先進複合材料によるマリンストラクチャの 設計・製作支援システムの開発

(第2報, 積層材料用 CAD/CAE システムの設計・開発)

正員 高戸谷 健* 正員 金 原 勲**
正員 影 山 和 郎**

Development of Computer Aided Design and Manufacturing System
for Advanced Composite Marine Structures

(2nd Report : Design and Developing CAD/CAE Systems for Laminated Structures)

by Takeshi Takatoya, *Member* Isao Kimpara, *Member*
Kazuro Kageyama, *Member*

Summary

Advanced Composite Materials (ACM), such as Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP), have a big potential for achieving a light-weight marine structure. However, material design, structural design and fabrication technology should closely be entangled in achieving a significant weight saving. For this reason, the present paper aims at developing a computer aided design and manufacturing system for advanced composite marine structures.

As the authors had applied the concept of CAD/CAE/CAM technology to design, manufacture and evaluate of an ultra light-weight sailing dinghy, we had pointed out that a general-purpose CAD/CAE had some problems in handling anisotropic laminated composites. Definition of orientation angles, structural analysis of sandwich shells and interface between CAD and CAE are such examples. As general-purpose CAD/CAE systems are developed mainly for isotropic materials, some specialized CAD/CAE systems suitable for anisotropic laminated composites are required to be developed.

First, in this paper, some basic concepts are presented for developing a CAD system of laminated materials for marine structures. In the concepts, a laminate is defined on surfaces with the use of surface-oriented coordinates, and compared with ordinary CAE defined laminates on finite elements. Furthermore, mesh generator suitable for anisotropic materials and interfaces from CAD to CAE, and from CAD to CAM are required in handling laminated composites.

Second, some prototypes of CAD system for laminated panel design are demonstrated, which are programed by one of the object oriented languages, C++. It is shown that object oriented language is effective for defining laminate sequences, because of its function of class definition and its easiness to change classes. In the developed system, a layout sequence is defined on the surface with the use of surface-oriented coordinate.

Third, some prototypes of CAE system for laminated panel are demonstrated, which are made of preprocessor, analysis code and postprocessor. In this paper, general-purpose finite element analysis program MARC is used as analysis code. The designed laminated panel is divided into finite elements concerned with material axis of anisotropic material, that is, fiber direction. The analysis results are displayed on every layer of all region and compared with ordinary post processor in which the results can be displayed on only one layer. It shows that the developed system is effective in designing and analyzing laminated panels.

* 東京大学大学院

** 東京大学工学部

1. はじめに

先進複合材料 (Advanced Composite Materials: ACM) は次世代を担う材料として注目されている。ACM の代表として炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) が挙げられる。従来の鉄鋼やアルミニウム合金と比較すると、CFRP は比強度・比剛性に優れ、曲面の成形が容易に行なえること、耐食性がよいことなどの利点がある。一方、材料の不均質性や強い異方性を持つこと、成形にコストと手間がかかるうえ、成形の品質にバラツキが大きいことなどの、新しい材料ゆえの問題点を多く抱えている。

本研究では、マリンストラクチャを新形式船舶や競走用舟艇のような、自由曲面を有し、面圧に対して剛性・強度を保持しながら高度の軽量化を要求される構造体と定義し、ACM によるマリンストラクチャの設計・製作支援システムを開発することを目的としている。前報¹⁾では、マリンストラクチャの一つであるレーシングディンギーに ACM を適用し、ACM が軽量構造の実現に有効であることを確認し、今後開発すべきシステムの在り方を検討した。

本報では、従来の設計法を用いることで生ずる様々な問題点に対するアプローチの一つとして、設計者がイメージした積層構造をオブジェクト指向の概念を用いて構造モデルにモデル化する積層材料用の設計支援システムの開発を行なった結果について報告する。このシステムでは、複合材料構造の積層の概念を設計から構造解析の評価まで一貫して扱えることが特徴である。

2. 研究の背景と目的

2.1 複合材料の適用可能性

複合材料とは一般に「複数の異種素材の組み合わせにより、素材単体に比べて優れた性質・機能を実現するために設計された材料」と言われている。既存の材料と大きく異なる点は材料自体が構造を持つ一つのシステムであり、発現される物性が設計し得る点にある。既存の鉄鋼やアルミ

ニウム合金に対する単なる材料置換にとどまらず、新しい構造概念の創成に直結する材料システム技術であると言える。

複合材料の特徴として挙げられる不均質性・異方性や材料と構造の一体化は大きなポテンシャルを秘めているが、優れた設計が出来て初めてそのメリットが発現されるものであり、慣用材料と比較して設計・解析・検査が困難であるというデメリットにもつながっている。

このため、複合材料の材料自体の設計には素材の段階での力学特性のみならず、一体化して部品とするための機能設計や製造方法も考慮して行なう必要がある。つまり、設計から製作までを一貫して扱うことが重要である。複合材料構造物の設計の概念図を Fig. 1 に示す。

2.2 研究の目的

本研究では、複合材料の特徴を生かし、マリンストラクチャとして複合材料構造体を実現するためには、材料・構造体の設計から製作までを一貫して扱うことが出来る電算機支援システムが有効であると考え、開発を行なっている。

このシステムでは、異方性や不均質性を積極的に用いて複合材料の高い自由度を有効に生かしながら、設計者のイメージ像を容易に具体化することが出来る設計・製作支援システムとなることを目指している。

あらかじめ樹脂を含浸させてあるプリプレグを曲面に沿って積層して行くことで構造体を実現する方法は、異方性を利用して必要な方向のみに強度・剛性を持たせるという点で優れているため、マリンストラクチャを実現する方法の有力な一つとして挙げられている。本報では、この積層の概念に注目した設計および解析支援システムを開発することを目的とした。

3. 既存システムの問題点と研究の現状

積層の概念を持つ設計・解析支援システムを開発するにあたり、複合材料用に用いられている市販の設計支援システム (CAD) と解析支援システム (CAE) や、他のコンピュータの適用事例を示し、その問題点を挙げる。

3.1 既存システムの適用と問題点

3.1.1 等方性材料ベースのシステム

等方性材料の設計・解析を支援するために開発された汎用の CAD/CAE については、そのほとんどが異方性材料を扱えるように拡張されている。

CAD については、各分野で専用 CAD システムとして活用されているが自動製図システムの領域にとどまるシステムが多く、等方性材料でさえ設計支援には程遠いのが現状である。三次元ソリッドモデラーとして有名な Pro/ENGINEER²⁾ では積層を入力できるが、インターフェース機能が不十分なためプリプロセッサに積層データが渡されないなどの問題がある。

CAE については、有限要素作成のプリプロセッサ、解析

Fig. 1 Flowchart of design for composite structures

のFEMコード、結果の後処理のポストプロセッサの各ステージで様々な問題が生じている。プリ・ポストプロセッサPATRAN³⁾やFEMコードMARC⁴⁾、NASTRAN⁵⁾では次に示すような問題がある。

○材料主軸の入力定義とその修正に時間・手間がかかること。

既存システムでは要素の剛性マトリックスを計算しやすいように、全体座標系に対する定義と、要素の各辺を基準とする局所座標系による定義の二つの方法をとるものがほとんどを占める。全体座標系では、曲面上の積層角度を定義しにくいこと。要素の辺を基準とする局所座標系では、要素分割に依存するため、要素の再分割や応力集中部の扱いが困難な点で問題がある。座標系の違いによる材料主軸の第一軸方向の与え方の違いを模式的にFig. 2に示す。

○材料が要素毎に定義されているので、要素の再分割が材料の再定義をともなうこと。

既存のCAD/CAEシステムでは複合材料を一つの材料として扱うため、要素毎に積層構成を定義している。要素分割に依存するため、要素の再分割に応じて材料の再定義を必要としたり、積層構成の変更や追加をするには要素分

Fig. 2 Comparison between directions of material axes which are defined in global, element oriented and surface oriented coordinates.

Fig. 3 Relations between finite elements and laminate layup data

割からやり直す必要があるため、デザインスパイラルに柔軟に対応しにくいシステムである。有限要素と積層データにはFig. 3に示すような関係があり、各々の変更に対して情報を交換する必要がある。

○層間応力が近似であり、自由端近傍で誤差が大きい。

積層材料の弱点である層と層の間の層間強度が低いことが衝撃損傷などによる離れ結び付き、設計荷重以下の応力での破壊にいたることがある。全体構造の厚肉シェル要素の解析時に層間応力が精度良く求められず、ソリッド要素などを用いた解析が別途必要である。

○サンドイッチ材などの面外せん断剛性が小さいものに適した要素がないこと。

マリストラクチャの全体構造の解析にはせん断変形を考慮した厚肉シェル要素が適していると考えられる。Fig. 4に示すように、サンドイッチ材の変形のような面外のせん断剛性が小さい場合の問題⁶⁾や、積層材料の解析はほとんどの解析コードで、層の中央面での応力しか得られないなどの様々な問題がある。

○応力の不連続な部分にもスムージングを施すため、結果を評価しにくいこと。

破壊指数などの結果を表示する場合に特に顕著であるが、等高線図を表示する際に応力の補間を行なう関係で、応力集中部が低く表示されたり、応力の不連続部の境界がぼやけたりする。Fig. 5に応力の積分点での計算値から求められる理論値とポスト処理によりスムージングされた応力値の比較の模式図を示す。

○複合材料独自の結果の評価である層毎の応力や破壊則の適用の表示が困難であること。

構造解析の結果を後処理する段階で、要素間の層の情報

Sandwich deformation model

Laminated beam longitudinal stress

Fig. 4 Some known problem in analysis of composite materials

Fig. 5 Schematic of comparison between calculated stress and smoothing stress

が欠落しているため、Fig. 6 に示すような解析を行なうと、ある層に着目した場合のプライ内の応力が容易に表示できない問題がある。

3.1.2 複合材料専用のシステム

汎用の CAD/CAE では、システムの機能のほとんどを複合材料構造以外のために準備されているため融通が利かないなどの理由で、最近では、複合材料構造の解析モジュールを独立させたり、統合したりして専用の解析システムが目立って来た。代表例としては、SYSTUS から独立した専用システム COMPOSIC⁷⁾ や、汎用のプリポストプロセッサから機能独立した P/COMPOSITE⁸⁾ などが挙げられる。

いずれのソフトウェアについても、ユーザーとのインターフェースを整えたことが特徴であり、積層の情報を要素にそれぞれ割り当てただけで基本的には汎用の FEM と同じである。専用化しインターフェースが向上したが、汎用のもののほど、多彩な解析機能を備えているわけではない。

3.2 研究開発の現状

複合材料の設計等を支援するため、三木や轟らが中心となりオブジェクト指向言語 Smalltalk-80 を用いて研究がなされ報告されている⁹⁾。これらの研究は、複合材料の専門家でなくても容易に設計や解析を行なえるエキスパートシステムを目指し、トラスや平板などの簡単な構造をコンピュータ上で設計し、構造や積層構成の最適化に結び付けた点で優れている。しかしながら、扱う対象をトラスや平板

Fig. 6 Schematic of layout

に限定し、構造解析や構造の最適化などの数値計算を目的としているので、実際の複合材料構造の設計者による曲面を持つ構造体の設計・製作を支援するまでにはいたっていない。

また、様々な企業を中心として、プリポストプロセッサのカスタマイズ機能を用いたり、データベースやアプリケーション間のインターフェースを揃えることにより既存の CAD と CAE を結び付けることも行なわれている^{10),11)}。先に述べた複合材料用に特化した解析システムと同様で、既存のシステムの拡張やユーザーインターフェースを揃えているに過ぎず、複合材料の特徴を生かした設計・解析を行なうには限界が生じている。

4. システム開発のアプローチとコンセプト

4.1 アプローチ方法

既存の CAD/CAE では構造を定義し要素分割した後、要素に対して使用する材料と板厚を別々に定義していた。本報で開発した積層の概念を持つ CAD/CAE では、積層とは、材料物性と板厚を物性として持つある材料を選択し、ある領域にある角度で積み重ねて行く作業であると定義している。つまり、積層することは構造体の構造を定めていく工程であると解釈している。

システム開発のアプローチ方法として、まず第一に、積層構造を階層構造としてモデル化していくことで、コンピュータ上に積層構造を実現できると考えているので、設計者のイメージ通りに積層構造を表現できるデータ構造を構築し、ユーザーとのインターフェースを備えた CAD システムを開発した。

次に、構築したデータ構造を用いて自動的に有限要素を作成する機能を整備し、構造解析とリンクすることで、設計案の力学的な評価を行なう CAE システムの開発を行なった。

積層構造のモデル化と構造解析の評価を行なうことで、

Fig. 7 Flowchart of developed CAD/CAE systems

設計-評価-変更のデザインスパイラルのループが実行できるので、力学的なパラメータに関しての設計を支援することが出来る。本システムのフローチャートを Fig. 7 に示す。

4.2 開発コンセプト

システム開発のコンセプトとして、積層構造の階層構造化とモデル化、設計者の意図する積層の定義と修正、層を扱う構造解析と評価の3点が挙げられる。

4.2.1 積層構造の階層構造化とモデル化

積層構造は、積層板、層、プリプレグ(単層板)、積層領域の四つの階層構造をなしているため、電算機上でも階層構造を持たせる。

設計と構造解析と製作の各ステージにおいて、積層構造の表現が異なっている。それらを共通して扱うことのできるデータ構造を備え、材料の物理特性やプリプレグの物性などとともにデータベース化する必要がある。

4.2.2 設計者の意図する積層の定義と設計変更への対応

ある型の曲面上に積層を行なう場合、設計者は曲面の局所座標系をもとに繊維方向を決めている。積層の領域は、外力や境界条件によるので全体座標系で考えている。このような設計者の意図する積層を容易に定義して行く。

積層の定義は構造の定義であるため、構造解析のための要素分割よりも上位に位置するとみなす。そのため、同一の積層構成の領域を抽出し、その領域を自動的に要素分割する自動的に要素分割を行なうアルゴリズムを取り入れ、設計者が要素分割を意識しないで積層の定義が行なえるようにする。積層構成の変更や積層領域の変更にも、柔軟に対応できるため、デザインスパイラルのフィードバックが容易に行なえる。

4.2.3 各層として扱う構造解析と評価

各層の特性が大きく違うため、層毎に応力を評価できる構造解析を必要とする。また層毎の応力などを表示できる後処理機能が必要とする。積層構成の異なる領域でどの層とどの層が同じ層であるという積層構成のデータを保持し、取り込めるポストプロセッサが必要である。

4.3 オブジェクト指向の適用

積層材料用 CAD を実現するために、オブジェクト指向の考え方をういてシステムを構築することを提案する¹²⁾。オブジェクト指向の考え方に基づく、プリプレグ-層-部品-構造体のデータ構造がクラス定義とクラス間の継承関係により明確に定義できること、また、各クラスに固有の属性値であるメンバーを、他クラスからの参照可能な範囲をコントロールすることで、プログラム内の実装に関わらずクラスを定義していくことができるため、将来の拡張性を保ちながら、設計変更に対応可能なシステムを構築できると考えられる。

5. 開発システム

5.1 開発環境とシステム構成

開発システムはワークステーション上で実行することを前提とし、システムの構築には、クラス定義をオブジェクト指向言語 C++¹³⁾ で、画面に表示するグラフィック関係にはオブジェクト指向の三次元グラフィックス・ライブラリ HOOPS¹⁴⁾ を用いた。

開発システムは積層構造のデータ構築を行なうため、ユーザーからの入力を受け持つ CAD システム部分と、構造解析の結果を評価するためのポスト処理部分の二つに分けられる。なお、本報では構造解析は、汎用有限要素法プログラム MARC K5 を使用している。MARC では、厚肉シェル要素を用いると、各層の中央面のみであるが各層毎の応力を求められ、ユーザーが定義できるサブルーチンを利用して破壊基準などの計算が可能である。

5.2 要素技術の特徴

5.2.1 積層構造のクラス構造

開発システムにおいて定義した積層構造の階層構造を Fig. 8 に示す。各クラスの中には、それぞれのクラスを表現

Fig. 8 Class hierarchy in laminate structures

するメンバーが定義されている。

このように積層構造を構造化したことで、層の追加や材料の変更など必要なクラスにアクセスするだけで設計の修正を行なうことが可能となった。

○積層構成を表わすクラス (laminate, ply, prepreg, region)

クラス prepreg はプリプレグの種類を表現し、品番や目付 (単位面積あたりの重量)、強度・剛性値などのプリプレグの情報をメンバーとして持つ。なお、本システムでは、プリプレグをあらかじめ樹脂を含浸させてある半製品としてのプリプレグの性質に加えて、硬化後の単層板としての材料物性や板厚を保持している構造の最小構成要素として広い意味で用いている。クラス region は積層領域を表わすクラスで、局所座標系で定義された積層領域の端点をメンバーとして持つ。クラス ply は各層を表わすクラスで、積層するプリプレグの領域や積層角度、面積や重量をメンバーと持つ。クラス laminate は複数の ply からなる積層構成を表わすクラスで、積層数や層の順列をメンバーとして持つ。

○形状を表わすクラス (surface, plate, line, point)

Fig. 9 Schematic of laminate on mold, which are converted into regions in local coordinates

クラス surface は基準面の形状を表現するクラスである。基準面の局所座標系を定義し、全体座標系への写像関数をメンバーとして保持している。クラス plate, line, point はそれぞれ全体座標系における面, 線分, 点を表現するクラスである。これらのクラスを用いて基準面の定義を行なう。

5.2.2 型の概念

成形時に必要なオスまたはメス型を、全体座標系を用いて基準面として定義する。局所座標系と間の相互の変換を必要とするため、基準面は平板、円錐曲面、B-Spline 曲面などの直交空間の基底からの線形写像で表わすことのできる平面・曲面である。

定義した基準面を基準として、オス型とする場合は法線ベクトルの正の方向に、メス型とする場合は負の方向に積層を行なう。また、板厚のオフセットも可能である。

本システムでは、複数の曲面を接続できるが、面同士はジョイント部を保持していないものとする。型と積層材料の関係を Fig. 9 に示す。

5.2.3 座標系の定義

基準面は空間固定の全体座標系 (x, y, z) で定義し、積層は曲面の局所座標系 (u, v) で定義する。プリプレグの繊維方向を決める基準軸は、曲面の u 方向を 0 度とする。したがって、基準軸は曲面に沿った曲線となる。

5.2.4 積層の定義、領域、角度

プリプレグは主要なメンバーとして、材料物性値と板厚、繊維およびトータル目付を持っている。また、積層領域の定義は、曲面上の局所座標により表わされる点を反時計周りで結ぶことで出来る内側の領域として定義される。

第 i 層を定義するには、プリプレグの種類を決め、積層する領域を決め、繊維方向を基準軸からの角度で決めることで定められる。この層の定義を必要な層数行なうことで、基準面への積層を定義することが出来る。Fig. 10 にある曲面の成形成に積層を定義した例の画面表示を示す。

5.2.5 設計変更

積層領域の変更は、変更したい領域のクラスにアクセスし、メンバーとして保持しているポイントのデータを変更することで行なうことが出来る。積層の追加や削除は、対

Fig. 10 Schematic of layup on basic surface by developed system

象とする層のクラスにアクセスし、新しい層のクラスをコンストラクトしたり、削除したりすることで行なえる。クラス構造として下流にあたる有限要素関係のクラスは自動的に再構築されるので、構造解析の再計算は手間をかけずに実施できる。積層の修正により変化するクラス構造を Fig. 11 に示す。

5.2.6 要素分割, 材料特性の付与

積層構成の異なる領域を区別するため, 定義した積層領域同士の内外の判定を行ない, 内部に他の積層領域がある場合は再分割を行ない, 属性を継承するサブ領域を新しく定義する。

等方性材料については誤差評価を行なう自動メッシュ作成機能¹⁵⁾がほぼ実現されている, 一方, 異方性を考慮した自動メッシュ作成機能に関する研究¹⁶⁾はまだ基礎的な段階にある。そのため本報では, 一定の積層構成であるサブ領域内を写像関数を用いて周囲の線分を n 等分することで要素を作成する簡易的な自動メッシュ生成機能を実現した。

有限要素作成の手順を模式的に Fig. 12 に示す。領域 A , B が定義された場合, 内外の判定をすることで, 領域 A の属性を継承するサブ領域 a, b , 領域 A と B の両方の属性を継承するサブ領域 c , 領域 B の属性を継承するサブ領域 d, e に分割する。サブ領域 e に注目すると, 基底上に定義された 4×4 の矩形のメッシュを写像することでサブ領域 e を有限要素に分割する。

さらに生成された有限要素に対して, 材料特性として層毎の板厚と積層角度を積層構成から取りだし, 材料物性として付与している。

5.2.7 層応力の評価

通常の構造物では複数の積層構成が存在するため, Fig. 13 の模式図に示すように, 積層領域が異なる関係で, 積層

の定義部で定義した層 (ply A-D) は有限要素に付与した材料物性としての層 (layer 1-4) とは違う層を意味する場合が多い。そのため, 積層の定義の層と有限要素の層の関係をテーブルの形でデータベース内に保持することで, ポスト処理において, 積層の定義部で定義した物理的に連続な各層 (ply) の応力を表示することが可能となっている。

さらに複合材料では一般に各層の特性が大きく異なり, 引張り強度と圧縮強度の差などから等方性材料で用いられる主応力は意味をなさない。引張り強度と圧縮強度の差を考慮できるため複合材料の破壊則として広く用いられている Tsai-Wu 則¹⁷⁾の計算を行ない破壊指数の表示が可能となっている。

また, 積層構成の同じ領域では応力の不連続部が生じないため, 各サブ領域毎にスカラーの補間をおこなうことで, 応力の不連続部を正確に表現している。

5.3 本システムと既存のシステムとの比較例

本システムを用いて積層構造の設計を模擬し既存システムとの比較を行ない積層材料の設計に有効であることを確

Fig. 12 Schematic of creating finite elements and nodes

Fig. 11 Class hierarchy which are effected by laminate change

Fig. 13 Relation between plies and layers

Fig. 14 Schematic of plate with hole under tension loading

Fig. 16 Finite element view of plate with hole, which are created automatically in developed system

Fig. 15 Data of plate with hole, which are required to define laminate

認した。円孔板に引張り荷重が加わる場合と半円筒シェルに曲げの集中荷重が加わる場合の2ケースについて検討を行った。

5.3.1 円孔板の事例

円孔板に引張り荷重が加わる構造の模式図を Fig. 14 に示す。開発した CAD システムを用いて全体を一樣な積層構成 $[0/90]_s$ として定義するために必要な情報を Fig. 15

Fig. 17 Distribution of failure margin of top ply (PATRAN 3)

に示す。要素分割を行なうと Fig. 16 に示すようなメッシュが得られる。FEM で計算した結果をもとに、Tsai-Wu 則から求められる破壊指数を表層の 0° 層について既存のプリポストプロセッサ PATRAN 3 と本報で開発した CAE システムで画面上に表示したもの Fig. 17, 18 にそれぞれ示す。補間方法の違いから若干の違いは生じているが、等高線図がほぼ同じであることが確認できた。

次に、円孔周辺で設計許容値を満たしていないとし円孔周辺に $[0]_s$ 層の補強を加えた場合、表層の 0° 層の破壊指数の分布は PATRAN 3 と開発した CAE システムではそれぞれ Fig. 19, 20 に示したようになり、大きな食い違いが生ずる。Fig. 21 に示すように既存のシステムにおいては円孔周辺の補強部では表層が補強した層となるため、表層の

Fig. 18 Distribution of failure margin of top ply (developed system)

Fig. 19 Distribution of failure margin of top ply with reinforcing layer (PATRAN 3)

Fig. 20 Distribution of failure margin of top ply with reinforcing layer (developed system)

0°層ではなく補強の層の破壊指数を表示したため、このような違いが生じることになる。

Fig. 21 Schematic of definition of top ply, compared between PATRAN 3 and developed system

Fig. 22 Schematic of half curved shell under out-membrane loading

Fig. 23 Distribution of failure margin before reinforcing

5.3.2 半円筒シェルの事例

半円筒シェル [0₄] 及び補強部 [0] に曲げの集中荷重が加わる構造の模式図を Fig. 22 に示す。開発したシステムを用いて表示した補強前の破壊指数の分布と補強後の破壊指数の分布をそれぞれ Fig. 23, 24 に示す。

Fig. 24 Distribution of failure margin after reinforcing

円孔板と同様に、補強したことで積層構成が変化したにもかかわらず注目したい層の力学的な評価が手軽に行なえることが確認できた。

6. 今後の計画

本報で設計支援システムとしては基本的な機能を備えたシステムを開発したと考えている。今後は設計から製作までを一貫して扱うシステムに拡張するため、次に挙げる項目について検討を加えて行く予定である。

複合材料ではプリプレグの種類や積層領域、積層角度などの設計パラメータが多いため、最適設計を実施するのが非常に困難である。感度解析などを用いて出来るだけ最適な積層を設計者に提供できるアルゴリズムを開発する。

曲面にプリプレグを貼れる貼れないの判断を行ないプリプレグの位置と幅をシミュレートすることで、構造物の総重量や必要とするプリプレグの面積や型紙が求められるなど製作を支援できるようにする。

また、統合化したシステムとして設計から製作までを一貫して扱うことを目標としているが、過去のデータの蓄積がある既存のアプリケーションとのインターフェースを揃えていないと機能が限定されたものとなる。特に B-Spline 曲面などの複雑な曲面については、既存の CAD で定義したものを IGES ファイル¹⁸⁾を介して取り込むことが出来るようにする予定である。

7. 結 論

異方性を有効に活用し、必要な方向のみに強度・剛性を持たせる複合材料の設計を支援するため、設計者が意図した積層構造を積層構造モデルとして表現する設計支援システムを構築し、このシステムは異方性を活用した設計を行なうデザインスパイラルの過程で有効であることを確認で

きた。

また、設計から製作までを一貫して扱う設計・製作支援システムへの拡張についての指針が得られた。

参 考 文 献

- 1) 金原勲, 影山和郎, 鈴木敏夫, 大沢勇, 高戸谷健, 先進複合材料によるマリンスラックチャの設計・製作支援システムの開発 (第1報, 超軽量ヨットの設計・製作・評価), 日本造船学会論文集, 174(1993, p. 815
- 2) Pro/ENGINEER (Release 11.0), Parametric Technology Corp.
- 3) PATRAN 3 (Release 1.1 B), PDA Engineering
- 4) MARC (Revision K 5.2), MARC Analysis Research Corp.
- 5) MSC/NASTRAN (VERSION 67), The MacNeal-Schwendler Corp.
- 6) 金原勲, 影山和郎, 高戸谷健, 浅井公広, 竹内崇也, 先進複合材料によるサンドイッチ構造の実構造物への適用, 第23回 FRP シンポジウム講演論文集, 1994, I-32.
- 7) COMPOSIC V 2.7, FRAMASOFT+CSI Corp.
- 8) P/Composite, PDA Engineering
- 9) 日本材料学会複合材料(高分子系)部門委員会 委員会研究「複合材料における知識情報処理およびエキスパートシステム」研究報告書, 1994.
- 10) 平山紀夫, 安藤由香, 村山広高, 綾目正朋, 3次元複合材料構造物のモデリング手法の開発, 第23回 FRP シンポジウム講演論文集, 1994, II-66.
- 11) Takashi Kosugi and Masami Kashikawa, Structural Analyses of Composite Materials for Watercraft, FAST' 93, 1993, p. 609
- 12) 高戸谷健, 金原 勲, 影山和郎, 積層プロセスを考慮した複合材料構造のモデル化, 第39回 FRP 総合講演会・展示会講演要旨集, 1994, p. 147.
- 13) DEC C++ Version 1.3, Digital Equipment Corporation, 1993.
- 14) HOOPS 3.30-09, Ithaca Software, 1993.
- 15) 大坪英臣, 久保田晃弘, 川村恭己, 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, 175(1994), p. 291.
- 16) 金原 勲, 影山和郎, 高戸谷健, 直交異方性材料の有限要素法解析誤差に関するパラメトリックスタディ, 第19回複合材料シンポジウム講演要旨集, 1994, p. 157.
- 17) S. W. Tsai and E. M. Wu, J. Composite Materials, Vol. 5 (Jan. 1971), p. 58.
- 18) B. Smith, G. R. Rinaudot, K. A. Reed, and T. Wright, Initial Graphics Exchange Specification (IGES) Version 4.0., U. S. Department of Commerce, 1988.