

海岸景観シミュレーションのための波の動的 CG 表現について

灘岡 和夫*・山下さゆり**・白水勝之***・八木 宏****

1. ま え が き

最近のウォーターフロント開発ブームなどに見られるように、より快適な環境空間を創造しようとする機運がさまざまな分野で高まってきており、その空間・施設設計支援ツールとしての景観シミュレータの必要性が広く認識されつつある。

ここで対象とする海岸空間においても、今後何らかの形の景観シミュレータの導入が計られていくものと考えられるが、従来主流をなしている建築用シミュレータの場合と違って、自然的要素（波、砂浜、木、岩等）が数多く含まれることや対象空間がかなり広いことといった景観表現上の解決すべき問題が幾つか存在する。

そこで本研究では、実用的な海岸景観シミュレータの開発のための重要なステップの一つとして、海岸景観を構成する最も重要な自然的要素の一つである波（特に砕波や波打ち際）の表現に対象を絞って、そのシミュレーション技法の開発を試みた。具体的には、海岸での波の存在が海岸空間の動的な側面を特徴づける支配因子であることを考慮して波の動的な CG 表現を行うことを試みたが、いくつかの工夫をこらすことによって、ワークステーションレベルでもシミュレーションが可能で、かつ実際の「波らしさ」を十分表現し得る、効率的かつ合理的なソフト開発を目指した。

2. システムの構成

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ース 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’、20 MIPS、32 Mb、住友電工（㈱製）に転送されたのち、グラフィクスソフト“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（‘ARVISS（M501）’（㈱グラフィカ製）上に一つの画面が作成されることとなる。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。

3. 波の表現方法

砕波や波打ち際を含めた波の動きを実際に CG 表現するには、つぎに挙げる 2 つの大きな制約条件がある。

1) かなり複雑な三次元形状を有する波を少なくとも数百メートル四方程度の平面的な広がりをもつ相当広い領域を対象として表現する必要がある。

2) 現時点での海岸工学上の知識レベルでは、砕波や波打ち際の波の這上がりといった景観上特に重要な要素を物理的に正確に計算し得る力学モデルが存在しない。

したがって、これらの大きな難点を克服するために、1) に対しては波の幾何形状データの CG 表現上の工夫が、また 2) に関しては波動場の計算に関する何らかの工夫が求められることになる。そこでここでは、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（Peachey 1986, Fournier and Reeves, 1986）。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、かなりの計算時間と莫大な記憶容量を必要としている。

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、テキスト表現方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

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

** 工修 建設省中部地方建設局企画課

*** 東亜建設工業(株)

**** 正員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

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-1に示すように、上記の二次元平面上の各ピクセルポイントにおいて、その放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、この放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這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。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。

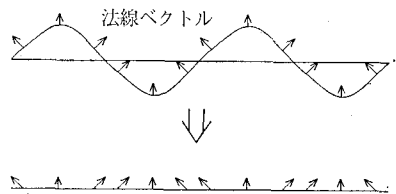


図-1 波形表現のバンプマッピングの手法

(2) 波の場の設定方法

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方法に基づいて表現する、という考え方に基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, 1984）、放物型近似方程式による方法（磯部, 1985）などいくつかの方法がある。この中のどの方法を採用するかということは、ここではあまり本質的な問題ではなく、使用する計算機の能力等を考慮して適宜選択すればよい。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行える ray method (Munk and Arthur, 1952) 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・灘岡 (1982) 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。

なお、ray method による具体的な計算では、ある一定の間隔で波向き線を計算し、それぞれの波向き線に沿って波の波長に対応する間隔で波峰線位置（これは波速 C で時間的に移動させる）が決められることになる。一方、波の場を最終的に CG 表現するには、ディスプレイされる各ピクセルポイントごとの位置での波の情報（一波内での相対的な位置や、対応する波高など）が必要となる。そこでここでは図-2に示すような形でピクセルポイント点 $P(x, y)$ におけるデータの補間を行った。すなわち、まず図の直線 AB と CD からその交点 Q を求め、つぎに直線 PQ と AC , BD の交点 F , G をそれぞれ求める。そうすることにより、この FG 線上での点 P の相対位置から位相を算定し、 F および G 点での波高の内そう値から対応する波高を算出した。

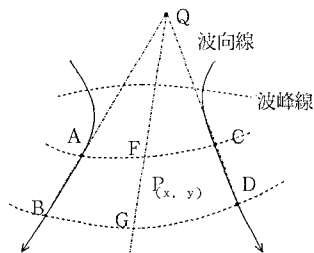


図-2 メッシュ間におけるデータの補間

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非対称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、これらの各要素の表現方法について述べる。

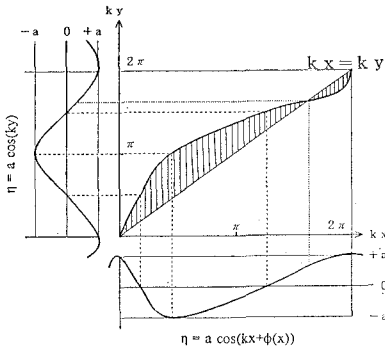


図-3 余弦波と前傾波との位相差

・波の前傾性（前後の非対称性）の表現方法

浅水変形に伴う波形の前傾化については、以下に述べるような適当な位相関数を導入することによって表現した。

図-3 は、 x 軸上に適当な前傾波形を、また y 軸上に適当な余弦波形を書き、両者の対応する位相をこの xy 平面上のグラフとして表したものである。このグラフと $kx=ky$ の直線との差(図中のハッチ部分)が両者の図形の位相の上でのずれを表すことになる。いまそれを $\phi(x)$ と記すと、前傾波形 $\eta(x)$ は a を振幅として $\eta=a \cdot \cos(kx+\phi(x))$ で表現できる。

したがって、この位相差関数 $\phi(x)$ を具体的に決めることが問題となるが、 $p(x)$ を 3 次関数で表すものとする、図-3 から容易にわかるように、この ϕ は α と β をパラメータとして $\phi(x)=\alpha e(kx)$; $e(kx)=kx(kx-\beta)(kx-2\pi)$ という一般的な形となる。

図-4 は α を次第に大きくしていったときの波形の変化を示したもののだが、これから、 α が 2 程度以下であれば波形の前傾の様子がうまく表せることがわかる。

またパラメータ β の値としては、いくつかの室内実験での実測波形を参考にしてここでは、 $\beta=0.8 \times 2\pi$ を採用した。

・波の上下の非対称性の表現方法

波の上下の非対称性については、二次関数を適当な割合で重ね合わせるという方法(Founier and Reeves, 1986)を用いた。図-5 は正弦波にさまざまな割合で二次関数を重ね合わせたときの関数値を示したものである。また図-6 は、上記の波の前傾性にこの非対称性を加えて表示したものの例である。

・波の不規則性の表現方法

波の不規則性については、本来ならば多方向不規則波として記述する必要があるが、ここでは簡単に、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。

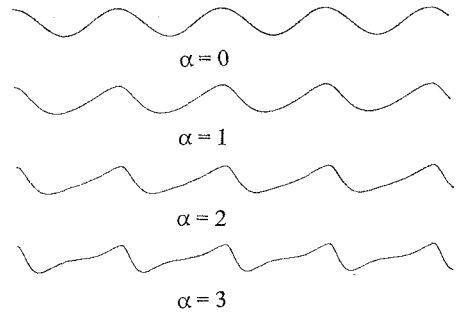


図-4 前傾波の表現法 ($\eta=a \cdot \cos(kx+\alpha \cdot e(kx))$)

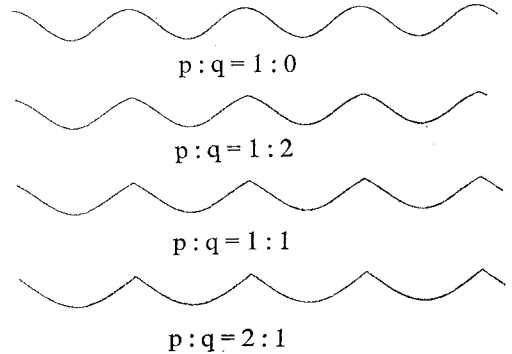


図-5 波の上下の非対称性の表現法 ($\eta=p \times$ 正弦波 $+q \times$ 二次関数)

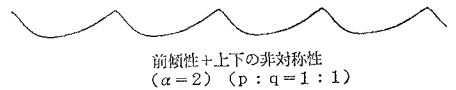


図-6 前傾性+上下の非対称性

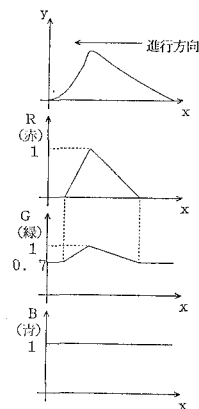


図-7 砕波による白濁の表現法

・砕波の気泡による白濁の表現方法

砕波による白濁については、波頭部からその後面の領域(その広さは時間的に変化させている)にかけて、図-7 に示すように RGB を砕波の白色 ($R=1, G=1, B$

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這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。

以上の操作により、かなり実際に近いイメージの画像表現が可能となった。

4. シミュレーション画像の作成例

写真—1 に、本シミュレーションシステムにより作成した画像の一例を示す。この一連の写真は、波打ち際近くの碎波やそれに続く波の這上がりの様子を 1/4 周期毎に示したものであるが、これから、本システムによってかなり実際に近いイメージの画像が作成できていることがわかる。(ただし、このような写真の形では、波の動的な移り変わり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。)

5. おわりに

本研究では、海岸空間の動的な側面を特徴づける支配因子である波(特に碎波や波打ち際)に対象を絞って、その動的な CG 表現を行うことを試みた。その結果、波の幾何データの CG の表現技術や波動場の設定法、あるいは「波らしさ」の表現技法等でさまざまな工夫を凝らすことによって、ワークステーションレベルでもシミュレーションが可能で、かつ合理的なソフト開発に成功した。

なお本論文では、景観シミュレータの中の波の表現に

関する部分について詳しく述べたが、このシミュレータは波の音といった聴覚情報も表現できる『聴覚情報統合型』のシミュレータとなっている。この点を含めた景観シミュレータの全体の内容については、別の文献(灘岡ら, 1991)で報告する予定なので、そちらを参照して頂きたい。

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海岸空間評価手法の向上」(研究代表者: 灘岡和夫)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

- 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, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 95-99.
- 田中則男・灘岡和夫 (1982): 汀線変化予測モデルの開発と現地への適用, 港湾技研資料, No. 436, 40 p.
- 灘岡和夫・山下さゆり・白水勝之・八木 宏 (1991): 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, 土木計画学研究・論文集, Vol. 13, (印刷中)
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・碎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.
- Founier, A. and Reeves, T., W. (1986): A simple model of ocean waves, SIGGRAPH, 20, pp. 75-84.
- Munk, W. H. and Arthur, R. S. (1952): Wave intensity along a refracted ray, Gravity Waves, U. S. National Bureau of Standards Circular, 521, pp. 95-109.
- Peachey, R. D. (1986): Modeling waves and surf, SIGGRAPH, 20, pp. 65-73.