

(昭和63年11月 日本造船学会秋季講演会において講演)

エキスパートシステムによる船体中央断面設計

正員 大坪 英 臣* 北 村 充*

Structural Design of Mid-Ship Section by Expert System

by Hideomi Ohtsubo, *Member* Mitsuru Kitamura

Summary

Since many design variables affect each other for ship structural design, it is difficult to decide them all at one time. Generally, a large number of trials in updating those variables is necessary to complete the design in order to satisfy the requirements by a customer and some other conditions. Hence, constructing expert systems for helping ship structural design have been desired these days.

In this paper, the expert system for aiding constructing a bulk-carrier is studied with emphasis upon the structural design of the midship section. The expert system is written in LISP which makes it possible to have more consultative and interactive systems. A knowledge base is called for deciding design variables, which are checked in a rule base and are updated until all conditions are satisfied. After assuming the initial design variables at the midship section with satisfying NK-rules locally, the longitudinal strength of the section is computed. An optimization technique is developed for obtaining the required longitudinal strength at the midship section in which the minimum weight is chosen to be an objective with handling the design variables as discrete numbers.

For an illustration of the system, a bulk-carrier is designed. The procedure of deciding the midship section is demonstrated in this paper which started from the two requirements such as "dead weight" and "speed of ship". In order to check the efficiency of the created system, the midship section is compared with one having the same principal requirements.

1 緒 言

船舶設計ではある仮定で数値を設定し検討を進め不合理が生じたとき初めに設定した数値を修正するという試行錯誤の作業が非常に多い。そのため、船舶設計を支援するエキスパートシステムの構築が要求される¹⁾。しかしながら、エキスパートシステム分野においてはコンサルティングの実例は数多いが、設計型のシステムはまだ事例が少ない。そこで、本研究において船体構造の最適設計を支援するエキスパートシステムの構築を試みる。今回対象としたのは商船の中のバルクキャリアーであり、なかでも中央断面の構造設計に重点を置いてみる。

船舶の最適設計とは、総合的な最小コストであろう。総合的なコストは材料費と施工費の和であり、さらに保船費をも考慮すると各部材の信頼度や経験的知識さらに

時代による経済の動向などが関わってくる。そこで、本研究では建造費最小ということに焦点を当て、目的関数を中央断面の最小重量と設定した最適設計を行う。

構造物の最適化を考えると一般的に目的関数は非線型になる。よって、その解析には非線形計画法を用いることになるが、船体縦強度部材の最適設計が非線形計画法²⁾を用いて考えるときに問題となるのが設計変数値の不連続性である。例えば、補強材の本数は自然数であり、その形状も任意ではなく既成の数タイプから選択するのが普通である。これを解くためには整数計画法が必要となる。しかし、整数計画法を応用するにはパラメータが多すぎて非常に困難である。これらの値を連続的に変化すると考え求めることも手法の一つではあるが、ここでは設計変数の中でその値が連続でないものは連続でないとして扱いたい。よって、最適化の経路を限定した簡便な手法を試みた。

* 東京大学工学部船舶工学科

2 設計手順

本研究において構築する船体構造設計を支援するエキスパートシステムは大きく分けて次の3つの部分より成り立つ。

- 1) 船舶基本設計部
 - 2) ルールの局部強度を満たす中央断面の初期設定部
 - 3) 縦強度を満たす(限定)最適化部
- 以下にこれらの詳細を記す。

3 船舶基本設計

船舶基本設計用のエキスパートシステムを構築するには船舶設計の専門家のノウハウを知識ベースに格納する必要がある。また、数多い設計変数は複雑な相互関係を持っており、試行錯誤的な変数の検討を繰り返して総合的な最適値へと修正される。このため、設計変数は独立に表現でき、かつこれらの相互関係が把握しやすいオブジェクト指向的な知識表現が船舶基本設計のエキスパートシステムに適している。オブジェクト指向では一つの設計変数の定義は一つのオブジェクト中に記述されるため、個々の知識を平等に扱うことができる。また、これらオブジェクト間では自由に情報やメッセージの送信が可能である。一つのオブジェクト(設計変数)を求めるために、関与している全てのオブジェクトが連鎖反動的に求まる。このようにして得られた船の主要目は全ての制約条件を満たすかを診断する。これはルール型知識表現で行い

“IF...THEN...”

という形式で記述される。例えば「もし二重底の高さが船幅の16分の1より小さければ、二重底の高さが小さすぎる」と判断され、この診断結果に基づき設計変数は修正される。また、この設計変数の修正の影響を受ける諸変数も同時に変更される。そして再びルール部で各要目は診断され、全ての条件を満たすまで設計変数の診断修正は繰り返される。なお、この船舶基本設計部においては大阪大学赤木教授ら⁴⁾の考えに基づいている。

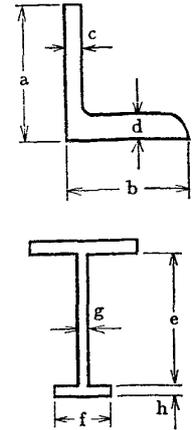
4 局部強度を満たす中央断面の初期設定

船舶基本設計部で設計船の諸要目を決定した後中央断面の設計に入る。船舶基本設計部と同様に設計変数はオブジェクト指向型知識で表現される。ここでは、各部において局部強度を満たすように中央断面の初期設定をする。二重底構造部、ビルジホップタンク部、トップサイドタンク部に分けて考える。各部分において、NK(日本海事協会)鋼船規則⁴⁾を満たす最薄の板厚、最小断面係数の縦通肋骨を選択するように設計は進められる。設計変数の中で板厚は0.5mmずつ増加し縦通肋骨

Table 1 Angle Steels (type 1-6) and Built up Sections (type 7-8)

	A	a	b	c	d
type1	29.66	200	90	9	14
type2	37.47	250	90	10	15
type3	42.95	250	90	12	16
type4	46.22	300	90	11	16
type5	52.67	300	90	13	17
type6	68.59	400	100	13	18
	A	e	f	g	h
type7	82.00	550	100	12	16
type8	96.20	600	125	12.5	16

A (面積) : (cm²)
a - h : (mm)



は Table 1 にある 8 タイプから選択するという離散的な数値を扱っている。この段階で決定される設計変数を次に示す。

4.1 二重底構造部

内底板と船底外板の板厚、側桁板の板厚と数および縦通肋骨の種類と本数を決定する。中央桁板と側桁板は同じ厚さを持つと仮定する。内底板および船底外板の厚さは船の中央でも側部でも一様とする。また、内底板と船底外板の縦通肋骨は同じ種類、本数とする。

4.2 ビルジホップタンク部

ビルジホップの板厚、斜板の板厚、斜板防撓材、外板および斜板に取り付けられる 2 種類の縦通肋骨の種類と本数を決定する。

4.3 トップサイドタンク部

トップサイドタンクの斜板の厚さ、上甲板の板厚、そこに設けられる縦通肋骨、船側縦通肋骨の種類と本数を決定する。

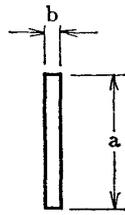
各部において縦通肋骨の種類と本数は次のようにして求める。まず、求めた板厚より縦通肋骨を設ける最大幅が規則より参照され、縦通肋骨の本数を決定する。そして局部的に必要な断面係数が得られるように縦通肋骨の種類が選択される。

5 縦強度を満たす(限定)最適化手法

前記の手順により決定された中央断面の初期設計値では要求されている縦強度を一般には満たせない。この縦強度を満たすため板厚を増やしたり補強材を換えたりする。しかし、むやみに補強すると必要以上の重量増加を併発してしまう。効率の良い設計をするためには最適化手法⁵⁾を導入する必要がある。そこで、断面積をあまり増やさずに必要な縦強度を得ることができる最適化手法を考える。最適化の設計変数は積載重量により次の 2 通りに分けて設定した。これら設計変数もオブジェクト指

Table 2 Large Flat Bar (type 9-15)

	A	a	b
type9	140.0	250	16.0
type10	155.0	250	22.0
type11	163.5	250	25.4
type12	166.5	350	19.0
type13	177.0	350	22.0
type14	101.6	400	25.4
type15	114.3	450	25.4



A (面積) : (cm²)
a, b : (mm)

向型表現で記述されている。ここでは目的関数Oとして変更可能部分の断面積を考える。

1) 積載重量が5万トン以下の船

上甲板板厚 TDP, 上甲板部分の縦通肋骨の本数 NLUD と上甲板縦通肋骨1本の断面積 ALUD を変数と考える。ここで, 上甲板縦通肋骨は既成の数タイプ (Table 2 参照) の中から選ばれるため ALUD は離散的な値となる。

$$O = TDP \times LUD + NLUD \times ALUD$$

2) 積載重量が5万トンを越える船

上記の場合に加えてトップサイドタンクの斜板の板厚 TST を変数とする。

$$O = TDP \times LUD + NLUD \times ALUD + LST \times TST$$

目的関数Oを最小とする時に縦強度を満たすための制約条件として, 次の3式を考える。

- 1) $Z_D > Z_R$
- 2) $Z_B > Z_R$
- 3) $I > 3Z_R L_1$

ここで, Z_D, Z_B はそれぞれ上甲板と船底での断面係数, I は中央断面の断面2次モーメント, Z_R は要求されている船体横断面の断面係数で, 次式により定義される⁴⁾。

$$Z_R = 5.27(M_S + M_W)$$

$$M_S = \text{静水中縦曲げモーメント } (kN-m)$$

$$M_W = \text{波浪縦曲げモーメント } (kN-m)$$

但し, 船体に 32HT を使用した場合は上式より得られた Z_R に 0.78 を掛けた値を用いる。すでに述べたように, ここでは不連続な設計変数は不連続として扱いながら目的関数Oを局所的に最小とする最適化の手法を考える。今回本研究で行った局所的最適化を Fig.1 のフローチャートを参照しながら各ステップごとに順を追って説明する。

*ステップ1

中央断面構造設計における各部材の初期設計値に基づき中央断面の断面二次モーメント I および断面係数 Z を計算し, これらに対する要求値 I_R, Z_R との差 dI, dZ

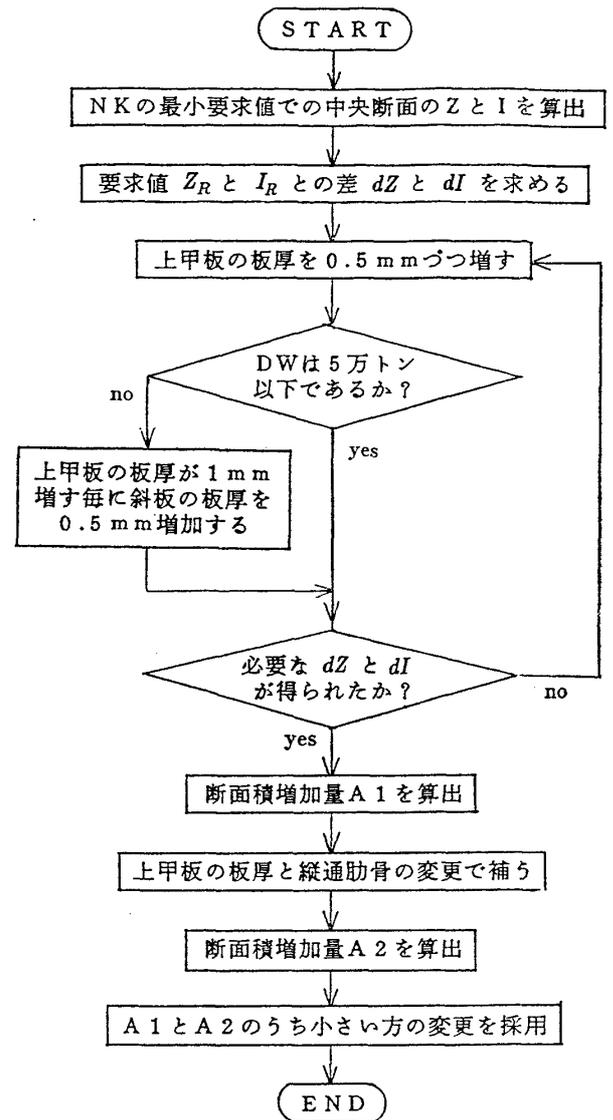


Fig.1 Flow Chart of Locally Optimization

を求める。

$$dI = I_R - I$$

$$dZ = Z_R - Z$$

*ステップ2

単位断面積増加当りの I および Z の増加を考えると一般に中立軸は船底よりとなるために上甲板部の板厚を変化させた方が効率が良い。また上甲板を除いた他の縦強度部材に関しては, 局部強度による要求寸法とし上甲板の板厚を調整して所要の I, Z を保たせるのが一般的であるので, 上甲板の板厚の変化によって dI, dZ を埋めることを検討する。すなわち, ここでは変数として上甲板の板厚のみを考える。実際問題として上甲板の板厚の値は連続ではないので, これを 0.5mm ごとに変化させる。ただし, 積載重量が5万トンを越える船については上甲板の板厚 1mm 増えるごとにトップサイドタンクの斜板の板厚を 0.5mm ずつ増やす。このようにして dI および dZ を補給できる最薄な上甲板の板厚を T_1 と

する。また、この時の断面積増加量を $A1$ とする。

* ステップ3

ステップ2で上甲板が T_1 となる一歩手前の板厚 T_2 ($=T_1-0.5\text{mm}$) を用いて埋め残した Z および I を縦通肋骨の変更によって埋めることを検討する。ここでは縦通肋骨の本数 n および種類 m をある程度の範囲に制限した上で、 $n \times m$ 通りの値を算出し、その中での最適値を与える縦通肋骨の種類と数を採用する。この時の断面積増加量を $A2$ とする。

* ステップ4

ステップ2とステップ3から求めた結果を最小重量変化の観点から比較し ($A1$ と $A2$ の比較) 小重量の方を最終的に採用する。

以上の4ステップをもって (限定) 最適化を終了する。ここで決定された中央断面は NK ルールを満たす最薄板厚を初期値として決定されたものであるが、ユーザーの判断により設定し直された初期値から再び (限定) 最適化の手順を繰り返すことが可能である。

中央断面設計では、まず初期値を決め不足する縦強度を上甲板や縦通肋骨の変更により補うのが一般的な手法である。本システムでもこの方法に基づいて中央断面設計を行っているため、今まで人力により行われていたプロシジャー的傾向が強く見られる。このためオブジェクト指向型知識により表現されている設計変数の持ち味が発揮されない部分がある。例えば初期値を再設定する場合、現時点では設計者の判断に頼っているが、どの変数をどの方向に変えるべきかの援助が欲しい。また、今日の造船分野において中央断面を設計する場合、諸条件 (船の長さ、幅など) が類似する船のデータを基にする事例が多い。この様な知識を取り入れることが今後エキスパートシステム拡張のために必要であろう。

6 設計過程と設計例

本研究で構築したエキスパートシステムを用いて船舶基本設計および中央断面設計を行う。本システムにおける中央断面設計値と実船の設計値を比べるため、実船のデータに極力近づけた設計を行い各々の中央断面について比較を行う。ここでは2ケースの設計を試みる。両ケースとも実船で高張力鋼が使用されているため、本設計では HT 32 を用いた。

要求される積載重量と航海速度の入力により設計が始まる。第1の設計として比較される実船の持つ 59,500 トンと 14.65 ノットを使用する。また、パナマックスクラスとして幅は 32.2m とする。幾度か評価修正を行った後にシステムより得られた主要目値を Table 3 に示し、実船のそれと比較する。しかし、本研究では中央断面の最適設計に重点を置いたため中央断面以外の条件を

Table 3 Principal Design Parameters of Model Ship and Designed Ship (CASE-1)

主要目	実船	本システム
DEAD WEIGHT	59500 ton	61440 ton
LENGTH P.P.	218.0 m	210.0 m
BREADTH	32.2 m	32.2 m
DEPTH	18.2 m	17.8 m
DRAFT	12.2 m	13.0 m

Table 4 Principal Design Parameters of Designed Ship after Restriction (CASE-1)

主要目	本システム
DEAD WEIGHT	59694 ton
LENGTH P.P.	218.0 m
BREADTH	32.2 m
DEPTH	18.2 m
DRAFT	12.2 m

できる限り等しくしたい。よって、船舶基本設計の段階で強制的に主要目を Table 4 のように修正した。もちろん、これより決定された諸要目は法規による制約条件を全て満たしている。

それぞれ、Fig. 2 が実船の、Fig. 3 がこの実船と同様の設計条件を入力した本システムによる設計結果の中央断面図である。縦通肋骨の種類は、実船では①~④の印を付け、そのサイズを Fig. 4 に示す。本システムによる設計船では Table 1, 2 より選ばれた type を表している。中央断面を比較すると、ビルジホップタンク部の形状の違いが大きい。これは、本システムでは斜板の角度を 45° と設定しているためである。より効率の良い角度を得るような検討が必要であろう。

第2ケースの設計として積載重量 140,000 トン、航海

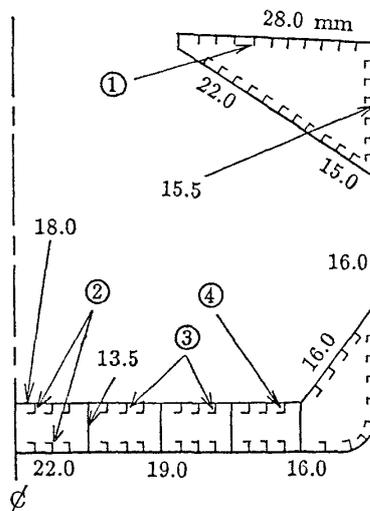
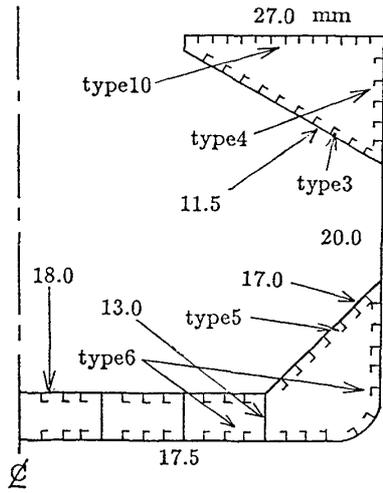


Fig. 2 Mid-Ship Section of Model Ship (CASE-1)



縦通肋骨の種類は表 1、2 の type で表示される

Fig. 3 Mid-Ship Section Designed by this System (CASE-1)

実船の縦通肋骨サイズ (単位: mm)

- ① a = 330, b = 28
- ② a = 300, b = 90, c = 11, d = 16
- ③ a = 250, b = 90, c = 10, d = 15
- ④ a = 250, b = 90, c = 12, d = 16

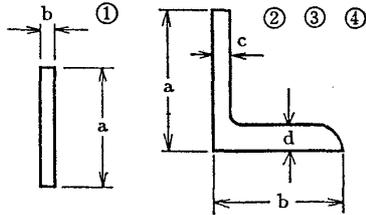


Fig. 4 Stiffner for Model Ship (CASE-1)

速度 13.8 ノットを与える。第 1 ケースの設計例と同様に、比較される実船の持つ主要目値に設計変数を設定して設計する。この主要目値を Table 5 に示す。また、実船及び設計船の中央断面図をそれぞれ Fig. 5, 6 に示す。

最適設計では中央断面の最小重量設計を目的関数としているため、ここで比較する値としては中央断面の断面積をとることとする。両者の中央断面の断面積を計算す

Table 5 Principal Design Parameters of Model Ship and Designed Ship (CASE-2)

主要目	実船	本システム
DEAD WEIGHT	141900 ton	141510 ton
LENGTH P.P.	260.0 m	260.0 m
BREADTH.	43.0 m	43.0 m
DEPTH	23.8 m	23.8 m
DRAFT	17.2 m	17.2 m

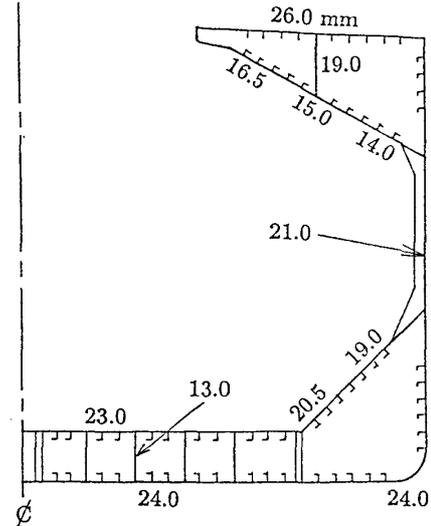


Fig. 5 Mid-Ship Section of Model Ship (CASE-2)

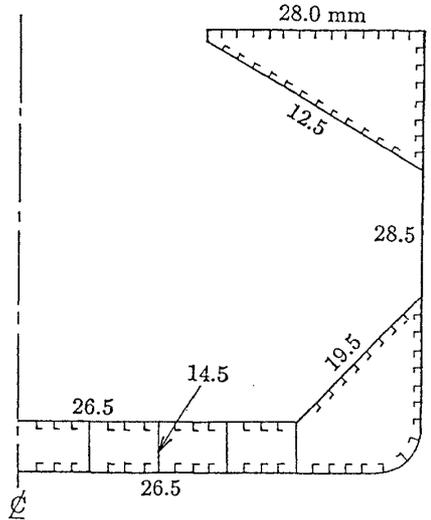


Fig. 6 Mid-Ship Section Designed by this System (CASE-2)

Table 6 Area of Cross Section at Mid-Ship Section

	ケース 1	ケース 2
実船	1.54×10^6	2.20×10^6
設計船	1.45×10^6	2.48×10^6

単位 (mm²)

ると、Table 6 のようになる。この結果において本システムによる設計船は実船よりケース 1 で軽く、ケース 2 で重くなっている。ケース 1 の場合、本システムの設計が軽量になったと言うよりも何らかの来歴のため実船が安全側に設計されていると思われる。また本システムでは両ケースにおいて、トップサイドタンクの斜板が薄く、船側外板が厚く設計されている。これらも経験的知

識の不足に起因していると思われる。なお、この設計例で比較されている実船はそれぞれ1985年、1981年建造のバルクキャリアーである。

7 結論および考察

本研究ではトータルコストの低減に寄与する船体構造設計エキスパートシステムの構築を行った。特に中央断面設計に焦点をあて（限定）最適設計の手法を導入した。

複雑に関係し合っている数多くの設計変数であるが、オブジェクト指向的な知識表現により診断そして修正を簡単に行うことができる。船舶基本設計終了後中央断面の詳細設計に入る。中央断面設計において局所的な強度を満たす部材の寸法としてNK規則ぎりぎりの値を採用し、ここを出発点として最小重量を目的関数とする最適化が進行する。この方法は設計変数の不連続性を考慮しているため、その経路が限定される。簡便ながらも、実行例でも見られるように、本システムはこの研究におけるエキスパートシステム構築の目的を満足する結果を与えてくれた。

中央断面の詳細設計部では鋼船規則をベースとしてシステムが構築されているため規則そのものの性質であるプロシジャー形式の傾向が強くなってしまった。このため局部強度部材から縦強度部材の決定が一方的であり、縦強度部材の修正が局部強度部材の寸法に影響を及ぼすことが少ない。また、縦強度のみを対象としている点にもネットワークの範囲を狭くする要因がある。横強度も設計条件に含めることにより柔軟性のあるオブジェクト

フローが構築でき、全体的なネットワークシステムが形成できる。このような意味で本研究はエキスパートシステムを用いた中央断面設計の第一歩であり、今後一層の研究が必要である。

現場では規則集には載っていない経験的知識が数多く設計に取り入れられている。今後こうした多くの経験的知識、また詳細解析の取り込み等を行ってさらに充実したエキスパートシステムとなるであろう。

謝辞

システム構築のための参考資料を提供して下さった大阪大学工学部赤木新介教授および大学院生藤田喜久雄氏、そして、当研究室でシステム構築の手伝いをしてくれた三橋孝司氏（日本郵船株式会社）、正岡賢氏（東京大学大学院）に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大坪英臣：船体構造設計における Design by Analysis のための技術開発，第13回造船学会夏期講座，1987.
- 2) 秋田好雄，北村勝英：船体構造の最適設計に関する研究（第1報—第4報），日本造船学会論文集，1970～1973.
- 3) 赤木新介，藤田喜久雄：船舶基本設計に関するエキスパートシステムの構築，関西造船学会誌，1987.
- 4) 鋼船規則集（昭和62年），日本海事協会.
- 5) Pedersen, P. T. and Nielsen, N. R.: Structural Optimization of Ship Structure, NATO ASI Series, Vol. F 27.