

風波によるマイクロブレーキング現象の画像計測

大塚 直* ・竹原 幸生** ・水谷 夏樹***
辻 本 剛 三**** ・江 藤 剛 治***** ・高 野 保 英*****

風波の発達・減衰機構や大気・海洋間の物質輸送等に大きく影響を及ぼす風波のマイクロブレーキング現象を画像解析により解明することを目的としている。風波のマイクロブレーキング現象は水表面極近傍で生じる微細な現象であり、その流れ場を画像計測するには拡大撮影し、狭い領域を細かく計測する必要がある。しかしマイクロブレーキングは波動場の状況に大きく左右されるため同時に広く波動場全体を画像計測する必要がある。本研究では、複数台のビデオカメラを用いて高解像度に、しかも広い範囲を画像計測する方法を適用し、高解像度かつ広範囲の画像計測を行った。

1. はじめに

大気-海洋間の運動量、および熱等の輸送現象は、水域環境を考える上で最も重要な因子の 1 つであり、水表面を通した収支量を正確に予測、評価することが急務となっている (例えば、Dean ら, 2002)。特に水表面に作用する主要な外的攪乱である風は、自然界での大気-海洋間の輸送現象を促進させる。水表面を通した輸送現象を明らかにするためには、現象を規定している水表面近傍の流速場の空間構造を明らかにする必要がある。

本研究は風波による水表面の乱れに着目し、なかでも風波の発達・減衰機構や大気-海洋間の物質輸送等に大きく影響を及ぼしているといわれているマイクロブレーキング現象 (例えば、Jones and Toba, 1996) の空間構造を画像解析により解明することを目的としている。

マイクロブレーキング現象は微細な現象であると同時に波動場の状況に大きく左右される。Ebuchi ら (1993) は可視化観察により、風上側の波峰から剝離した気流が波背面に衝突し、高渦度領域を形成し、マイクロブレーキングが生成されると報告している。マイクロブレーキングが生じている流れ場を画像計測するには、その部分を拡大撮影し、かつ同時に 1 波長分程度の広い波動場を撮影する必要がある。

著者らの研究グループは、これまで風波発生時における界面を通した輸送現象の解明を目的に、風波界面近傍の気流・水流の同時画像計測技術の開発を行ってきた (竹原ら, 2000, 2002)。本研究では、波を対象とした横に長い領域を複数台のビデオカメラを用いて高解像度に画像計測する方法を試みた。

2. マイクロブレーキングの画像計測

(1) 実験概要

マイクロブレーキングは波頂部前面に生じる非常に微細な現象である。よって狭い範囲を細かく計測する必要がある。細かく撮影するには拡大撮影する必要があるが、波は進行方向に長い現象であるため、拡大撮影すると波動場全体を把握することは困難となる。波動場全体を把握し、かつ水表面近傍の詳細な計測を行うには、複数台の CCD ビデオカメラを水平に並べ、各 CCD ビデオカメラは拡大撮影し、かつそれぞれのカメラを同期して撮影すればよい。これにより波の進行方向に長く、かつ同時に水表面近傍を詳細に計測できる。

今回は、まず第一段階として 3 台のビデオカメラを用いた計測を行った。原理的には台数を増やせば解像力を上げることができる。

また、風波は不規則波であるため、波高が一定でない。従ってカメラの設置の際に波が画面からはみ出さないように気を付けた。また、風波の 3 次元性により撮影断面より手前の水表面が写り込まないように、水面下から見上げるように少し角度を付けて設置した。

(2) 画像計測に用いた装置

高解像度かつ広範囲を撮影するために、高出力ダブルパルス Nd : YAG レーザー 1 台 (150 mJ/Pulse)、CCD カメラ 3 台 (1008×1018 pixels, Kodak 製)、制御用のパーソナルコンピュータ 3 台、同期装置 1 台、カメラ用ストロボ 1 台を用いた。ダブルパルス Nd : YAG レーザーは二次元の撮影断面を照射するため、シリンダリカルレンズを用いてシート光に広げた。

図-1 に示すように CCD カメラは 2 台を水平に並べ、水表面近傍を拡大し、広い範囲を撮影できるように、もう 1 台を表面決定のために水面上方から少し下を向け設置した。カメラの設置には目印として、画像計測で用いる 90 cm×90 cm 標定板を用いた。標定板には 2.5 cm 間隔で格子線が描かれており、CCD カメラ間の相互の撮影領域を調節することができる。水流部撮影では 1 台当りの撮影範囲を 12 cm×12 cm 程度に設定した。左右の

* 学生会員	近畿大学大学院総合理工学研究科環境系工学専攻
** 正 会 員	博(工) 近畿大学助教授理工学部社会環境工学科
*** 正 会 員	博(工) 国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部
**** 正 会 員	工 博 神戸市立工業高等専門学校教授 都市工学科
***** 正 会 員	工 博 近畿大学教授理工学部社会環境工学科
***** 正 会 員	博(工) 近畿大学助理工学部社会環境工学科

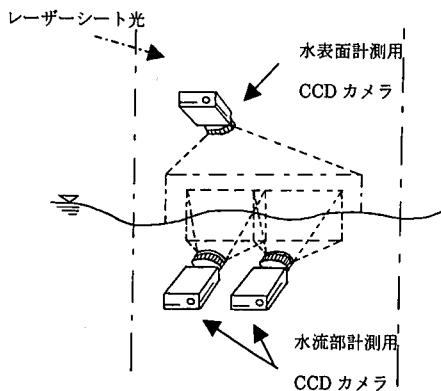


図-1 カメラの配置

CCDカメラの撮影範囲を2.5 cm重複させ、2台で波の進行方向に約20 cm、垂直方向に約10 cmになるように設置した。水面決定用のCCDカメラの撮影範囲は、水流計測範囲全体が入るように設定した。

風波は3次元性が強く、手前の波が写り込まないように、水面より下方から見上げるような角度で固定した。また波が画面からはみ出さないように、静水面が2台のCCDカメラの画面上で中心に位置するように設置した。

同期装置により、ダブルパルスNd:YAGレーザーと3台のCCDカメラのタイミングを完全に同期させた。現時点では、ダブルパルスNd:YAGレーザー1台とCCDカメラ3台を同期することはできるが、撮影開始時刻を合わせることができなかった。よって計測開始時点にストロボを1回画像中に写し込むことにより各CCDカメラの計測開始時点を確認できるようにした。

(3) 実験装置および実験方法

実験には長さ28.5 m、幅1.5 m、高さ1.3 mの風洞水槽(国土技術政策総合研究所)を用いる。水深は0.53 mに設定し、風の吹き出し口から11.3 mの位置において計測を行った。予備実験により、送風機の周波数と計測部での風速分布の関係を求めた。図-2にその結果を示す(水谷ら, 2002 参照)。今回の実験では最大風速が6.67 m/s(周波数200 Hz)および10.2 m/s(周波数300 Hz)の2ケースについて計測を行った。

水流部計測のためのトレーサー粒子として、ナイロン12粒子(平均粒径50 μm 、比重1.02)を用いた。計測は、混入したトレーサー粒子が全体に分配されるように水を長時間循環させた後、計測を行った。

水面位置の決定には水溶性の蛍光染料(フルオレセイン)を用いた。フルオレセインはYAGレーザーにより蛍光を発するため、水面上方からCCDカメラで撮影すると水面位置で大きく蛍光強度が変化する。水面位置は画像上の輝度が最も大きく変化する位置として決定した。

今回の計測では計測部での最大風速が6.67 m/sおよ

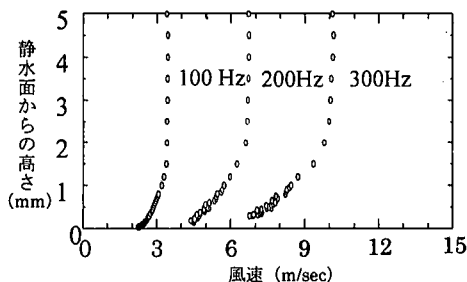


図-2 周波数と風速の関係

び10.2 m/sの2ケースであるため、水流部での粒子の流速をふまえレーザーの発光遅延間隔は3 m secに設定した。

実験は所定の速度の風を風洞内に送り込み、風波を発生させ、内部流が十分落ち着いた後に撮影を行った。

(4) PTV (Particle Tracking Velocimetry) 計測法

撮影されたトレーサー画像から流速を求める方法として、Takeharaら(2000)が開発したPTVの1つであるSuper-Resolution KC法を用いた。

撮影された連続する時刻の二枚の画像を用いて、PTVにより移動ベクトルを算出する(例えば、可視化情報学会, 2002 参照)。予め撮影しておいた標定板(2.5 cm間隔の標定格子を記した板)の画像上の座標を用いて、実座標に変換する。画像座標から実空間座標への変換には1次変換を用いた。1次変換で用いる変換係数は最小自乗法により求めた。

実空間へ変換された移動ベクトルを2枚の画像の時間間隔で割ることで流速ベクトルを算出する。さらに、水面上方から撮影された画像より求めた水面位置のデータを用いて、水表面より上方に分布している誤ベクトルを除去する。

PTVにより求められた流速分布はランダムな点での流速分布となる。渦度やせん断変形速度を求める上で都合の良い格子点状の流速分布に変換した。格子点への流速変換はガウシアン加重平均操作を用いた。

4. 実験結果および考察

(1) 風波特性

風速条件として、計測部での最大風速が6.67 m/s、10.2 m/sの2つのケースについて実験を行った。風波特性量は画像から計測した。それぞれの風速条件のもとで20波の平均値を求めた。最大風速6.67 m/sの条件下で、波高2.06 cm、波長3.85 cm、波速53.81 cm/sであった。また、最大風速10.2 m/sの条件下では、波高2.61 cm、波速73.8 cm/s、波長5.21 cmであった。

まず、比較的マイクロブレイキングが観察しやすい、

最大風速 10.2 m/s の場合について調べた。

撮影された連続画像から、マイクロブレイキングが生じていると思われる連続画像と、碎波していないと思われる連続画像を3ケースずつ抽出した。図-3は風波の波高の変化を波の進行に対してプロットしたものである。波は図中の左から右に進んでいる。マイクロブレイキングが生じているように見える波には●印を、マイクロブレイキングを生じていないと思われる波には▲印を付けた。明らかにマイクロブレイキングを生じていると思われる波は、波の移動と共に波高が減衰している。それに対して、マイクロブレイキングが生じていないと思われる波は、波高の減衰が見られなかった。

図-4には、図-3で示した波の波速の変化を波の進行に対してプロットしたものである。波速に関しても、マイクロブレイキングが生じている場合は、生じていない場合に比べて明らかに減速している。

これらの結果より、マイクロブレイキングが生じている場合と生じていない場合について詳細な観察を行っていく。

(2) 流速分布

最大風速 10.2 m/s の条件下で、マイクロブレイキングを生じている場合と生じていない場合の PTV 結果の1例を図-5, 6に示す。図-5(a), および図-6(a)をそれぞれ時刻 $t=0$ とおく。

図上に示した矢印は風向である。静水面の位置は 0.53 m である。

全般的に水面の波動による速度成分が卓越していることが分かる。図-5では、 $t=1/15$ s から $t=2/15$ s にかけて水面に擾乱が生じており、マイクロブレイキングが生成し始めていると考えられる。 $t=2/15$ s から $3/15$ s に

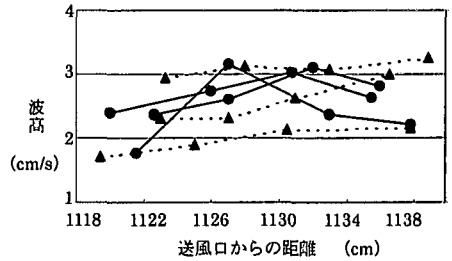


図-3 風波の移動に伴う波高の関係 (最大風速 10.2 m/s)

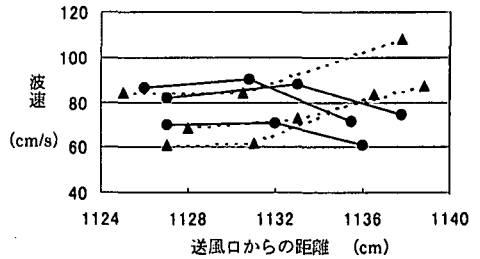


図-4 風波の移動に伴う波速の関係 (最大風速 10.2 m/s)

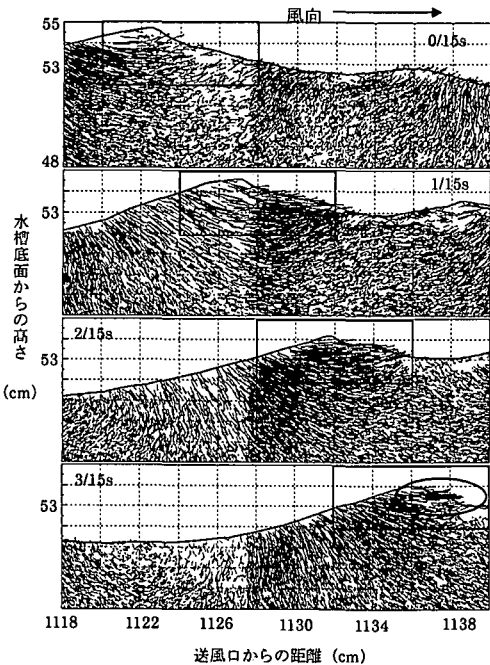


図-5 PTV による流速分布 (15 Hz 間隔)
(マイクロブレイキングが生じている場合)

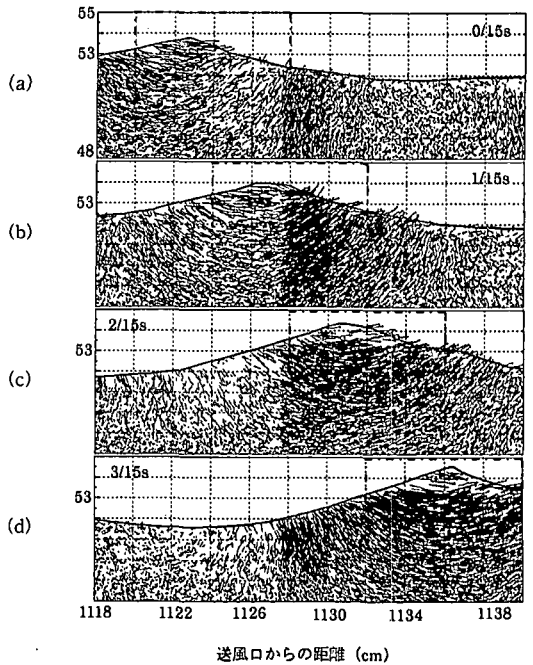


図-6 PTV による流速分布 (15 Hz 間隔)
(マイクロブレイキングが生じていない場合)

かけて明らかに砕波が生じていた。PTV 計測結果を見ると、波頂部に風向きと水平な流れが見られる。特に黒○で囲んだ領域内には、激しく飛び出すような流れが見られ、周囲の波動による速度成分とは異なった動きとなっている。それに対して、図-6では、すべてのPTV結果について波頂部でも周囲の波動による速度成分と同様の動きをしている。

(3) 渦度分布

図-5の実線の□印で囲んだ領域内の渦度分布を図-7に示す。また、図-6の点線の□印で囲んだ領域内の渦度分布を図-8に示す。

以下に図-7, 8の特徴的な現象について述べる。

- ① 両ケースにおいて、波峰付近では、水表面に沿うように渦塊が分布していることが分かる。
- ② 図-7(b)では、他のケースと違い矢印の方向に正負の渦列が波前面から斜め下方に入り込んでいる。この渦列がマイクロブレイキング現象の生成に大きく影響を及ぼしている可能性がある。砕波が生じていないケースでは、このような現象は見られない。
- ③ 撮影画像上では、図-7(b)から(c)にかけて、砕波が発生し始めている状態であった。結果的に波速は69.7 cm/sから71.2 cm/sへと少し速くなり、波高は2.6 cmから3.1 cmへと上昇している。
- ④ 図-7(c)から(d)にかけて撮影画像の観察から砕

波が完全に生じている。波速は71.2 m/sから61.1 cm/sへ、波高3.1 cmから2.8 cmへと減衰している。このとき、波峰付近に強い渦塊が見られる。

- ⑤ 図-8(a)~(d)の順に波速・波高が共に増加している。特に(c)から(d)にかけて、波速が84.4 cm/sから108.1 cm/sへ、波高が2.13 cmから2.36 cmへ最も増加している。
- ⑥ 図-7(c), 図-8(d)は、波の波高・波速が共に大きく増加した直後の結果である。両方のケース共に、水表面直下に分布する強い渦度の下方に、弱い負の渦度が波の進行方向に連なって長く分布している。

(4) 最大風速6.67 cm/sの場合

最大風速6.67 cm/sのケースにおける、マイクロブレイキング現象が生じていると思われる1ケースを抽出し、最大風速10.2 m/sのケースと比較した。

以下に図-9の特徴的な現象について述べる。

- ① 撮影画像の観察から図-9(a)~(d)にかけて、明瞭なマイクロブレイキングは生じていないが、波は減衰している。
- ② 図-9(a)から(b)にかけて、波高は1.1 cmから1.58 cmへ、波速は51.1 cm/sから57.2 cm/sへと、いったん増加し、(c)から(d)にかけて波高は1.52 cmから1.24 cmへ、波速は60 cm/sから40 cm/sへと減少している。

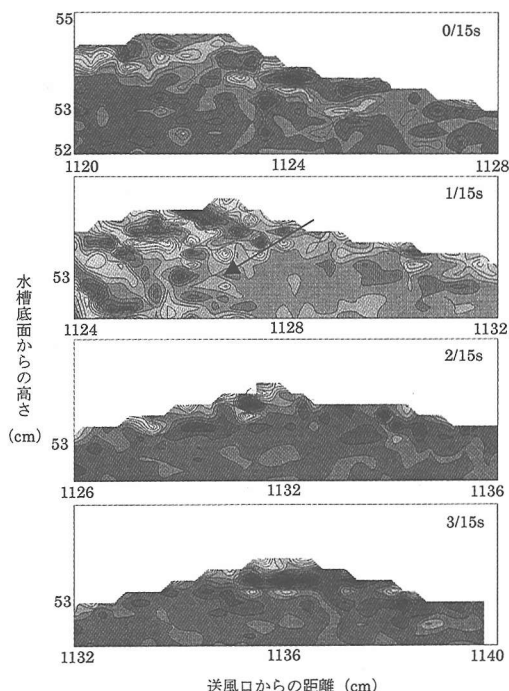


図-7 マイクロブレイキング発生時の渦度分布
(白→黒: 160 → -200 1/sec)

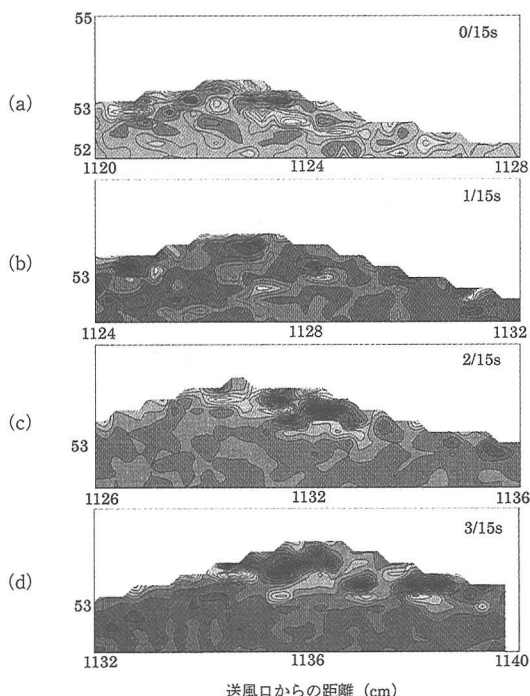


図-8 発達する波の渦度分布
(白→黒: 250 → -200 1/sec)

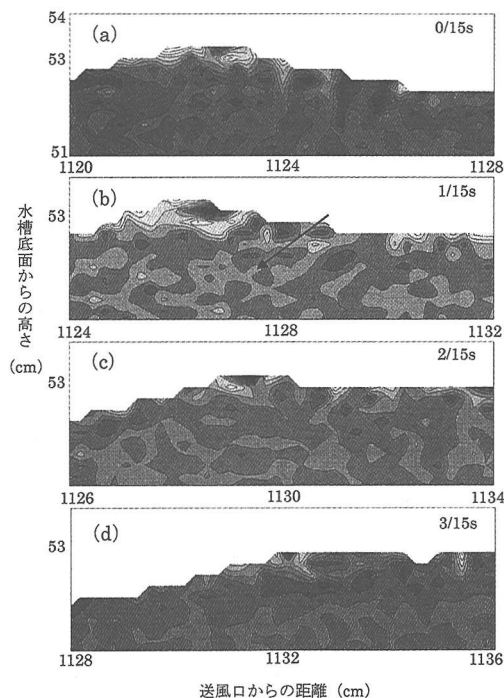


図-9 風速 6.67 m/s の砕波時の渦度分布
(白→黒: 80 → -60 1/sec)

- ③ 図-9(b)では、明確ではないが、弱い正負の渦列が斜め下方に入り込んでいる。

図-7(b)と同様な構造が見られる。この現象が発生した後には波高、波速が減衰している。

5. 結 言

風波によるマイクロブレイキング現象の空間構造を解明するため、3台のCCDカメラを用いて、広範囲かつ高解像度なPTV計測を行った。これにより波動場全体を把握した上で水表面極近傍の詳細な結果を得ることができた。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ① マイクロブレイキングの生成により、波高、波速が急激に減衰することが確認できた。
- ② 波峰付近では、波面に沿って、渦塊が生じる。
- ③ マイクロブレイキングが生じる前に、波峰前面から水深斜め下方に渦列が生じる。これがマイクロブレイキングの生成過程に影響を及ぼしている可能性が考えられる。
- ④ マイクロブレイキングが生じた後に、波峰直下に強い渦度領域が生じる。

今回、3台のCCDカメラを用いることにより、水表面近傍の詳細で、かつ広範な画像計測を行うことができた。しかし、今回の計測に用いたPIV計測装置の最高サンプリングレートは15 Hzであり、十分な時間分解能がなかった。今後より時間分解の高い計測が必要である。

参 考 文 献

- 可視化情報学会 編 (2002): PIVハンドブック, 森北出版, 328 p.
- 竹原幸生・江藤剛治・前田崇雄・相武克彦 (2000): PTVによる風波発生時の水表面近傍の気流・水流計測法, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 101-105.
- 竹原幸生・真木正弘・辻本剛三・江藤剛治・高野保英 (2002): 風波発生時における水表面近傍の気流・水流のPTV同時計測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 66-70.
- 水谷夏樹・佐藤裕司・橋本典明 (2002): PIV計測による白波砕波上の気流剝離特性, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 61-65.
- 光易 恒 (1995): 海洋波の物理, 岩波書店, 210 p.
- Dean, M. A., W. M. Drennan, E. S. Saltzman, and R. Wanninkhof, eds (2002): Gas transfer at watern surfaces, AGU, 383 p.
- Ebuchi, N., H. Kawamura, and Y. Toba, (1993): Bursting phenomena in the turbulent boundary layer beneath the laboratory wind wave surface, In Natural physical sources of under water sound, B. R. Kerman, ed., Kluwer Acad Publ., pp. 263-276.
- Jones, I. S. F. and Y. Toba, editors (2001): Wind stress over the ocean, Cambridge University Press, 303 p.
- Takehara, K., R. J., Adrian, T. Etoh, and K. T. Christensen, (2000): A Kalman tracker for super-resolution PIV, Experiments in Fluids, [Suppl.] pp. S34-S41.