

低流速における小型ローテーションフロー
タービンの性能評価及び
海洋エネルギー発電利用可能性検討
**Performance Evaluation and Feasibility
Study on Small-scale Rotation Flow Turbine
for Low Flow Velocities**

2019年3月

沈 健

低流速における小型ローテーションフロー
タービンの性能評価及び
海洋エネルギー発電利用可能性検討
**Performance Evaluation and Feasibility
Study on Small-scale Rotation Flow Turbine
for Low Flow Velocities**

弘前大学大学院理工学研究科
博士後期課程
博士論文

2019年3月

沈 健

第一章 序論.....	1
1-1 初めに.....	1
1-2 潮流・海流発電の現状.....	2
1-3 小型化の重要性.....	4
1-4 目的.....	6
第二章 プール実験.....	7
2-1 実験装置.....	9
2-2 実験方法.....	18
2-3 実験結果.....	23
第三章 風洞実験.....	28
3-1 実験装置.....	28
3-2 実験方法.....	31
3-3 実験結果.....	34
第四章 青森県平舘沿岸流域の潮流・海流.....	38
4-1 実験場所と測定方法.....	38
4-2 実験結果.....	44
第五章 考察.....	76
5-1 小括.....	76

5-2 考察.....	76
第六章 まとめ.....	80
参考文献.....	81
謝辞.....	83

第一章 序論

1-1 初めに

近年地球温暖化による環境破壊が問題となり、再生可能エネルギー利用の重要性が謳われるようになってきた。再生可能な自然エネルギーを利用する発電方式の中で、水力発電は安定した出力を得ることができ、日本における事業用発電システムとして約120年の歴史がある。国内の大規模な水力発電所は、その主な役割を昼間のピーク電力対応としており、その高速な出力調整能力を活用した電力系統安定化の役割も期待されてきている。また、中小水力発電の新規開発も増加してきており、世界的には、発展途上国での新設需要や、先進国での高性能機器への更新需要が拡大している⁽¹⁾。

一方、日本は四方を海に囲まれている島国であって海洋エネルギーを利用する潮流・海流発電には大変恵まれた条件にある。潮流・海流発電とは、海峡などで発生する速い潮の流れを利用し海中に設置した発電装置で海流を受けてタービンを回し、海洋エネルギーから直接エネルギーを取り出すもので、装置全体のシステムは風力発電とほぼ同一である。しかし、潮汐の大きさと潮流の最高流速の関係は場所によって異なり、潮汐は大きいものの潮流が微弱な場所や、潮汐は小さいものの潮流が極めて強い場所等様々で、地域性に強く依存するエネルギーである。一般的に無尽蔵のエネルギーを利用でき、安定した発電量も期待されている反面、発電コストが高く、設備の性能や保守面にも課題があるといわれている。また、装置についての実証試験はほとんどなく、他の代表的な再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電と比べて、未成熟な分野であるといえる⁽²⁾。

ここで潮流発電の長所と短所についていくつか紹介する。まず長所として、

潮流は潮汐力により起こるので流れ方向や流れ速度が予想しやすいため安定したエネルギー回収が可能であること、日本を含め世界には潮流の強い場所がいくつも存在するため膨大な利用可能未開発エネルギーが存在していることなどが挙げられる。その一方で短所として、漁業や航路との調整などが必要となり実証エリアが限られていること、着床型では海底に設置するので配備する送電海底ケーブルが長くなることや確立された設計モデルがないことから実証コストが膨大になる場合が多いことなどが挙げられる。この中でも実証エリアが限られるという短所が日本での潮流発電の研究開発が海外に比べて遅れている大きな要因となっていることは間違いない。また、水力発電の基本的技術は既に成熟しているので、技術自体の不確実性は低い。

1-2 潮流・海流発電の現状

2010年度のNEDOによる「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」では、日本の潮流エネルギーの賦存量は約22GWと試算されており、これは2010年の大手電力会社10社の総発電容量（約207GW）の約11%に相当する⁽³⁾。ただし、実際の機器の設置や、導入に適した流速（1m/s以上）を得られる地域などを考量すると、現実的な導入量は約1.9GW、発電可能量は6TWh（年間電力需要の約0.7%）と試算されている。日本で潮流が強い個所のほとんどは、瀬戸内海と九州西岸にある。津軽海峡でも強い潮流が見られる。また、海流に関しては、日本周辺には黒潮が流れているため、海流エネルギーのポテンシャルは大きい。海流エネルギーの賦存量は約205GWと試算されている。ただし、実際の機器設置や、導入に適した流速（水深5mで1m/s以上）を得られる地域などを考量すると、現実的な導入量は約1.3GW、発電可能量は10TWh（年間電力需要の約1%）と試算されている⁽⁴⁾。一方、欧州では、特に英国周辺海域に賦

容量が集中しており、スコットランドには、欧州の潮力エネルギーの 25%が賦存していると試算されている。英国貿易産業省 (DTI) の試算では、英国の有力 10 地点で 36TWh/年 (2010 年時点の電力需要の約 10%) の発電が可能とされている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。また、北米では、全米の潮流ポテンシャルは 50GW (2009 年時点の発電容量の約 5%) と試算されているが、そのうち 47GW がアラスカに賦存しており、本土のポテンシャルは小さい。カナダ全体の潮流ポテンシャルは約 42GW (2009 年時点の発電容量の約 32%) と試算されているが、その 80%は冬期に凍結する環境下であり、適地は限定される。カナダでは、特に東海岸のファンディ湾などのポテンシャルが大きい。ファンディ湾は潮の干満差が大きく、毎日 1,000 億トンもの海水が出入りしており、ファンディ湾にある FORCE 実証実験サイトは、最大で 5m/s の潮流が得られる⁽⁷⁾。

研究開発に関して、日本においては、1980 年前後から潮流・海流発電の開発・実証が行われていたが、2000 年以降研究開発は縮小していた。近年、内閣府総合海洋政策推進事務局によって実証実験の「実証フィールド」に 6 県 8 海域 (2017 年 11 月時点) が選定されたことにより複数の実証実験が行われているが、いまだ実用化には至っていない。日本で行われている海洋エネルギー研究開発と比較すると、海外における海洋エネルギー研究開発は進んでいる。世界の取組状況については海洋エネルギー発電の中でも、ポテンシャルの高い波力、潮流を中心に欧米で開発が進められている。特に周辺海域の波力や潮流のエネルギー密度が高いイギリスでは 1990 年半ばから活発化し、イギリスを筆頭とし北欧での海洋エネルギー研究開発が最も盛んに行われており、現在その分野において波力・潮流発電装置の開発は最先端を走っている。現在では、欧米を中心に大手発電機メーカーや発電事業者が技術開発に参入してきており、一部の装置は水槽実験による設計検証から実海域でのプロトタイプ機試験、フルスケ

ール機試験へと段階的に技術開発を行っており、実用化に近い実海域大規模プロトタイプ機試験からフルスケール機を複数配列したアレイプロジェクトの段階へと進行しつつある⁽⁸⁾。その中でも上述のように実証実験も様々な場所において行われており、MW級の潮流発電装置もいくつか試運転されている。

これから海洋エネルギー発電の研究開発を目指す日本にとって、この海外の研究動向から学ぶことは数多くある。効率の良い装置のモデルを参考にすることは当然として、その他にも、発電装置を稼働している海洋周辺における生物の生態系を乱さないようにする工夫や、メンテナンスを容易に行えるような設計とメンテナンス方法そのもの、また発電した電力を海洋から地上へと送電する効率の良い方法などを参考にする必要がある。

1-3 小型化の重要性

従来の潮流・海流発電は仕様上、流速の速い地域の想定に限られており、巨大タービンを設置し発電するといった提案も、現実的には巨大タービンの海中固定法や電力の取り出し、送電方法等の難問があって実験さえ簡単にはできない⁽⁹⁾。

再生可能エネルギーの普及・拡大が必要とされる理由の一つは、その環境負荷の小ささである。しかしそれだけではなく、「分散型」エネルギーシステムに親和的であるということも注目を集める大きな理由となっている⁽¹⁰⁾。これまでの日本の電力供給システムは、遠隔地に大規模な発電所を設置し、そこから消費地に送電を行う「大規模集中型」が主流であったが、この方式の問題は発電所に事故があると広範囲に重大な影響を及ぼすことであって、東日本大震災によって再認識された。相対的に小規模の発電設備で消費地に近いところで発電を行う分散型電源システムがあれば、そのような供給リスクを低減させること

が可能になる。

発電システム小型化のメリットとしては、次に列挙する4項が特徴的である。

1. 小さいため製作が簡単である。
2. 事前調査や工事、メンテナンスが相対的に簡単である。本来メンテナンスの時は、専門知識を持つエンジニアがメンテナンスを行うが、小型化にすることで一般の人でも簡単にメンテナンスなどを行うことができる場合がある。
3. 出力変動が比較的に小さいので、系統を不安定にさせにくい。
4. 出力の需要に合わせてモジュール化が可能である。

このようなことから、流速が遅い地域での実用的なタービンとして普及させるには水車カットイン流速を低くする必要がある。また、後述するが、本研究で用いる抗力型タービンは揚力型タービンと比較して低流速でも回転し、また低速領域での効率も良い。しかし低速回転では発電出力が小さいという課題もある。

潮流や河川の流れは空気の流れと異なって、密度は高いが流速は遅いので、タービンの回転は低く発電には不利である。さらに水の抵抗が大きいので、強度的に大型化が難しく、たとえ大型化してもタービンの半径が大きくなることにより、回転速度が小さくなる。発電電圧を高くするためには増速機や、多極型の発電機を利用する例が多い。しかし発電機の界磁を強くすることや、極数を増やしたような発電能力の高い発電機では、発電機を回すために必要なトルクが大きくなりタービンは回らない。一方発電能力の低い発電機では、回転数は上がるが流れのエネルギーがブレードの抵抗に奪われ発電出力は下がる。すなわちタービンが流れを受けて回る能力、発電の能力とのマッチングが重要となる。また、タービンのパワー係数が最大になる回転数に発電機の極数、負荷トルクを合わせるマッチングの必要性についての指針はあるが、その定量的な

取り扱いについての指針はない。タービンの構造と発電機の能力についての最適化を定量的に評価するためには、タービンの力学的モデルが必要となる。

1-4 目的

本論文ではプール実験と風洞実験を通してタービンについての評価をし、タービンのトルク係数及びパワー係数、カットイン流速を調査した。また、陸奥湾平館沿岸地域の流速データ解析を通して、平館沿岸地域の流向分布と流速分布を調査した。加えて、これらの知見に基づいて、ローテーションフロータービンを用いた水車発電の設計モデルを構築するとともにシステム性能と流況ポテンシャルからモデルの発電量予測と既存技術の場合と比較、有効な利用方法と検討することを目的とした。

第二章 プール実験

従来の潮流・海流エネルギー発電は、流速が速い地域において開発が進められてきた。本論文で後述するが、青森県の海流は低流速であるので、従来技術ではほとんどの地域で発電できない。しかし、この問題を打開すべく本研究は低流速用小型発電システムを開発することを推進している。売電以外の方法で地域活性に貢献することで青森県の漁産業に売電以上の効果が挙がるよう、利活用モデルも模索している。

水車や風車に用いられるタービンは回転力を生じる原理の違いによって抗力型と揚力型に分けられる。Fig. 2-1 に従来のタービンの例を示す。A, B, C, 1, 2 は抗力型で D, 3, 4 は揚力型である⁽¹¹⁾。

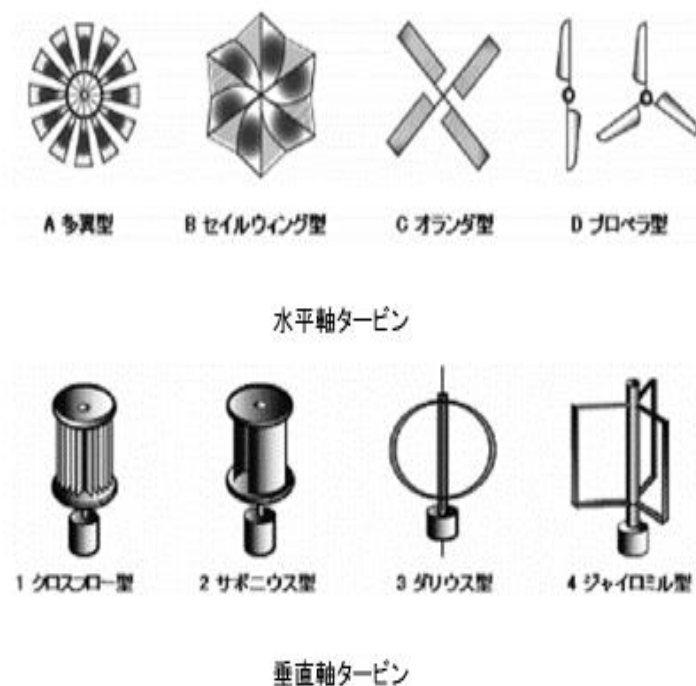


Fig. 2-1 Example of species of turbine

抗力型はその名の通り作動流体からの抗力で主な回転力を得るもので、揚力型は揚力で主な回転力を得る。一般的に抗力型タービンは低速でトルクが大きい反面、周速比の高い領域ではタービンのエネルギー変換率が高くない特徴がある。一方、揚力型タービンは航空機の主翼等に用いられていて、高い周速比で大きなパワーが得られ、従って、エネルギー変換率が高いのですが、反面低い周速比でのトルクが小さく起動特性に課題がある。本研究では第四章で後述する青森県平舘沿岸域での流況である、低速・高トルク環境に合う抗力型水車としている。

2-1 実験装置

1. ローテーションフロータービン

本実験では我々の研究室で試作した抗力型タービンを用いた新型のローテーションフロータービンを用いた。先行実験によりブレード幅が水車直径 1/4 時、水車の性能が一番高かった⁽¹²⁾ことから本実験で用いた水車の寸法は Fig. 2-2 に示すようにブレード幅 30 mm、枚数 8 枚、軸とブレード中心の角度が 35 °、高さ 240 mm、直径 120 mm、掃引面積 0.0288 m² である。Fig. 2-3 は実際の実験写真でタービンと発電機は同軸である。

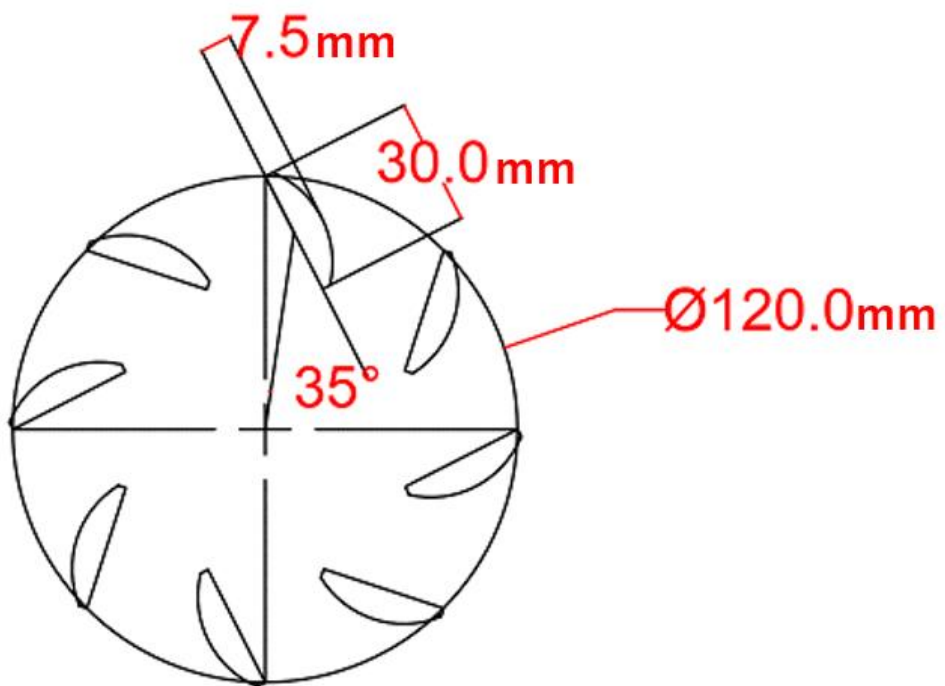


Fig. 2-2 Size of turbine which was produced by lab

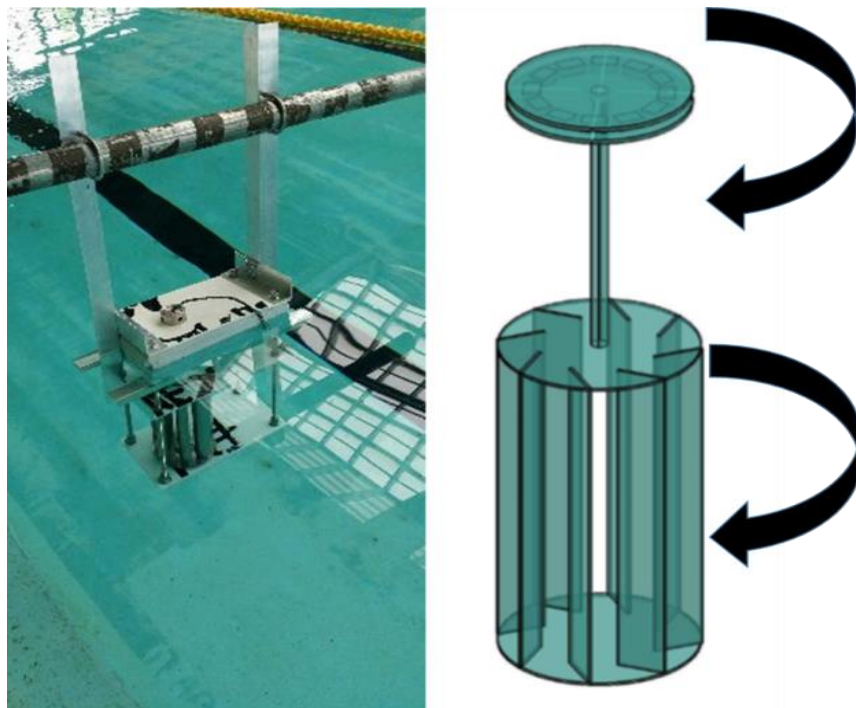


Fig. 2-3 Actual photo of turbine with generator and model diagram

2. セニアカー

プールで一定の流速を得るために Fig. 2-4 に示すセニアカー (ET4A、SUZUKI) にフレームを取り付け、その先にシステムを設置、セニアカーの速度を調査することで実験を行った。セニアカーの本体のサイズは全高 107 cm×全長 119 cm×全幅 65 cm であり、バッテリーを含む総重量は 96 kg で耐荷重は 100 kg である。充電での総走行距離は 25 km で、満充電時間は 2~12 時間である⁽¹³⁾。スピードのコントロールは 2 km/h から最大スピードの 6 km/h まで調整可能である。本実験では青森県沿岸域の流速を想定して流速 1 m/s 以下を得るためにスピードは 2 km/h (約 0.55 m/s) と 3 km/h (約 0.83 m/s) に設定した。また、低流速を再現するために流速計のデータをモニタリングしながら手作業でアクセル調整して 0.3 m/s の流速も得ることができた。流速のデータの解析から、誤差は±5 % であり誤差容赦範囲内とした。



Fig. 2-4 Photo of mobility scooter

3. 発電機

本実験では低始動トルクでの回転を可能とし、銅損に比べて鉄損や機械損が小さいコアレスのアキシシャルギャップ型発電機を使用した。Fig. 2-5 に発電機の外観を、Fig. 2-6 に発電機の回路図を示す。固定子は 12 個の三角形状コイルを周方向 1 列に配置している。回転子は周方向に同じく 12 個の永久磁石（ネオジム磁石、N48M 平角型）を円形の鉄心上に設置し、固定子コイルを両側から挟む構造となっている。各コイルの抵抗は 130Ω で端部は発電機の外部に引き出しており、これらの接続を変更することにより直列回路のコイル数を変更することができる。本実験は単相発電をしており実験時に一つのコイルが破損したため、最大 11 個のコイルを直列になるよう設計している。

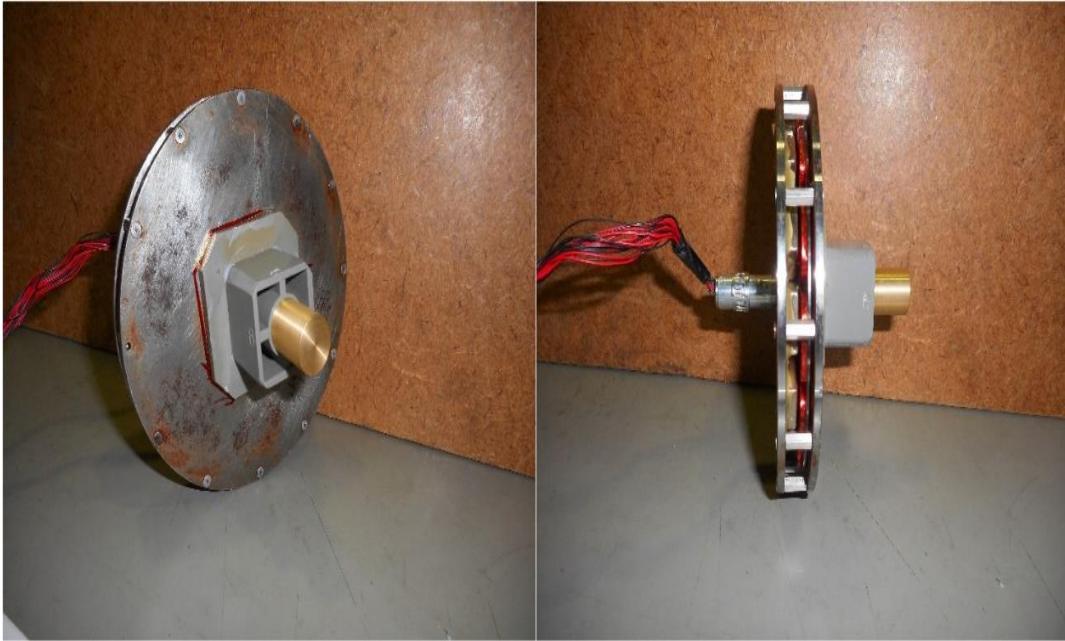


Fig. 2-5 Photo of generator used in experiment

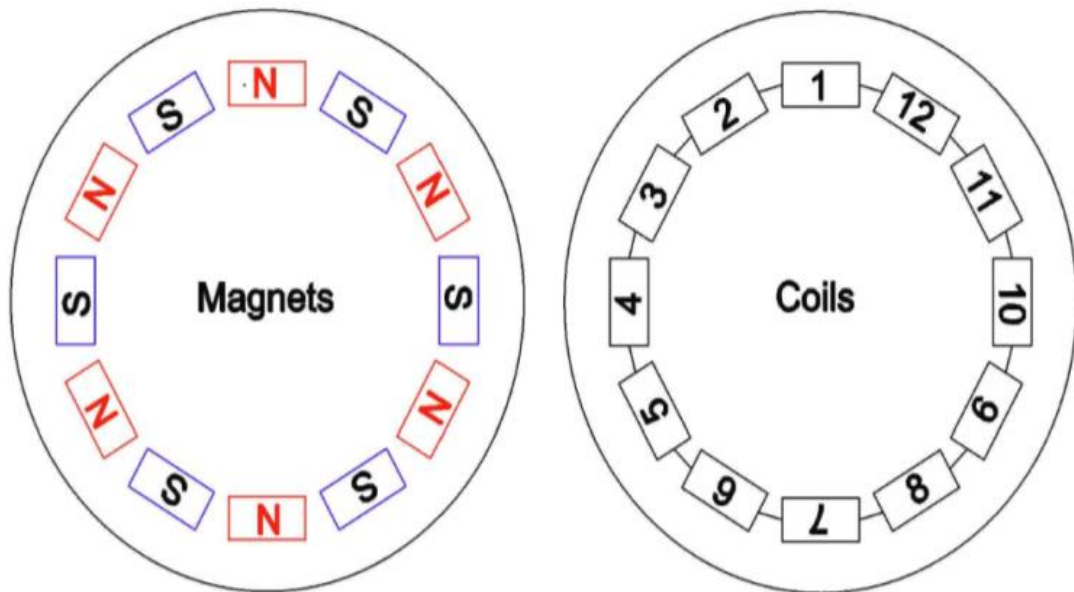


Fig. 2-6 Magnets and coils in generator

4. 流速計

Figure. 2-7 に示すのは本実験で使用したケネック社製プロペラ式流速計（本体：VO4100 検出器：VOT2-200-20）である。

流速計本体（VO4100）の寸法は 215 mm（横）×100 mm（縦）×72 mm（高）である。チャンネル数は 1 チャンネルで測定範囲は $\pm 30 \sim \pm 2000$ mm/s、電圧出力は ± 2 V/FS までである。満充電での使用時間は 16 時間である⁽¹⁴⁾。

検出器（VOT2-200-20）のプロペラは直径 20 mm、4 枚翼、樹脂製、ロッドはニッケルメッキ直径 8 mm のパイプである。全長は 680 mm、重量 220 g である。本実験ではより正確な流速データを取るため、タービンから発生する水波の影響をに配慮してタービンの中心から左前方向に各 80 cm 程度の位置に設置した。



Fig. 2-7 Photo of anemometer and sensor

5. データロガー

流速データと負荷抵抗電圧を記録するため本実験ではFig. 2-8に示すデータロガー（GL900、GRAPHTEC社製）を使用した。全4chであり全部絶縁である。また、4ch同時に収録でき電圧、温度、湿度、パルス、ロジックなどの測定対象を測定でき、最小10 μ sでサンプリングできる。256MBの内蔵フラッシュメモリもあり10msのサンプリングであれば約11時間計測できる⁽¹⁵⁾。内蔵フラッシュメモリが不足であれば、外部記憶媒体としてUSBメモリも使用可能で簡単に外部機器（パソコンなど）にデータ転送が可能である。そのほか、イーサネットI/Fで標準付属のPCソフトウェアを使用しなくてもPCへの収録データの転送や、PCからGL900の設定・制御が可能である。

本実験ではCh1に流速計のデータ、Ch2に発電機からの電圧データを記録し、サンプリング間隔は1msとした。



Fig. 2-8 The photo of data logger

6. 負荷抵抗

本実験ではローテーションフロータービンのトルク係数とパワー係数を計算するために有効電力のデータを測定する必要がある。そのため Fig. 2-9 に示す自作の負荷抵抗板を本実験で使用した。

負荷抵抗板は $1\ \Omega$ 、 $2\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $150\ \Omega$ 、 $300\ \Omega$ 、 $700\ \Omega$ 、 $1\ \text{k}\Omega$ 、 $2\ \text{k}\Omega$ 、 $5\ \text{k}\Omega$ 、 $10\ \text{k}\Omega$ 、 $20\ \text{k}\Omega$ 、 $50\ \text{k}\Omega$ 、 $100\ \text{k}\Omega$ まで 17 個の測定可能値があり本実験では代表的に

$10\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $300\ \Omega$ 、 $700\ \Omega$ 、 $1\ \text{k}\Omega$ 、 $5\ \text{k}\Omega$ 、 $10\ \text{k}\Omega$ 、 $50\ \text{k}\Omega$ 、 $100\ \text{k}\Omega$ の 10 個を使用し測定を行った。

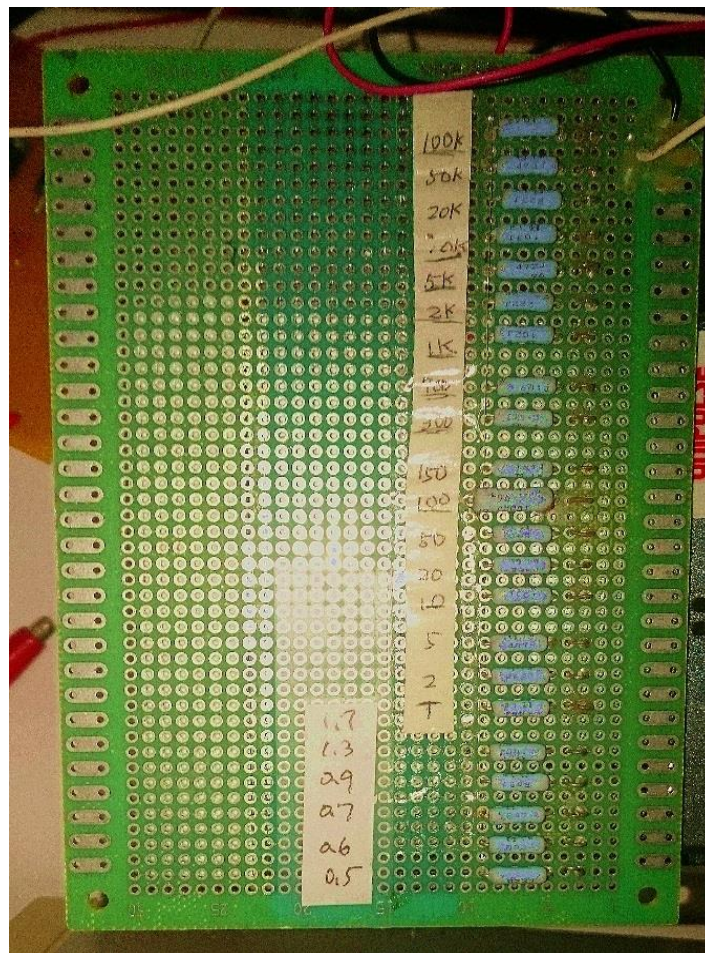


Fig. 2-9 The photo of resistor load

7. コイル数変更装置

Figure. 2-10 にコイル数変更装置を示す。本実験で使用する発電機はコイル数が 12 個であって、線路の接続は全部手作業である。結果的には実験において 12 個目のコイルの接続が不良であることがわかりデータ測定時はコイル 11 個目までのデータを測定している。



Fig. 2-10 Photo of coils number changer

2-2 実験方法

実験の流れを簡単に理解できるように Fig. 2-11 に装置の設置図と Fig. 2-12 に回路のイメージ図を示す。本来水車の実験では水槽を用いて水流を発生させデータを測定するが、本実験では実験装置の状況によりセニアカーに水車を取り付け移動させることで流速を得るようにした。実験は弘前大学学園町の水泳プールで行った。Figure. 2-11 から分かるようにタービンと発電機はセニアカーの進行方向の左側にあり、岸から 1 m 離れたところに設置してある。また、流速計はタービンの軸からプール側に 1 m と進行方向に 0.8 m 離しタービンと流速計が相互影響しないように設置した。タービンは全部水の中に沈めているが、同軸に設置してある発電機は防水ではないため水面から 0.2 m 離れたところに設置した。

弘前大学のプールは 25 m×50 m の大きさに今回セニアカーを徐行運転させたのは縦 50m である。実験では 50 m を 2 区域に分け 25 m ごとに負荷抵抗値を変更させ、11 個の抵抗値を測定したらコイルの数を変更させ上の順序で負荷抵抗値の電圧を測定した。

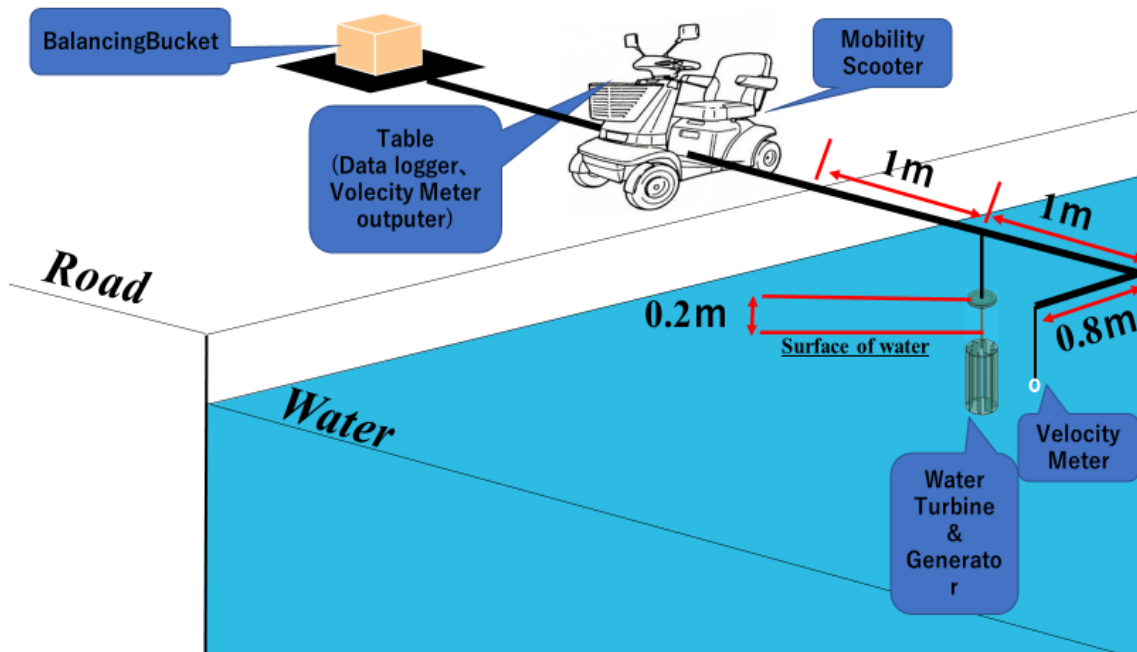


Fig. 2-11 The installation position of devices

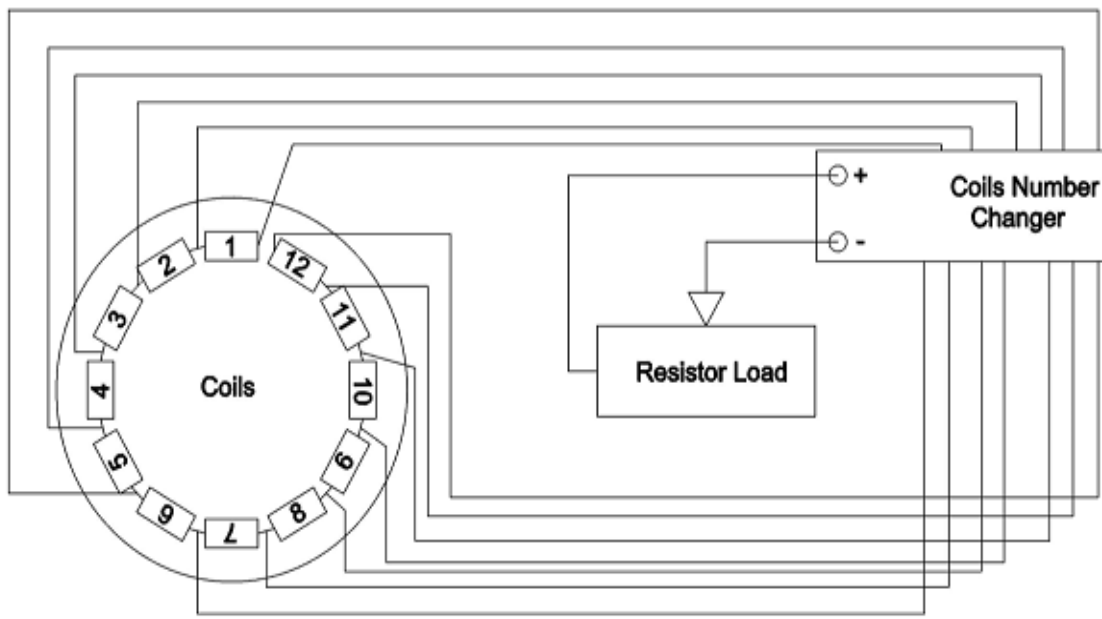


Fig. 2-12 Circuit diagram of generator coils and resistor load

なおセニアカーのスピード表示板の設定最低速度は 2 km/h である。これを換算すれば約 0.55 m/s の流速を得るのと同様である。同じく 3 km/h のデータを取った。この時の流速は約 0.83 m/s である。また、青森県沿岸域の流速のデータを見れば流速が 1 m/s 以下である。そのためセニアカーのスピードを調整することで低流速の 0.3 m/s のデータを取った。セニアカーで安定するスピードの最低値は 2 km/h である。そのため、0.3 m/s の実験ではデータロガーで表示される流速のデータを見ながらアクセルを指先で調整しながら行った。データを見るとちょうど 0.3 m/s ではないが誤差が±5 %以内のデータを採用してグラフ化した。

本実験でデータロガーに収録したデータは負荷抵抗電圧と流速である。そのため電力評価に必要な発電機の回転数（水車の回転数）、電力はロガーのデータから計算した。流速は非常に安定しており誤差は 3%以内に制御できた。データを取り出し計算した順序は次の通りである。

1. 各コイル数の各負荷抵抗値での最高電圧を取り出しその平均値を記録する。
2. ロガーで取りだした電圧は負荷抵抗値の電圧なので、下の式を通して水車が回り発電した発電機の全電圧を求める。

$$R = nR_s + R_L (\Omega) \quad (2.1)$$

ここで $R (\Omega)$ は全抵抗、 n は発電機のコイル数、 $R_s (\Omega)$ は発電機各コイルの抵抗、 $R_L (\Omega)$ は付加抵抗である。

$$U = \frac{E}{nR_s + R_L} R_L \quad (V) \quad (2.2)$$

$$E = \frac{nR_s + R_L}{R_L} U \quad (V) \quad (2.3)$$

ここで、 $U (V)$ は負荷抵抗電圧、 $E (V)$ は全電圧である。

3. 同様に、各コイル数と各負荷抵抗値での電圧の sin グラフの周期から水車の回転数を計算する。本実験では磁石が 12 極なので sin グラフ 6 個で一周期に相当する。式は以下のようになる。

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{s}) \quad (2.4)$$

そのため $f = \frac{1}{T}$ (N/s) である。ここで T (s) は周期、 f (N/s) は回転数及び周波数である。

4. 次に角速度を求める。求める式は以下のようになる。

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{rad/s}) \quad (2.5)$$

ここで、 ω (rad/s) は角速度、 f (N/s) は回転数である。

起電圧係数とは発電機のコイルが磁場の中を横切って発生する電圧と回転速(角速度)が比例しその比例値で定義される。

まず、発電機のコイルに加わる磁束密度を B (T)、その磁界中を横切る巻線の速度を v (m/s)、巻線の有効長を L (m) とするとフレミングの右手の法則により巻線に発生する起電圧を e とする。起電圧係数を求める式は以下のようになる。

$$e = v \times B \times L \quad (\text{V}) \quad (2.6)$$

ここで発電機の回転速度を ω (rad/s) とすると巻線の速度 v (m/s) は

$$v = \omega \times \ell \quad (\text{m/s}) \quad (2.7)$$

となる。 ℓ (m) は巻線の半径である。

上の式から書き直すと

$$e = \omega \times \ell \times B \times L \quad (\text{V}) \quad (2.8)$$

になる。

ここで Ke を

$$Ke = \ell \times B \times L \quad (2.9)$$

本実験での発電機コイル数は 12 個である。とすると

$$e = Ke \times \omega \times n \text{ (V)} \quad (2.10)$$

に表される。ここで Ke を起電圧係数と呼ぶ。

求めた Ke の値に基づいて、本実験中各流速での電力とトルクを計算することができる。

$$P = \frac{U^2}{R} \text{ (W)} \quad (2.11)$$

$$P = \omega \times T \text{ (W)} \quad (2.12)$$

ここで P (W) は全電力、 T (N) はタービンのトルクである。タービンのトルク T (N) は次式のように計算する。

$$T = \frac{n^2 \times Ke^2}{R} \times \omega \text{ (N)} \quad (2.13)$$

そして、水車の性能を知るためにトルク係数 C_t とパワー係数 C_p を計算する。

トルク係数 C_t とパワー係数 C_p の計算式は以下のようなになる。

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V^2 A r} \quad (2.14)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V^3 A} \quad (2.15)$$

ρ (kg/m³) は水の密度、 V (m/s) は流速、 A (m²) は投影面積、 r (m) はタービンの半径である。

周速比 λ はタービン性能評価で欠かせないパラメータであり、周速比とトルク係数、パワー係数との相関関係でタービンの性能を表す。周速比 λ の計算式は以下のようなになる。

$$\lambda = \frac{2\pi f r}{V} \quad (2.16)$$

ここで f (N/s) は水車の回転数である。

2-3 実験結果

Figure. 2-13 は各流速（0.3 m/s、 0.55 m/s、 0.83 m/s）での発電機の角速度と各コイルの電圧の比較グラフである。全データの近似曲線はほぼ一直線になっていて、その傾きは発電機の起電圧係数を示している。流速 0.3 m/s では 0.3844、0.55 m/s では 0.3824、0.83 m/s では 0.3897 である。

つまり、発電機は 0.55 m/s と 0.83 m/s の流速で発電しているだけでなく低流速である 0.3 m/s でも発電していることを示した。

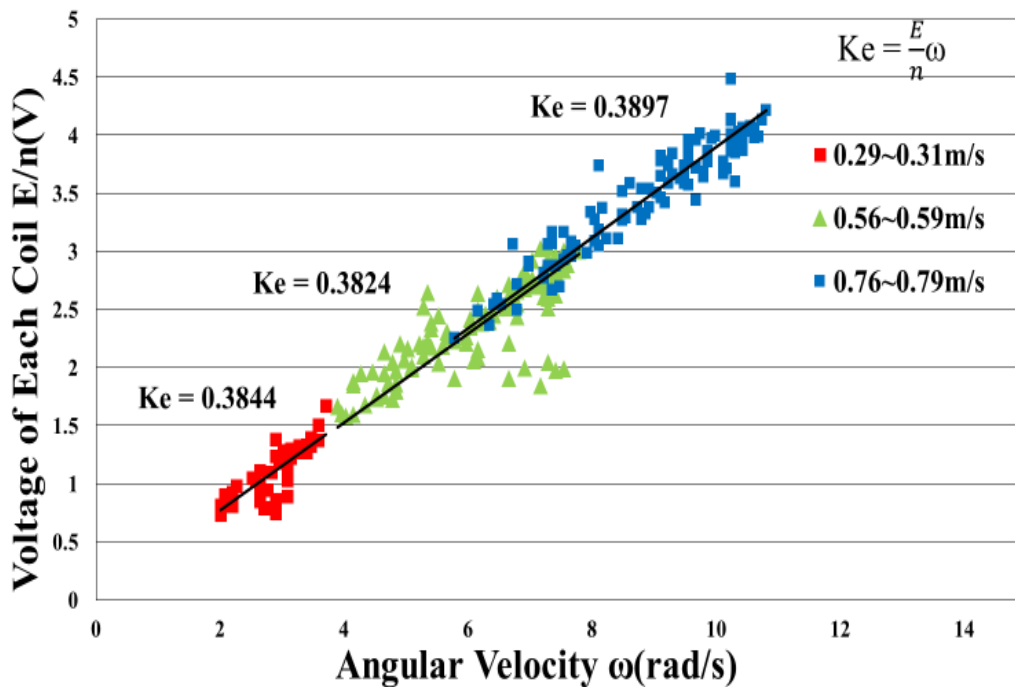


Fig. 2-13 Relationship of Voltage of each coil and Angular velocity

Fig. 2-14 と Fig. 2-15 はタービンの角速度 ω (rad/s) とパワーP (W) とトルク T (N) の相関図である。

Fig. 2-14 で示すように、パワーの最大値は流速が 0.3 m/s では 0.02 W、0.55 m/s では 0.26 W、0.83 m/s では 0.64 W を示していて、タービンの回転数が遅くなるに連れて大きくなっている。注目すべき所は 0.3 m/s では少ない電力であるが発電していることが分かった。今回の実験では電力のピーク値（極大値）を得ることができなかったがタービンの回転数を低くすることによって各流速で得られる電力の最大値を知ることができる。

Fig. 2-15 ではトルクの最大値は 0.3 m/s で 0.01 N、0.55 m/s では 0.06 N、0.83 m/s では 0.09 N を示している。上述のパワーと同じく今回の実験ではトルクのピーク値を得ることができなかったがタービンの回転数を低くすることによって各流速で得られるトルクの最大値を知ることができる。

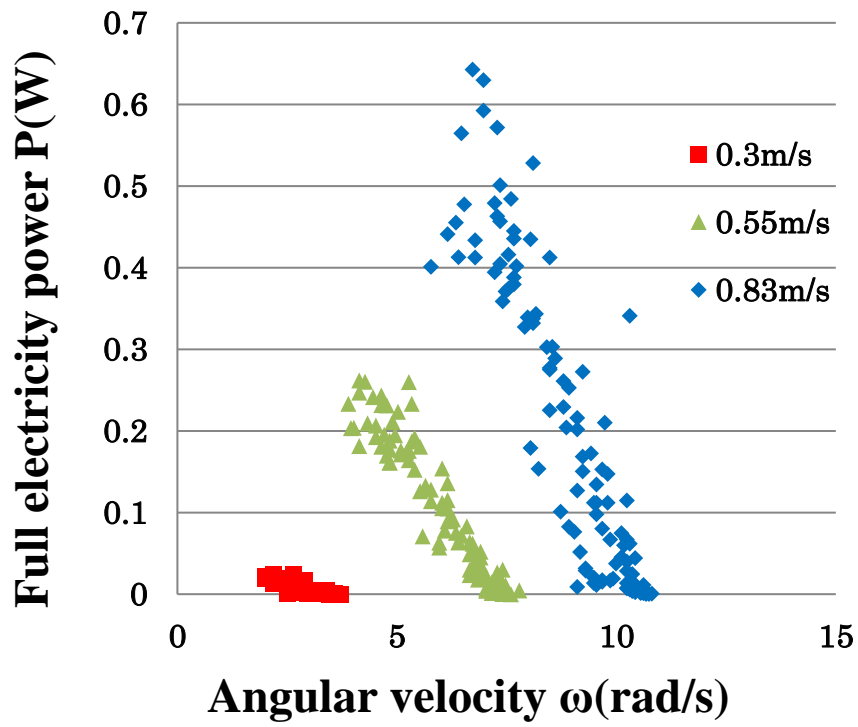


Fig. 2-14 Relationship of Full electricity Power and Angular velocity

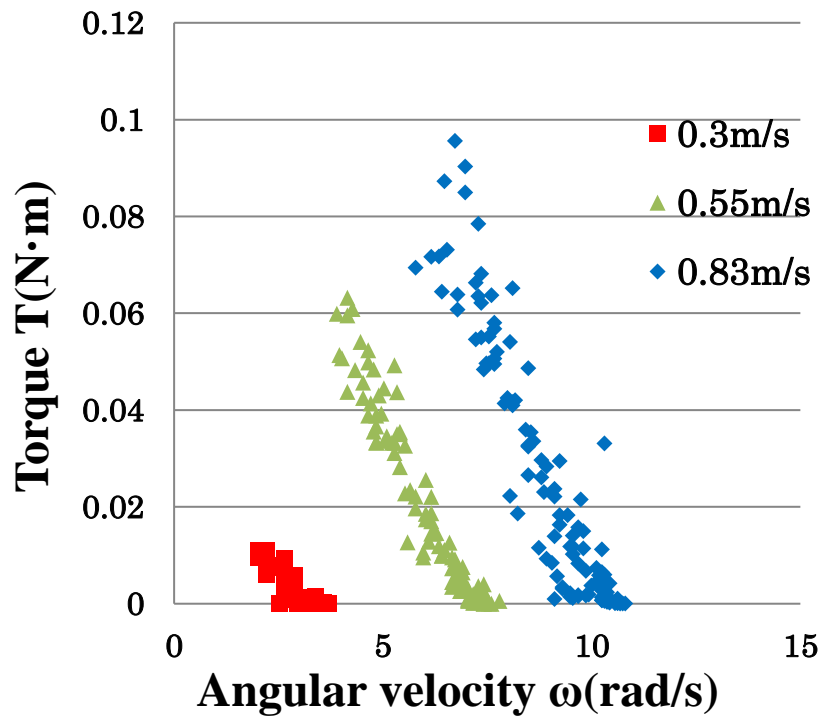


Fig. 2-15 Relationship of Torque and Angular velocity

計算を通して得られた C_t （トルク係数）、 C_p （パワー係数）、 λ （周速比）を用いてタービン性能評価を行うため λ - C_t 、 λ - C_p グラフを作成した（Fig. 2-16 と Fig. 2-17）。

グラフで示すように C_t の最大値は λ が 0.4 付近で 0.25 を示している。同じく C_p の最大値も λ が 0.4 付近で 0.1 を超えているが、ピーク値が見られていない。これは、発電機の低回転時の性能が不確定であったため、タービンとのマッチングができてないことが原因と考えられる。

また、各流速でのデータは同じ傾向を示しているがそれぞれに誤差がある。それは、実験状況が低流速という条件と各流速での実験時の水面から生成される波の影響で発電機の回転速度が不安定でデータの誤差が大きくなったと予想できる。

本実験では、正確なタービンの性能評価はできてないが、水車をプールで走らせることで発電機を回転させ発電データを測定できることが分かった。また、ローテーションフロータービンは流速 1 m/s 以下でも発電可能であり、流速 0.3 m/s の条件でも発電できることが分かった。そのように、低流速流域での発電に関して十分な可能性を示した。

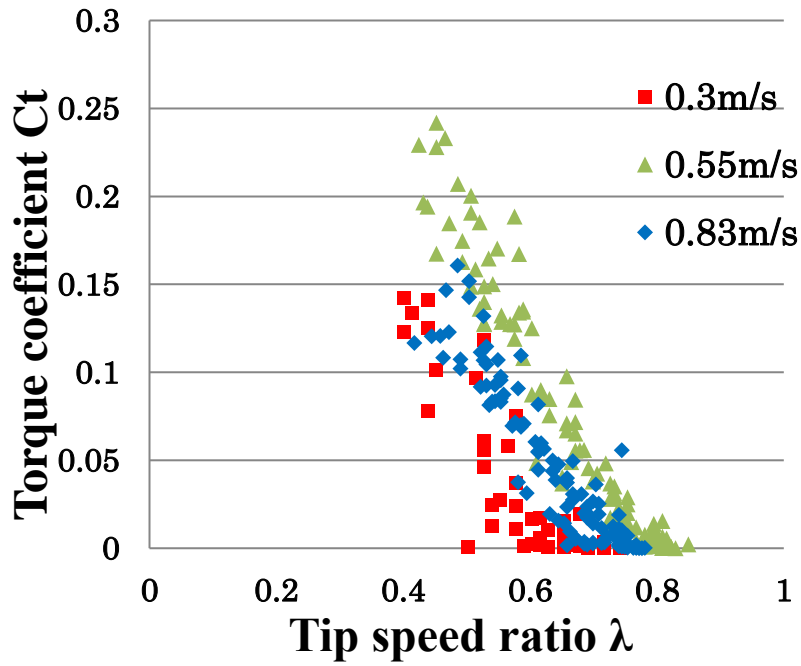


Fig. 2-16 Relationship between tip speed ratio and torque coefficient

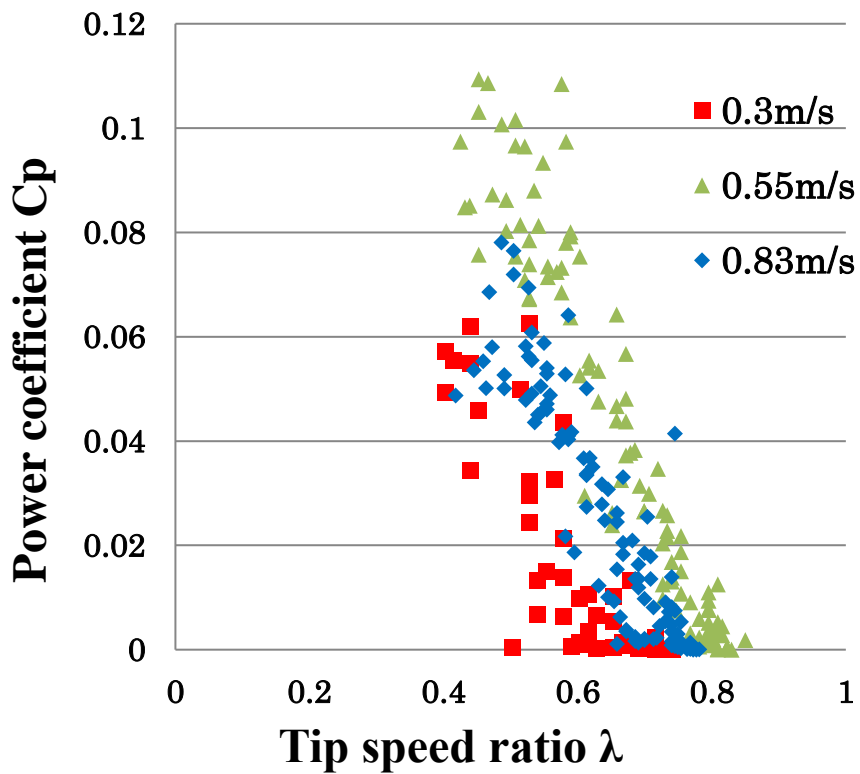


Fig. 2-17 Relationship between tip speed ratio and power coefficient

第三章 風洞実験

第二章では発電機を用いてタービン特性評価した。タービンは 0.3 m/s から発電可能であることはわかったが、プール実験では発電機のデータを測定しタービン特性評価するには限界があり、パワー特性の評価ではピーク値まで計測できていない。実用化を目指すためには、もっと正確なタービン特性評価が必要であるため、本章では九州大学応力研究所 (RIAM) に訪問し風洞実験を行った。本実験で用いた風洞は幅 3.6 m、高さ 2.0 m、長さ 15.0 m である

3-1 実験装置

1. ローテーションフロータービン

本実験で使用したローテーションフロータービンは直線翼でありその寸法は Fig. 3-1 に示すようにブレードは 8 枚であり、ブレードの取り付け角度は 35° でブレードの中心とタービン中心を結んだ直線とブレードのなす角度である。タービンの半径はブレード翼末からタービン中心までの距離と定義していて 150 mm である。ブレードの幅はタービン半径の半分である 75 mm で、厚みは 1 mm である。タービンの高さは 240 mm である。

タービンのブレード数、ブレードの取り付け角度、ブレードの幅とタービン半径の比はプール実験で用いたタービンと同じであるが、タービンの半径（プール実験では 60 mm、本実験では 150 mm）とタービンの形（プール実験ではカマボコ型、本実験では直線型）は違いがある。

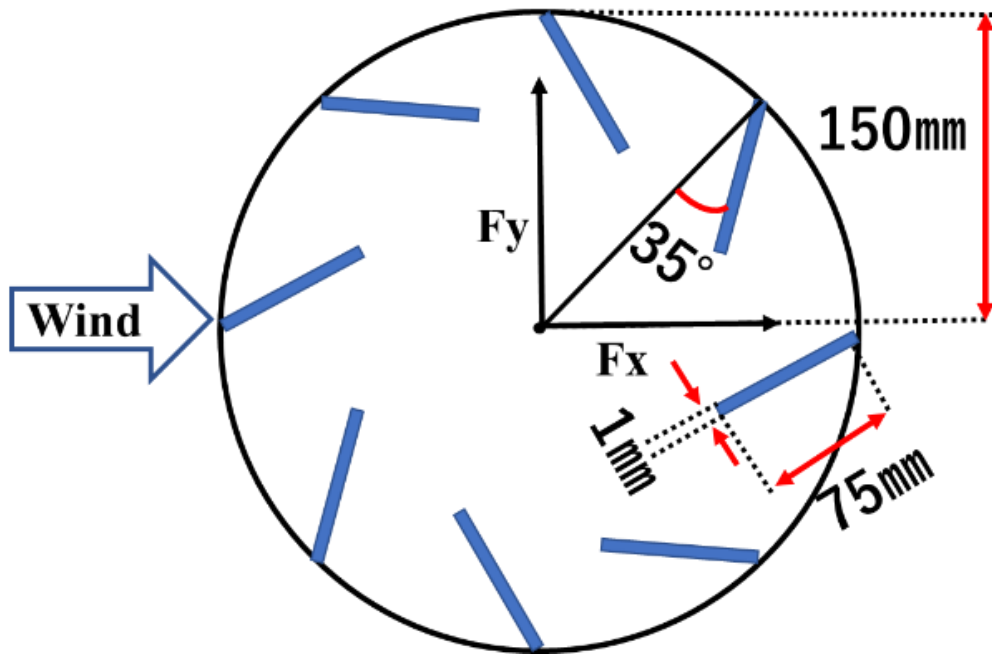


Fig. 3-1 Dimension of Rotation Flow Turbine in wind tunnel experiment

2. トルクメータ

本実験ではより正確なトルクデータを得るためにトルクメータ（UTM II-10 Nm）を用いた。電源入力は DC24 V、測定レンジは 0.05 Nm～10 Nm であり誤差は 0.03 %、低速回転域での測定も可能である。また、出力信号はトルク信号と 1 回転 4 パルスの回転パルス信号である⁽¹⁶⁾。

3. 電磁ブレーキ

第二章で述べたように発電機と負荷抵抗を用いた測定方法では周速比 λ が 0.5 までのデータしか得られていないため、本実験ではより大きいブレーキトルクを発生できる自然冷却式電磁ブレーキ（POB-0.3）を用いた。動作原理はコイルに通電し励磁状態になると、磁束が流れ、磁性体のパウダが磁路に沿って鎖状につながって固体化し、その結合力によってトルクを伝える。定額電圧は DC24 V であり、電圧制御により制御可能なトルク範囲は 0.1 Nm～3.0 Nm である⁽¹⁷⁾。

4. 三分力計

実用化にむけ、タービンを海に沈めた際に海流から受ける影響を推測するために本実験では、タービンフレームの下側に三分力計（FMH-30S）を設置した。三分力計で測定可能なデータは動圧 F_x （N）と横力 F_y （N）であり、動圧と横力の正の方向は Fig. 3-1 に示すように風向の後方と左側である。

5. RPM センサー

本実験では電磁ブレーキを制御しタービンが設定した回転速度で回転させデータを取るため回転速度をリアルタイムでモニタリングする必要があり、RPM センサーをなるべくタービンに影響が少ないタービンの後方に設置した。また、本実験では非接触方式で測定し、可視光光電反射法を用いたため反射マークをタービンの軸に取り付けて計測を行った。測定範囲は 6～99999 rpm であり精度は ± 0.02 % である⁽¹⁸⁾。

3-2 実験方法

実験装置の設置方法は Fig. 3-2 に示すようにフレーム（縦横 1 m × 高 1.2 m）の中に上から高さ 240 mm のタービンを設置、同軸にトルクメータと電磁ブレーキを接続してある。また、固定フレーム全体の力分布を知るためにフレームの下に三分力計を設置してある。そして、回転速度を知るためにトルクメータの横に RPM センサーを設置してある。

測定には電磁ブレーキの値を変化させながら各設定条件で 5 分程度慣らして安定運転させたあと、測定周期 1 ms で 30 s 間のデータを測定し平均化した。本実験では風速を 7.5 m/s と一定にして測定を行った。その理由は、風速 7.5 m/s は海流速 1 m/s 以下である 0.5 m/s 時と同じレイノルズ数 (1.5×10^5) となることを利用したものである。レイノルズ数を求める式は以下のようになる。

$$\text{Re} = \frac{V \times L}{\nu} \quad (3.1)$$

ここで Re はレイノルズ数、 ν (m^2/s) は流体における動粘性係数、V (m/s) は物体の流れに対する相対的な平均速度、L (m) は特性長さである。特性長さに関しては、垂直型タービンの場合にはロータの直径で定義する^{(19) (20)}。本論文では特性長さ L (m) はタービンの直径である 0.3 m とした。

Fig. 3-3 は実際の実験写真である。

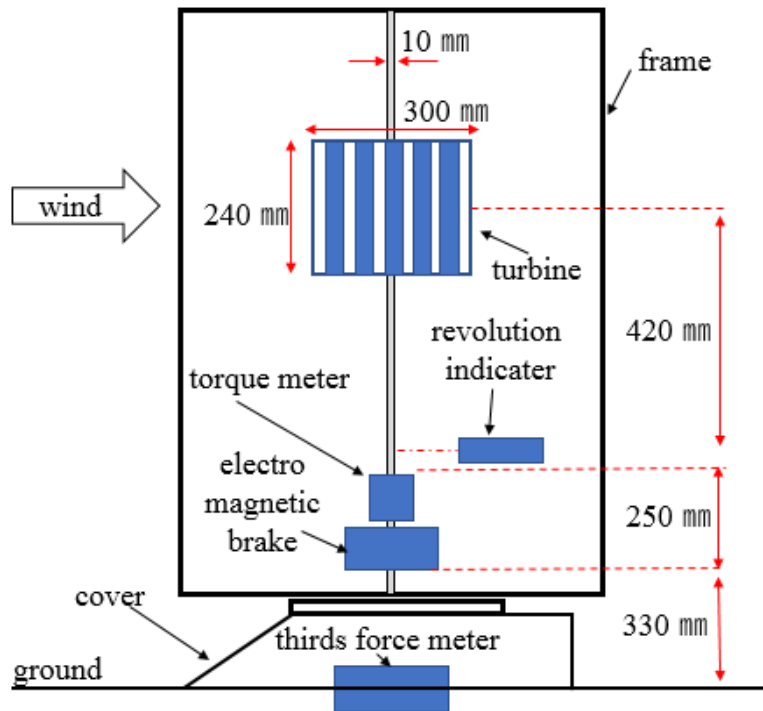


Fig. 3-2 The installation position of measuring device



Fig. 3-3 Experimental photograph in wind tunnel of RIAM

解析では測定データを無次元化することで結果に使用するトルク係数 C_t 、パワー係数 C_p 、周速比 λ 、フレームの流体に対する抵抗係数 C_x と C_y を算出した。回転速度 ω については RPM センサーのデータから次式のように算出した。

$$\omega = \frac{N}{60} 2\pi \text{ (rad/s)} \quad (3.2)$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (3.3)$$

ここで、 N はタービン回転数 (N/min) である。 R はタービン半径 (m)、 V は風速 (m/s) である。また、トルク係数 C_t については次のように与えられる。

$$A = D \times H \text{ (m}^2\text{)}$$

$$C_t = \frac{T}{0.5\rho AV^2 R} \quad (3.4)$$

ただし、 ρ は流体密度 (kg/m³)、 A はタービンの投影面積 (m²) であり D はタービン直径 (m)、 H はタービンの高さ (m) である。さらにトルク T (N) と回転速度 ω (rad/s) によってタービンのパワー係数 C_p を次式のように算出する。

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho AV^3} = \frac{\omega T}{0.5\rho AV^3} \quad (3.5)$$

ただし、 P はタービン出力 (W) である。

さらに、 F_x (N) と F_y (N) のデータを無次元化無次元化することで抵抗係数 C_x 、横力係数 C_y を求める。

抵抗係数 C_x 、横力係数 C_y の求め方は以下の式のようになる。

$$C_x = \frac{F_x}{0.5\rho v^2} \quad (3.6)$$

$$C_y = \frac{F_y}{0.5\rho v^2} \quad (3.7)$$

3-3 実験結果

解析結果として周速比 λ とトルク係数 C_t 、パワー係数 C_p の関係をグラフ化し同じ垂直軸であるダリウスタービン⁽²¹⁾のトルク係数 C_t 、パワー係数 C_p と比較した (Fig. 3-4 と Fig. 3-5)。

グラフから分かるように風速7.5 m/sでの実験データ C_t の値はきれいな直線型になってある。また、 C_p の値もほぼ曲線になっており λ が0.3付近で $C_{pmax}0.07$ の極大値が得られた。また、ダリウスタービンと比較して C_{tmax} はローテーションフロータービンの方が大きいのだが、 C_{pmax} は5分の1程度である。しかし、ダリウスタービンのカットイン流速は0.8 m/sであり⁽²¹⁾、低流速流域ではカットイン流速が0.3 m/sであるローテーションフロータービンの方が適していると思われる。

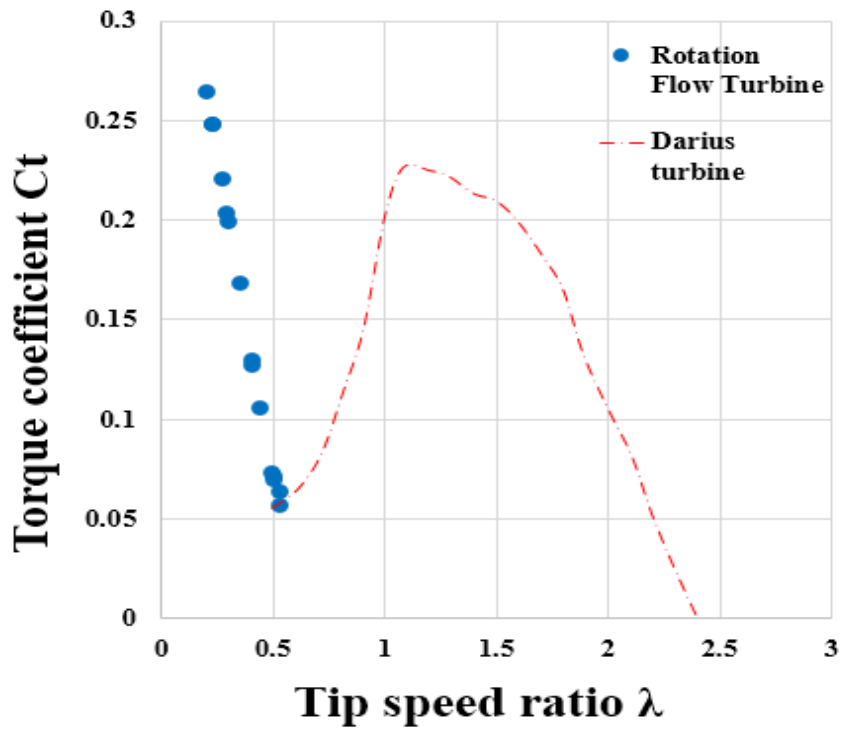


Fig. 3-4 Relationship between tip speed ratio and torque coefficient

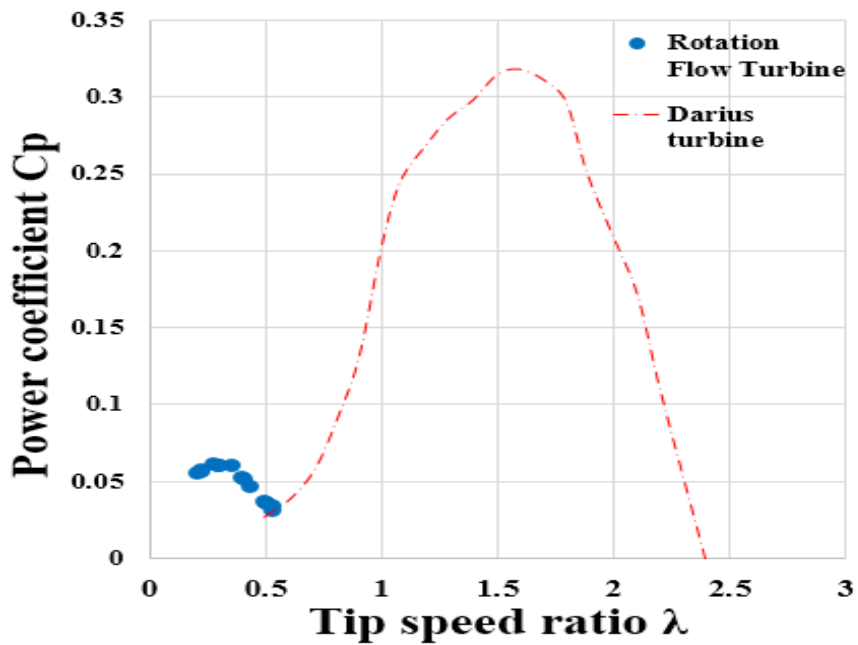


Fig. 3-5 Relationship between tip speed ratio and power coefficient

第二章プール実験と本実験でのトルク係数 C_t を比較し Fig. 3-6 に示す。ここから、プール実験の結果は誤差こそ大きいものの、確度の高い風洞実験の結果とおおむね一致することがわかる。なお、第二章で述べたようにプール実験では発電機の電圧からトルク係数を求めることに限界があった。そのため、本実験では電磁ブレーキとトルクメータを用いることで、周速比が 0.2 付近でのデータも測定でき、より正確なタービンの性能評価ができた。今後の実証実験の際に発電機とのマッチングできるタービンが設計できると期待できる。

また、 F_x と F_y のデータを無次元化無次元化することで抵抗係数 C_x 、横力係数 C_y を求め周速比との関係をグラフ化した結果を Fig. 3-7 に示す。

Fig. 3-7 から分かるようにタービン回転時には抵抗係数 C_x は全体的にはほぼ一定であり、タービン回転時に周速比による C_x の変化はあまり見られなく平均値は 5.3 である。また、横力係数 C_y はゼロではないが影響は極めて小さい。

抵抗係数を知ったことにより、実海域でタービンを沈めた際の動圧 F_x を求めることができる。式 (3.6) から逆算してタービン 1 台が受ける F_x の値を求めることができる。

$$F_x = 0.5\rho v^2 S C_x \quad (3.8)$$

ここで、 S (m^2) はタービン 1 台当たりの水流を受ける面積である。例えば、式 (3.8) に流速 0.5 m/s を代入すれば動圧は 56.76 N/台になる。従って、今後、実用化した時、動圧を考量して設置方法などを決めることができる。

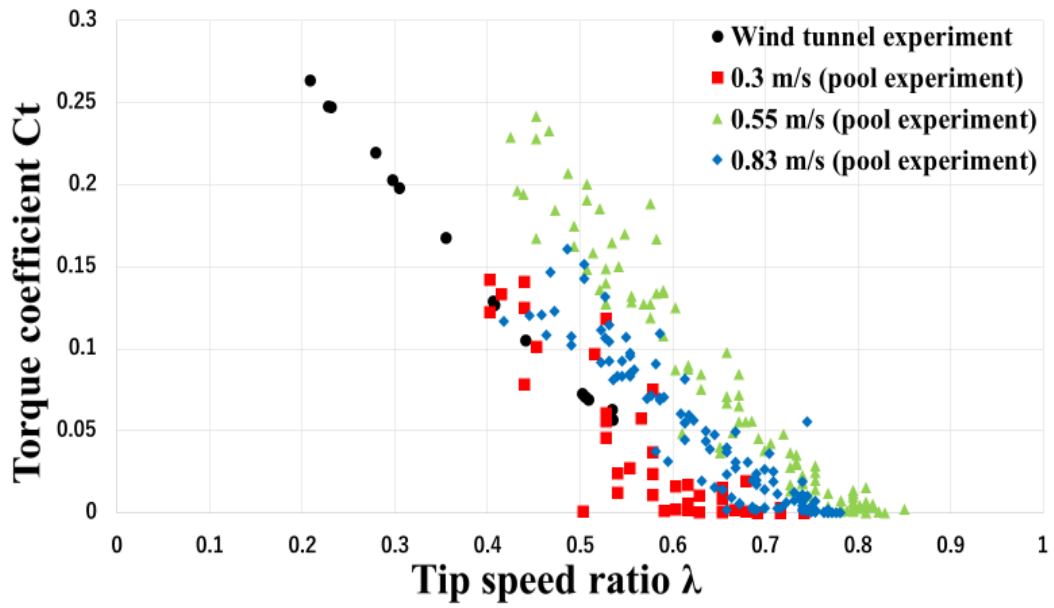


Fig. 3-6 Comparison of torque coefficient in pool experiment and wind tunnel experiment

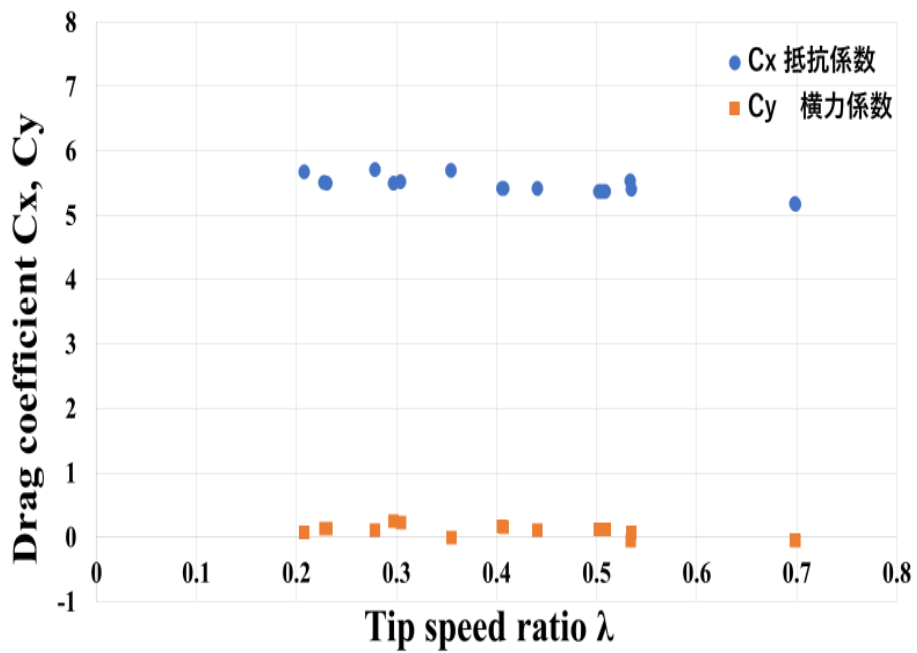


Fig. 3-7 Relationship between tip speed ratio and drag coefficient

第四章 青森県平館沿岸流域の潮流・海流

4-1 実験場所と測定方法

内湾、内海、大陸棚を含む沿岸海洋は、陸と海の境界をなしていて、地球上の物資とエネルギーの循環系の中で重要な位置を占めている。これはまた我々人類の身近にあつて、有形無形の多種多様で豊かな海の恵みと可能性を与えてくれるきわめて貴重な海域である⁽²²⁾。

従来は潮流・海流エネルギー発電は、流速が速い地域において開発が進められてきた。しかし、流速が強い津軽海峡での発電はマグロの捕獲に影響を与える可能性もあり送電方法も簡単なものでもない。また、陸奥湾内の青森港における潮差は大潮時でも60～70 cmであり、平均潮差は45.6 cmにすぎない。この平均潮差の値が湾の平均水深の1/76程度であることから推測されるように、湾内の潮流は全般に弱く、10 cm/sec程度またはこれ以下である⁽²³⁾。しかし、湾口の平館海峡では、最狭部が10.5 kmと狭く、湾口部断面積が湾内面積の3/10,000程度しかないため、平館海峡部では比較的強い流れがある⁽²⁴⁾。また、外ヶ浜漁協からのヒアリングより、この平館沿岸海域ではまれに定置網が動くほど速い流れがあることが確認できた。

序論で述べたように、本研究の目的の一つは、弘前大学がある青森県の地域活性化に貢献することである。そのため、低流速用小型発電システムを開発することにより、売電以外の方法で地域活性化に貢献することで青森県の漁産業に売電以上の効果が挙がるよう、その利活用モデルも模索してきた。本実験では青森県の地域活性化に使用できる可能性の検証として、2015年7月21日から2016年9月30日まで、1年間青森県の外ヶ浜の平館沿岸域で水深5 mと21 mで流速の定点観測を行った。

Fig. 4-1 に示すのが定点観測を実施した地点 (41.194N/140.642E) であり、Fig. 4-2 に示すのが観測地点における東西方向の断面図である。

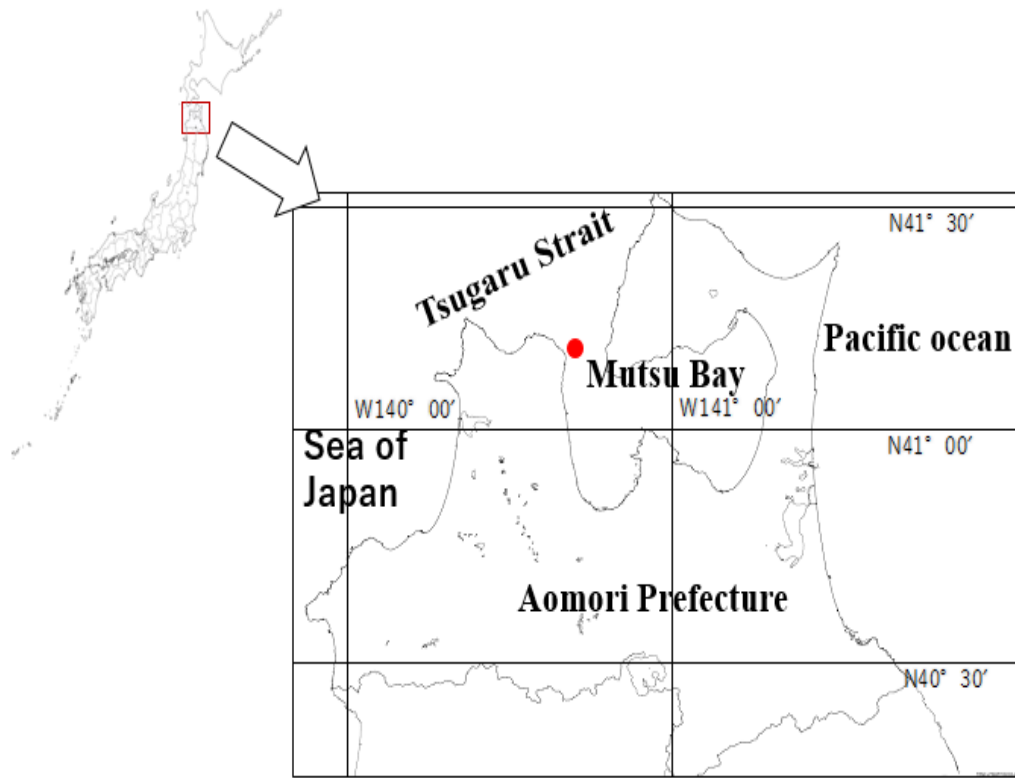


Fig. 4-1 Geo-position of measurement on the coast of Tairadate

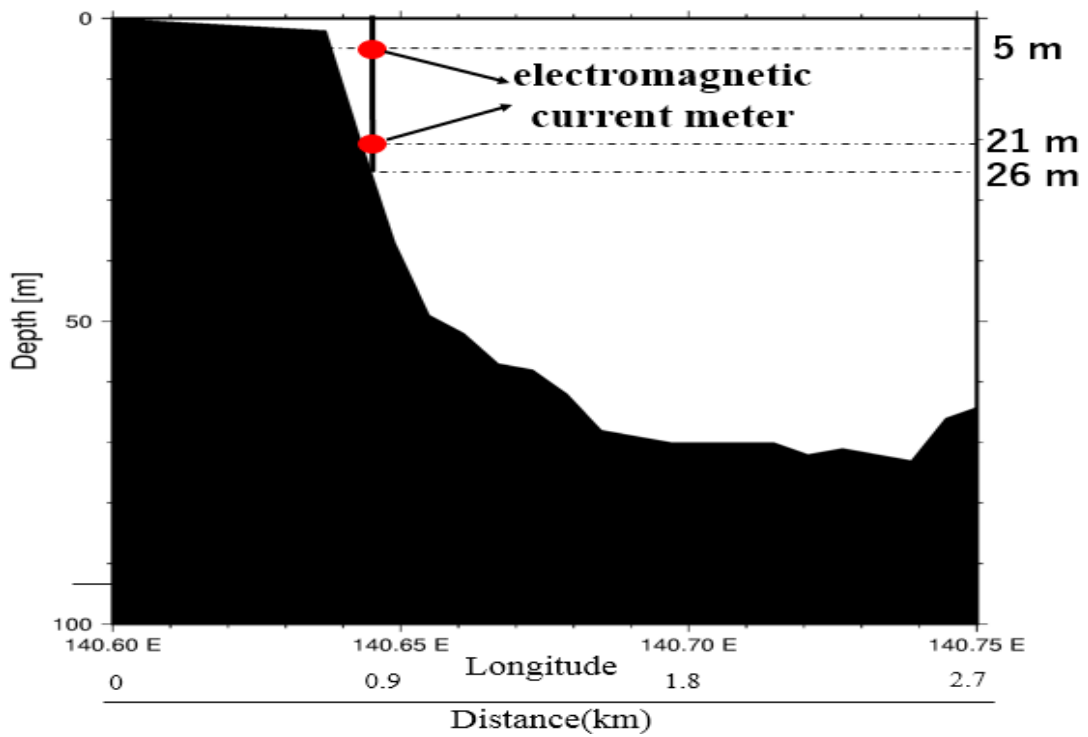


Fig. 4-2 Cross section of the experimental area on the coast of Tairadate about depth

測定方法は海の中に設置されている定置網の係留ロープに電磁流速計 (INFINITY-EM) を水面から 5 m と 21 m 地点に固定させ X-Y 平面内を流れる流速を 30 分毎に 1 秒をサンプリングし 30 秒間測定し、その計測値 30 点の最終結果を 30 秒で割り算して秒平均速度と方向を算出してロガーに記録した。センサータイプは 2 軸電磁誘導方式で流速、方位、水温が測定でき、各測定範囲は 0 ~ ± 500 cm/s (精度± 1 cm)、0~360° (精度± 2 °)、-3~45 °C (精度± 0.02 °C) である⁽²⁵⁾。Fig. 4-3 と Fig. 4-4 に電磁流速計の写真と設置図を示す。



Fig. 4-3 Photo of electromagnetic current meter

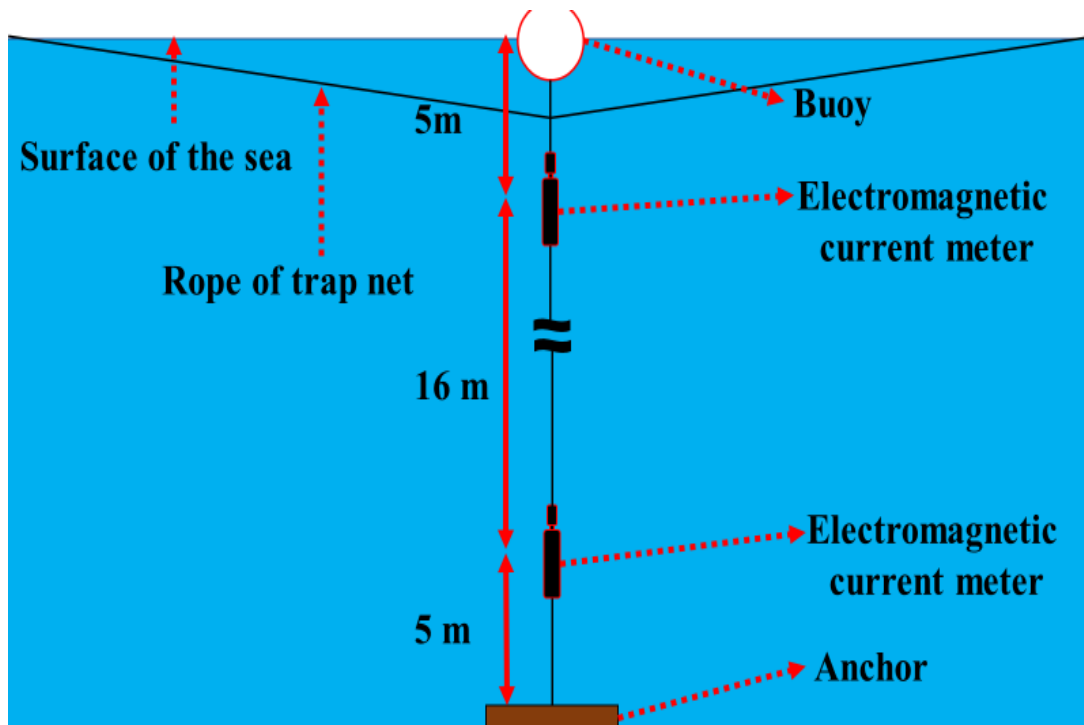


Fig. 4-4 Installation of electromagnetic current meter in the sea

実験の際には電磁流速計にテープを巻いて沈めてある。その理由としては、海中で生物が電磁流速計に付着しないようにすることと、1年間の観測中、3か月ごとに海から取り出してデータ回収と再設定を行うが、その際のメンテナンスを簡単にすることである。

設置場所は Fig. 4-4 に示す通りで、一番底に 50 kg のアンカーを固定させ 5 m 上に電磁流速計を一つ、また、その 16 m 上に 2 番目の電磁流速計を設置し、そこから 5 m 上にプラスチック製のブイを置きブイの浮力とアンカーの重力で二つの流速計をつなげるロープを引っ張らせ垂直に立たせる。この時、ブイはちょうど水面近くにあり、また、上述したように陸奥湾内の平均潮差が 0.5 m 以下とのことから、本論文では電磁流速計の設置位置を水面から 5 m と水深 21 m として扱う。電磁流速計の海流による傾き具合は、事前の計算を通して流速 1 m/s で電磁流速計は 1° 程度しか傾かず、ほぼ直立しているとみなした。

流向分布と流速頻度について、深さ 5m、21m での各季節のデータを流向分布（8 方向）と流速分布をグラフ化した。最後には全実験期間 2015 年 7 月 21 日から 2016 年 9 月 30 日までの流速分布を示した。

4-2 実験結果

4-2-1 深さ 5 m での流速分布

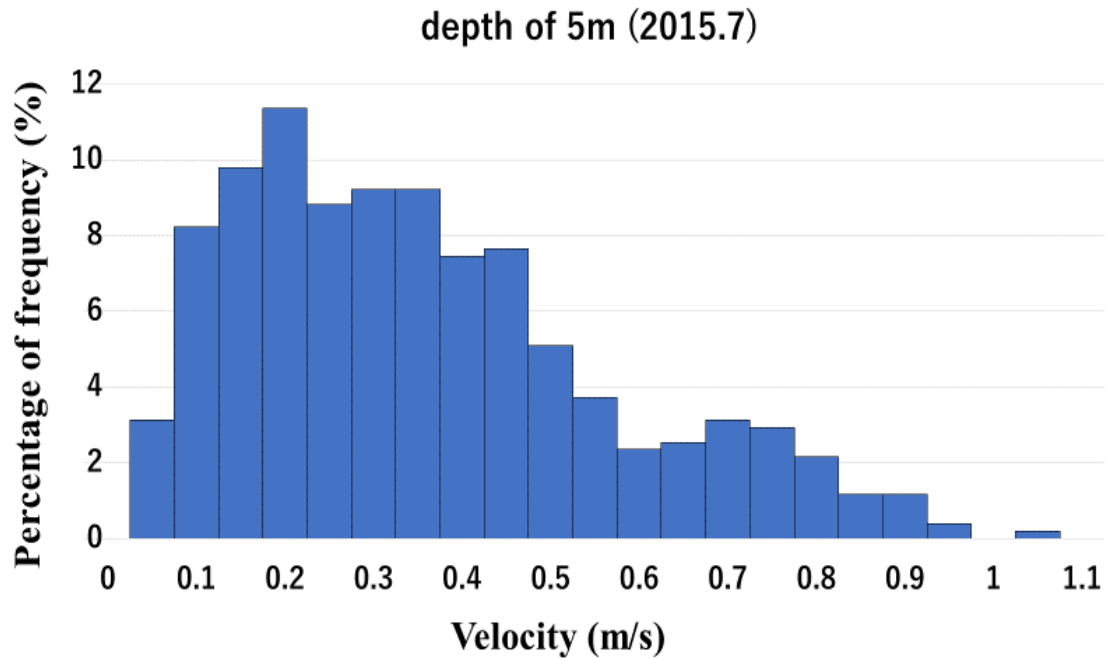


Fig. 4-3 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2015.7

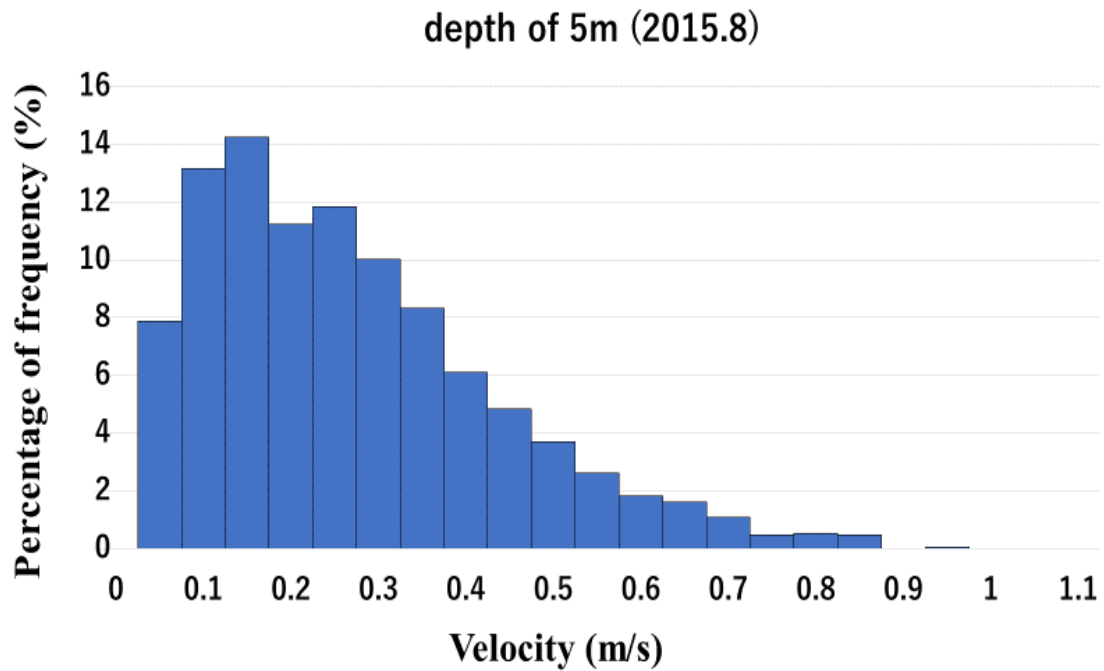


Fig. 4-4 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2015.8

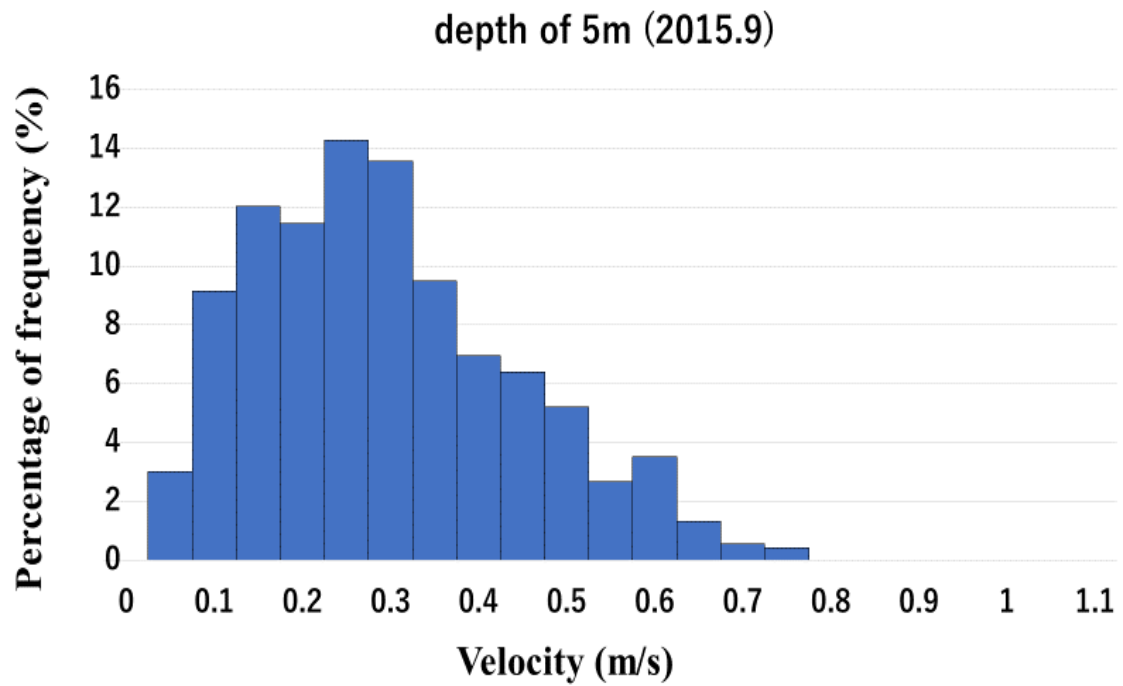


Fig. 4-5 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2015.9

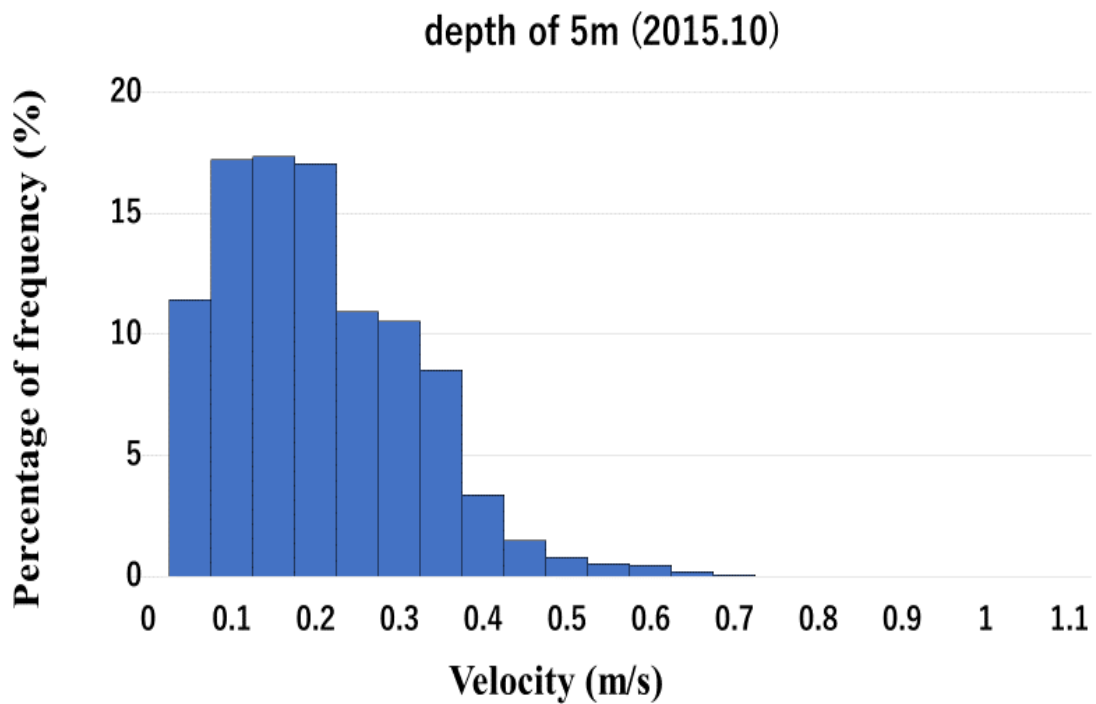


Fig. 4-6 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2015.10

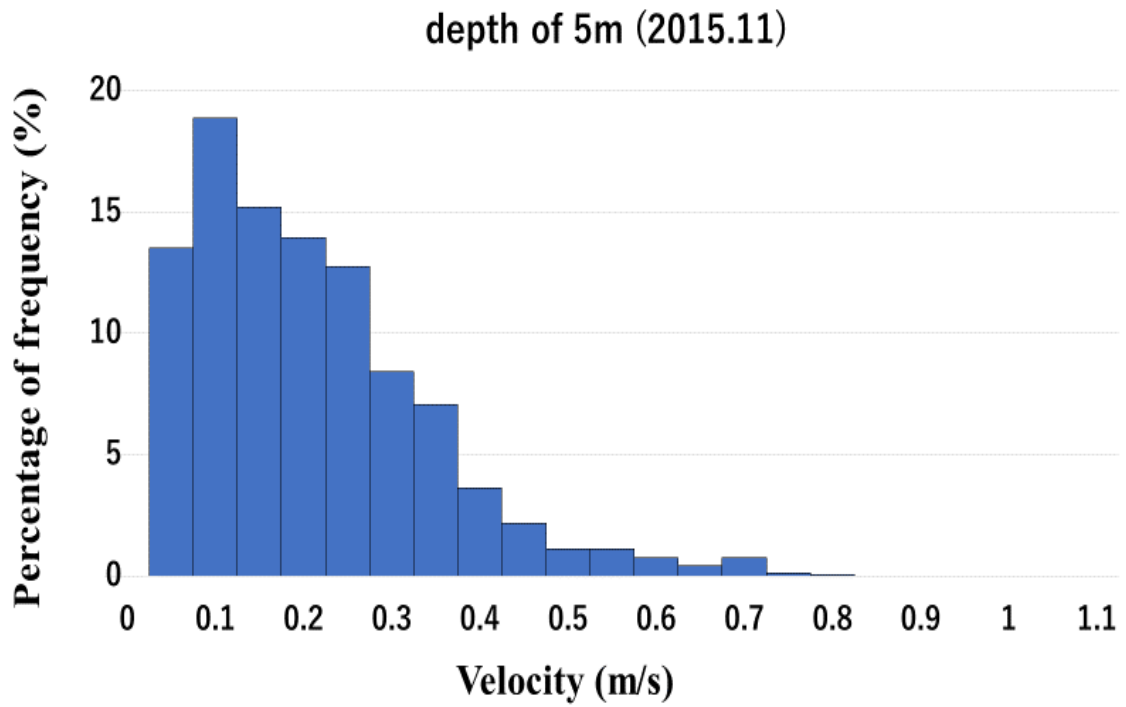


Fig. 4-7 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2015.11

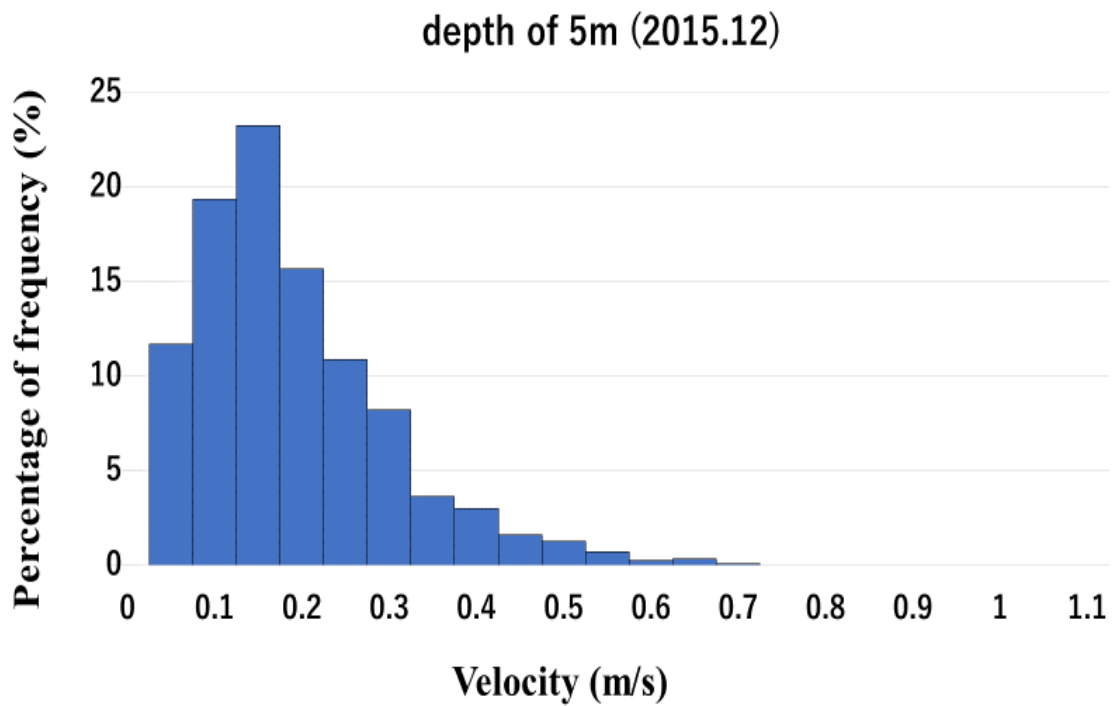


Fig. 4-8 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2015.12

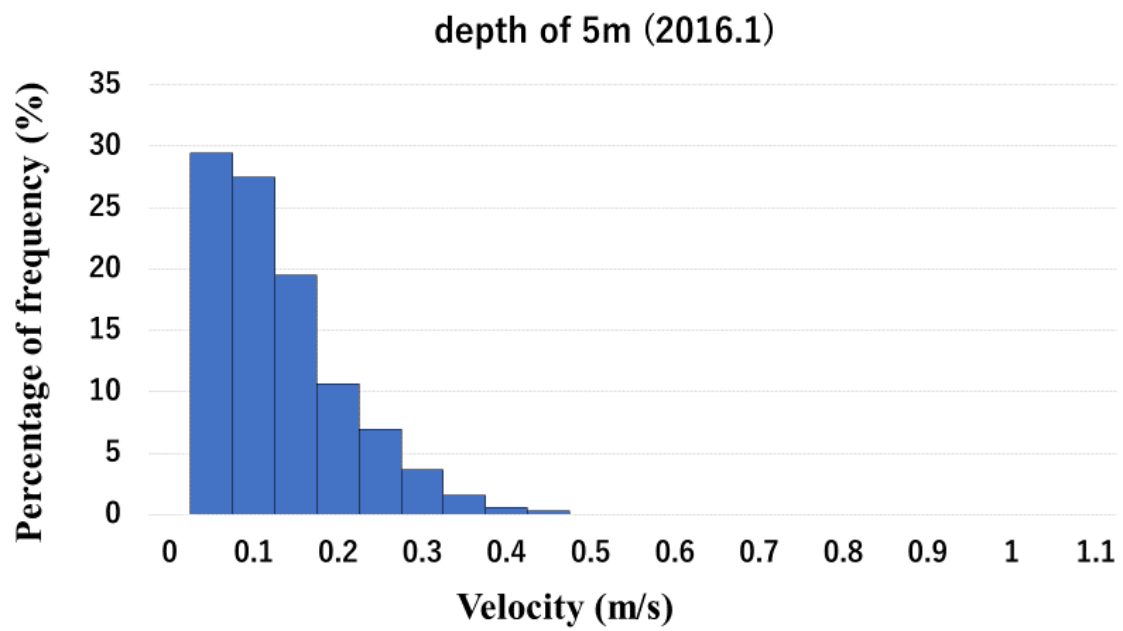


Fig. 4-9 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2016.1

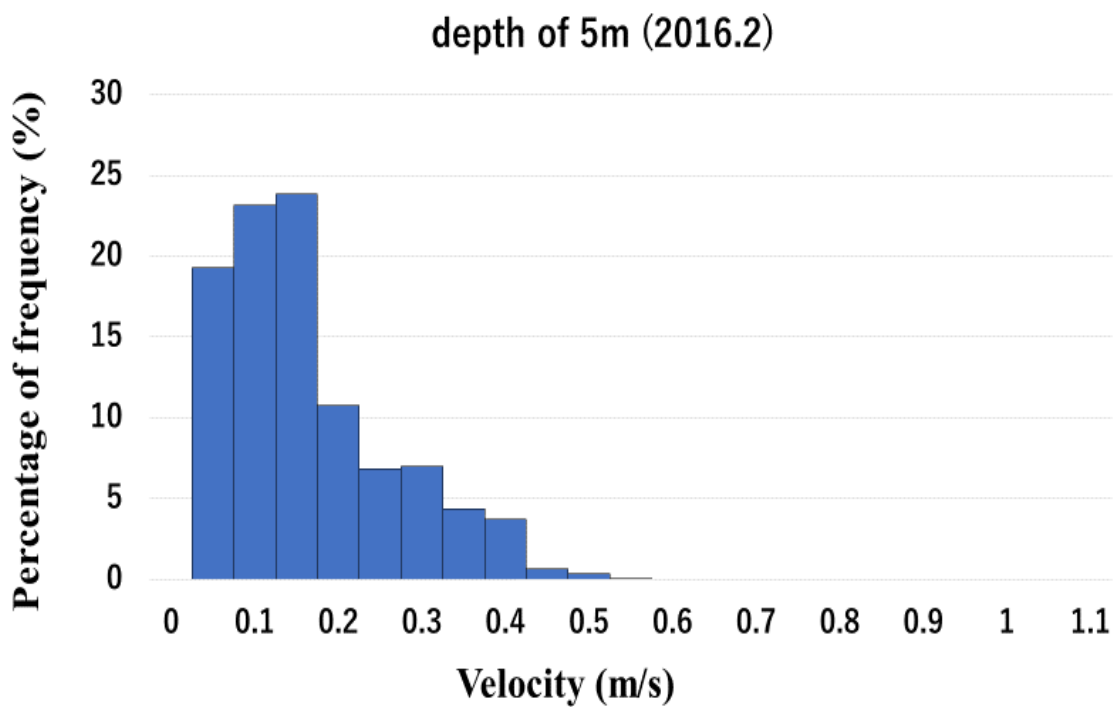


Fig. 4-10 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2016.2

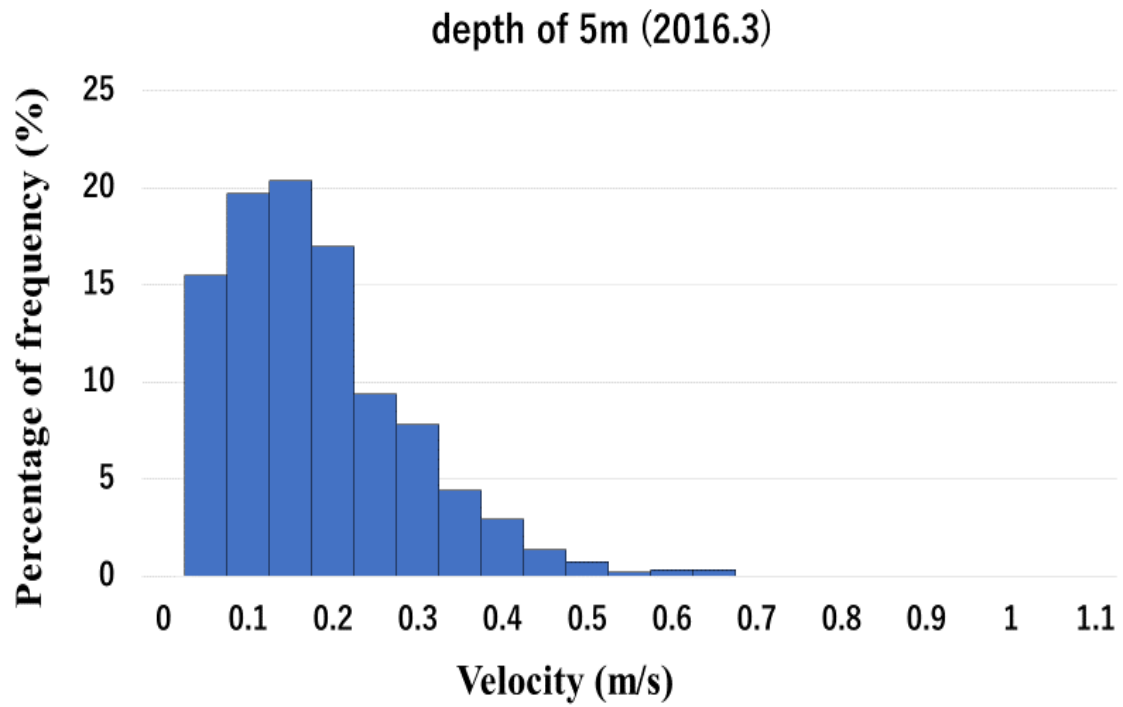


Fig. 4-11 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2016.3

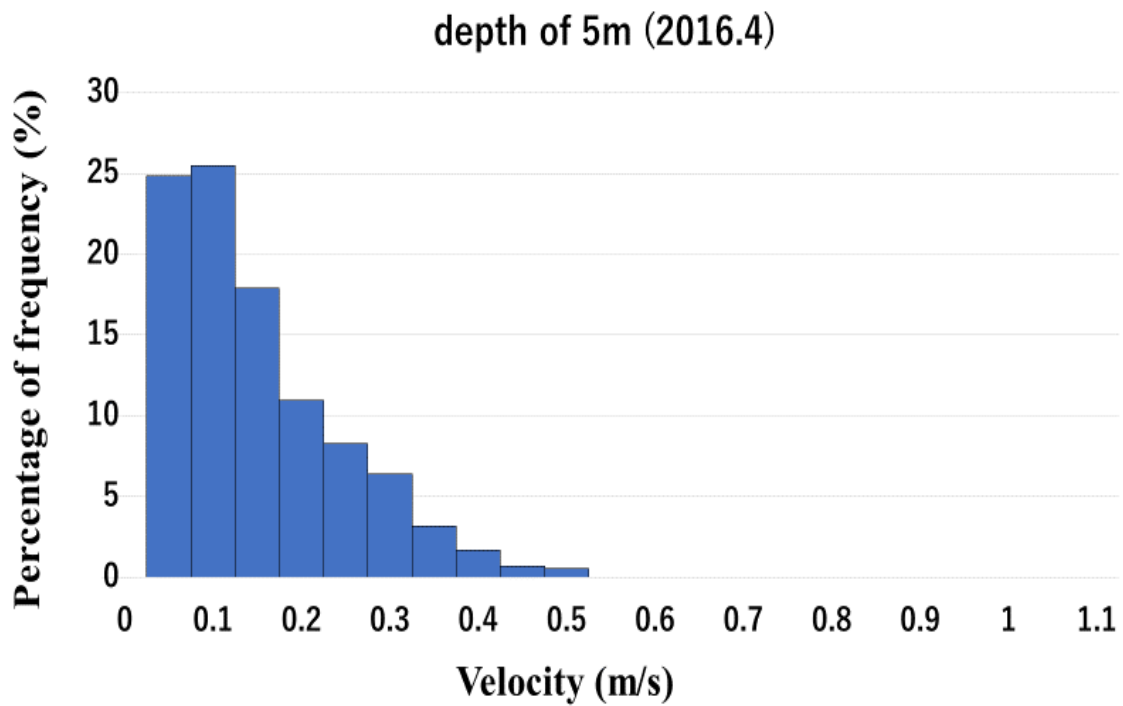


Fig. 4-12 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2016.4

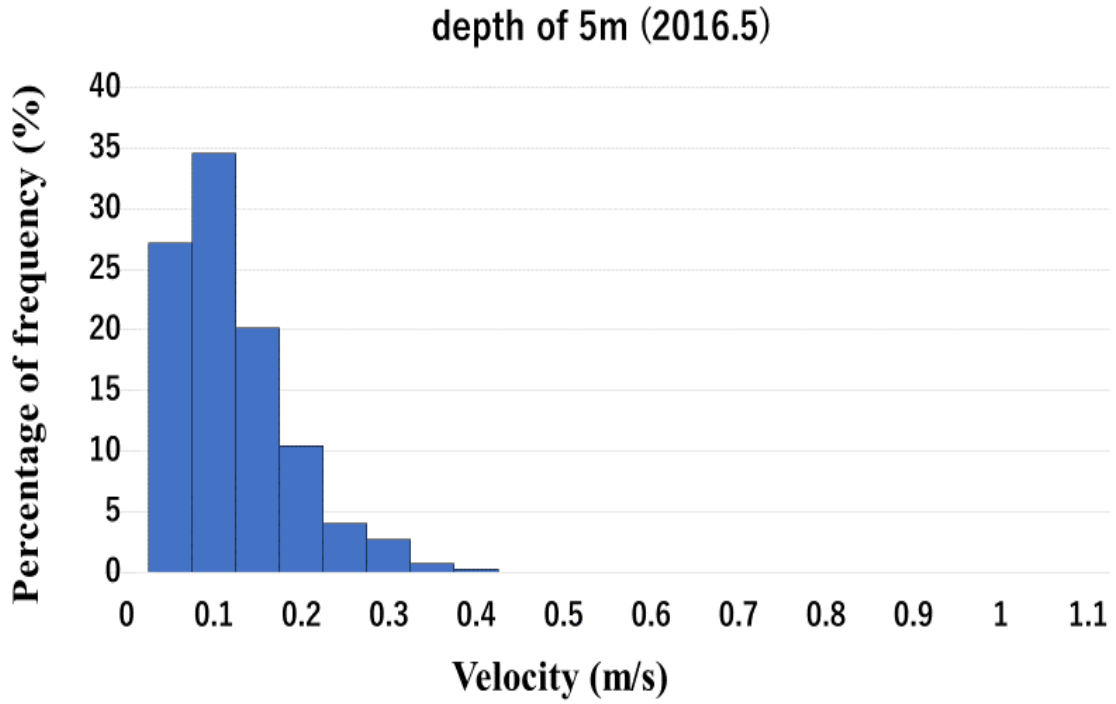


Fig. 4-13 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2016.5

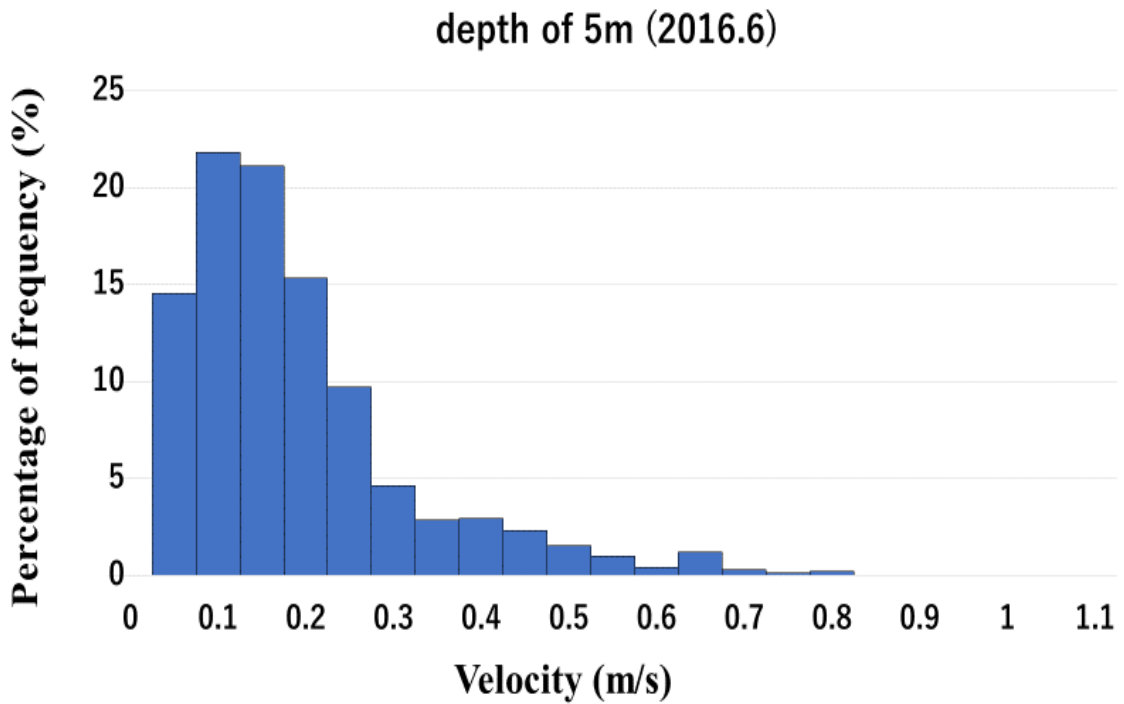


Fig. 4-14 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2016.6

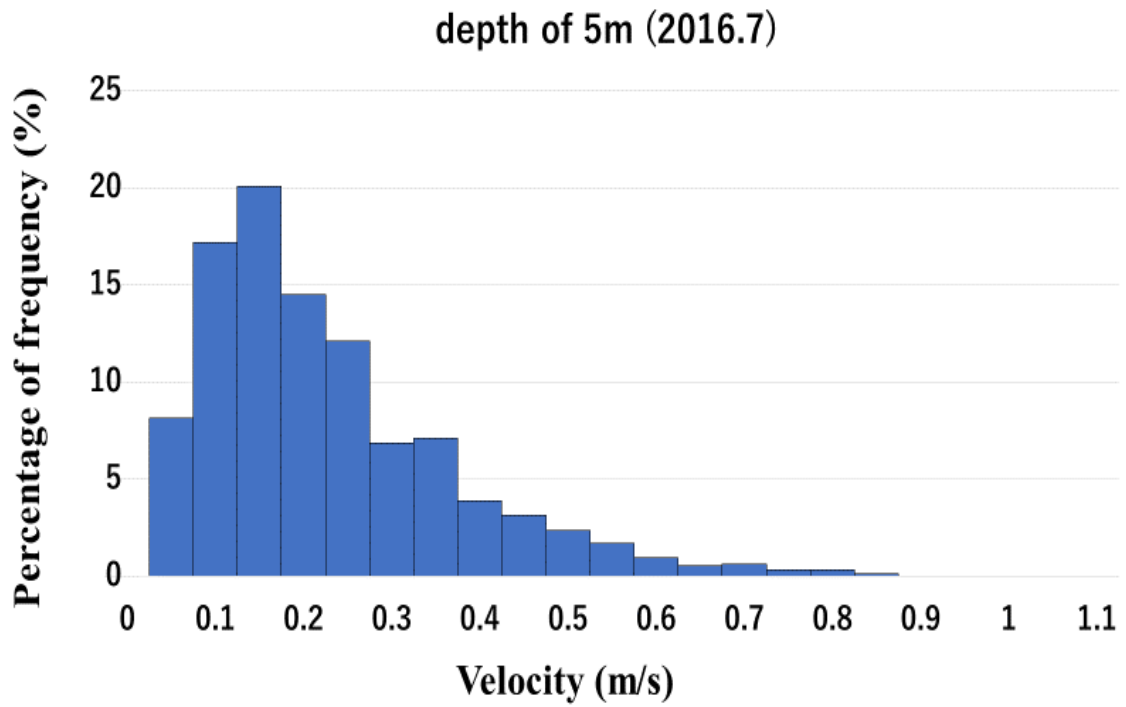


Fig. 4-15 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2016.7

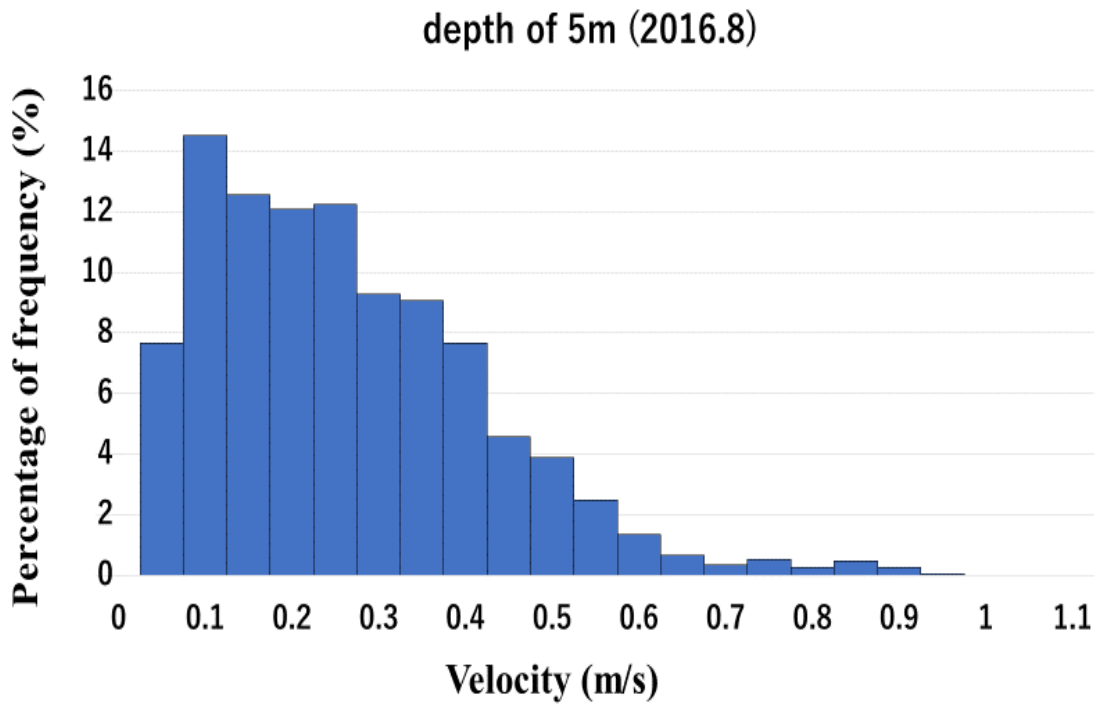


Fig. 4-16 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2016.8

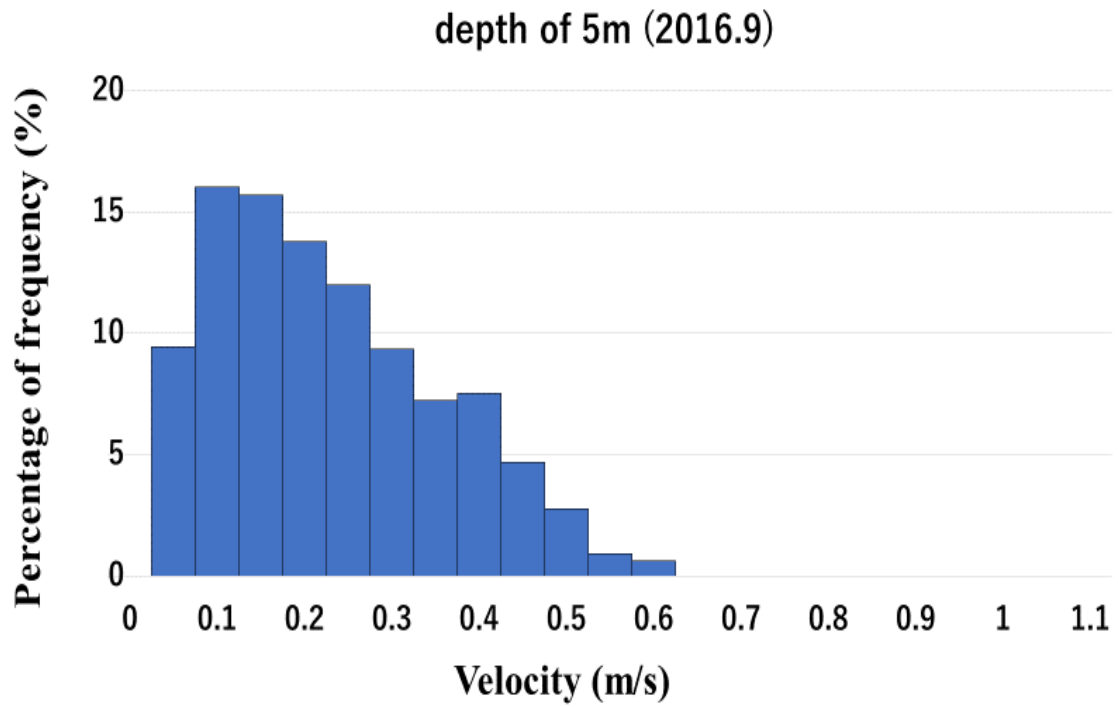


Fig. 4-17 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 5 m in 2016.9

4-2-2 深さ 5 m での流向分布

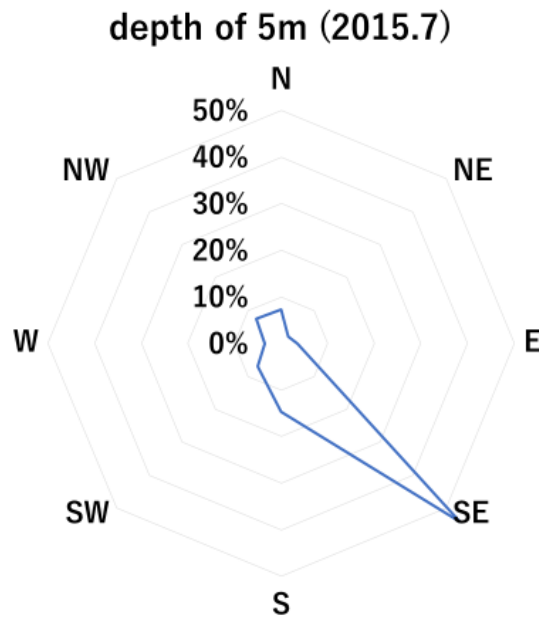


Fig. 4-18 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.7

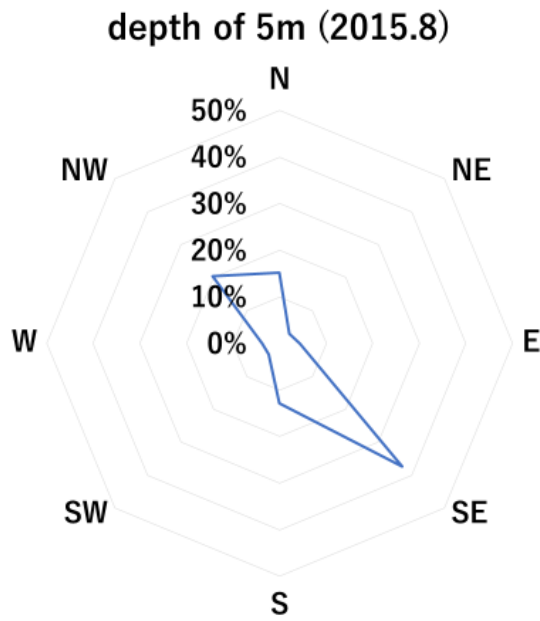


Fig. 4-19 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.8

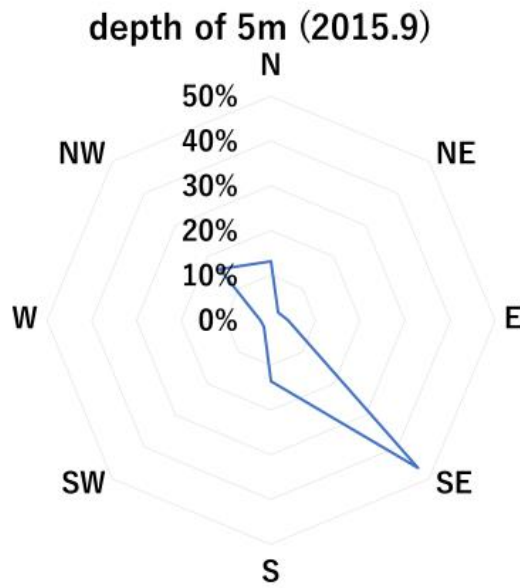


Fig. 4-20 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.9

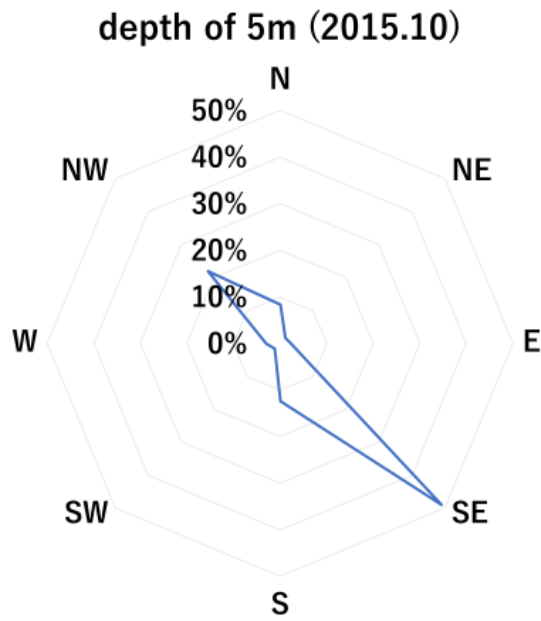


Fig. 4-21 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.10

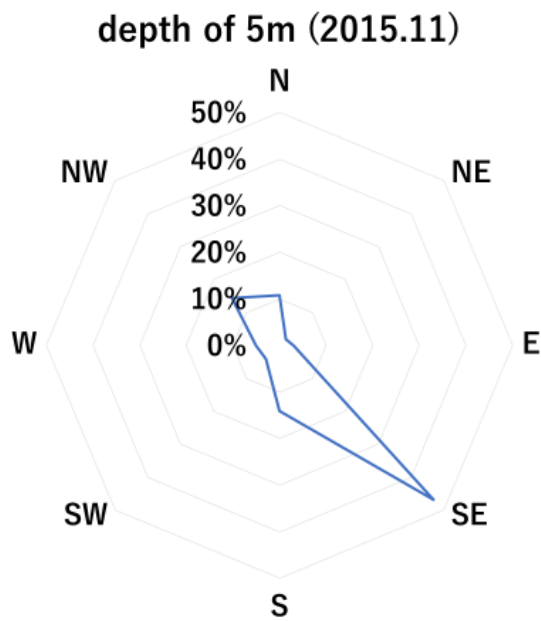


Fig. 4-22 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.11

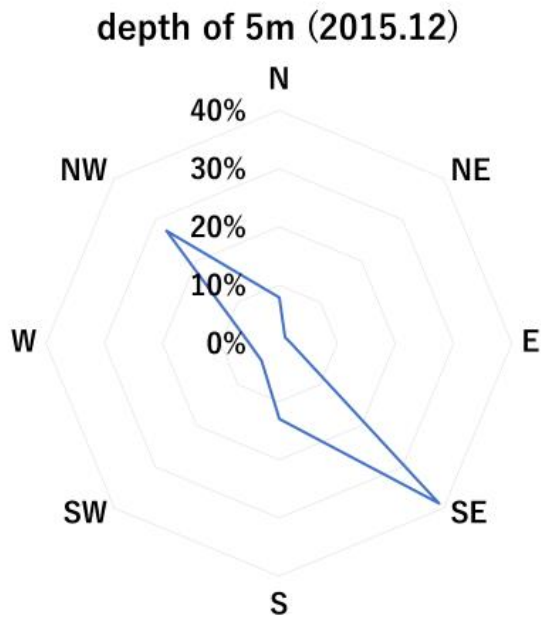


Fig. 4-23 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.12

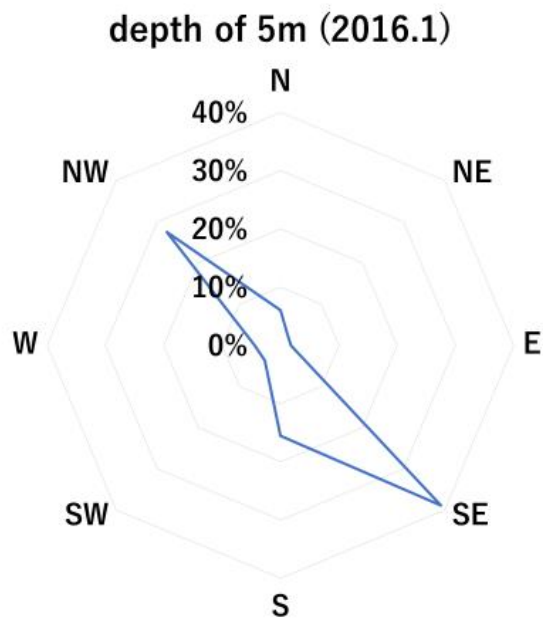


Fig. 4-24 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.1

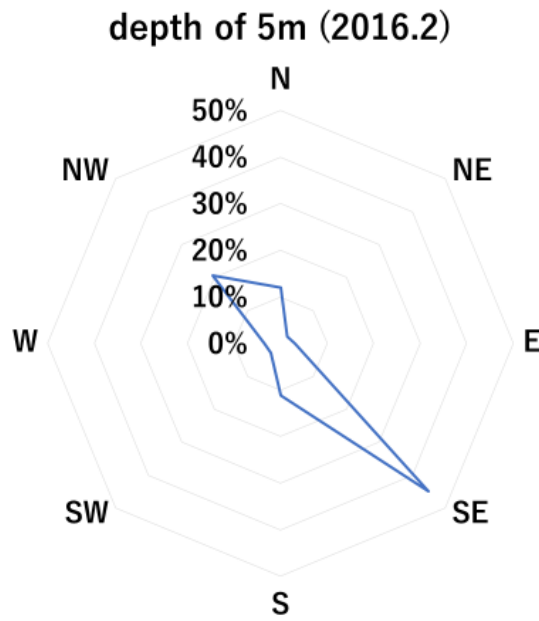


Fig. 4-25 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.2

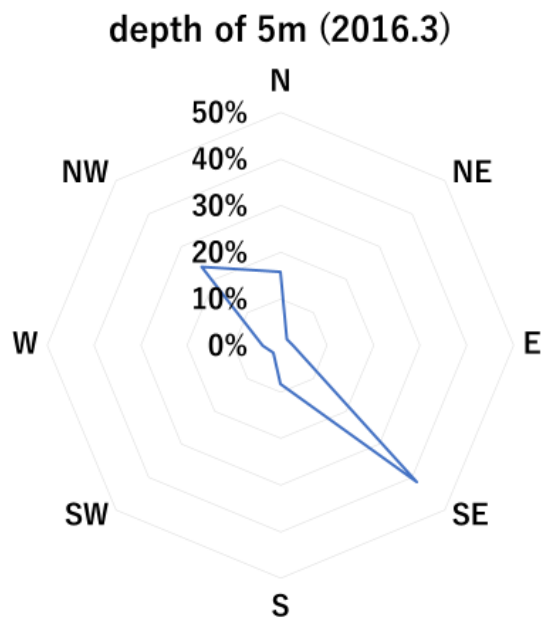


Fig. 4-26 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.3

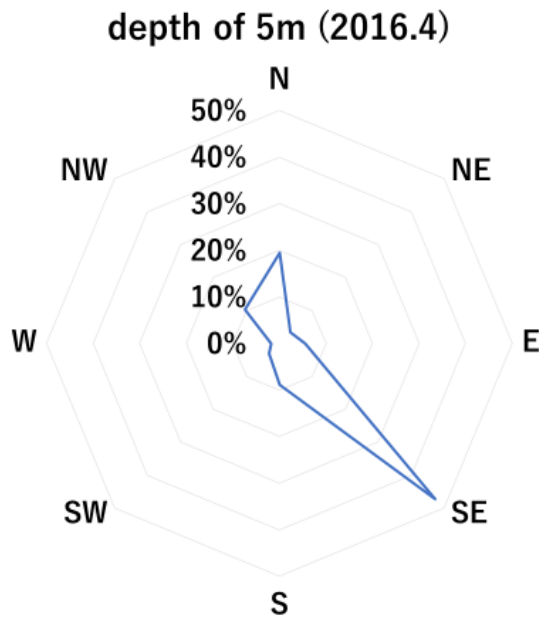


Fig. 4-27 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.4

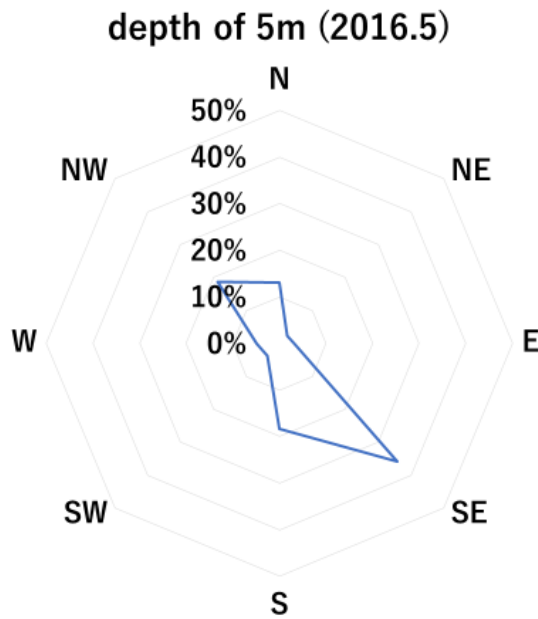


Fig. 4-28 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.5

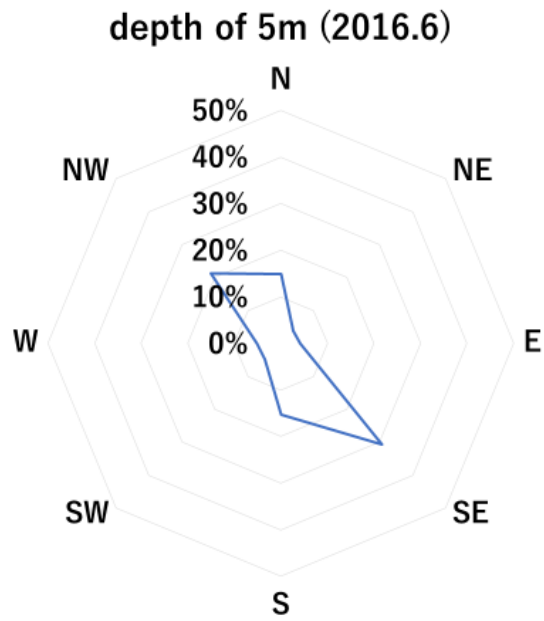


Fig. 4-29 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.6

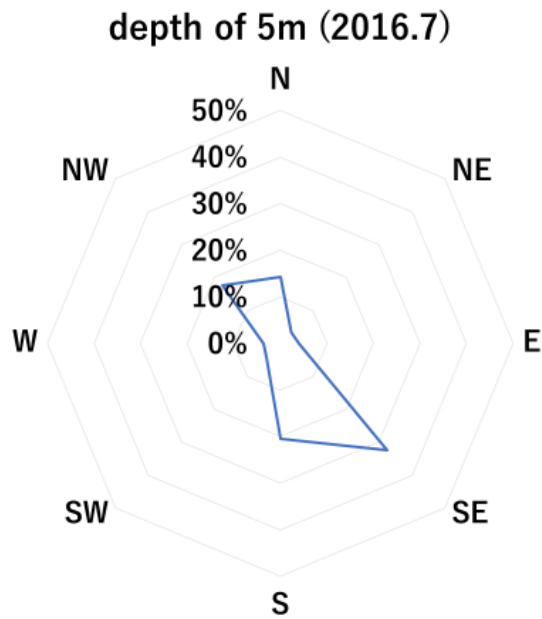


Fig. 4-30 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.7

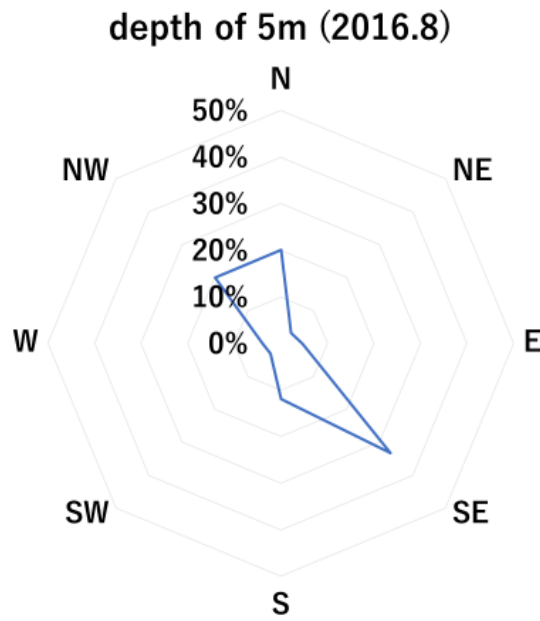


Fig. 4-31 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.8

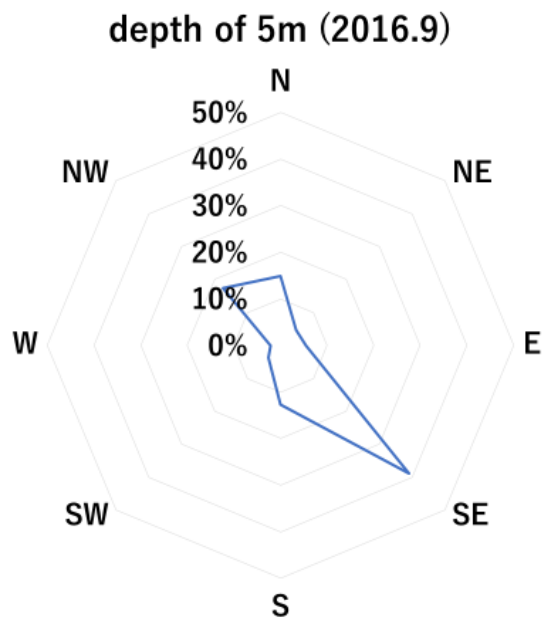


Fig. 4-32 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.9

4-2-3 深さ 21 m での流速分布

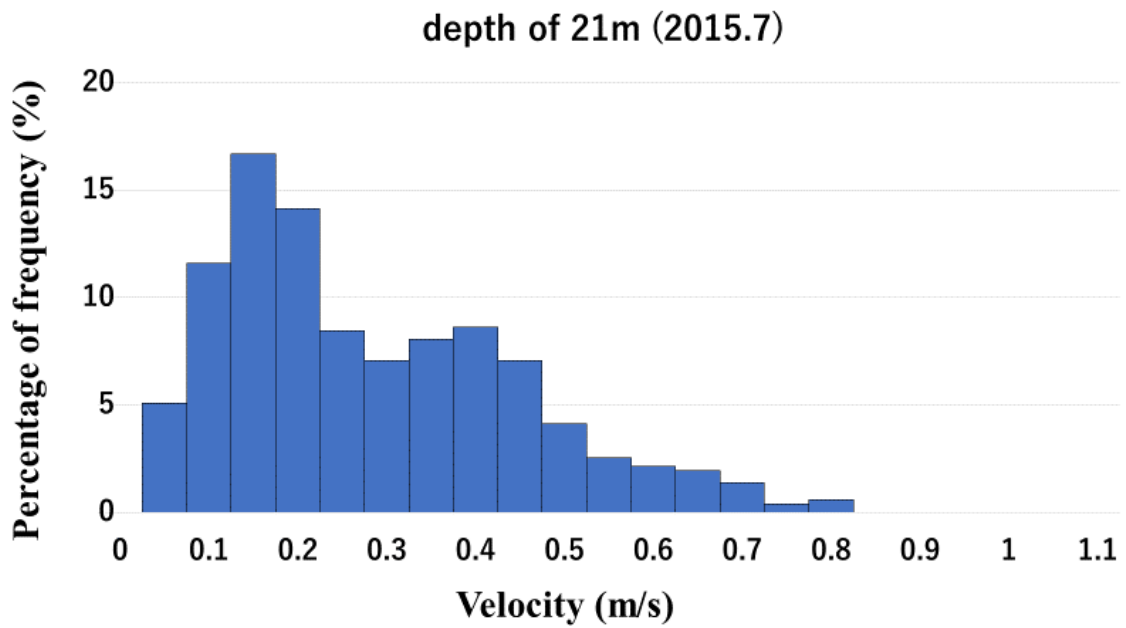


Fig. 4-33 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2015.7

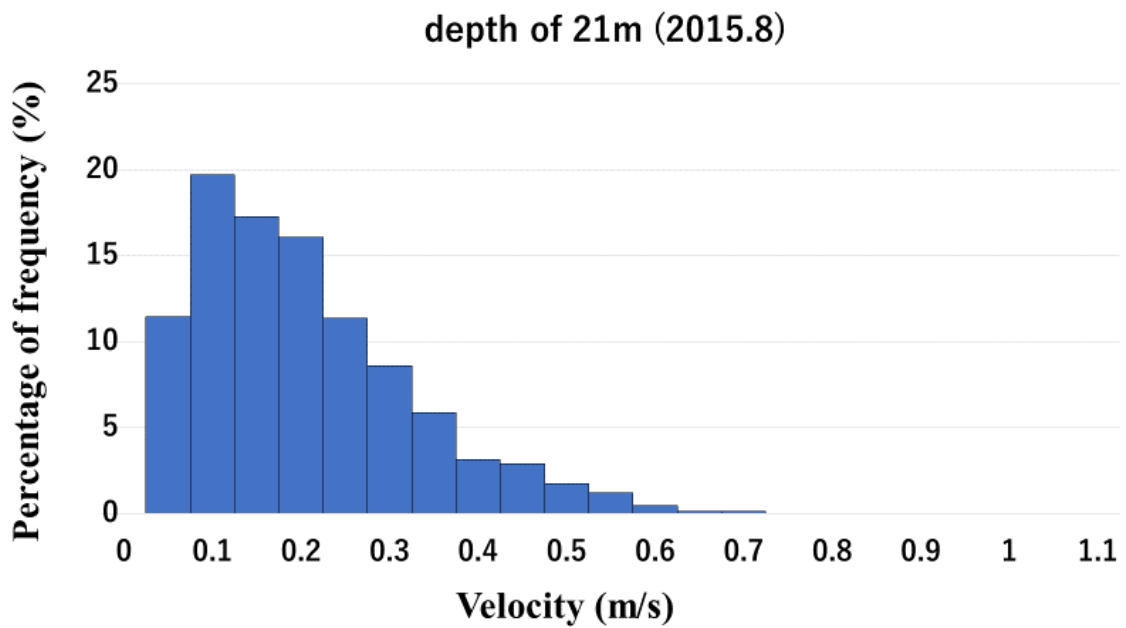


Fig. 4-34 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2015.8

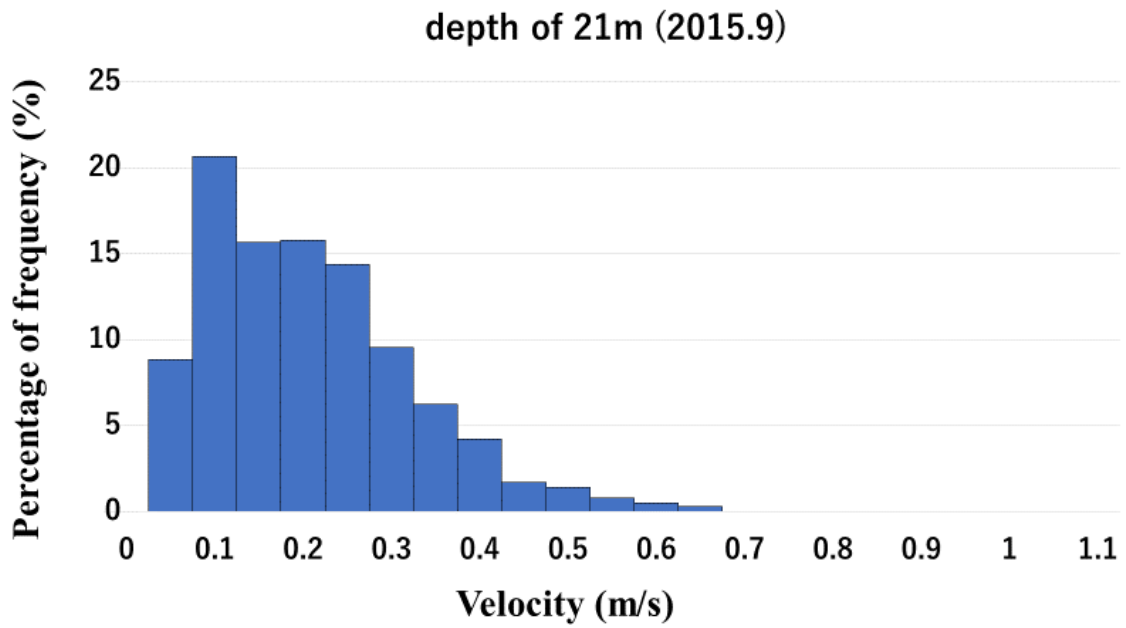


Fig. 4-35 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2015.9

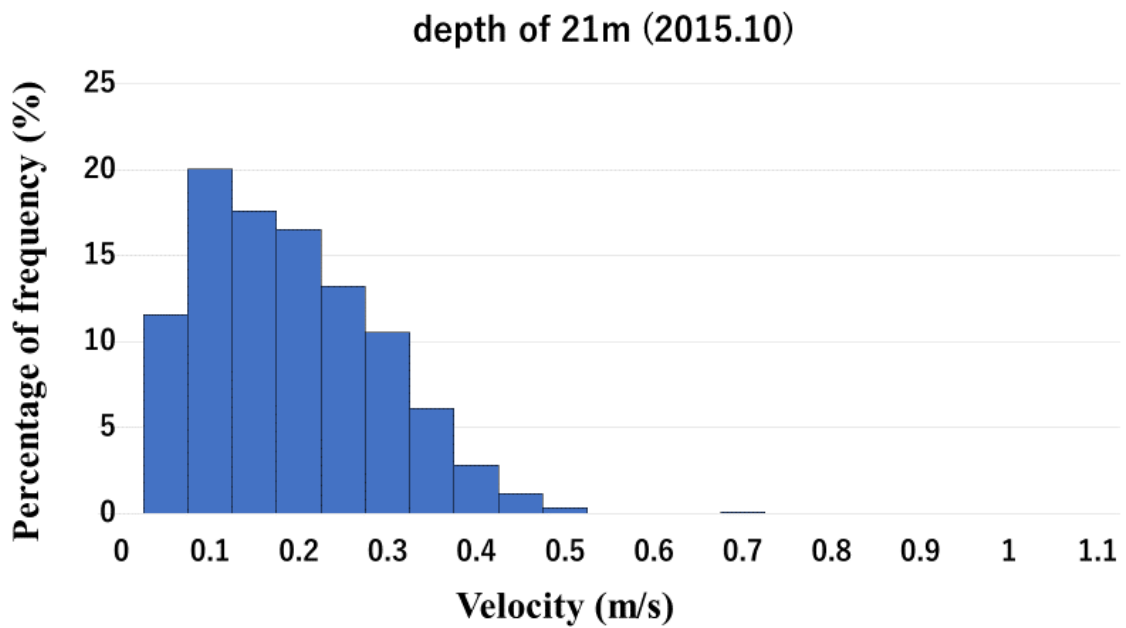


Fig. 4-36 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2015.10

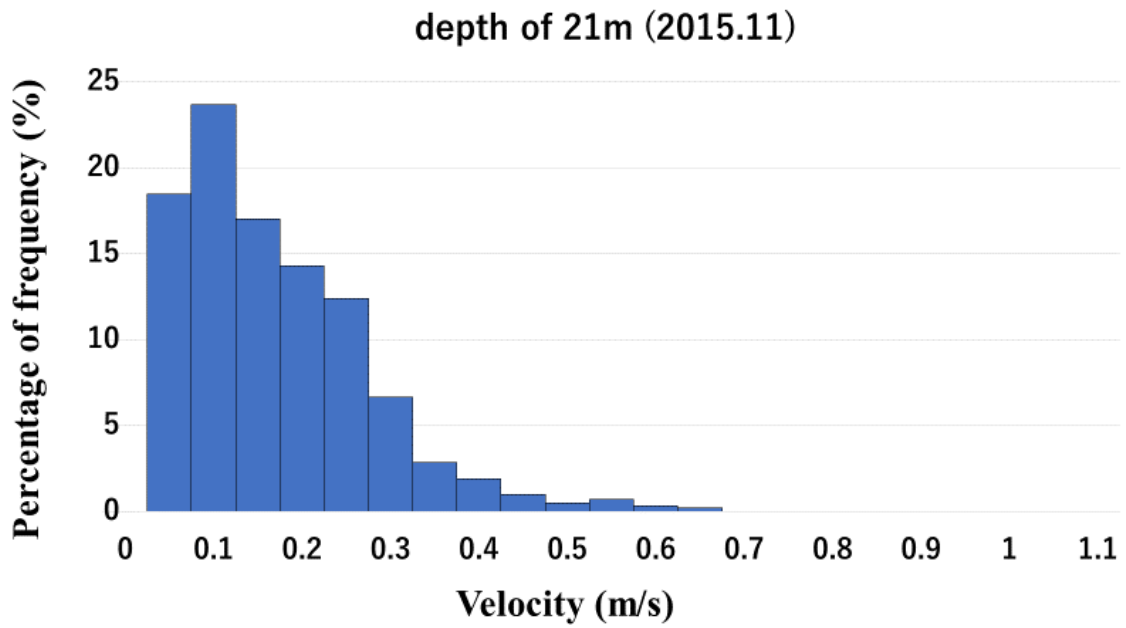


Fig. 4-37 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2015.11

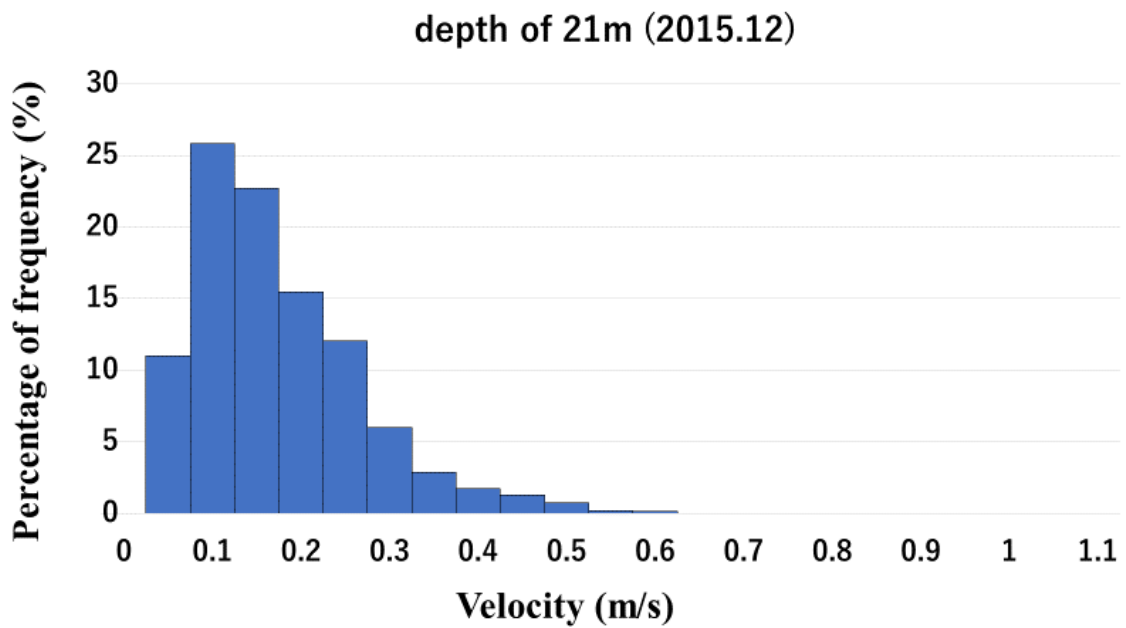


Fig. 4-38 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2015.12

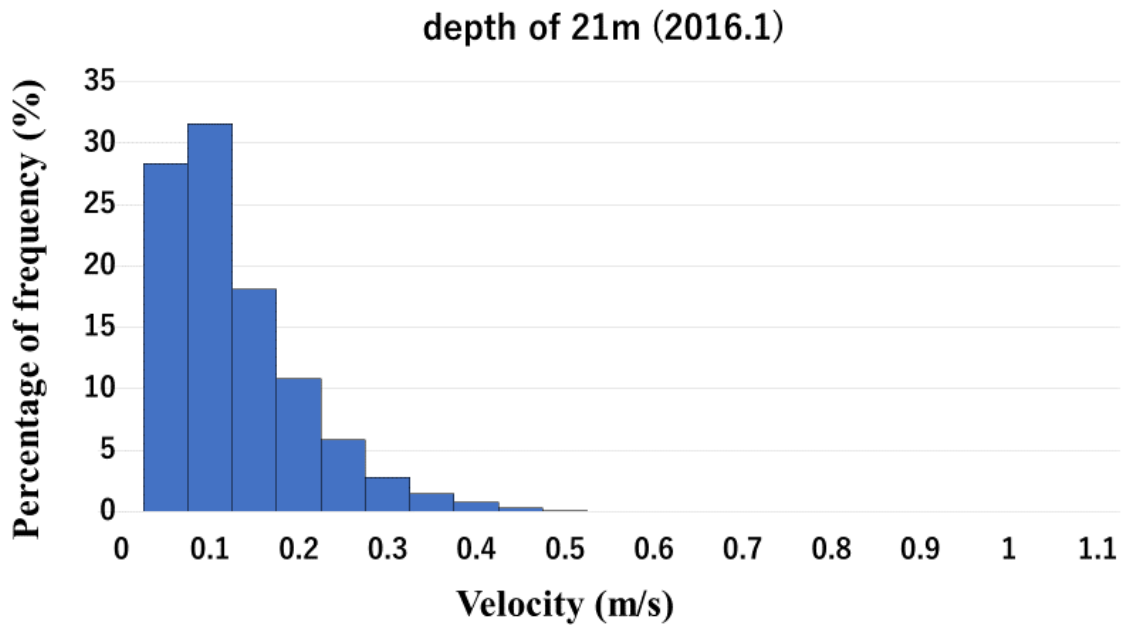


Fig. 4-39 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2016.1

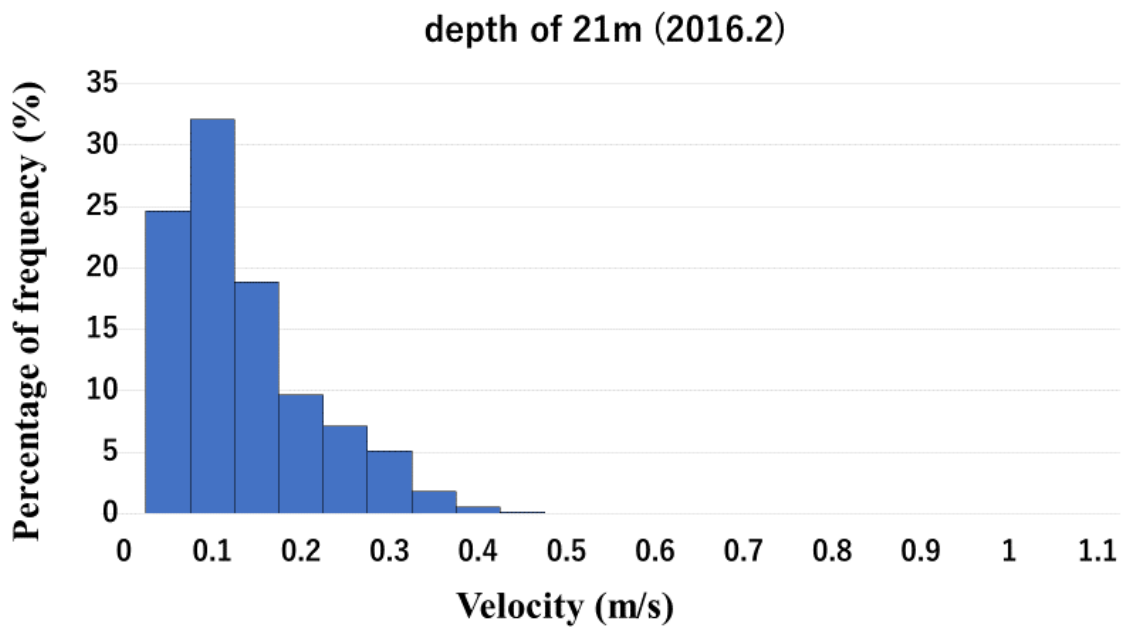


Fig. 4-40 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2016.2

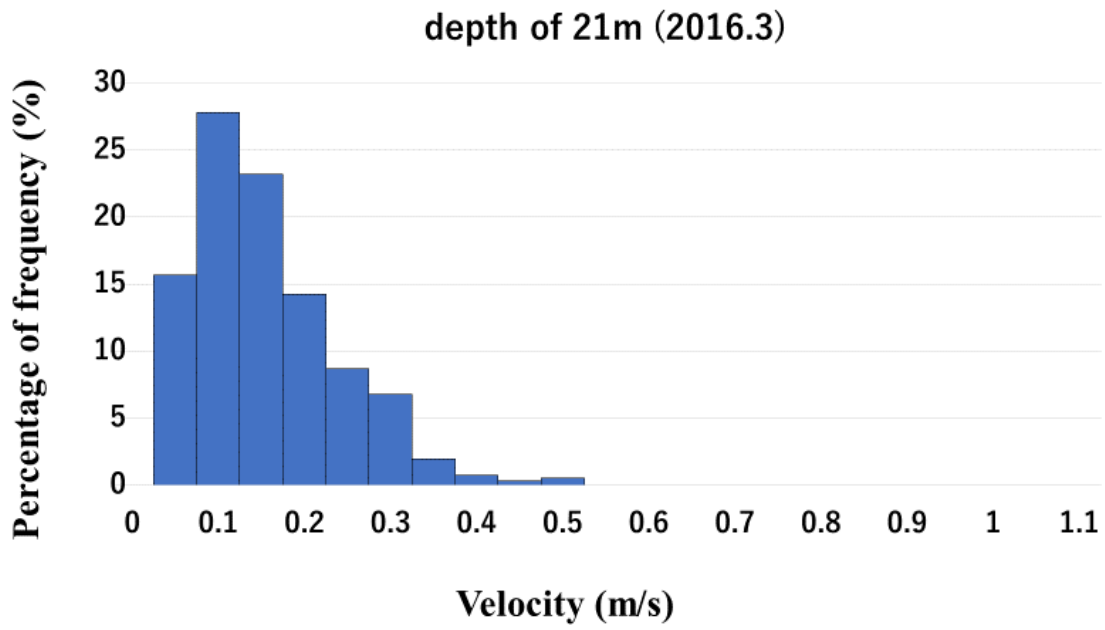


Fig. 4-41 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2016.3

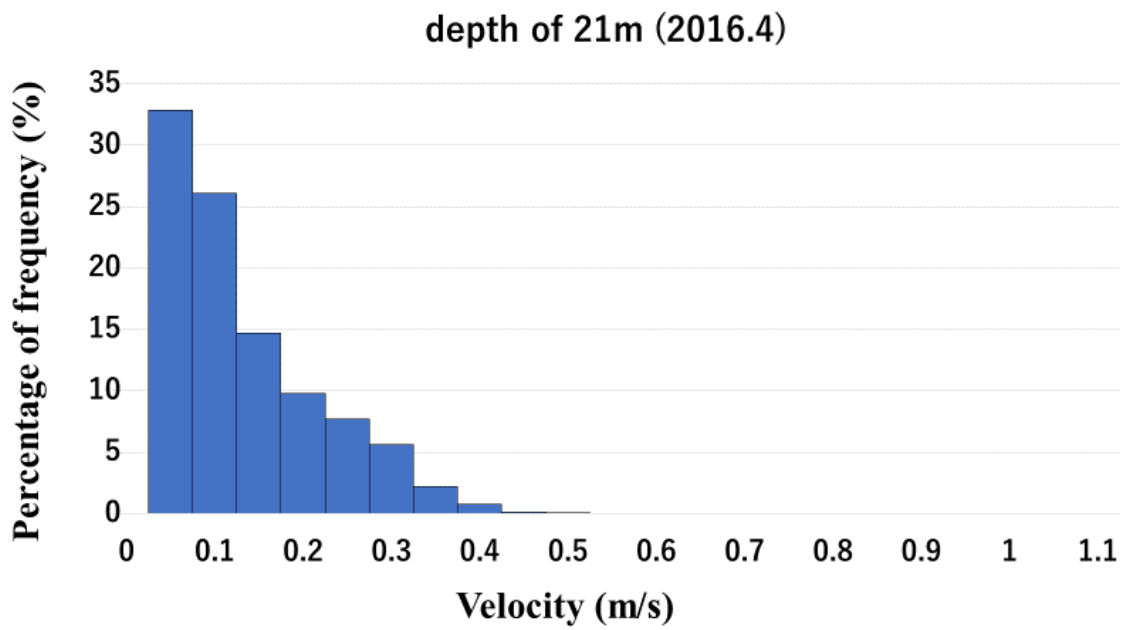


Fig. 4-42 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2016.4

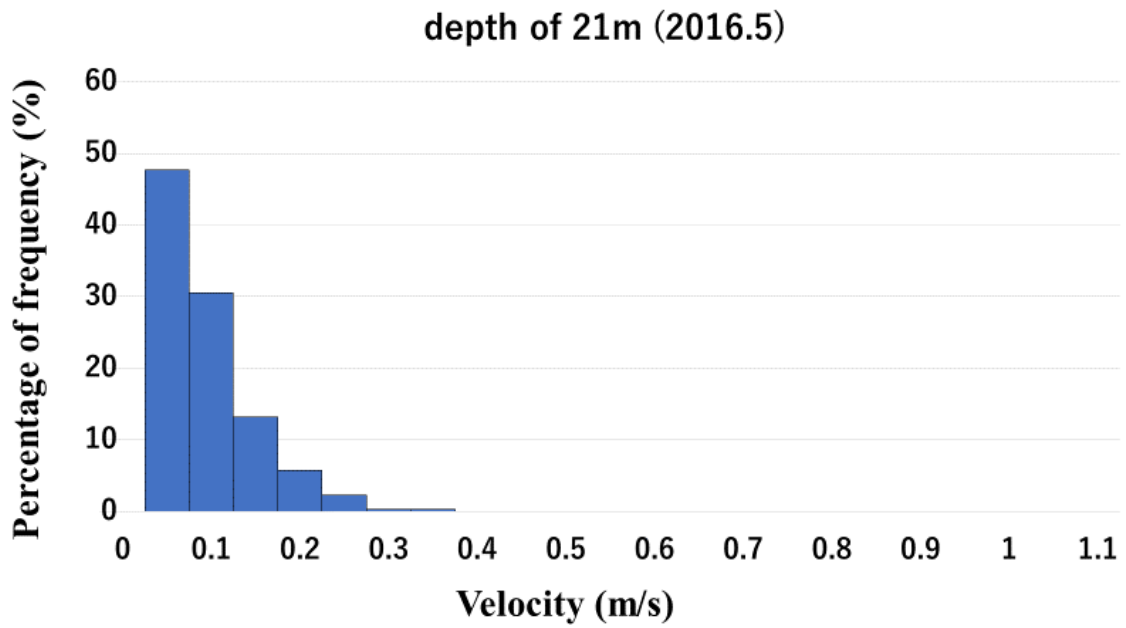


Fig. 4-43 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2016.5

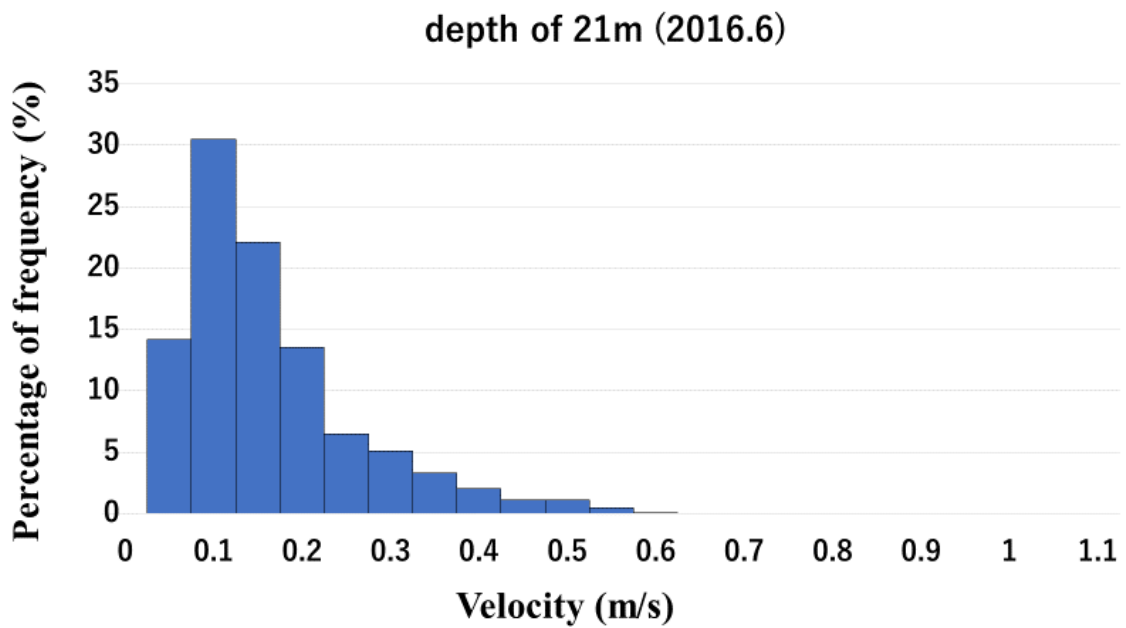


Fig. 4-44 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2016.6

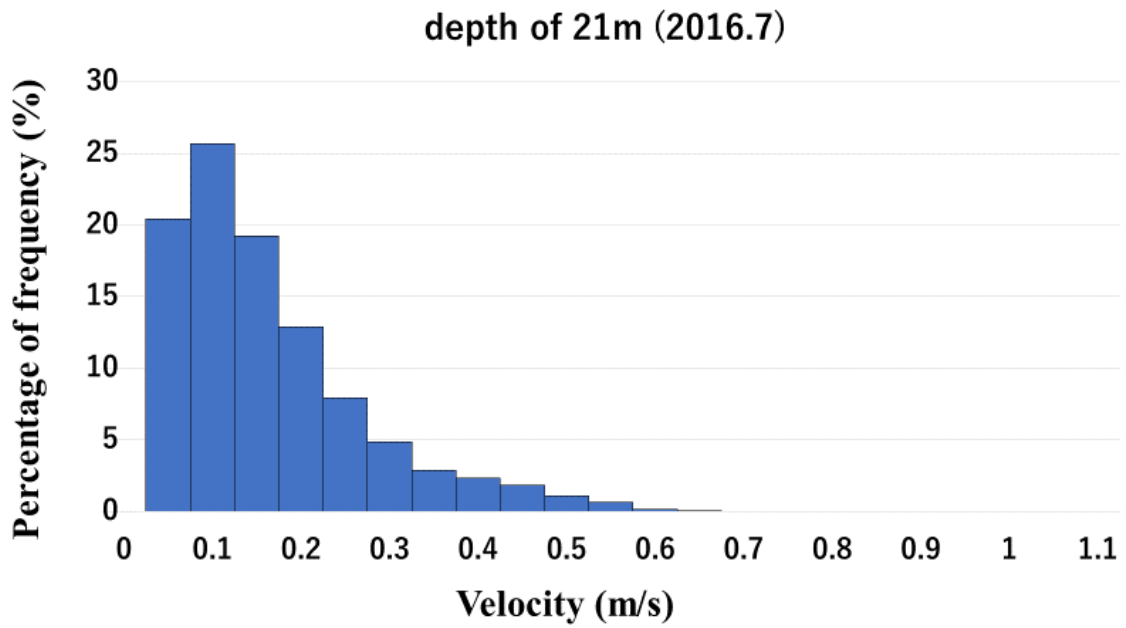


Fig. 4-45 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2016.7

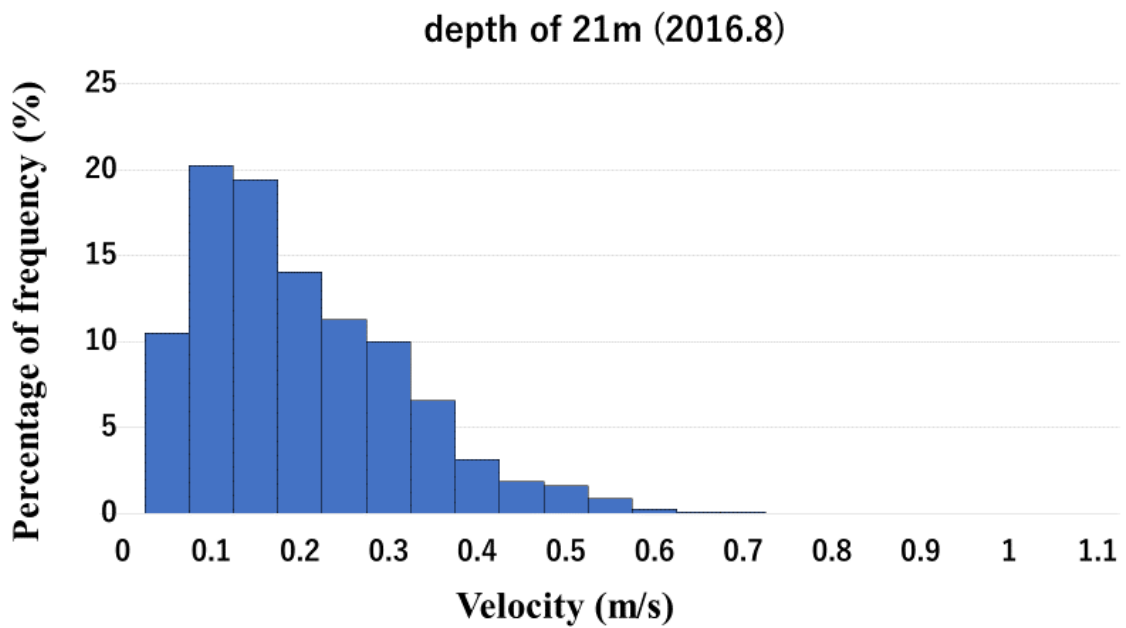


Fig. 4-46 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2016.8

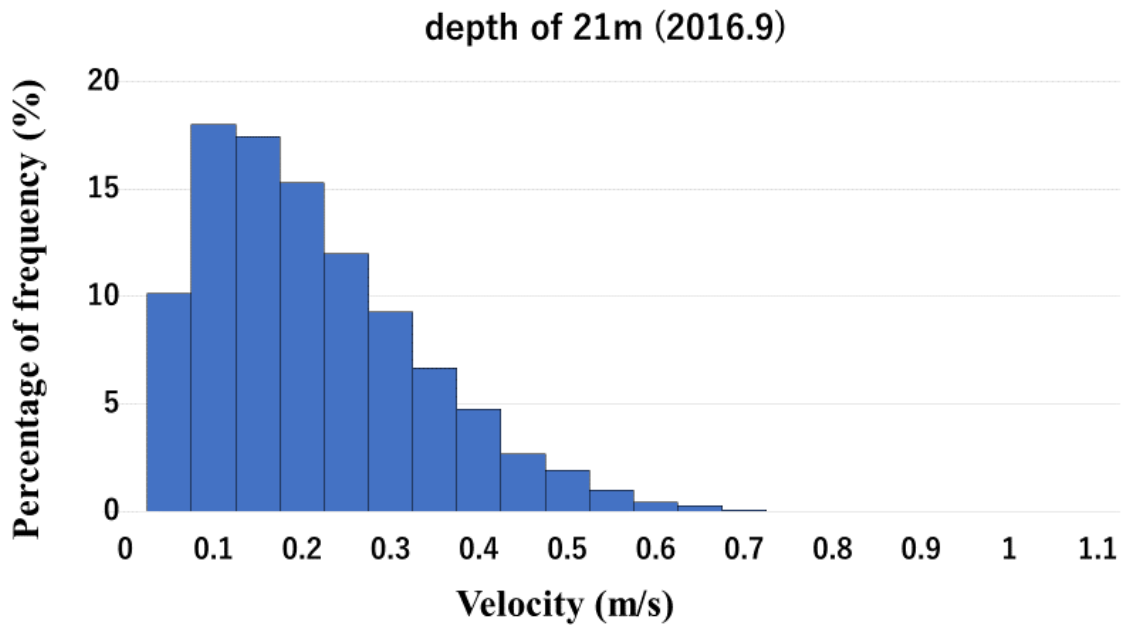


Fig. 4-47 Frequency distribution of flow velocity at the depth of 21 m in 2016.9

4-2-4 深さ 21 m での流向分布

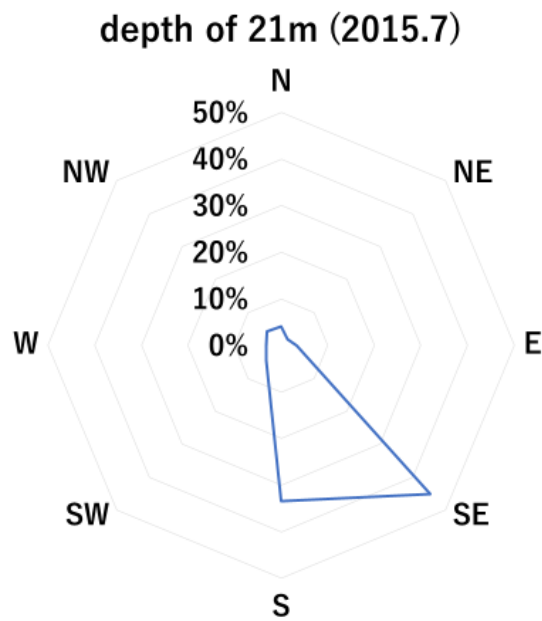


Fig. 4-48 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.7

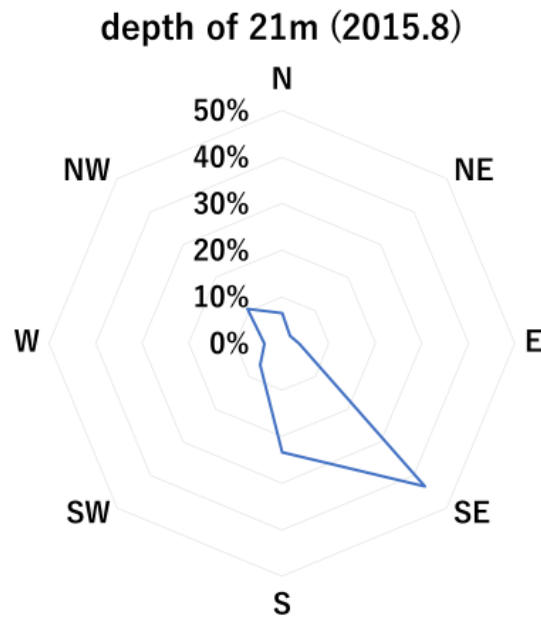


Fig. 4-49 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.8

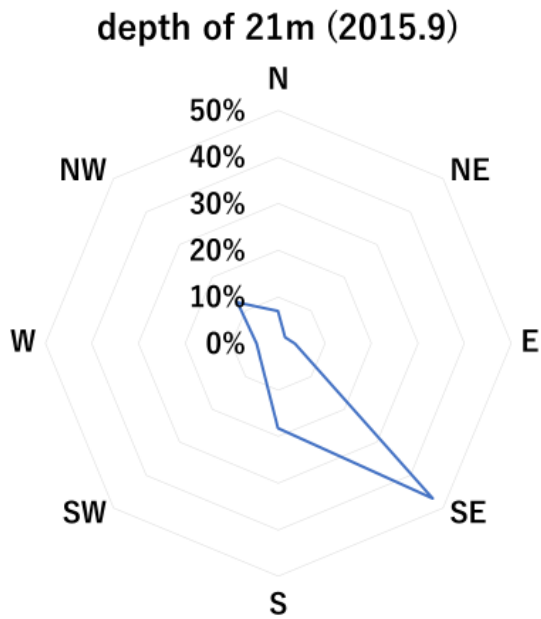


Fig. 4-50 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.9

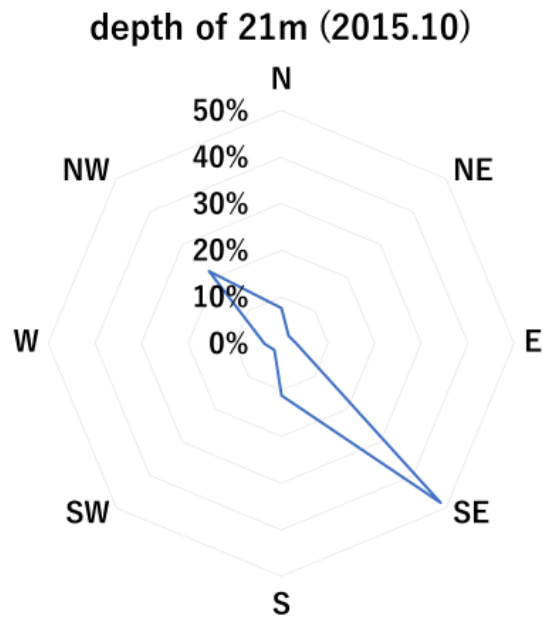


Fig. 4-51 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.10

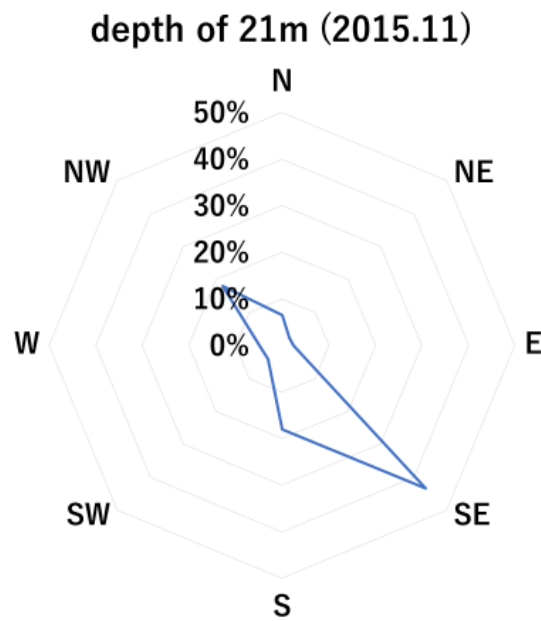


Fig. 4-52 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.11

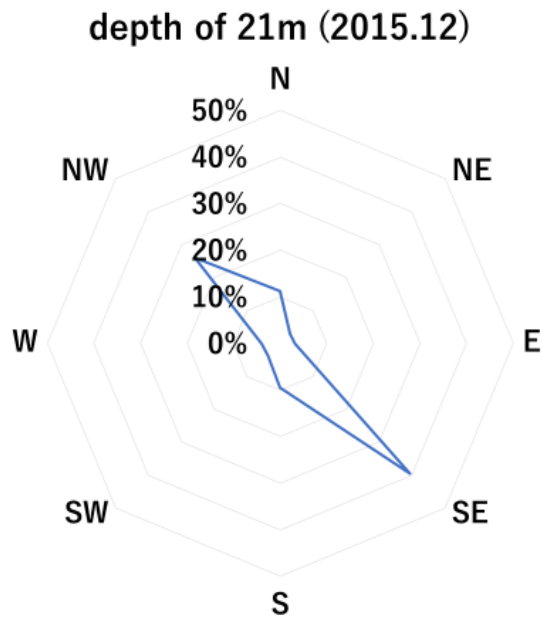


Fig. 4-53 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2015.12

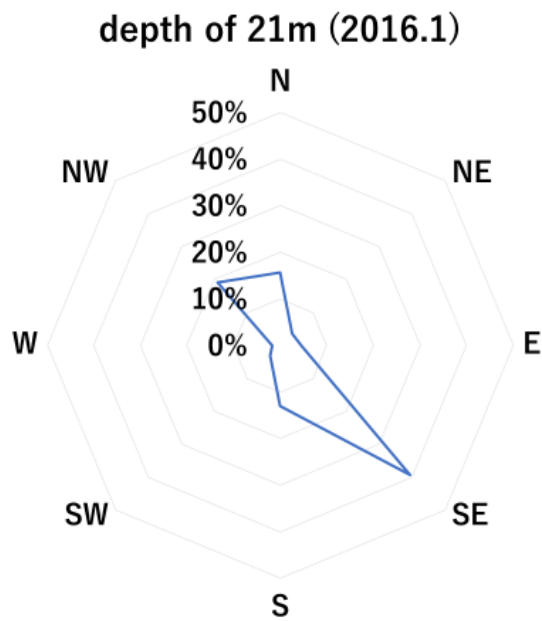


Fig. 4-54 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.1

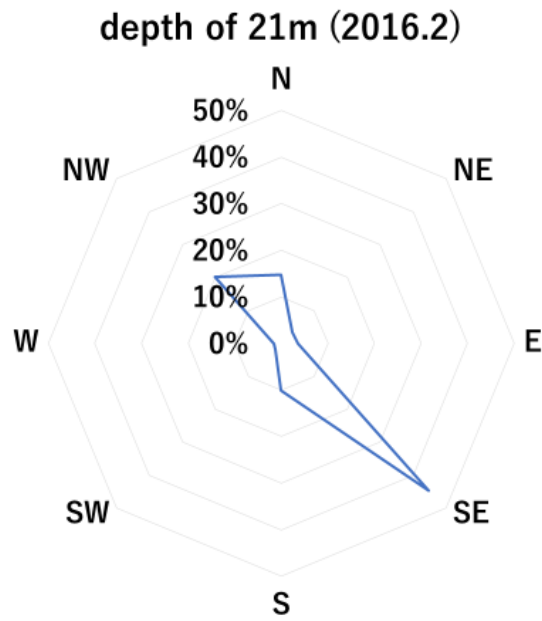


Fig. 4-55 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.2

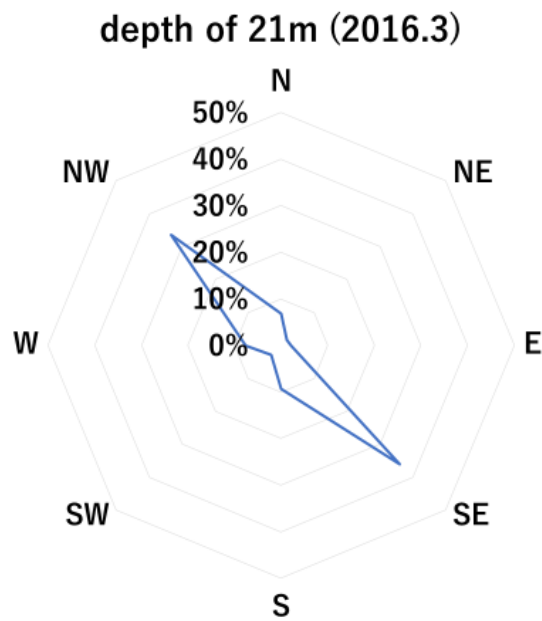


Fig. 4-56 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.3

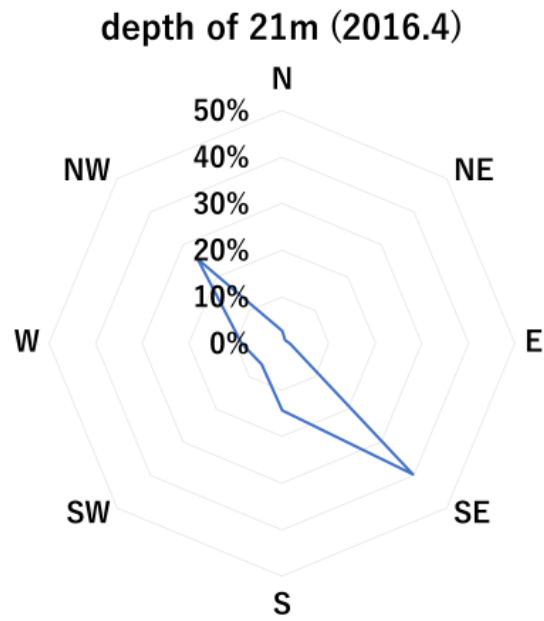


Fig. 4-57 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.4

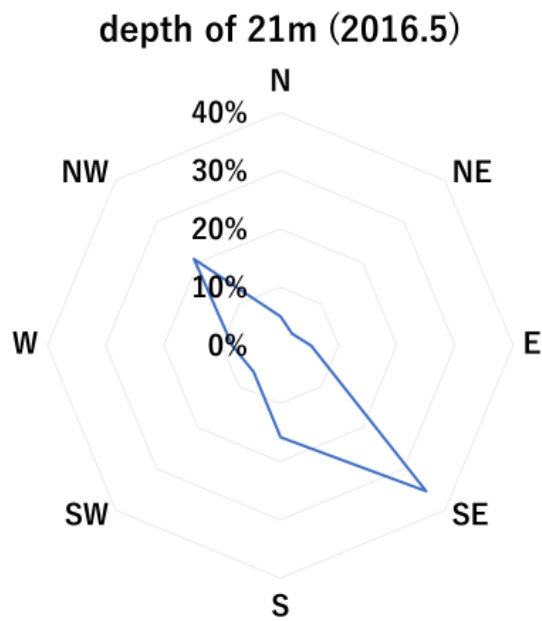


Fig. 4-58 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.5

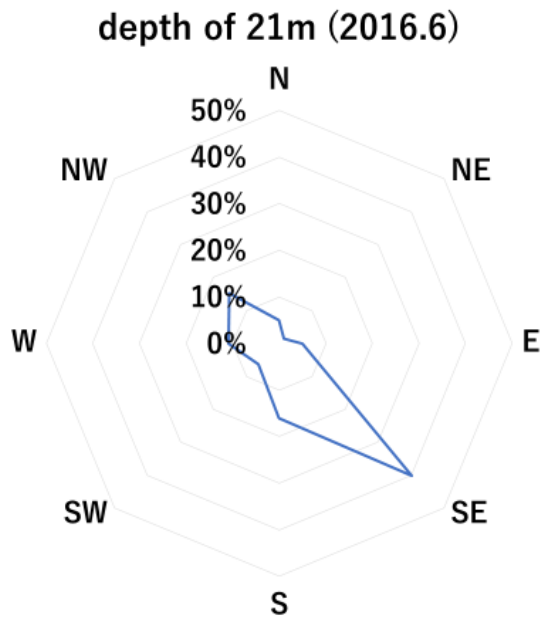


Fig. 4-59 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.6

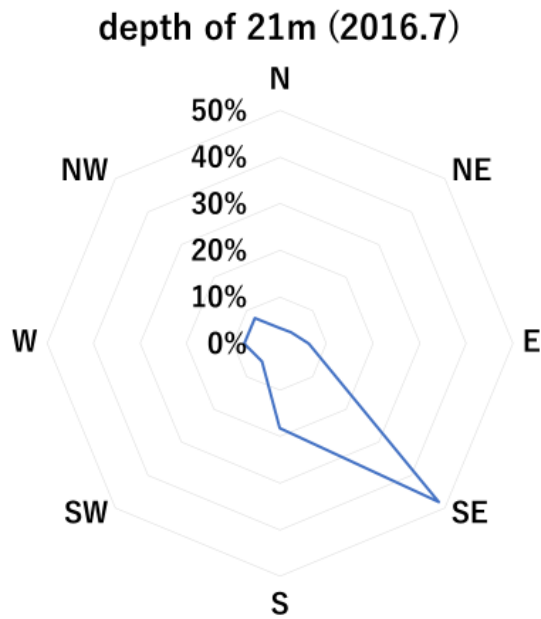


Fig. 4-60 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.7

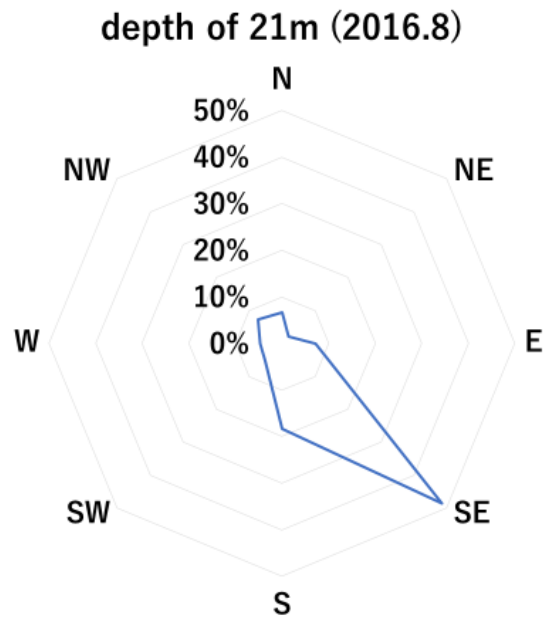


Fig. 4-61 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.8

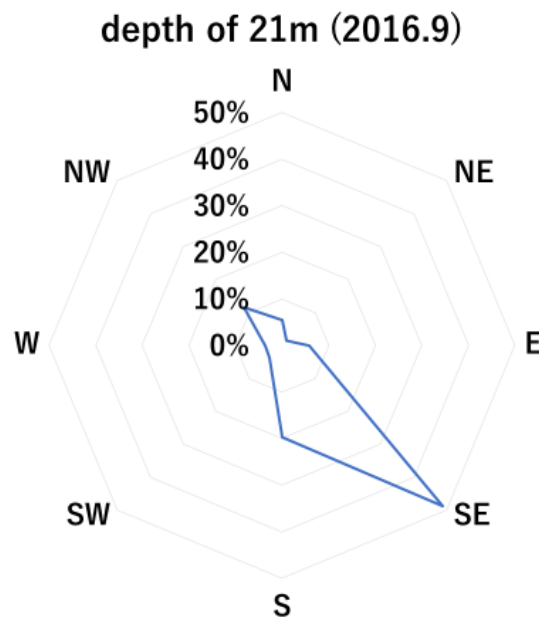


Fig. 4-62 Frequency distribution of flow direction at the depth of 21 m in 2016.9

結果に示すように深さ 5 m の流速分布については通年で流速の低い 0.1 m/s の頻度が一番高い。また、第二章で述べたタービンのカットイン流速である 0.3 m/s 以上の流速頻度は 8 月から 10 月までが比較的が高い。また、全期間中、流速の最大値は 1 m/s に達する可能性があることを 2015 年 7 月に一度だけ確認したが毎年同じ流況ではなく 2016 年には流速の最大値が 1m/s までには至らなかった。流向分布においては 5 月から 11 月では東南方向が主な流向である。特に夏季である、7 月、8 月、9 月は東南方向の流向が強い。しかし、2015 年 12 月と 2016 年 1 月には北西への流向頻度が増えている。

同じく深さ 21 m の流速分布については観測期間を通じて流速の低い 0.1 m/s の頻度が高く、8 月、9 月に流速が速くなり最大値は 2015 年 8 月に 0.8 m/s が確認できた。流向分布においても 5 月から 11 月では東南方向が主な流向である。特に夏季である、7 月、8 月、9 月は東南方向の流向が主である。しかし、12 月から 4 月までには北西への流向頻度が増えている。

深さ 5 m と 21 m の両方とも、7 月、8 月、9 月には流速がほかの時期より高い。その原因については本論文では言及しないが、陸奥湾の循環流モデル⁽²⁶⁾によれば 7 月から 9 月には湾外が相対的に高温で生じる逆エスチャリー循環流と湾内が相対的に低塩で生じるエスチャリー循環流が拮抗する時期と推測されると言われている。

Fig. 4-63 に示すのは全期間の流速分布をグラフ化した結果とワイブル分布である。

グラフから分かるように流速分布とワイブル分布はほぼ一致しており深さ 5 m と 21 m とともに流速が 0.1 m/s での頻度が一番高い。しかし、潮流エネルギーは流速の 3 乗に関係してくるので深さ 5m の方がエネルギーポテンシャルは大きい。潮流発電可能性は第五章で論ずる。

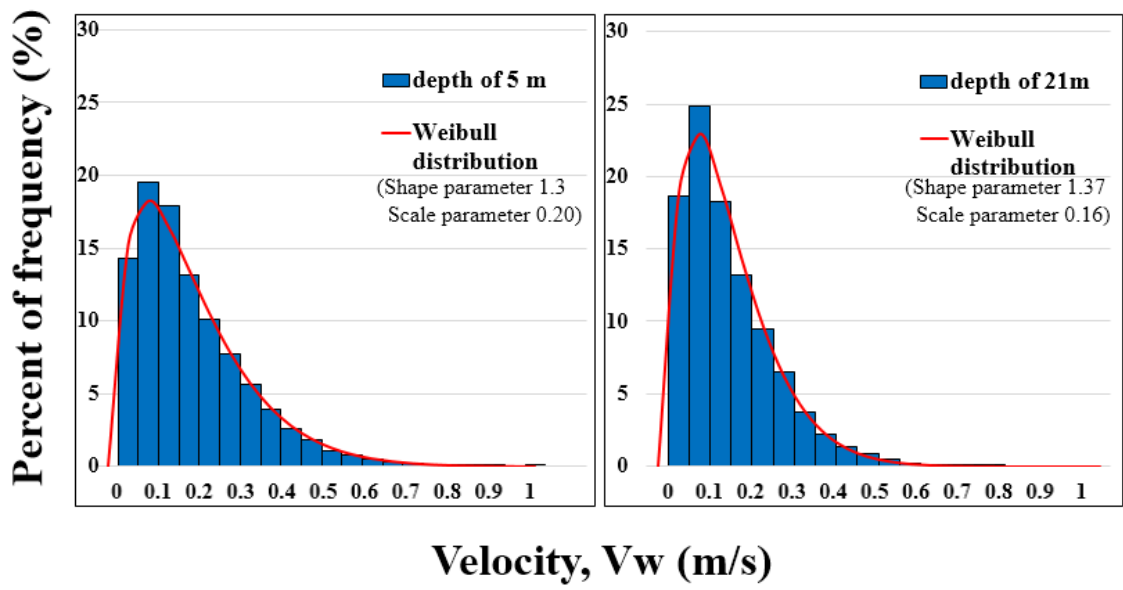


Fig. 4-63 Frequency distribution of flow velocity at the depths of 5 m and 21 m on the coast of Tairadate

第五章 考察

5-1 小括

1. ローテーションフロータービンを組み込んだ水車発電システムのカットイン流速が 0.3m/s である。

プール実験を通して、各流速での λ -Ct、 λ -Cp 曲線は同じ傾向を持っているが誤差が大きく正確な測定には限界があった。また、発電機と水車の性能がマッチングしてないことで周速比が 0.4 以下でのデータは取れなかった。

2. 風洞実験をとおしてローテーションフロータービンの性能評価を行い、トルク係数はダリウスタービンより高く、パワー係数 Cp の最大値は周速比 λ が 0.3 付近で 0.07 となった。ここから、低流速流域ではローテーションフロータービンを用いて発電する際、マッチングできる発電機を推定できるようになった。また、三分力計を用いて流体に対する抵抗係数を求めることによりタービンシステム 1 台が流体の中で受ける水の抗力を算出することができた。

3. 青森県平舘沿岸地域で主な流向は東南方向への流れであり、全時期で流速 0.1m/s の頻度が一番高かった。しかし、8 月、9 月には流速が速くなり瞬間最大流速 1m/s が出現することもある。また、年間流速平均値は深さ 5m と 21m で各 0.18m/s と 0.14m/s であり低流速流域であって、流速 0.3m/s 以上の流速頻度は 25.0 % と 15.6 % 程度である。

5-2 考察

本論文で述べたように青森県平舘沿岸地域の年間流速平均値は深さ 5m と 21m で各 0.18m/s と 0.14m/s であり低流速流域である。また、流速 0.3m/s 以上の流速頻度はそれほど高くはない。しかし、カットイン流速が 0.3m/s であるローテーションフロータービンを用いることで低流速流域でも発電は可能である。ター

ビンによって生成され得る電力を販売するには流速が不十分である。しかしながら、電線が設置されていない場所で使用することで地域や漁業に付加価値をもたらすことになる。例えば、ローテーションフロータービンから発電した電気を定置網に取り付け点灯させる方法がある。例えば、定置網にメタルハライドランプ（55 W、DC12 V）を取り付けマアジの捕獲量が増加した研究が舩田らによって報告されている⁽²⁷⁾。青森県でもマアジのように走光性を持つ魚類も捕獲されている。そのため、青森県の沿岸でも定置網にランプを設置し捕獲量の増加の可能性について検討する。

イメージ図を Fig. 5-1 に示すが、海にローテーションフロータービン発電システムを完全に沈め回転させ得られた電力で LED ランプを光らせ集魚する方法である。ここで、タービンは低速回転であるので魚も通り抜けることができ生態系への影響も少ないと予想される。

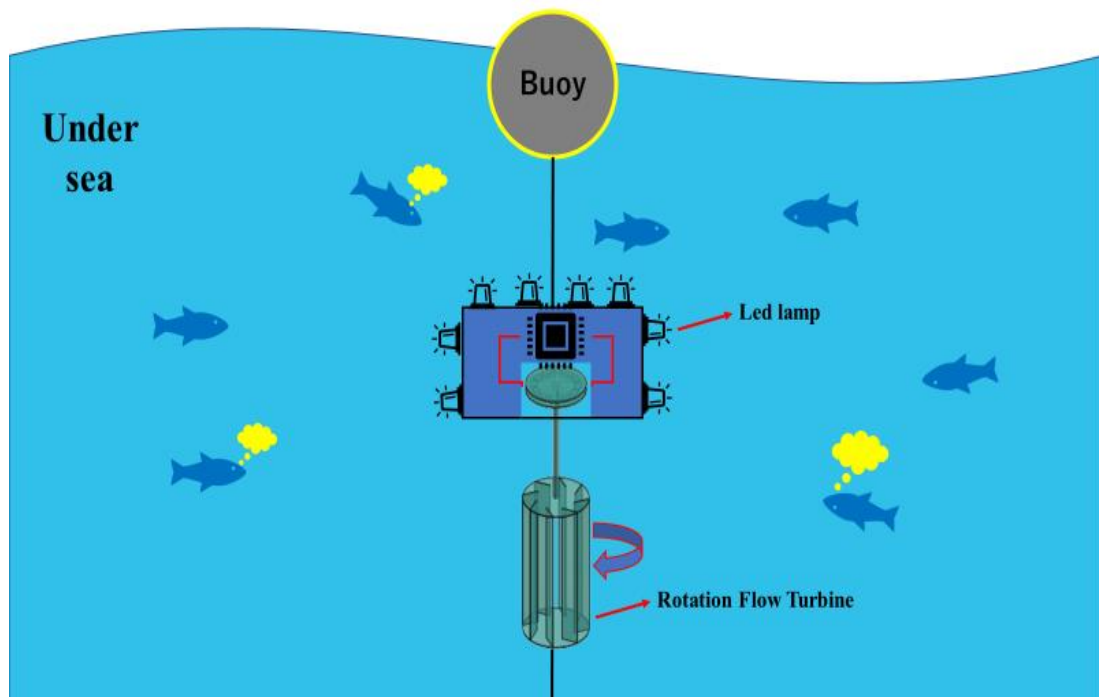


Fig. 5-1 Imaginary diagram of the Rotation Flow Turbine generation system with Led lamp

検討にあたって、本論文での実験データを用いて平館沿岸地域での海流ポテンシャル P_w (kW/m²・hour)と年間総発電量 AEP (kWh)を求める必要がある。求める式は以下のようになる。

$$P_w = 0.5\rho V_w^3 \times S \times F \times T_s \text{ (kW/m}^2 \cdot \text{hour)} \quad (5.1)$$

ここで V_w は流速 (m/s)、 S (m²)は面積でありここでは 1 m²、 F (%)は流速頻度、 T_s (s)は一時間の秒数 (3600s) である。

$$AEP = 365 \times \sum P_w \times A \times C_p \times \eta \text{ (kWh)} \quad (5.2)$$

ここで A (m²)はローテーションフロータービンの投影面積、 C_p はローテーションフロータービンのパワー係数、 η (%)は発電機の効率で本章では 60%とした。計算を通して、深さ 5m での海流ポテンシャルは 35.4 kW/m²・hour で、深さ 21m での海流ポテンシャルは 17.2 kW/m²・hour である。また、年間総発電量 AEP はローテーションフロータービンが回転する流速 0.3m/s 以上にて計算した結果、深さ 5m と 21m での推定 AEP は各 710 kWh と 298kWh であった。一時間の発電可能量に換算すれば 81 Wh と 34 Wh であり、深さ 5m での発電可能量は深さ 21m での発電可能量の 2.5 倍以上ある。従って、ローテーションフロータービンを用いた潮流発電システムを設置するのであれば、深さ 5m の方が適している。

また、第三章で述べたカットイン流速が 0.8 m/s であるダリウスタービンと比べると、同じ発電効率である時、ダリウスタービンの推定 AEP は深さ 5m と 21m で各、369 kWh と 14 kWh である。従って、青森県平館沿岸流域では抗力型であるローテーションフロータービンが適している。

また、舛田らの研究に用いられた集魚灯はメタルハライドランプ (55 W)であり効率は 60~100 lm/W である⁽²⁸⁾。これに代わって高効率な LED ランプ⁽²⁹⁾を使用すれば深さ 5m では 8 台取り付けと常時点灯が可能な量とみなせる。これらの検討を通じて平館沿岸地域での流速測定データとローテーションフロータービン

のデータを用いて定置網に潮流発電システムと LED ランプを設置することにより魚類捕獲量向上可能性が示唆される。

第六章 まとめ

本論文ではローテーションフロータービンの性能評価と平館沿岸地域の海流測定データの解析を通して実海域でローテーションフロータービンを用いた水車発電の設計モデルを構築するとともに、システム性能と流況ポテンシャルからモデルの発電量予測と既存技術の場合との比較、有効利用方法を検討することを目的とした。

結果的に、ローテーションフロータービンは低周速比でトルク係数が高く、回転特性が良いことと、正確な最大パワー係数 0.07 とカットイン流速が 0.3m/s であることから低速領域で効率が比較的良いことを確認できた。そして、平館沿岸流域の流速測定により深さ 5m での流速が 21m より速く発電には向いていることが分かった。加えて、漁業振興を担うと考えられる LED ランプを用いた集魚システムを仮想構築し、発電可能性について検討した結果、効率よく集魚できることが分かった。

実用化するためには、発電機の開発と設置方法、メンテナンスなどの検討も必須ながら、これらの課題に関しては今後引き続き研究していきたい。

参考文献

- [1] 日向 剛志・佐藤 夕介 (2013) 水力発電システムにおける最新技術. 東芝レビューVol.68, No6、P28-31
- [2] 徳島県企業局 (2014) 未来エネルギー活用基礎調査 (徳島の潮流発電に関する調査)、P1-26
- [3] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2010) 海洋エネルギー、NEDO 再生可能エネルギー技術白書、P478
- [4] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2014) 海洋エネルギー、NEDO 再生可能エネルギー技術白書、P17-64
- [5] AQUARET ホームページ
<http://www.aquaret.com/> (14/3/2019)
- [6] UK RENEWABLES ATLAS ホームページ
<https://www.renewables-atlas.info/>(14/3/2019)
- [7] Canadian Hydraulics Centre (2006) “Canada Ocean Energy Atlas (Phase 1) Potential Tidal Current Energy Resources Analysis Background”
- [8] 新エネルギー部 (2018) 「海洋エネルギー発電実証等研究開発事業」基本計画、NEDO P18007 (<http://www.nedo.go.jp/content/100878308.pdf>)
- [9] 化学工学会 (2009) 図解新エネルギーのすべて、P120-121
- [10] 伊藤 康 (2012) 小水力発電の現状・意義と普及のための制度面での課題. 科学技術動向 2012年5・6月号、P10-20.
- [11] 一般財団法人 新エネルギー財団 <http://www.nef.or.jp/index.html> (23/01/2019)
- [12] 藤井 智久 (2007) 低風速地域向け垂直軸型風車の基礎研究 弘前大学卒業論文
- [13] SUZUKI 株式会社 電動車いすホームページ <http://www.suzuki.co.jp/welfare/> (15/11/2018)

- [14] 株式会社ケネック プロペラ式流速計取扱説明書、P2-3
- [15] グラフテック株式会社ホームページ
http://www.graphtec.co.jp/site_instrument/instrument/gl900/index.html (15/11/2018)
- [16] <http://acepoint.co.jp/pdf/PDF2503.pdf> (15/11/2018)
- [17] <https://www.sinfo-t.jp/clutch/torque/powder/pob3.html> (15/11/2018)
- [18] <https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/tach/ht5500.html> (15/11/2018)
- [19] 佐藤 裕子、岡崎 博成、所田 達也、西尾 悠、茂田 正哉、伊澤 精一郎 (2011) 直線翼垂直軸風車周りの流れの熱線計測と数値解析、日本機械学論文集 B 77 巻 775 号 P637-640
- [20] 山田 誠治、田村 智弘、望月 信介 (2014) 小型直線翼垂直型風車性能へ及ぼすレイノルズ数の影響、風力エネルギー利用シンポジウム、36 巻、P401-404
- [21] 上野 正樹 (2013) 付加物による増速効果を利用した潮流発電用ダリウス形水車の開発研究 九州大学学術情報リポジトリ、 P26-62
- [22] 宇野木 早苗 (2009) 沿岸の海洋物理学、P1-2
- [23] 青森県 (1976) 陸奥湾漁業開発基本計画調査最終報告書作、青森県、青森市、 P322
- [24] 日本海洋学会・沿岸海洋研究部会 (1995) 日本全国沿岸海洋誌、 P183-184
- [25] <https://www.jfe-advantech.co.jp/ocean/infinity/infinity-em.html> (15/11/2018)
- [26] 河野 航平、磯田 豊、工藤 勲、藤原 将平、有田 駿、小林 直人、吉田 達、扇田 いずみ、高津 哲也 (2013) 陸奥湾の逆エスチャリー循環流「(1) 夏季の湾口海洋観察」、海と空、第 90 巻、第 1 号、P11-16
- [27] 舩田 大作(2015) 定置網漁業向上技術に関する研究、長崎県水産試験場研究報告 第 41 号、P22-100
- [28] 日本電球工学会 (2007) HID ランプガイドブック (上手に選ぶ 正しく使う)、P14-19
- [29] <https://www.irisohyama.co.jp/data/webcatalog/2017-2018-sogo/download.pdf> (15/11/2018)

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始有益かつ丁寧なご指導、並びにご助言をくださった本研究指導教員である弘前大学地域戦略研究所 久保田 健 准教授、本田 明弘 教授、弘前大学理工学研究科 宮永 崇史 教授、島田 照久 准教授、藤崎 和弘 准教授に深く感謝の意を表します。

日ごろからお互い励ましあい、研究だけに限らず多くの部分で助けていただいた弘前大学名誉教授 南條 宏肇 先生、弘前大学地域戦略研究所 桐原 慎二 教授、また、弘前大学理工学部に所属する 葛西 昭治 氏、藤寄 里美 氏に感謝します。

そして、風洞実験の研究で温かい助言を下された九州大学 内野 孝紀 准教授、大屋 裕二 特任教授、松島 啓二 技術職員に深く感謝します

日常生活を支えてくれた家族に感謝の意を表します。

挙げれば際限のないほど多くの人に支えられ、ここまで至りました。改めてここに感謝の意を表したいと思います。本当にありがとうございました。