

津波氾濫流の植生に作用する各種流体力

今井健太郎*・松 富 英 夫**・高 橋 智 幸***

津波氾濫流の植生に作用する流体力を対象に、流れに対して容易に変形する物体では抗力、慣性力と揺動による造波抵抗を考慮する必要があるとの立場から、Morison 式に線形造波抵抗項を付加して、各種流体力係数の変化特性や各種流体力の重要度などを実験を通して論じている。そして、主体的な流体力は抗力であり、慣性力は氾濫初期において最大抗力の 4～5 割程度、線形造波抵抗は其の後の準定常部分において特に重要で、最大抗力の 2 割程度に達し得ることなどを明らかにしている。

1. はじめに

1988 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、最大の犠牲者数と犠牲率を出したことである。また、南西太平洋地域の発展途上国においては、経済的かつ自然環境への配慮などの理由から、津波防災対策の一つとして沿岸域の植生が注目されている。

本研究は、これらの状況に鑑み、基礎研究として津波氾濫流の植生に作用する各種流体力の重要度などを、円柱物体に適用される Morison 式 (Morison ら, 1950) に物体 (植生) の揺動による線形造波抵抗項を付加して、実験的に評価することを目的とする。

2. 実 験

津波氾濫流はゲート急開流で模擬した。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、一様勾配斜面部と勾配を含めて連続的になるように設けた陸上部が 0.5 m (弦長)、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。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。

陸上部と Lagoon 部は勾配 $S=1$ の斜面で接続し、Lagoon 部の静水面位は沖の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。陸上部には樹幹高 $h_{tr}=1.5$ cm、直径 $d=2.4$ mm のアクリル棒と空隙率 $\lambda=(1-\text{枝葉の有効体積}/\text{枝葉を取り巻く直方体体積})=0.7$ 程度の枝葉 (以下、樹冠部とも呼ぶ) からなる模擬植生を設置した (写真-1)。図-2 に示す植生配置図は植生密度 $\kappa=(\Sigma \text{樹脂棒の断面積}/\text{植生域面積})=1.0\%$ 、植生域長 $L=0.5$ m の場合である。

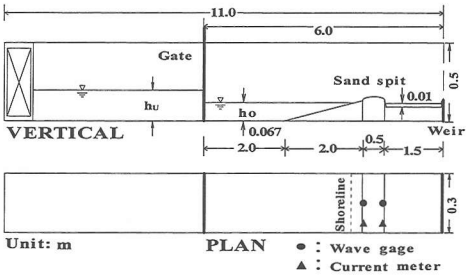


図-1 実験装置の概略

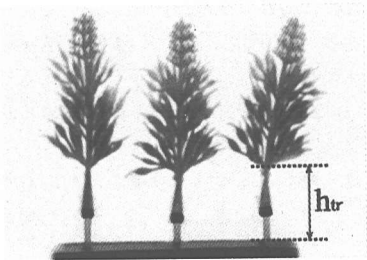


写真-1 模擬植生

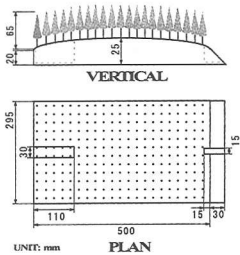


図-2 植生配置例 ($\kappa=1.0\%$)

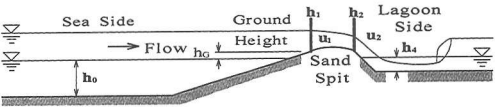


図-3 計測機器の配置や諸記号の定義

計測機器の配置や諸記号の定義を図-3 に示す。 h_G は静水面から砂嘴頂部までの地盤高、 h_1 は海側の浸水深、 h_2 は Lagoon 側の浸水深、 h_4 は Lagoon 部の静水深、 u_1

* 学生会員 修(工) 秋田大学大学院工学資源学研究所
** 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 博(工) 秋田大学助教授 工学資源学部土木環境工学科

は海側の流速, u_2 は Lagoon 側の流速である。浸水深の測定は容量式波高計(計測技研製), 陸上氾濫流速の測定は直径 3 mm 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, 蓋付きの水を満たした深さ 2 cm の箱の中に据えた。

表-1 に実験条件を示す。本条件は首藤(1985)の植生厚み dn (d : 植生の胸高直径, n : 沿岸方向 1 m あたりの植生本数) = 130~400 であり, 実際の沿岸植生に近いものである。また, 沖の一樣水深で強い入射段波(松富, 1985)となるのは貯水深 $h_u = 16$ cm からであり, $h_u \geq 18$ cm では植生域は完全に水没する。縮尺は 1/200 を想定しており, 本条件は周期 7.5~9.1 分の津波に相当する。この周期はパプア・ニューギニア津波のそれに近い(松富ら, 1999)。また, 本実験の入射段波周期 T は近似的に式(1)で評価される。

$$T = 8L_u / \sqrt{gk_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, L_u は貯水長, g は重力加速度である。

3. 植生に作用する各種流体力

(1) 換算直径

浸水深が樹冠部に達したときの植生の投影面積や体積を簡便に評価するため, 植生を円柱として扱うことを考える。植生の水面下体積を換算円柱体積として見積もるときの換算直径 d' は式(2)となる。

$$\frac{\pi d'^2}{4} h = (1-\lambda) \cdot b_w^2 \cdot (h - h_{tr}) + \frac{\pi}{4} d^2 h_{tr} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, h は浸水深, $b_w (= 3.0$ cm) は樹冠幅である。植生が完全水没する場合, 浸水深は植生高さとなる。

(2) 植生に作用する流体力と運動方程式

本研究では容易に変形する物体(樹幹や枝葉)を対象とし, その揺動に浮体の揺動の概念を用いる(例えば, 高山ら, 1980)。その際, 若干の工夫が必要である。

物体の揺動による流体力(線形造波抵抗力) F_w は流体から見た物体の揺動速度に比例し, 次式で与えられる。

$$F_w = \theta(u + u_{ob}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで, θ は線形造波抵抗係数, u は流速, u_{ob} は物体の揺動速度である。氾濫時の水表面部における植生の揺動速度について画像解析を行った結果, 氾濫流の規模やその時間的な変化(氾濫流先端部やその背後の準定常的な部分など)によるが, 概ね氾濫流速の 1~2 割程度であった。そこで, 植生の流体から見た揺動速度として近似的に流速を用いることにする。また, 揺動による造波抵抗は植生の表面積にも依存すると考えられるので, 換算直径及び浸水深で表面積を評価すると, 式(3)は次式となる。

$$F_w = \frac{\pi}{2} \rho \theta d' h u \quad \dots\dots\dots (4)$$

表-1 実験条件

h_u (cm)	11~21
h_0 (cm)	6.67
h_a (cm)	1.0
h_c (cm)	1.5
S	1/26
L (cm)	10, 30, 50
κ (%)	0, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 4.0, 5.0
Pattern	Staggered, Grid
Leaves	$h_{tr} = 1.5$ cm, $\lambda = 0.7$

ここで, ρ は水の密度, θ は植生に適用した時の線形造波抵抗係数で, 従来の線形造波抵抗係数 θ とは異なる。

造波現象に関係する要素として, 植生の種類, 特に幹部や枝部の剛性率や葉の付き方, それに付随して流れによる投影面積の変化(枝葉の変形)などが考えられるが, 本研究では簡便に評価できるよう, それらを一括して θ に含ませる。ただし, 本研究では模擬植生は 1 種類のみであり, しかも実際の樹木における樹冠部の空隙に比べて相当小さいものであることに注意を要する。

植生に作用する流体力は, 植生に作用する F_w を水深方向に一樣分布するとして, 直円柱に適用される Morison 式に付加することで表現されると仮定する。微少水深 dy 当たりの流体力 dF は式(5)となる。

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_D d' u^2 dy + \frac{\pi}{4} \rho C_M d'^2 \frac{\partial u}{\partial t} dy + \frac{\pi}{2} \rho \theta d' u dy \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで, C_D は抗力係数, C_M は質量係数である。

検査領域内の植生が式(5)の流体力を同じように受け持つと仮定し, 植生本数分を足し合わせると,

$$\Sigma dF = \frac{1}{2} \rho N C_D d' u^2 dy + \frac{\pi}{4} \rho N C_M d'^2 \frac{\partial u}{\partial t} dy + \frac{\pi}{2} \rho N \theta d' u dy \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, N は検査領域内の植生本数である。

式(6)を浅水理論の運動方程式に取り込み, 水深方向に積分すると, 式(7)を得る。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} \right) + g h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g n_0^2}{h^{7/3}} |q| q = -\frac{1}{2} N_u C_D d' h \left(\frac{q}{h} \right)^2 - \frac{\pi}{4} N_u C_M d'^2 \left(\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{q}{h} \cdot \frac{\partial q}{\partial x} \right) - \frac{\pi}{2} N_u \theta q d' \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで, q は線流量, N_u は単位面積当たりの植生本数, $C_M (= C_M - 1)$ は付加質量係数, n_0 は $\kappa = 0\%$ における Manning の粗度係数で, 実験結果に基づき 0.018 を採用する。

(3) 解析法

解析に用いる方程式は式(7)で、未知数は C_D , C_M , θ の3係数である。そこで、従来の解析手法(例えば、野路ら, 1993)にならい、微小時間では係数の変化は小さいと仮定し、物理量は実験から評価することにして、時間毎に互いに Δt 時間だけ隔てて未知数分の連立方程式を立て、それらを解くことで各係数の経時的な値を評価する。本研究では Δt として 0.01 s を採用する。

式(7)右辺の各種流体力を式(8)のように表現すると、時刻 t における連立方程式の行列は以下となる。

$$F(t) = C_D \bar{F}_D(t) + C_M \bar{F}_M(t) + \theta \bar{F}_W(t) \dots \dots \dots (8)$$

$$\{F(\bar{t})\} = \{F(t-\Delta t) \quad F(t) \quad F(t+\Delta t)\}^T \dots \dots \dots (9)$$

$$[B(\bar{t})] = \begin{bmatrix} \bar{F}_D(t-\Delta t) & \bar{F}_M(t-\Delta t) & \bar{F}_W(t-\Delta t) \\ \bar{F}_D(t) & \bar{F}_M(t) & \bar{F}_W(t) \\ \bar{F}_D(t+\Delta t) & \bar{F}_M(t+\Delta t) & \bar{F}_W(t+\Delta t) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $\bar{t}$ は評価対象時間である。式(9)と(10)から、 $\bar{t}$ における各係数は次式で与えられる。

$$\{C_D \quad C_M \quad \theta\}^T = \frac{1}{[B(\bar{t})]} [B(\bar{t})]^{-1} \cdot \{F(\bar{t})\} \dots \dots \dots (11)$$

4. 各種流体力係数

(1) 抗力係数

図-4 は抗力係数 C_D と段波下流域が静水状態時の Stoker 理論 (1948) による入射段波強度 $\Delta H/h_0$ の関係である。本図の C_D には準定常部分の時間平均値を採用している。図から、 C_D は植生密度 κ が大きくなるにつれて、小さくなるのが判る。 κ が大きくなるにつれて C_D が小さくなるのは、植生間隔と後流の復元距離が関係していると考えられる。植生間隔が大きく、後流域の影響外であれば、このような傾向は生じないものと考えられる。また、この傾向は従来の群杭流れと同じである。

植生が完全水没する前後 ($\Delta H/h_0 = 0.7 \sim 0.76$) 以降で、 C_D は一定となる傾向にある。これは、植生が完全水没するため、有効投影面積の変化がほとんどなくなり、しかも完全水没では大粗度を越えるような流れとなるためと考えられる。

$\Delta H/h_0$ の増加に伴って C_D が若干ではあるが減少するのは、単円柱における C_D とレイノルズ数の関係から考えて、従来の知見と一致するものである。

本実験範囲における C_D は 0.9~1.5 程度となり、単円柱における値と同程度かそれ以上となった。

(2) 質量係数

図-5 は質量係数 $C_M (=1+C_M)$ と $\Delta H/h_0$ の関係である。本図の C_M には加速度が大きい氾濫流先端部の時間平均値を採用している。図によると、 κ が大きくなるにつれて、 C_M は多少ばらつくが、小さくなる傾向にある。こ

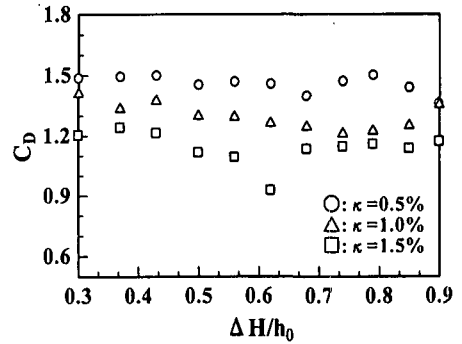


図-4 C_D と $\Delta H/h_0$ の関係

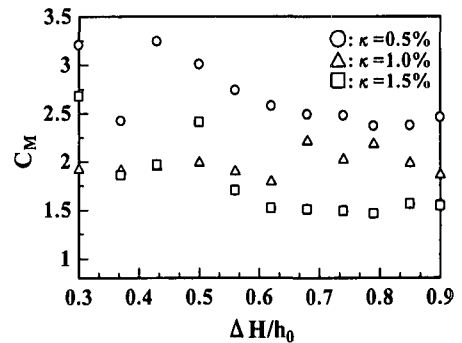


図-5 C_M と $\Delta H/h_0$ の関係

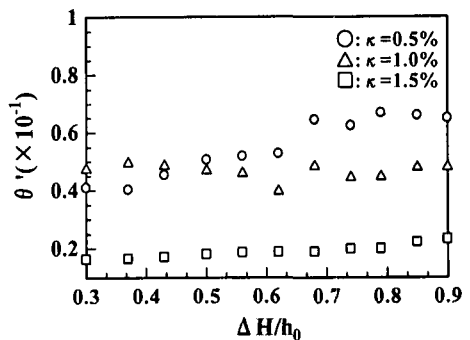


図-6 θ と $\Delta H/h_0$ の関係

れは C_D と同じく、植生間隔と後流の復元距離に関係していると考えられる。植生が後流域に入ってしまうと、前列の植生で慣性力が消散し、後続の植生では慣性力が低減されよう。また、 κ の増加(植生間隔の減少)に伴い、1本あたりの植生と流体の干渉が減少すると考えれば、この傾向は理解できることである。

単独円柱の場合、 C_M は水深・直径比 h/d の増加に伴い、減少していくことが様々な実験により確認されている(例えば、土屋ら, 1974)。本実験での換算直径は $\Delta H/h_0$ により樹幹部直径の 1~7 倍程度となるが、換算直径を κ 毎に一定と見なした場合、 $h/d \propto \Delta H/h_0$ となり、 $\Delta H/h_0$

の増加に伴って C_M が減少していくことは従来の知見と整合する。

本実験範囲における C_M は 1.5~2.5 程度となった。

(3) 線形造波抵抗係数

図-6 は線形造波抵抗係数 θ と $\Delta H/h_0$ の関係である。本図の θ には準定常部分の時間平均値を採用している。図によると、 θ は植生が完全水没するまでは $\Delta H/h_0$ の増加に伴い大きくなる傾向に、その後はほぼ一定の傾向にある。これは、植生高さまでは浸水深の増大とともに植生に作用する線形造波抵抗力が飛躍的に増加するが、それに比べて流速の増加割合が小さいためと考えられる。完全水没後は、線形造波抵抗力と流速の増加割合がほぼ同じとなり、一定になるものと考えられる。ただし、近似的に流速を用いて線形造波抵抗を評価しているため、より正確な議論を行うには、植生の揺動速度を精度よく測定する必要がある。

また、 θ は κ が大きくなるにつれて、小さくなる傾向にある。これは、本実験の $\kappa=1.0\sim1.5\%$ では植生間隔が非常に狭く、植生が相互に揺動を拘束してしまうためと考えられる。

本実験範囲における θ は 0.02~0.07 程度となった。

5. 各種流体力の作用割合

(1) 線形造波抵抗の妥当性

図-7 に入射段波強度 $\Delta H/h_0=0.62$ 、植生密度 $\kappa=1.0\%$ での線形造波抵抗力 F_w を考慮しない場合の抗力 F_{Dww} と考慮した場合の抗力 F_D 、そして F_w の経時変化を示す。図中の F_{Dmax} は F_w を考慮した場合の抗力の最大値で、各流体力は F_{Dmax} で無次元化している。時間については式 (1) の T で無次元化している。これらは以下でも同じである。

図によると、 F_{Dww} は F_D より 2 割程度大きい。一方、 F_w は F_D の 2 割弱であり、 F_w の考慮の有無でほぼ抗力のみが変化していることが判る。参考までに、 F_{Dww} での C_D は 1.53、 F_D での C_D は 1.26 である。氾濫が終息状態になると F_D 、 F_{Dww} 、 F_w の割合は変化し、 F_w が大きな割合を占めるようになる。これは、植生の揺動速度を近似的に流速で評価していることによると考えられる。しかし、植生に作用する流体力評価において、重要なのは氾濫初期とその後の準定常部分と考えられるので、揺動速度に流速を用いる方法は有効と思われる。

(2) 各種流体力の経時変化と割合

図-8(a), (b), (c) に $\Delta H/h_0=0.62$ 、 $\kappa=0.5, 1.0, 1.5\%$ での各種流体力の経時変化例を示す。図から、各種流体力の経時変化過程はやや異なるが、従来の結果と同じく(例えば、松富ら, 1999)、主体的に働く流体力は F_D で、慣性力 F_M は氾濫流先端部で最大となり、 κ によって

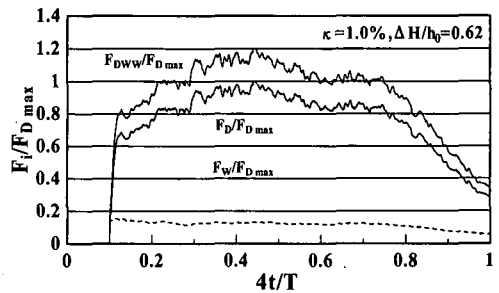
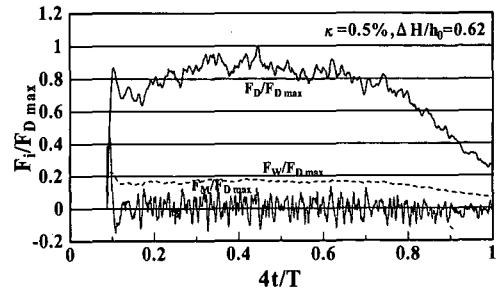
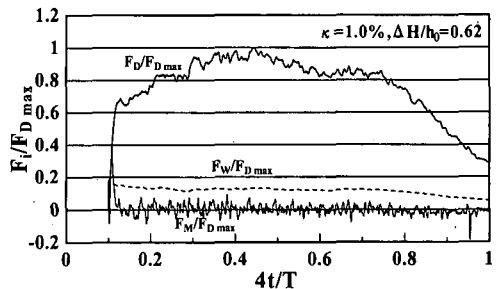


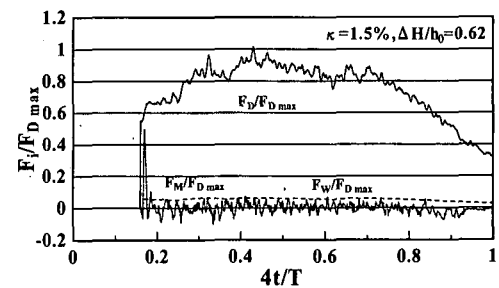
図-7 F_w の考慮の有無による流体力の経時変化例



(a) $\kappa=0.5\%$



(b) $\kappa=1.0\%$



(c) $\kappa=1.5\%$

図-8 各種流体力の経時変化

は F_{Dmax} を超えることもあるが、おおむね 4~5 割程度であることが判る。慣性力の評価に関しては検査領域や微小時間 Δt の選択問題がある。今後は検査領域を適切に選択し、実験値のサンプリング時間間隔をより細かくし、植生に作用する流体力の直接測定を行って、両者の

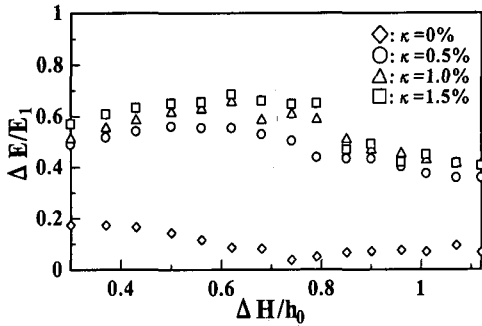


図-9 エネルギー損失割合と $\Delta H/h_0$ の関係

最適条件を検討する必要がある。

F_w は、 κ が比較的小さいとき、非定常・準定常に関係なく最大抗力の 2 割程度となり、準定常時の植生に作用する流体力は抗力と線形造波抵抗力が支配的となる。本実験での $\kappa=1.5\%$ は植生が相互に揺動を拘束してしまうほどの密集状態である。このことを考えると、 $\kappa=1.5\%$ で F_w の割合が小さいのも納得できる。各種流体力の割合の妥当性を確認するためにも、揺動による流体力を正確に評価することが今後の課題である。

6. 植生が完全水没する前後の水理特性

津波の規模によっては植生の高さを越える津波高を生じる場合もある。両者の相対高さによって、どの程度流勢を低減させ得るかを知らなくては重要と思われる。そこで、氾濫流に対して植生が完全水没する前後 ($\Delta H/h_0=0.7\sim 0.76$) での水理特性を、準定常時におけるエネルギー損失割合から議論する。

エネルギー損失割合は式 (12) で表せられる。

$$\Delta E/E_1 = (E_1 - E_2)/E_1 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 E_1 は海側のエネルギー、 E_2 は Lagoon 側のエネルギーである。図-9 はエネルギー損失割合と入射段波強度 $\Delta H/h_0$ の関係である。図から、 $\Delta H/h_0=0.70$ 付近でエネルギー損失割合のピークが生じ、その後減少していくことが判る。勿論、植生が完全水没する場合でも氾濫流のエネルギーを減勢させるが、効率良く減勢できるのは植生が完全水没する直前と言える。

7. おわりに

本研究で得られた主な結果は以下である。

①氾濫初期は抗力、慣性力、線形造波抵抗力の何れも無視できない。

②慣性力は氾濫初期で最大抗力の 4～5 割程度となり、その後の準定常部分では抗力と線形造波抵抗力が支配的となる。特に、植生密度 κ が小さいとき、線形造波抵抗力は抗力の 2 割程度となり、重要である。

③線形造波抵抗力を考慮した場合の植生の抗力係数 C_D は 0.9～1.5 程度、質量係数 C_M は 1.5～2.5 程度、線形造波抵抗係数 θ は 0.02～0.07 程度である。

④入射段波強度 $\Delta H/h_0$ の増加に伴った C_D の減少は、単円柱における C_D とレイノルズ数の関係を考えれば、従来の知見と一致するものである。

⑤ C_D , C_M と θ の κ への依存は、 κ が大きくなるにつれて減少する傾向にある。

⑥植生が完全水没する直前で効率良く氾濫流を減勢できる。

謝辞：本実験を行うに当たり秋田大学卒業研究生 金田一高成君と上野 繁君の助力を得た。平成 13・14 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。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 土屋義人・山口正隆 (1974): 直円柱に作用する全波力について, 土木学会論文報告集, 第 227 号, pp. 11-21.
- 高山知司・長井紀彦・菊池 治・諸石一幸 (1980): 大型矩形浮体の波浪中の動揺と保留力に関する研究 (第 1 報) 一模型実験による検討一, 港湾技術研究所報告, vol. 19, No. 3, pp. 71-104.
- 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.
- 野路正浩・今村文彦・首藤伸夫 (1993): 津波石移動計算の開発, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 176-180.
- 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 年バブ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.
- 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.
- Morison, J. R., M. P. O'Brien, J. W. Johnson and S. A. Schaaf (1950): The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Transaction, AIME, Vol. 189, pp. 149-154.
- Stoker, J. J. (1948): The formation of breakers and bores, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 1, pp. 1-87.