目　次

1. まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・36
2. 境界層吸い込み技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・36
2.1 検討対象船・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・36
2.2 境界層吸い込みによる効果・・・・・・・・・・・・37
3. 事前検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・37
3.1 トンネル傾斜角の変更・・・・・・・・・・・・・・・・37
3.2 水槽試験による検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・37
4. 境界層吸い込み効果の評価・・・・・・・・・・・・・・・39
4.1 吸い込み位置の予測・・・・・・・・・・・・・・・・・・39
4.2 水槽試験による検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・40
4.3 ZEUS コンテナ船における境界層吸い込み効果の評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42
5. 箱船への適用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42
5.1 箱船船型・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42
5.2 境界層吸い込み技術の適用・・・・・・・・・・・・43
6. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44

1. まえがき

海上技術安全研究所では、船舶からの二酸化炭素排出量低減のため、ZEUS プロジェクト[1)]を立ち上げ各種技術開発を行っており、本研究はその一環として始められた[2), 3)]。ZEUS プロジェクトでは、ツインスケグ船を採用し、幅広化による貨物積載量の増加を実現している。

ツインスケグ船では、さらに貨物積載量を増やすため、スケグ間のトンネル部船底の立ち上がり位置を船尾寄りに移動し、傾斜度を大きくするとることで肥大度を高めることができると考えられるが、船底流れの勾配の変化が大きくなると、粘性圧力抵抗の増加や、極端な場合には二次元剥離を引き起こす可能性もある。

本研究では、ツインスケグ船の船底から少量の水流を船内に導き、プロペラ直前で吹き出し、船体抵抗低減と推進効率向上を狙った、境界層吸い込み技術（Boundary Layer Suction: BLS）について調査する。水槽試験及び CFD 計算により、吸い込みによる効果と、関係する吸い込み位置・吸い込み量・トンネル傾斜角などのパラメータとの関係を調査する。

また、ZEUS プロジェクトに加え、造船における工数をミニマムとする箱船について、流体制御技術を導入することにより従来の船型の性能まで改良しようとする試みを行っており、境界層吸い込み技術の箱船への適用について検討する。

2. 境界層吸い込み技術

2.1 検討対象船

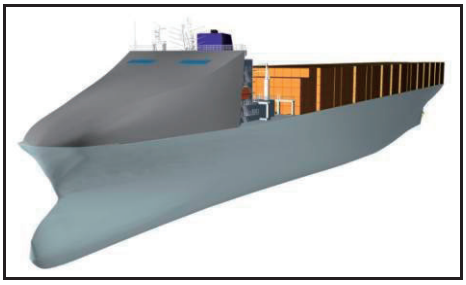
検討対象船を、ZEUS プロジェクトで開発したポッド推進の 4000TEU の二軸コンテナ船とした。想定する実船は垂線間長 196.2 m 、速力 20 knot である。対象船の主要目、イメージ図を表-1、図-1 に示す。図-1(b)に示す通り、ZEUS コンテナ船は 2 機のポッドにより推進するものである。ポッドプロペラの要目を表-2 に示す。

表-1　ZEUS コンテナ船主要目

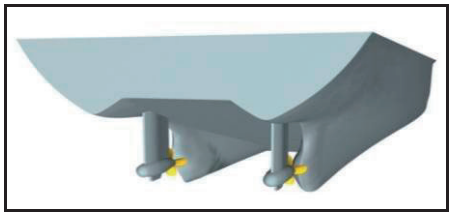
項目	値	
	実船	模型船
垂線間長 L_{pp} [m]	196.19	5.4175
水線長 L_{wl} [m]	196.20	5.4178
船幅 B [m]	42.507	1.182
型深さ D [m]	17.836	0.4925
喫水 d [m]	10.702	0.2955
浮心位置 lcb [%L_{pp}] +aft	4.04	
方形係数 C_b	0.6564	
浸水表面積 S [m²]	10,120	7.6555

表-2　ZEUS コンテナ船プロペラ要目

項目	値	
	実船	模型
翼数 Z	3	
プロペラ直径 D_p [m]	8.185	0.2260
ピッチ比 H/D_P	1.02	
展開面積比 a_E	0.35	



(a) 概観



(b) 船尾

図-1　ZEUS コンテナ船イメージ

2.2 境界層吸い込みによる効果

境界層吸い込みは、二軸船のトンネル部の境界層を吸い込み、スケグ船尾端から吹き出すことにより、船底に発達する境界層を制御しようとするものである。模式図を図-2 に示す。

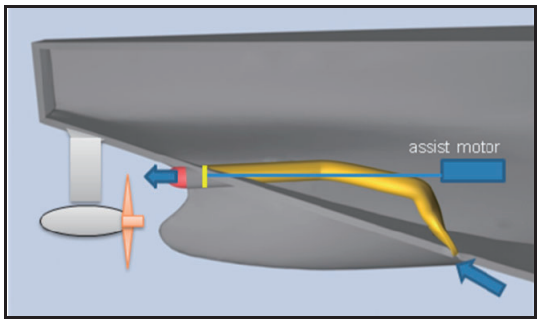


図-2　境界層吸い込み模式図

境界層吸い込みによる主な狙いは、船尾トンネル部の境界層の剥離を抑制することによる抵抗低減であるが、次に示す通り複合的に有効であると考えられる。

(1) 抵抗低減
(2) 推進効率の向上
(3) 操縦性の向上
(4) キャビテーションの抑制

ZEUS コンテナ船は、二軸ポッド船であり、船体のスケグ中心とポッドプロペラの軸をずらして配置することにより、二重反転プロペラ（Counter Rotating Propeller）効果を生み出し、推進効率を向上させるものとなっている。境界層吸い込みにより取り込んだ流れを、船尾の適した位置から吹き出すことにより、CRP 効果を増幅させ推進効率をさらに向上させることが可能と考えられる。

操縦性の向上については、吹き出し流れ方向を制御できるようにすれば、ポッドによる操船を助ける働きをさせることができる。

また、境界層吸い込みにより、トンネル部の立ち上がりによる流れの乱れを抑えることにより、キャビテーションを抑制し、振動や騒音を低減させることができる。

以上を模式的に図-3 に示す。

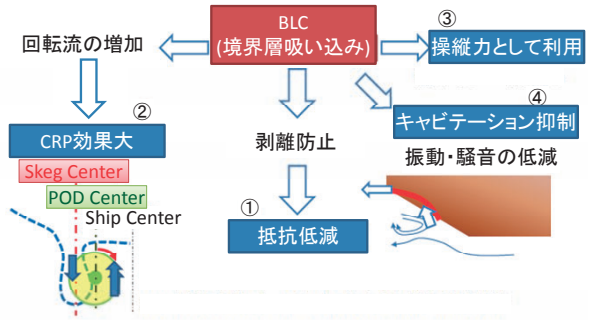


図-3　境界層吸い込みによる効果

3. 事前検討

3.1 トンネル傾斜角の変更

ツインスケグ船については、スケグ間のトンネル部船底傾斜の立ち上がり位置を船尾側に移動し、傾斜角度を大きくとることで肥大度を高めることができる。そこで、図-4 に示す通り ZEUS コンテナ船のスケグ間の船底立ち上がり位置を船尾寄りに移動し、最大船底傾斜角を原型の倍とし、約 16 度から約 32 度に変更した船型を想定した。ここで、C.L.はセンターラインを示す。また、トンネル傾斜角 32 度とした船を、以下で船尾肥大化船と表す。

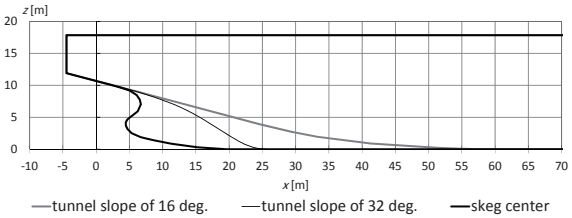


図-4　ツインスケグ船のトンネル傾斜角の変更

3.2 水槽試験による検討

事前検討として、船尾トンネル部で剥離が起こりやすいと考えられる船尾肥大化船について、水槽試験を行い境界層吸い込みによる効果を調べた。境界層吸い込み用の管路を模型船内に組み込み、管路内に直径 42.5 mm（実船において 1.54 m）のインペラを設置することにより船底の流れを吸い込む機構を設けた。CFD 計算などによる検討から、吸い込み位置については、ベースラインから 2.7 m 上方のトンネル傾斜部に置き、トンネル傾斜との取り合いと製作性から水平との角度が 65 度となるように管路を設置した。吹き出し部については、スケグセンター上部のベースラインから 8.3m 上方に水平に配置した。インペラについては、吹き出し口前方に配置し、インペラ直径に合

わせ、模型船における管路の内部直径を、45.5 mm（実船において 1.65 m）とした。

インペラを回転させ境界層吸い込みを行った場合と、境界層吸い込みを行っていない状態を模擬し、逆流を防ぐためインペラを低回転で回転させた場合で、抵抗試験結果を比較した。全抵抗係数の比較を図-5 に示す。ここで、C_T は(3.1)式から算出した全抵抗係数、$F_n(L_{wl})$は代表長さを水線長としたフルード数であり、R_Tは全抵抗、ρは流体密度、Vは船速、Sは浸水表面積であり、添え字の m は模型船を示す。

$$C_T = \frac{R_T}{0.5\rho V^2 S} \tag{3.1}$$

図-5 から、$F_n(L_{wl})$が 0.19 付近までは、境界層吸い込みによる抵抗低減効果が認められるが、それより高速域では、効果がなく、境界層吸い込みしない場合と同程度となることが分かる。吸い込み効果がなくなる高速域では、インペラのスラストが急降下していた。低速域で吸い込みにより消滅していたと考えられる剥離域が、高速域になると、剥離点が前進し、吸い込み口より船首側に移動したことが可能性として考えられるが、実船において同様の状況になるかどうかは、課題として残される。

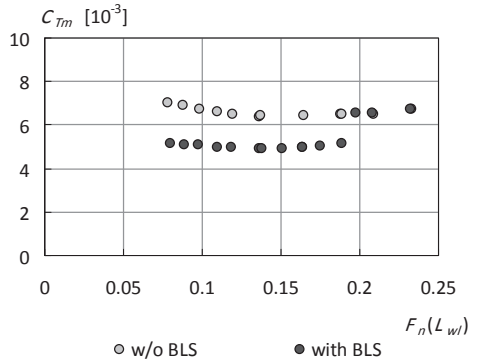


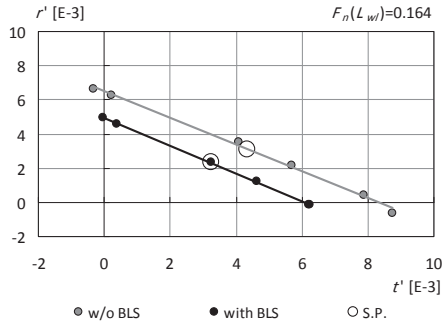
図-5　船尾肥大化船の抵抗試験結果

抵抗試験で効果の認められたフルード数 0.164, 0.137 で荷重度変更試験を行い、境界層吸い込みによる効果を調査した。曳航力とポッド推進器によるスラストの関係を図-6 に示す。ここで、r' は模型船の曳航力の無次元値、t' はポッド推進器によるスラストの無次元値であり、それぞれ(3.2)式、(3.3)式から算出する。ここで、R_m は模型船の曳航力、T_{POD}はポッド推進器によるスラストである。また、S.P.は自航点を示す。境界層吸い込みを行った場合の自航点の算出においては、抵抗試験結果のうち境界層吸い込みによる抵抗低減効果が確認できた試験速度範囲を用いて解析を行った。

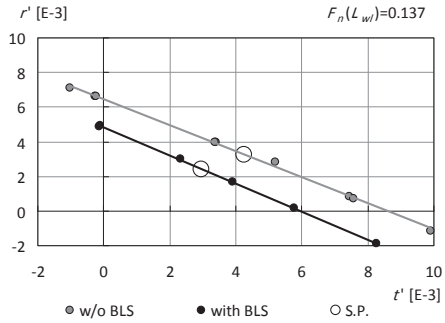
$$r' = \frac{R_m}{0.5\rho V^2 S} \tag{3.2}$$

$$t' = \frac{T_{POD}}{0.5\rho V^2 S} \tag{3.3}$$

図-6 から、自航点における効果は、どちらのフルード数の場合も約 25%の抵抗低減となる。



(a)　フルード数 0.164



(b)　フルード数 0.137

図-6 船尾肥大船の荷重度変更試験結果

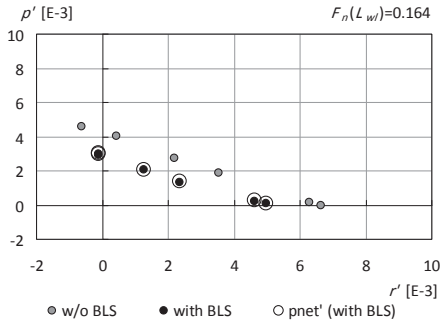
荷重度変更試験の結果から、模型船における馬力を算出し、境界層吸い込みによる効果を調査した。横軸に模型船の曳航力の無次元値をとり、図-7 に示す。p'は馬力の無次元値であり、(3.4)式から算出した。ここで、N_Pはポッドプロペラの回転数、Q_{POD}はポッド推進器によるトルクである。また、$\Delta p_{in}'$はインペラによる吸い込みに必要となる馬力であり、(3.4)式を用い、インペラ回転数 N_i、イン

ペラによるトルク Q_{in} から算出される。境界層吸い込みを適用した場合の正味の必要馬力 p_{net}' は、ポッド推進のための馬力と吸い込みのための馬力の合計となり、(3.5)式から算出される。

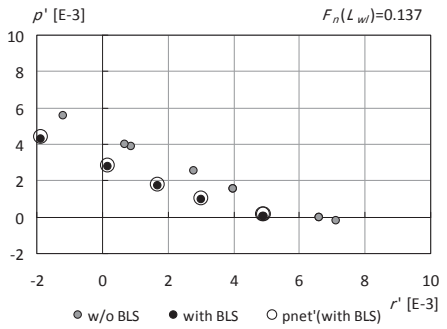
$$p' = \frac{2\pi N_P Q_{POD}}{0.5\rho V^3 S} \tag{3.4}$$

$$p_{net}' = p' + \Delta p_{in}' \tag{3.5}$$

図-7 から、インペラによる吸い込みのために必要なエネルギーは模型船の自航点（r'=0 となる点）において約 1~2%とわずかであり、これを考慮しても馬力低減効果があることがわかる。



（a）　フルード数 0.164



（b）　フルード数 0.137

図-7 船尾肥大船の水槽馬力

4. 境界層吸い込み効果の評価

船尾肥大化船を対象に境界層吸い込みによる効果を調査し、船尾トンネル部の剥離の抑制によると思われる抵抗低減を確認した。次に、ZEUS コンテナ船原型を対象に、境界層制御技術を適用し、抵抗の低減に加え、自航要素の向上を狙い、検討を行った。

4.1 吸い込み位置の影響

境界層吸い込みの主要な狙いである抵抗低減に対する吸い込み位置の影響を予測するため、2 次元 CFD 計算を行った。計算には、海上技術安全研究所で開発を進めている粘性流体解析ソフト SURF[4]を用いた。対象船型のトンネル部の流れを評価するため、midship(X=0)より後方の船体中心線の形状を用い計算を実施した。格子生成には HEXPRESS™ を用い、非構造六面体格子で構成した。計算領域は長手方向(X)に 1.5L_{pp}、深さ方向(Z)に 1.0L_{pp} とし、幅方向の厚さは 0.001L_{pp} の一層と設定した。船長 5.4175m の模型船で計画速力 20knot に相当するレイノルズ数 R_n=8.1×10^6 で計算を行った。

吸い込み位置の検討のため、図-8 に示す通り、模型船において、ベースラインから 10mm, 30mm, 74mm 上方（実船において、0.36m, 1.09m, 2.68m 上方）に置いた吸い込み口 A, B, C を設定し、比較計算を行った。吸い込み口の管路の角度は、事前検討における船尾肥大化船の実験時に合わせ、トンネル傾斜から 30 度としており、今回の検討対象については、水平から約 45 度となる。設定する吸い込みのためのスラストについては、船尾肥大化船についての試験で示された最も高いスラスト（T_{imax}）にあわせた。

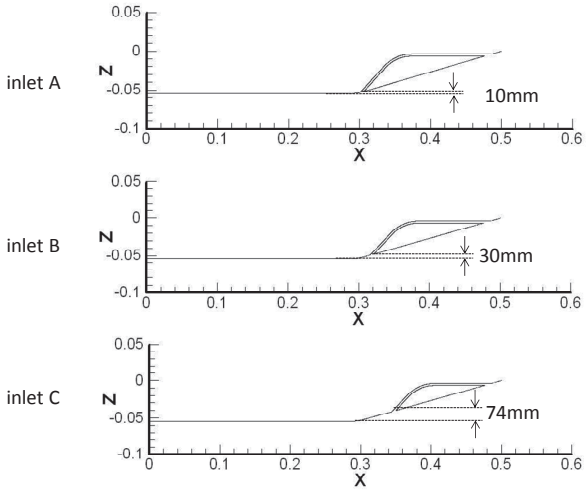
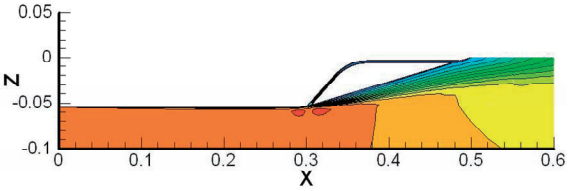


図-8 吸い込み位置の設定

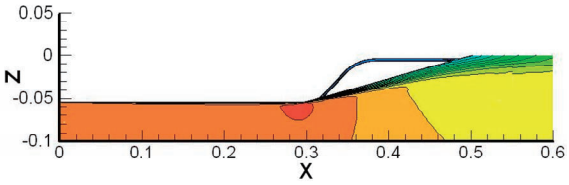
図-9 に船長方向速度(U) の無次元値の等高線図を示す。ここから、吸い込み口を下方に配置すると、トンネル下部の流れが遅くなることが分かる。スラストを設定して計算を行っているため、吸い込み口付近の流速により、吸い込み・吹き出し流

量が異なり、吹き出し部の流速が変わることによるものと考えられる。また、(4.1)式で表される船体後半部に働く抵抗の係数 C_Xの結果を図-10に示す。図-9, 10 から、吸い込み口 A,B,C の中では、最も上方に配置する吸い込み口 C が比較的効果的であると言える。

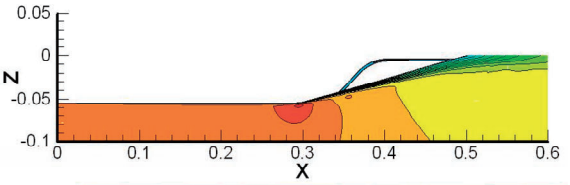
$$C_X = \frac{R_X}{0.5\rho V^2 L_{PP}} \tag{4.1}$$



(a) 境界層吸い込み: inlet A



(b) 境界層吸い込み: inlet B



(c) 境界層吸い込み: inlet C

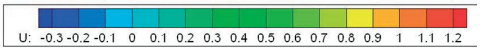


図-9 船長方向速度の等高線図
（吸い込み位置の検討）

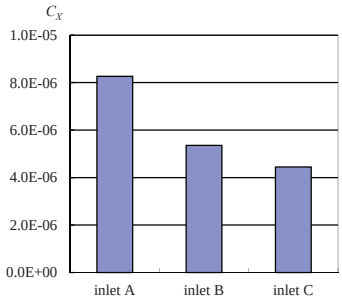


図-10 抵抗係数の比較（吸い込み位置の検討）

4.2 水槽試験による検討

事前検討では高速域で、インペラによる吸い込みでは効果を出すことが難しかったことから、ポンプを用いた管路を模型船に組み込み、吸い込みの効果を調査することとした。模型船を図-11 に示す。図-12 に示す船尾の配置図の通り、吸い込み位置 A, B, C を設け、それぞれから吸い込みを行った時の効果を比較した。吸い込み口はどれもトンネル傾斜部に設定し、A, B, C それぞれ、ベースラインから 0.3m, 1.9m, 2.7m 上方に配置した。吹き出し口については、事前検討と同様に、スケグセンターの上部、ベースラインから 8.3m 上方に配置した。

吸い込み口 A, B, C のうち、比較的効果の高かった吸い込み口 C の時の荷重度変更試験の結果を図-13 ~ 15 に示す。図-14 において、ポンプの駆動のために必要となるエネルギーは、抵抗試験から得られる抵抗減少量からポンプによるスラストを求め、効率は、理想効率として算出した。どちらの F_n についても、図-13 に示す曳航力 r' とポッド推進器によるスラスト t' の関係では、図-6 で示した船尾肥大化船の場合の剥離抑制によると考えられる大きな抵抗低減効果は見られない。図-14 から、流量 Q により馬力が変化していることが分かる。F_n=0.196 においては、流量 Q=100 l/m の場合の低減率が比較的高く、流量 Q=50 l/m では、効果が確認できなかった。F_n=0.113 においては、流量 Q=60 l/m では、わずかながら馬力低減が確認できるが、それより大きい Q =100 l/m になるとポンプ駆動によるエネルギーが馬力低減量を上回ることになる。図-15 には、模型船の船殻効率 η_H を示している。ここから、図-14 で馬力低減が見られた流量条件下では、船殻効率が比較的大きく、境界層吸い込みをしない場合より、よくなっていることが分かる。F_n=0.196 では、流量 Q =100 l/m の時、境界層吸い込みをしない場合より、約 1%大きく、F_n =0.113 についても、流量 60 Q=60 l/m の時、約 1%大きい。

図-11 ZEUS コンテナ船型模型船

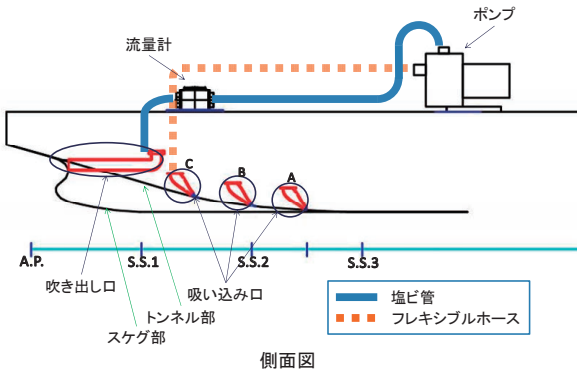
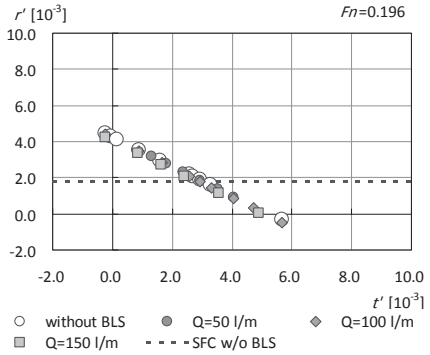
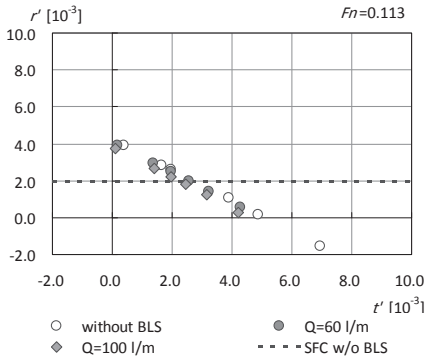


図-12 ポンプによる境界層吸い込み試験

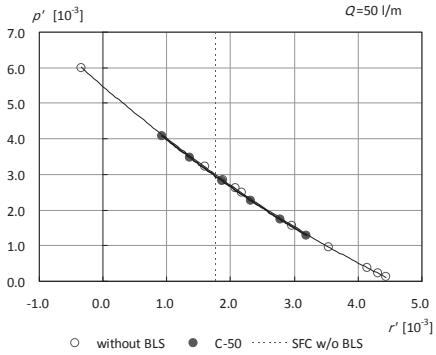


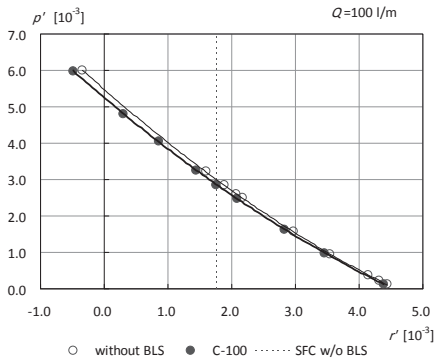
(a) F_n=0. 196

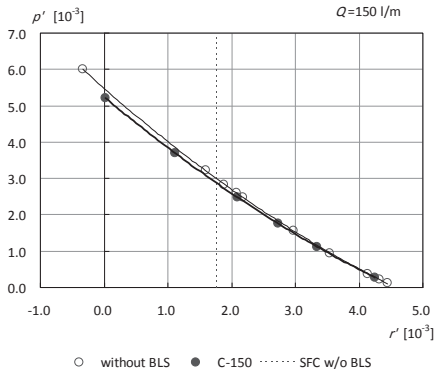


(b) F_n=0. 113

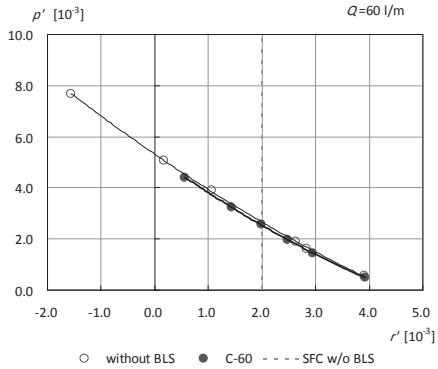
図-13 ZEUS コンテナ船の荷重度変更試験結果

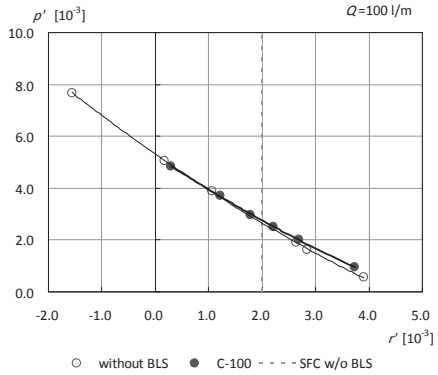






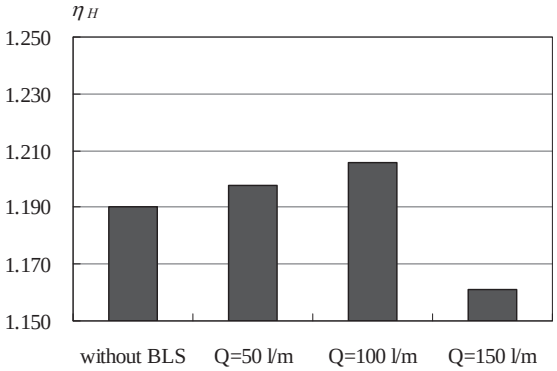
(a) F_n=0. 196



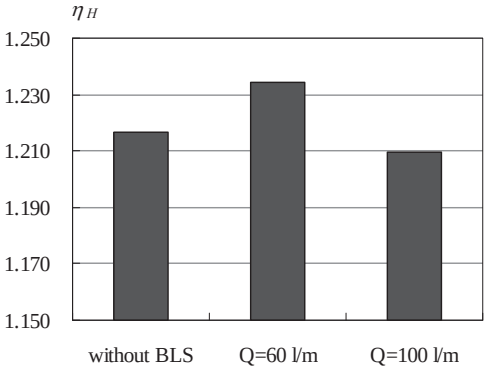


(b) F_n=0. 113

図-14 荷重度変更から得られる水槽馬力



(a) F_n=0.196



(b) F_n=0.113

図-15 模型船殻効率の比較（吸い込み口 C）

4.3 ZEUS コンテナ船における境界層吸い込み効果の評価

ZEUS コンテナ船を対象に境界層吸い込み試験を行い、その効果を調べた結果、事前検討で対象とした船尾肥大化船で見られたような大きな抵抗低減効果はなかったが、水槽馬力においては、低減効果が確認された。対象とした ZEUS コンテナ船では、船尾肥大化船で生じた船底トンネル部の剥離がもともとなく、剥離抑制による大きな効果はないが、船尾での吹き出しによる船殻効率向上により馬力が低減したものと考えられる。また、吸い込みによる馬力低減には、船速に応じて最適となる流量が存在することが分かった。

5. 箱船への適用

船尾にトンネル傾斜部を持つ二軸船に適した技術として境界層吸い込み技術の検討を行ってきた。二軸船の場合、一軸船より幅広な船型が実現でき、航海ごとに運べる貨物積載量を増やし輸送効率を上げることができる。一方、二軸船は船尾形状が一軸船より複雑になるため、造船工数は増加する。そこで、造船工数がミニマムとなる箱型に近い船型を考え、流体制御技術を導入することにより性能を従来の船型の性能のレベルにまで改善しようとする試みを行っている。

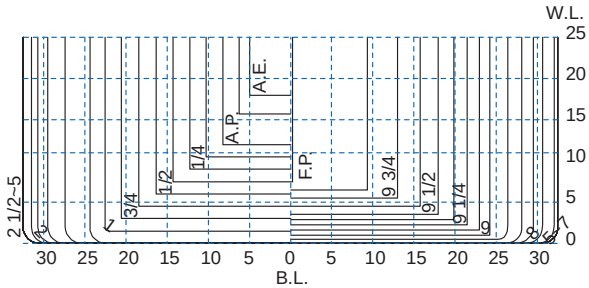
対象となる箱船の船尾形状を二軸船のトンネル部と同じような一定の角度の傾斜部とし、ベースラインからの立ち上がり部で起こりやすい剥離を抑制するため、境界層吸い込み技術を適用することについて検討した。この箱船船型の概要及び境界層吸い込み技術適用についての検討を、以下に示す。

5.1 箱船船型

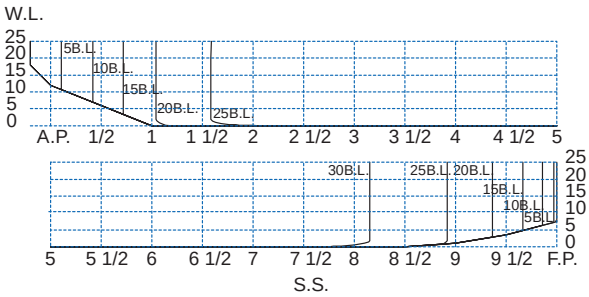
箱船船型の主要目を表-3 に形状を図-16 に示す。単純な 1 軸肥大船を想定した。

表-3 箱船の主要目

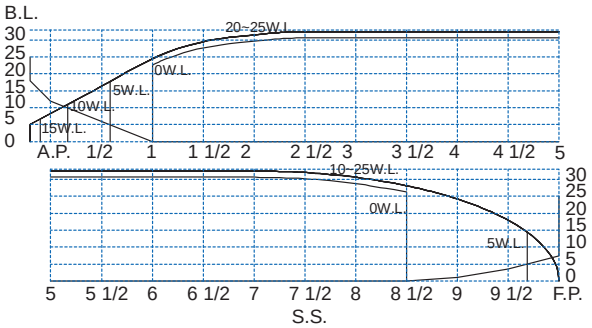
項目	値	
	模型船	想定実船
垂線間長 L_{pp} [m]	4.600	300.0
船幅 B [m]	0.9967	65.0
喫水 d [m]	0.2745	17.9
浸水表面積 S [m²]	6.3241	26898.5
浮心位置 lcb [%L_{pp}] aft+	-0.058	
方形係数 C_b	0.8496	



(a) 正面線図

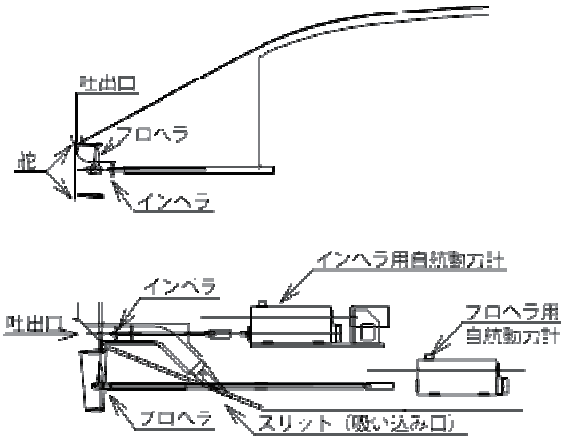


(b) 側面線図

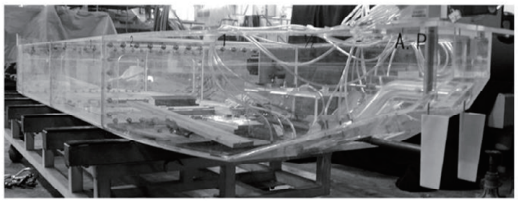


（c）平面線図

図-16 箱船船型の線図



（a）吸い込み管路配置（上：上面図、下：側面図）



（b）模型船の概観

図-17 箱船船型の模型船

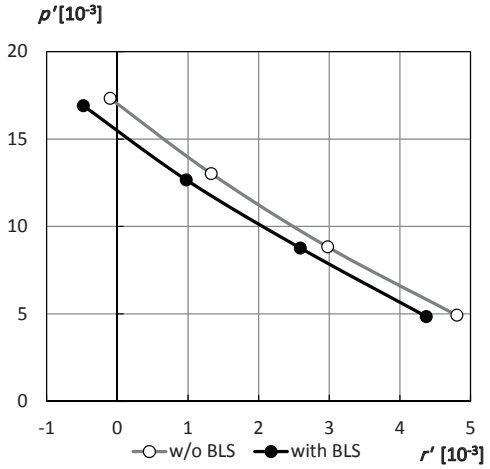


図-18 箱船による荷重度変更試験結果

5.2 境界層吸い込み技術の適用

模型船に境界層吸い込み管路を組み込み、水槽試験により効果を調査した。試験においては、インペラにより吸い込みを行い、計測するトルクから、吸い込みに必要となる馬力を求めて考慮した。管路配置図、使用した模型船を図-17 に示す。境界層吸い込みしない場合とした場合の船底の様子を観察するため、透明模型となっている。

荷重度変更試験から得られた水槽馬力の結果を図-18 に示す。ここから、水槽馬力における境界層吸い込みによる低減効果は、境界層吸い込みしない場合の自航点で約 18%と得られた。

境界層吸い込みにより流れがどのように変わるかを知るために可視化を行った。可視化はスリット（吸い込み口）前後より白インクを流し、流線を撮影した。剥離が有れば広がった流れとなり、剥離が無ければ流線となる。その様子を図-19 に示す。

図上が境界層吸い込み無しの状態、下が有りの状態を示している。境界層吸い込みを行わないと、流れが剥離しているためインクが拡散している様子が確認できた。これに対し境界層吸い込みを行うと、スリット前方の他、後方でも 1 本の流線になった。これは剥離が抑制された効果であると考えられる。

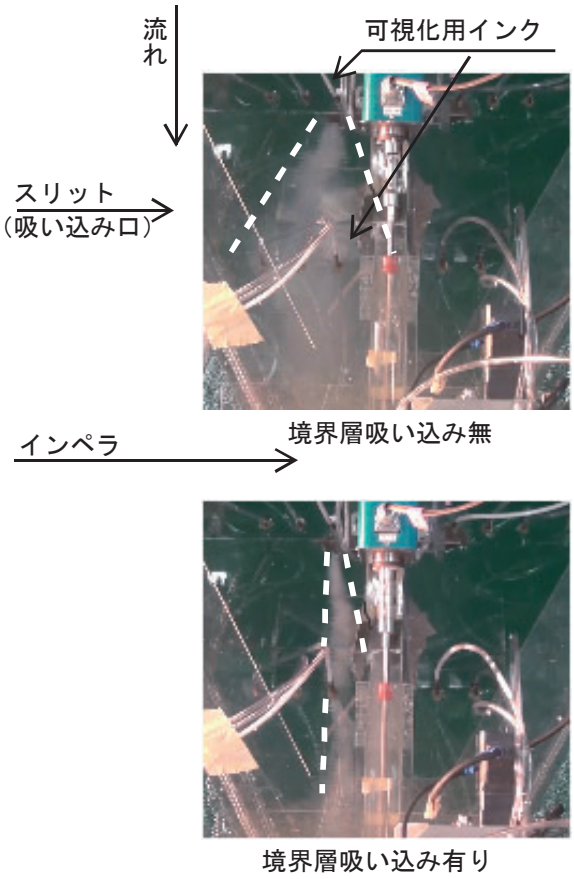


図-19 可視化の様子

6. まとめ

ツインスケグ船であるZEUSコンテナ船を対象に、船尾トンネル立ち上がり部の流れを吸い込み船尾スケグ上部から吹き出す境界層吸い込み技術の効果を調査した。境界層制御技術の効果としては、特に、船尾を肥大化した船でリスクの高い、トンネル部の立ち上がりによる流れの変化による剥離の抑制による抵抗低減効果、船尾吹き出しによる自航要素の改善などがあげられる。

事前検討として、ZEUS コンテナ船のトンネル傾斜を急にした船尾肥大化船について水槽試験で境界層吸い込みの効果を調査し、剥離の抑制効果からフルード数 0.167, 0.137 の自航点で約 25%の水槽馬力における低減効果を得た。

ZEUS コンテナ船を対象とした水槽試験の結果、自航要素の改善によると考えられる馬力低減効果を確認した。また、速度に応じて最適となる吸い込み流量があることを確認した。

境界層吸い込みの、工数ミニマム船型である箱船への適用について調査し、フルード数 0.1475 の自航点において、約 18%の水槽馬力低減効果を確認した。

尺度影響を考慮した実船での効果については、今後の検討課題となる。

謝辞

本研究の実施にあたり日夏宗彦氏、岸本雅裕氏に大変お世話になりました。厚くお礼申し上げます。また、水槽試験において多大なご協力をいただいた堀利文氏、深澤良平氏に深く感謝いたします。

参考文献

1) 佐々木紀幸：ZEUS プロジェクト、海上技術安全研究所平成 22 年度研究発表会講演集、2010、pp.23-38
2) Sasaki, N.: Boundary Layer Control of Twin Skeg Hull Form with Reaction Podded Propulsion, Proceedings of Second International Symposium on Marine Propulsors, 2011, pp.244-249.
3) Sasaki, N., Kume, K., Kuroda, M., Fujisawa, J., Kawanami, Y., Kawashima, H. and Ichinose, Y.: Evolutional Ship Design concept for the final phase of EEDI, 17th International Conference on Ships and Shipping Research, 2012.
4) Hino, T.: Navier-Stokes Computations of Ship Flows on Unstructured Grids, Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, 1998.