

63 船体構造解析システムの構築と構造計算の迅速化

構造強度部 *川野始、岡修二
山田安平、安藤孝弘

1. まえがき

船舶の構造設計においては直接強度計算法が重用されており、計算機能力の発達もあって、大型の構造解析や複雑な荷重条件における計算が設計や事故解析における半ば常套的な作業となっている。一般にFEM計算の大型化・複雑化に伴い、構造モデルや荷重データの作成など前処理作業の占める割合が肥大化する傾向が強くなり、解析環境の改善によるこの低減が解析迅速化や解析能力アップにとって不可欠である。

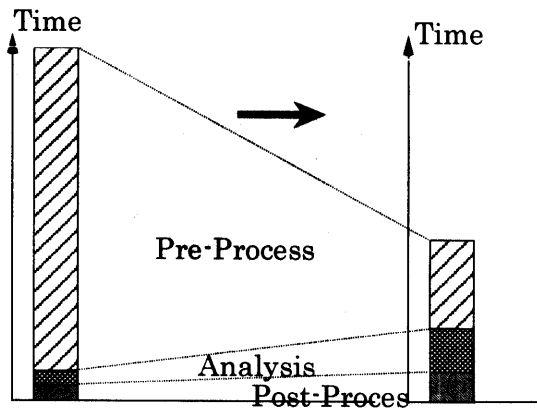


図-1. 構造解析における作業割合の変化¹⁾

このような最近の趨勢を踏まえて、当所においても構造解析のインフラ整備と解析能力の維持向上を図るべく、計算作業の迅速化・省力化のためのインターフェイス開発や解析システム再構築に注力してきており、以下にその概要や特徴的機能について紹介する。

2. 解析システムの構成

解析システムの構成を、解析作業を実施するユーザーからみた作業フローとして表現したものが図-2.1である。図-2.1の右側の流れは構造モデルを対象とするものであり、基本入力として主要目データと船体形状データが必要である。船体形状データは、オフセットテーブル(数表形式)の場合とIGESデータ形式の場合がある。

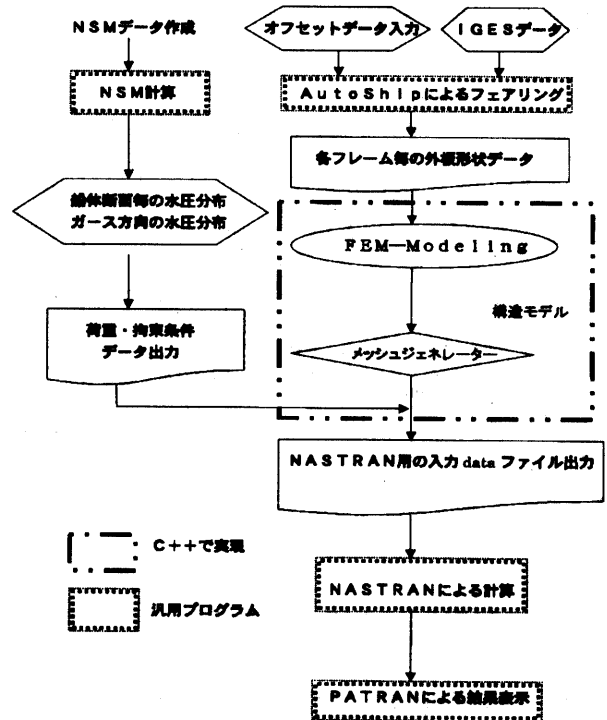


図-2.1. 解析作業の流れ図

作業手順の大きな流れとしては、市販の汎用ソフト AutoShip-Pro による外板形状フェアリング(外板面の形成) → 隔壁や上部構造の形成 → 要素分割の細分化 → 荷重・拘束データ統合による NASTRAN バルクデータ出力、と繋がっている。図-2.1 中の一点鎖線枠は、今回 C++にてプログラム開発した部分であり、標準的な船体構造であれば主要寸法を入力することで容易に基本構造が出来上がるし、個船の詳細モデル化をインターフェイス介して施せば構造モデル化が完成する。また、図-2.1の左側の流れは、荷重及び拘束条件のモデル化に係わる流れである。先ず船体に作用する水圧分布をストリップ法で解析する。計算結果は船長方向に 20 分割された各断面毎の水圧分布と断面ガース方向の水圧分布の結果を構造モデルで定義された外板上の FEM 節点に対する点

荷重へ変換する必要がある。この変換処理は当部作成のフォートランプログラム或いは BASIC プログラムにより実行される。以上の節点・要素に係わる構造モデル、荷重・拘束モデルをまとめて入力バルクデータとし、MSC/NASTRAN で解析を行なう。

解析結果は汎用ソフト PATRAN により応力や変形結果等を表示させる。

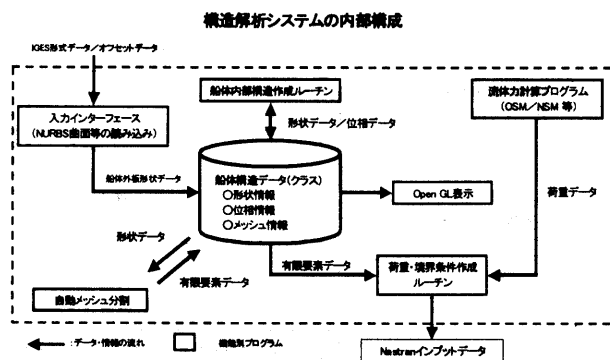


図-2.2. 構造解析システムの内部構成

開発した解析システムを内部ソフトの系統図として表現したものが図-2.2.である。その中枢部にはクラス構造を呈した船体構造データベースが位置しており、その周辺ソフトとして、前述の入力インターフェイス・自動メッシュ分割ルーチン・作画ルーチン・荷重境界条件作成ルーチン等によって構成されている。これらの主要な機能・性能については次章にて触れる。

3. 主要な機能・性能の紹介

3. 1. 外板形状フェアリング・プログラム

開発したシステムでは、市販フェアリングソフト「AutoShip-Pro Ver 7.0.2」を用いて外板形状データを作成し、このデータを Visual C++にて自作のプログラムにより取込んでいる。自作プログラムでは、取り込んだ曲面のデータから内部部材を作り上げて、最終的に FEM 構造モデルすなわち NASTRAN 用入力データを作成する。

前章で触れたように、次の2通りの方法で初期船型データの取得を選択できる。

(1) 離散データによる取得

AutoShip は station-line, buttock-line, water-line の間隔を指定することにより、曲面のオフセットデータを出力する機能を有している。この機能を利用して、X軸（又はY軸、Z軸）に垂直な面で船体外板を切ったときの曲線（交線）上の点の集まり即ちオフセットデータを出力することが出来る。船体の外板曲面を多数の離散点として出力し、自作プログラムで順次読み込む訳である。

この場合、オフセットデータの間隔を決定する際には、作成する FEM 要素寸法と同程度とすれば、実質的な精度上の問題がないと考えられる。

具体例として、AutoShip 上で3方向のオフセット間隔を FEM 要素寸法相当に十分小さく設定した離散データについて、AutoShip による Wireframe 表示した結果が、図-3.1.に示されている。

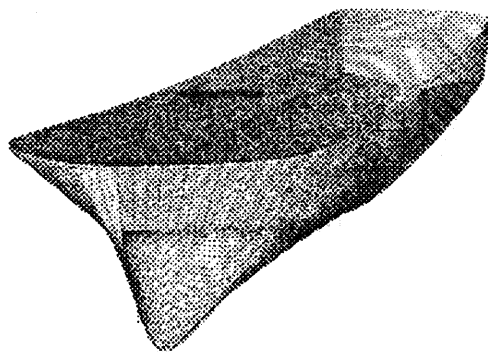


図-3.1. (離散化)外板データの Wireframe 表示例

(2) IGES データによる取得

汎用 CAD ソフトの標準入出力形式である Initial Graphics Exchange Specification (IGES) ²⁾による構造データ表現は、AutoShip 標準出力としても備わっており、今回開発システムにおける外板データ取得に用いることとした。IGES データは、汎用性があり、かつデータがテキストファイルであるため取り扱いが容易であるのが特長である。

IGES にて定義されている多くのエンティティのうち、船体外板の曲面情報を取得するため、Non Uniform Rational B-Spline (NURBS) 曲面 ³⁾⁴⁾⁵⁾を対象とする入力ルーチンを作成した。

3. 2. 荷重バルクデータ作成について

ストリップ理論を用いて、規則波中の作用水圧分布および船体の垂直加速度を（NSM 計算プログラムにて）求めて、この結果から没水面全体にわたり作用する水圧荷重（動圧+静圧）と垂直慣性力の同時刻分布を作用荷重として扱う。

ストリップ理論による応答の出力点は、通常、船体梁の長手方向には20点程度また断面内ガース長さ方向にも同数程度の離散点での出力である。他方、FEM 要素節点の分布は、通常これより密に分布しており、NSM 計算による離散点出力を内挿補間することにより、没水部の全 FEM 節点の作用水圧荷重に換算する。この入力変換ソフトを開発した。

3. 3. FEM メッシュの細分化機能

本システムでは、与えられた平面又は曲面形状データを、クラス構造の特性を利用して、2次元の三角形又は四角形要素に自動メッシュ分割することで FEM 要素を作成した。特に、形状データと FEM データを関連づけると共に、クラス特有のメッセージ機能を使って設計変更メッセージを用いることにより、設計変更に対応できる FEM データ生成・修正システムについてプロトタイプを構築した。

(1) 有限要素と形状データとの関連付け

船体構造の形状データが生成された後、FEM バルクデータ作成のためメッシュ細分割が必要である。メッシュ分割の基本アプローチとして、形状データと有限要素データを関連づけ、各形状データ毎に要素分割を行うこととした。この関連づけにより、要素は、各形状要素に從属し、形状データ毎にメッシュ分割が行われるので、局所的なメッシュ細分化や形状修正に対応しやすいという利点がある。ここで、形状データが複数ある場合、分割命令が複数必要になると考えられるが、命令システムを、Tree 構造にすることでこの問題を解決した。すなわち、ユーザーは、最も上位のクラスである、CShip クラスに対して、メッシュ分割を指示するだけで、CShip は自分の階層化のクラス（例えば CBow や CHull）に命令を伝達するという Tree 構造になっている。具体的には、メッシュ分割の際、目標とする基準要素長さ（以下「基準要素長」という。）を入力することでメッシュが自動生成される。また、メッシュ生成後にさらに細かく分割する必要が生じた場

合、当該形状データを選択後、基準要素長を変更して OK ボタンを押すだけで当該要素の再分割も可能である。

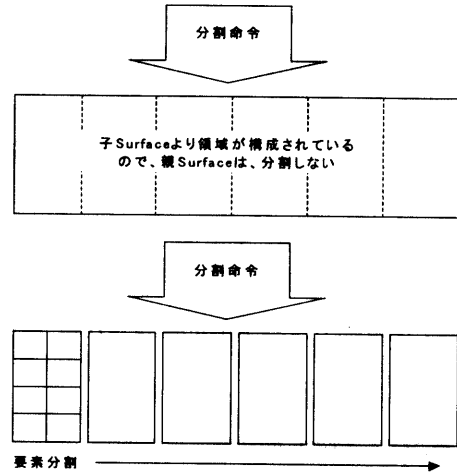


図-3.2. 領域分割の手続き

(2) 形状境界での分割数の整合

形状データ毎にメッシュ分割を行う場合、隣り合う形状データ同士のメッシュ整合性を保持することが問題となる。本システムでは、面の境界を表す CEdge クラスが当該エッジに対する分割数に関する情報を保持することで、当該整合性を保持することとした。CEdge クラスは、形状データとして、1次元の曲線クラス(CCurve クラス)又は直線クラス(CLine クラス)をメンバ変数として持っている。

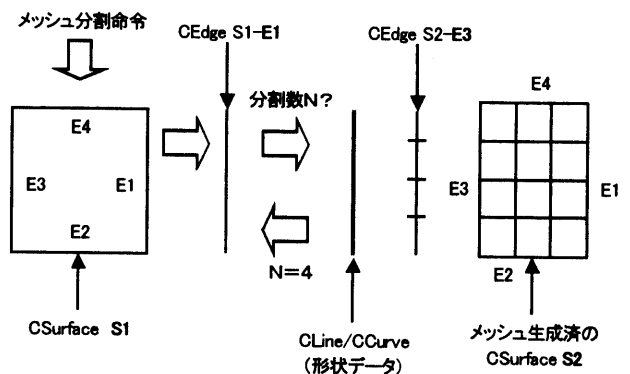


図-3.3. 形状データ間の分割数共有のためのデータ構成

(3) 自動メッシュ分割

本プログラムでは、FEM モデルを自動メッシュ分割によって生成できるようにした。生成する要素は板要素及び棒要素のみに限定しているが、以下のような四角形及び任意多角形に対する自動メッシュ分割

ルーチンを作成した。

① 2次元長方形のメッシュ分割

形状データの形状が、長方形又は正方形の場合、正規化されたパラメータ $u-v$ を軸とする $u-v$ 空間への写像により容易に分割することができる(図-3.4.参照)。

② 2次元任意多角形のメッシュ分割

船体を構成する面部材には、トランスリング下部等に5、6、7角形の形状があり、このような任意多角形に対するメッシュ分割機能をも考慮した。即ち本システムでは、大坪らの方法⁶⁾を用いて、2次元任意多角形に対するメッシュ分割ルーチンを作成した。メッシュ分割法の分類としては、Advancing Front 法を応用した方法に該当する。

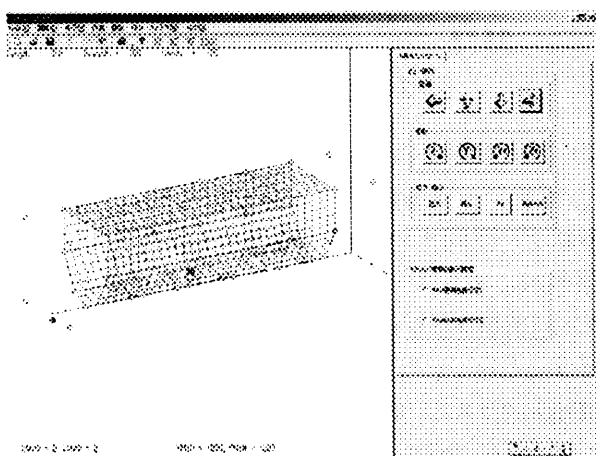


図-3.4. メッシュ分割例(形状データが長方形の場合)

3.4. データ構造について

船体構造には個々部材は形状の違いはあるものの共通な役割を果たすものが多いため、この共通する部分を抽象化しモデル化することによって、船種に依存しない柔軟なデータ構造が可能となり、解析モデル構築の迅速化に役立つと考えられる。

このようなデータ構造をつくるにあたり、本システムでは C++ のクラス構造を用いた。各部材のクラス構造は 1 つ以上の「面」や「箱」といった形状データと部材間の接合情報、位置や分割といった管理情報、また板厚や材料情報等の部材に固有のデータを保持するものとして定義し、それらを組み合わせることにより、船体構造をモデル化した。以下に形状データクラスと船体構造モデルデータを説明する。

(1) 形状データクラス

部材の形状を表すために、幾何情報を表す“点”、“線”クラスと、それらを組み合わせて幾何形状を表す、「面」、「箱」形状クラスを定義した。

面分および部屋の形状表現手法としては、野本ら¹⁾が頂点と稜線のリストを使ったデータ構造で面形状を表現し、それらの接合情報から部屋形状を導出する手法を報告している。本システムでもこのデータ構造を参考にしクラス的设计を行った。

- ・点クラス: 3次元座標(x, y, z)および、自身が含まれる稜線へのポイントを保持できる構造。
- ・線クラス: 始点および終点を表す点オブジェクトをメンバとして保持し、線の幾何情報だけでなく方向も表現できる構造。
- ・面形状: 線オブジェクトの方向性を利用してオブジェクトを双方向連結したリスト構造(図-3.5.参照)。

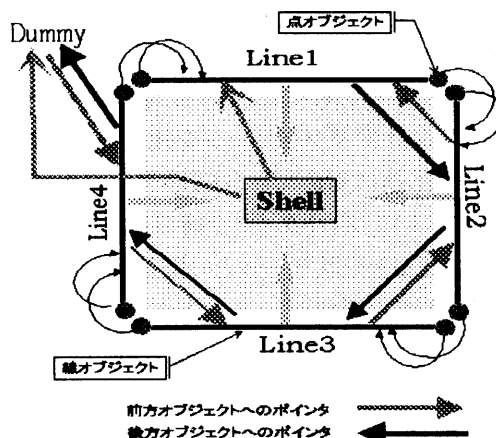


図-3.5. 面構造データの構造

箱型形状は、複数の面形状オブジェクトの結合によって表現できる。そのためには、面形状オブジェクトと面形状オブジェクトがどのように接合しているかという情報が必要となる。基本的な箱型形状では、面オブジェクトの稜線と稜線は 1 : 1 で接合するため、新たに接合情報オブジェクトを設け、対応する頂点 2 組、稜線 1 組のデータを持たせ、接合情報を定義した(図-3.6 参照)。この接合情報オブジェクトを、箱型形状を表現するのに必要な稜線数だけ用意し、各稜線のデータ構造を図-3.7 のような WingedEdge データ構造⁷⁾に

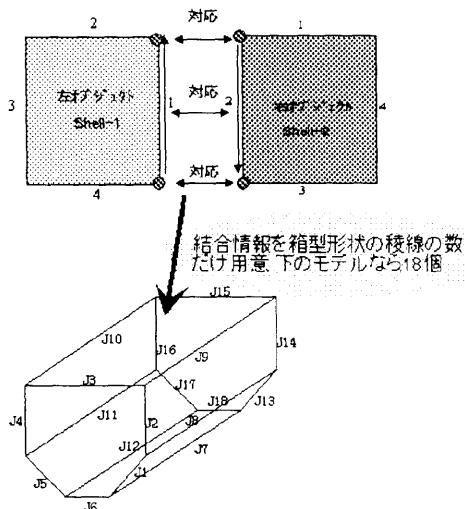


図-3.6. 接合情報および箱型形状の生成

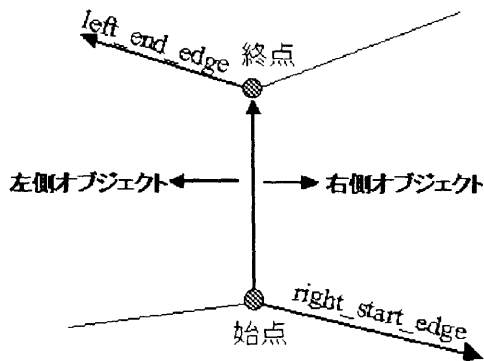


図-3.7 箱型オブジェクトの稜線のデータ構造

作り替えることにより箱型形状の表現を行った。各稜線は、自身が挟まれている左右の面オブジェクトへのポイントを持ち、また稜線の始点、終点には、それぞれ右面と左面の自身の次に連結されている稜線へのポイントを持つ。このようなデータ構造にすることにより、面、稜線、頂点のいずれからも他のオブジェクトへの参照が可能となる。

(2) 船体モデルのデータクラス

船体モデルは複数の部材モデルの組合せとして定義する。(1)で定義した面形状データを基にして板部材オブジェクトを、箱形状データを基にして区画オブジェクトを定義した。板部材オブジェクトには形状データの他に、次の情報を付加できるものとした。

- 1) 部材間の接合情報: 部材間の接合情報は、(1)で示した幾何情報の接合情報に加え、オブジェ

クト同士のポイントを持たせることにより、部材の削除や変形に対応できるものとした。一つの部材は複数の部材と接合するものとし、1:1の部材間接合オブジェクトを複数持つものとした。

- 2) 管理情報: 部材がどの区画にどのように配置されているか? 区画をどのように分割しているか? など。
- 3) 部材固有の情報: 板厚が何ミリか? 穴が空いているか? 材料は何か? など。

区画オブジェクトも箱型形状を形成する面形状データごとに板部材オブジェクトを生成し、板部材オブジェクトのユニットとして定義する。この他に隔壁やデッキをモデル化した板部材オブジェクト、それらによって仕切られた子区画の形状データ、区画や子区画に依存する部材ユニットが含まれるものとした(図-3.8参照)。

全船モデルを表現する場合も、区画ユニットを複数接合した形で表現が有効であると思われる。代表的な区画をモデル化し、似通った構造を持つ区画へ構造データの複製を行う。複製された構造データは、固有の区画形状データにより新たな区画として生成でき、最小限の編集で全船モデルの構築が可能と考えられる。

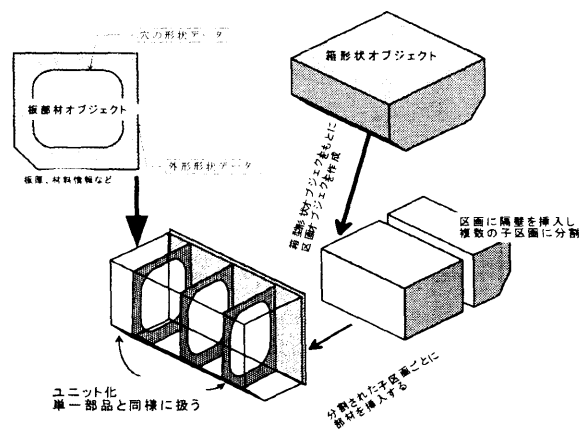


図-3.8. 区画の分割と部材のユニット化

3. 5. 三次元モデル表示機能

本システムの3次元描画機能はOpenGLを使用した。表示、モデル操作およびモデル選択の機能は次のようなものである(図-3.9参照)

- 1) 表示機能: ワイヤフレーム、陰線消去、塗り

潰しの各表示、平行投影、透視投影の各投影モード。鳥瞰図機能。

2) モデル操作：モデルの回転、移動、スケーリング。視点の回転、移動。

3) モデルの選択：マウスによるピッキング機能。

ここで1)の表示機能と2)のモデル操作の切替は、ツールバー上のボタン操作によって行われる。ツールバー上で表示、投影モードを各一つずつ選択し、マウスによって操作する。モデルの回転、移動、スケーリングのみダイアログからの数値入力も可能である。

鳥瞰図機能は複数の画面上に、同一モデルを別角度から見た図を個別に表示させる機能である。この機能によりモデルの不具合のチェックや、オブジェクトの選択といった操作を容易にするという利点がある。

モデル選択機能のピッキング処理は、画面上の描画モデル上をマウスでクリックすることにより、描画されているオブジェクトを選択するという機能である。選択されたオブジェクトは表示色を変えることにより、選択されたことをユーザーに知らせる。船舶モデルのような複雑なオブジェクトの場合、画面深さ方向で表示が重なっており、ユーザーが期待したオブジェクトの選択が困難な場合も想定されるが、カーソル深さ方向にある複数のオブジェクトを拾い上げることにより、ユーザー自身の判断で選択可能となっている。

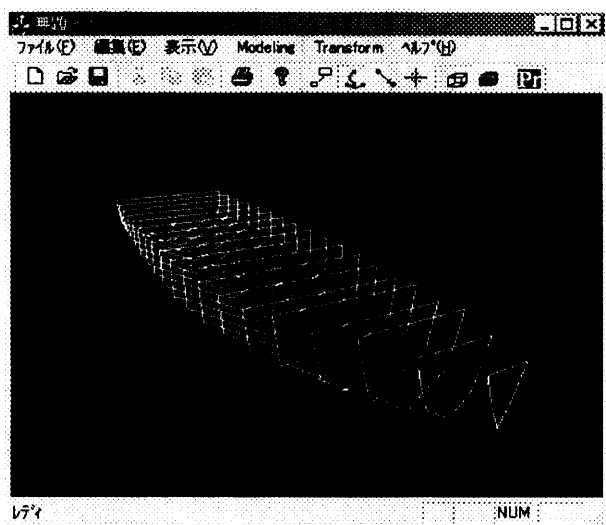


図-3.9. OpenGL での断面形状表示例

4. まとめ

構造解析業務の迅速化・省力化を目指して解析システムの再構築を行い、中核となる構造データベースや周辺ソフト群を開発することができた。今後は、構造解析の平時業務の推進を通じて、更に使い勝手の向上や人的ミス防止に優れた解析システムとすべく不断のブラッシュアップに努める必要がある。

参考資料

- 1) 鈴木克之、日本造船学会 #8回構造強度専門委員会資料、H12年3月
- 2) Initial Graphics Specification IGES 5.3, U.S. Product Association (1996)
- 3) Gerald Farin, Curves and Surface for CAGD, Academic Press, 1997
- 4) H.Norwack, M.I.G.Bloor, B.Oleksiewicz: Computational Geometry for Ships, World Scientific Publishing Co., 1995
- 5) 増田宏、大和裕幸、古川慈之、船型設計における高品質な曲面生成手法に関する研究、日本造船学会論文集第 187 号
- 6) 大坪英臣、久保田晃弘、川村恭巳、平木常正、斉藤雅樹：オブジェクト指向型有限要素モデラーの曲面板組構造への適用、日本造船学会論文集、第 172 号(1992)
- 7) 大坪英臣、久保田晃弘、川村恭巳：オブジェクト指向に基づく船体構造解析用 FEM モデリングシステム、日本造船学会論文集、第 170 号(1991)
- 8) 野本、早川、酒巻、青山：船体の汎用設計支援システムの研究、日本造船学会論文集、第 170 号、pp779-789、1991 年 12 月
- 9) ロンフォスナー：OpenGL Programming for Windows95 and WindowsNT(日本語版)、アジソンウェスレイ・パブリッシャーズ・ジャパン、1997 年