# 船体構造解析システム構築に関する研究

# 川野 始\*、岡 修二\*、山田 安平\*、安藤 孝弘\* 岡 正義\*、竹本 博安\*

# Study on Hull Structure Analysis System

By

# Hajime KAWANO, Shuji OKA, Yasuhira YAMADA, Takahiro ANDOH, Masayoshi OKA and Hiroyasu TAKEMOTO,

# Abstract

Among structural design field of ships a direct strength analysis has been prevailing steadily and it can be pointed out that a designer seems to take it for granted that FEM stress calculations become large-sized and with complicated load conditions. On the other hand, it has been generally recognized that a large-size and complicate FEM analysis is accompanied by remarkable increase in labor hours to input data preparations.

Therefore, for the purpose of speeding up of direct calculation designing it has been an urgent and indispensable subject to reduce working hours and human mistakes in input data arrangements. So the authors have developed a software system with man-machine interactive interface and also with well-organized data storage structure by applying object-oriented language. The following is pointed out as main features of the developed system.

1) The developed system is built based on the object-oriented modeling technique same as a CAD system, and has strong ability to respond to modification or re-processing of structure data easily and smoothly.

2) The input interface is excellent in displaying structure model with many drawing functions and in picking up a selected object among the embedded models in the drawing, and can expect speeding up and labor-saving.

3) The developed system can take a hull form fairing result in the offset table (discrete value) or IGES data form.

4) The subdivision function of FEM meshing is provided to carry out the automatic generation of plate-type finite elements by simply ordering a target length of elements.

5) As to load data generation, the estimated result by strip-theory on water pressure distribution in regular wave can be automatically converted to the data set of the distributed pressure applied on FEM nodes.

 <sup>\*</sup> 構造強度部
 原稿受付 平成 13 年10月15日
 審 査 済 平成 14 年 2月27日

# 目 次

1.	まえがき		•	•			 2
2.	解析システム構成とデータ構造						 2
2.1.	解析作業の流れ						 2
2.2.	データ構造						 3
3.	主要な機能・性能について		•	•			 5
3.1.	モデリング機能および作画表示機能						 5
3.2.	外板形状フェアリング結果の読込み						 7
3.3.	FEMメッシュの細分化機能					•	 9
3.4.	荷重バルクデータ作成について					•	 11
4.	FEM入力作業の迅速化・省力化につい	7		•		•	 11
4.1.	従来の入力作業		•			•	 11
4.2.	開発システムの活用と今後の方向		•			•	 12
5.	まとめ				÷		 13
	参考文献	•	•		•	•	 14

# 1. まえがき

船舶の構造設計分野における最近の特徴として、FE M応力解析が言わばブラックボックス化しており、直接 強度計算法が重用され、大型の構造解析や複雑な荷重条 件下の計算が半ば常套的手段となっている点が指摘で きる。これらは、小刻みに板厚を変え部材寸法を最適化 することで限界ギリギリまで贅肉を排除しようとする 合理化設計の結果であり、構造・材料の破損限界を解析 シミュレーションにより追跡することで設計判断の合 理性を確保しようとする姿勢の反映でもある。



図1-1.構造解析における作業割合の期待される変化<sup>1)</sup>

ところで、構造設計や事故解析におけるFEM解析を 作業内容別の内訳でみた場合、図1-1左に示すように、 FEM計算の大型化・複雑化に伴ない、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著しく 肥大化する傾向が認められる。即ち、直接強度計算の迅 速化や解析能力アップの為には、入力支援ソフト配備な ど解析環境の改善による前処理作業時間の低減が、必須 かつ焦眉の課題となっている。

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・省力化のための入力インターフ ェイス開発や解析システム再構築の研究に注力してき ている。その成果として、本稿では、次章以下に開発シ ステムの概要や特徴的機能などについて報告する。

ここで特に、解析システム<u>再構築</u>と表現したのは、昨 今のCADやCAEの浸透によって、構造データの保持 の仕方に大きな質的変化を迫られており、これに対応す るシステム構築を目指している点を明確にするためで ある。即ち、CADは設計者がコンピュータ画面に図形 を描きながら、製品図面を設計するシステムであり、C AEシステムでは、CADによる設計情報が適切かどう かをコンピュータにより工学的に判断する。FEM解析 は、有力なシミュレーション手段でありCAEシステム の中核を成しており、FEM解析用の構造データは、情 報としてはCADシステムが生成する製品モデル中に 含まれている。従って、CADシステムによる製品モデ ルデータを抽出・加工してFEM解析に供することが出 来れば、CADシステムの利便さ・迅速さが活用できる という点で極めて有望であると考えられる。

しかし、完全なFEM解析用の構造データである為には、 CADシステムから抽出した構造モデルでは未だ中間 データであって、更にメッシュ分割などの加工を施すこ とが必要である。この加工によりデータ量的に極く重く なってしまう事情や再解析時の便宜を考えて、中間デー タの在り様や構造解析システムにおける構造データの 保持の仕方について、新しい視点から改めて再構築する 必要性を認識した次第である。

更に付言すれば、当所は研究開発を責務とする機関で あって船の設計・建造を業とするものではないので、C ADシステムを身近に備えていない。しかし、これら設 計システムの普及発展は造船分野の必然の流れと考え られ、そのソフトウエア開発における新しい考え方を踏 まえたうえで、解析システム再構築を行なうことにより、 この分野の基本認識を深めつつ問題解決能力の向上を 図ることを意図した。

#### 2. 解析システムの構成とデータ構造

#### 2.1. 解析作業の流れ

開発した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図2-1に示した。 図2-1右側の流れは構造モデルを対象とするものであ り、初期入力として対象船の主要目データと船体形状デ ータ(船型データ)が必要である。船体形状データの取込 みは、オフセットテーブル(数表形式)の場合と CAD システムにおける標準データ形式である IGES データ形 式の場合(詳細は 3.2.(2)で述べる)の二つを想定してい 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、汎用ソフト AutoShip-Pro による外板形状フェアリング(外板面の生成) → 隔 壁や上部構造の生成 → 要素分割の細分化 → 荷重・拘 束データの統合による NASTRAN バルクデータ出力、の 順序で進行する。

図2-1中の鎖線枠部は、今回 Visual C++言語(以下 VC++ と略記)を用い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、後述する諸機能を有する入 カインターフェイスを介して詳細モデル化を施せば個 船の構造モデルが完成する。

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。解析結果は船長方向に 20 分割された各断面毎の水圧分布と断面ガース方向の 水圧分布結果として得られるが、これらを構造モデルで 定義された外板上の FEM 節点での圧力値へ変換する必 要がある。この変換処理は作成した FORTRAN プログラ ム及び VisualBasic 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、および荷重・拘束モデ ルをまとめて解析入力データとして、汎用 FEM ソルバ ーである MSC/ NASTRAN を用いて応力解析を行なう。 解析結果は、汎用ソフト PATRAN により、応力分布や変 形結果等としてグラフィック表示させる。



構造解析システムの内部構成

図2-2. 構造解析システムの内部構成

今回のソフトウエア開発は、一般のCADシステムにお ける構造データのモデル生成を強く意識して、オブジェ クト指向言語によるものとした。開発した解析システ ムの内部的なソフト系統図が、図2-2に表示されてい る。その中枢部には VC++によるクラス構造を有する船 体構造データベースが位置しており、その周辺ソフトで ある入力インターフェイス・自動メッシュ細分化ルーチ ン・作画ルーチン・荷重条件作成ルーチン等を作業によ って使い分ける構成となっている。これらの主要な機 能・性能については3章にて詳述する。

# 2.2. データ構造

船の構造は船種によって様々な形式があり、それぞれ を個別にモデル化し解析するのは、多大な時間と労力を 要する。しかし、個々の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く、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。また一度作成したデータ構造 を適切な形で保管することにより、同型船の解析や部分 修正した追加解析への対応も迅速に行えると考えられ る。

このようなデータ構造を作るにあたり、本システムで は図2-3に掲げるデータ構造の階層性を採用した。 即ち、CADシステムのデータ構造と同じデータ構造を 用いて船体モデルを先ず生成し、これに自動要素分割の 加工を施すことでFEMバルクデータに相当する構造 データが生成されるものとした。但し、追加解析などの 為に保存する対象はCADシステム構造データだけで あり、FEMバルクデータは解析実行の直前にのみ生成 し保存対象とはしない位置付けである。



図2-3. 採用したデータ構造の階層性

CADシステムのデータ構造として、本システムでは、 VC++のクラス構造を用いた。即ち、各部材のクラス構 造は一つ以上の「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と 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 構造モデルデータに別けて詳細を説明する。

#### (1) 形状データクラス

部材の形状を表すために、幾何情報を表現する"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法としては、野本ら<sup>2)3)</sup>の 手法つまり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 する手法を用いて本システムでのクラス設計を行った。

- ・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タを保持する。
- ・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
   なく方向も表現する。
- ・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、図2-4に示すように、双方向 連結したリスト構造とする。

これらにより面形状はデータ数の影響を受けない柔軟 な構造となり、稜線の追加、削除、面形状の切断といっ た操作が容易となる。面形状を利用する場合は、面形状 データリストの先頭に位置する線オブジェクトと、最後 に位置するダミーノードの2つのポインタのみを持つこ とにより、面に含まれる全てのオブジェクトの情報にア クセスできる。また線オブジェクトの連結の順番を辿り、 面の法線ベクトルを定義することにより表裏の判定も 可能となっている。



箱型形状は、複数の面形状オブジェクトの結合によっ て表現する。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2.5参照)。



図2-5. 接合情報および箱型形状の生成

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2-6のような Winged Edge データ構造<sup>4</sup>に作り替えるこ 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 のポインタを持ち、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 インタを持つ。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。



図2-6. 箱型オブジェクトの稜線のデータ構造

Winged Edge 構造はこのほかにも始点から左面オブ ジェクトへ向かう稜線と終点から右面オブジェクトへ 向かう稜線を含めて6つのポインタを持つものもあるが、 データ量が多く内部のポインタ処理が煩わしいという 欠点があるため、4つのポインタのみの簡略方式とした。 このために、面オブジェクトは全て反時計周りに稜線の 連結を行い、箱型形状の各面の法線は必ず外側に向くも のとしており、FEM メッシュ作成や荷重設定(圧力の 向き)における入力エラーの検出が容易になる。

# (2) 船体モデルのデータクラス

船体モデルは、複数の部材モデルが組合されているも のとして定義する。 つまり、(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定義し、箱形状デ ータを基にして区画オブジェクトを定義し、これらを組 合せて船体モデルを作る訳である。

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ている。

 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 ト同士のポインタ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こととした。

- 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。

2)の管理情報に関しては、部材の数が多くなると管理 が複雑になるため、複数で一つの部材として機能するケ ースには、野本ら<sup>20</sup>によるユニットの概念を導入した。 例えば、ウイングタンクにトランスリングを複数枚挿入 する場合には、一枚ずつ個別に管理するのではなく、 「この区画には縦方向にスペース 10 m間隔で深さ 2mの リングが存在する」といった情報を持たせることができ る。この処理により、膨大な量の部材の管理情報をグル ープ化し効率良く扱うことができる。

区画オブジェクトでは、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2-7参照)。

全船モデルを表現する場合も、区面ユニットを所要の 数だけ接合した形での表現が有効である。代表的な区面 をモデル化し、似通った構造を持つ区面へと構造データ の複製を行う。複製された構造データは、個有の区画形 状データを与えることで新たな区面として生成でき、少 ない入力操作で全船モデルの構築が可能となる。



図2-7.区画の分割と部材のユニット化

# 3. 主要な機能・性能について

# 3.1. モデリング機能および作画表示機能

(1) モデリング機能

船体構造のモデリングは、通常は、船長さ方向に適当

な個数の区画に分けて、上部構造を含めた各区画の接続 する順に従って生成・定義することで進行する。

生成手順の例示として、ここでは大型タンカーの船体 平行部を想定し、横隔壁で仕切られた区画を1ブロック としてブロック単位のモデル化を行うものとする。

先ず区画形状を生成するため、外板形状データの読込み (詳細は3.2節にて)を行なった後、横隔壁が挿入され ている位置の断面形状を算出させる。この断面形状と外 板形状から、2.2節(2)で述べた箱型形状オブジェク トを生成する(図3-1参照)。



図3-1. 区画形状の作成



図3-2. 隔壁の挿入

さらに図3-2に示すように、区画を一枚で仕切るような板部材(隔壁)を一つづつ順番に挿入定義すること により、区画を分割してゆく。隔壁生成の入力情報とし ては、予めX,Y,Z軸に垂直な隔壁のみが想定されており、 図3-2中に示すように、隔壁の向きおよび隔壁と交差 する座標軸の座標値のみを入力すれば良い。ここで、シ ステム内部では、面形状と箱形状との相貫情報を生成し ており、隔壁の向きがどの座標軸方向を向いていても区 画の分割は可能である。

また、区画を分割することにより区画の階層が生まれる。 即ち、区画のデータは「自身が分割されているかどうか」、 「どの隔壁によって分割されているか」という管理情報 を持っており、図3-3に示すように、次々と定義され た隔壁は自身が分割した区画の情報を持っているため、 階層情報の管理や区画の情報の編集にも対応できる。



図3-3. 区画の階層情報とポインタ

次のモデリング操作である内部部材の設定は、区画の 分割により作成された子区画ごとに行なわれる。 区画に依存する形状を持つ部材は、部材をまとめて管理 するユニットとして各子区画に対応させる。例えば、図 3-4に示すように、トランスリングあるいは縦隔壁や 外板に付く大骨部材もユニットの概念を利用して、各板 部材に対応させる。



図3-4. 内部部材の作成

以上のように、細部を造りこむことにより区画のモデ ル化を進める。

なお、現時点では、細分化された区画ごとに部材の編集 を行なう前提をおいており、複数の区画にわたってサイ ドフレームなど同じ部材が存在する場合には各々の区 画における定義が必要である。

# (2) OpenGL による3次元モデル表示機能

開発システムの3次元描画機能には、Open Graphics Library <sup>5)6)7)</sup>(以下 OpenGL と略す)を使用した。 OpenGLは業界標準の3次元グラフィックライブラリで あり、強力な形状表示・色付けなどレンダリング機能と 視覚化機能に特徴がある。多くのプラットフォームで採 用されており、今回用いた VC++上でもコーディング可 能である。

開発システムの3次元表示、モデル操作およびモデル 選択の機能には次のような項目がある。

- 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。
- モデル操作:モデルの回転、移動、スケリング。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えは、 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ことができる。

モデル選択機能のピッキング処理とは、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ることが普通であり、カーソル深さ 方向にある複数のオブジェクトを拾上げて特定するこ とにより、ユーザー自身がビジュアルに選択することが 可能となっている。

モデル表示機能の例として、ワイヤフレーム断面形状 の例を、図3-5に示している。



図3-5. OpenGL による断面形状表示の例

現在のシステムでは、ピッキング機能はオブジェクト の選択のみ可能であり、選択されたオブジェクトに対し ての何らかのアクションを起こす機能は付加していな い。しかし、部材オブジェクト、形状オブジェクトとも にデータの構造化がなされているため、選択されたオブ ジェクトの内部のデータへのアクセスも容易であり、ピ ッキングで選択されたオブジェクトへの変形や部材の 追加・削除等の機能と操作は比較的容易に実現できると 考えられ、次ステップにて考慮したい。

# 3.2. 外板形状フェアリング結果の取込み

前述のように、船体モデリングにおいて最初に成すべ き作業は、外板形状データの取得である。 開発システムでは、船体フェアリングソフト AutoShipProDesign(以下 AutoShipと略す)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 ムに取込むものとした。

前提条件として、船体外板データは AutoShip により予め フェアリングが完了したものが提供されるとする。

前章で触れたように、次の2通りの方法で船体外板デ ータ(船型データ)の取得を選択できる。

# (1) 離散データによる取込み

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。AutoShip の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これら点の座標 値を表わすオフセットデータを出力させることが出来 る。船体の外板曲面を多数の離散点として出力し、開発 したインターフェイスプログラムで順次読込む訳であ る。

この場合、交線の密度すなわちオフセットデータ間隔 は、システム内部処理により直線内挿にて再現すること から、誤差を小さくするため必要以上に大きな間隔には 出来ない。逆に、FEM解析そのものが幾何学的に連続 する弾性体を離散化する要素に分割する手法であるこ とから、FEM要素寸法より小さくしても意味がない。 本システムでは、実質的に解析精度上の問題がないよう に、オフセットデータ間隔の目標は、作成する FEM 要素 寸法と同程度に想定した(目安的にはロンジ間隔の1/10 オーダとした)。但し、AutoShipでは局部的にオフセッ ト間隔を小さくする機能が備わっているので、ズーミン グ解析のように局部的に細かいメッシュを作成する場 合にあっては、当該部のオフセット間隔を相応に小さく することで、データ量が膨大になることを抑制できる。



図3-6. (離散化)外板データの Wireframe 表示例



図3-7. Autoship でのライン図の表示例

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 を用いて、Wireframe 表示した結果及び3方向ライン図の ディスプレイ表示例を、それぞれ図3-6及び図3-7 に示した。また、外板オフセットデータの出力例を図3 -8に表示している。



図3-8. 外板フェアリング結果のオフセットデータ例

### (2) IGES データによる取込み

第2の取込み法として、AutoShip による外板フェアリ ングデータを、連続データとして取得ができる。即ち、 外板面を幾つかのパッチ曲面に分けて、各々を記述する IGES データをまとめて取込むことができる。

汎用 CAD ソフトの標準データ形式である IGES による 外板データ取得を可能とすることで、造船現場における 設計・建造の CAD ソフトからの外板データ取込みが、原 理的に可能となる。 ここで、IGES にて定義されている多くの幾何記述要素 (IGES の定義書<sup>®)</sup> においてエンティティーと称される もの)のうち、本システムでは、船体外板の曲面情報に 主題を限定して、NURBS 曲面<sup>9)~13</sup> (Non Uniform Rational B-Spline 曲面)を対象とする入力ルーチンを作成した。

# 3.3. FEMメッシュの細分化機能

2.2節で触れたように、本システムでは、先ずCAD システム相当のデータ構造を持つものとして船体モデ ルデータを生成し、これにメッシュ細分化の加工を施す ことで FEM 要素すなわち2次元の三角形又は四角形要 素の集合を生成する。

FEMメッシュ細分化に際しては、その直前と直後に おいてデータ構造において若干違っており、ソフト開発 上の幾つかの対処すべき課題があった。つまり、データ 構造の関連付けや船体モデル形状データ境界における 分割数の整合性、船体モデル変更への対応のさせ方、自 動メッシュ分割のアルゴリズム選定、等である。以下で は、これらの課題に対する対応を説明する。

# (1) FEM有限要素と形状データとの関連付け

メッシュ分割の操作は、原則的に、船体モデル形状デ ータとFEM要素データ群の関連付けに従って実行さ れる。すなわち、FEM要素データは、この関連付け命 令と船体モデル形状データに従属して生成される。

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、命令系統を、Tree構造にする ことでこの問題を解決した。ユーザーは、最も上位のク ラスである、CShip クラス(船体モデルに相当レベル) に対して、メッシュ分割を指示するだけで、CShip は自 分の階層化したクラス(例えば CBow や CHull)に命令を 伝達するという Tree構造としている。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 素長と称す)のみを入力することでメッシュが自動生成 される。また、メッシュ生成後に更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した後に、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 再分割が可能となる。

上記の方法において、命令を受けたクラスのメンバが 複数の子 Surface クラスに領域分割されている場合、つ まり、任意の Surface (親) がさらに細かく子 Surface に 領域分割されている場合には、親と子両方の形状データ がメッシュ分割されると同一の領域に FEM データが重 複して作成されては不都合である。そこで、本システム では、形状データとしてこれ以上分割できない最小領域 に対してのみ分割を実行することとした(図3-9参 照)。



図3-9. 領域分割の手続き

即ち、各 Surface は、メッシュ分割命令を受け取った後、 自分が複数の子 Surface に分割されているかどうかを判 定する。若し、複数の子 Surface に分割されていて、子 クラスがある場合は、当該子クラスにメッシュ分割命令 を伝言することだけを行い、自身を分割することはしな い。子クラスがない最下層 Surface では、自分自身を分 割する、という判断条件を用いている。

# (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つことが問題と なる。つまり、基準要素長から決まる稜線の分割数が、 辺を共有し合う面間において一致していなければなら ない。

この点に関しては、面の境界を表す CEdge クラスに当 該エッジに対する分割の情報を保持させることで、処理 することとした(図3-10参照)。



図3-10. 形状データ間の分割数共有の為のデータ構成

面は、エッジの分割数を、エッジから取得するので、隣 り合う面同士で分割数および中間節点の位置は必ず一 致することとなる。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。

### (3) 船体モデルデータの部分変更への対応

本システムの開発以前には、変更の程度にも依るが、 FEMデータに大幅変更を加える場合、既作成データに 修正を加えるよりも改めて最初から作る方が早かった。

今回のシステム開発では、最近の設計システム開発に おいて採用されているオブジェクト指向のシステム作 りを目標に掲げて、VC++のクラス構造を用いて船体モデ ルデータの定義を行なった。

従って、以前の状態に比べると、モデルデータの部分変 更(例えば、主要目の一部変更、区画数や肋骨心距等の 基本パラメタの変更など)に対して相当に強力かつ迅速 に対応できるシステム構築ができた。

その具体的な手順は、基本的に、次の5ステップより構成される。

- 1)形状データの変更、又は要素長の変更
- 2) CView クラスがデータ変更メッセージ送信
- 3) CDocument クラスがデータ変更メッセージ受信

4)既存メッシュデータがある時、既存メッシュ削除5)新規メッシュ生成

ここで、CView クラス予備 CDocument クラスは、Microsoft Foundation Class (MFC)の上位クラスである。

構造データ部分変更の操作例として、図3-11に示 す状態を既作成のものとして、要素長の変更データさら に形状データを(X軸長さを半分に)変更したデータを それぞれ図3-12及び図3-13に例示している。



図3-11. メッシュ分割例(既作成済みと想定)

M解析の実務において遭遇する修正解析は、単純な変更 や追加が複数重なった場合が多く、その作業の迅速化と いう点で強力な道具建てが構築できたと考えられる。



図3-12. 基準要素長を変更した例



図3-13. タンク長さを変更した例(X方向長さ1/2)

#### (4) 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。船体構造の特性から、分 割する対象は外板や隔壁等の面形状が主体であること、 及び、全船解析用の FEM モデルの作成が主目的であるこ とから、生成する要素は板要素及び棒要素のみとした。

曲面・平面形状に対する自動メッシュ分割は、メッシ ュ分割法の中でも Surface Meshing に分類されており、図 3-14に示すように、多くの手法がある<sup>14)</sup>。

本システムでは、四角形及び任意多角形に対する二次 元の自動メッシュ分割ルーチンを作成した。

i) 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 空間へのアイソパ ラメトリック変換により容易に分割することができる。 既出の図3-11におけるメッシュ生成はこの手法に よるものである。

これらはいずれも単純な変更例でしかないが、実際のFE



図3-14. 二次元メッシュ分割の手法<sup>14)</sup>

ii) 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など5 角形や6~7角形と見なせるような形状のものがあり、 このような多角形に対してもメッシュ分割機能が必要 である。

任意多角形のメッシュ分割法として、多角形を四角形と 三角形に分けてからそれぞれをメッシュ分割する方法 も可能であるが、その場合には、両形状の境界が不必要 な要素境界として残ってしまい、メッシュのバランスが 適当でないという欠点がある。

そこで、本研究では、大坪らの方法 <sup>15)</sup> <sup>16)</sup> <sup>17)</sup>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。即ち、フロント法 <sup>18)</sup>により与えられた形状を三 角形要素に分割し(ステップ1)、生成された三角形要 素を結合させて四角形要素を生成する(ステップ2)。 最後に生成された要素に対して、メッシュ全体のバラン スを良くする為のスムージング処理を行う(ステップ 3)。プログラムは、それぞれのステップをサブルーチ ン化して作成した。

### 3.4. 荷重バルクデータ作成について

迅速な構造モデル作成が直接強度計算の効率化にと って重要であることは勿論であるが、荷重データ作成に ついても注目すべき点がある。即ち、最近の傾向として、 現象シミュレーションの精密化の視点から、荷重・構造 一貫解析とでも称すべき手法が盛んであり、荷重ケース 数が多くなり勝ちである。

具体的には、大別して2つのアプローチが採られている。

- 1) 短期海象における船体と波との相対位置サイクル および作用水圧や慣性力を、時間ステップを区切る ことで、step by step に準静的な取扱いにより追跡 する時系列型アプローチ。
- 2) 船体の重要部位の破損モードに対応させた設計波

条件(ないし設計水圧分布条件)を、重要部位の数 だけ解析ケースとして想定する、ケース外延型アプ ローチ。

このうち1)では、船体運動・荷重評価ステージと構 造解析ステージを手作業で繋ぐ従来のやり方から、仲介 ソフトによる入出力ファイルの受渡しで直接に繋ぐこ とが、作業の迅速化・省力化にとって重要である。

そこで今回、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 を作用荷重として出力する、仲介ソフトを作成した。 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。一方、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 節点における作用水圧荷重に換算する変換ソフ トを開発した。

#### 4. FEM入力作業の迅速化・省力化について

### 4.1. 従来の入力作業

今回のシステム開発以前の時点における標準的なF EMデータ作成作業は、船体図面から手作業で寸法を読 取るものであり、概ね次の1)~3)の手順で行われて いた。

- ボディプランより、SquareStation間の外板曲面を幾 つかの区画に別けて、各区画(図4-1中の「読取り 区画」)ごとに辺は直線と近似し、各頂点の断面内座 標(y,z)をスケールにて読取る。実績的には、Square Station間隔は、船長さを20程度に分割し、船首・船 尾付近の曲がり部では必要に応じて更に細かく分割 する。
- 2)「読取り区画」ごとに、自作プログラムを組込んだパ ソコンを用いて、内部メッシュを作成してゆく。即 ち、「読取り区画」が四辺形の場合、縦・横辺の分割 数、4頂点の座標値(x,y,z)、板厚等を入力して、板要 素(CQUAD4、CTRIA3)や梁要素の要素リンクデー タ、節点番号および座標データを作成する。その際、 平面度が悪い四辺形要素(鞍形の外板部など)は、 対角線を結んで2つの三角形として扱う。
- 3)上の1)、2)の作業を、「読取り区画」ごとに繰り 返す。即ち、外板部分や甲板部分だけでなく、上部 構造や横隔壁・縦隔壁などについても繰り返して、

計算対象とする船の全構造をモデル化した FEM デー タを生成する。



図4-1. ボディプラン読取りの概念図

FEMデータ作成の骨格作業は上述の通りであるが、 作業効率という観点から、所要時間について触れると、 船種や解析目的(メッシュ粗密)あるいは作業者の熟練 度などにも依るが、多大の時間と手間を要する。

一つの例として、図4-2に示した鋼材運搬船の全船 FEM解析<sup>19)</sup>の場合、作業経歴として数隻のFEMデ ータ作成を経験した作業者一人で(研究者の助言を適宜 得ながら)、概ね下記程度の作業時間を要していた。

- ・図面からの寸法読取り作業とパソコンによる FEMメッシュ作成作業 --- 約2ケ月
- ・FEMデータの確認修正作業 --- 約1ケ月
- ・合計 --- <u>約3人月/隻</u>



図4-2. 全船FEM解析の例<sup>19)</sup>(鋼材運搬船)

以上のように、手作業で図面を読取りながらFEMデ ータを作成する従来の作業は、正しく根気と時間を必要 とするが、その主な理由は下記にあると考えられる。

1)「読取り区画」の頂点座標を3次元的に正しく読取る ことが、案外に難しい。同じく、甲板・船側外板・隔 壁など面の接続関係についても、交線の分割を共有 しながら、複数の図面を見ながら立体的な構造状況 を頭でイメージしながら作業を進める必要がある。 場合によっては、手書き図面であることや紙の伸縮 による読取り誤差を斟酌する要がある。

- 2)大骨や梁などが隔壁や外板に接続する交線や面材の 板厚寸法の表記などは、特定の図面でのみ表記され ることが多く(他の図面では実体を表わしているが 寸法など表記が無く)、板厚切替え位置など含めて 正確かつ素早く図面を読取るには、若干の習熟さが 求められる。
- 3)船首部・船尾部では、船体断面形状が3次元的に変化するため、区画読取りを単純な繰返しとして実施することが難しくなり、個別状況に即した作業と成らざるを得ない。船首尾の曲がり部では船体平行部と比べて、一般に、数倍の時間が掛かる。
- 4) 上記2)に含まれるが、作業者が図面を正しく読めない場合、正しい幾何学的位置関係の解釈が成されず、従って、手戻り的な修正作業に追われる結果となる。間違った構造イメージまま誤入力して要素リンクデータ等を作成した場合、新規に入力するよりも虫取り修正作業に手間取ることが多い。

#### 4.2. 開発システムの活用と今後の方向性

前節で述べたように、今までのFEM入力作業には多 大の時間と根気が必要であった。他方、最近の趨勢とし て1章で触れたように、船体構造の合理化設計や破損限 界シミュレーションへの指向(直接強度計算法の普及) により、大規模FEM解析を行なう機会が増えており解 析作業の迅速化・省力化は必須の要件となっている。 今回の船体構造解析システムの開発は、このような状況 を踏まえて実施されたものであり、今後上記のような場 面での実践適用が期待される処である。

実用的場面での活用は未だその緒に付いたばかりで あるが、作業迅速化の具体的イメージとしては、所要時 間を数分の一から1/10オーダーに、即ち図4-2に 掲げた事例(1隻あたり約3ケ月)では約1週間から半 月程度に短縮することを目論見としている。

ところで、構造解析作業の迅速化・省力化については、 入力支援システムの開発だけでなく、一段高い視点から、 解析チームの組織化と支援環境の改良とを目的に応じ て推進することが肝要であろう。即ち、自動車会社や造 船ヤードなど構造設計の最前線では、FEM解析自体が 完全にルーチンワーク化しており、作業効率を最優先に 考えた組織化や環境整備が成されている。



図4-3. 解析チームと支援環境の模式図

図4-3にA方式として模式的に示すように、計算者の FEMモデル化プランに従って、数人かそれ以上のメッ シャーさんとも呼ばれる計算補助者が部分々々を分担 して、同時併行的にFEMモデル化を進めてゆく。役割 分担と専業化を押し進めたチーム編成が採られている。 支援環境についても、メッシャーさんに必要となるもの は入力支援ソフトやその操作マニュアルであり、設計者 や計算者に必要なのはFEMマニュアルや事例ノウハ ウであって、これらは明確に階層化され目的別にカスタ マイズ化が図られている。

一方、当研究所の責務は研究開発であり、その大きな 目的に向かう一部として構造解析を行なう場面がある。 今のところ、定常的にFEM解析業務がオーバーフロー する程の計算量が発生する状況ではないし、過度の役割 分担やスキル専業化によって柔軟な発想や問題発見能 力がスポイルされてしまっては本末転倒である点にも 考慮の要がある。

FEM解析の迅速化・省力化は必須であるが、本分が 手薄になるほど、解析作業に研究者自身の時間と手間を 過大に費やさざるを得なくなる事態こそ問題視すべき であろう。このような基本スタンスに立つ時、設計・建 造の現業部門とは少し違ったアプローチによる迅速 化・省力化を思い描くことができる。つまり、図4-3 のB方式に模式的に示すように、敢えて専業化を第一義 とはしないで、平均的な研究者に求められる共通スキル として、強力な支援環境の整備に注力する方向である。 研究者自身に多芸を求める方向であり、それを可能にす るだけの頼りになる支援ソフトや参照する者の立場に 配慮した事例集やマニュアル類を整備する方向である。

このように考えてくると、今回の船体構造解析システムの構築は、大きな成果ではあるが、FEM解析の迅速 化・省力化に向けてのーステップに過ぎないことが理解 できる。即ち、FEM入力支援における重要な道具建て を手にした段階であって、今後さらに研究者を助けてF EM解析そのものを円滑に遂行するための種々環境を 持続的に整備してゆくことが必要である。

# 5. まとめ

構造解析作業の迅速化・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。開発システムの特徴 として、下記が挙げられる。

- 開発システムは、一般のCADシステムと同じく オブジェクト指向の考え方に基づいて構築されており、構造データの修正や再加工などに円滑に対応で きる。
- 2) FEM解析の入力支援インターフェイスは、構造 モデルの表示機能・ディスプレイ操作機能(回転な ど)・描画オブジェクトの選択機能などに優れてお り、入力作業の迅速化・省力化が期待できる。
- 開発システムは、外板形状フェアリング結果を、 曲面のオフセットデータ(離散値データ)又はIG ESデータ形式にて採り込むことができる。
- 4) FEMメッシュの細分化機能が装備されており、 目標とする基準要素長さを指示することにより、F EM板要素を自動生成できる。
- 5) 荷重データ作成に関して、ストリップ理論から得 られる規則波中の水圧分布や慣性力の評価結果を、 FEM節点での作用分布荷重に自動変換できる。
- 6) これら開発した入力支援機能の活用により、FE Mデータ作成に要する時間は、概略で数分の一から 1/10オーダに短縮でき(全船FEM計算例では 3人月/隻→0.5人月/隻)、かつ入力作業のミス 防止に貢献できる。

今後は、開発システムのブラッシュアップ(更なる使い 勝手の向上や人的ミス低減策など)に努めると共に、F EM解析の事例ノウハウ蓄積や操作マニュアル整備な ど、ソフトの周辺環境の充実にも注力してゆく必要があ 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)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
- 3)野本、青山:タンカーの設計、生産支援システムの 構築に関する研究、日本造船学会論文集第169号、 pp509-518、1991年6月
- 4)中前、西田:3 次元コンピュータグラフィックス、昭晃堂、1987年
- 5) ロンフォスナー: OpenGL Programming for Windows95 and Windows NT(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
- 6) クレイトン・ウォルナム: Win32 OpenGL プログラ
   ミング、プレスティンホール出版、1996 年
- 7) 酒井幸市: OpenGL 3D プログラミング、CQ 出版社、 2000 年
- 8) Initial Graphics Specification IGES 5.3, U.S. Product Association (1996)
- 9) Gerald Farin, Curves and Surface for CAGD, Academic Press, 1997
- O) H. Norwack, M.I.G. Bloor, B. Oleksiewicz: Computational Geometry for Ships, World Scientific Publishing Co., 1995
- 11)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
- 12) 穂坂衛、CAD/CAM における曲線曲面のモデリン グ、東京電機大学出版局、1996
- 13) 桜井明、スプライン関数入門、東京電機大学出版 局、1997
- 14)大坪英臣、相澤龍彦:有限要素法の最近の動向(その4)一二次元自動要素分割アルゴリズムとプリプロセッシングー、日本造船学会誌、第702号、昭和62年12月
- 15)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)
- 16)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)
- 17)大坪英臣、久保田晃弘、北村充、川村恭巳、有限 要素モデルのデータ構造とh法による順応型要素再

分割法に関する研究、日本造船学会論文集、第 169 号(1991)

- 1 8) S.FLO, A new mesh generation scheme for arbitrary planar domains, Int. Journal for Numerical Method in Engineering, vol21, 1403-1426(1985)
- 19)橋爪豊、岡修二、中村卓司、内航船の構造強度解 析について、平成10年度春季船舶技術研究所研究 発表会講演集、1998.6.11

(66)