

荒天時の屈折波浪場の解析

武若 聡¹・G. M. Jahid Hasan²

荒天時の波浪場を X バンドレーダで観測し、屈折プロセスに着目して解析を行った。卓越周波数、波数、波向の岸沖分布を求め、屈折状況を調べた。まず、観測結果と線形の屈折解析の結果を比較し、観測された波向の変化について考察し、線形理論で説明可能な範囲を示した。位相速度の非線形効果と流れが屈折に及ぼす影響を調べ、それぞれの波向の変化に与える影響を検討した。二つの卓越周波数があり、それぞれの入射角が顕著に異なる時間帯のデータを解析した。屈折が周波数毎に生じていることを確認した。線形の分散関係式を用い、沿岸方向に一樣な地形と沿岸流のみが存在するとして、海底地形の概形と流れの分布を推定した。

1. 緒 言

波浪の海岸上における屈折の理解は、海岸工学で扱う様々な現象、例えば、沿岸流、沿岸漂砂を扱う上で最も基本的な事項である。海岸工学の教科書では、スネルの法則を適用した屈折波浪場の解析方法が紹介されており、波向、波高の変化を求める方法が示されている。航空写真に屈折波浪場が捉えられていることがあるが（例えば、Bascom, 1980）、高波浪時のフィールドにおける屈折波浪場の波向、波高の分布が具体的に示された事例は、少なくとも著者らが調べた範囲では存在しない。実フィールドにおいて複数点に計測機器を設置し、波が浅海域に到達して屈折する状況を追跡することは簡単ではない。ここでは、面的に波浪場を捉えることが可能な X バンドレーダを用いた観測結果の解析を通じて、主に屈折波浪場の波向分布について議論する。

本論文では以下について議論する。荒天時の波浪場を X バンドレーダで観測し、屈折プロセスに着目した解析手順を説明する。沖合から汀線付近までの卓越周波数、波数、波向の分布を求め、屈折状況を調べた。観測結果と線形の屈折解析の結果を比較し、観測された屈折について考察した。数値的検討を行い、位相速度における非線形効果と流れが屈折に及ぼす影響を調べ、観測された屈折現象について議論を行った。また、異なる周波数の波浪が二方向から入射する場合の解析を行い、海底地形と流れ場を同時に推定する可能性について検討した。

2. 波浪場の観測

X バンドレーダ観測は、茨城県波崎町（2005 年 8 月より神栖市）にある港湾空港技術研究所の波崎観測棧橋 HORS で行った（武若ら, 2003, 2004）。後浜にある研究施設の屋上にレーダを設置した。

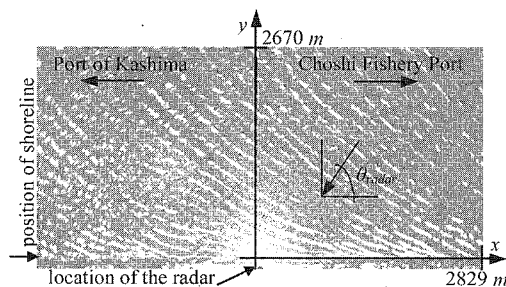


図-1 レーダ画像と座標系

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を示す。座標系の原点は棧橋上にある。波向 θ は、 x 軸から反時計回りに測った角度で定義する。従って、図-1 中の右上方から入射する波の波向は $0 < \theta < 90^\circ$ 、 y 軸に沿う波の波向は $\theta = 90^\circ$ である。

沿岸方向約 5,560 m、岸沖方向約 2,780 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 $1,024 \times 512$ 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状況を知ることができるが、個々の波峰の高さを推定することはできない。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。

レーダ観測は 2005 年に台風が鹿島灘の沖合を通過した時（台風 7 号：7 月 26 日、27 日、台風 11 号：8 月 25 日、26 日、台風 17 号：9 月 25 日、26 日）に行った。本論文では、台風 7 号と 17 号が通過した際に取得されたデータの解析結果を説明する。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 2005-05-06）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）、銚

1 正会員 工博 筑波大学助教授 大学院システム情報工学研究科
2 学生会員 工修 筑波大学大学院システム情報工学研究科

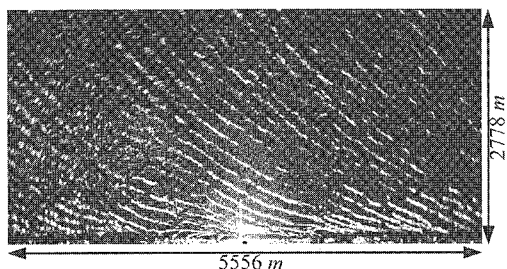


図-2 荒天時のレーダ画像 (2005年7月26日22時, 台風7号通過時) 波浪は画像中の右上方から入射。

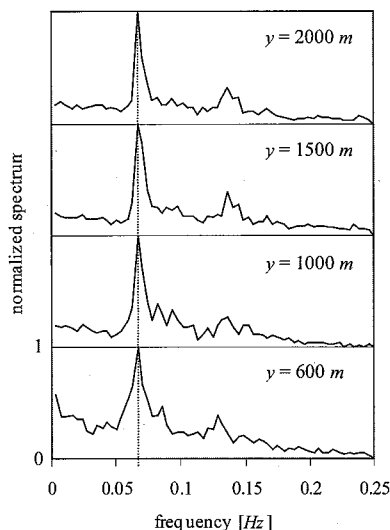


図-3 レーダ画像輝度値変化の周波数スペクトルの岸沖分布。周波数スペクトルはピーク値で無次元化。沿岸位置 $x=1,440$ m。卓越周波数 $f_p=0.066$ Hz (15.1 s) が全ての岸沖位置に認められる。

子で観測された風速, 風向(気象庁観測)を参照する。

3. 屈折解析

ここでは, 2005年7月26日22時から22時30分の間に観測されたエコーデータを解析した結果について説明する。この時間帯の海象, 気象を表-1に示す。

図-2にエコー画像の一例を示す。沖合から入射する波が徐々に屈折し, 波向を変化させながら浅海域に至る様子が捉えられている。波向は, 沖合では緩やかに, 汀線付近で急激に変化するように見える。

(1) 画像処理—卓越周波数によるフィルタリング

各位置における輝度変化の周波数(FFT)解析を行い, 周波数スペクトルを調べた。図-3に $x=1,440$ mにおける周波数スペクトルの岸沖分布を示す。ここで, 各位置における周波数スペクトルは256秒間の計測結果から求めたもので, 最大パワー値で無次元化した。各岸沖位置において, 0.066 Hz (15.1 s)の成分が卓越している。

表-1 2005年7月26日22時(台風7号通過時)の海象(NOWPHAS, 鹿島)と気象(アメダス, 銚子)

有義波高 $H_{1/3}$	3.69 m
有義周期 $T_{1/3}$	12.1 s
有義波向 $\theta_{1/3}$	33°
風向・風速	ENE 1.7 m/s

有義波向は図-1に示す座標系の定義で換算

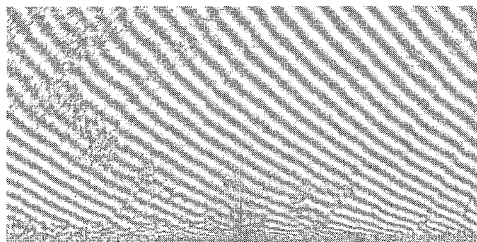


図-4 周波数フィルタリングしたレーダ画像 (2005年7月26日22時)。 $f_p=0.066$ Hz 成分を抽出

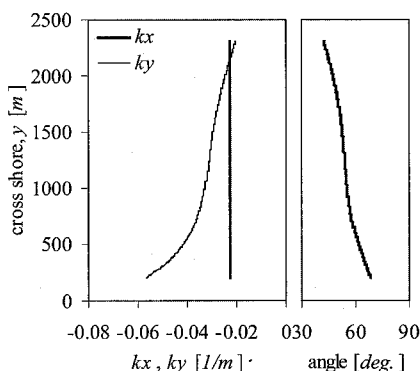


図-5 沿岸方向波数 k_{yp} , 岸沖方向波数 k_{xp} , 波向 θ_p (右段)の岸沖分布。卓越周波数 f_p 成分。沿岸位置 $x=1,440$ m。

この卓越周波数 f_p ($=0.066$ Hz) を用い, 連続する128組のエコー画像をフィルタリングし, f_p 成分の位相を表示した結果を図-4に示す。図-2に示した原エコー画像に比較して, 波浪場の屈折状況がより明瞭になる。

(2) 波数の分布

卓越周波数 f_p を用いフィルタリングした画像の波数解析を行い, 沿岸方向波数 k_x , 岸沖方向波数 k_y の分布を求めた。ある位置における波数を推定する際には, 沿岸方向 1,389 m, 岸沖方向には可変 (352 m~695 m) の大きさの部分領域を設定し, この領域内の波数をFFTにより求めた。明らかに卓越する波数がほとんどの結果に見られ, f_p における方向分散性は小さいと見せる。

各位置における波数解析で卓越していた沿岸方向波数を調べたところ, 観測対象領域のほぼ全ての位置で卓越する沿岸方向波数 ($k_{xp}=-0.0226$ [1/m], 沿岸方向波長: 278 m) が認められた。これより, 解析対象領域の地形と流れは沿岸方向にほぼ一様な状況 (平行等水深線,

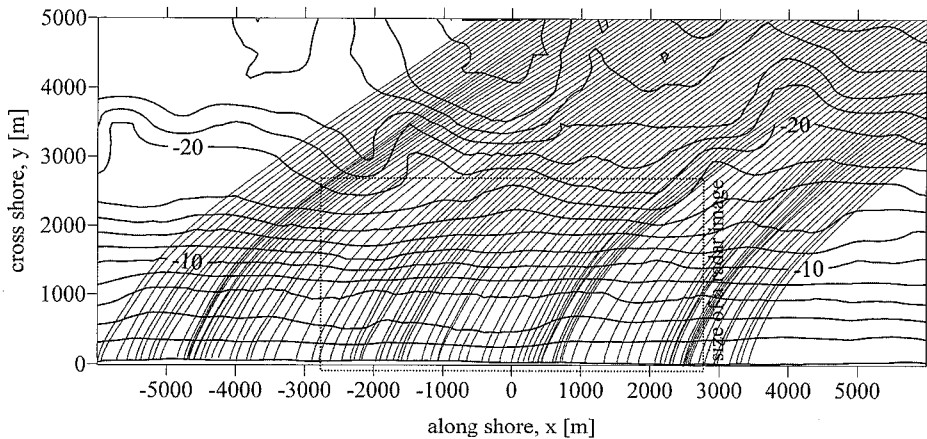
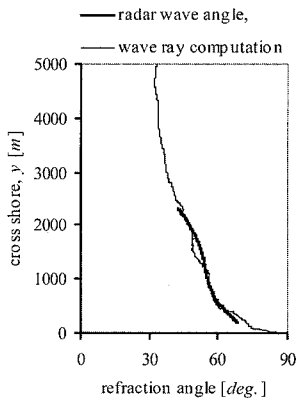


図-6 屈折解析により求めた波向線と海底地形


図-7 波向の岸沖分布 ($x=1,440\text{m}$)

平行沿岸流)にあったとみなせる。以降では沿岸方向に
 一様な屈折が生じていたとして解析を進める。

(3) 波向の変化

各位置における波向 θ_p を次式

$$\theta_p = \tan^{-1}(k_{yp}/k_{xp}) \dots \dots \dots (1)$$

より求めた。ここで、 k_{xp} 、 k_{yp} は、前節の波数解析で求
 めた沿岸と岸沖方向の卓越波数である。図-5 に $x=1,440$
 m における k_{xp} 、 k_{yp} 、 θ_p の岸沖分布を示す。 k_{yp} の絶対値
 は岸に近づくとき大きくなり、これに伴い波向 θ_p が増加し、
 波は汀線に対して直入射に近づく状況となった。

(4) 波向の解析

a) 波向線解析

NOWPHAS (鹿島、水深 24 m) で観測された波向を
 用い、線形の屈折解析を行った。海浜地形データは、海
 図 (沿岸海の基本図・鹿島、海上保安庁) と棧橋周辺の
 深淺測量結果から作成した。海図と深淺測量 (1989 年
 ～2005 年) の結果を比較し、海図の $y>750$ m の領域の
 地形は海図測量時からほぼ不変であるとみなせることを

確認した。

図-6 に棧橋周辺の地形と波向線図を示す。波向線は
 次の手順で作成した。まず、NOWPHAS (鹿島) で観
 測された波向を用い、波向の変化がなくなる地点まで沖
 側に向かって波向線の計算を行った。次に、この位置を
 沖側の計算開始点として全領域の波向線の分布を求めた。
 計算された波向は地形の不均一性により沿岸方向に変動
 しているが、その大きさは数度であり、これはレーダ観
 測では捉えることのできない大きさである。

図-7 には $x=1,440$ m における、レーダ観測により求
 めた波向、線形の屈折計算により求めた波向の岸沖分布
 を示す。両波向の変化量 (図中における線の勾配) は、
 $1,000\text{ m}<y<1,500\text{ m}$ と $y<500\text{ m}$ の区間で異なる傾向
 にある。レーダにより観測された波向の増加は屈折解析
 に比較して小さい。これの原因として、屈折解析では考
 慮されていない位相速度の非線形性の効果、流れ (沿岸
 流、吹走流など) の効果、などが考えられる。以降ここ
 では、後者の二つの効果について検討する。

b) 屈折における位相速度の非線形効果の検討

屈折は、波峰に沿う位相速度分布に不均一があること
 により生じる。浅海域では、相対的に浅い水深上にある
 波峰の進行が遅くなり、波の進行方向が変化する。波の
 位相速度は、波の振幅が大きくなると増し (非線形効
 果)、これは浅海域で特に顕著となり、屈折においては、
 波向変化を抑制する効果があると考えられる。屈折に非
 線形性を取り込んで解析する方法はいくつかの提案があ
 るが (例えば、Ryrie・Peregrine, 1982; Dalrymple,
 1988; 磯部, 1999)、定まった解析手順は示されていな
 い。ここでは、位相速度の振幅依存性を形式的に取り込
 み、屈折における位相速度の非線形効果を検討する。

平行等水深線海岸における屈折計算を行い、Kirby・
 Dalrymple (1986) の提案している波の振幅の効果を考慮し

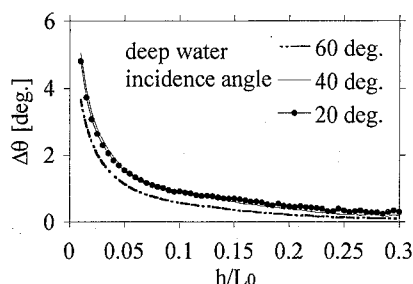


図-8 位相速度の非線形効果を考慮して求めた波向の差。沖波条件 $H_0/L_0 = 0.020$ 。 H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長。

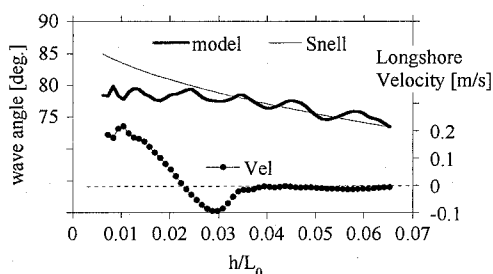


図-9 沿岸流速による屈折角の変化。Visser (1991) の実験条件 5 に対応した計算結果。沖波条件 $H_0/L_0 = 0.014$ 。沖波入射角: 64° 。正の沿岸流速が屈折の進行を妨げる成分。

た分散関係式を用い、波向変化を求めた。振幅は線形理論に従って増幅するとして扱った。通常の屈折計算で得られる波向との差を示した結果を図-8 に示す。波向の差は全領域にて小さく、少なくともレーダ観測 ($y=1,000$ m) における $h/L_0 \sim 0.022$ で数度の差を検出することは難しい。

c) 流れの効果の検討

砕波モデルを考慮したブシネスク方程式 (FUNWAVE, 参照 2006-05-01) を用い、沿岸流速の測定結果が詳しく報告されている Visser (1991) の実験条件で計算を行った。この際、沿岸方向の境界条件を周期的に設定した。計算された沿岸流速の発達実験結果に比べてやや小さかったが、水位と流速の分布は容認できるものであった。

図-9 に計算により求めた波向、スネルの法則により求めた波向、沿岸流速の分布を示す。砕波帯に流れ (波速の 2 割程度の大きさ) があることにより、波向変化が小さくなった。レーダ観測条件に完全に対応した計算では安定した計算結果を得られなかったが、砕波による流れが波向変化に影響を与えていたことは十分に類推できる。

4. 二方向波浪場の屈折解析

ここでは、2005 年 9 月 25 日 14 時から 14 時 30 分の間に観測されたエコーデータを解析した結果を示す。この時間帯には、卓越周波数、入射方向の異なる二つの入

表-2 2005 年 9 月 25 日 14 時 (台風 17 号通過時) の海象 (NOWPHAS, 鹿島) と気象 (アメダス, 銚子)

有義波高 $H_{1/3}$	4.87 m
有義周期 $T_{1/3}$	9.6 s
有義波向 $\theta_{1/3}$	89°
風向・風速	NNE 23.5 m/s

有義波向は図-1 に示す座標系の定義で表示

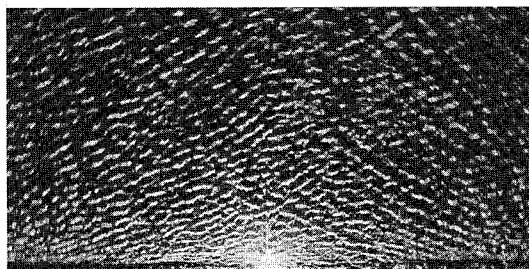
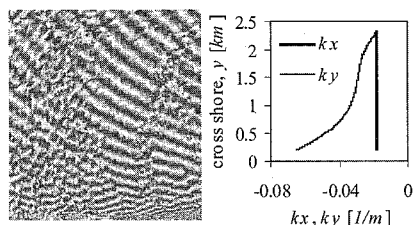
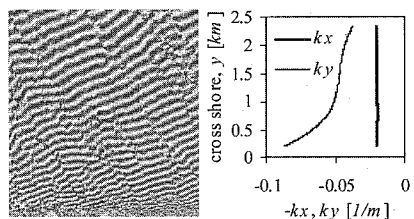


図-10 二方向波浪入射時のレーダ画像 (2005 年 9 月 25 日 14 時, 台風 17 号通過時)



(a) 入射波浪 1, $f_{p1} = 0.063$ Hz, $x = 2135$ m.



(b) 入射波浪 2, $f_{p2} = 0.098$ Hz, $x = -1340$ m.

図-11 周波数フィルタリングしたレーダ画像と沿岸方向と、岸沖方向波数の岸沖分布 (2005 年 9 月 25 日 14 時)。

射波浪があった。図-10 に示すエコー画像には、画像中の右上方と左上方から入射する波があることが認められる。この時間帯の海象、気象を表-2 に示す。

エコーデータ輝度値変動の周波数解析を行い、入射波浪 1 と入射波浪 2 の卓越周波数 f_{p1} ($=0.063$ Hz) と f_{p2} ($=0.098$ Hz) を求めた。これらの周波数を用い、連続する 128 組のエコー画像をフィルタリングした結果を図-11 に示す。入射波浪 1 と 2 のそれぞれの屈折状況が捉えられている。

前章と同じ方法で、各周波数成分の波浪場の波数分布を求めた結果を図-11 に示す。周波数成分 f_{p1} と f_{p2} に対

応する沿岸方向波数 k_{xp1} , k_{xp2} が観測領域内ではほぼ一定であったことを確認した。それぞれの入射波は沿岸方向に一樣な状況下で屈折していたと推測される。

複数の波浪成分が存在する場合に、線形の分散関係式を用い、海浜地形と流れ場を同時に推定する試み（例えば、Piotrowski・Dugan, 2002）があるが、手法として確立されたものではない。ここでは、卓越する波浪が二成分のみであったので、沿岸方向に一樣な流れがあったと仮定して地形・流れの推定を行う。この場合、ある地点の流れの無い場合の波速を C 、水深を h 、沿岸方向（ x 軸方向）流速を U 、レーダにより観測された入射波浪 1 と入射波浪 2 の波向を θ_1 , θ_2 、波数を k_1 , k_2 とすると、次の関係が成立する：

$$U \cos \theta_1 = 2\pi f_{p1}/k_1 - C(f_{p1}, h) \dots\dots\dots (2)$$

$$U \cos \theta_2 = 2\pi f_{p2}/k_2 - C(f_{p2}, h) \dots\dots\dots (3)$$

各地点でこの関係を満たす h と U を求めた結果を図-12 に示す。海浜地形の概形が捉えられているが、水深は全般に過大評価となっている。推定された流れは入射波浪 2（0.098 Hz）の波下方向に（ $+x$ 方向）向いている。NOWPHAS（鹿島港）では周期帯毎の波高、波向が提供されるが、解析対象とした時間帯は欠測であった。しかしながら、観測値が取得されていた前後の時間帯の結果を内挿すると、該当の時間帯では入射波浪 2 の波高が相対的に大きかったと推定され、ここで推定した

流れの発達方向（ $+x$ 方向）と整合する。

銚子のアメダスでは、解析対象とした時間帯の前に北北東の強風（ >20 m/s）が 5 時間以上連続的に観測されており、沿岸域の流れは風の影響を強く受けていた可能性が高い。また、流れは沿岸方向に平行である、という制約の大きい仮定を設けた解析を行った。より一般的に沿岸域の水深分布と流れを推定する際には、これらの点を含め、より詳細に解析方法について検討する必要がある。

5. 結 言

本論文では荒天時の波浪場を X バンドレーダで観測し、屈折プロセスに着目した解析を行った。沖合から汀線付近までの卓越周波数、波数、波向などの岸沖分布を求め、観測対象域では沿岸方向に一樣な屈折が生じていたことを示した。観測結果と線形の屈折解析の結果を比較し、観測された波向の変化について考察し、線形理論で説明可能な範囲を示した。数値的検討を行い、位相速度の非線形効果と流れが屈折に及ぼす影響を調べ、観測された波向が流れの影響を受けていた可能性があることを示した。異なる周波数の波浪が二方向から入射する場合の解析を行い、海底地形の概形と流れ場を同時に推定する可能性を示した。

謝辞：レーダ観測、海浜地形・海象データの提供等で多大なる支援いただいた（独法）港湾空港技術研究所漂砂研究室のメンバー各位に深甚なる謝意を申し上げます。

参 考 文 献

- 磯部雅彦(1999)：環境圏の新しい海岸工学，榎木亨監修，フジテクノシステム，pp. 14-21.
- 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 2006-05-01.
- 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・Ahmed, Ahmed S. M.(2004)：X バンドレーダを用いた荒天時の浅海域波浪場の観測，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 46-50.
- Bascom W.(1980)：Waves and beaches, Anchor Books, 366p.
- Dalrymple R. A. (1988)：Model for refraction of water waves, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 114, pp. 423-435.
- FUNWAVE, <http://chinacat.coastal.ude.edu/programs/funwave/funwave.html>，参照 2006-05-01.
- Kirby, J. T. and R. A. Dalrymple (1986)：An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models, Coastal Engineering, Vol. 9, pp. 545-561.
- Piotrowski, C. C. and J. P. Dugan(2002)：Accuracy of bathymetry and current retrievals from airborne optical time-series imaging of shoaling waves, IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, pp. 2606-2618.
- Ryrie S. and D. H. Peregrine(1982)：Refraction of finite-amplitude water waves obliquely incident on a uniform beach, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 115, pp. 91-104.
- Visser P. J. (1991)：Laboratory measurements of uniform long-shore currents, Coastal Engineering, Vol. 15, pp. 563-593.

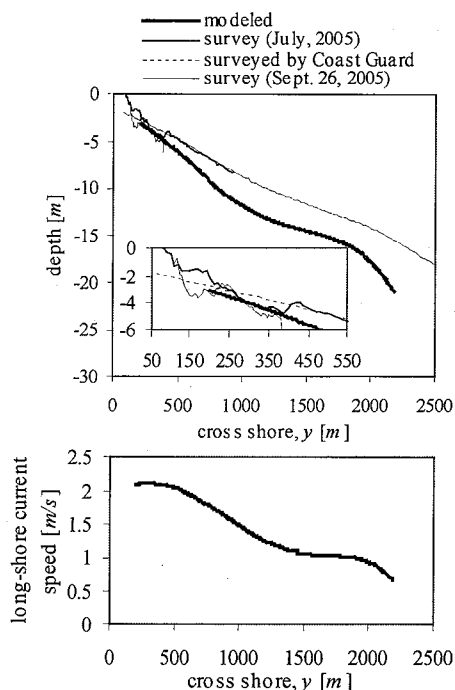


図-12 海底地形と沿岸流速分布の推定結果 上段：海底地形，下段：沿岸流速。海底地形は，海図，測量結果（2005年7月，9月26日）を表示。