

海水温予測のための水温情報精度向上を目的とした 異常値検出・排除手法の提案

阿草 裕¹ 遠藤 慶一¹ 黒田 久泰¹ 小林 真也¹

概要：養殖漁業においては、現場周囲の海域における水温情報が非常に重要である。水温を知ること、魚病対策や、赤潮の発生予測を行うことが可能となるからである。我々は、水産研究機構と協力して、愛媛県の宇和海上に 16 基の水温観測装置からなる多深度のセンサーネットワークを構築した。また、本ネットワーク上で測定された水温情報を即時可視化し、宇和海の漁業従事者へ提供できるような Web システムを構築した。しかし、本 Web システムによって提供される水温情報は現状、あるいは過去の情報のみであり、漁業従事者からは 1~2 週間程度の近未来の水温予報の提供が求められている。そこで本研究では、本 Web システムの新機能として、過去の水温情報から、近未来の水温を予測し、その予報情報を提供する機能を実装する。本稿では、水温予測手法を検討するうえで解決しなければならない課題のうち、水温情報の精度向上について取り上げ、水温の過去情報との比較等から、異常値を検出・排除する手法の検討および評価について報告する。

Proposal of Outlier Detection and Exclusion Method to Improve Accuracy of Water Temperature Information for Seawater Temperature Forecast

Agusa Yu¹ Endo Keiichi¹ Kuroda Hisayasu¹ Kobayashi Shinya¹

1. はじめに

愛媛県は、全国の中でも屈指の生産高（平成 30 年の年間生産高：約 907 億円（全国 3 位）[1]）を誇る水産県である。その生産を特に支えているのは、宇和海域での養殖漁業（平成 30 年の年間生産高：約 669 億円（全国 1 位）[2]）である。

我々愛媛大学は、宇和海域の養殖生産を支援するため、水産研究機構の協力を得て、海域の変色情報や海中のプランクトン濃度情報を現場の漁業従事者へ告知伝達する仕組み [3] や、赤潮の発生予報を同じく告知伝達する仕組み [4] の構築に取り組んでいる。

本稿では、関連研究として、水温情報を漁業従事者へ告知伝達するシステムに関する研究 [5] について述べる。その後、本告知伝達システムにおける現状の課題として、海

水温の予測を取り上げる。そして、海水温を予測するにあたって我々が解決しなければならない課題のうち、水温情報の精度向上について、解決手法とその評価実験について報告する。

2. 研究背景

2.1 養殖漁業および水産研究における水温情報の重要性

養殖漁業においては、水温情報が非常に重要となる。その理由は 2 つある。第一の理由は、イリドウイルス感染症 [6] など、養殖漁業に多大な被害を与える魚病にはそれが発生しやすい水温帯が存在することである。魚病の発生により弱った魚に対しては給餌量を抑える必要があり、必要以上の餌を与えてしまうと、魚の健康状態の悪化・病死に繋がってしまう。しかし、現場の水温を知ることができれば、それが魚の健康状態を知る指標となり、魚病による被害を抑えることが可能になる。第二の理由は、現場およびその周りの水温を知ること、潮の流れが今後どうなる

¹ 愛媛大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

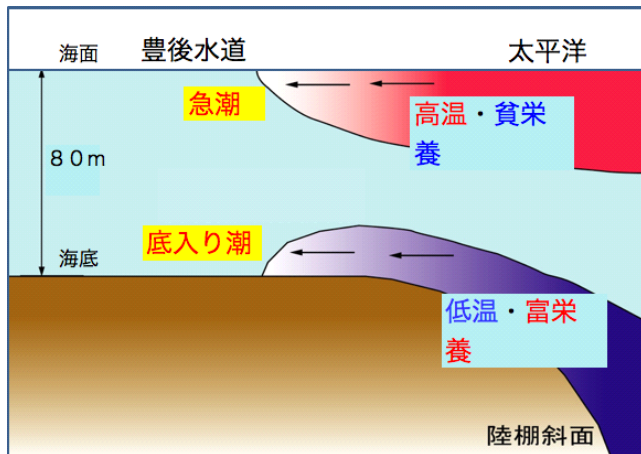


図 1 宇和海沿岸の潮の流れ



図 2 水温観測装置の配置

のか予測できることである。潮流が養殖漁業に与える影響度合はその時間や流入の厚み、範囲によって異なり、潮流状況に応じて給餌量の調整等を行う必要がある。よって水温を知ることでの対応を柔軟に行うことが可能となる。

また、水産研究においても水温情報は重要視される。過去の水温の時間変化を知ること、海洋物理学的観点から赤潮の発生予測を行うことができるからである。

2.2 海水温情報収集・告知伝達システム

2.2.1 課題

海水温情報収集・告知伝達システムが実装される前の状況を、漁業従事者および水産研究者の観点から述べる。

本システムが実装される前、漁業従事者は自身の現場の水温を知る手段がなく、現場の気温により、水温を推測していた。しかし、宇和海域では、海面近くで『急潮』と呼ばれる高温の潮が、海底近くで『底入り潮』と呼ばれる低温の潮が流入される（図 1 [7]）ために水温変化が激しく、実際の水温は漁業者の推測とは大きく異なるものであった。

この問題に対し、水産研究者は 1 ヶ月毎に宇和海域一円、24 ヶ所の定点で水温の調査を行っている。また、1 時間毎に水温を測定できる観測装置を海上に 5 基設置（その配置は図 2 参照）した。

しかし、急潮は多くの場合、2 週間間隔で発生するため、1 ヶ月毎の定点調査ではとらえきれないという問題や、5 基の水温観測装置だけでは、宇和海全域を包囲するものになっていないという問題があった。

また、測定された水温情報を即時漁業従事者へ告知伝達する手段も確立できていなかった。

2.2.2 システム概要

水温告知伝達に関する問題に対し、我々は図 3 のような情報収集・発信システムを構築した。

まず、2020 年 5 月現在 16 基（配置は図 2 の通り）の水温観測装置からなる、多深度（最小：1m、最大：60m）のセンサーネットワークシステムを構築した。本ネットワー

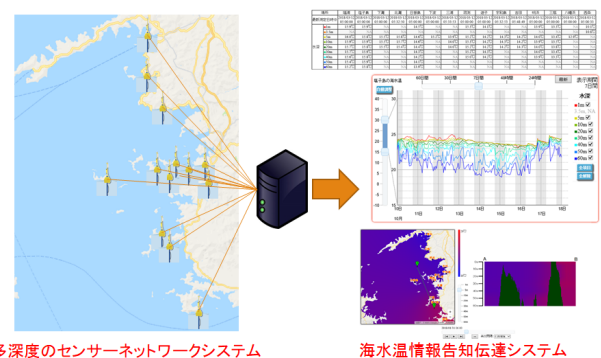


図 3 海水温情報収集・告知伝達システム

クシステムを構築することにより、宇和海全域を包囲、かつ多深度にわたる潮流状況の把握が可能になった。本ネットワークシステム構築の際、水温観測装置の設置に多大なコストを要するという問題があったため、安価でありながら、かつ漁業従事者および水産研究者が得る水温情報として十分な精度をもつ水温観測装置が開発された [8]。

次に、漁業従事者および水産研究者の要望に基づき、センサーネットワークシステム上で収集・蓄積された水温情報を現況情報として可視化・情報発信する海水温情報告知伝達システムを実装した。本システムを実装することにより、測定された水温情報を即時漁業従事者へ告知伝達する手段を確立させる。

2.3 水温観測装置

水温の測定に用いる水温観測装置には、大きく分けて、市販のものと、我々愛媛大学が開発したものの 2 つがある。市販観測装置と、愛媛大学開発観測装置 2 つの違いをまとめたのが、表 1 である。

前者は、30 分または 1 時間毎に 1 回水温を測定している。測定毎に異なる送信専用メールアドレスより、測定データが記述された電子メールを指定したメールアドレスへ送信する。

後者では、欠測を抑制し、かつ水温情報としての精度を

表 1 市販観測装置 vs 愛媛大学開発観測装置

	市販	愛媛大学開発
コスト	高	低
測定間隔	30 分または 1 時間	30 分
同時刻の測定回数	1 回	3 回
分解能	0.001°C	0.0625(1/16)°C
データ送信方法	電子メール送信	サーバと通信

高めるため、30 分毎に 3 回連続で水温を測定する（検証により各回の測定値が必ずしも同値にならないことがわっている）。本方式を採用することで、3 回の測定のうち 1 回が欠測または異常値（ビット誤りが原因で生じる、本来の水温とは大きく異なる値）であっても、残る 2 回の平均値を正常値として表示させるといった対応が可能となる。また、前者と違い、メールが届くのではなく、通信モジュールによりサーバに接続し、サーバ上に測定データを保存する。前者に比べると、安価になった分、分解能は劣るが、漁業従事者へのヒアリングより、0.1°C 単位で水温を知ることができれば十分ということがわかっており、1/16°C という分解能はその要求を十分満たすものといえる。

2.4 海水温情報告知伝達システム

2.4.1 システム概要

海水温情報告知伝達システムは、水温観測装置によって測定されたデータを、迅速に漁業従事者および水産研究者へ告知伝達することを目的とした情報発信システムである。

本システムは、海水温情報蓄積システムと海水温情報可視化システムの 2 つのサブシステムで構成されている。海水温情報蓄積システムでは、水温を測定した際、即時にデータの解読を行い、サーバ上にデータを蓄積する。海水温情報可視化システムは、サーバ上に蓄積されたデータを読み込み、Web ページ上に表やグラフ、分布図の形式で表示する Web アプリケーションである。

2.4.2 海水温情報蓄積システム

海水温情報蓄積システムでは、市販水温観測装置により送信されたメールに対し、受信したタイミングでその内容の解読を行い、データ部分を抽出する。抽出されたデータが、装置が設置されてから初めて測定されたデータであった場合、サーバ上にテキストファイル（ファイル名を送信元メールアドレスと同一とする）を作成し、そのファイルにデータを書き込む。そうでない場合は、サーバ上にある、送信元メールアドレスと同一のファイル名であるテキストファイルへデータを追記する。以上の方法により、サーバ上にデータが蓄積されていく。

2.4.3 海水温情報可視化システム

海水温情報蓄積システムによってサーバ上に蓄積されたデータは、海水温情報可視化システムを通して閲覧することができる。本システムは、いつでも、どこでも使えるようにするため、Web アプリケーションとして実装すること

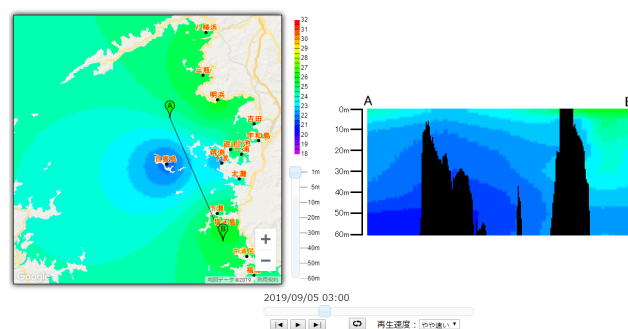


図 4 海水温情報告知伝達システムの実装機能例

で、マルチプラットフォームに対応させる。本システムを起動（Web ページにアクセス）すると、サーバ上に保管されているデータを読み込まれる。その後、利用者の要求に応じて、読み込まれたデータから動的に表やグラフ等が作成され、Web ページ上に表示される。

漁業従事者からは簡素なデータ表示、水産研究者からは詳細なデータ表示が求められていることから、Web ページの構成は、一般公開用ページとログインを要する水産研究者専用ページの 2 つとした。各ページでは、ボタンにより、『現在の状況』（各測点の、最新測定日時における測定データの表示）、『過去の状況』（各測点の、過去の測点データや、海水温の時間変化の表示）へ表示を切り替えることができる。

2.4.4 実装機能

養殖漁業者および水産研究者へのヒアリングにより定めた要求項目を以下に示す。

要求項目 1 海域の空間的広がりを視点とした海水温の現況情報および時間変化の可視化

要求項目 2 過去の測定データを利用者の端末へ保存

要求項目 1 に対しては、

- 観測点の地図表示
- 測定データを表形式で表示
- 海水温の現況をグラフ表示
- 海水温の時間変化をグラフ表示
- 宇和海全域の海水温時間変化を温度分布図を用いて三次元的に表示

以上 5 つの機能を実装した。要求項目 2 に対しては、測定データを csv 形式で利用者の端末へ保存する機能を実装した。

図 4 は、実装機能のうち、水温変化を温度分布図を用いて三次元的に表示する機能における表示例である。なお、この表示形式は、養殖漁業者へのヒアリングを通じて、養殖漁業者にとって見やすい形式を追求した結果である。

これらの機能を実装することによって、漁業従事者が収集された水温情報を閲覧できないという状況から、Web システムを利用して最新の水温情報をいつでも閲覧できるという状況へと変化した。また、水産研究者にとっても、水

水温情報が可視化されることによって解析にかかる手間が削減された。

2.4.5 本システム有効性の評価

情報処理学会・情報システムと社会環境研究会（IS）が発表している、情報システムの有効性評価のガイドラインによれば、“情報システムとは、企図する者（施主）が一定の意図を持って、個人、または組織の活動に変化をもたらそうとする個別一回性をもった働きかけである”，とある[9][10]。我々は本ガイドラインに則り、システム実装による影響，すなわちシステム有効性を定量的に評価するため、システムに対するユニークアクセス数や、アクセス者が1日に何回アクセスしたか等の傾向を調査した。

ユニークアクセス数については、1日300～700件あることがわかった。このユニークアクセス数と、平成29年の宇和海の養殖漁業経営体数が857[11]であることを踏まえると、愛媛県の養殖業界に与えた影響はとても大きいといえる。また、利用者のアクセス傾向調査については、ほぼ毎日定時に本システムを通して水温情報を閲覧している人や1日平均2回以上情報を閲覧している人等を確認できた。このことから、本システム実装が個人の活動に確かな変化をもたらしたといえる。

2.5 海水温情報告知伝達システムにおける現状の課題

本システムを通して提供される情報は、宇和海域における水温の現況および過去の時間変化である。しかし、漁業従事者へのヒアリングにより、現況や過去の測定情報だけでなく、1～2週間程度の近い未来の予報情報の必要性も感じている。

現状、水温予測に関しては、京都大の研究者らのベンチャー企業による取り組み[12]や、我々が開発したWebシステムと類似した機能を持つシステム『赤潮ネット』(<https://akashiwo.jp/>)の存在がある。前者は、海面上における水温の予測に留まっており、後者も、単一層（水深5m）における水温情報のみ提供されている。また、2.2.1節でも述べた通り、宇和海は海面近くおよび海底近くの潮流流入の発生により水温変化が激しいため、養殖漁業者からは多深度における水温情報が求められている。

これらのことがあって、養殖漁業者のみならず、水産研究者からも期待が向けられている。

本研究では、海水温情報告知伝達システムの新機能として、これまでに得た水温情報から、機械学習を利用して近未来の水温を予測し、その予報情報を表示する機能を提案および実装する。本機能を実装することにより、漁業従事者はこれまで事後対策しかできなかったものが、予報情報から事前対策も行うことができるようになり、生産性の更なる向上が見込まれる。

3. 海水温の予測

3.1 水温予測における課題

本研究を進めるうえで、我々が解決しなければならない課題は以下の通りである。

(1) 水温情報の精度向上

- 異常値の検出および排除手法の実装および評価
- 測点周囲における水温の補間精度向上

(2) 水温予測手法の検討・実装および評価

本稿では、第1課題における、異常値の検出および排除手法の実装および評価について述べる。

3.2 異常値の検出および排除

3.2.1 目的

高精度な海水温予報を提供するためには、予報に用いる現状および過去の水温情報も正確でなければならない。我々はこれまで、同水深に複数のセンサーを配置したり（点検する手間の増大が問題となっており、同時刻に連続して測定する手法で代用できることもあったため現在は撤廃されている）、同時刻に複数回測定させたりすることによって水温情報の精度向上を試みた。しかし、現状では、測定時にビット誤りが生じることで、実際の水温とは明らかに異なる値（異常値）が発信されてしまう問題がある。また、宇和海上のセンサーネットワークでは最深60mまで水温を測定していることから、ビット誤りの検出や訂正が正確に行えないという問題もある。

本稿では、観測装置より得られる水温情報の精度向上のため、水温の過去情報との比較等から、異常値を検出し、排除する手法を提案する。

3.2.2 目標

異常値の発生は、観測値の精度だけでなく、補間精度にも大きく影響するため、厳格な排除率が要求される。本研究では、異常値排除率（異常値発生回数に対する異常値排除回数の割合）99%以上を目標とする。

3.2.3 提案手法1

本研究において、最初に提案した異常値検出・排除手法は、同時刻における3回の測定のうち、最高値と最低値を異常値として排除する手法である。つまり、中央値を正常な測定値として扱う。

3.2.4 提案手法2

次に提案した異常値検出・排除手法は以下の通りである。

(1) 各回の測定値と比較するための基準値を以下のように決定する

- 過去1時間以内の異常値排除後のデータが存在しかつ、そのデータとの差が6/16°C未満となっている測定値が存在する場合は、過去データとの差が最も小さい測定値



図 5 小池と尻貝の位置

- そうでない場合は各回の測定値の中央値

(2) 基準値と各回の測定値をそれぞれ比較し、その差が閾値 ($2/16^{\circ}\text{C}$) 以上の測定値を異常値として排除する

本手法では、各回の測定値と基準値をそれぞれ比較し、あらかじめ定めた閾値以上であれば、その測定値を異常値として排除する。基準値を上記のように決定するのは、海水という環境を考えると、1時間の間に大きな温度変化が発生するとは考えられにくいため、その間に測定されたデータと比較することで異常値の検出ができるのではないかと考えたためである。表 2 および図 6 は、宇和海の小池（場所は図 5 の通り）に設置した観測装置における時間軸観点の温度差（各データとその過去 1 時間以内のデータの差）の度数分布（表 1 が示す通り、観測装置の分解能が $1/16^{\circ}\text{C}$ であることから、 $1/16^{\circ}\text{C}$ 刻みで算出）を示している。過去データとの比較に関する閾値 $6/16^{\circ}\text{C}$ は、この分布を考慮して決めたものである。また、基準値との比較に関する閾値は同時刻における測定値同士の比較であることを考慮して、過去データとの比較に関する閾値より厳格な、 $2/16^{\circ}\text{C}$ に設定する。

4. 提案手法 1 の評価

4.1 評価方法

評価方法としては、宇和海の尻貝（場所は図 5 の通り）に設置した観測装置の、2019 年 7 月 11 日から 7 月 28 日までのデータに提案手法を適用し、異常値排除率を算出した。

4.1.1 結果・考察

表 3 は、提案手法を適用した際の、全体の異常値排除率と、各深度における異常値排除率をそれぞれ示している。表 3 を見ると、異常値排除率は最高でも 62.5 % となっており、我々が目指す異常値排除手法として十分であるとは言えない。

5. 今後の予定

5.1 異常値の検出および排除手法について

提案手法 1 は、評価結果の通り、異常値排除手法として十分な手法とはいえないという結論に至った。提案手法 2 は、提案手法 1 を改善した手法であり、今後は提案手法 2 の評価を行う必要がある。

5.2 補間精度の向上について

海水温情報告知伝達システムでは、図 4 の機能を実装するにあたり、各測点周囲の水温を補間している。現行の補間手法では、平面上に対して逆距離加重法 (Inverse Distance Weighted : IDW) を、深さ方向に対しては線形補間を用いている。図 7 は、簡単な補間イメージである。

IDW とは、ある地点のデータを推定したいとき、周囲に存在する実測点との距離の 2 乗の逆数を実測データに対し加重することでその地点のデータを推定する方法である。本機能における平面上に対する補間では、地点 s における推定値 $\mu(s)$ を、以下の計算式により算出する。

$$\mu(s) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i(s) \mu_i}{\sum_{j=1}^n w_j(s)}, w_i(s) = \frac{1}{d(s, s_i)^2}$$

(n : 測点数, μ_i : i 番目の測点の実測値, $d(s, s_i)$: 地点 s と測点 s_i の距離, $w_i(s)$: 地点 s における測点 s_i の重み)

線形補間は、2 つの実測点の中間の 1 点における推定値を、近似的に一次式で表せるものとして推定する方法である。本機能における深さ方向に対する補間では、実測値 $\lambda(d_1), \lambda(d_2)$ の中間のある水深 $d(d_1 < d < d_2)$ における推定値を、以下の計算式により算出する。

$$\lambda(d) = \lambda(d_1) + \frac{\lambda(d_2) - \lambda(d_1)}{d_2 - d_1} (d - d_1)$$

しかし、現行の補間手法における補間精度（実測値との最大誤差）は、当初目標としていた 0.5°C を超えており、漁業従事者からは 0.1°C 単位の誤差が許容されない、よりクリティカルな精度が求められている。

今後は、補間手法の改善案を検討し、実装・評価する。現状では、平面上における補間手法となっている IDW にとって代わる手法としてクリギングを採用しようと考えている。クリギングでは、推定値を算出する前に、自己相関モデルに依存する、定量的な統計的従属性 (空間的自己相関) を見つけるため、バリオグラムと共分散関数を作成する。そして、推定の際に、求めた空間的自己相関を推定点との距離とともに加重する [13]。

クリギングは IDW を発展させた手法であり、クリギングを採用したことによって IDW より精度が改善されたことを報告した論文 [14] も存在するが、海水という環境下にも適用できるとは言いきれず、検証する必要がある。

表 2 時間軸観点の温度差度数分布 (表)

温度差	-8/16	-7/16	-6/16	-5/16	-4/16	-3/16	-2/16	-1/16	0	1/16	2/16	3/16	4/16	5/16	6/16	7/16	8/16
1m	5	6	14	16	25	43	106	1508	9057	1345	109	51	23	8	16	10	5
5m	3	3	6	19	39	57	170	1201	9452	1101	155	70	46	20	18	6	1
10m	0	3	9	9	12	32	74	1177	9833	1083	83	36	16	7	7	5	4
20m	0	1	1	5	12	19	55	1039	10189	964	43	19	13	7	11	3	3
30m	2	0	7	11	15	14	19	988	10442	839	23	17	11	6	4	7	3
40m	2	6	4	9	5	11	26	1041	10185	974	24	12	6	9	8	11	7

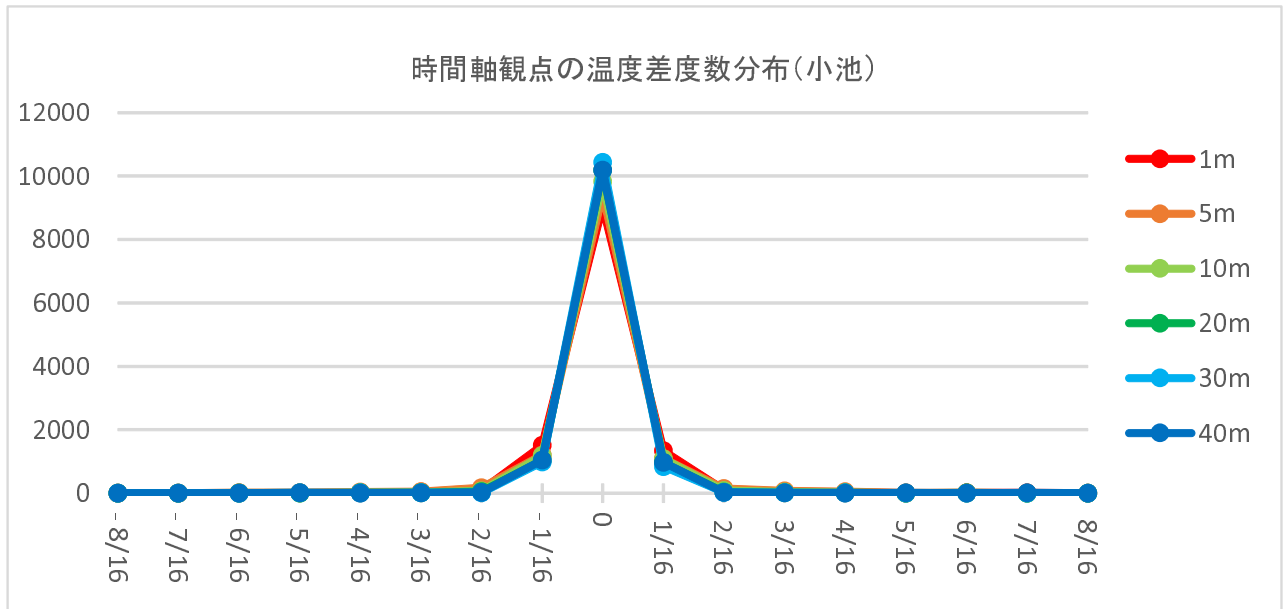


図 6 時間軸観点の温度差度数分布 (グラフ)

表 3 提案手法 1 を適用した際の異常排除率

		異常値発生回数	異常値排除回数	異常値排除率
合計		664	381	57.4%
内訳	1m	269	168	62.5%
	5m	119	65	54.6%
	10m	96	50	52.1%
	15m	92	49	53.3%
	20m	88	49	55.7%

参考文献

- [1] 愛媛県庁, “愛媛県漁業の地位 (平成 30 年)”, <https://www.pref.ehime.jp/h37100/toukei/documents/1-1.pdf> (2020 年 05 月 15 日参照).
- [2] 愛媛県庁, “海域別漁業産出額の推移 (総括: 昭和 39 ~ 平成 30 年)”, <https://www.pref.ehime.jp/h37100/toukei/documents/3-1-2.pdf> (2020 年 05 月 17 日参照).
- [3] 安藤顕人, 岡本拓哉, 遠藤慶一, 黒田久泰, 樋上喜信, 小林真也, “赤潮や魚病の発生予測のための海域情報収集支援システムの開発”, 情報処理学会第 78 回全国大会講演論文集 (1), pp.937-938, 2016.
- [4] 末廣恵海, 高市 嶺, 藤橋卓也, 遠藤慶一, 黒田久泰, 小林真也, “赤潮被害への早期対策を可能とする海域情報配信システムの開発”, 情報処理学会第 80 回全国大会講演論文集 (1), pp.549-550, 2018.
- [5] 阿草 裕, 藤橋 卓也, 遠藤 慶一, 黒田 久泰, 小林 真也, “水産業の生産効率改善を目的とした海水温情報告知伝達システムの開発”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム論文集 (DICOMO 2019), pp.1760-1771, 2019.
- [6] 中島 員洋, 栗田 潤, “マダイイリドウイルス病”, ウイルス 第 55 巻 第 1 号, pp.115-126, 2005.
- [7] 武岡英隆, “高度海況情報による水産業支援”, 愛媛ジャーナル 31(5), pp.84-87, 2017.
- [8] 荒木康輔, 藤橋卓也, 遠藤慶一, 黒田久泰, 小林真也, “海況予報情報サービスのための海水温連続観測装置の開発”, 情報処理学会第 80 回全国大会講演論文集 (4), pp.553-554, 2018 年 3 月.
- [9] 情報処理学会・情報システムと社会環境研究会, “情報シ

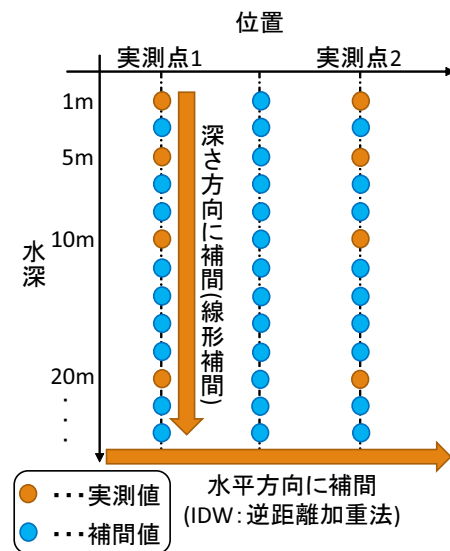


図 7 補間イメージ

ステムの有効性評価 量的評価のガイドライン 第 1.1 版”, 2012 年 11 月.

- [10] 情報処理学会・情報システムと社会環境研究会, “情報システムの有効性評価 質的評価のガイドライン 第 1.00 版”, 2013 年 9 月.
- [11] 愛媛県庁, “主として営んだ漁業種類別経営体数の推移 (昭和 35～平成 30 年)”, <https://www.pref.ehime.jp/h37100/toukei/documents/2-1-2.pdf> (2020 年 05 月 17 日参照).
- [12] 京都新聞, “高精度ナビで効率よく出漁 京大ベンチャー、海水温や潮流予測配信”, <https://this.kiji.is/576561761860404321?c=39546741839462401> (2020 年 02 月 12 日参照).
- [13] Hans Wackernagel, “Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications”, Springer, 1995. (青木 謙治 (訳), “地球統計学”, 森北出版, 2003.)
- [14] Reiner Jedermann, Javier Palafox-Albarrn, Pilar Barreiro, Luis Ruiz-Garca, Jose Ignacio Robla, Walter Lang, “Interpolation of spatial temperature profiles by sensor networks”, SENSORS, IEEE, pp.778-781, 2011.