

東京大学大学院新領域創成科学研究科

人間環境学専攻

平成 27 年度

修士論文

水槽試験と CFD の統合による
船型設計支援システムの開発

2016 年 2 月 4 日提出

指導教員 大和 裕幸 教授

和中 真之介

目次

目次.....	I
図目次.....	IV
表目次.....	VI
第1章 序論.....	1
1.1 背景.....	2
1.2 目的.....	3
1.3 本論文の構成.....	3
第2章 船舶の推進性能推定について.....	5
2.1 はじめに.....	6
2.2 水槽試験による推進性能の推定[7].....	6
2.2.1 模型船による造波抵抗算出.....	6
2.2.2 実船換算による EHP の算出.....	8
2.2.3 Trim、Sinkage の算出.....	8
2.3 CFD による推進性能の推定.....	9
2.3.1 有限体積法による離散化[10].....	9
2.3.2 SIMPLE 法、PISO 法[10][11].....	13
2.3.3 乱流モデル.....	16
2.3.4 VOF 法による自由表面解析.....	23
第3章 関連研究および関連事例.....	26
3.1 はじめに.....	27
3.2 CFD 計算を用いた船型最適化に関する研究.....	27
3.3 水槽試験による CFD の VERIFICATION&VALIDATION.....	28
3.4 D/A ハイブリッド風洞 DAHWIN.....	29
3.5 本研究の位置付け.....	30

第4章 水槽試験・CFDの統合による船型設計支援システム	32
4.1 船型設計システムの要件定義	33
4.1.1 設計プロセスの効率化に必要とされる機能	33
4.1.2 システムの要件定義	34
4.2 開発した設計データ統合管理システム	37
4.2.1 設計データベースとその検索機能	37
4.2.2 水槽試験・CFD・船型閲覧インターフェース	39
4.2.3 水槽試験・CFDデータ比較分析機能	41
4.2.4 設計に関する知識およびCFDに関するノウハウの蓄積	43
4.3 性能推定システム	44
4.3.1 東京大学船型試験水槽	45
4.3.2 OpenFOAMによるCFD計算	46
第5章 開発システムの機能・精度の検証	47
5.1 はじめに	48
5.2 完全没水球が一樣速度で進行する際の抵抗値推定	48
5.2.1 概要	48
5.2.2 東京大学船型試験水槽における水槽試験	49
5.2.3 OpenFOAMによるCFD計算	50
5.2.4 開発システムにおける比較分析	53
5.2.5 開発システム上での知識の登録	55
5.2.6 考察	55
5.3 コンテナ船の推進性能推定	57
5.3.1 概要	57
5.3.2 東京大学船型試験水槽における抵抗試験	59
5.3.3 OpenFOAMによる抵抗試験のシミュレーション	61
5.3.4 結果	66
5.3.5 考察	67
第6章 考察	69
6.1 はじめに	70
6.2 開発システムについての考察	70

6.2.1 設計データベースとその検索機能について.....	70
6.2.2 水槽試験・CFD データ比較分析機能について.....	71
6.2.3 設計に関する知識および CFD に関するノウハウの蓄積機能について...	72
6.3 造船 CAD システムについて	72
第 7 章 結論	74
7.1 結論.....	75
7.2 今後の展望.....	75
謝辞.....	77
参考文献.....	80

図目次

図 2-1	スタガート格子による 2 次元空間の差分化.....	10
図 2-2	乱流境界層における流速成分	20
図 2-3	VOF 法による自由表面の捕捉.....	24
図 3-1	DAHWIN の概要[25].....	30
図 4-1	想定する船型設計の流れ.....	33
図 4-2	提案する船型設計支援システムの構成.....	36
図 4-3	開発システムによる過去の船型の検索支援.....	37
図 4-4	設計データ統合管理システムにおけるデータ管理.....	38
図 4-5	船型検索インターフェース	39
図 4-6	船型データ閲覧インターフェース	40
図 4-7	水槽試験データ閲覧インターフェース	40
図 4-8	CFD データ閲覧インターフェース.....	41
図 4-9	開発システムによる高精度推定の支援.....	42
図 4-10	水槽試験・CFD 比較分析インターフェース	43
図 4-11	開発システムが生成する性能図表	44
図 4-12	東京大学船型試験水槽の設計図.....	45
図 5-1	水槽試験の概要.....	50
図 5-2	水槽試験の様子.....	50
図 5-3	OpenFOAM によるメッシュ生成	51
図 5-4	開発システムにおける結果の比較.....	54
図 5-5	水槽試験、CFD 結果および実験式の比較.....	56
図 5-6	球の抗力係数とレイノルズ数の関係([32]を参考に作成).....	57
図 5-7	対象とする 6600 TEU コンテナ船の外見	58
図 5-8	東大水槽における抵抗試験の概要	59
図 5-9	模型船取り付けの様子	60
図 5-10	東大水槽における抵抗試験プロセス	61
図 5-11	対象とする船型の線図(Body Plan).....	62

図 5-12 CAD による線図の補間	63
図 5-13 AutoCAD および Netgen によるメッシュ作成	63
図 5-14 OpenFOAM による抵抗試験のシミュレーション	64
図 5-15 船体付近のメッシュ細分化の様子	65
図 5-16 全抵抗値による水槽試験と CFD の比較	67
図 6-1 開発システム用いた場合とそうでない場合の比較	70

表目次

表 2-1 k - ϵ モデルにおけるパラメータ	19
表 2-2 k - ω モデルにおけるパラメータ	21
表 2-3 k - ω SST モデルにおけるパラメータ	23
表 4-1 船型設計システムを構成するサブシステムとその要件.....	36
表 4-2 東京大学船型試験水槽の仕様	46
表 5-1 メッシュ情報(分解能が高い場合)	52
表 5-2 メッシュ情報(分解能が低い場合)	52
表 5-3 シミュレーションの設定	53
表 5-4 水槽試験および CFD による抗力係数の比較	54
表 5-5 対象とするコンテナ船の要目	58
表 5-6 抵抗試験の条件.....	61
表 5-7 メッシュ情報(コンテナ船のケース).....	65
表 5-8 シミュレーションの設定	66
表 5-9 水槽試験および CFD による全抵抗値の比較	67

第1章 序論

1.1 背景.....	2
1.2 目的.....	3
1.3 本論文の構成	3

1.1 背景

船型設計とは船の型を決めていく船舶の基本設計である。最も上流側の設計作業であり、一度決定した船型を下流の工程で変更することはできず、船型設計が完了した時点でその船舶の性能は決定したものと言って過言ではない[1]。それほど船舶の製造において重要なプロセスである。船型設計において最も困難な問題は設計した船型がどのような性能を持つかを正確に推定すること、より性能の良い船型とするために設計をどう修正していくかを決定することの 2 点にある。このような問題に対し、長年水槽における模型試験が重要な役割を担ってきた。模型試験の結果から実船の性能を精度良く推定する方法が提案され、系統的な模型試験を行うことで船型の形状と性能の関係を明らかにする試みがなされてきた。Taylor 図表[2]や山県の図表[3]といったものがその代表的なものとなる。しかし、時代が移り船型に対する要求が変化するにつれ、全く新しい船型が要求されるようになり、これらの図表は使われなくなっていく。水槽試験を行うためには、模型船の作成コストや水槽試験自体を行うコストなど多くのコストを必要とする。新しい船型のたびに系統的な模型試験を行うことは事実上不可能であると言っていい。そこで水槽試験を行う前に、CFD 計算によって船型の性能を推定しようとする試みが行われている。コンピューターの発展とともにその精度は向上し、船型設計において重要なツールとなりつつある[4]一方で、CFD 計算が水槽試験に代替できるほどの精度は確保できていないのが現状である。水槽試験と CFD 計算の両者を組み合わせ効率的に活用することが重要である。

昨今の船型設計のニーズとして実海域性能に基づいた船型の開発がある[5]。従来の船型開発では平水中の性能のみが重要視されてきた。水槽試験において計測されるのは平水中推進性能であり、運航前の海上公試においてもできるだけ波風のない海象で試運転を行って性能の確認を行ってきた[6]。しかし実際に船舶が航行するのは波や風のある実海域である。波や風の影響による抵抗増加などの影響から平水中での性能と実海域中での性能は異なったものとなるため、実海域性能を重視して設計を進めていくべきである。実海域性能に基づく船型開発において困難となるのは、平水中で性能の良かった船型が必ずしも実海域中で性能が良くなるとは限らないという点にある。そこで実海域性能の良い船型を設計するためには、その船型のさまざまな気象、海象における性能を推定し、その性能が良好であるものを選ぶ必要がある。この場合、波の方向、大きさ、風の方向や大きさといった様々なパラメータを変化させながら性能推定を行わなければならない、性能推定コスト

が従来に比べて大幅に増大するという問題がある。

効率的に船型設計を行う上で最も大事なことは、主要目や船首形状、船尾形状を決定するためのデータをあらかじめ整備しておくことである。主要目と推進性能の関係、船首形状と造波抵抗の関係などをあらかじめデータベースとして整備しておき、それらを活用することで効率的な船型設計が可能となる。実海域性能に基づく船型設計を行う場合、このようなデータベースの充実はより重要となる。上述の通り、実海域性能に基づく船型設計を行うためには、性能推定に大きなコストを必要とするが、波風と性能の関係が整理されたデータベースが存在すれば、そのコストは低減することが可能である。このようなデータベースの充実の際、重要となるのは水槽試験と CFD の両者を効率的に活用することである。水槽試験だけでこのようなデータベースを充実させることは現実的に不可能であると言ってよく、CFD のみではその精度に問題がある。両者を効率的に活用し、網羅的かつ信頼性の高いデータベースを構築する必要がある。

1.2 目的

本研究では、船型開発のプラットフォームとして水槽試験データと CFD データを統合的に用いて、船型設計を支援するシステムの開発を行う。具体的には、設計プロセスの効率化を目的とした船型設計支援システムの要件を整理し、そのうち水槽試験データや CFD データなどの過去の船型に関するデータをメタデータによって管理する設計データ統合管理システム、水槽試験や CFD 計算を用いて性能推定するシステムの構築を行う。本論文では2つのケーススタディを通して開発システムの機能の検証を行う。1つ目のケースとしては船舶の簡易モデルとして流れの中にある没水球が水から受ける抵抗に関して実際に行った水槽試験と CFD の比較分析を開発システムによって行う。開発システムの水槽試験・CFD 比較分析が定義した要件を満たしていることを確認する。2つ目のケースとしては実際の船舶設計プロセスの一つである船型の抵抗試験とその CFD の結果を用いて、開発システムの CFD 計算が船型設計に使える精度であることを示す。

1.3 本論文の構成

本論文の構成について述べる。第 1 章では本研究の背景と目的について述べた。第 2

章では本論文の第 3 章以降で前提とする、船舶設計における推進性能推定についてまとめる。主に水槽試験による実験的方法と CFD を用いた計算による方法の 2 つの方法について述べる。第 3 章では関連研究および関連する事例についてまとめ、本研究の位置付けについて議論する。第 4 章では本研究の目的に基づき船型設計システムの要件定義を行う。定義した要件に基づき開発したシステムの詳細について説明を行い、第 5 章でその機能と精度の検証を行う。第 6 章で第 5 章の結果に基づき考察を行い、第 7 章で結論、今後の展望といった流れとなる。

第2章 船舶の推進性能推定について

2.1 はじめに.....	6
2.2 水槽試験による推進性能の推定[7]	6
2.2.1 模型船による造波抵抗算出.....	6
2.2.2 実船換算による EHP の算出	8
2.2.3 Trim、Sinkage の算出	8
2.3 CFD による推進性能の推定	9
2.3.1 有限体積法による離散化[10]	9
2.3.2 SIMPLE 法、PISO 法[10][11]	13
2.3.3 乱流モデル	16
2.3.4 VOF 法による自由表面解析	23

2.1 はじめに

本章では、本研究で扱う水槽試験による推進性能の推定、および CFD による推進性能推定の方法と理論について概説する。

2.2 水槽試験による推進性能の推定[7]

本節では、水槽試験のうち平水中抵抗試験の説明を行う。特に、計測の結果得られる模型船の全抵抗および前後の姿勢変化をどのようにして実船の性能に換算するかについて述べる。

2.2.1 模型船による造波抵抗算出

本来、実船の推進性能を推定するには、模型船のレイノルズ数およびフルード数の両方を実船の条件と揃える必要がある。フルード数 Fn 、およびレイノルズ数 Re の定義を式(2.1)、(2.2)に示す。 V は速度[m/s]、 g は重力加速度[m/s²]、 L は物体の代表長さ[m]、 ν は動粘性係数[m²/s]である。

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2.1)$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2.2)$$

しかし、フルード数、レイノルズ数の両方を実船に合わせることはできないので、水槽試験ではフルード数を合わせ、3次元外挿法と呼ばれる方法で造波抵抗の推定を行う。本項ではこの3次元外挿法による造波抵抗の推定方法について説明する。

まず模型船の造波抵抗係数 C_{tm} は模型船の抵抗値 R_{tm} [kg]および浸水面積 S [m²]、清水の密度 ρ [kg·s²/m⁴]、速度 V_m [m/s]を用いて以下の式(2.3)で表される。浸水面積 S に代えて排水量 ∇ の次元を変更した $\nabla^{\frac{2}{3}}$ を使うこともある。

$$C_{tm} = \frac{R_{tm}}{\frac{1}{2}\rho S V^2} \quad (2.3)$$

船体にかかる全抵抗係数は粘性抵抗係数 C_v および造波抵抗係数 C_w に分けられる。粘性抵抗は以下の式で表される。 C_f は相当平板の摩擦抵抗係数、 k は船型形状ごとに定められる形状影響係数である。

$$C_v = (1 + k)C_f \quad (2.4)$$

この粘性抵抗を推定し、全抵抗から差し引くことで造波抵抗を推定する。相当平板の摩擦抵抗係数はレイノルズ数 Re から算出できる計算式が幾つか提案されている。どの式を用いるかは水槽ごとに異なるが、式(2.5)、(2.6)に一般的によく用いられるSchoenherrの式、ITTC 1957の式[8]を示す。

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_f}} = \log_{10}(Re C_f) \quad (2.5)$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (2.6)$$

(2.5)、(2.6)のような式によって模型船の長さと同じ相当平板の摩擦抵抗係数 C_{fm} が計算できるが、3次元外挿法では形状影響係数による修正を行う。形状影響係数を船型の形状から推定する方法も提案されている[9]が、一般的には形状影響係数も模型試験から算出する。模型船をフルード数 Fn が0.1以下であるような十分遅いスピードで曳航し、その抵抗には造波抵抗が含まれないものとして形状影響係数の算出を行う。算出のための式を(2.7)に示す。

$$k = \frac{C_{tm,Fn \leq 0.1}}{C_{fm,Fn \leq 0.1}} - 1 \quad (2.7)$$

以上より、粘性抵抗の推定が行える。最終的に式によって造波抵抗係数が推定される。

$$C_w = C_{tm} - (1 + k)C_{fm} \quad (2.8)$$

2.2.2 実船換算による EHP の算出

2.2.2 で推定した造波抵抗係数を用いて実船の Effective horsepower (EHP) を推定する。実船の全抵抗係数 C_{ts} は以下の式(2.9)で算出される。 C_{fs} は実船の長さと同じ相当平板の摩擦抵抗係数である。これも式(2.5)や(2.6)から算出される。

$$C_{ts} = C_w + (1 + k)C_{fs} \quad (2.9)$$

計算された全抵抗係数 C_{ts} を用いて船体にかかる抵抗 R_{ts} が式(2.10)より計算される。全抵抗 R_{ts} [kg]から実船の EHP[W]が式(2.11)より算出される。

$$R_{ts} = \frac{1}{2} \rho C_{ts} V^2 S \quad (2.10)$$

$$EHP = R_t \cdot V_s \quad (2.11)$$

2.2.3 Trim、Sinkage の算出

通常航走する船舶は速力ごとに船体の姿勢変化が起こり、設計した喫水では航走しない。水槽試験では船体に発生する Trim および Sinkage の算出を行う。Trim とは船首喫水と船尾喫水との差を表し、Sinkage は航走時の船体の沈下量を表す。計測された船首での姿勢変化を D_f [m]、船尾での姿勢変化を D_a [m]とすると Trim[%]および Sinkage[%]は以下の式(2.12)、(2.13)で計算される。

$$\text{Trim} = \frac{D_f - D_a}{L_{pp}} * 100 \quad (2.12)$$

$$\text{Sinkage} = \frac{D_f + D_a}{2L_{pp}} * 100 \quad (2.13)$$

2.3 CFD による推進性能の推定

本節では CFD を用いた船型の推進性能推定手法について概説する。特に、海上の実船や水槽試験における模型船の航走を、空気と水の混相流中に船体を固定した状況でモデル化し、その抵抗や流場を取得する方法について述べる。

ここでは船体周りの流体は非圧縮性流体とする。 u_i を流速成分、 P を圧力、 x_i を座標系の成分、 ρ を流体の密度、 t を時間、 ν を動粘性係数とすると非圧縮性流体における連続の式および Navier-Stokes 方程式は以下の(2.14)、(2.15)のようにかける。ただし、縮約記法に基づいて記述しており添え字 i は1~3の値をとりそれぞれ流速や座標の xyz 成分を表す。また添え字が重なっている項についてはその添え字に関して和をとったものを表している。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.15)$$

(2.15)の右辺第1項を移流項、第2項を圧力項、第3項を粘性項と呼ぶ。この関係式は特殊な場合を除き、解析的な解を得ることはできない。そこで数値的に近似解を求めるために微分方程式の離散化を行う。2.3.1では有限体積法による離散化について概説し、2.3.2にてその解き方を説明する。SIMPLE法は定常流れを求めるアルゴリズムであり、PISO法は非定常流れを計算できるアルゴリズムである。

また船体周りの流場には基本的に乱流が含まれる。この乱流を Navier-Stokes 方程式からなんの近似も用いず計算すること(直接数値シミュレーション DNS)は非常に多くの計算リソースを必要とする。そこでモデルによってこの乱流を捉える乱流モデルが導入される。

2.3.3では本論文で扱ういくつかの乱流モデルについて概説する。

2.3.1 有限体積法による離散化[10]

数値流体力学では、支配方程式を解析的に解くことは特別な場合を除いて困難であり、連続である時間、空間を離散化する必要がある。離散化の手法としては有限差分法、有限体積法、有限要素法など様々な方法が考えられてきた。本項では、CFDにおいて広く一般的に用いられる空間離散化法である有限体積法について簡単に説明する。

有限体積法では、空間を格子によって離散化する。その際、有限体積法では格子によって囲まれた有限な領域(コントロールボリューム CV)およびセルとセルとの境界に変数の配置を行う。非圧縮性流れの計算ではスタガード格子が用いられる。2次元空間のスタガード格子による離散化の様子を図 2-1 に示す。スタガード格子ではセル中心に圧力などのスカラー変数を配置し、セル境界にこれと垂直な流速成分を配置する。図 2-1 における u 、 v はそれぞれ xy 方向の流速成分を表し、 P は圧力を表す。また添え字の i 、 j は計算格子上的の位置を表すインデックスである。こうすることにより、片方のセルから流出する物理量ともう片方のセルに流入する物理量がローカルで完全に一致する。これは、CFD において非常に重要視される保存性を有することにほかならない。

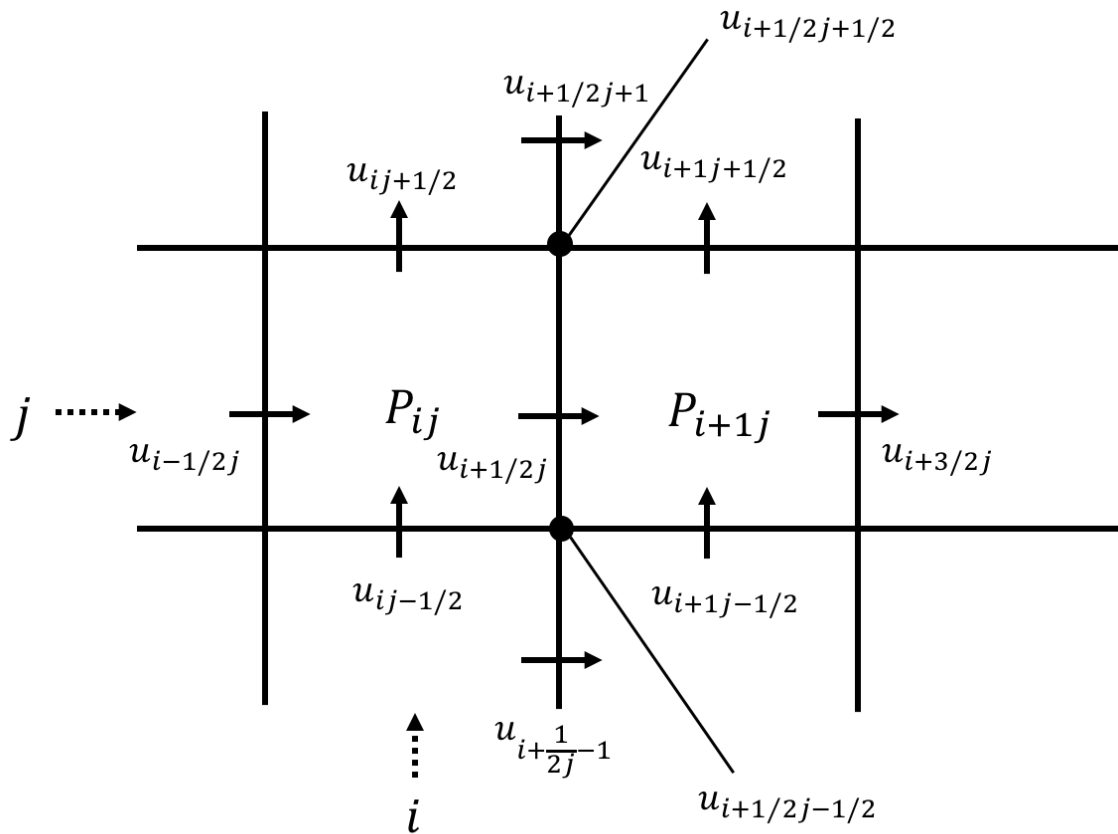


図 2-1 スタガード格子による 2次元空間の差分化

このようなスタガード格子による離散化に基づき、空間微分の差分化について考える。ナ

ビエストックス方程式における移流項について $u_i = u_j$ の時は以下の(2.16)のように差分化される。 Δx は格子の x 軸方向の幅を表す。

$$-\frac{\partial(uu)}{\partial x}\bigg|_{i+1/2j}^n = -\frac{(u_{i+1j}^n)^2 - (u_{ij}^n)^2}{\Delta x} \quad (2.16)$$

変数 u は $i+1j$ や ij に配置されていないので、これを様々な差分スキームで内挿しなければならぬ。中心差分の例を示すと以下の(2.17)(2.18)のように書ける。

$$u_{i+1j}^n = \frac{1}{2}(u_{i+3/2j}^n + u_{i+1/2j}^n) \quad (2.17)$$

$$u_{ij}^n = \frac{1}{2}(u_{i+1/2j}^n + u_{i-1/2j}^n) \quad (2.18)$$

中心差分のほかによく用いられる差分スキームとして風上差分などがある。同様に $u_i \neq u_j$ のときは(2.19)のように差分化される。

$$-\frac{\partial(uv)}{\partial x}\bigg|_{i+1/2j}^n = -\frac{(v_{i+1/2j+1/2}^n u_{i+1/2j+1/2}^n) - (v_{i+1/2j-1/2}^n u_{i+1/2j-1/2}^n)^2}{\Delta x} \quad (2.19)$$

やはりこの場合にも変数の配置されていない u や v については差分スキームで内挿する必要がある。

粘性項の差分についても同様に考えることができる。粘性項の第1項は以下の式(2.20)で書ける。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[2v \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{i+1/2j}^n = \frac{\left[2v \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{i+1j}^n - \left[2v \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{ij}^n}{\Delta x} \quad (2.20)$$

さらに(2.20)の右辺の分子については動粘性係数 v を定数とすると以下の式(2.21)(2.22)

で差分化できる。

$$\left[2v \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{i+1j}^n = 2v \frac{u_{i+3/2j}^n - u_{i+1/2j}^n}{\Delta x} \quad (2.21)$$

$$\left[2v \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{ij}^n = 2v \frac{u_{i+1/2j}^n - u_{i-1/2j}^n}{\Delta x} \quad (2.22)$$

それ以外の項は式(2.23)で差分化できる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left[v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]_{i+1/2j}^n & \quad (2.23) \\ &= \frac{\left[v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]_{i+1/2j+1/2}^n - \left[v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]_{i+1/2j-1/2}^n}{\Delta y} \end{aligned}$$

ただし、式(2.23)の分子については式(2.24)(2.25)で差分化できる。

$$\begin{aligned} \left[v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]_{i+1/2j+1/2}^n & \quad (2.24) \\ &= v \left[\frac{u_{i+1/2j+1}^n - u_{i+1/2j}^n}{\Delta y} \right] + v \left[\frac{v_{i+1j+1/2}^n - v_{ij+1/2}^n}{\Delta x} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left[v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]_{i+1/2j-1/2}^n & \quad (2.25) \\ &= v \left[\frac{u_{i+1/2j}^n - u_{i+1/2j-1}^n}{\Delta y} \right] + v \left[\frac{v_{i+1j-1/2}^n - v_{ij-1/2}^n}{\Delta x} \right] \end{aligned}$$

最後に圧力項の差分式を式(2.26)に示す。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{i+1/2}^n = -\frac{1}{\rho} \frac{P_{i+1}^n - P_i^n}{\Delta x} \quad (2.26)$$

これでナビエ・ストークス方程式の有限体積法による離散化がすべて完了したことになる。

2.3.2 SIMPLE 法、PISO 法[10][11]

2.3.1 ではナビエ・ストークス方程式の離散化について説明した。本項では離散化されたナビエ・ストークス方程式を解くアルゴリズムとして SIMPLE 法、および PISO 法の説明を行う。SIMPLE 法は定常の非圧縮性流れの計算アルゴリズムであり、PISO 法は非定常の非圧縮性流体の計算アルゴリズムである。

2.3.2.1 SIMPLE 法

SIMPLE 法(semi-implicit method for pressure-linked equations)は定常の非圧縮性流体の計算を行うアルゴリズムであり、移流項および粘性項を陰的に扱うことに大きな特徴がある。今第 n ステップまでの計算が終了し、 u_i^n および P^n が得られているものとする。まずナビエ・ストークス方程式において圧力項を陽的に、移流項および粘性項を陰的にして流速成分のみ修正することを考える。以下の式(2.27)により速度成分の修正量を定義する。

$$u_i^{n+1} = u_i^n + u_i' \quad (2.27)$$

これを(2.15)に代入することで以下の式(2.28)、(2.29)を得る。

$$\left. \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} \right|' - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]' = r^n \quad (2.28)$$

$$r^n = - \left. \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} \right|^n - \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial P}{\partial x_i} \right|^n + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]^n \quad (2.29)$$

ただし(2.28)の移流項については非線形であるため u_j の方には既知の値を用いて式(2.30)のように線形化する。

$$\left. \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} \right|' = \frac{\partial(u_j^n u_i')}{\partial x_j} \quad (2.30)$$

こうして得られた(2.28)(2.29)(2.30)の移流項と粘性項を差分化すると、流速の修正量 u_j' に対する連立 1 次方程式(2.31)が得られる。 \mathbf{A} は非対称行列である。

$$\mathbf{A}\vec{u}' = \vec{r}^n \quad (2.31)$$

連立 1 次方程式を解くアルゴリズムは多く開発されており、ここでは説明しないものとする。なんらかの方法でこれを解くことで u'_i を得る。SIMPLE 法ではこれに緩和係数 $\alpha_u < 1$ を掛け合わせ、式のように流速を更新する。

$$u_i^* = u_i^n + \alpha_u u'_i \quad (2.32)$$

次に連続の式(2.14)を満たすように圧力と流速を修正する。この計算ステップでは圧力のみ減速緩和を行うものとして式(2.33)(2.34)のような修正を考える。ただし $\alpha_p < 1$ である。

$$u_i^{n+1} = u_i^* + u''_i \quad (2.33)$$

$$p^{n+1} = p^n + \alpha_p P' \quad (2.34)$$

このとき修正量間の関係をナビエ・ストークス方程式より以下の式(2.35)のように書ける。

$$\left. \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} \right|'' - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]'' = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x_i} \quad (2.35)$$

この式を差分化すると前回の計算ステップ同様に \mathbf{A} を用いて連立 1 次の方程式で表すことができる。ここで \mathbf{A} の対角成分からなる行列 \mathbf{D} によって非対角成分を無視すると以下の式(2.36)を得る。

$$\mathbf{D}u''_i = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x_i} \quad (2.36)$$

ここで(2.14)および(2.33)より以下の式を得る。

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} = D^{-1} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 P'}{\partial^2 x_i} \quad (2.37)$$

これは P' についてのポアソン方程式となっており、これを解くことで P' を得ることができる。

(2.36)より u'' を計算し、第 $n + 1$ ステップの計算は終了となる。これを収束条件を満たすまで繰り返すことで定常の非圧縮性流れを計算する。

2.3.2.2 PISO 法

SIMPLE 法を非定常に適用する場合、時間ステップごとに反復計算が必要となり、計算コストが高い。PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators)法は非定常計算のために SIMPLE 法の計算コストを削減したアルゴリズムになる。そのため PISO 法における計算の第 1 段階は SIMPLE 法と全く一緒である。(2.32)までの計算によりまず流速成分の予測値を求める。SIMPLE 法ではその先でもう 1 段階の修正を圧力と流速で行っていたが、PISO 法ではこの修正を 2 段階に分けて行う。つまり以下の式(2.38)、(2.39)のように仮定する。

$$u_i^{n+1} = u_i^* + u_i' + u_i'' \quad (2.38)$$

$$p^{n+1} = p^n + p' + p'' \quad (2.39)$$

PISO 法においては不足緩和は必要ない。上式を段階的に表すと以下の式(2.40)、(2.41)、(2.42)、(2.43)のようにかける。

$$u_i^{**} = u_i^* + u_i' \quad (2.40)$$

$$u_i^{n+1} = u_i^{**} + u_i'' \quad (2.41)$$

$$p^{**} = p^n + p' \quad (2.42)$$

$$p^{n+1} = p^{**} + p'' \quad (2.43)$$

SIMPLE 法と同様にナビエ・ストークス方程式および連続の式の関係から修正量の間係を記述すると以下の式(2.44)、(2.45)、(2.46)、(2.47)を得る。(2.36)や(2.37)と全く同型の方程式となる。

$$D u_i' = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x_i} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} = D^{-1} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 P'}{\partial^2 x_i} \quad (2.45)$$

$$D u_i'' = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P''}{\partial x_i} \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial u_i^{**}}{\partial x_i} = \mathbf{D}^{-1} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 P''}{\partial^2 x_i} \quad (2.47)$$

PISO 法ではまず式(2.45)を解くことで P' を得る。得た P' を(2.44)に代入することで u'_i を得る。 P' や u'_i を(2.40)や(2.42)に代入することで u_i^{**} や P^{**} を計算し、式(2.46)と(2.47)を解くことで最終的な u_i^{n+1} および P^{n+1} を確定させる。つまり PISO 法では SIMPLE 法で無視した \mathbf{A} の非対角成分を計算するために、修正値の計算を2度に分けて行っていることになる。また最後の(2.44)から(2.47)を用いた反復計算部分については全く同じ式を用いているため変数を使いまわすことで2回以上、修正値の計算を行ってもよい。

2.3.3 乱流モデル

乱流シミュレーションの最も単純で正確なアプローチは、ナビエ・ストークス方程式を何の平均も近似も行わず解くことであり、この方法は直接数値シミュレーション(DNS)と呼ばれる。このようなシミュレーションでは、ある流れの瞬間を再現したものに等しいとすることができる。一方で、このようなシミュレーションを正確に行うためには解析領域に対して非常に細かい計算格子を必要とする。小スケールの乱流や運動エネルギーの散逸を全て捉えなくてはならない。計算格子数は実行する計算機のスペックによって制限されるため、このようなシミュレーションは単純な形状の単純な流れにのみ適用が可能である。工学の立場に立つとある程度粗い計算格子でも複雑な流れに計算を適用し、流れの特徴を捉えることが重要である。そこで乱流をモデル化し、計算を容易にする乱流モデルが考案された。本項では乱流モデルについて説明する。具体的にはレイノルズ平均により乱流を平均化して扱う RANS、流場に対しフィルタを施すことにより小さいスケールの乱流をモデル化し、大きいスケールの乱流のみを解く LES の2つの方法について説明する。

2.3.3.1 RANS (Reynolds Average Navier-Stokes Simulation)

物体表面にかかる力の平均量およびその分布、2つの流入によって生じる混合の度合いといった乱流の限られた定量的な性質を知るためには DNS による CFD 計算は過剰で無駄が多い。そこで乱流に対する RANS では全ての非定常性を平均化し、その定量的な値を算出する。この際、ナビエ・ストークス方程式の非線形項からモデル化すべき項が生じる。この乱流のモデル化については、すべての乱流を表現するようなモデル化は困難であると思われる。あくまでも科学的法則というよりも工学的近似として乱流モデルを考えるべきであ

る。

統計的に定常である流れは、すべての変数の時間平均値とその値からの変動量の和として式(2.48)、(2.49)を用いて表すことができる。

$$\phi(\mathbf{x}_i, t) = \bar{\phi}(\mathbf{x}_i) + \phi'(\mathbf{x}_i, t) \quad (2.48)$$

$$\bar{\phi}(\mathbf{x}_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \phi(\mathbf{x}_i, t) dt \quad (2.49)$$

もし流れが非定常である場合は時間平均の代わりにアンサンブル平均を用いて平均値を式(2.50)のように計算する。

$$\bar{\phi}(\mathbf{x}_i) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \phi_n(\mathbf{x}_i, t) \quad (2.50)$$

(2.50)、のような平均化操作はあらゆる流れに適用でき、この平均操作をレイノルズ平均と呼ぶ。このレイノルズ平均をナビエ・ストークス方程式に適用することで RANS 方程式を得ることができる。外力のない非圧縮性流体におけるレイノルズ平均された連続式およびナビエ・ストークス方程式を式(2.51)、(2.52)に示す。

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u'_i u'_j}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.52)$$

ここでは 2 次の非線形項で式(2.53)のような関係を用いた。

$$\overline{u_i u_j} = \overline{(\bar{u}_i + u'_i)(\bar{u}_j + u'_j)} = \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u'_i u'_j} \quad (2.53)$$

(2.52)には $\overline{u'_i u'_j}$ が含まれており、平均化された値のみを使って解くことは不可能である。そこで乱流モデルによるモデル化が必要となる。モデルの一つとして渦粘性モデルの説明をする。渦粘性モデルは以下の式で表される。

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (2.54)$$

(2.54)における δ はクロネッカーのデルタ関数であり、 k は式(2.55)で定義される乱流エネルギー、 μ_t は渦粘性係数である。

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} \left(\overline{u'_x u'_x} + \overline{u'_y u'_y} + \overline{u'_z u'_z} \right) \quad (2.55)$$

乱流エネルギーの輸送方程式はレイノルズ応力の輸送方程式を求めることで容易に計算できる。式変形が煩雑なため、ここでは省略するが結果として以下の式(2.56)を得る。ただしエネルギー散逸率 ϵ は(2.57)で定義される。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\rho}{2} \overline{u'_j u'_i u'_i} + \overline{p' u'_j} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (2.56)$$

$$\epsilon = \mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}} \quad (2.57)$$

この方程式もやはり平均値だけで解くことは不可能なのでモデル化を行う。(2.56)の右辺第2項は乱流エネルギーの乱流拡散を示す項であると考えられ、勾配拡散の仮定を用いて式(2.58)のようにモデル化される。

$$-\left(\frac{\rho}{2} \overline{u'_j u'_i u'_i} + \overline{p' u'_j} \right) \approx \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (2.58)$$

ここで σ_k は乱流プラントル数とよばれ、定数で近似的に与える。また第3項については渦粘性モデルの仮定に基づき以下の式(2.59)でモデル化することができる。 P_k は乱流エネルギーの生産率と呼ばれる。

$$P_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \approx \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.59)$$

このようなモデル化により乱流エネルギーの輸送方程式は完全に解くことができる。

エネルギー散逸率の正確な輸送方程式はやはりナビエストークス方程式から導くことが可能であるが、各項のモデル化が非常に困難であるため方程式全体をモデルとしてみない。最も一般的なモデル近似式は以下の式(2.60)のようになる。

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_j\epsilon)}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1}P_k \frac{\epsilon}{k} - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \quad (2.60)$$

このタイプのモデルでは渦粘性を以下の式(2.61)で表す。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.61)$$

これが一般的に k - ϵ モデル[12]と呼ばれる乱流モデルである。このモデルには5つのパラメータが含まれており、一般的には表で表されるような値が用いられる。

表 2-1 k - ϵ モデルにおけるパラメータ

C_μ	0.09
$C_{\epsilon 1}$	1.44
$C_{\epsilon 2}$	1.92
σ_k	1.0
σ_ϵ	1.3

k - ϵ モデルの数値解法の手順においては、まず流速と圧力修正の方程式を反復計算によって解く。次に k や ϵ の輸送方程式(2.56)、(2.60)を反復計算によって解く。求めた k や ϵ に従って(2.61)によって渦粘性係数を更新する。これを繰り返すことにより流場を計算する。

k - ϵ モデルでは、高レイノルズ数を仮定しているため壁面近傍の境界層の低レイノルズ数領域では正しく流れを解くことができない。この問題を解決するためのアプローチとしては

1. 壁法則に基づく壁関数の導入

2. 壁近傍での低レイノルズ数モデルへの切り替え

1 に関しては壁面での境界条件を壁法則に基づくものとする事で境界層を取り扱う。利点としては壁面周辺でメッシュを細かく取る必要がなく計算が容易である。一方境界層での剥離、再付着がある場合、1 の仮定は成り立たない。2 の場合は、壁面周辺に密にメッシュを配置し、低レイノルズ数に対応した乱流モデルを用いて流れを解く。この場合、剥離や再付着までを正確に解くことが可能となる。それぞれについて説明する。

壁面周辺における流速の分布を図 2-2 に示す。点線は理論値、実線は実験値を表している。横軸の目盛りは対数をとったものである。

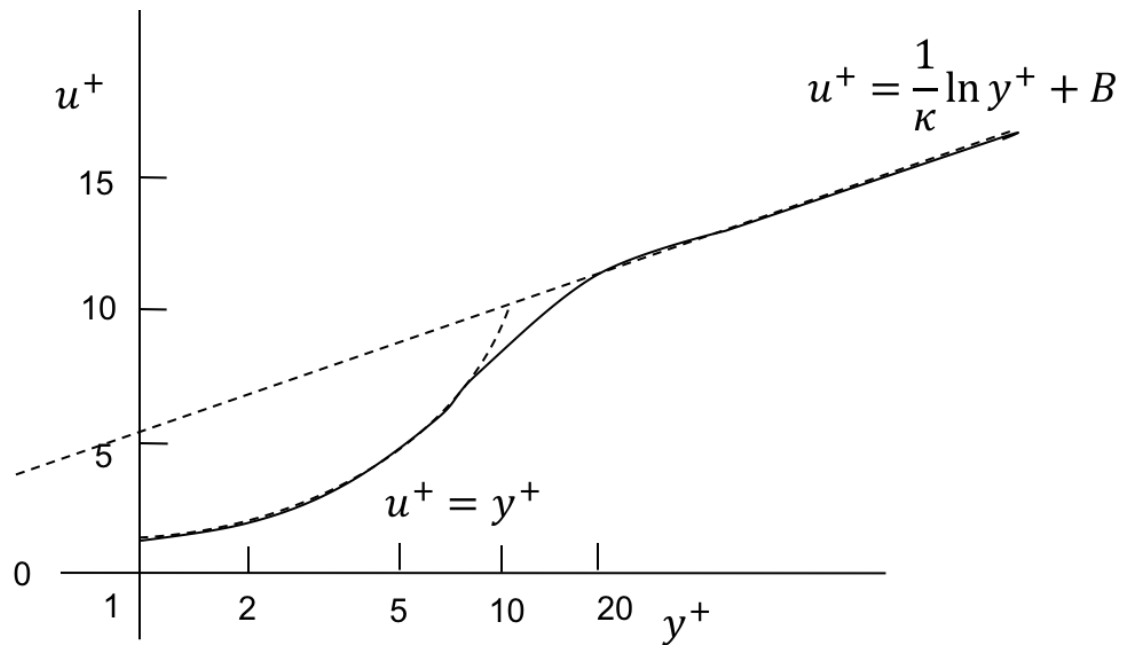


図 2-2 乱流境界層における流速成分

y^+ は壁面からの距離を式(2.62)で無次元化したものである。ただし y は壁面からの距離を表す。

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (2.62)$$

u_τ はせん断速度で $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ で表される。 τ_w は壁面せん断応力である。図 2-2 より境界層の速度分布には 3 種類の層があるのが見て取れる。 $u^+ = y^+$ に従う粘性低層、 $u^+ =$

$\frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B$ に従う対数則層その間をつなぐ遷移層である。乱流境界層での流速はレイノルズ数に依存せず壁面からの無次元距離にのみ依存する。これを壁法則と言う。壁関数を用いた境界条件ではこの対数則層での流速分布を仮定し、境界条件を導出する。壁関数を用いた境界条件は以下の式(2.63)、(2.64)、(2.65)で表される。

$$v_t = v \left(\frac{\kappa y^+}{\ln(Ey^+)} - 1 \right) \quad (2.63)$$

$$\mathbf{n} \cdot \nabla k = 0 \quad (2.64)$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{\kappa y} \quad (2.65)$$

2を代表するモデルとしては Menterら[13]による $k - \omega$ SST モデルがある。 $k - \omega$ SST モデルでは壁面付近を低レイノルズ数モデルである Wilcox[14]の $k - \omega$ モデルで解き、それ以外を高レイノルズ数モデルである $k - \epsilon$ モデルで解く。 $k - \omega$ モデルは変数として k と比散逸率 $\omega = \epsilon/k$ を採用したモデルである。 k についての輸送方程式は式(2.66)で表され、 ω の輸送方程式は(2.67)で表される。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \quad (2.66)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega \bar{u}_j}{\partial x_j} = \gamma \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right\} \quad (2.67)$$

ただし $\nu_t = k/\omega$ である。各定数は表 2-2 に示す通りである。

表 2-2 $k - \omega$ モデルにおけるパラメータ

β^*	0.09
σ_k	2
σ_ω	2
γ	5/9
β	0.075

k - ϵ モデルと k - ω モデルを混合関数 F_1 を用いることで k - ω SST モデルとして記述する。以下の式の通りである。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega \bar{u}_j}{\partial x_j} = \gamma \frac{\omega}{k} P_k^* - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right\} + (1 - F_1) \frac{2\alpha_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.69)$$

ただし混合関数 F_1 は以下の式(2.70)、(2.71)で表される。

$$F_1 = \tanh \left\{ \left(\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4k\alpha_{\omega 2}}{CD_k \omega y^2} \right] \right)^4 \right\} \quad (2.70)$$

$$CD_k \omega = \max \left(\frac{2\alpha_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (2.71)$$

このように混合関数を置くことで壁より離れた場所では $F_1 = 0$ となり k - ϵ モデルになり、壁近傍では $F_1 = 1$ となり k - ω モデルとなる。各係数についても混合関数を用いて式(2.72)、(2.73)、(2.74)、(2.75)、(2.76)、(2.77)のように表す。

$$\alpha_k = F_1 \alpha_{k1} + (1 - F_1) \alpha_{k2} \quad (2.72)$$

$$\alpha_\omega = F_1 \alpha_{\omega 1} + (1 - F_1) \alpha_{\omega 2} \quad (2.73)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\alpha_k} \quad (2.74)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\alpha_\omega} \quad (2.75)$$

$$\gamma = F_1 \gamma_1 + (1 - F_1) \gamma_2 \quad (2.76)$$

$$\beta = F_1 \beta_1 + (1 - F_1) \beta_2 \quad (2.77)$$

また乱流粘性係数と乱流エネルギー生成項には以下(2.78)、(2.79)のような制限を設ける。

$$v_t = a_1 k / \max \left(a_1 \omega, F_2 \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)} \right) \quad (2.78)$$

$$P_k^* = \min(P_k, \beta^* k \omega) \quad (2.79)$$

ここで F_2 は混合関数で以下の式で表される。

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (2.80)$$

各定数の数値は以下の表 2-3 の通りである。

表 2-3 k - ω SST モデルにおけるパラメータ

β^*	0.09
α_{k1}	0.85
α_{k2}	1
$\alpha_{\omega 1}$	0.5
$\alpha_{\omega 2}$	0.856
γ_1	5/9
γ_2	0.44
β_1	0.075
β_2	0.828

2.3.4 VOF 法による自由表面解析

CFD 計算では粘性を考慮した造波を計算することができるという利点がある。本項では CFD における自由表面の取り扱いについて述べる。自由表面における運動学的条件は、最も一般化された形で記述すると式(2.81)のように書ける。

$$\frac{\partial H(x, y, z, t)}{\partial t} + u \frac{\partial H(x, y, z, t)}{\partial x} + v \frac{\partial H(x, y, z, t)}{\partial y} + w \frac{\partial H(x, y, z, t)}{\partial z} = 0 \quad (2.81)$$

ここで $H(x, y, z, t)$ は以下の式(2.82)で自由表面を表す関数である。

$$H(x, y, z, t) = \text{const.} \quad (2.82)$$

(2.81)は自由表面上の点 (x, y, z) にある水粒子はそのまま自由表面上にあり続けるということを示している。このような $H(x, y, z, t)$ を解くことで自由表面の形状を求めることができる。Hirtら[15]によって発表されたVOF法では $H(x, y, z, t)$ として計算セル内の液体が占める割合を取る。つまり液体満たされたセルでは $H(x, y, z, t)$ の値は1となり逆に空気で満たされたセルでは0となる。セル内に自由表面が存在している場合は $0 < H < 1$ となり、その割合に応じて数値が決まる。境界面上のセルでは物性値を H の値に応じて加重平均で求めることにより計算を進める。VOF法による自由表面形状の表現方法のコンセプトを図2-3に示す。

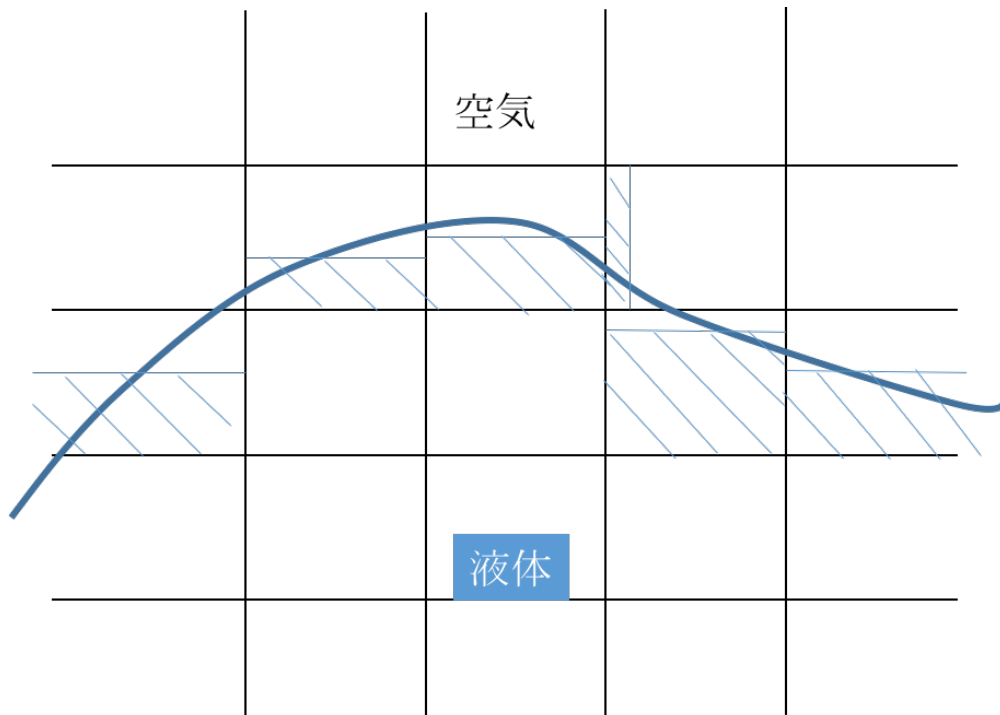


図 2-3 VOF法による自由表面の捕捉

VOF 法では図 2-3 のように液体の占める割合に応じて座標軸のいずれかに平行な面で境界を表現する。図 2-3 から読み取れる通り精度の良い自由表面の表現のためには自由表面上に配置する計算格子を十分細かく取る必要がある。

第3章 関連研究および関連事例

3.1 はじめに.....	27
3.2 CFD 計算を用いた船型最適化に関する研究.....	27
3.3 水槽試験による CFD の VERIFICATION&VALIDATION	28
3.4 D/A ハイブリッド風洞 DAHWIN.....	29
3.5 本研究の位置付け	30

3.1 はじめに

本章では、関連研究についてまとめ本研究の位置付けを明確にする。3.2 では CFD を用いた船型最適化に関する研究についてまとめ、船型の設計において CFD が現在占める立ち位置を明らかにする。3.3 では水槽試験による CFD の V&V (Verification&Validation) 手法についてまとめる。V&V は現在最も厳密な水槽試験と CFD の比較方法であり、本研究における水槽試験と CFD の統合について関連する部分も多い。3.4 では航空の分野における CFD と EFD の統合例の一つとして Digital-Analog Hybrid 風洞「DAWHIN」について概説し、最後に 3.5 で本研究の位置付けについて述べる。

3.2 CFD 計算を用いた船型最適化に関する研究

本項では、国内外の CFD を用いた船型最適化に関する研究についてまとめる。Daniele ら[16]はタンカーを対象にポテンシャル理論に基づいた CFD 計算による最適化を行った。目的関数としては全抵抗および船体周りの波の高さを用い、船体の前方部分に限定して最適化を行っている。また最適化の結果得られた船型を INSEAN における水槽試験の結果と比較し、性能が向上していることの確認を行った。この研究ではポテンシャル理論に基づく CFD 計算が船型開発に有用であることを示す一方で、ポテンシャル理論による性能推定には流体の粘性が考慮されていないという問題がある。また目的関数も線形のもののみ考慮している。Zhang ら[17]は Series 60 と呼ばれる貨物船のシリーズ船に対して、ランキンソース法を用いた造波抵抗の推定を行い、その形状の最適化を行っている。同様に Mon ら[18]は ULBS (Ultra Large Block Coefficient Ship) のバウ形状を対象にランキンソース法を用いて最適化を行っている。これらの研究ではランキンソース法による計算の結果得られた船型に対し、水槽試験による性能推定や NS 方程式に基づいた CFD 計算による性能推定を行いランキンソース法の結果と比較することで、ランキンソース法による計算の有用性を示している。一方で、目的関数が抵抗と造波の大きさの線形和であるなど、非線形な目的関数に対応していないという問題点は解決されていない。通常の船型の選択においては抵抗性能以外の互いに影響しあう様々な要素を検討しており、これは大きな問題である。

これに対し田原ら[19]は、複数の非線形な要素からなる目的関数に対し、RANS の CFD 計算を用いた船型最適化の手法を開発している。RANS も用いることで粘性を考慮した計算を行い、また遺伝的アルゴリズムを用いることで非線形な目的関数にも対応した。また

CAD を用いた自動格子生成手法についても開発を行っている。一方で、最適化における船型形状の変更には 2 種類の母船型のブレンドによって行うもの、母船型に対して C_p カーブの変更によって行うものを採用しており、母船型の選択に大きく依存した最適化であると言える。

3.3 水槽試験による CFD の Verification&Validation

現在水槽試験と CFD との比較手法として水槽試験との比較による CFD の V&V に関する論文が数多く存在する。その中でも Stern[20]や Wilson[21]らはより実用的で、汎用的に適用が可能な V&V 手法の提案を行っている。そもそも V&V における Verification とは CFD における数値計算やメッシュの精度に由来する不確実性を評価し、計算が正しく行われているかどうかの評価を行うことを指す。一方で、Validation では水槽試験と CFD の比較によって CFD の精度を評価するものである。Verification の際に用いられることが多いメッシュの精度に由来する不確実性の指標として、Roache[22]の提案した GCI (Grid Convergence Index)や Gneralized RE (Richardson Extrapolation)による方法[23]がある。GCI は以下の式(3.1)のようにして表される指標である。

$$GCI = \frac{F|\varepsilon|}{(r^p - 1)} \quad (3.1)$$

GCI を求めるためには少なくとも 2 種類の細かさのメッシュで計算する必要がある。それぞれのメッシュの細分化の比率を r 、それぞれのメッシュによって得られた結果を f_1, f_2 とする。ただし添え字が大きいものほど細かいメッシュによって計算された結果である。このとき ε は以下の式(3.2)で計算される。

$$\varepsilon = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \quad (3.2)$$

p については何次精度で近似するかを表す数字であり、適切な p の値は 3 種類以上のメッシュで計算を行った場合、以下の式(3.3)で見積もることができる。

$$p = \ln \left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1} \right) / \ln r \quad (3.3)$$

F は計算の結果の何倍程度まで不確実性として見積もるかを表す安全係数である。2種類のメッシュで計算を行った場合は $F = 3$ を用いることが多く、それ以上のメッシュでは $F = 1.25$ を用いることが多い。

GCIのような指標やCFD計算の収束判定に用いた残差の値を用いて見積もったシミュレーションの不確実性を U_{STE} 、水槽試験などの実験における不確実性を U_D とするとValidationに用いる U_V は以下の式(3.4)で計算できる。

$$U_V^2 = U_{STE}^2 + U_D^2 \quad (3.4)$$

シミュレーションの結果を S 、水槽試験などの実験データを D とすると以下の条件(3.5)を満たすようなCFD計算はValidationされたと言える。

$$E = |S - D| < U_{STE}^2 + U_D^2 \quad (3.5)$$

田原ら[24]は実際に、2種類のCFDコードに対してV&V手法を適用し、その不確実性の評価を行った例を報告している。

3.4 D/A ハイブリッド風洞 DAHWIN

渡辺ら[25]は航空の分野において風洞試験とCFDによるシミュレーションの統合を目的としたDAHWINの開発を行った。DAHWINの概要を図3-1に示す。船舶の分野ではないが、本研究と同様に実験とCFDの統合が重要であるとして、設計コスト、時間の減少、データの精度、信頼性の向上を目的に構築されたシステムがDAHWINである。

DAHWINではまずCFDによって風洞試験の設計支援を行う。さまざまな条件の模型および実験をCFDによってシミュレートし、模型の支持方法や試験条件の設計を支援する。決定した試験要目に基づき風洞試験が行われるが、この風洞試験とほぼ同時に詳細なCFD計算も行われる。このとき行われるCFD計算は支持部分や風洞の壁まで含むもの、含まないものの2種類が行われる。この2種類によって風洞における壁の影響や、模型の支

持部分の影響を換算し、風洞試験の精度向上に役立てる。また流場の可視化もほぼ同時に行われる。PIV(Particle Image Velocimetry)によって得られた風洞試験の流場と CFD によって可視化した流場を比較し、実験や CFD の結果の妥当性の確認、分析が行える。最終的に風洞試験の結果と CFD 結果は統合データベースに保管され、蓄積される。

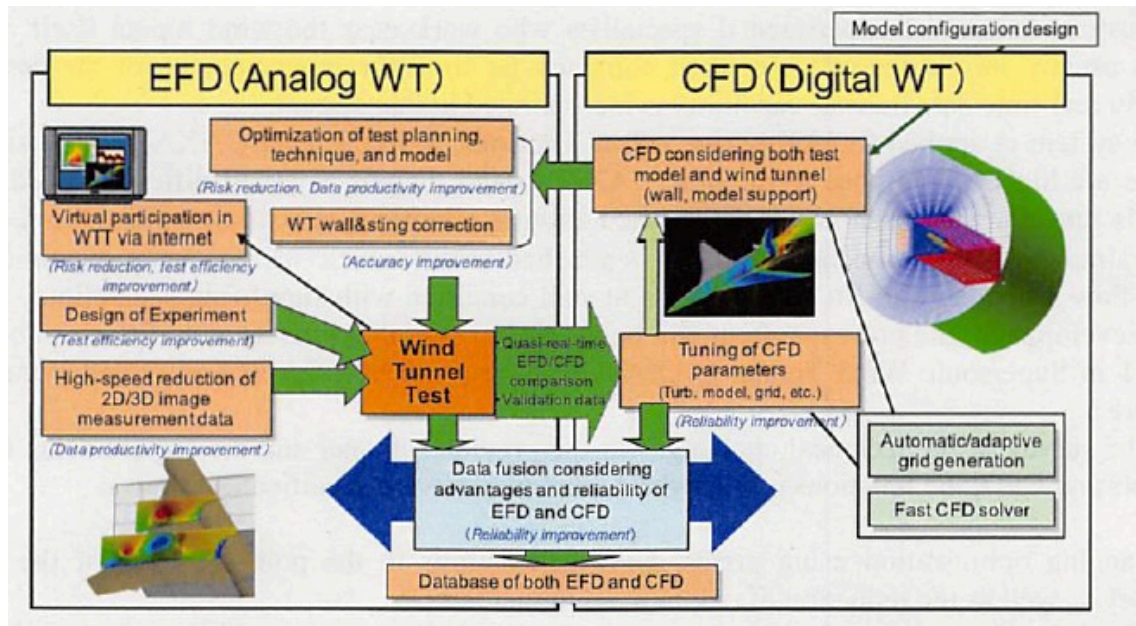


図 3-1 DAHWIN の概要[25]

DAHWIN ではシステム構築にあたって特に下記の 2 点に焦点を当てている。

1. 高速 CFD ソルバーおよび計算格子自動生成システムの開発
2. PIV などの画像処理技術の高速化

風洞試験と CFD の統合のためには、風洞試験と CFD のリアルタイム比較が重要であると考え、それぞれの高速化に取り組み、実現したのが DAHWIN である。

3.5 本研究の位置付け

3.2 では CFD を利用した船型最適化に関する研究について概説した。それぞれ一定の成果を上げてはいるものの、克服しなければいけない問題も数多く存在する。CFD を利用し船型の最適化を行う際には、船型を数式でどう表現するかという問題が常に存在する。その結果、最適化のプロセスで探索の対象となる船型は非常に限定的になる。また逆に考え

られるすべての船型を探索の対象とした場合、探索範囲が広くなりすぎ、最適化するために必要な時間が膨大なものとなってしまいます。時間を短縮するために、メッシュを粗くしてしまうと今度はその精度に問題が生じ、定量的な信頼性を失ってしまう可能性がある。このような問題に対して有効な方法の一つがある種のヒューリスティクスを用いて最適化を行うことである。どのような変形に対して性能はどのように変化するのか、船型のどの部分を変形すれば性能は向上するのか、といったそれまでの設計の経験に基づき、探索の範囲を狭めることによって、定量的な精度を保ちつつより良い船型を作ることが可能となる。このようなヒューリスティクスを用いた最適化を行うためには設計の経験を蓄積することが非常に重要となる。設計された船型とその性能推定に用いられた水槽試験やCFDのデータを蓄積し、知識抽出を行うことでヒューリスティクスの構築が可能となる。本研究では、そのような設計の経験を蓄積し、知識抽出を可能とするデータベースの構築を行う。その際、単に水槽試験やCFDのデータを個々に蓄積するのではなく、メタデータによって統合的に管理することで知識抽出を容易にする。さらに、水槽試験のデータとCFDのデータを統合することによって、CFDの性能推定の精度向上を行うことが可能となる。このように設計の知識を統合的に管理することで船型設計を支援することが本研究の目的である。

水槽試験のデータとCFDデータを統合する際に注意しなければならないのが、両データの誤差の取り扱いである。水槽試験のデータには計測機器やモデルの精度による誤差が生じる。CFDのデータにはメッシュ生成による誤差、数値計算上の誤差、モデル化による誤差などが生じる。そのような不確実性を考慮してデータの統合を行うことが重要である。3.3で概説した水槽試験とCFDのV&Vはまさにそのような不確実性を取り扱っている。本研究でもその考え方を取り入れ、水槽試験データとCFDデータの比較を行い、それぞれの誤差の分析を行っている。

3.4で示したDAHWINは、本研究と同様に実験とCFDを統合することを目的としているが、システム自体は実験とCFDをリアルタイムで比較することに重点を置いている。本研究で構築するシステムはDAHWINとは異なり、設計のプロセスを考慮し、その支援ということを目的にして構築している。

第4章 水槽試験・CFD の統合による船型設計支援システム

4.1 船型設計システムの要件定義	33
4.1.1 設計プロセスの効率化に必要とされる機能	33
4.1.2 システムの要件定義	34
4.2 開発した設計データ統合管理システム	37
4.2.1 設計データベースとその検索機能	37
4.2.2 水槽試験・CFD・船型閲覧インターフェース	39
4.2.3 水槽試験・CFD データ比較分析機能	41
4.2.4 設計に関する知識および CFD に関するノウハウの蓄積	43
4.3 性能推定システム	44
4.3.1 東京大学船型試験水槽	45
4.3.2 OpenFOAM による CFD 計算	46

4.1 船型設計システムの要件定義

本章では、本研究における船型設計支援システムの目的を整理し、要件定義を行う。本研究における船型設計支援システムの目的は設計プロセスの効率化である。そのために必要な機能を議論し、その後それらの機能を細分化し、システムの要件定義を行う。

4.1.1 設計プロセスの効率化に必要とされる機能

想定する船型設計プロセスを図 4-1 に示す。まず船主要求に対して、過去の船型のデータを検索し、基準となる基準船を決定する。しかし、船主要求に対して完全に最適な船型であることは少なく、主要目や船首、船尾形状の変更を行い、要求に合うよう修正する。この際、考えられる修正は数多くあり、候補となる船型が複数できる。修正した船型の性能を知るために CFD 計算による性能推定を行い、その推定結果をもとに候補となる船型の絞り込みを行う。絞り込んだ船型に対して水槽試験を行い、最終的な船型を決定する。この際、全ての条件を満たさない場合は再び船型の変更を行い、CFD 計算、水槽試験の流れを繰り返す。

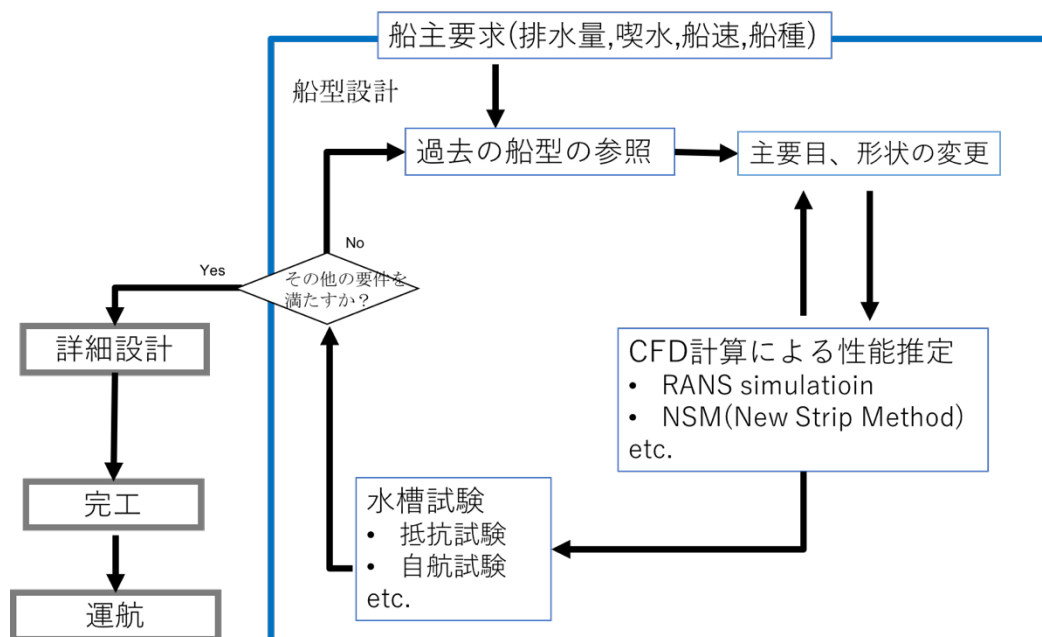


図 4-1 想定する船型設計の流れ

このプロセスを効率的に行うためには以下のような機能が必要であると考えられる。

1. 過去の設計の素早い検索
2. 設計者のアイデアを素早く形にする船型変更
3. 設計に関する知識に基づいた船型変更の方針の決定
4. CFD 計算による正確な性能推定

基準船を決定する際に過去の船型とその性能のデータを調べる必要があるが、この検索は網羅的かつ迅速に行われる必要がある。次に船型の変更を行うが、設計者のアイデアを素早く船型に反映できる必要がある。船型変更の際、困難となるのは船型形状を滑らかな一つの曲面で表すことである。形状のパラメータを変更すると、素早く滑らかな曲面として船型形状を得る仕組みが必要である。また可能な変更は数多く考えれるが、全ての可能性を考えることは効率が悪い。これまでの設計実績からどのような形状がどのような性能となるか、という設計に関する知識を抽出し、設計者に提示することで、効率化を行うことができる。また CFD 計算による性能推定の精度も非常に重要である。性能推定の精度が悪く、水槽試験の結果と大きく異なる場合、再び形状の変更、性能推定、水槽試験といったプロセスの手戻りが発生する可能性が高くなり、効率が悪くなってしまう。正確な CFD 計算によりこの手戻りの頻度を低減する必要がある。

4.1.2 システムの要件定義

本項では 4.1.1 で議論した機能をもとにシステムの要件定義を行う。

過去の設計の素早い検索のためには設計のデータベース化が必要である。この場合、船型のデータとその性能を示す水槽試験、CFD のデータが統合的に管理される必要がある。具体的には船主要求や主要目などのパラメータを入力として、船型を検索できること、船型に水槽試験や CFD データを関連付け、その性能を一覧できるようなインターフェースが必要である。

船型の変更方法には様々な方法がある。船型のプリズマティック曲線に基づく変更[26]、パラメータによって船型形状を制御し、そのパラメータを変更する方法がある。プリズマティック曲線とは横軸に垂線間長さをとって、縦軸に船体の水面下部分の横断面積をとった曲線で、横断面積の分布を表した曲線である。どの方法をとった場合も曲面を滑らかにするためのフェアリングの作業を行う必要がある。要求される機能としては、ユーザーがプリズマティック曲線を変更することやパラメータを入力することで形状を変更できること、その

変更にもとづき自動的にフェアリングを行うことが挙げられる。

設計に関する知識は、これまでの設計とその性能データを図表で整理することで得られる。方形係数、柱形係数、Run 係数や Entrance 係数といった船型形状を表すパラメータとその際の性能を図表の形式で整理することで、パラメータの変更が性能に与える影響をユーザーが取得できるようにする。Run 係数や Entrance 係数とはプリズマティック曲線の船首部分、船尾部分の特性を表す係数である。

CFD 計算による正確な性能の推定には、当然であるが精度の高い CFD 計算の技術が必要である。また水槽試験と CFD 計算の比較分析機能も非常に重要である。このような比較分析機能を整えることによって、CFD 計算の精度の検証が行える。また比較によって CFD 計算の技術を向上させることができる。CFD 計算を行う際には、どのように計算格子を生成するか、どのようなソルバーを用いるかで大きく結果が異なる。そのためそのようなノウハウを水槽試験との比較によって取得することは、CFD 計算の精度を向上させるためには非常に重要となる。またそのようなノウハウをシステム内に蓄積し、素早く参照できる環境を整えることも重要である。

以上に述べた必要な機能を図 4-2 に表されるようなシステムの構成で実現する。システムは主に以下の 3 つのサブシステムから構成される。

- 水槽試験・CFD シミュレーションからなる性能推定システム
- 船型とその性能のデータ、水槽試験や CFD データ、船型設計に関する知識を統合的に管理する設計データ統合管理システム
- 船型の変更を行う造船 CAD システム

設計データ統合管理システムでは過去に行われた設計とその性能に関するデータを統合的に管理する。具体的には、主要目や線図、3次元 CAD データといった船型データ、各船速に対する抵抗係数、EHP などの推進性能をあらわす性能データ、その性能を算出するために行われた水槽試験や CFD などのデータが管理の対象となる。これらのデータは様々な形式で蓄積されるが、それぞれに対してメタデータを付与し統合管理を行う。造船 CAD システムとは単なる CAD ではなく、船型の、フェアリングによる船型曲面の生成といった船型設計に特化した操作が可能である CAD を指す。

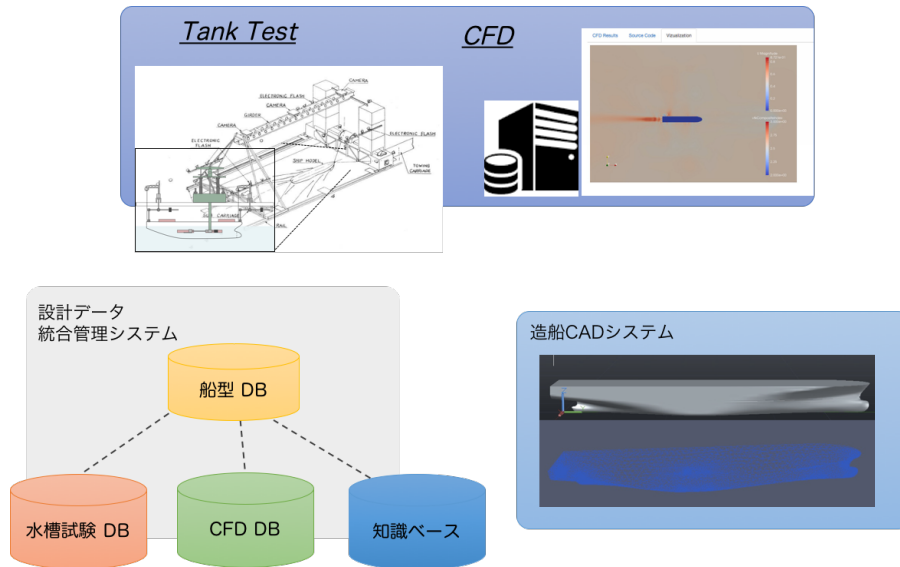


図 4-2 提案する船型設計支援システムの構成

それぞれのシステムが担当する機能を表 4-1 にまとめる。

表 4-1 船型設計システムを構成するサブシステムとその要件

設計データ統合管理システム	設計データベースとその検索機能
	水槽試験閲覧機能
	CFD 閲覧機能
	船型データ閲覧機能
	水槽試験・CFD 比較分析機能
	設計に関する知識の整理、閲覧機能
	CFD に関するノウハウの蓄積機能
造船 CAD システム	形状変更機能
	自動フェアリング機能
性能推定システム	水槽試験による性能推定機能
	CFD による性能推定機能

本研究では表 4-1 に示した要件のうち、赤文字で記した機能を実現した。性能推定システムに関しては、東京大学船型試験水槽での水槽試験、および OpenFOAM による CFD 計算によって実現した。また設計データ統合管理システムについては、独自に Web システム

を構築し、実現した。本章の残りの部分ではそれぞれの詳細について説明する。

4.2 開発した設計データ統合管理システム

4.2.1 設計データベースとその検索機能

開発システムによる過去の設計データの検索支援の様子を図 4-3 に示す。

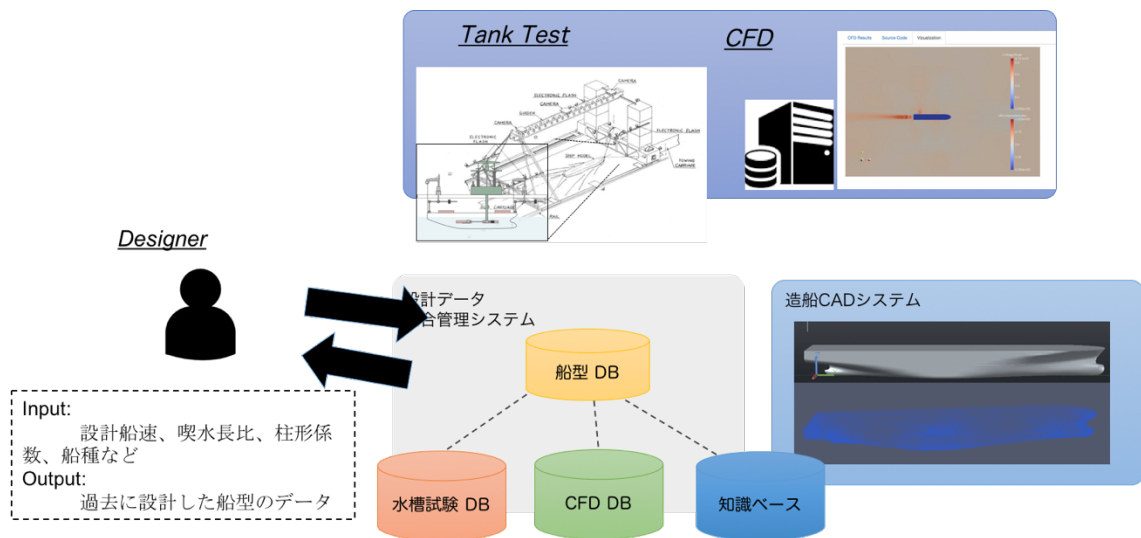


図 4-3 開発システムによる過去の船型の検索支援

設計者は設計条件として考えられる排水量 Δ 、喫水 d 、船速 V などと今回検討する船長 L や船体の水線下の前後部の痩せ度合いを表す柱形係数 C_p 、船体の水線下の容積の痩せ度合いを表す方形係数 C_b の範囲を設計データ統合管理システムに入力する。検索を行うと条件を満たす船型とその性能のデータを即座に得ることができる。またそれらのデータにはその推定を裏付ける水槽試験のデータや CFD のデータが結びつけられており解析後の数値だけでなく解析に用いられたデータや動画、画像による流場の情報を参照することができる。

設計データ統合管理システムにおけるデータ管理のコンセプトを表した図を図 4-4 に示す。

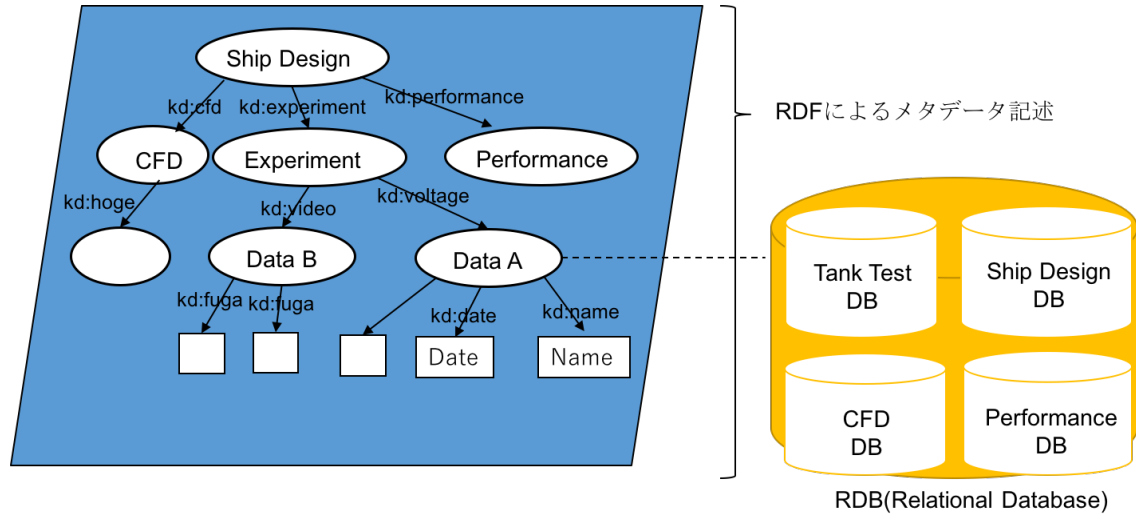


図 4-4 設計データ統合管理システムにおけるデータ管理

設計データ統合管理システムではメタデータによってデータ間の関係を記述することによって柔軟な検索と変更に対する頑強性を実現している。水槽試験、CFD、船型、性能、それぞれを表すデータファイルは通常の RDB で管理し、その関係をメタデータによって管理している。メタデータの記述については Resource Description Framework (RDF)[27]を利用している。RDF では主語述語目的語の関係によって情報を記述する。その様子は図 4-4 に示されているようにノードとリンクを用いて表すことができる。図の例ではリンクが述語を表しており、リンク元が主語、リンク先が目的語を表している。図では船型データに対して CFD、水槽試験、性能のデータが紐づいており、さら水槽試験のビデオデータは Data B、電圧データは Data A であることが表されている。変更に対して頑強であるとは、ここに新たにデータ項目を加える場合、その他のデータ構造を変更する必要がないことを指している。例えば、実験データに対して流場計測のデータを加える場合は、流場のデータを RDB に登録し、水槽試験を表すノードと流場計測を表すノードをリンクで結ぶだけで良く、その他のデータ構造には変更を加える必要がない。

実際の開発システムのインターフェースの説明を行う。開発システムは基本的に Web アプリケーションとなっておりブラウザを通してデータの閲覧、アクセスを行う。図 4-5 に開発システムの船型検索インターフェースを示す。4.1 で述べた支援を可能にするためこのインターフェースでは模型船、水槽試験、CFD、性能データとして管理されているあらゆる項目に対して検索を行うことができる。図 4-5 では模型船の項目に対して検索を行っている様子を示しているが、「Group Name」の項目を変化させることで選択できる項目も動的に変更

される。「Add」ボタンによって検索フォームを追加し、複数条件で検索することも可能である。

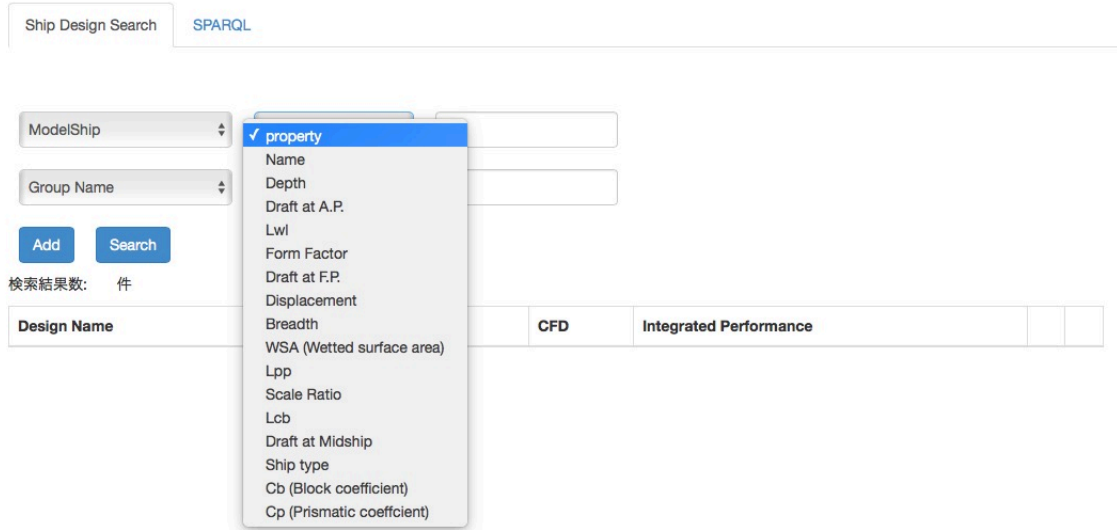


図 4-5 船型検索インターフェース

4.2.2 水槽試験・CFD・船型閲覧インターフェース

4.2.1 で示したような検索インターフェースから過去に設計された船型のデータとその水槽試験、CFD のデータ、それらから統合的に評価した性能のデータを得ることができる。それぞれのデータの閲覧インターフェースについて説明する。

図 4-6 に船型データの閲覧インターフェースを示す。3つのタブで表示が分かれており、船型の主要目示す表、線図、そして関連するファイルというカテゴリによってデータが整理される。船型の主要目や線図については Web 上で直接値を閲覧することができる。一方で CAD のように様々なフォーマットが想定されるようなデータ類に関しては関連するファイルとしてユーザーの手元にダウンロードできる形で表示する。

水槽試験データを表示する様子を図 4-7 に示す。実験の条件(日付や水温、水槽名)、解析で用いた模型船の数値、各フルード数に対する抵抗係数、EHP などが表およびグラフの形式で閲覧でき、さらにそれぞれのリンクから解析の詳細、ビデオや電圧の時系列データを閲覧することができる。このように解析後の数値だけでなくその過程や視覚的な情報を蓄積し管理することは、将来の設計の参考とすることや CFD のデータと比較分析することを

考慮すると重要なことである。

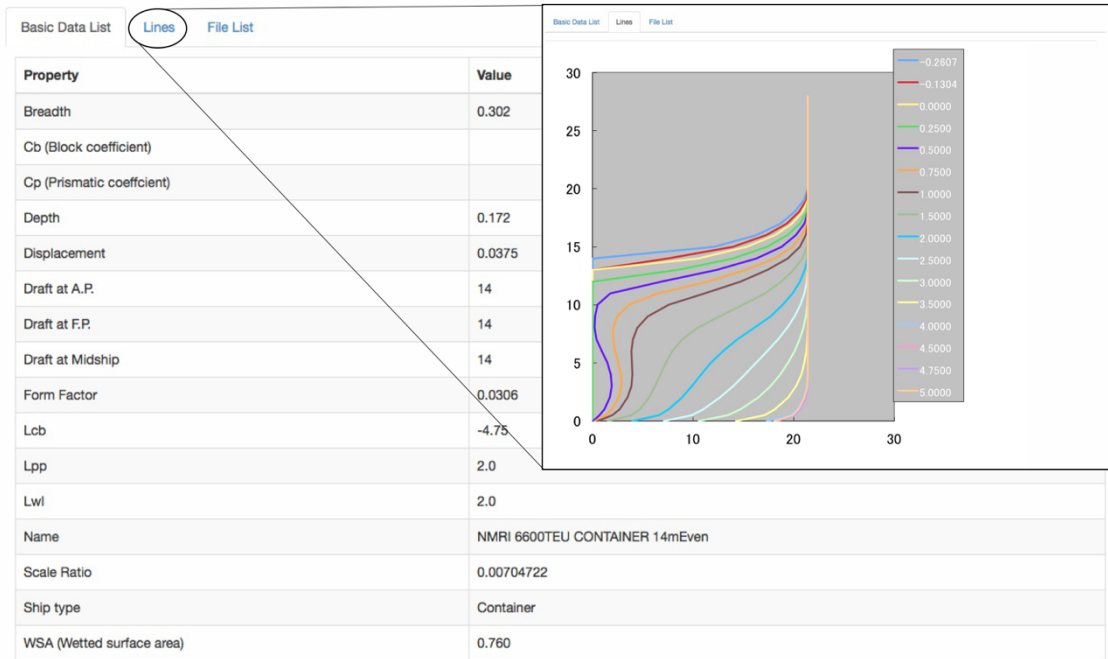


図 4-6 船型データ閲覧インターフェース

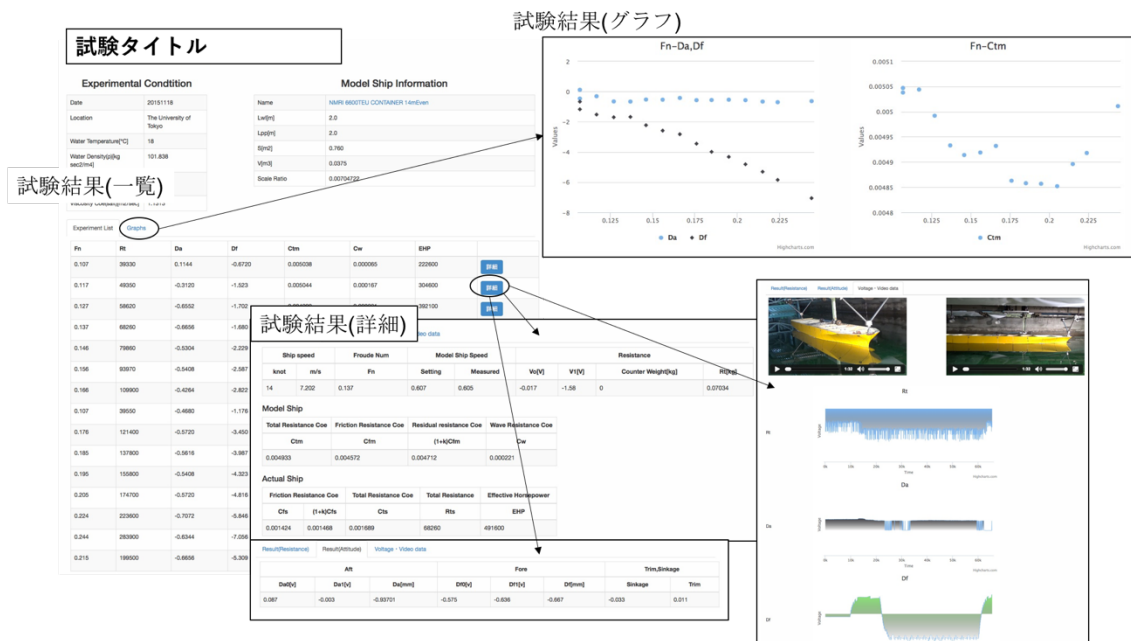


図 4-7 水槽試験データ閲覧インターフェース

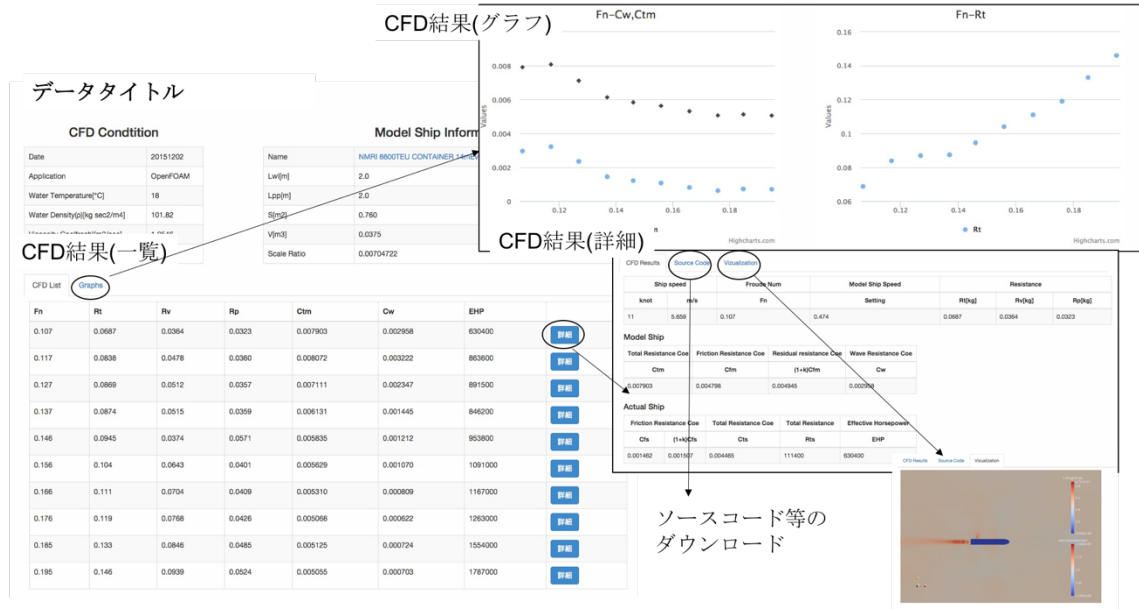


図 4-8 CFD データ閲覧インターフェース

図 4-8 に CFD データを閲覧するためのインターフェースを示す。CFD の閲覧の形式も基本的には水槽試験データの形式と同様である。シミュレーションの条件(流体の密度や粘性係数)、解析に用いた模型船の数値、各フルード数に対する抵抗値が表およびグラフの形式で整理されており、さらにそれぞれのリンクから詳細を閲覧することができる。可視化した様子も画像をアニメーション形式で表示することで、動画のように閲覧することができる。CFD については計算のために生成したメッシュの様子や計算に用いられたプログラムのソースコードが非常に重要である。境界層メッシュを何層配置したのか、乱流モデルとして何を選択したか、その違いによってシミュレーションの結果が大きく異なるからである。それらの計算に用いられたデータは関連するファイルとしてリストの形式で整理されており、各自のローカル環境にダウンロードすることが可能である。

4.2.3 水槽試験・CFD データ比較分析機能

初期計画時に得られた船型や性能はあくまでも過去に設計された船型とその性能であり、今回の設計条件に対して最適なものではない。そこで初期計画で得られた船型をもとに条件に合うように変更を加えその性能を推定する必要がある。模型船による水槽試験は高い

精度で船型の性能推定を行うことができる一方で、模型船作成のコストが大きく、何度も行うことは非現実的である。そこで CFD 計算に基づく性能推定をいかに正確に行うか、が重要となる。しかしながら CFD 計算にはメッシュの切り方やパラメータのチューニングなど技術者の経験に頼る部分が多く、様々な状況に対応できる知識がなければ正確な性能推定を行うことができないのが現状である。また CFD 計算による性能推定結果は、水槽試験の結果と比較され信頼性を確保していくことも非常に重要である。そこで開発システムでは水槽試験と CFD データの比較分析を支援し、比較の結果得られたノウハウを蓄積することを可能とする。図 4-9 に開発システムによる比較分析支援とその知識の蓄積の様子を示す。

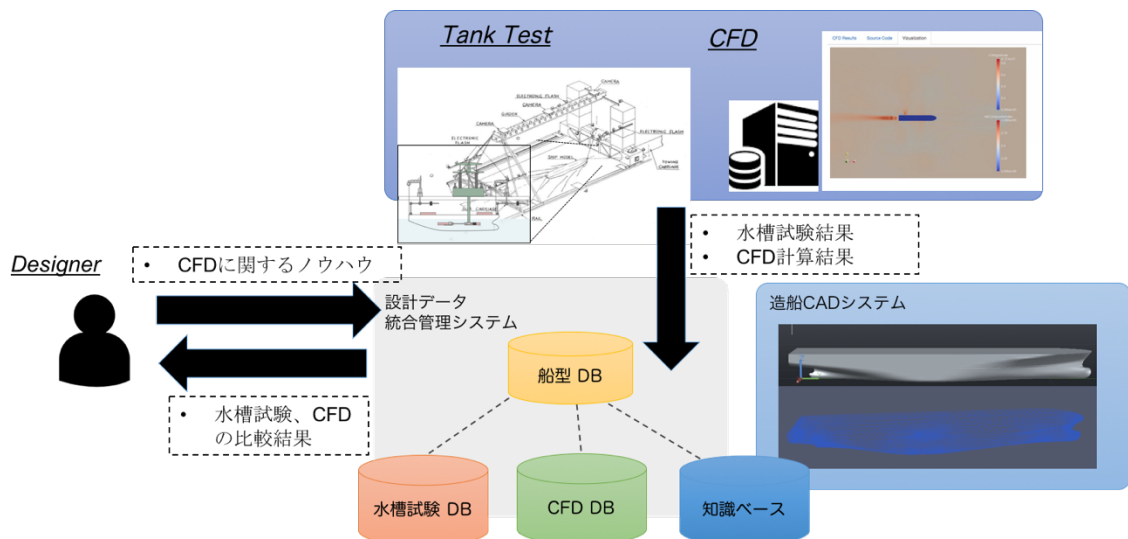


図 4-9 開発システムによる高精度推定の支援

本システムの想定する開発プロセスでは必ず少なくとも 1 組の新しい船型の水槽試験と CFD 計算の結果が得られる。これを設計データ統合管理システムに蓄積する。こうすることで設計プロセスのたびに設計データ統合管理システムには、同条件で計測、計算された水槽試験、CFD のペアが蓄積されることになる。対となる水槽試験と CFD の結果を関連付けて蓄積することで、設計者はいつでも過去の水槽試験と CFD の結果を比較分析することができる。

図 4-10 に水槽試験・CFD の比較分析インターフェースの様子を示す。同一の模型船に対する水槽試験、CFD の結果を一覧で確認することができ、さらに同一グラフ上での比較が可能である。ここではフルード数に対する全抵抗係数 C_{tm} 、有効馬力 EHP の比較をしている

様子を例示している。またリンクをたどることにより 4.2.2 に示した閲覧インターフェースから水槽試験・CFD 計算の詳細にアクセスすることが可能である。

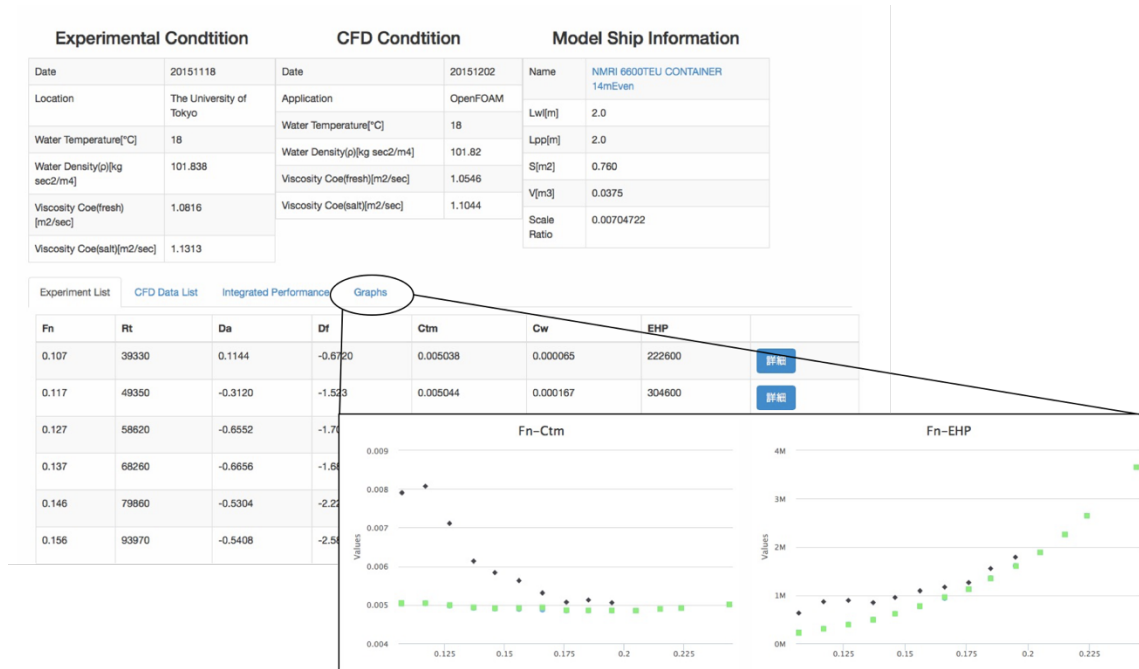


図 4-10 水槽試験・CFD 比較分析インターフェース

4.2.4 設計に関する知識および CFD に関するノウハウの蓄積

システムによる設計に関する知識の蓄積の方法について述べる。本システムでは以下の 2 種類の方法で知識の蓄積を行う。

1. フリー記述による蓄積
2. 性能図表作成による蓄積

1 に関しては、各船型に対してファイルを登録できる機能を実装することで実現した。登録するファイルの形式は問わない。またファイルに対してメタデータを付与することを可能とした。これはこのファイルに対して、キーワード検索を可能とするためである。同様の機能を水槽試験データや CFD データに対しても行えるようにすることで水槽試験のノウハウや CFD に関するノウハウなどの蓄積も可能にしている。

2 に関しては、船型を表すパラメータと性能を対応づけて図表形式でシステム内に蓄積することで、船型の変更が性能に対してどのような影響を与えるかが一目でわかるようにす

る。本システムが作成した性能図表を図 4-11 に示す。

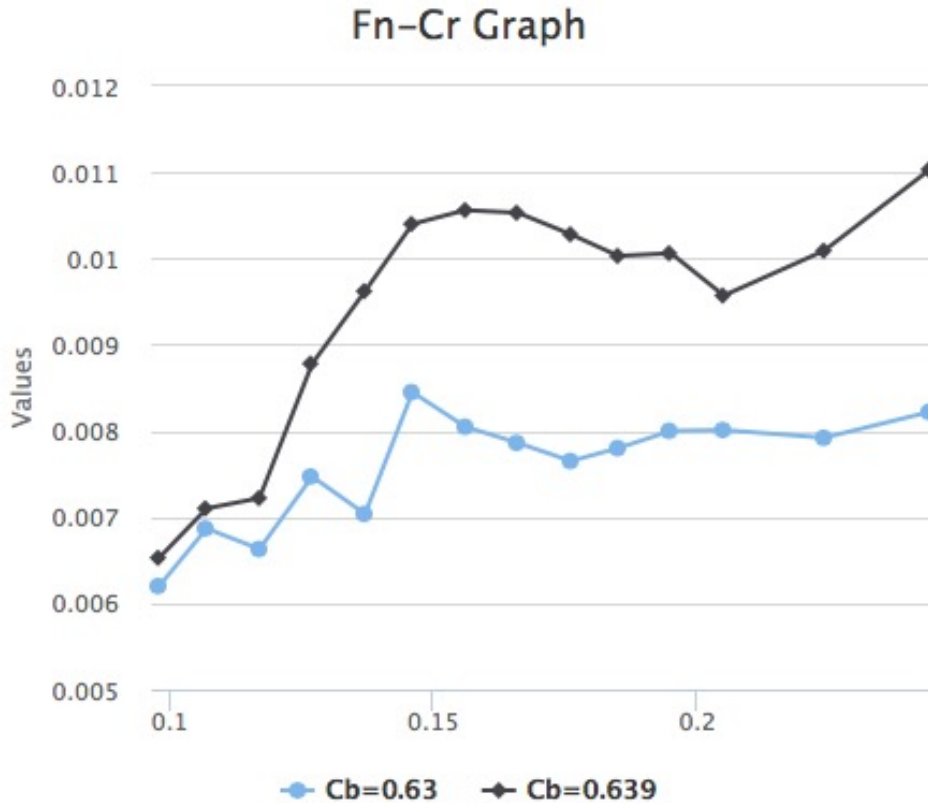


図 4-11 開発システムが生成する性能図表

本システムでは、方形係数 C_B と剰余抵抗係数 C_r の関係を表形式で表示する。この整理の方法は山県昌夫が種々の船型の水槽試験結果を整理した山県の図表で行われていた整理の方法を参考にしたものである。

4.3 性能推定システム

本システムには、水槽試験および CFD 計算による船型の性能推定が欠かせない。水槽試験や CFD 計算を行う環境には様々な試験水槽や CFD 計算ソフトウェアが考えられる。それぞれの試験水槽や計算ソフトウェアによって出力の方法やファイル形式が異なることが予想されるが、本システムで採用しているデータ管理方法であればどのようなデータであっ

でも一元に管理することが可能である。本論文では開発システムにおける水槽試験環境としては東京大学船型試験水槽での水槽試験を、CFD 計算環境としては OpenFOAM をインストールした Linux サーバーを用いた。

4.3.1 東京大学船型試験水槽

東京大学船型試験水槽の設計図を図 4-12 に、水槽本体の大きさ、曳航台車の性能等を表 4-2 にまとめる。水槽の大きさは 85[m]×3.5[m]×2.4[m]であり、模型船の大きさは約 2[m]のものを使用する。抵抗動力計としては天秤方式によるものを採用しており、姿勢計測についてはトリム量測定装置による計測方式を採用している。

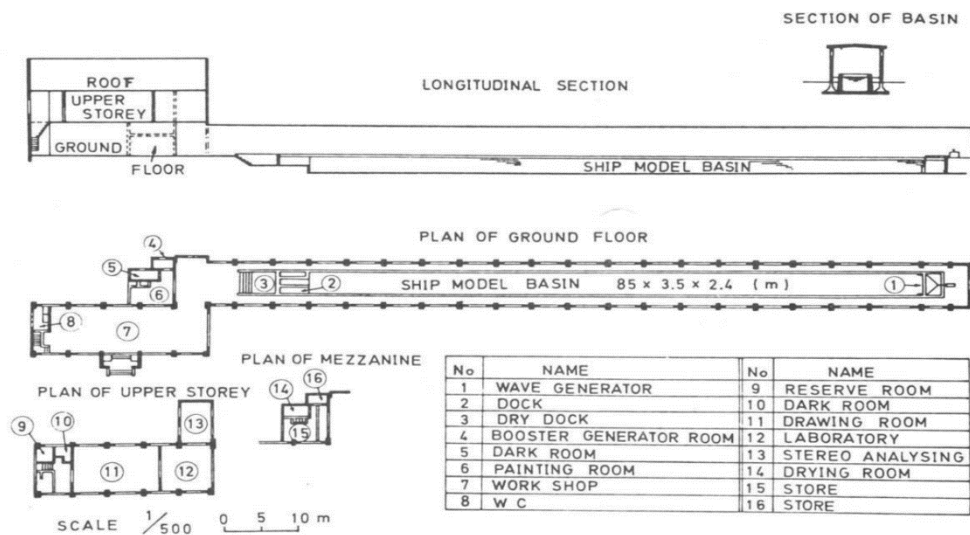


図 4-12 東京大学船型試験水槽の設計図

表 4-2 東京大学船型試験水槽の仕様

本体寸法	
長さ[m]	85
幅[m]	3.5
深さ[m]	2.4
曳航台車	
長さ×幅[m × m]	4.80 × 4.12
重量[ton]	約 5.5
設定最高速度[m/s]	4.0
加速度[G]	0.01 ~ 0.1
抵抗動力計	
方式	天秤型手動載錘方式
総合誤差[%]	0.05
姿勢計測装置	
方式	トリム量測定装置による計測
精度[%]	0.5

4.3.2 OpenFOAM による CFD 計算

本ケーススタディでは、CFD シミュレーションのデータを取得するために OpenFOAM[28] による CFD シミュレーションを行った。OpenFOAM は無償のオープンソース CFD ソフトウェアであり、Linux 上で動作する。標準的なメッシュ生成から様々な乱流モデル、定常もしくは非定常解析など数多くの機能を揃えている。OpenFOAM はオープンソースのソフトウェアであるためユーザーが自由に改良することができることも大きな特徴である。

第5章 開発システムの機能・精度の検証

5.1 はじめに.....	48
5.2 完全没水球が一樣速度で進行する際の抵抗値推定.....	48
5.2.1 概要.....	48
5.2.2 東京大学船型試験水槽における水槽試験.....	49
5.2.3 OpenFOAM による CFD 計算.....	50
5.2.4 開発システムにおける比較分析.....	53
5.2.5 開発システム上での知識の登録.....	55
5.2.6 考察.....	55
5.3 コンテナ船の推進性能推定.....	57
5.3.1 概要.....	57
5.3.2 東京大学船型試験水槽における抵抗試験.....	59
5.3.3 OpenFOAM による抵抗試験のシミュレーション.....	61
5.3.4 結果.....	66
5.3.5 考察.....	67

5.1 はじめに

本章では、開発システムを用いたケーススタディを行い、開発システムの機能・精度を検証する。本研究では開発システムを以下の2つのケースに対して適用した。

1. 完全没水球が一樣速度で進行する際の抵抗値推定
2. コンテナ船の推進性能推定

一つ目のケースでは完全に没水した球が一樣速度で進行する際の抵抗値を推定する問題において、開発システムの水槽試験・CFD 比較分析機能を用いて分析を行う。機能の目的であるCFDに関するノウハウの抽出とその蓄積が開発システムで実現できることを検証する。また二つ目のケースでは、開発システムのCFD計算の精度を確認し、設計に用いることが可能な精度であることを示す。

5.2 完全没水球が一樣速度で進行する際の抵抗値推定

5.2.1 概要

本ケーススタディでは、開発システムを「完全没水球が一樣速度で進行する際の抵抗値を推定する」問題に対して適用する。開発システムにおける水槽試験・CFD 比較分析機能によってCFDに関するノウハウが取得できること、その蓄積が可能であることの検証を行う。

本研究の対象は船舶の設計であり、本来球体に対する抵抗値を推定することは対象の範疇ではない。しかし、球体を設計した船型、抵抗値をその性能、とみることで船舶の性能推定と同様のプロセスであると考えられる。また、船型を簡易的な形状でモデル化する際には、船体を平板に、バルバスバウや船尾を球体としてモデル化することも多い。球体が流れに対してどのような抵抗を受けるかを解析すること、そのCFD計算の際にはどのようなことに留意すべきかを明らかにすることは、船舶の設計を考える上でも重要なことである。

本ケーススタディでは、水槽試験による計測の結果、CFDによるシミュレーション結果を開発システム上で比較し、CFDに関するノウハウを得られる様子をシステム上で再現する。

比較する項目は抗力係数 C_D であり、 Re をレイノルズ数とすると式(5.1)で表される。ただし、 D は抗力[kg]、 ρ は比質量[kg/m³]、 q は流速[m/s]、 d は球の半径[m]である。

$$C_D = D / \left(\frac{\rho}{2} q^2 \frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (5.1)$$

比較の流れとしては、水槽試験の結果と2種類のCFD計算の結果を比較する。球体表面のメッシュが粗いCFD計算の結果と細かいCFD計算の結果を用意し、水槽試験の結果と比較することで、球体のCFD計算によってどの程度のメッシュ分解能が必要であるかの検討を行う。比較分析、ノウハウの抽出、現象の考察、知識の登録までを開発システム上でを行い、システムの機能が第4章で議論した要件を満たすことを示す。

5.2.2 東京大学船型試験水槽における水槽試験

本ケーススタディにおける水槽試験データを取得するため、東京大学船型試験水槽にて球体の曳航試験を実施した。図5-1にその概要を図示する。3分力計にL字ロッドによって球体を取り付け、その状態で曳航台車によって曳航することで抗力の計測を行った。この際、L字ロッドに対してカルマン渦の発生による振動が発生することを防ぐため、ロッドにアルミ製のフィンを取り付けている。また記録のため球体の上部よりビデオカメラによる撮影を行った。球の半径は0.17[m]、台車の速度は0.26~1.00[m/s]の5ケースで計測を行った。対応するレイノルズ数は44200~170000である。水面から球体の上部までの距離は自由表面の影響を無視できると考えられる0.224[m]で設定した。

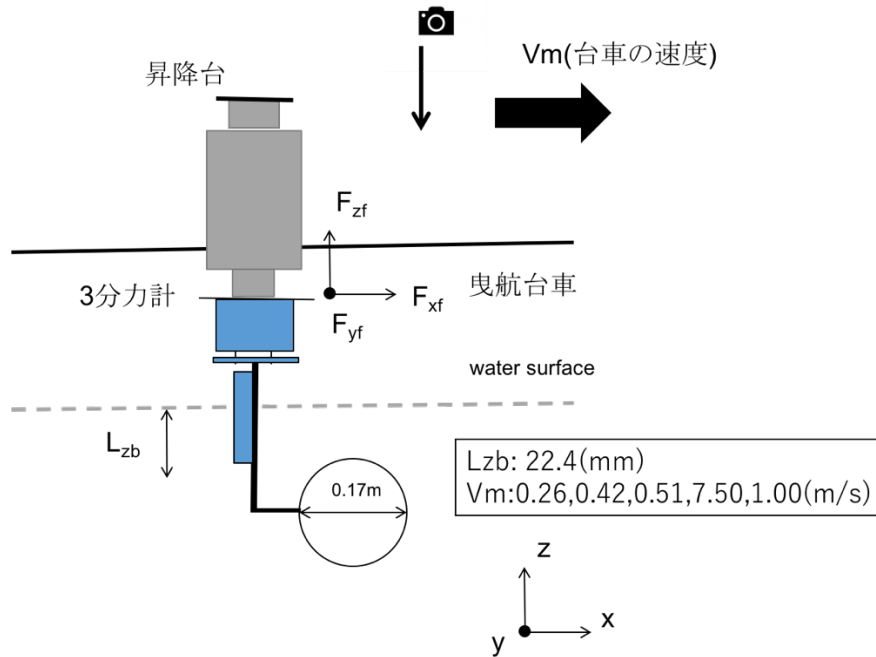


図 5-1 水槽試験の概要

実際の試験の様子を図 5-2 に示す。左から球の固定の様子、試験中の上部からのビデオカメラによる撮影の様子、計測用のアンプおよび PC のセッティングの様子である。

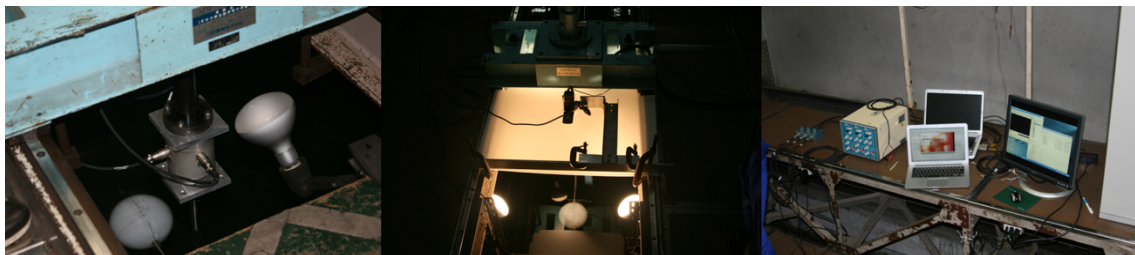


図 5-2 水槽試験の様子

5.2.3 OpenFOAM による CFD 計算

本ケーススタディでは球が流体内を進行する様子を、流れの中に固定された球としてシミュレートし、計算格子の生成、計算を OpenFOAM も用いて行った。生成されたメッシュの

様子を図 5-3 に示す。

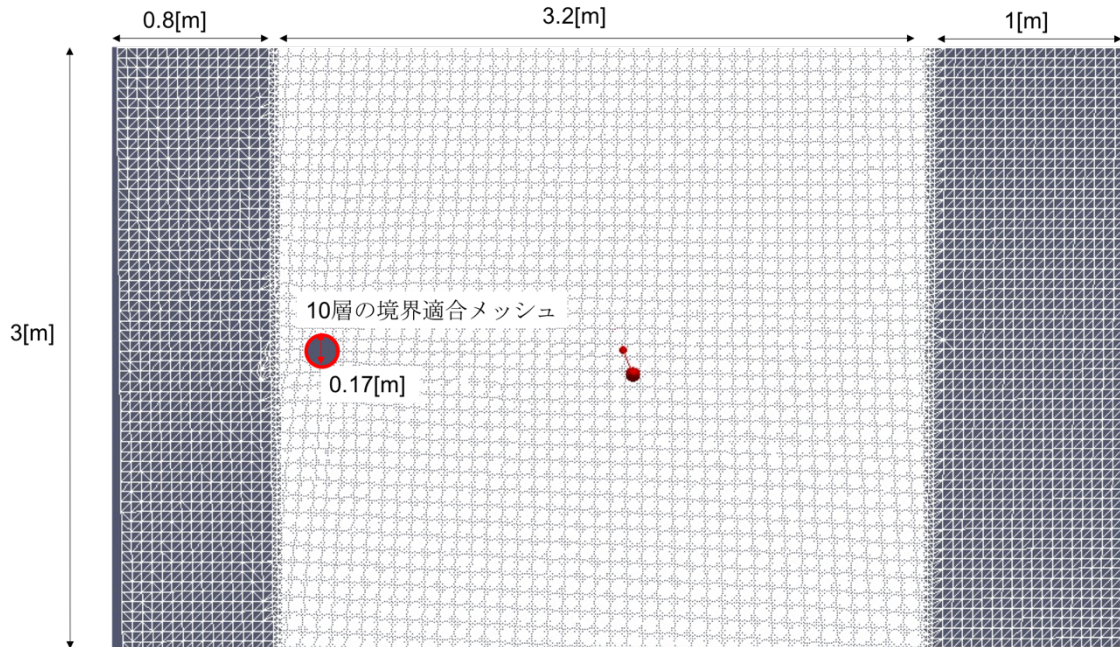


図 5-3 OpenFOAM によるメッシュ生成

図では三次元のメッシュを z 軸方向に半分の部分で切断した断面を図示している。球体の寸法は水槽試験の寸法に一致させ、前後 3.2[m] に対してメッシュの細分化を行っている。また球体表面に対しては 10 層の境界適合メッシュを配置した。境界適合メッシュの厚さは各ケースで変更し、おおよそ $1/\sqrt{Re}$ となるように設定している。横幅、長さについては影響のないよう十分な長さ確保している。メッシュに関する情報は表 5-1、表 5-2 にまとめる。分解能が高いメッシュについては球表面に対し、約 50 万のセルを配置しており、分解能が低いものについては約 2000 個ほどである。

計算の詳細について述べる。今回対象とするレイノルズ数の範囲は臨界レイノルズ数に非常に近く、乱流の影響が極めて大きく出ることが予想される。そこで、乱流モデルとしては $k-\omega$ SST モデルを採用した。

表 5-1 メッシュ情報(分解能が高い場合)

総節点数	8570098	
総セル数	6665048	
面数(球体表面)	496104	
境界層拡大率	1.1	
境界層厚さ	$Re = 44370$	0.00474
	$Re = 75170$	0.00365
	$Re = 86700$	0.00340
	$Re = 127500$	0.00280
	$Re = 170000$	0.00242

表 5-2 メッシュ情報(分解能が低い場合)

総節点数	15142580	
総セル数	666504	
最小分割体積	1.11e-11	
面数(球体表面)	2040	
境界層拡大率	1.1	

詳細は 2.3.3.1 で述べたためここでは説明しない。初期条件や境界条件、モデル変数について表 5-3 にまとめる。乱流強度や比散逸率といった乱流に関する初期条件は本来実験などから得られた数値を用いなければならないが、データが存在しなければ適切な数値を見積もる必要がある。ここでは乱流強度を 0.5%、乱流の長さスケールを 0.2d として乱流に関する初期条件を設定した。また k や ω に関する壁面の境界条件には 2.3.3.1 で説明した壁法則に基づく境界条件を用いている。乱流モデルに関するパラメータは 2.3.3.1 でまとめた通りである。設定した条件のもと PISO 法を用いた非定常解析によって計算を行った。

今回の目的は球にかかる抵抗を計算し、抗力係数を求めることである。シミュレーションの結果、圧力および速度分布が分かると以下の式(5.2)によって抵抗の計算が行える。

$$F = \rho \int \{pI - v(\nabla u + (\nabla u)^T)\} \cdot n dS \quad (5.2)$$

ρ は流体の密度[kg/m^3]、 ν は流体の動粘性係数[m^2/s]、 \mathbf{n} は力が作用する面の法線ベクトルである。計算した力に対し、流入方向とは逆方向の力の成分を取り出し、式(5.1)より抗力係数の計算を行った。今回の計算は非定常解析のため、十分に安定したと見なせる期間の平均値をもってそのレイノルズ数の抗力係数であるとした。

表 5-3 シミュレーションの設定

計算時間幅	0.01	
計算ステップ数	1000	
境界条件(速度)	入口	一定
	球表面	0
	出口	$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial n} = 0$
境界条件(圧力)	入口	0
	球表面	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
	出口	0
境界条件(k)	入口	一定
	球表面	壁関数による条件
	出口	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$
境界条件(ω)	入口	一定
	球表面	壁関数による条件
	出口	$\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$
初期条件	乱流強度 5% 長さスケール 0.2d	

5.2.4 開発システムにおける比較分析

ケーススタディの結果を述べる。表 5-4 に水槽試験、CFD 計算によって得られたレイノルズ数ごとの抗力係数を示す。

表 5-4 水槽試験および CFD による抗力係数の比較

	水槽試験	CFD(分解能:高)	CFD(分解能:低)
44370	0.421	0.489	0.492
75170	0.440	0.492	0.501
86700	0.423	0.491	0.492
127500	0.420	0.488	0.161
170000	0.393	0.499	0.144

また 3 種類のデータに加え、開発システムによってプロットした結果を図 5-4 に示す。
 $Re \leq 86700$ の領域では水槽試験の数値は全体として小さく、逆に CFD 計算の結果は全体として大きくなっていることが見て取れる。またメッシュ分解能の低い CFD 計算の結果は $Re \geq 127500$ の範囲では急減に減少しており、水槽試験、メッシュ分解能の高い CFD 計算結果と大きく異なる結果が得られた。

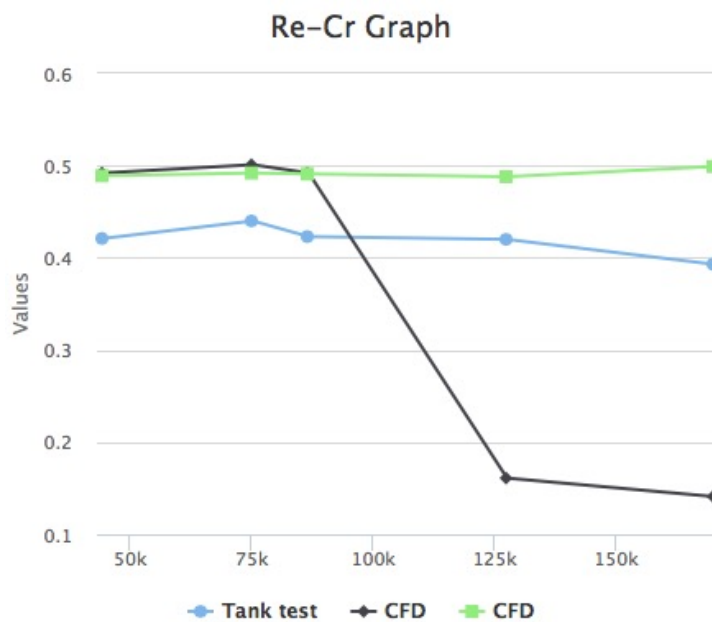


図 5-4 開発システムにおける結果の比較

この比較の結果から球体の抗力を CFD 計算によって推定するためには、球表面のメッシュを密に確保することが非常に重要であり、特にレイノルズ数が 1.0×10^5 を超える領域におい

では特に留意すべきであることが判明した。このことは CFD 計算における一種のノウハウであると言える。

5.2.5 開発システム上での知識の登録

今回得られたノウハウを開発システムに登録する。登録には、システムのファイル登録機能を用いる。今回得られた知見を Microsoft Word の形式で記述し、比較データに関連ファイルとして登録する。また登録の際に、メタデータを用いて「CFD に関するノウハウ」という情報を付与した。このような登録により、ユーザーは今回得た知見に対し、比較分析インターフェース、検索インターフェースの両方からアクセスが可能となる。

5.2.6 考察

5.2.6.1 水槽試験・CFD 結果のより詳細な考察

まず、水槽試験および CFD の比較をより詳細に行う。分析のため以下の Cheng[29]の実験式を用いる。実験式とは過去の実験より得られた数値に対して関数によるフィッティングを行ったもので、Cheng の実験式はレイノルズ数を引数として、抗力係数を簡易に求めることができる。

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.27Re)^{0.43} + 0.47[1 - \exp(-0.04Re^{0.38})] \quad (5.3)$$

今回のケーススタディの結果に加え、Cheng の式から得た値を図 5-5 に示す。図から読み取れるように実験式の数値の傾向と水槽試験、メッシュ分解能が高い CFD 計算の傾向は等しく、数値に関しても非常に精度良く計測、計算が行えていることが分かり、メッシュ分解能の低いものに関してはその計算が正しくないことが分かる。一般的に球の抗力係数についてはレイノルズ数が $2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$ の間で急激に低下する Drag crisis と呼ばれる現象が知られている[30]。Achenbach[31]の実験によると、球面の形状の粗さによってこの Drag crisis 現象が発生する領域が低レイノルズ数側に移動することが報告されており、今回の結果はそのことを後押しする結果であると言える。

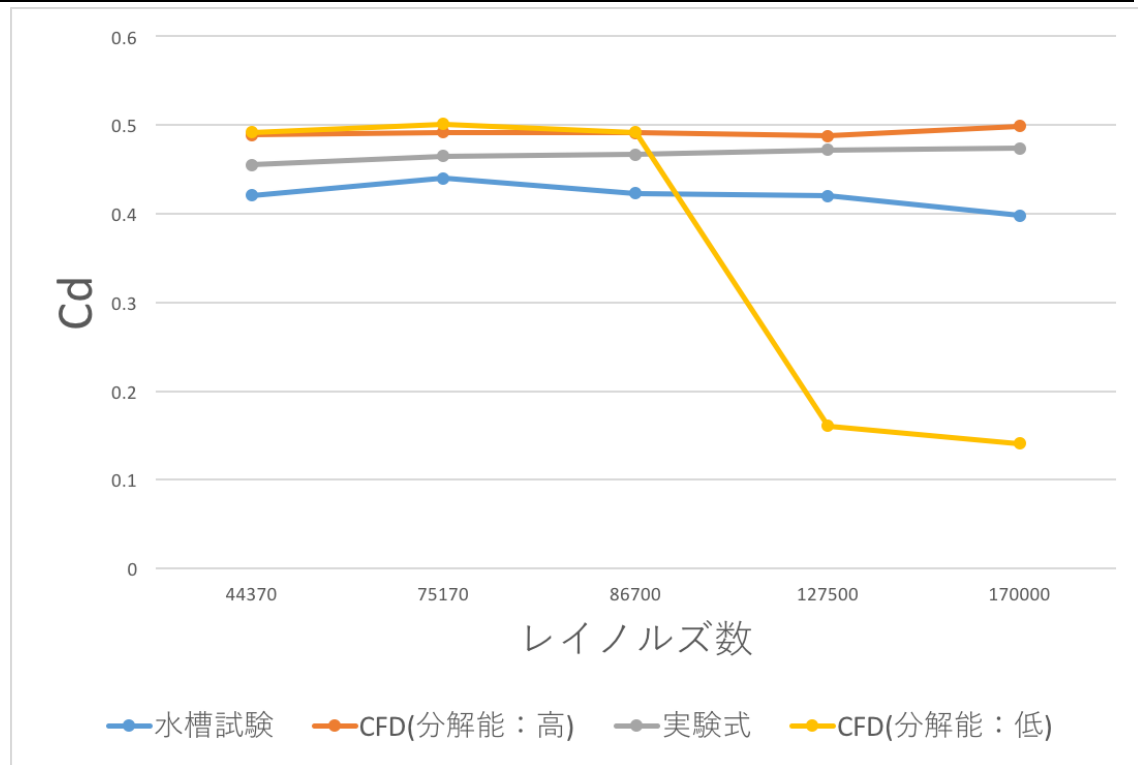


図 5-5 水槽試験、CFD 結果および実験式の比較

また、実験式の数値に対して、水槽試験の値は低く、CFD 計算の値は大きい。特に、水槽試験については $Re = 127500 \sim 170000$ にかけて、実験式や CFD 計算には見られない減少傾向が見られる。この理由についても考察する。この減少傾向の要因としては模型の支持方法、球模型の精度が考えられる。Achenbach[32]の実験によると 1 様流中の球の抗力係数とレイノルズ数の関係は図 5-6 のように表される。図 5-6 は[32]を参考に作成した。Achenbach の実験結果によると、高レイノルズ数帯において抗力係数は $Re = 2 \times 10^5$ まではおおよそ一定であり、 $Re = 2 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$ で急激に低下する。ところが模型の支持方法が変わるとこの急激な下落が低いレイノルズ数帯で起こること、一定である部分の抗力係数が通常よりも低くなることが Achenbach[32]の研究で報告されている。このことから今回のケーススタディにおいても、球模型周りの支持方法や形状の精度によって抗力係数が小さくなり、 $Re = 127500$ から $Re = 170000$ にかけて抗力係数の値の減少傾向が見られたと考えられる。

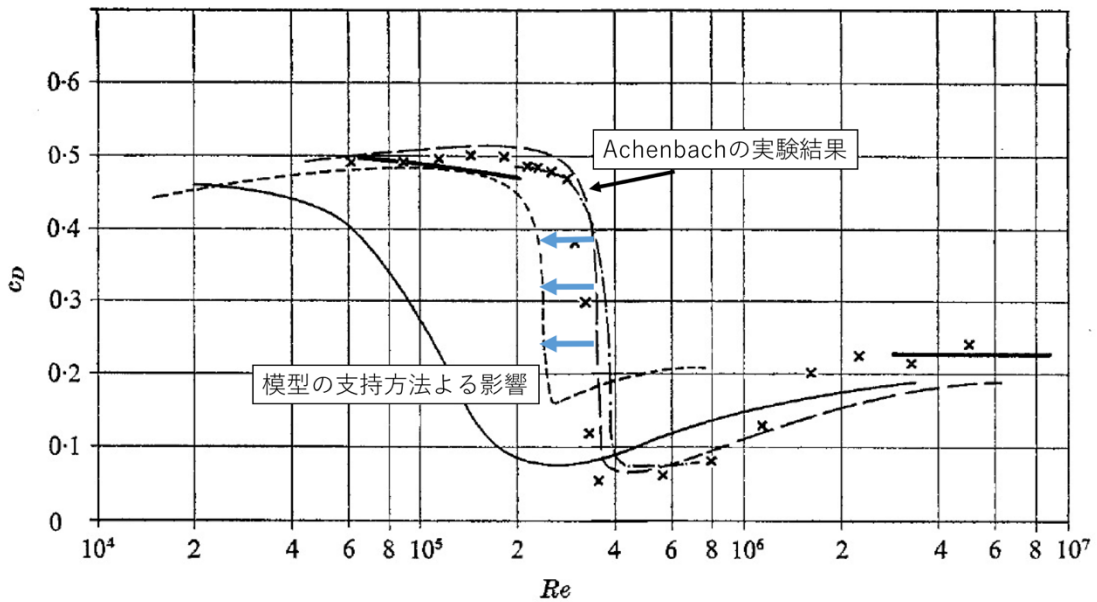


図 5-6 球の抗力係数とレイノルズ数の関係([32]を参考に作成)

5.2.6.2 開発システムの比較分析機能についての考察

このケーススタディでは開発システムの水槽試験・CFD 比較分析機能が有効に働くかどうかの検証を行った。4.1 で述べた通り開発システムの水槽試験・CFD 比較分析機能の目的は水槽試験と CFD 計算の結果を比較し、CFD 計算に関するノウハウを抽出することにあった。本ケーススタディで得られた必要な計算格子数に関する知見は、この CFD 計算に関するノウハウであると言え、開発システムは必要な機能を満たしていると言える。

5.3 コンテナ船の推進性能推定

5.3.1 概要

本ケーススタディでは、コンテナ船の抵抗性能の推定について水槽試験と CFD 計算の結果を比較し、開発システムの CFD 計算の精度の検証を行う。図 4-1 に示した通り本システムが想定する設計プロセスではある船型の形状の決定と性能推定のループを繰り返すことによって船型の設計を行う。そこで本ケーススタディでは開発システムによってこのループ 1 周が実現されることを示す。船型の検索機能や知識の蓄積方法については 4.2 で説明し

た通りである。よって CFD 計算による性能推定が行えるのであれば、開発システムによって設計プロセスの 1 ループを実現できたと言える。

本ケーススタディで対象とするコンテナ船の外観を図 5-7 に、その主要目を表 5-5 に示す。



図 5-7 対象とする 6600 TEU コンテナ船の外見

表 5-5 対象とするコンテナ船の要目

	実船	模型船
L_{pp} [m]	283.8	2.00
Breadth[m]	42.80	0.302
Depth[m]	24.4	0.172
Volume[m ³]	107072.1797	0.00375
WSA[m ²]	15300.6758	0.760
Draft[m]	14.00	0.099
Block coefficient	0.6296	
Prismatic coefficient	0.6347	
Scale ratio	0.00705	

方形係数(Block coefficient)は船体の水線下の容積のやせている度合いを示す係数であり以下の式(5.4)で計算される[34]。 ∇ は排水容積、 B は船体の幅、 d は喫水を表す。

$$C_b = \frac{\nabla}{L_{pp} \cdot B \cdot d} \quad (5.4)$$

また柱形係数(Prismatic coefficient)は船体の水線下の前後部のやせている度合いを示す係数であり、以下の式(5.5)で計算される。 A_M は中央断面積を表す。

$$C_p = \frac{\nabla}{L_{pp} \cdot A_M} \quad (5.5)$$

5.3.2 東京大学船型試験水槽における抵抗試験

本項では、ケーススタディで使用する東京大学船型試験水槽での抵抗試験の説明を行う。東京大学船型試験水槽における抵抗試験の概要を図 5-8 に示す。

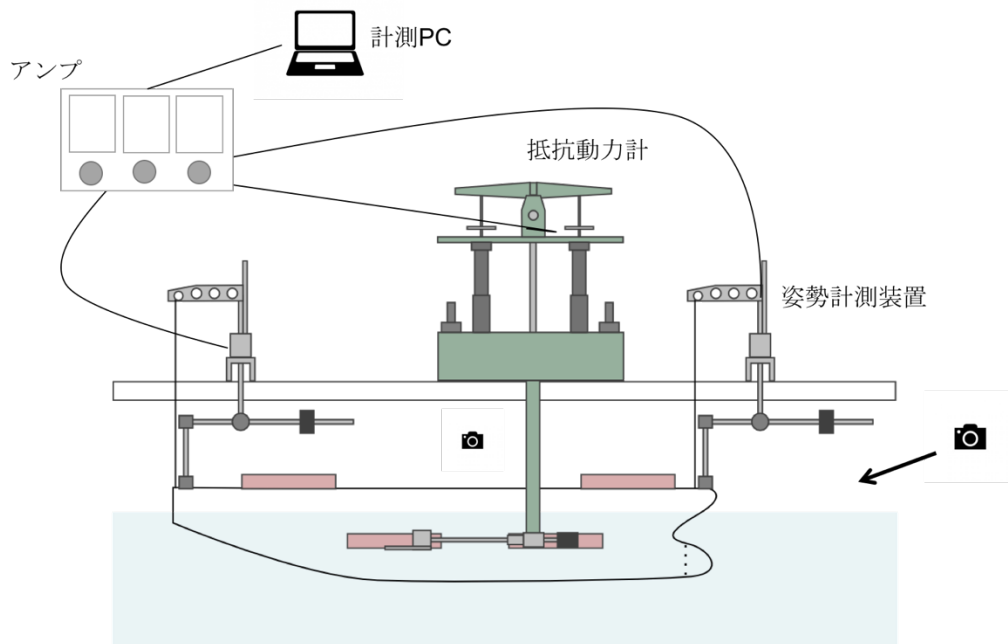


図 5-8 東大水槽における抵抗試験の概要

抵抗動力計による抵抗の計測、姿勢計測装置による前後の姿勢変化の取得を行う。抵抗動力計は天秤式の物を使用する。データの収録にはデータ集録ソフトである Wave Shot!

を用いた。測定の結果得られる全抵抗値、前後の姿勢変化を換算することで、実船の EHP(主機出力)、Sinkage や Trim の計算を行う。換算のための数式は 2.2 に記した。ビデオデータとしては前方および側面から撮影を行ったデータを記録する。また、映像同期のためライトによるパルス信号の挿入を行う。実際に模型船を曳航台車に取り付けた様子を図 5-9 に示す。

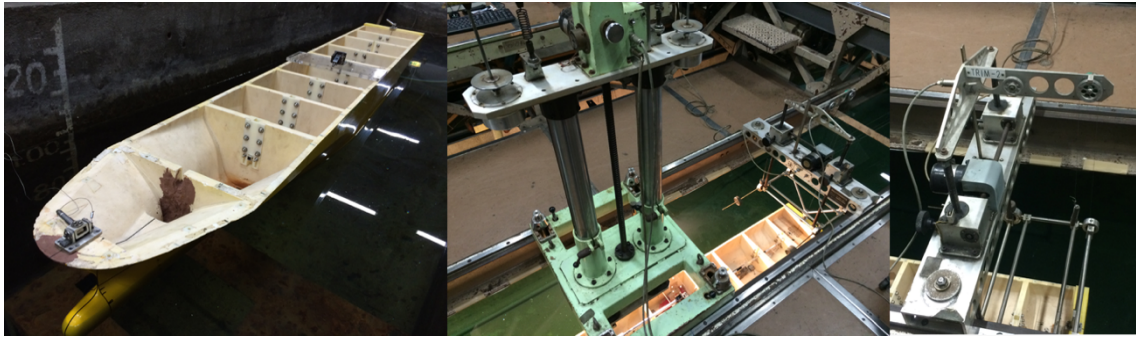


図 5-9 模型船取り付けの様子

模型船のバルバス付近には船体周りの流場の乱流化を促進するためのスタッドを取り付ける。抵抗試験の計測のプロセスを図 5-10 に示す。計測開始とともにビデオ撮影を開始し、0 点の計測を行う。決められた計測時間の約 15%ほどが経過した段階で抵抗動力計のクランプを Lock し、台車による曳航を開始する。台車の速度が定速に達した段階で、クランプを Open にする。クランプを Open にすると抵抗動力計は計測を開始する。そこで計測された値が抵抗動力計の許容値を超えているようであればカウンターウェイトによって調整を行う必要がある。一定時間曳航し、計測終了となる。

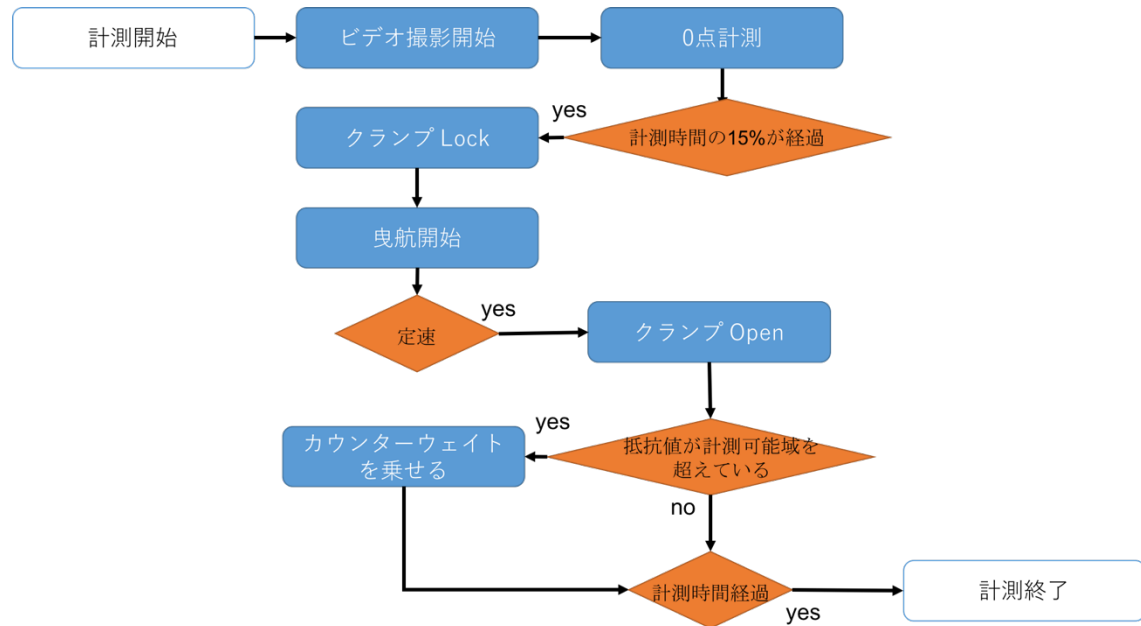


図 5-10 東大水槽における抵抗試験プロセス

行った試験の条件を表 5-6 にまとめる。フルード数 0.098 の速度では造波はないものとみなし、模型船の形状影響係数の算出を行った。また摩擦抵抗の算出には ITTC 1957 で提案された式を用いた。各抵抗係数については、排水量ベースで無次元化を行った。

表 5-6 抵抗試験の条件

喫水条件	14m Even
水温[°C]	18.0
密度[kg・sec/m ⁴]	101.838
動粘性係数[m ² /sec]	1.0816
台車速度[m/sec]	0.779 ~ 1.081
フルード数	0.176 ~ 0.244

5.3.3 OpenFOAM による抵抗試験のシミュレーション

OpenFOAM では 3 次元形状を STL ファイルの形式で読み込む。一般的な CAD モデルがあれば、STL 形式でエクスポートすることは容易であるが、対象とする船型の CAD データ

を入手することはできなかった。そこで本ケーススタディでは線図のデータを用いて 3 次元モデルを作成した。本項では、3 次元モデルの作成方法、OpenFOAM によるシミュレーションのそれぞれについて説明する。

5.3.3.1 3 次元モデルの作成

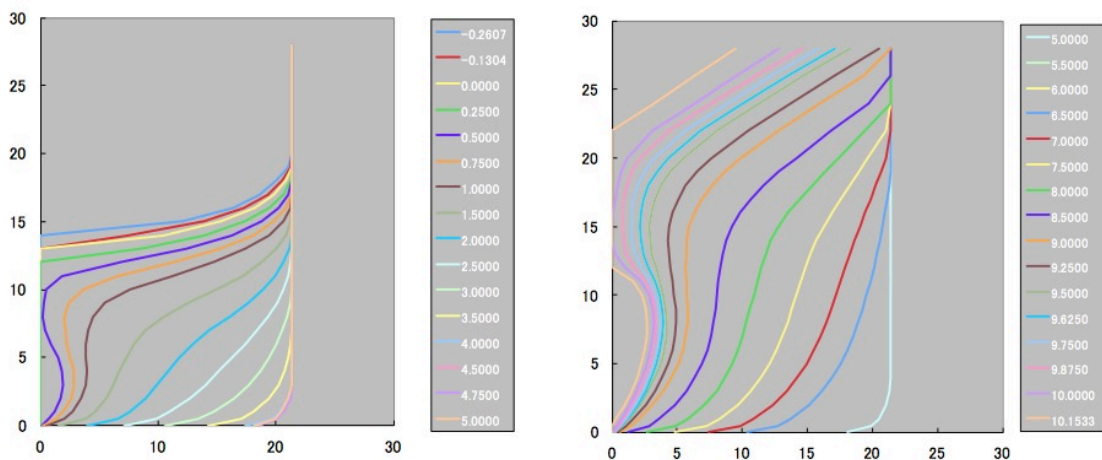


図 5-11 対象とする船型の線図(Body Plan)

本ケーススタディでは、線図よりおこされたオフセット表の数値をもとに船型の 3 次元 CAD モデルを生成し、そのメッシュ化を行う。

対象とする船型の線図データ(Body Plan)を図 5-11 に示す。各線はそれぞれのスクエアステーションにおける船型の正面から見た断面図を表している。スクエアステーションとは垂線間長さを等間隔で 10 等分した箇所を指す。凡例に書かれている数字はスクエアステーションの番号と対応している。このオフセット表の値をもとに 3 次元 CAD データを作成する。図 5-12 は線図のオフセットデータを鉛直方向に対して水平な面で補間した曲線群を表している。

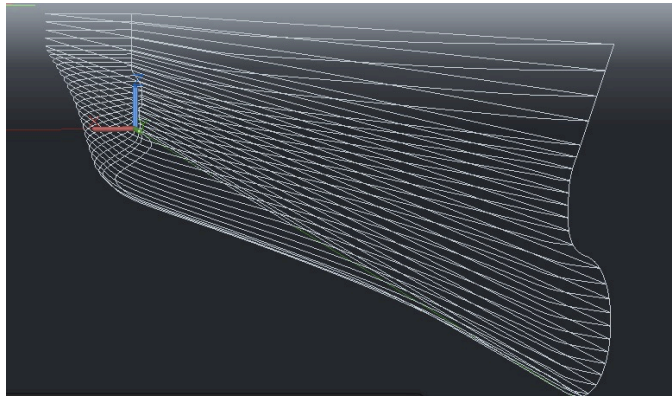


図 5-12 CAD による線図の補間

このように作成した水平面を押し出すことによって 3 次元 CAD モデルの作成を行った。できあがった 3D CAD モデルおよびそのメッシュ化したデータを図 5-13 に示す。今回の CAD モデルの作成には AutoCAD[35]を用い、表面メッシュ作成には Netgen[36]を用いた。

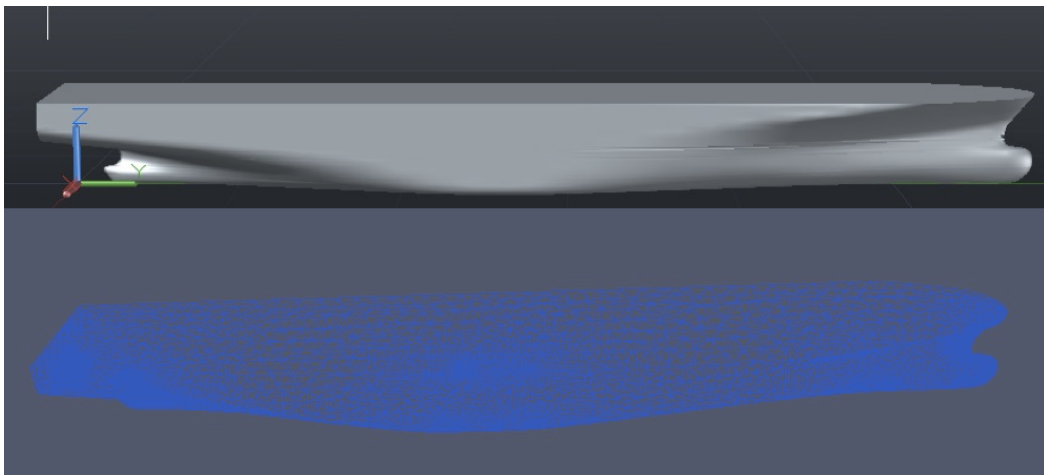


図 5-13 AutoCAD および Netgen によるメッシュ作成

5.3.3.2 RANS による混相流シミュレーション

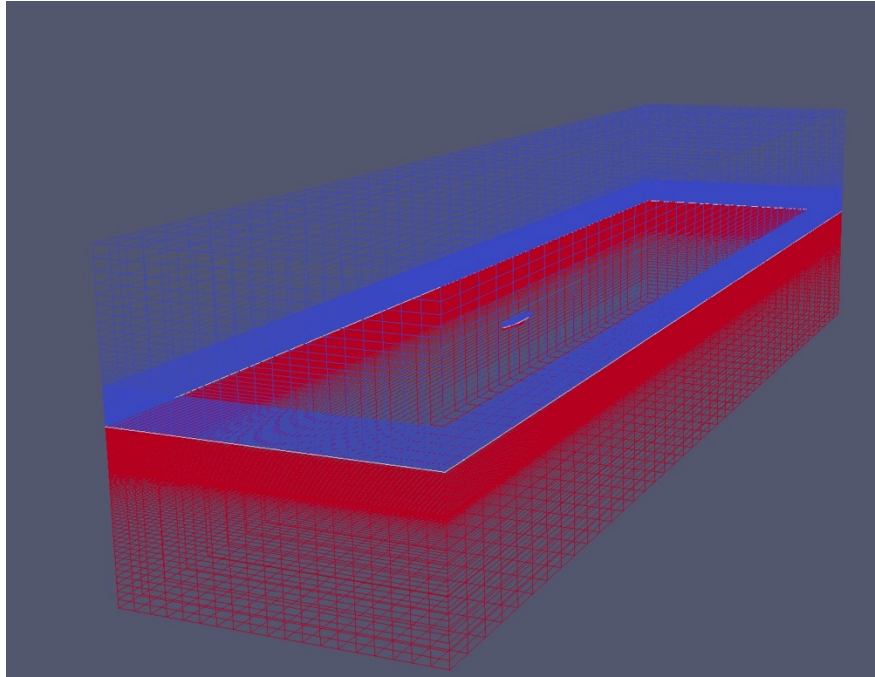


図 5-14 OpenFOAM による抵抗試験のシミュレーション

5.3.3.1 で作成した船型形状をもとに抵抗試験の CFD シミュレーションを行う。具体的には空間を空気と水の 2 相からなる混相流で表現し、その境界に船体のメッシュを固定することで水槽試験をモデル化する。一様速度で空気および水を流入させ、船体メッシュが流れから受ける力の計算を行う。実際のシミュレーションの様子を図 5-14 に示す。青い色で表された領域が空気の領域であり、赤い色で表された領域が水の領域である。画像の中心付近にあるものが船体である。図から分かるとおりの境界面付近には密にメッシュを配置している。計算領域は xyz 方向に 52[m]×10[m]×10[m]である。ただし船体の進行方向が x、船幅方向が y、深さ方向が z で表される。

図 5-15 に船体付近におけるメッシュ細分化の様子を示す。図に示される通り、メッシュの細分化を段階的に行い、船体近傍では非常に密なメッシュを配置している。船体の表面には 3 層の境界層メッシュを配置している。全体のメッシュの情報を表 5-7 にまとめる。

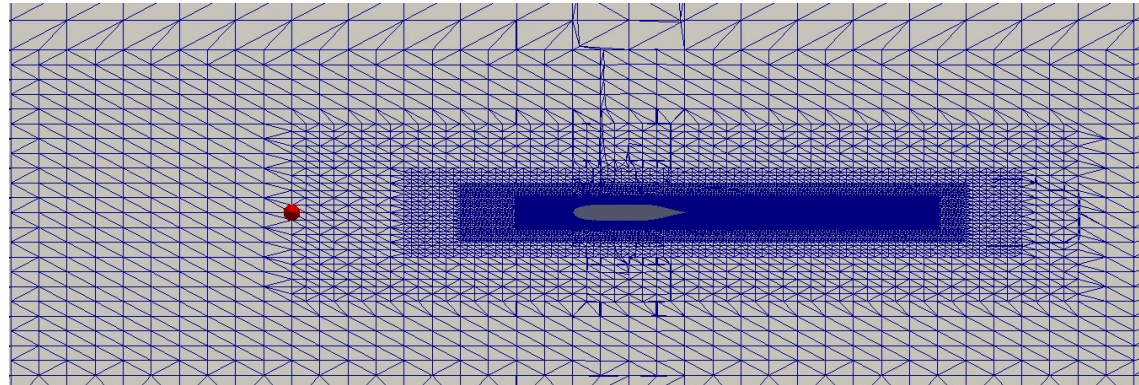


図 5-15 船体付近のメッシュ細分化の様子

表 5-7 メッシュ情報(コンテナ船のケース)

総節点数	2113963
総セル数	2014847
最小分割体積	3.74e-8
面数(船体表面)	11122
境界層拡大率	1.5
境界層厚さ	0.0121

乱流モデルとしては $k-\omega$ SSTモデルを採用し、PISO法で非定常解析を行った。 $k-\omega$ SSTモデルのパラメータは2.3.3.1で示した通りである。境界条件について表 5-8にまとめる。基本的な流入条件、流出条件を設定し、 k や ω の壁面の境界条件には壁関数による条件を設定している。乱流強度は0.5%であるとし、代表長さは船体の L_{pp} として乱流の長さスケールを計算している。水の密度や動粘性係数、船体の速力については水槽試験と同じ数値を用いた。

表 5-8 シミュレーションの設定

計算時間幅	1	
計算ステップ数	4000	
境界条件(速度)	入口	一定
	船体表面	0
	出口	$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial n} = 0$
境界条件(圧力)	入口	0
	船体表面	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
	出口	0
境界条件(k)	入口	一定
	船体表面	壁関数による条件
	出口	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$
境界条件(ω)	入口	一定
	船体表面	壁関数による条件
	出口	$\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$
初期条件	乱流強度 0.5% 長さスケール $0.2L_{pp}$	

5.3.4 結果

本ケーススタディの結果について述べる。水槽試験と CFD 計算の結果得られた模型船の全抵抗の値を図 5-16 で比較する。横軸にフルード数 Fn 、縦軸に全抵抗 $Rt[\text{kg}]$ を取っている。グラフから読み取れるように水槽試験に対して CFD 計算によって非常に近い数値を得ることができている。水槽試験に対する CFD 計算結果の誤差の絶対値の平均は約 4.33[g] であり、平均誤差率は約 2.93% である。平均誤差率とは水槽試験の値に対する誤差の絶対値の割合である。各フルード数に対する水槽試験と CFD 計算の値とその差を表 5-9 に示す。

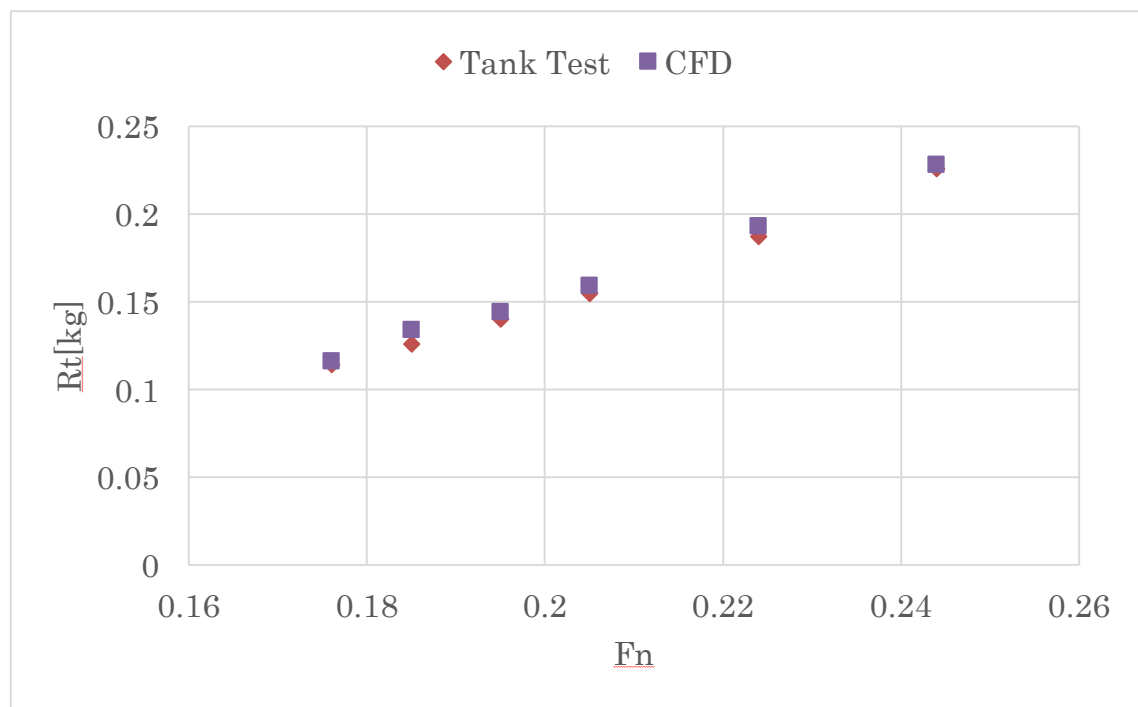


図 5-16 全抵抗値による水槽試験と CFD の比較

表 5-9 水槽試験および CFD による全抵抗値の比較

	水槽試験[kg]	CFD[kg]	誤差[kg]
0.176	0.114	0.116	0.002
0.185	0.126	0.134	0.008
0.195	0.140	0.144	0.004
0.205	0.155	0.159	0.004
0.224	0.187	0.193	0.006
0.244	0.226	0.228	0.002

5.3.5 考察

表 5-9に見られる通り模型船の全抵抗値に対する CFD 計算による全抵抗値の誤差は平均で 4.33[g]であった。ITTC の水槽試験準備と計測装置に関するガイドライン[37]では、抵抗動力計の精度は最大容量の 0.2%、もしくは 0.05[N]のどちらか大きい方を満たすことが要求されている。0.05[N]はおよそ 5.1[g]である。さらに実際には曳航台車の速度による誤差、

数値の読み取り誤差などが加わることを考慮すると今回のケーススタディで得られた CFD の精度は水槽試験で要求されている精度に近い値を示すことができている。このことから開発システムが、想定する設計プロセスの船型の決定、推進性能推定の 1 ループを実現できることが示された。

Case 2 では平水中抵抗試験を対象に CFD と水槽試験の比較を行うことで、開発システムの CFD 計算の精度を検証した。しかし実際には、推進性能推定のためには平水中抵抗試験だけではなく、プロペラ単独試験、自航試験などの試験も必要となる。これらの試験についても今回のケーススタディと同様な検証を行い、その精度の確認する必要があると言える。また今回の船型に対して、開発システムの CFD 計算が十分な精度であることが示されたが、今回の船型と大きく異なる船型については、その精度が十分かどうかは不明である。可能な限り CFD 計算の結果と水槽試験結果の比較を行い、CFD 計算の精度向上、開発システムでのノウハウの蓄積を継続していくことが重要となる。

第6章 考察

6.1 はじめに.....	70
6.2 開発システムについての考察	70
6.2.1 設計データベースとその検索機能について	70
6.2.2 水槽試験・CFD データ比較分析機能について	71
6.2.3 設計に関する知識および CFD に関するノウハウの蓄積機能について ...	72

6.1 はじめに

本章では、開発システムのそれぞれの機能についての考察を行う。また本研究では開発の対象としなかった造船 CAD システムについても考察する。

6.2 開発システムについての考察

6.2.1 設計データベースとその検索機能について

今回開発した機能により設計者が過去の船型を検索し、性能を取得する作業が省力化される。一般的な手法と本システムとの比較を図 6-1 に示す。

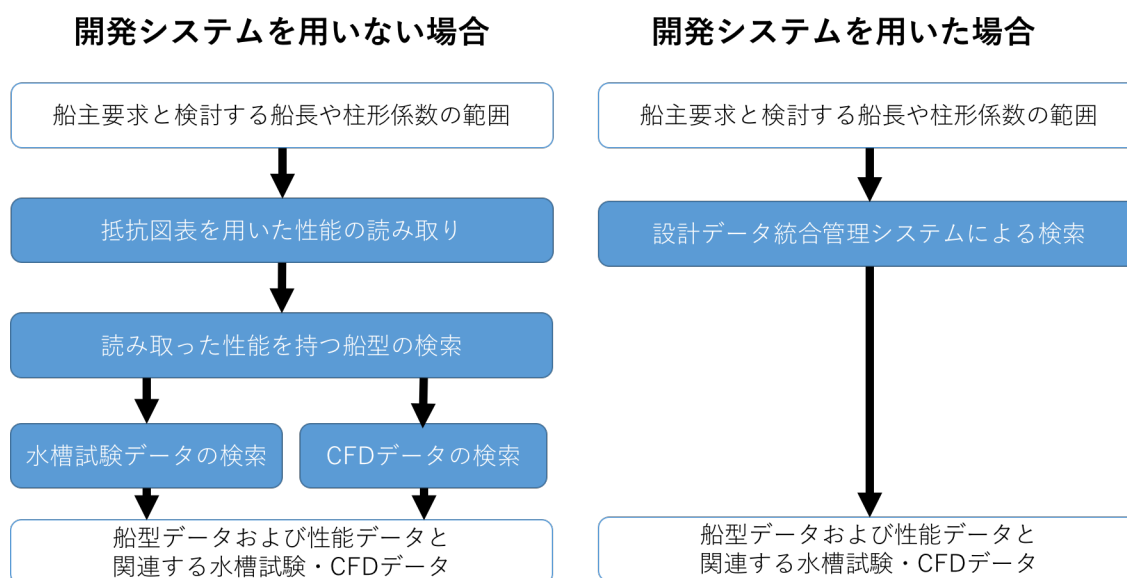


図 6-1 開発システム用いた場合とそうでない場合の比較

船型のデータおよびその性能データの整理の仕方は各造船所ごとに異なる。ここでは造船設計便覧[2]を参考に船型の性能は Taylor 図表に準じた形式で整理されているものとし、一般的な手法として比較している。つまり図中の抵抗図表とは Taylor 図表のように C_p 、 ∇/L^3 、

$V/L^{\frac{1}{2}}$ をパラメータとして剰余抵抗係数を読み取るものである。一般的な手法では抵抗図表から性能を読み取った後、船型のデータ、水槽試験のデータ、CFDのデータを別々に検索する必要がある。図 6-1 より統合管理システムによって検索が大幅に省力化していることがわかる。

近年、無線技術の発達により、実際の船舶の運航における速力や FOC などの運航に関するデータがとても密に入手することが可能となりつつある[40]。気象や海象のデータと組み合わせで解析することで、今まで知ることのできなかつた船舶の実海域における性能を知ることができるようになることが期待される。実際に運航データを解析し、船舶の実海域における性能を明らかにする研究も存在する[41]が、このような運航データの取り込みが本システムにとっても有用であると考えられる。運航データと水槽試験による性能推定結果を比較することで、水槽試験自体の精度の検証を行うことが可能となる。また、実海域における性能を知ることができれば、CFD を用いた実海域性能の検討も可能となる。筆者ら[42]は実際にこのような運航データと水槽試験のデータを統合的に管理するようなシステムの構築を行っており、このシステムと本研究における開発システムを融合することで、より充実したデータベースになると考えられる。

6.2.2 水槽試験・CFD データ比較分析機能について

これまでの設計を船主要求に合わせて修正していく設計手法では、全く新しい船型を生み出すことはできない。第 1 章で述べた通り近年、実海域性能に基づいた船型の開発へのニーズが高まっているが、そのようなニーズに応えるためには、これまでにない新しい船型を模索する必要がある。

実海域性能に基づく船型設計が困難である理由は、その現象が物理的に解明されていない点にある。水槽試験は抵抗値などの計測により性能の推定を正確に行えるが、流場を正確に把握することが困難であるという特性を持つ。そのためどのような物理現象がその性能の裏にあるかを把握することが難しい。一方で、CFD 計算では流場の様子を詳細に可視化することが可能であり、現象の解明に対して有用であると考えられる。水槽試験と CFD 計算の結果を比較し、現象を分析することによって新船型の検討に必要な知識が得られると考えられる。

また水槽試験による計測によって流場の情報を得られた場合、流場の情報をベースにデータの分析を行うことが考えられる。実際、流体実験の結果と CFD シミュレーションの結

果をデータ同化の手法によって統合する試みは行われており、加藤ら[38]は実験の結果と CFD の結果を用いて乱流モデルのパラメータ最適化を行っている。このようなデータの統合はより正確な CFD 計算を行うために必要である。水槽試験の流場計測には PIV 計測が用いられる[39]。PIV 計測とはトレーサー粒子を計測空間に流し込み、レーザーシート光を照射し、その様子をカメラで撮影することで流場を計測する手法である。PIV 計測の結果得られた流場のデータをシステム内に蓄積し、CFD シミュレーションの結果と比較を行うことで、より詳細なデータ分析が可能となる。

6.2.3 設計に関する知識および CFD に関するノウハウの蓄積機能について

ケーススタディにおいて、開発システムの水槽試験・CFD 比較機能が有効であることや、CFD 計算の精度が検証されたが、システムによって蓄積する設計知識の整理の仕方についてはまだ検討の余地がある。現状の開発システムでは山県の図表を参考に設計データの整理を行っているが、他にも喫水長比と柱形係数の値に剰余抵抗を関連付けて整理するもの、Entrance 係数や Run 係数と造波抵抗を関連付けて整理するなど様々な方法が考えられる。設計者が船型の変更を考える際に、どの整理の方法が効率的であるかの検証を行う必要がある。

6.3 造船 CAD システムについて

本システムの想定する設計プロセスでは基準を選択し、その形状を修正することで目的の船型を設計する。船型の修正方法としては、プリズマティック曲線の変更に基づく修正、2つの船型形状を一定割合でブレンドして新しく船型を生み出す方法など様々な手法が取られるが、基本的には基準船の船型を表す離散的な3次元のオフセット点を移動することで、形状の変更を実現する。そうした場合、一般的に新しく生成された点では船型を綺麗な曲面で表すことはできず、いびつな曲面を生成してしまう。そこでオフセット点の情報をもとに船型を3次的に滑らかにするフェアリングと呼ばれる作業が必要となる。このフェアリングを行うためのシステムが造船 CAD システムである。現在、NAPA[33]などの数多くの造船 CAD が開発され実際に活用されている。本システムでは、CFD 計算の入力として STL ファイルを想定している。オフセット点を入力とし、フェアリングした結果を STL 形式に変換可能

な CAD データとして出力できる造船 CAD であれば、どのような造船 CAD であっても本システムに適用可能であり、ユーザーは自身の使いなれた造船 CAD で設計を進めることが可能である。

第7章 結論

7.1 結論.....	75
7.2 今後の展望.....	75

7.1 結論

本研究では、船型開発のプラットフォームとして水槽試験データと CFD データを統合的に用いて、船型設計を支援するシステムの開発を行った。具体的には、設計プロセスの効率化を目的とした船型設計支援システムの要件を整理し、そのうち水槽試験データや CFD データなどの過去の船型に関するデータをメタデータによって管理する設計データ統合管理システム、水槽試験や CFD 計算を用いて性能推定するシステムの構築を行った。本論文では 2 つのケーススタディを通して開発システムの機能の検証を行った。1 つ目のケースとしては船舶の簡易モデルとして流れの中にある没水球が水から受ける抵抗に関して実際に行った水槽試験と CFD の比較分析を開発システムによって行い、水槽試験と CFD の比較分析機能の検証を行った。ケーススタディで得られた必要な計算格子数に関する知見は、この CFD 計算に関するノウハウであると言え、開発システムは必要な機能を満たしていることが検証された。2 つ目のケースとしては実際の船型の抵抗試験とその CFD の結果を用いて、開発システムの CFD 計算の精度の検証を行った。抵抗試験の結果と開発システムの CFD 計算の結果を比較することで、CFD 計算によって水槽試験の数値に対して平均約 4.33[g]の精度で船型の抵抗値を計算できることを示した。このことから開発システムの CFD 計算の精度が、設計に使用できる精度であることが示された。

7.2 今後の展望

今後の展望としては、以下の 4 点が挙げられる。

1. 実際の開発システムを用いて船型設計を行う、もしくは外部のデータベースを取り込み本システム内のデータベースを充実させること
2. 水槽試験と CFD のより密接な連携
3. 実運航データの活用
4. 設計知識に基づいた知識 CAD の構築

まず 1 についてであるが、本システムが有効に働くためには、設計データベースの充実が不可欠である。開発システムを用いた設計の事例を増やし、データ量を増やす必要がある。また他の造船所のデータベースを取り込みことなども考えられる。

2 についての詳細を述べる。開発システムでは、水槽試験と CFD の比較分析を支援する

環境を構築したが、比較分析以上のより密接な連携を行うことが将来的に考えられる。例えば、水槽の両脇の壁面の影響を CFD によって考慮することで、小さい水槽においても大きなモデルを使用した実験を可能とする、モデル試験と CFD の比較によって CFD の精度を確認した後、その CFD によって直接実船の性能を推定するなどが考えられる。また水槽試験と CFD の比較により、その裏側にある物理現象に対するより深い理解を得ることも本システムの目指すところである。

3 については第 6 章でも述べたが、船舶が運航した際に得られる船速や FOC とその際の気象海象のデータを解析し、実船の性能を明らかにし設計にフィードバックすることでより良い設計を可能とすることが考えられる。また水槽試験結果や CFD 計算の結果との比較を行うことで、水槽試験法の見直しや CFD を用いた実海域性能推定へ繋がることが期待される。

最後に 4 についてであるが、本システムでは設計データ統合管理システムと設計用 CAD が完全に別モジュールとして、設計されている。しかし、本システムによって抽出した知識を CAD と一体化し、知識 CAD を構築することで、直接設計者の作業を支援することが可能である。このような知識 CAD の導入により、迅速な設計が可能となり、設計プロセスの効率化、品質の向上に繋がることが期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々にご助力を頂きました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 教授 大和裕幸先生には東京大学理事・副学長という非常にご多忙なお立場にもかかわらず、貴重な時間を割いてご指導いただいたことに心より感謝いたします。研究についてのみならず日々の生活に対する姿勢や一般的な教養など様々なことについてご指導してくださいました。本当にありがとうございました。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 准教授 稗方和夫先生には日々の研究室生活におきまして大変お世話になりました。特に、毎週の輪講での鋭いご質問、ご指摘、空いた時間にデスクまで足を運んでくださり交わした議論は私の研究には無くてはならないものでした。先生と議論することで混乱していた頭の中が整理され、自分の今やるべきこと、取り組まなければいけない課題が明確になり、それを一つ一つクリアしていくことでこの論文は出来上がりました。心より深く感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 准教授 白山晋先生には別の研究室ながら CFD について貴重なアドバイスをいくつもしてくださいました。CFD のことが何もわからず、途方にくれていた私に、メッシュの切り方や境界層メッシュについて、アルゴリズムやその他のテクニックについて丁寧にご指導くださいました。また、年に数回の大輪講においても本研究に関する貴重なアドバイスをしてくださいました。ありがとうございました。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 助教 満行泰河先生には研究室活動と私生活、両方で大変お世話になりました。研究室活動については、水槽試験のたびに実験の監督をしてくださったり、初めての海外発表に引率として同伴して下さったりしました。また私生活については、バレーボール大会、バスケットボール大会など多くのスポーツ大会で自ら先頭に立ちチームを牽引してくださいました。満行先生のおかげで大変密度の濃い研究室生活を送ることができました。深く感謝申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 特任准教授 Bryan Moser 先生には、何度も英語の発表を聞いていただき、その度に自分の研究について深く考えるきっかけとなるような問いかけをしてくださいました。先生の本質を捉えた問いかけのおかげで本質を見失うことなく自分の研究を進めることができました。本当にありがとうございました。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 教授 鈴木克幸先生には本研究において必要な模型船の貸出をしていただきました。また、船型のオフセットデータの提供をしていただきました。これら無くして本研究を行うことはできませんでした。厚く御礼申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 技術専門員 榎本昌一様には、水槽試験のたびに曳航台車の運転等、多大なるご支援を頂きました。その他にも研究室内や水槽内のネットワークの整備などで大変お世話になりました。ありがとうございました。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 技術専門員 土屋好寛様には、水槽試験について非常に多くのご指導をして頂きました。至らない私の実験計画を厳しく批判してくださる一方で、必要なジグを工作してくださるなど厳しくも優しく指導してくださいました。本当にありがとうございました。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境専攻 客員共同研究員 石松拓人様には、毎回の輪講で大変お世話になりました。ご自身の CFD の経験からなんども私にヒントをくださいました。また石松様にはバスケットボール大会にも参加していただきました。結果は惜しくも準優勝でしたが、石松様のお力がなければ到底そこまで勝ち進むことはできなかったでしょう。本当にありがとうございました。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境専攻 秘書 大塚朋子様、鮫島文子様、山本和子様には研究室内の様々な事務作業で大変お世話になりました。また日頃から体調などを気にかけてくださったおかげで健康に研究室生活を送ることができました。厚く御礼申し上げます。

共同研究員である富士通株式会社 斎藤稔様を始め富士通の方々には毎週の勉強会で大変お世話になりました。特に研究所の皆様は言語処理の内容を主として、論文紹介をしてくださいました。その分野を専門としない私でも分かりやすく発表していただき、とても勉強になりました。大変ありがとうございました。

研究室の先輩である、博士課程の孫晶鈺様、岡田伊策様、中村覚様、笈田佳彰様には、技術、学問的な面について大変指導していただきました。皆様の指導のおかげでこの論文を執筆することができました。大変ありがとうございました。

研究室の同輩である、修士課程の齋藤智輝様、松原洸也様、水林義博様、廣井貴彰様とは互いに切磋琢磨しながら日々の研究室生活を楽しく送ることができました。心より感謝します。

研究室の後輩である、修士課程の上野隆治君、後藤拓矢君、馬目信人君、学部 4 年生の伊藤航大君、岡田航太君のおかげで大変楽しく論文の執筆を行うことができました。皆様が研究室の空気を明るくしてくれたおかげで、日々の作業に折れることなく論文を書ききることができました。本当にありがとうございました。

東京大学工学系研究科システム創成学専攻 白山研究室の学生の皆様には、大輪講の際、いろいろな視点から貴重な意見をいただきました。また、修士課程の今福翔太君には新領域のバスケットボール大会に参加していただき助っ人として活躍していただきました。厚く御礼を申し上げます。

最後になりましたが、和歌山からみかんや柿を送ってくれた家族、研究生活を支えてくれた友人に心から感謝いたします。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1]. 森正彦：船型設計，船舶技術協会，1997.
 - [2]. 関西造船協会：造船設計便覧(第4版)，海文堂出版，2004.
 - [3]. 大串雅信：理論船舶工学(下巻)，海文堂，第8版，pp. 144-145, 1975.
 - [4]. Seo, J. H., Seol, D. M., Lee, J. H., and Rhee, S. H.: Flexible CFD Meshing Strategy for Prediction of Ship Resistance and Propulsion Performance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2(3), pp. 139-145, 2010.
 - [5]. Prpić-Oršić, J., and Faltinsen, O. M.: Estimation of Ship Speed loss and associated CO₂ emissions in a seaway, *Ocean Engineering*, 44, pp. 1-10, 2012.
 - [6]. Furustam, F., Kuutti, I., Koike, K., and Yoshida, R.: Designing Ships for Service with the Help of Performance Monitoring, *International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, vol. 1, pp.31-35, 2015.
 - [7]. 荻原誠功, 芳村康男, 足達宏之, 山崎正三郎：船舶性能設計，成山堂書店，船舶海洋工学シリーズ，11, 2013.
 - [8]. 造船テキスト研究会：商船設計の基礎(上巻)，成山堂書店，pp. 264, 1982.
 - [9]. 笠原良和：肥大船の形状影響係数の簡易推定，日本造船学会論文集，第186号，pp. 169-176, 1999.
 - [10]. 越塚誠一：数値流体力学，培風館，1997.
 - [11]. J.H. ファーツィーガー, M. ペリッチ：コンピューターによる流体力学，シュプリンガー・フェアラーク東京，2003.
 - [12]. Launder, B. E., & Sharma, B. I: Application of the Energy-dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow near a Spinning Disc. *Letters in heat and mass transfer*, 1(2), pp. 131-137, 1974.
 - [13]. Menter, F. R.: Zonal Two Equation K-turbulence Models for Aerodynamic Flows, *AIAA Paper*, 2906, 1993.
 - [14]. Wilcox, D. C.: Reassessment of the Scale-determining Equation for Advanced Turbulence Models. *AIAA Journal*, 26(11), pp. 1299-1310,
-

-
- 1988.
- [15]. Hirt, C. W., and Nichols, B. D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries., *Journal of Computational Physics*, 39(1), pp. 201-225, 1981.
- [16]. Peri, D., Rossetti, M., and Campana, E. F.: Design Optimization of Ship Hulls via CFD Techniques. *Journal of Ship Research*, 45(2), pp. 140-149, 2001.
- [17]. ZhanG, B. J., Kun, M., and Ji, Z. S.: The Optimization of the Hull Form with the Minimum Wave Making Resistance Based on Rankine Source Method, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 21(2), pp. 277-284, 2009.
- [18]. Mon, A. A., Suzuki, K., & Hino, T. (2014). Study on Bow Shape Optimization of Ultra Large Block Coefficient Ship and CFD Simulations of Initial and Optimized Hull Forms.: *Journal of the Society of Naval Architects and Ocean Engineers of Japan*, Vol. 20, pp. 1-11, 2014.
- [19]. Tahara, Y., Tohyama, S., and Katsui, T.: CFD-based Multi-objective Optimization Method for Ship Design. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 52(5), pp. 499-527, 2006.
- [20]. Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H. W., and Paterson, E. G.: Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations—part 1: Methodology and Procedures, *Journal of Fluids Engineering*, 123(4), pp.793-802, 2001.
- [21]. Wilson, R. V., Stern, F., Coleman, H. W., and Paterson, E. G.: Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations—Part 2: Application for RANS Simulation of a Cargo/container Ship, *Journal of Fluids Engineering*, 123(4), pp. 803-810, 2001.
- [22]. Roache, P. J.: Perspective a Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies, *Journal of Fluids Engineering*, 116(3), pp. 405-413, 1994.
-

-
- [23]. Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H. W., and Paterson, E. G.: Verification and Validation of CFD Simulation, Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, pp. 9-12,1999.
- [24]. Tahara, Y., Wilson, R. V., Carrica, P. M., & Stern, F.: RANS Simulation of a Container Ship Using a Single-phase Level-set Method with Overset Grids and the Prognosis for Extension to a Self-propulsion Simulator, *Journal of Marine Science and Technology*, 11(4), pp. 209-228, 2006.
- [25]. Watanabe, S., Kuchi-ishi S., Murakami, K., Hashimoto, A., Kato, H., Yamashita, T., Yasue, K., and Imagawaga, K.: Towards EFD/CFD Integration: Development of DAHWIN –Digital/Analog-Hybrid Wind Tunnel, 52nd, AIAA Aerospace Science Meeting, 2014.
- [26]. 慎 燦益 : 造船幾何学-造船設計の基礎知識, 海文堂, pp. 72-81, 2013.
- [27]. RDF – Semantic Web Standards, Available at :<<http://www.w3.org/RDF/>> Feb. 13th 2015.
- [28]. OpenFOAM – The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox, Available at :< <http://www.openfoam.com>> Feb. 14th 2015.
- [29]. Cheng, N.: Comparison of Formulas for Drag Coefficient and Settling Velocity of Spherical Particles, *Powder Technology*, 189(3), pp. 395-398, 2008.
- [30]. Moradian, N., Ting, D. S. K., and Cheng, S. The Effects of Freestream Turbulence on the Drag Coefficient of a Sphere, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(3), pp. 460-471, 2009.
- [31]. Achenbach, E.: The Effects of Surface Roughness and tunnel blockage on the Flow Past Spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, 65(1), pp. 113-125, 1974.
- [32]. Achenbach, E.: Experiments on the Flow Past Spheres at Very High Reynolds Numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 54(3), pp. 565-575, 1972
- [33]. Kutti, I.: Impacts of Product Modeling on Ship Design and Production Planning, 9th International Conference on Computer Applications in
-

-
- Shipbuilding, vol. 2, pp. 189-202, 1997
- [34]. 池田良穂, 古川芳孝, 片山徹, 藤井辰博, 村井基彦, 山口悟: 船舶算法と復元性, 成山堂書店, 船舶海洋工学会シリーズ, 1, pp. 18-21, 2013.
- [35]. AutoCAD: Available at: <
<http://www.autodesk.co.jp/products/autocad/overview> > Jan. 12nd 2015.
- [36]. Netgen Mesh Generator: Available at: <
<http://sourceforge.net/projects/netgen-mesher/> > Jan. 12nd 2015.
- [37]. 鈴木和夫, 佐々木紀幸, 川村隆文: 船体抵抗と推進, 成山堂書店, 船舶海洋工学シリーズ, 2, 2013.
- [38]. Kato, H., & Obayashi, S.: Approach for Uncertainty of Turbulence Modeling Based on Data Assimilation Technique, Computers & Fluids, 85, pp. 2-7, 2013.
- [39]. Gui, L., Longo, J., & Stern, F.: Towing tank PIV Measurement System, Data and Uncertainty Assessment for DTMB Model 5512, Experiments in Fluids, 31(3), pp. 336-346, 2001.
- [40]. 安藤英幸: 環境負荷低減のための運航モニタリング, 計測と制御, 第 50 巻, 第 6 号, pp. 189-195, 2005.
- [41]. 箕浦宗彦, 古池健太: オンボードデータを用いた実海域船舶性能の統計的推定. 日本船舶海洋工学会論文集, 13, pp. 41-50, 2011.
- [42]. Wanaka, S., Yamato, H., Hiekata, K., Mitsuyuki, T., Enomoto, M., and Tsuchiya, Y.: Development of Ship Performance Data Management System combining Experiment Data and Measured Data in Actual Sea, Proceedings of the 17th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Vol. 1, pp.37-43, 2015
-