

超音波による海面境界層の観測 (風波砕波による気泡の取り込み)

吉岡 洋*・芹沢重厚**・高山知司***

1. はじめに

海面境界層とは、風や波や日光の影響が直接及ぶ海面からせいぜい 10 m 程度の深さまでの浅い層で、海全体からみれば薄膜のような領域であるが、波、流れ、生物生産から気候変動に及ぶ海に起こる現象のほとんどが、この層を通しての大気と海洋とのエネルギーや物質の交換で営まれている。したがって、この境界過程を究明することは、高波、高潮、漁場、海岸侵食、気候変動などの予測精度を向上させる上で重要であり、とくに荒天時には平常時に比べてけた外れの激しさで交換が行われているので、強風高波浪時の海面境界層の観測は重要であるが、厳しい自然条件のため十分な観測データが得られていない。たとえば、海底設置型超音波波高計で波浪を観測する場合、高波浪時の砕波による水中気泡の存在は計測障害となる。一方、ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) は流速の鉛直分布を連続的に計測するとともに、反射強度 (Echo Intensity) から水中に浮遊する粒子の後方散乱率 (Back Scattering) を計算して、動物プランクトンや浮遊懸濁物の分布を計測する方法が検討されているが、高波浪時には海面付近は砕波によって気泡が充満し、それによる反射のほうが卓越してしまう。S. A. Thorpe (1992) はこの邪魔な気泡を流れのトレーサーとして利用すべきであると提唱し、海面境界層の観測に新たな視野を開いた。気泡量の分布を後方散乱率から推定し、分布の変動を追跡すれば、砕波による気泡の生成や下層への取り込みの構造が明らかになり、海面を通しての運動量やガスの輸送量が正しく計算できるであろう。最近鳥羽ら (1995) は実験で得られた風波直下の乱流構造を解析して、風波と直結した特殊な乱流境界層 Downward Bursting Boundary Layer (DBBL) の存在を提唱した。そこで現地で砕波や乱れの状態を気泡分布から追跡する海面境界層観測装置を開発し、和歌山県田辺湾に位置する京都大学防災研究所白浜海象観測所の高潮観測塔に設置して観測を実施した。

2. 観測方法および観測条件

2.1 海面境界層観測装置

砕波による気泡の存在は、ADCP データのエコー反射強度分布にも反映されているが、ADCP では鉛直分解能や時間分解能が粗くて平均的な状態しかとらえられない。砕波によって気泡が発生し、内部領域へ取り込まれて消滅していく過程を追跡するためには、魚群探知機のような密な時空間分解能をもち、出力は数値解析が可能なデジタルデータである必要がある。我々が開発した海面境界層観測装置とは、図-1 に示すように、既成の水平 2 次元超音波式流速計 (TP-21 B and RC-500) と水中発射型超音波波高計 (TU-40 A and USW-150) を組み合わせて、そこに特別な信号処理回路アンプ (ATFL-8) を組み込んだ物で、水中発射型超音波式波高計で波高とともに海底から海面にいたる間 (トランスデューサー直上 2.5 m から約 40 m の距離まで) の超音波の反射強度 (受信波包絡線検波電圧) を鉛直分解能 7.5 cm で計測し、超音波式流速計による流速を加えて、パーソナルコンピュータのハードディスクに 4 サイクルのサンプリングで記録する。

2.2 キャリブレーション

1996 年 5 月末に観測塔から 20 m 沖の水深 10 m の海底に本装置を設置し、反射強度のキャリブレーションおよび気泡の記録状況をテストした (図-2)。キャリブレーションは反射率既知の鉄球 (直径 15 mm) をトランスデューサーの直上 2 m に係留して、反射強度を計測した。またコンプレッサーで気泡を発生させて本装置に検知される様子を確認した。

校正球によるキャリブレーションは古澤ら (1995) の研究を参考にして以下の式で行った。

$$20 \log E = P + M + G_r - 40 \log R - 2aR + TS$$

E : 受信エコー強度 = 1.4 Vp (オシロスコープ計測)

P : 送波レベル = 218 ± 4 dB

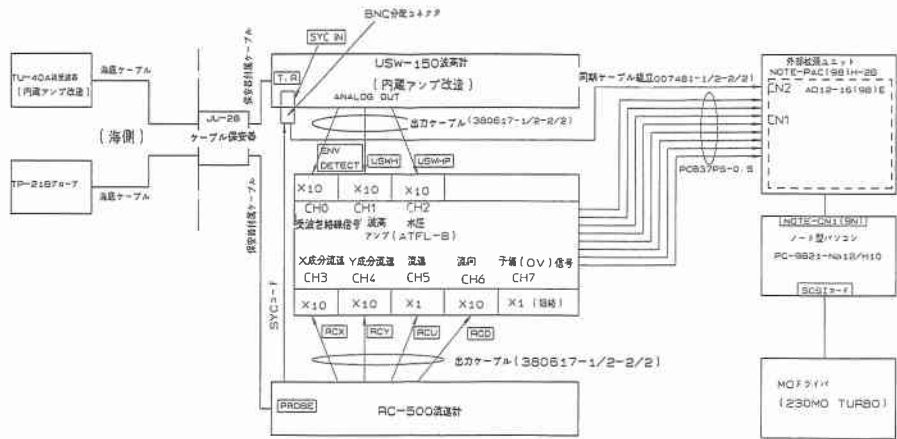
M : 受波感度 = 未知量

G_r : 受信アンプ利得 = 56 dB

R : 距離 = 2 m

a : 吸収減衰率 = -52 dB/1000 m

* 理博 京都大学助手 防災研究所
** 京都大学助手 防災研究所
*** フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所



図一 海面境界層観測装置ブロック図

TS : Target Strength=46.5 dB (既知)
キャリブレーションの結果は
 $P+M+G_r=61.4$ dB
従って観測値から後方散乱強度を求めるには
 $E=X/255$
 X : パソコン記録値 (0-255)
 $SV=20 \log(X/255)-(P+M+G_r)$
 $+20 \log R+2aR$
SV : Water mass volume backscattering strength

2.3 砕波の観測

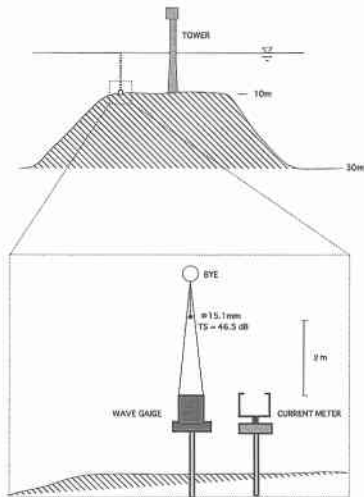
その後、夏季の台風による高波発生時をねらって、10月まで3時間おきに10分間記録して、砕波による気泡の存在を唆する強い反射領域を検知した。得られた反射強度データに音の拡散や吸収による減衰量の補正やキャ

リブレーションによる定数項を加えて後方散乱強度の分布を求めた。さらに1997年には7月から10月にかけて、1時間おきに10分間記録を行うとともに、砕波時には観測塔から海面をビデオ撮影し、ビデオで確認された海面のホワイトキャップと反射強度計測による気泡検知の対応を調べ、また気泡の侵入深度と有義波高の関係を解析した。

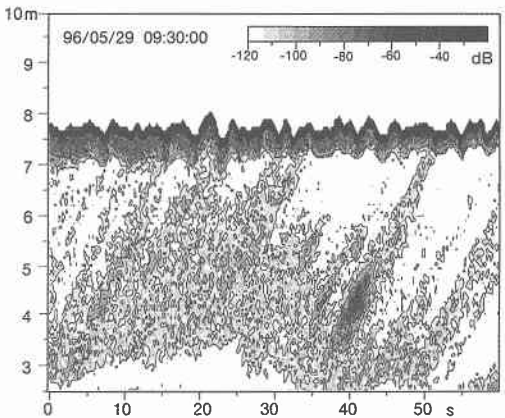
3. 観測された気泡の挙動

3.1 コンプレッサーによる気泡

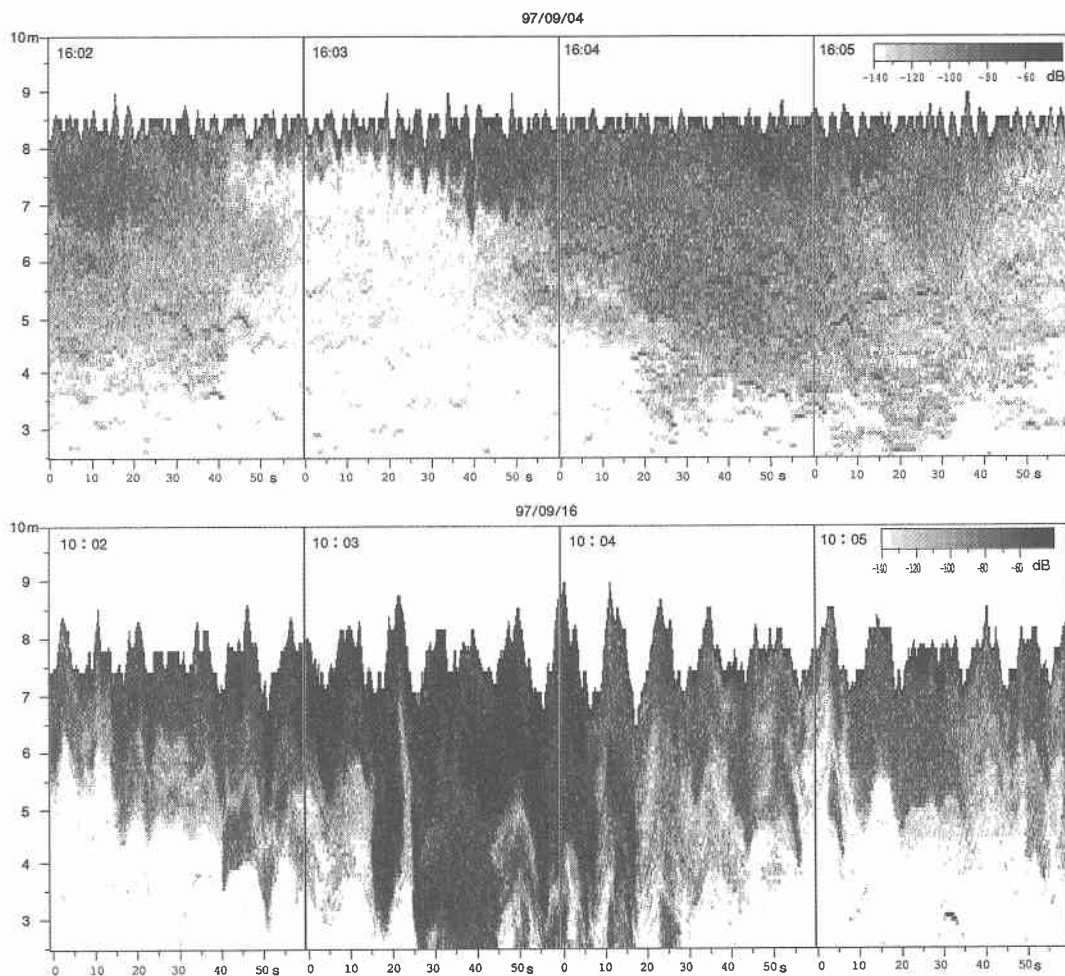
図3～図5は縦軸がトランスデューサーからの高さ、横軸が時間の面の後方散乱強度の分布を濃淡で表した物で、魚群探知機の記録紙に相当する画面である。画面の上半部に水面を示す高反射帯があり、計測生データでは一度水面で反射して受信された信号が水面より上層の反射強度として見かけの分布を表しているが、この画面では最高反射帯を水面としてそれ以上の記録を無視し



図二 海面境界層観測装置の設置とキャリブレーション



図三 コンプレッサーによる気泡



図—4 砕波による気泡の取り込み（上が風波の砕波，下がうねりを伴う砕波）

ている。図—3 はコンプレッサーによる気泡をとらえたもので、人工的な気泡はサイズが大きく（目視で直径数 mm 程度）、約 30 cm/s の速度で上昇していく様子が明瞭である。

3.2 砕波による気泡の取り込み

低波浪時には水面の反射帯しか検知されないが、波高が 1 m を越す頃から砕波による気泡を示す高反射領域が水面直下に間欠的に発生し、時には波高以上の深さまで大量に発生するが、単発の砕波で生じた気泡は 4～5 波程度の期間存続しては消失する。図—4 に周期 4 s 以下の風波の砕波（上段）およびうねりを伴う風波砕波（下段）を示す。砕波で生じた気泡が波高の 4～5 倍の深さまで取り込まれて高反射率層（気泡含有層）を形成して漂っている。コンプレッサーによる気泡と違ってほとんど上昇が見られないところから、風波砕波で取り込まれた気泡は直径がずっと小さいと予想できる。気泡と海面の間に低反射層（気泡が存在しない層）が割り込んでい

る例も多く見られ、高反射率層の気泡は表層からの混合で到達したものでなく、砕波で出現と同時に内部に貫入したことをうかがわせている。波の位相との対応をみると、水面の上下と平行して上下する場合と、波の峰と谷に対応して消滅と出現とを繰り返す場合がある。前者は気泡が波に追従するので当然の変化であるが、後者は気泡がブロック状に分布してその境界に計測ビームが位置したために消滅出現を繰り返すと考えられる。個々の波別にみると大きな波が大きな気泡群を生じるとは限らず、むしろ逆のケースが多かった。吹送時間が経過して十分に発達した風波の状態では、定常的に気泡層が表面から波高の 4～5 倍の深さまで存在するようになる。鳥羽らの提唱した DBBL とはこれをさしているのであろう。

3.3 砕波により海面検知不可の例

波高が大きくなって砕波がさらに激しくなると、気泡貫入層がトランスデューサー付近まで達するようになり

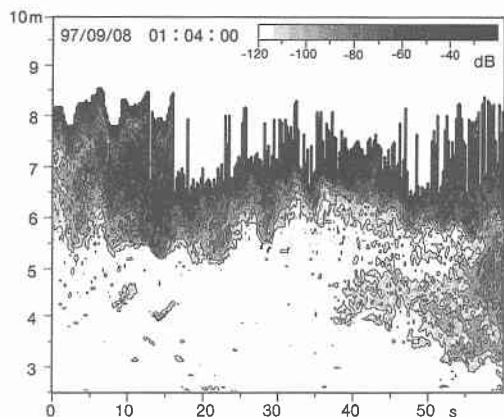


図-5 砕波により海面検知不可の例

気泡濃度も高くなって超音波をほとんど反射するようになり、そこを通過して海面に達して反射する音よりも高反射強度になる。超音波波高計は最高反射層を目安に海面を決めて波高を求めめるのでこのような事態になると異常値を算出する。図-5 はそのような状態の一例で最高反射層はもはや海面ではない。ここまで気泡が高濃度になると 2.2 節の後方反射率算定式も適用できないであろう。

4. 気泡取り込み現象の統計的検討

4.1 反射率の平均鉛直分布

計測された反射率値はトランスデューサーからの距離と時間の関数である。1 観測 10 分間の平均鉛直分布を求めるとき、単純に時間平均すると、波による上下変化が

もたらす反射率変化を平均して実質以上に上下平均してしまうかもしれない。そこで時事刻々の最高反射層を海面としてそれに相対的な深さを求め、反射率値を海面からの深さと時間の関数に変換してから、時間平均して平均鉛直分布を求めた。

図-6 は代表的な砕波時の反射率の鉛直分布(最小, 平均, 最大値)であり, 上段は海面からの深さ分布, 下段は深さをその時の有義波高値で無次元化したものである。風波が砕波しているケース(左側)では平均反射率が -120 dB 以上の層が有義波高の 4~5 倍に達しているが, 周期の長いうねりを含んだ波が砕波しているケース(右側)では 2 倍程度しか達していない。前者は鳥羽らが提唱する DBBL の深さ(有義波高の 3~7 倍)と一致する。後者の場合, 有義波高を代表するうねりが砕波するのでなく, その上に載っている風波が砕波しているために, 見かけ上, DBBL が浅くなったのであろう。

4.2 反射率の発生頻度分布

4.1 節で求めた海面からの深さと時間の関数に変換した反射率を, それぞれの深さで反射率の高い順番に並べ直し(sorting), ある深さである値以上の反射率が出現する頻度を示したのが図-7 である。縦軸が深さ(フルスケール 6 m), 横軸が時間(フルスケール 10 分)で, 平面上のある点(深さ, 時間)の反射率値はその値以上の反射率がある深さで出現する時間を表す。海面付近が高反射域なので右上から下左に等高線が走るは当然であるが, ある深さまで上から下に走ったり, などらかに分布せずしばしば密集して階段上の推移を示していることが特徴的である。最も低い階段は -140 dB 付近で, その次の階段は -120 dB 付近である。階段状に分布することは

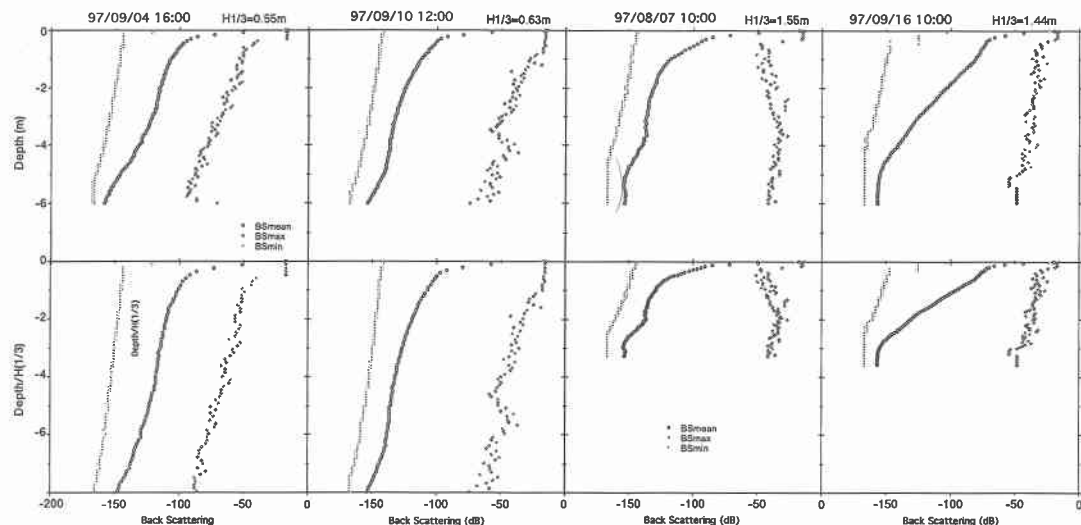
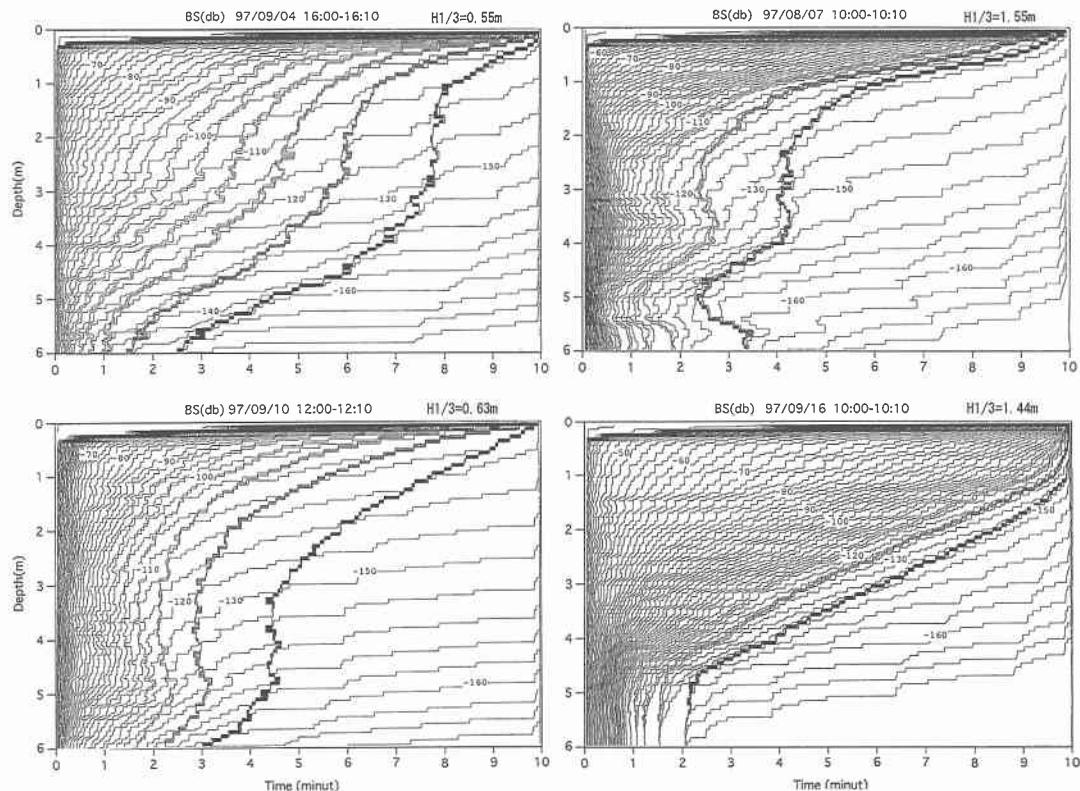


図-6 反射率 (BS) の鉛直分布。(左 2 例が風波砕波, 右 2 例がうねりを含んだ砕波)



図一7 反射率出現頻度の鉛直分布（左2例が風波碎波，右2例がうねりを含んだ碎波）

観測期間中（10分）に気泡貫入が到達した回数を反映しているであろう。また階段線がある深さまで立ってそれ以深で傾いているのはDBBLの存在を反映しているのかもしれない。

5. ま と め

海底から海面にいたる超音波の反射強度（受信波包絡線検波電圧）を鉛直分解能7.5 cm 時間分解能4 Hz で計測する測器を開発し、紀伊水道に面した田辺湾湾口の観測塔で、碎波によって気泡が発生し、内部領域へ取り込まれて消滅していく過程を観測した。低波高時には水面の反射帯しか検知されないが、北西の風が吹き、風波が発達して、ホワイトキャップが見られるようになると、気泡の侵入域（高反射率領域）が有義波高の5倍程度の深さまで見られた。これは鳥羽らが提唱するDBBLの特性と一致する。しかしうねりが伴う場合は、気泡は有義波高の2倍程度しか達しない。おそらく有義波高を代表

するうねりが碎波するのでなく、その上に載っている風波が碎波しているために、見かけ上、DBBLが浅くなったのであろう。

謝辞：本研究を提案し、応援して頂いた土屋義人名城大学教授、装置開発を担当した(株)カイジョーおよびデータ解析に貴重な助言を頂いた鳥羽良明東北大学名誉教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 古澤昌彦・宮野鼻洋一・澤田浩一・高尾芳三（1995）：計量魚群探知機の較正方法，水産工学研究所技報（漁船工学），第15号，pp. 9-37.
- Thorpe, S. A. (1992): Bubble clouds and the dynamics of the upper ocean, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 118, pp. 1-22.
- Toba Y. and H. Kawamura (1996): Wind-wave coupled downward-bursting boundary layer (DBBL) beneath the sea surface, J. Oceanography, Vol. 52, pp. 409-419.