

内航省エネ船型の実船適用

眞砂 徹*, 清水 泰良*, 一ノ瀬 康雄**

Demonstration of the Energy-saving Hull Form with an Actual Ship

by

MASAGO Tetsuo, SHIMIZU Yasuyoshi, ICHINOSE Yasuo

Abstract

Koa shipyard built the first ship which implemented the new energy-saving hull form developed in a research and development project sponsored by the Ministry of Economy, Trade, and Industry. The difficulties that arose when building the first ship provided insight into the areas that needed improvement. In particular, we made several changes to implement the new hull form – we increased the volume of the closure on the bow side to meet the damaged stability requirements and integrated the components' structure to ensure workability even in the narrow bow and stern shapes. As predicted, the results of the sea-trial result showed significant energy-saving potential of the developed ship – a 19.1% decrease of CO₂ emissions compared with a standard ship from 1990s. Furthermore, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism bestowed the vessel with the highest rating of 5.0 stars in the energy-saving rating system for coastal shipping in Japan. The ship also demonstrated high maneuverability and operated with low noise and low vibration on actual voyages.

* 興亜産業株式会社

** 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 流体設計系

原稿受付 令和2年 7月 31日

審査日 令和2年 9月 14日

目 次

1. まえがき	44
2. 実船建造における課題とその解決方法	44
3. 試運転による省エネ効果の実証	48
4. まとめ	51
謝辞	51
参考文献	51

1. まえがき

経済産業省の補助事業「平成 28 年度輸送機器の実使用時燃費改善事業費補助金（海上輸送機器の実使用時燃費改善事業）」を受けて実施した研究「内航海運のための省エネルギー船型群の研究開発」では資源エネルギー庁が示した 1990 年代の標準燃費である比較対象船に対して 16%以上の省エネ性能を有する船型を開発し、水槽試験によりその省エネ性能を確認した。

興亜産業株式会社はこの省エネ船型の第 1 番船である「光令丸」を建造し、著者らはその建造実証と試運転による省エネ効果の検証を行った。本稿では省エネ船型の建造にあたり直面した課題とその解決方法について紹介するとともに、試運転で開発した省エネ船型の実際の省エネ率を検証した詳細について述べる。

建造した本船「光令丸」(図 1) は開発目標である 1990 年代の標準燃費である比較対象船に対する省エネ率 16%以上を上回る 19.2%の省エネ率が試運転で確認された。さらに、評価基準の異なる国土交通省の内航船省エネルギー格付制度においても最高ランクの 5 つ星（代替手法）を 2020 年 5 月 28 日付けで付与された。



図 1 プロジェクト開発船型を採用した「光令丸」

2. 実船建造における課題とその解決方法

「内航海運のための省エネルギー船型群の研究開発」ではコンピュータシミュレーションおよび水槽試験により省エネ船型の開発および性能確認が行われ、このプロジェクトの中で区画割り、タンク配置、機関室の機器配置、船首バルブと錨の干渉等を検討し運航上の課題を解決した。一方、実際の建造においては十分に計画された設計でも第 1 番船では複数の新たな課題が顕在化した。

まず、1 つ目の課題は省エネ船型を採用することにより従来船と比較して板曲げ量および工作時間が増加することである。省エネ船型は従来の船型と比較し曲面が多く、板曲げ量で 3 割増、工作時間は 2 倍程度に増加した。

特に工作時間増加の要因となったのは非可展面である曲げ外板を線状加熱で加工した際にできる板耳のタクレ（板耳のしわ）を臼型プレス（図2）で補正する工程の増加である。これらの第1番船の建造で明らかとなった課題は2番船以降で外板分割の要領の変更や施工要領の工夫により解決できる。例えば図3のDU-8板およびDL-8板の曲げ形状は図4に示すように船首側がお椀状で船尾側が鞍板状になっており、1枚の外板に2種類の曲がり形状がある複雑な板である。このような板の曲げ加工は特に難易度が高く、工作時間も増大し品質も悪化する。しかし、図3右図のように分割位置を増やすことで工作難易度は低下し、工作時間の削減、品質向上につながる。このような改善検討は三次元CADを用いて撓鉄作業者と展開作業者が共同で実施する必要がある。図5や図6に示すようなインカーブからアウトカーブへの変曲線を見つけて分割線を決定する。工作についての改善点はこの他にもまだ多くあり、今後も品質向上とコスト低減に向け試行錯誤で曲げ易さを追求していく予定である。この研究開発で得られた成果のひとつとして、大幅に向上した省エネ船型の建造に携わる中で従来とは異なる工程やそれに伴い必要となる創意工夫が作業者への良い刺激となりモチベーションの向上につながったことが挙げられる。

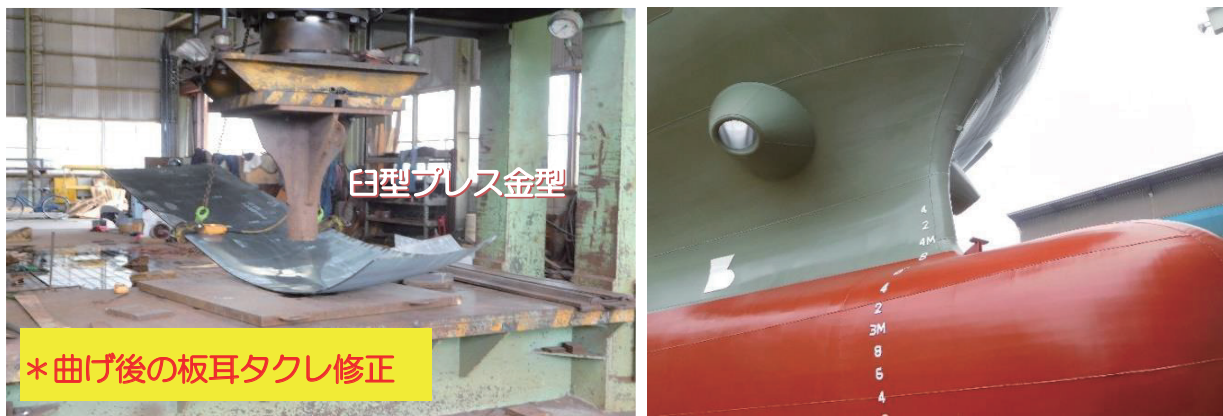


図2 臼型プレス金型（左）による船首部の外板加工（右）

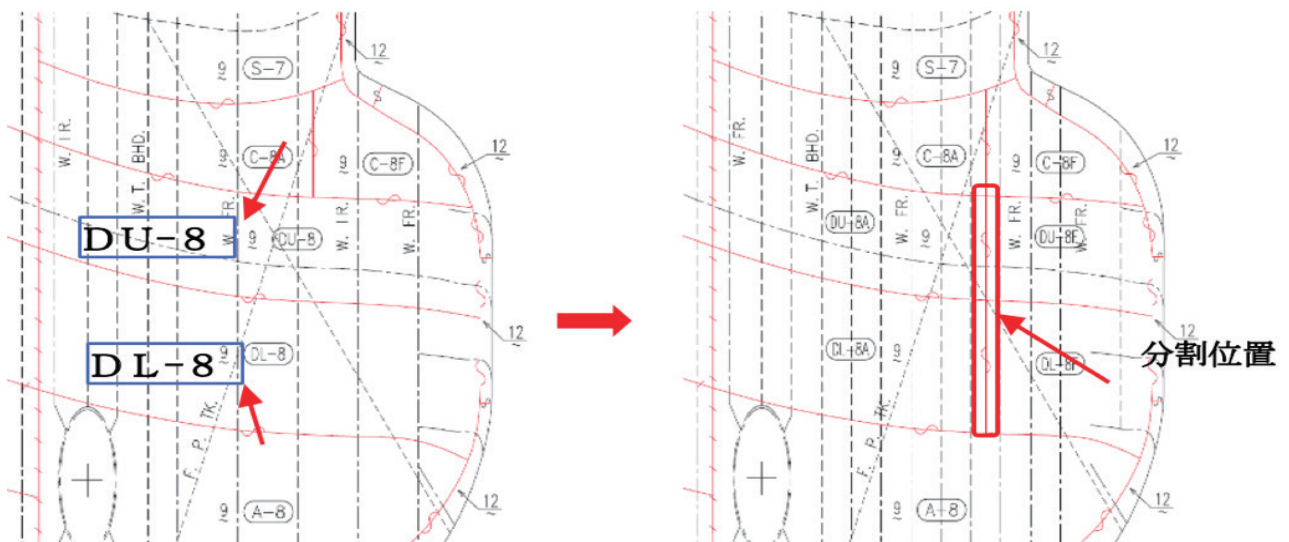


図3 従来の外板分割（左）と曲げ易さを検討した後の外板分割（右）

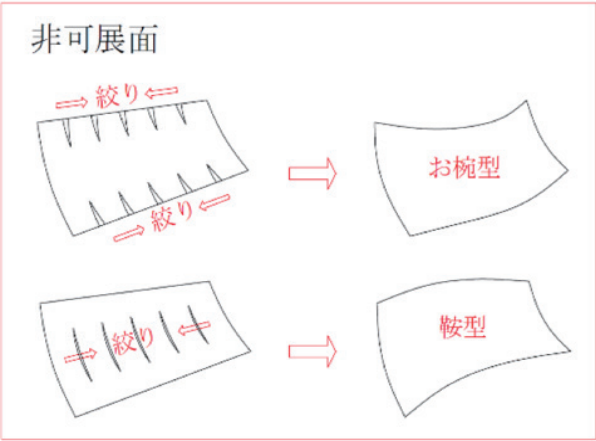


図 4 非可展面のイメージ図

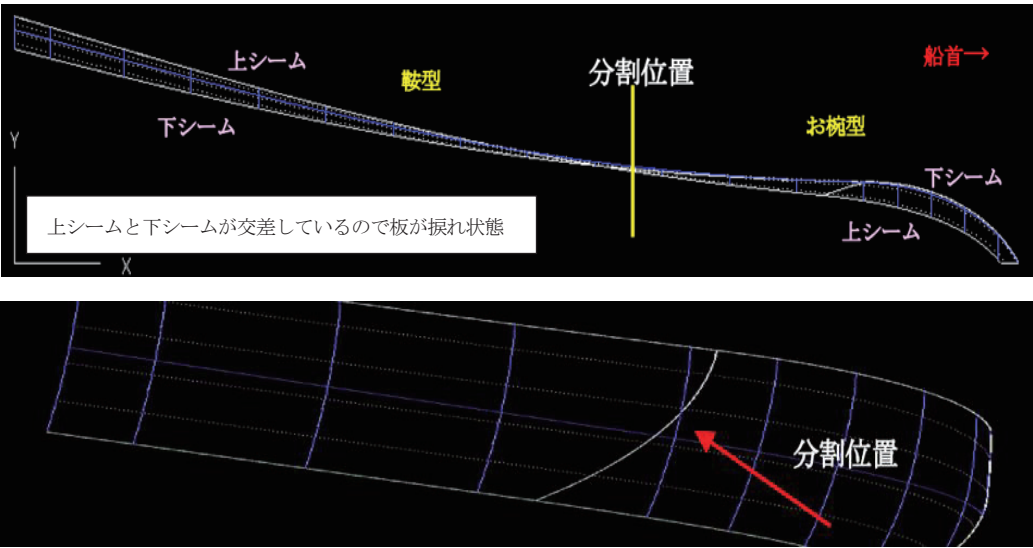


図 5 DU-8 板の平面図（上）と DU-8F 板の斜視図（下）

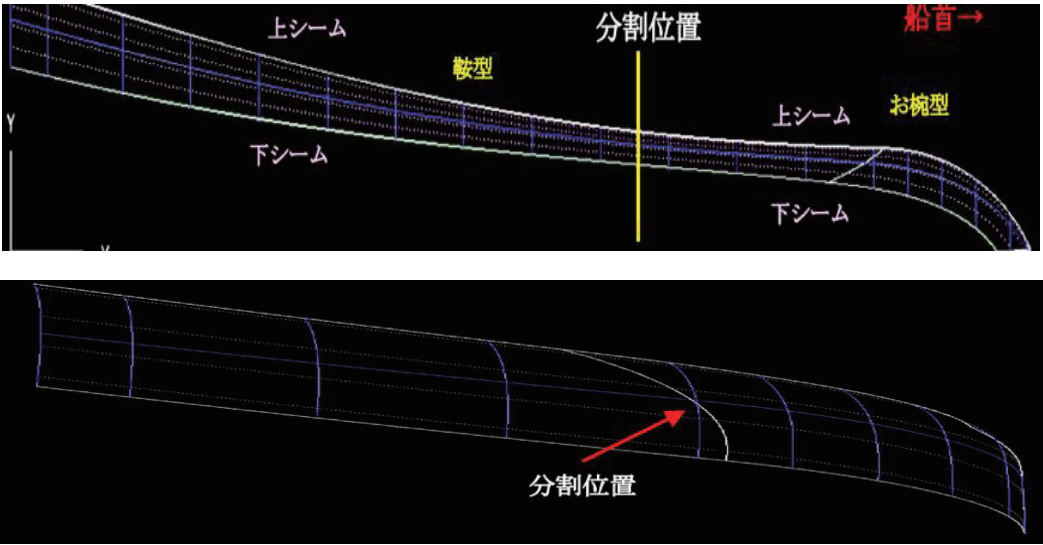


図 6 DL-8 板の平面図（上）と DL-8F 板の斜視図（下）

次に実船建造にあたり実施した設計の工夫について述べる。対象船の積荷は比重の大きい液体でタンク容積やタンク配置の非損傷時復原性（インタクトスタビリティ）は十分に満足されている。しかし、推進性能を向上させるため船首尾の喫水下の船型をスリムな形状にしたため、損傷時復原性（ダメージスタビリティ）を確保するための工夫が必要であった（図7）。本船では船首尾楼構造の閉鎖容積を従来船より大きくすることにより、このダメージスタビリティを確保した（図8）。

また、船首尾が痩せているため船首バウスラスター及び機関室内減速逆転機等の機器配置と外板との間隔が非常に狭くなることが課題であった。そのため、本船では、外板付き内構部材を機器台と一体化した構造にすることにより作業性空間を確保した。

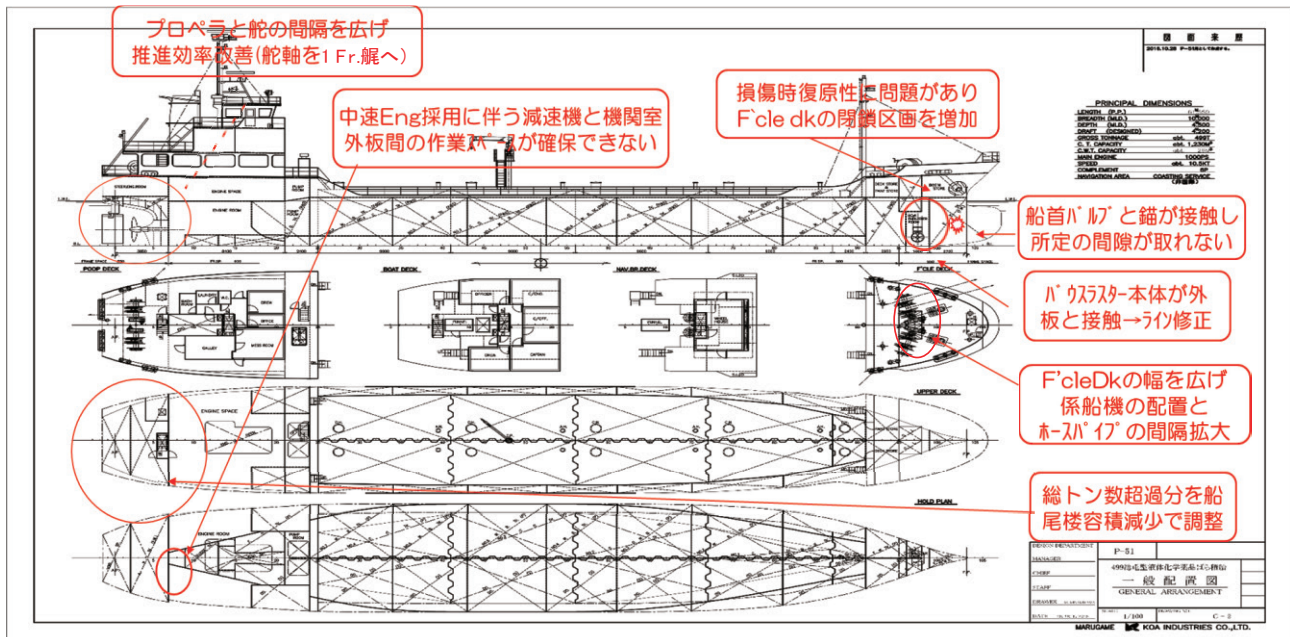


図7 研究開発プロジェクトで検討した一般配置図

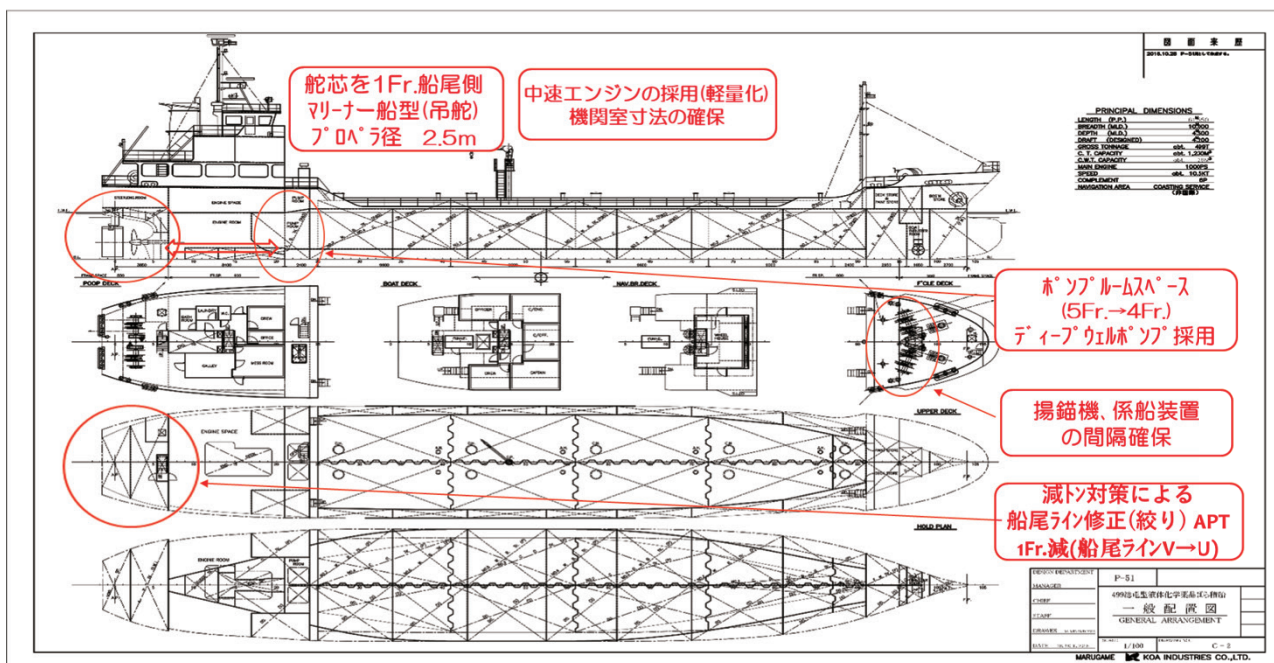


図8 建造船の一般配置図

省エネ船型を採用するためのこれらの創意工夫により、本船光令丸は無事に建造され、図9のように進水を迎えることができた。



図9 進水式の様子

3. 試運転による省エネ効果の実証

3.1 内航海運のための省エネルギー船型群の研究開発

内航海運のための省エネルギー船型群の研究開発では、燃費の計算式が次式の通り定められ省エネ率の算定基準となる 1990 年代の比較対象船の燃費は $0.01212[l/(t \cdot NM)]$ であった。

$$\text{主機燃費率} \quad FOCR_{ME} [g/(kWh)] \quad (\text{MCR の関数, 算出式は非公開}) \quad (1)$$

$$\text{主機燃料消費量} \quad FOC_{ME} [g/h] = FOCR_{ME} [g/(kWh)] \cdot 0.75 \cdot MCR [kW] \quad (2)$$

$$\text{補機燃料消費量} \quad FOC_{AE} [g/h] = 0.08 \cdot FOCR_{ME} [g/(kWh)] \cdot MCR [kW] \quad (3)$$

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} \quad Emmision_{CO_2} [gCO_2/(t \cdot NM)] = \frac{3.114 \cdot FOC_{ME} + 3.206 \cdot FOC_{AE}}{Vs [\text{knot}] \cdot DWT [t]} \quad (4)$$

$$\text{燃費} \quad FOC [l/(t \cdot NM)] = \frac{Emmision_{CO_2}}{2.71 \times 1000} \quad (5)$$

ここで、 V_s は計画満載状態の 75%MCR での到達速力、 DWT は載貨重量トンである。

建造された本船の試運転の結果から研究開発プロジェクトで省エネ船型の省エネ効果を検証した。（図 10）



図10 試運転時の様子

満載状態の試運転結果から開発船型の省エネ率を研究開発プロジェクトの算式を次式の通り算定した。なお、主機燃料消費率には試運転で計測された値を、MCR には試運転で計測された 4/4 主機出力の値を採用した。また、計測値は往復運転の平均値を採用し、海象（波・風）修正は実施していない。計測項目は、DGPS による位置及び距離、所要時間、風向及び海面状況、主機毎分回転数、主機気筒内最高圧力、主機冷却水及び潤滑油圧力、主機各気筒排気温度、主機各気筒冷却水入り口及び出口温度、主機各燃料ポンプ圧力目盛りである。海上試運転の海域は撚灘（庄内半島近辺）で、当日の対地風速は平均 9m/s 程度、波高は 1.0m-1.5m 程度であった。なお、建造船は水槽試験の状態とプロペラ直径の減少（水槽試験：2.5m に対し建造船：2.4m（性能悪化要因））と舵バルブ型の省エネ付加物の搭載（性能向上要因）の差異があるため馬力曲線を直接比較はできない。

$$Emmision_{CO_2}[gCO_2/(t \cdot NM)] = \frac{3.114 \cdot 195.2 \cdot 0.75 \cdot 664 + 3.206 \cdot 0.08 \cdot 195.2 \cdot 664}{10.60 \cdot 1226} = 26.55 \quad (6)$$

$$FOC[l/(t \cdot NM)] = \frac{26.55}{2.71 \times 1000} = 0.0097989 \quad (7)$$

$$\text{省エネ率}[\%] = \frac{0.01212 - 0.0097989}{0.01212} = 19.1[\%] \quad (9)$$

この試運転結果から、1990 年代の比較対象船と比較した開発船型の省エネ率は研究開発プロジェクトの目標とした 16%を上回る 19.1%であることが確認された。

3.2 内航船省エネルギー格付制度の代替手法の改善率

本船「光令丸」（図 1）は国土交通省の内航船省エネルギー格付制度において最高ランクの 5 つ星（代替手法）を 2020 年 5 月 28 日に付与された。

内航船省エネルギー格付制度の代替手法では船舶が航海中に行った仕事とそれに費やした燃料消費量から換算される CO₂ 排出量との比が、基準値より何%改善されているかを算定する。

改善率（省エネ率）は表 1 に示す計算項目により代替手法の計算値 X を算定することにより（11）式で算定される。なお、本船では革新的省エネ技術および複数の主機を搭載した場合の計算項目は対象外のため除外している。

表 1 内航船省エネルギー格付制度における代替手法を使用される計算項目

P_{ME}	主機関の 75%連続最大出力 [kW]
SFC_{ME}	P_{ME} における燃料消費率 [g-fuel/kWh] A 重油：3.206, C 重油：3.1144, LNG：2.750 [g-CO ₂ /g-fuel]
CF_{ME}	主機関の CO ₂ 排出係数 [-]
P_{AE}	船舶の推進に必要な電力需要 [kW]
SFC_{AE}	補機関の 50%連続最大出力における燃料消費率 [g-fuel/kWh]
CF_{AE}	補機関の CO ₂ 排出係数 [-]
f_i	船型補正係数
W_T	海上試運転状態の排水量 [ton]
V_T	P_{ME} , W_T における速力 [knot]
X	代替手法の計算値

$$X = \frac{CF_{ME} \cdot P_{ME} \cdot SFC_{ME} + CF_{AE} \cdot P_{AE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot W_T \cdot V_T} \quad (10)$$

(11)

$$\text{改善率}[\%] = \frac{(\text{基準値} - X)}{\text{基準値}} \times 100$$

研究開発プロジェクトの省エネ率と、内航船省エネルギー格付制度の代替手法の改善率（省エネ率）との計算式の主な違いは、重量の単位が載貨重量か排水量であるかの違いと、省エネ率を計算する基準値である。内航船省エネルギー格付制度の代替制度による基準値（ケミカルタンカー）は表2で計算できる。

表2 内航船省エネルギー格付制度の代替制度による基準値

船種	X の基準値 (X_T)	基準式の適用範囲
ケミカルタンカー	$520.1 \times W_T^{-0.3931}$	$W_T: 600 \sim 2,000[t]$

試運転結果から光令丸の内航船省エネルギー格付制度の代替手法の改善率を算定すると、次式の通り 26.09%となる。

$$X = \frac{3.206 \times 551 \times 195.2 + 3.206 \times 97 \times 215}{1.0 \times 1863.7 \times 11.09} = 19.92 \quad (12)$$

$$\text{改善率}[\%] = \frac{26.95 - 19.92}{26.95} \times 100 = 26.09\% \quad (13)$$

内航船省エネルギー格付制度では、改善率 20%以上の船に 5 つ星が付与されることとなっており、光令丸の改善率 26.09%は最高ランクの 5 つ星に相当し、国土交通省の内航船省エネルギー格付制度にこれを申請し、2020 年 5 月 28 日に最高ランクの 5 つ星（代替手法）を付与された。

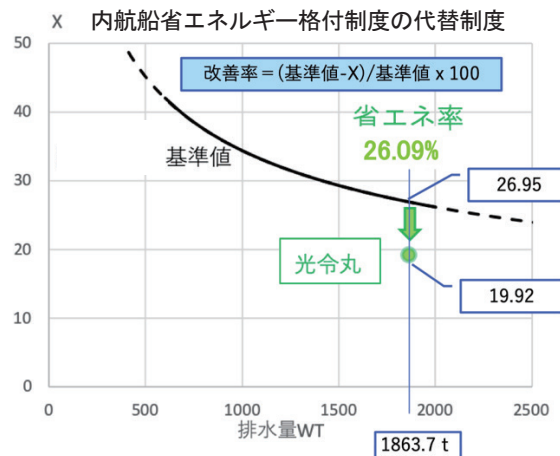


図 11 内航船省エネルギー格付制度（代替手法）の改善率（省エネ率）

このように本船「光令丸」は研究開発プロジェクトの省エネ率で 19.1%，内航船省エネルギー格付制度の代替手法による改善率で 26.09%と開発船型の高い省エネ効果が確認された。

さらに、その後引き渡された光令丸は、従来船に比べ振動騒音は少なく、操船性能は舵の座りが良く、波乗りがよい、ローリングが少ない、ピッチングも思ったほど大きくはない等、非常に安定性の良い船との高い評価を船長からいただいております。省エネ性能、振動、騒音、操船性能についても高い性能を船型であることが確認されている。

4. まとめ

本研究では「内航海運のための省エネルギー船型群の研究開発」で開発された従来船の性能を大幅に改善する省エネ船型の建造実証を行なった。第1番船の実船建造は、工作、機器配置等に様々な創意工夫が必要となり相応の産みの苦しみが伴ったが、従来とは異なる工程やそれに伴い必要となる創意工夫は作業者の良い刺激となり、モチベーションの向上につながった。

試運転では計画通り1990年代の標準燃費である比較対象船に対して16%を上回る19.1%の省エネ率が得られた。また、省エネ性能の評価基準の異なる内航船省エネルギー格付制度においても26.09%の改善率（代替手法）が確認され、同制度において最高ランク5つ星が付与された。さらに、本船は引き渡し後船長からも従来船と比べて振動騒音および操船性能について高い評価が得られており、この省エネ船型の実用性が確認されている。

この省エネ船型第1番船の建造は、船会社のご協力のもと、船会社と造船所が応分のリスクを分担し合い実現したパイロットケースである。今後もこの省エネ船型の普及ならびに、今後の社会情勢に対応した環境性能の高い競争力のある船の建造に取り組むを続けていくことで、地球環境の保全につなげたい。

謝 辞

光令丸の建造にあたり青野海運株式会社様には多大なるご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。また、光令丸の建造には平成30年度「トラック・船舶等の運輸部門における省エネルギー対策事業費補助金（内航船の総合的な運航効率化措置実証事業）」による補助をいただいております。建造にあたり、お世話になりました関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本船舶海洋工学会 P-51 研究委員会：内航海運のための省エネ母船型の研究開発委員会報告書, 2017.