

マラッカ通行最大型 VLCC の開発

Development of Malacca-Maximized VLCC

光 武 英 生 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 基本設計部
板 橋 正 泰 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 基本設計部 課長
高 橋 弘 行 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 基本設計部

マラッカ海峡を通行可能な喫水で載貨重量 30 万トンを確認したマラッカ通行最大型 VLCC を開発した。実海域での高い推進性能を確保するために主要目の見直しを行い、船体を肥大化させながらも波浪中抵抗増加を従来型 VLCC 程度に抑えた船型としている。また、船尾形状は CFD を駆使し、粘性抵抗を低減させた船型とした。上部構造の防振設計においては全船モデルを使用した振動応答解析を実施し、海上公式試運転で上部構造の振動応答が ISO ガイドラインの下限值以下であることを確認した。

A design of VLCC of the maximum deadweight to pass the Strait of Malacca (Malacca-Maximized VLCC) was developed. The loading capacity of 300 500 metric tons deadweight was achieved at a draught able to pass the Strait of Malacca. To achieve high propulsive performance at sea, the hull particulars and the fore section of the hull were designed to prevent the resistance increase in waves and the stern form was optimized using CFD code to maintain low viscous resistance. Moreover, vibration response analysis for the superstructure was carried out using the three dimensional finite element model of the whole ship at the design stage. Measurement results of the vibration response of the superstructure were confirmed under the lower boundary of ISO 6954:1984 at the official sea trial.

1. 緒 言

株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド^{*1}（以下、IHIMU と呼ぶ）は、「SUPER ZEARTH」（1995 年完工）以来 20 隻以上の 2 重船殻 VLCC を建造してきた。特に 1998 年完工の「TAKACHIHO II」に始まる 28 万トン型シリーズおよび積載能力を拡大した 30 万トン型シリーズは、すでに合計 17 隻を引き渡している。

しかしながら、上記シリーズを含む従来の VLCC では、30 万トン積載時の喫水がペルシャ湾から我が国へ原油を輸送する途中にあるマラッカ海峡において、航行可能な制限を超えている。このため、ロンボク海峡など水深の深い海峡まで回ることになり、航海日数も燃料消費量も余計に掛かるため、マラッカ海峡を通行できる喫水で積載量をより大きくしたマラッカ通行最大型 VLCC を望む声が高まっていた。また、近年の港湾規制緩和によって、入港時に以前より多くの原油を積載することができる港湾が増えてきており、入港時の喫水制限内でより多くの原油を積載で

きる VLCC を望む声も高まっている。

IHIMU はこのような客先の要求にこたえるため、これまでの豊富な開発、建造実績を基に浅い喫水でより多くの積載を可能にするマラッカ通行最大型 VLCC を開発した。

本稿では超肥大船型の開発と防振設計技術の進歩に焦点を当てて紹介する。

2. マラッカ通行最大型 VLCC の概要

本船の計画時に設定した設計条件のうち、主な項目は以下のとおりである。

- (1) マラッカ海峡の喫水制限内（約 20.5 メートル）で載貨重量 30 万トンを確認する。
- (2) 貨物油タンク容積 35 万立方メートルを確認する。
- (3) 実海域での推進性能を重視した船型とする。
- (4) 上部構造の振動応答は ISO ガイドラインの Lower Boundary レベルとする。
- (5) マニホールド位置や係留装置に関する OCIMF（石油会社国際海事評議会）の規則なども考慮する。

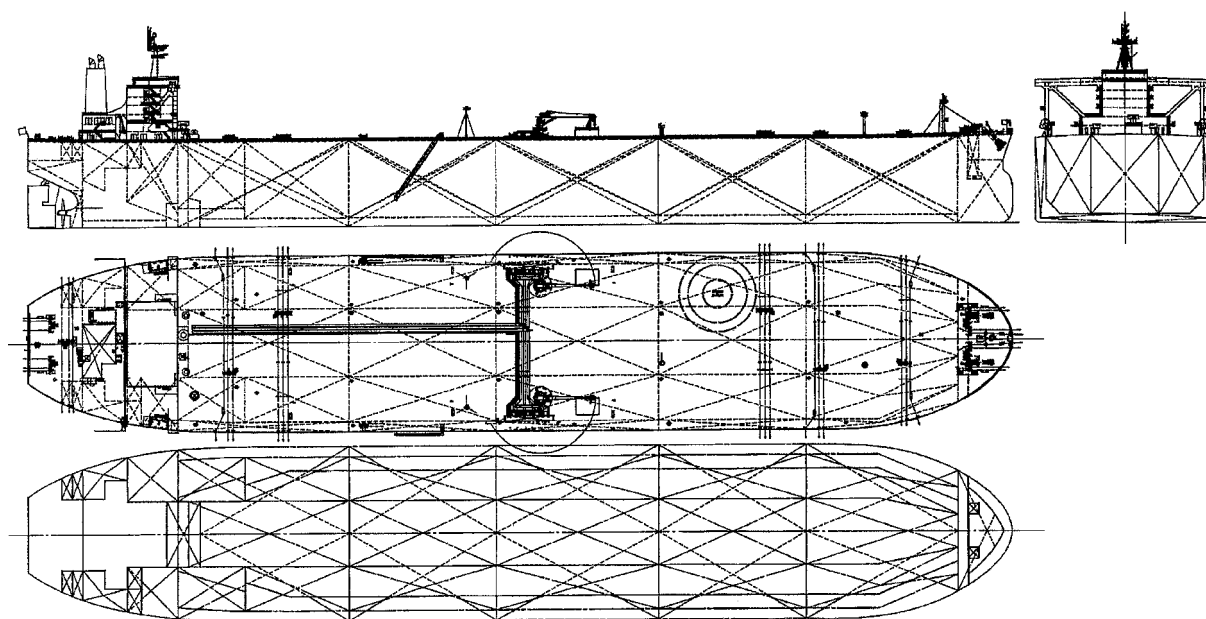
本船の主要目を第 1 表に、一般配置図を第 1 図に示す。第 1 表には比較のため、前 VLCC シリーズの 28 万トン型と 30 万トン型の主要目も示した。本船の主な特長は以下の

^{*1}：石川島播磨重工業株式会社（IHI）の船舶海洋事業の分社化によって、IHI の船舶海洋事業を母体として、住友重機械工業株式会社の艦艇部門を包括する会社として、2002 年 10 月に設立発足した会社である。

第1表 主要目比較

Table 1 Comparison of principal particulars

船 型	28 万トン型	30 万トン型	マラッカ通行最大型
全 長 (m)	330.0	333.0	333.0
垂 線 間 長 (m)	316.6	319.6	324.0
型 幅 (m)	60.0	60.0	60.0
型 深 (m)	28.9	29.5	29.0
満 載 喫 水 (m)	20.4	21.4	20.5
載 貨 重 量 (t)	280 000	300 000	300 500
総 ト ン 数 (トン)	149 600	154 700	160 300
貨 物 油 タ ン ク (m ³)	328 000	340 000	350 000
主 機 関	Diesel United-Sulzer 7RTA84T	Diesel United-Sulzer 7RTA84T	Diesel United-Sulzer 7RTA84T
最 大 出 力 (kW × rpm)	27 160 × 74.0	27 160 × 74.0	27 160 × 74.0
常 用 出 力 (kW × rpm)	23 090 × 70.1	23 090 × 70.1	23 090 × 70.1
航 海 速 力 (kt)	16.1	15.8	15.7



第1図 一般配置図

Fig. 1 General arrangement

とおりである。なお、船型設計および防振設計関連については次章以降で述べる。

- (1) タンク配置と船型のバランスを最適化し積付効率を向上させた。この結果、燃料油半載の状態では比重約0.84の原油を全タンク満載した場合でもトリムをほぼ0に保つことができる。
- (2) 主機室の両サイドにバラストタンクを配置し、燃料消費によるトリム状態の変化をキャンセルさせるようにした。
- (3) 中央断面形状は実績のある前 VLCC シリーズと同じ形状とし、高い信頼性を継承した。
- (4) 燃料油タンクの2重船殻化の要求に対し、船型を変更せずに対応できるように配慮した。

3. 超肥大船型の開発

本船の船体形状は、就航路、港湾などにおける船体主要寸法の制限内で最大の載貨重量を確保するとともに、船体の肥大化（肥瘠度を上げる）による性能劣化を抑えてトップレベルの推進性能を達成するように設計を行った。船体の肥瘠度は、造波抵抗および波浪中の抵抗増加に影響を与える船首肥瘠度と、粘性抵抗および推進性能に影響を与える船尾肥瘠度に分けて考えることができる。

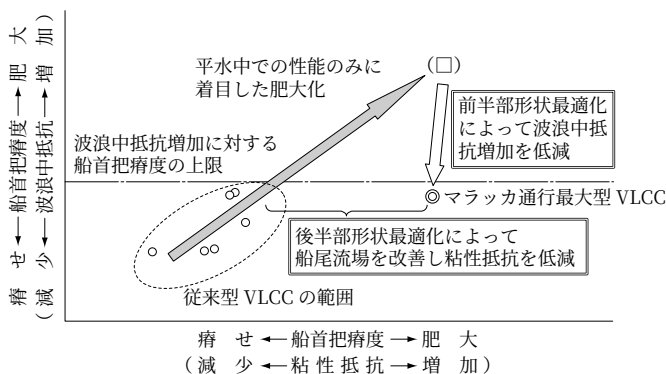
一般に、VLCC を代表とする低速肥大船では、平水中の全船体抵抗に占める造波抵抗の割合が比較的小さく、かつ造波抵抗自体は、ある船首肥瘠度までは大きく変化しない。したがって、平水中の性能の観点からは、載貨重量を増加

させる方法の一つとして、船首肥瘠度を大きくすることが考えられる。しかし、船首肥瘠度は、波浪中における抵抗増加と密接に関連しており、平水中の性能向上のみに着目して船首部を肥大化させると、波浪中での性能劣化を招く危険性がある。このため IHIMU では、従来から波浪中抵抗増加を防ぐために、船首肥瘠度の実績および実験データの解析結果から判断した制限を設けている。

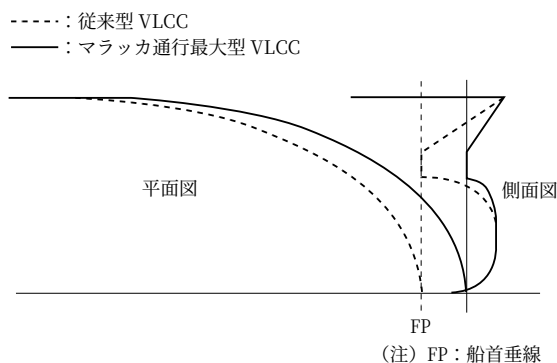
一方、載貨重量の増加のためには船尾肥瘠度を大きくすることも必要になる。しかし、船尾肥瘠度を増加させると船体からの渦放出や剥離による抵抗が増加しやすい。また、その渦や剥離によってプロペラ周りの流場が大きく乱れ、振動の原因となったり推進性能の低下を招く危険性があるため、船尾船体形状の設計には細心の注意が必要になる。

以上に述べたように本船の船型設計は、① 船体前半部は排水量を増加させながら船首肥瘠度を抑える ② 船体後半部は船尾肥瘠度を増加させながらも流場の改善を図り粘性抵抗を低減させて推進性能を確保する、という 2 点をブレークスルーする必要があった。この設計概念を第 2 図に示す。本船の開発では主要寸法の見直しから行い、二つの目標を達成した。概要を以下に紹介する。

船体前半部の船型設計は、本船では船首垂線（以下、FP と呼ぶ）を前方に移動し垂線間長さを長くした。このことによって、船体前半部の側面図と平面図を第 3 図のように設計し、従来型 VLCC と同程度まで船首肥瘠度を抑え、波浪中抵抗増加を抑える船型とすることができた。しかし、FP を前方に移動すると、船首バルブの長さが必然的に短くなり、平水中での造波抵抗の低減からは不利になる。このため、FP の位置は平水中の造波抵抗と波浪中抵抗増加量のバランスを考慮して最適な位置を求めた。また就航後の VLCC は、満載状態とバラスト状態の航海がほぼ半々になる。そのため、バラスト状態についても波浪中性能を考慮



第 2 図 船体肥瘠度を考慮した船型設計の概念
Fig. 2 Schematic diagram for design of the hull form with fullness



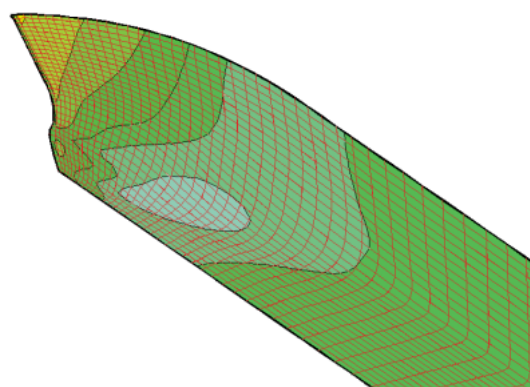
第 3 図 船体前半部船体形状設計の概念図
Fig. 3 Schematic diagram for design of the fore section of the hull

した船体形状にした。

本船の船体後半部も第 2 図に示すように従来船型以上に肥大化させている。そこで船尾周り流場の改良によって粘性抵抗低減と自航要素向上を図るため、船尾周り流場の検討のためのツールとして数値流体力学（以下、CFD と呼ぶ）による流場解析を用いた（第 4 図）。IHIMU では、従来から CFD を船型最適化のための設計手法の一つとして活用しており、各種船型の性能要素に対する CFD の推定精度を検証したデータも蓄積されている⁽¹⁾。本船の船型設計では、これらのデータと経験を十分に生かしながら CFD を用いて船尾形状の最適化を行い、船尾の肥大化と推進性能向上という相反する要求を両者とも満足する船型を開発することができた。

また本船は、船体形状のほかにも種々の省エネルギー装置や高効率プロペラを適用し、優れた推進性能を実現した。これらについてもすべて IHIMU で水槽試験を実施し、性能だけではなく相互干渉やキャビテーションについても問題のないことを確認した。

以上を踏まえた本船の速力は、海上公式試運転で計画値



第 4 図 CFD による船尾周り流場の計算例
Fig. 4 Example of flow field calculation around the aft hull section by CFD code

を満足していることが確認された。さらに同型の VLCC には、二重反転プロペラの装備が決定しており、通常プロペラを装備した場合に比べ 13 ～ 15% の馬力低減効果をねらい、現在建造が進められている。

4. 上部構造の防振設計

4.1 防振設計

乗組員が居住する上部構造の振動は、乗組員の航海中の快適性に大きく影響する。また航海機器への悪影響も懸念される。本船は上部構造の振動応答を低減することで乗組員が快適に航海できるように、また、航海機器への悪影響を防ぐように、上部構造の振動応答が上部構造の振動に関するガイドライン ISO 6954 : 1984 の Lower Boundary (4 mm/s) レベルとなるように防振設計を行った。

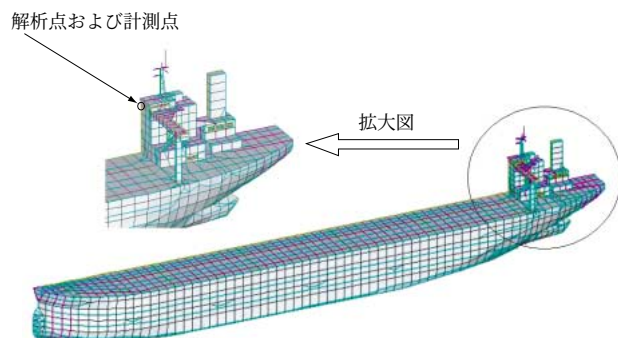
近年、以下の理由で、新設計船においては全船モデルを使用した振動応答解析結果に基づき防振設計を行うことを標準にしている。

(1) 全船モデルの使用

以前は上部構造とその近傍をモデル化して固有振動数解析を行い、共振回避の設計を行っていた。しかし、部分的なモデルでは、主機、主船体などとの連成が考慮されず、上部構造の振動特性が忠実に再現できない場合があるという知見を得た。このため、近年の防振設計では第 5 図に示すような全船モデルを使用している。上部構造の振動特性を忠実に再現し、精度の良い解析を行うため、全船を三次元で詳細にモデル化し、ファンネル、レーダマスト、主機もモデル化している^{(2)～(4)}。

(2) 振動応答解析の実施

上部構造は主機、ファンネル、主船体と相互に影響し合いながら振動しているため、固有振動数解析を行うとさまざまな箇所が主体となって振動している無数



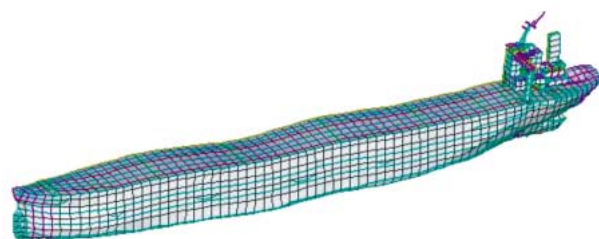
第 5 図 全船モデル
Fig. 5 Calculation model of whole ship

の振動モードが計算される。これらすべての振動モードに対して起振振動数を回避させるのは困難である。このため、多数の振動モードの中から問題となる可能性のある振動モードが抽出でき、その振動応答を評価することができる振動応答解析結果を用い、起振力に対して大きな振動応答を生じさせる振動モードを対象に防振対策を検討している。

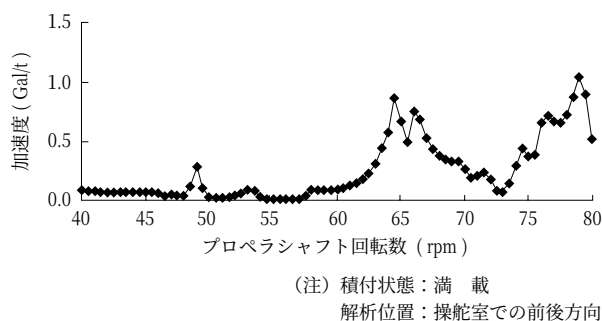
なお、評価に際しては、IHIMU で建造した実績船の試運転時の振動計測結果と実績船の全船モデルを使用した振動応答解析結果を用いてキャリブレーションを実施し、推定精度を向上させている。本船についても上部構造の防振設計では最新の知見を基に精度を向上させた振動応答解析結果を用いて、効果的な防振設計を行うことができた。

振動応答解析はバラスト状態、満載状態の 2 状態について行った。船側外板に接する海水と貨物油タンク内の貨物油が振動に与える影響は有限要素法と境界要素法を連成させたバーチャルマスを使用して考慮した。また、起振力はプロペラサーフェスフォース、プロペラベアリングフォース、主機軸系縦振動起振力、主機ガイドモーメントを対象として振動応答解析を実施した。

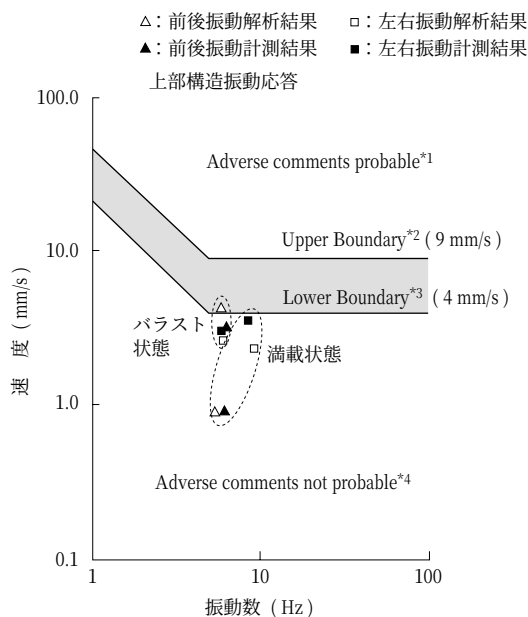
解析結果のうち、振動モードの例を第 6 図に示す。また、振動応答の解析結果の例を第 7 図に示す。振動応答解析結果を基に、各状態の起振力に対する上部構造の振動応答をそれぞれ評価したところ、振動応答の大きいものでも ISO



第 6 図 振動モード
Fig. 6 Vibration mode



第 7 図 振動応答解析結果
Fig. 7 Results of vibration response analysis



(注) *1: 苦情が出る可能性がある
 *2: 通常経験され受け入れられている船上における振動の上限
 *3: 通常経験され受け入れられている船上における振動の下限
 *4: 苦情が出る可能性がない
 振動応答の位置: 操舵室

第 8 図 防振設計時の振動応答解析結果と海上運転時の計測結果
Fig. 8 Results of analysis on design stage and results of measurement of vibration response during sea trials

6954 : 1984 の Lower Boundary (4 mm/s) 程度と推定され、実船において多少の誤差はあるものの、デザインターゲットを満足できることを確認した。

4.2 振動計測結果

本船の海上運転時に振動計測システムを使用して船体構造、艤装品の振動計測を行った。本船の上部構造の振動応答計測結果は ISO 6954 : 1984 の Lower Boundary (4 mm/s) 以下であった。上部構造の防振設計時の振動応答の解析結果と海上運転時の計測結果の比較を**第 8 図**に示す。上部構造の振動応答はデザインターゲットをクリアし、良好な振動応答レベルを達成した。また、防振設計時の上部構造の振動応答解析結果と計測結果は同レベルであり、防振設計に対して全船モデルを使用した振動応答解析の精度が十分

に高いことを確認した。

5. 結 言

マラッカ海峡を航行可能な喫水で載貨重量 30 万トンを実現したマラッカ通行最大型 VLCC を開発した。本船の開発に当たっては船型設計、防振設計にも十分に配慮し、当初の計画値を満足していることを海上公式試験で確認した。本船はすでに 2 隻を引き渡したが、実海域での推進性能にも優れ、また振動の大変少ない船であると船主から高い評価を得ている。

— 謝 辞 —

本船の開発に当たり、新日本石油タンカー株式会社、日本郵船株式会社を始め、各船会社の関係各位から多大なご助言とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 大森拓也, 石黒 剛: 肥大船の初期設計段階における推進・操縦・耐航性を考慮した船型設計 石川島播磨技報 第 43 巻第 5 号 2003 年 9 月 pp. 151-155
- (2) 武田 裕, 根木 勲: 船体振動の減衰同定法の研究 (第 1 報) 日本造船学会論文集 第 189 号 2001 年 6 月 pp. 273-279
- (3) 武田 裕, 根木 勲, 楠本裕己: 船体振動の減衰同定法の研究 (第 2 報) — 実船起振機試験の同定結果 — 日本造船学会論文集 第 191 号 2002 年 6 月 pp. 283-290
- (4) 武田 裕, 根木 勲, 楠本裕己: 船体振動の減衰同定法の研究 (第 3 報) — 構造・流体連成系の減衰係数の分離 — 日本造船学会論文集 第 192 号 2002 年 12 月 pp. 583-590