

砕波による波の音の発生特性に関する考察

村上 仁士* ・ 伊藤 禎彦** ・ 細井 由彦***
小川 慶樹**** ・ 小薮 剛史****

1. 緒 言

海岸空間における環境資源のもつ情緒的資質として、波は重要なものの一つと考えられる。これまで波は防災の立場からは多くの研究がなされてきたが、快適なレクリエーション環境を創造するために活用する有力な要素として検討されている例はまだわずかしかない。灘岡ら(1988, 1989)は、先駆的な研究を行っているが現地の波の音を観測して波の音の特性を概括的に論じているにとどまっている。現地の波の音は海岸周辺の地形や風の影響も受けるために、波高、周期などの波浪特性、海浜勾配、底質条件などの個々の要因について波の音に及ぼす影響をあらかじめ明らかにしておく必要がある。こうしたことから著者ら(1992)は、水槽実験により種々の波浪条件のもとで波の音に及ぼす海浜勾配、底質の影響について考察を行ってきた。

本研究では、波の音に及ぼすこれら個々の要素の影響についてさらに考察を深め、砕波の挙動をより細かく観察することにより、波の音の発生特性について詳細に検討する。さらに現地の波の音を収録し、実験的に得られた結果と比較検討する。またラジオの白色雑音より人工的に作成された音圧特性の異なる波の音ならびに現地で収録されたスペクトル構造の異なる波の音を使用した官能試験を行い、人間心理に及ぼす波の音の影響を快適性の面から若干の考察を加える。これらの結果から快適な海岸環境を創造する「心地よい波の音」およびその波の発生条件に関する基礎資料を提供するものである。

2. 波の音の収録方法および解析方法

前報(村上ら, 1992)では、騒音計の周波数補正特性のうち、人間の感覚に最も対応している聴感補正回路A特性の計測値を用いて砕波音の音色特性を調べた。本報では、水槽実験および現地観測を通して、砕波する波の音の特性をより詳細に検討するため、音の物理的数値を

示す聴感補正回路C特性により波の音を収録した。

実験には、長さ30 m、幅1 m、深さ0.9 m、片面ガラス張りの造波水槽を用いた。実験諸元は、前報(1992)と同じで、海浜勾配 $\tan \theta$ を1/10および1/15と2種類用い、一様水深部は全実験を通じて35 cmとし、surf similarity parameter ($\xi_0 = \tan \theta / (H_0 / L_0)^{1/2}$)を計27種類に変化させ種々の砕波形態の波を用いた。そして1/10の海浜斜面には滑面の合板を用い、1/15の斜面には、砕波時の波の音に及ぼす底質の影響をみるために、合板のほかにれき($D_{50} = 18.6$ mm)および細砂($D_{50} = 0.63$ mm)も使用した。また波の音の場所的变化を調べるため、波の砕波点と汀線背後2 mの位置で砕波音を測定し、砕波状態を観察するため実験水槽のガラス壁側方約2 mの位置にビデオ装置(Panasonic NV-S9)を設置した。

現地観測は、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われた。風の影響を最小限におさえるため、比較的風の穏やかな日を選び現地海岸の砕波音を砕波点から岸側10 m、20 mおよび30 mの3ポイントで収録した。

室内実験の解析では砕波する波の状態を図-1に示すように「砕け」、「突っ込み」、「遡上」および「引き」の4状態に区分し、その音圧変動特性を検討するとともに、収録された砕波音圧を周波数解析し、パワースペクトル図によって波の音色特性を調べた。巻き波砕波の「砕け」状態とは、(1)に示すように波頭部が波前面におおいかぶさり静水面と交わった後、splashを形成するまでの期間を指し、その後気泡を巻き込みながら続く砕波期間を

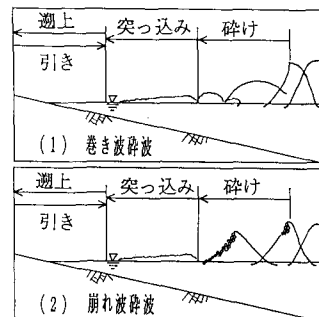


図-1 砕波する波の状態の区分

* 正 会 員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科
** 正 会 員 工博 徳島大学講師 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
**** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科 建設工学専攻

「突っ込み」状態とする。崩れ波砕波では、(2)に示すように波頭が白く泡立ち始め、それが波前面に広がるまでの期間を「砕け」状態間、その後気泡を連行しながら続く波の乱れた期間を「突っ込み」状態とする。そして砕波後、目視により波の気泡連行がおさまリ、波の進行方向に海浜斜面上を進む期間を「遡上」状態、逆に斜面上を流下する期間を「引き」状態と定義した。

また、砕波音のリズム特性を表すために、灘岡ら(1988)にしたがひ、リズム性 L_{zm} を次式のように定義した。

$$L_{zm} = (L_{peak} - L_{av}) / L_{av} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 L_{peak} は音圧 (dB) の最大値、 L_{av} は音圧 (dB) の平均値である。

3. 砕波帯付近における波の音圧特性

本実験で得られた巻き波砕波および崩れ波砕波の一周期間における音圧 P の時間変動記録を図-2に示す。巻き波砕波の場合は「砕け」および「突っ込み」状態時に大きな音圧値を示し、「遡上」、「引き」状態では音圧値が小さくなるのがわかる。一方、崩れ波砕波では、4状態による音圧変動の顕著な違いは現れていない。

図-3は、巻き波砕波が生じる現地海岸の砕波点より10 mの位置における観測記録であり、室内実験同様の音圧変動特性が明確に現れていることがわかる。

つぎに波の音圧変動に及ぼす海浜勾配、入射波の波高

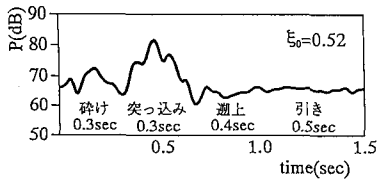
および周期、海浜斜面の底質などの影響について検討しよう。

図-4は、造波水槽において、同じ波高 H_0' と波長 L_0 をもち、海浜勾配が $\tan \theta = 1/10, 1/15$ と異なる場合の音圧変動記録を示したものである。この図より、勾配 $\tan \theta = 1/15$ の場合に比べ、急勾配である $\tan \theta = 1/10$ の方が波の「砕け」および「突っ込み」状態時の音圧パワーが大きいがわかる。

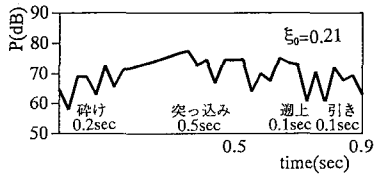
図-5は、実験時について一定の波長 $L_0 = 530$ cm をもち沖波波高 H_0' の異なる巻き波の音圧値を4状態別に示し、波高の影響をみたものである。図中の同模様のグラフは、同じ波高 H_0' をもつ波を示している。この図より、砕波する波が「遡上」、「引き」状態時にある時には波高 H_0' の影響は明確に現れていないが、この2つの状態に比べ「砕け」、「突っ込み」状態では、砕波音圧の値が増大するために波高 H_0' の大きい波ほど音圧値も大きくなるといえそうである。また、崩れ波の場合にも同様の結果が得られた。

前報(1992)で海浜勾配が $\tan \theta = 1/15$ の場合より $1/10$ の場合、あるいは波高 H_0' が大きくなるほど数周期間の砕波音圧の平均値が大きくなることを報告した。今回の検討により、海浜勾配 $\tan \theta$ および沖波波高 H_0' の影響は特に波の「砕け」、「突っ込み」状態時の音圧値に現れることがわかった。

また、波高の影響については現地海岸の観測結果からも同様の結果が得られた。



(1) 巻き波砕波の音圧変動



(2) 崩れ波砕波の音圧変動

図-2 実験による砕波の音圧変動

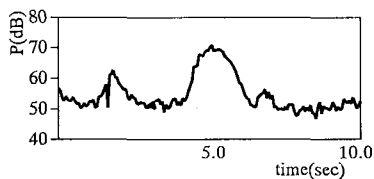


図-3 現地海岸(大神子)の音圧変動

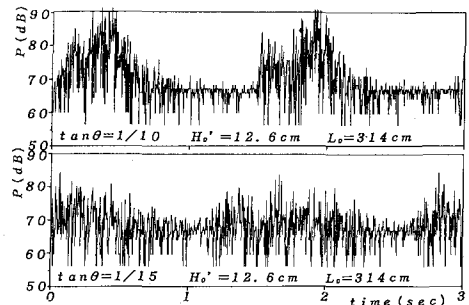


図-4 砕波音圧特性と $\tan \theta$ との関係

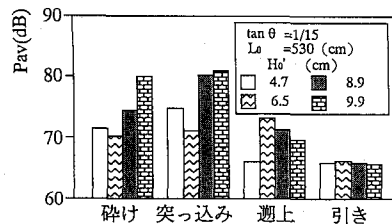


図-5 4状態別砕波音圧と H_0' との関係

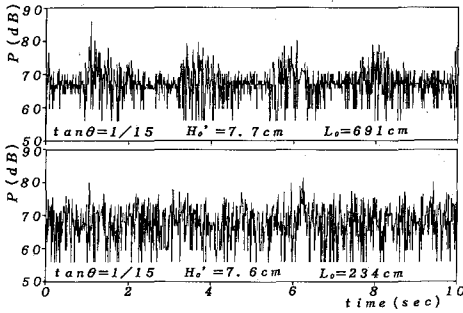


図-6 砕波音圧特性と L_0 との関係

図-6は、ほぼ同じ波高 H_0' をもち、波長 L_0 の値が234 cmと691 cmとかなり異なる周期で砕波運動が生じる実験波についてそれらの音圧変動記録を示したものである。

波長の長い $L_0=691$ cm の場合には、一波一波の砕波が比較的明確な変動をしているが、 $L_0=234$ cm の場合には、砕波が絶え間なく生じ、その音圧変動からは各砕波状況を読みとることはできない。このことより、砕波のリズム特性を考慮する場合に、その波の周期が大きく影響することが示唆される。

前報(1992)において、海浜勾配が一定($\tan\theta=1/15$)のもと、崩れ波砕波(surf similarity parameter $\xi_0 < 0.5$)におけるリズム性 L_{zm} の値は、 ξ_0 の値の増加にともない増大し、巻き波砕波($\xi_0 > 0.5$)では、 ξ_0 の値の増加にともない逆に減少する傾向があった。つまりこれは、波形勾配 $H_0'/L_0=0.02$ 以上では、周期 T の増大にともない、砕波音のリズム性 L_{zm} の値は増大し、波形勾配 $H_0'/L_0=0.01$ 以下の波では、周期 T の増大にともないリズム性 L_{zm} の値は減少するということになる。

前報(1992)の室内実験の結果では、海浜斜面の底質が細砂の場合が、れきや滑面の合板に比べ、砕波時の平均音圧値が大きくなることが示された。

図-7は、斜面の底質を滑面の合板、れきおよび細砂と変化させ、音圧値を砕波状態別にみたものである。波の「砕け」、「突っ込み」状態時の音圧値は、底質が細砂の場合に最も大きくなり、以下れき、合板と順に小さくなる。

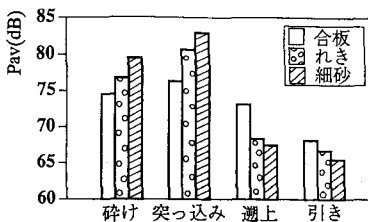


図-7 4状態別砕波音圧と底質との関係

「遡上」、「引き」状態時には逆に細砂の場合に音圧値が最も小さくなり、れき、合板の順に大きくなっている。つまり、一周期間の砕波運動を通してみると、音圧変動は、細砂、れき、合板の順にその値の振幅が大きいがわかる。これは、砕波時にかく乱される底質の浮遊状況が音圧に影響するものと考えられる。

4. 砕波帯付近における波の音色特性

灘岡ら(1988)は、急深海岸および遠浅海岸で収録した波の音をスペクトル解析し、砕波する波の音色に海浜勾配の違いは現れないことを報告している。本研究においても実験水槽および現地海岸の砕波運動より得られた一波分あるいは数波分の全音圧データを一度にスペクトル解析し、波の音色と砕波形式(巻き波、崩れ波)との関係あるいは海浜斜面の底質および海浜勾配、波浪特性である波高、波長との関係についても検討を行った。しかし、それらの影響を音色特性からよみとることはできなかった。

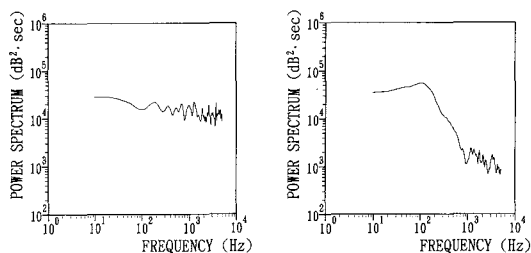
本研究では、砕波音圧をAD変換し、1秒間に10000データの割合で収録している。そこでその時系列データを1/15秒ごとに、データ数1024個づつ、順に繰り返しスペクトル解析を行うことにより、時々刻々と変化する波の音色特性を微少時間ごとに観察し、砕波運動の4状態時の各音色特性を調べた。

前報(1992)では、騒音計の聴感補正回路A特性で収録された砕波音の音色特性より、①砕波帯付近の音色は、スペクトル形状から3種類に大別できる②その3種のスペクトル形状の現れ方は崩れ波砕波と巻き波砕波によって異なることを報告した。今回の室内実験におけるC特性収録データからも、上述の①②と同じ結果が得られた。

今回得られた3種類のスペクトル形状の代表的な例を図-8に示す。巻き波砕波における「砕け」、「突っ込み」状態時には(1)に示す白色雑音が大部分であり、「遡上」、「引き」状態時には(2)のように高周波ほど減衰するという特性をもつ音色となる。崩れ波砕波では、4つの全ての状態で(1)の白色雑音が大部分となる。(3)のスペクトル形状は、巻き波と崩れ波と明確に判断できない ξ_0 の値が0.5付近の波の「遡上」、「引き」状態時に現れる。

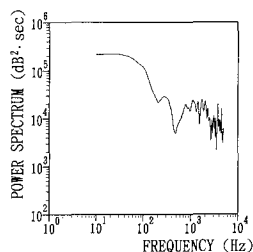
現地海岸における巻き波砕波の観測データについても1/15秒ごとのスペクトル解析を行い音色特性を調べた結果、図-8の室内実験より得られたスペクトル図と同じ形状をもつ3種類の音色に大別することができた。

ついで底質の違いによる砕波音のスペクトル構造を詳細に調べたところ、「砕け」および「突っ込み」状態時のスペクトルは常に白色雑音形を示したが、「遡上」、「引き」状態時のスペクトル形状は底質により若干の相違がみられた。



(1)

(2)

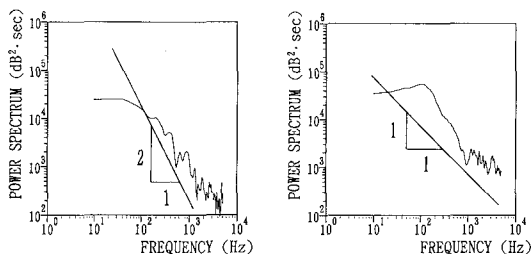


(3)

図-8 代表的スペクトル形状

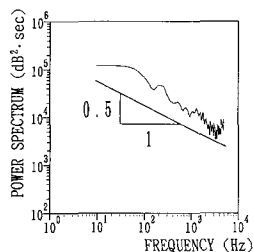
図-9 は、実験波の「引き」状態時の代表的なパワースペクトル図を底質別に示したものである。これを見ると、(1)に示す前浜の底質がれき、(2)に示す滑面の合板、および(3)に示す細砂の順に高周波の減衰が大きくなっているのがわかる。

図-10 は現地海岸における「引き」状態時の波の音色を示したものである。(1)は、れき浜である徳島県の大神子海岸、(2)は砂浜である徳島県の月見ヶ丘海岸のデータより得られたものである。これを見ると、水槽実験



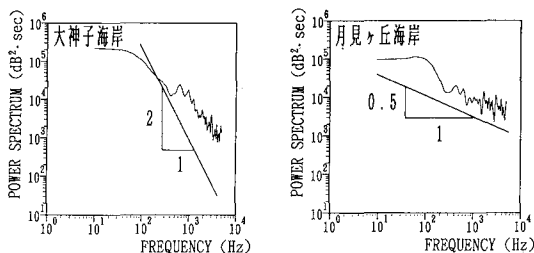
(1) れき

(2) 滑面の合板



(3) 細砂

図-9 実験による「引き」状態時のスペクトル形状



(1) れき浜海岸

(2) 砂浜海岸

図-11 砕波音収録位置によるリズム特性

の結果と同様、底質が砂に比べてれきの方が、高周波の減衰が大きくなっていることがわかる。

また、波の音色に及ぼす海浜勾配、入射波の波高および波長の影響についても同様の検討を行ったが、有為な結果は得られなかった。

6. 砕波点から汀線背後における波の音の減衰特性

前報(1992)では、砕波点から汀線背後にかけて生じる砕波音圧の距離的な減衰特性について考察を行っている。本報では、砕波音の減衰特性についてリズム性と音色の面より追加考察を行う。

図-11 は、室内実験において、波の砕波点上と汀線背後2mの位置で収録したデータより、それぞれのリズム性 L_{zm} を求めたものである。

この図より、汀線背後では音圧の減衰とともに砕波音のリズム性 L_{zm} の値も小さくなるのがわかる。

図-12 は、室内実験における砕波点上と汀線背後2mの位置で収録したデータより得られた音色、図-13 は現地海岸の砕波点から岸側へ10mおよび30mの位置における音色を示したものである。

いずれも、砕波点付近の音色に比べ、汀線背後の音色は高周波成分が減衰していることがわかる。このような傾向は、現地における砂浜海岸でもれき浜海岸でも見られた。これらのことより、砕波音圧は距離減衰が著しく、当然、周波数の高い音の減衰が著しいことがわかる。

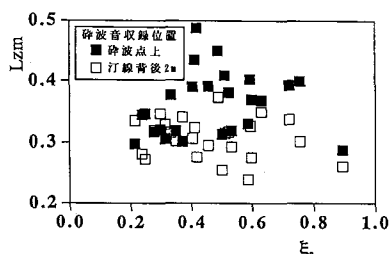
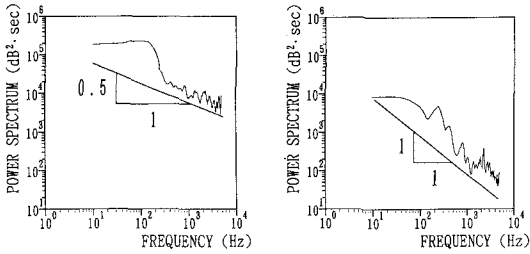


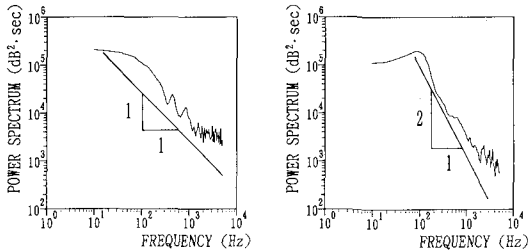
図-10 現地の「引き」状態時のスペクトル形状



(1) 砕波点上

(2) 汀線背後 2 m

図-12 実験による砕波音の収録位置別スペクトル形状



(1) 砕波点より 10 m

(2) 砕波点より 30 m

図-13 現地の収録位置別スペクトル形状

7. 人間心理と波の音との関係

波の音圧特性や音色特性の人間の快適性に及ぼす影響を若干考察しておこう。まず、砕波音の音圧変動のリズム性の影響について検討した。調査方法は、ラジオの白色雑音をボリューム調整することにより平均音圧 P_{av} 、周期 T の値が等しく、リズム性 L_{zm} の値の異なる 5 種類の人工の波の音を作成し、徳島大学の学生 28 人に聞かせ、それぞれ大変快い、快い、普通、不快、大変不快の 5 項目の中で、該当すると思われるものを選ばせた。そして 5 項目の選択肢の内、大変快いと感じられた波の音には 5 ポイント、快いと感じられた波の音には 4 ポイントと以下順に普通は 3 ポイント、不快と大変不快は、それぞれ 2 ポイント、1 ポイントと点数をつけた。その合計結果とリズム性 L_{zm} との関係を図-14 に示す。

この場合リズム性 L_{zm} の値が非常に小さな値の範囲ではあるが、 L_{zm} の値が増大するとともにポイントが高くなっており、灘岡ら (1988) と同様にリズム性がその音の快適性と密接な関係があることが示唆される。

つぎに、異なる底質をもつ海岸の波の音により、人間心理がどのように影響を受けるか、アンケート調査を行

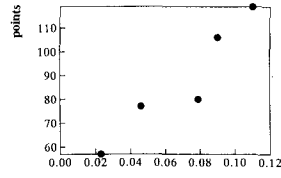


図-14 「快適性」とリズム性との関係

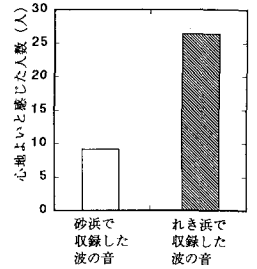


図-15 「快適性」と底質の異なる砕波音との関係

った。被験者は徳島大学の学生 35 人である。内容は、底質 (れき、砂) の異なる海岸で収録した、平均音圧値 P_{av} と波の周期 T 、リズム性 L_{zm} の値のほぼ等しい波の音を聞かせ、一対比較法により心地よいと感じられる波の音を選ばせた。その結果を図-15 に示す。

これを見ると、砂浜海岸の波の音より、れき浜海岸における波の音に快適性を感じる人が多い結果になっている。このアンケート結果より、海浜底質は「心地よい波の音」を創造する海岸条件として重要な要素の一つであると考えられる。

8. 結 言

今回は、波の音の特性についてこれまでの室内実験に加え、現地海岸における観測結果からも考察を行った。まず、波の音圧が大きい海浜斜面での「砕け」、「突っ込み」状態時のスペクトル特性は白色雑音形を示し、つづく「遡上」、「引き」状態時には高周波音の減衰が生じる。また、各砕波状態時の波の音圧と音色は入射波の波高、周期、海浜の勾配、底質および砕波点からの距離などの影響を受けることがわかった。さらには、リズム性 L_{zm} の値が大きいあるいは海浜底質が砂よりれきの場合の砕波音に人が快適性を感じるなどが示された。

最後に、本研究の実験および解析方法について御助力いただいた中野晋徳島大学講師に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 灘岡和夫・徳見敏夫 (1988): 海岸の音環境に関する基礎的研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 757-761.
- 灘岡和夫・玉嶋克彦 (1989): 海岸環境要素としての波の音の特性について, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 869-873.
- 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, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 1081-1085.