

称号及び氏名	博士（工学） 田井 祥史
学位授与の日付	平成 24 年 3 月 31 日
論文名	「ミニマムバラスト PCC 船型の開発研究」
論文審査委員	主査 池田 良穂
	副査 馬場 信弘
	副査 深沢 塔一
	副査 片山 徹

論文要旨

地球環境破壊や温暖化に関する社会的関心の高まりに伴い、環境保護や CO₂ 排出を抑制することが重要視されている。自動車運搬船（以下、PCC）は安全上の長さ制限のほか、入港時やパナマ運河通過のために全長、船幅、喫水などの主要寸法が制限されるなかで最大積載数を確保するため、画一的な船型を選択せざるを得ない。このような限られた寸法の中で PCC は多層デッキ化が進み、上部構造物はいわゆる背高箱型の巨大なものになっている。また、積荷である自動車は体積の割に軽量なために積荷比重が小さく、PCC の排水量は少なく喫水は浅い。そのため、復原力とプロペラ没水深度の確保のために、満載出港時でも大量のバラスト水を搭載しており、その量は載貨重量の 30% 以上にも及んでいる。船舶においては、このバラスト水に対する問題も多く、例えば、大量のバラスト水を搭載して航行することに伴う CO₂ 排出量の増加、年間に全世界でおよそ 30 億トンから 100 億トンともいわれている国際間移送されるバラスト水を介した水生生物の移動・拡散による水域生態系の破壊など、様々な問題が指摘されている。このような背景のもと、国際海事機関（IMO）は 2004 年 2 月にバラスト水の処理等に関する条約「船舶のバラスト水及び沈殿物の規制及び管理のための国際条約」を採択した。この条約に基づき、船舶にはバラスト水中のプランクトン等を死滅させるための処理装置の搭載が義務づけられることとなり、コスト増や配置スペースの確保が必要となる。これらの問題を解決するために、バラスト水処理装置の開発が行われる一方で、バラスト水を極力必要としない船型開発を進めることが重要であるが、そのような船型では少ないバラスト水で姿勢の調整や復原性の確保が必要とされるため、

その形状は従来船型とは異なることとなり、復原力や推進性能も変化することが推測される。

本論文では、制限された主要寸法の中で設計されているために載貨状態およびバラスト状態において大量のバラスト水を必要とし、バラスト水に対する問題も多い在来型 **PCC** を対象に、復原性規則を満足したうえでバラスト水を削減し、エネルギー効率が高く **CO₂** 排出量の削減に貢献することが期待される次世代型 **PCC** に基本コンセプトを提案し、その性能を把握する。

第 1 章は、緒論であり、本研究の背景、目的および、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、2014 年パナマ運河拡張工事完了に伴う船幅制限拡張を見据えて、船幅をパナマックス型より広げたオーバーパナマックス仕様とし、かつ浅喫水にすることで、大きな復原力を確保するとともに、甲板面積が大きくなるために在来型 **PCC** とほぼ同じ積載台数でも水面上の船体の高さを抑え風圧面積を減少でき、さらに痩せ型でバトックフロー船尾を採用したノンバラスト **PCC** 船型とすることで、排水量を減少させることが可能なエネルギー効率の高い次世代 **PCC** の基本コンセプトを提案し、このコンセプトに基づいて開発した新船型の平水中および風の中での抵抗性能について調査した。

まず抵抗試験を行った結果、新型 **PCC** の抵抗性能は、バラスト水を無くしたことによる排水量削減、浸水表面積の減少、および痩せ型船型にしたことによる形状影響係数の低減などにより、在来型 **PCC** より航海速度 20 ノットにおいて、有効馬力 (**EHP**) を 13.8% 低減できた。また、概してバトックフロー船型は、横流れ抵抗が小さく、針路安定性について在来型船型と比べて著しく劣ることが報告されているが、新型 **PCC** においては、高アスペクト比のフィン型スケグを装着することで、風による斜航角は、在来型 **PCC** と同程度となること、ヨット船型に近い丸型形状とすることにより、斜航時にもその抵抗増加を在来型 **PCC** より抑えられること、さらに、在来型 **PCC** が無風時に平水中を船速 20 ノットで航走するための有効馬力を両船型が維持して、風速 20m/s の中で航行する時の船速低下については、新型 **PCC** では在来型 **PCC** よりも 1.0~1.8 ノット程度減少することを示した。なお、幅広船型を採用したため大きな復原力が確保できる一方、メタセンタ高さ (**GM**) が大きくなり過ぎ、積載物に働く加速度、乗り心地に問題が発生する可能性があり、適正な運動性能確保のための対策が必要となるが、この大きな **GM** を利用して、デッキ数を増やすことができるので、積載台数の増加が可能であることも明らかにした。

第 3 章では、現実問題として、港湾事情や航行制限等から、船体主要目 (**L, B, d**) を変えずにバラスト水を削減したいという要望も多いため、在来のパナマックス型 **PCC** 船型を対象に、船体主要目を変更することなく、水線面積を維持したまま計画満載喫水下の船体形状を変えることでバラスト水の量を最小化し、非損傷時復原性規則 (**Weather Criterion**) を満足する復原性を維

持し、同時に抵抗推進性能にも優れた船型開発の基本コンセプトを提案した。

バラスト水を削減するためには、重心を下げるか、メタセンタを上昇させる必要がある。ここでは、船体主要目は従来型 **PCC** と同一としており、水線面は、ほぼ変わらないとしていることから、メタセンタを上げるためには排水量を減らすことが必要となる。バラスト水を削減した分だけ排水量が減少することを利用し、ビルジ半径と船底勾配を増加させることにより中央断面係数 (C_m) を小さくし、バラスト水削減分だけ排水量を減少させることとした。加えて、造波抵抗にあまり影響を及ぼさないように、在来型 **PCC** と C_p 値が等しくなるように C_m を決定し、 C_p カーブも在来型 **PCC** と概略同じとなるようにする。また、バラスト水の減少により重心が上昇するため、この影響についても考慮する必要があるので、非損傷時復原性を規定する **Weather Criterion** を満足させる限界のバラスト水を求めることを試みた。

以上のコンセプトに基づいて開発したミニマムバラスト **PCC** 船型 (**Ship B**) については、満載出航時とバラスト出航時のバラスト水を **50%**まで削減でき、この **50%**バラストレス **PCC** では、満載時に **5.3%**、バラスト時に **4.7%**の馬力削減が可能であることを示したが、バラスト水を削減するために、主要寸法を維持したまま船型を丸型にした場合、ある角度以上で復原力が減少し、風などの外力による大きな横傾斜、復原力の非線形性による特異な横揺れなどが発生する可能性が生ずるため、現行の復原力規制のもとでは計画満載喫水下の形状変更による更なるバラスト水の削減は困難なことが明らかになった。

第4章では、こうした欠点を解消して、積載バラスト水の更なる削減を行うために、ミニマムバラスト **PCC** 船型の、満載喫水線上の船幅を上げた張り出し付きミニマムバラスト **PCC** 船型 (**Ship C**) を開発し、推進性能の優れた復原性要件を満足する基本コンセプトを提案した。

主要目をパナマックスの **Ship B** と同じく垂線間長 **192m**、幅 **32.26m**、水面上最大幅を **36m** とした **PCC** で、計画満載喫水線を幅広とすることで、1デッキあたりの面積が大きくなり積載台数が増加し、上甲板に設けた **GARAGE** を除いても在来型 **PCC** 以上の積載台数を確保することができるため、軽荷重量の増加は少なくなり、重心の上昇も抑制でき、さらに、非損傷時復原性規則 (**Weather Criterion**) を満足する限界 ($C=1$) となる所要メタセンタ高さ (GM) が **Ship B** に比べると大幅に小さくなる。また GZ 曲線の非線形性を弱め、在来型 **PCC** よりバラスト水を、満載出航状態において **80%**、**Ship B** と比べても **60%**の削減となり、排水量が **Ship B** より **3%**程度減少できること、バラスト出航状態においても在来型 **PCC** よりバラスト水が **59%**削減でき、**Ship B** と比べても **17%**のバラスト水削減が可能であることを示し、満載時に **7.0%**、バラスト時に **4.7%**の馬力削減が可能であることを確認した。さらに、バラスト水を大幅に削減できたことから、バ

ラストタンクの容量の削減，バラスト水処理装置の小型化，バラスト水交換作業の削減，バラストタンク内部の塗装コストの削減も可能となる。

第 5 章では，本研究で対象とした PCC は，幅広浅喫水船型であるうえに，バラスト水を削減して船体断面を丸くしたため，復原力曲線が強い非線形性を示すという特徴を持っているが，このような特殊な船型の横揺れ特性は，非損傷時復原性規則の **Weather Criterion** の中で用いられている同調横揺れにも影響を及ぼす可能性があるため，開発した 50%バラスト水を削減した **Ship B** 船型について，その横揺れ減衰力，横揺れ固有周期，波浪中での横揺れ特性，および，その復原性を実験により調査するとともに，現行の **IMO** 非損傷時復原性規則の妥当性について検討し，以下の結論を得た。

開発したバラストレス PCC の **Ship B, C** は水面下の船体を削って丸くしたため，その復原力は横傾斜核に対する非線形性が強いことが明らかになった。また，自由横揺れ減衰試験の結果から，同船型の横揺れ固有周期は，横揺れ振幅角に強く依存し，横揺れ振幅の増加に伴い長くなることがわかった。さらに，**IMO** が規定する，実験を援用した組立法を比べて，**Weather Criterion** による同調時横揺れ振幅 ϕ_{1r} は大きな値を示すが，この原因は，横揺れ振幅と横揺れ固有周期の関係（復原力の非線形性）が考慮されていないためであることを確認した。また，数値計算のみにより同調時横揺れ振幅 ϕ_{1r} を推定する方法についても検討し，横波中横揺れを横揺れ減衰力係数の推定に池田法を用いたストリップ法により求め，横揺れ振幅と横揺れ固有周期の関係を **GZ** 曲線から求めることで，組立法とほぼ同様の結果が得られた。

第 6 章では，本研究で得られた結果をまとめている。

審査結果の要旨

本論文は、重心が高いために大量のバラスト水の積載が必要な自動車専用運搬船（PCC）の省エネ化および環境負荷軽減のために、航海の安全性を確保した上でバラスト水を削減する手法の研究と、その手法によるミニマムバラスト船の開発を行ったものであり、以下の成果を得ている。

- (1) パナマ運河の拡張計画を念頭に、船幅を広げたオーバーパナマックス型として復原力を確保してバラスト水をなくし、排水量削減、浸水表面積削減、痩せ型の船型を開発し、**20**ノットの航海速力において抵抗（EHP）を **13.8%**低減させることができた。
- (2) 現在の港湾での制限から、既存のパナマックス主要寸法を維持したまま、水面下船体形状を痩せ型にすることで復原力を確保する手法を開発し、バラスト水を **50%**まで削減でき

る PCC の開発に成功した。

- (3) さらにバラスト水を削減するために、水面上の船幅を広げた張り出し付ミニマムバラスト PCC 船型を考案し、同船型によってバラスト水の **80%**削減と、満載時に **7%**および軽荷時に **4.7%**の馬力削減が可能となることを示した。
- (4) 本研究で開発した痩せ型船型における復原性特性について検討し、その強い非線形性から、現在の船舶の復原性規則 (**IMO 規則**) である **Weather Criterion** では正しい評価ができないことを示し、その原因が横揺れ振幅の増加に伴う横揺れ固有周期の変化にあることを明らかにした。

以上の成果は、現在、緊急の課題である船舶における省エネ化と環境負荷軽減に対する新たな解決策を示したものであり、船舶工学分野に大きく貢献するところ大である。また、申請者が研究者として自立して活動できる能力と学識を有することを証するものである。本委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。