

1. はじめに

船舶が横波や横風中のみだけではなく縦波、それも追波中で転覆することが知られている。この現象を理論的および実験的に解明し、事故防止に役立てることはたいへん有意義なことである。しかし、運動が大きく、諸外乱の影響も大きく実験でもなかなか再現が難しい。また、実験結果にしろ、理論計算結果にしろ単なるタイムヒストリーではどういう現象なのか捕らえ難く、以前からグラフ表示の工夫が種々なされている（図1、2）。そこで、理論結果をもとに現象をコンピュータグラフィックスを用いて再現し、実験結果との比較をしたりや、現象の説明を行なうことを目的としたコンピュータアニメーションシステムを作成した。

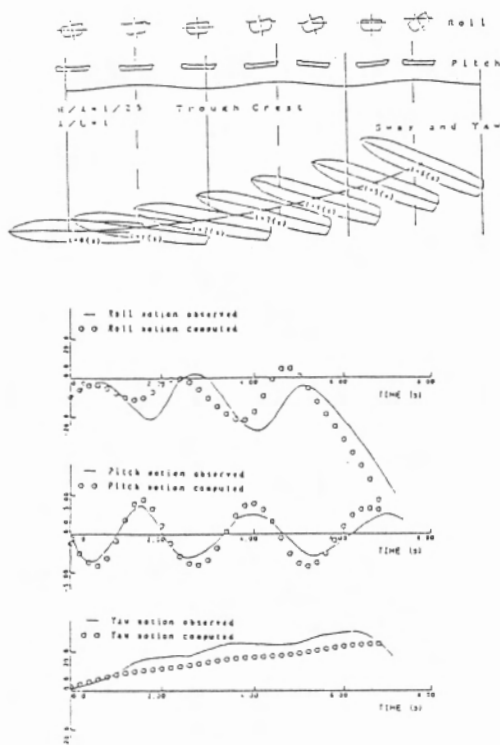


図1 転覆現象のグラフ表示例¹⁾

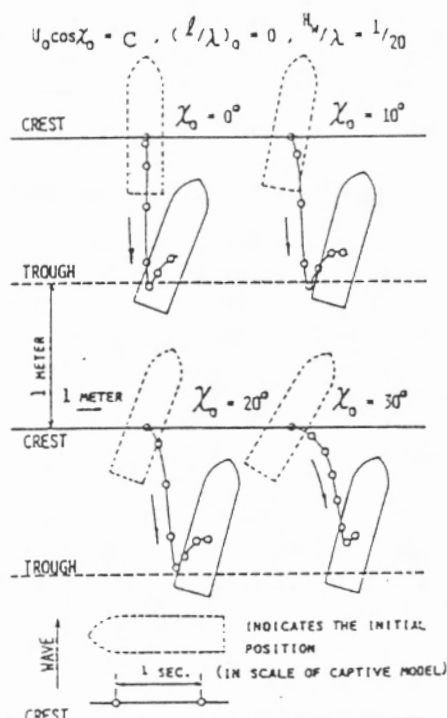


図2 転覆現象のグラフ表示例(2)³⁾

2. 船の転覆現象の理論計算と実験

2. 1 追波中の復原力変動と転覆のモード⁴⁾

縦波中ではその波面に浮かんでいる船の水線面形状が静水中のそれに比べると変化し、したがって横傾斜に対する水線面二次モーメントと浮心も静水中のものに比べて変化すること、そして、水の粒子の円運動によって船体没水部表面に働く水圧の圧力勾配が深さ方向に変化することが復原力変動の主原因と考えられる。特に、船の長さとはほとんど等しい波長の波の頂に船体中央があるとき、フレアについている船体前後端部では水線面二次モーメントが減少し、これに水の粒子の円運動による影響が加わり、全体として復原力の損失が著しくなる。この現象を Pure loss of intact stability と呼ぶ。

また、このような原因による復原力の変動と縦波中での船の縦揺が連成すると、ある条件の下で大きな横揺を誘発することがある。この種の横揺は一種の共振であり、Parametric oscillation と呼ばれている。

さらに、波長が船の長さに比べて長く波高が大きい追波中を、波速と同程度の速度で航行するとき、船が波の下り斜面に捉えられ、いわゆる波乗り状態となることがある。この状態で船が波の進行方向に対して偏角をもつと、保針のための操舵にもかかわらず、波による回頭モーメントの作用により急激に回頭および船体傾斜が発達し、転覆に至る場合もある。この現象はBroaching-toと呼ばれ古来から船乗りに恐れられてきた。

2. 2 理論計算法の概略

これまでの船の波浪中運動計算は一般に運動モードを限定し（例えば、ヒービングとピッチング）、微小波高を仮定したストリップ理論が主体であった。しかし、波との出合周期の長い追波中で、しかも転覆のように、大波高で運動振幅も大きくなるともはや線形理論は成り立たず、かつ、運動も正弦的でなくなるので6自由度すべてを含んだ連立微分方程式を時々刻々解く必要がある。理論の詳細¹⁾²⁾はここでは省略するが、その概略は次のような手法である。まず、船体を縦方向にいくつかの断面に分割し、各断面での波力をフルードクリロフの仮説に基づき求め、さらに、それを船長方向に積分することによって、その瞬間に波から受ける流体力（外力）を求める。この2重積分により外力項が決まると6自由度の連立微分方程式に代入してそれを数値的に解くことによって微小時間後の船の速度と角速度が決まる。それを積分して姿勢、さらに積分して位置が決まる。再び、2重積分によりその位置と姿勢での波面の形状より船体に働く外力を求め、微分方程式に代入する。そして、これを繰り返す。このように時々刻々、水面下の船体形状が変わるのでタイムステップ毎の計算量は相当多く、現在、実船で約1分間の現象を0.1秒刻みで計算するのにワークステーション(4.1MIPS)で約3分、

すなわち3倍の時間がかかっている。図1の○印はこの手法により求めたものである。

2.3 模型船による転覆実験

計算結果の確認のため水槽実験を並行して行なった。実験に用いたのは表1と図3に示す4990総トンのコンテナ船の46分の1模型船である。

転覆実験では波との関係で相当に動きまわるし、転覆した後模型船内の計測器が濡れないように完全に水密構造になっているので電源や計測・制御用のケーブルを引っ張ることができない。従来からわれわれの研究室ではZ試験などを行なう目的の無線操縦装置があるが、ホビー用の送受信機を用いた6チャンネルの一方通信（陸上から模型船）であるし、しかもリレーを組み合わせもので大型であり、特定のロジックでしか動かない。今回の実験は2.5m模型船であること、しかもハッチカバーで完全に密封された状態で転覆にも耐えること、任意の操舵、プロペラ回転数の指令ができること、などからこの装置が使えない。そこで、模型船内にマイコンを搭載して電車上のパソコンからワイヤレスモデムを介して無線で操縦する装置を開発した⁵⁾。さらに送受信機をマイコンやパソコンに置き換えることによって、操縦指令だけの一方通信ではなく、同時に計測したデータを陸上に転送する逆通信も可能となり、模型船内にデータレコーダを搭載したり、実験後にA/D変換をする必要がなくなった。また、実験中各データがモニタできるのでハッチ内温度やバッテリー電圧も常時チェックできるし、実験終了後は直ちにその結果のタイムヒストリが表示され、パソコン上のフロッピーに格納される。

さらに、3次元空間内の船の位置を計測するために2台のビデオカメラを用いた非接触計測装置も開発し、このふたつの装置を組合わせて6自由度非接触計測制御システム⁶⁾として使用している。図4に、その実験システムの概略を示す。

表1 供試模型船の主要寸法

	Ship	Model
L (m)	115.	2.5
B (m)	19.	.413
d (m)	6.4	.139
V (m ³)	9859.	.101
S (m ²)	2845.	1.345
C _g	.705	.705
C _b	.97	.97
B/d	2.97	2.97
L/B	6.05	6.05
		1/46

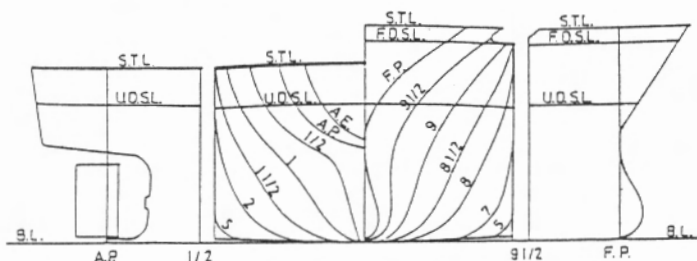


図3 供試模型船の船図

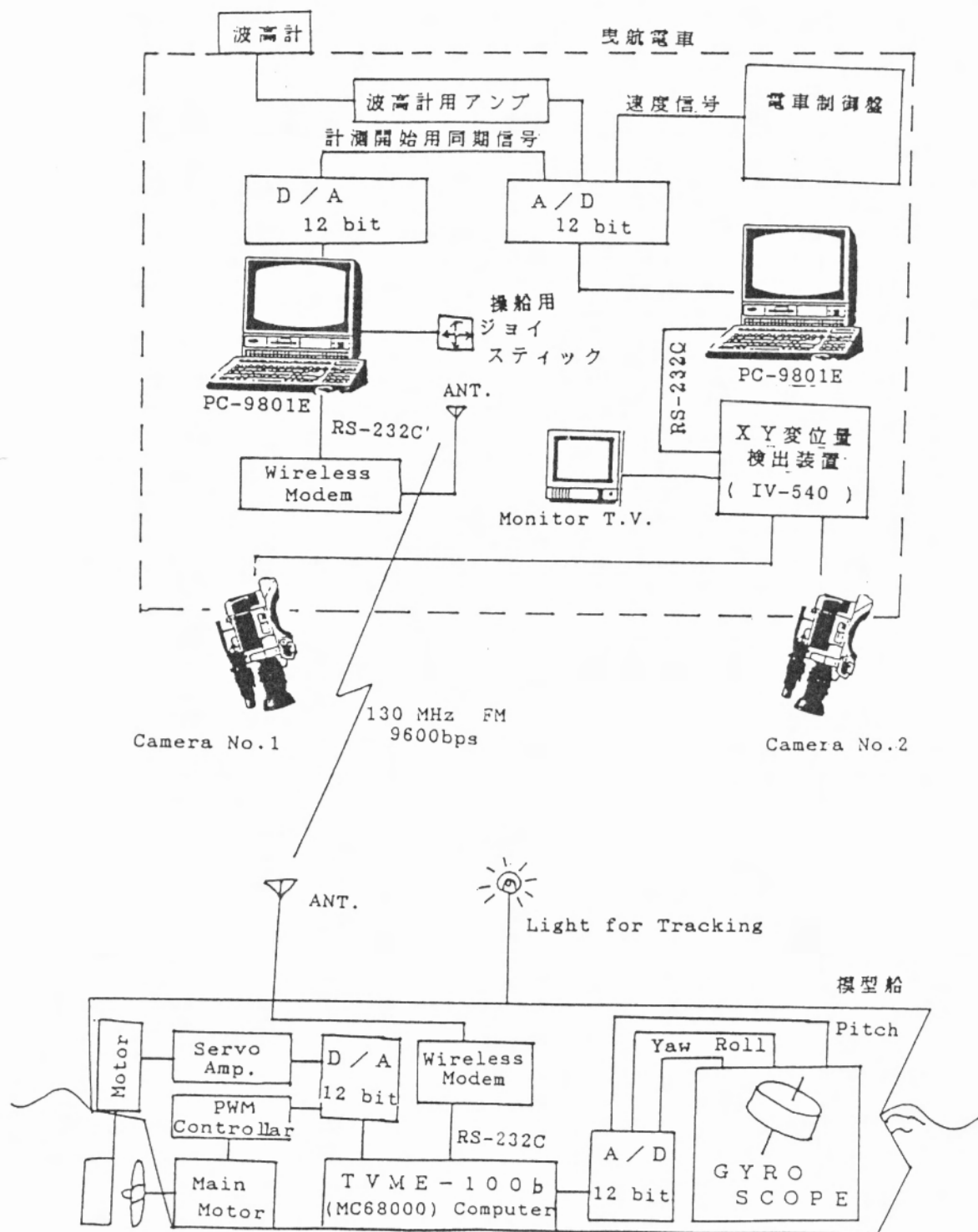


図 4 船体 6 自由度非接触制御計測システムの構成⁶⁾

しかし、転覆実験は手間と人手がかかる割には設定条件がなかなか微妙で、ねらった結果が得られず、1回のデータがたった15秒程度の実験なのに1週間で数回しかまとめた結果が得られないことが多い。

そこで、ある程度実験により理論計算の信憑性が確認できたら、今度は実験状態の大まかな絞り込み、設定条件のおおよその検討を逆に理論計算で行なう、そして実験で同様の結果が得られたら、理論計算の見直し、改良を行なう、こういった理論と実験のタイアップをいまわれわれは考えている。そこでCGアニメーションが役立つ。

3. 船の転覆現象のコンピュータグラフィックス

3. 1 パイロットシステムの開発

まず最初に、当時ミニコンで理論計算を行なっていたので、モノクロのグラフィックターミナルを用いたパイロットシステムの開発を行なった。しかし、グラフィックターミナルにはエスケープシーケンスとしてのグラフィック命令しかなく、結局、カルコンバチのPLOT命令と画面消去の命令だけをサブルーチンの形で作り、あとは座標変換を含めてすべての作画ルーチンを自作して、300ベクトル程度の簡単なワイヤフレームの表示を行なうことにした。「線を引きの見える」速度で一枚の画面を書くのに5秒程度かかっていた。しかしその分、ビデオカメラを使ってマニュアルのコマ撮りができた。図5にそのうちの2シーンを示す。船体の表現も非常に簡略だが、学術用には十分である。また、細かい話だがヒーピング、ピッチングに比べローリングはこの視点からはほとんど識別不能だったので、船首マストを立てることによって見やすくしてあり、最低限のベクトル数で船らしく、しかもむだのない表現になっている。この辺もサイエンティフィック・ビジュアルイゼーションを行なう際に考えるべき基本的な点ではなかろうか。

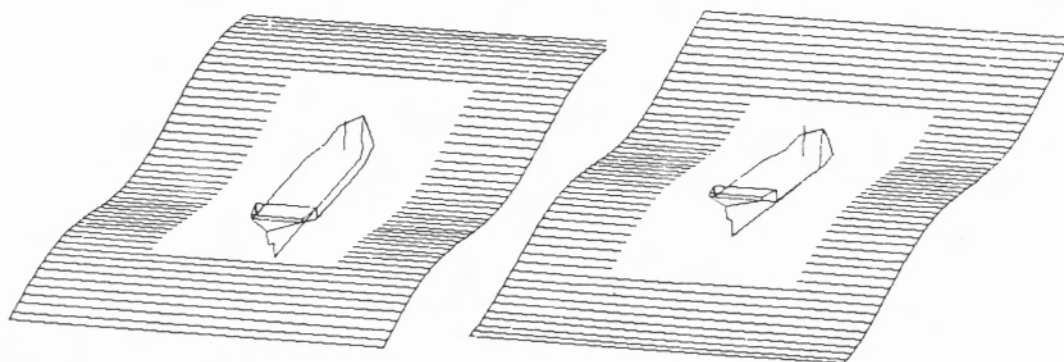


図5 転覆アニメーション（パイロットシステム）

ただし、隠線処理ができないので船体まわりの波は表示しておらず、おおよその波面との位置関係はわかるものの、船体表面上での波形などはわからない。この点は、後にサーフェイスモデルを使うことによって解決したが、かえって学術的な面が薄らいだような気がしないでもなく、サイエンティフィック・ビジュアルイゼーションの難しさを感じる。

とにかく、今まで図1に示すようなグラフから7つの変数を目で追って想像していた動きが、このような簡易的なワイヤフレームのアニメーションでさえ手にとるようにわかるのだからすばらしい。その結果、波との関係がどうも不自然なのでプログラムを見直してみると案の定間違っている箇所が見つかることもある。つまり、アニメーションは完成したプログラムの出力やプレゼンテーションのみならず、むしろ、デバッグ時に役に立つ。また、実験のビデオとの比較から理論計算の改良点に思い当たったりするといった使い方があるのではなかろうか。

3. 2 本格的な転覆現象再現アニメーションの開発

転覆アニメーションのパイロットシステムである程度の有効性が確認できたので、次にわれわれは3年度計画で理論計算からアニメーション出力までを一貫して行なうシステムの開発にとりかかった。

パイロットシステムでの経験をもとに使用する計算機は計算速度はもちろん、図形処理能力と速度に優れたものを選定する必要がある。また、ワイヤフレームモデルでは表現能力に限界があり、サーフェイスモデル、それもカラーが望ましい。また、通常はグラフィックスのための座標変換や隠面処理などはソフトウェアで行なわれるが、グラフィックス能力を高めるためグラフィックスエンジンと呼ばれる専用のハードウェアを標準で搭載したEWSもあり、特にグラフィックス能力の優れたEWSはグラフィックスワークステーション(GWS)とも呼ばれている。GWSが導入されると早速、理論計算プログラムの移植にかかった。ただし今回、微分方程式の数値解法、流体力の計算方法ともパイロットシステムの方法とは変えたので、ほとんど書き換えることになった。また、使用言語が理論計算プログラムはFORTRAN、アニメーションプログラムはC言語であり、ふたり⁸⁾が同時にコーディングしたので、それぞれ独立のプログラムにした。グラフ出力などの再利用のため計算結果は一度ファイルに出力される。しかし今後、計算速度もますます速くなるだろうからUNIXのパイプやフィルタを活用し、計算設定条件、計算目的、その結果を得るための入力ストリーム(コマンド列)などのみをファイル出力し、むだなファイル出力はやめようと思っている。また理論計算プログラムとアニメーションプログラムが独立しているのでアニメーションプログラムのみを前述の転覆実験で計測された結果に適用して、実験結果を

さまざまな視点から見ることもできる。

アニメーションのプログラムは、基本的には物体の移動・回転・透視あるいは平行投影変換の繰り返しにより実現できる。ただし、座標変換を効率よく計算するためにマトリックススタックなる概念を用いていること、建築や都市景観のアニメーションとは逆に物体（今の場合船と波）がそれぞれ独立に任意の移動と回転をし船体との相対的視点は固定していること、波の起伏と水面下の船体形状もわかり易くするために水面は半透明にするとともに光源を与えて陰影をつけていること、などが特徴である。ちょうど、船と並進するヘリコプターから見ているような感覚である。図6は、図7に示すような物体の回転をマトリックススタックを用いて行なう手順を示している。ただし、図6で vdc とは仮想装置座標系、 dc とは装置座標系である。また、`push_matrix3d`、`concat_transformation3d`、`pop_matrix3d`はそれぞれマトリックススタックの最上部にマトリックスを格納したり、最上部マトリックスの前あるいは後に別のマトリックスを掛けたり、最上部マトリックスを取り出したりする関数である。さらに $T1$ 、 $X\theta$ 、 $Y\theta$ 、 $Z\theta$ は平行移動および、それぞれ X 、 Y 、 Z 軸回りの θ 回転マトリックスを表わす。

船体表面の3次元座標はオフセットで与えられるが、船首・船尾の細かい形状や甲板上の形状については別途図面から読みとった（図8および表紙参照）。波をどのように表現するかについてはいろいろな考え方があるが、今回は2次元規則波であること、3分以内の現象であること、船体の存在による波の変形は考えていないことから波板のような変形しない物体を一定の波速で移動することにした（図9）。この両者をマトリックススタックを利用して表示するだけで隠面処理、透視変換、光源処理はハードウェアがサポートしているので船側波形などは計算する必要はない（図10およびカラーページ参照）。また、位置の検討をつけるため静水面上に20m毎のグリッドがひいてある。水面下の船体形状（これが船体にかかる流体力を支配する）も半透明処理によってうまく表現できている。

さらに船体を横からみることによって、船首や船尾（の舵やプロペラ）が水面から空中へでるようすも一目でわかる。図1からは窺うすべもなかった成果である。また、波に持ち上げられた後ピッチングの影響で甲板に波がかかることがある。ただし、この場合ひとつだけハードウェアによる隠面処理に問題がある。つまり、風呂で洗面器を上向きのまま沈めていったとき洗面器の上縁まで沈めないかぎり水は入ってこない。しかし、ハードウェアによる隠面処理では洗面器の中に水が外と同じ水面まで染み込むのである。同じことがブルワークで起きる。これを防ぐためにブルワークには透明のビニールシートが張ってある（これも透明処理をサポートしているハードウェアのおかげである）。細かいことであるが、人間に違和感を感じさせないための方策である。

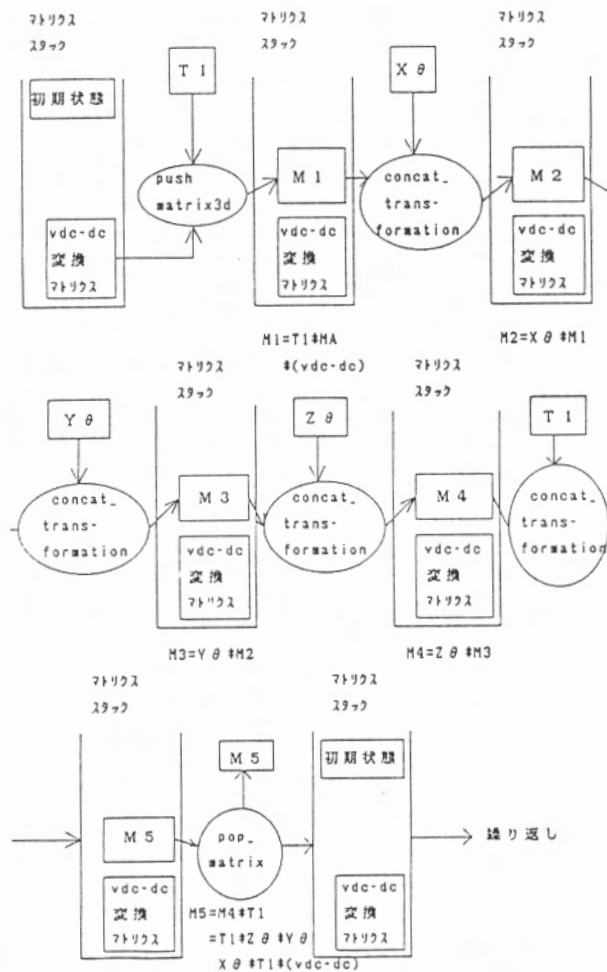


図6 マトリックスタックによる物体の変換マトリックスの計算

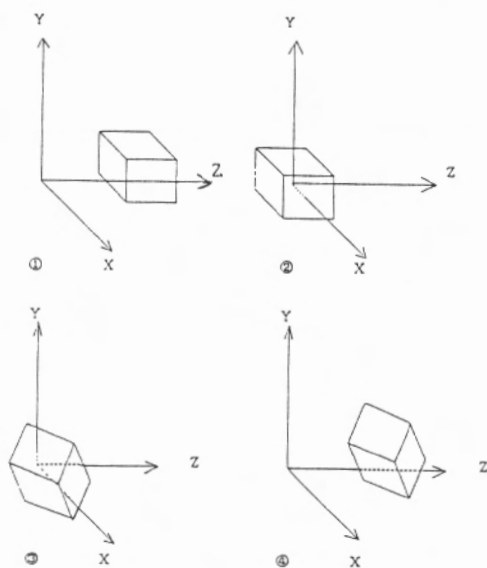


図7 物体の回転操作の手順

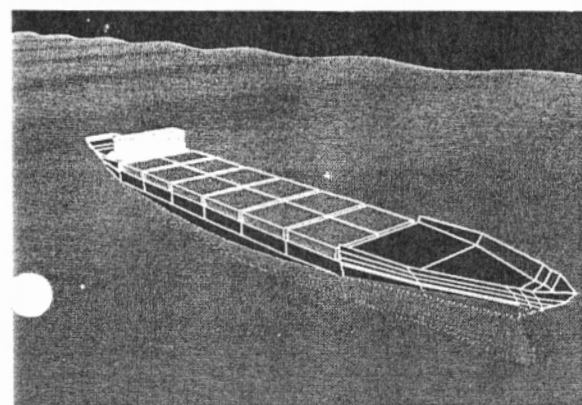
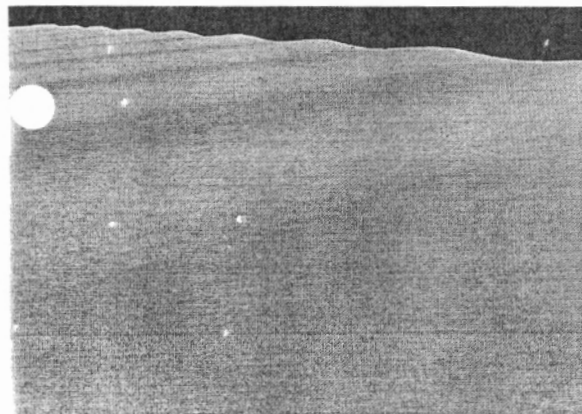
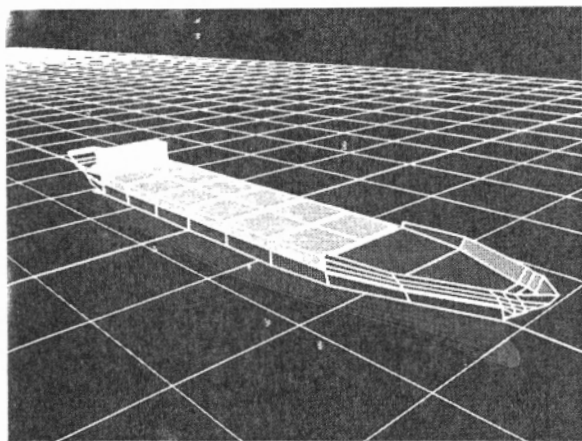


図8 転覆計算に用いた
コンテナ船

図9 2次元規則波

図10 ハードウェアによる
隠面処理と半透明処理

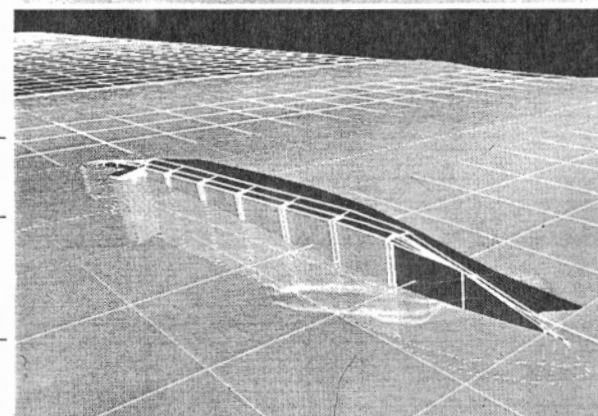
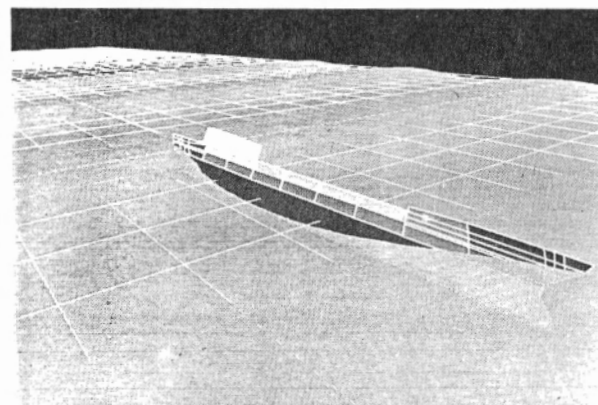
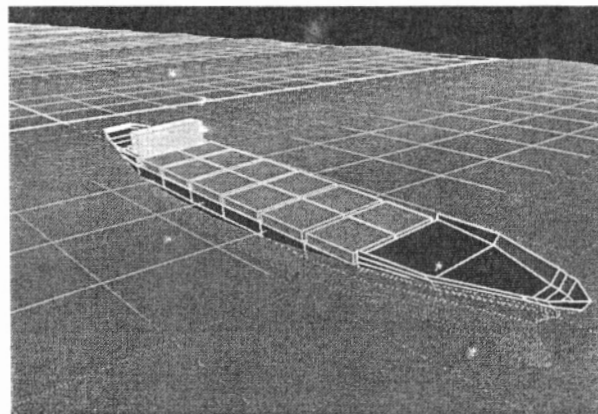
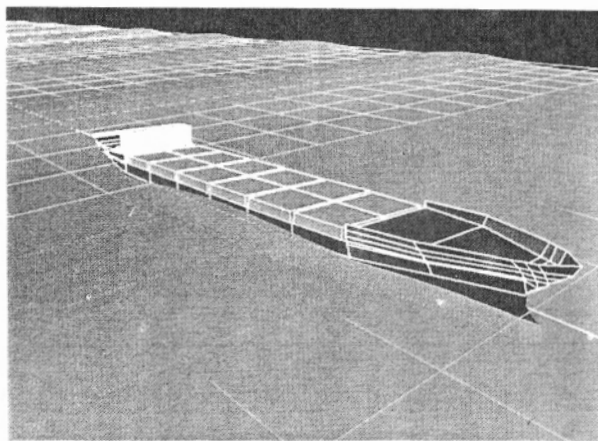


図12 23秒後

図13 27秒後

図14 63秒後

図15 72秒後

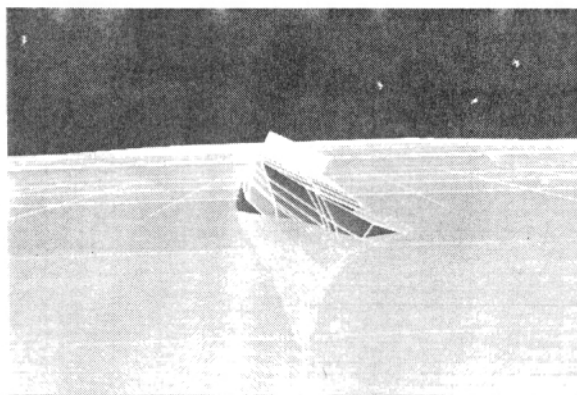


図 1 6 6 3 秒後

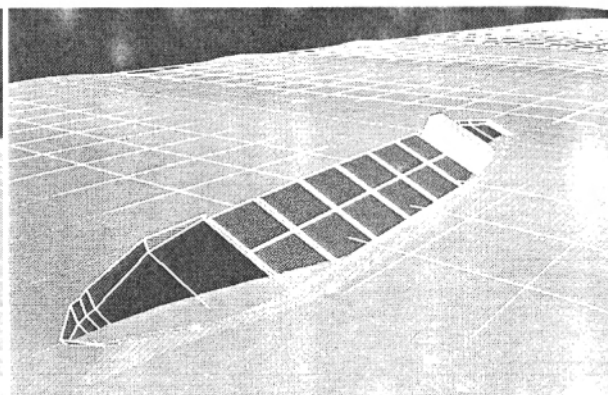


図 1 7 6 3 秒後

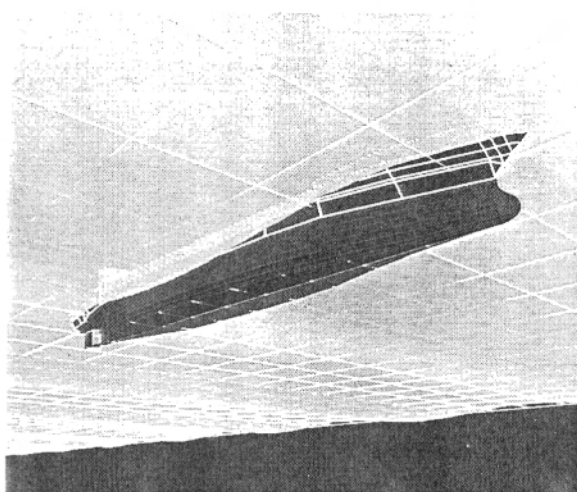


図 1 8 水中からみた 1 シーン

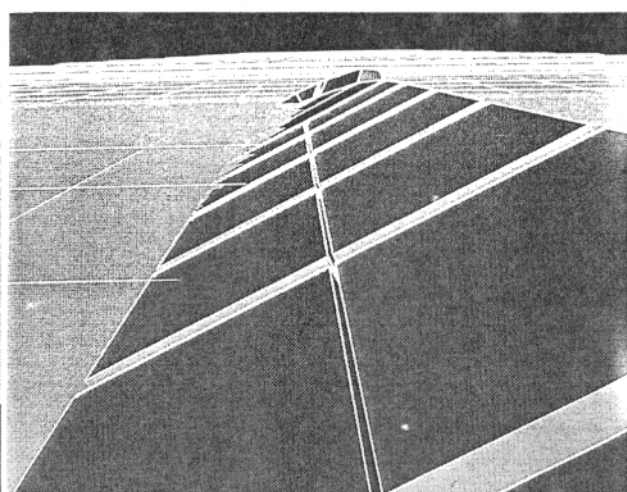


図 1 9 ブリッジからみた 1 シーン

3. 3 決め手はアニメーションと視点の変更

このアニメーションの最大の利点はその動きであり、実際のグラフィック画面を見るのが一番鮮明である。しかし、リアルタイムで再現できないこと、どこでも再現できないことから、一般にはビデオテープにコマ撮りする方法が取られる。今回用いたのは図11に示すシステムであり、一画面の描画が終わるとGWSからパソコンを経由してビデオデッキに必要なフレーム数の録画を指令し、録画が終了すると再びGWSに計算を続行するようになっている。しかし、この方法は描画に録画時間をはるかに超える時間がかかる場合は問題ないが、本ケースのように録画時間とほぼ同じ時間で描画が終わる場合には録画しない場合の約2倍の時間がかかる。そこで、描画と録画を並行して行ない、描画が終了しても画面の更新はしないで録画終了の指令を待ち、終了後に画面を更新するとともにその画面の録画指令を出すように改良する予定である。ここではビデオテープを見せられないのが残念であるが、そのうちの数コマを図12から図15に示す。もう一つの利点は自由に視点を変更できることである。図14と同じ場面を違う視点から見たのが図16と図17（カラーページも参照のこと）であり、場面によりどの視点から見るのが効果的かを調べるのに役立つ。さらに、図18は水面下からみた1シーンであり、流体力計算のチェックに使いそうである。最後に図19はブリッジから見た転覆前のようすである。転覆前に乗組員は危険を感じているのか、それともほとんどいつもと変わらないのか。なぜ、転覆するような状況だっ

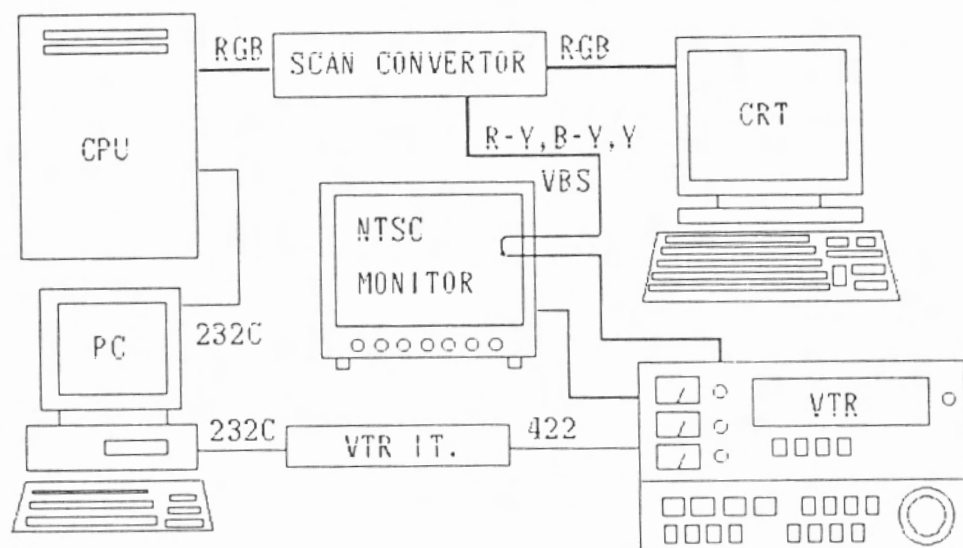


図11 コマ撮りシステムの概要

たのに減速するなり、針路を変更するなどといった措置を取らなかったのか、という疑問がよくある。転覆事故では生存者がいないことが多いので聞きようがない。こういう面でもアニメーションが役立つものと思われる。

4. お わ り に

サザランド博士 (I. E. Sutherland) が1963年に対話型の2次元図形表示システムSketchpad を発表して世間を驚かせてから25年がたった。当時は何に使うのだろうかと思われていたコンピュータグラフィックスもその後のハードとソフトの格段の進歩によって、当時の予想をはるかに超えた幅広い分野で活用されている。自動車や建築では、クレイモデルや景観模型を作らずに外観設計が行なわれるようになり、造船所でも現図がなくなった。ワープロで文書を書くようにモデルや図面を計算機で表現することは修正や合成などが容易にできるので便利である。コンピュータアニメーションはさらに一步進んで、モデルだけでなく、「動き」を計算機上で表現しようとするものである。アニメーションのプログラムそのものは物体が変形しない場合には景観シミュレーションなどとプログラムのほぼ同じでそんなに難しいものではない。問題は何をどう表現するかである。

現在の計算機的能力は、研究者がコンピュータグラフィックスに対して必要以上の労力を払わなくても道具として使える所まで来ている。しかし、その道具を組み合わせて必要な仕事ができるようにするためにはある程度道具を知らないといけない。ここに、コンピュータグラフィックスに限らず、新しい道具を使い続けるための苦労があり、努力がいる。われわれの場合、パイロットシステムの経験が役に立った。道具がなくて自分で道具から作った人ほど、与えられた道具のありがたさ、また、不具合さに気付くものである。

船舶流体力学や運動力学、構造力学にはこうしたアニメーションが効果的な現象が多い。近い将来にはコンピュータグラフィックスやアニメーションは当たり前になると思う。ぜひ、多くの人が挑戦されんことを期待する。

最後に、本研究は文部省科学研究費(総合研究(A)、課題番号62302036)の補助金により行なわれたこと、また、コマ撮りにあたっては、タクビデオ機の松永 直氏の協力を得たことを付記する。

参考文献

- 1) Hamamoto, M. and T. Shirai : Study on Ship Motions and Capsizing in Following Seas(1st Report) - Equations of Motion for Numerical Simulation -, 日本造船学会論文集、第163号、1988年6月。

- 2) Hamamoto, M. and T. Shirai : Study on Ship Motions and Capsizing in Following Seas (2st Report) - Simulation of Capsizing -, 日本造船学会論文集、第165号、1989年6月.
- 3) 元良誠三、藤野正隆 他：ブローチング減少発生機構に関する考察、日本造船学会論文集、第150号、1981年12月.
- 4) 浜本剛実、藤野正隆：船舶の縦波中の転覆、日本造船学会運動性能研究委員会・第3回シンポジウム、1986年10月.
- 5) 長谷川和彦：マイクロコンピュータを用いた模型船無線操縦システム、第5回低速・浅水域数学モデル検討専門委員会資料 (MSS5-11)、1986年11月.
- 6) 長谷川和彦：波浪中の船体6自由度非接触計測システム、第1回KFRシンポジウム「水槽における画像処理と非接触計測技術」、関西船舶流体力学研究会、1988年6月、または関西造船協会誌、第210号、1988年9月.
- 7) 近藤安徳、野元琢磨：追波中の船体運動と転覆に関する3次元コンピュータグラフィックス、昭和63年度大阪大学工学部造船学科卒業論文、1989年3月.