

音環境としての波の音の発生機構に関する考察

村上仁士* ・伊藤禎彦** ・細井由彦***
 荒木秀夫**** ・小川慶樹***** ・小薮剛史*****

1. 緒 言

近年、「ランドスケープ (景観)」に対する造語として「サウンドスケープ (音の風景)」という概念 (R. M. Schafer, 1986) が一般化され、環境としての音に対する意識が高まりつつあるといえる。海岸における波の音についても、こうした視点からの研究の必要性が指摘されている (鳥越, 1992)。

海岸近くに建てられた老人福祉施設などで波の音は、あるときには心地よく感じられたり、静寂なために不安を抱かせたり、夜中に遠くから聞こえてくる大きな波の音などで恐怖を抱かせることもあるようであり、今後の海岸整備においては波の音の制御も重要な要素となるであろう。著者ら (1992, 1993) は、波高、周期、砕波形式、前浜の底質などが波の音圧や音色にどのような影響を及ぼすかについて実験的に考察し、ある程度の有用な知見を得ている。しかしながら、波の音の制御や心地よさなど感覚量と対応させるためには、波の音の詳細な発生機構を把握する必要がある、これらの点については、まだ十分検討できていなかった。

本研究では、砕波によって生じる空気の巻き込みやそれによって生じる気泡や乱れの変化を詳細に調べ、それと波の音との関係について検討を行い、砕波による波の音の発生機構について考察を行う。それに加え、本論では波の音の心地よさなどの心理・生理的影響をみる第一歩として、新たに脳波に及ぼす波の音圧の影響についても若干の考察を試みた。

2. 波の音の発生特性

2.1 実験装置および方法

a) 気泡の測定方法および解析方法

実験には、図-1 に示すように長さ 30 m、幅 1 m、深さ 0.9 m の片面ガラス張りの造波水槽を用いた。

本実験で用いた実験諸元を表-1 に示す。一樣水深部は、全実験を通じて 35 cm とし、砕波形式を変えるために surf similarity parameter ($\xi_0 = \tan \theta / \sqrt{H_0/L_0}$) を計 45 種類変化させている。ビデオカメラ (Panasonic NV-9) を水槽壁面より 1.5 m の位置に設置し、砕波によって発生する気泡の様子を調べた。任意の位相における気泡発生量 B は、正確には測定しえないので、便宜上砕波水深より岸側の領域で発生している気泡に対し、水槽のガラス面を通してみた気泡発生面積に水槽幅を乗じた値として定義した。また、一波あたりの平均気泡量 B_{av} は、各実験波の一周期間を 5 位相に分割し、各位相において求めた気泡量を加算し、それを 5 で除して求めた。

b) 砕波帯の乱れの測定および解析方法

これに用いた水槽は、図-2 に示すように一端にフラップ型造波機を備えた長さ 15 m、幅 0.2 m、深さ 0.3 m、

表-1 実験諸元

海浜勾配 $\tan \theta$	周期 $T(\text{sec})$	換算沖波波高 $H_0(\text{cm})$	surf similarity parameter ξ_0	前浜の底質
1/10	0.8~2.0	1.8~13.4	0.397~2.045	合板
1/15	0.8~2.0	2.9~13.3	0.214~0.894	合板

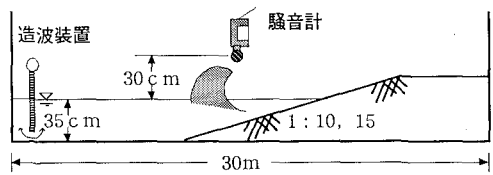


図-1 実験水槽 1

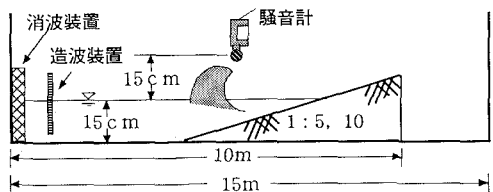


図-2 実験水槽 2

* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科
 ** 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科
 *** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科
 **** 学術博 徳島大学総合科学部助教授 人間社会学科
 ***** 正会員 工修 大成建設 (株)
 ***** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科 建設工学専攻

両面ガラス張りの一次元造波水槽で、他端には1/5または1/10の2種類の勾配をもつアクリル板を設置した。

実験波は、周期0.72 sec, 入射波高4.7 cm および5.7 cm の2種類とし、水深は15 cm とした。

流速の測定には、レーザードップラー流速計 (SYSTEM 9100-3, KANOMAX 社製) を用い、砕波帯を5領域に分割し、1ケース16測点にわたり水平および鉛直方向の流速を測定した。なお、測点上の水位変動も同時に計測している。また、同時にビデオ撮影も行い、砕波の状況も詳細に調べた。

乱れ強度 $\sqrt{u^2 + v^2}$ は、水平 u および鉛直 v の水粒子速度記録から、一周期分のデータを8位相に分割し、各位相ごとに平均して平均流速 (U, V) を求め、その偏差 ($u-U, v-V$) を乱れ変動成分とするアンサンブル平均法により求めた (村上ら, 1992)。

c) 波の音の測定方法および解析方法

a) で用いた水槽1における波の音圧レベルの測定は、前報 (1993) と同様であり、b) で用いた水槽2における波の音圧レベルの測定では、静水面上方15 cm の位置に騒音計を下向きに設置して行った。

両実験ともにサンプリング周波数は10 kHz であり、前報同様の定義のもと、波の砕波状態を「砕け」、「突っ込み」、「遡上」および「引き」の4つに区分している。ただし、「遡上」状態とは、波が完全に砕け、気泡が広が

り海浜斜面上を進む期間である。

2.2 気泡および乱れの発生特性

図-3 および図-4 は、砕波高がほぼ等しい場合の巻き波および崩れ波砕波の気泡の発生状況の変化を一周期にわたり示したものの一例である。

一般的に、巻き波砕波では、「砕け」時に空気を巻き込み、その後の「突っ込み」時には気泡が多量に発生して、それが底面にまで達し、「遡上」および「引き」時に気泡は徐々に消滅してゆく。

一方、崩れ波砕波では、波頂部で砕け始めたときには、その前の波の砕波によって生じた気泡が消滅しないで広範囲にまだ多く残っているのが特徴である。波の進行にともない気泡は、徐々に水面付近から拡散してゆく。波の周期が短くなると気泡の残留する割合が多くなり、つづいて起きる次の砕波の気泡も加えられるようになる。巻き波か崩れ波か砕波形態の違いにより空気を取り込み方、気泡の発生位置や消長の状況が大きく異なることがわかる。

図-5 は、海浜勾配 $\tan \theta$ が1/15 の場合について巻き波および崩れ波砕波における一波あたりの平均気泡量 B_{av} が、波の周期 T や砕波高 H_b により、どのように変化するかを調べたものである。

巻き波砕波では、砕波高 H_b の増大にともなって気泡量 B_{av} も増大することがわかる。また、本実験の範囲内

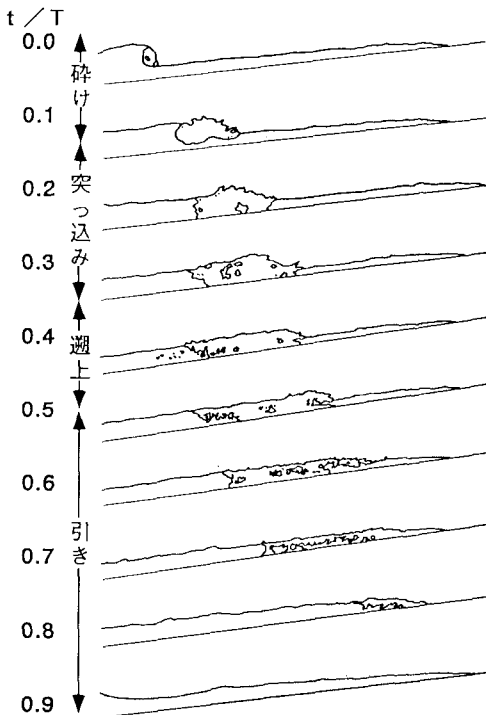


図-3 巻き波の気泡分布 ($H_b/L_0=0.01, \tan \theta=1/15$)

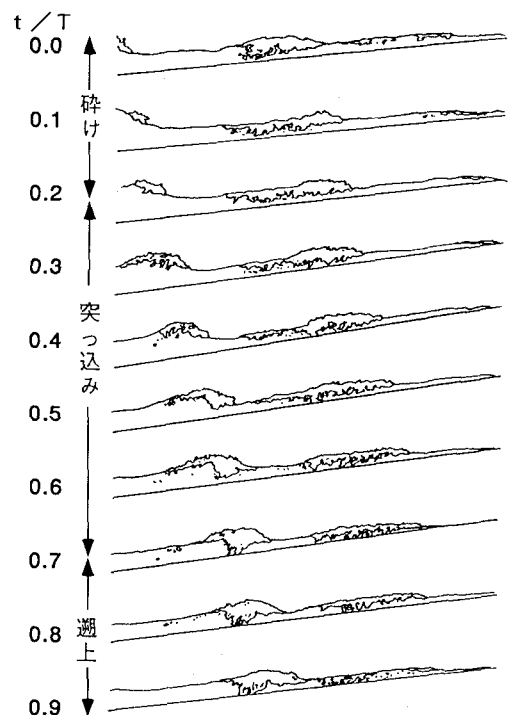
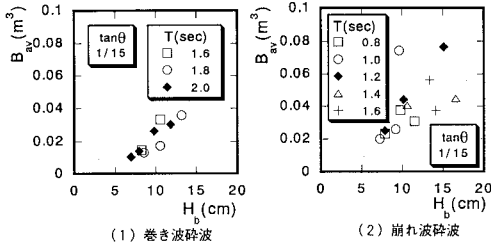


図-4 崩れ波の気泡分布 ($H_b/L_0=0.12, \tan \theta=1/15$)

図-5 H_b と B_{av} との関係

では、気泡量に及ぼす周期の影響はみられない。

一方、崩れ波砕波では、図-4でもみたように一周の間で前の砕波によって生じた気泡が残り、つぎの砕波で発生する気泡量が増えられるために、砕波高が大きくなると気泡量も増大するが、周期が長くなるにともなう前に存在していた気泡が消滅し始めるため、その増大の割合は小さくなるようで、むしろ気泡量は逆に減衰する傾向すらみられる。

砕波形式にかかわらず気泡の発生により砕波帯内では大きく乱れ、水面近くの乱れの大きさは、音圧変化にも影響を及ぼすものと考えられる。そのため発生した気泡により生じた乱れの強さの分布特性もみておこう。

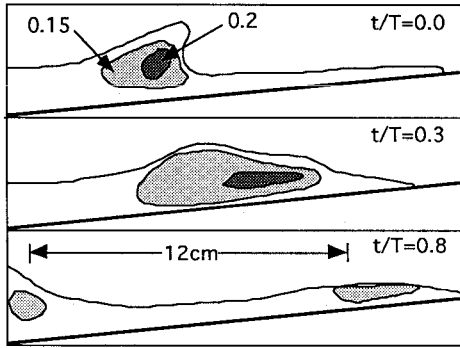
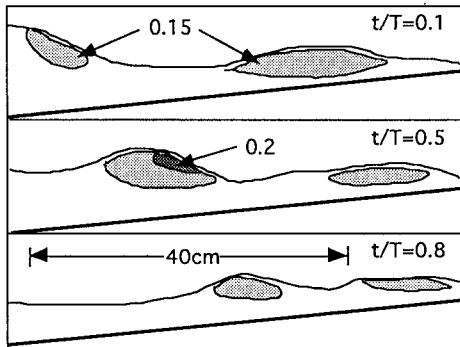
(1) 巻き波砕波($H_b/L_0=0.07, \tan\theta=1/15$)(2) 崩れ波砕波($H_b/L_0=0.07, \tan\theta=1/10$)

図-6 乱れ強度の空間分布

図-6は、流速測定実験によって得られた乱れ強度の空間分布を経時的にみたものである。なお、図中の数値は、乱れ強度 $\sqrt{u'^2 + v'^2}$ を微小振幅波理論で求められる水平水粒子速度の最大値 U_{max} で無次元化して示している。

まず、巻き波では、まさに「砕け」時の状態 ($t/T=0$) で強い乱れが生じ始め、「突っ込み」時 ($t/T=0.3$) には水塊の突入、それにひきつづいて起きる気泡や渦の発生により強い乱れは底面付近にまで達し、その後拡散している状況や等乱れ強度の発達・減衰の様子がわかる。

一方、崩れ波砕波では、「砕け」時 ($t/T=0.1$) から「突っ込み」時 ($t/T=0.5$) にかけて波頂から波が崩れてゆくことにより水面付近で強い乱れが発生し、その乱れは比較的水面付近に広く拡散し、その後消滅してゆくことがわかる。

2.3 音圧に及ぼす気泡および乱れの影響

砕波による気泡および乱れの発生特性はすでに述べたが、砕波による水塊の突入や気泡の巻き込み、気泡の消滅によって音は発生する。

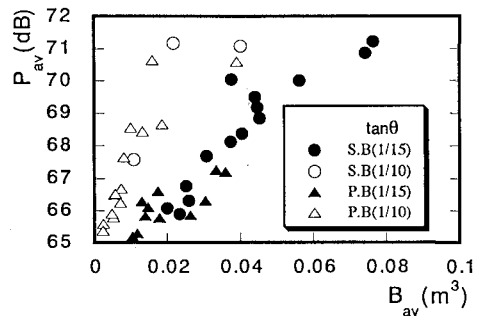
図-7は、一波あたりの音圧レベルの平均値 P_{av} と気泡量 B_{av} との関係を砕波形式別にみたものである。

まず、巻き波 (P.B) および崩れ波 (S.B) にかかわらず、気泡量が多く発生すれば一波あたりの音圧 P_{av} は増大し、しかも海浜勾配 $\tan\theta$ が急なほどその増加の割合は大きいことがわかる。

また、勾配が等しければ崩れ波砕波の方が気泡量は多く発生し、音圧の大きくなる範囲も広がる。

つぎに一波あたりの気泡量のかわりに、一波あたりの乱れ強さと音圧レベルの平均値 P_{av} との関係を見よう。図-8は、さきに定義した無次元化した乱れ強度をもとに8位相の空間分布より一波あたりの乱れ強度の平均値 q'_{av} を求め、音圧 P_{av} との関係を示したものである。図から、乱れ強度が大きくなるほど、巻き波、崩れ波砕波にかかわらず音圧レベルは大きくなるといえる。

以上の考察から、一波あたりの気泡量やそれにとまな

図-7 P_{av} と B_{av} との関係

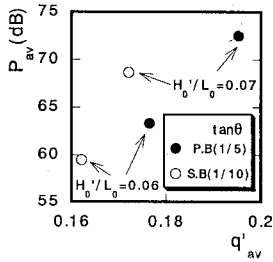


図-8 q'_{av} と P_{av} との関係

う乱れと音圧の間には一定の関係があることが認められた。しかしながら、気泡の発生位置や発生範囲だけから音の発生特性が決まるわけではなく、その場の乱れの強さ、さらには気泡の消長などによって音の発生機構が異なるはずであり、気泡量および音圧の時間変化をみる必要がある。

図-9は、巻き波および崩れ波について音圧レベル P および気泡量 B の時間変化を示したものである。

まず、図の(1)の巻き波砕波についてみると、音圧レベル P は「砕け」時に最大となり「突っ込み」の後、「遡上」および「引き」時に急激に減衰している。一方、気泡量 B をみると「砕け」した後、「突っ込み」から「遡上」時に極大となっている。つまり、「砕け」時の水塊が水面に突入するとき音圧は最大となり、その時点での気泡量は多くなく、その後気泡量は増大してゆくが、音圧はむしろ減少してゆく。また、「遡上」時に気泡量が最大に達しても音圧は大きく変化することはない。図-6の

(1)をみても比較的強い乱れは、この位相 ($t/T=0.3$) では、水面からかなり下にある。このような場に発生した乱れは、音圧に顕著な変化を与えないものと解釈できる。

したがって、巻き波砕波では、主に波頂から飛び出した水塊の水面への突入によって生ずる音が卓越し、その後の気泡を含む強い乱れによっても音は生ずるが、その音圧は空気を巻き込みながら砕けるときに比べて小さいものであるといえる。

一方、図の(2)の崩れ波砕波の音圧変化をみると、波頂部が砕け始め、水面付近で気泡を巻き込みながら、しだいに音圧は大きくなり、「突っ込み」時で最大値をとるがその後の音圧の減衰は、巻き波のように急激ではないことがわかる。この例のように、むしろ引き続いてくるつぎの砕波音も重畳されることもあるため、「遡上」時でも音圧に大きな変化はない。また、一周期にわたる気泡量には顕著な変化はない。「突っ込み」時に音圧が大きくなった原因を考えると、図-6の(2)のこれに近い位相 ($t/T=0.5$) で水面付近に強い乱れが認められており、音圧の強弱は単に気泡量だけでなく水面に近い乱れに依存することがわかる。

したがって、崩れ波砕波における音の発生は、水面付近で発生する気泡をとまなう強い乱れや気泡の消滅によるものが支配的であると考えてよいであろう。

現実には、こうした音圧の変化特性は、気泡にとまなう乱れの発生の状態によるものばかりだけでなく、現地の底質にも依存するはずである。前報(1993)の室内実験の結果によれば、底質の浮遊により音圧値が増大することが指摘されている。そこで、現地でもそうしたことがいえるかどうかを現地観測で確かめた。

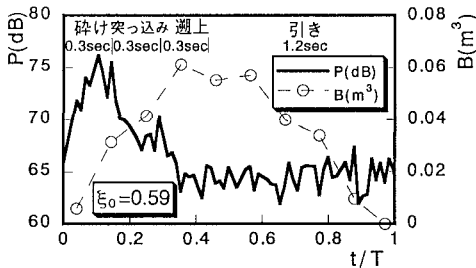
現地観測には、徳島県下の代表的れき浜である大神子海岸と砂浜である月見ヶ丘海岸において行った。風の影響を最小限におさえるため、比較的穏やかな日を選び現地海岸の波の音を砕波点から10mの位置で収録した。

図-10は、周期が約5secの現地の波(巻き波砕波)について底質の違いによる平均音圧 P_{av} の値をプロットしたものである。○印で示したれき浜海岸でも▼印の砂浜海岸でも、砕波高 H_0 の増大につれて音圧 P_{av} も増大するが、室内実験と同様、砂浜海岸の方が同じ砕波高のれき浜海岸よりも音圧は大きくなっている。このように、砕波にとまなう巻き上げられる底質の粒度組成なども波の音圧値に影響を与えることが改めて確認された。

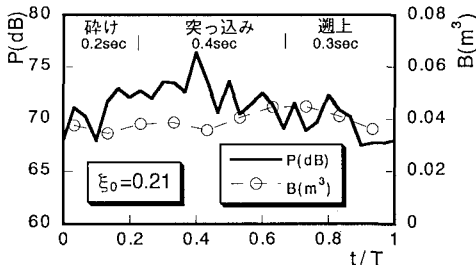
3. 脳波に及ぼす波の音圧の影響

3.1 脳波の測定実験

脳波に及ぼす波の音圧の影響をみるため、波の音を聞かせない場合と聞かせた場合について約6分間、開眼状



(1) 巻き波砕波 ($H_0'/L_0=0.01, \tan\theta=1/15$)



(2) 崩れ波砕波 ($H_0'/L_0=0.12, \tan\theta=1/15$)

図-9 音圧レベル P および気泡量 B の時間変化

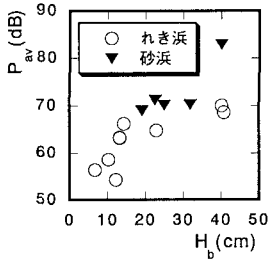


図-10 現地の砕波音圧と前浜の底質との関係

態で脳波を測定した。用いた波の音は、現地で収録された市販テープによるものであり、音量調節により音圧レベルを3種類に変化させた。このときの3種類の波の平均音圧値は、それぞれ54 dB, 62 dB および 74 dB であった。なお、0 dB を含む4つの条件で脳波を測定するにあたり、各測定の間5分間の休息を与え、波の音の順序はランダムにして行った。また、被験者は、健康な男子学生4名、女子学生1名の計5名である。

脳波は、国際式10-20法による C_z (中心野)と O_z (後頭野)に皿型電極を固定し、両耳朶連絡を基準電極として、時定数0.3 sec, 周波数帯域30 Hz以下で脳波計(SYNAFIT 1000, 日本電気三栄)を用いて連続記録すると同時にFMデータレコーダ(A-49, SONY)にて磁気記録した。

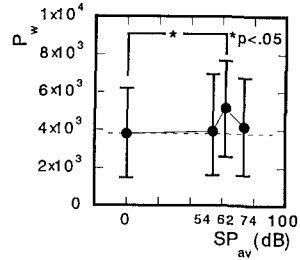
脳波の解析は、磁気記録された2部位の脳波を分析器(SIGNAL PROCESSOR 7T08, 日本電気三栄)によるFFT分析(最大周波数100 Hz, 分解能0.195 Hz)を行うことにより、脳波のパワースペクトルを得た。これらを60回加算することにより脳波の代表パワースペクトルを算出して8つの帯域に分けて分析を行った。

3.2 脳波の特性

図-11は、全被験者の O_z における α 波の高帯域である α_2 (10-13 Hz)のパワーの平均値 P_w と波の平均音圧値 SP_{av} の大きさとの関係を示したものである。

波の音を与えないとき(0 dB)に比べて、6分間の平均音圧値が62 dBの波の音のときにだけ、5%の危険率(* $p < .05$)で有意な α 波の増大がみられた。

したがって、波の音の大きさが異なることで心理的な影響のみならず、生体反応にも影響を及ぼしていることが明らかになった。また、 α 波は、低帯域(α_1)と高帯域

図-11 P_w と SP_{av} との関係

(α_2)で生理・心理的(特に情緒的)な反応に差があるといわれつつあり、 α_2 のみに違いが現れたのはたいへん興味深い結果である。海岸の環境を聴覚的にも把握し積極的に活用しうる可能性があることを示すものである。

4. 結 言

本研究では、波の音の発生機構について考察し、気泡や乱れの特性から砕波形式によって波の音の発生機構が異なることを示した。したがって、砕波帯で生じている気泡や乱れ現象を明らかにすれば波の音の制御も可能であることが示唆された。

また、心理・生理的な側面から考察するための若干の脳波測定実験を行った結果、波の音の大きさの違いに対して α 波のパワーの増大などの変化が確認された。しかし、波の音の大きさだけでなく、波の周期や音色などの影響についても考察を行う必要がある、今後これらの生理的影響についても検討しなければならない。

本研究にあたり、実験に協力されたウエスコ飯田和人氏(元徳島大学工学部学生)に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 鳥越けい子(1992): サウンドスケープからのやさしい環境のとりえ方, 土木施工, Vol. 33, No. 4, pp. 23-26.
- 村上仁士・細井由彦・伊藤禎彦・澤村賢行(1993): 波動場における傾斜没水平板周辺の流れ特性, 海岸論文集, 第40巻, pp. 671-675.
- 村上仁士・細井由彦・上月康則・小川慶樹(1992): 砕波による波の音に関する二, 三の実験的考察, 海岸論文集, 第39巻, pp. 1081-1085.
- 村上仁士・細井由彦・伊藤禎彦・小川慶樹・小藪剛史(1993): 砕波による波の音の発生特性に関する考察, 海岸論文集, 第40巻, pp. 1116-1120.
- R. M. Schafer(鳥越けい子ら訳)(1986): 世界の調律, 平凡社.