

持続可能な海産養殖のための海水温予測アルゴリズムの提案

大塚 孝信^{1,a)} 北澤 裕司² 伊藤 孝行^{3,b)}

受付日 2017年4月21日, 採録日 2017年11月7日

概要: 海産養殖は, 天然海洋資源の減少と世界的な需要の増加により今後さらに重要となる. さらに, 高齢化や異常気象の影響もあり, より安定した供給を実現するためには, 海水温の予測が重要となっている. 特に, 真珠やホタテといった高付加価値商品に関しては, 水温異常による全滅事例が数多くあり, 社会的にも問題となっている. さらに, 安定した品質で供給するためには毎日の水温確認を行ったうえで, 養殖箇所を季節に応じて変更することが重要である. 本論文では, 実際に得られた海水温データと気象データを組み合わせることで, 海産養殖分野における海水温の予測を行うアルゴリズムを提案する.

キーワード: WSN, IoT, 海水温予測, 海産養殖支援

Proposal of Seawater Temperature Prediction Algorithm for Sustainable Marine Aquaculture

TAKANOBU OTSUKA^{1,a)} YUJI KITAZAWA² TAKAYUKI ITO^{3,b)}

Received: April 21, 2017, Accepted: November 7, 2017

Abstract: Aquaculture is even more important in the future due to the decrease in natural marine resources and the increase in worldwide demand. In addition, due to aging and abnormal weather, prediction of seawater temperature is important in order to realize a more stable supply. In particular, concerning high value added products such as pearls and scallops, due to abnormal water temperature It is also important to society that there are many cases of extinction and it is also a problem in society. In addition, in order to supply with stable quality, it is important to check the temperature of the water every day, then change the farmed part according to the season is there. In this paper, we propose an algorithm to estimate seawater temperature in marine aquaculture field by combining seawater temperature data actually obtained with weather data.

Keywords: WSN, IoT, seawater temperature prediction, marine aquaculture support

1. はじめに

海産養殖分野において養殖環境の把握は重要である. 天然資源の魚介類と異なり, 養殖環境下で生存する魚介類は制限されたいけすやいかで飼育され, 自らの意思で移動

することができない. そのため, 赤潮や海水温の変動が発生した場合には, 漁場で飼育されている魚介類が全滅することも珍しくない. 代表的な例として真珠養殖の代表的な養殖池である三重県英虞湾においては, 1996年に発生した感染症による日本産アコヤ貝の大量死が発生している. さらに, 2011年には3月11日に発生した東日本大震災による津波の影響で赤潮が発生し, アコヤ貝が多くへい死した例もある. また, 小規模なへい死や真珠の品質不良は毎年出ており, 水温の急変動や植物プランクトンの管理によって品質が悪化することが判明している [15]. そのため, 養殖従事者にとって, 遠隔地の海水温がリアルタイムで取得可能なサービスが一般的に利用されている. しかし, 海水

¹ 名古屋工業大学大学院
Nagoya Institute of Technology, Showa, Aichi 466–8555, Japan

² 日油技研工業株式会社研究開発部
NiGK Corporation, Kawagoe, Saitama 350–1107, Japan

³ 名古屋工業大学大学院情報工学専攻情報科学フロンティア研究院
Nagoya Institute of Technology, Department of Computer Science, Frontier Research Institutes, Showa, Aichi 466–8555, Japan

^{a)} otsuka.takanobu@nitech.ac.jp

^{b)} ito.takayuki@nitech.ac.jp

温の測定箇所は1つの湾に対して多くても2カ所程度であり、実際の養殖箇所とは海水温が異なることが多い。さらに、湾の構造によって日照条件や気象条件による海水温変化が異なることが多く、従来からある全地球モデルによる予測は困難である。本論文では、実際に得られた海水温データと気象データを組み合わせることで、海産養殖分野における海水温の予測を行うアルゴリズムを提案する。

本論文の構成を示す、まず、2章で真珠養殖における水温管理の重要性と本研究の解決する課題について示す。そして、3章において提案手法である海水温の予測アルゴリズムについて述べる。そして4章において評価実験結果を示す。さらに、5章において本研究と関連する先行研究を紹介する。そして最後に、6章で本論文のまとめと今後の課題を示す。

2. 真珠養殖の課題と現状

2.1 真珠養殖の歴史と現状

真珠は古くから世界中において宝石として珍重されている。文献[13]によると古くは紀元前から世界中で真珠の美しさから宝飾品として用いられていたとみられている。真珠養殖技術が確立する以前の真珠は、天然貝1万個に数粒しか産出されず、希少価値の高いものであった。しかし、1893年（明治26年）三重県英虞湾で世界に先駆け真珠の人工養殖に成功し、1920年代には人工養殖された真珠が安定して世界に供給できるようになった。その後、1950年代には世界の9割のシェアを日本が持つようになり、三重県、和歌山県、長崎県をはじめとして日本の輸出産業の一端を担った。近年では、世界各地で真珠養殖が行われるようになり、日本のシェアは年々減少している。日本における真珠養殖の復興について、2017年6月7日に“真珠振興法”[13]が施行され、日本国として真珠養殖を補助する動向にある。また、日本国内における真珠養殖生産高が最も高い三重県においては、1996年に発生した感染症をきっかけに、環境変化に強い品種改良を目的として、日本原産アコヤ貝と日本産以外のアコヤ貝を交配させた貝を養殖に用いており、現在養殖されているほぼすべてが交配種となっている[12]。しかし、交配種は日本産アコヤ貝と比較して以下の問題がある。

- 1級品と評価される割合が低い（品質が悪い）。
- 性質が多様であり、養殖管理の手段が複雑である（必要数以上の飼育が必要）。
- 生殖巣に日本産アコヤ貝には見られない卵細胞の混入がある（品質低下の原因）。
- 日本産特有の遺伝情報が失われる（種の保存）

以上の問題から、環境変化には弱い質の良い日本産アコヤ貝を用いた真珠養殖に回帰することで、日本産真珠のブランドイメージと売上げを復興することが進められている。日本産アコヤ貝は、交配種と比較して環境変化に弱

いという特性がある。特に、動物性プランクトンの大量発生によって引き起こされる赤潮や、水温変化によるへい死率が交配種と比較して高いため、水温・水質管理が重要である。

2.2 水温管理の重要性と現状

真珠の養殖には、数多くの工程が存在する。真珠の人工養殖は、人手により真珠の核となる樹脂球（核）をアコヤ貝の体内にメスなどを利用して挿入することで真珠層が形成される[13]。稚貝の養殖から浜揚げまでに3年6カ月かかるため、一般的な魚類の養殖と比較して長期にわたった管理が必要である。特に、アコヤ貝に核を挿入する際には、対象となるアコヤ貝を低水温状態にさらすとともに密集状態にすることで弱らせ、意図的にストレスをかけることが行われる。また、アコヤ貝の適正水温は冬季10℃以上、夏季25℃以下であり、冬季に関しては越冬場所で冬を越し、夏季は水温の急上昇が予想される場合には養殖いかだそのものを水温の低い箇所に移動しているのが現状である。海水温の予測は養殖従事者の経験と勘によって行われており、だれもがすぐに習得できる技術ではない。そのため、経験と勘を持つ養殖従事者の高齢化や引退などにより、真珠養殖の持続可能性が問題となっている。

海水温の収集と予測については広く行われている。しかし、リモートセンシングで用いられる衛星を用いた海水温測定は水面下数ミリの海水温のみ取得が可能である[8]。また、予測についても海流や気象データを統合することでモデルを作成し、全地球規模で海水温を予測するサービス[1]も存在する。しかし、双方ともに水面下数ミリの海水温のみを対象としており、魚介類を問わず海産養殖にとって重要であるのは水深2–10m間の水温が重要である。真珠養殖やホタテ養殖、およびカキなどの貝類における養殖方法は図1に示すようなネットに貝を入れ、養殖イカダなどを用いて海水中に投入する。また、ネットを縦にならべて設置するため、現実には2–10m間の各水温の収集・予測が必要である。

さらに、問題点として予測に使用されるエリアのサイズがある。衛星画像を利用した海水温測定・予測に関しては一般的に1kmメッシュから5kmメッシュの比較的広範囲な計測範囲が設定されており、近海養殖のように、周囲の地形によって海水温が変化する海産養殖向けには精度が粗いという問題点が存在する。特に、本論文で題材としている三重県英虞湾のようなリアス式の地形においては、周辺の地形条件によって春季では最大2℃、夏季では最大5℃の差異があることも珍しくなく、実際に養殖場として利用している箇所の100–500m四方の範囲の温度を収集・予測する必要がある。三重県真珠養殖協議会では2007年より“英虞湾・的矢湾・五ヶ所湾環境モニタリングシステム”[17]により、図2に示す4カ所において、各地点0.5m、2m、



図 1 貝類養殖に用いるネット

Fig. 1 Net used for shellfish cultivation.

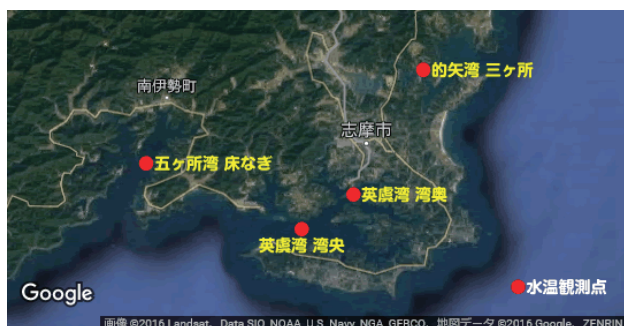


図 2 観測地点

Fig. 2 Observation point.

5 m, 8 m の水深ごとの水温を計測しており、養殖事業者にデータを提供している。

収集されたデータを基に、夏季と冬季の水温の例を示す。春季である 2016 年 3 月 12 日 18:00 のデータを表 1 に示し、夏季である 2016 年 8 月 20 日のデータを表 2 に示す。先述したように、リアス式海岸が特徴である英虞湾においては、周辺状況の違いにより、各地域の海水温変化が大きい。特に、夏季における温度変化については、英虞湾奥に存在する湾奥地点が潮溜まりとなっており、水深 0.5 m, 2 m 地点においてアコヤ貝に悪影響を与える水温 25℃ 以上が計測されている。

以上のように、海産養殖においては細かな計測範囲でのデータ収集・予測が必要である。我々はそのために、各地

表 1 2016/3/12 18:00 の水温

Table 1 Sea water temperature of 2016/3/12 18:00.

地区	0.5 m	2 m	5 m	8 m
五ヶ所	13.58	13.60	13.42	13.16
的矢湾	11.53	11.49	11.35	11.42
湾奥	13.04	13.11	12.84	12.72
湾央	12.03	12.88	11.37	11.29

表 2 2016/8/20 18:00 の水温

Table 2 Sea water temperature of 2016/8/20 18:00.

地区	0.5 m	2 m	5 m	8 m
五ヶ所	27.56	24.62	22.72	22.55
的矢湾	25.23	23.11	22.85	22.12
湾奥	28.11	27.81	25.04	24.62
湾央	26.11	25.48	23.14	23.19

点の水温だけではなく、気象データと組み合わせることで高精度な予測を提案する。

3. 実データを用いた海水温予測

3.1 水温データと気象データ収集装置

2.2 節で述べたように、三重県英虞湾においてはすでに水温を計測する装置が 2007 年より存在している。既存装置は水温のほかにクロロフィル a 濃度、塩分濃度、溶存酸素、および濁度を測定している [18]。しかし、装置の老朽化や水温以外の測定装置の問題もあり、2017 年 9 月より水温のみを測定する観測装置に変更された。主な理由として、海水中のクロロフィルや塩分濃度などのセンサは定期的なキャリブレーションが必要であるとともに、センサが正しい値を返すためのメンテナンスコストが高額であった。そのため、真珠養殖従事者らの要望を受け、真珠養殖にとって最も重要なパラメータである水温を安定して収集可能な装置を導入している。2007 年–2017 年までの観測装置（旧観測装置）と 2017 年から現在運用中の観測装置（新観測装置）を図 3 に示す。外観から分かるように、旧観測装置はセンサを直接設定された水深まで下降させる必要があるため、大型である。通信方式は双方ともに携帯電話回線網を利用しており、定期的にサーバに対して計測データを送信している。本研究では、旧観測装置で収集された 2007 年から 2017 年の水温データを用いて各地点の水深ごとの海水温を予測するアルゴリズムを提案する。

3.2 海水温予測アルゴリズム

本節では海水温予測に使用したアルゴリズムについて述べる。本研究では、予測アルゴリズムとしてランダムフォレストを利用している。ランダムフォレストは、ランダムさが持つ利点を活用することで大量に作成された決定木を効率良く学習させることが可能な機械学習の 1 つである。特に、代表的な教師あり学習である Support Vector

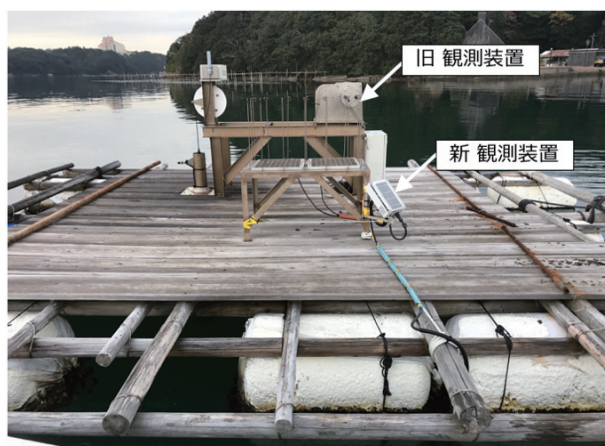


図3 新旧観測装置の外観

Fig. 3 Appearance of old and new observation device.

Machine (SVM) と比較した場合、特徴量の重要度が学習によって計算可能であり、過学習が少ないといった特徴がある [4]。ランダムフォレストは決定木による弱学習を用いており、決定木の学習は完全に独立していることから、並列処理が可能であることから、学習を高速に行うことができる。また、集団学習により複数モデルを生成し、各モデルの結果を統合・組み合わせることにより精度を向上させるため、多くのパラメータが存在する予測環境に適している。本研究における海水温の予測に関しては、各地点ごとに4点の海水温が存在するうえ、気象データや潮流のデータなど多くのパラメータが存在する。本研究では英虞湾モニタリングシステムによる過去10年分の水温データを三重県真珠養殖連絡協議会より入手した。さらに、気象データの収集は気象庁の提供するデータベース [19] より2007年から2017年にかけて、観測地点である英虞湾に最も近い南伊勢気象台のデータを入手した。以上により、以下に示す各地点においてランダムフォレストによる重回帰分析を行い、予測モデルの構築および予測を行った。

以下にデータ入手箇所と各地点の特徴を示す。

五ヶ所湾床なぎ 湾の奥に存在するため気象変動の影響が大きい、潮目の変化にはあまり影響がない。

的矢三ヶ所 伊勢湾外海に接し、水深2mと8mの差異が大きい。

湾奥 表層の温度変化が非常に大きい（気象条件）、大潮ごとに潮が入れ替わるまで各水温の乖離が大きい。

湾中央 水温変化は緩やか。

南伊勢気象台（気象データ収集箇所）

実際のデータ入手箇所について衛星写真による地点を図4に示す。

次に、実際に収集した三ヶ所の可視化結果と気象条件による海水温変化の例を図5に示す。三ヶ所地区は伊勢湾外海近傍に位置しており、比較的緩やかに海水温変化が起こる。しかし、11/24に発生した急激な気温変化により、表

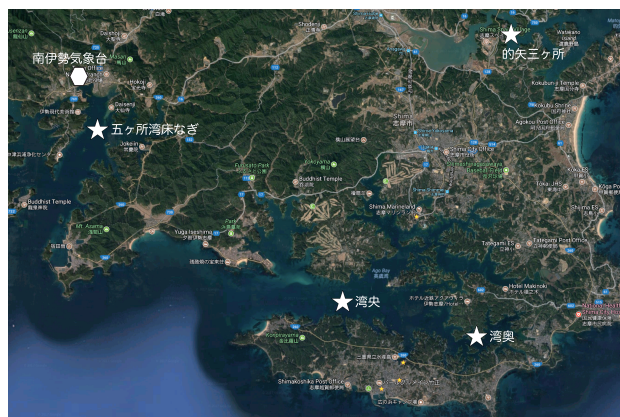


図4 データ収集箇所

Fig. 4 Overview of data collection location.

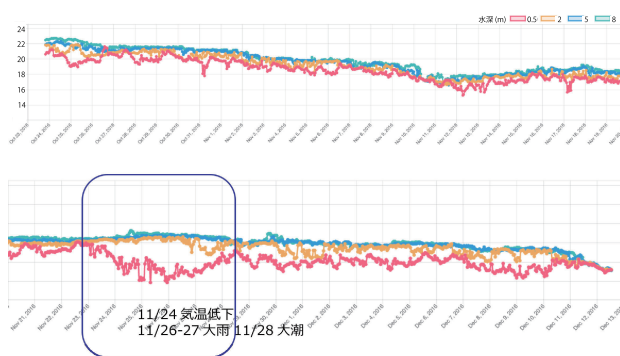


図5 三ヶ所における海水温変化と気象条件

Fig. 5 Seawater temperature change and climatic conditions in “Sangasho”.

層の水温変化が激しく、その後の大雨の影響で中層の海水温も低下している。以上のように、海水温は水深によって異なるのはもちろんだが、気象の影響を多分に受けることは明らかである。本研究では、気象条件として気温と風速データを用いて各地点の海水温変化をモデル化し、水温予測アルゴリズムを構築した。

3.3 データ予測の流れ

データ予測は各地点の実データに基づき、予測モデルが構築される。予測アルゴリズムおよびモデル化にはランダムフォレストを利用した。計算はすべてPython上で行い、サーバ上のデータベースへ直接アクセスが可能である。そのため、大規模データを利用した予測モデルの構築が容易な構造としている。各地点のモデル化が完了した後、モデルに対しての入力は気象庁が毎日15時に発表する翌日の気象予報を利用している。つまり、気象庁が提供する気象予測データにおける1時間ごとの気温と風速の予測値を入力することで、1時間単位での各地点における水深0.5m, 2m, 5m, 8mの海水温の予測が可能である。予測の流れを図6に示す。

次章では、実際の予測モデルによる予測結果について述

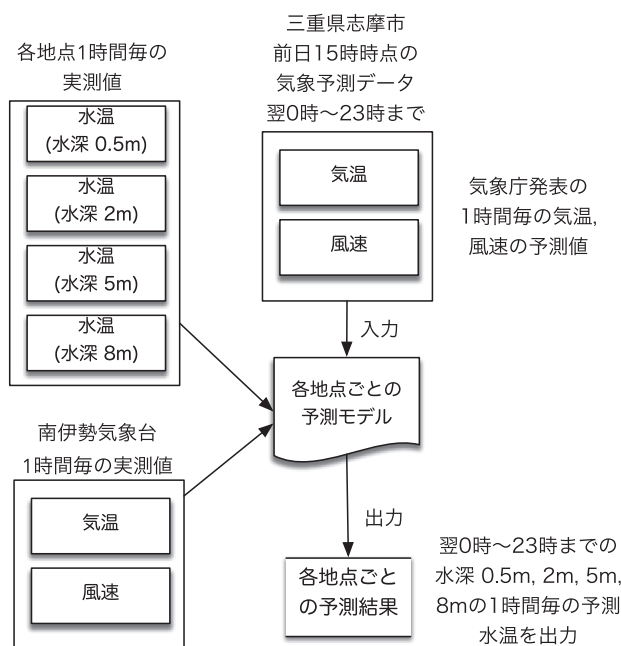


図6 データ予測フロー

Fig. 6 Data prediction flow.

べる。

4. 評価実験

4.1 実験設定

評価実験には学習データとして実際の各地点の水温データと南伊勢気象台による1時間ごとの気象データ（気温と風速）を利用してモデル化を行い、予測精度の検証には三重県伊勢市の毎日15時に発表される1時間ごとの気温と風速の予測値を用いて予測精度の検証を行っている。各データの収集期間と水温データについてはデータ数を以下に示す。

モデル構築に使用したデータ列

- 南伊勢気象台の気象データ実測値（1時間ごとの気温、風速）2007/3/20–2016/1/5
- 五ヶ所湾の水温実測値（1時間ごと）2007/3/20–2016/1/5 72,923件
- 的矢湾の水温実測値（1時間ごと）2007/3/20–2016/1/5 76,254件
- 湾奥の水温実測値（1時間ごと）2007/3/20–2016/1/5 114,321件
- 湾央の水温実測値（1時間ごと）2007/3/20–2016/1/5 96,957件

水温データに関して、メンテナンスや台風による陸揚げデータについては削除を行っているため、データ件数の差異が発生している。次節では、ランダムフォレスト法における決定木の深さとモデルサイズと予測精度を検証するための事前検証について述べる。

表3 決定木の最大深度と正解率

Table 3 Maximum depth of decision tree and accuracy rate.

最大深度	正解率
5	0.325333
10	0.326667
15	0.326667
20	0.325333
25	0.94
30	0.946667
35	0.953333
40	0.946667

4.2 事前検証

本節では、ランダムフォレスト法における決定木の深さが予測精度に与える影響について検証する。ランダムフォレストにおいては、決定木における木構造の深さがモデルの複雑度を調整するパラメータとなっており、決定木の木構造の深さが深いものはより複雑であり、決定木の深さが浅いものはより単純なモデルとなる。本事前検証における決定木の最大深さの検証には、Pythonのライブラリであるscikit-learn [5] を利用し、決定木の最大深度ごとに正解率を計算させ、モデルの汎化性能を交差検証法を用いて算出した。本事前検証に利用したデータは以下である。

- 南伊勢気象台の気象データ実測値（1時間ごとの気温、風速）2007/3/20–2016/1/5
- 五ヶ所湾の水深8mにおける水温実測値（1時間ごと）2007/3/20–2016/1/5 72,923件

次に、決定木の最大深さを40と設定し、最大深度ごとの汎化性能を出力した。正解率は予測と実測値に対して一般的な水温センサの誤差範囲である $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内であれば正解とした。最大深度ごとの正解率を表3に示す。

本結果により、決定木の最大深さが25以上であれば、汎化性能はおおむね0.94となることが分かった。次節では、予測精度の検証について述べる。

4.3 予測結果

本節では、実際のデータを用いた予測結果について述べる。予測精度の検証については、4.1節であげたデータを用いて生成された各地点の予測モデルに三重県伊勢市における気象庁の発表する予報データを入力として使用した。気象庁の発表する予報データは毎日15時に発表され、翌日0時～23時の毎時ごとの気温と風速の予報値が公開される。我々は、気象庁の公開する予報データを各地点の予測モデルへ入力することで、翌日0時～23時の毎時間における水深0.5m、2m、5m、および8mの水温の予測データを取得し、同一期間における各地点のそれぞれの水深における水温の実測値との比較を行った。各データ列における欠損データについては、時系列の前後データの間接値を生成することで補完している。本精度検証におけるランダムフォレストの決定木の最大深さは、前節における事前検証

で得られた知見により、最大深さ 30 と設定している．予測精度検証に使用したデータ列を以下に示す．

予測精度検証に使用したデータ列

- 三重県志摩市の気象予測値（15 時発表，1 時間ごとの気温，風速）2016/1/6-2017/1/5 8,688 件
- 五ヶ所湾の水温実測値（1 時間ごと）8,751 件
- 的矢湾の水温実測値（1 時間ごと）8,748 件
- 湾奥の水温実測値（1 時間ごと）8,751 件
- 湾央の水温実測値（1 時間ごと）8,710 件

我々は、どのパラメータが最も予測に効いているかを示すため、2つのステップに分けて予測を実行した．まずはじめに、各水温と気象データにおける気温のみを学習させたものを予測 1 とし、次に各水温と気象データにおける気温と風速を用いて学習させたものを予測 2 として行った．予測結果 1 を表 4 に示し、予測結果 2 を表 5 に示す．予測結果における誤差については、予測モデルにより出力された、2016/1/-2017/1/7 の各水深・地点における水温の予測値と、各地点において実際に計測された値を比較し、比較後の差異を平均化したものを平均誤差．比較した際の誤差が最大であるものを最大誤差としている．

各水温におけるカンマの後の数値は、各水深における最大誤差を示し、各地点における最大誤差についても表に示す．

表 4 予測結果 1：気温のみ使用
Table 4 Result 1: Use only temperature.

地区	0.5 m	2 m	5 m	8 m	最大誤差
五ヶ所	1.175, 7.10	1.113, 6.46	1.083, 6.25	1.095, 6.14	6.46
的矢湾	1.157, 6.10	1.171, 5.68	1.158, 6.62	1.141, 7.37	7.37
湾奥	1.121, 11.9	1.188, 11.6	1.136, 12.24	1.079, 10.47	12.24
湾央	1.157, 6.39	1.109, 7.01	1.070, 6.25	0.969, 5.68	7.01

表 5 予測結果 2：気温と風速を使用
Table 5 Result 2: Use temperature and wind speed.

地区	0.5 m	2 m	5 m	8 m	最大誤差
五ヶ所	1.008, 5.99	0.978, 6.06	0.951, 5.46	0.971, 6.49	6.49
的矢湾	1.029, 5.60	1.051, 5.76	1.042, 5.80	1.030, 6.16	6.16
湾奥	1.042, 12.9	1.060, 11.6	1.006, 11.76	1.030, 6.16	12.91
湾央	0.994, 6.56	0.971, 6.52	0.938, 6.32	0.853, 5.57	6.57

4.4 考察

予測結果 1 における気温と海水温の組合せによるモデルにおいても平均誤差 1.1℃ 程度であることが分かった．また、予測結果 2 における風速を加えた予測モデルによる結果については平均誤差がおおむね 1℃ であることから、通常時の予測は可能である．しかし、どちらの結果を見ても最大誤差が 6℃ を超え、湾奥に至っては最大誤差が 12.9℃ となっている．予測結果における誤差の原因として、気温の急変動があげられる．特に、冬季初期に関しては気温の変動幅が大きく、気温変動にともない、予測結果と実測値の乖離が起きていることが分かった．図 7 に予測値と実測値の誤差が最大であった、2016/12/26-27 の予測値と実測値のグラフを示す．

2016/12/26 付近の天気の状態としては、2016/12/25 まで高気圧に覆われていた天気が、前線をともなった低気圧の通過により急に崩れている [6]．

これらの最大誤差増加の要因として、データ数の少ない急激な天候変化が起きた場合には、訓練データに多く含まれる平常時のデータに関しては性能が向上では対応できず、機械学習における過学習が想定されるため、継続してアルゴリズムの変更や過学習に対する対策、および潮流や風速、降雨量などのパラメータの追加を行うことで、予測精度の向上が可能と考える．本研究では、気象庁が提供する気象予測データ（1 時間ごとの気温と風速予報）を利用し、予測を行っている．気象庁の提供する翌日の気象予測は、降雨の有無に関してはおおむね 87%、最高気温の予報誤差に関してはおおむね 85% の的中率であることから [7]、信頼性が高く、海水温の予測の入力としては精度に問題はないと考える．しかし、降雨に関しては水温観測地点と気象観測地点である南伊勢気象台が離れていることから、水温観測地点とは異なる降雨量であることが予測される．また、潮汐に関しては気象庁の提供する潮汐データの利用を予定している．今後は、学習に必要な最低限のデータの確認とはずれ値に対する対処、および長期予報データによる海水温の長期的な予測を目指す．また、湾奥地点に関しては気象データ取得箇所が遠方であり、かつ周囲が山で囲まれているという特性を持っている．そのため、著者らの開発した WSN プラットフォーム [20] を用いて、2017 年 4 月

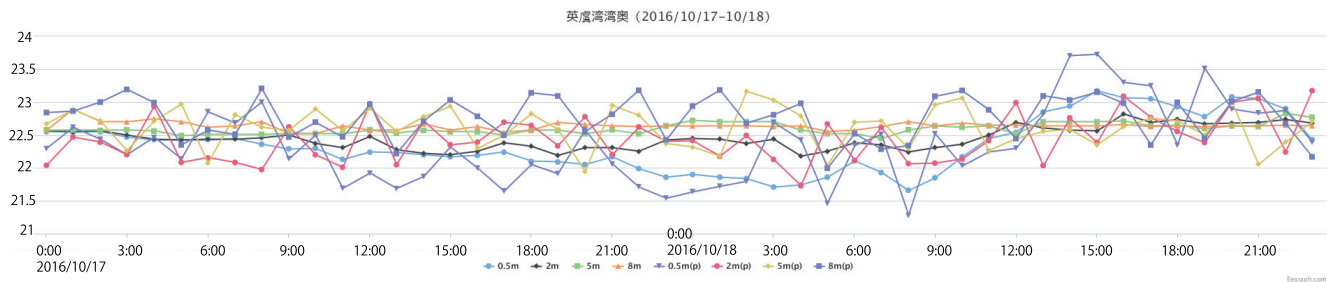


図 7 英虞湾湾奥における 2016/12/26-27 の予測値と実測値
Fig. 7 Predicted value and measured value of 2016/12/26-27.

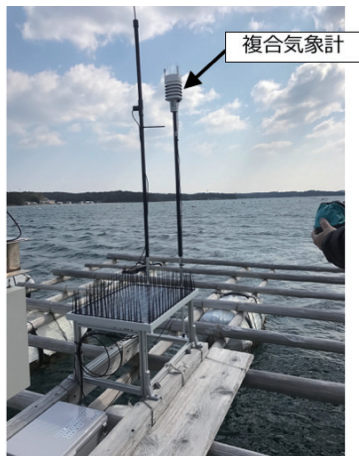


図 8 実際に設置した複合気象計

Fig. 8 Meteorological sensor at actual field.

より複合気象計を水温観測装置と同一のいかだ上に設置している。実際に設置された複合気象計を図 8 に示す。

本気象計のデータを継続して収集することにより、海水温を予測したい箇所近傍の気象データと組み合わせることで誤差の低減を図る。

5. 関連研究

5.1 リモートセンシングに関する研究

海洋学の分野において、潮流や海水温のモデル化と予測は古くから行われている [21]。近年では、航空機に加え、人工衛星に搭載された各種センサ情報を基にした海洋環境情報の把握と予測が行われている。たとえば、衛星画像と地上・洋上にある気象やセンシングブイによる海水温データを利用した海洋の環境予測に関する研究 [1] や、2–20 km メッシュの比較的細かな範囲の大気と海洋の状態を予測する研究 [3]、人工衛星に搭載された赤外線センサとマイクロ波センサを利用し、海表面温度のセンシング精度向上させる研究 [8] がある。また、海水温変化と漁業の関係を定量化する試みとして、いか漁獲量と海水温度の関係を調査した研究 [9] や、サンゴ礁の生育状況を衛星画像で判断する研究 [10] がある。しかし、これらの研究において、漁業や海産養殖にとって最も重要である、魚介類生息水深の海水温は把握できていない。海表面温度は、周辺の気温を代表とする気象状況によって左右されやすい。海表面温度と比較して、水深 2 m 以下の海水温変化は水深が深いほど安定する傾向にあり、気温変化によって大きく変化する海表面温度とは異なる。特に、夏季や冬季においては海表面温度は日射や気温変化の影響で大気気温と近似することが多いが、中層の海水温に関しては海表面ほどの影響を受けないことが大きい。そのため、リモートセンシングによる海表面温度予測だけではなく、実際に利用する水深の海水温を予測することが重要である。

5.2 WSN による環境情報収集と予測に関する研究

ワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) は近年、IoT (Internet of Things) や M2M (Machine to Machine) の中核をなす技術であり、広く研究が行われている [22]。WSN を構成するノードは、温度、照度、加速度などのセンサデータを取得し、取得したデータを実無線波を利用してバケツリレー方式で転送する“マルチホップ・アドホックネットワーク”を構成することができる [23], [24]。WSN は、ノードを配置するだけで自律的なネットワークを構成できるため、利用現場での敷設作業を軽減できる。また、センサデータを取得することで、現実世界の動態をとらえることができるため、対象物のトラッキングや自然環境のモニタリングが WSN における有望なアプリケーションとして広く研究されている。

我々は、大規模に高密度の情報を収集可能なセンサネットワークデバイスとサーバアプリケーションを開発し、環境データの収集を行っている [25]。

6. まとめと今後の課題

本論文では、海産養殖に利用する水深の海水温を予測するアルゴリズムについて提案した。本研究で提案する実際の利用水深における予測については、養殖従事者が特に必要としているにもかかわらず、行われていなかった。我々は、予測モデルに対する実際の予測値精度を約 1°C と高精度に予測するアルゴリズムを提案した。今後は、外れ値の減少と過学習に対する対処、および 1 カ月単位の長期海水温予測について研究を進めていく。また、将来的には海水温だけではなく、クロロフィル a や塩分濃度の予測を行うことで、持続可能な海産養殖をサポートしていく。

謝辞 本研究の一部は日油技研工業株式会社との共同研究である。“平成 28 年度高耐久自立遠隔監視装置の研究開発”の一部である。また、実データの提供および実験フィールドの提供は三重県真珠養殖連絡協議会の協力によるものである。

参考文献

- [1] Chassignet, E.P. et al.: Ocean prediction with the hybrid coordinate ocean model (HYCOM), *Ocean weather forecasting*, pp.413–426, Springer Netherlands (2006).
- [2] Shriver, J.F. et al.: 1/32 real-time global ocean prediction and value-added over 1/16 resolution, *Journal of Marine Systems*, Vol.65, No.1, pp.3–26 (2007).
- [3] Hodur, R.M.: The Naval Research Laboratory's coupled ocean/atmosphere mesoscale prediction system (COAMPS), *Monthly Weather Review*, Vol.125, No.7, pp.1414–1430 (1997).
- [4] Breiman, L.: Random forests, *Machine learning*, Vol.45, No.1, pp.5–32 (2007).
- [5] scikit-learn, available from (<http://scikit-learn.org/stable/>) (accessed 2017-08-01).
- [6] tenki.jp: 過去の天気 (2016/12/26), 入手先 (<http://www.tenki.jp>)

- tenki.jp/past/2016/12/26/) (参照 2017-08-01).
- [7] 気象庁：天気予報の精度検証結果，入手先 http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/kensho/yohohyoka_top.html (参照 2017-08-01).
 - [8] 細田皇太郎：2. 衛星リモートセンシングによる海面水温観測，写真測量とリモートセンシング，Vol.52, No.5, pp.234-238 (2013).
 - [9] 安藤朗彦：衛星リモートセンシング技術を用いた筑前海春季水温分布の変動といか釣り漁業との関連，福岡県水産海洋技術センター研究報告，Vol.12, pp.45-50 (2002).
 - [10] 瀬岡和夫，Paringit, E.C.，山野博哉：サンゴ礁のリモートセンシング，環境省・日本サンゴ礁学会編 日本サンゴ礁，環境省，東京，pp.95-106 (2004).
 - [11] Hosoda, K., Kawamura, H., Lan, K.W., Shimada, T. and Sakaida, F.: Temporal Scale of Sea Surface Temperature Fronts Revealed by Microwave Observation, *IEEE Geosci. Rem. Sens.*, Vol.9 (2011).
 - [12] 立神地域真珠養殖復興プロジェクト，NPO 法人水産業・漁村活性化推進機構，入手先 <http://www.fpo.jf-net.ne.jp/> (参照 2017-04-01).
 - [13] 山田篤美：真珠の世界史，中公新書 ISBN 978-4-12-102229-5.
 - [14] 真珠の振興に関する法律（平成二十八年六月七日法律第七十四号），日本国政府法令データベース，入手先 <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H28/H28HO074.html> (参照 2017-04-02).
 - [15] 上野成三ほか：英虞湾の真珠養殖漁場におけるアコヤガイの成長過程と汚濁負荷に関する現地調査，海岸工学論文集，Vol.47, pp.1206-1210 (2000).
 - [16] 漁海況，三重県水産研究所，入手先 <http://www.pref.mie.lg.jp/suigi/hp/000200511.htm> (参照 2017-04-01).
 - [17] 三重県真珠養殖関係漁場水温モニタリングシステム，三重県真珠養殖連絡協議会，入手先 <http://www.ohyamanet.info/~m-shinkyo/index.php> (参照 2017-04-05).
 - [18] 英虞湾・的矢湾・五ヶ所湾環境モニタリングシステム，志摩市政策推進部里海推進室，入手先 <http://www.satoumishima.jp/data/monitoring/> (参照 2017-04-05).
 - [19] 過去の気象データ検索，気象庁，入手先 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.html> (参照 2017-04-05).
 - [20] 大塚孝信，鳥居義高，伊藤孝行：多様なセンサ接続を可能とする WSN システムの実装と社会応用，第 14 回情報学ワークショップ WiNF2016 (2016).
 - [21] 星 仰：リモートセンシング工学の基礎，森北出版 (1984).
 - [22] Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.: Wireless sensor networks: A survey, *Computer Networks*, Vol.38, pp.393-422, Elsevier Science B.V (2002).
 - [23] Chong, C-Y. and Srikanta, P.K.: Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges, *Proc. IEEE*, Vol.91, No.8, pp.1247-1256 (2003).
 - [24] Kuorilehto, M., Hannikainen, M. and Hamalainen, T.D.: A survey of application distribution in wireless sensor networks, *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, Vol.5, No.5, pp.774-788 (2005).
 - [25] Otsuka, T., Torii, Y. and Ito, T.: Anomaly Weather Information Detection using Wireless Pressure-Sensor Grid, *Journal of Information Processing (JIP)*, Vol.23, No.6, Information Processing Society of Japan (IPSJ) (2015).



大塚 孝信 (正会員)

2015 年名古屋工業大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学) 2012 年名古屋工業大学特任助教。2015 年同大学プロジェクト助教。その間，カリフォルニア大学アーバイン校客員研究員。総務省東海総合通信局長賞，IEEE Nagoya

Section 国際会議研究発表賞，IEICE 東海支部学生研究奨励賞。



北澤 裕司

1976 年生まれ，2000 年東洋大学学士修了，2007 年日油技研工業株式会社入社，海洋観測機器の開発に電気系エンジニアリングに従事，現在に至る。



伊藤 孝行 (正会員)

2000 年名古屋工業大学博士後期課程修了。博士 (工学)。1999 年 JSPS 特別研究員。2007 年北陸先端科学技術大学院大学助教授。2003 年名古屋工業大学助教授。2006 年同大学院産業戦略工学専攻准教授。2011 年内閣府

最先端・次世代研究開発プロジェクト PI。2014 年より名古屋工業大学教授。その間，JST さきがけ代表研究者。JST CREST 代表研究者。USC，ハーバード，MIT，東京大学客員研究員。人工知能学会業績賞。ITS シンポジウム最優秀論文賞。JSSST 基礎研究賞。JSPS 賞。文部科学大臣表彰科学技術賞。AAMAS2013 PC Chair。IFAAMAS 国際財団理事。文部科学大臣表彰若手科学者賞。IPJS 長尾真記念特別賞受賞。AAMAS2006 最優秀論文賞。JSSST 論文賞。IPA 未踏ソフトスーパークリエイター。