

海岸環境要素としての波の音の特性について

灘岡 和夫*・玉嶋 克彦**

1. はじめに

最近のウォーターフロント開発熱の高まりを背景として、いかにして魅力のある海岸空間を創造していくかということが重要な課題となってきた。そうした中において、灘岡・徳見(1988)は、アンケート調査や官能試験の結果に基づいて、人間にとっての海岸環境の構成要素の一つとして「波の音」が重要な役割を演じていることを明らかにしている。

ところで、このような「波の音」というファクターを背後地を含めた海岸空間の設計に具体的に反映させるには、海岸の音空間の構造を明らかにしていく必要がある。具体的には、波の音の音源と空間分布の特性を物理的および音響心理的な観点から把握する必要があるが、本研究では、この二つの項目について、それぞれ音量と音質の両面から、現地観測データと官能試験データの解析に基づいて検討を行った。

2. 波の音の音源特性

波の音の発生源は、主として砕波によるものである。したがって波の音の音源特性は、砕波の規模や砕波形式に何らかの依存性を持つと考えられる。そこで本研究では、砕波規模と砕波形式への依存性という観点から波の音の音源特性を調べていくことにした。

前報(灘岡ら, 1988)では、①波の音が持つ心地よさや「波らしさ」が主として波の音のリズム性に依存していること、②そのリズム性が海岸特性によってかなり異なり、surf similarity parameter ξ_0 (Battjes, 1974) によってその違いが統一的に説明でき、 ξ_0 の値がおよそ 0.6 以上のときにリズム性が顕著になってくること、などを示した。

Battjes (1974) によれば、この surf similarity parameter ξ_0 は砕波形式の分類指標でもあり、Galvin (1968) の結果に基づいて次式を示している。

$$\text{surging or collapsing if } 3.3 < \xi_0$$

$$\begin{array}{ll} \text{plunging} & \text{if } 0.5 < \xi_0 < 3.3 \\ \text{spilling} & \text{if } \xi_0 < 0.5 \end{array}$$

したがって、 $0.6 \leq \xi_0$ でリズム性が顕著になるという前報で示した結果は、砕波形式で言えば、ほぼ spilling 型砕波以外でリズム性が顕著になることを意味している。そこで本報告では、対象とする波の音を、「波らしさ」をもつ波の音という意味で、surging 型と plunging 型砕波形式のものに限ることにした。なお、Battjes (1974) によると、砕波帯内の波の数 N は $N = 0.8\xi_0^{-1}$ で概略見積れるが、ここで対象とした波の音のリズム性が顕著となる $0.6 \leq \xi_0$ という条件は $N \leq 1.3$ に対応する。すなわち今回対象とするのは、砕波帯内の波の数の条件で言えば、一波程度以下の場合に限っていることになる。

波の音の収録は、相模湾に面する袖ヶ浦海岸と辻堂海岸で行った。収録にあたっては、砕波形式や砕波波高などを知らするためにビデオでの撮影も同時に行った。これらの海岸の前浜勾配は、それぞれ 1/8.6 と 1/17 で、前浜の平均底質粒径は、0.92 mm と 0.45 mm であった。音の収録時の砕波形式は、両海岸とも surging 型と plunging 型が混在する状態であったが、袖ヶ浦海岸の方が、前浜勾配が若干大きいことに対応して surging 型砕波の占める割合が相対的に大きかった。

(1) 音源の時間変動特性

図-1 は、同程度の砕波規模(砕波波高)の plunging 型砕波と surging 型砕波の二種類の砕波について、音源から約 15m 岸側で収録した音の音圧実効値(音の大きさ) P とピッチ(音の代表的な高さ) f の時間変動波形の例を、波の一波分について示したものである。

まず音圧実効値の時間変動波形を見てみると、surging 型砕波では立ち上がり部分が比較的滑らかになっているのに対し、plunging 型砕波ではかなり急激な立ち上がりを示していることが分かる。このことは、plunging 型砕波の砕波音がかなり衝撃的な音に聞こえることに対応している。このように、砕波形式の違いは音量の時間変動波形の違いに明瞭に現れる。

一方、ピッチの時間変動を見てみると、音量の最大位相付近で逆にかなり減少しており、砕波のピーク時での

* 正 員 工 博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

** 東京工業大学大学院 修士課程

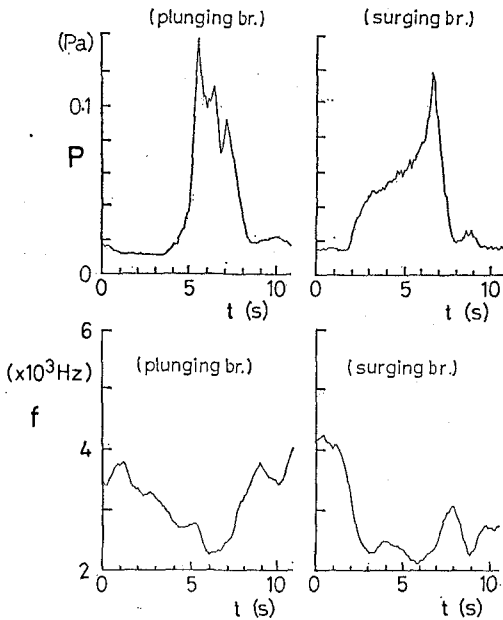


図-1 音圧実効値 P とピッチ f の時間変動記録

音の代表的高さは低音側にシフトすることがわかる。ただし、ピッチの時間変動パターンは、plunging 型碎波の場合でも音圧実効値の場合ほど急激には変化している形にはなっていない。

(2) 音源のパワーレベル特性

つぎに、波の音源特性のうち最も基本となるパワーレベル特性について検討した結果について述べる。図-2 (a) と (b) は、一波ごとの音源のピーク音量レベル L_p と、それに対応する碎波波高 H_b の関係を碎波形式別に見てみたものである。これを見ると、 L_p は当然ながら H_b の増加に対応して単調に増える形になっているが、(a) と (b) を比較すると、碎波形式の違いにはあまり依存していないことがわかる。

また、碎波波高 H_b が同じでも L_p は 5 dB 程度の範囲にわたって散らばっているが、これは波峰長や碎波角の一波ごとの変動によるものと考えられる。すなわち、今回は先に述べたように碎波帯内の波の数が一波程度以下の場合を対象としているので碎波ピーク時の波峰長の有限性が問題となり、入射波の波峰長や碎波角が一定でないとピーク時の碎波音の生成に寄与する碎波の実質的な波峰長が一波ごとに变化してくるため、碎波波高が同じでも L_p は異なってくることになる。

(3) 音源の周波数特性

つぎに、音源の周波数特性を代表するものとして、音量のピーク時のピッチ f_p の値をとり上げ、それとピーク位相での音量 L_p との関係を調べてみた。その結果を示したものが図-3 である。これから、碎波のピーク位

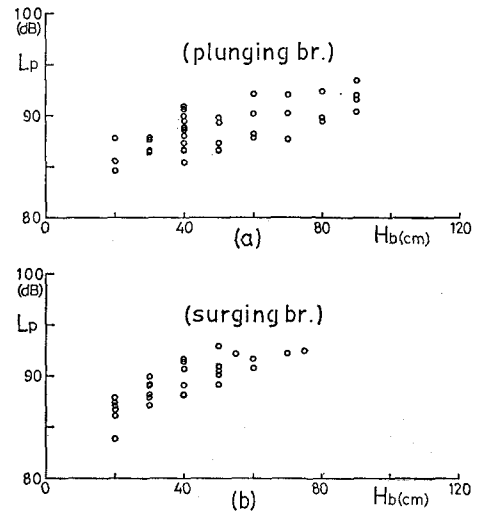


図-2 音源のピーク時パワーレベル L_p と碎波波高 H_b の関係

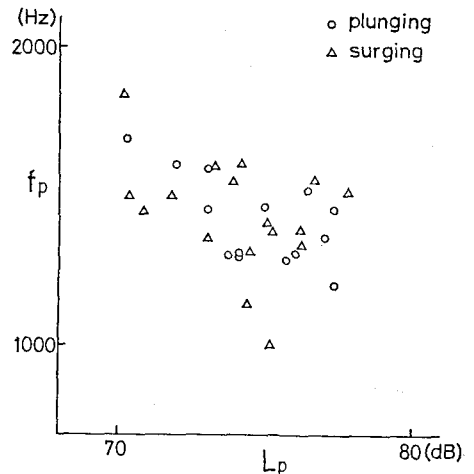


図-3 音源のピーク時平均周波数 f_p と L_p の関係

相での平均的な音の高さ(ピッチ)は、碎波の規模の増大とともに低くなることがわかる。これは、音源の周波数特性を支配すると考えられる碎波に伴う乱れの代表的なスケールが、碎波規模(碎波波高)に対応して増加するためと考えられる。なお、図中のデータは、碎波形式の違いを表すために記号を変えてプロットしてあるが、これを見ると、音源の周波数特性には碎波形式の違いはあまり影響を与えていないことがわかる。

以上をまとめると、波の音の音源特性のうち、①そのパワーレベル(音の大きさ)とピッチ(音の高さ)は碎波の規模(碎波波高)によって第一義的に支配されるが、このうちの音源のパワーレベルに関しては、碎波角や波峰長によっても影響を受けること、②碎波形式の違い

は、もっぱら音圧実効値やピッチの時間変動パターンに反映されること、が明らかになった。

3. 官能試験

(1) 砕波形式と規模の違いに対する心理的反応の相違

このような、砕波形式や砕波規模の違いに対する波の音の時間特性や周波数特性の違いは、人間の耳を通してときに何らかの心理的反応の相違となって現れてくるものと考えられる。そこで、この心理的反応の相違を見るために、東京工業大学土木工学科の学生40人を被験者として官能試験を行った。

試験は、表-1 に示すような順番で、砕波形式と規模の異なる四種類の波の音を聞かせ、表-2 に示すような音の品質表現に関する10対の各ペアに関して、その間を5段階にカテゴライズしたものに対して回答させるという形式をとった。

図-4 は、この10種類の音の品質表現の中で、特に目だった違いのあった4つを取り上げ、各々の平均得点を示したものである。これを見ると、規模の小さいものより大きいものの方が、また surging 型よりも plunging 型の方が、「迫力」、「鋭さ」、「恐さ」というファクターがともに増大し、結果的にそれに反比例する形で「快さ」が減少していることがわかる。このように音源の物理的特性の質的な違いは、心理量の違いとして比較的明瞭に現れてくる。

表-1

	砕波形式	音量 (dB)
1	plunging	70
2	plunging	75
3	surging	70
4	surging	75

表-2

	形容詞対
1	大きい——小さい
2	瘦せた——豊かな
3	暗い——明るい
4	荒い——滑らかな
5	快い——不快な
6	迫力のある——物足りない
7	濁った——澄んだ
8	響いた——響かない
9	恐い——優しい
10	鋭い——鈍い

(2) 浜上の音の大きさの分布と「快さ」の関係

図-4 の結果は、波の音に対する快さが音源の砕波規模に依存していることを示しているが、このことは、同時に浜上の受音点の位置の違いによる音の大きさの変化に対しても、「快さ」の反応が異なってくることを示唆している。そこでこの点を明らかにするために、ここでは surging 型砕波の波の音を source として用い、その音量

を大きく4段階に変えることによって浜上の受音点の違いによる音量の変化を模擬して官能試験を行った。(ただし正確に言うと、次節に述べるように受音点が砂面に近い場合には音量だけでなく音質も変化するが、ここでは簡単のため音量の変化だけに着目している。)図-5はその結果で、各音量に対する「快さ」の平均得点を示したものである。これからわかるように、音量の変化に伴う「快さ」の変化はかなり大きい。

浜上での音量の変化は音源からの距離に伴う距離減衰が最も大きい、そのことからすると、図-5の結果は(少なくとも他の視覚的な要素などを除いて波の音だけを被験者に聞かせた場合には)音源に近づくほど「快さ」が減少することを意味している。逆に音源から遠ざかる

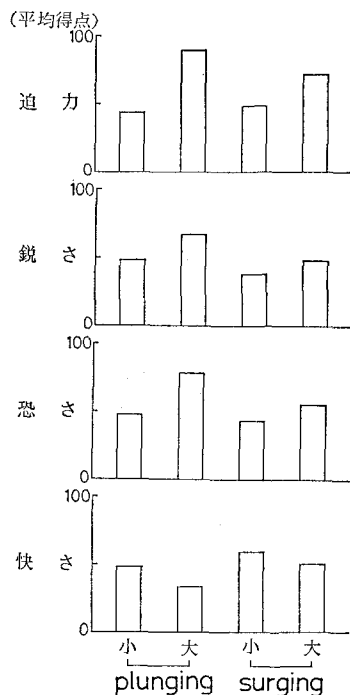


図-4 官能試験の回答結果

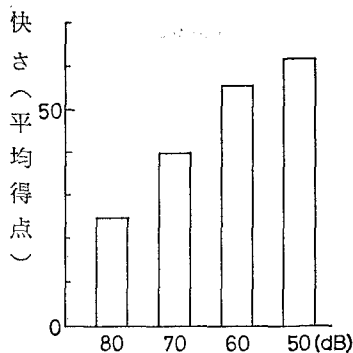


図-5 音量の違いによる快さの度合の変化

と「快さ」が単調に増大する結果になっているが、聞き取れないくらい音量が小さくなった場合には他の雑音に埋もれてしまい「快さ」は減少していくものと考えられる。したがって、「快さ」は、音源からの距離に伴って途中にピークを持つ分布型を示すものと予想される。このことは、音環境を海岸の空間・施設設計に反映させる上で重要な意味を持っており、海岸の背後地を含めた波の音の空間分布構造を具体的に調べることの必要性を示すものである。

4. 波の音の空間分布特性

(1) 浜上での波の音の岸沖分布

図-6 は、波の音の音量の岸沖分布特性を見てみるために、砂面上 1.2m の高さで測定された波の音の大きさを横軸に各測定点から音源までの岸沖方向距離 r をとってプロットしたものである。ただし、ここで示したデータは、各 5 分間の記録中の音量のピーク値をすべて拾い出し、その上位 1/3 の平均値として算出された値である。

2. (2) で述べたように、今回は碎波帯内の波が一波程度以下の場合を対象としていることから、音源としては有限の長さの線音源とみなすことができる。従って音源の近くでは $1/r$ 特性で、また遠方場では $1/r^2$ 特性に従う距離減衰を示すものと予想される。しかし実際は、図-6 に見られるように $1/r^2$ 特性よりもさらに急激に減衰する部分が現れ、逆に右端の測定点では $1/r^2$ 特性より増えており、予想ほど単純な分布形にはなっていない。

図-6 の分布形を詳しくみると、図中の A と B の部分で音量の変化傾向が急変していることがわかる。検討の結果、この急変点に対応する岸沖方向の位置は、実は浜の断面地形の勾配急変点に対応していることがわかった。このことから、何らかの浜の地形による効果が波の音の音量分特性に鋭敏に現れることがわかる。

(2) 音量に関する砂面効果

そこでこの地形効果の具体的中身が問題になるが、図-6 に示したデータの各測定点からはいずれも音源（碎波点）が見通せたことから、地形による遮蔽効果は今の場合考えられない。そこで、他の原因を探るために、実際の砂面近傍の音圧レベルの鉛直分布を詳しく調べてみた。図-7 は、2 台の騒音計を用いて、そのうちの 1 台を高さ 1.2m に固定し他の 1 台を砂面

上のさまざまな高さに置いて同時測定を行うことにより、両者の音圧レベル (dB [A]) の差を算出してその鉛直分布をプロットしてみたものである。ただし、砂面から十分離れると 1.2m 基準点との音圧レベル差がほとんど変化しなくなることから、プロットに際しては、十分上方の測定点での音圧レベルに対する各測定点での音圧レベルの相対的な減少量の形で示してある。これを見ると、地面に近づくにつれて急激に音が減衰し、しかも減衰を示す範囲が音源から遠ざかるに連れて増大していることがわかる。

砂面近くでのこのような明瞭な減衰特性の現れは、砂面が高い吸音性を持つためと考えられる。ところでこのような地表面効果による音の過剰減衰量は、次式により与えられることが知られている (山本, 1988)。

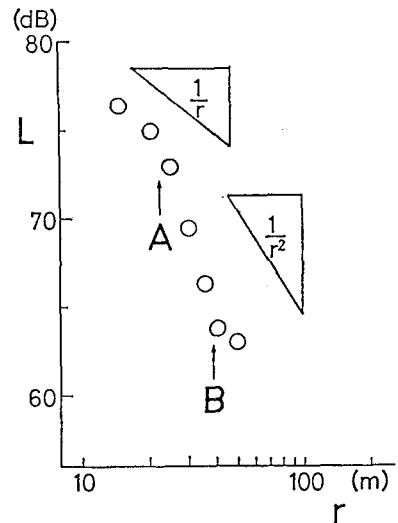


図-6 浜上での波の音の岸沖分布(袖ヶ浦)

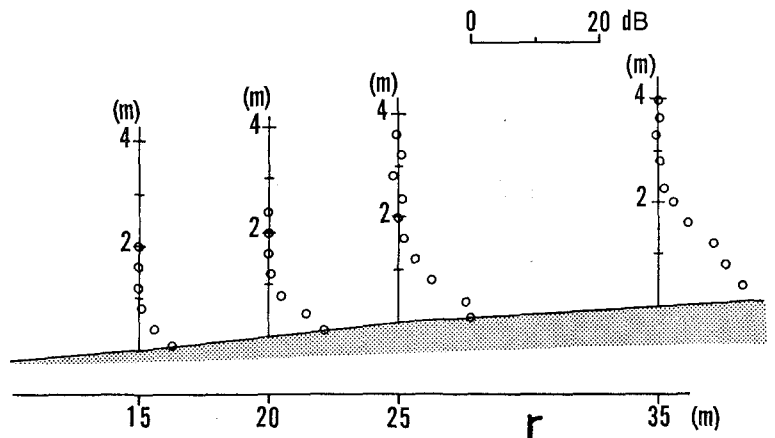
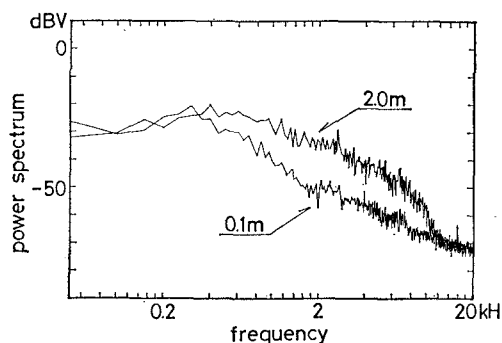


図-7 浜上での過剰減衰量の分布(袖ヶ浦)



図—8 音圧変動の周波数スペクトル(袖ヶ浦)

$$\Delta L_g = -K \log(r/r_0) \quad (r > r_0) \\ = 0 \quad (r < r_0)$$

ここに、 ΔL_g ：地表面の影響による過剰減衰量、

r ：音源から受音点までの距離、

r_0 ：過剰減衰が生じ始める距離。

また、上式中の K 値は過剰減衰特性を表す係数であり、一般に地表面性状と平均伝搬経路高の関数となる。そこで、図—7 に示した今回の測定結果から K 値を逆算して求めてみると、30～40 の値が得られた。 K 値の値は、比較的吸音性の高い草地の場合でも一般に 20 以下となる(山本, 1988)。ことから、砂浜の場合の吸音効果はかなり高いことがわかる。

(3) 音質に関する砂面効果

また、このような過剰減衰現象は強い周波数依存性を持つことが一般に知られている。そこで、音圧変動の周波数スペクトルをとることによってこの点を調べてみた。図—8 は、音源から 15m 離れた地点での地上 0.1m と 2m での音圧変動の周波数スペクトルを示したものである。この図を見ると、地上 0.1m でのスペクトルでは 2m のスペクトルに比べて高周波側のエネルギーが相対的に低下していることが分かる。すなわち、浜上の砂面近くで波の音を聞く場合には、高音領域の波の音が相対的に大きく減衰する。(実際に、浜に座って波の音を聞いてみると、立ち上がった場合に比べて、小さく聞こえるだけでなくこもった感じの音に聞こえることが容易に体験できる。)

浜上で聞く波の音の場合、一般にその音源の高さと受

音点の高さがともに砂面に近いので、音の伝搬経路が砂面にかかなり近くなる。そのため、このような「砂面効果」は、海岸の音空間の物理特性を支配する重要なファクターになっているものと考えられる。

5. あとがき

「音」は当然ながら空間的になめらかな広がりを持つ。すなわち連続的である。同様に、視覚による景観も視点の変化によって連続的に変化するけれども、時に不連続的な変化を伴う。このような相違は、ある場合において「音」の持つ積極的な意味合いを顕在化させる。例えば、山間の溪流の音を聞くと、たとえ溪流の姿が目に見えなくてもわれわれは一時の清涼感をおぼえ、近くに澄んだ清流が待っていることを期待する。つまり、「音」は、たとえ対象物が視覚的に遮断されている場合においても周囲の空間に“浸み出す”ことによって対象物の存在を周囲空間に“なめらかに”接合し、その可聴空間は対象物へのアプローチの過程で何等かの期待感を高める一つの意味を持った空間を形成しているのである。

このことは、ここで対象としている海岸空間においても重要な意味を持つ。すなわち、「波の音」はなめらかに海岸の背後地空間に浸み出し、視覚的な海の広がりが見えないものとなる前にもその期待感を高める役割を果たしている。このような「波の音」を含む感覚量が海岸へのアプローチの過程で果たす役割という視点は、必然的に背後地を含めた海岸空間のあり方の議論に結び付く。(そのような観点から見ると、わが国の現在の海岸空間の姿はきわめて貧弱であると言わざるを得ない。) こう言った意味からも、本研究の成果が今後の海岸空間論の発展のための一助になれば幸いである。

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.
- 山本貢平 (1988): ユニットパターンの簡易計算法について, 道路騒音調査研究委員会報告, 日本音響学会, pp. 15～23.
- Battjes, J. A. (1974): Surf similarity, Proc. 14th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 466～480.
- Galvin, C. J. Jr. (1968): Breaker type classification on three laboratory beaches, J. Geophys. Res., Vol. 73, No. 12, pp. 3651～3659.