

バイクの活用に着目した津波避難シミュレーション：シポラ島におけるケーススタディ

前田 裕紀¹・小野 祐輔²・Rusnardi Rahmat Putra³

¹ 学生員 鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科

(〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101)

E-mail: m20j6019x@edu.tottori-u.ac.jp

² 正会員 鳥取大学教授 工学部社会システム土木系学科

(〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101)

E-mail: ysk@tottori-u.ac.jp (Corresponding Author)

³ Non-member Padang State University

スマトラ島の西方沖およそ 120km に浮かぶメンタワイ諸島は、M9 クラスの地震を引き起こすスンダ海溝に隣接しており、地震の揺れだけでなく津波に襲われることが危惧されている。津波の発生源が近いため、住民が津波からの避難に使える時間は極めて限られている。そこで、メンタワイ諸島において、個人の主要な交通手段であるバイクを避難に活用することが考えられる。本研究では、バイクによる避難者と徒歩による避難者と出会った場合、同乗してバイクで避難するという行動をモデル化したマルチエージェント避難シミュレーションモデルを開発した。開発したマルチエージェント避難シミュレーションモデルを用いて、メンタワイ諸島の中の一つの島であるシポラ島の Tuapejat を対象としたケーススタディを実施し、避難におけるバイクの有効性を検討した。

Key Words: Sunda trench, short-time evacuation, multi-agent simulation, Mentawai islands, Indonesia

1. はじめに

インドネシア・スマトラ島西方沖のスンダ海溝では、M9 クラスの地震の発生が予測されている^{1,2)}。この地震は震源域が海域にあるため、大規模な津波を引き起こすと考えられており、スマトラ島西海岸が大きな被害を及ぼすことが危惧されている。特に、この地域の中核都市であるパダンに対しては、津波ハザード、さらに津波リスクに関する研究が多数行われている³⁻⁷⁾。

スンダ海溝で発生する地震の震源域には、メンタワイ諸島と呼ばれる島々がある(図-1)。メンタワイ諸島は、シベルト島、シポラ島、北パガイ島、南パガイ島という4つの島の有人島を中心として構成されている。メンタワイ諸島は、スマトラ島西海岸と同様に津波により大きな被害を受ける恐れがあるのにも関わらず、スマトラ島西海岸と比較して人口が少なく、また経済的に発展した地域ではないため、これまで津波ハザード、津波リスクに関する研究はいずれもほとんど行われていない。

本論文では、メンタワイ諸島の中で中心的な役割を有

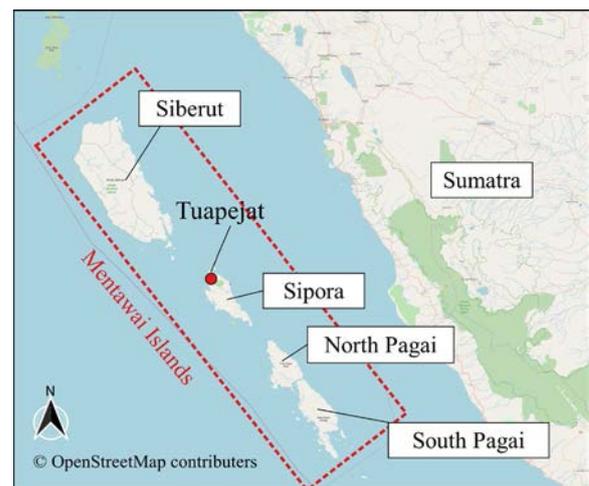


図-1 メンタワイ諸島

するシポラ島を対象に、マルチエージェントモデルを用いて、住民が避難に要する時間を検討する。津波避難時の移動手段としては、徒歩によることが推奨されている。これは、自動車やバイク等の車両を避難に用いた場合に

交通渋滞や事故の発生により、避難が妨げられることを防ぐためである。ところが、シボラ島のように人口密度が低く、かつ自動車の台数が少ない地域では、車両による避難が有効に機能する可能性が高い。そこで、本論文では、シボラ島において主要な交通手段であるバイクを用いた避難の有効性を中心に論じる。この議論のため、本論文では、バイクによる避難者が、避難途中で徒歩による避難者を発見した際に、徒歩による避難者をバイクに同乗させて避難を行うモデルを作成した。

2. 研究対象エリア

インドネシア政府が 2019 年に実施した国勢調査によると、本論文の研究対象としたシボラ島の人口はおよそ 23,000 人であり、メンタワイ諸島全体の 25% を占めている。メンタワイ諸島を管轄する行政機関の多くがシボラ島に置かれている。シボラ島の主な産業は漁業、農業である。さらに、サーフィンの名所として国内外から旅行者も訪れるため、観光産業に従事する住民も多い。ただし、大規模な宿泊施設や商業施設は存在せず、豊かな自然を楽しめる地となっている。島民の主要な交通手段は徒歩あるいはバイクであり、一般家庭には自動車はほとんど普及していない。シボラ島と島外との移動はほとんどが海上交通による。最寄りの大都市は西スマトラ州のパダンであり、パダンとシボラ島との間は高速船で片道 4 時間程度を要する。

シボラ島は、スンダ海溝で発生する地震の震源域内にあることから、近い将来の発生が予測されている M9 クラスの地震だけでなく、他の小規模な地震によって引き起こされる津波の影響も受けやすい。実際に、2010 年の M7.8 の地震では、島南部で津波被害を受けた。行政機関および住民は、島の海岸域全体で津波に襲われる危険性が高いと認識しているものの、防潮堤や防波堤等の津波防護施設はほとんど整備されていない。そのため、避難が唯一の津波対策となっている。シボラ島内には中層以上の建物はなく、現状では避難タワーも設けられていない。したがって、津波からの避難は高台に向かって行うしかない。

これまで、スンダ海溝付近で発生する津波に対する関心は、スマトラ島西岸の中核都市であるパダンに集中しており、メンタワイ諸島の島々に対する津波ハザードを中心に扱った研究は数少なく、著者らの知る限り Griffin ら⁹⁾のみである。Griffin ら⁹⁾は、過去の地殻変動の履歴と調和的な断層破壊パターンを仮想的に生成することで、1000 パターンの津波シミュレーションを実行し、メンタワイ諸島の主要 4 島の沿岸部における最大の津波高さを求めた。Griffin ら⁹⁾の示した結果によると、シボラ島は 5m から 10m の津波に襲われる可能性があること

が示されている。また、シボラ島に到達する津波では短周期成分が卓越するため海底の細かな地形の影響を受けやすく、局所的に波高が大きくなる危険性があることが指摘されている。

3. シミュレーションモデル

(1) 津波避難のモデル

ある地域において津波による避難が有効に行われるかどうかは、津波の浸水エリアから安全な地点まで人々が移動するに要する時間として定義される避難時間を用いて検討できる。避難時間を求める手法は、地理情報を用いて静的な評価を行うものと、マルチエージェントモデルを用いて動的な評価を行うものに分けられる。地理情報を用いた静的な評価手法⁸⁾¹⁰⁾では、避難時間を地形の起伏や土地利用等の地理空間に応じた避難者の移動速度の変化を考慮した最小コスト距離に基づいて求めることが主流となっている。この手法では、避難者個々の性質や避難者同士の相互干渉など、避難の過程で時々刻々と変化する現象を考慮することができない。これらの現象を考慮したい場合には、マルチエージェントモデルに基づく動的な評価手法⁷⁾¹¹⁻¹⁴⁾が用いられる。マルチエージェントモデルでは、避難者一人一人をエージェントとしてモデル化する。エージェントは予め定義された行動ルールに従って移動する。行動ルールには、地形の起伏や土地利用による移動速度の低下だけでなく、経路選択の多様性や混雑状況の影響を含めることができる。

(2) 現地調査

シボラ島を対象とした津波避難モデルの作成に必要な情報を収集するため、著者らは 2019 年 9 月 11 日から 13 日の 3 日間で現地調査を実施した。現地調査においては、避難に用いられる道路の状況、交通手段、交通渋滞の状況等について行政機関と住民への聞き取り調査を行った。現地調査によって得られた情報は次のようにまとめられる。

- ・シボラ島の島内の沿岸部の道路は多くが舗装されているものの、ひび割れや窪みが多い。
- ・一般家庭に自動車は普及しておらず、島民の主な交通手段は徒歩あるいはバイクである。
- ・交通渋滞はほとんど起こらない。

これらの情報に基づき、避難は徒歩あるいはバイクによって行われると設定した。さらに、平常時においても住民同士が乗り合わせてバイクで移動することが多いことから、バイクによる避難者が避難中に歩行者による避難者を発見すると、その歩行者をバイクに同乗させるという状況が多く発生すると推測した。また、このようにバ

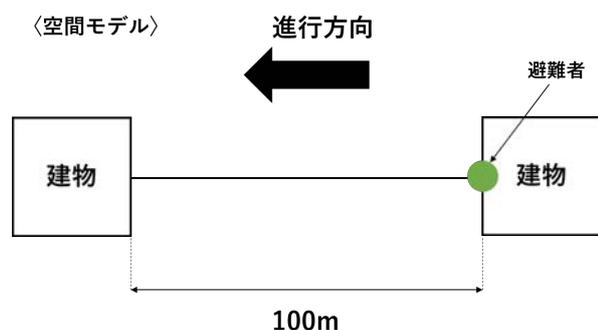


図-2 移動速度の検証に用いた空間モデル

設定した移動速度	シミュレーションによる移動時間	移動時間の理論値
1.10m/s	91s	91s
15.0km/h	24s	24s

バイクに乗り合わせる避難は、地域全体の避難時間を短縮する効果が期待できると考えた。徒歩、あるいはバイクのいずれかのみによる避難を対象とした場合には、地理情報を用いた静的な検討が行える。一方、バイクに乗り合わせる状況を取り扱う必要性から、本研究ではマルチエージェントモデルを用いることにした。

(3) マルチエージェント避難シミュレーション

本研究では、徒歩で避難する避難者である歩行者エージェントと、バイクを用いて避難するバイクエージェントを定義する。いずれの避難者も、シミュレーション開始時の位置から、指定した避難場所に向けて道路上を最短経路で移動する。道路上では歩行者エージェントとバイクエージェントが合流する場合を除き、混雑による移動速度の変化等のエージェント間の相互作用は考慮しない。

歩行者エージェントの移動速度は、Wood and Schmidlein⁹⁾が slow walk と定義した 1.10 m/s を用いる。シポラ島内のほとんどの道路は舗装されているものの、細かな起伏やひび割れが多いため、バイクエージェントの移動速度は 15 km/h と仮定した。歩行者エージェント、バイクエージェントともに、経路の勾配や混雑による速度の変化は考慮しない。バイクエージェントは、避難開始時には 1名の運転者が乗車しているものとする。バイクによる乗り合いを考慮するケースでは、移動中のバイクエージェントの前方 5 m 以内に歩行者エージェントが入った場合、10秒間停止し、歩行者エージェント 1名を同乗させるものとした。バイクエージェントには最大で避難者 2名が乗車することになる。

モデルの実装には、マルチエージェントモデル開発用

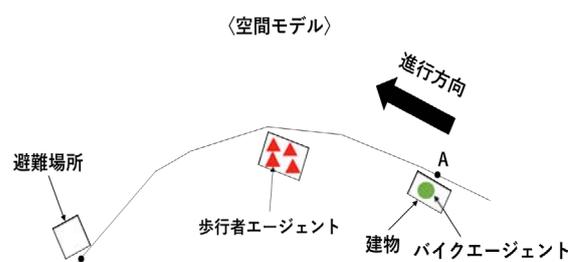


図-3 バイクエージェントと歩行者エージェントの合流の検証に用いた空間モデル

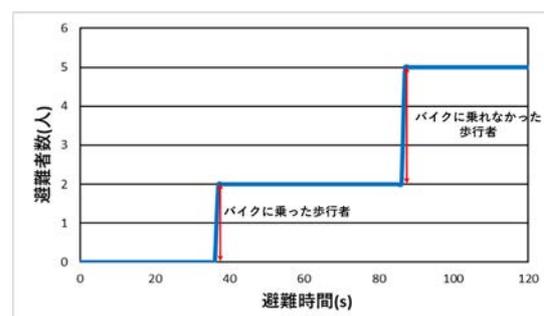


図-4 避難場所に到着した人数の時間変化

プラットフォームである GAMA¹⁵⁾を用いた。

(4) モデルの検証

まず、ここでは避難者が設定した移動速度に従って移動していることを確認した。図-2 に検証に用いた空間モデルを示す。一人の歩行者エージェントが道路ネットワーク上を図の右から左方向へ 100 m 移動するのに要する時間を比較した。表-1 にシミュレーションから得られた移動時間と理論値を示す。両者は一致しており、シミュレーションモデルの実装において、エージェントの歩行速度が正しく再現されていることが確認できた。

次に、歩行者とバイクの合流について検証を行った。図-3 に検証用に設定した空間モデルを示す。歩行者エージェントを 4人、バイクエージェントを 1人配置し、後方から来たバイクエージェントが歩行者エージェントを乗せて避難場所まで避難を行う。移動速度は、歩行者エージェントを 1.10 m/s、バイクエージェントを 15 km/h とした。図-4 にシミュレーションから得られた避難場所に到着した人数の時間変化を示す。バイクに乗った避難者が 2人、徒歩による避難者が 3人それぞれ同時に避難場所に到着していることから、想定通りの挙動を示すことが確認できた。

4. シポラ島 Tuapejat への適用

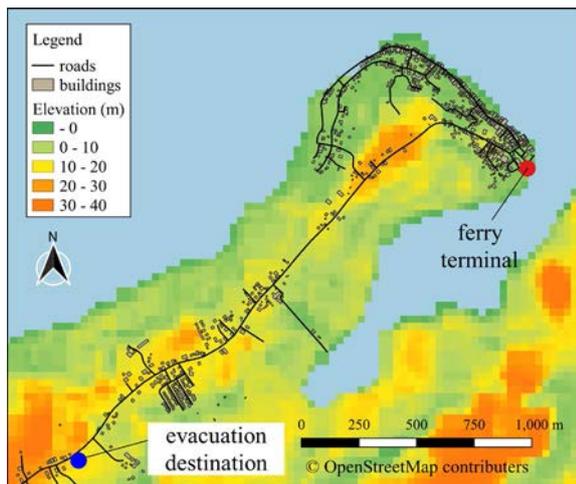


図-5 Tuapejat 周辺の標高と道路，建物の分布および設定した避難場所

(1) 対象地区の設定

本研究では、シボラ島で最も人口の多い Tuapejat を対象とした（図-5）。Tuapejat はシボラ島の最北端に位置し、島外との交通の拠点である高速フェリーのターミナルがある。高速フェリーの発着時には乗客、乗員、関係者が集まる。メンタワイ諸島の地方政府関係者によると、Tuapejat では最大の津波浸水高さを 20 m と想定している。そこで、標高 20m を越える高台の中に避難場所を設定することにした。半島部の中央にある高台と半島の付け根部にある高台は、想定以上の高さの津波が襲来した場合により高所へ避難することが不可能であることから、避難場所の候補から除外した。より標高の高い内陸部への避難も可能であることから、図-5 の左下に青い点で示した地点を避難場所として設定した。なお、標高データは JAXA の ALOS 全球数値地表モデルを使用した。

(2) シミュレーションケースの設定

表-2 に示す 3 つのケースを設定し、シミュレーションを実施した。ケース 1 では、すべての避難者が徒歩で避難する。ケース 2 では、ケース 1 において徒歩で避難する歩行者エージェントの 42% がバイクを用いて避難する。ケース 3 では、バイクエージェントが自身から 5m 以内に存在する歩行者エージェントを 1 人まで乗せることができるとした。

歩行者エージェントの数は、対象地域の詳細な人口データを得られなかったため、現地での聞き取りにより得た 1 世帯当たりおおよそ 5 人という値と、OpenStreetMap より抽出した建物の数との積により、3,910 人とした。ただし、道路ネットワークから離れた位置の建物は住居ではないとみなし、シミュレーション時にエージェントが配置されないように、あらかじめ削除しておいた。

バイクエージェントの台数は、資料¹⁸⁾より得たインド

表-2 シミュレーションを実施したケース

ケース	歩行者エージェント (人)	バイクエージェント (台)
1	3,910	0
2	2,268	1,642
3	2,268	1,642

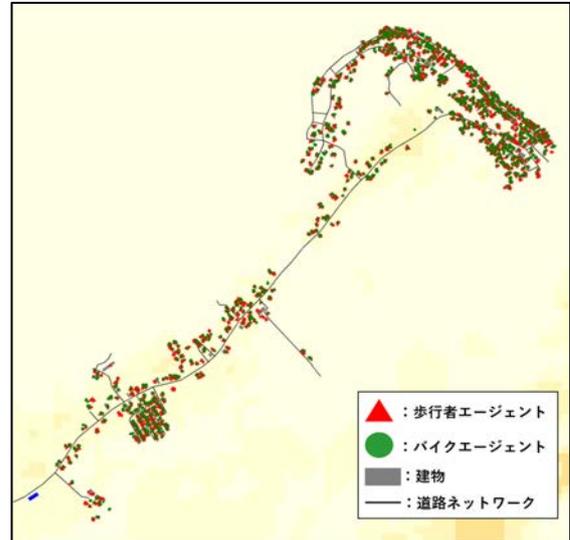


図-6 エージェントの初期配置（ケース 2，3）

ネシアのバイク保有台数と総人口から得た人口当たりのバイク保有率（42 パーセント）に基づき 1,642 台と設定した。

(3) エージェントの初期配置

シミュレーションの開始時において、エージェントは建物位置に等しい確率でランダムに配置する。まず、歩行者エージェントを設定した人数になるまで配置し、その後バイクエージェントを所定の台数まで配置した。ただし、各ケースにおいて、疑似乱数のシードは共通とし、初期配置が同じになるようにした。ケース 2 とケース 3 では、歩行者エージェント、バイクエージェントともに初期位置は同じである。ケース 1 は、ケース 2 あるいはケース 3 のバイクエージェントを歩行者エージェントに置き換えたものと同じになる。図-6 に避難エージェントの初期配置を示す。

(4) シミュレーション結果

シミュレーションから得られた避難率の時間変化を図-7 に示す。全員の避難が完了（避難率 100%）するまでに要する時間は、すべてのケースにおいてほぼ等しかった。これは、全員が避難を完了するまでに要する時間は、避難距離が最大となる歩行者エージェントによって決まるためである。避難率 90% を見ると、ケース 1 では 2,577 秒、ケース 2 では 2,535 秒と両者の差は 42 秒であっ

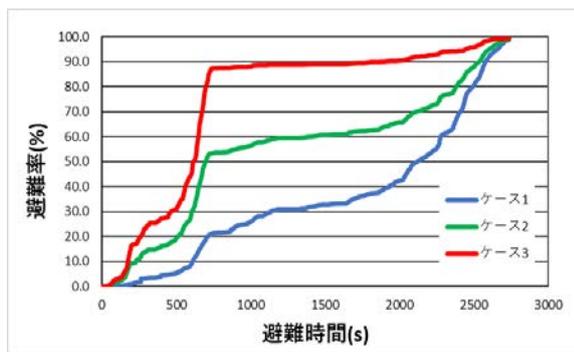


図-7 避難率の時間変化

た. ケース 1 はすべて歩行者エージェントであり, 各エージェントの避難距離と直接対応した結果となっている. ケース 2 では, 歩行者エージェントとバイクエージェントが混在し, 各バイクエージェントは 1 名の避難者に対応している. このケースでは, 図-8 に示したように, 避難距離の大きい半島先端部から出発したエージェントは, 先行するバイクエージェントの集団と, その後続く歩行者エージェントの集団に分離される. バイクエージェントの集団の到着に対応して, 避難開始から 700 秒後付近で避難率が急激に増加する. その後, 歩行者エージェントの到着に対応して, 避難率は緩やかに増加している. ケース 3 では, バイクエージェントの到着により避難開始から避難率は急激に増加している. 多くの避難者がバイクに同乗できるため, 避難率 90% に要する時間は 1,899 秒となり, ケース 2 と比べて 636 秒短縮されている. なお, バイクエージェントのおよそ 85% は避難開始直後に 2 名が乗車した状態になっており, 避難途中で歩行者と合流したものは 15% 程度であった.

(5) 考察

本研究と同様に, マルチエージェントシミュレーションを用いてバイクによる避難の有効性を検討した研究として, スマトラ島北部アチェ州の州都バンダ・アチェを対象とした Affan らの研究¹⁴⁾がある. バンダ・アチェでは海岸線から内陸の高台までが遠いため, 避難ビルや盛土したマウンド等の避難施設が設けられている. Affan ら¹⁴⁾は, これらの人工的に整備した施設は収容人員の制限があるため, バイクによる避難者はより遠方に避難するといった工夫が必要になることを指摘している. また, Mauro ら⁷⁾は, 西スマトラ州の州都であるパダンを対象として, 住民の避難に自動車とバイクを用いる効果について, マルチエージェントシミュレーションにより検討した. パダンにおいても, 海岸線から津波に対して安全な内陸部までは遠く, 海岸近くに設けられた避難施設の収容人数も限りがある. そのため, 避難における自動車やバイクの活用が検討された. ところが, パダンの沿岸部は, スマトラ島でも有数の人口密集地区となっており,

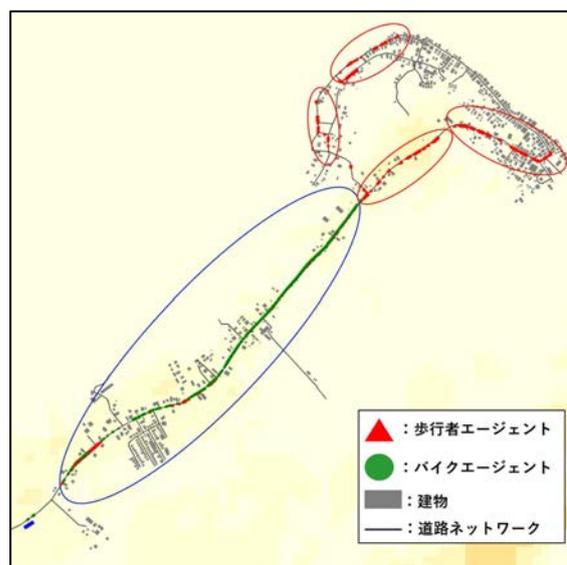


図-8 歩行者エージェントの集団とバイクエージェントの集団の分離の様子 (ケース 2)

避難に自動車やバイクを用いた場合, 交差点において大規模な交通渋滞が発生し, 大幅に避難効率が低下するという結果が示された.

本研究で対象としたシボラ島の Tuapejat では, 避難施設として使用できるような高層建物は存在せず, 盛土による避難場所の整備も行われていない. 全ての人々は, 内陸部の高台に向けて避難することになるため, バンダ・アチェやパダンのように収容人数の制限について検討する必要はない. また, Tuapejat は, パダンのような人口密集域ではなく, 自動車の保有台数も少ない. さらに, 道路ネットワークの形状も単純で交差点が少ないことから, 交通渋滞による避難効率が低下する恐れはほとんどない. したがって, 本研究のマルチエージェントシミュレーションの結果で得られたように, 避難におけるバイクの利用が有効だと考えられる. しかし, バイクに乗ることができず, 長距離を徒歩で避難することを強いられる避難者の存在に対しては, 別途対策を講じる必要がある.

本研究で作成したシミュレーションモデルは, 簡易的なものであるが, Tuapejat のように人口が少なく, さらに避難時に交通渋滞が発生する恐れのない地域へ適用は有効である. しかし, 地域特有の避難上の問題点を抽出し, また改善点の効果を検証するためには, 対象地域の人口, 家族構成, 年齢分布, バイクの保有率を把握し, 実態に即した避難シナリオを設定することが不可欠である. 今後は, 現地調査や資料調査を通じて制度の高いデータを入手した上で, シミュレーションモデルの改善と対象地域の分析を行う予定である.

5. まとめ

本研究では、人口密度が低く、交通渋滞の発生の可能性が小さいと考えられる地区において、津波避難時のバイクの有効性を定量的に評価できるマルチエージェント避難シミュレーションモデルを開発した。開発したシミュレーションモデルでは、歩行者が後方から来たバイクに同乗し避難をする状況が再現されている。このシミュレーションモデルを、インドネシアのメンタワイ諸島を構成する島の一つであるシポラ島の Tuapejat に適用し、この地区における津波避難においてバイクを活用することの利点と問題点を示した。

謝辞：本論文に使用した標高データは、JAXA の ALOS 全球数値地表モデルより提供を受けました。

参考文献

- 1) Sieh, K., Natawidjaja, D. H., Meltzner, A. J., Shen, C. C., Cheng, H., Li, K. S., Suwargadi, B. W., Galetzka, J., Philibosian, B., Edwards, R. L.: Earthquake supercycles inferred from sea-level changes recorded in the corals of west Sumatra, *Science*, Vol.322, pp.1674–1678, 2008.
- 2) Philibosian, B., Sieh, K., Avouac, J. P., Natawidjaja, D. H., Chiang, H. W., Wu, C. C., Shen, C. C., Daryono, M. R., Perfettini, H., Suwargadi, B. W., Lu, Y., Wang, X.: Earthquake supercycles on the Mentawai segment of the Sunda megathrust in the seventeenth century and earlier, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.122, No.1, pp.642–676, 2017.
- 3) Post, J., Wegscheider, S., Mück, M., Zosseder, K., Kiefl, R., Steinmetz, T., Stunz, G.: Assessment of human immediate response capability related to tsunami threats in Indonesia at a sub-national scale, *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol.9, No.4, pp.1075–1086, 2009.
- 4) McCloskey, J., Antoniolli, A., Piatanesi, A., Sieh, K., Steacy, S., Nalbant, S., Cocco, M., Giunchi, C., Huang, J. D., Dunlop, P.: Tsunami threat in the Indian Ocean from a future megathrust earthquake west of Sumatra, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.265, pp.61–81, 2008.
- 5) Stunz, G., Post, J., Zosseder, K., Wegscheider, S., Mück, M., Riedlinger, T., Mehl, H., Dech, S., Birkmann, J., Gebert, N., Harjono, H., Anwar, H. Z., Sumaryono, Khomarudin, R. M., Muhari, A.: Tsunami risk assessment in Indonesia, *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol.11, No.1, pp.67–82, 2011.
- 6) Griffin, J. D., Pranantyo, I. R., Kongko, W., Haunan, A., Robiana, R., Miller, V., Davies, G., Horspool, N., Maemunah, I., Widjaja, W. B., Natawidjaja, D. H., Latief, H.: Assessing tsunami hazard using heterogeneous slip models in the Mentawai Islands, Indonesia, *Geological Society Special Publication*, Vol.441, No.1, pp.47–70, 2017.
- 7) Di Mauro, M., Megawati, K., Cedillos, V., Tucker, B.: Tsunami risk reduction for densely populated Southeast Asian cities: Analysis of vehicular and pedestrian evacuation for the city of Padang, Indonesia, and assessment of interventions, *Natural Hazards*, Vol.68, No.2, pp.373–404, 2013.
- 8) Wood, N. J., Schmidlein, M. C.: Anisotropic path modeling to assess pedestrian-evacuation potential from Cascadia-related tsunamis in the US Pacific Northwest, *Natural Hazards*, Vol.62, No.2, pp. 275–300, 2012.
- 9) Wood, N. J., Schmidlein, M. C.: Community variations in population exposure to near-field tsunami hazards as a function of pedestrian travel time to safety, *Natural Hazards*, Vol.65, No.3, pp.1603–1628, 2013.
- 10) Wood, N., Jones, J., Schmidlein, M., Schelling, J., Frazier, T.: Pedestrian flow-path modeling to support tsunami evacuation and disaster relief planning in the U.S. Pacific Northwest, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol.18, pp.41–55, 2016.
- 11) Mas, E., Suppasi, A., Imamura, F., Koshimura, S.: Agent-based simulation of the 2011 great east Japan earthquake/tsunami evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.34, No.1, pp. 41–57, 2012.
- 12) Mas, E., Koshimura, S., Imamura, F., Suppasi, A., Muhari, A., Adriano, B.: Recent Advances in Agent-Based Tsunami Evacuation Simulations: Case Studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 72, No.12, pp.3409–3424, 2015.
- 13) Wijerathne, M. L. L., Melgar, L. A., Hori, M., Ichimura, T., Tanaka, S.: HPC enhanced large urban area evacuation simulations with vision based autonomously navigating multi agents, *Procedia Computer Science*, Vol.18, pp.1515–1524, 2013.
- 14) Affan, M., Goto, Y., Agussabti: Tsunami Evacuation Simulation for Disaster Awareness Education and Mitigation Planning of Banda Aceh, *the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012.
- 15) Taillandier, P., Gaudou, B., Grignard, A., Huynh, Q. N., Marilleau, N., Caillou, P., Philippon, D., Drogoul, A.: Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform, *Geoinformatica*, 2019.
- 16) 総務省統計局：世界の統計 2019，<https://www.stat.go.jp/data/sekai/index.html> (2019年12月26日閲覧)

TSUNAMI EVACUATION SIMULATION FOCUSING ON THE USE OF MOTORCYCLES: A CASE STUDY FOR SIPORA ISLAND, INDONESIA

Yuki MAEDA, Yusuke ONO and Rusnardi Rahmat PUTRA

A M9 class earthquake followed by a massive tsunami is predicted to occur near the Mentawai Islands. Residents in the Mentawai Islands need to reach safety in a short time because the tsunami may reach the island within a few minutes after the earthquake. To reduce the time required for evacuation, motorcycles could be used. Motorcycles are the main means of transportation in the Mentawai Islands. In this study, we developed a multi-agent evacuation simulation model that incorporates the behavior of an evacuee on a motorcycle assisting other evacuees on foot. The developed multi-agent evacuation simulation model was used to conduct a case study of Tuapejat on Sipora, which is the administrative center of the Mentawai Islands.