

京都大学大学院工学研究科	学生員	○松本昌章
京都大学防災研究所	正会員	吉岡 洋
京都大学防災研究所	フェロー	高山知司

1. はじめに

砕波による気泡は、海面境界層を通しての熱やガスの輸送と密接に関わっている。気泡は音波を反射するので、その分布は超音波の反射強度の分布として計測できる。超音波を用いて、砕波による気泡の発生から海面下への取りこみ、そして消滅までの過程を究明すれば、海面を通しての物質・エネルギー輸送の予測精度の向上に大いに役立つと期待できる。そこで、外洋における砕波（WHITE CAP）の海面下の構造を観測するために、超音波波高計を改良して超音波の後方反射強度分布を計測し、気泡の空間的・時間的な変動を追跡し、波浪条件との関係を調べた。

2. 観測条件

観測を実施した田辺中島高潮観測塔は紀伊水道に面した田辺湾の入口に設置され、南西方向には太平洋が広がっている。図1に示すように、湾口付近は水深30mの平坦な地形で、そこに急峻な海山がそびえて海面下10mに達している。観測塔はその海山の上に位置し、設置水深は10mであるが、南西からの外洋波浪がほとんど海底地形による変形を受けずに到達している。観測装置は水中発射式超音波波高計を改良したもので、塔から20m離れた水深10mの海底に設置され、波高などの常時観測項目とともに海底から海面までの超音波の反射強度を鉛直分解能7.5cm、毎秒4回のサンプリングで記録する。観測された反射強度は波高計からの高さと時間のマトリックスとなっている。

3. 1 砕波による気泡の取りこみ

波高が低いと水面による反射しか検知されないが、波高が高くなると砕波による気泡の侵入を示す高反射領域が水面直下にみられるようになる。気泡塊が水面の上下に連動して上下したり、現れたり消えたりする変化が著しいのは、波の振動流によって移動する気泡を鉛直ビームで感知しているためである。波による上下運動に追従する動きを取り除くと、一度取りこまれた気泡はほとんど上昇せず、存続してから消滅するまでの4～5波程度の間ほとんど移動しない。水面下に潜り込んだ気泡層と水面付近の気泡層の間に低反射層が割り込んでいる場合も多く、水面下の気泡は鉛直混合してその深さまで到達したのではなく、砕波による取りこみと同時に内部に貫入したと思われる。

3. 2 気泡の侵入深さ

統計的に進入深度を求めるに際して、波の振動流による上下運動の影響を除去するため、微小振幅波理論で水面変動から任意水深の水粒子軌跡を算出し、求めた水粒子軌跡に沿った反射強度の鉛直分布を求めた。このようにして反射強度のマトリックスデータを平均海面からの深さと時間のマトリックスに変換してから、深さごとに時間平均して平均鉛直分布を求めた。

反射強度の平均値とある値以上の反射強度が発生する頻度を鉛直分布にとると図2のようになる。この場合は水深3m付近で、反射率の減衰が極大になっている。かりに気泡の進入が一定深度であるならば、その深さで階段状に反射率は急変するはずである。実際は気泡の進入深度にばらつきがあるので、その平均的な深さで反射率の減衰が最大になると予想される。また、反射率が最小値に収束する深さが最大進入深度といえる。

3. 3 気泡の挙動の統計的検討

反射率の平均鉛直分布とそのときの波浪条件を比較すると、有義波周期が5秒以下の風波では有義波高の

Masaaki MATSUMOTO, Hiroshi YOSHIOKA, Tomotsuka TAKAYAMA

4～5 倍程度の深さまで気泡が取り込まれて高反射層を形成しており、これは実験で得られた風波直下の乱流構造(DBBL: Downward Bursting Boundary Layer)の特性とよく一致する。しかし、有義波周期が 7 秒以上のうねりが波浪の中心になっている場合には、気泡の進入深さは有義波高の 2 倍程度にとどまっている。このとき砕波しているのは有義波高を代表するうねりではなく、うねりの上にとった風波である。

十分に発達した風波では高周波側のスペクトル成分が周波数のマイナス 4 乗に比例するようになるが、観測されたほとんどのスペクトルは図 3 のようにマイナス 4 乗に沿った風波と、それからはずれたより長周期のうねりがまざった多峯型スペクトルになっている。そこで波高をフーリエ変換して風波とうねりを分離し、風波成分の有義値と気泡の進入深さの関係をみると、気泡の進入深さは波高の 3 倍以上になる。

4. 結論

砕波によって取りこまれた気泡は、発生と同時に侵入領域全体に広がり、出現から消滅までほとんど鉛直移動しない。十分に発達した風波では有義波高の 5 倍程度の深さまで気泡が取りこまれており、DBBL の特性とよく一致するが、うねりが中心になっている場合にはうねりの上にとった風波が砕波しているため、進入深さは有義波高の 2 倍程度となる。そこで、スペクトル解析で風波成分を抽出して有義値を求めたところ、気泡の進入深さは有義波高の 3 倍以上になった。

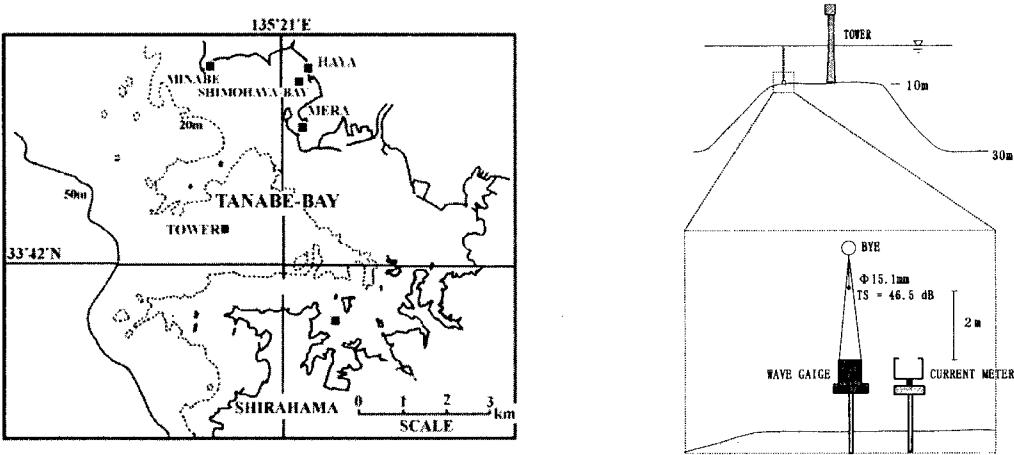


図 1：観測点および観測機器配置

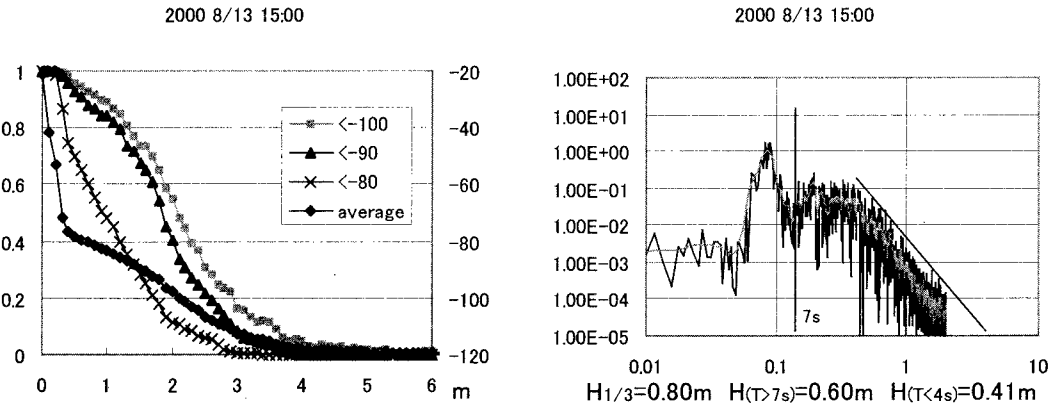


図 2：反射強度の鉛直分布

図 3：波のスペクトル分布