

# ライフサイクルコストを考慮した船体構造最適設計

106701 壽福 宏恭  
指導教員 鈴木 克幸 教授

This paper shows optimization of LCC (life cycle cost) considering maintenance. It is the time and method of maintenance that is expected to reduce the life cycle cost of ships. Cost of maintenance is the most important of it. The ship's age is strongly affected by corrosion according as long. Strength of steel is reduced by corrosion. This paper proposes formulation of optimization of maintenance. Evaluation function is maintenance cost and income in addition to initial cost (material and producing costs), resulting in a reduction of LCC.

Key words: Optimization, LCC, Maintenance, Corrosion

## 1 緒言

2006年以降、タンカーは、鋼材や資材の供給不足で価格の高騰、人件費の上昇、CO<sub>2</sub>排気ガスの防止のための規制の強化などから建造コストが大幅に上昇し、厳しい価格競争に置かれている。価格の上昇傾向にある新造船の国際競争に勝ち残るためには、最適化が必要である。

一般に、船舶の設計寿命は、25年としている。船体の寿命に影響を与えるのは、腐食と疲労である<sup>1)</sup>。繰り返し荷重となる波浪を受ける過酷な状況で使用されている船舶は、船齢が上がるにつれて腐食の影響が大きくなり、腐食を考慮した適切なメンテナンスが必要である。船舶の検査には、定期的検査(定期検査・更新検査、年次検査、中間検査)と臨時検査があり、それぞれ検査時期が設定され、定期検査は5年とされている<sup>2)</sup>。本研究では、定期検査を考慮する。

本研究の目的は、評価関数を従来考えられてきた鋼材費と加工費からなる初期コストに加えて、メンテナンスコスト、運航収益とからなるライフサイクルコストにすることが、タンカーを25年間使用するのにかかるコストの低減に有効であること及び設計の方向性を示すことである。

## 2 船体構造強度

### 2.1 船体の強度

船体に作用するモーメント、座屈強度は、文献3), 4)のものを適用する。各部材に作用する応力として、ホギングモーメント、サギングモーメント、水平曲げ応力を考慮し、強度の制約は、降伏応力、パネル座屈、全体座屈、局部座屈、ねじれ座屈の座屈応力を考慮する。

### 2.2 板厚の腐食予備厚

デッキ、サイド、ボトム、二重船側、二重船底、及びそれぞれの防撓材の腐食予備厚は、塗装をするまでの期間に応じて腐食予備厚を決定する。ただし、最低2.0mmは保持する。

### 2.3 最小要求値

デッキ、サイド、ボトム、二重船側、二重船底、及びそれぞれの防撓材の最小要求板厚、最小要求断面二次モーメント及び最小要求断面係数は、各船級共通の構造規則CSR(Common Structural Rules)<sup>3)</sup>に基づく。

## 3 船体構造最適設計

### 3.1 最適化問題の定式化

タンカーの中央断面の最適化を行う。評価関数は、初期コスト及びライフサイクルコストとし、制約条件は、縦強度とする。最適化手法は、逐次2次計画法を用いる。鋼材の腐食量 $y_c$ を式(1)に示す。

$$y_c = \frac{1}{12} \alpha (\tau_1 - u) n \quad (1)$$

$\alpha$ : 腐食速度,  $u$ : 塗装効果の期間,  $n$ : メンテナンス回数,  $\tau_1$ : 塗装をするまでの期間

次に、腐食量と塗装をするまでの期間の関係を図1に示す。

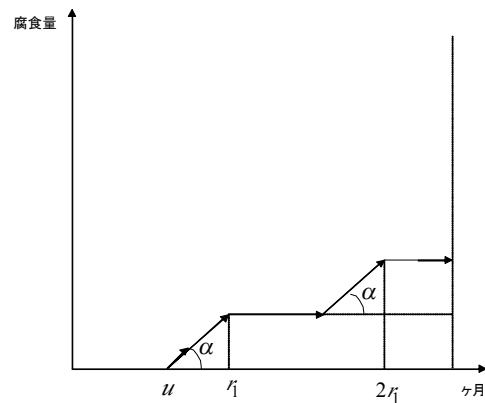


図1 腐食量と塗装をするまでの期間の関係

船舶の初期コスト<sup>5)</sup>は、鋼材費と加工費の和とする。

$$C_f(\mathbf{x}) = C_m + C_c \quad (2)$$

ライフサイクルコストの定式化は、

$$C_L(\mathbf{x}) = C_m + C_c + n \cdot C_r - C_b \quad (3)$$

と表す。

$C_m$ : 鋼材費,  $C_c$ : 加工費,  $C_r$ : メンテナンスコスト,  $n$ : メンテナンス回数,  $C_b$ : 運航収益,

$\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_m\}$ : 設計変数

ただし、運航収益  $C_b$  は、鋼材量が減少した分、原油を多く積載することができると考えている。また、将来のコストを現在の価値に還元する、いわゆる割引率 (2%) を適用する。

初期コストの最適化問題を以下のように考える。

$$C_f(\mathbf{x}) \rightarrow \min \quad \mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_m\} \text{ 設計変数}$$

subject to:

$$\frac{M}{Z(\mathbf{x})} \leq \sigma_j(\mathbf{x}) \quad (4)$$

(j=1,2,3,4,5)

j:強度の制約(降伏応力, パネル座屈, 全体座屈, 局部座屈, ねじれ座屈の座屈応力)

ライフサイクルコストの最適化問題を以下のように考える。

$$C_L(\mathbf{x}) \rightarrow \min \quad \mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_m\} \text{ 設計変数}$$

subject to:

$$\frac{M}{Z(\mathbf{x})} \leq \sigma_j(\mathbf{x}) \quad (5)$$

(j=1,2,3,4,5)

j:強度の制約(降伏応力, パネル座屈, 全体座屈, 局部座屈, ねじれ座屈の座屈応力)

### 3.2 構造最適化までの流れ

構造最適化までの流れを図2に示す。

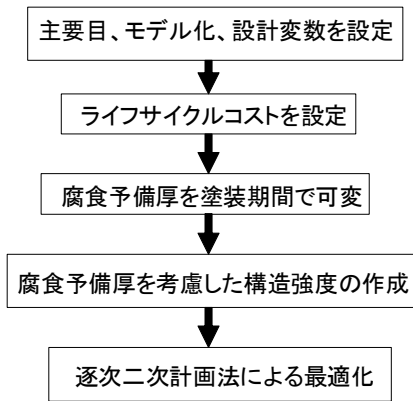


図2 構造最適化までの流れ

### 3.3 箱形モデルタンカーにおける構造最適化

船体中央断面をデッキ, サイド, ボトムの3つに分解したようなモデル<sup>6)</sup>で, それぞれの板は, いくつかの一般的なT型の防撓材で補強された防撓板として考え, 最適設計を行う。箱形モデルタンカーを図3に示し, 各設計変数の初期値と最適値を表1に示す。船舶の大きさは以下の通りとする。

- $L=300m$
- $B=50m$
- $D=35m$

設計変数は  $x_i$  と表し, 外板の厚さ, ウェブの高さ, ウェ

ブの厚さ, フランジの厚さ, フランジの幅, 防撓材の間隔の各寸法で18変数とし, 塗装をするまでの期間を加えて合計19設計変数とした。厚さは, mm表示とし, 塗装をするまでの期間は, ヶ月表示としている。

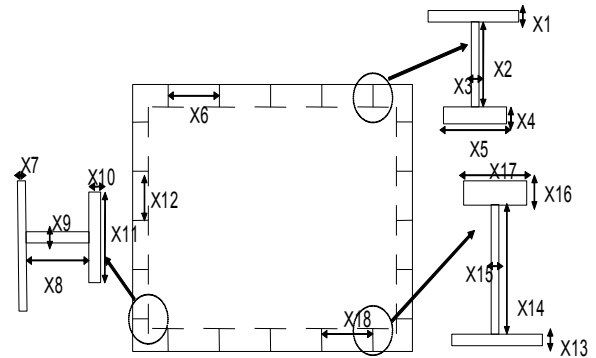


図3 箱形モデルタンカー

表1 初期値と最適値

	単位(mm)	初期値	最適値 ( $C_f$ )	最適値 ( $C_L$ )
デッキ	外板厚さ i=1	18	28.2	30.8
	ウェブ高さ i=2	275	311.6	373.3
	ウェブ厚さ i=3	10	18.1	15.5
	フランジ厚さ i=4	30	36.8	32.8
	フランジ幅 i=5	160	248.3	212.7
	防撓材間隔 i=6	500	862.1	913.6
サイド	外板厚さ i=7	18	18.9	18.8
	ウェブ高さ i=8	300	180.0	180.0
	ウェブ厚さ i=9	10	6.7	6.2
	フランジ厚さ i=10	30	30.0	30.0
	フランジ幅 i=11	160	197.8	192.8
ボトム	防撓材間隔 i=12	350	882.6	934.1
	外板厚さ i=13	18	27.7	29.5
	ウェブ高さ i=14	300	307.4	369.7
	ウェブ厚さ i=15	10	13.7	12.1
	フランジ厚さ i=16	30	34.7	31.3
	フランジ幅 i=17	160	245.6	210.6
	防撓材間隔 i=18	500	898.5	950.0
	塗装期間 i=19 (ヶ月)	60	60	47

次に, 評価関数の違いによる防撓材の寸法の比較を図4に示す。

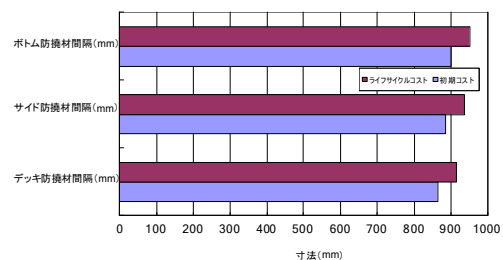


図4 箱形モデルタンカーの評価関数の違いによる防撓材の寸法の比較

次に、メンテナンス回数とライフサイクルコストの関係を図5に示す。

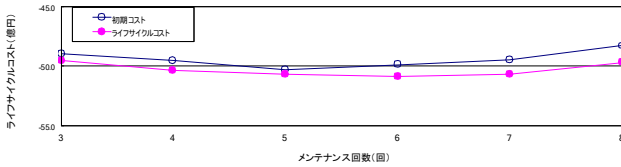


図5 箱形モデルタンカーのメンテナンス回数とライフサイクルコストの関係

次に、ライフサイクルコストの比較を図6に示す。

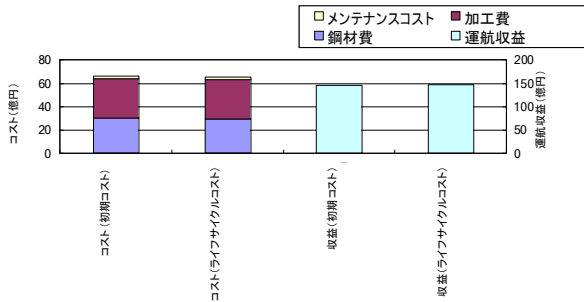


図6 箱形モデルタンカーのライフサイクルコストの比較

評価関数を初期コストにした場合と評価関数をライフサイクルコストにした場合の寸法結果の比較では、評価関数をライフサイクルコストにすると、デッキ、サイド、ボトムの防撓材の間隔は、いずれも増加した。

評価関数を初期コストにした場合とライフサイクルコストにした場合のコスト結果では、評価関数を従来の初期コストのみとするよりもライフサイクルコストとした方が、約1億円(約2%)のコスト削減ができることがわかった。これは、評価関数をライフサイクルコストにすることで、腐食予備厚の減少とメンテナンスコストが影響し、鋼材費、加工費、メンテナンスコストが減少し、運航収益が増加したことによるものである。

また、メンテナンス回数とライフサイクルコストの関係では、評価関数が初期コストでは、5回が最もコストが安くなったが、評価関数がライフサイクルコストでは、6回が最もコストが安くなる結果になった。これは、従来よりメンテナンスをこまめに行うことで、船体の強度を保ちつつ腐食予備厚を減少させたことによるものだと考えられる。

### 3.4 ダブルハルタンカーモデルにおける構造最適化

船体中央断面を箱形モデルタンカーで用いたデッキ、サイド、ボトムの3つに分解したようなモデルに、二重船側、二重船底を加えて、最適設計を行う。設計変数は、外板の厚さ、ウェブの高さ、ウェブの厚さ、フランジの厚さ、フランジの幅、防撓材の間隔の各寸法で42変数、塗装をするまでの期間を合わせて合計43変数とする。厚さは、mm表示とし、塗装をするまでの期間は、ヶ月表示としている。

ダブルハルタンカーモデルを図7及び図8に示す。

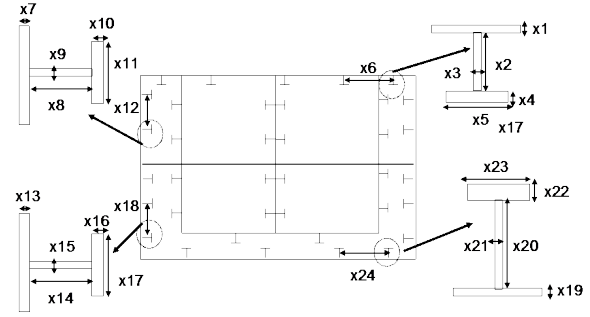


図7 ダブルハルタンカーモデル

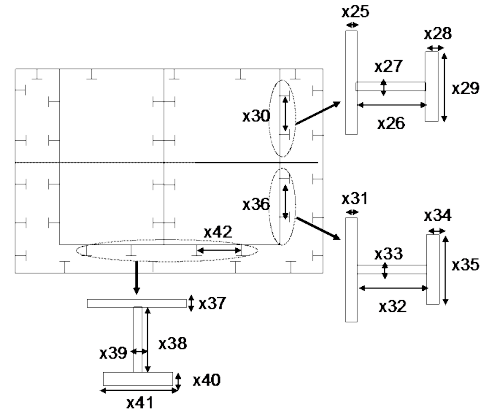


図8 ダブルハルタンカーモデル

また、メンテナンス回数とライフサイクルコストの関係を図9に示す。

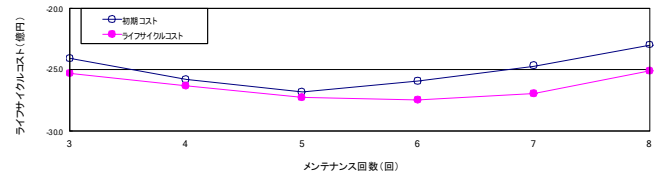


図9 ダブルハルタンカーモデルのメンテナンス回数とライフサイクルコストの関係

次に、評価関数の違いによるライフサイクルコストの比較を図10に示す。

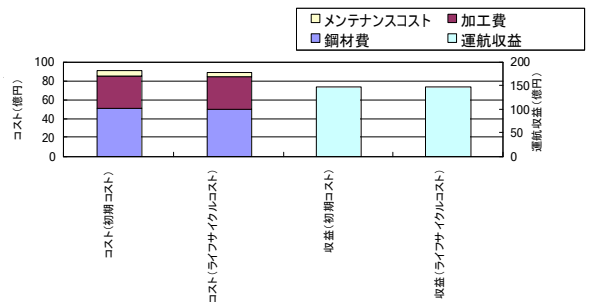


図10 ダブルハルタンカーモデルの評価関数の違いによるライフサイクルコストの比較

次に、初期値と最適値を表2及び表3に示す。

表2 初期値と最適値

		初期値	最適値 ( $C_I$ )	最適値 ( $C_L$ )
デッキ	外板厚さ i=1	18	24.4	25.6
	ウェブ高さ i=2	300	261.9	345.4
	ウェブ厚さ i=3	10	9.1	20.0
	フランジ厚さ i=4	30	15.0	15.0
	フランジ幅 i=5	160	157.6	141.1
サイドU	防撓材間隔 i=6	700	514.7	1036.4
	外板厚さ i=7	18	12.5	15.8
	ウェブ高さ i=8	300	180.0	180.0
	ウェブ厚さ i=9	10	9.0	17.5
	フランジ厚さ i=10	30	15.0	15.0
サイドL	フランジ幅 i=11	160	157.5	141.0
	防撓材間隔 i=12	650	520.1	1050.0
	外板厚さ i=13	18	12.5	12.5
	ウェブ高さ i=14	300	180.0	180.0
	ウェブ厚さ i=15	10	8.8	10.3
ボトム	フランジ厚さ i=16	30	14.0	14.0
	フランジ幅 i=17	160	145.6	130.0
	防撓材間隔 i=18	650	510.0	510.0
	外板厚さ i=19	18	15.5	22.9
	ウェブ高さ i=20	300	240.0	306.9
ボトム	ウェブ厚さ i=21	10	9.0	17.5
	フランジ厚さ i=22	30	15.0	15.0
	フランジ幅 i=23	160	157.5	141.1
	防撓材間隔 i=24	700	528.3	1050.0

表3 初期値と最適値

		初期値	最適値 ( $C_I$ )	最適値 ( $C_L$ )
二重船側U	外板厚さ i=25	18	12.5	15.8
	ウェブ高さ i=26	300	180.0	180.0
	ウェブ厚さ i=27	10	9.0	17.5
	フランジ厚さ i=28	30	14.0	14.1
	フランジ幅 i=29	160	145.6	130.0
二重船側L	防撓材間隔 i=30	650	528.3	1018.4
	外板厚さ i=31	18	12.5	12.5
	ウェブ高さ i=32	300	240.0	240.0
	ウェブ厚さ i=33	10	9.3	10.8
	フランジ厚さ i=34	30	14.0	14.0
二重船底	フランジ幅 i=35	160	145.6	130.0
	防撓材間隔 i=36	650	550.0	550.0
	外板厚さ i=37	18	12.5	12.5
	ウェブ高さ i=38	300	240.0	240.0
	ウェブ厚さ i=39	10	9.3	10.8
二重船底	フランジ厚さ i=40	30	14.0	14.0
	フランジ幅 i=41	160	145.6	130.0
	防撓材間隔 i=42	700	550.0	550.0
	塗装期間 i=43	60	60	48

箱形モデルタンカーより複雑な構造で設計変数が2倍以上になったダブルハルタンカーモデルでの結果でも、評価関数をライフサイクルコストにすることで、約1億3000万円(約3.5%)のコスト削減ができた。

#### 4 結言

本研究では、評価関数を初期コストにした場合とライフサイクルコストにした場合の船舶の構造最適設計を行った。船舶の構造最適設計は、初期コストを考えたのみの設計がほとんどであり、設計寿命の中でのライフサイクルコストを考慮した研究は、少なかった。評価関数をライフサイクルコストにすることで、メンテナンスコストと運航収益の考え方が重要であった。メンテナンスコストは、腐食予備厚に焦点を当て、塗装をするまでの期間に応じて腐食予備厚を可変させ、最適な寸法を選択することを可能にした。運航収益は、船体重量が軽くなった分、原油を積載することで、メンテナンス回数が増加しても、収益が多く見込めることを可能にした。評価関数をライフサイクルコストにすることによるコスト削減は、ダブルハルタンカーモデルのように、より複雑な構造では、更に効果が認められることがわかった。

本研究では、評価関数を従来考えられてきた初期コストとするよりも、ライフサイクルコストにすることで、設計寿命25年間にかかるコストが安くなることを示すことができた。

また、船舶のモデル化において、本研究では、箱形モデルタンカーとダブルハルタンカーモデルの2つを考えたが、本研究の設計思想を用いて、今後は、モデルを詳細化し、細かいコスト設定を行うことで、実際の船体に近づけ、船舶会社の新たな知見になることができると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 山本規雄:船舶の腐食・疲労とその管理, 防錆管理, pp.385-390 (2009)
- 2) 魚谷明彦, 三浦明純:船級協会による就航船の検査, 日本船舶海洋工学会誌, 第29号, pp.11-16 (2010)
- 3) CSR-T 編 共通構造規則, 日本海事協会 (2006)
- 4) DETNORSKE VERITAS, HULL STRUCTURAL DESIGN SHIPS WITH LENGTH 100 METRES AND ABOVE, pp.117-118 (2001)
- 5) 岡田哲男:船体構造の設計と現図における最適化手法の適用に関する研究, 東京大学博士論文(2006)
- 6) 鈴木克幸, 大坪英臣:多段階最適化手法による船体構造最適設計, 日本造船学会論文集, 第178号, pp.405-411 (1995)