

船の転覆現象を再現する コンピュータ・アニメーション

船が追波の中で転覆する現象をコンピュータの中で計算し、アニメーションとして再現することにより、現象の解明に予想外の効果を上げている例を紹介する。

長谷川 和彦*

はじめに

今年の夏、アメリカとデンマークで開かれた2つの国際学会に出席する機会を得た。2つの学会の間がちょうど2週間ほど空いていたので、ついでにカナダと北欧を回り関係する研究所や大学を訪問することにした。訪問先では一通り施設の見学や互いの興味について話し合った後、私たちの行っている研究の紹介をすることになった。従来なら論文の別刷にせいぜい発表用のOHPフィルムで間に合うのだが、今回私はビデオテープも持参していた。ビデオテープというと、通常は実験の様子を収めたものか宣伝色の濃いものと相場が決まっているが、今回私が用意したものは純粋に学術的な2種類のコンピュータ・アニメーションである。その1つがここで紹介する追波中の船の転覆現象を再現したものであり、そのダイナミックな動きは自画自賛で恐縮だがなかなか好評であった。

そして、ただ見た目がよい、人目をひきやすいという理由だけでなく、むしろコンピュータ・グラフィックス(CG)やアニメーションが重要な意味をもつのは、科学者自身が自分の計算や実験結果を見るときである。これまではせいぜいプロッタやグラフィック・ターミナルにグラフとして表示するのが精一杯であり、それでもかなりの効果はあった。しかし、CGやアニメーションとなるとまだ、何のために使うのか、どう表現すればよいのか、そしてどうしたら使えるのか、科学者自身の手には負えなかった。しかし現在の計算機、特にワークステーションがそれを可能にしてくれたのである。

今後、計算機的能力はますます上がるであろうから、次はリアルタイムで計算しながら結果を表示し、その画面を見ながら状態を変えて再計算する、あるいはズームアップやスローモーションで見る、いつの間にかそれが計算された結果であること

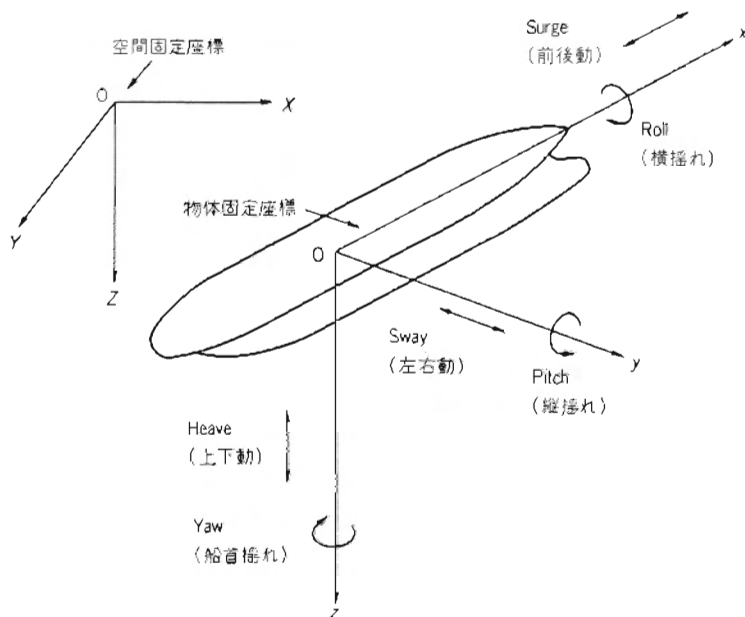
を忘れビデオカメラで現象を直接見ているような錯覚さえ起こさせる、そんなサイエンティフィック・ビジュアライゼーションをしてみたいと思っている。

そういうわけで、あまり学術的な面にはふれないで、むしろ苦労談や学術論文では書けないような話も交えながら、サイエンティフィック・ビジュアライゼーションの新しい表現手法として将来性が期待されるCGアニメーションの一活用例を紹介する。

サイエンティフィック・ビジュアライゼーション の元祖? シミュレータ

本題に入る前に、私とCGの付き合いについて簡単にふれる。私がCGを本格的に研究の対象として認識し始めたきっかけは、操船シミュレータである。操船シミュレータというのはあまりなじみがないかもしれないが、フライト・シミュレータの船舶版と思えばよい。ただ、フライト・シミュレータとの違いは、船の操縦はコクピット(縦席)ではなくブリッジ(船橋)とよばれる操縦室で行われる点である。ブリッジの視界は真後ろを除いてほぼ全周ある。航海士はブリッジ内で、窓際に行って双眼鏡で確認する、レーダーを見る、チャートにプロットするなど、頻繁に動き回る。さらに、入出港においてはウィングとよばれるブリッジの張り出しに出て、接岸速度を目で確かめながらタグボートへの指示などをする。そのため、操船シミュレータには一般に広い視界と動き回れるだけのスクリーンからの距離が必要とされる。1976年、アメリカのニューヨーク郊外に世界最大・最新の操船シミュレータが完成した。ブリッジのモックアップを中心に半径9mの円筒状のスクリーンがあり、CGI(Computer Generated Imagery)を駆使した映像が合計5台のアイドホール(Eidphor, 商品名)プロジェクタを運動させてス

* はせがわ かずひこ 大阪大学 工学部船舶海洋工学科 565 大阪府吹田市山田丘2-1



◀図1 船の動揺の種類と名称

クリーンいっばいに映し出される。しかも、その映像は沿岸に見える原油タンクの影まで太陽の動きと自船の動きに合わせて再現させるほどの凝りようで、現在でもこのシミュレータの性能を上回る操船シミュレータはできていない。

当時、アナログコンピュータで計算した運動をもとに、模型とビデオカメラ・プロジェクタとサーボ機構の組合せで巨大なからくり仕掛けといってい操船シミュレータの開発を手伝っていた私にとって、その印象はあまりにも鮮烈であった。TK-80という8ビットのワンボードマイコンが出たか出ないかのころである。どうしてそんな絵が計算機に描けるのか、想像すらできなかった。初めて黒船を見た船大工の心境である。

■ GWS がシミュレータを変える？

しかし、その後の計算機の進歩は著しく、最も手軽で安価なビジュアルディスプレイが可能となり、気がついたら私自身がブラウン管の中に鉄ならぬ「電子の船」をつくっていたのである。また、現に今回訪問した各地の研究所でもわれわれになじみのある計算機が操船シミュレータのグラフィック用に使われていた。しかも、運動計算をするホスト・コンピュータとは別に表示用に汎用のグラフィック・ワークステーション (GWS) を用いた利点として、簡単なコマンドでホスト・コンピュータの負担をかけずに視点の変更、ズームイン/ズームアウト、昼夜の変更や霧の有無などができ、これからの新しい感覚の操船シミュレータとして訓練用のみならず、研究用やアセスメント用として主流になるのではないかと感じて帰ってきた。

まさしくサイエンティフィック・ビジュアライゼーションとしてのCGの利用である。そして、その時々のお操作に応じた応答をリアルタイムで計算しなければならない点、大型スクリーンに映す絵は人に違和感を与えないための質が要求される点でも操船シミュレータ用のCGはレベルが高い。

船の転覆現象の理論計算と実験

話がだいぶん転覆、いや脱線しかけたが、本題の船の転覆の話に戻そう。まずは船の復原力について簡単に説明する。

船は海面上にほぼ拘束されているものの、飛行機などと同様3次元空間の中で自由に運動する。それぞれの運動モードには図1に示すような名称がついている。このうち、転覆に最も関係の深いのはローリング (横揺れ) である。平水中では、浮力が重力と同じ大きさで反対方向に働き (働くところまで沈んで) 釣り合っている。もしなんらかの原因で横傾斜しても重心が低ければもとに戻ろうとする偶力 (復原力という) が働く。しかも、ある程度までは傾斜すれば傾斜するほど大きな復原力が働く。逆に、重心が高ければますます横傾斜して転覆する (図2)。

遊園地の貸しボートで実感された方も多いと思う。もちろん、沿は図2 (b) になるように設計されている。この関係が危なくなるのは突風や荷崩れなどによる大傾斜、海水打込み、衝突による浸水などであるが、いずれに対しても相当の程度まで復原力が保たれるように国内や国際的な規則で規定されているので、一般に船はなかなか転覆しない。

しかし現実には、特に漁船を中心とした小型船の転覆事故が後を絶たない。その原因の多くは過積載、無許可の改造などによる復原力の不足、悪天候での無謀操作などである。ところが、若干復原力に不足はあるものの転覆しそうな船が転覆する事故などがあり、どうも船と波の状態にある危険な関係が存在するのではないかと。もしあるなら、それを解明して国際規則に盛り込むべきだという動きがでてきた。

そういった背景から、われわれの研究室では浜本剛実教授の指導のもと、理論計算と実験の双方からその原因究明に取り組んでいる。

■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線形理論が主体であった。しかし、転覆のように大波高で運動振幅も大きくなると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解く必要がある。理論の詳細り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。まず船体を前後方向にいくつかの断面に分割し、各断面での波面までの水圧を深さ方向に積分し、さらにそれを前後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、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。これを繰り返すのである。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ごとの計算量は相当多く、現在、実船で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(4.1 MIPS)で約3分、すなわち3倍の時間がかかっている。

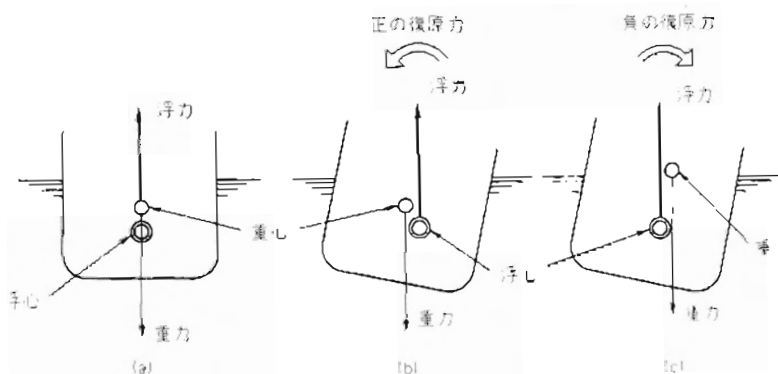
■模型船による転覆実験

計算結果の確認のため、実験を大阪大学の試験水槽(長さ100m、幅8m、深さ4.5m)において行った。試験水槽の一方の端にはさまざまな周期と振幅の波を発生できる造波装置もある。さらに、長手方向の両側には新幹線のレールより精密に敷設されたレールがあり、その上を $\pm 1\text{mm/s}$ の精度で制御できる電車(その下に検力計などを介して模型船を接続するので、曳航電車または曳引車ともよばれる)が設置されている。通常の試験は船体まわりの流速や圧力を計測したり、その積分値としての流体力を計測するために模型船を電車で拘束し、種々のケーブルを懸下して行う。しかし、転覆実験は力を計測する実験ではなく運動を計測する実験であり、波との関係で相当に動き回るし、転覆した後模型船内の計測器が濡れないよう完全な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。そこで、模型船内にマイコンや運動計測用のジャイロなどの計測機器を搭載し、電車上のパーソナルコンピュータ(パソコン)からワイヤレス・モデムを介して無線で

操縦し、計測したデータを同時に無線でパソコンに転送する装置を開発して実験に供している。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2つの装置を組み合わせで6自由度非接触計測制御システム²⁾として使用している。

実験は4,990総トンの中コンテナ船の46分の1模型(長さ2.5m、重さ102kg)を用いて行った。結果の一例を図3に示す。この図では波との相対位置はわからないが、船は直進中、真後ろから船長とほぼ同じ長さの波を受け、ゆっくりと波に追い越されている。そして追い越されるたびにローリング振幅が大きくなり、ついに転覆にいたっている。これは、船と波との(相対的な)出会い周期がその船のローリング固有周期と近いときに起こる一種の共振でパラメトリック・オンレーションとよばれており、理論計算と同様の現象が実験で確認できたという意義は大きい。この一連の実験の一部は、海洋調査船「へりおす」の転覆事故(1986年6月、福島県相馬沖)に焦点を当てたNHK番組クローズアップ「なぞの沈没・船と波の危険な関係」(1986年12月放映)の中で紹介されたので、ご覧になられた方もおられると思う。

実験は準備段階から非常に時間がかかり神経を使う。完全に密閉された模型船のハッチ内に自動車用バッテリー数個、推進用モーター、操舵機、計測用ジャイロ、通信制御用マイコンなどがびっしりと納まっている。装備が重過ぎると計画喫水にならないし、第一納める場所がない。トリム(前後方向の喫水の差)も合わせるためにはバラストウエイト(計量された鉛の固まり)を置くだけの余裕が必要である。ハッチ内温度(最大60°近くに達する)とバッテリー電圧は常に無線でモニターしておき、適当なときに充電と放熱を兼ねてハッチを開ける必要がある。まるで人工衛星である。さらに、実験要員としては模型船の無線操縦、電車上にある送受信と位置測定用パソコンの操作、造波機の操作と電車の運転、そしてバッテリーの充電や搭載機器のチェック、実験の前後での模型船のキャッチ(きまなければ転覆後に波で水槽のコンクリート壁に打ちつけられて模型船、搭載機器ともに大破する)と多くの人手がかかり、いつも研究室の学生総出の実験となる。その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



◀図2 船に働く復原力(ローリング時)

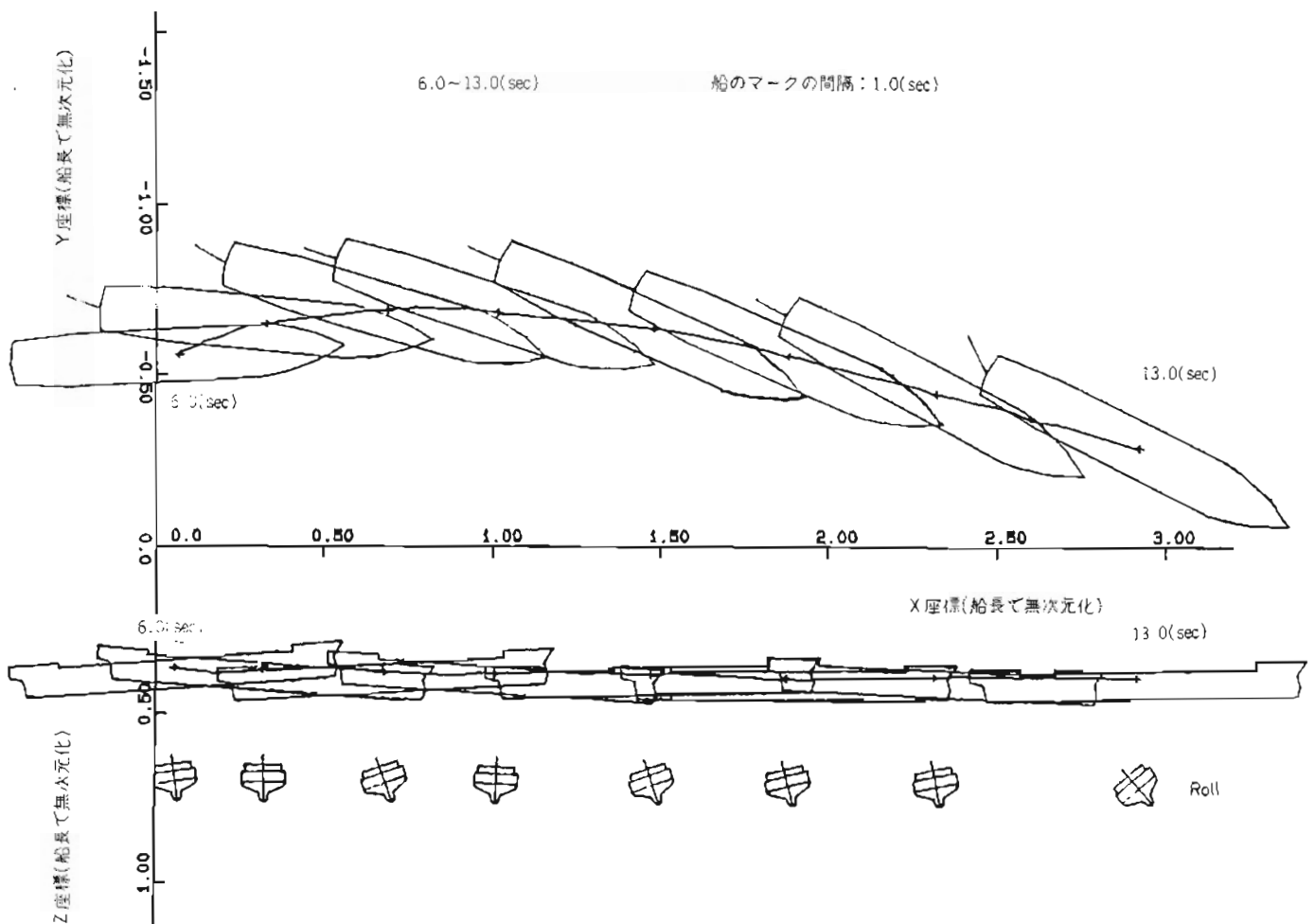


図1 模型船の転覆実験例

ことが多い。

追波中の転覆には、実はここで紹介したパラメトリック・オシレーション以外にも2つのモードが知られているが、すべてのモードを実験で確認するのは大変な労力を要することが見込まれる。そこで、ある程度実験により理論計算の信頼性が確認できたら、今度は実験状態の大まかなしほり込みや設定条件のおおよその検討を逆に理論計算で行う、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、改良を行う、こういった理論と実験のタイアップを今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のである。

なぜ、船の転覆現象の再現にCGが有効か

われわれが船の転覆運動をCGで再現しようと思ったきっかけは、実は1985年8月の日航ジャンボ機の事故である。この事故の詳細を報道し、その原因を航空専門家や評論家の意見を交えて解説するある番組の中で、尾翼をもぎ取られたジャンボ機がダッチロールを繰り返すシーンがワイヤー・フレームながらコンピュータ・アニメーションで放映された。ダッチロールという独特の運動の様子がよくわかった。なんとなく前述のパラメトリック・オシレーションに似ている。これだ、と思った。浜本教授もこの番組を見ていて、これをやってみようというこ

とになった。

■パイロットシステムの開発

当時ミニコンピュータ（ミニコン）で理論計算を行っていたので、グラフィック環境としてはモノクロの線画用グラフィック・ターミナルとプロッタしかなかった。プロッタだとカラー表示が可能であるし分解能も良いのだが、1枚1枚出力してコマ撮りする気になれず、グラフィック・ターミナルを使うことにした。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・コンパチのPLOT命令と画面消去の命令だけをサブルーチンのかたちで作り、後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ー・フレームの表示を行うことにした。「線を引くのが見える」速度で1枚の画面（図4にその2シーンを示す）を引くのに5秒程度かかっていたが、おかげでビデオカメラを使ってマニュアルのコマ撮りができた。そして、完成したテープを再生したときは波の中で船が揺まれる様子がわかり、実に感激した。ご覧のように船体の表現も非常に簡略なものだが、学術用には十分であった。また、細かい話だがヒービングやピッチングに比べて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

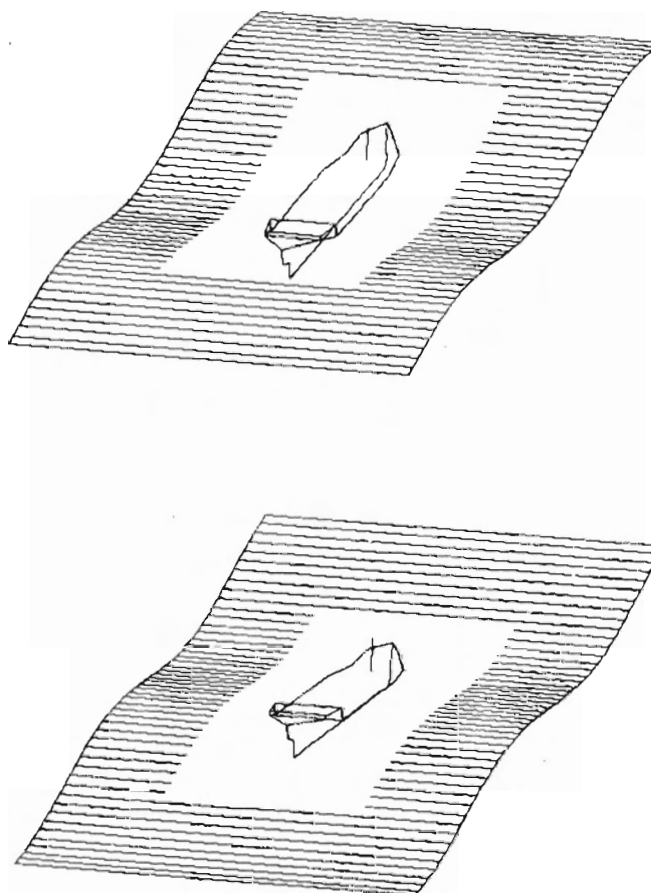


図4 転覆アニメーション（パイロットシステム）

船らしくしかも無駄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・ビジュアライゼーションを行う際に考えるべき基本的な点ではないだろうか。

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、後にサーフィス・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感じがしないでもなく、サイエンティフィック・ビジュアライゼーションの難しさを感じる。

とにかく、今まで図3に示すようなグラフから7つ（図3には船と波の相対位置が出ていない）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ー・フレームでさえアニメーションにすると手にとるようにわかるのだから素晴らしい。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立つ。さらに、ここから想像の話で申し訳ないが、例えば、実験では外乱が多くあまりわからなかったが、計算結果をアニメーションで見るとどうもパラメトリック・オシレーションが起きる領域と起きない領域の間にほんのちょっとした差異があるのに気がついたり、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ってはならないか。

転覆アニメーションのパイロットシステムの成功に気をよくしたわれわれは、3年度計画で理論計画からアニメーション出力までを一貫して行うシステムの開発に取りかかった。余談ながら、機種選定にあたってはNICOGRAPHなどの展示会や本誌記事が役立った。われわれの研究室ではエキスパートシステムを用いた船舶の自動設計や自動運航の研究も行っており、最終的には、グラフィックス能力とAI環境、ミニコンからのプログラム移植とファイル転送・通信などの点を考慮した。

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。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、2人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、無駄なファイル出力はやめようと思っている。また、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することもできるので、実験結果をさまざまな視点から見ることで便利である。

アニメーションのプログラムについては、本誌の読者には説明する必要はないと思う。ただし、座標変換を効率良く計算するためにマトリクス・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）はそれぞれ独立に任意の移動と回転をするが、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やす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付けていること、などが特徴である²⁾。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。

船体表面の3次元座標は飛行機や自動車同様オフセットとよばれる表で与えられているが、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取った（図5）。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6）。この両者を表示するだけで隠面処理はハードウェアがサポートしているので船体表面上の波形などを計算する必要はない（図7）。なお、船の位置や姿勢、波長の検討をするときは静止水面上に任意の間隔のグリッドを引くこともできる。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）も半透明処理がうまく表現している。

さらに細かい点になるが、図7のように船体を横から見ていると船首や船尾（の舵やプロペラ）が水面から空中へ出る様子も一回でわかる。図3からは窮うすべもなかった成果である。船首や船尾が空中へ出ると再突入時に大きな衝撃圧を受け振動や強度上の問題になる。また、推進効率や舵効きにも大きく影響する。細かい点でいってもう1点あげると、波に持ち上げられ

た後ピッチングの影響で甲板が波に突入することがある。これも振動・強度・積荷の破損などの問題を起す。このとき、一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。同じことが船首・船尾の外板部で起きる。これを防ぐために、実は船首・船尾の外板には皿をラップで包むように透明のシートが張ってある。もちろん、その外板を越える波が来たときは（シートの上に）波がかぶり巨視的には問題ない。

■転覆アニメーションの決め手は視点の変更

このアニメーションの最大の利点は自由に視点を変更できることである。図8～11は、図7の状態から航走中の船が転覆する様子の一部を同じ視点から見たものであり、全体の様子、波との位置関係がよくわかる。図12～15はこれと同じシーンを真正面から見たものであり、波の山谷が見にくいものもローリングとピッチングがよくわかる。図16は水面下から見た1シーンで、流体力計算のチェックに便さそうである。最後に、図17はなんとブリッジから見た転覆前の様子である。カメラは船と並進しながら姿勢は固定しているので、ブリッジに固定するにはカメラの座標・回転計算を加える必要があるが、非常に臨場感のある画面になっている。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。また、事故防止のキャンペーンにもすぐに使えそうだ。さらに、エンジンテレグラフと舵輪をGWSのダイヤル・モジュールに割り当てて運動計算プログラム、アニメーション・プログラムとフィ

ルタでつなげば、たぶん世界最初の荒天操船用のミニ・シミュレータの出来上がりとなる。

おわりに

私の専門は船の運動力学であり制御工学である。そこは粘性が支配的な世界であり、個々の流体粒子の挙動よりは積分値としての流体力に興味があり、さらにはそれも飛び越してシステムの入力と出力といった見方さえすることが多い。しかし、それだけに問題の本質を常に理解しないとんでもない間違いをすることがある。実践はうそをつかないからいいが、計算が主体となると本質を離れてしまっても気づかないことがある。学

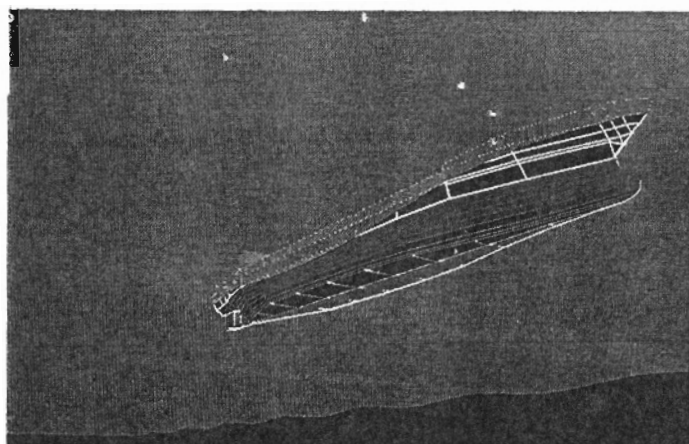


図16 水中から見た1シーン (27秒後)

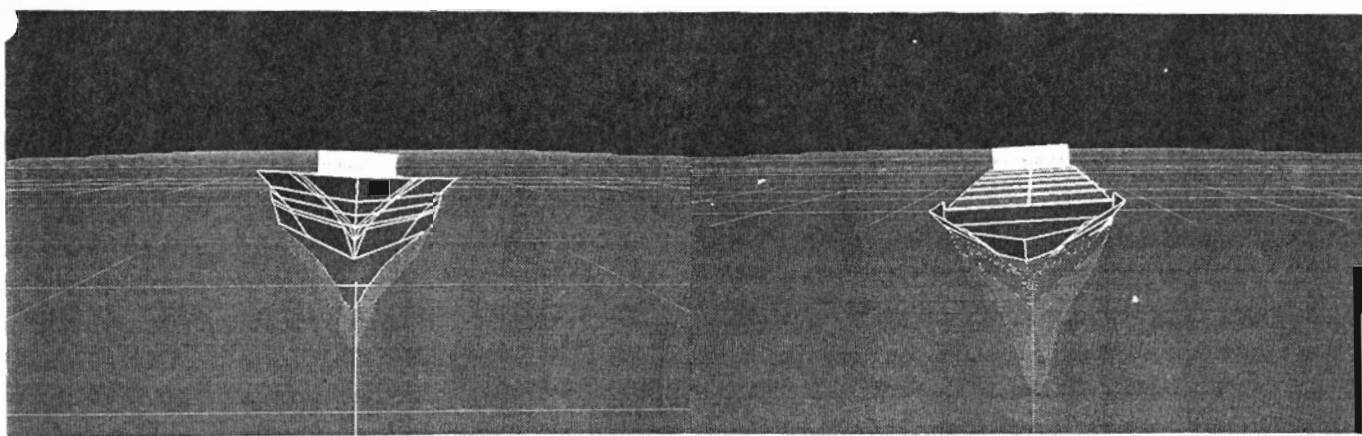


図12 23秒後

図13 27秒後

生がよくやる間違いに、多過ぎる有効数字、1をはるかに超えた（あるいは下回る）修正係数、…あげればきりが無い。しかし、こと科学技術計算に限って言えば、そのほとんどが現象を理解していれば感覚的にわかるものではないだろうか。グラフィックスやアニメーションはこういった理解を助ける道具である。日航機の事故の再現しかり、今年放映されたNHKの「驚異の小宇宙・人体」しかり、である。逆に、感覚的にわかりやすいから「意識を誘導する」道具にもなる、十分注意してほしい。

今年の6月に私の属する研究会で、まさしく本特集を先取りしたようなシンポジウムを企画した。数値流体力学、CAE、建築・都市計画、そして私を含めた講演でCGの応用例が紹介され

た後、最新のCGハードウェア/ソフトウェアに関する展示会、引き続き、講師全員でパネルディスカッション⁴⁾を行った。そこで出てきた意見は、すべての科学分野で通用するものでどれも示唆に富んでいる。これからサイエンティフィック・ビジュアライゼーションを行おうとする方、サイエンティフィック・ビジュアライゼーションを支援するシステムを開発される方にはぜひ読んでいただきたい。

最近、流体力学や構造力学の分野で従来大型計算機やスーパーコンピュータを使って計算していた人々たちから、EWSを使ってみたいとかグラフィックスを行いたいという話をよく耳にするようになった。科学技術計算結果のCG表示、アニメーションは次第に当たり前になると思う。問題は科学者が使いやすい計算環境である。次に私の前に現れる「黒船」は何だろうか。

参考文献

- 1) Hamamoto, M. et al.: "Study on Ship Motions and Capsizing in Following Seas", 日本造船学会論文集, 第163号(1st Report), 1984. 6, 第165号(2nd Report), 1989. 6
- 2) 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(KFR), 1988. 6
- 3) 浜本剛実, 長谷川和彦:「追波中の船舶の転覆現象のコンピュータアニメーション」, 第2回KFRシンポジウム「船舶流体力学におけるコンピュータグラフィックスの応用」, 関西船舶流体力学研究会(KFR), 1989. 6
- 4) パネルディスカッション「サイエンティフィック・ビジュアライゼーションのあり方と今後」, 第2回KFRシンポジウム「船舶流体力学におけるコンピュータグラフィックスの応用」, 関西船舶流体力学研究会, 1989. 6

*なお、このテキスト(B5判, 約70ページ, 1989年10月発行)をご希望の方は、郵便振替にて口座番号: 大阪0-95201, 名称: 関西船舶流体力学研究会宛に住所、所属、氏名、電話番号、「KFR 209回テキスト希望」と書き、1,500円(送料込み)を振り込んで下さい。入金確認後、発送します。

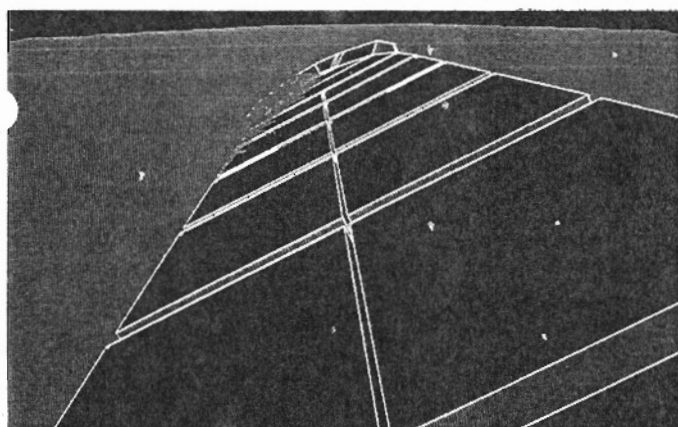


図17 ブリッジから見た転覆前の様子(63秒後)

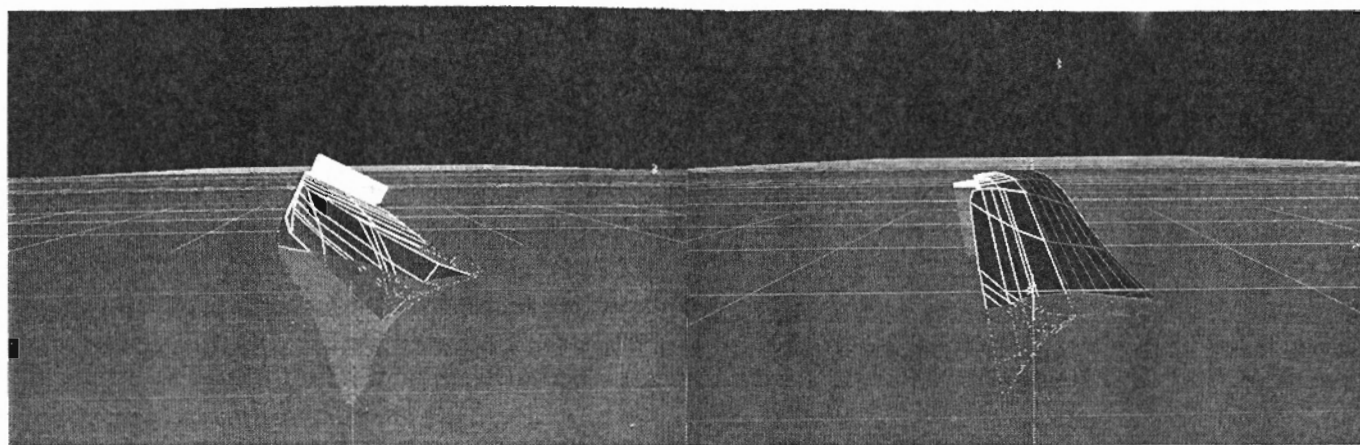


図14 63秒後

図15 72秒後

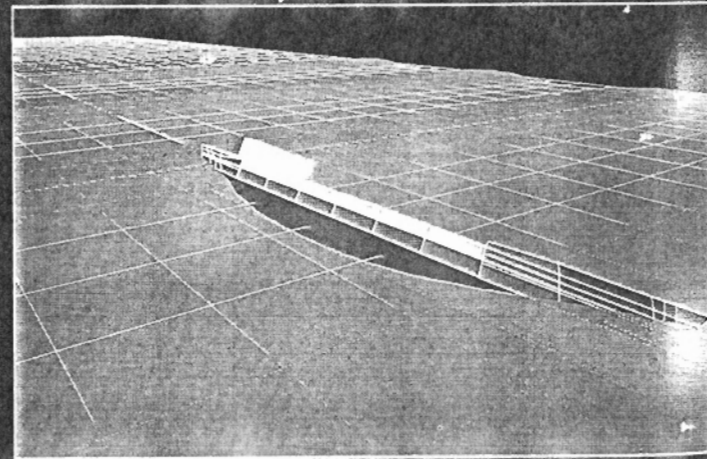
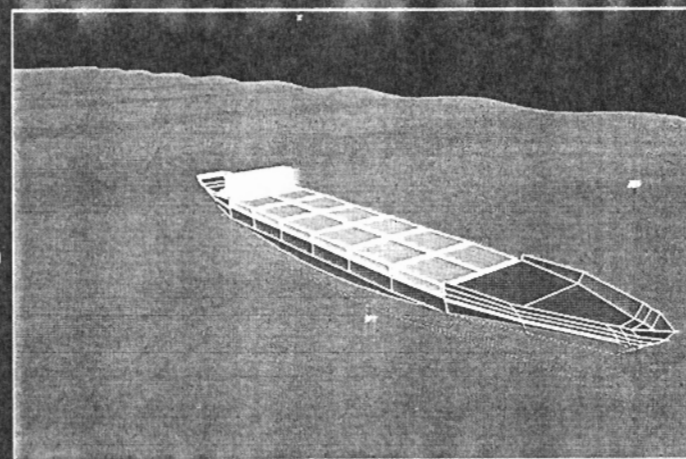
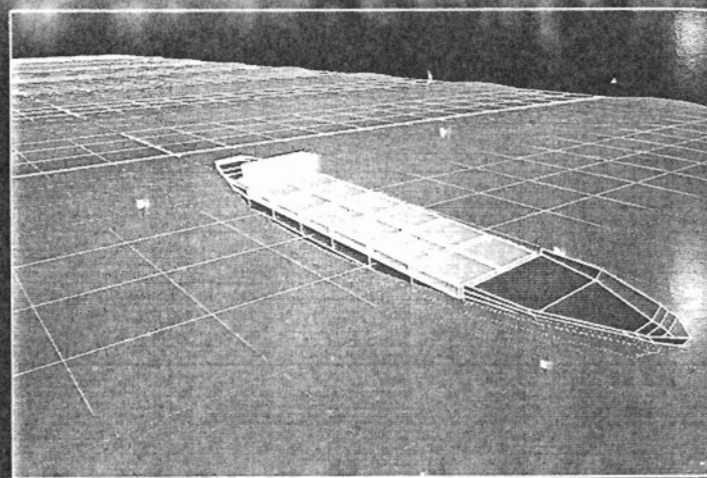
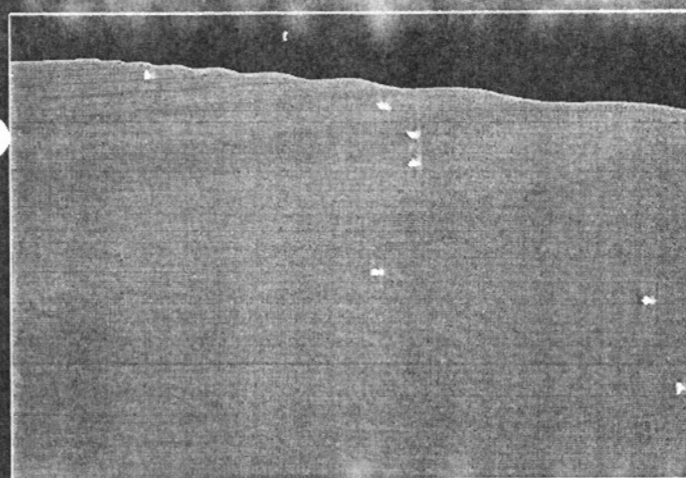
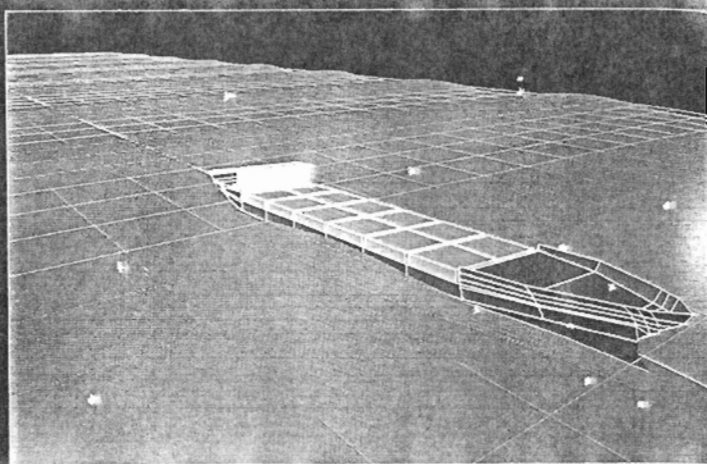
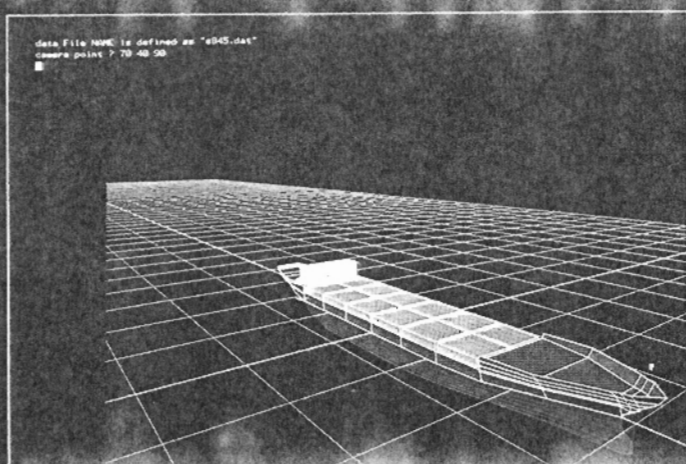


図 5 転覆計算に用いた
コンテナ船

図 8 23 秒後

図 6 2 次元規則波

図 9 27 秒後

図 7 ハードウェアによる
隠面処理と半透明処理

図 10 63 秒後

図 11 72 秒後

