

津波遡上に対する海岸樹林内通路の影響 — 2次元数値計算による検討 —

EFFECT OF OPEN GAP IN COASTAL FOREST ON TSUNAMI RUNUP
- INVESTIGATION BY 2-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATIONS -

谷本勝利¹・田中規夫²・N. B. THUY³・N. A. K. NANDASENA⁴・飯村耕介³
Katsutoshi TANIMOTO, Norio TANAKA, N. B. THUY, N. A. K. NANDASENA
and Kosuke IIMURA

¹フェロー会員 工博 埼玉大学名誉教授 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

²正会員 工博 埼玉大学教授 大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

³学生会員 埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

⁴工修 University of Moratuwa 講師 (Sri Lanka)

Numerical simulations of tsunami run-up have been carried out to investigate the effect of open gap in a coastal forest zone parallel to the shoreline. First, a straight open gap perpendicular to the shoreline is considered and the gap width is changed. As the gap width increases, the current velocity at the end of the open gap increases first, reaches to the maximum and then decreases, while the run-up height increases monotonously. The maximum velocity is 1.8 times comparing with the velocity without the coastal forest at the opening ratio of 0.075. This is mainly due to the effect of in-flow from the both sides of the open gap. Next, for the condition of the opening ratio with 0.075 the effects of an open gap parallel to the shoreline in the forest and a zigzag arrangement of the open gap are investigated. It is concluded that the effect of those difference in the arrangement is not large on the run-up height.

Key Words : *Tsunami run-up, open gap in coastal forest, 2-D numerical simulation*

1. まえがき

海岸林の津波減災効果については、1998年のパプアニューギニア地震津波、さらには2004年のインド洋大津波に際して再認識され、熱帯の開発途上国における有力な津波対策の一つとして注目されており、種々の海岸樹を対象とした樹林幅の影響等系統的な検討が主として1次元数値計算によって行われている(たとえば、原田・今村, 2003¹⁾; 谷本ほか, 2007²⁾)。また、樹木の倒壊を考慮した2次元数値計算も行われるようになっており(たとえば、柳澤ほか, 2007³⁾)、海岸林の津波減災効果に関する研究が近年非常な発展をみせている。

しかしながら、そうした2次元計算の多くは事例的であり、通路など樹林帯内に切れ間があるときの影響等に関する系統的検討は未だ少ない。そのため、Nandasena ほか(2008)⁴⁾は樹林帯に切れ間があるときの津波遡上計算を行い、切れ間において流速が早くなること等を指摘したが、切れ間の幅については2条件に限っており、また配置についてもまっすぐにあるときのみを対象としていた。本研究は、その研究に続いて、あらためて通路の幅を系統的に変化

させた計算を行うとともに、配置についても通路が折れ曲がっている条件を加えて計算を行い、津波遡上に及ぼす通路の幅と配置の影響を明らかにするものである。

2. 数値計算の方法と計算条件

(1) 基礎方程式

計算に用いる基礎方程式は次の非線形長波方程式である。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{d} \right) + gd \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{F_x}{\rho} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{d} \right) + gd \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{F_y}{\rho} = 0 \quad (3)$$

ここに、 x , y は平面座標、 t は時間、 ζ は水位、 Q_x , Q_y は x , y 方向線流量成分、 d は全水深($=h+\zeta$, h : 静水深)、 ρ は水の密度である。また、 τ_{bx} , τ_{by} は水底摩擦応力、 F_x , F_y は単位面積あたりの樹林による抵抗力のそれぞれ x , y 方向成分であり、摩擦応力ベクト

ル $\bar{\tau}_b$ および樹林による抵抗力ベクトル \bar{F} は次式で与える。

$$\bar{\tau}_b = \frac{\rho g m^2}{d^{7/3}} \bar{Q} |\bar{Q}| \quad (4)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{2} \frac{\rho \gamma C_{D-all} b_{ref}}{d} \bar{Q} |\bar{Q}| \quad (5)$$

ここに、 g は重力の加速度、 m はManningの粗度係数、 \bar{Q} は線流量ベクトル、 γ は樹林密度（単位面積あたりの樹木の本数）、 b_{ref} は樹木の基準投影幅（胸高での幹の直径で与える）であり、 C_{D-all} は次式で与える樹木の抵抗係数である（田中・佐々木、2007⁵⁾）。

$$C_{D-all}(d) = C_{D-ref} \frac{1}{d} \int_0^d \alpha(z) \beta(z) dz \quad (6)$$

$$\alpha(z) = \frac{b(z)}{b_{ref}} \quad (7)$$

$$\beta(z) = \frac{C_D(z)}{C_{D-ref}} \quad (8)$$

ここに、 C_{D-ref} は基準抵抗係数（胸高での幹に対する抗力係数で与える）、 b および C_D は地面からの高さ z での幹と枝の投影幅およびそこでの樹木の抗力係数である。このように、 C_{D-all} は高さ方向における抗力係数の変化ばかりでなく、投影幅の変化を含んだもので、全水深（没水深）の関数であるところに特色がある。

数値計算は基礎式を差分式に変換して行うが、差分化には、空間的にはstaggered grid、時間的にはleapfrog schemeを用い、非線形の移流項にはup-wind scheme、摩擦や抵抗の項にはsemi-Crank-Nicolson schemeを適用する。なお、造波領域は線形長波方程式に基づく特性曲線法による無反射性造波方式を採用し、適当な領域において非線形長波方程式に線形的にすり付ける方法をとっている（図-1の $x=-2000 \sim -500$ m区間が線形方程式、 $x=-500 \sim 0$ m区間が移流項等非線項の線形すり付け領域）。陸地との移動境界には岩崎・真野の方法(1979)⁶⁾を適用する。

(2) 海岸と樹林のモデル

対象としたのは図-1に示す断面が一樣に続く海岸であり、そこに周期20分の津波がまっすぐに来襲する条件である。汀線付近は基準面（±0.0m）までが1/100勾配、基準面上+4.0mまでが1/50勾配であり、後の陸地の勾配は1/500である。これらは特定の地点を対象としたものではなく、一つのモデルとして想定したものである。また、水深100mでの入射津波の波高を6m（静止面からの高さ3m）としているが、これは次に述べる海岸樹が津波によって倒壊しない程度の規模であることを考慮したものである。なお、津波来襲時の潮位は+2.0mとする。

海岸樹林は1/500斜面の沖側端（+4.0m）から幅 B_T にわたってあるものとし、平面配置は図-2のような3ケースを考える。図中、 L_T は汀線方向の長さ、 b_G

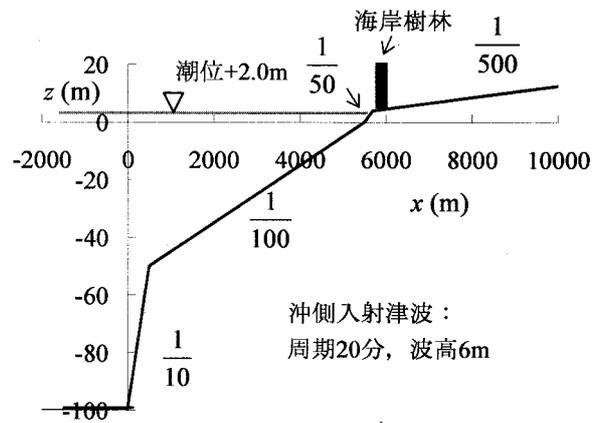


図-1 対象とする海岸地形

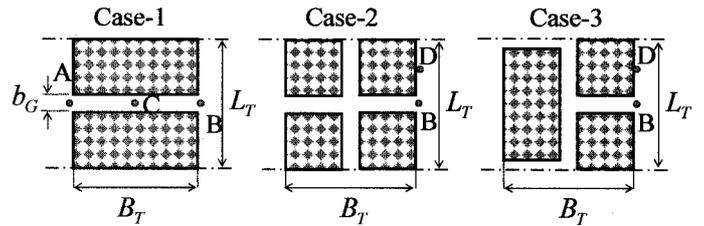


図-2 海岸樹林の配置

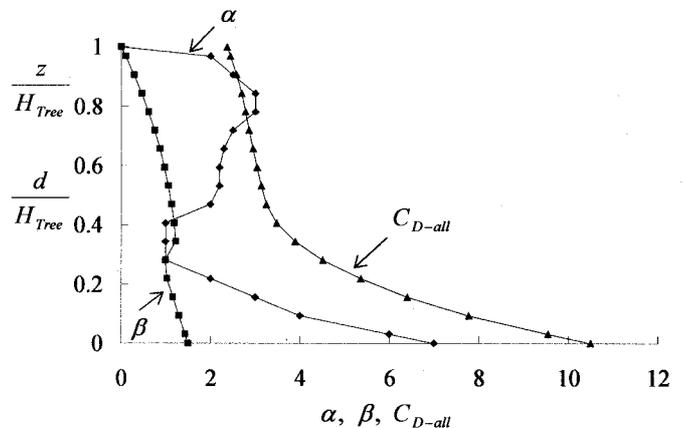


図-3 対象とする樹種の抵抗特性



写真-1 アダン

は通路の幅である。いずれも汀線方向には一点鎖線を対称軸として同様な配置で一樣に樹林が続くものとしており、側方は鏡像の原理で完全反射境界とし

て計算する。対象とした樹木は写真-1に示したような熱帯海岸樹のアダン(*Pandanus odoratissimus*)で気根があり、図-3に示したような抵抗特性を有している。図中、 H_{Tree} は樹高で、本研究では8mとしている。また、樹木の基準投影幅(胸高での幹の直径) b_{ref} を0.20m、そこでの基準抗力係数 C_{D-ref} を1.0、樹林密度 γ を0.22(樹木間距離を4.4mとして正三角形配置したときの密度に相当)としている。

計算は B_T 、 L_T はそれぞれ200mで一定として、まずCase-1を対象とし通路(切れ間)幅 b_G を変化させた条件で行い、次いで b_G を15mと一定として配置をCase-2、Case-3に変えた条件で行う。差分間隔 Δx 、 Δy は2.5mである。

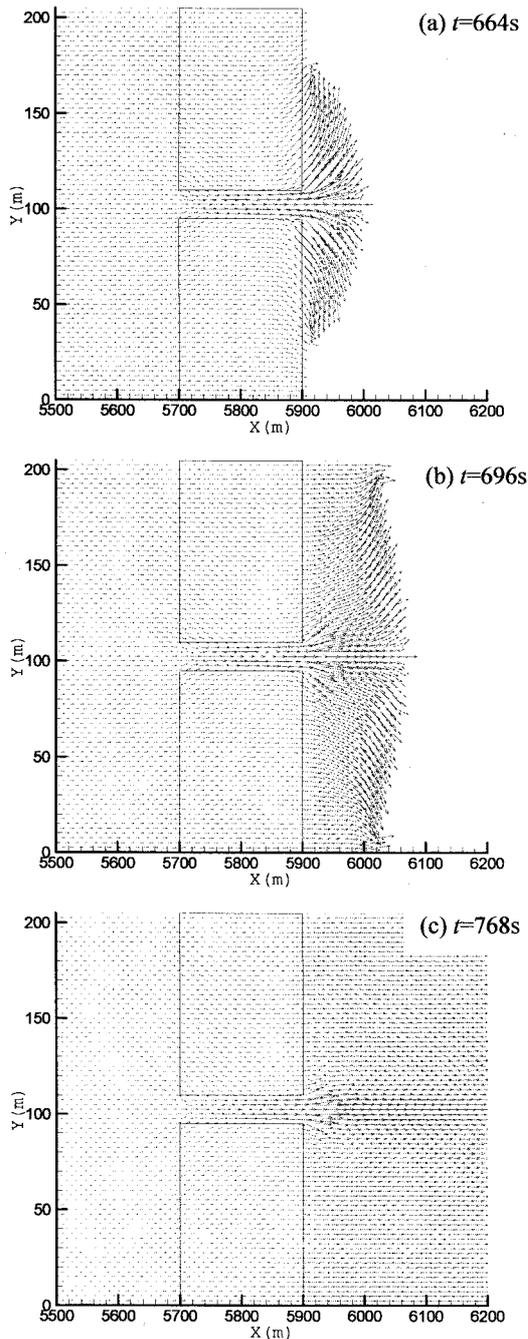


図-4 流速ベクトル (Case-1)

3. 結果と考察

(1) 通路(切れ間)幅による変化

図-4は $b_G=15m$ の場合の流速ベクトルの平面分布を示している。図中の時間 t は計算開始後の時間であり、第1波の先端が背後全体にほぼ達した664sから768sの104s間における変化である。このように海岸に遡上した津波は樹林帯を抜けて背後へ伝わっていくが、切れ間となっている通路では樹林による抵抗がないため、流速が大きく、早く背後に達し、通路出口付近から広がるように流れ出していることがわかる。しかし、時間がたつにつれ背後の流れは出口近傍を除いて次第に均一化し、この例の場合、図には示していないけれども最終的な遡上高はD.L.上6.96m(海面上4.96m)で一様となる。これは陸地の勾配は1/500と緩く津波は相当奥地まで遡上していき(樹林の前端から約3.5km)、幅200mというスケールに対してほぼ完全に1次元化することによって

図-5は通路の陸側端出口中央のB地点での水位 ζ (基準面D.L.上の値)、線流量と水深平均流速の岸沖方向成分 Q_x と V_x の時間変化を示したものである。このようにそれぞれのピークの出現時刻が異なるのが特徴であり、以下流速の代表値としては線流量がピーク時の値をとり、これを代表流速という。また、そのときの水位を代表水位と呼び、 ζ_{rep} で表す。この線流量が最大となる時間はたとえば樹木に働く抗力が最大となるときに近い²⁾。この例の場合、線流量が最大になるのは772sであり、図-4の768sの流れパターンは出口中央で線流量が最大時にほぼ対応している。

図-6に最大線流量 Q_{max} 、代表全水深 $d_{rep}(=\zeta_{rep}+h)$ 、代表流速 V_{rep} 、さらに海面(潮位2.0m)上遡上高 R の b_G による変化を示している。横軸の b_G/L_T が0は通路による切れ間がない場合、1は樹林がない場合に相当する。縦軸は、最大線流量、代表全水深、代表流速ともに、樹林がないときの同地点での最大線流量 $Q_1(=17.3m^2/s)$ 、代表全水深 $d_1(=4.20m)$ 、代表流速 $V_1(=4.11m/s)$ でそれぞれ割って無次元化してある。

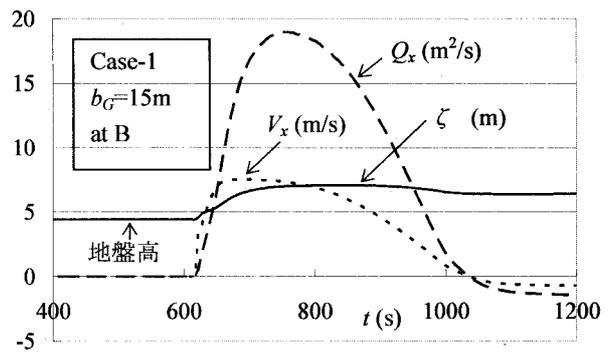


図-5 水位、線流量、流速の時間変化

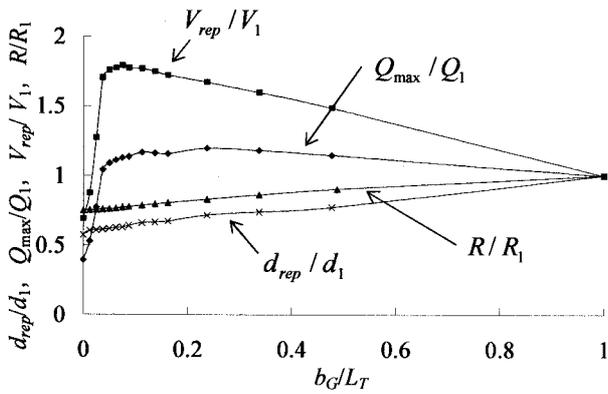


図-6 通路出口中央での最大水深，最大線流量，代表流速，および遡上高

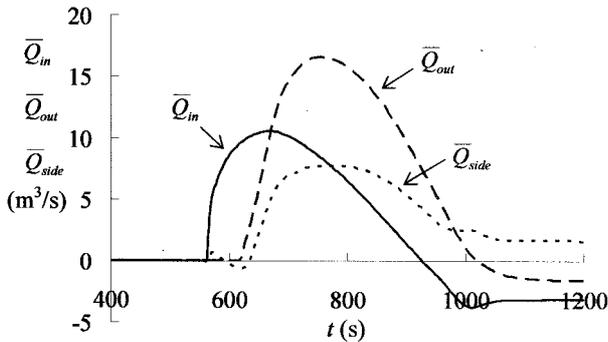


図-7 通路への流入，流出量の時間変化

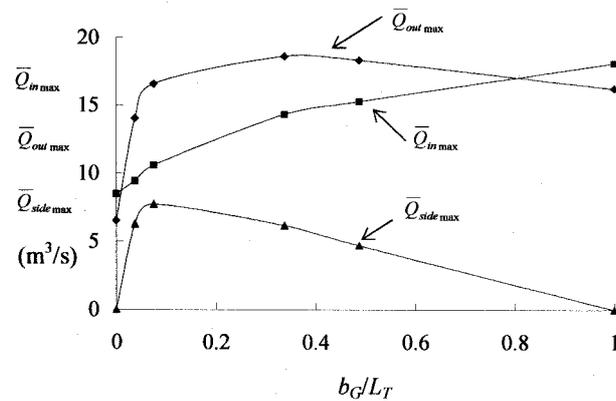


図-8 通路への流入，流出量の時間変化

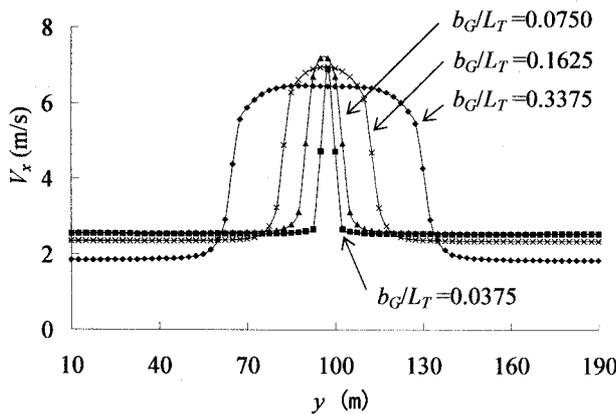


図-9 出口線上での V_x の分布

また、遡上高も樹林がないときの遡上高 $R_1 (=6.44\text{m})$ で割って示している。この結果によれば、通路幅が広がるにつれて、代表全水深や遡上高は単調に増加するのに対し、最大線流量や代表流速は極大値を有するような変化を示し、たとえば b_G/L_T が 0.075 ($b_G=15\text{m}$) のとき代表流速は 1.8 に達する。これは通路がないときの代表流速と比較すると 2.6 倍であり、Nandasena ほか⁴⁾ がすでに指摘しているように、通路内では局所的に非常に早い流れとなる危険性を示しているといえる。以下、なぜそのような極大を有するような変化を示すのかを考察する。

図-7 は通路海側入口からの全流入量を通路幅で割った幅平均流入量 \bar{Q}_in 、陸側出口での全流出量を通路幅で割った幅平均流出量 \bar{Q}_out 、側方からの全流入量をやはり水路幅で割った幅平均側方流入量 \bar{Q}_side の時間変化を示したものである。 b_G が 15m のときの例であるが、通路にはこの場合側方からの流入の影響が大きいことがわかる。こうした時間変化からそれぞれの最大値 (max を下付けして表す) を読みとって、 b_G に対してプロットしたのが図-8 である。 \bar{Q}_in_{max} は比較的単調な増加、 \bar{Q}_out_{max} は最初急激に増加するがその後は比較的緩やかな変化であるのに対し、 \bar{Q}_side_{max} は b_G が 15m 付近で極大値を持つ変化を示しており、これが図-6 における出口中央での線流量や流速の極大を有する変化をもたらしているものと考えられる。 \bar{Q}_side_{max} がこのような変化を示すのは、通路幅が 0 から広がるにつれて 2 次元平面効果が効いて流入が大きくなるが、一方、幅が広がると流入量が通路内で薄められるという要素があるので、ある程度以上では逆に低下することによっていると考えられる。ちなみに、図-9 は出口での流出流量が最大になる時刻での岸沖方向流速成分 V_x の分布をいくつかの通路幅に対しプロットしたものである。幅が狭くなるにつれて、分布はシャープになり中央での流速が大きくなる傾向にあるが、ある限界を超すと最大値が減少する傾向が認められる。

さらに、図-10 は入口 (A 地点)、通路長さ方向の中央 (C 地点)、および出口 (B 地点) を通る y 軸に平行な線上での同時水位分布の時間的变化を示したものである。(a) の最下端の線は A 地点の地盤高 D.L. 上 3.97m を表しており、その上にある最初の線は津波到達後の $t=563.5\text{s}$ の同時水位分布である。図には、その後最大水位となるまでほぼ 2s ごとの同時水位分布を示してある。ここで特徴的なことは通路内で水位が低下していることであり、低下量は最大で 0.42m である。最上端の最大水位時には図ではほとんど見えないけれども通路中央で 0.03m 低下している。

図-10 の (b) の地盤高 (C 地点) は 4.20m で、 $t=586.5\text{s}$ から、(c) の地盤高 (B 地点) は 4.42m で、 $t=630.6\text{s}$ からのほぼ 2s ごとの同時水位分布である。津波は通路から早く進入するので、(b) の図の初期の段階では通路内で水位が上昇しており、上昇量は最大で 1.13m である。しかし、時間が経つにつれ

て上昇量は減少し、若干であるが低下する傾向に転じ、最大の低下量は 0.03m、最後の最大水位時には 0.02m である。これに対し、出口では最大水位に達するまで常に通路内での水位が高く、上昇量は最大で 1.35m にも達する。こうした通路での水位の低下、上昇は、入口付近では流入、出口付近では流出

が卓越することに対応している。

(2) 配置パターンの違いによる変化

次に配置パターンの違いによる影響について述べる。図-11 は Case-2 と Case-3 の $t=680s$ での流速ベクトルの平面分布を示している。通路幅は岸沖方向、汀線方向通路ともに 15m であるが、Case-3 の海側の 2 カ所の通路はそれぞれ半分の 7.5m としている。Case-2 の配置では海側と陸側の通路がまっすぐにつながっているため、Case-1 とほとんど同じ流れのパターンである。それに対し、Case-3 はジグザグ状であるため、樹林帯内における流れのパターンが異なり、陸側の樹林帯内で陸側通路に向かう流れが発生しているのが認められる。

図-12 は陸側通路の出口中央の B 地点と、樹林背後の D 地点での Case-2 と Case-3 における水位の時間変化を示したものである。B 地点では初期の津波到達にやや遅れが現れているが、最大値はほとんど変わらない。D 地点ではほとんど違いがない結果となっている。これに対し、同地点での流速の時間変化を比較したのが図-13 である。D 地点での流速は大差ないが、B 地点では Case-3 が全体に小さくなっている。線流量が最大時 ($t=772s$) の代表流速でいえば、Case-2 が 7.10m/s、Case-3 が 6.34m/s で、Case-3 の流速が約 10% 小さい。これはもちろん通路がまっすぐでないことの効果である。ここでは示していないけれども Case-1 と Case-2 では B 地点、D 地点ともほとんど違いがない。

最後に、図-14 に Case-1, 2, 3 と通路なし、樹林なしの場合の海面上遡上高を示す。遡上高は樹林なしの場合 6.44m、Case-1 で 4.96m、Case-2 で 4.99m、Case-3 で 4.97m、通路なしで 4.84m である。Case-1 と Case-2 違いは僅かで、通路幅が 15m 程度の場合樹林帯内の汀線方向通路は背後への津波遡上にはほとんど影響しないといえる。また、通路を設けることによって遡上高は大きくなるが、通路なしに比べて上昇量は 0.13~0.15m 程度とそれほど大きくない。

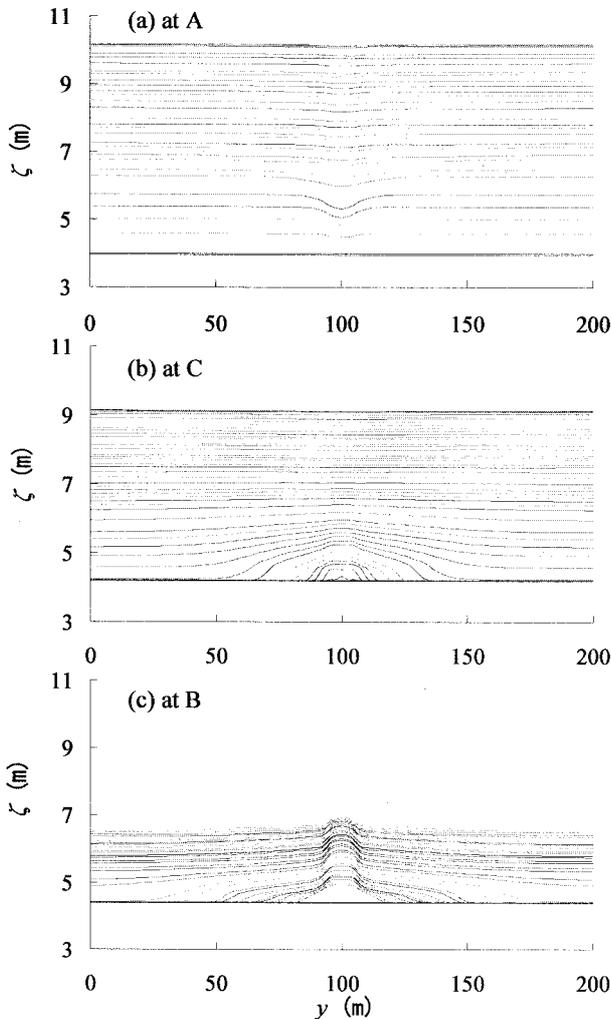


図-10 入口、中央、出口線上での水位の分布

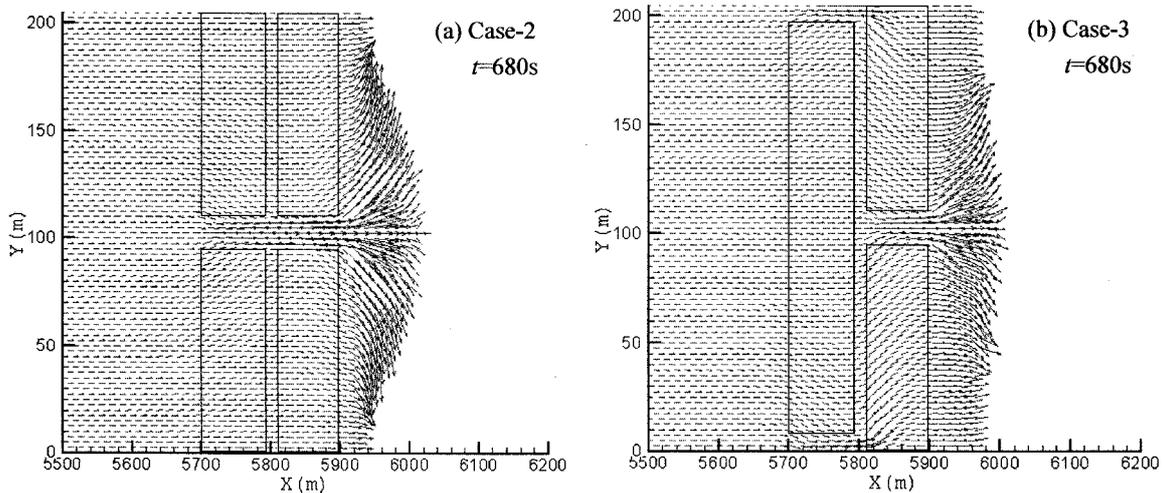


図-11 流速ベクトルの平面分布 (Case-2, Case-3)

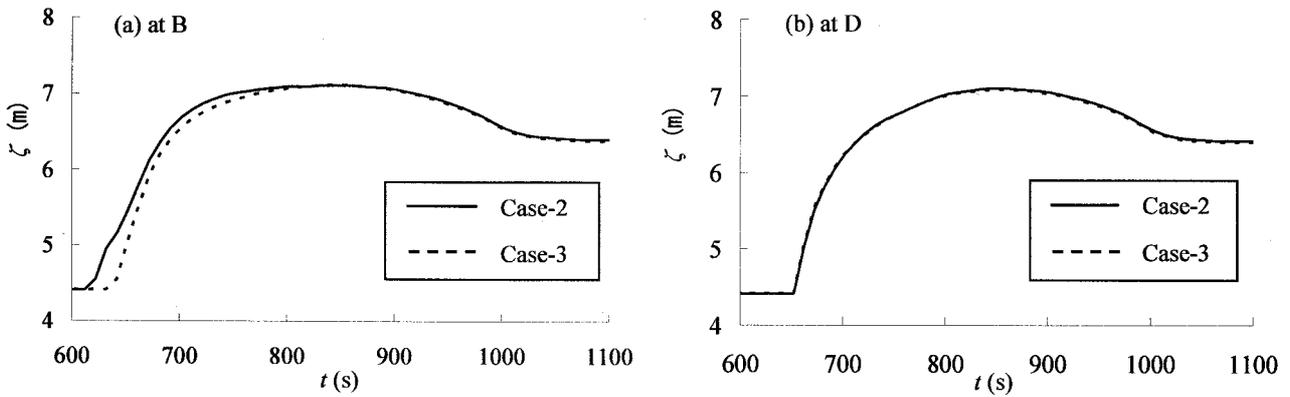


図-12 B, D地点での水位の時間変化

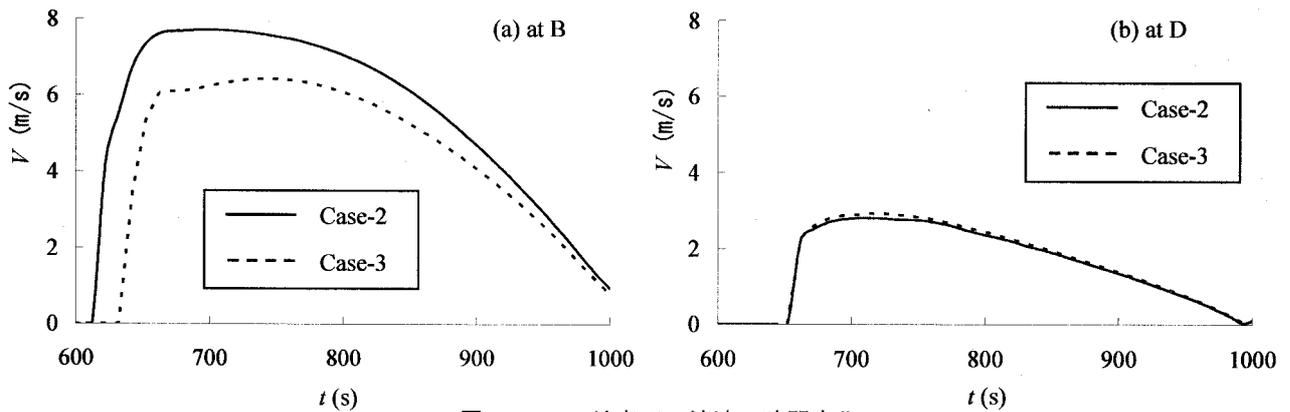


図-13 B, D地点での流速の時間変化

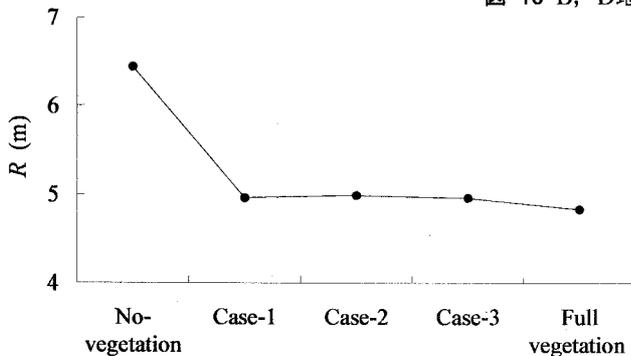


図-14 海面上遡上高の変化

4. むすび

本研究における主要な検討内容とその結果を簡単にまとめると以下のとおりである。

- 1) 通路が岸沖方向にまっすぐにある場合を対象として通路幅の影響を検討した。通路による開口幅が大きくなるにつれて、通路出口での水位や遡上高は単調に増加するのに対し、通路出口での線流量最大時の流速は極大を有するような変化をする。本研究の計算条件の範囲では、極大値は通路による開口率(通路幅/樹林帯の汀線方向長さ)が 0.075 のとき生じ、樹林がない場合の同地点での同様な流速の 1.8 倍にもなる。これは主として通路側方からの流入の影響による。
- 2) 開口率が 0.075 の条件を対象として、樹林内に

汀線方向に平行な通路を設けた場合や岸沖方向通路をジグザクにした場合を検討したが、そうした配置による遡上高への影響は小さい。

なお、今回の検討では渦粘性項を無視しているが、今後その影響を明らかにすることが必要である。

参考文献

- 1) 原田賢治, 今村文彦: 防潮林による津波減衰効果の評価と減災のための利用の可能性, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.341-345, 2003.
- 2) 谷本勝利, 田中規夫, Nandasena, N.A.K., 飯村耕介, 清水隆: 種々の熱帯性海岸樹の組合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 50 巻, pp.1381-1385, 2007.
- 3) 柳澤英明, 越村俊一, 宮城豊彦, 大塚隆行, 今村文彦: 2004 年インド洋大津波におけるインドネシア・バンドアチェでのマングローブ林の潜在的減災効果, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.246-250, 2007.
- 4) Nandasena, N.A.K., Tanaka, N. and Tanimoto, K.: Perspective of coastal vegetation patches with topography variations for tsunami protection in 2D-numerical modeling, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.52, pp.133-138, 2008.
- 5) 田中規夫, 佐々木寧: 2006 年ジャワ津波災害において海岸林が果たした役割とその破断・なぎ倒し限界, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.1445-1450, 2007.
- 6) 岩崎敏夫, 真野明: 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, 1979.