
報 告

東北地方の養殖漁業のための沿岸水温予測方法の紹介

中川 憲一*・福田 義和**・金子 秀毅**・中村 寛**・中村 辰男***

要 旨

仙台管区気象台では、海洋情報の利活用を推進するために、ユーザーと対話を行い、養殖漁業において沿岸水温の予測についてのニーズがあることを把握した。これらのニーズに対して、水産関係試験研究機関から提供された水温観測値や、府県天気予報や府県週間天気予報、異常天候早期警戒情報で発表されている気温予測、海洋モデルの水温予測値を利用して、1週間先までの日々の水温や2週間先の7日間平均水温を予測する手法を開発し、精度検証を行った。開発したこれらの予測手法は、ユーザーから求められた精度をおおむね満たしており、水産関係試験研究機関が漁業者向けに発信している情報に利用されている。一方で、予測手法や予測地点、予測する季節によって予測精度は異なっており、様々な予測地点や予測する季節に対して最適な予測手法を選定する方法の確立が課題である。今後は、検証事例をさらに増やす必要があると考えている。

1. はじめに

平成 25 年 10 月、地方における気候や海洋に関する情報を発表する地球環境・海洋課が各管区気象台・沖縄気象台に発足した。これを契機に、仙台管区気象台では、気象台が発表する気候情報や海洋情報が各種産業や防災分野で幅広く活用されることを目指し、東北地方の海洋情報のユーザーとの対話を行った(吉田ほか, 2015)。

ユーザーとの対話では、特に水産関係試験研究機関(東北区水産研究所及び各県水産試験場など)に出向いての意見交換を重点的に行った。意見交

換の中で、東北地方ではノリ、ワカメ、カキ、ホタテガイなどの養殖漁業が盛んだが、養殖作業は時期によって水温の影響を大きく受けるため、被害の軽減や生産量の増大のために、沿岸水温を予測することができれば望ましいという話があった。このようなニーズに対して、仙台管区気象台は、宮城県水産技術総合センター(以下、宮城水技センター)と連携して、ノリ養殖漁業に資するための1週間先までの1日ごとの沿岸水温の予測方法を開発した。また、宮城県水産技術総合センター気仙沼水産試験場(以下、気仙沼水試)と連

* 仙台管区気象台気象防災部地球環境・海洋課

** 仙台管区気象台気象防災部地球環境・海洋課(現地球環境・海洋部海洋気象課海洋気象情報室)

*** 仙台管区気象台気象防災部(現地球環境・海洋部地球環境業務課)

(平成 30 年 5 月 18 日発行)

携して、ワカメ養殖漁業に資するための2週間先の7日間平均の沿岸水温を予測する方法を開発した。本稿では、これまでの取組みで得られた養殖漁業における海洋情報についてのニーズ、東北地方における養殖漁業のために開発した沿岸水温予測手法とその精度、宮城水技センターや気仙沼水試での利用状況について紹介する。

2. 養殖漁業の概要と海洋情報に対するニーズ

東北地方ではノリ、ワカメ、カキ、ホタテガイなどの養殖漁業が盛んである。本章では、ユーザーとの対話で得られた東北地方沿岸域で行われている各養殖漁業の概要や、海洋情報に対するニーズについて紹介する。

2.1 ノリ養殖漁業

宮城県のノリ養殖は、全国第5位の生産量であると共に、ノリ生産の北限であることから日本で季節的に一番早くノリ養殖に取り組むことができる。

ノリは春から夏(3~8月)にかけて糸状体と呼ばれる形で生長し、水温がある程度下がると殻胞子と呼ばれるノリの種を放出する。ノリ養殖では、この種をノリ網に付ける作業を8~9月頃行う(採苗)。ノリは冷凍・解凍しても生存できるため、この時期に多くの網に種をつけ、発芽に適した水温になるまで網を冷凍庫に保管する。発芽に適した水温の上限は23℃前後とされており、漁場の水温が安定して23℃を下回るとノリ網の張り込みを行い、ノリの芽を9月から10月にかけて育てる(育苗)。水温がこれより高い状態では、幼芽基部の発達の遅れや細胞の配列異常が発生しやすくなる。育苗期間中はノリ以外の雑海草を漁場から取り除き、生命力のある強いノリだけを残すため、潮の干満を利用してノリ網を海の中から空気中に一定期間出す(干出)。干出は水深が浅く、穏やかな海域で行うのがよいとされ、宮城県では主として松島湾で行われている。

ノリの芽が2~3 cmに生長すると、石巻湾や仙台湾の沖の漁場にノリ網を移して育てる(本養殖)。ノリの葉長が20 cmくらいになる10月下旬頃からは収穫(摘採)を始め、本養殖は4月まで

続けられる。ノリが生長してくると赤ぐされ病の被害が懸念される。赤ぐされ病は藻菌類の赤ぐされ病菌の寄生に起因する病気であり、赤錆色の円形の斑点として認められはじめる。赤ぐされ病が発症した場合は、早期に摘採したり活性処理(酸処理)により殺菌したりする対策をとる必要が生じるが、水温が10℃以下になると赤ぐされ病菌は不活発になる(宮城県, 1999)。

ノリの養殖では、水温が、9月頃に安定して23℃以下になる時期、11~12月頃に安定して10℃以下になる時期を把握できれば、水温変化によるノリの被害を軽減できるとされ、作業が計画的に進められ生産量の向上が期待できる。特に、ノリ網を張る時期を決めるための条件は厳しく、網を張った後に水温が23℃よりも高い状態が続いた場合、大きな被害が生じる。このため、内湾で水温変化が比較的大きい松島湾において、安定して23℃以下になる時期を見極めるためには、日単位の水温予測が重要で、1週間程度先までの日別沿岸水温を±1℃の誤差の範囲内で予想するニーズがあることが意見交換の中で分かった。

2.2 ワカメ養殖漁業

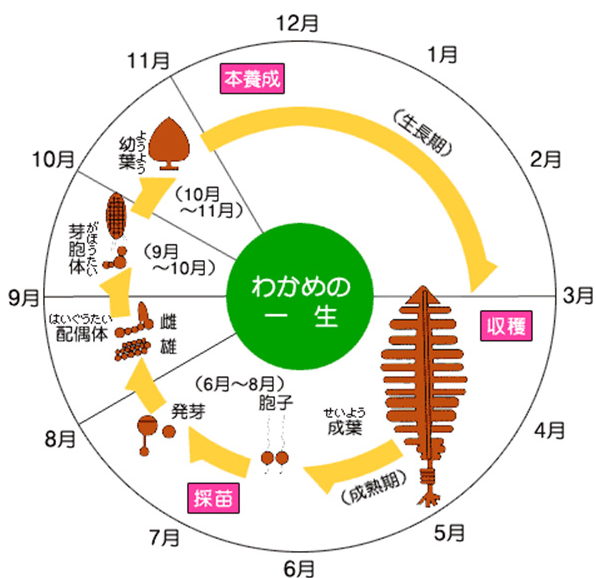
三陸沿岸のワカメ養殖は、全国で生産されるワカメの約7割にも上る。ワカメ養殖の作業は、第1図(ワカメの生活史)のサイクルに合わせて行われるが、時期によって水温の影響を大きく受けるため、作業のタイミングを誤ると経済的な損失が大きい。

養殖では、6月頃になるとワカメのメカブから放出した遊走子(胞子)を人工的に糸(種糸)に付着させる作業(採苗)を行う。遊走子は水温が14~20℃のときに活発に放出され、三陸沖では6~8月が採苗の適期にあたる。遊走子は着生後3日くらいで配偶体となる。配偶体はその後、雌雄に分かれて水温が23℃以下になると成熟して受精し、芽胞体(幼芽の初期状態)になる。芽胞体の生育に適した水温は16~18℃である。また、水温が20℃以上になると発芽した幼芽が脱落することが多い。一方で、配偶体は、弱光下で水温23℃以上の環境に保つと、雌雄に分かれず成熟が停止する(休眠状態)。この性質を利用し、

養殖業者は、夏の間採苗器に入れたワカメの種を水深の深い所に沈めて配偶体を大きく増やし、秋に水温 20℃以下になった頃を見計らって、採苗器を浅い場所に引き上げ芽胞体の発生を促進させる作業（芽出）を行う。11月頃には、水温低下と発芽の状況を見ながら、ワカメがある程度生長した種糸を養殖用ロープに巻きつけ本格的に育てる（本養成）。翌年の3月頃から、長さが1～2mに成長したワカメを刈り取り収穫する（宮城県、1999）。

作業の中で、芽出するタイミングを誤ると特に経済的な損失が大きい。このため、養殖業者にとって、9月頃に水温が安定して20℃以下となり、芽出作業を行う上で最適な時期を早めに把握することは作業効率の観点からとても重要である。本養成でも水温の低下状況に応じた作業が必要である。このような時期を早めに把握することを含め、9～12月における2週間先の沿岸水温を予想するニーズがあることが、意見交換の中で分かった。

また、水産関係試験研究機関との意見交換では、ワカメ養殖に影響を及ぼすのは水温だけでなく、収穫の際に風が止んで海の成層が強まるとプランクトンの影響でワカメが色落ちするので、風が止む（冬型の気圧配置がゆるむ）タイミングが事前にわかれば効率的な収穫に役立つとの話もあった。



第1図 ワカメの生活史
(岩手県漁業協同組合連合会ホームページより引用)

2.3. カキ養殖漁業

カキ養殖について、具体的な水温予測のニーズを得ることはできなかったが、養殖の概要を以下に説明する。

ノリやワカメとは異なり、一般に養殖カキは出荷できるまでに1年以上の歳月を要する。

まず、数十枚ものホタテガイの殻を半分ずつ同じ向きに針金で通し、一本の棒状にする「原盤」を作る。カキの放卵時期の7～8月に、この原盤を海中に設置し、カキの幼生を付着させる。この作業時の海水温の適温は24℃とされるほか、風や潮流によって幼生が流されることもある。原盤に幼生が付着すると、干満差の大きな所（例えば、石巻周辺の万石浦）へ移動し、ノリ養殖と同様、干出により他の生物の付着を防ぎ、強いカキだけが残るようにする（抑制、9～3月）。

採苗した年の翌年の3～4月にカキが指の爪ほどの大きさになると、それぞれの養殖場へ戻して原盤を解き、種ガキの付着したホタテの貝殻をロープのよりの間に挟みこんで海中5mほどに沈めて本養成が始まる。その後、栄養の豊富な沖合に移動するなどして2～3年目の秋に収穫する。

2.4 ホタテガイ養殖漁業

ホタテガイの生産量は国内の都道府県別では北海道が最も多いが、東北では青森県、宮城県、岩手県の順に多く、特に青森県の陸奥湾でホタテガイの養殖が盛んに行われている。ホタテガイ養殖について、具体的な水温予測のニーズを得ることはできなかったが、養殖の概要を以下に説明する。

陸奥湾では春（2～4月）にホタテガイが産卵期を迎え、水温上昇の刺激により海中に卵子や精子の放出が始まり海中で受精する。その後、1週間程度で海中を浮遊する幼生となり、40日ほど浮遊して物に付着する。養殖では、この時期にタマネギ袋に古い魚網などを詰めた採苗器をロープに取り付け海中に垂下して幼生を集める。幼生が付着して40～60日経過すると、稚貝の殻長が約8～10mmに成長する。7～8月までに採苗器から稚貝を採取し、ネットに適正個数収容して一定の大きさまで育てる。10月頃、殻長が20～25mm程度となった稚貝を新しい籠に適正個体数に

調整して再度入れ替え、海中に垂下する。この時期は餌となる植物プランクトンの多い層や水温に合わせてホタテガイを上下させる。成貝になるまでさらに1年から1年半程度の養殖期間を経て出荷される¹⁾。

ホタテガイは生息水温が5～22℃の冷水性の二枚貝であり、夏季に水温が20℃を超える日が長く続くとへい死してしまう。平成22年夏季から秋季にかけて陸奥湾の海水が過去に例を見ない高水温で推移し、ホタテガイの成長不良と大量へい死が起り生残率は約33%となった（陸奥湾ホタテガイ高水温被害対策専門家委員会, 2012）。

3. 沿岸水温の予測方法の開発

沿岸域・内湾の水温予測に関しては、ワカメ養殖が盛んな岩手県では岩手県水産技術センターが、「ワカメ養殖情報」を定期的に発行し、10 m 深水温、海面水温などの旬単位の予測値をホームページで発信している。また、青森県産業技術センター水産総合研究所では、第2.3.2項で述べた陸奥湾でのホタテガイの大量へい死を契機として、稚貝採取を始める7月の時点で8月から9月の水温予測値をホームページで発信している。このように、いくつかの試験研究機関において、統計的な手法を用いた推定や、気温の予測を参考にした推定が行われている。沿岸域・内湾では水深が浅く、水温に対する気温の影響が大きいことから、気温予測を基にした予測はある程度有用と考えられる。

一方で、この手法では外洋の水が沿岸部や湾に入り込むような現象は原理的に予測できないため、海洋現象を力学的に予測する手法に対する期待は大きい。また、海洋モデルでは、海面だけでなく海洋内部の水温構造も予測できる。

第2章で述べたとおり、ノリ養殖においては1週間先までの日々の水温予測（9～12月）にニーズがあり、ワカメ養殖においては2週間先の

水温予測（9～12月）にニーズがある。そこで、仙台管区气象台では、気温予測を用いた沿岸域の水温予測手法と、気象庁の現業数値海洋モデルであるMOVE/MRI.COM-WNP（以下、MOVE；石崎ほか, 2009）を用いた沿岸域の水温予測手法を開発した。本章ではそれぞれの予測手法について解説する。

3.1 気温予測を用いた沿岸水温予測手法について

ここでは、気温予測を用いた沿岸水温予測手法について大まかな流れを説明する。

まず、予測する時間スケールとその期間を決める。1週間先まで1日単位で予測する、2週間先の5日平均単位で予測する、など様々なニーズが考えられるので、どのような予測ニーズなのかをふまえた上で決定することになる。

その次に、決定した時間スケールにおいて、予測する水温と、近隣の地上気象観測地点における気温との相関を過去の水温・気温データから調査する。相関が良ければ両者の間に少なくとも統計的な関係性があるので、予測可能性がある。なお、ここで使用する気温の過去データについては、気象庁ホームページの「過去の気象データ・ダウンロード」²⁾から取得可能である。また、この地点を選ぶ際には、天気予報等で気温予測を行っている地点に限定されることに注意する必要がある。

使用する気温の地点が決定できれば、次に、統計的な手法を用い、沿岸水温の予測式を作成する。具体的には、水温及び気温データを説明変数、予測する水温を目的変数とした重回帰分析を行うことで作成する。

この重回帰分析を行う際に、特に考慮すべき点を、第3.1.1項、第3.1.2項及び第3.1.3項で解説する。次に、第3.1.4項で仙台管区气象台が行った具体的な予測式の作成例について説明する。

¹⁾ 青森県産業技術センター水産総合研究所ホームページ参照（ホタテ貝豆知識：<http://www.aomori-itc.or.jp/index.php?id=1358>, 2018年3月19日閲覧）

²⁾ <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>

3.1.1 説明変数の選択の種類とその特徴について（PPM方式とMOS方式）

重回帰分析を行うときの気温の説明変数は、過去の気温観測値を使用する方法（PPM（Perfect Prognosis Method）方式）と、過去の気温予測値を使用する方法（MOS（Model Output Statistics）方式）の2通りの選択肢がある。PPM方式は、観測値を入手できれば予測式を比較的容易に作成でき、単純に気温と水温の観測値の対応を見ているため、重回帰式の係数の解釈が容易だという利点がある。これに対して、MOS方式では、過去事例の予報実験から予測式を作成するため、気温の予測精度が重回帰分析において考慮されている。このため、MOS方式のほうがPPM方式より一般的に水温の予測精度が高いと考えられる。ただし、MOS方式では、数値予報モデルを変更した場合は、再度予報実験を行い、その結果から予測式を作り直さなければならない。

3.1.2 予測する期間の違いによる、気温予測資料の選択について

気象庁では、府県天気予報（以下、短期予報）、府県週間天気予報（以下、週間予報）、異常天候早期警戒情報（以下、早警）、1か月予報など、様々な時間スケールで気温予測を行っている。これらの気温予測資料の中から、予測期間に応じて適切な資料を選択する必要がある。

2週間先の水温を予測する場合には、2週間先の気温予測資料が必要なので、早警の2週間先までの気温予測資料を用いることになる。ただし、早警の気温予測は7日間平均値で、日々の予測値ではないことに注意が必要である。一方、1週間先までの日々の水温を予測する場合には、1週間先までの日々の気温予測資料が必要なので、1週間先までの最高気温や最低気温の予測を行っている短期予報や週間予報を用いることになる。

3.1.3 重回帰分析を行う期間について

重回帰分析により得られる係数は、分析に使用したデータ期間に依存する。予測式を作成する際には、なるべく多くのデータを使用するほうが、計算結果が安定すると考えられる。一方、使用す

るデータの期間が短いと、データが偏っている可能性が高くなり、信頼できる係数を得ることができないと考えられる。また、地球温暖化などの気候変化や十年から数十年規模の長周期の気候変動が存在することを考慮すると、より直近のデータを使用することで、それらの影響が反映されたより適切な予測式が作成できると考えられる。なお、次項で説明する予測式の作成には過去10年間のデータを使用している。ただし、各予測式で作成時期が異なるため、使用したデータ期間も異なっている。

3.1.4 予測式の作成方法について

上記の考慮すべき点を踏まえて、ノリ養殖でニーズがあった1週間先までの日々の水温の予測式と、ワカメ養殖でニーズがあった2週間先の7日間平均水温の予測式について、重回帰分析を用いた予測式の作成方法を紹介する。

(a) 1週間先までの日々の水温の予測式

ここでは、松島湾の桂島（第2図）を例として、ノリ養殖のための予測式の作成について説明していく。

桂島の水温データについては、宮城水技センターから提供された10時の日別水温観測値を使用する。また、1週間先までの日々の水温を予測するため、気温予測資料は短期予報と週間予報を用いることにし、気温の予測地点は、桂島に最も近い仙台を選択する。

また、PPM方式とMOS方式のどちらを採用す



第2図 岩井崎及び桂島の位置（●：大船渡）
（地図出典：国土地理院地図データを加工）

るかについては、短期予報や週間予報は過去の予報値を得ることが一般には難しいため、PPM方式を採用している。なお、短期予報や週間予報では、日最高気温と日最低気温の予測を公表しているが、予測式を簡潔にするため、これらを平均したものを日平均気温（以下、日平均気温は日最高気温と日最低気温の平均値のこととする）として説明変数に使用する。

このように予測式の作成方針を決定したのち、過去10年間（ここでは2005～2014年）の9～12月の桂島の水温観測データと仙台の気温観測データを準備し、予測対象日の桂島の水温観測値を目的変数、予測日当日の桂島の水温観測値と予測日翌日から予測対象日までの仙台の日平均気温を説明変数として重回帰分析を行い、1～7日先までの水温予測式を作成する。ここで*n*日先の水温予測値 $T(n)$ は式(1)のように表される。

$$T(n) = a(n)T_0 + \sum_{i=1}^n b_i(n)X(i) + c(n) \quad (1)$$

ただし、予測日当日の水温観測値は T_0 、*i*日先の日平均気温予測値は $X(i)$ ($i=1,2,\dots,n$)、求める係数は $a(n)$ 、 $b_i(n)$ ($i=1,2,\dots,n$)、 $c(n)$ である。

実際に水温予測値を計算する際は、予測日当日の11時発表の短期予報（1日後）と週間予報（2～7日後）の気温予測値（日平均気温）、及び予測日当日10時の水温観測値を式(1)に代入し、1～7日先までの水温予測値を計算する。なお、この手法の予測精度については第4章で述べるが、予測地点による有効性の違いを比較するため、ニーズには無かった岩井崎でも仙台の気温観測値を用いた水温予測式を作成する。

(b) 2週間先の7日間平均水温の予測式

ここでは、気仙沼湾の岩井崎（第2図）を例として、ワカメ養殖のための予測式の作成について説明していく。

岩井崎の水温データについては、気仙沼水試から提供された10時の日別水温観測値を使用した。2週間先の水温を予測するため、気温予測資料は早警の気温ガイダンスを用いることにし、気温の

予測地点は岩井崎に最も近い早警の気温ガイダンス地点である大船渡を選択する。

また、PPM方式とMOS方式のどちらを採用するかについては、早警の過去の気温予測データが、気象庁ホームページ「過去の1か月予報気温ガイダンスデータ・ダウンロード」³から取得できることを考慮し、比較的成績が良いと考えられるMOS方式を採用している。

このように予測式の作成方針を決定したのち、過去10年間（ここでは2002～2011年）の9～12月の岩井崎の水温観測データと大船渡の気温予測データを準備し、岩井崎の6～12日先の7日間平均水温予測値を目的変数、岩井崎の前日までの7日間平均水温観測値と早警の気温ガイダンスによる大船渡の6～12日先の7日間平均気温予測値を説明変数として重回帰分析を行う。ここで、6～12日先の7日間平均水温予測値 T_{sea-f} は、式(2)のように表される。

$$T_{sea-f} = aT_{sea} + bT_{air} + c \quad (2)$$

ただし、 T_{sea} は前日までの7日間平均水温観測値、 T_{air} は6～12日先の7日間平均気温予測値、求める係数が a 、 b 、 c である。

実際に水温予測値を計算する際は、前日までの7日間平均水温観測値を T_{sea} 、公開されている早警の予測資料から取得した6～12日先の7日間平均気温予測値を T_{air} として式(2)に代入し、6～12日先の7日間平均水温予測値 T_{sea-f} を計算する。なお、この手法の予測精度についても、地点ごとの違いを比較するため、ニーズには無かった松島湾の桂島についても、最寄の石巻における早警の気温ガイダンスを用いた水温予測式を作成する。

3.2 MOVEの水温予測を利用する方法

次に、MOVE予測値を利用した沿岸水温予測手法について説明する。ここでは、1週間先までの日々の水温予測手法について、桂島を例として説明していく。MOVEの格子点間隔は、水平方向に0.1度（日本近海）で、予測する水温観測地

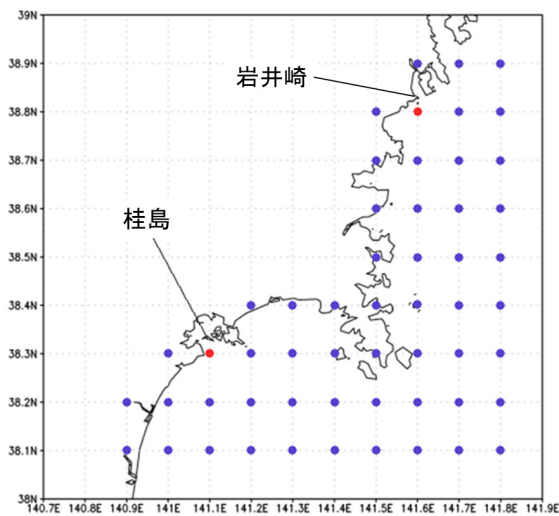
³ <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/fcstdl/index.php>

点の最も近い格子点における最も浅い層の日別水温予測値を利用する。桂島に最も近い格子点は北緯 38.3 度，東経 141.1 度である（第 3 図）。

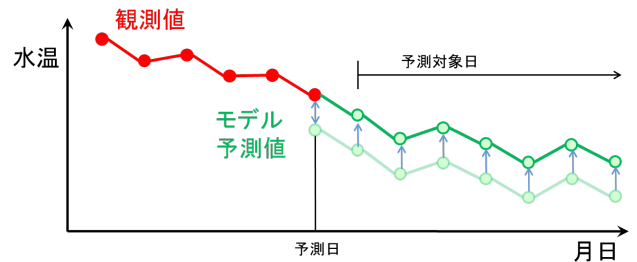
第 4 図に桂島における水温観測値と MOVE 予測値の時系列グラフを示す。MOVE 予測値と観測値を比較すると，MOVE 予測値と観測値に大きなバイアスが見られ，そのまま利用することはできない。このため，予測日当日の MOVE 予測値と観測値の差を予測期間中の MOVE 予測値

に加えて補正した値（以下，MOVE 補正予測値）を使用することとする（第 5 図）。この補正によって予測値と観測値のバイアスは軽減される（第 6 図）。

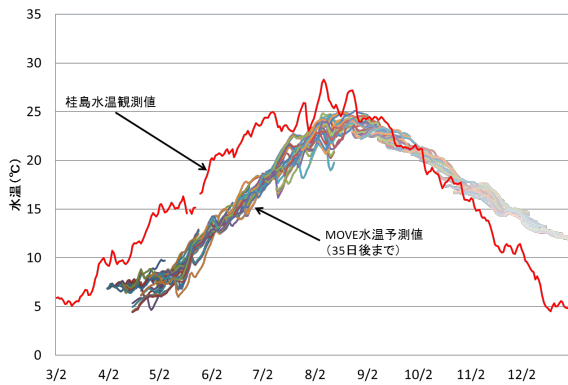
なお，MOVE についても，第 4 章の精度検証において，予測精度の地点間の相違を比較するため，岩井崎での MOVE 補正予測値を作成する。岩井崎に最も近い格子点は北緯 38.8 度，東経 141.6 度である（第 3 図）。



第 3 図 使用した MOVE 格子点（桂島と岩井崎：赤点部分）

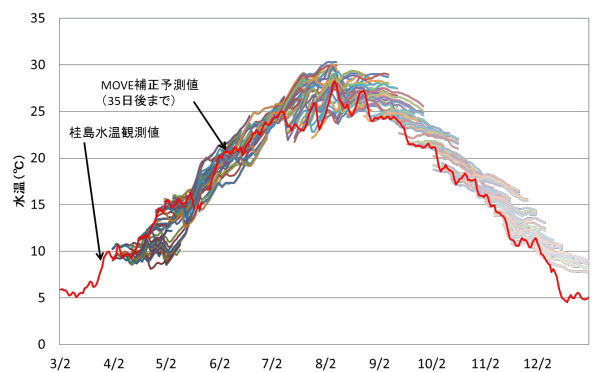


第 5 図 MOVE 予測値の補正イメージ（MOVE 予測値（薄緑線），観測値（赤線），MOVE 補正予測値（濃緑線））



第 4 図 桂島水温観測値（赤線）と MOVE 水温予測値（2014 年 3～12 月）

MOVE 水温予測値については，予測日ごとの予測値をプロットしている。



第 6 図 桂島水温観測値（赤線）と MOVE 補正予測値（2014 年 3～12 月）

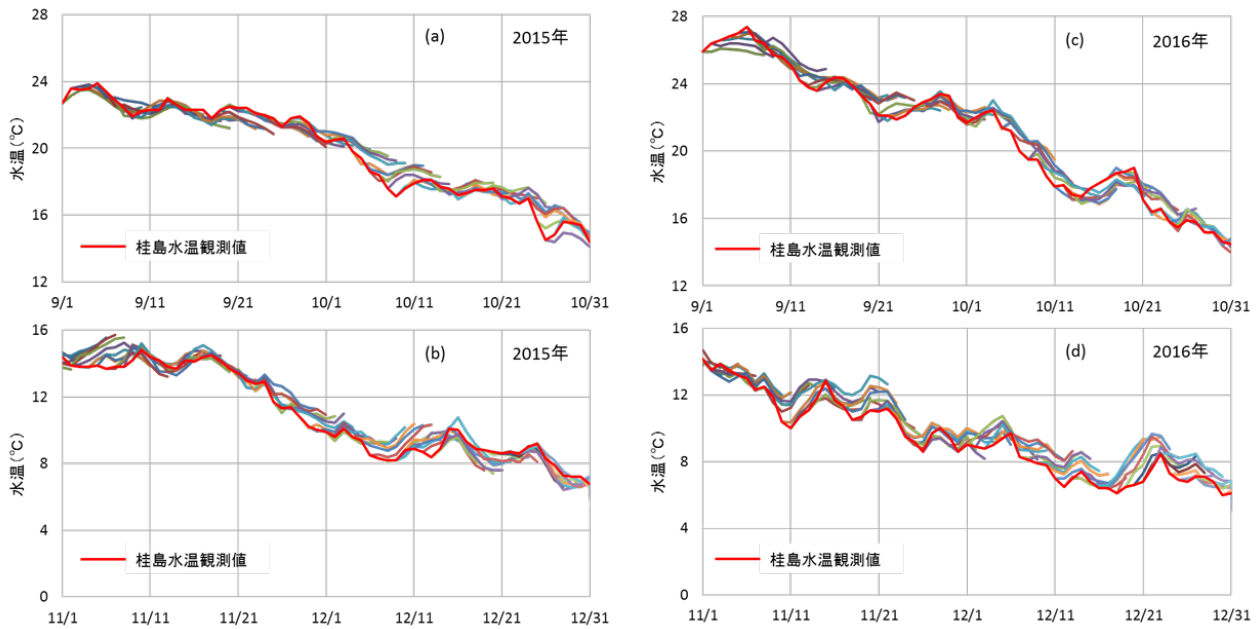
4. 各水温予測手法の精度検証について

ここでは、前章で説明した2種類の気温予測（短期予報・週間予報の気温予測と早警の気温ガイダンス）を用いた水温予測と1週間先までのMOVE予測値を用いた水温予測の予測精度の検証結果を示す。

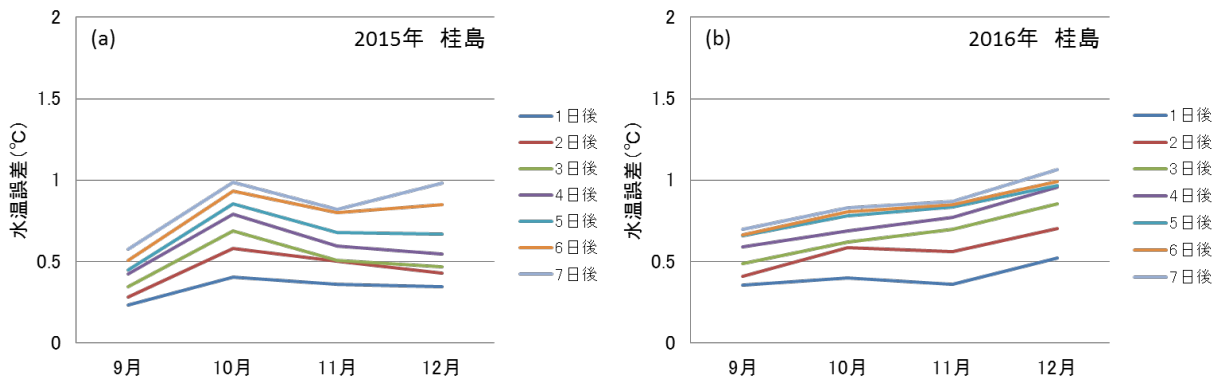
桂島と岩井崎の2地点についてそれぞれの手法の予測精度を求め、両者の比較を行う。検証期間は、2015～2016年9～12月で、2乗平均平方根誤差（RMSE）と平均誤差（ME）によって精度を評価する。

4.1 1週間先までの日々の水温予測の精度検証

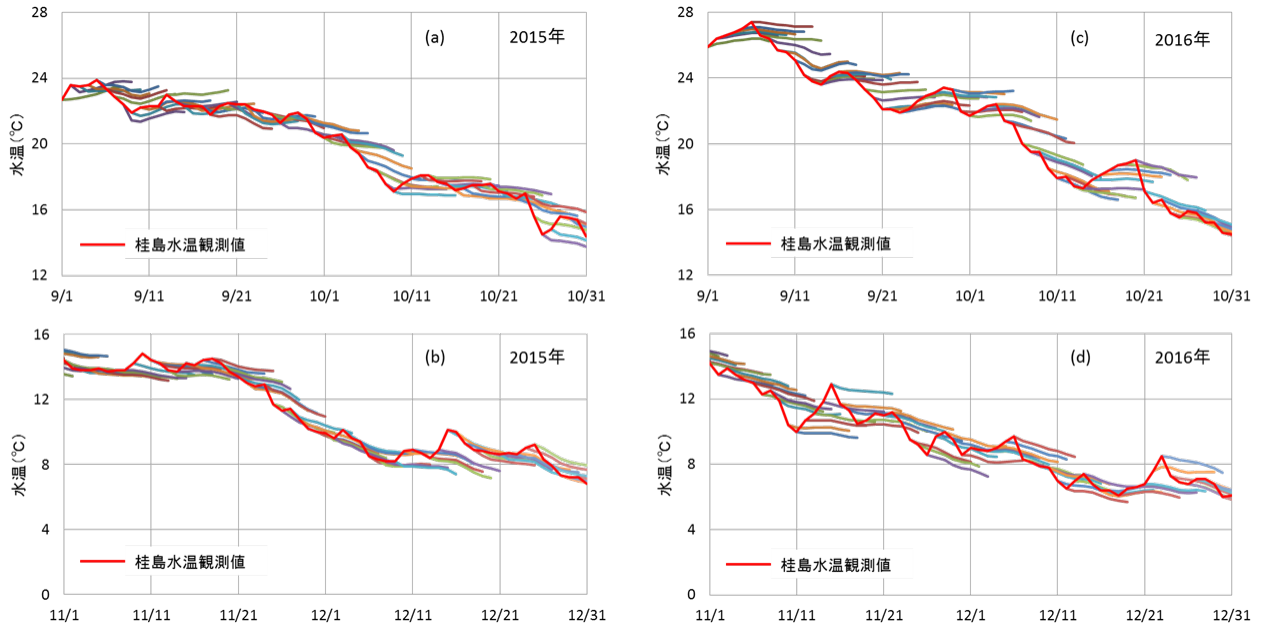
短期予報と週間予報を用いた7日後までの日々の水温予測（以下、週間予報を用いた予測値）について、桂島における9～12月の時系列グラフを第7図に、月ごとのRMSEを第8図に示す。MOVE補正予測値についても同様に、時系列グラフを第9図に、月ごとのRMSEを第10図に示す。それぞれの予測値の予測対象日ごとのMEを第11図に示す。また、岩井崎における週間予報を用いた予測値とMOVE補正予



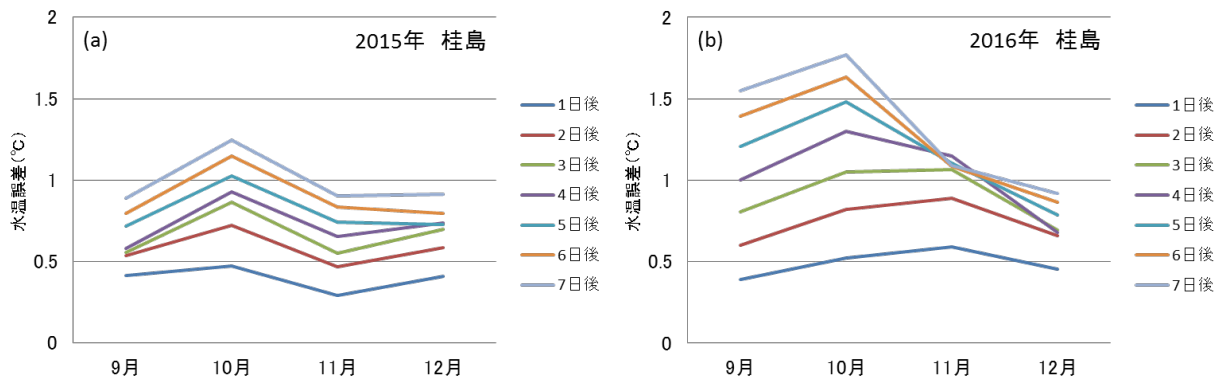
第7図 桂島水温観測値と週間予報を用いた予測値 ((a):2015年9～10月, (b):2015年11～12月, (c):2016年9～10月, (d):2016年11～12月)



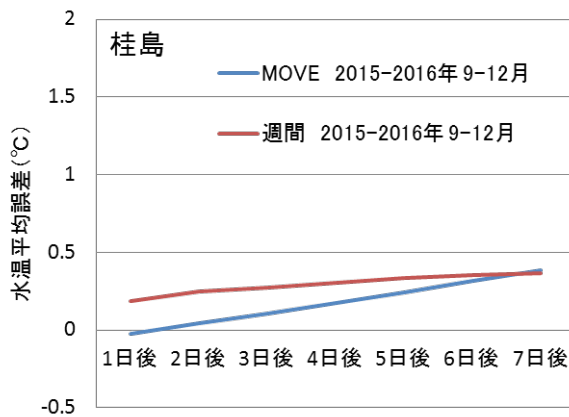
第8図 桂島における週間予報を用いた予測値のRMSE ((a):2015年9～12月 (b):2016年9～12月)



第9図 桂島水温観測値とMOVE補正予測値 ((a) : 2015年9～10月, (b) : 2015年11～12月, (c) : 2016年9～10月, (d) : 2016年11～12月)



第10図 桂島におけるMOVE補正予測値のRMSE ((a) : 2015年9～12月 (b) : 2016年9～12月)

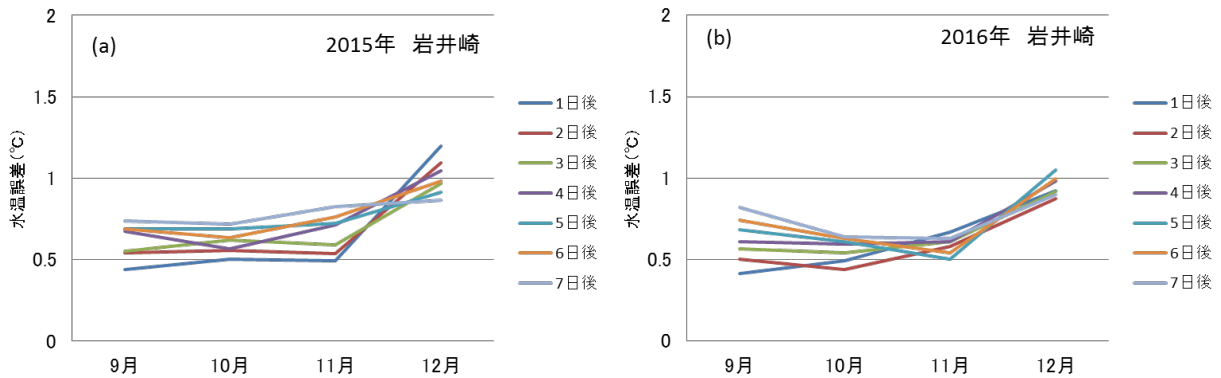


第11図 桂島での週間予報を用いた予測値とMOVE補正予測値のME

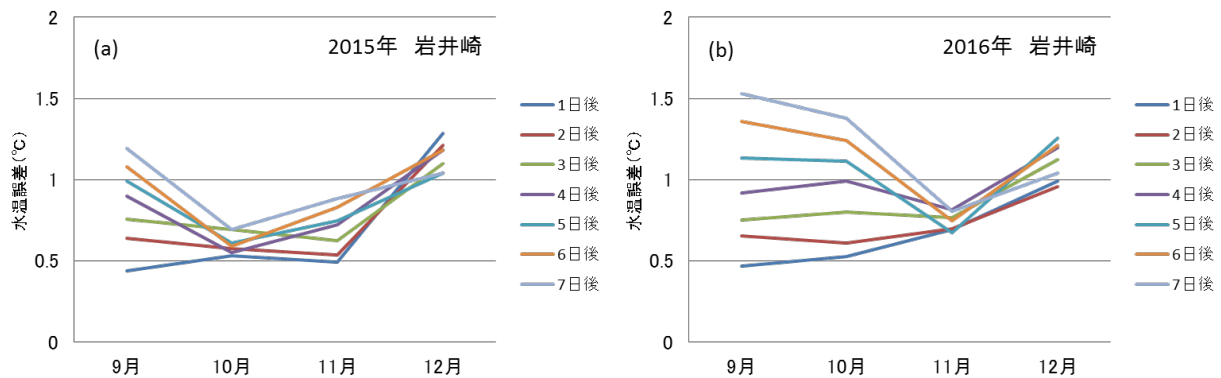
測値の月ごとの RMSE を第 12 図と第 13 図に、ME を第 14 図に示す。

桂島については、第 2.1 節で述べたように、水温の求められる精度は±1℃であり、週間予報を用いた予測値の RMSE は 7 日先でもおおむね 1℃を下回っていて実用的な予測手法であると言える(第 8 図)。MOVE 補正予測値の RMSE は 2015 年の 9～12 月や 2016 年の 11 月、12 月は 7 日先の予測でもおおむね 1℃を下回るが、2016 年の 9 月

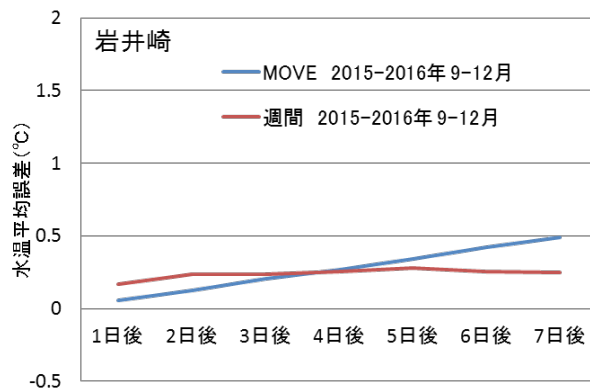
や 10 月は 5 日後以降 1℃を大きく上回る結果となった(第 10 図)。2016 年の 9 月及び 10 月は三陸沖に暖水渦があり(第 15 図)、MOVE 補正予測値では暖水渦が西進して宮城県沿岸の海面水温が下がらないと予想しているが、実際には暖水渦は北東に離れて行き桂島の海面水温に与える影響は小さく、MOVE 補正予測値は桂島の水温が低下することを予測できていないことが分かる(第 9 図(c))。期間を通じた桂島の水温観測値と週



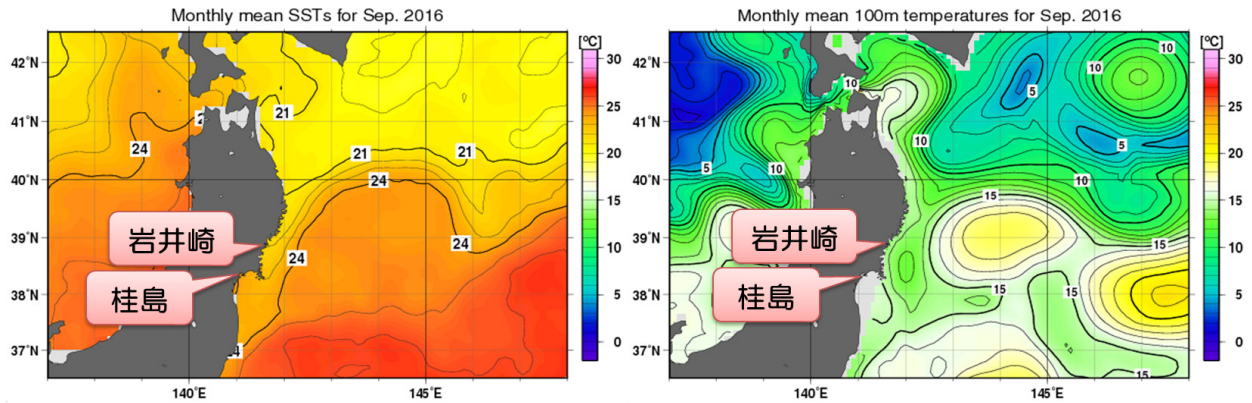
第 12 図 岩井崎における週間予報を用いた予測値の RMSE ((a): 2015 年 9～12 月 (b): 2016 年 9～12 月)



第 13 図 岩井崎における MOVE 補正予測値の RMSE ((a): 2015 年 9～12 月 (b): 2016 年 9～12 月)



第 14 図 岩井崎での週間予報を用いた予測値と MOVE 補正予測値の ME



第15図 2016年9月の月平均海面水温図(左)と月平均100m深水温図(右)

間予報を用いた予測値、MOVE補正予測値の推移(第7図、第9図)をみると、MOVE補正予測値も水温の変化傾向は予測できていることが多いが、水温の急激な変化や数日単位の短周期の変動には追従できていないことが分かる。週間予報を用いた予測値はそのような水温変化にも比較的よく追従している。桂島は内湾にあり、水温の急激な変動は気象からの影響が大きいためと考えられる。MEをみると、週間予報を用いた予測値とMOVE補正予測値はともにおおむね0.0~0.5°C程度の正のバイアスがあり、この検証期間では観測値よりやや高めに予測する傾向にあることが分かる(第11図)。

岩井崎では週間予報を用いた予測値のRMSEは2015年と2016年ともに、おおむね1°C以下である(第12図)。MOVE補正予測値のRMSEは、2015年12月と2016年9月、10月、12月に1°Cを上回る予測対象日が多く見られる(第13図)。2016年9月、10月については、桂島と同様に、三陸沖の暖水渦の予測の影響を受けていると考えられる。また、週間予報を用いた予測値とMOVE補正予測値のMEをみると、ともにおおむね0.0~0.5°C程度で、桂島と同様に、正のバイアスがあることが分かる(第14図)。

岩井崎についても、桂島と同様に週間予報を用いた予測値の精度がMOVE補正予測値の精度を上回っている月が多い。一方で、予測誤差は予測時間が長くなるほど大きくなるのが一般的だが、2015年12月は、1日後のRMSEの値が最も大きい(第12図、第13図)。この要因について

は、同月下旬は水温が1日単位で大きく変動したことに伴い、これを用いて算出した補正值や説明変数に使用する予測値も大きく変動するが、特に予測対象日前半に水温の急激な変化に追従できずRMSEを大きくしていると考えられる。

RMSEでみると、1週間先までの日々の水温予測では、週間予報を用いた予測値がMOVE補正予測値よりも精度がよい。一方、桂島における個々の予測をみると、主に水温の急激な変化や数日単位の短周期の変動が少ないときにMOVE補正予測値の精度が週間予報を用いた予測値の精度よりもよいことがあり、初期値ごとの事例数で3分の1程度はMOVE補正予測値が勝っていることが分かる(第16図)。また、初期値ごとの事例を月別でみると、12月におよそ6割でMOVE補正予測値が勝っていることが分かる。7日後の予測値と観測値を比較しても、12月ではMOVE補正予測値は他の月と比べて観測値との差がそれほど無く、比較的精度がよいことが分かる(第17図)。12月は、季節進行に伴って混合層が厚くなることで、気温の変化に対する水温の応答が鈍くなり、MOVE補正予測値の精度が週間予報を用いた予測値の精度に勝っていると考えられる。この2つの予測値の適切な選択方法の開発が今後の課題と言える。

4.2 2週間先の7日間平均水温予測の精度検証

早警を用いた2週間先の7日間平均水温予測値(以下、早警を用いた予測値)について、2015~

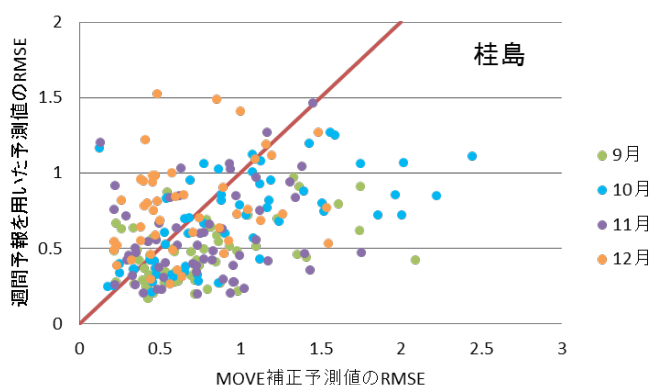
2016年9～12月の岩井崎における予測値と観測値の時系列を第18図に、桂島における時系列を第19図に示す。第18図(岩井崎)と第19図(桂島)をみると、予測値が7日間平均なので観測値の数日単位の短周期変動には追従できていないが、それより長い変動成分については比較的追従できていることが分かる。

岩井崎と桂島での2015年と2016年の9～12月におけるRMSEを第1表に、MEを第2表に示す。RMSEをみると、岩井崎と桂島ともに0.6～0.8℃と1℃以下の精度である。前節でみた週間予報を用いた予測値やMOVE補正予測値は日々の予測なので単純に比較はできないが、例として週間予報を用いた予測値のRMSE(第8図(桂島))、

第12図(岩井崎))をみると、7日後ではおおむね0.8℃を上回っているときが多く、早警を用いた予測値のほうが精度が良いことが分かる。7日間平均した水温を予測対象とすることで、数日の短周期変動が除かれて、より予測時間の長い2週間先の水温も予測できることが分かる。MEをみると、岩井崎と桂島で0.0～0.3℃であり、やや高めに予測する傾向であるが、RMSEに比べると値は小さい。

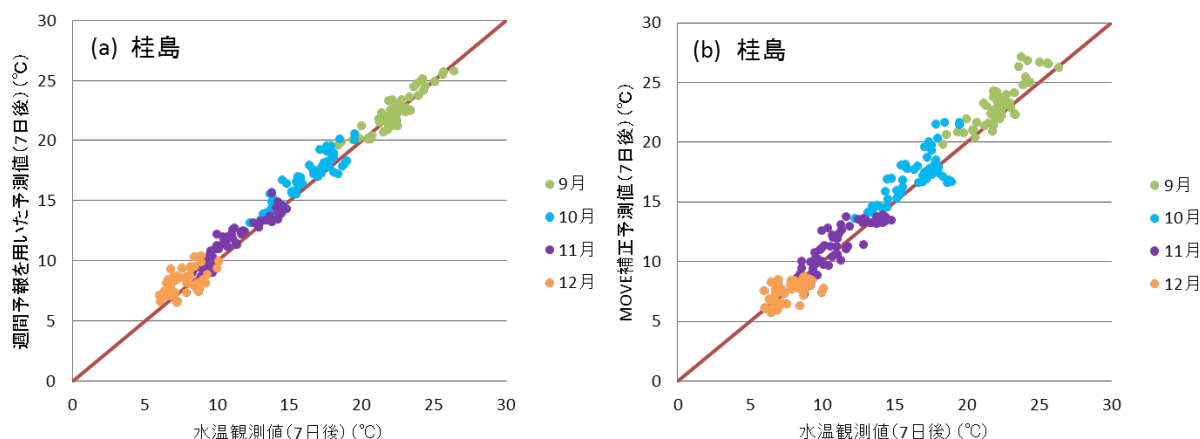
4.3 桂島と岩井崎の比較

第4.1節及び第4.2節で、桂島と岩井崎での週間予報を用いた予測値、MOVE補正予測値、早警を用いた予測値の精度をみてきたが、予測精度

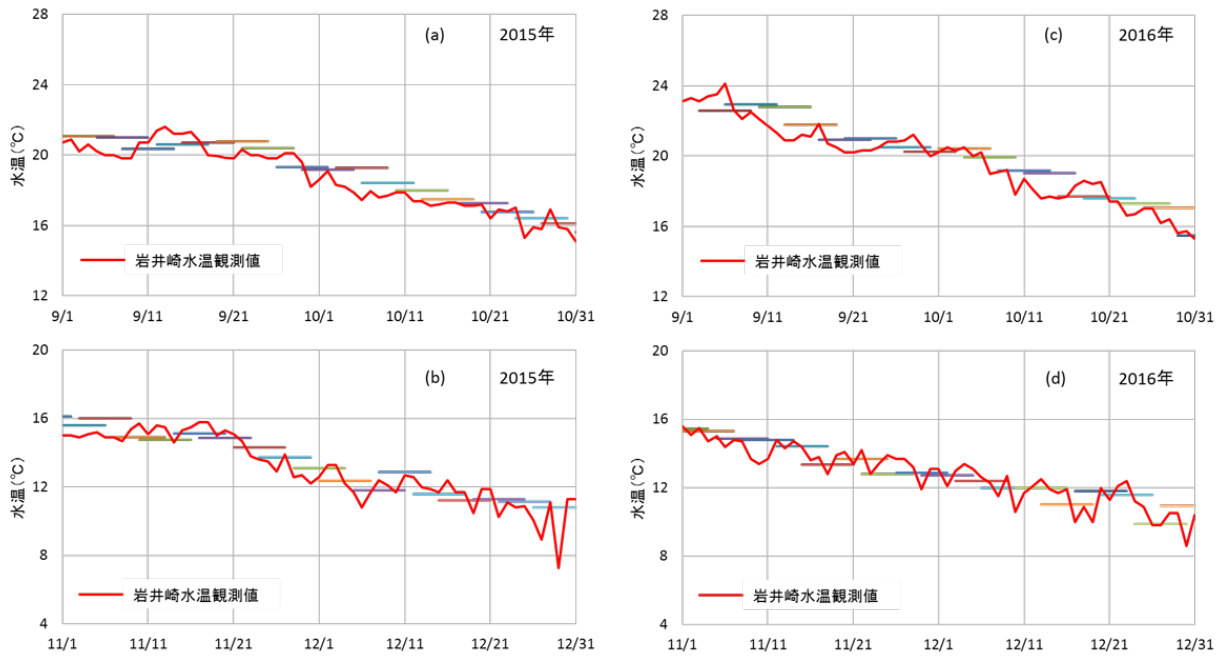


第16図 MOVE補正予測値と週間予報を用いた予測値の精度の比較

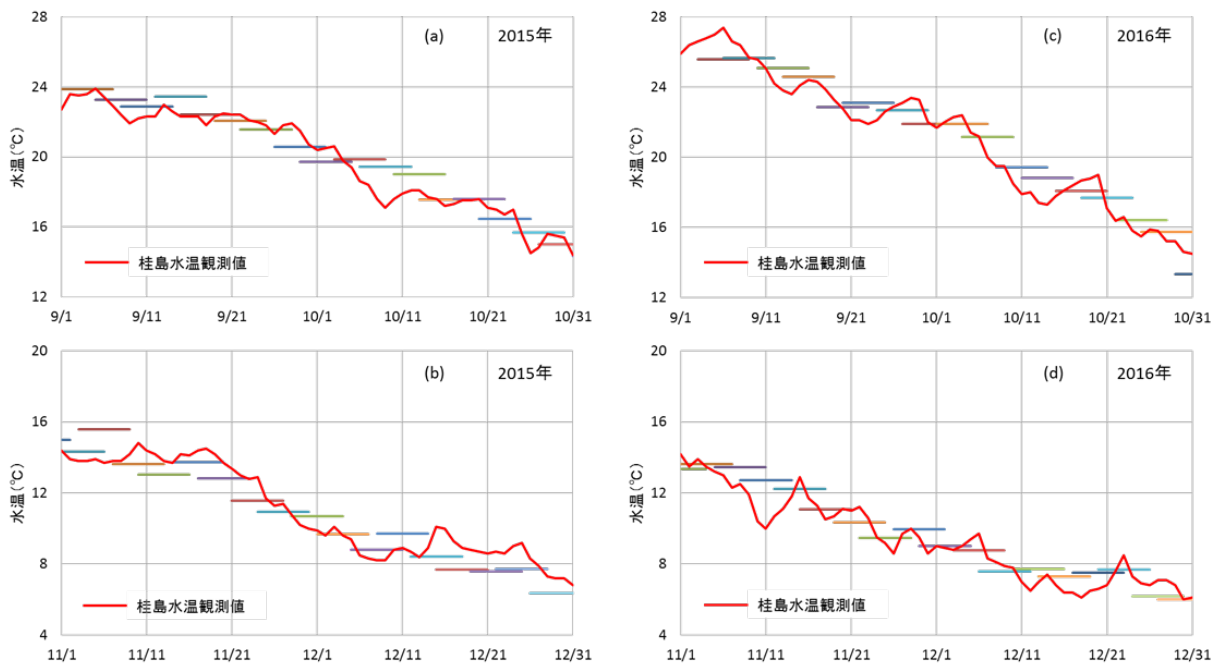
桂島における2015～2016年9～12月の各予測初期日からの予測について、1～7日目までのRMSEをプロットしたもの。赤線は傾き1の直線であり、これより上は週間予報を用いた予測値のRMSEがMOVE補正予測値のRMSEを上回っている(週間予報を用いた予測値の成績が悪い)ことを示す。



第17図 桂島での水温観測値と(a):週間予報を用いた予測値(7日後)、(b):MOVE補正予測値(7日後)の比較。2015～2016年9～12月までのデータをプロットしたもの。赤線は傾き1の直線。



第 18 図 岩井崎水温観測値と早警を用いた予測値 ((a) : 2015 年 9 ~ 10 月, (b) : 2015 年 11 ~ 12 月, (c) : 2016 年 9 ~ 10 月, (d) : 2016 年 11 ~ 12 月)



第 19 図 桂島水温観測値と早警を用いた予測値 ((a) : 2015 年 9 ~ 10 月, (b) : 2015 年 11 ~ 12 月, (c) : 2016 年 9 ~ 10 月, (d) : 2016 年 11 ~ 12 月)

の傾向をみると、これらの予測手法では、桂島よりも岩井崎のほうがおおむね精度がよいことが分かる (第 8 図, 第 10 図, 第 12 図, 第 13 図, 第 1 表)。

週間予報について、桂島と岩井崎の予測式に

仙台の実況気温を代入して計算した予測結果の RMSE を第 20 図に示す。実際の予測結果の第 8 図, 第 12 図と比較すると、桂島は予測精度が改善されているが、岩井崎はあまり改善がみられない。これは桂島の水溫予測誤差には仙台の気温予測誤

差の寄与が大きいことを示している。桂島と岩井崎の回帰係数を、7日後を例として第21図に示す。水温の項の係数が桂島に比べて岩井崎が大きいこ

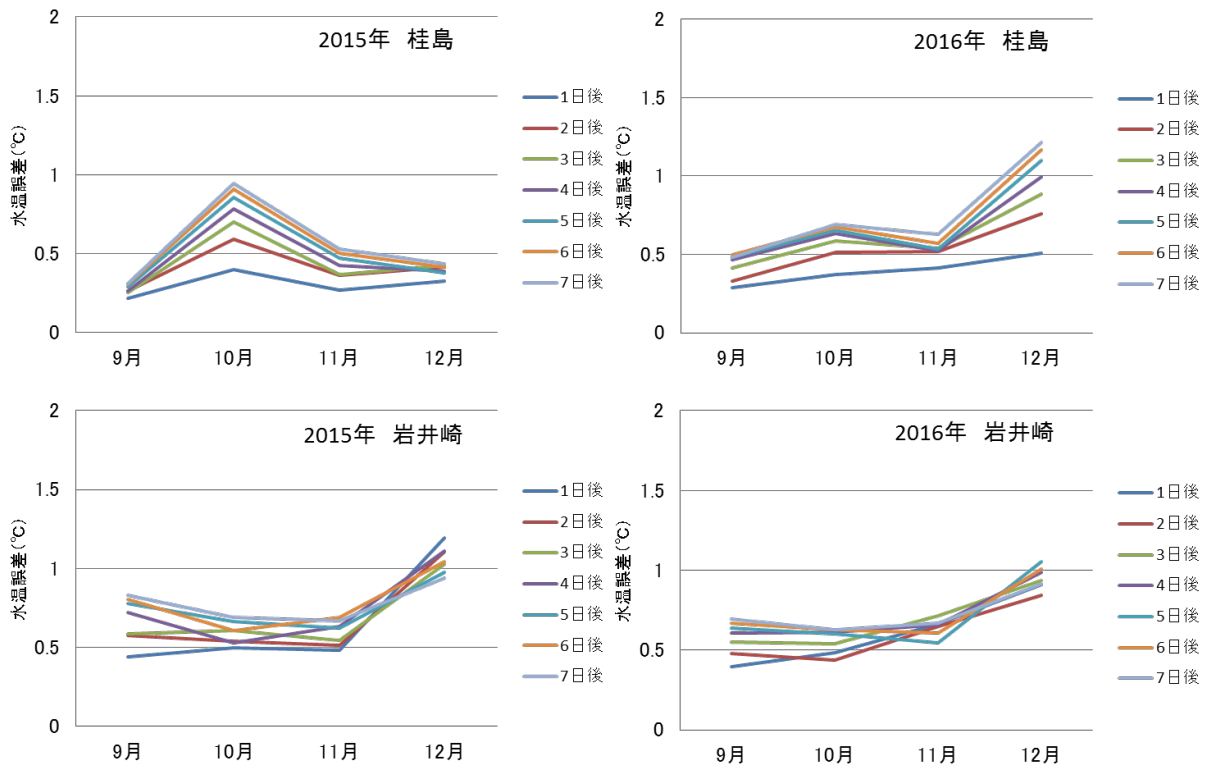
と、各日の気温の係数が桂島に比べて岩井崎が小さいこと、気温の係数が1日後から予測対象日に近づくにつれて値が大きくなることは他のリード

第1表 岩井崎と桂島での早警を用いた予測値の

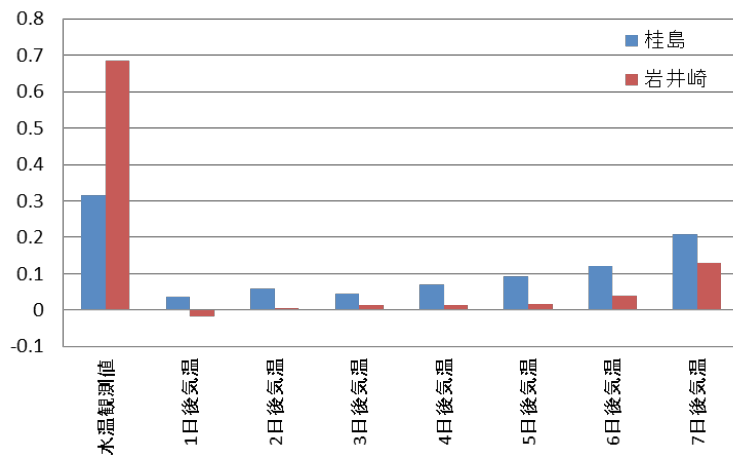
RMSE		
早警	岩井崎	桂島
2015年	0.6	0.8
2016年	0.6	0.7

第2表 岩井崎と桂島での早警を用いた予測値の

ME		
早警	岩井崎	桂島
2015年	0.3	0.0
2016年	0.3	0.3



第20図 第8図、第12図に同じ。ただし、気温の項に気温観測値を用いて予測したもの。



第21図 週間予報を用いた予測の回帰係数 (7日後の予測)

タイムでも同様である。岩井崎に比べて、桂島は気温の項の係数の寄与が大きく、同じ仙台の気温予測誤差に対して水温予測誤差が大きくなることが示唆されている。

また、桂島と岩井崎の予測式の当てはまり具合を比較するために、水温予測値と観測値の相関を第 22 図に示す。いずれの地点、手法も 0.95 を超えるよい相関が見られるが、これは気候値としての季節変化による寄与が大きいためと考えられる(第 17 図)。このため、ここでは予測日 (0 日後) の水温からの変化量に着目して評価する。なお、この観点での RMSE は、予測回数を M 、予測日の水温を T_{r0k} 、 n 日後の予測水温を T_{fnk} 、 n 日後の実況の水温を T_{rnk} ($k=1,2,\dots,M$) とすると、

$$\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \{(T_{fnk} - T_{r0k}) - (T_{rnk} - T_{r0k})\}^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (T_{fnk} - T_{rnk})^2}$$

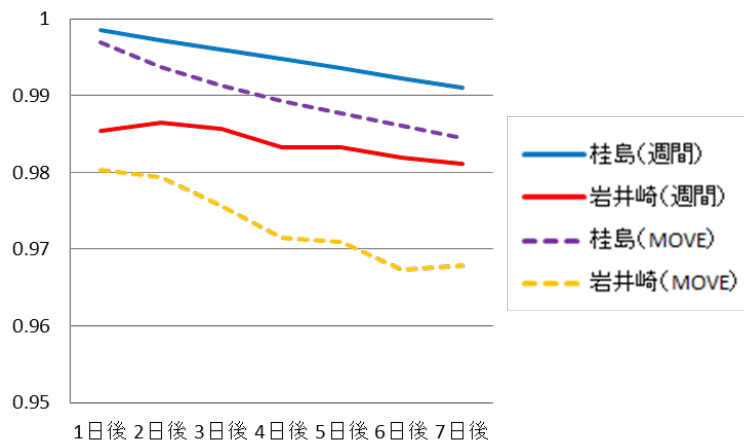
となるため、これまで見てきた RMSE と同じ値である。

7 日後に着目して、各地点、各手法の 7 日間変化量の実況と予測の相関係数と RMSE、実況と予測の 7 日間変化量の根二乗平均値を第 3 表に示す。いずれの手法でも相関係数は桂島のほうが高いが、RMSE は岩井崎のほうが小さくなっている。これは 7 日間の水温変化量が桂島よりも岩井崎のほうが小さいため、傾向としては桂島のほうがよく予測できているものの、差としては桂島のほうが値が大きくなっているためだと考えられる。

なお、予測日 (0 日目) と 7 日後の差 (7 日間変化量) だけでなく、7 日間の日々の変動も考慮した 7 日間移動標準偏差で比べても 9 ~ 11 月を中心に桂島のほうが変動が大きい (第 23 図)。

5. 作成した各予測手法の利用について

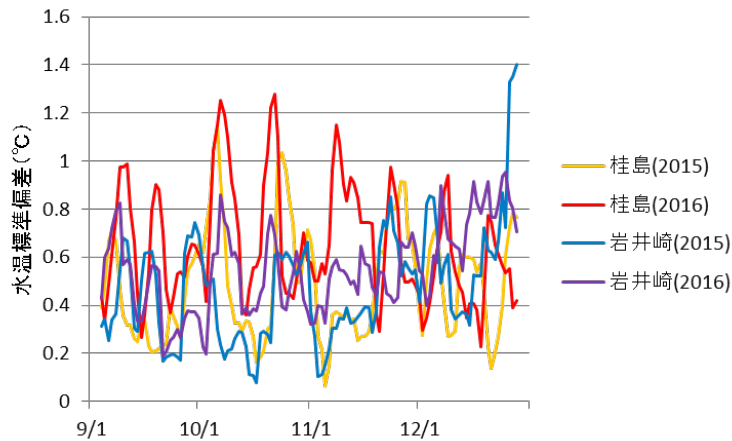
ここでは、第 3 章で示した予測式や計算した予測値が、実際にどのように利用されているかを紹介する。



第 22 図 MOVE 補正予測値と週間予報を用いた予測値の実況値との相関

第 3 表 7 日間変化量の実況と予測の相関係数と RMSE、観測と予測の 7 日間変化量の根二乗平均値

	相関係数	RMSE[°C]	7日間変化量の根二乗平均[°C]
桂島(実況)			1.6
岩井崎(実況)			1.2
桂島(週間)	0.75	0.9	1.2
岩井崎(週間)	0.65	0.8	0.6
桂島(MOVE)	0.36	1.2	0.9
岩井崎(MOVE)	0.19	1.1	0.5



第 23 図 各日を中心として前 3 日，後 3 日を加えた 7 日間の水温変動の移動標準偏差の時系列

5.1 ノリ養殖に利用される 1 週間先までの日々の水温の予測式

宮城水技センターでは，松島湾近傍の海水温，比重及び栄養塩の調査結果のほか，週間予報や早警等の気象予報，さらに育苗の時期には潮位情報も気象庁ホームページより転記して，「のり養殖通報」として漁業者向けに発信している．この中で，桂島の 9～12 月の 1 週間先までの日々の水温予測について，平成 27 年 9 月から MOVE 補正予測値の掲載が始まり，平成 28 年 9 月からは MOVE 補正予測値と，週間予報を用いた予測値の両方を考慮した予測値が掲載されている．この水温予測値を参考にして，養殖業者はノリ網の張り込み作業の時期などの見込みを立てられるようになっている．

5.2 ワカメ養殖に利用される 2 週間先の 7 日間平均水温の予測式

気仙沼水試では，ワカメの養殖技術の指導・支援のために「ワカメ養殖通報」を発行している．ワカメ養殖通報では，岩井崎の過去，現在の水温とともに養殖作業の留意点が記述されているほか，週間予報や 1 か月予報などの気象情報があわせて掲載されている．平成 26 年 9 月からは岩井崎の 2 週間先までの 7 日間平均水温の予測値が掲載され，この 2 週間先の予測水温値を参考にして，養殖業者は作業時期の見込みを立てられるようになっている．

6. まとめ

東北地方で盛んな各種養殖漁業にとって水温は欠かせない情報であり，水温予測に対するニーズは高い．仙台管区気象台では，宮城水技センター，気仙沼水試と連携し，沿岸水温予測について様々な取り組みを行っている．本稿では，沿岸水温予測のニーズと，仙台管区気象台が宮城水技センター，気仙沼水試と共同で開発した水温予測手法の概要と精度検証，実際の活用状況について述べてきた．

宮城水技センターと連携して，ノリ養殖への利用のための桂島における 1 週間先までの日々の水温予測として，MOVE 予測値にバイアス補正を加えた手法と，短期予報と週間予報の気温予測値と海面水温観測値を用いた重回帰式に基づく手法を開発した．また，気仙沼水試と共同で，ワカメ養殖への利用のための岩井崎における 2 週間先までの 7 日間平均水温予測として，早警の気温ガイダンスと海面水温観測値を用いた重回帰式に基づく手法を開発した．これらの予測式の精度は，桂島と岩井崎の 2 地点でみると，年月にもよるが，おおむね 1°C 以内の精度に収まることが分かった．桂島と岩井崎を比較すると，岩井崎のほうがおおむね精度がよいことが分かった．また，1 週間先までの日々の水温予測では，週間予報を用いた予測値が MOVE 補正予測値よりも精度がよいことが分かった．一方で，桂島における個々の予測をみると，初期値ごとの事例数で 3 分の 1 程度は MOVE 補正予測値が勝っており，12 月では，

およそ 6 割で MOVE 補正予測値が勝っていることが分かった。

沿岸の海面水温は、気温などの大気からの加熱、冷却や、風による湧昇、かき混ぜ、外洋からの海況変動など様々な要因で変化する。また、用途により求められる予測期間、精度幅が異なる。これらのことに留意し、予測する地点・期間の水温について、適切な手法を選択する必要がある。今後、より適切に手法を選定する方法の確立が課題であるため、検証事例を増やしていくことが必要である。また、これらの手法が他の観測点や他の季節に広く適用できるかどうか調べていきたい。

謝辞

本調査にあたり、水温観測データを提供して頂いた宮城県水産技術総合センターの皆様、MOVE データを提供して頂いた本庁地球環境・海洋部海洋気象課海洋気象情報室海況班の皆様には厚くお礼申し上げます。また、本稿の作成に際し、貴重な助言やコメントを頂いた本庁地球環境・海洋部海洋気象課、海洋気象情報室、気候情報課、海洋環境解析センター及び仙台管区気象台の皆様には厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 青森県産業技術センター水産総合研究所：ホタテガイ豆知識 (<http://www.aomori-itc.or.jp/index.php?id=1358>, 2018 年 3 月 19 日閲覧)
- 石崎士郎・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲池政文 (2009) : MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築. 測候時報, 特別号, 76, S1-S15.
- 岩手県漁業協同組合連合会：三陸産いわてわかめ (<http://www.iwate-wakame.jp/index.html>, 2018 年 3 月 19 日閲覧)
- 宮城県 (1999) : 水産業改良普及ハンドブック.
- 陸奥湾ホタテガイ高水温被害対策専門家委員会 (2012) : 平成 23 年度陸奥湾ホタテガイ高水温被害対策専門家委員会報告書.
- 海ナビ@あおもり (<http://www.aomori-itc.or.jp/uminavi/>, 2018 年 3 月 19 日閲覧)
- 吉田隆・遠峯勉・諸岡浩子・片山恭男・高谷祐吉・永

井千春・藤本敏文・永井直樹 (2015) : 海洋情報の利活用促進に関するユーザーとの対話. 測候時報, 82, 1-14.