

砕波帯内での汚染物質拡散に関する実験的研究

Experimental analysis of pollutant diffusion in the surf zone

代表研究者 東京理科大学助手
Res. Assoc., Tokyo Rika Univ.
Tomonao KOBAYASHI

小林 智 尚

Flow fields under breaking waves are analyzed using a new image processing procedure which is developed in this study. And velocity fields in the neighborhood of a surf zone are evaluated numerically to estimate a behavior of water in the surf zone due to nearshore currents. Breaking waves have two important operations for purification of the water; one is to take uncountable number of air bubbles in the water, and the other is to mix the water forcedly to diffuse pollutant in it. So breaking waves contain an ability to purification of nearshore area. This study is a first step to develop a purification system of the seawater at the nearshore area using breaking waves. The new procedure developed in this study uses Spectrum-Correlation technique of image processing, and can be applied to measurement of instantaneous velocity distribution of the flow containing air bubbles. Ordinary velocity meters cannot be applied such measurement in that flow field. For the numerical estimation of nearshore currents, a parabolic equation is applied. This equation can be treated relatively easy, and can be evaluated not only wave amplitude but also a wave propagation direction of each point in the area. Using both the new procedure and the numerical system, behavior of pollutant in the seawater at nearshore area can be analyzed.

研究目的

近年、地球をとりまく水圏環境の汚染は急速に進んでいる。中でも海岸・沿岸域の汚染レベルの悪化には目を見張るものがある。この海岸・沿岸域では、現在早急な汚染防止対策が求められている。そこで本研究では、海岸域でみられる砕波現象に着目し、この現象を利用した汚染防止・浄化対策の手法の確立を最終的な目標としている。今回はその第一歩となり得る、砕波帯内での流体の混合や拡散・気泡の混入・エネルギーの拡散などの現象を実験的にとらえることを目的としている。

砕波現象は沖からの波が海岸域で砕ける現象であるが、この時、海水中には無数の気泡が取り込まれ、激しい海水の混合が発生する。この現象のうち、海水中への気泡の混合と海水の混合・拡散の2点は、特に海水の汚染防止・浄化に有効であると考えられる。汚染物質を分解・浄化するためには酸素が必要であることはよく知られている。

砕波はこの汚染物質の分解に必要な空気中の酸素を積極的に取り込み海水中の溶存酸素量を増加させている。したがって、この砕波現象を利用して海水への酸素の供給を積極的に行うことにより、海水の浄化を促進させることができる。また一方、水は混合拡散によりある汚染濃度以下にできれば、その自浄作用を示すことも知られている。この点についても砕波は波のエネルギーを流体の混合・拡散のためのエネルギーに変換する現象であるため、この海水の自浄作用を促進する作用があると考えられる。

このように砕波現象は海水を混合・拡散し、さらに海水中に酸素を供給するという、汚染防止・浄化に必要な作用を持っており、十分に利用できる現象と考えられる。しかし、現時点で砕波現象を浄化システムに適用するには、この砕波のメカニズムにまだ多くの未解決な点が残されている。そこで本研究では、まずこの砕波のメカニズムについて、特に海水の混合や拡散、空気の混入の視

点から詳細な実験を通して解析を行う。

研究経過

本研究では海水の浄化の手段として砕波内部に取り込まれた気泡に着目しているが、この領域の流体運動の定量的計測を行う上では、この気泡は逆に邪魔になり、レーザー流速計などの従来の計測器を用いることが困難である。また、砕波内部の流体は非定常で複雑な乱流であるために、従来の定量的測定装置のように1点でのみ計測を行う測定装置ではこの現象のメカニズムを明らかにするのは困難である。したがって、本研究では対象としている領域の流速分布を同時にかつ定量的に測定できる新しいタイプの流速計を開発する必要がある。したがってこの点についても考慮し、当初本研究を進める手順として、新しい流速計の開発、砕波現象の測定、メカニズムの解析、汚染物質の挙動についての考察、という手順を考えていた。しかし、測定装置の開発が予定以上に困難であったため、今回は新しい測定装置の開発と砕波現象の測定に重点を絞り、またこれと並行して、砕波帯近傍での流況を解析するための数値計算による解析システムの構築を行った。

次節ではこの測定装置の開発および測定結果と砕波帯近傍での流況の数値解析システムについて述べる。

研究成果

1. 砕波帯内流速分布測定装置の開発

現在、画像処理方法を利用した流速分布測定法として、トレーサー追跡法や相関法などが提案されている。しかし、これらは流体中のトレーサーに対する規定や処理速度の点で問題を含んでおり、本研究で対象としている砕波帯内での流体運動の測定には不十分である。そこでここでは、流体中のトレーサーには依存せず、かつ高速で処理が可能となるよう、フーリエ変換を利用した画像処理による流速分布測定装置の開発を試みた。

この装置の測定原理を以下に示す。いま、対象としている現象を撮影した画像の輝度分布を関数 $f(x, y)$ で表す。するとわずかの時間差 Δt のちに再び撮影される画像は、もとの画像が $(x, y) = (a, b)$ だけ移動した画像となり、その輝度分布は

$f(x-a, y-b)$ で表される。ここで $f(x, y), f(x-a, y-b)$ をフーリエ変換するとそれぞれ

$$F[f(x, y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-2\pi i k_x x} e^{-2\pi i k_y y} dx dy \\ = F(k_x, k_y) \quad (1)$$

$$F[f(x-a, y-b)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x-a, y-b) \\ e^{-2\pi i k_x x} e^{-2\pi i k_y y} dx dy \\ = F(k_x, k_y) e^{-2\pi i (a k_x + b k_y)} \quad (2)$$

となる。ここで $F[\]$ はフーリエ変換を表し、 k_x と k_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の波数を、 $F(k_x, k_y)$ は $f(x, y)$ のスペクトル密度を表している。ここで、これらの比をさらにフーリエ変換すると

$$F\left[\frac{F[f(x, y)]}{F[f(x-a, y-b)]}\right] \\ = F\left[\frac{F(k_x, k_y)}{F(k_x, k_y) e^{-2\pi i (a k_x + b k_y)}}\right] \\ = F[e^{2\pi i (a k_x + b k_y)}] \\ = \delta(x-a, y-b) \quad (3)$$

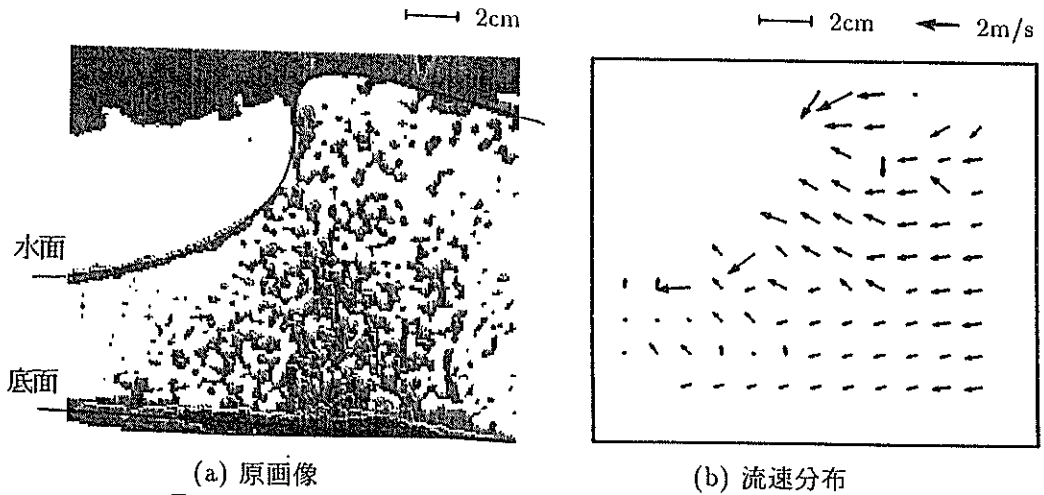
となる。ここで $\delta(x, y)$ はディラックのデルタ関数である。したがって、式(3)で表される2次元平面の輝面の高い点の座標から式(2)中の (a, b) が得られ、領域内の画像の微小時間 Δt での平均移動ベクトルが算定できる。

一方、流速分布を見積もる上で必要な砕波の画像を得る撮影装置の構築も行った。解析に必要な画像はわずかの時間差 Δt を有する2枚の連続映像である。特に砕波のような高速で運動する流体に対してはこの時間差 Δt を数 ms にする必要がある。ここでは一眼レフカメラのシャッター幕の特性を利用して、高速でこの連続写真を撮影する装置を構築した。

以上に述べた原理を用いて流速分布の測定を行った。その結果の一つを図1に示す。この画像は砕波瞬間の流速分布を表している。ただし、この画像を解析する前処理としてラプラシアン・フィルタおよびスムージング・フィルタによる処理を施している。これにより水面近傍でも精度よく流速分布が算定されている。

2. 数値計算による砕波帯近傍の流況の解析

砕波帯近傍では特に強く発生するラディエー



(a) 原画像 (b) 流速分布
 図1. フーリエ変換を用いた画像処理解析法により算定された流速分布

ジョン・ストレスにより海浜流が発生し、砕波帯内の海水を移流する。したがって、砕波帯近傍を含めた沿岸域での海水の汚染防止・浄化を考える上では砕波現象により酸素を取り込んだ海水がこの海浜流によりどのような挙動を示すかを把握する必要がある。そこでここでは数値計算によりこの海浜流の解析システムの構築を行った。

海浜流の流況を数値解析するためには、まず対象領域での波高分布を把握する必要がある。ここでは平口・丸山(1986)によって提案された、放物型方程式の波浪変形モデルを用いた。このモデルは次式によって表される。

$$\frac{\partial}{\partial x}(CC_g k_x \xi^2) + \frac{\partial}{\partial y}(CC_g \frac{\partial \chi}{\partial y} \xi^2) + 2CC_g k_x f'_D \xi = 0 \quad (4)$$

ここで C , C_g はそれぞれ波速と群速度を、 k_x , k_y は x および y 方向の波数を示す。また、 ξ は水位変位の振幅を、 χ は位相角を、さらに f'_D 砕波による減衰高を示している。このモデルは他の波浪変形モデルに比べて計算が簡便であるにも関わらず、屈折などによる波向の変化が考慮されているモデルである。式(4)より得られた水位変位の振幅 ξ の分布から、次式によって海浜流の流速分布が得られる。

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{Q_x^2}{D} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q_x Q_y}{D} \right\}$$

$$+ gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + M_x + F_x + L_x = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{Q_x Q_y}{D} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q_y^2}{D} \right\}$$

$$+ gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + M_y + F_y + L_y = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

ここに、 $D=h+\eta$, $Q_x=uD$, $Q_y=vD$ である。また、 η , h , は水位変化量及び水深であり、 M_x , M_y はラディエーション・ストレスによる項を、 F_x , F_y は海底摩擦項を、 L_x , L_y は水平渦粘性項をそれぞれ表している。

以上のモデルを基礎に構築された海浜流の数値解析システムをいくつかの試験的なケースに適用したところ、ほぼ満足のいく結果が得られた。これによって、溶存酸素を多く含んだ砕波帯内の流体の移流形態が推定可能となった。

今後の課題と発展

本研究は当初目標としていた砕波帯内の汚染物質の挙動について議論するまでに至らなかった。したがって、本研究を継続し、砕波帯内の流体運動のメカニズムを解明し、汚染物質の挙動に関して考察を行うことが現時点での緊急課題である。また、本研究で開発した画像処理を利用した流速分布測定装置について、より精度の高い計測が行

えるように、またさまざまな分野で適用可能となるように改良を進める必要がある。

また今後の発展について本研究は二つの方向を持っている。一つは当初からの最級目標である、波浪を制御し高効率で海水を浄化する海洋海岸構造物を提案することである。本研究を継続し碎波帯内での流況や汚染物質の挙動が明らかになった後、この結果をさらに進め碎波帯近傍での流体や汚染物質について解析を行う。そしてこの成果に現在の海洋海岸構造物による波浪制御の技術を組み合わせ、最終的には海水浄化に有効な海洋海岸構造物を提案する、という方向である。もう一つの発展方向は本研究で開発した流速分布測定装置についてである。現在のコンピュータ技術によ

りこの測定装置はさまざまな分野で簡便に利用できる可能性を多く含んでいる。したがって、この測定装置の改良を進めることによりさまざまな流体の実験的研究の測定手段となり得る測定装置が構築できる。

発表論文リスト

- 1) Kobayashi, Tomonao and Mikio Hino: Spectrum-Correlation Method and Filters Technique Application for Velocity Field Estimation, Flow Visualization IV (1992), pp. 807-811.
- 2) 小林智尚, 日野幹雄, 疋田賢七, 荻原秀規: フーリエ変換を用いた画像処理による碎波内部流速場の測定, 海岸工学論文集, 39 (1992), pp. 56-60.