

海水温情報提供システムにおける 非観測点海水温補間の精度改善手法の提案

阿草 裕¹ 遠藤 慶一¹ 黒田 久泰¹ 小林 真也^{1,2}

概要：養殖漁業においては、現場周囲の海域における海水温情報が非常に重要である。我々は、愛媛県および愛媛大学の水産研究機関と協力して、愛媛県の宇和海域に多深度の海水温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海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 システムを開発した。本システムが提供する、海水温時間変化の三次元可視化機能では、観測情報を用いて、非観測点の海水温を補間した情報をアニメーション型で可視化表示できる。しかし、現状の補間手法では、補間地点によっては、漁業従事者にとって満足できる精度を達成できないことがある。そこで本研究では、海水温の補間精度を改善する手法を提案・実装することで、漁業従事者へより信頼性のある情報を提供することを目指す。本稿では、海水温補間精度改善手法の検討および評価について報告する。

1. はじめに

愛媛県は、全国 3 位の漁業生産高（令和元年の年間生産高：約 862 億円 [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 653 億円 [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、愛媛大学南予水産研究センターおよび愛媛県農林水産研究所 水産研究センターの協力のもと、海水温やプランクトン濃度等の海況情報を現場の漁業従事者へ告知伝達するシステムの実現に取り組んでいる [3], [4], [5]。本稿では、海水温情報を告知伝達するシステムにおける、非観測点の補間精度改善手法を提案し、その評価結果を報告する。

2. 研究背景

2.1 養殖漁業における水温情報の重要性

愛媛県宇和海の養殖漁業において、海水温を見る理由として以下の 2 点が挙げられる。

第一の理由は、イリドウイルス感染症 [6] 等の魚病には、それが発生しやすい水温帯が存在することである。漁業従事者へのヒアリングによれば、魚病に感染した魚が確認された生簀への対策方法として餌止め（給餌量の抑制）を行

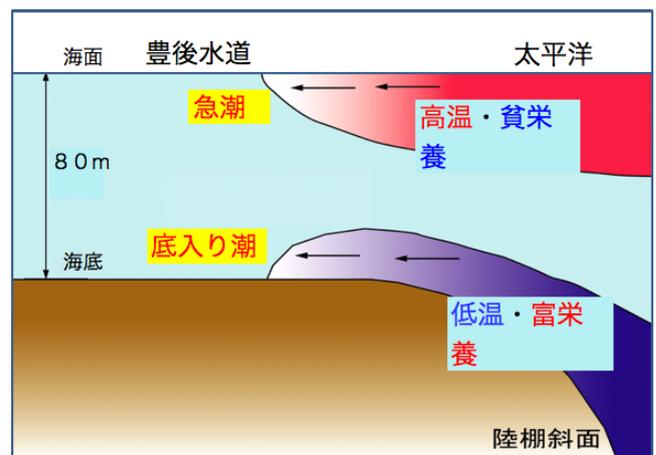


図 1 宇和海沿岸の潮の流れ

うという。海水温情報は、魚の健康状態を知る指標となるため、海水温を見ることで魚病の早期対策に繋がる。

第二の理由は、南北の水温を比較することによって、高温な潮流（急潮）や低温な潮流（底入り潮）（図 1）が北上する様子を把握できることである。これら 2 つの海域現象は、愛媛県宇和海の養殖漁業生産に大きく関わる [7] ため、これらの現象を監視できる体制の実現が求められる。

また、水産研究においても海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によって、海洋物理学の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。

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

² 愛媛大学南予水産研究センター
South Ehime Fisheries Research Center, Ehime University

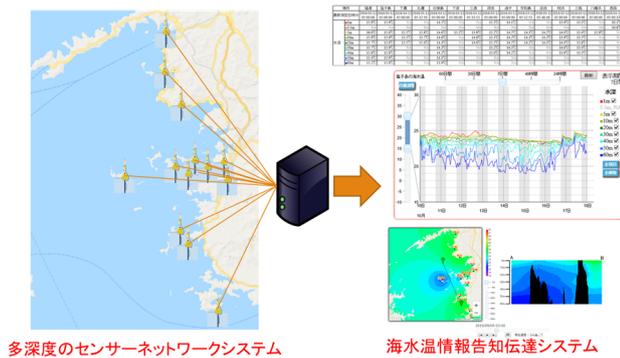


図 2 海水温情報収集・告知伝達システム

2.2 海水温情報収集・告知伝達システム

海水温情報を監視するため、南予水産研究センターおよび愛媛県水産研究センターでは、1時間または30分毎に海水温を測定する多層観測装置を、養殖漁場の生簀等に設置している(2021年10月現在17基)。これらの装置設置の際には、企業製の装置が非常に高価であ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情報として十分な精度をもつ観測装置を、愛媛大学が独自に開発している[8],[9]。

観測装置から得られる情報を彼らへ告知伝達する際の課題として、以下3点が挙げられる。

- (1) 装置により異なるフォーマットのデータを統一形式へ変換し、データベースへ蓄積する仕組みの実現
- (2) 情報入手に対する制限(時・場所)のない情報告知伝達システムの実現
- (3) 空間的広がりを見点とした海水温情報可視化機能の実現

我々はこれらの課題を解決するため、図2のような情報収集・発信システムを実装した。

まず、課題(1)の解決策として、多深度のセンサーネットワークシステムを実装した。本システムでは、様々なフォーマットで送られてくるデータを、受け取ったサーバ上のプログラムにより統一形式に変換し、データベースへ蓄積する。本システムにより、これまで個々に独立していた観測装置間にネットワークが構成され、海水温情報の一元管理が可能となる。

次に、課題(2),(3)の解決策として、海水温情報告知伝達システムを実装した。課題(2)の解決策として、本システムをWebアプリケーションとして開発する。これにより、漁業従事者は漁場でスマートフォンから、水産研究者は研究所内PCから、リアルタイム情報を入手できる。また、各環境における操作の容易性および必要な情報の違いを反映したレイアウト・機能を実現している(図3)。課題(3)の解決策として、本システムでは、観測装置から得られた水温情報を、図4のような、漁業従事者および水産研究者の目的・業務に適した形式として可視化する。

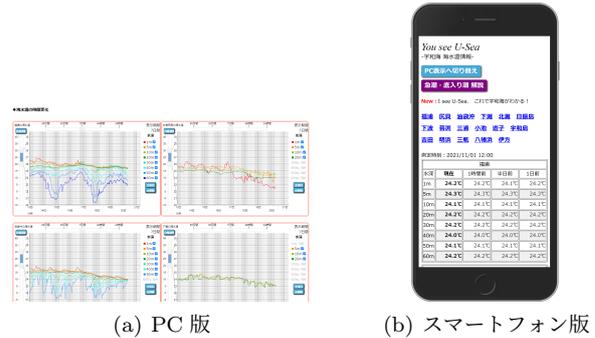


図 3 環境によるレイアウト・機能の違い

2.3 三次元可視化機能

海水温時間変化の三次元可視化機能は、海水温情報告知伝達システムが提供する機能の1つである。

本機能では、観測情報から、非観測点の海水温を補間し、宇和海全体の海水温時間変化を図4の形式でアニメーション表示する。画面上左に深度毎の平面温度分布図を表示し、右に地図上で指定した2点間で切った断面温度分布図を表示することで三次元的な可視化を実現している。本機能により、急潮や底入り潮が北上する様子を容易に把握できる。

2.4 非観測点の補間手法

現状の補間手法では、補間方向を水平方向と深さ方向の2軸としている。水平方向に対しては逆距離加重法(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5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[10]。本機能における水平方向に対する補間では、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。

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

2.5 現行補間手法における問題

海水温の補間精度について、漁業従事者へのヒアリングにより、誤差 0.1°C 以内の精度が求められていることがわかっている。しかしながら、現行手法では、補間地点に

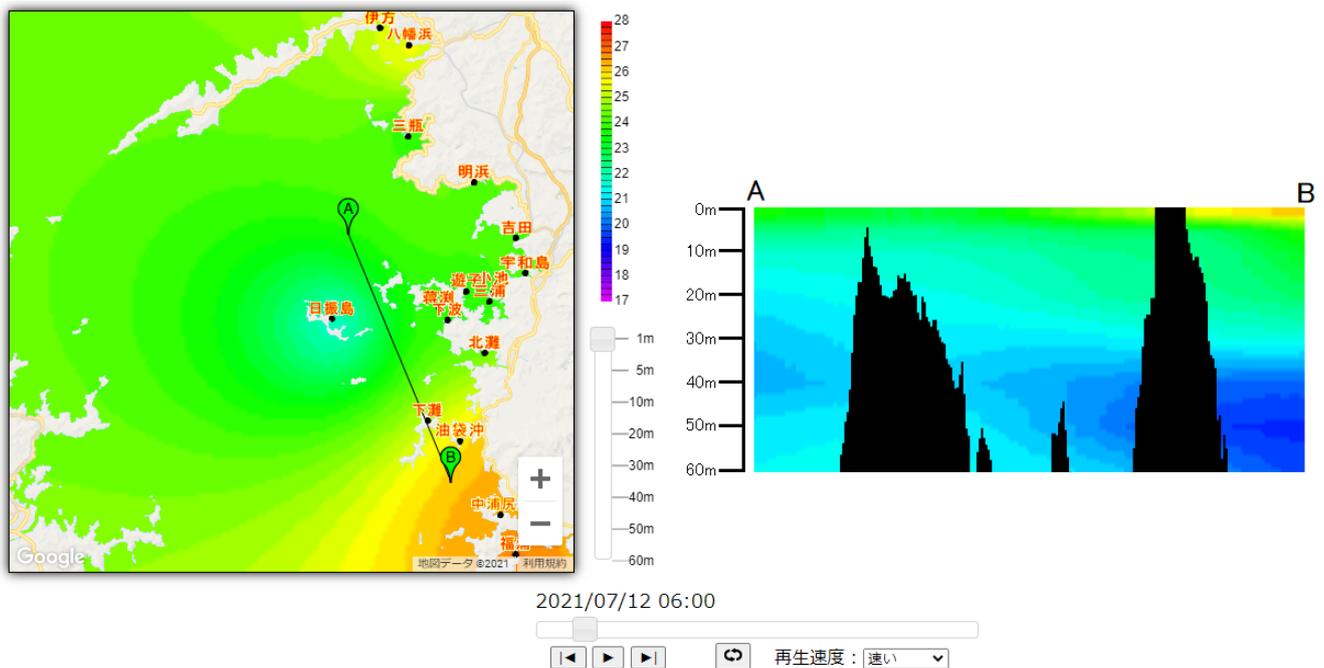


図 4 海水温情報告知伝達システムの実装機能例

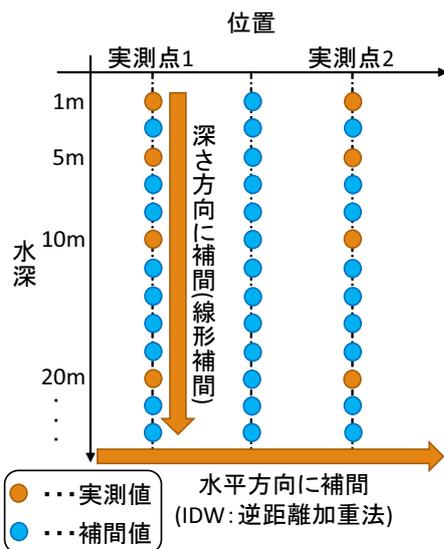


図 5 補間イメージ

表 1 現行補間手法の評価実験結果

水深	1m	5m	10m	20m	30m	40m
最大誤差	2.40	3.26	4.91	4.78	0.72	1.04

よっては、要求される精度を達成できないことがある。表 1 に、評価実験より得られた、現行手法における、深度 1m から 40m までの、各深度の最大誤差を示す。本評価実験では、2018 年の実測データ（観測装置ではなく、調査船によって得られた定点観測データ）と補間データを比較している。表 1 の通り、1m から 40m までのすべての深度において最大誤差が 0.1°C を超える結果となっている。

このような結果となった要因としては、急潮および底入

表 2 現行補間手法の評価実験結果（急激な温度変化が生じた場合を除外）

水深	1m	5m	10m	20m	30m	40m
最大誤差	2.40	1.04	0.69	1.58	0.72	1.04

り潮による急激な温度変化が生じた場合に、実測データを使った補間では正確な推定ができないことが挙げられる。よって、急激な温度変化が生じた時には別の推定手法を適用する必要がある。また、表 2 は急激な温度変化が生じた時に補間したと思われる（水温観測装置による観測値から判断）実験データを除いた場合の実験結果であるが、その場合でも要求精度は達成できていない。このことから、現状の補間手法、特に水平方向の補間手法を改善する必要がある。

本稿では、水平方向における補間手法の改善案を検討し、実装・評価する。

3. 提案手法

3.1 概要

本研究では、水平方向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、クリギングを採用する。

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）を見つけるために、空間的構造を解析する。空間的構造の解析では、バリオグラム雲（標本対の空間的距離に対する非類似度（標本値の差分の 2 乗））を算出する。そして、推定の際に、求めた空間的自己相関（バリオグラム雲に対し、自己相関モデルで近似した理論バリオグラム）を推定地点の距離とともに加重する [11]。

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 [12] も存在する。しかし、海水という環境下においても改善されるとは言えず、検証する必要がある。

3.2 空間的構造の解析

図 6(a) に、2020 年 8 月 15 日の 12 時に測定された海水温データから形成されたバリオグラム雲を示す。これを含め、過去の海水温データから形成されるバリオグラム雲は、ほとんどが時季に関わらず、空間的距離が 20000~30000m を超える標本対に関しては非類似度が発散していくという特徴が見られる。このことから言えることは、推定位置からの距離が 20000m 以内の標本との相関性は認められるが、それ以外の標本とは相関性がないことである。したがって、補間に利用する標本は、推定位置から 20000m 以内の標本とするのが適切だと考えられる。

また、図 6(b) のように、空間的距離が 20000m 以内の標本対であっても、高い非類似度となる場合があるが、これは、急潮等によって一部の海域で急激な温度変化が発生したことが原因だと考えられる。実際の水温推移 (図 7) から、急潮が福浦 (南) から油袋 (北) へ北上することにより、急激な温度上昇が発生していることを確認している。

3.3 提案手法の実装

空間的構造の解析を踏まえ、クリギングアルゴリズムを実装する。

実装に際しては、Python のクリギング用モジュールである、PyKrig を用いた。近似する自己相関モデルには、空間的構造の解析結果を考慮し、ある距離 (シルと呼ばれる) に達するまでは自己相関 (傾き) が徐々に小さくなり、超えた後は 0 になる、球型モデル (図 8[13]) を採用する。

4. 評価

4.1 評価目的

実測データと補間データの比較を現行手法および提案手法双方で行う。その結果を比較することで、提案手法が現行手法より精度が改善されている、かつ漁業従事者が要求する精度 (最大誤差 0.1°C 以内) を満たすか検証する。

4.2 評価手法

本研究では、以下 2 つの評価実験を実施した。

- (1) 観測装置の測定データを比較対象とした評価実験
- (2) 調査船による月例観測データを比較対象とした評価実験

評価実験 (1) では、全測点の中から 1 つの測点を取り除いた状態 (その測点における実測値を補間計算に用いない) で補間計算を行う。その後、その測点位置の補間値と、取

表 3 各補間精度評価結果

	現行手法 (IDW)	提案手法 (クリギング)
福浦	1.42	1.43
尻貝	0.64	0.91
油袋	0.52	0.51
下灘	0.39	0.48
北灘	0.18	0.20
日振島	0.26	0.15
下波	0.12	0.13
蔣測	0.02	0.01
遊子	0.14	0.03
宇和島	0.39	0.24
吉田	0.21	0.01
明浜	0.23	0.37
三瓶	0.25	0.13
八幡浜	0.46	0.39
伊方	0.22	0.22

り除いた測点における実測値を比較する。これを全測点に対し行い、誤差を算出した。

評価実験 (2) では、調査船による月例観測データ (計 20 測点, 2019 年 9 月~2020 年 9 月まで計 260 個のデータ) と補間値の差を算出した。

4.3 実験結果および考察

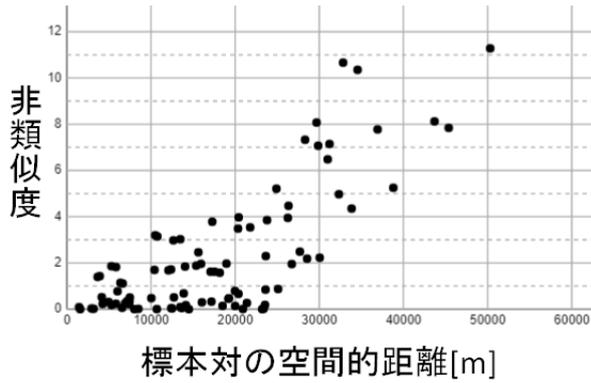
評価実験 (1) について、2020 年 12 月 24 日 10 時のデータを用いた評価結果を表 3 に示す (各測点の位置は図 9 の通り)。表中の青字は現行手法と比べ 0.05°C 以上の改善がみられた測点、赤字は 0.05°C 以上悪化してしまった測点を示している。図 9 と照らし合わせるとわかるが、観測領域のうち、遊子や吉田等、観測装置が密集している領域で特に改善効果が現れている。しかし、IDW と同様、補間地点により、要求精度を達成できないことがある。

次に、評価実験 (2) について、水深 5m における評価結果 (各測点における最大誤差・最小誤差・平均誤差) を表 4 に示す。各測点の位置は図 10 の通りである。この結果を見ても、提案手法が現行手法より優れていると言えず、補間地点により現行手法より精度が悪化することが多いことがわかる。

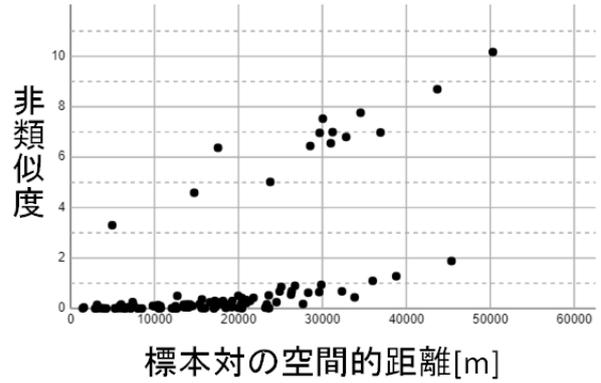
以上の実験結果を踏まえると、海水温の観測データのみを用いた推定手法で要求精度を達成することは不可能であると考えられる。

5. おわりに

本稿では、海水温情報告知伝達システムの三次元可視化機能における、非観測点の補間精度改善手法を提案し、その評価を行った。評価結果から、提案手法は、補間地点により現行手法より効果が改善されることがあるが、現行手法と同様、要求精度を達成できないことがあることがわかった。



(a) 2020年8月15日12時の測定データ



(b) 2020年4月13日0時の測定データ

図6 バリオグラム雲



図7 急潮による急激な温度上昇の様子

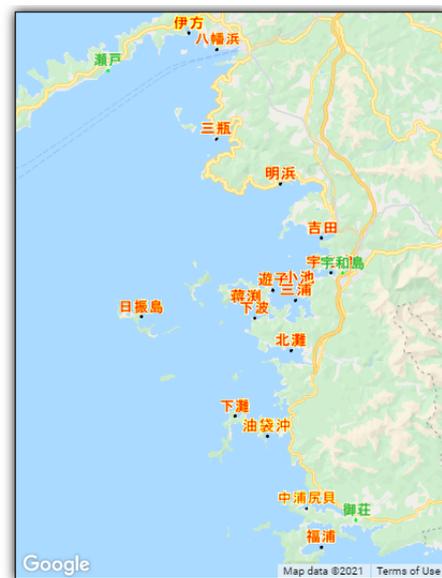


図9 各測点の位置 (赤文字が海水温観測装置)

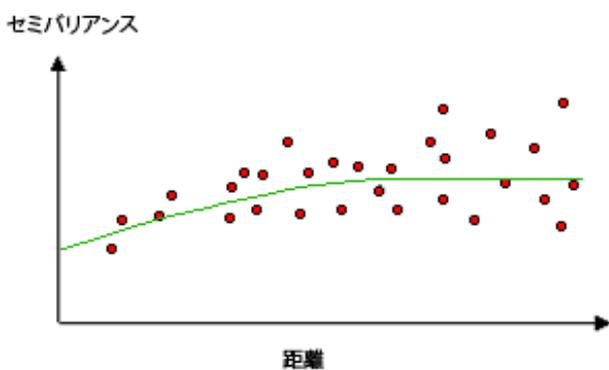


図8 球型モデル

今後は海水温観測データに加え、海水温に影響を及ぼすと考えられる観測データ(気象データ等)も参照する推定手法を検討する必要がある。

謝辞 現行手法および提案手法の評価実験に用いた、調査船による月例観測データは、愛媛大学沿岸環境科学研究センター(CMES)より提供いただいた。CMESの先生方

表4 各手法の評価結果

	最大誤差		最小誤差		平均誤差	
	現行手法	提案手法	現行手法	提案手法	現行手法	提案手法
測点1	1.3	1.7	0.01	0.05	0.4	0.8
測点2	1.3	1.5	0.00	0.11	0.6	0.7
測点3	1.4	1.5	0.03	0.14	0.7	0.8
測点4	3.0	2.7	0.16	0.13	1.0	1.0
測点5	1.5	1.7	0.03	0.13	0.6	0.8
測点6	2.5	2.5	0.00	0.02	0.6	1.0
測点7	1.2	1.3	0.01	0.03	0.4	0.6
測点8	2.4	2.1	0.02	0.01	0.9	0.8
測点9	2.5	2.0	0.02	0.09	0.9	0.7
測点10	2.2	2.0	0.04	0.00	0.5	0.5
測点11	1.5	1.3	0.03	0.07	0.6	0.4
測点12	1.5	1.1	0.02	0.06	0.6	0.3
測点13	1.4	1.3	0.01	0.02	0.6	0.6
測点14	1.9	2.4	0.03	0.02	0.7	1.0
測点15	2.1	2.9	0.03	0.06	0.8	1.1
測点16	1.4	1.9	0.01	0.03	0.5	0.7
測点17	2.3	2.4	0.32	0.41	1.0	1.1
測点18	1.0	1.0	0.01	0.02	0.5	0.6
測点19	2.6	2.5	0.06	0.08	0.9	1.1
測点20	2.7	3.6	0.20	0.54	1.3	1.8

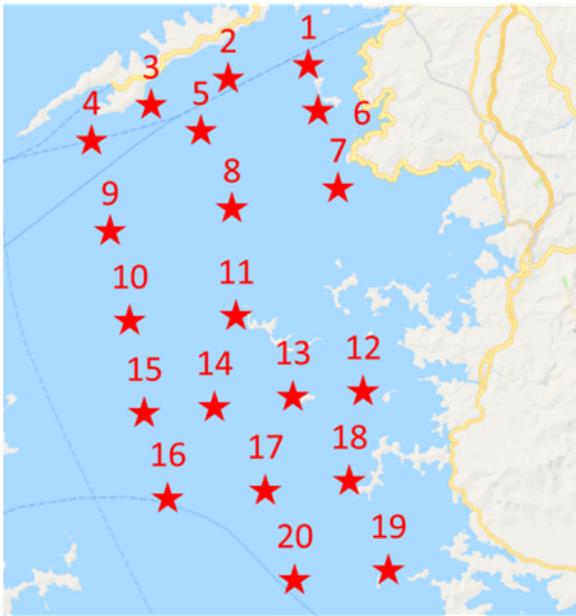


図 10 各測点の位置

に深謝する。

参考文献

- [1] 農林水産省：“農林水産統計 令和元年 漁業算出額 統計結果の概要”，p.8, 2021.
- [2] 愛媛県庁：“海域別漁業産出額の推移（総括：昭和 39 年～令和 1 年）”，<https://www.pref.ehime.jp/h37100/toukei/documents/3-1-2.pdf> (2021 年 10 月 28 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] Yu Agusa, Takuya Fujihashi, Keiichi Endo, Hisayasu Kuroda, Shinya Kobayashi: “Development of seawater temperature announcement system for improving efficiency of fishery industry”, Journal of Information and Telecommunication, 2020. doi:<https://doi.org/10.1080/24751839.2020.1824153>
- [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.115-125, 2005.
- [7] 武岡英隆：“豊後水道の急潮と底入り潮”，沿岸海洋研究 58 巻 1 号, pp.19-43, 2020. doi:<https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.002>
- [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.
- [9] 井村洋介, 遠藤慶一, 黒田久泰, 小林真也：“多深度海水温連続観測装置の平均修復時間短縮を目的とした自己診断機能の開発”，2020 年電子情報通信学会総合大会 情報・システム講演論文集 (1), p.101, 2020.
- [10] Meijering, Erik: “A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing”, Proceedings of the IEEE, 90 (3), pp.319-342, 2002.
- [11] 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.)
- [12] Reiner Jedermann, Javier Palafox-Albarrán, Pilar Barreiro, Luis Ruiz-García, Jose Ignacio Robla, Walter Lang: “Interpolation of spatial temperature profiles by sensor networks”, SENSORS, IEEE, pp.778-781, 2011.
- [13] Environmental Systems Research Institute: “How Kriging works”, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm> (2021 年 11 月 01 日参照).