

Title	船体後半部に取り付けられた小型フィンによる推進性 能向上に関する基礎的研究
Author(s)	山下, 力藏
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76574
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

船体後半部に取り付けられた小型フィンによる 推進性能向上に関する基礎的研究

山下 力藏

2019年12月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章	緒言	Î				
	1.1	研究	리书素			1
	1.2	研究	E目的			2
	1.3	研究	£構成			2
第2章	平极		イン			
	2.1	対象	象形状			4
	2.2	PIV	7試験			6
	2.	.2.1	PIV 装置および解析	F手法		6
	2.	.2.2	曳航水槽 PIV 流場	計測装置の配	置及び設定	. 8
	2.	.2.3	回流水槽 PIV 流場	計測装置の配	置及び設定	9
	2.3	CF	D計算			11
	2.	.3.1	ソルバーおよび乱	流モデル		11
	2.	.3.2	計算格子			11
	2.	.3.3	境界条件の設定			13
	2.	.3.4	格子数の妥当性の研	崔認		13
	2.4	PI	V 試験と CFD 計算の	の結果の比較		16
	2.	4.1	フィン上流での境界	界層の比較		16
	2.	.4.2	流速分布の比較			18
	2.	.4.3	渦度分布の比較			22
	2.	.4.4	乱流エネルギー分布	布の比較		26
	2.5	CF	D計算の改良			32
	2.	5.1	乱流モデルの改良			33
	2.	.5.2	DDES の適用			34
	2.	.5.3	壁関数を用いない諸	计算		39
	2.	.5.4	乱流強度の変更			44
	2.6	結言				52
第3章	船体	本表面	i上のフィン			
	3.1	対象	良船型およびフィンヲ	形状		53
	3.2	回汾	記水槽(SHI-ME)に	おける試験		55
	3.	.2.1	抵抗自航試験			55
	3.	.2.2	PIV 試験設定			59
	3.3	曳舠	1水槽(大阪大学) 1	こおける試験		61
	3.	.3.1	抵抗自航試験			61

3.3.1	抵抗自航試験	
3.3.2	PIV 試験設定	

62

3.4 CFD 計算		63
3.4.1 OpenFOAM 計算		63
3.4.2 SHIPFLOW 計算		64
3.5 PIV 試験結果と CFD 計算結	果の比較検討	67
3.5.1 面内流速の分布とフィン	の有無による撹乱成分について	67
3.5.2 渦度分布について		78
3.6 フィン効果の発生メカニズ	Д	80
3.7 結言		83
第4章 結論		84
謝辞		85
付録 A 乱流モデル		86
付録 B CFD 計算に仕様したコンピュー	ター仕様	90
参考文献		91
記号一覧		93
表一覧		95
図一覧		96
本論文に関連した著者の発表論		102

第1章 緒言

本研究はプロペラから離れた上流側の船体表面に装着した小型フィンによる推進性能向上について、その効果やメカニズムを模型試験および数値シミュレーションで検証したものである.

1.1 研究背景

船舶の燃費性能は海運会社においては燃料コストの削減,造船会社においては製品価値を向上さ せる重要な指標のひとつであり,企業の競争力に大きなインパクトがある.また,世界的な環境へ の関心の高まりもあり,国際海事機関(International Maritime Organization: IMO)において1トンの 貨物を1マイル運搬する時に排出する二酸化炭素のグラム数を規制するエネルギー効率指標(Energy Efficiency Design Index: EEDI)が2011年に採択され,2013年から発効されている.本論文を作成中 の2019年では2013年の発効時のEEDIと比較して10%厳しい規制である'Phase 1'が発効されてお り,今後,2020年には20%厳しい'Phase 2',2025年には30%厳しい'Phase 3'が発効されることが予 定されている.現在の船舶の燃費性能では'Phase 2'を満足することもやや難しく,'Phase 3'を満足さ せるにはかなり大きな改善が必要となる.EEDIの規制を満足させるためには燃料種別の変更などの 手段もあるが,船舶の燃費性能を向上することが最も直接的な方法である.燃費向上,すなわち省

エネの手段としては, 主に船殻やプロペラの効 率改善が挙げられるが, その他には, 省燃費化 を可能にするダクトやフィンなどの付加物(省 エネ付加物の中でもフィンは, シンプルな構造 ながら推進性能に与える影響は大きく, 多種多 様なフィン[2]が開発装着されている. 筆者が勤 務する住友重機械マリンエンジニアリング株 式会社(SHI-ME)でも近年フィンを装着する船 舶を開発・製造しており, フィンの効果は模型



図 1.1 プロペラから離れたフィンの実船装着例

実験や実船速力試験で確認されている.実船にフィンを取り付けた例を図 1.1 に示す.写真右下付近 にフィンが装着されている.

省エネ付加物に関するコンピューターによる流体力学的特性の推定(CFD: Computational Fluid Dynamics)に関しても様々な事例があり、プロペラの直前に設置したダクトに関しては CFD Workshop Tokyo 2015[3]にて詳細な研究例が報告されている.プロペラ直前にフィンを配置した CFD の例としては、川北ら[4]の研究も存在する. CFD で付加物性能が推定可能であると、船舶の設計初 期段階で付加物の形状や位置を決定できるため船型開発に有用であるが、本研究で取り扱うプロペラから離れた位置に大着したフィンを有する船体周りの流れおよび推進性能をシミュレートしても、模型試験や実船試験のように推進性能が向上するという結果は得られ なかった. つまり、プロペラから離れたフィンの効果は、実際の模型や実船の試験では確認できる

ものの、単純に CFD を適用したのでは十分なシミュレーションができていないと考えられる.

そこで本研究では、プロペラから離れたフィンが省エネ効果を発生するメカニズムを明らかにし、 CFD によるシミュレーションを可能にすることで様々な船型に対してフィンの位置や形状の最適設 計を行う一助となり、船舶の燃費低減に貢献し、経済および環境面において社会的貢献を狙うもの である.

1.2 研究目的

プロペラから離れた位置の船体上にフィンを装着した場合と装着しない場合では、模型船試験時 にその自航要素、特にプロペラ伴流係数に大きな差(第3章参照)が表れることから、フィンによ る流場の変化は、フィンから離れたプロペラ付近の流場に影響を与えていると考えられる.ところ が、船体に装着されたフィンは船体の境界層の内部に位置していることが予想され、フィンの流場 への影響は複雑であると考えられる.一方で、一様流中に置かれた平板上に翼を配置することによ り境界層に対する翼端渦の影響を調査した研究は、過去に鈴木・薮下ら[5]などによって行われてい るが、境界層内部に起立する翼またはフィンは速度勾配のある流場の中で翼端渦を発生することに なるため、上記の先行研究の場合とは渦が流場に与える影響は異なると考えられる.

本研究では、まず、平板にフィンを装着した単純な形状に対する流れについて流場を計測した上 でそれをシミュレートできる CFD 手法について検討した.次に、フィンを装着した模型船を用いた 抵抗自航試験および流場計測と、それに対応する CFD を実施し、フィンが流場に与える影響と推進 性能への効果およびそのメカニズムを明らかにすることとした.

1.3 研究構成

本研究の最終的な目標は、船体に装着したフィンについて実験で確認できた性能改善効果を CFD でシミュレートすることと、その性能改善のメカニズムを明らかにすることである.しかし、船体 に装着したフィンから発生する渦は、フィン上流で発生した船体のビルジ渦と重なった複合的な流 場となるため、フィンの影響を CFD 計算で求めることに成功したかどうかを明確に判断することは、 難しいことが予想された.そこで、まず、平板に垂直に小型フィンを装着した形状について、フィン が流れに対して迎角を持つ場合の流場計測を行うことで、境界層による速度変化以外の流れの影響 を受けない環境でフィンが流場に与える影響を把握し、それをシミュレートできる CFD 計算の設定 を検討した.次に、その CFD 計算設定を参考にして小型フィンを装着した船体について、CFD 計算 を実施した.CFD 計算で得た流場と、同形状のフィンおよび模型船についての PIV による流場計測 の結果を比較して、CFD 計算が十分に実験の流場をシミュレートできていることを確認した.さら に、それらの結果から、フィンの性能改善メカニズムについて考察した.

次章の第2章では、平板に垂直に小型フィンを取り付けた単純な形状(平板上フィン)の場合の 流れについて、S-PIV (Stereo Particle Image Velocimetry)装置(以下 PIV)を用いた流場計測を実施 し、平板による境界層内の流速勾配以外の流速を持たない流れに対し、迎角を持ったフィンが流場 に与える影響に関する実験データを取得した.その後、同じ幾何形状、配置を有する平板およびフ ィンを含む流れについて, CFD 計算を実施した.当初実施した CFD による計算結果では,十分に PIV 試験で計測した流場をシミュレートできなかったため, CFD 計算の格子の変更,乱流モデルの 改良,定常および非定常解析の適用などを検討した.

第3章では、船体表面上に装着した小型フィンが流場に与える影響とその効果を調査するため に、まず、対象の船型(JBC: Japan Bulk Carrier)にフィンを装着して自航試験を実施し、推進性能 が向上するようなフィンの位置を探索した.次に、そのフィンが流場に与える影響を明らかにする ために、PIV 装置を用いてフィン後流の流場の計測および、第2章で検討した CFD の計算設定を応 用して、対象船型である JBC 模型船周りの流れの CFD 計算を実施した.これらより、まず、フィン による性能改善効果について、自航試験結果と CFD 計算結果で比較検討した.次に、フィンによる 流場の変化についても、PIV 試験で計測された流場と CFD で計算された流場を比較することにより、 シミュレーションの精度を確認したうえで、フィンが推進性能を向上させるメカニズムについて考 察した.

第2章 平板上フィン

2.1 対象形状

境界層内部に設置されたフィンの流場への影響を計測するために,アクリル製の平板とその平板 表面に直角にフィンを設置した模型を作成した.平板のサイズは長さ 2000mm,高さ 750mm,厚さ 15mm とし,フィンのサイズは長さ 50mm (平板長さの 1/40),幅 10mm (平板長さの 1/200),厚さ 1mm とした.フィンの取り付け位置は,フィン先端が平板の先端から 1500mm,平板底面から 250mm の位置である.流れに対するフィンの迎角を変更するために,フィン先端を中心に内径 (左舷側) 210mm,外径 (右舷側) 300mm,厚さ 15mm (内径と外径の境界は厚さの半分位置)の円形フランジ

(図 2.3) を平板に嵌め込む機構を作り,フランジを回転させることでフィンの迎角を変更可能とした. 模型の全体図を図 2.1,平板とフィンのサイズを表 2.1 に示す.平板の全体とフランジの平板側の写真を図 2.2 に示す.アクリル製の平板は PIV 試験での反射を避けるために透明なものを用いた. 平板の前後端の断面は直径 15mm の半円とし,先端から 50mm の位置に乱流促進のためのテープを 両舷に貼り付けた (図 2.4). このテープは DYMO ラベルライターを用いて 9mm 幅のビニール製テ ープに「X」の文字を連続して刻字したものを使用した.平板の長さを 2mとした理由は,筆者がよ く用いる模型船の長さが 2.0~2.5mでレイノルズ数は $Rn=1\times10^6\sim2\times10^6$ であるので,その模型船に近 いレイノルズ数 ($Rn=1\times10^6$) とし,同等の境界層厚さを得るためである.レイノルズ数 Rn は(式 2.1) で定義される.

$$Rn = \frac{uL}{u}$$
 $u: 流速 L: 代表長 v: 動粘性係数$ (式 2.1)

フィンについても模型船の大きさに合わせたため上記のサイズや位置とした.この平板と小型フィンを組み合わせた形状を,本論文では平板上フィンと呼ぶこととする.

座標系は主流方向を*X*,主流に対して水平方向に直角で平板右舷向きを*Y*,鉛直上向きを*Z*とし, 原点を*X*軸は平板の先端, Y軸は平板の左舷側表面, Z軸はフィン先端の高さ位置とした.また,そ れぞれの軸方向の速度を*u*, *v*, *w*とした.

表 2.1 平板とフィンのサイズ表

平板			フィン		
長さ <i>L</i>	2000mm		長さ L_{FIN}	50mm	
深さ	750mm		幅	10mm	
厚さ	15mm		厚さ	1mm	





図 2.2 左図:アクリル平板全体(右後方から撮影)右図:平板フランジ嵌め部分(左前方から撮影)



図 2.3 左図:フランジ全体(左側から撮影)



右図:フランジ断面(前方から撮影)



図 2.4 平板先端に取り付けた乱流促進テープ

2.2 PIV 試験

2.2.1 PIV 装置および解析手法

平板上フィンの流場計測は、大阪大学所有の PIV 装置を用いて実施した. PIV 装置の写真を図 2.5 に、PIV 装置と平板上フィン模型の配置イメージを図 2.7 に示す.大阪大学の PIV 装置では図 2.6 に 示すように、対象面に対して横からレーザーを照射し、対象の後方に異なる角度で設置した2台の カメラで流体中に散布したトレーサー粒子の画像を撮影した.一度の計測は、レーザーを瞬間的(本 試験では 300µsec 間隔) に 2 回照射し, それと同時に 2 台のカメラで撮影を行う. これを 1 セットの 計測と呼ぶことにする.1セットの計測において、1台のカメラからは2回のレーザー照射と同時に 撮影した2枚の画像を取得し、その2枚の画像に写った同じトレーサー粒子の移動量を算出して、 事前に取得しておいた校正値から、カメラの向きに対して垂直な面への投影流速を求める.もう1台 のカメラでも同じ撮影および解析を行い、2 台のカメラから得られたそれぞれのカメラに対して垂 直な面の投影流速を計測面に座標変換して計側面の3次元流速を解析する.この解析を画像内の解 析可能なトレーサー全てに対して実施し、1セットの計測での計測面内の流速を求める.この計測を 複数セット(本試験では1断面当たり約240セット)実施し、その平均値を最終的な流速の解析値 とする.図2.8にカメラ1,2から撮影した画像例を示す.画像上の多数の白い点がトレーサー粒子 である.ここで、レーザー光の発生には Litron Lasers 社の Nano L 135-15 PIV(ダブルパルス YAG レ ーザー)を用いている.発振したレーザー光は、水中ポッド内のシリンドリカルレンズを通してシ ート光に変換され、対象面を照射している.2つのカメラは La Vision 社の Imager pro X 2M であり、 これらを水中ポッド内に設置し、こちらも水中ポッド内の鏡を通して対象面を撮影している.





図 2.7 PIV 装置と平板上フィン模型の配置イメージ



図 2.8 左:カメラ1で撮影した1枚目の画像例 中央左:カメラ1で撮影した2枚目の画像例 中央右:カメラ2で撮影した1枚目の画像例 右:カメラ2で撮影した2枚目の画像例

2.2.2 曳航水槽 PIV 流場計測装置の配置及び設定

平板上フィン模型を対象とした流場計測試験は、2017年11月に大阪大学船舶海洋試験水槽(曳航 水槽 長さ100m,幅7.8m,深さ4.35m)にて実施した.計測結果については2.4項で報告する. 水槽の電車下に設置した模型の写真を図2.9に示す.模型は平板試験用の治具に取り付け,その治具 を水槽上の模型船試験用の治具と連結した.平板の位置決めおよび鉛直の設定には、曳航台車に吊 り下げた下げ振りを基準とした.トレーサー粒子にはレーザー光に対する反射を大きくするために 銀コーティングされた平均直径8~20µm,比重1.7の中空ガラス粒子(品名 SH400S33)を用いた. 計測時には,計測開始直前から計測終了まで連続して電車の前端より散布した(図2.10).平板模型 の位置は電車に対して固定とし,PIV 装置の前後位置を変更することで,異なる断面位置で⇔計測 を実施した.計測断面位置は、フィンの先端から300mm後方までは25mm間隔,300mmから450mm までは50mm間隔とした.曳航速度は0.75m/s(フルード数0.1693)としたが、これは肥大船模型で の計測と同じとするためである.フィンの迎角は5°と10°の2種類とした.試験では1走行で1 断面の計測を行い、1走行あたり238セットのPIV計測を行った.本試験に用いたPIV装置では、 200セットの計測で平均流場が収束することが確認されており、装置のメモリ量の仕様から1走行 あたり238セットとした.1セットのレーザーの照射間隔は300µsecとした.なお、本計測時の水温 は14.8℃であり、レイノルズ数は1.30×10⁶であった.



図 2.9 大阪大学水槽での PIV 装置と平板



図 2.10 トレーサー容器とトレーサー散布装置



図 2.11 レーザー照射の様子

境界層内に設置したフィンの迎角の変更を可能とするため、平板にフィン付きのフランジを嵌め 込む機構としたが、その接合部は僅かながら不連続となり本来の意味で平面とはならない. そこで フィン付きの流場計測を行う前に、平板とフランジの左舷上流側の境界位置である、フィン先端か ら 105mm 上流位置(図 2.1 および図 2.3 参照)の前後 30mm でフィン無しの流場を計測し,平板と フランジの境界が流場に影響を与えていないかどうかを確認することとした. その計測結果を図 2.12 に示す. 平板とフランジの接合部の上流と下流で、計測誤差と考えられる違いはあるものの、 境界層厚さや面内流速分布など流場の違いが認められなかった.これより、平板とフランジの接合 部が流場に与える影響はないと判断した.







右図: X=1425mm 断面の流速分布 (平板とフランジ境界の 30mm 下流)

2.2.3 回流水槽 PIV 流場計測装置の配置及び設定

2017 年 11 月に実施した大阪大学での PIV 試験では、流速分布に注目した計測を実施した. さら に乱流エネルギー分布を計測するために 2018 年 11 月に再度 PIV 試験を行った.当初は同じ大阪大 学での計測を予定していたが、2018年6月の大阪府北部地震により、大阪大学船舶海洋試験水槽が 損傷を受けて使用できなくなったため、住友重機械マリンエンジニアリング㈱(SHI-ME)の横須賀 造船所内にある回流水槽での計測を実施することとした.これの計測結果については 2.4 項で報告 する. SHI-ME の回流水槽全体図と写真を図 2.13, 仕様を表 2.2 に示す.



右図:回流水槽本体写真

表 2.2 SHI-ME 回流水槽仕様

寸法 (外径)	全長=約21m 全高=約7.5m 全幅=最大約4.5m
観測部	長さ=約6.0m 高さ=1.75m 幅=2.0m 水深=1.4m
水量	約 150 トン
流速	最大 3.3m/s

PIV 装置を回流水槽に設置するために、回流水槽の既存設備である XY トラバーサーの可動部分 を取り外して PIV 計測用の冶具に変更し、その先端に PIV 装置を連結した. これの写真を図 2.14 に 示す.本装置では、1000 セット計測で平均の乱流エネルギー分布が収束することが確認されている ので、1 断面あたり 1190 セットの計測を実施した. 1 セットの 2 回の撮影間隔は 300µsec とした. 回 流水槽では 2 つのインペラによって流れを発生させる仕組みであり、曳航水槽に比べてやや乱れた 流れ場となることから、フィン渦が計測されにくくなる可能性を考慮したこと、および日程的な理 由から、強いフィン渦の発生が予想されるフィン迎角 10°のみの試験を行った.



図 2.14 左図: SHI-ME 回流水槽での PIV 装置と平板模型配置 右図:回流水槽での平板模型

トレーサー粒子は SHI-ME での PIV 試験時に通常使用いている,ナイロン製で平均直径が約 56µm, 比重 1.016 (品名: VESTONSINT 2157) のものを使用し,回流水槽全体に行き渡らせるように試験前 に散布した.本試験時の水温は 15.1℃であった.また,レイノルズ数は 1.32×10⁶ であった.本試験 においては,トレーサー粒子がレーザー光を反射する量が予想外に少なかったため,2017 年の大阪 大学での PIV 試験に比べてやや不鮮明な計測結果となったものの,同様の流速分布を得た (2.4.2 項 参照).ただし,SHI-ME での計測結果は,フィンによって発生した低速領域が平板表面 (*Y/L*=0) 方 向に圧縮されたような流速分布 (図 2.29~図 2.32 参照) となっている.これは PIV 装置によるブロ ッケージ影響が原因であると考えられる.そのため,流速分布については 2017 年に実施した大阪大 学での計測結果を,より正確なものとして本論文では扱うこととした.ただし,2017 年の大阪大学 での試験では,乱流エネルギーについては計測していなかったので,乱流エネルギー計測結果につ いては SHI-ME での計測結果を採用した.

2018 年 SHI-ME と 2017 年大阪大学における,同じ平板断面の PIV 計測画像の比較を図 2.15 に示 す. SHI-ME の試験では,平板表面が発光するまで画像を明るく処理しないとトレーサー粒子が見え にくいのに対して,大阪大学の試験では,暗い画像でもトレーサー粒子が多数確認できる.





左: SHI-ME 回流水槽(2018 年試験) 右: 大阪大学 曳航水槽(2017 年試験) 図 2.15 平板上フィン X=1800mm(フィン先端から 300mm 後方) 断面のカメラ 2 による撮影画像

2.3 CFD 計算

2.3.1 ソルバーおよび乱流モデル

平板上フィン模型周りの流場をシミュレートする CFD ソフトウェアとして, OpenCFD Ltd が無 償で公開している OpenFOAM v1812 を用いた. CFD ソルバーとしては OpenFOAM に含まれる simpleFoam を使用した. simpleFoam は, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes eq.)の解法のひと つである SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 法を実装したものである. 乱 流モデルは船舶の CFD で近年よく使われる k-omegaSST のうち,壁面条件として壁関数を用いるも のを選択した. k-omegaSST の詳細を付録 A に記す. これらの CFD 計算の結果については, PIV 計 測結果とともに 2.4 項で報告する.

2.3.2 計算格子

計算格子の作成するためのソフトウェアとして、NUMECA インターナショナル社の Hexpress (version 7.1) [6]を用いた. Hexpress は解析領域をまず大きな直方体格子で分割し,次に物体回りに ついては段階的に格子を細かく分割した上で,境界層格子を挿入することが可能である. この Hexpress を用いて平板上フィン形状について作成した格子の全体図を図 2.16 に示す. 座標系は前述 の 2.1 項で示した通りである. 解析領域の範囲を決定する際には,平板の向かい側の壁面境界影響を なるべく小さくしながら格子数の増加を抑制するようにバランスを考慮した上で,解析領域を上流 は平板先端から 1.0m,下流も平板後端から 1.0m,Y方向は左舷側の平板表面の Y=0m から Y=-1.0m まで,深さは平板上面から 1.0m と設定した. フィン近傍の格子について図 2.17 に示す. この計算で は、フィン後流の格子密度をその周囲に比べて高くしている. これは後の 2.3.4 項で述べるように, 様々な格子で計算を実施した結果,フィンの影響を十分に解像するためには、フィンの後方に高密 度の格子が必要であったためである. なお,本計算ではフィンの位置が自由表面から 0.5m と深いの で,自由表面の影響は無視できると考え自由表面は考慮しなかった.



図 2.16 計算領域と境界条件設定



図 2.17 フィン近傍の計算格子

OpenFOAM で壁関数を用いる場合の壁面からの無次元距離 y^+ の推奨値である 30~300 を満たすため, $y^+ = 100$ 程度となるように, 平板およびフィンに接する格子の法線方向の厚さは 1mm とした. ここで, y^+ は以下の式で定義[7]される.

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$
 (式 2.2)
 $y^+ = u_{\tau} * y/\nu$ (式 2.3)
 $u_{\tau}: 摩擦速度 y: 壁面からの距離 $\tau_w: 壁面せん断応力 v: 動粘性係数 \rho: 密度$$

ここでは $\tau_w = C_{f0} * 0.5 \rho V^2$ として計算した. ただしVは流速, C_{f0} は摩擦抵抗係数で Schoenherr の簡易式[8] $C_{f0} = 0.463/(log_{10}Rn)^{2.6}$ を用いて求めた.

2.3.3 境界条件の設定

まず,流速について,流入境界は流速一定(0.75m/s),流出境界は1階微分がゼロ,平板とフィンの表面はゼロ,その他の壁面境界には対称条件を設定した.次に,圧力について,流出境界でゼロとし,平板とフィン表面および流入境界で1階微分がゼロ,その他の壁面境界には対称条件を設定した.最後に,乱流エネルギーkおよび乱流エネルギー比消散率ω(omega)について,流入境界および平板とフィンの表面は一定値,流出境界は1階微分がゼロ,その他の壁面境界には対称条件を設定した.以上を表 2.3 にまとめる. k およびωの初期値は以下の式で計算[9]した.ただし,U:流速(0.75m/s),T:乱流強度(0.05), Cu:0.09, l:平板長さ*0.07(=2*0.07)とした.乱流強度Tおよび代表長さ1については,汎用的な他の商用 CFD ソフトで用いられていた値を参考にした.

$$k = \frac{3}{2}(U \cdot T)^2 \qquad (\vec{\mathbf{x}} \ 2.4)$$

$$\omega = Cu^{-0.25} \cdot k/l \qquad (\exists 2.5)$$

表 2.3 OpenFOAM の境界条件

		U	р	k	omega
Fin	type	noSlip	noSlip zeroGradient		omegaWallFunction
Plate	value	-	-	uniform 2.11×10^{-3}	uniform 4.2×10^{-2}
Inlet	type	fixedValue	zeroGradient	fixedValue	fixedValue
	value	uniform(0.75,0,0)	-	uniform 2.11×10^{-3}	uniform 4.2×10^{-2}
Outlet	type	zeroGradient	fixedValue	zeroGradient	zeroGradient
	value	-	0	-	-
Others	type	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane
	value	-	-	-	-

2.3.4 格子数の妥当性確認

平板上フィン模型周り流場の計算を実施するにあたり、フィン周りの格子密度が結果に与える影響について調査するため、格子密度についてパラメータスタディを行った. Hexpress では前述のように格子を段階的に細かく(Refine)でき、その回数(Level)と領域を指定できる. Levelを上げる毎に指定した領域の格子の辺を半分に分割する. Refine する領域はフィンの影響があると予想される固定領域とし、その内部の格子密度を変化させて結果の変化を調査した. 格子密度を変化させたときの最小格子の一辺の長さを平板長さ *L*=2m で無次元化した値を表 2.4 に示す.

表 2.4 Refine Level による格子の辺長さの無次元値

HEXPRESS Refine Level	Level 0	Level 5	Level 6	Level 7
Cell Size / L	5.00×10^{-2}	1.57×10^{-3}	7.80×10^{-4}	3.90×10^{-4}

Level5~7の格子について、フィン中央における断面図を図 2.18 に、計算結果としてフィン先端から 100mm 下流 (X=1600mm)の断面での流速分布を図 2.19 に示す.計算された流速分布の等値線が描く幾何形状は、Level6(図 2.19 中央)と level7(図 2.19 右)ではフィンの影響によって流速が低くなった領域の等値線形状が境界層から大きく同じ形状で突起しているのに対し、Level5(図 2.19 左)では Lvel6 や Level7 に比べてなだらかな突起となっている.また、Level5~7の格子で計算された主流方向の無次元渦度 $\overline{\omega_x} = -15$ (定義は 2.4.3 項参照)の等値面を図 2.20~図 2.22 に示す.こちらでも Level5 と Level6 では渦度等値面の長さに違いがあるが、Level6 と Level7 では差がほとんど見られない.以上のことから Level6 まで細分化した格子が必要十分であると判断し、本研究の平板上フィン形状の当初の CFD 計算にはこの格子を用いた.Level6の格子数は約 81 万セルで、CFD 計算の開始から収束するまでの時間は、収束条件を圧力の残差が 1.0×10^4 以下、その他の速度などの残差が 1.0×10^5 以下として約 30 分であった.計算に用いたコンピューターの仕様は付録 B に示す.



図 2.18 フィン中央断面における格子密度の違い 左: Level5 中央: Level6 右: Level7



図 2.19 X=1600mm(フィン先端から 100mm)での流速分布の違い 左: Level5 中央: Level6 右: Level7



図 2.20 無次元渦度 $\overline{\omega_x} = -15$ の渦度等値面: Level5 格子



図 2.21 無次元渦度 $\overline{\omega_x} = -15$ の渦度等値面: Level6 格子



図 2.22 無次元渦度 $\overline{\omega_x} = -15$ の渦度等値面: Level7 格子

2.4 PIV 試験と CFD 計算の結果の比較

2.4.1 フィン上流での境界層比較

本研究の目的のひとつは、船体後方の境界層内におかれたフィンの船尾流場に対する影響を調査 することであるので、平板上フィン模型周りの流場についてもフィンの存在と境界層の関係を把握 しておくため、フィン位置から上流の境界層の発達の様子について PIV と CFD の結果を比較するこ ととした. これを図 2.23~図 2.27 に示す. 縦横軸は高さと幅を平板長さ *L*=2m で無次元化し、コン ターは流速を曳航速度 *U0*=0.75m/s で無次元化した値である. これらの図からわかるように、PIV 計 測の結果も CFD 計算の結果も、上流からフィン位置直前まで徐々に境界層が発達している様子が示 されている. フィン先端は *Y/L*=0, *Z/L*=0 に位置しており、フィン幅は *Y/L*換算で 0.005 であるので、 フィン先端から上流に 50mm の位置(図 2.27)で、フィンは境界層の中に入っていることが確認で きる. CFD の精度評価の観点では、境界層の発達過程も含めて CFD は PIV の結果をよく説明してい る.



図 2.23 流速分布図 X=500mm(フィン先端から 1000mm 上流) 左: PIV 右: CFD



図 2.24 流速分布図 X=750mm(フィン先端から 750mm 上流) 左: PIV 右: CFD



図 2.25 流速分布図 X=1000mm (フィン先端から 500mm 上流) 左: PIV 右: CFD



図 2.26 流速分布図 X=1250mm (フィン先端から 250mm 上流) 左: PIV 右: CFD



図 2.27 流速分布図 X=1450mm (フィン先端から 50mm 上流) 左: PIV 右: CFD

2.4.2 流速分布比較

平板上フィンについての PIV による流速分布の計測は、2017 年に大阪大学の曳航水槽、2018 年に SHI-ME の回流水槽で実施したので、それらの結果と CFD の結果を本項で示す.前述の通り(2.2.2 項参照) PIV 試験では多くの断面で計測を実施したが、本論文では簡単のために X=1600mm、1700mm、 1800mm、1900mm(それぞれ、フィン先端から 100mm、200mm、300mm、400mm の位置)の断面に ついての結果を示す.それらの断面とフィンの位置関係を図 2.28 に示す.ただし、SHI-ME の PIV 計測では前述(2.2.3 項参照)の通り、トレーサー粒子を計測するために撮影画像全体を明るくする 必要があったため、X=1600mm の断面での計測では X=1605mm にあるフランジと平板の接合部か らのレーザー光の反射が大きく画像に写り込み、トレーサー粒子を撮影画像で認識することができ なかったため、X=1600mm の断面の計測の代わりにレーザーの反射が少なく良好な計測結果が得ら れた X=1590mm 断面の結果を示す.





フィンの迎角を 10° に設定した場合の PIV 計測および CFD 計算の流速分布を,図 2.29~図 2.32 に示す. それぞれは,大阪大学 PIV 試験(2017年),SHI-ME PIV 試験(2018年),CFD 計算の結果 である.縦横軸は高さと幅を平板長さ(*L*=2.0m)で無次元化した値で *Y/L*=0 が平板表面であり,フ ィン先端は *Y/L*=0~-0.005, *Z/L*=0 に位置する.コンターは平板長手方向の流速を曳航速度(*U0*=0.75m/s) で無次元化した値を示し,ベクトルは断面内の水平垂直方向の流速を曳航速度で無次元化した量と 向きを示している.

X=1600mm (図 2.29) では, PIV 結果と CFD 結果ともにフィンによって渦が形成されていること が確認でき,その渦の下側では境界層が厚くなり上側では薄くなっているのがわかる. CFD ではそ の渦がやや大きく計算されているようである. *X*=1700mm (図 2.30) では, PIV 結果, CFD 結果とも にフィンにより生成された渦がやや下方に移動し,それに伴って低速領域も下方に移動しているの が確認できるが,依然として CFD で計算された渦はやや大きいようである. *X*=1800mm (図 2.31) および *X*=1900mm (図 2.32) の位置では, CFD 結果を観察すると,ここまで PIV 結果より大きく計 算されていた渦は,急激に小さくなっている.一方で,それまでの強い渦の影響のためか低速領域 の中心が PIV 結果より下方に移動している.全ての断面を通して SHI-ME での PIV の計測結果は前述の通り(2.2.3 項参照)精度が良くないようである.

フィンの迎角を5°に設定した場合の PIV 計測および CFD 計算の流速分布を図 2.33~図 2.36 に示 す.フィンの迎角5°は SHI-ME の回流水槽では計測を行わなかったので、大阪大学の曳航水槽での 計測結果と CFD 計算結果を示す.5°でも10°と同様に、CFD 計算ではフィンから遠くなると PIV 結果より渦が小さくなっていることがわかる.



図 2.29 流速分布 フィン迎角 10° X=1600mm



図 2.30 流速分布 フィン迎角 10° X=1700mm



図 2.31 流速分布 フィン迎角 10° X=1800mm



図 2.32 流速分布 フィン迎角 10° X=1900mm



図 2.33 流速分布 フィン迎角 5° X=1600mm



図 2.34 流速分布 フィン迎角 5° X=1700mm



図 2.35 流速分布 フィン迎角 5° X=1800mm



図 2.36 流速分布 フィン迎角 5° X=1900mm

2.4.3 渦度分布の比較

YZ 平面内の無次元渦度 $\overline{\omega_x}$ の定義式を (式 2.6) に示す.

$$\overline{\omega_x} = \left(\frac{\partial w}{\partial Y} - \frac{\partial v}{\partial Z}\right) * \frac{U_0}{L}$$
 U0: 曳航速度(0.75m/s), L: 平板長さ(2.0m) (式 2.6)

この式で計算された無次元渦度分布について,図 2.37~図 2.40 にフィン迎角 10°,図 2.41~図 2.44 にフィン迎角 5°の結果を示す. これらの図からも前項と同じく CFD ではフィンから離れるに つれて渦度の絶対値が小さくなっていることが確認できる.

無次元渦度の等値面図を図 2.45~図 2.48 に示す.フィン迎角 10°の場合の PIV の図 2.45 と CFD の図 2.46 では CFD でも PIV と同等かやや絶対値の大きい渦度がシミュレートできているが,フィン迎角 5°の図 2.47 と図 2.48 を比較すると, CFD でシミュレートされた渦度は PIV の渦度に比べて小さく,CFD 計算の渦は早く減衰していることがこの図からも確認できる.



図 2.37 渦度分布 フィン迎角 10° X=1600mm



図 2.38 渦度分布 フィン迎角 10° X=1700mm



図 2.39 渦度分布 フィン迎角 10° X=1800mm



図 2.40 渦度分布 フィン迎角 10° X=1900mm



図 2.41 渦度分布 フィン迎角 5° X=1600mm



図 2.42 渦度分布 フィン迎角 5° X=1700mm



図 2.43 渦度分布 フィン迎角 5° X=1800mm



図 2.44 渦度分布 フィン迎角 5° X=1900mm



図 2.45 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° 阪大 PIV



図 2.46 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° CFD



図 2.47 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5° 阪大 PIV



図 2.48 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5° CFD

2.4.4 乱流エネルギー分布の比較

SHI-ME の回流水槽で計測されたフィンの迎角 10°の乱流エネルギー分布を, CFD で計算された ものと比較する. CFD での乱流エネルギーの流入境界条件を算出するにあたり,当初は乱流強度を 5%(T=0.05)として計算していたが, PIV と比較した結果,過大であったので乱流強度を 2%(T=0.02) として追加計算した結果も示す. OpenFOAM での CFD 計算において,当初設定していた乱流強度 5%での境界条件を表 2.5,乱流強度を 2%に変更した境界条件を表 2.6 に示す.

表 2.5 OpenFOAM 境界条件設定: 乱流強度 5%

		k	omega
Fin	type	kqRWallFunction	omegaWallFunction
Plate	value	uniform 2.11×10^{-3}	uniform 4.20×10^{-2}
T. l. t	type	fixedValue	fixedValue
Inlet	value	uniform 2.11×10^{-3}	uniform 4.20×10^{-2}

表 2.6 OpenFOAM 境界条件設定: 乱流強度 2%

		1	
_		k	omega
Fin	type	kqRWallFunction	omegaWallFunction
Plate	value	uniform 3.38×10^{-4}	uniform 1.68×10^{-2}
T. 1. 4	type	fixedValue	fixedValue
Inlet	value	uniform 3.38×10^{-4}	uniform 1.68×10^{-2}

乱流エネルギー分布を示した図 2.49~図 2.52 全てにおいて, 乱流強度 5% (T=0.05) としていた CFD では境界層の外側で乱流エネルギーが PIV に比べて過大にシミュレートされていたので, PIV と同等になるように乱流強度を 2% (T=0.02) に変更した. その結果, CFD (T=0.02) の計算は PIV の結果とよく一致した乱流エネルギー分布となった.



図 2.49 乱流エネルギー分布 フィン迎角 10° X=1600mm



図 2.50 乱流エネルギー分布 フィン迎角 10° X=1700mm





図 2.52 乱流エネルギー分布 フィン迎角 10° X=1900mm

図 2.53~図 2.56 までに、大阪大学で計測された PIV 結果と CFD 結果の流速分布を示す. CFD 結 果では流入境界での乱流強度を 5%に設定した結果(CFD (T=0.05))と、2%に設定した結果(CFD (T=0.02))について示す. 比較対象を SHI-ME の結果ではなく大阪大学の結果としたのは、より精 度が高いと考えられるデータを採用したため(2.2.3 項参照)である. フィン先端から 100mm 下流 (X=1600mm)の図 2.53 で CFD (T=0.05) と CFD (T=0.02)を比較すると、CFD (T=0.02)の結果 の方が、僅かながらではあるが、渦中心の低速領域が広くなっている. その傾向は、図 2.54~図 2.56 に示すように、さらに下流でも継続して観察できる. 一方、CFD (T=0.05)では低速領域が PIV の結 果に比べて下方に存在していたが、CFD (T=0.02)では、CFD (T=0.05)の場合より PIV 結果の低速 部の存在領域位置に近づいた結果となっている.



図 2.53 流速分布 フィン迎角 10° X=1600mm



図 2.54 流速分布 フィン迎角 10° X=1700mm



図 2.55 流速分布 フィン迎角 10° X=1800mm



図 2.56 流速分布 フィン迎角 10° X=1900mm

次に、図 2.57~図 2.60 に渦度分布を示す.全ての位置の断面で流入境界での乱流強度を 2%とした CFD (T=0.02)の結果は乱流強度を 5%とした CFD (T=0.05)より渦度の存在領域が拡大する. これは、乱流強度を 5%とした CFD (T=0.05)では境界層外側で乱流エネルギーの消散が大きく、 その影響が境界層の内部まで影響しているためと考えられる.渦周りの乱流エネルギーの変化は図 2.49~図 2.52 の CFD (T=0.05)と CFD (T=0.02)を比較しても確認できる.その結果、渦度等値面 図を示した図 2.61~図 2.63 でも、CFD (T=0.02)で渦度等値面が延長した.



図 2.57 渦度分布 フィン迎角 10° X=X=1600mm



図 2.58 渦度分布 フィン迎角 10° X=1700mm



図 2.59 渦度分布 フィン迎角 10° X=1800mm



図 2.60 渦度分布 フィン迎角 10° X=1900mm



図 2.61 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10°阪大 PIV (図 2.45 と同じ)




図 2.63 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° CFD (T=0.02)

2.5 CFD 計算の改良

2017年の大阪大学の曳航水槽での PIV 試験結果を得た時点(2018年 SHI-ME での乱流エネルギー計測は未実施の時点)の PIV 結果と CFD の比較では,フィン迎角が 10°の場合はフィンで発生した渦が,図 2.45,図 2.46 に示したように,十分後方まで維持されている.一方,フィン迎角を5°とした場合は,CFD の結果はフィンが生成した渦が PIV の結果より上流で消散してしまう(図 2.47,図 2.48 参照).

本研究では船体表面上に装備したフィンが船体回りの流場に与える影響を CFD で明らかにする ことが目標のひとつである.船体にフィンを装備した場合では、フォィンの境界層内の主流方向に 対する有効迎角が 5°程度となることも予想されるため、フィンの存在が境界層内の流れに対する 影響を正確に予測できないことは問題である.そのため、この問題を改善するために CFD 計算手 法の改良を試みた.

2.5.1 乱流モデルの改良

フィンから発生した渦は回転(旋回)成分を多く含むため,通常の k-omegaSST に比べてより回転 流を考慮できるモデルについて検討した.中山・中川[10]の手法を参考にし, OpenFOAM において k-omegaSST モデルの乱流エネルギーの散逸項を改造[11]することで,旋回流れへの適用性を向上さ せた乱流モデルの変更を実施した.本改良は k-omegaSST の開発者である Menter ら自らによって修 正されたモデル[12]をベースに改良されており, Menter らの修正は以下に示すとおりである.

[修正前]
$$\Rightarrow$$
 [修正後]
 $\nu_T = \frac{a_1 k}{max(a_1\omega;\Omega F_2)} \Rightarrow \frac{a_1 k}{max(a_1\omega;SF_2)}$ (式 2.7)

$$\Omega = \sqrt{2W_{ij}W_{ij}} \quad W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \Longrightarrow \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\vec{x}, 2.8)$$

$$CD_{k\omega} = \max\left(\frac{2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k\partial\omega}{\partial x_{j}\partial x_{j}}; 10^{-20}\right) \implies \max\left(\frac{2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k\partial\omega}{\partial x_{j}\partial x_{j}}; 10^{-10}\right) \qquad (\not{\mathbb{R}}\ 2.9)$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + \frac{\partial(u_j\omega)}{\partial x_j} = -\frac{\gamma}{\nu_T} \overline{u_i^* u_j^*} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \sigma_\omega \nu_T\right) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right\} + 2\sigma_{\omega 2} \frac{1 - F_1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial\omega}{\partial x_j}$$
(£2.10)

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + \frac{\partial(u_j\omega)}{\partial x_j} = -\frac{\gamma}{\nu_T} \overline{u_i^* u_j^*} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - F_4 \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right\} + 2\sigma_{\omega 2} \frac{1 - F_1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial\omega}{\partial x_j}$$
(£2.11)
$$F_4 = \frac{1}{1 + C_{RC}R_i} \quad R_i = \frac{\Omega}{S} \left(\frac{\Omega}{S} - 1 \right) \quad C_{RC} = 1.4$$

これらの乱流モデルの改良前後の CFD 計算から得た, 渦度等値面を図 2.64, 図 2.65 に示す.明確 な渦度の変化を期待していたが, 結果的にはほとんど変化はなく, PIV 結果の図 2.47 のようにフィ ン渦の影響が下流まで伸びることはなかった.よって,この改良乱流モデルは採用せず,標準の komegaSST モデルを適用することにした.





図 2.65 渦度等値面(w_x = -12) フィン迎角 5° 乱流モデル改良 CFD

2.5.2 DDES の適用

ここまでの CFD では RANS をベースとした定常解析ソルバーの simpleFoam で計算を行ってきた が、フィンから発生する渦は非定常現象を含むことや、レイノルズ平均モデルが渦の消散に過大な 影響を与えている可能性を考え、物体近傍には RANS を適用し、物体から離れた空間には非定常解 析ソルバーの LES を適用するハイブリッド乱流モデルである DDES (Delayed Detached Eddy simulation) を用いて計算を実施した. DDES を適用するにあたり、フィンが生成する渦の予測精度を改善するた め、フィン表面付近やフィンによる渦の存在領域付近の格子を密にし、壁関数を適用せずy⁺を1程 度となるようにフィン表面に接する格子のサイズを設定した. これまでの計算に用いていた格子と DDES のために格子密度を高くした格子を図 2.66 に示す. この結果,格子数は 81 万セルから 630 万 セルに増加した.



図 2.66 左: RANS の格子

右:DDES 用の格子

壁関数を用いない場合の OpenFOAM の境界条件を表 2.7 に示す. 乱流エネルギー比消散率ωに関 しては壁関数を使用する設定のままとしているが, OpenFOAM 内部では, y⁺の値によって壁関数を 適用するかしないかを判断しているので, ここで用いている格子では壁関数が適用されることはな い. 計算はまず RANS (simpleFoam) 計算を行い, その結果を DDES 計算の初期値とした.

表 2.7 OpenFOAM の境界条件設定:壁関数非適

		k	omega
Fin type fixedValue		fixedValue	omegaWallFunction
Plate value		uniform 1.00×10 ⁻¹²	uniform 4.20×10 ⁻²
T - 1 - 4	type	fixedValue	fixedValue
Inlet	value	uniform 2.11×10 ⁻³	uniform 4.20×10 ⁻²

フィン迎角10°についてのDDES計算の結果とPIV結果およびこれまでに示してきたCFD(RANS) 結果との比較を図2.67~図2.73に示す.DDESではシミュレーション時間で1秒間の計算を行い, 後半の0.5秒間の平均値を結果として示している.フィン先端から100mm下流(X=1600mm)の断 面の流速分布を示した図2.67では,PIV結果やRANSによる計算結果に比べてDDESを適用した場 合ではフィンから発生する渦が強く,その渦はあまり減衰することなく下流(図2.68~図2.70)ま で続いているが,逆に,フィンにより生成された渦は,過大評価となることも示されている.図2.71 ~図2.73に示した渦度等値面図でもフィンで発生した渦がほとんど消散せずに下流までつづいてい る.ここで,DDES計算の初期値として用いたRANS(simpleFoam)計算結果の渦度等値面(図2.74) を確認すると,DDESの計算と同様に渦が減衰することなく後方まで続いている.つまり,DDES用 に変更した格子ではRANS計算による結果がPIV結果と大きく異なる結果であった.

引き続き DDES 計算の結果の確認を続けるのであれば、2.4 節で得られた CFD 結果と同じような 結果を RANS 計算で得ることができるように,格子を修正するなどして再計算するべきであったが, DDES では1秒間のシミュレーションに6日間の計算時間が必要で,船体表面上へ応用した場合は さらに格子数が増えて計算時間が増加するため実用的ではないと判断し、これ以上の DDES 計算は 実施しなかった.



中央: CFD (RANS)

図 2.68 流速分布 フィン迎角 10° X=1700mm

左: 阪大 PIV

-0.01 Y/L

右: CFD (DDES)

Ref. Vector U/U0=0.1





図 2.72 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° RANS (図 2.46 と同じ)



図 2.73 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° DDES



図 2.74 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° DDES 格子を用いた RANS 計算結果

2.5.3 壁関数を用いない計算

2.5.2 項で DDES 計算のための初期状態として壁関数を用いない RANS 計算を行ったが、その結果が壁関数を用いた場合に比べて改善される傾向があった. そこで RANS で壁関数を用いない計算 を実施した.ただし、平板に対する境界層に対しては壁関数を適用しないと DDES の計算と同様に 計算が安定しなかったので、フィンが生成する境界層にのみ壁関数を用いない設定とした.壁関数 を適用しない場合、その部分はy⁺が1程度となるように小さい格子を追加した.その格子幅は、平 板長さで無次元化した値で 5×10⁻⁵である.

元の計算格子とフィン周りの格子数を増加した改良計算格子を図 2.75 に、境界条件の設定を表 2.8 に示す. 改良格子は 86 万セルで CFD の計算時間は約 30 分であった. 計算に用いたコンピュー ターの仕様は付録 C に示す.



表 2.8 OpenFOAM の境界条件設定:フィン周りに壁関数非適用

		k	omega
Fin	type	fixedValue	omegaWallFunction
Fin	value	uniform 1.00×10 ⁻¹²	uniform 4.20×10 ⁻²
Dl. t.	type	kqRWallFunction	omegaWallFunction
Plate	value	uniform 2.11×10 ⁻³	uniform 4.20×10 ⁻²

上記の改良 CFD 格子を用い,フィン迎角 5°について CFD (RANS)で計算した結果を図 2.76~ 図 2.86 に示す.図 2.76~図 2.79 は流速分布を示しているが,壁関数を用いた CFD (壁関数適用)よ りフィン周りの格子に壁関数を用いない CFD (壁関数非適用)は,フィンの影響によって境界層か ら突出した低速領域が拡大してその位置も高くなっており,その傾向は PIV の結果と近くなってい る.渦度分布について図 2.80~図 2.83 に示す.フィン先端から 200mm 下流 (*X*=1700mm)の断面の 渦度分布を示した図 2.81 では,壁関数を用いない CFD の方が壁関数を用いた計算より渦度の絶対 値のピーク値は下がっているが渦度の存在領域は拡大している.その結果,下流の *X*=1800mm, 1900mm の図 2.82,図 2.83 でも壁関数を用いた計算より渦度が減衰しにくくなっており,より PIV の計測結果に近い結果を得た. 渦度等値面を図 2.84~図 2.86 に示す. CFD(壁関数適用)の図 2.85 の等値面に比べて, CFD(壁関数非適用)の図 2.86 の等値面が下流側に延びており, 壁関数を非適用とすることで渦が減衰しにくくなったことが確認できる.



図 2.76 流速分布 フィン迎角 5° X=1600mm



図 2.77 流速分布 フィン迎角 5° X=1700mm







図 2.79 流速分布 フィン迎角 5° X=1900mm









図 2.84 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5°阪大 PIV (図 2.47 と同じ)





図 2.86 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5° CFD (壁関数非適用)

2.5.4 乱流強度の変更

2.5.3 項で示した壁関数を用いない CFD 計算では,2.4.2 項で示した当初の CFD 計算に比べて予測 精度が改善した.この後,2.4.3 項で示したように流入境界での乱流強度を2%とすることでも CFD 結果が改善することがわかったので,その両方を組み合わせた設定(流入境界の乱流強度2%,フィ ン周りの格子を細密化,壁関数を非適用)を用いた計算を行った.設定した境界条件を表 2.9 に示 す.

		k	omega
Fin	type	fixedValue	omegaWallFunction
F 111	value	uniform 1.00×10 ⁻¹²	uniform 1.68×10^{-2}
Dlata	type	kqRWallFunction	omegaWallFunction
Plate	value	uniform 3.38×10^{-4}	uniform 1.68×10^{-2}
Inlet	type	fixedValue	fixedValue
	value	uniform 3.38×10 ⁻⁴	uniform 1.68×10 ⁻²

表 2.9 OpenFOAM 境界条件設定:フィン周りに壁関数非適用および流入境界の乱流強度 2%

壁関数を非適用とし、図 2.75 の右側と同じ改良格子を用いて、フィン迎角 5°について RANS (simpleFoam)で計算した結果を図 2.87~図 2.90に示す. 2.4.2 項で示した当初の CFD 計算結果を 初期 CFD,フィンの壁関数を非適用とし、流入境界の乱流強度を 2%とした CFD 計算結果を改良 CFD と呼ぶことにする.図 2.87~図 2.90 は流速分布を示しているが、全ての図で初期 CFD より改良 CFD の方が PIV 結果に近くなっており、特にフィン先端から 400mm 下流(X=1900mm)の断面の流速分 布を示した図 2.90 では、改良 CFD は初期 CFD より低速領域の拡大が顕著であり、PIV 計測結果に 似た流速分布となっていることがわかる.全ての図で初期 CFD と比べて改良 CFD では壁近くの境 界層がやや厚くなり、より PIV による計測結果に近くなっていることが観察できる.壁付近には壁 関数を適用せず、格子変更もしていないので、この差は流入境界における乱流強度の変更に起因す るものと考えられる.渦度分布について図 2.91~図 2.94 に、渦度等値面について図 2.95~図 2.97 に 示すが、この場合でも、上記と同様に渦度絶対値の高い領域が拡大し、フィンから発生した渦が PIV 結果と同様に長く維持されていることが確認できる.

フィン迎角 10°について確認のため計算した結果を図 2.98~図 2.108に示す. 全体的にフィン迎 角 5°の結果と同様に,流速分布および渦度分布ともに CFD 結果が改善されていることが確認でき る. 渦度等値面を示した図 2.106~図 2.108 においては,初期 CFD と改良 CFD でほとんど同じ結果 になっているが,壁関数を適用した結果の図 2.63 と比較すると,改良 CFD の渦度等値面は短くなり PIV 結果に近づいている. これは壁関数を適用した CFD の場合はフィン周りの解析精度が不十分な ため,フィンから発生する渦が過大に計算されていたが,壁関数非適用とした場合には計算精度が 向上し,発生する渦が適正に計算されたためと考えられる.







図 2.95 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5°阪大 PIV (図 2.47 と同じ)



図 2.96 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5°初期 CFD (図 2.48 と同じ)



図 2.97 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5° 改良 CFD





図 2.99 流速分布 フィン迎角 10° X=1700mm







図 2.102 渦度分布 フィン迎角 10° X=1600mm



図 2.103 渦度分布 フィン迎角 10° X=1700mm













図 2.108 渦度等値面(ω_x = -20) フィン迎角 10°改良 CFD

2.6 結言

ー様流に対して 5° および 10° の迎角を持つように設置した平板上の小型フィンと,平板の境界 層が干渉する流場を対象として, PIV 装置を用いて時間平均流場および乱流エネルギーを計測し, フィンが流場に与える影響を調査した.次に RANS モデルを用いた CFD で PIV 計測と同様の幾何 形状を有する数値モデル周りの流れのシミュレーションを行った.

当初に適用した CFD の計算設定では, PIV で測定したフィン後流の流場と一致しなかったため, 乱流モデルの変更・改良, 壁関数の適用・非適用, 流入境界における乱流強度について検討した. そ の結果, 壁関数を適用せず流入境界の乱流強度を 2%とすることで PIV の計測結果と一致する結果を 得ることができた.

第3章 船体表面上フィン

第2章では、一様流中の平板上に小型フィンを設置した単純な形状の場合の流れを対象として、 流場計測やCFD計算を実施し、計算手法の改善を試みた.第3章では、平板に替えて船体形状を考 え、この表面に小型フィンを装着した流れを対象として、流場計測やCFD計算を実施した.

3.1 対象船型およびフィン形状

本研究で対象とした船型は Japan Bulk Carrier(JBC)である.JBC は CFD Workshop Tokyo 2015[13] で省エネ付加物を装着した肥大船の推進性能改善のテストケースとして扱われた船型であり,筆者 がよく扱う船型と似た肥大船型である.JBC の船型図[14]を図 3.1 および図 3.2 に示す.実験で用い た模型船とその実船の要目を表 3.1 に示す.ただし,JBC には標準的に舵が装備され,オプションと して船尾ダクトが装備されることがあるが,本研究では舵や船尾ダクトによる船尾周り流れの複雑 化を避けるために,全ての模型試験および CFD 計算においてこれらは装着しなかった.模型プロペ ラは MAU 型のストックプロペラを用いた.模型プロペラの要目を表 3.2,写真を図 3.4 に示す.ま た,このプロペラの単独プロペラ試験(POT)から得た,プロペラ特性を図 3.5 に示す.図 3.5 の横 軸の前進係数 J と縦軸のスラスト係数K_tはそれぞれ次の式で定義される.

$$J = \frac{V}{nD} \qquad V: 流速 n: プロペラ回転数 D: プロペラ直径 (式 3.1)$$
$$K_t = \frac{T_P}{\rho n^2 D^4} \qquad T_P: プロペラスラスト \rho: 密度 \qquad (式 3.2)$$

船体に装着する小型フィンのサイズは,第2章で用いた平板とフィンのサイズ比を参考にして, 長さ65mm(船長の約1/40),幅13mm(船長の約1/200),厚さ1mmとした.このフィンの要目を表 3.3,写真を図3.6に示す.フィンは船体静止時の水面と平行になるように固定した.S.S.2の断面上 にフィンを装着したJBC 模型の写真を図3.7に示す.

座標系は静止時の Aft Perpendicular (A.P.) の水面高さを原点,軸は船首方向をX,右舷方向をY, 鉛直上向きをZとし,それぞれ向きの速度をu,v,wとした.

	Full scale	Model scale	
Lpp (m)	280.0	2.5862	
B (m)	45.0	0.4156	
draft (m)	16.5	0.1524	
Сь	0.	858	
Propeller Dia. (m)	8.12	0.075	
Speed (m/s)	7 44	0.715	
(Fn=0.142)	/.44	0.715	
			23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2

表 3.1 JBC 要目(実船と模型)

図 3.1 JBC 正面断面図





図 3.3 JBC 船尾側面断面図

表 3.2 模型プロペラ要目

Dia (m)	0.075
Boss Ratio	0.165
Pitch Ratio at 0.7R	0.70
Expansion Area Ratio	0.50
Skew Angle (deg)	0.0
Number of Blade	4
Rotation Direction	Right



図 3.4 模型プロペラ



図 3.5 模型プロペラ特性

表 3.3 フィン要目(実船と模型)

FIN length (m)	7.0	0.065
FIN width (m)	1.4	0.013
FIN thickness (m)	0.108	0.0010



図 3.6 模型フィン



図 3.7 模型船にフィンを装着した様子

3.2 回流水槽(SHI-ME)における試験

2.2.3 項で示した 2018 年 11 月の SHI-ME での平板上フィンの PIV 試験と同時期に, JBC の船体表面に小型フィンを装着した自航試験,および PIV 装置による船尾の流場計測を行った.

3.2.1 抵抗自航試験

対象船型において,推進性能が改善されるフィン位置を探索するための自航試験を行った.フィンを装着した位置は,図 3.8 に示すように,フィン先端が Square Station (S.S.) 2, S.S.1³/₄, S.S.1¹/₂ (*X/Lpp*=0.2, *X/Lpp*=0.175, *X/Lpp*=0.15),高さ方向がボトムラインから喫水の 20%, 30%, 40% (*Z/Lpp*= -0.0471, *Z/Lpp*=-0.0413, *Z/Lpp*=-0.0354)の場合の 9 通りとした.前述の通り,舵および船尾ダクトは装着しなかった.



図 3.8 検討したフィン位置(写真では S.S.1³/4 30%喫水にフィンを装着)

試験は、2.2.2 項で示した平板上フィンの PIV 試験を実施したのと同じ、SHI-ME の回流水槽で実施した. 流速は JBC の設計速度である、フルード数 *Fn*=0.142 に相当する 0.715m/s に設定した. プロペラの回転は自航動力計を介してモーターで制御し、プロペラスラストは自航動力計で計測、船体抵抗は検力計で計測した. 試験時の写真を図 3.9 に示す.



図 3.9 自航試験時の様子

まず,標準とするフィンを装着しない状態の抵抗試験を実施した.この時の全抵抗を *R*, 全抵抗 係数を *C*,とすると, *C*,は以下のように定義できる.

$$C_t = \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho SV^2} \tag{$\frac{1}{3}.3$}$$

ただし、水の密度を ρ 、舵を含まない浸水表面積をSとした. 実験時の水温は 20.7℃であったので、密度 ρ は 1009.4 kg/m³、動粘性係数vは 0.987×10⁶ m²/s であり、浸水表面積Sは 1.6834 m² であるので、

$$C_t = 5.469 \times 10^{-3} \tag{$\pi 3.4$}$$

が得られた.

各速度に対する全抵抗係数 C_t を図 3.10 に示す.前述の船長,船速,動粘性係数から計算されるレ イノルズ数は $Rn=1.873 \times 10^6$ あるので,シェーンヘルの摩擦抵抗式から摩擦抵抗係数 C_f は 3.919 と計 算され,剰余抵抗係数 C_r (= C_t - C_f)は 1.550 となる. CFD Workshop Tokyo 2015[13]で公開されている 船長が 7mの JBC 船型の舵無しダクト無しの C_t は 4.289, R_n は 7.4×10⁶, C_f は 3.079 となり C_r は 1.210 であるので,この回流水槽での抵抗試験による船体抵抗は、これに比べてやや大きい結果となる.

本試験の形状影響係数 K は 0.390 とした. その場合の造波抵抗係数 C_w を図 3.11 に示す. Fn=0.12 以下の低速域では計測量が小さく,結果のばらつきが大きかったため, Fn=0.13 以上のデータを考慮 して低速接線法で K を決定した.



この抵抗試験結果から得られた形状影響係数 K と摩擦抵抗から, SFC (Skin Friction Correction)を 計算して実船相当のプロペラ荷重度 (Ship Point) でフィン無しの自航試験を行い[15], その後に各位 置の両舷にフィンを装着した試験を行った.なお,プロペラ回転数はフィン無しの Ship Point での回 転数をすべての計測に適用し,スラスト減少係数の解析に必要な船体抵抗は,フィン無しの値を用 いた. SFC, Load,スラスト減少係数 (1-t),プロペラ伴流係数 (1- w_T)の計算式を (式 3.5) ~ (式 3.7) に示す.

SFC は模型船の摩擦抵抗係数 C_{fm} ,実船の摩擦抵抗係数 C_{fs} ,粗度修正係数 ΔC_f (本試験では 1.50×10^4 を使用)を用いて以下の式で計算される.

$$SFC = \left[(1+k) * \left(C_{fm} - C_{fs} \right) - \Delta C_f \right] * \rho SV^2 \qquad (\not \exists 3.5)$$

スラスト減少係数 (1-t) は、自航試験時の船体抵抗R、自航試験時のプロペラスラスト T_P を用いて以下の式で計算される.

 $1 - t = (R + SFC)/T_P \tag{$\frac{1}{3}.6$}$

プロペラ伴流係数(1-w_T)は、自航時のプロペラスラスト係数を用いて、図 3.5 のプロペラ特性から 計算されたプロペラ前進係数 J を用いて以下の式で計算される.

$$1 - w_T = J * n * D/V \tag{$\frac{1}{3.7}$}$$

なお,解析には図 3.5 のプロペラ特性を 2 次式で近似した以下のプロペラ特性を用いた. $K_t = -0.10924 * J^2 - 0.28776 * J + 0.29616$ (式 3.8)

Load は抵抗試験時の船体抵抗 Rt を用いて以下の式で計算した.

$$Load = (R_t - R)/(R_t - SFC)$$
 (式 3.9)

本実験では Load が 0.9,1.0,1.1 なるような船体曳航力を狙ってプロペラ回転数を設定し,解析された各 Load (計測では狙った通りの Load にはならない)から load=1.0 となるスラスト減少係数とプ

ロペラ伴流係数を2次曲線で補間して求めた.フィンを装着しない場合に Load が 1.0 となるプロペラ回転数は, 13.4rps であった.

自航試験から得られた,スラスト減少係数(1-t)とプロペラ伴流係数(1-wr)の値,およびフィン を装着しない場合からの船殻効率 η_Hの変化率を表 3.4 に示す.フィンを装着しない場合のスラスト 減少係数(1-t)およびプロペラ伴流係数(1-wr)は,表の上部のwoFINに示す.当初は推進性能が 改善するフィンの候補位置として 9 箇所の探索を予定していたが,試験途中で結果の傾向を考慮す ると,S.S.1¹/2の20%喫水とS.S.2の40%喫水の位置は,スラスト減少係数,プロペラ伴流係数とも に悪化することが予想されたので,これら 2 箇所の計測は割愛した.表 3.4 の船殻効率の変化率は S.S.1¹/2,40%喫水のフィン位置で船殻効率が最も大きく効率改善がされているが,伴流係数は改善 されているもののスラスト減少係数は悪化している.これは,船体に装着した小型フィンが,流速 のみでなく,船体表面の圧力にも少なからず影響を与えていることを示唆する.自航試験に続いて 実施した PIV 装置による流場計測では,流場の変化については計測できるが,船体圧力に関する変 化は捉えられないので,本研究ではスラスト減少率の変化が少なく伴流係数が改善している S.S.2 (*X/Lpp*=2.0),20%喫水(*Z/Lpp*=-0.0471)のフィン位置に着目することとした.

0.8100		
$S.S.1^{1}/_{2}$	<i>S.S.</i> 1 ³ / ₄	<i>S</i> . <i>S</i> .2
0.7918	0.7987	-
0.7841	0.7958	0.8017
-	0.7887	0.8099
	0.8100 S.S.1 ¹ / ₂ 0.7918 0.7841 -	$\begin{array}{c} 0.8100 \\ \hline S.S.1^{1}/_{2} \\ \hline S.S.1^{3}/_{4} \\ \hline 0.7918 \\ \hline 0.7958 \\ \hline - \\ 0.7887 \\ \hline \end{array}$

表 3.4 フィン位置の変更による自航要素

woFIN	0.4290		
1-w _T	<i>S.S.</i> 1 ¹ / ₂	$S.S.1^{3}/_{4}$	<i>S</i> . <i>S</i> .2
40%喫水	0.3699	0.3968	-
30%喫水	0.4003	0.3748	0.3924
20% 喫水	_	0.4011	0.3833

η _H 変化率(%)	$S.S.1^{1}/_{2}$	$S.S.1^{3}/_{4}$	<i>S.S.</i> 2
40%喫水	13.4%	6.6%	_
30%喫水	3.7%	12.4%	8.2%
20%喫水	-	4.1%	11.9%

これまでの自航試験で、フィンを両舷に装着した場合に、主にプロペラ伴流係数の変化による船 殻効率が改善されるフィンの位置を確認した.ここで、プロペラ回転によるプロペラ周り流れの非 対称性を考慮すると、左右舷に装着されたフィンのどちらか一方が大きく改善に寄与していること が予想されたので、さらにこの位置で片舷ずつにフィンを装着して自航試験を実施した.その結果 を表 3.5 に示す.この表に示しているフィン無しおよび両舷フィンの試験は、前述の両舷フィンの試 験(表 3.4)と別日に実施したためわずかに解析の値が異なっている.左右のフィンを別々に計測し た結果、左舷のみにフィンを装着した場合は両舷フィンの場合より船殻効率が改善し、右舷のみに フィンを装着した場合は両舷フィンの場合より悪化している.このことから、左舷フィンは改善、 右舷フィンは改悪の効果があることがわかった.これ以降の PIV 試験については、この S.S.2

(*X/Lpp=*0.2), 20% 喫水(*Z/Lpp=*-0.0471) 喫水位置の左舷のみにフィンを装着した場合について, 計測を実施することとした.

表 3.5 フィン位置 S.S.2, 20% 喫水での自航試験 (SHI-ME)

	FIN 無し	両舷 FIN	左舷 FIN	右舷 FIN
1-t	0.8120	0.8080	0.8116	0.8017
$1-w_T$	0.4297	0.3856	0.3777	0.4297

3.2.2 PIV 試験設定

JBC の船体およびフィン周りの流場に対する PIV 試験は, 2.2.3 項の平板上フィンの PIV 試験と同 時期に同じ SHI-ME の回流水槽で実施した. PIV 装置の配置は 2.2.2 項に示した平板上フィンの PIV 試験と同じとし,模型船は PIV 装置に対する位置の調整を簡単にするため,船体の位置を制御でき る PMM 装置に装着した.この時の写真を図 3.12 に示す.



図 3.12 SHI-ME 回流水槽における PIV 試験の様子

プロペラ, 舵, 船尾ダクトは装着せず, フィン無しの場合と, 左舷の S.S.2 (*X/Lpp*=0.2), 高さ 20% 喫水(*Z/Lpp*=-0.0471)位置にフィンの先端を取り付けた場合について計測を行った. 流速は *Fn*=0.142 となるように回流水槽のインペラ回転数を設定し, 各断面での計測は PIV 装置を固定したまま船体 を移動させて行った. ただし, 水温は 20.5℃であった.

計測した断面は S.S.2 から A.P.までであるが, 船体やプロペラボス表面がレーザーを激しく反射し たため, 船体が存在する断面の流場は正常な解析ができなかった.回流水槽で用いたトレーサー粒 子がレーザー光を反射する量が少なく,計測時に撮影画像内のトレーサー粒子を判別するために画 像全体を明るくする必要があった.その結果,トレーサー以外の船体やプロペラの反射も大きくな ってしまい,船体周りのトレーサー粒子が判別できなくなった.SHI-MEの回流水槽ではナイロン製 のトレーサーを水槽全体に行き渡るようにして PIV 計測を行っていたが,その後に実施した大阪大 学での銀コーティングを施したトレーサー粒子を用いた PIV 計測では,トレーサー粒子がレーザー 光をよく反射し,回流水槽で行った PIV 試験ほどのトレーサー以外の反射は見られなかった.図 3.13 に JBC の A.P.面を計測した時の SHI-ME 回流水槽での PIV 計測と,大阪大学曳航水槽での PIV 計測 の撮影画像の比較を示す.図 3.13 左側の SHI-ME での撮影画像では,船体がはっきり見える程度に 画像を明るくしても確認できるトレーサーはまばらであるが,図 3.13 右側の大阪大学での撮影画像 では,船体がわずかに判別できる程度の明るさでも,非常に多くのトレーサーが分布していること が確認できる.



図 3.13 A.P.面での撮影画像 左 SHI-ME (2018 年 11 月) 右 大阪大学 (2019 年 10 月)

船体やプロペラが存在する断面の計測では、レーザー光の反射のため解析ができなかったものの、 A.P.断面では船体もプロペラも存在しないため正常な解析結果を得られた. A.P.断面のフィン無し、 フィン有りの流速分布を図 3.14 に示す. フィン位置は前述の通り左舷側の S.S.2, 高さ 20%喫水位置 である. 一方、同様の計測を大阪大学で行った結果を図 3.15 に示す. 図 3.14 と図 3.15 を比較する と、SHI-ME での計測結果の方が横方向にやや圧縮されたような結果となっている. これは図 3.12 の 写真からもわかるように、2m 幅の水槽の左舷側に PIV 装置を配置したことによる狭水路影響である と推測される. この影響や A.P.断面以外では正常な解析結果が得られたかったことから、本論文で は SHI-ME 回流水槽での PIV 試験については扱わないこととした.





3.3 曳航水槽(大阪大学)における試験

2019 年 10 月に大阪大学船舶海洋試験水槽において,JBC の船体表面に小型フィンを装着した自 航試験,および PIV 装置による船尾の流場計測を行った.

3.3.1 抵抗自航試験

3.2.1 項に示したのと同様、まず船体にフィンを装着しない状態の抵抗試験を実施した.実験時の 水温は 21.4℃であった.水の密度 ρ =997.9 kg/m³、動粘性係数 ν = 0.970 × 10⁶ m²/s であるので、

 $C_t = 5.414 \times 10^{-3}$

が得られた. レイノルズ数は1.91×10⁶であるので、3.2.1 項と同様の解析を行うと、摩擦抵抗係数 $C_f = 3.906 \times 10^{-3}, C_r = 1.510 \times 10^{-3}$ となり、回流水槽とほぼ同じの結果であった.抵抗試験の結果 を、2018 年 11 月の SHI-ME での抵抗試験結果と比較した全抵抗係数および造波抵抗係数の図を、そ れぞれ図 3.16 および図 3.17 に示す. K は 3.2.1 項と同様の決定法を用いて 0.360 とした.



自航試験はフィン無しの場合と、2018 年の SHI-ME での自航試験で採用を決定した、S.S.2、20% 喫水位置の左舷にフィンを装着した場合について実施した.スラスト減少係数(1-t)とプロペラ伴流 係数(1-w_T)について解析結果を表 3.6 に示す.フィンを装着しない場合に Load が 1.0 付近となる回転 数は、13.45rps であった.2018 年の SHI-ME の結果(表 3.5)と比較して、スラスト減少係数の値は やや低下しているが、これは、抵抗試験の結果(図 3.16 参照)が異なることが原因と考えられる. プロペラ伴流係数の値については、SHI-ME の結果と比べてややの違いはあるが、ほぼ再現した. 表 3.6 フィン位置 S.S.2、20%喫水の自航試験(大阪大学)

	FIN 無し	両舷 FIN	左舷 FIN	右舷 FIN
1-t	0.7816	0.7963	0.7892	0.7743
$1-w_T$	0.4381	0.4024	0.3900	0.4513

3.3.2 PIV 試験設定

PIV 装置の設定に関し、計測対象が模型船であること以外、2.2.2 項の平板上フィンの PIV 計測と 同じである.1 走行で1 断面の計測を行い、236 セットの撮影画像を取得した.ただし、水温は 21.3℃ であった.当初、水槽の幅に対して中央に船体を設置して計測を行っていたが、S.S.1 から上流側で は計測したい領域が PIV 装置の計測可能な領域から外れたので、船体を約 150mm 右舷側に移動させ て計測を行った.プロペラを装着し、自航試験時の Ship Point であった 13.45rps でプロペラを回転さ せたプロペラ有りの状態と、プロペラ翼の無いプロペラボスのみを装着したプロペラ無しの状態で 計測を実施した.プロペラ有りの状態では、プロペラ位置 (*X*=30mm)の断面の計測は出来ないので、 プロペラ位置の前後 15mm の断面で計測を行った.

計測された A.P.面でのプロペラ無しフィン無しの場合の流速分布と,公開されている同状態の JBC の流速分布を図 3.18 に示す.本試験のレイノルズ数は1.91×10⁶であった..一方,公開されている データに用いられた模型船の船長 *Lpp* は,前述のように 7.0m であり,レイノルズ数は7.46×10⁶で あった.レイノルズ数が異なるため,当然,流速分布にも差があって然るべきであるが,これらの流 速分布は,確かに異なるものの定性的にはよく一致しており,本試験で正確な計測および解析がで きていることを確認できた.その他の断面での計測や,プロペラを回転させた場合の計測などの詳 細な結果は 3.5 項で報告する.



3.4 CFD 計算

JBC 船型を対象とした CFD 計算は当初,平板上フィンと同様に OpenFOAM で実施を試みたが,得られた結果は実験と大きく異なった.そこで OpenFOAM に加え,SHIPFLOW で計算を実施した.

3.4.1 OpenFOAM 計算

格子は平板上フィンと同様に Hexpress で作成した.解析領域は船首から上流を 0.5Lpp,片幅およ び深さを 1Lpp,船尾から下流を 1.5Lpp とした(図 3.19).この領域は,船体より上流側が ITTC のガ イドライン[16]に比べて狭く設定したが,本計算は船尾周りの流場に注目しているので,格子数削減 のためこのようにした.フィン周りは 2.3 項の平板にフィンを付けたケースの格子を参考にして,フ ィンの幅方向に 10 個以上の格子を配置した.船体表面付近の格子についても,フィンの影響がある と予想される領域は格子密度を高めた領域を作成した(図 3.20).フィン表面に接する格子の幅は Lpp で無次元化した値で約2×10⁻⁵である.ダブルモデルとし,自由表面は設定しなかった.船体運動は 固定としたが,模型試験で得た船体沈下量 2.3mm と船首が沈下する方向のトリム 0.1°を事前に与 えた.



図 3.19 OpenFOAM 格子 左:解析領域

右:船体表面格子



図 3.20 OpenFOAM フィン付近の格子

計算レイノルズ数は水槽試験を参考にして1.90×10⁶とした.また,第2章で得た知見から、フィ

ン表面の境界条件は壁関数を非適用とし、乱流エネルギーの流入境界条件については乱流強度を 2% として計算, y⁺は1程度になるようにフィン表面に接する格子の厚さを決定した.また,船体表面 においても壁関数を非適用とし,計算精度の向上を図った.これら設定を用いて OpenFOAM の simpleFoam でフィン無しの計算を行った.その計算結果の A.P.面での流速分布を図 3.21 に示す.計 算された流速分布は実験で得た流場(図 3.18)と一致しているとは言い難い.格子の変更などで計 算結果の改良を試みたが,実験と一致するような改良の方向性を見いだせなかったので, OpenFOAM による計算は採用しないこととした.



図 3.21 OpenFOAM で計算された A.P.での流速分布

3.4.2 SHIPFLOW 計算

前述のように、OpenFOAM による計算では、少なくともプロペラ面付近の流速分布が実験結果と 全く一致せず,計算の改善も試みたが安易ではなかった. そこで,別の CFD ソフトウェアである SHIPFLOW を用いて計算を行った. SHIPFLOW はスウェーデンで開発されたソフトウェアであり、 ポテンシャル計算や境界層計算などの複数のモジュールから構成されている.本研究では SHIPFLOW のモジュールのひとつで, RANS ソルバーである XCHAP[17]を用いて計算を行った. SHIPFLOW にはプロペラ体積力モデルも組み込まれており、自航状態も計算可能である.計算格子 は SHIPFLOW 内部で自動的に作成されるので、船体に対する格子には SHIPFLOW の推奨設定を用 い、フィンおよびフィン後流付近の格子は第2章で得た結果を参考に手動で高密度格子領域を追加 した. 作成された格子を図 3.22 および図 3.23 に示す. 乱流モデルは、レイノルズ応力の非等方性を 考慮でき, k と ω の輸送方程式を解く EASM (Explicit Algebraic Stress Model) [18]を使用した. EASM は SHIPFLOW の標準乱流モデルである. EASM の簡単な説明を付録 A に示す. 流入境界では無次元 で k=1×10⁻⁸, ω=10 が設定される. SHIPFLOW で自動設定される解析領域の範囲は,船首より上流 側および船尾より下流側はそれぞれ 0.8Lpp, 片幅と深さは 3Lpp である.船体運動は固定して流場計 算を実施しているが、船体には、模型試験で得た船体沈下量 2.3mm と、船首が沈下する方向のトリ ム 0.1°を与えた.これらの結果、本計算に用いた格子数は約 1420 万セルとなった.計算の収束条 件は、船体抵抗について過去100回の計算の平均値と最大値との差が0.025%以下、且つ、船体表面 圧力の残差の標準偏差が 0.25%以下とした. CFD 計算が収束するまでの時間は約 3.4 時間であった.



図 3.23 SHIPFLOW フィン付近の格子

計算レイノルズ数は水槽試験を参考にして1.90×10⁶とした.この計算によって得られた A.P.面での流速分布を図 3.24 に示す.この図と実験で得た流場(図 3.18 左図)はよく似ており,SHIPFLOW 計算結果の正確性を裏付けていると考えられる.OpenFOAM では良い計算結果が得られず, SHIPFLOW では実験と一致する計算結果を得られた原因として,Hexpress で平板上フィンと同じような設定で格子を作成すると座標軸に対して平行および垂直方向に格子面を作成するため,流れに対しての格子直交性が確保し難いのに対し,SHIPFLOW は船舶用に開発されたソフトウェアであり, 船舶の流場に合わせた計算精度の高い格子を作成するためと考えられる.



図 3.24 SHIPFLOW で計算された A.P.での流速分布

模型船の抵抗自航試験と同様に、まず、フィン無しプロペラ無しの状態で船体抵抗を計算した. 今回用いた SHIPFLOW の XCHAP モジュールは、自由表面を考慮しないダブルモデルであるため造 波抵抗は計算できないが、剰余抵抗係数は $C_r = 1.31 \times 10^{-3}$ と計算され、大阪大学での模型試験の剰 余抵抗係数 $C_r = 1.51 \times 10^{-3}$ と近い値であった.次に、この抵抗係数を用いて SFC を求めて曳航力を SHIPFLOW に入力すると、Ship Point になるようにプロペラスラストが自動調整される。その時のス ラストを、事前に SHIPFLOW で計算していた船体抵抗と POT 特性に照らし合わせ、スラスト減少 係数とプロペラ伴流係数が算出される。その値を実験と比較したものを表 3.7 に示す.また、この値 を 2018 年に SHI-ME、2019 年に大阪大学で行った模型試験との比較を図 3.25 に示す.SHIPFLOW の計算結果は実験結果とよく一致している.

表 3.7 フィン位置 S.S.2, 20% 喫水の CFD 結果

	FIN 無し	左舷 FIN	右舷 FIN
1-t	0.8027	0.7906	0.7780
1- <i>w</i> _T	0.4315	0.3943	0.4488



図 3.25 SHIPFLOW で計算された自航要素と実験の比較

3.5 PIV 試験結果と CFD 計算結果の比較検討

3.5.1 面内流速の分布とフィンの有無による撹乱成分について

PIV 計測結果と CFD 計算結果について,フィンが有る場合と無い場合の流速分布と,撹乱速度成 分の分布図を図 3.27~図 3.53 に示す. X 軸方向のフィンによる流速の撹乱(Disturbance) 成分を ud とし式 3.10 で定義する. ただし, u_{fn} はフィン有りの場合の流速, u_{wo_fin} はフィンなしの場合の流速 とする.

$ud = u_{fin} - u_{wo_fin} \tag{\tilde{T} 3.10}$

図 3.27~図 3.53 で示す断面は、S.S.1¹/₂ (X/Lpp=0.15)、S.S.1 (X/Lpp=0.1)、S.S.¹/₂ (X/Lpp=0.05)、 プロペラ面 (X=30mm)、A.P. (X=0mm) で、これらの断面位置を図 3.26 に示す.ただし、図 3.27~ 図 3.53 の縦軸、横軸はともに Lpp で無次元化しており、原点はそれぞれ船体中心位置、水面位置で ある.また、フィンの先端位置は、X/Lpp=0.2 (S.S.2)、Y/Lpp=-0.0651、Z/Lpp=-0.0446 である.図 のコンターは流場を設定流速 U0=0.715m/s で無次元化した速度の無次元値を示しており、ベクトル は断面内の水平および垂直方向の流速を U0 で無次元化した量と向きを表している.撹乱速度分布 図はフィン有りの速度分布から、フィン無しの速度分布を差し引いた速度差の分布、つまりフィン によって流場がどの程度変更されたかを示しており、図のコンターは前進方向のフィンによる撹乱 速度、ベクトルは断面内の水平および垂直方向のフィンによる撹乱速度をベクトルで示している.



図 3.26 PIV および CFD の結果を示す断面位置(フィンは S.S.2, 20% 喫水位置に装着)

プロペラ無しの PIV 計測結果と CFD 計算結果について,図 3.27~図 3.41 に示す.

S.S.1¹/₂断面での流速分布について,図 3.27 に PIV の結果を,図 3.28 に CFD の結果を示す.とも にフィン有りの右図で,フィンの影響で流速が遅くなっている部分が存在していることがよくわかる.図 3.29 のフィンによる撹乱速度分布において,その分布は定性的,定量的に PIV と CFD でよく 一致している.

S.S.1 断面について示した図 3.30~図 3.32 においても,同じように CFD がフィンの影響をよくシ ミュレートできていることが確認できる.

S.S.¹/2断面についての結果を図 3.33~図 3.35 に示す. 図の中心右側の円は, プロペラ位置を参考 のために示したものである. PIV の結果を示した図 3.33, および CFD の結果を示した図 3.34 ともに フィン有無の差がやや分かりにくいものの, Y/L=-0.01~-0.02, Z/L=-0.04~-0.05 付近でフィン有 りの流速分布でフィンの影響による遅い領域があることがわかる. フィンによる撹乱速度分布を示
した図 3.35 においては PIV の結果に乱れがあるが、これはフィン無しの計測結果(図 3.33 左図)で 正常に計測できていないと考えられる領域(Y/Lpp, Z/Lpp=-0.03 付近)が存在するためである.

プロペラ位置断面での結果を図 3.36~図 3.38 に示す. 図 3.36 の PIV 結果においてプロペラ中心の 右側に *u/U0=0* の領域が存在するが,これは,左舷側から照射したレーザーがプロペラボスに遮られ てトレーサーが撮影できず,解析結果が異常であったため,意図的にその領域を削除したものであ る.図 3.39,図 3.45,図 3.47 においても同様の操作を行った.図 3.36 および図 3.37 の流速分布図で 明確なフィン有無の差を見出すのは難しいが,図 3.38 のフィンによる撹乱速度分布では PIV と CFD で定量的には異なるものの,プロペラの左舷側から上側にかけて低流速の領域ができていることが 確認できる.さらに,左舷側のプロペラチップ付近で,YZ 方向のフィンによるの撹乱成分を示す図 中のベクトルが,プロペラ回転方向(船尾から見て右回り)に対向する向きとなっていることが, PIV および CFD で確認できる.

A.P.断面での結果を図 3.39~図 3.41 に示す. プロペラ無しの A.P.断面のみ, 船体や PIV 装置を船幅方向に移動させて広範囲に PIV 計測を行ったので, CFD 計算もその範囲に合わせて結果を示している. この断面ではプロペラ位置断面と同様に,図 3.41 に示したフィンによる撹乱速度分布図において,フィンによって左舷のプロペラ面外側の領域で流速が遅くなっていることと,プロペラ面内の流速がプロペラ回転に対向する向きに変化していることがわかる.また,船体の喫水(Z/L=0)付近で加速された領域の存在も PIV 結果および CFD 結果で確認できる.

プロペラ有りの S.S.¹/₂~A.P.断面まで結果を図 3.42~図 3.53 に示す. S.S.¹/₂断面の PIV の結果を 示した図 3.42 では、プロペラによってトレーサー粒子が写りにくい部分が存在し、その領域 (Y/L>-0.01)で計測の乱れがあるが、プロペラ無しの PIV 結果である図 3.33 と比較すると、船体近 傍の流速が速くなっており、プロペラ回転がこの断面位置まで影響していることが確認できる.ま た、その影響は CFD でもよくシミュレートされていることが、プロペラ有りの CFD 結果である図 3.43 と、プロペラ無しの CFD 結果である図 3.34 の比較から読み取れる.図 3.44 のフィンによる撹 乱速度分布は、PIV 計測ではプロペラ無しの図 3.35 と同様に正常に計測できていないようである.

プロペラ位置の15mm上流(X=45mm)の断面でのPIVの結果を図3.45に示す.この図からはフィン有無の有意な差を読み取ることはできない.図3.46に示したCFDの結果では、プロペラ面の左舷側にフィンによって減速された領域が確認できる.また、フィンによる撹乱速度分布を示した図3.47では、プロペラ無しの場合のプロペラ位置断面の図3.38と同様のプロペラ面左舷側における流速と流向の変化も確認できる.

プロペラ位置の 15mm 下流の断面での結果を,図 3.48~図 3.50 に示す. PIV 結果の図 3.48 でも, CFD 結果の図 3.49 でも,プロペラによって増速された領域が存在し,その分布は PIV の結果と CFD の結果でよく一致していることが確認できる.フィンによる撹乱速度分布を示した図 3.50 では PIV の結果と CFD の結果で違いがあるが,これは SHIPFLOW がプロペラモデルを用いた計算であるこ とが原因かもしれない.

A.P.断面での結果を示した図 3.51~図 3.53 においても、プロペラ位置の 15mm 下流と同様の結果 が見られる.

68





27 S.S.1¹/₂ プロペラ無し流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.28 S.S.1¹/₂ プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.29 S.S.1¹/₂ プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD



図 3.30 S.S.1 プロペラ無し流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.31 S.S.1 プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.32 S.S.1 プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD



図 3.33 S.S.¹/₂ プロペラ無し流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.34 S.S.1/2 プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.35 S.S.¹/₂ プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD







図 3.37 プロペラ面 プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.38 プロペラ面 プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD



図 3.39 A.P.面 プロペラ無し流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.40 A.P.面 プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.41 A.P.面 プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD



図 3.42 S.S.1/2 プロペラ有り流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.43 S.S.1/2 プロペラ有り流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.44 S.S.¹/₂ プロペラ有り フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD



図 3.45 プロペラ面 15mm 上流 プロペラ有り流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.46 プロペラ面 15mm 上流 プロペラ有り流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.47 プロペラ面 15mm 上流 プロペラ有り フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD



図 3.48 プロペラ面 15mm 下流 プロペラ有り流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.49 プロペラ面 15mm 下流 プロペラ有り流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有



図 3.50 プロペラ面 15mm 下流 プロペラ有り フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD



図 3.51 A.P.面 プロペラ有り流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.52 A.P.面 プロペラ有り流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り



図 3.53 A.P.面 プロペラ有り フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD

3.5.2 渦度分布について

プロペラ無しの場合の無次元渦度の分布について図 3.54~図 3.58 に示す. 断面位置はそれぞれ, S.S.1¹/₂, S.S.1, S.S.¹/₂, プロペラ位置(*X*=30mm), A.P. (*X*=0mm) である.

S.S.1¹/₂断面の無次元渦度を示した図 3.54 では、フィンの存在によって渦が発生していることが、 PIV の結果および CFD の結果で確認できる.

S.S.1 断面の無次元渦度を示した図 3.55 では, PIV の結果と CFD の結果で定量的な差が確認でき, さらに、フィンによって発生した渦が船体表面に沿って上昇していることがわかる.

S.S.¹/₂断面の無次元渦度を示した図 3.56 では, 3.5.1 項の図 3.33 および図 3.35 と同様に, PIV 計測 (左図および中央左図)が正常でなかった可能性が高く,データの信頼性は低いと考えられる.一 方, CFD の結果ではフィンにより発生した渦の上昇に誘起されるように渦度の存在領域が広範囲に 広がると同時に,逆に渦度絶対値の高い領域が減少しており,渦の拡散が見て取れる.

プロペラ位置断面(X=30mm)および A.P.断面(X=0mm)の無次元渦度を示した図 3.57 および図 3.58 では,その傾向がさらに強まり, PIVの結果と CFD の結果ともにプロペラ面左舷側で,フィン が無い場合の渦度絶対値が小さくなっていることが確認できる.



図 3.54 S.S.1¹/₂ 渦度分布 左図:フィン無し PIV 中央左図:フィン有り PIV 中央右図:フィン無し CFD 右図:フィン有り CFD



中央右図:フィン無し CFD 右図:フィン有り CFD



図 3.56 S.S.¹/₂ 渦度分布 左図:フィン無し PIV 中央左図:フィン有り PIV 中央右図:フィン無し CFD 右図:フィン有り CFD



図 3.57 プロペラ位置断面 渦度分布 左図:フィン無し PIV 中央左図:フィン有り PIV中央右図:フィン無し CFD 右図:フィン有り CFD



図 3.58 A.P.断面 渦度分布 左図:フィン無し PIV 中央左図:フィン有り PIV 中央右図:フィン無し CFD 右図:フィン有り CFD

3.6 フィン効果の発生メカニズム

ここまでに得られたデータから、フィンの存在が推進性能を改善するメカニズムについて考察する. PIV による計測結果を用いてフィン効果の発生メカニズムを考察するべきであるが、PIV 計測は 計測断面によっては結果に疑義のあるデータも存在する. したがって、計測結果をよく説明できる CFD 計算結果に基づいて考察を行う.

3.5.1 項で示したフィンによる撹乱成分の速度分布について再度,同じ図を以下に示す.図3.59 左 図に示す S.S.1¹/2断面はフィンの直後に位置する.フィンは,船体平行部後半のビルジから船尾に向 けて船底から上昇してくる流れの中に置かれているので,フィンによる撹乱速度として船尾から見 て右回りの渦が発生する.本論文ではこの渦を,フィン渦と呼ぶことにする.図3.59 右図に示す S.S.1 断面では,フィン渦はやや拡散しながら船体に沿って上昇する.



図 3.59 フィンによる撹乱速度分布 左: S.S.1¹/2 右: S.S.1

図 3.60 左図に示す S.S.¹/₂付近では、フィン渦はさらに上昇しているものの、船体形状の変化とフィン渦が起こした右回りの渦によって、船体近傍にフィン渦と逆の左回りの渦が発生している.図 3.60 右図に示すプロペラ面 (*X*=30mm) においては S.S.¹/₂付近で発生した左回りの渦がさらに強くなっていることがわかる. プロペラ面において左回りの流れが生じたことは、右回りプロペラの翼に流入する迎角を大きくする (図 3.61) ことになるので、左舷側にフィンをつけた場合の自航試験 (3.2.1 項および 3.3.1 項参照) で伴流係数 (1-w) が改善した要因と考えられる. 逆に、右舷側にフィンを付けた場合は、プロペラ翼の迎角が小さくなる方向に渦が発生することになるため、自航試験で伴流係数 (1-w) が悪化したと考えられる.



図 3.60 フィンによる撹乱速度分布 左:S.S.1/2 右:A.P.



図 3.61 プロペラ翼の迎角(模式図)

3.5.2 項で示した, 無次元渦度分布について, フィンによる撹乱成分による無次元渦度分布を図 3.62 ~図 3.63 に示す. 主流方向に対するフィンによる無次元渦度の撹乱 (Disturbance) 成分を $\overline{\omega_{xd}}$ とし以下の (式 3.11) で定義する. ただし, $\overline{\omega_{x_fun}}$ はフィン有りの場合の無次元渦度, $\overline{\omega_{x_wofun}}$ はフィンなしの場合の無次元渦度とする.

$$\overline{\omega_{xd}} = \overline{\omega_{x_f \iota n}} - \overline{\omega_{x_w of \iota n}}$$

(式 3.11)

これらの図からも、フィンの存在によって船尾の渦度場が変化し、プロペラ面でプロペラ翼の迎 角を増大させる方向に流場が変化していることが確認できる.



図 3.62 フィンによる撹乱渦度分布 左: S.S.1¹/2 右: S.S.1



図 3.63 フィンによる撹乱渦度分布 左: S.S.¹/2 右: A.P.

フィンによって発生する渦と,その渦が逆向きの渦を発生させる様子を3次元的に確認するため, フィンによる撹乱速度分布から Q-criterion[19]を計算し, Q-criterion=40の等値面を描画したものを図 3.64 に示す. Q-criterion は以下の式で計算される.

図 3.64 の等値面表面のコンターは X 方向の渦度を示しており,負の渦度は船尾から船首方向に向かって右回り,正の渦度は左回りの渦度を示している.この図から,フィンから発生した船尾から見て右回りの渦が,境界層付近から逆向きの渦を誘起し,その逆向きの渦がプロペラ面付近に流入していることが確認できる.



図 3.64 Q-criterion=40 の等値面 (CFD)

3.7 結言

JBC 船型を対象として,自航要素の観点から,推進性能が改善される船体表面上のフィン位置を 探索した.その自航要素を測定し,同時に PIV 装置を用いて船体にフィンを装着した場合と装着し ない場合について,フィン後流を含む流場測定を行い,船尾流場に対するフィンの影響を調査した.

次に,第2章の平板上にフィンを設置した場合の CFD 計算により検討した計算設定を応用して JBC 船体にフィンを装着した場合,しない場合の CFD 計算を実施し,計算によって得られる自航要 素が,実験と一致することを確認した.

さらに,流場についてもフィンの有無による流場の違いが,CFD でシミュレートできていること を PIV 計測結果との比較において確認した.その上で,フィンによって推進性能が改善されるメカ ニズムを明らかにした.

第4章 結論

本論文では、プロペラから船長の15~20%離れた位置の船体表面に装着する小型フィンについて、 その推進性能改善量をCFDでシミュレートし、改善効果のメカニズムを解明することを目的とした.

船体の船尾流れは複雑な流場となることがよく知られており、最初からこれについての CFD 計算 に取り組むことは、難易度が高いと考えられた.そのため、第2章では、模型船と同等のサイズの 平板と小型フィンから構成される単純な模型(平板上フィン模型)を対象として、フィン後流の流 場について PIV 装置を用いて計測した.同じ流場に対し、CFD(OpenFOAM)手法を適用して流場 をシミュレートした.当初の CFD 計算設定では、PIV の計測結果と一致するような結果は得られな かったが、流入境界での設定値や乱流モデルの変更、壁関数の取り扱い、格子の改善などを行うこ とで、この流場を正確にシミュレートできる CFD 手法を確立した.

第3章では、具体的な船型(JBC)を対象として、小型フィンによる性能改善効果について検討した.まず、プロペラから船長の15~20%離れた位置の船体表面に小型フィンを設置し、自航試験を行ってJBC 船型において推進性能の改善効果が得られるフィン位置を探索した.さらに、そのフィンによる推進性能の改善効果が,主にプロペラ伴流係数の改善によるものであることを実験的に確認した.次に、その推進性能の改善が得られる位置に設置したフィンが、流場に与える影響を把握するために、フィン有無の場合の流場を PIV 装置によって計測した.さらに、適切な CFD 計算の設定を応用して、フィン有無の場合について SHIPFLOW によるシミュレーションを実施した.この結果、フィンによる性能改善量やフィン有無による流場の変化が、自航試験結果や PIV 計測結果とよく一致していることを確認した.一方、PIV の結果や CFD の結果で得られたフィン有無の流場の差異から、フィンによる性能改善効果はフィンから発生する渦が直接影響しているのではなく、フィンから発生した渦によって誘起された 2 次渦がプロペラ面に到達することによってプロペラ翼への流入迎角が増大し、プロペラ伴流係数が改善することを明らかにした.

謝辞

本論文は著者が大阪大学大学院工学研究科博士後期課程在学中に,大阪大学大学院工学研究科の 戸田保幸教授の指導の下において行った研究をまとめたものです.専門知識が浅かった著者が,本 論文に含まれる PIV 試験や CFD 計算を実行するにあたり,戸田教授には多大なるご指導とご鞭撻 を賜りました.厚く御礼申し上げます.

論文の審査にあたり,著者の稚拙な文章や論理展開に貴重なご意見,ご指導を賜りました大阪大 学大学院工学研究科の梅田直哉教授ならびに鈴木博善准教授に,心より感謝の意を表します.

PIV 試験の実施にあたり、計測を一緒に行ってくれた、戸田教授研究室の学生の皆様に感謝いたします.

付録A 乱流モデル[17]

A.1 レイノルズ平均ナビエ-ストークス方程式 質量保存則である連続の式は以下で表される.

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

非圧縮性流体の場合の連続の式は以下で表される.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

ナビエ・ストークス方程式は以下の式で表される.

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (U_j U_i)}{\partial x_j} = \rho R_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$$
(3)

ここで*σ_{ii}は*剪断応力でニュートン流体の場合は以下の式で表される.

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\mu \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) \tag{4}$$

ここでSiiは剪断速度で以下の式で表される.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$
(5)

(4)式のSkkは非圧縮流体の場合はゼロであることと(1)式より

$$S_{kk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) = \frac{\partial U_k}{\partial x_k} = 0$$
(6)

レイノルズ平均ナビエ-ストークス方程式は(2)式に以下の式を適用して導かれる. 速度 U_i を時間平均速度 u_i と時間変動速度 $u_i^"$ に分割.

$$U_i = \overline{U}_i + u_i^{"} \equiv u_i + u_i^{"} \tag{7}$$

圧力Pを時間平均圧力pと時間変動圧力p"に分割.

$$P = \overline{P} + p^{"} \equiv p + p^{"} \tag{8}$$

各変数の時間平均は以下の式で定義される.

$$\bar{\phi} = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} \phi dt \tag{9}$$

任意の2つの乱流量 ϕ_1, ϕ_2 について以下の平均則が成立する.

$$\phi_{1} = \overline{\phi_{1}} + \phi_{1}^{"} \qquad \phi_{1}^{"} = 0 \qquad \overline{\phi_{1}} = \overline{\phi_{1}}$$

$$\overline{\overline{\phi_{1}}\phi_{2}} = \overline{\phi_{1}\phi_{2}} \qquad \overline{\phi_{1}^{"}\overline{\phi_{2}}} = 0 \qquad \overline{\overline{\phi_{1}}} = \frac{\overline{\phi_{1}}}{\overline{\partial s}} \qquad (10)$$

$$\overline{\phi_1 + \phi_2} = \overline{\phi_1} + \overline{\phi_2} \qquad \overline{\phi_1 \phi_2} = \overline{\phi_1 \phi_2} + \overline{\phi_1^{"} \phi_2^{"}}$$

連結の式に時間亚切た適用すると

これらを連続の式に時間平均を適用すると,

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{11}$$

(2)式から(11)式を引くと時間変動速度についての非圧縮性の連続の式が得られる.

$$\frac{\partial u_i^{"}}{\partial x_i} = 0 \tag{12}$$

次に(3)式の右辺を左辺に移動して時間平均を取る.

$$\overline{\rho \frac{\partial U_{i}}{\partial t} + \rho \frac{\partial (U_{j}U_{i})}{\partial x_{j}} - \rho R_{i} + \frac{\partial P}{\partial x_{i}} - \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left\{ \mu \left(\frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial U_{j}}{\partial x_{i}} \right) \right\} = \rho \frac{\partial \overline{U}_{i}}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\overline{U_{j}U_{i}})}{\partial x_{j}} - \rho \overline{R}_{i} + \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_{i}} - \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left\{ \mu \left(\frac{\partial \overline{U}_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \overline{U}_{j}}{\partial x_{i}} \right) \right\} = \rho \frac{\partial u_{i}}{\partial t} + \rho \frac{\partial \left(u_{j}u_{i} + \overline{u_{j}}\overline{u_{i}} \right)}{\partial x_{j}} - \rho \overline{R}_{i} + \frac{\partial p}{\partial x_{i}} - \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) \right\}$$

$$(13)$$

以上から,時間平均を考慮した連続の式とレイノルズ平均ナビエ-ストークス方程式は以下のように 表される.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \left(u_j u_i + \overline{u_j} \overline{u_i} \right)}{\partial x_j} = \overline{R}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$
(14)

ただし,

レイノルズ応力*puīuj*に非圧縮流体に対するブシネスクの近似を仮定することで、レイノルズ応力 は平均流の勾配と乱流エネルギー*k*についての方程式で表され、平均流の消散から乱流エネルギーが 生成される.

$$\rho \overline{u_i^{"} u_j^{"}} = -\mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$
(16)

(15)

(16)式の最後の項は(11)式から導かれる以下のレイノルズ応力テンソルを表している.

$$\rho \overline{u_i^{"} u_i^{"}} = -\mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + 2\rho k \implies \overline{u_i^{"} u_i^{"}} = 2k$$
(17)

以上からレイノルズ平均方程式は以下の式で表される.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = \overline{R}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_E \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\}$$
(18)

$$\nu_E = \nu + \nu_T \qquad \qquad \nu = \frac{\mu}{\rho} \qquad \qquad \nu_T = \frac{\mu_T}{\rho} \tag{19}$$

kの輸送方程式は、(3)式の瞬間流れのナビエ-ストークス方程式から(13)式の平均流れのナビエ-ストークス方程式の差分を取り、それにu["]を掛けることで導かれる.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = \overline{u_i^{"} u_i^{"}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{u_i^{"} u_i^{"} u_j^{"}} - \frac{1}{\rho} \overline{p^{"} u_j^{"}} \right)$$
(20)

(20)式の右辺の最後の2つの項は以下のようにモデル化する.

$$-\frac{1}{2}\overline{u_i^{"}u_i^{"}u_j^{"}} - \frac{1}{\rho}\overline{p^{"}u_j^{"}} = \frac{\nu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}$$
(21)

ここで乱流エネルギー散逸率εは次のように定義され、乱流エネルギーが熱エネルギーに変換される.

$$\epsilon = v \frac{\overline{\partial u_i^{"} \partial u_i^{"}}}{\partial x_k \partial x_k}$$
(22)

 ϵ の輸送方程式はモデル定数 $C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_{\epsilon}$ を用いて次の式で表される.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \epsilon)}{\partial x_j} = -C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i^{"} u_j^{"}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\}$$
(23)

A.3 k-ω-SST モデル

 $k-\omega$ -SST モデルでは壁近傍では $k-\omega$ モデル,壁から離れた場所では $k-\epsilon$ モデルが使われ,その間の領域 kF_i 関数によって混合される.

ωとεの関係を以下の式で定義する.

$$\omega = \frac{\epsilon}{0.09k} \tag{24}$$

kとωの輸送方程式は以下で表される.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = -\overline{u_i^* u_j^*} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\}$$
(25)

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + \frac{\partial(u_j\omega)}{\partial x_j} = -\frac{\gamma}{\nu_T} \overline{u_i^{"} u_j^{"}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right\} + 2\sigma_{\omega 2} \frac{1 - F_1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial\omega}{\partial x_j}$$
(26)

ここで F_1 は境界層内の領域でk-ωモデルとk-εモデルを切り替えるスイッチ関数で,次の式で定義される.

$$F_1 = \tanh(\Gamma^4) \tag{27}$$

$$\Gamma = \min\left\{\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta * \omega d}; \frac{500\nu}{\omega d^2}\right); \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}d^2}\right\}F_1 = \tanh(\Gamma^4)$$
(28)

(29)式のdは壁からの法線距離である.また, $CD_{k\omega}$ は以下の式で定義される.

$$CD_{k\omega} = \max\left(\frac{2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k\partial\omega}{\partial x_j\partial x_j}; 10^{-20}\right)$$
(29)

渦粘性 ν_T は次の式で定義される.

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{max(a1\omega; |\Omega_{ij}|F_2F_3)} \tag{30}$$

Ω_{ii}は次の式で表される渦度である.

$$\Omega_{ij} = 1/2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$
(31)

ここで $\left|\Omega_{ij}\right| = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$, $a_1 = 0.31$ である. またスイッチ関数 F_2 は以下の式で定義される.

$$F_{2} = tanh(\Gamma_{2}^{2})$$

$$\Gamma_{2} = max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta*\omega d};\frac{500\nu}{\omega d^{2}}\right), \quad F_{3} = 1 - tanh\left\{\left(\frac{150\nu}{\omega d^{2}}\right)^{4}\right\} \quad \text{(32)}$$

 $k-\omega$ モデルの係数を ϕ_1 , $k-\epsilon$ モデルの係数を ϕ_2 として,SST モデルの係数 ϕ との関係は次の式で表される.

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \tag{33}$$

ϕ	1	2
$\sigma_{\kappa \phi}$	0.85	1.0
$\sigma_{\omega\phi}$	0.5	0.856
eta_{ϕ}	0.075	0.0828

また, γ は $\kappa = 0.41$, $\beta^* = 0.09$ として以下の式で計算される.

$$\gamma = \frac{\beta}{\beta^*} - \frac{\sigma_\omega \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}} \tag{34}$$

A.4 Explicit Algebraic Stress Model

(16)式のブシネスクの仮定は線形モデルのため推定精度が良くない場合があるので,EASM では非 線形項を含むモデルを用いる.レイノルズ応力テンソルは次の式で与えられる.

$$\rho \overline{u_i^{"} u_j^{"}} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \mu_T \{ S_{ij} + a_2 a_4 (S_{ik} W_{kj} - W_{ik} S_{kj}) \} - a_3 a_4 \left(S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} S_{mn} S_{mn} \delta_{ij} \right)$$
(35)

乱流粘性は次の式で表される.

$$\nu_T = max \left(-k\alpha_1; \frac{0.0005k}{\beta * \omega} \right) \tag{36}$$

ここで,α1は次の式で与えられる.

$$\left(\frac{\alpha_1}{\tau}\right)^3 - \frac{\gamma_1}{\eta^2 \tau^2 \gamma_0} \left(\frac{\alpha_1}{\tau}\right)^2 + \frac{\gamma_1^2 - 2\eta^2 \tau^2 \gamma_0 a_1 - \frac{2}{3}\eta^2 \tau^2 a_3^2 + 2R^2 \eta^2 \tau^2 a_2^2}{(2\eta^2 \tau^2 \gamma_0)^2} \left(\frac{\alpha_1}{\tau}\right) = -\frac{\gamma_1 a_1}{(2\eta^2 \tau^2 \gamma_0)^2}$$
(37)

ただし,

ここで

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \qquad \eta^2 = S_{ij} S_{ij} \qquad R^2 = \frac{W_{ij} W_{ij}}{\eta^2}$$

$$a_{1} = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} - C_{2}\right) \quad a_{2} = \frac{1}{2} (2 - C_{4}) \quad a_{3} = \frac{1}{2} (2 - C_{3}) \quad a_{4} = \frac{\tau}{\gamma_{1} - 2\gamma_{0}(\alpha_{1}/\tau)\eta^{2}\tau^{2}}$$
$$\gamma_{0} = \frac{C_{1}^{1}}{2} \quad \gamma_{1} = \frac{C_{1}^{0}}{2} + \frac{C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1}}{C_{\epsilon 2} - 1}$$
$$C_{\epsilon 1} = 1.44 \quad C_{\epsilon 2} = 1.83 \quad C_{1}^{0} = 3.4 \quad C_{1}^{1} = 1.8 \quad C_{2} = 0.36 \quad C_{3} = 1.25 \quad C_{4} = 0.4$$

EASM の詳細は参考文献[18]を参照.

付録 B CFD 計算に使用したコンピューターの仕様

- CPU : Intel Xeon E5-2690v3 2.6GHz 12core × 2
- RAM : 128GB
- OS : Red Hat Enterprise Linux 6.10

参考文献

- ITTC, "Report of the Specialist Committee on Energy Saving Methods", Proceedings of 28th ITTC-VolumeII (2017).
- [2] サノヤス造船株式会社, "Sanoyas Tandem Fin", http://www.sanoyas.co.jp.
- [3] Tokyo 2015 Program (presentations), <u>http://www.t2015.nmri.go.jp/program.html</u> (2015).
- [4] Kawakita C., Takashima R., Sato K., "CFD on Cavitation around Marine Propellers with Energy-Saving Devices", Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 49 No. 1 (2012).
- [5] 鈴木博善, 薮下和樹, 戸田保幸, 鈴木敏夫, 新井英行, "Experimental Study on a Turbulent Boundary Layer with a Longitudinal Vortex - Turbulence Measurements by Triple Sensor Hot Wire -", 関西造船協 会講演論文集 第5卷, 平成7年11月.
- [6] USER GUIDE HEXPRESSTM v7.1, NUMECA (https://www.numeca.asia/).
- [7] 笠木伸英,河村洋,宮内敏雄,他,"乱流工学ハンドブック",朝倉書店 (2009).
- [8] 関西造船協会編, "造船設計便覧(第4版)", 海文堂.
- [9] H.K. Versteeg and W. Malalasekera (訳 松下洋介,他),"数值流体力学(第2版)",森北出版.
- [10] 中山勝之, 中川慎二, "旋回流れ対応型 k-ω SST モデルの OpenFOAM への実装", オープン CAE シンポジウム 2017.
- [11] Hellsten, A., "SomeImprovements in Menter'sk-wSST turbulence model", AIAA Paper, 98-2554 (1998).
- [12] Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, BegellHouse, Inc., 2003, pp. 625 -632.
- [13] Webpage, Tokyo 2015 A Work Shop on CFD in Ship Hydrodynamics, https://t2015.nmri.go.jp/ (2015).
- [14] Webpage, Tokyo 2015 A Work Shop on CFD in Ship Hydrodynamics Hull data and conditions, https://t2015.nmri.go.jp/jbc_gc.html (2015).

- [15] ITTC, "1978 ITTC Performance Prediction Method", ITTC Recommended Procedures and Guidelines (2017).
- [16] ITTC, "Practical Guidelines for Ship CFD Applications", ITTC Recommended Procedures and Guidelines (2011).
- [17] FLOWTECH International AB, "XCHAP theoretical manual", https://www.flowtech.se/.
- [18] G.B. Deng, P. Queutey, M. Visonneau, "Three-Dimensional Flow Computation with Reynolds Stress and Algebraic Stress Models", Engineering Turbulence Modelling and Experiments 6, Elsevier (2005).

記号一覧

C_f , C_{f0}	摩擦抵抗係数	
C_r	剰余抵抗係数	
C_t	抵抗係数	
C _w	造波抵抗係数	
D	プロペラ直径	
F_n	フルード数	
J	前進係数	
Κ	形状影響係数	
K _t	プロペラスラスト係数	
k	乱流エネルギー	
L	代表長	
L _{PP}	船体長さ(垂線間長)	
n	プロペラ回転数	
p	圧力	
R, R_t	船体抵抗	
R_n	レイノルズ数	
S	浸水表面積	
Т	乱流強度	
T_P	プロペラスラスト	
1 - t	スラスト減少係数	
<i>U</i> 0	設定流速	
u	X方向の流速	
$u_{ au}$	摩擦速度	
V	代表流速	
ν	Y方向の流速	
w	Z方向の流速	
$1 - w_{T}$	有効伴流係数	
X	主流方向座標	
Y	横方向座標	
<i>y</i> ⁺	壁面からの無次元距離	
Ζ	鉛直上向き座標	
η_H	船殻効率	
ν	動粘性係数	
ρ	流体密度	
ω	乱流エネルギー比消散率	

$\overline{\omega_x}$	無次元渦度
$\overline{\omega_{xd}}$	フィンによる撹乱成分の無次元渦度
$\overline{\omega_{x_{fin}}}$	フィンを装着した場合の無次元渦度

 $\overline{\omega_{x_wofin}}$ フィンを装着しない場合の無次元渦度

表一覧

- 表 2.1 平板とフィンのサイズ表
- 表 2.2 SHI-ME 回流水槽仕様
- 表 2.3 OpenFOAM の境界条件
- 表 2.4 Refine Level による格子の辺長さの無次元値
- 表 2.5 OpenFOAM 境界条件設定: 乱流強度 5%
- 表 2.6 OpenFOAM 境界条件設定: 乱流強度 2%
- 表 2.7 OpenFOAM の境界条件設定: 壁関数非適用
- 表 2.8 OpenFOAM の境界条件設定:フィン周りに壁関数非適用
- 表 2.9 OpenFOAM 境界条件設定:フィン周りに壁関数非適用および流入境界の乱流強度 2%
- 表 3.1 JBC 要目(実船と模型)
- 表 3.2 模型プロペラ要目
- 表 3.3 フィン要目(実船と模型)
- 表 3.4 フィン位置の変更による自航要素
- 表 3.5 フィン位置 S.S.2, 20% 喫水の自航試験(SHI-ME)
- 表 3.6 フィン位置 S.S.2, 20% 喫水の自航試験(大阪大学)
- 表 3.7 フィン位置 S.S.2, 20% 喫水の CFD 結果

図一覧

- 図 1.1 プロペラから離れたフィンの実船装着例
- 図 2.1 平板上フィン模型の全体図
- 図 2.2 左図: アクリル平板全体(右後方から撮影)右図: 平板フランジ嵌め部分(左前方から撮影)
- 図 2.3 左図:フランジ全体(左側から撮影)右図:フランジ断面(前方から撮影)
- 図 2.4 平板先端に取り付けた乱流促進テープ
- 図 2.5 PIV 装置図
- 図 2.6 PIV 装置計測イメージ
- 図 2.7 PIV 装置と平板上フィン模型の配置イメージ
- 図 2.8 左:カメラ1で撮影した1枚目の画像例 中央左:カメラ1で撮影した2枚目の画像例 中央右:カメラ2で撮影した1枚目の画像例 右:カメラ2で撮影した2枚目の画像例
- 図 2.9 大阪大学水槽での PIV 装置と平板
- 図 2.10 トレーサー容器とトレーサー散布装置
- 図 2.11 レーザー照射の様子
- 図 2.12 左図: X=1365mm 断面での流速分布(平板とフランジ境界の 30mm 上流) 右図: X=1425mm 断面での流速分布(平板とフランジ境界の 30mm 下流)
- 図 2.13 左図: SHI-ME 回流水槽全体図 右図: 回流水槽本体写真
- 図 2.14 左図: SHI-ME 回流水槽での PIV 装置と平板模型配置 右図:回流水槽での平板模型
- 図 2.15 平板上フィン X=1800mm (フィン先端から 300mm 後方) 断面のカメラ2による撮影画像
- 図 2.16 計算領域と境界条件設定
- 図 2.17 フィン近傍の計算格子
- 図 2.18 フィン中央断面における格子密度の違い 左: Level5 中央: Level6 右: Level7
- 図 2.19 X=1600mm(フィン先端から 100mm)での流速分布の違い 左: Level5 中央: Level6 右: Level7
- 図 2.20 無次元渦度 $\overline{\omega_x} = -15$ の渦度等値面: Level5 格子
- 図 2.21 無次元渦度 $\overline{\omega_x}$ = -15の渦度等値面: Level6 格子
- 図 2.22 無次元渦度 $\overline{\omega_x} = -15$ の渦度等値面: Level7 格子
- 図 2.23 流速分布図 X=500mm (フィン先端から 1000mm 上流) 左: PIV 右: CFD
- 図 2.24 流速分布図 X=750mm (フィン先端から 750mm 上流) 左: PIV 右: CFD
- 図 2.25 流速分布図 X=1000mm (フィン先端から 500mm 上流) 左: PIV 右: CFD
- 図 2.26 流速分布図 X=1250mm (フィン先端から 250mm 上流) 左: PIV 右: CFD
- 図 2.27 流速分布図 X=1450mm (フィン先端から 50mm 上流) 左: PIV 右: CFD
- 図 2.28 PIV および CFD の結果を示す断面とフィンの位置関係
- 図 2.29 流速分布 フィン迎角 10° X=1600mm

```
左:阪大 PIV 中央:SHI-ME PIV(X=1590mm) 右:CFD 図 2.30 流速分布 フィン迎角 10°X=1700mm
```

```
左: 阪大 PIV 中央: SHI-ME PIV 右: CFD
```

図 2.31 流速分布 フィン迎角 10° X=1800mm 中央:SHI-ME PIV 右:CFD 左:阪大 PIV 図 2.32 流速分布 フィン迎角 10° X=1900mm 左: 阪大 PIV 中央:SHI-ME PIV 右:CFD 図 2.33 流速分布 フィン迎角 5°X=1600mm 左: 阪大 PIV右: CFD 図 2.34 流速分布 フィン迎角 5°X=1700mm 左: 阪大 PIV右: CFD 図 2.35 流速分布 フィン迎角 5°X=1800mm 左:阪大 PIV右:CFD 図 2.36 流速分布 フィン迎角 5°X=1900mm 左: 阪大 PIV右: CFD 図 2.37 渦度分布 フィン迎角 10° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: SHI-ME PIV(X=1590mm) 右: CFD 図 2.38 渦度分布 フィン迎角 10° X=1700mm 左: 阪大 PIV 中央: SHI-ME PIV 右: CFD 図 2.39 渦度分布 フィン迎角 10° X=1800mm 左: 阪大 PIV 中央: SHI-ME PIV 右: CFD 図 2.40 渦度分布 フィン迎角 10° X=1900mm 左: 阪大 PIV 中央: SHI-ME PIV 右: CFD 図 2.41 流速分布 フィン迎角 5°X=1600mm 左:阪大 PIV 右:CFD 図 2.42 流速分布 フィン迎角 5°X=1700mm 左: 阪大 PIV 右: CFD 図 2.43 流速分布 フィン迎角 5° X=1800mm 左: 阪大 PIV 右: CFD 図 2.44 流速分布 フィン迎角 5°X=1900mm 左:阪大 PIV 右:CFD 図 2.45 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° 阪大 PIV 図 2.46 渦度等値面(wx = -20) フィン迎角 10° CFD 図 2.47 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5°阪大 PIV 図 2.48 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5° CFD 図 2.49 乱流エネルギー分布 フィン迎角 10° X=1600mm 左: SHI-ME PIV 中央: CFD (T=0.05) 右:CFD (T=0.02) 図 2.50 乱流エネルギー分布 フィン迎角 10° X=1700mm 左: SHI-ME PIV 中央: CFD (T=0.05) 右: CFD (T=0.02) 図 2.51 乱流エネルギー分布 フィン迎角 10° X=1800mm 左: SHI-ME PIV 中央: CFD (T=0.05) 右:CFD (T=0.02) 図 2.52 乱流エネルギー分布 フィン迎角 10° X=1900mm 左: SHI-ME PIV 中央: CFD (T=0.05) 右: CFD (T=0.02) 図 2.53 流速分布 フィン迎角 10° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (T=0.05) 右: CFD (T=0.02) 図 2.54 流速分布 フィン迎角 10° X=1700mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (T=0.05) 右: CFD (T=0.02) 図 2.55 流速分布 フィン迎角 10° X=1800mm

97

左: 阪大 PIV 中央: CFD (T=0.05) 右: CFD (T=0.02) 図 2.56 流速分布 フィン迎角 10° X=1900mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (T=0.05) 右: CFD (T=0.02) 図 2.57 渦度分布 フィン迎角 10° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (T=0.05) 右:CFD (T=0.02) 図 2.58 渦度分布 フィン迎角 10° X=1700mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (T=0.05) 右: CFD (T=0.02) 図 2.59 渦度分布 フィン迎角 10° X=1800mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (T=0.05) 右: CFD (T=0.02) 図 2.60 渦度分布 フィン迎角 10° X=1900mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (T=0.05) 右: CFD (T=0.02) 図 2.61 渦度等値面(ω_r = -20) フィン迎角 10° 阪大 PIV 図 2.62 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° CFD (T=0.05) 図 2.63 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° CFD (T=0.02) 図 2.64 渦度等値面(w_x = -12) フィン迎角 5° 初期 CFD 図 2.65 渦度等値面(wx = -12) フィン迎角 5°乱流モデル改良 CFD 図 2.66 左: RANS の格子 右: DDES 用の格子 図 2.67 流速分布 フィン迎角 10° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (RANS) 右: CFD (DDES) 図 2.68 流速分布 フィン迎角 10° X=1700mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (RANS) 右: CFD (DDES) 図 2.69 流速分布 フィン迎角 10° X=1800mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (RANS) 右: CFD (DDES) 図 2.70 流速分布 フィン迎角 10° X=1900mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (RANS) 右: CFD (DDES) 図 2.71 渦度等値面(ω_r = -20) フィン迎角 10° 阪大 PIV 図 2.72 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° RANS 図 2.73 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° DDES 図 2.74 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -20$) フィン迎角 10° DDES 格子を用いた RANS 計算結果 図 2.75 左:元の CFD 格子 右: 改良 CFD 格子 図 2.76 流速分布 フィン迎角 5° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (壁関数適用) 右: CFD (壁関数非適用) 図 2.77 流速分布 フィン迎角 5° X=1700mm 左:阪大 PIV 中央:CFD (壁関数適用) 右:CFD (壁関数非適用) 図 2.78 流速分布 フィン迎角 5° X=1800mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (壁関数適用) 右: CFD (壁関数非適用) 図 2.79 流速分布 フィン迎角 5° X=1900mm

左: 阪大 PIV 中央: CFD (壁関数適用) 右:CFD (壁関数非適用) 図 2.80 渦度分布 フィン迎角 5° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (壁関数適用) 右:CFD (壁関数非適用) 図 2.81 渦度分布 フィン迎角 5° X=1700mm 左: 阪大 PIV 中央: CFD (壁関数適用) 右:CFD (壁関数非適用) 図 2.82 渦度分布 フィン迎角 5° X=1800mm 右:CFD (壁関数非適用) 左: 阪大 PIV 中央: CFD (壁関数適用) 図 2.83 渦度分布 フィン迎角 5° X=1900mm 左:阪大 PIV 中央:CFD (壁関数適用) 右:CFD (壁関数非適用) 渦度等値面($\overline{\omega_x} = -12$) フィン迎角 5° 阪大 PIV 図 2.84 図 2.85 渦度等値面(ω_x = -12) フィン迎角 5°CFD(壁関数適用) 図 2.86 渦度等値面(w = -12) フィン迎角 5°CFD (壁関数非適用) 図 2.87 流速分布 フィン迎角 5° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.88 流速分布 フィン迎角 5° X=1700mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.89 流速分布 フィン迎角 5° X=1800mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD X=1900mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.90 流速分布 フィン迎角 5° 図 2.91 渦度分布 フィン迎角 5° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD X=1700mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.92 渦度分布 フィン迎角 5° 図 2.93 渦度分布 フィン迎角 5° X=1800mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.94 渦度分布 フィン迎角 5° *X*=1900mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.95 渦度等値面(wx = -12) フィン迎角 5° 阪大 PIV 図 2.96 渦度等値面(wx = -12) フィン迎角 5°初期 CFD 図 2.97 渦度等値面(w = -12) フィン迎角 5°改良 CFD 図 2.98 流速分布 フィン迎角 10° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD X=1700mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.99 流速分布 フィン迎角 10° 図 2.100 流速分布 フィン迎角 10° X=1800mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.101 流速分布 フィン迎角 10° X=1900mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.102 渦度分布 フィン迎角 10° X=1600mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.103 渦度分布 フィン迎角 10° X=1700mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD X=1800mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.104 渦度分布 フィン迎角 10° 図 2.105 渦度分布 フィン迎角 10° X=1900mm 左: 阪大 PIV 中央: 初期 CFD 右: 改良 CFD 図 2.106 渦度等値面(w = -20)フィン迎角 10° 阪大 PIV 図 2.107 渦度等値面(wx = -20)フィン迎角 10°初期 CFD 図 2.108 渦度等値面(w = -20) フィン迎角 10° 改良 CFD 図 3.1 JBC 正面断面図 図 3.2 JBC 船首側面断面図 JBC 船尾側面断面図 図 3.3 模型プロペラ 図 3.4

- 図 3.5 模型プロペラ特性
- 図 3.6 模型フィン
- 図 3.7 模型船にフィンを装着した様子
- 図 3.8 検討したフィン位置
- 図 3.9 自航試験時の様子
- 図 3.10 全抵抗係数 C_t (SHI-ME)
- 図 3.11 造波抗係数 Cw (SHI-ME)
- 図 3.12 SHI-ME 回流水槽における PIV 試験の様子
- 図 3.13 A.P.面の撮影画像 左 SHI-ME (2018 年 11 月) 右 大阪大学 (2019 年 10 月)
- 図 3.14 A.P.での流速分布 (SHI-ME) プロペラ無し 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.15 A.P.での流速分布(大阪大学)プロペラ無し 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.16 全抵抗係数 C_t (大阪大学)
- 図 3.17 造波抵抗係数 C_w (大阪大学)
- 図 3.18 A.P.面での流速分布 左: PIV データ 右: 公開データ
- 図 3.19 OpenFOAM 格子 左:解析領域 右:船体表面格子
- 図 3.20 OpenFOAM フィン付近の格子
- 図 3.21 OpenFOAM で計算された A.P.での流速分布
- 図 3.22 SHIPFLOW 格子 左:解析領域 右:船体表面格子
- 図 3.23 SHIPFLOW フィン付近の格子
- 図 3.24 SHIPFLOW で計算された A.P.での流速分布
- 図 3.25 SHIPFLOW で計算された自航要素と実験の比較
- 図 3.26 PIV および CFD の結果を示す断面位置(フィンは S.S.2, 20% 喫水位置に装着)
- 図 3.27 S.S.1¹/2 プロペラ無し流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.28 S.S.1¹/2 プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.29 S.S.1¹/2 プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD
- 図 3.30 S.S.1 プロペラ無し流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.31 S.S.1 プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.32 S.S.1 プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD
- 図 3.33 S.S.¹/2 プロペラ無し流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.34 S.S.¹/2 プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.35 S.S.¹/₂ プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD
- 図 3.36 プロペラ面 プロペラ無し流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.37 プロペラ面 プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.38 プロペラ面 プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD
- 図 3.39 A.P.面 プロペラ無し流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.40 A.P.面 プロペラ無し流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り
- 図 3.41 A.P.面 プロペラ無し フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD
- 図 3.42 S.S.1/2 プロペラ有り流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り

図 3.43 S.S.1/2 プロペラ有り流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り 図 3.44 S.S.¹/₂ プロペラ有り フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD 図 3.45 プロペラ面 15mm 上流 プロペラ有り流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り 図 3.46 プロペラ面 15mm 上流 プロペラ有り流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り 図 3.47 プロペラ面 15mm 上流 プロペラ有り フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD 図 3.48 プロペラ面 15mm 下流 プロペラ有り流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り 図 3.49 プロペラ面 15mm 下流 プロペラ有り流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有 図 3.50 プロペラ面 15mm 下流 プロペラ有り フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD 図 3.51 A.P.面 プロペラ有り流速分布 PIV 左:フィン無し 右:フィン有り 図 3.52 A.P.面 プロペラ有り流速分布 CFD 左:フィン無し 右:フィン有り 図 3.53 A.P.面 プロペラ有り フィンによる撹乱速度分布 左: PIV 右: CFD 図 3.54 S.S.1¹/₂ 渦度分布 左図:フィン無し PIV 中央左図:フィン有り PIV 中央右図:フィン無し CFD 右図:フィン有り CFD 図 3.55 S.S.1 渦度分布 左図:フィン無し PIV 中央左図:フィン有り PIV 中央右図:フィン無しCFD 右図:フィン有りCFD 図 3.56 S.S.¹/₂ 渦度分布 左図:フィン無し PIV 中央左図:フィン有り PIV 中央右図:フィン無しCFD 右図:フィン有りCFD 図 3.57 プロペラ位置断面 渦度分布 左図:フィン無し PIV 中央左図:フィン有り PIV 中央右図:フィン無しCFD 右図:フィン有りCFD 図 3.58 A.P.断面 渦度分布 左図:フィン無し PIV 中央左図:フィン有り PIV 中央右図:フィン無し CFD 右図:フィン有り CFD 図 3.59 フィンによる撹乱速度分布 左:S.S.1¹/2 右:S.S.1 図 3.60 フィンによる撹乱速度分布 左:S.S.¹/2 右:A.P 図 3.61 プロペラ翼の迎角(模式図) 図 3.62 フィンによる撹乱渦度分布 左: S.S.1¹/2 右: S.S.1

- 図 3.63 フィンによる撹乱渦度分布 左:S.S.¹/₂ 右:A.P.
- 図 3.64 Q-criterion=40 の等値面 (CFD)

本論文に関連した著者の発表論文

- Rikizo Yamashita, Yasuyuki Toda "Computation and Measurement of Wake Field of Fin Installed in Boundary Layer", Proceedings of the 28th International Ocean and Polar Engineering Conference Sapporo, Japan. (2018)
- Rikizo Y., Yasuyuki T., Jun A., Hina M., "Computation and Measurement of Wake Field of Fin Installed in Boundary Layer (2nd Report)", Proceedings of the 29th International Ocean and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii. (2019)
- 3. 山下力蔵,戸田保幸,安藤潤,"JBC における船体 FIN 効果および流場の実験および数値解 析", 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第29号 (2019)