

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360232

研究課題名(和文)原子力発電所などの高危険度施設の竜巻対策ガイドラインの提案

研究課題名(英文)Guideline of countermeasure for tornado to nuclear power plants

研究代表者

田村 幸雄(Tamura, Yukio)

東京工芸大学・工学部・客員教授

研究者番号：70163699

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：日本の原子力発電施設やLNGタンクなどは全て海岸線に沿って建設されており、米国中部の竜巻常襲地域の竜巻発生確率などと較べても、これら我が国の高危険度施設の竜巻遭遇確率は遥に高い。本研究では、従来から設計では採り上げられていなかった竜巻等のシビア・ローカルストームの、原子力発電施設、大規模液化天然ガス貯蔵施設、使用済核燃料再処理施設、有害産業廃棄物処理施設など、被害が発生した際に周辺地域、住民に甚大な悪影響を与える重要施設に対する影響と対策、設計・施工に対するガイドラインを検討した。

研究成果の概要(英文)：In Japan, the nuclear-plant facilities and LNG tanks have built in coastal area. The encounter rate of tornadoes on these kinds of facilities is higher than the rate in Middle part of United States. In this study, the guidelines on countermeasure, design, and construction of the facility such as nuclear power plants, huge-scaled LNG storage installations, nuclear fuel reprocessing plants, and hazardous industrial wastes when the damage occurred on these facilities due to the sever local storm were examined.

研究分野：耐風工学

キーワード：竜巻 高危険度施設 原子力発電所 LNGタンク 竜巻対策ガイドライン

1. 研究開始当初の背景

2005年12月25日に山形県酒田市付近で羽越本線特急いなほ14号の突風による脱線事故、翌2006年9月17日の延岡市の竜巻、同年11月7日の北海道佐呂間町での竜巻と、大量輸送機関の被害や多数の死者を出す竜巻による災害が連続した。日本の竜巻の多くが海岸沿いの地域で発生しており、海岸線に沿って敷設された鉄道での事故も多い。近年の日本の竜巻の85%以上が海岸線の前後2km以内で発生している事実は極めて重要である。日本の原子力発電施設やLNGタンクなども、全て海岸線に沿って建設されており、トルネードアレイと称される米国中部の竜巻常襲地域の竜巻発生確率などと較べても、これら我が国の危険物収容施設の竜巻遭遇確率は遥に高いのである。これまで完全に見落とされてきた事実である。

2. 研究の目的

本研究では、従来から設計では採り上げられていなかった竜巻等のシビア・ローカルストームの、原子力発電施設、大規模液化天然ガス貯蔵施設(LNGタンク)、使用済核燃料再処理施設、有害産業廃棄物処理施設など、被害が発生した際に周辺地域、住民に甚大な悪影響を与える重要施設に対する影響と対策、設計・施工に対するガイドラインを検討し、提案する。

3. 研究の方法

本研究の最終目的は竜巻等の突風による原子力発電施設等の重要施設への影響と対策、設計・施工に対するガイドラインを提案することであり、喫緊の事項である。

原子力発電施設などが建設されている海岸線周辺での竜巻発生時の環境場の調査、竜巻被害調査を行う。

米国において2011年だけでも2箇所の原子力発電所の送電設備が竜巻により被害を受け、外部電源が遮断され原子炉計5基がシャットダウンする事故が発生している。日本でも竜巻等の突風によるものと見られる被害が原子力発電施設内の建造物や附属施設で発生している可能性があり、原子力発電施設付近での竜巻発生事例の有無やその状況について調査することが必要である。また、現地調査に基づいて、原子力発電施設等での被害のポテンシャルの推定、原子力発電施設等のための竜巻リスクモデルの構築、竜巻状気流および風圧力の性状の把握、原子力発電施設等における飛散物のポテンシャル調査

を行い、そこで得られた結果を基に原子力発電所など高危険度施設への竜巻影響評価と竜巻対策ガイドラインを提案する。

4. 研究成果

(1) 竜巻等の発生頻度

過去の竜巻等の突風データベースから、竜巻発生の地域性を検討した結果を図1に示す。海岸線付近での発生頻度が極めて高い。日本において海岸線付近には、発電施設や大規模プラントなどの安全性評価においては慎重を期すべき重要構造物が多く建設される傾向にあるため、海岸線からの距離に応じた地域性を考慮して竜巻等の影響を評価することが必要であることがわかる。

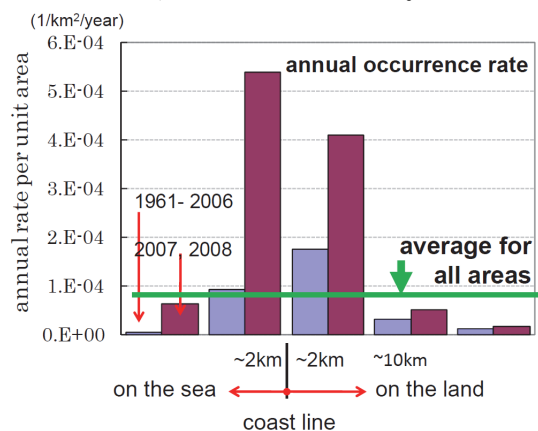


図1 竜巻の発生位置と海岸線からの距離の関係

(2) 竜巻状旋回流に竜巻移動速度、地表面粗度が及ぼす影響の検討

図2に示す3種類の床面粗度(粗度平面密度0, 4, 16%)について、移動する竜巻状旋回流を発生させその旋回流形状と床面における風圧力の変化を調べた。図3(a)~(c)に床面粗度ごとに、移動速度が竜巻状旋回流の形成に及ぼす影響について可視化実験結果をまとめた。床面粗度が小さい場合は、床面に近い位置から旋回流の軸が傾斜するのに対し、床面粗度が大きくなると、床面付近の旋回流軸の傾斜が小さくなり、上部において急傾斜を呈する傾向を示している。

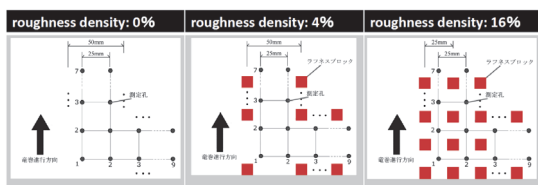
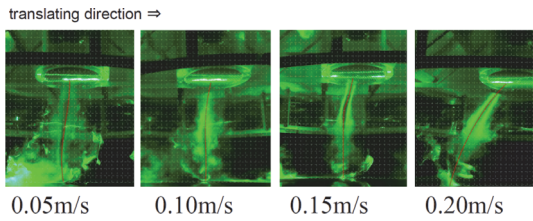
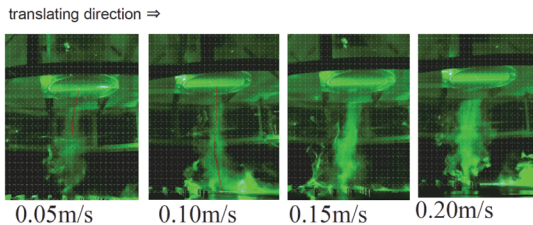


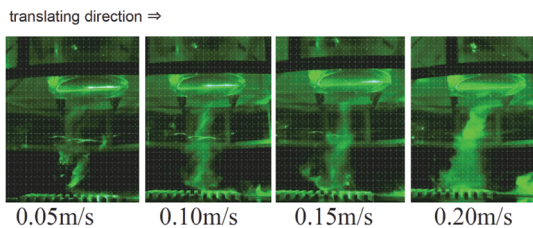
図2 竜巻の渦形成に及ぼす移動効果と表面粗度の影響に関する実験条件



(a) updraft: 4.5m/s, roughness density: 0%



(b) updraft: 4.5m/s, roughness density: 4%



(c) updraft: 4.5m/s, roughness density: 16%

図3 移動効果が竜巻渦形成に与える影響

床面圧力への粗度と移動速度の影響について図4, 図5に実験結果を示す。図4に床面粗度が移動竜巻渦の床面圧力に及ぼす影響を示す。床面粗度が大きくなるにつれて、旋回流中心付近が床面に接する位置での気圧低下量が小さくなる。粗度が小さい場合は、集中した極めて低い圧力が発生している。図5には移動効果が竜巻渦による床面圧力に及ぼす影響を示す。移動速度の変化により若干の圧力低下量の減少が見られるがあまり顕著ではない。

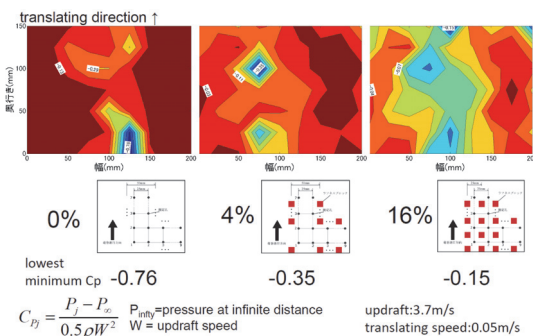


図4 床面粗度が移動竜巻渦の床面圧力に及ぼす影響

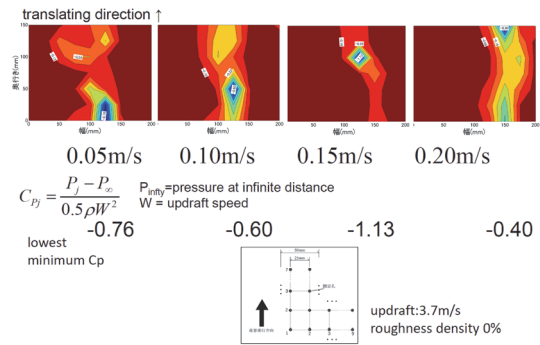


図5 移動効果が竜巻渦による床面圧力に及ぼす影響

(3) 台風時の強風や竜巻等突風時に発生する人的リスクに関する調査

東京工芸大学 風工学研究センターAPEC 強風防災センターでは、日本における過去の強風、突風時の被害事例について、マスメディア、学術調査報告書、気象庁資料等を基に情報収集と整理を行い、データベースを構築している。本研究においても、最近の被害事例について情報収集を行い、データベースに情報を追加した。

図6に、強風・突風時に発生した人的被害の件数を要因別に整理した。風にあおられて転倒・落下する件数が多いが、最も顕著な要因は飛来物・落下物の直撃を受けての被害であることがわかる。図7に被害に関連して発生した飛来物の形状について、点状(0次元), 棒状(1次元), 面状(2次元), 複雑形状(3次元)に分類して件数を示した。面状(2次元)の飛来物の発生件数が多いことが明らかである。

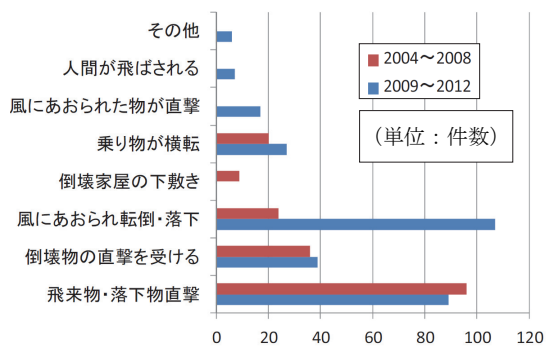


図6 東京工芸大学 強風・突風被害データベース (マスメディア、学術調査報告書等を1次資料として構築したデータベース) による人的被害要因

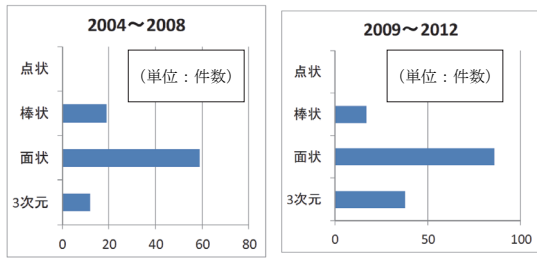


図7 東京工芸大学 強風・突風被害データベース (マスメディア, 学術調査報告書等を1次資料として構築したデータベース) による飛来物の形状

(4) 米国における原子力発電施設に竜巻が及ぼす影響に関する事例調査

米国の原子力発電所について、竜巻に対する安全性について、過去の事例をまとめ、ケーススタディとして検討した。アメリカ合衆国の原子力発電所は、竜巻やその他の自然災害のリスクを考慮している。米国 Nuclear Research Council(NRC)は、1974年に確率論的リスク評価に基づく原子炉の竜巻設計仕様を発表した。これまでのところ、この基準に相当するような竜巻の襲来は報告されておらず、基準以下の竜巻の襲来を受けた場合について、原子力発電所は、安全性に関してのすべての NRC 設計基準を満たしていることが確認された。

米国では、福島第一発電所の事故発生後、可能性のあるすべての自然災害について、原子力発電の安全性を再検討した。その結果、Tornado Alley と呼ばれる竜巻常襲地域において、最大風速 103m/s(旋衡風速 82m/s)、中心気圧低下量 83hPa の竜巻に対する安全性が確認された。さらに、最も損傷を受けやすいとされたのは、消防や非常時の冷却水の供給に必要な施設や車両であることが明らかにされた。

表1に米国原子力発電所に竜巻が及ぼした影響の過去の事例についてまとめた。1970年代からの原子炉の建設後、竜巻が直撃した事例はないが、近傍を通過したケースでは、原子力発電所敷地内に影響を与え、または、送配電施設へ影響を与え、原子炉の停止に至る事例が報告されている。

(5) 高危険度施設に作用するピーク外圧係数の検討

原子炉建屋、大規模 LNG タンク、ガスタンク等の球形タンク、管理棟を対象として4種の形状を有する風圧模型を作製し、それらに対して、ピーク風圧力を調べた。図8~11は模型表面と床面に作用する実物換算1秒相

表1 米国原子力発電所に竜巻が及ぼす影響

原子力施設 (建設年)	
竜巻発生年月日	原子力施設内での事象
スケール	
距離	
フェルミ原子力発電所 (1972)	
2010/6/6	建屋の外装材剥離, 緊急設備 2 基中の 1 基が使用不能, 送電施設の損傷により原子炉は安定的に停止, 電力供給地域の停電 1 日
EF1	
0.71km	
ブラウンフェリー原子力発電所 (1973, 1974, 1976)	
2011/4/27	外部電源喪失による Hot standby 状態(バックアップ施設同時稼働), 電力供給地域の停電
EF3 以上 EF5 まで同時多発(358 個)	
4.8km	
サリー原子力発電所 (1972, 1973)	
2011/4/16	バックアップ用燃料タンクトラックの損傷(車庫倒壊)
EF3	
0.35km	
デービス・ベッセ原子力発電所 (1970)	
1998/6/24	漏斗雲が冷却塔に接近した際の鉄道操車場, 配電施設の被害に応じた自動停止, 非常電源により安全装置稼働
F2	
5.6km	
クアド・シティーズ原子力発電所 (1970)	
1990/3/13	安全防護壁損傷, 屋根部材が汚染水の排気塔につながるダクトに飛来するも放射能を含む漏気は無し
EF3	
3.9km	

当のピーク風圧係数の分布を示している。立方体模型と直方体模型の場合、風上側面と屋根面のコーナー部に大きなピーク負圧が生じている (図8, 図9参照)。一方、円筒模型と球体模型の場合、それぞれ風上の屋根面と球体模型の頂点(下向き)で少し大きくなっている(図10(b), 図11参照)。しかし、角柱模型と比較すると、円形に作用するピーク負圧が小さいことを分かった。

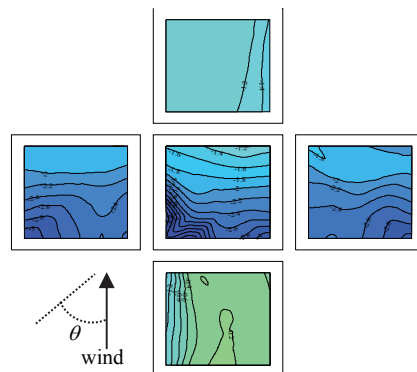


図8 立方体模型に作用するピーク負圧係数

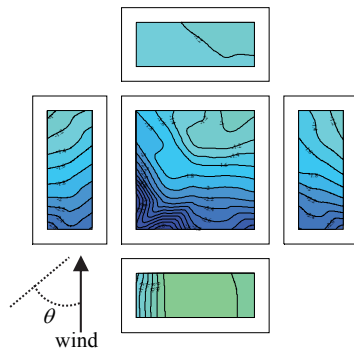
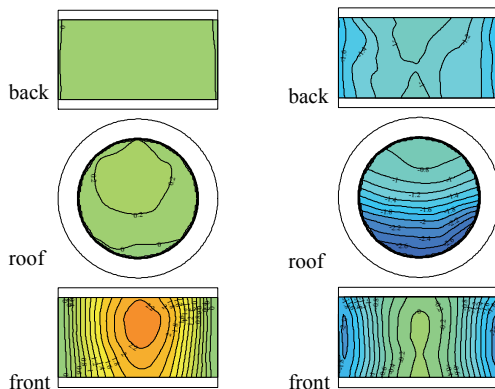
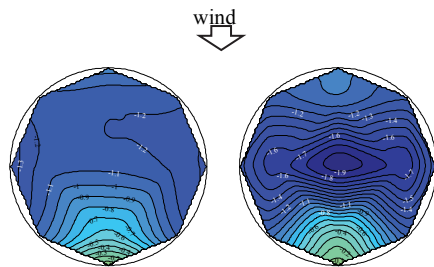


図 9 直方体模型に作用するピーク負圧係数の分布



(a) ピーク正圧係数 (b) ピーク負圧係数

図 10 円筒模型に作用するピーク風圧係数の分布



(a) View from above (b) View from below
図 11 球体模型に作用するピーク負圧係数の分布

(6) 竜巻等の突風に対する設計ガイドラインの検討

以上の検討より、竜巻等の突風に対して、重要構造物を設計する場合には、以下の項目を検討すべきことが提案される。

- (a) 海岸線からの距離等の地域性の考慮
- (b) 風圧力や風力の特徴の十分な吟味
- (c) 風圧力だけでなく、飛来物の影響の考慮
- (d) 安全性を評価すべき構造物だけでなく、非常時のバックアップシステムなどを含むシステム全体の評価

このうち、竜巻の風速と飛来物の影響に対する評価方法を図 12 に示す。

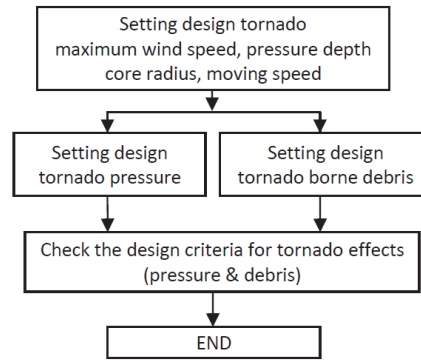


図 12 竜巻に対する安全性の評価手順

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

(1)Geetha Rajasekharan Sabareesh, Masahiro Matsui, Yukio Tamura, 査読有, Dependence of surface pressures on a cubic building in tornado like flow on building location and ground roughness, Journal of Wind Engineering & Industrial aerodynamics, Vol103, 2013, 50-59, doi:10.1016/j.jweia.2012.02.011

(2)田村幸雄, 松井正宏, 吉田昭仁他 10 名, 査読無, 2012 年 5 月 6 日に北関東地方で発生した竜巻による建築物等への被害, 日本風工学会誌, Vol.38, No.1, 17-30, 2013, http://doi.org/10.5359/jawe.38.17

(3)石原正仁, 小林文明, 他 6 名, 査読無, 竜巻発生時の気象状況と竜巻及び竜巻を生み出したストームの特徴, 日本風工学会誌, Vol38 No.1, 5 - 16, 2013, http://doi.org/10.5359/jawe.38.5

(4)松井正宏, 喜々津仁密, 野田稔, 佐々浩司, 査読無, 竜巻による構造物の風圧力, 実験手法と課題, 日本風工学会誌, Vol.37 No.2, 118 - 123, 2012, http://doi.org/10.5359/jawe.37.118

(5)E. Kobayashi, A. Katsura, Y. Saito, T. Takamura, T. Takano and D. Abe, 査読有, Growing Speed of Cumulonimbus Turrets, Journal of Atmospheric Electricity, 32, 13-23, 2012, DOI 無

(6)小林文明, 野呂瀬敬子, 査読有, 日本の竜巻による人的被害の特徴, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, 79-84, 2012, http://doi.org/10.14887/kazekosymp.22.0.79.0

(7)佐々浩司, 鈴木修, 小林文明, 査読無, 竜巻の発生環境と生成メカニズム, 日本風工学会誌, 37, 108-117, 2012, http://doi.org/10.5359/jawe.37.108

(8)小林文明, 査読無, 2012 年 5 月 6 日に北関東で発生した広域突風災害について一被害発生時の気象状況, 日本風工学会誌, 37, 211

-212, 2012, <http://doi.org/10.5359/jawe.37.210>

(9)小林文明, 査読無, 2012年5月6日茨城・栃木の竜巻に関する調査研究報告会—上空から見た被害の特徴, 天気, 60, 51-52, 2013, DOI 無

(10)Rei Okada, Yukio Tamura, Masahiro Matsui, Akihiro Yoshida, 査読有, Critical Equivalent Wind Speeds for Overturning and Roof Blow-off of 2-Story Wooden Houses, Journal of Disaster Research, Vol.8, pp.1084-1089, 2013, DOI 無し

(11)斎藤洋一, 小林文明, 桂啓仁, 高村民雄, 鷹野敏明, 操野年之, 査読有, 衛星(MTSAT-1R)ラピッドスキャンデータで見た孤立積乱雲の一生, 天気, 60, pp.247-260, 2013, DOI 無

(12)F. Kobayashi, M. Yamaji, 査読有, Cloud Lightning Features of Tornadoic Storms Occurred in Kanto, Japan, on May 6, 2012, Journal of Disaster Research, Vol.8, pp.1071-1077, 2013, DOI 無

(13)小林文明, 査読無, わが国における竜巻の発生実態と観測の現状, 大気電気会誌, 7, pp.19-28, 2013, DOI 無

(14)佐藤英一, 小林文明, 査読無, 2013年9月に発生した一連の竜巻き災害について—竜巻発生時の気象場—, 日本風工学会誌, 39, pp.70-71, 2013, <http://doi.org/10.5359/jawe.39.69>

(15)G. R. Sabareesh, Masahiro Matsui, Yukio Tamura, 査読無, Characteristics of tornado vortex developed under a translating tornado-like flow simulator, Asia Pacific Conference on Wind Engineering(APCWE-VIII,2013), Chennai, India, 1/1, pp.99-102, 2013, DOI 無し

(16)Sudha Radhika, Yukio Tamura, Masahiro Matsui, 査読無, Strong wind-damaged roof detection from post-storm aerial images, Asia Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE- VIII ,2013), Chennai, India, 1/1, pp.1122-1128, 2013, DOI 無し

(17)小林文明, 野呂瀬敬子, 木村孝承, 査読有, 日本沿岸の海上で発生した竜巻の特徴とその評価, 第23回風工学シンポジウム論文集, pp.169-174, 2014, https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosymp/23/0/23_169/_pdf

(18)D. O. Prevatt, D. Agdas, A. Thompson, Y. Tamura, M. Matsui, R. Okada, 査読有, Tornado damage and impacts on nuclear facilities in the United States, 日本風工学会論文集, 40, pp.169-174, 2015, DOI 未
〔学会発表〕(計21件)

(1)G.R. Sabareesh, M.Matsui, Y.Tamura, Ground

roughness effects on internal pressures and local roof wind forces of building exposed to tornado like flow, 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications, 2012.9.2, Shanghai, China

(2)小林文明, 桂啓仁, 高村民雄, 齊藤洋一, 鷹野敏明, 雲レーダー・Xバンドレーダー・衛星フッピドスキャン・可視像による孤立積乱雲発生初期の観測-ナウキャストの可能性-, 日本気象学会, 2012.5.26, つくば国際会議場

(3)小林文明, 高村民雄, 鷹野敏明, 齊藤洋一, 桂啓仁, Isolated cumulonimbus initiation observed by 95 GHz cloud radar, X band radar, MTSAT-IR(rapid scan), and photogrammetry in the Kanto region, Japan, 日本地球惑星科学連合, 2012.5.21, 幕張メッセ

(4)小林文明, 大窪拓未, 山路実加, 桂啓仁, 2012年5月6日北関東で発生した竜巻, 日本大気電気学会, 2012.9.13, 大阪大学
他17編

〔図書〕(計4件)

(1)Y. Tamura, F Kobayashi, O. Suzuki, Y. Uematsu and Y. Okuda Emerald Books (R. Shaw and P. Tran 編), Environment Disaster Linkages, Typhoon and tornado risk management, 2012, 354,

(2)小林文明, 他(分担執筆: 編者14名, 著者128名), 朝倉書店, 地球環境の事典, シビアーウェザー, p.378, 2014

(3)前田潤滋, 田村幸雄, 小林文明, 吉田昭仁, 松井正宏他, 日本建築学会, 2012年5月6日に北関東で発生した一連の竜巻による突風被害の記録, p.101, 2014

(4)小林文明, 成山堂書店, 竜巻 メカニズム・被害・身の守り方, p.151, 2014

6. 研究組織

(1)研究代表者

田村幸雄 (客員教授)

東京工芸大学 工学部

研究者番号: 70163699

(2)研究分担者

松井正宏 (教授)

東京工芸大学 工学部

研究者番号: 60350576

吉田昭仁 (准教授)

東京工芸大学 工学部

研究者番号: 90329219

小林文明 (教授)

防衛大学校 応用科学群

研究者番号: 80202068

(3)連携研究者 なし