

東京大学大学院新領域創成科学研究科

海洋技術環境学専攻

2019 年度

修士論文

双発式海流発電装置のクロスビームと

ナセルに働く流体力の数値的研究

**(A numerical study of hydrodynamic forces acting on nacelles
and crossbeam of a twin-type ocean current generator)**

2020 年 2 月 26 日提出

指導教員 高木 健 教授

西山 和希

目次

1. 序論

1.1 研究背景	9
1.2 再生可能エネルギー	10
1.3 日本における海洋資源の有効性	12
1.4 黒潮について	13
1.5 海流発電について	14
1.5.1 海流発電措置概要	14
1.5.2 双発タービン式と二重反転式の海流発電装置	15
1.6 先行研究	16
1.6.1 海流発電装置の成り立ち	16
1.6.2 実機の海流発電装置の実証試験	17
1.7 自由度の定義	18
1.8 研究の目的	19

2. 理論および数値計算

2.1 数値流体力学 CFD	20
2.2 質量保存方程式および運動量保存方程式	21
2.3 レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式	21
2.4 乱流モデルの選択	22
2.5 Menter の SSTk- ω モデル	22
2.6 物性値および計算スキーム	28
2.7 SIMPLE 法について	29
2.8 物体に働く流体力	30
2.9 摩擦抵抗の推定	33

3. 実験

3.1 概要	36
3.2 発電装置およびその他の器具・実験場所	36
3.2.1 発電装置概要	36
3.2.2 流入流速の設定	37
3.3 実験試験概要	38

4.CFD 計算

4.1 解析対象	41
4.2 解析格子	44
4.3 格子依存性検証	46
4.3.1 境界層内の格子依存性検証	47
4.3.2 流れ方向の格子依存性検証	49

5.CFD 計算の実験値との比較・検証

5.1 斜行試験における実験結果と CFD 解析結果	50
5.1.1 X'方向に働く流体力	50
5.1.2 X'方向に働く流体力（条件の拡張）	51
5.1.3 Y'方向に働く流体力	52
5.1.4 Y'方向に働く流体力（条件の拡張）	53
5.1.5 CFD で流れ場を可視化した考察	54
5.2 縦傾斜試験における実験結果と CFD 解析結果	58
5.2.1 クロスビームにかかる X'方向の流体力	58
5.2.2 クロスビームにかかる Z'方向の流体力	59
5.2.3 クロスビームにかかる Z'方向の流体力に関する考察	60
5.2.4 ナセルとクロスビーム結合体にかかる X'方向の流体力	65
5.2.5 ナセルとクロスビーム結合体にかかる Z'方向の流体力	66
5.2.6 X'方向、Z'方向の流体力（条件の拡張）	67
5.2.7 CFD で流れ場を可視化した考察	68
5.2.8 ナセルの Z'方向に働く流体力（CFD）	70
5.3 二軸傾斜（Pitch 角傾斜、Yaw 角傾斜）での CFD 計算	72
5.3.1 X'方向の流体力	72
5.3.2 Y'方向の流体力	74
5.3.3 Z'方向の流体力	76

6.CFD 計算の検証

6.1 単純形状による CFD 計算値の検証	78
6.2 実験模型と似た形状や翼形状での CFD 計算値の検証	81
6.3 突起物を取り付けた CFD 解析結果	83
6.4 ナセルとクロスビーム結合部の干渉による影響	85

7.実験値が CFD の計算結果と異なることの考察

7.1 抗力係数を考慮した実験値の検証	87
7.2 斜行試験の X'方向に対する考察	91
7.3 斜行試験の Y'方向に対する考察	95
7.4 縦傾斜試験の X'方向に対する考察	95
7.5 クロスビームの縦傾斜試験の X'方向に対する考察	97
7.6 クロスビーム及び結合体の縦傾斜試験の Z'方向に対する考察	99
7.7 CFD での流体力の算出結果に関して	99

8. 結論

8.1 結言	100
8.2 今後の課題	101

9. 参考文献

謝辞

【図一覧】

Fig. 1-1 日本の北緯 35 度、東経 135 度における地点別二酸化炭素濃度経年変化図[2]
Fig. 1-2 世界主要国の再生可能エネルギー導入量[3]
Fig. 1-3 日本の電源構成[3]
Fig. 1-4 日本の排他的経済水域[4]
Fig. 1-5 日本列島近海の海流[4]
Fig. 1-6 海流発電装置[7]
Fig. 1-7 双発タービン式と二重反転式の比較[8]
Fig. 1-8 C-Plane[11]
Fig. 1-9 二重反転式海流発電装置[13]
Fig. 1-10 海流発電装置「かいりゅう」実証試験の様子[14]
Fig. 1-11 6 自由度の定義
Fig. 1-12 姿勢変化時の物体固定座標
Fig. 2-1 SIMPLE アルゴリズム計算フロー
Fig. 2-2 投影面積の定義
Fig. 2-3 いろいろな形状に働く物体の抗力[18]
Fig. 2-4 笹島・田中の式で用いられる P と r の関係図[20]
Fig. 3-1 発電装置概要[21]
Fig. 3-2 海洋工学水槽造波機および実験場[21]

Fig. 3-3 斜行試験流体力計測の座標系
Fig. 3-4 正面から見る試験概要
Fig. 3-5 縦傾斜試験クロスビーム流体力計測の座標系
Fig. 3-6 縦傾斜試験双発式海流発電装置縦傾斜試験流体力計測の座標系
Fig. 4-1 ナセルおよびクロスビーム結合体
Fig. 4-2 解析領域
Fig. 4-3 解析格子全体メッシュ
Fig. 4-4 双発式海流発電装置模型周辺メッシュ
Fig. 4-5 双発式海流発電装置の表面付近での境界層メッシュ
Fig. 4-6 前面から見た双発式海流発電装置 y^+ 計算結果
Fig. 4-7 後面から見た双発式海流発電装置 y^+ 計算結果
Fig. 4-8 CASE1 境界層メッシュ
Fig. 4-9 CASE2 境界層メッシュ
Fig. 4-10 CASE3 境界層メッシュ
Fig. 4-11 CASE4 境界層メッシュ
Fig. 4-12 CASE1 速度コンター図
Fig. 4-13 CASE2 速度コンター図
Fig. 4-14 CASE3 速度コンター図
Fig. 4-15 CASE4 速度コンター図
Fig. 5-1 斜行試験における X方向の CFD と実験値、および摩擦力
Fig. 5-2 斜行試験における X方向の CFD (条件の拡張)
Fig. 5-3 斜行試験における Y方向の CFD と実験値、および摩擦力
Fig. 5-4 斜行試験における Y方向の CFD(条件の拡張)
Fig. 5-5 Yaw 角 80 度流れ後方ナセル圧力コンター図
Fig. 5-6 Yaw 角 90 度流れ後方ナセル圧力コンター図
Fig. 5-7 Yaw 角 0 度圧力コンター図
Fig. 5-8 Yaw 角 20 度圧力コンター図
Fig. 5-9 Yaw 角 40 度圧力コンター図
Fig. 5-10 Yaw 角 60 度圧力コンター図
Fig. 5-11 Yaw 角 80 度圧力コンター図
Fig. 5-12 Yaw 角 90 度圧力コンター図
Fig. 5-13 Yaw 角 0 度圧力コンター図
Fig. 5-14 Yaw 角 20 度圧力コンター図
Fig. 5-15 Yaw 角 40 度圧力コンター図
Fig. 5-16 Yaw 角 60 度圧力コンター図
Fig. 5-17 Yaw 角 80 度圧力コンター図

Fig. 5-18 Yaw 角 90 度圧力コンター図
Fig. 5-19 クロスビーム縦傾斜試験における CFD と実験値、X'方向の流体力
Fig. 5-20 クロスビーム縦傾斜試験における CFD と実験値、X'方向の流体力
Fig. 5-21 縦傾斜試験 5 度の傾きでのクロスビーム付近の流線
Fig. 5-22 縦傾斜試験 7 度の傾きでのクロスビーム付近の流線
Fig. 5-23 縦傾斜試験 10 度の傾きでのクロスビーム付近の流線
Fig. 5-24 縦傾斜試験 5 度の傾きでのクロスビーム付近の流速ベクトル図
Fig. 5-25 縦傾斜試験 7 度の傾きでのクロスビーム付近の流速ベクトル図
Fig. 5-26 縦傾斜試験 10 度の傾きでのクロスビーム付近の流速ベクトル図
Fig. 5-27 クロスビームの X 方向の流体力
Fig. 5-28 クロスビームの Z 方向の流体力
Fig. 5-29 典型的な翼形状の迎え角による抗力係数、揚力係数[29]
Fig. 5-30 後縁失速型の NACA4412 翼の抗力係数、揚力係数[30]
Fig. 5-31 縦傾斜試験 (Pitch 角) におけるナセルとクロスビーム結合体の X'方向に働く流
体力
Fig. 5-32 縦傾斜試験 (Pitch 角) におけるナセルとクロスビーム結合体の Z'方向流体力
Fig. 5-33 縦傾斜試験のナセルとクロスビーム結合体 X'方向に働く流体力 (CFD)
Fig. 5-34 縦傾斜試験のナセルとクロスビーム結合体 Z'方向に働く流体力 (CFD)
Fig. 5-35 Pitch 角 10 度速度コンター図
Fig. 5-36 Pitch 角 20 度速度コンター図
Fig. 5-37 Pitch 角 30 度速度コンター図
Fig. 5-38 Pitch 角 40 度速度コンター図
Fig. 5-39 Pitch 角 10 度圧力コンター図
Fig. 5-40 Pitch 角 20 度圧力コンター図
Fig. 5-41 Pitch 角 30 度圧力コンター図
Fig. 5-42 Pitch 角 40 度圧力コンター図
Fig. 5-43 ナセルの Z'方向に働く流体力 (CFD)
Fig. 5-44 縦傾斜試験ナセル圧力コンター図
Fig. 5-45 縦傾斜試験ナセル速度ベクトル図
Fig. 5-46 二軸傾斜での X'方向流体力
Fig. 5-47 一軸斜行試験 (Yaw 角) での X'方向流体力
Fig. 5-48 二軸傾斜での Y'方向流体力
Fig. 5-49 一軸斜行試験 (Yaw 角) での Y'方向流体力
Fig. 5-50 二軸傾斜での Z'方向流体力
Fig. 5-51 一軸傾斜縦傾斜試験 (Pitch 角) での Z'方向流体力
Fig. 5-52 一軸傾斜縦傾斜試験 (Pitch 角) での X'方向流体力

- Fig. 6-1 球体のジオメトリおよびメッシュ
- Fig. 6-2 円柱体（縦置き）ジオメトリおよびメッシュ
- Fig. 6-3 円柱体（横置き）ジオメトリおよびメッシュ
- Fig. 6-4 球体速度コンター図
- Fig. 6-5 円柱体（縦置き）速度コンター図
- Fig. 6-6 円柱体（横置き）速度コンター図
- Fig. 6-7 1:4 楕円体ジオメトリおよびメッシュ
- Fig. 6-8 1:2 楕円体ジオメトリおよびメッシュ
- Fig. 6-9 1:2 楕円速度コンター図
- Fig. 6-10 ナセル表面
- Fig. 6-11 ナセル裏面
- Fig. 6-12 突起物を考慮したモデル
- Fig. 6-13 ナセルとクロスビーム胴体結合部における圧力コンター図
- Fig. 6-14 ナセル部分のみの圧力コンター図
- Fig. 7-1 ナセル部分
- Fig. 7-2 ナセル部分メッシュ
- Fig. 7-3 ナセル部分流速コンター図
- Fig. 7-4 ナセル部分圧力コンター図
- Fig. 7-5 ナセル部分摩擦力コンター図
- Fig. 7-6 CFD 計算値を 3 倍した値と実験結果の X'方向に働く流体力
- Fig. 7-7 CFD 計算値を 0.7N した値と実験結果の X'方向に働く流体力
- Fig. 7-8 コネクターおよび突起物がついたナセルおよびクロスビーム結合体（表面）
- Fig. 7-9 コネクターおよび突起物がついたナセルおよびクロスビーム結合体（裏面）
- Fig. 7-10 ナセルおよびクロスビーム流速ベクトル図
- Fig. 7-11 流入流速方向がナセルの側面にあたる方向の実験と CFD の X'方向流体力
- Fig. 7-12 実験と CFD を三倍した時の Y'方向流体力
- Fig. 7-13 坂田の実験で計測したと考えられる X'方向の図
- Fig. 7-14 縦傾斜試験で X'方向に働く流体力
- Fig. 7-15 クロスビームを取付を間違っただけの図
- Fig. 7-16 クロスビームにかかる X'方向の流体力の係数
- Fig. 7-17 分力計が取り付けられた場合の CFD

※一般的に論文等で流速分布や圧力分布を書く際は流速分布なら流入流速で割った無次元量のコンター図を、圧力分布なら岐点圧で割った無次元のコンター図を描くべきである。しかし、今回は実験の有次元量の単位[N]と比較するためそのまま有次元で示している。

【表一覧】

Table 1-1 海流圧電装置主項目

Table 2-1 流体の特性

Table 2-2 計算条件まとめ

Table 3-1 実機と実験模型との比較[21]

Table 3-2 実験試験概要[21]

Table 4-1 模型寸法[21]

Table 4-2 解析領域寸法

Table 4-3 境界層格子依存性検証パターン

Table 4-4 流れ方向格子依存性検証パターン

Table 6-1 単純形状の抗力係数

Table 6-2 その他の形状での抗力係数

Table 6-3 それぞれの部材に働く流体力

Table 7-1 ナセルとクロスビーム結合体の抗力係数

Table 7-2 クロスビーム部分の抗力係数

Table 7-3 ナセル部分の抗力係数

Table 7-4 コネクター高さによる流体力の検証

1. 序論

本章では海流発電装置の研究に至るまでの社会的背景や海流発電装置などの概要について述べる。

1. 1 研究背景

現在地球では産業革命、緑の革命以後の爆発的な人口増加によって人々の生活が劇的に向上した。しかし、その副作用として大気中の二酸化炭素濃度の上昇による地球温暖化が問題視されている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)によると南極を除くすべての大陸域において 20 世紀半ば以降の地上気温の上昇に人為的起源強制力が寄与していた可能性が高く、今世紀末の世界気温変化は RCP シナリオによれば 0.3~4.8°C の範囲、平均海面水位の上昇は 0.26~0.82m の範囲となる可能性が高く世界的広範囲での水没が予想される。また、世界平均地上気温の変化予測について温室効果ガス削減の程度に応じて 4 つのシナリオ (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5) を提示しているが、いずれのシナリオにしても 1 度以上の気温上昇が考えられ、異常気象や食糧生産の減少、生物多様性の損失など様々な影響が懸念されている [1]。

当然先進国の日本においても同様に二酸化炭素濃度の上昇が見られ(Fig. 1-1)、海拔の低い地域の水没懸念や害悪な外来種の到来などが懸念されている。

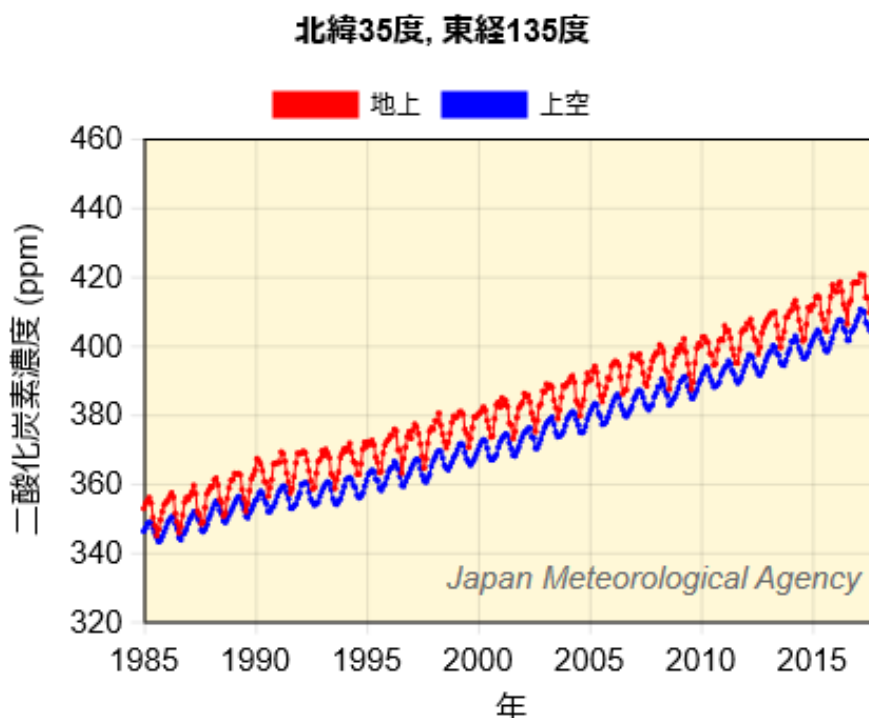


Fig. 1-1 日本の北緯 35 度、東経 135 度における地点別二酸化炭素濃度経年変化図[2]

1. 2 再生可能エネルギー

二酸化炭素の温室効果ガスを削減しようと低炭素化社会実現への取り組みが世界的に進められている。この二酸化炭素を削減するための手段の1つとして再生可能エネルギーの開発が挙げられ、太陽光、風力、地熱、水力、バイオマス、海洋エネルギー等があり飛躍的に導入が進められている。ノルウェーやロシアなどは地形の利を生かし世界に先駆けて水力発電が積極的に進められている。(Fig. 1-2) それに対し、エネルギー白書によると世界の主要国の中で日本は再生可能エネルギー導入量が第6位と高いが、国内での電源構成は化石燃料に頼っており、いまだ再生可能エネルギーが主流とはなっていない。(Fig. 1-3) また、日本では東日本大震災以後、原子力発電での国内使用は控えられる傾向にあり、代替となるエネルギーの必要性が高まっている。

国内では固定価格買取制度が設けられ、再生可能エネルギーの設備を導入した時点でその設備から供給されるエネルギーの買い上げ価格を一定期間保障する方式がとられており、再生可能エネルギーの普及を後押ししている。しかし、海流発電をはじめ再生可能エネルギーには初期コストが莫大な額になるケースが多く、採算性の問題を解決するには至っていない。

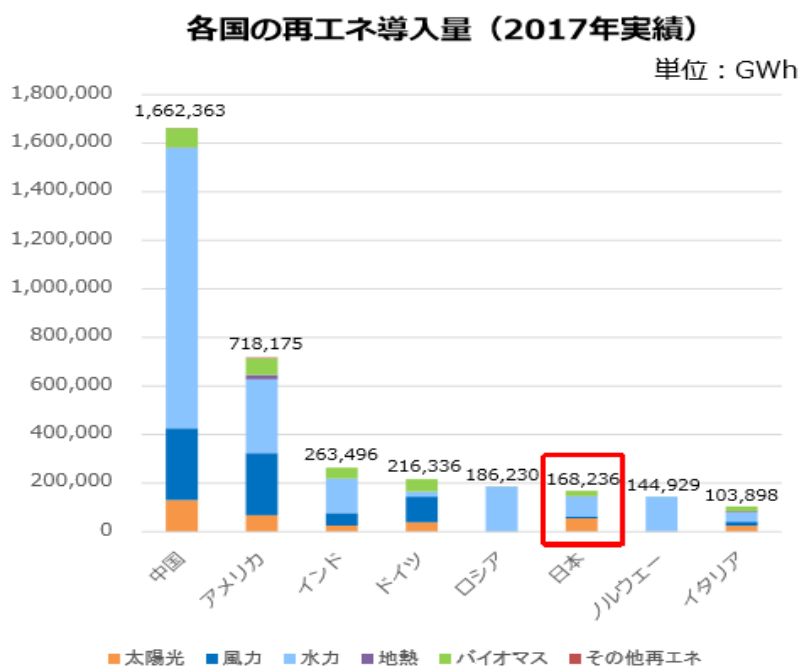


Fig. 1-2 世界主要国の再生可能エネルギー導入量[3]

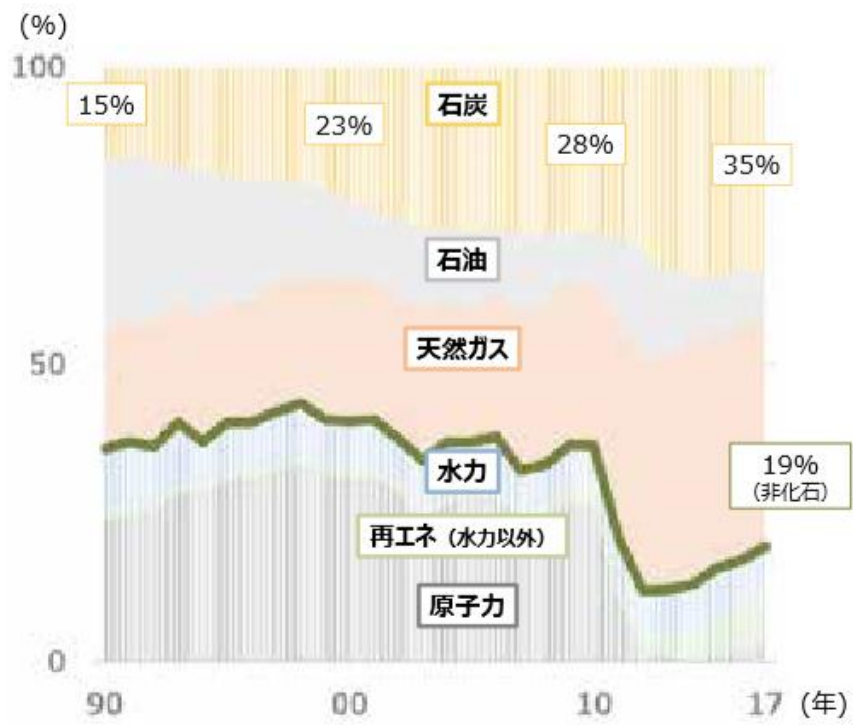


Fig. 1-3 日本の電源構成[3]

1. 3 日本における海洋資源利用の有効性

日本は広大な排他的経済水域を有しており、さらに日本近海には世界有数の強い海流として知られている黒潮が流れている。また、国土面積が約 38 万km²であるのに対して排他的経済水域は沖ノ鳥島、南鳥島、小笠原諸島などの離島を数多く有することで約 405 万km²もある(Fig. 1-4)。国土面積の 10 倍以上を有する海洋の資源を利用していくべきである。

経済産業省と石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) は海底にある鉱物資源を船で大量採掘することに世界で初めて成功している。また、沖縄県近海では海底から熱水とともに噴出した金属が堆積してできる海底熱水鉱床の存在が確認されており、国産資源としての期待が高まっている。

日本近海には水産物だけでなく、それらを賢く利用するとともに、近年激化している中国や韓国などの隣国からの密漁や盗掘に備える必要がある。



Fig. 1-4 日本の排他的経済水域[4]

1. 4 黒潮について

地球規模で起きる表層の海水の流れに海流がある。海流は海面上の風が海面に摩擦力を作用させることによって生じる流れである。日本沿岸の代表的な海流である黒潮は惑星 β 効果による湾岸強化流の影響を受けて、台湾沖で流速を増し、琉球列島の北側を通り、トカラ海峡を抜けて九州、四国、東海の沖を通過して太平洋上に流れていく。(Fig. 1-5) 黒潮の幅は日本近海では100km程度、深さ500m程度の流れで最大流速は2.0m/s~2.5m/sに達することもあり、非常に高いポテンシャルを秘めている。また、黒潮の流速は通常海面から深さ200m付近までの間で最大となる。

黒潮は鉛直構造を持っているため水深が深くなるにつれて流速が遅くなる。そのためタービンが水面に比較的近いところで行われるのが望ましいとされている。



Fig. 1-5 日本列島近海の海流[4]

1. 5 海流発電装置について

1.5.1 海流発電措置概要

古くには海流発電装置のコンセプトとして海底着底式が挙げられた。しかし、5キロで40億円とも言われている送電線にかかるコストや海底に設置するコストを考えると非常に困難である。そこで係留索を用いた浮遊式のシステムが考案されている。(Fig. 1-6)

双発タービン式海流発電装置は黒潮の1.5[m/s]程度の流速から、1MWの出力を得ることを想定している。主要目をTable 1にまとめている。浮遊式であるこのコンセプトは海流から受けるスラスト力と海流発電装置本体の浮力のバランスによって、係留角を一定に保っている。スラスト力に関してはタービンのピッチ角を変化させ、浮力に関してはナセル内部にあるバラスト水を調整することで浮体姿勢を維持している。浮遊することで海底にたてたポールに設置する形式や大きな浮体からぶら下げる形式よりも小型軽量化することが可能であり、より低コストでも発電量を得られる仕組みになっている。

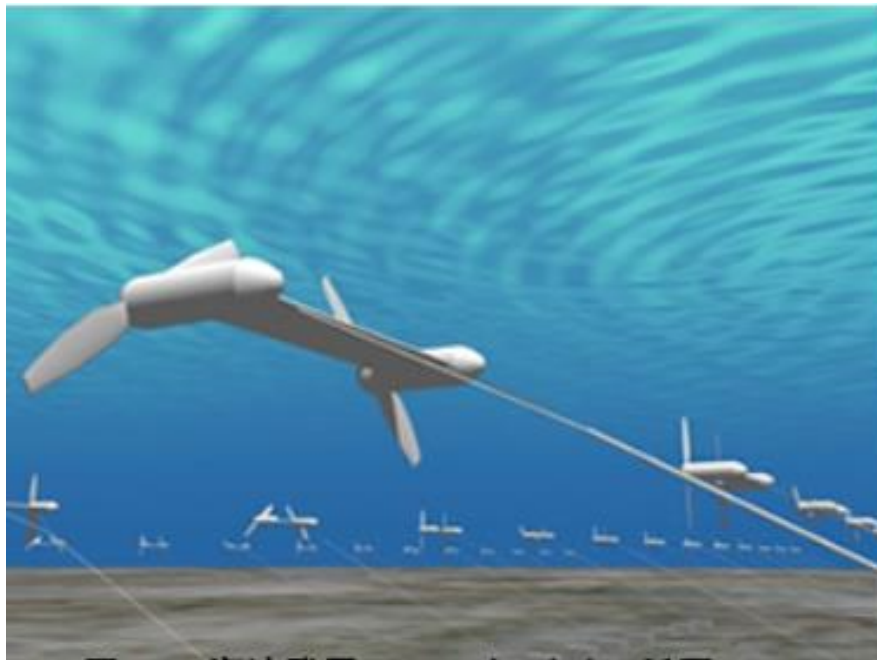


Fig. 1-6 海流発電装置[7]

Table 1-1 海流発電装置主項目

主要目	数値
タービン直径	40m
ナセル長さ	20m
ナセル直径	6m
クロスビーム長さ	40m
定格出力	1MW×2
定格流速	1.5m/s(3ノット)

1.5.2 双発タービン式と二重反転式の海流発電装置

海流発電装置は流れから受けるトルクを打ち消すために二重反転式と双発タービン式の主に二つの方式が考えられてきた。(Fig. 1-7) 二重反転式は同軸に逆回転するタービンがついておりそれによってトルクを打ち消している。双発タービン式は二つのナセルを一つのクロスビームが連結している構造になっており、左右のタービンが逆回転することでトルクを打ち消している。東京大学では二重反転式においては数値シミュレーションと1/60スケールの模型を用いた水槽試験などが行われてきた[8]が、二重反転式は故障リスクが高いなどの理由から、シンプルな構造を持つ双発タービン式海流発電装置の研究開発が進められている。

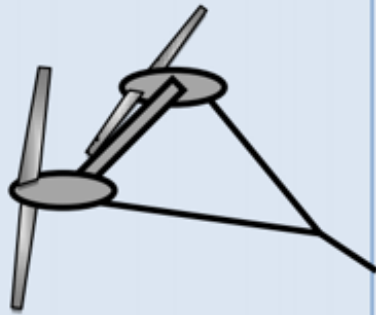
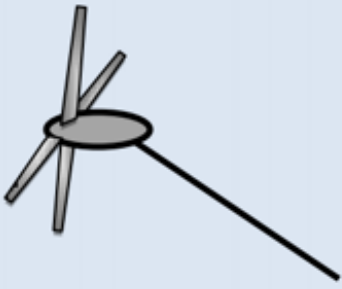
	双発タービン式	二重反転式
模式図		
特徴	クロスビームを介しているため大型になる。 シンプルな構造である。	小型で軽量である。 同軸に逆回転するタービンがついている。 前後タービンによる干渉が起こる。

Fig. 1-7 双発タービン式と二重反転式の比較[8]

1. 6 先行研究

1.6.1 海流発電装置の成り立ち

海流発電の研究開発は黒潮と並び世界最大の海流とされているメキシコ湾流を想定したアメリカのフロリダアトランティック大学のグループが先行して実施してきた。[9] 'C-Plane'という双発型の発電装置を設計し(Fig. 1-8)、1/30 のスケール模型による実験や数値解析を通して研究開発を進めている。この研究によりピッチ角の調整による姿勢制御に成功し、有効性を示している。

東京大学では二重反転式においては数値シミュレーションと 1/60 スケールの模型を用いた水槽試験により技術的成立性の検討[10]や、タービンブレードのピッチコントロールによる姿勢制御に関する研究[11] が行われてきた。(Fig. 1-9)

双発タービン式においては二重反転式と同様に数値シミュレーションを用い、坂田は曳航試験により流向変化時にかかる流体力を微係数としてシミュレーションの中に組み込んだ[21]。また、五之治は異常時における発電装置の動的挙動に関する研究[12]を行った。1/50 スケールの模型を用いた水槽試験により浮遊式の海流発電装置であっても流速、流向変化、故障時を模擬した試験を行い一様流中で安定的に係留でき、急激に流速変化をさせた場合でも不安定な挙動は見られないことが結論付けられている。



Fig. 1-8 C-Plane[11]

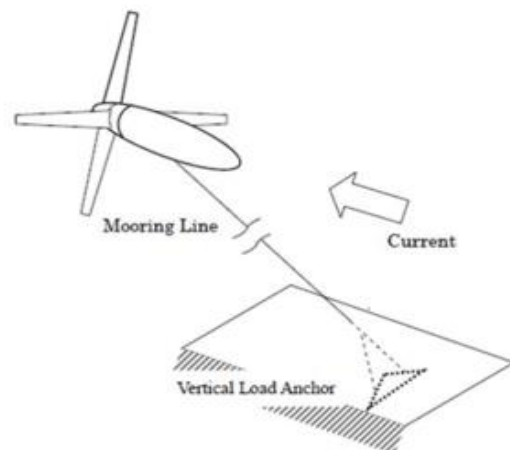


Fig. 1-9 二重反転式海流発電装置[13]

1.6.2 実機の海流発電装置の実証試験

実機スケールでの実証試験としては国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)と株式会社 IHI は 100kW 級実証機「かいりゅう」を制作し(Fig. 1-10)、2017 年 8 月に鹿児島県十島村口之島沖にて曳航試験及び実証実験を通じての発電性能や姿勢制御システムの検証など実機スケールでの実証試験を行っている。[14]。また、2019 年には 1 年以上の長期にわたり発電能力や設備の耐久性、経済性などの検証を行うために、想定海域における環境変化の調査、系統接続のための調査などを行う実証実験を実施した。

しかし、「かいりゅう」のような非常に大掛かりな実証試験を行うためには多くのコストや技術的な障壁がかかる。そのため、シミュレーションによって過渡状態などの異常時の対応や定期的なメンテナンスなど多角的な事象に対応する必要がある。

矢作は CFD を用いた研究では海流発電装置の流体力にもっとも影響を与えるブレードの部分において 1/50 スケールでの流体力計測実験を行っている。その結果と比較し、一様流れ中での CFD の有効性を示すとともに、実際の海の流れを考慮したせん断流条件下において CFD での解析を行っている。[15]



Fig. 1-10 海流発電装置「かいりゅう」実証試験の様子[14]

1.7 自由度の定義

6自由度の定義は Fig. 1-11 のようになっている。斜行試験は Yaw 角傾斜を、縦傾斜試験は Pitch 角傾斜を表している。また x, y, z 軸まわりの傾斜運動に関してはそれぞれ Roll, Pitch(Φ), Yaw(θ)と定義する。ただし、本研究において Roll 運動は行っていないため角度の定義は行っていない。Fig. 1-12 では姿勢変化時における物体固定座標の X' 軸、Y' 軸、Z' 軸を示した。

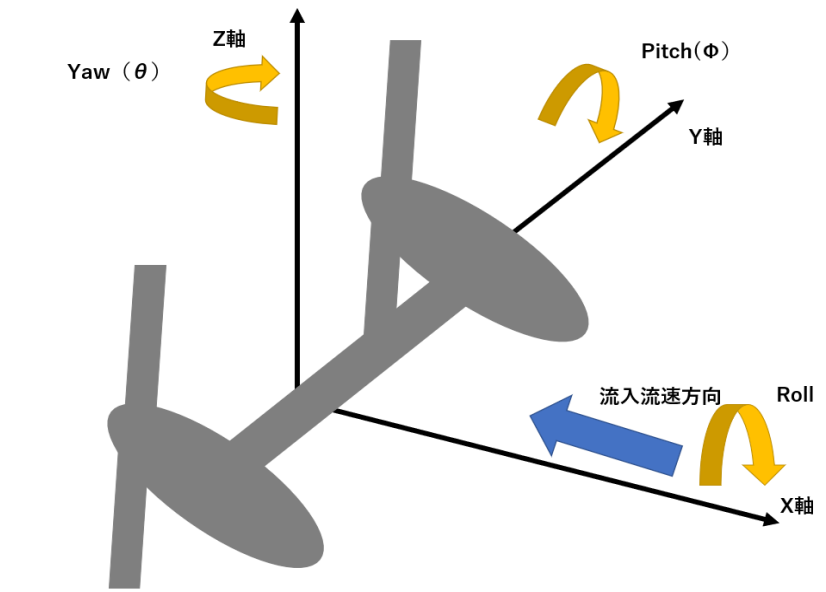


Fig. 1-11 6自由度の定義

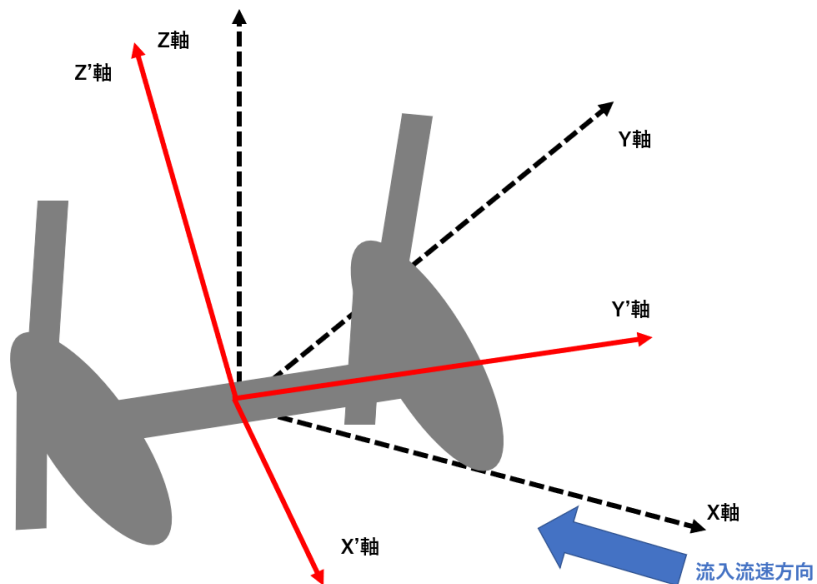


Fig. 1-12 姿勢変化時の物体固定座標

1. 8 研究の目的

海流発電装置には海流によって流体力を受ける。海流発電装置は常に黒潮の流れの方向に対して流体力を受けるわけではなく、気象条件や係留索の破断時などの過渡状態において流向変化を伴って海流の力を受ける。本研究では流向変化時に海流発電装置がどのような力を受け、角度によってどのような傾向があるのか、CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いることで流向変化が発電機に及ぼす影響の考察をする。流れ場の可視化などで実験では見られない多くの情報を得ることができる。

また、本研究では双発式海流発電装置の胴体部分であるナセルおよびクロスビームの流体力について評価した。坂田[21]が行った流向変化時に受けるナセルおよびクロスビームの流体力の実験結果と CFD の計算結果を比較し、その妥当性を検証する。また、実験では-60 度から 60 度までしか再現できなかった斜行試験の大きな Yaw 角 (-90 度～90 度) の場合の流体力、同様に実験では-20 度から 20 度までしか再現できなかった縦傾斜試験の大きな Pitch 角 (-45 度～45 度) の場合の流体力を CFD 計算によって求める。また、二軸傾斜での流体力を CFD で求め、その傾向を考察するのが目的である。

第 2 章 理論および数値計算

本章では数値流体力学 CFD(Computational Fluid Dynamics)で用いられる理論について述べる。本研究では CFD ソルバーとして、ANSYS 社の Fluent ver.18.2 を用いた。[16]

2.1 数値流体力学 CFD[16][17]

数値流体力学 CFD(Computational Fluid Dynamics)はコンピュータによるシミュレーションを用いて、流れ場の支配方程式であるナビエ・ストークス方程式を数値的に解く手法である。ナビエ・ストークス方程式で流れ場を表現するので、3次元影響や粘性による影響を考慮でき、流れ場の可視化など実験からは得られない情報も数多く得ることができる。

乱流により同時に複雑に作用する広範囲の長さや時間スケールを持つ渦の乱れを解析するためには主にレイノルズ平均モデル RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation)、LES (Large Eddy Simulation)、直接数値解析 DNS (Direct Numerical Simulation) などの3つの手法が用いられる。

RANS は流れ場の基礎式に対して、時間的平均を施した方程式を解くことによって解を得る方法である。適度な精度の流れの計算に必要な計算機リソースに制限があるため、工学・工業的な応用分野において広く利用されている。

このモデルでは時間平均操作を行うため瞬時の変動に含まれる流れ状態に関連する詳細な情報は失われてしまう。

LES では、流れ場の変動や形状などに依存し流れ場を特徴づける大規模な流れ場や乱流渦は直接解像する Grid-Scale 成分 (GS 成分) とし、普遍性の期待できる解析格子サイズよりも小さな乱流渦のみ Sub-Grid-Scale 成分 (SGS 成分) としてモデル化を行う手法である。非定常の流れの式を解かなければならないため、計算メモリの容量と計算量の観点から、計算機リソースへの要求は高くなる。複雑な形状をもつ数値流体力学の問題に対する取り組みは始まりつつあるが主流とはなっていない。

DNS は平均流れとすべての乱流速度変動を計算する。非常に細かい空間の乱流格子上において最も早い変動周期を解像するために十分に最も小さい時間刻みを用いて非定常のナビエ・ストークス式を解いている。

一説には推奨格子数としてレイノルズ数の 2.25 乗程度が必要とされているため、今回の海流発電タービン周りの流れ場のような、莫大な計算コストがかかる大規模乱流解析を行うことは非現実的である。

本研究では微細な乱流スケールによる変動ではなく、一様流において発電装置が受ける力を推定しているため、3次元的影响を考慮できる RANS による CFD 計算を行った。

2.2 質量保存方程式および運動量保存方程式[16]

質量保存方程式（連続の式）は、以下のように書ける。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2.2.1)$$

ここで ρ は流体の密度、 \vec{v} は流体の速度であり、 S_m はユーザ定義のソース項である。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.2.2)$$

ここで、 p は静圧、 $\bar{\tau}$ は応力テンソル、 $\rho \vec{g}$ と \vec{F} はそれぞれ重力体積力と外部体積力である。

応力テンソルは以下で与えられる。

$$\bar{\tau} = \mu [(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} I \quad (2.2.3)$$

I は単位テンソルである。

2.3 レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式[16]

レイノルズ平均では、瞬間的なナビエ・ストークス方程式における変数を、平均成分と変動成分に分解する。速度成分に関しては、

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad (2.3.1)$$

$\bar{\mathbf{u}}$ は平均速度成分、 \mathbf{u}' は変動速度成分である。

同様にして、圧力などのスカラー量も、

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.3.2)$$

と分解できる。

変数に関するこれらの式を、瞬間的な質量保存方程式と運動量保存方程式に代入し、それを

時間平均することで、レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式 (RANS 方程式) を得ることができる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.3.4)$$

レイノルズ平均されたナビエ・ストークス方程式では、速度やその他の解変数はアンサンブル平均されたものになっている。ここで、乱流の影響を表す付加的な項である、 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ が現れている。この項をレイノルズ応力と呼び、式(2.7)を閉じるためにはモデル化が必要である。そこで、レイノルズ応力を平均速度勾配に関係づける式(2.8)に示されるブジネスクの仮説を採用する。

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \delta_{ij} \quad (2.3.5)$$

2.4 乱流モデルの選択

本研究における計算では、乱流モデルとして SST $k-\omega$ モデルを採用した。SST $k-\omega$ モデルは境界層の内層では $k-\omega$ モデルを、境界層の外層では高レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルを用いるというハイブリッドモデルである。

幅広い流れ（逆圧力勾配流れ、航空機の翼、遷音速衝撃波など）で信頼性の高い予測ができると考えられ一般的によく用いられているモデルである。また、実験におけるレイノルズ数が8万程度と低く、剥離などの現象の解析に適していると考えたからである。

2.5 Menter の SST $k-\omega$ モデル[16]

SST $k-\omega$ モデルにおける乱流運動エネルギー k と比散逸率 ω の輸送方程式は以下の通りで

ある。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.5.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.5.2)$$

ここで、 G_k は平均速度勾配による運動エネルギーを、 G_ω は ω の発生を表している。

Γ_k と Γ_ω は k と ω の有効拡散係数である。 Y_k と Y_ω は k と ω の散逸を表す項である。 D_ω は k - ω モデルと k - ϵ モデルをあわせて内挿するためのクロス拡散項である。また、 S_k と S_ω はユーザ定義のソース項である。

有効拡散係数は以下の通りに計算される。

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.5.3)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (2.5.4)$$

このとき、 σ_k と σ_ω はそれぞれ k と ω の乱流プラントル数である。

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k,2}}} \quad (2.5.5)$$

モデル定数として $\sigma_{k,1}=1.176$ 、 $\sigma_{\omega,1}=2.0$ 、 $\sigma_{k,2}=1.0$ 、 $\sigma_{\omega,2}=1.168$ である。

式中の内挿関数 F_1 は

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (2.5.6)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega}^+ y^2} \right] \quad (2.5.7)$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (2.5.8)$$

式中の y は壁面表面までの距離、 D_{ω}^+ はクロス拡散項の正部分である。

クロス拡散項 D_{ω}^+ は以下のように定義される。

$$D_{\omega} = 2(1 - F_i) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial z_j} \quad (2.5.9)$$

また、乱流粘性係数 μ_t は次のように計算される。

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (2.5.10)$$

S はひずみ速度の大きさであり、係数 α^* は低レイノルズ数効果を反映し、乱流粘性係数を減衰させる役割を持つ。

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (2.5.11)$$

$$\alpha^* = \alpha_{\infty}^* \left(\frac{\alpha_0^* + \frac{Re_t}{R_k}}{1 + \frac{Re_t}{R_k}} \right) \quad (2.5.12)$$

ここで $Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}$

$$R_k = 6 \quad (2.5.13)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (2.5.14)$$

$$\beta_i = 0.072 \quad (2.5.15)$$

また、内挿関数 F_2 は次のように定義される。

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (2.5.16)$$

$$\Phi_1 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (2.5.17)$$

G_k 項は乱流運動エネルギーの生成を表している。

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.5.18)$$

G_ω 項は比散逸率 ω の生成を表している。

$$G_\omega = \frac{\alpha \alpha^*}{\nu_t} G_k \quad (2.5.19)$$

係数 α は

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + \frac{Re_t}{R_\omega}}{1 + \frac{Re_t}{R_\omega}} \right) \quad (2.5.20)$$

このとき、 $R_\omega = 2.95$ である。

$$\alpha_\infty = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (2.5.21)$$

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{k^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (2.5.22)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{k^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (2.5.23)$$

このとき $k=0.41$ 、 $\beta_{i,1} = 0.075$ 、 $\beta_{i,2}=0.0828$ である。

Y_k 項は次式となる。

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (2.5.24)$$

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_t)] \quad (2.5.25)$$

$$\beta_i^* = \beta_{\infty}^* \left(\frac{\frac{4}{15} + \left(\frac{Re_t}{R_{\beta}}\right)^4}{1 + \left(\frac{Re_t}{R_{\beta}}\right)^4} \right) \quad (2.5.26)$$

このとき、

$$\zeta^* = 1.5, R_{\beta} = 8, \beta_{\infty}^* = 0.09$$

である。

Y_{ω} 項は次式の通りである。

$$Y_{\omega} = \rho \beta \omega^2 \quad (2.5.27)$$

$$\beta = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (2.5.28)$$

$F(M_t)$ は圧縮性の影響を表す圧縮関数というものであるが、一般的な用途には用いられず
今回も無効として設定した。

$$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases} \quad (2.5.29)$$

ここで、 M_t 乱流マッハ数であり、 a は音速である。

$$M_t^2 \equiv \frac{2k}{a^2} \quad (2.5.30)$$

$$M_{t0} = 0.25 \quad (2.5.31)$$

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.5.32)$$

2.6 物性値および計算スキーム

Table 2-1 は外部流体領域における水の特性値を示した。Table 2-2 は計算スキームを示した。計算スキームは一般的に解に安定性があるとされているものを用いている。

今回の離散スキームでは乱流運動エネルギー k と比散逸率 ω では一次精度風上差分法を用いている。二次精度などの高次精度に比べてパラメーターの偽拡散によって高精度で表現できないなどの欠点がある。

しかし、一般的に解に安定性がありよく用いられていることに加えて、本研究の流体力計算において二次精度で計算する検証を行い、一次精度とほとんど誤差が見られない値が得られていたため一次精度を用いている。

Table 2-1 流体の特性

流体	水	単位
温度	20	°C
密度	998	kg/m ³
粘度	0.001003	Pa · s

Table. 2-2 計算条件まとめ

解法	陰解的定常/非定常
粘性モデル	SST-k- ω モデル
圧力-速度連成手法	SIMPLE 法
勾配計算	Least Squares Cell Based
離散スキーム	圧力/二次精度風上差分
	運動量/二次精度風上差分
	k/一次精度風上差分
	ω /一次精度風上差分

2.7 SIMPLE 法について

SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) はスタaggerド格子において圧力の計算を行うための推測と補正の手順である。初期値 $p^*u^*v^*\Phi^*$ を推定しアルゴリズムで補正計算を行っていく。

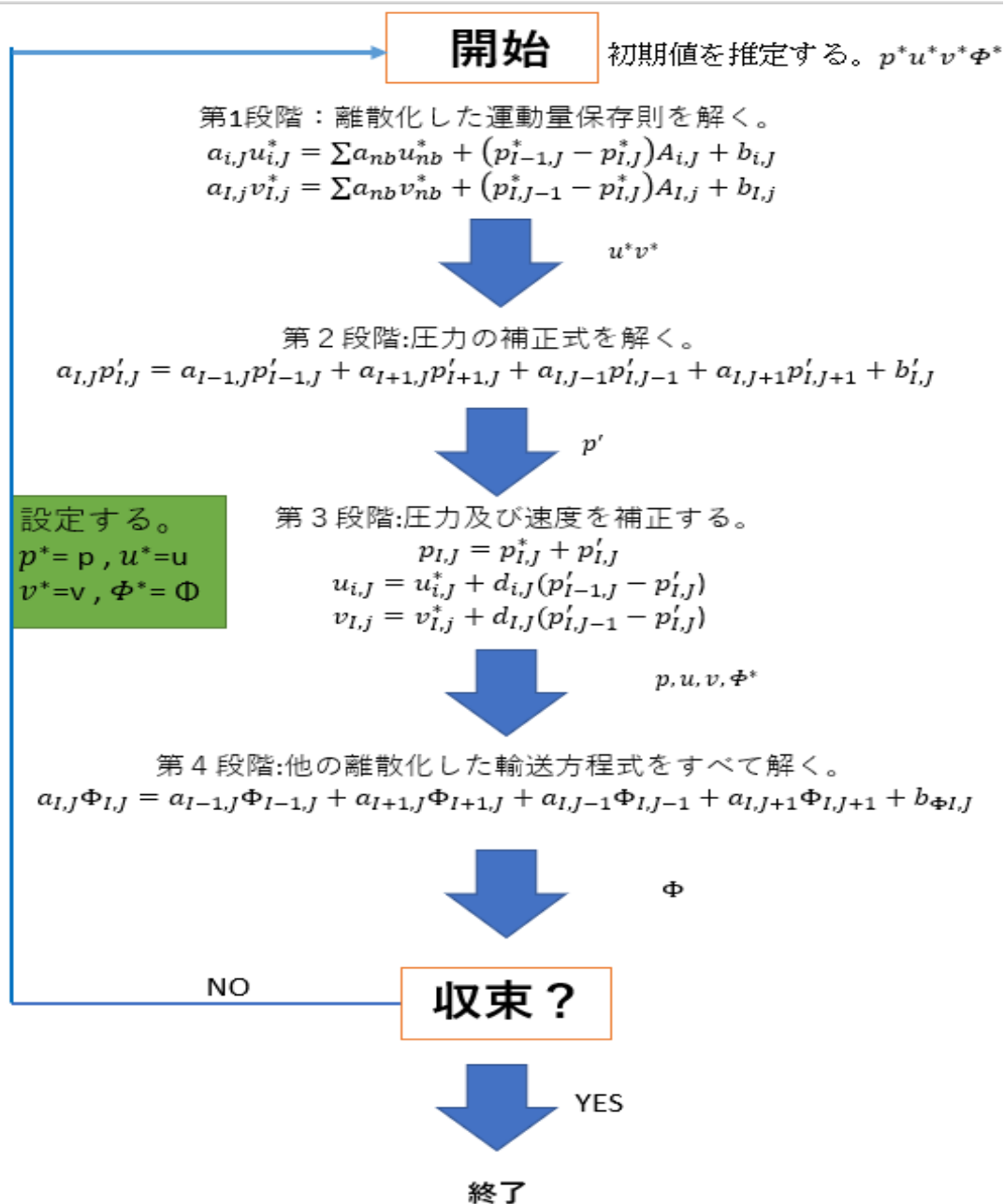


Fig. 2-1 SIMPLE アルゴリズム計算フロー

2.8 物体に働く流体力

物体に働く流体力は X', Y', Z' 各々について下のように表せられる。

$$X' = \frac{1}{2} \rho C_{x'} S U^2 \quad (2.8.1)$$

$$Y' = \frac{1}{2} \rho C_{y'} S U^2 \quad (2.8.2)$$

$$Z' = \frac{1}{2} \rho C_{z'} S U^2 \quad (2.8.3)$$

X' : X' 方向の物体に働く流体力

Y' : Y' 方向の物体に働く流体力

Z' : Z' 方向の物体に働く流体力

ρ : 流体の密度

$C_{x'}$: X' 方向の流体力の係数

$C_{y'}$: Y' 方向の流体力の係数

$C_{z'}$: Z' 方向の流体力の係数

S : 流れ方向正面の投影面積(Fig. 2-2)

U : 流入流速

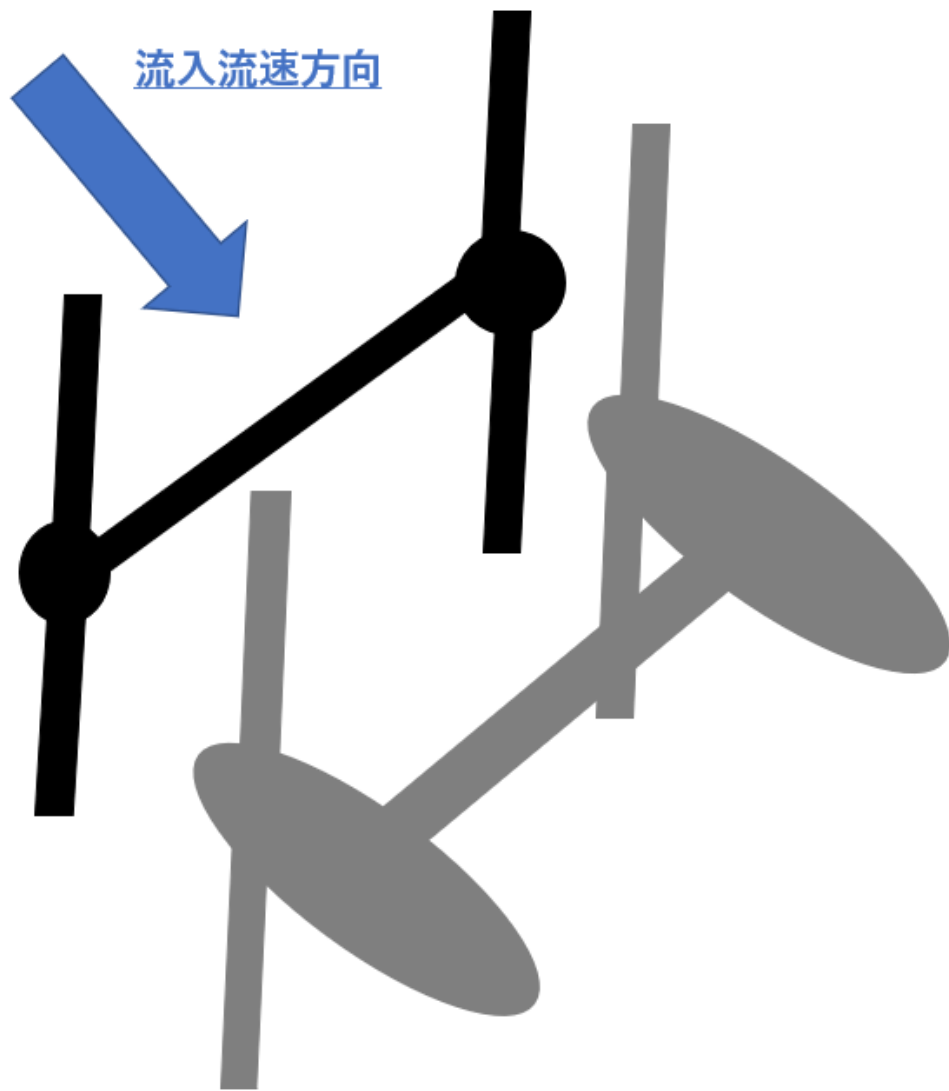


Fig. 2-2 投影面積の定義

表 8.8.2 種々の物体の抗力係数

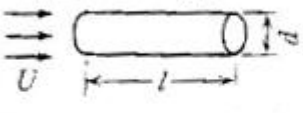
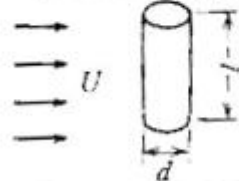
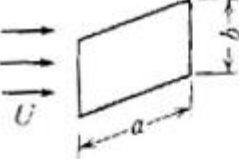

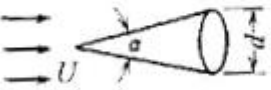
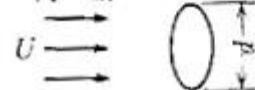
物 体	寸法の割合	基準面積 A	抗力係数 C_D
円柱 (流れの方向) 	$l/d=1$	$\frac{\pi}{4}d^2$	0.91
	2		0.85
	4		0.87
	7		0.99
円柱 (流れに直角) 	$l/d=1$	dl	0.63
	2		0.68
	5		0.74
	10		0.82
	40		0.98
	∞		1.20
長方形板 (流れに直角) 	$a/b=1$	ab	1.12
	2		1.15
	4		1.19
	10		1.29
	18		1.40
	∞		2.01
半球 (底なし) 	I (凸)	$\frac{\pi}{4}d^2$	0.34
	II (凹)		1.33
円錐 	$\alpha=60^\circ$	$\frac{\pi}{4}d^2$	0.51
	$\alpha=30^\circ$		0.34
円板 		$\frac{\pi}{4}d^2$	1.2

Fig. 2-3 いろいろな形状に働く物体の抗力[18]

Fig. 2-3 はレイノルズ数 $10^4 \sim 10^6$ で、抗力係数が一定になったところの値である。平板で抗力係数は 1 よりも大きく、流線形のような物体に近づくにつれて剥離を防ぎ抗力が小さくなる。実験で用いた双発式海流発電装置は全体として凸形状の半球付き円柱に形状が似たナセルに楕円断面の形状のクロスビームが真ん中にくっついた形となっているため抗力係数が同じ投影面積を持つ平板よりも小さくなることが予測される。

2.9 摩擦抵抗の推定

流体力の摩擦成分を推定する。'C'クロスビーム、'N'はナセルを表している。

$$X = X_N + X_C \quad (2.9.1)$$

$$Y = Y_N + Y_C \quad (2.9.2)$$

$$Z = Z_N + Z_C \quad (2.9.3)$$

ナセルにおいては MMG モデルの推定法[19]を用いている。船舶における抵抗値や斜行角による流体力の変化を実験等を通じて得られた推定法である。

$$X'_N = \frac{1}{2} C'_{XN} \rho L d U^2 \quad (2.9.4)$$

$$Y'_N = \frac{1}{2} C'_{YN} \rho L d U^2 \quad (2.9.5)$$

$$C'_{YN} = Y'_\beta \beta \quad (2.9.6)$$

$$C'_{XN} = X'_{uu} \cos^2 \beta \quad (2.9.7)$$

$$X'_{uu} = \frac{1}{2} C_f \rho S U^2 \quad (2.9.8)$$

$$C_f = (1 + k) C_{fa} \quad (2.9.9)$$

$$C_{fa} = 0.463 (\log_{10} R_n)^{-2.6} \quad (2.9.10)$$

$$k = \sqrt{\frac{\nabla}{L^3} \left(2.2 C_b + \frac{P}{C_f} \right)} \quad (2.9.11)$$

$$r = \frac{\frac{B}{L}}{\{1.3(1 - C_b) - 3.1 l_{cb}\}} \quad (2.9.12)$$

$$Y'_\beta = \frac{1}{2}\pi j + 1.4C_b \frac{B}{L} \quad (2.9.13)$$

$$j = \frac{L}{d} \quad (2.9.14)$$

各パラメーターは以下のようにになっている。

ρ	水密度
L	船長
β	偏角
S	浸水面積
U	流入速度
Cf	全抵抗係数
Cfa	摩擦係数
k	形状影響係数
∇	排水面積
P	rを用いて推定した値
l_{cb}	浮心の前後位置
R_n	レイノルズ数
C_b	方形係数
B	船幅

摩擦抵抗についてはシェーンヘルの公式を用いた。さらに形状影響係数の推定は笹島・田中の式を採用した。その際の P と r の関係図を示す。

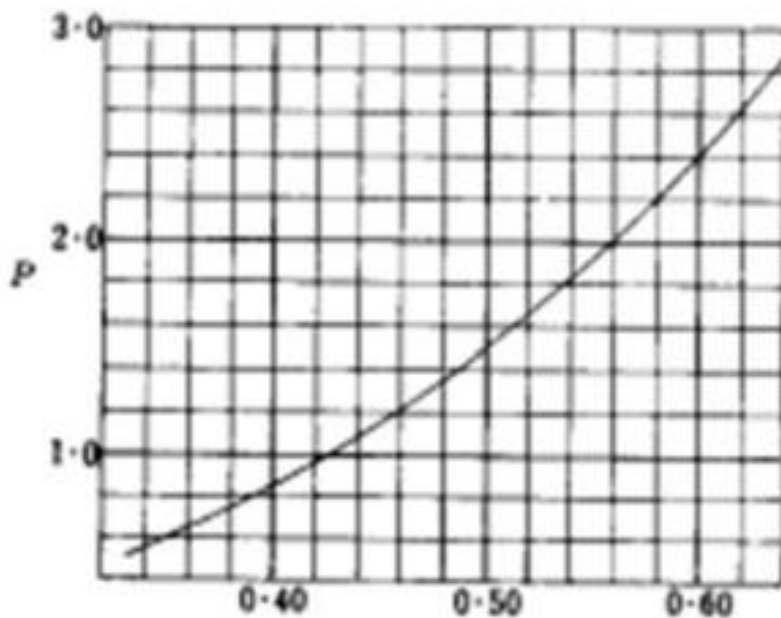


図 51 P と r の関係図

Fig. 2-4 笹島・田中の式で用いられる P と r の関係図[20]

クロスビームに働く摩擦力も同様にシェーンヘルの式を用いて算出している。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_{fa} S_c U^2 \quad (2.9.15)$$

$$C_{fa} = 0.463 (\log_{10} R_n)^{-2.6} \quad (2.9.16)$$

S_c : クロスビーム排水面積

第3章 実験概要[21]

※2013年度東京大学の修士論文の中で坂田が『双発タービン式海流発電装置運動シミュレータで用いられる流体力に関する研究』で行った実験について述べる。模型などは実物が残っており大きさを記録することは出来たが、生データが残っていないため実験値は修士論文のプロット図を読み取って使用している。

3. 1 概要

双発タービン式海流発電装置模型を作成し、計測を行った。流体力試験においては浮体部にかかる力を計測するため固定治具を用い Z 軸周り, Y 軸周りに流れに対する浮体の角度を変化させた。以下に実験で用いた模型, 機材について記述する。

3. 2 発電装置および実験その他の器具・実験場所

3.2.1 発電装置概要

実験で用いた発電装置模型は実機の約 1/50 スケールのものである。(ナセルの流れ方向の長さ) 実験装置のナセル長さは 0.4m、幅は 0.1m である。またクロスビームは長さ 0.1m、幅 0.956m である。発電装置模型概要を Fig. 3-1 に、実機とのスケール比較表を Table3-1 に示す。

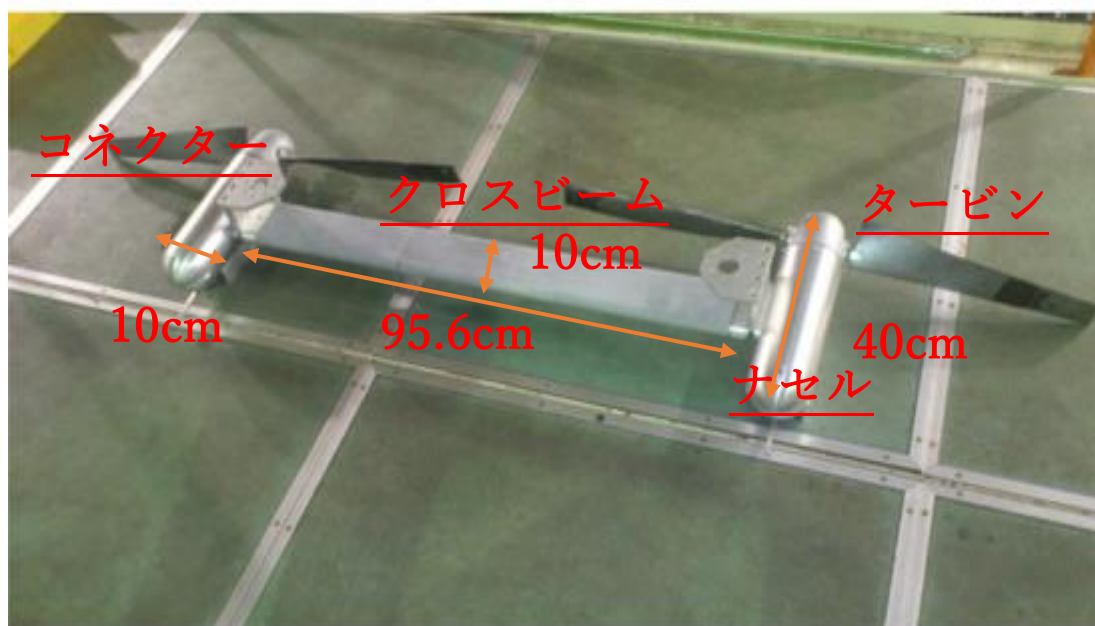


Fig. 3-1 発電装置概要[21]

Table. 3-1 実機と実験模型との比較[21]

	実機	実験模型
ナセル長	20m	0.4m
ナセル直径	6m	0.1m
タービン直径	40m	0.88m
クロスビーム長	40m	0.956m



Fig. 3-2 海洋工学水槽造波機および実験場

また、この実験は千葉県にある東京大学生産技術研究所海洋工学水槽にて行われた。(Fig. 3-2)水槽の寸法は長さ 50m×幅 10m×深さ 5.5m(水深 5m)となっており、実験装置に比べて十分に大きい。海流の流速の再現は水槽の上部にある台車を用いて台車に実験装置を固定して曳航させることで行っている。曳引台車は 0m/s~2.0m/s の範囲内の速度で動かすことができ、今回の実験ではいずれの計測項目についても 0.2m/s で行っている。

3.2.2 流入流速の設定

本研究の実験では流入角に対応する流体力を求める。その際設定した流速はフルード則に基づき設定されている。フルード則による流入流速は以下の式により推定する。

$$F_r = \frac{U^2}{gL} \quad (3.2.2.1)$$

このフルード速は造波抵抗の分析に用いられる相似則である。実機の挙動を厳密に再現することが難しいが、似た挙動を示し評価することが可能となる。実機の流入流速 1.5 m/s を想定して、実験は 0.2m/s において行った。

3.3 実験試験概要

海流発電装置にかかる流体力を計測した。Table 3-2 にそれらの概要を示した。その中でナセルとクロスビームにかかる流体力を計測している。その際、Z 軸周り、Y 軸周りで流入角度を変化させその時の流体力を計測している。Z 軸周りの傾斜を斜行試験(Fig. 3-3)、Y 軸周りの傾斜を縦傾斜試験と呼称している。斜行試験は Yaw 角の回転を、Y 軸回転では Pitch 角の回転を表している。

まず初めに Z 軸周りにナセルとクロスビームを傾斜させた場合にかかる流体力とそれにタービンを付けた流体力を計測している。そして Y 軸周りにおいてはクロスビーム単体(Fig. 3-5)とナセルとクロスビームが接続された場合(Fig. 3-6)とで分けて計測した。実験値は分力計からの読み取りであり、実験器具の条件上全て物体固定座標での値が得られている。また、Fig. 3-4 に流れ方向正面から見た試験の概要を示す。

Table 3-2 実験試験概要[21]

回転軸	流速	計測項目	計測値
Z 軸 (斜行試験)	0.2 m/s	ナセル+クロスビーム	X'方向力、Y'方向力
	0.2 m/s	ナセル+クロスビーム(タービン付)	X'方向力、Y'方向力
Y 軸 (縦傾斜試験)	0.2 m/s	クロスビーム	X'方向力、Z'方向力
	0.2 m/s	ナセル+クロスビーム	X'方向力、Z'方向力

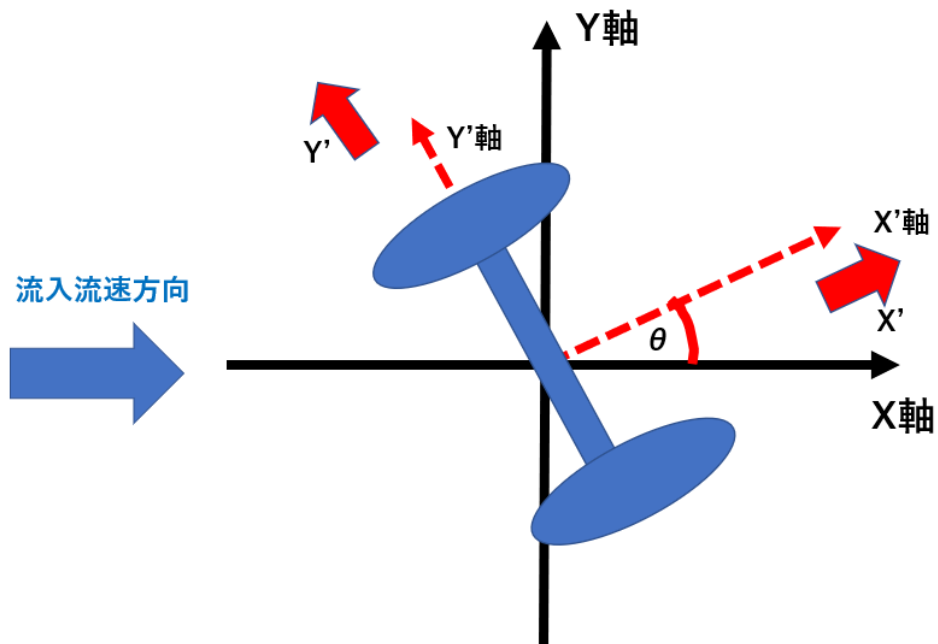


Fig. 3-3 斜行試験流体力計測の座標系

※斜行試験の座標系は物体固定座標で新たに X'軸、Y'軸が設定される。斜行試験の傾斜角は θ と定義する。斜行試験は-60度から 60度までの傾斜角において 10度ずつ静止させ流体力を計測した。

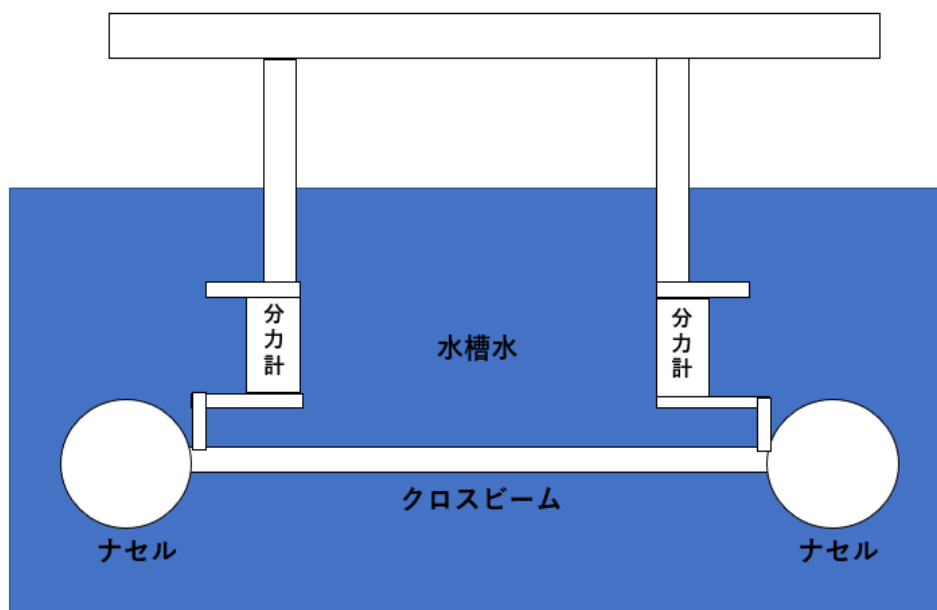


Fig. 3-4 正面から見る試験概要

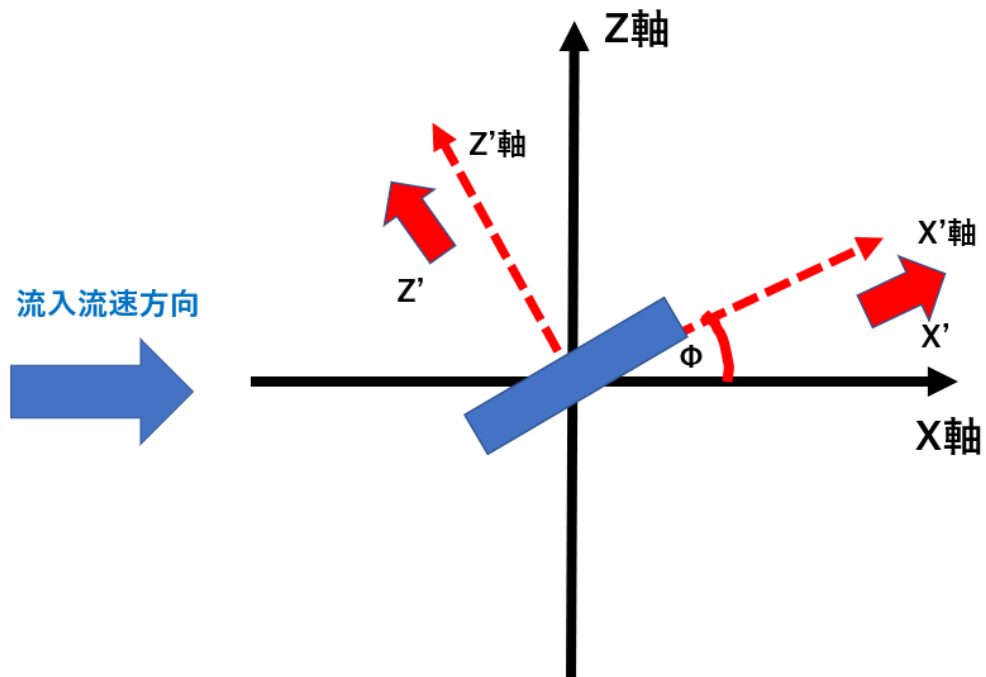


Fig. 3-5 縦傾斜試験クロスビームのみ流体力計測の座標系

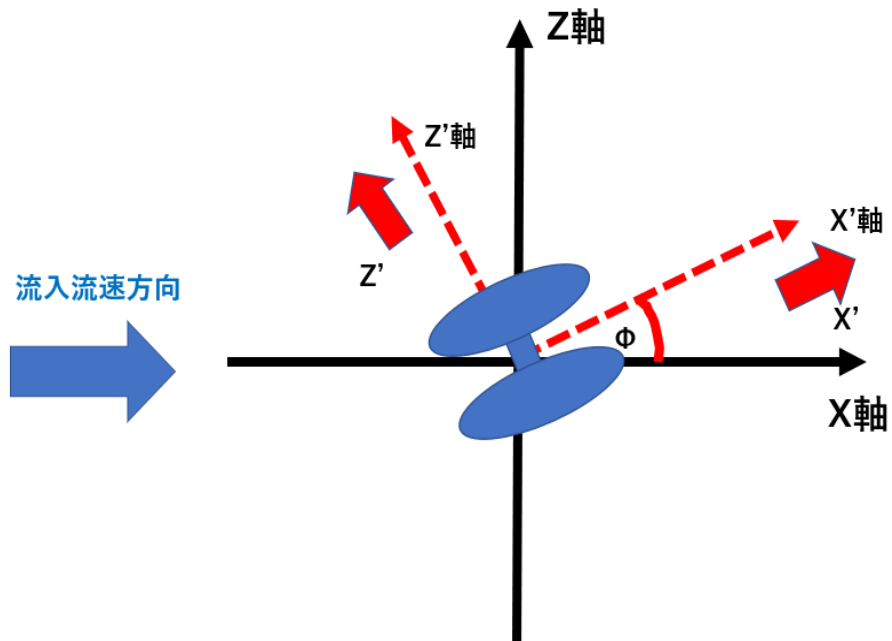


Fig. 3-6 縦傾斜試験ナセルとクロスビーム結合体流体力計測の座標系

※クロスビームのみの場合もナセルを取り付けた場合も縦傾斜試験の座標系は物体固定座標で新たに X'軸、Z'軸が設定される。縦傾斜試験の傾斜角は Φ と定義する。縦傾斜試験は-20度から20度までの傾斜角において5度ずつ静止させ流体力を計測した。

第4章 CFD を用いたナセルおよびクロスビームの 数値解析

本章では、第2章で示した数値流体力学 CFD を用いて一様流条件における海流発電装置の数値流体シミュレーションを行う。この解析は実験で得られた結果と CFD の計算結果を比較し精度検証を行うこと、実験からは得られない情報を CFD から得ることでその考察を行う。

以下に述べる数値解析では、ANSYS 社によって開発されている有限体積法ベースの流体解析ソルバー「Fluent ver18.2」を使用した。ANSYS Fluent は非圧縮性流体から圧縮性流体、および層流や乱流までの幅広い問題をモデル化できる機能をもっている。[16]

3D 形状の作成には形状作成・修正ツールの「ANSYS Design Modeler」、メッシュの作成には FLUENT 搭載メッシングツール「ANSYS Fluent Meshing」、結果処理ツールとしては流体解析専用処理ツール「ANSYS CFD Post」を用いている。3D モデルの形状作成から結果処理まで統合されたソフトが ANSYS Fluent である。

4.1 解析対象

CFD を用いて、流向変化時におけるクロスビームおよびナセルの数値解析を行うために Fig. 4-1 に示す 3 次元モデルを用いた。解析対象は実験で用いている実機に対して 1/50 スケールの実験装置である。模型の寸法を Table 4-1 に示す。

Fig. 4-2 は CFD の解析領域である。ナセルの流れ方向の長さ 0.4m を基準として、海流発電の形状で解析領域を設定していた論文に合わせ、[22]長さ 20 倍、幅 12.5 倍、高さ 2.5 倍でとっており、外部流体領域の大きさは十分に広くとっていると言える。解析領域の寸法を Table 4-2 に示した。前後に流入境界(速度一定)で出口は圧力一定と定義した。外部流体領域の壁面は free slip 条件とし、ナセル及びクロスビーム結合体の固体壁と流体領域の境界条件は no slip ($u=0, v=0$) 条件とした。

また、いずれの形状においても実験装置の粗度高さは 0[m]として計算しており、剥離の低減などは起こっていないと考える。

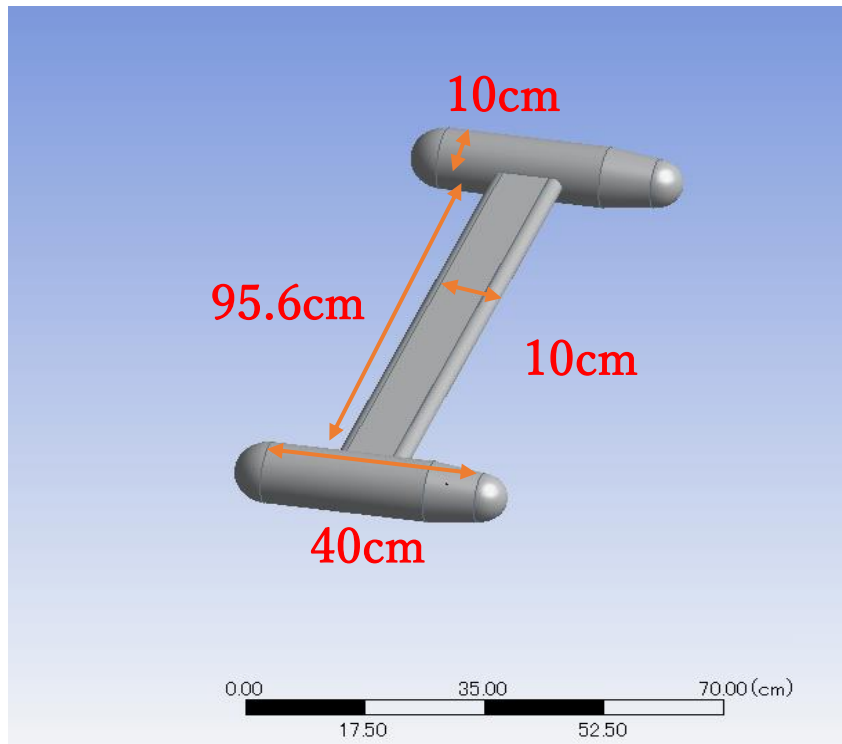


Fig. 4-1 ナセルおよびクロスビーム結合体

Table 4-1 模型寸法[21]

模型長さ	0.4[m]
ポッド直径	0.10[m]
クロスビーム幅	0.956[m]
クロスビーム長さ	0.10[m]
クロスビーム高さ	0.03[m]

※実験装置を模擬したものである。細かな電源装置や突起物は排除し、流体力に影響を与えると考えられる部分のみで計算を行った。

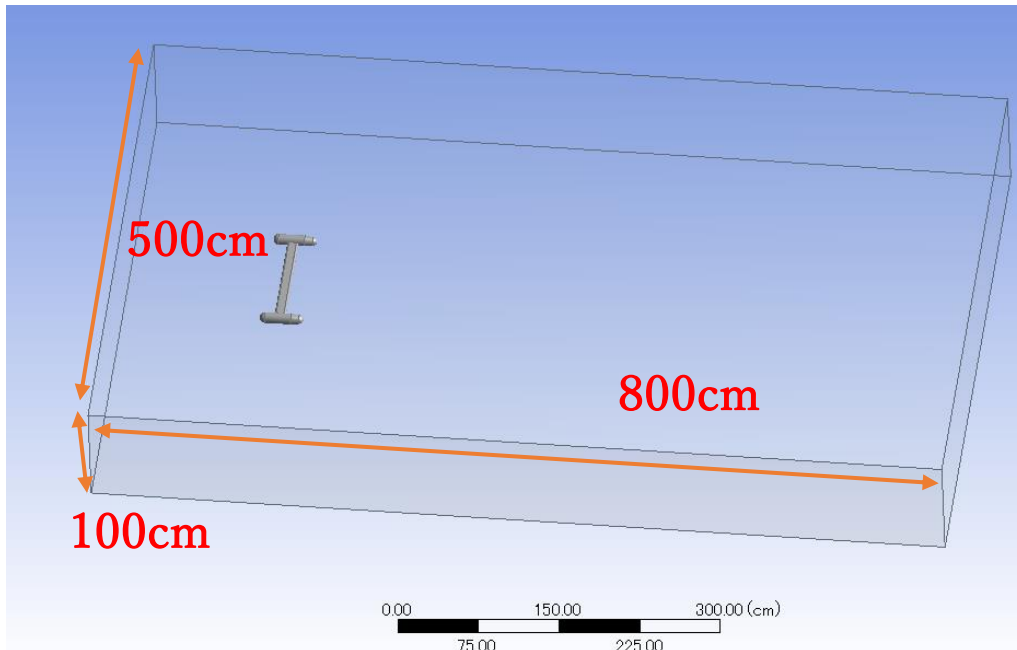


Fig. 4-2 解析領域

Table 4-2 解析領域寸法

解析領域幅	500[cm]
高さ	100[cm]
長さ	800[cm]

4.2 解析格子

Fig. 4-3 には解析格子全体のメッシュ図を、Fig. 4-4 には実験模型周辺のメッシュを、Fig. 4-5 には境界層メッシュを作成したものを示した。

格子は物体にかかる流体力を計測し傾斜させたりするため座標固定の構造格子ではなく非構造格子を用いている。解析格子は計算時間などの観点からテトラ要素とプリズム要素を用いた。プリズム要素は実験装置において境界層を再現するために用いた。実験装置表面の境界層を解像するため、表面の第1層目は以下の式の通りに計算し設定した。[16]

ここで、 u はブレードへの合成流入速度[m/s]、 L は代表長さでありナセルの流れ方向の長さ 0.4m とした。また ρ は水の密度 998[kg/m³]、 μ は水の粘性係数 1×10^{-3} [kg/m²・s]である。

$$Re: \text{レイノルズ数} \quad Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (4.2.1)$$

$$C_f: \text{摩擦係数} \quad C_f = \frac{0.026}{Re} \quad (4.2.2)$$

$$\tau_{wall}: \text{壁面せん断応力} \quad \tau_{wall} = \frac{C_f \rho u^2}{2} \quad (4.2.3)$$

$$U_{fric}: \text{摩擦速度} \quad U_{fric} = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}} \quad (4.2.4)$$

$$\Delta s: \text{第一層セル高さ} \quad \Delta s = \frac{y^+ \mu}{U_{fric} \rho} \quad (4.2.5)$$

第一層の高さ Δs は 1.93×10^{-4} m とし、成長率が 1.1 で積層数を 25 層とした。実験装置表面の y^+ を計算しコンター図を示した。Fig. 4-6 および Fig. 4-7 からほぼすべての面において第一層目のメッシュが粘性低層内 ($y^+ \leq 5$) に配置されていることを確認した。

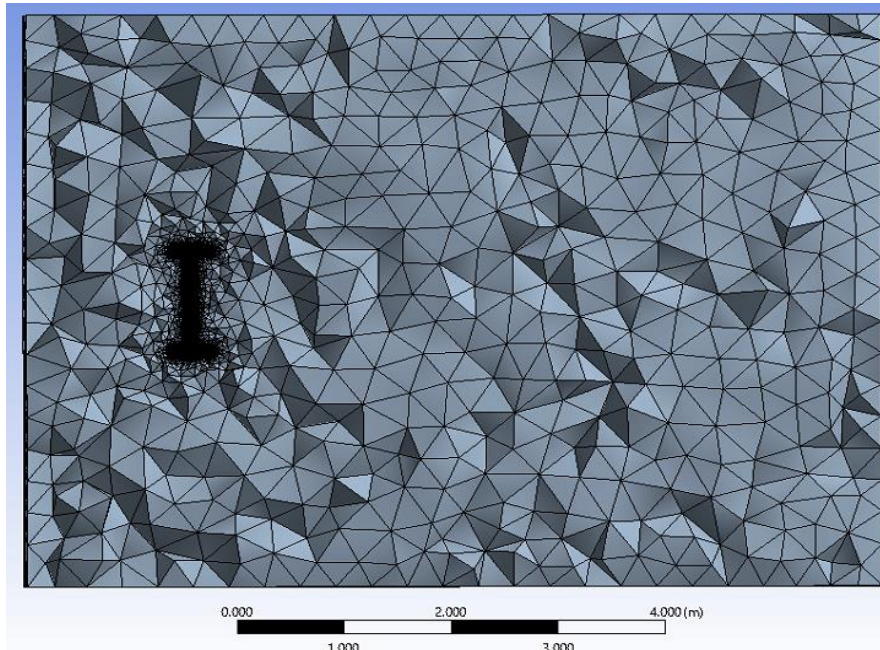


Fig. 4-3 解析格子全体メッシュ

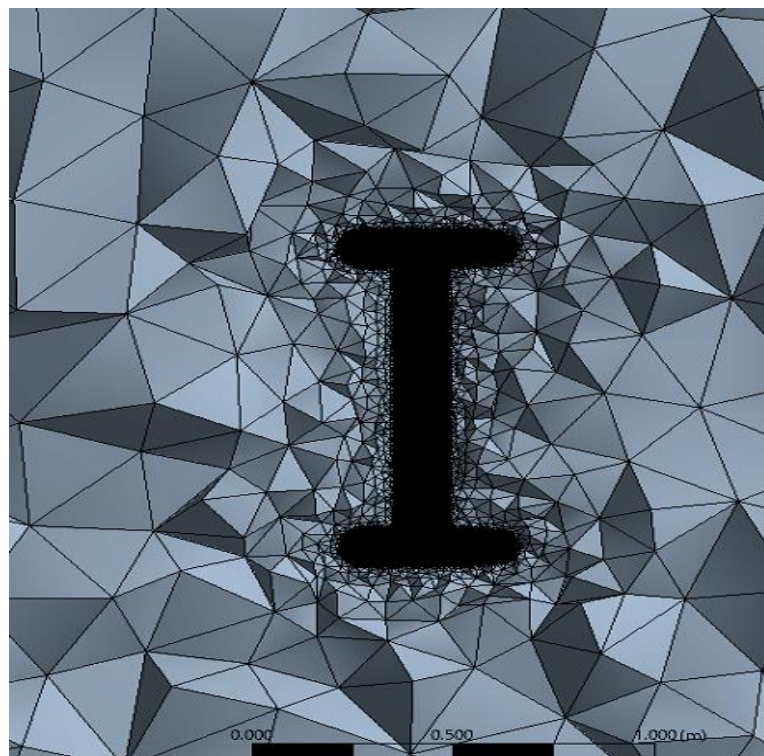


Fig. 4-4 双発式海流発電装置模型周辺メッシュ

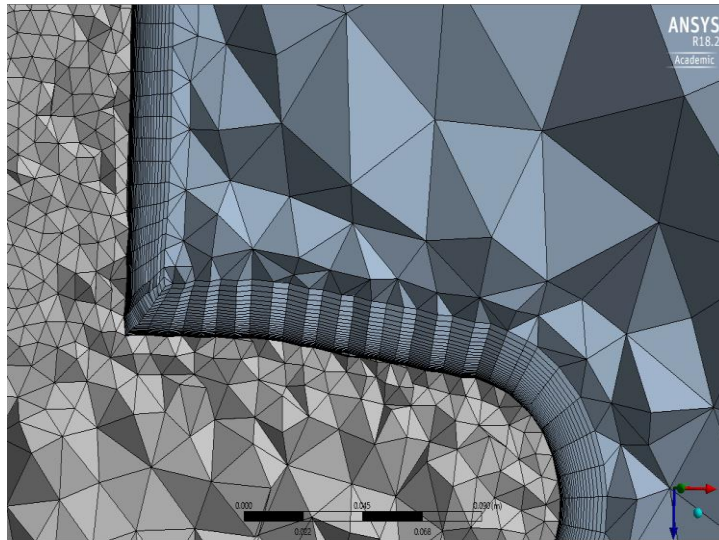


Fig. 4-5 双発式海流発電装置の表面付近での境界層メッシュ

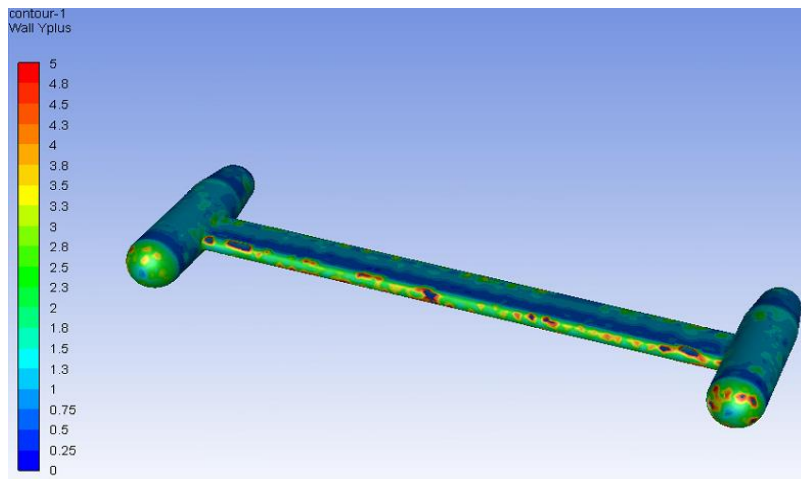


Fig. 4-6 前面から見た双発式海流発電装置境界層第一層高さ と y^+ の比

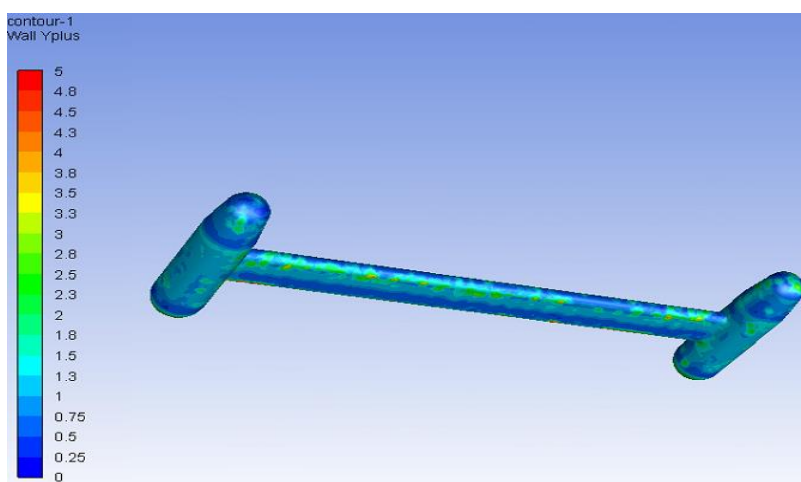


Fig. 4-7 後面から見た双発式海流発電装置境界層第一層高さ と y^+ の比

4.3 格子依存性検証

4.3.1 境界層内の格子依存性検証

物体表面の圧力や摩擦力をより詳細に解像するために流体力に大きな影響が出ると考えられる境界層のメッシュについて解像パターンを変更して流体力を求めた。(Table 4-3)また、それぞれのメッシュの様子(クロスビーム部分をz断面で切ったもの)を Fig. 4-8~Fig. 4-11 で示す。

$y^+ = 1$ の CASE3 に対してその 1/10 の第一層高さを持つ CASE1 と 1/2 の第一層高さを持つ CASE2 を作成した。流体部分のメッシュの成長率も CASE1 などは 1.25 と細かくして検証を行った。求められた流体力は CASE1~CASE3 においてはほとんど差異が見られないことを確認した。CASE 4 においてはメッシュの粗さゆえに流体力が他のケースと大きく異なっていた。

Fig. 4-12~Fig.4-15 はクロスビーム部分を流れ方向の断面で切った速度ベクトル図である。CASE 1 の細かいメッシュでは剥離によってクロスビームから遠いところで流れに沿って流れていることがわかる。それに対して CASE 4 の速度ベクトル図ではクロスビームから近いところで流れに沿って流れており境界層の発達を表せず、流れが変化していると考えられる。

Table 4-3 境界層格子依存性検証パターン

CASE	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
境界層第一層高さ [m]	0.0000193	0.0000965	0.000193	0.000965
境界層積層数	30	25	25	25
境界層内の成長率	1.2	1.1	1.1	1.1
最小格子面サイズ (物体表面の平行方向) [m]	0.025	0.05	0.05	0.075
流体部分メッシュ成長率	1.25	1.35	1.546	1.546
抗力係数	0.3345	0.3489	0.3665	0.1782
メッシュ数	6017059	3136542	2421252	785739

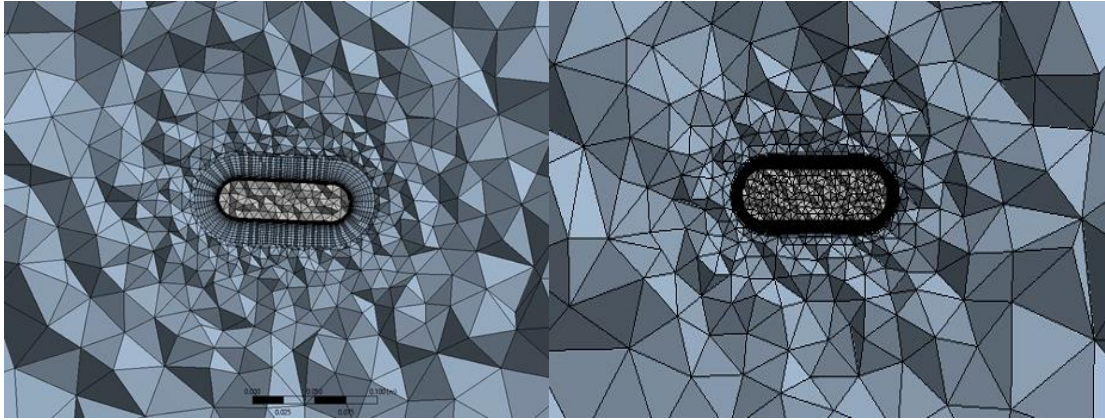


Fig. 4-8 CASE1 境界層メッシュ

Fig. 4-9 CASE2 境界層メッシュ

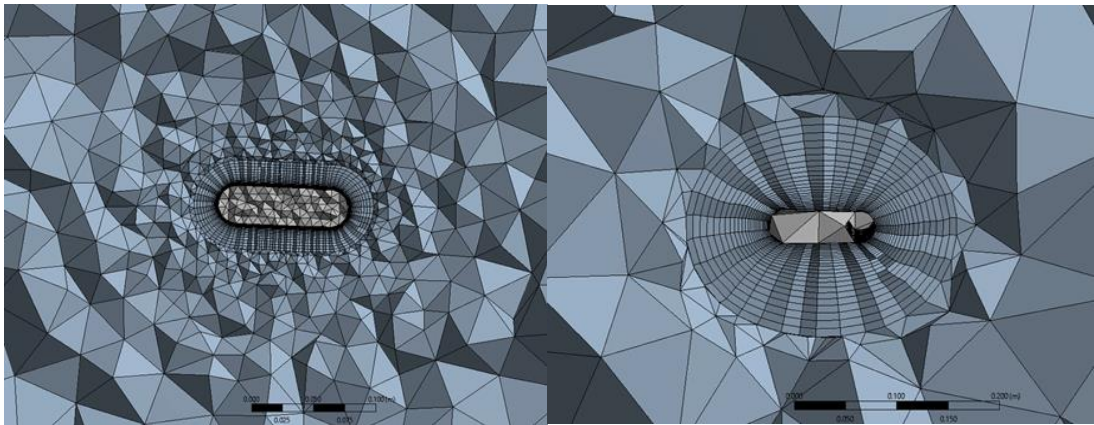


Fig. 4-10 CASE1 境界層メッシュ

Fig. 4-11 CASE2 境界層メッシュ

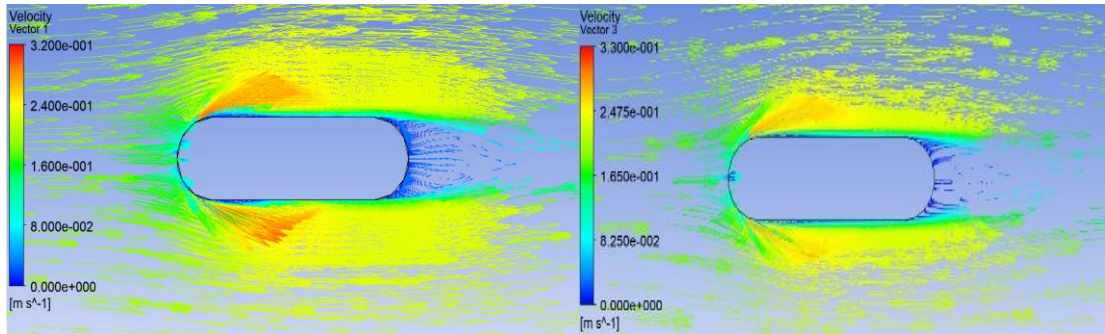


Fig. 4-12 CASE1 速度ベクトル図

Fig. 4-13 CASE2 速度ベクトル図

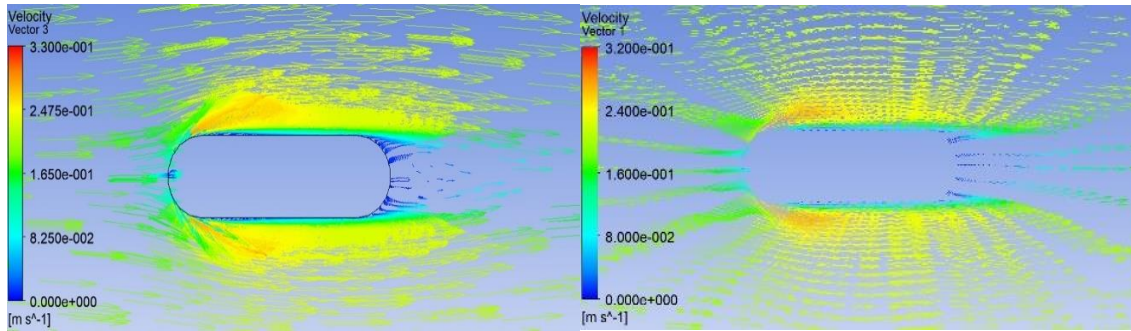


Fig. 4-14 CASE3 速度ベクトル図

Fig. 4-15 CASE4 速度ベクトル図

4.3.2 流れ方向の格子依存性検証

Table 4-4 流れ方向格子依存性検証パターン

CASE	最小面格子サイズ[cm] (物体表面の平行方向)	メッシュ 数	抗力係数
CASE1	0.75	992462	0.3818
CASE2	0.5	2421252	0.3672
CASE3	0.375	3722284	0.3711
CASE4	0.25	5220361	0.3787

同様に流れ方向についても4パターン計算し (Table 4-4) 格子依存性を検証した。最小格子面サイズを変更してメッシュ数を調整し、双発式海流発電装置が正面から0.2[m/s]の流れを受ける場合での流体力計算を行い、CASE4でのメッシュ数でもCASE1のメッシュ数でも流体力の値にはさほど影響しないことがわかった。よって流体力の値の計算にはCASE1のメッシュ数程度で十分であることが分かった。ただ、斜行試験の角度が大きい場合においてはCASE1のメッシュ数では収束しない事例があったので計算時間の観点からCASE2を採用し、計算を行った。

5.CFD 計算の実験値との比較・検証

5.1 斜行試験における実験結果と CFD 解析結果

5.1.1 X'方向に働く流体力

Fig. 5-1 は斜行試験 (Yaw 角) における X'方向の実験値と CFD、摩擦力の値をプロットしたものである。実験値、CFD 計算値ともに Yaw 角が大きくなるにつれて X'方向に働く流体力が小さくなる傾向が見られた。実験値については多少の誤差が見受けられた。実験値と CFD では実験値のほうが非常に大きな値を示しており、実験値との整合性が見られない。

仮に CFD の値を三倍すると斜行角 0 度の地点では同じような値を示すが、斜行角の大きい 60 度などの地点では大きな誤差が生じる。CFD の値をすべての斜行角において 0.7N ほど大きくすると斜行角の大きい地点では実験値よりも大きくなってしまう。

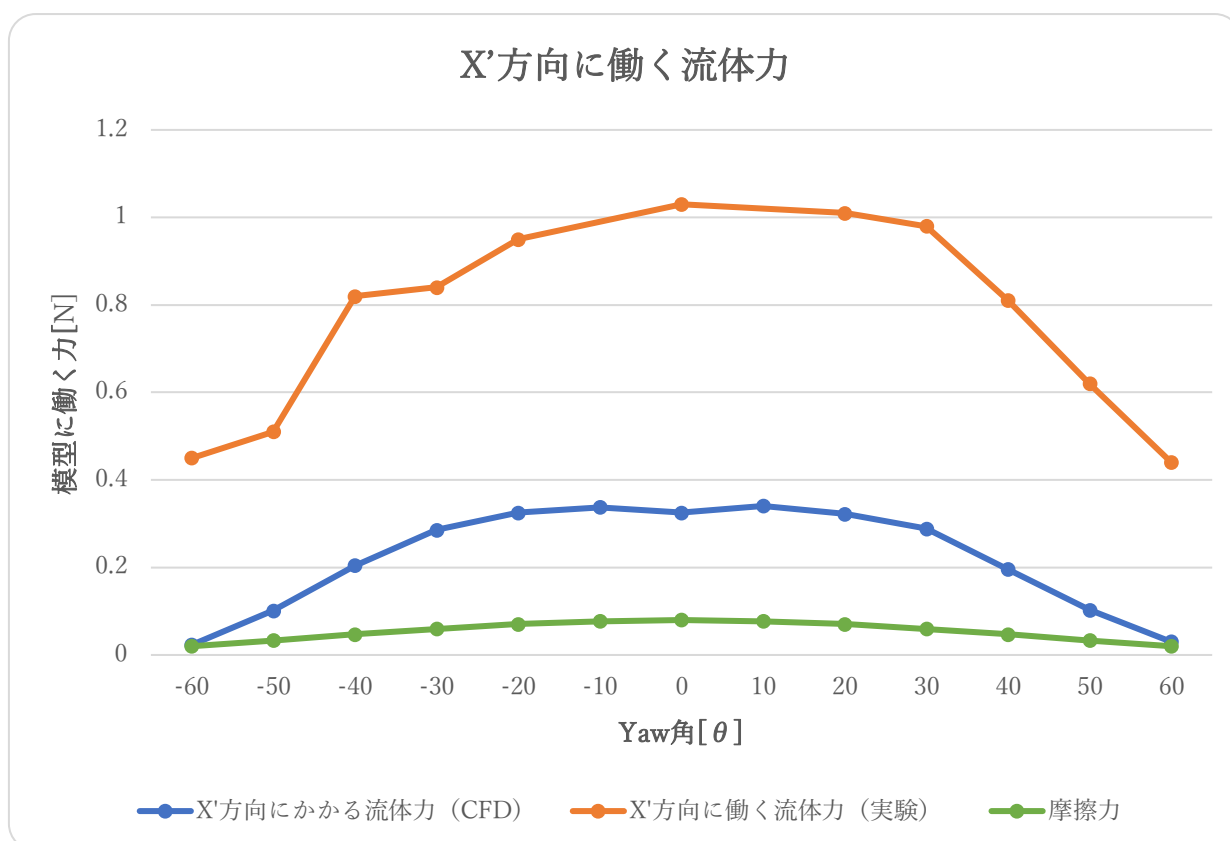


Fig. 5-1 斜行試験における X'方向の CFD と実験値、および摩擦力

5.1.2 X'方向に働く流体力（条件の拡張）

Fig. 5-2 は斜行試験（Yaw 角）における X'方向の CFD の値をプロットした図である。実験では 60 度までと限定的であった条件を拡張し、プロットした。Yaw 角が 0 度から 80 度までの点において CFD 計算値ともに Yaw 角が大きくなるにつれて X'方向に働く流体力が小さくなる傾向が見られた。90 度の地点において少し流体力が大きくなる傾向が見られた。

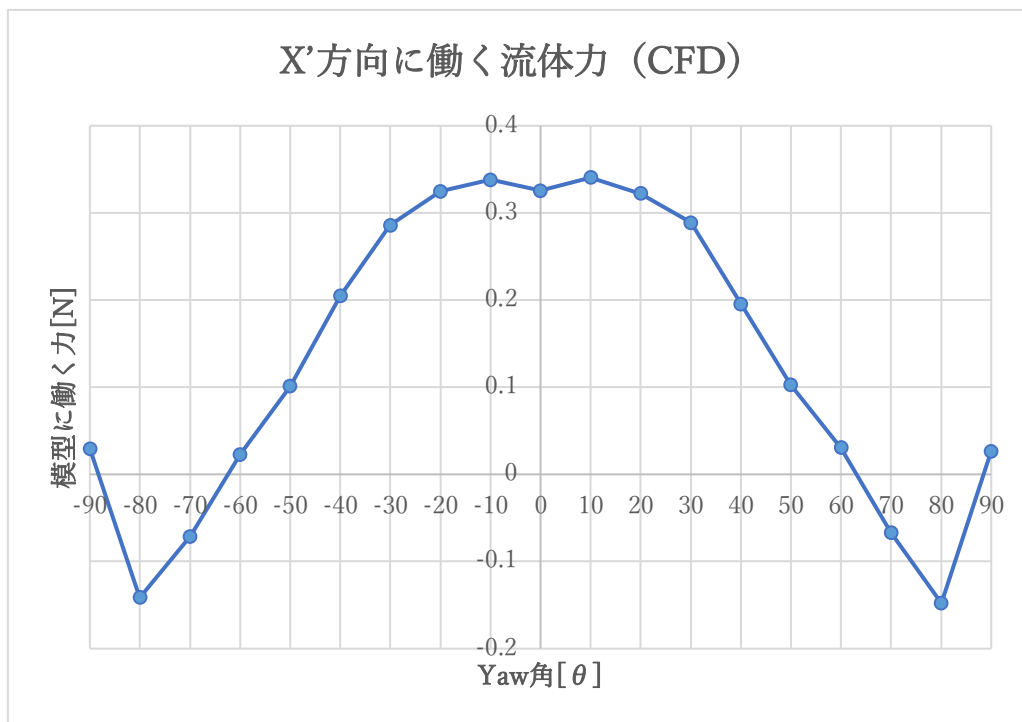


Fig. 5-2 斜行試験における X'方向の CFD (条件の拡張)

5.1.3 Y'方向に働く流体力

Fig. 5-3 は斜行試験における CFD と実験値、および摩擦力（推定値）Y'方向の流体力をプロットしたものである。CFD、実験値ともに摩擦力よりも大きいことを確認した。実験値 CFD を比べてみると実験値のほうが CFD 計算値よりも大きくなっている。傾斜角が大きくなるにつれて流体力が増加する傾向はどちらも変わらなかった。実験値では Yaw 角 30 度と-30 度のところで大きく値が異なっているがこれは実験の条件などにおける誤差であると考えられる。

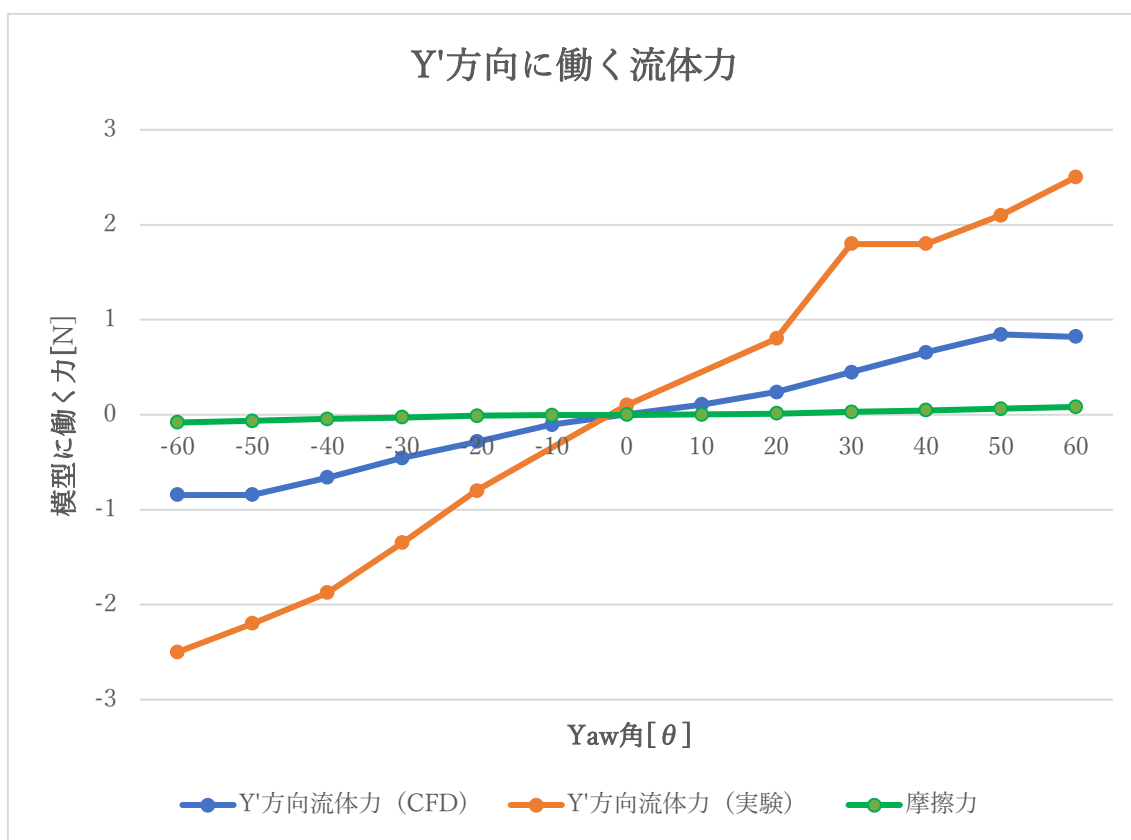


Fig. 5-3 斜行試験における Y'方向の CFD と実験値、および摩擦力

5.1.4 Y'方向に働く流体力(条件の拡張)

Fig. 5-4 は斜行試験における CFD で求められた Y'方向の流体力である。実験では Yaw 角-60~60 度までと限定的であった条件から拡張して計算を行った。Yaw 角 80 度までは Yaw 角 60 度までと同様に角度が大きくなるにつれて流体力が大きくなる傾向が見られた。CFD では Yaw 角が 90 度になると少し Y'方向の流体力が 80 度に比べて少し小さくなっていた。

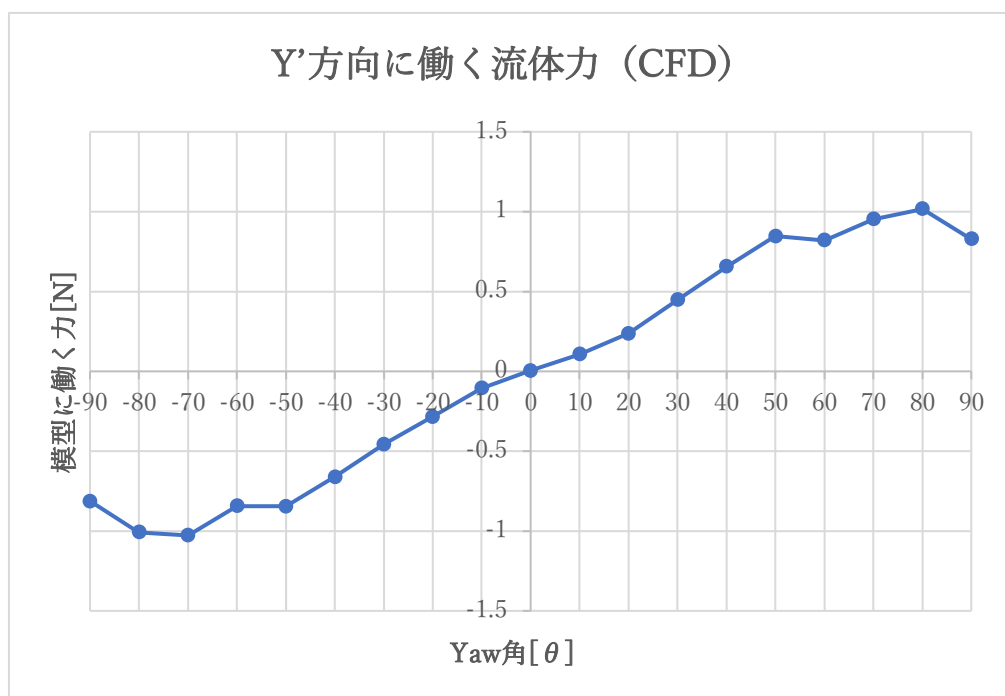


Fig. 5-4 斜行試験における Y'方向の CFD(条件の拡張)

5.1.5 CFD で流れ場を可視化した考察

5.1.4 節の Fig. 5-4 に示すように斜行角 80 度のところまでは流れの後部に圧力が加わり Y 方向の流体力が大きくなっている。しかし、斜行角 90 度になると少し小さくなる傾向が見られた。これは Fig. 5-5 と Fig. 5-6 の圧力分布が Yaw 角 80 度の時のほうがナセル後部において高い圧力を受けている。前側のナセルが流体の力を受け、後ろ側のナセルに流れが当たらないので Y 方向の流体力は 80 度の時よりも小さくなっていたと考えられる。

Fig. 5-7~5-12 は Yaw 角を変化させたときの速度コンター図である。青い部分で流速度遅くなっており剥離が起こっていると考えられる。また、Fig. 5-13~Fig. 5-18 は Yaw 角による圧力コンター図である。

5.1.1 節でも説明したように Yaw 角が大きくなるにつれて X 方向の流体力が小さくなる傾向がある。それは圧力コンター図から Yaw 角 0 度ではクロスビームの前面やナセルの先端で圧力を受けて X 方向で流体力が生じていたが、Yaw 角が大きくなるにつれて X 方向の流入流速が小さくなるため流体力が小さくなっていたと考えられる。

Y 方向の流体力についても同様に、斜行角 0 度のところで流体力は 0 に近かった。Yaw 角が大きくなるにつれて Y 方向の流体力が大きくなる傾向は Y 方向のナセルの側面にかかる圧力が Yaw 角の増加とともに大きくなっているためだと考えられる。

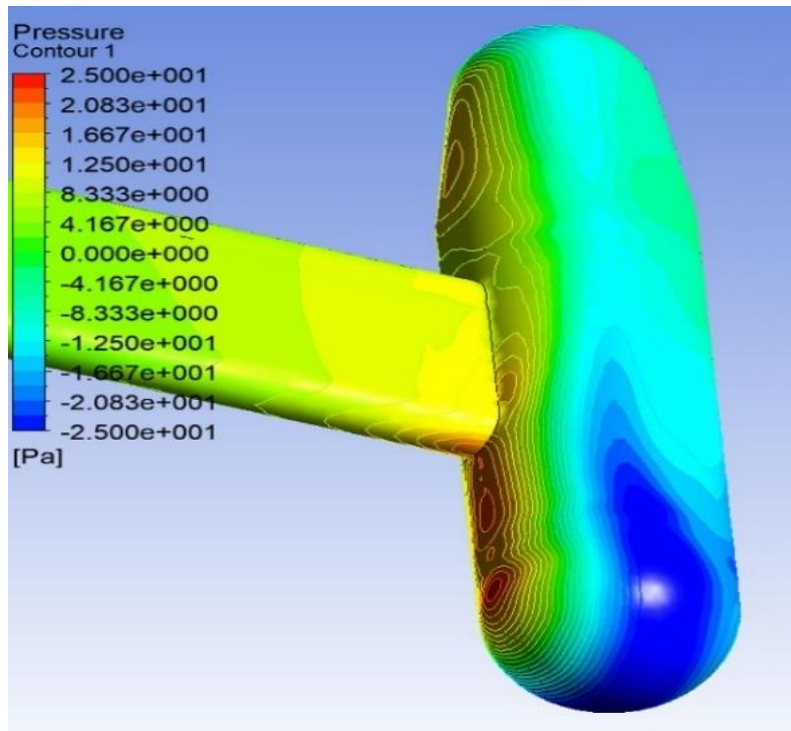


Fig. 5-5 Yaw 角 80 度流れ後方ナセル圧力コンター図

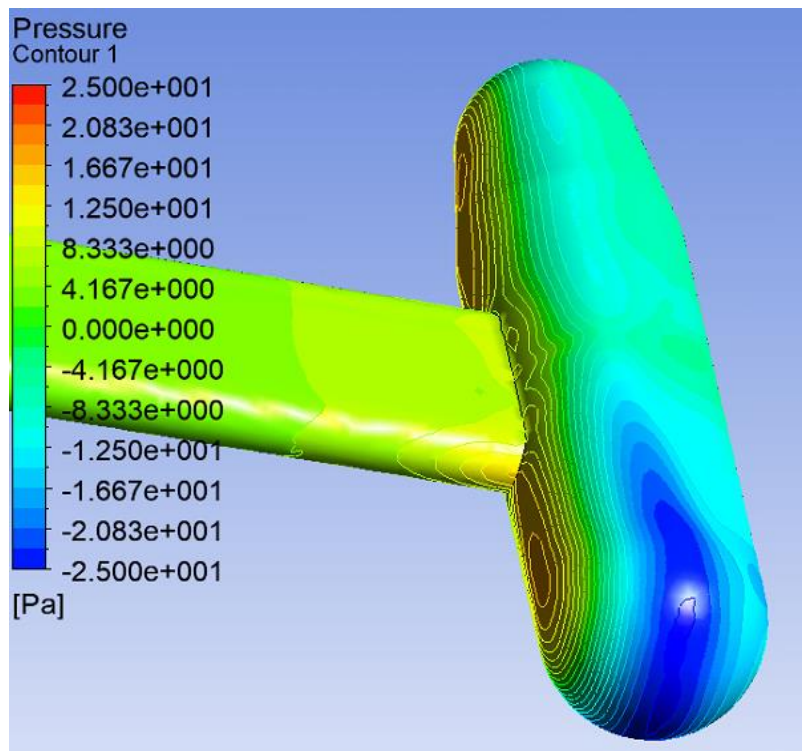


Fig. 5-6 Yaw 角 90 度流れ後方ナセル圧力コンター図

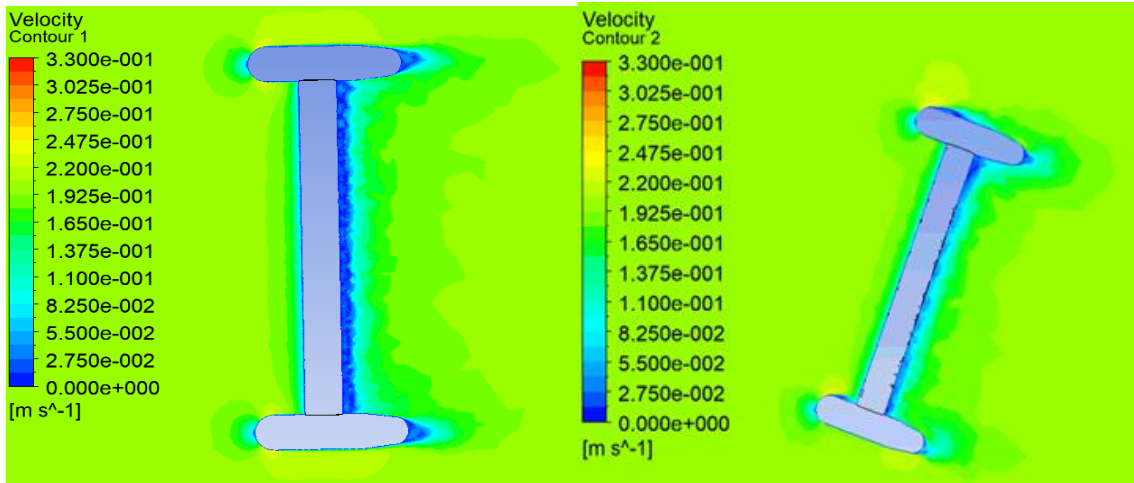


Fig. 5-7 Yaw 角 0 度速度コンター図

Fig. 5-8 Yaw 角 20 度速度コンター図

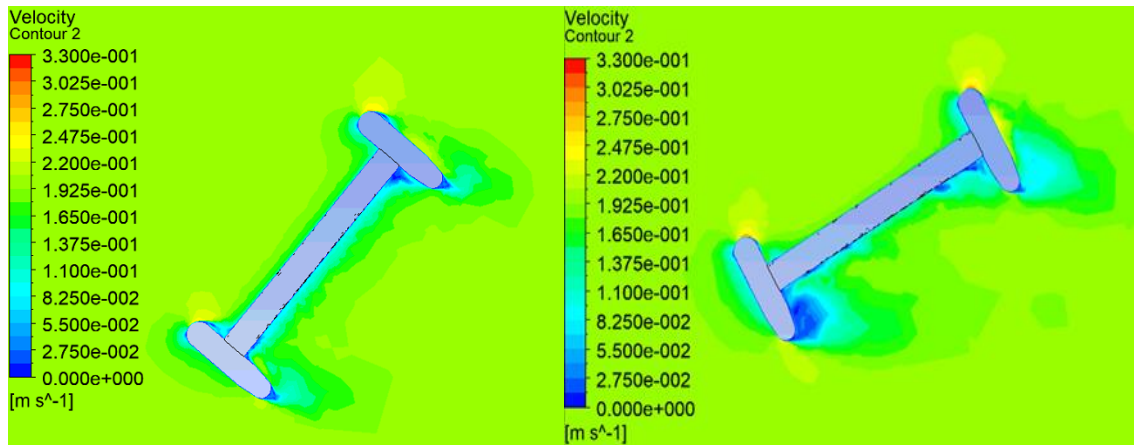


Fig. 5-9 Yaw 角 40 度速度コンター図

Fig. 5-10 Yaw 角 60 度速度コンター図

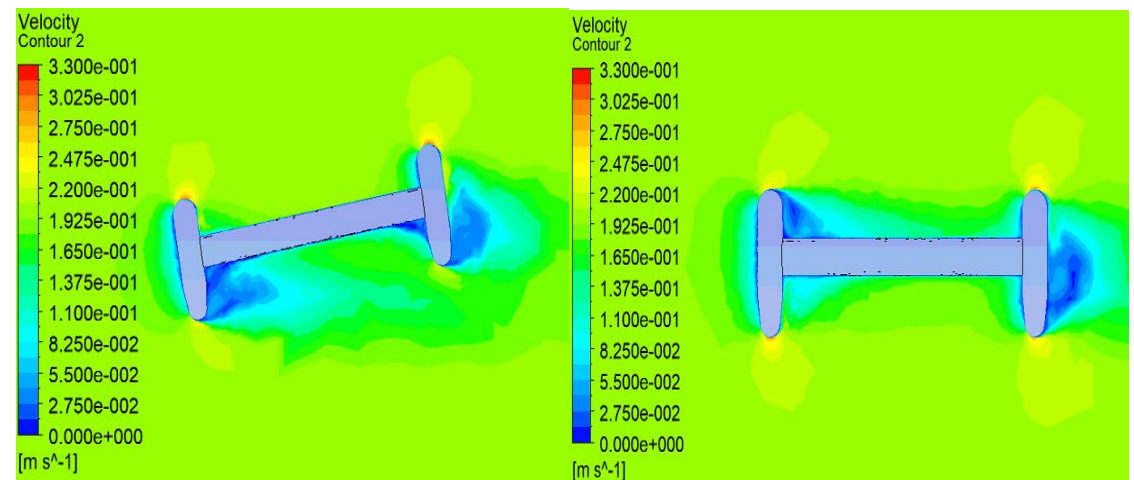


Fig. 5-11 Yaw 角 80 度速度コンター図

Fig. 5-12 Yaw 角 90 度速度コンター図

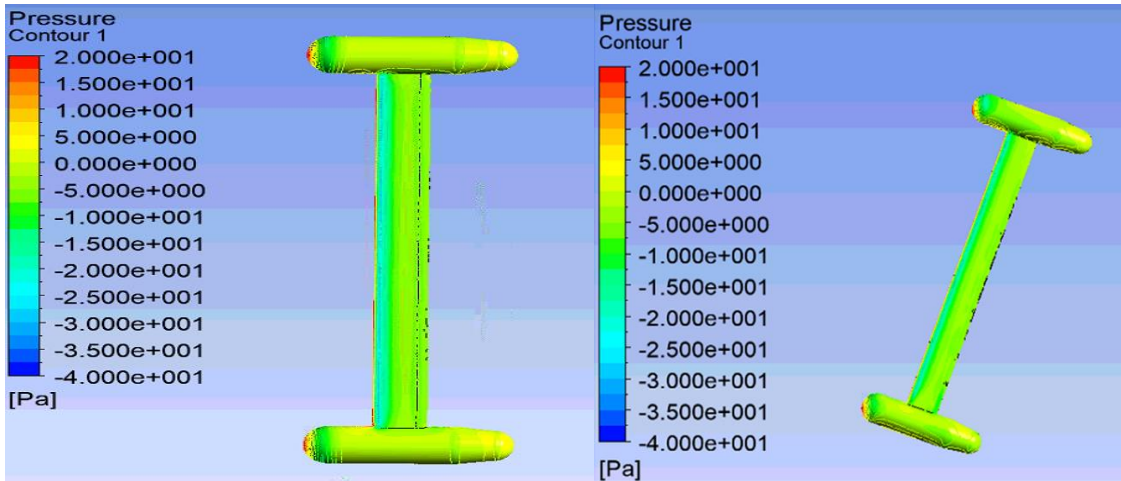


Fig. 5-13 Yaw 角 0 度圧力コンター図

Fig. 5-14 Yaw 角 20 度圧力コンター図

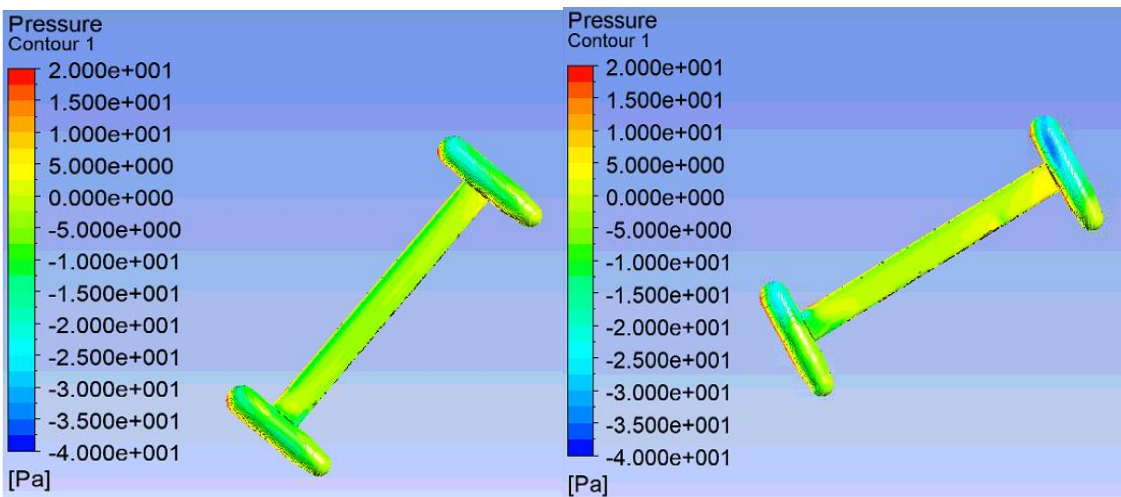


Fig. 5-15 Yaw 角 40 度圧力コンター図

Fig. 5-16 Yaw 角 60 度圧力コンター図

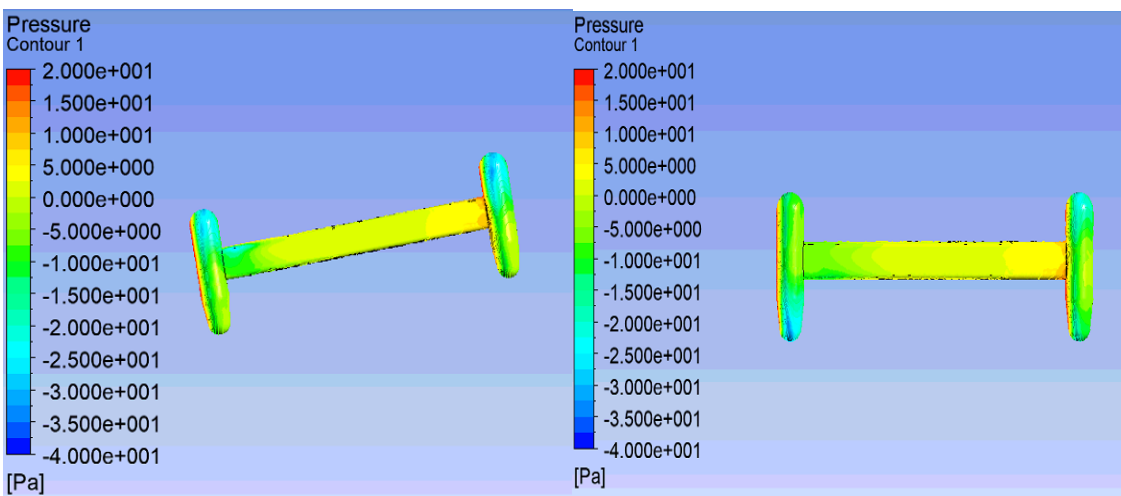


Fig. 5-17 Yaw 角 80 度圧力コンター図

Fig. 5-18 Yaw 角 90 度圧力コンター図

5.2 縦傾斜試験における実験結果と CFD 解析結果

5.2.1 クロスビームにかかる X'方向の流体力

Fig. 5-19 は縦傾斜試験時クロスビームにかかる X'方向の流体力を実験と CFD で比較したものである。いずれの Pitch 角においても実験値のほうが CFD の値よりも大きくなっている。Pitch 角 0 度の時の誤差は小さかったが CFD では Pitch 角 5 度と-5 度の時に流体力が小さくなっていることが伺える。また、Pitch 角が 15 度から 20 度になる時、Pitch 角が-15 度から-20 度になる時に流体力の増加はあまり見られなかった。実験においては CFD と同じく、Pitch 角が 0 度から 5 度になる時に減少する傾向が見られた。クロスビームは上下左右対称な形状であるため Pitch 角の正負に関わらず X'方向の流体力は同じ値を示すはずである。しかし、Pitch 角 5 度と Pitch 角-5 度の時を比較してみると Pitch 角 5 度の値を基準にしたときの約 20%の誤差があり、Pitch 角 20 度のところでも同様に誤差が大きく異なっていた。

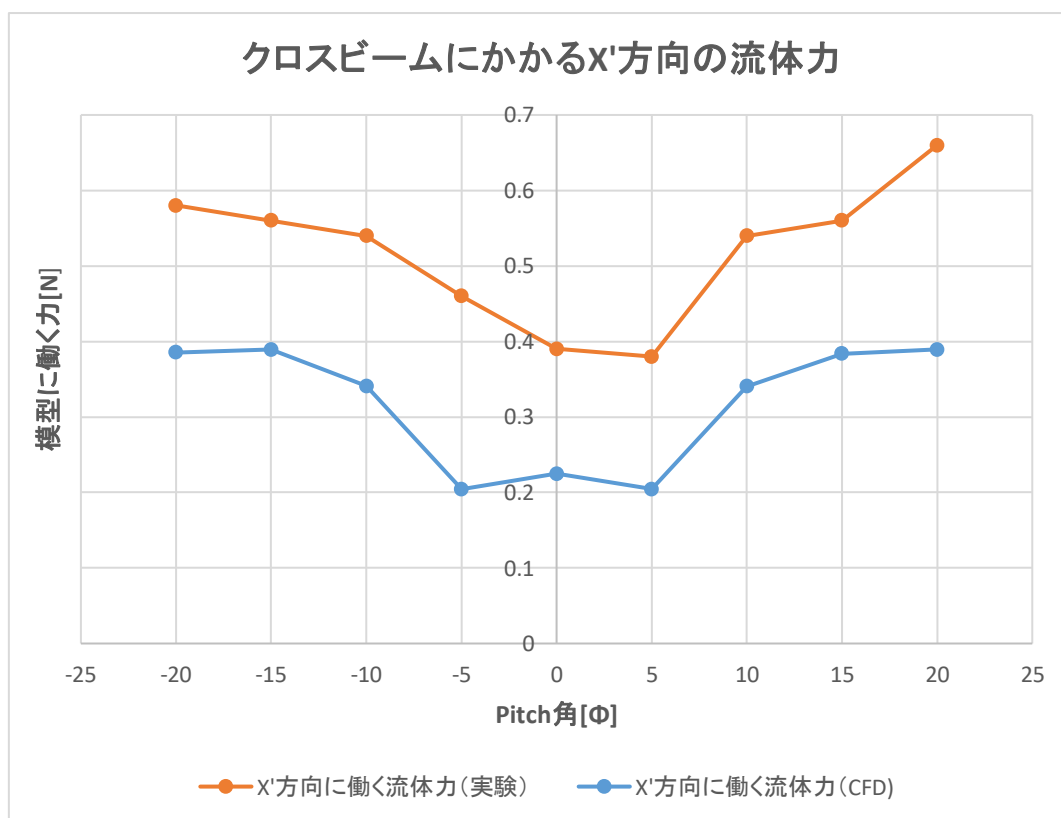


Fig. 5-19 クロスビーム縦傾斜試験における CFD と実験値、X'方向の流体力

5.2.2 クロスビームにかかる Z'方向の流体力

Fig. 5-20 は縦傾斜試験時クロスビームにかかる Z'方向の流体力を実験と CFD で比較したものである。Pitch 角-20 度から 5 度のところでは CFD と値が一致していた。しかし、Pitch 角 10 度以降では値が大きく異なっていた。CFD では Pitch 角が 5 度から 10 度に傾斜する時に流体力が小さくなっている。X'方向の流体力と同様にクロスビームは上下左右対称な形状であるため Pitch 角の正負に関わらず Z'方向の流体力も同じ値を示すはずである。しかし、10 度以降では 2 倍以上の大きな誤差が生じていた。

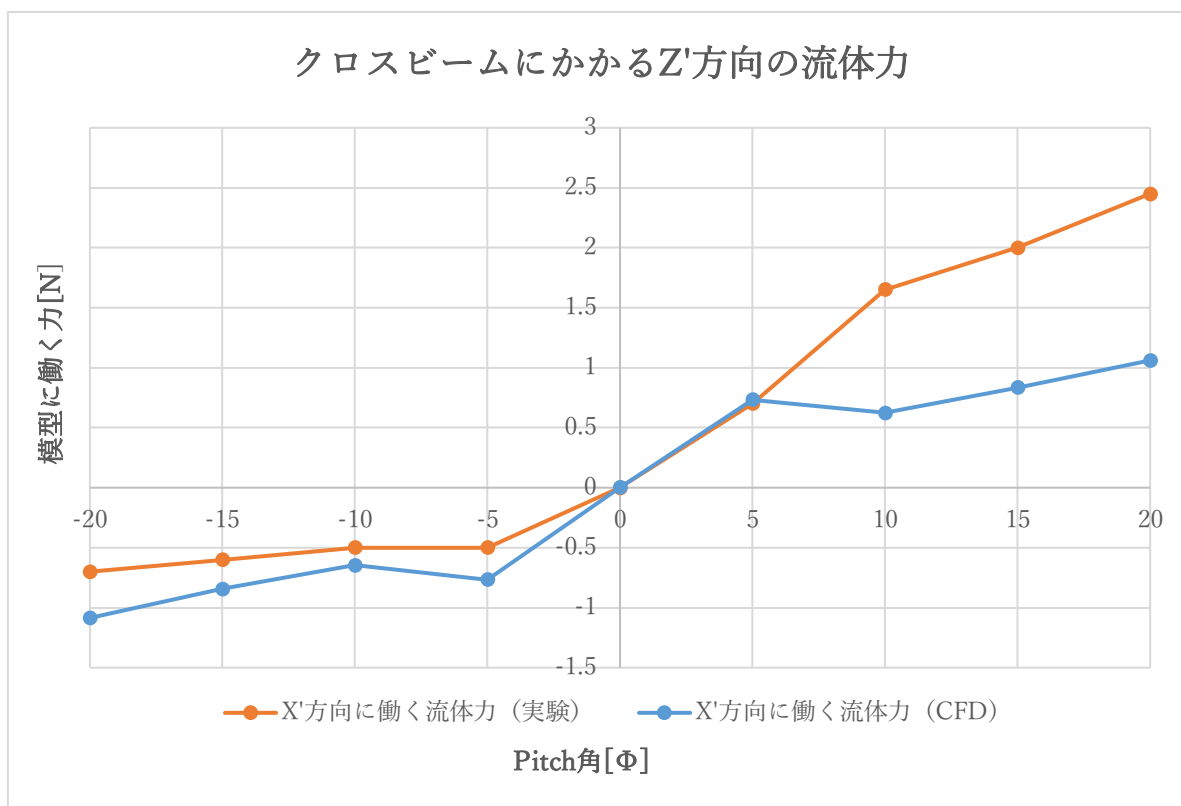


Fig. 5-20 クロスビーム縦傾斜試験における CFD と実験値、X'方向の流体力

5.2.3 クロスビームにかかる Z'方向の流体力に関する考察

Fig. 5-21、Fig. 5-23 からはクロスビームを縦傾斜試験では 5 度の時に物体表面にあった流線が 10 度になるとクロスビームの右上部分で剥離が生じており、クロスビームの揚力の減少が起こっていると考えられる。Fig. 5-24 および Fig. 5-26 の速度コンター図からも同様に 5 度の時にクロスビーム上部では表面に沿っていた流れが、迎え角が大きくなった傾斜角 10 度の場合ではクロスビーム上部の流れが剥離することにより揚力が減少する失速状態となっていることが伺える。

また、Fig. 5-27 及び Fig. 5-28 ではクロスビームについて X 方向の流体力と Z 方向の流体力を傾斜角 1 度ごとに CFD で計算しプロットした。X 方向の流体力は Fig.5-29 のように典型的な翼形状と同じように傾斜角 0 度のところでもっとも小さく、傾斜角 6 度以降のところで大きく上昇している。これは失速による抗力増加によるものとみられている。Z 方向の流体力を見ると 6 度以降のところで揚力の成分が小さくなっていることがわかる。これも失速によって Z'方向の流体力が減少したためだと考えられる。ただ 6 度以降のところで前縁失速のような急激な揚力な低下が見られず、なだらかな揚力の減少であった。また、Fig. 5-21~5-26 で示した 5 度 7 度 10 度の流線や流速ベクトル図からは徐々に剥離が大きくなり、完全な失速状態となるまでに角度の傾斜範囲があることがわかる。また、クロスビームを翼と見立てた場合の翼厚比が 0.30 であり、一般的な翼形状で後縁失速が起こると考えられる翼厚比 0.18 前後以上であることからクロスビームの失速は後縁失速に類するものであると考えられる。

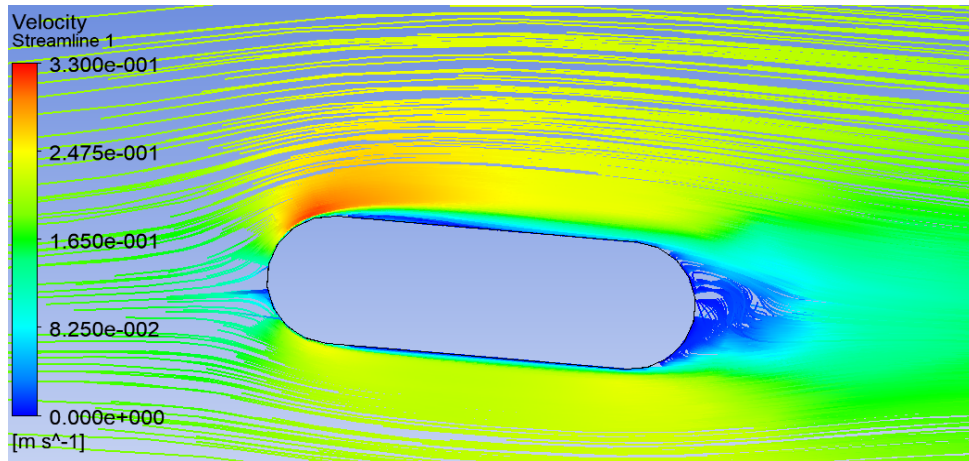


Fig. 5-21 縦傾斜試験 5度の傾きでのクロスビーム付近の流線

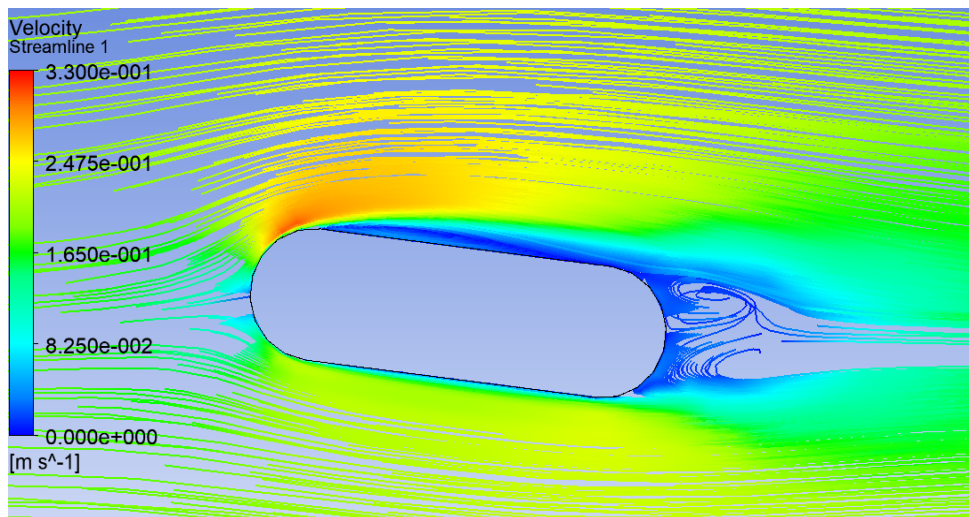


Fig. 5-22 縦傾斜試験 7度の傾きでのクロスビーム付近の流線

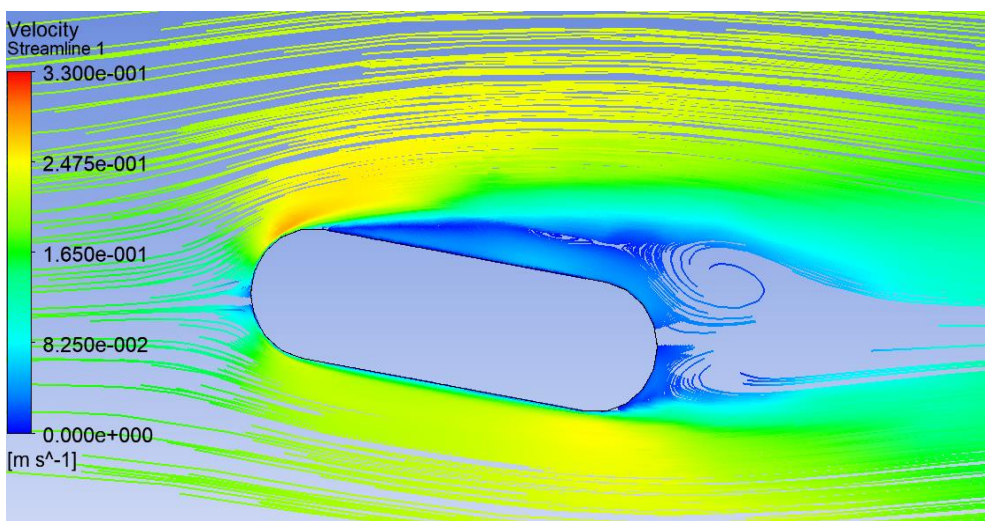


Fig. 5-23 縦傾斜試験 10度の傾きでのクロスビーム付近の流線

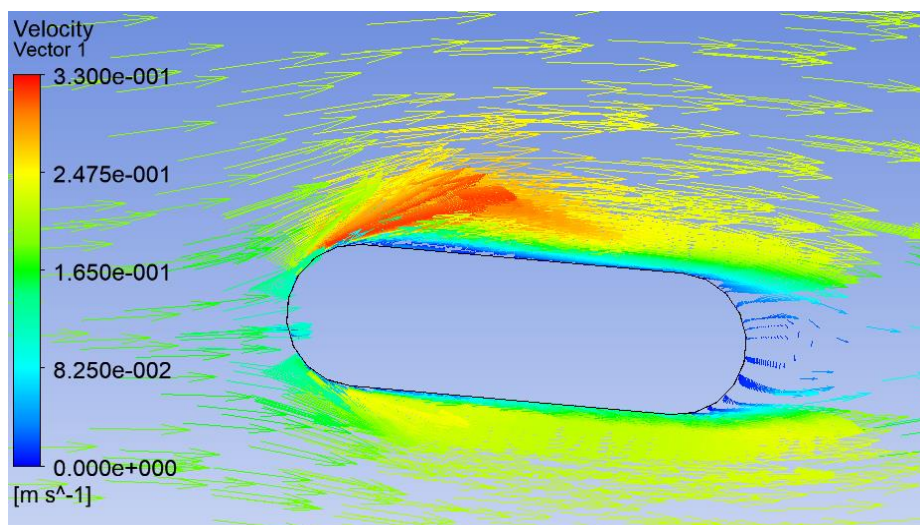


Fig. 5-24 縦傾斜試験 5度の傾きでのクロスビーム付近の流速ベクトル図

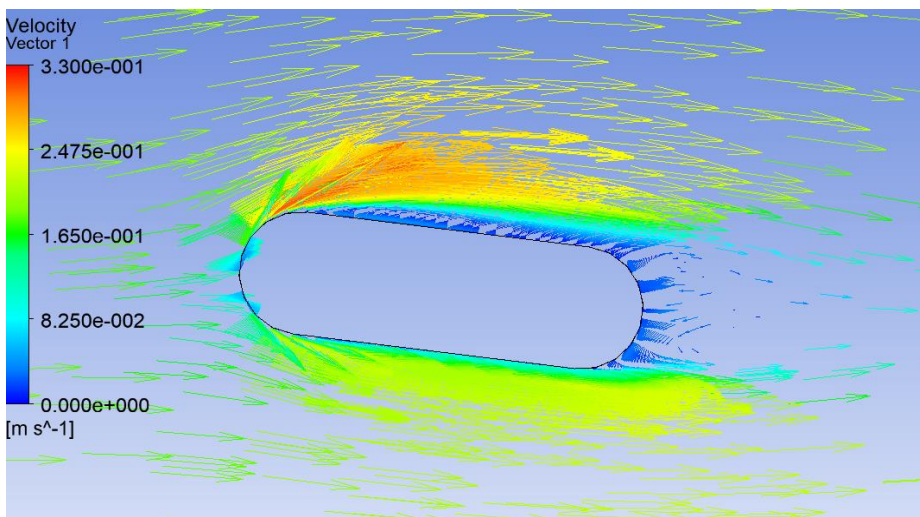


Fig. 5-25 縦傾斜試験 7度の傾きでのクロスビーム付近の流速ベクトル図

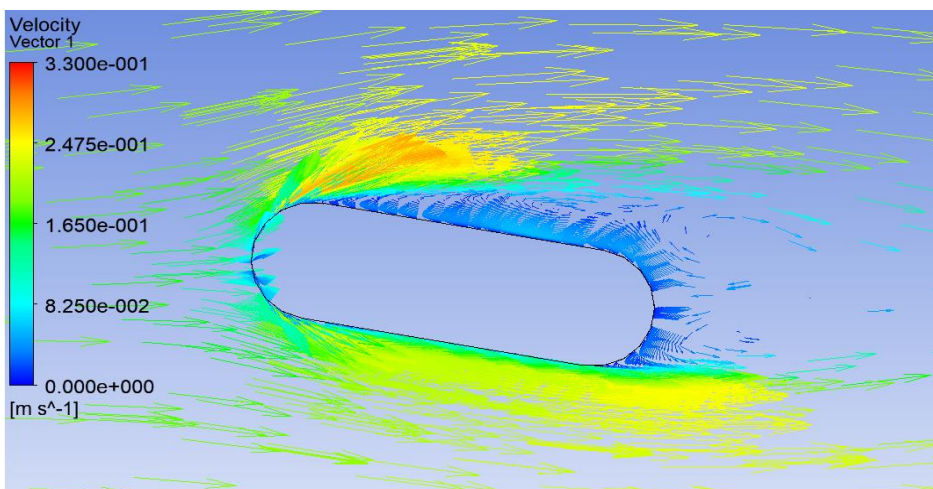


Fig. 5-26 縦傾斜試験 10度の傾きでのクロスビーム付近の流速ベクトル図

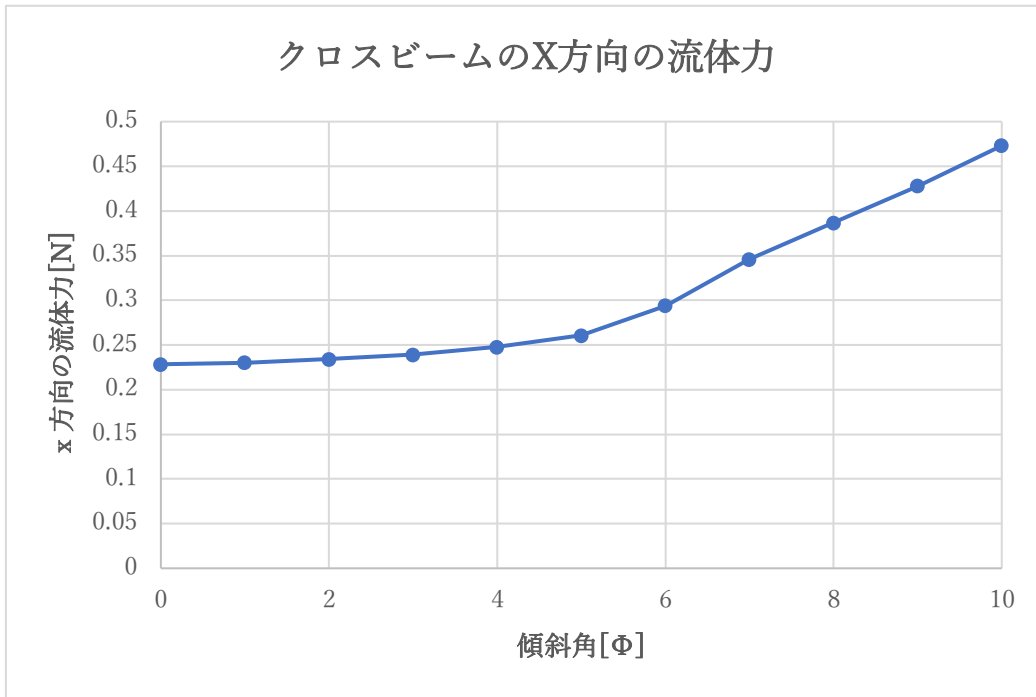


Fig.5-27 クロスビームの X 方向の流体力

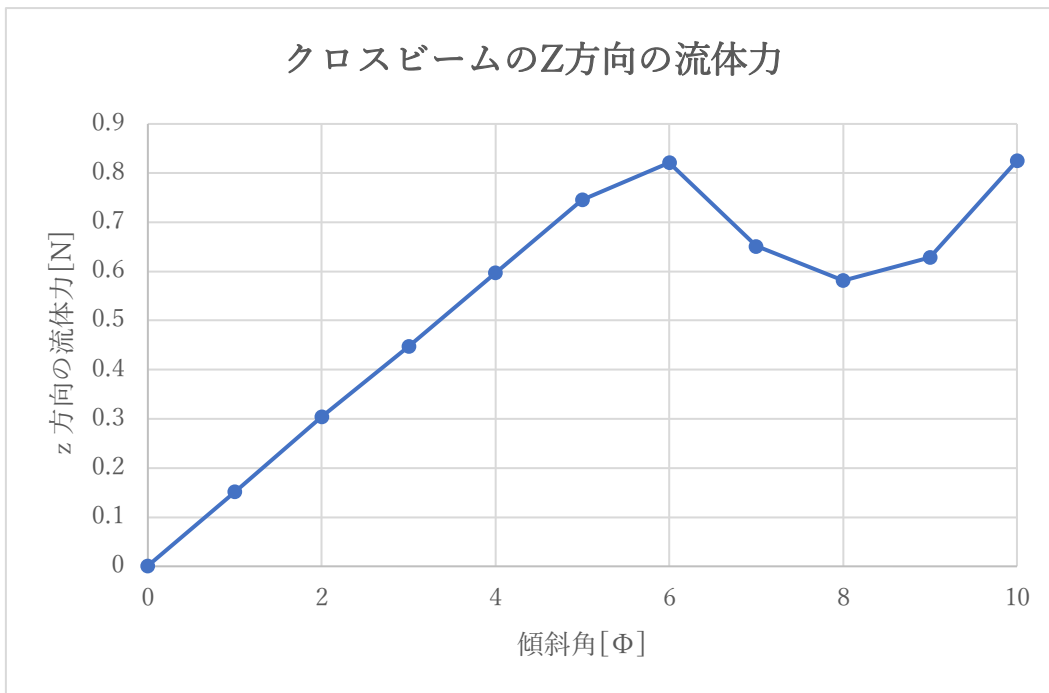


Fig.5-28 クロスビームの Z 方向の流体力

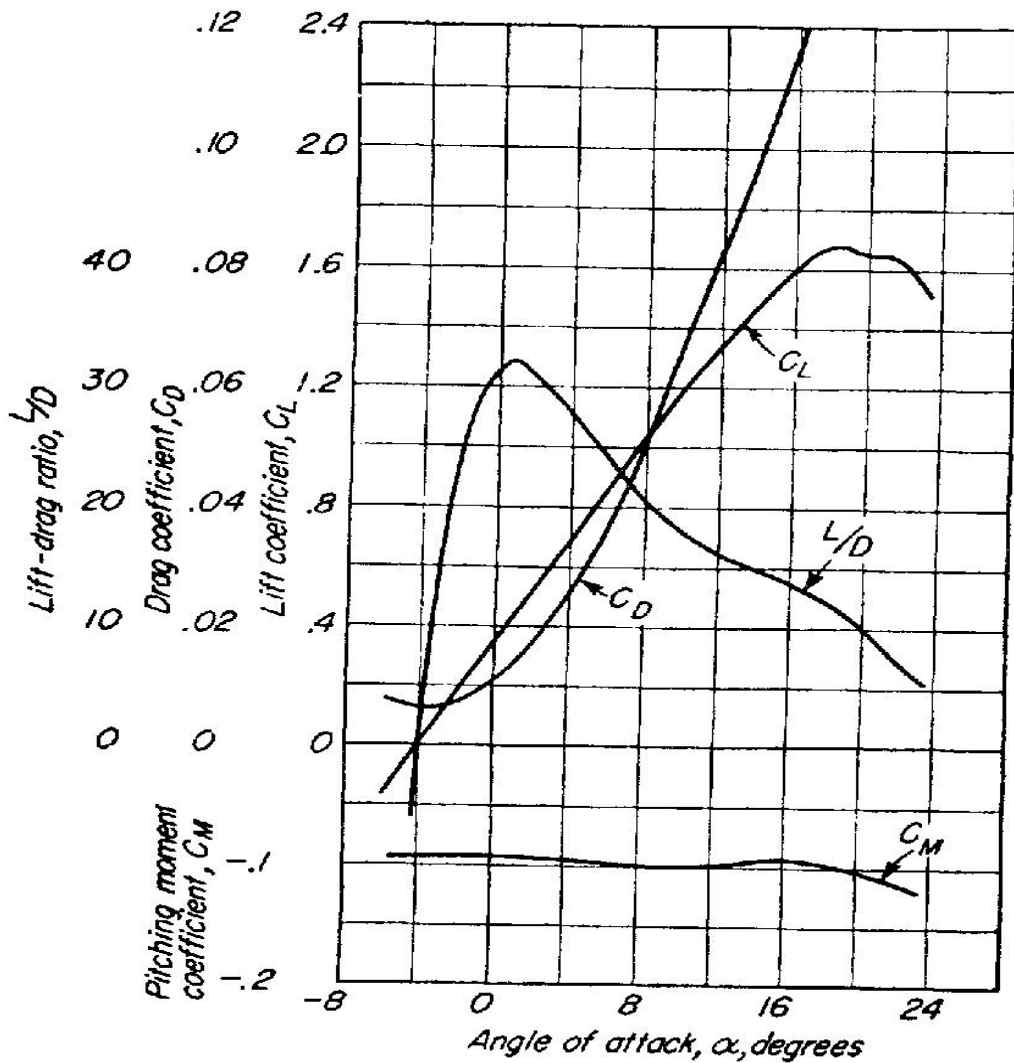


FIG. 1. Typical wing characteristics.

Fig. 5-29 典型的な翼形状の迎え角による抗力係数、揚力係数[29]

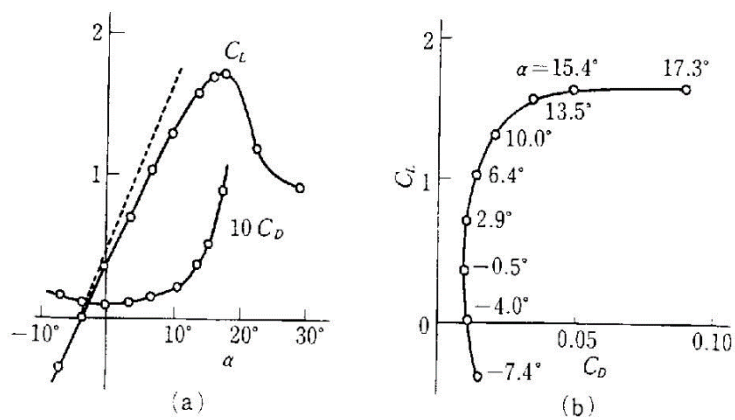


Fig. 5-30 後縁失速型の NACA4412 翼の抗力係数、揚力係数[30]

5.2.4 ナセルとクロスビーム結合体にかかる X'方向の流体力

Fig. 5-31 に 縦傾斜試験 (Pitch 角) におけるナセルとクロスビーム結合体の X'方向に働く流体力のプロット図を示した。

縦傾斜試験のクロスビームの X'方向の流体力と同じく Pitch 角が大きくなるにつれて流体力が大きくなる傾向は変わらなかった。CFD では Pitch 角が 0 度から 5 度になるときに X'方向の流体力が小さくなっている。

一般的に翼型の場合クロスビームのみの場合と同様に失速に至る前の Pitch 角 0 度から 5 度になるときに大きな抗力の違いは見られないため X'方向に変換する際には失速角より前の Pitch 角では X'方向の流体力は少し小さくなると考えられる。CFD はその特性をよくとらえていると考えられる。逆に実験値は Pitch 角が 0 度から 5 度、0 度から -5 度になるときにむしろ X'方向の流体力が大きくなっている。また、Pitch 角が 15 度から 20 度になるときにその X'方向の流体力の増加は鈍化するはずであるがこれも実験では見られない。

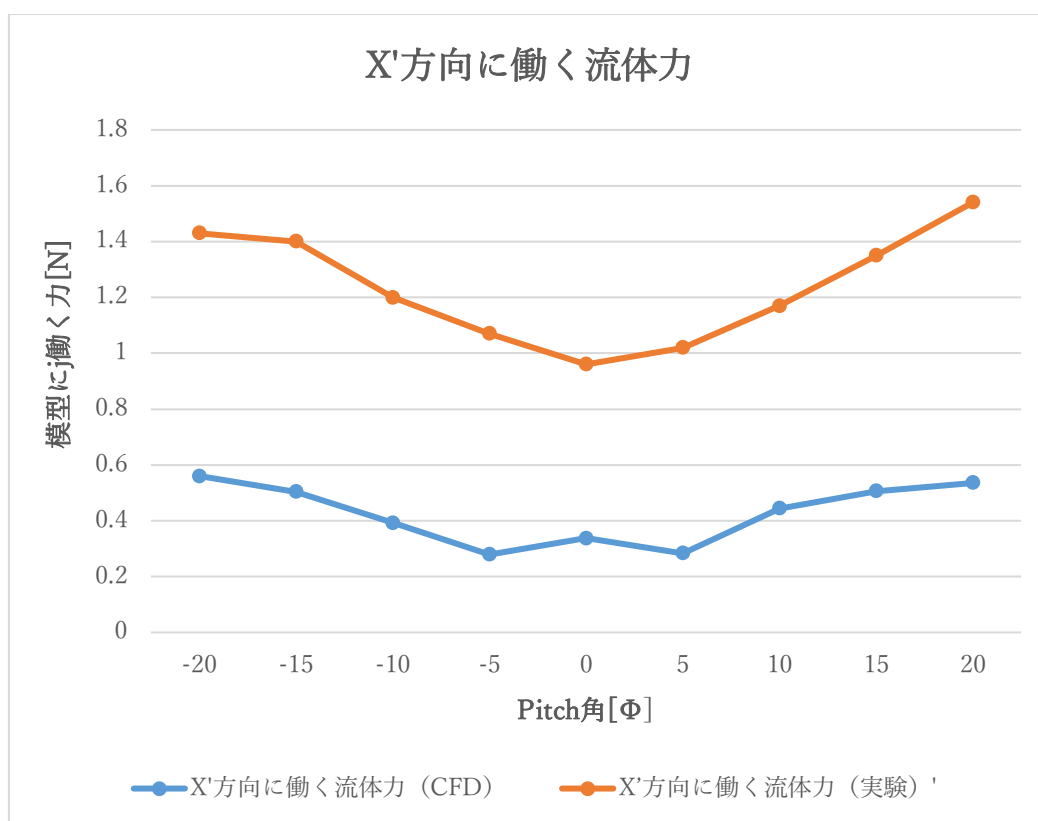


Fig. 5-31 縦傾斜試験 (Pitch 角) におけるナセルとクロスビーム結合体の X'方向に働く流体力

5.2.5 ナセルとクロスビーム結合体にかかる Z'方向の流体力

Fig. 5-32 では 縦傾斜試験 (Pitch 角) におけるナセルとクロスビーム結合体の Z'方向流体力を示した。

縦傾斜試験のクロスビームのみの Z'方向の流体力と同じく結合体も Pitch 角-20 度から 5 度では実験値と同じような値を示していた。ただし、Pitch 角 5 度から 10 度になるときに実験値と CFD の違いが見られた。CFD では 5 度以降の失速による Z'方向の流体力の減少を表していると考えられる。また、結合体も同様に X 軸に対して対称な物体であるため Pitch 角の正負が変わっても Z'方向の流体力の絶対値は変わらないと考えられる。しかし、実験値では Pitch 角 10 度以降と Pitch 角-10 度以降では全く異なった絶対値を示しており、実験の様々な要因による誤差であると考えられる。

また坂田[21]による考察では-5 度から-20 度までの値が小さくなるのは分力計の影響によるものと結論付け、5 度から 20 度までの傾向が正しいと結論づけられている。しかし、5 度から 20 度までの傾向が正しいと仮定するならば、傾斜角が 20 度になるまで失速が起こらないのは不自然であることや CFD の計算結果、分力計が Z'方向の流体力を減少させる要因にはならないといった観点から坂田[21]の考察については再考の余地があると言える。

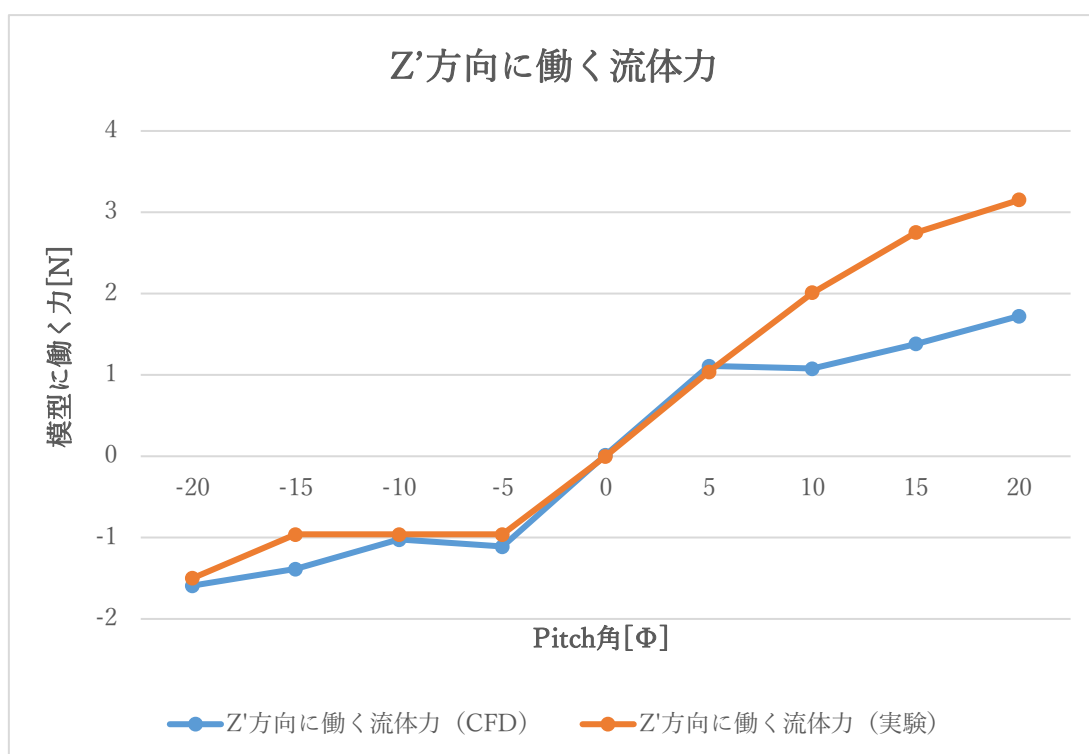


Fig. 5-32 縦傾斜試験 (Pitch 角) におけるナセルとクロスビーム結合体の Z'方向流体力

5.2.6 X'方向、Z'方向の流体力（条件の拡張）

縦傾斜試験において-20 度から 20 度までと限定的であった条件を延長して計算を行った。X'方向、Z'方向の結果を Fig. 5-33 及び Fig. 5-34 に示す。X'方向に働く流体力については 20 度が最も高く、それ以降の Pitch 角では小さく傾向が見られた。これは X'方向で流体力を計測しているため Pitch 角 90 の時は 0 近くなるため小さくなっていると考えられる。Z'方向の流体力については 5 度から 10 度になる時に失速が起これり Z'方向の流体力が減少している傾向が見られ、それ以降の Pitch 角では一定の割合で流体力が増加していた。Pitch 角 90 度の時に Z'方向の流体力を CFD で計算してみると 3.8972[N]であり、45 度以降も一定の割合で流体力が増加する傾向にあると考えられる。

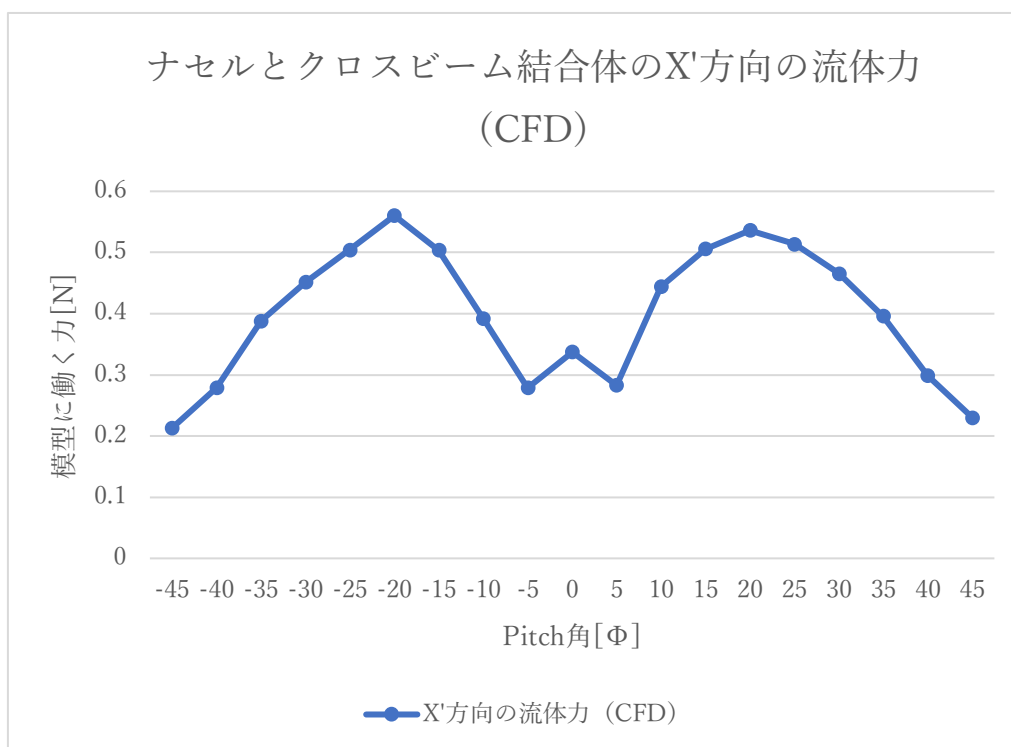


Fig. 5-33 縦傾斜試験のナセルとクロスビーム結合体 X'方向に働く流体力 (CFD)

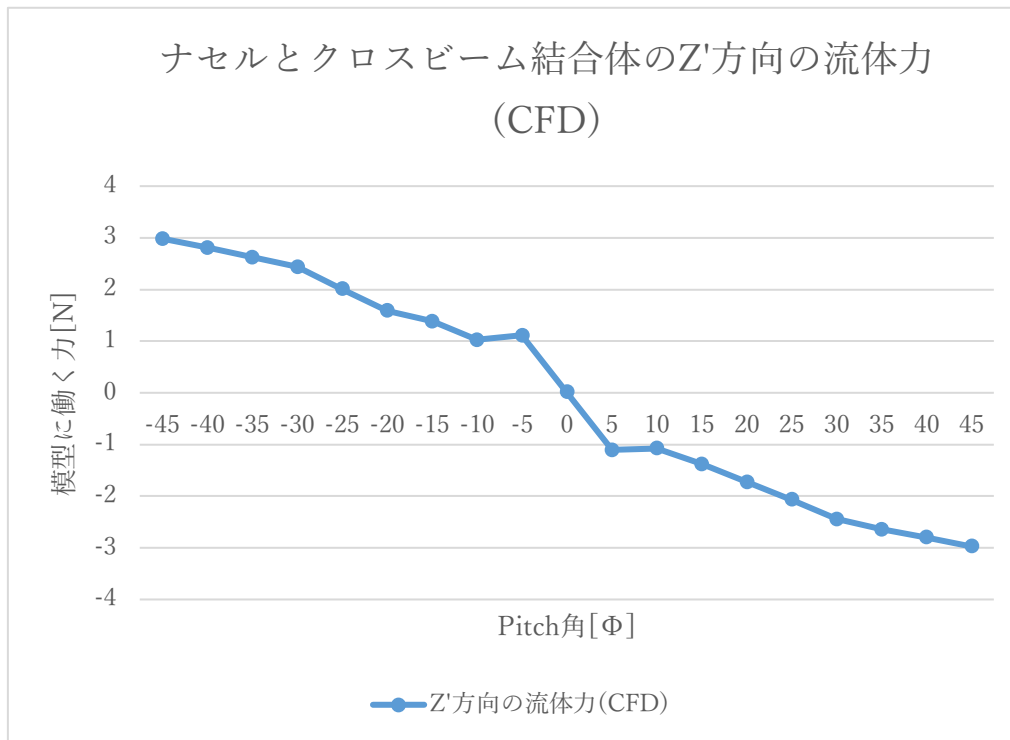


Fig. 5-34 縦傾斜試験のナセルとクロスビーム結合体 Z'方向に働く流体力 (CFD)

5.2.7 CFD で流れ場を可視化した考察

Fig. 5-35~Fig.5-38 には傾斜角が 10 度ずつの速度コンター図を示した。クロスビームは 10 度以て失速に至ることがわかったのでナセルの部分を示した。Pitch 角 10 度のところではナセルの前方において剥離が起こっていないことがわかる。しかし、20 度以降ではナセル前方において剥離が起こっている。ただし 40 度でも剥離点の再付着が起こっている。

Fig. 5-39~Fig. 5-42 には圧力コンター図を示した。圧力のかかる方向によって流体力が変化していると考えられる。

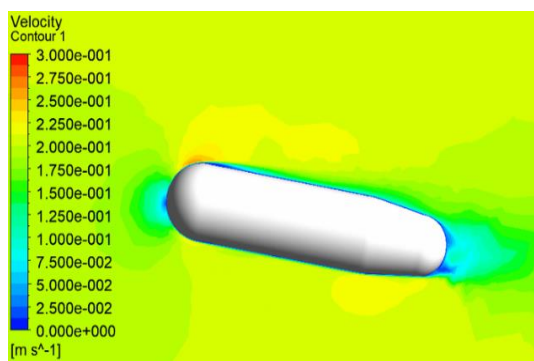


Fig. 5-35 Pitch 角 10 度速度コンター図

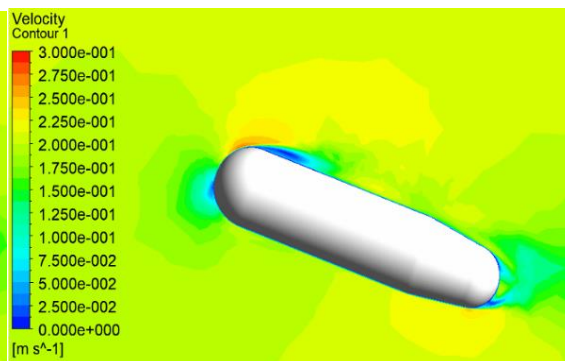


Fig. 5-36 Pitch 角 20 度速度コンター図

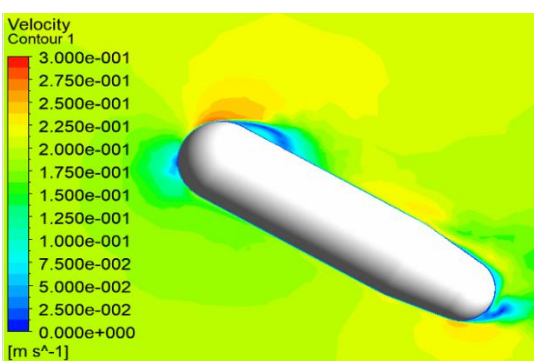


Fig. 5-37 Pitch 角 30 度速度コンター図

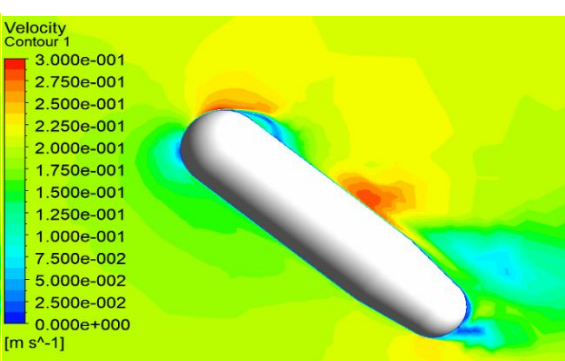


Fig. 5-38 Pitch 角 40 度速度コンター図

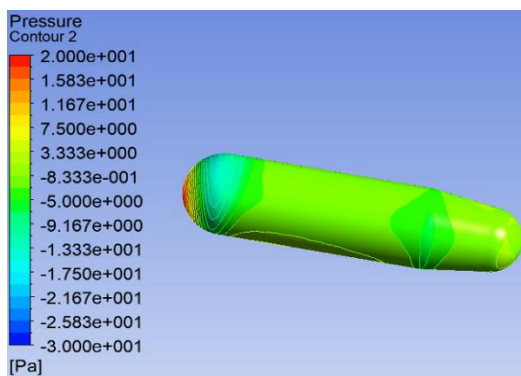


Fig. 5-39 Pitch 角 10 度圧力コンター図

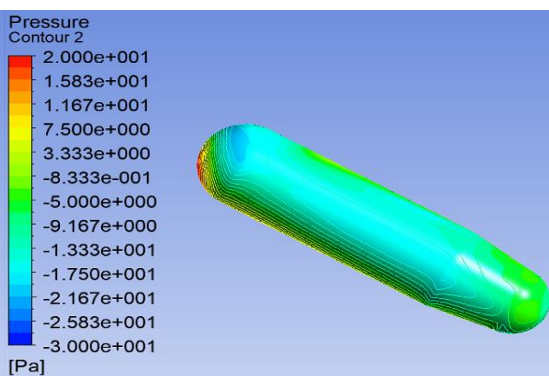


Fig. 5-40 Pitch 角 20 度圧力コンター図

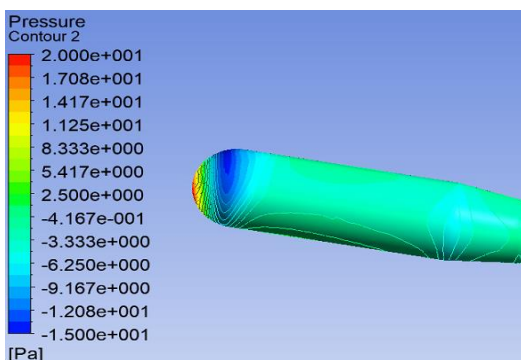


Fig. 5-41 Pitch 角 30 度圧力コンター図

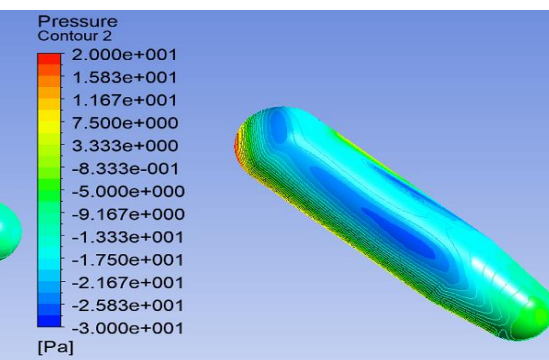


Fig. 5-42 Pitch 角 40 度圧力コンター図

5.2.8 ナセルの Z'方向に働く流体力 (CFD)

Fig. 5-43 は縦傾斜試験のナセルとクロスビームの結合体の CFD 計算値からクロスビームのみの CFD 計算値を引いて算出し、ナセルの Z'方向に働く流体力を Pitch 角の変化に合わせてプロットした図である。Pitch 角 5 度のところはナセルに働く流体力は 0.4N なのに対して傾斜角 10 度でも値があまり大きくない。

Fig. 5-44 の圧力コンター図では赤丸で囲んだ領域において負の圧力が生じていることがわかる。Fig. 5-45 の速度ベクトル図からは赤丸で囲んだ領域において剥離が生じているが再びナセル表面に沿って流れている。剥離点の再付着によって Z'方向に働く流体力がクロスビームなどの部材に比べて 10 度になる時に剥離による失速によって Z'方向の流体力が減少するまでの流体力変化は起こっていない。

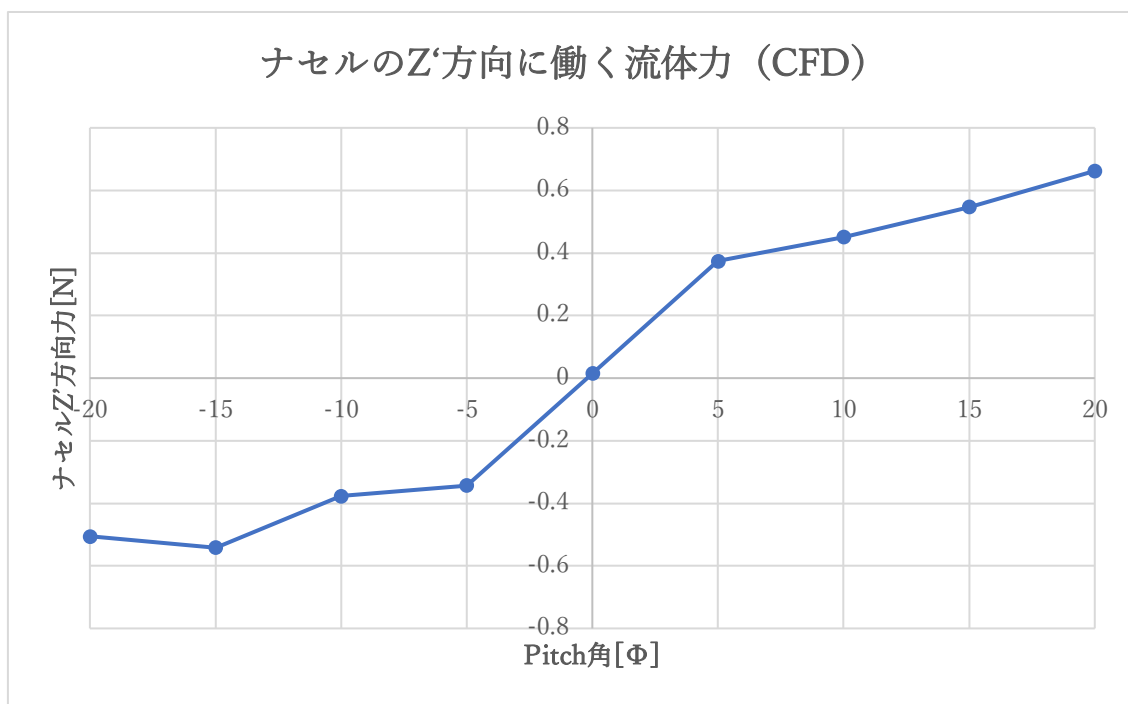


Fig. 5-43 ナセルの Z'方向に働く流体力 (CFD)

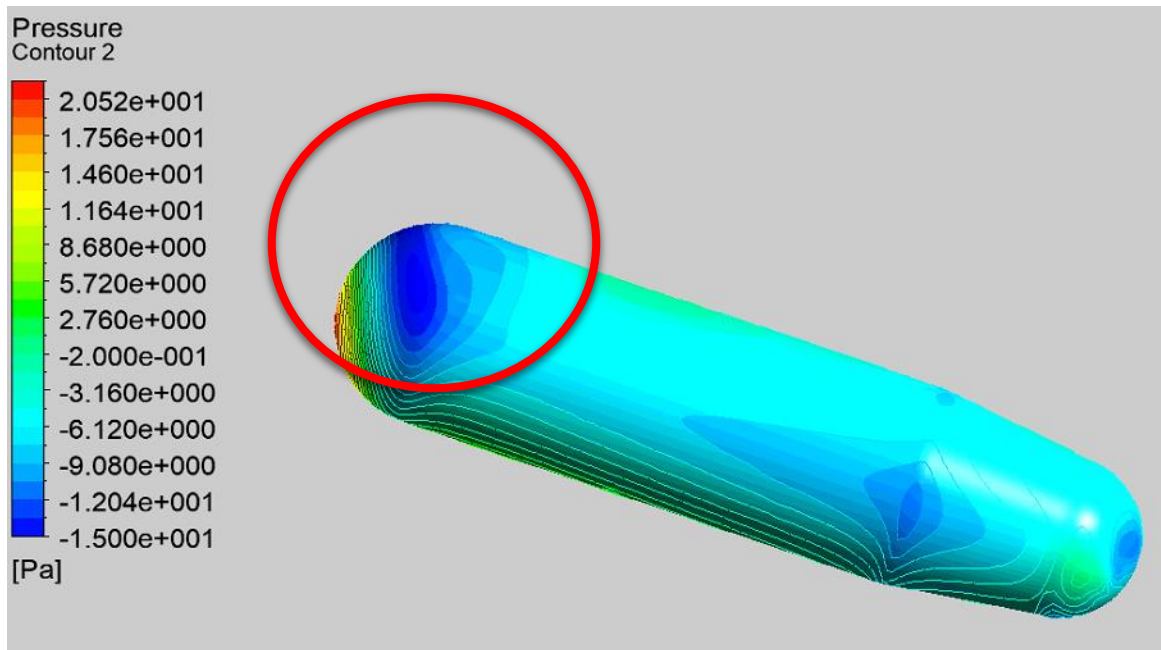


Fig. 5-44 縦傾斜試験ナセル圧力コンター図

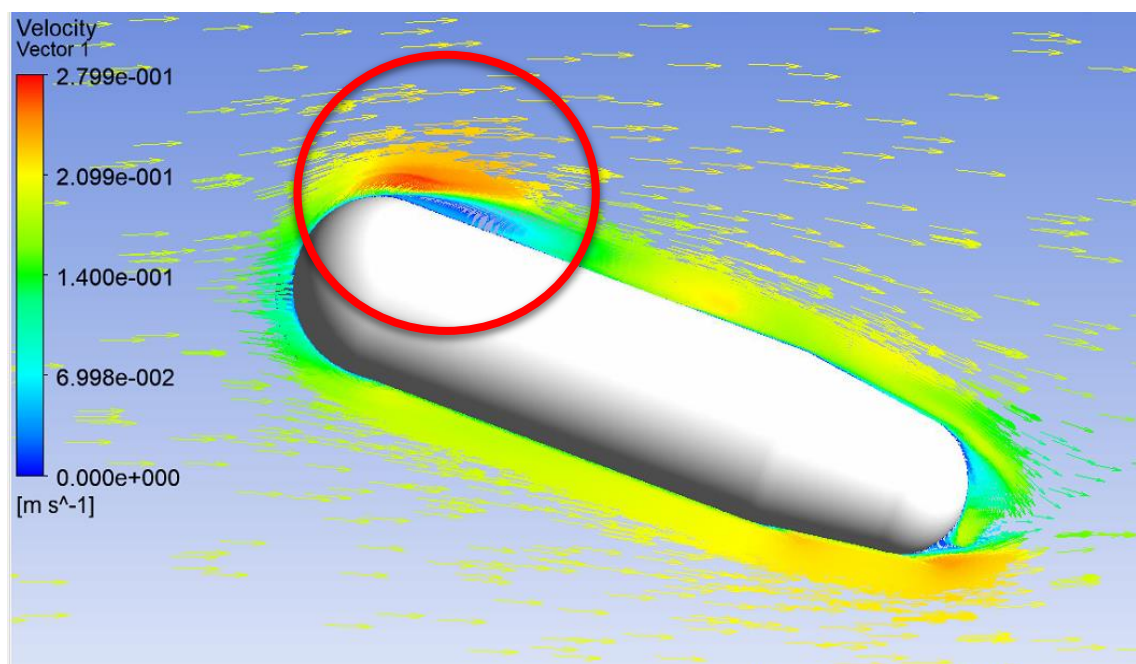


Fig. 5-45 縦傾斜試験ナセル速度ベクトル図

5.3 二軸傾斜(Pitch 角傾斜、Yaw 角傾斜)での CFD 計算

5.3.1 X'方向の流体力

Fig. 5-46 は Pitch 角傾斜（縦傾斜試験）と Yaw 角傾斜（斜行試験）の二軸傾斜について流体力を X'方向にプロットしたものである。Pitch 角、Yaw 角ともに-20 度から 20 度の範囲について行った。Fig. 5-47 は CFD のみでの一軸斜行試験（Yaw 角）での X'方向の流体力をプロットしたものである。

一軸斜行試験（Yaw 角）では Yaw 角が大きくなるにつれて X'方向の流体力が大きくなる傾向は二軸傾斜でも変わらなかった。また、Yaw 角が 0 度のところから 5 度になると X'方向の流体力は小さくなり、15 度から 20 度に傾斜するとき X'方向の流体力があまり変わらない傾向も変わらなかった。

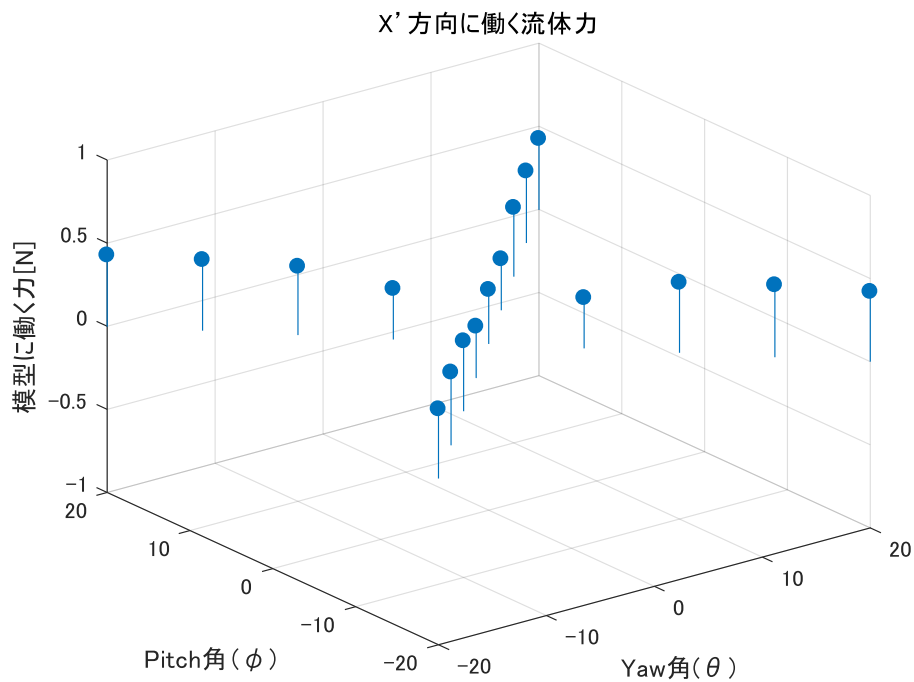


Fig. 5-46 二軸傾斜での X'方向流体力

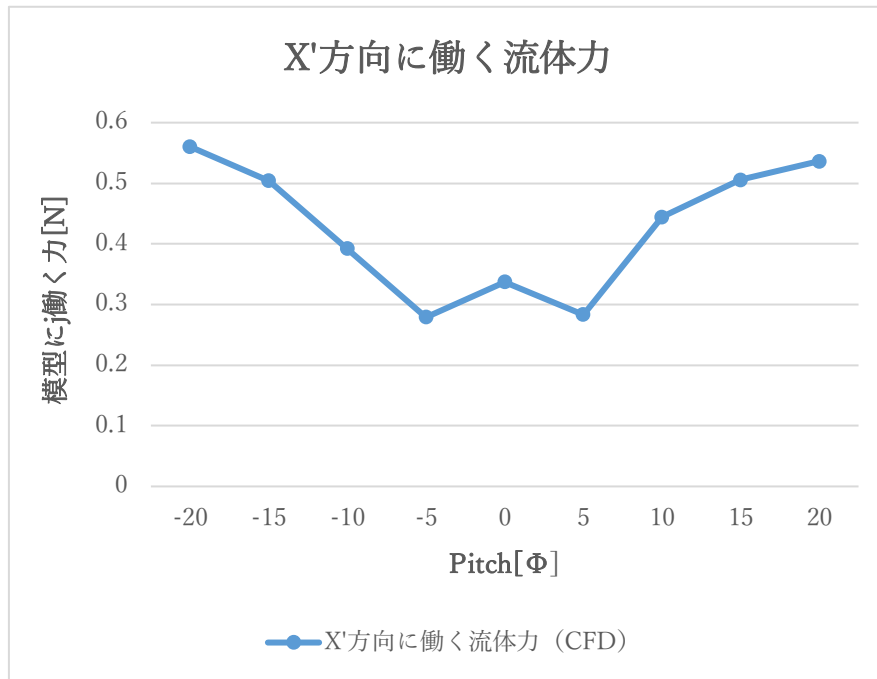


Fig. 5-47 一軸縦傾斜試験 (Pitch 角) での X'方向流体力

5.3.2 Y'方向の流体力

Fig. 5-48 は Pitch 角傾斜（縦傾斜試験）と Yaw 角傾斜（斜行試験）の二軸傾斜について流体力を Y'方向にプロットしたものである。Pitch 角、Yaw 角ともに-20 度から 20 度の範囲について行った。Fig. 5-49 は CFD のみでの一軸斜行試験（Yaw 角）での Y'方向の流体力をプロットしたものである。

一軸斜行試験（Yaw 角）での Yaw 角が大きくなるにつれて Y'方向の流体力が大きくなり、Yaw 角が小さくなるにつれて Y'方向の流体力が小さくなる傾向は二軸傾斜でも変わらなかった。

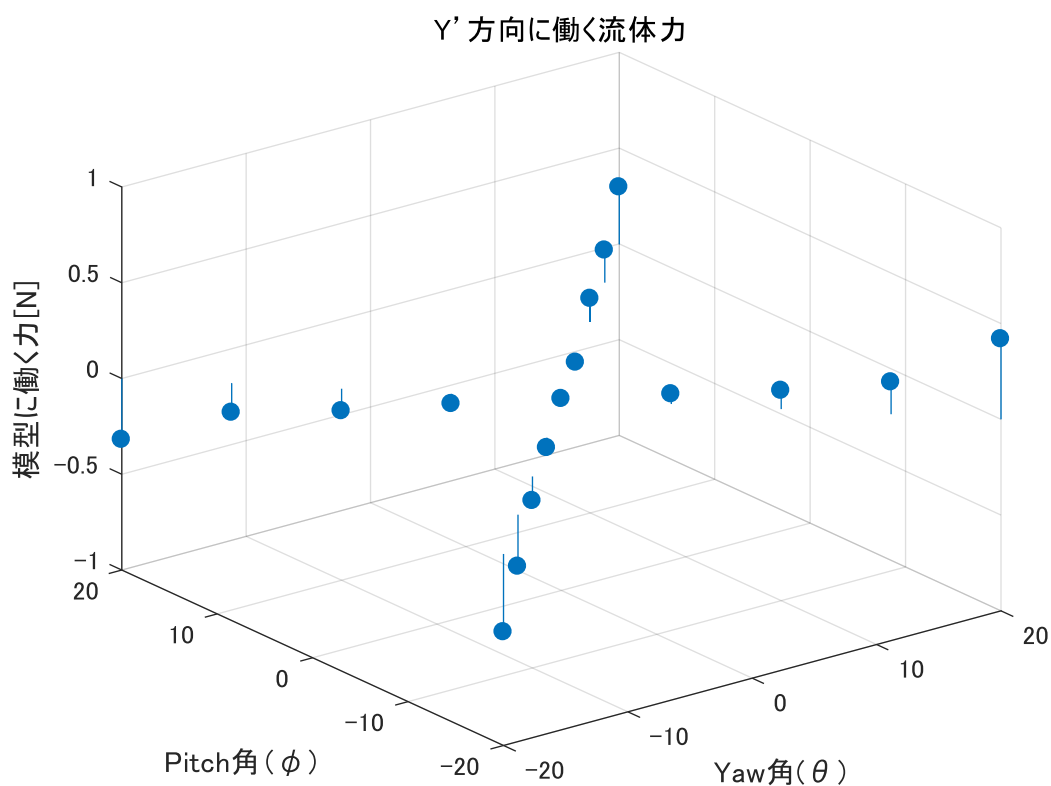


Fig. 5-48 二軸傾斜での Y'方向流体力

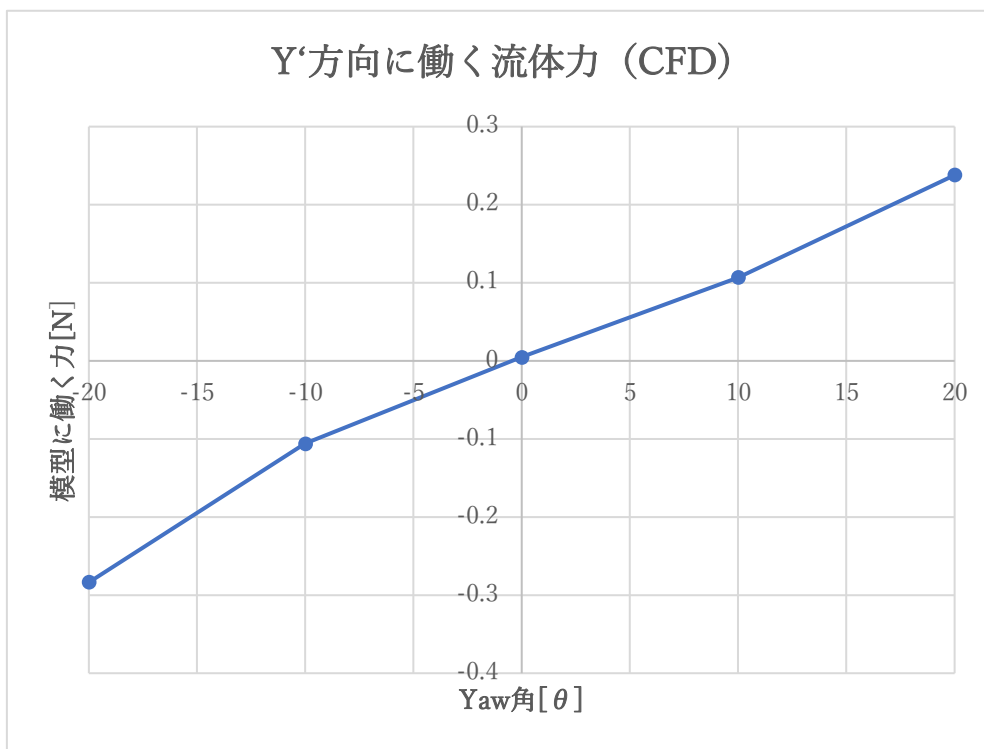


Fig. 5-49 一軸斜行試験 (Yaw 角) での Y'方向流体力

5.3.3 Z'方向の流体力

Fig. 5-50 は Pitch 角傾斜（縦傾斜試験）と Yaw 角傾斜（斜行試験）の二軸傾斜について流体力を Z'方向にプロットしたものである。Pitch 角、Yaw 角ともに-20 度から 20 度の範囲について行った。一軸縦傾斜試験での Z'方向と X'方向の流体力のプロット図を Fig. 5-51 および Fig. 5-52 に示す。

一軸縦傾斜試験では Pitch 角が大きくなるにつれて流体力が大きくなり、逆に Pitch 角が小さくなるにつれて流体力が小さくなっていたがその傾向は二軸傾斜でも変わらなかった。

一軸縦傾斜試験では Pitch 角が 10 度のところで剥離し、失速による Z'方向の流体力の減少および X'方向の流体力の増加が起こっていた。それと同様に二軸傾斜の（Yaw 角、Pitch 角）=（5,5）の地点の Z'方向の流体力と（Yaw 角、Pitch 角）=（10,10）の Z'方向の流体力には大きな差が見られず同じように失速による Z'方向の流体力の減少が起こっていたと考えられる。

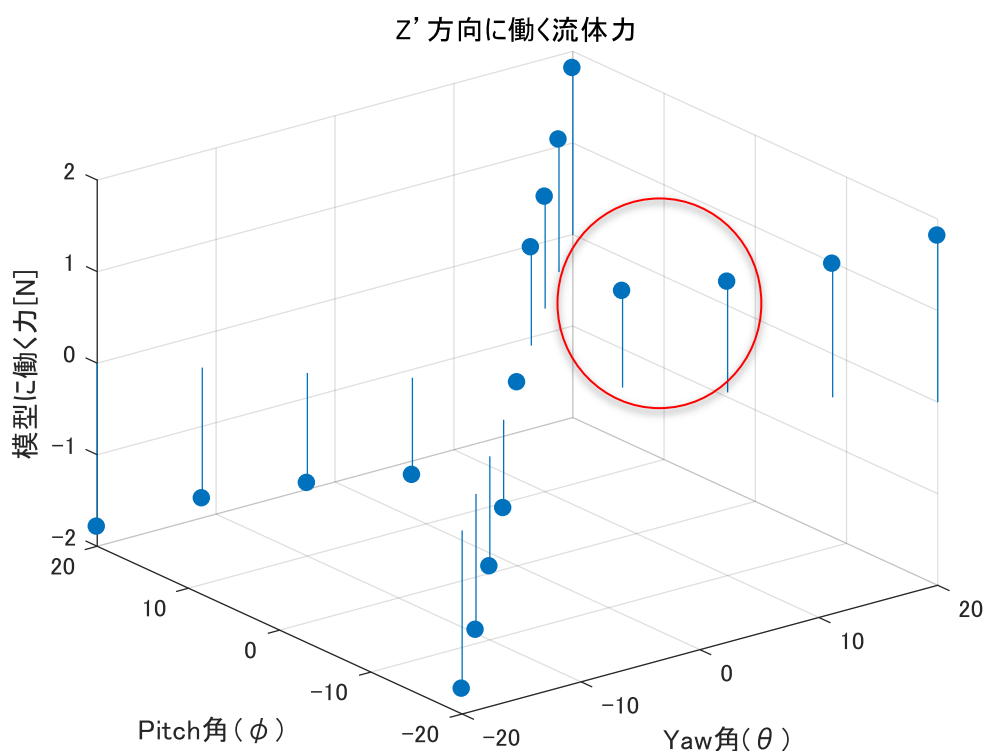


Fig. 5-50 二軸傾斜での Z'方向流体力

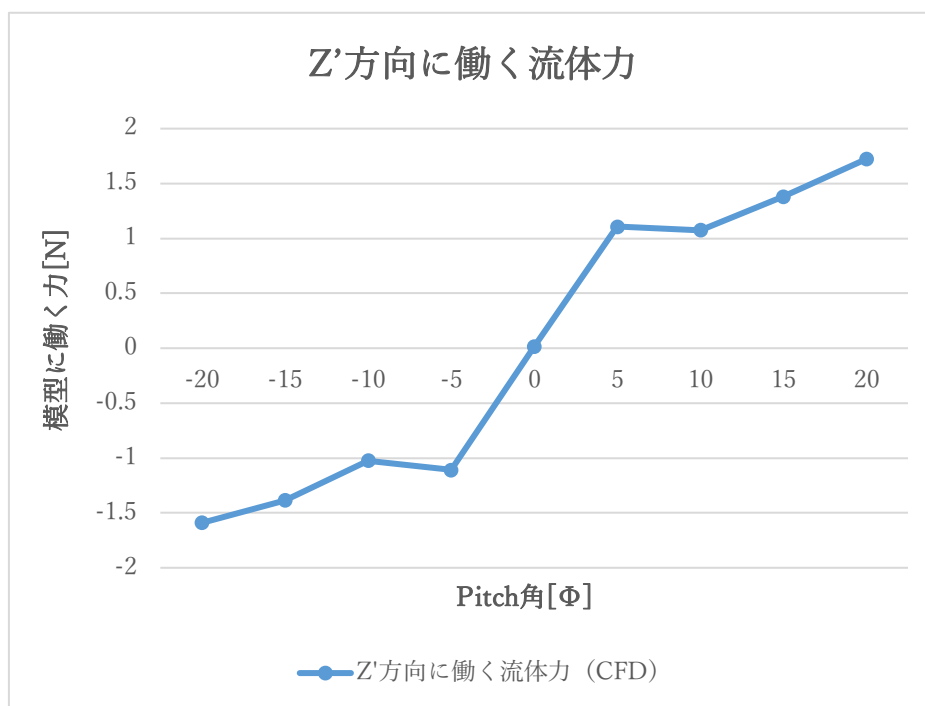


Fig. 5-51 一軸傾斜縦傾斜試験 (Pitch 角) での Z'方向流体力

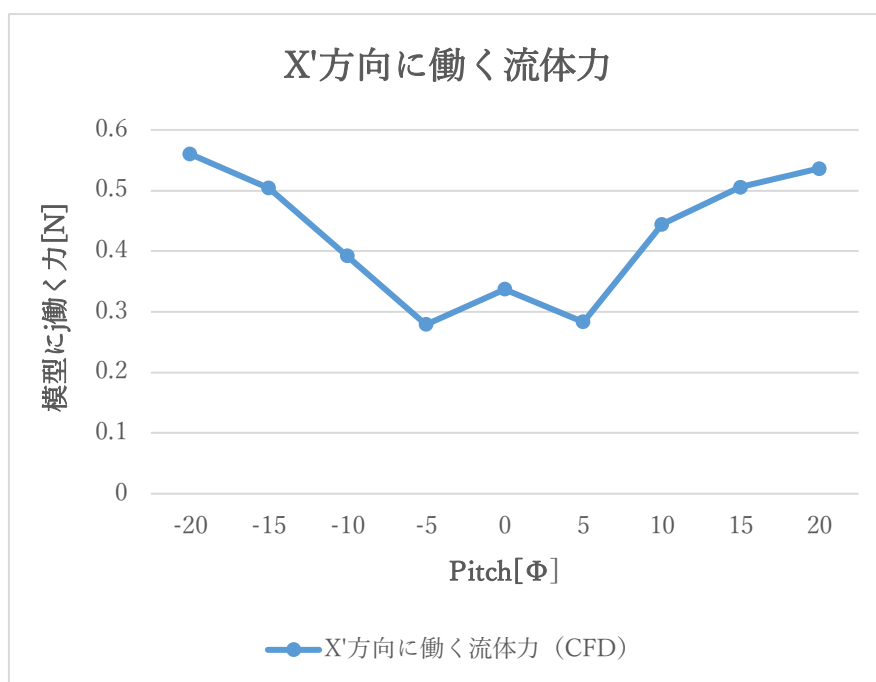


Fig. 5-52 一軸傾斜縦傾斜試験 (Pitch 角) での X'方向流体力

6.CFD 計算の検証

6.1 単純形状による CFD 計算値の検証

実験と大きな違いが出ており、CFD が正しく解けているかを検証する必要がある。そこで、教科書等で一般的に抗力係数が分かっている形状において CFD でナセルやクロスビームと同様の計算スキームやメッシュ作成を行い、流体力が正しく解けるかを検証した。Fig. 6-1~Fig. 6-3 では単純形状での形状とメッシュを示す。Table 6-1 にはそれぞれの形状と抗力係数をまとめ、Fig. 6-4~Fig. 6-6 にはそれぞれの形状の速度コンター図を示した。

すべての形状において外部の流体は水であり、乱流モデルは SST- $k-\omega$ モデルを用いている。計算スキームなどはナセルとクロスビーム結合体と同じものを用いている。

球体の直径は 0.2[m]として設定し、流入流速は 0.4[m/s]である。境界層メッシュについては第一層の高さを 1.5×10^{-4} m とし、成長率を 1.1、積層数を 20 とし CFD 計算を行った。レイノルズ数は実験と同じく 8 万である。この時の抗力係数は 0.58 である。Fig. 6-4 の速度コンター図からも教科書等で掲載されている剥離角と同じになることを確認した。[23]

円柱の直径は縦置き横置きいずれも流入流速は 0.2[m/s]である。境界層メッシュについては第一層の高さを 1.5×10^{-4} m とし、成長率を 1.1、積層数を 20 とし CFD 計算を行った。レイノルズ数は実験と同じく 8 万である。この時の抗力係数は 0.98（縦置き）、0.85（横置き）である。[18]円柱においても抗力係数を CFD と比較してみるとほとんど誤差が見られず CFD が妥当な値を示していると考えられた。

Table 6-1 単純形状の抗力係数

形状	レイノルズ数	流入流速 [m/s]	教科書や論文等での抗力係数	CFD での抗力係数
球体	80000	0.4	0.580	0.578
円柱体（縦置き）	80000	0.2	0.850	0.830
円柱体（横置き）	80000	0.2	0.980	0.956

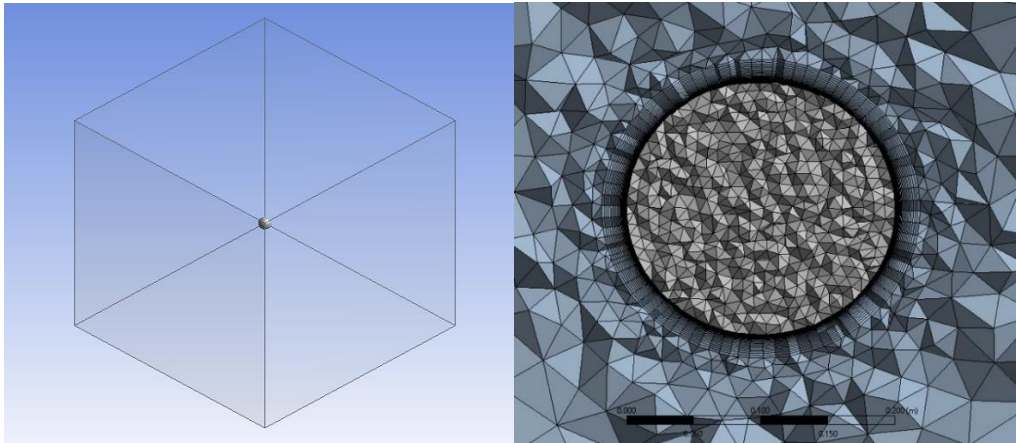


Fig. 6-1 球体のジオメトリおよびメッシュ

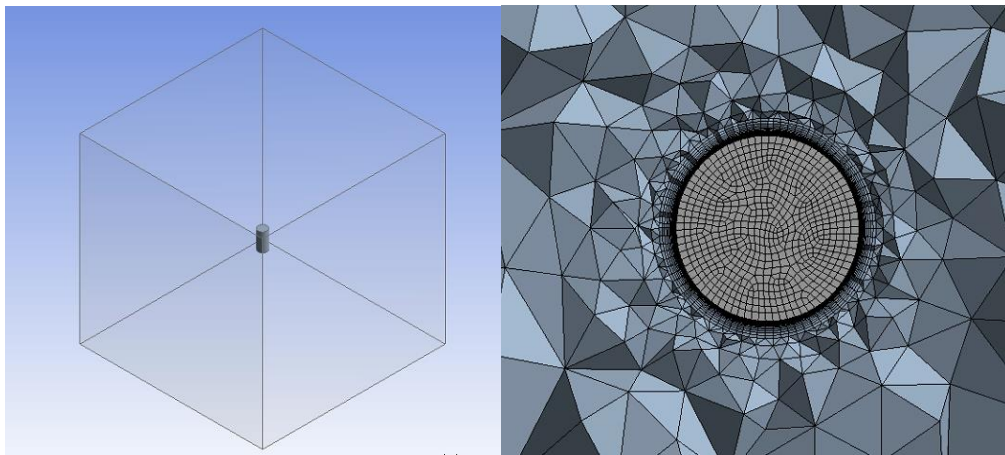


Fig. 6-2 円柱体（縦置き）ジオメトリおよびメッシュ

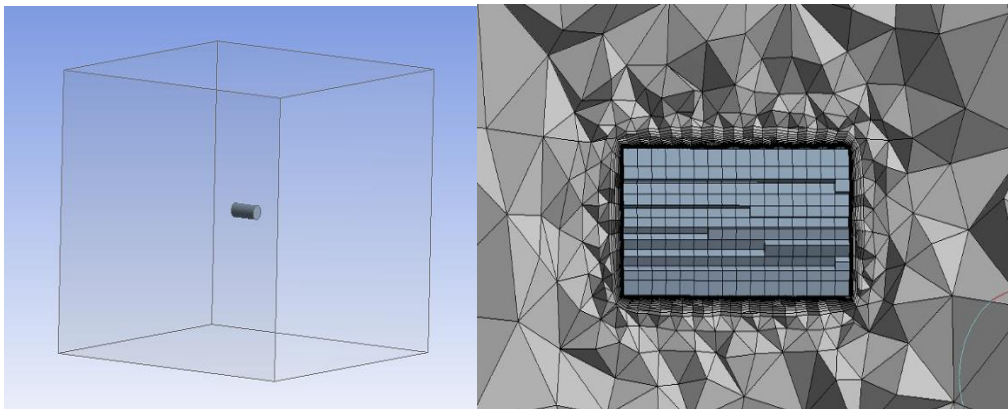


Fig. 6-3 円柱体（横置き）ジオメトリおよびメッシュ

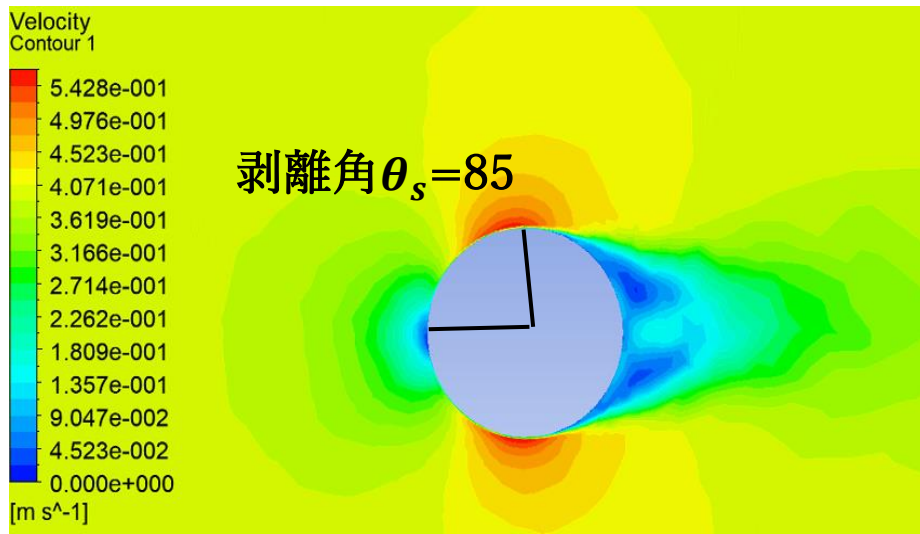


Fig. 6-4 球体速度コンター図

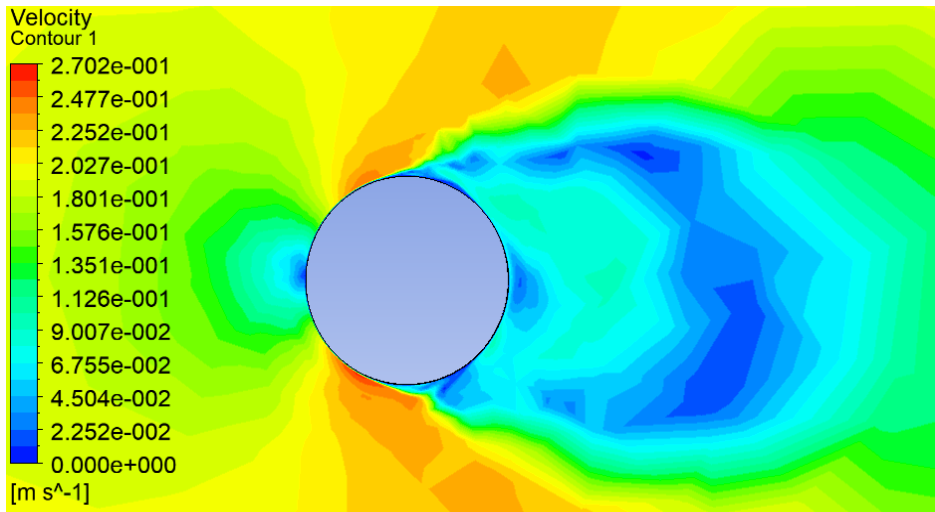


Fig. 6-5 円柱体（縦置き）速度コンター図

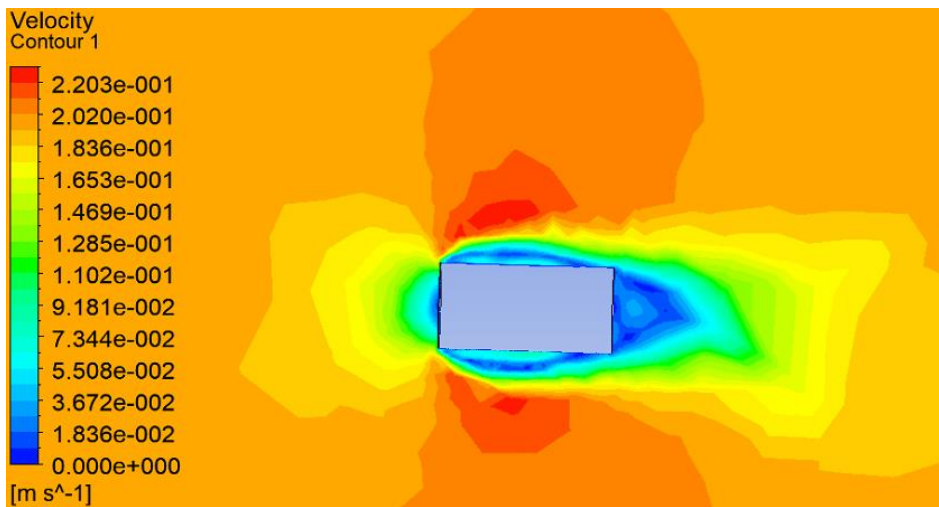


Fig. 6-6 円柱体（横置き）速度コンター図

6.2 実験模型と似た形状や翼形状での CFD 計算値の検証

Fig. 6-7 および Fig. 6-8 のように二次元楕円のジオメトリとメッシュを作成した。クロスビームの形状と似ており、クロスビームはナセルと比べて働く流体力が大きいことから、CFD は似た形状でも正しい値を示せるかを確認した。1:4 の楕円も 1:2 の楕円もメッシュについては第一層メッシュが 0.00025[m]、積層数は 15 層、成長率は 1.2 として作成した。1:4 の楕円体の抗力係数は 0.079 であり、1:2 の楕円体の抗力係数は 0.29 である。[18]

Table 6-2 に実験の抗力係数と CFD の抗力係数を示した。レイノルズ数はいずれも 40000 であり、実験の抗力係数と CFD での抗力係数の誤差は 6%程度しかなかった。単純形状においてはいずれの形状でも CFD と実験値が等しいことを示した。また、Fig. 6-9 からは楕円体の速度コンター図を示した。およそ予想される剥離状態が表されていた。

Table 6-2 その他の形状での抗力係数

形状	レイノルズ数	流入流速 [m/s]	教科書や論文等での抗力係数	CFD での抗力係数
1 : 4 楕円	40000	0.05	0.0790	0.0841
1 : 2 楕円	40000	0.05	0.29	0.278

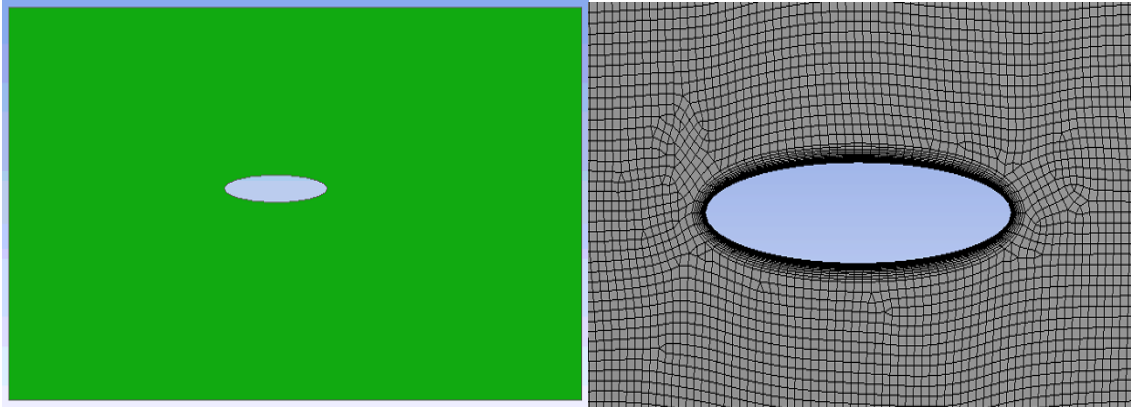


Fig. 6-7 1:4 楕円体ジオメトリおよびメッシュ

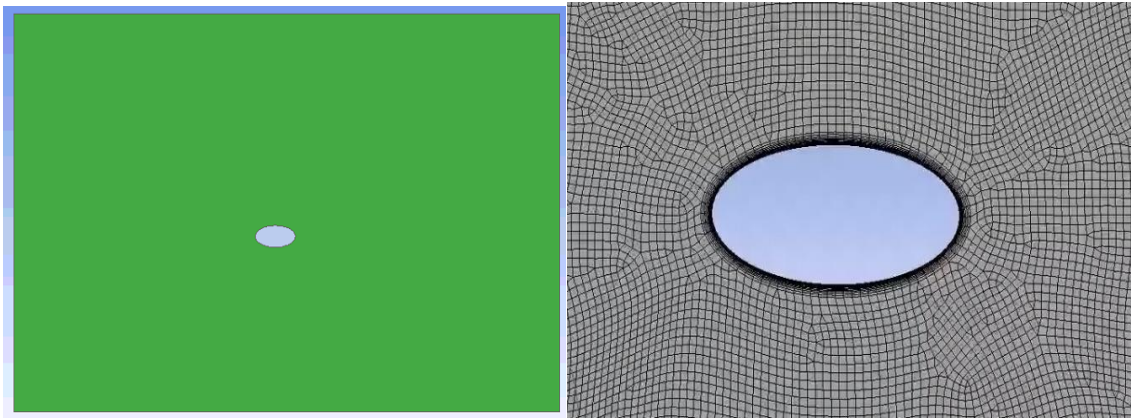


Fig. 6-8 1:2 楕円体ジオメトリおよびメッシュ

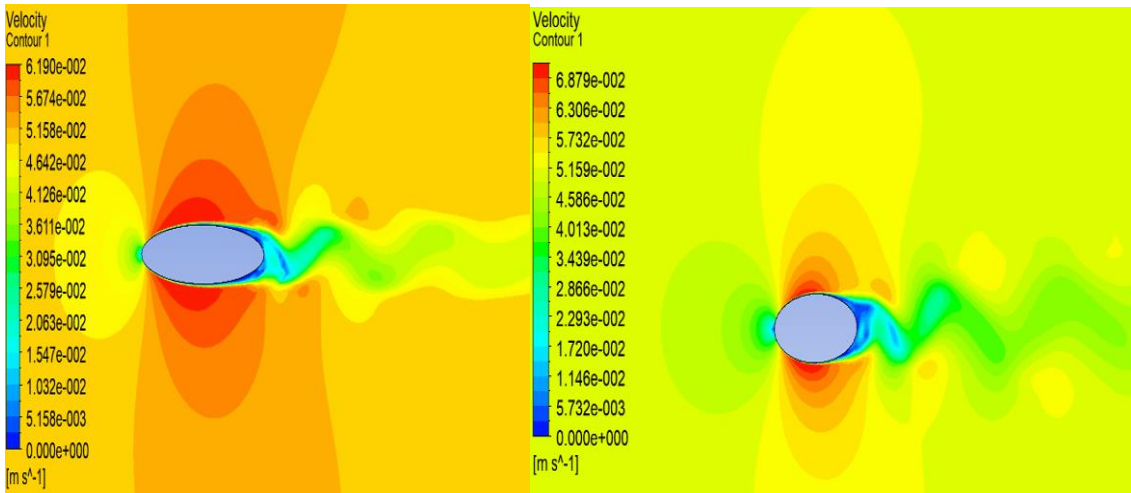


Fig. 6-9 1:2 楕円体及び 1:4 楕円体速度コンター図

※Fig. 6-7 および Fig. 6-8 は緑色の部分が外部流体を示しており、真ん中のくりぬかれた部分が楕円形状である。

6.3 突起物を取り付けた CFD 解析結果

実験で用いられたナセルは Fig. 3-1 からは滑らかな表面しか見えなかったが裏面には実際には実験計測で用いられる様々な突起物を取り付けられている。

ナセルの表面と裏面の様子を Fig. 6-10 及び Fig. 6-11 に示す。

モデル設計の際にはブレードと取り付ける土台の部分や電源コードを差し込む突起物などを再現していなかったがそれらを再現することでより現実に近い値が得られるのではないかと考えモデルを新たに設計した。

Fig. 6-12 のように電源コードにつなぐ端子やプロペラの回転土台の部分まで再現しより詳細なモデルを作成した。メッシュの切り方や計算条件は簡略化した模型と同じ方法を用いている。

突起物を考慮し CFD で計算を行った。抗力係数は 0.3673 (抗力 0.3260N) であり、突起物のないモデルの抗力係数 0.3664 (0.3253N) に比べて流体力はあまり変わらなかった。以上の結果から Yaw 角の 0 度のところでは突起物の影響は無視できるほど小さいものであると考えられる。



Fig. 6-10 ナセル表面



Fig. 6-11 ナセル裏面

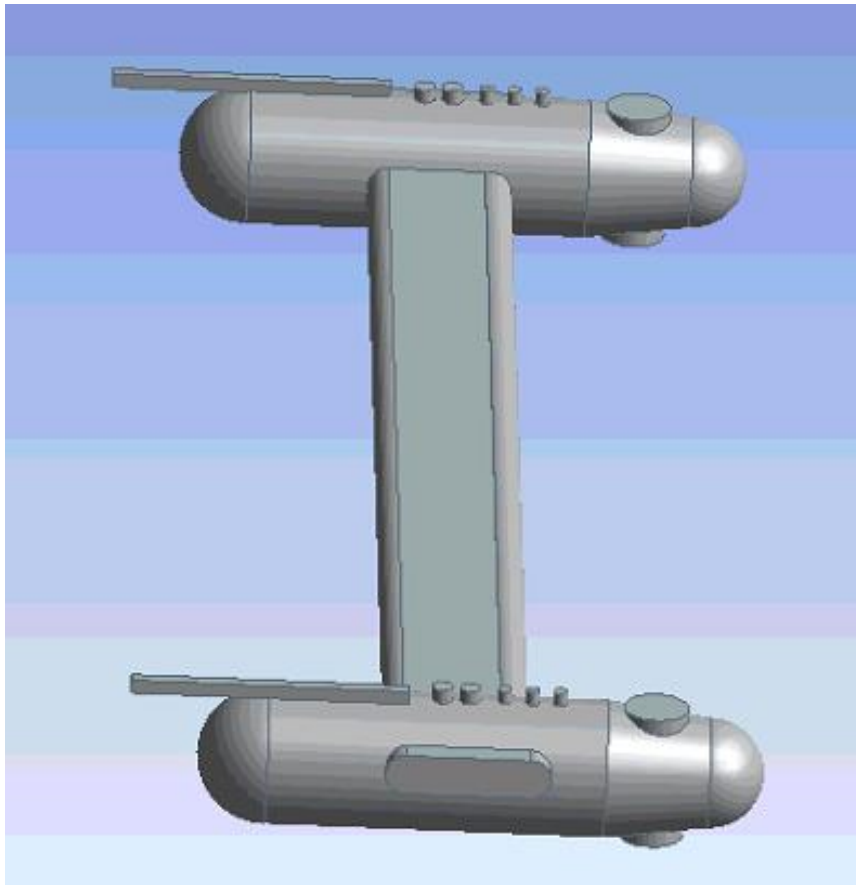


Fig. 6-12 突起物を考慮したモデル

6.4 ナセルとクロスビーム結合部の干渉による影響

Fig. 6-13 にナセルとクロスビーム胴体結合部における圧力コンター図を示し、Fig. 6-14 にはナセル部分のみの圧力コンター図を示す。

また、Table 6-3 にそれぞれの場合の流体力を示した。

ここで Table 6-3 の③のナセル+クロスビームはナセルとクロスビームの流体力のそれぞれの合計値を、④結合体はナセルとクロスビームを合わせた部材の流体力の合計値を表している。

CFD でナセルのみの流体力とクロスビームのみの流体力を求めた。その合計値が結合体として求めた流体力よりも小さいことを確認した。一般的に航空機などで翼と胴体の部分の結合部で干渉によって首飾り渦が見られその空力特性などが研究され、流体力が増加する。

Table の③と④を比較してみると④のほうが大きい。しかし、大きな差があるわけではない。

ナセルのみの圧力コンター図からは側面において圧力の低下が見られなかったが、Fig. 6-13 の結合体の部分では圧力が低下していることがわかる。流体力の増加はこれらの干渉影響による圧力の変化によって起こったものであると考えられる。

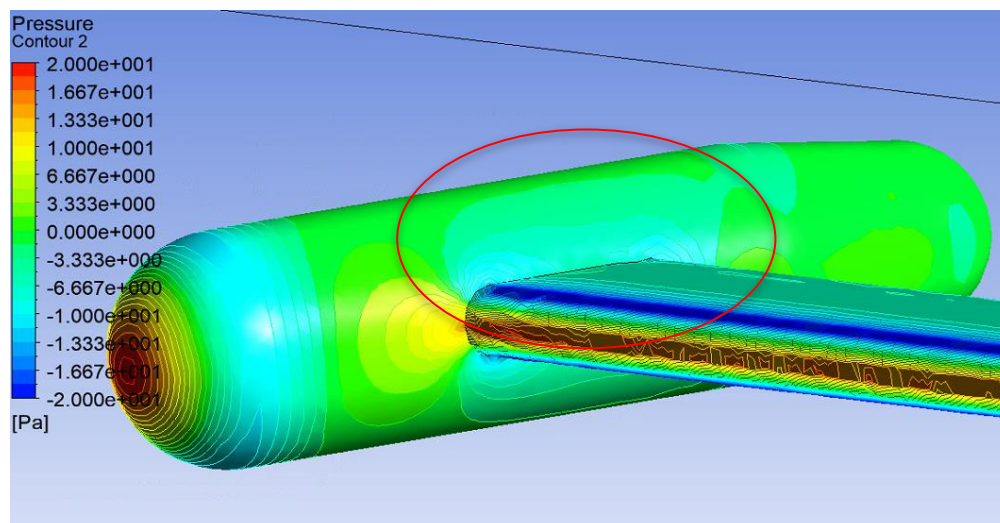


Fig. 6-13 ナセルとクロスビーム胴体結合部における圧力コンター図

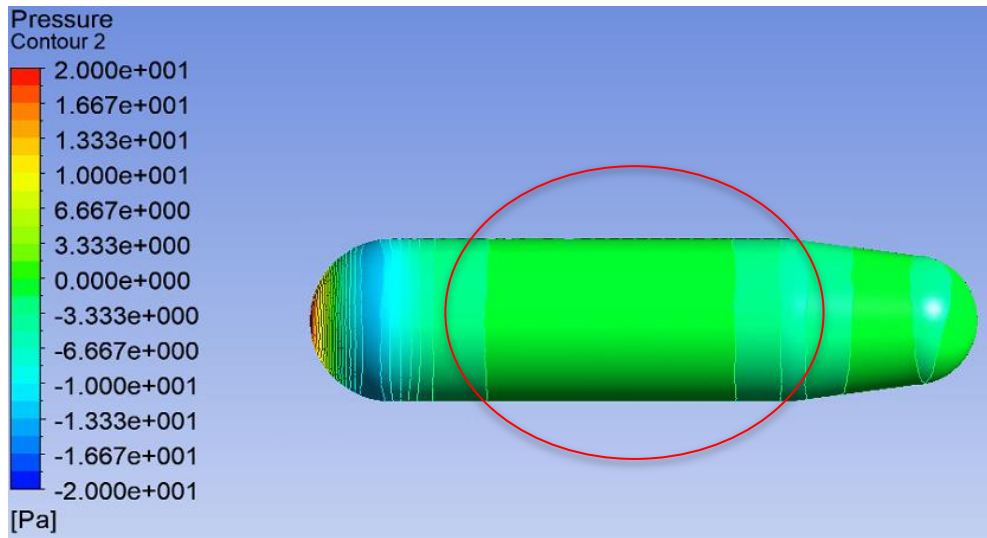


Fig. 6-14 ナセル部分のみの圧力コンター図

Table 6-3 それぞれの部材に働く流体力

通し番号	部材名	流体力 [N]
①	ナセル	0.0335
②	クロスビーム	0.2249
③	ナセル+クロスビーム	0.2919
④	結合体	0.3253

7 実験値が CFD の計算結果と異なることに対する考察

今章では、実験結果と CFD の計算結果を示しながら考察していく。

7.1 抗力係数を考慮した実験値の検証

Fig. 7-1 はナセル部分の形状のみを表したものである。Fig. 7-2 に CFD 解析時のメッシュを示す。実験値の値を検証するためにナセルの部分のみで CFD 計算を行った。第一層高さを 1.93×10^{-4} 、積層数 25、成長率 1.1 としてメッシュを作成し、計算を行った。CFD での計算結果は 0.0335N であった。

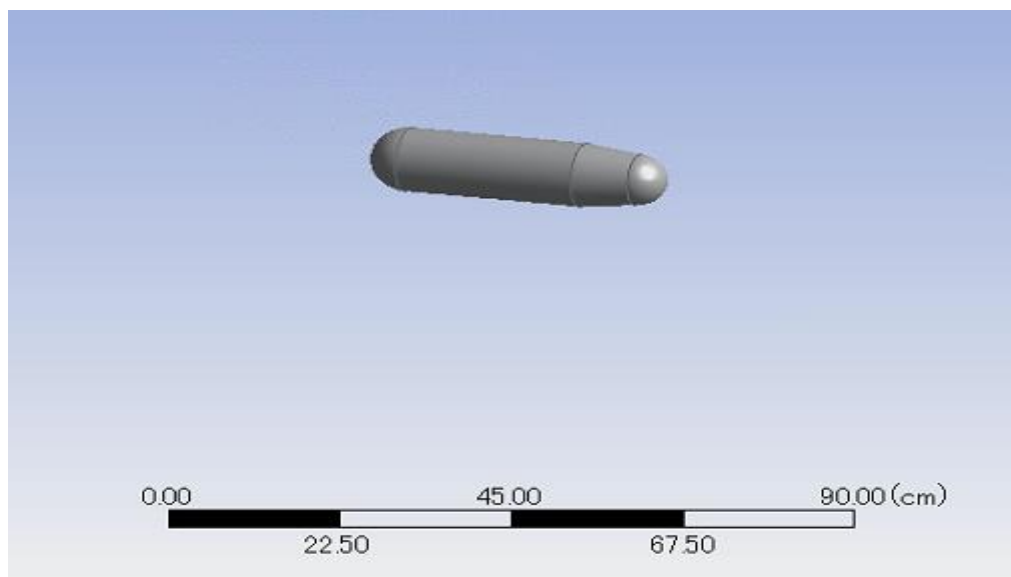


Fig. 7-1 ナセル部分

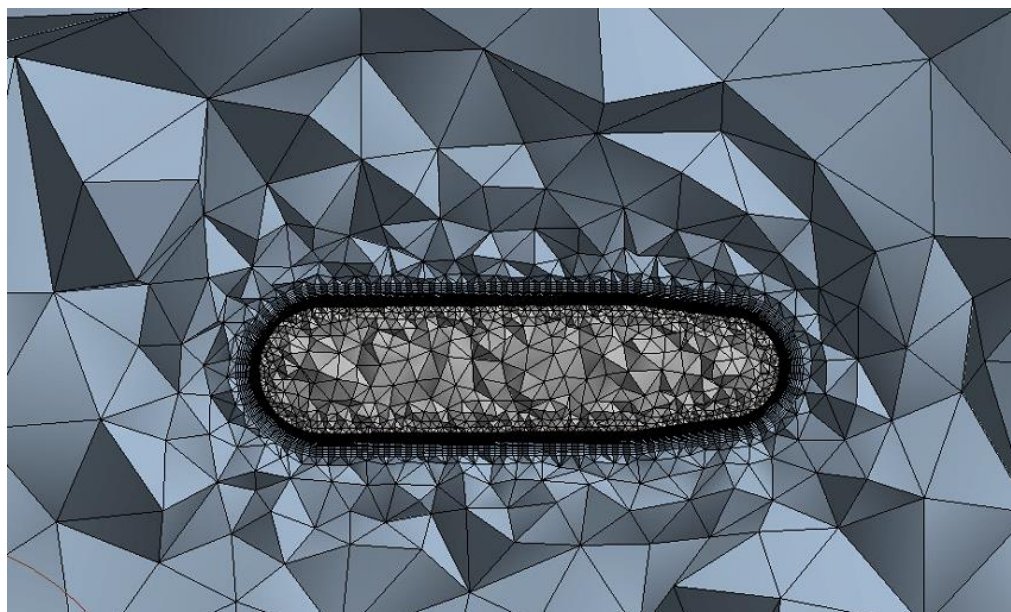


Fig. 7-2 ナセル部分メッシュ

Fig. 7-3 にナセル部分の流速コンター図を示す。CFD ではおよそナセルの形状から予測される流速の変化状況だった。

Fig. 7-4 にナセル部分の圧力コンター図を示し、Fig. 7-5 はナセル部分の摩擦力のコンター図でありナセルに働く流体力を示した。

ナセルの抗力係数は 0.214 であった。およそナセル部分は楕円体によく似ており、楕円柱の抗力係数はおよそ長径や短径の比にもよるが 0.1~0.4 程度であることや、[18]ナセル後面が剥離を防ぐ形状になっていることから大きく異なった値は算出されていないと考えられる。Fig. 7-3 から丸みを帯びた前面では大きな剥離は起きず、ナセル後面において小さな剥離が起こっている様子が伺える。

Table 7-1~7-3 では実験での Pitch 角 Yaw 角 0 度での実験と CFD の抗力係数をクロスビームとナセルに分け、比較してみた。なおナセル部分の実験の抗力はナセルとクロスビームの結合体の抗力とクロスビーム部分の抗力の大きさを測定しているので引いて求めた。特にナセル部分の抗力係数について実験では 1.94 と非常に高い値を示していた。

Fig. 2-3 の単純形状での抗力係数とナセルの形状を比較してみる。一般的に流れの受ける前面において平面などになっていて圧力を受ける面積が高い形状は抗力係数が高いということが言える。また、後面においても同様に形状が丸みを帯びた流線形や翼型に近づけば 近づくほど抗力係数は小さくなる。

しかしナセル部分は Fig. 7-1 のように前面に丸みを帯びた半球体であることや後面が剥離を防ぐ形状になっていることから実際の抗力よりも過大に評価していることが考えられる。

クロスビームも同様に二次元的に考察すると前面と後面は半球状になっており、実験値の抗力係数の 0.68 は大きいと推察される。

また、ナセルとクロスビームの結合体が結合部分における干渉の影響などで高い抗力を示していたとしてもナセルの抗力係数は CFD の 10 倍程度でもあるため、実験値を信用できる要素とはならないと考えられる。

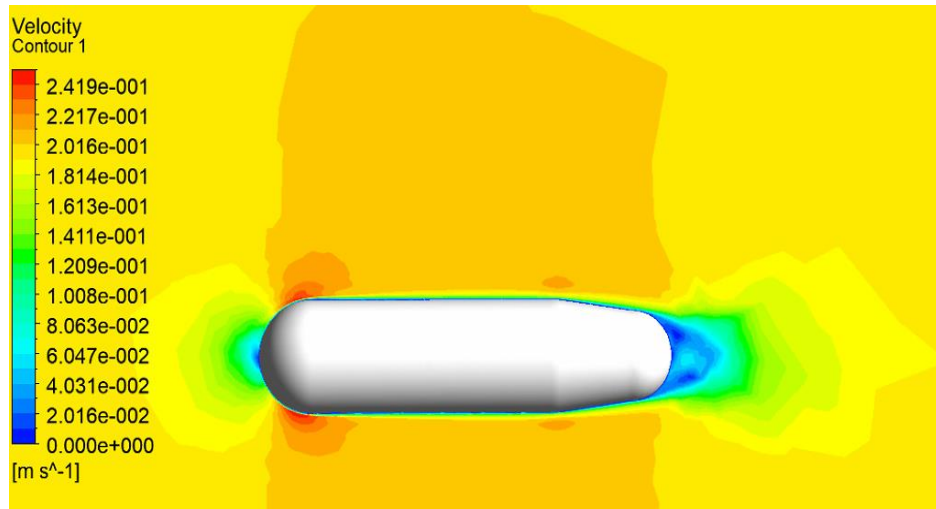


Fig. 7-3 ナセル部分流速コンター図

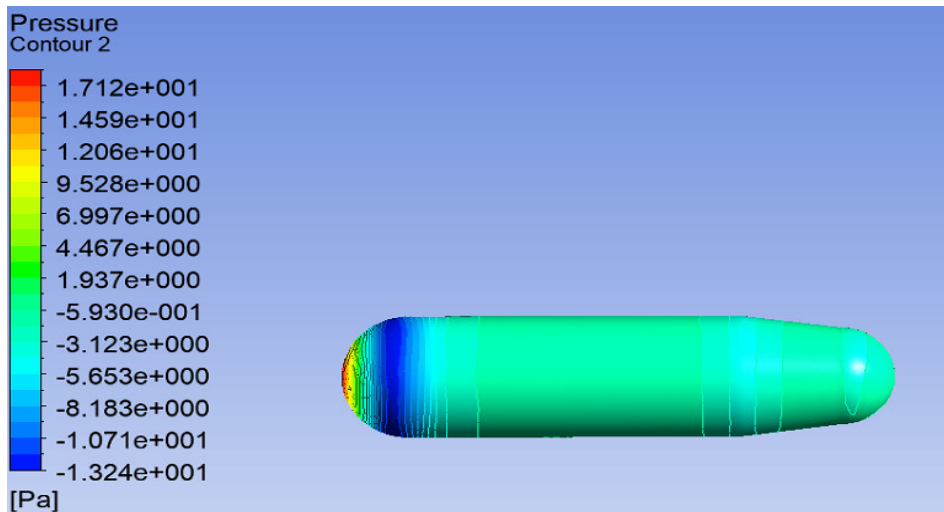


Fig. 7-4 ナセル部分圧力コンター図

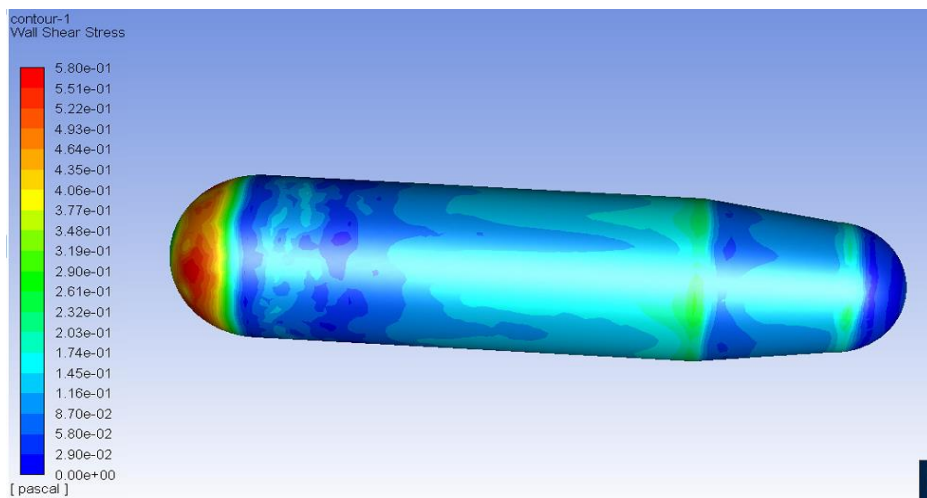


Fig. 7-5 ナセル部分摩擦力コンター図

Table 7-1 ナセルとクロスビーム結合体の抗力係数

双発式海流発電装置	実験	CFD
流体力	1.0[N]	0.3253[N]
投影面積	443.8[cm ²]	443.8[cm ²]
抗力係数	1.13	0.366

Table 7-2 クロスビーム部分の抗力係数

クロスビーム	実験	CFD
流体力	0.39[N]	0.2249[N]
投影面積	286.8[cm ²]	286.8[cm ²]
抗力係数	0.6799	0.3920

Table 7-3 ナセル部分の抗力係数

ナセル	実験	CFD
流体力（推定）	0.305[N]	0.0335[N]
投影面積	78.5[cm ²]	78.5[cm ²]
抗力係数	1.94	0.214

※実験値の流体力 1.0[N]は斜行試験における取付角 0 度の時の流体力 1.02[N]と縦傾斜試験における Pitch 角 0 度の時の流体力 0.98[N]の平均値でとっている。

7.2 斜行試験の X'方向に対する考察

斜行試験における X'方向に働く流体力について考察する。Fig. 7-6 には CFD 計算値を 3 倍した値と実験結果を示した。Yaw 角が ± 40 度、 ± 50 度、 ± 60 度のところで大きく値が異なっていることがわかる。仮に CFD 計算値が一定数倍して実験値に一致するのであれば電圧を力の単位に変換する際に係数を間違えていたなどの原因が考えられるがそのような原因ではなさそうであると考えられる。

Fig. 7-7 には CFD 計算値に 0.7N した値と実験結果を示した。 $+0.7N$ はおよそ Yaw 角 0 度のところで一致するように設定した値である。これも同様に ± 40 度以降の Yaw 角において大きく値が異なっている。

そこで実験時に Fig. 7-8 のように流入流速方向がナセルの側面に当たる方向であり、その時の Yaw 角を 0 度として記録したときにどのような値になるかを CFD で計算した。

その結果を Fig. 7-11 に示す。

実験で用いた模型は Fig. 7-8 や Fig. 7-9 に示すようにコネクタや電源コードをつなぐ突起物がついている。6 章では X 方向からの流れに対して流体力が変わらないことを指摘したが、今章ではコネクタ部分の投影面積が大きくなり、それらの影響が大きくなると考えられるためこのような形状を用いている。

ここでコネクタの部分については当研究室では保管しておらず見当たらなかったため Fig. 3-1 の画像からコネクタ部分を想定し作成した。ただし、コネクタ部分の高さは不明であったが写真などからコネクタ高さを Table 7-4 のように 3 パターン想定し検証を行った。コネクタの高さによって Fig. 7-10 のように剥離が起り流体力が大きくなることが考えられる。検証の結果、実験の Yaw 角 0 度時の流体力が $1.0[N]$ であったことから CASE3 を採用した。

CFD 計算時には細かな突起物周辺で細かいメッシュを用意しなければ計算が収束しない。よってメッシュ数は 480 万と膨大な数になってしまう。計算時間の観点から数多く計算を行うことは不可能であるため一部だけ計算し考察をした。斜行試験の X'方向の流体力は Yaw 角の正負に関わらず同じ値になると考えられるため正の値の Yaw 角を計算しそれを Yaw 角の負の値にも適用している。

Fig. 7-11 からは実験と CFD で非常によく値が一致していることがわかる。ただし坂田の修士論文[21]では Yaw 角 10 度と -10 度の点が消去されている。坂田の実験により算出されている推定値と CFD では値が異なる。

この結果から坂田の実験[21]では実験装置の取り付け時に流入流速がナセルの側面に当たる方向を Yaw 角 0 度として記録し、斜行試験を行った可能性が高いと考えられる。

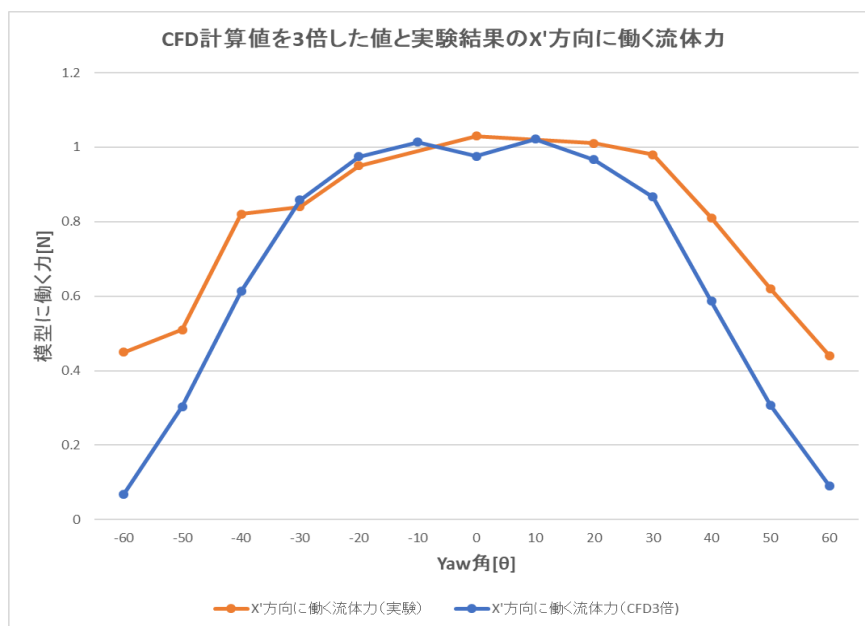


Fig. 7-6 CFD 計算値を 3 倍した値と実験結果の X'方向に働く流体力

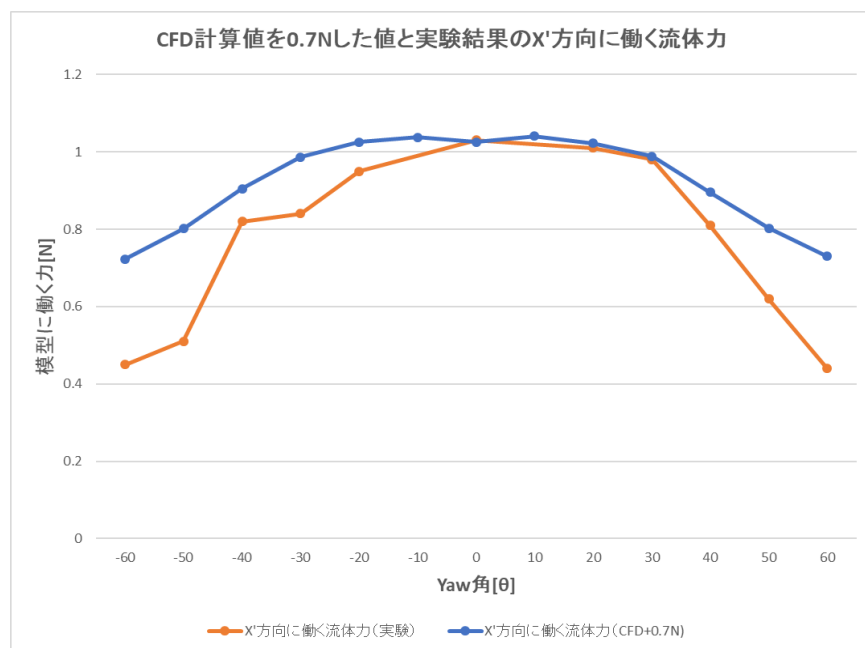


Fig. 7-7 CFD 計算値を 0.7N した値と実験結果の X'方向に働く流体力

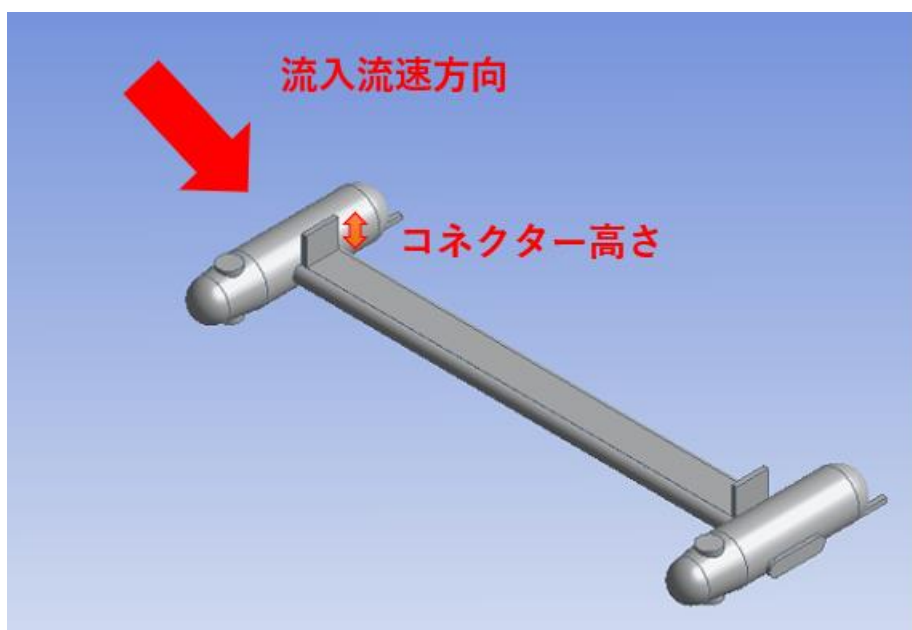


Fig. 7-8 コネクタおよび突起物がついたナセルおよびクロスビーム結合体（表面）

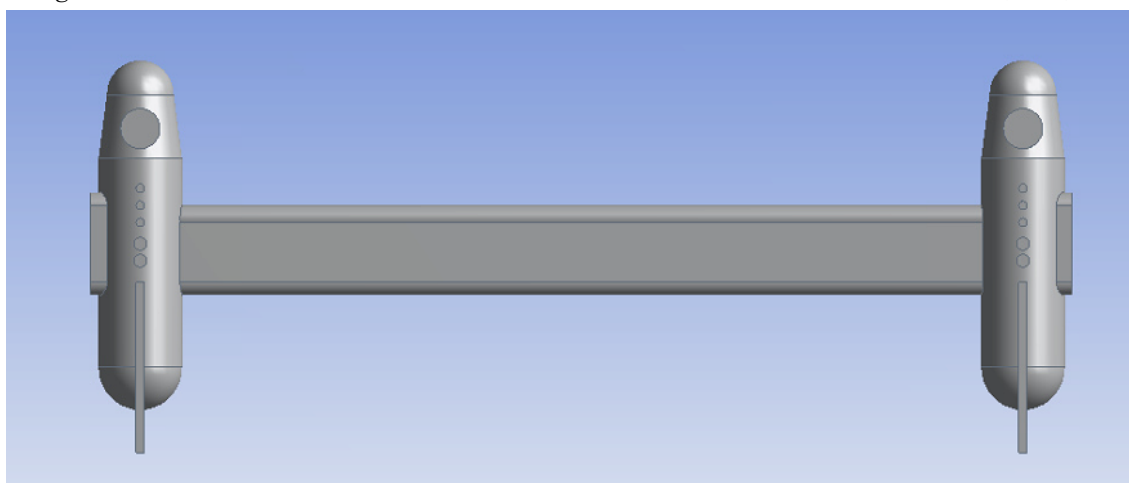


Fig. 7-9 コネクタおよび突起物がついたナセルおよびクロスビーム結合体（裏面）

Table 7-4 コネクタ高さによる流体力の検証

CASE	コネクタ高さ[cm]	模型に働く流体力 [N]
1	10	1.1032
2	7.5	1.0552
3	5	1.0089

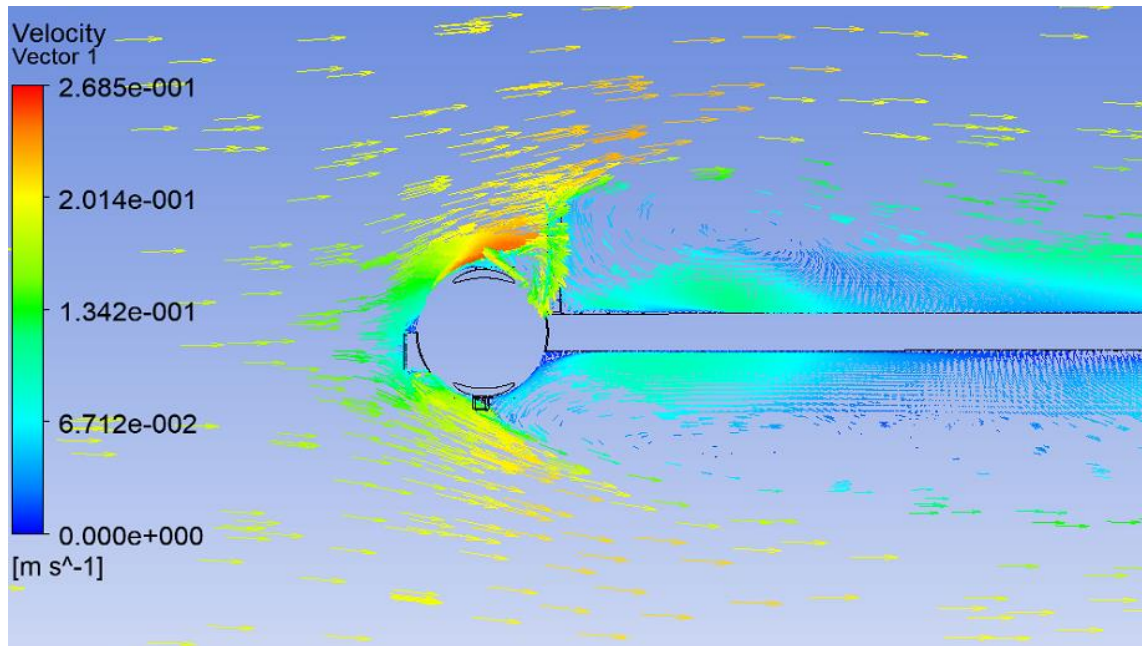


Fig. 7-10 ナセルおよびクロスビーム流速ベクトル図

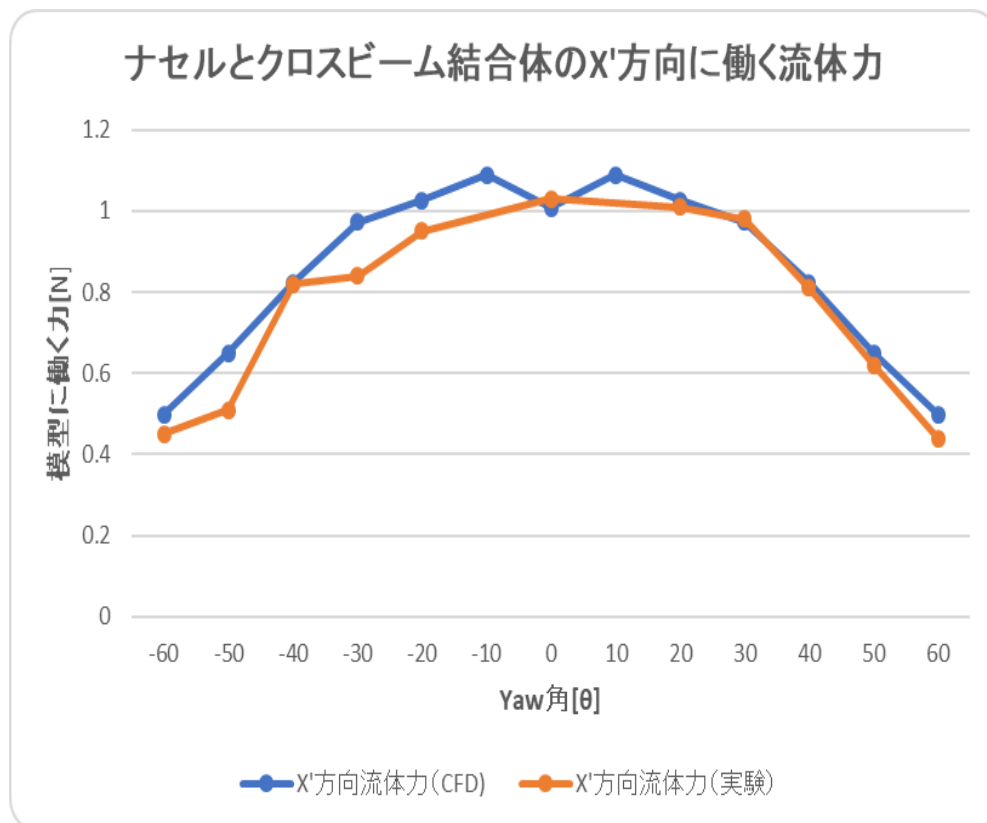


Fig. 7-11 流入流速方向がナセルの側面にあたる方向の実験と CFD の X'方向流体力

7.3 斜行試験の Y 方向に対する考察

斜行試験における Y 方向に働く流体力について考察する。Y 方向に関しては先ほどと同じように実験時に取付を間違っただとして計算を行ったり、後述する縦傾斜試験のように分力計の付け方をとり間違っただとしてそれぞれの方向に働く流体力を求めたが実験値と一致するような計算結果は得られなかった。ただし、取付を正常に行っただと仮定して CFD 計算値を 3 倍した値と実験結果を示した。(Fig. 7-12) 非常によく一致していることがわかる。電圧を力に変換する際に係数を間違っただなどの原因が考えられる。

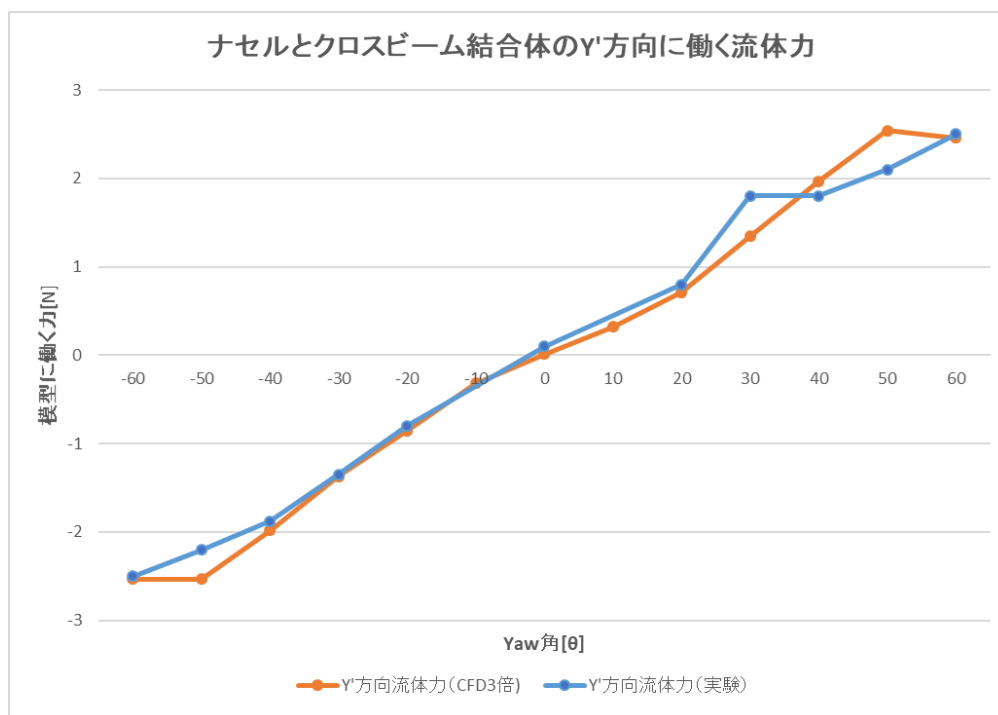


Fig. 7-12 実験と CFD を三倍した時の Y 方向流体力

7.4 縦傾斜試験の X 方向に対する考察

坂田の論文では縦傾斜試験において X 方向から流入し、Y 軸周りに傾斜させ X' 方向と Z' 方向の流体力を計測したと書いてある。しかし、Fig. 7-3 のように実験装置が最初から Yaw 角が 90 度傾斜した状態で実験を行い、Yaw 角を 0 度として記録してみたときにどうなるかを CFD で求め、検証した。

Yaw 角 90 度の場合はコネクタや計測機器が模型に与える流体力に与える影響も大きいと考えられるため斜行試験と同様にそれらも加味した Fig. 7-3 を用いている。

また、前章でも指摘したことだが坂田の実験結果では 0 度から 5 度になる時に X' 方向で流体力が少し小さくなったり、20 度にもなると X' 方向の流体力の増加が抑制されるはずだがそのような傾向が見られない。これを仮に分力計の取り扱い方を間違い、Fig. 7-13 のように傾斜角 Φ で求めたい X' 方向の流体力が元ある空間固定座標の X 軸と対称の X_e 方向であ

ったときにどのような値になるかを CFD で検証し実験と比較した。(Fig. 7-14)

Fig. 7-14 から実験値と CFD の計算値が非常によく一致していることがわかる。

ただし、斜行試験の時と同様に細かなコネクタなどを再現したモデルではメッシュ数が多いため、斜行試験の X'方向の流体力は Pitch 角の正負に関わらず同じ値になると考えられるため正の値の Pitch 角を計算しそれを Pitch 角の負の値にも適用している。

この結果から坂田の実験では実験装置の取り付け時に流入流速がナセルの側面にあたる方向を Yaw 角 0 度して記録し、縦傾斜試験を行った際に、分力計の取り扱い方を間違い、求めたい物体固定座標の X'方向とは異なる X_e 方向の流体力を求めていた可能性が高いと考えられる。

また、坂田の修士論文[21]では Pitch 角の傾斜によって X'方向の流体力が増加する傾向はナセルとクロスビーム部分の干渉によるものであると結論付け、実験値による推定値を算出し、Pitch 角とともに増加する実験結果と一致させている。それらの考察についても再考の余地がある。

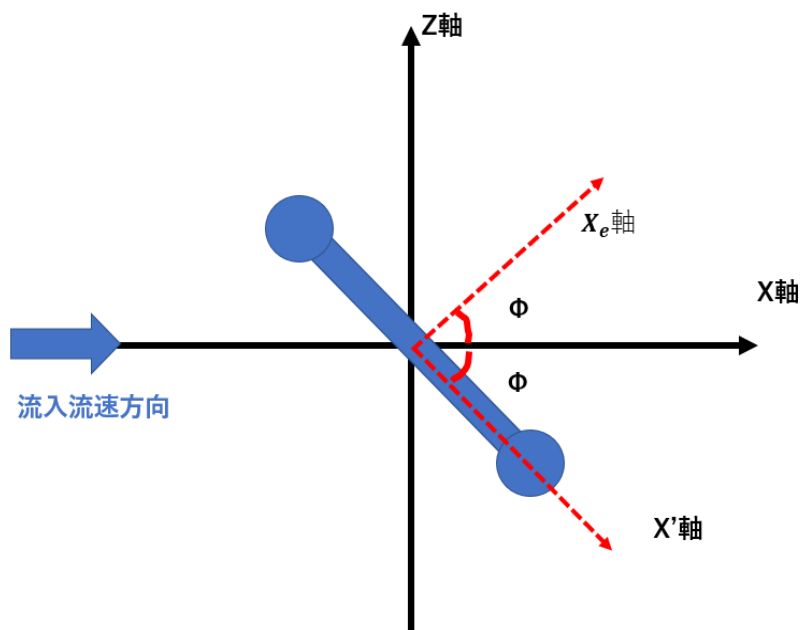


Fig. 7-13 坂田の実験で計測したと考えられる X'方向の図

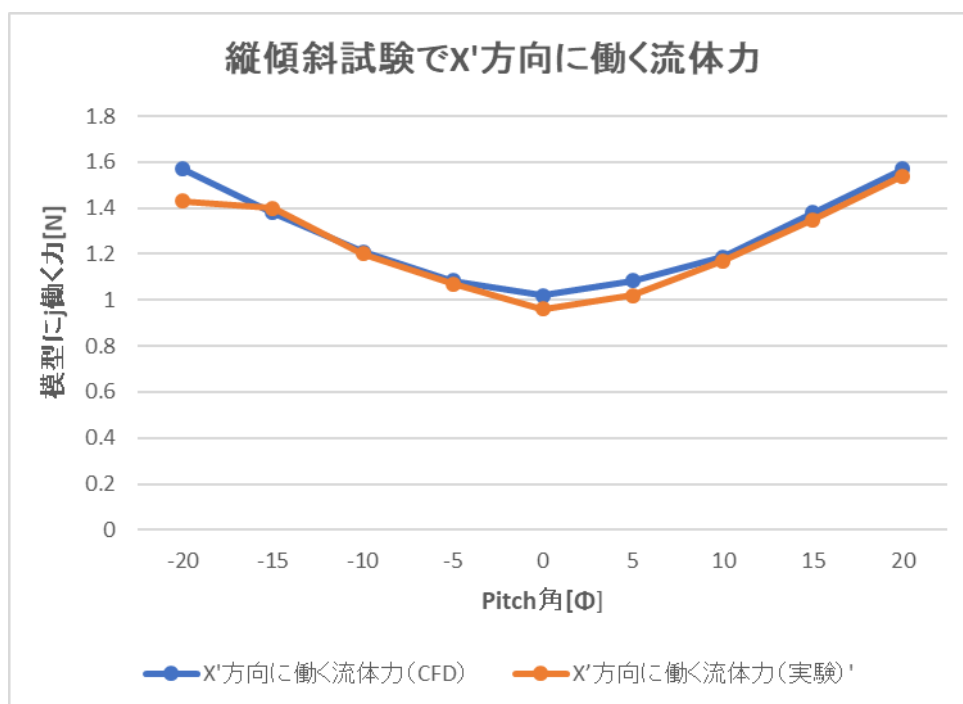


Fig. 7-14 縦傾斜試験で X'方向に働く流体力

7.5 クロスビームの縦傾斜試験の X'方向に対する考察

前章でも示したようにクロスビームの実験と CFD は X'方向において全く値が異なっている。今までの実験のミスから考えて取付方向の間違いや計測軸を誤っていることも考慮して Fig. 7-15 のように取付ミスを想定し計算を行ったが全く実験と一致しなかった。CFD 計算値は左の 1.9189N であり、右の場合は 0.073449N である。いずれも実験時の 0.39N からは遠い値である。

ところで、坂田の修士論文[21]では他のグラフにおいて書かれている単位[N]がこのグラフでのみ書かれていない。そこで誤って無次元である流体力の係数を算出してしまったのではないかと考えた。その際流入流速は Pitch 角の変化によらず 0.2[m/s]として計算して実験と比較した。(Fig. 7-16) このグラフから実験と CFD が Pitch 角 15 度と-15 度のところ以外比較的一致することがわかった。

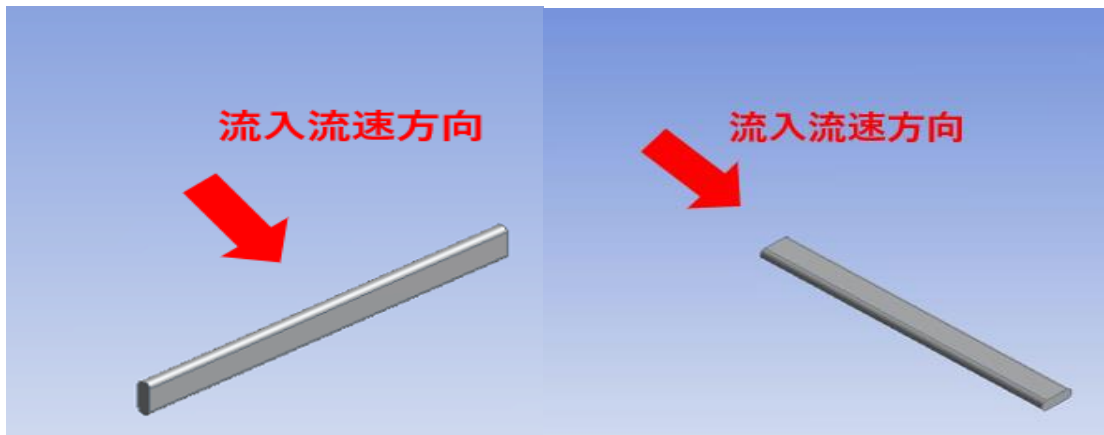


Fig. 7-15 クロスビームを取付を間違っただけの図

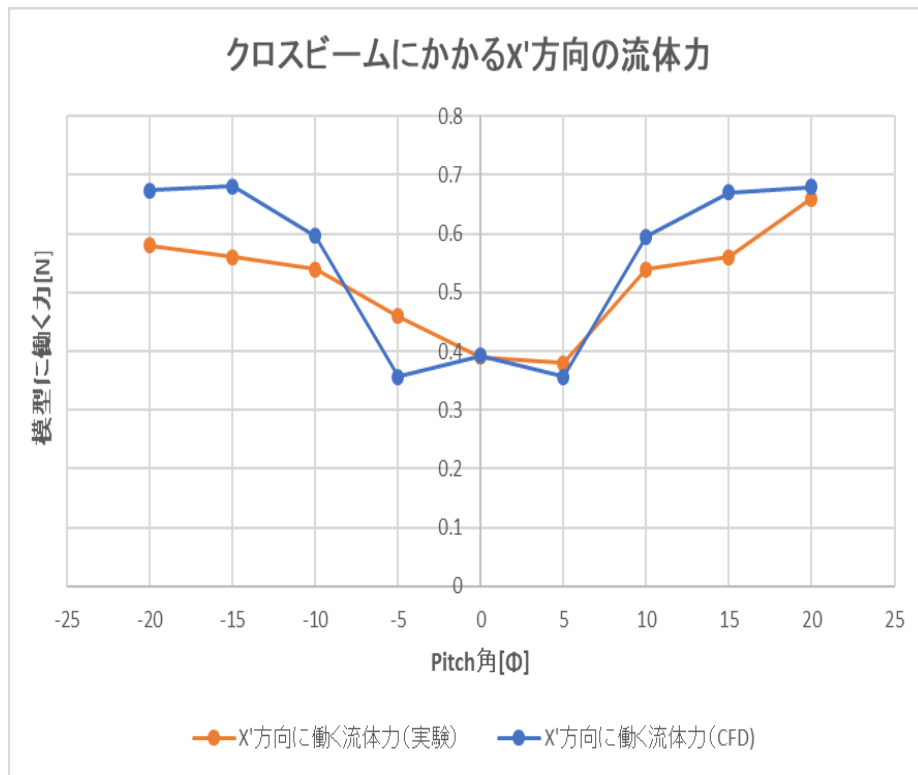


Fig. 7-16 クロスビームにかかる X'方向の流体力の係数

7.6 クロスビームおよび結合体の縦傾斜試験の Z'方向に対する考察

Z'方向については Yaw 角 90 度を 0 度として取り付けた場合のいずれの方向の流体力も実験と一致する傾向は見られなかった。ただし、取付が間違っていなかった場合の CFD 計算値と -20 度から 5 度までは一致していたので Pitch 角 10 度以降で何かしらの実験時のミスがあった可能性は考えられる。

ただ前後に対象であるはずの形状において Z'方向の流体力が Pitch 角の正負によって大きく異なっている理由を分力計によって流れが変化するためと結論付けている。CFD で Fig. 7-17 のように分力計のような形状を合わせて Pitch 角 20 度の時の計算を行ったがナセルおよびクロスビームの部分の流体力はない場合に比べて 2%以内しか変わらなかった。

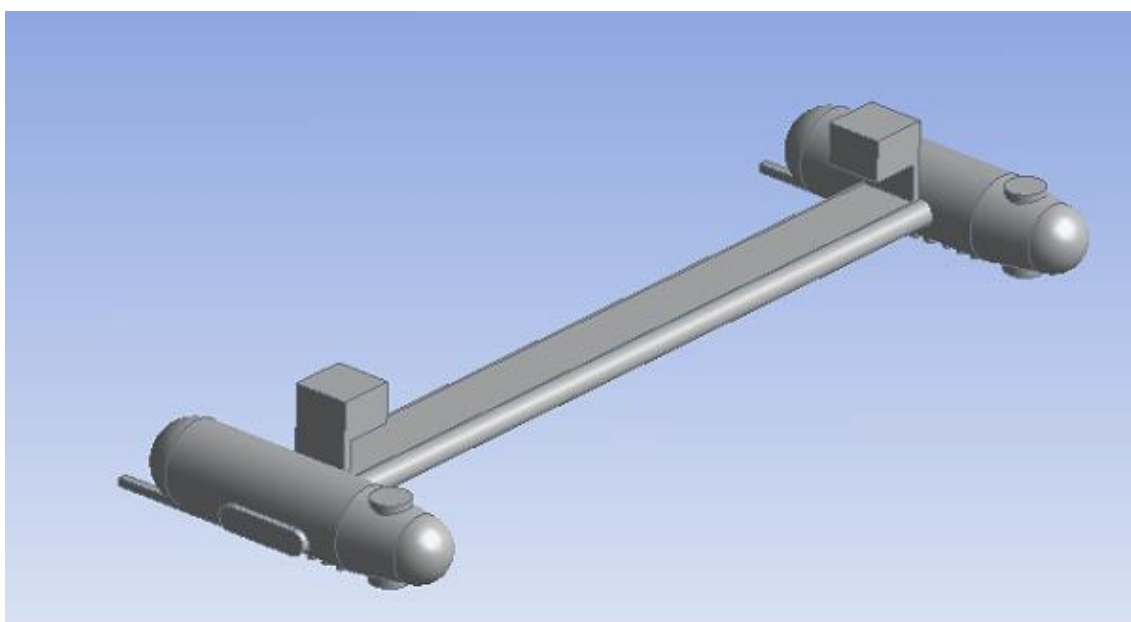


Fig. 7-17 分力計が取り付けられた場合の CFD

7.7 CFD での流体力の算出結果に関して

流体力は剥離による物体前後の圧力差によって生じる。剥離は本来非定常な現象であり、定常解として時間平均のモデル化を行う RANS の SIMPLE 法で解くことに一部矛盾が生じている。また、メッシュ数も 200 万程度であり、傾斜時の格子の収束性も検証されていない。

ただ本研究では計算時間の観点と単純形状での流体力が実験値と変わらなかったことなどから採用している。

8. 結論

本研究は双発式海流発電装置のタービン部以外の部材に働く流体力を CFD により求め、考察したものである。模型による斜行試験や縦傾斜試験を実施した坂田の実験[21]と比較した。また、実験において限定的であった条件を拡張して計算を行いその傾向を把握した。それらによって得られた結論は以下である。

8.1 結言

1. 坂田[21]による実験と CFD での計算値を比較した。その結果、斜行試験の X'、Y'方向の流体力、縦傾斜試験の X'方向の流体力の結果からは CFD のほうが実験値よりも小さな値を示していることが確認できた。しかし、CFD で単純形状の流体力計算による検証結果や実験のナセルの抗力係数が 1.94 と非常に高い値を示していたことから実験値が信用性に欠けると考えられる面もある。
2. 縦傾斜試験では Z'方向の流体力についてはクロスビームとナセルの結合体、クロスビームのみの場合でも -20~5 度の傾斜角では実験値と CFD では同じような値を示していた。CFD で流れ場を可視化した結果、10 度以降の傾斜角ではクロスビーム後面で剥離が生じ失速状態となっており、Z'方向の流体力が小さく評価されていることが分かった。
3. 斜行試験、縦傾斜試験において角度が限定的であった条件から拡張し CFD で解析を行った。斜行試験の X'方向の流体力では斜行角が 80 度のところで最も大きく、90 度になると流れ前方にあるナセルが流体力を受け、後方のナセルの受ける流体力は小さくなるため 80 度に比べて少し小さくなる。縦傾斜試験の Z'方向の流体力は 10 度以降の傾斜角で増加する傾向は変わらなかった。
4. 二軸傾斜（Pitch 角、Yaw 角傾斜）での CFD 計算を行った。X'、Y'方向の流体力については縦傾斜試験で傾き角が大きくなるにしたがって流体力が大きくなる傾向が見られた。これらの傾向は一軸傾斜の傾向と同じである。また、Z'方向の流体力については 5 度から 10 度になるときに流体力が大きく変化しないことからこれも縦傾斜試験と同じく剥離が生じ失速状態になっていると考えられる。
5. 実験と CFD の計算結果が全く異なるものであったので実験で実験装置の取り付けミスや分力計の取り扱いにおけるミスを犯したと仮定し CFD による計算を行った。斜行試験においても縦傾斜試験においても X'方向については非常に値がよく一致しており、それらのミスを犯していた可能性が高いことを指摘した。

8.2 今後の課題

1.本研究では CFD で用いた計算により坂田の実験[21]での流向変化時にナセルおよびクロスビームにかかる流体力の計測結果が取り付けや分力計のミスをしていた可能性があることを指摘した。また、実験値を正しいと仮定した場合ナセルの抗力係数が 1.94 と非常に高いものであるため誤った実験をしていた可能性があることを示した。これらの実験の計測結果は本研究室で開発されているコードに組み込まれ浮体部にかかる流体力として様々なシミュレーションに応用されている。しかし、実験の計測結果には再検証の余地があり、再実験を行う必要があると考えられる。

2. 実際の海流発電装置は実験スケールの 50 倍の大きさであり、レイノルズ数もそれに伴って大きくなるため流れの状態も変わることが考えられる。それらを加味した実機スケールでの流体力の解析を数多く行っていく必要がある。

3. 先行研究でタービン部分のみで CFD による研究が行われてきたがタービンとナセル、クロスビームを合わせた形状で計算を行っていくことで、タービン部分の干渉の影響や結合した部材周辺の流れ場などを考察することができるためそれらも行っていく必要がある。

9. 参考文献

- [1] IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis” (2013).
- [2]国土交通省気象庁：ホームページ「二酸化炭素濃度地点別経年変化」
(<https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/co2timeser/co2timeser.html>)
- [3]経済産業省資源エネルギー庁：ホームページ「平成 30 年度エネルギーに関する年次報告」 (<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf/>)
- [4]海上保安庁：ホームページ「日本の領海」
(https://www1.kaiho.mlit.go.jp/JODC/ryokai/ryokai_setsuzoku.html)
- [5] NEDO ニュースリリース,“世界初、100kW 級の海流発電の実証試験を完了”(2017)
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100824.html
- [6] NEDO ニュースリリース,“世界初、100kW 級の海流発電の実証試験を完了”(2017)
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100824.html
- [7](株)IHI 技報 Vol.53 No.2 (2013)
- [8]高木健、松田和也、須山友樹：「二重反転タービン式海流発電装置の技術成立性に関する研究」日本船舶海洋工学会講演会論文集第 15 号 (2012)
- [9] J. VanZwieten, F.R. Driscoll, A. Leonessa and G. Deane:Design of a prototype ocean current turbine—Part I: mathematical modeling and dynamics simulation, Ocean Engineering 33 1485-1521, (2006)
- [10] 須山友貴,加賀谷健,高木健,鈴木英之:二重反転タービン式海流発電装置の姿勢制御に関する試み,第 22 回海洋工学シンポジウム OES22-040(2011)
- [11] 五之治孝明「双発タービン式海流発電装置の運動シミュレーションに関する研究」東京大学修士論文 (2013)
- [12] K. Sakata, T. Gonoji, K. Takagi: A motion of Twin type Ocean Current Turbines in realistic situations, OCEANS'12 IEEE/OES MTS, Yeous(2012)
- [13]五之治孝明:双発式海流発電装置のコンセプト設計と運動シミュレーション,東京大学学士論文,(2012)
- [14] (株)IHI ホームページ「世界初、実海域において海流発電装置の 100 k W級実証試験を実施へ～新たな再生可能エネルギー技術「水中浮遊式海流発電」実証機が完成～」
(2017) https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2017/technology/2017-7-07/index.html
- [15]矢作和臣：せん断流中で海流発電タービンに働く流体力，東京大学修士論文，(2018)
- [16]ANSYS FLUENT ver.16.0 ”ANSYS USER’S GUIDE” (2016)
- [17] H.K.Versteeg&W.Malalasekera 「数値流体力学」，森北出版株式会社 (2011)
- [18] S.F.HOERNER, 「Fluid Dynamic drag」 (1965)
- [19]貴島勝郎：操縦性および復原性基準に関する研究の動向第 2 章 船舶操縦性能推定法の精度向上

- [20]造船設計便覧, 海文堂出版(1986)
- [21]坂田和輝: 双発タービン式海流発電装置シミュレーションで用いられる流体力に関する研究, 東京大学修士論文, (2013)
- [22]浅海 典男 山根 善行 長屋 茂樹 久保 幸一 加幡安雄(株)IHI 日本風力エネルギー学会第 35 巻「CFD による双発式海流発電タービンに作用するスラストの変動量予測」(2013)
- [23]Hermann Schlichting, Klaus Gersten, eighth revised and Enlarged Edition(2000)「Boundary-Layer Theory」,Springer 社
- [24]吉澤徴「流体力学」東京大学出版会(2001)
- [25]鈴木和夫、川村隆文、佐々木紀幸 日本船舶海洋工学会能力開発センター教科書編集委員会(監修)「船体抵抗と推進」, 日本船舶海洋工学会シリーズ②(2012)
- [26]飯島一博、井上俊司、岡田真三、尾崎雅彦、神田雅光「海洋構造物」成山堂書店(2013)
- [27]J.H.ファーツィガー、「コンピュータによる流体力学」、丸善出版(2012)
- [28]東京大学生産技術研究所ホームページ「海洋工学水槽」
<https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/about/facilities/chiba/rheem/>
- [29]IRA H.ABBOTT AND ALBERT E.VON DOENHOFF Dover Books on Aeronautical Engineering「THEORY OF WING SECTIONS INCLUDING A SUMMARY OF AIRFOIL DATA」
- [30]深野徹著 機械工学選書「わかりたい人の流体力学(II)」東京褒華法発行(1994)
- [31]田古里哲夫・荒川忠一著「流体力学」東京大学出版会(1989)
- [32]大竹智久、中江雄亮、本橋龍郎「低 Re 数領域での NACA0012 翼の非線形空力特性」日本航空宇宙学論文集 Vol55 No.64 (2007)
- [33]ANSYS Fluent 入門セミナー Version17.0 アンシス・ジャパン株式会社(2016)
- [34]ANSYS プリ入門セミナー-DesignModeler コース Version17.0 Lecture アンシス・ジャパン株式会社(2016)
- [35]ANSYS ICEM CFD 入門セミナー Version16.0 Workshop 資料 アンシス・ジャパン株式会社(2016)
- [36]ANSYS Fluent UDF 初級セミナー アンシス・ジャパン株式会社(2016)
- [37]ANSYS ICEM CFD 入門セミナー Version16.0 アンシス・ジャパン株式会社(2016)
- [38]ANSYS FLUENT 理論ガイド入門セミナー Version16.0 アンシス・ジャパン株式会社(2016)

謝辞

本研究をすすめるに当たり非常に多くの方の支えをいただきました。

指導教員でありました高木健先生には研究とはどのようなものであるかという根底の部分から教えていただきました。ありがとうございました。

副査である山口先生には私が行っている研究において違った観点からのご指摘をいただくことができ、研究をすすめるに当たり非常に有益な助言をいただくことができました。また、私が思いつめ悩んだ時によき相談相手となつていただきました。先生が私と同じ目線に立ち的確なアドバイスをいただくことで研究を楽しみと感ずることができました。私の研究についても丁寧にご指摘をいただき大変感謝しております。

佐藤先生には研究に対する相談だけではなく、発表のスライドまで見ていただきました。不出来な私でしたが最後まで見捨てることなくわかりやすく説明していただきました。先生と話をさせていただく時間が楽しかったです。大変感謝しております。

また、早稲田先生には研究に対する相談だけではなく私のことを気にかけてくださり、つらい時期に親身になって励ましていただき大変感謝しております。

村山先生には私生活のことなど余分な仕事もお願いし、ご迷惑をおかけしました。先生の温かい言葉に救われました。ありがとうございました。

さらに、同期である高木研究室の佐藤君には普段一緒に行く筋トレのほかにいろいろな話をしました。また一緒に遊びに行きましょう。同期でもある西田さんや早稲田研の麻崎君、小林君、二木君、尾崎研究室の安保君や土橋君や当専攻の同期とは楽しい時間を過ごすことができました。今までありがとう。

研究室の先輩でもありました加納さん、田中さん、松平さん、孫さん、濱道さんにはM1の時に一緒にご飯に連れて行ってくださり、大変お世話になりました。また、後輩である双石君、商さん、何くんには何一つ先輩らしいことはできていませんがこれからの研究生活でも頑張ってください。

最後に、私をここまで育ててくれ、温かく見守ってくれた親・家族、本当にありがとうございました。最後に頼りになるのは家族だと実感しました。ここに感謝いたします。