

二重殻構造のトポロジー最適化

奥本泰久¹⁾ 濱川博行²⁾

Topology Optimization of Double Hull Structures

by Yasuhisa Okumoto, Hiroyuki Hamakawa

Synopsis

Though the optimization of size and shape has been widely applied in structural design, a new technique of the structural optimization, "topology optimization", is introduced recently, and it has been applied to the architecture and automobile design. In this study, the double bottom construction of a bulk carrier was taken up as an example of complex grillage structures, which consisted of floors and girders, and the topology optimization was examined. The double bottom construction was modeled as a boundary supported structure loaded by water pressure. According to the calculation results, unnecessary parts of the floors and girders to keep the rigidity were removed, and necessary parts were reinforced. By the analysis, the optimum structure, which has enough rigidity and less light-weight, was proposed.

Key Words: Topology optimization, Double bottom structure, Bulk carrier, Optimization

1. 緒言

現在、機械や構造物の形状設計に際し、寸法最適化や形状最適化が盛んに行われているが、有限要素法の進歩とともにトポロジー最適化（または位相最適化）という手法が近年導入され、土木・建築や自動車部品の設計に応用されつつある^{1)~5)}。それらは骨組み構造やソリッド構造であるが、本研究では板・殻構造の応用として撒積貨物船の二重底構造を取り上げ、フロア・ガーダーからなる格子構造に対しトポロジー最適化を検討したものである。

具体的には二重底構造を周辺支持（完全固定）された一つのかたまり（ソリッド）またはパネル構造と考えてトポロジー最適化を検討し、外力（船底水圧）に対する剛性上 unnecessary な箇所を取り除き、主要な箇所に補強材を配置した。その結果、現状の設計案を軽量化した構造を提案した。

2. トポロジー最適化

ある構造物を設計する際、その重量を最小にすることが製品コストの面からも望ましい。そこでこれまで様々な構造最適化手法が研究されてきた。従来は寸法最適化や形状最適化が主であったが、近年トポロジー最適化（位相最適化）の手法が導入され、実用化が進みつつある。

トポロジー最適化は、有限要素法と最適化数値計算手法を用いて構造の最適化を図る手法である。これまでのように寸法や形状を定型的に変化させるだけでなく、自由に形を変化させることができる。

一例として、端部に集中荷重を受ける片持ちばりの計算例を Fig.1 に示す。応力密度が高い箇所は黒く、低い箇所は白抜きになっており、剛性を高めるため必要な箇所（黒い箇所）を残し、他は穴を開けたり切り取ったりすることで軽量化をはかることができる。

1) 近畿大学 工学部 知能機械工学科

2) 近畿大学 大学院 工業技術研究科

Intelligent Machines Department, School of
Engineering, Kinki University
Graduate School of Industrial Technology, Kinki
University

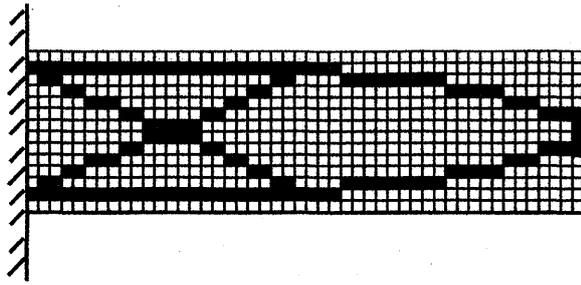
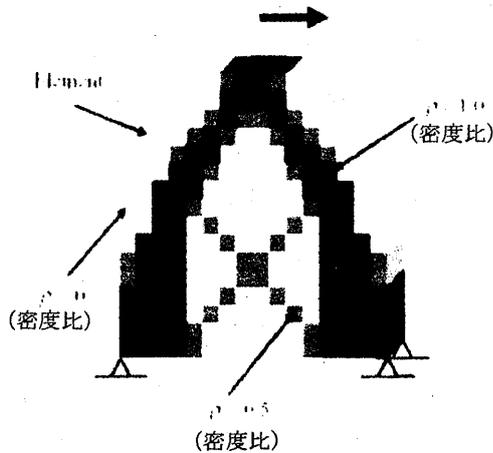


Fig.1 Calculation example of a beam

トポロジー最適化にはグラッドストラクチャー法や均質化設計法及び密度法があるが、板構造では密度法が便利のため本稿でもこれによる解析を行った。密度法は、材料の弾性剛性が密度比のべき乗に比例すると仮定し、Fig.2 に示すように各有限要素の密度比を設計変数として最適位相を求める方法である。これは材料の等方性を仮定している。

Fig.2 Topology optimization using density method¹⁾

具体的には、構造全体の総重量（総密度比）を与えられた値以下に制約し、構造全体の剛性を最大化する（コンプライアンスを最小化する）というもので、総重量は、要素の空隙比 α を設計変数とし、次式で与えられる¹⁾。

$$W = \sum_{i=1}^N (1 - \alpha_i) \quad (1)$$

α_i : i 番目の要素の空隙比 ($0 \leq \alpha_i \leq 1$)

$$\alpha = 1 - \rho$$

ρ : 密度比

N : 有限要素数

本稿では、アルテアエンジニアリング(株)で販売している解析ソフト HyperWorks のモジュールに含まれている OptiStruct という汎用ソフト⁵⁾を用いて解析した。両端単純支持ばりに等分布荷重を荷重した解析例

を Fig.3 に示す。トポロジー最適化計算によれば Fig.3(b)に示すように、密度の低い箇所（荷重に対する寄与の少ない箇所）が空白となって表れ、必要箇所は滑らかなアーチ形状となった。

この場合、留意すべき点は図の部分拡大部に示すように、一部構造が不連続な箇所が出力されることである。この近傍では密度が高い要素が黒く、低い要素が白く表示され（Fig.3 では詳細は省略）チェッカーフラグのようになることからチェッカーボードと呼ばれている。このような箇所では出力通りに部材を配置すれば、製造上成り立たないあるいは好ましくないケースが生じるため、トポロジー最適化の解析結果から、製造不可能な箇所の修正や設計意図を反映させたモデルを再度作成する必要がある。

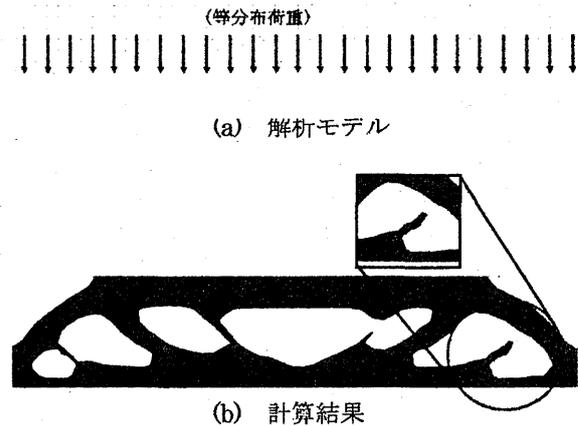


Fig.3 Calculation of simply supported beam

3. 解析対象と解析方法

本研究では載貨重量 24,000 ton 積み撒積貨物船の二重底構造を対象とした。Fig.4 に船体の形状を、Fig.5 に今回対象とした貨物倉（Cargo hold）の二重底構造を示す。この船は、満載状態で Fig.4 の×で示す貨物倉に比重の重い貨物を積載した状態で、中央の貨物倉が空倉となり下部から水圧を受ける最も厳しい荷重条件となるため（×部船倉は上から貨物、下から水圧を受け相殺される）、この船倉を解析対象とした。

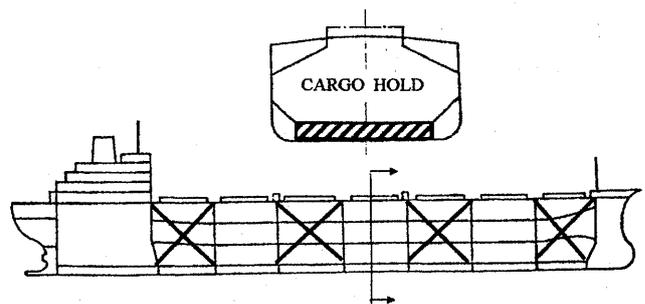


Fig.4 Bulk carrier of 24,000 ton

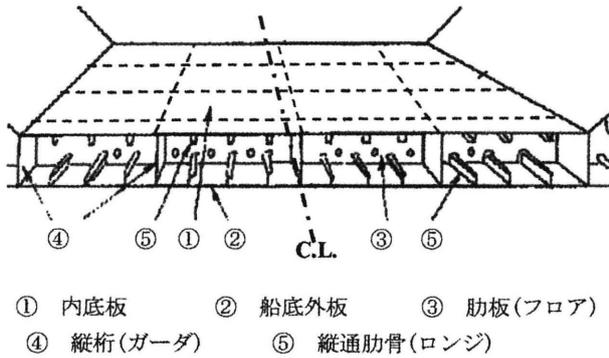


Fig.5 Structure of double bottom⁶⁾

船体下部の二重底構造は、上下の板（内底板、船底外板）で挟まれる太鼓状の空間にフロアと呼ばれる横部材、ガーダーと呼ばれる縦部材を格子状に配置して、強度を保っている。また、上下の板は局部変形を防止するためロンジという小骨が配置されている。
 二重底構造の両サイドはビルジホッパーという構造で、前後は隔壁構造でそれぞれ強固に支えられている。Fig.6 に二重底構造のモデル化を示す。

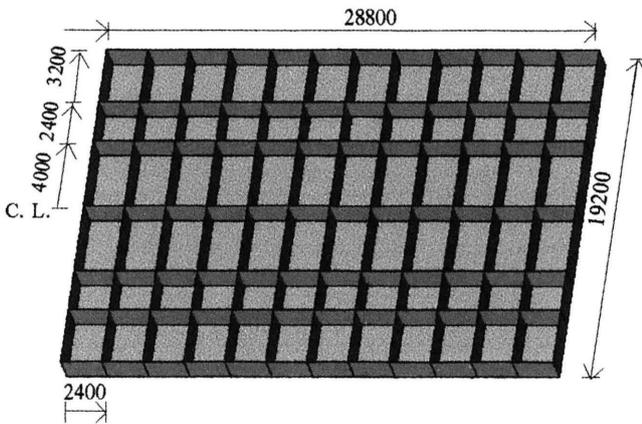


Fig.6 Model of double bottom structure

構造モデルは、全幅 19.2m、全長 28.8m、二重底高さ 1.6m、ガーダー数 5 本、フロア数 11 本、フロア・ガーダーの板厚は全て 12mm と仮定し、船舶構造用鋼（軟鋼）で構成されている。ロンジは全体の剛性や応力に与える影響が少ないとしてモデルから除外した。また、荷重は喫水の 1.35 倍(9.55×1.35=12.9m)を船底に等分布荷重として上向きに与えた。四周の拘束条件は完全固定とした。

最初に、格子状のモデルを解析するのではなく、船底外板と内底板に挟まれた厚さ 1.6m 間を部材が充填しているものとし、ソリッド要素としてトポロジー最適化を行って密度分布を調べた。計算結果を Fig. 7 に示す。他の図と違って、フロア・ガーダーの白色部は密度の高い箇所を、黒い部分は密度の低い箇所を示す。すなわち、屋根型の稜線に沿った箇所の密度が高いといえる。

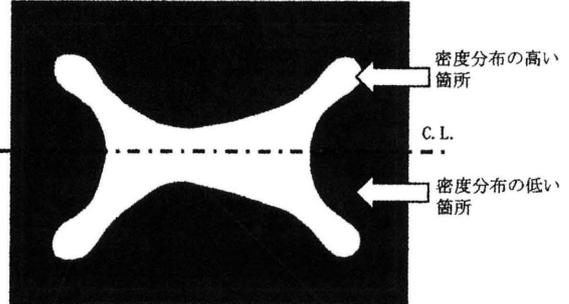


Fig. 7 Calculation results of solid model

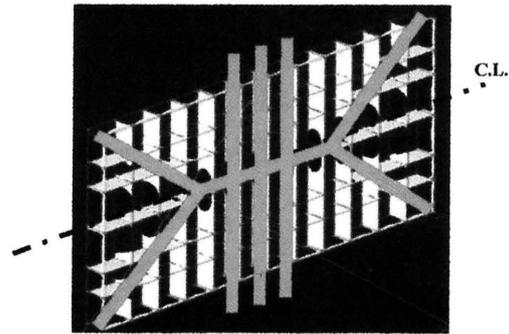


Fig.8 Calculation results of plate model

次に Fig.6 に示すような実船の格子型のモデルをシェル要素で作成し、トポロジー最適化の解析を行った。結果を Fig.8 に示す（黒い部分が密度が高く、白い部分が低い）。実際には内底板や船底外板はモデル化されているが図では省略した。Fig.8 によればもう少し現実から離れた太線で示すような部材配置も可能であるが、以下の解析では、工作面を考慮してフロアの配置は等間隔とし、フロア・ガーダーの斜行は避け縦横直行配置のままとした。この結果を基に構造寸法を各種変化させた 4 ケースについて線形応力解析を行った。

- CaseA : 現状の構造寸法。
- CaseB : Fig.8 の結果をもとに、密度の高い箇所の板厚を 12mm から 14mm に増加させ、密度の低い箇所は 12mm から 10mm に減少させた (Fig.9(a))。
- CaseC : Fig. 7 で得られた形状に近づけるために、ガーダーを 2 本中心側に寄せた (Fig.9(b))。図の左右方向がガーダーの配置である。
- CaseD : CaseC から最外側のガーダーを取り除いた (Fig.9(c))。

4. 解析結果

各ケースについて FEM 計算を実行し出力されたミーゼスの相当応力を Fig.10 に示す。図では内底板と外板の応力図は省略している。CaseB, CaseC, CaseD になるにつれ、ガーダーの荷重分担は減少し、フロアが広範囲に荷重を分担していることがわかる（ガーダーよりスパンが短いため）。また、各ケースの中央フロ

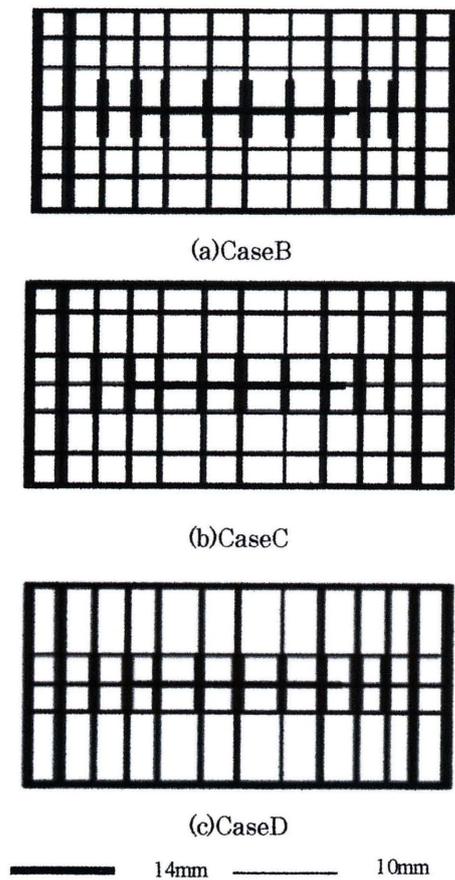


Fig.9 Calculation cases

アの応力分布を Fig.11 に、解析結果の最大応力および変位を Fig.12 に示す（ケース E はフロアに多くの開孔を設けた場合）。

Fig.10~Fig.12 から現状の CaseA と比べ、CaseB, CaseC はミーゼス相当応力（最大値）も最大変位も大幅に低下した。

各ケースについてフロア・ガーダーの鋼材重量の増減を Fig.13 に示す。CaseB, CaseC とも重量軽減が計れたことがわかる。Fig.12 および Fig.13 から最も適した構造は CaseC といえる。

5. 結 言

近年、構造最適化の分野で有限要素法をベースにしたトポロジー最適化の手法が導入されてきた。これらは骨組構造やソリッド構造に適用されているが、大型の板・殻構造では適用例が見られない。本稿では、トポロジー最適化について概観した上で、板・殻構造の代表例として格子構造を有する 24,000ton 積み撒積貨物船の二重底構造を取り上げ、トポロジー最適化の検討を行った。これを元に、密度の高い箇所を増厚し低い箇所を減厚して線形の有限要素応力解析で確認計算を実施した。この結果、合理的に鋼材重量の低減を図ることができ、幅広い分野でトポロジー最適化手法が有効であることがわかった。

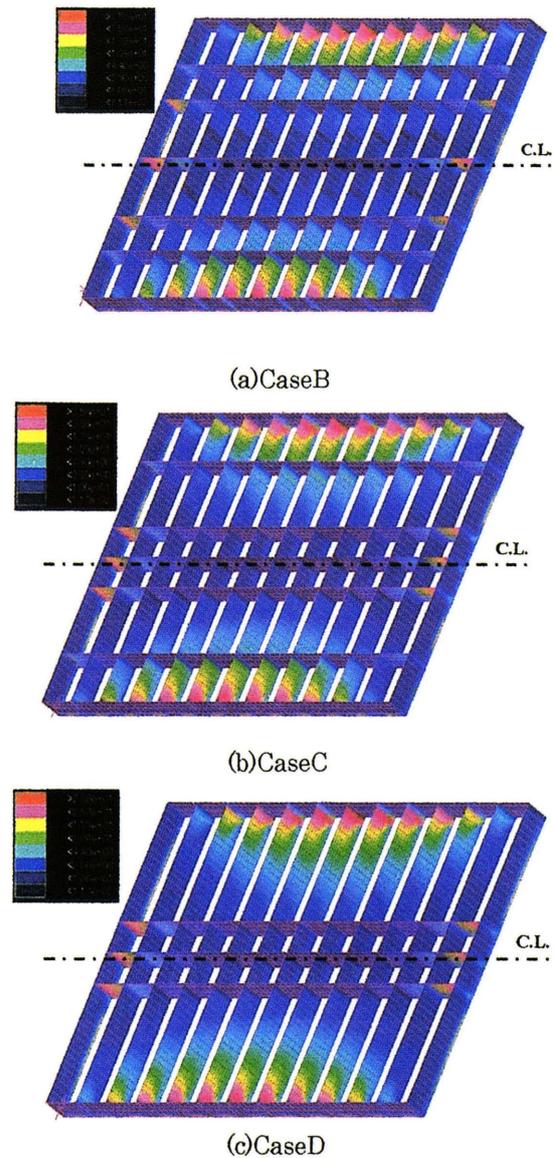


Fig.10 Distribution of equivalent stress

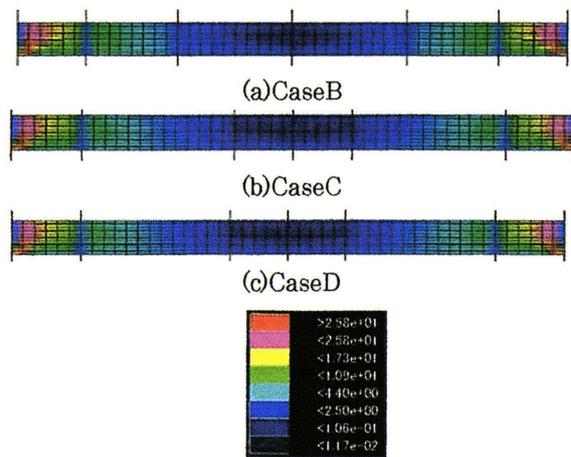


Fig.11 Stress distribution of floor

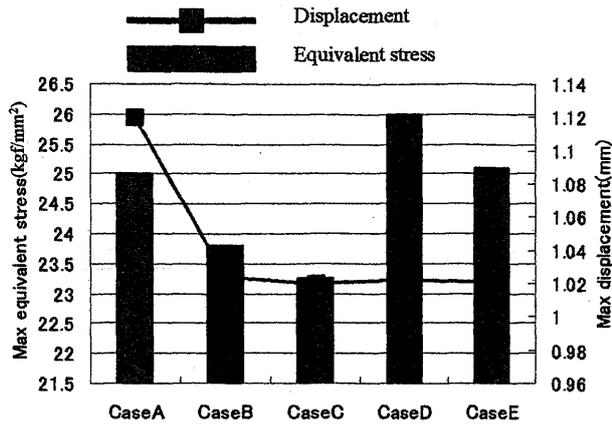


Fig.12 Maximum stress & displacement

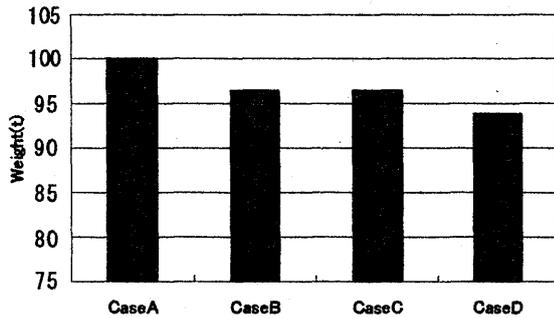


Fig.13 Calculation summary

謝 辞

本研究を進めるにあたり、本学部建築学科の藤井大地先生をはじめ、アルテアエンジニアリング㈱および㈱神田造船所の皆様にご支援を頂きました。ここにお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 藤井大地：パソコンで解く構造デザイン，丸善，pp.160-164
- 2) 北村允，濱田邦裕，田中涼嗣，有田洋介：有限要素内部の密度分布を制御したトポロジー最適化，日本船舶海洋工学会講演会論文集 第1号，(2005)，pp.321-322
- 3) 三井和雄ほか：発見的最適化手法による構造のフォルムとシステム，コロナ社，pp.32-40
- 4) ㈱クイントホームページ
<http://www.quint.co.jp/jp/pro/>
- 5) アルテアエンジニアリング㈱ホームページ
<http://www.altairjp.co.jp/ajp00030.html>
- 6) 船のメンテナンス研究会：船のメンテナンス技術，成山堂書店，pp.22