

称号及び氏名	博士（工学） 水谷 圭介
学位授与の日付	2015年3月31日
論文名	「チップ船の風波浪中抵抗とレスバラスト化に関する研究開発」
論文審査委員	主査 池田 良穂
	副査 馬場 信弘
	副査 深沢 塔一

論文要旨

紙の原料となる木材チップを専用に輸送するチップ船は、昭和 30 年代後半に荷主・船会社・造船所が共同で開発した"呉丸"（17,315 総トン）が最初で、その後、各社がチップ船を導入して今日に至っており、現在就航中のチップ船は約 140 隻といわれている。チップ船の船型は、当初が 150 万立方フィート（以下 cft と表示）型前後であったが、製紙パルプメーカーのキャパシティ増加、輸送距離の長距離化に伴い、1990 年代には 350～360 万 cft 型まで大型化が進んだ。木材チップの調達先としては 1990 年代前半までは南米・北米が主な調達ソースであったため、チップ船の船幅はパナマックス幅の 32.2m が主流であったが、パナマ運河を通行しない豪州ソースに対して輸送効率を高めたオーバーパナマックス幅の竣工が始まり、現在ではパナマックス幅の 360 万 cft 型とオーバーパナマックス幅の 400 万 cft 超型の 2 大船型が混在している。こうした船型の大型化に加え、燃料油価格高騰の背景のもと、チップ船の燃費性能向上の必要性が高まっている。チップ船は比重の軽い貨物を積載するため、大容量の貨物スペースを要し、一般的なバルクキャリアーに比べて背高で浅喫水という特徴を持ち、船に働く風圧力が大きい。加えて、チップ船は陸上荷役設備のない日本の製紙会社向けにデッキクレーンなどの荷役装置（ギア）を上甲板上に装備している独特の船型で、これらに起因する風圧抵抗を低減し、荒天時の船速低下・燃費悪化を軽減することがチップ船省エネ化のポイントとなっている。また、実海域では風に加えて波による抵抗増加の影響があり、外乱のない平水中の性能が良くても太平洋航路での馬力増加や船速低下が大きいと、チップ船の生涯に亘る運用コストに大きく差が出ることになる。

本論文では、まず、このような課題を抱え、船首部にスポンソンを有するなど特徴的な船型となっているチップ船を対象としてその風圧力および波浪中抵抗増加特性を把握し、それを踏まえて風圧抵抗および波浪中抵抗増加低減を図った付加物を提案し、その効果を確認す

る。

また、チップ専用船は比重の軽い貨物を最大限積載できるように、トップサイドタンクを設けず、バラストタンクが船底部に限って設けられている船型である。そのため、船底の専用バラストタンクへの漲水だけではバラスト航海中に十分な喫水を確保できず、貨物艙の一つをバラスト兼用艙として使用しているが、海水濡れ防止や貨物艙の錆対策の観点からバラスト兼用艙に代わるバラストシステムが求められている。また、チップ専用船は片荷航海が多いことから、満載状態だけでなくバラスト航海での燃費性能向上も重要な課題である。

そこで、本論文ではチップ船のバラスト状態（空荷でバラスト水を漲った状態）での排水量を貨物艙へのバラスト漲水不要なレベルまで減らして燃費性能向上を図る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、本研究の背景となるチップ船の変遷と省エネ化に向けた課題、および本論文の構成を述べている。

第2章では、チップ船の複雑な風圧力特性を模型実験および CFD 計算により調査することによって、風圧抵抗係数 C_x は風向角 20° で最大値を示し、ギアレスの場合に比べて 33% 増加すること、その時に荷役装置に働く風圧抵抗は各艙装品に働く風圧力を線形的に足し合わせることで推定できることを見出した。また、逆に斜め追い風においては荷役装置を装備していることが推進力を増すこと、正面向い風に対しては最船首部のホッパーが風を遮蔽してその後部に死水域ができ、風圧抵抗に対して支配的となることを明らかにした。また、ギアレス船の船尾居住区前面に隅切りを施すこと等によって 16% の正面風圧抵抗低減効果が得られるが、チップ船の場合は、荷役装置が風を遮蔽して居住区に当たる風の量が少ないため、その効果が得られないことも明らかにした。そして、これらの知見をもとに、まず正面向い風を受ける場合に最船首部のホッパーへ直接風が当たらないよう防風カバーを付加物として取り付けることを提案し、スポンソンの有無に関わらず全体（居住区+船体+艙装品）で 11% の風圧抵抗低減効果があること、および斜め向い風における風圧抵抗低減および斜め追い風における推進力増強にも寄与することを示した。さらに、船首防風カバーに加えて横風、斜め風に対する風圧抵抗を低減するべく、カーゴホールドのガンネル付近に防風サイドガードを設置するコンセプトを提案した。斜板型の防風サイドガードをその延長線上におよそ上甲板上荷役装置頂部のある角度で設置することが、斜め風を上方に流して複数の艙装品が受ける抵抗を低減するために有効であり、その高さを増すにしたがってデッキクレーンや居住区が受ける風圧抵抗も低減されるため、風向角 20° での C_x 値は線形的に減少し、船首防風カバーとの組み合わせで最大 47% まで低減することができる。提案した 2 種の防風付加物を

設置して、かつ、局所的なスタグネーション圧力により抗力増加を招くスポンソンをなくした風圧抵抗低減型チップ船は、従来のチップ船と比べて正面向い風における C_x を 24%小さく、またチップ船特有の C_x が最大値を示す風向角 20° において C_x を 40% (ギアレス船と比べても 14%) 小さくすることができて、かつ斜め追い風においてもギアレス船にはない推力が得られる低風圧抵抗の省エネルギーが図れる船型となる。このチップ船の風圧力特性を、何らと共に著者が提案した全方位の風に対する総合評価指標を用いて従来のチップ船と比較すると、絶対風速 5m/s の風を受けると仮定した場合で 38% (ギアレス船と比較しても 12%) 改善となり、総合的にみてもエネルギー効率が高いチップ船になり得ると評価できる。

第3章では、本研究で対象とした 400 万 cft 超型チップ船の模型を用いて、まず向波中での船体運動および抵抗を計測し、短波長域では縦揺れおよび上下揺れ運動がほとんどないにも関わらず、大きな抵抗増加が生じることを確認した。この短波長域での波浪中抵抗増加を低減させるには、これまで一般的に船首の反射波を減らすことが有効とされているが、スプレーによる抵抗増加が無視できないことも指摘されており、チップ船においても船首に大波高の波が当たるときに高いスプレーが発生することを水槽実験において観察して確認した。また、短波長域で船体運動が生じないという仮定のもとに CFD 計算を行い、スプレー発生要因となる高いスタグネーション圧力が発生することを波が当たるときの動圧分布から確認し、波高が高くなるに伴いスプレーが高く上がるメカニズムを再現した。そして、CFD 計算によって把握したスタグネーション圧力が高い位置に、流れを淀ませないための三角柱状の付加物を取り付けることで、短波長域におけるチップ船の波浪中抵抗増加を 10~15%程度低減することができることを水槽実験によって確認した。

第4章では、抵抗増加の大きな要因になっているバラスト水を削減することによるチップ船の省エネ化を試みた。空荷のバラスト状態において必ず1つの貨物艙へバラスト水を搭載しているチップ船が、逆に二重底内の大半のバラスト専用タンクには漲水していないという不合理な点に着目し、プロペラを全没させるのに貨物艙への漲水が不要で、必要なバラスト量は二重底バラストタンクのみで賄えるようなレスバラスト船型を考案し、その性能を調べた結果、以下の結論を得た。

提案したレスバラスト船型は前章までと同様のオーバーパナマックス幅のチップ船をベースとしており、陸上ローダーのアウトリーチなどの制限を考慮して船幅は変えることなく満載喫水を 12%深くして載貨重量は維持しつつ、船体平行部の断面形状を楕円型とすることでバラスト状態にて貨物艙へバラスト水を漲水する必要がないレベルまで、必要バラスト量を約 40%削減することができた。船体平行部の断面形状については、レスバラスト化に加え、

摩擦抵抗を低減して推進性能向上を図るという観点からも楕円型を採用したが、満載載貨重量を確保するためには、中央部での排水量削減分を船首尾に割り振る必要があり、船首船尾の肥大度が大きくなる。これに加えてチップ船は造波抵抗が大きくなる傾向がある船型なので、船首に割り振ることのできる排水量は限られ、船尾の肥大度が極端に大きくならないように、船の全長をベース船より **10m** 伸ばすこととしたが、それでもバラスト状態において浸水表面積を **13.6%**削減することができた。

以上のコンセプトに基づいて開発した船型の推進性能を **CFD** 計算から得られたデータをもとに推定すると、バラスト状態においては、浸水表面積削減の効果が大きく、**16.6%**の馬力低減が期待できて、木材チップ専用船の課題とされるバラスト航海での性能向上を解決するひとつの手段として有効であることを確認した。また、本船型の船尾形状については、機関室配置とのマッチングに更に詳細な検討を要するものの、船首船尾の肥大度を適切な大きさに抑えることで、満載状態においても少なくとも従来船型と同等の推進性能が見込まれる。

また、本船型では、船体中央部のバラスト兼用艙への漲水が不要なので、局所的に大きなサギングモーメントおよびせん断力が発生しないため、船体にかかる応力軽減の効用も期待できる。さらに言えば、楕円型の船体中央断面形状は、自動荷役設備を備えた船と形状的に相性が良く、従来船型（矩形の船体中央断面形状）よりも貨物艙の容積効率が約 **10%**高くなる等の基本計画上のメリットが得られ、チップ船の次世代型のひとつの形と考えられる。

第5章では、本研究で得られた知見をまとめている。

審査結果の要旨

本論文は、比重の小さい木材チップを専用に運ぶチップ船に働く風および波による抵抗増加を低減し、かつ空船時に大量積載するバラスト水の削減により、大幅な省エネ化を達成することを目的とした研究開発で、以下の成果を得ている。

- (1) 複雑な荷役設備がデッキ上に配置されているチップ船に働く風圧抵抗を、実験およびCFD計算によって調べ、その全風向角における特性を明らかにした。特に、これまで確認されていなかった、主船体、居住区、荷役装置の間の干渉効果について調査し、個々の風圧低減が必ずしも全体の風圧抵抗低減にはつながらないことを明らかにした。
- (2) (1)で明らかにした風圧抵抗の知見に基づき、風圧抵抗低減のための船首防風カバーを開発し、正面向い風において **11%**の低減ができることを示した。

- (3) 横風および斜め風を受ける時の風圧抵抗を低減するための防風サイドガードを開発し、最も風圧抵抗が大きくなる斜め前方 20° の風に対して、船首防風カバーの効果と合わせて最大 **47%** まで低減できることを示した。
- (4) さらにチップ船特有の船首にあるスポンソンをなくすることによっても風圧抵抗を低減できることを示した。
- (5) 波浪中抵抗を低減するための船首付加物を、CFD計算結果を活用して設計し、**10~15%**の削減効果があることを模型実験によって確認した。
- (6) 空船時のバラスト水を削減するため、丸型断面を有する新しい船型を開発し、必要バラスト水を **40%**削減できることを示し、エンジンの必要馬力を **16.6%**低減できることを示した。

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。