

海岸環境構成要素としての波の音について

A Study on Sounds of Breaking Waves as Natural Environment
Constituting the Amenity of Beaches

灘岡和夫*・徳見敏夫**

By Kazuo NADAOXA and Toshio TOKUMI

The results of a questionnaire survey have shown that the sounds of breaking waves is one of the indispensable natural conditions to constitute the amenity of beaches. The analysis of the sounds recorded on several beaches indicate that the difference in characteristics of the sounds on beaches is the most noticeable in the "rhythm of sounds", which may be evaluated as the relative magnitude of the fluctuation of the sound intensity to the mean. The numerical simulation of the sounds based on a simple model of the sound generation by wave breaking reveals that the "rhythm of sounds" on a beach is closely correlated to the surf similarity parameter, $\xi_s (= \tan\theta / \sqrt{H_s/L_s})$.

1. はじめに

最近のウォーターフロント開発熱の高まりは、既にいくつかの「人工渚」の造成などの形となって具体的に現れてきている。その場合に問題となるのは、単に、安定な海浜をどの様に作るかということだけでなく、人間の側からみて、如何にして魅力のある海浜空間を作り出すかという点である。

このようないわゆるアメニティの問題に対する具体的なアプローチとしては、通常の場合、対象とする空間の持つ景観を何等かの形で議論することが多い。しかしながら、人間がその周辺環境を受け入れる過程が、視覚だけでなく聴覚や臭覚等を複合した

トータルな認識行為である以上、視覚だけにとらわれて人間環境を論じることが明らかに不十分である。特に、ここで対象とする海岸環境においては、その景観の問題もさることながら、砕波によって不断に作り出される「音」が海岸環境の形成に非常に重要な役割を果しているものと考えられる。

そこで本研究では、アンケート調査や音の官能試験を行うことにより人間心理からみた「波の音」の占める役割の重要性や波の音の快さの構成要因を明らかにするとともに、人間環境からみた波の音の特性を具体的に解析することを試みた。

なお、これまでの音に関する議論では、一般に「音楽」として取り扱うか、あるいは「騒音」として取り扱うかのどちらかであったように思われる。しかしながら、現実には我々を取り巻く種々の音は、これらの狭い枠組みの中では捉えることのできないはるかに多様な側面を持っている。そのような広範な音環境の持つ役割を積極的にとらえていこうとする

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部 土木
工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

** 首都高速道路公団
(〒100 東京都千代田区霞が関1-4-1)

試みは、例えば作曲家 R. Murray, Schafer¹⁾ らの取り組みに見ることができるが、この種の問題はほとんど未解明のまま残されているといつてよい。特に、ここで対象とする海岸での音環境の問題となると全くいってよいほど研究されていないが、逆に、このような問題を手掛けていくことにより、人間環境における一般的な「音」の持つ積極適役割を解明する糸口が得られることが期待される。

2. 『海岸の魅力』 — “海岸らしさ” — の構成要素に関するアンケート

人間にとっての海岸の自然環境の構成要素としてはさまざまなものが考えられるが、その中で「波の音」が占める位置を探るためにアンケート調査を行った。被験者は、東京工業大学土木工学科3年生28名である。アンケートは、回答用紙にあらかじめ記載した18項目に対して、海岸の魅力（海岸らしさ）を構成する自然環境項目として重要と思うものを5個選び、それに対してさらに順位をつけて回答させるという方法をとった。図-1は、このアンケート結果を集計したもので、上位12項目を得点順に示したものである。（得点の値は、上記の5個の回答項目に対して、その中の1位から5位の順に5点から1点の得点を与えたときの平均得点。）これを見ると、「砂浜」や「水平線」、「青く透き通った海」など多くの景観としての視覚的要素にまじっ

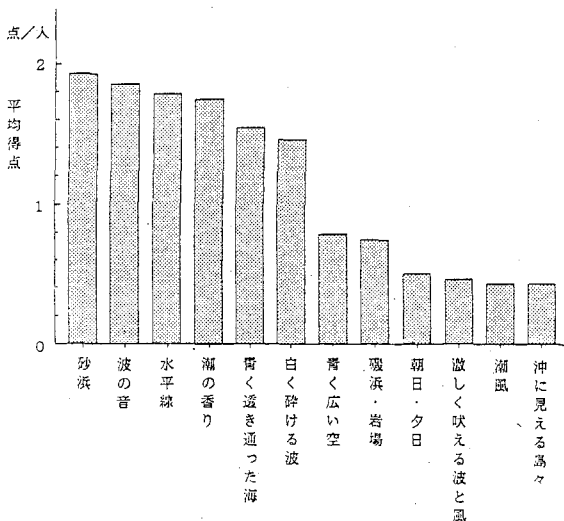


図-1 「海岸の魅力」 — “海岸らしさ” — の構成要素に関するアンケート集計結果

て、聴覚的要素である「波の音」、臭覚的要素である「潮の香り」、さらには触覚的要素である「潮風」という項目が比較的上位に位置づけられていることがわかるが、特に、ここで対象としている「波の音」が第2位に入っていることが注目される。このことは、海岸環境における波の音の占める役割が意外に大きいことを示すものである。

3. 波の音の物理的特性

波の音の物理的な特性の分析を行うために実際にいくつかの海岸で波の音の収録を行った。ここでは、海岸特性の異なる二つの海岸、すなわち急深海岸の代表としての相模湾に面する袖ヶ浦海岸と、遠浅海岸の代表である鹿島灘の波崎海岸の浜上でそれぞれ収録された音の解析結果を示す。

音のような不規則信号を分析する上でまず思い付くのはそのスペクトル特性を見تينることである。図-2は、収録された音圧変動記録に対して通常のスペクトル解析を行った結果を示したものである。これを見ると、両方とも大体においてpink noise的なスペクトル形状となっており、海岸特性の違いを反映した結果にはなっていないことがわかる。このことは、波の音をその「音色」の面からとらえようとしてもその特徴はあまり現れず、海岸特性の違いを反映した情報はほとんど得られないということを示している。（滝の音や噴水の音なども、その「音色」はやはりpink noise的である。）

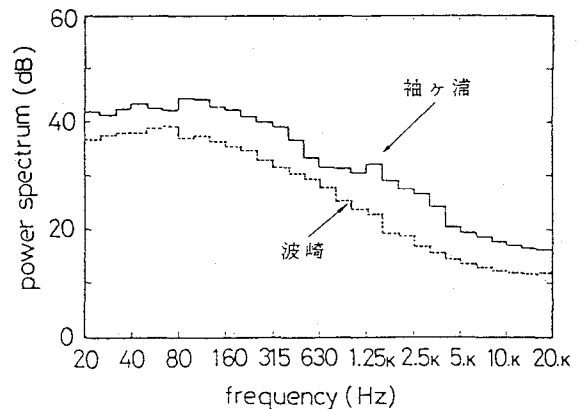


図-2 音圧変動のパワースペクトル（1/3オクターブ分析）

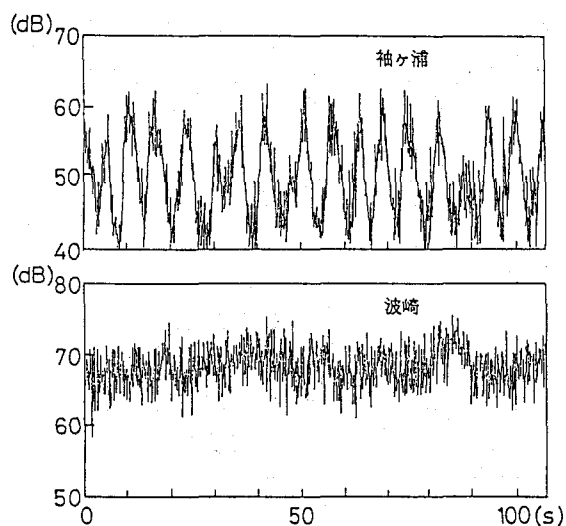


図-3 音の大きさ（音響パワー）の時間変動記録

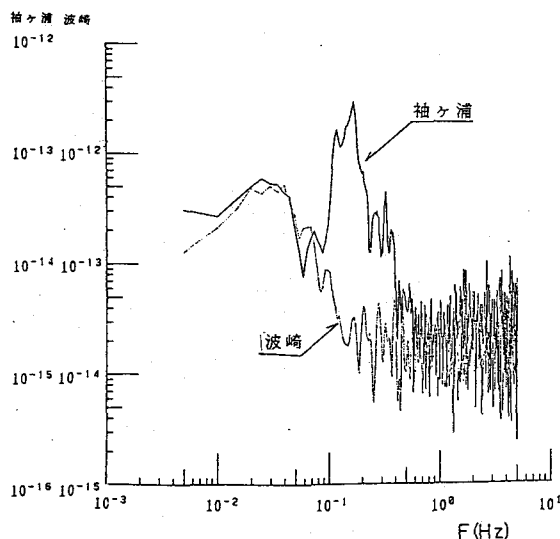


図-4 音響パワーのパワースペクトル

ところで、われわれが普通「波の音」という言葉から連想するイメージはどのようなものなのだろうか。よく、文学的な表現では「寄せては帰す波の音」というたぐいの描写を目にする。おそらく、これがわれわれのもつ波の音の一般的なイメージではないだろうか。すなわち、波の音というとき通常イメージするのは、そのくり返し、あるいはリズム性という点であろう。そしてその場合に繰り返すのは、波の音の「音色」ではなくむしろ「音の大きさ」や「

音の高低」であると考えられる。そこでここでは次に、「音の大きさ」（音響パワー）の面から検討してみることにした。

図-3は音響パワーの時間変動記録を示したものであるが、これを見ると袖ヶ浦ではかなりリズムカルに変動しているのに対し波崎ではほとんど変動のないパターンになっていることがわかる。またこの場合のパワースペクトル特性を見てみると、図-4に示すように、袖ヶ浦の場合には図-3に対応して明瞭なピークをもつ形となる。このように、「音の大きさ」の変動の面からみると海岸特性の違いはかなり明瞭に現れて来ることがわかる。このようなことから、ここではこの波の音の「リズム性」に着目して以後の解析を行った。

なお、音の「心地よさ」が、音響パワーあるいはピッチ（音の高低）変動のパワースペクトルの傾きが $1/f$ の傾斜を持つことと関係するという議論が、武者²⁾や渡辺³⁾らによってなされており、波の音に関しても $1/f$ 特性を持つ場合があることが報告されている（渡辺⁴⁾）。しかし、いまの場合には図-4に見られるように $1/f$ 特性は現れてはならず、特に、袖ヶ浦の場合のように明確なリズム性を持つ場合には $1/f$ から外れることは明らかである。

4. 自然音に関する官能試験

波の音のリズム性の解析に移る前に、音響心理学的な観点からみたときの、自然音のリズム性と、音の心地よさの間の関係について調べてみた。具体的には、ここでは波の音だけでなく川のせせらぎや滝の音など表-1に示す合計10種類の自然音を、2.で述べたアンケート調査の被験者と同じ被験者に聞かせて官能試験を行った。なお、試験用の自然音のソースとしては、波の音以外は、効果音が収録されている市販のCDを用いている。

試験は、この10種類の音を表-1の順番にしたがって聞かせ、表-2に示した音の品質表現に関する9つの各ペアに関して、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。また、各自然音に関して、その音が何の音に聞こえるかということも併せて回答させるようにした。

まず、図-5に、各自然音を聞かせたときの正解

表-1

1.	川の流れ
2.	波（小）
3.	せせらぎ
4.	滝
5.	波（中）
6.	雷
7.	風
8.	波・波崎
9.	ししおどし
10.	波（大）

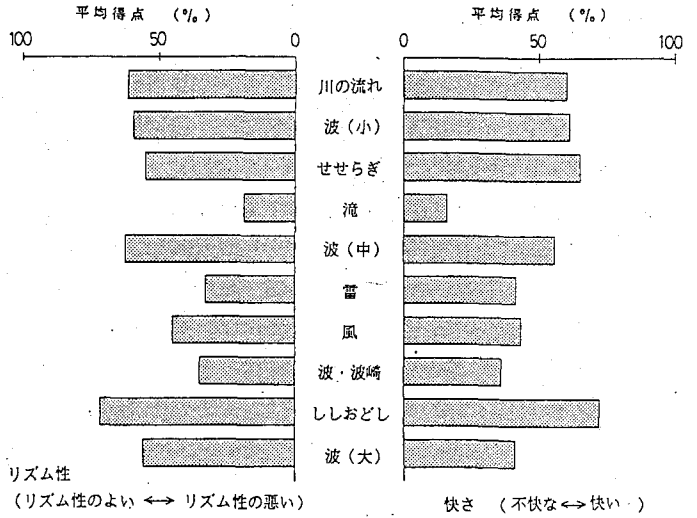


表-2

	1	2	3	4	5	
1.	小さい					大きい
2.	痩せた					豊かな
3.	暗い					明るい
4.	リズム性の悪い					リズム性の良い
5.	荒い					なめらかな
6.	不快な					快い
7.	ものたりない					迫力のある
8.	濁った					澄んだ
9.	響かない					響いた

図-6 「快さ」と「リズム性」に関する回答結果

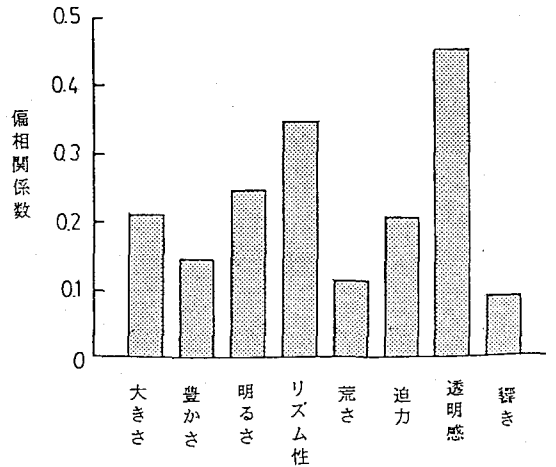


図-7 数量化第2類による解析結果

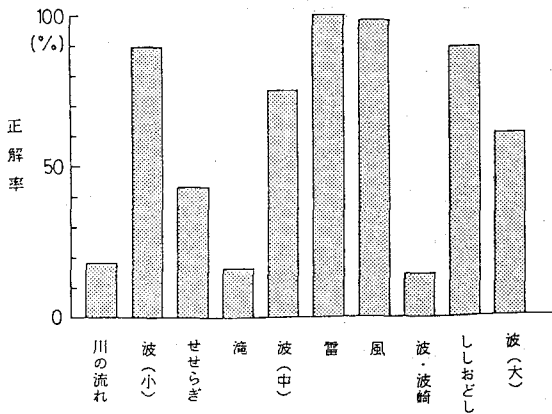


図-5 正解率

率を示す。これを見ると、まず、波崎の波の音に対する正解率が、川の流れや滝の音に対する正解率とともにかなり小さくなっていることが目につく。このことは、これらの自然音の持つ情報量が他の音に比べてかなり少ないことを示している。これに対して袖ヶ浦の波の音は、雷やししおどしの音ほどでは無いけれども正解率がかなり高くなっている。このことは、よりリズム性の高い波の音は、それだけ'波らしさ'という情報量が多いことを示すものと考えられる。なお、表中に、波（大）、（中）、（小）

とあるのは、共に袖ヶ浦の波の音で、波の音の全体的な大きさの違いによる心理的な反応の違いを見るために、同じ音を音量を3種類に変えたものである。

図-6は各自然音の「快さ」と「リズム性」に対する得点の単純平均の結果をそれぞれ対応させて示したものである。このうちまず「快さ」について見ると、波崎の波は、リズム性の高い袖ヶ浦の波の音に比べて、快さの面でも劣っていることがわかる。次に、この「快さ」と「リズム性」の結果の全体的なパターンを対応させて見てみると、この二つの要因の間はかなり密接な相関があることがわかる。ただしこれはあくまで快さとリズム性の間の単相関に関する結果であり、これから直ちにこの2要因間の直接的な相関性を論ずることには問題がある。そこで、「リズム性」以外の要因も対象とした多重相関構造を考慮した解析を行うために、「快さ」を外基の基準とし、リズム性以外に「豊かさ」や「明るさ」など表-2に含まれる8項目すべてを要因に選んで数量化第2類による解析を行ってみた。図-7はその結果の一部で、第1軸(相関比0.585)の各要因と外的基準との間の偏相関係数の値を示したものである。これを見ると、実際に「リズム性」の偏相関係数の値は「透明感」について第2位の高得点を示していることがわかる。

以上のことから、自然音の持つ「リズム性」がその音の快さとかかなり密接な関係があることが明らかになった。なお、図-5や6を見ると、同じ袖ヶ浦の波の音でも、音量が小さい波の方が正解率や快さの得点が高くなっていることがわかる。このことは、汀線からどれぐらい離れたところで波の音を聞くかということが「波らしさ」あるいは波の音の快さに影響を与えることを意味しており、海岸空間における波の音の空間分布を把握することの重要性を示すものと考えられる。(浜上の音の空間分布についての解析も行っているが、それについては別の機会に報告する予定である。)

5. 波の音のリズム性とsurf similarity parameter ξ の関係

波の音の発生源は、主として砕波によるものであると考えられるが、実際に浜上で聞こえる波の音は、砕波帯内の各波(音源)からの音の積分量としての

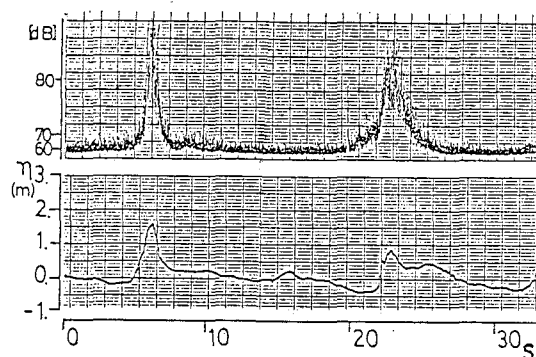


図-8 boreの直上の音響パワーと水位変動の同時記録

音である。そこで、ここでは、現地観測結果を踏まえて砕波とそれに伴う音の発生の関係について検討した上で、砕波帯内の音源分布をモデル化することにより、上記の積分量としての浜上の音響パワーの時間変動をシミュレートすることを試みた。

(1) 波の音の発生源についての検討

海岸での波の音の主要な発生原因は、砕波による乱れの生成に伴う気泡の連行ならびにその後の水面からの気泡の消滅によるものと考えられる。砕波による乱れ特に大規模渦の生成は、boreのcrest付近に集中するため当然ながら音源分布としてもcrest付近に集中した形状になるものと考えられる。

図-8は、実際に運輸省波崎海洋研究施設(HORF)で収録された音の音響パワーの記録を示したものである。この場合の音は、棧橋のデッキ面から超指向性マイクロフォンを吊り下げ、平均水面上約3mの位置で収録されたもので、同図には直上のデッキ面に設置されている超音波波高計によって同時に計測された水位変動も併せて示してある。これを見ると、明らかに音の発生量が波(bore)のcrest付近に集中している様子がよく分かる。

(2) 音源分布のモデル化と積分量としての浜上で音の数値シミュレーション

上記の事を踏まえて、ここでは波の一波内での音源分布形状 $f(\xi)$ を、次式のような簡単な関数形でモデル化する。(ξ は位相。)

$$f(\xi) = (a\xi)^n \cdot \exp\{-a\xi\} \quad (1)$$

式中の a と n はパラメータで、ここではともに $a =$

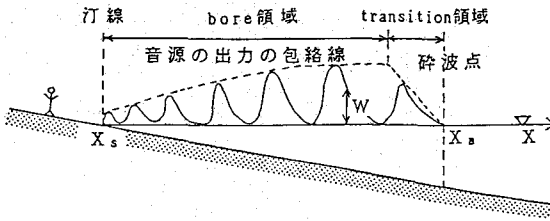


図-9 音源分布の概念図

1、 $n=1$ とした。

つぎに、砕波帯内全体の音源分布のモデルについて考える。ここでは、モデル化の前提として、

- ① 入射波は規則波とする、
- ② 砕波帯内での波はその形状を相似形に保って減衰する、
- ③ 波速は線形長波の波速で近似できる、
- ④ 1波内での発生音のピーク値はその地点の水深 h によって一義的に決まる、

という仮定を設けた。このうちの②、③については通常よく用いられる仮定で特に問題はない。また④の仮定は、砕波帯内の特にinner regionでの乱れのレベルが、ほぼ水深 h に規定されることを考慮したものである。実際、上記のEORFでの栈橋上の数地点で収録された音を解析してみた結果、発生音のピーク値 L_p [dB] は、水深 h [m] とほぼ次式で示されるような関係があることが見いだされた。

$$L_p = 73 + 5.82 h^{0.39} \quad (2)$$

さらに、補助的な仮定として、ここでは、図-9に示すように、砕波点とinner region (bore領域) との間に transition 領域を設け、その領域内では L_p が直線的に変化するものとした。また transition 領域の範囲は、ここでは $5H_b$ (H_b : 砕波高) として与えた。

このような、音源モデルの導入により、砕波帯内の任意の地点 x での音源の出力 $L_w(x, t)$ [dB] は、次式のように表せる。

$$L_w(x, t) = L_p \cdot f \left[\omega \left\{ \int_{x_R}^x \frac{d\xi}{\sqrt{gh(\xi)}} + t \right\} \right] \quad (3)$$

ここに、 ω は入射波の角周波数、 x_R は reference

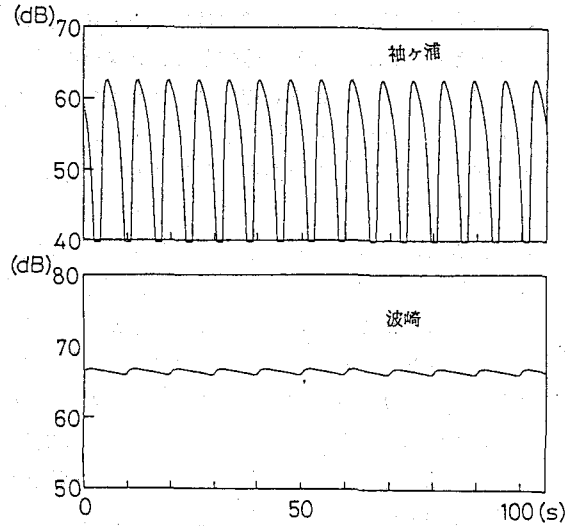


図-10 袖ヶ浦と波崎の条件でのシミュレーション結果

pointである。この L_w はdB値であるので、normal表示の $W(x, t)$ [W/m^2] に直すと、

$$W(x, t) = W_0 \cdot 10^{L_w(x, t)/10} \quad (4)$$

である (W_0 は基準値)。したがって、浜上の1地点 $x=x_0$ での音響インテンシティー $I(x_0, t)$ [W/m^2] は、

$$I(x_0, t) = \int_{x_s}^{x_b} \frac{W(x, t)}{\pi(x-x_0)} \cdot D_L dx \quad (5)$$

となる。ここで、 x_s は汀線位置、 x_b は砕波点位置である。また、 D_L は空気と砂の吸収による減衰を表す係数で、

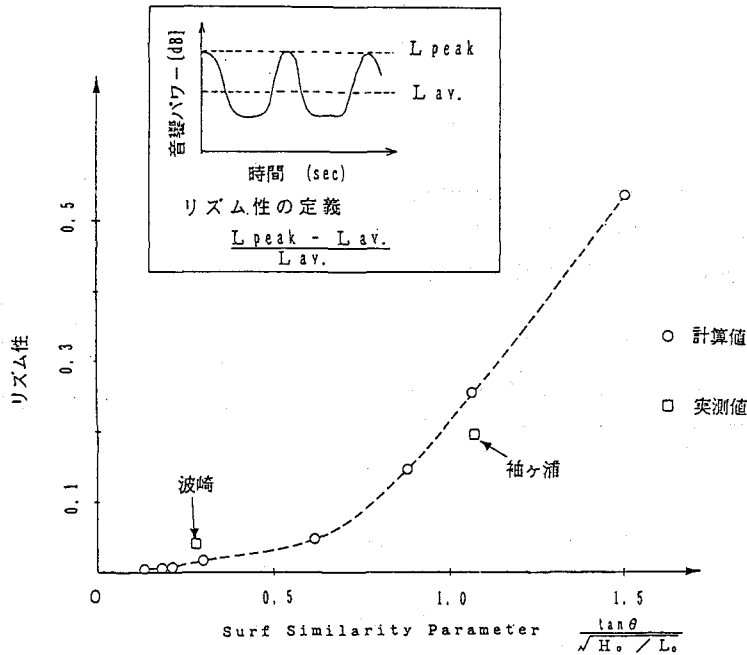
$$D_L = 10^{-\frac{D_a(x-x_0)}{10}} \cdot 10^{-\frac{D_s x_0}{10}} \quad (6)$$

D_a : 空気の吸収による減衰量 (dB/m)

D_s : 地表面の吸収による減衰量 (dB/m)

である。ここでは、 D_a 、 D_s の値として、それぞれ0.044、0.040とした。

図-10は、このモデルによる波崎と袖ヶ浦の条件での浜上の音響パワーの計算値を示したものである。この結果と先の図-3で示した実測値を比較し



図一 1 リズム性とsurf similarity parameterの関係

てみると、図一 3 のリズム性の現れ方の特徴がほぼ再現できていることが確認できる。このことから、本シミュレーションモデルの妥当性が確認できる。

(3) surf similarity parameter ξ_0 による波のリズム性の表現

ところで、図一 3 に見られる波の音のリズム性の違いは、基本的には砕波帯内の波の数に支配されるものと考えられる。そこで、ここでは海底勾配や沖波波高・周期をそれぞれ独立に何ケースか変えて数値計算を行い、砕波帯内の波の数の違いを表現できることが知られているsurf similarity parameter ξ_0 ⁵⁾ に対してリズム性の計算結果の関係がどのようになるかを調べたものが図一 11 である。ただし、ここでのリズム性の定義は、図中に示すように、音響パワーの最大値 L_{peak} と平均値 $L_{av.}$ との差を $L_{av.}$ で割った値としている。これを見ると、波の音のリズム性が予想どおり ξ_0 によってほぼ一義的に表現できていることがわかる。そして、袖ヶ浦と波崎の実測値が計算値とほぼ一致しており、このことから本モデルの有効性がうかがえる。さらに、 $\xi_0 \approx 0.6$ を越えるあたりから波のリズム性が急激に増大しており、このことから $\xi_0 \approx 0.6$ が波のリズム性の

有無を区別する臨界値になっていることがわかる。

6. まとめ

以上をまとめると、本研究にの結果により、人間にとつての海岸環境を構成する要素として、波の音の果たす役割が意外に大きいこと、そしてその‘波らしさ’が主としてそのリズム性に依存していること、さらには、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 によってその違いがほぼ統一的に説明でき、 ξ_0 の値がおおよそ 0.6 以上となったときにリズム性が顕著になってくこと、などが示された。

ただし、ここで用いたシミュレーションモデルでは、波の不規則性(ゆらぎ)や砕波形式の違いの影響、さらには前浜の底質粒径の違いの効果など、浜上での波の音の聞こえ方に関与すると考えられるファクターを考慮していない。これらの点については今後の課題としたいが、これらの諸要素を組み込んでも波の音の特性の基本的な違いがある程度表現できるところから、逆に、海岸特性の代表パラメータとしての surf similarity parameter ξ_0 の持つ重要性が理解できる。

参考文献

- 1) R. Murray Schafer : The Tuning of World,
1977、邦訳書名：「世界の調律」、鳥越けい子ら訳
、平凡社、1986.
- 2) 武者利光：「ゆらぎの世界」 — 自然界の1/
f ゆらぎの不思議 — 、講談社、1980。
- 3) 渡辺茂雄：「ストレス時代の音楽健康法」、誠
文堂新光社、1982。
- 4) 渡辺茂雄：毎日新聞、1987年8月17日朝刊。
- 5) Battjes, J. A. : Surf similarity, Proc. 14th
Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 466-480,
1974.