

海岸における波の音の音響特性と快適性の評価に関する研究*

Characteristics of Wave Sounds and their Relation to Amenity in a Beach Space

上野 成三**・灘岡 和夫***・浜田 幸雄****・大山 能永*****

by Seizo UENO, Kazuo NADAOKA, Yukio HAMADA and Yoshie OHYAMA

In recent years, many projects has been carried out to improve coastal environments to be more comfortable. These activities has been carried out mostly for the landscape aspect, although other factors, such as wave sounds, smell of sea, sea breeze have also important roles to constitute coastal environments. Among these factors, in this study, the characteristics of wave sounds are investigated through data analyses of wave sounds recorded under various conditions of beach topography and waves, revealing that the presence of coastal structures appreciably affects wave-sounds characteristics. Based on a factor analysis of sensory-test data, a psychological model is developed to evaluate "comfortableness" of wave sounds.

1. はじめに

最近、建築・土木の各分野で快適性の高い空間設計が強く要望されており、海岸・海洋の分野でも快適性の向上を目的とした事業がここ数年の間で急速に増加してきた。しかし、その内容としては、今まで海への眺望を妨げていたブロック堤を撤去して、新たに没水型の消波堤や人工海浜を整備するというような計画がほとんどであり、海岸環境の景観をいかに改善するかが議論の中心となっている。これに対して、灘岡¹⁾は、海岸の持つ快適性にとって、「波の音」、「潮の香り」、「潮風」といった景観以外の要素も重要な役割を占めることを指摘している。

これらの要素を海岸空間設計に具体的に反映させ

るためには、まず、海岸における各要素の実態や人の心理に与える影響を明らかにする必要があるが、この内の「波の音」に関しては、灘岡ら^{2),3),4)}が自然海岸の波音を収録・解析して、基本的な物理的特性や人の心理に与える影響などを検討している。その結果、波音の音響特性の中で、音量、リズム性が快適性に強く関係し、音量が小さく、かつ、リズム性が強い波音になるほど人は快適と感ずること、海岸に発生する砕波の数が少なくなるほど波音のリズム性は強くなることなど、自然海岸における波音の基本的特性や役割が明らかにされている（リズム性の定義については3章で詳しく述べる）。

しかし、日本沿岸では、そのほとんどで何らかの人工構造物が構築されており、それにより自然海岸の波音に変化している可能性がある。また、人工構造物による波音の変化機構が分かれば、構造物により波音を制御できる可能性が開けてくる。

そこで、本研究では、人工構造物に着目した波音

* キーワード：波の音、快適性、海岸環境

** 正会員 工修 大成建設技術研究所
(〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

*** 正会員 工博 東京工業大学助教授工学部土木工学科

**** 工博 大成建設技術研究所

***** 工修 同上

表-1 波音の収録ケースの一覧

ケース	計測場所	年月日	海岸の状況	砕波状況
case 1-1	郷 津	'91.9.17(夏)	緩勾配, 砂浜, 自然海岸	砕波帯幅約50m, 砕波数1~3波
1-2	〃	'91.2.18(冬)	緩勾配, 砂浜, 自然海岸	砕波帯幅約300m, 砕波数4~5波
1-3	〃	'91.9.17(夏)	緩勾配, 砂浜, 離岸堤	汀線際でのみ砕波
1-4	〃	'91.2.18(冬)	緩勾配, 砂浜, 離岸堤	離岸堤より沖で2~3波の砕波, 汀線際で砕波
1-5	柿 崎	'91.9.16(夏)	急勾配, 砂浜, 自然海岸	汀線際でのみ砕波
1-6	〃	'91.2.18(冬)	急勾配, 砂浜, 自然海岸	沖合約200mで1次砕波, 汀線際で2次砕波
1-7	〃	'91.9.16(夏)	急勾配, 砂浜, 離岸堤	汀線際でのみ砕波
1-8	〃	'91.2.18(冬)	急勾配, 砂浜, 離岸堤	離岸堤より沖で1次砕波, 汀線際で砕波
case 2-1	小田原	'91.10.31	急勾配, レキ・砂, 離岸堤	汀線際でのみ砕波
2-2	国府津	'91.10.31	急勾配, レキ多し, 自然海岸	汀線際でのみ砕波
2-3	片 瀬	'91.10.31	緩勾配, 砂浜, 自然海岸	砕波帯幅約50m, 砕波数2~3波
2-4	江ノ島	'91.11.1	岩礁	砕波生じない, 岩礁のくぼみに水が落ち込む時に音が発生する
2-5	〃	'91.11.1	直立防波堤	砕波生じない
2-6	〃	'91.11.1	消波ブロック防波堤	砕波生じない

の現地収録・解析を行い、人工構造物が波音に与える音響・心理的影響を検討した。さらに、現地の波音を用いた官能試験を行い、波音の音響指標と快適性の関係を定量的に求め、波音の持つ快適性を予測する心理モデルを提案した。

2. 波音の現地収録

(1) 収録地点

快適性に寄与する波音のリズム性は砕波帯内の砕波の数に支配され、砕波の数は海岸の海底勾配や来襲波浪の波形勾配(波の陰しさ)により表現される surf similarity parameter によって支配される(灘岡ら²⁾)。よって、人工構造物による波音の影響を評価するには、広範囲の地形・波浪条件のもとでの波音を収集し、その中で構造物によりいかに波音が変化するかを検討する必要がある。

そこで、本研究では、日本海側の直江津海岸(ケース1)と太平洋側の相模湾沿岸(ケース2)の2ヶ所で現地収録を行い、各地点での収録ケースの地形・波浪条件を幅広く設定した(表-1)。ケース1では、人工構造物の代表例である離岸堤が波音に及ぼす影響を検討することを目的とし、緩勾配海岸(郷津)と急勾配海岸(柿崎)の2海岸で静穏時(夏季)と高波浪時(冬季)の2回の現地観測を実施し、それぞれ離岸堤背後と人工構造物のない自然海岸の2地点で波音を収録した。ケース2では、同様な波浪状況のもとで構造物の種類や海岸地形、底質(砂、レキ、岩礁)による波音の変化を調べた。全ての収録は2日間で行い、その間、顕著な気象擾乱はなく波浪状況の変化が少なかった。なお、各ケースの具

体的な海岸、砕波の状況は表-1に併せて示した。

(2) 収録方法

波音の収録には騒音計を用い、スポンジ、ストッキングなどで作成した風防により風音の混入を極力防いだ。各ケースで10~30分間の波音を収録し、解析や官能試験には風、自動車、人の声などの雑音が入っていない波音を抜き出して用いた。また、波高や周期などの波浪条件、海底勾配、底質は目視や簡易的な測量により求めた。

3. 波音の音響特性の解析

(1) 音圧レベルの変動特性

波音の音圧レベル(A特性)の時間変動の例を図-1に示す。ここで示した3ケースは2日間に収録したもので、ほぼ同様な静穏時の波浪が作用している。なお、本研究では、人間の聴感と対応させるため全てのケースでA特性の音圧レベルを用いた。急勾配の自然海岸の場合、音圧レベルが波の個々の波浪に対応して明確な変動を示す(同図a)。本研究では、灘岡ら²⁾にならい、一波一波の波音の変動が明確な波音をリズム性の強い波音と呼ぶ。これに対して、緩勾配の自然海岸の場合、音圧レベルの変動幅が小さくなり個々の波との対応が付き難い(同図b)。このような波音をリズム性の弱い波音と呼ぶ。以上の結果は灘岡ら²⁾の示した海底勾配・波浪条件とリズム性の関係と一致する。ここで着目すべきことは、同図cに示した離岸堤のある海岸の波音である。自然海岸での緩勾配の波音はリズム性が弱いものに対して、離岸堤の有るこのケースでは、音圧レベルは個々の波に対応した変動を示し、リズム性

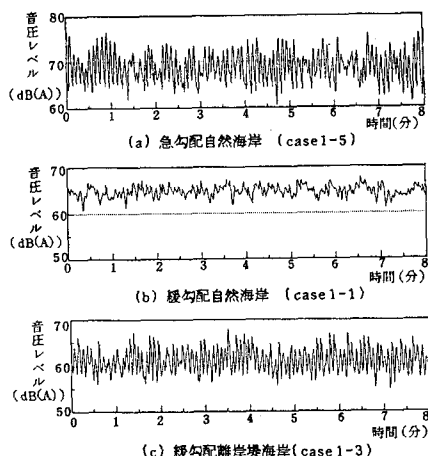


図-1 音圧レベルの時間変動の例(静穏時)

の強い波音に変化している。すなわち、たとえ海底勾配・波浪条件が同じであっても、離岸堤の有無により波音の音圧レベルの時間変動は大きく変化することが分かる。

(2) 離岸堤の有無による波音の音響特性の変化

海底勾配、波浪の条件別の離岸堤の有無による波音の音響特性の変化を図-2に示す。灘岡ら²⁾は波音を特徴付ける音響特性として音量とリズム性をあげ、音楽の分野で一般に重要とされる音色については波音の違いによる音色の変化が小さいことを指摘した。そこで、ここでは、波音の音量の指標として、音圧レベルの時間平均値(ここでは、平均音圧レベル $\bar{L}_{mean}$ と呼ぶ)をとることにする。なお、この指標は音響の分野で用いる等価騒音レベル L_{Aeq} と同じである。波音のリズム性の指標として波浪の一波の時間内における音圧レベルの最大値、最小値の全波数に対する平均値(平均最大音圧レベル $\bar{L}_{max}$ 、平均最小音圧レベル $\bar{L}_{min}$)を採用した。

$\bar{L}_{mean}$ は各ケースとも自然海岸より離岸堤海岸の方が小さくなった。これは、離岸堤により入射波高が減少し、波音の音源である碎波の波高が減少した結果、波音の音量も低下したためである。これに対して、 $\bar{L}_{max}$ と $\bar{L}_{min}$ の差である音圧レベルの変動幅 $\Delta\bar{L}$ は、静穏時の緩勾配海岸に離岸堤を設置すると増大し(リズム性が増大し)、静穏時および高波浪時の急勾配海岸に離岸堤を設置すると逆に減少した(リズム性が低下した)。また、高波浪時の緩勾配海岸では $\Delta\bar{L}$ の変化は小さい。以上より、離岸堤の

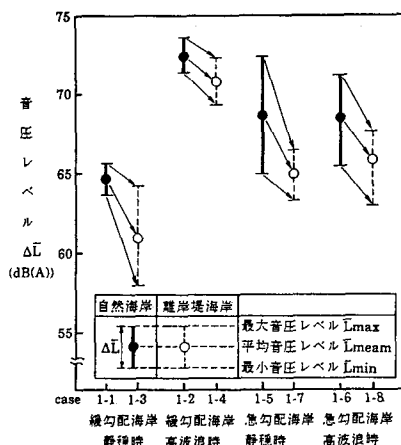


図-2 離岸堤の有無による音圧レベル特性の変化

有無が波音のリズム性に及ぼす影響は海底勾配や波浪の条件によって全く逆の傾向となることが分かる。

(3) 離岸堤の有無による碎波状況の変化と波音変化の関係

離岸堤による波音のリズム性の変化機構について、海岸工学の分野で得られている離岸堤による波浪変形の特性を基に考察する。各ケースについて、碎波の数を規定するsurf similarity parameterと、リズム性の指標である音圧レベルの変動幅 $\Delta\bar{L}$ の関係を図-3に示す。surf similarity parameterは $\xi = \tan \theta / (H_0/L_0)^{1/2}$ ($\tan \theta$; 海底勾配、 H_0/L_0 ; 沖波の波形勾配)で示され、 ξ が増大するにしたがって碎波の数は少なくなる。まず、自然海岸のデータに着目すると(図中の●)、灘岡ら²⁾の結果と同様に、 ξ が増大するにしたがって $\Delta\bar{L}$ は急速に増大する。但し、 $\xi > 0.6$ の範囲では碎波数は最小の1となるため、この ξ の範囲における $\Delta\bar{L}$ は碎波の数よりも汀線での碎波波高に規定される。なお、図-3中で $\xi > 2$ 以上の自然海岸の $\Delta\bar{L}$ が一定値に漸近したのは本ケースでの碎波波高がほぼ等しいためである。次に、自然海岸に離岸堤を設置した場合の変化(●→○)に着目する。 $\xi < 0.4$ の範囲の自然海岸に離岸堤を設置すると ξ 、 $\Delta\bar{L}$ とも増大し、リズム性が強い自然海岸の位置に近づく。これは、離岸堤を設置したことにより来襲波高(式中の H_0)が減少して ξ が増加(碎波数が減少)した結果、波音のリズム性が強まることを示している。これに対して、 $\xi > 0.6$ の範囲の自然海岸に離岸堤を設置すると ξ は増大す

るものの ΔL は逆に低下する。この場合、離岸堤により来襲波高が低下しては増大するものの、汀線での碎波波高が減少するためリズム性は低下したと考えられる。

以上より、本研究で得られ離岸堤の有無による碎波状況の変化と波音の変化の関係をまとめると以下ようになる(図-4)。

(a) 高波浪時の緩勾配海岸：自然海岸では複数の碎波が発生し、リズム性が弱い状態にある。この状態に離岸堤を設置すると、離岸堤位置より岸側の碎波の数はやや減少するものの沖側に依然複数の碎波が存在するため、リズム性はほとんど増大しない。

(b) 静穏時の緩勾配海岸：自然海岸では2、3個の碎波が生じ、リズム性が弱い状態にある。しかし、離岸堤を設置すると、来襲波高が低下して碎波は汀線際のみ発生する結果、リズム性は強くなる。

(c) 高波浪時の急勾配海岸：自然海岸では、沖側の一次碎波と汀線際の2次碎波が発生する。ただし、沖側の碎波による波音は伝播過程で低減するため、波音に対して実質的に寄与する碎波は、汀線での2次碎波のみとなり、リズム性は強い。この状態に離岸堤を設置すると、来襲波高が低下して汀線での碎波波高が減少する。その結果、波音の音量が小さくなりリズム性は弱くなる。

(d) 静穏時の急勾配海岸：(c)と同様に、離岸堤を設置すると、来襲波高が減少してリズム性は弱くなる。

4. 官能試験

(1) 試験方法

波音の心理イメージの構造と音響指標の関係を明らかにするため、現地で収録した波音を用いた官能試験を行った。試験は被験者にヘッドホンを通して波音を聞かせ、その印象を10対の形容詞について7段階法で評価させた。形容詞の選定については、約40種類の形容詞を用いた予備試験を行い、波音のイメージが「力量性」と「調和性」の2つで概略分類できることを確認した上で、本試験ではこの2つに関係する形容詞と音響指標に直接関係する形容詞を評価尺度として採用した。試験で用いた波音には、現地で収録した波音から音響解析の結果を参考にして、音量、リズム性が幅広く変化する16種類の波音を選定した。また、波音の提示時間は3分とし、各波音の間に30秒の無音状態を挟んだ。被験者の構成は10代～40代の男女34名である。

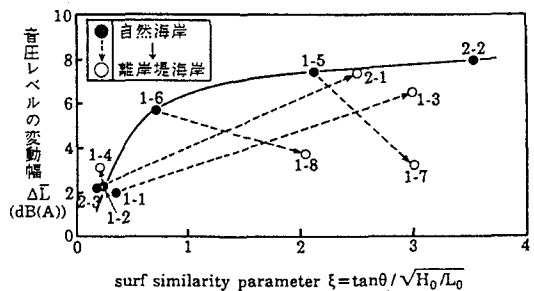


図-3 音圧レベルの変動幅 ΔL と surf similarity parameter, ξ の関係

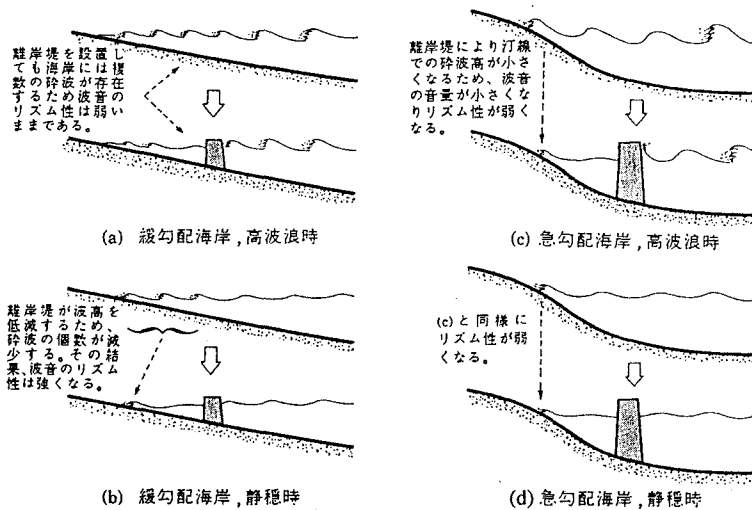


図-4 離岸堤の設置による碎波状況の変化と波音変化の概念図

表-2 各形容詞の因子負荷量

形容詞	因子Ⅰ	因子Ⅱ	因子Ⅲ
軽やかな	0.95	0.28	0.06
音が高い	0.79	0.11	0.50
心地よい	0.71	0.69	-0.03
音が大きい	-0.90	-0.07	0.17
荒々しい	-0.96	-0.21	0.14
波の音らしい	0.19	0.97	0.10
明瞭である	0.35	0.87	0.26
音色が豊か	0.46	0.83	-0.03
規則的である	-0.18	0.82	0.42
テンポが早い	-0.12	0.35	0.78
寄与率 (%)	41.95	38.05	11.61
累積寄与率 (%)	41.95	80.00	91.61

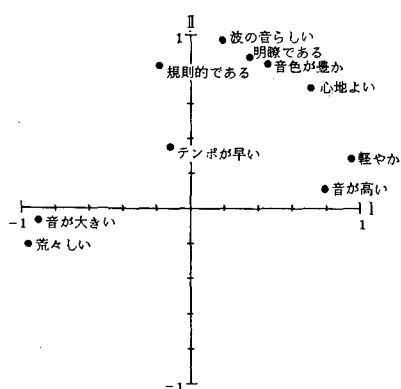


図-5 各形容詞の因子負荷量の散布図

(2) 波音を特徴づける形容詞の構成

波音の心理イメージの構造を明らかにするために、形容詞の評点を全被験者について平均し、形容詞を変数、波音を個体とみなして因子分析を行った。最終的に第3因子までの結果を採用し、因子の解釈を容易にするためバリマックス回転を行った。各形容詞の因子負荷量を表-2に示す。因子Ⅰでは、「軽やかな」、「荒々しい」、「音が大きい」の負荷量が高く、因子Ⅱでは、「波の音らしい」、「明瞭である」、「規則的である」、「音色が豊か」の負荷量が高い。因子Ⅲでは負荷量が特に高い形容詞はなく、また、因子の解釈の上でも有意な特徴を持たない。また、累積寄与率は因子Ⅱまでで80%となることから、波音の心理イメージは因子Ⅰ、Ⅱにより概略説明できると考えられる。因子Ⅰ、Ⅱについて、各形容詞の因子負荷量の散布図を図-5に示す。因子Ⅰを構成する形容詞として「音が大きい」、「荒々しい」、「音が高い」が、因子Ⅱを構成する形容詞

表-3 形容詞と音響特性量の相関係数行列

形容詞	平均音圧レベル $\bar{L}_{\text{average}}$	平均音圧レベル(A特性) $\bar{L}_{\text{average}}$	最大音圧レベル $\bar{L}_{\text{max}}$	最大音圧レベル(A特性) $\bar{L}_{\text{max}}$	音圧レベルの変動幅 ΔL	音圧レベルの変動幅(A特性) ΔL
荒々しい	0.58	0.77	0.59	0.82	0.23	0.06
音が高い	-0.40	-0.34	-0.37	-0.28	0.30	0.29
テンポが早い	0.18	-0.05	0.24	0.09	0.70	0.53
音色が豊か	-0.59	-0.64	-0.53	-0.45	0.46	0.71
心地よい	-0.60	-0.83	-0.58	-0.73	0.13	0.44
音が大きい	0.36	0.78	0.38	0.86	0.25	0.15
規則的である	0.16	-0.23	0.22	-0.01	0.72	0.78
明瞭である	-0.31	-0.46	-0.25	-0.24	0.66	0.82
軽やかな	-0.59	-0.74	-0.59	-0.75	-0.06	0.06
波の音らしい	-0.26	-0.54	-0.20	-0.31	0.53	0.83

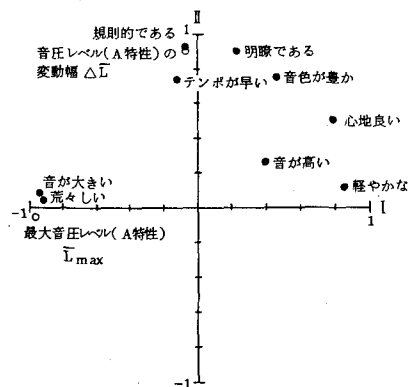


図-6 形容詞と音響特性量の因子負荷量の散布図

として「規則的である」、「波の音らしい」、「明瞭である」が上げられる。「音色豊か」、「心地よい」などは因子Ⅰ、Ⅱの両者に対して負荷が高い形容詞と言える。以上より、各因子の持つ意味として、因子Ⅰは波音の大きさを表すと解釈でき、因子Ⅱは一波一波が規則的に聴こえるという意味でリズム性を表すと解釈できる。なお、音の高低を示す形容詞である「音が高い」が、音の大きさを示す因子Ⅰに対して高い負荷量を示すした。この理由について被験者が各形容詞に持つイメージを確認したところ、「音が高い」と「音が大きい」を混同している傾向が見受けられた。

(3) 波の音の心理イメージと音響特性量の関係

波音の心理イメージと関係の強い音響特性量を求めるために、各形容詞と音響特性量の相関係数行列を表-3に示す。因子Ⅰの代表的な形容詞である「荒々しい」、「音が大きい」はA特性の平均最大音圧レベル $\bar{L}_{\text{max}}$ と相関が高く、因子Ⅱの代表的な形容詞である「規則的な」、「明瞭な」はA特性の音圧レベルの変動幅 ΔL と相関が高い。音響的な意

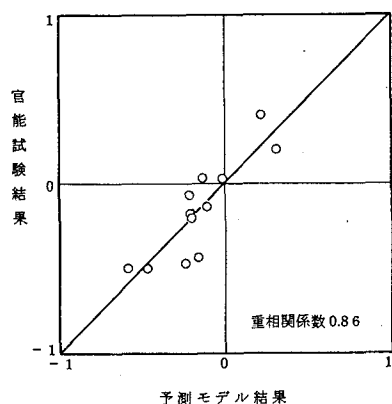


図-7 重回帰分析より求めたモデルの予測値と
官能試験結果の比較

味としては、 $\bar{L}_{\max}$ は波音の音量を、 $\Delta \bar{L}$ は波音のリズム性を表す指標である。そこで、波音の音響特性量として $\bar{L}_{\max}$ と $\Delta \bar{L}$ を採用し、各形容詞とこれらの音響特性量を変量とみなして因子分析を行った。因子Ⅰ、Ⅱについて、形容詞と音響特性量の因子負荷量の散布図を図-6に示す。各形容詞の位置関係は図-5とはほぼ一致し、音響特性量を変量に加えても波音の心理イメージの因子構成はほとんど変わらない。音響特性量の位置をみると、 $\bar{L}_{\max}$ は因子Ⅰの軸上に、 $\Delta \bar{L}$ は因子Ⅱの軸上にある。よって、因子Ⅰは波音の音量を表す特性量と、因子Ⅱは波音のリズム性を表す特性量と相関が高いと言える。以上より、波音の心理イメージは波音の音量とリズム性の2つの尺度で概略説明がつき、波音の心理イメージを説明する音響特性量としては、最大音圧レベルと音圧レベルの変動幅を用いればよいことが明らかになった。

(4) 波音の心地よさを予測する心理モデル

以上の知見から、各波音の「心地よさ」を目的変数、 $\bar{L}_{\max}$ 、 $\Delta \bar{L}$ を説明変数として重回帰分析を行い、波音の心地よさを予測する重回帰モデルを求めた。その結果を次式に示す。

$$Y = -0.060 \bar{L}_{\max} + 0.060 \Delta \bar{L} - 3.68 \quad \cdots (1)$$

ここで、 Y は-1～1に規格化した心地良さの指標であり、 $Y = -1$ で全ての被験者が非常に心地悪く感じ、 $Y = 1$ で非常に心地良く感じる。また、 $\bar{L}_{\max}$ 、 $\Delta \bar{L}$ の単位はdB(A)である。本心理モデルの予測精度を評価するために、式(1)による予測値

と官能試験の結果を比較した(図-7)。式(1)は官能試験結果の重回帰モデルであるため相関性が高いのは当然であるものの、心理量を扱ったものとしては両者のバラツキはかなり小さい。なお、今回の試験結果の内、心地良さがプラスとなるものが2例と少ないのは、汀線際で収録した波音を刺激音として用いたため、全体的に音量が大きかったことが原因と考えられる。

式(1)により、灘岡ら²⁾が明らかにした音量が小さく、リズム性が強い波音ほど快適性が高いという心理特性量と音響特性量の関係が定量的に求められた。海岸の波音の持つ快適度が音響特性からある程度評価できたことにより、本心理モデルは海岸空間設計の一手法として有効であると考えられる。

5. まとめ

現地海岸の波音を収録し、音響解析、官能試験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 離岸堤の設置により波音の音量・リズム性は大きく変化し、その変化は地形、波浪、構造物などの条件を考慮した碎波状況の変化により概略説明できることが分かった。
- ② 波音の心理イメージは音量とリズム性の2つの因子により構成され、音量の因子は平均最大音圧レベル $\bar{L}_{\max}$ 、リズムの因子は音圧レベルの変動幅 $\Delta \bar{L}$ と相関が高いことが明らかになった。
- ③ 重回帰分析により、音量、リズムを表す音響特性量から波音の心地よさを予測できる心理モデルを提案した。

参 考 文 献

- 1) 灘岡和夫：アメニティ空間としての海岸空間のとらえ方、みなとの防災、港湾海岸防災協議会、第10号、pp.49-56、1989。
- 2) 灘岡和夫・徳見敏夫：海岸環境の構成要素としての波の音について、土木計画学研究・講演集、No.11、pp.317-324、1988。
- 3) 灘岡和夫・玉嶋克彦：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、土木学会、第36巻、pp.869-873、1989。
- 4) 灘岡和夫：波の音のはなし、海岸、全国海岸協会、No.30、pp.26-32、1990。