

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1124

June 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

平 石 哲 也
南 靖 彦
田 中 政 典

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. 津波による被害	4
2.1 構造物の被害	4
2.2 海岸の地盤被害	5
3. グリーンベルトによる津波力の低減効果	5
3.1 津波力低減率の変化	5
3.2 海岸地形変化を考慮したグリーンベルト効果予測	8
4. 現地地形を用いたグリーンベルトの効果予測	14
4.1 計算の条件	14
4.2 計算の結果	15
5. まとめ	16
参考文献	16
主要記号表	17

Fundamental Study on Tsunami Force Reduction by Greenbelt Countermeasure

Tetsuya HIRAISHI*
Yasuhiko MINAMI**
Masanori TANAKA ***

Synopsis

A gigantic tsunami was generated in the Indian Ocean Earthquake on December 26, 2004. The tsunami attacked and gave the devastated damages in the coastal areas facing to the ocean. Meanwhile it was reported that dense coastal forests reduced the tsunami energy on land and protect several villages behind it. The dense vegetation composed of mangroves, coconuts, local trees etc. at shore is called “Greenbelt” This paper describes the effect of the greenbelt to reduce the water level, current velocity and hydraulic forces due to the tsunami employing a tsunami run-up simulation model. The density N (tree number per 100m²) and width B (m) are employed to represent the effect of the greenbelt. The numerical result demonstrated that the greenbelt with $N=15$ and $B=100$ m is able to reduce the tsunami force to 50% in a practical case.

Key Words: Field survey, Greenbelt barrier, Numerical model, Sustainable technique

*Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department, Dr. Eng.

**Member, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

***Senior Researcher, Soil and Geological 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

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

平石 哲也*
南 靖彦**
田中 政典***

要 旨

2004年12月26日にスマトラ島沖で発生したマグニチュード9.0の地震によってインド洋沿岸に巨大津波が来襲し、未曾有の被害を与えた。被害後の調査によって、マングローブなどの海岸樹木林に防護された村落では被害が比較的小さかったことが報告されている。海岸の樹木帯による津波防災施設をグリーンベルトと呼ぶ。グリーンベルトによる津波力の軽減効果を、グリーンベルトの密度と幅を変化させて調べ、密度(N :100m²あたりの樹木本数)が大きく、幅(B :海岸線に直角方向のグリーンベルト幅)が広がるほど、背後の津波力は軽減されることを示した。ただし、軽減効果は海岸の地形によっても異なることが判明した。たとえば、パプアニューギニア北岸のシッサノ地区を用いた試算では、 $N=15$ 、 $B=100$ mのグリーンベルトによって遡上した津波の力が半減されることが推測できた。

キーワード：津波，数値計算，グリーンベルト，維持可能な防災技術

* 海洋・水工部波浪研究室長，博士（工学）

** 海洋・水工部波浪研究室員

*** 地盤・構造部主任研究官，博士（工学）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail: hiraishi@pari.go.jp

1. まえがき

2004年12月26日のインドネシア西部時間午前7時58分(日本時間午前9時58分, UTC(世界標準時)午前0時58分), スマトラ島北端の西方160km沖(3.244°N, 95.825°E), 深さ約10kmでマグニチュード9.0(USGS:米国地震研究所発表)の地震が発生した。この地震は過去40年に起こった地震の中で最大もので, 1964年に発生したアラスカ地震のマグニチュード9.2以来の巨大地震であった。この地震によってインド洋沿岸には津波が押し寄せ, インドネシアをはじめとして多くの国々で甚大な被害が生じた。被害の概要については, 平石ら(2005)を参考にできる。

一方, 各地からの津波による被害と同様に, 沿岸の樹木による津波力減衰効果によって, 住民の生命や家屋の倒壊が免れたことが報告されている。たとえば, Danielsenら(2005)は, インド南部の平行な等深線が続く海岸線に沿って, 村落の被害を調べ, マングローブ林が存在していた場所では, 家屋の被害数が比較的少なかったことを明らかにしている。田中ら(2005)は, タイ沿岸での被害調査を実施し, 海岸線の樹木林による津波被害の軽減を示唆している。ただし, 津波による被害程度は, 村落近傍の海岸樹木だけでなく, 地形の条件にも影響されているので, 両者を考慮した検討が必要とも言われている(Dahdouh-Guebas et al., 2006)。

海岸の樹木林が津波の被害を軽減する効果を有することは, 1998年のパプアニューギニアでの津波災害後のワークショップで議論され(Hiraishi, 2000), インドネシアのスラウエシ島地震津波(2000)においては, 樹木林の背後では家屋の倒壊が免れたことが実証されている(Amri, 2002)。これらの事例から, インドネシア政府は, 2000年より沿岸でのマングローブ植林を進め, 津波災害や風浪による海岸の浸食を抑止する事業を進めてきた(Widgyo, 2005)。2004年のインド洋地震津波以降は, 事業を加速させ, 最も被害が大きかったスマトラ島のバンダアチェ地区での植林を緊急に計画している(Subandono, 2006)。

海岸の植樹帯は, 満潮時に海水に浸かる場所に生育するマングローブ種と砂浜海浜に生育する椰子系の樹木に大別できる。これらの樹木林を密にして, 津波被害を軽減しようとする樹木帯を“グリーンベルト”と呼ぶ。グリーンベルトによる津波被害軽減法は, 費用が小さいので, アジア諸国における緊急の津波対策として取り組むべき課題である。一部ではすでに計画がなされているが, 津波対策に必要なグリーンベルトの密度と幅については, 定量的な評価がなされていない。そこで, 本研究では, 津波対策として必要なグリーンベルトの密度と幅等を提案するために, 基

本的な条件で計算を行い, その効果を調べる。なお, グリーンベルトによる津波力の軽減効果については, 2次元水路において模型実験が実施され, 樹木林による津波力の低減効果を抗力および慣性力の変化として定量化している(Hiraishi and Harada, 2003, Harada et al, 2000)。本研究で用いた計算での抗力係数や慣性力係数は, 上記の実験結果に従っている。

2. 津波による被害程度

2.1 構造物の被害

ここでは, 筆者が直接調査を行ったタイとインドネシアを例にして, 津波による被害を分類する。タイ南部における構造物の被害としては, リゾートホテル, 鉄筋コンクリート製の倉庫や住居, 木造家屋やコテージなどがあり, 構造物の種類を松富ら(1994)にしたがって, 鉄筋コンクリート造り(A), コンクリート・ブロック造り(B)および木造(C)に分類した。これに, 護岸(S)および栈橋(P)を加えた。被害は, 大破(3):すべて破壊されたか, 壁と柱のかんりの部分が失われ修復できない, 中破(2):柱は残っているが壁の一部が破壊されている, 小破(1):窓等は破壊されても, 壁は残っている, の3段階で表した。

表-1は, 各構造物の被害程度を示したもので, タイの海岸に加えてバンダアチェ市内での調査結果を加えた。概ね津波痕跡高が高くなるほど被害は顕著になり, 今回の調査範囲では木造家屋は全壊し, コンクリート・ブロック造り家屋は大破していた。鉄筋コンクリート造りのホテルおよび家屋は, 津波痕跡高が5mを越えても中破しているだけで, 柱の多くは残っていた。ただし, 鉄筋コンクリート製構造物の立地条件や前面の海岸条件で被災状態は変化しており, パカラン岬では柱も倒壊していた。また, 同じ鉄筋コンクリート造りの構造物でも, 3階建てのリゾートホテルと倉庫・家屋では被害程度が異なり, 家屋は, 津波痕跡高が8mを越えると大破以上になるが鉄筋コンクリート製のリゾートホテルは, 柱も太く構造そのものが破壊されることはなく, 壁は一部が破壊され, 修理が可能であった。

栈橋や護岸などの施設は, 家屋に比べると被災程度が少なく, 津波来襲後も緊急物資の荷役に使用されていた。栈橋は, 基礎が円柱であり, 津波力を受けにくいことが被災の低減に繋がっている。インドネシアのバンダアチェ周辺では, 他の家屋に比べてモスクの被害が少ないことが報告されている。一般的に, 円柱に作用する抗力や慣性力は直柱に作用する場合に比較すると小さい。したがって, 柱が円形になっていることが, 津波による倒壊が少なかった一因になっていると考えられる。写真-1に津波来襲後も

表－1 津波被害の分類

			構造物	A	B	C	S	P
	痕跡高(m)	護岸	洗掘深(m)	破壊程度(大破3中破2小破1)				
1	バンナムケン漁港	5.4	有り	2	3	3	1	2
2	カオラック・リゾート	8.8	無し	2	3	3		
3	バカラン岬	9.8	無し	3	3	3	3	
4	カマラ(ブーケット島)	6.0	有り	1	3	3	1	
5	パトン(ブーケット島)	3.4	有り	2	3	3	2	
6	バンダアチ(インドネシア)	10	有り	3	3	3	3	



写真－1 修理によって使用された栈橋

簡単な補修で使用されている栈橋を示す (2006/3/14, バンナムケン)。

2.2 海岸の地盤被害

津波による海岸の被害としては、洗掘や浸食があげられる。タイ国カオラックでは、ホテル敷地で陥没が見られ、周辺のコテージが甚大な被害を受けて、8.9mの津波痕跡高が測定された。場所は Khao Lak Orchid Resort である (北緯 8 度 41'04", 東経 98 度 14'28", 1 次調査: 2005/1/2, 海浜測量日: 2005/3/14)。写真-2 に陥没したホテル敷地を示す。ホテル本館の海側は眺望のため樹木が切られ、2 列ほどの椰子の木が残されていた。ホテルの北側及び南側は植林されたココヤシとタイ松からなる樹木帯が残り、その幅は 100~150m であった。ここで、"幅"は海岸線から陸上へ向かって直角方向に測定した樹木帯の幅である。樹木帯の平均主幹直径 $D=30\text{cm}$, 樹間間隔 $x=13\text{m}$, 植生の幅 $B=110\text{m}$ である。首藤(1985)によると、津波痕跡高 (浸水深) と植生幅 B には相関があり、痕跡高 10m および $B=100\text{m}$ のときには、主樹木に被害が生じるので防潮林効果は発揮できないとされているが、田中ら(2005)はタイにおける植樹帯の被害を検討して、枝分かれや樹形の相違によって、植樹帯の効果は変化し、低木林の混在によって津波流速の低減効果が異なることを示している。

周辺の海浜やホテル敷地内における砂を 4 カ所で採取した。砂の中央粒径、密度、粘土・シルト成分含有率を表-2 に示す。ホテルの敷地で採取された土(P.1)は、明らかに海岸砂(P.4)よりも粒径が細かく、建設資材として他の地域よ

り移されたものである。この砂で構成された敷地では、各所で陥没が見られた。緩く締め固められ、粒径が小さい砂層に波や振動流が作用すると液状化が促進され、舞い上がりやすくなる(鈴木ら(2002))。ホテル敷地の埋め立て土砂は、波や振動流の作用を受けたことがないため、十分締め固められていないので、津波作用により締め固まっていなかった砂層が陥没した可能性が高い。海岸の砂はすでに十分締め固められており、津波によっても陥没するような現象は見られなかった。

表－2 海岸で採取した土の構成

採取点	中央粒径 d_{50} (mm)	最大粒径 (mm)	礫分 (%)	砂分 (%)	粘土・シルト分 (%)	密度 (g/cm^3)
P. 1	0.0908	4.75	2.0	50.1	47.9	2.687
P. 2	0.2399	4.75	1.0	83.6	15.4	2.663
P. 3	0.4875	4.75	1.6	98.0	0.4	2.703
P. 4	0.4420	2.00	0.0	99.7	0.3	2.717



写真-2 海岸ホテル敷地の陥没

3. グリーンベルトによる津波力の低減効果

3.1 津波力低減率の変化

グリーンベルトに作用する津波力の低減は、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、次式で示される(Hiraishi and Harada, 2003)。

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

ここで、 WF はグリーンベルト前後での津波力の差、 C_D は抗力係数、 C_M は慣性力係数、 A_0 および V_0 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 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。 ρ は海水の密度で、 u は地表での津波流速である。 Δs は計算に用いる格子面積で、 D は津波のグリ

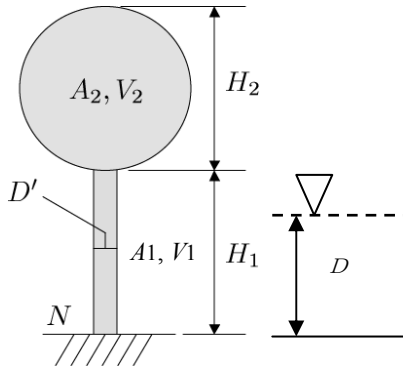


図-1 樹木のモデル（立面図）

ーンベルト帯での浸水深である。

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。幹部の直径を D' 、長さを H_1 とする。幹部の長さとは直径はタイにおける現地状況を参考にして、ここでは $H_1=5\text{m}$ 、 D' をやや大きめの $0.3\sim 0.5\text{m}$ としている。幹部の有効投影面 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。

$$A_1 = D \left[D' \frac{N}{100} \Delta s \right] \quad (2)$$

$$V_1 = D \left[\pi \frac{D'^2}{4} \frac{N}{100} \Delta s \right] \quad (3)$$

葉が茂っている部分は葉部とし、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。 A_2 は、樹木種の形状によって変化し、明確な値を設定できない。ここでは、模型実験(Hiraishi and Harada, 2003)で使用した葉部模型樹脂を対象した $A_2=0.2$ を用いた。ただし今回の計算では、津波の波高を 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いので、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)から次式で与えられる。

$$C_D = 8.4(V_1/V + V_2/V) + 0.66 \quad (4)$$

$$C_M = 1.70 \quad (5)$$

2次元における津波実験(Hiraishi and Harada, 2003)では、津波が作用する瞬間を除いて、津波は流れとなって作用するために、グリーンベルトによる抵抗は、ほとんど抗力として作用することが判明している。そこで、樹木本数の効果を簡単に予測するために、抗力による低減効果について、

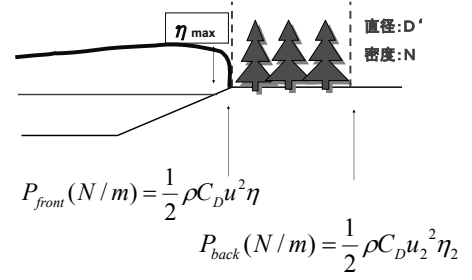


図-2 グリーンベルトの前後での津波力イメージ

樹木本数による変化を調べた。抗力の変化が式(1)の右辺第1項として示されたように、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 はグリーンベルト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、グリーンベルト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を η として表すと、グリーンベルトの前面と背面で浸水深が変化すると考えて、前後の単位幅当たりの抗力は次式で示される。

$$P_{front}(N/m) = \frac{1}{2} \rho C_D u_1^2 \eta_1 \quad (6)$$

$$P_{back}(N/m) = \frac{1}{2} \rho C_D u_2^2 \eta_2 \quad (7)$$

陸上で遡上した津波の流速は、松富ら(1994)が次式で示している。なお、式(6)および(7)で示した抗力係数は、壁面等に作用する流体力を推定するときの抗力係数で、円柱であれば1、長方形であれば2程度の値を有する。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} = \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \quad (8)$$

ここで、 R は周辺の海浜の津波遡上高、 h_f は構造物前面の浸水深で、構造物が無い海岸では式(6)および(7)で用いた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、 $0.8\sim 0.9$ 程度になる。 F_r はフルード数で、次式で示される。

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gh_r}} \quad (9)$$

ここで、 h_r は構造物背後の浸水深である。

松富ら(2005)は、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、 F_r を推定している。その結果、インド洋地震津波での現地調査から得られた F_r は、 $0.7\sim 2.0$ に分布し、これまでの津波調査から推定された値と大きな差はないことを確認している。

ここでは、 $C_v=0.9$ 、 $F_r=1.0$ とし、構造物前面の浸水深は津波遡上高 R と等しいとし、植樹帯の有効体積で変化する C_D は、単位面積あたりの円柱で表される樹木総体積から設定した。次に、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。樹木の高さ H_1 は 5m 以上とし、津波力は幹部だけで受けているとした。グリーンベルトにおける津波水位の低下は小さく無視している。 P_{front} は、家屋の直立壁に作用する津波による抗力として計算し、 P_{back} は、 P_{front} から式(1)の右辺第 1 項を引いて計算した。

図-3 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低減率を示す。低減率は次式で定義している。

$$C_R = P_{\text{back}} / P_{\text{front}} \quad (7)$$

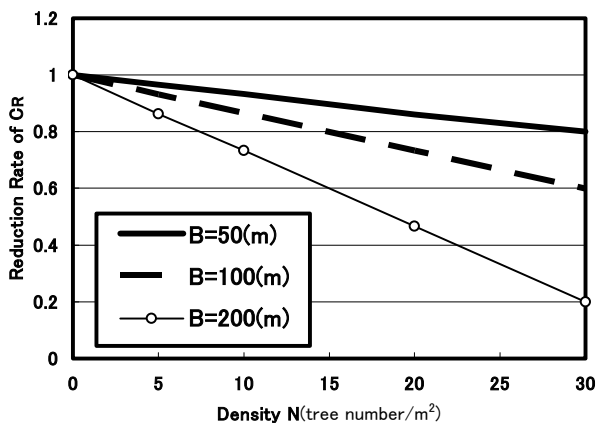


図-3 グリーンベルトの幅(B:m)および密度 N による津波抗力低減率の変化

図-3 に示されるようにグリーンベルトの密度が大きく、幅が広いほど津波力の低減効果は大きくなる。一方、木造家屋は単位幅あたり 10kN/m 程度で破壊される（首藤，1999）。家屋に作用する津波力は、上記の計算条件である遡上高 $R=5\text{m}$ のときは、 $u=5.5\text{m/s}$ となって、 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守ることができない。このためにはグリーンベルトの条件としては、密度 $N=30$ で幅が $B=200\text{m}$ 以上の植樹が必要で、かなり幅広い防護ラインが必要になる。また、樹木の直径と密度を現地で調査した例（首藤ら，1999）によると、現地の樹木密度としては $N=15$ 程度が標準で、 $N>15$ のグリーンベルトを育成するためには、 2m 間隔程度の植林が必要になる。ただし、上記のケースは海浜地形や改訂

勾配を考慮した計算を行っているわけではなく、単純な抗力の変化を示したものであり、ある程度の目安としては使えるが、より詳細な計算が必要である。

次に、グリーンベルトにおける地表の粗度影響を調べた。地表の粗度はマンニングの粗度係数で表すことができ、津波の数値計算では一般に次式で考慮する。

$$p_g = \frac{gn^2}{\eta^3} \quad (8)$$

ここでマンニングの粗度係数 n は、津波の遡上計算では標準値として $n=0.025$ が用いられている（Harada and Imamura, 2005）。図-4 は、地表面での粗度による抵抗力和グリーンベルトで軽減される抗力による抵抗力の比を示したものである。遡上高 R は 5 および 10m とした。図に示すように、 $N=5$ の場合には、地表の粗度とグリーンベルトによる抵抗がほぼ同じ大きさで、地表面の粗度の影響が大きい。グリーンベルト密度 N が 15 になると、地表面の粗度はグリーンベルトによる抵抗の $1/5$ 程度になり、グリーンベルトによる抵抗が支配的になる。したがって、グリーンベルトによって津波力を低減させるためには、密度をできるだけ大きくすることが重要である。密度が小さい場合には、地表による粗度の割合が小さくなり、グリーンベルトの役割が大きくなる。実際の計算では、地表による粗度とグリーンベルトによる抵抗が合成されて津波力の低減効果を現す。後述するモデル地形での数値計算では、グリーンベルトによる抵抗と地表による粗度を同時に考慮している。

なお、本計算では、樹木の直径 D を $0.3\sim 0.5\text{m}$ 程度としており、マングローブのような多くの枝に分かれた樹木の幹径に比べると大きい。しかし、抗力の計算式は $N \times D$ によって有効投影面積を計算しているため、式(1)のように津

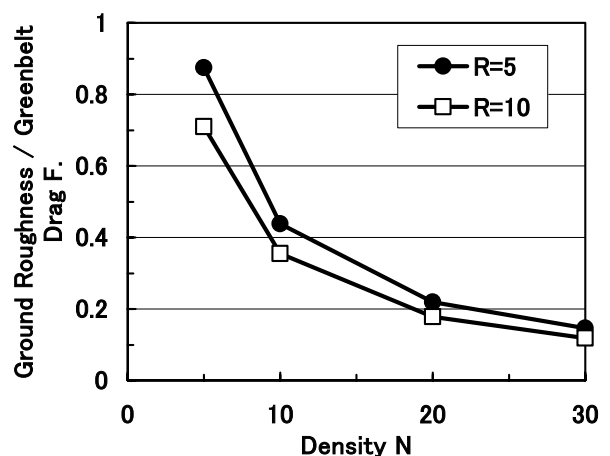


図-4 地表の粗度とグリーンベルトの抵抗力の比較
波に対する抵抗を考える場合には、結果的に差がなくな

るので、細い枝柱を多数有している樹木の場合には、1つの樹木から枝分かれしている細い枝の直径と枝分かれ数の積で D' を与えてもよい。ただし、実際には水理的な流れのメカニズムが異なってくると考えられ、今後の検討が必要である。

3.2 海岸地形変化を考慮したグリーンベルト効果予測

(1) 数値計算手法

前節では、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。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。

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。

$$\frac{\partial(\eta+h)}{\partial t} + \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_x M_y}{D} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M_x \sqrt{M_x^2 + M_y^2} + F_x = 0 \quad (10)$$

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

ここで、式(9)は連続式、式(10)および(11)は x および y 方向の運動方程式で、それぞれの F_x および F_y がグリーンベルトによる抗力と慣性力抵抗を示す。 M_x および M_y は x および y 方向への線流量である。具体的に、 x および y 方向の計算式表示を示す。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D [A_1 + A_2] \frac{M_x \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\Delta x \Delta y D} + C_M \left[\frac{V_1 + V_2}{V} \right] \frac{\partial M_x}{\partial t} \quad (12)$$

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

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。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。また、現地

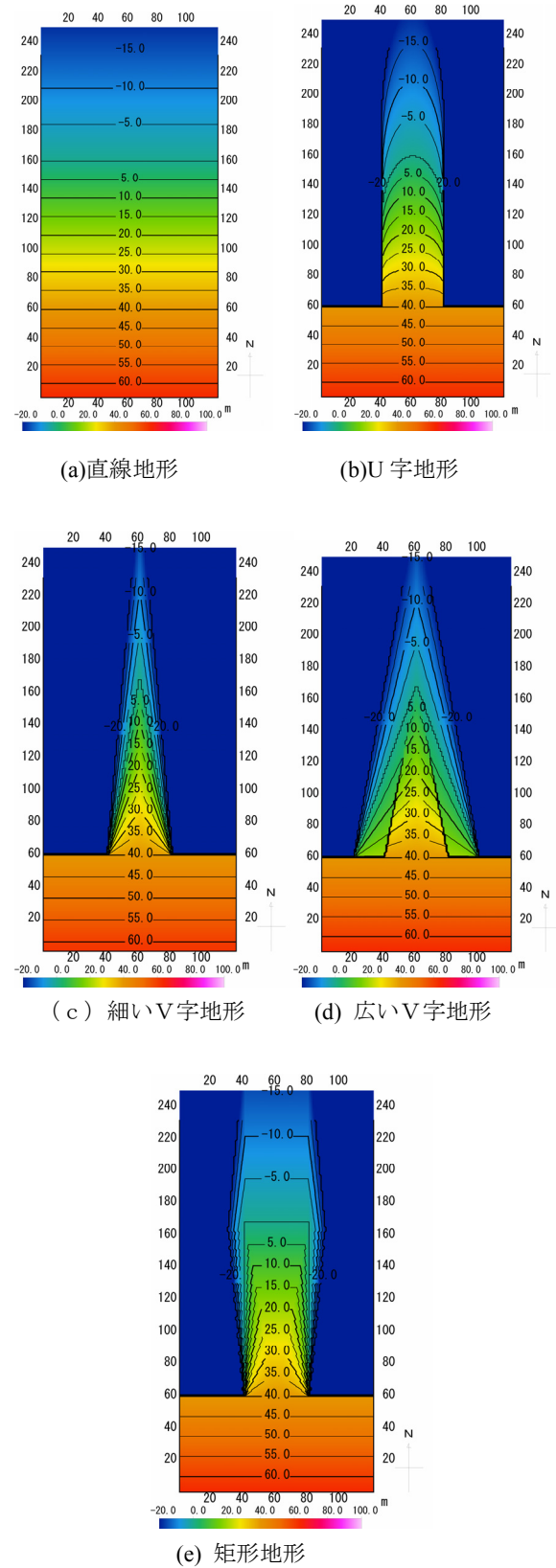
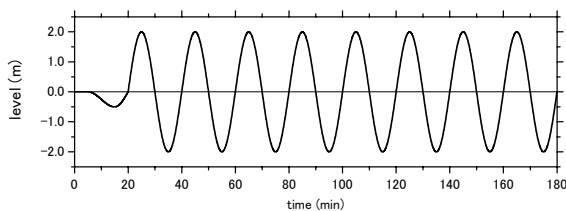


図-5 モデル地形

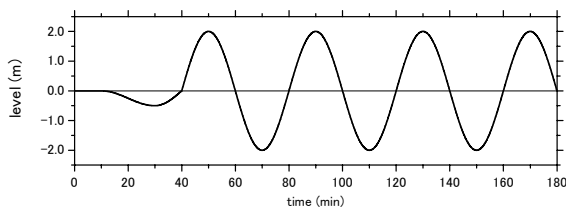
地形での適用例では、時間ステップを 0.25s とし、地震直後から 1 時間の計算を行った。

モデル地形は、インドネシアの沿岸地図を参考にして図-5 に示す 5 地形とした。図には地表における計算領域も含めて示しており、0m のコンターが汀線で、正が海側の水深、負が陸側の地盤高さを示す。計算領域の周囲の数値はサイズが 50m の格子数で、計算領域は、幅が 6km(120 格子)、長さが 12.5km(250 格子)である。

モデル地形の海底勾配は 1/125、陸上勾配は 1/250 である。計算に含まれる湾の入り口での水深は 40m である。津波は、計算領域の沖側、すなわち図-5 では下方境界で規則波として入力した。陸域の遡上高が約 5m 程度になるように、沖側での津波波高は 4m とし、周期は 10min、20min、40min とした。図-6 は、沖合における入力津波波形の例で、初期の 1 波で振幅を増加させて目標波高を作成している。また、インド洋地震津波では、タイやインドネシアでは引き波初動となっていたので、本計算でも引き波で開始している。

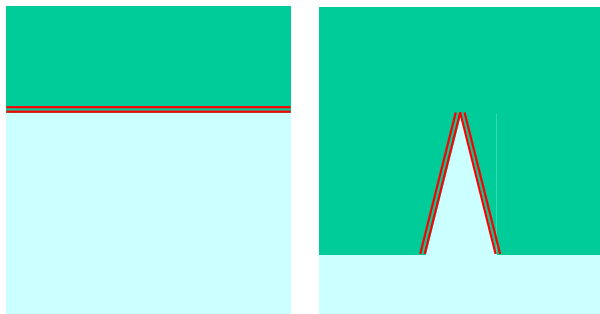


(a) 波高 $H=4\text{m}$ 、周期 $T=20\text{min}$



(b) 波高 $H=4\text{m}$ 、周期 $T=40\text{min}$

図-6 計算領域に入射する津波



(a) 直線地形

(b) V字型湾

図-7 グリーンベルトの配置 (二重線で示す)

グリーンベルトは、汀線のすぐ陸上側に一様な幅で配置した。配置例を図-7 に示す。グリーンベルトの密度 N は 0~15、幅 B は 0~200m で変化させた。表-2 にモデル地形を用いて計算したケースの一覧を示す。

表-2 モデル地形を用いた計算ケース

入射波高(m)	入射周期(min)	グリーンベルト 密度(N)	グリーンベルト 幅(m)	地形形状				
				直	U	V1	V2	矩
2.0	10	10	100	○			○	
	20	0	0	○	○	○	○	○
		5	100	○				
		10	50	○			○	
			100	○	○	○	○	○
			200	○			○	
		15	100	○			○	
	40	10	100	○			○	
1.0	20	10	100	○			○	

(3) モデル地形における計算結果

モデル地形において津波の伝播および遡上計算を実施した結果を示す。図-8 は、例として直線地形における最大津波高を示したもので、陸上部は汀線での水面からの高さに相当する。最大の陸上での遡上高は、基準水面上 6m 程度で、これは津波の先端が標高で 6m 程度の地盤まで到達していることを示すし、直線地形の場合には、遡上高は、沖合いでの津波波高にほぼ等しい。図-8 には、中央の縦断面での最大水位の場所的な変化と最大津波力の変化を示した。津波力は、時々刻々の水位と流速から $p=\rho u^2$ として単位幅あたりの力(N/m)を計算している。図の縦軸は計算時間中の最大値を示している。汀線で津波力は最大となり、遡上するに従って減少する。そして、遡上して 1km 程度進むと津波力は 0 になる。

図-9 は同一の地形条件で、 $N=10$ 、 $B=100\text{m}$ としてグリーンベルトを設置した場合の最大水位と最大流速を示す。最大水位については変化が小さく、津波の遡上域の最も高い場所で 5.5m である。流速は、遡上域の最大値が 4m/s 程度から 3m/s に減衰し、流速の低減効果が大きいことがわかる。津波力は水位が低減しないにも関わらず小さくなり、約 40kN/m から約 30kN/m に減衰する。

次に地形により湾奥で津波のエネルギーが集中する V 字型での計算結果を示す。図-10 および 11 は、幅広の V 字型湾での津波水位等の変化をグリーンベルト有無について示したものである。V 字型湾においても直線海岸と同様に、グリーンベルトの設置により水位は大きく変化しないものの、津波力は小さくなる。 $N=10$ 、 $B=100\text{m}$ の場合には、汀線付近での最大津波力を比較すると、70kN/m から 20kN/m へ急速に減衰しており、グリーンベルトのすぐ背後に家屋が位置している場合には、その効果が大きい。

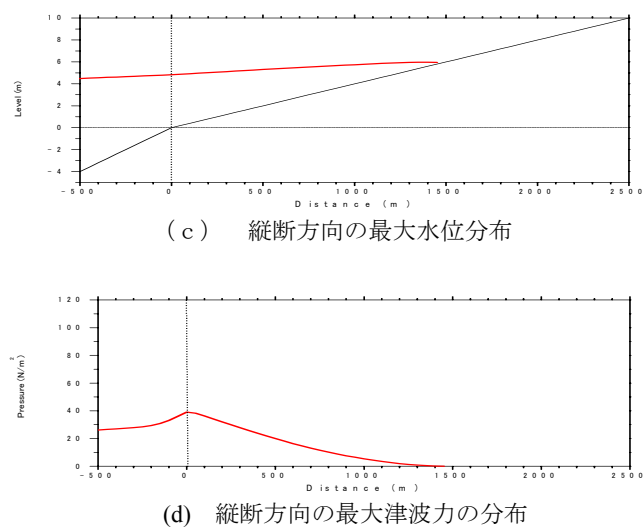
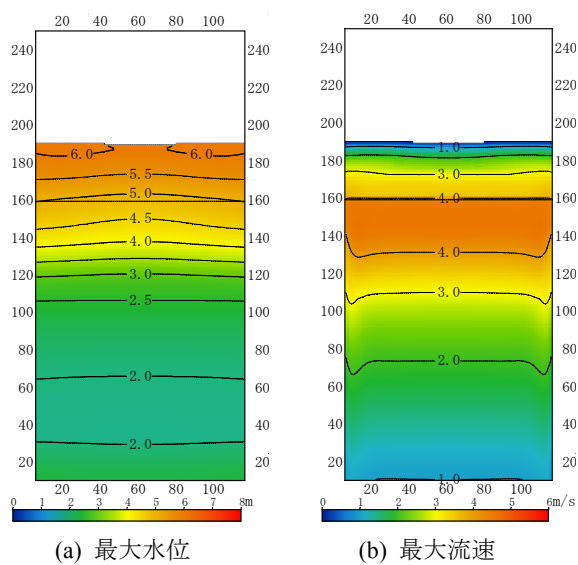


図-8 直線海岸での津波水位, 流速, 力の変化
(グリーンベルトなし, $T=20\text{min}$, $H=4\text{m}$)

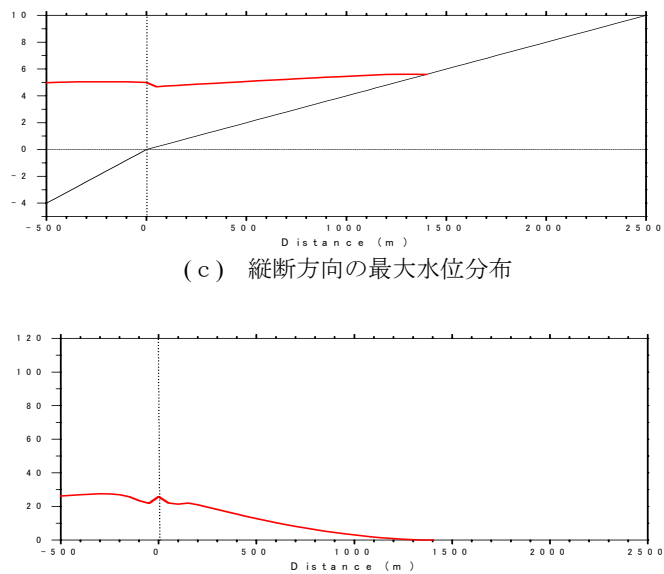
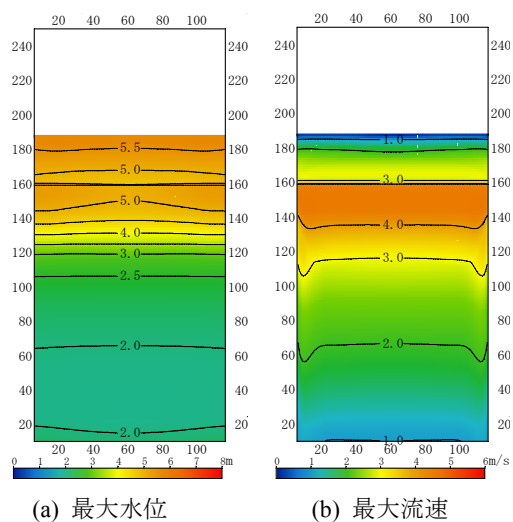
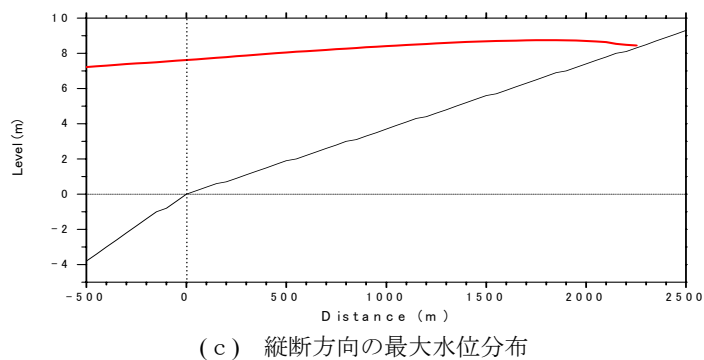
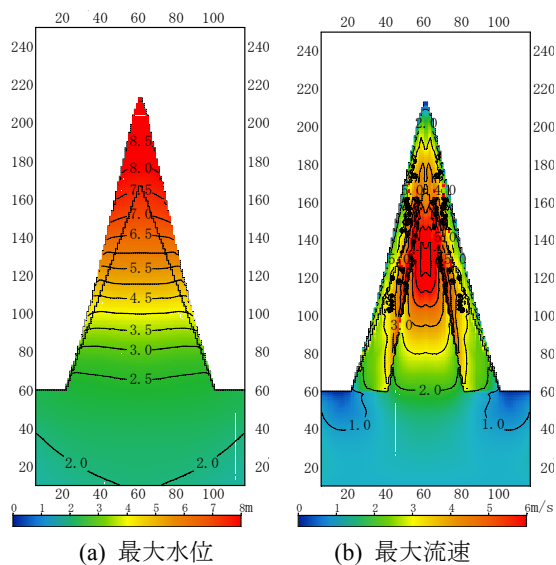
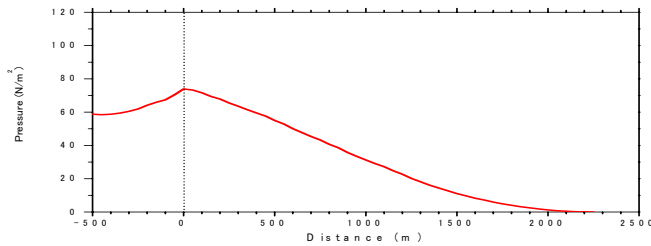


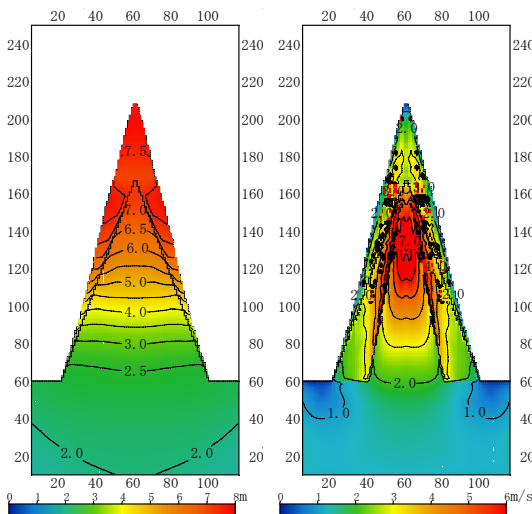
図-9 グリーンベルトを有する直線海岸の津波水位,
流速, 力の変化 ($N=10$, $B=100\text{m}$, $T=20\text{min}$, $H=4\text{m}$)





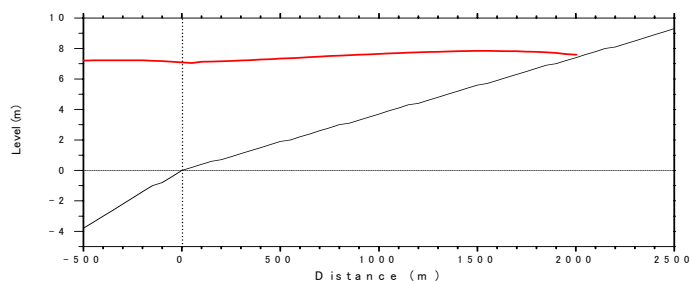
(d) 縦断方向の最大津波力分布

図-10 V字型湾での津波水位、流速、力の変化
(グリーンベルト無し, $T=20\text{min}$, $H=4\text{m}$)

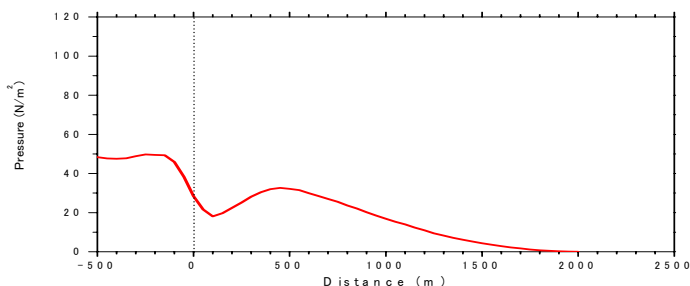


(a) 最大水位

(b) 最大流速



(c) 縦断方向の最大水位分布



(d) 縦断方向の最大津波力分布

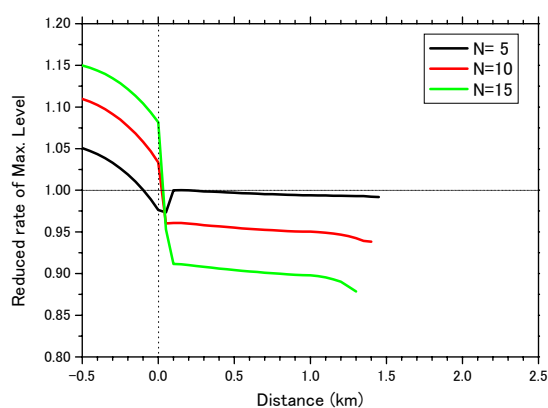
図-11 グリーンベルトを有するV字型湾の津波水位、
流速、力の変化 ($N=10$, $B=100\text{m}$, $T=20\text{min}$, $H=4\text{m}$)

ただし、汀線から 500m 離れた場所では、グリーンベルトを通過した流れが集中するために、津波力は大きくなり、30kN/m になる。この値は、グリーンベルトが無い場合の 40kN/m に比較して、大きく減少している訳ではなく、グリーンベルトの効果は、湾の形状によって変化している。本調査では、単純なモデル地形を対象としており、現地の海岸での複雑な地形を再現しているわけではなく、今後、グリーンベルトの効果を検討していく場合には、現地の地形や家屋の配置状況について、より高度な考察が必要であと思われる。

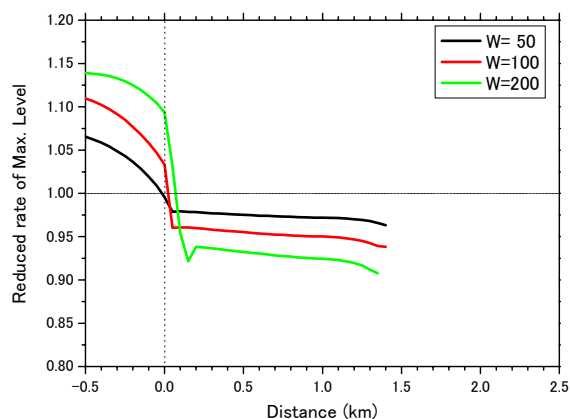
今後、グリーンベルトを用いた地域防災計画を検討する場合には、現地の地形について正確な情報を用意するとともに、どの地点に家屋が存在して、どの程度の津波力を許容するのかについて考察していく必要がある。本モデル計算は、幅の広い水路のような状況を仮定して、水路の長軸方向に津波を作用させている。したがって、厳密には幅広い海岸での津波の変化が再現されていない。したがって、本計算からは、グリーンベルトによって津波力は軽減されるが、その軽減率や場所的な変化は、地形によって大きく異なり、今後の模型実験やより広範囲での数値解析が必要であることが判別できる。それらの調査結果を総合的に判断して、グリーンベルトによる効果が最大になる場所に家屋や避難施設を設置するように地域防災計画を策定する必要があると考えられる。

次にグリーンベルト密度による津波力低減率の変化を調べた。図-12 はグリーンベルトが無い場合の津波水位と津波力を計算し、それらの値に対してグリーンベルトを設置した場合の最大津波水位と津波力がどの程度変化するかを比で示したものである。図は直線海岸でグリーンベルトの幅 B を 100m で一定とし、密度を変化させている。

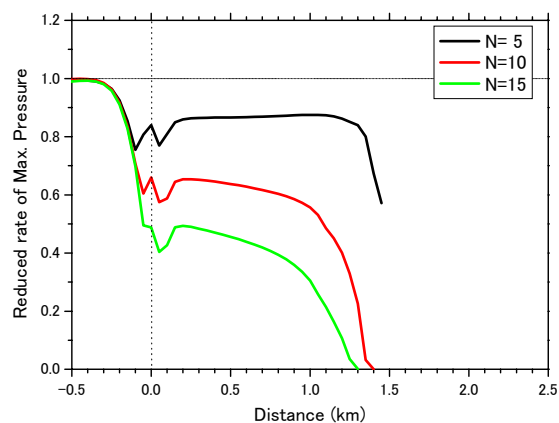
汀線より海側では水位は上昇しているが、これはグリーンベルトによって流速が小さくなり、堰き止め効果が生じたためである。ただし、本計算は幅の広い2次元水路を仮定した計算となっており、計算領域の外側へ広がる津波の挙動は再現されていない。水路の中央部で津波力が回りより高くなるのは、平面的な挙動が十分再現されていない影響も含まれていると考えられる。なお、グリーンベルトの設置によって水位は減少するが、その低減率は小さく、 $N=15$ の場合でも 10% 程度しか低減しない。一方、津波力はグリーンベルトによって大きく低減し、密度が高くなるほど効果は大きくなる。グリーンベルトが無い場合でも、津波は 1.5km までしか遡上しないので、 $N=5$ の場合でも、1.5km までしか表示できない。 $N=15$ の場合には、距離



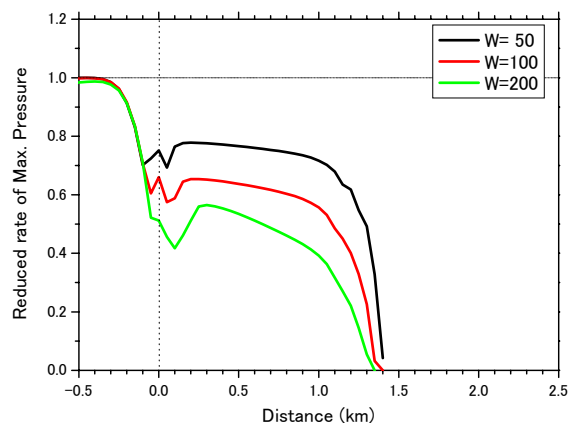
(a) 最大水位



(a) 最大水位



(b) 最大津波力



(b) 最大津波力

図-12 グリーンベルト密度 N による最大水位および最大津波力の低減率の変化 (直線海岸, $B=100\text{m}$, $T=20\text{min}$, $H=4\text{m}$)

が 1.3km で津波流速が 0 になるので、その位置で 100% 減衰したものと考えられる。

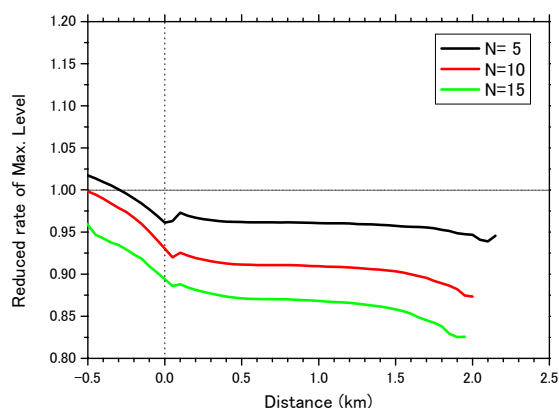
計算結果には距離による減衰効果も含まれているので、グリーンベルトの効果を比較するためには、グリーンベルトのすぐ背後で比較する必要がある。距離が 100m の地点では、 $N=5, 10, 15$ の場合に津波力は、グリーンベルトが無い場合に比較して、それぞれ約 $85, 65$ および 50% になる。

次にグリーンベルトの幅 (ここまで B として記述しているが、図-13 では W で表している) による最大水位と最大津波力との変化を図-13 に示す。グリーンベルトの幅が増加するほど津波水位と津波力の減衰効果は大きく、 $W=200\text{m}$ の背後では、津波力は 55% 程度になる。この値は $W=100\text{m}$ で $N=15$ とした場合の津波力比である 50% より大きく、植樹本数から考えると、グリーンベルトの幅よりも

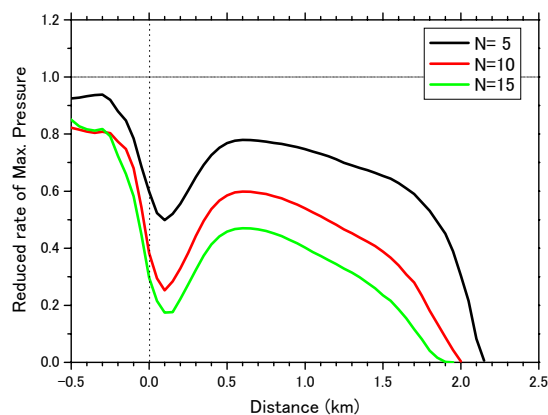
図-13 グリーンベルト幅 W による最大津波高および最大津波力の低減率(直線海岸, $T=20\text{min}$, $H=4\text{m}$, $N=10$)

密度を大きくした方が、より効果的に津波被害を軽減できる。ただし、本計算は幅広い水路を仮定した計算であり、平面的な津波変化の効果が十分に表されていない。実際の地形についてはより詳細な検討が必要である。

図-14 は、幅広の V 字型地形におけるグリーンベルト密度による最大水位比および最大津波力比の変化である。直線海岸の場合に比較すると汀線より沖合での津波水位の増幅はみられない。これは V 字型湾でグリーンベルトによる反射がすべて同方向へ戻るわけではなく分散してしまうためである。グリーンベルト密度による水位の変化は小さく、汀線付近で 10% 程度である。津波力は、グリーンベルトのすぐ背後で小さくなり、 $N=15$ の場合には津波力は 20% に低減する。V 字型湾での津波の力が集中して湾の奥で大きくなるため危険性が増している。そこで、この力を少しでも低減できれば湾奥における津波力の居住する住民のリス

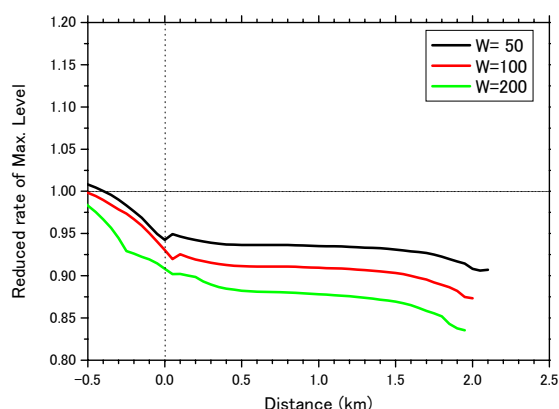


(a) 最大水位

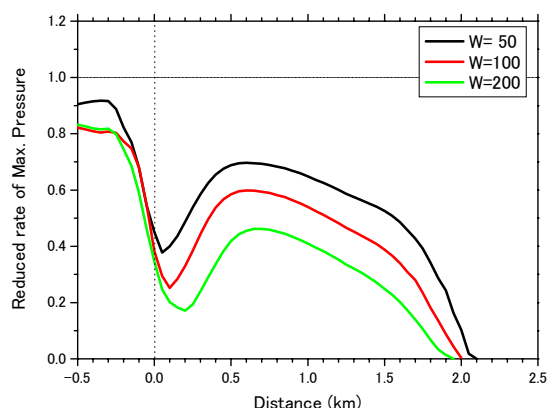


(b) 最大津波力

図-14 グリーンベルト密度 N によるV字型湾における津波水位と津波力の低減の変化 ($T=20\text{min}$, $H=4\text{m}$, $W=100\text{m}$)



(a) 最大水位



(b) 最大津波力

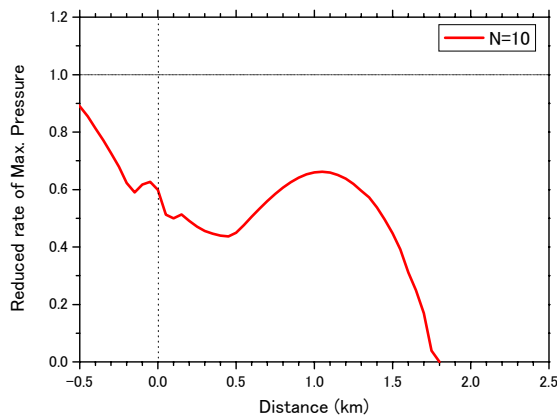
図-15 グリーンベルト幅(W)による最大水位と最大津波力の低減率(V字型湾, $T=20\text{min}$, $H=4\text{m}$, $N=10$)

クを小さくできる。

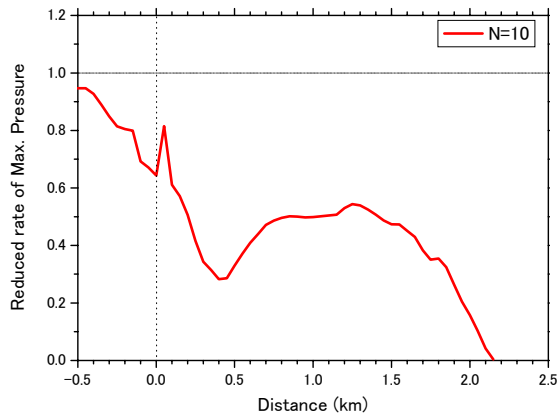
図-15 にV字型湾でのグリーンベルト幅(W)による津波水位と津波力の低減率を示した。 $W=200\text{m}$ では、グリーンベルトすぐ背後で、津波力を20%に低減することができる。ただし、湾奥の汀線から500m 遡上した地点では、津波力は40%しか低減できない。またグリーンベルトの幅が100m から200m に変化しても、低減率が半減するわけではない。また、 $W=50\text{m}$ と比較しても1/4に低減されるわけではなく、津波力の低減効果をあげるためには、単位面積あたりの樹木本数すなわち密度 N をあげることが重要である。したがって、グリーンベルト設置方針としては、まず植樹できる密度を決めておき、次に必要な幅 W を決定するような手法が適切である。

図-16 は、U字型、幅の狭いV字型および矩形湾での最大津波力の変化を示したものである。グリーンベルトの密度 $N=10$ および幅 $W=100\text{m}$ は一定である。U字型および幅の狭いV字型湾では、グリーンベルトのすぐ背後よりも1km離れた地点で津波力が増加する傾向を示しており、幅広のV字型湾と同様に地形による効果を検討しておく必要がある。繰り返すように本計算では、幅の広い水路のような地形を仮定しており、現地の複雑な地形に対しては、今後の検討が必要である。

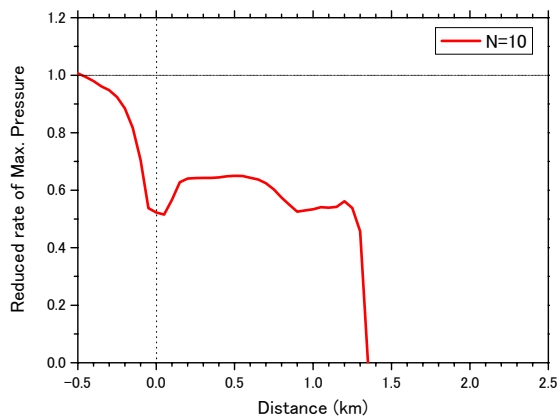
矩形湾ではグリーンベルト背後で低減した津波力の距離による低減率は大きく変化しておらず、グリーンベルトのすぐ背後での低減率60%が遡上域全域でほぼ維持される。グリーンベルトの効果は、津波力の低減率によって評価した方が適切と考えられるので、矩形湾の場合には汀線からの距離に関係なくグリーンベルトの効果が一様に現れていることになる。



(a) U字型湾



(b) 幅の狭いV字型湾



(c) 矩形湾

図-16 各種の湾形状でのグリーンベルトによる最大津波力の低減の効果 ($N=10$, $W=100\text{m}$, $T=20\text{min}$, $H=4\text{m}$)

最後に、モデル地形におけるグリーンベルトの有無による津波力の変化を表にまとめた。表-4は、波高2m、周期20分の津波を作用させた場合の核タイプの海岸での汀線

表-4 各タイプの海岸における津波力の比較

波高	周期	密度 N	幅 B(m)	直線	U字型	V字型	幅広V字	矩形
2.0m	20min	0	0	20	46	53	56	20
		5	100	16			43	
			50	16			38	
		10	100	15	32	18	31	12
			200	12			23	
		15	100	10			25	
(unit : KN/m)								
波高	周期	密度 N	幅 B(m)	直線	U字型	V字型	幅広V字	矩形
2.0m	20min	0	0	1.0	2.3	2.7	2.8	1.0
		5	100	0.8			2.2	
			50	0.8			1.9	
		10	100	0.8	1.6	0.8	1.6	0.6
			200	0.6			1.2	
		15	100	0.5			1.3	

から 500m 離れた地点での最大津波力の計算値を示したものである。表の上段は津波力 (kN/m) を示し、下段では直線海岸でのグリーンベルト無しの場合を 1 として力の比を示した。直線海岸に比べると、同じ津波が入射しても、U字型やV字型では湾の中央部における津波力は増加する。これは、地形の効果によるものである。グリーンベルトを設置すると、直線海岸や矩形湾では 60 から 80% の津波力の低減が期待される。U字型やV字型湾でも、グリーンベルトによる低減率はほぼ同じで、たとえば U字型湾では、(1.6/2.3) として低減率を計算すると、70% 程度に津波力は低減される。このようにグリーンベルトによる低減効果は、海岸線に沿って一様にグリーンベルトが配置されている場合には、直線海岸と大きくは変化しない。ただし、津波力は地形によって多い変化するので、現地への適用に当たっては、現地の地形条件や家屋の分布等を考慮して適切な考察が必要になる。

4. 現地地形を用いたグリーンベルト効果予測

4.1 計算の条件

ここでは、1998 年パプアニューギニア北岸での津波によって大きな被害を受けたシッサノ地区にグリーンベルトを設置した効果を数値計算で調べる。パプアニューギニア北岸での津波の再現計算はすでに著者が実施しており、地震後の地滑りによって、局所的に大きな津波が生じたことを示唆している(Hiraishi, 2000)。またグリーンベルトによる津波の低減効果について限定されたケースで計算を行っている。しかし、浸水域についてのみ効果を調べており、用いていたグリーンベルト密度も大きく、海浜としては適さない数値であった。そこで、ここでは現地で適切に植樹できる密度として、 100m^2 あたり $N=15$ を用いてグリーンベルトの実効果的な効果を調べた。なお、計算で再現した津波の規模

や現地痕跡との比較については、文献(Hiraishi, 2000)を参照されたい。

図-17は、シッサノラグーンの鳥瞰図である。ラグーンは砂州によって外海と遮られており、砂州の幅は約500m、長さは約5kmである。砂州における津波高は痕跡では6～15mと大きく変化するが、本計算では、最大値で8mである。グリーンベルトは汀線に沿って砂州の全長にわたって幅100mで設置する($N=15$)。グリーンベルトの幹部の高さは5m、直径0.5mで、葉部は直径10mの球とする。これらの条件はモデル地形での計算で用いた図-1の説明で用いた値と同一である。葉部の直径が10mなので、樹木の間隔が狭くなると葉部同士が当たってしまい、現実にはあり得ない状態になるが、計算上は葉部に空隙率を設定しているだけなので、隣接してしまうとすべて一体とした計算になり、重なった部分の空隙率を大きくして変化させているわけではない。したがって、本計算はモデルを用いた試計算であり、現実のグリーンベルトの効果を詳細に検討する場合には、現地における樹木の形状について現地調査をしておくことが必須である。

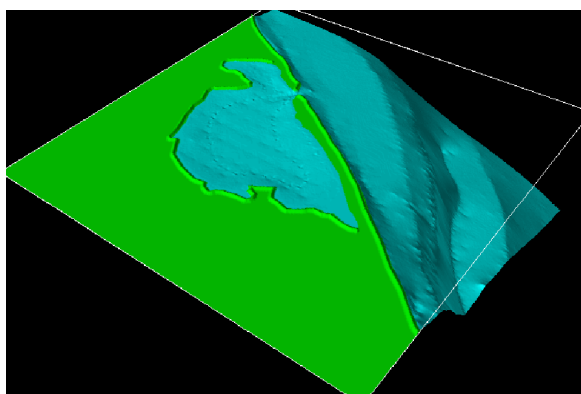


図-17 グリーンベルトを設置する砂州

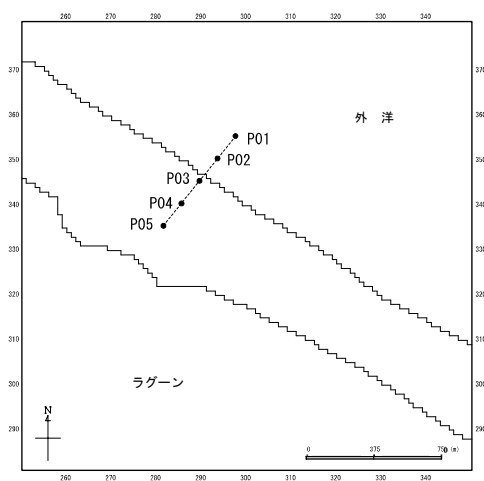
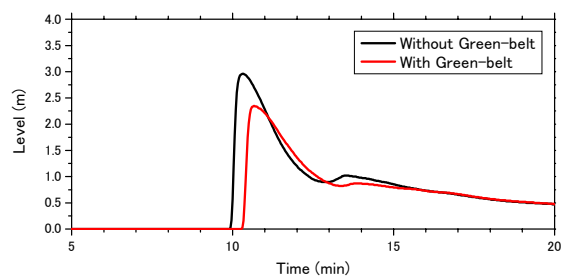


図-18 砂州上における計算値の出力点

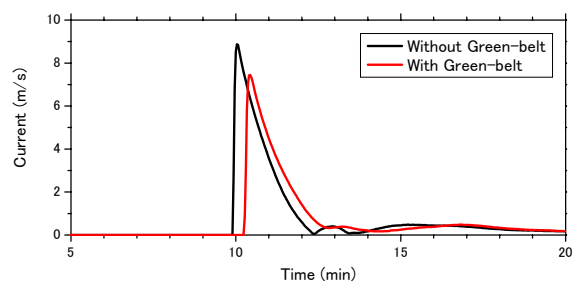
4.2 計算の結果

計算結果の出力点として、図-18に示すように、グリーンベルトの効果を調べるために砂州上に測点Po.1からPo.5を配置する。Po.1およびPo.2は砂州の前面での海上の点である。砂州上のPo.3はグリーンベルトの前面の点で、グリーンベルトの背後がPo.4およびPo.5である。これらの点で、津波の水位、流速、津波力を計算し、時系列の形で出力する。ここでは、グリーンベルト背後に位置する村落位置の測点Po.5での津波水位、流速、津波力の変化を示す。

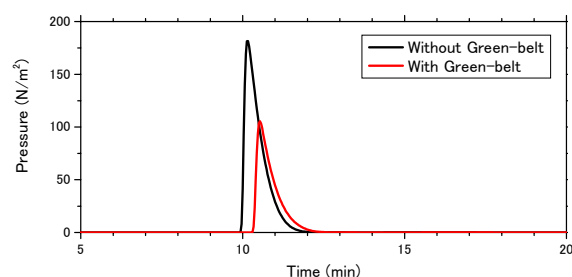
図-19はグリーンベルト有無による津波水位、津波流速および津波力の変化を示し、グリーンベルト存在による砂州上で津波水位、流速、津波力ともに減衰していることがわかる。特に津波力は半分になっている。また、図に示されるように、グリーンベルトが存在すると最大津波力が出現する時刻が遅くなる。このケースでは、グリーンベルト



(a) 津波水位



(b) 津波流速



(c) 津波力

図-19 シッサノ砂州を対象としたグリーンベルト効果 (1998 パプアニューギニア津波, $N=15$, $W=100$ m)

が無いケースでは、地震発生後 10min 程度で最大津波力が発生しているが、グリーンベルトを設置すると、最大津波力の発生時刻は 30s 程度遅れる。

以上の結果を考察すると、 $N=15$ という現実的な密度を有するグリーンベルトであっても津波力が低減できることがわかる。また、津波力のピークが遅延されることから、避難を始めたときに津波が来襲した場合に安全に避難できる時間が長くなるので、避難支援施設としても活用できる可能性がある。このようにグリーンベルトは津波力を軽減して、背後の家屋が破壊されるリスクを軽減するとともに、避難支援施設としても活用できる可能性がある。

5. まとめ

本資料では、アジア諸国の緊急の津波対策に資することができる海岸樹木を用いたグリーンベルトによる防災効果を数値計算で調べた。用いた数値モデルは、非線形長波の方程式で一般の津波計算に用いられるものである。グリーンベルトの津波力低減効果は、模型実験で得られた抗力係数と慣性力係数を用いて算定した。グリーンベルトの効果を決める主要なパラメータとしては、 100m^2 の単位面積に含まれる樹木数 N と幹の直径 D および海—陸方向のグリーンベルト幅を用いた。限られたケースでの結果であるものの、以下のような特性が判明した。

- (1) グリーンベルトの密度 N および幅 B が増加すると、簡便な計算法で津波の主要な力である抗力の低減率を推定できた。
- (2) 抗力の低減率だけで判断したところ 3 次元水路での流れを仮定したところ、津波遡上高が 5m と予想される海岸で木造家屋の倒壊を防ぐためには、グリーンベルトの密度は 15 以上で、幅は 200m 程度が必要になると考えられる。
- (3) 直線海岸では、グリーンベルトによる津波力の低減率は汀線から離れるほど大きくなる。U や V 字型の湾ではグリーンベルトのすぐ背後で津波力は軽減する。グリーンベルト背後における津波力は、無い場合に比較して、 $10 < N < 15$ および $B = 50 \sim 100\text{m}$ の範囲では、最も小さいときに、1/5 になる可能性がある。
- (4) U 字型や V 字型湾では、湾奥の海岸線から数百 m 陸域へ入った地点では、グリーンベルトの直背後より津波力が大きくなる地点が出現する可能性がある。これは、地形の効果によって津波が集中したためと考えられるが、本計算でのモデル地形は幅の広い水路の中央部に湾が形成されている場合を想定しており、現実の地形

による検討を今後も続ける必要がある。

- (5) 本モデル計算では、 $N=15$ 、 $B=100\text{m}$ という程度のグリーンベルトを基本として想定した場合に、1/2 および 2 倍に上記の数値を変更して結果を比較したところ、津波力の低減効果は、汀線に平行方向の単位幅あたりでの総本数で比較すると密度を増した方が、幅を増やすよりも効果が大きかった。ただし検討範囲は限定されており、現地での植生条件に対する考察が必要である。
- (6) グリーンベルト密度 N を 15、幅を 100m としてパプアニューギニア津波を対象として海岸の津波力低減効果を予測したところ、海岸線に沿って一様なグリーンベルトを設置した場合には、グリーンベルト背後では作用力が半分に低減されることが分かった。

なお、本検討は限られたケースでの計算をもとにして、なされておき、現地でグリーンベルトを育成する場合には、より詳細な検討を行ってグリーンベルトの最適条件を決める必要がある。本件等で示した手法が参考になれば幸いである。

(2006.3.10 受付)

参考文献

- Amri S. (2002) : Housing and environmental damages due to 4 May 2000 Banggai Earthquake in Central Sulawesi Province of Indonesia, Proc. International Workshop on Tsunami Disaster Risk and Its Reduction in the Asia-Pacific Region, Bandung, Indonesia, Session 1.
- Dahdouh-Guebas F. and N. Koedam(2006) : Coastal vegetation and the Asian tsunami, SCIENCE Vol.311, p.37.
- 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.
- 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, ed. by Satake, Springer, pp.279-292.
- 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.
- 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.

Subandono D. (2006) : The disaster impacts of December 2004 Indian Ocean Tsunami in Indonesia and its rehabilitation efforts, Proc. of 2nd International Workshop on Coastal Disaster Prevention –Tsunami and Storm Surge Disaster Mitigation-, in printing.

Widgyo K. (2005) : Greenbelt technique – Tsunami disaster reduction technology, Proc. APEC-EqTAP Seminar on Earthquake and Tsunami Disaster Reduction, Jakarta, in printing.

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.

首藤伸夫(1985) : 防潮林の津波に対する効果と限界, 第 32 会海岸工学講演会論文集, pp.465-469.

鈴木高二郎・高橋重雄(2002) : 緩く堆積した地盤の波浪による液状化について, 港湾空港技術研究所報告, 第 41 巻, 第 3 号, pp.1-17.

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ーインド洋大津波におけるタイでの痕跡調査結果ー, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1346-1350.

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ータイにおける事例を中心としてー, 港湾空港技術研究所資料 No.1106, 20p.

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.

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 : 地表のマニングの粗度係数

R : 津波遡上高

T : 津波周期

u : 津波流速

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

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_V : 流速係数

港湾空港技術研究所資料 No.1124

2006.6

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(84)5040 URL: <http://www.pari.go.jp>

印 刷 所 ニッセイエプロ株式会社

Copyright© (2006) 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。