

風力エネルギーを利用した 持続可能な水産生物培養システム に関する研究

Research on the sustainable aquaculture systems for fisheries organisms utilizing wind energy.

2022年3月

17DS254

弘前大学大学院理工学研究科博士後期課程
安全システム工学専攻

志田 崇

目 次

第1章 序論

1.1 研究背景.....	1
1.1.1 漁業における再生可能エネルギー利用の現状.....	1
1.1.2 漁業や環境におけるアマモの現状.....	3
1.1.3 ナマコ養殖の現状.....	6
1.2 研究目的.....	8
1.2.1 アマモの種苗生産システム.....	8
1.2.2 ナマコ養殖システム.....	8

第2章 風車の検討..... 13

2.1 風車の選択.....	13
2.2 予備検討.....	16
2.2.1 数値解析.....	16
2.2.1.1 解析方法.....	16
2.2.1.2 解析モデル.....	16
2.2.1.3 解析結果.....	19
2.2.2 小型トラックによる実験.....	20
2.2.2.1 供試風車共通概要.....	20
2.2.2.2 実験計測機器・装置.....	21
2.2.2.3 実験方法.....	23
2.2.2.4 実験結果.....	24
2.3 風洞による実験（I）.....	28
2.3.1 供試風車.....	28
2.3.2 使用風洞.....	29

2.3.3	実験装置及び実験方法	29
2.3.4	実験結果	33
2.3.5	考察	37
2.4	風洞による実験(Ⅱ)	40
2.4.1	供試風車	40
2.4.2	使用風洞	41
2.4.3	実験装置及び実験方法	42
2.4.4	実験結果	44
2.4.5	考察	46
2.5	ブレードの検討	48
2.5.1	実験装置及び実験方法	48
2.5.2	実験結果と考察	50
第3章	揚水及び送気システムの設計と実証実験	54
3.1	揚水システムの設計	54
3.1.1	揚水ポンプの性能評価	54
3.1.1.1	実験装置及び実験方法	54
3.1.1.2	実験結果	56
3.1.2	揚水システムの設計	57
3.1.2.1	方法	57
3.1.2.2	結果	58
3.2	送気システムの設計	65
3.2.1	送気ポンプの性能評価	65
3.2.1.1	実験装置及び実験方法	65
3.2.1.2	実験結果	68

3.2.2 送気システムの設計ライン.....	71
3.2.2.1 方法.....	71
3.2.2.2 結果.....	71
3.3 実証実験.....	75
3.3.1 揚水システム.....	75
3.3.1.1 使用風車.....	75
3.3.1.2 実験装置及び実験方法.....	75
3.3.1.3 実験結果.....	77
3.3.1.4 考察.....	80
3.3.2 送気システム.....	83
3.3.2.1 使用風車.....	83
3.3.2.2 実験装置及び実験方法.....	84
3.3.2.3 実験結果.....	85
3.3.2.4 考察.....	87
第4章 風力エネルギーの水産生物培養への適用.....	89
4.1 アマモ種苗生産.....	89
4.1.1 方法.....	89
4.1.2 結果.....	93
4.2 ナマコ養殖.....	95
4.2.1 養殖用構造物の形状検討.....	95
4.2.1.1 方法.....	95
4.2.1.2 結果.....	103
4.2.2 養殖システムの構築.....	113
4.2.2.1 方法.....	113

4.2.2.2 結果.....	117
4.2.3 ナマコ閉じ込め効果の検討.....	125
4.2.3.1 実験方法.....	125
4.2.3.2 実験結果.....	127
4.3 考察.....	136
4.3.1 送気システムのコンクリートブロックの形状検討.....	136
4.3.2 揚水及び送気システムの種苗生産と養殖への検証.....	141
第5章 総合考察.....	145
5.1 風力エネルギーを利用した水産培養システムの展開.....	147
5.2 風力エネルギー利用の経済性と環境貢献についての検討... ..	151
5.3 揚水及び送気システムに利用する風車の最適化.....	161
第6章 結言.....	173
謝辞.....	175
Appendix 1 ブレードの弛みの検討.....	176
Appendix 2.....	179

第 1 章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 漁業における再生可能エネルギー利用の現状

養殖業を含む漁業では、漁船の動力、いか釣りの集魚灯などの艀装及び陸送トラックの燃料として軽油や重油などの化石燃料が用いられている。平成 17 年度の我が国の漁船漁業における軽油と A 重油を合わせた燃料消費量は、216 万 kL-245 万 kL と推定されており、我が国全体の軽油と A 重油の販売量の合計値の 2.8%-3.2%に相当する。一方、平成 17 年度の水産業の総生産額は、約 8,800 億円で国内総生産額（約 503 兆 2 千億円）の 0.17%を占めるに過ぎない¹⁾。漁業は、産業の生産規模と燃料消費量の比率から、他産業より化石燃料を多量に消費し、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を排出する産業と言える。このため、経費や二酸化炭素排出量の節減を目的に、衛星データを用いた漁場探索効率化、漁船のプロペラ、機関及び発光ダイオード (LED)の集魚灯使用など漁具や漁労機器、漁法の改良など種々の省エネ技術の開発が試みられている²⁾。

一方、省エネとは別に、動力に化石燃料を用いない電動漁船の開発や、再生可能エネルギーを漁船の動力に直接活用する研究も試みられている。これらのうち、風力や潮力を漁船の動力として活用する打瀬網漁が伝統的に行われてきたが、操作性が劣ること、気海象条件に操業が大きく左右されることなどから、小型機船底曳などの動力漁船への転換が進んだため、現在、アマモ群落を傷つけないために行われる北海道野付湾尾岱沼でのホッケイエビの打瀬網や鹿児島県、熊本県のエビ漁など特殊な漁法が行われているに過ぎない。新たな帆装漁船の開発も試みられているが、操船が煩雑で習熟が必要なこと、甲板が狭隘すること、風速や風向きによっては却って通常の動力漁船より多くの燃料が必要になるこ

と、風力のみで内燃機関を動力とする沿岸小型漁船並みの船速を得ることが難しいことから実用に至っていない。また、バイオディーゼル燃料では、天ぷら油の廃油をメタノールと反応させて脂肪酸メチルエステルを生成し、軽油の代替品やそれと混合することでディーゼル機関の燃油に供することが可能である³⁾。しかし、軽油に比べ燃費や製造コストが劣り、安定的な供給が行われていないため、漁業現場で普及するに至っていない。また、太陽光の利用では、発電パネルを搭載できる漁船上の場所が、漁労作業を考慮すると船橋天端に限られるうえ、機関や艀装の動力として用いる場合には相当の蓄電池の搭載が必要となる。このため、漁船や漁業用装備に再生可能エネルギーの直接的な利用は、ほとんど進んでいない。

海面養殖業では、給餌機の電源に太陽光パネルを用いたソーラー式自動給餌機が開発され⁴⁾、市販されている⁵⁾。また、小型風車と太陽光パネルを組み合わせ、ICT技術を活用した漁港水面での魚類養殖が青森県北金ヶ沢漁港で試みられた⁶⁾。しかし、これらはいずれも通信機器や給餌機、環境測定機器に再生可能エネルギーを活用して発電した電力を供給するものであり、陸上に比べ沿岸に豊富な風力や潮力などの再生可能エネルギー資源を直接、養殖業など水産生物の培養に活用する試みは見当たらない。

持続可能な海面養殖漁業の経営を実現するためには、風力など再生可能エネルギーを直接動力として活用する水産生物培養システムの開発が必要である。

1.1.2 漁業や環境におけるアマモの現状

青森県陸奥湾には海草であるアマモやスゲアマモの群落が発達している⁷⁾。そのような場所をアマモ場といい、陸奥湾におけるアマモ場の役割は、カレイ類やメバル類稚魚の育成場、アイナメ類の産卵場、ホタテガイの発生場、マナマコやウニ類の棲み場や餌になるほか、窒素や磷の固定による海水浄化や水産動物への酸素供給などがあり、持続的漁業生産の基礎を支えている⁸⁾。さらに、アマモは光合成をすることにより、温室効果ガスである二酸化炭素から炭素を吸収・固定し、地球温暖化の影響を緩和すると期待され、人間の暮らしや地球環境にも重要な役割を果たしている。国連環境計画（UNEP）は、アマモなどの海洋生物により貯蔵される炭素のことをブルーカーボンと名付けた⁹⁾。我が国においても吸収や固定の仕組み¹⁰⁾について、所ら（2014）、桑江ら（2019）の報告^{11)・12)}により、アマモによる二酸化炭素吸収量の定量化が進められている。また、日本政府は、2050年までに温室効果ガスの排出から吸収を差し引いて、全体としてゼロにするカーボンニュートラル、脱炭素社会を目指すことを宣言しているが、温室効果ガスの吸収源を森林などによるものだけではなく、アマモ場も重要な役割を果たしていくと考える。

1990年の環境省調査によると、陸奥湾のアマモ場面積は、国内のアマモ場の13.9%を占める6,862haであるが、1978年調査に比べ369ha消滅した¹³⁾。青森県が1999年から2000年にかけて行った調査では、4,847haと推定され⁸⁾、1990年調査に比べ33.0%少ない。さらに、環境省が2018年から2020年にかけて行った調査では、2,068haと推定され、減少傾向である。アマモ場の減少要因には、マナマコやホタテガイなどの桁曳き漁業によるアマモ類根茎部の剥離、港湾や漁港などの海岸施設の設置に伴う物理的な消滅や海水流動や底質の変化が挙げられており⁸⁾、このような消滅傾向は日本全国で確認されている¹³⁾。アマモ場

の保全や再生は、漁業生産にとって重要であり、アマモを保護育成する魚礁の開発¹⁴⁾や再生活動を行っている。また、そのような再生活動は、NPO 法人などが主体となり市民活動として全国でも盛んに行われているほか、企業による CSR (社会的責任) 活動の一環として行われている。

アマモ場の再生は、種子を播種する方法と種子から苗を作り移植する方法がある。種子を播種する方法は比較的安価にできるが、その発芽率の低さから数百万粒単位の種子が必要になることなど、問題が多い。特に、播種シートを用いたアマモ場造成では、発芽後の株数は一時的に増加するが、翌年には減少することが多く、継続的に維持するのは難しい^{15, 16, 17)}。また、種子から苗を作り移植する方法¹⁸⁾では、陸上水槽海水を汲み上げ、種子から苗をつくり、海底へ移植するが、種子を播種する方法に比べ定着率が高い。アマモは、春期に地下茎が発出した花枝(生殖株)上に肉穂花序(花穂)を形成し、夏期にかけて花穂中で種子の成熟が進むと同時に花枝が地下茎から離脱し、海面を漂流しながら花穂や成熟種子を海底に散布する。種子は、冬期に海底の砂泥中で発芽し子葉を形成する。子葉は、生長し春期以降に成葉となって地下茎を伸長させるようになり、順次栄養株を発出する¹⁹⁾。したがって、本種は、有性生殖(種子繁殖)と無性生殖(栄養繁殖)により繁殖する。このため、アマモの種苗生産は、一般に夏期に成熟した、あるいは、成熟途上の種子を持つ花枝を採集し、1-2ヶ月程度の陸上水槽に収容しながら、種子の成熟を進行させると同時に外套皮を腐敗させ、花穂から脱落し水槽の底面などに溜まった成熟種子を集める種子採取から行われる。次いで、採取した種子を洗浄後に水槽に敷き詰めた砂中に播種し、移植のためのハンドリングが可能なサイズに生長する翌年の春頃まで育苗が行われる。冷蔵庫中で種子が保存できるため²⁰⁾、採苗後直ちに育苗を開始する必要はないが、アマモ種苗生産には、種子採取と育苗を合わせて半年前後の陸上水槽での培養を要

している。

青森市にある NPO 法人あおもりみなとクラブでは、Table 1.1 に示すとおり、種子採取に 3 ヶ月間、育苗に 7 ヶ月間の計 10 ヶ月間程度とほぼ周年にわたってアマモ種苗生産のために陸上水槽を運用している。アマモ種苗生産

Table 1.1 Eelgrass seeding production procedure.

Timing of implementation	Content of implementation items
June	Collection of flower branches
June – August	Seed collection
August – November	Chilled storage of seeds
December	Sowing seeds in the water tank
December – June	Germination and growth
July	Transplant seedlings

は一般に、濾過海水や天然海水をかけ流した水槽が用いられるが^{21, 22)}、草体の発育段階別に必要な海水の供給量、適切な交換率についての検討例は見当たらない。海水の供給量、交換率が大きいほど、天然草体に近い生育環境が確保できると言えるが、大型水槽に収容した花枝では止水下でも種子の成熟が進むため、種子採取では海水をほとんど供給せずに行うこともでき、また、育苗のごく初期では、発芽に胚軸に蓄えた栄養が用いられるため栄養塩を補給する必要がなく、発芽の好適温度範囲である 5-10℃²³⁾ に維持できれば頻繁に海水を交換する必要はない。一方、子葉や成葉の育苗では、生育のため塩分を 23-31% に維持する必要があり、さらに、栄養塩の補給、ガス交換の促進、付着珪藻の排除のため、海水を供給、交換する必要がある。NPO 法人あおもりみなとクラブでは、成葉の育苗期間中に揚水ポンプの故障による 1-3 日程度の海水供給停止がしばしば発生するが、それによる種苗生産への影響はほとんどないものの、1-2 週間続く場合は葉の変色や枯死が進む。このことから、育苗においてもからなずしも常時海水を供給し続ける必要はなく、5 日程度で水槽の海水が入れ替わればよいと考える。しかし、海水を汲み上げるためのポンプは電気駆動であるため、設置コストもさることながらランニングコストが高くメンテナンスも容易ではないため、再生活動の支障をきたしている。また、現在は化石燃料で稼働している火力発電

による電力で揚水ポンプを駆動させており、アマモ生育のための揚水に二酸化炭素を排出している電力を使用していることに矛盾を感じている。そこで、低コストで、メンテナンスが容易で二酸化炭素を排出しない仕組みで海水を揚水する、再生可能エネルギーを離党したシステム開発が、環境保全、再生活動を持続的に行うには重要である。さらに、その揚水は漁港における活魚や海藻養殖用の水槽への給水や、漁港や港湾施設、臨港道路などの融雪に利用できるため開発を行う意義は大きい。

再生可能エネルギーによる揚水は、風力エネルギーを風車による回転などの機械的エネルギー動力に変換し、直接利用（揚水利用）したものが最も古い方法である。現在では、機械的エネルギーを電気へ変換する発電（電力利用）が風力利用形態の主だが、アメリカでは揚水利用風車が農場や牧場に使われているほか、電力供給がなされていない開発途上国における揚水利用は、給水のための経済的で環境に優しい方法の一つとなっている。

1.1.3 ナマコ養殖の現状

国の漁業産出額及び農林水産物輸出入統計によると、ナマコ類は、2019年に164億円あまりの漁獲、約2億3千万ドルの輸出額がある重要な水産物である^{24, 25)}。しかし、主産地である北海道及び青森県のナマコ類の漁獲量は、いずれも近年減少傾向にあつて、2007年の各々2,835ton及び1,653tonから2019年には1,932ton及び693tonとなった²⁶⁾。ナマコ類の中でも主要な漁獲対象種であるマナマコ *Apostichopus armata* については、人工種苗生産技術が開発されており²⁷⁾、2017年には全国で37,432千個の種苗が天然海域に放流された²⁸⁾。

ナマコ種苗を増殖に供さず養殖することで、より安定した収穫を期待する漁業者もいる。ナマコ養殖は、中国の渤海湾や東シナ海沿岸では、潮間帯を堰堤で

仕切る方法や陸上の養殖池に海水を汲み入れる手法で大規模な給餌養殖が行われている²⁹⁾。しかし、このような養殖手法は、海岸地形の変化や給餌による水質悪化などに伴う海域環境への影響が懸念される。

一方、漁港水面は、稚ナマコの生息に適する静穏な環境が形成されており³⁰⁾、餌料となる付着珪藻が一般に豊富であるためナマコの好適な成育環境にあることから、陸奥湾でも一部の漁港はナマコ漁場として利用されている。また、人家に近く比較的密漁を監視しやすい利点を持つため、漁港水面にナマコを閉じ込めることで無給餌養殖の場として活用できる可能性がある。

アワビやウニなどの匍匐性水産動物は、空気層を忌避する性質があるため、天然の岩礁や構造物に空気を送り込むことで、それらを閉じ込め養殖する手法が発明されている³¹⁾。また、ナマコについては、外周を空気層で囲んだ礁体に稚ナマコを放流し、中間育成場としての利用が研究されている^{32, 33)}。そこで、空気層をもつコンクリート構造物を漁港開口部に設置し、さらに、エアーポンプから構造物中の空気層に送気することで漁港水面にナマコを閉じ込め養殖する手法を考案した(特許第 6842674 号:水中設置システム及び水中設置物)。しかし、この構造物は、空気の漏出や砂泥の堆積などによって空気層が喪失した場合、ナマコを漁港水面に閉じ込め養殖する機能が損なわれる。このため、構造物には、空気層の直下に砂泥が堆積しにくく、空気層から空気が漏出しにくい形状が求められる。さらに、漏出した空気を補充するため、エアーポンプを稼働させる動力が必要である。

1.2 研究目的

1.2.1 アマモの種苗生産システム

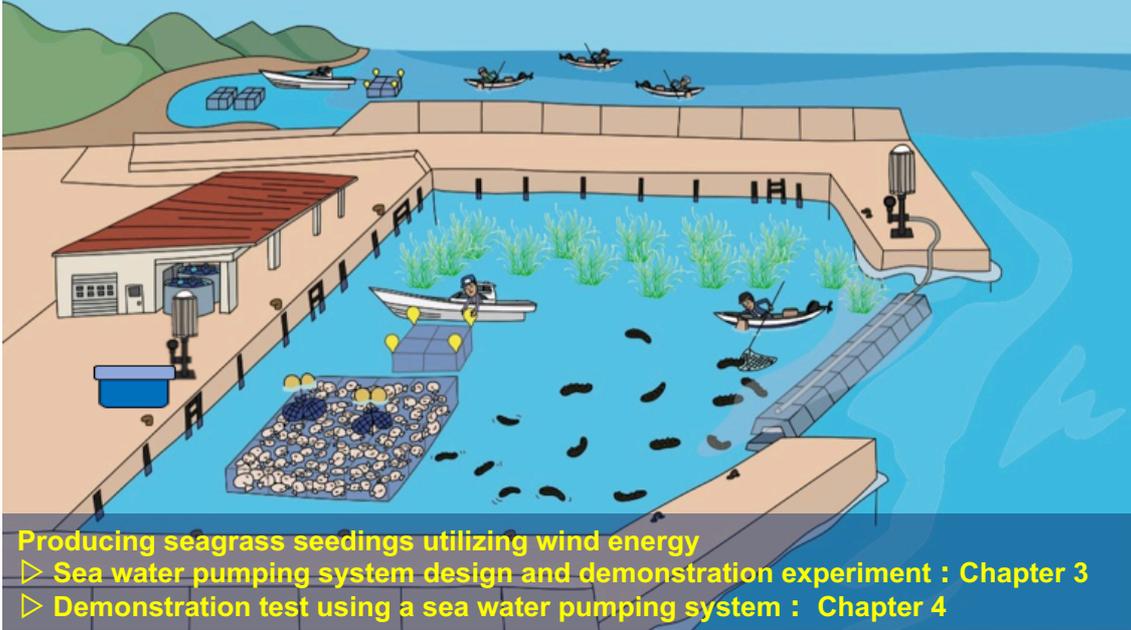
電気代やランニングコストの低減による経済的な負担，化石燃料発電を通して二酸化炭素排出による環境的な負担がかからない，持続可能なアマモ種苗生産を実現するために，低コストで軽量，メンテナンスしやすい安全な風車を設計し，実証実験地を想定した，平均風速 5m/s，揚程 2.2m における回転数，トルクの関係を示した揚水システムを設計し，実証実験を行い，持続可能なアマモの種苗生産システムに風力エネルギーが適用できるかを明らかにする(Fig. 1.1)

1.2.2 ナマコ養殖システム

漁港を活用した，電気代やランニングコストの低減による経済的な負担，化石燃料発電を通して二酸化炭素排出による環境的な負担がかからない，持続可能なナマコ養殖を実現するために，エアーポンプから海底に設置した構造物中の空気層に送気し，漁港水面にナマコを閉じ込め養殖する手法を用いるために，砂が堆積しにくい，構造物を開発する。次いで，空気層へ空気を補充する自動的なシステムを構築するため，低コストで軽量，メンテナンスしやすい安全な風車を設計し，実証実験地を想定した，平均風速 5m/s，水深 4.5m における回転数，トルクの関係を示した送気システムを設計する。設計した送気システムをもとに風車を利用した送気システムを構築し，実証実験を行い，持続可能なナマコ養殖システムに風力エネルギーが適用できるかを明らかにする(Fig. 1.1)。

Sea cucumber culture in a fishing port utilizing wind energy.

- ▷ Air pumping system design and demonstration experiment : Chapter 3
- ▷ Concrete structure for sea cucumber culture : Chapter 4
- ▷ Demonstration test using a air pumping system : Chapter 4



Producing seagrass seedlings utilizing wind energy

- ▷ Sea water pumping system design and demonstration experiment : Chapter 3
- ▷ Demonstration test using a sea water pumping system : Chapter 4

第1章 参考文献

- 1) 農林水産省, 平成 18 年度漁業経営調査報告.
- 2) 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所開発調査センター, 漁船漁業の省エネルギーに向けて. July, 2013.
- 3) 長谷川勝男, 溝口弘泰, 小田健一, 井原雄一, 縄武宏, 太田政則 廃食油 BDF の船舶利用における潤滑油への影響. 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 47 巻, 第 1 号, 2012.
- 4) 古川清, 山下光司 マダイ養殖における実用規模自発摂餌給餌システムの開発. 日本水産学会誌, 75 (5), 775-778, 2009.
- 5) 永富忠良 養殖環境保全に貢献する残餌センサー付自動給餌機. YAMAHA 技報, 第 36 号, 2003.
- 6) 桐原慎二, 久保田健 ICT を活用した漁港水域での魚類養殖システムの構築と実証試験. 水産工学, 第 58 巻, 第 1 号, 37-43, 2021.
- 7) S. Kiriwara, N. Kon, D. Fujita and M. Notoya Distributions of zosteraceae species along the coasts of Aomori Prefecture, locating at the northernmost of Honshu, Japan. Algal Resource, 5(1), 1-14, 2013.
- 8) 桐原慎二 陸奥湾のアマモ類藻場と持続的漁業生産. 用水と廃水, 53(1), 76-82, 2011.
- 9) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdes, L., DeYoung, C., Fonseca, L. and Grimsditch, G.: Blue Carbon - A Rapid Response Assessment, United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri AS, Birkeland, 2009.
- 10) 水産庁 藻場・干潟の二酸化炭素吸収・固定のしくみ ～ブルーカーボンの評価～, 2014.

- 11) 所立樹, 細川真也, 三好英一, 門谷茂, 茅根創, 桑江朝比呂 沿岸域のブルーカーボンと大気中 CO₂ の吸収との関連性に関する現地調査と解析. 港湾空港技術研究所報告, 第 52 巻, 第 1 号, 2013.
- 12) 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 梅澤有, 佐々木淳 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol 75 , No.1, 10-20, 2019.
- 13) 環境庁自然保護局・財団法人海中公園センター第 4 回自然環境保全基礎調査, 海域生物環境調査報告書 (干潟, 藻場, サンゴ礁調査) 第 2 巻藻場, 1994.
- 14) 志田崇, 藤川義一, 石川義朗, 今男人, 桐原慎二 アマモ・ナマコ増殖礁におけるスゲアマモの保護育成及びマナマコの資源培養効果. 水産工学, 第 52 巻, 3 号, 161-170, 2016.
- 15) 金澤剛, 森 鐘一 現地アマモ場造成試験と適地評価に関する研究. 海岸工学論文集, 50, 1266-1270, 2003.
- 16) 桐山隆哉, 森洋治, 藤井昭彦 アマモ場増殖技術開発事業. 長崎県総合水産試験場報告, 90-96, 2000.
- 17) 和泉安洋, 広沢 晃, 團 昭紀, 森口朗彦, 寺脇利信 底質安定化マットによる 4 年間のアマモの成長と成熟. 水産工学, 39, 139-143, 2002.
- 18) 越川義功, 山木克則, 林文慶, 中村華子, 田中昌宏, 小河久朗 アマモの安定種苗生産とその移植による群落形成. 海洋開発論文集, 第 22 巻, 625-630, 2006.
- 19) 徳田廣, 大野正夫, 小河久朗 海藻資源養殖学, 1987.
- 20) 金澤剛 アマモ場造成の実用に関する研究, 大阪大学博士論文, 2011.
- 21) 水産庁 アマモ類の自然再生ガイドライン, 2007.

- 22) 草加耕司 水温管理によるアマモ種子短期保存. 岡山水産試験場報告, 24号, 40-43, 2009.
- 23) 川崎保夫, 飯塚貞二, 後藤弘, 寺脇利信, 下茂繁 アマモへの温度の影響 I 発芽と発芽体の生長. 電力中央研究所報告, 研究報告 485028, 1986.
- 24) 農林水産省, 統計情報, 令和元年漁業産出額.
- 25) 農林水産省, 統計情報, 令和2年農林水産物輸出入概況.
- 26) 農林水産省, 統計情報, 令和2年漁業・養殖業生産統計
- 27) 酒井勇一・近田靖子, マナマコ人工種苗の陸上育成マニュアル. 北海道立栽培水産試験場, 北海道立稚内水産試験場, 2009.
- 28) 全国豊かな海づくり推進協会, 平成29年度栽培漁業・海面養殖用種苗の生産・入手・放流実績. http://www.yutakanaumi.jp/saibai/saibai_01.html, 2021年5月.
- 29) 酒井勇一・中尾博己, 中国のナマコ養殖事情(視察報告). 北水試だより, 75, 12-17, 2007.
- 30) 大橋正臣・牧田佳巳・梶原瑠美子・伊藤 敏朗, 波動流場における稚ナマコの行動に関する一考察. 寒地土木研究所月報, 775, 35-40, 2017.
- 31) 菊地省吾・浮永久, 匍匐性水産動物用の移動防止装置. 特許第1646040号.
- 32) 山田俊郎・大野史耶・麻島梨沙・三浦博・櫻井泉: 空気ポケットフェンスを用いたマナマコ中間育成施設の開発, 平成28年度日本水産工学会学術講演会集, 55-58, 2016.
- 33) 山田俊郎・高橋伸次郎・麻島梨沙・櫻井泉: 空気ポケットフェンスを用いたマナマコ中間育成施設に関する研究Ⅱ, 平成29年度日本水産工学会学術講演会集, 162-165, 2017.

第2章 風車の検討

2.1 風車の選択

この章では、風力エネルギーを利用し持続可能な水産生物培養を明らかにするために揚水・送気システムを構築するため実証実験にて使用する風車について検討する。

風車の種類は、回転軸の方向によって水平軸風車と垂直軸風車に分けられ、さらに、作動原理によって揚力型風車と抗力型風車に分けられている¹⁾ (Fig. 2.1)。

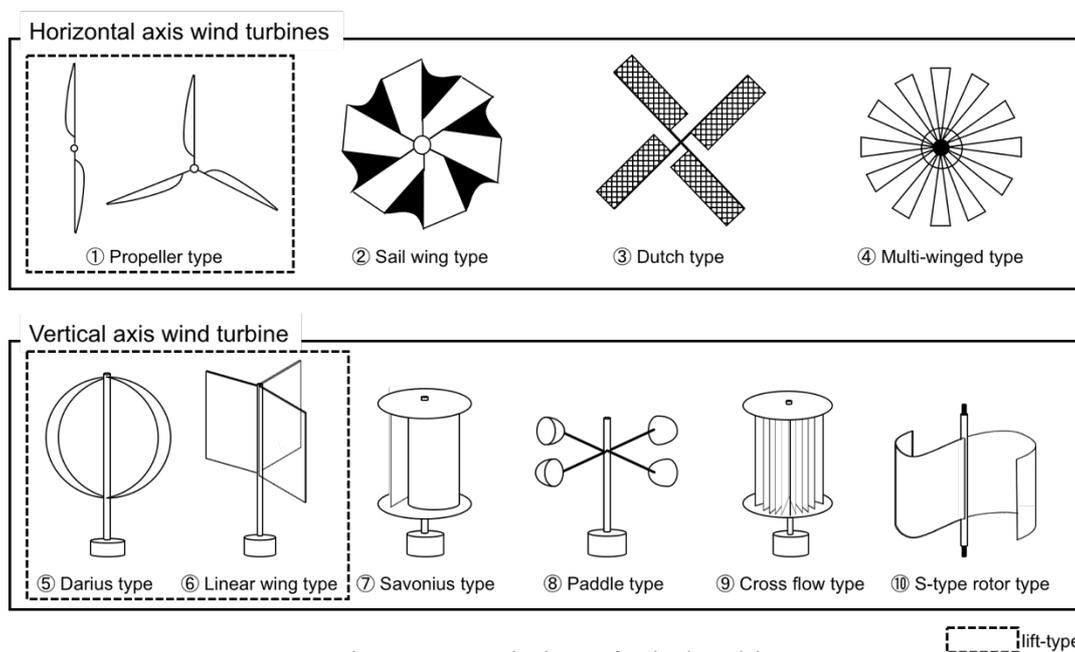


Fig. 2.1 Variation of wind turbines.

【水平軸風車】

・風車の回転軸が風向きに対して平行となるタイプで、風車の正面が風向きの方向を向かないと回転しない。

【垂直軸風車】

・風車の回転軸が風向きに対して垂直となるタイプで、風向きの方向に左右されずに回転する。

【揚力型風車】

・気流の進行方向に対して飛行機の翼のような形状が上下の圧力差により受ける垂直方向の力（揚力）で風車の回転力を得ることから，風速の数倍以上の周速度（ブレードの先端速度）で回転可能なため，発電用に適している。

【抗力型風車】

・気流の進行方向の物体にあたる力（抗力）で風車の回転力を得る。トルクは大きい風速以上の周速度で回転できないため，揚水や製粉等の機械的作業の利用に適している。

このことから，風向きに左右されず，トルクが大きい抗力型垂直軸風車を選択することとした。

抗力型垂直軸風車には，クロスフロー風車とサボニウス風車があり，クロスフロー風車は，出力性能や特性について様々な研究，定量的な評価が行われ^{2,3,4,5,6)}，出力性能は把握されている。また，サボニウス風車は，揚水に利用する先行研究⁷⁾はあるものの，市販の実用機は存在していない。弘前大学では，形状はクロスフローに類似しているが，ローテーションフローという理論でブレード 8 枚の抗力型垂直軸風車を開

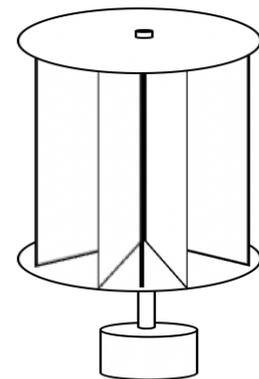


Fig. 2.2 Figure of the rotation-flow wind turbine.

発しており⁸⁾，製品化もされている⁹⁾ (Figs. 2.2, 2.3)。製品化されたローテーションフロー型風車は，防雪柵の LED lump を発光させるため，発電用に開発されたものであり⁹⁾，回転数を上げることを目的としている。そのため，トルクについての定量的な評価がなく，検討と実験が必要であるが，本研究ではローテーションフロー風車を用い，定量的な評価を通じての空力出力性能を明らか

にし、揚水用及び送気用の風車として検証する。

	Model of wind turbine	Rotation flow type (vertical axis)
	Rotor dimension	Diameter : 250mm Height : 500mm
	Air guide plate size	Diameter : 390mm Height : 560mm
	Total height (including dome roof)	730mm
	System weight	13.5kg
	Blade material	JIS H 4100 Aluminum based Alloy A-6063S-T5
	Blade painting	JIS H Anodic oxide coating+Electrolytic tinted silver with glossy clear coating

Fig. 2.3 Commercialized rotation-flow wind turbine and its specification.

ローテーションフローの理論は、風が風車の上流側で1回、内部では順回転方向に旋回流が形成され、これがブレード内側を多段に押すことで回転力を得ている。形状はクロスフロー風車と似ており、クロスフロー風車は上流側での挙動は同様ながら、内部に入り込んだ風が風車を通り抜ける際に後流側で1回の計2回ブレードを押すことで回転している¹⁰⁾。Figs. 2.4, 2.5は、大坂ら(2016)によるそれぞれの風車のシミュレーション¹¹⁾から内部の風の流れの状況を流速により可視化した結果であって、ローテーションフローは内部に入り込んだ風が風車中心で渦を形成し、ブレードを押しているが、クロスフローはみられない。

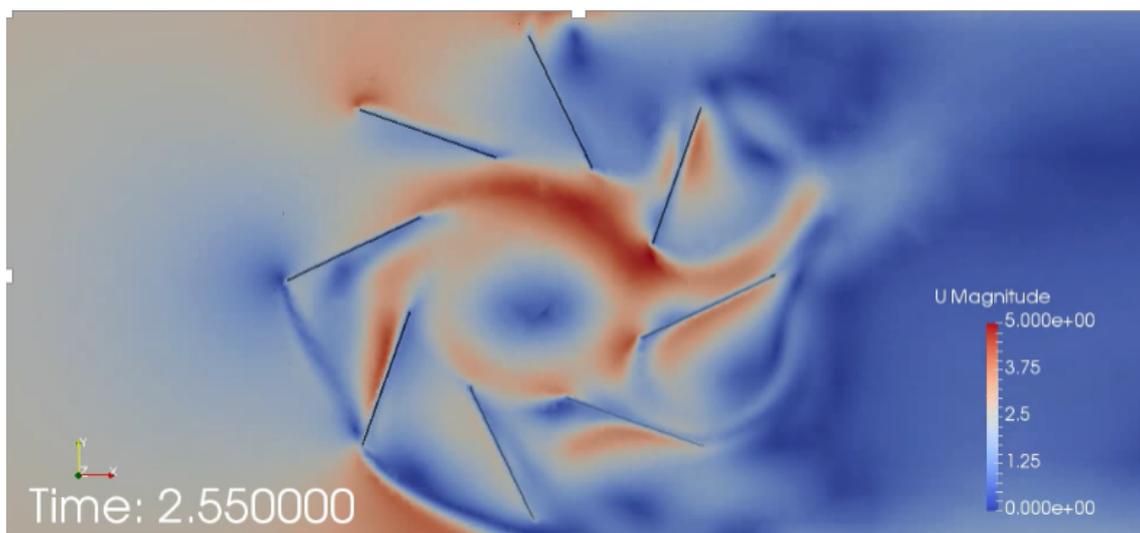


Fig. 2.4 Simulation result of unsteady flow-field for rotation-flow type turbine.

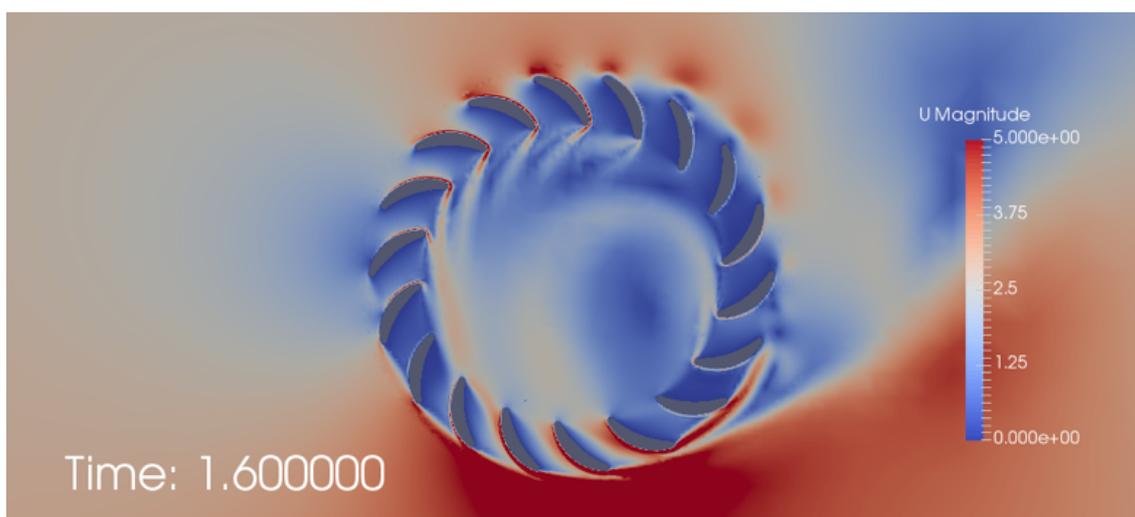


Fig. 2.5 Simulation result of unsteady flow-field for typical cross-flow type turbine.

2.2 予備検討

2.2.1 数値解析

空力出力性能評価の実験を始める前に、供試風車寸法において性能が最も高くなるブレード幅を検討するため、設計した風車寸法をもとに、ブレード幅による性能評価を、オープンソースのソフトウェア OpenFOAM、2次元 CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いて解析を行った。

2.2.1.1 解析方法

解析には OpenFOAM 3.0.1 を使用し、pimpleDyMFoam を用いた非圧縮非定常乱流ソルバーによる 2次元 CFD 解析を行った。ここで、乱流モデルは $k-\omega$ SST とし、初期条件は非圧縮定常乱流ソルバーの simpleFoam を用いて速度場と圧力場を計算して与えた。

2.2.1.2 解析モデル

解析する風車は、試作したものと同一寸法とし、回転する風車の外直径 D は 940 mm である (Fig. 2.6)。ブレード幅 W は 75, 185, 290, 410 mm の 4 種類とし、厚さ t は 4 mm に固定した。風車は 8 枚のブレードからなり、迎え角につい

では、ブレード中心から風車中心を結んだ直線とブレードとのなす角度が 35° となるものとした (Fig. 2.7)。また、回転軸を中心にブレードのみ回転しているものとした。

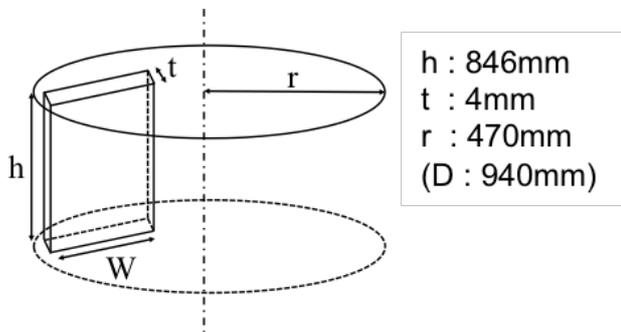


Fig. 2.6 Dimensions of a single blade and size of the turbine.

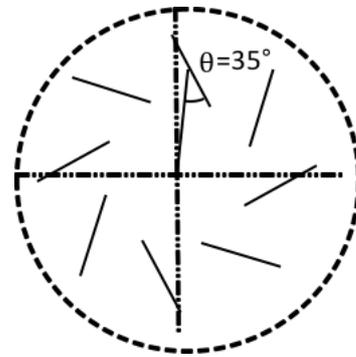


Fig. 2.7 Blade arrangement image from the direction of the wind turbine axis used.

風車の直径 ($D:940\text{ mm}$) を基準として、流れ方向は風車の前後でそれぞれ $5D$ と $15D$ 、垂直方向 (幅) は風車を中央に $10D$ とした領域を blockMesh で作成した (Fig. 2.8)。風車近傍及び流域は, snappyHexMesh を用いて再分割している。風車近傍のメッシュの状態は、ブレードとロータの回転境界で微細化した (Fig. 2.9)。なお、計算時間短縮のため計算領域全体を微細メッシュとせず、領域の外縁部は粗くとり、流体が流れた際に影響の大きいタービン近傍と下流域のみを細分化した。

また、鉛直方向 (風車奥行き) はメッシュ 1 層の $h: 846\text{ mm}$ の長方形とし、セル数は約 $26,000$ である。

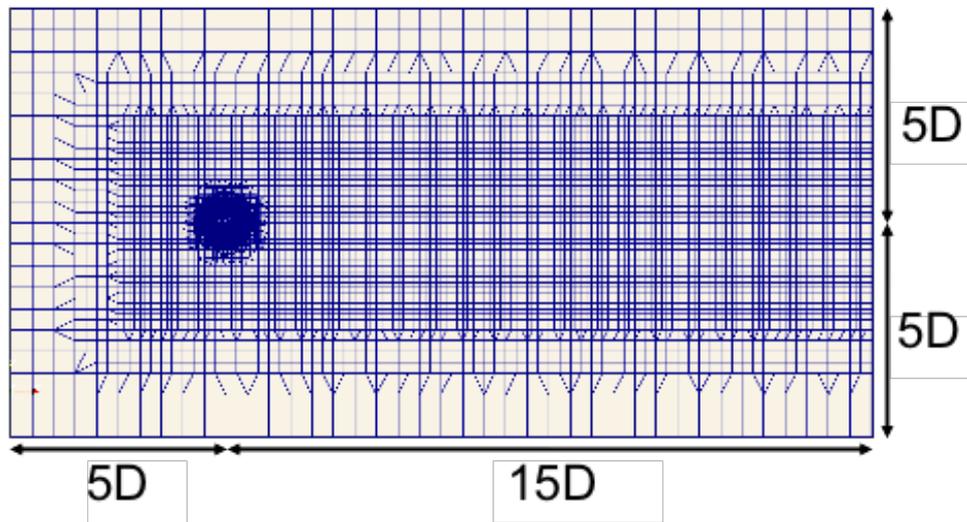


Fig. 2.8 Mesh distribution of the analysis domain used in the simulation.

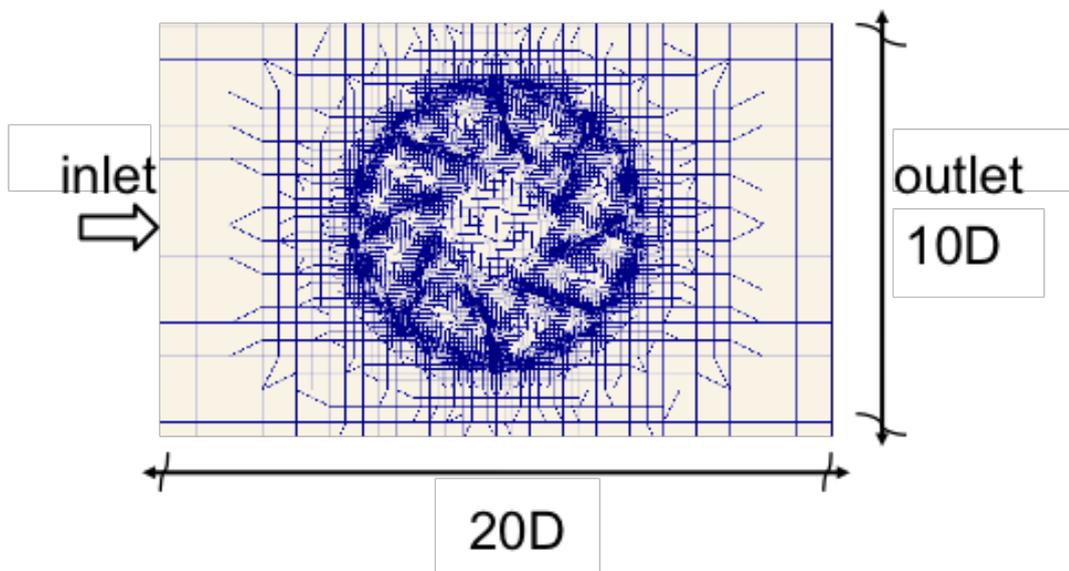


Fig. 2.9 Enlarged view near a wind turbine in the mesh distribution of the analysis domain used in the simulation.

風速は 3 m/s の一定とした。周速比 λ の値は 0.2 , 0.4, 0.6, 0.8, 1.1 とし、下記に示す式 (1), (2), (3) を用い回転角速度 ω を計算し、1, 3, 4, 5, 7 rad/s と条件を決めた。ここで、周速比 (λ) は風車のブレード先端速度と流入風速 v の比で表される。

$$\text{周速比 } \lambda = \frac{\omega r}{v} \quad (1)$$

$$\text{回転角速度 } \omega = \frac{\lambda \cdot v}{r} \text{ [rad/s]} \quad (2)$$

$$\text{時間 } t = \frac{2\pi}{\omega} \text{ [s]} \quad (3)$$

さらに、パワー係数 (C_P) を下記に示す式 (4) で求め、性能評価を行った。

パワー係数 (C_P : power coefficient) は、自然風から風車を利用して取り出すことのできるエネルギーの効率を表す。

$$\text{パワー係数 } C_P = \frac{T \cdot \omega}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho A v^3} \quad (4)$$

T : トルク[Nm] ω : 回転角速度[rad/s] ρ : 空気密度[kg/m³]

A : 受風面積[m²] v : 風速[m/s] r : 風車半径[m]

2.2.1.3 解析結果

解析結果を Table 2.1 にまとめた。 $C_p \text{ max}$ は C_p が周速比 λ に対して最大となる値である。この結果、ブレード幅 290mm 付近が出力性能の高いブレード幅と推測された。この解析結果を参考に小型トラックを利用した予備実験を行った。

Table 2.1 Analysis results of 2D-CFD simulation for Rotation-flow turbines

Blade width	$C_p \text{ Max}$	Tip speed ratio
75	0.037	0.158
185	0.116	0.588
290	0.168	0.572
410	0.042	0.534

2.2.2 小型トラックによる実験

2.2.1 で行った数値解析を参考に、供試風車を小型トラックに搭載し走行させ、模倣的に風を起こし、ブレード幅と設置角度を変化させた場合のトルク出力の変化を比較及び出力性能の相対比較を行った。

Fig. 2.10 は、小型トラックに供試風車並びに実験装置を搭載した外観写真である。

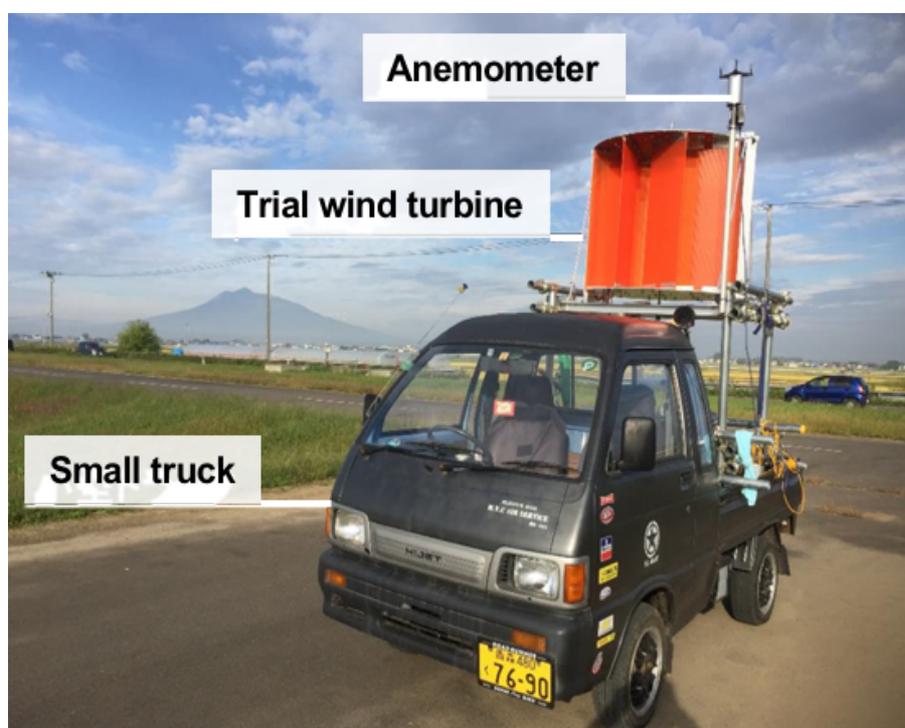


Fig. 2.10 Appearance of the on-board used in the experiment wind turbine.

2.2.2.1 供試風車共通概要

供試風車の寸法は、直径 940mm、高さ 847mm である (Fig. 2.11)。材料に関しては Table 2.2 に示した。

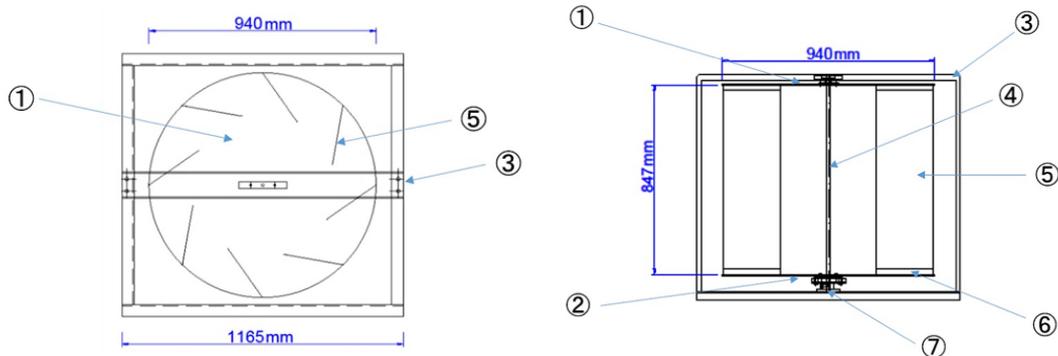


Fig.2.11 Overview and sideview of wind turbine used in the experiment.

Table 2.2 Components of the wind turbine used in the experiment

No.	Name	Material	Dimensions
①	Top plate for blade connection	A5052	Diameter : 940mm Thickness : 4mm
②	Bottom plate for blade connection	A5052	Diameter : 940mm Thickness : 4mm
③	Outer frame	A5052	Height : 1005mm Width : 1165mm
④	Shaft	Sus304	Diameter : 10mm Length : 100m
⑤	Blade	Polycarbonate	Height : 847mm Thickness : 4mm Number of sheets : 8 sheets
⑥	L-shaped angle	A2017	Height : 40mm Width : 140mm Thickness : 2mm
⑦	Thrust bearing	Scm435+Sus304	Inside Diameter : 10mm ball bearing balls : Chromium molybdenum steel

2.2.2.2 実験計測機器・装置

Fig. 2.12 は，模擬的に風を起こすために走行させた小型トラックへ実験計測機器・装置の搭載を示したものであり，個別に説明する。

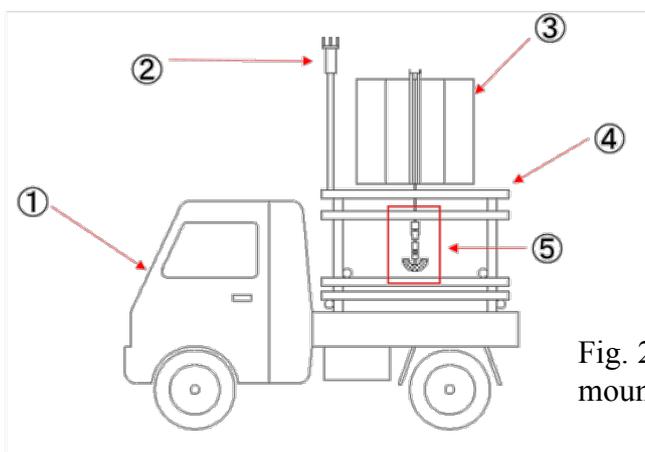


Fig. 2.12 Experimental apparatus mounted on the small truck.

① ダイハツ社製の型式 V-S83P, 車両総重量 1180kg, 長さ 3290mm, 幅 1390mm, 高さ 1790mm, ガソリン駆動の小型トラック。

② ヤング社の 2 成分超音波風向風速計, CYG-85000 を用いた。供試風車から約 150mm 遠ざけた位置に設置した。

③ 供試風車は, 2.2.1.3 の解析結果を参考にブレード幅 290mm と 350mm と設置角度を変えたものを用意し, Fig. 2.13 示すようにそれぞれ Rotor 1, Rotor 2, Rotor 3 とした。

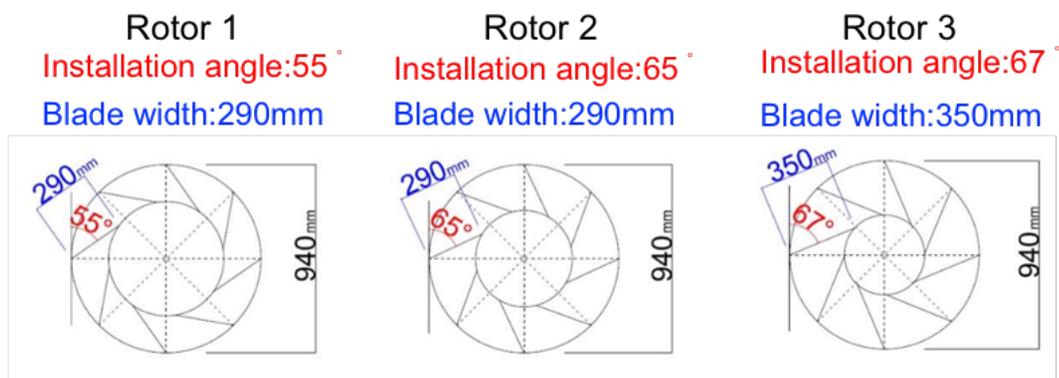


Fig. 2.13 Blade width and installation angle of the used in the experiment wind turbine.

④ 供試風車の架台である。

⑤ 拡大し個別に説明する (Fig. 2.14)。

・ 風車の回転軸を繋ぎ合わせるためのカップリング (高減衰能タイプ)

・ トルク, 回転数計測器: UNIPULSE 社製の回転トルクメータ UTMII -1Nm

・ 3 倍の増速機 (トルクメータの定格容量が $\pm 1\text{Nm}$ のため回転数を上げトルク測定値を低くするため)

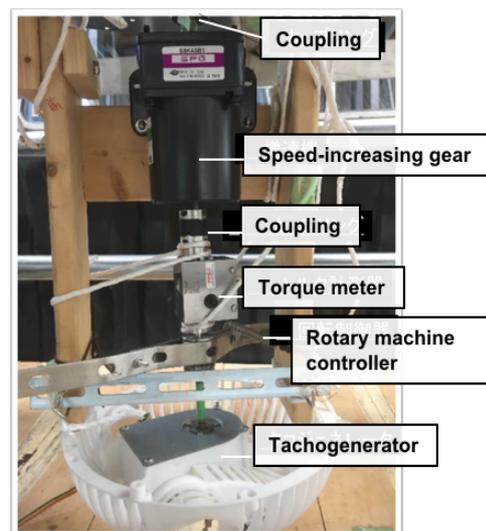


Fig. 2.14 Experimental setup directly connected to the rotating axis of the

- ・回転制御器（回転を制御しトルク出力を高めるため。カップリングのゴム部分をステンレス製の板状のもの2枚で挟み，その2枚をねじとナットで連結し，ねじを締め，摩擦が大きくなることによりブレーキを掛け回転を制御する）
- ・回転数計測：タコジェネレータ
- ・データ収録装置：GRAPHTEC社データロガー（GL900）

2.2.2.3 実験方法

本実験は，青森県黒石市にある地方独立行政法人青森県産業技術センター農林総合研究所敷地内の農道で行った。農道は距離約1kmであり，舗装整備がされた平坦な道路である。

Fig. 2.15 は小型トラックの走行実験直前の様子である。

実験は，車速 5km, 10km, 1km, 20km, 25km, 30km, 35km (1.39m/s, 2.78m/s, 4.16m/s, 5.56m/s, 6.94m/s, 8.33m/s, 9.72m/s に相当) と，計7回行った。それぞれ速度を保ちながら 500m 直線走行し，小型トラックと風車の回転を止めてから，ブレーキ力を変えて繰り返し測定し，出力トルク，風速，回転角速度をデータロガーに記録した。それぞれの車速で出力トルクは，回転制御器の摩擦ブレーキの強弱を変え，風車を手回しし，出力トルク数値をデータロガーで確認しながら設定した。実験はなるべく自然風のない時間帯，または弱い時間帯（風速 2m/s 以下）に行い，計測への影響が少なくなるよう工夫した。

無風状態における想定風速を，Table 2.3 に示した。

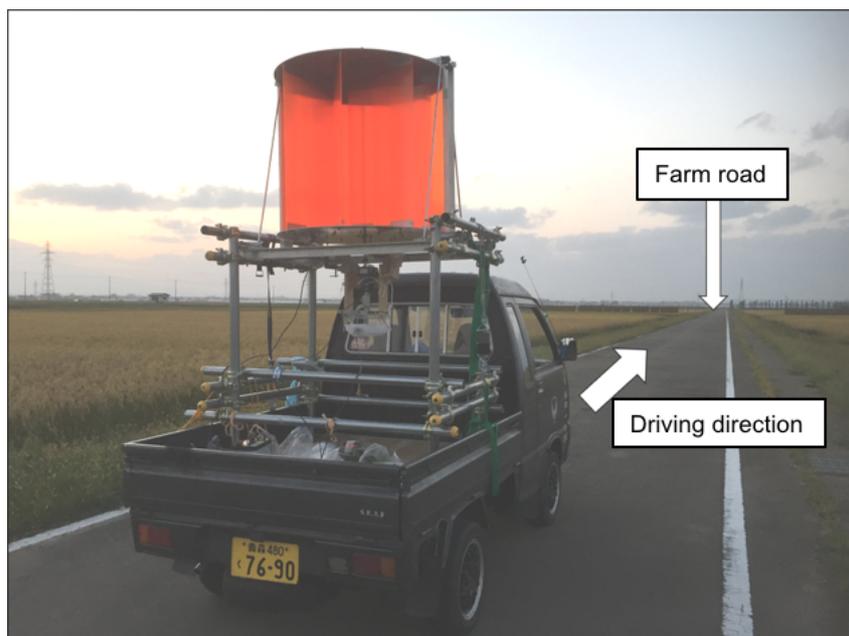


Fig. 2.15 State of truck driving experiment.

Table 2.3 Estimated wind velocity in relation to vehicle speed

Vehicle speed(km/h)	5	10	15	20	25	30	35
Wind speed(m/s)	1.4	2.8	4.2	5.6	6.9	8.3	9.7

2.2.2.4 実験結果

本実験では、出力トルク、回転数及び風速をデータロガーに収録した (Fig. 2.16)。さらに拡大したものを Fig. 2.17 に示す。

横軸に経過時間を、1ch には出力トルク (0-1Nm/0-5V)、2ch には回転数 (1回転 4 パルス)、3ch には風速 (0-100m/s/0-5V)、4ch には回転数を収録した。

小型トラックの走行中にトルク出力、風速、回転数の波形が同時に安定している時間帯をカーソル A-カーソル B 間で範囲指定し、出力トルク風速に関しては平均値を求め、実験値とした。2ch、4ch は、それぞれ回転トルクメータから出力される回転数でそれを回転角速度に変換した。

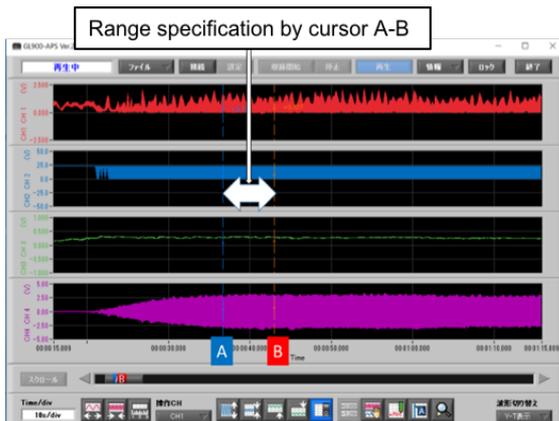


Fig. 2.16 Waveform of the data logger.



Fig.2.17 Waveform of the data logger (Fig. 2.16) further enlarged.

トルク性能の変化

Fig. 2.18 は、各風車の風速 7m/s [6.5m/s~7.4m/s] における回転角速度とトルクの関係を示したものであり、以下のことがわかる。

- ・ 回転角速度が低いほど、トルクは高くなる。
- ・ Rotor 1 と Rotor 2 のトルク値は、回転角速度 6rad/s 以下の領域で 1Nm 以上になった。
- ・ Rotor 3 については、回転角速度 6rad/s でトルクは 0.68Nm となり Rotor 1, 2 に比べ低い。その他の回転角速度に対するトルクも低い数値を示した。
- ・ ブレード幅 35mm はブレード幅 290mm に比べ、トルク出力が低いことが認められた。Rotor 1 及び Rotor 2 は、ほぼ同じようにトルク出力が変化している傾向がみられ、本実験ではブレード設置角度における違いはみられなかった。

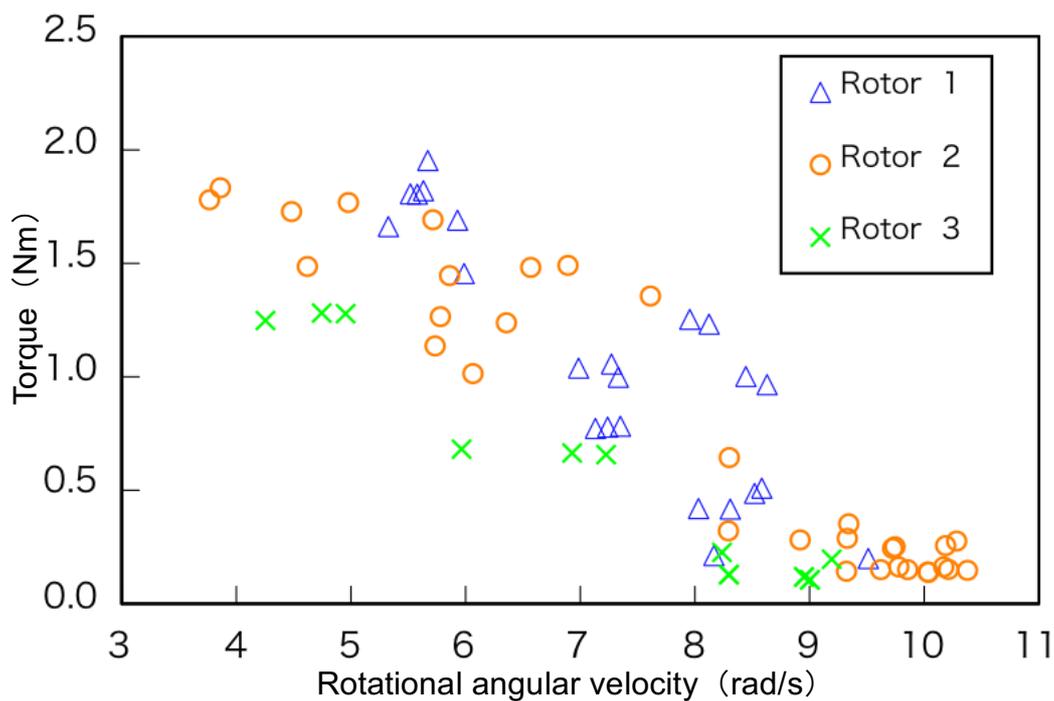


Fig. 2.18 Relationship between rotational angular velocity and torque.

出力性能の相対比較

性能評価は、出力トルクと風車回転角速度を風速及び風車受風面積で無次元化した周速比 λ 式 (1)、パワー係数 C_P 式 (4) 及びトルク係数 C_T 式 (5) を用いた。

$$\text{トルク係数 } C_T = \frac{T}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho A v^2 r} \quad (5)$$

T : トルク [Nm] ρ は空気密度 [kg/m³] A : 受風面積 [m²]

v : 風速 [m/s] r : 風車半径 [m]

トルク係数 C_T (torque coefficient) は、風により発生する回転力のうち、風車がどれだけトルクとして利用できるかを表す性能評価指標である。

Fig. 2.19 は、Rotor 1 及び Rotor 2 の周速比 λ に対するトルク係数の変化を示し、以下のことがわかる。

- ・周速比 0.4 付近風車もトルク係数 0.15-0.2 の値を示した。
- ・周速比 0.6 付近がトルク係数の最小値を示して、周速比が低くなるとトルク係数は高くなり、その変化の傾向が類似している。
- ・Rotor 1 及び Rotor 2 の設置角度によるトルク係数による性能の大きな違いはみられなかった。

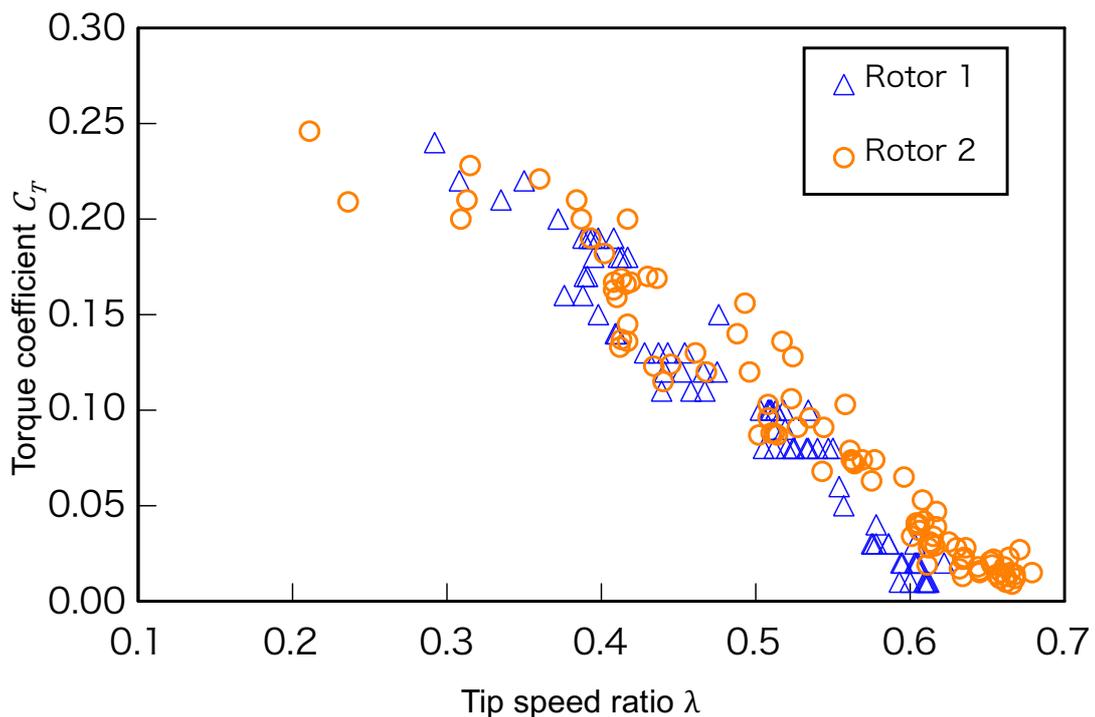


Fig. 2.19 Relationship between tip speed ratio λ and torque coefficient C_T .

- Fig. 2.20 は、Rotor 1 及び 2 の周速比 λ に対するパワー係数の変化を示した。
- ・周速比が 0.3-0.4 の範囲でパワー係数が最大値を示し、最大値が 0.06-0.08 の範囲にあった。
 - ・周速比 0.6 付近がトルク係数の最小値を示し、周速比が低くなることによるパワー係数の変化の傾向も類似している。
 - ・Rotor 1 及び Rotor 2 の設置角度によるパワー係数による性能の大きな違いはみられなかった。

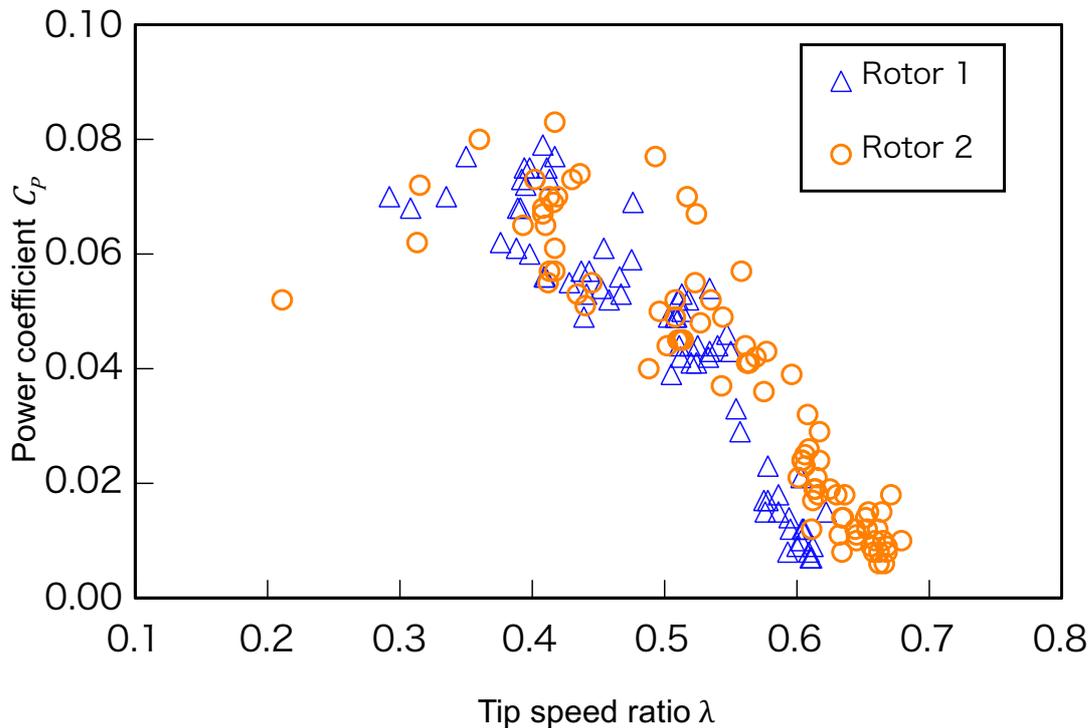


Fig. 2.20 Relationship between tip speed ratio λ and torque coefficient C_p .

2.3 風洞による実験（I）

予備検討・実験の結果を参考に、ブレード幅の違いによる空力性能を定量的に評価した。さらに、市販のベーンポンプを風車回転軸へ直結し、揚程 5.7m の揚水開始風速，トルク及び回転数，揚水量の評価をするとともに，他の抗力型垂直軸風車と比較し，実証実験で使用する風車を選定した。

2.3.1 供試風車

本実験の供試風車共通概要に関して，予備実験である小型トラックにおける実験（2.2.2.2）と同様である。予備実験の結果を参考にブレード幅を 250mm と 290mm と選定した（Fig. 2.21）。

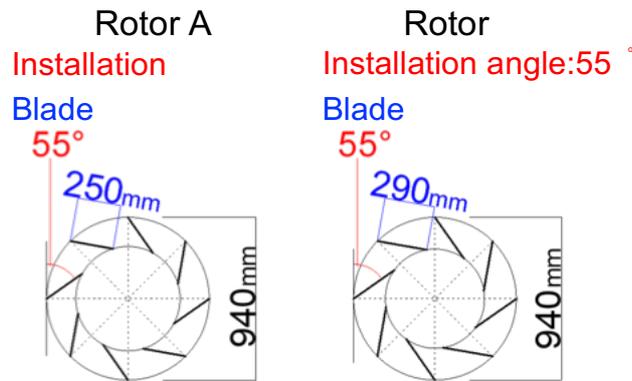


Fig. 2.21 Blade width and installation angle

2.3.2 使用風洞

風洞は、三菱重工業(株)総合研究所の、大型汎用風洞の風格 1 (幅 10m×高さ 3m) を使用した (Fig. 2.22)。気流は一様流とし気流傾斜角は無し (0°) とした。

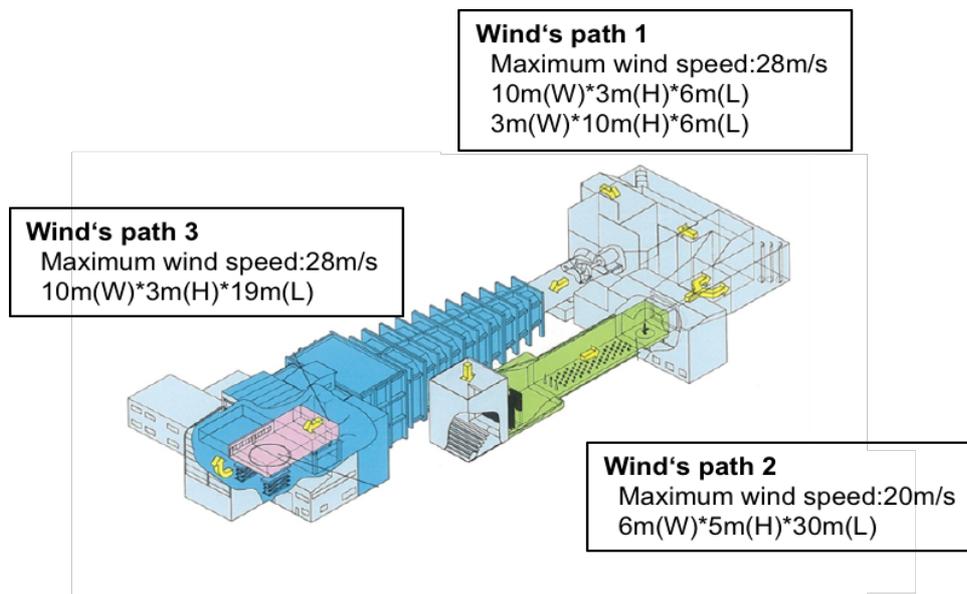


Fig. 2.22 Overview of a large general-purpose wind tunnel

2.3.3 実験装置及び実験方法

Fig. 2.23 は、空力性能評価実験計測機器・装置の連結の全体を表したものであり、個別に説明する。

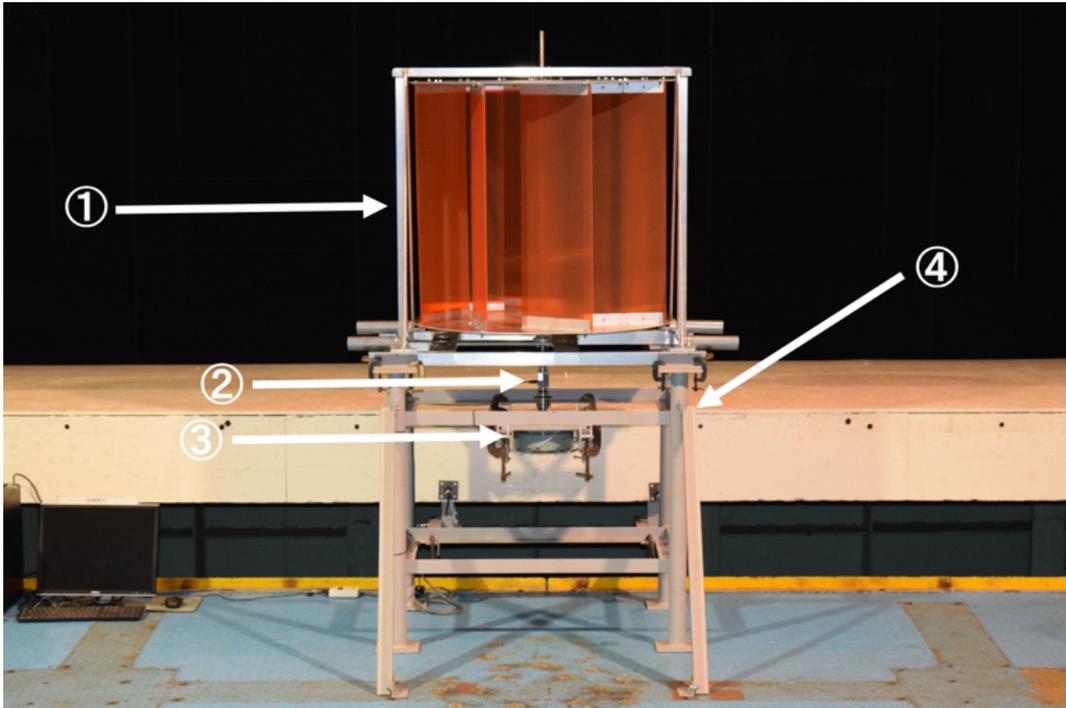


Fig. 2.23 Overall performance evaluation experiment measurement equipment and apparatus.

- ① 供試風車で 2.2.2 と同様の風車。
- ② トルク・回転数計測器 (UNIPLSE 社製回転トルクメータ UTMII-10Nm)
(Fig. 2.24)。
- ③ トルク発生用負荷器 (シンフォニアテクノロジー社製パウダブレーキ POB-5)
(Fig. 2.25)。
- ④ 供試風車架台。

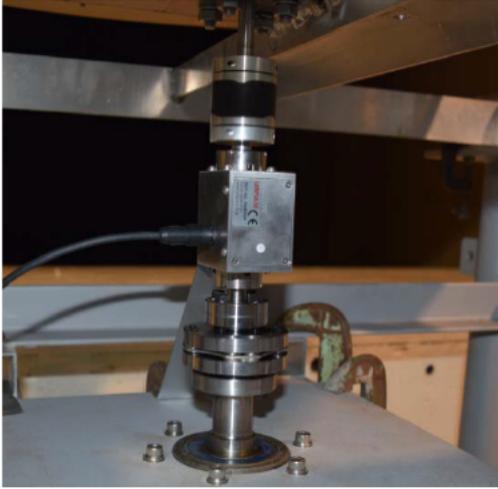


Fig. 2.24 Torque meter.



Fig. 2.25 Powder brake.

Fig. 2.26 は、揚水実験計測機器・装置連結の全体を表したものであり、個別に説明する。

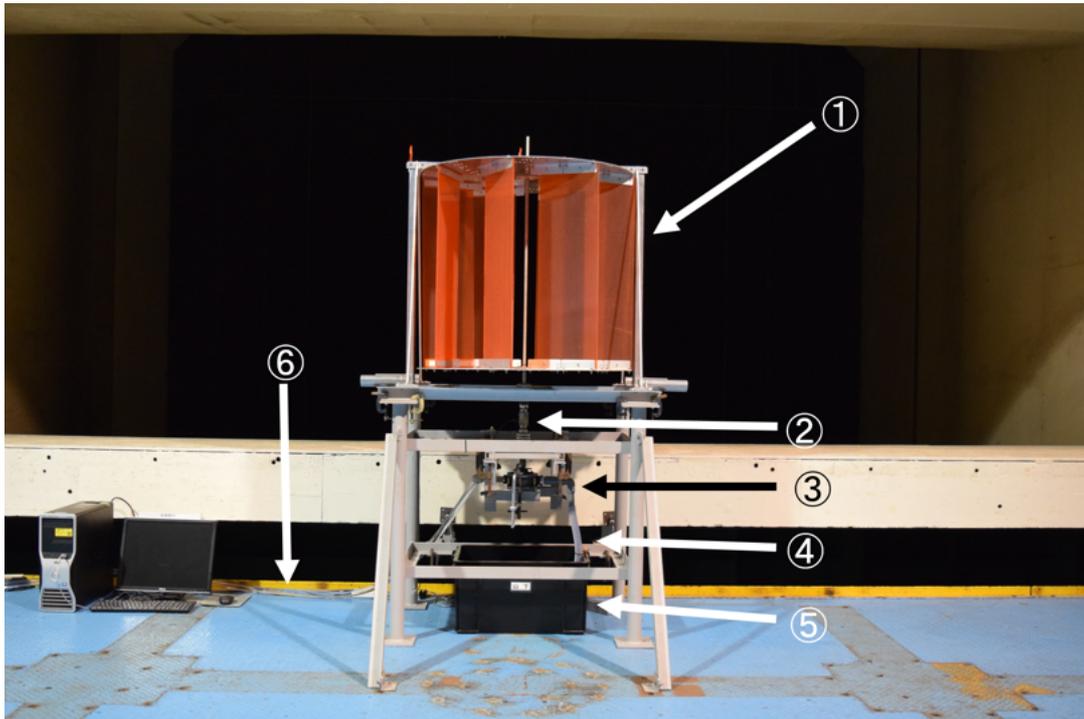


Fig. 2.26 Overall view of the pumping experiment measurement equipment and apparatus.

①, ② 性能評価実験と同様。

③ 揚水用ポンプ（アクアシステム社製 HRP-25Z）。樹脂製で、1回転の吐出量が 200 cc の手回し式ベーンポンプ（Fig. 2.27）。

④ 吸入側水路用ホース。

⑤ 揚水用の水を入れるプラスチック製ケース。

⑥ 吐出し側水路用ホース。高さ 5.7m 位置に吐出口を設置。

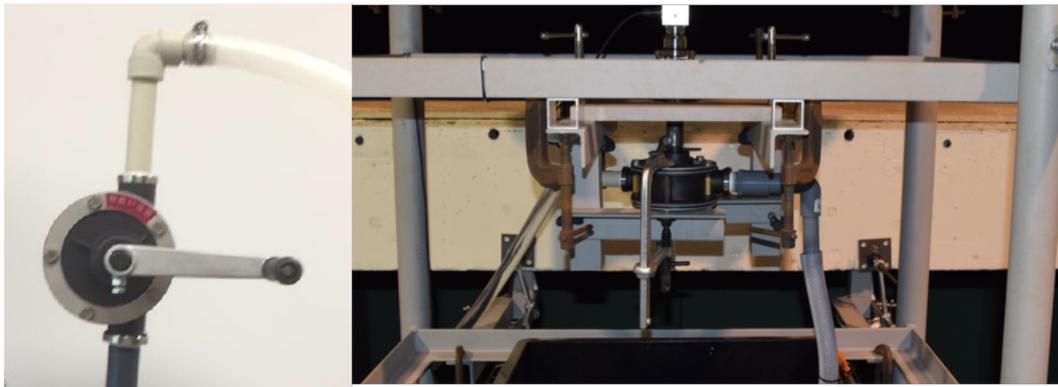


Fig. 2.27 The vane pump.

風速計は OKANO 社製 LK-7S 標準ピトー管 (Fig. 2.28), データ収録装置については, 横河電機社製データロガー DL850 を使用した。

空力性能評価実験の方法は, トルク発生用負荷器のブレーキ電流をそれぞれ 0.14A, 0.28A, 0.42A, に設定し, 風速は性能曲線に応じて適宜設定した。



Fig. 2.28 Standard pitot tube.

揚水実験は、ペーンポンプ下にある水槽に水を汲み、ホースの先端（吐き出し口）を高さ約 5.7m に設置し、全揚程を 5.7m とした（Fig. 2.29）。風速を徐々に増加させ、供試風車が回転し、揚水が確認できた時点での能力計測と空力性能評価を行った。



Fig. 2.29 Pumping experiment.

2.3.4 実験結果

データロガーには、トルク（T）、回転数（Rs）及びパワー（P）を収録した（Fig. 2.30）。各風速 30 秒間ずつ収録し、それぞれの平均を実験値とした。また、風速は別モニターで管理した。

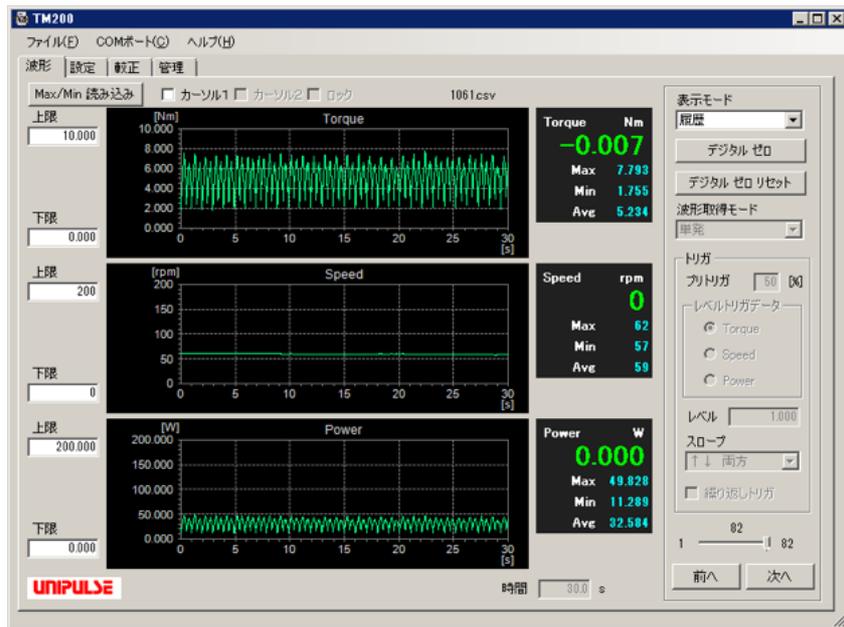


Fig. 2.30 Waveform and numerical values of the data logger.

空力性能評価

空力性能評価は、2.2.1.2, 2.2.2.4 であげた式 (1), (2), (5) を用いた。

Fig. 2.31 は、ブレーキ電流 0.28A 時の Rotor A 及び Rotor B の周速比 λ に対するトルク係数の変化を示した。ここから以下のことがわかる。

- ・周速比 0.6 付近がトルク係数の最小値を示し、周速比が低下するとトルク係数は増加する。
- ・周速比 0.4 付近で Rotor A のトルク係数は 0.17, Rotor B のトルク係数は 0.15 を示し、Rotor A の方がトルク係数は高くなり、広い周速比領域に対しても同様の傾向がみられる。
- ・ブレード幅 250mm の Rotor A は、ブレード幅 25mm の Rotor B に比べ、性能が高いことが認められた。

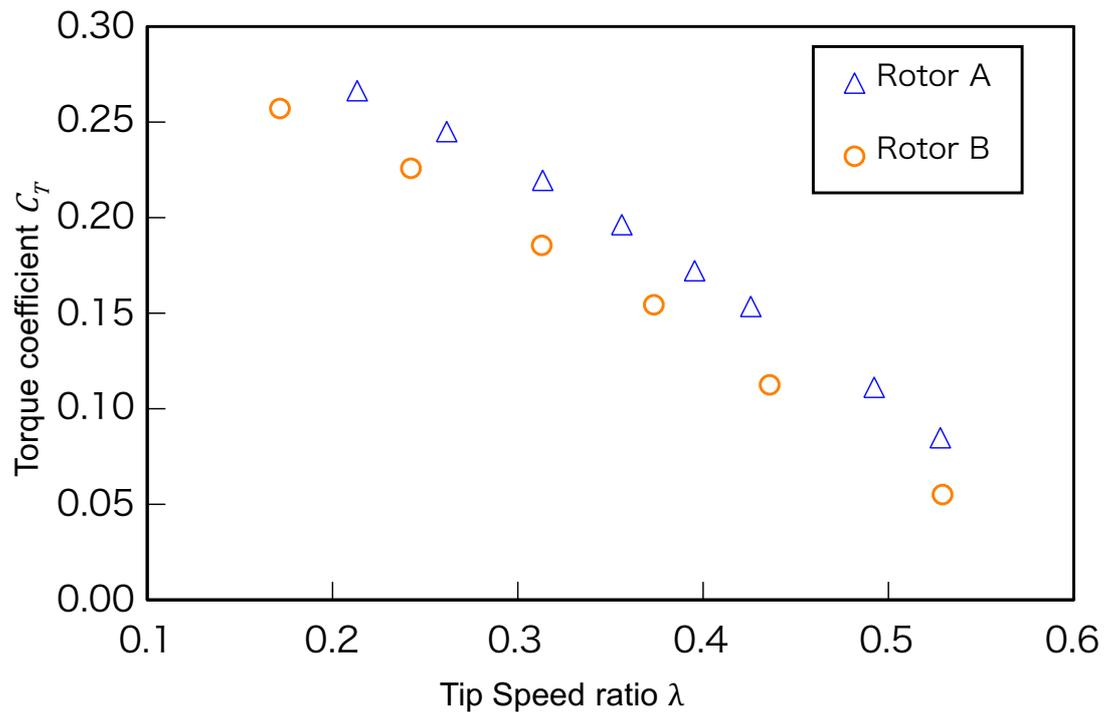


Fig. 2.31 Relationship between the speed ratio λ and the torque coefficient C_T .

Fig. 2.32 は、ブレーキ電流 0.28A 時の Rotor A 及び Rotor B の周速比 λ に対するパワー係数の変化を示した。ここから以下のことがわかる。

- ・周速比 0.35 付近でパワー係数は最大値を示した。
- ・Rotor A のパワー係数が 0.07, Rotor B のパワー係数が 0.06 と Rotor A の方が高いパワー係数を示し、広い周速比領域に対しても同様の傾向がみられる。
- ・ブレード幅 250mm の Rotor A は、ブレード幅 25mm の Rotor B に比べ、性能が高いことが認められた。

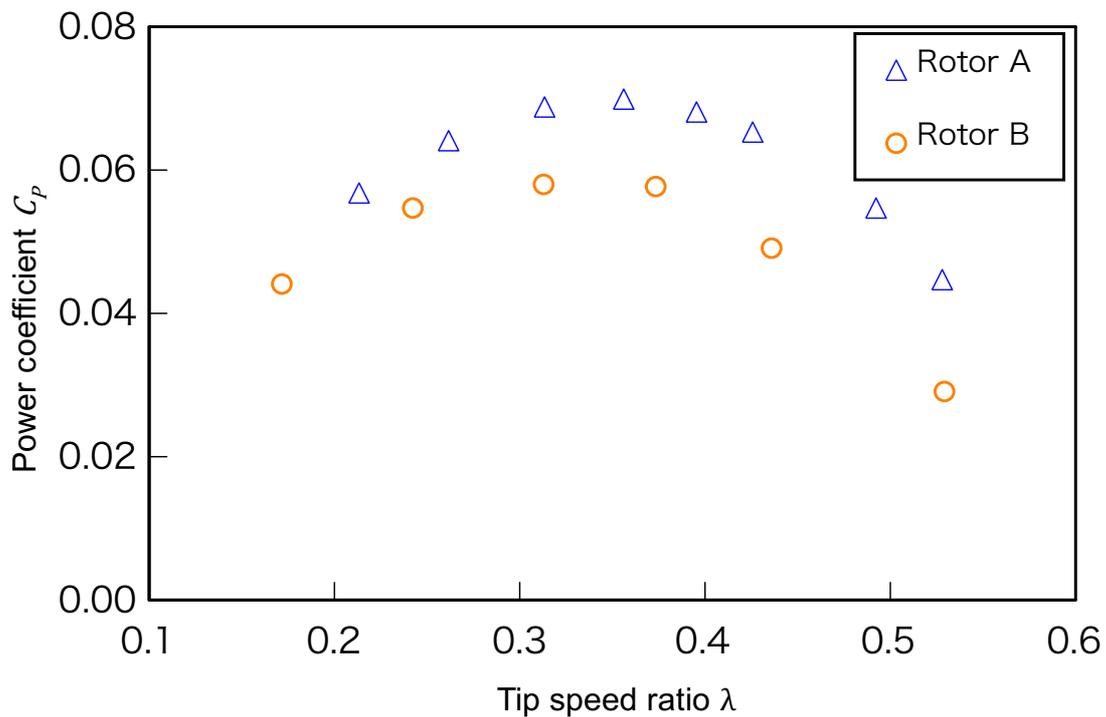


Fig. 2.32 Relationship between the tip speed ratio λ and the power coefficient C_p .

揚水時の能力測定・評価

Fig. 2.33 は、性能が高い Rotor A の供試風車を使用し、揚水時の風速、トルク及び回転数の関係を示した。ここから以下のことがわかる。

- ・風車が回転し、揚水開始と同時にデータ収録が開始されたため、揚程約 5.7m の揚水開始風速が 8m/s であることがわかる。
- ・必要なトルクは 4.5Nm, 回転数は 14rpm となった。
- ・風速を増加させ, 風速 9m/s でトルクは一定となったが, 回転数は上昇を続け, 風速 10m/s では 60rpm となった。
- ・ポンプの吐き出し量が 1 回転で 200cc であることから, 風速 8m/s の 1 分間の揚水量は 2.8 l, 風速 10m/s では 12l となり, 風速の増加とともに揚水量も増大した。

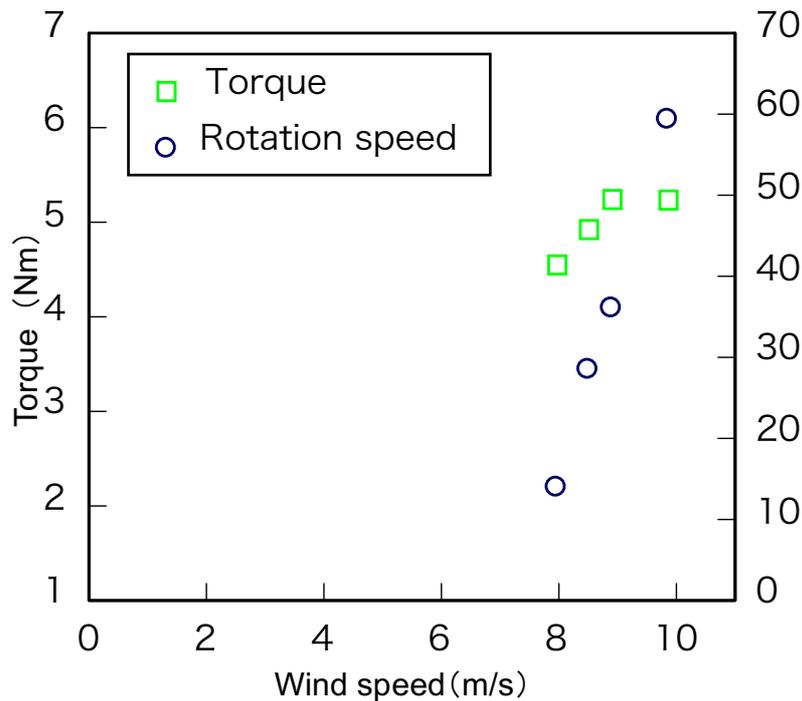


Fig. 2.33 Relationship between wind speed, torque, and rotation speed.

2.3.5 考察

1) 小型トラックによる実験と風洞実験の比較

Fig. 2.34 は、ブレード幅 290mm、設置角度は外側で 55° の供試風車 Rotor 1 及び Rotor B の周速比 λ に対するパワー係数の変化を示した。Rotor 1 及び Rotor B のパワー係数は、周速比 0.35 付近で最大値を示し、Rotor 1 の方がやや高い数値を示した。実験装置、方法、風況が違うため、同じになるとは限らない。また、Rotor 1 は、周速比 0.33 でパワー係数 0.06-0.07 の数値を示し、一定していない。周速比 0.2-0.62 でも同様の結果がみられた。これらの原因について、気象状況による風況の変化や走行中の振動などの影響、さらに、風速計を風車の近くに設置したことによる計測値が影響している可能性があり、先行調査研究の実験でも同様の結果が認められる¹²⁾。一方、風洞での実験は、機械的故障がない限り安定した実験値を得ることが出来る。したがって、小型トラックによる実験

は、風車性能の傾向の確認や予備実験としては有効であるが、定量的な評価に最適ではない。また、屋外で行うと気象の影響により実験値が安定しにくいいため、風洞のように気象影響がない屋内で行うことが望ましい。

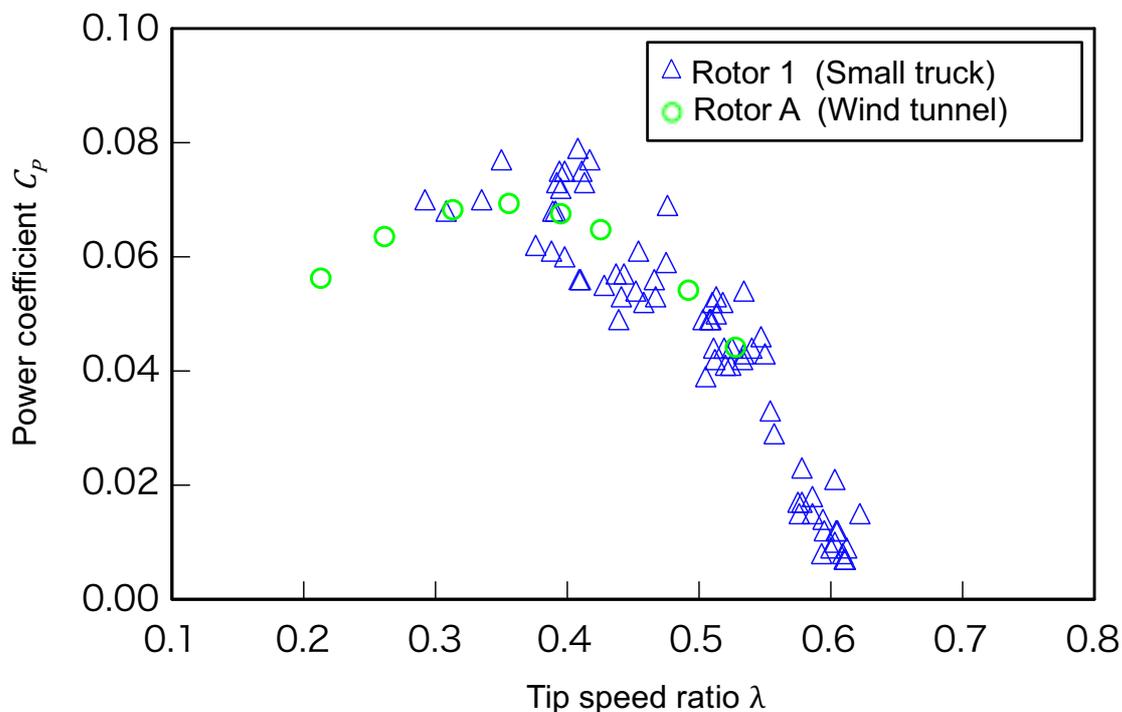


Fig. 2.34 Relationship between the circumferential speed ratio λ and the power coefficient C_p .

2) 各垂直軸抗力型風車との性能比較と選択

ローテーションフロー風車の性能を評価するため、石川らの各種垂直軸風車の推力に関する研究報告³⁾を参考に、各種抗力型垂直軸風車との性能比較を行った。

風洞実験における制御電流 0.42A (7.3Nm) の Rotor A の周速比 λ に対するパワー係数及びトルク係数の最大値は周速比 0.35 で最大値 0.07 及び周速比 0.2 で 0.28 を示し、トルク係数 0 の最小値は周速比 0.6 付近ということが確認された (Figs. 2.31, 2.32)。この数値を他の抗力型垂直軸風車と比較するための代表値とする。

石川らの研究報告³⁾のサボニウス型風車、クロスフロー型風車のパワー係数が最大値を示した時の周速比及び周速比 0.2 におけるトルク係数の値とトルク係数が 0 における周速比 λ の関係を Table 2.4 に示した。

Table 2.4 Performance evaluation values of various vertical axis wind turbines and oration flow wind turbines in other studies

Name of wind turbine	Power factor $C_p(\lambda)$	Torque coefficient $C_T(\lambda)$	Tip speed ratio when Torque coefficient $C_T=0$
Rotation flow	0.07 (0.35)	0.28 (0.2)	0.6
Savonius	0.19 (0.8)	ca. 0.35 (0.2)	1.5
Cross flow	0.12 (0.36)	ca. 0.4 (0.2)	0.75

サボニウスとの比較では、パワー係数 0.19 (周速比 0.8)、トルク係数 0.28 (周速比 0.2) と高い数値を示したのがサボニウスとなった。トルク係数が 0 になった時の周速比については、ローテーションフローで 0.6 近傍、サボニウスで 1.5 近傍となった。このことから、ローテーションフローはサボニウスと比べ、風車性能は低いですが、風速の増加による回転数の過剰な増加はおこらず、低回転を維持できる特性がある。

クロスフローとの比較ではパワー係数 0.12 (周速比 0.36)、トルク係数 0.4 (周速比 0.2) と高い数値を示したのがクロスフローとなった。トルク係数が最小値を示した時の周速比については、ローテーションフローで 0.6 近傍、クロスフローで 0.75 近傍となった。このことから、ローテーションフローはクロスフローと比べ、風車性能は低いですが、風速の増加により風車回転の過剰な増加はおこらず、低回転を維持できる特性がある。

これらの比較により、実験に使用したローテーションフロー風車の性能はサボニウス風車、クロスフロー風車よりもやや低いが、風速増加に伴う回転数の増加は起こりにくい傾向があり、高回転による故障や事故の可能性が一番低く、安全な風車といえる。

経済産業省は、小型風車の事故の要因は過回転で事故を引き起こすと報告している。このことから、実証実験に用いる風車はローテーションフロー風車とした。

2.4 風洞による実験（Ⅱ）

2.3 風洞による実験（Ⅰ）で、実証実験に用いる風車をローテーションフロー風車と選択した。運搬や設置が容易になるよう風車を軽量化し、風洞実験による風車の空力性能評価を行った。さらに、2.2.1 風洞による実験（Ⅰ）で使用したペーンポンプを直結し、揚程 1.2m の揚水時の空力性能評価を行った。

2.4.1 供試風車

本実験で使用した風車は、風洞テストセクションの大きさに合わせ、直径 1m、高さ 0.75m とした (Figs. 2.35, 2.36)。

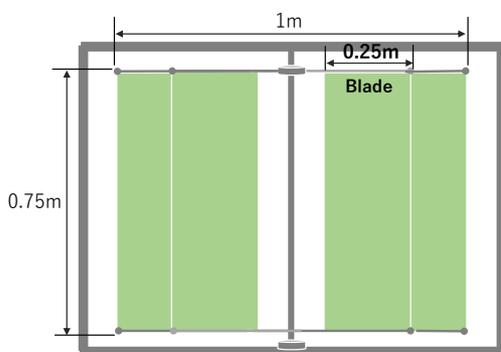


Fig. 2.35 Side view of a wind turbine.

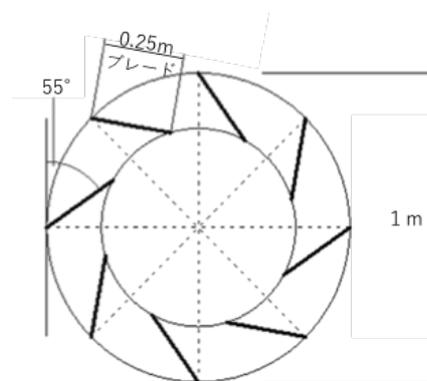


Fig. 2.36 Top view of the wind turbine.

閉塞率は 10.4%となるが、テストセクションが完全に密閉されていないため、この閉塞率は参考値である。ブレードを連結させる治具は運搬や設置が容易になるよう軽量化を目的に、2.2.1 の風洞による実験（Ⅰ）で風車の天板として使

用したジェラルミン製円盤 (t4mm) から, SUS304 製丸パイプ ($\Phi 13$ -t1.5mm) を 8 本骨組みしたものとした。この結果, 約 8kg (43%) の軽量化ができた。また, ブレードの素材は, これまでの重量 2.1g, 4mm 厚の硬いプラスチックボードから, 柔らかく丈夫な重量 1.0g のポリエステル系ゴム引布 (帝国繊維社製 TH5, 0.57mm 厚) へと変更し, ブレード 1 枚 (幅 0.25m, 長さ 0.75m) に対し, 1.1g (52%) 軽量化となった。また, ブレードの素材を変更したことで, 柔軟性があり取り扱いやすいほか, 風で飛散した場合でも周囲に対する被害を最小限に留めることができる。

2.4.2 使用風洞

風洞は, 国立大学法人九州大学応用力学研究の大型境界層風洞 (地球大気動態シミュレーション装置) を使用した (Fig. 2.37)。仕様について Table 2.5 に示した。

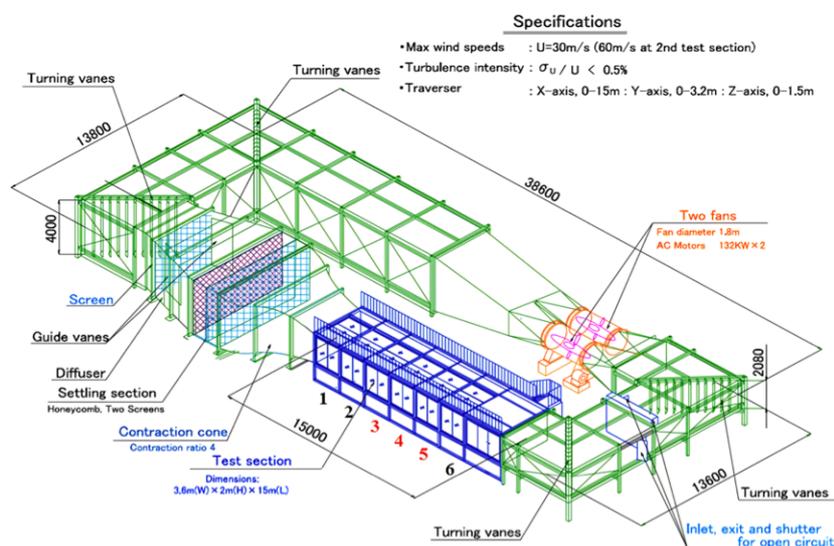


Fig. 2.37 Overview of the large boundary layer wind

Table 2.5 Specifications for large boundary layer wind tunnels

Item	Specifications
Format	Single circuit circulating current type
Wind velocity range of the first measurement section	15.0[m]L x 3.6[m]W x 2.0[m]H 0 to 30[m/s]
Wind speed range of second measurement section	3.0[m]L x 1.8[m]W x 2.0[m]H (installed in the first measurement section) 0 to 60[m/s]
Traverse device	Movable within the range of 15.0[m] in x-direction, 3.0[m] in y-direction and 1.2[m] in z-direction by computer control

2.4.3 実験装置及び実験方法

Fig. 2.38 及び Fig. 2.39 は、電磁ブレーキを用いた空力性能評価実験計測機器・装置の連結の全体及び揚水ポンプを用いた空力性能評価実験計測機器・装置を表したものであり、個別に説明する。

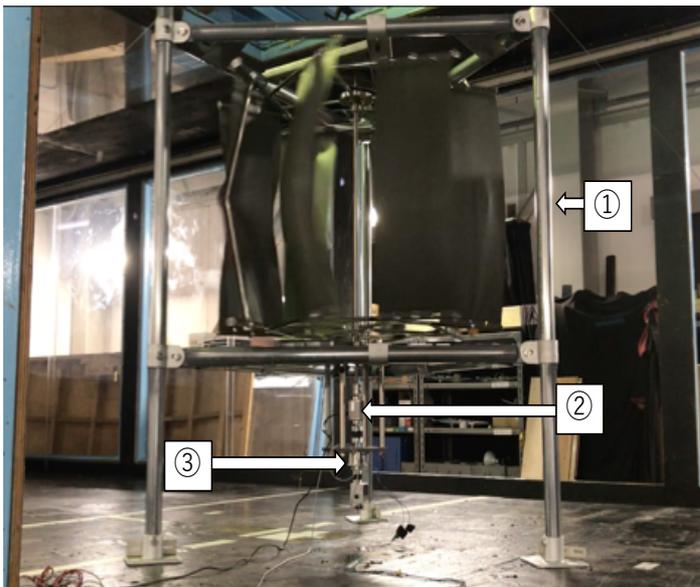


Fig. 2.38 Overall performance evaluation experiment measurement equipment and apparatus.

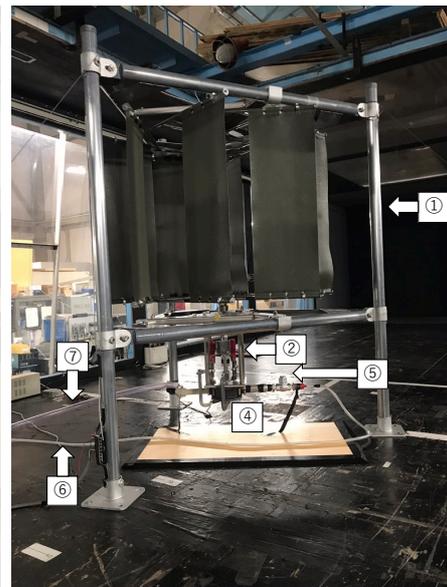


Fig. 2.39 Overall pumping performance evaluation experimental measurement equipment and devices.

- ① 供試風車であり、2.4.1 に示した。
- ② トルク・回転数計測器 (UNIPLSE 社製 回転トルクメータ UTMII -10Nm)
- ③ トルク発生用負荷器 (OGURACLUTCH 社製マイクロ電磁ブレーキ MODELAMB80 形)

- ④ 揚水用ポンプ（アクアシステム社製 HRP-25Z 樹脂製，液体の吐出量が1回転で200 ccの手回し式ベーンポンプ）
- ⑤ スイングバルブ式逆止弁（揚水用ポンプは揚水時に呼水が必要であり，ポンプ，⑥の吸込み口ホースを水で満たす必要があり，一度揚水した水をポンプ内に確保しておくため。）
- ⑥ 吸入側水路用ホース（1.4m 下に吸い込み口があり，スイングバルブ式逆止弁を設置。）
- ⑦ 吐出し側水路用ホース（1.4m 下に吐出口。）

電磁ブレーキを用いた空力性能評価の実験方法は，風洞の出力風速を7m/sに設定し，トルク発生用の電磁ブレーキ負荷は周速比に合わせるように適宜調節した。揚水ポンプを用いた空力性能評価の実験は，水を入れた貯水箱を風洞床下に配し，ホース吸込み口を水中に投入，風洞テストセクション内のベーンポンプの吸込み口と連結，ポンプ吐出し口にホースを連結し，その吐出し口を大気中の貯

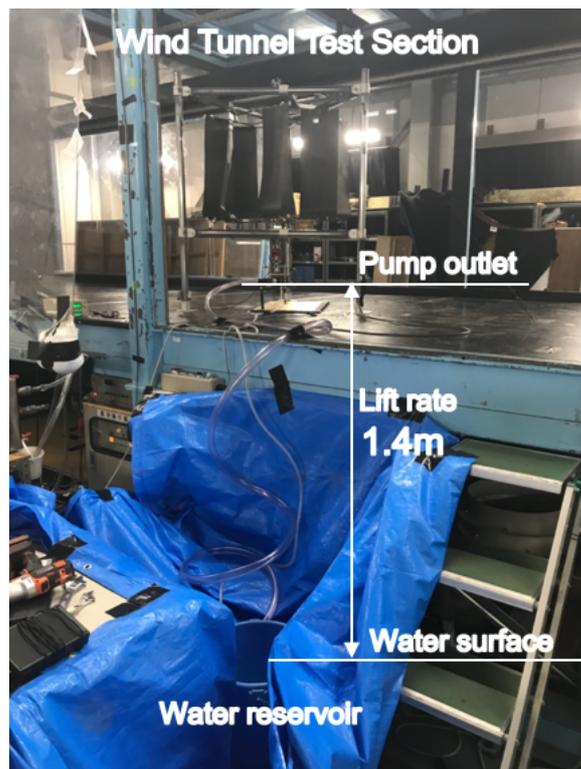


Fig. 2.40 Pumping experiment.

水箱直上に配し，水を循環させるようにした。貯水箱の水面からポンプの吐出し口までの高さが1.43mであるため，揚程を1.4mとした（Fig. 2.40）。風速を徐々に増加させ，5.5m/s付近で揚水が確認できたことから，6-10m/sについて計

測・評価を行った。各種データはロガー（GRAPHTECH GL900）に 1.0×10^{-3} s 刻みで 30s 間計測し、時間内に回転した最大数を評価期間とした。なお、風速計は風洞内据え付けの計器を使用し、その指示値を採用した。

2.4.4 実験結果

1) 空力性能評価

空力性能評価は、2.2.1.2, 2.2.2.4 であげた定義、式 (1), (2), (4), (5) を用いた。

Fig. 2.41 は、電磁ブレーキによる回転負荷及びペーンポンプでの揚水時の周速比に対するパワー係数の変化を示した。周速比 0.3 でパワー係数 0.04 が最大となった。

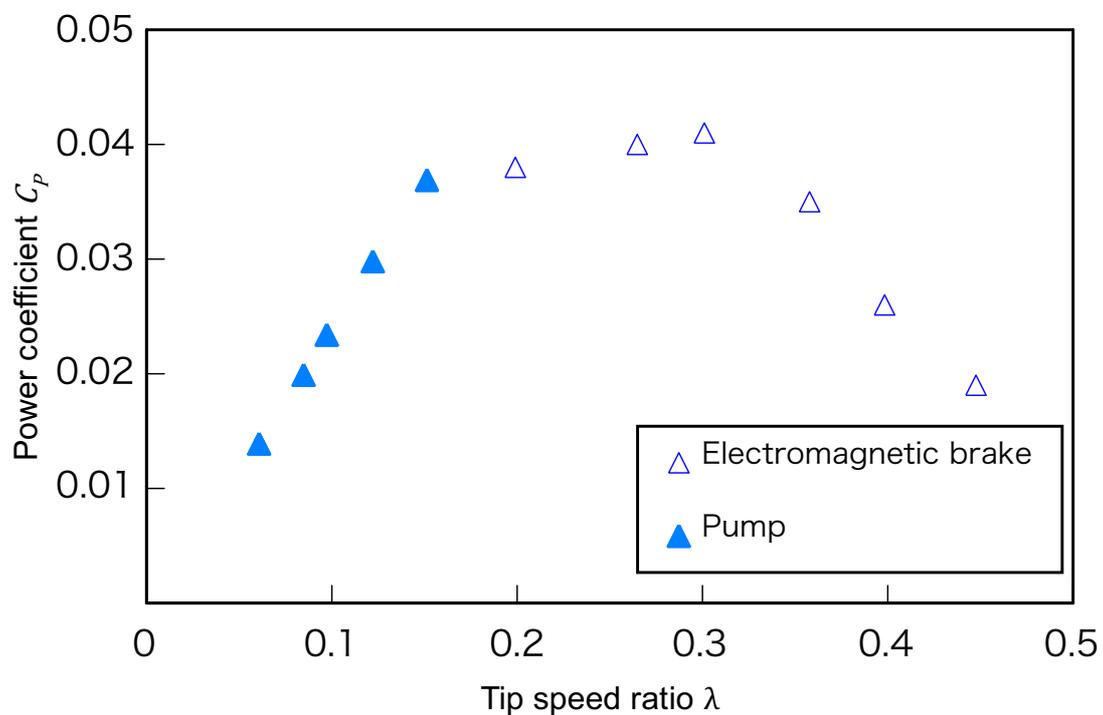


Fig. 2.41 Relationship between the tip speed ratio λ and the power coefficient C_p .

Fig. 2.42 は、電磁ブレーキによる回転負荷時及びペーンポンプでの揚水時の周速比に対するトルク係数の変化を示した。周速比 0.12 でトルク係数 0.24（風速 9m/s）となった。さらに、風車特性を簡便的に 2 次曲線の近似関数で表すと以下のようなになる。

$$C_T = -0.725 \lambda^2 - 0.189 \lambda + 0.262 \quad (\text{相関係数 } R^2: 0.98) \quad (6)$$

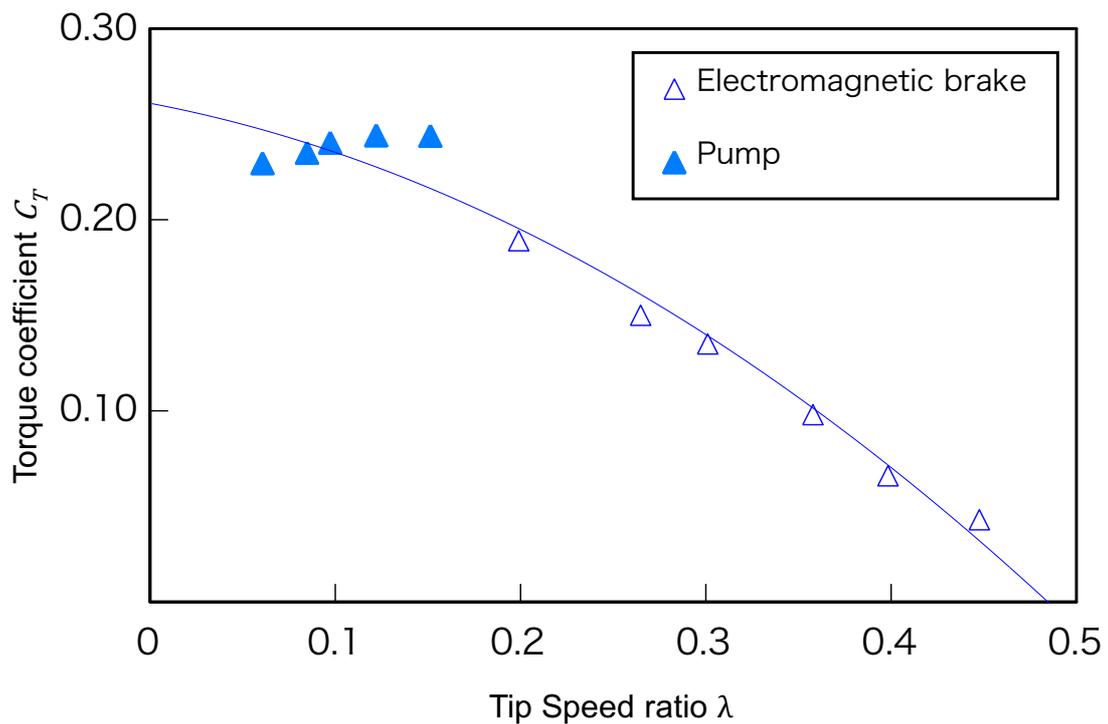


Fig. 2.42 Relationship between the tip speed ratio λ and the torque coefficient C_T .

2.4.5 考察

風洞実験で、軽量化したローテーションフロー風車の空力出力性能の確認ができた。ここで、2.3の風洞による実験（I）で使用したブレード幅250mmの供試風車 Rotor A と、Rotor A を軽量化した供試風車を Rotor 1 として空力出力性能を比較する。

Fig. 2.43 は、供試風車 Rotor A と Rotor 1 の周速比 λ に対するパワー係数 C_p の変化を示した。パワー係数の最大値は、Rotor A では周速比 0.36 でパワー係数 C_p 0.07 を示しているのに対し、Rotor 1 では周速比 0.30 でパワー係数 0.04 を示した。Rotor A に比べ Rotor 1 のパワー出力性能は低くなった。

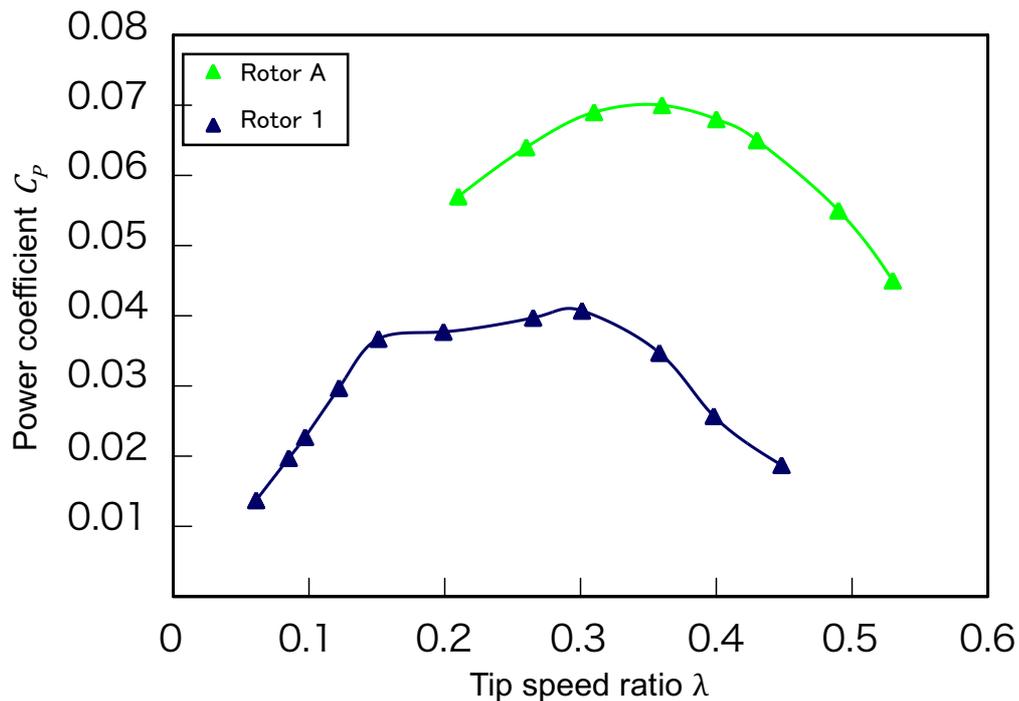


Fig. 2.43 Relationship between the circumferential tip speed ratio λ and the power coefficient C_p .

Fig. 2.44 は、供試風車 Rotor A と Rotor 1 の、周速比に対するトルク係数の変化を示した。トルク係数の最大値は、Rotor A では周速比 0.21 でトルク係数 0.27

を示しているのに対し、Rotor 1 では周速比 0.12 でトルク係数 0.24 を示した。Rotor A に比べ Rotor 1 の出力性能は 0.03 低くなった。

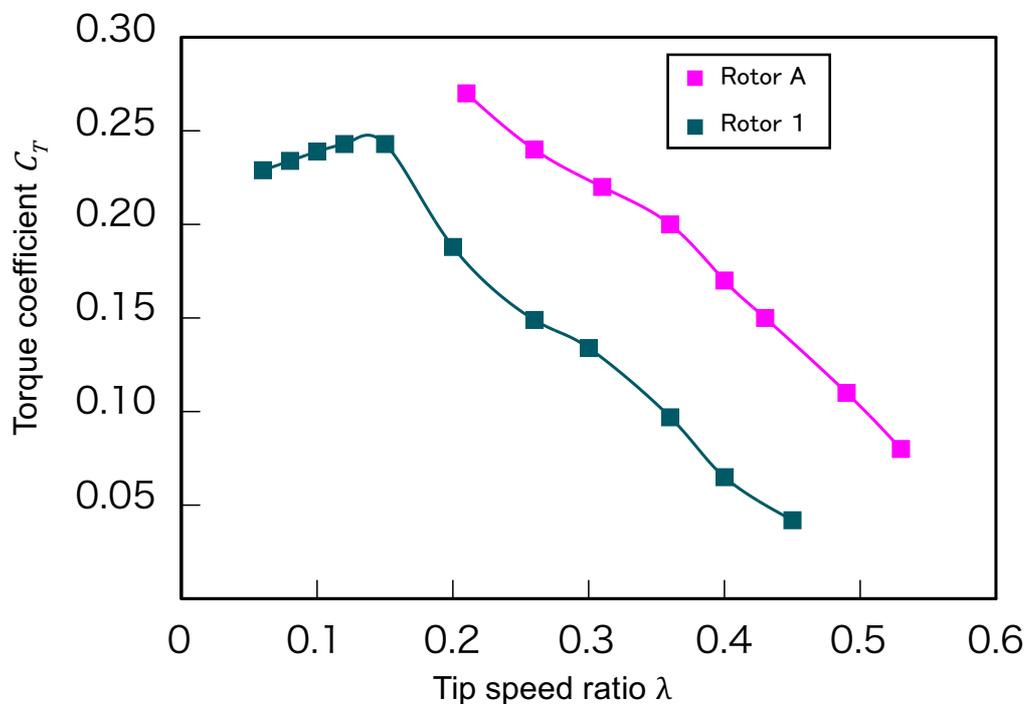


Fig. 2.44 Relationship between circumferential speed ratio λ and torque coefficient C_T .

このことから、Rotor A に対して Rotor 1 の出力性能は低いことがわかった。風車を軽量化するため、ブレード接続用の上板及び底板をアルミニウム製の円盤からステンレス製の骨組みに変更したことにより、骨組みの間を風がすり抜け、風車のブレードを押し力が減少したと考えられる。しかし、風車に入る風がブレード接続用のアルミニウム製円盤の上板及び底板により風車内に一時的に留まることは、風車内部に発生する鉛直上方及び下方の風圧により風車に負担がかかり故障の原因となることが懸念される。そのため、ステンレス製の骨組みに変更したことにより、風が風車内に留まることなく出ていくことで風車への負担は軽減する。

Fig. 2.44 から、Rotor A 及び Rotor 1 のトルク係数の最小値を示した周速比は、

0.53 及び 0.45 であり，トルク係数が 0 になる時の周速比が小さいのは Rotor 1 と考えられる。このことから，Rotor 1 は，Rotor A に比べ，風速の増加による回転数の過剰な増加は起こらず，低回転を維持できることが認められた。

実証実験場所は，青森県沿岸部の漁港内の胸壁を検討している。漁業操業の活動拠点となるため，風車の故障による怪我や事故に留意する必要がある。また，風車は，胸壁の高さが約 5m あるため，運搬するには軽い方が望ましい。

このことから，風車の低回転を維持することで，風車の負担や故障を軽減し，軽量で運搬しやすい Rotor 1 を実証実験に用いることにした。

2.5 ブレードの検討

2.4 風洞による実験（Ⅱ）で，実証実験に用いる風車をローテーションフロー風車と選択した。風車の安全性を高めるため，4mm 厚の硬いプラスチックボードから柔らかく丈夫なゴム引布（帝国繊維社製 TH5，0.57mm 厚）へと変更した。さらに，風車の過回転を抑止するため，ブレードの片端をドットボタン留めにし，突風や強風時に片端が脱離することで，風車を回転しないようにした。片端止めしたドットボタンが外れ，ブレードが脱離し，風車が回転しなくなるカットアウト風速を検討した。

2.5.1 実験装置及び実験方法

ブレードは，縦 85cm，横 25cm のゴム引布（帝国繊維社製 TH5，0.57mm 厚）を，片端を端から 3.5cm 折り，輪になるよう丈夫な糸で縫い，直径 1.3cm 長さ 40cm のシャフトを通せるようにした。もう片端には，ステンレス製の頭直径 1.5cm のドットボタン（C.S Osborne 製）を取り付けるため，穴あけ用工具で直径 0.5cm の穴を開け，ドットボタンを取り付けた（Fig. 2.45）。ドットボタンを

留めると直径 2.5cm の輪ができ、シャフトを通せるようにした。両端をシャフトに通し、縦 75cm、横 25cm の形状となった。

実験方法は、高さ 20cm のコンクリート製の架台にシャフトを通したブレードを水平に張るように設置し、その状態を保つため両方のシャフト間にパイプを設置し、ネジボルトで固定した。ブレードへ均等に荷重されるよう、ブレードの中心部へ縦 30cm、横 20cm、厚さ 1cm のスタイロフォームを敷き、1分毎に 1kg の鉄製の錘を乗せ、ドットボタンが外れた時の錘の重さを観察した (Fig. 2.46)。

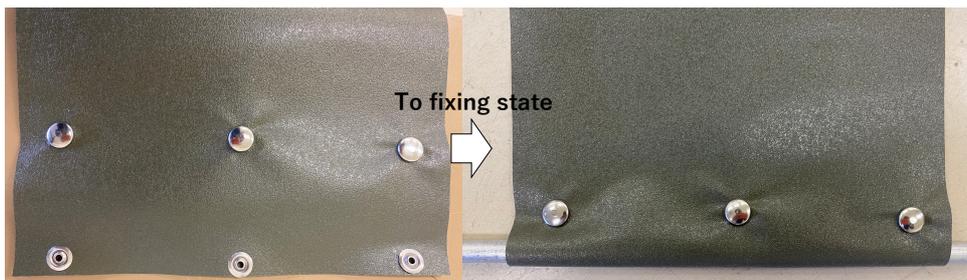


Fig. 2.45 Outer appearance of Tip part of blade with hook buttons , and fixing state.

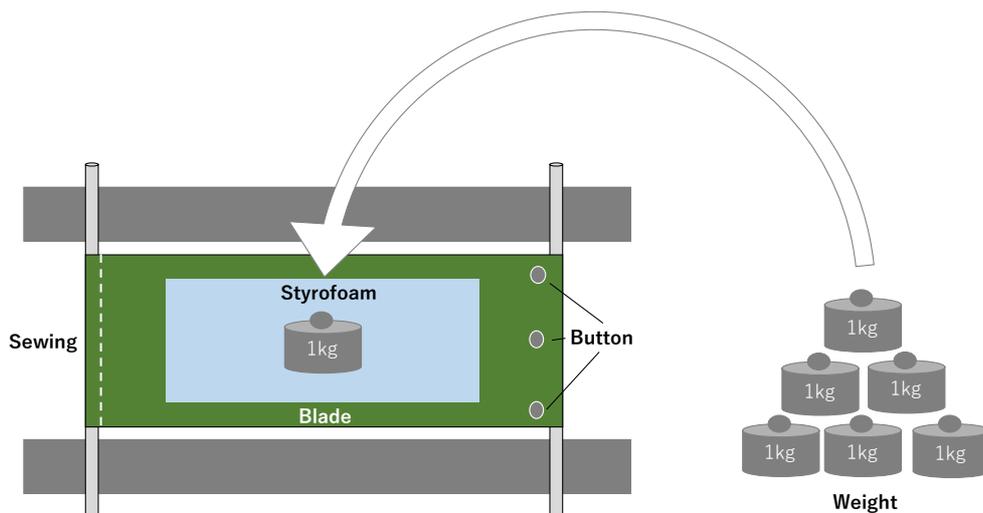


Fig. 2.46 A state of the experiment to put a weight on the blade.

2.5.2 実験結果と考察

縦 75cm, 横 25cm のゴム引布のブレードに 1 分毎に 1kg の錘を乗せた結果, ドットボタンが外れブレードが離脱した重さは 22kg となった。

ここで, ドットボタンが外れた錘の重さをブレードの張力 T_0 とし, ドットボタンが外れる風速を算出する。ブレードにかかる荷重に対する反力の関係を Fig. 2.47 に表した。

式 (6), (7), (8), (9), (10) を用い, 張力 T_0 が 22kg になる風速 v を求めた。実験時の計測から, ブレードのサグ S は 0.05m とした。風速 v に 1 から代 0.1 刻みに代入し計算すると 26.9 となり, 四捨五入し, 風速 v は 27m/s となった。

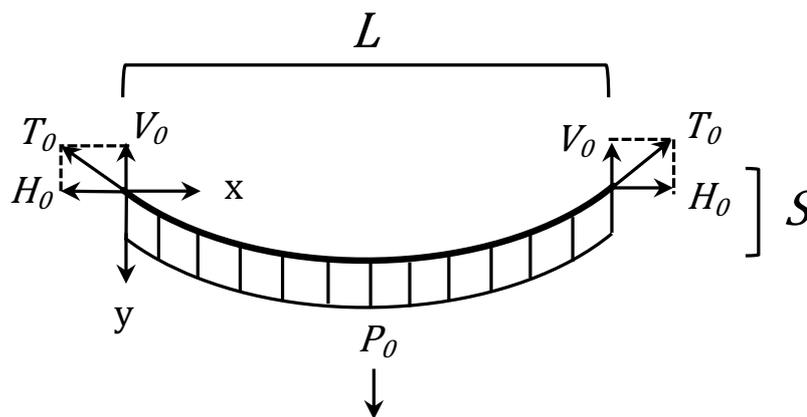


Fig. 2.47 Shear strength relationship.

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \quad (6)$$

$$P_0 = P \times B \quad (7)$$

$$V_0 = \frac{P_0}{2} \quad (8)$$

$$V_0 \times L = H_0 \times S \quad (9)$$

$$T_0 = (V_0^2 + H_0^2)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

P : 動圧 [kg/m³]

ρ : 空気密度 [kg/m³]

V : 風速 [m/s]

V_0 : 鉛直反力 [kg]

P_0 : 分布荷重 [kg/m]

B : ブレードの幅 [m]

L : ブレードの長さ [m]

H_0 : 水平反力 [kg]

S : ブレードのサグ [m]

T_0 : 張力 [kg]

自然状況下で、突発的に 27m/s の風が吹き、風車が停止した状態からブレードが外れることは考えがたい。このことから、回転している風車の周速と自然風の相対速度からドットボタンが外れる風速を検討する。回転時のブレードに風が垂直に作用する位置を Fig. 2.48 に示した。なお、ブレードへの動圧は最大となる。

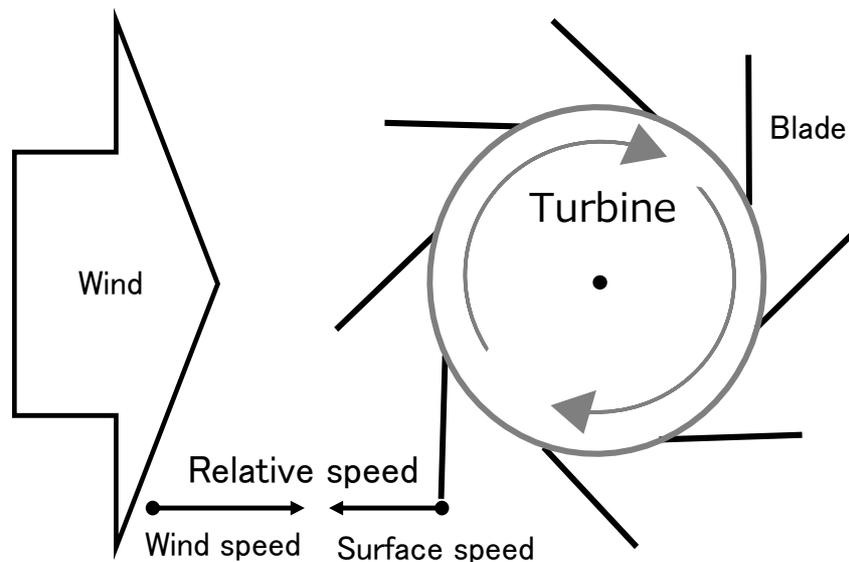


Fig. 2.48 Relative speed between the Surface speed of the wind turbine and the wind speed.

2.4 風洞実験（Ⅱ）で、実証実験に用いる Rotor 1 のパワー係数 C_p の最大値は、周速比 0.30 でパワー係数 0.04 を示し、最大の回転角速度 ω となることが認められた。このことから、式 (11) を用いて、回転角速度 ω から回転数を、式 (12) から周速 v を、風速 $v +$ 周速 $V =$ 相対速度 27m/s になる風速 v を求めた結果、20.7m/s となった。このことから、三つ留めしたドットボタンが離脱し、風車が回らなくなるカットアウト風速は 21m/s と予想された。

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (11) \quad R_s = \frac{60\omega}{2\pi} \quad (12) \quad V = \pi \times D \times \frac{N}{1,000 \times 60} \quad (13)$$

N : 回転数 [rpm] R_s : 回転数[rpm] V : 周速 [m/s] D : 風車の直径 [mm]

第2章 参考文献

- 1) 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) エネルギー対策推進部 風力発電導入ガイドブック改訂第9版, 2008.
- 2) 清水幸丸, 高田実, 坂田甚作 クロスフロー風車の高性能化に関する研究. 日本機械学会論文集 (B 編), 64 巻, 625 号, 202-207, 1998.
- 3) 石川善彦, 根本泰行, 牛山泉 各種垂直軸風車の推力に関する研究. 風力エネルギー利用シンポジウム 23 巻, 72-75, 2001.
- 4) 谷野忠和, 仲尾晋一郎 クロスフロー型風車の翼枚数及び翼取付角が出力特性に及ぼす影響. 日本機械学会論文集 B 編, 225-230, 2007.
- 5) 谷野忠和, 宮國健司, 仲尾晋一郎, 田口啓太 二偏流板ケーシング付クロスフロー風車のケーシング傾き角と性能の関係. ターボ機械, 第40巻, 第5号, 13-319, 2012.
- 6) 奥林豊保 異なる翼形状を有するクロスフロー型風車の特性に関する研究. 大分大学工学部技術部報告書 (5), 69-70, 2012.
- 7) 押谷一, 岡本全弘, 山下亜紀朗, 谷口克典, 上山博明, 宮田三芳, 山本一枝 サボニウス形風車による地下水汲み上げに関する検討. 酪農学園大学紀要自然科学編, 32 巻 2 号, 221-225, 2008.
- 8) 南條宏肇 抗力型風力発電の力学的モデルと発電出力の最適化評価 日本風力エネルギー学会誌 32, No4, 102-108, 2008.
- 9) 株式会社日本パーツセンター, <http://www.n-parts.jp/guide/detail.php?id=390>
- 10) 牛山泉 風力エネルギーの基礎, オーム社出版, 2005.
- 11) 大坂将史, 志田崇, 南條宏肇, 沈健, 久保田健, 桐原慎二, 島田宗勝, 葛西昭治, 本田明弘 揚水のための垂直軸風力タービンに関するシミュレーションの評価と考察. 第38回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, 38 巻,

1号, 471-474, 2016.

12) 島田宗勝, 志田 崇, 久保田 健, 南條 宏肇, 桐原 慎二 小型ローテーションフロー風車による揚水ポンプの開発, 一般社団法人漁港漁場漁村総合研究所調査論文集, 26 巻, 75-77, 2016.

第3章 揚水及び送気システムの設計と実証実験

第2章では、水産資源培養に供する揚水及び送気用の風車のブレードについて検討した結果、幅 250mm、設置角度 55° のローテーションフロー風車 (Rotor 1) が、トルク性能が高いことが明らかとなった。さらに、翼材にゴム引布を採用することで、軽量で安全性が高く、メンテナンスも容易になるように設計した風車を、実証実験地である津軽半島の津軽海峡沿岸の漁港に設置し、自然条件下での風速、回転数、トルクデータと風洞による空力性能、システム設計値を比較し、揚水及び送気ポンプの選定、性能評価を検証したので、結果を論じる。

3.1 揚水システムの設計

3.1.1 揚水ポンプの性能評価

揚水ポンプの性能を評価するため、室内実験でポンプの回転数とトルクの関係を測定した。ポンプは、第2章の2.3 風洞による実験 (I)、2.4 風洞による実験 (II) で使用した市販のベーンポンプを用いた。

3.1.1.1 実験装置及び実験方法

実験装置は、モータ、ベーンポンプ、トルクメータ、貯水箱及びホースから構成され、弘前大学地域戦略研究所内の階段の踊り場に構築した。貯水箱の水面からポンプまでの揚程は、実証実験を想定する漁港の海水面から岸壁の高さが約 1.4m、岸壁上に置く水槽の高さが約 0.8m、さらに、潮汐の影響で水面が 0.2m 変化することを考慮し 2.4m とした (Fig. 3.1)。モータ (日立建機製 三相誘導型 TFO-750W) の回転軸にトルクメータ (UNIPULSE 製 UTMV-10Nm)、ベーンポンプ (AQUASYSTEM 製 HRP-25Ⅲ) を接続し、水を入れた貯水箱を階段の下方に置いた。吸込み側のホースは、内径 15mm とし、貯水箱の水中とポンプの吸

込み口を連結した。吐出し側のホースは、水の詰まりによる液面変化の影響を考慮し吸込み口より内径が 5mm 太いホースにし、ベーンポンプの吐出し口と貯水箱の水面の約 5cm 上に配置した。ホースの吸込み口とポンプ吸込み口にそれぞれスイングバルブ式逆止弁を付けた。なお、2本のホースの間隔は、約 0.3m であった。

モータの回転数を徐々に上げ、揚水が確認された 9rpm, 33rpm 及び 67rpm 時に、各々 1.0×10^{-3} s 間隔で 30 秒間のトルク測定値をロガー (GRAPHTECH GL900) に記録した。測定されたトルクは、30 秒間の平均値を求め、回転数との関係を求めた。

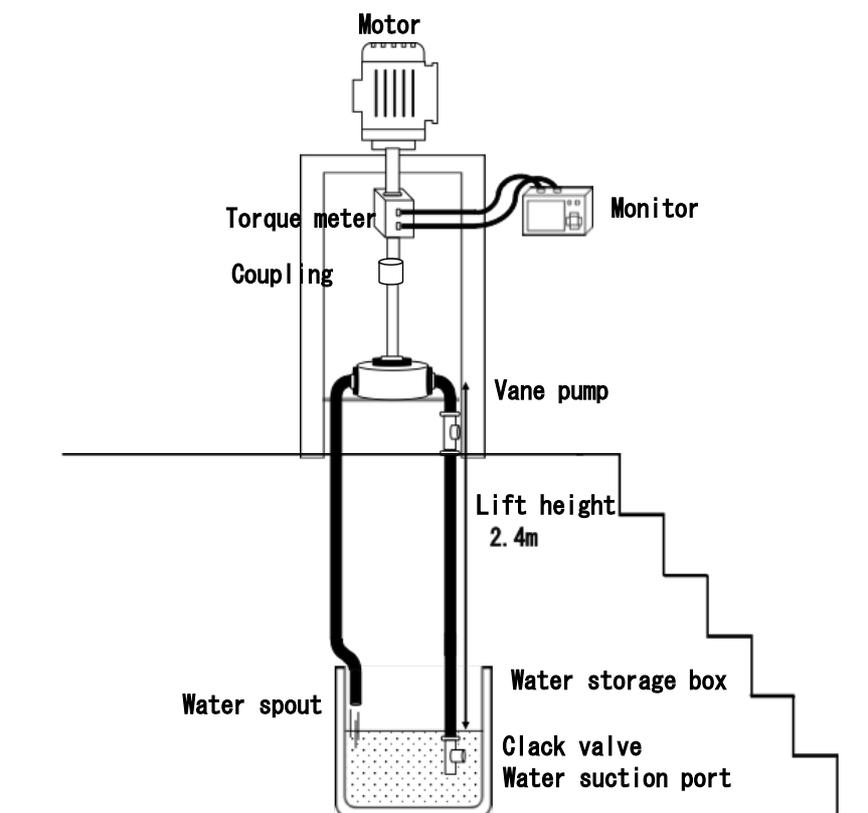


Fig. 3.1 Image of pump characteristic experiment.

なお、当該漁港において干潮時の水面から岸壁までの高さを調べた結果、1.2m

とペーンポンプの特性実験で想定した高さより 0.2m 低かったことから、実証実験における揚程は 2.2m となる。トルクは、揚程の低下によって 2.2m/2.4m 倍に減少すると考えられるため、ポンプ特性実験から得られたトルクの値に 2.2/2.4 を乗じた値を用いて、回転数とトルクの関係からポンプ特性直線を作成した。

3.1.1.2 実験結果

Fig. 3.2 は、揚程 2.4m の揚水時におけるペーンポンプ回転数とトルクの関係を示した。

トルクは、揚水時のポンプの回転数が 9rpm, 33rpm, 67rpm において、各々 2.1Nm, 2.9Nm, 4.2Nm を示した。揚水時のポンプの回転数とトルクの間には、正の相関が認められた。本結果から、揚程 2.4m におけるポンプの特性は次式(1)のとおり表された。

$$T = 0.0357R_s + 1.76 \quad (\text{相関係数 } R: 0.99) \quad (1)$$

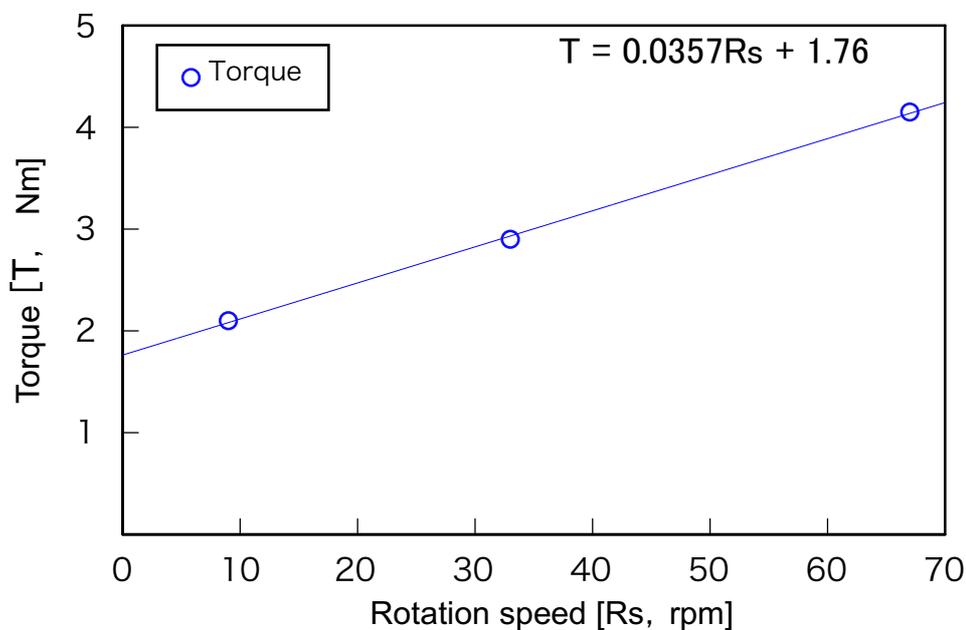


Fig. 3.2 Relationship between the pump rotation speed and torque.

実証実験地での揚程が 2.2m となることから、(1) の式に 2.2/2.4 を乗じた、次

式 (2) で実証試験におけるポンプの性能特性を表した。

$$T = (0.0357R_s + 1.76) \times (2.2/2.4) \quad (2)$$

R_s : 回転数[rpm], T : トルク[Nm]

3.1.2 揚水システムの設計

第2章2.4 風洞による実験 (II), 及び, 3.1.1 の実験結果を基に, 揚水条件については, 揚程 2.2m, 送気カットイン風速については, 実証実験漁港の年間平均風速を 5m/s と想定し, 風速に対する回転数及びトルクの関係を表す揚水システムをライン設計した。

3.1.2.1 方法

1) 近似関数を用いた揚水システム設計ラインの算出

第2章の2.2.4の結果から得た, 風車特性 (3) を用いて, 周速比 0.01-0.45 の範囲のトルク係数及び 5-10m/s の範囲の風速を組み合わせた条件下における回転角速度, 回転数, トルクについて, 次式 (4) - (6) から算出し, 風速, 回転数及びトルクの風車特性曲線を求めた。

$$C_T = -0.725\lambda^2 - 0.189\lambda + 0.262 \quad (3)$$

$$\omega = \frac{\lambda v}{r} \quad (4)$$

$$R_s = \frac{60\omega}{2\pi} \quad (5)$$

$$T = C_T \frac{1}{2} \rho A v^2 r \quad (6)$$

C_T : トルク係数, λ : 風速比, ω : 回転角速度[rad/s], v : 風速[m/s]

r : 風車半径[m], R_s : 回転数[rpm], π : 円周率, T : トルク[Nm]

ρ : 空気密度[kg/m^3], A : 受風面積[m^2]

受風面積(A) は, 2章 2.4 風洞による実験 (II) に使用した風車の 0.75 m^2 (高さ 0.75m , 幅 1m) 及び 1 m^2 (高さ 1m , 幅 1m) に加え, 1.36 m^2 (高さ 1.36m , 幅 1m) の 3 通りを用いた。また, 風車半径及び空気密度は, 0.5m 及び $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ とした。

3.1.2.2 結果

受風面積が, 0.75 m^2 , 1 m^2 及び 1.36 m^2 の風車についてトルク係数 0.03 - 0.26 , 周速比 0.01 - 0.45 , 風速 5 - $10\text{m}/\text{s}$ の範囲で回転角速度, 回転数, トルクの計算結果を Table 3.1, Table 3.2, Table 3.3 にそれぞれ示した。

Table 3.1 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 0.75 m² under the conditions of the ranges of torque coefficient (CT) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s.

C _T	λ	v:5m/s			v:6m/s			v:7m/s			v:8m/s			v:9m/s			v:10m/s			
		ω[rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]																
0.26	0.01	0.1	1.0	1.1	2.2	0.1	1.3	2.9	0.2	1.5	3.8	0.2	1.7	4.8	0.2	1.9	6.0	0.2	2.1	7.5
0.26	0.02	0.2	1.9	2.3	2.1	0.3	2.7	2.9	0.3	3.1	3.8	0.4	3.4	4.8	0.4	3.8	5.9	0.4	4.2	7.5
0.26	0.03	0.3	2.9	3.4	2.1	0.4	4.0	2.9	0.5	4.6	3.8	0.5	5.2	4.8	0.6	5.7	5.9	0.6	6.3	7.5
0.25	0.04	0.4	3.8	4.6	2.1	0.6	5.4	2.9	0.6	6.1	3.7	0.7	6.9	4.7	0.8	7.6	5.8	0.8	8.4	7.5
0.25	0.05	0.5	4.8	5.7	2.1	0.7	6.7	2.8	0.8	7.6	3.7	0.9	8.6	4.7	1.0	9.6	5.8	1.0	10.6	7.5
0.25	0.06	0.6	5.7	6.9	2.1	0.8	8.0	2.8	1.0	9.2	3.6	1.1	10.3	4.6	1.2	11.5	5.7	1.2	12.9	7.5
0.25	0.07	0.7	6.7	8.0	2.0	1.0	9.4	2.7	1.1	10.7	3.6	1.3	12.0	4.5	1.4	13.4	5.6	1.4	15.3	7.5
0.24	0.08	0.8	7.6	9.2	2.0	1.1	10.7	2.7	1.3	12.2	3.6	1.4	13.8	4.5	1.6	15.3	5.6	1.6	17.2	7.5
0.24	0.09	0.9	8.6	10.3	2.0	1.3	12.0	2.7	1.4	13.8	3.5	1.6	15.5	4.5	1.8	17.2	5.5	1.8	19.1	7.5
0.24	0.10	1.0	9.6	11.4	1.2	1.4	13.4	2.7	1.6	15.3	3.5	1.8	17.2	4.4	2.0	19.1	5.4	2.0	21.0	7.5
0.23	0.11	1.1	10.5	12.6	1.3	1.5	14.7	2.6	1.6	16.8	3.4	2.0	18.9	4.3	2.2	21.0	5.3	2.2	22.9	7.5
0.23	0.12	1.2	11.5	13.8	1.4	1.6	16.1	2.6	1.9	18.3	3.4	2.2	20.6	4.3	2.4	22.9	5.3	2.4	24.8	7.5
0.23	0.13	1.3	12.4	14.9	1.4	1.8	17.4	2.5	2.1	19.9	3.3	2.3	22.4	4.2	2.6	24.8	5.2	2.6	26.8	7.5
0.22	0.14	1.4	13.4	16.1	1.8	2.0	18.7	2.5	2.2	21.4	3.3	2.5	24.1	4.1	2.8	26.8	5.1	2.8	28.7	7.5
0.22	0.15	1.5	14.3	17.2	1.8	2.1	20.1	2.4	2.4	22.9	3.2	2.5	25.8	4.0	3.0	28.7	5.0	3.0	30.6	7.5
0.21	0.16	1.6	15.3	18.3	1.8	2.2	21.4	2.4	2.6	24.5	3.1	2.7	27.5	4.0	3.2	30.6	4.9	3.2	32.5	7.5
0.21	0.17	1.7	16.2	19.5	1.7	2.4	22.7	2.4	2.7	26.0	3.1	3.1	29.2	3.9	3.4	32.5	4.8	3.4	34.4	7.5
0.20	0.18	1.8	17.2	20.6	1.7	2.5	24.1	2.3	2.9	27.5	3.0	3.2	31.0	3.8	3.6	34.4	4.7	3.6	36.3	7.5
0.20	0.19	1.9	18.2	21.8	1.7	2.7	25.4	2.3	3.0	29.0	2.9	3.4	32.7	3.7	3.8	36.3	4.6	3.8	38.2	7.5
0.20	0.20	2.0	19.1	22.9	1.6	2.8	26.8	2.2	3.2	30.6	2.9	3.6	34.4	3.6	4.0	38.2	4.5	4.0	40.1	7.5
0.19	0.21	2.1	20.1	24.1	1.6	2.9	28.1	2.1	3.4	32.1	2.8	3.8	36.1	3.5	4.2	40.1	4.4	4.2	42.0	7.5
0.19	0.22	2.2	21.0	25.2	1.5	3.1	29.4	2.1	3.5	33.6	2.7	4.0	37.8	3.5	4.4	42.0	4.3	4.4	43.9	7.5
0.18	0.23	2.3	22.0	26.4	1.5	3.2	30.8	2.0	3.7	35.2	2.7	4.1	39.6	3.4	4.6	43.9	4.1	4.6	45.9	7.5
0.17	0.24	2.4	22.9	27.5	1.4	3.4	32.1	2.0	3.8	36.7	2.6	4.3	41.3	3.3	4.8	45.9	4.0	4.8	47.8	7.5
0.17	0.25	2.5	23.9	28.7	1.4	3.5	33.4	1.9	4.0	38.2	2.5	4.5	43.0	3.2	5.0	47.8	3.9	5.0	49.7	7.5
0.16	0.26	2.6	24.8	29.8	1.4	3.6	34.8	1.8	4.2	39.7	2.4	4.7	44.7	3.1	5.2	49.7	3.8	5.2	51.6	7.5
0.16	0.27	2.7	25.8	31.0	1.3	3.8	36.1	1.8	4.3	41.3	2.3	4.9	46.4	2.9	5.4	51.6	3.6	5.4	53.5	7.5
0.15	0.28	2.8	26.8	32.1	1.3	3.9	37.5	1.7	4.5	42.8	2.2	5.0	48.2	2.8	5.6	53.5	3.5	5.6	55.4	7.5
0.15	0.29	2.9	27.7	33.2	1.2	4.1	38.8	1.6	4.6	44.3	2.2	5.2	49.9	2.7	5.8	55.4	3.4	5.8	57.3	7.5
0.14	0.30	3.0	28.7	34.4	1.2	4.2	40.1	1.6	4.8	45.9	2.1	5.4	51.6	2.6	6.0	57.3	3.2	6.0	59.2	7.5
0.13	0.31	3.1	29.6	35.5	1.1	4.3	41.5	1.5	5.0	47.4	2.0	5.6	53.3	2.5	6.2	59.2	3.1	6.2	61.1	7.5
0.13	0.32	3.2	30.6	36.7	1.1	4.5	42.8	1.4	5.1	48.9	1.9	5.8	55.0	2.4	6.4	61.1	2.9	6.4	63.0	7.5
0.12	0.33	3.3	31.5	37.8	1.0	4.6	44.1	1.4	5.3	50.4	1.8	5.9	56.8	2.2	6.6	63.0	2.8	6.6	64.9	7.5
0.11	0.34	3.4	32.5	39.0	0.9	4.8	45.5	1.3	5.4	52.0	1.7	6.1	58.5	2.1	6.8	64.9	2.6	6.8	66.8	7.5
0.11	0.35	3.5	33.4	40.1	0.9	4.9	46.8	1.2	5.6	53.5	1.6	6.3	60.2	2.0	7.0	66.8	2.5	7.0	68.7	7.5
0.10	0.36	3.6	34.4	41.3	0.8	5.0	48.2	1.1	5.8	55.0	1.5	6.5	61.9	1.9	7.2	68.7	2.3	7.2	70.7	7.5
0.09	0.37	3.7	35.4	42.4	0.8	5.2	49.5	1.0	5.9	56.6	1.4	6.7	63.6	1.7	7.4	70.7	2.1	7.4	72.6	7.5
0.09	0.38	3.8	36.3	43.6	0.7	5.3	50.8	1.0	6.1	58.1	1.3	6.8	65.4	1.6	7.6	72.6	2.0	7.6	74.5	7.5
0.08	0.39	3.9	37.3	44.7	0.7	5.4	52.2	0.9	6.2	59.6	1.1	7.0	67.1	1.5	7.8	74.5	1.8	7.8	76.4	7.5
0.07	0.40	4.0	38.2	45.9	0.6	5.6	53.5	0.8	6.4	61.1	1.0	7.2	68.8	1.3	8.0	76.4	1.6	8.0	78.3	7.5
0.06	0.41	4.1	39.2	47.0	0.5	5.7	54.8	0.7	6.6	62.7	0.9	7.4	70.5	1.2	8.2	78.3	1.4	8.2	80.3	7.5
0.05	0.42	4.2	40.1	48.2	0.5	5.9	56.2	0.6	6.7	64.2	0.8	7.6	72.2	1.0	8.4	80.3	1.3	8.4	82.2	7.5
0.05	0.43	4.3	41.1	49.3	0.4	6.0	57.5	0.5	6.9	65.7	0.7	7.7	73.9	0.9	8.6	82.2	1.1	8.6	84.1	7.5
0.04	0.44	4.4	42.0	50.4	0.3	6.2	58.9	0.4	7.0	67.3	0.6	7.9	75.7	0.7	8.8	84.1	0.9	8.8	86.0	7.5
0.03	0.45	4.5	43.0	51.6	0.2	6.3	60.2	0.3	7.2	68.8	0.4	8.1	77.4	0.6	9.0	86.0	0.7	9.0	87.9	7.5

Table 3.2 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 1 m² under the conditions of the ranges of torque coefficient (C_T) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s.

C_T	λ	$v:5\text{m/s}$			$v:6\text{m/s}$			$v:7\text{m/s}$			$v:8\text{m/s}$			$v:9\text{m/s}$			$v:10\text{m/s}$		
		ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]															
0.26	0.01	0.1	2.0	1.1	2.9	0.1	1.3	3.9	0.2	1.5	5.1	0.2	1.7	6.5	0.2	1.9	8.0	0.2	2.1
0.26	0.02	0.2	1.9	2.3	2.8	2.7	3.1	3.9	0.3	3.1	5.1	0.4	3.4	6.4	0.4	3.8	7.9	0.4	4.2
0.26	0.03	0.3	2.9	3.4	2.8	4.0	3.8	4.0	0.4	4.6	6.3	0.5	5.2	6.3	0.6	5.7	7.8	0.6	6.1
0.25	0.04	0.4	3.8	4.6	2.8	5.4	3.8	0.6	5.4	6.1	5.0	0.7	6.9	6.3	0.8	7.6	7.8	0.8	8.4
0.25	0.05	0.5	4.8	5.7	2.8	6.7	3.8	0.8	6.7	7.6	4.9	0.9	8.6	6.2	1.0	9.6	7.7	1.0	10.6
0.25	0.06	0.6	5.7	6.9	2.7	8.0	3.7	1.0	8.0	9.2	4.9	1.1	10.3	6.2	1.2	11.5	7.6	1.2	12.7
0.24	0.08	0.8	7.6	9.2	2.7	10.7	3.6	1.3	10.7	12.2	4.8	1.4	13.8	6.0	1.6	15.3	7.4	1.6	17.2
0.24	0.09	0.9	8.6	10.3	2.6	12.0	3.6	1.4	12.0	13.8	4.7	1.6	15.5	5.9	1.8	17.2	7.3	1.8	19.1
0.24	0.10	1.0	9.6	11.5	2.6	13.4	3.5	1.6	13.4	15.3	4.6	1.8	17.2	5.9	2.0	19.1	7.2	2.0	21.0
0.23	0.11	1.1	10.5	12.6	2.6	14.7	3.5	1.8	14.7	16.8	4.6	2.0	18.9	5.8	2.2	21.0	7.1	2.2	22.9
0.23	0.12	1.2	11.5	13.8	2.5	16.1	3.4	1.9	16.1	18.3	4.5	2.2	20.6	5.7	2.4	22.9	7.0	2.4	24.8
0.23	0.13	1.3	12.4	14.9	2.5	17.4	3.4	2.1	17.4	19.9	4.4	2.3	22.4	5.6	2.6	24.8	6.9	2.6	26.8
0.22	0.14	1.4	13.4	16.1	2.4	18.7	3.3	2.2	18.7	21.4	4.3	2.5	24.1	5.5	2.8	26.8	6.8	2.8	28.7
0.22	0.15	1.5	14.3	17.2	2.4	20.1	3.2	2.4	20.1	22.9	4.3	2.7	25.8	5.4	3.0	28.7	6.7	3.0	30.6
0.21	0.16	1.6	15.3	18.3	2.4	22.2	3.2	2.6	22.2	24.5	4.2	2.9	27.5	5.3	3.2	30.6	6.5	3.2	32.5
0.21	0.17	1.7	16.2	19.5	2.3	24.4	3.1	2.7	24.4	26.0	4.1	3.1	29.2	5.2	3.4	32.5	6.4	3.4	34.4
0.20	0.18	1.8	17.2	20.6	2.3	26.7	3.1	2.9	26.7	27.5	4.0	3.2	31.0	5.1	3.6	34.4	6.3	3.6	36.3
0.20	0.19	1.9	18.2	21.8	2.2	29.1	3.0	3.0	29.1	29.0	3.9	3.4	32.7	5.0	3.8	36.3	6.1	3.8	38.2
0.20	0.20	2.0	19.1	22.9	2.2	31.6	2.9	3.2	31.6	30.6	3.8	3.6	34.4	4.8	4.0	38.2	6.0	4.0	40.1
0.19	0.21	2.1	20.1	24.1	2.1	34.1	2.9	3.4	34.1	32.1	3.7	3.8	36.1	4.7	4.2	40.1	5.8	4.2	42.0
0.19	0.22	2.2	21.0	25.2	2.0	36.6	2.8	3.5	36.6	33.6	3.6	4.0	37.8	4.6	4.4	42.0	5.7	4.4	43.9
0.18	0.23	2.3	22.0	26.4	2.0	39.1	2.7	3.7	39.1	35.2	3.5	4.1	39.6	4.5	4.6	43.9	5.5	4.6	45.8
0.17	0.24	2.4	22.9	27.5	1.9	41.6	2.6	3.8	41.6	36.7	3.4	4.3	41.3	4.3	4.8	45.8	5.4	4.8	47.7
0.17	0.25	2.5	23.9	28.7	1.9	44.1	2.5	4.0	44.1	38.2	3.3	4.5	43.0	4.2	5.0	47.7	5.2	5.0	49.6
0.16	0.26	2.6	24.8	29.8	1.8	46.6	2.5	4.2	46.6	39.7	3.2	4.7	44.7	4.1	5.2	49.6	5.0	5.2	51.5
0.16	0.27	2.7	25.8	31.0	1.7	49.1	2.4	4.3	49.1	41.3	3.1	4.9	46.4	3.9	5.4	51.5	4.8	5.4	53.4
0.15	0.28	2.8	26.8	32.1	1.7	51.6	2.3	4.5	51.6	42.8	3.0	5.0	48.2	3.8	5.6	53.4	4.7	5.6	55.3
0.15	0.29	2.9	27.7	33.2	1.6	54.1	2.2	4.6	54.1	44.3	2.9	5.2	49.9	3.6	5.8	55.3	4.5	5.8	57.2
0.14	0.30	3.0	28.7	34.4	1.5	56.6	2.1	4.8	56.6	45.9	2.7	5.4	51.6	3.5	6.0	57.2	4.3	6.0	59.1
0.13	0.31	3.1	29.6	35.5	1.5	59.1	2.0	4.9	59.1	47.4	2.6	5.6	53.3	3.3	6.2	59.1	4.1	6.2	61.0
0.13	0.32	3.2	30.6	36.7	1.4	61.6	1.9	5.1	61.6	48.9	2.5	5.8	55.0	3.2	6.4	61.0	3.9	6.4	62.9
0.12	0.33	3.3	31.5	37.8	1.3	64.1	1.8	5.3	64.1	50.4	2.4	5.9	56.8	3.0	6.6	62.9	3.7	6.6	64.8
0.11	0.34	3.4	32.5	39.0	1.3	66.6	1.7	5.4	66.6	52.0	2.2	6.1	58.5	2.8	6.8	64.8	3.5	6.8	66.7
0.11	0.35	3.5	33.4	40.1	1.2	69.1	1.6	5.6	69.1	53.5	2.1	6.3	60.2	2.7	7.0	66.7	3.3	7.0	68.6
0.10	0.36	3.6	34.4	41.3	1.1	71.6	1.5	5.8	71.6	55.0	2.0	6.5	61.9	2.5	7.2	68.6	3.1	7.2	70.5
0.09	0.37	3.7	35.4	42.4	1.0	74.1	1.4	5.9	74.1	56.6	1.8	6.7	63.6	2.3	7.4	70.5	2.8	7.4	72.4
0.09	0.38	3.8	36.3	43.6	0.9	76.6	1.3	6.1	76.6	58.1	1.7	6.8	65.4	2.1	7.6	72.4	2.6	7.6	74.3
0.08	0.39	3.9	37.3	44.7	0.9	79.1	1.2	6.2	79.1	59.6	1.5	7.0	67.1	1.9	7.8	74.3	2.4	7.8	76.2
0.07	0.40	4.0	38.2	45.9	0.8	81.6	1.1	6.4	81.6	61.1	1.4	7.2	68.8	1.7	8.0	76.2	2.2	8.0	78.1
0.06	0.41	4.1	39.2	47.0	0.7	84.1	1.0	6.6	84.1	62.7	1.2	7.4	70.5	1.6	8.2	78.1	1.9	8.2	80.0
0.05	0.42	4.2	40.1	48.2	0.6	86.6	0.9	6.7	86.6	64.2	1.1	7.6	72.2	1.4	8.4	80.0	1.7	8.4	81.9
0.05	0.43	4.3	41.1	49.3	0.5	89.1	0.8	6.9	89.1	65.7	0.9	7.7	73.9	1.2	8.6	81.9	1.4	8.6	83.8
0.04	0.44	4.4	42.0	50.4	0.4	91.6	0.7	7.0	91.6	67.3	0.8	7.9	75.7	1.0	8.8	83.8	1.2	8.8	85.7
0.03	0.45	4.5	43.0	51.6	0.3	94.1	0.6	7.2	94.1	68.8	0.6	8.1	77.4	0.7	9.0	85.7	0.9	9.0	87.6

Table 3.3 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 1.36 m² under the conditions of torque coefficient (C_T) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s.

C_T	λ	$v=5m/s$			$v=6m/s$			$v=7m/s$			$v=8m/s$			$v=9m/s$			$v=10m/s$		
		ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]															
0.26	0.01	0.1	1.0	2.7	1.1	3.9	0.1	1.3	5.3	0.2	1.5	6.9	0.2	1.7	8.8	0.2	1.9	10.8	
0.26	0.02	0.2	1.9	2.7	2.3	3.9	0.3	2.7	5.3	0.3	3.1	6.9	0.4	3.4	8.7	0.4	3.8	10.8	
0.26	0.03	0.3	2.9	2.7	3.4	3.8	0.4	4.0	5.2	0.5	4.6	6.8	0.5	5.2	8.6	0.6	5.7	10.7	
0.25	0.04	0.4	3.8	2.6	4.6	3.8	0.6	5.4	5.2	0.6	6.1	7.6	0.7	6.9	8.6	0.8	7.6	10.6	
0.25	0.05	0.5	4.8	2.6	5.7	3.8	0.7	6.7	5.1	0.8	7.6	6.7	0.9	8.6	8.5	1.0	9.6	10.5	
0.25	0.06	0.6	5.7	2.6	6.9	3.7	0.8	8.0	5.1	1.0	9.2	6.6	1.1	10.3	8.4	1.2	11.5	10.3	
0.25	0.07	0.7	6.7	2.6	8.0	3.7	1.0	9.4	5.0	1.1	10.7	6.5	1.3	12.0	8.3	1.4	13.4	10.2	
0.24	0.08	0.8	7.6	2.5	9.2	3.6	1.1	10.7	4.9	1.3	12.2	6.5	1.4	13.8	8.2	1.6	15.3	10.1	
0.24	0.09	0.9	8.6	2.5	1.0	3.6	1.3	12.0	4.9	1.4	13.8	6.4	1.6	15.5	8.1	1.8	17.2	10.0	
0.24	0.10	1.0	9.6	2.5	1.1	3.5	1.4	13.4	4.8	1.6	15.3	6.3	1.8	17.2	8.0	2.0	19.1	9.8	
0.23	0.11	1.1	10.5	2.4	1.3	3.5	1.5	14.7	4.7	1.8	16.8	6.2	2.0	18.9	7.8	2.2	21.0	9.7	
0.23	0.12	1.2	11.5	2.4	1.4	3.4	1.7	16.1	4.6	1.9	18.3	6.1	2.2	20.6	7.7	2.4	22.9	9.5	
0.23	0.13	1.3	12.4	2.3	1.6	3.4	1.8	17.4	4.6	2.1	19.9	6.0	2.3	22.4	7.6	2.6	24.8	9.4	
0.22	0.14	1.4	13.4	2.3	1.7	3.3	2.0	18.7	4.5	2.2	21.4	5.9	2.5	24.1	7.5	2.8	26.8	9.2	
0.22	0.15	1.5	14.3	2.3	1.8	3.3	2.1	20.1	4.4	2.4	22.9	5.8	2.7	25.8	7.3	3.0	28.7	9.1	
0.21	0.16	1.6	15.3	2.2	1.9	3.2	2.2	21.4	4.4	2.6	24.5	5.7	2.9	27.5	7.2	3.2	30.6	8.9	
0.21	0.17	1.7	16.2	2.2	2.0	3.1	2.2	22.7	4.3	2.7	26.0	5.6	3.1	29.2	7.1	3.4	32.5	8.7	
0.20	0.18	1.8	17.2	2.1	2.2	3.0	2.5	24.1	4.2	2.9	27.5	5.5	3.3	31.0	6.9	3.6	34.4	8.5	
0.20	0.19	1.9	18.2	2.1	2.3	2.9	2.7	25.4	4.1	3.0	29.0	5.3	3.4	32.7	6.8	3.8	36.3	8.3	
0.20	0.20	2.0	19.1	2.0	2.4	2.9	2.8	26.8	4.0	3.2	30.6	5.2	3.6	34.4	6.6	4.0	38.2	8.1	
0.19	0.21	2.1	20.1	2.0	2.5	2.9	2.9	28.1	3.9	3.4	32.1	5.1	3.8	36.1	6.4	4.2	40.1	7.9	
0.19	0.22	2.2	21.0	1.9	2.6	2.8	3.1	29.4	3.8	3.5	33.6	4.9	4.0	37.8	6.3	4.4	42.0	7.7	
0.18	0.23	2.3	22.0	1.9	2.8	2.8	3.2	30.8	3.7	3.7	35.2	4.8	4.1	39.6	6.1	4.6	43.9	7.5	
0.17	0.24	2.4	22.9	1.8	2.9	2.7	3.4	32.1	3.6	3.8	36.7	4.7	4.3	41.3	5.9	4.8	45.9	7.3	
0.17	0.25	2.5	23.9	1.8	3.0	2.7	3.5	33.4	3.5	4.0	38.2	4.5	4.5	43.0	5.7	5.0	47.8	7.1	
0.16	0.26	2.6	24.8	1.7	3.1	2.6	3.6	34.8	3.3	4.2	39.7	4.4	4.7	44.7	5.5	5.2	49.7	6.8	
0.16	0.27	2.7	25.8	1.6	3.2	3.1	3.8	36.1	3.2	4.3	41.3	4.2	4.9	46.4	5.3	5.4	51.6	6.6	
0.15	0.28	2.8	26.8	1.6	3.4	3.2	3.9	37.5	3.1	4.5	42.8	4.1	5.0	48.2	5.1	5.6	53.5	6.3	
0.15	0.29	2.9	27.7	1.5	3.5	3.2	4.1	38.8	3.0	4.6	44.3	3.9	5.2	49.9	4.9	5.8	55.4	6.1	
0.14	0.30	3.0	28.7	1.5	3.6	3.4	4.2	40.1	2.9	4.8	45.9	3.7	5.4	51.6	4.7	6.0	57.3	5.8	
0.13	0.31	3.1	29.6	1.4	3.7	3.5	4.3	41.5	2.7	5.0	47.4	3.6	5.6	53.3	4.5	6.2	59.2	5.6	
0.13	0.32	3.2	30.6	1.3	3.8	3.6	4.5	42.8	2.6	5.1	48.9	3.4	5.8	55.0	4.3	6.4	61.1	5.3	
0.12	0.33	3.3	31.5	1.3	4.0	3.7	4.6	44.1	2.5	5.3	50.4	3.2	5.9	56.8	4.1	6.6	63.1	5.0	
0.11	0.34	3.4	32.5	1.2	4.1	3.9	4.8	45.5	2.3	5.4	52.0	3.0	6.1	58.5	3.8	6.8	65.0	4.7	
0.11	0.35	3.5	33.4	1.1	4.2	4.0	4.9	46.8	2.2	5.6	53.5	2.9	6.3	60.2	3.6	7.0	66.9	4.5	
0.10	0.36	3.6	34.4	1.0	4.3	4.1	5.0	48.2	2.0	5.8	55.0	2.7	6.5	61.9	3.4	7.2	68.8	4.2	
0.09	0.37	3.7	35.4	1.0	4.4	4.2	5.2	49.5	1.9	5.9	56.6	2.5	6.7	63.6	3.1	7.4	70.7	3.9	
0.09	0.38	3.8	36.3	0.9	4.6	4.3	5.3	50.8	1.7	6.1	58.1	2.3	6.8	65.4	2.9	7.6	72.6	3.6	
0.08	0.39	3.9	37.3	0.8	4.7	4.4	5.5	52.2	1.6	6.2	59.6	2.1	7.0	67.1	2.6	7.8	74.5	3.3	
0.07	0.40	4.0	38.2	0.7	4.8	4.5	5.6	53.5	1.4	6.4	61.1	1.9	7.2	68.8	2.4	8.0	76.4	2.9	
0.06	0.41	4.1	39.2	0.7	4.9	4.7	5.7	54.8	1.3	6.6	62.7	1.7	7.4	70.5	2.1	8.2	78.3	2.6	
0.05	0.42	4.2	40.1	0.6	5.0	4.8	5.9	56.2	1.1	6.7	64.2	1.5	7.6	72.2	1.8	8.4	80.3	2.3	
0.05	0.43	4.3	41.1	0.5	5.2	4.9	6.0	57.5	1.0	6.9	65.7	1.2	7.7	73.9	1.6	8.6	82.2	1.9	
0.04	0.44	4.4	42.0	0.4	5.3	5.0	6.2	58.9	0.8	7.0	67.3	1.0	7.9	75.7	1.3	8.8	84.1	1.6	
0.03	0.45	4.5	43.0	0.3	5.4	5.1	6.3	60.2	0.6	7.2	68.8	0.8	8.1	77.4	1.0	9.0	86.0	1.3	

Fig. 3.3 は (3) - (6) の式から求めた風速 5m/s 下における受風面積 0.75 m², 1 m²及び 1.36 m²の風車特性曲線に, (2)の式から求めたポンプ特性直線を重ねたグラフを示した。風車特性曲線とポンプ特性直線とが交わる点は, 揚水時の回転数とトルクを表す。受風面積 0.75 m²の風車では交点が求められなかったことから, 実証試験地で揚程 2.2m の海水を揚水できないと推察された。

これに対して, 受風面積が 1 m²及び 1.36 m²の風車特性曲線とポンプ特性直線の交点は, 回転数 9rpm でトルク 1.9Nm 及び回転数 19rpm で 2.2Nm の値を示した。したがって, 風速 5m/s において 1.36 m²の風車は 1 m²の風車に比べ回転数の比に相当する 2.1 倍多くの海水を同一の時間において組み上げると考えられ, 同一風速下では受風面積が大きい風車ほど, 回転数が高くなり, 揚水量が増すと推察された。

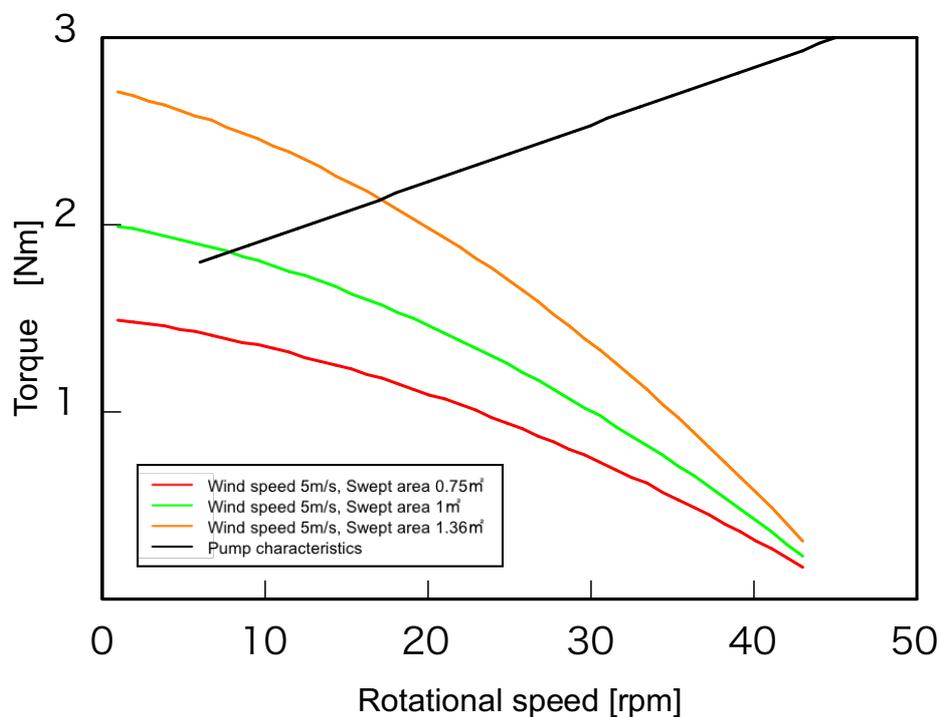


Fig. 3.3 Relationship between the rotation speed and torque.

実証実験地では、揚水量が多い直径 1m, 高さ 1.36m, 受風面積 1.36 m²の風車を用いることにした。設置及び撤去の容易さからコンクリート製アンカーブロックに据え付けることにした。風車の高さが 2m を超える場合、高所作業となってメンテナンスが困難となるためブロックの高さは 0.5m とした。

実証実験に供する揚水システムを構築するため、受風面積 1.36 m²の風車について、風速 5m/s-10m/s 下における風車特性曲線、及び、揚程 2.2m におけるポンプ特性直線を Fig. 3.4 に示した。この結果、風車特性曲線とポンプ特性直線の交点は、風速 5m/s, 6m/s, 7m/s, 8m/s, 9m/s 及び 10m/s 下において、回転数・トルクが各々 15rpm・2Nm, 30rpm・2.5Nm, 40rpm・2.8Nm, 51rpm・3.2Nm・61rpm・3.5Nm 及び 71rpm・3.8Nm となった。各交点における風速と回転数、及び、風速とトルクの関係から、受風面積 1.36 m²の風車で海水をベーンポンプで揚程 2.2m まで揚水するシステムの設計ラインを求めた。風速と回転数、風速とトルクの設計ラインは、Fig. 3.5 に示したとおり、いずれも直線的な関係を示すため、相関直線を求めた結果、次式 (7), (8) のとおりとなった。

$$R_s = 10.97v - 37.62 \quad (\text{決定係数 } R: 0.99) \quad (7)$$

$$T = 0.35v + 0.31 \quad (\text{決定係数 } R: 0.99) \quad (8)$$

式 (7) に示した設計ラインからは、風速が 1m/s 速くなるに従って、回転数が約 11rpm 増加するとみなされ、この割合で揚水量が増加すると考えられた。また、本式に風速 4m/s を当てはめた場合、回転数が 6rpm となり、この風速下でも揚水する可能性が考えられた。

式 (8) に示した設計ラインからは、風速が 1m/s 速くなるに従って、トルクが約 0.35Nm 増加するとみなされた。

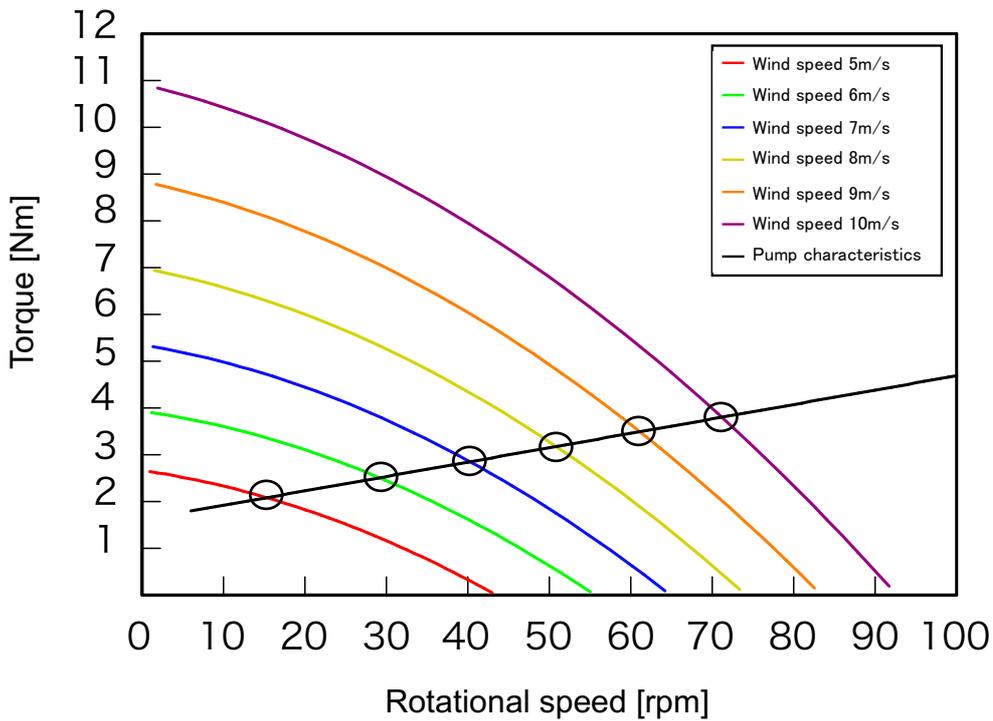


Fig. 3.4 Relationship between rotation speed and torque at each wind speed and pump characteristics.

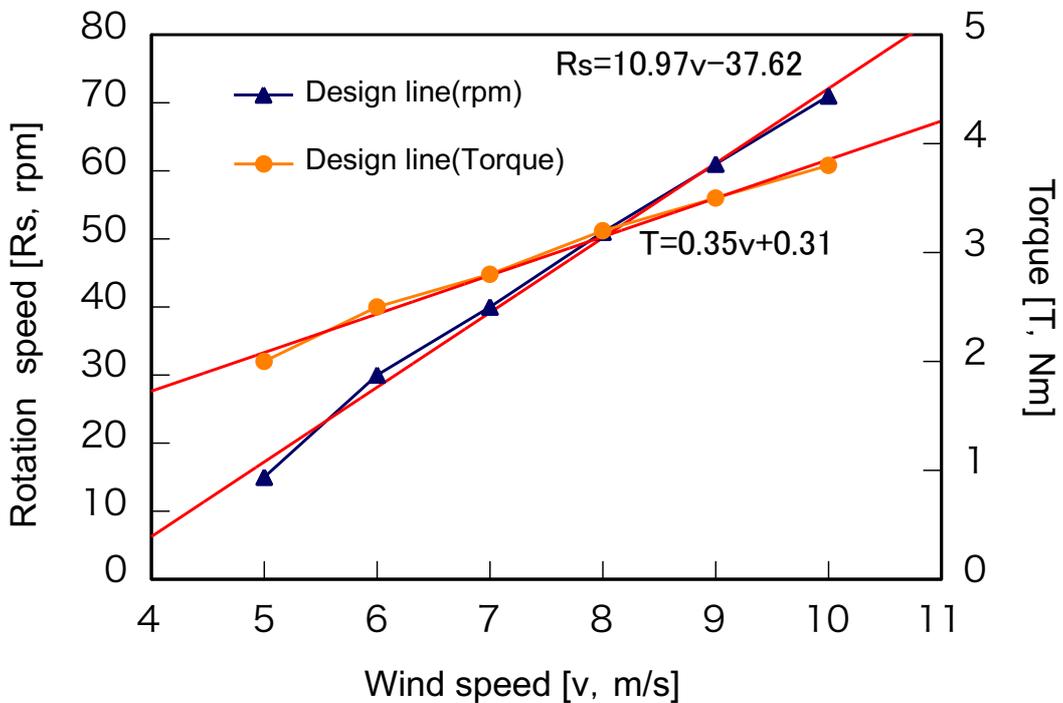


Fig. 3.5 The design lines of wind speed-rotation speed and wind speed-torque of the pumping system.

3.2 送気システムの設計

3.2.1 送気ポンプの性能評価

実証実験に先立ち、送気ポンプの性能を評価するため、室内実験でポンプの回転数とトルクの関係性を測定した。ポンプは汎用性を考慮し、市販のピストン式エアポンプを用いた。

3.2.1.1 実験装置及び実験方法

実験装置は、モータ、トルクメータ、ギアボックス、クランク機構、ピストン式エアポンプ、ホース、リリーフバルブ低圧大気解放型及びバランスウェイトから構成され、弘前大学地域戦略研究所内に構築した (Fig. 3.6)。モータ (富士変速機製 VX04-20MF) の回転軸に回転数、トルク、回転角度を計測するトルクメータ (UNIPULSE 製 UTMV-10Nm)、回転軸を縦軸から横軸に変換するギアボックス (マキシマコー製 TB 型スパイラルベベルギアボックス TB17-2-1)、横軸の回転軸を実用エンジンで用いられている連桿比 3.5 に設定したクランク機構 (Fig. 3.7) を介し、ストローク量が 13cm のエアポンプ (キジマ製エアポンプ 302-318) (Fig. 3.8) を接続した。ポンプ吐出し口にホースを連結し、ホースの先端に水深 4.5m の気圧を擬似的に再現させるため、クラッキング圧力が 40kPa 及び 50kPa のリリーフバルブ低圧大気解放型 (IBS 製 RAB1-40, 50) を取り付けました。また、クランク機構には、クランクピンが回転する事による振動を抑えるために 360g の円盤型のバランスウェイトを取り付けた (Fig. 3.7)。

実験では、クランクの最下点が 0 度になるよう調整し、モータ 1 回転におけるトルク変動を観察した (Fig. 3.9)。モータの回転を徐々に上げ、14rpm, 30rpm, 45rpm, 61rpm 及び 76rpm に、各々 1.0×10^{-3} s 間隔で 30 秒間のトルク測定値をロガー (GRAPHTECH GL900) に記録した。測定されたトルクから回転数との関係性を求めた。

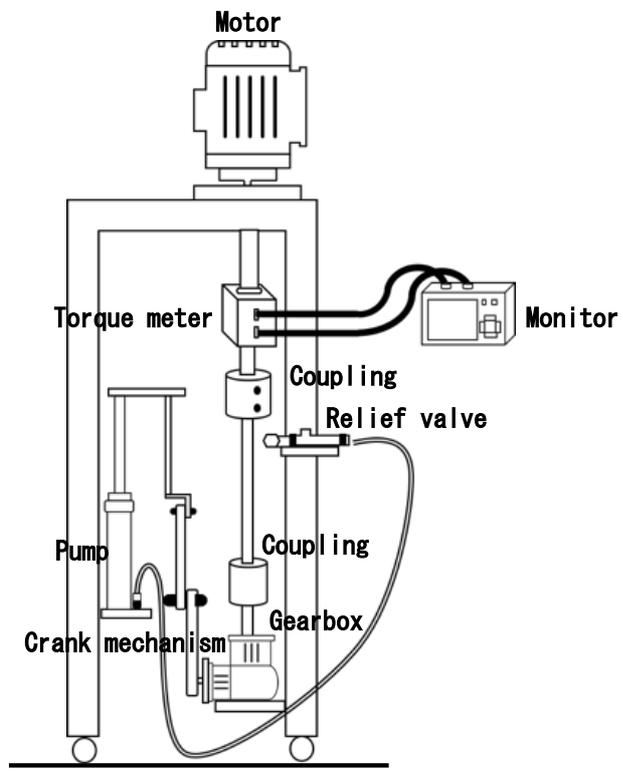


Fig. 3.6 Image of pump characteristic experiment.

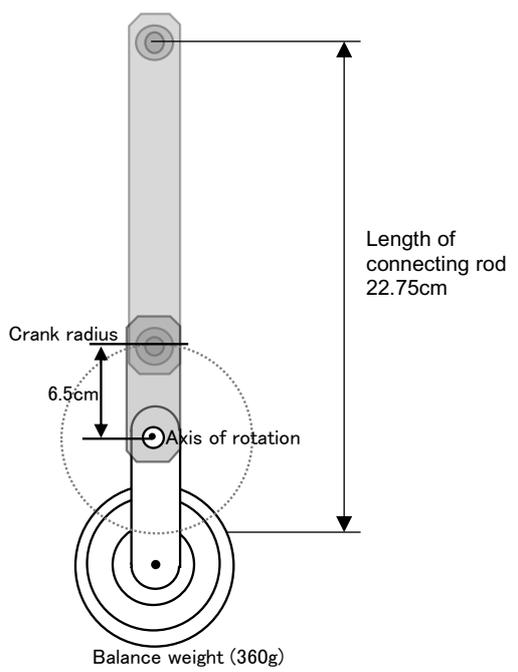


Fig. 3.7 State of balance weight.



Fig. 3.8 Air Pump.

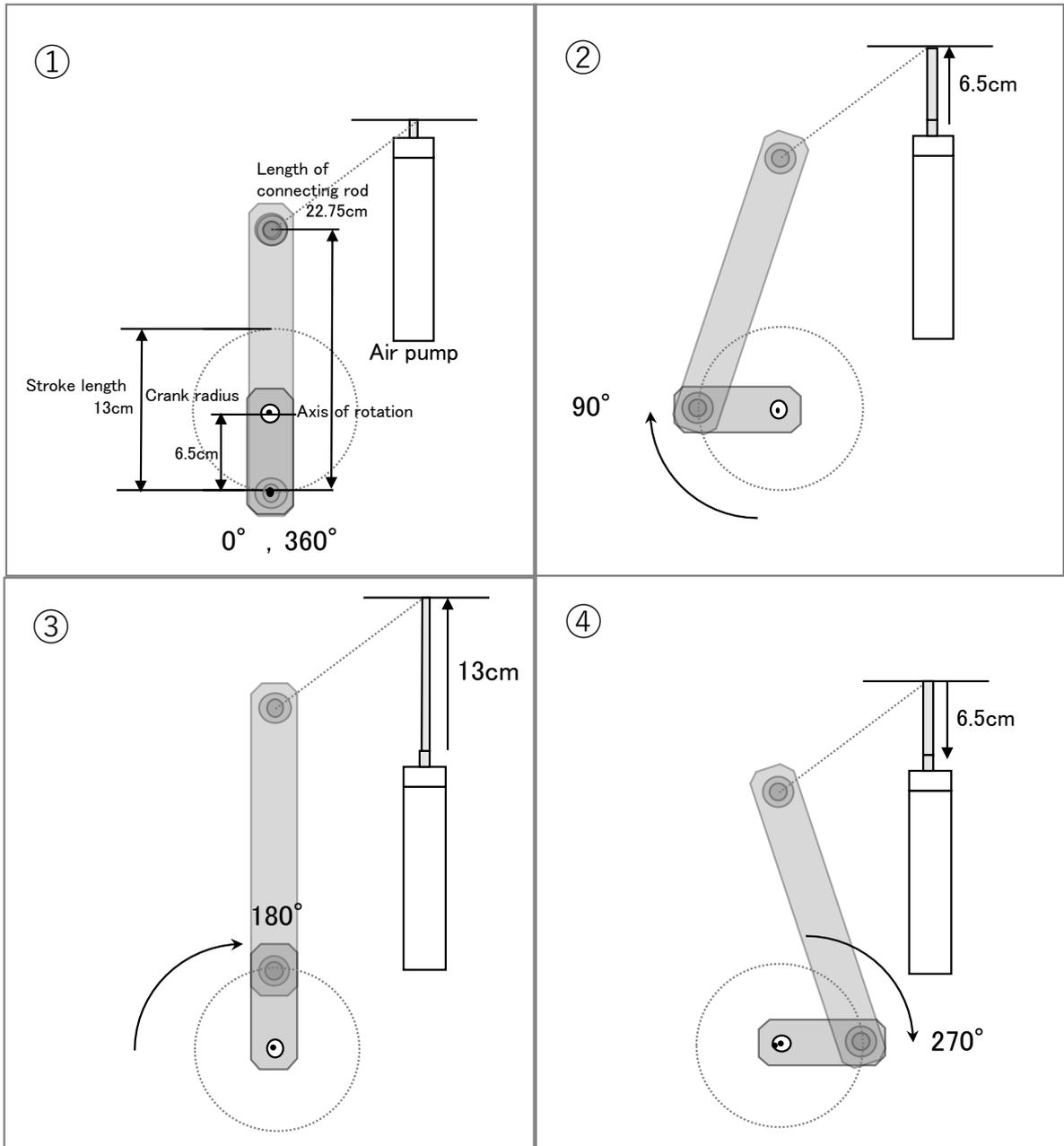


Fig. 3.9 State of the crank mechanism.

3.2.1.2 実験結果

Fig. 3.10 は、バランスウエイト無し、40kPa のスイングバルブ接続時の回転数 45rpm におけるモータ 1 回転のトルクと回転角度を示した。トルクは、A 地点の 0 度 (Fig. 3.9, ①) では 0.4Nm, B 地点の 90 度 (Fig. 3.9, ②) では 1.0Nm, C 地点の 180 度 (Fig. 3.9, ③) では 0.2Nm, D 地点の 270 度 (Fig. 3.9, ④) では 2.9Nm, A 地点の 360 度 (Fig. 3.9, ①) では 0.4 Nm の数値を示した。ポンプが下から上に引き上がる場合、上から下に押し込む場合それぞれ山型のトルク変動が確認され、ストロークの中間地点の B, D 地点にトルク変動のピークが見られる。上から下に押し込む D 地点にてトルクが最大となり、送気を可能にするためにはこのトルクを出力する必要がある。

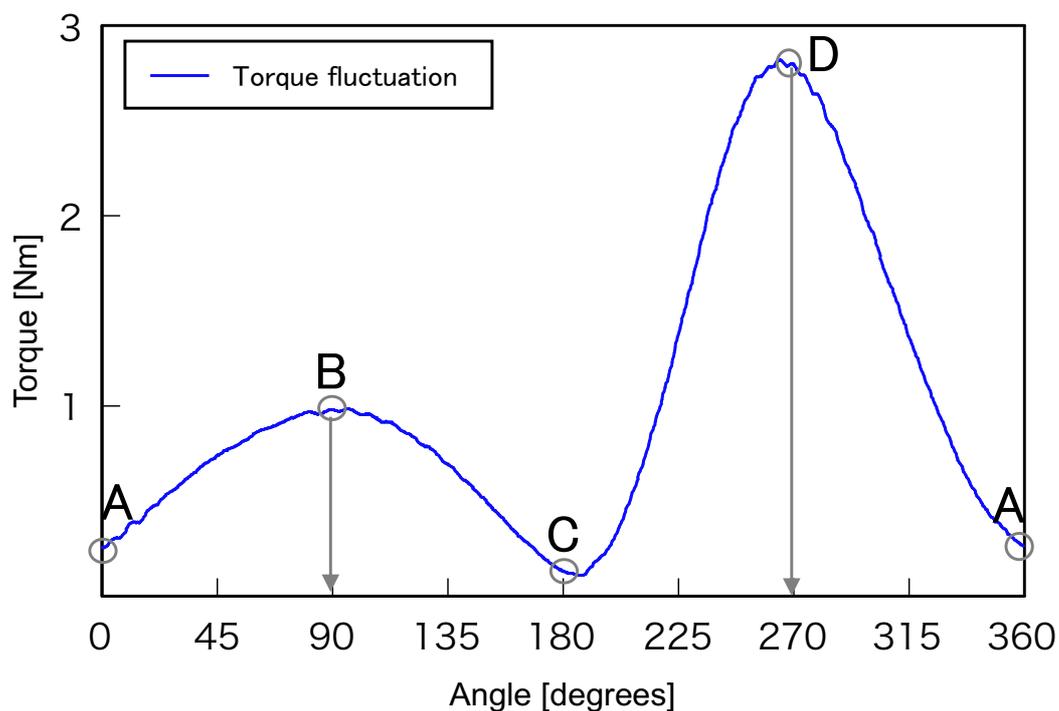


Fig. 3.10 Torque fluctuation of one rotation.

Fig. 3.11 は、送気時における回転数とトルクの最大値の関係を示した。送気時の回転数が 14-76rpm の範囲内で、40kPa のリリースバルブ接続時、バランスウェイト無し及び有りのトルクの最大値は各々3.05Nm, 3.31Nm, 3.48Nm, 3.58Nm, 3.65Nm 及び 2.79Nm, 3.17Nm, 3.38Nm, 3.48Nm, 3.57Nm となり、50kPa リリースバルブの接続時では、各々3.23Nm, 3.60Nm, 3.69Nm, 3.76Nm, 3.79Nm 及び 2.92Nm, 3.35Nm, 3.56Nm, 3.65Nm, 3.70Nm となった。モータ出力を上げることで回転数は上昇し、送気に必要なトルクと正の相関を示した。また、どちらもバランスウェイトを接続した方がトルクの値は低くなり、風車と連結した場合に低風速で送気することが考えられたため、実証実験において接続することにした。

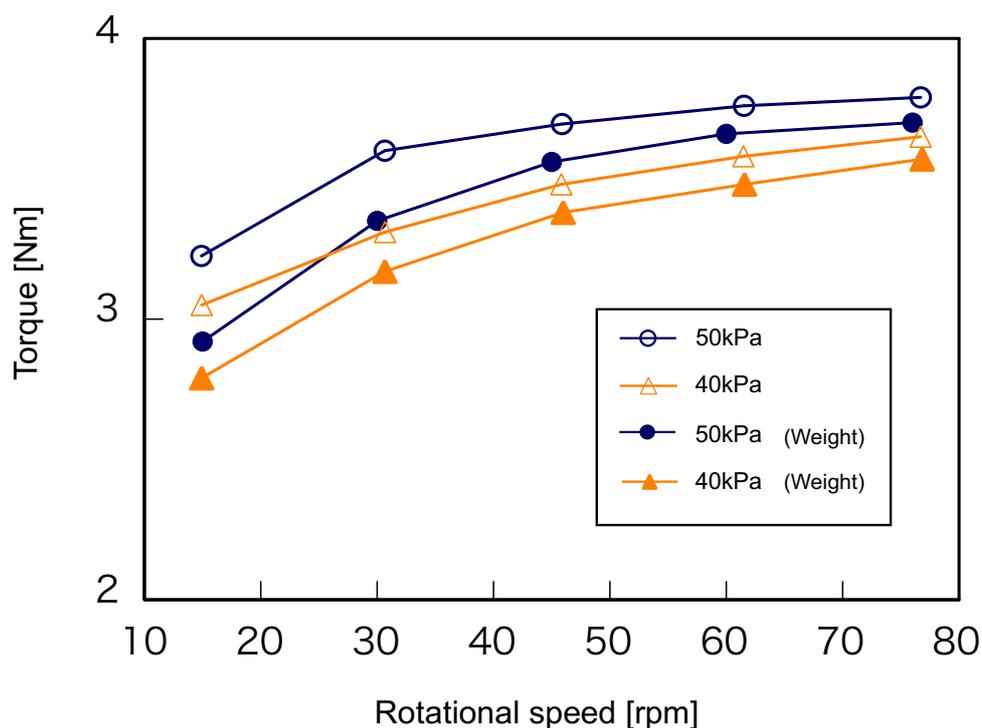


Fig. 3.11 Relationship between rotation speed and torque.

Fig. 3.12 は、実証実験地の水深 4.5m、圧力 45kPa を求めるため、Fig. 3.11 に示した 40kPa 及び 50kPa リリーフバルブのバランスウェイトを接続し、それぞれの回転数によるトルクの値の平均値を示した。回転数が 15rpm, 30rpm, 45rpm, 61rpm, 76rpm の場合、トルク最大値は 2.9Nm, 3.3Nm, 3.5Nm, 3.6Nm, 3.6Nm となり、送気に必要なトルクと正の相関を示している。本結果から、水深 4.5m のおけるポンプの特性は 15-30rpm, 31-45rpm, 46-60 rpm, 61-76rpm において次式 (9) (10) (11) (12) のとおり表された。

$$T=0.021Rs+2.60 \quad (\text{決定係数 } R^2 : 1) \quad (9)$$

$$T=0.013Rs+2.86 \quad (\text{決定係数 } R^2 : 1) \quad (10)$$

$$T=0.0067Rs+3.13 \quad (\text{決定係数 } R^2 : 1) \quad (11)$$

$$T=0.005Rs+3.23 \quad (\text{決定係数 } R^2 : 1) \quad (12)$$

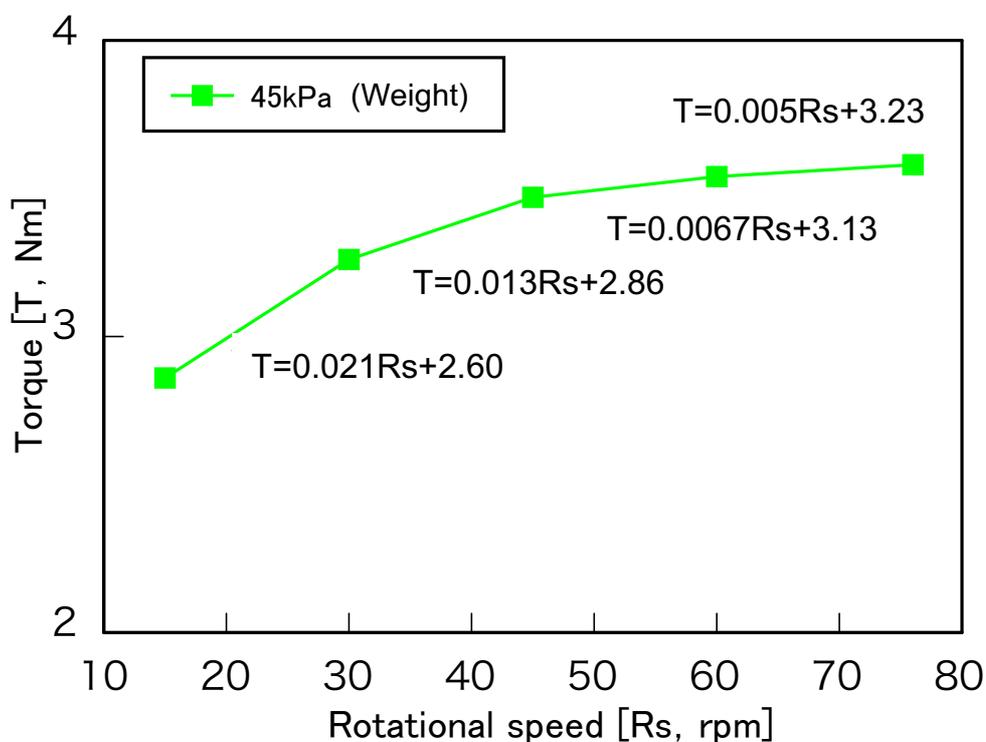


Fig. 3.12 Relationship between pump rotation and torque.

3.2.2 送気システムの設計ライン

第2章2.4風洞による実験(Ⅱ),及び,3.2.1の実験結果を基に,送気条件については,水深4.5m,送気カットイン風速については,実証実験漁港の年間平均風速5m/sと想定し,風速に対する回転数及びトルクの関係を表す揚水システムをライン設計した。

3.2.2.1 方法

1) 近似関数を用いた送気システム設計ラインの算出

第2章の2.2.4の結果から得た,風車特性(3)を用いて,周速比0.01-0.45の範囲のトルク係数及び5-10m/sの範囲の風速を組み合わせた条件下における回転角速度,回転数,トルクについて,次式(4)-(6)から算出し,風速,回転数及びトルクの風車特性曲線を求めた。

受風面積(A)は,2章2.4風洞による実験(Ⅱ)に使用した風車の0.75 m²(高さ0.75m,幅1m)の2倍となる1.5 m²(高さ1.5m,幅1m)値を用いた。また,風車半径及び空気密度は,0.5m及び1.2 kg/m³とした。

風車を実証実験地の漁港にケミカルアンカーを用い直接固定することを想定している。風車の下に,ギアボックス,クランク機構及びピストン式エアポンプを収納するの高さ50cmのボックスを設置する予定である。高さが2mを超える場合,高所作業となって風車のメンテナンスが困難となるため,高さ2mを越えないように直径1m,高さ1.5m,受風面積1.5 m²にした。

3.2.2.2 結果

トルク係数0.03-0.26,周速比0.01-0.45,風速3-10m/sの範囲で回転角速度,回転数,トルクの計算結果をTable 3.4に示した。

Table 3.4 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 1.5 m² under the conditions of the ranges of torque coefficient (C_T) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s.

C_T	λ	$v=2\text{m/s}$		$v=3\text{m/s}$		$v=4\text{m/s}$		$v=5\text{m/s}$		$v=6\text{m/s}$		$v=7\text{m/s}$		$v=8\text{m/s}$		$v=9\text{m/s}$		$v=10\text{m/s}$				
		ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]	ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]	ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]	ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]	ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]	ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]	ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]
0.26	0.01	0.1	1.0	1.1	0.1	1.1	0.1	1.0	1.0	1.1	1.1	4.3	0.2	1.5	7.7	0.2	1.7	9.7	0.2	1.9	12.0	
0.26	0.02	0.2	1.9	2.3	0.2	1.9	0.2	3.0	3.0	0.2	4.3	0.3	2.7	5.8	3.1	5.8	3.4	3.4	9.6	0.4	3.8	11.9
0.26	0.03	0.3	2.9	3.4	0.3	2.9	0.3	4.4	4.4	0.4	4.6	0.4	4.0	5.8	0.5	7.5	0.5	5.2	9.5	0.6	5.7	11.8
0.25	0.04	0.4	3.8	4.6	0.4	3.8	0.4	5.8	5.8	0.5	4.6	0.5	5.4	5.7	0.6	6.1	0.7	6.9	9.4	0.8	7.6	11.6
0.25	0.05	0.5	4.8	5.7	0.5	4.8	0.5	6.9	6.9	0.6	5.7	0.6	6.7	5.6	0.8	7.4	0.9	8.6	9.2	1.0	9.6	11.5
0.25	0.06	0.6	5.7	6.9	0.6	5.7	0.6	8.0	8.0	0.7	6.9	0.7	7.3	5.6	1.0	8.2	1.1	10.3	9.2	1.2	11.5	11.4
0.25	0.07	0.7	6.7	8.0	0.7	6.7	0.7	9.4	9.4	0.8	8.0	0.8	8.0	5.5	1.1	10.7	1.2	12.0	9.1	1.4	13.4	11.3
0.24	0.08	0.8	7.6	9.2	0.8	7.6	0.8	10.7	10.7	0.9	9.2	0.9	9.2	6.4	1.2	12.2	1.3	13.8	9.0	1.6	15.3	11.1
0.24	0.09	0.9	8.6	10.3	0.9	8.6	0.9	12.0	12.0	1.0	10.3	1.0	10.3	7.2	1.3	14.4	1.4	15.5	8.9	1.8	17.2	11.0
0.24	0.10	1.0	9.6	11.5	1.0	9.6	1.0	13.4	13.4	1.1	11.5	1.1	11.5	8.0	1.4	16.0	1.5	16.8	8.9	2.0	19.1	10.9
0.24	0.11	1.1	10.6	12.7	1.1	10.6	1.1	14.8	14.8	1.2	12.7	1.2	12.7	8.8	1.5	17.6	1.6	18.2	8.9	2.2	21.0	10.8
0.23	0.12	1.2	11.5	13.9	1.2	11.5	1.2	16.1	16.1	1.3	13.9	1.3	13.9	9.6	1.6	19.8	1.7	20.6	8.5	2.4	22.9	10.5
0.23	0.13	1.3	12.4	14.9	1.3	12.4	1.3	17.4	17.4	1.4	14.9	1.4	14.9	10.5	1.7	21.9	1.8	22.4	8.4	2.6	24.8	10.4
0.22	0.14	1.4	13.4	16.1	1.4	13.4	1.4	18.8	18.8	1.5	16.1	1.5	16.1	11.4	1.8	23.8	1.9	23.8	8.2	2.8	26.8	10.2
0.22	0.15	1.5	14.3	17.2	1.5	14.3	1.5	20.2	20.2	1.6	17.2	1.6	17.2	12.4	1.9	25.8	2.0	25.8	8.1	3.0	28.7	10.0
0.21	0.16	1.6	15.3	18.3	1.6	15.3	1.6	21.6	21.6	1.7	18.3	1.7	18.3	13.4	2.0	27.7	2.1	27.7	7.9	3.2	30.6	9.8
0.21	0.17	1.7	16.2	19.5	1.7	16.2	1.7	23.0	23.0	1.8	19.5	1.8	19.5	14.4	2.1	29.7	2.2	29.7	7.8	3.4	32.5	9.6
0.20	0.18	1.8	17.2	20.6	1.8	17.2	1.8	24.4	24.4	1.9	20.6	1.9	20.6	15.4	2.2	31.7	2.3	31.7	7.6	3.6	34.4	9.4
0.20	0.19	1.9	18.2	21.8	1.9	18.2	1.9	25.8	25.8	2.0	21.8	2.0	21.8	16.4	2.3	33.7	2.4	33.7	7.4	3.8	36.3	9.2
0.20	0.20	2.0	19.1	22.9	2.0	19.1	2.0	27.2	27.2	2.1	22.9	2.1	22.9	17.4	2.4	35.7	2.5	35.7	7.3	4.0	38.2	9.0
0.19	0.21	2.1	20.1	24.1	2.1	20.1	2.1	28.6	28.6	2.2	24.1	2.2	24.1	18.4	2.5	37.7	2.6	37.7	7.1	4.2	40.1	8.8
0.18	0.23	2.3	22.0	26.4	2.3	22.0	2.3	30.0	30.0	2.3	26.4	2.3	26.4	19.4	2.6	39.7	2.7	39.7	6.9	4.4	42.0	8.5
0.18	0.24	2.4	23.0	27.6	2.4	23.0	2.4	31.4	31.4	2.4	27.6	2.4	27.6	20.4	2.7	41.7	2.8	41.7	6.7	4.6	43.9	8.3
0.17	0.25	2.5	24.0	28.8	2.5	24.0	2.5	32.8	32.8	2.5	28.8	2.5	28.8	21.4	2.8	43.7	2.9	43.7	6.5	4.8	45.8	8.0
0.16	0.26	2.6	24.8	30.0	2.6	24.8	2.6	34.2	34.2	2.6	30.0	2.6	30.0	22.4	2.9	45.5	3.0	45.5	6.3	5.0	47.7	7.5
0.16	0.27	2.7	25.8	31.0	2.7	25.8	2.7	35.6	35.6	2.7	31.0	2.7	31.0	23.4	3.0	47.3	3.1	47.3	6.1	5.2	49.6	7.3
0.15	0.28	2.8	26.8	32.1	2.8	26.8	2.8	37.0	37.0	2.8	32.1	2.8	32.1	24.4	3.1	49.1	3.2	49.1	5.9	5.4	51.6	7.0
0.15	0.29	2.9	27.7	33.2	2.9	27.7	2.9	38.4	38.4	2.9	33.2	2.9	33.2	25.4	3.2	50.9	3.3	50.9	5.7	5.6	53.5	6.7
0.14	0.30	3.0	28.7	34.4	3.0	28.7	3.0	39.8	39.8	3.0	34.4	3.0	34.4	26.4	3.3	52.7	3.4	52.7	5.4	5.8	55.4	6.4
0.13	0.31	3.1	29.6	35.5	3.1	29.6	3.1	41.2	41.2	3.1	35.5	3.1	35.5	27.4	3.4	54.5	3.5	54.5	5.2	6.0	57.3	6.1
0.13	0.32	3.2	30.6	36.7	3.2	30.6	3.2	42.6	42.6	3.2	36.7	3.2	36.7	28.4	3.5	56.7	3.6	56.7	5.0	6.2	59.2	6.1
0.12	0.33	3.3	31.5	37.8	3.3	31.5	3.3	44.0	44.0	3.3	37.8	3.3	37.8	29.4	3.6	58.9	3.7	58.9	4.7	6.4	61.1	5.9
0.11	0.34	3.4	32.5	39.0	3.4	32.5	3.4	45.4	45.4	3.4	39.0	3.4	39.0	30.4	3.7	61.1	3.8	61.1	4.5	6.6	63.1	5.5
0.11	0.35	3.5	33.4	40.1	3.5	33.4	3.5	46.8	46.8	3.5	40.1	3.5	40.1	31.4	3.8	63.3	3.9	63.3	4.2	6.8	65.0	5.2
0.10	0.36	3.6	34.4	41.3	3.6	34.4	3.6	48.2	48.2	3.6	41.3	3.6	41.3	32.4	3.9	65.5	4.0	65.5	4.0	7.0	66.9	4.9
0.10	0.37	3.7	35.4	42.4	3.7	35.4	3.7	49.6	49.6	3.7	42.4	3.7	42.4	33.4	4.0	67.7	4.1	67.7	3.7	7.2	68.8	4.6
0.09	0.38	3.8	36.4	43.5	3.8	36.4	3.8	51.0	51.0	3.8	43.5	3.8	43.5	34.4	4.1	69.9	4.2	69.9	3.5	7.4	70.7	4.3
0.08	0.39	3.9	37.4	44.5	3.9	37.4	3.9	52.4	52.4	3.9	44.5	3.9	44.5	35.4	4.2	72.1	4.3	72.1	3.2	7.6	72.6	3.8
0.07	0.40	4.0	38.2	45.5	4.0	38.2	4.0	53.8	53.8	4.0	45.5	4.0	45.5	36.4	4.3	74.3	4.4	74.3	2.9	7.8	74.5	3.6
0.06	0.41	4.1	39.2	46.5	4.1	39.2	4.1	55.2	55.2	4.1	46.5	4.1	46.5	37.4	4.4	76.5	4.5	76.5	2.6	8.0	76.4	3.2
0.05	0.42	4.2	40.1	47.5	4.2	40.1	4.2	56.6	56.6	4.2	47.5	4.2	47.5	38.4	4.5	78.7	4.6	78.7	2.3	8.2	78.3	2.9
0.05	0.43	4.3	41.1	48.5	4.3	41.1	4.3	58.0	58.0	4.3	48.5	4.3	48.5	39.4	4.6	80.9	4.7	80.9	2.0	8.4	80.3	2.5
0.04	0.44	4.4	42.0	49.5	4.4	42.0	4.4	59.4	59.4	4.4	49.5	4.4	49.5	40.4	4.7	83.1	4.8	83.1	1.7	8.6	82.2	2.1
0.03	0.45	4.5	43.0	51.6	4.5	43.0	4.5	60.8	60.8	4.5	51.6	4.5	51.6	41.4	4.8	85.3	4.9	85.3	1.4	8.8	84.1	1.8

Fig. 3.13 は、(3) - (6) の式から求めた風速 3-10m/s 下における受風面積 1.5 m²の風車特性曲線に、(9) - (12) の式から求めたポンプ特性直線を重ねたグラフを示した。風車特性曲線とポンプ特性直線とが交わる点は、送気の回転数と最大トルクを表す。風速 3m/s 及び 4m/s では交点が求められなかったことから、その風速は実証試験地で送気できないと推察された。

風車特性曲線とポンプ特性直線の交点は、風速 5m/s, 6m/s, 7m/s, 8m/s, 9m/s 及び 10m/s 下において、回転数・トルクが各々 10rpm・2.7Nm, 24rpm・3.2Nm, 38rpm・3.3Nm, 51rpm・3.6Nm・64rpm・3.7Nm 及び 74rpm・3.9Nm となった。各交点における風速と回転数、及び、風速とトルクの関係から、受風面積 1.5 m²の風車で空気をエアープンプで水深 4.5m まで送気するシステムの設計ラインを求めた。風速と回転数、風速とトルクの設計ラインは、Fig. 3.14 に示したとおり、いずれも直線的な関係を示すため、相関直線を求めた結果、次式 (13), (14) のとおりとなった。

$$R_s = 12.94v - 53.57 \quad (\text{決定係数 } R: 0.99) \quad (13)$$

$$T = 0.23v + 1.68 \quad (\text{決定係数 } R: 0.97) \quad (14)$$

式 (13) に示した設計ラインからは、風速が 1m/s 速くなるに従って、回転数が約 13rpm 増加するとみなされ、この割合で揚水量が増加すると考えられた。

また、本式に風速 4.3m/s を当てはめた場合、回転数が 2rpm と計算され、この風速下でも揚水する可能性が考えられた。

式 (8) に示した設計ラインからは、風速が 1m/s 速くなるに従って、トルクが約 0.23Nm 増加するとみなされた。

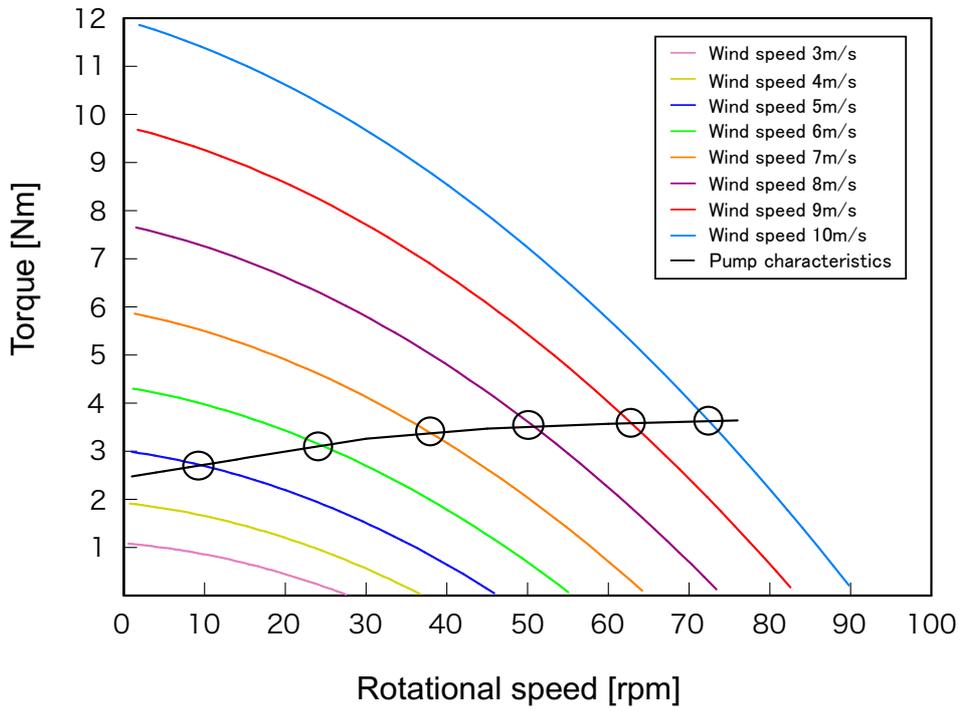


Fig. 3.13 Relationship between rotation speed and torque at each wind speed and pump characteristics.

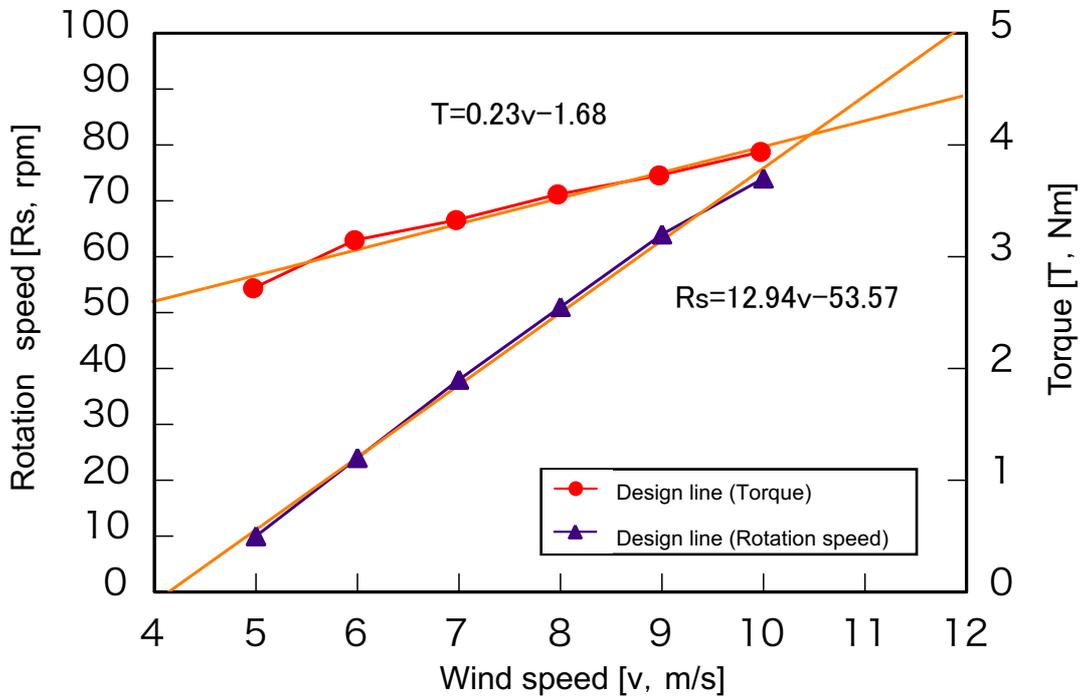


Fig. 3.14 The design lines of wind speed-rotation speed and wind speed-torque of the pumping system.

3.3 実証実験

3.3.1 揚水システム

実証実験地の青森県津軽半島沿岸の漁港の岸壁へローテーション風車を用いた揚水システムを設置し、2.4 風洞における実験（Ⅱ）による空力性能評価及び 3.1.2.2 で得られた揚水システムラインと自然状況下における揚水性能の比較検討を行った。

3.3.1.1 使用風車

使用するローテーションフロー風車は、直径 1m、高さ 1.36 m である (Fig. 3.15)。シャフトが長くなることにより、風車が不安定に回転することを懸念し、高さ 0.68m の風車を 2 基製作し連結した。ブレードは、2.5 において実験に供したゴム引布（帝国繊維社製 TH5, 0.57mm 厚）を使用し、片端をドットボタンで留め、幅 0.25m、高さ 0.68m のものを 16 枚装着した。風車のフレームはステンレス製で、風荷重、積雪荷重、地震荷重、風車荷重を考慮した建築基準法を参考に、構造安定計算を踏まえて設計した。

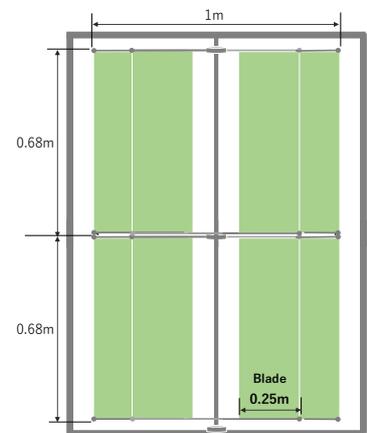


Fig. 3.15 Side view of a wind turbine.

3.3.1.2 実験装置及び実験方法

実証実験地の漁港岸壁に設置した揚水実証実験計測機器・装置を個別に説明する (Fig. 3.16)。

- ① 3.1.1.1 に示した使用風車
- ② トルクメータ（ユニパルス製 UTMV-10Nm）
- ③ ベーンポンプ（AQUASYSTEM 製 ハンドロータリーポンプ HRP-25Ⅲ）
- ④ データロガー（CAMPBELLSCIENTFI 製 CR300）

- ⑤ 水槽（アース製 KF-1000S 長さ 181cm, 幅 91cm, 深さ 70cm）
- ⑥ 風向風速計（Young 製 5103）



Fig. 3.16 Overall view of the measurement equipment and apparatus for the demonstration experiment.

海水面からベーンポンプの吐き出し口までの高さは約 2.2m であるため、揚程を 2.2m とし、自然風によって、風車が揚水回転している場合の風洞実験と揚水システム設計との比較を行った。実証実験によるデータ取得は、2020年3月19日19時から開始したが、3月20日14時30分にポンプ吐き出し口から水とともに空気の流出が確認されたため、ポンプの機能異常とし、データ取得完了時間とした。この間のトルク、回転数、風速及び風向のデータは、1秒間にデータロガーに記録した。設置及び設定のため、風車、計測機器・装置に触れた時間のデータは省いた。

3.3.1.3 実験結果

1) 風洞実験(Ⅱ)との比較

Fig. 3.17 は、1 分間における風速の平均値、回転角速度及びトルクの平均値を用いて、周速比及びパワー係数を算出し、周速比に対するパワー係数の変化と、2.4.4 の風洞実験の空力性能曲線を示した。パワー係数の最大値は、周速比 0.27 で 0.038 となっており、性能曲線に近い計測値も見られるが、周速比 0.12 でパワー係数の値に 0.021 ほどの差異が現れ、ばらつきが見られる。

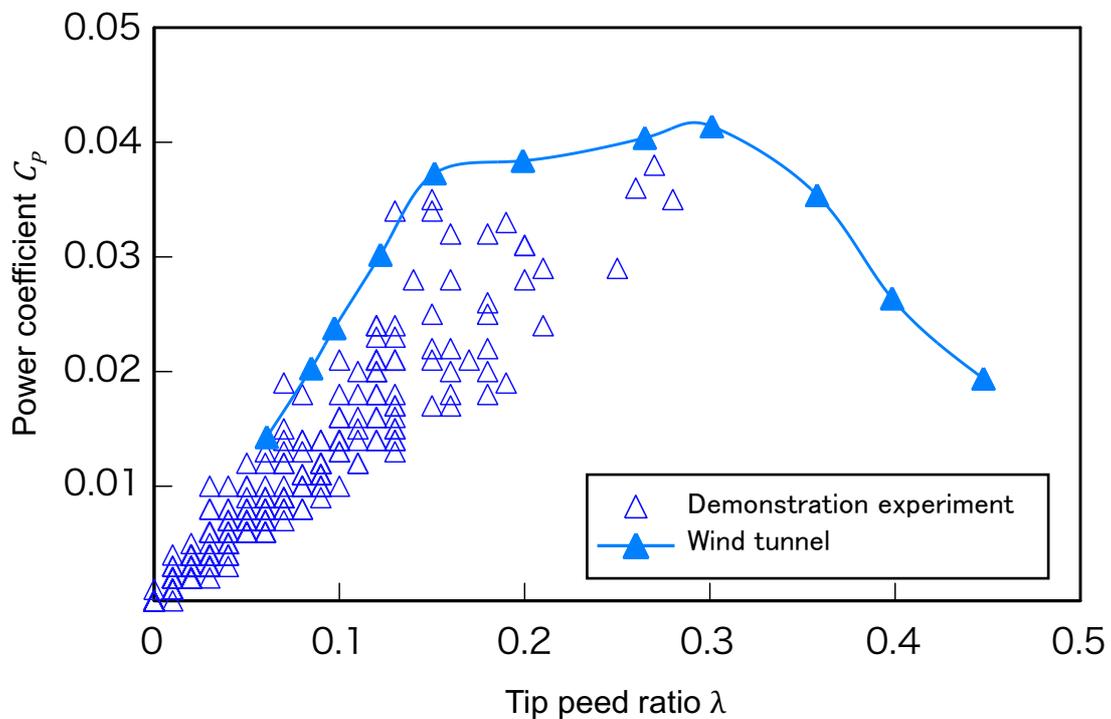


Fig. 3.17 Relationship between tip speed ratio (λ) and power coefficient (C_p) of the 1-minute average data measured in demonstration experiment (\triangle) and wind tunnel experiment (\blacktriangle).

2) 揚水システム設計ラインとの比較評価

Fig. 3.18 は、1 分間における平均風速値と回転数及び 3.1.2.2 で得られた回転数に対する揚水システム設計ライン式 (7) を示した。最大値は、風速 7.8m/s で 37.5rpm となり、設計ラインに近い計測値が見られた。風速 3m/s から回転数 5rpm の計測値が見られ、風速 4m/s より低い風速で風車が回転していた。風速 4m/s では設計ラインより回転数が高い数値もあったが、それ以上の風速では設計ラインに近いもしくは下振れした計測値が見られた。また、平均風速 7m/s で計測値に回転数に 21rpm の差異が現れ、ばらつきが見られた。

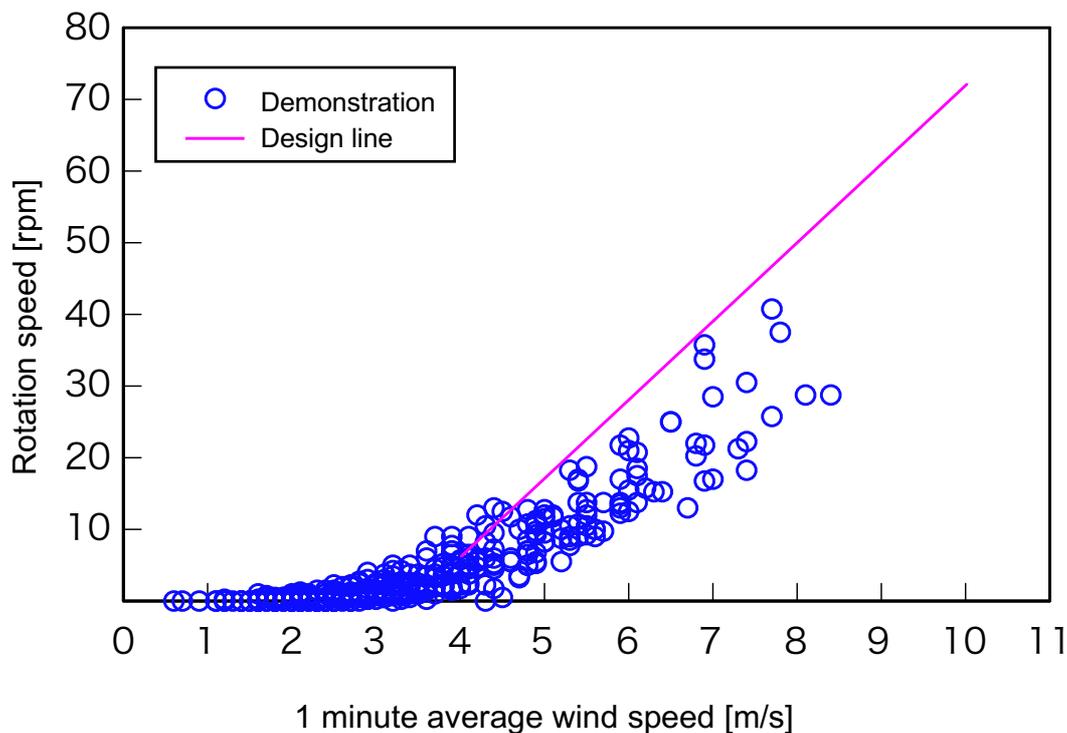


Fig. 3.18 Relationship between wind speed and rotation speed of the 1-minute average data measured in demonstration experiment (○) and design line.

Fig. 3.19 は、1 分間における平均風速値と回転数及び 3.1.2.2 で得られた回転数に対する揚水システム設計ライン式 (8) を示した。最大値は、風速 7.7m/s で 3Nm となり、設計ラインに近い計測値が見られた。風速 3.7m/s で設計ラインに近い計測値が得られ、それ以上の風速では、設計ラインに近いもしくは下振れしている計測値が見られた。また、平均風速 6m/s において計測値に 0.9Nm の差異が現れ、ばらつきが見られた。

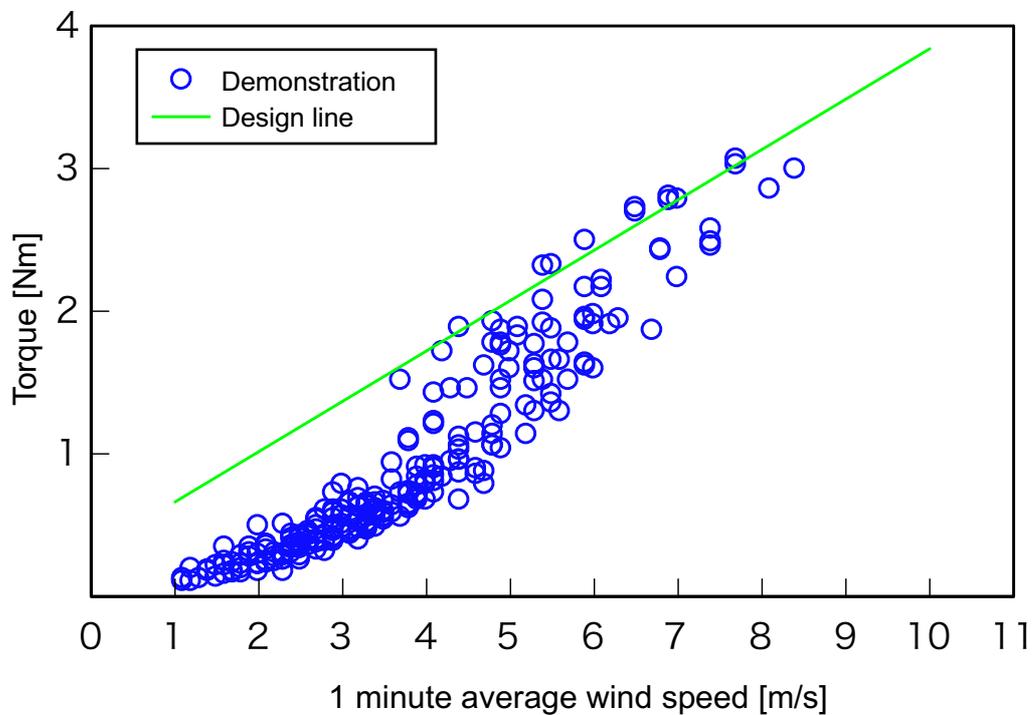


Fig. 3.19 Relationship between wind speed and torque of the 1-minute average data measured in demonstration experiment (○) and design line.

3.3.1.4 考察

実証実験にて揚水システムの設計ラインと 1 分間の平均風速と回転数及びトルクの比較を行なったところ、回転数は、揚水システムの設計ライン式 (7) を用いた計算から、風速 4m/s から風車が回転すると示唆されたが実証実験計測値では風速 3m/s から回転していた。計測値は設計ラインから近い値が見られたが、下振れした値も見られた。トルクは、風速 3.7m/s で設計ラインに近い値が見られ、それ以上の風速では、近傍している値と下振れしている値が見られた。また、同じ平均風速値に対して回転数及びトルクの計測値にばらつきが見られた。

Fig. 3.20 は平均風速 3.7m/s において回転数 9rpm を観測した 2020 年 3 月 20 日 2 時 54 分の 1 分間における風速変動と回転数の積算値を示した。平均値が 3.7m/s であっても風は変動しており、瞬間的には風速 7.3m/s を計測し、これにより風車が回転していることがわかる。また、風速 4m/s を越える計測値に伴い、回転数の増加も確認でき、揚水システムのカットイン風速が設計通り 4m/s である事も確認できた。

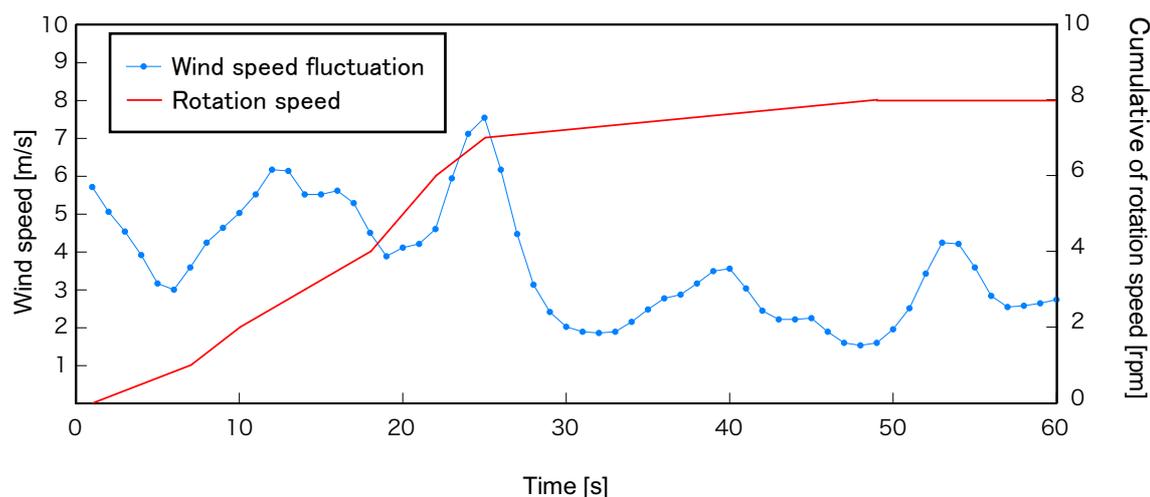


Fig. 3.20 Changes of wind speed and cumulative number of rotations measured in the 1 minute demonstration experiment from 2:54 to 2:55, March 20, 2020.

Figs. 3.21, 3.22 は平均風速 6m/s において 1.6N/m 及び 2.5N/m となった 2020 年 3 月 20 日 2 時 30 分及び 2 時 42 分の 1 分間における風速変動とトルク変動、回転数の積算値を示した。

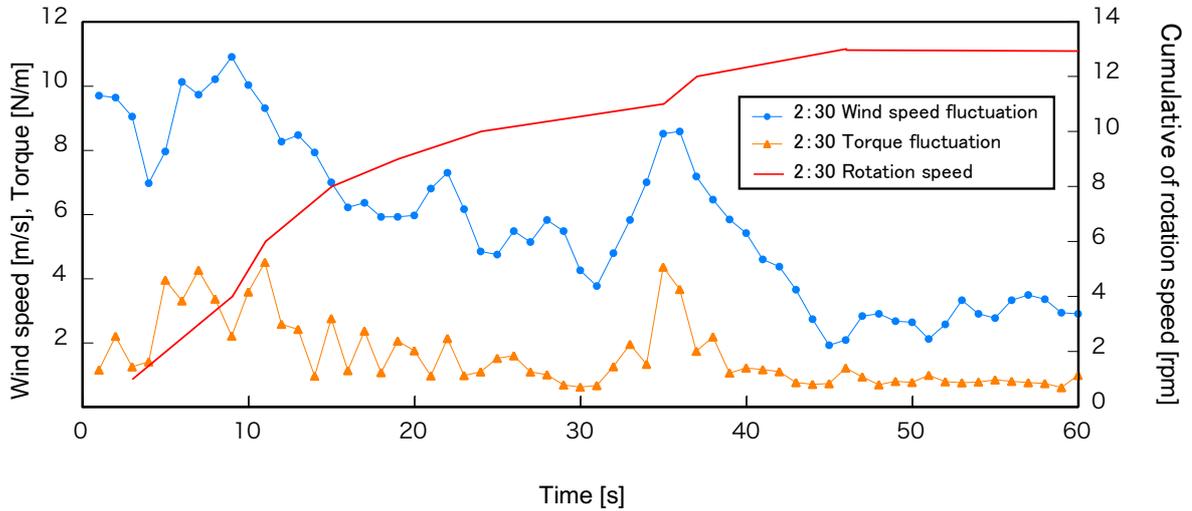


Fig. 3.21 Changes of wind speed, rotation speed and torque measured in the demonstration experiment from 2:30 to 2:31, March 20, 2020.

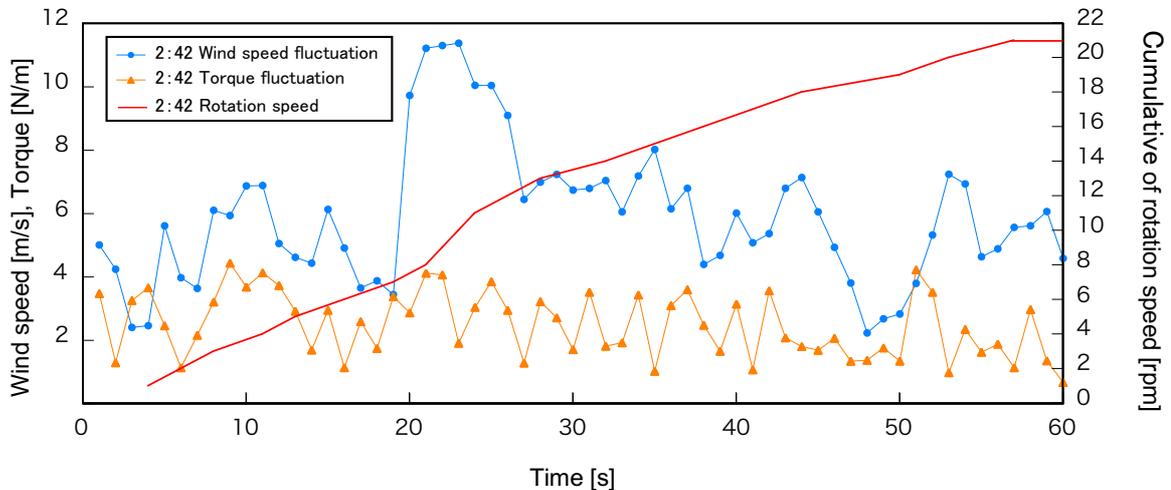


Fig. 3.22 Changes of wind speed, rotation speed and torque measured in the demonstration experiment from 2:42 to 2:43, March 20, 2020.

どちらも風速変動に伴いトルクは変化している。Fig. 3.21 では 9 秒に風速のピークがあり、その後低下傾向が見られると同時にトルク変動も低下、カットイン風速 4m/s 以下の風速は 30 秒からの 1 秒間と 44 秒からの 16 秒間であるのに対し、Fig. 3.22 では、23 秒に風速のピークがあり、カットイン風速 4m/s 以下の

風速は区間内に 2 秒間, 1 秒間, 1 秒間, 5 秒間と不規則に現れた。このように、一様ではない風速変動に対する風車の応答性は複雑であり、さらに 47 秒から 51 秒において、風速 4m/s 以上から風速 4m/s 以下に変動しているが回転数が 1 増加しており、慣性モーメントが影響していると考えられ、トルクの計測値にも関与していると推察される。回転数の計測値は、2 時 30 分においては 13rpm, 2 時 42 分においては 22rpm と、トルクの平均値の場合と同様に 2 時 42 分の方が大きく、妥当な風車の応答性が確認された。同じ平均風速に対してトルク、回転数の計測値のばらつきは Fig. 3.17 で示した周速比に対するパワー係数のばらつきにも影響したことが考えられる。このことから、揚水ポンプの能力測定実験、風洞実験で導出した設計ラインと、実証実験の結果で見られる差は、自然風における風の乱れや風速変動に対する風車の応答性の影響もあるものの、傾向は類似し、設計ラインに近い回転数やトルク値が確認でき、整合性が得られたと考えられる。

2020 年 3 月 20 日 14 時 30 分に、ポンプの吐き出し口から水とともに空気の流出が確認されており、このポンプの機能異常を発見した時の時刻をデータ取得完了時刻とした。原因は、長時間の運転によりポンプの摺動部 (Fig. 3.23) が摩耗し、僅かな隙間が生じたことによるもので、ポンプが回転し海水を吸引する時、ポンプ内の陰圧が限界値に達するとこの隙間を介して空気が浸入し、結果として吐出し口から海水とともに空気が流出したと断定した。これにより、ポンプ一回転あたりの揚水量の低下を引き起こし、揚水時の必要トルクの低



Fig. 3.23 Photo shows sliding part of the pump using in the air pumping system pictured on March 20, 2020.

下や、回転数の増加が起こることを意味し、風速が大きいほど影響が顕著に表れると予想された。しかし、Fig. 3.19 で設計ラインに対してトルクの低下は確認されるものの、Fig. 3.18 に示した回転数は設計ラインを上回る計測値はなく、ポンプに空気の進入は認められるものの、その影響は僅かと考える。

今回使用したベーンポンプは、揚程 2m までと規定されているが、押上式の揚水実験において揚程 5.7m、屋内実験における揚程 2.4m の吸上げ式揚水実験で揚水可能揚程幅と耐久性の確認をし、本実証実験においても使用した。しかしながら、ポンプ内に空気が進入する異常が見られた。よって、今後使用していく際には、隙間が生じ空気が進入しないように、ポンプ自体を水没させるなど、空気の進入を阻止する工夫が必要と考えられた。

3.3.2 送気システム

実証実験地の青森県津軽半島沿岸の漁港の岸壁へローテーション風車を用いた送気システムを設置し、3.2.2.2 で得られた送気システム設計ラインと自然状況下における送気性能の比較検討を行った。

3.3.2.1 使用風車

使用するローテーションフロー風車は、3.1.2 でも触れたように、直径 1m、高さ 1.5 m である。シャフトが長くなることにより風車が不安定に回転することを懸念し、高さ 0.75m の風車を 2 基製作し連結させた。ブレードは 2.4.1 と同様（帝国繊維社製 TH5、0.57mm 厚）で 2.5 と同様に片端をドットボタンで留め、幅 0.25m、高さ 0.68m のものを 16 枚装着した（Fig. 3.24）。風車のフレームはステンレス製で風荷

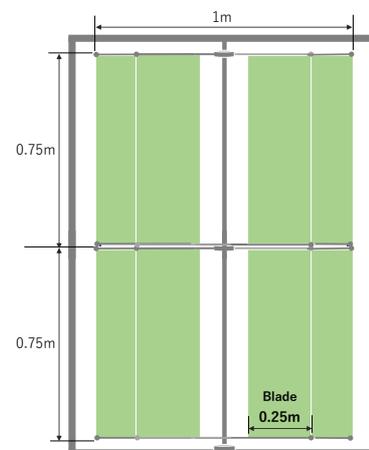


Fig. 3.24 Side view of a wind turbine.

重，積雪荷重，地震荷重，風車荷重を考慮した建築基準法を参考に，構造安定計算を踏まえて設計した。

3.3.2.2 実験装置及び実験方法

Fig. 3.25 は，漁港胸壁に設置した送気実証試験計測機器・装置全体を表わしたものであり個別に説明する。

- ① 使用風車であり 3.3.1.1 に示したとおりである。
- ② トルク・回転数計測機器（ユニパルス製 UTMV-10Nm），クランク機構（連桿比 3.5，バランスウェイト 360g），ピストン式エアーポンプ（キジマ製エアーポンプ 302-318）が収納してあるステンレス製のボックス。（Fig. 3.26）
- ③ データロガー（CAMPBELLSCIENTFI 製 CR300），密閉型バッテリー（EnerSys 製 Genesis NP24-12BFR）が収納してあるプラスチック製のボックスである。
- ④ 風向風速計（Young 製 5103）
- ⑤ 海底に空気を送る耐圧ホース（プラスチック製，内径 19mm，外径 26.5mm）



Fig.3.25 Photo shows the exterior view of facility of demonstration experiment. ① wind turbine; ②, storage box of piston pump; ③, data logger box; ④, anemometer; ⑤, air hose.



Fig. 3.26 Inside view of the piston pump storage box.

ピストン式エアポンプの空気吐き出し口は漁港胸壁にありホースを通り、海面から海底まで水深約 4.5m へ空気を送る。自然風によって風車が回転し、水深 4.5m へ送気している時の能力計測を行った。実証実験によるデータ取得時間は 2021 年 10 月 27 日 15 時 30 分-11 月 4 日 14 時 00 分までとした。この時間内のトルク、回転数、風速及び風向のデータは 1 秒間にデータロガーに記録し、風車、計測機器・装置に触れている時間のデータは省いた。

3.3.2.3 実験結果

Fig. 3.27 は、1 分間における平均風速値と回転数及び 3.2.2.2 で得られた回転数に対する揚水システム設計ライン式 (13) を示した。最大値は、風速 15m/s で回転数 109rpm と設計ラインから下振れした計測値が見られた。風速 3m/s にお

いては回転数 10rpm と設計ラインを下回る風速においても風車が回転していた。風速 4m/s-風速 8m/s にかけては，設計ラインに対して上振れしていたが，風速 9m/s-10m/s にかけて下振れした計測値が多くなる傾向が見られた。また，風速 6m/s で計測値に回転数 29rpm の差異が現れ，ばらつきが見られた。

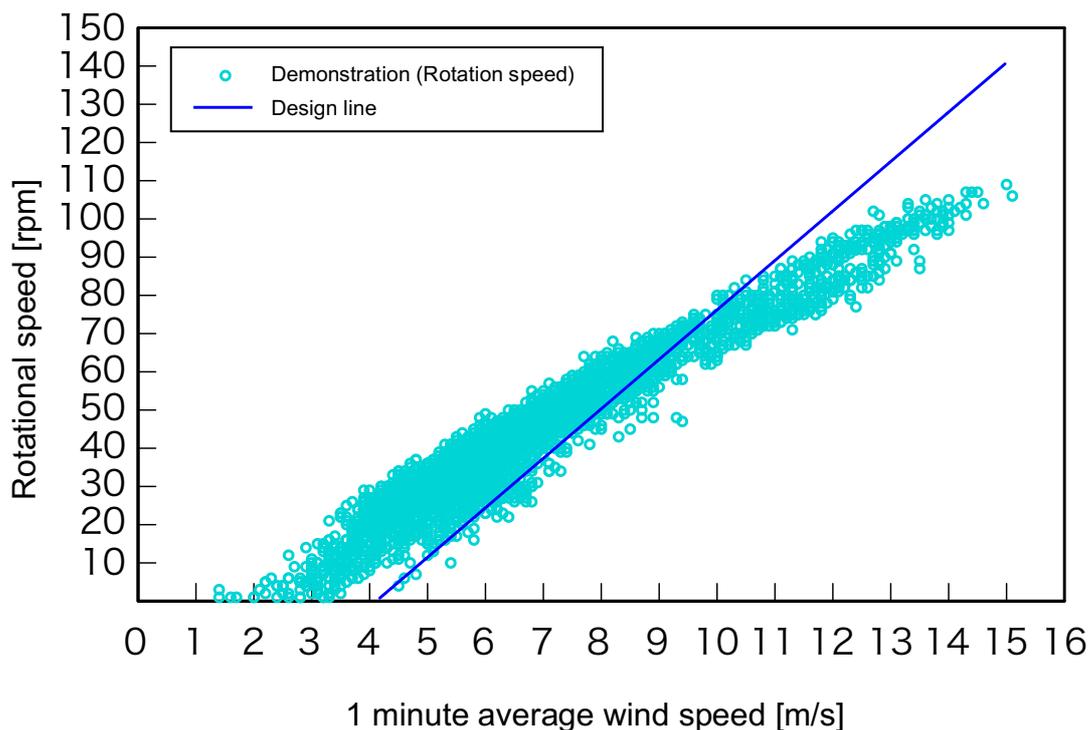


Fig. 3.27 Relationship between wind speed and rotation speed of the 1-minute average data measured in demonstration experiment (○) and design line (-) .

Fig. 3.28 は，1 分間における平均風速値とトルクの最大値及び 3.2.2.2 で得られたトルクの送気システム設計ラインを示した。トルクの最大値は風速 13m/s で 5.3Nm と設計ラインから上振れした計測値が見られた。風速 1.7m/s ではトルク 2.5Nm と設計ラインを下回る風速においても送気に必要なトルクの計測値が見られた。風速 1m/s-7m/s にかけては，設計ラインに対し上振れ，下振れしている

計測値が見られたが、それ以降の風速では上振れしている計測値が多くなる傾向となった。また、風速 7m/s で計測値に 2.2Nm の差異が現れ、ばらつきが見られた。

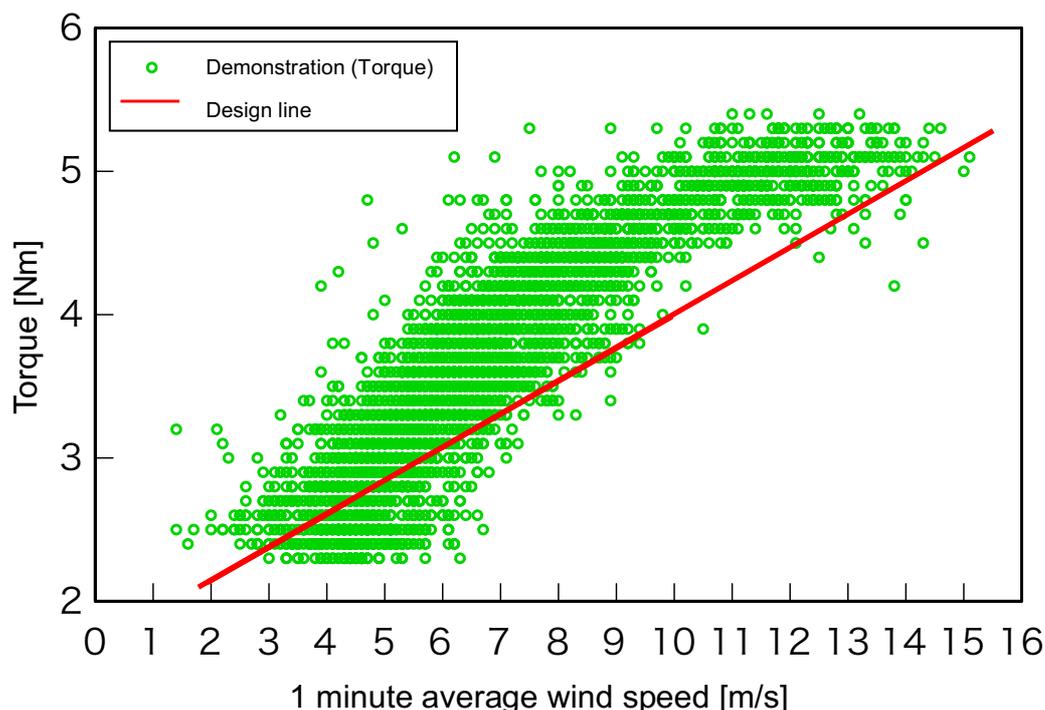


Fig. 3.28 Relationship between wind speed and torque of the 1-minute average data measured in demonstration experiment (○) and design line (-) .

3.3.2.4 考察

実証実験にて送気システムの設計ラインと 1 分間の平均風速と回転数，最大トルクの比較を行なったところ回転数は，揚水システムの設計ライン式 (13) を用いた計算から，風速 4.3m/s から風車が回転すると示唆されたが，実証実験計測値では風速 3m/s から回転していた。風速 1m/s-風速 8m/s までは設計ラインを上振れする計測値が見られたが，風速 8m/s からは下振れする計測値が多くなった。トルクにおいては風速 1m/s-15m/s において設計ラインより上振れする計測

値が約 90%となった。設計ラインより高いトルクであったにもかかわらず、風車が回転し、送気をしていたことから、送気に必要なトルクに対して風車が応答していたと考えられ、実証実験で得られたトルクの計測値は実証実験地における送気ポンプの特性であると推察された。

実証実験で計測されたトルクは風速 1m/s-15m/s において設計ラインより上振れする傾向がみられた。実証実験中、クランク機構の回転軸が水平方向に振動しながら回転している様子が見られた。振動は、ピストン運動中のシャフトに伝わり、シャフトが横揺れしながらピストン運動をし、シャフトホルダとの間に摩擦を発生させ、摩擦音を発していた。摩擦音は風車の回転数が増すことに大きくなる傾向がみられた。このことから、クランク機構の振動によって生じたシャフトの摩擦により、送気に必要なトルクが大きくなったと考える。このことは、Fig.3.27 より風速 10m/s 以上から回転数の計測値が設計ラインより少なくなったことから、シャフトとシャフトホルダの摩擦力の増加によりトルクが大きくなったことで、回転数が減少したと考えられる (Fig. 3.29)。

しかし、設計ラインに近いトルク計測値もあることから、クランク機構の振動で生じるシャフトの摩擦力は一定ではない。このことから、実証実験において、トルクの計測値が設計ラインより大きくなった原因は一定ではないクランク機構

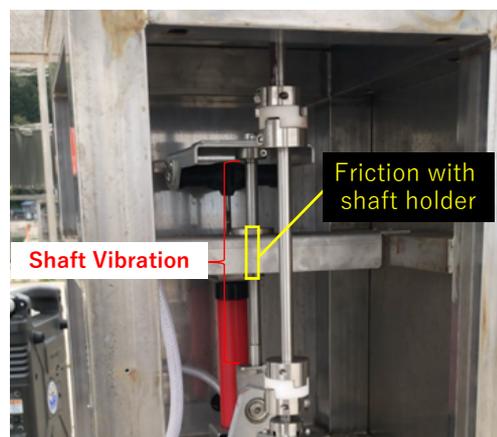


Fig. 3.29 Photo shows friction part.

の振動で生じるシャフトの摩擦力によるものと推察された。また、実証実験ではクランク機構の振動を防ぐために連桿比 3.5 にしていたが、回転数の増加によりクランク機構の振動が大きくなり、トルクが増加し、回転数の減少が見られたため、振動を防ぐためには連桿比を大きくする工夫が必要と考えられた。

第4章 風力エネルギーの水産生物培養への適用

第3章において、ローテーションフロー風車に取り付けたベーンポンプの揚水特性及びピストン式エアポンプの送気特性を検討した結果、風車を水産資源培養に利用できる可能性が示唆された。

本章では、風力エネルギーをアマモ種苗生産のための海水の汲み上げ、及び、漁港水域にナマコを閉じ込め養殖するための構造物への送気の動力として、それぞれ水産資源培養への利用を実証するため津軽半島の津軽海峡沿岸にある漁港内に一連のシステムを構築し、効果を検証したので結果を論じる。

4.1 アマモ種苗生産

第3章3.3.1 揚水システムの実証実験と平行して、揚水された海水を利用し、スゲアマモの種苗生産を試みた。

4.1.1 方法

スゲアマモの種子採取は、「アマモ類の自然再生ガイドライン¹⁾」の方法に従った。2019年6月9日に陸奥湾沿岸野辺地町地先水深5m前後に二人のダイバーが潜水し、成熟した種子を形成したスゲアマモ *Zostera caespitosa* の花枝を約10kg（湿重量）採取した（Fig. 4.1）。花枝は採取後直ちに、青森市にある県営浅虫水族館に搬送し、濾過海水をかけ流した500ℓ角形水槽に2つのカゴに分けて収容した。10月23日には、花穂の包皮が自然に腐敗し、種子が水槽の器底に脱落したため、目合い2mmのステンレス製篩を用いて、種子を腐敗した花枝の茎や葉と分離し、夾雑物を除いた上で海水を含ませたガラス瓶に集めた。ガラス瓶ごと種子を弘前大学地域戦略研究所内の冷蔵庫中に運び、播種までの期間冷暗所で保存した。



Fig. 4.1 Seedling procedures of seagrass *Zostera caespitosa*. A-B, collection of flowering shoots by divers on June 6, 2021 on the coast of Noheji, Mutsu Bay; C, flowering spikes bearing seeds; D, seeds separation in the Aomori Prefectural Asamushi Aquarium on October 23, 2021; E-F, seeds collection; G, collected seeds in the bottle.

スゲアマモ種苗の育苗は、第3章 3.3.1 に示した揚水システムの実証試験地である津軽半島の津軽海峡沿岸にある漁港で行なった (Fig. 4.2)。2020年1月15日に、高さ 27.5cm、幅 14cm のポリ乳酸製の生分解水切りネット (aisen, KA625) に 5, 6 個の砂利、次いで 200g 程度の砂を入れたのち、砂の中央に指で深さ 3 cm の孔を穿ち、スプーンで 10 粒程度のスゲアマモ種子を播種し、砂を被せた。スゲアマモを播種したネットを 12 個ずつ、側面に穴が空いた計 14 個の長さ 38cm、幅 26cm、深さ 8cm のプラスチックバスケット (ヒラヤマ化学工業, FIT バスケットワイド) に入れ、長さ 181cm、幅 91cm、深さ 70cm の 1 トン水槽 (アース, KF-1000S) の器底に置いた。

水槽に海水を満たしたのち、揚水システムのポンプの配水が水槽に注ぐようホースを取り付けた。水槽の海水が深さ 60 cm になるよう、水槽の排水部分に塩ビ管を立ち上げた。

2020年3月27日、4月14日、6月13日に各々、漁港に出向き、揚水の状況とスゲアマモの発芽及び実生の生長を観察した。また、地域の漁業者から、育苗状況を聞き取りした。



Fig. 4.2 Sowing procedures of seagrass *Zostera caespitosa* in the aquarium. A, gravel into the biodegradable nets; B, sand into the biodegradable nets additionally; C, sowing seeds into the sand in the nets; D, setting into the aquarium; E, seawater pouring into the aquarium; F, outside view of the seagrass culture system.

4.1.2 結果

水槽に播種したスゲアマモは、2020年3月27日に発芽が認められ、4月14日にはそれが草丈5cm程度に成長した。5月には漁業者から実生の成長が認められたと連絡があったため、6月13日に現地に出向いたところ、育苗に用いた12個のバスケットの全てに実生が認められた。実生は、各バスケットで4-12個の播種用ネットに観察された (Fig. 4.3)。

6月14日に8個分のバスケットを水槽から取り上げ、漁港水深4mの海底に潜水し、海底の砂泥中に実生を直接、あるいは、播種用ネットごと移植した。各播種ネットの実生の草丈は、最大10-15cmあった。実生の髭根は、複数の個体で絡み合う様子が認められた。一方、地下茎による栄養繁殖は、移植作業を通じて明瞭に観察できなかった。

揚水システムは、第3章に結果を示したとおり、育苗中であって風速3m/s以上の風があった場合、海水を汲み上げ水槽に配水した。ポンプ内に空気が入り込み、海水を汲み上げられない様子も認められたものの、本結果から揚水システムを用いてスゲアマモ種苗を育苗できることが確かめられた。

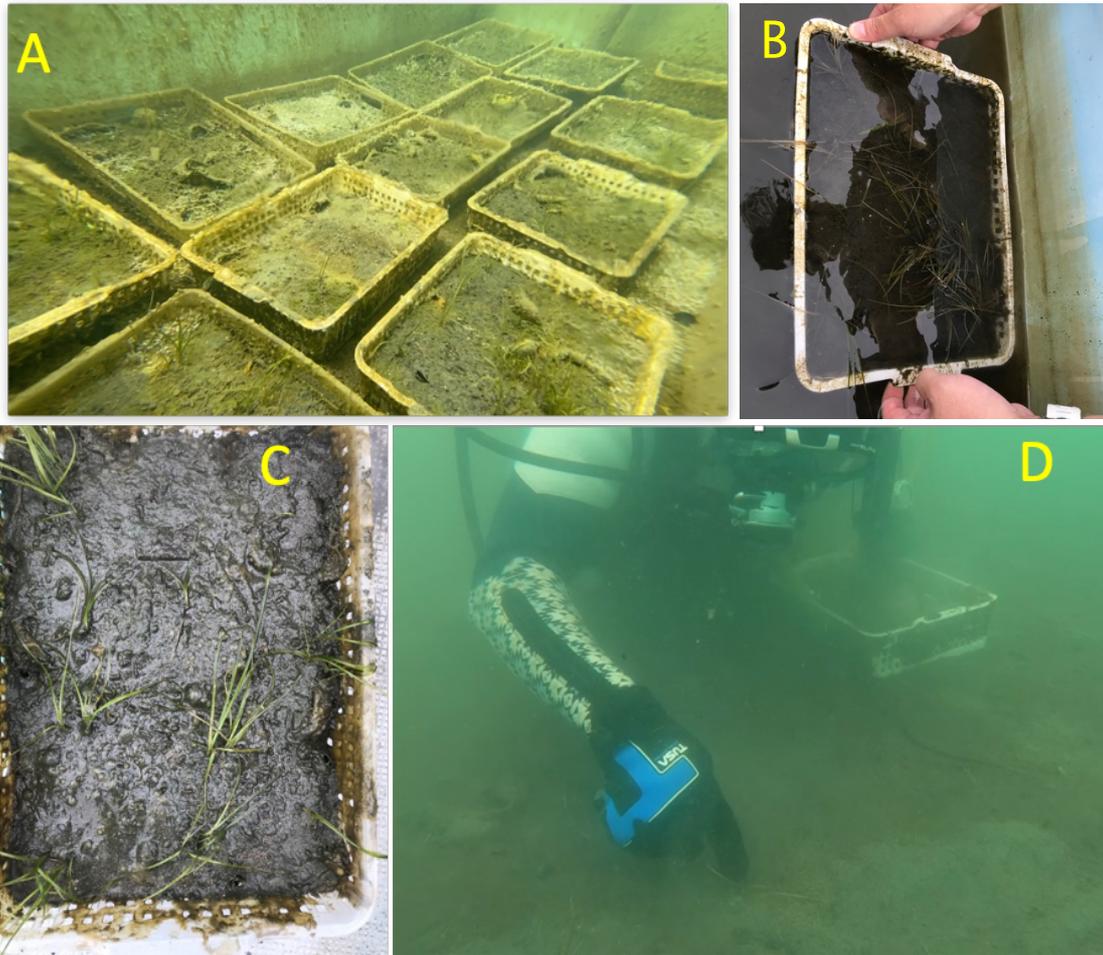


Fig. 4.3 Transplanting of vegetative shoots of seagrass *Zostera caespitosa* in the water area of the fishing port on July 14, 2021. A-C, vegetative shoots cultured in the aquarium; D, transplanting of vegetative shoots by the diver.

4.2 ナマコ養殖

ナマコ養殖用構造物に砂が溜まりにくい形状を設計し、安全性の検討をしてから、実証実験地にナマコ養殖システムを構築し、第3章 3.3.2 送気システムの実証実験と平行して、送気された空気を利用し、ナマコの養殖を試みた。

4.2.1 養殖用構造物の形状検討

4.2.1.1 方法

1) 養殖用構造物の形状検討

実験は、国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所の鉛直循環振動流水槽（以下、「振動流水槽」）及び造波水槽で実験縮尺を 1/10 として行なった。

漁港開口部には、入射波によって振動流が発生する。このため、構造物の形状と砂の堆積や洗掘、空気層中の空気の漏洩などとの比較には、振動流水槽を用いることとした。水槽は、観測部の長さ、幅及び高さが各々1.2m、0.5m及び0.7m あって、実証試験を行う漁港開口部の水深である約4mの実験縮尺から水深を0.4mとした。水槽に予め敷き詰められていた中央粒径値 $150\mu\text{m}$ の砂を厚さ18cmになるよう均したのち、水路の中央部に水槽幅と同じ0.5m幅の3Dプリンターで製作したプラスチック樹脂製の模型を設置した。模型の断面は、構造物の安定性と空気層の容積節約を考慮し、Fig. 4.4 に示したように、法面の傾斜角が 30° の山型の形状とした。

模型は、高さを60mmとし、天端部 (Fig. 4.4, A)、港内側立上げ部 (Fig. 4.4, B)、港外側立上げ部 (Fig. 4.4, C)、空気層直下から港内方向にかけての底盤部（以下、「底盤部」、Fig. 4.4, D）の4部位については各々10-40mm、10-30mm、10-20mm、30-60mmの範囲とし、空気層の断面積 (Fig. 4.4, E) は $480\text{-}700\text{mm}^2$ の

範囲とした。なお、港内側立上げ部が高いほど引き波による空気層直下への砂の移動や空気の漏出が低減する可能性が、天端が長いほど模型近傍での剥離流が模型から離れる可能性が、さらに、底盤が長いほど港内側での砂の移動が小さくなる可能性が予想されたため、各々が異なるサイズを組み合わせた 9 種類 (Model I -IX) の模型を供試した。各模型の断面を Fig. 4.5 に、各部位のサイズと空気層の断面積を Table 1 に示した。

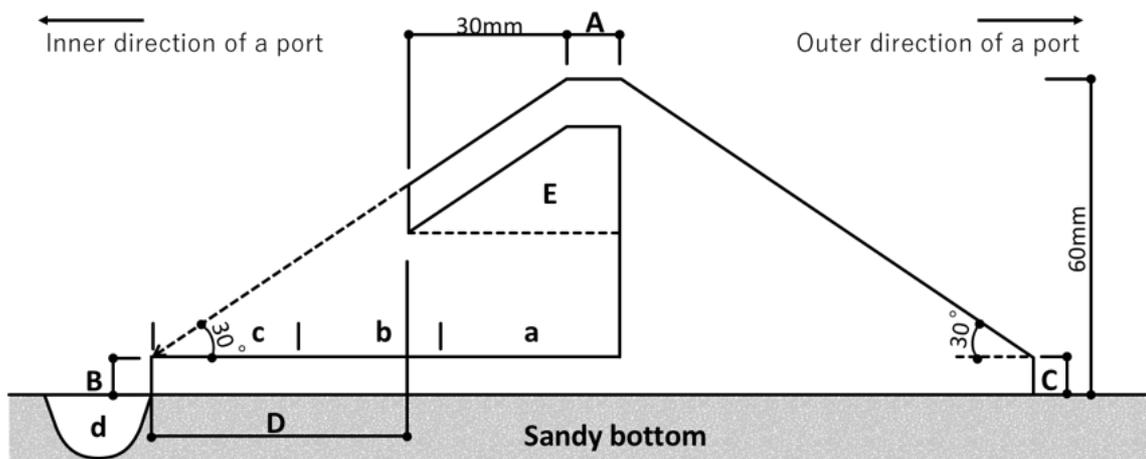


Fig. 4.4 The parts of the model that were examined in different sizes (A-E) and the location of observation points (a-d) for sand accumulation or scouring. The names of the parts of the model with different lengths are as follows: A, width of top end; B, height of inner direction of a port; C, height of outer direction of a port; D, width of basal plate; E, air layer.

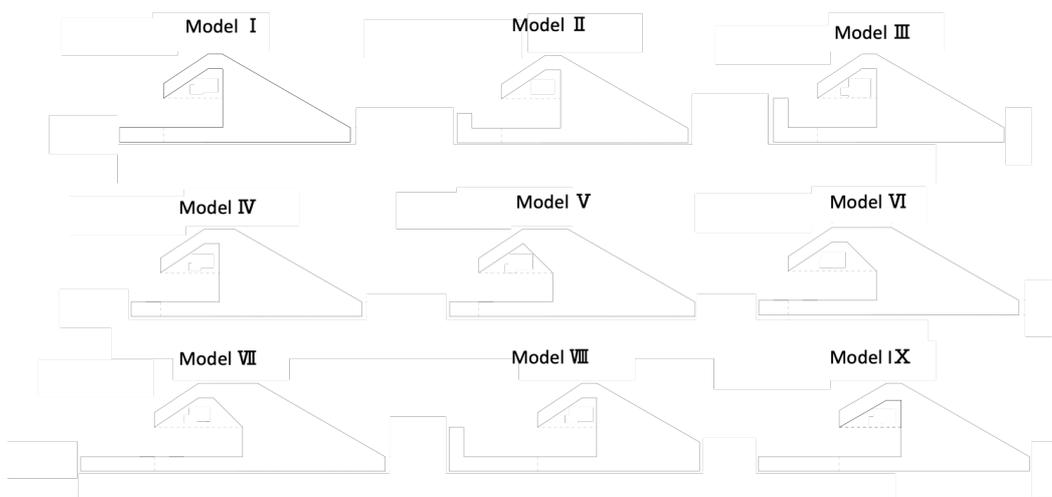


Fig. 4.5 The cross-sectional views of each model used in the oscillation water tank experiment.

Table 4.1 The sizes of A-D parts and cross-sectional areas of air layers (E) of the models used in circulation water tank experiment. The name and location of A-E in this table are shown in Fig. 4.4

Type of Model	Size (mm)				Cross-sectional area of air layer (E, mm ²)
	A	B	C	D	
I	10	10	10	30	500
II	10	20	10	30	500
III	10	30	10	30	500
IV	20	10	10	20	500
V	30	10	10	20	500
VI	40	10	10	20	700
VII	40	10	10	50	700
VIII	10	10	20	60	500
IX	10	10	10	55	480

水槽の側壁と模型に隙間を生じないように模型両端の縁辺部に薄くスポンジテープを貼り付け、水槽の砂層上に水平になるよう模型を設置し、エアブローを使って空気層全体に送気した。水の濁りが収まり水面が静止したのち、水平流速の振幅 0.4m/s、周期 3.0 秒の正弦振動流を 5 分間作用させた。実証実験を想定する津軽半島の東部にある 3 漁港における沖波 30 年確率波高・周期表²⁾に示される最大周期 (WN W9.0 秒から W10.0 秒) の平均値である 9.5 秒が、フルードの相似則で $1/\sqrt{10}$ であることから 3 秒に設定した。水平振幅の流速については水槽が開渠式であったため、水が溢れることなく実験できる最大振幅に設定した。なお、微小振幅波で周期 9.5 秒の場合、水深 4m で波長が 57.7m となり、海底で流速 1.26m/s ($0.4 \times \sqrt{10}$) が発生する現地の波高は 1.56m と計算された。従って、本実験条件は実海域においては周期が 9.5 秒、入射波高が約 1.6m の波に相当する。実験時間については 5 分と設定したが、予備実験において、最初の 5 分間までに砂の洗堀や堆積等で模型周辺の地形が大きく変化し、以後の変化は小さかったことから、5 分で傾向を把握できると判断したためである。底盤部 (Fig. 4.4, D) については、模型と水平になるよう設置したビデオカメラ

(SONY, FDR-AXP35) の画像から、空気層の直下の底盤 (Fig. 4.4, a), 底盤中央部分 (Fig. 4.4, b), 底盤港内端 (Fig. 4.4, c) に区分し、各々に堆積する砂の高さを、模型の港内側砂層 (Fig. 4.4, d) については洗掘深度を、空気層については残存部分の断面積 (Fig. 4.4, e) を求めた。実験は模型 Model I -IXのそれぞれについて、砂を均し、模型設置、空気層へ空気補填の後に水が澄むのを待って、正弦振動流を作用させて開始した。

造波水槽中で模型に人工イクラを置いて波動流を作用させたところ、模型周辺での流れが可視化できた。そこで、空気層直下に砂が堆積するメカニズムを把握するため、砂の堆積が最も少なかった形状の模型について、波動流を作用させ模型周辺での詳細な流れを観察した。供試した振動流水槽は、水路部の長さ、幅及び高さが各々70m, 0.7m 及び 2.0m であった。断面が Model IX (Fig. 4.5) と同様の天端部、港内側立上げ部及び港外側立上げ部が各々10mm, 底盤部が 55mm, 幅が水槽と同じく 0.7m とした模型の底面を長さ 0.45m, 幅 0.7m, 厚さ 10mm のプラスチック板に接着剤で貼り付けて水槽中央部に設置した。水槽には、流れをトレースするため、比重 1 を僅かに上回るよう調整した直径 2-3mm の人工イクラを模型上とその周辺に置いた。波動条件は、予備実験において周期 2-4 秒、波高 5-30 cmの組み合わせた規則波を作用させた結果、模型周辺での人工イクラの動きを最も明瞭に観察できた周期 3 秒、波高 30 cmとした。この条件の波動を作用させた場合、1 回目の波が模型に達してから約 5 秒後には空気層直下に人工イクラが移動する様子が観察されたため、この間のビデオカメラによる録画面像から、0.3-0.5 秒間隔で人工イクラの位置を確認することで模型周辺の流れを可視化した。

2) 養殖用構造物の安定性の検討

(1) 作用流体力の検討

実験は、株式会社西日本流体技研に設置されている、観測部の幅が 2.0m、深さが 1.0m、長さが 6.0m の 2 インペラ方式縦型循環回流水槽において行なった (Fig. 4.6)。前節で砂の堆積が最も少なかった Model IX について、実験縮尺が 1/6 の相似形模型を 3D プリンターで作成した。本実験に供した模型は、長さを 306.7mm、高さを 100mm とし、Fig. 4.4 に示す A, B, C 及び D の各部位の大きさを各々 16,7mm, 16.7mm, 16.7mm 及び 9.2mm, 空気層の断面積 (Fig. 4.4, E 部位) を 1,229mm² とした。また、模型の幅は 300mm とした。

水面変化の影響を受けないようにするため、回流水槽の水面全体に波抑さえ板を取り付けた。波抑さえ板の中央を円形にくり抜き、ターンテーブルを嵌め込むようにした。ターンテーブルの下面に上下が逆転するよう逆さに模型を貼り付けた。流れの二次元性を確保するため、模型の両端部に仕切り板を設置した。模型と仕切り板の間には、計測に影響がないように約 1mm の隙間を設け、多分力計を用いて流体力を求めた。計測は、サンプリング周波数 50Hz, サンプリング時間 30 秒で行い、それらの平均値を抗力 (F_x , kgf) とした。流速は、0.3-1.0m/s の範囲で、0.1m/s 間隔で設定した。事前に、ターンテーブルのみの抗力を計測し、その抗力を差し引いた値を模型の抗力とした。流速は、波抑え板の底面から 100mm までの流速分布を 20mm ピッチで計測し、その平均値を用いた。計測は、海域での実証試験を想定し、港外側から港内方向への流れと港内側から港外方向への流れの 2 方向について行った。計測した流体力から、以下の式により、抗力係数 C_D 及び、レイノルズ数 R_n を求めた。

$$C_D = \frac{F_X}{\frac{1}{2} \rho S U_{cwc}^2}$$

$$R_n = \frac{U_{cwc} L}{\nu}$$

F_X : 抗力 (kgf), ρ : 水の密度 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$),

S : ブロックの投影面積 0.03 m^2 (高さ 0.1m , 幅 0.3m),

U_{cwc} 回流水槽代表流速 (m/s), ν : 動粘度 (m^2/s),

L : 代表長さ 0.307 (m) 。

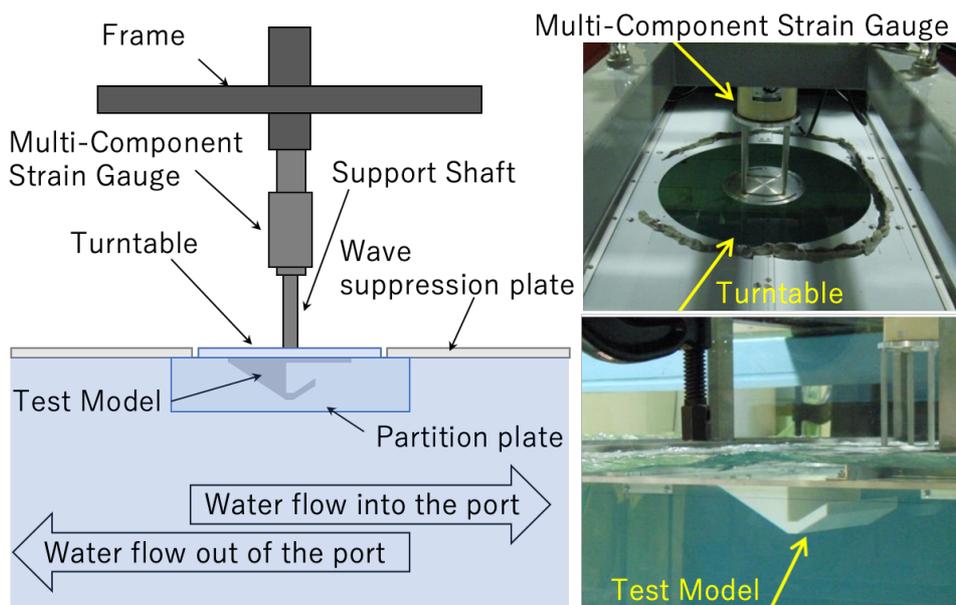


Fig. 4.6 Overview of the drag force measurement system.

(2) 構造物の安定計算

構造物の安定計算は、以下により求めた。

設計流速は、平成 28 年度青森県水産土木設計積算資料³⁾、青森県沿岸漁港沖波調査委託報告書（平成 18 年 2 月）²⁾にある龍飛から平館（石崎）の潮位表から設計波高を算出した。ブロック実質量，空気層の実質量，ブロックの射影面積，ブロックの図心，空気層の図心，ブロックの転倒中心距離，空気層の転倒中心距離については，設計図面（Fig. 4.7）から求めた。海底勾配は海図の等深線図から計算した。海水の密度は，浮体橋の設計指針（土木学会）⁴⁾に示される既報値を用いた。ブロックの密度，摩擦係数，安全率は，漁港・漁場の施設の設計参考図書（2015 年版）⁵⁾及び漁港・漁場構造物設計計算例⁶⁾に準拠した。

流体力(P)は，次式から求めた。

$$P = C_D \cdot A \cdot W_0 \cdot U^2 / (2g) \quad (1)$$

滑動の安全性については，次式から滑動安全率を求めて行った。

$$F = \frac{\{W_b \cdot (1 - w_0 / \sigma G) \cdot \cos \phi - P \cdot \sin \phi\} \cdot L_{vb} - W_e \cdot \cos \phi \cdot L_{ve}}{\{W_b \cdot (1 - w_0 / \sigma G) \cdot \sin \phi + P \cdot \cos \phi\} \cdot L_{ab} - W_e \cdot \sin \phi \cdot L_{ae}} \quad (2)$$

転倒の安全性については，次式から転倒安全率を求めて行った。

$$F = \frac{\mu \cdot \{W_b \cdot (1 - w_0 / \sigma G) - W_e\} \cdot \cos \phi - P \cdot \mu \cdot \sin \phi}{\{W_b \cdot (1 - w_0 / \sigma G) - W_e\} \cdot \sin \phi + P \cdot \cos \phi} \quad (3)$$

U : 設計流速 W_b : ブロック実質量 W_e : エア一部実質量
 σG : ブロックの密度 W_o : 海水の密度 C_D : 抵抗係数 μ : 摩擦係数
 ϕ : 海底勾配 A : ブロックの射影面積 LV_b : ブロックの図心
 LV_e : エア一部の図心 LA_b : ブロックの転倒中心距離
 LA_e : エア一部の転倒中心距離

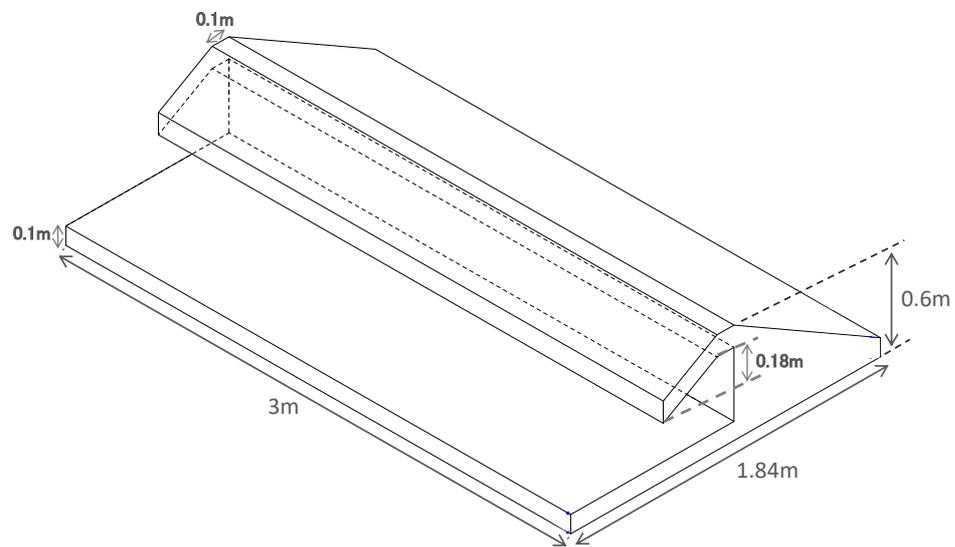


Fig. 4.7 The figure of the concrete block for culture sea cucumber.

4.2.1.2 結果

1) 養殖用構造物の形状検討

(1) 模型への砂の堆積

振動流水槽内の砂層上に置いた形状が異なる 9 種類の模型に、水平流速の振幅 0.4m/s、周期 3.0 秒の正弦振動流を 5 分間作用させた結果、模型の A-D の各部位の長さ と a-c の各部位に堆積した砂の厚さには、Table 4.2 に示す特徴的な関係が認められた。

模型の底盤上に堆積した砂の厚さは、天端に当たる A 部位が長い模型ほど、増す傾向が見られた (Fig. 4.8)。即ち、B 及び C 部位の長さがいずれも 10mm で、A 部位の長さが 10mm、20mm、30mm 及び 40mm と異なる Model I、IV、V 及び VI に堆積した砂の厚さは、空気層直下の底盤にあたる a 部位で各々 3mm、2mm、6mm 及び 11mm、底盤の中央部分に当たる b 部位では各々 1mm、3mm、7mm 及び 9mm であった。底盤の港内側端に当たる c 部位については、底盤に当たる D 部位の長さが 30mm 以上の模型でのみ観察したが、Model I で厚さ 1mm の砂の堆積が観察されたのみであった。同様に港内側の立上げ部に当たる B 部位が高い模型ほど、堆積した砂の厚さは、増す傾向が見られた。A 及び C 部位の長さがいずれも 10mm で、B 部位の高さが 10mm、20mm 及び 30mm と高さの異なる Model I、II 及び III に堆積した砂の厚さは、a 部位で各々 3mm、5mm、7mm、b 部位では各々 1mm、8mm、8mm であった。c 部位は、Model I で砂の厚さが 1mm であった。

また、堆積した砂は、港外側の立上げ部に当たる C 部位が高い模型で厚くなった。A 及び B 部位の長さがいずれも 10mm で、C 部位の高さが 10mm 及び 20mm である Model I 及び VIII に堆積した砂の厚さを比べると、a 部位で各々 3mm、5mm、b 部位で各々 1mm、4mm であった。

一方、堆積した砂は、底盤部である D 部位が長い模型ほど、薄い傾向が見られた。即ち、A, B, C の各部位の長さがいずれも 10mm で、D の長さが 30mm 及び 55mm である Model I 及び IX の模型に堆積した砂の厚さは、a 部位で各々 3mm, 1mm, b 部位でいずれも 1mm, c 部位で各々 1mm, 0mm であった。また、A, B, C の各部位が各々 40mm, 10mm, 10mm で、D 部位が各々 20mm 及び 50mm の Model VI 及び VII の 2 つの模型に堆積した砂の厚さは、a 部位で各々 11mm, 2mm, b 部位では 9mm, 1mm となり、顕著な差異が見られた。

本実験を通じて、砂が最も厚く堆積した模型は、供試した模型の中で A 部位の長さが 40mm と最も長く、D 部位の長さが 20mm と最も短い Model VI であった。また、砂の堆積が最も薄い模型は、供試した模型の中で A, B, C の各部位の長さが 10mm と最も短く、D 部位の長さが 55mm と最も長い Model IX であった。

Table 4.2 The sand accumulation thickness at the a-c points and sand scour depth at the d point of the models after 5 minutes oscillatory flow in the circulation water tank. Locations of a-d points are shown in fig. 4.4

Type of Model	Sand accumulation thickness (mm)			Sand scour depth (mm)
	a	b	c	d
I	3	1	1	7
II	5	8	-*	8
III	7	8	-	8
IV	2	3	-	7
V	6	7	-	7
VI	11	9	-	8
VII	2	1	0	6
VIII	5	4	0	6
IX	1	1	0	5

*, unmeasurable

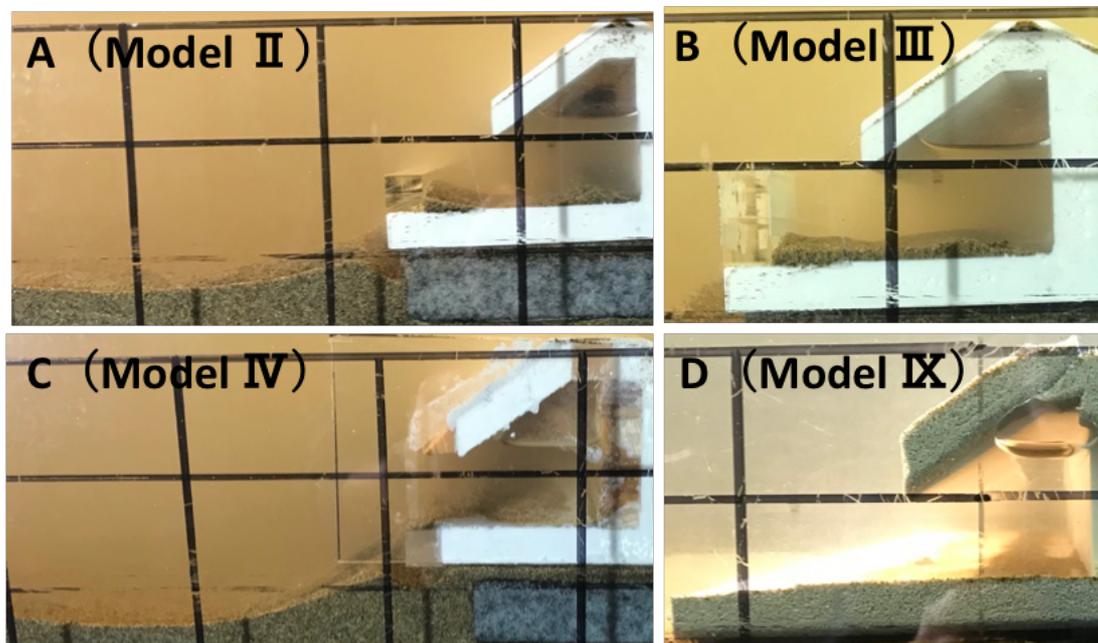


Fig. 4.8 Photos show the sand accumulation and air layer of four models after 5 minutes of oscillatory flow in the oscillation water tank.

(2) 模型周辺での砂の洗掘

振動流水槽内で水平流速の振幅 0.4m/s, 周期 3.0 秒の正弦振動を 5 分間作用させた結果, Fig. 4.8 に示すように, 模型の港内側立上げ部近傍 (Fig. 4.4, d) で砂の洗掘が見られた。

d 部位での砂の洗掘深度は, Table 2 に示したとおり, 5-8mm の範囲にあった。洗掘の深さと底盤の D 部位の長さの間には相関関係が認められた。即ち, D 部位が 50-60mm と比較的長い Model VII-IX の 3 種類の模型では, d 部位での砂の洗掘深度が 5-6mm の範囲を示した反面, D 部位が 20mm または 30mm と短い Model I -VI の 6 種類の模型では, d 部位での砂の洗掘深度が 7-8mm となり, Model VII-IX に比べ深い値を示した。

d 部位での砂の洗掘深度と A, B, C の各部位の長さとの間には, 明瞭な関

係は認められなかった。

(3) 空気層の変化

振動流水槽内で水平流速の振幅 0.4m/s、周期 3.0 秒の正弦振動流を 5 分間作用させた結果、空気層 (Fig. 4.4, E) に残留した空気の量には、模型の形状によって差異が認められた (Fig. 4.8)。振動流を作用させた前後の空気層の断面積とその比から算出した空気の漏出率を Table 4.3 に示した。空気層の漏出率は、17-66%の範囲にあった。このうち、底盤の D 部位が 50-60mm と比較的長い Model VII-IX の 3 種類の模型では、空気層の漏出率が各々 66%、62%及び 61%であって、振動流を作用させた後に空気層中の空気の 6 割以上が失われた。これに対して、D 部位の長さが 20mm または 30mm と比較的短い Model I -VI の 6 種類の模型では、空気層の漏出率が 17-45%となり、振動流を作用させた後でも過半の空気が空気層中に留まった。

一方、天端部の A 部位と港外側の立上げ部に当たる C 部位の長さが 10mm で、港内側の立上げ部に当たる B 部位の長さが 10mm、20mm 及び 30mm と異なる Model I、II 及び III では、空気層の漏出率が各々 45%、32%及び 17%となり、B 部位が高い模型ほど、空気が漏出しにくくなる傾向が見られた。

これに対して、港内及び港外側の立上げ部に当たる B 部位及び C 部位の高さが 10mm で、天端にあたる A 部位の長さが 10mm、20mm、30mm 及び 40mm と異なる Model I、IV、V 及び VI の 4 種の模型では、空気層の漏出率が各々 45%、32%、39%及び 35%であって、天端の長さとは空気層中の空気の漏出には明瞭な関係が認められなかった。

空気層中の空気の漏出が最も多かった模型は、A 部位の長さが 40mm であって供試した模型の中で最も長く、D 部位の長さが 50mm と比較的長い Model VII

であった。これに対して、空気層中の空気の漏出が最も少なかったモデルは、B 部位の長さが 30mm と供試したモデルの中で最も長い Model III であった。

モデルの底盤部 a-c の各部位に堆積した砂の高さの合計値と空気層の空気漏出率には、Fig. 4.9 に示すように負の関係が認められ、空気層の空気が多く漏出したモデルで砂の堆積が少ない傾向を示した。

Table 4.3 Cross-sectional areas of air layers and their air leakage rates before and after 5 minutes of oscillatory flow in the circulation water tank. Locations of a-d points are shown in Fig. 4.4

Type of Model	Cross-sectional area of air layer (mm ²)		Air leakage rate (%) 1- ②/①
	Before flow ①	After flow ②	
I	500	274	45.2%
II	500	341	31.8%
III	500	416	16.8%
IV	500	341	31.8%
V	500	304	39.2%
VI	700	454	35.1%
VII	700	235	66.4%
VIII	500	192	61.6%
IX	480	185	61.5%

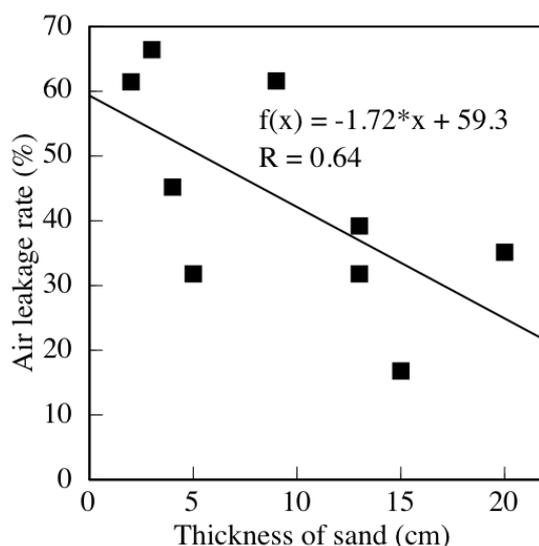


Fig. 4.9 Relationship between the air leakage rate in the air layer and the thickness of sand accumulated in the model after 5 minutes of oscillatory flow in the oscillation water tank.

(4) 模型周辺の流れ

造波水槽内で周期 3 秒，波高 30cm の規則波を約 5 秒間与え，0.3-0.5 秒間隔で模型 (Model IX) 周辺での人工イクラの位置を撮影した画像を Fig. 4.10 に示した。

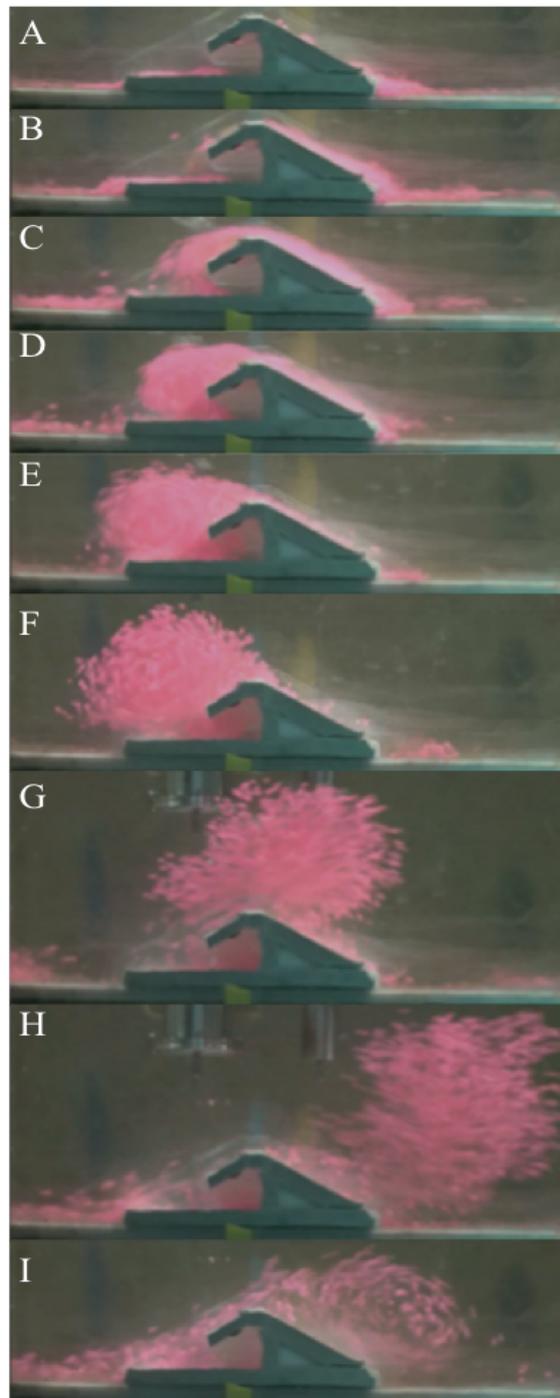


Fig. 4.10 Water flow around the model IX in the wave tank. The pink particles show artificial salmon eggs as a tracer.

港外側から港内側方向への押し波時に、港外側立上げ部 (Fig. 4.4, C) の付近に溜まっていた人工イクラ (Fig. 4.10, A) は、港外側の模型法面に沿って港内側に移動し (Fig. 4.10, B), 天端を越えた (Fig. 4.10, C)。さらに、人工イクラは、天端から剥離し、模型の港内側に鉛直方向の反時計回りに渦を巻き (Fig. 4.10, D), 渦に伴い一部が水槽の底にまで移動した (Fig. 4.10, E)。港内側から港外側への引き波時に人工イクラは、渦の高さが増し (Fig. 4.10, F), さらに、渦を保ちながら天端上を港外方向へと移動した (Fig. 4.10, G)。この時、底盤上やその付近にあった一部の人工イクラは、引き波時に底盤上を移動し、空気層直下まで押し付けられる様子が見られた (Fig. 4.10, H 及び I)。天端を越えて港外側に移動した人工イクラは、天端から剥離し、模型の港外側で鉛直方向に時計回りの渦状に動いた (Fig. 4.10, I)。

造波水槽での人工イクラの動きから、模型周辺では押し波と引き波によって模型の港内外側にそれぞれ鉛直方向の渦流を形成すること、引き波によって空気層直下まで人工イクラが運ばれることが確かめられた。

2) 構造物の安定性の検討

(1) 流体力の検討

実験に供した海流水槽の水は、水温が 14.8°Cであったため、密度が 101.848kg/m³, 動粘度が $1.145 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ と計算された。

回流水槽を用いた抗力の計測結果、抗力係数の計算結果を Table 4.4 に示した。

抗力係数は、港外側から港内方向への流れに比較して港外側から港内方向への流れを作用させた場合に大きい値を示す傾向が確認された。これは、模型の形状が、港外側から港内方向への流れを受ける面が角度 30° の法面であるの

に対して、それとは逆の港内側から港外方向への流れを受ける面には空気層直下の開口した部分があり、流れの圧力を受けやすい形状であることが一因に考えられた。

抗力係数とレイノルズ数の関係を Fig. 4.11 に示した。

Table 4.4 The measurement results of Reynolds number (Rn), drag force and coefficient of drag (Cd) using the circulating water tank

$U_{cwc}(m/s)$	$Rn(\times 10^5)$	Water flow into the port		Water flow out of the port	
		Drag (kgf)	CD	Drag (kgf)	CD
0.190	0.051	0.033	0.598	0.039	0.707
0.284	0.076	0.083	0.674	0.092	0.747
0.377	0.101	0.147	0.677	0.166	0.765
0.478	0.128	0.234	0.670	0.257	0.736
0.575	0.154	0.332	0.657	0.355	0.703
0.680	0.182	0.457	0.647	0.480	0.679
0.786	0.211	0.607	0.643	0.641	0.679
0.880	0.236	0.756	0.639	0.818	0.691
0.981	0.263	0.931	0.633	1.036	0.705

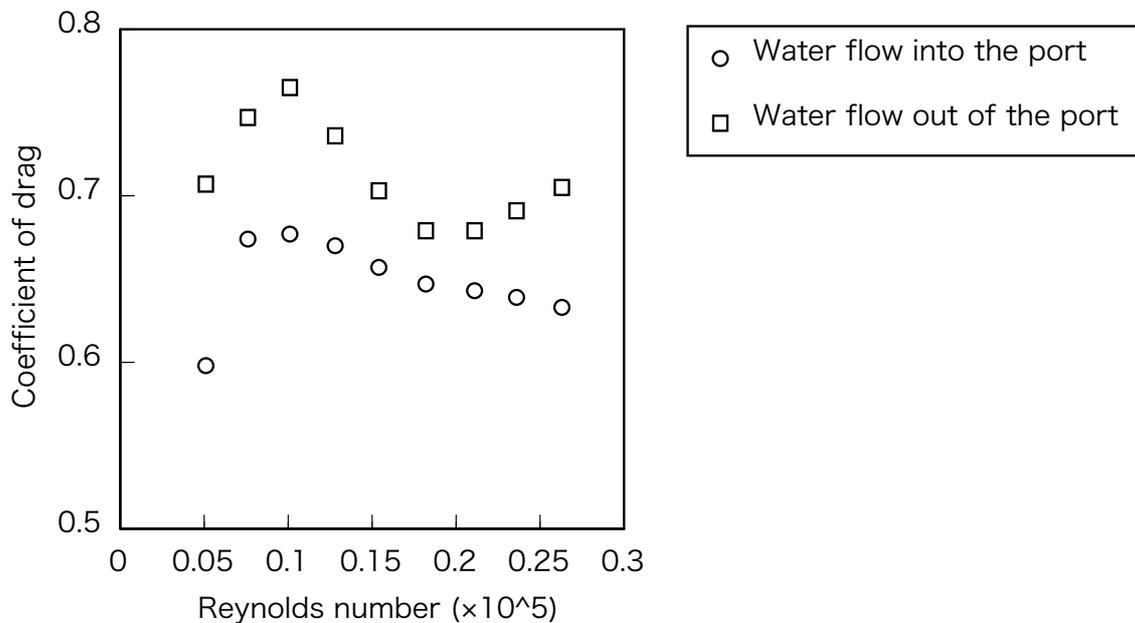


Fig. 4.11 Relationship between Reynolds number and coefficient of drag.

抗力係数は、レイノルズ数 1.0×10^5 付近で、港外側から港内方向への流れで 0.765、港内側から港外方向への流れでは 0.677 で各々最大値を示した。従って、構造物の安定計算に用いる抗力係数には 0.765 を用いることとした。

(2) 構造物の安定計算

構造物の安定計算に供した各項目の数値は、Table 4.5 のとおりであった。

Table 4.5 Numerical values of each item used in the stability calculation of the concrete structure

Item	Symbol	Numerical value	Unit	Quote
Design flow velocity	U	2.697	m/sec	Reference 2,3)
Virtual mass of concrete block	Wb	30.58	kN	Calculated from block design drawings
Virtual mass of air layer	We	1.45	kN	Calculated from block design drawings
Bulk density of concrete block	σG	22.6	kN/m ³	Reference 3,4)
Density of sea water	Wo	10.1	kN/m ³	Reference 5)
Coefficient of drag	C _D	0.765		Calculated from the results of the circulating water tank experiment
Coefficient of friction	μ	0.6		Reference 5,6)
Sea bottom slope	ϕ	1.1458	°(i=1/50)	Calculated from nautical chart
Factor of safety	S	1.20		Reference 5,6)
Projected area of concrete block	A	1.80	m ²	Calculated from block design drawings
Centroid of concrete concrete block	LVb	1.067	m	Calculated from block design drawings
Centroid of concrete of air layer	LVe	0.822	m	Calculated from block design drawings
Tipping center distance of block	LAb	0.2	m	Calculated from block design drawings
Tipping center distance of air layer	LAe	0.373	m	Calculated from block design drawings

構造物の流体力 (P) は、方法に示す (1) 式から、以下のとおり算出された。

$$P = 0.765 \times 1.80 \times 10.1 \times 2.697^2 / (2 \times 9.807) = 5.157 \text{ kN}$$

構造物の滑動安全率は、方法に示す (2) 式から、以下のとおり 1.686 と計算され、安全率 1.2 を上回った。

$$F = \frac{[0.6 \times \{30.58 \times (1 - 10.1/22.6) - 1.45\} \times \cos(1.1458^\circ) - 5.157 \times 0.6 \times \sin(1.1458^\circ)]}{[30.58 \times (1 - 10.1/22.6) - 1.45] \times \sin(1.1458^\circ) + 5.157 \times \cos(1.1458^\circ)}$$

$$= 1.686 > 1.2$$

また、構造物の転倒安全率は、方法に示す (3) 式から、以下のとおり 11.76 と計算され、安全率 1.2 を上回った。

$$\begin{aligned}
 F = & \left[\{30.58 \times (1 - 10.1/22.6) \times \cos(1.1458^\circ) - 5.157 \times \sin(1.1458^\circ)\} \times 1.067 - \right. \\
 & \left. 1.45 \times \cos(1.1458^\circ) \times 0.822 \right] \div \left[\{13.11 \times (1 - 10.1/22.6) \times \sin(1.1458^\circ) + 2.891 \right. \\
 & \left. \times \cos(1.1458^\circ)\} \times 0.221 - 0.01 \times \sin(1.1458^\circ) \times 0.380 \right] \div \left[\{13.11 \times (1 - 10.1/22.6) \right. \\
 & \left. \times \sin(1.1458^\circ) + 5.157 \times \cos(1.1458^\circ)\} \times 0.221 - 0.01 \times \sin(1.1458^\circ) \times 0.380 \right] \\
 = & 11.76 > 1.2
 \end{aligned}$$

以上の結果から、本構造物は、実証試験を行う津軽海峡沿岸の漁港開口部に設置した場合、十分な安定性が確保できると考えられた。

4.2.2 養殖システムの構築

4.2.2.1 方法

1) 構造物の製作と設置

2018年2月2日から27日にかけて、第4章4.2.1の水理実験において砂の堆積が最も薄い Model IXの形状を基に、Fig. 4.7に姿図を示す、長さ300cm、幅184cm、高さ60cmのコンクリート製ブロックを10基製作した (Fig. 4.12)。空気層部分については、体重300g程度のナマコ移動を制限できるように底面の長さを42cm、高さを18cmとした。ブロックの長さは、当初500cmを想定したが、設置工事におけるクレーン吊りの作業性や安全性、ダイバーによる設置微調整作業等を考慮し300cmに短縮した。ブロックの両端の空気層部分には、空気の残留量を視認できるように、厚さ8mmのポリカーボネートを接着剤で貼り付けた。また、不等沈下などによるブロックの傾きが発生した場合、空気層がより維持できるように、空気層内部に3枚の中仕切りを設けた。この仕切りは中央のものをブロックの天井面と隙間ができるよう両端のものに低位置に設置した。空気層は、断面積が462cm²、体積が138ℓであった。

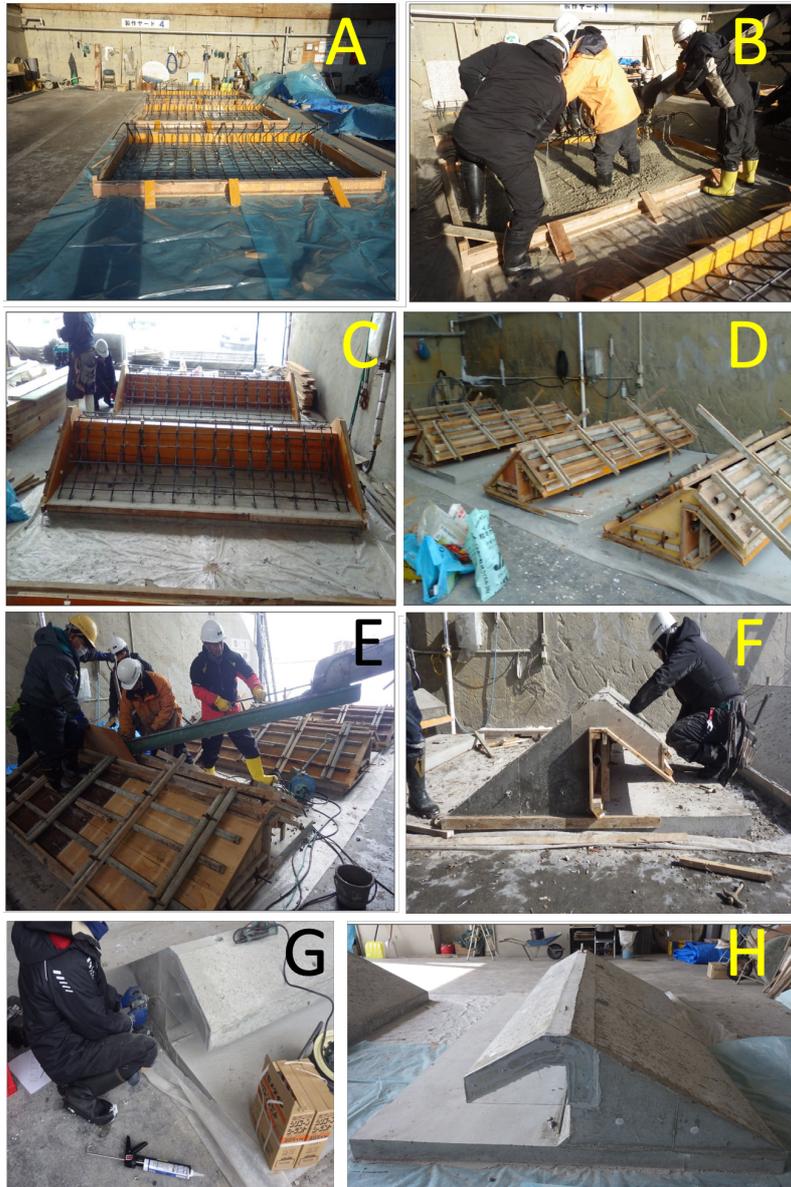


Fig. 4.12 Fabrication of the concrete blocks for culture sea cucumbers. A, assembling the formwork and rebar for the bottom plate; B, injection ready-mixed concrete into the bottom formwork; C, assembling the inside formwork and rebar for the upper section; D, assembling the outside formwork and rebar for the upper section; E, injection ready-mixed concrete into the formwork of upper section; F, dismantling of the formwork's; G, polycarbonate observation window installation; H, the completed concrete block.

2018年3月5日に青森港に停泊中の工事用台船に10基のコンクリート製ブロックを積み込み (Fig. 4.13, A), 7日に津軽海峡沿岸の漁港に向けて出航した (Fig. 4.13, B, C)。3月13日に漁港開口部の幅30mの範囲に10基のブロックを台船のクレーンで吊り上げ設置した (Fig. 4.13, D)。コンクリートブロックには、西端から東端方向に設置された順に1番から10番の番号を順に付した。



Fig. 4.13 Installation of the concrete blocks for sea cucumber aquaculture. A, loading concrete blocks onto the barge on March 5, 2018; B, ten concrete blocks loaded on the barge on March 7, 2018; C towing the barge from Aomori Port on March 7, 2018; D installation of concrete blocks onto the mouth of fishing port. on March 13, 2018.

1, 3, 5, 7, 10 番ブロックには、ブロックの漁港内及び漁港外の端から各々 50cm 離れた地点に目盛の付いた長さ 1m の鉄筋（センターポールを）を差し込んだ。

2018 年 9 月 13 日, 10 月 13 日, 24 日, 11 月 21 日, 2019 年 1 月 12 日, 3 月 3 日にブロック設置場所に潜水し, 目視観察により不等沈下や傾きを確認するとともに, ブロックの漁港内及び漁港外の砂層に接する面における洗掘の深度及び堆積厚を測定した。同時に各ブロックの接する部分の高低差の変化, ブロックの底盤部分の砂や海草の枯葉などの堆積厚を測定した。また, 2018 年 10 月 13 日, 24 日, 11 月 21 日, 2019 年 1 月 12 日, 3 月 3 日にブロックの漁港内外の砂層に差し込んだ鉄筋とブロックまでの距離を測定した。

2) 送気系の設置

2018 年 2 月 16 日にブロックの設置を予定する津軽海峡沿岸の漁港開口部に潜水し, 海岸線に沿って 3m 間隔, その垂直方向に 2m 間隔で設定した計 30 点の海底で水圧計を用いて水深を測定し, 潮汐補正後に水深を求めた。コンクリートブロックへの送気は, Fig. 4.14 に示したとおり, 深所にあたる 2 つのブロックにそれぞれ 1 基の風車から送気することとし, ブロックの送気部分の反対側天端に埋め込んだ真鍮製タケノコジョイントから隣接するブロックの天端の管にホースを取り付けることで, 順次送気できるように工夫した。送気用の風車は, 第 3 章第 2 節において実証に供したピストンポンプを付した 2 基のマイクロ風車とした。風車からブロックに空気を送る送気管は, ブロックが地震などにより多少の移動を生じることを考慮し, プラスチック製耐圧ホース（内径 19mm, 外径 26.5mm）を用いた。

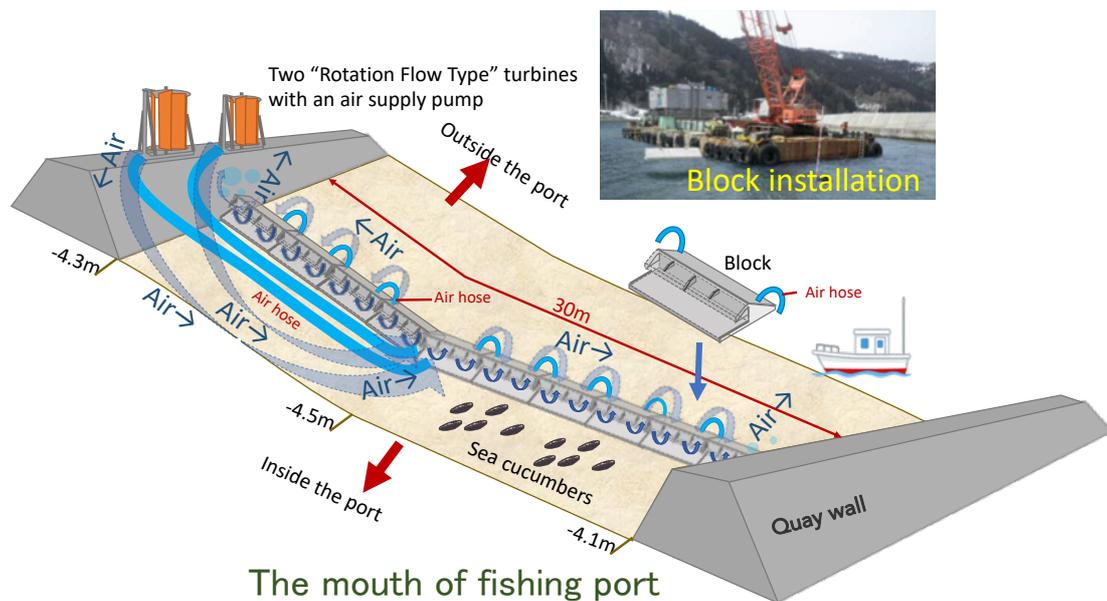


Fig. 4.14 Schematic drawing of the air supply system.

4.2.2.2 結果

1) 構造物と送気系の設置

2018年2月16日に津軽海峡沿岸の漁港開口部に潜水し、海岸線に沿って3m間隔、その垂直方向に2m間隔で設定した計30点の海底で水圧計を用いて水深を測定し、潮汐補正後に水深を求めた結果、Fig. 4.15に示したとおり、西側の防波堤根固めブロックから9m東側に相当する地点で水深が4.47m前後あって最も深いことが明らかとなった。一方、それより東西側に進むに従い水深が浅くなり、東西の根固めブロック部分で各々水深が4.1m、4.3m前後であった。

2018年3月14日に津軽海峡沿岸の漁港に設置したコンクリートブロックの設置状況の全景をFig. 4.17に、10番ブロックの状況をFig. 4.16に示した。設置直後のブロックは、概ね水平を保った。

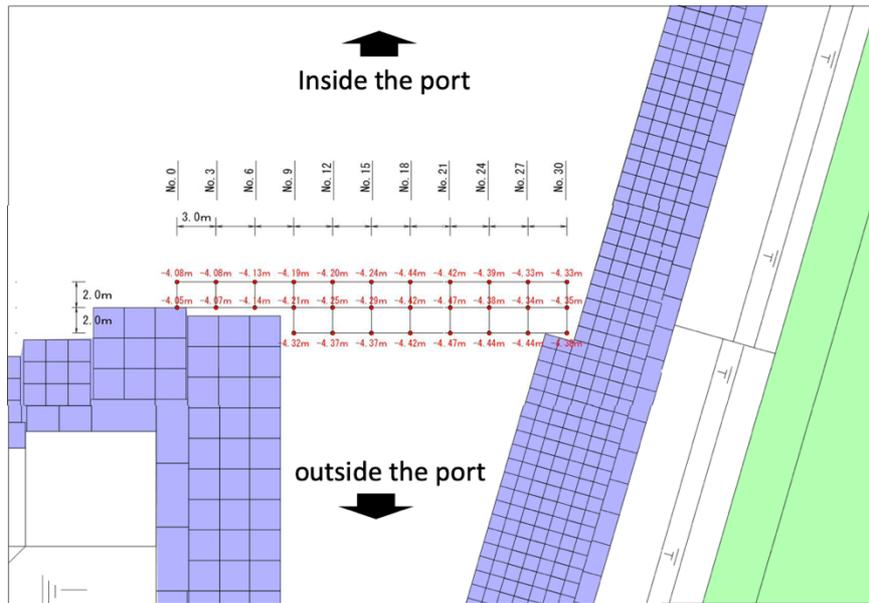


Fig. 4.15 Water depths of the seabed on the mouth of fishing port.

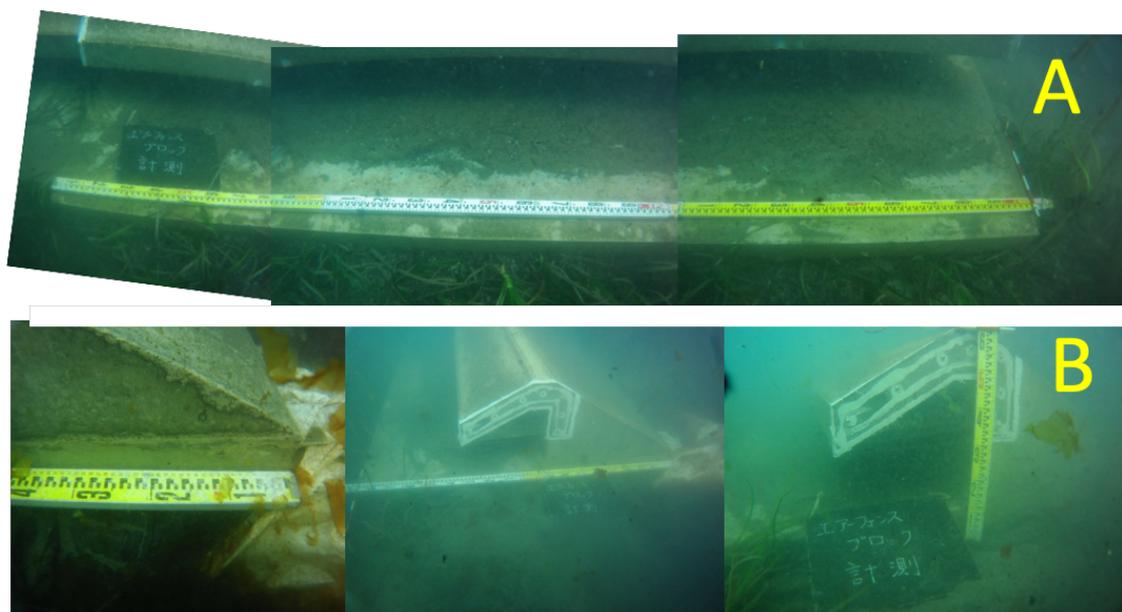


Fig. 4.16 Installed concrete blocks of the sea cucumber aquaculture system. A, the front view; B, the side view.

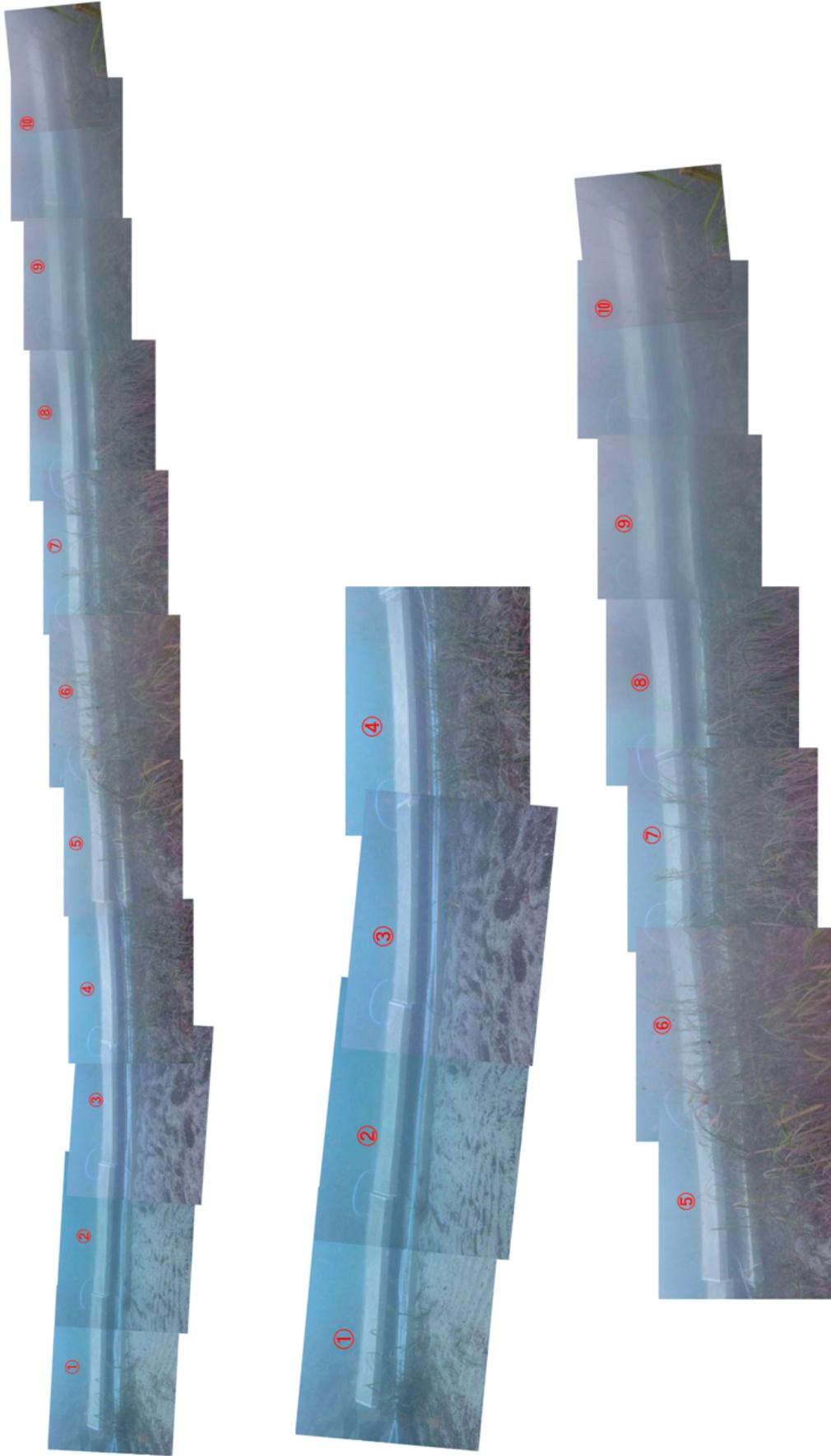


Fig. 4.17 The out viewing of the concrete blocks installed into the mouth of fishing port for sea cucumbers aquaculture in fishing port on the coast of Tsugaru Strait (pictured on March 8, 2018).

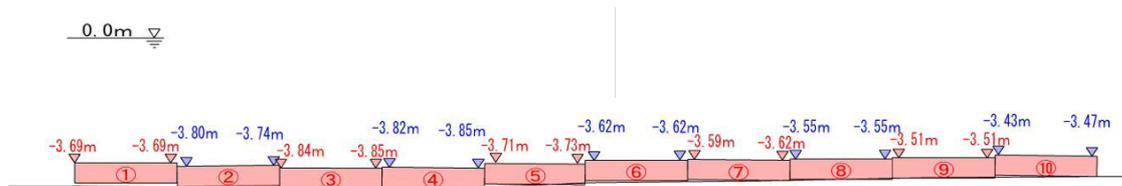


Fig. 4.18 The water depth at both ends of the top of the installed concrete blocks of the sea cucumber aquaculture system.

ブロックの設置水深は、Fig. 4.18 に設置直後に水圧から測定して各ブロックの天端の両端部の水深を示したとおり、最も深所に設置した4番及び5番ブロックで各々3.82-3.85m 及び 3.71-3.73m であった。それらに隣接する3番、5番ブロックの天端の水深は、各々3.84-3.82m 及び 3.62m、さらに、それらに隣接する2番、7番ブロックでは各々3.74-3.80m 及び 3.52-3.62m であって、1番、8番ブロックでは各々3.69m 及び 3.55m となった。東端に設置された9番、10番の2基のブロックは、水深が各々3.51m 及び 3.43-3.47m であった。設置水深は、5番から10番にかけての6基のブロックで東側に設置されたものが順次浅所になった。一方、それより西側にある4基のブロックでは東側のものに比べ高低差が小さかった。

各ブロックの設置水深が判明したため、岸壁上の陸側にある1基の風車から4番ブロックの空気層部分にホースを配管し、それより西側にある1-3番の3基のブロックに送気するようにした (Fig. 4.19)。また、沖側の風車から5番ブロックに同様に配管し、それより東側にある6-10番の5基のブロックに送気するようにした (Fig. 4.14)。

ブロックに送気系を設置した2018年3月14日に漁港の防波堤上では約風速8m/sの風があり、防波堤上に設置した2つの風車は、いずれも毎秒1回転程度の速さで回転した。送気系の設置から約2時間後には東西の両端に設置された

1番及び10番ブロックから空気の漏出が確認されたため、風車から各ブロックへの送気が確認できた。

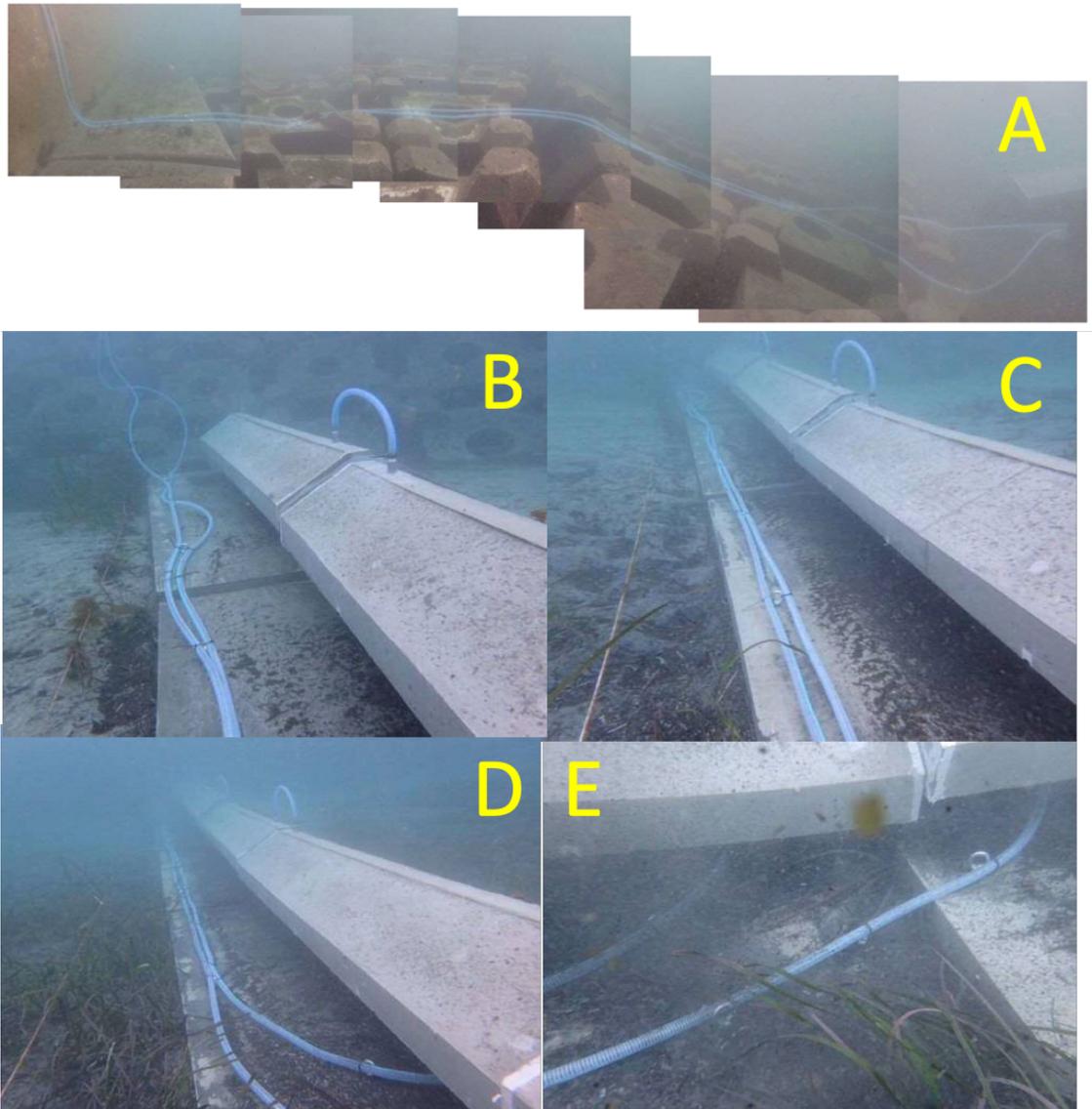


Fig. 4.19 Underwater hoses for supplying air into the concrete blocks of the sea cucumber aquaculture system. A, installed air hoses from the rock wall onto rooting blocks; B, onto the rooting blocks and the No. 1 and No. 2 concrete blocks; C, onto the No. 2 and No. 3 concrete blocks; D, onto the No. 4 block; E, onto the No. 4 and No. 5 blocks.

(2) 構造物の安定性と空気層の確認

2018年3月のブロック設置後、2018年5月から8月にかけて、風車のブレードの剥がれやローター交換のため、約3か月間に渡って各ブロックに送気できなかった。2018年9月に潜水しポリカーボネート製の窓を取り付けた東西端のブロック（1番及び10番ブロック）を観察した結果、西端で高さ6cm、東端で10cmの空気層が認められた。他のブロックについては、海水の濁りが甚だしいこと、空気層部分が狭いいため空気層の厚さを測定できなかったが、潜水用グローブを脱いで触診した結果、全てに5cm以上の空気層が維持、形成されていることが確認された（Table 4.6）。このうち、10月13日、24日、11月21日、2019年1月12日、3月3日に2019年3月までの計5回の潜水観察を通じて、Table 4.6に示したとおり、各ブロックには高さ5cm以上の空気層が維持され、ブロックから空気層が失われることはなかった。また、観察を通じて、最深部に設置された4番及び5番ブロックへの風車からの送気ホース、及び、それらから順次隣接する各ブロックに送気するためにブロック天端に取り付けたホースとも取り付け金具や繋部からの脱落等が見られず、ホース内には空気が充填されている様子が認められた。

ブロック周辺での砂層変動について、Table 4.6に2018年9月から2019年3月にかけて測定したブロックの漁港内外側の砂層における洗掘深度と堆積厚を示した。洗掘は、9月に2番ブロックの漁港外側に接した面で1cm認められたほか、調査を通じて確認できなかった。また、砂の堆積は、一般に漁港外側に面した部分が内側のそれより厚くなる傾向がみられた。即ち、漁港外側の面では、9月には2-6番ブロックで最大10cm、11月には2ブロックで最大24cm、3、9番ブロックで20cm、1月には8-10番ブロックで最大20cm、3月には9、10番ブロックで最大20cm堆積した。これに対して、漁港の内側面では、9月

に9番ブロックで11cm, 11月に3, 8番ブロックで各々8cm, 1月に4番ブロックで18cm, 3月には3番ブロックで17cmの堆積が認められた。ブロックの底板上に腐敗したアマモの枯葉が海水流動に伴い漂いながら堆積する様子が見られ, 調査を通じて最大10-15cm程度の厚さになった。これら枯葉は, ナマコ, キタムラサキウニやエゾバフンウニの蝸集が認められ, ナマコが潜り込む様子が見られた。観察を通じて, 空気層の下面にまで砂が堆積することはなかった。

ブロックの滑動を把握するため, ブロックから50cm離れた地点の砂層に突き立てた鉄筋とブロックまでの距離を測定した結果, 2018年10月から2019年3月までの計5回の観察を通じて, その距離に変化は見られず, ブロックの傾斜や転倒も視認されなかった。鉄筋における砂の洗掘深度と堆積厚は, Table4.7に示したとおり, 1番ブロックの周辺では調査を通じて最大15cmの洗掘が認められ, 3, 6番ブロックでは各々最大15cm, 10cmの堆積が見られた。10番ブロックでは洗掘と堆積とも1cm以下に留まった。

ブロックの天端の高低差を観察した結果, 2019年3月に2番ブロックと3番ブロックの西側の間の高低差が設置時に比べ約1cm拡大した。これには, 3番ブロックの西側部分が若干沈下したためと考えられた。これを除く各ブロックでは, ブロック間の高低差の変化は認められず, 視認できる範囲で不等沈下や傾斜が確認されなかった。

Table 4.6 The scour depth and accumulation thickness (cm) of the concrete blocks facing the sand layer both inside and outside the fishing port, leaning of concrete blocks, and presence of air in their air layer. +, block leaned or air presented; -, not leaned or no air presented

Block No.	September 13, 2018				November 21, 2018				January 12, 2019				March 3, 2019			
	Inside		Outside		Inside		Outside		Inside		Outside		Inside		Outside	
	Scouring	Accumu-lation	Leaning of block layer	Air	Scouring	Accumu-lation	Leaning of block layer	Air	Scouring	Accumu-lation	Leaning of block layer	Air	Scouring	Accumu-lation	Leaning of block layer	Air
1	0	4	0	0	0	0	-	+	0	7	-	+	0	8	-	+
2	0	9	1	4~10	0	5	-	+	0	15	-	+	0	0	-	+
3	0	4	0	10	0	8	-	+	0	0	-	+	0	17	-	+
4	0	5	0	10	0	5	-	+	0	18	-	+	0	15	-	+
5	0	4~5	0	0-10	0	3	-	+	0	7	-	+	0	0	-	+
6	0	4	0	0-10	0	1	-	+	0	4	-	+	0	5	-	+
7	0	5	0	5	0	7	-	+	0	6	-	+	0	8	-	+
8	0	10	0	0	0	8	-	+	0	12	-	+	0	10	-	+
9	0	11	0	<1	0	5	-	+	0	7	-	+	0	15	-	+
10	0	8	0	<1	0	4	-	+	0	6	-	+	0	5	-	+

Table 4.7 Changes in sand layer level (cm) measured by measuring rods at 50 cm from the concrete blocks both the inside and outside of the fishing port

Block No.	October 13, 2018		October 24, 2018		November 21, 2018		January 12, 2019		March 3, 2019	
	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside
1	-9	-13	-8	-12	-7	-15	-7	-5	-7	-2
3	6	10	10	10	13	13	15	10	15	10
5	5	10	7	10	5	10	10	7	8	8
7	-1	-4	0	0	-2	3	-2	-8	-5	0
10	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0

4.2.3 ナマコ閉じ込め効果の検討

4.2.3.1 実験方法

ブロックのナマコ閉じ込め効果を把握するため、2019年1月12日14時に、水深20-30m前後から桁曳き漁具を用いて採取した20個体のナマコをブロック設置場所の中央部分の漁港内側水域の海底に、さらに20個体をブロック設置場所の西端と根固めブロックとの境界にあたる砂層の海底に放流した（Fig. 4.20）。放流したナマコの湿重量は、Fig. 4.21に示すとおり、ブロック設置場所の中央部分及び西端で各々平均が355.0g, 344.3gであった。放流から0.5時間後、1時間後、3時間後、24時間後、27時間後、48時間後の計6回、潜水により放流ナマコの位置をスケッチし記録した。

2019年3月3日14時にはブロック設置場所の西端と根固めブロックの境界にある砂層に20kgの砂利を詰めたサンドバック4袋を設置し、その漁港内側水域に当たる砂層に漁港内から採取した17株のスゲアマモ栄養株の根と地下茎部分を、シャベルを用いて海底に埋め込むように移植したのち、移植株の漁港の内側部分の海底に20個体のナマコを放流した。放流から3時間後、24時間後、48時間後、96時間後の計4回潜水により放流ナマコの位置をスケッチし記録した。

放流はいずれもナマコを50cm四方の範囲1箇所にとめて放流した。また、放流直前にブロック及び周辺の根固めブロックの約10m四方に生息するナマコを除去した。

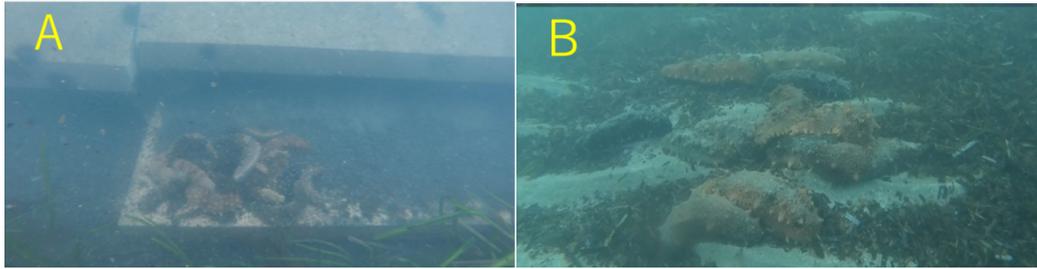


Fig. 4.20 Sea cucumbers released at the center (A) and at the edge (B) of the concrete blocks of sea cucumber cultivation system installed between the mouth of fishing port.

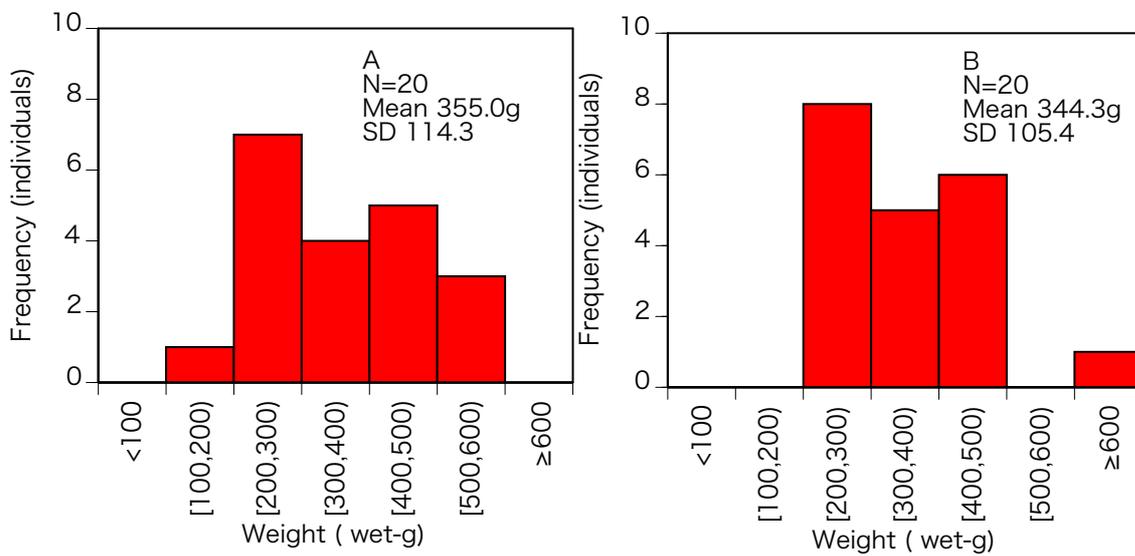


Fig. 4.21 Wet weight of sea cucumbers released at the center (A) and at the edge (B) of the concrete blocks of sea cucumber cultivation system installed to the mouth of fishing port.

4.2.3.2 実験結果

2019年1月12日に、ブロック設置場所中央にあたる5番ブロックと6番ブロックの境界部分に放流した20個体のナマコは、Fig. 4.22に放流後の位置を示したとおり、放流0.5時間後及び1時間後には概ね放流地点から0.5m以内の範囲に留まった。3時間後には2個体が放流場所から1.5m程度離れた地点に移動したものの、このほかの18個体のナマコには顕著な移動が見られなかった。しかし、24時間後の観察では、放流場所とした5番及び6番ブロックに8個体が留まったものの、このほかのナマコはブロック伝いに東方向に移動する様子が認められ、9番ブロックに3個体、7及び8番ブロックに各1個体ずつが観察された。これらを除く7個体は、ブロックから0.5m-2.5m漁港内側水域方向に移動する様子が観察された。27時間後に観察を行った結果、11個体がブロックに、残り9個体がそれより最大2.5m漁港内側水域より離れたアマモ群落中の砂層に観察された。さらに、48時間後には、5、6、7番ブロックに計10個体のナマコが見られ、残り10個体は漁港内側水域とブロックの間に当たる3.2mの範囲に観察された。観察を通じて、ブロックの漁港外側の水域に移動したナマコは認められなかった。

一方、2019年1月12日にブロックと根固めブロックの境界部分の砂層に放流したナマコは、Fig. 4.23に示したとおり、放流から3時間後までは概ね放流場所から1mの範囲にとどまったが、24時間後には8個体がブロックに、2個体がブロックの漁港外側水域に当たる根固めブロック上に、残り10個体がブロックの近傍または漁港内側にある根固めブロックの周辺に移動した。27時間後にはさらに2個体のナマコがブロックの漁港外側水域に移動し、ブロックには5個体、漁港内側水域の根固めブロック上に11個体が認められた。48時間後には、ブロックに4個体、漁港内側水域の根固めブロック上に5個体、砂層

に 1 個体が移動し、ブロックの漁港外側水域にある根固めブロック上やそれと接する砂層に 10 個体が観察された。

ブロックと根固めブロックの境界部分の砂層に放流した場合、半数のナマコがブロックの漁港外側水域に移動した。そこで、その間隙から漁港外へのナマコの移動を抑制するため、2019 年 3 月 3 日に間隙部分に砂利を詰めたサンドバック及びナマコの好適住み場となるスゲアマモの栄養株を移植した上で、同様に 20 個体のナマコを放流し、その後の移動を観察した。なお、1 月の放流試験の結果、放流 3 時間後までナマコの移動が大きくなかったため、放流 0.5 時間、1 時間後の観察を割愛した。

この結果、Fig. 4.24 に示したとおり、放流したナマコは、すでに放流 3 時間後には 6 個体がスゲアマモ栄養株に身を接するようにして観察され、残り 14 個体は栄養株の周囲またはそれより漁港内側水域に観察された。放流から 24 時間後には、1 個体がブロックの漁港外側水域にある根固めブロックに面した砂層に移動していたが、これのほかの 19 個体は全てブロックの漁港内側水域、即ち、6 個体がスゲアマモ栄養株に、5 個体がブロックの上またはその直近に、1 個体がサンドバックに、残りの 7 個体が根固めブロック上に認められた (Fig. 4.25, C)。放流から 48 時間後には、4 個体がブロックの漁港外側水域の根固めブロック上やそれと接する砂層に見られたが、これのほかの 16 個体では漁港内側水域に観察され、8 個体が根固めブロック上、3 個体が砂層、5 個体がブロックやその近傍に認められた (Fig. 4.25, D)。スゲアマモを移植した場合、放流したナマコの漁港外側水域への移動が、それを移植しなかった 1 月放流に比べ少なかったため、さらに 96 時間後に同様の観察を行った結果、ブロックの漁港外側水域に 3 個体が観察され、そのうち 2 個体はブロックの砂層が面した部分に認められた。ブロックの漁港内側水域に観察された 17 個体のうち、1 個体が

移植したスゲアマモ栄養株に対を接して、2 個体がサンドバックに接して、2 個体がブロックに接して、残りの 10 個体が根固めブロック上に認められた (Fig. 4.25, E)。

以上から、サンドバックやスゲアマモの移植により、ブロックと根固めブロックの間隙から漁港外側水域へのナマコの移動を抑制し、ブロックのナマコ閉じ込め効果を高められることがわかった。

移植したスゲアマモ栄養株は、放流ナマコの追跡調査を行なった移植後 4 日間の範囲で脱落、流失することはなかった。また、移植から 4 ヶ月後にあたる 7 月 3 日に移植場所に潜水した結果、Fig. 4.25 に示したとおり、全ての栄養株が栄養繁殖によってシュートが増加する様子が認められ、さらに、草丈が 2m 前後に達したため小群落として認められた。小群落には、海底に体長 30cm 前後のマコガレイが認められ、周辺や葉の間隙をウミタナゴの群泳が観察された。

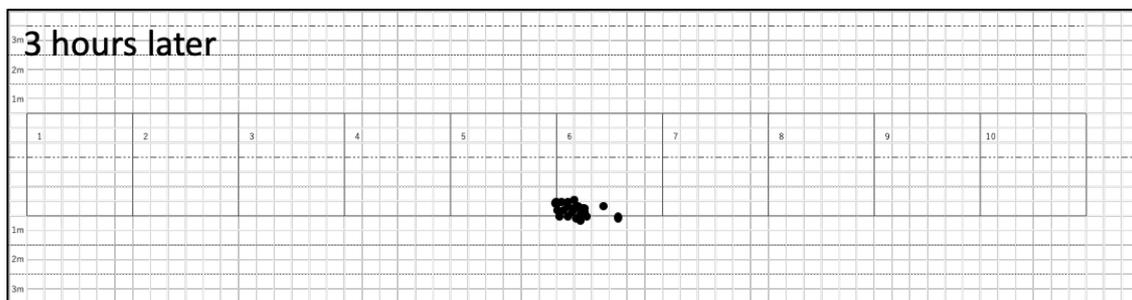
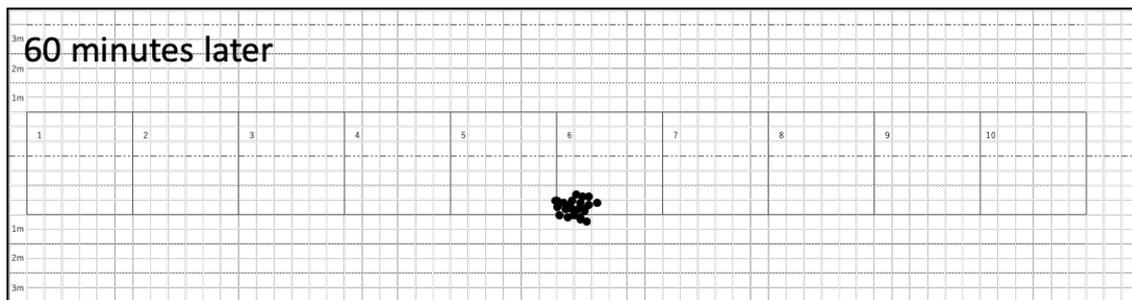
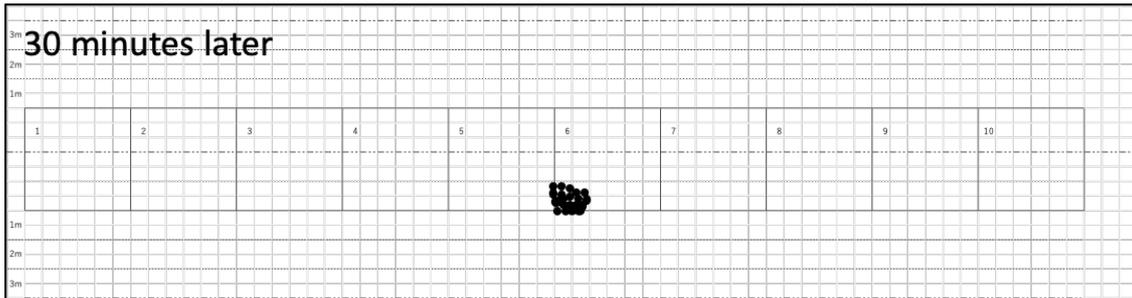
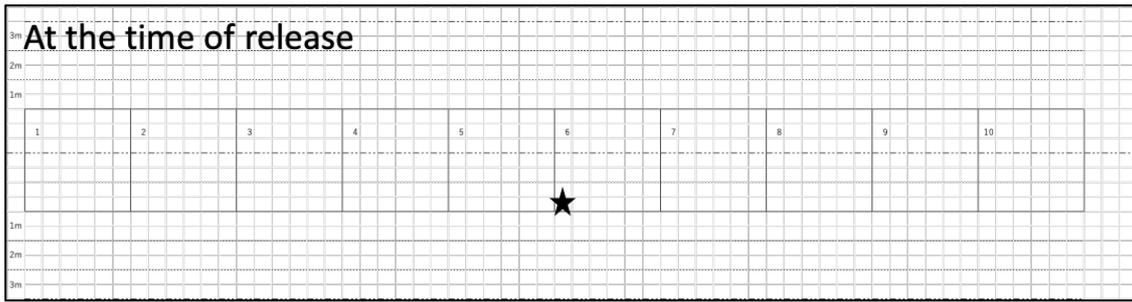


Fig. 4.22 Location of the sea cucumbers released into the center of the concrete blocks of the sea cucumber culture system installed into the mouth of the fishing port at the periods of after 30 minutes to 48 hours from released.

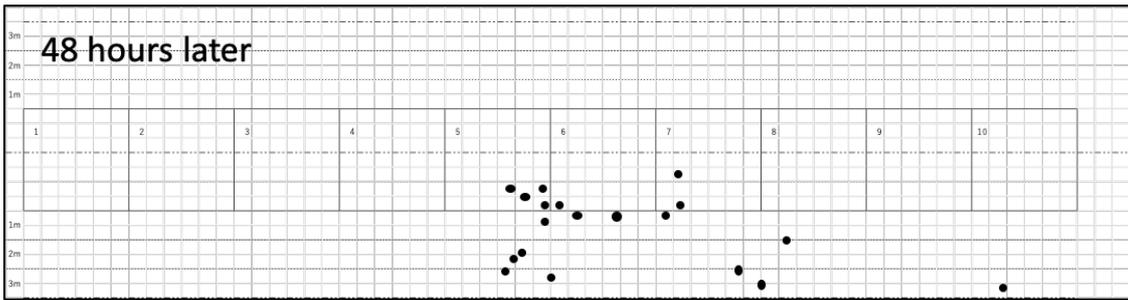
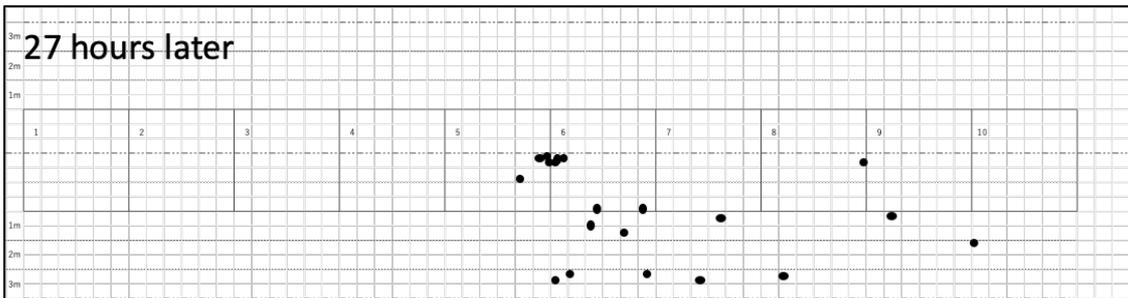
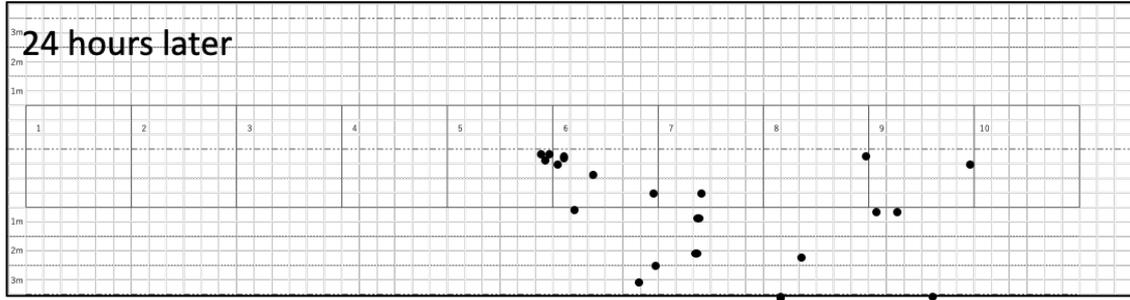


Fig. 4.22 (continued) Location of the sea cucumbers released into the center of the concrete blocks of the sea cucumber culture system installed into the mouth of the fishing port at the periods of after 30 minutes to 48 hours from released.

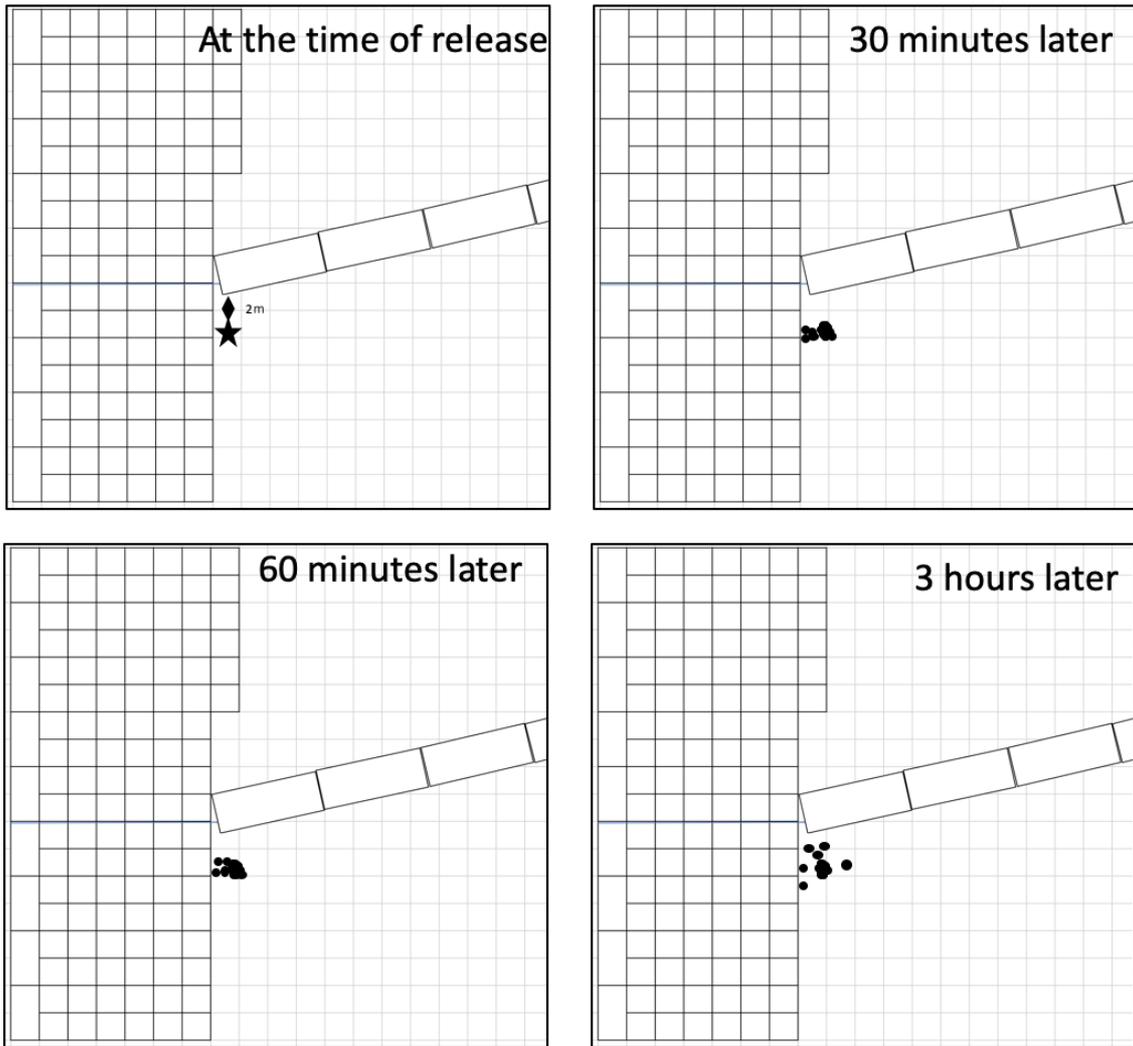


Fig. 4.23 Location of the sea cucumbers released into the edge of the concrete blocks of the sea cucumber culture system installed into the mouth of the fishing port at the periods of after 30 minutes to 48 hours from released.

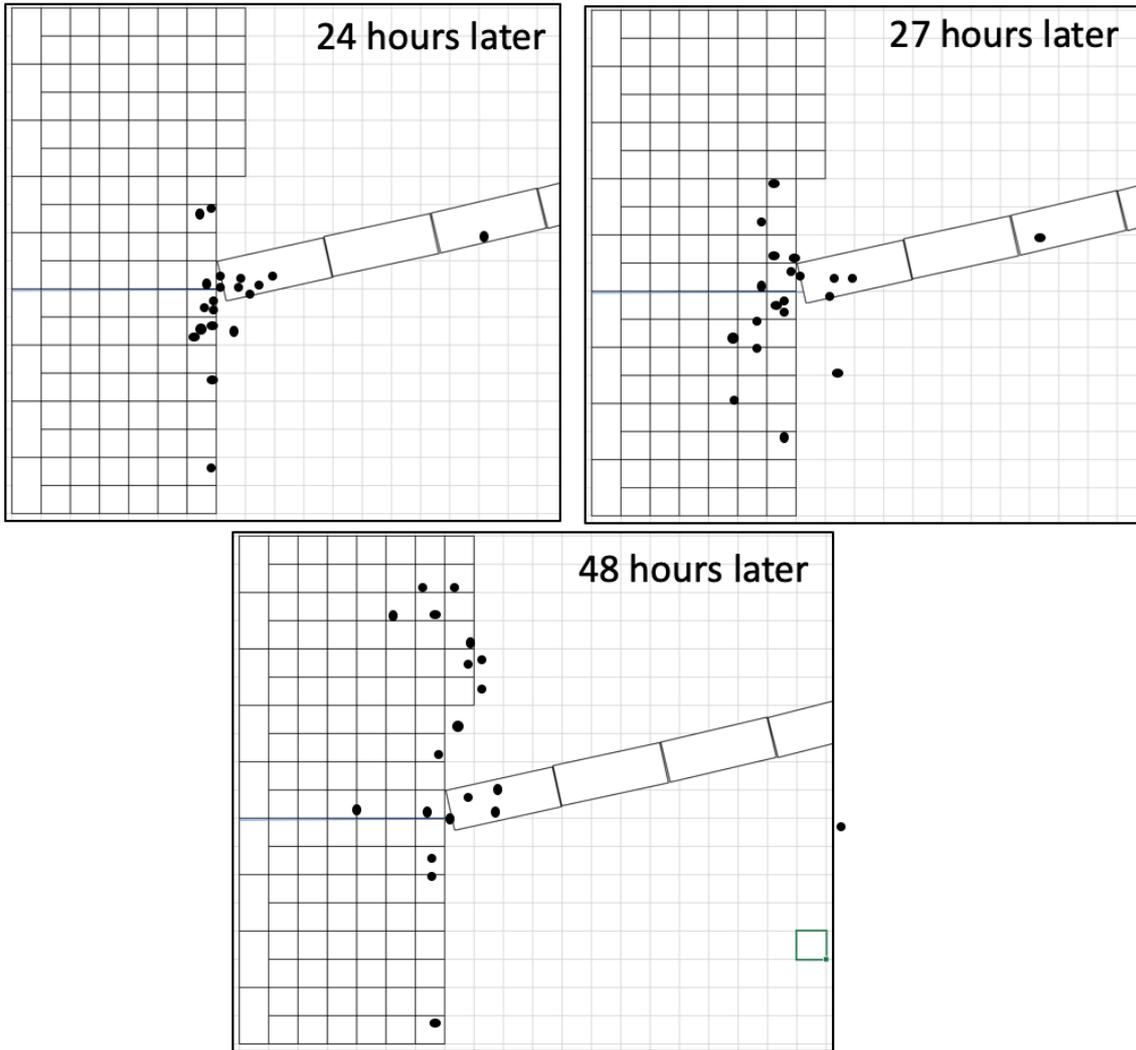


Fig. 4.23 (continued) Location of the sea cucumbers released into the edge of the concrete blocks of the sea cucumber culture system installed into the mouth of the fishing port at the periods of after 30 minutes to 48 hours from released.

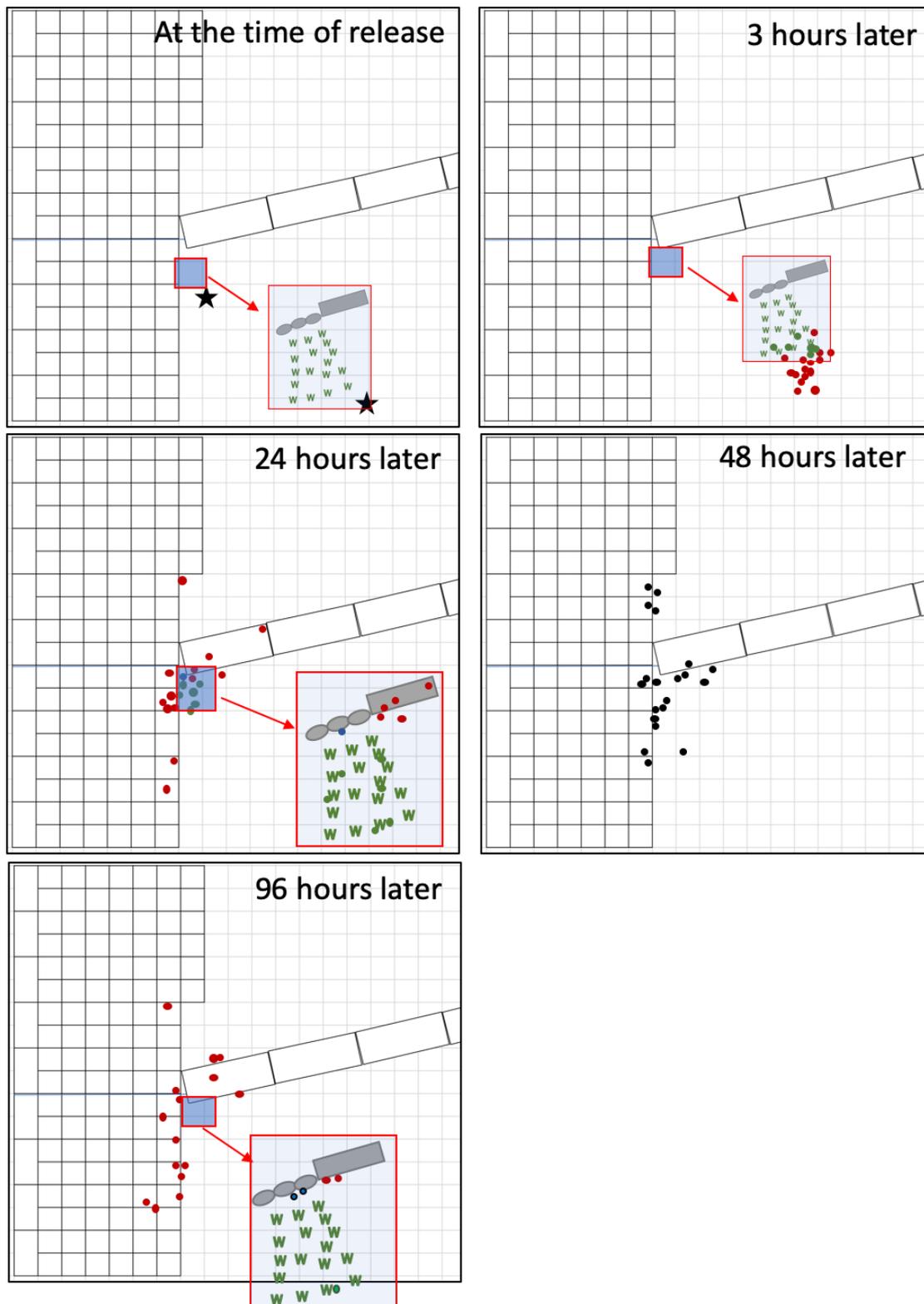


Fig.4.24 Locations of the sea cucumbers released into the edge of the concrete blocks of the sea cucumber culture system installed into the mouth of the fishing port at the periods of after 3 hours to 96 hours from released. "W" shows the locations of transplanted vegetative strains of seagrass *Zostera caespitosa*.

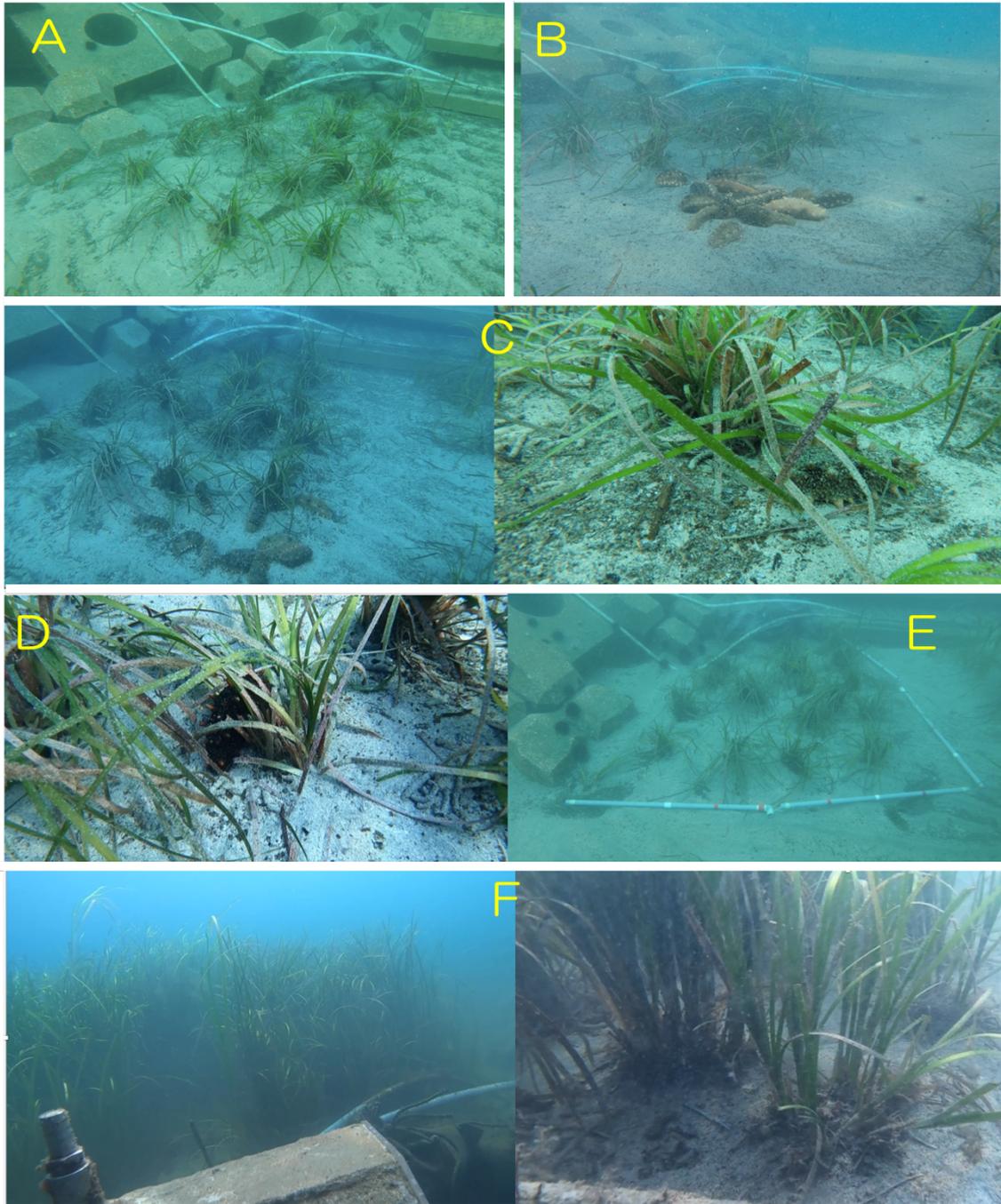


Fig. 4.25 Photos show transplanted seagrass *Zoster caespitosa* and released sea cucumbers near the transplants. A, *Z. caespitosa* transplanted on March 3, 2019; B, sea cucumbers released on March 3, 2019; C, transplanted *Z. caespitosa* and released sea cucumbers 24 hours after release; D, 48 hours after release; E, 96 hours after release; F, *Z. caespitosa* community 4 months after transplantation (July 3, 2019).

4.3 考察

4.3.1 送気システムのコンクリートブロックの形状検討

漁港水域は、稚ナマコの生息に適する静穏な環境が形成されており⁷⁾、餌料となる付着珪藻が一般に豊富であるためナマコの好適な成育環境にあることから、陸奥湾でも一部の漁港はナマコ漁場として利用されている。また、人家に近く比較的密漁を監視しやすい利点を持つため、漁港水域にナマコを閉じ込めることで無給餌養殖の場として活用できる可能性がある。

アワビやウニなどの匍匐性水産動物は、空気層を忌避する性質があるため、天然の岩礁や構造物に空気を送り込むことで、それらを閉じ込め養殖する手法が発明されている⁸⁾。また、ナマコについては、外周を空気層で囲んだ礁体に稚ナマコを放流し、中間育成場としての利用が研究されている^{9,10)}。そこで、空気層をもつコンクリートブロックを漁港開口部に設置し、さらに、エアーポンプから構造物中の空気層に送気することで漁港水域にナマコを閉じ込め養殖する手法を考案した(特許第 6842674 号:水中設置システム及び水中設置物)。しかし、このブロックは、空気の漏出や砂泥の堆積などによって空気層が喪失した場合、ナマコを漁港水域に閉じ込め養殖する機能が損なわれる。このため、構造物には、空気層の直下に砂泥が堆積しにくく、空気層から空気が漏出しにくい形状が求められる。

本研究では、異なる形状を持つ模型を製作し、振動流水槽及び造波水槽において模型の各部位の長さや砂の堆積や空気層の漏出の関係を検討し、これらの結果をもとに津軽海峡沿岸の漁港にて行う実証試験に供するコンクリート構造物を開発した。

漁港開口部に設置し、ナマコを港内側の海底に閉じ込めて養殖する構造物の形状、特に空気層直下に砂が堆積しにくく、空気層から空気の漏出が少ない構

造物の形状を振動流水槽及び造波水槽を用いた模型実験によって検討した。この結果、模型周辺の水や砂の流れと動きが明らかになり、造物の空気層直下に砂が堆積しにくい形状を把握し、実証実験に供する造物を設計することができた。

港内側から港外側への引き波による水粒子は、造物の港外側背後に剥離し、鉛直渦流となってその背面縁辺部にある底質の砂層を洗掘し巻き上げる (Fig. 4.26, A)。巻き上げられた砂は、港外側から港内側方向への押し波によって生じた剥離流により、造物の港内側に移動し拡散する。同時に、造物の港内側背後に形成された鉛直方向の渦流が港内側縁辺部底質の砂層を洗掘し、造物近傍に砂を巻き上げる (Fig. 4.26, B)。造物の港内外の縁辺部周辺の底質に起源を持つ砂は、剥離流によって造物周辺で混じり合い、特に港内側で混じり合った砂が、港外方向への流れによって造物の底盤上に運ばれ、空気層直下に堆積する (Fig. 4.26, C)。従って、空気層直下の砂の堆積を抑制するためには、造物周辺の砂を洗掘させにくい形状を選ぶことが、ナマコの閉じ込め機能の持続に有効と考えられた。

造波水槽での模型周辺における人工イクラの挙動の観察結果 (Fig. 4.10) から、Fig. 4.26 に示すメカニズムによって空気層直下に砂を堆積させると推察された。

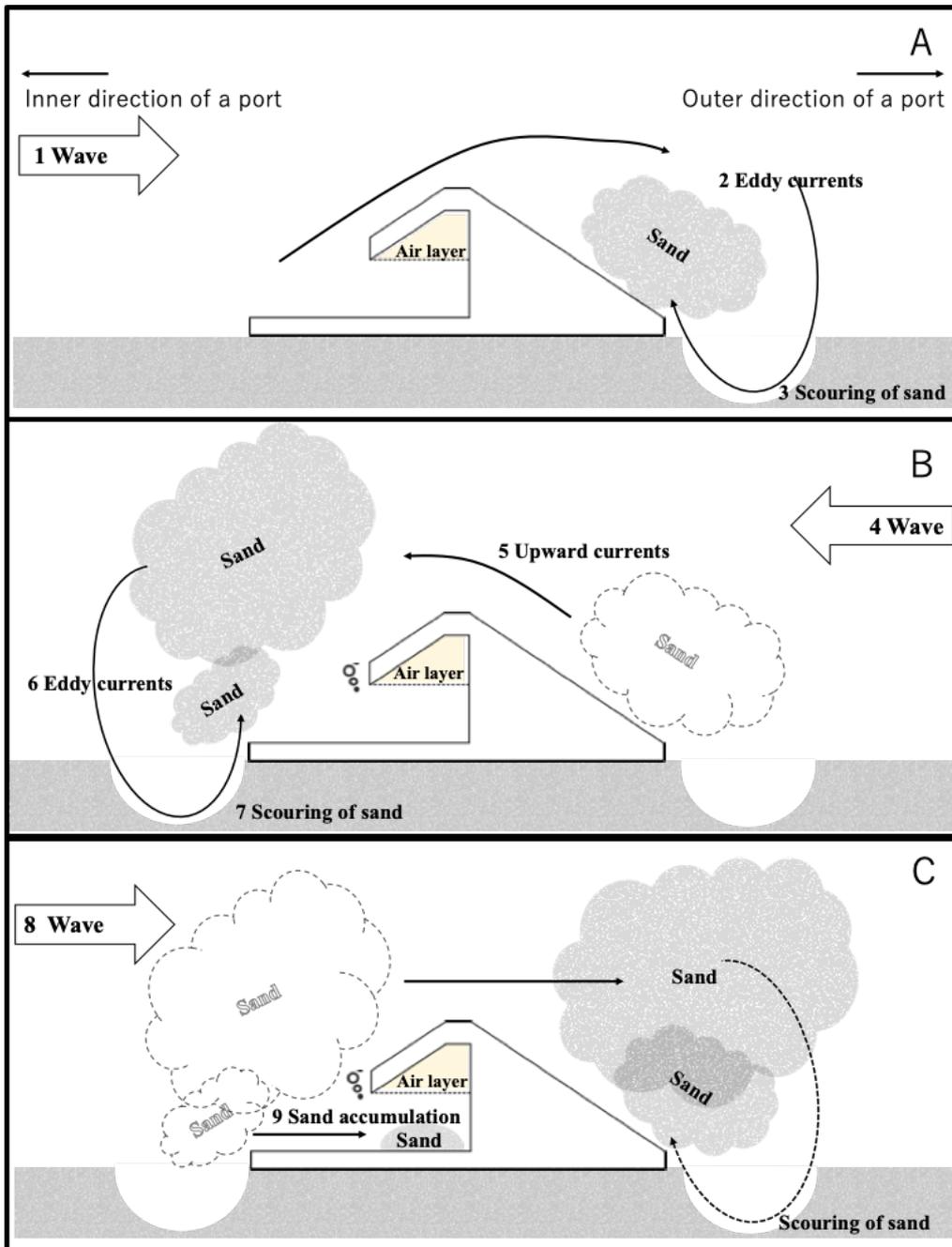


Fig. 4.26 Sand accumulation scheme on the block, based on the results of the tank experiment.

振動流水槽の実験からは、天端部位が長い模型ほど底盤上に堆積する砂の量が多くなった (Table 4.2)。魚礁周辺では、背後に形成される渦の規模によって、魚礁後方の洗掘領域の範囲が変化する¹¹⁾。一方、林 (1986) のスモークワイヤ法による矩形断面柱の背面の渦流形成の観察結果からは、主方向の流れと平行の位置にある矩形断面が長いほど、背面で大きな渦流が形成されており¹²⁾、また、松見・瀬山 (1985) の小型循環水槽を用いた群体魚礁についての模型実験からは、魚礁モデルの間隔が狭く天端面での流れが長く形成される場合、モデルの後流域の渦流の面積が広く形成されることが示されている¹³⁾。本研究の実験条件は、これら先行研究とレイノルズ数はおおむね同程度であるため、流れ場の挙動は同様と考えられる。したがって、本研究における模型の天端部分が長いほど、模型近傍に比較的大きな渦流が形成され、洗掘される砂の量が増え、結果的に空気層直下に砂が厚く堆積すると考えられた。これらから、天端の長さが短い構造物ほど空気層によるナマコ閉じ込め機能がより長期間発揮できるものと考えられる。しかし、鉄筋コンクリート構造物では、構造耐力上重要な主鉄筋からコンクリートのかぶりを 2.5cm 以上求められている¹⁴⁾こと、さらに製作及び設置における安全性を考慮し、本構造物のコンクリートの部材の厚さを最低 10cm にすることとした。

また、振動流水槽の実験からは、港内側の立上げ部が高い模型ほど、底盤上に堆積する砂が厚くなることがわかった (Table 4.2)。これらの立上げ部は、空気層直下への砂の押し出しを低減させるため障壁になることを期待し、底盤の端部分に底盤に対して L 字型に設けた。しかし、立ち上げ部を設けた模型では、ひとたび底盤上に堆積した砂が排出されにくくなり、経時的に空気層直下に砂が堆積する様子が見られた (Fig. 4.8, B)。これに対して、立ち上げ部を欠く模型では、底盤上の砂が掻き出される様子が観察された (Fig. 4.10, G)。したがっ

て、底盤部分を平坦にすることで、空気層の機能を長期間維持しやすくなると考えられた。

港外側の立上げ部は、構内側の立ち上げ部同様に高い模型ほど、底盤上に堆積する砂が厚くなった(Table 4.2)。これから、この立ち上げ部分が短い構造物ほど、空気層をよく維持しナマコの閉じ込め機能をより長時間発揮できると思われる。しかし、当該立ち上げ部の高さとその近傍の底質の砂の洗掘深度には、明瞭な関係が認められなかった(Table 4.2)。これらの関係については、本実験からは十分検討できなかったため、今後、両者の関係について、浮遊砂の移流拡散と沈降に関する数値シミュレーションや汎用性の高い条件での実験による検討を試みる予定である。

振動流水槽の実験から、底盤が長い模型ほど底盤上に堆積する砂が薄くなった(Table 4.2)。榎木ら(1984)は、魚礁周辺の局所洗掘とその対策工法について検討し、魚礁周辺の捨石やゴムシートの設置による渦流と底質の遮断が洗掘防止に有効であることを示した¹⁵⁾。これから、適切な範囲に石の敷設やシートを用いることで、構造物から剥離した流れによって形成される渦流と底質を遮断できると考えられる。このことから、構造物自体に十分な長さの底盤を持たせることで、捨石やゴムシートと同様にその周辺での渦流と底質が遮断しやすくなり、その結果、空気層直下の砂の堆積を低減させ、ナマコの閉じ込め機能を長期間維持できると考えられた。

空気層からの空気漏出量と底盤上での砂の堆積厚には、バラツキが大きいを負の相関が見られた(Fig. 4.9)。一方、港内側の立上げ部が高い模型ほど、空気の漏出割合が小さかった(Table 4.3)。空気層中の空気は、模型の港内側に生じた反時計回りの渦流(Fig. 4.26, B)が、空気層を上方に押し付けることで漏出する様子が認められた。これらから、空気層直下での流動が小さいほど空気層の

空気を維持できると考えられた。なお、水面変動による気圧変化に伴い空気層中の空気の体積が変化する。振動流水槽に設置した模型の空気層下面の気圧は、その部分の水深が 0.38m であることから振動流を作用させる前には 1.038 気圧程度であって、波高 0.1m の波を作用させたことで±0.005 気圧の範囲で変化すると計算される。本実験による波高の変化は、空気層の体積を 0.5%程度膨張させるものの、Table 4.3 に示した空気層からの空気の漏出率には大きな影響を与えないと言えた。

以上の水槽実験から、底盤上に砂が最も堆積しなかった Model IXの形状が、漁港でのナマコ養殖の実証実験に最も適していると考えられたため、模型を現地スケールに戻して幅 3m、奥行き 1.84m、高さ 0.6m、重さ 2.5ton のコンクリート構造物を設計した (Fig. 4.7)。なお、Model IXは、振動流水槽での実験結果では、空気層から 61%の空気が漏出したため、当該構造物においても相当量の空気の漏出が予想される。一方、振動流水槽での実験条件からはシールズ数が 0.2 程度と計算されるため、掃流移動状態及び浮遊移動状態の砂を観察できたと考えられた。

4.3.2 揚水及び送気システムの種苗生産と養殖への検証

実証実験の結果、ローテーションフロー風車を海水揚水に供することでスゲアマモ種苗が生産できること、また、送気に供することでナマコを漁港水域に閉じ込めて養殖できることが明らかとなった。また、揚水システムを用いて生産したスゲアマモ栄養株を漁港水域に移植することで、ナマコの住み場となるスゲアマモ群落が形成され、送気システムを用いて漁港水域に閉じ込めたナマコの育成機能が向上し、養殖効果が高められる可能性も示唆された。

送気システムの実証実験に供したコンクリートブロックは、空気層に 1 基あ

たり最大 138.6ℓ の空気を保つよう設計されている (Fig. 4.7)。送気システムは、Fig. 4.14 に概要を示したとおり、岸壁上にある陸側の風車が漁港開口部の西側に設置された 4 基のブロックに、もう一方の風車が漁港開口部の東側に設置された 6 基のブロックに送気するよう構築されている。4 基及び 6 基のブロックの空気層の体積は各々 554.4ℓ, 831.6ℓ とみなされる。風車に取り付けたピストンポンプの容量が 0.105ℓ であること、また、ブロックの設置水深が概ね 4m 前後にあることから、西側と東側に設置された各々 4 基及び 6 基ブロックに送気するためには、風車が各々 3,772 回転及び 5,583.6 回転する必要があると計算される。実証試験に供した風車は、第 3 章の Fig. 3.31 に風速と回転数の関係を示したとおり、送気システム構築直後の風速が 6m/s 程度であったことから、30rpm 前後の速さで回転していたと推察される。風車がこの速さで回転数した場合、漁港開口部の西側及び東側に設置されたブロックの空気層を全て満たすためには、各々 126 分間、186 分間が必要と考えられる。送気システム構築から約 3 時間後にはブロック設置場所の東西端の水域に、余剰の空気の泡を確認できたことから、風車に付したピストンポンプからは概ね、実証実験の結果どおり送気がなされたと言えた。また、送気システム構築後の検証を通じて、ブロックの空気層には高さ 5cm 以上の空気が維持される様子が観察された。

また、ブロックを設置した場所の中央部分に放流したナマコは、Fig. 4.22 に検証試験の結果を示したとおり、ブロックを超えて漁港外側の水域に移動することはなかった。したがって、縦軸型マイクロ風車、空気層を持たせたコンクリートブロック、風車とブロック及び各ブロック間に送気するためのホースからなる本送気システムによって、ナマコを漁港水域に閉じ込めて養殖することが可能であることが確かめられた。

第4章 参考文献

- 1) 水産庁・マリノフォーラム 21, アマモ類の自然再生ガイドライン, 第3章
アマモ場再生を計画する. 38-39, 2007.
- 2) 財団法人漁港漁村建設技術研究所: 青森県津軽海峡沖波調査報告書,
pp.231,1986.
- 3) 青森県農林水産部水産局漁港漁場整備課, 水産土木設計積算資料(平成28
年度), 2017
- 4) 土木学会鋼構造委員会浮体橋の研究小委員会編, 浮体橋の設計指針,
2006,
- 5) 公益社団法人全国漁港漁場協会漁港 漁場の施設の設計参考図書(2015年
版), 2015
- 6) 漁港・漁場構造物設計計算例(平成16年新刊). 社団法人 全国漁港漁場
協会, 2004
- 7) 大橋正臣, 牧田佳巳, 梶原瑠美子, 伊藤 敏朗 波動流場における稚ナマコ
の行動に関する一考察, 寒地土木研究所月報.775, 35-40, 2017
- 8) 菊地省吾, 浮永久 匍匐性水産動物用の移動防止装置. 特許第1646040号.
- 9) 山田俊郎, 大野史耶, 麻島梨沙, 三浦博, 櫻井泉 空気ポケットフェンスを
用いたナマコ中間育成施設の開発. 平成28年度日本水産工学会学術講演会
集, pp.55-58, 2016
- 10) 山田俊郎, 高橋伸次郎, 麻島梨沙, 櫻井泉 空気ポケットフェンスを用い
たナマコ中間育成施設に関する研究Ⅱ. 平成29年度日本水産工学会学術講演
会集, pp.162-165, 2017
- 11) 榎木亨, 松見吉晴 魚礁背後の水平渦流による地形変動機構について. 第
30回海岸工学講演会論文集, pp.288-291, 1983.

- 12) 林正徳, 剥離流と離散渦法について. *ながれ*, 5, pp.4-15, 1986.
- 13) 松見吉晴, 瀬山明 群体魚礁周辺の流況特性について. 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.652-656, 1985.
- 14) 公益社団法人全国漁港漁場協会 漁港・漁場の施設の設計参考図書 (下) pp.772-785, 2015.
- 15) 榎木亨, 松見吉晴, 北口雅章 魚礁周辺の局所洗掘とその対策工法について. 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.345-349, 1984.

第5章 総合考察

風力エネルギーを持続可能な水産生物培養システムに利用するため、2次元シミュレーション、小型トラックや風洞を用いた実験を通じてトルク係数とパワー係数を求め、空力出力性能を評価した結果、ブレード幅 250mm、設置角度 55° のローテーションフロー風車を実証試験に供することとした（第2章）。また、漁業者が出入りする漁港での供用を想定していることから、ブレードにゴム引布を採用し、軽量で安全性が高く、メンテナンスしやすい風車を設計した。この風車について、揚水ポンプと送気ポンプを取り付けた揚水システムおよび送気システムを風洞に持ち込んで設計ラインを求め、さらに、実証試験を行った結果、津軽半島津軽海峡沿岸の漁港における風況条件下で、揚水システムについてはアマモ種苗生産に、送気システムについてはナマコ養殖に供できると推察された（第3章）。

さらに、津軽半島の津軽海峡沿岸に面した漁港に Fig. 5.1 に外観を示した揚水システム、即ち、ベーンポンプを付けた風車で汲み上げた海水を、スゲアマモの種子を播種した 1ton 水槽に配水した結果、3 か月後には実生が認められ、6 か月後には草丈 15cm 程度に成長した。揚水システムを用いて生産したスゲアマモ栄養株は、ナマコの住み場や餌場となることを期待して漁港水面内に移植した（第4章）。

また、同じ漁港内に送気システム、即ち、エアーポンプをつけた風車から漁港開口部の幅 30m の範囲にある水深 4.5m 前後の海底に設置した空気層をもつコンクリートブロックに送気するよう配管し、漁港水面内にナマコを閉じ込めることで養殖を試みた（第4章）。なお、ブロックは、あらかじめ波動水槽及び回流水槽を用いて模型実験を行い、模型周辺の水の流れや砂の動きの観察結果から、模型周辺に洗掘が起こりにくく、かつ、底盤部位に砂が堆積しない形状を選

定した。選定した模型について、縮尺を10倍に拡大し、長さ3m、幅1.84m、高さ0.6m、重さ3ton、空気層の体積138.60のコンクリートブロックについて、送気システムに供した。システムを構築した2018年3月から約1年間にわたって送気状況、ブロックの安定性及び漁港水面へのナマコ閉じ込め効果を追跡調査した結果、風車からの送気がなされ空気層が維持され、ブロックに滑動や転倒などなく、ナマコが空気層を超えて漁港外に移動することが確かめられた（第4章）。以上の一連の研究から、持続可能な水産生物培養システムに風力エネルギーが適用できることを明らかにした。

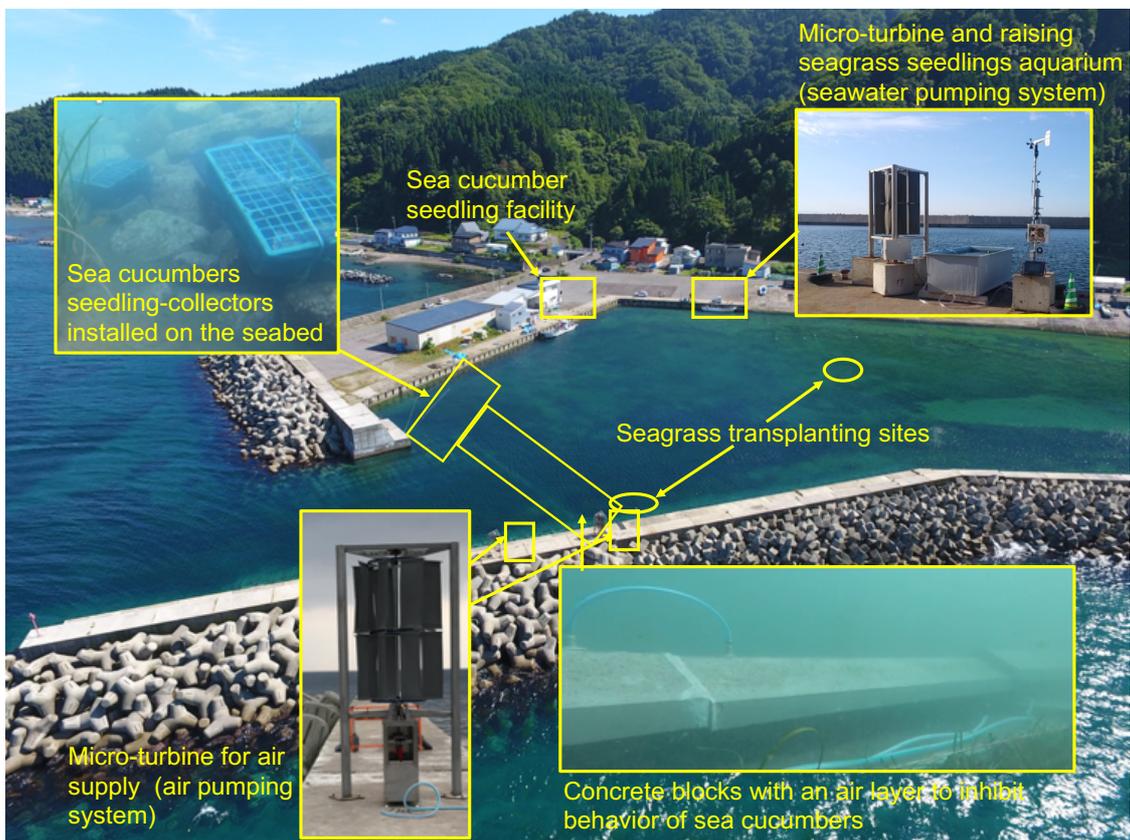


Fig. 5.1 Appearance of the sustainable culture systems for fisheries organisms using wind energy constructed in the fishing port on the coast of Aomori Prefecture, on August 10, 2021.

5.1 風力エネルギーを利用した水産培養システムの展開

我が国には、全ての都道府県に合わせて2,765の指定漁港が存在する。これら、指定漁港の中には、複数の地区が含まれることがあるため、防波堤などで囲まれたいわゆる漁港の数は、指定漁港の数を上回る。

一方、ナマコは、Table 5.1 に 2020 年の漁獲量を示したとおり、北海道から九州にかけて 39 道府県求められ 1 千 ton が漁獲された。全国津々浦々に漁港があり、かつ、ナマコが我が国の各沿岸海域で漁獲されていることから、本送気システムを用いた漁港でのナマコ養殖には広範な需要が期待できる。本送気システムを導入できる漁港は、ナマコの成育に適した水質、底質や餌料などの環境にあること、漁港開口部の水深がブロック設置後にあっても漁船の航行に支障ない十分な深度があること、設置場所の底質が比較的平坦で安定していること、ブロックが安定する範囲の波浪環境にあること、閉鎖性が高くブロックの設置範囲が比較的小さな範囲ですむこと、漁港利用に支障なく送気用風車を設置できる場所があること、漁港水面に放流するナマコ種苗が入手できることなど、いくつかの条件を満たす必要がある。

漁港水面は、稚ナマコの生息に適する静穏な環境の形成されており¹⁾、餌料となる付着珪藻が一般に豊富なためナマコの好適な成育環境にあることから、陸奥湾では多くの漁港がナマコ漁場として利用されている。また、我が国の指定漁港数と漁港地区に所属する登録動力漁船数は、昭和 55 年に各々2,834 隻、302,538 隻であったのが、27 年後の平成 28 年には各々2,827 隻、170,457 隻となった²⁾。この間の減少割合は、漁港数の 0.2%に対して漁船数では 43.7%となり、漁港に比べ漁船が著しく減少したことがわかる。水産庁は、漁港水面の中には、利用の低下に伴って水面に余裕が生じている地区があるため、水産白書の「令和 2 年

度に講じようとする施策」の中で、「漁業者の減少や高齢化，漁船の減少に対応するため，漁港機能の再編・集約化を図ることにより，漁港水域の増養殖場としての活用等，漁港施設の有効活用・多機能化を推進する」と記しており，“漁港ストック”の最大限の活用と漁村のにぎわいの創出を目指すとしている³⁾。したがって，本システムによる漁港での匍匐性水産動物の養殖は，水産庁が示す漁港利用の方向とも一致していると言える。

ナマコ種苗については，実証試験システムを構築した漁港を利用する漁業者が，青森県が作成した「漁業者が行えるなまこ種苗低コスト生産・放流ガイド⁴⁾」に従って，自ら親ナマコの採取，採卵・受精，浮遊幼生の給餌飼育，着底した稚ナマコの漁港水面への沖出し，幼ナマコの放流などの一連の作業を行なっている (Fig. 5.2)。このような，漁業者による増殖の取り組みによって，風力エネルギーを利用したナマコ養殖が持続可能な水産資源培養に貢献できるものと考えられる。

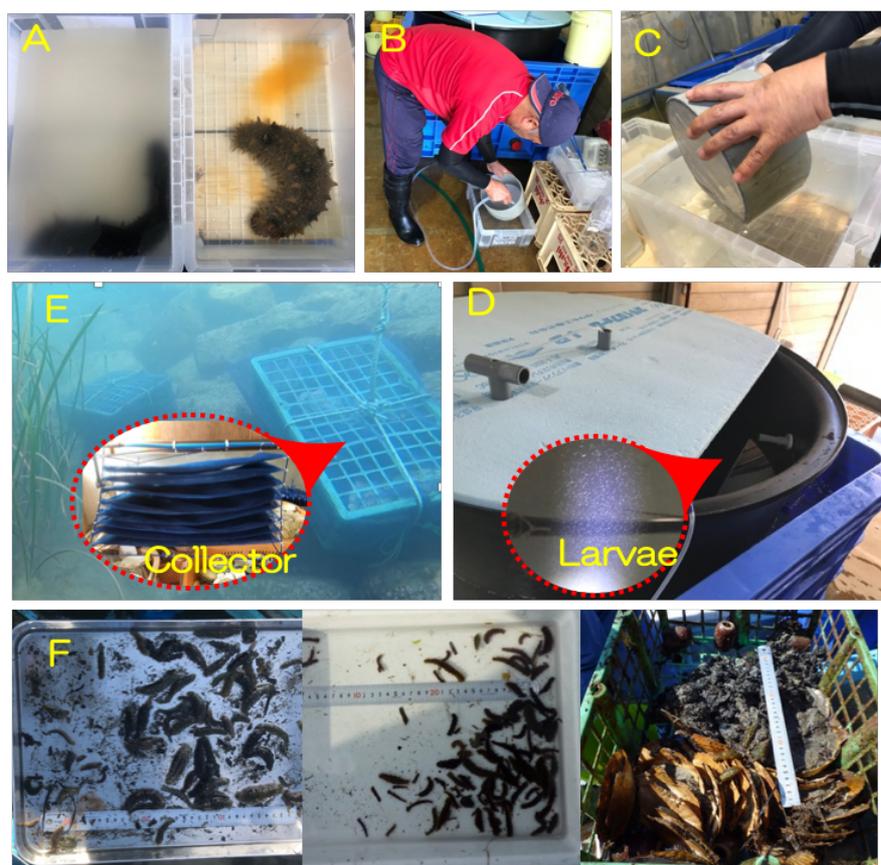


Fig. 5.2 Photos show the sea cucumber seeds production by the fishermen. A, spawning eggs and spermatozoa; B, egg wash; C, egg sorting; D larvae cultivation; E, release of juvenile sea cucumber onto seabed; F, young sea cucumber after 8 months from the release.

本送気システムは、ナマコに限らず匍匐性水産動物を漁港水面に閉じ込め養殖に適用できると考えられる。匍匐性水産動物のうち、ウニ、アワビ及びサザエについては、我が国の漁業生産上重要な魚種であることから農林水産省の統計に都道府県別漁獲量が示されており (Table 5.1), 各々33, 38 及び 33 都道府県から計 6,800ton, 700ton 及び 4,600ton が漁獲されている。これらの魚種についても、送気システムを設置できる物理的条件にあつて、かつ、生息できる環境条件にある場合、本システムを用いた養殖が可能と考えられる。

以上のとおり、本研究を通じて、風力エネルギーを水産資源培養への新たな利用方法を示すことができた。

Table 5.1 Fish catches of the four creeping fisheries animal species in 2020 and the number of designated fishing port areas, by prefecture

Prefecture	Fish catch (100ton)				Number of fishing port
	Sea cucumber	Sea urchin	Abalone	Top shell	
Hokkaido	23	41	0	0	243
Aomori	8	5	0	0	85
Iwate	0	7	1	-	99
Miyagi	2	5	1	-	143
Akita	0	-	0	1	22
Yamagata	0	-	0	1	15
Fukushima	0	0	0	-	10
Ibaraki	0	0	0	-	24
Chiba	0	0	1	2	68
Tokyo	0	-	0	0	23
Kanagawa	0	0	0	2	25
Nigata	1	0	0	4	64
Toyama	0	0	0	0	16
Ishikawa	2	-	0	2	69
Fukui	1	0	0	1	44
Shizuoka	0	0	0	1	48
Aichi	1	0	0	1	34
Mie	1	0	0	3	72
Kyoto	1	0	0	1	33
Osaka	1	-	0	0	13
Hyogo	3	0	0	1	53
Wakayama	0	0	0	0	94
Tottori	0	0	0	1	18
Shimane	1	0	0	4	83
Okayama	1	-	0	0	26
Hiroshima	1	0	0	0	44
Yamaguchi	5	2	0	6	97
Tokushima	x	0	0	0	29
Kagawa	1	0	0	0	92
Ehime	1	0	0	3	190
Kochi	0	0	0	-	88
Fukuoka	1	2	1	2	65
Saga	0	0	0	1	46
Nagasaki	2	2	0	9	228
Kumamoto	0	1	0	0	103
Oita	3	0	0	2	110
Miyazaki	x	0	0	0	23
Kagoshima	0	1	0	0	139
Okinawa	0	0	-	-	87
Total	61	68	7	46	2,765

0, catch of less than 100 tons; -, no catch; x, not published.

5.2 風力エネルギー利用の経済性と環境貢献についての検討

4章では、揚水システム及び送気システムを用いることで、電力を用いることなくアマモ種苗の生産と漁港水面にナマコを閉じ込めて養殖できることを実証した。ここでは、3章の実証実験における揚水、送気及び風況観測結果を基に、電気駆動ポンプを用いた場合の揚水、送気に要する電気料金と二酸化炭素排出量を試算し、本システムの経済性と環境貢献を検討した。

1) 揚水システムの経済性と環境貢献

Fig. 5.3 は、2020年6月から2021年5月までの期間について、揚水実証実験の風向風速計（第3章 3.3.1.2, Young 製 5103）で記録された10分間毎の平均風速の出現頻度を月別に表した。データに欠測は無く、風速 0m/s は、2020年6月に3回、7月に6回、8月に1回、9月に1回、2021年1月に2回、2月に5回、5月に3回の計21回記録された。

各月の平均風速±標準偏差は、2020年6月-2021年5月に各々2.1m/s±1.8, 2.2m/s±1.2, 2.3m/s±1.4, 3.3m/s±2.1, 2.8m/s±1.5, 2.8m/s±1.5, 3.4m/s±1.9, 3.0m/s±1.8, 3.5m/s±1.8, 2.8m/s±1.6, 3.1m/s±0.6, 2.5m/s±1.5であり、2020年6月に2.1m/sで最小値を、2021年2月に3.5m/sで最大値を示した。

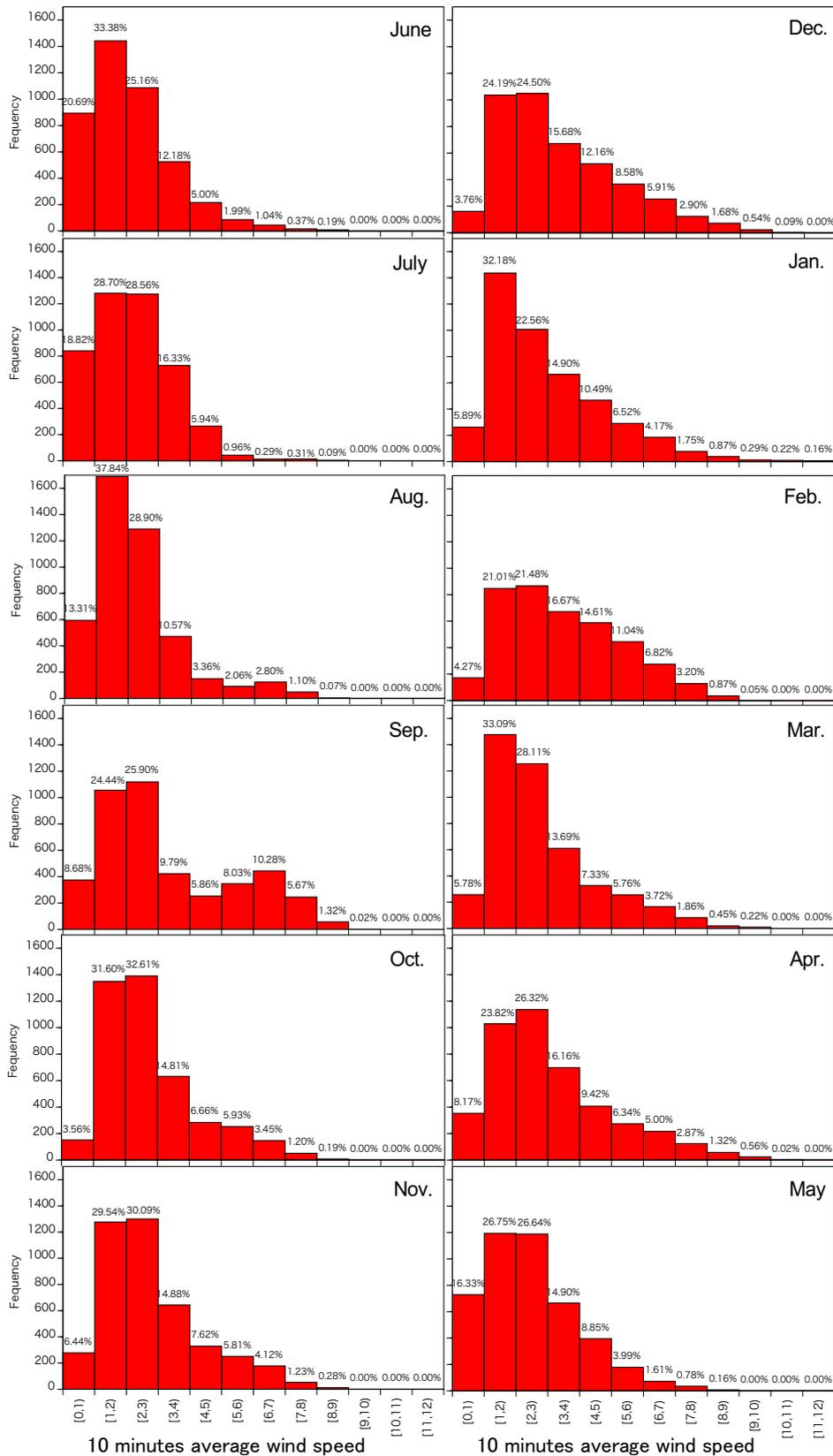


Fig. 5.3 Frequency of appearance of 10 minutes average wind speeds from June 2020 to May 2021.

Fig. 5.4 は、揚水実証実験（3章 3.3.1.4）の結果から得られた、1 分間の平均風速（ V_{avg} , m/s）と風車の回転数（ R_s , rpm）の関係を示した。この関係から、揚水ポンプの性能特性は、平均風速 3m/s 以上において式 (1) のとおり得られた。

$$R_s = 5.7V_{avg} - 17.6 \quad (\text{決定係数 } R^2:0.81) \quad (1)$$

実証試験で海水をくみ上げた量を把握するため、実証試験地で測定された 10 分間の平均風速を式 (1) に当てはめ得られた回転数に、ペーンポンプの容量である 0.2ℓ を乗じ、月ごとの揚水量を求めた (Table 5.3)。

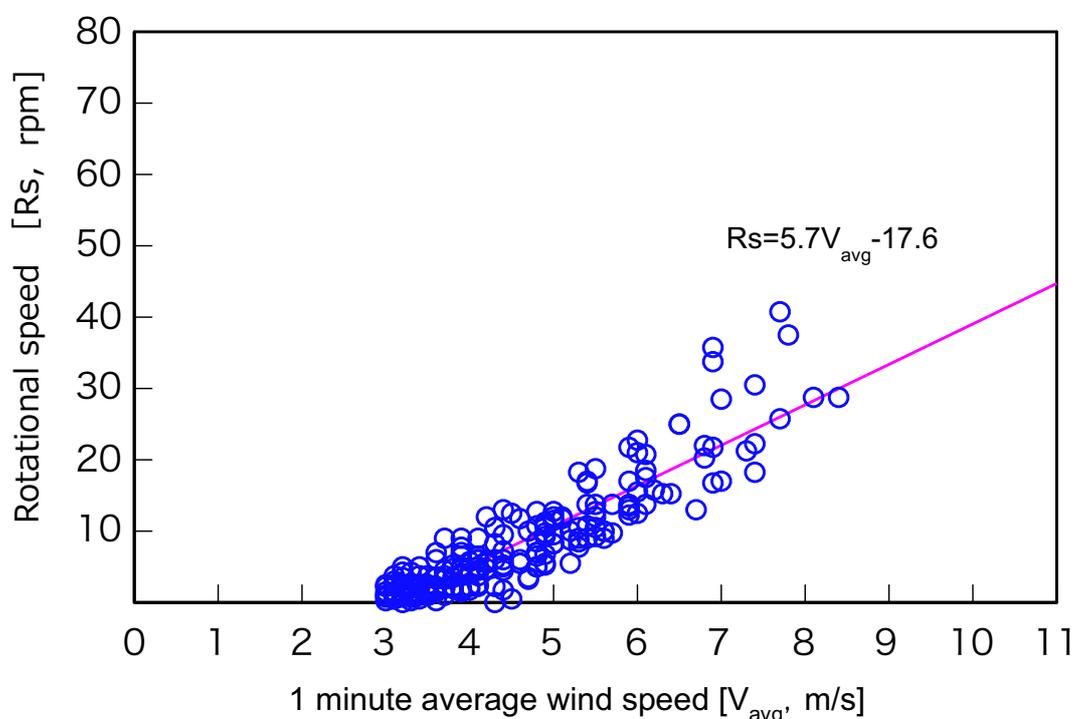


Fig. 5.4 Relationship between wind speed and rotation speed.

実証実験で揚水された海水を、電動ポンプで揚水する場合に必要な消費電力量及び電気料金、発電による二酸化炭素排出量を試算した。電動ポンプは、市販の海水用加圧揚水ポンプを選定し、その仕様を Table 5.2 に示した。電気使用基本料金、電力量料金単価、再エネ発電賦課金単価は、東北電力⁵⁾及び東京電力⁶⁾を参考に毎月の基本料金を 100 円、電力量料金単価を 18 円/kWh、再生可能エネルギー発電促進賦課金を 3.36 円/kWh⁷⁾とした。なお、二酸化炭素排出係数は、

東京電力⁸⁾が報告する 0.44kg-CO₂/kWh を用いた。試算結果を Table 5.3 に示した。

Table 5.2 The electric pump specifications used to estimate power consumption, electricity bills and CO₂ emissions.

A power source(V)	Single-phase alternating current 100V
Maximum supply(L/min)	17
maximum Lift width(m)	20
Weight(kg)	4
Size(W×D×H) (cm)	15.9×13.8×26.3
Rated output power(kW)	0.15

Table 5.3 Estimated power consumption, electricity bills and CO₂ emissions when pumping seawater using the electric pump.

Month	Amount of pumped water(ℓ)	Power consumption (kWh)	Electricity bills (Yen)	CO ₂ emissions (kg)
June	8,207	1.2	126	0.5
July	8,390	1.2	126	0.5
August	12,249	1.8	138	0.8
September	40,983	6.0	229	2.7
October	18,965	2.8	160	1.2
November	20,725	3.0	165	1.3
December	36,571	5.4	215	2.4
January	28,701	4.2	190	1.9
February	36,131	5.3	213	2.3
March	23,567	3.5	174	1.5
April	30,660	4.5	196	2.0
May	15,475	2.3	149	1.0
Total	280,624	41.3	2,081	18.2

本揚水システムを用いた実証試験地における揚水量は、式(1)から年間280,624ℓと計算された。市販の電気駆動式の海水用加圧揚水ポンプで揚水する場合、年間の消費電気量、電気料金及び発電による二酸化炭素排出量は41.3kWh及び2,081円、18.2kgと試算された。揚水に電気ポンプを用いる場合は、電力使

用料に加え発電に伴う二酸化炭素が発生する。

本揚水システムは、スゲアマモの種苗生産を目的に構築された。スゲアマモを海底に移植することで、アマモ場が形成され、光合成を通じて根や地下茎など地下部に炭素が固定される。4章4.1では、1ton水槽を用いて、スゲアマモ種苗を168株生産し、1m²あたり1株を目安に広さ約170m²漁港の海底に移植した。約170m²のスゲアマモ群落による二酸化炭素吸収量は、既報のアマモ場の二酸化炭素吸収係数である4.9tonCO₂/ha/year⁹⁾から、0.083ton CO₂/yearと計算される。

環境省は、1人当たりの二酸化炭素の年間生活排出量を1.26tonCO₂¹⁰⁾と報告している。これから2,570m²のアマモ場を造成することで、1人分の二酸化炭素生活排出量を吸収すると推察される。本システムの実証試験を通じて、風力エネルギーを利用したスゲアマモ種苗生産手法を開発できた。風力エネルギーを活用して生産したスゲアマモ種苗を用いて約2,570m²のアマモ場を造成することができれば、1年間の生活1人分のカーボンニュートラルの状態を実現できる。

また、実証実験地では、12-3月の冬期に漁港管理者が荷捌き場や関連道路をタイヤショベルなどの重機を用いて除雪している。揚水システムによる12月-3月の冬季間の揚水量は、式(1)から各々36,571ℓ、28,701ℓ、36,131ℓ、23,567ℓと計算される。本揚水システムによって冬期間に1日あたり1ton程度の海水を汲み上げ、融雪に利用することが可能と考えられる。

本揚水システムを利用して、スゲアマモの種苗を生産する場合、電気料が発生しない。このため、種苗生産に係る経費を接舩することが可能であり、また、二酸化炭素が発生しないことから環境に貢献すると言える。

2) 送気システムの経済性, 環境貢献の検討

Fig. 5.5 は 2020 年 6 月から 2021 年 5 月までの期間について, 送気実証実験の風向風速計 (第 3 章 3.3.2.3, Young 製 5103) で記録された 10 分間毎の平均風速の出現頻度を月別に示した。データに欠測が無く, 風速 0m/s は, 2020 年 6 月に 162 回, 7 月に 137 回, 8 月に 34 回, 9 月に 23 回, 10 月に 2 回, 2021 年 4 月に 18 回, 5 月に 20 回記録された。

各月の平均風速±標準偏差は, 2020 年 6 月-2021 年 5 月に各々 2.7m/s±1.9, 3.0m/s±1.8, 2.9m/s±2.0, 4.7m/s±3.2, 3.7m/s±2.0, 3.6m/s±2.0, 4.6m/s±2.6, 4.3m/s±2.5, 4.6m/s±2.3, 3.6m/s±2.1, 4.0m/s±2.2, 3.2m/s±1.9 であり, 2020 年 6 月に 2.7m/s で最小値を, 2020 年 12 月及び 2021 年 2 月に 4.6m/s で最大値を示した。

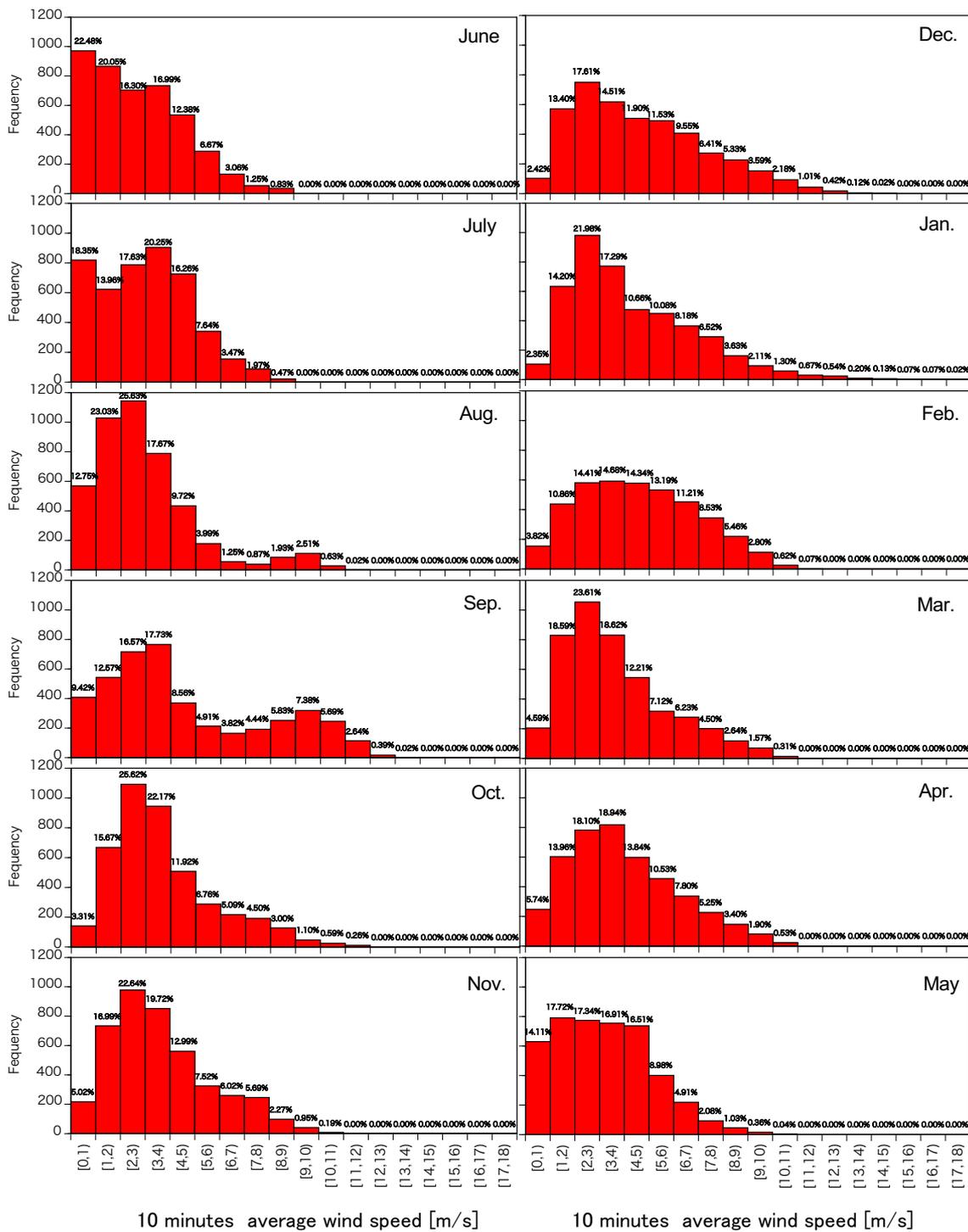


Fig. 5.5 Frequency of appearance of 10 minutes average wind speeds from June 2020 to May 2021.

Fig. 5.6 は、送気実証実験（3章 3.3.2.4）の結果から得られた 1 分間の平均風速（ V_{avg} , m/s）と風車の回転数（ R_s , rpm）の関係を示した。この関係から、送気に使用したエアープンプの性能特性は、平均風速 3m/s 以上において式（2）のとおり得られた。

$$R_s = 8.4V_{avg} - 13.4 \quad (\text{決定係数 } R^2:0.93) \quad (2)$$

実証試験で送気した量を把握するため、実証試験地で測定された 10 分間の平均風速を式（2）に当てはめ得られた回転数に、エアープンプの容量である 0.105 θ を乗じ、月ごとの送気量を求めた（Table 5.3）。

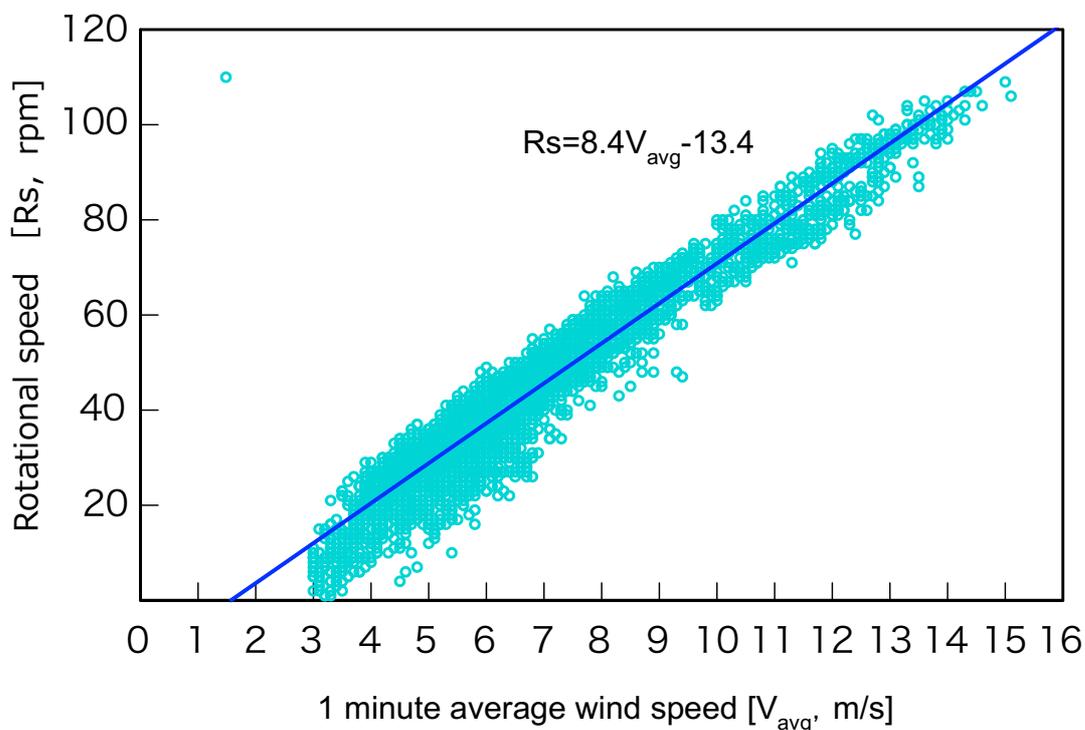


Fig. 5.6 Relationship between wind speed and rotation speed.

実証実験の送気量を電動ポンプで送気すると仮定した場合に要する、消費電力量及び電気料金、発電による二酸化炭素排出量を試算した。電動ポンプは、市販の電気駆動式のエアープンプを選定し、その仕様を、Table 5.4 に示した。電気使用基本料金、電力量料金単価、再エネ発電賦課金単価は、東北電力⁵⁾及び東

京電力⁶⁾を参考に毎月の基本料金を100円、電力量料金単価を18円/kWh、再生可能エネルギー発電促進賦課金を3.36円/kWh⁷⁾とした。なお、二酸化炭素排出係数は、東京電力⁸⁾が報告する0.44kg-CO₂/kWhを用いた。試算結果をTable 5.5に示した。

Table. 5.4 The electric pump specifications used to estimate power consumption, electricity bills and CO₂ emissions.

A power source(V)	Single-phase alternating current 100V
Maximum air volume(L/min)	7
discharge pressure(Mpa)	0.07
Rated output power(kW)	0.018

Table. 5.5 Estimated power consumption, electricity bills and CO₂ emissions when air supply using the electric pump.

Month	Amount of air supply (ℓ)	Power consumption (kWh)	Electricity bills (Yen)	CO ₂ emissions (kg)
June	38,985	4.7	200	2.1
July	48,926	5.9	225	2.6
August	34,770	4.2	189	1.8
September	105,024	12.6	369	5.5
October	62,078	7.4	259	3.3
November	64,078	7.7	264	3.4
December	98,529	11.8	352	5.2
January	88,303	10.6	326	4.7
February	91,463	11.0	334	4.8
March	60,765	7.3	256	3.2
April	72,771	8.7	286	3.8
May	54,863	6.6	240	2.9
Total	820,556	98.5	3,301	43.3

本送気システムを用いた送気量は、実証実験地での風況結果をもとに式(2)から年間820,556ℓと計算された。市販の電動ポンプで送気する場合、年間の消費電

力量, 電気料金及び発電による二酸化炭素排出量は 98.5kWh 及び 3,169 円, 43.3kg と試算された。送気に電気ポンプを用いる場合は, 電力使用料に加え発電に伴う二酸化炭素が発生する。

ナマコ養殖用構造物は, 漁港開口部の海底に設置されるため, 電力会社が保有する商用の配電線網から, 防波堤の開口部付近まで系統電源を引き込まなければならず, 送電線の引込み距離によっては系統電源の設置費用が相当嵩む。本送気システムは, 開発中のため, ローテーションフロー風車 1 基当たりの製作コストに約 75 万円のコストを要した。しかし, 風車を大量生産することによる材料原価の削減や, 風況及び送気条件に合わせ, 必要最小風車を用いることで製作コストの削減が可能である。

本送気システムを利用して, ナマコ養殖をする場合, 施設の維持に電気料金及び二酸化炭素が発生しないことから, 経済性が高く環境に貢献する。さらに, 風車サイズの最小化, 最適化や商用化による大量生産により, 初期投資費用を抑え, 経済性を高められる可能性がある。

5.3 揚水及び送気システムに利用する風車の最適化

ここでは、揚水及び送気システムの風車の受風面積の最小化、即ち風車の最適化を目的に、風況及び必要とする揚水量及び送気量に見合った受風面積から検討した。

本揚水及び送気システムを用いて、新たにアマモ種苗生産や漁港を活用したナマコ養殖に取り組む場合、風況に応じてできるだけ小型の風車を用いることで、イニシャルコストや維持経費を低減させ、無駄を省くことができる。ここでは、風車の受風面積の最小化、即ち風車の最適化の手順について、実証試験での検討と合わせて説明する。

① 風況の把握

風力エネルギーを利用した水産資源の培養に取り組む場合、まず、風況を把握する必要がある。実証試験地では、季節変化を考慮し自記風速計を用い1年間に渡って風向、風速を観測した。揚水及び送気システムの実証試験地における風況を Figs. 5.3, 5.6 に示したとおりである。

② 揚水及び送気条件の把握

i 揚水条件

漁港の岸壁に設置したアマモ種苗生産用の水槽に海水を汲みあげる場合、海水を汲みあげる揚程は、海面からの岸壁からの高さ、水槽の高さ及び潮汐によって決定される。実証試験では、海面の平均潮位から水槽上端までの高さが 2.2m あったことから、これを揚程とした。

実証試験におけるアマモの種苗生産では、序論に示したとおり、5日に1回の割合で容量 800ℓのスゲアマモ種苗生産水槽の海水の交換が必要と考えられたため、

160ℓ/day, 約 4,800ℓ/month をアマモの種苗を生産するために必要な海水の揚水量とみなした。

ii 送気条件

第 4 章に示したとおり、実証実験では 138ℓの空気層を持つ構造物 10 基に月 1 回の割合で全量の空気を入れ替えることで、漁港水域にナマコを閉じ込め養殖することができ、したがって、実証実験においては約 1,380ℓ/month を構造物の機能維持に必要な空気量とみなした。なお、構造物を水深 4.5m、即ち 1.45 気圧の海底に設置したことから、ナマコの閉じ込め機能の維持に必要な地上からの送気量は、構造物の空気層容量の 1.45 倍に相当する約 2,000ℓ/month とみなした。

③ 揚水及び送気ポンプの選択とポンプ特性の把握

i 揚水ポンプ

アマモ種苗生産に供する揚水ポンプについては、第 3 章に示したとおり、風車の動力を直接ポンプに伝えることができるベーンポンプが最も適していると結論づけられた。実証試験では、市販されている容量 0.2ℓ のベーンポンプを用いた。

揚水システムに供する風車の最適化には、ポンプ特性、即ち回転数(R_s , rpm)とトルク(T , Nm)の関係を把握する必要がある。実証試験に供するベーンポンプのポンプ特性は、第 3 章 3.1.1 のとおり、揚程 2.2m の室内実験にから式 (1) のとおり求められた。

$$T = (0.0357R_s + 1.76) \times (2.2/2.4) \quad (1)$$

ii 送気ポンプ

ナマコ養殖に供する送気ポンプについては、第3章に示したとおり、汎用性があり、ポンプの交換を容易に出来ることを考慮し、実証実験では、市販されている容量0.1050のピストン式エアーポンプを用いた。

送気システムに供する風車の最適化には、ポンプ特性、即ち回転数(R_s , rpm)とトルク(T , Nm)の関係を把握する必要がある。実証実験に供するエアーポンプのポンプ特性は、第3章3.2.1のとおり、水深4.5mを想定した室内実験から回転数(R_s)が異なる式(2) - (5)のとおり求められた。

$$T=0.021R_s+2.6 \quad (R_s:15-30) \quad (2) \quad T=0.013R_s+2.9 \quad (R_s:31-45) \quad (3)$$

$$T=0.007R_s+3.1 \quad (R_s:46-60) \quad (4) \quad T=0.005R_s+3.2 \quad (R_s:61-76) \quad (5)$$

④ 風車特性の把握

風車の最適化には、ポンプ特性に加えて風車特性、即ち風速に対する風車の回転数(R_s , rpm)とトルク(T , Nm)の関係を把握する必要がある。このため、第2章2.4.4に示したとおり風洞実験を行い、実証実験に供するローテーションフロー風車の周速比(λ)とトルク係数(C_T)の関係を式(6)のとおり求めた。この式に、周速比(λ)0.01-0.45の範囲を当てはめトルク係数(C_T)を算出した。また、周速比(λ)を、式(7)及び(8)に当てはめることで回転角速度[ω , rad/s]及び回転数[R_s , rpm]を求めた。さらに、算出されたトルク係数(C_T)、0.75-1.0 m²の範囲の受風面積[A , m²]及び5-10m/sの範囲の風速[v , m/s]を式(9)にあてはめることでトルク(T , Nm)を求め、風車特性を導いた。トルク係数、回転角速度、風速、回転数及びトルクの計算結果をAppendix 2 (Tables 1, 2, 3, 4, 5, 6)に示した。

$$C_T = -0.725\lambda^2 - 0.189\lambda + 0.262 \quad (6)$$

$$\omega = \frac{\lambda v}{r} \quad (7) \quad R_s = \frac{60\omega}{2\pi} \quad (8) \quad T = C_T \frac{1}{2} \rho A v^2 r \quad (9)$$

C_T : トルク係数, λ : 周速比, ω : 回転角速度[rad/s], v : 風速[m/s]

r : 風車半径[m], R_s : 回転数[rpm], π : 円周率, T : トルク[Nm]

ρ : 空気密度[kg/m³], A : 受風面積[m²]

⑤ 揚水システムに供する風車の最適化

揚水システムに供する風車の最適化には、ポンプ特性と風速に対する受風面積別の風車特性を組み合わせ、風速と回転数の関係を表す揚水システムの設計ラインを求める必要がある。このため、Appendix 2 (Tables 1, 2, 3, 4, 5, 6) に計算結果を示した、各風速の段階における回転数とトルクの関係曲線、即ち風車特性を Fig.5.7 にまとめた。これらの風車特性を表す各曲線と揚水ポンプの特性直線の交点から、Fig.5.8 に示すとおり、受風面積 0.75-1.0 m²の範囲で揚水システムの設計ライン、即ち、風速と回転数の関係を求めた。

システムが通年稼働できるよう 1 年を通じてもっとも風速が低い季節の値を用いて検討する必要がある。実証試験地では、6月の平均風速が最も低い値を示したため、この月の10分間の平均風速値を用い受風面積の最小化を用いて検討した。Fig. 5.8 に示す揚水システムの設計ラインに、風速を当てはめ、得られた回転数に 0.20 を乗じて 6月の揚水量を計算し、Fig. 5.9 に受風面積と揚水量の関係性を求めた結果、受風面積[A, m²]と揚水量[L/month]には、式 (10) に示す直線の関係が認められた。

$$L=10,401A+5,448 \quad (\text{決定係数 } R^2:0.98) \quad (10)$$

アマモ種苗生産に必要な揚水量は、5.3 ② - i に示したとおり 4,800 ℓ/month である。本式から、揚水量 4,800ℓ/month を満たす風車の受風面積は、0.98m² と

計算される。したがって、実証試験地では直径 1m、高さ 0.98m 程度の風車があれば、アマモ種苗生産が可能と言える。

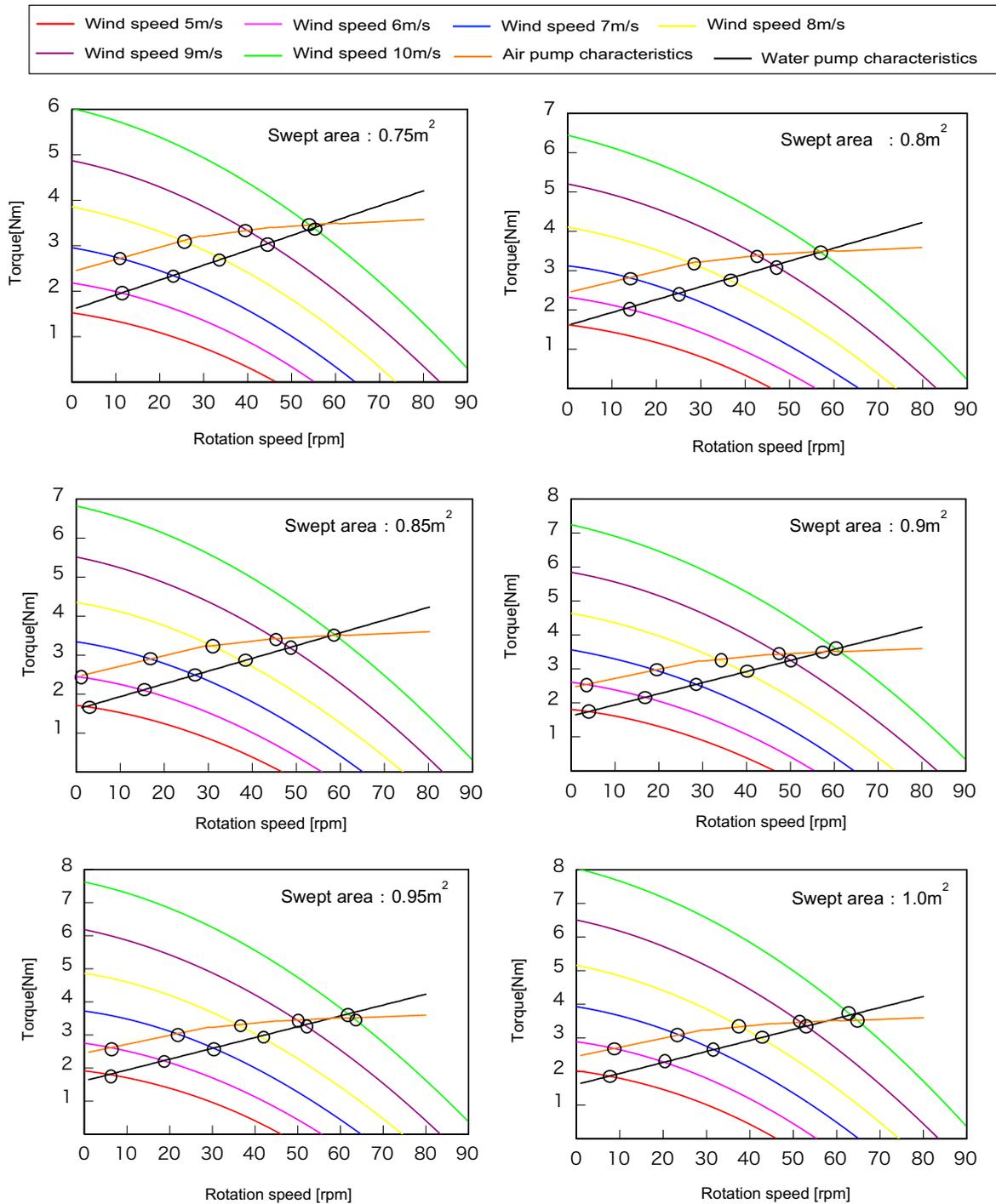


Fig. 5.7 Relationship between rotation speed and torque at each wind speed and Air/Water pump characteristics.

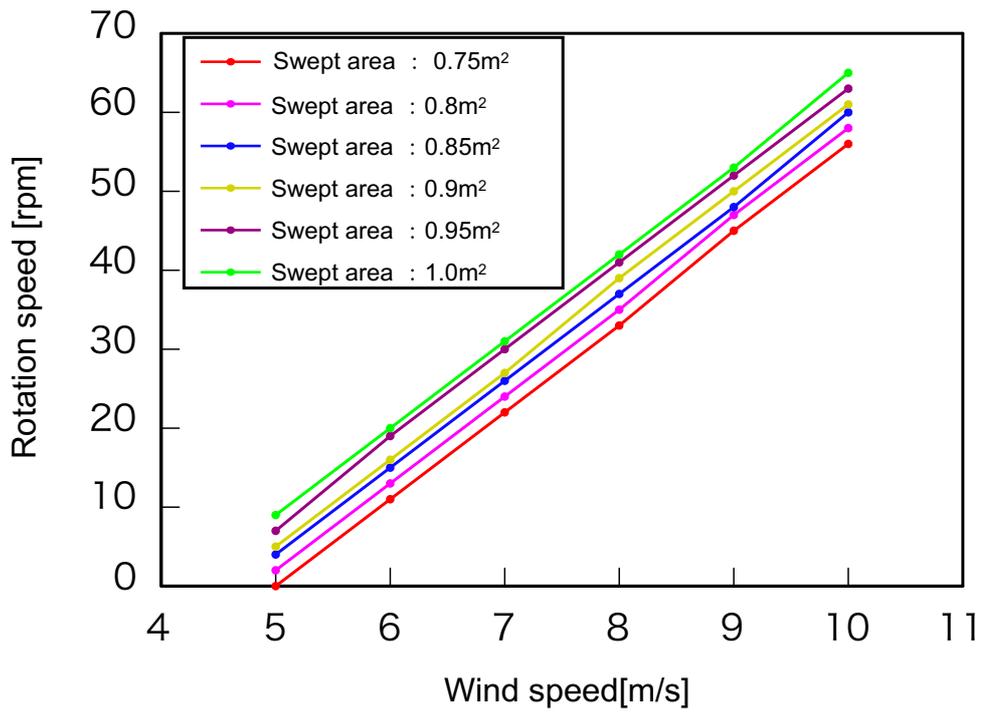


Fig. 5.8 Relationship between wind speed and rotation speed at each swept area.

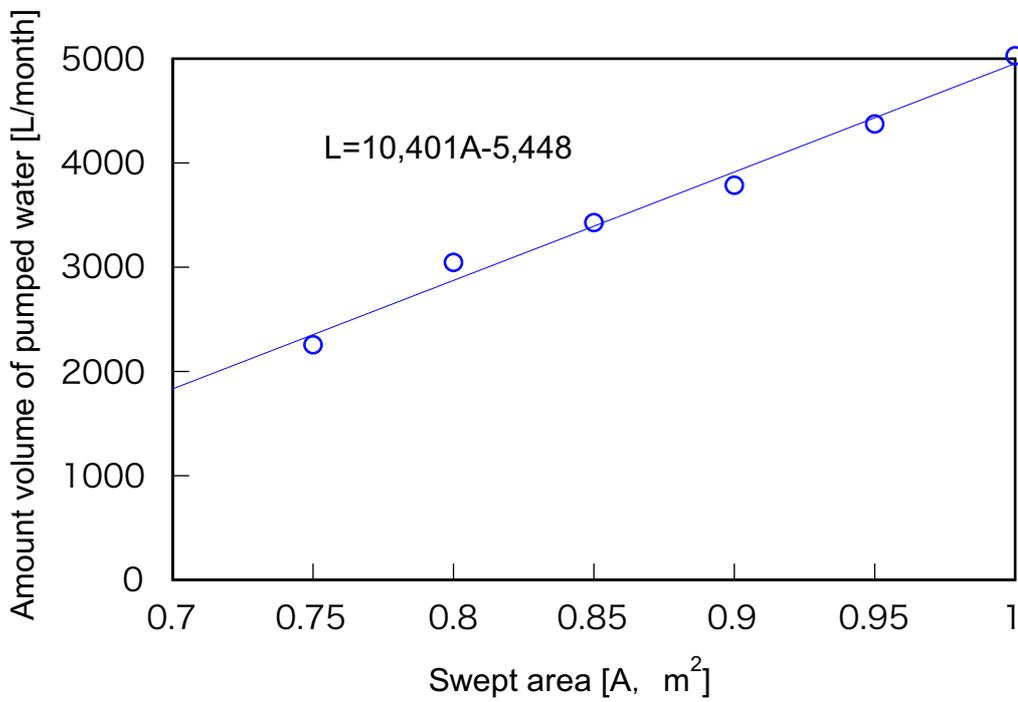


Fig. 5.9 Relationship between amount of pumped water and swept area.

次に、実証試験地と異なる風況下での本揚水システムを用いた場合の風車の最適化の目安となる手順を示す。年間を通じて、揚水システムを稼働させる場合、最も平均風速の値が小さいと見込まれる月について、風況を観測し、各風速の出現割合を Fig.5.10 に示す風速の出現頻度と受風面積の関係に当てはめることで、風車の最適化を図ることができる。例えば、風速 5m/s の風がその月うち 10%、即ち、約 72 時間記録される場所では、受風面積が 0.91m² の風車があればアマモ種苗生産に必要な 4,800ℓ/month の揚水が可能であることが分かる。

以上の手法で、アマモ種苗生産の揚水システムに供する風車を最適化できる。

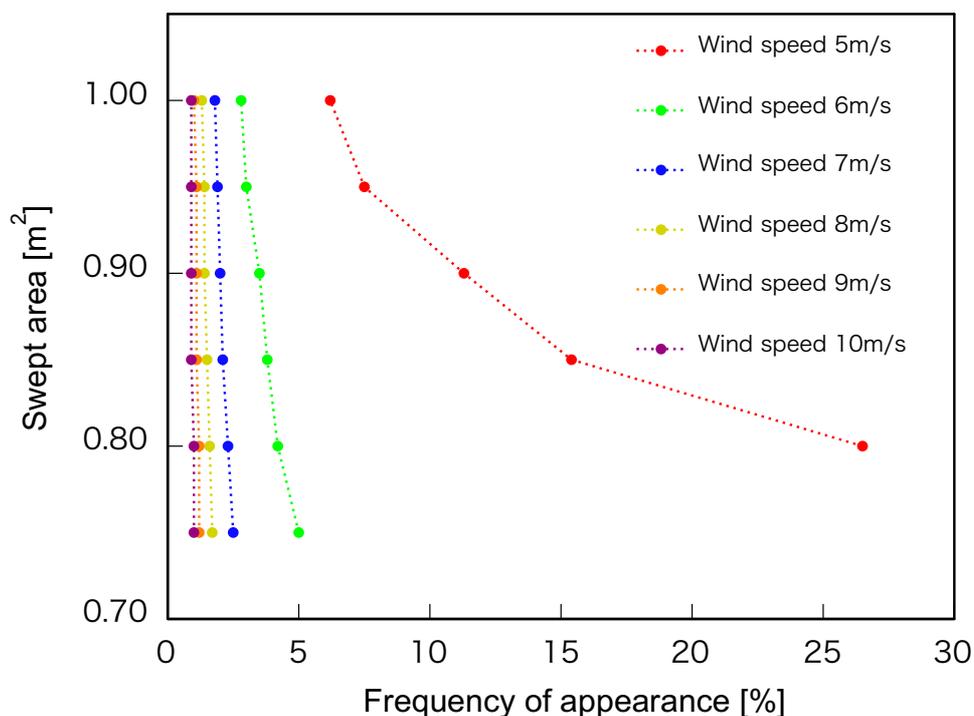


Fig. 5.10 Relationship between a month frequency of appearance at each wind speed and wind turbine swept area.

⑥ 送気システムに供する風車の最適化

送気システムに供する風車の最適化には、ポンプ特性と風速に対する受風面積別の風車特性を組み合わせた、風速と回転数の関係を表す送気システムの設計ラインを求めた。このため、Appendix 2 (Tables 1, 2, 3, 4, 5, 6) に計算結果を示した、各風速の段階における回転数とトルクの関係曲線、即ち風車特性を Fig. 5.7 にまとめた。これらの風車特性を表す各曲線と送気ポンプの特性直線の交点から、Fig. 5.11 示すとおり、送気システムの設計ライン、即ち、風速と回転数の関係を求めた。

システムが通年稼働できるように 1 年を通じてもっとも風速が低い季節の値を用いて検討する必要がある。実証試験地では、6 月の平均風速が最も低値を示したため、この月の 10 分間の平均風速値を用い受風面積の最小化を用いて検討した。Fig. 5.11 に示す送気システムの設計ラインに、風速を当てはめ、得られた回転数に 0.105ℓ を乗じて 6 月の送気量を計算し、Fig. 5.12 に受風面積と送気量の関係を求めた結果、受風面積[A, m²]と送気量[L/month]には、式 (11) に示す直線の関係が認められた。

$$L=11,257A-6,918 \text{ (決定係数 } R^2:0.98) \text{ (11)}$$

ナマコの閉じ込め機能の維持に必要な地上からの送気量は 5.3 ② - ii に示したとおり 2,000ℓ/month である。本式から、送気量 2,000ℓ/month を満たす風車の受風面積は 0.79m² と計算される。したがって、実証試験地では直径 1m, 高さ 0.79m 程度の風車があれば、ナマコの閉じ込め機能の維持が可能と言える。

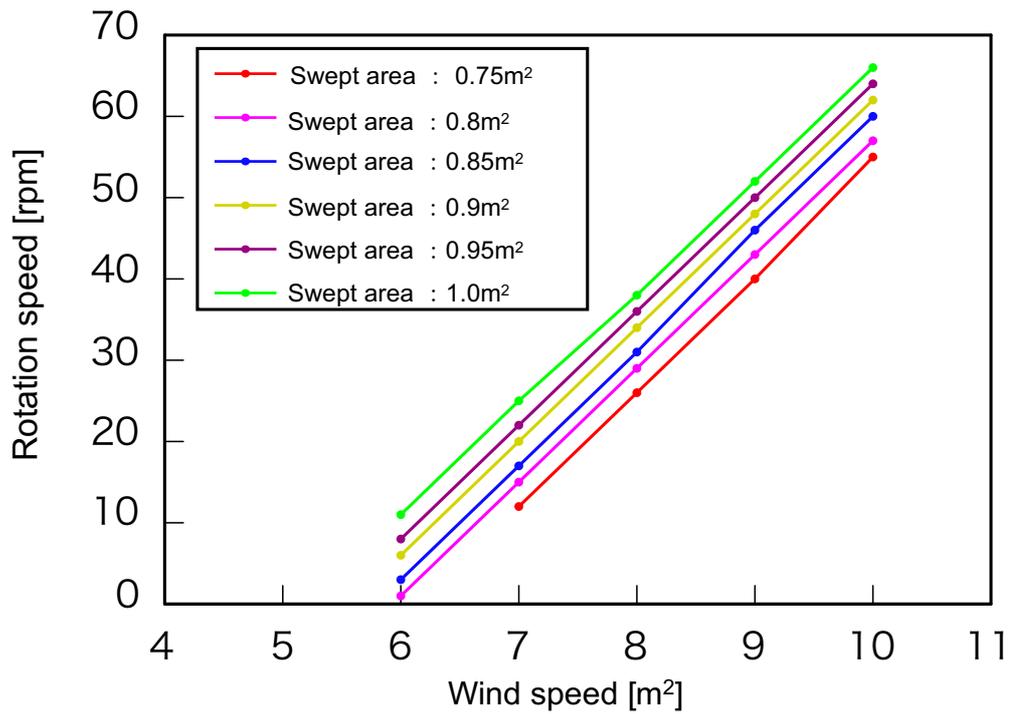


Fig. 5.11 Relationship between wind speed and rotation speed at each swept area.

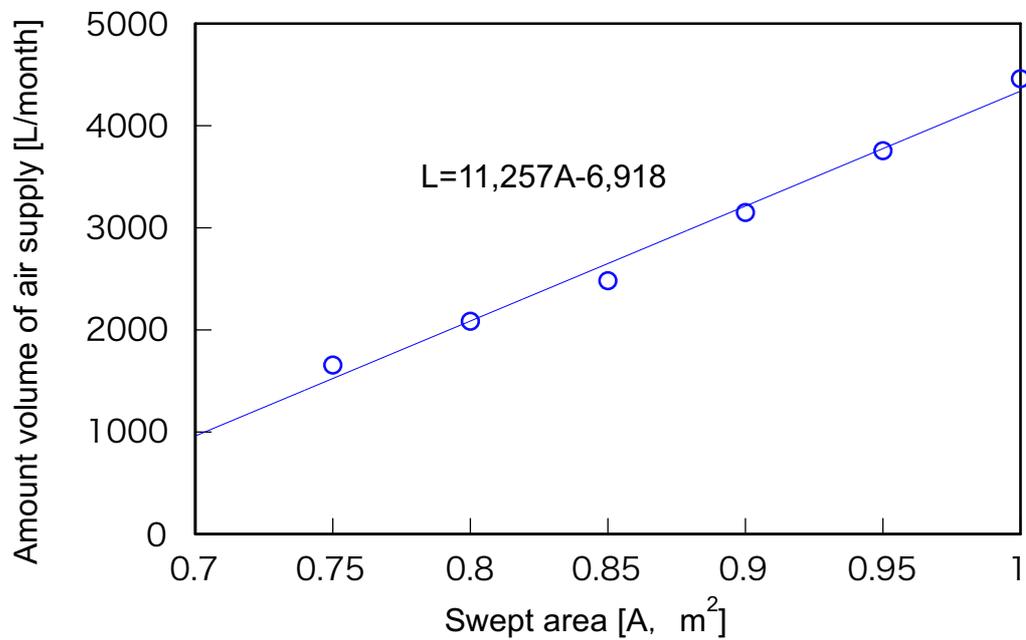


Fig. 5.12 Relationship between amount of air supply and swept area and.

次に、実証試験地と異なる風況下での本送気システムを用いた場合の風車の最適化の目安となる手順を示す。年間を通じて、送気システムを稼働させる場合、最も平均風速の値が小さいと見込まれる月について、風速を観測し、各風速の出現割合を Fig. 5.13 に示す風速の出現頻度と受風面積の関係に当てはめることで、風車の最適化を図ることができる。例えば、風速 6m/s の風がその月うち 8%、即ち、約 58 時間記録される場所では、受風面積が 0.90m² の風車があればナマコの閉じ込め機能の維持に必要な地上からの送気量 2,000ℓ/month の送気が可能であることが分かる。

以上の手法で、ナマコ養殖の送気システムに供する風車を最適化できる。

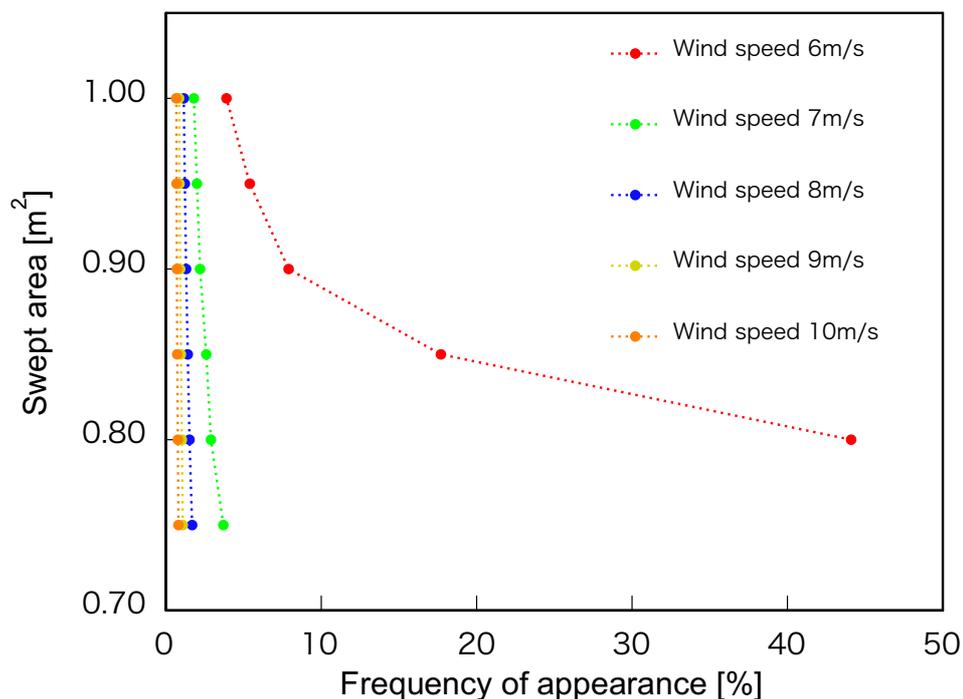


Fig. 5.13 Relationship between a month frequency of appearance at each wind speed and wind turbine swept area.

⑦ 風力エネルギーを利用した水産培養システムに供する風車の最適化

揚水及び送気システムに供するローテーションフロー風車の最適化について、実証試験において取り組んだ手順をもとに、一連の手法を説明した。これらの手順は、Fig. 5.14 に示すとおり、風力エネルギーを利用した水産培養システムに供する風車の最適化スキームとしてまとめることができた。

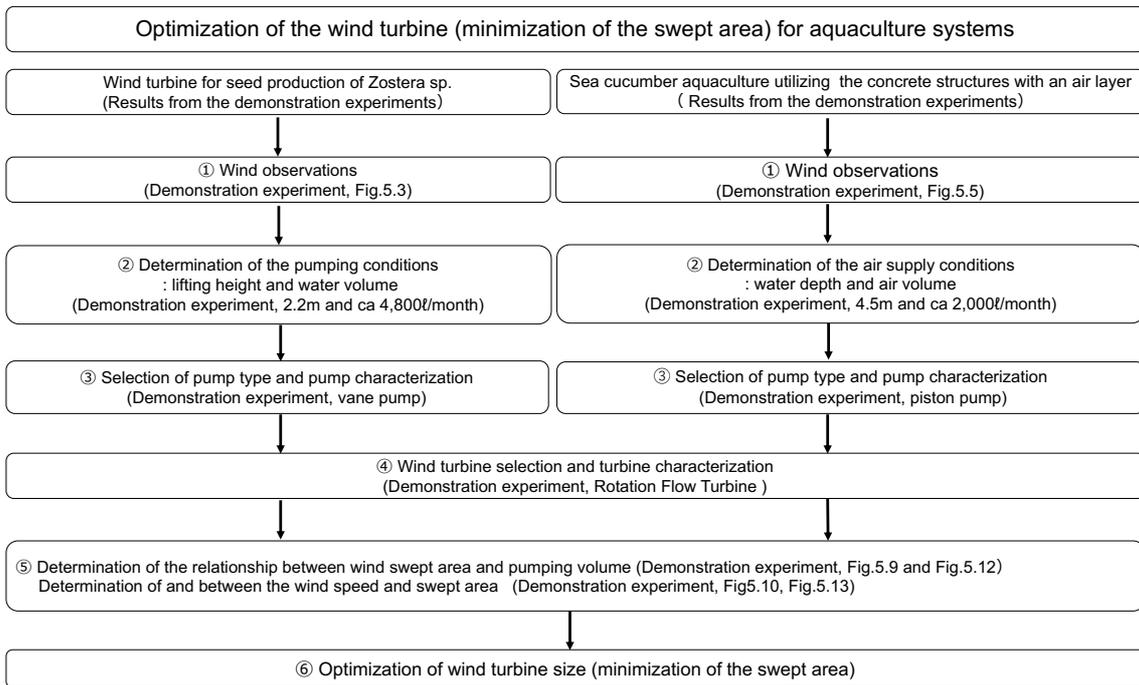


Fig. 5.14 Scheme for optimization of aquaculture systems for fisheries organisms utilizing wind energy.

第5章 参考文献

- 1) 大橋正臣, 牧田佳巳, 梶原瑠美子, 伊藤 敏朗 波動流場における稚ナマコの行動に関する一考察. 寒地土木研究所月報, 775, 35-40, 2017.
- 2) 水産庁, 漁港港勢の概要.
https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_zyoho_bako/kousei/attach/pdf/index-11.pdf
- 3) 水産庁, 令和2年度 水産白書, 第2部 令和2年度水産施策.
<https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/R2/attach/pdf/210604-17.pdf>
- 4) 青森県漁港漁場整備課, 漁業者が行えるなまこ種苗低コスト生産・放流ガイド. 2019.
- 5) 東北電力.電気料金単価一覧表.
<https://www.tohoku-epco.co.jp/dprivate/unit/pdf/ryokin01.pdf>, (参照 2022-3-12) .
- 6) 東京電力.電気の料金プラン一覧.
<https://www.tepco.co.jp/ep/private/plan/index-j.html#tohoku>, (参照 2022-3-12) .
- 7) 経済産業省資源エネルギー庁 なつとく!再生可能エネルギー.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/surcharge.html
- 8) 東京電力. 2020年度のCO₂排出係数について.
https://www.tepco.co.jp/ep/notice/news/2021/1628675_8909.html, (参照 2022-3-12) .
- 9) 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 梅澤有, 佐々木淳 浅海生態系における年間 CO₂ 吸収量の全国推計. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol 75 , No.1, 10-20, 2019.
- 10) 環境省 令和2年度 家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査 結果の概要(速報値) 2021.

第6章 結言

持続可能な水産資源の培養を実現するため、揚水や送気への風車の利用について研究した。

はじめに、2次元シミュレーション、小型トラックや風洞での実験を通じてローテーションフロー風車の風車特性を求めた。次に、風車に接続するポンプの種類を検討し、揚水用のベーンポンプ、送気用のピストン式エアポンプを選択し、それらのポンプ特性（回転数とトルクの関係）を求めた。風車とポンプの特性をマッチングさせ、風速と風車の回転数の関係及び風速とトルクの関係から揚水及び送気システムの設計ラインを求めた。

風力エネルギーを利用した揚水システムをアマモ種苗生産に、送気システムを漁港水域にナマコ閉じ込め養殖に供するため、津軽海峡沿岸の漁港で実証試験を行なった。実証実験では、設計ラインと概ね一致する結果が得られたが、揚水システムではポンプへの空気の流入によって、送気システムではクランク機構の振動による機能の低下が見られた。

これらの設計ラインをもとに、漁港の岸壁に風車、ベーンポンプ及び1ton水槽からなる揚水システムを構築した。また、防波堤上に設置した風車及びエアポンプと、漁港開口部の海底に1380の空気層をもつ長さ3mのコンクリート製構造物10基をホースで繋げ、送気システムを構築した。なお、構造物の形状は、砂に埋没しにくく、周辺の洗掘を起こしにくいよう、振動流水槽と波動水槽での実験を通じて決定した。実証試験の結果、揚水システムを用いて168株のスケアマモ栄養株種苗が生産できた。これら栄養株は、漁港水域の海底に移植した。また、送気システムを用いたナマコを漁港水域に閉じ込め養殖できることを、潜水調査を通じて確認した。

実証試験を通じて、揚水及び送気システムを用いた水産生物の培養において

維持管理に電気料が不要で、かつ、二酸化炭素を排出しないことで環境に貢献することが明らかとなった。さらに、揚水及び送気システムの設計ラインから、運用場所の風況に合わせ、風車を最適化にする手法を示した。風車については、商用化による大量生産によって、製作費などの初期投資費用を抑えられるものと考えられる。

一方、揚水システムについては、ベーンポンプへの空気の流入による機能低下が認められたため、ポンプ自体を海中に水没させるなどの工夫が必要と考えられた。また、送気システムについては、クランク機構の振動によって摩擦が発生し回転数が低下したため、クランク機構の連桿比を高めるなど、振動の抑制を検討する必要があると考えられた。

揚水システムを用いることで、系統電源の有無にかかわらずアマモ種苗生産に取り組むことができるようになる。全国各地でアマモの種苗生産が行われアマモ場が造成されることで、漁業生産や生物多様性の向上、水質や底質の浄化など海域環境の保全が図られ、ブルーカーボンへの取り組みの進展が期待できる。環境貢献の可視化を目的に、今後、本揚水システムを用いて生産したスゲアマモについて、二酸化炭素吸収量や炭素固定量を定量化に取り組む予定である。

また、送気システムについては、ナマコのほかにウニ、アワビ及びサザエなどの匍匐性水産動物を漁港水域に閉じ込め養殖することが可能と考えられる。

風力エネルギーを利用したアマモ場造成による環境貢献や持続可能な養殖漁業の実現のため、本研究で開発したシステムの普及に取り組みたい。

謝辞

本研究の指導を賜った、弘前大学 南條宏肇名誉教授，本田明弘地域戦略研究所長・教授，久保田健准教授，桐原慎二教授に深く感謝の意を表します。

論文作成において，貴重な助言を賜った，弘前大学 官国清教授，片岡俊一教授，島田照久准教授，総務グループ教育研究支援室葛西昭治氏，東京海洋大学池谷毅教授，国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所桑原久実氏に感謝申し上げます。

本研究の調査にご協力いただいた，外ヶ浜漁業協同組合最上雅樹理事ほか漁業者の皆様，野辺地町漁業協同組合熊谷浩氏，青森県営浅虫水族館の皆様，株式会社大坂組大坂将司氏にお礼申し上げます。

Appendix 1 ブレードの弛みの検討

第2章 2.4の風導実験(Ⅱ)にて、ローテーションフロー風車のブレードを柔軟性があり取り扱いやすく、風で飛散した場合でも周囲に対する被害を最小限に留めることができる、ポリエステル系ゴム引布(帝国繊維社製 TH5, 0.57mm厚)を用いた。そこで、柔らかく容易にアレンジが出来る素材の利点を活かして、ブレードの弛みを調整した場合の風車性能について検討した。

実験装置及び実験方法

本実験は、応用力学研究所の地球大気動態シミュレーション装置(大型境界層風洞)で行なった。Figs. 1, 2にローテーションフロー風車の仕様を示した。ブレード自体の縦長さは755 mmがあり、基準軸長を750 mmとして軸長を610 mmまで短縮することで弛み割合(サグ率=翼全長/弛み長)を変えた(Fig. 2)ブレードの材質は、ポリエステル系ゴム引布(厚み: 0.53mm)を用いた。

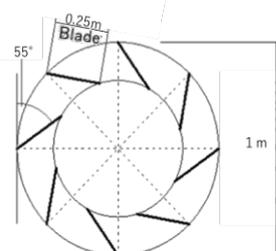


Fig. 1 Top view of the wind turbine.

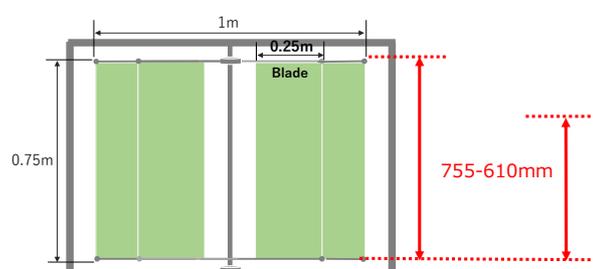


Fig. 2 Side view of a wind turbine.

風洞で発生させる風速は7m/sとした。これは低風速下では帆布の重力由来の下弛みがみられることを考慮したものである。周速比の制御は、減速機付きサーボモータ(オリエンタルモータ製 NX94MS-PS10)を回転数制御モードにて用い、トルクと回転数計測にはトルクメータ(UNIPULSE製 UTM2-10Nm)を用いて計測した。トルクデータは2000 Count/secで取得し、30秒間の平均値を評価した。得られたトルク値と周速比から、周速比トルク係数の関係を評価した。

実験結果

Fig. 3 は、風速 7 m/s におけるブレードの長さが 610-755mm のトルク係数と周速比の関係を示した。長さ 755 mm では周速比に対して直線的な挙動を示し、周速比が 0.1 で約 0.28 のトルク係数が得られ、周速比 0.55 でトルクは消失する。ブレードの長さが短くなるとトルクが消失する周速比は、低下する傾向がみられ、ブレードの長さが 610 mm では周速比が 0.32 でトルク係数は消失、即ち回転力が消失することがわかった。一方、周速比が 0.2 以下におけるトルク係数はブレードの長さに単調に依存しない。

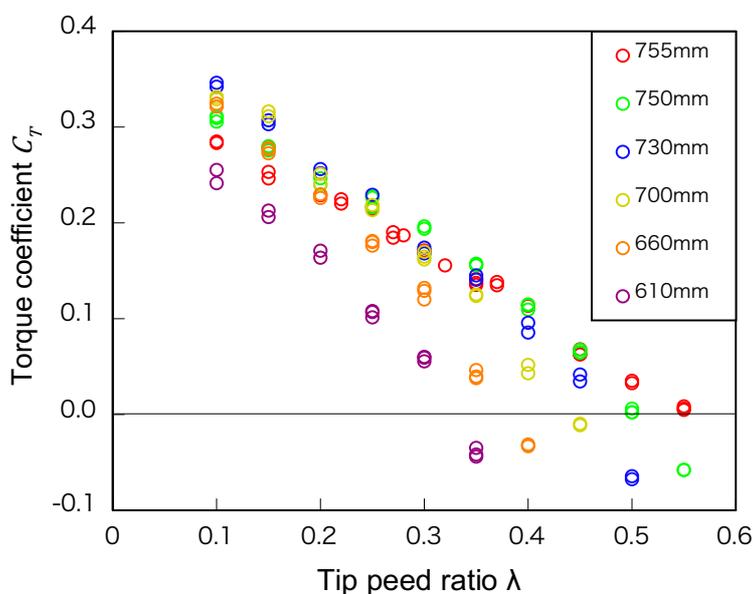


Fig.3 Relationship between the tip speed ratio λ and the torque coefficient C_T

Fig.4 は周速比が 0.1 におけるトルク係数を示した。周速比が低いとトルク係数は、ブレードの長さを短くすることで顕著に変化しているが、直線状態からわずかに弛ませることでトルク係数は増大する。一方、過剰に弛ませるとトルク係数は低下する傾向がみられ、今回の風車仕様ではサグ率で 3% 付近が極大値となった。

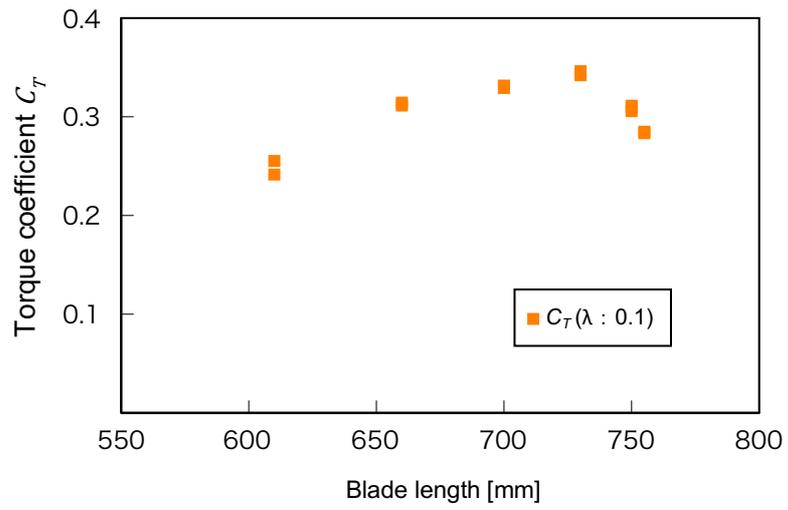


Fig.3 Relationship between the blade length and the torque coefficient C_T

Appendix 2

Table 1 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 0.75 m² under the conditions of the ranges of tip speed ratio (λ) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s

Cr	λ	v:5m/s			v:6m/s			v:7m/s			v:8m/s			v:9m/s			v:10m/s		
		ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]															
0.26	0.01	0.1	1.0	1.5	0.1	1.1	2.2	0.1	1.3	2.9	0.2	1.5	3.8	0.2	1.7	4.8	0.2	1.9	6.0
0.26	0.02	0.2	1.9	1.5	0.2	2.3	2.7	0.3	2.7	2.9	0.3	3.1	3.8	0.4	3.4	4.8	0.4	3.8	5.9
0.26	0.03	0.3	2.9	1.5	0.4	3.4	2.1	0.4	4.0	2.9	0.5	4.6	3.8	0.5	5.2	4.8	0.6	5.7	5.9
0.25	0.04	0.4	3.8	1.5	0.6	4.6	2.1	0.6	5.4	2.9	0.6	6.1	3.7	0.7	6.9	4.7	0.8	7.6	5.8
0.25	0.05	0.5	4.8	1.4	0.6	5.7	2.1	0.7	6.7	2.8	0.8	7.6	3.7	0.9	8.6	4.7	1.0	9.6	5.8
0.25	0.06	0.6	5.7	1.4	0.7	6.9	2.1	0.8	8.0	2.8	1.1	10.3	3.6	1.1	10.3	4.6	1.2	11.5	5.7
0.25	0.07	0.7	6.7	1.4	0.8	8.0	2.0	1.0	9.4	2.8	1.1	10.7	3.6	1.3	12.0	4.6	1.4	13.4	5.6
0.24	0.08	0.8	7.6	1.4	1.0	9.2	2.0	1.1	10.7	2.7	1.3	12.2	3.6	1.4	13.8	4.5	1.6	15.3	5.6
0.24	0.09	0.9	8.6	1.4	1.1	10.3	2.0	1.3	12.0	2.7	1.4	13.8	3.5	1.6	15.5	4.5	1.8	17.2	5.5
0.24	0.10	1.0	9.6	1.4	1.2	11.5	2.0	1.4	13.4	2.7	1.6	15.3	3.5	1.8	17.2	4.4	2.0	19.1	5.4
0.23	0.11	1.1	10.5	1.3	1.3	12.6	1.9	1.5	14.7	2.6	1.8	16.8	3.4	2.0	18.9	4.3	2.2	21.0	5.3
0.23	0.12	1.2	11.5	1.3	1.4	13.8	1.9	1.7	16.1	2.6	1.9	18.3	3.4	2.2	20.6	4.3	2.4	22.9	5.3
0.23	0.13	1.3	12.4	1.3	1.6	14.9	1.9	1.8	17.4	2.5	2.1	19.9	3.3	2.3	22.4	4.2	2.6	24.8	5.2
0.22	0.14	1.4	13.4	1.3	1.7	16.1	1.8	2.0	18.7	2.5	2.2	21.4	3.3	2.5	24.1	4.1	2.8	26.8	5.1
0.22	0.15	1.5	14.3	1.2	1.8	17.2	1.8	2.1	20.1	2.4	2.4	22.9	3.2	2.7	25.8	4.0	3.0	28.7	5.0
0.21	0.16	1.6	15.3	1.2	1.9	18.3	1.8	2.2	21.4	2.4	2.6	24.5	3.1	2.9	27.5	4.0	3.2	30.6	4.9
0.21	0.17	1.7	16.2	1.2	2.0	19.5	1.7	2.4	22.7	2.4	2.7	26.0	3.1	3.1	29.2	3.9	3.4	32.5	4.8
0.20	0.18	1.8	17.2	1.2	2.2	20.6	1.7	2.5	24.1	2.3	2.9	27.5	3.0	3.2	31.0	3.8	3.6	34.4	4.7
0.20	0.19	1.9	18.2	1.1	2.3	21.8	1.7	2.7	25.4	2.2	3.0	29.0	2.9	3.4	32.7	3.7	3.8	36.3	4.6
0.20	0.20	2.0	19.1	1.1	2.4	22.9	1.6	2.8	26.8	2.2	3.2	30.6	2.9	3.6	34.4	3.6	4.0	38.2	4.5
0.19	0.21	2.1	20.1	1.1	2.5	24.1	1.6	2.9	28.1	2.1	3.4	32.1	2.8	3.8	36.1	3.5	4.2	40.1	4.4
0.19	0.22	2.2	21.0	1.1	2.6	25.2	1.5	3.1	29.4	2.1	3.5	33.6	2.7	4.0	37.8	3.5	4.4	42.0	4.3
0.18	0.23	2.3	22.0	1.0	2.8	26.4	1.5	3.2	30.8	2.0	3.7	35.2	2.7	4.1	39.6	3.4	4.6	43.9	4.1
0.17	0.24	2.4	22.9	1.0	2.9	27.5	1.4	3.4	32.1	2.0	3.8	36.7	2.6	4.3	41.3	3.3	4.8	45.9	4.0
0.17	0.25	2.5	23.9	1.0	3.0	28.7	1.4	3.5	33.4	1.9	4.0	38.2	2.5	4.5	43.0	3.2	5.0	47.8	3.9
0.16	0.26	2.6	24.8	0.9	3.1	29.8	1.4	3.6	34.8	1.8	4.2	39.7	2.4	4.7	44.7	3.1	5.2	49.7	3.8
0.16	0.27	2.7	25.8	0.9	3.2	31.0	1.3	3.8	36.1	1.8	4.3	41.3	2.3	4.9	46.4	2.9	5.4	51.6	3.6
0.15	0.28	2.8	26.8	0.9	3.4	32.1	1.3	3.9	37.5	1.7	4.5	42.8	2.2	5.0	48.2	2.8	5.6	53.5	3.5
0.15	0.29	2.9	27.7	0.8	3.5	33.2	1.2	4.1	38.8	1.6	4.6	44.3	2.2	5.2	49.9	2.7	5.8	55.4	3.4
0.14	0.30	3.0	28.7	0.8	3.6	34.4	1.2	4.2	40.1	1.6	4.8	45.9	2.1	5.4	51.6	2.6	6.0	57.3	3.2
0.13	0.31	3.1	29.6	0.8	3.7	35.5	1.1	4.3	41.5	1.5	5.0	47.4	2.0	5.6	53.3	2.5	6.2	59.2	3.1
0.13	0.32	3.2	30.6	0.7	3.8	36.7	1.1	4.5	42.8	1.4	5.1	48.9	1.9	5.8	55.0	2.4	6.4	61.1	2.9
0.12	0.33	3.3	31.5	0.7	4.0	37.8	1.0	4.6	44.1	1.4	5.3	50.4	1.8	5.9	56.8	2.2	6.6	63.1	2.8
0.11	0.34	3.4	32.5	0.7	4.1	39.0	0.9	4.8	45.5	1.3	5.4	52.0	1.7	6.1	58.5	2.0	6.8	65.0	2.6
0.11	0.35	3.5	33.4	0.6	4.2	40.1	0.9	4.9	46.8	1.2	5.6	53.5	1.6	6.3	60.2	2.0	7.0	66.9	2.5
0.10	0.36	3.6	34.4	0.6	4.3	41.3	0.8	5.0	48.2	1.1	5.8	55.0	1.5	6.5	61.9	1.9	7.2	68.8	2.3
0.09	0.37	3.7	35.4	0.5	4.4	42.4	0.8	5.2	49.5	1.0	5.9	56.6	1.4	6.7	63.6	1.7	7.4	70.7	2.1
0.09	0.38	3.8	36.3	0.5	4.6	43.6	0.7	5.3	50.8	1.0	6.1	58.1	1.3	6.8	65.4	1.6	7.6	72.6	2.0
0.08	0.39	3.9	37.3	0.4	4.7	44.7	0.6	5.5	52.2	0.9	6.2	59.6	1.1	7.0	67.1	1.5	7.8	74.5	1.8
0.07	0.40	4.0	38.2	0.4	4.8	45.9	0.6	5.6	53.5	0.8	6.4	61.1	1.0	7.2	68.8	1.3	8.0	76.4	1.6
0.06	0.41	4.1	39.2	0.4	4.9	47.0	0.5	5.7	54.8	0.7	6.6	62.7	0.9	7.4	70.5	1.2	8.2	78.3	1.4
0.05	0.42	4.2	40.1	0.3	5.0	48.2	0.5	5.9	56.2	0.6	6.7	64.2	0.8	7.6	72.2	1.0	8.4	80.3	1.3
0.05	0.43	4.3	41.1	0.3	5.1	49.5	0.5	6.0	57.5	0.5	6.9	65.7	0.7	7.7	73.9	0.9	8.6	82.2	1.1
0.04	0.44	4.4	42.0	0.2	5.2	50.4	0.4	6.2	58.9	0.4	7.0	67.3	0.6	7.9	75.7	0.7	8.8	84.1	0.9
0.03	0.45	4.5	43.0	0.2	5.4	51.6	0.2	6.3	60.2	0.3	7.2	68.8	0.4	8.1	77.4	0.6	9.0	86.0	0.7

Table 2 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 0.8m^2 under the conditions of the ranges of tip speed ratio (λ) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s

C _t	λ	v:5m/s			v:6m/s			v:7m/s			v:8m/s			v:9m/s			v:10m/s		
		ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]															
0.26	0.01	0.1	1.6	1.1	2.3	3.1	4.1	1.5	1.7	5.2	1.9	6.4							
0.26	0.02	0.2	1.6	2.3	2.3	3.1	4.0	3.1	4.0	5.1	3.8	6.3							
0.26	0.03	0.3	2.9	3.4	2.3	4.0	4.6	4.6	4.0	5.1	5.7	6.3							
0.25	0.04	0.4	3.8	4.6	2.2	0.6	6.1	4.0	0.7	6.9	7.6	6.2							
0.25	0.05	0.5	4.8	5.7	2.2	0.7	7.6	3.9	0.9	8.6	9.6	6.1							
0.25	0.06	0.6	5.7	6.9	2.2	0.8	8.0	3.9	1.1	10.3	11.5	6.1							
0.25	0.07	0.7	6.7	8.0	2.2	1.0	10.7	3.8	1.3	12.0	13.4	6.0							
0.24	0.08	0.8	7.6	9.2	2.1	1.1	10.7	3.8	1.4	13.8	14.8	5.9							
0.24	0.09	0.9	8.6	10.3	2.1	1.3	12.0	3.8	1.6	15.5	17.2	5.9							
0.24	0.10	1.0	9.6	11.5	2.1	1.4	13.8	3.7	1.8	17.2	19.1	5.8							
0.23	0.11	1.1	10.5	12.6	2.1	1.5	14.7	3.6	2.0	18.9	21.0	5.7							
0.23	0.12	1.2	11.5	13.8	2.0	1.7	16.1	3.6	2.2	20.6	22.2	5.6							
0.23	0.13	1.3	12.4	14.9	2.0	1.8	17.4	3.5	2.3	22.4	24.8	5.5							
0.22	0.14	1.4	13.4	16.1	2.0	2.0	18.7	3.5	2.5	24.1	26.8	5.4							
0.22	0.15	1.5	14.3	17.2	1.9	2.1	20.1	3.4	2.7	25.8	28.7	5.3							
0.21	0.16	1.6	15.3	18.3	1.9	2.2	21.4	3.3	2.9	27.5	30.6	5.2							
0.21	0.17	1.7	16.2	19.5	1.8	2.4	22.7	3.3	3.1	29.2	32.5	5.1							
0.20	0.18	1.8	17.2	20.6	1.8	2.5	24.1	3.2	3.2	31.0	34.4	5.0							
0.20	0.19	1.9	18.2	21.8	1.7	2.7	25.4	3.1	3.4	32.7	36.3	4.9							
0.20	0.20	2.0	19.1	22.9	1.7	2.8	26.8	3.1	3.6	34.4	38.2	4.8							
0.19	0.21	2.1	20.1	24.1	1.7	2.9	28.1	3.0	3.8	36.1	40.1	4.7							
0.19	0.22	2.2	21.0	25.2	1.6	3.1	29.4	2.9	4.0	37.8	42.0	4.5							
0.18	0.23	2.3	22.0	26.4	1.6	3.2	30.8	2.8	4.1	39.6	43.9	4.4							
0.17	0.24	2.4	22.9	27.5	1.5	3.4	32.1	2.7	4.3	41.3	45.9	4.3							
0.17	0.25	2.5	23.9	28.7	1.5	3.5	33.4	2.7	4.5	43.0	47.8	4.2							
0.16	0.26	2.6	24.8	29.8	1.4	3.6	34.8	2.6	4.7	44.7	49.7	4.0							
0.16	0.27	2.7	25.8	31.0	1.4	3.8	36.1	2.5	4.9	46.4	51.6	3.9							
0.15	0.28	2.8	26.8	32.1	1.3	3.9	37.5	2.4	5.0	48.2	53.5	3.7							
0.15	0.29	2.9	27.7	33.2	1.3	4.1	38.8	2.3	5.2	49.9	55.4	3.6							
0.14	0.30	3.0	28.7	34.4	1.2	4.2	40.1	2.2	5.4	51.6	57.3	3.4							
0.13	0.31	3.1	29.6	35.5	1.2	4.3	41.5	2.1	5.6	53.3	59.2	3.3							
0.13	0.32	3.2	30.6	36.7	1.1	4.5	42.8	2.0	5.8	55.0	61.1	3.1							
0.12	0.33	3.3	31.5	37.8	1.1	4.6	44.1	1.9	5.9	56.8	63.1	3.0							
0.11	0.34	3.4	32.5	39.0	1.0	4.8	45.5	1.8	6.1	58.5	65.0	2.8							
0.11	0.35	3.5	33.4	40.1	0.9	4.9	46.8	1.7	6.3	60.2	66.9	2.6							
0.10	0.36	3.6	34.4	41.3	0.9	5.0	48.2	1.6	6.5	61.9	68.8	2.5							
0.09	0.37	3.7	35.4	42.4	0.8	5.2	49.5	1.5	6.7	63.6	70.7	2.3							
0.09	0.38	3.8	36.3	43.6	0.8	5.3	50.8	1.4	6.8	65.4	72.6	2.1							
0.08	0.39	3.9	37.3	44.7	0.7	5.5	52.2	1.3	7.0	67.1	74.5	1.9							
0.07	0.40	4.0	38.2	45.9	0.6	5.6	53.5	1.1	7.2	68.8	76.4	1.7							
0.06	0.41	4.1	39.2	47.0	0.6	5.7	54.8	0.8	7.4	70.5	78.3	1.5							
0.05	0.42	4.2	40.1	48.2	0.5	5.9	56.2	0.7	7.6	72.2	80.3	1.3							
0.05	0.43	4.3	41.1	49.3	0.4	6.0	57.5	0.6	7.7	73.9	82.2	1.1							
0.04	0.44	4.4	42.0	50.4	0.3	6.2	58.9	0.5	7.9	75.7	84.1	0.9							
0.03	0.45	4.5	43.0	51.6	0.3	6.3	60.2	0.4	8.1	77.4	86.0	0.7							

Table 3 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 0.85m² under the conditions of the ranges of tip speed ratio (λ) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s

C_T	λ	$v=5\text{m/s}$			$v=6\text{m/s}$			$v=7\text{m/s}$			$v=8\text{m/s}$			$v=9\text{m/s}$			$v=10\text{m/s}$				
		ω (rad/s)	Rs(rpm)	T(Nm)																	
0.26	0.01	0.1	1.0	1.1	2.4	0.1	1.3	3.3	0.2	1.5	4.3	0.2	1.7	5.5	0.2	1.9	6.8	0.2	2.1	8.1	
0.26	0.02	0.2	1.9	2.3	2.4	0.3	2.7	3.3	0.3	3.1	3.1	4.3	0.4	3.4	3.4	0.4	3.8	3.8	0.4	4.2	6.7
0.26	0.03	0.3	2.9	3.4	2.4	0.4	4.0	3.3	0.5	4.6	4.6	5.2	0.5	5.2	5.2	0.6	5.7	5.7	0.6	6.3	6.7
0.25	0.04	0.4	3.8	4.6	2.4	0.6	5.4	3.2	0.6	6.1	4.2	6.9	0.7	6.9	5.3	0.8	7.6	6.6	0.8	8.3	6.6
0.25	0.05	0.5	4.8	5.7	2.4	0.7	6.7	3.2	0.8	7.6	4.2	8.6	0.9	8.6	5.3	1.0	9.6	6.5	1.0	10.3	6.5
0.25	0.06	0.6	5.7	6.9	2.3	0.8	8.0	3.2	1.0	9.2	4.1	10.3	1.1	10.3	5.2	1.2	11.5	6.5	1.2	12.2	6.4
0.25	0.07	0.7	6.7	8.0	2.3	1.0	9.4	3.1	1.1	10.7	4.1	11.5	1.1	11.5	5.2	1.4	13.4	6.4	1.4	14.1	6.4
0.24	0.08	0.8	7.6	9.2	2.3	1.1	10.7	3.1	1.3	12.0	4.0	13.8	1.1	13.8	5.1	1.6	15.3	6.3	1.6	16.0	6.2
0.24	0.10	1.0	9.6	11.1	2.2	1.3	12.0	3.1	1.4	13.8	4.0	16.1	1.4	16.1	5.0	1.8	17.2	6.2	1.8	18.0	6.1
0.23	0.11	1.1	10.5	12.6	2.2	1.5	14.7	3.0	1.6	15.3	3.9	18.9	1.8	18.9	4.9	2.0	21.0	6.1	2.0	21.9	6.1
0.23	0.12	1.2	11.5	14.2	2.1	1.7	16.1	2.9	1.9	17.4	3.8	22.4	2.2	22.4	4.8	2.4	24.9	6.0	2.4	25.9	6.0
0.23	0.13	1.3	12.4	15.8	2.1	1.8	17.4	2.9	2.1	19.9	3.8	25.8	2.3	25.8	4.8	2.6	28.8	5.9	2.6	29.9	5.9
0.22	0.14	1.4	13.4	17.1	2.1	2.0	18.7	2.8	2.2	21.4	3.7	28.8	2.5	28.8	4.7	2.8	32.8	5.8	2.8	33.9	5.8
0.22	0.15	1.5	14.3	18.3	2.0	2.1	20.1	2.8	2.4	22.9	3.6	32.8	2.7	32.8	4.6	3.0	36.8	5.7	3.0	37.9	5.7
0.21	0.16	1.6	15.3	19.4	2.0	2.2	21.4	2.7	2.6	24.5	3.6	36.8	2.9	36.8	4.5	3.2	40.8	5.6	3.2	41.9	5.6
0.21	0.17	1.7	16.2	20.6	2.0	2.4	22.7	2.7	2.7	26.0	3.5	40.8	3.1	40.8	4.4	3.4	44.8	5.4	3.4	45.9	5.4
0.20	0.18	1.8	17.2	21.8	1.9	2.5	24.1	2.6	2.9	27.5	3.4	44.8	3.3	44.8	4.3	3.6	48.8	5.3	3.6	49.9	5.3
0.20	0.19	1.9	18.2	23.0	1.9	2.7	25.4	2.6	3.0	29.0	3.3	48.8	3.4	48.8	4.2	3.8	52.8	5.2	3.8	53.9	5.2
0.20	0.20	2.0	19.1	24.2	1.8	2.8	26.8	2.5	3.2	30.6	3.3	52.8	3.6	52.8	4.1	4.0	56.8	5.1	4.0	57.9	5.1
0.19	0.21	2.1	20.1	25.4	1.8	2.9	28.1	2.4	3.4	32.1	3.2	56.8	3.7	56.8	4.0	4.2	60.8	5.0	4.2	61.9	5.0
0.19	0.22	2.2	21.0	26.6	1.7	3.1	29.4	2.4	3.5	33.6	3.1	60.8	3.8	60.8	3.9	4.4	64.8	4.8	4.4	65.9	4.8
0.18	0.23	2.3	22.0	27.8	1.7	3.2	30.8	2.3	3.7	35.2	3.0	64.8	4.1	64.8	3.8	4.6	68.8	4.7	4.6	69.9	4.7
0.17	0.24	2.4	22.9	29.0	1.6	3.4	32.1	2.2	3.8	36.7	2.9	68.8	4.3	68.8	3.7	4.8	72.8	4.6	4.8	73.9	4.6
0.17	0.25	2.5	23.9	30.2	1.6	3.5	33.4	2.2	4.0	38.2	2.8	72.8	4.5	72.8	3.6	5.0	76.8	4.4	5.0	77.9	4.4
0.16	0.26	2.6	24.8	31.4	1.5	3.6	34.8	2.1	4.2	39.7	2.7	76.8	4.7	76.8	3.5	5.2	80.8	4.3	5.2	81.9	4.3
0.16	0.27	2.7	25.8	32.6	1.5	3.8	36.1	2.0	4.3	41.3	2.6	80.8	4.9	80.8	3.3	5.4	84.8	4.1	5.4	85.9	4.1
0.15	0.28	2.8	26.8	33.8	1.4	3.9	37.5	1.9	4.5	42.8	2.5	84.8	5.0	84.8	3.2	5.6	88.8	4.0	5.6	89.9	4.0
0.15	0.29	2.9	27.7	35.0	1.4	4.1	38.8	1.9	4.6	44.3	2.4	88.8	5.2	88.8	3.1	5.8	92.8	3.8	5.8	93.9	3.8
0.14	0.30	3.0	28.7	36.2	1.3	4.2	40.1	1.8	4.8	45.9	2.3	92.8	5.4	92.8	3.0	6.0	96.8	3.6	6.0	97.9	3.6
0.13	0.31	3.1	29.6	37.4	1.3	4.3	41.5	1.7	5.0	47.4	2.2	96.8	5.6	96.8	2.8	6.2	100.8	3.5	6.2	101.9	3.5
0.13	0.32	3.2	30.6	38.6	1.2	4.5	42.8	1.6	5.1	48.9	2.1	100.8	5.8	100.8	2.7	6.4	104.8	3.3	6.4	105.9	3.3
0.12	0.33	3.3	31.5	39.8	1.1	4.6	44.1	1.5	5.3	50.4	2.0	104.8	5.9	104.8	2.5	6.6	108.8	3.1	6.6	109.9	3.1
0.11	0.34	3.4	32.5	41.0	1.1	4.8	45.5	1.5	5.4	52.0	1.9	108.8	6.1	108.8	2.4	6.8	112.8	3.0	6.8	113.9	3.0
0.11	0.35	3.5	33.4	42.2	1.0	4.9	46.8	1.4	5.6	53.5	1.8	112.8	6.3	112.8	2.3	7.0	116.8	2.8	7.0	117.9	2.8
0.10	0.36	3.6	34.4	43.4	0.9	5.0	48.2	1.3	5.8	55.0	1.7	116.8	6.5	116.8	2.2	7.2	120.8	2.6	7.2	121.9	2.6
0.09	0.37	3.7	35.4	44.6	0.9	5.2	49.5	1.2	5.9	56.6	1.5	120.8	6.7	120.8	2.0	7.4	124.8	2.4	7.4	125.9	2.4
0.09	0.38	3.8	36.3	45.8	0.6	4.6	46.8	1.1	6.1	58.1	1.4	124.8	6.8	124.8	1.8	7.6	128.8	2.2	7.6	129.9	2.2
0.08	0.39	3.9	37.3	47.0	0.7	4.7	48.1	1.0	6.2	59.6	1.3	128.8	7.0	128.8	1.6	7.8	132.8	2.0	7.8	133.9	2.0
0.07	0.40	4.0	38.2	48.2	0.5	4.8	49.5	0.9	6.4	61.1	1.2	132.8	7.2	132.8	1.5	8.0	136.8	1.8	8.0	137.9	1.8
0.06	0.41	4.1	39.2	49.4	0.4	4.9	50.8	0.8	6.6	62.7	1.1	136.8	7.4	136.8	1.3	8.2	140.8	1.6	8.2	141.9	1.6
0.05	0.42	4.2	40.1	50.6	0.5	5.0	52.0	0.7	6.7	64.2	0.9	140.8	7.6	140.8	1.2	8.4	144.8	1.4	8.4	145.9	1.4
0.05	0.43	4.3	41.1	51.8	0.3	5.2	49.3	0.6	6.9	65.7	0.8	144.8	7.7	144.8	1.0	8.6	148.8	1.2	8.6	149.9	1.2
0.04	0.44	4.4	42.0	53.0	0.4	6.2	50.4	0.5	7.0	67.3	0.8	148.8	7.9	148.8	0.8	8.8	152.8	1.0	8.8	153.9	1.0
0.03	0.45	4.5	43.0	51.6	0.3	6.3	60.2	0.5	7.2	68.8	0.6	152.8	8.1	152.8	0.6	9.0	156.8	0.8	9.0	157.9	0.8

Table 4 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 0.9m^2 under the conditions of the ranges of tip speed ratio (λ) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s

C_T	λ	$v:5\text{m/s}$			$v:6\text{m/s}$			$v:7\text{m/s}$			$v:8\text{m/s}$			$v:9\text{m/s}$			$v:10\text{m/s}$		
		ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]															
0.26	0.01	0.1	1.0	1.8	0.1	1.1	2.6	0.1	1.3	3.5	0.2	1.5	4.6	0.2	1.7	5.8	0.2	1.9	7.2
0.26	0.02	0.2	1.9	1.8	0.2	2.3	2.6	0.3	2.7	3.5	0.3	3.1	4.6	0.4	3.4	5.8	0.4	3.8	7.1
0.26	0.03	0.3	2.9	1.8	0.4	3.4	2.5	0.4	4.0	3.5	0.5	4.6	4.5	0.5	5.2	5.7	0.6	5.7	7.1
0.25	0.04	0.4	3.8	1.7	0.5	4.6	2.5	0.6	5.4	3.4	0.6	6.1	4.5	0.7	6.9	5.7	0.8	7.6	7.0
0.25	0.05	0.5	4.8	1.7	0.6	5.7	2.5	0.7	6.7	3.4	0.8	7.6	4.4	0.9	8.6	5.6	1.0	9.6	6.9
0.25	0.06	0.6	5.7	1.7	0.7	6.9	2.5	0.8	8.0	3.4	0.9	9.2	4.4	1.1	10.3	5.5	1.2	11.5	6.8
0.24	0.08	0.8	7.6	1.7	1.0	9.2	2.4	1.1	10.7	3.3	1.1	12.2	4.3	1.3	13.8	5.4	1.6	15.3	6.7
0.24	0.09	0.9	8.6	1.6	1.1	10.3	2.4	1.3	12.0	3.2	1.4	13.8	4.2	1.6	15.5	5.3	1.8	17.2	6.6
0.24	0.10	1.0	9.6	1.6	1.2	11.5	2.3	1.4	13.4	3.2	1.6	15.3	4.2	1.8	17.2	5.3	2.0	19.1	6.5
0.23	0.11	1.1	10.5	1.6	1.3	12.6	2.3	1.5	14.7	3.1	1.8	16.8	4.1	2.0	18.9	5.2	2.2	21.0	6.4
0.23	0.12	1.2	11.5	1.6	1.4	13.8	2.3	1.7	16.1	3.1	1.9	18.3	4.0	2.2	20.6	5.1	2.4	22.9	6.3
0.23	0.13	1.3	12.4	1.6	1.6	14.9	2.2	1.8	17.4	3.0	2.1	19.9	4.0	2.3	22.4	5.0	2.6	24.8	6.2
0.22	0.14	1.4	13.4	1.5	1.7	16.1	2.2	2.0	18.7	3.0	2.2	21.4	3.9	2.5	24.1	4.9	2.8	26.8	6.1
0.22	0.15	1.5	14.3	1.5	1.8	17.2	2.2	2.1	20.1	2.9	2.4	22.9	3.8	2.7	25.8	4.9	3.0	28.7	6.0
0.21	0.16	1.6	15.3	1.5	1.9	18.3	2.1	2.2	21.4	2.9	2.6	24.5	3.8	2.9	27.5	4.8	3.2	30.6	5.9
0.21	0.17	1.7	16.2	1.4	2.0	19.5	2.1	2.4	22.7	2.8	2.7	26.0	3.7	3.1	29.2	4.7	3.4	32.5	5.8
0.20	0.18	1.8	17.2	1.4	2.2	20.6	2.0	2.5	24.1	2.8	2.9	27.5	3.6	3.2	31.0	4.6	3.6	34.4	5.6
0.20	0.19	1.9	18.2	1.4	2.3	21.8	2.0	2.7	25.4	2.7	3.0	29.0	3.5	3.4	32.7	4.5	3.8	36.3	5.5
0.20	0.20	2.0	19.1	1.3	2.4	22.9	1.9	2.8	26.8	2.6	3.2	30.6	3.4	3.6	34.4	4.4	4.0	38.2	5.4
0.19	0.21	2.1	20.1	1.3	2.5	24.1	1.9	2.9	28.1	2.6	3.4	32.1	3.4	3.8	36.1	4.3	4.2	40.1	5.3
0.19	0.22	2.2	21.0	1.3	2.6	25.2	1.8	3.1	29.4	2.5	3.5	33.6	3.3	4.0	37.8	4.1	4.4	42.0	5.1
0.18	0.23	2.3	22.0	1.2	2.8	26.4	1.8	3.2	30.8	2.4	3.7	35.2	3.2	4.1	39.6	4.0	4.6	43.9	5.0
0.18	0.24	2.4	22.9	1.2	2.9	27.5	1.7	3.4	32.1	2.4	3.8	36.7	3.1	4.1	41.3	3.9	4.8	45.9	4.8
0.17	0.25	2.5	23.9	1.2	3.0	28.7	1.7	3.5	33.4	2.3	4.0	38.2	3.0	4.5	43.0	3.8	5.0	47.8	4.7
0.16	0.26	2.6	24.8	1.1	3.1	29.8	1.6	3.6	34.8	2.2	4.2	39.7	2.9	4.7	44.7	3.7	5.2	49.7	4.5
0.16	0.27	2.7	25.8	1.1	3.2	31.0	1.6	3.8	36.1	2.1	4.3	41.3	2.8	4.9	46.4	3.5	5.4	51.6	4.4
0.15	0.28	2.8	26.8	1.0	3.4	32.1	1.5	3.9	37.5	2.1	4.5	42.8	2.7	5.0	48.2	3.4	5.6	53.5	4.2
0.15	0.29	2.9	27.7	1.0	3.5	33.2	1.5	4.1	38.8	2.0	4.6	44.3	2.6	5.2	49.9	3.3	5.8	55.4	4.0
0.14	0.30	3.0	28.7	1.0	3.6	34.4	1.4	4.2	40.1	1.9	4.8	45.9	2.5	5.4	51.6	3.1	6.0	57.3	3.9
0.13	0.31	3.1	29.6	0.9	3.7	35.5	1.3	4.3	41.5	1.8	5.0	47.4	2.4	5.6	53.3	3.0	6.2	59.2	3.7
0.13	0.32	3.2	30.6	0.9	3.8	36.7	1.3	4.5	42.8	1.7	5.1	48.9	2.2	5.8	55.0	2.8	6.4	61.1	3.5
0.12	0.33	3.3	31.5	0.8	4.0	37.8	1.2	4.6	44.1	1.6	5.3	50.4	2.1	5.9	56.8	2.7	6.6	63.1	3.3
0.11	0.34	3.4	32.5	0.8	4.1	39.0	1.1	4.8	45.5	1.5	5.4	52.0	2.0	6.1	58.5	2.5	6.8	65.0	3.1
0.11	0.35	3.5	33.4	0.7	4.2	40.1	1.1	4.9	46.8	1.4	5.6	53.5	1.9	6.3	60.2	2.4	7.0	66.9	3.0
0.10	0.36	3.6	34.4	0.7	4.3	41.3	1.0	5.0	48.2	1.4	5.8	55.0	1.8	6.5	61.9	2.2	7.2	68.8	2.8
0.09	0.37	3.7	35.4	0.6	4.4	42.4	0.9	5.2	49.5	1.3	5.9	56.6	1.6	6.7	63.6	2.1	7.4	70.7	2.6
0.09	0.38	3.8	36.3	0.6	4.6	43.6	0.8	5.3	50.8	1.2	6.1	58.1	1.5	6.8	65.4	1.9	7.6	72.6	2.4
0.08	0.39	3.9	37.3	0.5	4.7	44.7	0.8	5.5	52.2	1.1	6.2	61.1	1.5	7.0	67.1	1.7	7.8	74.5	2.2
0.07	0.40	4.0	38.2	0.5	4.8	45.9	0.7	5.6	53.5	1.0	6.4	61.1	1.2	7.2	68.8	1.6	8.0	76.4	1.9
0.06	0.41	4.1	39.2	0.4	4.9	47.0	0.6	5.7	54.8	0.8	6.6	62.7	1.1	7.4	70.5	1.4	8.2	78.3	1.7
0.05	0.42	4.2	40.1	0.4	5.0	48.2	0.5	5.9	56.2	0.7	6.7	64.2	1.0	7.6	72.2	1.2	8.4	80.3	1.5
0.05	0.43	4.3	41.1	0.3	5.2	49.3	0.5	6.0	57.5	0.6	6.9	65.7	0.8	7.7	73.9	1.0	8.6	82.2	1.3
0.04	0.44	4.4	42.0	0.3	5.3	50.4	0.4	6.2	58.9	0.5	7.0	67.3	0.7	7.9	75.7	0.9	8.8	84.1	1.1
0.03	0.45	4.5	43.0	0.2	5.4	51.6	0.3	6.3	60.2	0.4	7.2	68.8	0.5	8.1	77.4	0.7	9.0	86.0	0.8

Table 5 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 0.95m^2 under the conditions of the ranges of tip speed ratio (λ) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s

C_T	λ	$v:5\text{m/s}$			$v:6\text{m/s}$			$v:7\text{m/s}$			$v:8\text{m/s}$			$v:9\text{m/s}$			$v:10\text{m/s}$		
		ω [rad/s]	Rs[rpm]	T [Nm]															
0.26	0.01	0.1	1.0	1.0	1.1	1.3	3.7	0.2	1.5	4.8	0.2	1.7	6.1	0.2	1.9	7.6	0.2	2.1	8.3
0.26	0.02	0.2	1.9	2.3	2.3	2.7	3.7	0.3	3.1	4.8	0.4	3.4	6.1	0.4	3.8	7.5	0.4	4.2	8.2
0.26	0.03	0.3	2.9	3.8	3.4	4.0	3.6	0.4	4.6	4.0	0.5	4.8	4.8	0.5	5.2	7.4	0.6	5.7	7.4
0.25	0.04	0.4	3.8	5.4	4.6	4.6	3.6	0.6	5.4	6.1	0.7	6.9	6.0	0.8	7.6	7.4	0.8	8.6	7.4
0.25	0.05	0.5	4.8	7.6	5.7	5.7	2.6	0.7	6.7	3.6	0.8	8.6	4.7	0.9	9.6	7.3	1.0	11.5	7.2
0.25	0.06	0.6	5.7	10.3	6.9	6.9	2.6	0.8	8.0	3.5	1.0	10.3	4.6	1.1	12.1	7.2	1.2	14.4	7.1
0.25	0.07	0.7	6.7	13.4	8.0	8.0	2.6	1.0	9.4	3.5	1.1	12.1	4.6	1.3	15.3	7.1	1.4	18.2	7.1
0.24	0.08	0.8	7.6	16.6	9.2	9.2	2.5	1.1	10.7	3.5	1.3	15.3	4.5	1.4	18.2	7.0	1.6	22.1	7.0
0.24	0.09	0.9	8.6	20.1	1.1	10.3	3.4	1.4	12.0	3.4	1.4	18.2	4.5	1.6	23.0	6.9	1.8	27.0	6.9
0.24	0.10	1.0	9.6	24.1	1.2	11.5	3.4	1.6	13.4	3.4	1.6	20.1	4.4	1.8	27.0	6.9	2.0	31.9	6.9
0.23	0.11	1.1	10.5	28.7	1.3	12.6	3.3	1.8	14.7	3.3	1.8	22.1	4.3	2.0	30.6	6.8	2.2	35.5	6.8
0.23	0.12	1.2	11.5	33.8	1.4	13.8	3.3	1.9	16.1	3.3	1.9	24.1	4.3	2.2	34.4	6.7	2.4	39.3	6.7
0.23	0.13	1.3	12.4	39.4	1.6	14.9	3.2	2.1	17.4	3.2	2.1	26.0	4.2	2.3	38.2	6.6	2.6	43.1	6.6
0.22	0.14	1.4	13.4	45.6	1.7	16.1	3.2	2.2	18.7	3.2	2.2	27.9	4.1	2.5	42.0	6.4	2.8	46.9	6.4
0.22	0.15	1.5	14.3	52.4	1.8	17.2	3.1	2.4	20.1	3.1	2.4	29.8	4.0	2.7	50.7	6.3	3.0	50.5	6.2
0.21	0.16	1.6	15.3	59.7	1.9	18.3	3.0	2.6	21.4	3.0	2.6	31.7	4.0	2.9	54.4	6.2	3.2	54.2	6.2
0.21	0.17	1.7	16.2	67.6	2.0	19.5	2.9	2.7	22.7	3.0	2.7	33.6	3.9	3.1	58.1	6.1	3.4	57.9	6.1
0.20	0.18	1.8	17.2	76.1	2.2	20.6	2.8	2.9	24.1	2.9	2.9	35.5	3.8	3.2	61.9	6.0	3.6	61.6	6.0
0.20	0.19	1.9	18.2	85.2	2.3	21.8	2.8	3.0	25.4	2.9	3.0	37.4	3.7	3.4	65.6	5.8	3.8	65.3	5.8
0.20	0.20	2.0	19.1	94.9	2.4	22.9	2.8	3.2	26.8	2.8	3.2	39.3	3.6	3.6	69.3	5.7	4.0	69.0	5.7
0.19	0.21	2.1	20.1	105.2	2.5	24.1	2.7	3.4	28.1	2.7	3.4	41.2	3.5	3.8	73.0	5.5	4.2	72.7	5.5
0.19	0.22	2.2	21.0	116.1	2.6	25.2	2.6	3.5	29.4	2.6	3.5	43.1	3.5	4.0	76.6	5.4	4.4	76.3	5.4
0.18	0.23	2.3	22.0	127.6	2.8	26.4	2.6	3.7	30.8	2.6	3.7	45.0	3.4	4.2	80.3	5.2	4.6	79.9	5.2
0.17	0.24	2.4	22.9	139.7	2.9	27.5	2.5	3.8	32.1	2.5	3.8	46.9	3.4	4.4	84.0	5.1	4.8	83.6	5.1
0.17	0.25	2.5	23.9	152.4	3.0	28.7	2.4	4.0	33.4	2.4	4.0	48.8	3.2	4.5	87.7	4.9	5.0	87.3	4.9
0.16	0.26	2.6	24.8	165.7	3.1	29.8	2.3	4.2	34.8	2.3	4.2	50.7	3.1	4.7	91.4	4.8	5.2	91.0	4.8
0.16	0.27	2.7	25.8	179.6	3.2	31.0	2.3	4.3	36.1	2.3	4.3	52.6	2.9	4.9	95.1	4.6	5.4	94.7	4.6
0.15	0.28	2.8	26.8	194.1	3.4	32.1	2.2	4.5	37.5	2.2	4.5	54.5	2.8	5.0	99.2	4.4	5.6	98.4	4.4
0.15	0.29	2.9	27.7	209.2	3.5	33.2	2.1	4.6	38.8	2.1	4.6	56.4	2.7	5.2	103.3	4.3	5.8	102.5	4.3
0.14	0.30	3.0	28.7	224.9	3.6	34.4	2.0	4.8	40.1	2.0	4.8	58.3	2.6	5.4	107.4	4.1	6.0	106.6	4.1
0.13	0.31	3.1	29.6	241.2	3.7	35.5	1.9	5.0	41.5	1.9	5.0	60.2	2.5	5.6	111.5	4.0	6.2	110.7	4.0
0.13	0.32	3.2	30.6	258.1	3.8	36.7	1.8	5.1	42.8	1.8	5.1	62.1	2.4	5.8	115.6	3.9	6.4	114.8	3.9
0.12	0.33	3.3	31.5	275.6	3.9	37.8	1.7	5.3	44.1	1.7	5.3	64.0	2.2	5.9	120.7	3.8	6.6	118.9	3.8
0.11	0.34	3.4	32.5	293.7	4.1	39.0	1.6	5.4	45.5	1.6	5.4	65.9	2.1	6.1	125.8	3.7	6.8	123.0	3.7
0.11	0.35	3.5	33.4	312.4	4.2	40.1	1.5	5.6	46.8	1.5	5.6	67.8	2.0	6.3	130.9	3.6	7.0	127.1	3.6
0.10	0.36	3.6	34.4	331.7	4.3	41.3	1.4	5.8	48.2	1.4	5.8	69.7	1.9	6.5	136.0	3.5	7.2	131.2	3.5
0.09	0.37	3.7	35.4	351.6	4.4	42.4	1.3	5.9	49.5	1.3	5.9	71.6	1.7	6.7	141.1	3.4	7.4	135.3	3.4
0.09	0.38	3.8	36.3	372.1	4.6	43.6	1.2	6.1	50.8	1.2	6.1	73.5	1.6	6.8	146.2	3.3	7.6	139.4	3.3
0.08	0.39	3.9	37.3	393.2	4.7	44.7	1.1	6.2	52.1	1.1	6.2	75.4	1.5	7.0	151.3	3.2	7.8	143.5	3.2
0.07	0.40	4.0	38.2	414.9	4.8	45.9	1.0	6.4	53.5	1.0	6.4	77.3	1.3	7.2	156.4	3.1	8.0	147.6	3.1
0.06	0.41	4.1	39.2	437.2	4.9	47.0	0.9	6.6	54.8	0.9	6.6	79.2	1.2	7.4	161.5	3.0	8.2	151.7	3.0
0.05	0.42	4.2	40.1	460.1	5.0	48.2	0.8	6.7	56.2	0.8	6.7	81.1	1.1	7.6	166.4	2.9	8.4	155.8	2.9
0.05	0.43	4.3	41.1	483.6	5.2	49.3	0.7	6.9	57.5	0.7	6.9	83.0	1.0	7.7	171.3	2.8	8.6	159.9	2.8
0.04	0.44	4.4	42.0	507.6	5.3	50.4	0.6	7.0	58.9	0.6	7.0	84.9	0.9	7.9	176.2	2.7	8.8	164.0	2.7
0.03	0.45	4.5	43.0	532.1	5.4	51.6	0.5	7.2	60.2	0.5	7.2	86.8	0.8	8.1	181.1	2.6	9.0	168.1	2.6

Table 6 Calculation results of rotational angular velocity (ω), rotational speed (Rs), and torque (T) for a wind turbine with the swept area of 1m² under the conditions of the ranges of tip speed ratio (λ) of 0.01 to 0.45 and wind speed (v) of 5 m/s to 10 m/s

C_T	λ	$v:5m/s$			$v:6m/s$			$v:7m/s$			$v:8m/s$			$v:9m/s$			$v:10m/s$		
		ω [rad/s]	Rs[rpm]	T[Nm]															
0.26	0.01	0.1	2.0	1.1	2.9	0.1	1.3	3.9	0.2	1.5	5.1	0.2	1.7	6.5	0.2	1.9	8.0	0.2	2.1
0.26	0.02	0.2	1.9	2.0	2.8	0.3	2.7	3.9	0.3	3.1	5.1	0.4	3.4	6.4	0.4	3.8	7.9	0.4	4.2
0.26	0.03	0.3	2.9	2.0	3.4	0.4	4.0	3.8	0.5	4.6	5.0	0.5	5.2	6.3	0.6	5.7	7.8	0.6	6.3
0.25	0.04	0.4	3.8	1.9	4.6	0.6	5.4	3.8	0.6	6.1	5.0	0.7	6.9	6.3	0.8	7.6	7.8	0.8	8.4
0.25	0.05	0.5	4.8	1.9	5.7	0.8	6.7	3.8	0.8	7.6	4.9	0.9	8.6	6.2	1.0	9.6	7.7	1.0	10.6
0.25	0.06	0.6	5.7	1.9	6.9	0.7	8.0	3.7	1.0	9.2	4.8	1.1	10.3	6.2	1.2	11.5	7.6	1.2	12.8
0.25	0.07	0.7	6.7	1.9	8.0	0.8	9.4	3.7	1.1	10.7	4.8	1.3	12.0	6.1	1.4	13.4	7.5	1.4	14.8
0.24	0.08	0.8	7.6	1.9	10.7	1.1	12.7	3.6	1.3	14.2	4.8	1.4	15.5	6.0	1.6	17.2	7.4	1.6	18.8
0.24	0.09	0.9	8.6	1.8	11.5	1.1	13.4	3.6	1.4	15.3	4.7	1.6	17.2	5.9	1.8	19.9	7.3	1.8	21.5
0.24	0.10	1.0	9.6	1.8	12.6	1.3	14.7	3.5	1.6	16.8	4.6	1.8	19.9	5.9	2.0	22.2	7.2	2.0	24.1
0.23	0.11	1.1	10.5	1.8	13.4	1.3	15.5	3.5	1.8	17.8	4.6	2.0	21.0	5.8	2.2	23.1	7.1	2.2	25.1
0.23	0.12	1.2	11.5	1.8	14.3	1.4	16.1	3.4	1.9	18.3	4.5	2.2	22.2	5.7	2.4	24.2	7.0	2.4	26.2
0.23	0.13	1.3	12.4	1.7	14.9	1.5	17.4	3.4	2.1	19.9	4.4	2.3	23.4	5.6	2.6	25.4	6.9	2.6	27.4
0.22	0.14	1.4	13.4	1.7	16.1	1.7	18.7	3.3	2.2	21.4	4.3	2.5	24.1	5.5	2.8	26.8	6.8	2.8	28.8
0.22	0.15	1.5	14.3	1.7	17.2	1.8	20.1	3.3	2.4	22.9	4.3	2.7	25.8	5.4	3.0	28.7	6.7	3.0	30.7
0.21	0.16	1.6	15.3	1.6	18.3	2.4	22.2	3.2	2.6	24.5	4.2	2.9	27.5	5.3	3.2	30.6	6.5	3.2	32.6
0.21	0.17	1.7	16.2	1.6	19.5	2.3	23.7	3.1	2.7	26.0	4.1	3.1	29.2	5.2	3.4	32.5	6.4	3.4	34.4
0.20	0.18	1.8	17.2	1.6	20.6	2.3	25.2	3.1	2.9	27.5	4.0	3.2	31.0	5.1	3.6	34.4	6.3	3.6	36.3
0.20	0.19	1.9	18.2	1.5	21.8	2.2	26.8	3.0	3.0	29.0	3.9	3.4	32.7	5.0	3.8	36.3	6.1	3.8	38.2
0.19	0.20	2.0	19.1	1.5	22.9	2.2	28.1	2.9	3.2	30.6	3.8	3.6	34.4	4.8	4.0	38.2	6.0	4.0	40.1
0.19	0.21	2.1	20.1	1.5	24.1	2.1	29.4	2.9	3.4	32.1	3.7	3.8	36.1	4.7	4.2	40.1	5.8	4.2	42.0
0.18	0.22	2.2	21.0	1.4	25.2	2.0	30.8	2.8	3.5	33.6	3.6	4.0	37.8	4.6	4.4	42.0	5.7	4.4	43.9
0.18	0.23	2.3	22.0	1.4	26.4	2.0	32.1	2.7	3.7	35.2	3.5	4.1	39.6	4.5	4.6	43.9	5.5	4.6	45.8
0.17	0.24	2.4	22.9	1.3	27.5	1.9	33.4	2.6	3.8	36.7	3.4	4.3	41.3	4.3	4.8	45.8	5.4	4.8	47.7
0.17	0.25	2.5	23.9	1.3	30.0	2.8	35.8	2.5	4.0	38.2	3.3	4.5	43.0	4.2	5.0	47.7	5.2	5.0	49.6
0.16	0.26	2.6	24.8	1.3	31.1	2.9	37.1	2.5	4.2	39.7	3.2	4.7	44.7	4.1	5.2	49.6	5.0	5.2	51.5
0.16	0.27	2.7	25.8	1.2	32.2	3.1	38.4	2.4	4.3	41.3	3.1	4.9	46.4	3.9	5.4	51.5	4.8	5.4	53.4
0.15	0.28	2.8	26.8	1.2	33.1	3.1	39.7	2.3	4.5	42.8	3.0	5.0	48.2	3.8	5.6	53.4	4.7	5.6	55.3
0.15	0.29	2.9	27.7	1.1	35.2	3.2	41.0	2.2	4.6	44.3	2.9	5.2	49.9	3.6	5.8	55.3	4.5	5.8	57.2
0.14	0.30	3.0	28.7	1.1	36.6	3.4	42.1	2.1	4.8	45.9	2.7	5.4	51.6	3.5	6.0	57.2	4.3	6.0	59.1
0.13	0.31	3.1	29.6	1.0	37.7	3.5	43.1	2.0	5.0	47.4	2.6	5.6	53.4	3.3	6.2	59.1	4.1	6.2	61.0
0.13	0.32	3.2	30.6	1.0	38.8	3.6	44.1	1.9	5.1	48.9	2.5	5.8	55.0	3.2	6.4	61.0	3.9	6.4	62.9
0.12	0.33	3.3	31.5	0.9	40.0	3.7	45.1	1.8	5.3	50.4	2.4	5.9	56.8	3.0	6.6	63.1	3.7	6.6	64.8
0.11	0.34	3.4	32.5	0.9	41.1	3.9	46.1	1.7	5.4	52.0	2.2	6.1	58.5	2.8	6.8	65.0	3.5	6.8	66.7
0.11	0.35	3.5	33.4	0.8	42.1	4.1	47.1	1.6	5.6	53.5	2.1	6.3	60.2	2.7	7.0	66.9	3.3	7.0	68.8
0.10	0.36	3.6	34.4	0.8	43.1	4.3	48.1	1.5	5.8	55.0	2.0	6.5	61.9	2.5	7.2	68.8	3.1	7.2	70.7
0.09	0.37	3.7	35.4	0.7	44.1	4.4	49.1	1.4	5.9	56.6	1.8	6.7	63.6	2.3	7.4	70.7	2.8	7.4	72.6
0.09	0.38	3.8	36.3	0.7	45.6	4.6	50.1	1.3	6.1	58.1	1.7	6.8	65.4	2.1	7.6	72.6	2.6	7.6	74.5
0.08	0.39	3.9	37.3	0.6	47.1	4.7	51.1	1.2	6.2	59.6	1.5	7.0	67.1	1.9	7.8	74.5	2.4	7.8	76.4
0.07	0.40	4.0	38.2	0.5	48.6	4.9	52.1	1.1	6.4	61.1	1.4	7.2	68.8	1.7	8.0	76.4	2.2	8.0	78.3
0.06	0.41	4.1	39.2	0.5	49.7	5.0	52.8	0.9	6.6	62.6	1.2	7.4	70.5	1.6	8.2	78.3	2.0	8.2	80.3
0.05	0.42	4.2	40.1	0.4	50.7	5.1	53.4	0.8	6.7	64.2	1.1	7.6	72.2	1.4	8.4	80.3	1.9	8.4	82.2
0.05	0.43	4.3	41.1	0.4	51.6	5.2	54.0	0.7	6.9	65.7	0.9	7.7	73.9	1.2	8.6	82.2	1.8	8.6	84.1
0.04	0.44	4.4	42.0	0.3	52.5	5.3	54.4	0.6	7.0	67.3	0.8	7.9	75.7	1.0	8.8	84.1	1.6	8.8	86.0
0.03	0.45	4.5	43.0	0.2	54.1	5.4	54.6	0.5	7.2	68.8	0.6	8.1	77.4	0.7	9.0	86.0	1.5	9.0	87.9