

X バンドレーダを用いた荒天時の浅海域波浪場の観測

武 若 聡*・Ahmed, Ahmed S. M.**

X バンドレーダを用い, 台風通過時の高波浪を観測した。レーダエコーデータの解析を行い, 汀線位置と前浜勾配, 海底地形とバー位置, 個々の波の遡上高さの沿岸分布を求め, その結果について検討した。高波浪の継続時間が短かったために, 地形に顕著な変化はなかった。波浪の伝播状況を調べ, 波向と波速の分布を推定した。波速分布から海底地形を推定し, バーの存在を概ね捉えた。個々の波の遡上状況を調べ, 遡上高が相対的に大きくなる領域が沿岸方向に伝播する状況を捉え, これがエッジ波の分散関係式を満たすことを示した。

1. 緒 言

個々の波の伝播状況を捉えて波浪場を面的に観測するリモートセンシング手法については, ビデオカメラを利用した可視光域の計測 (例えば, Stockdon・Holman, 2000; 武若ら, 2000; 鈴木ら, 2002) と本研究で利用した X バンドレーダによる計測 (例えば, Bell, 1999; 小林ら, 2001; 武若ら, 2003) にすでに報告がある。ビデオを用いた観測は, 個々の波の碎波状況, 濁質の浮遊状況などを確認できるという利点があるが, 撮影範囲を広げるためには複数のカメラが必要になる, 太陽高度により撮影結果が変化する, 雨天時, 夜間時の画像取得は難しいなどの欠点がある。一方で, X バンドレーダは広範囲 (数 km のオーダ) の波浪状況を夜間・雨天時にも取得できるが, 碎波状況を知ることができない, データの時間分解能が低い (ナイキスト周期約 3 秒) などの欠点がある。

著者らは, 沿岸の波浪が大きくなる時には天候が崩れることが多いこと, また, 数十時間オーダの高波浪継続により顕著な海浜地形が生じることなどの観点から, 荒天時の波浪場観測とこれに伴う海浜変形を追跡するのに X バンドレーダが適していると考えている。

ここでは X バンドレーダを用い, 台風 (2002 年 6 号) 通過時の高波浪を観測した結果を報告する。レーダエコーデータの解析を行い, 汀線位置と前浜勾配の沿岸分布, 個々の波の進行状況から波速の推定とその結果から求めた海底地形とバー位置, 遡上波の変動のそれぞれについて結果を示す。

2. 観測の概要

X バンドレーダ観測は (独法) 港湾空港技術研究所の波崎観測棧橋 HORS で行った (武若ら, 2003)。後浜にある研究施設の屋上にレーダ (日本無線 (株) JMA-3925-9) を設置した。図-1 にレーダと棧橋の位置関係, 本論の説明に用いる座標系を示す。座標系の原点は棧橋

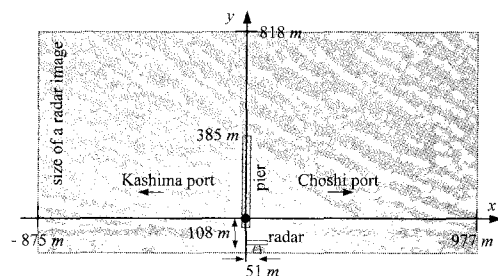


図-1 座標系とレーダ設置位置, レーダ画像との重ね合わせ表示

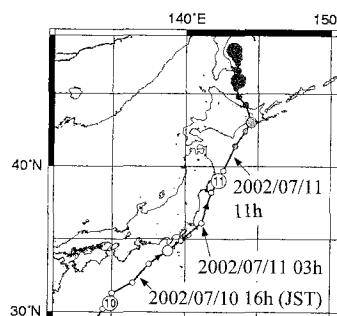


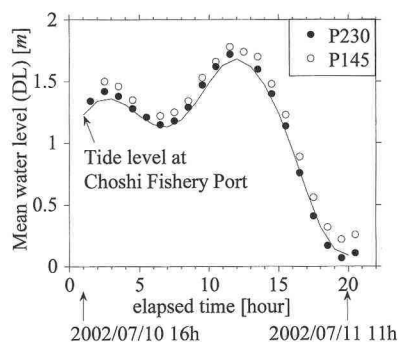
図-2 台風 (2002 年 6 号) の経路 (北本, 2004)

上にある。沿岸方向約 1850 m, 岸沖方向約 930 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 (日本無線 (株) 製) 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 階調の画像として記録した。1 ピクセルの大きさは約 1.8 m に相当し, 輝度がレーダエコーの相対的な強度に対応する。なお, レーダ機器の測定原理上の空間分解能は 7.5 m である。また, レーダのアンテナは約 2.5 秒で一回転するので, 2 秒毎に収集されたレーダ画像の一部には更新されない領域がある。

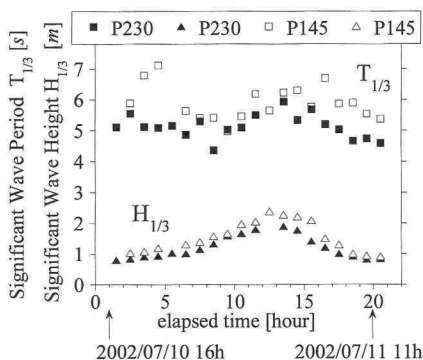
観測は, 台風 6 号が鹿島灘を通過した 2002 年 7 月 10 日 16 時から翌日 11 日 11 時までの間, 約 20 時間連続的に行った。図-2 に台風の経路, 図-3 に棧橋に設置された波高計 ($x=145, 230$ m) で計測した水位記録から求め

* 正会員 工 博 筑波大学助教授 システム情報工学研究科

** 博 (工) (独法) 港湾空港技術研究所 外国人特別研究員



(a)



(b)

図-3 (a) 平均水位, (b) 有義波高・有義周期の変化

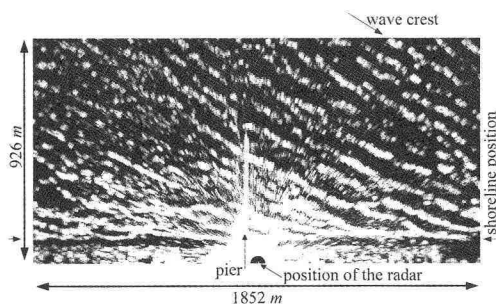


図-4 レーダ画面の一例。観測開始後13時間(2002年7月11日3時)。有義波高2.4 m, 有義周期5.7 s

た平均水位, 有義周期, 有義波高の変化を示す。観測開始後12時間の時点(11日3時)には有義周期5.7 s, 有義波高2.4 mを記録した。

図-4に観測開始後13時間の時点(11日3時)のレーダ画像を例示する。斜め右上方から波が入射し, これらが海浜上で屈折する状況が鮮明に捉えられている。

棧橋に沿って測られた, 台風通過前後の地形を図-5に示す。高波浪の継続時間が短かったために顕著な海浜変形は見られなかった。汀線付近の地形はほとんど変化していない。バーは若干削られ, トラフの位置がわずかに

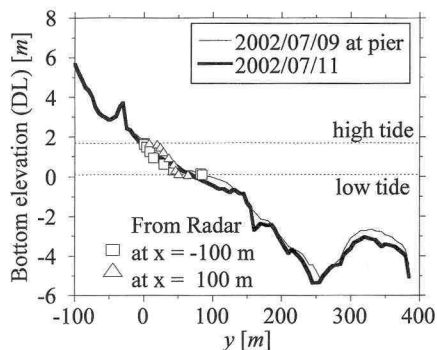


図-5 棧橋に沿いの海底地形

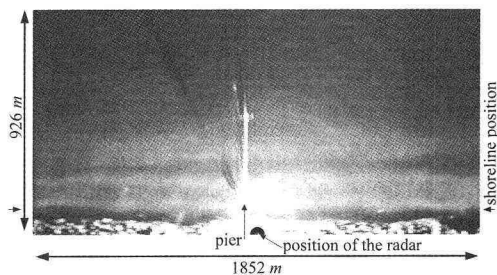


図-6 平均画像(観測開始後13時間, 2002年7月11日3時)

に岸側へ移動した。

3. 汀線位置と前浜勾配の沿岸分布

(1) 平均画像を用いた汀線位置と前浜勾配の推定

観測開始後12時間の時点(11日3時)で満潮を迎え, その後20時間の時点(11日11時)で干潮となった(図-3)。この間の原レーダ画像から1時間間隔の平均画像を作成し, 武若ら(2003)と同じ手法で汀線位置と前浜勾配の沿岸分布を求めた。

個々のレーダ画像を1時間にわたって平均した画像(以降, 平均画像とする)を作成し, 線位置の読み取りを行った。図-6に観測開始後13時間の時点(11日3時)の平均画像を示す。エコー強度の大きい領域が白く表示されている。なお, レーダ前面の一部領域はエコー信号が飽和しているために解析に使用できなかった。

潮位と汀線位置を次のように定義する。平均画像を作成したのと同じ時間帯に, 棧橋の最も沖側で計測された平均水位をその時間帯の潮位とする。平均画像の岸沖方向の輝度分布を読み取り, 岸近くの最大輝度を示す位置をその時間帯の汀線位置とした。平均水位と平均画像から決定した汀線位置より, 汀線の垂直位置と水平位置を定めた。

以上の作業を潮位の異なる満潮から干潮までの時間帯

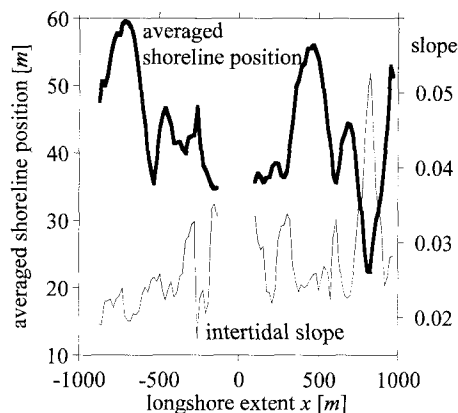


図-7 平均汀線位置（太線）と前浜勾配（細線）の沿岸分布

に行い、各時間帯の汀線位置を推定した。図-5には、 $x = -100$ m, 100 m 地点の汀線位置の推定結果を、棧橋に沿って測った海底地形とあわせて示す。レーダ平均画像から推定した汀線位置はほぼ妥当な結果であることが伺われる。なお、ここに説明した手順で読み取った汀線位置には wave setup の影響が含まれており、特に入射波高が大きい時には汀線位置を岸側に読み誤る可能性がある。観測された波高値から wave setup の大きさを見積もり、推定結果を修正することも可能であるが、ここでは検討しなかった。

前浜勾配は、潮位が満潮から干潮まで変化する区間の潮位と汀線位置を直線回帰して推定した。

(2) 汀線位置と前浜勾配の沿岸分布

前節の手順で求めた汀線位置から平均汀線位置を求め、前浜勾配の沿岸分布とあわせて図-7に示す。なお、平均汀線位置は、満潮位から干潮位にかけて、汀線が移動した範囲の前浜地形の重心位置として定義した。

高波浪作用前よりあったカスプ状の地形は保たれ、汀線形状には 500 m オーダの変動が見られる。これに対応して、やや不鮮明ではあるが、汀線が沖側に出ている領域では前浜勾配が相対的に小さく、岸側に引いている領域では大きくなっている。

4. PIV 解析による波速の分布推定

個々の波の進行方向と速度を PIV 解析により求めた。解析は観測開始後 13 時間の時点 (11 日 3 時) のレーダ画像に対して行った。局所的な解析範囲を定め、フーリエ解析により輝度変動の卓越周期を調べた。次に、この卓越周期で変動する成分のみからなる画像を再構成し、これに PIV 解析を適用した。なお、解析手順の詳細は Ahmed・Takewaka (2004) にある。

図-8 は、周期 8.4 s 付近の輝度変動成分を取り出して解析した結果で、各地点の波峰の進行方向と速さをベク

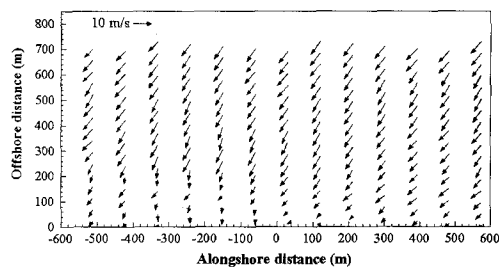


図-8 PIV 解析から推定した波速ベクトルの分布。観測開始後 13 時間 (2002 年 7 月 11 日 3 時) のデータを使用

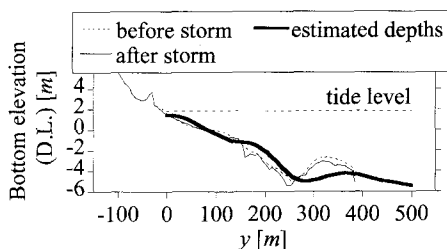


図-9 地形の推定結果 ($x \sim 0$ m)

トル表示した。沖合から入射してきた波の進行速度が小さくなり、また入射角度が汀線に直交する方向に近づいている。ベクトルの分布パターンは $y > 300$ m の領域で沿岸方向に一様である。これに対して、岸側 ($y < 300$ m) の領域では $x = 0$ を境にして分布状況が異なっている。流れの影響、あるいは、海底地形の沿岸方向不均一がこれをもたらした可能性があるが、これらについて定量的に議論するためのデータが取得されていない。

棧橋の最寄の測線で推定した波峰の移動速度 C と輝度変動成分を抽出した周期 $T (= 8.4 \text{ s})$ を線形の分散関係式

$$h = \frac{CT}{4\pi} \log \frac{1 + \frac{2\pi}{g} \frac{C}{T}}{1 - \frac{2\pi}{g} \frac{C}{T}} \dots \dots \dots (1)$$

に代入して求めた水深 h の分布を図-9に示す。ここで g は重力加速度である。この推定では、流れの効果は考慮されない。バーの位置と高さに相異が見られるが、海底地形の全体的な特徴は捉えている。先に説明した平均画像の中には、沖合の沿岸方向に分布する高輝度の帯があり、これはバーが存在する位置に対応していると考えられる。推定されたバー位置の沿岸分布と平均画像中の高輝度データ位置の沿岸分布を比較したところ、おおむね一致が見られた。

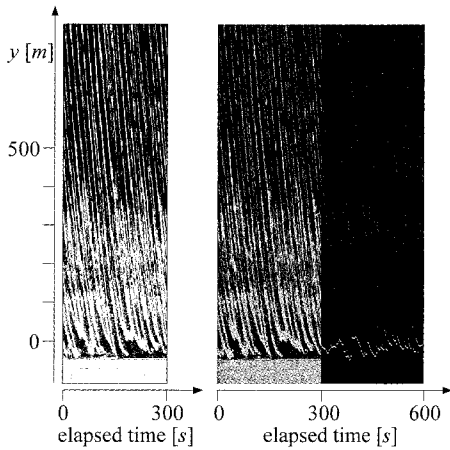


図-10 岸沖方向ライン画像(左)と遡上位置の読み取り(右)。観測開始後13時間(2002年7月11日3時)。 $x = -136$ m

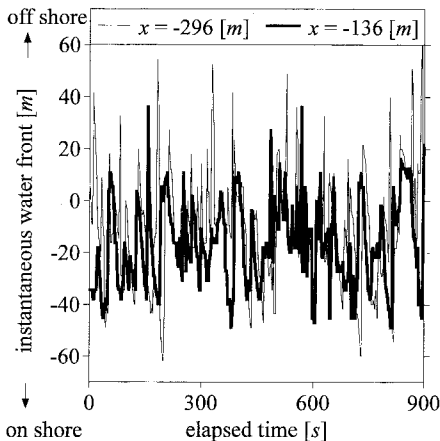


図-11 遡上位置の時間変動 ($x = -136$ m, -296 m)

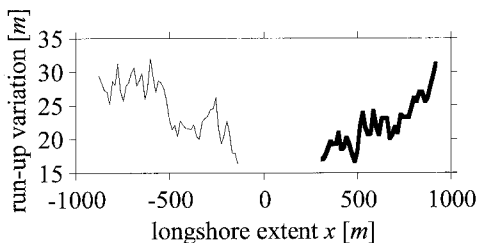


図-12 遡上変動強度の沿岸分布

5. 遡上波の解析

原レーダ画像をPC上で連続的に表示すると、沿岸の各位置における波の遡上運動パターンを視覚的に理解できる。ここでは、画像から読み取った遡上位置の変動を解析し、観測時にあった遡上運動の特徴を説明する。解

析は観測開始後13時間の時点(11日3時)のレーダ画像に対して行った。

(1) ライン画像と遡上位置の読み取り

沿岸の各位置における波の遡上状況を調べるために岸沖ライン画像(稲葉ら, 2001)を作成した。これは、レーダ画像中の岸沖方向の線に沿った輝度分布を時間方向に並べたもので、沖合からの波の伝播状況、遡上帯における個々の波の打ち上げ状況などを読み取れる。

図-10の左側は $x = -136$ mにおけるライン画像である。図の縦方向が岸沖方向、横方向が時間経過に対応している。斜状の線は、個々の波が沖から伝播し、遡上帯で打ち上がるまでの状況を捉えたものである。この線の数、岸に近づくにつれ減少しており、いわゆる波の合体が砕波帯から遡上帯($y \sim 0$ m)にかけて生じているのが見られる。

ライン画像中の遡上帯付近に見られる高輝度部分の分布パターンから判断すると、波が遡上する間のフロントは捉えているが、フロントが最大打ち上げ高さに達し、その後に砂浜を駆け下る状況は捉えていないと判断される。図-10の右側に、この高輝度部分の位置を読み取った結果を示す。ここでは、この位置を個々の波の遡上位置と呼ぶことにする。この読み取りは、レーダ前面のエコーデータが飽和している領域($-130 < x < 310$ m)を除き、約14.5 m間隔の95地点で行った。

図-11は $x = -136$ mと $x = -296$ mにて読み取った遡上位置の時間変化を示す。遡上位置が相対的に大きくなる時間帯が数十秒の間隔で現れ、これが沿岸方向の負方向(鹿児島港方向)に伝播している様子が見える。図-12には各地点の遡上位置の時間変動強度(標準偏差)の沿岸分布を示す。先に求めた、前浜勾配との明確な関連性は見られず、平均汀線位置が相対的に沖側にある領域で変動が大きいように見える。

(2) 遡上位置の変動方向伝播

遡上位置の変動が沿岸方向に伝播する状況を確認するために、各地点における遡上位置の変動成分を図化した(図-13)。図化するには、遡上位置データを x の正負の領域毎に分けてフーリエ解析し、高周波成分を除いて表示した。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、図中央の灰色はエコーデータが飽和していたために遡上位置を読み取れなかった領域である。図には遡上位置が相対的に大きくなる領域(図中では白色で表示)が x の負方向にほぼ一定の速さで伝播している状況が捉えられている。

図-14には x の正負の領域毎に行ったフーリエ解析の結果を示す。図中の線は、勾配 $s=1/50$ の一樣斜面上のエッジ波(モード n)の分散関係式

$$f^2 = g/2\pi(2n+1)s/L \dots\dots\dots (2)$$

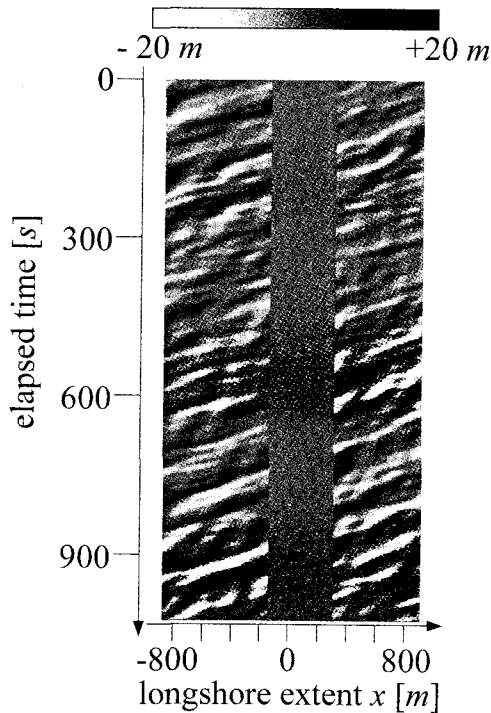


図-13 遡上位置変動の時間-沿岸分布. 観測開始後 13 時間 (2002 年 7 月 11 日 3 時). 縦軸: 時間経過, 横軸: 沿岸方向. 平均位置より遡上した領域を白色で表示. x 負方向 (鹿島港方向) に遡上位置の変動伝播する状況が捉えられている

より求まる, エッジ波の周波数 f と波長 L の関係を示したものである. 遡上位置変動がパワーを持っている周波数-波長域は, モード $n=1$ あるいは 2 のエッジ波の分散関係式を満たしている. このことより, 遡上位置変動の沿岸方向の伝播は, エッジ波の進行に伴う水位変動によりもたらされた可能性が大きい.

6. 結 言

X バンドレーダを用い荒天時の波浪場を観測した. 高波浪の継続時間が短かったために, エコー画像から求めた汀線形状に顕著な変化はなかった. 波浪の伝播状況を調べ, 波向と波速の分布を推定した. 波速分布から海底地形を推定し, パー位置の沿岸分布を概ね捉えた. 個々の波の遡上状況を調べ, 遡上高が相対的に大きくなる領域が沿岸方向に伝播する状況を捉え, これがエッジ波の分散関係式を満たすことを示した.

謝辞: (独法) 港湾空港技術研究所漂砂研究室にはレーダ観測, 海岸地形データの提供などで便宜を図って頂いた. 岐阜大学助教授小林智尚氏にはレーダ観測に関するアドバイスを頂いた. 観測の際には後藤勇君 (茨城県庁)

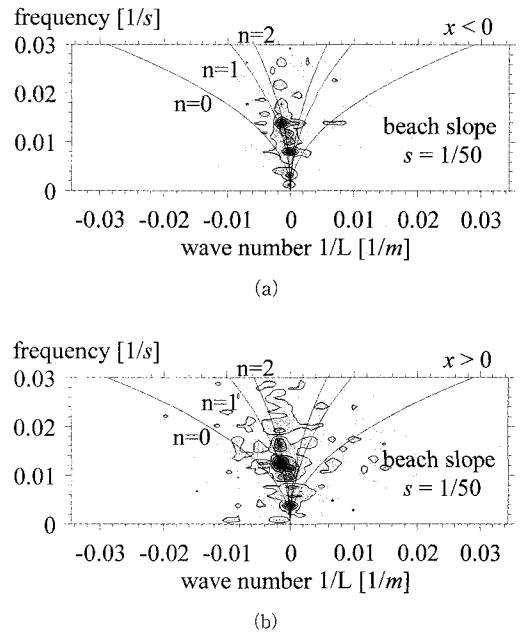


図-14 遡上位置変動のフリーエ解析結果. (a) $x < 0$, (b) $x > 0$. 変動強度の大きい領域を黒色で表示. $1/L < 0$ の成分が x 負方向 (鹿島港方向) に伝播する成分. 分散関係式を満たすことを示した

の支援を得た. 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金の支援の下で実施された. 以上, ここに記して謝意を申し上げます.

参 考 文 献

- 稲葉 徹・森本佳緒里・武若 聡・西村仁嗣 (2001): 波浪場画像の解析による水深分布推定, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1416-1420.
- 北本朝展 (2004): デジタル台風 (台風画像と台風情報), <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>
- 小林智尚・河合篤司・小塚将之・安田孝志 (2001): X バンドレーダによる沿岸域の観測, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1431-1435.
- 鈴木高二朗, 他 7 名 (2002): ARGUS ビデオ解析による宮崎住吉海岸の長期地形観測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 571-575.
- 武若 聡・後藤 勇・西村仁嗣 (2003): X バンドレーダを用いた前浜地形の観測, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 546-550.
- 武若 聡・中村 崇・三崎尚一郎 (2000): 係留ビデオシステムを用いた碎波帯水理現象の解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 126-130.
- Ahmed, S. M. A. and S., Takewaka (2004): Nearshore bathymetry around HORS derived from an enhanced PIV analysis of dominating frequency radar images, Submitted to Coastal Engineering Journal.
- Bell, P. S. (1999): Shallow water bathymetry derived from an analysis of X-band marine radar images of waves, Coastal Engineering, Vol. 37, pp. 513-527.
- Stockdon, H. F. and R. A., Holman (2000): Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery, J. Geophys. Res., Vol. 105, No. C 9, pp. 22, 015-22, 033.