

2010 年 Mentawai 地震津波と海岸樹木の被害形態

松富 英夫*・原田 賢治**・Subandono DIPOSAPTONO***

1. はじめに

海岸林は防風, 防砂, 防潮, 防雪, 環境機能ばかりでなく, 特に途上国においては, 資材, 燃料, 食料の供給源としての機能を有する。海岸林は来襲津波の視認を妨げ, 巨大津波では漂流物源となるなど両刃の剣であるが, 津波の二次的な減勢 (面的防護), 漂流物の阻止, 流された人・物の捕捉などといった機能も有する。海岸林で堆砂が進み, 地面が高くなって, 海岸林の津波防御機能が促進される場合もある。

津波の減勢を目的とした海岸林の利用は, 1854 年の南海地震津波直後に浜口吾稔により和歌山県広村 (現広川町) で行われている。しかし, 海岸林は, 樹冠部を想像すれば容易に理解できるように, 柔な複雑体の集合であり, 津波の流勢次第で樹木が倒伏, 抜根, 折損するため, その津波減勢効果の評価は難しく, その合理的な利用指針は定まっていない。

本研究は, 先ず 2010 年 Mentawai 地震津波の概要を論じる。次に, この津波における海岸樹木の被害形態と海岸樹木への抗力やモーメントとの関係を論じる。ただし, 抗力やモーメントは Matsutomi & Okamoto (2010) の簡易な津波氾濫流速推定式を用いて推定される。さらに, この結果と 2010 年にインドネシアのスマトラ島中部西岸の Padang 近くの Pariaman で行った海岸樹木 (Casuarina) の倒伏・抜根・折損に関する現地試験結果 (松富ら, 2011a) との比較・検討を行い, 津波に対する海岸樹木の倒伏限界と抜根限界を論じる。推定津波氾濫流速のクロスチェックなど

のため, 建物周りの津波痕跡分布に関する調査結果も論じる。

2. 津波の概要

2010 年 10 月 25 日 21 時 42 分 (日本時間 25 日 23 時 42 分), スマトラ島中部西岸沖に位置する Pagai 島の南方沖 (3.484°S, 100.114°E) で $M_w=7.7$ の地震 (深さ 25 km, 走向 326°, 傾斜角 12°, すべり角 101°) とそれに伴う津波が発生した (USGS, 2010) (図-1)。証言によれば, 北 Pagai 島の Sikakap における津波の初動は引きで, 地震後 15 分で第 1 波が来襲した。津波来襲時の潮位は DL 18 cm である。検潮記録によれば, スマトラ島中部西岸の Padang でも津波の初動は引きで, 周期は 25 分程度である。また, Sikakap 港では地盤が沈降し, 本地震前までは 5 年に 1 度の海水の陸域への氾濫が, 地震後は毎日となった。

南北 Pagai 島における津波の浸水高や遡上高の分布を図-2 に示す。図中には PARI と NILIM の調査結果 (港湾空港技術研究所,



図-1 震源と Pagai 島の位置 (Google Earth)

*秋田大学大学院工学資源学研究所

**埼玉大学大学院理工学研究科

***インドネシア海洋漁業省

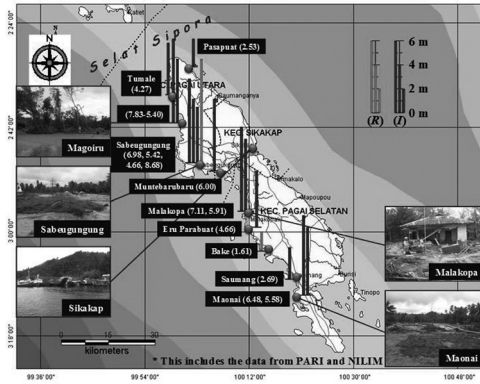


図-2 南北 Pagai 島における津波の浸水深や遡上高

2010) も示してある。 R は遡上高, I は浸水深, 基準面は津波来襲時の潮位 (DL 18 cm) で, 単位は m である。地震規模と津波規模の関係は平均的なものと考えられる。しかし, 証言によれば, 地震規模と震源距離の割に震度が小さく, 震度の割に津波規模は大きいと言える。これが次の死者数に影響した可能性がある。

この津波による死者は, 2010 年 10 月 30 日現在, 449 人, 行方不明者は約 50 人である。死者の内訳は南 Pagai 島の Malakopa 村で 125 人 (人口 2259 人), Bulasat 村で 37 人 (2163 人), 北 Pagai 島の Betumonga 村で 230 人 (1188 人), Silabu 村で 7 人 (967 人), Taikako 村で 9 人 (1385 人), Sipora 島の Bosua 村で 15 人 (1293 人), Beriulou 村で 26 人 (853 人) である。

3. 現地調査

現地調査は 2010 年 11 月 6～8 日 (正味) にかけて, スマトラ島中部西岸の Padang 南沖に位置する南北 Pagai 島で行った。調査地域は南 Pagai 島が Malakopa 村の Malakopa 地区 (死者 0 人 / 人口 405 人) と Bulasat 村の Maonai 地区 (36/177), 北 Pagai 島が Silabu 村の Magoiru 地区 (1/282) と Betumonga 村の Sabeugungung 地区 (117/258) である (図-2)。主な調査項目は浸水深, 浸水高と海岸樹木の諸元や被害形態である (図-3)。



図-3 主な調査項目

4. Malakopa 地区の氾濫浸水深と氾濫流速

Malakopa 地区は北北東に伸びる長さ 1.5 km ほどの砂浜 (ポケットビーチ) 海岸の南南西端に位置し, 砂浜海岸の中央辺りから海岸線に沿って川が流れ, 北北東端に河口がある。これらから日頃の波浪の入射方向や沿岸漂砂方向が推定できる。

本地区ではこの津波の前に居住区の高地移転が行われ, これが被害の軽減につながった。本地区の海岸線から建物域にかけての浸水位 Z , 縦断地形 (ともに高さの基準は津波来襲時の DL 18 cm) と推定氾濫流速 u の分布例を図-4 に示す。測線は図の左部分の白線で, 卓越的な氾濫方向であり, 浸水延長は 460 m である。浸水位は氾濫流による撓みが小さいと考えられる海岸樹木の枝の折損や樹幹に引っかかった枝葉などの漂流物から評価しており, 最大のものでない可能性があることに注意を要する。また, 氾濫流速は次式で推定している (Matsutomi & Okamoto, 2010) :

$$\begin{aligned} \text{最大流速: } u_{Max} &= 1.2\sqrt{gh_{Max}}, \\ \text{平均流速: } u_{Mean} &= 0.81\sqrt{gh_{Mean}}, \\ \text{黒丸流速: } u &= 0.6\sqrt{2g(h_f - h_r)} \quad (1) \end{aligned}$$

ここで, g は重力加速度, h_{Max} は最大浸水深, h_{Mean} は平均浸水深, h_f と h_r は建物の前・背面の浸水深である。建物における氾濫流速については, 建物の前面または背面の浸水深のみで推定したもの (図中に各々 Front, Back

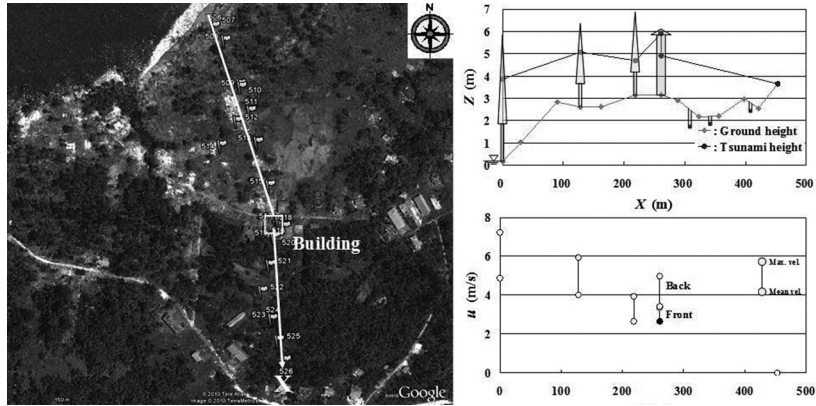


図-4 浸水位、縦断地形と推定氾濫流速 (Malakopa 地区) (左: Google Earth)

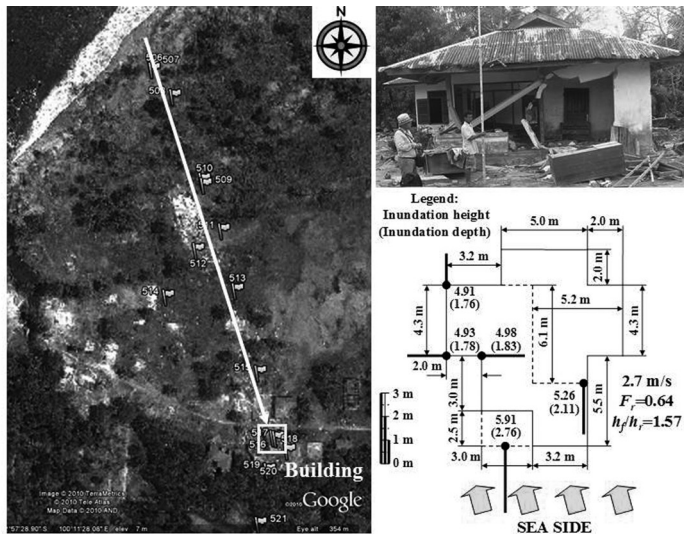


図-5 建物周りの津波痕跡分布 (Malakopa 地区) (左: Google Earth)

と記したもの)も示してある。図から、氾濫流速は、建物の背面浸水深によるものを除けば、浸水際に向かって単調的に減少したことが推定される。

できるだけ平坦地にあり、しかも孤立的で、引き波や反射流の影響を受けていないと判断した建物周りの津波痕跡分布(松富・原田, 2010)を図-5に示す。建物は写真と平面図の両方で示してある。図中の太い黒実線と矢印は各々痕跡浸水深と建物周りの痕跡分布から推定した津波の卓越氾濫方向を示す。建物は衛星写真中の白矢印線に沿って、勾配約+1/30の斜面に続く勾配約+1/500の緩斜面上にあり、汀線からの距離約260m地点に建っ

ている。建物の平面形状はやや複雑で、5点で痕跡の水位と浸水深を得た。建物がないとしたときの津波ピーク時の入射氾濫流速(松富・原田, 2010)は2.7 m/s(図-4中の黒丸)、入射フルード数 F_r は0.64と推定された。津波はここからさらに200m程度内陸へ氾濫した。

図-6に建物の前・背面の痕跡浸水深(縦棒)と孤立した正四角柱模型におけるその実験結果(自由曲線)(Matsutomi & Okamoto, 2010)の比較を示す。実験結果は定常流で得られたもので、凡例の B は水路幅(cm)、 F_{r0} は等流のフルード数である。また、 h は水路底面から水際線までの水深、 h_0 は等流水深、

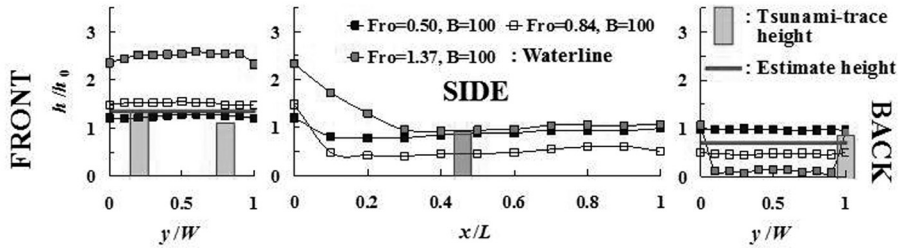


図-6 正四角柱周りの浸水深分布（自由曲線）と現地調査データ（縦棒）の比較

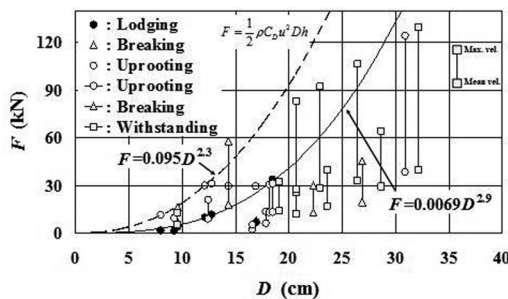
y は模型前面（左図）では模型左端，模型背面（右図）では模型右端を原点とする水平距離座標で，模型幅 W で無次元化されており， x は模型の右側面に沿い，模型上流端を原点とする距離座標で，模型長さ L で無次元化されている。図において，実津波の無次元最大前面痕跡浸水深は，入射フルード数 F_r ($\cong F_{r0}$ と考える) を考慮しながら，実験結果から線形補間して決めたもの（図面左側の太い水平直線）と一致させている。これに基づいて実津波の仮想的な等流水深と無次元背面痕跡浸水深を順次評価し，実験の無次元背面痕跡浸水深（図面右側の太い水平直線）と比較している。図から，Malakopa における実津波の無次元背面痕跡浸水深は実験のものより大きめであることが判る。この理由として，実際の津波氾濫流は非定常であり，窓や戸口を通して建物の背後へ流れ込むことが考えられる（松富・原田，2010）。

5. 海岸樹木の被害形態

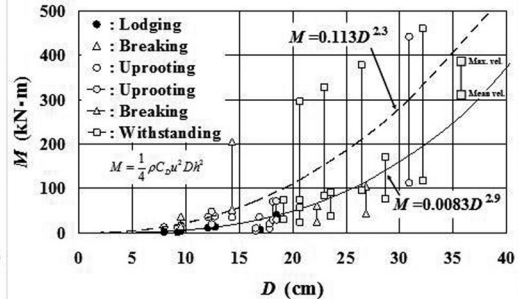
海岸樹木の被害形態の調査では，時間と浸

水深の測定の制約から，樹種や樹木の大きさはこだわらなかった。ただし，海に面したところのものであり，椰子の木は避けた。結果的に海岸樹木の倒伏・抜根・折損に関する現地試験で対象とした Casuarina（松富ら，2011a）は 19 例中 1 例もなかった。ほぼ同一地点で浸水深が複数得られた場合はそれらの最大を h_{Max} ，平均を h_{Mean} とした。したがって，大きな浸水深が 1 つと小さな浸水深が複数得られた場合は，浸水深が 1 つだけの場合に比べて，式 (1) で推定される氾濫流速の最大値と平均値の差は大きくなる。

図-7 (a) と (b) に海岸樹木の被害形態に関する現地試験結果（松富ら，2011a）と本津波の現地調査に基づく結果の比較を示す。図-7 (a) は力 F ，図-7 (b) はモーメント M から見たものである。樹木に働く力 F は抗力とした。抗力の氾濫流速には式 (1) によるものを採用した。抗力係数 C_D は 1.1 とした。投影面積は胸高直径 $D \times$ 浸水深 h で評価した。モーメント M は抗力 \times 浸水深の半分で評価した。図中の 2 曲線は松富ら (2011a) が提案した Casuarina に対する倒



(a) 力から見た場合



(b) モーメントから見た場合

図-7 海岸樹木の被害形態に関する現地試験結果と本津波の現地調査に基づく結果の比較

伏限界線（実線）と抜根限界線（破線）である。実際の倒伏限界や抜根限界は氾濫流による洗掘などのため、提案されたものより小さいと考えられる。樹木の抜根（Uprooting）は倒伏（Lodging）より大きな力やモーメントを必要とする。樹木の折損（Breaking）は樹木の状態（樹幹に欠陥があるなど）により倒伏限界や抜根限界より大きい場合も、小さい場合もあり得る（松富ら，2011a）。図-7によると、力から見た抜根、折損、無被害または小被害（Withstanding）は、現地調査結果19例中11例が現地試験結果を満足している。モーメントから見た場合は19例中12例が満足している。力とモーメントの両方を満足しているものは8例、どちらか一方を満足しているものは15例である。

海岸樹木の被害形態は海岸林域内の場所に依存すると考えられる。海に面した樹木には衝撃力が働き得て、域内の他の場所のものより折損の可能性が高くなる。

図-8はスマトラ島中部西岸のPainan近くの海岸林と海岸線に平行に流れる河川を示しており、インドネシアで比較的良好に見える地勢である。河川の規模は小さいが、今回の津波で被災した南Pagai島Bulasat村のMaonai地区はこのような地勢であった。海岸線に平行に流れる河川は両刃の剣の面があるが（例えば、松富ら，2011b）、津波氾濫方向に流速がない河川水は津波の減勢に有効と考えられ、海岸林と合わせて活用することが推奨される。Painanでは津波の減勢を目的としたCasuarinaの植林計画がある。海岸線沿いの土地が狭く、埋め立てにより土地を確保する計画である。環境面に十分な注意を払い



図-8 海岸林と海岸線に平行に流れる河川（Painanの北隣）

ながら、図-8にある河川のような機能を有する水域を設けることが推奨される。

6. おわりに

本調査研究で得られた主な結果は次の通りである。

- ①地震規模と津波規模の関係は平均的なものと考えられる。しかし、地震規模と震源距離の割に震度が小さく、震度の割に津波規模が大きい。
- ②簡易な津波氾濫流速推定式を用いて推定した海岸樹木への抗力やモーメントと海岸樹木の被害形態（倒伏、抜根、折損）の関係を検討し、現地試験で得たものとの比較を行った。その結果、4割強の現地調査結果が現地試験結果を満足した。
- ③自然物による津波減災手法として、両刃の剣の面があるが、海岸林と海岸線に平行に流れる河川による面的防護が考えられる。

謝辞

本調査研究はJST-JICA地球規模課題対応国際科学技術協力「インドネシアにおける地震火山の総合防災策」（研究代表 佐竹健治）と科学研究費補助金（基盤研究（C））「津波被害の軽減を目的とした植生の実装に関する基礎的研究」（研究代表 松富英夫）の一環として行われた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 港湾空港技術研究所：インドネシア・スマトラ島南部沖の地震・津波（2010年）現地調査報告書，<http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/trc/fieldhtml>。
- 松富英夫・原田賢治：建物周りの津波痕跡分布とその活用 —2009年サモア地震津波を例に一，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. B2-66, No.1, pp.271-275, 2010。
- 松富英夫・原田賢治・Aloysius Bagyo Widag-

- do : 海岸樹木の倒伏, 抜根, 折損に関する
現地試験 — インドネシアの Casuarina を
例に一, 東北地域災害科学研究, 第 47 卷,
pp.69-75, 2011a.
- 松富英夫・原田賢治・小笠原敏記・片岡俊一 :
2010 年チリ地震津波の諸相, 東北地域災
害科学研究, 第 47 卷, pp.83-88, 2011b.
または, Preliminary Field Survey Report of
the 2010 Chile Earthquake Tsunami, [http://
www.hel.ce.akita-u.ac.jp/%7Ematsu/](http://www.hel.ce.akita-u.ac.jp/%7Ematsu/).
- Matsutomi H. and Okamoto K.: Inundation flow
velocity of tsunami on land, *Island Arc*, Vol.
19, Issue 3, pp.443-457, 2010.
- USGS: Magnitude 7.7 – KEPULAUAN MEN-
TAWAI REGION, INDONESIA, [http://earth-
quake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews
/2010/usa00043nx/](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/usa00043nx/).