

一点係留システムの安全性評価のための 新しいグラフィックス表示システム

中 本 隆*・吉村 藤 謙*・高橋 宏 直*・平石 哲 也**

1. はじめに

沖合における大型タンカーの係留および貯油受け払い施設として SALM (Single Anchor Leg Mooring) ブイ (高山ら, 1985), CALM (Catenary Anchor Leg) ブイ (平石ら, 1992) 等が用いられている。ブイ等の設置水深は通常 30~40 m で, 多点係留ブイバースを除くと, SALM 型ブイが広く用いられている。SALM 型ブイは, ブイによる浮力を初期張力とする 1 本のチェーンで海底に係留されたブイで, タンカーはナイロン製のホーサーで船首単点係留 (一点係留) される。係留されたタンカーは, 風と波の作用した場合には振れ回り運動と呼ばれる大振幅の長周期水平運動を示す。一点係留システムの設計にあたっては, 風と波の作用下において, ホーサーにどのような張力が作用するか, および係留されたタンカーがどのような運動を行うかを検討しておかなければならない。風と波を外力とするタンカーの運動および作用張力を求める数値計算法は, 鈴木 (1995) 等によって開発されている。

ところで, タンカーの運動および作用張力の数値解析結果は, 従来, 図表形式で出力されてきた。この表記形式では, 船体の位置や移動状況を視覚的に表すことは困難で, 安全作業において最も重要な現場の作業員の意見を幅広く収集することはできず, 振れ回り運動中に船体が防波堤等の海洋構造物に接近した場合に乗員が抱く危険度等を評価できなかった。そこで, 係留中のタンカー運動をリアルタイムで動画表示しながら, 乗員の視線で運動状況を判断できるようなグラフィック表示システムの開発を行い, 人間工学的な視点から一点係留システムの安全性を評価することを試みた。

計算結果を視点を変えてリアルタイムで表示するバーチャル・リアリティ (VR) グラフィックシステム自体は, 著者らがすでに開発し, 津波表示 (酒井ら, 1995) と港内の波浪表示 (中本ら, 1996) に応用している。本研究では, タンカーの運動数値解析結果を VR グラフィックシステムに取り入れて, 視点を変化させながら, タンカー

の運動状況を表示するシステムを開発した。

2. グラフィック・システムの概要

本リアルタイム表示システムで用いたワークステーションは Silicon Graphics 社製の Onyx Reality Engine 2 である。表-1 に装置の仕様および周辺機器を示す。図-1 は表示用のスクリーンの構成を示したものである。スクリーンは幅 70 インチのものを 5 枚円弧状に配置したものである。表示はリアプロジェクター方式を採用し, 試験者は, 円弧の中心点位置に立って, 数値解析の結果によるタンカー運動の様子を観測する。数値解析はあらかじめ実行し, タンカー運動と張力の時系列データを記憶部に保存して, グラフィック出力を行う。このときの視野角は 225° となり広い角度の映像が出力される。したがって, 画面の前の試験者は, いわゆるバーチャル

表-1 システムの構成

EWS 本体 Onyx Reality Engine 2 (シリコングラフィックス社製)	
CPU 処理能力: 85 MIPS×2 (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 50 MHz	
内部クロック数 100 MHz	
システムバス帯域: 1.2 GB/s	
1 次キャッシュメモリ: 命令キャッシュ	16 KB
データキャッシュ	
16 KB	
2 次キャッシュメモリ: 1 MB	
内部メモリ: 128 MB	
ラスターマネージャー: 2 枚	
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: 4 MB	
陰面処理: Z-buffer 法	
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	
ソフトウェア仕様	
オペレーティングシステム: IRIX™ ver 5.2	
(System V 系 UNIX 準拠)	
開発環境: X-Window, C	
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°	

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所計画設計基準部システム研究室

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室

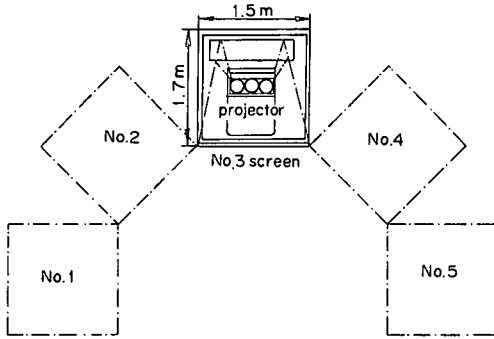


図-1 スクリーンの配置

リアリティイメージとしてタンカーの運動と港内における波の状況を観測できる。試験者の視点は計算途中であっても自由に移動させることができ、鳥瞰図などが自由に選択できる。また、計算結果を実時間で出力したり、時間を早くして高速で表示することも可能で、出力する画像の時間的な早さを任意に変更することができる。すなわち、計算で得られる微小なタイムステップ毎の6自由度の船体運動の計算結果をあらかじめ記憶しておくことによって画像出力ができる。

また、広範囲にわたる海域におけるイメージを作成するためには、波の伝播状況を平面的に表す必要がある。そこで、作用する波の一樣水深域での伝播計算を別ファイルに保存して、船体中心位置における位相が、船体運動計算に用いる作用波の波形の位相と一致するように出力時間を調整して動画表示を行った。したがって、画面内に現れた波はタンカー運動の外力とはなっているが、タンカーによる反射波や回折散乱波については動画出力の対象としていない。

一点係留ブイシステムから見える沿岸部のイメージ画像は、あらかじめ現地で写真撮影した画像を平面データに張り付け（テキストチャマッピング機能）で作成できる。あるいは、ビルや立方体等の要素を組み合わせることで仮想の港湾イメージを作成することもできる。

3. タンカー運動の数値計算

波と風を外力とするブイに一点係留された船舶運動の数値計算法は、鈴木（1995）が提案したものに従った。以下にその概要を示す。

図-2は、計算の座標系を示し、空間に固定した座標系 $X-Y-Z$ と船体に固定した座標系 $x-y-z$ を考える。ここで、空間固定座標の原点は、係船ブイのアンカーを通る鉛直軸と静水面の交点とし、風の進行方向と逆向きに X 軸、それと直角に静水面上に Y 軸、鉛直上方に Z 軸をとっている。また、船体固定座標の原点は船体重心 (G 点) とし、水平面内で船首方向に x 軸、真横方向に y 軸、

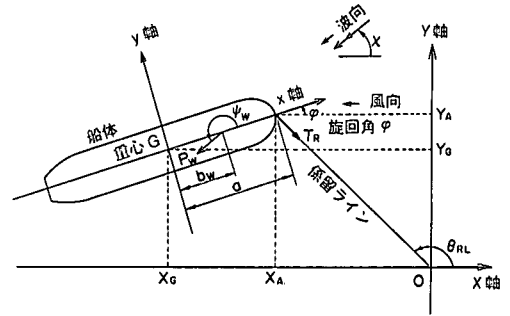


図-2 計算に用いる座標系

上方に z 軸をとっている。また、 ϕ は船体の旋回角である。長周期の水平運動においては風が主要因となり、波浪が作用しても水平運動には大きな影響を及ぼさない（平石・高山，1992）。そこで、風抗力のみを外力する振れ回り運動の運動方程式を時間積分によって解いて、各タイムステップ毎の船体水平運動変位 $X_G(t)$, $Y_G(t)$ および旋回角 $\phi(t)$ を求める。ここで、添字 G は船体重心の値であることを示す。運動方程式では風抗力と係留力が外力となっている。風抗力は次式で求められる（たとえば、鈴木・諸石（1982））。

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a C_w U_{wr}^2 (A_T \cos^2 \phi_{wr} + A_L \sin^2 \phi_{wr}) \quad \cdots (1)$$

ここに、 P_w ：船体に作用する風抗力

ρ_a ：空気密度

C_w ：風圧係数

U_{wr} ：船体と空気との相対速度

A_T ：水面上船体正面投影面積

A_L ：水面上船体側面投影面積

ϕ_{wr} ：船体軸と風との相対角

係留力は、あらかじめブイ運動に関する静的釣り合い方程式を解いて、船首の係留点からアンカー点までの距離の関数として係留力を求める表を作成しておき、各タイムステップ毎にその値を与える。

船体の波浪中の動揺計算においては高木（1975）による特異点分布法によって2次元の流体力が計算されている。計算では、波浪を一方向の不規則波と考え、6自由度の力の釣り合い式を解いている。このときの外力は波浪強制力と定常波漂流力である。船体運動の長周期成分はあらかじめ前述の振れ回り運動プログラムで計算されている値を用いる。長周期成分による船体座標において波浪による運動方程式を解くことにより、長周期成分と短周期成分を合成した変位ベクトル $[X]$ が求められる。波による船体の運動方程式は次式で表すことができる。

$$[A][\ddot{x}] + [B][\dot{x}] + [C][x] = [F] + [F_0] + [M] \quad \cdots (2)$$

- ここで、 $[A]$ ：仮想質量およびモーメントの係数行列
 $[B]$ ：造波減衰力係数行列
 $[C]$ ：復元力係数行列
 $[x]$ ：船体の6自由度運動ベクトル
 $[F]$ ：波浪強制力ベクトル
 $[F_0]$ ：定常波漂流力ベクトル
 $[M]$ ：係留力ベクトル，である。

係留力 $[M]$ は波による運動に対するもののみを考慮して、

$$[M] = [M]_{L+s} - [M]_L \dots\dots\dots (3)$$

と考えることができる。ここで、 $[M]_{L+s}$ ：長周期運動に波周期運動を加えたときの係留力、 $[M]_L$ ：長周期運動だけの係留力である。計算では、長周期運動+波周期運動の場合と長周期運動のみの場合について、それぞれ時間ステップ毎に係留ラインの船体取り付け点の変位を求め、変位と係留力の関係から補間を行って $[M]$ を求めている。

図-3は、本プログラムによる船体運動と係留力の計算結果の一例を示したものである。計算対象船舶は、長さ209m、幅40m、吃水4.7mのタンカーで、水深31m地点に40mのホーサーで係船されている。作用波の有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ はそれぞれ2.5mおよび14sである。風は風速10m/sの定常風である。図では上段から、作用波形、船体重心の X 座標と Y 座標、上下方向の Z 座標、ローリングおよびピッチング角度、旋回角 ϕ およびホーサー張力を示している。水平運動につ

いては波周期運動は現れず、張力変動も長周期の変動を示している。ただし、ピークの周辺で短周期の変化が現れており、波による運動を考慮した数値計算が必要であることがわかる。

図-3のように計算結果を図示すると、張力の最大値や変動周期は定量的に判断できるので、ホーサーおよびブイ形式の設計に用いることができる。しかしながら、船体運動の様子は図面からは判断することが困難で、コンピュータグラフィックスによる表示が必要になる。

4. 船体運動のグラフィック出力

本システムによるバーチャル・リアリティ（VR）グラフィックは、5枚のスクリーンに表示されるものなので、それ自身を紙面上に出力することができない。ここでは、1枚のスクリーン上に表示される連続画像の一部を画像データとして保存し、カラープリンター上に出力した画面を示す。

図-4は、図-3と同一の計算条件で、波と風が同一方向から作用した場合の、係留海域におけるタンカーの状況を鳥瞰図として示したものである。スクリーンの前面に位置した観測者はタンカーの6自由度の運動をリアルタイムあるいは高速で観察できるので、振れ回り運動や船体動揺を視覚的に把握することができる。タンカー係留中の場合は、ホーサーによって水平方向へブイは引っ張られるため、ブイ自体は水没している。したがって図では表示できない。また、アンカーも海中に位置しており、視認できない。そこで、ブイの位置を明確に示すために、図-5では、仮想の赤い円筒を海中に表示して、ブイのアンカー点の位置を表した。船舶は、赤い円柱が示す点をアンカーとするブイに係留されているので、ブイは円柱と船首との中間点付近に位置する。また、波の伝播の様子は視覚的に把握できるが、風に対する情報は図中に仮想の矢印で風向を示し、定常風速の値を数値で表

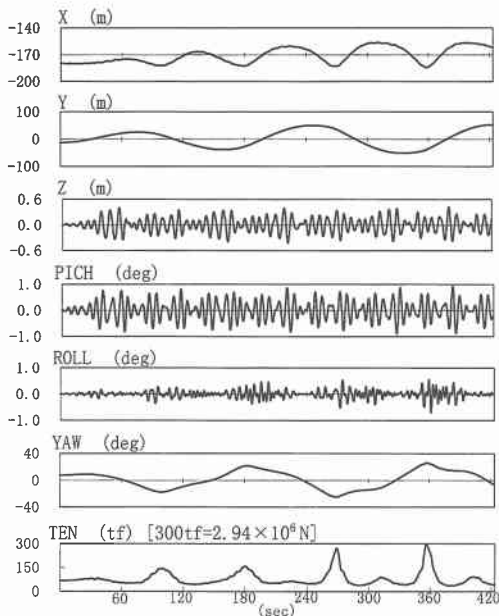


図-3 風と波が作用した場合のブイ係留船舶の運動と作用張力の計算例

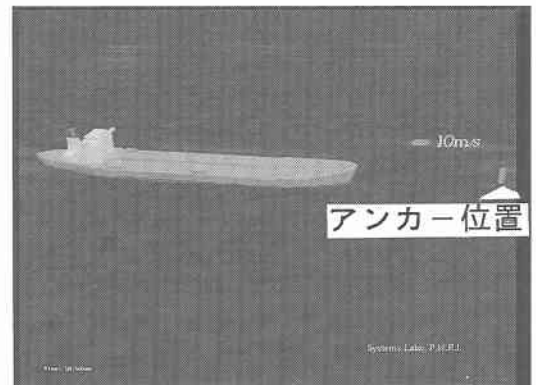


図-4 係留船舶の鳥瞰図

すことにした。

図-5は、船体の運動軌跡を把握するために過去の時刻における位置を同時に映写したものである。これによって、残像として振れ回り運動の軌跡をたやすく判断できる。振れ回り運動の軌跡および最大変位は、ブイ係留バースに必要な海域の大きさを設定するために重要であり、軌跡が示す面積でバースの所要域が推定できる。

図-6は、VRシステムの特徴である観測者の視線を変化させた例を示す。ここでは、観測者はブイへの係留作業を行うタグボート上にいる。船体の運動と波浪状況を視覚イメージとして捉えることができるので、ある海象条件下で石油油送ホースの脱着や離標等の作業が安全に実施できるかどうかを作業者の視点から判断できる。

図-7は観測者の視点を船体上の作業者に移動させた場合のイメージ図を示す。図中の縦格子はブリッジの窓枠を示す。振れ回り運動および波浪中における動揺運動中にブリッジの操船者から周辺の海域がどのように見えるかを判断できる。図では、沿岸の構造物はかなり遠方に見えており、近接するような危険性は感じられないが、防波堤等がブイバース近辺に位置する場合には、人間的

な判断で、ブイバースにおける係留が安全かどうか、ブイバースの設置位置が適切であるかどうか判断できる。なお、沿岸のイメージは現地の写真を張り付けて作成している。

図-7は比較的晴天の日中におけるイメージである。VRシステムでは天候変化によるイメージの変化も検討することができる。図-8では、海上によく起こる濃霧状態を再現している。霧がある場合には、図-7と同一の視点にも係わらず、沿岸の様子がよくわからず、タンカーの安全性が判断しにくいことがわかる。

図-9は、屋外のデッキから沿岸部を観察した場合を示し、視点をタンカーデッキ上の作業者へも移すことができる。風速が強くなると振れ回り運動の周期が早くなったり、高波浪時には動揺が大きくなる様子が、屋外の作業者の視線から判断でき、作業基準等の作成に資することができる。ここでは、沿岸のイメージは仮想のものとして作成している。

5. あとがき

ここでは、バーチャル・リアリティ・グラフィックス

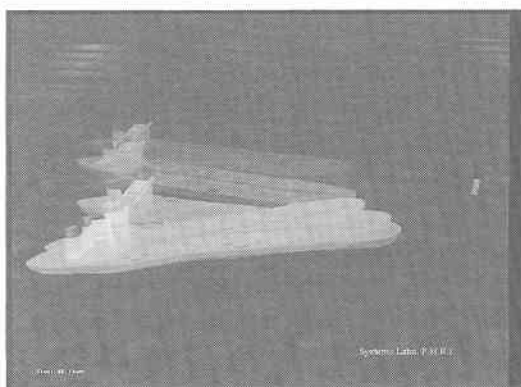


図-5 船体運動の軌跡による振れ回り振幅の検討

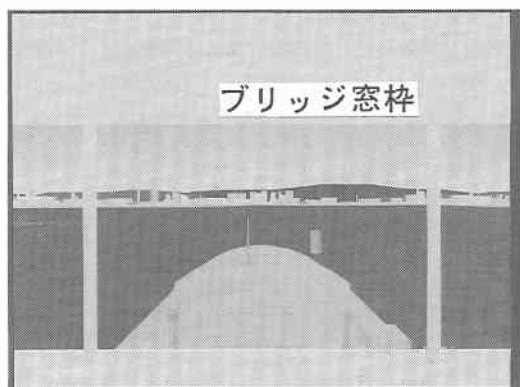


図-7 船体ブリッジからの晴天時の沿岸部の様子

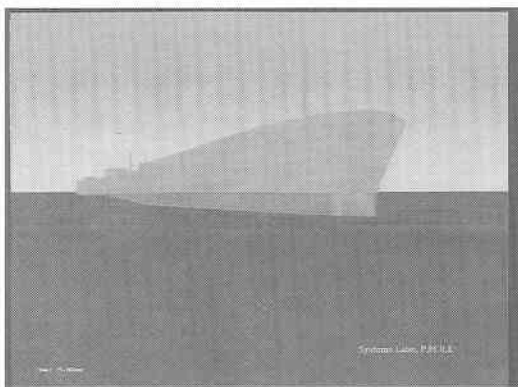


図-6 海面上の作業船から見える船体運動

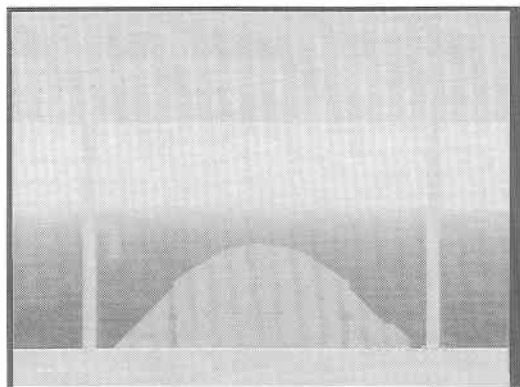


図-8 船体ブリッジからの濃霧時の沿岸部の様子

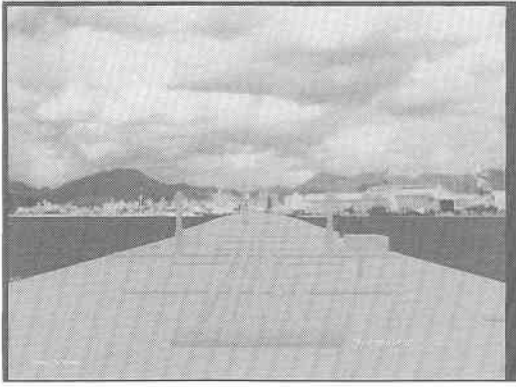


図-9 屋外の作業者から見える船体と沿岸

システムをブイ係留船舶の運動表示に応用すると、運動を3次元的に把握できるだけでなく、船上の作業者から見たシステムの安全性判断が可能になることを示した。今後は、本システムを荒天時の避泊係留システム(平石ら, 1991)の計画策定支援装置としても活用していく予定である。

参 考 文 献

- 酒井浩二・高橋宏直・平石哲也・柴木秀之 (1995): コンピューター・グラフィックスによる新しい津波表示システム, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1231-1235.
- 鈴木康正・諸石一幸 (1982): ブイ係留船舶の荒天時の振れ回り運動, 港湾技術研究所報告, Vol. 21, No. 2, pp. 107-150.
- 鈴木康正 (1995): 船舶係留時の一点係留ブイの係留力の風と波を考慮した数値解析法, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 966-970.
- 高木幹雄 (1975): 浅海域における船体運動について (その1), 西部造船会会報, 第50号, pp. 29-63.
- 高山知司・平石哲也・古川正美・佐尾邦久・立野信一郎 (1985): 一点係留ブイと係船索張力に関する現地観測, 港湾技研資料, No. 508, 28 p.
- 中本 隆・森光賢治・高橋宏直・平石哲也 (1996): 港内波浪のための新しいグラフィック表示システム, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1266-1270.
- 平石哲也・本城 智・古川正美 (1991): 避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 731-735.
- 平石哲也・高山知司 (1992): 多点係留ブイバースにおける係留張力と船舶の運動に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 735, 36 p.