.
- [27]H. Kasa, M. Kurodai, S. Obayashi, H. Kojima, “On the Applicability of Remote Sensing Data for Landslide Prediction Model,” Journal of the Remote Sensing Society of Japan, Vol.12(1), 1992, pp.5–15.
- [28]R. Furuda, GIS and satellite image analysis with QGIS (Part 3: Basic functions, Part 2), Information Geology, vol. 29, no. 4, pp. 141–149, 2018. (Japanese)
- [29]M. Miyamoto, Causes of tropical deforestation: Reconsidering slash-and-burn, population growth, poverty, and road construction, Jirinshi (2010) 92: 226–234. (Japanese)
- [30]Katsuhide Yokoyama, Hiroto Tauchi, Hideo Amaguchi, Akira Kawamura, Study on the relationship between urbanization on steep slopes and landslide disasters in Japan (Japanese)
- [31]ESCAP SDGHELPDESK: <https://sdghelpdesk.unescap.org/>
- [32]Closing-the-Loop - ESCAP: <https://www.unescap.org/projects/ctl>
- [33]Yasushi KIYOKI, Shiori SASAKI, Ali Ridho BARAKBAH, “AI-Sensing Functions with SPA-based 5D World Map System for Ocean Plastic Garbage Detection and Reduction ”, Information Modelling and Knowledge Bases XXXIV, Jan. 2023. DOI:10.3233/FAIA220489
- [34]Yuki Nakamura, Shiori Sasaki, “Disaster-Affected Area Estimation Method with Open Multispectral-Image Data Analysis for Multidimensional World Map System ”, ICBIR 2022 - 2022 7th International Conference on Business and Industrial Research, Proceedings, 616–621, Jun, 2022.
- [35]Max J Egenhofer, David M. Mark, Modeling conceptual neighborhoods of topological relations, Geographical Information Systems 9(5):555–565, DBLP, September 1995.
- [36]USGS: <https://www.usgs.gov/>
- [37]Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, National Land Numerical Data, Future Population Estimates by 1km Mesh (H30 National Bureau Estimates) (shape format version), in Japan (Japanese)
<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-mesh1000h30.html>

- [38]Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, National Land Numerical Data, Expressway Time Series Data, in Japan(Japanese)
https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N06-v1_2.html
- [39]Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, National Land Numerical Data, Flood Inundation Assumption Area Data, in Japan (Japanese)
https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A31-v2_1.html
- [40]Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, National Land Numerical Data, Landslide Disaster Precaution Area Data, in Japan (Japanese)
https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A33-v1_4.html
- [41]Copernicus Open Access Hub, Open Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- [42]QGIS: <https://qgis.org/ja/site/>
- [43]City, town, and village offices in Ibaraki prefecture:
<https://www.pref.ibaraki.jp/bugai/kokusai/tabunka/en/administration/level.html>
- [44]Google Earth: <https://earth.google.com/>
- [45]Shiori Sasaki, Yasushi Kiyoki, Amane Hamano, A Time-Series Multilayered Risk-Resilience Calculation Method for Disaster and Environmental Change Analysis with 5D World Map System, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, Volume 380: Information Modelling and Knowledge Bases XXXV, pp. 253 - 270, IOS press, 2023