造船 CIMS のための構造設計過程の表現に関する研究

正員 古 賀 輝 一*

On the Representation for the process of structural design for CIM for shipbuilding

by Kiichi Koga, *Member*

Summary

CIM for shipbuilding studied basically by SHIP & OCEAN FOUNDATION is one of the measures to continue shipbuilding industry under the circumstances that man power is decreasing year after year. This paper is one of the results of works for developing pilot system of CIM for shipbuilding.

The paper proposes the representation for the process of structural design by which the fundamental framework of knowledge-based structural design system can be established. "Panel to be Stiffened" as design process object is newly defined and the process of structural design can be represented as the process of generation and division of "Panel to be stiffened". Knowledge of the process of structural design is defined as the description of method of generation and division of "Panel to be Stiffened". The knowledge is classified to enable to use knowledge of structural engineering independent of the product.

Thus bottle neck of shallow knowledge acquisition dependent on specified ship type can be avoided. "Panel to be stiffened" is general representation of static state in process of structural design including plate, girder, stiffener and strut, which is easily converted into structural analysis model. On the basis of this representation, computer system that is a good assistant of designer to support design works excluding creative parts can be developed.

1. 緒 言

最近の造船業界では、経営環境の一頃よりの好転にもかかわらず人的資源の減少に対応して産業としての継続発展の具体策が強く望まれている。(財)シップ・アンド・オーシャン財団「造船 CIMS パイロットモデルの開発研究委員会」(委員長 笹川陽平氏)においても、コンピュータの力の利用という観点からその一つの方策を研究中である。造船においては、大型構造物であることから鋼構造設計の占める役割は、他産業に比し大きなものがあり、コンピュータの利用に関しても先進的な歴史をもち、有効利用が図られてきた。しかし最近 CAD/CAM から FA さらに CIM とコンピュータシステムの扱う対象と規模の拡大の方向に流れが向いており、FEM 計算の普及の他は、構造設計者にとって有効なコンピュータシステム化の進展は頭打ちの傾

向である。構造設計分野のみならず造船 CIMS の全体構想¹⁾からみても、速く間違いの少ない設計が強く望まれており、構造設計支援システムに対する期待は強いものがある。

数年前に、エキスパートシステム構築ツールが実用の段階を迎え、構造設計支援を試みた研究がなされたが^{2)~5)}、限定された範囲では有効であるが、応用が難しいところから、その後の進展がみられないようである。近年は、プロダクトモデルの概念やオブジェクト指向の枠組みを基礎にした設計や生産計画の知的支援システムに関する研究が盛んになりつつあるが^{6)~9)}、構造設計については研究が少ない。エキスパートシステムの知識処理を最終的に成功させるには、範囲を限定した試作の前に対象とする設計の過程そのものの表現を研究し、知識のメンテナンス機構を考慮しておく必要がある。

本論は、前述の造船 CIMS のパイロットモデルの開発研究の一部で行った構造設計支援システムのための構造設計過程の表現に関する検討をまとめたものである。即ち、防撓面というオブジェクトを導入し、構造設計過程を防撓面

* (財)シップ・アンド・オーシャン財団
造船 CIMS パイロットモデルの開発研究委員会
推進部専任チーム/三菱重工業(株)本社

の生成分割の過程と考え、その分割生成方法を記述したものを知識と呼び、製品に依存しない構造工学一般の知識の活用を可能にする知識の分類と階層を考察した。これにより、対象船舶船型別の船舶構造設計のヒューリスティックな知識獲得のボトルネックを解消し、船舶構造の大半をしめる薄板骨構造についてそのコンピュータシステム上での有効活用を図ることができ、創造的な部分以外をコンピュータがアシスタントとなって支援するシステムの実現の基礎を築くことができる。

2. 構造設計業務の分析とあるべき姿

2.1 構造設計業務の分析 業務としての構造設計を設計対象からみると、創造的なアイデアがありその製品への実現を試行錯誤的に行う開発設計と、設計実績があり設計手順が判っていて、実績とは若干異なる制約の中で、その設計手順をなぞる類似設計に大別される。どのような設計船にも開発設計要素と類似設計要素があり、同じように見えても、改善と呼ばれる細かいレベルの開発設計要素がある。開発設計は、設計の終了即ち設計手順の確立と共に、次からは類似設計となる。設計業務の中には、大量の類似設計の中に質的に高い開発設計が混在している。

構造設計を作業の内容からみると、思考する、計算する及び絵に描く3つにわけられる。思考することは、設計結果を頭の中で組み立てるイメージ生成部分や、設計対象を抽出し必要なら梁などに等価近似変換するモデル化部分や、図面として表現された設計対象や計算結果の良い悪いを判断する判断部分及び次に何をするかを決める設計手順の制御部分などに分けられる。

計算する部分は、等価近似変換されたモデルの上で Analysis や Synthesis を行うモデル計算と、設計対象の幾何学的な情報から長さ（溶接長）、面積（塗装面積）、体積（重量）及び面積のモーメント（断面性能）などを計算する幾何学的計算に分けられる。前者のモデル計算は、さらに梁理論式のようにある特定の周囲状況を前提に定式化された数式により、応力などを求める Analysis と逆に許容応力を満たす設計対象の板厚や断面性能などを求める Synthesis の両方を行える設計算式計算と、有限要素法計算のように汎用の数値モデルを使って、Analysis を行う数値解析計算の二つに分けられる。

絵に描くことは、頭の中のイメージを設計対象の実体として表現し、イメージを確認する視覚的認識と、他人に設計結果を伝えることの設計情報の伝達の二つの役目がある。現在船舶の構造設計図面と呼ばれているものは、機械製図のような実体形状の正確な三面表示ではなく、高度の記号化と形状の誇張表現を駆使して、視覚的認識と設計情報の人間から人間への伝達を効率よく両立させた紙の上の設計結果の表現方法である。

2.2 現状の問題点

構造設計業務の現状の問題点を一言で述べると、人的資源と機械的資源の調和がとれていないことである。

機械的資源のうち、電卓は、設計算式計算で、メインフレームは、断面性能計算、船級協会規則一括計算及び骨組み構造計算などで威力を発揮したが、これは、コンピュータへの入力が必要なレベルまで人間が抽象化を行っているため人間と機械の役割分担が効率的であるためである。FEM 計算になると、設計対象の実体そのものに近い数値解析モデルの情報を全部入力する必要がある、このシステム支援が不十分で、非人間的な作業が人間に残される他、数値実験的な側面から高度な実験遂行技術が必要で、数値解析専門家が設計者と別に存在する状況もあり、機械が人間の足を引っ張っている。絵に描くところのうち、情報伝達は現在 CAD/CAM システムとして、実用化されているが、現在のレベルでは、下流の切断工程に落とせるデータを図面の形で入力する作業の支援に止まっている。思考することに対する支援機能が薄く、旧来の図面よりは、表現形式の柔軟さに欠ける CAD 表現での入力は、設計者にとっては、思考することや計算することは相も変わらず、絵にすることが煩雑になっただけで、コンピュータに足をとられた形であり、ここでも CAD 入力オペレータの分離の傾向が見られる。また CAD で作られるコンピュータの上の情報は、図面に含まれていて人間が抽出する情報のうちの形状情報を中心にしており、組立情報の生成につながる接続情報は、直接表現されていない。絵にする作業のうち、頭の中の設計イメージを具象化するいわゆるポンチ絵などと言われている視覚的認識の支援は、CAD ではサポートされていない。

人的資源は、我国の造船産業の構造的な問題から、その低下は避けられない。本来、人間である設計者の仕事は、開発設計であるべきだが、現状では、開発設計要素と類似設計要素が混在する中で、両方を設計者が行っており、量的に大部分を占める類似設計のために、貴重な人材の知能資源を浪費している。

即ち、現状では、計算する行為の一部と絵にする行為のうちの一部を支援する機械はあるが、それらがかえって別の人的資源を必要としたり、思考することのうち類似設計を支援する道具が無いために、業界全体として減少しつつある中堅以上の設計者に負荷が集中したりしている。結局、人間と機械の調和がとれておらず本来人間を支援すべき機械がその役目を果たしていない。Fig. 1 の左側に現状を、右側に次項に述べるあるべき姿を簡単に図示した。

2.3 構造設計システムのあるべき姿

この現状を変えるには、Fig. 1 の右側にあるように、類似設計部分を、コンピュータが行い、設計者は創造的な開発設計部分を行える構造設計支援システムが必要である。このシステムを実現するには、構造設計過程の全体を表現した枠組みを構築し、マンマシンを統合させた知識システムを

Fig. 1 System Support for Structural Design

始めから目指す必要がある。全体の枠組みを考えた知識システムが実稼働に移行した初期には、知識が入っていないために詳細なシステムからの提案がされない場合があることや、高度な知識処理ができるはずだが、その時点でのシステム技術では実行速度が遅すぎて使えないなどの未完成部分がある。しかし、インタフェースを充実させこの部分を人間が容易にカバーできるようにし、知識システムがその対象を問わずまたその発展のどの段階に於いても、程度の差はあれ稼働することで知識システムが進化し現状を変えることができる。

構造設計の設計過程の表現の結果実現されるシステムのありべき姿は、次の要件を満足している必要がある。

- 1) 類似設計部分と開発設計部分を設計対象や設計段階によらず切り分けることができること
- 2) 類似設計部分については、短時間に満足解が得られること
- 3) 開発設計部分については、計算と絵を描くことが連動して、高度なシミュレータとして機能すること

3. 知識処理システム技術から見た構造設計

3.1 構造設計エキスパートシステム試作の問題点

エキスパートシステムを知識ベースシステムを中心にした人工知能の広範な領域にわたる実用的な応用システムであるとすると¹⁰⁾、構造設計過程の表現を基礎にしたシステムは、エキスパートシステムになる。これまでの構造設計へのエキスパートシステム適用例での成果は、問題空間を限定すれば実現できるということであり、問題点は逆に実現可能なように問題空間を限定したことで、特定の対象に対する個別の設計対象表現を用い、個別の知識を抽出しているため、構造設計以外の他のシステムとの連携方法や取り扱う対象の拡張や知識の獲得のボトルネック解消のための展望が開けないことである。

3.2 船舶構造設計の知識処理からみた特徴

構造設計は、配管設計やレイアウト設計に比し、領域理

論が体系的で豊富である。即ち、構造力学の背景がしっかりしており、それを表現できれば、問題対象が限定された製品依存の経験的な知識によらない構造工学の知識による推論ができる。

船舶構造設計は、事例が豊富にあるので、本来は最適設計であるが、あらゆる制約条件を満足し、目的の達成度が類似構造並の満足解空間を比較的簡単に見つけることができる。

後者の船種に依存した知識だけでは、対象の拡大に伴う知識獲得を永遠に繰り返す必要があるので、前者の構造工学の知識でこれを補完することにより、知識獲得のボトルネックを解消できる。

3.3 構造設計における知識処理問題

3.3.1 構造設計過程とその周囲の諸要素の定義

設計を機能空間から属性空間へ至る過程であるという一般的な考え方に従って、諸要素の構造設計での定義を行う。Fig. 2 に示すように機能空間は、一般には設計仕様の表現であるが船舶構造設計の場合には、仕様書に明示されていない構造設計独自の暗黙の機能要件（壊れない、過度の振動応答がない）と、船自身の機能要件を具体化したもので構造設計にとっては支える対象やその制約を表現した区画配置情報の二つからなる。前者は、設計過程に於ける不変の制約となる。後者は、後述のプロダクトモデルで表現される。属性空間は、設計の結果による具体的設計対象の表現で、形状モデリングを含みプロダクトモデルで表現される。Fig. 2 に記すように機能空間と属性空間の表現を除いた部分を構造設計過程と呼ぶ。ただし、設計過程のある局面では機能空間に属するが、可変である重量最小などの可変の制約は設計過程に含まれる。

設計過程全体は、Synthesis だが、設計案の機能確認のための Analysis が行われる。Analysis のためにその時点の属性空間から近似等価変換されたものを数値解析モデルと呼ぶ。また属性空間を高度に抽象化して、パラメータ間の関係式としたものを設計算式と呼ぶ。設計過程のある瞬間

Fig. 2 Process of Structural Design

での設計対象を代表する単位を静的に表現するものが、後述の防撓面群で、防撓面群を変えていく操作に関するものを設計過程の知識と呼ぶ。

構造設計は主に機能設計であるので、設計案の生成、機能の検査、設計案の変更の生成検査法の基本の枠組みと探索空間を表現しておく必要がある。

3.3.2 知識処理からみた構造設計

構造設計のシステム化に伴う知識処理に関する主な問題を、知識処理の観点から以下に定義及び概観を行う。

1) 類似設計

過去の設計事例にある構造様式の選択や構造配置方針に従って、3.3.1の機能設計の探索空間を減少させ設計を行うものであると定義する。

2) 倣い設計

一般には同じ船のある構造単位的设计が終わっていて、それを利用して同様の別の位置にある構造単位的设计を大幅に簡略化することを言う。知識処理の観点からみると、機能の検査を省略できるようにきつい制約を設けて、直接に設計対象の属性を決定することであると定義する。

3) 最適化の融合

局所的な問題でかつ、限定された目的関数なら構造工学上の最適解を求めることができるものがあり、これを操作知識として組み込むことが有効である。

ある設計が船全体として、最適であるかどうかの設計全体の最適問題は、目的関数自体があいまいであることや、目的関数を仮定しても設計変数が多く解を得るのが難しいことから、直接最適解を捜す方法よりも、いくつかの設計

案に対し満足解をそれぞれ求めてそれらの相対比較を行う方法がより現実的である。

4) 設計結果の瞬時判断 (直感)

最も高度なものは、区画配置情報と制約だけをみて、瞬時に満足解の有無を判断したり満足解を得るための配置や制約の変更を得ることである。これは、膨大な設計事例情報と対象船の情報を瞬時に処理することであり、理由は後から考えるいわゆる直感になり、ニューロ技術の進展を持つ他当面は、人間の右脳に任せるのが効率的である。ただし、チェックに絞り最終判断は人間が行えば、診断型のプロダクションルールベース推論で補完できる。

5) 設計案の生成 (構造様式)

開発設計要素の場合も本当の無からの創造ではなく陸上の構造から船の構造の新方式を考えるなどの類推が行われるが、表現形式の異なるものの間の一般的な類推は現在、基礎研究の段階であり、当面は人間の仕事である。最も短時間で満足解を得るには、製品依存の直接に属性も決められる知識 (例えば8万トンのタンカであれば、1ストラットのリング方式でトランススペースが4000台)が有効である。もう少し高度な類似設計の場合には、類似であることの認識が一つの問題であるが、実船での構造様式のパターンは有限であるので、あらかじめ準備が可能であり、どの船に対してどのレベルで類似であるかを人間が指示することで、演繹型のルールベース推論でカバーできる。

6) 設計案の生成 (形状)

満足解である可能性の高い形状を生成することであり、設計事例に基づく推論が有効であると思われるが、それには、設計結果の事例だけではなく解析事例を失敗も含めて保管する事例ベースの設計を行う必要がある。事例が蓄積されるまでは、ヒューリスティックな知識を活用する。

7) 解析モデルへの変換

静的表現をどう作っておくかが重要となる。数値解析モデルへの変換は知識処理としては、手続き計算に近い低レベルで実現可能であるが、設計算式への適用の方が難しい。設計過程の静的表現から甲板縦肋骨であることを認識でき、また荷重を計算できることが必要である。

8) 解析結果の評価

設計算式での評価と次の戦略決定は、各パラメータの感覚が判っているので、容易に表現できる。数値解析の結果は、許容値との比較などの評価を行い、解析モデルの抽象表現を含んだ事例ベースを構築すると次の戦略決定を行うことができる。トポロジーの変化のない範囲では、数値逆解析関係の手法が、事例ベースの構築手法として有効になると思われる。

4. システム化のための構造設計過程の表現

4.1 構造設計の設計全体の中の立場

構造設計は、一般に設計物の機能を直接作り出さないの

で、これに先だって基本設計が終わっていないなければならない。例えば、建築物であれば、床面積や階数や概略配置などのいわゆる建築設計、船舶の場合は、流体を仕切り船を定義する船型計画と推進プラントの基本設計と荷物を運ぶための荷役関係の艀装の基本設計及び区画配置が仮にせよ終了している必要がある。すなわち、支える物が明らかになっている必要がある。船舶の場合には、この基本設計時に次の詳細設計の各分野を包含した典型的な短い設計サイクルが行われている。

構造設計は、同時に行われる配管配線などの艀装設計とともに実際に生産するべき具体物を決定する過程である。船舶では、これらの設計は、各分野別に並行して行われ、取り合い部分での調整作業を繰り返す。

構造設計や艀装設計の後にくるものは、部品の組立要領や加工要領を設計する工程設計である。工程設計のために構造設計には、仮にでも構造部品を提供する必要がある。これらの関係を Fig. 3 に図示する。

構造設計にとっての入力であるところの区画配置情報と出力である部材情報の定義を述べる。これらは、造船 CIMS にとっての基幹情報であるので、プロダクトモデルとして、別途体系化しつつあり、現在 Fig. 4 に示すように概念面としての「面」とその構成要素で一品部品である「部材」を中心とした物オブジェクトと、物オブジェクトと物オブジェクトとの間の接続関係オブジェクトで構成されたと考えており、従来の CAD/CAM データベースで陽に表現していなかった組立情報を作る種をもっているものである。これは、造船 CIMS の配管設計の論文¹¹⁾に述べられた考え方と同様である。構造設計とは、「面」で定義された区画配置情報を受け取って、壊れず過度の振動のないように、「部材」と「接続関係」を作り出す過程である。「部材」と「接続関係」は造船 CIMS の工程設計¹²⁾へと受け渡される。

4.2 防撓面の定義

構造設計過程を表現するためにまず設計対象物の表現法を考える必要がある。部品の板一枚のオブジェクト「部材」は、材質や板厚の一定な建造の為の単位であり、構造設計の結果を表現しているが、必ずしも構造設計の過程に於ける設計対象の単位にならない。ここで、十分な剛性を持つ

Fig. 3 Structural Design in Ship Design

Fig. 4 Example of Product Model for structure

防撓材及び自由縁で囲まれた薄板を指すパネルの意味を拡張して、設計の過程のあらゆる段階での設計対象を指すものとし、これを「防撓面」と呼ぶことにする。「防撓面」は次の基本的な性質を有するものとして定義される。

- 十分な剛性を持つ防撓材及び自由縁で囲まれた薄板である。周囲形状、板厚及び材質などの構造設計で決定されるべき属性を持つ。
- 分割の結果として下位の「防撓面」を持つことができる。従って、ある「防撓面」は、一般的には上位の「防撓面」と下位の「防撓面」を持ち、全体で階層構造を作る。
- 構造設計の過程を、「防撓面」の抽出または分割による生成の繰り返しであると表現できる。最下位の「防撓面」が機能要求を満足したとき、設計が終了する。

この「防撓面」は、構造工学上の検討対象であるパネルや梁の概念を含んでいるので、船種に依存した直接属性を決定する経験的な知識のない場合でも、構造工学上の知識により生成検査が可能であり、知識処理の柔軟性を確保できる。

防撓面の概念を用いて、四辺支持された長方形の水槽の底板を水圧に耐えるような構造設計をする過程を述べると、下記のようになり、防撓構造の階層を下りながら、各種の要素を表現できることがわかる。Fig. 5 にこれを図示している。

- 1) 底板の四角形を防撓面(P)即ち防撓する対象として抽出する。
- 2) 防撓面(P)の必要板厚を求める。不満足なら 3) に、満足なら 4) に移る。再分割していなくて満足ならここで設計終了となる。
- 3) 防撓材を配置し、底板の防撓面を分割する。(P 1, P 2, P 3)をそれぞれ一つの防撓面と考え 2) に戻る。
- 4) 防撓面の周囲の防撓材の形状と防撓材のフェースの形状板厚を防撓材自身の曲げ強度から決定する。即ち、防撓材(g)を新しい防撓面(G)として生成する。
- 5) 防撓面(G)が、座屈に耐える板厚を求める。不満足なら 6) に、満足なら 7) に移る。
- 6) 防撓材(s)を配置し、防撓面(G)を分割する。(G 1), (G 2)及び(G 3)がそれぞれ一つの防撓面として生成され、5)に戻る。

Fig. 5 Example of "Panel to be Stiffened"

- 7) 防撓材(g)が横倒れ座屈するなら、防撓材(s)を横倒れ防止ブラケット(T. BKT)に変える。
- 8) フェースを新しい防撓面(F)として抽出し、座屈に耐える板厚を求める。4)で決まった曲げ強度からの板厚よりも小さければ設計が終了する。
- 9) 8)が不満足なら一部の防撓材(s)の端部をフェースにタッチさせ、防撓面(F)を分割し、防撓面(F1), (F2)及び(F3)を生成して、8)に戻る。

構造設計過程の表現はこれまでのシステムでは考えられていなかった。また、防撓板「Stiffened Plate」と呼ばれる防撓された板という概念はあったが、防撓面「Panel to be stiffened」という防撓されるべき対象を中心とする考え方はなかった。これまでの設計のやり方は、まず設計者が防撓方式を考え、CADで防撓された板を図面にし、その形状情報を設計者が見て、数値解析モデルのインプットデータを設計者が作り解析を行ったり、ルール計算などの手続き計算を行ったりして、各パネルの強度を検査するというパッチ処理の手順であった。防撓面を基礎にしたシステムでは、設計の対象と過程の根幹が表現されているので、様々な知識処理を組み込んで拡張することが容易である。

拡張の例としては、「防撓面の組」の概念について述べる。組立構造物では、トーションボックスのように同階層の防撓面の組み合わせで、設計対象を表現するものがあるので、これを防撓面の組として表現する。防撓面の組は、それぞれの防撓材の間での関係を規定するかまたは、それ自身で

Fig. 6 Recursive Generation of "Panel to be Stiffened"

機能を有するものである。例えば、リング構造は、四角形の閉じた防撓面の組で、それぞれの一次防撓材が連続しており、4つの防撓材と複数の支材で、新しい防撓面を形成する。トーションボックスは、閉ループの断面を持つ防撓面の組で閉面積を持つ。即ち防撓面の組は、防撓面の生成分割の過程での制約として機能し、類似設計の強力な表現となる。Fig. 6に概念図を示す。

設計過程では、強度(曲げ、座屈)と振動を検査すべき基本機能として考える。断面形状保持は、防撓面の基本機能を検査する際に、前提とした周囲の境界条件を防撓面が有し、この前提を検査する。疲労や連続性は、防撓面の生成知識として表現する。尚、防撓面を生成したときの可変の制約を保存する。

このように表現された構造設計過程は、Fig. 7に示すように、360度の分割方向と無限の分割幅と何層かの分割階層があり、無限の探索空間になる。構造設計システムに含まれる設計事例の知識は、類似設計において速く満足解を得るために、防撓面の階層で表現された探索空間を大幅に減少させる防撓面に対する操作知識として、位置づけられる。

Fig. 7 Image of infinite state space

4.3 防撓面と他の表現との変換

4.3.1 区画から最初の防撓面の抽出

区画情報の区画面は、各面がどの面にとりつけられているか、トリミングされているかで表現されている。この情報から、隅肉溶接接続関係を各面の間に作り、隅肉溶接接続線でかこまれた面を抽出すると最初の防撓面を作ることができる。(Fig. 8)

4.3.2 防撓面から部材への変換

防撓線を隅肉溶接線または折れ曲がり線と定義すると防撓面は、防撓線に囲まれた面と認識できる。防撓面ごとに必要な板厚を持っているので、これを編集して、一定の板厚の範囲にまとめると、「部材」となり、この分割線は、突き合わせ溶接関係として定義できる。折れ曲がり線は、構造設計過程では、隅肉溶接線とみなして処理し、「部材」にする段階で処理する。このようにして、工程設計に使える部品とその接続関係への変換が可能である。(Fig. 8)

4.3.3 防撓面からの数値解析モデルへの変換

構造設計過程の中で数値解析モデルへの変換は、防撓面自身が、パネルであるので防撓面を粗メッシュとし、これを分割すればよいので、容易である。ただし、強度解析ツールに依存した分割手法と軸力要素に簡易化する変換を行う必要がある。

4.3.4 部材のカテゴリの認識

製品依存の知識の活用に必要な部材のカテゴリ化は、板と防撓材については防撓面の生成過程から自明であり、桁材と骨材については、次項に述べる防撓の階層から判断できる。また、縦部材は方向と連続性から、縦横水平部材は方向から判断できる。

防撓構造の類似性は、次項で述べる構造様式と構造配置方針の同一性として表現できる。ある区画での検討を、そのまま他の区画で用いることができる。

4.4 防撓面を基礎にした知識処理システム

実際の設計では、設計過程の表現に述べたループの大部分を省略し、短期に満足のいく解を得ている。それは、探索問題の効率のよい刈り込みの手法をベテラン設計者が経験的に保持し、一般協会の規則などを有効利用して実現しているからである。4.2では、設計の過程を防撓面の分割の過程としたが、いかに防撓面を生成分割するかを、知識処理の表現で述べたい。

これまでのエキスパートシステムでは、専門家のインタビューによる知識を if-then 形式で整理するのが通例であったが、適用範囲の拡大が困難であるという欠点を有して

Fig. 8 Relation between "Panel to be Stiffened" and Product Model

いる。船舶の構造設計では、幸いドメイン（構造設計）の表現が体系だてられているので、これを利用し汎用製の高い知識整理が可能であると考えた。ここでいう知識とは、防撓面の生成分割の方法を記述するために役立つすべての表現である。

(1) 全体構成

防撓面を用いた知識システムは、Fig. 9 に示すように、設計過程における設計対象としての防撓面群、ある局面での防撓面を操作する知識である実行局面の知識、あらゆる防撓面の操作に関する知識が保存されている知識プール、実行局面の知識を状況により作り出す知識ロード及び実行局面の知識が処理を終了した時の制御部にわけられる。設計対象を防撓面と定義したことで、知識ロードの働きにより、船種依存の直接操作知識が無い場合でも、システム支援が可能となっており、何も指示しなければ、アシスタント（知識システム）が自動的に設計を進めることもできる。もちろんユーザの介入は後述の状況の変更により、用いる知識レベルの指定及び設計方針の選択や寸法の変更を含め、幅広く可能である。

(2) 実行局面の知識

実行局面の知識は、状況と実行知識群の二つからなり、防撓面に対し、操作を行うべく待機している。状況は、フェーズ（設計のフェーズ、設計対象、属性のレベル、知識処理のフェーズ）と可変の制約（設計方針）に分けられる。

実行知識群は、そのときの設計対象の状態即ち防撓面群と状況を見て、必要な防撓面を生成分割する処理と状況を書き換える処理を実行する。

設計フェーズは、構造の構成の特徴を表す構造様式の決定（防撓面の組の選択）、構成要素の幾何学的位置を決める構造配置（防撓面の分割）、構成要素の形状と属性を決める

Fig. 9 Outline of Knowledge based system

部材寸法（防撓面の属性決定）と端部処理などのミクロな構造を決める応力集中の4つに分けられる。

知識処理フェーズは、生成、チェック、ユーザ入力支援の3つに分けられる。

このようにフェーズを分けることが知識の整理と活用の両面に有効である。

状況に関して、登録時の状況を自動的にルールの条件部とし、実行操作を書き入れることでシステムのあらかじめ提供する知識の他にユーザが特定のものに限って用いるユーザ知識の登録を、その状況が表現している範囲で実現できる。

（3）知識プール

知識プールは、各種のキーワードの組み合わせで表現された分類がつけられている。そのうち、主なものは、次の3つである。

- （I）製品依存かつ直接操作知識
- （II）製品非依存かつ直接操作知識
- （III）製品依存かつ宣言的知識

（I）の製品依存の直接操作知識は、船種に依存して、直接防撓面の属性を操作できる知識である。例えば、8万トンタンカのサイドトランスなら深さは0.1Dにせよ、というものである。

（II）の製品非依存の直接操作知識は、構造工学上の防撓面に対する知識で、例えば、面外荷重であれば一次防撓材は、防撓面の短辺方向に配置するなどの配置戦略の知識と面外荷重を受ける板の板厚決定の知識などの属性決定の知識がある。

（III）製品依存の宣言的知識は、例えば、長大タンクのヘッドは、ある付加圧を考慮するなどの荷重に関する諸知識や3万トン以下の船舶では、材料は軟鋼をデフォルトとするなどの材料制約の知識などがある。

分類のキーには、製品依存／非依存、防撓面の直接操作／宣言的、防撓面の生成／防撓面のチェック、各設計フェーズ、防撓面の操作／防撓面と他の表現との変換、部材変換後のチェックなどがあり、各知識は、任意複数のキーを持つ。

製品依存の知識は、下は個船レベルの知識から上は船舶一般の知識に至る分類を行う。分類のキーは、浮上方式、推進方式、大きさ、区画用途（積み荷）、船種などである。万トンのタンカのオイルタンクの知識のように大きさと船種と区画により限定されたものである。タンクの知識のように区画だけで限定された知識も有効に補完を行える。例えば、15万トンクラスのタンカのトランスリングの深さ決定の知識がなければ、深水タンクの桁の深さ決定の知識を用いることができ、次善の解を与える。尚、対象船がどこに分類されるかは、その船の機能を表現している区画配置情報に含まれている大きさと区画用途及び仕様として定義される船級ノテーションによりシステムが自動的に分類

できる。

製品非依存かつ直接操作知識には、例えば、防撓面の周囲条件と荷重の大きさや許容応力は、直接数値として表現されていないので、対象の防撓面に対応する製品依存の宣言的知識から、これを実行可能なルールに知識ロードが合成する。

製品非依存の知識を記述するための薄板骨構造の防撓面分割に関する構造様式の定義は、大骨、中骨、小骨などの階層（防撓材なしが0で、2階層なら桁と梁）を中心にする。同一階層の防撓材の入れ方に対して、等分、相持ち及びウェットフレーム方式などが定義できる。

（4）知識ロード

状況を監視していて、知識プールから実行知識に知識を汲み上げる知識ロードを設ける。基本的な知識ロードの動きは、まず知識プールの知識のうち、（I）の製品依存の直接操作知識のうちより細かい分類を優先し、もしなければ、より粗い分類で探す。それらなければ（II）の製品非依存の操作知識をロードし、それが動くための条件データを（III）の製品依存の宣言的知識プールから細かい分類を優先して探す。以上のように必要な知識のロードは2重の2段階構成であり、従来よりも幅の広い知識支援を可能にするものである。

5. 防撓面を基礎にした知識システムの動作例

防撓面を基礎にした知識システムの動きを、8万トンのタンカの中央部ウィングタンクトランスを例に記述する。本例はその一部を、Fig. 10に示すようにプロトタイプシステムとして作成している。

1) プロダクトモデルから読み込んだ区画配置情報のうち、各面の取り付けられている面とトリミングされている面の情報から、隅肉溶接接続関係と溶接線をシステムが作りだし、最初の防撓面を抽出する。例えば、upper deck は、shell という面に取り付けられた一つの面として、定義されているが、transverse bulkhead や longl. bhd が upper deck によってトリミングされているという情報から作られる隅肉溶接線を複数持ち、それに囲まれた面として、Fig. 10 中のハッチングパートの防撓面 (upper deck no. 3 wing tank p. side) を自動的に作り出せる。

2) ユーザが使用知識レベルを選択する。Fig. 10 の例では、メニューの assistant の項目の下に液体貨物運搬船と conventional oil tanker の2種がある。ユーザが無指定のまま先へ進むと、自動的に8万トンクラスの conventional oil tanker の知識が選択される。システムの実行中に8万トンの知識がなければ、システムが conventional oil tanker の知識を選択する。それらなければ、液体貨物運搬船の知識を自動的に選択する。

3) 防撓面の組をシステムが作る。二重底タンカが既に conventional oil tanker となっているとするとユーザが、

Fig. 10 Example of Prototype System

液体貨物運搬船の知識使用を指定しない限り、システムが防撓面 (inner bottom no. 3 wing p), 防撓面 (side girder no. 3 wing p) と防撓面 (bottom shell wing p) の3つを防撓面の組 (二重殻板張り) と定義し, 防撓面 (side shell no. 3 wing p), 防撓面 (upper deck no. 3 wing p), 防撓面 (logl. bhd. no. 3 wing p) と先の防撓面の組 (二重殻板張り) の4つを新たな防撓面の組 (ring and floor main) と定義してくれる。この防撓面の組 (ring and floor main) は, 前三者の一次防撓材は, 同一断面内にあり支材を含む新たな防撓面 (ring) を生成するという制約と, リングの下には, フロアありという制約及び防撓の階層は2であるという制約を持っている。更に, 8万トンタンカの知識により, トランスのスペースが決まり, 形状が Fig. 10 のように決定される。

もし, 液体貨物運搬船の知識で実行すると, 防撓面の組の指定がユーザの任意となり, ウィングタンクを防撓面の組 (二重殻板張り) とユーザ定義すれば, all girder system を作りだすことも可能である。防撓面の組は, 3.3.2 の5) で述べた構造様式の生成について有効に機能する。

防撓面の組が, システムからもユーザからも定義されなかったとすると, 各防撓面一枚ごとに設計が進む。以下に,

タンカの直接操作知識がなかった場合の例を述べる。

4) 防撓面 (side shell no. 3 wing p) の荷重方向と周囲境界条件をシステムが確認する。荷重方向は, 製品依存の宣言的知識により, 面内の縦曲げによるものと面外の外水圧とタンク内圧によるものとがある。周囲境界条件は, deck や bulkhead であるが, 隣のタンクが空で有り得るので支持として進める。もし, deck に大倉口があていければ, 防撓面 (upper deck no. 3 wing p) に前提条件 (side shell の lateral force に対し変形小) をつけて, 固定として進める。deck に十分な剛性が得られないと, 前提が満足されないで, 後で不静定な解析モデルへの変換をシステムが行い, 数値解析を実施することになる。

5) 静定な解析モデル (設計算式) に変換を行い, 板厚を求める。水圧の場合は, 2 辺支持, 2 辺固定のパネルになる。3.3.2 の7) で述べたカテゴリ認識は, 4.3.4 で述べたようにして行う。また, 荷重の計算は, 製品依存の宣言的知識を利用して求められる。

6) 設定した局所的な設計制約 (例えば板厚の最大値 20 mm) と比較を行い, 満足しないので, 分割を行い, 4) に戻る。分割方法は, 可変の制約を重量最小に設定してあったとすると, 液体貨物運搬船であることから防撓材の形状制約がないことと横荷重が深さ方向に分布で船長方向に同様

であることと面内の荷重があることより、製品非依存の直接操作知識が働き、防撓面のアスペクトレシオにより、一次防撓材を船の深さ方向に配置し、2次防撓材を面内の力の方向に配置する方式をシステムが提案する。3.3.2の8)で述べたように、設計算式では、板厚の最大値を満たす分割スペースを決めることは容易である。この段階では、支材が挿入されずに進む。

7) 一次防撓材 (side trans) を、防撓面としてシステムが定義する。重量最小の制約だけであれば、3.3.2の3)で述べた最適設計との融合により製品非依存の直接操作知識により、桁の最適断面が作られる。

8) 防撓面分割方式の変更に関する制御知識が働いた場合、この例では、縦部材の設計で前提条件とされた断面変形の少ないことが満たされないで、箱の菱形変形を抑える支材を挿入し、7)に戻る。尚、3.3.2の4)で述べたチェック機能が前段階で有効に動作すれば、システムのチェックにより、ユーザがもっと早く支材を挿入することができる。

9) 防撓面 (side trans web) について、4)に戻る。例の場合の具体的な動作は、荷重が面内の曲げであるので、解析モデルとして、パネル座屈の式を用いる。

10) 前提条件が満足されているかどうかを検査する。

11) 対象とした範囲 no.3 wing tank で、防撓面の分割を終了し、かつ前提が満たされていないければ、不静定な解析モデル (数値解析モデル) へ変換を行い、解析と検査を実施する。

12) 解析結果の評価を行い、不変の制約である壊れず過度の振動応答がないという暗黙の機能要件を満たしていない場合には、次の戦略を決定する。

13) 対象とした範囲の重量、材料費、部材数等を計算する。

14) 前項で設計者が不満足と思う項があった場合は、設計者がシステムにその項を指示することにより各防撓面の生成時の制約から、不満足な項 (例えば重量) を、より満足に近づけるように制御知識が、知識ロードに働きかけ、実行知識の変更を行い、該当防撓面より下層の防撓面と防撓面の組を介して関係している防撓面の分割の修正を行い、13)に戻る。

以上に述べた例のうち通常の類似設計では、4)~6)の解析と検査部分のループの多くは、省略できる。また、改善を試み、シミュレーションを行う場合は、上記の項目対応のレベルで制御が戻せるので、必要なところの分割方針を入力することができ、類似設計部分と開発設計部分の切り分けが随時できる。

設計制約は、不変の制約として、形状の保持 (過度の撓みがおこらない) と強度 (壊れない) と振動 (過度の振動応答がない) の3つを考える。可変の制約として、配置制約 (艤装品との取り合い)、重量制約、材料費制約、設備制約、部材数制約、溶接長制約などを考える。局所的な可変

の制約として、板厚制約、スペース制約を考える。満足解に至らぬ場合は、制約を変えて、次の案を試行する。

製品依存の直接操作知識がなく重量最小などの制約のない極端な場合の防撓面の生成と分割の動作は、基本的には、最終レベルの防撓面数最小即ち隅肉溶接最小の方向に分割を進めることになる。製品依存の直接操作知識の多くは、重量と工数のバランスの良い解を与える。また、最適設計の知識は、一般に重量最小を目的としたものが多い。基本の防撓面の生成過程が、工数最小の方を向いており、それを知識で重量最小の要素を補っていくのが、本知識システムである。

以上の知識処理により、類似設計部分の中に開発設計要素を織り込み、類似設計部分は、製品依存の直接操作知識により、短時間で満足解が得られ、解析モデルへの変換や幾何学的計算との連動が計られる。尚、絵を描くことのうち、情報の伝達に関しては、プロダクトモデルにより、整理された形でデータベースに登録できる。視覚の確認は、プロダクトモデルや防撓面の3次元形状表示機能を付加しこれを実現する。

6. 結 言

以下の知見により、類似設計を速く行いかつ開発要素も織り込むことができ、計算機能とも連動し、造船 CIMS の他のシステムとのつながりもある柔軟な構造設計システムの知的支援の基盤ができた。

(1) 構造設計過程を防撓面の生成と分割の過程と表現することで、薄板骨防撓構造であれば、構造設計で生成検査する対象を設計のどの段階でも明示できる。

(2) 知識を防撓面の生成と分割方法を記述したものと表現したので、製品に依存しない構造工学の汎用の知識を利用する仕組みを実現できた。これにより、製品別のヒューリスティックな知識獲得のボトルネックを解消でき、幅広い設計対象に適用が可能である。

(3) 防撓面は、構造設計の前の区画配置情報から生成できることが確認できた。また、部品情報への編集も容易であり、造船 CIMS の他のシステムとの情報の連続性も保持できる。また、解析モデルへの変換も容易である。

本論では、船倉部の構造設計上流の知識処理を中心に考察したが、今後、解析による機能設計よりは配置制約と防撓面の連続性による形状保持の要素の強い機関室や前後部での防撓面の組の検討や板厚をいれたレベルでの部材単位を含むマイクロ構造での知識処理、パフォーマンスチェック、解析事例ベースの検討を本構造設計過程の表現を基に検証する必要がある。

謝 辞

本研究は、モーターボート競争公益資金による財団法人日本船舶振興会 (会長 笹川良一氏) からの補助金を受けており、関係各位に深謝します。また、ご指導いただいた

東京大学小山健夫教授ならびに、貴重なお助言を頂いた東京大学金博士および造船 CIMS 開発研究委員会の皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) (財)日本造船振興財団：平成元年度造船 CIMS のパイロットモデルの開発研究報告書, 1990 年 3 月
- 2) 佃洋孝他：知識ベースによる撒積貨物船の横断面内部材配置決定支援システムの試作, 西部造船会々報第 76 号, 1988 年 5 月
- 3) 渡部修他：AI 手法の縦強度座屈設計への適用の試み, 日本造船学会論文集第 164 号, 1988 年 11 月
- 4) 大坪英臣他：エキスパートシステムによる船体中央断面設計, 日本造船学会論文集第 164 号, 1988 年 11 月
- 5) J. J. Connor and G. A. Finn: Applied Artificial Intelligence for Structural Engineering Analysis and Design, International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, 4th, 1985 年 2 月
- 6) 野本敏治他：造船 CIM のための設計・生産情報獲得支援システムの構築, 日本造船学会論文集第 166 号, 1989 年 11 月
- 7) 赤木新介：設計エキスパートシステムの基礎と応用, 初版, コロナ社, 1990 年
- 8) 小山健夫他：プロセスプランニングエキスパートシステムの研究, 日本造船学会論文集第 168 号, 1990 年 11 月
- 9) 野本敏治他：製品モデルを用いた工作情報の獲得手法の検討, 日本造船学会論文集第 168 号, 1990 年 11 月
- 10) 情報処理学会：情報処理ハンドブック, 初版 p 1074
- 11) 中井裕司他：オブジェクト指向に基づく配管モデル表現に関する研究, 日本造船学会論文集第 168 号, 1990 年 11 月
- 12) 雨宮俊幸：造船 CIMS のための工程設計システムの構築, 日本造船学会論文集第 168 号, 1990 年 11 月