

省エネルギー型ロジスティクス等推進事業
「革新的省エネルギー型海上輸送システム実証事業
(標準的省エネルギー船舶開発調査)」

2014年度

3DCADフレックスデザインによる
省エネルギー型フレックス標準船の開発
報告書(概要版)

フレックス標準船研究会

目 次

1. はじめに	p. 2
2. 研究の目的	p. 2
3. 研究会の活動状況	p. 4
4. フレックス標準船の基本計画	p. 7
5. 船型設計と水槽試験	p. 16
6. 3D CAD設計	p. 31
7. 総合評価	p. 42
8. 結言	p. 45

1. はじめに

内航海運および内航船舶の省エネルギー対策は、以前よりSES(スーパーエコシップ)や先進CO₂低減化船の研究開発を国や(独)鉄道運輸施設整備支援機構(以下JRTTと略す)の主導のもとに行い成果を上げてきたが、これらの省エネ船舶が内航海運の主流になるまでには至っていない。主たる要因は省エネ船舶の建造コストや内航海運の置かれている経済環境にあり、省エネ船舶をさらに普及させていくためには、より一層の省エネ効果に加えて経済性の対応が必要である。

本研究会では以前より、「3DCAD 連携・共同利用研究会」を組織し、中小型、内航造船所の 3DCAD の連携・共同利用による省エネ等の設計技術の高度化と生産性の向上を目的とした実証研究を行って来た。その大きな成果は 3DCAD の中小型、内航造船の連携・共同利用の普及促進と、3DCAD の最新機能を活用したフレックスデザインにより、特定の主要目、船型に限定された画一的標準船ではない、フレキシブルな設計ができる新標準船が可能であることであった。これをフレックス標準船と名付け、活用をはかることにより、設計技術の高度化と生産性向上の可能性があることを示したことであった。

このフレックス標準船の技術を発展させることにより、本事業の目的である「比較対象船舶から 16%以上の省エネルギー効果を有する省エネルギー内航船舶」を、船主の様々な要望に応えつつ、造船所での生産性向上によるコストダウン建造が可能となり、これらの船舶の普及促進が可能となると考えた。さらに 499 型貨物船は近年中に船齢 18~20 の高船齢船の代替需要が見込まれており、この代替建造需要期に合わせてフレックス標準船が大いに役立と期待している。

2. 研究の目的

2.1. 研究の背景と目的

内航海運の輸送力(輸送量×輸送距離)は国内総輸送の 40%を占め、特に石炭、セメント、石油製品等の産業基礎物資の 90%は内航海運によるものである。しかし国内産業構造の縮小傾向により内航海運の輸送力は年々減少傾向にある。一方で燃料費の高騰、船員の高齢化、高船齢化(14 年以上の中古船が全体の 74%)、さらに環境対策の義務化等内航海運をとりまく環境は厳しいものがある。より一層の合理化の推進が必要であるが、複雑な事業者構成(元請けオペレーターをトップにピラミッド構造)がそれを困難にしている。

省エネ船舶を普及させていくためには、内航造船所だけでなく、船主にも、オペレーターにも、荷主にもメリットのある新造船対策が必要である。即ち省エネ船の普及拡大のためには、従来からの省エネ対策に加えて、船価が安くかつ多様な運航上の船主要望に応えられる経済性への対応が必要である。

このためには本研究会が提唱し、実証研究を行ってきた画一的船型ではない新しい省エネ型フレックス標準船が有効である。本研究会の会員は 2012 年度より(一財)日本船舶技術研究協会をプラットフォームとする「3DCAD 連携・共同利用研究会」を造船所等と組織し、

内航造船所の 3DCAD の連携・共同利用による設計技術の高度化と生産性の向上を目指して、3DCAD の最新機能を活用したフレックスデザインによるフレキシブルな新しい標準船の研究開発の実証研究および普及活動を続けてきた。

一方、2013 年に運航されている船舶の船種、船型別統計では、総トン数 400～499 トンの貨物船の隻数が最も多く約 790 隻である。それも大多数が 499GT 型に集中しており、内航海運で最も広く使用されている船型である。本事業では波及効果の最も大きい 499GT の標準船の開発を資源エネルギー庁のエネルギー型ロジスティック等推進事業「革新的省エネルギー型海上輸送システム実証事業（標準的省エネルギー船舶開発調査）」として行うことにしたものである。

499GT 型省エネ貨物船の開発は、JRTT の先進 CO₂ 低減化船認定第 1 号として「山鋼丸」が 2011 年に国の支援により山中造船(株)において開発、建造された。本船は 1990 年代の基準船より 16% 削減の省エネ性能 (CO₂ 排出量低減に同義) を達成し、その後、同型船が数隻建造された。山鋼丸の基本設計図書は JRTT を通じて無償で他造船所に提供される仕組みも作られたが、それ以上の普及は進んでいない。図 1. は 499 型貨物船の Lpp と B の分布をしたもので、山鋼丸は赤丸で示している。同じ 499 型貨物船でも、積み荷の種類、運航形態、船主、オペレーターの意向等により大きくバラついており船型の標準化が進んでいない。山中造船でも山鋼丸同型船の営業活動を積極的に続けているが、全て同型船とはならず、「0.5m 幅を広げたい」「DW をあと 100t 増やしたい」といった様々な船主要求に従い、種々の主要目の 499 型貨物船を都度設計、建造しているのが現状である。船主も造船所も同型船建造が生産性向上、建造コストダウンに有利なことは良く理解していても、さらに「山鋼丸」の設計図書が無償提供されても、運航上の様々な制約により新造船を 1 つの船型、1 つの主要目、1 つの仕様に絞りきれないのが要因である。結果的に省エネ対策が不十分な船舶が建造され続けることになる。

このような状況を解決する効果的な方策として、本補助事業では 3DCAD によるフレックスデザイン機能を活用して、省エネルギーでかつ建造コストを押さえた経済性の高い 499 型一般貨物船でありながら、主要目を 1 つに固定しない新しいコンセプトの標準船「省エネ型フレックス標準船」を開発することを目的とした。

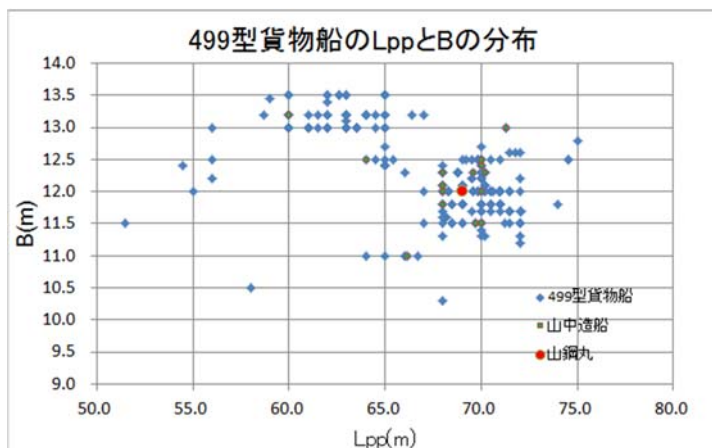


図 1.499 型貨物船の Lpp と B の分布 (出典：日本船舶明細書より作成)

3. 研究会の活動状況

3.1. 研究会関係者名簿

研究会は下記のメンバーにて実施した。

加戸 正治	有識者	(研究会主査、基本計画)
松尾 晃	(株)エス・イー・エー創研	会長 (研究会代表)
山口 荘一	(株)エス・イー・エー創研	代表取締役 (3DCAD 設計)
前田 幸喜	(株)エス・イー・エー創研	代表取締役社長
武田 俊文	山中造船(株)	執行役員 設計部長
黒河 保	山中造船(株)	設計部船殻設計課長
真木 宏	山中造船(株)	設計部基本設計課係長
岡村 明	下ノ江造船(株)	常務取締役 設計統括部長
師籐 孝道	下ノ江造船(株)	設計部長
志賀 貴志	下ノ江造船(株)	設計部船殻設計課
牧 和弥	下ノ江造船(株)	設計部機装設計課
田頭 慎一	前畑造船(株)	代表取締役社長
玉島 正裕	流体テクノ有限会社	代表取締役 (船型設計と水槽試験)
杵尾 憲治	流体テクノ有限会社	船舶設計・省エネ装置担当

また本研究の実施にあたり外部有識者による評価委員会を設置し、下記の方の評価およびご指導をいただいた。

平山 次清	横浜国立大学	名誉教授
吉田 稔	(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構	審議役
志賀 辰也	NS ユナイテッド内航海運(株)	取締役船舶部長
福岡 哲二	(一財)日本船舶技術研究協会	参与

3.2. 事業計画

本開発の期間は補助金交付の2014年10月より2015年3月末までの6ヶ月間とした。実際にはそれ以前より準備段階として種々の検討を続けてきたが、それらの成果も踏まえて本研究に取り込み実施した。本開発を6ヶ月の超短期間で完了させるため、図2の開発工程表に示すように、下記の3本立てで、相互に連携をとりながら同時並行的に遂行した。

I:基本計画(含むマーケット調査)

II:3DCAD設計(含むペアレント基本設計とチャイルド生成検討)

III:船型開発(含む水槽試験)

特に水槽試験は月1隻のピッチで、船型検討、線図作成、模型船製作、水槽試験、解析、性能評価の一連の作業を、前船の結果を見る前に次船の水槽試験を実施せざるを得なかったが、水槽試験する船型の順序を工夫する等で当初の予定通り完了させることができた。



図 2.開発の実施工程

3. 3. 研究の概要

現在運航されている 499 型貨物船 550 隻の内の約 40%は鋼材等の鉄鋼等金属材料の輸送であり、残り 60%は産業原材料、製造工業品、機械部品、農林水産物、雑貨等の様々な一般貨物の運送である。一般貨物の主要な船主、オペレーターは鋼材輸送に比べると小規模かつ多数である。これらのうちから主要な船主、オペレーターを訪問し、運航状況、貨物の積付状況等についてヒヤリングを行った。特に省エネ経済船型の開発のベースとなる貨物の実際の運航状況についてヒヤリング調査を行い、フレックス標準船の船型範囲、仕様範囲の設定の根拠とした。

山鋼丸は、鋼材運搬の為に 40m×9.5mのボックス型カーゴホールドとしている。この為水面下にエラ船型と呼ばれる特殊な張り出し形状を有している。このエラ船型は鋼材運搬船にとっては有効な省エネ装置でもあるが、鋼材を運ばない一般貨物船にとっては必ずしも必要としない。また船体の浮心位置は省エネ性能に大きな影響を与える性能要素の一つであり、浮心位置の最適化による性能向上をはかるべきであるが、一方でカーゴホールドの形状、船体重心位置、トリム、機関室配置等の種々の設計要素とも深く関連し、さらには積荷の種類、積載量、積載方法、運航方法等により変化するので、性能要素と設計要素をリンクさせた最適化は、設計時間の制約もあり困難であり、最適化されないまま船型が決められている場合も多かった。3DCAD フレックスデザインにより短時間に最適化設計が可能となるので、性能要素と設計要素を定量的にリンクさせた最適化が容易にできるようになった。

山鋼丸のエラ部分を削除した船型を 3DCAD フレックスデザインによるフレックス標準船のエクセレントペアレント(16%以上の省エネ性能を有する母船型)と、このペアレントから性能と設計の両面から主要目の変更、船型の変型、仕様の交換できる範囲を下記に示すように幅

広く検討した。この範囲で本事業の目的である「比較対象船舶から 16%以上の省エネ効果」を満足する範囲で船主、オペレーターの運航条件から要求される設計要目に、多くの設計工数をかけることなく、フレキシブルに対応できる範囲を確定し、この範囲の船型をエクセレントチャイルド(16%以上の省エネ性能を有する子船型)として設定した。

この設計システムのマニュアル化とエクセレントペアレントのデータベース化を行い、エクセレントペアレントとこれから派生するエクセレントチャイルドを、従来の船型仕様が1つに限定された山鋼丸に代わる新たな省エネ型フレックス標準船とした。

想定するチャイルドは総トン数を 499 トンに固定して、下記およびその組合せた船型とする。

- D1. エラ船型の有無(鋼材運搬か、一般貨物運搬かによるホールド形状最適化)
- D2. DW、CAP変更(Cb 変更)
- D3. DW、CAP変更(L/B変更)
- D4. Lcb 移動による性能向上(トリム考慮)
- D5. マリナー船尾による性能向上(プロペラ低回転大直径化)
- D6. カーゴホールド構造、仕様変更
- D7. 機関室仕様、配置の変更(主機変更含む)
- D8. 居住区仕様変更
- D9. その他主要装備品変更

山鋼丸は開発時に既に曳航試験水槽において水槽試験を繰り返し行い、開発した船型で、比較対象船舶(90年代の類似船の燃料消費量 0.0143 l/t-mile)から 16%以上の省エネ性能が認定されており、さらに山鋼丸およびその同型船も数隻建造され、海上公試成績書や実海域での運航記録からも裏付けられている。この山鋼丸の船型をベースとし、一部船型を修正した船型をエクセレントペアレントとし、山鋼丸のデータと、今回新たに行う水槽試験、CFDや性能計算プログラムによる性能計算との対比等により性能の再解析を行うこととした。

この性能予測計算と同時に 3DCAD フレックスデザインにより配置、構造、重量、容積、トリム、復原性等の成立性を確認することにより、Lpp、B、d、Cb、Lcb、船尾形状等を、499GTを確保して変更した場合の性能変化を予測し、変更可能な範囲を確定した。

この性能と設計の両面から 16%以上の省エネ性能を確保し、かつ設計変更の可能範囲を確定し、画一的船型でなく、エクセレントペアレントを核にして一定の変更可能領域を持ったフレックス船型を省エネ標準船とした。この変更可能範囲の確認のため水槽試験を実施した。

ペアレントからの主要目変更に伴う線図変更には船型計算ソフト「NAPA」のトランスフォーミング機能、設計の変更には 3DCAD「NUPAS-CADMATIC」のフレックスデザイン機能、また性能評価には性能評価プログラム「HOPE」を改良したプログラムを使用することとした。

4. . フレックス標準船の基本計画

4. 1. 研究計画

フレックス標準船の「フレックス」の意味は船主要求に応じてフレキシブルに変更出来るという意味であり、「標準船」の意図するところは一定の船型、仕様に決め込むことであり、矛盾するコンセプトが合体したものである。499型貨物船において一定の範囲であれば、船型、線図がどのように変更になっても十分にその性能を、その都度水槽試験を行わなくても性能計算プログラムによって推定することができることを示した。また3DCADのフレックスデザイン機能を用いて、船型、線図がどのように変更になっても、短時間に基本設計から生産設計まで完了できることを示した。

これにより船主要求に応じて様々な船型、線図、仕様でも設計出来るようになったが、船主要求に応じるだけでなく、むしろ造船所は高性能船、高経済船を提案していく責務があり、フレックス標準船は船主要求を満たし、かつ生産性の上がる高性能船を、具体的かつ定量的に造船所から船主に対し技術提案を行うために活用すべきものである。

499型貨物船の船型、線図、仕様の分布の実績を調査し、それをカバーし、かつ体系的に変化させた設計を行い、その影響を確認することとした。DW、GT、L、B、D、d、Cb、Lcb、船首形状、船尾形状、ホールド形状と容量、推進装置、等々考慮すべきパラメーターは多く、それらの組み合わせを考えると、設計船の数は無限大となる。今回は条件をつけて150隻に絞り込んで実施した。このようなシリーズ設計は従来からも標準船開発には良く行なわれてきたことであるが、今回のシリーズ設計は基本計画と平行して行われた船型開発と3DCAD設計とをリンクさせて、150隻のシリーズ設計を基本設計レベルの精度で行うことを目指した。

性能、コストがベストな499型貨物船の船型は1つではなく、種々の制約条件、経済、社会環境条件等により変化していくものであり、その時々最適な船型を見つけ出して行くのがフレックス標準船である。

4. 2. マーケット調査

現在登録されている499型貨物船550隻の内、約40%は鋼材等の鉄鋼等金属材料の輸送であり、残り60%は産業原材料、製造工業品、機械部品、農林水産物、雑貨等の様々な一般貨物の運送である。鉄鋼関係の輸送は製鉄メーカー系列の元請オペレーター、2次・3次オペによるピラミッド型階層構造で構成化されているが、一般貨物の主要な船主、オペレーターは、鋼材輸送に比べると小規模かつ多数である。

内航海運のオペレーター上位50社の中から一般貨物、特にバラ積み貨物を多く取り扱っている代表的な4社を訪問し、運航状況、貨物の積付状況等についてのヒヤリングを行い、特に省エネ型フレックス標準船の開発の条件設定の根拠となる貨物の実際の積載量、種類、性状、積付状態、実際の運航速力、荷役方法等についての現状の把握を行った。

内航海運のうちフェリーや旅客船を除く内航船として登録されている貨物船、タンカー等が2013年現在で、20GT以下の小型船舶1,400隻を含み約5,200隻ある。またこれらの内航船による年間輸送量は2011年に3億6,000万tで、平均輸送距離は490kmである。これらの船が1年間に運ぶ貨物量と輸送距離を掛け合わせた輸送力(輸送活動量=輸送

量×距離 ton-km)は約 1,750 億t-kmで、国内の総物量の約 40.7%を占めている。トラック輸送が第 1 位で全体 55%を占めているが、これに次ぐ輸送力を担っている。特に石炭、セメント、石油製品等の産業基礎物資の輸送はその 90%が内航海運によるものである。

しかしながら、内航海運の輸送活動量の推移をみると年々減少の傾向にあり、また総輸総力の中で海運が占める割合も年々低下している。運航隻数も 1999 年に 8,000 隻、2002 年に 7,000 隻、2014 年には 5,200 隻を割り込んでいる。内航海運をとりまく環境は厳しいものがある。

- ・国内産業構造の縮小傾向(国内工場の海外移転)による輸送量減少

- ・合理化をはばむ複雑な事業者の構成

(元請オペ:185 社、2 次 3 次オペ:1,368 社、貸渡事業者:1,775 社)

- ・運航経済性の悪化(燃料費の高騰、運賃、トラックとの競合)

- ・高船齢化(14 歳以上 74%)に伴う代替建造促進(効率、安全性確保、海外売船)

- ・船員の高齢化(職員 15,500 人のうち 60 才以上 3,400 人)、後継者の確保・育成

- ・環境対策の促進義務化(国際規制の動向対応) 等

また船齢 6 歳以下の新造船は 15%以下であり、船齢 14 才以上の老朽船が 70%以上にもなり、内航船の高船齢化がますます進んでいる。船員もまた高齢化が進み、後継者の確保、育成が問題になってきている。一方で、国際的な環境対策の一環で環境にやさしい、より高度な船舶が要求されるようになってきている。

マーケット調査の訪問先で、造船所、船主、オペのそれぞれの立場により壁のあることも改めて感じたが、示唆に富む様々な意見を聴取することができた。

省エネ船、標準船に対する一定の理解はあるが、荷主、オペ、船主の複雑な利害関係や、造船所から具体的な技術提案の不足もあり、省エネ対策はまだ十分ではない。造船所は今後より一層の技術説明、船主への省エネ船、標準船についての働きかけが必要である。

フレックス標準船は服のイージーオーダーのたとえでコンセプトの理解が得られたと思うが、省エネ船の必要性、標準船の有効性は十分理解していても、それでも自分好みの船を作りたいと考えている船主もおり、実現に向けてはさらに粘り強い、かつ技術的かつ具体的な提案が必要である。

実際の運航速力は主機の最大出力の 60%負荷程度の 10~11knots であるのに対し、船型やプロペラ等の性能設計は主機の最大出力を基準に、12~13knots 速力で設計されている。この他にも業界の長年の慣習や基準を改めることにより、性能向上が図れる項目が多くあると思われた。以下にそれらの主な意見を要約して記載した。

① 最近の内航貨物船のマーケット、特に499型貨物船について

鋼材専用船、鋼材/バラ積兼用船、バラ積み船の 3 種類に分化の傾向があり、また最近の船員、ステベの人手不足が著しいことに絡めて、199/299 型から 499 型、499 型から 749 型への大型化の傾向の指摘があった。

② 499 型貨物船の主要な貨物とその運送状況の変化について

バラ積船の主要貨物は石炭、コークス、石灰石、砂利、化学肥料等である。発電事情の関連で石炭、石灰の輸送が増えているが、一般には内航の需要増加は見込めない状況。

③ オペとしての新造船に対する主要な要求仕様

通常、船主の好みまで規定すると用船料がUPするので、標準仕様、省エネ仕様の要求はしていないが、性能、コスト上本当に良いものならば、提案して欲しいとの意見もあった。

④ 499型貨物船に対するDWの要求値

通常カーゴDWで1,500t~1,600t、従って水油を含むDWは1,700tであり、これ以上は必要ないし、見掛けDWでチャーター料が上がることはない。DWと省エネ効果については具体的な提案があれば前向きに検討するので、具体的な定量的な技術説明が欲しいとの意見であった。

⑤ 499型貨物船に対する船速の要求値は？

仕様書上は12.5kt程度が多いが、実際の運航速度は10.5~11knots程度。特に省エネ目的の減速運航を指示しているわけではないが、運航航路からこの程度の船速になっているのが多い。目的地に早く着いて待機するより、減速運航して目的地にJust In Timeのほうが省エネであること解っているが、船長判断まかせで強い指示は出していない。

⑥ 燃料費

燃料代はオペ、荷主持ちなので省エネに対する船主の関心度が低いという意見に対し、省エネ効果の利益配分はあいまいな部分があるかもしれないとの率直な意見もあった。

⑦ 幅9.5mの完全ボックスホールドの必要性

多くのオペはバラ積み船でもクリーニングやブルによる荷役ハンドリングのしやすさを考慮して、完全ボックスホールドを標準としている。前端部の一部の隅が傾斜していてもクリーニングに影響がなく、燃費性能との得失判断で有効という十分な説明があれば、検討する。

⑧ GTの制約について

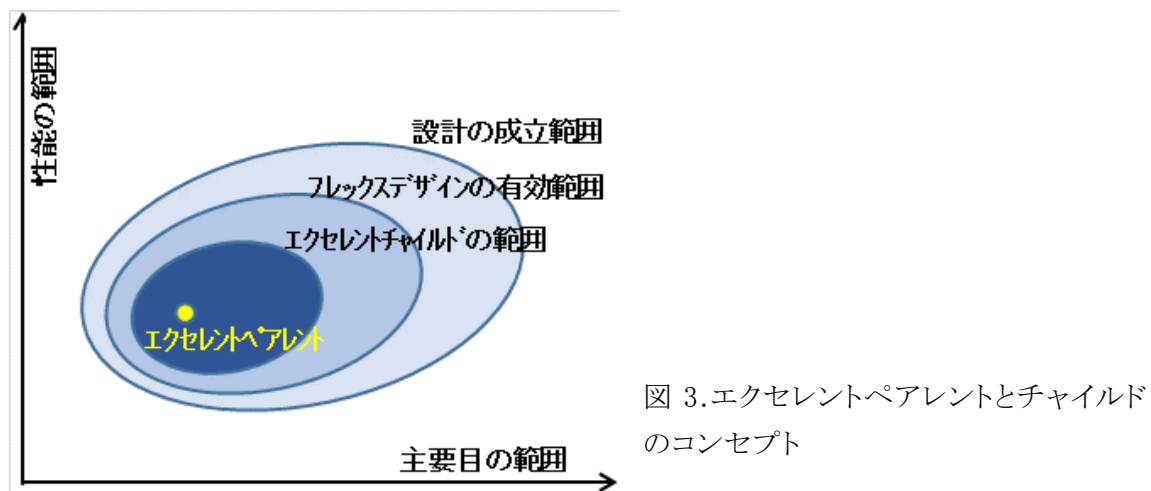
性能面はともかく、船員対策として居住性を良くすることは重要であるが、GT制限が足かせになっていると聞いている。運航上もGTの制約がある港湾も多く、GT制限の緩和を要望しているとの意見があった。

⑨ フレックス標準船のコンセプトに対する意見

フレックス標準船のコンセプトは好評であり、船齢の高い船が多いのが問題であり、これを減らす努力をすべきである。フレックス標準船がこれに役立てば良いとの意見があった。画一的な標準船ではダメである積極的な理由はないが、個性的な船主が多く、オペとしては船主の裁量にまかせてあり、特には言わない。標準船によりの船価が-5%できれば、船主にとって魅力と思うが、内航船主には自分好みの仕様にしたがる傾向にあり、高くても好みの仕様でやってくれる造船所を選ぶのではないかと。

4.3. ペアレント船の計画

図 3.がペアレントとチャイルドの概念である。設計的にはペアレントからチャイルドを生成する成立範囲は広いが、フレックスデザインの有効範囲、省エネ性能を確保できる有効範囲の両面から、主要目、船型、仕様の変更できる範囲を幅広く検討し、16%以上の省エネ性能を満足し、かつ船主、オペレーター、荷主の運航条件からの要求に対し、多くの設計工数をかけず、短期間に、フレキシブルに対応できる範囲と生成方法を開発した。この範囲の船型をエクセレントペアレントから生成したエクセレントチャイルドとした。エラ船型の山鋼丸同型もこの中の1船型として含まれる。



JRTTおよび山中造船の協力を得て、山鋼丸をペアレントの基本計画の参照船とした。山鋼丸は鋼材運搬の為に、40m×9.5mの完全ボックス型ホールドとし、このため水面下に「エラ」と呼ばれる特殊な張り出し形状を有することを特徴する。このエラ船型は水槽試験でも確認された優秀な船型であるが、一般貨物船にとっては必ずしも必要条件ではないと考え、本開発では一般性を持たせるため、山鋼丸船型の主要目を踏襲し、エラを削除した船型をフレックス標準船のエクセレントペアレント(基準船から16%以上の省エネ性能を有する母船型)とした。

山鋼丸は2011年に建造された船であり、その後鋼材の基準の変更等により15tの重量増加となった。また鋼材船から一般貨物船仕様とすることで2重底の板厚増加、第2甲板～上甲板間のホールド側壁の延長等の船殻構造変更、艀装仕様変更で30tの重量増加が見込まれた。499型貨物船は通常2層甲板船の船型が採用されており、GT計算が他船型と比べて複雑であり、わずかの排水量の増加でも、GTが増加し、GT調整のためにDを減少させると、第2甲板の高さ、喫水、DWに影響が連鎖する。これらを考慮してペアレントを計画した。さらに最新の規則、基準、業界の動向にも配慮し、ペアレントの基本計画を行った。最終決定したペアレントの主要目は下記の通りである。

- ・船種船型:一般貨物船(バラ積み貨物)、2層甲板船
- ・主要寸法:Loa=75.2m、Lpp=69.0m、B=12.0m、D=7.12m、d=4.172m
- ・載貨重量:1,700t
- ・総トン数:499
- ・主機:阪神6LA30G、MCR 1,323kw×290rpm、NOR 1,124kw×274rpm
- ・航海速度:12.7knots

4. 4. ペアレント船からチャイルド船の生成の検証

チャイルドの生成可能を確認するため、GT を 499 トンで、Lpp、B、d、Cb、Lcb、船首尾部形状、等を一定範囲で系統的に変化させて、基本計画の比較検討を行った。

ペアレントを中心にして、GTを 499 トンに保ったまま、Lpp を 68m、69m、70m、71m、72m に、L/B を 5.6、5.75、5.9、6.05 に、Cb を 0.722、0.737、0.752 に、Lcb を -1.36%、-1.0%、-0.5% に変化させ、さらに船尾形状を逆 G 型からマリナー型に変更した場合の組み合わせ合計 150 ケースの検討を行った。

図 4.および図 5.の左図は実際の 499GT 型貨物船のL、B、DW の分布を示し、右図は今回比較検討の設計を行った 150 隻の分布を示す。この中には性能の低下するもの、DW が減少するもの等も含まれ、これらをふるいにかけて、チャイルドの範囲を絞り込んで行った。また代表例をチャイルド A~D として表 1.比較要目表に示した。水槽試験結果、3DCAD 設計により計算した船殻重量の結果をここにフィードバックした。

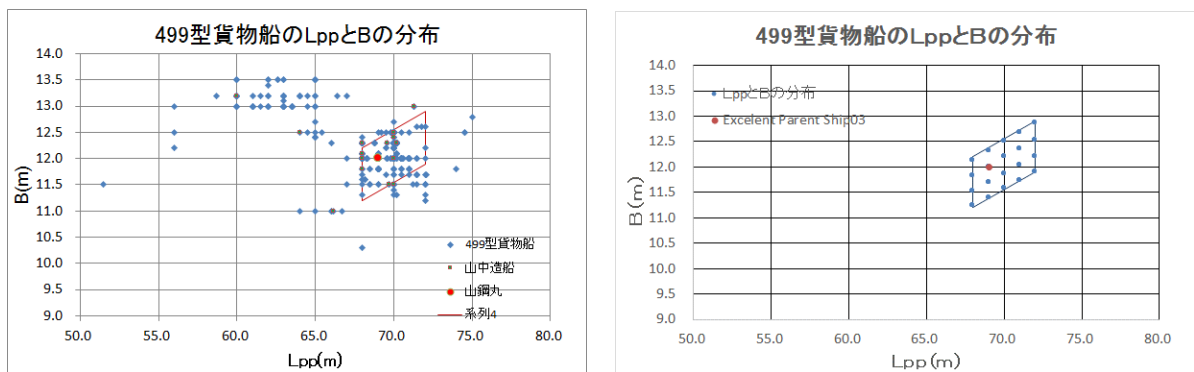


図 4.499GT 型貨物船のLとB の分布(左図:実績、右図:今回の調査範囲)

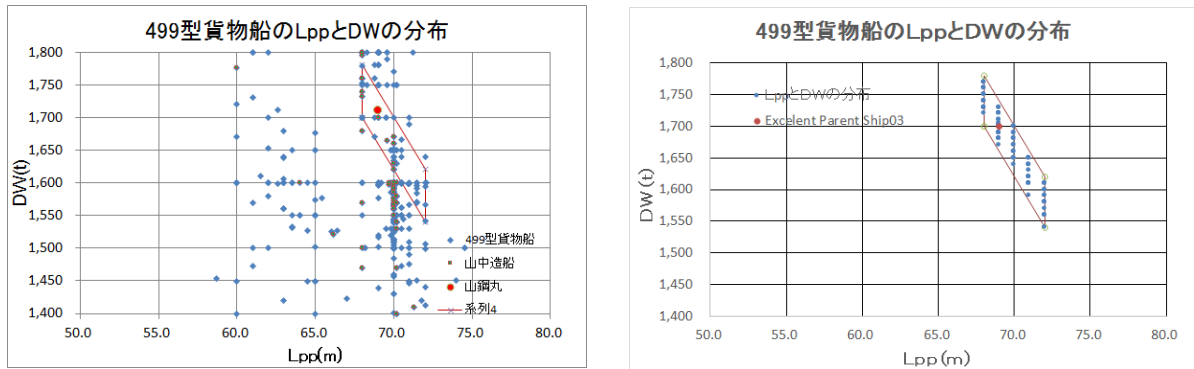


図 5.499GT 型貨物船のLとDW の分布(左図:実績、右図:今回の調査範囲)

図 6.の横軸は DW、図 7.の横軸は喫水 d であり、縦軸はいずれも省エネ率 (%) である。● は 150 隻の計画船をプロットしたものであり、Cb と Lcb でのシリーズで色分けしてある。一見バラついているように見えるが、最大の省エネ効率が得られる●を繋ぐと、省エネ率最大線が得られる。たとえば Cb0.737、Lcb-1.36% の場合は赤線である。DW を 1,700t では 19% 程度が最大であり、ペアレントの 17% はもう少し改善の余地があると言える。ただし図 7.から解るように、そのためには喫水を 4.17m から 4.25m 程度まで大きくなった。

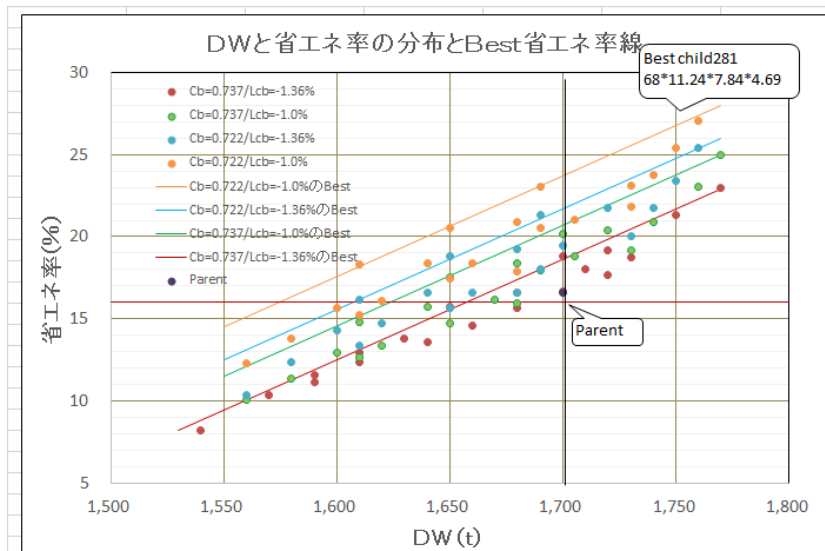


図 6. 499 型貨物船の評価表
(省エネ率と DW)

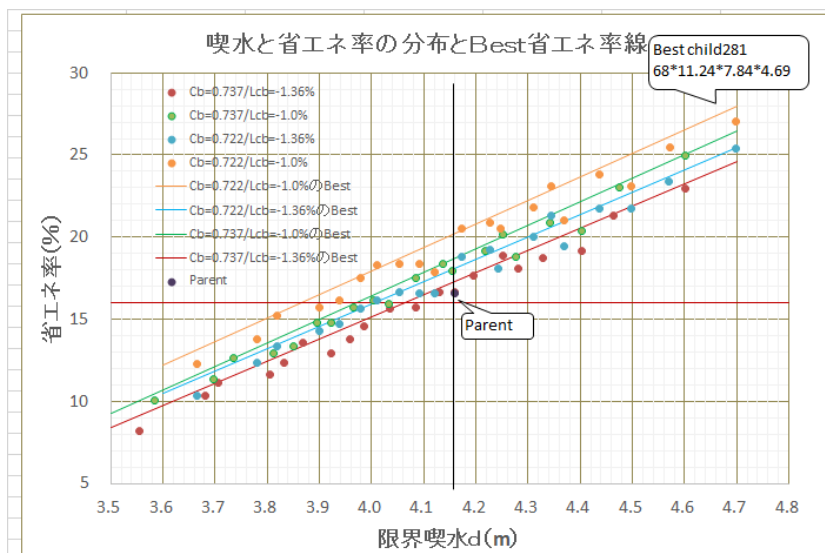


図 7. 499 型貨物船の評価表
(省エネ率と喫水)

同様に図 8.は省エネ率と L/B を、図 9.は省エネ率と深さ D をプロットしたものである。いずれの場合も GT を 499 に固定した場合である。150 隻の分布の中から省エネ率が最大となる推定線を記入した。

省エネ率 17%のペアレントと比較すると、これより省エネ率の良い船型多くあるように見えるが、DW や喫水等に制約条件をつけていくと、●が絞られていく。DW を 1,700t以上、喫水を 4.3m以下に制約すると、選定出来る船型の範囲がかなり狭くなり、さらに条件をペアレント近傍まで絞り込むと、残るのはペアレントだけということになる。

図 6.と図 7.の傾向は DW 増加に伴い、省エネ率も増加しているが、これは GT を 499 に固定し、かつ 2 層甲板船特有の GT 計算により、DW の増加は喫水の増加となり、性能向上の結果となっているものである。図 9.の D の傾向は図 7.の d の傾向と同じであり、2 層甲板船の d は第 2 甲板で決まり、最小 GT を与える D は第 2 甲板にリンクしているためである。

図 8.を見比べると L, B は小さく、L/B が大きい船型の省エネ効果が大きいが、GT を 499 に押さえて DW を出来るだけ大きい船型を選ぶと、結局は d を出来るだけ大きくするのが良いという船型計画上の常識的な結論が出てくる。今回はこれを定量的に裏付けたものである。

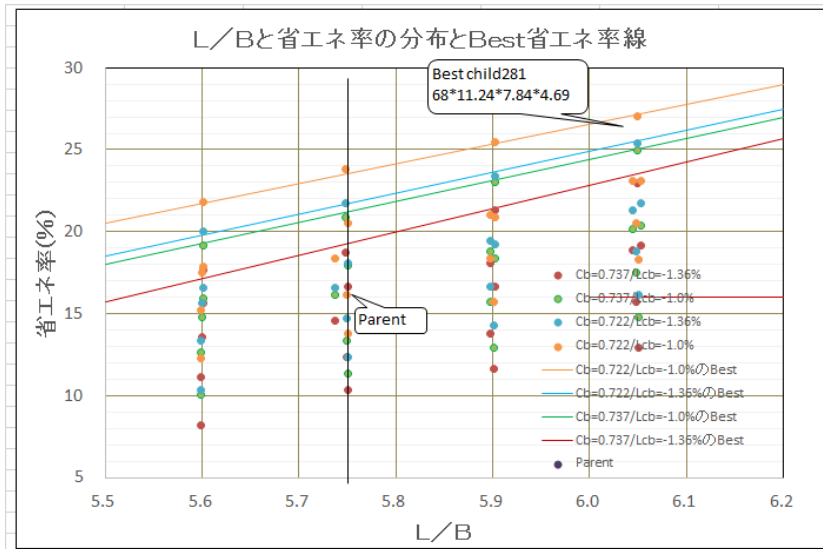


図 8. 499 型貨物船の評価表
(省エネ率とLpp/B)

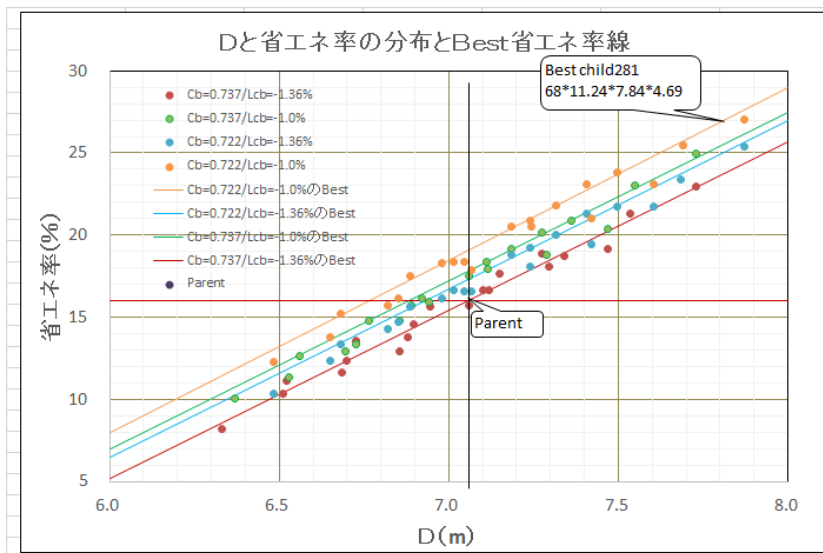


図 9. 499 型貨物船の評価表
(省エネ率とD)

省エネ船には船型だけでなく、主機も重要な要素であり、本船には最新の 1,300kw クラスの低速 4 ストローク機関を標準仕様とした。主機メーカーは限定しないが、山鋼丸では阪神内燃機(株)を採用したことから、最新の 6LA30G をベースに検討を行った。2 ストローク機関では主機のディレーティングゾーンを設定し、燃費率と回転数の最適化をしているが、4 ストローク機関では従来あまり行われなかった。今回、メーカーの協力を得て、ディレーティングゾーンを設定し主機出力の設定を行った。

チャイルド A については回転数を大幅に下げたことにより、既存の主機の rpm 範囲内ではカバーできず、減速比 5:4 の減速機付きとしたが、今後 4 ストローク主機でも 2 ストローク主機並のディレーティングゾーンに拡大すれば、更なる省エネ効果とコストダウンを期待できる。

表 1. ペアレントとチャイルドの代表例の比較要目表

		Parent		Child A		Child B		Child C		Child D		
		Parent		Child A		Child B		Child C		Child D		
		499GTtype BC (P丸)		499GTtype BC (501丸)		499GTtype BC (13丸)		499GTtype BC (12丸)		499GTtype BC (222丸)		
		G stern type	w/o ERA	Mariner Stern	w/o ERA	G stern type	w/o ERA	G stern type	w/o ERA	G stern type	w/o ERA	
LxBoD & Dispt.	Loa	m	75.240		75.240		75.240		75.240		76.240	
	Lpp (L/B)	m	69.000 (5.75)		69.000 (5.75)		69.000 (5.75)		69.000 (5.75)		70.000 (5.90)	
	B mid (B/d)	m	12.000 (2.89)		12.000 (2.89)		12.000 (2.89)		12.000 (2.89)		11.860 (2.87)	
	D mid (L/D)	m	7.120 (9.69)		7.120 (9.69)		7.120 (9.69)		7.120 (9.69)		7.110 (9.85)	
	d mid	m	4.159		4.159		4.159		4.159		4.137	
	Cb		0.737		0.737		0.737		0.737		0.737	
	lcb	%	-1.362		-1.362		-0.536		-1.000		-1.000	
	Dispt. (ext.)	t	2,613		2,613		2,613		2,613		2,606	
	D.W.	t	1,700		1,700		1,700		1,700		1,680	
	Light Weight Total		911		911		911		911		918	
Gross Tonnage		499		499		499		499		499		
Cap	Cargo (SF or SG)	m3	2,867		2,867		2,867		2,867		2,867	
	Ballast	m3	861		861		861		861		861	
Vs	Vs (Des. Full)	knots	12.7		12.7		12.7		12.7		12.7	
	Vs (Ballast)	knots	(15%) 13.0		(15%) 13.0		(15%) 13.0		(15%) 13.0		(15%) 13.0	
Main Engine	Eng.Type & Number		Hanshin 4cycle Diesel Eng		Hanshin 4cycle Diesel Eng		Hanshin 4cycle Diesel Eng		Hanshin 4cycle Diesel Eng		Hanshin 4cycle Diesel Eng	
	No. of Cylinder & Type		6LA30G		6LA30G		6LA30G		6LA30G		6LA30G	
	MCR (kW x rpm)		1,323	290.0	1,282	242.0	1,324	290.0	1,300	288.3	1,294	287.9
	NOR (kW x rpm)		1,125	274.7	1,090	229.2	1,125	274.7	1,105	273.1	1,100	272.7
	F.O.C. (M/E)rate	g/kwh	185		185		185		185		185	
	F.O.C. (M/E) (C oil)	t/day	5.2		5.0		5.2		5.1		5.1	
	Energy Saving Index (A)	l/t-mile	0.01192	16.6	0.01160	18.9	0.01186	17.1	0.01160	18.9	0.01167	18.4
Co2 Emissions(temp.)	g/t-mile	33.171		32.289		32.999		32.292		32.479		
Prop	Prop.No×Type		1 FPP		1 FPP		1 FPP		1 FPP		1 FPP	
	Prop.Dia	m	2.450		2.700		2.450		2.450		2.450	

注記：黄色く塗られた部分がペアレントと異なる部分

4. 5. 仕様の標準化

また船型性能だけでなく、下記のような船殻構造様式、配置、艀装仕様についても、標準仕様を設定し、さらに一定範囲で任意の組み合わせも可能とし、仕様書とリンクする要目選定表を作成した。

D1. 鋼材運搬か、一般貨物かによるホールド形状の選定

2重底の補強、第2甲板から上甲板間のホールド側壁の構造、完全ボックスホールド構造か端部斜板構造を選択できる。またはエラ構造の採否を選定できる。

D2. マリナー船尾による性能向上の選定

従来の逆G船尾に代えてマリナー船尾にすることにより、プロペラ径を2.45mから2.70mまで増加できる。これによりプロペラ回転数を290rpmから230rpm程度まで低回転化して推進効率を約7%向上できる。

D3. カargoホールド構造様式、仕様変更

ホールドの幅、長さを、2重底の高さを変更できる。また内張の有無を選定できる。

D4. 主機変更

主機は阪神内燃機の低速4サイクルディーゼル主機6LA30G(逆転機付き)を標準とするが、船主の要望に応じてこれ以外の同種の機種に変更可能である。また中速主機、さらに電気推進船SESに変更することも可能であり、この場合には機関室長さを短縮でき、カargoホールドの改良にも関連する。

D5. 機関室仕様、配置の変更

主機、補機を選定に伴い、機関室の配置をより合理的なものに変更が可能である。

冷却システム、機関制御室の設置の有無、機器のモジュール化の採否等選択できる。

D6. 居住区仕様変更

最近の IMO 規定に沿った居住区となっているが、さらなる居住環境の改善や女性職員配乗への考慮等が可能。変更は GT に関係し、船倉部と併せて調整可能である。

D7. その他主要装備品変更

外艀、管艀、内装、機装、電装の変更が可能である。ただし標準化の観点から変更の合理性、経済性、要望の頻度等を勘案し、標準化を進める。

4.6. 基本計画の評価

本研究開発の完了後のペアレントからチャイルドの生成は、図 10. の設計フローとなる。従来の基本計画、基本設計のフローと異なるのは左側のペアレントからの設計情報が付加されることによる。これにより高性能船の高精度の設計が短期間に完成でき、また生産性向上に不可欠な、初期段階における十分な事前検討が可能となる。

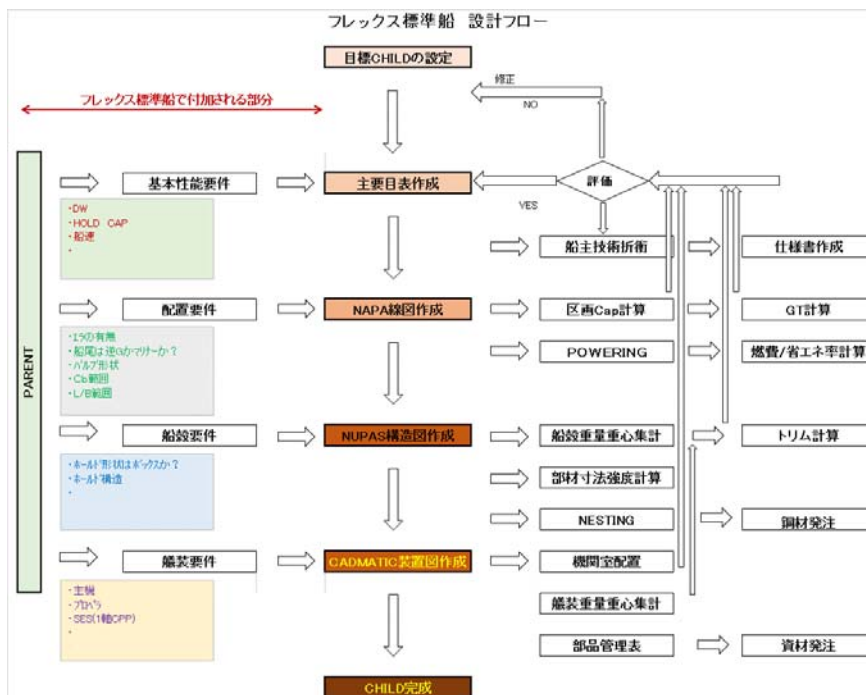


図 10. フレックス標準船の設計フロー

本方式では 499 型貨物船において、ペアレントからチャイルドの生成に生産図面まで含めて概ね 1 月で完了できると想定した。

従来、内航船建造では短納期であるため、資材発注を設計完了まで待つことができず、見込数量(予量)で発注しているが、確定数量で発注できるようになると期待している。

本開発完了後の 499 型フレックス標準船の建造および普及は研究会参加会社の山中造船、下ノ江造船、前畑造船の 3 造船所が中心になって行い、設計およびエンジニアリング業務、特に造船所からの要請に応じて、ペアレントからチャイルドの生成作業はエス・イー・エー創研と流体テクノが行うこととした。また本研究の成果は JRTT から共有船建造の造船所にも提供されることを予定している。

本研究は 499 型一般貨物船を対象として行ったが、このフレックス標準船のコンセプトは他船型、船種にも応用可能であり、建造隻数の多い 749 型の貨物船や 499/749 型ケミカル船等は最も有力候補である。今後も積極的にこの為のビジネス展開を行うことを目指していくこととした。

5. 線図生成と水槽試験

5.1. 船型計画

基本計画に従って、ペアレントとチャイルド A から D の線図を生成した。チャイルドは以下①～③の主旨に基づいてペアレントから線図を生成した。

- ① 船尾形状を逆 G 型からマリナー型へ変更し、抵抗・推進性能の向上を計る。
- ② Lcb、Cb の変更により性能の向上を計る。
- ③ L/B の変更により性能の向上を計る。

チャイルドの船型を生成する際、造波抵抗への影響が大きく、この船型と速力に対し既に最適化されている船首バルブは、できるだけペアレントの形状を維持することとした。フレーム形状は線図生成システム「NAPA」の船型変換機能を使用して、自動変換した形状を採用した。ただし個々に実用船型から離れると思われる箇所については従来の知見に基づきマニュアルにて線図を修正した。特に船首尾部での喫水上の線図に修正を行った。

さらに CFD を援用し、NAPA による船型変換線図から、特に船体抵抗値、流線及び圧力に注目して、船型を評価して改良を加え、水槽試験で性能確認を行う最終船型とした。

5.2. 水槽試験計画

船型設計に際しては、下記項目を満たすチャイルドをペアレントから短時間で、効率的に作成することを目標とした。

- ・総トン数 499GT、載貨重量約 1,700DWT を満たす貨物船で、実用に供することができる。
- ・船尾上甲板の幅は、ILO の規則に従った居住区を確保できる。
- ・係船機器の配置が可能となるよう船首上甲板幅を確保できる。
- ・船首第二甲板幅は船倉の船首端で通路が確保される最小幅とする。
- ・完全ボックス型ホールドの確保が Lcb、Cb により困難となる場合には、エラ船型も考慮する。
- ・開発船型は NAPA で線図を自動生成し船型変更を行うことをベースとする。

① ペアレント

山鋼丸を母船型として船型設計条件を満足し、かつ山鋼丸より船殻重量が増加するので、DW を調整し、調整量を超える分は排水量を増加し、Cb を若干増加させた。エラを除き、Cb を少し大きくし、その分喫水線上の容積を減らした船型である。

② チャイルド A

ペアレントの船尾プロファイルを逆 G 型からマリナー型へ変更し、2.7m の大直径プロペラが装着できる船型とした。大型船では標準的な省エネ船型であるが、従来内航船では一般的にはあまり使用されてこなかった船尾形状である。

③ チャイルド B

Lcb 位置をペアレント船型よりも船尾側に変更し、ペアレントより船首側を全体的に痩せさせた船型とした。これにより造波抵抗低減を意図した。

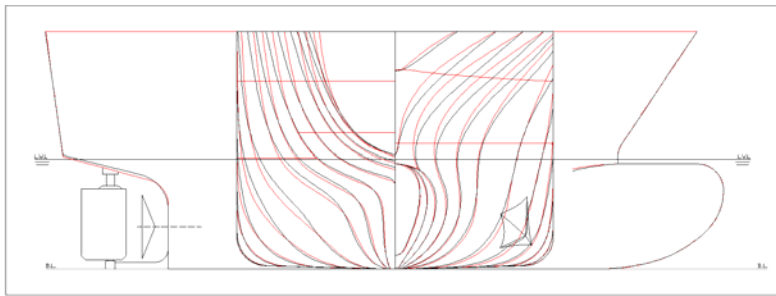


図 11. ペアレント(赤)
山鋼丸(黒)のプロファイル
とボディプラン

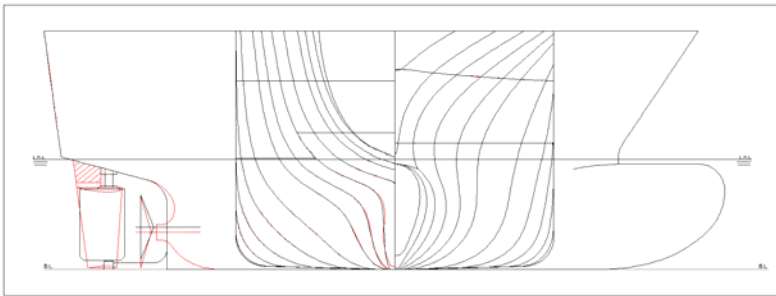


図 12. ペアレント(黒)と
チャイルド A(赤)の
プロファイルとボディプラン

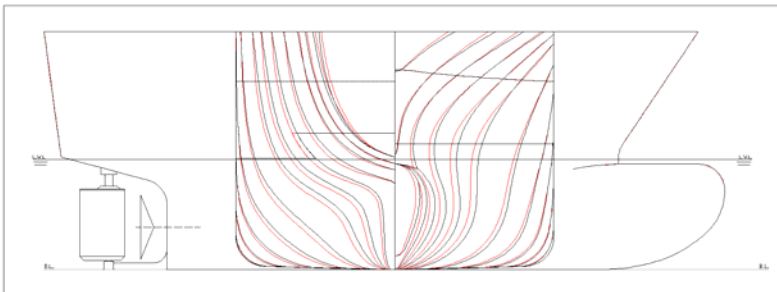


図 13. ペアレント(黒)と
チャイルド B(赤)の
プロファイルとボディプラン

④ チャイルド C

Lcb 位置をペアレントよりも船尾側に変更し、船首バルブ形状と大きさをペアレントと同じ寸法に保ちつつ、ペアレントより船首側を痩せさせた船型とした。

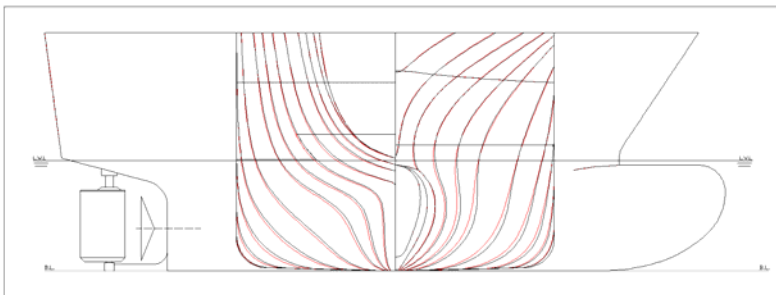


図 14. ペアレント(黒)と
チャイルド C(赤)の
プロファイルとボディプラン

⑤チャイルド D

ペアレントの L/B をペアレント船型の 5.75 から 5.90 に変更した船型で、ペアレントよりも Lpp を 1m 長くし、B を 0.14m 狭い船型とした。GT499 トンを確保する為、D が 7.12m から 7.11m へ、d が 4.159m から 4.137m に変更した。

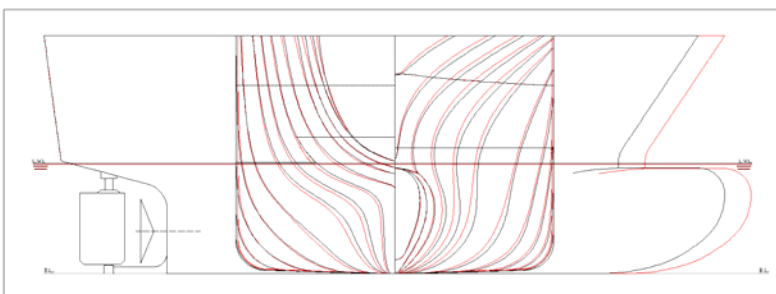


図 15. ペアレント(黒)と
チャイルド D(赤)の
プロファイルとボディプラン

フレックス標準船のペアレントとチャイルドA～Dの性能評価をするため、 $L_{pp}=2m$ の模型船を用いて、(株)西日本流体技研(以下 FEL と略す)の回流水槽試験により、抵抗、自航要素を求めた。回流水槽でも十分な精度を確保するため、回流水槽試験と大型曳航水槽試験との比較検証により、6m 模型による曳航水槽試験で得られる抵抗、自航要素と同等な精度で推定する方法を用いた。今回のペアレントの参照船の山鋼丸は 2011 年に、(独)海上技術安全研究所(以下海技研と略す)で 6m 模型船による曳航水槽試験が行われており、また 2m 模型船での今回と同じ FEL の回流水槽でも試験が行われ、両者の相関が明らかとなっており、造波抵抗係数、形状影響係数、自航要素の相関は十分な精度で求められる。

今回のフレックス標準船のペアレントとチャイルドの各船型も同じ回流水槽で試験が行われており、山鋼丸での相関関係が成り立つものと考え、大型模型試験結果に相当する抵抗、自航要素に換算した。

さらに FEL に保管されていた山鋼丸の模型船を、ペアレント、チャイルドの各船型の試験毎に検定のための再試験を行い、その相関係数を求め、試験時の水温や流速の若干の変化に対する補正を行うとともに、相関係数に変化のないことを確認した。

この結果から大型模型試験結果に相当する抵抗要素を 3 次元解析法にて推定し、自航試験結果から大型模型試験に相当する自航要素を求めた。

5.3. CFD による船型改良

ペアレントの線図を作成するにあたり、ペアレントとして決定された主要目の範囲の中で、最も省エネとなる最適船型を CFD 計算により比較評価した。CFD の計算には、海技研の SURF を用いた。CFD の計算による計算結果は格子生成や計算条件に因って水槽試験結果と差が生じる為、相対的な評価として扱った。格子数を約 50 万、90 万、200 万と変えて格子による影響を確認した上で、50 万格子にて計算を行った。

最初の船型を Parent_ver.A とし CFD で抵抗要素及び EHP を求めた。Parent_ver.A の圧力分布や流線の評価しながら船尾側の排水量を減らし、船首側の排水量を増やし、船首端を修正した。その船型を Parent_ver.B とし CFD 計算で EHP を求めた。ver.B は ver.A に対して 0.8%EHP が低減した。同様に C_b 、D、デッキ幅等の改良等の作業を ver.C、ver.D……と繰り返し、最終的に Parent_ver.G は ver.A よりも EHP が 1.8%低い船型が完成した。

チャイルド A、B、C、D もペアレントからの自動変換後、同様な手順により線図生成を行った。ペアレント及びチャイルド A での船型改良は、経験に基づいた従来の方法によって進めたが、チャイルド B、C 及び D は NAPA の船型自動変換機能を用いて求めた。自動変換機能で不足した部分は、経験的手法により補正した。

各船型の船首尾の CFD 計算による圧力分布と流線を図 16.から図 20.に示す。船体表面上の赤色は圧力の高いことを、青色は低いことを示す。船体前半部での正圧は抵抗を、負圧は推力を示す。船体後半部では、逆に負圧が抵抗となり、正圧が推力となる。又、流線間の拡大集中は流れが剥離し渦となり易い部分であることを示している。

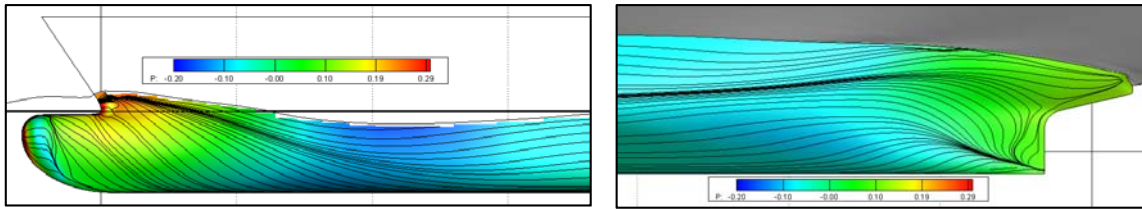


図 16. ペアレント 圧力分布と流線 (12knots)

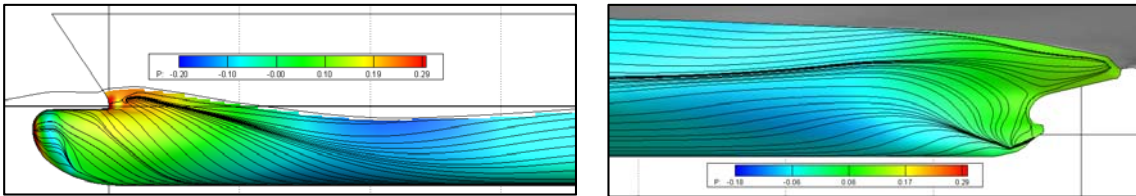


図 17. チャイルド A 圧力分布と流線 (12knots)

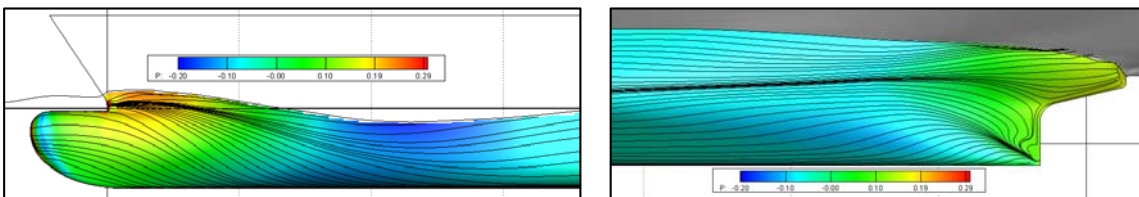


図 18. チャイルド B 圧力分布と流線 (12knots)

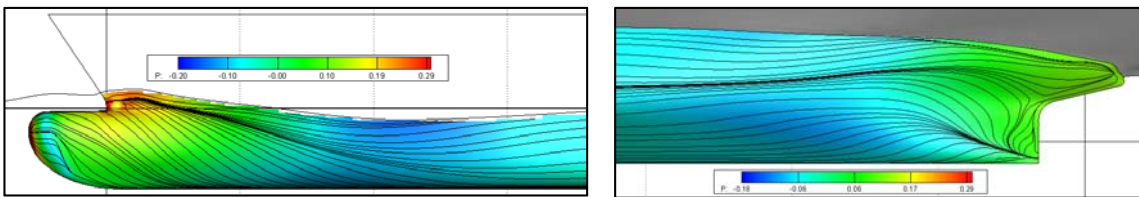


図 19. チャイルド C 圧力分布と流線 (12knots)

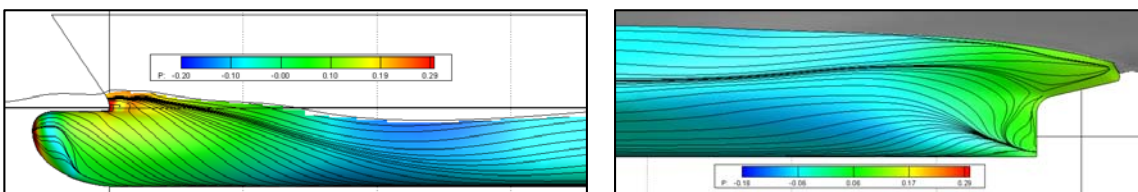


図 20. チャイルド D 圧力分布と流線 (12knots)

5. 4. ペアレント 水槽試験結果

ペアレントでトリムの影響を調べる為、FULLトリム 0%、1%、1.5%、2%にて抵抗試験を実施した。抵抗試験結果、自航試験結果を図 21.～図 22.に示す。

図 22.の造波抵抗抵抗係数の変化を見ると、計画速度 12.7knots は F_n で 0.25 であり、このあたりから急激に増加し、全抵抗の 30% 近くになっている。従来の船型学ではホローランプが大きくなり避けるべき領域に入っている。また水槽試験で得られた造波抵抗係数を HOPE で使用している通常の大船型の造波抵抗係数 r_w と比較すると、30%程度小さくなっている。これは船体の大きさに比べて巨大な船首バルブの効果であると言える。

計画速度 F_n が下がると造波抵抗係数 r_w は急激に小さくなり、従って主機出力が小さくなり、省エネ効果大きい。計画速度の決定は性能に与える影響が大きいので慎重に決定すべきと考える。

またトリムの差による造波抵抗係数の変化も大きく、フルード数 $F_n=0.25$ (図中赤線)でトリム 0%では 3.6×10^{-3} が 1.0%、1.5%、2.0%とトリムの増加に伴い、2.8、2.4、2.0 に大きく変化(図中赤矢印)しており、この差がそのままトリム状態での主機出力の差となって現れている。さらに船速が 11knots、 $F_n 0.215$ まで低下するとその差はほとんど無くなっている。経験的に運航時のトリム効果が知られているが、その効果もその時の速力によることを周知すべきである。

図 22.に自航試験による ηR 、 $1-t$ 、 $1-wm$ の結果を示す。 F_n の変化による差は少なく、計測データのバラ付きも小さく、トリム差もほとんど無い安定した結果が得られた。

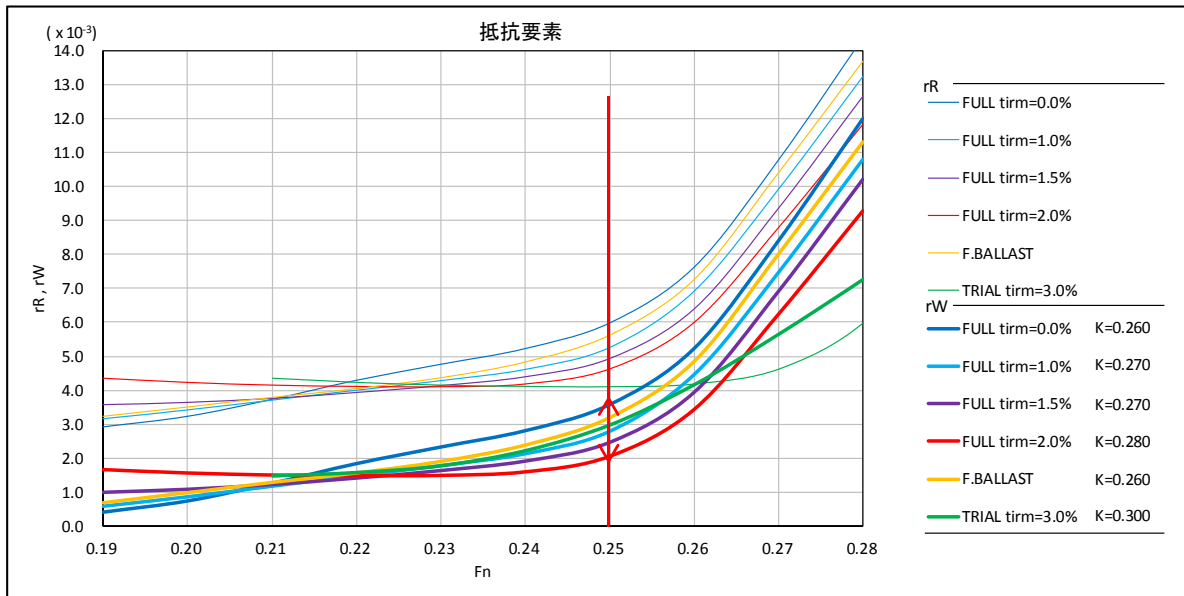


図 21. ペアレント 抵抗試験結果

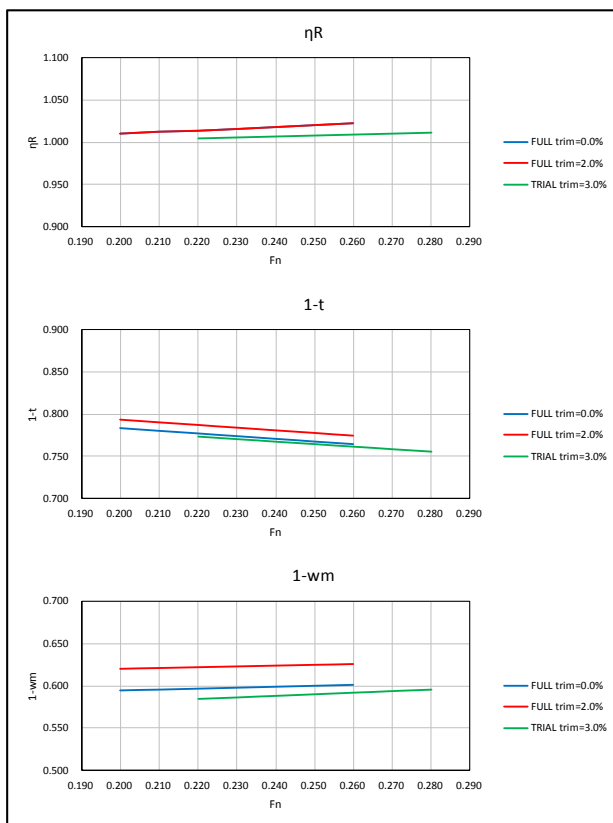


図 22. ペアレント 自航試験結果

図 23.～図 26.に水槽試験での波形写真を示す。大きな差は無いが、船首部の波形を比較すると、トリムの変化により船首波形が変化していることが解る。

運航上の燃費を議論する場合は満載状態とこのバラスト状態の平均であることから、船型開発は満載状態のみに注目するのではなく、バラスト状態にも配慮した船型とすべきである。特に船首バルブの大きさ、形状、高さは両状態をみて最適化を図る余地があると推量された。



図 23. 波形写真
(ペアレント FULL
トリム 0%)
船速 12.5knots



図 24. 波形写真
(ペアレント FULL
トリム 1%)
船速 12.5knots



図 25. 波形写真
(ペアレント FULL
トリム 1.5%)
船速 12.5knots



図 26. 波形写真
(ペアレント FULL
trim2%) 船速
12.5knots

5.5. チャイルド A 水槽試験結果

抵抗試験結果を図 27.に、自航試験結果を図 28.に示す。ペアレントとチャイルドAの違いは船尾部の形状だけで、他は全くの同船型である。従って造波抵抗係数はペアレントとほぼ同一であり、トリム差の影響もほとんど同じである。自航要素には船尾形状の差が現れ、 ηH が 4%程度低下しているが、プロペラの低回転大直径化に伴いプロペラ効率が大幅に向上しているため、これらの合わせた推進効率は 0.602 から 0.641 まで、約 6%性能向上となった。従来内航船にはあまり使われて来なかった船尾形状であるが、省エネ効果のより一層の向上のためには普及させて行きたい船型である。今回の水槽試験ではマリナー船尾は 1 船型だけであるが、 L_{cb} 、 C_b 、 L/B の組み合わせでさらに性能向上が期待できる。

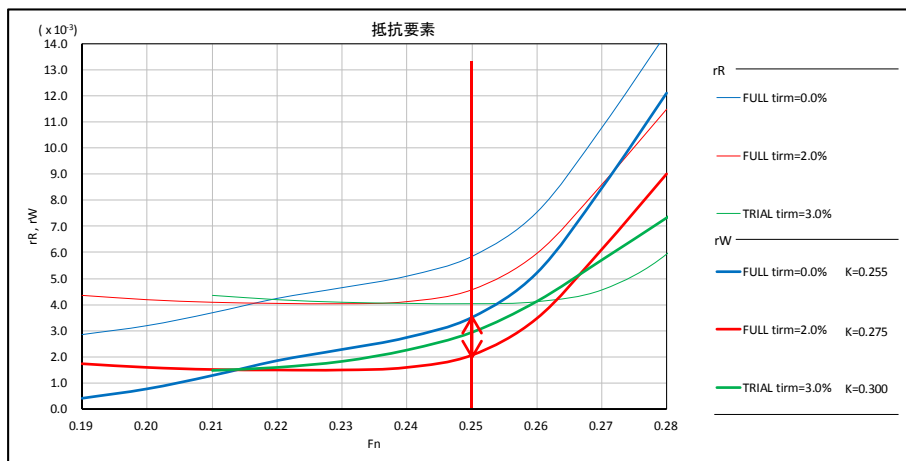


図 27. チャイルド A 抵抗試験結果

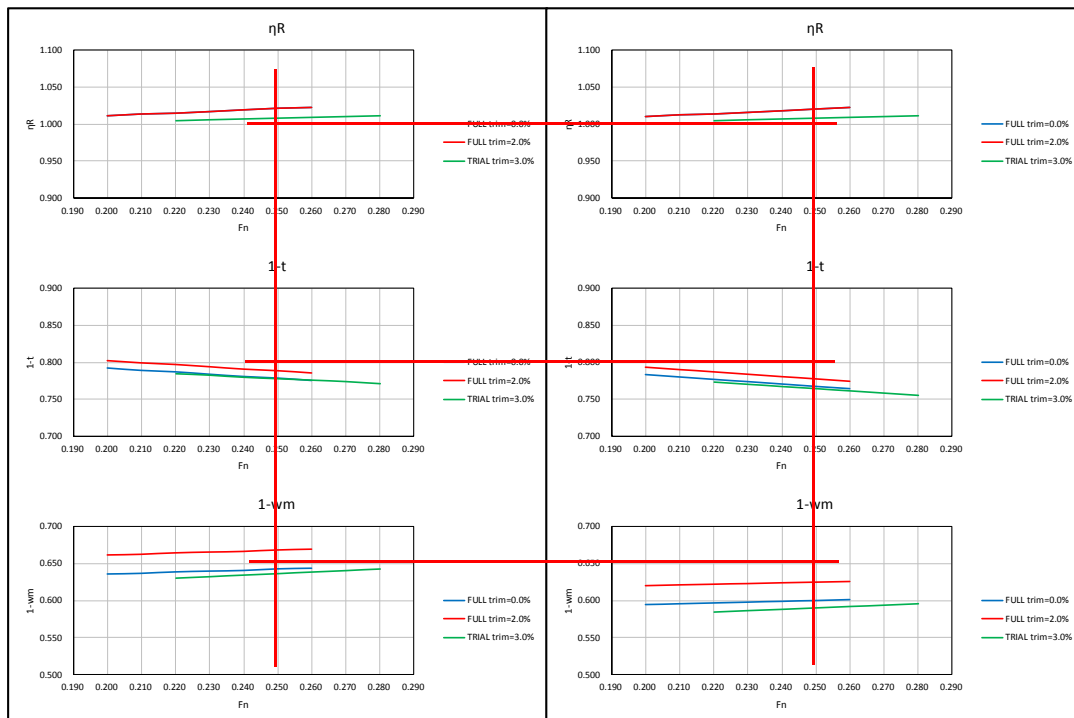
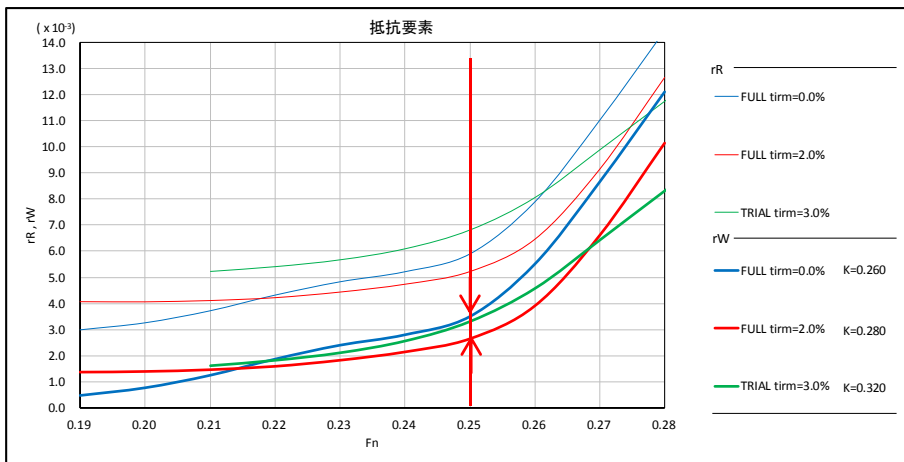


図 28. チャイルド A(左) とペアレント(右)の自航試験結果の比較 (赤線は比較のための補助線)

5.6. チャイルド B 水槽試験結果

抵抗試験結果を図 29.に、自航試験結果比較を図 30.に示す。チャイルド B では L_{cb} を限界まで船尾側に移動して性能変化を確認した。線図作成過程で大幅な L_{cb} の移動に伴い船首バルブの寸法(排水量)が変化し、船首バルブの造波抵抗影響に変化が発生した。即ち図 29.とペアレントの図 21.の造波抵抗係数を比較すると解るように、 $Fn=0.25$ のとき、トリム 0%ではペアレント 3.57 に対しチャイルド B では 3.12 となり 13%の抵抗減少になっているのに対し、トリム 2%の状態ではペアレント 2.06 に対し、チャイルド B では逆に 2.28 となり、逆に 11%の抵抗増加になった。CFD による比較評価により、船首バルブの特性に変化が発生したものと判断された。

チャイルド B は計画速度 12.7knots で他船型と比較すると、船首バルブの影響により若干性能が劣るが、11knots 以下の速度では良い結果を示した。計画速度を下げた場合の船



型としては良い船型と考えられる。この差の元は船首バルブの造波抵抗低減効果によるものである。

図 29. チャイルド B 抵抗試験結果

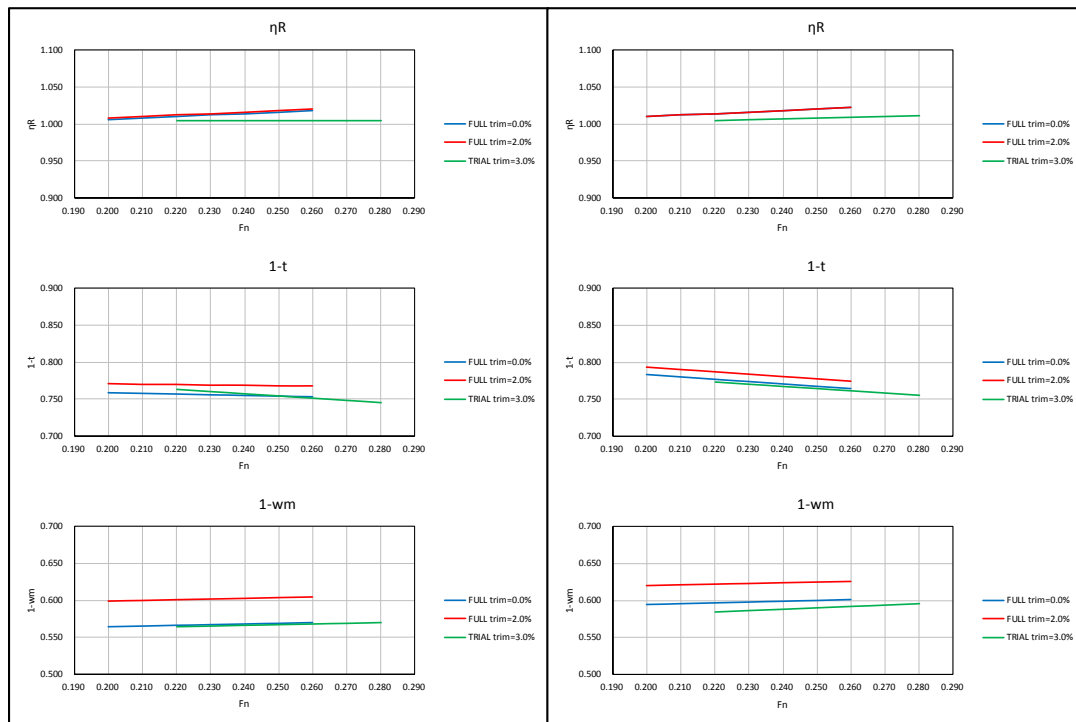
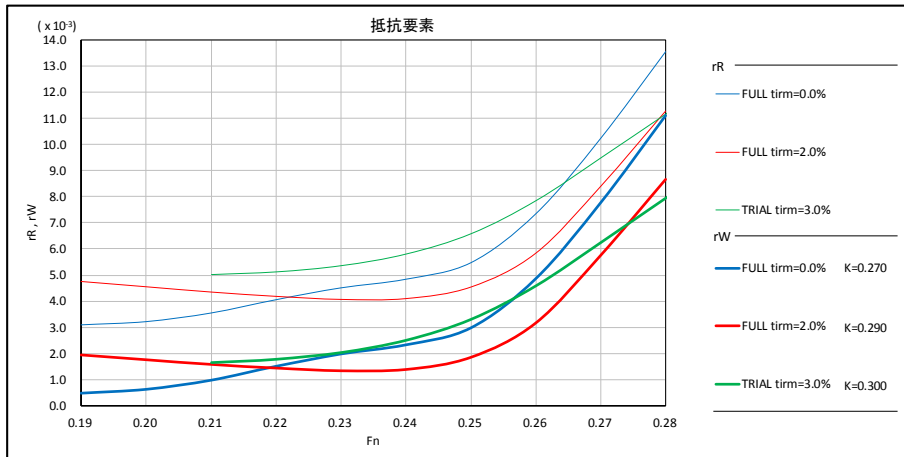


図 30. チャイルド B(左)とペアレント(右)の自航試験結果比較

5.7. チャイルド C 水槽試験結果

抵抗試験結果を図 31.に、自航試験結果比較を図 32.に示す。チャイルド C は当初の Lcb の効果予測通りの性能を示した。船首バルブ形状を変えずに Lcb を船尾側に移動したことにより造波抵抗係数は 10%以上低下した。しかし形状影響係数 K は逆に増加したため全抵抗 EHP はトリム状態により 1.5%~4.5%の減少にとどまった。自航要素には大きな差は無く、主機出力 BHP も 2%~4%程度 of 減少であった。

一方で船首部が痩せたことによりホールド前端部で完全ボックス形状を確保することは困難となるので、この船型にエアを装備するのもチャイルドの選択枝として考えられる。



チャイルド C の水槽試験は性能推定法の確立の上で重要なデータを与える結果となった。

図 31. チャイルド C 抵抗試験結果

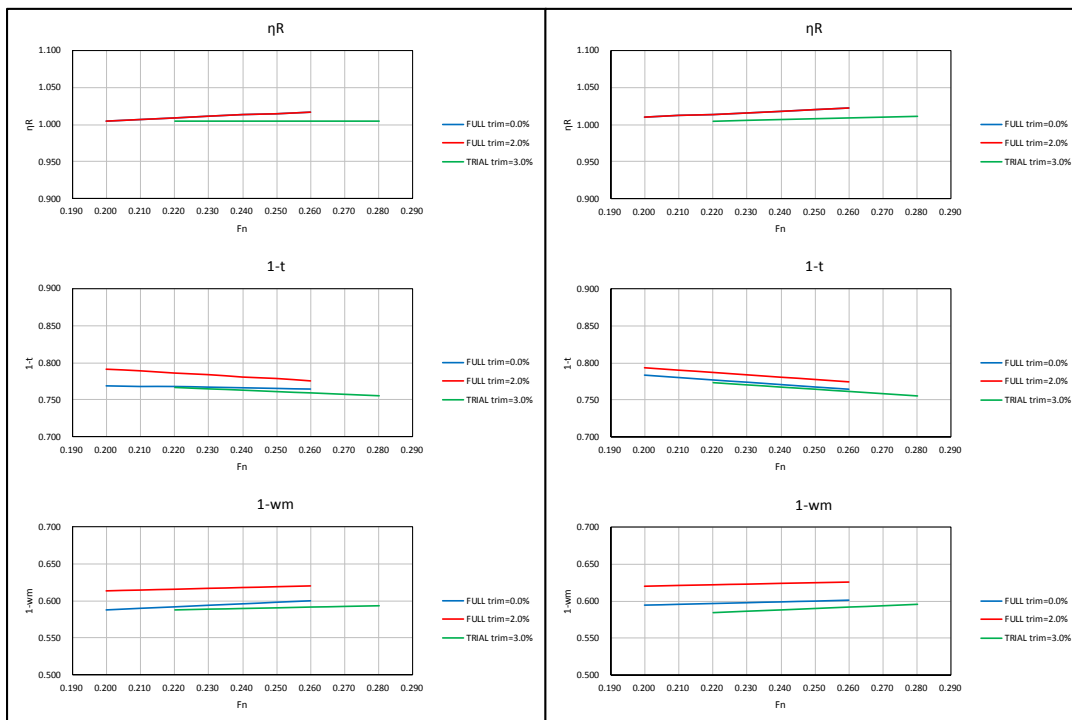


図 32. チャイルド C (左) とペアレント (右) の自航試験結果比較

5.8. チャイルド D 水槽試験結果

抵抗試験結果を図 33.に、自航試験結果を図 34.に示す。チャイルド D は造波抵抗係数に大きな関係のある指数 $CmHe/B$ が大きい船型群から選択したものであり、予想通り造波抵抗が小さくなったが、船型が変更したことに伴い DW が他船型と比べ小さくなった。

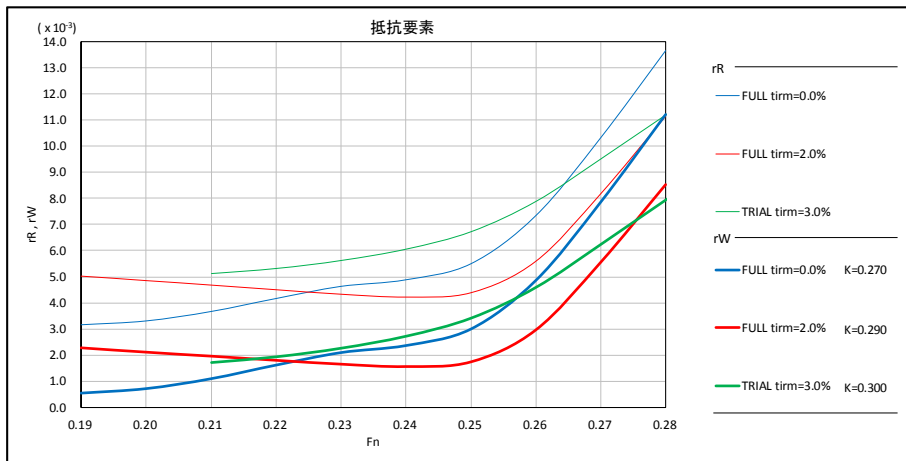


図 33. チャイルド D 抵抗試験結果

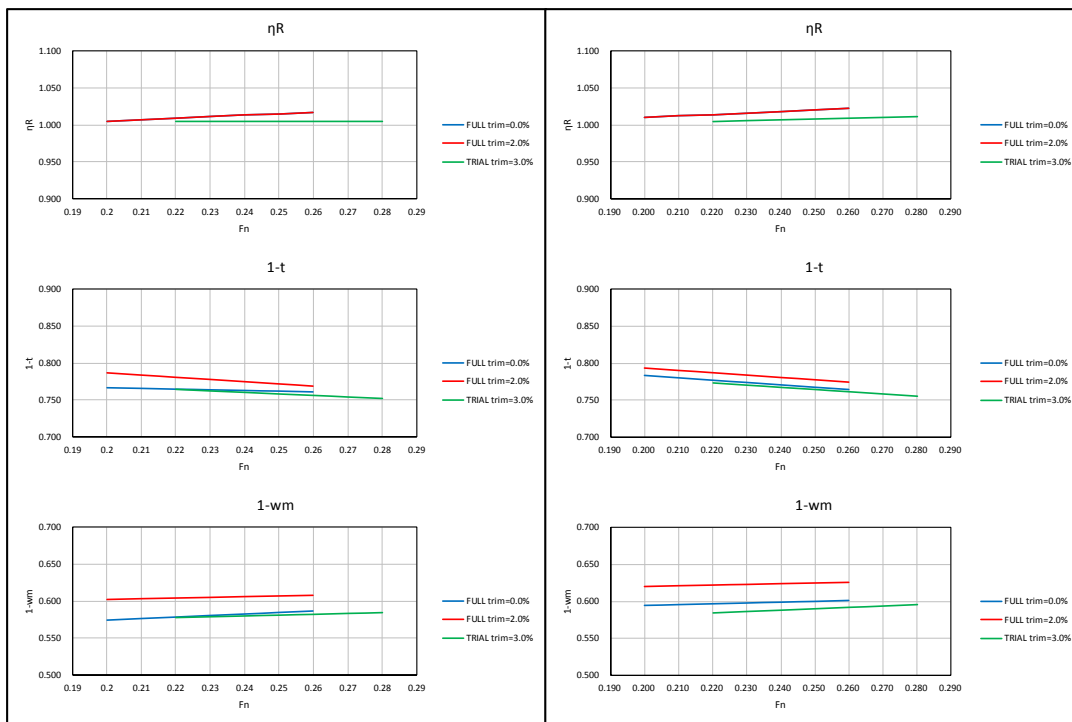


図 34. チャイルド D(左)とペアレント(右)の自航試験結果比較

5. 9. 水槽試験結果による性能評価

図 35. に示すように、10%程度の性能差はあるが、ペアレントおよびチャイルド A~D の各船型ともに山鋼丸と比べ、同等以上の省エネ効果のあることが確認された。

1) ペアレントの性能

ペアレントは山鋼丸と比較すると、FULL トリム 2%で、同一船速で 3%~4%BHP が大きい。これは排水量が増加していることと、エラ船型採用の有無の差によるものである。

ペアレントは、トリムが大きくなるに従い、造波抵抗が順次減少した。自航要素の中で η_R 、 $1-t$ は大きく変化しないが $1-w$ はトリムが増加した。この水槽試験結果から推定された抵抗、自航要素を用いて実船の推進性能推定法を新たに開発した。12knots 以上の高速ではトリム 2%程度が最も推進性能が良い結果となった。しかし 11knots 以下の低速では、トリムが小さい方が推進性能は良い傾向となった。これは主に船首バルブの没水率と流入角度に

起因すると推測された。今後様々な仕様のチャイルドを生成するために十分な省エネ性能を有することが確認された。

2) Lcb の影響

チャイルド B～C の水槽試験では、Lcb 変化等による推進性能の変化量を確認することができた。Lcb を船尾に移動したチャイルド C は、FULL トリム 0% のときペアレントと比べると、低速では差がないが、高速では 3% から 4% BHP が低減しており、FULL トリム 2% でも、高速ではペアレントより 1～2% 性能が向上した。

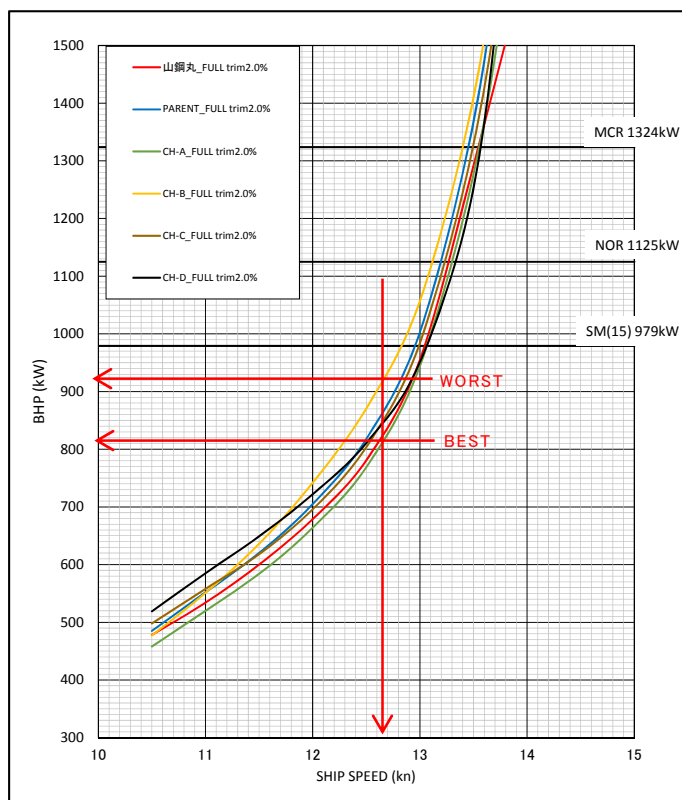
チャイルド B では Lcb をチャイルド C よりも更に船尾側に移動し、船首バルブも小さくなった為、11knots 以下の低速域での性能は良かったが、高速域では船首バルブによる造波抵抗削減効果が減少し、性能が低下する結果となった。

Lcb の船尾側への移動効果は、造波抵抗係数は減少に対し、形状影響係数が大きくなり、EHP 削減を妨げ、さらに船首バルブの影響が複雑に絡んでくる。また自航要素のうち、 ηR と $1-t$ には大きな変化はないが、 $1-w$ は減少し、 ηH が大きくなり推進性能が向上し BHP 削減となるが、それらの効果の程度は船速やトリムの状態により複雑に変化する。今回の水槽試験から 499 型貨物船の範囲では、その効果を定量化できた。

3) L/B の影響

L/B を大きくしたチャイルド D は、12.5knots 以上でペアレントと比べて、FULL トリム 0% で 5～6% 程度馬力が低減し、FULL トリム 2% では、1～2% 程度性能が良くなった。

山鋼丸とペアレントとの比較では、一見山鋼丸の性能が良く見えるが、これは排水量差とエラの有無に伴う差である。ペアレントの満載状態において、トリムの 2% 差、あるいは排水量の 10% 差が上記の性能曲線の幅であり、計画速力の 12.7knots の近傍では約 0.4knots の差ある。この特性を念頭に入れて運航することが経済運航につながる。



計画速力の近傍ではチャイルド A および D が山鋼丸を超える良い性能を示している。ただしチャイルド D は船型差により DW が約 1% 減少している。それに次いでチャイルド C、チャイルド D の順になっている。チャイルド D はこの中では最も性能が低い、10.5knots 以下ではチャイルド A に次ぐ良い性能を示している。

チャイルド A はマリナー型船尾と低回転大直径回転プロペラの効果により、12.7～10.5knots で良い性能をされており、省エネ船型のホープと言える。

図 35. 比較性能曲線 (FULL トリム 2%)

5. 10. 性能推定法

フレックス標準船の性能推定ツールとして、汎用の性能計算プログラム HOPE を使用する計画であったが、水槽試験や海上公試の結果と比較検討した結果、肥大度の大きい小型船で、かつFnが高い船型の性能推定結果には誤差が大きいことが判明した。

誤差が大きくなる要因は以下の通りであると推測した。

- ① HOPE では性能推定のための船型の細部要目が大型船型ベースで作られており、小型船型では差が大きくなり、結果として性能推定に誤差が発生した。
- ② HOPE の造波抵抗係数等の性能データが大型船の水槽試験結果から作られており、小型船では差が大きくなり、性能推定の誤差が発生した。
- ③ 小型船で特にFnが高い場合にはトリムの影響が顕著であり、経験的にも知られており、実運航でもトリム状態で運航される場合が多い。一方 HOPE にはトリム状態での性能推定の機能がない。

この為、従来からの小型内航船の性能に対する知見と、今回の水槽試験結果から、HOPE を補正する性能推定計算方法を新たに開発した。

- ① 浸水表面積、 C_m 、 C_{pf} 等の船型細部要目を線図作成プログラムの NAPA から直接計算した数値から近似式を作成した。
- ② 従来の知見と今回の水槽試験結果から造波抵抗係数 r_w 、形状係数 K 、プロペラ効率比 η_R 、推力減少係数 $1-t$ 、有効伴流係数 $1-w$ の推定チャートを新たに作成し、HOPE の内部データを置き換えた。

水槽試験結果から $C_m \cdot He/B$ と r_w の関係を各状態について求め、図 36. に示すチャートを作成した。ペアレント及びチャイルド A、C、D の r_w はFn毎に一本の二次曲線で近似できたが、チャイルド B だけは、この近似曲線から外れた。これは、チャイルド B のみ船首バルブの大きさが他船型よりも小さくなっているためと推測した。自航要素についても同様に $C_m \cdot He/B$ との関係性を求めた。但し、自航要素については各喫水の状態毎に求めた。

η_R は図 37. に示すように $C_m \cdot He/B$ が大きくなると右下がりの傾向となっているが、Fnが大きくなると右上がりの傾向となっている。逆 G 型とマリナー型の船尾形状の違いによる η_R の差は見られなかった。

$1-t$ は図 38. に示すように $C_m \cdot He/B$ が大きくなると右下がりの傾向となり、Fnが大きくなっても右下がりの傾向となっている。船尾形状の違いによる差が見られ、マリナー型の方が、 $1-t$ が 0.01 程度大きくなっている。

$1-w$ は図 39. に示すように $C_m \cdot He/B$ が大きくなると右下がりの傾向となるが、Fnが大きくなると右上がりの傾向となっている。船尾形状の違いによる差が見られ、マリナー型の方が $1-w$ が 0.04 程度大きくなっている。

K は HOPE の推定式を用いたが、 FLF_{ini} の値は水槽試験結果から新たに船尾肥瘠係数 $P=C_m/[L/B*(B/d*C_b)^{(1/2)}]*\gamma A$ に対す数値として求めた。

水槽試験結果から性能推定した結果と作成したチャートから性能推定した結果では、最大では約 4%差があるが、全体的には約 2%以下の差となっている。この差は計画段階での性能を推定する上では、問題のない誤差範囲であると判断した。

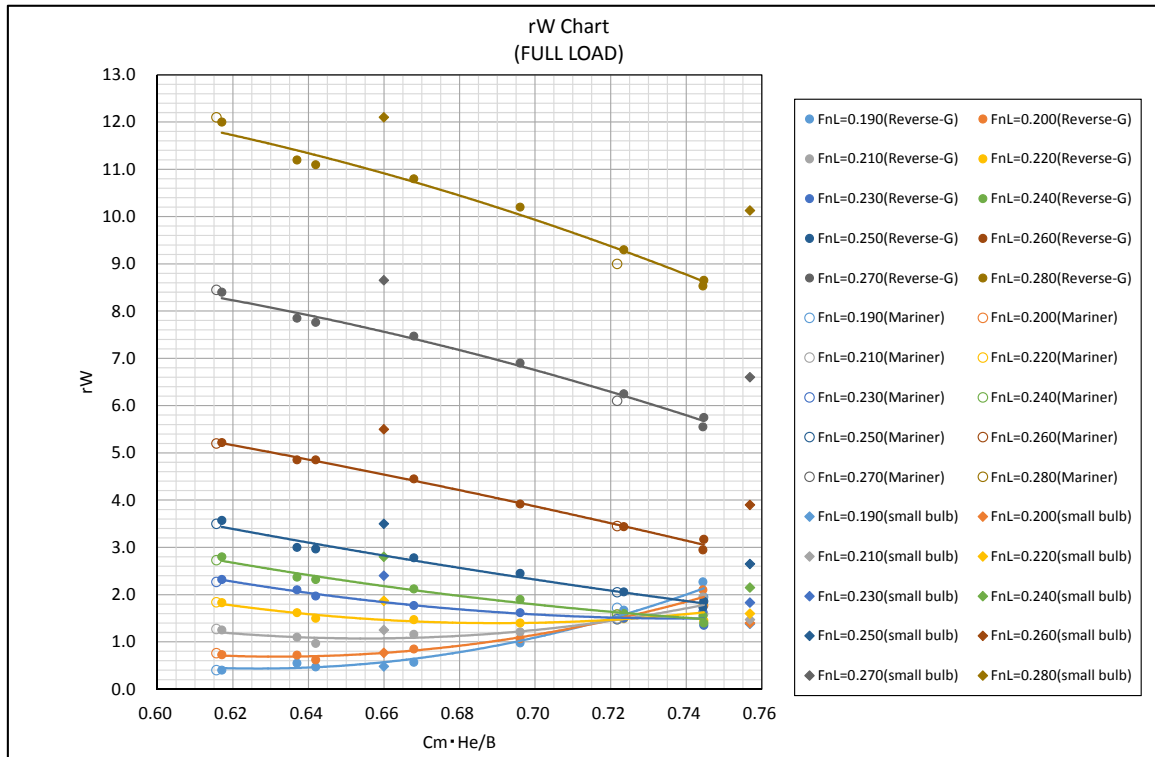


図 36. 造波抵抗チャート (FULL LOAD)

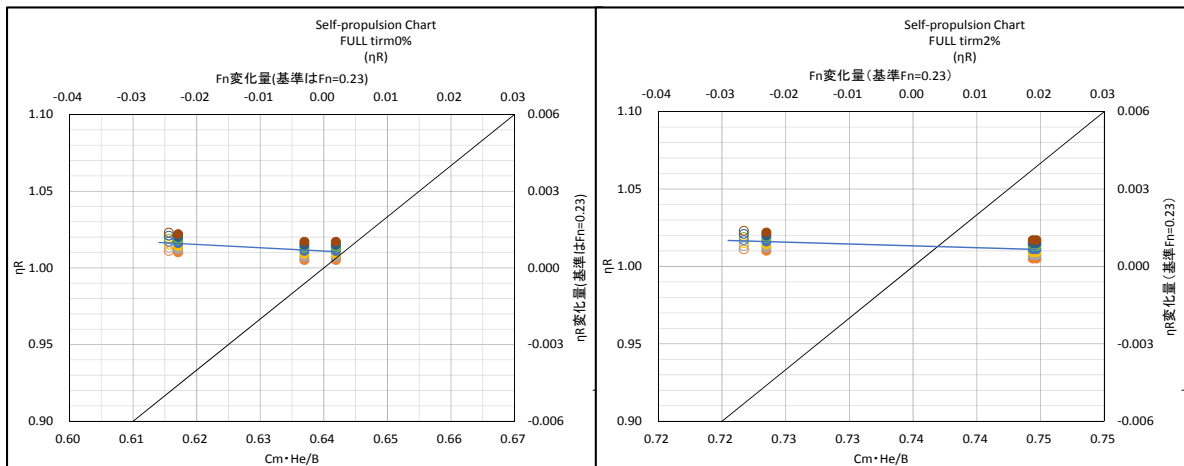


図 37. ηR チャート (左:FULLトリム 0% 右:FULLトリム 2%)

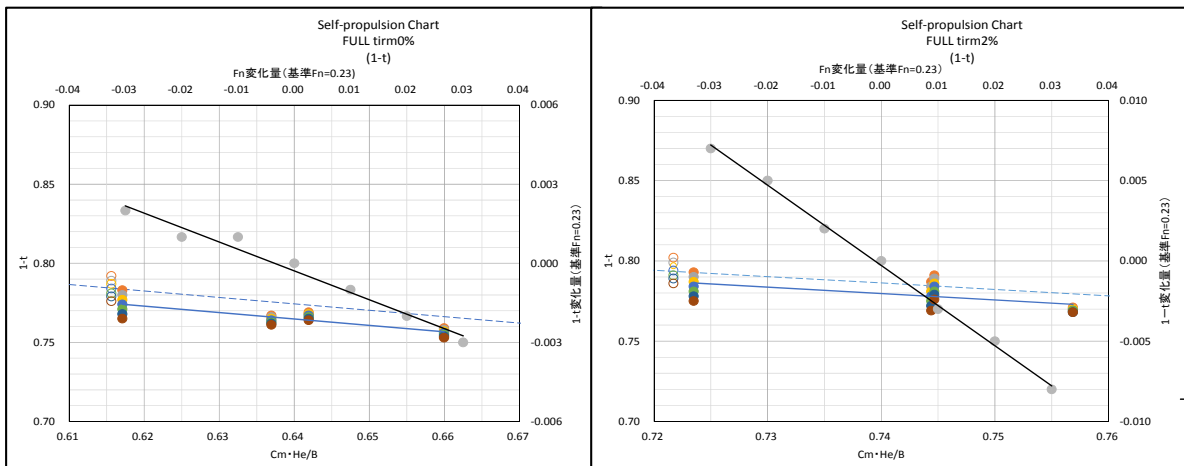


図 38. 1-t チャート (左:FULLトリム 0% 右:FULLトリム 2%)

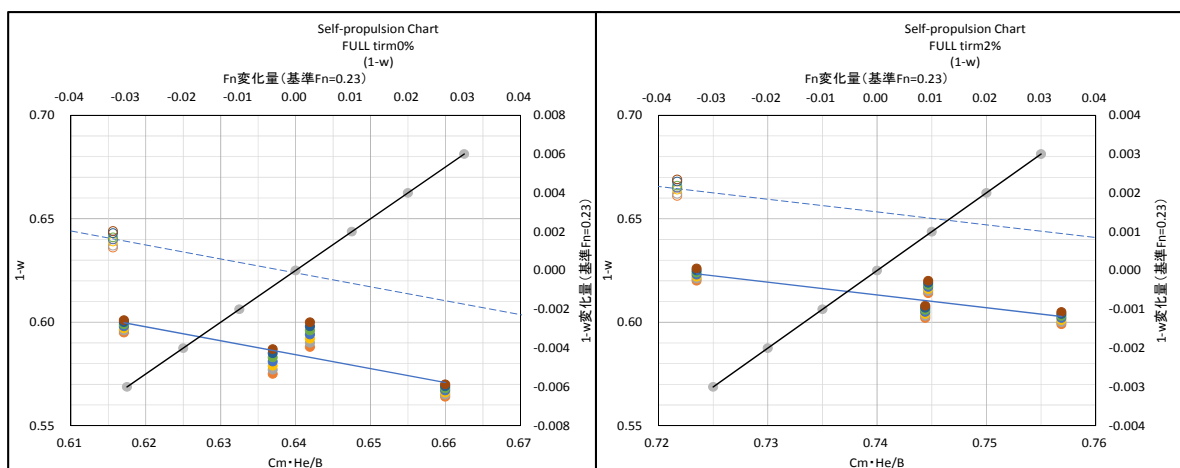


図 39. 1-wm チャート (左:FULLトリム 0% 右: FULLトリム 2%)

5. 11. 先進 CO₂ 低減化船の達成度評価

ペアレントおよびチャイルドの省エネ達成度の評価を行うため、2011 年に山鋼丸で行ったのと同じ JRTT 仕様の計算シートで評価を行った結果を表 2.に示す。省エネ率の目標は 90 年代の比較対象船の燃料消費量を 0.0143 l/t-mile として、これから16%以上の省エネ率とした。今回の水槽試験結果からの各船型の省エネ率は下記のとおりである。

- ・山鋼丸 19%(海上公試ベースに、燃費及び計算条件を同じにして修正したもの)
- ・ペアレント 18%
- ・チャイルド A 23%
- ・チャイルド B 17%
- ・チャイルド C 19%
- ・チャイルド D 20%

ペアレントおよびチャイルド A~D の各船型ともに省エネ率は目標である 16%以上を達成しており、いずれもエクセレントペアレントとエクセレントチャイルドである。基本計画で示したようなこのエクセレントペアレントから生成されるチャイルドの中には省エネ率 16%以下のチャイルドも多数ある。何を優先させるかの船主の要望に沿って選択することが必要である。

最終的な評価は海上公試での試運転成績と主機の燃費率計測の結果からの評価となるが、山鋼丸の場合も試運転結果は水槽試験からの推定よりもさらに良くなる傾向にあり、今回のペアレントおよびチャイルド船型も実船の海上公試では同様の結果が予想される。

この計算方法と評価基準は JRTT の共有船制度の中で、特に燃費性能の良い船を先進 CO₂低減化船として認定のために 2011 年に制定されたものである。当時、外航船に対し IMO の EEDI を適用する直前のもので、これを先取りした先進的な評価基準であった。

しかし実際の 499GT 貨物船の運用速力 10~11knots であるのに対し、通常多く使用されている主機の連続最大出力(MCR)1,323kw の 75%から一義的決定される評価基準速力は 12~13knots であり、大きく離れている。また DW も制度上の DW と実際の運用時の DW にも乖離が出ているので、見直しが必要な時期と考えられる。

表 2.先進 CO₂ 低減化船計算シート(ペアレント)

先進二酸化炭素低減化船計算シート6A(フレックス造船/P03丸)			
～ 499GT型鋼製貨物船 ～			
[CO ₂ 排出量が16%以上削減する船舶]			
1. 建造船舶の要目			
(1) 船種	水槽試験ベース	貨物船	←選択
(2) 総トン数(トン)		499	←入力
(3) 主たる積荷		一般貨物	←入力
(4) 最大搭載人員(人)		6	←入力
(5) 輸送能力(貨物船は載貨重量トン)		① 1700	←入力
(6) 平水中航海速力(主機関75%負荷時) (ノット)		12.96	←入力
(7) 速力低下係数(主機連続最大出力1177Kw:0.94,1323Kw:0.95,1471Kw以上:0.96)		0.95	←入力
(8) 実海域航海速力(主機関75%負荷時) (ノット)		② 12.33	自動 採用
2. 主機関の要目			
(1) 主機関製造者及び型式(6LA30G)	7m ³ はMAU2.45mを想定		
(2) 主機関連続最大出力(KW)		③ 1323.0	←入力
(3) 主機関連続最大出力回転数(min-1)		290	
(4) 主機関連続最大出力時燃料消費率(g/KW・h)		④ 185	←自動
(5) 航海中使用燃料油(A重油:3.206/C重油:3.1144)		⑤ 32060	←選択
3. 補助機関の要目			
(1) 航行中の補助機関出力(KW)		⑥ 130.4	←入力
(2) 補助機関連続最大出力時燃料消費率(g/KW・h)		⑦ 224	←自動
(3) 航海中使用燃料油(A重油:3.206/C重油:3.1144)		⑧ 32060	←選択
4. ボイラ等設備の要目(該当する設備に○をつける)			
(1) () 温水ボイラ航海中出力(KW)	0に修正	⑨ 0.0	←○×
	燃料消費率(g/KW・h)	⑩ 0.0	←自動
	航海中使用燃料油(A重油:3.206/C重油:3.1144)	⑪ 32060	←選択
(2) () 熱媒ボイラ航海中出力(KW)		⑨	←入力
	燃料消費率(g/KW・h)	⑩ 0.0	←自動
	航海中使用燃料油(A重油:3.206/C重油:3.1144)	⑪ 31144	←選択
(3) () 蒸気ボイラ航海中出力(KW)		⑨ 0.0	←入力
	燃料消費率(g/KW・h)	⑩ 0.0	←自動
	航海中使用燃料油(A重油:3.206/C重油:3.1144)	⑪ 31144	←選択
(4) () その他航行中燃料使用設備() 航海中出力(KW)		⑨ 0.0	←入力
	燃料消費率(g/KW・h)	⑩ 0.0	←自動
	航海中使用燃料油(A重油:3.206/C重油:3.1144)	⑪ 31144	←選択
5. 建造船舶の単位当たり二酸化炭素排出量(g-CO ₂ /ton/mile)			
	$\{(0.75 \times ③ \times ④ \times ⑤) + (⑥ \times ⑦ \times ⑧) + \Sigma (⑨ \times ⑩ \times ⑪)\} / (① \times ②)$	⑫ 32.54	自動
6. 基準船舶の単位当たり二酸化炭素排出量(いずれかに○をつける)			
(1) (○) 499総トン型鋼材運搬船(g-CO ₂ /ton/mile)			
(2) () その他(g-CO ₂ /ton/mile)		⑬ 39.85	自動
7. 単位当たり二酸化炭素排出量の低減率(%)			
	$\{1 - (⑫/⑬)\} \times 100$	18.33	自動 採用
注) 1. 平水中速力は、水槽試験結果に基づいて計算した75%MCR時の航海速力を記入し、当該速力が確認できる資料(速力馬力曲線を含むプロペラ計算書)を添付すること。			
2. 主機関、補助機関及びボイラ等設備の燃料消費率は、メーカーの要目表に記載されている燃料消費率を記載すること。			
3. 航行中の補助機関出力は、航海中に必要な発電機出力を記載し、当該出力が確認できる資料(電力調査表等)を添付すること。			
4. ボイラ等設備については、航海中に燃料を燃焼して使用する設備すべてについて記入し、航海中出力の計算資料を提出すること。			
5. 航行中の乗組員の給湯のみに使用するボイラ等設備の出力は、乗組員1人当たり2KWとして計算し記載すること。ただし、これ以上の出力を想定している場合はその出力を記載すること。			

6. 3DCAD設計

6. 1. 3DCAD フレックスデザイン法

3D CAD システムが開発された当初、全ての3D 構造・部品配置は座標指定により行われていたので、船体形状、主要構造位置が少しでも変化すると、3D モデル修正の範囲が広範囲に及んだ。この為仕様が変わることが多い基本設計段階での利用には難しかった。

最新の3D CAD システムでは、形状定義は様々な参照面(外板、隔壁、甲板等)上に相対的な参照を行う形状定義が可能となっており、少々の形状変化にはフレキシブルに自動追従するトポロジー機能を有している。これらの最新機能を積極利用した設計法を「3DCAD フレックスデザイン法」と呼ぶことにした。

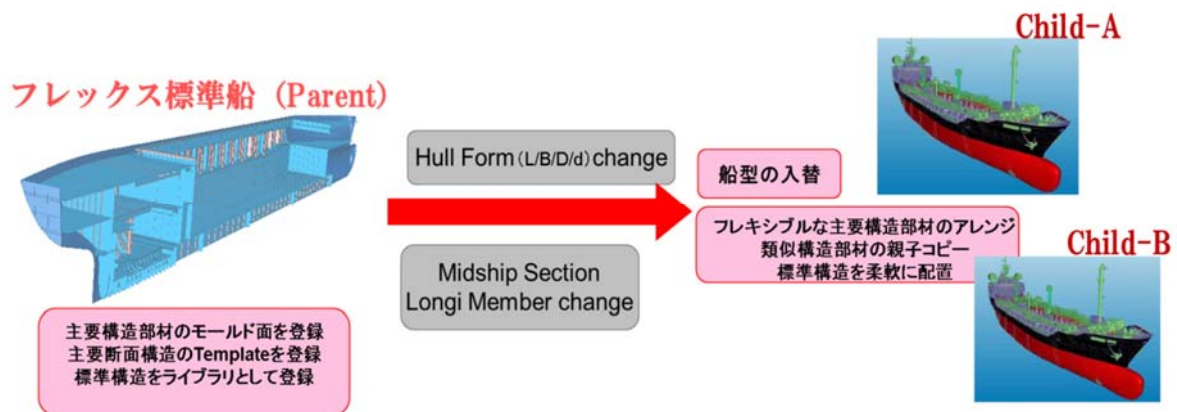


図 40.3DCAD フレックスデザイン概念図

図 40.に示すように、以下の変更に、外板、内部の船殻構造部材が自動追従する。

- ・線図及び主寸法(L、B、D、d)の変更
- ・参照面の変更による区画の変更
- ・船尾部形状(逆G型、マリナー型)や船首部構造のライブラリ登録による変更
- ・標準的な内部構造部品をテンプレートとしてライブラリ登録による変更
- ・フレーム配置の変更手順の標準化による変更

3DCAD モデルに登録された図面は、線図を入れ替えるだけで、3DCAD モデルの変更にも自動追従した新しい 3DCAD モデルが出力出来るので、設計者は、図面ごとの整合性に気を使う必要は無く、もっぱら設計の良否、設計図としての仕上げに集中できる、経験年数の少ない設計者であっても、短期間で正確な図面を作成することが出来る。

船型、配置、主要寸法など、起こり得る変更を想定し、その変更にも船殻構造が自動追従するように、外板、甲板、二重底、船首隔壁、ホールド隔壁、機関室隔壁など主要な構造の位置に参照面を配置し、且つ、変更になり易い寸法を数値ではなく、パラメータで定義することで船殻構造を定義することができる。例えば、ホールドの二重底高さを変更する場合、内底板を一つの参照面で定義しておけば、参照面を上方へ移動するだけで、複数の板とそれに付着したロンジなどの骨などを一斉に持ち上げることが出来る。

図 41.の 499 型貨物船では、黄色い線で示す参照面と、青・赤・黄色の枠で示す X・Y・Z 方向のパラメータを使って、ペアレントの船殻構造の主要な区画、隔壁、甲板を定義した。

並行して、図 42.の示すように船尾形状の変更の用途を想定し、船殻構造の一部を部品化してライブラリに登録してチャイルドで簡単に入れ替え出来るようにした。登録部品との寸法の違いはチャイルドの線図に併せて自動修正される。

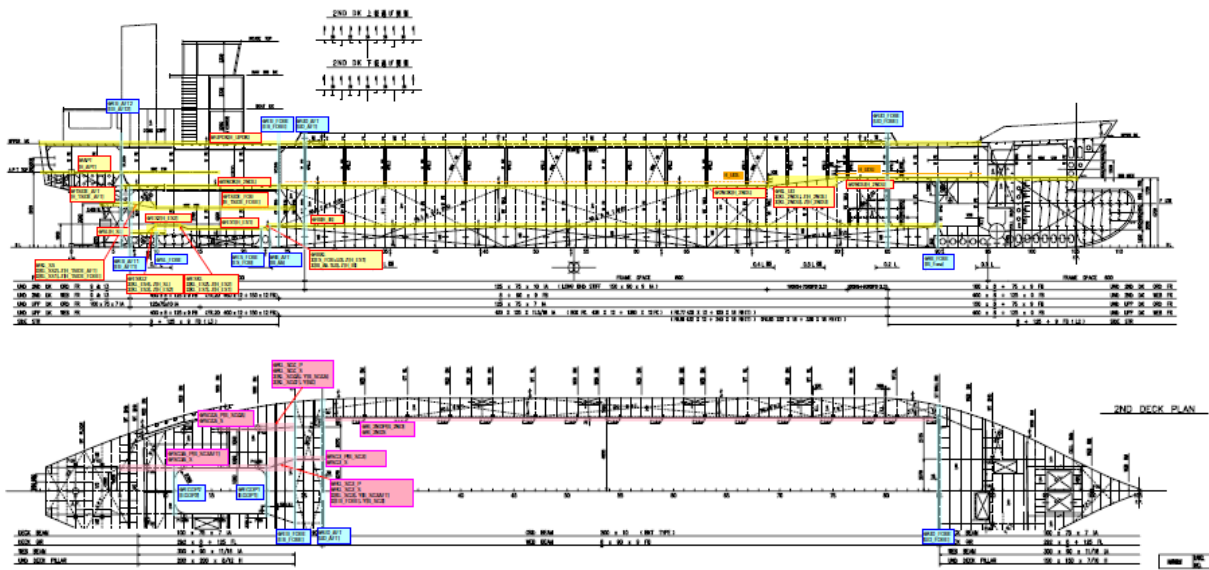


図 41.参照面の配置とパラメータ寸法

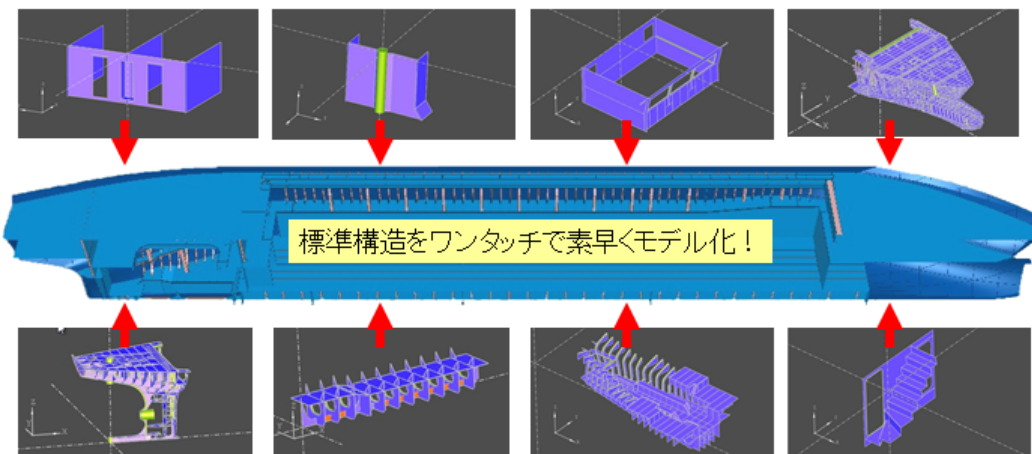


図 42. 船尾構造など、船体標準構造の部品化とライブラリ登録

図 43.に示すように 499 型貨物船に通常良く使用される標準的な船殻構造をテンプレートとして登録しておき、チャイルドで複数のフレーム位置にコピーする際、開孔やスティフナなどの有無やサイズ変更など、それぞれ位置ごとに指定してコピーする機能を活用し、短時間でチャイルドの新構造を構築することが出来るようにした。

一方、現在の 3DCAD にはフレキシブルに形状、配置を変更することはできても、それに伴う部材寸法を自動的に変更する機能はまだない。部材変更のトラブルや煩雑さを防止するために、部材寸法が変わらない範囲での変更とすることが必要であり、部材寸法に関連が強いフレームスペース、配置の標準化が必要である。今回のペアレントの開発においては、標準フレームスペース、配置を決定し、隔壁等の位置はこの位置で決定するようにした。フレックスデザイン法と矛盾する側面もあるが、フレキシブル&スタンダードがフレックス標準船の発想である。部材寸法の確認のためNK CS編に準拠した船殻構造部材寸法計算表を作成し、必要に応じてチャイルドの部材寸法を簡単に確認できるようにした。

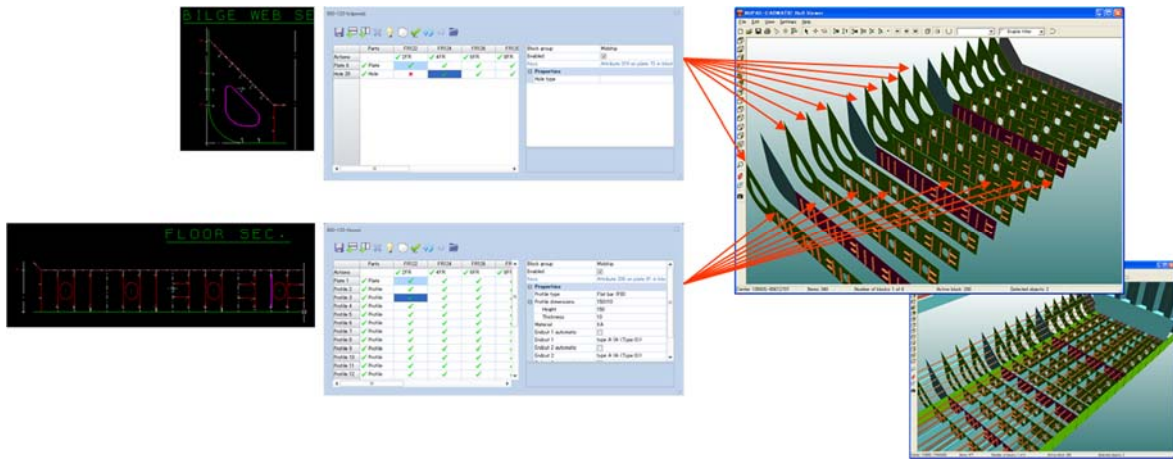


図 43.船殻構造を、配置する位置ごとに変更しながらのコピー&ペースト

6. 2. ペアレントの船殻モデルの作成

フレックスデザイン法に従ってペアレントの船殻モデルを作成した。3DCAD なので、ディスプレイ上で、任意の部分、任意の視点、任意の大きさで表示することが可能であるが、その典型的な例を図 44.～図 49.に示す。一見通常の 3DCAD の鳥瞰図であるが、参照面やパラメータを主要な各部分に仕込んであり、チャイルドが短時間に生成できる。

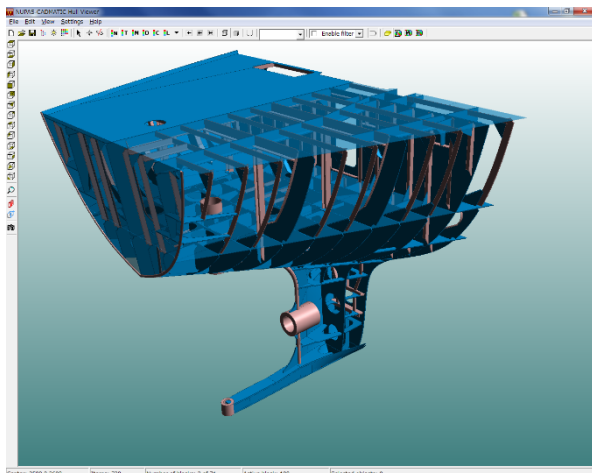


図 44.船尾構造

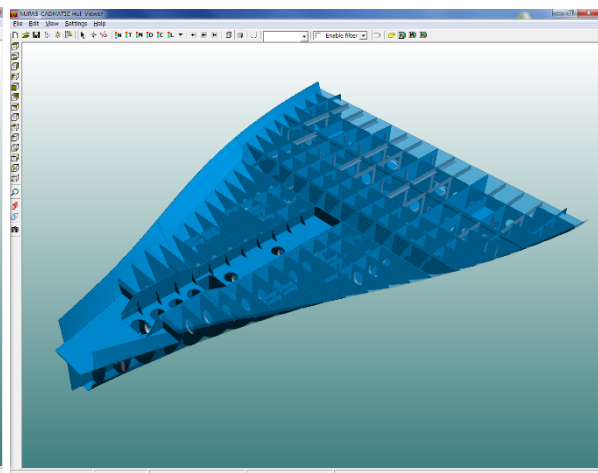


図 45.主機台構造

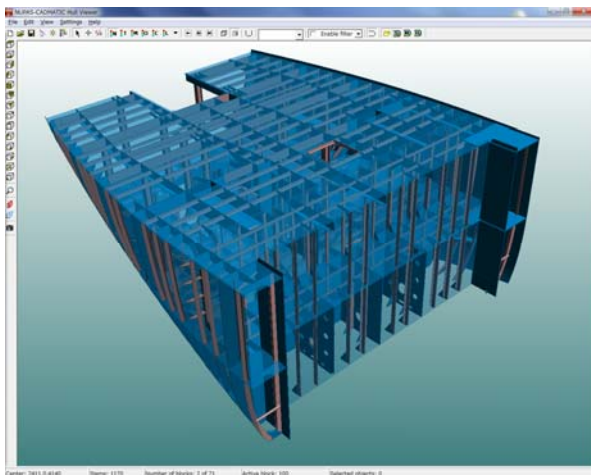


図 46.機関室構造

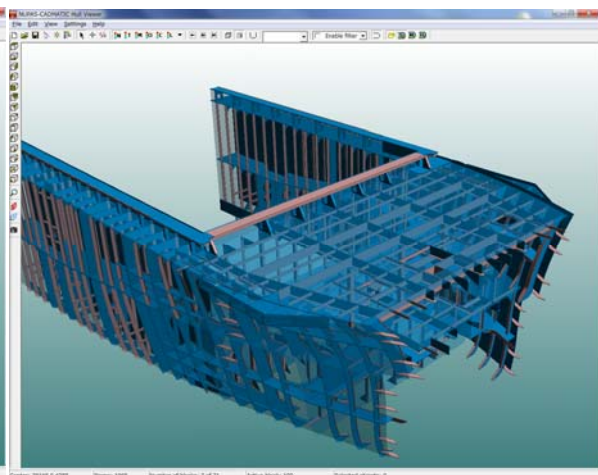


図 47.艙内構造

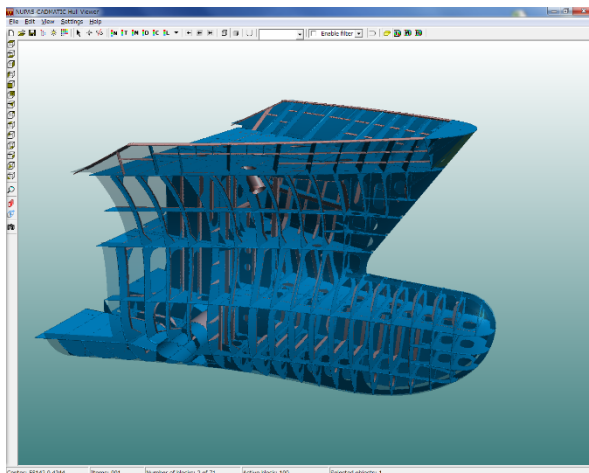


図 48.船首構造

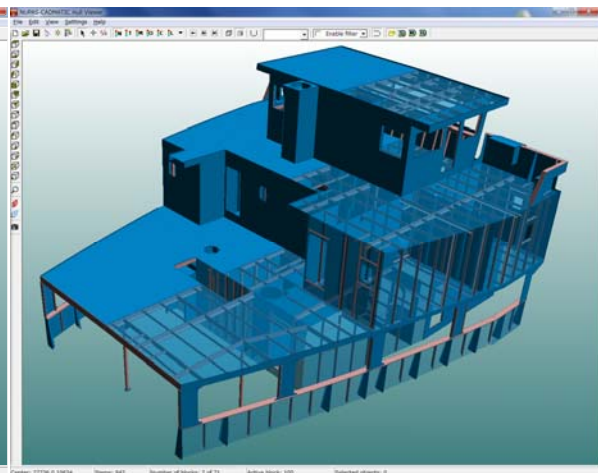


図 49.上部構造

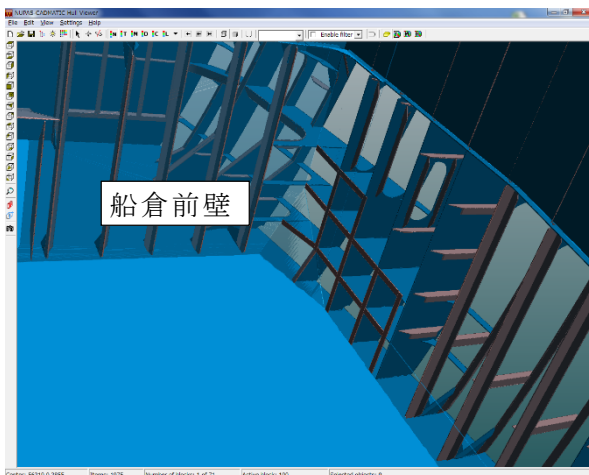


図 50.ホールド前端底部のボックス構造

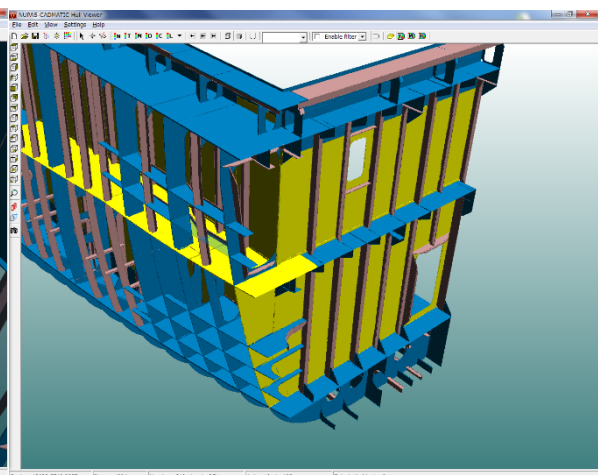


図 51.ホールド前端底部のボックス構造

図 50.及び図 51.はホールドの前端の底部拡大図と第 2 甲板の通路部拡大図である。この部分は通常完全ボックス型のホールド形状や交通性が船主から求められる場合が多い。推進性能に大きな影響のある船首部線図や、船殻構造、工作法とも深い関連があり、一部門だけで簡単には決められない。3DCAD ではこのような問題点を早期に検出し、事前検討を十分に行うことにより最良の方策を見つけ出すことができる。図 50.の例では解決策として

- ・線図を変更し、この部分を少し膨らませるたりエラをつける
- ・ホールドの前端部を1フレーム船尾側に移動する
- ・ホールドの前端底部を部分的に傾斜させる
- ・狭隘な部分の工作法を検討する

等の対策が考えられ、今回は暫定的にホールド内を部分的に傾斜させることとした。計画時に船主にこの 3DCAD 鳥瞰図を示し、荷役作業に支障のないことを示して、了解を取り付けることも可能である。

EXCEL 形式で全部材を表示することが可能であり、部材の仕分け、部材毎の数量算出、特殊な部材の抽出などが、即時に可能であり、ペアレントからチャイルドを生成した場合でもペアレントとチャイルドの変更量を直ちに算出することができる。

部材一覧表を集計して得られた重量重心集計表を表 3.に示す。この結果は直ちに DW 計算書、トリム・スタビリティ計算書にフィードバックされ、早い段階での高精度な性能把握が可能となる。またブロック別の重量重心はブロックの製作や、クレーンで吊る時の吊りピース配置の決定にも重要な情報を与えることができる。

ペアレントからチャイルドを生成した場合でもペアレントとチャイルドの変更量を直ちに算出することができる。特に 499 型貨物船のような小型船の場合には船殻重量、重心の差が DW や性能に敏感に影響してくるので非常に重要である。

表 3. ペアレントの重量重心集計表

		重量(t)	重心 (mm-船長方向)	重心 (mm-船側方向)	重心 (mm-船高方向)
船尾構造	AP-1	21.127	FR3+239	3	3634
	PD-1	19.326	FR7+14	8	6473
主機台構造	EB-1	37.653	FR22+122	0	836
機関室構造	ER-1	32.853	FR19+366	10	3314
	PD-2	21.796	FR22+291	119	6250
二重底構造	DB-1	50.832	FR38+53	1	950
	DB-2	51.340	FR52+646	2	944
	DB-3	51.461	FR67+634	1	945
	DB-4	42.282	FR82+278	0	937
艙内構造	SS-1	40.915	FR37+337	-13	4649
	SS-2	41.339	FR55+312	14	4628
	SS-3	41.416	FR73+439	-23	4676
	SS-4	20.594	FR87+395	-6	3586
	FD-1	18.329	FR88+307	1	6580
船首構造	FP-1	15.269	FR96+355	0	829
	FP-2	17.975	FR100+309	3	3249
	FD-2	13.616	FR99+439	0	6538
ビルジキール		2.542	FR50+664	0	360
ハッチコーミング構造	HC-1	1.275	FR26+526	0	7577
	HC-2	1.432	FR84+603	0	7577
居住区	DH-1	21.212	FR11+233	-140	8689
	DH-2	22.491	FR15+155	20	11750
	FN	3.073	FR7+465	149	12589
船首ブルワーク	BC	3.980	FR103+13	-22	8046
合計		594.128	32582	0	3592

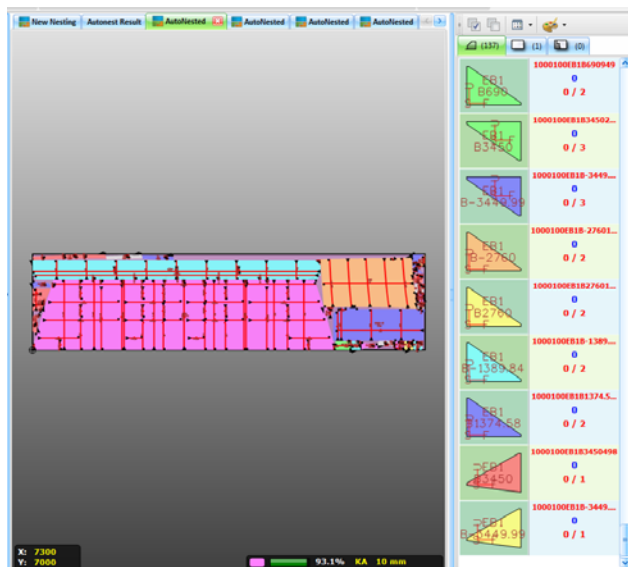


図 52. ペアレントのオートネスティング結果

コンピュータが行ったオートネスティングの結果を図 52.に示す。さらにこの結果からネスティング部材集計表を自動で算出することができる。鋼材歩留まりを上げるためにはベテラン技術者による補正作業が必要であるが、鋼材発注用には十分な精度の情報を提供できる。この場合でもペアレントからチャイルドを生成した場合の変更量を直ちに算出でき、資材の過不足のトラブルを未然に防止できる。

6. 3. ペアレントの艤装モデルの作成

マスト/ポスト、交通装置、消火/救命装置、係留金物、航海装置、ハッチカバー、通風装置等の外艤装装置、係留機械、バウスラスター、舵/舵取機、等の甲板機械、ポンプ、配管/弁/管金物/管受台等の管艤装装置、厨房機器、椅子/ベッド、/机等の居住区設備、主機/過給機、逆転機/減速機、プロペラ/プロペラシャフト、発電機、配電盤/制御盤、焼却炉、ボイラー、圧縮機/空気槽、空調機/通風機、ポンプ/置きタンク、清浄機、冷却器、機関室交通装置など一切を含む艤装モデルを作成した。

船殻図の場合と同様に、ディスプレイを用いて任意の場所、視点、大きさで船内外の各部を隈無く見ることが出来るが、その一部を図 53.に示す。艤装配置図(CADMATIC)には船殻図(NUPAS)のようなトポロジー機能を用いた自動作成機能はまだ完備されていないが、予め登録された装置、部品図に置き換え、移動を 3DCAD システムの干渉チェック機能を用いて効率的に、ミスなく行えるフレックスデザインを可能とした。

仕様の標準化および仕様選定表で定めた標準仕様とそのオプション群を予め図面、データ登録を行うことにより、基本計画で選定した仕様に基づき、だだちに図面が完成し、部品表、重量重心表が作成されることになる。全てのオプション群の図面、データを準備するには造船所および機器メーカーの協力と、膨大な作業を必要とするので、当面必要な標準仕様の範囲に留め、フレックス標準船の実際のビジネス展開に応じて逐次整備していくこととした。

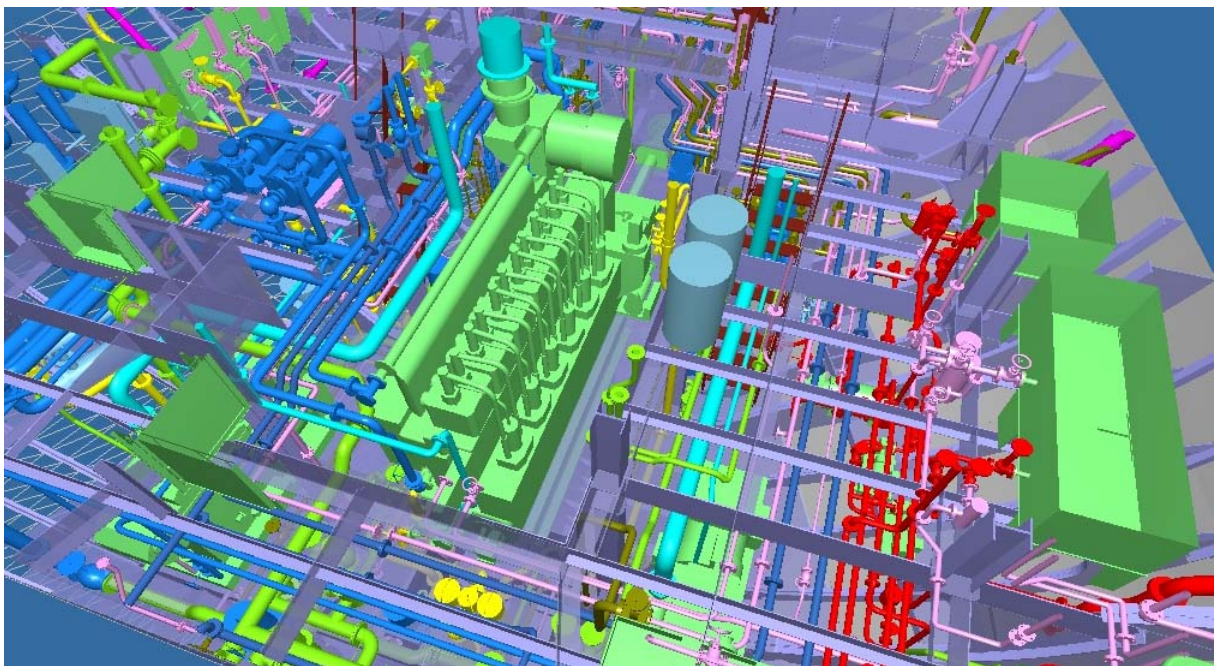


図 53.機関室配置図

6. 4. 船尾タイプ変更のチャイルドの船殻モデルの生成

線図の入れ替えや、参照面で定義した区画を変更することで、ペアレントからチャイルドが自動生成されるが、船型形状や構造様式が大きく変更になる場合には、自動生成後にマニュアル修正を行うよりも、変更予定の標準モデルを予め作成し、ライブラリ登録を行っておき、それに入れ替えることにより、より簡便にチャイルドを生成することができる。

その例として図 54. と図 55. に示すチャイルド A の船尾タイプを逆 G 型からマリナー型へ入れ替える試行を 10 時間程度で作業完了させることができた。通常モデリング手法に対

し、工期を半減出来た。この手法は船首部のバルブ形状の変更等にも応用することができる。挿入された構造物は、トポロジー機能により自動的に、新しい外板(新しい船尾船型)や隣接する既存の構造と正しく取り合って挿入される。

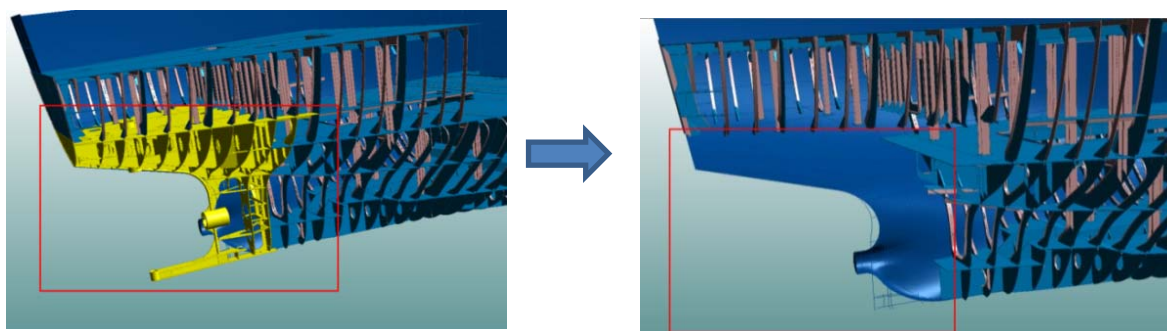


図 54.逆 G 船尾構造の撤去

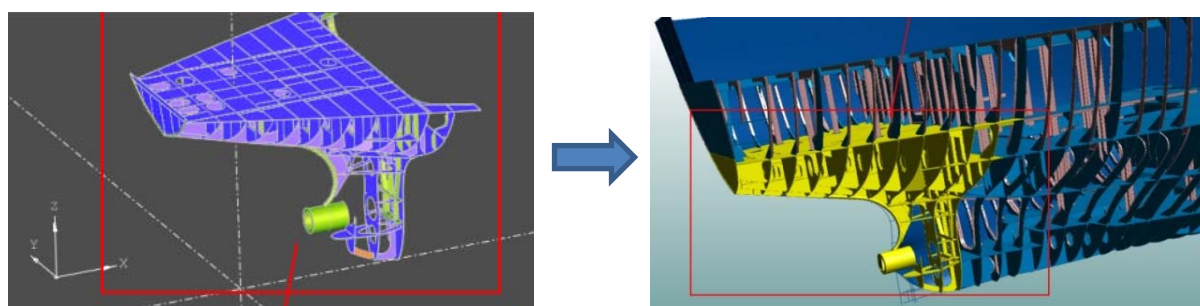


図 55.マリナー船尾構造を Library で選択し、3D モデルに挿入

6. 5. 船型・配置変更のチャイルドの船殻モデルの生成

ペアレントから、線図及び主寸法(L、B、D、d)を少し変更したチャイルド D を生成して図面類を完成させる作業を実施し、類似船の2次元図面を修正して新船の図面を作成する従来手法に要する時間との比較を試みた。

船型を入れ替えて船殻構造の再計算を行うと、船体中央部は自動的に新しい船型に内殻構造材が追従するが、船首や船尾の端部では変更の具合によっては、部材タイプを変更すべき箇所や、参照先との位置関係に拠っては、エラーが起きて構造が壊れることがある。この場合にはオペレーターが手作業で不具合箇所を修正する作業が発生する。

トポロジー機能による自動追従機能は、全ての変更に対して適正な追従が出来ない場合も有るが、全体から細部までを目視確認し易い3次元モデルであること、不具合の種類によってはディスプレイ上でアラームやエラー表示が出てオペレーターに注意喚起することで、自動追従機能を超えた作業指示によるトラブルや、ヒューマンエラーによるミスを最小化することが出来る。

図 56.から図 58.を作成する船型の入替えは、再計算を夜間、オペレーター不在でも実行することができ、今回も作業の所要時間は 10 時間程度であった。

図 57.に示されているように、参照が外れている箇所や、異様に小さい、または大きい部材が発生している箇所も有る。この部分はオペレーターによるマニュアル作業が必要となるが、

修正に要する時間は、このケースでは船全体で 30 時間程度であった。図 58.に示すような修正した図が合計 40 時間程度で、チャイルドの船殻モデルとして完成した。

表 3 に示したペアレントの部材一覧表と重量重心集計表などと同様なチャイルドの表を 3H 程度の短時間で出力することが可能である。また同様に、図 52.に示すチャイルドのネステイング検討も 20 時間程度で可能であった。

以上の検討結果から、当初の目標である 1 ヶ月でペアレントからチャイルドの生成は図 59.に示す約 1 ヶ月工程で達成可能であると判断した。

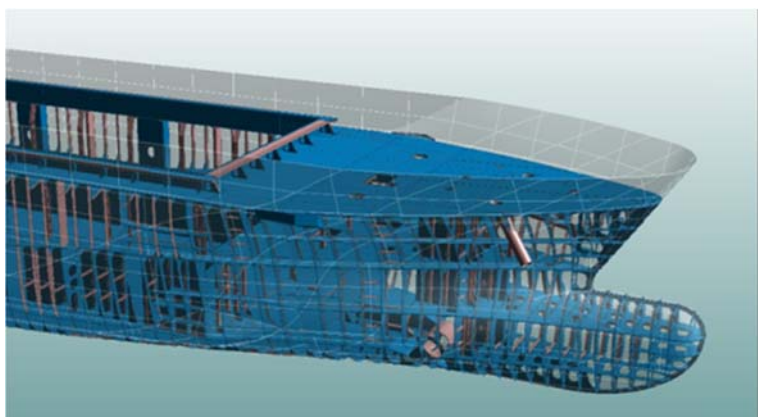


図 56.ペアレント：
船型入れ替え前

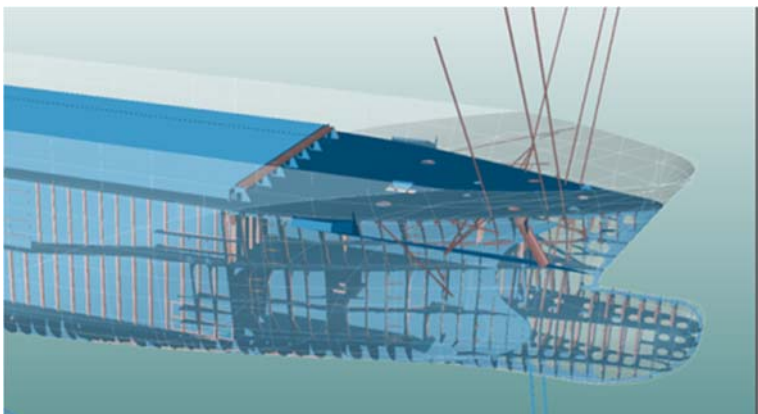


図 57.チャイルド D：
線図の入れ替え再計算直後

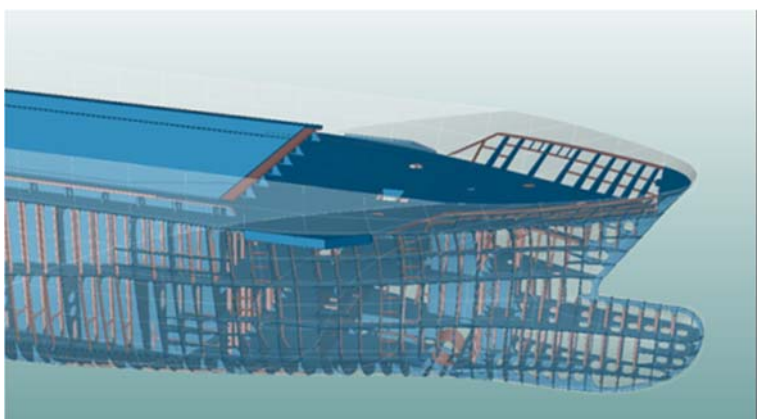


図 58.チャイルド D：
不具合箇所の修正後

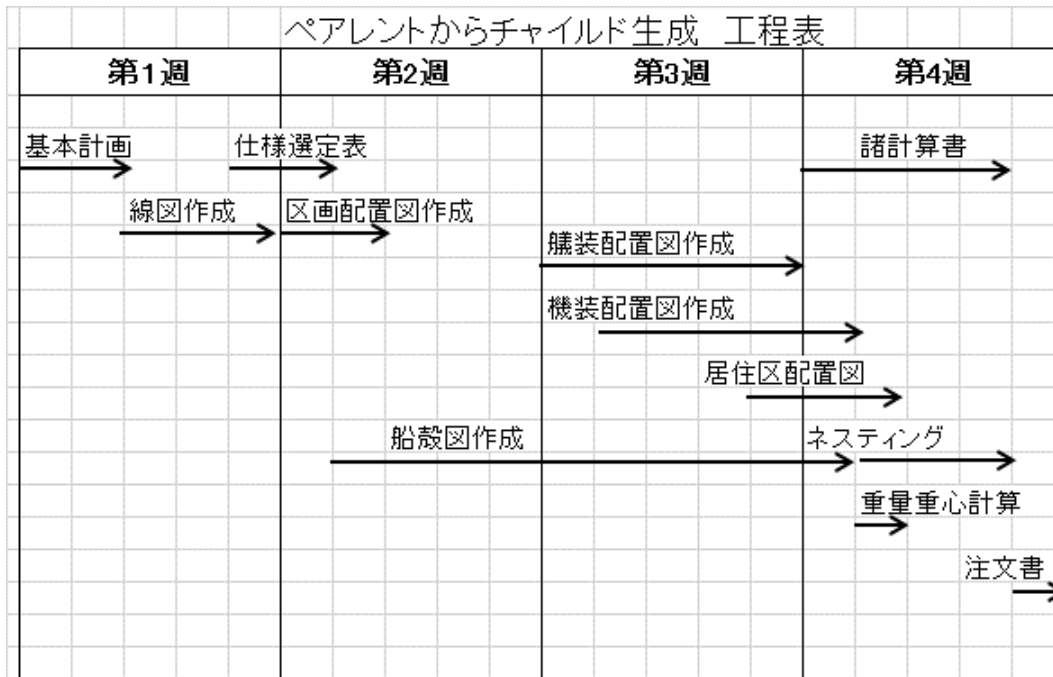


図 59. ペアレントからチャイルド生成 工程表

6. 6. 船型・配置変更のチャイルドの艙装モデルの生成

新しい船殻構造に置き換えた時に、艙装モデルの中で、3DCAD の干渉チェック機能を使って、新しい船殻構造に干渉しているパイプや機器などの艙装品のリストを自動検索して一覧表が作成される。オペレーターは干渉箇所を一つずつ 3D モデルの中で目視確認しながらパイプの変形や機器の移動等の必要な修正を行うことで、漏れなく確実に干渉箇所を補正することが出来る。

今回のチャイルド D 生成では、船の幅と深さを少し小さくし、Cb を少し大きくし、Lcb を後方へ持って行った効果により、機関室前壁の位置を F24 から F23 へ、1Fr. 後方へ移動して、機関室長さの短縮を図った。

艙装をアップデートする前の状態を図 60. に示ように、機関室前壁付近では船殻の隔壁だけが 1Fr. 後方へ移動して、周辺のパイプや機器に干渉していることが簡単に目視確認できる。さらに人間が目視するだけでは漏れが発生する可能性が有るため、3DCAD の干渉チェック機能を使って機械的に全ての干渉部をリストアップし、確実に漏れなく補正することができる。

干渉したものが赤色(上図ではパイプ)と黄色(上図では隔壁)で表示され、その他の周囲の物体は半分透き通った暗い色で表示されるので、3D ビューを回転、拡大することで、干渉箇所を色々な角度から確実に把握することが出来る。干渉チェック機能は接触、貫通する場合だけでなく、予め設定した間隔以下に接近した場合にも可能である。

リストに表示される干渉箇所が無くなるまで消込作業を行なうことで、確実に、漏れなく干渉箇所を補正できたことが確認された。

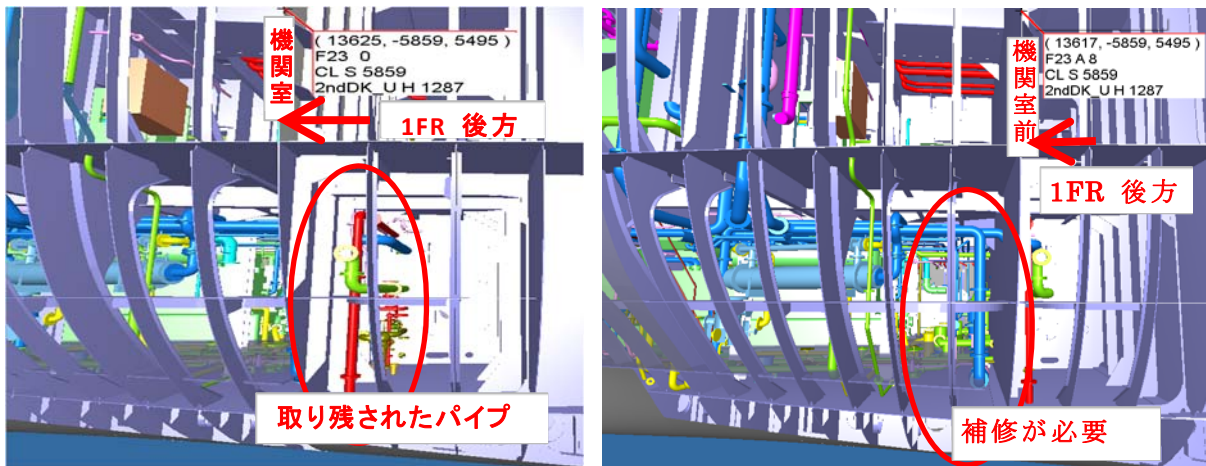


図 60.機関室前壁移動後の前方の状況(左図)と後方の状況(右図)

6. 7. 基本計画へのフィードバックと生産計画へのフロントローディング

基本計画へのフィードバックは、フレックス標準船では基本計画の段階で単に主要目だけでなく、艀装品も含めた細部まで標準化をすすめ、より完成度の高い基本計画を行えるようにすることにある。これにより性能、機能、コストをより精度、信頼性の高い定量把握をすることができ、船主ニーズに沿った最適化を進めることができる。

3DCAD は従来の基本計画、基本設計、詳細設計、生産設計という階層的な設計システムを変革し、上流設計から下流設計まで一気通貫で設計を行うようになる革新的な設計システムであり、下流から上流への高精度な、短期間でのフィードバックサイクルは極めて重要である。

船殻構造、艀装品の重量、重心はより精度の高い DW の推定を行うことができ、建造後の DW 不足のトラブルを未然に防止することができる。重心位置の正確な把握は従来、基本計画段階では難しかった。運航時のトリム・スタビリティの予測精度が格段に向上し、トリムの最適化のため、タンク配置の変更等事前に十分な対策を行うことができる。499 型貨物船の推進性能は船の喫水やトリムにより大きな影響を受ける。計画時に 3DCAD からのフィードバックにより、重量重心を正確に把握できることは 499 型貨物船の省エネ化の推進にも大いに寄与することになる。

艀装品も船主要求により変更される場合が多いが、重量重心への影響を考慮されないままに決定される場合が多い。艀装品の変更範囲は広範囲であり、また時間とともに改良品、新製品等が次から次に出されていく。この結果を 3D データベースとして保管し、フィードバックしていくことが可能である。たとえば主機が代われば主機台構造が変わり、関連する機器の配置、配管配線が変わり、その変更は多岐に及ぶことになる。基本計画の段階でこれを定量的に、具体的に把握しておくことは重要である。

チャイルドの 3D モデルが出来れば、船殻重量、溶接長、塗装面積など種々の正確な物量を短時間で算出することが可能であり、基本計画へフィードバックするだけでなく生産計画へ供給し、生産管理や建造方法のフロントローディング(事前検討)を効果的に行うことが出来る。

ホールド前端底部と外板との間のスペース等の狭隘な場所での溶接作業ができるか、現場と相談しても従来であれば「やってみないと判らない！」といった返事しか帰ってこなかった

が、3DCAD を確認しながらであれば的確な回答が期待できるようになる。現場から出来ないと言われると困るから予め十分な余裕を持った設計にせざるを得なかったのが、ギリギリまで詰めることにより、省エネ性能の向上にも波及していく。

6. 8. フレックス標準船の評価と課題

船型と区画配置の変更に自動追従する船殻構造モデル、及び機械的な干渉チェックで漏れなく艀装品の配置調整を行える艀装モデル、及びそれら変更された船殻モデルや艀装モデルに自動追従する各種図面をセットにしたフレックス標準船は、短納期と高精度という相反する命題への解決法に成り得るものと思われる。

時間と費用をかければ良い船を設計することは可能である。現に大型外航船では多くの工数をかけて標準船開発を行ってきた。一方、内航造船所では極めて短納期で、数少ない設計技術者、大きい設計外注への依存の中で設計を行う必要があり、最適化設計、現場との十分な事前検討されることなしに進まざるを得ないことが多いのが現状である。今回のフレックス標準船はペアレントからチャイルドの生成を短期間で完了させることができるので、従来不十分であった事前検討を十分に行うことができるようになる。今回の研究の中でこれが一ヶ月で可能であることを示すことができたのは大きな成果である。

船主の多様なニーズに応えるためには画一的な標準船では対応できず、フレキシブルな対応が必要であり、フレックス標準船のコンセプトが発生した。このシステムを有効活用するためには船主ニーズを的確に把握することが重要である。この船主が最も必要とするのは DW か、ホールド容積、燃費、船価、維持管理費、居住性、作業性、船速、操縦性、耐航性なのか、・・・等々様々な要望の中で、どれを最優先とし、どれを次優先にするのかを適切に仕分ける必要がある。フレックス標準船はその仕分けに必要な定量的な情報を提供することができる。船主にとっても非常に有用なシステムである。

フレックス標準船の船型や構造の変更に伴うチャイルドの生成は 1 ヶ月で十分に対応可能であることを示すことができた。一方艀装の仕様変更に伴う配置、配管の変更は、多種多様な艀装品の標準化にかかっており、今回の研究では標準化の範囲を限定せざるを得なかった。今後さらに艀装品の情報、船主の要望、評価選択を行って一層の標準化をすすめる、これらをライブラリとして登録しておくことが必要である。

今回の研究を通じて造船所やオペ/船主から熟練設計技術者の枯渇を心配する声と、フレックス標準船がこの課題の解決になるのではとの期待の声が聞かれた。数が少なくなった造船技術者だけに設計を頼るのではなく、3DCAD オペレーターと協業して設計を行う仕組みであることによる。3DCAD の技術的進化によりこれが可能になったとも言えるが、まだフルオートマチックとは言えず、3DCAD オペレーターのマニュアル操作も必要とするセミオートマチックの段階である。今後も 3DCAD はさらに便利なツールに発展していくが、オペレーター作業のマニュアル化と教育は是非とも必要である。

今後、フレックス標準船の実船への適用を繰り返してチャイルドで生成される膨大なヤード図や工作図を、ペアレントにフィードバックして、あらかじめ登録していく努力を続けるべきである。

7. 総合評価

7.1. フレックス標準船の総合評価

従来、造船所では新船開発の時には、過去に自社で建造した船舶の中から新船に出来るだけ近い船型でかつ性能の良い船型を選出し、これを母船型、TYPE-SHIPとして、新船開発を行ってきた。今回のフレックス標準船のコンセプトは従来の手法を踏襲したものであり、これをより系統的に行い、支援ツールとして3DCADのフレックスデザインを活用し、性能評価する手段として499型貨物船に特化したシリーズ水槽試験を行い、この結果から499型貨物船の高精度の性能推定が出来るようにしたものである。

さらに船型以外の主機の選定を含む仕様の標準化もフレックス標準船の重要な要素であり、3DCAD設計の一連の作業の中で、仕様選定表を作成し、この中から選ぶようにした。

これらを組み合わせて設計するシステムがフレックス標準船である。今回燃費性能の良いエクセレントペアレントを新設計し、これから性能の良いエクセレントチャイルドを生成するプロセスを実証し、十分に有効であることを確認することができた。

設計作業の多くの部分が、コンピュータプログラムによる自動計算作業であり、マニュアル作業部分も、コンピュータの指示による修正作業、定められた手順書に従ったマニュアル作業であり、かなりの部分を造船技術の専門知識のない作業員でも対応できる。最近の中小型造船業の最大の懸念事項は設計技術者の定年退職に伴う熟練設計技術者の不足である。フレックス標準船の実用化、普及はこの問題の解決となるものである。

内航造船業は大型外航船の造船業と比べ、きわめて短納期である。契約から起工までわずか1ヶ月という例も通常である。鋼材の納期だけでも2ヶ月かかるので、設計完了を待って資材発注を行えず、やむなく予量発注し、大量の棚卸資産を持つことになる。結果として不要部材が増加し、歩留まりが悪化する、番船ごとのコスト管理が曖昧となり、コストの把握やコストダウンの活動が不活性になる。フレックス標準船による設計時間の短縮は単に設計工数の低減の効果だけでなく、資材発注や加工開始までに時間的余裕をもつことが出来、フロントローディングと呼ばれる事前検討を十分行うことが出来るようになることにある。これにより誤作を防止し、作業性、作業手順の改善を図ることができる。

内航船の年間建造量は年間100隻程度であり、内航造船業は年間20隻近くを連続建造している内航大手造船所から、年間1~2隻を建造している手作り小造船所まで多様である。フレックス標準船は内航造船業の合理化を推進し、現状でも年間建造隻数からすると多すぎる造船所の淘汰、集約につながるものと思われる。499型貨物船に限ると、船齢の高い船が多く、代替建造による建造隻数が一時的に増加する可能性があり、このような需要の急激に変化にも効果的な対応が可能である。また性能の良いエクセレントペアレントを持つことがキーポイントであり、このための開発は継続していかなければならない。1社だけでこれを行うのはリスクが大きいのと思われる。いくつかの内航造船所がグループを作り開発進めることも必要となる。グループ間の性能、経済性競争が加速される。

マーケット調査の一環で内航貨物船の主要なオペ/船主に服のイージーオーダーをたどるにしてフレックス標準船のコンセプトを説明した範囲では、良く理解し、高い評価が得られたと思う。オペ/船主は異口同音に従来も造船所から省エネ船、標準船の提案はあったが、具体的な技術説明がなく、燃費や船価の定量的な説明がなく、これではオペ/船主も採否の判断が出来ないとの意見があった。フレックス標準では造船所はペアレントからの変更が明確

であり、その効果を定量的に把握できるので、オペ/船主に対するより解りやすい説明ができるようになる。

まだ一部の船主には標準船に対して抵抗感があるようであるが、フレックス標準船のコンセプトの説明とチャイルドの具体的な提示により、徐々に浸透していくものと期待される。

7. 2. 3DCAD の活用の効果

今回は「3DCADフレックスデザインによる省エネ型フレックス標準船」の開発であり、フレックス標準船の有効性について主に論じてきたが、そのベースにあるのが 3DCAD であり、その活用によりフレックス標準船が成立しているとも言える。また逆にフレックス標準船の普及に伴い、3DCAD の活用が進展することにもなる。3DCAD の活用による効果は単にフレックス標準船だけでなく、もっと幅広くその有効性を期待することができる。

1) 3DCAD の活用による設計技術の高度化

3DCAD 自体の効能はすでに広く使用され、良く理解されている。3DCAD は設計検討、生産方法の検討にはじまり、生産管理システムとして資材管理、工程管理に幅広く活用できる可能性を秘めている。さらに CAE、エンジニアリングソフトに連動させて、構造解析、騒音解析、通風計算等従来手間のかかる解析作業も簡単にできるようになる可能性をもっていることも、十分認識されている。

今までと同じような船を、今までのやり方で造り続けるならば、必要ないかもしれないが、中小型、内航造船業は大きな曲がり角にさしかかりつつある。環境保全のため、CO₂の排出低減、NO_xの3次規制、居住区の騒音低減等、今まで内航船には課せられなかった規制がかけられようとしている。むしろこのような規制を先取りした性能の良い船、そして経済性の高い船を積極的に建造していくことで、これからの技術・コスト競争に勝ち残れるものと思われる。

2) 生産性向上への寄与

3DCAD の生産性向上への有効性については、十分良く認知されている。一般的には設計工数は従来の2次元設計に比べて大幅に工数UPなるが、製造現場におけるコトダウンの効果は大きく、トータルでコストダウンになると評価されている。

中小型、内航造船所では、会社により状況は大きく異なるが、生産技術に関する課題の中で、工程管理がまだ不十分の造船所が多い。船主、船級協会向けの承認用の大日程表は作られていても、造船所自身で日程を最適化して、生産効率を上げていくための管理指標としての中日程表、小日程表は作られていない。また作られていても、その予実管理が十分されていないケースが多い。

3DCAD は工程表作成に欠かせない重量や溶接長等の管理物量を、設計段階で、精度良く、ブロック単位、ステージ単位等で、しかも計画変更に即時対応して、算出することができる。工程管理は 3DCAD の生産技術への有効活用例としては分かりやすく効果の大きい活用例である。この点に的を絞った共同研究「3DCAD の活用による最適化生産工程表の作成」を推進することも重要と考える。

3) 設計技術者と3DCADオペレーターの専門分業化の効果

造船設計技術者の深刻な不足が懸念されている。従来設計技術を支えてきた熟練設計技術者が高齢化、定年退職期を迎え、社内でも指導教育、切磋琢磨する同じ技術を担う同僚がいなくなり、技術者を育てる場がなくなったことによる。

一方3DCADを造船所における主設計システムとして定着させるためには、造船設計だけでなく、3DCADを操作できる設計技術者が必要となる。設計技術者を多数かかえる大手造船所は別として、中小型、内航造船所では外部設計会社への依存度が高く、社内の設計技術者の絶対数が少ないのが現状である。現状の設計技術の維持、設計技術者の確保が急務である造船所にとって、3DCADという新たなシステムの導入は大きな負担でもある。

設計技術者不足の問題を解決し、さらに3DCAD本来の機能を有効に活用する方策は設計技術者と3DCADオペレーターの専門分業化である。設計技術者が3DCADを操作して行うこともあるが、むしろ設計オペレーターに指示して、3DCADの図面作成を行うのが有効である。設計技術者は造船会社に所属し、3DCADオペレーターの多くは造船会社から独立した設計エンジニアリング会社に所属し、複数の造船会社の仕事を並行して行うことにより工数の山谷を平準化し、生産効率の改善をはかることができる。さらにエンジニアリングクラウド環境により造船所間をインターネットで結んで、遠隔地であっても効率的に作業をすすめることができる。

数少ない造船設計者を設計技術者と3DCADオペレーターに分化し、3DCADオペレーターは設計アライアンスに参加の造船各社で共有化、共同活用していくことが、これからの造船業において不可避であり、生産性の向上にも繋がる。

4) 標準化、マニュアル化の推進の効果

造船会社、設計エンジニアリング会社間で意思をスムーズに運ぶ為には、用語、単位、座標の取り方等の表記方法についても統一の必要がある。従来造船で使用してきた用語、表記方法は用語集を作成し、造船会社により異なる場合には調整し統一する。3DCAD特有の用語については設計エンジニアリング会社にて取捨選択して、定義をはっきりさせ、造船会社との間で確認をはかり、造船所の指示が明確に伝わるようにすることが必要である。

5) チェックシステムの構築の重要性

3DCADは上流(基本設計)から下流(詳細設計、生産設計)まで一貫通のシステムでつながっている。従来の設計法では、各設計ステージでベテランの設計者がこれをチェックしているので、上流のミスが下流で発見され、修正される場合が多い。3DCADでは上流のミスがそのまま下流まで流れ、気が付いたときはすでに間違っただまま完工していたという事例も起こりうる。未然防止のため3DCADに見合った2重3重のチェックシステムが必要である。

8. 結言

国内物流を支える内航船を省エネ対策や建造コスト面を含めた総合力で、より一層競争力ある形にしていく為、日本の造船業界には新たな設計手法の実現が求められている。今回、従来設計手法に革新をもたらすであろう一つの取組を、内航船の代表的な船種である499GT型貨物船を一つの事例として実施した。この取組内容を纏めると次の2項になる。

1) 省エネルギー型フレックス標準船の設計手法の実現：従来型のピンポイント標準船開発ではなく、16%省エネルギーを実現可能な基本要目ゾーンの設定とこのゾーンの周辺を含む基本要目範囲の基本設計最適化検討が容易に素早く行える計算ツールの実現

2) 3D CAD フレックスデザイン機能による短期間・高品質設計手法の実現：

省エネルギー型フレックス標準船の基本設計検討が可能な基本要目範囲であれば、3D CAD フレックスデザイン機能を組み込んだ親3Dモデル(ペアレントモデル)から類似要目の様々な子3Dモデル(チャイルドモデル)と関連図面を半自動的に作成出来るスタイルの実現。子モデルと関連図面の作成に要する時間が従来手法に比べて半分程度になる事の検証。

6ヶ月足らずの短期間の取組みであったが、革新的ともいえる今回の取組み、新しい設計手法の開発と検証は、十分な成果を挙げたものと思われる。この設計手法を用いれば、個々の商談で出てくる船主要望に、それぞれの造船所が持つ標準的な実績船をベースに、短時間で高品質・低コストの最適設計を提示できる形が実現するものと思われる。

今後我々がやるべき事は、今回開発の499GT型貨物船の省エネルギー型フレックス標準船の実建造船への適用である。更に、この設計手法を用いて、様々なサイズ、船種の「フレックス標準船」の親モデルづくり、子モデルづくりへと進んでいく事である。この新しい設計手法が、省エネ対応、振動・騒音対応、低コスト化など様々な厳しさを増す内航船建造分野の突破口の一つになるものと期待している。更に、日本の造船業界が現在抱える大きな課題、有能なベテラン設計者が今後急激に減少していく課題にも、この取組が一つの解を与えるものである事を期待している。

最後に、本研究の機会を与えて頂いた経済産業省資源エネルギー庁殿ならびに国土交通省海事局殿に、そして本研究の取組みに対する確かなコメントや評価を頂きました評価委員会の皆様方に厚くお礼を申し上げます。又、本研究のためのマーケット調査にご協力いただき、貴重なご意見をお聞かせいただいた内航海運のオペレーター、船主の皆様には感謝いたします。

フレックス標準船研究会 代表 松尾 晃