

# 概論 I

## 海事流体力学研究室における研究活動

Ver. 1.0

大阪府立大学海洋システム工学分野 二瓶 泰範  
<http://hydrodynamics.marine.osakafu-u.ac.jp/>

2021 年 4 月

# 目次

|              |                              |           |
|--------------|------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章</b> | <b>四胴型自動航行船の研究開発とその適用</b>    | <b>1</b>  |
| 1.1          | 養殖現場における課題と自動航行船             | 1         |
| 1.2          | 研究開発の歴史                      | 3         |
| 1.3          | 基礎研究                         | 4         |
| 1.4          | 現在のプロジェクト                    | 5         |
| <b>第 2 章</b> | <b>浮体式洋上風車の研究開発</b>          | <b>7</b>  |
| 2.1          | 洋上風力発電                       | 7         |
| 2.2          | 浮体式洋上風車とは                    | 8         |
| 2.3          | 基礎研究 — 一点係留方式を用いた浮体式風車の実海域試験 | 9         |
| 2.4          | 浮体式洋上風車の課題と今後に向けて            | 9         |
| <b>第 3 章</b> | <b>あとがき</b>                  | <b>12</b> |
|              | <b>参考文献</b>                  | <b>13</b> |

## 第1章

# 四胴型自動航行船の研究開発とその適用

大阪府立大学工学域海洋システム工学課程（大学院でいうと工学研究科航空宇宙開海洋系専攻海洋システム工学分野）に所属している二瓶研究室は海事流体力学に関する研究をしている。海事流体力学は英語では Marine Hydrodynamics と呼ばれ、海洋構造物や船舶に関わる流体力学に関する研究を主たる研究テーマにしている。海事流体力学の大きな特徴は、海洋構造物や船舶といった浮体とその周りの流体との相互干渉の問題を主に取り扱うことである。

浮体が海面に浮かんでいるところを想像すると、浮体は波だけでなく、風、流れの影響を受けることは納得できる。同時に、浮体が運動することで新たな波を作り出すことも理解できる。また、船には舵があって船の操船制御も行なうわけであり、より一層浮体周りの流体现象は複雑になることが想像できる。海洋構造物においても、例えば近年研究開発が進む浮体式洋上風車も風の中で風車はそのブレード角を制御している。その為、海事流体力学は浮体運動、流体、制御が連成している問題を取り扱う学問だと位置付けることもできる。

加えて海洋工学は総合工学とも称される。一つの部品要素が最適であっても、総合的にシステム全体を見渡した時に、必ずしもそれは最適であるわけではない。また、素晴らしい部品の組み合わせであってもシステムは決して機能しないのである。全体を最適化するようデザインを何度も何度も繰り返すことが必要なのである。社会といえば大袈裟だが、何か大きな問題点を見つけ、それを解決するシステムを生み出し、そのシステムの実証試験を行い、その中で再び新たな問題点を見つけてそれを改善し、社会に実装していくことが何よりも大切である。分析力だけを高めることだけでは大きな問題は解決しないのである。

本誌はこれまで海事流体力学研究室で実施してきたプロジェクトを簡単に纏めたものである。一つは四胴型自動航行船の研究開発と適用事例を示したものであり、もう一つは浮体式洋上風車の研究開発事例である。この資料を読み、海事流体力学や総合工学の面白さに興味を持っていただけたら幸いである。

### 1.1 養殖現場における課題と自動航行船

国際的な肉・魚等の動物性たんぱく質の摂取量は飛躍的に増大しており、陸上部で生産される牛肉等のたんぱく質だけではならず、水産資源で賄われている。2010年には牛肉より水産資源である養殖魚が上回ってきた（図1.1）。他方、日本国内においては海水温度の上昇による海洋環境変動の影響を受け資源量が減少したことにより我が国の漁業生産量が長期的に減少傾向にあるという課題に直面しており、漁業全体の生産量はピーク時の33%程度まで減少している。結果として価格が高騰し魚離れが進み、牛肉・豚肉・鶏肉等に移行しつつあり、水産資源の低コスト化が強く望まれている。その大きな担い手として養殖業がある。漁業全体の生産量が減少する中、養殖業は安定した生産量を維持し、今や全体の約24%の水揚げ量を占める（図1.2）。生産額においてもその重要性が高まっており2017年には約40%を占めるなど、今や養殖業は我が国水産業界における一大産業であると言える。特にインバウンドに代表される国際的な日本食ブームにより、低コスト化はもとより高価格でも高品質であれば確実に需要が伸びる見通しが出てきたことは養殖

業界にとって大きなフォローとなってきた。また、水産資源の減少と共に海洋環境の悪化や燃料の高騰、漁業者の高齢化や後継者不足等の問題に直面しており、益々養殖業への期待が高まっているのが現状である。

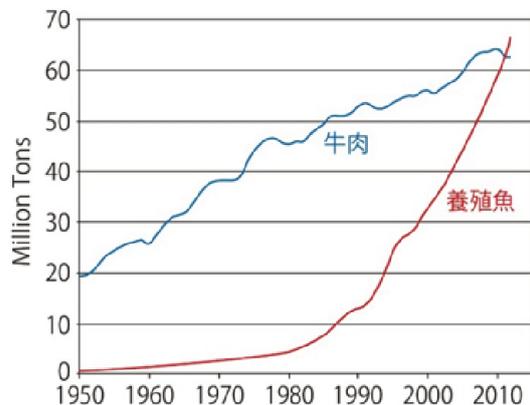


図 1.1: 世界の養殖魚と牛肉の生産高 (出典: 国連食糧農業機関, 米国農務省に基づき EPI が作成)

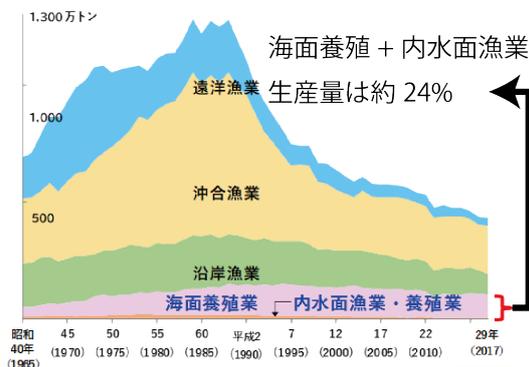


図 1.2: 漁業・養殖業の生産量の推移 (出典: 水産庁「平成 30 年度水産白書」)

一方で、海面養殖はリスクと隣り合わせでもある。大きな原因として挙げられるのが、貧酸素水塊、低塩分水、水温上昇、貝類にとっての餌といえる植物プランクトン (クロロフィル a) の欠如、赤潮等による水質環境悪化である。最近、観測史上類を見ない台風・集中豪雨等の異常気象に起因する養殖魚介の斃死、実入りの悪化が生じ、養殖漁業に深刻かつ重大な経済的悪影響を与える事例が起きている。図 1.3 にそのいくつかの事例を挙げる。このような事例は枚挙にいとまがなく、養殖漁業者、漁業協同組合、地方公共団体等々にとって、水質環境の高精度なモニタリング及び高精度な水質予報は喫緊の課題であり早期対応が望まれている。



図 1.3: 養殖業の被害事例

以上の背景から、養殖場の水質環境の詳細な把握は、海面養殖や内水面養殖にはなくてはならない。これに対して、情報通信分野、水質モニタリング分野、漁業組合、地方公共団体、水産試験場等では協業して、水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル a 等の水質モニタリングを行ってきている。また、飛躍的に計算機性能が向上した昨今、数値天気予報に実観測データを活用することにより、天気予報精度が上がっている。海洋の水質シミュレーション技術も、スーパーコンピュータを使うことによって計算可能な解像度が大きく向上しているが、その計算解像度に比べ、現場の実観測データ量が大きく不足しており、シミュレーションの精度検証に至らず、養殖場での水質予報に運用できていないのが現状である。

養殖場のような数 km× 数 km といった広大な海域では水質に時空間分布があり、ブイや人力計測では限界がある。また、実測の詳細な計測データが存在しない為、養殖場における高密度な水質予報システムが存在していないのが現状である。そこで、二瓶らが独自に研究開発してきたのが、四胴型自動航行船 (図 1.4) である。4つの船体を持ち、これらの船体は独立に回転することができる (図 1.5)。これによって風の中での定点保持が容易になったり (特許 6332824

号 [1]), 養殖場のような様々な障害物がある海域で小回りの利く操船が容易になる (特許 6796292 号 [2]). ロボセンは極めて独創的なアイデアであり, このようなロボット船は世界的にも存在していない.



図 1.4: 四胴型自動航行船

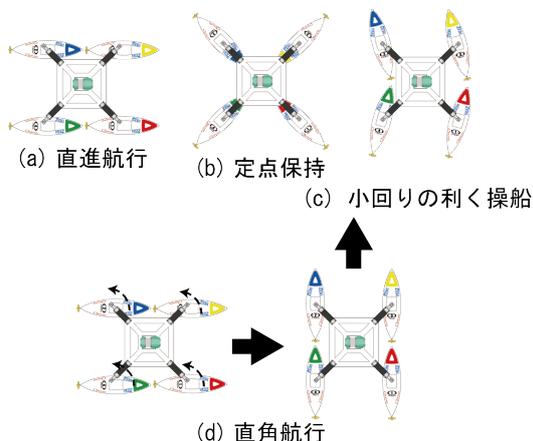


図 1.5: 船体が独立に回転することが出来, 様々な操船が可能

我々は, このロボセンを養殖場に適用している. 2018 年度, 2019 年度の実海域試験は石川県七尾湾のカキ養殖場で行われた. 2019 年度は半日で 80 地点, 水深方向にそれぞれ 5 つ, 計 400 か所の超高密度な自動水質計測を実現し, これまで知られていなかった水温や塩分や溶存酸素等の日周期変動等を明らかにしてきた. また, 国立環境研究所 中田聡史博士が手掛ける数値計算と連携させることで超高分解能水質シミュレーションの高精度化を目指す取り組みを始めている.



図 1.6: 2018 年度の実証試験の様子 (You Tube より)



図 1.7: 2019 年度の実証試験の様子 (You Tube より)

## 1.2 研究開発の歴史

四胴型自動航行船の研究が始まったのが 2015 年度. 最初は台所にあるボールにポッドプロペラをつけたような試作機からのスタートであった. 次の試作機は 4 つのハルとそれぞれのハルにはプロペラを付け, それぞれのハルは独立に回転が出来るという現在のロボセンの原型が出来上がる事となる. 予算も限られていたため, ほとんどが研究室のメンバーによる手作りといっても良い (図 1.8).

翌年度の 2016 年度, いよいよ実機サイズの GFRP 製ロボセンの製作フェーズへと移行することとなった. そして 2017 年 1 月, 我々が現在 RS-01 と開発番号を付けているロボセンの誕生である (図 1.9). 船体の材料は小型船で使われる GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) を用いており, 海での長期使用が可能なものとなっている. 2 月, 3 月には大阪府立大学でのプールでの基礎実験と, 神戸大学深江キャンパス内のポンドをお借りしての実験を行い, 2016 年度を終えることとなった.

2017 年度からは総務省戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) の事業採択を受け自動制御部の研究開発を行うこととなった (図 1.10). そして 2018 年度には目標点への移動, 定点の保持, 水質の自動計測を可能とした. 石川県七尾湾カキ養殖場にて自動観測を実施するに至った. これは前節の You Tube 動画で示した通りである.



(a) 船体はパルサ材を組み合わせて製作



(b) 四胴船の基本コンセプトが決まった

図 1.8: 2015 年度の実験機



図 1.9: RS-01 号機の完成



図 1.10: 2018 年 1 月 SCOPE 採択を受けて本学広報より

### 1.3 基礎研究

これまで四胴型自動航行船の研究は主にハードウェアに関する研究とソフトウェアに関する研究とに大別される。また、近年では多機運用することも想定してこの自動航行船の航路最適化問題にも取り組みつつある [3]。また、無人航空機 (所謂ドローン) と連携した応用研究についても取り組んでいる [4]。

ここで言うハードウェアに関する研究とは、四胴型自動航行船というシステムの物理的な構成要素部分に関わる研究のことを指している。つまり、例えばこの船の流体力学的な特性を調べ、この船自体の性能を明らかにすることである。また、この船を実際的大海で使うときに、どのような時に壊れるかを予め把握しておくことも重要となろう。つまり構造的な特性を調べるのが重要である。主にこの2点がハードウェアに関する研究である。一方で、ソフトウェアに関する研究とは、主に四胴型自動航行船の自動制御に関する研究のことを指している。図 1.5 に示す通り、四胴型自動航行船は様々な航行形態が考えられ制御方法も航行毎に変わる。以下、二瓶等によって纏められ、土木学会論文集 B1(水工学) に収録されている四胴型自動航行船の性能および操船制御について述べられた論文 [5] からの抜粋 (一部改変) である。

#### 1.3.1 四胴型自動航行船の直進制御手法

Komizo et al.[6] の研究では、左右のプロペラの推力の差で回頭制御を行っていたが、スムーズな直進制御であったとは言い難い。そこで、本船の大きな特徴である図 1.11 に示す「くの字」の航行形態を用いた操船方法について述べる。次の計測地点等の目標地点に向かう際、参照点の角度と船体の角度にずれが生じた場合、船体角度を変え目標点に向かうようにする。この直進制御は PID 制御で行われており、この PID 制御時の船主側の船体回転角度  $\theta_{PID}$  を以下

の式 (1.1) に示す。尚,  $\theta_{PID}$  は船固定座標系に対する回転角である。また, 船尾側の胴体は  $-\theta_{PID}$  回転させる。ただしこの新手法ではプロペラ回転数の制御値は常に一定である。

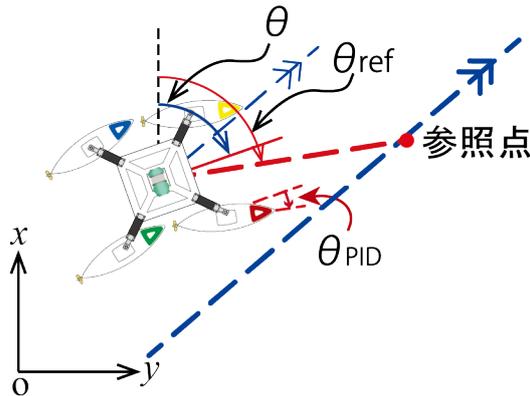


図 1.11: 操船制御手法

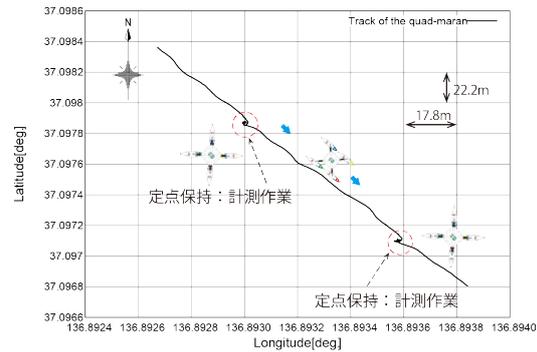


図 1.12: 四胴型自動航行船の航行直進制御による航跡

$$\theta_{PID} = K_P \Delta\theta + K_I \int \Delta\theta dt + K_D d\theta/dt \quad (1.1)$$

$K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  は比例, 積分, 微分ゲインである。  $\Delta\theta$  は  $t = t$  における目標航路との偏差角で図 1.11 中  $\theta_{ref} - \theta$  と表される。

この制御方法を組み込んだ海上試験を実施した。図 1.12 に計測点に向かい定点保持し計測作業を行っている際の航跡を示す。計測点に対する定点保持の平均誤差は 1m 前後, 計測点間の目標航路に対する平均直進誤差は約 1.6m であった。提案する直線制御法の有効性が検証できたといえる。

### 1.3.2 四胴型自動航行船の風圧下及び実海域での航行性能

本船の風圧下での性能は簡単な VPP (Velocity Prediction Program) を構築することにより明らかにした。船固定座標系における船長手方向の力のつり合い方程式を以下の式 (1.2) に示す。

$$-R_0 - X_A + (1 - t)T = 0 \quad (1.2)$$

ここで,  $R_0$  は船体抵抗 [N],  $X_A$  は上部デッキ空力抵抗 [N],  $T$  はプロペラ推力 [N],  $t$  は推力減少率である。船体抵抗及び空力抵抗は回流水槽試験, 風洞試験により求め, プロペラ推力はデータベース [7], 推力減少係数は Van Lammern の推定式から求めた。各風向に対する上部デッキの船速方向の抗力を計測した風洞試験の結果を図 1.13 に示す。また各プロペラの回転数は一定, 喫水は満載喫水時の半分の 10cm として計算を行った。この喫水は実海域試験時の喫水である。

図 1.14 に式 (1.2) より得られた絶対風向 ( $0 \sim 180^\circ$ ), 絶対風速 ( $0 \sim 10\text{m/s}$ ) に対する船速の推定結果のポーラーカーブを示す (風が  $0^\circ$  方向から来ている場合に各方向に航行する船速)。例えば風速  $10\text{m/s}$ , 風向  $0^\circ$  の正面向かい風中を本船が航行する場合, 無風時と比べ 56% 程度船速低下がみられ航行性能に大きく影響を及ぼすことが分かった。

また風速が  $1\text{m/s}$  以下の実海域環境下で複数回一定時間直進航行させ, 本船の船速を調査した。この実海域で得られた船速を図 1.14 の VPP による推定結果と比較した。実海域試験の船速は  $0.998\text{m/s}$  であったのに対し, 無風時の推定結果は  $1.14\text{m/s}$  であった (ただし潮流, 波等の外乱及び PID 制御に伴う抵抗の増加は考慮していない)。推定手法との誤差は 12.8% であった。

## 1.4 現在のプロジェクト

現在, 四胴型自動航行船の付帯装備の高度化技術を開発することを行っている。また, 得られた水質ビッグデータにより超高分解能水質シミュレーションを高精度化している。さらに AI 技術を導入し養殖場の水質予報システムを開発

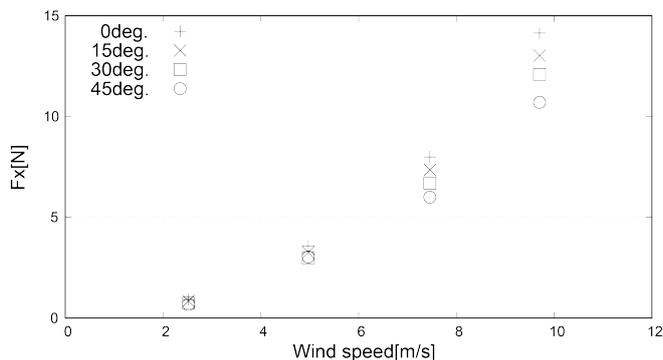


図 1.13: 上部デッキの風洞試験結果

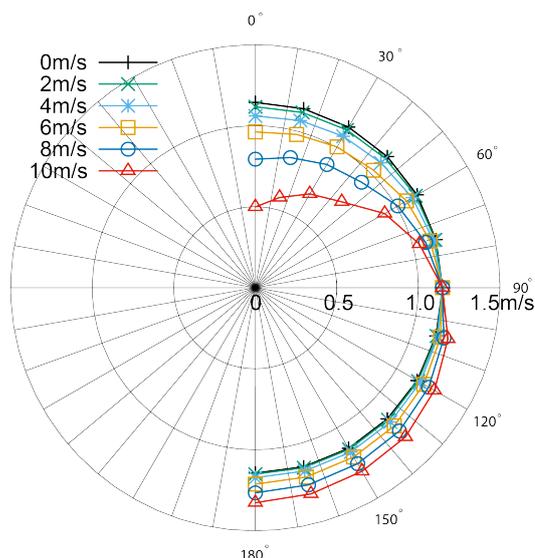


図 1.14: 四胴型自動航行船の風圧下での航行性能

している。付帯設備が高度化した四胴型自動航行船による水質ビッグデータと市販PCで実行可能な水質予報、この両者を開発することにより養殖漁業の持続可能な成長に貢献する取り組みを行っている。本事業は、2020 年度から戦略的基盤技術高度化支援事業の支援を受け、現在 2 年目を迎える。図 1.15 に 2020 年度の本学広報による資料を、図 1.16 に 2021 年度の本学広報による資料を示す。

本自動航行船が将来的にこのロボセンが広く活用されるためには、1 人でも容易な操作が望まれる。本事業における付帯装備技術とは例えばモニタリング情報データ通信モジュールおよびアプリケーションの研究開発や、障害物回避・夜間航法の研究開発、自動着岸法の研究開発、自動アンカリング装置（緊急時対策）の研究開発、深浅測量技術と連携した自動計測・自動航行システムの研究開発のことを指している。



図 1.15: 2020 年度の四胴型自動航行船プロジェクトの広報



図 1.16: 2021 年度の四胴型自動航行船プロジェクトの広報

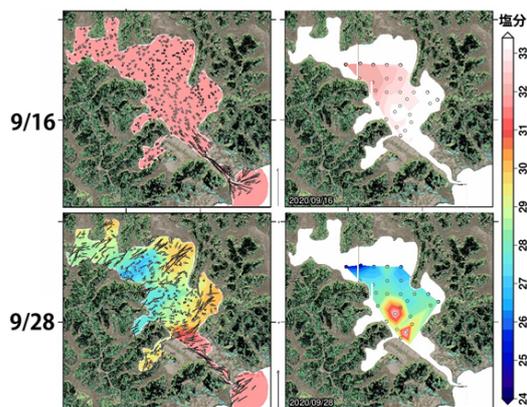


図 1.17: 実際の塩分計測とシミュレーション結果

また、四胴型自動航行船による超高分解能水質シミュレーションの適用 (図 1.17) や AI (人工知能) による水質予測システムの研究開発や養殖場ごとのきめ細かい水質予報の確立を行い、漁業者等が自ら水質予報するシステムの試験運用を実施することを行う。

## 第 2 章

# 浮体式洋上風車の研究開発

海事流体力学研究室ではエネルギー問題の解決の一助を目指して 2010 年より浮体式洋上風車 (Floating offshore wind turbine) の研究を実施してきた [8]。日本のみならず世界でもエネルギー問題は大きな転換期に 있다고 言うて良い。この章では洋上風力発電の近年の世界的な動向について述べる。その後、どうして浮体式なのか、浮体式風車はどういう構成で成り立っているのかについて説明する。また、用いられる浮体構造、係留技術等についても述べる。さらに、海事流体力学研究室で取り扱ってきた浮体式風車の基礎研究について述べたい。特に一点係留式浮体式風車について注目して述べることにする。最後に世界的にも広く研究開発が行われているこの浮体式風車の分野であるが、残されている課題についても述べることにする。

### 2.1 洋上風力発電

2015 年 12 月の第 21 回気候変動枠組条約締約国会議 (COP21) でパリ協定が採択された。世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べ  $2^{\circ}\text{C}$  より十分低く保つとともに、 $1.5^{\circ}\text{C}$  に抑えるよう努力を続けることを目標に掲げた。また、各国は温室効果ガス (greenhouse gas:GHG) の人為的な発生源による排出と吸収源による除去量を均衡させるよう取り組むことが求められている。いわゆるカーボンニュートラルを意味している。日本ではパリ協定合意に先立つ 2015 年 7 月に 2030 年度に GHG 排出量を 2013 年度に比べ 26% 削減する目標に掲げた「日本の約束草案」を地球温暖化対策本部で決定している。長期戦略では 2050 年までに 80% の GHG 排出削減を掲げている。図 2.1 に、2020 年に明らか

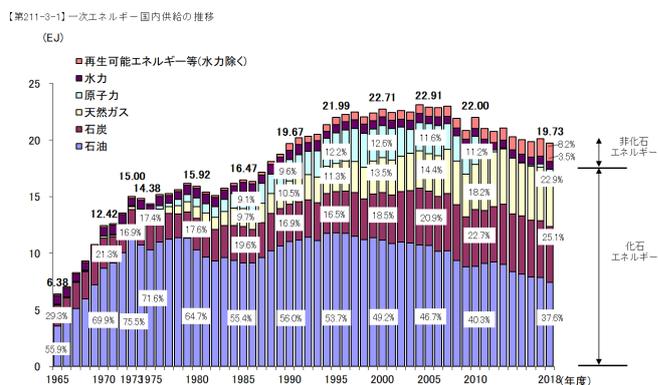


図 2.1: 一次エネルギー国内供給の推移 [9]



図 2.2: デンマーク最大の Anholt 洋上風力発電所 [10]

以上の理由から洋上での再生可能エネルギーの研究開発が世界的に活況を呈している。洋上での再生可能エネルギーは風力・波力・潮流力が挙げられる。ここでは特に洋上での風力発電について述べる。風力発電は陸上での実績も多数あり、さらには洋上の風は比較的安定しており平均風速も高いことから洋上の風力発電の実用化が期待されている。洋上風力には大きく 2 つの設置工法がある。1 つが着床式であり、もう 1 つが浮体式である。水深 30m~50m くらいま

では着床式を用いることが可能である。着床式は欧州で既にかかなり多く導入されてきている。図 2.2 に洋上風力発電の 1 例としてデンマーク最大の Anholt 洋上風力発電所を示す [10]。日本でも今後さらに進展が進む分野と言えよう。また、欧州では風車の大型化や設置までの効率化も進んできている。例として図 2.3 にデンマーク・エスビアウ港を示す [11]。そして欧州では 10 円/kWh を下回る価格で売電される事例も報告されている。

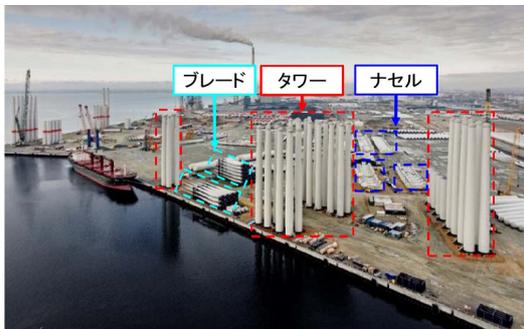


図 2.3: 欧州での組み立ての効率化様子 [11]



図 2.4: 洋上風車の基礎 [12]

最後に着床式の洋上風力発電の基礎部分に着目する。図 2.4 に基礎部分のイメージ図を示す [12]。水深の深さに応じて基礎部分を使い分けるのが一般的である。Monopile 式といってタワーを海底に差し込むもの、Tripod 式といって組んだ架台を海底に打ち込む方法、Jacket 式といって鋼管をトラス式に組むものとの大きく 3 つに分けられる。この他にも重力式といってコンクリートを円錐状にしたものもある。

## 2.2 浮体式洋上風車とは



図 2.5: 浮体式風車の浮体形式 [13]

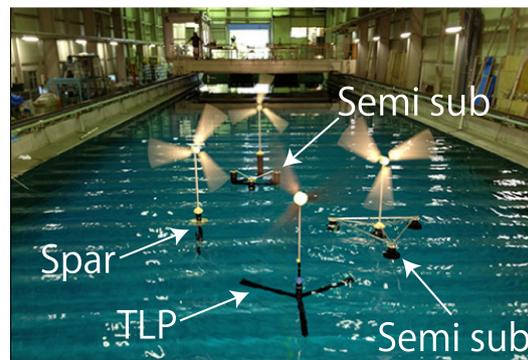


図 2.6: Nihei et al. による水槽試験 [14]

水深が 50m を超えてくると着床式から浮体式が必要となってくる。浮体式になると風車タワーから下は浮体と、係留チェーンや係留ワイヤーや係留ロープ等と、アンカーとなる。図 2.5 及び図 2.6 に浮体式風車用の浮体形式を示す。(a) スパー型 (Spar:筒), (b) セミサブ型 (Semi submersible:半潜水式), (c) TLP 型 (Tension Leg Platform), (d) バージ型 (barge:箱船) に大きく分類される。一般的にスパー型は構造が単純なため製造コストを他の浮体より低く抑えることが可能である。一方で、タワー高さと同程度の喫水が必要となり使える水深が限られる。スパー型はコストが低いということもあり使用海域さえあれば商業利用が一番最初に始まる。Scotland の北東部沖合 25km の沿岸に 5 基の 6MW のスパー式風車が 2017 年から商業運転している (図 2.7 [15])。また日本でも九州五島沖で商用運転の計画が進行中である [16]。図 2.8 は五島沖の浮体式風車である。現在は 1 機浮いているが、今後数機での商用運転が始まる。

次に浮体の係留方法について述べてみたい。係留は係留の素材としてチェーンを使うか、合成繊維ロープを使うか、ワイヤーを使うというのが現在の海洋構造物の主流である。係留方式はカテナリー係留という方式が一番多く利用され、緩く浮体をつなぎ留めることで波からの力や風による力を逃すようにする。また、多数の係留チェーンを使って浮体を多方向から海底とつなぎ留め浮体の振れ回り (回転) を許さないものと、一点係留という敢えて振れ回りを許し波



図 2.7: Scotland 沖の Hywind Scotland



図 2.8: 五島沖の浮体式風車

や風といった外力から逃す方法とがある。一点係留方式は技術的に難しい面もあるが、次節および次々節で述べる通り水深が 50m~100m とした多くの海域で使える浮体式風車が研究開発されている。

### 2.3 基礎研究 — 一点係留方式を用いた浮体式風車の実海域試験

当研究室では世界で初めて一点係留式浮体式風車の実海域試験を行った (2015 年 [17])。設置海域は石川県の七尾湾である。小型の浮体式風車ではあったが、本浮体式風車は約 1ton の質量、発電から陸上への送電ケーブルがあり、風車ブレードのピッチ制御 (翼の迎角の制御) も可能な仕様となっている。また、係留設計、浮体設計、風車設計、施工設置、運用・保守、撤去まで全てを実施している。「一点係留式」という新しい技術ということもあり、係留設計は特に工夫を凝らしている [18]。この工夫について力学的考察を加えたもの [19] について抜粋および日本語訳したものをここで簡単に紹介する。

図 2.9 に一点係留方式浮体式風車の簡易図を示す。本浮体式風車は、風車ブレード、風車ブレード迎角コントロール機構、発電機、送電ケーブル、制御ケーブル、浮体、浮体と係留をつなぐ回転機構部、係留チェーンで構成される。浮体は図 2.9 における Rotational Axis まわりに回転するのがこの浮体式風車の特徴である。電気ケーブルと制御ケーブルは浮体と絡まないようにするために回転機構部の中を通す必要がある。

同図において回転機構部上部にあるベアリングの摩擦モーメントを  $M_f$ 、係留チェーンによる復原モーメントを  $M_r$  とすると  $M_r > M_f$  である必要がある。回転機構上部のベアリングがこの条件を満たさないと係留チェーンは回転機構と一緒に捻じれていく。図 2.10 に実際の計測により得られた回転機構部の摩擦モーメント (緑部) と係留チェーンによる復原モーメント (赤線) の関係を示す。横軸が浮体の回転角度であり、縦軸がモーメントである。この関係より浮体が約  $40^\circ$  回転するとき係留チェーンによる復原モーメントの方が大きくなりチェーンは振れずに浮体は回ることが出来る。

図 2.11 に石川県七尾湾において実施した実海域試験の断面図を、図 2.12 にその時の写真を示す。図 2.13 はその試験の時の結果の一部であり、横軸が時間、縦軸が風速、風向、浮体向きを示している。風向 (青点) が変化すると浮体向き (緑点) が風向に追従することが出来ることが明らかになった。

### 2.4 浮体式洋上風車の課題と今後に向けて

最後に課題と今後に向けて述べる。現在取り組まれている浮体式風車のプロジェクトは 50m~100m とした多くの海域でも使用できる浮体式風車となる。そうなる浮体形式としてはバージ型またはセミサブ型が候補として挙げられる。また浮体式風車の一番のネックはそのコストである。コストをいかに下げていくかも重要な課題である。現在取り組まれているプロジェクトはその課題を解決しようとして取り組まれている。そのいくつかを紹介する。

一つ目のプロジェクトがバージ型浮体を用いたものである。現在、フランスや日本で取り組まれている [20]。洋上であるため風車ブレードの回転数を上げて良いという発想から 2 枚翼を用いている。これにより風車の軽量化に繋がっている。また浮体のコスト軽減を狙ってコンクリート浮体も当初検討された。図 2.14 に示すように現在北九州沖において実証試験が行われている。

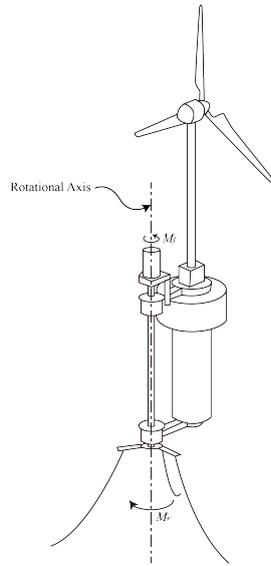


図 2.9: Physics model of the mooring system

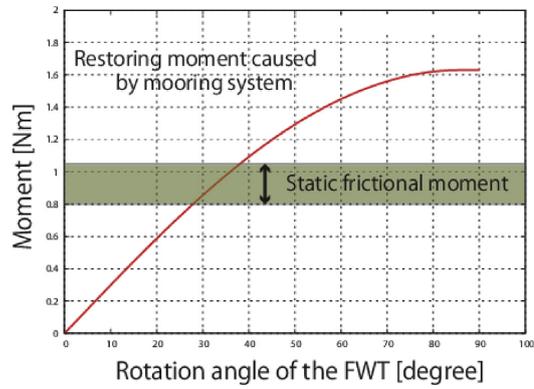
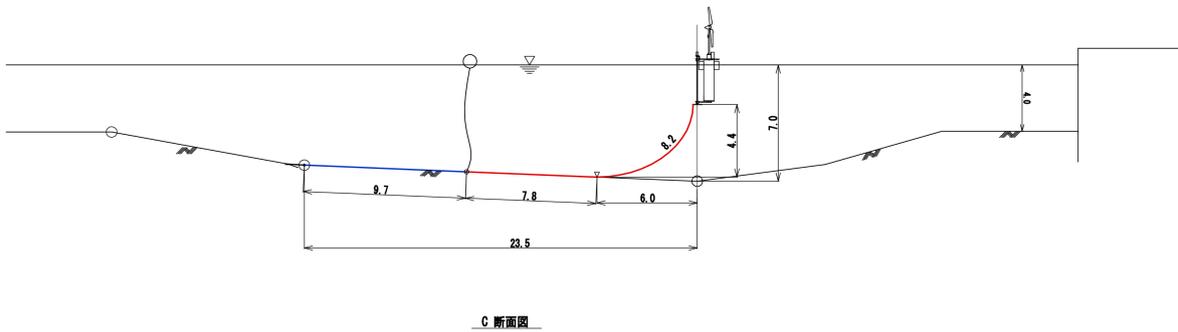


図 2.10: Relation between each moment



C 断面図

図 2.11: 実海域試験の断面図



図 2.12: Photo of the FWT model in the real sea test

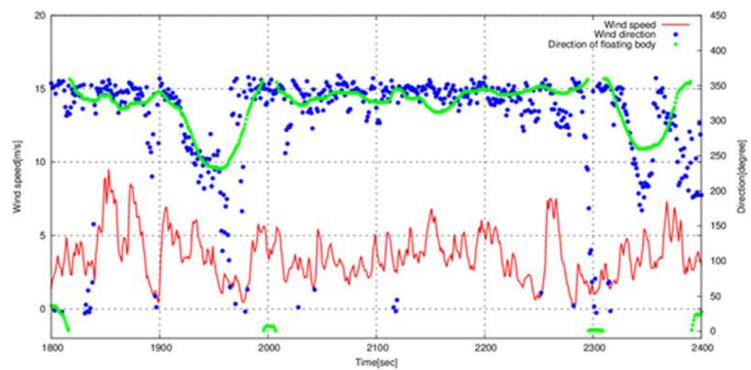


図 2.13: Weather vane test result in over 3m/s wind velocity

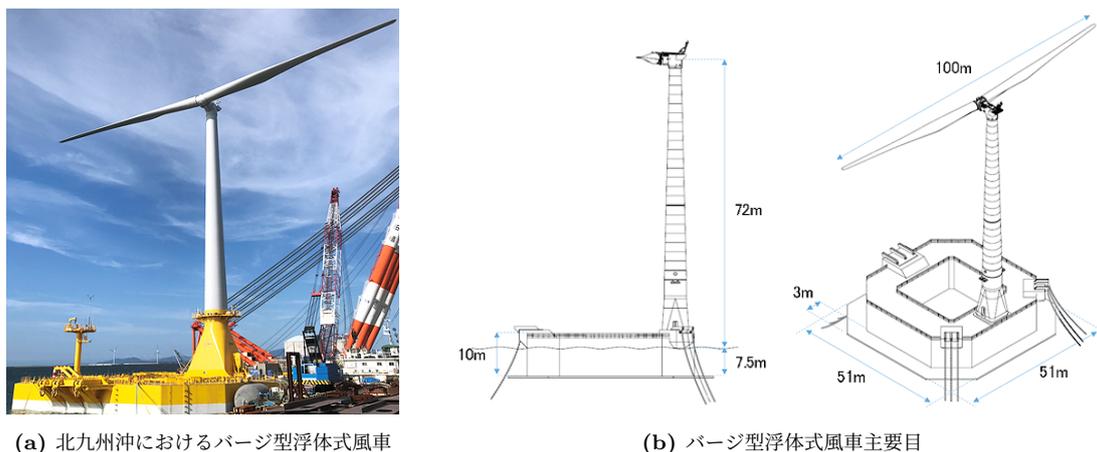


図 2.14: NEDO 北九州沖における浮体式風車プロジェクト [20]

また、風車が巨大化し、これに伴い風車タワーの上部に設置する発電機も巨大化している。故にタワーにも負担が生じている現状にある。そこで導入が検討されているのが、ワイヤー等によってタワーをサポートするといったアイデアである。ワイヤーと風車ブレードとは干渉してしまうので、風車が風向に追従するために必要なヨーイング装置を廃し、一点係留を用いて浮体ごと風に追従する仕組みである。一点係留方式は既に前節で述べたとおりである。Suzuki, Nihei et al. は図 2.15 に示す一点係留式浮体式風車の 1/60 模型試験を実施している。波浪中の構造応答 [21] や潮流・波浪・風の複数の環境条件下での振れ回り挙動について明らかにしている。図 2.16 はその試験模型である。時々刻々と変化する風荷重を模擬するためにこの水槽試験ではファンをリアルタイムに制御し、風荷重を模擬するという Real Time Hybrid Model 試験という新しい試験方法が導入されている。一点係留式浮体式風車は日本だけでなくフランスでも EOLINK によって研究開発が進んでいる [22]。基本的な考え方は同じであるが、この EOLINK は、タワーそのものがない。このように、国土に近く比較的送電し易い海域を利用する浮体式風車の研究開発が続いている現状にある。



図 2.15: NEDO による一点係留式浮体式風車

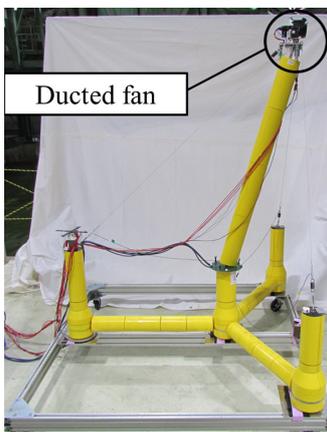


図 2.16: Real Time Hybrid Model 試験機



図 2.17: France Brest 沖の EOLINK

## 第3章

# あとがき

大阪府立大学工学域機械系学類の概論 I の講義資料として海事流体力学研究室 (二瓶研究室) の研究活動を紹介しました。

第 1 章では四胴型自動航行船について纏めました。元々北海道火散布沼のウニ養殖場で起きていた大きな被害を調べている際に自動航行船、中でも特に定点で留まる機能の有する船の必要性に駆られて研究開発を始めたものです。2015 年の四胴型自動航行船のコンセプト検討から始め、実際の開発、漁業の現場での試験運用をようやく開始するところまでできています。2020 年に関係機関の大きな協力を得て大型の実証試験が始まるところまでこぎつけています。次の目標は、この自動航行船を地元の方々でも誰でも手軽に使えるまでに高度化し、この自動航行船を用いて養殖場の水質データ化を実現したいと考えています。漁師さんたちがデータに基づく確かな養殖が出来るようお手伝いをしていきたいと考えてます。

第 2 章では浮体式洋上風車について纏めました。来るべき時代に備えエネルギー問題に資することをしたいと思い 2010 年頃から取り組み始めました。2015 年には研究室としては大きなプロジェクトである実海域試験に取り組みました。発電機そのものの製作からブレード製作、風車タワー製作、浮体製作に始まり、海上での浮体式風車の設置や撤去、そして長期間に渡る試験はかけがえのない経験を積んだと思います。まさに総合工学的な視点が重要でした。私が実海域試験で取り組んだのは一点係留式浮体式風車で、2015 年当時は見向きもされない形式でしたが、2017 年頃から NEDO を始めフランスでもこの方式が採用された大きな実証試験が始まっています。

私の考える総合工学について少しはお分かり頂けたでしょうか。四胴型自動航行船なら、ハードウェア部である船体、プロペラ、駆動するモータ、ギア、バッテリー、ソフトウェア部である制御機器、GPS や地磁気やポテンショメータといったセンサー部もあります。これらのどれか 1 つでも欠けてしまえば、この船を動かすことは決してできないのです。浮体式風車も同じで、発電機、風車ブレード、タワー、浮体、係留系のどれか 1 つでも欠けてしまえば機能しません。総合的な視点に立ち 1 つの新しいモノを生み出すことが総合工学なのかと思います。これらは社会の問題点に基づくモノなので、問題点解決のための新しいコトづくりを始めることも必要かと思います。こうした総合的な視点で明日を解決する「モノ・コト」を生み出していくのが総合工学の理想だと思っています。専門を異にする仲間たちと新たな技術を生み出して「モノ・コト」を生み出した時、科学者の端くれとして非常にワクワクします。

最後に 2 つ、3 つ、重要なと思う私見を述べておきたいと思います。1 つは常日頃から色々なことに疑問点を持つことではないかと思います。どうしてこんなものが世の中に無いのか、こんなものが世の中にあったら便利になるのかな、こんなことに困っている人が居たら助けられないものか、何でも良いと思います。学生の中に色々疑問を持ち、それを実現するためには何をしたら良いのか考え続けることだろうと思います。もう 1 つ重要なと思うことは、問題点を解決できる仕組みを考え、生み出すことです。色々解析することは重要だろうけど、やっぱり大切なことは解決策を生み出すことです。そして、その時鍵になるかなと思うことは、全く専門を異にする人たちとどれだけ協力し合えるかということだろうと思います。四胴型自動航行船プロジェクトは私のような総合工学を専門にする人や、水産、水文、土木、計測、行政、漁業の方々協力して進めています。とても刺激的で研究開発していて楽しいです。学生の中に限られた専門分野や大学のコミュニティという”タコソボ”から出て、多様な視点で物事を捉え、色々な分野の人に出会い、その貴重な出会いを大切に刺激を受けたり与えたりして欲しいと思います。

## 参考文献

- [1] 二瓶泰範, 北村眞一, 宮本一之, 外城正昭, 石井好治, 近本雅彦, 篠井隆之, 増田憲和. 船舶 特許第 6332824 号. 2017.
- [2] 二瓶泰範, 北村眞一, 外城正昭, 篠井隆之, 増田憲和. 船舶 特許第 6796292 号. 2020.
- [3] Ryosuke Saga, Zhipeng Liang, Naoyuki Hara, and Yasunori Nihei. *Optimal Route Search Based on Multi-objective Genetic Algorithm for Maritime Navigation Vessels*, pp. 506–518. Springer International Publishing, 2020.
- [4] Mingyao Ji, Sharath Srinivasamurthy, and Yasunori Nihei. Basic research on the influence of descent flow from small unmanned aerial vehicle(quadcopter) on a small floating body. *Proceedings of ASME 2020 39th international conference on ocean, offshore and arctic engineering(OMAE2020)*, No. OMAE2020-18787, pp. 1–9, 2020.
- [5] 二瓶泰範, 鶴見悠太郎, 増田憲和, 原田浩太郎, 奥野充一, 原尚之, 中田聡史. 四胴型自動航行船による高密度・高頻度な自動水質環境計測. 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 76, No. 2, pp. 1039–1044, 2020.
- [6] M Komizo, K Mukai, N Hara, Y Nihei, and K Konishi. Sea testing of automatic motion control system for a quad-maran unmanned vessel. *Proc. of 2019 International Automatic Control Conference*, 2019.
- [7] 関西造船協会. 造船設計便覧. 第 4 版. 海文堂, 1983.
- [8] 藤岡弘幸. T L P を利用した新形式洋上風力発電の運動特性と発電量予測に関する研究. 大阪府立大学工学部海洋システム工学科, 2010.
- [9] 経済産業省資源エネルギー庁. 令和元年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2020). 2020. <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/2-1-1.html>.
- [10] Ramboll. Anholt offshore wind farm - denmark's largest offshore wind farm. Technical report, Ramboll, 2011. <https://ramboll.com/projects/re/anholt-offshore-wind-farm>.
- [11] 経済産業省資源エネルギー庁. 第 2 回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会, 2020. [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/yojo\\_furyoku/002.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/002.html).
- [12] NGI(Norwegian Geotechnical Institute). R & d program— oc6 - improve offshore wind computer modelling. Technical report, NGI(Norwegian Geotechnical Institute), 2019. <https://www.ngi.no/eng/Projects/OC6-improve-offshore-wind-computer-modelling>.
- [13] Walt Musial. Overview of floating offshore wind. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2020. <https://www.nrel.gov/news/video/overview-of-floating-offshore-wind-text.html>.
- [14] Yasunori Nihei, Kazuhiro Iijima, Motohiko Murai, and Tomoki Ikoma. A comparative study of motion performance of four different fowt designs in combined wind and wave loads. *33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, No. OMAE2014-24643, pp. 1–10, 2014.
- [15] Irene Rummelhoff. World' s first floating wind farm has started production. Technical report, equinor, 2017. <https://www.equinor.com/en/news/worlds-first-floating-wind-farm-started-production.html>.
- [16] EnergyShift 編集部. 戸田建設に聞く ( 2 ) 実用化が進む洋上風力発電～戸田建設が挑む「浮体式」とは. Technical report, EnergyShift, 2019. <https://energy-shift.com/news/aa2dc32a-886c-4b85-bdd7-f3bb9b54e7de>.
- [17] 二瓶泰範, 神田信之, 高岩千人, 北村眞一, 小田健次, 久川俊一, 増山豊. 一点係留機構を用いた浮体式洋上風車の実海域試験. 日本船舶海洋工学会平成 27 年春季講演会論文集, No. 20, pp. 49–52, 2019.

- [18] 二瓶泰範, 北村眞一, 松田有祐, 神田信之, 高岩千人. 浮体式洋上風力発電装置 特許 6617907 号. 2019.
- [19] Yasunori Nihei, Yusuke Matsuda, Shinichi Kitamura, Kazuhito Takaiwa, and Nobuhiro Kanda. Research and development about the mechanisms of a single point mooring system for offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, Vol. 147, pp. 431–446, 2018.
- [20] 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) 他. 日本初のバージ型浮体式洋上風力発電システム実証機が完成—北九州市沖に設置後、実証運転開始へ—. Technical report, NEDO, 2018. [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101008.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101008.html).
- [21] Hideyuki Suzuki, Hiroki Shiohara, Anja Schnepf, Hidetaka Houtani, Lucas H. S. Carmo, Shinichiro Hirabayashi, Ken Haneda, Toshiki Chujo, Yasunori Nihei, Edgard B. Malta, and Rodolfo T. Goncalves. Wave and wind responses of a very-light fowt with guy-wired-supported tower: Numerical and experimental studies. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8, No. 11, pp. 841–841, 2020.
- [22] EOLINK. First prototype 1/10th 2018. Technical report, EOLINK, 2018. <http://eolink.fr/fr/>.