

砂嘴植生域を越える津波の基礎水理

松 富 英 夫*・穂 積 拓 哉**・今 井 健 太 郎***

1. ま え が き

1998 年パプア・ニューギニア津波の特徴の一つは、波源に直面した Sissano Lagoon の植生を有する右岸砂嘴上で最大津波高 14.8 m を生じ、最大の犠牲者と犠牲率を出したことである (松富ら, 1999)。

また、首藤 (1985, 1987) は過去の諸種の津波報告書から実データを精力的に抽出し、防潮林の津波に対する効果と限界を論じ、それらの判定図を作成した。その際、植生厚み dn (d : 植生の胸高直径, n : 沿岸方向 1 m 当たりの植生本数) という無次元パラメータを導入すると共に、今後は防潮林 (以下、植生と呼ぶ) の水理学的な検討が必要と強調した。

そこで、本研究は首藤の判定図の有効利用を前提に、実験に基づいて砂嘴植生域を越える津波 (ピーク時) の基礎水理を dn で検討し、その結果を報告するものである。

2. 実 験

津波氾濫流はゲート急開流で模擬した。ピーク時の津波氾濫流をこの流れで模擬してよいことは確認済みである (松富ら, 1998)。

実験装置の概略を図-1 に示す。貯水部 (水深 h_u) が 5 m、一様水深部 (水深 h_o)、一様勾配斜面部 (勾配 $S=1/26$) が 2 m、縦断形が円弧で、一様勾配斜面部と連続的 (勾配を含む) になるように設けた陸上部 (弦長) が 0.5 m、一様水深の Lagoon 部が 1.5 m で、全長が 11 m の両面ガラス張り鋼製矩形水路である。

陸上部と Lagoon 部は勾配 1 の斜面で接続し、Lagoon 部の静水面位は海 (一様水深部や一様勾配斜面部) と同じにした。水路下流端には Lagoon 部の水深調節用の越流堰のみが存在し、氾濫流はそこを自由に越流できる。

一様勾配斜面部、陸上部と Lagoon 部は塩化ビニール樹脂製である。

陸上部には枝葉の無い椰子の木を模した高さ 10.0

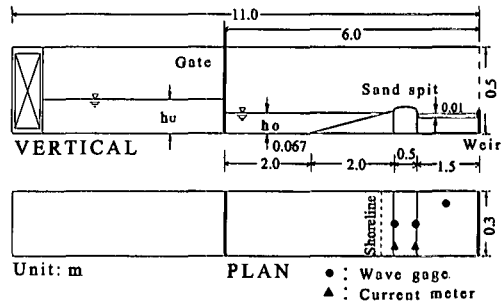


図-1 実験装置の概略

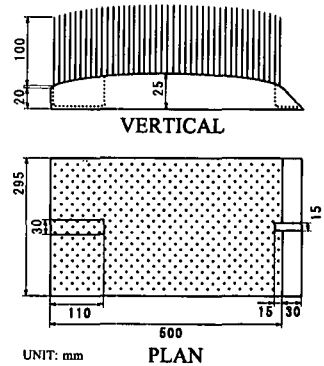


図-2 椰子模型の配置例 ($\kappa=1.5\%$)

cm、直径 $d=2.4$ mm の塩化ビニール樹脂棒を千鳥と格子状に配置した。植生域幅は水路幅、植生域長 L は砂嘴頂部が植生域の中心となるようにして 10~50 cm の 3 種類、植生密度 $\kappa (= \Sigma \text{樹脂棒の断面積} / \text{植生域面積})$ は 0~5% の 7 種類とした。これらの条件は植生厚み $dn=0 \sim 1326$ となり、実際の値域である 1000 以下 (首藤, 1985, 1987) を包含する。 $L=50$ cm, $\kappa=1.5\%$ の千鳥配置の例を図-2 に示す。

$\kappa \leq 1.5\%$ では上述の樹脂棒を短くカットし、枝葉を取り付けた実験も行った。その枝葉を写真-1 に示す。写真は $\kappa=0.5\%$ の場合で、 h_{tr} は底面から枝葉下端まで (樹幹部) の高さである。 h_{tr} は 2.5 cm と 4 cm の 2 種類とした。

浸水深や Lagoon 内の跳水高または段波高 (以下、簡単

* 正 会 員 工 博 秋田大学助教授 工学資源学部土木環境工学科
** 正 会 員 J R 東日本
*** 学生会員 秋田大学大学院 工学資源学部土木環境工学科

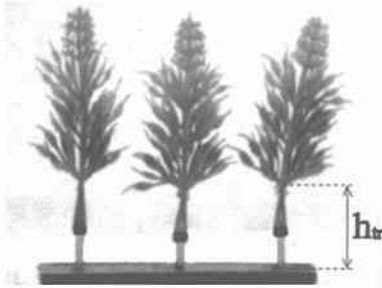


写真-1 枝葉のある模擬植生 ($\kappa=0.05\%$)

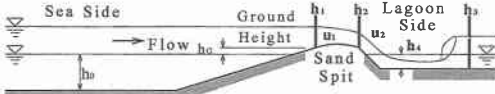


図-3 計測機器の配置と諸記号の定義

に跳水高と呼ぶ)の測定は容量式波高計(計測技研製)、陸上氾濫流速の測定(1点法)は直径3mmのプロペラ流速計(中村製作所製)で行った。波高計は線形応答確保のため、海側で2.9cm、Lagoon側で2cmの深さの水の満たされた箱の中に据えた。

計測機器の配置や諸記号の定義を図-3に示す。 h_c は静水面から砂嘴頂部までの地盤高、 h_1 は h_2 と同時刻の海側浸水深、 h_2 はLagoon側の最大浸水深、 h_3 はLagoon部の静水面からの最大跳水高、 h_4 はLagoon部の静水深、 u_1 と u_2 は各々 h_1 、 h_2 と同一位置・同時刻の陸上氾濫流速である。ただし、流速は1点法で測定しているため、反射波の影響がないLagoon側のものが正確と思われる、海側の流速は定常を仮定し、Lagoon側の流速、浸水深と流量連続条件を用いて評価したものを採用する。実測した u_1 は参考値とする。

実験条件を表-1に示す。各ケース3回ずつ実験を行った。枝葉が有る場合、 L と κ の()内の条件は実験を行っていない。沖の一樣水深部で強い入射段波(松富, 1985)となるのは貯水深 $h_U=16$ cmの場合だけである。また、本実験条件では植生は水没しない。縮尺は1/200を想定しており、本実験条件は周期7.5~9.1分の津波に相当する(松富ら, 1998)。この周期はバプア・ニューギニア津波のそれに近い(松富ら, 1999)。

図-4に貯水深が15cm、植生厚みが1061の場合の浸水深 h_1 と h_2 、跳水高 h_3 と流速 u_2 の経時変化例を示す。浸水深や流速に定常的な部分が存在することが判る。また、Lagoon内の跳水が複雑であることもうかがわれる。

3. 実験結果とその考察

本実験の範囲では千鳥配置の方が流勢の低減効果が強かった。しかし、枝葉が有る場合を除いて、格子配置と

表-1 実験条件

貯水深 h_U (cm)	11, 12, 13, 14, 15, 16
一樣水深 h_0 (cm)	6.7
Lagoon水深 h_L (cm)	1.0
地盤高 h_c (cm)	1.5
底面勾配 S	1/26
植生域長 L	(10, 30), 50
植生密度 κ (%)	0, 0.5, 1.0, 1.5, (3, 4, 5)
植生配置	千鳥, 格子
植生 ($d=2.4$ mm)	枝葉有 ($h_{tr}=2.5, 4$ cm), 無

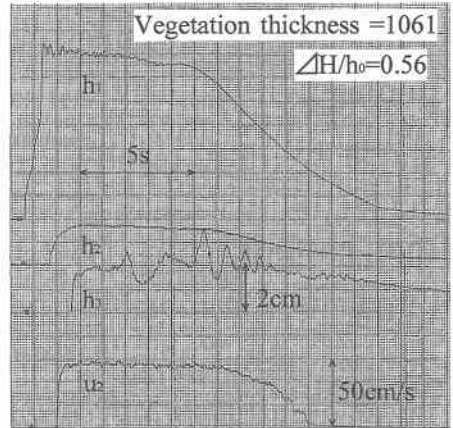


図-4 浸水深や流速などの経時変化例

h_1/h_{10} , h_2/h_{20} , h_2/h_1

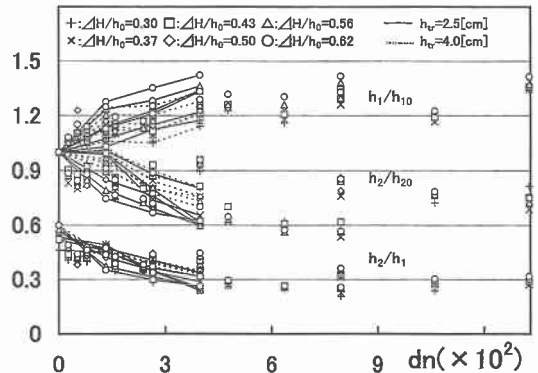
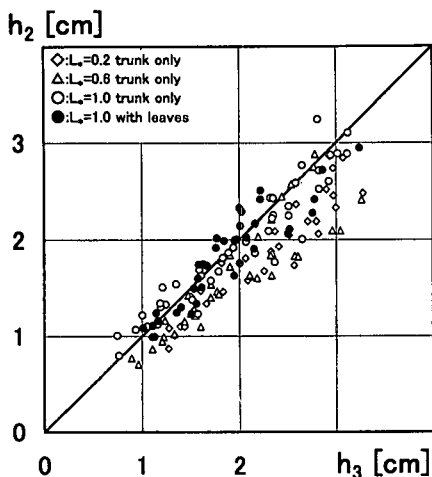


図-5 浸水深の植生厚みへの依存

の顕著な差が認められなかったもので、以下では千鳥配置の結果のみを示す。実験値は全て3回の平均である。枝葉が有る場合の差については機会を改めて公表したい。

3.1 浸水深

図-5に浸水深と植生厚み dn の関係を示す。図中、 $\Delta H/h_0$ は沖の一樣水深部での無次元入射段波波高(Stokerの理論値を採用)、2番目の下添字0は植生厚み

図-6 Lagoon 側浸水深 h_2 と最大跳水高 h_3 の関係

が 0 のものであることを示す。これらは以下の図でも同じである。図から、次のことが判断される。

① 海側浸水深 h_1 の植生厚みに対するまともりは比較的よいが、Lagoon 側浸水深 h_2 のまともりは悪く、植生域長 L の影響を強く受けている。これは植生厚み ($= 4\kappa L/\pi d = 100dn/B$) が植生域長の影響を十分に取り込んでいないことを示している。

② 実際の植生厚みの範囲では、植生の有無に関わらず、海側浸水深は最大で 40% 程度増加し、Lagoon 側浸水深は 40% 程度減少し得る。

③ Lagoon 側浸水深はほとんどの場合で海側浸水深の半分以下となる。

④ 入射段波が強くなるにつれて、植生による海側浸水深の増加率は大きくなり、Lagoon 側浸水深の低下率は小さくなる。また、両者の比 h_2/h_1 は大きくなる。

参考までに、同じ植生厚みの時、両浸水深とも植生域長の長い方が大きい傾向にあった。これは主に浸水深の測定場所に起因している。

図-6 に Lagoon 側浸水深と Lagoon 内の最大跳水高 h_3 の関係を示す。 L^* は $L=50$ cm で無次元化した無次元植生域長である。図から、Lagoon 内の最大跳水高は Lagoon 側浸水深と同程度になり得ることが判る。ただし、植生域長が短くなるにつれて、最大跳水高は Lagoon 側浸水深より大きくなる傾向にある。さらに、本実験条件での跳水位に関して、次の傾向が認められた。① 植生が無い場合、初めに短時間のピーク (段波) が現れ、後に定常的な水位の低いものが生じる。② 植生が有る場合、入射段波が強ければ、初めに定常的な部分が生じ、後に短時間のピークが現れる。一方、入射段波が弱ければ、定常的な部分のみが生じる。以上のように、Lagoon 内の流況はちょっとした条件の違いで大きく変わった。

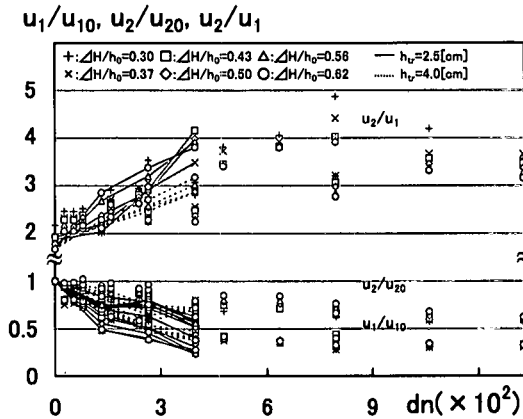


図-7 流速の植生厚みへの依存

植生域内の水面形は捨石防波堤内 (Patterson et al., 2000) などのそれと異なり、空隙が大きいためか、こぶ地形を越える流れの水面形 (Rouse, 1946) と同じで、上に凸であることも観察した。

3.2 流 速

図-7 に流速と植生厚みの関係を示す。図から、次のことが判断される。

① 海側流速 u_1 と Lagoon 側流速 u_2 の植生厚みに対するまともりは比較的よいが、両者の比のまともりは悪い。ただし、悪いと言っても浸水深比と同程度である。

② 実際の植生厚みの範囲では、枝葉の有無に関わらず、海側流速は最大で 70% 程度、Lagoon 側流速は 40% 程度減少し得て、減少は海側で著しい。

③ Lagoon 側流速はほとんどの場合で海側流速の 2 倍以上となる。

④ 入射段波が強くなるにつれて、植生による海側と Lagoon 側流速の減少率は小さくなる傾向にある。また、両者の比 u_2/u_1 は小さくなる。

参考までに、同じ植生厚みの時、 u_1 は植生域長の長い方が、 u_2 は植生域長の短い方が大きい傾向にあった。 u_1 の傾向は前述の h_1 の傾向と矛盾するかに思える。これらは植生厚みが同じ時、植生域長の短い方が氾濫流を透過させ難いこと (後述)、流量連続条件を用いて u_1 を評価していること、流速の測定場所などに起因している。

3.3 エネルギー損失

植生や底面摩擦などによるエネルギー損失割合 $\Delta E/E_1$ を図-8 に示す。ここで、 $\Delta E = E_1 - E_2$ 、 E_1 と E_2 は各々海側と Lagoon 側測点での比エネルギーである。図から、植生厚みが大きくなるにつれて、エネルギー損失割合が大きくなることは勿論であるが、① 浸水深や流速の場合に比べて、植生厚みに対するまともりがよいこと、② 底面摩擦によるエネルギー損失割合が 5% 程度と小さいこと、③ 植生によりエネルギーを 60% 程度減少さ

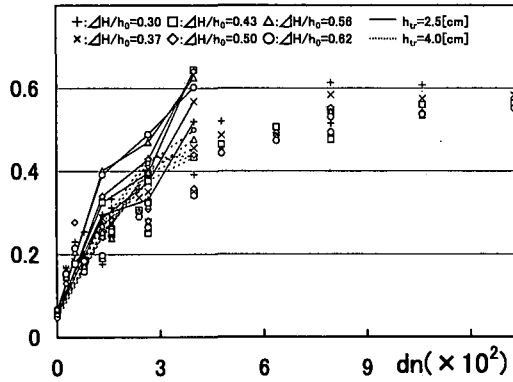
$\Delta E/E_1$ 

図-8 エネルギー損失割合の植生厚みへの依存

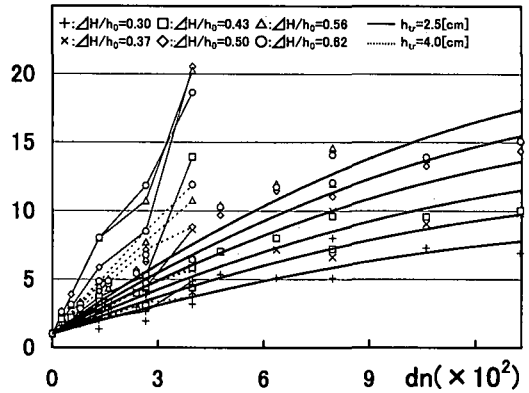
 n_s/n_0 

図-9 合成粗度係数の植生厚みへの依存

せ得ること、④入射段波が強くなるにつれて、植生によるエネルギー損失割合がやや小さくなることなどが判る。

参考までに、同じ植生厚みの時、エネルギー損失割合は植生域長の短い方が大きい傾向にあった。これは植生域長の短い方が氾濫流を透過させ難いことと整合する。

3.4 合成の粗度係数と抗力係数

簡便さを考えて、砂嘴と植生による摩擦力や抗力を分離せず、合成摩擦力または合成抗力という概念で議論を進める。こうすれば、合成粗度係数を求めることになり、既往の津波数値計算法（後藤・小川，1982）に植生の影響を容易に取り込むことができる。

一般に、定常流の底面摩擦力はエネルギー勾配 I を用いて次式のように表現される。

$$\tau_0 BL = \rho g I R L \quad (1)$$

ここで、 τ_0 は底面剪断応力、 B は植生域幅、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 R は径深である。陸上氾濫流速にマンニング式を用いることにすれば、底面摩擦力は

$$\tau_0 BL = \rho g n_0^2 h^{-7/3} (Q^2/B) L \quad (2)$$

ここで、 n_0 はマンニングの粗度係数、 h は浸水深、 Q は流量であり、 $R \approx h$ としている。

合成摩擦力 D を底面摩擦力のように表現することになれば、

$$D = \rho g n_s^2 h_T^{-7/3} (Q^2/B) L \quad (3)$$

ここで、 n_s は合成粗度係数、 h_T は陸上氾濫流の代表浸水深である。

一方、樹幹部で代表させた場合の合成抗力 D （＝合成摩擦力）は次式のように表現される。

$$D = \sum D_i = \sum \rho C_D u_i^2 h_i d / 2 \\ = \rho C_D N d (Q/B)^2 / 2 h_T \quad (4)$$

ここで、 C_D と C_b は各々の定義式における合成抗力係数、 N は植生の本数で、浸水深は合成摩擦力の場合と同じものを用いている。

植生密度 $\kappa(\%)$ 、 d 、 N 、 B 、 L 、 dn の間には次式の関係がある。

$$\kappa = 25 \pi d^2 N / BL = \pi (d/L) (dn) / 4 \quad (5)$$

式（5）を式（4）に代入すれば、植生厚みで表現した場合の合成抗力として次式を得る。

$$D = \rho C_D (dn) (Q^2 / B h_T) / 200 \quad (6)$$

式（6）は合成抗力または合成摩擦力が植生厚みと入射段波の強さに直接依存することを示している。

以上より、合成抗力係数と合成粗度係数の間には次式の関係がある。

$$C_D = 200 g L n_s^2 / (dn) h_T^{7/3} \quad (7)$$

代表浸水深 h_T には松富・大向（1999）の実験結果や汎用性（津波被害想定への利用）などを考慮して、海側浸水深 h_1 を採用すればよからう。既往の津波浸水深データから植生の合成粗度係数などを評価する場合には、Lagoon 側浸水深 h_2 を採用したものが必要とならう。ただし、海側浸水深が枝葉に達し、Lagoon 側浸水深が枝葉に達していない場合には、工夫が必要である。

運動量の定理を用いて合成摩擦力を、そして式（3）から合成粗度係数を評価し（ h_T として h_1 を採用）、植生厚みとの関係を検討したものが図-9 である。図から、当然のことながら、合成粗度係数は植生厚みが大きく、入射段波が強くなるにつれて、大きくなることが判る。植生が無い場合に比べて、20 倍程度にもなり得る。また、同じ植生厚みの時、植生域長が短くなるにつれて、合成粗度係数は大きくなった。これは、植生の幹径と本数が同じ時、植生域長の短い方が流れを透過させ難いことを示しており、その極限である不透過壁の場合を考えれば、妥当な結果と言える。

枝葉の合成粗度係数への影響は主に陸上氾濫流に対する遮蔽面積の増加という形を通して現れよう。沿岸方向 1 m 当たりの植生の遮蔽面積 A は、枝葉の投影を矩形と

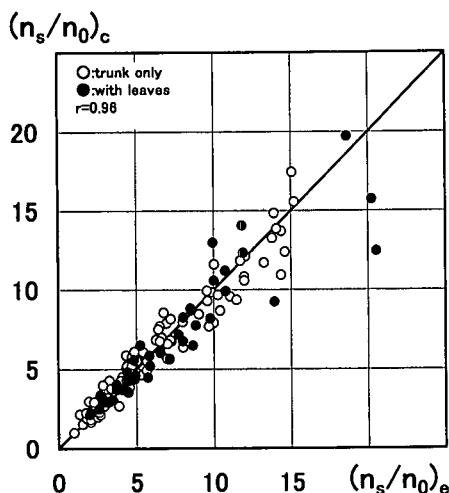


図-10 合成粗度係数の回帰値と実験値の比較

仮定すれば、次式に比例しよう。

$$A \sim \sigma(dn)\{h_T - (1-1/\sigma)h_{tr}\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 σ は枝葉の投影幅と幹径の比である。この遮蔽面積を樹幹部の投影面積の何倍かという見方で無次元化すれば、

$$\begin{aligned} \psi &= A/(dn)h_{tr} \\ &\sim \sigma(h_T/h_{tr})\{1 - (1-1/\sigma)h_{tr}/h_T\} \\ &\equiv \sigma(h_T/h_{tr}) \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ただし、本実験での $(1-1/\sigma)h_{tr}/h_T$ の値は最大と最小の平均で 0.3 程度ある。この項の省略は値が大きめで無理な感があるが、合成粗度係数の ψ への依存は 0.44 乗程度であり (式 (10) 参照)、それほど大きな影響を及ぼさない。式 (9) は枝葉の影響が近似的に (h_T/h_{tr}) で表現され得ることを示している。本研究では、枝葉の影響の表現にこの無次元パラメータを採用する。

枝葉が有る場合をも含めた千鳥配置の全データに対する合成粗度係数の回帰式として、次式を得た。

$$\begin{aligned} n_s/n_0 &= 1 + 0.11(dn)^{0.77}(\Delta H/h_0)^{1.20} \\ &\quad \cdot L_*^{-0.21}(h_T/h_{tr})^{0.44} \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

図-9 中の太い実線が $L_* = 1$, $h_T/h_{tr} = 1$ (枝葉部分は浸水していないと解釈) とした時の式 (10) である。また、回帰値と実験値の相関が図-10 で、縦軸が回帰値 (下添字 c)、横軸が実験値 (下添字 e) である。相関係数 r は 0.96 であり、植生厚みは合成粗度係数の記述により無次元パラメータと言える。また、枝葉の影響についても、本実験の範囲と用いた枝葉では、 (h_T/h_{tr}) で比較的良好に表現できることが判る。

4. む す び

砂嘴植生域を越える津波の基礎水理を首藤の無次元パ

ラメータ dn で検討した。紙数の都合で植生域長 L の影響などを明示できなかった。主な結論は次の通りである。

① 植生厚み dn は植生域長の影響を十分に取っ込んでいない面があるが、植生域を透過する津波の基礎水理を記述するのによい無次元パラメータである。

② 植生により、海側浸水深は最大で 40% 程度増加、Lagoon 側浸水深は 40% 程度減少し、Lagoon 側浸水深は海側浸水深の半分以下となる。

③ 海側流速は最大で 70% 程度、Lagoon 側流速は 40% 程度減少し、Lagoon 側流速は海側流速の 2 倍以上となる。

④ 植生により、津波氾濫流のエネルギーを 60% 程度減少させ得る。

⑤ 合成粗度係数 n_s の評価実験式 (10) とその合成抗力係数への換算式 (7) を得た。

⑥ Lagoon 内の最大の跳水高または段波高は Lagoon 側浸水深と同程度かそれ以上になり得る。

⑦ 植生が有る場合の浸水深は無い場合に比べて海側で大きくなり (海側の増大量 > Lagoon 側の減少量)、浸水深から見た植生は減災効果があるとは一概には言えない。しかし、流速は海側と Lagoon 側共に大幅に減少し、この面での減災効果は十分に期待できる。勿論、漂流物の阻止効果 (首藤, 1985, 1987) も期待できる。

謝辞：本実験を行うに当たり秋田大学大学院 大向達也君、望月章宏君、金光紀代太君、富樫宏二君及び秋田大学卒研究生 大塚忍さんの助力を得た。また、平成 11・12 年度科学技術庁振興調整費 (代表：京都大学教授 河田恵昭) の補助を受けた。記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 後藤智明・小川由信 (1982): Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科, p. 52.
- 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.
- 松富英夫 (1985): 下流側水深を有する場合のダム破壊流れについて, 土木学会論文集, pp. 79-86.
- 松富英夫・飯塚秀則 (1998): 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 361-365.
- 松富英夫・大向達也 (1999): 津波氾濫流の流体力に関する実験, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 336-340.
- 松富英夫・河田恵昭・首藤伸夫・都司嘉宣・藤間功司・今村文彦・松山昌史・高橋智幸・牧 紀男・韓 世燮 (1999): 1998 年パプアニューギニア津波の陸上での流勢と被害, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 376-380.
- Patterson, M. D., Peregrine, D. H. and Loveless, J. (2000): Water wave interaction with coarse sediment, Proc. 27th Internat. Conf. Coastal Eng., ASCE, Vol. 1, pp. 720-732.
- Rouse, H. (1946): Elementary Mechanics of Fluids, John Wiley & Sons, Inc., pp. 138-140.
- Shuto, N. (1987): The Effectiveness and Limit of Tsunami Control Forest, Coastal Eng. in Japan, Vol. 30, pp. 143-153.