

# 荒天時の遡上波高きの沿岸分布

## Longshore Characteristics of Wave Run-up under Stormy Condition

武若 聡<sup>1</sup>・ジャヒド ハッサン<sup>2</sup>

Satoshi TAKEWAKA and G. M. Jahid HASAN

An X-band nautical radar system was employed to examine wave run-up during a typhoon around the research pier HORS in Hasaki, Japan. Analyses on radar echo images were done to estimate temporal and spatial variations of water fronts by manual digitizing of cross-shore time stack images. Digitized instantaneous water fronts were validated with wave gauge measurements with an acceptable agreement. Long-shore distribution of mean shoreline positions and intertidal foreshore slopes were then estimated using time averaged images. Run-up, the height of discrete water level maxima, was estimated from the digitized water fronts with the help of foreshore profile. Run-up variations were parameterized with surf similarity parameter. Low frequency variances in run-up motion were observed, which were traveling in the longshore.

### 1. 緒言

高波浪時の前浜地形の変化を理解するためには、遡上波の挙動について知る必要がある。本研究では、台風通過時に取得されたXバンドレーダ画像の解析を行い、前浜地形、遡上波形、遡上高さとして surf similarity parameter の関係、遡上波の長周期成分の沿岸方向伝播状況を調べた。

遡上波の高さ(遡上高)  $R$  はある基準から測った遡上波の最高到達高さであり、これを沖波の波高  $H$  で無次元化した量  $R/H$  は以下の線形の関係式

$$R/H = c\xi + d \quad (1)$$

により整理されることが多い。ここで、 $\xi$  は surf similarity parameter (Iribarren・Nogales, 1949),  $c$  と  $d$  は回帰係数である。 $\xi$  は砕波に関連する事象の整理に用いられるパラメータであり、

$$\xi = \tan \beta / (H/L)^{1/2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\tan \beta$  は海底勾配、 $L$  は沖合の波長である。遡上波の挙動は、 $\xi$  が小さい時には散逸的な状況 ( $\xi < 0.3$ , dissipative condition, 入射波の大半が砕波する)、大きい時は反射的な状況 (reflective condition, 入射波が砕波せずに反射する) に分類して議論される。 $c$  と  $d$  については各地の観測サイトにおける報告があり、散逸的条件、反射的条件などに依存して値が異なる (例えば、Ruessinkら, 1998; Ruggieroら, 2001)。

本研究は  $\xi$  がおおそ0.3以下の、いわゆる散逸的な条件下の遡上を観測した結果を解析し、遡上変動の周波数特性、遡上高さ、これと潮位、入射波高、前浜地形などとの関係を調べ、さらに、沿岸方向に伝わる長周期遡上波の伝播特性について述べる。

### 2. 観測の概要

表-1 解析時間帯の入射波浪(鹿島港)と潮位(銚子漁港)

時間帯	波浪(有義値)			潮位
	波高 [m]	周期 [s]	波向 [deg]	D.L. [m]
2005/07/26 22h	3.69	12.1	33	1.21
2005/07/27 00h	3.46	12.9	34	0.86
2005/07/27 02h	2.85	12.9	36	0.60

Xバンドレーダレーダ観測は、茨城県神栖市にある港湾空港技術研究所の波崎観測棧橋HORSで行った (Takewaka, 2005; Hasan・Takewaka, 2007)。図-1にレーダと棧橋の位置関係と以降の説明に用いる座標系、波向の定義を示す。座標系の原点は棧橋上にあり、沿岸方向に  $x$  座標、岸沖方向に  $y$  座標を設定する。

沿岸方向約5560 m、岸沖方向約2780 mの範囲のエコーデータを2秒毎にレーダデータサンプリングボードを通じてPCに収録した。エコーデータは1024×512ピクセル、1ピクセルあたり256階調のエコー画像として記録した。1ピクセルの大きさは約5.4 mに相当し、輝度がエコーデータの相対的な強度に対応する。画像中の高輝度領域には波峰が存在し、これらの移動を追跡することにより波の伝播と遡上の状況を知ることができる。

棧橋に沿って波高計アレイ (Mizuguchi・Seki, 2007) が設置されており、この測定記録からレーダによる遡上波観測の妥当性を検証した。各波高計の設置位置は図-1に示されている。

レーダ観測は2005年7月26日、27日に台風7号が鹿島灘の沖合を通過した時に行った。解析の際には、鹿島港 (NOWPHAS (ナウファス)、設置水深24 m、港湾空港技術研究所 海象情報研究室、参照2008-05-01) で観測された有義周期・波高・波向、銚子漁港で観測された潮位 (気象庁観測) を参照する。台風通過時の波浪の屈折状況、周波数スペクトルの空間変化などの詳細はHasan・Takewaka (2007)にある。本研究では、波高と潮位が異なる時間帯 (2005年7月26日22時、27日0時、2時) の遡上波の解析を行う (表-1)。

1 正会員 工博 筑波大学准教授 大学院システム情報工学研究科  
2 博(工)Shahjalal科学技術大学 講師

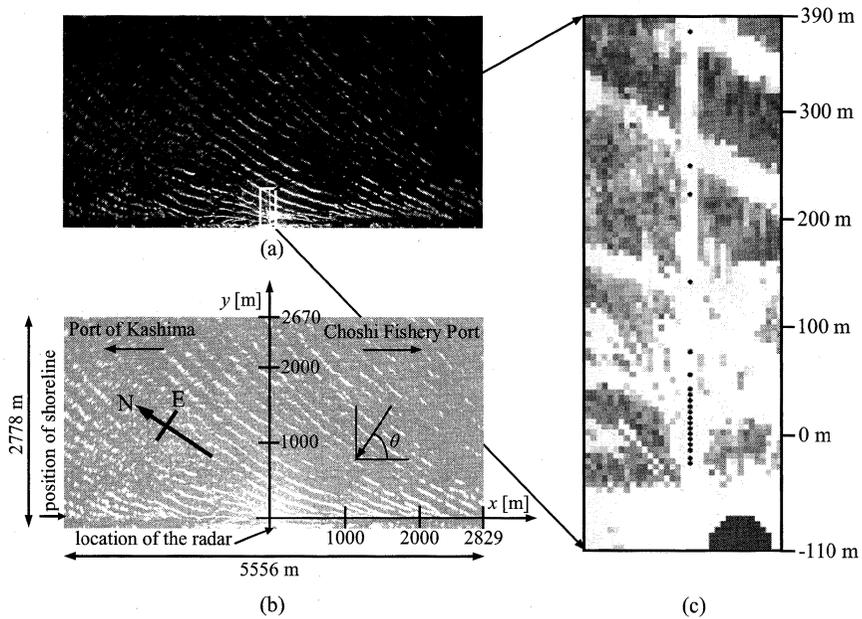


図-1 (a) レーダ画像, (b) 座標系と波向 $\theta$ の定義, (c) 栈橋沿いに設置された波高計アレイ (設置位置・)

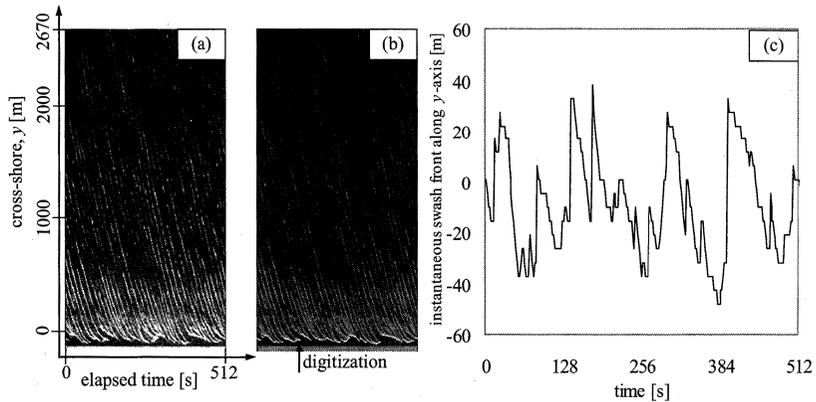


図-2 (a) 岸沖ライン画像 ( $x=-166\text{m}$ ), (b) 波遡上端の読み取り, (c) 波遡上端位置  $S(x, t)$  の時間変動

### 3. 遡上波先端の読み取りと遡上波高さの時間変動

Xバンドレーダ画像には、個々の波が前浜を遡上する状況が捉えられており、これから遡上波先端の水平位置を読み取った。また、Xバンドレーダ画像を平均化した平均画像と潮位の観測結果から前浜の断面形状を推定した。これらのデータを組み合わせて遡上波先端の鉛直位置を求める。

#### (1) 遡上波の先端位置の読み取り

2秒毎のレーダ画像から、ある沿岸位置における岸沖方向の輝度分布を取り出し、時間方向に並べた画像を作成した(岸沖ライン画像、図-2(a))。画像の縦方向は岸沖方向、横方向は時間経過に対応し、画像上部(沖)か

ら画像下部(岸)右下方に延びる斜めの線が、波峰の岸向き伝播を表す。個々の斜線の傾きが波の岸沖方向進行速度に、隣り合う斜線との横方向間隔が波の周期に相当する。入射した波の岸沖方向伝播速度が浅水変形により徐々に小さくなること、個々の波の遡上最高点を迎える位置、遡上帯で斜線が交わる波の追いつきや合体があることなどが読み取れる。

各沿岸位置 ( $-1425\text{m} < x < 1603\text{m}$ , ただし栈橋付近の領域はレーダ反射が飽和しているために除く)で岸沖ライン画像を作成し、遡上波の先端位置  $S(x, t)$  を読み取った(図-2(b))。ここで  $S$  は遡上先端の岸沖位置、 $x$  は沿岸位置、 $t$  は時間である。図-2(c)に  $x=-166\text{m}$  地点における遡上波先端位置の時間変動を示す。

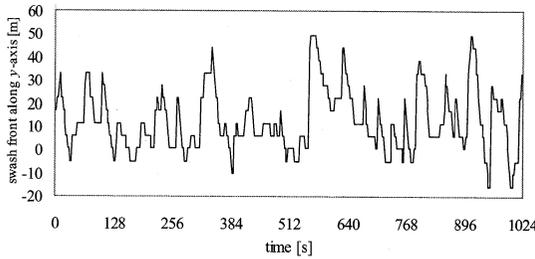


図-3 Sの時間変動(実線)と波高計アレイにより検知した海水の有無(-)( $x = -47$  m, 2005/07/27 02h)

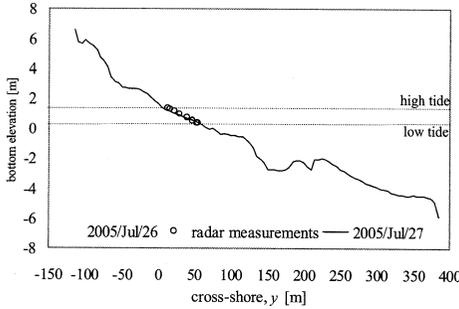


図-4 栈橋沿いの海底地形(実線)とレーダにより推定した前浜地形(○)

Sの読み取り精度を、栈橋沿いに設置された波高計アレイの観測結果と比較して検討した(図-3)。波高計アレイは波の遡上域にあり、その観測結果から波高計下に海水が存在する時間を求めた。図に海水が存在した位置と時間を図中に「-」で示した。レーダから読み取った波遡上位置Sは、波が遡上する時の対応は良好であるのに対して、波が打ち下がる時の一致は悪い(例えば、時間544~576sにかけての変動)。波の遡上と打ち下げは放物運動として近似できるが(例えば、Shen・Meyer, 1963)、レーダの観測結果から読み取った結果はのこぎり刀状であり、打ち下げ運動を捉え切れていない。

(2) 遡上波高さの時間変動

潮位の異なる時間帯に取得したレーダ画像を平均化した平均画像から、各時間帯の平均水際位置を読み取った。これは、該当の時間帯のSの時間平均 $S_m$ と等価な量である。平均水際位置(水平座標)と銚子漁港で観測された潮位(鉛直座標)に放物線をあてはめ、前浜地形 $h(x, y)$ を推定した(Takewaka, 2005)。ここで、 $h$ は潮位が変化する領域の前浜地盤高さ、 $x$ は沿岸位置、 $y$ は岸沖位置である。図-4は前浜地形の推定結果を栈橋沿いの測量結果と比較したものであり、前浜地形の推定は良好になされている。

遡上波先端位置 $S(x, t)$ の鉛直高さ $R_f(x, t)$ を前浜地形の推定結果 $h(x, y)$ から求めた：

$$R_f(x, t) = h(x, S(x, t)) \quad (3)$$

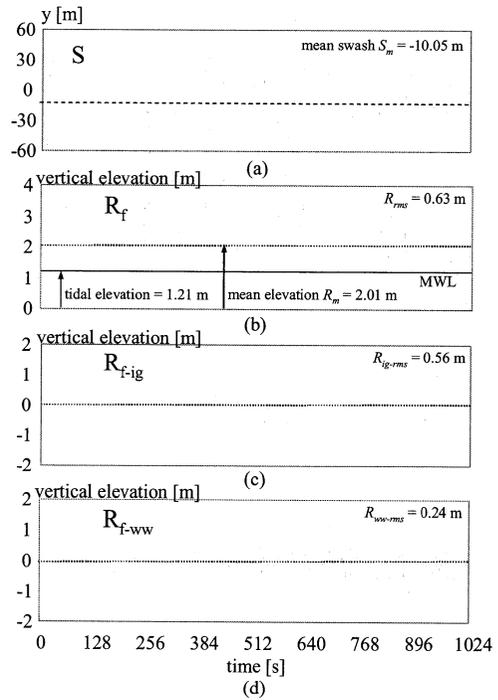


図-5  $x = -166$  m, 2005/07/26 22hにおける (a) Sの時間変動 (b)  $R_f$ の時間変動, (c)  $R_{f-ig}$ の時間変動, (d)  $R_{f-ww}$ の時間変動

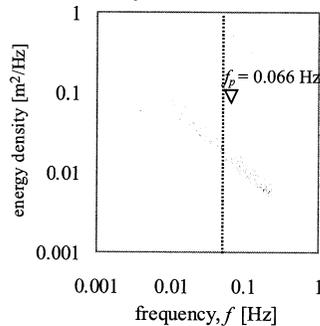


図-6 各観測時間帯の $R_f$ スペクトルの沿岸平均  $f_p$ : 沖合波浪の卓越周波数

図-5(a), (b)に $x = -166$  mにおけるSと $R_f$ の時間変動を示す。図-5(b)の $R_m$ はRの時間平均値である。

FFTで求めた $R_f$ の周波数スペクトル(沿岸平均)を図-6に示す。0.006 Hz付近(約170s)に顕著なピークが見られた。一方、卓越入射波の周波数付近(おおよそ0.066 Hz, 15s)のエネルギー分布はピーク構造の無い分布となっており、遡上域では風波成分のほとんどが碎波減衰した状況、いわゆる、散逸的な状態(dissipative beach condition)にあったと推定される。

先に示した周波数スペクトルを参考にし、 $R_f$ を周波数0.004~0.05 Hzの長周期成分 $R_{f-ig}$ 、0.05 Hz以上の周波

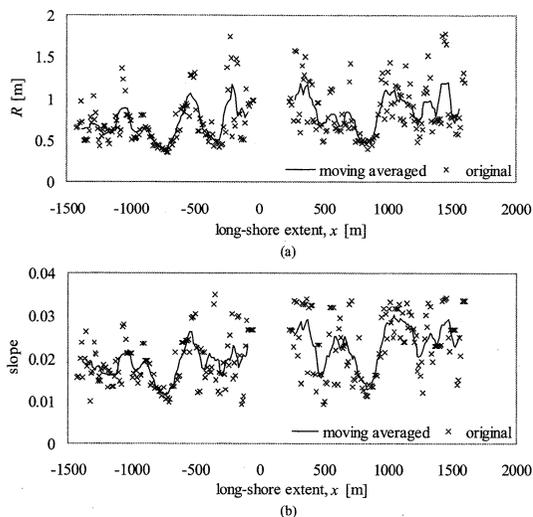


図-7 (a)Rと(b)前浜勾配の沿岸分布 (2005/07/26 22h)

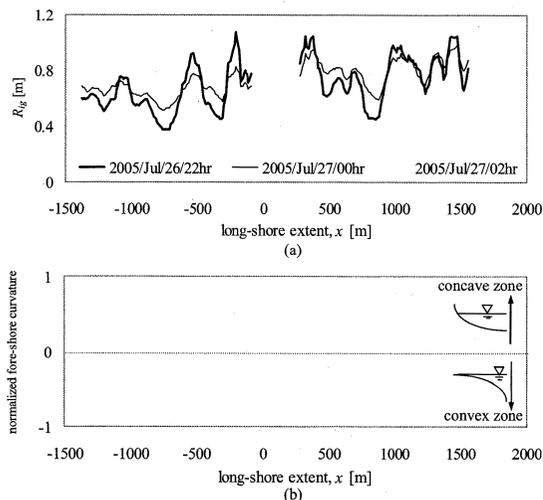


図-8 (a)  $R_{ig}$  の変化と(b)前浜曲率の沿岸分布

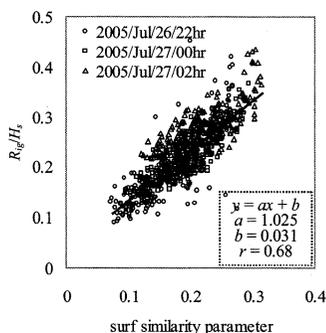


図-9  $R_{ig}$  と  $\xi$  (surf similarity parameter) の関係

数帯成分  $R_{f-ww}$ , 平均高さ  $R_m$  (=潮位+wave set-upの和) に分離した。これらの関係は

$$R_f(x, t) \approx R_m(x) + R_{f-ig}(x, t) + R_{f-ww}(x, t) \quad (4)$$

であり、図-5 (c), (d)に  $R_{f-ig}$  と  $R_{f-ww}$  を示す。短周期成分の波形は、不規則で変動の小さい時間が持続することが多く、先に示した周波数スペクトルの結果と合致する。

#### 4. 荒天時の遡上高さ

##### (1) 遡上高さの沿岸分布

個々の遡上波の最高到達位置に関する統計値である遡上高さを求めた。遡上高さ  $R$  は次の手順で求めた：先ず  $R_f$  から潮位高さを差し引いた変動の平均値 (wave set-up量に相当) を求めた。次にこれを上回る極値を個々の遡上高とし、これらの単純平均として  $R$  を求めた。

$h$  から求めた前浜地形勾配、 $R$  の沿岸分布を図-7に示す。図中の記号 (×) が各位置における  $R$  であり、実線はこれらの移動平均 (平均幅 86.8 m) である。前浜勾配の大きい位置で遡上高さは大きく、式(1)の関係と合致する。

長周期成分の遡上高さ  $R_{ig}$  も類似の手順で求めた： $R_f$  から潮位高さを差し引いた変動波形から長周期成分を取り出し、これの正の極値を求めた。これら極値の単純平均として  $R_{ig}$  を求めた。

図-8(a)に潮位の異なる時間帯の  $R_{ig}$  の沿岸分布 (移動平均値, 平均幅 86.8 m) を示す。 $R_{ig}$  の分布も、基本的には、先に示した  $R$  と前浜地形勾配との関係に従う。潮位の下降に伴い、 $R_{ig}$  が大きくなる領域 (例えば、450 m <  $x$  < 900 m), ほぼ変化の無い領域 (例えば、1100 m <  $x$  < 1400 m), 小さくなる領域 (例えば、900 m <  $x$  < 1100 m) の存在が認められる。この分布特性は、図-8 (b)に示す  $h$  から求めた前浜地形曲率と関連付けて説明できる。前浜地形が上に凹 (曲率：正) となっている領域では、潮位が下がるのに伴い前浜地形勾配が小さくなり  $R_{ig}$  が小さくなり、前浜地形が上に凸 (曲率：負) となっている領域では逆の関係にある。前浜地形がほぼ直線状の領域では潮位変化に伴う  $R_{ig}$  の変化は僅かであった。

##### (2) 遡上高さ $R_{ig}$ と $\xi$ の関係

潮位の異なる時間帯に求めた全ての無次元  $R_{ig}/H_s$  と式(2)の  $\xi$  の関係を調べた。ここで、 $H, L$  は NOWPHAS 鹿島港で観測された有義波高・周期から算定し、 $\tan \beta$  には各位置における前浜勾配を与えた。図-9に  $R_{ig}/H_s$  と  $\xi$  の関係を示す。式(1)の係数は  $c=1.025$ ,  $d=0.03$  となり、従来の報告と同じオーダーの値が得られた (例えば、Ruessink ら, 1998 ; Ruggiero ら, 2001)。

##### (3) 長周期遡上変動の沿岸方向伝播

荒天時に取得されたレーダ原画像を連続的に再生すると、遡上運動が沿岸方向に伝播する状況が常に確認できる (武若, 2005)。各沿岸位置で求めた  $R_{f-ig}$  を用い、長周期遡上変動の沿岸伝播を可視化した (図-10)。図の横方向は沿岸方向に、縦方向は時間経過に対応する。また、

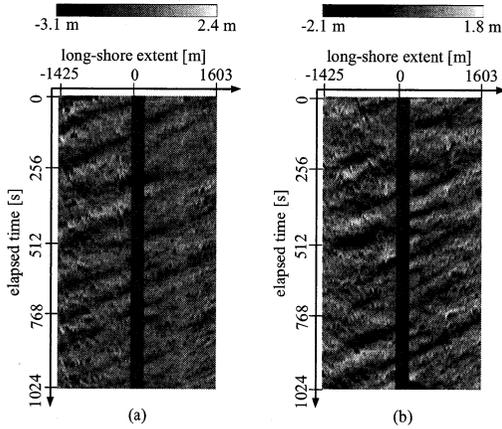


図-10 長周期遡上高さ変動の沿岸伝播  
(a) 2005/07/26 22h, (b) 2005/07/27 02h

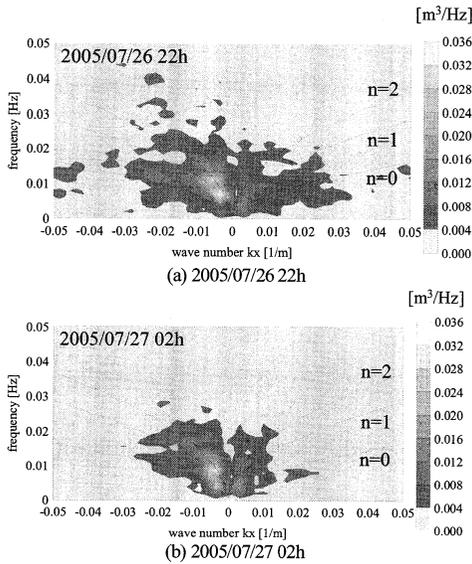


図-11 長周期遡上高さ変動の周波数-波数スペクトル  
実線は勾配1/45のエッジ波分散関係式 ( $n$ : mode)

図中の灰色領域はレーダ信号が飽和していたために遡上を読み取れなかった領域である。図には遡上高さが相対的に大きくなる領域(図中では白色で表示)が入射波の波下方向(沿岸方向  $x$  の負方向)にはほぼ一定の速さ(20 m/s のオーダー)で伝播している状況が捉えられている。

図-10に示した伝播状況を2次元FFTで解析した結果を図-11に示す。縦軸が周波数、横軸が沿岸方向波数である。図中に、海浜勾配1/45の一樣勾配斜面上のエッジ波の分散関係式を実線で参考のため示した。長周期遡上変動のエネルギーは集中して分布している。解析対象とした時間帯では、ピーク周期はおおよそ170 s から100 s に、

表-2 長周期遡上変動の変化

時間帯	鹿島港観測波浪 (有義値)		長周期遡上変動 (ピーク値)	
	波高 [m]	周期 [s]	周期 [s]	波長 [m]
2005/07/26 22h	3.69	12.1	170.7	2778.0
2005/07/27 00h	3.46	12.9	128.0	2778.0
2005/07/27 02h	2.85	12.9	102.4	1389.0

ピーク波長はおおよそ 2800 m から 1400 m へと変化していた(表-2)。この間に観測された鹿島港の有義波高は 3.7 m から 2.9 m に低下していたのに対して、有義周期はほぼ同一であった。一方、長周期遡上変動のピーク周期は短周期の入射波高の減少に伴い短くなっていた。

4. 結語

台風通過時の遡上波の挙動を、Xバンドレーダデータの解析を通じて調べた。遡上高さは前浜勾配に比例していた。潮位変化に伴い、遡上高さが大きくなる、変化しない、小さくなる領域があり、これが前浜地形の曲率に依存することを示した。長周期の遡上変動が入射波の波下方向に伝播し、その周期は入射波高により変化した。

謝辞：(独法)港湾空港技術研究所漂砂研究室のメンバーにはレーダ観測に際し、また、海浜地形・海象データの提供等で多大なる支援を頂きました。中央大学関克己助教、水口優教授には桟橋波高計アレイの観測結果を提供頂きました。筑波大学工学システム学類平田伸仁君にはデータ読み取りにご協力を頂きました。以上、各位に深甚なる謝意を申し上げます。

参考文献

港湾空港技術研究所 海象情報研究室, 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)波浪データ, <http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/kaisho/index.htm>, 参照 2008-05-01.

武若 聡(2005): Xバンドレーダによる長周期遡上変動の沿岸伝播の観測, 海岸工学論文集, Vol. 52, pp. 126-130.

Hasan, G. M. J. and S. Takewaka (2007): Observation of a stormy wave field with X-band radar and its linear aspects, Coastal Engineering Journal, Vol. 49, pp. 149-171.

Iribarren, C. R. and C. Nogales (1949): Protection des ports, XVIIth International Naval Congress, Lisbon, Portugal, pp. 31-80.

Ruessink, B. K., M. G. Kleinhaus and P. G. L. van den Beukel (1998): Observations of swash under highly dissipative conditions, Journal of Geophysical Research, Vol. 103 (C2), pp. 3111-3118.

Ruggiero, P., P. D. Komar, J. J. Marra, W. G. McDougal and R. A. Beach (2001): Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches, Journal of Coastal Research, Vol. 17, pp. 407-419.

Mizuguchi M. and K. Seki (2007): Field observation of waves and topographical change near the shoreline, Proc. of Asian and Pacific Coasts on CD-ROM (APAC 2007), China, pp. 30-40.

Shen, M. C. and R. E. Meyer (1963): Climb of a bore on a beach, Part 3: Run-up, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 16, pp. 113-125.

Takewaka, S. (2005): Measurements of shoreline positions and intertidal foreshore slopes with X-band marine radar system, Coastal Engineering Journal, Vol. 47, pp. 91-107.