

小型船舶における複合材料の構造解析手法

Structural Analysis Approach for Composite Material of Small Boat

小杉 隆司*

Takashi Kosugi

柏川 政巳*

Masami Kashikawa

高須賀 利江*

Rie Takasuka

要旨

小型船舶の開発における構造設計の果たす役割はその安定性や信頼性などの観点から極めて大きい。その一方で、いかに合理的で有利な最適設計を図るかが課題となる。この構造設計を進める上での指標となる有限要素法を中心とした構造解析がさまざまな分野で活用されている。さらに、対象とする領域も静的な荷重下での変形・応力問題ばかりでなく、非線形解析による大変形問題、伝熱解析による熱応力問題、固有値解析による振動問題など多岐にわたる。また、小型船舶ではFRPをはじめ、さまざまな複合材料が用いられる。そのため、異方性材料の解析手法も開発しなければならない。本稿では、これらの構造解析技術について電算システムから適用事例までを紹介する。

なお、本稿は1993年12月13日から16日にわたり、横浜で開催されたFAST'93（高速海上輸送に関する国際会議）での講演論文の抜粋版である。

Abstract

The role played by structure design in the development of a small watercraft is extremely important from the viewpoint of the safety and reliability of the watercraft. Moreover, the important target in the development is to achieve reasonable, advantageous, optimum design. The structure analyses which use the finite element method as a chief tool to provide information on structure design are utilized in various fields. The areas covered by the structure analyses include not only the problem of deformation and stress under a static load but also many other problems such as the large deformation problem for the non-linear analysis, the thermal stress problem for the thermal analysis, and the vibration problem for the eigen-value analysis. FRP and many other composite materials are used for small watercrafts. Therefore, an analysis approach for anisotropic materials should also be developed. In this paper, these structure analysis technologies are introduced by citing many examples ranging from computer systems to applications.

This paper is a selection from the paper used for the lecture in the FAST '93 (international conference on fast sea transportation) held in Yokohama from Dec.13 to 16, 1993.

はじめに

小型船舶において安全性、信頼性および快適性は、その走航性能とともに重要な評価項目であり、構造のもつ剛性や強度を把握することが不可欠である。一方、小型船舶ではFRPなどが多く用いられるので、複合材料のための構造解析手法も開発しなければならない。

本稿では、この構造解析を行うための技術電算システムの概要を述べ、次にいくつかの解析手法を紹介する。さらに、これらの適用事例を挙げ、その有用性を明らかにする。

技術電算システム

マリン事業本部における技術電算システムの構成の概要を図1に示す。既にEWS（エンジニアリング・ワークステーション）を中心とするシステムが構築されている。コンピュータ・ネットワークにより有機的に結びついたEWS上では、CADをはじめ、船舶計算用プログラム群、解析・シミュレーション、データベースの管理運用などさまざまな設計支援ツールが実行される。

支線系LAN上のEWS群は、FDDI準拠の基幹系LANに結ばれ、さらに専用デジタル回線を通じて本社の大型コンピュータと接続されている。スーパーコンピュータには構造解析プログラムが組み込まれ高速な演算処理が行われている。

* マリン事業本部舟艇技術部

図2に構造解析プログラムの処理フローを示す。EWS上のプリプロセッサにより作成されたデータに基づいて、FEM（有限要素法）計算が実行され、再びEWS上のポストプロセッサにより計算結果を処理して、変形図や応力分布図などが出力される。なお、プログラムは主として、プリおよびポストプロセッサにI-DEAS、ソルバーにMSC-NASTRANを使用している。

構造解析手法

CFRPの単一方向性カーボン繊維を用いた積層複合材に対するFEMによる構造解析では図3に示す計算モデルが用いられる。これは直交異方性の材料特性をもつ各々の層を積分して等価な単板に置換するものである。この方法は簡便で実用的ではあるが、各層の材料特性を予め材料試験な

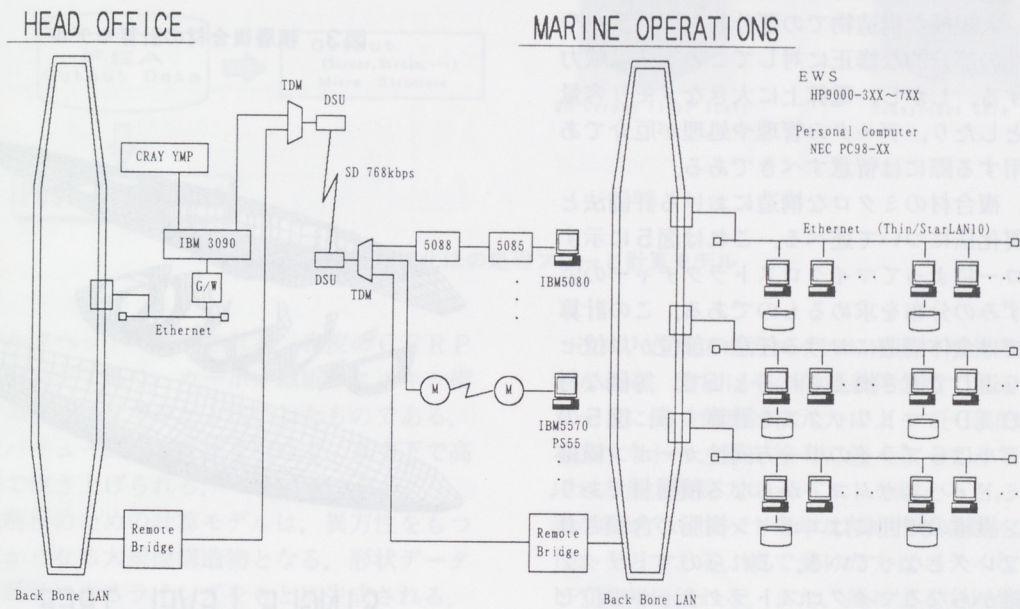


図1 技術電算システムの構成

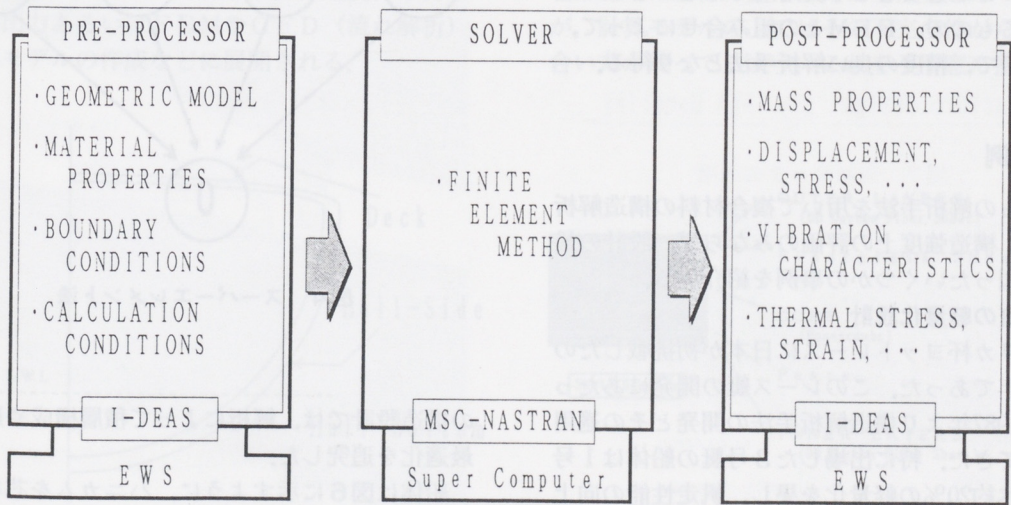


図2 構造解析プログラムの処理フロー

どにより把握しておく必要があり、多種多様な複合材への対応が難しいという欠点をもつ。

また、大規模であったり、複雑な構造物などのように大きな自由度をもつモデルに対しては図4に示すスーパーエレメント法が有効である。この方法では、予め全体構造物をいくつかの部分構造に分割し、各々の部分構造に自由度を設定して境界領域の変位などを求める。次にデータリカバリーを行って全体構造物の変位や応力分布などを算出する。このように剛性マトリックスと荷重ベクトルの縮退が行われて電算処理時間を短縮できる。そこで、大規模な構造物での部分的な形状変更や材料特性の部分的な修正に対してこの手法は威力を発揮する。しかし、電算上に大きなメモリ容量を必要としたり、データの管理や処理が厄介であり、適用する際には留意すべきである。

次に、複合材のミクロな構造における評価法として均質化法について述べる。これは図5に示す処理フローによってマイクロストラクチャーの応力やひずみの分布を求めるものである。この計算モデルでは全体構造における任意の部位が単位セルの繰り返しで置き換えられるとして、等価な材料定数の〔D〕マトリックスを計算する。図5の計算モデルは6プライの単一方向性カーボン繊維とアラミド・ハニカムコアからなる積層材であり、カーボン繊維の周囲にはエポキシ樹脂が含まれたプリプレグとなっている。これらのマトリックスや繊維からなるマイクロストラクチャが単位セルとなる。この手法では、微細な構造挙動が把握できる反面、実際の構造物では数多くの単位セルのパターンが必要となり実用的ではないなどの短所があるものの、FEMとの組み合わせによって、より簡便で、精度の良い解析手法となり得る。

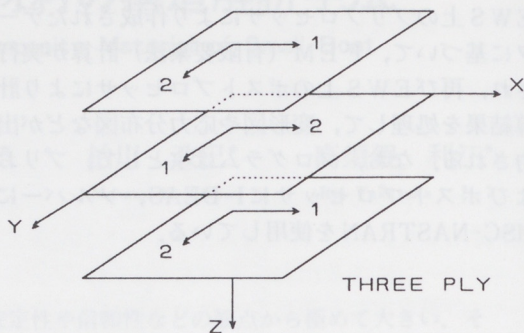
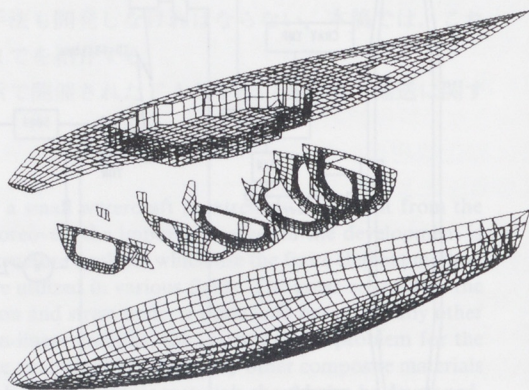


図3 積層複合材の計算モデル



SINGLE LEVEL TREE

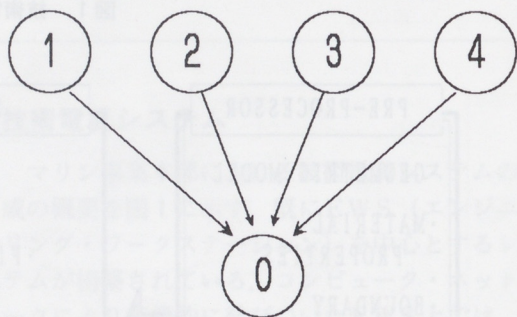


図4 スーパーエレメント法

適用事例

これらの解析手法を用いて複合材料の構造解析を行い、構造強度上の評価のみならず、設計の最適化を図ったいくつかの事例を紹介する。

①AC艇の軽量化設計

アメリカ杯ヨットレースに日本が初挑戦したのは1992年であった。このレース艇の開発にあたっては、1987年より構造解析手法の開発とその適用を図ってきた。特に出場した3号艇の船体は1号艇に較べ約20%の軽量化を果し、帆走性能の向上に大いに貢献した。このCFRPを多用した船体

の構造設計では、解析によって積層構成や形状の最適化を追究した。

船体は図6に示すように、ハニカムを芯材とするCFRPサンドイッチ構造からなるハル、デッキ

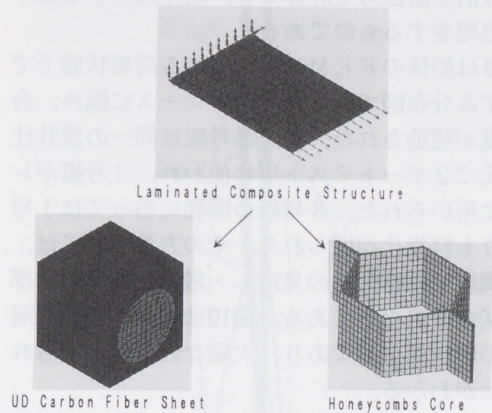
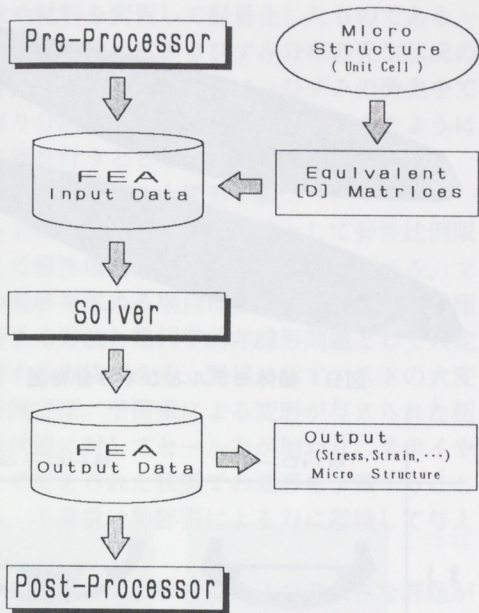


図5 均質化法の処理フローと計算モデル

キヤバルクヘッドで構成される。表皮のCFRPはプリプレグであり、カーボン繊維にエポキシ樹脂を予め含浸させてシート状にしたものである。工法はバキュームバック法を用いて、真空中で高温状態で焼き上げられる。

構造解析のための計算モデルは、異方性をもつ積層材からなる大規模構造物となる。形状データは船型設計によるラインズをもとに生成される。なお、これらのデータは図7に示すようにタンクテスト用のスケールモデル製作のためのNC加工用工具軌跡計算、構造部材の設計、型製作のための現図出力あるいはFEMやCFD（流れ解析）の計算モデルの作成などに展開される。

次に、作成されたモデルに対して境界条件が与えられる。図8はその荷重条件の例である。通常ヨットに働く荷重は復元力によって一義的に決まる。すなわち、風が徐々に強くなってきても踏んばれる最大復原力のポイントを超えると、いくら風が吹いてもヨットは単に傾いて帆は風を逃してしまうのである。帆で受けた力はステイなどを通じて船体に伝わる。また、風による力以外にラダーに生じる力やキール部の自重などさまざまな力が加わる。

これらの船体に働く外力は全体としてつり合うが、計算モデルの上ではその不完全性から不釣り合い力が残ってしまう。これを不用意に拘束する

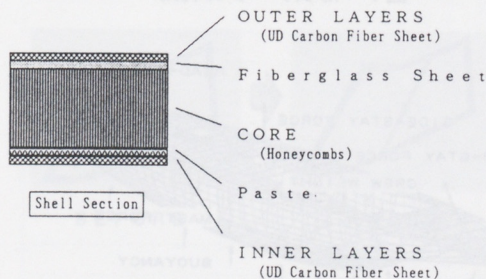
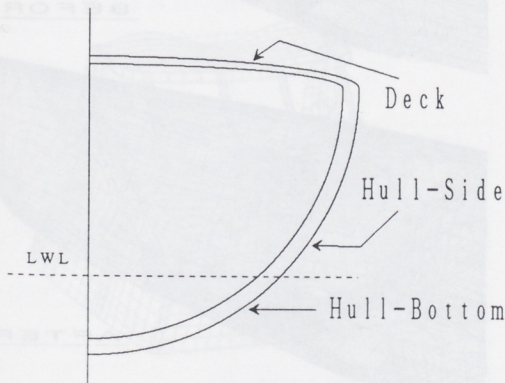


図6 AC艇の船体構造

と反力を生じて不具合が発生するためにフリーボ
ディサポートを施す。これは生じた不つり合い力
を打ち消す慣性力を計算して、剛体モードを取り
除く処理をするものである。

図9は船体のFEMモデルとある荷重状態下で
のひずみ分布図である。今回のレースに臨み、合
計3艇が建造された。1、2号艇は同一の設計仕
様諸元で2ポートテスト用に使われ、3号艇がレ
ースに用いられた。3号艇の開発に当っては1号
艇よりも軽量化が図られた。その方策としては、
積層構成や繊維配向の見直し・最適化あるいは部
材形状の変更などである。図10はバルクヘッド(隔
壁)の形状変更例であり、大幅な軽量化が図られ
たことがわかる。

②異方性材料による部材の軽量化

これは先述の船体の解析手法を用いて構造部材

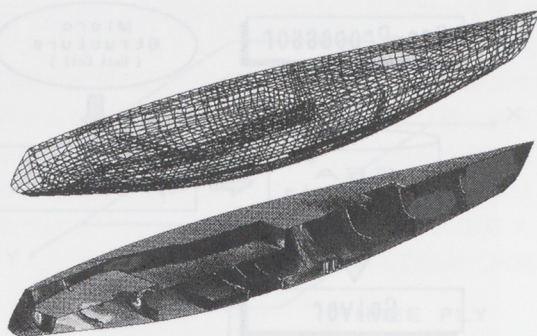


図9 船体モデルとひずみ分布図

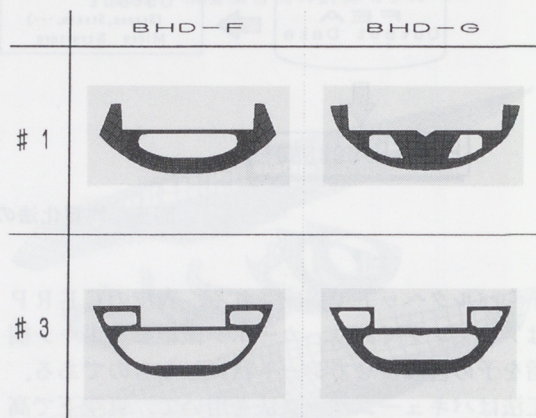


図10 バルクヘッドの形状変更例

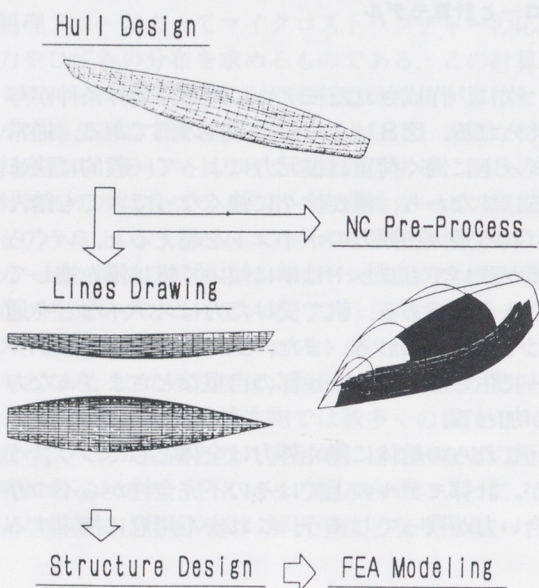


図7 形状データの利用

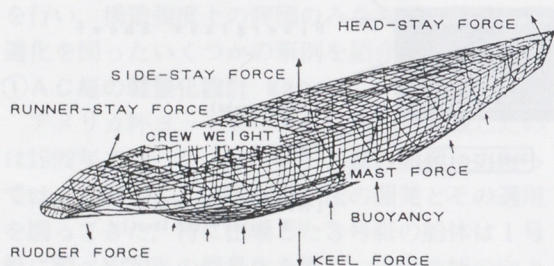


図8 荷重条件

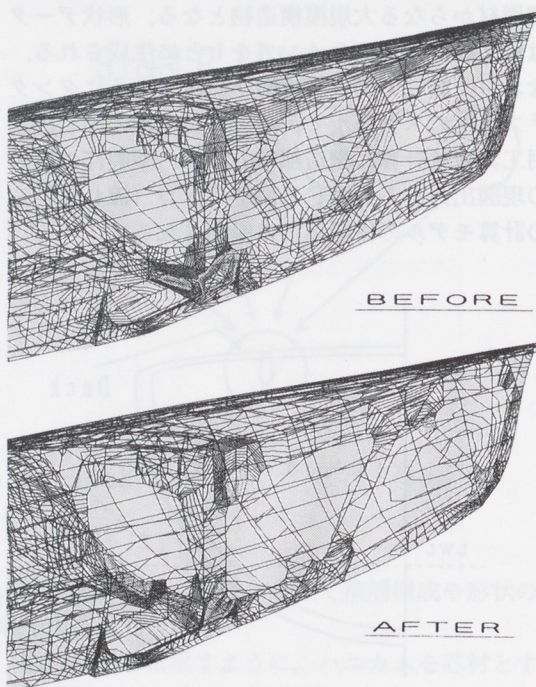


図11 構造部材の軽量化

の形状や材料を変更して軽量化したものである。図11は形状の違いによるひずみ分布の発生状況の相違を表している。ここでは、ひずみの発生をできる限り分散させて局所的な変形を抑えるように形状変更を行うとともに軽量化を図っている。

③非線形解析による大変形予測

ヨットのマストの変形は、時として弾性比例限を越えて塑性域に入り破壊に到ることがある。マストの変形を求める場合には固有値問題として座屈解析する方法と幾何学的非線形問題として大変形解析する方法がある。図12に示すマストの大変形解析例では、予荷重による変形が与えられた初期荷重状態に対してセール力加わり、ステイやリギンで支えられた状態での変形を予測することになる。予荷重は熱膨張による力に置換して与えられる。

このマストの変形解析には2つの大きな課題がある。その1つは外力を精度良く把握しにくいことである。実測によって各部位に働く外力を時系列に得て計算に反映しなければならない。もう1つは計算モデルが縦長な形状であり、板要素にてモデル化するとアスペクト比により大きな自由度をもつことになる。これは固有値解析での多数の局所モードを発生させることになる。はり要素でのモデル化では変形評価はできるものの強度評価が難しくなる。

④熱応力解析による変形予測

図13は窓用部材として用いられるアクリル板の熱変形の計算例である。熱伝導率を材料特性データとして与えて表面と裏面の温度差を境界条件とする。さらに、板周辺の数箇所を固定して熱ひずみや応力分布を求める。

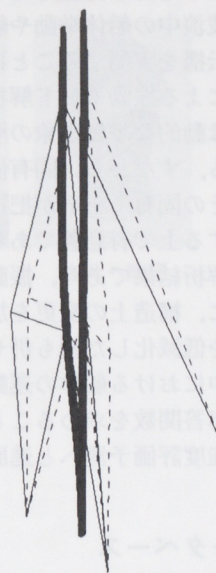


図12 マストの大変形問題

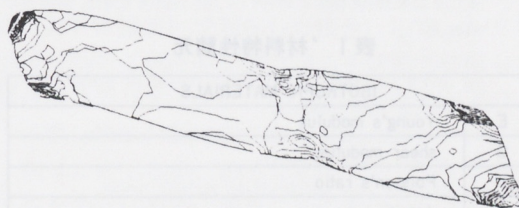


図13 熱応力解析による変形予測

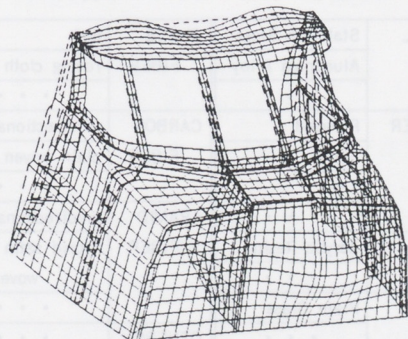
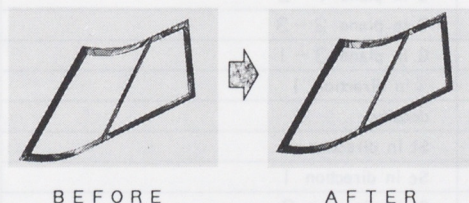


図14 振動モードと発生応力の低減



⑤振動解析による動的な発生応力予測

高速域での波浪中の船体挙動や船体に加わる動的な力やその伝播を実測することは厄介である。しかし、実測による振動モード解析と計算モデルとの比較検証は動的な挙動現象の解明への1つの糸口となり得る。すなわち、固有値解析によって共振周波数とその固有モードが把握できれば、振動強度を評価する上で有意義である。図14はキャビンの固有値解析結果であり、振動モードを表している。さらに、構造上の変更を加えて構成部材に生じる応力を低減化した例も併せて示す。

今後、波浪中における船体の運動シミュレーションができ、応答関数を求めることによって精度の良い動的な強度評価予測へと進展できよう。

材料特性データベース

先述の構造解析手法の開発やその適用とともに重要なのが材料特性データベースである。これは表1に示す特性値からなる。すなわち、等方性および直交異方性材料に対する縦弾性係数、ポアソン比や許容引張強度などの材料力学上の特性デー

表1 材料特性諸元

ISOTROPIC MATERIALS	
E	Young's modulus
G	shear modulus
ν	Poisson's ratio
ρ	density
St	allowable tension stress
Sc	allowable comprssion stress
Ss	allowable shear stress
t	thickness
ORTHOTROPIC MATERIALS	
E1	E in birection 1
E2	E in direction 2
G12	G in plane 1-2
G23	G in plane 2-3
G31	G in plane 3-1
ν 12	ν in direction 1
ρ	density
St1	St in direction 1
Sc1	Sc in direction 1
St2	St in direction 2
Sc2	Sc in direction 2
Ss	allowable shear stress
t	ply thickness

タである。また、船舶に用いられる材料は表2に示すように鉄鋼をはじめ、アルミニウム合金などの非鉄金属、木材や合板、プラスチックやガラスなど多種多様である。

これらの数多くの種類の材料に対する材料特性値は文献資料やカタログあるいは材料試験から得ている。さらに、集められた各種の諸元値は整理され電算上の共通データベースに登録される。そして、FEMデータの作成時には材料名の指定によって自動的にその特性データが割り付けられる。また、解析結果での強度評価においても許容応力を参考に構造物の安全性・信頼性の検証が行われ、より精度の高い設計ができる。

おわりに

小型船舶の開発のための構造解析における技術的な課題をまとめておく。

①解析モデル作成時間の短縮

解析所要時間の中、約80%はプリプロセッサでの解析モデルの作成時間である。従来より、この作業時間の短縮化を目指してCADデータの流用や自動メッシュ生成機能の向上が図られてきたが、より一層の推進が必要である。

また、複合材料の場合、積層パターンが数多くなり材料特性データの作成が極めて繁雑となる。そこで、材料設定を要素単位でなく、実際の積層パターンによる指定で自動化されれば、大幅な作成時間の短縮と労力の低減が期待できる。

②解析結果の信頼性・精度の向上

特に、構造部材間の結合部における疲労破壊強

表2 船舶に用いられる材料

METAL	Stainless Steel	GLASS FIBER	mat
	Aluminum Alloy		roving cloth

LUMBER	Plywood	CARBON FIBER	unidirectional mat
	Lauan		plain woven cloth
	Teak		...
	...	ARAMID FIBER	unidirectional mat
RESIN	Acrylic Resin		hybrid satin
	...		woven cloth
GLASS	Plate Glass	OTHERS	...

RUBBER	Silicon Rubber		...

度の予測精度を向上したい。このために今後さまざまな結合に対して強度試験と併行して計算を行い両者の整合を取っていく。

また、自由曲面上における異方性材料の配向を実際の積層方向と一致させて精度の向上を図っていきたい。

③最適化設計の推進

構造物の軽量化を進める上で、形状の最適化あるいは異方性材料での繊維配向や積層構成の最適化が重要である。これらの処理を電算上で自動的に行って構造設計の最適化を図りたい。

■ 著者



小杉 隆司



柏川 政巳



高須賀 利江

Table 1: Comparison of VFW and SPFS	
VFW	SPFS
Length	2.77 m
Weight	4.0 kg
Material	Carbon fiber
Structure	Monocoque
Cost	Low

