

図-9 自由表面の検出に波高計を用いる方法

コスト面が生じる。この他にも図-9のようにレーザ一面から僅かに離れた場所(数mm)に容量式波高計を設置し、画像の記録と同期を取ることで画像中央における正確な波高の記録を得ることができる。両者のデータから画像中央における波高と直下の流速の鉛直分布は必然的に算出することができる。また、波動理論を適用して空間方向に展開することで画像内程度の範囲であれば空間波形を近似的に得ることは可能である。しかしながら、砕波が生じるような非線形性の強い波形に対しては画像の端部で誤差が大きくなることに注意が必要である。

以上のように自由表面が計測対象となることによって生じる諸問題について述べてきた。この他にもPIV解析を行うにあたっては、前述の検査窓が自由表面にかかってしまうような場合は計算結果に信頼性がない。自由表面下の流体運動と自由表面よりも上部の光の散乱による記録は、全く独立なものであり、検査窓内に両者の情報が混在するような場合は、算出結果の精度に保証ができなくなる。この面から見ても検査窓のサイズは小さい方がより自由表面近傍まで速度情報を得ることができる。

4. 波動成分と平均流の取り扱い

PIV解析が終わり、自由表面位置との結合が済むと図-10のような速度場が得られる。しかし、速度場だけが得られれば問題が終了するような研究課題はほとんど無く、乱流諸量や渦度分布などの2次量を算出しなければならない。図-10は風波の内部流速場を示したものであるが、図を見ても分かるように波動成分が卓越しており、吹送流によるせん断乱流や砕波による乱流成分は図を見る限りほとんど確認することができない。一般に波動場における内部流速場は波動成分が卓越しており、砕波帯のボア領域を

除いて乱流成分は小さいのが通常である。そこで、これらの速度場から波動成分を取り除くことを考えなければならない。

波谷部より下の常に水面下に没している領域においては、計測点の流速の時系列データが得られることから、移動平均法やパワースペクトルからハイパス・フィルターを用いて乱流成分を抽出する方法が一般的である。安田ら(2000)はスペクトルから風波下の流速の乱流成分の分離を行っている。しかし、計測点の流速の時系列が断続的に欠損する波谷部から波頂部に至る領域については、これらの方法を用いることができず、アンサンブル平均法を用いる方法が用いられている。Chang and Liu(1999)は砕波後の乱流場に対し、20波のアンサンブル平均を用いて平均場と乱流場を分離している。また、水谷ら(2001)も同じ条件下で10回の繰り返し計測を行いアンサンブル平均を用いて乱流諸量を算出している。これらの結果はいずれも再現性の高い造波機による実験であるため、乱流場の算出が可能であった。では、波動成分がそもそも不規則な波浪場ならばどうすればよいか。水谷・鈴木(2004)は、風波を対象にアンサンブル平均を用いて乱流場の算出を行っている。始めに波高計の記録から、波高と周期の頻度表を作成し、スペクトルのピーク周波数と有義波高にごく近い波のデータだけを抽出して重ね合わせ平均を行った。その結果が、図-11である。左側がアンサンブル平均流速場であり、右側がその渦度分布である。対応する渦度場はほぼゼロとなっており、平均流場が非回転流れであることが分かる。しかし、この方法では特定の諸元を持つ波の成分に対して計算を繰り返さなければならず、効率的でない。また、膨大な計測数を重ねても条件に適合するサンプル数は少なくなってしまう、アンサンブル平均の精度が全領域に渡って確保することができないなどの問題がある。寺澤ら(2005)は画像から求められた空間波形を元に流れ関数法を用いて波動成分を求め、PIV解析結果から差し引くことで吹送流成分を求めている。砕波を伴うような強非線形な場においてもこの手法が適用可能かどうか、今後精度の検証を行いより信頼性のある手法として確立しなければならない。

5. 結語

本資料では、波動場計測における可視化計測の現状を紹介すると共に、機器の選定法や問題点について述べた。また、波動場計測に特有の自由表面の問題についても述べ、その解決策に対してもいくつかの事例を紹介した。PIV解析結果から平均成分や波動成分の分離に関しては、それぞれの成分の厳密な意味での定義がなく、特に波頂部から波

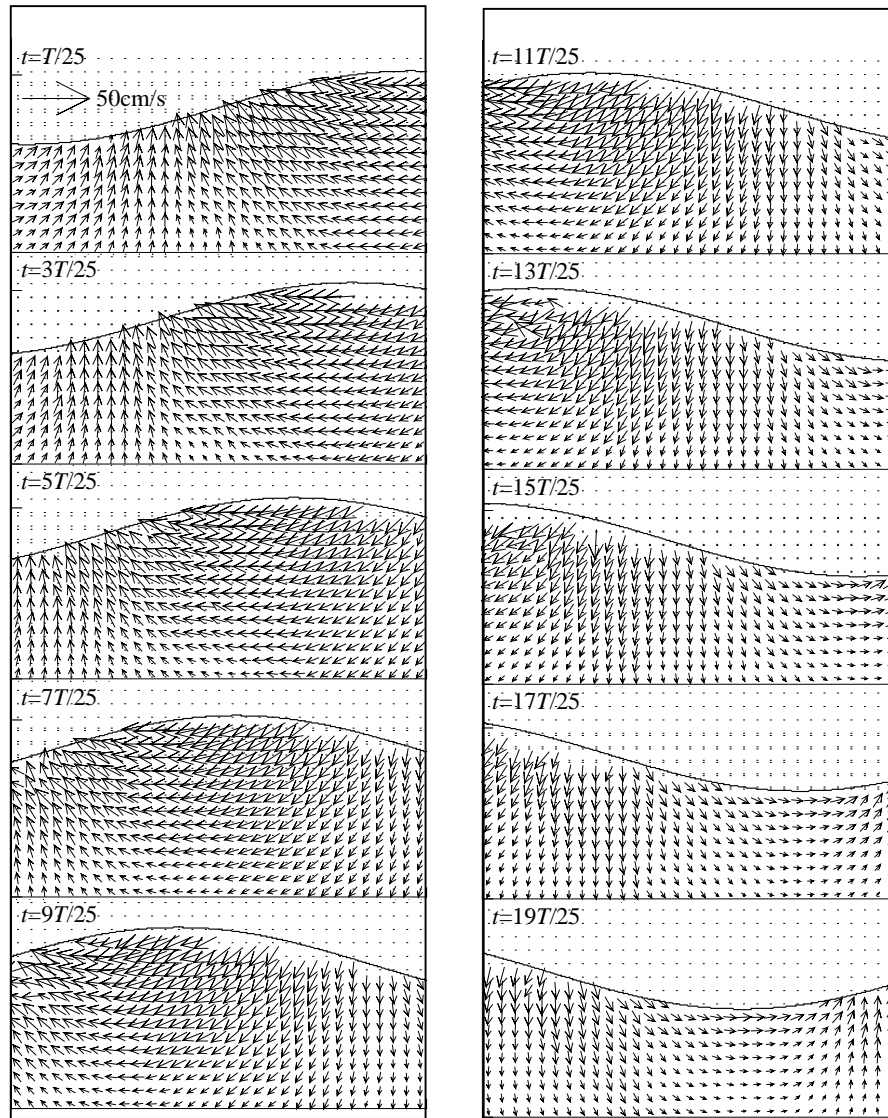


図-10 PIV 解析された風波内部流速場の一例

谷部にかけての領域については手法が確立しているとは言い難い状況にあり、今後も検証研究が必要であろう。

今後、機器の性能は益々進化し、より容易で精度の高い可視化計測が可能になると思われる。機器の発達に伴いこれから可視化計測を行う研究者の一助になれば幸いである。

(2005年6月29日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり、九州大学大学院工学研究院の橋本典明教授(元独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋水理・高潮研究室長)には有益な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。また本研究は、文部科学省科学技術振興調整費若手任期付支援研究費による成

果であることを付記して謝意を表します。

参考文献

- 日野幹雄, 灘岡和夫, 小俣 篤 (1984) : 砕波帯の乱れの組織渦構造と水粒子速度場について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.1-5.
- 西村仁嗣, 武若 聡 (1988) : VTR 画像の相関解析による砕波時内部流速分布の推定, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp.45-48.
- 小林智尚, 日野幹雄, 疋田賢七, 萩原秀規 (1992) : フーリエ変換を用いた画像処理による砕波内部流速場の測定, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.56-60.
- 宮本恭交, 長尾昌朋, 新井信一, 上岡充男 (1999) : 孤立波砕波の水面形と流速分布の可視化計測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.131-135.
- 水谷夏樹, 安田孝志, 武田真典 (2000) : 砕波後の組織渦構造とエネルギー散逸の関係について, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.36-40.

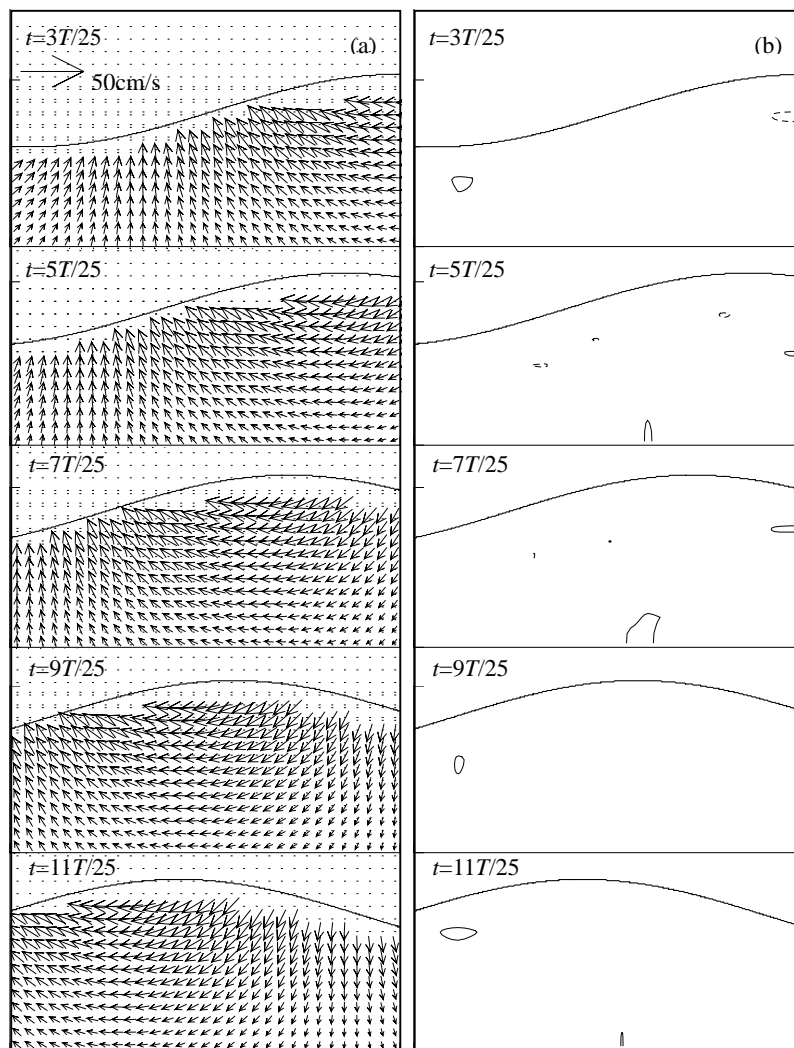


図-11 アンサンブル平均された風波内部流速場とその渦度分布

水谷夏樹, 安田孝志, 武田真典 (2001) : 砕波後の流れ場の3次元特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.156-160.

渡部靖憲, 松本靖治, 佐伯 浩 (1998) : 砕波帯内の3次元水粒子軌道の実験的研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.136-140.

竹原幸正, 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.

小笠原敏記 (2004) : 強風下の海洋表層流の輸送・乱流構造の解明とモデル化, 岐阜大学博士学位論文, 100p.

水谷夏樹, 橋本典明 (2004) : 風波が発達した界面下の吹送流特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.71-75.

西野耕一 (1998) : PIV可視化技術の要点, 実践集中講義「PIVの要点」, (社)可視化情報学会編, pp.27-40.

(社)可視化情報学会 (1998) : 実践集中講義「PIVの要点」, (社)可視化情報学会編, 139p.

(社)可視化情報学会 (1998) : PIVハンドブック, (社)可視化情報学会編, 328p.

Raffel, M., C.E. Willert and J. Kompenhans (2000) : PIVの基礎と応用, Springer-Verlag Tokyo, 246p.

大塚 直, 竹原幸正, 水谷夏樹, 辻本剛三, 江藤剛治, 高野保英 (2003) : 風波によるマイクロレーキング現象の画像計測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.86-90.

安田孝志, 水谷夏樹, 板野誠司, 井坂建司, 西部義彦, 小林智尚 (2000) : 吹送流の発達と流速分布に及ぼす風波砕波の影響について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.441-445.

水谷夏樹, 鈴木 武 (2004) : Micro-breakingに伴う風波界面下の乱流構造, 国土技術政策総合研究所資料, No.170, 7p.

寺澤泰一, 竹原幸正, 江藤剛治, 辻本剛三, 水谷夏樹 (2005) : Deanの流関数を用いた風波下流速分布からの波動成分分離の試み, 土木学会年次学術講演会概要集, (印刷中)

Svendsen, I.A. (1987) : Analysis of surf zone turbulence, J. Geophys. Res., vol.92, No.C5, pp.5115-5124.

Okuda, K., S. Kawai, M. Tokuda, Y. Toba (1976) : Detailed observation of the wind-exerted surface flow by use of flow visualization methods., J. Oceanogr. Soc. Japan, 32,

pp.53-64.

- Kawamura, H. and Y. Toba (1988) : Ordered motion in the turbulent boundary layer over wind waves, *J. Fluid Mech.*, 197, pp.105-138.
- Chang, K. and P.L.-F. Liu (1998) : Velocity, acceleration and vorticity under a breaking wave, *Phys. Fluids*, 10(1), pp.327-329.
- Chang, K. and P.L.-F. Liu (1999) : Experimental investigation of turbulence generated by breaking waves in water of intermediate depth, *Phys. Fluids*, 11(11), pp.3390-3400.
- Kawai, S. (1982) : Structure of air flow separation over wind wave crests, *Boundary Layer Meteorology*, 23, pp.503-521.
- Reul, N., H. Branger and J.-P. Giovanangeli (1999) : Air flow separation over unsteady breaking waves, *Physics of Fluids*, vol.11, No.7, pp.1959-1961.
- Mizutani, N and N. Hashimoto (2003) : Air flow characteristics over wind waves from measurements by the PIV technique, *Proc. 13th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, vol.3, pp.253-157.
- Etoh, G.T., Takehara K. and Takano Y (2002) : Development of high-speed video cameras for dynamic PIV, *J. Visualization*, vol.5, No.3 pp.2313-224.
- Hart, D.P. (2000) : Super-resolution PIV by recursive local-correlation, *J. Visualization*, vol.3, No.2, pp.187-194.
- Banner, M.L. and Peirson W.L. (1997) : Tangential stress beneath wind-driven air-water interfaces, *J. Fluid Mech.*, 364, pp.115-145.