

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1171 March 2008

植栽による津波力減殺効果に関する検討

平石哲也

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 沿岸におけるグリーンベルトの防災機能と簡易推定法	4
2.1 グリーンベルト効果の簡易推定法	4
2.2 グリーンベルトによる津波力の変化	6
3. グリーンベルト配置を決めるための数値解析	8
3.1 対象とする地形と数値解析法	8
3.2 数値解析による評価	10
4. 現地での効果の検討	16
4.1 モデル海岸における計算例	16
4.2 2007年ソロモン津波での事例	19
5. まとめ	26
参考文献	27
主要記号表	28

Fundamental Study on Effect of Coastal Forest to Mitigate Tsunami Force

Tetsuya HIRAISHI*

Synopsis

The Indian Ocean Tsunami in 2004 induced gigantic tsunami hazards in the coastal areas. Meanwhile the effects of coastal forest (greenbelt) to mitigate the loss of human being and coastal villages were broadcasted and the tsunami prevention employing the greenbelt was paid attention especially in the South Asian countries. A few experimental results in two-dimensional channels demonstrated the fundamental effect of greenbelt against tsunami flows. The practical technique to determine the appropriate arrangement of greenbelt, however, has not been discussed. In the paper the variation of tsunami force due to the greenbelt with uniform and leap-frog arrangement is numerically calculated and the tsunami flow velocity in a gap between the neighboring greenbelts is evaluated. Finally the effect of greenbelt in a model coast approximating the prototype is estimated.

Key Words: Tsunami prevention by greenbelt, Field survey on tsunami height, Tsunami simulation, Disaster management in Asia

*Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department, Dr. Eng.
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail: hiraishi@pari.go.jp

植栽による津波力減殺効果に関する検討

平石 哲也*

要 旨

2004年インド洋津波においては、沿岸諸国に甚大な津波被害が生じた反面、海岸の樹林帯によって家屋や人名の被害が軽減されたことが報道されており、海岸樹木帯（グリーンベルト）を整備して津波防災を図る技術が南アジア諸国で注目されている。グリーンベルトによる津波力低減効果については2次元の模型実験によって検討されてきたが、現地での津波防災に活用できるような適正な配置法に関する検討は成されていない。そこで本研究では、数値解析によって一様および千鳥に配置されたグリーンベルトによる津波力低減効果を定量的に示し、最も効果的に津波力が低減できる配置案を提案した。また、グリーンベルト間の道路を流れる津波の流速を簡便に推定する手法を提案し、道路上の津波流速とその危険性を示した。最後に、現地海岸をモデル化した地形で、津波波形を入力し、グリーンベルトを配置した場合の効果を検証した。

キーワード：グリーンベルトによる津波防災、現地津波調査、津波の数値計算、アジア諸国での防災計画

* 海洋・水工部波浪研究室長

1. まえがき

密生したマングローブ林や常緑樹の樹林帯によって津波の力が弱められ、背後の家屋や村落の被害が軽減された例は、2004年インド洋大津波でも報告されており(Danielsenら, 2005), 効果を具体的に整理する試みもなされている(Dahdouh-Guebasら, 2007). 津波や高波による災害を防止する機能を有する海岸付近の樹木帯を、ここではグリーンベルトと定義する. 我が国でも、海からの風による塩や砂粒の村落部への飛散を防ぐために、各地で整備されてきた防潮林もグリーンベルトの一種と考えることができる.

グリーンベルトを整備して、津波被害を軽減しようとする試みは、1998年パプアニューギニア津波の復興会議でも議論され(Hiraishi, 2000), 海岸線から500m離して家屋を建設する土地利用が推奨されている. 会議では、現地で自生する植物を海岸部に人工的に密生させると津波力が軽減され、平常時には食物や日陰帯として活用できることが示された(Hiraishi, 2000). この提案はグリーンベルトによる沿岸防災技術として2005年に神戸で開催された国連防災会議でも紹介され、インドネシア(Subandono, 2005)やインド(Sundar, 2007)では、局所的ではあるが、沿岸防災プロジェクトの一環として実行に移されている.

グリーンベルトの主な効果は津波力を軽減し、背後の人命と家屋の被害を守ることであるが、単独樹木の効果も含めて、以下の項目もグリーンベルト効果としてあげられている.(佐々木ら(2005)).

- ① トラップ効果：流出した瓦礫や板切れなど、人を傷つけるものが樹林帯で止まる効果.
- ② エスケープ効果：樹木の上に避難して救出される効果.
- ③ ソフトランディング効果：津波に流された人が柔らかい樹林帯に打ち上げられ救助される効果.

海岸のココヤシのように、まばらに樹木が点在している場合には、津波力を低減する効果は期待できないが、樹木が自立しておれば、津波来襲時に捕まることによって、津波で流されることを防ぐことができる. インド洋津波直後に実施した現地調査(平石ら, 2005)では、バンダアチェのシアクラ大学の学生が沿岸のココナツの高木に捕まって津波来襲を乗り切ったことを聞き取った. また、プーケット島パトンビーチでは、木を登ってホテルの2階に避難したという証言を得た. したがって、単独樹木であっても捕まって漂流を防いだり、樹木そのものや近隣の建物の高い場所へ避難するのに役立つ可能性

がある.

一般に、樹木の背丈は直径の3乗に比例し(ピーター・トーマス, 2005), 同じ種類であれば、背が高い樹木の方が強い. すなわち、津波から受ける力は、主に樹木の断面積によって決まるので、直径が2倍になると津波から受ける力も2倍になる. ただし、直径が2倍になると幹の断面積は2倍に増加するので、樹木の強さは相対的に強くなる. したがって、樹木に登ったり、捕まる場合には、できるだけ高い樹木を選ぶべきであろう. また、樹木が密集してくると、津波の受圧面積が増加するので、グリーンベルトとしての津波力低減効果を発揮するようになる. このように定性的にはグリーンベルトや樹木の存在が、津波被害を軽減できることは想像できるが、どの程度の密度で樹木を植林すればよいか、あるいはグリーンベルトとしてどのような配置を提案すべきか、について明らかにはなっていない.

そこで、グリーンベルトの効果を具体的に示すために著者らは模型実験を行って、限られた条件ではあるものの、その効果を数値的に明らかにした(Hiraishi and Harada, 2003). さらに、グリーンベルトの育成のために、簡単な津波力低減効果推定式を提案した(平石ら, 2006). これまでの研究によって、単位面積にどの程度の樹木を配置すれば有効な対策がとれるかについては回答が得られるようになった. しかし、課題として最も有効なグリーンベルトの配置に関する検討が残された. そこで、本研究では、より適切な配置計画を作成するために、グリーンベルト配置を変更したり、海岸へアクセスするための道路を設けたときの流速変化を数値的に明らかにすることを目的とした.

2. 沿岸におけるグリーンベルトの防災機能と簡易推定法

2.1 グリーンベルト効果の簡易推定法

海岸線に沿って幅数十m以上で生育する樹木帯を代表的なグリーンベルトとして考える. 陸上へ氾濫した津波の単位幅あたりの力 p (N/m)は、一般に津波による浸水深 η (m)と流速 u (m/s)を用いて次式で表される.

$$p=0.5C_D\rho\eta u^2 \text{ (N/m)} \quad (\rho\text{は水の密度(kg/m}^3\text{)}) \quad (1)$$

なお、 C_D は抗力係数と呼ばれ、家屋や構造物の形状によって変化する係数である. 一般に円柱のような丸い構造物は $C_D=1.0$ で、家屋壁のような平板は $C_D=2.0$ として力を計算できる.

樹木は主に津波流速 u を軽減するために効果を有しており、 u が減衰することで津波の力も軽減される。樹木の津波力軽減効果は実験によって求められている。家屋に作用する津波力は、津波の流速の2乗に比例する抗力と、加速度に比例する慣性力で表されるが、一般に抗力が卓越して大きい(Hiraishi and Harada, 2003)。グリーンベルトの効果は、この抗力の低減を調べることによって検討できる。ここでは、現地の会議でおおよそのグリーンベルト幅と密度を決めることができる簡易推定法を示す。

グリーンベルトによって低減される津波力は、津波の流れに比例する抗力と、加速度に比例する慣性力で表され、単位幅および単位浸水深当たりで表すと次式で示される(Hiraishi and Harada, 2003)。

$$WF = \frac{1}{2} C_D \frac{\rho A_0 u |u|}{\Delta s} + C_M \rho \frac{V_0}{D \Delta x V} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 WF はグリーンベルト前後での津波力の差(N/m/m)、 C_D は抗力係数、 C_M は慣性力係数、 $A_0(\text{m}^2)$ および $V_0(\text{m}^3)$ はグリーンベルトを構成する樹木が占める単位面積あたりの有効投影面積と有効容量を示す。 $V(\text{m}^3)$ は、グリーンベルトが位置する単位面積あたりの総水塊量で面積に津波による浸水深を乗じた数値になる。 $\rho(\text{kg/m}^3)$ は海水の密度で、 $u(\text{m/s})$ は地表での津波流速である。 $\Delta s(\text{m}^2)$ は計算に用いる格子面積で、ここでは $10\text{m} \times 10\text{m}$ の正方な地形を用いる。 $D(\text{m})$ は津波のグリーンベルト帯での浸水深である。 $\Delta x(\text{m})$ は津波進行方向に直角な計算格子幅である。

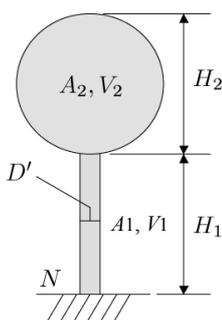


図-1 樹木のモデル (立面図)

樹木帯の単独樹木のモデルを図-1に示す。個々の樹木は、幹部と葉部に分けられ、幹部は円柱として近似できる。図では、幹部の直径を D' 、長さを H_1 として表している。グリーンベルトの津波抑止効果は、ほとんど、津波流に対して抵抗できる樹木幹部の投影面積で決まり、具体的には、直径 D' と一定の土地に生えている樹木の

数 N で決まる。

幹部の有効投影面積 A_1 および有効体積 V_1 は、 $10\text{m} \times 10\text{m}$ をグリーンベルトの密度を定義する単位面積とした場合に、単位面積あたりの樹木本数 N によって決定され、次式で示される。単位面積は、そこに含まれる樹木数を決めるために設定し、首藤(1985)にしたがっている。

$$A_1 = D \left[D' \frac{N}{100} \Delta s \right] \quad (3)$$

$$V_1 = D \left[\pi \frac{D'^2}{4} \frac{N}{100} \Delta s \right] \quad (4)$$

樹木の上方で葉が茂っている部分は葉部とし、有効容積はマングローブなどを対象とした実験で用いられている $V_2/V=0.04$ を採用した (Harada ら, 2000)。今回の計算では、津波の波高 4m 以下としているので、樹木モデルの葉部まで水塊が達することはなく、グリーンベルトの効果は、幹部の樹木本数と樹木の直径で定まる。抗力係数 C_D と慣性力係数 C_M は模型実験の結果(Hiraishi and Harada, 2003, Harada and Imamura, 2005)から次式で与えられる。

$$C_D = 8.4(V_1/V + V_2/V) + 0.66 \quad (5)$$

$$C_M = 1.70 \quad (6)$$

図-2 は海岸の樹木林の効果を模式的に表したもので、津波高さ η は樹木林の中では、大きく変化しない (平石ら, 2006)。しかし、流速が小さくなるため、家屋等に作用する津波力(抗力)は小さくなる。なお、沖合から流入する津波の水量は一定なので、樹木帯での流速が低減され、樹木帯に流入する水量そのものが制限を受けると、樹木帯の沖側では津波の一部が反射され、津波水位

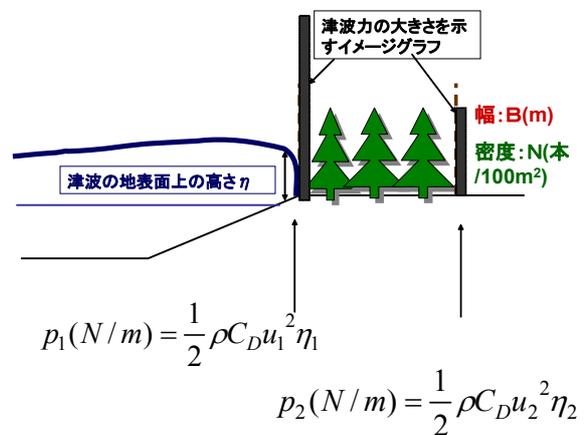


図-2 樹木帯による津波力低減イメージ

は増加する (Hiraishi and Harada, 2003). ここでは, 流速に比べると水位の変化は小さいと仮定して, $\eta_1 = \eta_2$ と近似している.

抗力の変化が式(1)に示されたように, 抗力は流速の2乗に水位を乗じた値から計算される. 図-2 は樹木帯による津波力のうち, 抗力による力の作用をイメージしたものである. 図で添え字 1 および 2 は, 樹木帯の前面と背後での値であることを示す. 図-2 のように海岸に遡上した津波の浸水深 (地表面からの津波高さ) を η , 流速を u として表し, 樹木帯の前面と背面で浸水した津波による力に変化すると考える. 前後の単位幅当たりの抗力の変化は, $C_R = p_2/p_1$ で示すことができる. ここで, C_R を津波力比とする.

2.2 グリーンベルトによる津波力の変化

(1) 津波力

陸上で遡上した津波の流速 u は, 松富ら(1994)が示すように, 浸水深と関係有しており, 浸水深 (地表面からの津波高さ) が明らかになれば, 推定が可能である. インド洋津波においては, 松富ら(2005)が現地調査で得られた浸水深とビデオで撮影された浸水域の津波の流れから氾濫水の流速 u を読みとって, 推定式の検証を行っている.

松富ら(1994)による流速推定式を式(7)に示す.

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} = \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \quad (7)$$

ここで, $R(\text{m})$ は周辺の海浜の津波遡上高, $h_f(\text{m})$ は構造物前面の浸水深で, 構造物が無い海岸では浸水深と同一であるが, ここでは原論文の表記を用いる. C_v は流速係数で, 0.8~0.9 程度になる. F_r はフルード数で, 次式で示される.

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gh_r}} \quad (8)$$

ここで, h_r は現地測定された構造物背後の浸水深である. インド洋地震津波での現地調査から得られた F_r は, 0.7~2.0 に分布した. ここでは松富ら(2005)の現地調査から導かれた近似値である $C_v=0.9$, $F_r=1.0$ を用い, 構造物前面の浸水深は津波遡上高 R と等しいとした. また, 地表面が平坦で, 浸水深が津波の遡上高 R と等しく, 一様な密度 (樹木数) を有するグリーンベルトが海岸に分布していると仮定して, グリーンベルトによる津波力の減衰効果を計算する. 計算法の詳細は, 平石ら(2006)を参照できる.

計算では, 津波の遡上高はタイ沿岸での痕跡高を参考にして $R=5\text{m}$ とした. 力を受ける家屋の高さは, 平屋ブロック積みを想定して 3m とした. このとき $u=5.5\text{m/s}$ となる. 樹木の高さ H_1 は 5m 以上とし, 津波力は円柱で近似できる幹部だけで受けているとした. 樹木の幹径は 40cm とした.

図-3(1)にグリーンベルトの密度 N と幅 B を変化させたときの津波抗力の変化を示す. 密度 N は, 前述のように 10m 四方の土地に生育する樹木本数である. 抗力の変化は, 前述のように, p_2/p_1 として計算した. 図の縦軸では, $C_R = p_2/p_1$ として津波力比を示している. すなわち, 図の縦軸が, グリーンベルトの外側に位置する家屋へ作用する力に対するグリーンベルト背後に位置する津波の力の比を示す. この値が 0.2 のときには津波力は $1/5$ まで減衰できることを示し, グリーンベルト密度毎に幅 B によって変化する減衰率を表している. 密度は 10m 四方の土地に含まれる樹木本数で, 疎らに植えられているココナッツで $N=5\sim 10$ 程度である. 図では計算上 $N=30$ まで示しているが, 2m 間隔で樹木が密生している状況は特殊であり, グリーンベルトとして意識的に密度の高い樹林帯を育成した場合を想定している.

なお, 平石ら(2006)は, 津波高が 2m 程度の時は, グリーンベルトによる津波抗力の低減効果は, 地表上での摩擦による津波力の低減効果とほぼ同じであることを示している. 図-3(2)に地表の摩擦による抗力の低減成分と樹木による低減成分の比を示す. 樹木密度 N が 10 以下の時は, 地表面の摩擦による力の低減する割合が $0.4\sim 0.9$ となり比較的大きい. 従って, 密度 N が 10 程度の場合には, 地表面の摩擦による力の低減も考慮して, グリーンベルトの効果を推測できる.

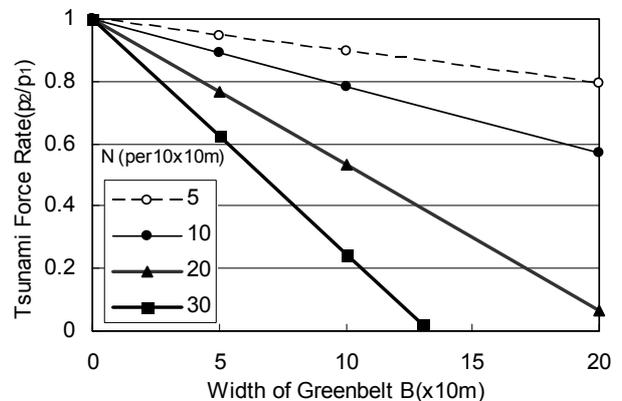


図-3(1) グリーンベルトの幅($B:\text{m}$)および密度 N による津波力比の変化

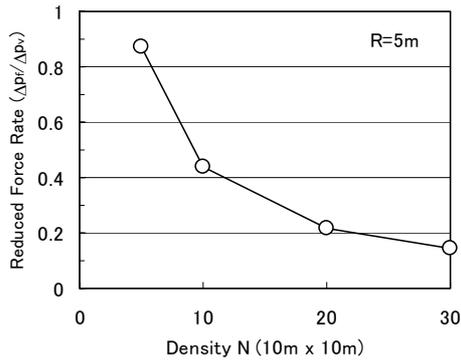


図-3(2) 津波力の地表粗度による減衰部分と樹木による減衰部分の比較

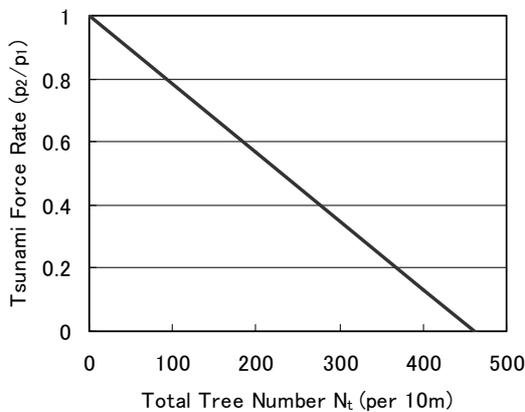


図-4 単位海岸長(10m)あたりに必要な樹木本数

図-4は、樹木幹径 D を 40cm として、密度毎に示した津波力比を平均して、海岸線 10m あたりの総樹木数で表した津波力比である。計算では、図-3(1)で示した各代表点（記号で示したケース）で、海岸線と直角のグリーンベルト幅 B と密度 N から海岸線長 10m あたりの樹木総数 N_t を計算して、 N_t と C_R の相関を最小二乗法で求めた。すなわち、密度と幅の双方の効果を合計した場合の効果を表し、密度が低い場合には、グリーンベルト幅を増加させて樹木総本数を増やせばいいことを示している。計算では、密度が異なると、総本数が同じでも計算結果は変化するので、平均した結果を示したため、図は直線で近似されている。図に示されるように海岸線 10m あたりに 400 本の樹木が内陸に存在すると津波力はほぼ 0 になる。図-3(1)および図-4 に示すように密度が高いか幅の広いグリーンベルト（海岸樹林帯）の背後に家屋を位置させると津波の力が小さくなるため、家屋が流出したり、人が押し流される危険性が小さくなる。

たとえば、木造家屋は単位幅あたり 10kN/m 程度で破壊される（松富ら，1994）。家屋に作用する津波力は、上

記の計算条件である遡上高 $R=5m$ のときは、前述のように $u=5.5m/s$ となり、3m の家屋壁にはグリーンベルトが無い場合には単位幅あたり 90kN/m が作用する。したがって、低減率が 0.11 程度にならなければ木造家屋を完全に守ることはできない。しかし、木造家屋を完全に防護することが不可能な密度でも、ある程度、作用する津波力を軽減できるので、人命や家屋に対する危険性は小さくできる。したがって、できるだけグリーンベルト背後に家屋を立地させるか、家屋前面に植樹を行うことが重要である。

(2) 津波の流速

ここまでは、グリーンベルト背後の力の低減を調べたが、通常、幅広い植樹帯であっても海岸にアクセスするために道路が作られる。カオラック海岸での現地調査時のヒアリング(2004.12.31)では、地元の主婦が海岸から樹林帯の間に位置する幅 3m の道路をモーターバイクで逃げようとしたとき、津波がモーターバイクと同じ速度で迫ってきて、かろうじて逃げ切れたという証言を得た。すなわち、グリーンベルト内で流れが減衰するために、逆にグリーンベルト間の樹木がない場所で津波速度が大きくなり、津波来襲時の避難が困難になる可能性がある。この場合は、道路に沿って真っ直ぐ内陸へ避難するよりも、グリーンベルト内へ逃げ込んで、高木に登ることがより安全になる。

なお、ここでは樹木は津波によって倒壊することは考慮していない。2004年インド洋地震津波による樹木の被害を調べた結果（柳澤ら，2007）によると、津波高が 10m を越えるとマングローブが倒されて、津波力の軽減効果を発揮しないとされており、10m を越える大きな津波が予想される場所では、グリーンベルトだけでなく人工的な砂丘等による複合的な防護が必要と考えられる。

ここでは、グリーンベルト間の道路内での津波流速を推定し、その危険性を示すために、グリーンベルトの海岸線方向の長さに対するアクセス道路の幅の比を開口率 γ とする。グリーンベルト前後では津波の運動量が保存されると仮定して、アクセス道路内の津波流速 u_3 を簡便に推定した。この仮定は、津波がグリーンベルト帯に流入すると、その流束はグリーンベルト背後でも保存されるとしており、グリーンベルト内でのエネルギー減衰やグリーンベルトより沖側への反射は無視している。詳細な計算は、後述する数値計算による必要がある。図-5にアクセス道路の流速を簡便に計算する地形のイメージ図を示す。図の上段は、アクセス道路が無いグリーンベルト配置を示し、下段は、アクセス道路を有するグリーン

ベルト帯を示す。海岸線に沿った全横幅を $W(m)$ とすると、流速が $u_2(m/s)$ となるグリーンベルトで覆われる横幅は、 $(1-\gamma)W$ で、流速が u_3 となる道路帯の横幅は γW である。グリーンベルト直前の運動量は保全され、グリーンベルト背後での流速 u_2 は、これまでに断面的な考えで計算した値と一致する。このとき次式が成立する。

$$u_1 W = u_2 (1-\gamma)W + u_3 \gamma W \quad (9)$$

式(9)のように、この計算は、道路からグリーンベルト内へ流入する流れは考慮しておらず、簡便式によるものである。式(9)の u_1 は前節の式(7)で計算できる。流速 u_2 は式(1)に p_2 を代入して計算する。

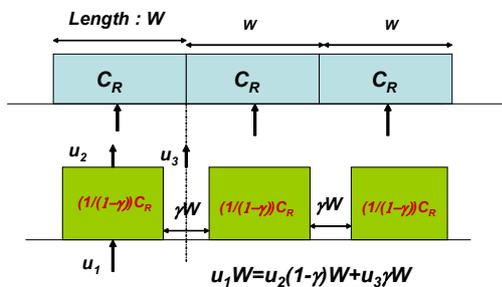


図-5 アクセス道路の配置イメージ

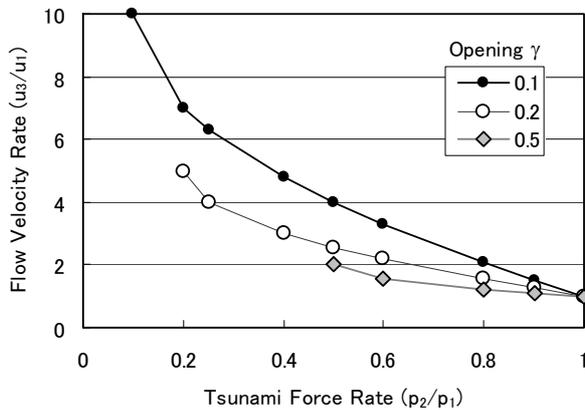


図-6 津波低減効果に対する流速増加率の変化

図-6 は、グリーンベルトによる前述の津波力比 C_R を用いてグリーンベルトがない場合の津波流速 u_1 に対するアクセス道路内流速 u_3 の比を示した図である。津波力比は、グリーンベルトの幅と密度が大きくなるほど 0 に近づき、グリーンベルト背後や内部の津波に対する危険度が小さくなることを示す。これに対して、低減率が大きくなるほど道路内流速の値は大きくなり、特に開口率

が 0.1 の場合には、津波が道路上に集中するので、 C_R が 0.2 の場合に流速は 7 倍まで増加し、避難時の危険性が非常に高くなる。この計算結果から、道路上での速い流れによる人への危険性が高くなることが判るので、津波来襲時の避難において、密度の高い樹林帯があれば、すみやかに道路から離れて樹林帯に逃げ込み、できるだけ直線的に道路上を非難することを避けた方がよいといった提言も可能になる

3. グリーンベルト配置を決めるための数値解析

3.1 対象とする地形と数値解析法

(1) 計算法

ここまでは、グリーンベルトが一様に分布しており、前面の海岸地形も同様として、グリーンベルトに作用した津波の減衰効果だけを簡易式で求めた。実際には海岸の地形は複雑で、グリーンベルトも一様には分布していない場合がある。この場合には、グリーンベルトによる津波防御効果は、配置や地形の影響を受けて変化するものと思われる。マクロ的な視野からグリーンベルトの効果調べた例が Danielsen ら(2005)によって示されている。

Danielsen ら(2005)は、マングローブ樹木帯の海側やマングローブがない場所では村落の被害が顕著に表れ、マングローブ樹木帯の背後に位置する村落では被害が生じていないことを現地調査で明らかにした。このことから、マングローブ樹木帯によって、津波力が軽減されることで、その背後や樹林帯内部の村落では津波被害が軽減されたことがわかる。マレーシアのマングローブが自生している河口部においても同様な効果がヒアリングによって示されている(毎日新聞, 2005.3.3)。

前章では、津波力の主要な要素である抗力についてグリーンベルトによる低減を調べ、密度が十分にあれば津波力を低減できることを示した。前章の簡易式による計算は、地表を水平面とし、地形による津波波形の変化は考えていないので、植林等で必要なグリーンベルト幅や樹木数をおおよそ計算するためには適用できるが、グリーンベルト配置による津波力の変化やグリーンベルト内での津波流速が推定できるものではない。ここでは、より現地に近い条件で津波力の変化を計算するために、津波遡上に関する数値計算を実施する。津波計算には鉛直方向に積分した非線形長波モデル(後藤ら, 1993)を用いた。基礎方程式は次式で示される。

$$\frac{\partial(\eta+h)}{\partial t} + \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_x M_y}{D} \right) + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M_x \sqrt{M_x^2 + M_y^2} + F_x = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_y^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_x M_y}{D} \right) + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M_y \sqrt{M_x^2 + M_y^2} + F_y = 0 \quad (12)$$

ここで、式(10)は連続式、式(11)および(12)は x および y 方向の運動方程式で、それぞれの $F_x(N/m)$ および $F_y(N/m)$ がグリーンベルトによる抵抗力と慣性力抵抗を示す。ここで、 $\eta(m)$ は水位、 $M(m^2/s)$ 、 $N(m^2/s)$ はそれぞれ x 方向、 y 方向の線流量、 $h(m)$ は静水深、 $D(m)$ は全水深、 $g(m/s^2)$ は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数 ($=0.025(m^{-1/3}s^2)$)で一定とした)、 $F_x(N/m)$ および $F_y(N/m)$ はグリーンベルトによる抵抗力を表す。具体的に、 x および y 方向の計算式表示を示す。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D [A_1 + A_2] \frac{M_x \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\Delta x \Delta y D} + C_M \left[\frac{V_1 + V_2}{V} \right] \frac{\partial M_x}{\partial t} \quad (13)$$

$$F_y = \frac{1}{2} C_D [A_1 + A_2] \frac{M_y \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\Delta x \Delta y D} + C_M \left[\frac{V_1 + V_2}{V} \right] \frac{\partial M_y}{\partial t} \quad (14)$$

ここで、 V_1 および V_2 は、図-1 に示した樹木の幹部および葉部が浸水した津波の水塊中で占める単位面積あたりの容積である。 C_D および C_M は式(5)および(6)で示したとおりで、密度 N 、樹径 D によって変化する。計算では葉部も考慮できるようにしており、水位が幹部より上昇して葉部に達すると、葉部も含めた係数を用いる。計算における時間ステップは、モデル地形で 1.0s で、3 時間分の計算をして、陸上部の津波遡上高、流速および時間ごとの水位と流速の 2 乗 (ηu^2) で表される汀線に平行な単位幅当たりの津波力を計算した。

グリーンベルトは、海岸線 (汀線) から 15m 離して、基本形として、幅 50m の樹林帯が一様に設置されるものとした。アクセス道路での流速変化や、異なる配置にした場合の効果を検証するために、千鳥格子状に配置された場合 (千鳥配置) および幅 5m のアクセス道路を設けた場合 (ギャップ帯) についても計算を行った。計算地形は、海底勾配 1/200 の直線形海岸で、陸域の勾配を 1/100 とした。また、グリーンベルト幅を 20m に縮小したケースについても結果を比較した。グリーンベルト密度は、現地の樹木帯で最高密度と考えられる $N=20$ とした (首藤、

1985)。表-1 に計算条件と対象としたグリーンベルトの位置を整理する。

また、直線海岸の中央 1000m を直線で残して、両側は V 字型とした V 字型湾での計算も行った。図-7 に計算地形を示す。

表-1 植生およびグリーンベルト配置のタイプ

植生タイプ	幹のみ	幹+葉	葉のみ
密度 N (本数/m ²)	20		
直径 D (m)	0.3		
投影面積率 A_0/A	0.65		
体積率 V_0/V	0.04		
抵抗力係数 C_D	$C_D = 8.4(V_0/V) + 0.66$		
慣性力係数 C_M	1.0		
慣性力係数 C_M	1.7		
グリーンベルトの配置	幅		
	50m	20m	
一様配置			
千鳥配置			
ギャップ配置			

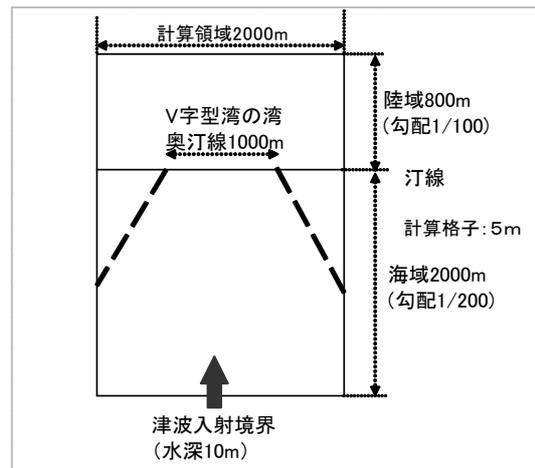
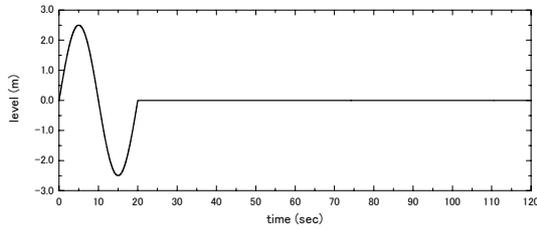


図-7 計算領域

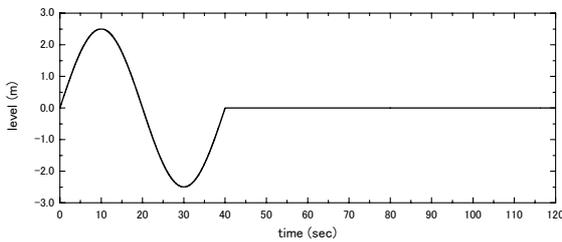
(2) 地形と外力

モデル地形に入射する津波波形は、波高 5m とした 1 周期分の正弦波を設定し、周期をそれぞれ 20 分および

40分の2ケースを設定して2時間分の計算を行う。モデル地形の断面と対象としたグリーンベルトの配置は前述の表-1および図-7の通りである。図-8は、沖側境界から入射させた津波波形である。



(1) 周期 20min



(2) 周期 40min

図-8 入射させた津波波形

(3) 計算の条件

計算方法は、空間にスタッガード格子、時間にリーブ・フロッグ法を利用した有限差分法を用いる。なお、移流項は1次近似の風上差分法を採用した。

沖側境界は、時間波形を入射させるとともに、陸側からの反射波を線形長波に基づく波速に利用して透過処理を行った。遡上域における津波の遡上境界は、岩崎・真野の方法(岩崎ら, 1979)を採用した。時間ステップは、できるだけ小さい方がよいので、ここでは0.1sを採用した。

3.2 数値解析による評価

(1) 植生モデルによる違い

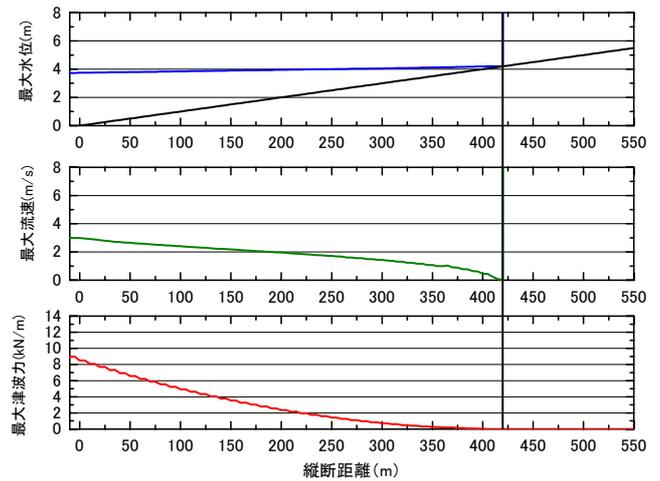
地形モデルが直線地形、津波周期が20分、グリーンベルトの配置が直線帯で幅50mのケースを対象に、植生モデルの違いによる津波減衰効果を確認する。

図-9(1)~(4)は、それぞれグリーンベルトが無い場合、植生モデルが幹のみ、植生モデルが幹+葉および植生モデルが葉のみを対象に、縦断方向(グリーンベルト開始地点を0mと定義)における最大水位、最大流速および最大津波力の分布を示したものである。

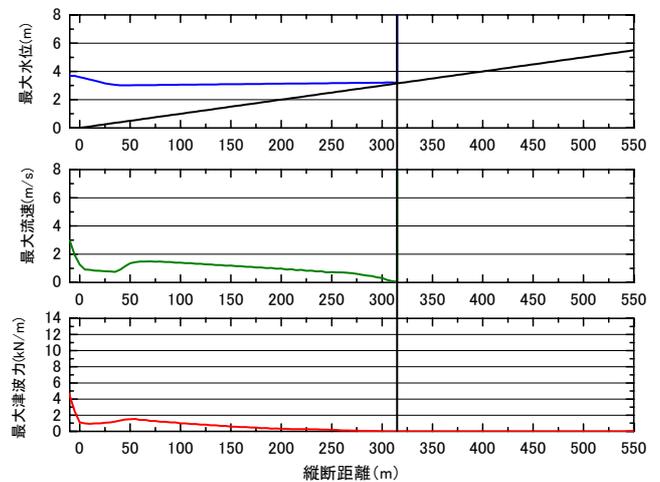
グリーンベルトを配置した図-9(2)では、グリーンベルトの前後で水位が減衰するとともに、グリーンベルト内

の流速が大きく減衰していることが確認できる。水位の減少率は約25%で、流速の減少率は、60%程度である。津波力が水位×流速²で計算されることを考慮すると、津波力の変化は、ほとんど流速変化として表される。前章の簡易式では水位はグリーンベルト内で大きく変化しないと仮定しているので、計算結果はやや安全側となる。

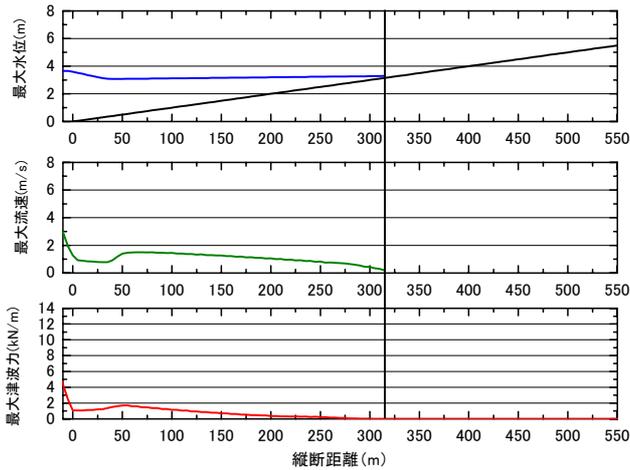
図-10は、横断方向(グリーンベルト開始地点を0mと定義)に関する津波力の比率(F/F_0)を示したものである。ここで、 F は各植生モデルの津波力、 F_0 はグリーンベルト無しの津波力である。グリーンベルトによる津波力の減衰効果は6~8割程度である。植生モデルが幹のみのケースが最も減衰効果が大きく、次いで幹+葉、葉のみのケースとなった。なお、前章の簡易式では、グリーンベルト前後の津波抗力の比を津波力比として示したが、本章では同一地点におけるグリーンベルト有りの場合の津波力をグリーンベルト無しの場合の津波力で除した数値を津波力比と定義した。



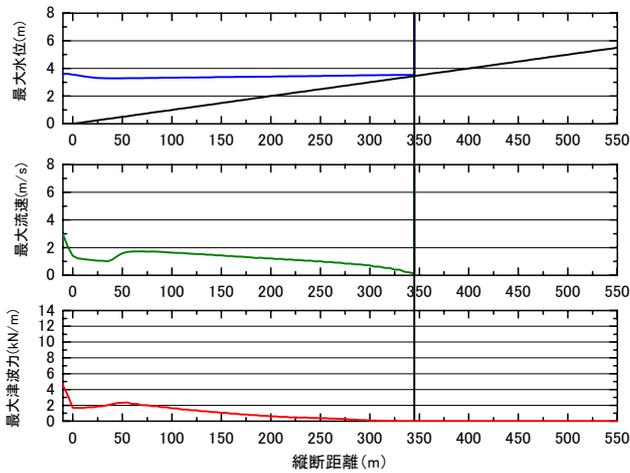
(1) グリーンベルトが無い場合



(2) 植生モデルが幹のみの場合



(3) 植生モデルが幹+葉の場合



(4) 植生モデルが葉のみの場合

図-9 異なった植生を用いた海岸での縦断方向における最大水位・流速および津波力分布 (グリーンベルトは距離 0~50m に分布している。縦の実線は、津波遡上の先端を示す)

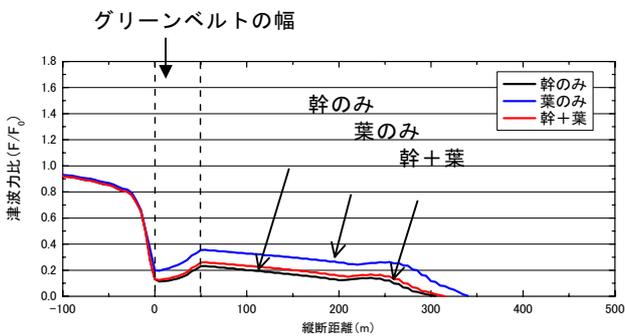


図-10 植生モデルの違いによる縦断方向の津波力の比率

図-10 に示すように、グリーンベルトによる津波力比から判断できる津波力の低減効果は、本計算条件では幹部によるものが大きく、葉部だけでは幹部と同等の低減

率は期待できない。

(2) グリーンベルトの配置による違い

地形モデルが直線地形、津波周期が 20 分、植生モデルが幹のみ、グリーンベルトの幅が 50m のケースを対象に、グリーンベルトの配置による津波の減衰効果を確認する。千鳥帯およびギャップ帯に関しては、図-11 に示す抽出ライン A および A' を対象とした横断方向 (グリーンベルト開始地点を 0m と定義) とする。

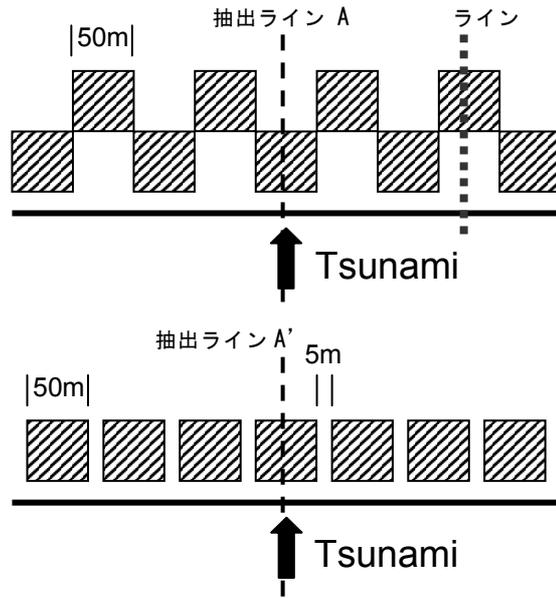
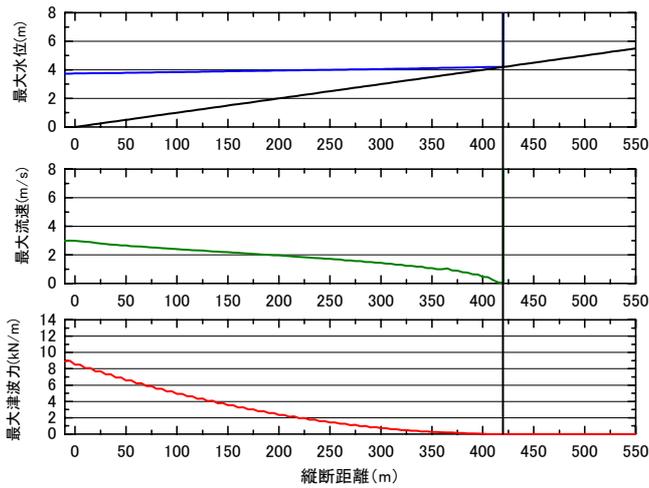


図-11 千鳥帯およびギャップ帯における縦断方向の抽出ライン

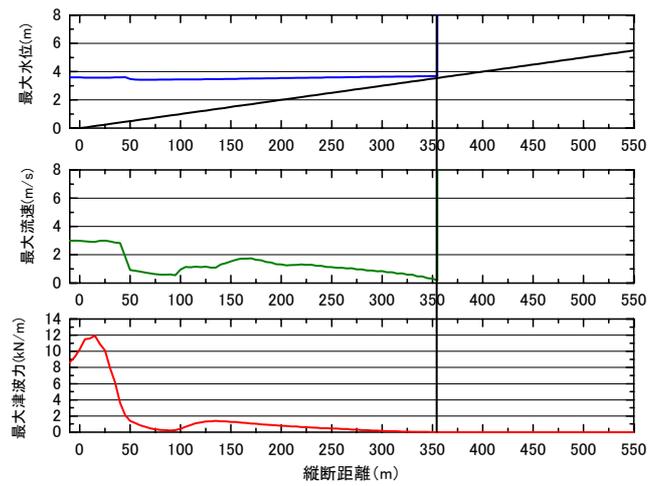
図-12(1)~(4)は、それぞれグリーンベルトが無い場合、直線帯、千鳥帯およびギャップ帯を対象に、縦断方向 (グリーンベルト開始地点を 0m と定義) における最大水位、最大流速および最大津波力の分布を示したものである。図中の縦実線は、遡上した津波先端の最高到達ラインを示す。一様にグリーンベルトを配置すると、最大津波力は約 1/4 に低減され、遡上先端も約 100m 小さくなる。

図-12 の千鳥帯 (ライン A) では、グリーンベルトの背後で流速が大きくなる。この背後は、背面のグリーンベルトに挟まれた区間であるため、津波が集中して流速が大きくなったものと考えられる。津波力もグリーンベルトの直背後 (距離 50~100m) で無い場合よりも大きくなり、両側のグリーンベルトで抑制された津波が集中して、局所的に力が大きくなるのが判る。

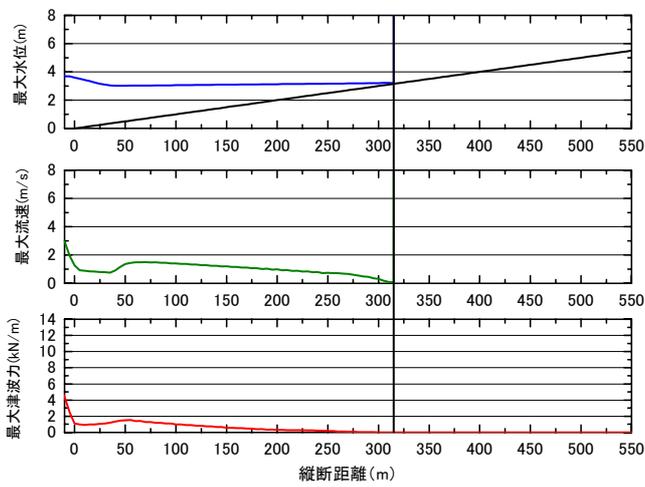
ライン B の場合には、逆にグリーンベルト前面の海岸で津波力が大きくなっている。これは、ライン B では、



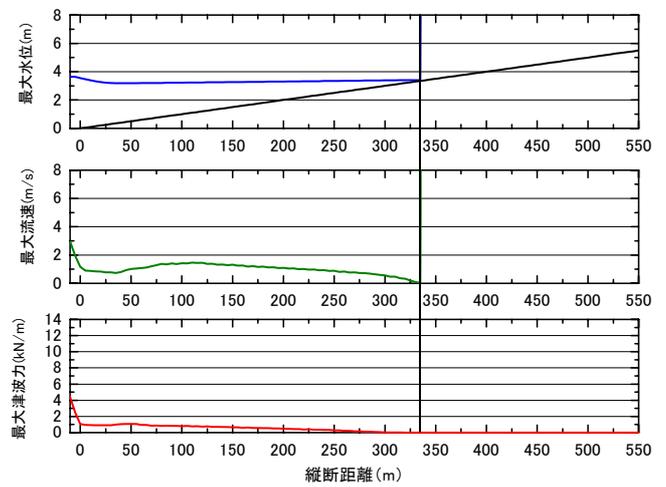
(1) グリーンベルトが無い場合



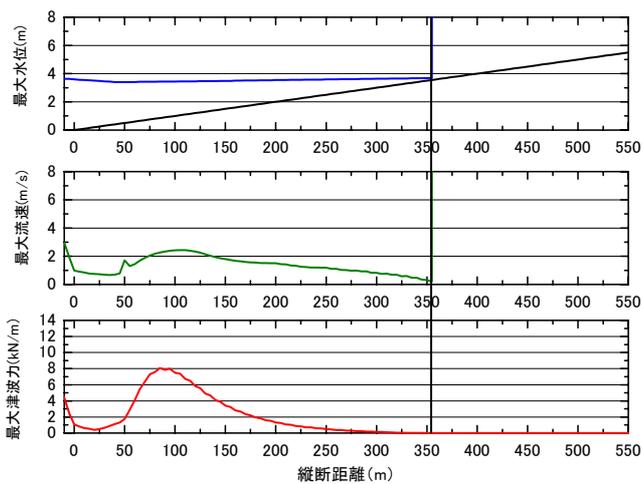
(4) 千鳥帯 (ライン B) の場合



(2) 直線帯



(5) ギャップ帯 (ライン A') の場合

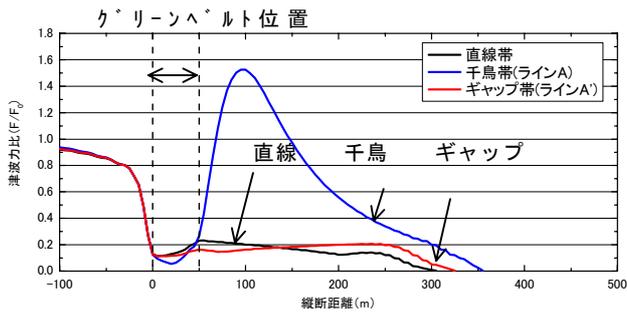


(3) 千鳥帯 (ライン A) の場合

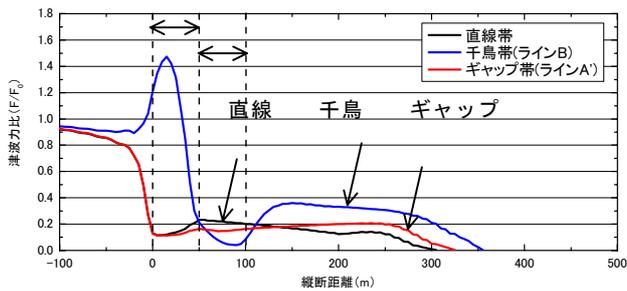
図-12 直線帯の場合の縦断方向における最大水位・流速および津波力分布 (図中の縦断距離 300~400m に示した縦線は、遡上した津波の先端位置)

ライン両側のグリーンベルト帯で流速が小さくなるために、グリーンベルトがない区域に津波の流れが集中してしまうために生じると考えられる。なお、アクセス道路を設けた‘ギャップ帯’の計算では、グリーンベルト帯を縦断する測線で津波力を表示したために、一様配置の場合と同様に津波力は低減されている。

図-13 は、横断方向 (グリーンベルト開始地点を 0m と定義) に関する津波力の比率 (F/F_0) を示したものである。なお、千鳥帯の配置およびギャップ帯の配置については、図-11 に示す抽出ライン A およびライン A' の縦断方向を図-13(1) に示した。グリーンベルトの直背後では、ギャップ帯の比率が最も小さくなるが、内陸部に行くに従って一様帯の比率と逆転する。千鳥帯の背後では、



(1) 抽出ライン A および A'



(2) 抽出ライン B および A' (両矢印は前列および後列のグリーンベルトの位置)

図-13 グリーンベルトの配置の違いによる縦断方向の津波力の比率 (縦破線はグリーンベルトが分布している範囲を示す)

グリーンベルト無しの約 1.5 倍の大きさとなる。

千鳥帯に関しては、図-11 に示すような抽出ライン B を対象とした横断方向 (グリーンベルト開始地点を 0m と定義) に関する分布も比較する。図-13(2)は、抽出ライン B に関する千鳥帯の縦断方向 (グリーンベルト開始地点を 0m と定義) における最大水位、最大流速および最大津波力の分布を示したものである。図より千鳥帯 (ライン B) では、図-12 で考察したように、グリーンベルトの前面で流速が大きくなる。この背後は、背面のグリーンベルトに挟まれた区間であるため、津波が集中して流速が大きくなったものと考えられる。

ただし、グリーンベルトを離れて、直線距離が 300m 以上になると、グリーンベルトの配置による津波力比の相違は小さくなり、千鳥配置であっても、一様配置と同様に津波力の低減が期待できる。また、抽出ライン B における千鳥帯グリーンベルトの効果は、グリーンベルト内部および直背後では、津波力の比率が最も小さくなるが、内陸部に行くに従って一様帯と同一になる。

(3) 水位・流速の時系列

津波周期 20 分, 地形形状が直線および植生モデルが軒

のみの場合におけるギャップ帯の配置を対象に、グリーンベルト内 (幅 50m) とギャップ帯内 (幅 5m) の水位および流速の時系列を示す。グリーンベルト内の水位と流速の変化を把握するため、グリーンベルトが無い場合と直線帯のグリーンベルト内の水位と流速を調べる。

図-14 に示すように、縦断方向に同位置でグリーンベルトが無い場合と直線帯のグリーンベルト内 (中心) の地点の水位と縦断方向における流速の時系列を示したものが図-15 である。

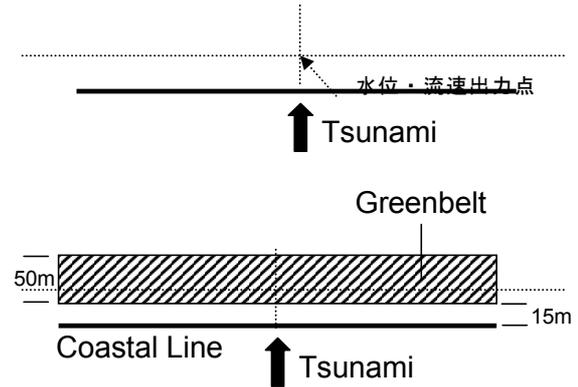


図-14 水位・流速の出力地点 (グリーンベルト内)

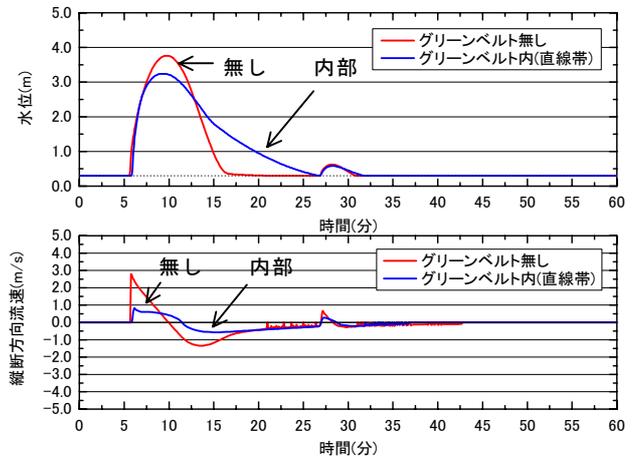


図-15 グリーンベルト内の水位と縦断方向の流速の時系列

図中の細い実線はグリーンベルトが無い場合の水位と流速を示し、薄くピーク高さが低い線はグリーンベルト内の水位と流速を表している。水位も流速もグリーンベルト内ではいずれも小さくなる。水位の時系列に着目すると、立ち上がりはグリーンベルトの有無に関わらず同じ変化率であるのに対して、グリーンベルト内のピークから水位が減衰する部分は、緩やかに減衰していることが特徴である。これは、グリーンベルトの影響により流速が減衰するため、グリーンベルト内部に侵入した津波

が、グリーンベルト外部へ流出するために、時間を要することが原因であると考えられる。

津波流速は、津波の先端がグリーンベルト内へ侵入したときに鋭いピーク波形を示し、グリーンベルトの有無による最大値は、3.0m/sおよび1.0m/sになる。したがって、グリーンベルトによる効果は、流速の軽減に大きく現れ、水位の変化は小さい。

次に、千鳥帯におけるグリーンベルト内外の水位と流速の変化を把握するため、図-16に示すような4点(①:前列, ②:後列)における水位と流速の時系列を調べる。

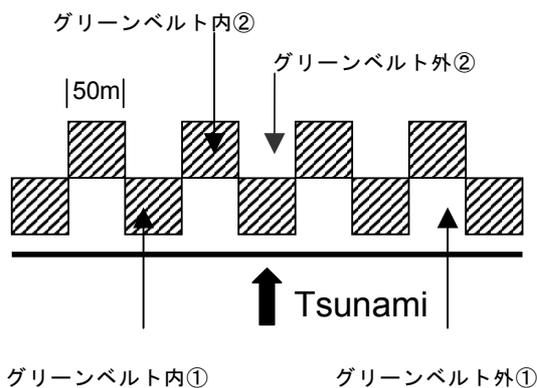


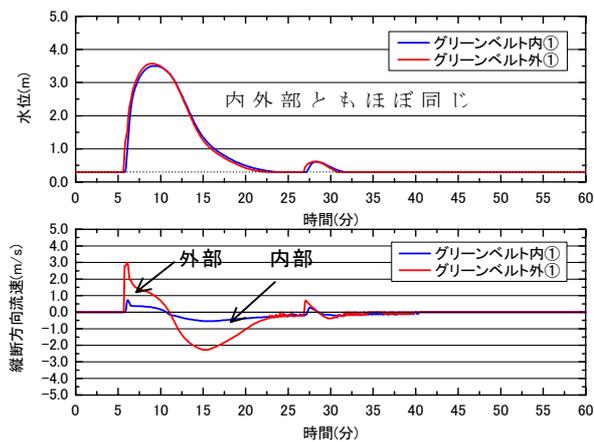
図-16 水位・流速の出力地点(千鳥帯のグリーンベルト内外)

水位・流速出力点での径時変化を示したものが図-17である。水位に関しては、グリーンベルトの内外で大きな差異は生じていないが、縦断方向の流速に関してはグリーンベルト内で減衰していることが確認できる。図-17(1)の前列では、グリーンベルトの外部では3.0m/sの流速が海岸線で生じるが、内部では0.5m/s程度で、避難した住民が樹木の間で流されずにとどまることができる程度になる。このことから、本計算結果を避難計画の作成等に活用する場合には、グリーンベルトが千鳥状に配置されているときは、近傍の樹林帯の中にいち早く避難することが必要であることなどが提案できる。

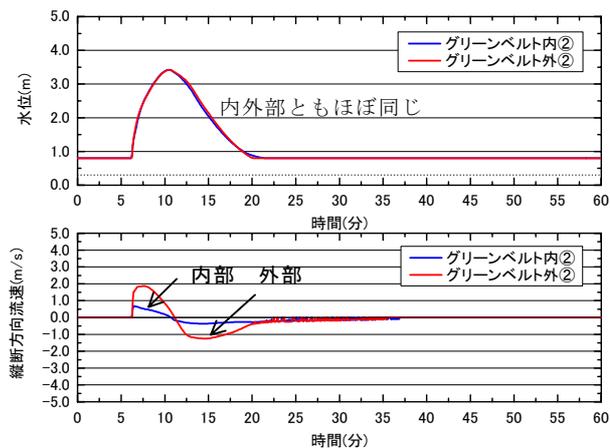
次に、ギャップ帯におけるグリーンベルト内外の水位と流速の変化を把握するため、図-18に示すようなグリーンベルト外部および内部の2点における水位と流速の変化を時系列として表して比較した。

図-19にギャップ帯内部での水位と流速変化を示す。図より、水位に関しては、グリーンベルトの内外で大きな差異は生じていない。これは、千鳥帯においても観測された現象で、流速の変化に比べると、グリーンベルト内部での津波水位の変化が小さいためである。グリーンベルト‘外部’のアクセス道路上での最大流速は、4.0m/s

であり、人の避難路としては使えない。グリーンベルト‘内部’では、最大流速は1.0m/s以下になる。前章の簡易計算でも、アクセス道路等のギャップでは局所的に流速が大きくなる現象が、本章の長波モデルによる数値計算でも明らかになり、グリーンベルトを設置した場合には道路上の流速に留意すべきことが確認できた。



(1) ①前列



(2) ②後列

図-17 千鳥帯の内部における水位と縦断方向の流速の時系列

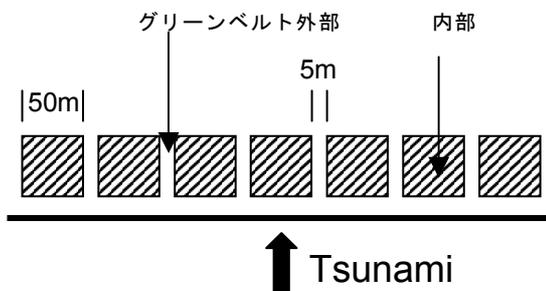


図-18 水位・流速の出力地点(ギャップ帯のグリーンベルト内外)

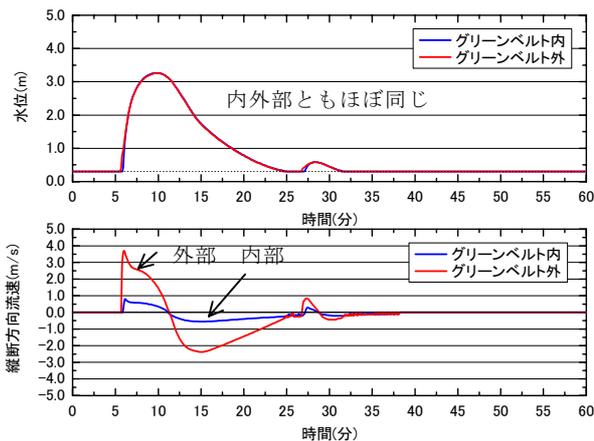


図-19 ギャップ帯の水位と縦断方向の流速の時系列
津波周期による違い

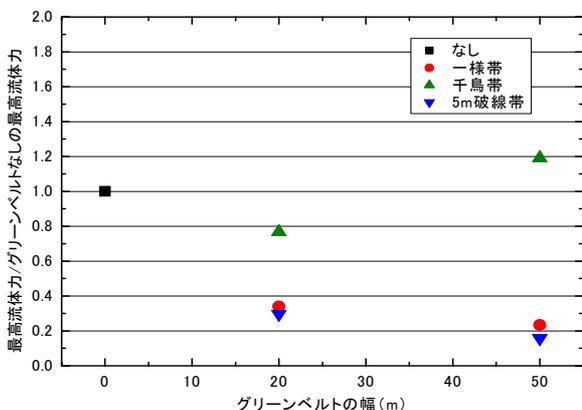


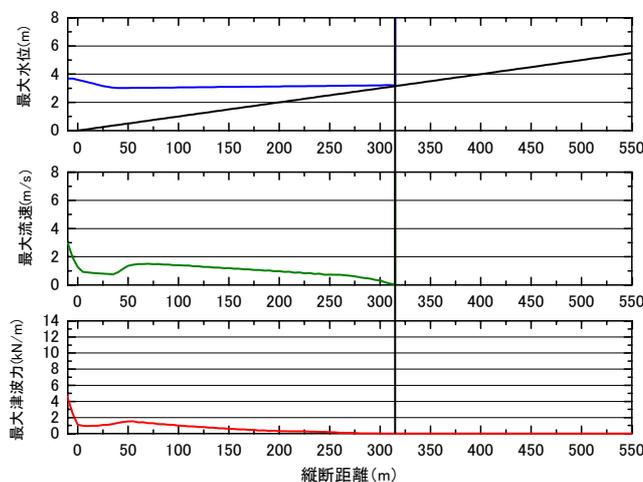
図-20 グリーンベルト幅による津波力比の変化

計算では、グリーンベルトの幅を変化させたケースについても津波力の変化を調べた。図-20は、グリーンベルトの幅が20mになったときに津波力比を幅50mの場合と比較した図である。縦軸は、グリーンベルト有りの場合の最大津波力をグリーンベルトなしの場合の最大津波力で除した数値である。図から、一様およびギャップ帯ではグリーンベルトの幅が広がると津波力の低減効果が大きくなり、幅が大きくなると津波力はより小さくなる。千鳥帯の場合は、グリーンベルトの背後（ラインA）における最大津波力を比較しているため、グリーンベルトによる津波力低減効果は数値的に現れず、図-20では、幅20mの方が最大津波力は小さい。これは、グリーンベルトの幅が小さいので、グリーンベルトによる津波力の変化が小さく、結果として、千鳥帯配置の場合は、グリーンベルトがない場合と同じ結果になるためと考えられる。

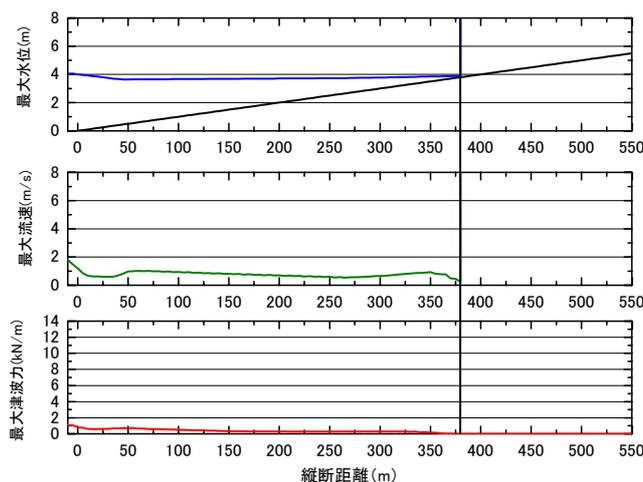
(4) 津波周期による違い

地形モデルが直線地形、植生モデルが幹のみの、グリーンベルトの配置が直線帯で幅20mのケースを対象に、津波周期の違いによる津波減衰効果を確認する。

図-21は、津波周期が20分および40分に関する直線帯の縦断方向（グリーンベルト開始地点を0mと定義）の最大水位、最大流速および津波力の最大値の分布を示したものである。縦断方向の浸水距離に関しては、津波周期が40分の方が津波周期20分よりも長くなることから、周期が短い程グリーンベルトの効果は大きくなると考えられる。なお、グリーンベルト背後付近の流速および津波力は周期が短い方が大きくなっている。



(1) 周期 20min



(2) 周期 40min

図-21 津波周期 40 分の場合の縦断方向における最大水位・流速および津波力分布

図-22は横断方向（グリーンベルト開始地点を0mと

定義)に関する津波力比 (F/F_0) を示したものである。津波力比は、津波の周期が長くなるほど大きくなる。すなわち、津波の周期が短いほどグリーンベルトによって津波力が減少する割合が高くなることがわかる。

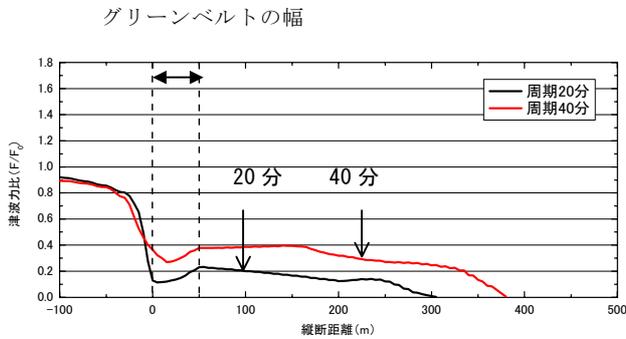
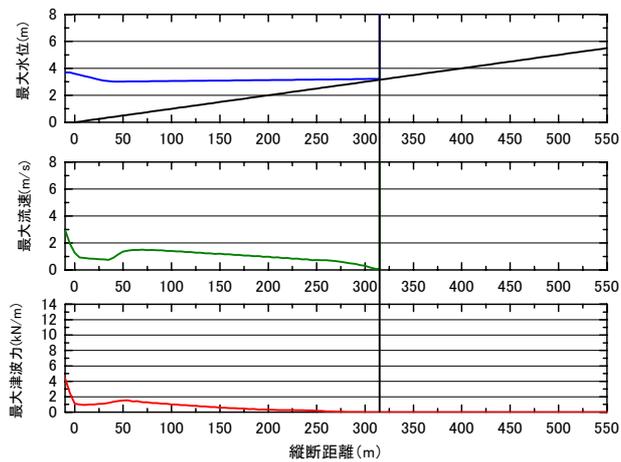
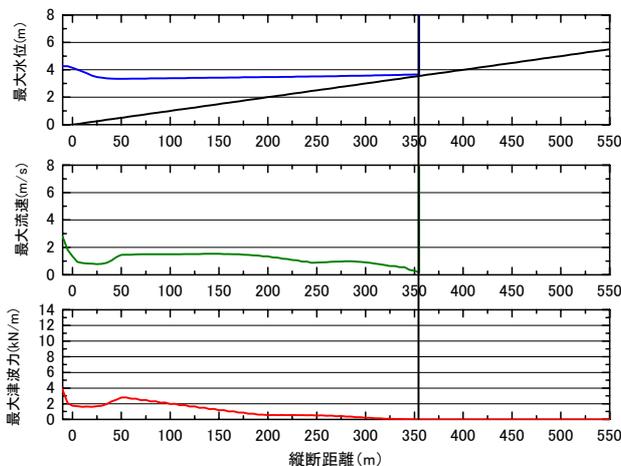


図-22 津波周期の違いによる縦断方向の津波力の比率



(1) 直線地形



(2) V字型地形

図-23 直線形とV字形での津波周期40分の場合の縦断方向における最大水位・流速および津波力分布比較

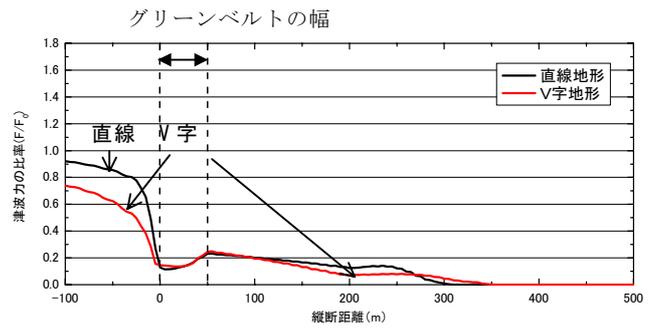


図-24 地形形状の違いによる縦断方向の津波力の比率

(5) 湾幅による違い

ここでは、直線形の海岸と異なり、V字型の海岸における最大津波力の変化等を調べた。V字型は水深100mから浅い部分で海岸の幅を狭くし、V字谷を形成したものである。平面形状は前出の図-7に示す。図-23にV字型湾の中心線での最大津波力および流速変化を示す。

図-24に津波力比の比較を示す。直線形に比べると、V字型地形の方が縦断方向の浸水距離は長くなる。これは、V字型地形は地形効果で湾奥の津波高が大きくなるためであり、グリーンベルトに侵入する前に、既に直線地形よりもV字型地形の方が津波が大きくなっているためである。グリーンベルトの効果はV字型湾でも発揮され、海岸地形に関わらず、津波力低減に効果を有していることがわかる。

4. 現地での効果の検討

4.1 モデル海岸における計算例

(1) 計算の条件

前節では、一様な勾配を有する海岸線に規則波形を津波として作用させて、グリーンベルトの配置法を検討した。ここでは、現地の海岸を模した地形に、実際に生じた津波波形を作用させ、現地により近い条件でグリーンベルトを設置した場合の効果調べた。モデル地形としては、インド洋津波において外国からの観光客が多く被害を受けたタイ南部のカオラック(Khao Lak)海岸を用いる。この海岸は遠浅の比較的直線形状で近似できる海岸(田中ら, 2005)で、グリーンベルト効果を検討するために適切と考える。津波の計算は、外洋域と沿岸域の2つに分割する。最初に、津波波源からカオラック海岸までの外洋域で伝播する津波に関しては、線形長波理論による解析モデルを利用し、カオラック海岸沖地点における津波の時間波形を出力する。

次に、前章で検討したように、カオラック海岸部の地

形をモデル化し、沖側境界として外洋域の計算から得られた津波の時間波形を入力条件として陸上域への津波計算を行い、グリーンベルトによる津波の減衰効果を検討する。本調査で設定する地震の断層モデルは、表-2に示す。計算では越村ら（2005）によって推定された断層モデルのパラメータから、Mansinha & Smylie の方法（1971）により地盤の鉛直変動成分を算出して海面上の津波初期水位とした。

表-2 2004年のスマトラ島沖地震の断層パラメータ（越村ら，2005）

	南セグメント	北セグメント
長さ/幅(km)	500/150	400/150
走行/傾斜角/滑り角(度)	329/15/90	358/15/90
深さ(km)	10	10
滑り量(m)	11.0	11.0
基準点(経度/緯度)	94.8E/2.5N	92.0E/6.5N

波源域からカオラック海岸沖までの津波伝播計算には、今村ら（1987）による地球座標系の線形長波理論による解析モデルを使用する。水深分布のデータは2分間隔のデータ（ETOPO2）を使用し、計算格子も同じ2分間隔（時間ステップ2秒）とした。外洋域の計算領域と水深分布を図-25に示す。また、陸側の境界条件は完全反射とする。

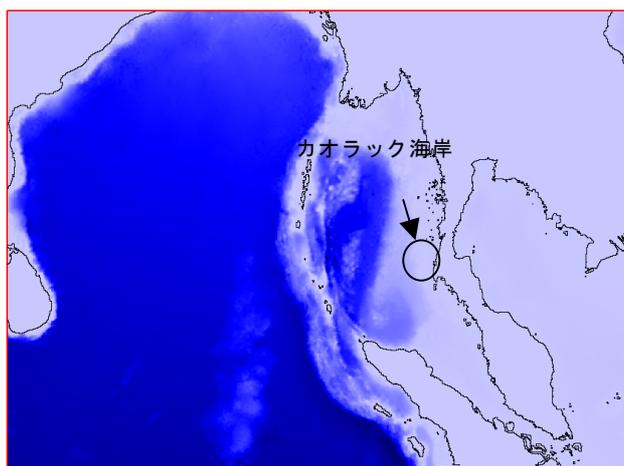


図-25 大領域での計算地形

図-26にカオラック海岸沖約28km地点における津波の時間波形を示す。'Total'は全津波成分の時間波形、'Incident'は西側から東側へ進行する津波成分の時間波形である。波形の分離には、線形長波理論に基づく特

性曲線を利用して分離を行った。図に見られる2つ山の最初は南側断層、2番目は北側断層による津波の波峰と考えられる。また、120分以降での黒線と赤線の差は、陸側からの反射波による影響であると推測できる。

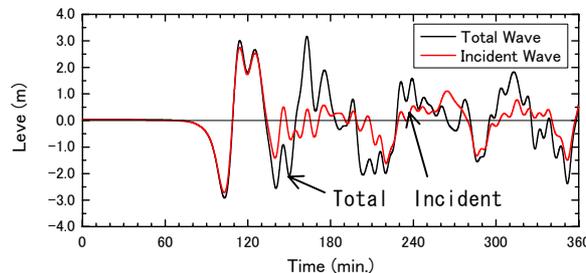


図-26 カオラック海岸沖約28km地点における津波の時間波形（'Incident'は西→東へ進行する津波成分）

本調査における沿岸域の計算領域は、先のモデル地形と同じ計算領域を想定する。よって、沿岸域の沖側境界における水深は10mである。すなわち、カオラック沿岸の海底地形は1/200の一樣斜面とした。外洋における津波計算では、沿岸より28km沖の水深140mの地点での津波波形を出力している。沿岸での計算を開始する水深10mまでの津波高の変化は、以下のグリーンの公式を用いて計算し、水深10mにおける津波高は、水深140m地点の約2倍となるものと考えた。

$$\eta_{10m} = \eta_{140m} \times \left(\frac{h_{140m}}{h_{10m}} \right)^{1/4} = 3 \times \left(\frac{140}{10} \right)^{1/4} \cong 2 \quad (15)$$

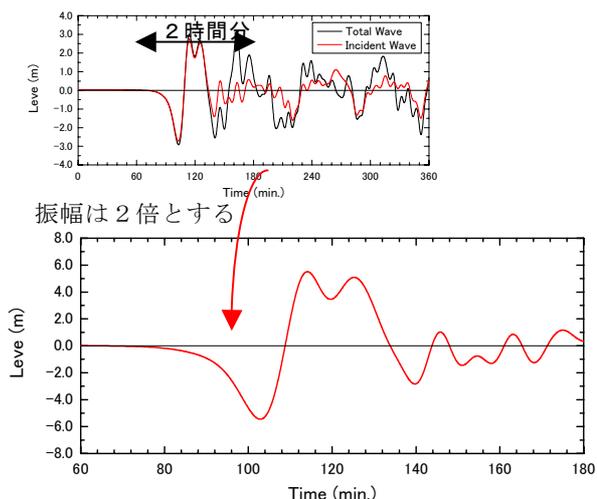


図-27 モデル地形の入射境界から入射させる津波波形の時系列

したがって、沿岸域の沖側境界に与える津波の時間波

形は、外洋での計算結果の水位に関して2倍した時間波形を与える。このとき、沖側境界での波高水深比は大きくなるため、自由透過の処理は行わず強制入力として計算する。なお、津波の時間波形は、図-26における入射成分(Incident)の60分から180分までの2時間を利用する。海岸での詳細メッシュでの計算に用いる津波波形の抽出イメージを図-27に示す。

カオラック海岸周辺の地形については、図-7で示した直線形状のモデル地形(陸上勾配 1/100)を使用する。ただし、領域をY方向へ300格子=1.5km拡張して格子数400×900とした。グリーンベルトの配置は、一様帯およびギャップ帯の2ケースとする。また、植生モデルは幹のみとし、パラメータは表-1に従うものと仮定した。ここでは、樹木径も40cmで一様としており、現地の樹木の種類等を調査して、パラメータを設定したものではなく、モデルによる計算例として位置づけている。図-28は直線海岸の背後に設けるグリーンベルトのモデルである。千鳥配置は、局所的に津波力が大きくなるとともに、内陸部でも効果が一様帯と変化しないので、現地においては一様帯かギャップ帯を設けるものとした。

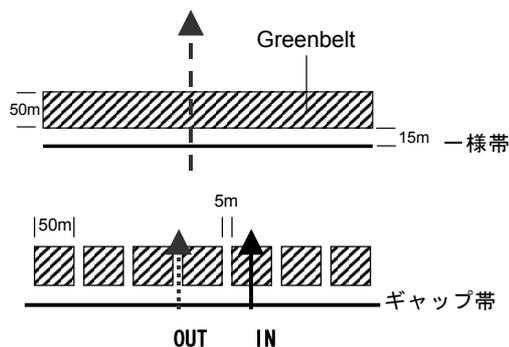


図-28 単純化した現地地形におけるグリーンベルトの配置

(2) 計算の結果

ケースの計算結果を以下に示す。なお、津波力の最大値(kN/m)は、以下の式を用いて算出した。

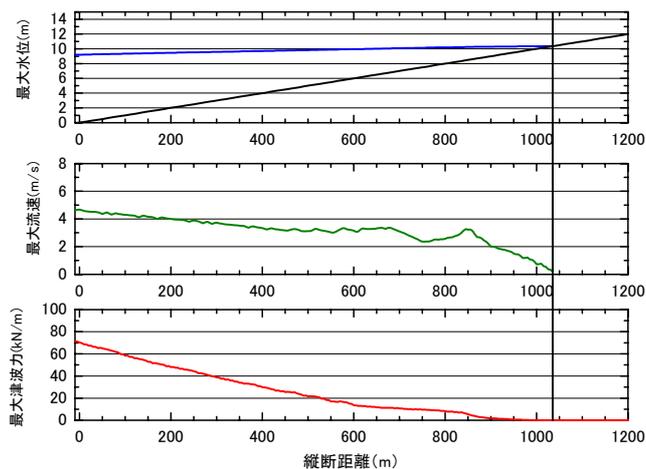
$$\frac{1}{2} \rho C_D (Du^2)_{\max} = \frac{1}{2} \times 1.03 \times 2.0 \times (Du^2)_{\max} \quad (16)$$

ここで、 ρ は(kg/m³)海水の密度、 C_D は抵抗係数で2.0とし、 D (m)は全水深、 u (m/s)は断面平均流速である。添え字_{max}は計算結果の時系列から最大値を抽出したものである。

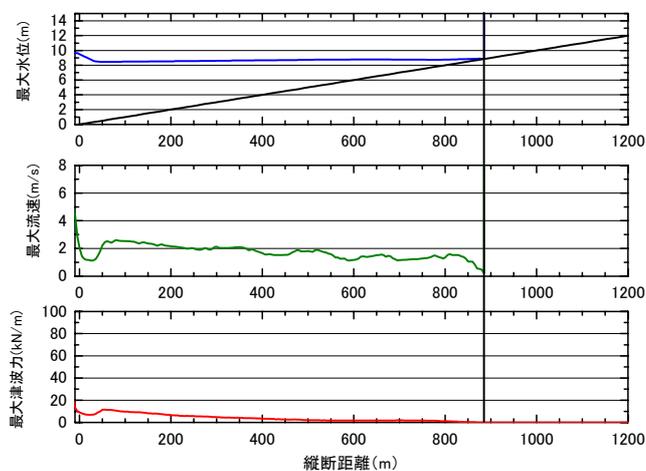
計算の結果、最大浸水域は、グリーンベルトの設置に伴い、津波の浸水面積および浸水深が減衰していることが確認できた。汀線付近の水位は約9mであり、平石ら

(2005)が示した痕跡値とほぼ一致する結果となる。図-28に示した各グリーンベルトの配置について、矢印で示した縦断方向に関する最大水位、最大流速および最大津波力の分布を図-29に示す。なお、ギャップ帯では、グリーンベルトの内部(IN)と道路上の外部(OUT)に分けて、縦断方向の力と流速変化を示した。また、グリーンベルトの設置に伴い、グリーンベルト内およびグリーンベルト背後で流速が減衰していることが確認できた。さらに、浸水深に比べて減衰効果は大きかった。ギャップ帯グリーンベルトでは、グリーンベルト外部(OUT)に津波が集中するため流速が著しく速くなり、このギャップ帯によって速くなった流速は、グリーンベルトの背後約500m付近まで影響を及ぼしていた。

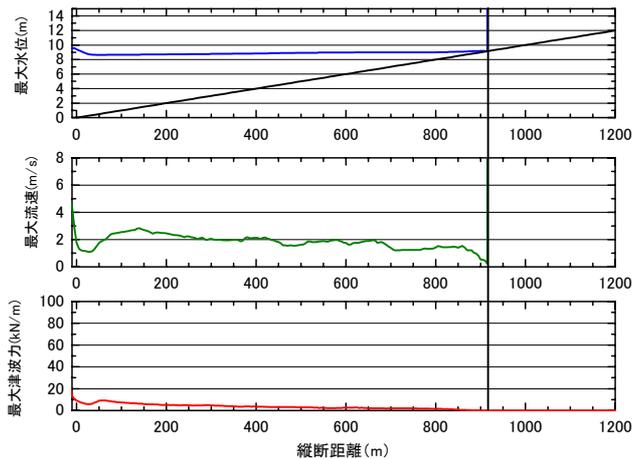
最大津波力分布を調べたところ、グリーンベルトの設置に伴い、グリーンベルト内およびグリーンベルト背後での流速減衰に伴い津波力も減衰していることが確認できた。ただし、ギャップ帯グリーンベルトのグリーンベルト外部(ギャップ帯内)に津波が集中して流速が速く



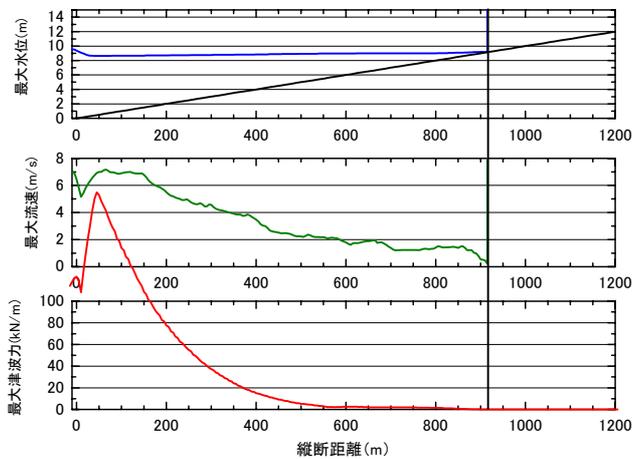
(1) グリーンベルトなしの場合



(2) 直線帯の場合



(3) ギャップ帯 (内部 IN) の場合



(4) ギャップ帯 (外部 OUT) の場合

図-29 縦断方向における最大水位・流速および津波力分布

なるため、津波力も大きく増幅する結果となった。

一様帯グリーンベルトの内部およびギャップ帯グリーンベルトの内部では、流速の減速に伴い津波力も減衰している。ギャップ帯グリーンベルトの外部では、津波が集中して流速が大きくなるため、津波力も増幅する。特に、グリーンベルトの背後近傍での流速が最も大きくなっている。

図-30 は、横断方向（グリーンベルト開始地点を 0m と定義）に関する津波力の比率 (F/F_0) を示したものである。直線帯とギャップを有するもののグリーンベルト内部における津波力比は、ほぼ同等で図では差が現れていない。グリーンベルト外部では、流速が速くなるために津波力も大きくなっている。直線帯とグリーンベルトの内部での津波力比の値は約 0.2 となり、グリーンベルトを海岸線に沿って配置することにより、津波力に関して約 8 割の減衰効果が期待できる。ギャップ帯グリーンベ

ルトでは、グリーンベルト外の津波力はグリーンベルト無しの場合に比べ約 3 倍となる。したがって、グリーンベルトに道路を設ける場合には、道路上での津波力が何も無い場合に比べて増大する可能性があることも考慮しておかなければならない。

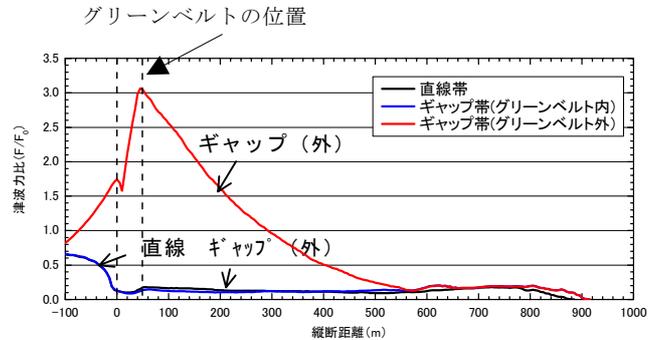


図-30 グリーンベルトの配置の違いによる縦断方向の津波力の比率

4.2 2007年ソロモン津波での事例

(1) 津波の概況

前節までの考察で、グリーンベルトを設置すると津波力が軽減されることが判明した。また、谷本ら(2007)および柳澤ら(2007)も、数値解析によって海岸樹林の津波防災への有用性を示している。しかしながら、実際に現地で既存の樹木帯が津波軽減効果を有したと明瞭に判別できる例は希である。そこで、最近の津波による被災事例を示し、グリーンベルトの効果を定量的に検討することを試みた。被災事例はソロモンでの津波である。

2007年4月2日5:40頃(日本時間)、ソロモン諸島沖(南緯 8.6° 、東経 157.2°) を震源として地震が発生し、沿岸部に津波被害を与えた。地震マグニチュードは 8.1(Moment)および 7.6(RICHTER)である。地震断層は震源を中心に東西へ広がり、ギゾ島、シンボ島、ベララベラ島等の沿岸に数 m の遡上高を有する津波をもたらした。図-31 および図-32 にソロモン諸島国の位置および被災調査団の痕跡調査例を示す(防衛大学藤間教授提供)。

この津波は、沿岸の島嶼地域に大きな被害をもたらし、早急な復旧が望まれる。また、複雑な海岸地形での津波の特徴や沿岸の家屋被害状況の把握など、今後の津波防災技術の確立のためにも、現地における痕跡や被害状況の調査が必要である。すでに緊急調査の一環として、港湾空港技術研究所から調査団が派遣され、現地の状況を把握し、被害概要と津波痕跡高の測定を行った。その後、北海道大学、秋田大学等の調査チームが現地踏査を行い、津波痕跡高は、遠隔地を除くと、ギゾ島周辺では、ほぼ

人々がいる。今回の地震・津波では病院と学校の被害が大きく、復旧は遅れている。また 3m 程の盛土がある家は被害がなかった。ギゾ周辺の人口は 4000 人で、行方不明も入れて 100 名が犠牲になっている。子供の被害が大きい。これは、好奇心から波を見に行っただけのためと思う。インド洋大津波のニュースはラジオで流されたが、広くニュース内容が認知されているわけではない。ギゾ島では、Titiana, New Mander の被害が大きい。ホニアラでも地震があり、今後もソロモン諸島の危険度は高い。なお、チョイセル島でも 1 名無くなっている。

ギゾ島の被災村落は、ギルバート諸島からの移民で成り立っており、独立前の英国の統治時代に移住が行われた。今後、移転も含めて政策的な安全対策が必要と考えられる。

(ロ) ギゾホテル従業員および警官(6/19-22)

床上 20-30cm の浸水があり、通信施設が使えなくなった。地震後、海面があがるように津波は来襲し、海岸のマーケットから全員が避難した。警察でも避難を促し、避難行動を支援した。山上のキャンプ地に居住している人々には、いまだ公式には、元の住居へ戻ることを促していない。

(ハ) スバ村村長(Mr. Willieton Kazi)(6/19)

スバ(Suva)はギゾ(Gizo)島の西部に位置する村(S8:5:37.8, E156:47:29.7)で、津波で最も大きな被害を受けた村落の一つである。人口は 140 名で 28 家族で 1 軒だけ残り、すべて流された。津波は 3 回来襲し、地震後数分でラノンガ島の隆起により、最初の津波は西から来た。2 波目、3 波目は沖側から来襲し、3 波目が最大(12feet)であった。住民は津波を知っており、1 波目が来たときに全員が山へ逃げた。山は近く、避難はできたが 3 波目ですべてが流された。英国人が写真を撮り、BBC で放送された。

ヒアリングから求めた浸水深は、海岸より 200m 離れた倉庫が 1.3m、100m 離れた高床式住居で 2.0m であった(柱の回りの洗掘深は 45cm)。

(ニ) パエログ(Paelogge)村村長(6/19)

集會中に揺れを感じ、全員が逃げたが、胸まで浸かった人もいる。村長の息子さんの家は、鉄筋コンクリート製柱を有する高床式で被害は軽微であった。この家も含めて樹木で囲まれた地域の被害は軽微であった。村の中央はグラウンドになっており、回りの家は土台ごと流された。鉄筋入りブロック積み教会は、土台洗掘および壁の崩壊が生じた。

(ホ) ボリボリ村 村民(唯一残った家の主人)(6/19)

ボリボリ村(Vorivori)はギゾ島西端に位置し、100 名が

住む。地震後 2, 3 分で突然前面の海が盛り上がり(リーフによる浅水変形の影響と思われる)全員が山へ逃げた。インド洋地震津波のことはテレビで知っており、子供たちにも教えている。また朝の 8 時頃であり避難には都合が良かった。二つの地区で 27 軒あったが残った家は 1 軒だけである。

主人は家に痕跡を記録しており、浸水深は 195cm であった。高床式の柱は 2m50cm で床面は浸水していない。実は 2 階建てにするつもりで柱を強くして、1 階部分ができている状態で津波に遭遇した。

(ハ) ティティアナ(Titiana)村村長(Mr. Siroia Benetesi)(6/20)

津波は 3 波来襲し、1 波目は膝より下、2 波目は腰、3 波目は背丈を越え、教会の窓枠まで水が来た。第 1 波を見て全員が山に逃げ、その日はブッシュで寝た。今は山上のキャンプで過ごしている。400 人が住んでおり、13 人が亡くなった。今後、津波が再来するかどうか全員が恐れている。

(ト) キタノ・メンダナホテル従業員(Mr. Neil Poloso)(6/22)

Choiseul (チョイセル島) 出身で、集めた情報を示す。チョイセル島の首都 Taro (北端) は揺れたが、津波は来襲していない。津波は、チョイセル島中央部で大きく、1 名が亡くなっている。中央部の家は、約 1m の柱を有する高床式で、満潮時には、柱の基部まで浸かるような位置に建てられている。津波は柱頂部より高くなり、家の壁面を押して、家全体を押し流した。現在でも復旧はされていない。被害が大きかった中部では、家屋の前面に海岸林は少ないと思う。北部では、海岸に沿ってマングローブ林が汀線より沖側に位置し、津波の被害軽減に役立っていたのかもしれない。チョイセル島の樹木は、現地語で、Pututu, Buni 等でその他、マングローブ、Sago Palm, Keyport (まくら材) などがある。

(3) 被害の様子

(イ) ギゾ空港

棧橋の上部歩道や階段が津波で流され、本島の棧橋も水没していた。ただし、一部が修理され、使用されている。調査時点(6/17)には地震で崩壊した教会が残されていたが、海岸マーケットなどは開かれていた。海岸道路は護岸形式で標高が 1~2m 程度有り、背後家屋の津波被害が軽減された。また、ギゾ湾は西に開いており、津波は回折して入り込んだ。また島の南にはリーフが帯状に広がっており、津波被害軽減につながったと思われる。

(ロ) 佐藤商会ギゾ店(ギゾの海岸に面している)

地震で商品が落下し、床上まで水が来て、商売ができなくなった。揺れは強く、今でも津波を心配して、山の

上にテントを所有している。またボートは1隻を常時係留し、もう1隻を陸地の高台に保管している。

(ハ)Suva (スバ) 村

高床式の家屋は柱を残し、全壊し、1軒だけが残った。近隣の Paelogge では比較的堅牢な家屋を残し、ほぼ全壊していた。Suva 村で残った家屋の浸水深をヒアリングから確認し、200cm とした。浸水高は海面から 368cm (津波来襲時の海面から 341cm) である。

(ニ)Vorivori (ポリポリ) 村

村落中央の教会は、拡張部が破壊され周辺の家屋もすべて流された。残存家屋の痕跡から測った浸水高は 345cm (津波来襲時の海面から 301cm) である。

(ホ)Titiana (ティティアナ) 村

村落は大きく東西に 1km 程度広がっている。東端のブロック造りの教会は、基礎が洗掘され、建物回りの砂が掘られていた。洗掘深は 70cm である。ほとんどの家は山の方向へ流されており、残骸が広がっている。残っている家の特徴は高床式で基礎が堅牢 (深さ 90cm くらいまで基礎を埋めている) である。また、周辺の樹木の影響で流出を免れた家もあった。村落の海側には高さ 1m 程度の石積み防潮堤が築かれていた場所がある。村落の東端は、津波以前は堤外には砂浜が無かったが、津波により堆積が生じた。しかし、防潮堤基部は洗掘によって破壊されていた。浸水高は 382.5cm (351cm) である。

(4) 樹木の効果

4-1) スバ村

スバ村では、西側にココ椰子の密集林があり、西側からの1波目を弱めた可能性がある。フィールドを有し、海岸線に沿った植生が疎らなパロンガ地区に比べると、高床式の柱や、家の土台は残り、やや津波の力は弱められたと思われる。スバ村内でも樹木前面に巨木が生えているライン上(Line-2)では高床式家屋が傾きながらも残り、海岸から見通せる(樹木がない)ライン上(Line-1)では、家屋が全壊し、200m 奥まで津波の浸水跡が明瞭であった。なお、各測点での地盤高・痕跡高および樹木に関する調査結果を表-3 にまとめている。

そこで、両ライン上の地盤高の変化と、樹木ラインの樹木位置と直径などを測定した。測定結果を図-34 に示す。測定ラインは、津波後も残った家屋とヒアリングで確認した津波時に流された家屋の跡が、数十 m の範囲に並列して残された区域で決定した。図-34(1)に決定したラインのイメージを示す。他の地区でも同じ手法を用いた。写真-1 は Line-1 の家屋と樹木の様子である。図-34(2) は、各ライン上の横断面であり、樹木無しの家屋破壊が

大きかったラインの方が地盤は高い。図-34(3)は被害が少なかった家屋前面の樹木配置である。最も海側には、写真-1(2)で示す巨木があり、洗掘も受けていなかった。この巨木は現地語で BUNI と言われ、根本から 5 本に枝分かれしており、それぞれを表-3 では B1~B5 として単独樹木と同様に整理している。



写真-1(1) Suva 村で樹木の効果で被害が軽減された家



写真-1(2) 家屋前面の海岸林(BUNI)

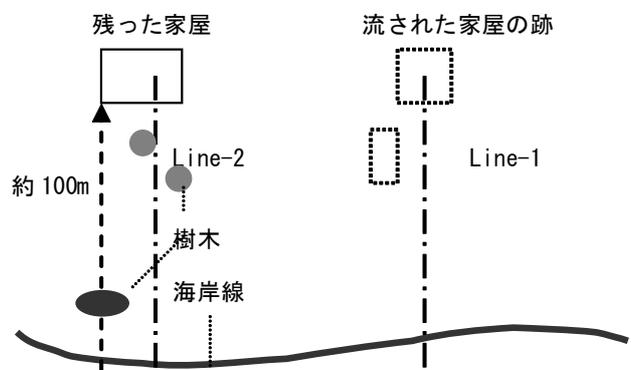


図-34 (1) Suva における Line-1 と Line-2 のイメージ

表-3 ギゾ島における植生の津波力低減効果に関する調査結果

(1) スバ村

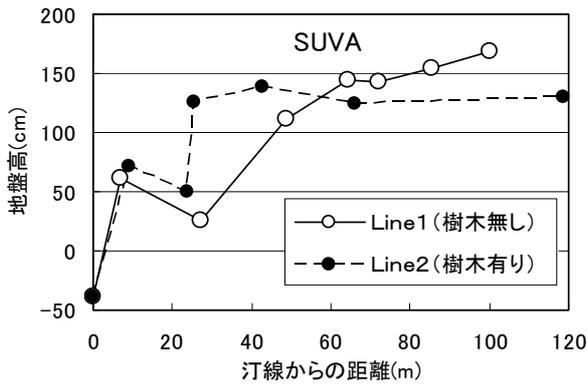
地点名	緯度・経度	日時	津波時潮位		津波痕跡			Line1(樹木無し)			Line2(樹木有り)				
			59	痕跡高	浸水深	根拠	測点番号	地盤高(補正)	汀線からの距離(m)	測点番号	地盤高(補正)	汀線からの距離(m)			
			推定潮位										測定値	補正值	測定値
スバ(SUVA)	S 8° 5' 37.8"	2007/6/19,10:00	21	368	330	200	ヒアリング	0	-38	0	0	-38	0		
			10:0-14:00の平均					1	62	6.9	1	71	9.0		
	E 156° 47' 29.7"							2	26	27.0	2	50	23.6		
								3	112	48.9	3	126	25.4		
								4	144	64.2	4	138	42.6		
								6	143	72.1	6	125	66.2		
								7	155	85.5	7	130	118.5		
								8	169	100.3					
	樹木番号	1	2	3	4	5	6	B1	B2	B3	B4	B5	7	8	9
	種類	CT*1	CT*1	T*2	C*3		T*2	"BUNI"					ADAN		
樹径D'(cm)	55.8	53.6	48	26	22.8	66	105	117	91	110	75	100*4	100	100	
樹高H'(m)	14	15.4	18.3	12.2	6.6	16.1	22.5								
汀線:0 距離x(m)	114.1	108.7	104.5	100.2	92.6	86.3	37.6					52.5	49.8	50.1	
家屋中心:0 横距離y(m)	-0.7	-3.6	-2.3	-3.7	-3.1	-11.8	0.0					-13.4	-7	-1.6	
CT*1 Christmas Tree			T*2 Teibia		C*3 Coconuts			100*4 ADANは細い樹幹の集合体径を100cmとした。							

(2) ティティアナ村

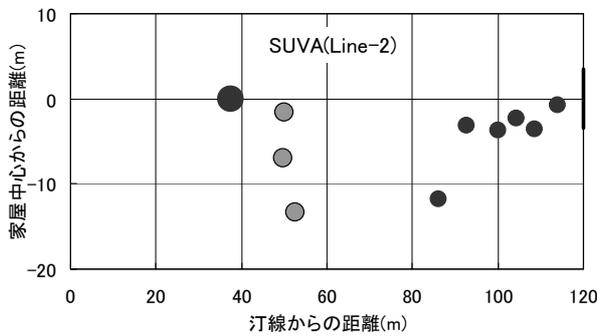
地点名	緯度・経度	日時	津波時潮位		津波痕跡			Line1(樹木無し)			Line2(樹木有り)		
			59	痕跡高	浸水深	根拠	測点番号	地盤高(補正)	汀線からの距離(m)	測点番号	地盤高(補正)	汀線からの距離(m)	
			推定潮位										測定値
ティティアナ(Titiana)	S 8° 6' 35.1"	2007/6/20,11:00	25	383	349	82	破壊された教会の窓枠	0	-34	0	0	-34	0
			11:0-15:00の平均					1	94	9.5	1	101	12.1
	E 156° 49' 0.5"							2	89	14.6	2	124	19.5
				Line-1			3	189	21.3	3	167	25.8	
				447	413	210	家屋での柱記録	4	189	23.2	4	203	31.8
								6	170	25.3	6	226	39.8
				Line-2			7	267	36.6	7	285	46.3	
							8	216	46.5	8	227	53.9	
							9	235	52.7	9	202	69	
							10	201	67.1				
							11	187	75.6				
							12	188	87.7				
				13	291	103.6							
樹木番号	1	2	3	4	5	6	6'	7	8	9			
種類	ADAN	CT*1	T*2	C*3	C*3	T*2	W*5	W*5	W*5	ADAN			
樹径D'(cm)	130	33	130	130	44	29	25	42	36	130			
樹高H'(m)	8.4	7.1	6.9	5.4	9.5	2.7	2.7	10.5	8.4	7			
汀線:0 距離x(m)	18.6	18.9	23.2	19.3	22.08	22	22.3	25	28.5	36.6			
家屋中心:0 横距離y(m)	-13.6	-7.2	-8.5	-2	1.9	6.6	7.4	6.2	7.3	6.7			
CT*1 Christmas Tree			T*2 Teibia		C*3 Coconuts			W*5 Waru					

(3) ボリボリ村

地点名	緯度・経度	日時	津波時潮位		津波痕跡			Line2(樹木有り)		
			59	痕跡高	浸水深	根拠	測点番号	地盤高(補正)	汀線からの距離(m)	
			推定潮位							測定値
ボリボリ(Vorivori)	未測定	2007/6/19,15:00	16	345	302	196	家屋内の記録	0	-43	0
			15:0-16:00の平均					1	67	6.8
								2	49	11.6
								3	107	13.9
								4	106	22.5
								6	109	37.7
								7	121	59.8
	樹木番号	1	2	3	4	5	6	7		
	種類	W ³	W ³				W ³			
樹径D'(cm)	70	87	22.7	24.5	40	42.2	48.6			
樹高H'(m)	21.4		22	22	39	39				
汀線:0 距離x(m)	17.3	14.9	18.6	9.5	11.7	16.6	18.6			
家屋中心:0 横距離y(m)	0	-8.2	2	4	8.4	9.3	9.3			
W ³ Waru										



(2) Suva における樹木が無い Line-1 と樹木の多い Line-2 の断面

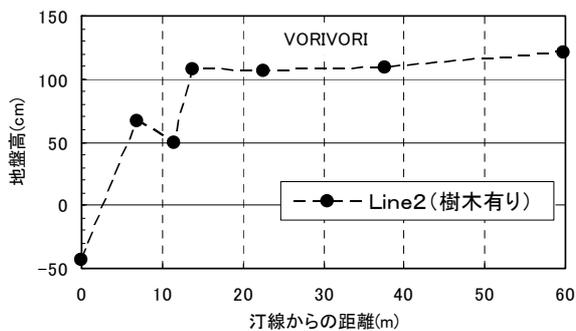


(3)家屋（直線）前面の樹木配置（黒丸）（距離 120m 上に示された太実線は家屋の位置を示す）

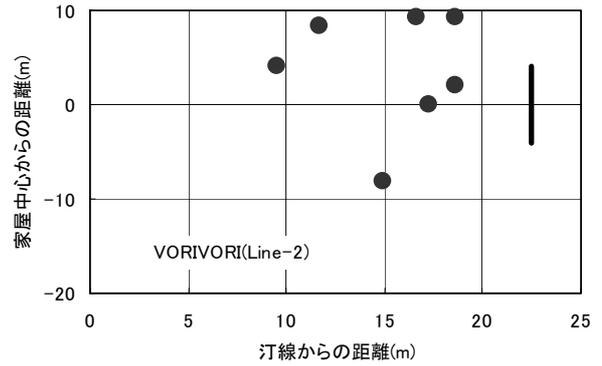
図-34 スバにおける地盤高と植生

4-2)ボリボリ村

ボリボリ村では唯一残った高床式家屋周辺の地盤高を測定した。この家が残った原因としては床柱が堅牢であったことと前面の巨木の存在が考えられる。家屋は、直径数十 cm の樹木が数本密集している位置にあり、周辺に比べると樹木による遮蔽効果が高い。地盤高および樹木位置を図-35 に示す。写真-2 は家屋周辺の樹木の様子である。



(1) Vorivori の代表断面



(2)樹木配置図(右側の直線は家屋位置)

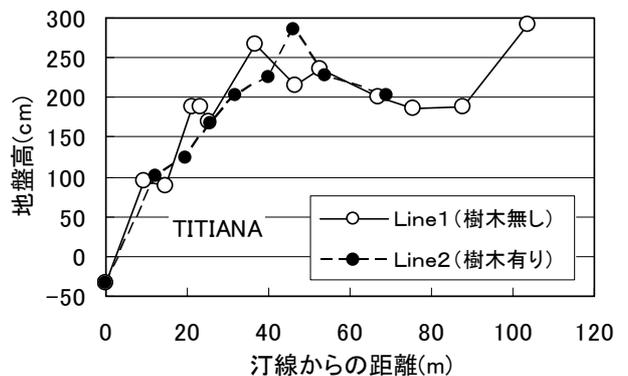
図-35 ボリボリにおける地盤高と植生



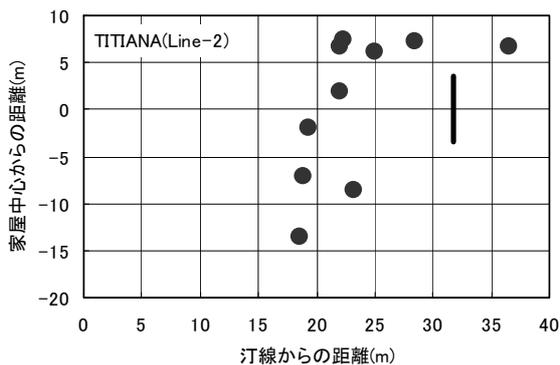
写真-2 Vorivori 村で被害が小さかった家屋の周辺樹木

4-3)ティティアナ村

ティティアナ(Titiana)村において樹木効果を調べた。樹木が無く、被害が顕著であった教会を Line-1 とし、それに隣接して、高床式家屋が残っていた場所を Line-2 とした。Line-1 および Line-2 の縦断面を図-36 示す。Line-1 および Line-2 での浸水高は、それぞれ 382.5, 446.5cm である。Line-2 の家屋が軽微な被害で住んだ理由として地形の影響等が考えられ、周辺植生の効果



(1) Titiana 村における地盤高の変化



(2) Titiana での家屋前面の樹木位置

図-36 Titiana での地盤高と植性



写真-3(1) Titiana 村の破壊された教会(Line-1)



写真-3(2) Titiana 村で被害が小さかった家屋(Line-2)

もある程度あったものと考えられる。Line-2 前面での植生の配置を図-36(2)に示す。Titiana 村でも、津波による被害が軽微であった家屋の前面には、樹木が多数位置していることが判った。写真-3 に状況を示す。

本調査地点での地盤上の浸水深ならびに測定した樹木位置等については、表-3 に数値をまとめた通りであ

る。樹木の配置と樹径から、ここでは簡易式で津波力の低減効果を推定した。津波の浸水深は、3 カ所で大大きく変化せず約 2m である。樹木の密度および幹径は、津波で破壊されずに残った家屋(Line-2)の前面に位置する樹木の平均値から算出した。計算に用いた N (密度), N_s (海岸の幅(10m の N_s 倍とする), 平均幹径(D')) を表-4 に示す。

表-4 簡易式に用いた植生条件

	N	N_s	D' (cm)
SUVA	2	8	76
VORIVORI	7	1	48
TITIANA	5	1	73

図-37 は、3 カ所における樹木の分布から、樹径を決め、式(2)で抗力の減衰率を計算した結果である。浸水深は 2m と仮定し、松富(1994)にしたがって、浸水流速を計算した。図に示すように、津波の抗力は、家屋前面の樹木によって、1 割から 2 割が低減されることが判る。また、地表での摩擦による津波力の低減効果は、津波の浸水深が小さいほど相対的に大きくなる。津波浸水深が 2m 程度であれば、樹木による低減率と摩擦による低減は同じオーダーで表される(平石, 2006)。そこで、本計算結果も摩擦による低減率を加えて 2 倍にする事も可能である。図では 2 倍にした効果も示した (図中の X2)。

いずれの計算結果でも津波力を半分程度にさせることは困難であっても、津波による力を 1 割から 2 割程度は低減させることが可能である。この低減効果が家屋の流出防止に役立ったのではないかと推測できる。ただし、津波の高さや作用方向は前面の地形によっても大きく異なり、ここでの結論はあくまでも限定された条件での概算である。今後、より詳細な現地の地形測量や家屋の構造調査が実施されるべきと考える。

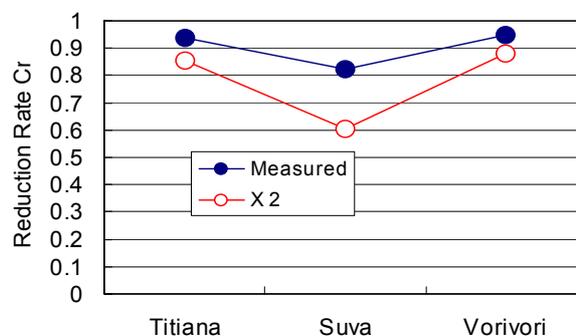


図-37 簡易式による植生による津波力低減効果

津波による被害を軽減させるためには、グリーンベルトによる作用力の低減だけでなく、家屋そのものの強度を上げることも必要である。これまでも高床式の柱の高さを浸水深より高くすることが効果的であると言われてきた。今回の調査地域においても、床の高さが高い家屋、基礎をモルタルで覆ったもの、柱の根入れを十分に取ったものは津波来襲後も現地に残っており、今後の津波防災の参考となる。写真-4に津波に強い家屋の例を示す。



(1) 高床基礎をモルタルで保護した家屋



(2) 高床式住居の基礎洗掘（ギゾ島）（根入れが浅いものは倒壊していたが、90cm以上の根入れ長があるものは残っていた）



(3) 樹木に支えられる家屋（ギゾ島）（樹木は、家屋の流出を堰き止める効果も有する）

写真-4 津波被害を軽減するための工夫

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 植生モデルについて

グリーンベルトの植生モデルを「幹のみ」、「葉のみ」および「幹+葉」の3ケースを対象に津波の減衰効果について検討を行った。表-1に示した植生パラメータでは、「幹のみ」のケースが最も効果を有し、津波力に対して約8割の減衰効果があった。

(2) グリーンベルト配置について

グリーンベルトの配置について、「直線帯」、「千鳥帯」および「ギャップ帯」の3ケースを対象に津波力の減衰効果について検討を行った。「直線帯」のケースが津波力において、最も減衰効果が確認された。幅50mのグリーンベルトの背後で、津波流速および津波力は、それぞれ約1/2および約1/4になった。「千鳥帯」では1列目のグリーンベルト背後および2列目のグリーンベルト前面で流速が大きくなる傾向にあり、グリーンベルト無しに比べ、津波力は局所的に約1.5倍に増加することもあった。

(3) 津波周期について

津波周期が20分および40分の2ケースを対象に、津波の減衰効果について検討を行った。津波力比は、周期20および40分の場合に、それぞれ0.2および0.4になった。すなわち、津波周期が短い20分の方がグリーンベルトによる津波力の減衰効果は大きくなる結果となった。

(4) 地形形状について

グリーンベルトとしての津波の減衰効果は変わらないが、V字地形の方が地形効果により津波そのものが大きくなった。

(5) モデル海岸におけるグリーンベルトの減衰効果

タイ国カオラック海岸をモデル化し、2004年スマトラ島沖地震津波波形を入力した。幅50mで、密度 $N=20$ のグリーンベルトを設置すると、津波力の最大値の比は、グリーンベルトの無い場合に対して、約0.2となった。開口率0.1の道路を設けても、開口部を除くとグリーンベルト背後の津波力比は約0.2となった。

(6) 現地の事例

ソロモン諸島ギゾ島周辺において、海岸樹木の津波低減効果を調べた。その結果、ギゾ島南岸において幹直径が大きい低木が効果を有し、背後の家屋被害が軽微になったことが判った。

最後に、本研究で示した現地調査にあたり、調査関連資料をいただいた防衛大学藤間教授および鳴原助教に感謝します。また、現地の交通状況や痕跡速報は、当所津波防災センター辰巳研究官に教えていただいた。また、現地調査は、独立行政法人森林総合研究所坂本知巳室長と共同で実施したもので、樹木種類に関する教示を受けた。皆様に深く感謝いたします。

ソロモン諸島の皆様には、調査支援、生活支援など大変お世話になりました。特に現地調査でご支援を受けた被災地の皆様の一瞬も早い復興を祈ります。今後はカオラック海岸および陸上域の地形形状をより詳細に調査し、グリーンベルトの適用計算の高精度化を図る予定である。

(2007.12.10 受付)

参考文献

- Danielsen, F., M.K.Sorensen, M.F.Olwig, V. Selvam, F.Parish, N.D.Burgess, T.Hiraishi, V.M.Karunagaran, M.S.Rasmussen, L.B.Hansen, A.Quarto and N.Suryadiputra(2005):The Asian Tsunami: A protective role for coastal vegetation, SCIENCE, Vol.310,p.643.
- Dahdouh-Guebas, F., L.P.Jayatissa, D.Di Nitto, J.O.Bosire, D.Lo Seen and N.Koedam (2007):How effective were mangroves as a defence against the recent tsunami?, J. Current Biology, Vol.15, No.12, pp.443-447.
- Harada K., L. Hamzah and F. Imamura (2000) : Study on the mangrove control forest to reduce tsunami impact, Proc. 12th Congress of the APD-IAHR, Bangkok, pp.527-535.
- Harada K. and F. Imamura (2005): Effects of coastal forest on tsunami hazard mitigation – A preliminary investigation, Tsunamis, edt. by Satake, Springer, pp.279-292.
- Hiraishi T. (2000): Characteristics of Aitape tsunami in 1998 Papua New Guinea, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.39, No.4, pp.3-23.
- Hiraishi T. and K. Harada (2003): Greenbelt tsunami prevention in South-Pacific region, Report of the Port and Airport Research Institute, Vol.42, No.2, pp.25.
- Mansinha, L. and D.E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.
- Subandono D. (2005): Tsunami, Penerbit Buku Ilmiah Populer, Bogor, 222p.
- Sundar V.(2007) : Protection against natural coastal hazards: case studies on coastal protection measures, Proceeding of the Indo-Japan Workshop on Coastal Problems and Mitigation Measures – Including the Effects of Tsunami, pp.79-95.
- 今村文彦・永野修美・後藤智明, 首藤伸夫(1987) : 1960年チリ沖津波に対する外洋伝播計算, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.172-176.
- 岩崎敏夫・真野明(1979) : オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演会論文集, pp.70-74.
- 越村俊一・高島正典・鈴木進吾・林春男・今村文彦・河田恵昭(2005) : インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1416-1420.
- 後藤智明・佐藤一央(1993) : 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発, 港湾技術研究所報告, 第32巻, 第2号, pp.3-44.
- 佐々木寧・S.Homchuen・田中規夫(2005) : インド洋大津波と海岸林が果たした役割—タイ, スリランカ沿岸—, 日本マングローブ学会公開国際シンポジウム—2004年インド洋大津波災害とマングローブ林—講演集.
- 首藤伸夫(1985) : 防潮林の津波に対する効果と限界, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.465-469.
- 田中規夫・佐々木寧・湯谷賢太郎・S.Homchuen (2005) : 津波防御に対する樹林幅と樹種影響について—インド洋大津波におけるタイでの痕跡調査結果—, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1346-1350.
- 谷本勝利・田中規夫・N.A.K.Nandasena・飯村耕介・清水隆(2007) : 種々の熱帯性海岸樹の組み合わせによる津波防御効果に関する数値計算, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1381-1385.
- ピーター・トーマス(2005) : 樹木学, 築地書館, 4版, 邦訳書, p.149.
- 平石哲也・有川太郎・南靖彦・田中政典(2005) : インド洋地震津波の被害例について—タイにおける事例を中心として—, 港湾空港技術研究所資料 No.1106, 20p.
- 平石哲也・南靖彦・田中政典(2006) : グリーンベルトによる津波力の軽減に関する水理的検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1124, 17p.
- 松富英夫・首藤伸夫(1994) : 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.246-250.

松富英夫・高橋智幸・松山昌史・原田賢治・平石哲也・
 S.Supartid, S.Naksuksakul(2005) : タイの Khao Lak
 と Phuket 島における 2004 年スマトラ島沖津波と
 その被害, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1356-1360.
 柳澤英明・越村俊一・宮城豊彦・大家隆行・今村文彦
 (2007) : 2004 年インド洋大津波におけるインドネ
 シア・バンダアチェでのマングローブ林の潜在的
 効果, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.246-250.

V_0 : グリーンベルトの単位面積あたりの有効
 容積
 V_1 : グリーンベルト幹部の単位面積あたり有
 効容積
 V_2 : グリーンベルト葉部の単位面積あたり有
 効容積
 W : モデル計算でのグリーンベルト幅
 Δs : 計算格子面積
 η : 津波の浸水深
 ρ : 海水の密度
 γ : 道路開口率

主要記号表

A_0 : グリーンベルトの単位面積あたり有効投
 影面積
 A_1 : グリーンベルト幹部の単位面積あたり有
 効投影面積
 A_2 : グリーンベルト葉部の単位面積あたり有
 効投影面積
 B : グリーンベルトの幅
 C_D : グリーンベルトの抗力係数
 C_M : 慣性力係数
 C_R : 津波力比
 C_V : 流速係数
 D : 津波の全水深
 D' : モデル樹木の幹部直径
 F_x : x 方向のグリーンベルト抵抗
 F_y : y 方向のグリーンベルト抵抗
 F_r : フルード数
 g : 重力加速度
 H : 津波波高
 H_1 : モデル樹木の幹部の高さ
 h : 水深
 h_r : 家屋背後の浸水深
 h_f : 家屋前面の浸水深
 M_x : x 方向線流量
 M_y : y 方向線流量
 N : グリーンベルト密度 (樹木数/100m²)
 N_s : グリーンベルト幅を決める係数 ($N_s \times 10m$)
 N_t : 海岸線 10m あたりの総樹木数
 n : 地表のマニングの粗度係数
 p : 津波の単位幅あたりの力
 p_1 : グリーンベルト前面 (海側) の津波力
 p_2 : グリーンベルト背後 (陸側) の津波力
 R : 津波遡上高
 T : 津波周期
 u : 津波流速

港湾空港技術研究所資料 No.1171

2008.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 ニッセイエプロ株式会社

Copyright © (2008) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。