

砕波による波の音に関する二、三の実験的考察

村上仁士*・細井由彦**・上月康則***・小川慶樹***

1. 緒 言

魅力ある快適な海岸環境を創造するには、周辺の景観や波の音など自然の魅力を引き出す努力も必要であろう。海岸の魅力の構成要素に関する著者ら(1991)のアンケート調査では、砂浜、水平線、といった視覚的要素に加えて、聴覚的要素である波の音が上位に位置し、灘岡ら(1988)の調査結果とほぼ一致するという興味深い結果を得ている。波の音は海岸環境を構成する重要な要素の一つに違いないが、波の音は絶えず変化しており、必ずしも心地よい音を与えるとは限らず、台風時の波の音のように時には恐怖をいだかせることもある。

波の音に関する研究は灘岡ら(1988, 1989)により精力的に進められてきた。彼らの研究はいずれも現地の波の音の観測結果をもとに、波の音の「心地よさ」をリズム性と surf similarity parameter で論じたものである。著者ら(1991)も徳島県の海岸で同様の考察を行うとともに「心地よさ」は波の周期性にも依存することを指摘した。しかしながら、耳に入ってくる波の音の特性は波浪のみにより規定されるものではなく、海岸背後地の形状や地形、底質、風向きや風速などによっても変化する。現地観測による波の音はこれらのさまざまな要素の合成された結果であると言える。したがって、現地観測から求められた従来の知見は波の音の特性に及ぼす各要素の影響については十分に明らかにしていると言いがたい。

本研究では、こうした観点から、まず波の音の物理的特性を明らかにするために、水槽実験によって波浪条件を変えた各種の砕波状態を与え、波の音の特性を考察した。さらに、前浜の底質、海浜勾配および風の影響についても若干の考察を行った。本研究は、「心地よい波の音」を聞くことができる海岸の条件の設定や将来の魅力ある海岸環境の創出に寄与する基礎資料を提供しようとするものであるが、ここでは「心地よさ」に関する段階まで言及していない。

2. 実験装置および実験方法

実験には、図-1に示すような長さ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。海浜勾配 $\tan \theta$ は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とした。そして 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。ここに、 H_0' は換算沖波波高、 L_0 は深海波長である。実験諸元は表-1のとおりである。

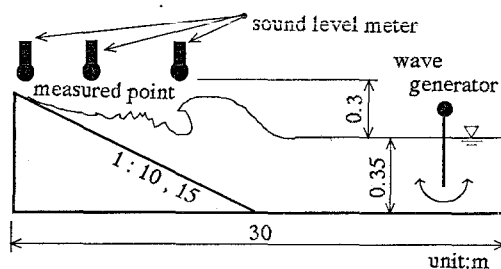


図-1 実験水槽

表-1 実験諸元

前浜勾配 $\tan \theta$	周期 T (sec)	換算沖波波高 H_0' (cm)	surf similarity parameter ξ_0	前浜の底質
1/10	0.8~2.0	1.82~13.44	0.397~2.045	合板
1/15	0.8~2.0	2.86~13.28	0.214~0.894	合板、れき、細砂

なお、surf similarity parameter $\xi_0 < 0.5$ の場合は崩れ波砕波、 $0.5 < \xi_0 < 3.3$ の場合には、巻き波砕波が生ずる。

砕波時の波の音を、後述する位置の静水面上方30 cmに騒音計(NA-24 リオン社製)を設置し、DR-F1(ティアック社製)で収録した。砕波時の波の音に及ぼす底質の影響をみるために、1/15の斜面底質には、滑面の合板のほか、れきおよび細砂も使用した。なお、本実験に使用したれきは、中央粒径 $D_{50} = 18.6$ mm、細砂は $D_{50} = 0.63$ mm である。実験中、細砂の場合には砕波した波に底質の砂が巻き込まれたが、れき質については波に巻き込まれることはなかった。さらに、波の音に及ぼす風の影響を概括的にみるため、汀線より背後50 cm およ

* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部教授 土木工学科

** 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

*** 学生員 工修 徳島大学大学院工学研究科 生産開発工学専攻

*** 学生員 徳島大学大学院工学研究科 建設工学専攻

び沖側2mの位置に扇風機を設置し、陸風と海風とを模擬的に起こした。このとき、風速 U は0m/sec～4.28m/secの範囲で変化させた。波の音の場所的変化を調べるため、波の突っ込み部、遡上部および汀線より2m背後の計3カ所で測定した。一方、実験水槽のガラス壁側方約2mの位置にビデオ装置(SONY CCD-V800)を設置して、碎波状態を観察した。

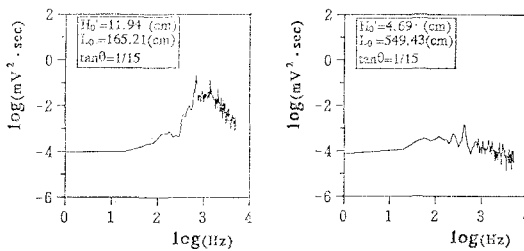
波の碎波状態は碎ける直前の「突っ込み」、つづいて起こる「砕け」、その後の「遡上」および「引き」と時間とともに変化し、これが波の音圧変化として現れている。解析では、まず種々の波の状態における波の音色を求めることにした。波が「突っ込み」、「砕け」、「遡上」、「引き」の4状態にある瞬間の音色については、1/15秒ごとのスペクトル解析より求めた。また、波の音圧は、約10秒間の音圧変化の平均値をとって求めた。なお、本実験では崩れ波碎波における「突っ込み」状態とは波が崩れ始めた時点を指すこととする。

3. 波の音色特性

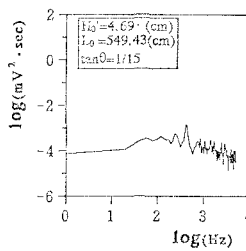
すべての実験結果について、波の音色のスペクトル形状を求めた結果、スペクトル形状は大きく3つのグループに分類することができた。それらを本報では α 型、 β 型および γ 型と名付け、それぞれの代表的な形状を図一2～図一4に示す。

α 型の特徴は1000Hz付近の帯域に顕著なピークがみられ、 β 型ではその帯域に顕著なピークがみられずスペクトル形状が平坦になっている。 γ 型はその両者の中間的なタイプである。

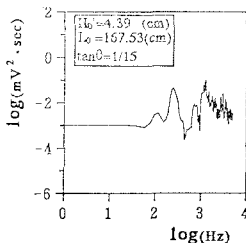
つぎに、海浜勾配 $\tan \theta = 1/15$ の滑面の合板上で碎波



図一2 α 型スペクトル形状



図一3 β 型スペクトル形状

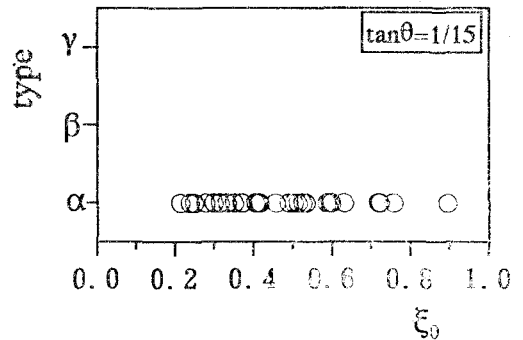


図一4 γ 型スペクトル形状

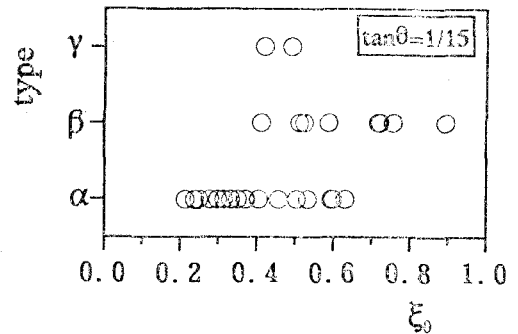
する波の音を波の「突っ込み」部で収録した結果から、波の音色のスペクトル形状と碎波形態の関係について考察する。図一5～図一7は碎波状態別に縦軸に音色のスペクトル形状のタイプを、横軸に surf similarity parameter ξ_0 をとったものである。

図一5をみると、全ての ξ_0 の範囲、すなわち巻き波碎波あるいは崩れ波碎波にかかわらず、波の「突っ込み」、「砕け」時には音色のスペクトル形状がすべて α 型となっている。

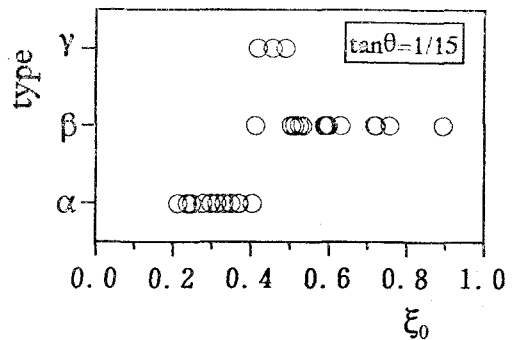
図一6および図一7からは、波の「遡上」あるいは「引き」状態にかかわらず、 $\xi_0 = 0.5$ を境に波のスペクトル形状が異なる傾向にある。 $\xi_0 < 0.5$ の崩れ波碎波の場合には α 型の、 $\xi_0 > 0.5$ の巻き波碎波では β 型の音色が



図一5 「突っ込み」、「砕け」状態時のスペクトル形状の分布



図一6 「遡上」状態時のスペクトル形状の分布



図一7 「引き」状態時のスペクトル形状の分布

現れている。この傾向は、図-7 に示される波の「引き」状態時において顕著に認められた。

一方、図-6 および図-7 に示した「遡上」、「引き」状態時には、崩れ波と巻き波と明確に判断できない、 ξ_0 の値が 0.5 付近で、 α 型または β 型以外の γ 型のスペクトル形状が認められた。

以上のことより崩れ波砕波と巻き波砕波は「遡上」、「引き」状態時における波の音色より、その区別が可能ながことが示唆された。

なお、風速 U および風向を変化させた検討も行ったが本実験範囲内では有為な結果は得られなかった。

4. 波の音圧特性

4.1 波の平均音圧特性と砕波形態の関係

図-8 は底面を滑面の合板とし、海浜勾配 $\tan \theta$ を 1/10 および 1/15 とした場合の砕波時の平均音圧 P_{av} と surf similarity parameter ξ_0 との関係を示したものである。

全般的にみると、 ξ_0 の値が増大するにともない P_{av} は減少し、砕波時における平均音圧は巻き波砕波 ($\xi_0 > 0.5$) より崩れ波砕波 ($\xi_0 < 0.5$) の方が大きいことがわかる。ただし崩れ波砕波の場合には音圧の値に幅がある。

そこでもう少し詳細に調べるために、海浜勾配 $\tan \theta$ が砕波時の平均音圧に及ぼす影響をみよう。

図-9 は沖波波形勾配 H_0'/L_0 の値が等しく $\tan \theta$ の異なる場合について示したものである。図中の線で結んだ記号は、同じ波形勾配をもち、海底勾配の異なる波を示している。

勾配が大きい $\tan \theta = 1/10$ に比べ、勾配が小さい $\tan \theta = 1/15$ の場合は、砕波するときの平均音圧 P_{av} が小さくなるのがわかる。

つぎに、入射波の特性が波の平均音圧 P_{av} に与える影響をみるために、換算沖波波高 H_0' が平均音圧 P_{av} に及ぼす影響について検討した。図-10 は沖波の周期 T が等しい、すなわち沖波波長 L_0 が等しい波に対する結果である。

この図をみると波高 H_0' が増大するにともない、砕波時の平均音圧 P_{av} も同様に増大していることが明らかである。また、この図より波形勾配 H_0'/L_0 が等しければ周期 T の長い波ほど波の平均音圧 P_{av} は大きくなることも示唆される。

図-11 は底質を滑面の合板に加え、れきおよび細砂の場合に対して砕波時の平均音圧 P_{av} を比較したものである。

滑面をもつ合板とれきの場合を比較すると、両者の音圧には、 ξ_0 が小さい場合にはやや違いがみられるが全般的にそれほど顕著な差異はないようである。しかし、細

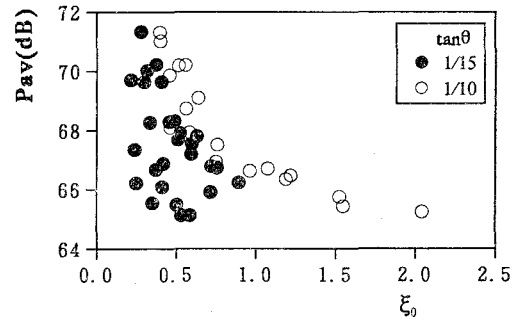


図-8 P_{av} と ξ_0 との関係

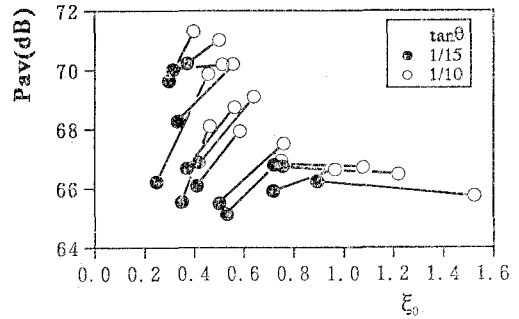


図-9 P_{av} と $\tan \theta$ との関係

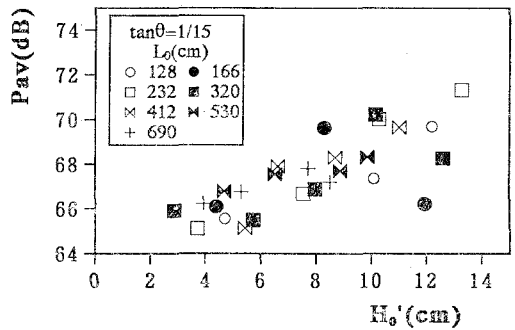


図-10 P_{av} と H_0' との関係

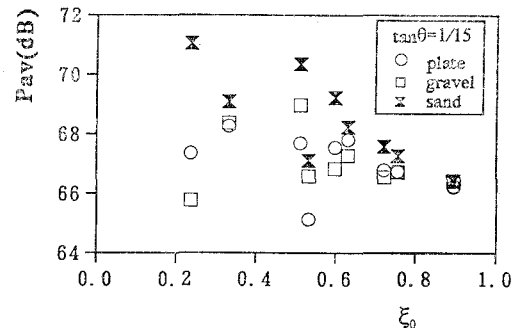
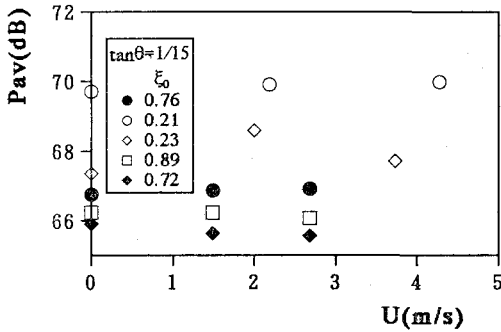


図-11 P_{av} と前浜の底質との関係

砂の場合には合板やれきに比べやや砕波時の音圧が大きくなり、特に ξ_0 が小さい崩れ波砕波の場合には他の二者に比べてかなり音圧が大きくなるのがわかる。この

図-12 P_{av} と U との関係

原因は明らかではないが、底質が細砂の場合、合板やれきに比べ、碎波時に水中に浮遊した砂が音圧を増大させる原因となっているのかも知れない。

図-12は底面が滑面の合板の場合、沖側から風速 U を与えたときの突っ込み部における平均音圧の変化を調べたものである。限られた本実験の範囲内では、風の影響は認められなかった。このことは、風向きを逆に陸側から与えた場合についても同様であった。

4.2 碎波点から汀線背後における音圧の減衰特性

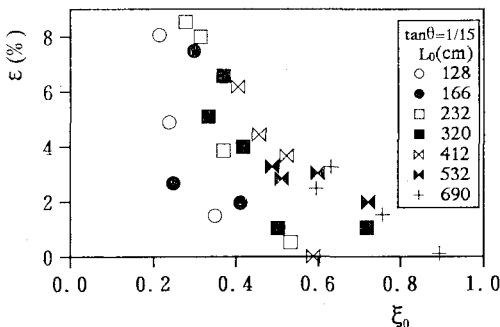
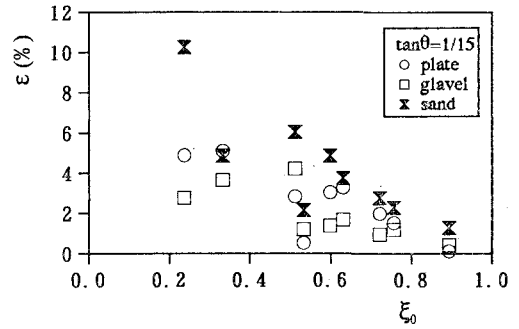
つぎに、碎波点から汀線背後にかけて生じる碎波音圧の減衰特性について若干の考察を加えておこう。ここでは、碎波音圧の減衰特性を表す指標として、減衰率 ε を次式のように定義した。

$$\varepsilon = \{(P_{av} - P_{bac}) / P_{av}\} \cdot 100 \quad (1)$$

ここに、 P_{av} は突っ込み点の平均音圧 (dB)、 P_{bac} は汀線背後の平均音圧 (dB) である。

図-13は海浜勾配 $\tan \theta = 1/15$ における碎波音圧の減衰率 ε と surf similarity parameter ξ_0 との関係を示したものである。

碎波音圧は突っ込み点から汀線背後の間で減衰し、 ξ_0 の値が増大するにともない減衰率 ε の値が小さくなる。このことより、 ξ_0 が小さい崩れ波ほど、音圧の減衰は大きく、本実験の場合では最大で約 9%、巻き波時では 5% 以下であった。ただし、この値は実験から得られたものであり、音の縮尺効果が明らかでないので値そのもの

図-13 ε と ξ_0 との関係図-14 ε と前浜の底質との関係

のから現地換算した定量的な減衰効果は言及できない。

また、この図は海浜勾配 $\tan \theta$ を一定かつ波を沖波波長 L_0 によって分類していることから、換算沖波波高 H_0' が大きくなるにつれて減衰率 ε の値も大きくなることも意味している。

図-14は減衰率 ε に及ぼす底質の影響をみたものである。滑面の合板とれきでは平均音圧の特性同様、音の減衰率に顕著な違いは認められない。しかし、細砂の場合、特に ξ_0 の値の小さい崩れ波碎波の場合には、他の底質に比べ音圧の減衰率も大きいことがわかる。砂面の吸音効果が高いことは灘岡ら (1989) も指摘している。

5. 波のリズム特性

灘岡ら (1988) は、波のリズム性 L_{zm} を次式で定義した。

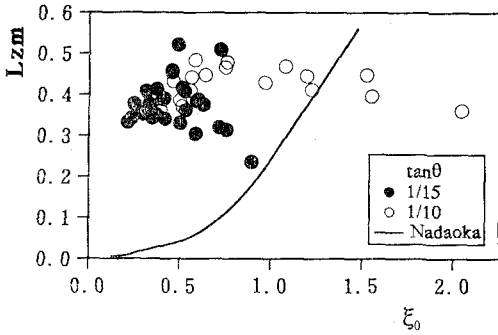
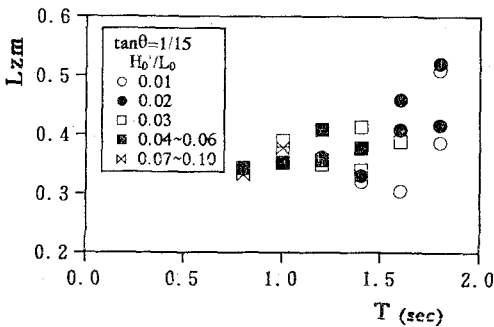
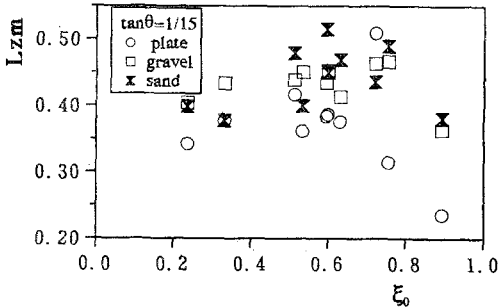
$$L_{zm} = (L_{peak} - L_{av}) / L_{av} \quad (2)$$

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。灘岡ら (1988) によると、リズム性は海岸の特性によりかなり異なるが、surf similarity parameter ξ_0 でその違いがほぼ統一的に説明でき、 ξ_0 が小さい崩れ波碎波では、リズム性を示す L_{zm} の値は小さいが、 ξ_0 が大きくなると L_{zm} は大きくなるといわれている。リズム性 L_{zm} は、海岸の波の音の心地よさの程度を表す一つの指標であり、その値と心地よさの間には正の相関があるとされている。しかし、本研究では室内実験から得られたリズム性の値をもとにした考察を行っており、心地よさまで言及していない。

ここでは、本実験の結果をもとに波のリズム性の値についても検討を行った。その結果を図-15に示す。

灘岡ら (1988) は、 ξ_0 が 0.6 以下で L_{zm} の値は 0.1 より小さく、 ξ_0 がその値以上になると急激に L_{zm} が大きくなることを報告しているものの、図-15ではこの傾向は認められない。

図-16は、海浜勾配 $\tan \theta$ を一定とし、沖波波形勾配 H_0'/L_0 別に、リズム性 L_{zm} と周期 T との関係を調べようとしたものである。この図より、周期 T が増大す


 図-15 L_{zm} と ξ_0 との関係

 図-16 L_{zm} と T との関係

 図-17 L_{zm} と前浜の底質との関係

るにともない、リズム性の値も大きくなっている。

図-17は、前浜の底質が波のリズム性に及ぼす影響をみたものである。必ずしも明確でないが、細砂、れき、滑面の合板の順でリズム性 L_{zm} の値が大きくなっているようにも見える。また、この図をみる限り $\xi_0 < 0.5$ の崩れ波砕波時には、 ξ_0 の増大にともない L_{zm} の値は増加するが、 $\xi_0 > 0.5$ の巻き波砕波においては ξ_0 が大きくなるほど、 L_{zm} の値はむしろ減少する傾向もうかがえる。

また、波のリズム性に与える風速 U および風向の影響についても検討を行っているが、先に述べた音圧特性と同様、本実験条件の範囲内では有為な結果は得られなかった。

6. 結 語

本研究では、砕波時の波の音の特性を明らかにするための第一段階として、砕波条件や海底勾配および底質の種類を変化させ、水槽実験を行うことによってそれら個々の要因が波の音にどのような影響を及ぼすかについて考察した。

以下、本実験で得られた主な結果を述べる。

1) 崩れ波砕波と巻き波砕波の砕波帯付近における音色の特性は、スペクトル形状から、3種類に大別できた。この3種類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がわかった。

2) 砕波時の平均音圧 P_{av} は、巻き波砕波時より崩れ波砕波時、また海浜勾配 $\tan\theta = 1/15$ より $\tan\theta = 1/10$ の場合に大きくなった。さらに、 P_{av} は、波高 H_0' とともにその値は増大した。一方、底質が滑面の合板、れきに比べ、砕波時に波に巻き込まれる細砂の場合に音圧が増大することが示された。

3) 砕波音圧は砕波点から汀線背後にかけて減衰し、その減衰率 ε は、巻き波砕波時より崩れ波砕波時に大きくなった。さらに、波高 H_0' の増大とともに ε の値は増大した。また、底質が滑面の合板、れきに比べ、細砂の場合に ε の値が増大することがわかった。

4) 沖波波形勾配 H_0'/L_0 と海浜勾配 $\tan\theta = 1/15$ が一定条件のもとでは、周期 T が長くなるとともに、砕波音のリズム性 L_{zm} の値も大きくなった。また、このリズム性 L_{zm} の値が増大する傾向は、「砂」、「れき」、「滑面の合板」の順で顕著になった。

また、風の影響についても若干の検討を行った。その結果、波の音圧、リズム性に及ぼす風の影響については本実験の範囲内では顕著な影響は認められなかった。しかしながら、風の発生装置の精度、風速の鉛直分布、現地とのスケールなどを再検討し、今後さらに詳細な実験を行う必要がある。それに加え、さらに実験条件を増やすことや、室内実験で得られた知見と現地観測との比較などが今後課題である。

最後に、本研究の実験および解析方法について御助力、御助言いただいた中野晋徳島大学講師、吉田善昭氏(元 徳島大学大学院生)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, 海岸工学講演会論文集, 第35巻, 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・木下 保 (1991): 海岸環境における快適性の要因——波の音——に関する一考察, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp. 377-380.