

聴覚情報を統合した動的景観シミュレータの開発と
海岸空間設計への応用

Development of a dynamic simulator of landscape and auditory environments
for the design in coastal space

瀬岡和夫*・山下さゆり**・白水勝之***・八木 宏****

By Kazuo NADAOKA, Sayuri YAMASHITA, Katsuyuki SHIROUZU, and Hiroshi YAGI

As one of powerful tools for the design in coastal space, where waves and their sounds have significant roles as factors constituting amenity of the space, a dynamic simulator of landscape and auditory environments has been developed, being based on Computer-Graphics techniques and incorporating a sound processing system. To realize the simulator system on a work-station (20MIPS, 32Mb), several inventions to reduce computational time and storage domain are introduced in the software system both in the method of the CG expression and of the calculation of waves. The validity and availability of the present system have been confirmed through an application to a specific plan of construction of artificial beaches.

1. はじめに

最近、コンピュータ・グラフィクス（以下、単にCGと呼ぶ）を土木分野の施設設計や景観設計に活用しようとする試みがいくつか行われるようになってきている。その場合、施設設計等でのCG技術の利用ということではすでに建築分野等で多くの試みがなされていることから、ある意味ではその方面で先行して開発されている方法論を、対象空間の大きさを広げた形でそのまま利用すればよいことになる。

しかしながら、場合によってはそのような単純な応用では対処しきれない対象が土木分野ではいくつか存在する。そのような空間こそ、CG技術の応用

対象という意味において、土木分野で扱う空間として最も本質的な特徴を有する空間ということになるが、本研究で対象とする海岸空間は、まさしくそのような空間の一つといえる。それは、以下のような理由による。

- 1) 人工的な幾何学的構造物だけではなく、ある程度の不規則性を内包したさまざまな自然的要素（波、砂浜、松林、岩場、etc.）が、表現対象空間の中でかなりのウェイトを有している。
- 2) 特に波の存在が、海岸空間の中の特に近景場においてある種のダイナミズムをもたらし、その表現のためには、その動的表現を可能にする必要がある。
- 3) 波（特に砕波）による音は、上記のダイナミズムの聴覚面での現れであるが、この「波の音」は海岸空間のアメニティ構成要素として重要な役割を果たしている（瀬岡・徳見）。すなわち、「波の音」

* 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)
** 工修 建設省中部地方建設局企画部
(〒460 名古屋市中区三の丸2-5-1)
*** 東亜建設工業株式会社
(〒231 横浜市中区日本大通18)
**** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部 土木
工学科

極的に活かされるべき要素となっているわけで、したがって目標とすべきシミュレータには、何等かの形で聴覚的要素のシミュレーション技法も組み込まれる必要がある。

4) 波の表現法としては、波と海岸構造物との関係の評価を含めて、何らかの海岸工学上の知識を取り込む必要がある。また、波の音、特にその浜上あるいは背後地空間上での空間分布の表現法にも多少とも音響工学的知識を導入する必要がある。すなわち、海岸空間を対象とした場合、単なるCG技術の応用では限界があり、何らかの形で他の力学的・工学的知識と連結される必要がある。

5) 海岸空間の場合、その背後地空間との接続が特に重要となる。すなわち、背後地空間は海岸空間と独立に存在するのではなく、われわれが背後地空間に達したとき、たとえ海が見えなくても波の音や潮の香りに接することによって海が近いことを予感させ、何らかの期待感を高めさせ得る空間となっている(瀬岡²⁾)。とすれば、そのような期待感を意識的に演出するという視点が成立するはずである。したがって、シミュレータとしてはこのようなアプローチ空間での視覚的・聴覚的情報の変化をシミュレートすることを前提としたものでなければならない。

CGの一般的な利点としては、視点を任意に選べることや、対象物体の形状や色彩あるいはテクスチャを容易に変更して映像化できることなどがあげられる。本研究においてCGをベースとして景観シミュレータを開発したのは、そのような一般的な利点に加えて、上記の1)と3)で述べたように、シミュレート対象そのものが動的要素を持つことや、5)で述べたように、アプローチ空間での視点位置の移動に対応した「見え方」と「聞こえ方」の動的な変化をシミュレートする必要がある、という理由によっている。すなわち、ここで目標としている景観シミュレータは二重の意味で動的である必要があるわけで、そのようなことから、本論文の表題ではあえて「動的」という語句を掲げている。

本論文では、以上述べたような事柄を念頭に置いて、海岸空間という一つの特徴的な空間を対象として開発した景観シミュレータの内容を述べるとともに、具体的に香川県の津田町海岸の海岸整備事業計

画をケーススタディとして行った景観シミュレーションの結果を示すことを通じて、その有用性を明らかにすることを目的としている。

2. シミュレータ開発上のポイントと制約条件

ここでは、前節で述べたことを念頭に置きつつ、具体的に景観シミュレータを開発する上で、その前提(制約)条件となる点と、特に開発上のターゲットとすべきポイントについて述べておく。

(1) ハードウェア上の制約条件

いうまでもなく、開発目標とするシミュレータの内容は、前提とするハードウェアの性能や構成によって大きく制約を受ける。特に、今回のように対象空間が広くしかも複雑な形状を有する対象物を多く含む場合には、計算機の記憶容量や演算速度の制約に見合った合理的なソフトウェアを開発していくことが重要となる。

ここでは、システムに汎用性を持たせるという意味で、スーパーコンピュータクラスの計算機ではなく、最近急速に一般化してきているワークステーションクラスの計算機(後述)を前提にしてシステムを構成している。

(2) 海岸景観における「波」の重要性と表現上の問題点

海岸景観における海域空間は、水平線に代表される遠景場としての静的広がりといった側面だけでなく、近景場としての波打ち際近くの動的躍動感を伴う空間といった質的に異なった要素が折り重なって存在しているところにその基本的な特徴がある²⁾。

このような『海岸景観の二重構造』とでもいうべき構造を形成している重要な主役は、海岸景観に動的な側面をもたらしている波(特に波打ち際や砕波)の存在である。したがって、海岸景観シミュレータの開発目標としては、こういった要素をしかも動的に(アニメーションの形で)表現できるものでなくてはならない。

ここで重要なことは、このような波といった要素は、現象としてある程度制御可能となり得る要素であるということである。例えば、人工ビーチの場合を考えると、通常、突堤や離岸堤、潜堤といった海岸構造物ならびに養浜形状等の諸元は、主として異

められる。(ただ最近では、平常時の景観上の考慮から、水平線を隠してしまう離岸堤よりも潜堤形式の構造物が好まれるという傾向が出てきている。)しかしながら、このような構造物は異常波浪に対してだけでなく平常時の波浪にも何らかの影響を与えている。とすれば、これらの海岸構造物の設計にあたって、“平常時の波”を積極的に演出するという視点を持ち込むことが可能なはずである。その支援システムとして景観シミュレータが有効に機能するためには、入射波や海岸構造物の諸元に対応した形で波の場が表現できるものである必要がある。

しかしながら、ここで大きな制約がある。というのは、現在の海岸工学の知識では、砕波や波打ち際の波の追上がりといった近景場の重要な動的要素を物理的に正確に計算する方法が存在しないからである。また仮に存在したとしても、それを広大な領域を対象として時空間上で綿密に解いていくというのは、(1)で述べたハードウェア上の制約から考えて不可能に近い。

したがって、シミュレータ開発上のポイントとしては、このようなハードウェア上の制約を満足させつつ、上記の海岸構造物や入射波の諸元との関連や現象の力学的物理性をどのレベルまで取り込むか、そして視覚的に現実に近い砕波や波打ち際の画像表現をどのように実現させるか、ということが重要な点となる。

なお、海岸の波のアニメーションに関しては、大容量で高速のコンピュータを用いた例がすでに二三報告されている³⁾⁴⁾。しかしながらそれらは、10秒程度のアニメーションをかなりの計算時間を費やして行ったもので、しかも用いられている波の表現方法は力学的な根拠に乏しいものであることから、今回の目的には合致しない。

(3) 聴覚情報 — 「波の音」 — の導入

さきに述べたように、「波の音」に代表される聴覚情報は、海岸空間のアメニティ構成要素として重要な積極的役割を果たしている。このことは、例えば街路空間設計における交通騒音がむしろできるだけ小さく抑えるべきnegativeな要素であるのと対象的である。したがって海岸空間は、これまでいわば「視覚情報シミュレータ」の枠組みの中に留まっていた景観シミュレータを、聴覚情報を統合した形に

質的に発展させ得る絶好の対象となっている。

具体的には、波の音のsourceである砕波の情報と波の音の表現をどのように関連づけるかということや、シミュレーションシステムの構成に音の要素をどのように組み込むかがポイントとなる。

4. シミュレータシステムの構成

図-1に示すように、本システムは画像処理部と音響処理部から構成されている。以下に、これらの詳細について述べる。

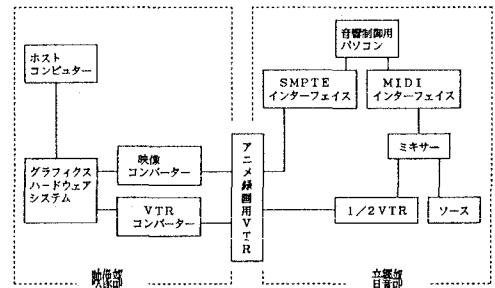


図-1 システム構成図

(1) 画像処理部

ここでは、画像データ入力(モデラー)はパソコンレベル(NEC-PC9801 RL2)で対応するものとし、そのソフトウェアとしては三次元CADソフトの一つであるダイナパス3(㈱ダイナウェア製)を使用した。

モデリングされた三次元地形データは、ワークステーション(‘Uステーション’、20MIPS、32Mb、住友電工㈱製)に転送されたのち、グラフィックスソフト“MOVIS”によって種々のレンダリング操作(視点・光源・色など種々のパラメータの設定や、マッピングなどによる画像生成)が施されて、画像処理装置(‘ARVISA(M5081)’、㈱グラフィカ製)上に一つの画面が作成されることになる。そして、これら一枚一枚の画面をビデオにコマ撮りすることによって、CGアニメーションが製作される仕組みとなっている。

なお、今回新たに開発した波の表現などのソフトウェアは、上記のMOVISの中に組み込んで使用する形となっている。

(2) 音響処理部

製作されたCGアニメーション画像に音を組み込むためには、各画面に対応してソース音を録音しなければならない。すなわち、①映像から得られる各場面の音響制御因子（音源までの距離など）に従ってソース音を制御すると同時に、②その音を映像に同期録音する、という作業が必要となる。

①の音響制御には、一般にシンセサイザーの演奏などで使用されるデジタル信号MIDI (Musical Instrument Digital Interface) を用い、MIDI制御可能ミキサーヤマハDMP-11によって音響を制御した。また、②の同期録音に関しては、SMPTEタイムコード記録・再生機能をもつビクターCR-850 (3/4インチVTR) を用い、画像と音響との同期操作を行った。そして、これらのMIDIやSMPTEのデジタル信号の入出力操作には、パソコンをホストとして専用のインターフェイスボードKMU98およびESU98 (三鈴エリー製) を使用した。

5. 波の表現方法

先の2。(1)や(2)で述べたように、海岸の波を表現するには、ハードウェア上の制約や表現対象である波の場の計算方法自体の問題など、克服すべきさまざまな課題がある。ここでは、それぞれについて工夫した内容を中心に述べる。

(1) CG表現技術上の工夫

流体運動に関するCG表現手法は多数開発されてきているものの、海の波に関するものはまだごくわずかの研究例しか存在しない。しかもそれらは、波の三次元形状をそのまま三次元データとしてモデリングし画像表現するものであるため³⁾⁴⁾、かなりの計算時間と莫大な記憶容量が必要としている。

そこで今回は、波を三次元的にモデリングするのではなく、テキスト表現手法の一つであるいわゆるバンプマッピングの技法を応用することによって効率的に波動場を表現することを試みた。すなわち、ここでは海面全体を二次元的な一枚の水平面で定義し、その平面に本来の波に対応した陰影や色の“柄”をつけることで、あたかもその平面上に実際の波が存在するかのように見せるという方法をとることにした。

具体的には、まず図-2に示すように、上記の二

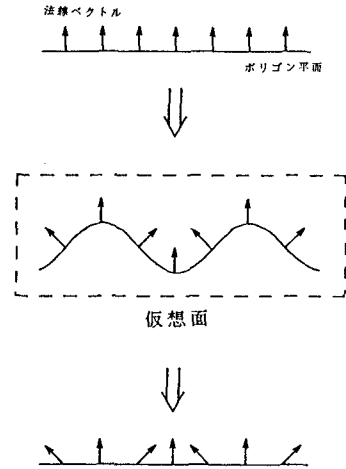


図-2 バンプマッピング

次元平面上の各ピクセルポイントにおいて、その法線ベクトルの向きを表現対象の波の形状に対応した値に設定しておく。そうすれば、この法線ベクトルの値と光源と視点の位置関係によってその点の陰影の程度が計算できるので、その輝度値を各ピクセルポイントに割り付ければ三次元的な波に対応した画像が作成できることになる。

以上はこの手法の原理であるが、実際には各ポイントの色(RGB)の操作を含めて、砕波の泡による白濁や波の遡上がり部の処理といったかなり複雑な表現を行う必要がある。(バンプマッピングの簡単な応用としては、単純な凹凸をつけて水面をより水面らしく見せるという例がある。)それらの内容については後述するが、この手法の導入によって、CG表現効率としては計算時間や記憶容量の面において従来に比べて格段に向上させることができた。

(2) 波の場の設定方法

先に述べたように、砕波や波打ち際を含む波動場(海岸工学の用語で言えばsurf zoneやswash zone)を力学的に正確に表現し得る計算法は、いまのところ存在しない。しかし、ここでの目的から言えば、画像上に表現された波が心理的な印象として海岸の波らしく見えることが重要なのであって、力学計算そのものを正確に行うことを目的としているのではない。その意味では「ごまかし」が効くわけである。しかしながら逆に、「ごまかし」に徹することでも

きない。3。(2)で指摘したような、波動場の表現に海岸構造物や養浜形状といった設計要素との関連性を組み込む、という重要なポイントが抜け落ちてしまうからである。そこでここでは、以下のような考え方に基づいてこの問題に対処した。

海岸の波の場を特に印象づけているのは、砕波（およびそれに伴う気泡による白濁）と波打ち際の存在である。このことは例えば、湖岸では通常これらの規模がかなり小さく、その結果として湖の近景場が海岸のそれと比べてかなり異なった印象を与えるということを考えれば明らかである。したがって、砕波や波打ち際の表現のためには、まず、それらの規模（例えば砕波帯幅）を実際の条件に即して適切に決めることが重要となる。

このような砕波の規模といったファクターは、基本的に波動場の波高分布によって支配されるが、この波高といったoverallな量については現在の知識レベルである程度見積りが可能である。しかも、海岸構造物等の設計条件の違いは、主としてこの波高分布の違いとなって現れる。そこでここでは、この波高分布の計算を海岸工学上の知識に基づいて物理性を持った形で行うこととし、その他の実際の「波らしさ」に関連する諸要素は何等かの疑似的な画像表現技法に基づいて表現する、という考え方に基づいて波動場のシミュレーションシステムを構成することを試みた。以下にその詳細について述べる。

a) 波高分布の算定法

ここで対象とする波動場に関してその波高分布を算定するには、波の浅水変形・屈折・回折・反射・砕波減衰といった諸要素を考慮した計算を行う必要がある。それには、非定常緩勾配方程式による方法（渡辺・丸山⁵⁾）、放物型近似方程式による方法（磯部⁶⁾）などいくつかの方法があるが、ここでは波向きや波長の変化を含めて計算がごく簡単にしかも短時間でできるray method⁷⁾を採用することとした。ただし、この方法では本来、波の回折効果が考慮されないことになるが、ここでは田中・磯岡⁸⁾によって提案された方法によって回折効果を近似的に取り込むようにした。

また計算時間をなるべく短くするために、ここではさらに、計算上必要となる波の分散関係式を長波近似によって簡略化するとともに、砕波条件ならび

に砕波後の波高を波高・水深比一定（ $=0.78$ ）とする最も簡単な形で与えた。

b) 「波らしさ」の疑似的表現技法

実際の海岸の波は正弦波のような単純な波形ではなくある程度の前傾性や不規則性を有しており、さらに砕波による海水の白濁といった要素も海岸の波らしさを構成する重要なファクターとなっている。

ここでは、浅水変形に伴う波形の前傾ならびに急峻化については、適当な位相関数を導入することによって正弦波形を歪ませ、それに波形の急峻化に対応した重みで二次関数を加えることによって表現した。また、波の不規則性については上記の波高の計算結果にランダム関数を重ねることにより表現した。

さらに砕波による白濁については、波頭部から後面の領域にかけて、RGBを砕波の白色（ $R=1, G=1, B=1$ ）から海の青色（ $R=0, G=0.7, B=1$ ）まで波長に対応させて連続的に変化させるとともに、各RGBを乱数によって適宜変動させることにより白濁部のまだら模様を表すようにした。

c) 波打ち際の表現方法

波打ち際部分では、海域としてここで定義している水平領域内に波の動きが留まらず砂面領域の中に這上っていくため、その表現には特別の工夫が必要となる。

ここでは、図-3に示すような形で砂面の下部に水平海域を一波長分仮想的に延長してその範囲にある波の波峰線位置を波の這上がり線として定義し、

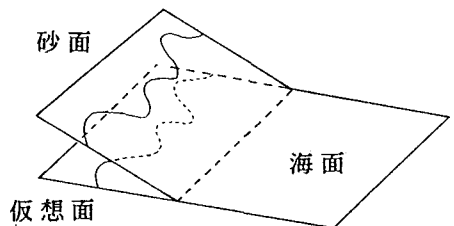
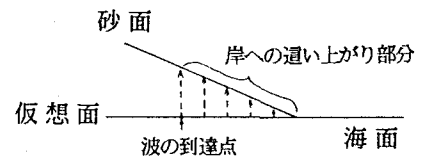


図-3 波の這上がりの表現法

それより沖側にある部分の画像情報を砂面に投影することによって波の遣上がり表現するという手法を考案した。この方法は、砂面の沖側端領域を波の運動に合わせて波の色や柄にカメレオンのように変化させるというもので、計算時間はごくわずかで済む。

実現象では上記の遣上がり線がある程度の不規則性を持って時空間的に変化するため、ここでは適当なランダム関数をこの遣上がり線位置関数に付加することによってこの不規則性を表現することを試みた。その結果、かなり実際に近いイメージの画像表現が可能となった。

6. 波の音の表現方法

波の音の表現に当たっては、波の音のsourceをどうするかということ、音源から視点位置までの音の伝播に伴う変化をどのように表現するかということがポイントになる。

まず前者の波の音のsourceについてだが、波の画像と厳密に対応させるには、原理的には海域中のすべての碎波部分に音源を配置して時々刻々それら空間積分を行えばよいことになる。しかし、それには膨大な計算量が必要となるし、音源を配置するといっても、実際には碎波音の周波数特性が波の一周期内で大きく変化するため⁹⁾、source音の段階から波の音をシミュレートすることはかなり困難である。そこでここでは、波の音のsourceとしては、実際にいくつかの海岸で録音した波の音や市販のCDを利用することとした。ただし、その際に波の周期がほぼ同じsourceを用いることになるのはいうまでもないが、海岸で聞く波の音の特性が surf similarity parameterによって基本的に支配されることから¹⁾、このパラメータ値もほぼ同じものを用いる必要がある。また、音源のパワーレベルは碎波高と密接な関連を持つことがわかっているので⁹⁾、ここではその経験式によってパワーレベルを評価するようにした。

一方、音源から視点位置までの音の伝播に伴う変化要因としては、例えば砂浜の吸音効果⁹⁾や植栽の影響などさまざまなものが存在するが、今回は簡単に距離減衰のみを考慮した計算を行った。具体的には、各画像での視点の位置座標から音源からの距離を計算し、それから音源を近似的に線音源とみなして視点位置での音響インテンシティを算出した。

7. ケーススタディ

本研究で開発したシミュレータの有効性を確認するために、ここでは、運輸省の「ふるさと海岸整備モデル事業」に選定されている香川県津田町海岸整備事業計画を対象としてその景観シミュレーションを行った。

この海岸は白砂青松の海岸として古くから海水浴客でにぎわっていたが、近年の地震による地盤沈下や津田側河口の港湾施設の影響などで急激に海岸侵食が進み、砂浜が消失するばかりか背後の民家も越波等で危険にさらされつつある。現在は海岸線に沿って高さ約2 mの護岸を設置することで対処しているが、今後さらに侵食が進む可能性があるだけでなく、この護岸が海へのアクセスを阻害し視覚的にも圧迫感を与えて海の眺望を妨げるものであることから、図-4のような人工海浜を中心とした新たな整備事業が計画されている。

そこで今回のシミュレーションシステムによって、この海浜地形及び計画構造物をモデリングし、様々な視点からそれらの景観をシミュレートすることを試みた。

写真-1は、移動する観測者が認識する景観のアニメーションを製作した際の、数フレームを抽出したものである。ここでは、背後地から次第に海岸へアプローチしていく際の人の動きに合わせた展開となっている。まず①は上空からみた全景図であり、②～③で背後地の住宅地を抜け、④で松林に入って次第に海岸に近づいてゆき、そして⑦で海岸に到達している。さらに⑨で階段護岸を越えると、⑩で砂



図-4 津田町海岸整備事業計画の概略図

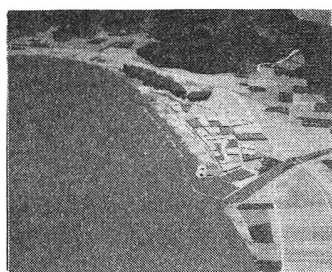
浜の上を海岸線に沿って北西の方向に移動し、最後の⑫ではもう一度海岸線を振り返っている。。

また写真-2は、波打ち際をクローズアップし、そこでの砕波の様子や波が岸に寄せては返す様子を、1/4周期ごとに示したものである。これから、砕波やそれに引き続く波打ち際での波のはい上がり等が実際の状況とよく類似した形で表現されていることが

わかる。(ただし、このような写真の形では実際にシミュレートされた波の動的な状況がうまく表現できないので、講演時にはビデオを上映する予定である。)

8. おわりに

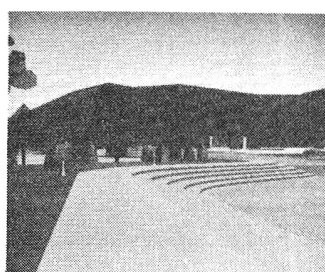
最初に述べたように、海岸空間は「波」という動



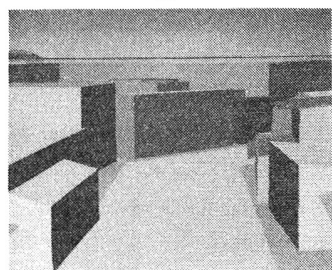
①



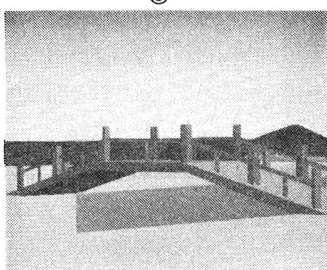
⑤



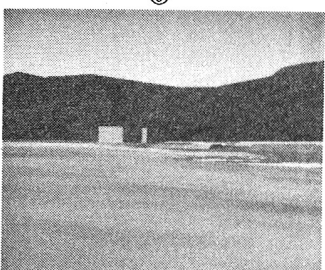
⑨



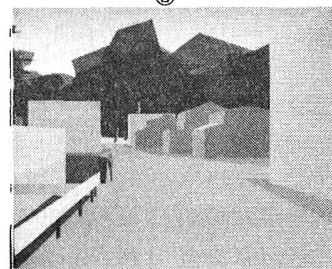
②



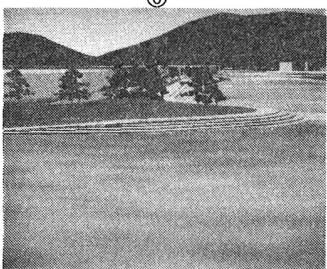
⑥



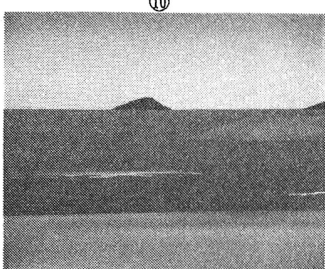
⑩



③



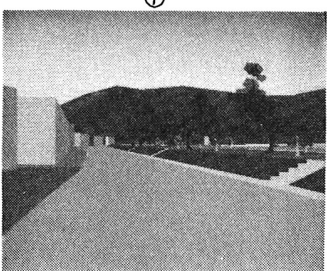
⑦



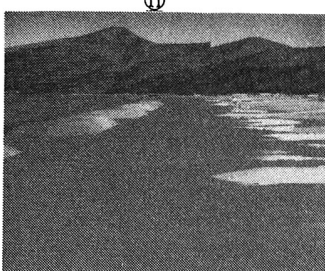
⑪



④



⑧



⑫

写真-1 完成したアニメーション

的な自然現象が景観上の一つの主役をなし、しかもその聴覚面上の現れである「波の音」がアメニティ構成要素として重要な役割を果たしている、というきわめてユニークな空間となっている。本論文では、この海岸空間の特徴をできるだけ反映させた景観シ

ミュレータの開発を目標として、さまざまな工夫を施した内容について述べるとともに、具体的なケーススタディへの応用を通じてその有効性を確認した。

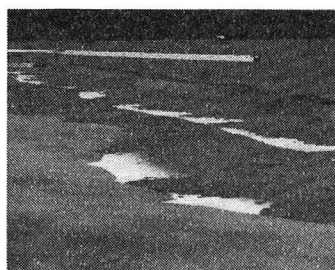
なお、ここでは、景観シミュレータの開発の面で質的に新たな内容のシミュレータを提案し、同時に海岸工学上の観点からいえば、「平常時の波」の評価といった新たな視点を提起したつもりである。このような試みが、いわば景観工学と海岸工学の接点ともいうべき領域の発展の一助になれば幸いである。

謝辞： 本研究は文部省科学研究費試験研究B「聴覚情報を統合した動的景観シミュレータの開発とアメニティ空間評価手法の向上」(研究代表者：瀬岡和夫)の補助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表します。

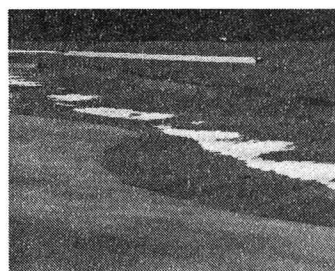
参考文献

- 1) 瀬岡和夫・徳見敏夫：海岸環境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。
- 2) 瀬岡和夫：アメニティ環境としての海岸空間のとりえ方、みなとの防災、104号、pp. 49-56、1989。
- 3) Peachey, R. D. : Modeling waves and surf, SIGGRAPH, 20, pp. 65-73, 1986。
- 4) Fournier, A. & Reeves T. W. : A simple model of ocean waves, SIGGRAPH, 20, pp. 75-84, 1986。
- 5) 渡辺 晃・丸山康樹(1984)：屈折・回折・砕波減衰を含む波浪場の数値解析法、第31回海岸工学講演会論文集、pp. 103-107。
- 6) 磯部雅彦(1985)：波向線座標における放物型方程式を用いた屈折、回折の計算法、海岸工学講演会論文集 pp. 95-99
- 7) Munk, W. H. & Arthur, R. S. : Wave intensity along a refracted ray, U.S. National Bureau of Standards Circular 521 : Gravity Waves, 1952。
- 8) 田中則男・瀬岡和夫：汀線変化予測モデルの開発と現地への適用、港研資料、運輸省港湾技術研究所、No. 436, pp. 1-40, 1982。
- 9) 瀬岡和夫・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、第36巻、pp. 869-873。

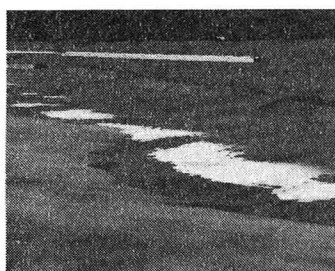
$\frac{1}{4} T$



$\frac{2}{4} T$



$\frac{3}{4} T$



$\frac{4}{4} T$



写真-2 波打ち際の連続写真