

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05905

研究課題名(和文) 強風災害にみる、在来知が有する自然災害対応力の工学的再評価

研究課題名(英文) Re-evaluation of response capacity inherited in local knowledge to natural disasters by engineering approach: Case of wind-induced disaster

研究代表者

西嶋 一欽(Nishijima, Kazuyoshi)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：80721969

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、在来知に依拠するコミュニティをシステムと捉え、その自然災害対応力評価のために、外乱に対する「機能低下」と「復旧時間」という指標を用いてレジリエンスを評価する手法を構築した。また、「機能低下」低減に関する在来的な防災技術である、(1)特徴的な建築形態についてその空気力学特性を明らかにし、(2)樹木による防風効果を定量的に評価する提案し、(3)隣接した建物配置による風荷重低減効果を定量的に評価した。また、(4)バヌアツ共和国タンナ島に見られる伝統建築様式を含む3種類の建築様式について、総合的なレジリエンス評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、従来社会学的な研究対象であった在来知に工学的にアプローチする点にある。風工学・建築工学を用いた防災技術要素の性能評価から、コミュニティ全体の自然災害対応力評価までを一貫して行うことも、本研究の特徴である。本研究の成果を用いれば、異なる防災技術に依拠するコミュニティ間の自然災害対応力の違いを横断的に比較することが可能になる。さらに、開発途上地域の社会状況や風土に合致した防災対策立案へ活用できる。以上により、2030アジェンダ(SDGs)が目指している豊かな生活の実現に向けて、科学と在来知が協働するという方向性を提示したことが本研究の社会的意義である。

研究成果の概要(英文)： This research established an approach for evaluating response capacity of community inherited in local knowledge, taking its basis in system modeling approach. It employs functionality reduction and recovery time as two indicators to evaluate the capacity. Regarding functionality reduction, the research focused three illustrative examples of local knowledge to cope with wind-induced hazards: (1) aerodynamic characteristics of traditional architecture, (2) quantitative assessment of wind-breaking effect of trees, and (3) wind load reduction of construction by nearly-surrounding constructions. Furthermore, by employing the established approach, (4) resiliencies of three typical constructions including traditional construction in Tanna Island, Vanuatu, are evaluated.

研究分野：風工学、信頼性工学、災害リスク評価

キーワード：災害リスク評価 構造信頼性 レジリエンス システム コミュニティ

1. 研究開始当初の背景

自然災害が頻発している開発途上地域で、外部からの防災技術の導入により、在来知に基づく防災技術が失われている。これにより、以下の問題が発生している。

- 不適切な建材使用や未熟な施工および管理技術により、期待される減災効果が得られない。
- 地域で流通していない建材の導入により、発災後に建材が入手できず、再建が遅れる。
- 外来技術の導入によって生活様式が変化し、地域固有の文化が失われる。

在来知に基づく防災技術（以下、在来防災技術）は、地域の気候や住民の価値観・生活様式に適合しつつ、過去の災害経験に基づいた修正が行われてきたことで、一定の合理性を有していると考えられる。しかしながら、性能が工学的に検証されている工学デザインに基づく防災技術（以下、工学的防災技術）に対し、在来防災技術はその性能が定量的に不明な場合が多く、正当に評価されていない可能性がある。そこで、

- 工学的防災技術と同様の手法を用いて在来防災技術の性能を定量化し、その有効性が実証されれば、在来防災技術の価値が見直され、また、
- 在来防災技術の弱点が定量的に明らかになれば、その改善策を工学的に検討することで、在来防災技術を起点とした自然災害対応力の高度化が可能になる、と考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、在来知に依拠するコミュニティの自然災害対応力を工学的に再評価することである。本研究での考察対象は、強風災害に対する対応力である。しかしながら、本研究で構築する自然災害対応力の評価手法は、さまざまな自然災害に応用できる汎用的な手法である。構造物の安全性を確率的に評価する信頼性理論と、システムの外乱に対する対応力を評価することができるレジリエンス工学の手法を用いて、このような手法を構築する。また、個別の在来知について、風工学および建築工学等の関連する工学的手法を用いてその性能を科学的に評価する。

3. 研究の方法

本研究では、在来知に依拠するコミュニティをシステムと捉え、その自然災害対応力評価のために、システムのレジリエンス評価手法を応用する。システムのレジリエンスは、外乱に対する「機能低下」と「復旧時間」で計量されるという Bruneau ら（2003）の定式化を採用した（図1）。前者については、各論的工学および信頼性理論の手法を用いて評価することができる。後者については、社会経済学的観点から現地調査を行うことで評価することができる。本研究では、この定式化のもとで、在来知が有する自然災害対応力評価に関して、機能低下については、「二つの伝統建築様式の空気力学的特性評価（課題1）」、「樹木による防風効果の評価方法の構築（課題2）」、「建築物の近接配置による風荷重低減効果の検証（課題3）」を課題として取り組んだ。復旧時間および自然災害対応力評価については、「バヌアツ共和国タンナ島ミドルブッシュエリアをフィールドとした現地調査に基づいて総合的なレジリエンス評価を行った（課題4）」。

また、本研究を通じて、開発途上国での風速観測には設置に関して多大な困難を伴うことが改めて明らかになったことから、タワー等の剛な支持部材ではなく、運動・変形を許容する支持部材に設置した風速計による計測値を用いた、「新たな風速計測手法を開発した（課題5）」。

これは、研究計画当時には想定してなかった課題と成果である。

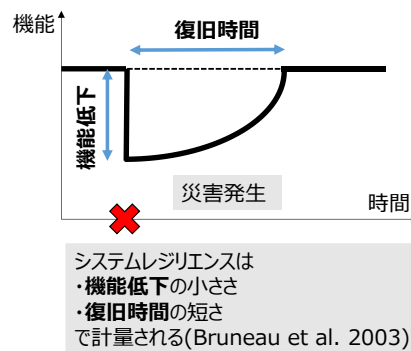


図1. レジリエンスの定量化

4. 研究成果

4. 1. 伝統建築様式の空気力学特性

先進国で一般的な形態の建築物については、多くの風洞実験による空気力学特性に関する知見が蓄積されているが、伝統建築様式に関するそれらの知見は限定的である。そこで、本課題では、熱帯地域で多く見られる高床式建築物の空気力学特性の評価とバヌアツ共和国タンナ島の伝統建築様式であるニマラタンの空気力学特性の評価を行った[雑誌論文12, 雑誌論文1]。高床式建築物については、通常の建築物には存在しない床下部の通風空間に着目し、床下通風空間の諸特徴（床下高さ、空間充実率、地面の粗度）が空力特性評価に与える影響を建築物周りの風速場と建築物に作用する風圧力の観点から評価した。さらに、建築物本体の形態を工夫することで風荷重を低減できる可能性を検討し（図2）、高床部に水平の板を設けることで風荷重が有意に低減できる可能性を示唆する結果を得た（表1）[雑誌論文3]。

ニマラタンの空気力学特性評価は、課題（4）のレジリエンス評価に資するものである。

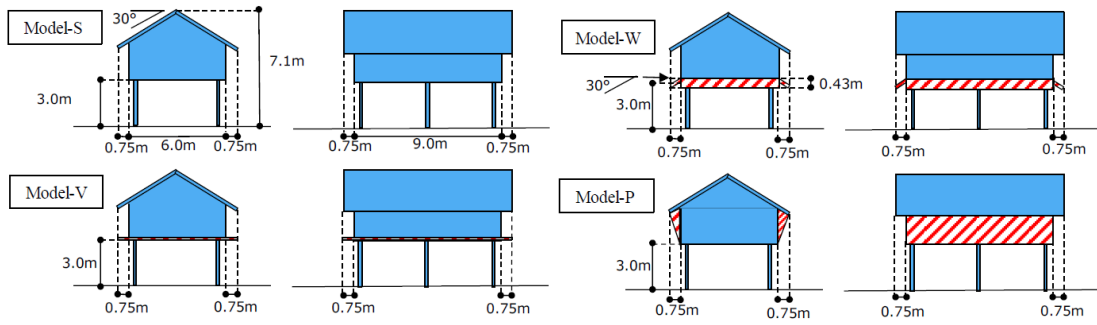


図2. 高床式住宅モデルと工夫 (S:標準、V:ベランダ状板設置、W:小屋根状板設置、P:傾斜壁)

表1. 風荷重の最大値の変化

| | | 軸力(変化率) | | | 柱頭モーメント(変化率) | |
|---------|--|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| | | \bar{N}_a | \bar{N}_b | \bar{N}_c | \bar{M}_{Fx} | \bar{M}_{Fy} |
| Model-S | | 11.7kN | 6.4kN | 6.3kN | 8.9kN·m | 16.6kN·m |
| Model-V | | 8.2kN (-30%) | 4.7kN (-27%) | 4.2kN (-34%) | 9.0kN·m (+1%) | 15.8kN·m (-5%) |
| Model-W | | 9.2kN (-22%) | 5.8kN (-10%) | 5.6kN (-11%) | 10.6kN·m (+19%) | 17.0kN·m (+3%) |
| Model-P | | 11.1kN (-5%) | 7.4kN (+15%) | 5.6kN (-13%) | 9.4kN·m (+6%) | 15.6kN·m (-6%) |

4. 2. 樹木による防風効果

樹木による防風効果があることは過去の実測や経験等により明らかであるが、防風効果の程度を定量的に予測する手法は確立されていない。数値流体解析 (CFD) に基づく予測手法については、一般的な定式化は平岡ら (1989) によって与えられているが、樹木との力の作用を表す項 (葉面積密度と抗力に関するパラメタ) の評価方法については明示していない。現状、この項は実測と整合するように経験的に評価されている。一方、草木の風害を評価するという視点から、草木と流れ場の動的な相互作用を考察した先駆的研究もある (例えば、Finnigan(1977))。しかしながら、いずれの研究においても、風作用による樹木の動き (揺れ) を考慮し流れ場を解析するには至っていない。そこで、本課題では、揺れを考慮しつつ、個別建物スケールでの変動風速および風圧を評価し得るモデルの構築を目指して研究を行った。

本研究では、樹木との力の作用を表す項を図3左のように変形することで、風速によらない無風時の葉面積密度と風速に依存する抗力を表すパラメタの積で評価することを提案した。これにより、樹木の密度・形状および樹木の剛性や葉の変形性能などの樹木に関するパラメタとCFDモデル化に用いるパラメタとを関連付けることができる。本研究では、樹木の特徴量から直接的にこれらのパラメタの値を同定するには至っていないが、風洞実験結果との比較により、このようなモデル化により樹木後流の流れ場を再現し得ることを示唆する結果を得た (図4) [学会発表5, 学会発表6]。

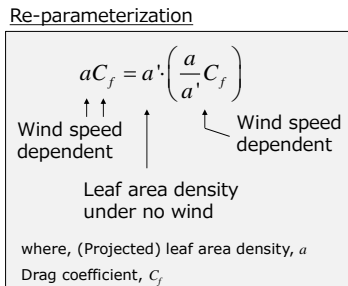


図3. 樹木の空力特性モデル化

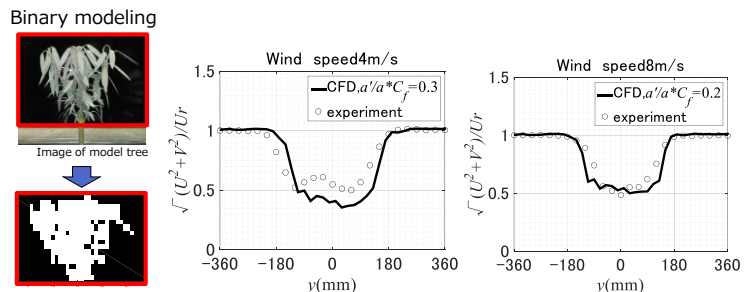


図4. CFDの結果と風洞実験結果の比較

4. 3. 建築物近接配置による風荷重低減効果

沿岸部や強風が卓越する地域では、建築物間の距離を小さく取り、建築物群全体として風荷重を低減することを期待している配置が見られる。これらの効果を定量的に評価するために一連の風洞実験を行った (図5)。この結果、本風洞実験で用いた建物群の幾何学的特徴の下では、建物群間の距離を屋根高さの2倍以下に抑えることで、最も風荷重が大きくなる風向で比較した場合、風荷重が50%程度に抑えられることが明らかになった (図6) [雑誌論文6]。



図5. 建築物群内の建築物に作用する風圧を計測する風洞実験風景

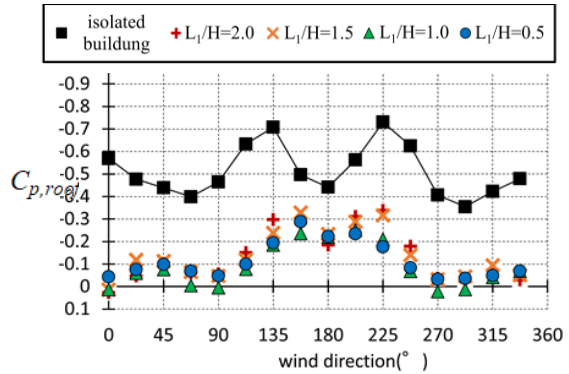


図6. 建築物群内部に配置された建築物の屋根(片面)に作用する平均風圧係数の平均値

4. 4. 総合的レジリエンス評価

バヌアツ共和国タンナ島の伝統建築ニマラタンはサイクロン襲来時にサイクロンシェルタとして用いられてきた在来建築様式である(西嶋(2016):災害から学ぶ—2015年3月バヌアツ共和国を襲ったサイクロンパム—)。また、同島では、西洋的建築様式を模したニマイトウンガの数が増えてきている。これらのうちの一部は、建材の一部に工業製品を用いたものである。

一方、近年開発途上国では工業製品を用いた外来建築様式の建設が増えているが、冒頭にも述べたように未熟な施工技術によって必ずしも所期の性能を確保できていない。また、外来建築様式の導入により、在来建築技術が失われ、発災時に建材が入手できずに長期にわたり復旧できないという問題が発生している(例えば、2013年台風Haiyanに襲われたフィリピン中部)。そこで、本課題では、在来建築のほうがレジリエントであるという仮説のもと、復旧時間の期待値を指標として、タンナ島に見られる典型的な3種類の建築物についてレジリエンス評価を行った(図7)。レジリエンス評価に際しては、確率的サイクロンシミュレーションによるハザード評価、構造信頼性に基づく重要な破壊モードに対する破壊確率の評価、現地での建設行程のモニタリング(図8)に基づく復旧に要する労力の評価の結果を統合して評価を行った。その結果、ニマラタンは、建設労力は他の2種類に比べて大きいものの、破壊確率が低いことから期待復旧時間は小さいという結果が得られた。また、ニマラタンの建材はコミュニティ内の森林や隣接するコミュニティから入手可能なため、入手不可能性による復旧遅延も起こりにくく、総合的にレジリエンスが高いことが明らかになった。[雑誌論文4]。

| Type | Nimalaten (NT) | Nimaitunga (NO) | Nimaitunga (NI) |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Appearance | | | |
| Structural Component | Local material | Local material | Local material |
| Connection | Vine, tree skin | Nail | Nail |
| Roofing | Thatch | Thatch | GI sheet |

図7. 検討対象とした3種類の建築物



建設全体をタイムラプス動画で撮影
→建設工程ごとに工数を計測

図8. 建設工程のタイムラプス動画

本課題を通じて得られたニマラタンの耐風性能評価結果は、JICA 草の根協力事業(タンナ島における在来建設技術の高度化支援)において高度化支援に際しての科学的根拠を与えるとともに、同事業のアウトプットの一つであるニマラタン建設マニュアルの付録に掲載するなど、社会実装へ貢献した[アウトリーチ3]。

4. 5. 運動する風速計で計測された風速値を用いた対地風速評価

本研究での活動を通じて、開発途上地域での風速計の設置および計測に困難が伴うことが改めて認識されたので、通常用いられる塔状支持物ではなく、現地で生育している樹木あるいは係留されたバルーン等の設置が容易な支持物に風速計を設置し、風速を観測する手法を考案した。これは、風に煽られて運動する支持物あるいは風速計に加速度・ジャイロ・地磁気センサー等を設置し、風速計の運動状態を逐次ゼロ点補正アルゴリズムと既存のカルマンフィルター手法を用いて推定する手法である(図9)。

この手法の精度を、風洞実験内で風の作用によって振り子運動をする熱線風速計を用いて検証した(図10)。その結果、今回の実験系においては約10%の誤差で対地風速を推定できることが明らかになった(図11)[雑誌論文10, 雑誌論文11]。この手法を実用化することで今後の開発途上地域での風速計測が容易になることが期待される。

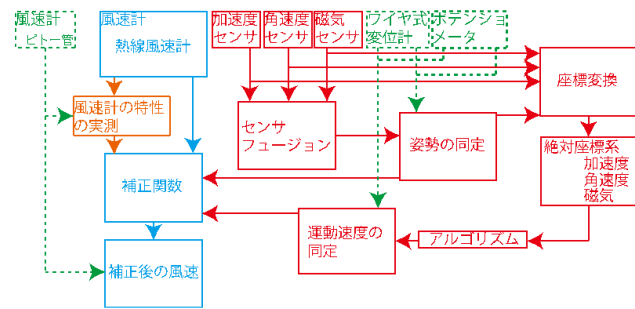


図9. 提案する補正手法 (実線部分が提案するアルゴリズムのチャート。点線部分は提案する手法の妥当性を検証するための実験装置)

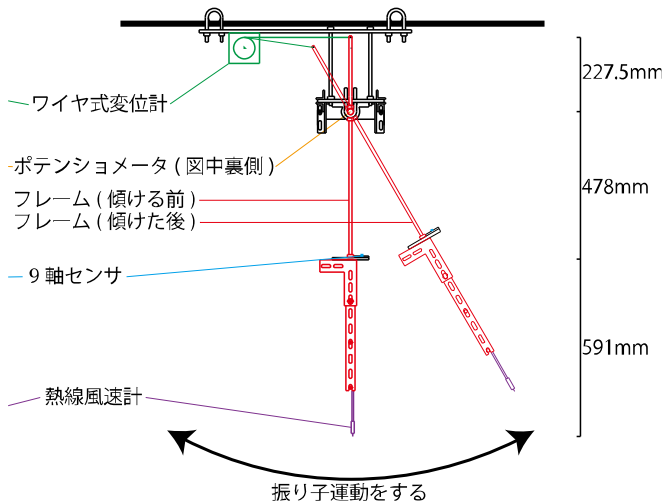


図10. 提案する補正手法を検証するための実験装置

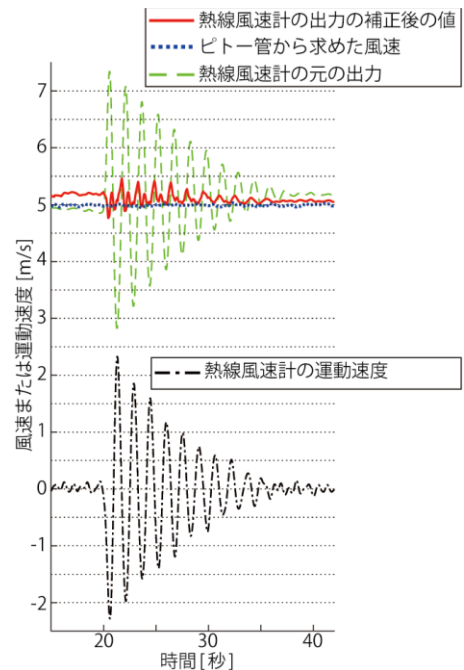


図11. 提案する補正手法の精度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計12件)

- [1] 岸田夏葵, 西嶋一欽, 西村宏昭, 形状に着目したバヌアツ共和国タンナ島における伝統的サイクロンシェルターの空気力学特性, 第24回風工学シンポジウム論文集, 211-216 (2016).
- [2] 西嶋一欽, 災害から学ぶ—2015年3月バヌアツ共和国を襲ったサイクロンパム—, 京都大学防災研究所年報, 59(A), 91-97 (2016).
- [3] 奥田博貴, 西嶋一欽, 西村宏昭, 形状の工夫による高床式建築物の風荷重低減の可能性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, 129-130 (2017).
- [4] N. Kishida, K. Nishijima, H. Nishimura, Recovery-time assessment of non-engineered buildings in Tanna Island, Vanuatu, Proceedings of International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation (2018).
- [5] Nishijima, Kazuyoshi, Climate Change and Foundation for Survival; Cooperating with Local Knowledge and Science, Trends in the Sciences, 23, 8_54-8_58 (2018).
- [6] 美並浩成, 西嶋一欽, 丸山敬, 西村宏昭, 隣接建物の影響を考慮した建物群の風荷重評価手法, 日本風工学論文集, 印刷中.
- [7] Kazuyoshi Nishijima, Fumiaki Kobayashi, Junji Maeda, Linking post-disaster survey and disaster risk reduction, Proceeding of 18th Science Council of Asia Conference (2018).
- [8] 藤枝絢子, 宮地茉莉, 小林広英, 西嶋一欽, バヌアツ農村集落におけるサイクロン被害と再建に関する調査研究 その1—タンナ島ラウナウラ村における集落と住居の状況—, 日本建築学会近畿支部研究発表会要旨 (2018).
- [9] 宮地茉莉, 藤枝絢子, 小林広英, 西嶋一欽, バヌアツ農村集落におけるサイクロン被害と再建に関する調査研究 その2—タンナ島ラウナウラ村における災害対応と復興過程—, 日本建築学会近畿支部研究発表会要旨 (2018).
- [10] 岩崎弘高, 西嶋一欽, 運動する風速計による風速測定を試み, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, 149-150 (2018).
- [11] 岩崎弘高, 西嶋一欽, 運動している風速系で計測された風速のセンサフュージョンによる補正手法, 第25回風工学シンポジウム論文集, 187-192 (2018).
- [12] Hiroki Okuda, Kazuyoshi Nishijima, Espina, Mary Ann, Study on aerodynamic characteristics of vernacular house with elevated floor - wind force, pressure and speed, Proceedings of the 15th International Conference on Wind Engineering.

〔学会発表〕（計12件）

- [1] Nishijima, K., Nishimura, H., Espina, M.A., Hernandez, Hr. J., Wind-resistant Performance Improvement of Non-Engineered Houses Considering Vernacular Architectural Characteristics: Case in the Middle of the Philippines, Sustainable Built Environment “Sustainable Built Design”, Alabang, the Philippines (2016).
- [2] Nishijima, K., Espina, M.A., Collaboration between engineering and architecture for resilient vernacular construction in the Philippines, the sixth U.S. - Japan workshop on wind engineering - windstorm hazard reduction of critical infrastructure -, Tokyo, Japan (2016).
- [3] 岸田夏葵, 西嶋一欽, 西村宏昭, 丸山敬, バヌアツ共和国タンナ島に見られるサイクロン・シェルターの風洞実験による空力特性評価, 日本建築学会大会学術講演会, 福岡 (2016).
- [4] K. Nishijima, J.P. Pinelli, State-of-the-art of engineering approach for wind-related risk modeling of residential exposure, 6th International Summit on Hurricanes and Climate Change: From Hazard to Impact, Crete, Greece (2017).
- [5] R. Inoue, K. Nishijima, Modeling of wind flow around tree for CFD simulation, UNESCO-JASTIP Joint Symposium on Intra-Regional Water Security and Disaster Management, Quezon City, the Philippines (2017).
- [6] 井上龍一, 西嶋一欽, 気流性状解析のための樹木空力パラメータ最適化手法の提案, 京都大学防災研究所研究発表講演会(2018).
- [7] 岸田夏葵, 西嶋一欽, 復旧時間に基づくレジリエンス評価: タンナ島における風災害後の住宅復旧を事例として, 京都大学防災研究所研究発表講演会(2018).
- [8] 三浦史樹, 西嶋一欽, ヤンゴンにおける学校および集合住宅の耐風性能調査報告, 京都大学防災研究所研究発表講演会(2018).
- [9] 迫田恵子, 西嶋一欽, ネパールにおけるノンエンジニアド住宅の構造性能向上に対する投資対効果の検証, 京都大学防災研究所研究発表講演会(2018).
- [10] P. Lacorre, K. Nishijima, Preliminary study for modeling of windbreaking effect of trees considering their dynamic motion, The 5th JASTIP Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia (2018).
- [11] 奥田博貴, 西嶋一欽, 床下の通風空間に着目した風洞実験による高床式建築物の空力特性評価, 京都大学防災研究所研究発表講演会(2019).
- [12] 三浦史樹, 西嶋一欽, 開発途上国におけるトタン屋根被害に着目した屋根緊結部改善策の費用対効果, 京都大学防災研究所研究発表講演会(2019).

〔図書〕（計1件）

Kazuyoshi Nishijima, Chapter 10 Housing Resilience to Wind-Induced Damage in Developing Countries, Climate Adaptation Engineering, Butterworth-Heinemann, 総ページ数 27 (2019).

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

〔その他〕（アウトリーチ3件、受賞1件）

アウトリーチ

- [1] サイエンスアゴラへの出展: 科学で迫る伝統の防災術～バヌアツ共和国の場合～, 京都大学防災研究所マンタナチーム, 2017. 11. 25, テレコムセンタービル, <http://www.ist.go.jp/sis/scienceagora/reports/2017/program/booth/120/>
- [2] 日独ジョイントレクチャ: 自然災害に強い建物をどう実現するか?, 2018. 3. 20, ハイデルベルグ大学, https://www.oc.kyoto-u.ac.jp/overseas-centers/eu/news/20180306_6012/
- [3] JICA 草の根事業「Advancement of Vernacular construction in Tanna」への実装, 2016. 09-2018. 09, バヌアツ共和国タンナ島, https://www.jica.go.jp/partner/kusanone/partner/van_01.html

受賞

International Associations for Wind Engineering Junior Award (2018).
<http://www.iawe.org/award.html>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。