琉球大学学術リポジトリ

巻き波型砕波に伴う組織的乱流構造に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2010-02-23 キーワード (Ja): キーワード (En): Horizontal Roller, Wave Breaking, Plunging Breaker, Mass Transport, Undertow 作成者: 仲座, 栄三, 津嘉山, 正光, 宮里, 一郎, 榎本, 真久, 川満, 康智, Nakaza, Eizo, Tsukayama, Seikoh, Miyazato, Ichiro, Enomoto, Masahisa, Kawamitsu, Yasutomo メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/15847

巻き波型砕波に伴う組織的乱流構造に関する研究

仲座　栄三*　津嘉山正光*　宮里　一郎**
榎本　真久***　川満　康智****

Coherent Structures in Turblent Flow Under Plunging Breaker of Water Waves

Eizo NAKAZA*, Seikoh TSUKAYAMA*, Ichiro MIYAZATO**
Masahisa ENOMOTO***, and Yasutomo KAWAMITSU****

Abstract

In surf zone, wave height and velocity of incoming waves change dramatically. It has been said that the sand transportin the near shore region is mostly occurred in the surf zone. Sawaragi and Iwata(1973) discovered a coherent structure of turbulent flow under plunging breaker, and they named it as 'Horizontal roller'. They pointed out that a lot of sediment on the sea bottom is curled up towards water surface by the horizontal roller. Clarification of the turbulent structure in breaking waves make advances in developing the physical models of wave breaking and sand transport. But until now,many attempts to measure the velocity field in surf zone, with the LDV or EMC, have been prevented due to a large amount of bubble entrained by plunging of water jet.

Nakaza et.al. (1995) succeeded in measuring of the velocity field contained a large amount of bubble under plunging breaker. In this study, by Nakaza's method utilizing a super-miniature proper current meter, the coherent structures in surf zone, particular the horizontal roller, are clarified experimentally. The generation and dissipation of large eddies in the water under plunging breaker are studied, applying Dean's stream function theory to discrete thepotential and velocity components of flow velocity from measured data.

Key Words : Horizontal Roller, Wave Breaking , Plunging Breaker , Mass Transport , Undertow

1．はじめに

砕波帯内は，波の波高や内部流速が劇的に変化するところである．その砕波帯内では，波の変形や沿岸流の形成，大規模漂砂の発生など海岸工学上最も重要視される波浪・水理現象が生じている場所でもある．その現象の激しさがゆえに，砕波帯内は通常多量の気泡や巻き上げられた底質などで水表面及び内部を覆われている．それゆえ，砕波帯内の内部流速はおろか水位変動さへも未だ十分に明らかにされていない（水位変動に関しても，水表面付近に気泡を大量に含む所では，通常見かけ上のものと言える）．

砕波の中でも，特に巻き波型の砕波は，その形の美しさや漂砂などに及ぼす影響の大きさなどから，常に海岸工学者の興味を引きつけてきたと言える．その巻き波型砕波の下では，Horizontal Roller （水平渦）と呼ばれる大規模な渦が発生し，それが波の減衰や海底砂の巻き上げに大きな影響を及ぼすことが指摘されてきた（例えば，椹木ら（1973），酒井・内田（1984））．

受理：1996年5月20日
・工学部環境建設工学科
(Dept . of Civil Engg ., and Architecture. Fac . of Engg .)
・・（有）海岸環境調査研究所
(Coastal Environment and Engineering Center , Ltd .)
・・・（株）エコー
(Enviromental Consultant for Ocean and Human , Co .)
・・・・大学院工学研究科建設工学専攻
(Graduate Student , Architectural and Civil Eng .)

これまで，多くの研究の中で最新の測定技術の導入と共に，その大規模渦構造の解明や渦と漂砂との関連の解明などが試みられてきたが（例えば，柴山・堀川（1985），三村ら(1984)，灘岡ら（1985a），灘岡ら（1987），水口・友金（1985））大量に含まれる気泡の存在によって，殆どの研究でその核心に迫るまでには至っていない．我々が，本当に明らかにしなければならないのは，気泡混入領域中心部を含めた流れの構造でこそあり，底質などとの関連から底面近傍の流速場の解明のみを行うことは問題の解決にならず，その実態は未だベールに包まれたままと言える．

そのような状況下，仲座ら（1995）は，大量に気泡を含む砕波帯内の流速測定に，超小型プロペラ流速計を導入し流速計測に成功した．この計測手法は，原理的には旧式であるが超小型化の技術は最新であり，急激に変化する砕波帯内の流速測定へのプロペラ流速計の導入はまさしくコロンブスの卵と言えよう．

ところで，ごく最近，分散性を有する非線形波動方程式の開発が盛んに行わるように至り，砕波帯外すなわち非砕波領域における波動場の数値計算手法が大きく前進している．波動場の数値計算において問題となるのが，砕波現象のモデル化である．数値計算の高精度化に伴い，砕波現象のモデル化も物理現象をより正確に取り組んだものであることが要求されている．

数値計算に砕波現象を取り組む手法としては，一般にエ

ネルギー減衰項の付加というダイレクトな表現や運動方程式中への拡散項の追加という形で行われている．しかしながら，この手法では，「物理現象が劇的に変化する」ということを表現するには迫力不足という感がする．つい最近，Pedersonら（1992，1995）は，噴流という新たな表現を巻き波型砕波の数値計算に採用し，水平渦やそれに巻き上げられる底質の移流計算を行っている．これも砕波点を破切りに「劇的に変化する流速場」を再現するための苦心の策であるが，その結果に大きな問題があることは，この後すぐに本論文中で示されることになろう．

砕波帯内の内部流速構造を明らかにすることは，幾つかの砕波形式が存在することの物理的な説明を与えることを始め，上述のような砕波帯内で生じる様々な物理現象の解明に大きく寄与するばかりでなく，数値波動解析が今抱えている砕波現象の物理モデルの開発という難問へも光明を与えることと期待される．

本研究は，このような砕波帯内の組織的乱流構造を明らかにすることを目的として，巻き波型砕波に伴う流速場の解明を実験的に行う．

2．実験装置及び実験方法

図-1に，実験装置の概要を示す．用いた水槽は，長さ27m幅0.7mの二次元不規則波造波水槽である．図示のとおり，モデルの縮尺として1/100を想定して，水槽の一端に勾配が1/10の一様斜面を設置した．水位の測定には，12台の容量式波高計を用いた．また，流速の測定には2成分電磁流速計2台と3成分超小型プロペラ流速計2台を用いた．また，水位変動や内部流速の可視化には気泡や中立粒子を用い，3CCDビデオカメラによって行った．水位及び流速計からの検出信号は，A/D変換器をへてパソコン上へ取り込んだ．データサンプリングは，静水状態に造波後1時間を得てから開始し，サンプルレートを50Hzとして，各測定点で6000個（約85波相当長）のデータを得た．

超プロペラ流速計の有用性は，仲座ら（1995）によっても説明されているが，ここでは電磁流速計との比較や，超プロペラ流速計から得られるデータの取り扱い方について述べる．図-2に，それぞれ水平方向(u)，鉛直方向(w)の超プロペラ流速計と電磁流速計で得られた流速データの比較を示す．これは，砕波点（B.P.）直前で得られたデータである．図示のとおり，大きさ的には両者はほぼ同じであるが，超プロペラ流速計のデータに位相の遅れが生じている．データ解析では，この位相の遅れ分（0.06秒）だけプロペラ流速計のデータをシフトさせて用いた．また，大きさに関してはそのままの値を用いた．

3．実験結果及び考察

実験に用いた入射波は，規則波で周期1.4秒，波高8.9cmである．この実験波は，仲座ら（1995）が平均流速と平均水位の変動などを検討した際に用いた波と同一である．また，用いた水槽及び斜面モデルも同一のものであり，波高変化など平均的な水理量の変化に関しては，仲座ら（1995）を参照して頂きたい．

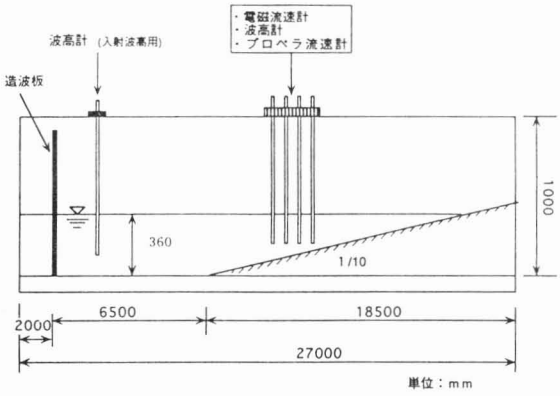


図-1　実験装置

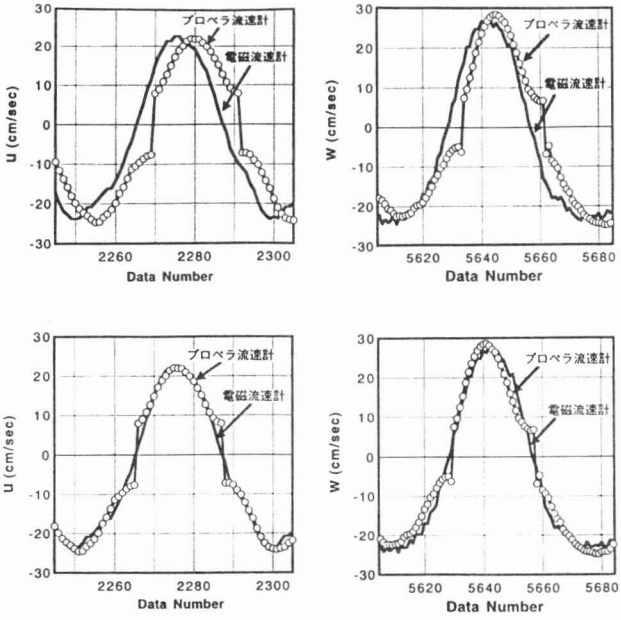


図-2　超小型プロペラ流速計と電磁流速計の比較
（水平方向及び鉛直方向）

3-1 巻き波型砕波の形成と流れの組織的乱流構造

図-3-(a)～(h)に砕波瞬間から遡上するまでの波形及び流速分布を示す．図中に示す流速ベクトルの値は，85波間で位相平均された値である．また，水表面波形に関しては，ビデオカメラから読みとった値を示してある．本論文では，現象をなるべく詳細に見るということから，実験値を0.1秒あるいは0.02秒間隔で示してある．図-3-(a)は，波峰頂部の水塊が飛び出す僅かに前の瞬間であるが，強い戻り流れと進行波（ポテンシャル運動）に伴う流速とが激しくぶつかり，波の前面で強い上向き流速を生じている（○で囲む領域）．図-3-(b)に示すように，この上向き流速は，波頂直下の流速を上側に押し上げ，さらに進行する波動成分の水平流速と共に，波頂付近のジェットを造り出す．こうして形成されたジェットは，大きく巻き込みながら波の前面に突入していく（図-3-(c)に示す瞬間）．突入部の水塊の僅かに後方には，空気塊がとじこめられる．このジェットの突入は，さらに波前面へ水塊の突入を生じさせるが，その飛び

出す水塊と空気塊の下側には，戻り流れが存在しており，波頂より僅かに後方で上向き流速を生じている．結果として，この時点から水平渦が形成される．

図-3-(d)で示すように，水塊が突入すると，それは自由噴流に類似した流れを水表面から底面に向けて形成させ，その地点で波前面の戻り流れは遮断される形となり，大規模渦構造が作られている．図-3-(e)の状態では，その組織渦の前面で強い下向き流速が形成されており，他の領域の流速を大きく上回っている．図-3-(f)の状態では，飛び出した水塊の再突入によって，第一の渦の前面にさらに第二の渦の形成が見られる．図-3-(g)で示す状態でも第一渦に伴う下向き流速は存在しており，図-3-(c)の状態からこの時間帯までの間は，底質に及ぼす影響が大と想定される．第二の渦の前面では，顕著な水塊の再飛び出しは見られず，波はボア状になって遡上した（図-3-(h)で示す状態）．この時，突っ込み点（P.P.）よりも僅かに岸側に，第一の水平渦が移流拡散した状態で残っている．また，この領域付近の流れは殆ど淀んだ状態である．

現地海岸などで，巻き波砕波に伴う漂砂を見ていると，三次元的な巻き波砕波を伴う波が通過後，しばらくしてジェットの突入点付近から大量の気泡と膨大な量の砂雲とがパッチ状に海底から湧くような形で現れる．この時，水平流速は殆ど認められず，あたかも気泡の上昇に伴い，砂雲が舞い上がるように見える．これらの現象は，まさしくここで示した流れの構造から全て説明される．このことに関する具体的な説明は，海底砂の巻き上げ現象の数値計算結果と共に，別の機会に述べる予定である．

3-2　Deanの流れ関数法を用いたポテンシャル成分と渦度成分との分離

強非線形の波動場で水面形の情報から内部流速を予測する手法に，Deanの流れ関数法がある．これは，波形を任意の周波数成分からなる成分波と見なし，成分波に対応する流速にポテンシャル波の流速分布を適用して，水表面位置で力学的境界条件を満足するように，各成分波の振幅を決定する方法である．そのようなことから，この手法は水表面位置が明確であり，かつエネルギー損失無しとするBernoulliの定理を満足するような場で無ければならない．しかしながら，これらは砕波帯の中では満足されない．そのようなことから，灘岡ら（1985）らは，水表面の境界条件を採用するのを止め，気泡などが影響しないような海底面付近の流速を近似するという，いわばDeanの改良バージョンとでも呼ばれる手法を用いている．しかしながら，この手法も流速データから時間平均流速をさっ引いた残りの成分をそのまま波動成分としなければならないなど，重大な問題点を有している（図-3に示したように，組織的渦構造は，波と同様，周期的に形成されるということや，戻り流れも脈流の構造を持つという理由による）．

以下では，上記のような問題点があるものの，強非線形の波動場の流速を比較的精度良く与えるDeanの流れ関数法を用いて，容量式波高計で得られた水表面のデータからポテンシャル波動成分の予測を行うこととする　図-4-(a)～(h)に，Deanの流れ関数法を適用して求めたポテンシャル波動

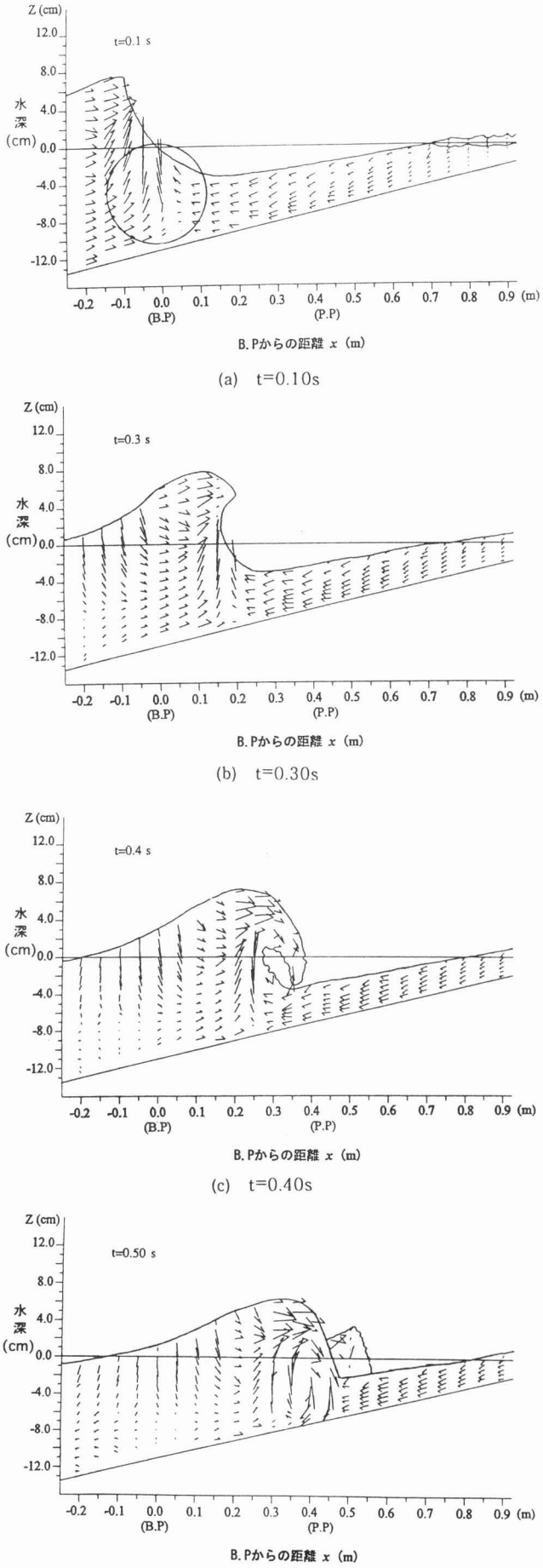
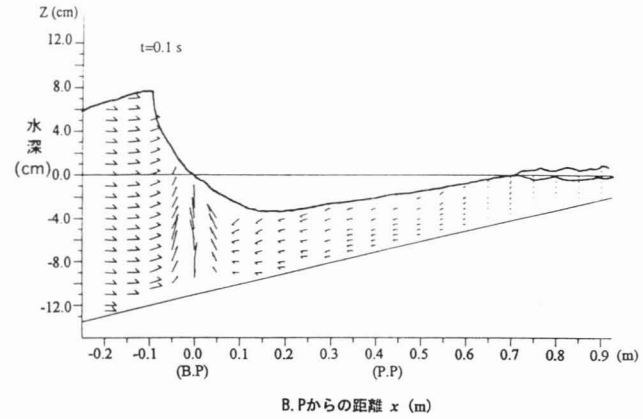
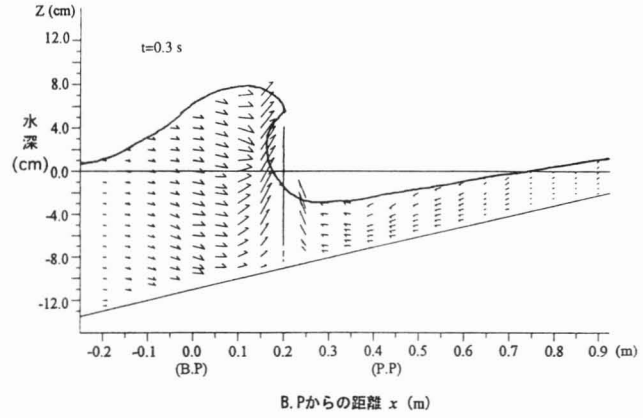


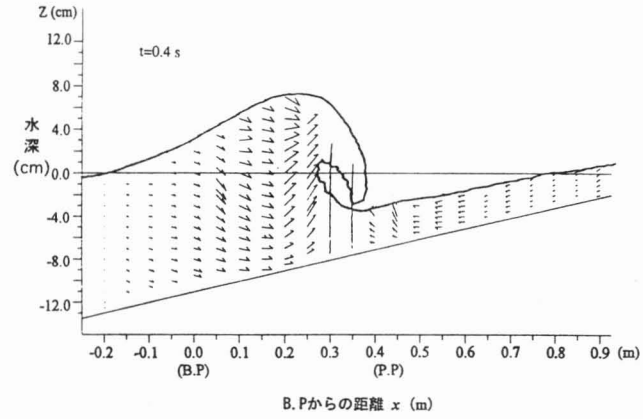
図-3　位相平均流速計の時間変化（実測値）（続く）



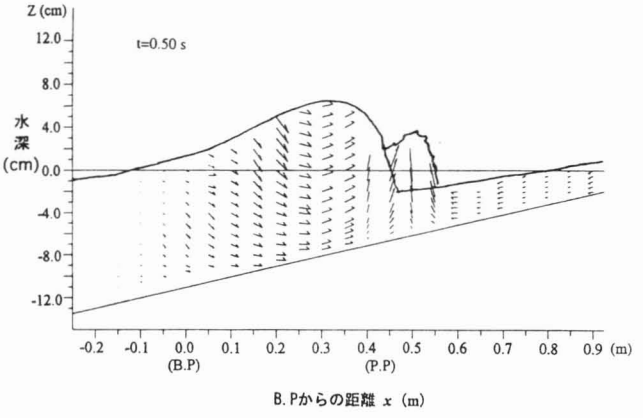
(a) t=0.10s



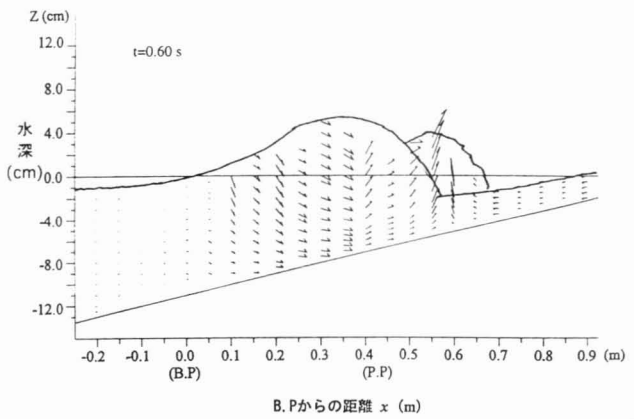
(b) t=0.30s



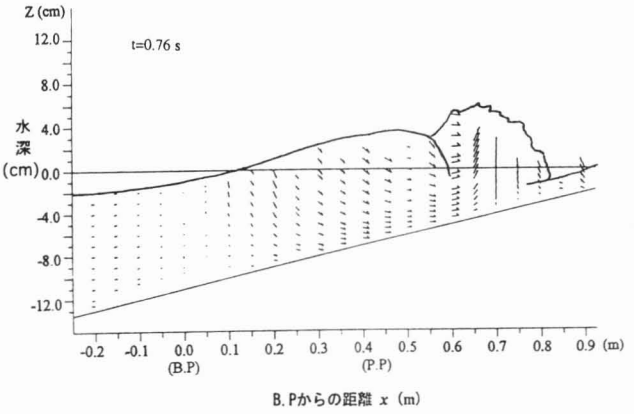
(c) t=0.40s



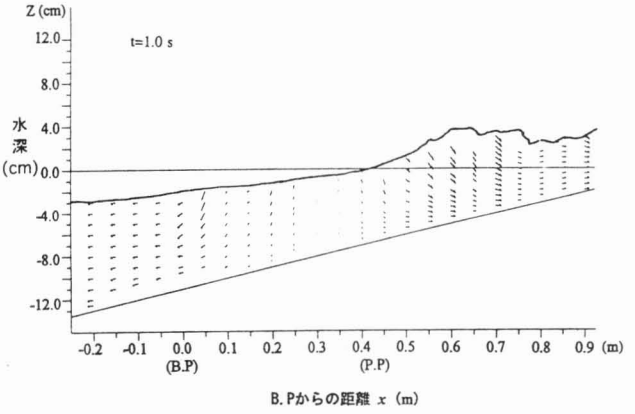
(d) t=050s



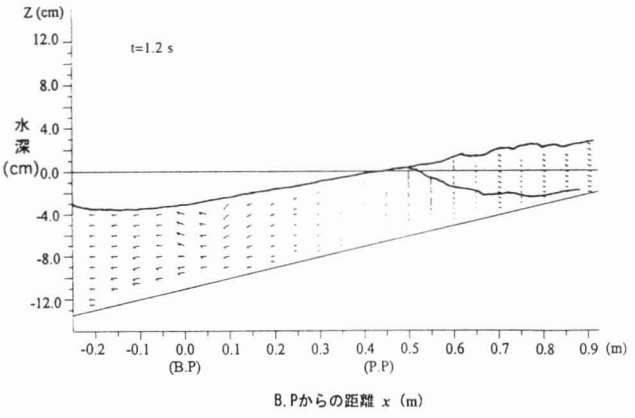
(e) t=0.60s



(f) t=0.76s

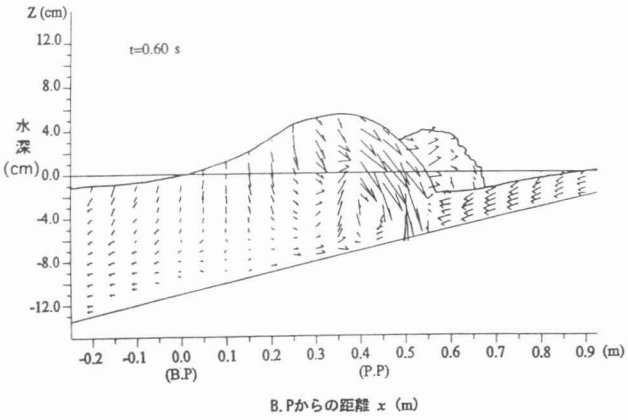


(g) t=1.00s

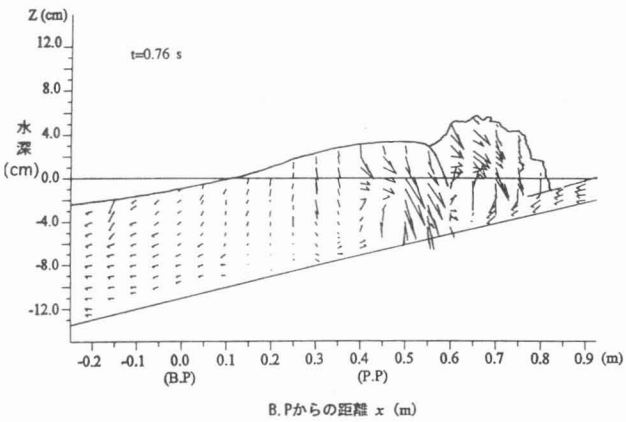


(h) t=1.20s

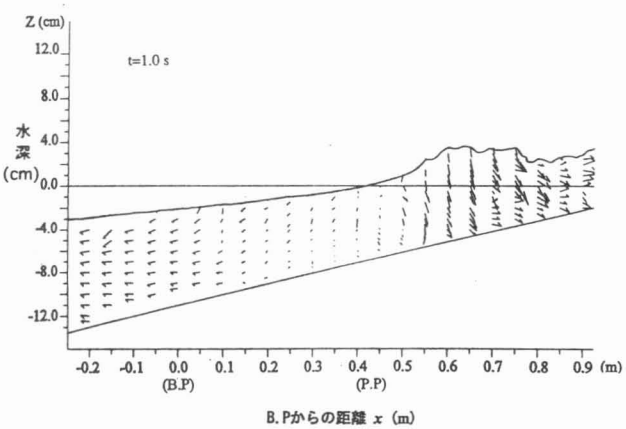
図-4 位相平均流速計の時間変化（計算値）



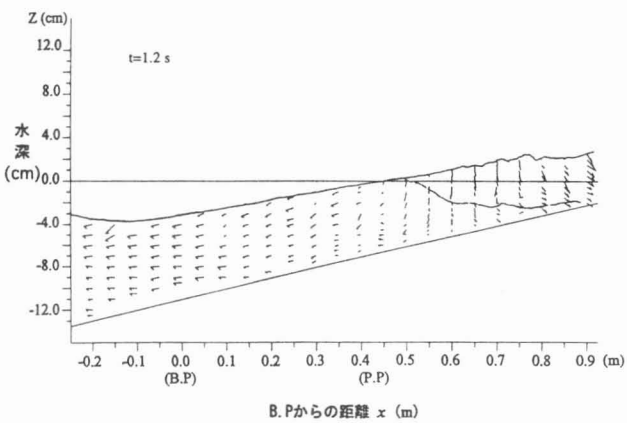
(e)　t=0.60s



(f)　t=0.76s



(g)　t=1.00s



(h)　t=1.20s

図-3　位相平均流速計の時間変化（実測値）

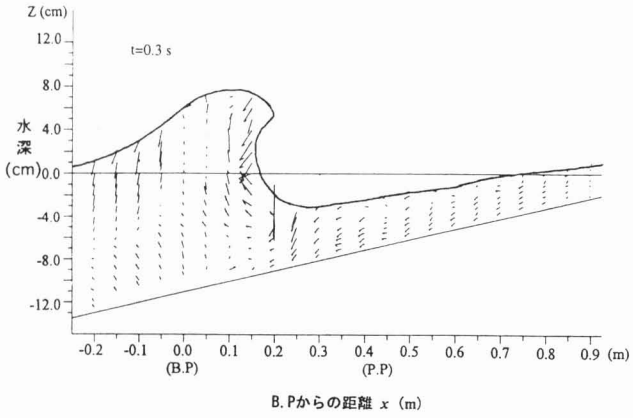
成分を示す．実験値と計算値との比較や問題点などに関しては，仲座ら（1995）を参照されたい．図示のとおり，Deanの流れ関数法による流速分布は，その流線のパターンからして進行波としての波形に対応した形となっている．

図-5-(a)～(d)に，実測値からDeanの流れ関数法で予測されるポテンシャル波動成分をさっ引いた残りの成分（以下，非ポテンシャル成分あるいは渦度成分と呼ぶ）を示す．砕波直前の場合の流速分布を図-5-(a)に示す．波の前面で見られる戻り流れが波動流速との衝突によって，底面から剥離し波峰直下に集められ，非ポテンシャル成分の集中領域が現れている．図-5-(b)に示すジェットの突入瞬間では，波の巻き込み部に大きな循環が形成されると共に，戻り流れに明確な剥離が見られる．また，波後部の水表面付近か図-5-(a)～(d)に，実測値からDeanの流れ関数法で予測されるポテンシャル波動成分をさっ引いた残りの成分（以下，非ポテンシャル成分あるいは渦度成分と呼ぶ）を示す．砕波直前の場合の流速分布を図-5-(a)に示す．波の前面で見られる戻り流れが波動流速との衝突によって，底面から剥離し波峰直下に集められ，非ポテンシャル成分の集中領域が現れている．図-5-(b)に示すジェットの突入瞬間では，波の巻き込み部に大きな循環が形成されると共に，戻り流れに明確な剥離が見られる．また，波後部の水表面付近からもかなりの強さの戻り流れが形成されている．図-5-(c)で示す時間帯では，水平渦と戻り流れとの境目辺りの底面近傍で大きな負の流速が発生している．第二の渦が形成される時間帯の流速ベクトルを図-5-(d)に示す，波によって輸送された水量は，大規模水平渦の拡散に伴い，波の後部に戻り流れを形成させている．すなわち，大規模水平渦は，波によって運ばれるエネルギーを消散させると共に，波による質量輸送を効率良く沖側へ戻す役割を担っている．また，戻り流れが脈流の構造を持つことも特筆すべきである．

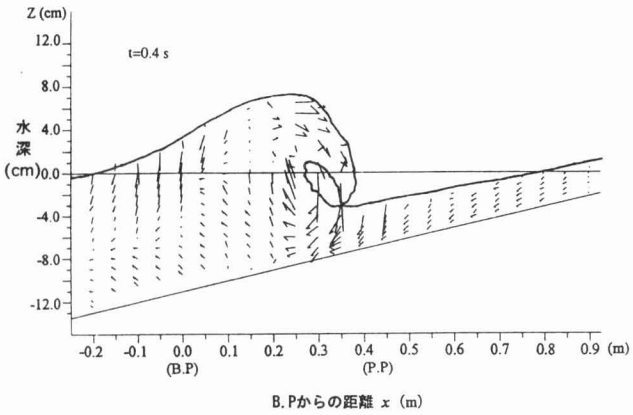
4．おわりに

本研究では，超小型プロペラ流速計を用いて巻き波型砕波の場合の流速場の組織的乱流構造を調べた．従来，その重要性が指摘されながらも定性的にしか議論されることがなかったHorizontal Rollerの生成・消滅やその構造を定量的に明らかにすることができた．さらに，Deanの流れ関数法を用いて流れをポテンシャル波動成分と非ポテンシャル流とに分離し，渦や戻り流れの形成メカニズムを明らかにした．

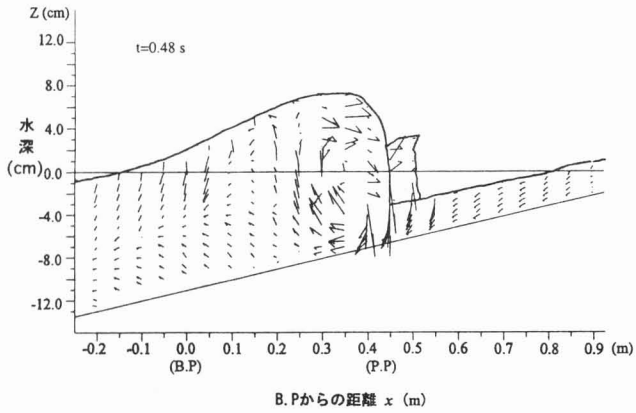
筆者らは，気泡や底質を大量に含む砕波帯内で内部の流れ構造がどうなっているのか？　そのことを明らかにすることこそが海岸工学上最も重要とされる岸近くの波及び水理現象の解明へのブレイクスルーを与えるはずであり，それは決して数値計算や理論解析的な面からは与えられず，観測データのみから与えられるはずであるとの信念から，超小型プロペラ流速計による波動場の流速測定手法の開発に取り組んだ．「激しい流速変動をプロペラ式流速計で測定し得るはずがないという」固定観念から抜け出すことに2年を要した．原理的にプロペラ流速計が抱える問題点は，労力やデータ解析ソフトの開発でクリヤーすることができた．その成果を前年に引き続き提示することができた．今後は，これらのデータをさらに解析することや，他の砕波



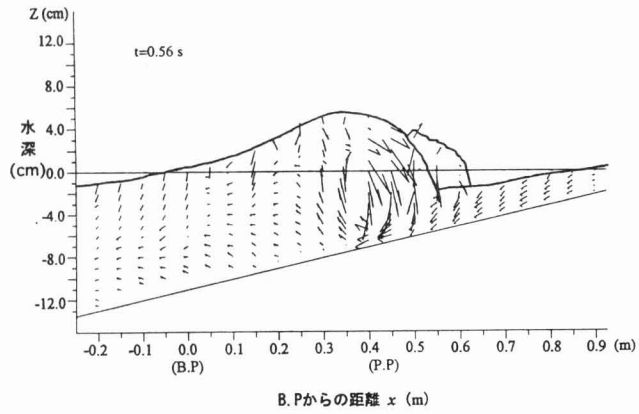
(a)　t=0.30s



(b)　t=0.40s



(c)　t=0.48s



(d)　t=0.56s

図-5　位相平均流速計の時間変化（渦成分流速）

形式での流れ場の構造の解明，漂砂現象との関連などを検討して行きたい．

本研究を行うにあたり，天野和宏（西濃建設株式会社）・宇座俊吉（琉球大学工学部技官）の両氏にご協力頂いた．また，本研究で用いた超プロペラ流速計は，篠塚製作所製のものであり，代表者篠塚守氏には多大なご協力を頂いた．ここに記し感謝致します．

参考文献

1)　酒井哲朗・内田雅博（1984）：巻き波型砕波による乱れと底質浮遊機構，第31回海講，pp.296-300.

2)　椹木亨・岩田好一郎・松本昇（1973）：砕波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について，第20回海講　pp.565-570.

3)　仲座栄三・河野二夫・宮里一郎・天野和宏（1995）：波の砕波変形と質量輸送量及びundertowに関する研究，海講，第42巻，pp.71-75，1995.

4)　灘岡和夫・小谷野喜二・日野幹雄（1985a）：二成分光ファイバー流速計を用いた砕波帯内流速場の特性の解明，第32回海講，pp.51-54.

5)　灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行（1987）：砕波帯内における底面近傍の流体運動特性と浮遊砂について，第34回海講，pp.256-260.

6)　日野幹雄・灘岡和夫・小谷野喜二（1985b）：崩れつつ進行する波のポテンシャル成分と渦度成分の分離方法について，第32回海講，pp.55-59.

7)　水口優・友金幸浩（1985）：巻き波型砕波時の流れの場の実験的研究，第32回海講，pp.60-64.

8)　三村信男・岡安章夫・柴山知也・プリ-チャ カムロンリティソン（1984）：Plu nging砕波によって発生する砕波帯内流速場の構造，第31回海講，PP.11-14.

9)　柴山知也・堀川清司（1985）：砕波による底質の浮遊，第32回海講，PP.302-306.

10) Zhang, D.P. and T. Sunamura (1994) : Multiple barformation by breaker-induced vortices,Coastal Eng., pp.2857-2870.

11) Pederson, C., R. Deigaard, J. Fredsoe, and E. A. Hansen-(1995) : Simulation of sand in plunging breakers, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng. , pp.77-86, ASCE.

12) Pedersen, c., R. Deigaard, J. Fredsoe and E.A. Hansen (1992) : Numerical simulation of sand in plunging breakers, Coastal Eng., pp .2345-2356.

13) Powell, K.A., P. A. Quinn and C. A. Greated (1992) : Shingle beach profiles ans wave kinematics, pp.2359-2369,ASCE.

14) Bonmarin P. (1989) :Geometric properties of deep-water breaking waves, J. Fluid M., Vol.209, pp.405-433.

15) Dean, R.G.: Sream function representaion of nonlinear-ocean waves, J. Geophys. Res., pp.4561-4572,1965.