

令和元年6月7日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05648

研究課題名(和文) 日本、インドネシア及びスリランカにおける津波が発生しやすい地域の脆弱性評価

研究課題名(英文) Vulnerability Assessment of Tsunami-Prone Areas in Japan, Indonesia and Sri Lanka

研究代表者

プシュパラル ディニル (Pushpalal, Dinil)

東北大学・国際文化研究科・教授

研究者番号：10361148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、日本、インドネシアおよびスリランカの津波多発地域の脆弱性または強靱性の測定方法および数学モデルの構築を試みた。本研究の対象となる三つの国において、広範囲なフィールドワークを実施して、特定の場所の強靱性に影響を与える必要条件、要因および特徴を特定した。さらに、現地収容力、瞬時に災害を生き抜く力および復興可能性を3つの必要条件として、強靱性を評価するための枠組みを提案した。最後に、集積レジリエンス指標を構築するために、モデルとして、力学で広く使われているばねの方程式を採用して、ある特定場所の災害強靱性を評価するための数学モデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最初に、本研究はどのようにすれば津波の被害を免れることができるかを示唆した。次に、研究者らの現地調査および文献検索による分析結果に基づき、先行研究で行っているレジリエンス指標の再モデル化を行った。そして、従来よりも強靱な沿岸地区を構築するため、より優れた設計法を提案することによって、世界のどの地域にも適用可能な普遍的モデルを構築することに寄与した。最後に、レジリエンス評価で使用されてきた従来の方式の代わりに、力学で広く使われているばねの方程式に基づく数学モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempted to build an evaluation method and a mathematical model for measuring vulnerability or resilience of tsunami prone areas in Japan, Indonesia and Sri Lanka. Extensive field work was conducted in the above three countries to identify the requisites, factors and different dimensions that affect the resilience of a particular location. The framework to assess the resilience consists of three requisites: on-site capacity, ability to survive disasters instantly and recoverability. Finally, in order to calculate the integrated resilience index, we adopted the spring theory widely used in mechanics of materials as the basis of model, and proposed a mathematical model for evaluating the disaster resilience of a specific place.

研究分野：災害・人間の安全保障

キーワード：津波 レジリエンス スリランカ インドネシア 現地収容力 onsite capacity Galle市 ばねの方程式

### 1. 研究開始当初の背景

2004年12月26日、インド洋大津波(IOT)がマグニチュード9.1の地震によって引き起こされた。被災国は15ヶ国を超え、インドネシアとスリランカは被害がもっとも大きい国であった。インドネシアでは、127,720名が死亡、93,285名は依然行方不明であり、全壊家屋139,195戸、一部損壊家屋は85,000戸、転居を余儀なくされた人は635,384名であった(出典: Bappeda Aceh 2012)。スリランカでは、35,399名が死亡、全壊または一部損壊家屋は114,069戸、転居を余儀なくされた人は480,000名であった(出典: International Recovery Platform 2014)。インド洋大津波のおよそ6年後の2011年3月11日、マグニチュード9.0の地震によって東北地方太平洋沖地震が発生し、津波が東日本の太平洋岸を襲った。この地震と津波による直接死による死者数は15,886名、行方不明者は2,620名(出典: 平成26年5月警察庁調べ)全壊家屋は224,798戸、一部損壊は434,327戸(出典: 消防庁2011東北地方太平洋沖地震2013)であり、災害発生直後1週間内のピーク時の避難者は450,000名(出典: 平成26年5月警察庁調べ)を超した。

上記の津波災害による被害や損失に関する様々な話や調査によると、何らかの理由で被害を免れたり被害が小さかったりする沿岸地域の事例がいくつかあることが明らかになった。インドネシアやスリランカ、日本に存在していた「幸運な浜」とは以下の通りである。インドネシアについては、南アチェ県のLhok Pawoh村やLadang Tuha村、ニアス島のMoawo村やPasar Lahewa村は被害を免れたあるいは死傷者が皆無であった。Lhok Pawoh村やLadang Tuha村が被害を避けることができたのは地理的要因によるが、一方、Moawo村やPasar Lahewa村の住民の命を救ったのは社会的要因であった。スリランカについては、Galle市に古くから存在するインフラのDutch Fortのおかげで被害を免れた町があったが、その周辺地域の被害は甚大であった。日本においては、海の近くに位置する宮城県仙台市南蒲生浄化センターは、敷地内に存在していた建物群が背後地の集落を守ったことで近隣住民に賞賛された。日本では、岩手県の吉浜は社会的および地理的要因により、被害が少なかったことが報告されている。これらの事例を並べてみると、自ずと「被害を免れたあるいは被害の少なかった地域がある一方、被害の甚大な地域があるのはどうしてか」という疑問がわく。

### 2. 研究の目的

東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって日本国の東北地方の沿岸の多くの町は破壊されたが、何らかの理由によって、中には被害を免れたあるいはほとんど被害を受けなかった地域もあった。インド洋大津波に襲われたインドネシアやスリランカにも同じように、「幸運の地域」と「不運の地域」があった。このような大規模災害に遭遇した事例について、その被災地域の脆弱性や強靭性を特定することが、本研究の主要な検討テーマである。本研究の目的は、日本、インドネシアおよびスリランカにおいて、いくつかの地域を選択して広範なフィールドワークを実施し、先行研究者から得られた脆弱性評価および脆弱性指標を用いて、これらの地域の評価を行い、更に、本研究で得られた知見を用いて評価の正確さを向上させるために脆弱性指標の再モデル化を行うことである。

### 3. 研究の方法

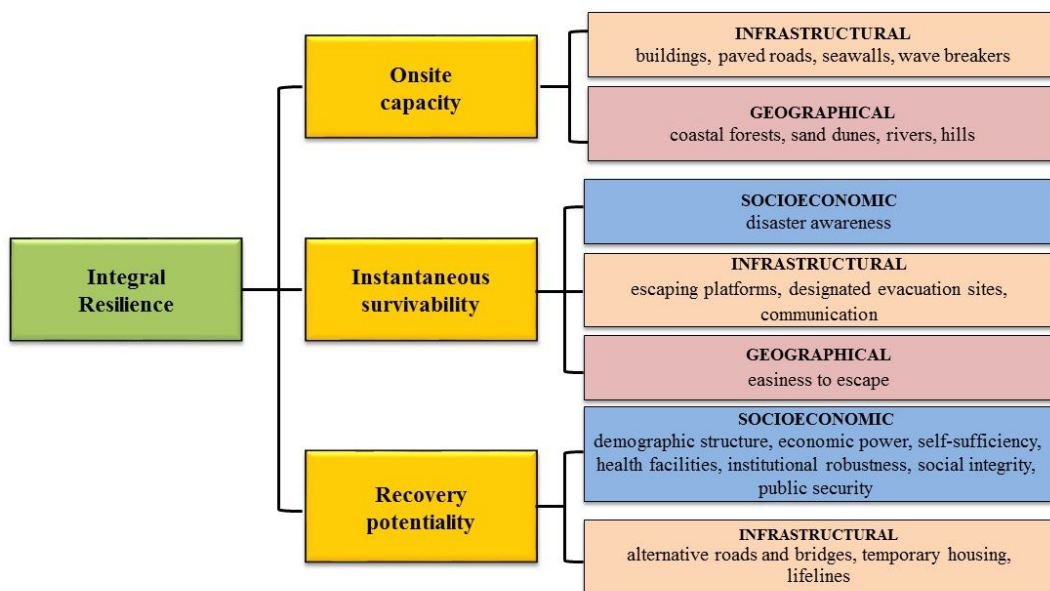


図1. 研究方法の概念的枠組み

本研究では、「幸運の地域（理想的な災害強靱性地域）」は3つの必要条件、すなわち、現地収容力（onsite capacity）、瞬時に災害を生き抜く力（instantaneous survivability）および復興可能性（recovery potentiality）を満たしていると想定する。対象地域において、これらの必要条件がどの程度満たされているか（達成レベル）は基本的に、社会的要因、インフラ要件および地理的要因によって評価することができる（図1参照）。現地収容力とは、ある特定の場所が津波の来襲前から有する、津波に抗することができる「内在的」な能力のことである。瞬時に災害を生き抜く力とは、災害の極限状態において生き抜くことのできる能力のことである。復興可能性とは、津波によって地域が破壊されても、災害後直ぐに復興を果たせる能力のことである。

本研究の進め方として、広範囲の文献調査に続いて、現地調査を実施した。現地調査では、ある特定の場所における災害強靱性あるいは脆弱性を把握するために、一次データおよび二次データの収集を行った。現地調査を実施したのは、日本国においては東北地方太平洋沖地震の津波によって破壊された沿岸地域、インドネシアにおいては Banda Ache、Palu および Tanjung Lesung、スリランカにおいては Galle、Hambanthota および Batticaloa の各地方である。もっとも大々的な現地調査を実施したのはスリランカであるが、同国の数ヶ所の調査対象地域を比較すると、どこも同じように土地面積が比較的狭いが、地理的、民族のおよび宗教的背景が明らかに異なる。



図2. 強靱性のベンチマーク

最後に、弾性理論並びに力学で広く使われているばねの方程式を用いて、強靱性の指標としてインテグラル・レジリエンス（Integral Resilience）を構築した。ここで、強靱性とは、エネルギーを弾性的に吸収する物質の能力のことであり、一方、弾性とは、応力を受けて歪むが、応力が除去されると元の寸法に戻る物質の能力と定義される。必要条件を評価するうえでの社会的要因、インフラ要件および地理的要因について、調査方法および得られた結果を以下に示す。

### 3.1 社会的要因 (socioeconomic) に関する現地調査

#### 3.1.1 調査方法

本研究で提案する枠組みでは、災害強靱性はその構成部分として社会的に構築された能力を含むと仮定する。当枠組みの社会的要因を計算するために、政府および民間の調査機関による人口構造や経済力、自給自足能力、医療施設の充実度などの量的側面のデータを収集した。諸制度の堅固性、社会の公正さ（ソーシャル・インテグリティ）、治安、防災意識などの質的側面のデータは現地調査を実施して収集した。半構造化面接およびアンケート調査の対象は、新しく再建された村に住んでいる被災者、および津波に破壊された場所に戻って住んでいる被災者の双方である。

#### 3.1.2 結果

インドネシアとスリランカにおいて、インド洋大津波の被災後に定住した住民に面接調査を行った結果、人口構造や経済力、自給自足能力、医療施設の充実度、諸制度の堅固性、社会の公正さ（ソーシャル・インテグリティ）、治安、防災意識が災害強靱性（災害レジリエンス）を高めるのに重要な役割を果たしていたことが明らかになった。インドネシアにおいては、社会の公正さや治安、防災意識を高めるうえで宗教が非常に重要な役割を果たしていると思われる。

Banda Aceh で津波に被災し、現在は新しく再建された村に定住している面接調査の対象者の多くは、新しい定住地に満足していると述べた。地域のモスクを基盤にして頻繁に開かれる集まりは、社会の公正さを発展させるうえで有用だった。

スリランカの津波被災者について、面接調査の対象者の多くは、彼らが津波の知識を前もって持っていたならば、津波からの避難がより適切かつ迅速に行なえたと述べている。多くの人々は津波の来襲パターンを知らなかったため第二波で命を落とした。

スリランカの津波被災者について、津波に破壊された場所に戻って定住している面接調査の対象者の多くは、津波がこの次に来るのは千年後になるので、津波対策をする必要はな

いと強く信じている。

スリランカの津波被災者について、現在は新しく再建された村に定住している面接調査の対象者の多くは、新しい村での生活に不満を持っており、理由として、公的秩序が欠如していることやカースト、職業、教育レベル等の違う人々と共に住むことが簡単でないことを挙げている。

スリランカの津波被災者について、現在は新しく再建された村に定住している面接調査の対象者の多くは、政府や外国の援助に多大に依存していることがわかった。

### 3.2 インフラ要因 (infrastructural) に関する現地調査

#### 3.2.1 調査方法

本研究において提案する枠組みのインフラ要因は、鉄筋コンクリート製の建物、ダム、防潮堤などの既存の人工構造物について、GIS に結びつけた現地調査によって評価した。過去の主な津波の体験によると、防潮堤や大型の建物のようなインフラによって、沿岸域のコミュニティが津波から守られたことが証明された。少なくとも、これらの人工構造物は津波の影響を低減した。津波によって破壊された場所や破壊を免れた場所の特定は、面接調査によって行った。破壊を免れることができた理由や破壊を免れるうえでインフラがどのような貢献をしたかについて、地域のコミュニティの指導者と話し合うとともに五万分の一の地勢図を観察して推測した。

#### 3.2.2 結果

調査対象としたのは宮城県仙台市南蒲生浄化センター内の一群の建物である。これら一群の建物すべては、海岸線から 325 ~ 637m、海拔 2.2 ~ 3.1m に位置する。2011 年 3 月 11 日、津波がこの敷地に来襲し、14.7m 遡上した。建物の破壊は皆無だった。海に近接しているにも関わらず、これらの鉄筋コンクリート製の建物は破壊を免れ、更には、浄化センターが背後地に住む人々の生命や家屋を守ったことで、近隣の人々から称賛された。これらの構造物は、緊急退避場所や一時避難所としても役立った。

津波防護のうえで壁が貢献した事例のひとつが、Galle 市に 350 年前に築かれた Dutch Fort である。岬に建てられたこの要塞には、砲撃を防御できるように壁が築かれており、要塞を取り囲む城壁と稜堡(りようほ)は、2004 年のインド洋大津波に対して防潮堤の役目を果たし、旧市街地を壊滅から救った。2004 年 12 月 26 日に津波が要塞の東側の低い門を突破して侵入してきたが、珊瑚、石およびスタッコ化粧壁から作られた稜堡(りようほ)と城壁は、要塞内の約 400 の建物を津波から防護する役目をした。侵入してきた津波流は、直ぐに再び引いていき、構造物に大きな被害は残らなかったが、その一方、要塞の周囲は約 3.5m の高さまで浸水し、新市街地を破壊した。

2004 年のインド洋大津波では、建物のコンクリートでできた骨組みの大部分が残ったが、その一方、煉瓦やコンクリート・ブロック製の壁は破壊された。なお、コア抜きによる圧縮強度試験や非破壊検査によって確認したところ、これらコンクリートの圧縮強度は 12 ~ 23MPa であった。破壊を免れるうえでの鉄筋の役目は明らかにならなかった。

建物の開口率が低い場合、建物の移動・転倒の可能性は高くなることがわかった。建物が完全に水没した場合でも、浸水縦断面積と開口率のどちらか一方または両方が大きければ移動・転倒の可能性は低い。

### 3.3 地理的要因 (geographical) に関する現地調査

#### 3.3.1 調査方法

地理的要因では、津波の影響を低減するうえで、海岸林、砂丘、川および丘陵地が果たす役目の重要度を求める。面接調査によって、津波によって破壊された場所と破壊を免れた場所を特定した。破壊を免れた理由については、地域のコミュニティの指導者と話し合うとともに五万分の一の地勢図の観察によって推測した。地形の分類は、空中写真や衛星画像の解釈および被災地域の現地調査によって行った。これらの特徴は、GIS を用いてマップ化し、数値に変換した。

#### 3.3.2 結果

スリランカで実施した現地観察に基づいて、津波防護に果たす砂丘やマングローブの役目を検討した。本研究では、砂丘とその陸地側に続けて植生を組み合わせることは、津波の侵入を遅延させるうえで重要な役割を果たすことを示した。特に、マングローブの林が砂丘の後背地にある場合、この林がトラップとして機能し、瓦礫の大半をせき止め、林の背後にある建物の被害を防ぐことができる。スリランカの Hambanthota の砂丘は、砂丘の持つ積極的な役割を証明した。Hambanthota 湾の東側は砂丘があるため被害を免れたが、他方、湾の西側は砂丘がないため破壊された(西側の天然砂丘は人間の破壊行為により消滅していた)。

ムディラ (Barringtonia asiatica) と呼ばれるスリランカに育つ木の一つは、沿岸域に位置する家屋を津波から守った。この木はスリランカの固有種であり、河口域や、川、湖、海岸、街路、民家の庭に見られる。

スリランカ南部州の沿岸の町 Kahawa に存在する露天珊瑚採掘場跡地が、津波による破壊を低減させるうえで積極的な役割を果たしたことを見出した。それぞれが 50 から 60 メー

トルの深さの露天珊瑚採掘場跡地は一般に、土地浸食を引き起こすとして環境保護主義者の批判を受け、歓迎されざる地勢となっている。これらの跡地は、珊瑚採掘者の約2世紀にわたる採掘によって生じたものである。津波来襲時に、露天採掘場跡地は陸に向かう津波流を低減する働きをした。

スリランカ東部州の Batticaloa 市の調査では、パティカロア半島に位置する Navalady および Dutch Bar と呼ばれる2村に焦点が当てられた。パティカロア半島は津波によって完全に流され、これら2村の死者は1,200人と報告されている。しかしながら、ラグーンは津波の影響を減衰させる緩衝域（ショックアブソーバー）の役目を果たし、沿岸域のラグーンの陸地側は守られた。

### 3.4 強靱性指標の構築

#### 3.4.1 方法

強靱性指標を構築するために、モデルとして、材料力学で広く使われている弾性理論並びにばねの方程式を用いた。弾性理論の分野では、強靱性とは、歪を与える力が除去されたことにより、歪んだ物体が元に戻る力と理解される。ここにおいて、強靱性はエネルギーを弾性的に吸収する物質の能力であり、他方、弾性は応力を受けて歪み、応力が除去されると元の寸法に戻る物質の能力である。弾性理論において、強靱性という用語は、弾性、比例性および比例限界点を重要な特徴とする。ここでの比例性とは、災害の大きさと災害が引き起こす社会/経済/物理的な歪の相関関係を指す。

#### 3.4.2 結果

研究者らは、強靱性評価のための実用的な概念枠組みを統合して、弾性理論並びに力学で広く使われているばねの方程式に基づいた数学モデルを提案した。この枠組みは、研究者らの調査結果に基づく。提案したモデルは、以下の3点に特別の注目を払う。すなわち、(a) 津波の現象を、津波の影響の時間性に関係した3つのフェーズに分ける、(b) ある特定のフェーズに影響を及ぼすのはどの要因かを決定する、(c) それぞれの要因に最も大きな影響を与える側面を選定する。二重に考慮するのを避けるため、注意深く、ひとつの側面をひとつのフェーズにのみ対応させる。従って、「幸運の地域（理想的な災害強靱性地域）」とは3つの必要条件、すなわち、現地収容力（onsite capacity）、瞬時に災害を生き抜く力（instantaneous survivability）および復興可能性（recovery potentiality）を満たすものと想定する。対象地域において、これらの必要条件がどの程度満たされているか（達成レベル）は基本的に、社会的要因、インフラ要因および地理的要因によって評価できる（図1参照）。現地収容力とは、ある特定の場所が津波の来襲前から有する、津波に抗することができる「内在的」な能力のことである。瞬時に災害を生き抜く力とは、災害の極限状態において生き抜くことのできる能力のことである。復興可能性とは、津波によって地域が破壊されても、災害後、直ぐに復興を果たせる能力のことである。各側面において脆弱性のレベルを測定するために、一次データおよび二次データに基づき、脆弱性の度合いを低、中、高に割り当てた。一般的な脆弱性の度合いである低、中、高を、それぞれ1、2、3の数値スコアに分類した。

最後に、ある特定の場所について、以下の式によって、インテグラル・レジリエンスを求めた。

$$Ir = \frac{Oc(Is+Rp+1)}{Oc+Is+Rp}$$

この式において、Ir はインテグラル・レジリエンス（integral resilience）、Oc は現地収容力（onsite capacity）、Is は瞬時に災害を生き抜く力（instantaneous survivability）、Rp は復興可能性（recovery potentiality）である。

## 4. 研究成果

本研究では、日本、インドネシアおよびスリランカの津波多発地域の脆弱性または強靱性の測定方法および数学モデルの構築を試みた。上記の3ヶ国において広範囲なフィールドワークを実施して、特定の場所の強靱性に影響を与える必要条件、要因および特徴を特定した。この研究から、上記に述べた数学モデルに対して、強靱性が最も弱いベンチマークを検討するうえでスリランカの Batticaloa 半島が適しており、強靱性が最も強いベンチマークを検討するうえで Galle 市の Dutch Fort が適していることを確認した。

当研究では、3つの必要条件、すなわち、現地収容力、瞬時に災害を生き抜く力および復興可能性を通して、強靱性を評価するための枠組みを提案した。必要条件の評価は基本的に、対象とする地域の社会的要因、インフラ要因および地理的要因によって行われる。当該研究の枠組みの社会的要因は、政府および民間の調査機関によって収集が可能な人口構造や経済力、自給自足能力、医療施設の充実度などの量的側面を考慮する。諸制度の堅固性、社会の公正さ（インテグリティ）、治安、防災意識などの質的側面は現地調査によって収集が可能である。インフラ要因は、コンクリート製の建物、ダム、防潮堤などの既存の人工構造物に関して、GISと結びつけた現地調査によって評価し、調整によって数値変換が可能である。地理的要因は、

海岸林、砂丘、丘陵地および自然の波よけ堤などの地理的特徴を入手して評価することが可能である。これらの特徴は、GISを用いてマッピングし、調整によって数値変換が可能である。3つの必要条件の中で、現地収容力は津波から地域を防護するうえで最も影響が強い。最後に、集積レジリエンス指標を構築するために、モデルとして、力学で広く使われているばねの方程式を採用して、ある特定の場所の災害強靭性を評価するための数学モデルを提案した。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① [Dinil Pushpalal](#), A conceptual framework for evaluating tsunami resilience, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, (56), (2017)  
DOI: 10.1088/1755-1315/56/1/012026
- ② [Dinil Pushpalal](#), The Fears, Journal of Human Security Studies, Special Issue, 2018-1, (2018), 43-57  
[https://docs.wixstatic.com/ugd/3b5c68\\_ba861644d00b4914a3ab5cc2519b0e5a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/3b5c68_ba861644d00b4914a3ab5cc2519b0e5a.pdf)
- ③ Ismail Wekke, Rajindra Rajindra, [Dinil Pushpalal](#), Muhammad Ahsan Samad, Ahmad Yani, Rofiqul Umam, Educational Institution on Responding Disasters in Palu of Indonesia, INA-Rxiv. (2019)  
DOI:10.31227/osf.io/drc8q.

〔学会発表〕(計5件)

- ① [Dinil Pushpalal](#), A conceptual framework for evaluating tsunami resilience, The 10<sup>th</sup> Aceh International Workshop and Expo on Sustainable Tsunami Disaster Recovery (AIWEST-DR 2016), Banda Aceh, Indonesia, 2016年11月22日~24日(招待講演)(国際学会)
- ② [Dinil Pushpalal](#), The Concept of Human Security: What is the difference between human and state security and how concept of human security has been grown in Japan, Second International Interdisciplinary Workshop for Young Scholars “Imaginary Borderlands: ‘Othering’ and ‘Domestic Other’ on Post-Soviet Frontiers,” Kyiv, Ukraine, 2018年6月21日(招待講演)(国際学会)
- ③ [Dinil Pushpalal](#), The Concept of Human Security: Focusing on disasters, Politics and Human Development, The 2nd International Conference on Environmental Governance (ICONEG 2018), Makassar, Indonesia, 2018年10月25日~27日(招待講演)(国際学会)
- ④ [Dinil Pushpalal](#), Disaster Governance in Vulnerable Society, Universitas Muhammadiyah Makassar, Makassar, Indonesia, 2019年1月14日(招待講演)
- ⑤ [Dinil Pushpalal](#), Resource Management and Environmental Sustainability, International Conference on Challenges and Opportunities of Sustainable Environmental Development (ICCOSED), Jakarta, Indonesia, 2019年1月12日(招待講演)

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

- ① 研究分担者氏名：冬木 勝仁  
ローマ字氏名：FUYUKI Katsuhito  
所属研究機関名：東北大学  
部局名：農学研究科  
職名：教授  
研究者番号(8桁)：00229105
- ② 研究分担者氏名：朴 槿英  
ローマ字氏名：PAK Keunyoung  
所属研究機関名：奈良工業高等専門学校  
部局名：一般教科  
職名：准教授  
研究者番号(8桁)：90435404