コンテナ船, Ro/Ro 船の 輸送性能分析*

西川 栄一**・橋本 淳**

Analysis of Transportation Energy Efficiency
of Container Ships and Roll on-Roll off Ships

By Eiichi Nishikawa, Jun Hashimoto

Container- and Ro/Ro-vessels are featured especially by the reduction of terminal time as a result of containerized cargo handling of lift-on/lift-off and roll-on/roll-off method, respectively. This paper analyzes the transportation energy efficiency of both vessels built in Japan so far, with paying attention to the feature mentioned above. Firstly the hull resistance characteristics are analyzed. In the same as car ferry, both vessels have the property being able to separate the hull function into buoyant support and cargo vessel. This property permits the hull form to have less resistance than general cargo ships. The performance level of hull resistance is same for all container- and Ro/Ro-vessels except the large, high speed container vessels with the speed above 26 knots and the displacement above 50,000 tons, of which hull form are different because of the Panamax limit, and result in inferior level by about 30%. It is pointed out, therefore, that the enlargement of hull size over the Panamax limit is excessive as for the container ship. Secondly the cargo performance, which is indicated by the payload-to-displacement ratio, is analyzed. The payload of container- and Ro/Ro-vessels can be regarded as the carrying number of containers. The above ratio of container vessel is mainly determined by two factors of deadweight-to-displacement ratio and container number on deck loading. The deadweight-to-displacement ratio raises undesirably with speed. While it cannot be improved by the increase of displacement. Therefore the high speed container ship above 26 knots cannot have necessarily good cargo performance in spite of the design for increase of container number on deck loading. The cargo performance of the Ro/Ro ship is worse by two times than the container ship due to the roll-on/roll-off cargo handling method. This demerit sets off inevitably the merit that the Ro/Ro ship can handle cargoes without the special equipment ashore.

1. 緒 言

筆者らは現在就航している諸船舶の輸送性能の分析を行なっているが^{1,2)}、本報ではコンテナ船, Ro/Ro 船について調べる。船舶も含めて交通機関の性能は主に二つの要因, すなわち, 輸送性能(単位輸送量当りのエネルギー消費量)と輸送速度で決定される。後者は船舶の場合航海速度と合せて荷役速度の影響が大きい。周知のようにコンテナ船, Ro/Ro 船は貨物をコンテナ化し, リフト(Li/Li)方式, 自走(Ro/Ro)方式で荷役することによって, とくに荷役速度の向上をねらったものであり, これが一般貨物船と比べて両船が有する第1の特徴である。第2の特徴としてつぎの点が指摘される^{3,4)}。コンテ

ナ化と関係して貨物容積が大きく, すなわち, 貨物比重が小さくなる。これは不利であるが, しかし, このことにより喫水線より上部の載貨比率が大きくなり, ために一般貨物船では未分化であった船体の役割を, 浮体支持機能と載貨機能に分化させることになった, という点である。

本報の目的の一つは両船がもつかかる特徴点, もう一方の要因である輸送性能にどのように反映されているか, を分析することにある。コンテナ船についてはすでに中村が貨物船との比較ですぐれた分析³⁾を行なっているが, ここではもう少し輸送性能の構成要素に立ち入って, また Ro/Ro 船も視野に入れて検討する。なお, Ro/Ro 船についていえば, リフト方式のコンテナ船に対して自走方式を採用することによって, 港湾設備が簡単になるという利点がよく指摘される⁵⁾。しかし, 反面そ

* 原稿受付 昭和56年4月15日

** 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

のことによってコンテナ化で悪くなった載貨性能が、より一層悪化するということが考えられる。コンテナ船とRo/Ro船の比較に際してはこの点にも注目していきたい。

2. 主要目の現状

2.1 全 般 調査対象船は、コンテナ船は国内船会社の保有船で、必要な要目は船舶明細書、就航時公表された諸雑誌の記事などによった。Ro/Ro船は日本籍の船は極めて少ないので、日本で建造されたもの全船を対象とし、必要な要目は各造船所から提供してもらった。

図1は航海速度の実情をみたものである。図によるとコンテナ船は速度によってグループに分けられることがわかる。そこで、速度の低いものからA, B, Cのグループに大別することにする。主要目でみると表1のようである。ただし、図1で⊗印をつけた25ノット級の3隻は速度ではCグループだが軸数は1であり、以下本論の検討内容がしめすようにBグループの特徴と一致するのでBグループに入れることにする。なお、この3隻はタービン船である。一方、Ro/Ro船はこのようなグループ別れは明りょうでない。2万G/T以下では全体としてRo/Ro船の方がコンテナ船よりも速度は大きいことがうかがえる。図2は調査対象船の年次別就航隻数をみたものである。コンテナ船は1972~74ころまで次第に増大し、以後漸減しつつある。とくに高速大形の船の減少

図1 コンテナ船、Ro/Ro船の航海速度VとG/Tとの関係

表1 速度レベルにもとづくコンテナ船の分類

項目 分類	速 度 (ノット)	排水量 (10 ⁴ トン)	主機常用出力 (10 ⁴ 馬力)	プロペラ軸数	コンテナ積載数 (TEU換算)
グループA	18以下	2以下	1.2以下	1	700以上
グループB	20~23	2~5	3~5	1	700~1500
グループC	25~26	5以上	5以上	2, 3	1800以上

図2(a) コンテナ船年次別就航隻数

図2(b) Ro/Ro船の年次別建造隻数

は急で、最近就航するものはAグループの船が多く、以前と比べればコンテナ船は低速、小形化の傾向にあるようである。Ro/Ro船は逆にコンテナ船と入れ代るように1975年以後急増しつつある。コンテナ船、Ro/Ro船はそれぞれの荷役方式を反映して、前者は設備の整った近代港湾で、後者はそのような設備がない中東方面で比較的多く使用されている。1973年末にオイルショックが始まったことを考慮すれば、図2はそれ以後の経済、海運情勢を反映しているとみられるかもしれない。

さきにRo/Ro船をコンテナの荷役を自走方式で行なう船と定義したが、実際に建造された船をみるとこの定義のように単純でなく、部分的に、あるいはほとんどすべてをリフ

ト方式を採用した, 事実上コンテナ船と変わらないものがあったり, あるいは貨客船があったり, また場合によっては, リフト方式, 自走方式どちらも可能であったり, 実に様々である. それで図2では大よそではあるがリフト方式, 自走方式混用のもの, はほぼ全部を自走方式(これが厳密な意味での Ro/Ro 船)のものなどで分類してしめしてある.

2.2 船体形状の特徴 図3は垂線間長 L , 形幅 B , 形深さ D , 喫水深さ d と排水量 W_T との関係をみたものである. 図3(a)のコンテナ船では, B , D はコンテナの積列数, 段数によって不連続に変化するが, しか

図3(a) コンテナ船船体主要目と排水量との関係

図3(b) Ro/Ro 船船体主要目と排水量との関係

し, 全体としては L , d も含めて W_T の増大とともに一定の関係で増大している. ただし, W_T 45,000 トンあたりでPanamax に達し, B は32 m, d は12 mで増大は止まり, これが影響しているのであろう, L の増大傾向が少し大きくなる. Cグループのうち W_T 6万トンを越えると D が急増し注目されるが, これはPanamax のためコンテナ積載数を L でかせぐことになるが, それに応じて必要となる船体縦断面係数を保持するためと思われる³⁾. このようにCグループ W_T 5万トン以上のコンテナ船は主としてPanamax の影響で, 他のコンテナ船と比べて船体形状がかなり相異してくるのがわかる. したがって, Bグループの最大の船が一般コンテナ船と相似な船体形状を維持できる限界といえ, 先述の25ノット級の1軸タービン船3隻がこれに相当する. Ro/Ro 船の L , B , d の変化は図3(b)のとおりで, 全体としてコンテナ船とほとんど同様の寸法関係にある. Ro/Ro 船では W_T 5万トンを越えるものはほとんどないので, コンテナ船のような特異な変化はみられない.

図4はコンテナ船の方形係数 C_b の値をみたものである. 同図(a)をみるとAグループの0.7前後からBグループになると0.6程度に減少する. これは同図(b)からみて高速化の反映といえる. この関係からすればCグループの C_b はもっと小さくなっていいはずだが, 注目すべきことに, 実際には小さくならず, 逆に W_T とともに増大している. この傾向は船体抵抗の面からみれば好ましくないが, うえにみたPanamax の影響で d を止めたまま D を大きくする必要性などのために, 避け得ないものと推定される. Cグループはこのように C_b でも特異な傾向をもっていることがわかる. Ro/Ro 船の C_b は図5

(a) C_b と排水量との関係

(b) C_b と速度との関係

図4 コンテナ船の方形係数 C_b の現状

図5 Ro/Ro 船の方形係数 C_b の現状

のようで、コンテナ船と比べてばらつきが大きい、全体として大きな変化はなく、速度の増大とともに減少していている。排水量の小さい船でも C_b は比較的小さい船が多いが、これは図1でみたように速度が比較的大きいためであろう。

以上、船体形状の特徴を概観したが、前章で述べた第2の特徴が反映してコンテナ船、Ro/Ro 船ともほぼ同様の形状である。ただしコンテナ船CグループはPanamaxの影響で、他のグループやRo/Ro 船とかなり違った特徴をしめすことが明らかになった。

3. 船体抵抗性能

既報^{1,2)}で行なってきたように輸送性能 $HP(SFC)/n \cdot V$ を船体抵抗性能 R/W_T 、推進性能 $1/\eta$ 、載貨性能 W_T/n の3要因に分けて検討する。載貨性能はここではコンテナ個数が問題になるので、うえのように定義する。記号はそれぞれ HP 主機常用出力、 n はTEU換算コンテナ積載個数、 V 航海速度、 R 船体抵抗、 η 推進効率、 SFC 主機燃料消費率である。ただし、 SFC は主機性能なのでここでは検討しない。

推進性能は事実上プロペラ効率 η_p で決定される。プロペラ直径 D_p 、回転数などプロペラ要目から η_p の実情を推定すると図6のようである。Ro/Ro 船で W_T 1万トン級以下では0.6程度でやや小さいが、2万トンを越えるとRo/Ro 船、コンテナ船ともほぼ同じで0.7前後である。 η_p には D の影響が大きい。 D と満載喫水深さ d との関係は図7のようになっており、 $d/D \approx 1.5$ とな

図6 コンテナ船、Ro/Ro 船のプロペラ効率 η_p の現状 図7 プロペラ直径 D と満載喫水深さ d との関係

る D が使用されている。プロペラの水面影響をさけるにはプロペラ深度 $0.7D$ 以上が必要といえるから、ほぼ限界に近い D が使われているとみられる。コンテナ船Cグループは2軸のためであろう、 d からみると D は小さくなっている。

みたように推進性能は各船で大差ないので、船体抵抗性能は推進性能を含めた $HP/(W_T \cdot V)$ でみていくことにする。 $HP/W_T V$ と W_T との関係をみると図8のよう、コンテナ船は各グループで明りように別れるが、これには速度の影響が大きいと思われる。Bグループのうち少しうえにずれている3点は25ノット級1軸タービン船である。Ro/Ro 船はグループ別れはみられないが、ばらつきは大きい。このばらつきも速度の影響が大きいと思われる。そこで船体抵抗が速度の3乗で変化するとみて $HP/(W_T \cdot V^3)$ を計算してプロットすると図9のようになり、コンテナ船の各グループもCグループを除いて、また、Ro/Ro 船もすべてきれいに同一線上にのってくる。したがってコンテナ船A、BグループおよびRo/Ro 船の船体抵抗性能はいずれもほぼ同一水準にあるといえる。注目すべきはコンテナ船Cグループで、これ

図8 コンテナ船, Ro/Ro 船の $HP/(W_T \cdot V)$ と排水量との関係

図9 コンテナ船, Ro/Ro 船の $HP/(W_T \cdot V^3)$ と排水量との関係

だけは船体抵抗性能が他の船と比べて約30%悪い。これは、前章でみたようにPanamaxにより特異な船体形状をとっているためと考えられる。この意味でCグループは大形化し過ぎていると指摘できよう。

図8, 9をみると船体抵抗性能に対する大形化の効果は大きく、コンテナ船は W_T の0.7乗で、Ro/Ro船は0.75乗で $HP/W_T V$ は減少していく。しかし、Cグループではこの効果は消えてしまっており、Bグループと同程度の値にしかっていない。図によると1軸タービン船の3隻が最も小さく、これがPanamaxという条件下では最も有利な船形とみることができる。

4. 載貨性能

載貨性能はここではさきにしめた W_T/n が問題であるが、載貨重量トン当り所要排水トン W_T/W についてもとりあげ、 W_T/n と W_T/W との関係もみながら分析をすすめる。

4.1 コンテナ船 図10は W_T/n および W_T/W と W_T との関係をみたものである。図からつぎの特徴がよくとれる。第1点は、 W_T/W は各グループではほぼ一定値をとり、且つ、A, B, Cと W_T が大きくなるグループほど大きくなる、すなわち、載貨重量でみた載貨性能は悪くなっていくことである。 W_T/n の変化は W_T/W と比べて複雑であるが、 W_T による変化はほとんどみられない、また、AよりB, Cが悪いなど、 W_T/W と似た傾向がよくとれる。全体として図10によれば、大形化しても載貨性能は良くなることはない、といえる。つまり前章でみた船体抵抗性能と異なり、載貨性能に関する限り大形化の効果はない、ということである。従来載貨性能にも大形化の効果があるといわれてきており、コンテナ船についても中村は同じ指摘をしているが³⁾、しかし、実際はそうではないようである。第2点は、 W_T/W に比べて W_T/n の変化は複雑で、同じグループでもいくつかの値

図10 コンテナ船の載貨性能

に別れていることである。また、載貨重量 W が大きければそれだけコンテナ積載数 n も大きいはずだが、図によるとB、Cグループでは逆のような対応をしていることである。

このような特徴の要因について調べる。図11は載貨性能を速度との関係で、図12は C_b との関係でみたものである。まず、 W_T/W についてみると速度 V とはきれいに関係し、 V の0.3乗程度で増大していくのがわかる。また、図12によれば C_b が小さくなるほど大きくなっているから、図4でみた C_b と V との関係を考慮すれば、 V による W_T/W 増大の原因の一つは船体形状にあるとみられる。さらにBグループとCグループでは C_b は同程度であるが、図12によると速度の大きいCグループの方

が W_T/W が大きいため速度増それ自体も W_T/W を大きくする原因の一つとみれる。以上のように V を増大させると W_T/W が大きくなり、つまり載貨性能が悪くなる。図10の傾向はこの関係の反映とみれよう。すなわち、大形化しても W_T/W は良くならないので、速度の影響だけが主に働き、ためにA、B、Cの順に W_T/W が大きくなっていると考えられる。

つぎに、 W_T/n についてみると、図11、12によると W_T/W と似た傾向もうかがえるが、先述のように異なった特徴もみられるので、 W_T/n にはさらに他の要因が働いていると推定される。 W_T/n と W_T/W との関係をみると図13のようである。図をみると両者の間には一定の関係があり、 W_T/W が増えれば W_T/n も増え、下式のように表わせようである。

$$W_T/n = k_1 + k_2 (W_T/W) \quad (k_1, k_2 \text{ 定数})$$

より注目されるのは、上式で k_1 がいくつかのグループに別れることである。そして、このグループは図1で分類したA、B、Cとは全然別のわかれ方で、 k_1 の値が小さいほど年代の新しい船になっている。この k_1 の相異は中村の分析³⁾から推定するとデッキ積コンテナ数の相異によると思われる。図13で k_1 大、中、小がデッキ積段数1、2、3段に相当すると思われる。こうみると中村の指摘するように n に対するデッキ積の効果は大変大きいといえ、図10～12で W_T/n が複雑に変化しているのはこの要因のためであったことがわかる。

図11 コンテナ船載貨性能と速度との関係

図12 コンテナ船載貨性能と
方形係数 C_b との関係

図13 コンテナ船載貨性能 W_T/n と
 W_T/W との関係

以上コンテナ船の載貨性能の現状をみたが、コンテナ載貨性能 W_T/n はデッキ積段数と W_T/W の2要因によってほぼ決定されることがわかった。高速大形のCグループに関していえば、高速化によって W_T/W が悪くなるのを、船体抵抗性能をある程度犠牲にして C_b を大きくすることで防ぎ、加えてデッキ積段数を増すことで載貨性能の悪化を防いでいる、とみることができる。しかし、デッキ積に同様の工夫をしたAやBグループの船と比べれば W_T/W が悪い分だけ W_T/n が悪くなるのは避けられない。図13はこの事情を明らかにしめている。結果として W_T/n は図10のようになる。 W_T/W は排水量

で変化しないので速度が遅い分だけそれを小さくできる A グループで、デッキ積の多い船が最もすぐれ、27 (排水トン/TEU) 程度の値になっている。速度 22~23 ノット以上の船では 30 程度が現在の水準とみれる。なおここでも B グループ最大の船、1 軸タービン船はすぐれており、28 程度の値をしめている。

4.2 Ro/Ro 船 Ro/Ro 船では図 14 をみると W_T/W は W_T の増大で少し減少していきおり、大形化の効果があるようにみえる。しかし、図 15 にみるように W_T/W は C_b が小さくなると増大すること、および図 5 でみたように Ro/Ro 船では W_T が大きいほど C_b も大きくなる傾向にあることを考慮すれば、大形化の効果というよりは船体形状の相異によるものとみる方が妥当であろう。したがって、Ro/Ro 船でもやはり載貨性能に対する大形化の効果はないといえる。

図 14 Ro/Ro 船の載貨性能と排水量との関係

図 15 Ro/Ro 船の載貨性能 W_T/W と方形係数 C_b との関係

Ro/Ro 船の W_T/n で注目すべき特徴は図 14 にみられる。すなわち、リフト方式(事実上コンテナ船と変わらない)ではコンテナ船と同じ 30 (排水トン/TEU) 程度の値であるが、自走方式では 55 程度と倍近くに悪くなっていることである。2 段積(1 台の台車にコンテナ 2 段積)にすると相当改善されるがそれでもリフト方式にはおよばない。自走方式とリフト方式混用の場合の W_T/n は両方式の中間にきている。これら載荷方式による W_T/n の相異をみれば、その増大に自走方式が原因していることは明らかである。港湾設備が簡単になるというのが Ro/Ro 船の大きな利点であるが、その代償として、載貨性能悪化という犠牲を払わなければならないのが現状である、とみることができよう。

5. 輸送性能 HP/nV

輸送性能を構成する 3 要因についてみてきた。これらを総合した全体の性能 HP/nV がどのような水準にあるか、簡単にみておこう。図 16 のようである。速度の影響を消した HP/nV^3 でみると図 17 のようになる。コンテナ船, Ro/Ro 船ともいくつかの集団にわかれるが、図 9 でみたように $HP/W_T V^3$ はコンテナ船 C グループを除いて同一水準にあったから、この分布は専ら前章で

図 16 コンテナ船, Ro/Ro 船の輸送性能 HP/nV と排水量との関係

図17 コンテナ船, Ro/Ro 船の HP/nV^3 と排水量との関係

みた W_T/n の分布に起因する。全体性能に対する載貨性能の影響の大きいことがよく理解できる。

コンテナ船Cグループは、Panamax 限界のためこのグループだけが船体抵抗性能が悪かったが、この不利は W_T/n を小さくする色々な工夫によっても補い得ず、図16によればBグループ W_T 2~3万トン級、デッキ積1段の船と同程度の水準になっている。Bグループ最大船形の1軸タービン船は、速度も25ノットとCグループとほとんど変わらないにもかかわらず、最もすぐれた水準をしめしている。Ro/Ro 船は自走方式による W_T/n の悪化分だけ全体性能が悪くなっており、結局リフト方式のコンテナ船に比べて2倍近く悪い値になっている。

6. 結 言

荷役速度の向上をねらった近代船であるコンテナ船、Ro/Ro 船について、現在就航している船を対象にして輸送性能の現状を分析した。明らかになった諸点は以下のようなものである。

①コンテナ船, Ro/Ro 船とも船体形状は一般貨物船と比べて同一の特徴を有しているが、これには積荷が容積形のコンテナであるため、喫水より上部の載貨比率が

高くなり、それだけ喫水下の船体形状を自由にできるという特性が反映されている。

②ただし、25~26ノット級、排水量5万トンを越える大形高速コンテナ船(本文中のCグループ)はPanamax 制限をうけ、他のコンテナ船, Ro/Ro 船と異なった船体形状になっている。

③船体抵抗性能は速度影響を消した $HP/W_T V^3$ で表現すれば、コンテナ船, Ro/Ro 船ともCグループを除くすべてが同一水準にある。船体抵抗性能に対する大形化の効果は大きく、コンテナ船, Ro/Ro 船でそれぞれ排水トンの0.7, 0.75乗で減少する。Cグループは船体形状の特異性が影響し、30%程度他の船より悪い。したがって、Panamax の存在を前提すれば、Cグループはコンテナ船としては大形化し過ぎているといえる。

④全体の輸送性能におよぼす載貨性能 W_T/n の影響は大きい。船体抵抗性能同様載貨性能も大形化の効果があると従来いわれているが、その事実はない。

⑤コンテナ船の W_T/n にはデッキ積の量が大きく影響する。 W_T/n はこの量と載貨重量性能 W_T/W とではほぼ決定されるが、 W_T/W は高速ほど悪くなるので、デッキ積段数が同じ場合 W_T/n は高速ほど悪くなる。

⑥Ro/Ro 船は自走方式荷段のために W_T/n は悪くなり、大形船で比較するとコンテナ船の約30(排水トン/TEU)に対して約55と2倍近い値になっている。

⑦全体の輸送性能 HP/nV は、コンテナ船, Ro/Ro 船とも載貨性能の差に応じて水準の異なるいくつかのグループに別れる。大形コンテナ船で最もすぐれているのは、Panamax 条件下でコンテナ船の一般的船体形状を維持できる最大の大きさの船で、デッキ3段積を採用している船である。これを越えるCグループ船は大形化の効果はみられず、22~23ノット、2~3万トン級の船の輸送性能と同程度になっている。Ro/Ro 船は W_T/n の悪化がひびいてコンテナ船よりかなり悪くなっている。

謝 辞

Ro/Ro 船のデータ収集に関して川崎重工業(株)をはじめ、多数の造船所の方々に親切な御協力を頂きました。また、データ整理で神戸商船大学学生仲野真次君に多大の労力をおかけしました。合せて深甚なる謝意を表します。

文 献

- 1) 西川ほか, 舶機誌, Vol. 15, No. 2 (1980-2), 142.
- 2) 西川ほか, 舶機誌, Vol. 16, No. 6 (1981-6), 499.
- 3) 中村, 関西造船協会誌, No. 171 (1978-12), 1.
- 4) 石谷, 赤木, 舶機誌, Vol. 15, No. 2 (1980-2), 2.
- 5) たとえば, Baraka, M., et al, J. Arab. Maritime Transport Acad., Vol. 5, No. 9 (1977-9), 40.