

港湾技術資料

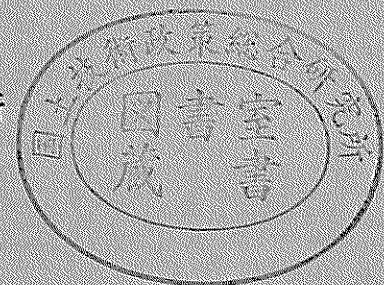
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 815 Dece. 1995

コンピュータグラフィックスによる波浪現象の
バーチャルリアリティシステム

酒高平 井橋石 浩宏哲 二直也

運輸省港湾技術研究所



目 次

1. まえがき	4
1.1 VRとは何か	4
1.2 VRの手法	4
1.3 VRシステム構築への取り組み	4
2. 波浪現象のVRシステムの構築方策	5
2.1 波浪現象のVR化	5
2.2 数値解析手法	5
2.3 VRシステム	6
3. 深浦港を事例とした波浪現象のVR化	8
3.1 ブシネスク方程式による深浦港の波浪現象数値解析	8
3.2 VRシステムによる画像表示	9
5. 結論	10
6. あとがき	10
参考文献	10

DEVELOPMENT OF VIRTUAL REALITY SYSTEM FOR WAVE TRANSFORMATION IN COMPUTER GRAPHICS

Koji SAKAI*
Hironao TAKAHASHI**
Tetsuya HIRAISHI***

Synopsis

Computer graphic technic has been widely applied to make the visual image of numerical simulation result. In the computer graphics, the view point is generally fixed on the one point with a large height. The virtual reality system with five large screens has been developed in order to make the audience have the presence. In the system, the view point is able to be moved to any point during calculation. This system has been already applied to make the virtual image of the tsunami attack to a harbour.

In the present paper, the virtual graphics of wind wave transformation in a harbour is developed. The Boussinesq equation model which can calculate wave diffraction, refraction and nonlinearity is applied for the numerical simulation of wave profiles in the harbour. The virtual reality system for wind wave calculation is applicable to the design of breakwater arrangement considering the view from navigators and fishermen.

Key Words: Virtual Reality System, Computer Graphics, Wave Transformation,
Boussinesq Equation

* Member of System Laboratory, Planning and Design Standard Division (Marine Environment Division, Port Bureau at present)

** Chief of System Laboratory, Planning and Design Standard Division

*** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

コンピュータグラフィックスによる波浪現象の バーチャルリアリティシステム

酒井 浩二*
高橋 宏直**
平石 哲也***

要 旨

対象物やその周りの環境条件をコンピュータグラフィックスの中にとりこみ、映像のみならず音響をも媒体とする仮想空間を構築し、さらにその空間内において任意の移動を可能とする。これにより、まるで実際にその空間内に存在するのと同様の状況を創出し、空間内の状況を容易に理解できることを可能とするシステム（バーチャルリアリティシステム）を開発した。

さらに、このシステムを深浦港の波浪現象の数値シミュレーション結果に適用し、構築された仮想空間の高質性、空間内の状況把握の容易性を確認した。今後、港湾計画、防災計画、環境計画等における支援システムとしての本システムの活用が期待される。

キーワード：バーチャルリアリティ、コンピュータグラフィックス、波浪現象、ブシネスク方程式

* 前 計画設計基準部 システム研究室（現 港湾局 環境整備課）

** 計画設計基準部 システム研究室 室長

*** 水工部 主任研究官

1. まえがき

1.1 VRとは何か

VR (Virtual Reality : バーチャルリアリティ) という言葉は、1989年サンフランシスコで開催されたTEXPO'89でVPL社が始めて用いて以来、まだ10年も経過していない。

さて、のVRの訳に関して、廣瀬¹⁾、黒崎²⁾は次のように述べている。

—VRを「仮想現実」と訳すか、「人工現実感」と訳すかは、大変大きな問題である。なぜなら、これは、リアリティのとらえ方の問題に起因し、前者は客観的存在としてリアリティをとらえ、後者は主観的存在としてとらえており、事実、この問題は昔から哲学の基本問題として考えられてきた。VRの世界では、まさに、この問題、つまり「現実感」の外に「現実」が存在するのか、あるいは、「現実」とは「現実感」そのものにほかならないのかという「存在と認識」の根本問題を、科学的・技術的に取り扱わなければならない。—

また、原島³⁾は、VR技術の目標に関して次のように述べている

—VR技術の目指すものは、「等身大の科学技術への挑戦」である。これまでの科学技術は、素粒子論に代表される超マイクロ科学と、宇宙論に代表される超マクロ科学に二極化されていた。これに対して、最も身近にある等身大の科学は、比較的軽く見られてきた。あるいは、近すぎて誰も評価できる世界であることから、最も難しい世界だったのかもしれない。VRの世界は、等身大であることを本質とする。言い換えれば、我々が見て聞いて触るという当たり前のことを対象とする技術である。しかし、この当たり前のことが最も難しい。—

すなわち、VR技術の追求は、哲学者が永遠に議論している「現実と何か」という命題を、工学に携わる技術者としてこの命題を解き明かそうとすることになる。

1.2 VRの手法

VR=CG(コンピューターグラフィックス)とすぐに直結するとは妥当ではない。例えば、映画に感動した時を思い出してみると、その映画を観ていた間、映画の世界に完全に入り込み、頭では虚構の世界であることを理解しながらも、完全にリアリティを感じていることがある。また、例えば、琵琶法師が創り出す平家物語の世界には、

平家の亡霊さえも涙したという。

実は、「一流の芸術家は、一流のVR技術者でもある。」ともいえる。

さて、一流の琵琶法師が、「琵琶」という楽器一つあれば形成できるVRの世界において、一流の芸術家でない者がVRの世界を演出するための重要な支援システムの一つがCGの技術である。特に、近年のアメリカを中心とするGWS (Graphic Work Station) の発達がこれを可能としている。

このVRのためのCGの世界も大きく二つに分類される。一つは、HMD(Head Mounted Display) + CGTM(Cyber Glove)による手法である。これを用いることは、人間個人個人をVRの世界へ誘う。

もう一つは、大画面をいくつか組み合わせることによって仮想空間を構築する手法である。これは、複数の人間を同時にVRの世界へ導うが、HMDの世界よりリアリティの度合いは低いといわれている。

1.3 VRシステム構築への取り組み

計画設計基準部システム研究室においては、現在、次の3項目に対するVRシステムの構築を進めている。

①高速船入港に際しての水域施設計画の評価

船速50ノットを目標とするTSL(テクノスーパーライナー)に代表される超高速大型貨物船の技術開発が世界的に推進されている。我々のシステムでは、通常では危険で実施できない高速入港を実際の船長に実験してもらうことで、水域施設の規模、具体的には航路の幅員に関する現行基準等の妥当性の評価を可能とする。

②津波来襲に対する防災施設計画の評価

津波に対する防波堤あるいは防潮堤の効果は、一般的に遡上の高さや浸水領域の大きさという数値情報で評価されることが多く、その評価方法には疑問が呈せられている。我々のシステムでは、実際に想定地域に津波が来襲する状況を再現し、文字通り人間の視点で、あるいは、ヘリコプターの機上からの評価を可能とする。

③港内静穏化のための防波堤計画の評価

防波堤の静穏化効果は、高山⁴⁾の提案した静穏度モデルにより評価されることが多い。我々のシステムでは、より高次の運動方程式により波浪現象を解析し、その結果の波浪変動状況を海面上での人の視点、あるいは、防波堤上での人の視点での評価を可能とする。

このうち津波来襲に対する防災施設計画の評価については、「コンピューターグラフィックスによる津波現象のバーチャルリアリティシステム：港湾技研資料 No.805, 1995」において成果の一部を報告した。

本論文においては、③港内静穏化のための防波堤計画の評価に関連し、コンピュータグラフィックスによる波浪現象のバーチャルリアリティシステムの構築方策及び深浦港を事例とした具体例について報告する。

2. 波浪現象のVRシステム

2.1 波浪現象のVR化

(1) 計画策定における支援システムとしての要件

港湾計画、防災計画等の計画策定におけるポイントを整理すると大きく次の2点になると考えられる。

①計画代替案の評価

②幅広い理解の確保

防波堤の配置を事例にして説明する。防波堤の法線計画手法は、実際の港湾で、実際に防波堤を種々建設し、種々の環境状況下でその効果、影響を実際に視測し、その中で一番評価が高い防波堤法線を最終法線とすることが理想である。小人の国のガリバーであればこれも可能であろうが、我々の世界では当然のことながら不可能である。すなわち、港湾を始めとする土木事業においては、再現（あるいは、やり直し）不能が基本原則である。例えば、家電製品のように、まず試作をおこない、問題があれば改めて作り直し、試行錯誤の結果に最終製品の完成となる世界とは全く異なる。したがって、計画内容を仮想空間内に再現し、計画代替案を評価できるシステムが求められる。

次に、計画者が最も正しいと判断した防波堤の配置計画に対して幅広い理解を得ることが必要である。表現を替えば、多くの人に見てもらうことで、計画内容の妥当性が確認される。岸壁の静穏化を主目的として計画された防波堤は、港口部に航行している小型船には望ましくない反射波を引き起こしているのかもしれない。その確認として、あるいは、実際に航行する人からも理解を得るためには、その海域の状況を実際に体験してもらうことが効果的な手法となる。したがって、計画内容を仮想空間内に再現し、幅広い立場からの疑似体験を可能とするシステムが求められる。

(2) 波浪現象のVR化の基本的な考え方

支援システムとしての要件から、波浪現象のVR化を考えた場合、通常の静穏度計算において用いられる計算手法では、必ずしも十分ではない。具体的には、屈折、浅水変形等が十分に考慮されていないことに加え、計算領域の各格子点において、水位変化量が直接求められていないことが挙げられる。

このため、平面波浪場解析のための高次の波動方程式であるブシネスク方程式を用いた数値解析を行い、その解析結果を次の手法によりVR化を行う。

①時間軸の歪が無く、実時間で表示する。

②X、Y、Z軸方向の比率を歪ませることなく、かつ、実スケールで表示する。

③画像表示が進行中において、リアルタイムで自由な視点場設定を可能とする。

2.2 数値解析手法

(1) ブシネスク方程式の概要

現在、多方向不規則波を入射波とする港内波浪計算を行う場合は、高山の手法⁹⁾が広く用いられている。この方法は、一様水深域の半無限堤及び島堤による規則波の回折の解析解を用い、これを多方向不規則波のスペクトル分布に対応する各成分波に対して求め、それを重ね合わせるといものである。高山の手法は、任意の反射率境界の取扱も容易で、大規模な港湾に対しても比較的短時間で計算することができ、非常に実用的な手法である。しかしながら、一様水深を前提としているので、屈折・浅水変形を考慮できず、水深変化が大きい場合には誤差が生じることになる。

この欠点を解消した手法としては、屈折・回折を同時に含む緩勾配方程式を基礎方程式として、不規則波にも適用できるように拡張した非定常緩勾配不規則波動方程式¹⁰⁾による波浪計算法がある。この方法は、沖側境界から波を入射させ、時間ステップ毎に基礎方程式を差分化する方法であり、高山の手法と比較すると長い計算時間が必要であるが、最近の計算機の性能向上により実設計に適用できる状況にある。ただし、これらの波浪計算手法は、いずれも線形理論に基づく手法であり、非線形性(有限振幅性)は含まれていない。

これに対して、最近、弱非線形・弱分散性の方程式であるブシネスク方程式を用いた波浪変形計算が行われるようになってきている⁶⁾。この方程式は長波近似方程式であるため、波の周波数帯が長波領域近傍に限定されるが、波の分裂と非線形性が表現できる。

(2) 基礎方程式

基礎方程式を以下に示すとともに、その座標系を図-1に示す。実際の解析においては、差分法により計算を行う。差分近似による計算法の詳細については、文献⁷⁾を参照されたい。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial b}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

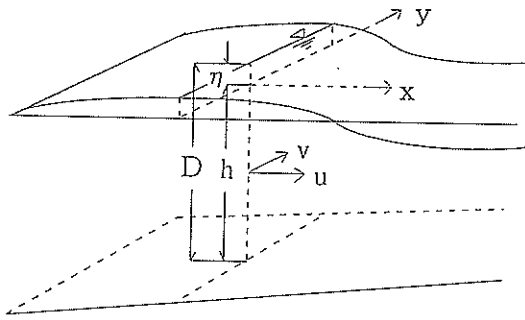


図-1 座標系

$$\begin{aligned} & \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{b^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{bq}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & - \nu \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} \right) + \epsilon b + \frac{f}{D^2} b \sqrt{b^2 + q^2} \\ & = \frac{1}{3} h^2 \left(\frac{\partial^3 b}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 q}{\partial x \partial y \partial t} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{bq}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & - \nu \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) + \epsilon q + \frac{f}{D^2} q \sqrt{b^2 + q^2} \\ & = \frac{1}{3} h^2 \left(\frac{\partial^3 q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 b}{\partial x \partial y \partial t} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、

η : 静水面からの水位変動

u : X方向流速

v : Y方向流速

w : Z方向流速

h : 静水深

D : 全水深 ($=h+\eta$)

f : 底面摩擦係数

ν : 砕波によって生じる乱れによる運動の混合を表す渦動粘性係数

ϵ : エネルギー吸収帯の吸収係数

2.3 VRシステム

(1) ハードウェア

本リアルタイム表示システムで用いられているワークステーションは、シリコングラフィックス社製Onyx Reality Engine²である。この機種における主な仕様を以下に示す。また図-2にスクリーン配置を示す。

① 演算仕様

CPU処理能力：85MIPS×2個

(対称型並列プロセッサ構成)

CPUクロック数：外部クロック数50MHz

内部クロック数100MHz

システムバスの帯域：1.2GB/sec

1次キャッシュメモリ：命令キャッシュ 16KB

データキャッシュ 16KB

2次キャッシュメモリ：1MB

内部メモリ：128MB

ラスターマネージャー：2枚

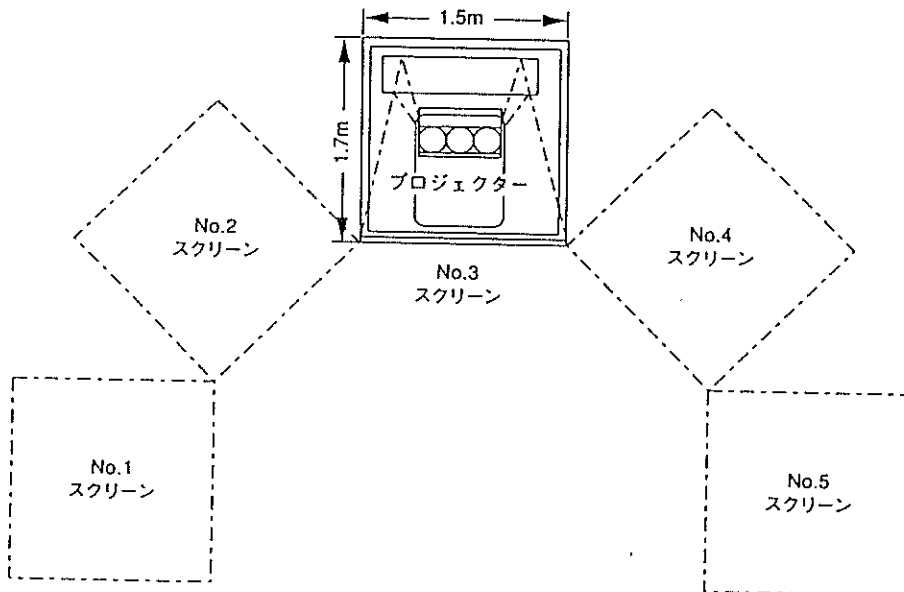


図-2 スクリーン配置

② グラフィックス仕様

リアルタイムテクスチャマッピング機能

テクスチャメモリ：4MB

陰面処理：Z-buffer法

Z-buffer：32bit

発生画素数：1チャンネル時1280×1024ピクセル

5チャンネル時640×480ピクセル

発生色調：フルカラー 1677216色

③ ソフトウェア仕様

オペレーティングシステム：IRIX™ver5.2

(System V系UNIX準拠)

開発環境：X-Window, C

④ スクリーン仕様

リアプロジェクター方式

70インチスクリーン×5台

視野角225°(45°×5)

(2) 画像データベース

波浪画像を映写するにあたり、背景となる町並みや山、港湾施設をも併せて表示することが必要である。そして、このためのデータとしては、平面上のX値、Y値及びそこにおけるZ値を与えることが必要となる。さらに、この画像データにより3次元図形を効率よく作成し、保存する必要があるため、本システムでは、米国Software Systems社のMultiGenを使用した。このソフトのデータフォーマットは画像表示イメージジェネレータの標準フォーマットである「Flight」形式であり、作成された画像データを階層構造に分割し3次元データとして管理することができる。また画像データの中で、その属性として距離に応じて自動的に必要とされる詳細度のモデルを選択する機能であるレベル・オブ・ディーテイルを持たせることができる。また、よりリアルな画像を作成するために3次元平面データに写真を貼るテクスチャマッピング機能を有している。

なお、画像データは、多くなればなるほど、現実的な空間が再現できる一方で、画像更新速度の低下を生じさせるため、目的に応じたデータ作成が必要となる。

(3) リアルタイム画像表示

MultiGenにより作られた町並み地形と津波数値計算結果を統合して、3次元画像を表現する必要がある。そのためのソフトウェアとして本システムではSilicon Graphics社のIRISPerformerを使用している。IRISPerformerはSilicon Graphicsのシステム上で、CPU、キャッシュ、メモリ等を効率的に管理し得る画像ライブラリーであり、特徴的な機能として以下の機能がある。

①データ・カリング機能：画像として表示する必要のな

い、言い換えれば設定された視野角を越える画像データは、3次元画像計算をする必要がない。そのために、その部分のデータについてはあらかじめ計算を行わないことにより画像の更新速度を向上させる機能。

②レベル・オブ・ディーテイル機能：画像データを、その属性として距離に応じて自動的に必要とされる詳細度のモデルを選択する機能であり、作成されたFlightフォーマットに応じたデータ属性の表示を行う。

③システム・ロード・マネージメント機能：リアルタイム画像表示するためには、CPU、キャッシュ、メモリ等を有効に利用しなければならない。そのために、表示する画像の更新速度をあらかじめ計算する機能。

(4) 数値解析結果のグラフィック化

CGにおいて、3次元の形状を表現するには、ワイヤーフレームモデル、サーフェスモデル、ソリッドモデルの3種類の方法がある。ワイヤーフレームモデルでは文字通り3次元空間にある物体をワイヤーフレーム(線)で表現するもので、データ構造が単純なためコンピュータ内部の記憶容量が少なく済み、高速な図形処理が可能である。しかし、線による情報のため物体の内部と外部の区別がつかない。サーフェイスモデルは、ワイヤーフレームにおいて、ワイヤの間に面を張ったものである。つまり3次元空間に、2次元の平面を配置することにより物体を表現する。その平面の頂点がねじれた位置にならないように、その平面は普通三角形で表現することが多く、その平面はポリゴンと呼ばれる。ソリッドモデルではサーフェイスモデルに立体情報をつけ加えたもので、3次元物体をある断面で切った場合、その切り口には3次元物体の内部情報がその切り口の平面に存在するものである。以上のように3次元情報を画像に出力するには3種類のモデルがあり、ワイヤーフレームモデル、サーフェイスモデル、ソリッドモデルの順でデータ量が大きくなっていく。表現者が何を見せたいのかということと計算機の能力によりモデルが選択される。今回の表示においては、その用途からサーフェイスモデルを用いた。

また、地形データは、国土地理院発行の「数値地図250mメッシュ(標高)」と都市計画図から50m間隔に補正したデータにより地形ポリゴンを作り、同じく国土地理院撮影のカラー空中写真をテクスチャマッピングして張り合わせた。なおこの写真は、建設省国土地理院長の承認を得て、同院撮影の空中写真を複製したものである。(承認番号 平7総複、第72号)。



図-3 深浦港の概要

3. 深浦港を事例とした波浪現象のVR化

3.1 ブシネスク方程式による深浦港の波浪現象の数値解析

次の理由により深浦港を選定し、波浪現象のVRシステムの適用性を確認した。なお、深浦港の概観を図-3に示す。

- ・計算容量を少なくするため、小領域の港湾であること。
- ・回折影響の確認のため、沖合いに第一線防波堤を有すること。
- ・屈折影響の確認のため、海底地盤形状の変化に富むこと。
- ・浅水変化による波浪変形の確認のため、水深変化が著しいこと。

この深浦港における波浪数値解析のための条件を以下

に整理する。

- ①計算範囲 図-4
- ②格子間隔 5 m
- ③格子数 図-4
- ④水深変化 図-5 (沖合い水深-19mから埋立護岸直前-2 mなお、現地水深の平滑化を実施した。)
- ⑤境界条件 防波堤は完全反射、その他の陸岸境界は完全透過
- ⑥海底摩擦 なし
- ⑦碎波 あり
- ⑧入射波 規則波 (波高2 m, 周期10秒)
- ⑨計算タイムステップ 0.2秒
- ⑩計算時間 20分

3.2 VRシステムによる画像表示

VRシステムにより出力された画像を図-6~10に示

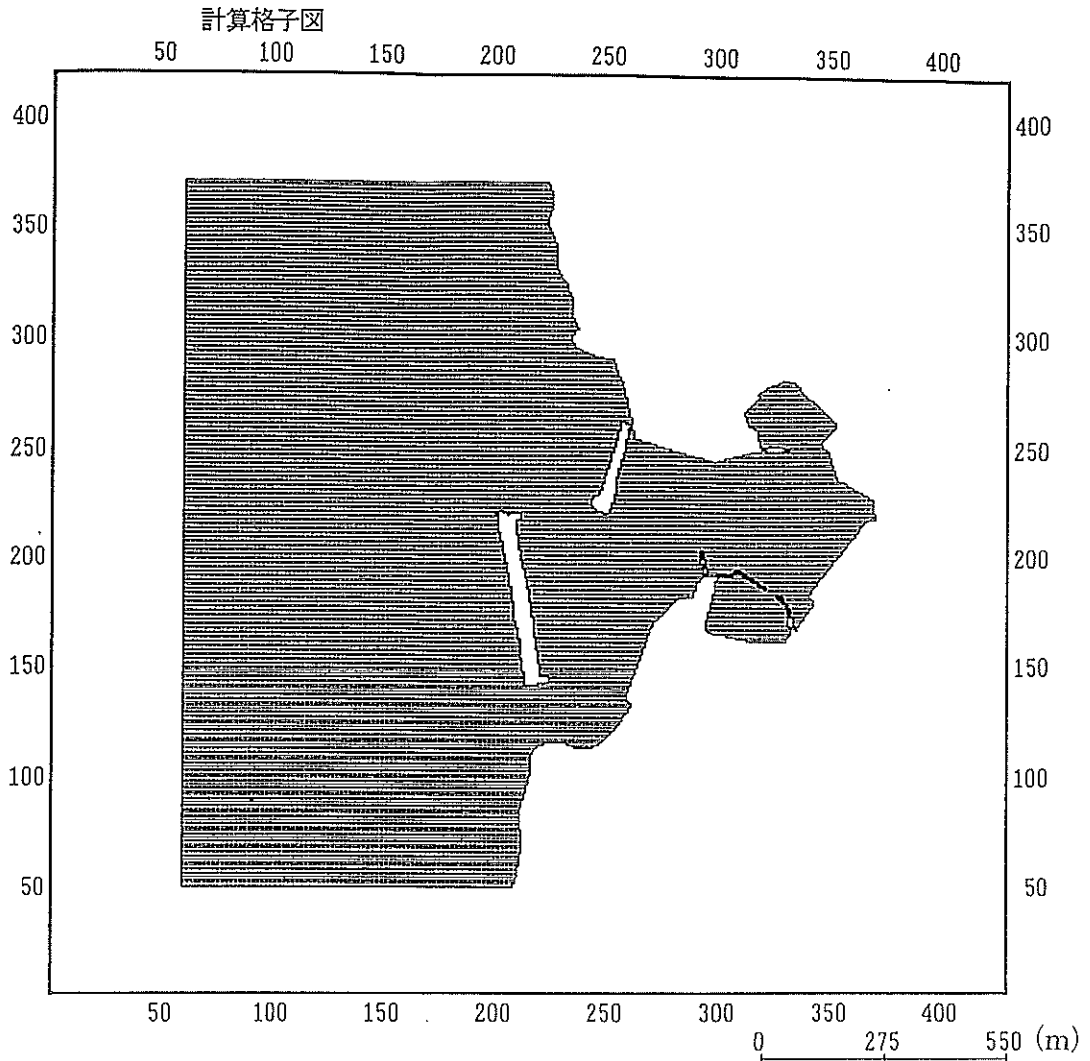


図-4 数値解析のための計算範囲

す。また、図-11にワイヤーフレームの状態での出力を行った画像を示す。

なお、波頂部分が白くなっているのは、波峯線を理解しやすくするための表示を行っているのであり、砕波を直接的に現しているものではない。

これらは静止画像であるが、当初に設定した

- ①時間軸の歪無く、実時間と同一のスケールで表示する。
- ②X、Y、Z軸方向の比率を歪ませることなく、かつ、実スケールで表示する。
- ③画像表示が進行中において、リアルタイムで自由な視点場設定を可能とする。

という条件を満足するとともに、音響効果と併せて5画面のスクリーン上での3次元表示が可能となった。

4. 結論

今回の検討の結果、CGによる波浪現象のVR化において高精度システムの構築の可能性が十分あることが明らかになった。

そして、これにより、港内静穏化のための防波堤計画の評価における本システムの有効性、さらに、計画策定支援システムの方策としての有意性が確認された。

しかしながら、今後の課題として次の点が整理される。

- ①波高、流速、波向き等の指標の定量的な表示
- ②船舶、ブイ等の浮体の動揺状態の表示
- ③大領域に対応できるVRシステムの構築

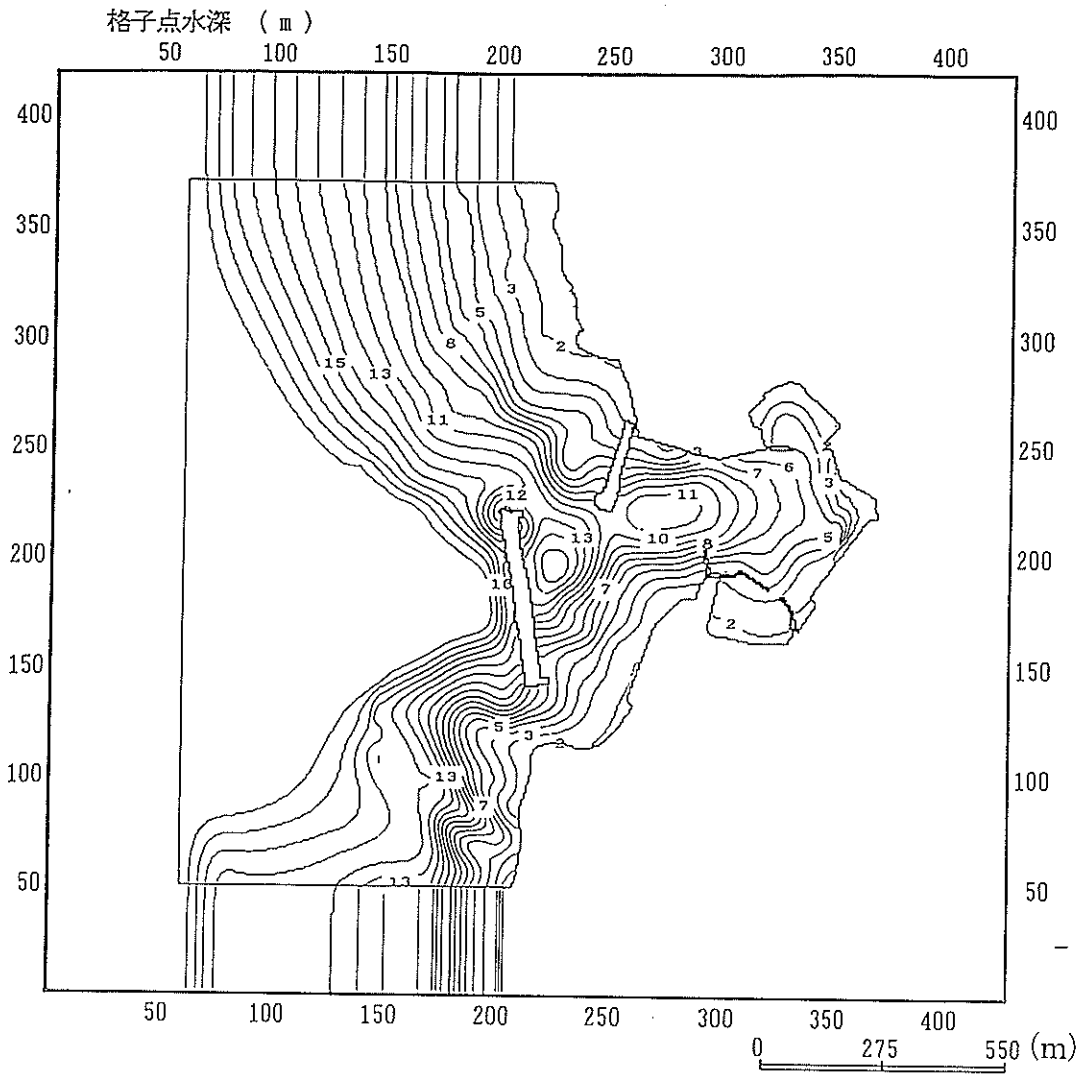


図-5 数値解析のための設定水深

5. あとがき

高次の波動方程式により数値解析された波浪現象を、操船シミュレータとして開発が進められてきたシステムによるVR化を行い、良好な結果が得られた。

今後は、波浪現象のVR化における課題を解決し、より高質なVRシステムの確立を図るとともに、現場での活用方策、さらに、他の数値解析結果の表示の可能性についても検討を推進する必要がある。

(1995年9月27日受付)

参考文献

- 1) 広瀬通孝：「バーチャルリアリティ」, 産業図書, 1993
- 2) 黒崎政男：「実在とは何か」, bit別冊, 1994
- 3) 原島博：「ヒューマンメディアへの道」, bit別冊, 1994
- 4) 高山知司：「波の回折と港内波高分布に関する研究」, 港湾技研資料, No.367, 1981, 140P
- 5) 窪康浩・小竹康夫・磯部雅彦・渡邊晃：「非定常緩勾配不規則波方程式について」, 海岸工学論文集, Vol.38, 1991, PP.46-50
- 6) 佐藤慎司・Michael Kabilng：「Boussinesq方程式を

- 用いた波浪・海浜流・海浜変形の数值計算」, 海岸工学論文集, Vol.40, 1993, pp.386-390
- 7) 平石哲也・上原功・鈴木康正: 「アネシスク方程式を用いた波浪変形計算法の適用性」, 港湾技研資料,

No.814, 1995

- 8) 酒井浩二・高橋宏直・平石哲也: 「コンピュータグラフィックスによる津波現象のバーチャルリアリティシステム」, 港湾技研資料, No.805, 1995

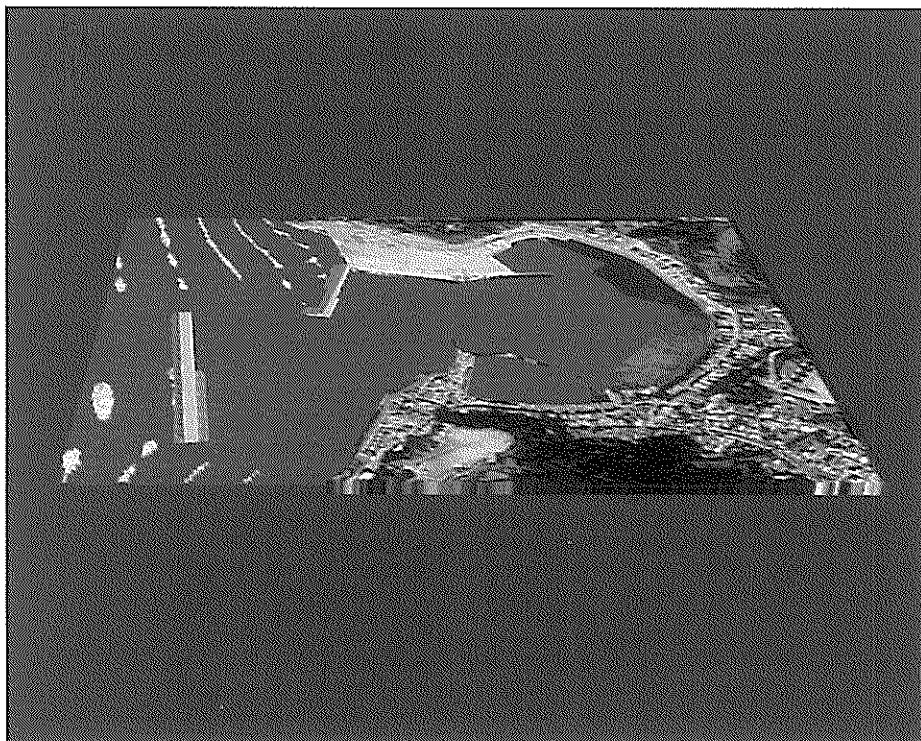


図-6 画像出力例 その1

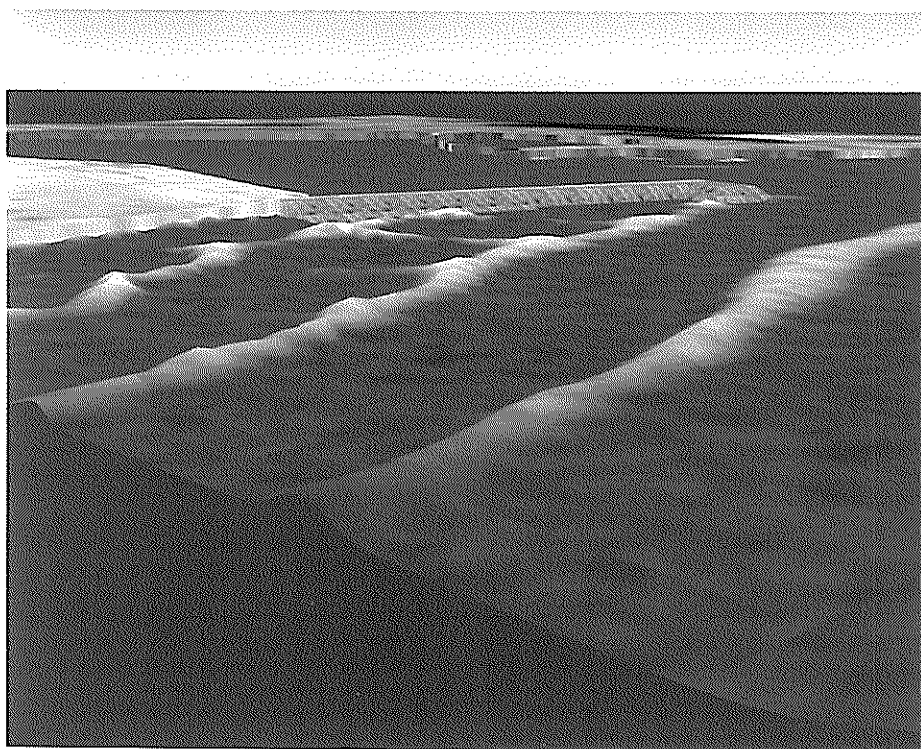


図-7 画像出力例 その2

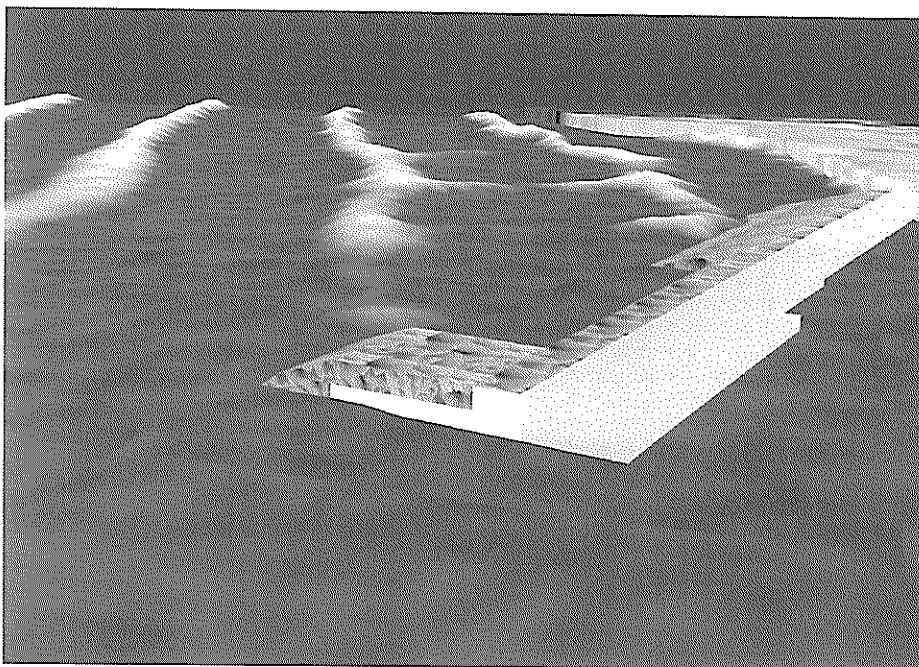


図-8 画像出力例 その3

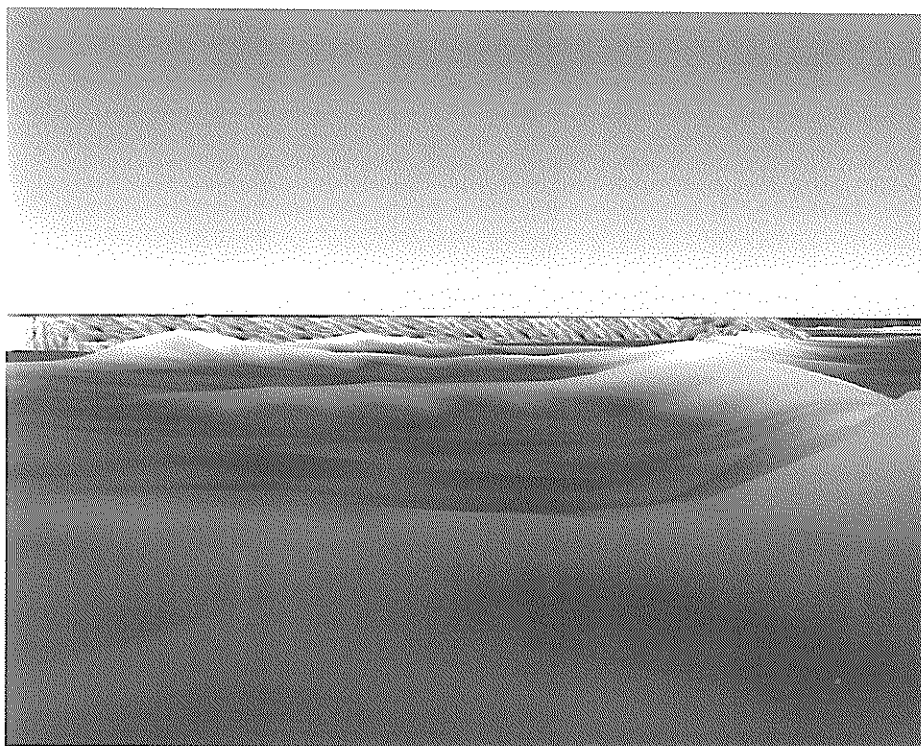


図-9 画像出力例 その4

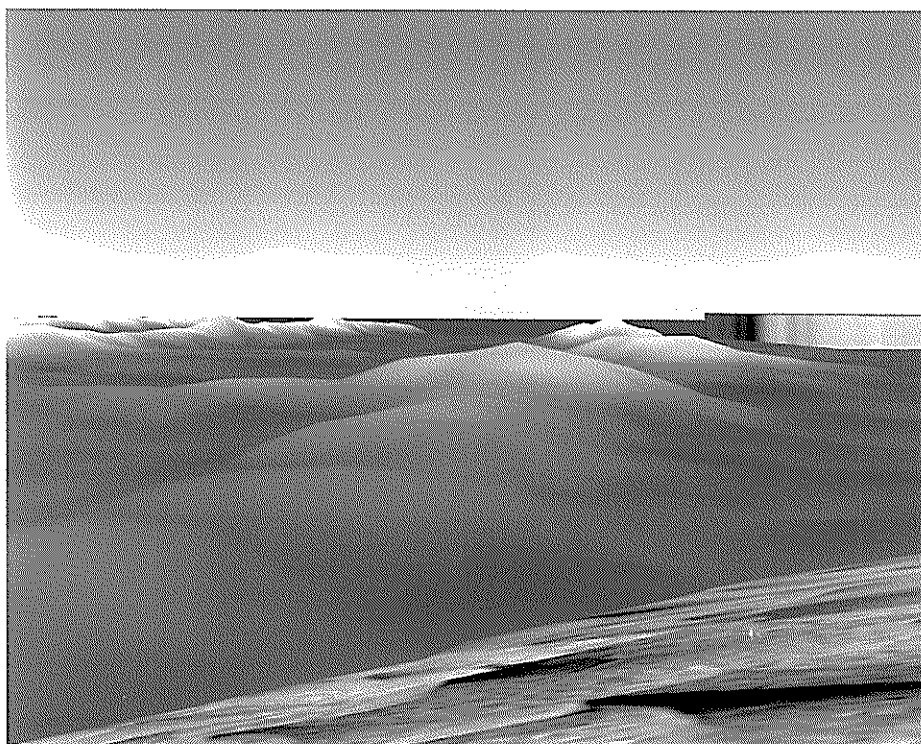


図-10 画像出力例 その5

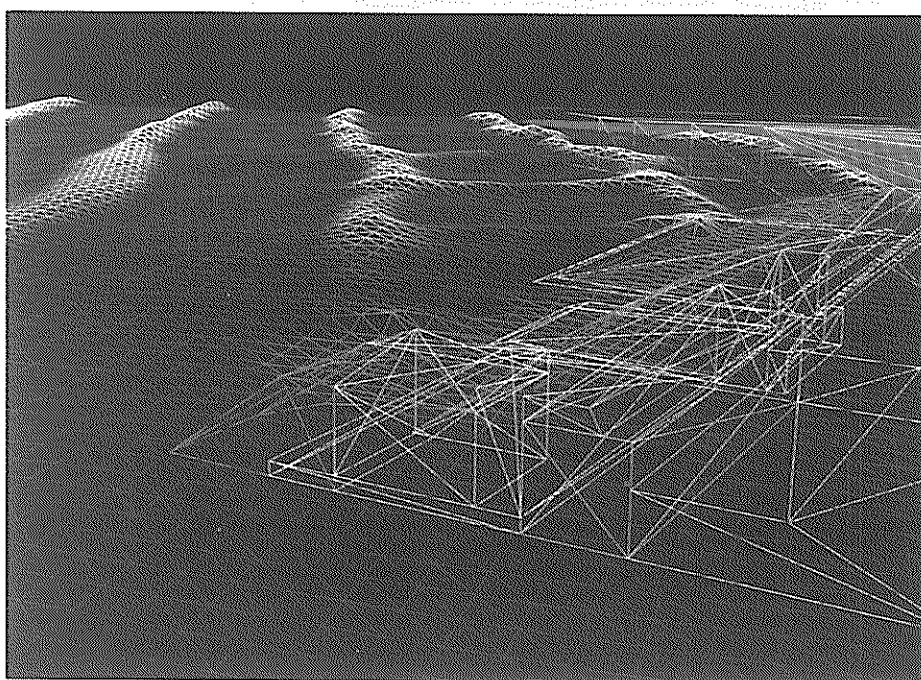


図-11 画像出力例 (ワイヤーフレーム表示)

港湾技研資料 No. 815

1995. 12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 昭和工業写真印刷所

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1995) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。