

津波の陸上流速とその簡易推定法

松 富 英 夫*・飯 塚 秀 則**

1. ま え が き

著者ら (1996a) は津波に伴う流木の衝突力に関する研究を行ってきており, 流木の漂流速度 ($\equiv$ 流速) が判れば, 衝突力を推定できる段階に達している。浸水深と家屋の被害程度の関係も現地調査してきており (松富ら, 1994, 1995, 1996b), 浸水深と流速の関係が判れば, 津波に対する家屋強度を力で議論できるようになる。津波陸上流速の現地データも収集してきているが (松富ら, 1993, 1994, 1995, 1996b), 調査法やデータの妥当性の検討が必要である。さらに, 阪神・淡路大震災以後, 国や多くの自治体で津波被害想定の見直しを行っているが, 波源や津波到達時間, 沿岸津波高, 浸水域, 浸水深, 打ち上げ高の見直し程度で, 個々の被害想定には立ち入れないでいる。この一因に陸上流速の推定が容易でないことが上げられよう。

以上を背景に, 本研究は現地調査, 実験と理論から陸上流速の特性を検討すると共に, 沿岸津波諸元から陸上流速を簡易に推定する方法を考案するものである。

2. 対象陸上流速

陸上流速として, 次の2つが考えられる。

①最大沿岸津波高時の波先端部: 局部的に大きな衝撃波圧 (主に部材強度に関係) が作用するが, 全波力 (滑動, 転倒に関係) はその背後の流れでの方が大きい (松富, 1988 a, 1991)。漂流物の移動速度も加速段階で, 構造物にとって危険側を想定することにはならない。

②①の背後の準定常的な部分: 全波力や浮力が大きいばかりでなく, 時間積分効果 (力積, 洗掘など) もある。

そこで, 本研究は構造物にとって危険側である②の流速を対象とし, 水平床でのものを論じることとする。

3. 陸 上 流 速

3.1 現 地 調 査

現地データは著者ら (1996 b) のものを用いる。これらの流速は平坦か, 周囲に比べてやや高所の頂部辺り, す

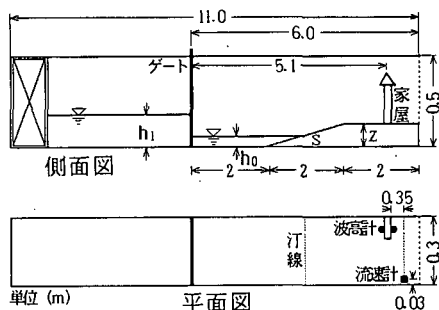


図-1 実験装置の概略

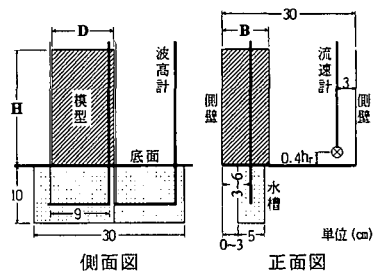


図-2 家屋模型と計測機器配置の概略

なわち海水が滞留し難い所に位置する家屋などで得られたもので, 流れ方向に見て, 家屋などの前面と背面に残された津波痕跡の高低差とベルヌーイの定理から評価されている。以下, 実験も含めて, この方法による流速をベルヌーイ流速と呼び, u_B と記すことにする。

3.2 実 験

津波は, 一様水深部とそれに続く一様斜面部を伝播した後, 平坦な陸上部を氾濫するゲート急開流れて模擬した。この模擬の妥当性は現地データとの対応性から検討する (3.4 d) 項参照)。実験装置の概略を図-1 に示す。貯水長 L_0 が 5 m, 一様水深部 (水深 h_0), 一様斜面部 (勾配 s), 水平陸上部がそれぞれ 2 m で, 全長が 11 m の両面ガラス張り鋼製矩形水路である。水路下流端の壁は撤去してあり, 氾濫流はそこを自由透過する。一様斜面部と水平陸上部は塩化ビニール樹脂製である。

家屋模型も塩化ビニール樹脂製で, 水平陸上部のほぼ中央の水路側壁に密着させて設けた。家屋模型諸元の定

表-1 実験条件

家屋(B×H×D)(cm)	10×11×17	5×10×12
開度λ(%)	67	83
斜面勾配S	1/100, 1/50, 1/30, 1/20	
一様水深 h_0 (cm)	1~10	
貯水深 h_1 (cm)	6~19	

義などを図-2に示す。

実験ケースを表-1にまとめて示す。開度 λ の定義は $\lambda=100 \times (1 - \text{家屋模型幅/水路幅})$ である。貯水深などの水深変化は1 cm ずつで、縮尺は1/200を想定している。ゲート急開流れでは、波周期 T と貯水長 L_0 、貯水深 h_1 、重力加速度 g の間にほぼ次式の関係が成立する。

$$T/4 \approx 2L_0/(gh_1)^{0.5} \dots\dots\dots (1)$$

よって、表-1に示す実験条件は周期約7~12分の津波を想定していることになる。

浸水深の測定は容量式波高計(計測技研製)、流速の測定はプロベラ流速計(直径3 mm, 中村製作所製)、流速評価は1点法で行った。流速計の底面からの設置高を決めるため、先ず浸水深のみを測定する実験を、引き続き流速をも測定する実験を行い、結局同一条件の実験を2回行った。これら測定機器の配置状況なども図-2に示す。

3.3 理 論

定常を仮定し、エネルギー損失を考慮した場合の水平床でのエネルギー保存則は次式である。

$$h_f \approx u^2/2g + h_r + h_L \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 h は水深、 u は流速、 h_L はエネルギー損失水頭で、添字 f と r は家屋などの前面と背面の区別を示す。

家屋などを過ぎる流れの形状損失係数 ξ を導入して、エネルギー損失水頭を次式のように定義すれば、

$$h_L \approx \xi u^2/2g \dots\dots\dots (3)$$

流速 u として次式を得る。

$$u \approx \{2g(h_f - h_r)/(1 + \xi)\}^{0.5} \\ = (1 + \xi)^{-0.5} u_B = C_v u_B \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 C_v は流速係数である。

式(4)の流速は次節に示すプロベラ流速計による測定流速 u_p と考えられる。よって、次式から家屋模型通過時の形状損失係数や流速係数が評価できることになる。

$$u_p/u_B \approx (1 + \xi)^{-0.5} = C_v \dots\dots\dots (5)$$

また、式(4)を変形すると次式群を得る。

$$h_f/h_r \approx F_r^2/2C_v^2 + 1 \dots\dots\dots (6)$$

$$u/(gR)^{0.5} \approx \{2C_v^2 F_r^2/(F_r^2 + 2C_v^2)\}^{0.5} (h_f/R)^{0.5} \dots\dots (7a)$$

$$u/(gR)^{0.5} \approx F_r (h_r/R)^{0.5} \dots\dots\dots (7b)$$

ここで、 $F_r = u/(gh_r)^{0.5}$ はフルード数、 R は津波打ち上げ高である。式(7b)から、流速はフルード数と浸水深の関数であることが判る。

3.4 総合的検討

a) 家屋の有無による流れの違い

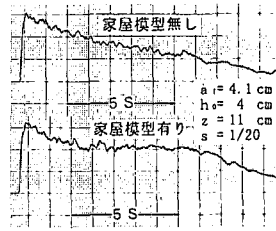
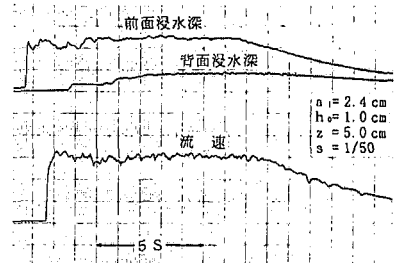


図-3 家屋の有無による流速の違い (λ=83%)

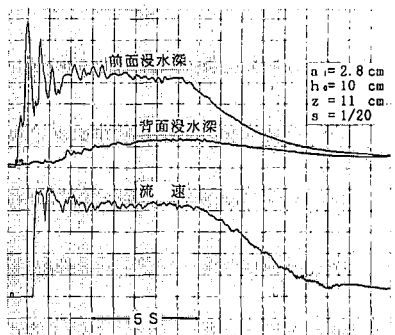
流れの発生条件や地形条件などは同じで、家屋の有無だけが異なる場合の流況の相違例を図-3に示す。図中、 a_1 は入射段波波高である。この図は流速に関するもので、上・下図の縦・横軸のスケールは同じであり、本実験では周期と流勢($F_r \approx 1.6$)がともに中程度に属するものである。図から、家屋の有の方が流速は大きく、準定常部分がより明瞭に現れるが、家屋前面から反射波が発生するなどのためか、流速が減少し出すと、それが急速に進行することが判る。図示はしていないが、家屋がある方では、流速が大きくなった分、それに対応して背面浸水深 h_r が小さくなったことを付記しておく。

b) 準定常部分の存在

図-4(a)と(b)に実験での浸水深と流速の代表的な時間波形例を示す。それぞれ流れ先端部が分裂しなかった場合とした場合である。図-4(a)は本実験では周期が長く、流勢が中程度の場合で($F_r \approx 1.6$)、流れ先端部背後に準定常的な部分が明瞭に認められる。図-4(b)は本実験では周期が短く、流勢が強い方($F_r \approx 1.9$)であるが、それでも背後にやや長い準定常的な部分が認められる。



(a) 分裂しない場合



(b) 分裂する場合

図-4 浸水深と流速の時間波形例 (λ=67%)

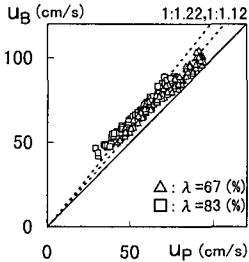


図-5 ベルヌーイ流速と測定流速の関係

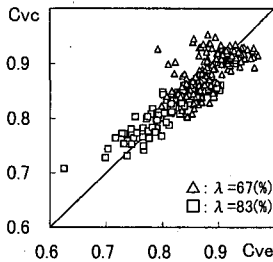


図-6 式(8)と実験値の比較

これらは、対象流速に対する定常性の仮定がほぼ妥当であることを示していると言える。

分裂波の場合、流れ先端部通過時に家屋前面で大きな浸水深が認められる。家屋へ作用する波力として、この時が最大かどうかは不明で、今後の検討課題である。分裂しない場合でも、流勢（フルード数）次第で、流れ先端部通過時に浸水深が大きくなる。この場合の浸水深は上方に投げ出される水塊によって形成されるもので、波力としては小さい（松富，1988a，1991）。

c) ベルヌーイ流速と測定流速の関係

実験でのベルヌーイ流速 u_B とプロベラ流速計による測定流速 u_p の関係を図-5 に示す。両者の間には一定差が生じる傾向にある。ただし、両者の測定場所が流下方向に 0.35 m 異なっていることに注意を要する（図-1 参照）。図中の点線は開度ごとの全実験データの平均差を示し、ベルヌーイ流速が平均的に 10～20% 程度大きいことを示している。このことは、①式(5)から理解されるように、本実験での家屋模型と開度での流速係数 C_v が 0.8～0.9 程度であること、②家屋などが密集した地域でない限り（福岡ら，1997）、対象流速をベルヌーイの定理で評価してほぼよいことを示している。

開度に関しては 2 種類のみであるが、本実験での流速係数の回帰式として次式を得る。

$$C_v = 0.27\lambda^{0.22}Fr^{0.40} \quad (8)$$

式(8)の計算値 C_{vc} と実験値 C_{ve} の比較を図-6 に示す。図から、式(8)が妥当な回帰式であることが判る。

図-7 に時々刻々（0.5 s 間隔）のベルヌーイ流速と測定流速の関係例を示す。図-4(a)に示したケースのもので、図中の矢印が大体の経時変化経路である。図によると、流れ先端部は非定常性が強いいためか、ベルヌーイ流速が測定流速よりも 5 割程度大きい。その差は、測定流

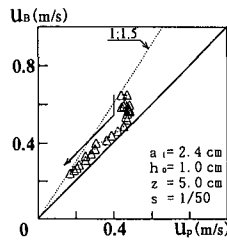


図-7 ベルヌーイ流速と測定流速の経時変化

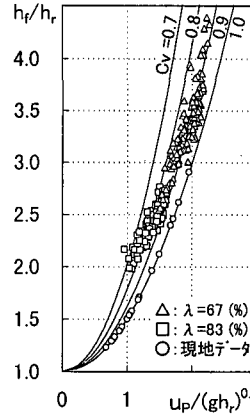


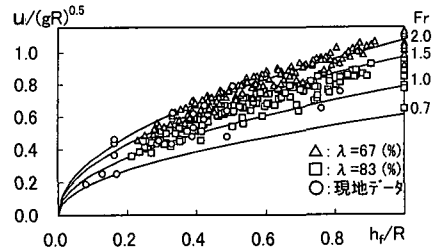
図-8 前・背面の浸水深比とフルード数の関係

速がほとんど変わることなく、時間と共に 1 割程度までに減少する。流速の減少部でも、非定常性が弱いいためか、1 割程度の差が維持される傾向にある。よって、ベルヌーイ流速と測定流速の一致度は、流れ先端部を除いて、どの段階でも比較的良好と言える。

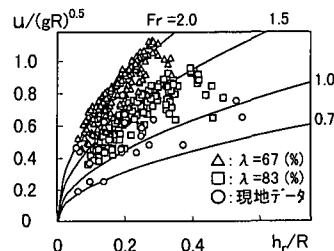
d) h_f と h_r の関係

式(6)によれば、前・背面浸水深比 h_f/h_r はフルード数に依存する。現地調査と実験での両者の関係を図-8 に示す。図中、○は現地データ、△と□は実験データ、実線は式(6)である。これらの記号分類は本論文を通して一貫させてある。現地調査の流速はベルヌーイ流速で、流速係数に依存せず、 $C_v=1$ 上にプロットされる。図によると、現地調査と実験の h_f/h_r やフルード数に重複部分が認められる。これは、ピーク時の津波氾濫はゲート急開流れで模擬してよいことを示している。

津波とゲート急開流れの h_f/h_r やフルード数の上限値は異なると思われる。今のところ、津波のそれは不明である。これまでの現地調査津波の h_f/h_r は最大で 2.9、フルード数は 2 弱である（松富ら，1996b）。



(a) 前面水深を浸水深とした場合



(b) 背面水深を浸水深とした場合

図-9 流速と浸水深の関係

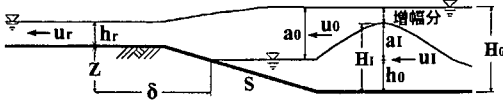


図-10 陸上流れと沿岸津波諸元の関係

e) 浸水深と流速の関係

現地調査，実験，理論に基づく浸水深と流速の関係を図-9(a)と(b)に示す。図-9(a)は前面浸水深でまとめたもので，津波来襲後などは前面浸水深が目立ち，得易いことから，既往津波の流速推定に適しよう。図-9(b)は背面浸水深でまとめたもので，想定津波ではこの浸水深が推定されることから，想定津波の流速推定に適しよう。各図中の実線群は $C_v=0.9$ とし，フルード数をパラメータとした時の式(7a)と(7b)である。これらの理論式が現地や実験データをよく説明していることが判る。各図中の最も外側の実線は，これまでの現地データを危険側で包絡するもので，それぞれ次式である。

$u/(gR)^{0.5} \cong 1.1(h_r/R)^{0.5} \dots\dots\dots (9a)$

$u/(gR)^{0.5} \cong 2.0(h_r/R)^{0.5} \dots\dots\dots (9b)$

4. 陸上流速の簡易推定法

式(7b)から理解されるように，浸水深 h_r とフルード数 F_r が判れば，陸上流速 $u=u_r$ が推定できる。よって，浸水深やフルード数が沿岸津波諸元から推定されれば，面倒な陸上氾濫計算を行うことなく，沿岸津波諸元から陸上流速が推定できることになる。そこで，本章では図-10に示す理想的な地形域を対象として，①入射津波高 a_1 と沿岸津波高 a_0 が判る場合，②沿岸津波高と浸水深が判る場合の陸上流速の簡易推定法を考案する。

4.1 入射津波高と沿岸津波高が判る場合(推定法I)

最大の沿岸津波高が生じた時の波峰から陸上部を考え，この部分の流れは定常的と仮定すれば，エネルギーと質量の保存則として次式を得る。

$z+h_r+u^2/2g+f(\delta/h_r)u^2/2g \cong H_0+u_0^2/2g \dots\dots (10)$

$h_ru \cong H_0u_0=(h_0+a_0)u_0 \dots\dots\dots (11)$

ここで， z は陸上と沿岸地盤の高低差， $f=2gn^2/h_r^{1/3}$ は摩擦損失係数， n はマンニングの粗度係数， δ は初期汀線から対象陸上地点までの距離， h_0 と u_0 は沿岸津波高が推定される地点での静水深と沿岸津波高生起時の流速である。そして，式(10)と(11)を基本式として，浸水深とフルード数は次の手順で推定される。

①波の非線形性を無視して，反射率 K_r を求める。

$K_r=a_0/a_1-1 \dots\dots\dots (12)$

②沿岸での流速 u_0 と流量 Q_0 を次式から求める。これらは波の非線形性を若干考慮したものとなっている。線形理論によるものより，こちらの方が適用度が高い。

$u_0 \cong 2\{g(h_0+a_1)\}^{0.5}-2\{g(h_0+K_ra_1)\}^{0.5} \dots\dots (13)$

表-2 計算条件

項目	諸 元		
Δx (m)	25に固定		
Δt (s)	1に固定		
h_0 (m)	10に固定		
z (m)	11に固定		
T (分)	10, 20, 30, 40, 50, 60		
S	1/25	1/50	1/100
δ (m)	50, 100, 300, 500	100, 300, 500	300, 500
a_1 (m)	1.0, 1.5, 2.0, 2.5	1.5, 2.0, 2.5	1.0, 1.5, 2.0, 2.5

$Q_0=H_0u_0 \dots\dots\dots (14)$

③式(10)と(11)から，陸上流速式(15)を導く。

$u \cong \{2g(H_0-z-h_r)/(1+2gn^2\delta/h_r^{1/3}-h_r^2/H_0^2)\}^{0.5} \dots\dots\dots (15)$

④ h_r を $(H_0-z) \rightarrow 0$ と変化させ，流量 Q を求める。

$Q=h_r\{2g(H_0-z-h)/(1+2gn^2\delta/h_r^{1/3}-h_r^2/H_0^2)\}^{0.5} \dots\dots\dots (16)$

⑤流量連続条件 $Q_0=Q$ から， h_r と u を特定する。

⑥ $Q_0=Q$ となる Q が存在しない場合，本方法は適用外と考える。

4.2 沿岸津波高と浸水深が判る場合(推定法II)

浸水深が既知であるから，フルード数のみを推定すればよい。基本式は前節と同じ式(10)と(11)で，フルード数の評価式として次式を得る。

$F_r \cong \{2(H_0-z-h_r)/h_r(1+2gn^2\delta/h_r^{1/3}-h_r^2/H_0^2)\}^{0.5} \dots\dots\dots (17)$

4.3 推定法の検討

一般に，津波被害想定時の数値計算から得られる沿岸流速 u_0 は多方向波の合成結果で，向きが真反対の入射波と反射波によるものではないし，汀線に直角なものでもない。よって，上記2方法による陸上流速は危険側を想定した場合のものであることに注意を要する。

上記2方法の有効性を検討するため，図-10に示す地形条件下の一次元津波氾濫計算を行った。計算に用いた基本式は摩擦を考慮した浅水理論で，計算法はリープ・フロッグ法である。陸上での流れ先端条件は著者らのもの(1982)を用いることにし，その際の流れ先端での無次元打ち切り水深(= $\Delta h/\Delta x$)の値として 1.0×10^{-3} を採用した(松富，1988b, 1990)。ここで， Δh は打ち切り水深， Δx は空間格子間隔である。マンニングの粗度係数 n は陸域で0.05，海域で0.01(m, s単位)を採用した。その他の計算条件は表-2に示す通りである。表中， Δt は時間格子間隔である。初期入射波形 η_1 は斜面法先から押し始める正弦波を与え，流速は次式で評価した。

$u_1 \cong 2\{(gH_1)^{0.5}-(gh_0)^{0.5}\} \dots\dots\dots (18)$

ここで， $H_1=h_0+\eta_1$ である。沖側と陸側の境界は計算時間内に反射波や流れ先端が到達しない程の沖側(斜面法先から19km)と陸側(斜面法先から6km)に設けた。

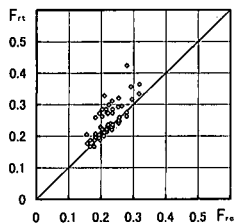


図-11 推定と計算フルード数の比較 (推定法 I)

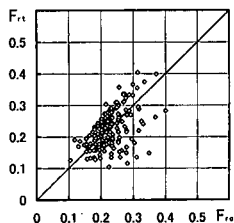


図-12 推定と計算フルード数の比較 (推定法 II)

ただし、計算は対象陸上地点を 1 波目のピークが通過した時点で打ち切っており、計算の浸水深やフルード数はこの時点のものである。一方、計算の沿岸津波高は斜面法先でのもので、この生起時と計算打ち切り時には差がある。

a) 推定法 I

推定フルード数 F_{r1} と計算フルード数 F_{r0} の比較を図-11 に示す。図によると、推定値は計算値の 1~1.5 倍の間に分布している。本方法は、①推定値は一般に危険側に推定された方がよいこと、②計算値は数値粘性などにより小さめに評価されている可能性があることなどを考えると、有効と言えよう。ただし、図-12 との比較から判るように、推定値が存在する条件が限られている。その条件は、定性的には周期が長く、初期汀線から対象陸上地点までの距離が短く、斜面勾配が急な時である。

b) 推定法 II

推定フルード数と計算フルード数の比較を図-12 に示す。図によると、両者の一致度はあまりよくない。数値粘性などにより計算値が小さめに評価されている可能性があるにもかかわらず、推定値が極端に小さい場合がある。推定値が計算値より小さい場合、本方法は適用外と考えるべきであろう。

そこで、その判定式を得るため、推定値と計算値の比の回帰式を求めることにし、結果として次式を得た。

$$(F_{r1}/F_{r0})_{r=0.67}(\delta/h_0)^{0.22}(\sigma/s)^{-0.14}s^{0.14} \dots\dots\dots (19)$$

ここで、添字 r は回帰式を示し、 $\sigma=2\pi(h_0/g)/T$ は無次元角周波数である。式 (19) とその基になったデータとの比較を図-13 に示す。参考までに、式 (19) の計算値のデータ値に対する標準偏差は約 0.14 である。図から明らかなように、式 (19) はデータ値に対して下に凸の傾向を示し、近似度のよい回帰式とは言えない。しかし、どのような条件の場合に式 (17) が適用できるかの判定に

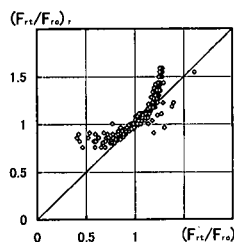


図-13 式 (19) とデータの比較

は利用できる。式 (19) に津波諸元や地形条件などを代入して計算を行い、その値が 1 より大きい場合は式 (17) でフルード数を推定してよいと判定するのである。よって、式 (17) が適用できるかどうかの判定式は次式となる。

$$(\delta/h_0)^{0.22}(\sigma/s)^{-0.14}s^{0.14} > 1.5 \dots\dots\dots (20)$$

式 (20) は周期と初期汀線から対象陸上地点までの距離が長く、斜面勾配が急な時に式 (17) の適合度がよいことを示している。定常性の仮定のことを考えると、陸上距離が長い時に適合度がよいというのは少し奇異である。これは浸水深が予め判るとしていることによる。

5. む す び

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

①対象陸上流速の評価式として式 (7)、その式に含まれた流速係数の評価式として式 (8)、危険側を想定した時の簡便式として式 (9) を得た。

②家屋などの前・背面での浸水位差とベルヌーイの定理を用いて対象陸上流速を推定する方法は、家屋などが密集した地域を除けば、津波の場合でも有効である。

③沿岸津波諸元から対象陸上流速を推定する 2 方法を示した。入射津波高と沿岸津波高が判る場合の推定法は周期が長く、初期汀線から対象陸上地点までの距離が短く、斜面勾配が急な時に、沿岸津波高と浸水深が判る場合の推定法は周期と初期汀線から対象陸上地点までの距離が長く、斜面勾配が急な時に有効である。

謝辞：実験に際し、東北工業大学の高橋敏彦先生の御援助を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 福岡捷二ら (1997): 家屋群に作用する氾濫流の流体力に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 41 巻, pp. 693-698.
- 松富英夫 (1982): 津波の二次元遡上計算, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 85-89.
- 松富英夫 (1988a): 砕波段波衝突による衝撃波力について, 土木学会論文集, No. 399, pp. 147-155.
- 松富英夫 (1988b): 陸上氾濫計算での打ち切り水深について, 東北地域災害科学研究, 第 24 巻, pp. 13-18.
- 松富英夫 (1990): 仮想水深法, 打ち切り水深法による陸上氾濫計算の精度に関する一考察, 東北地域災害科学研究, 第 26 巻, pp. 63-65.
- 松富英夫 (1991): 砕波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 626-630.
- 松富英夫 (1993): フローレス島東北部の津波とその被害, 月刊海洋, 海洋出版, Vol. 25, No. 12, pp. 756-761.
- 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.
- 松富英夫ら (1995): 1994 年東ジャワ地震津波の現地調査, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 346-350.
- 松富英夫・池田弘樹 (1996a): 大規模実験に基づく流木衝突力の評価法, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 781-785.
- 松富英夫ら (1996b): 1996 年イリアンジャヤ地震津波とその被害, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 311-315.