

— 論 文 —

三陸女川湾における水系分布とその季節変動、 特に河川系水について*

五味 泰史^{1a**}・高橋 大介²・遠藤 宜成^{1b}

要 旨

三陸女川湾において、2000年4月から2017年2月の間に実施されたモニタリング調査により得られたデータを用いて、水系分布とその季節変動について調べた。本研究では、女川湾の海水を Hanawa and Mitudera (1987) で定義された6つの水系および沿岸水（岸近くには存在するが、その沖合には存在しない海水）のいずれかに分類した。水系分類の結果を用いてモード水系を求めたところ、その分布は季節により大きく変動し、秋の下層および冬の全層で津軽暖流水系、春の下層で親潮水系、春から夏の表層で沿岸水が卓越することが明らかになった。女川湾に出現した沿岸水は、沖合の海水に比べて低塩分および／あるいは低密度で、おもに4月から10月の表層に分布していたことから、湾内の表層水が河川水と混合することで形成されたものと考えられた。また、女川湾湾口部の表面塩分と追波湾に淡水を供給する北上川の流量との関係から、女川湾に出現した沿岸水の一部は湾外から流入してきたものであることが示唆された。

キーワード：沿岸水，津軽暖流水系，親潮水系，モード水系，女川湾

1. はじめに

日本の北東部に位置する三陸海岸は多数の小さな湾からなっており、ここでは餌や栄養塩を自然環境に依存し

た二枚貝やワカメ等の無給餌養殖が盛んに行われてきた。これらの養殖活動は、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波により壊滅的な打撃を受け、宮城県では2020年5月末の時点で、ギンザケおよびワカメの生産量は地震前の93-101%まで回復したが、それ以外の主要な養殖対象種（カキ，ノリ，ホタテガイおよびホヤ）の生産量は地震前の27-59%にとどまっている（宮城県，<https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/803607.pdf>）。養殖活動の復旧，復興にあたっては、瓦礫の撤去等による養殖漁場や養殖施設の復旧といったハード面に加えて、養殖漁場の持続的かつ効果的な利用を目指した環境収容力の評価といった長期的視点からの取り組みも実施されている（長澤ら，2016；尾定ら，2018）。また、津波以降、貝毒原因プランクトンの

* 2019年4月25日受領 2021年10月26日受理
著作権：日本海洋学会，2021年

1 東北大学大学院 農学研究科
〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1
a (現) 〒981-0922 宮城県仙台市青葉区鷹ヶ森1丁目18-8-105
b (現) 放送大学宮城学習センター
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2丁目1-1
2 東海大学 海洋学部海洋地球科学科
〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1

** 連絡著者：五味泰史
e-mail : ygomi53@gmail.com

大量発生(加賀ら, 2012; 増田ら, 2014; 石川ら, 2015)や底層における貧酸素化の進行および貧酸素水塊の発生(高橋ら, 2016; 大越, 2018)といった問題が報告されるようになってきており, これらへの対策も求められている。

三陸の外洋域には, 親潮前線と黒潮前線に挟まれた混合域と呼ばれる海域が広がっている(宇田, 1935)(Fig. 1a)。混合域は複雑な海況を呈する海域であり, ここには親潮から切離した冷水渦や, 黒潮統流から切離した暖水渦が分布し, さらに親潮から親潮第一分枝や親潮第二分枝が張り出してくる。それに対し, 三陸の沿岸域には, 高温で高塩分の亜熱帯水を運ぶ津軽暖流が津軽海峡から南方へ流れているが, ときに親潮第一分枝によりもたらされた低温で低塩分の亜寒帯水や, 暖水渦によってもたらされた高温で高塩分の亜熱帯水も流入してくる(武藤ら, 1969)。このように三陸の沿岸域は様々な水塊の影響を受ける海域であり, さらに, これらの水塊はそれぞれ異なる水温特性や栄養塩特性を持つことから(武藤・荒井, 1985), 三陸の湾において環境収容力を評価し, 環境問題を解決するためには, その基礎として湾に出現する水塊に関する理解が欠かせない。

Hanawa and Mitsudera(1987)は, 水系の概念を用いて, 三陸の沿岸域から外洋域にかけて分布する海水を6つの水系(黒潮水系, 津軽暖流水系, 親潮水系, 沿岸親潮水系, 低温下層水系および表層水系)に分類した。その分類基準に従うと, 親潮水系に該当する海水が大槌湾(Furuya *et al.*, 1993; Ishizu *et al.*, 2017), 大船渡湾(Yamada *et al.*, 2017), 追波湾(工藤ら, 2002)および女川湾(Abe *et al.*, 2011)から, 津軽暖流水系に該当する海水が大槌湾(Ishizu *et al.*, 2017), 大船渡湾(Yamada *et al.*, 2017), 志津川湾(Takahashi *et al.*, 2018), 女川湾(Abe *et al.*, 2011)および仙台湾(Taniuchi *et al.*, 2017)から, 表層水系に該当する海水が大槌湾(Furuya *et al.*, 1993; Ishizu *et al.*, 2017), 大船渡湾(Yamada *et al.*, 2017), 志津川湾(Takahashi *et al.*, 2018), 追波湾(工藤ら, 2002), 女川湾(Abe *et al.*, 2011)および仙台湾(Taniuchi *et al.*, 2017)から報告されている(Fig. 1b)。さらに, 報告例は少ないが, 黒潮水系および沿岸親潮水系に該当する海水も, それぞれ大船渡湾(Hayakawa, 1990)および岩手県の諸湾(奥田・武藤, 1986)から報告されている。

また, Hanawa and Mitsudera(1987)で定義された6

つの水系に該当しない, 塩分が32を下回る低塩分の海水も三陸の諸湾の表層で観察されている(大槌湾(Furuya *et al.*, 1993; Ishizu *et al.*, 2017), 大船渡湾(日比野ら, 2004; Yamada *et al.*, 2017), 気仙沼湾(伊藤ら, 2006), 志津川湾(Takahashi *et al.*, 2018), 追波湾(工藤ら, 2002; 石川ら, 2004), 女川湾(Abe *et al.*, 2011), 松島湾(Kakehi *et al.*, 2017a)および仙台湾(筧ら, 2012; Taniuchi *et al.*, 2017))。このような低塩分水は, 河川水の影響を受けて形成されたものと考えられており(工藤ら, 2002; 伊藤ら, 2006; Ishizu *et al.*, 2017; Kakehi *et al.*, 2017a; Taniuchi *et al.*, 2017; Takahashi *et al.*, 2018), また, 距岸約10 kmよりも沖合の海域には一般的に存在しないことから(Oguma *et al.*, 2002), 上述の諸水系とは異なり, 沿岸域の中でも岸近くの海域のみに存在するものと考えられるが, その性質, 分布, 季節変動, 起源および形成要因について十分明らかにされているとは言い難い。

物理環境の周年調査から, 三陸の湾で観察される海水は明瞭な季節変動を示し, Hanawa and Mitsudera(1987)で定義された親潮水系に該当する海水が春季に, 津軽暖流水系に該当する海水が夏季から冬季に, 塩分が32を下回る低塩分水が春季から秋季に出現したことが, 大槌湾(Ishizu *et al.*, 2017), 大船渡湾(Yamada *et al.*, 2017)および女川湾(Abe *et al.*, 2011)から報告されている。内湾の環境を考えるうえで, 各季節を代表する水系, すなわち各季節の湾内環境に対して強い影響力を持つ水系を把握することは重要であるが, これまでに三陸の湾から報告されている周年調査の総期間は約2年から3年と比較的短いため, 観察された水系が各季節を代表するものであるかどうかは定かではない。この点を明らかにするためには, 長期データを解析し, 各季節で最も頻繁に出現する水系を示す必要がある。

ある海域における水系分布の季節変動は, それに関わる諸水系の季節変動の違いにより引き起こされる。したがって, 水系分布の季節変動の仕組みを理解するためには, 各水系の季節変動とそれに影響を及ぼす過程を明らかにする必要がある。内湾における水系の季節変動に対しては, 湾外からの流入, 湾内における滞留およびその間の変質などの過程が関与する(大谷, 1971)。三陸の様々な湾では, 湾外からの流入がしばしば起こることが

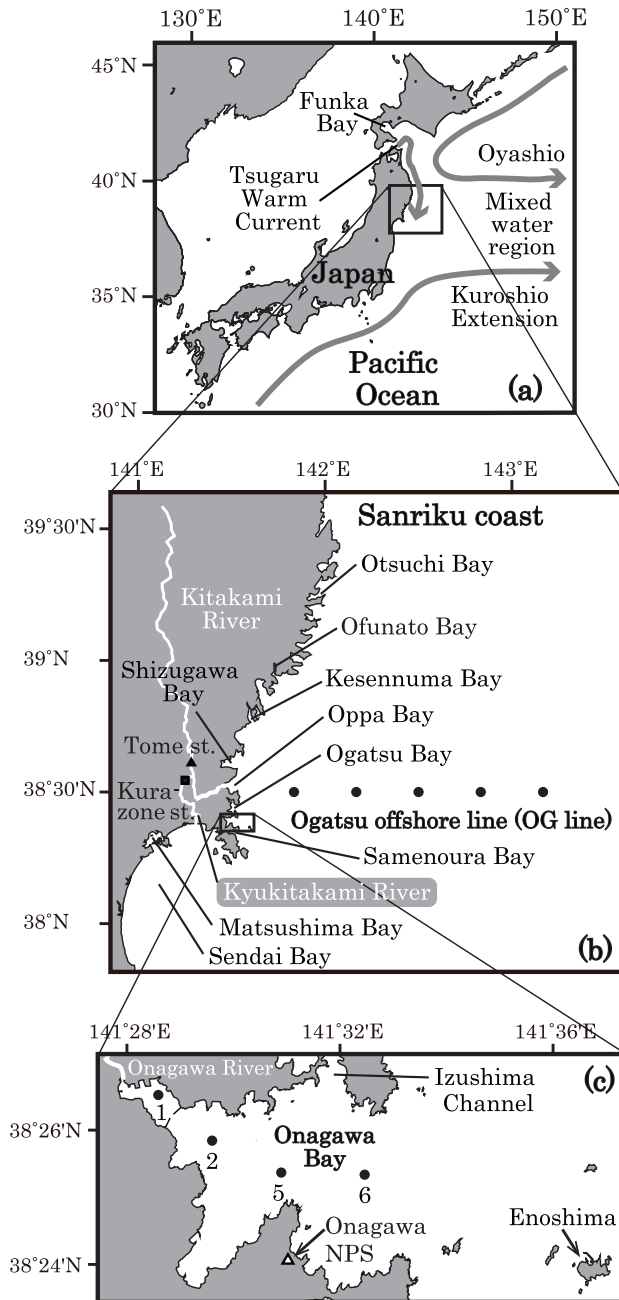


Fig. 1. Maps of (a) Sea area around Japan, (b) Sanriku coast, and (c) Onagawa Bay. Closed circles in (b) and (c) denote the stations for hydrographic observation. Closed triangle and square in (b) denote the location of the Tome and Kurazone stations, where the discharge of the Kitakami and Kyukitakami Rivers is measured, respectively. Opened triangle in (c) denotes the location of the Onagawa Nuclear Power Station (Onagawa NPS).

報告されており (岡寄, 1994; Ishizu *et al.*, 2017; Takahashi *et al.*, 2017, 2018), また, 上述したように, 湾内では沖合に起源を持つ水系が多く観察されることから, 湾外からの流入は三陸の湾内の水系に影響を与える重要な過程と考えられるが, 湾内水系の季節変動に対するその重要性は十分に明らかにされていない。これを理解するうえで, 各水系の季節変動について湾内と湾外との間の関係性を明らかにすることは有効な手段と考えられる。

三陸南部に位置する女川湾は, 長さが約 7 km, 幅が約 2-3 km の半閉鎖的な湾である (Fig. 1c)。湾の水深は, 湾奥から湾口へ向かって徐々に深くなり, 最深部で約 40 m に達する。女川湾へ流入する河川として, 女川と呼ばれる小さな二級河川があり, 北側の湾奥部へ淡水を供給している。また, 湾中央部の南岸には女川原子力発電所があり (Fig. 1c), 発電中は温排水を湾内へ放出する。この温排水が湾の生物や環境に与える影響を監視するため, 宮城県および東北電力によって定期調査 (女川原子力発電所温排水調査) が長期間にわたって行われており, 女川湾の物理, 化学および生物に関するデータが蓄積されている。

本研究では, (1) 沖合には存在せず, 女川湾には存在する海水の性質, 分布, 季節変動, 起源を明らかにし, さらにその形成要因を検討する, (2) 長期データを用いて, 女川湾の各季節を代表する水系分布を明らかにする, (3) 各水系の季節変動について女川湾内と湾外との間の関係性を調べることを目的とした。また, (4) 女川湾における各水系の季節変動および分布の東北地方太平洋地震前後の変化についても検証した。

2. 資料と方法

本研究では, 二つの長期データセットを用いた。一方は, 宮城県および東北電力が女川湾で行っている女川原子力発電所温排水調査で得られたものであり, もう一方は, 宮城県が宮城県沿岸から外洋にかけて行っている定期調査で得られたものである。

女川湾における調査は, 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10 および 11 月の年 8 回, 湾全域にわたって行われている (Fig. 1c)。本研究では, 2000 年 4 月から 2017 年 2 月にかけて, 北側の湾奥から湾口にかけて設定された 4 測点 (Sts. 1, 2, 5 およ

び6)で、4-5深度(0.5, 5, 10, 20 m および海底直上0.5 mあるいは1 m)から得られた水温、塩分および σ_t のデータを用いた(宮城県・東北電力, 2002-2018)。なお、各測点の海底直上0.5 mあるいは1 mに該当する平均深度は、湾奥から湾口に向かって、それぞれ15, 31.5, 36.6 および39.9 mであった。水温と塩分は、それぞれサーミスタ温度計およびサリノメーターにより測定された。

宮城県沿岸から外洋にかけての調査は、原則として毎月、38°Nから38°50'Nの間に設定された3本の調査線上で行われている。本研究では、3本の調査線のうち、最も女川湾に近い雄勝沖合ライン(OGライン: 38°30'N, 141°50'E-143°10'E)上の5測点で(Fig. 1b), 6深度(0, 5, 10, 20, 30 および40 m)から、先述した女川湾の調査と同じ期間の同じ8つの月に、CTD観測により得られた水温、塩分および σ_t のデータを用いた。なお、各測点の水深は、最も海岸に近い測点のみ200 m以下(平均190 m)で、それ以外の4測点では200 m以上であった。また、宮城県沿岸から沖合にかけての調査は、時々、月末から翌月の月初めにかけて行われたため、OGラインの観測が月に2回、あるいは1回も行われないことがあった。

データ品質管理のため、値が35を超える塩分データを異常値とみなし、データセットから棄却した。また、水温あるいは塩分のどちらかが欠損したデータペアもデータセットから棄却した。最終的に解析に用いた女川湾およびOGラインのデータ数は、それぞれ1ヶ月あたり303-323個, 337-583個であった(Fig. 2)。先述したように、OGラインでは1ヶ月あたりの観測頻度が変動したため、OGラインのデータ数は月によりばらつきがあり、2月および8月に少なく(≤ 350 個), 7月および10月に多かった(≥ 500 個)。

“はじめに”で述べたように、三陸の諸湾では、Hanawa and Mitsudera (1987)で提示された諸水系に該当する海水に加えて、それらには該当しない、一般的に低塩分で沖合には存在しないと考えられる海水も出現する。そこで本研究では、“岸近くには存在するが、その沖合には存在しない海水”を沿岸水(coastal water (CW))と呼称し、女川湾の海水をHanawa and Mitsudera (1987)で提示された6つの水系およびCWのいずれかに分類した。それにあたっては、まず、後に述べる分類基準値に従って、女川湾の海水をCWとそれ以外の海水

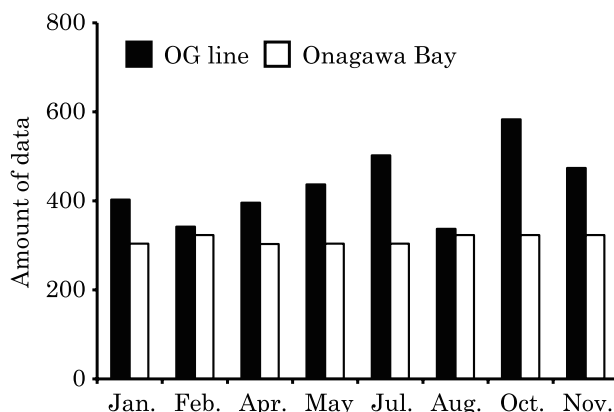


Fig. 2. Amount of data of each month obtained from Onagawa Bay and the Ogatsu offshore line (OG line) from April 2000 to February 2017.

とに分類し、次に後者を Hanawa and Mitsudera (1987)の定義に従い、以下に示す6つの水系のいずれかに分類した(Fig. 3): 津軽暖流水系(Tsugaru Warm Current water system (TW): 水温 $> 5^{\circ}\text{C}$, $33.7 < \text{塩分} < 34.2$ および $\sigma_t > 24$), 親潮水系(Oyashio water system (OW): 水温 $< 7^{\circ}\text{C}$, $33.0 < \text{塩分} < 33.7$ および $\sigma_t < 26.7$), 沿岸親潮水系(Coastal Oyashio water system (CO): 水温 $< 2^{\circ}\text{C}$ および $32.0 < \text{塩分} < 33.0$), 黒潮水系(Kuroshio water system (KW): 塩分 > 34.2 および $24.0 < \sigma_t < 26.7$), 低温下層水系(cold lower-layer water system (CL): $\sigma_t > 26.7$)および表層水系(surface-layer water system (SW): 水温塩分散図(T-S分散図)において、上述した5水系の領域を除いた領域の水温および塩分)。

岸近くに存在する海水のうち、その沖合では一般的に検出されない特性値をもつ海水は、沖合には存在しない海水、すなわちCWといえる。したがって、沖合で検出される特性値と検出されないそれとの境界値を分類基準値とすることで、CWとそれ以外の海水とを分類することができる。そして、この分類基準値は、 3σ 法の考え方に則り、沖合のデータを用いて求めることができる。 3σ 法は、データの頻度分布が正規分布に従う場合、ほぼ全て(99.7%)のデータが、平均(m)から標準偏差の3倍(3σ)の範囲内に入ることに基づき、この範囲から外れた値を異常値とみなす手法である。この手法に従うと、沖合のデータを用いて $m \pm 3\sigma$ を求めた場合、その上限を

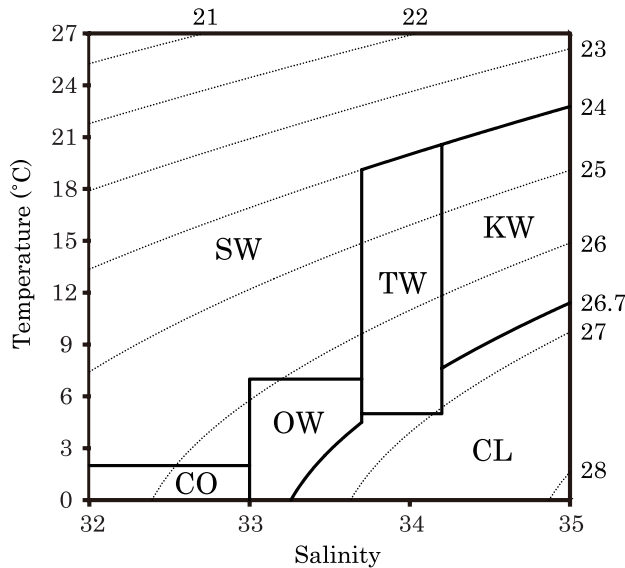


Fig. 3. Classification of water systems defined by Hanawa and Mitsudera (1987): the Tsugaru Warm Current water system (TW), the Oyashio water system (OW), the Coastal Oyashio water system (CO), the Kuroshio water system (KW), the cold lower-layer water system (CL), and the surface-layer water system (SW).

上回る、あるいは下限を下回る値は、沖合においては異常値、すなわち沖合において一般的に検出されないものとみなされることになる。したがって、岸近くに存在する海水のうち、沖合のデータから求めた $m \pm 3\sigma$ を超える特性値を持つものは、沖合には一般的に存在しないことになるため、CW ということができる。なお、三陸海域の場合、沖合水の性質は時空間的に変動するので、この分類基準値は対象とする岸近くの海域や時期毎に定める必要がある。

以上のような考えに基づき、本研究では、女川湾の海水を CW とそれ以外の海水とに分類するための分類基準値として、女川湾の沖合付近に設定された OG ラインの観測により得られた水温、塩分および σ_t のデータからそれぞれ月毎に求めた $m \pm 3\sigma$ の値を用いた。そして、女川湾に出現した海水のうち、その水温、塩分および σ_t の値のいずれかが、この分類基準値の上限を上回る、あるいは下限を下回るものを CW とした。なお、既報の CW に該当する海水は、一般的に低塩分で特徴づけら

れるが、その他の特徴を有する CW が存在する可能性も考慮して、水温および σ_t も分類特性に用いた。基準値となる OG ラインの水温、塩分および σ_t の平均および標準偏差の値は、月毎に外れ値を除外したデータから算出した。なお、外れ値の検出方法としては、スミルノフ・グラブス検定を用いた。この検定は、データが正規分布に従うと仮定して、データの中の最小値、もしくは最大値が外れ値であるかどうかを検定するものである。

上述の水温および塩分による分類方法では、同じ水温および塩分を持つが、起源は異なる海水を分類することはできない(例えば、親潮水系と黒潮水系の混合により津軽暖流水系と同じ水温と塩分を持つ海水が形成された場合、これと津軽暖流水系とを区別できない)。ただし、親潮水と黒潮水とではアルカリ度が異なることや (Kakehi *et al.*, 2017b)、津軽暖流水と同じ起源(対馬暖流水)を持つ宗谷暖流水と親潮水とでは炭素および酸素の安定同位体比が異なることから (Oguma *et al.*, 2008)、これらの成分を併用することでそのような海水を分類できる可能性がある。しかしながら、本研究で対象としたモニタリング調査ではこれらの成分の測定は行われていないため、本論文では上述した水温と塩分のみによる分類方法に従った。

ある任意の測点の水深を代表する水系を表すために、本研究では、Hanawa and Mitsudera (1987) により提案されたモード水系を用いた。ここでモード水系は、ある任意の測点の各水深において最も高頻度に出現する水系として定義される。本研究では、モード水系を女川湾について月毎に求めた。

3. 結果

3.1. 水温塩分分散図におけるデータの分布

CW の分類基準となる、OG ラインの水温、塩分および σ_t は、調査期間を通じてそれぞれ 1.1-26.6°C、23.1-34.8 および 14.9-27.1 の範囲にあった。なお、塩分が 32 を下回るデータは、本研究で用いた OG ラインの全データ (3474 個) のうち、わずか 3 個であった。T-S 分散図において (Fig. 4, Fig. 5)、OG ラインのデータは、1月から5月までの間は σ_t が 25.5-26.6 の狭い領域に集中していた

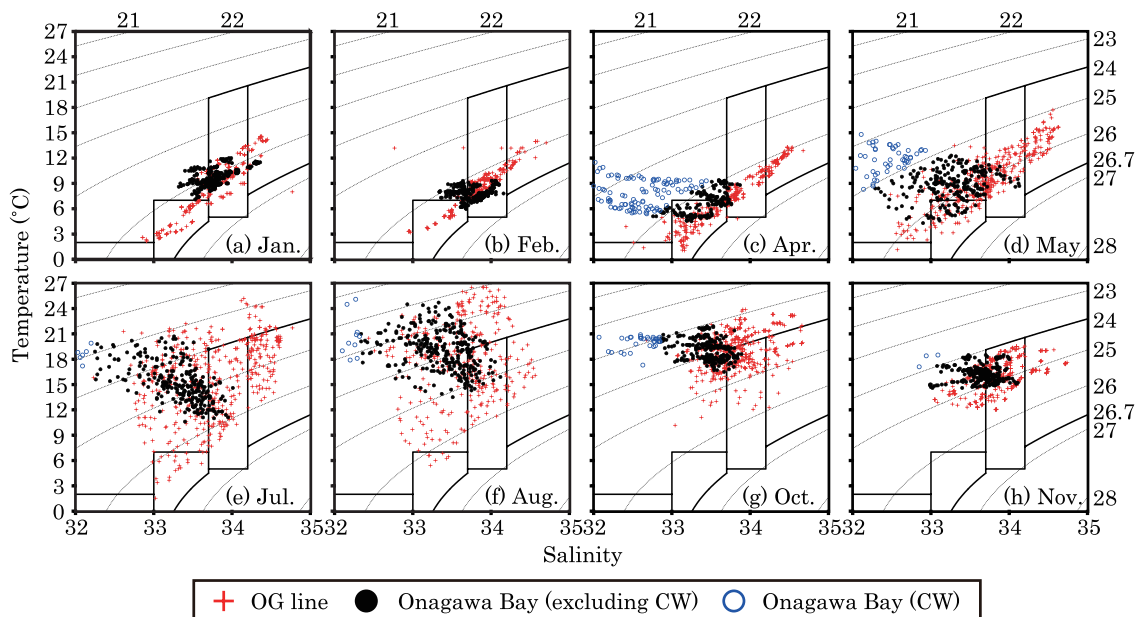


Fig. 4. Temperature-Salinity scatter diagram for Onagawa Bay and the OG line in (a) January, (b) February, (c) April, (d) May, (e) July, (f) August, (g) October, and (h) November. Circles and crosses denote the data obtained from Onagawa Bay and the OG line, respectively. Empty and solid circles denote coastal water (CW) and the other water systems, respectively.

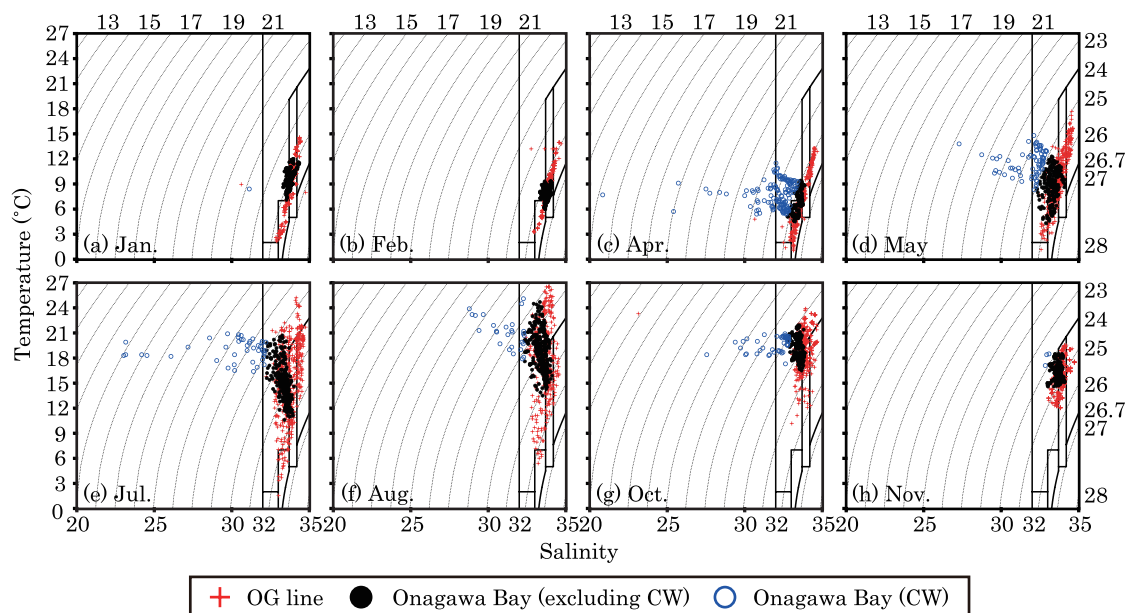


Fig. 5. Temperature-Salinity scatter diagram for Onagawa Bay and the OG line in (a) January, (b) February, (c) April, (d) May, (e) July, (f) August, (g) October, and (h) November. Circles and crosses denote the data obtained from Onagawa Bay and the OG line, respectively. Empty and solid circles denote coastal water (CW) and the other water systems, respectively.

が (Fig. 4a-d), 7月および8月は σ_t が 22-26.6 の広い領域に分散していた (Fig. 4e, f)。その後, 11月にかけて, データの分布領域は縮小していった (Fig. 4g, h)。

女川湾の水温, 塩分および σ_t は, 調査期間を通じてそれぞれ 4.3-25.1°C, 20.8-34.4 および 15.8-26.6 の範囲にあった。T-S 分散図において, 女川湾のデータは, 11月から2月までの間はそのほぼ全てが OG ラインのデータの分布領域内あるいはその近傍に分布していたが (Fig. 4a, b, h), 4月から10月までの間はそのような領域だけでなく, それらよりも明確に低い塩分あるいは低い σ_t の領域にも一定数が分布していた (Fig. 4c-g, Fig. 5c-g)。

3.2. 女川湾における沿岸水の分類と性質

OG ラインのデータから算出した CW の分類基準値 (Table 1) を用いて女川湾の海水を分類した結果, 2月を除く全ての月に CW が認められた (Fig. 4a, c-h, Fig. 5a, c-h)。個々の海水の分類において実際に適用された CW の分類基準値は, 塩分の基準下限値および/あるいは σ_t の基準下限値であり, それ以外の基準値 (水温の基準上限値および下限値, 塩分および σ_t の基準上限値) が適用されることはなかった。したがって, 本研究で確認された CW は, OG ラインの海水と比較して, 低塩分および/あるいは低密度であったといえる。CW の分類において, 1, 7, 8 および 10 月に確認された全ての CW は, 塩分の基準下限値 (32.7, 32.2, 32.3 および 32.9) が適用されていた。一方, 4, 5 および 11 月に確認された CW のうち, 約半分は塩分の基準下限値 (32.4, 32.3 および 32.9) が適用されていたが, 残り半分は塩分の基準値が適用されず, σ_t の基準下限値 (25.9, 25.1 および 23.8) のみが適用されていた。

T-S 分散図において, CW は, 塩分が 32 以下の領域および SW の領域に分布した。調査期間中に出現した CW の 39.6% および 60.4% が, それぞれ塩分が 32 以下の領域および SW の領域に分布していた (Fig. 4, Fig. 5)。また, 塩分が 32 以下の CW は, 4月および7月に頻出し, その総出現数のそれぞれ 30.1% および 27.2% がこれらの月に出現していた (Fig. 5c, e)。

Table 1. Mean \pm standard deviation of temperature, salinity, and density (σ_t) of each month from April 2000 to February 2017 on the OG line, and criterion values (in parentheses) for classifying coastal water in Onagawa Bay, which are mean \pm three standard deviations of each parameter on the OG line.

	Temperature (°C)	Salinity	σ_t
Jan.	8.9 \pm 3.0 (-0.1, 18.0)	33.8 \pm 0.3 (32.7, 34.8)	26.1 \pm 0.2 (25.4, 26.9)
Feb.	8.6 \pm 2.2 (1.9, 15.2)	33.9 \pm 0.3 (32.9, 34.8)	26.3 \pm 0.1 (25.9, 26.7)
Apr.	7.5 \pm 3.1 (-1.8, 16.7)	33.8 \pm 0.5 (32.4, 35.1)	26.3 \pm 0.1 (25.9, 26.8)
May	9.8 \pm 3.2 (0.1, 19.5)	33.7 \pm 0.5 (32.3, 35.2)	25.9 \pm 0.3 (25.1, 26.8)
Jul.	15.8 \pm 4.5 (2.4, 29.2)	33.8 \pm 0.5 (32.2, 35.3)	24.7 \pm 0.9 (22.2, 27.3)
Aug.	17.9 \pm 4.8 (3.5, 32.3)	33.6 \pm 0.4 (32.3, 34.9)	24.1 \pm 1.1 (20.7, 27.6)
Oct.	19.0 \pm 2.1 (12.7, 25.3)	33.8 \pm 0.3 (32.9, 34.8)	24.1 \pm 0.5 (22.6, 25.6)
Nov.	16.0 \pm 1.8 (10.5, 21.5)	33.9 \pm 0.3 (32.9, 34.9)	24.9 \pm 0.4 (23.8, 25.9)

3.3. 女川湾における水系の季節変動, 水平および鉛直分布

Hanawa and Mitsudera (1987) の分類基準に従い, CW を除いた女川湾の海水を分類した結果, OW, TW, SW および KW が確認された (Fig. 4)。これらの水系のうち, KW は出現頻度が極めて低く, その出現が確認されたのは 2002 年 1 月のみであった (Fig. 4a, Fig. 6a)。一方, KW 以外の 3 つの水系および CW は, 調査期間中繰り返し出現した (Fig. 6)。

女川湾に出現した水系のうち, OW, TW および CW は, 出現頻度の季節変動が大きく, また, OW および CW は,

鉛直方向について顕著に不均一な分布を示した。すなわち、OWは2月から5月までの期間にのみ出現し、とりわけ4月に高い頻度で出現した (Fig. 4b-d)。また、その分布は20 m以深に偏っていた (Fig. 6b-d)。CWの出現頻度は、4月から10月までの間は高く (Fig. 4c-g, Fig. 5c-g), 11月から2月までの間は非常に低かった (Fig. 4a, b, h, Fig. 5a, b, h)。また、CWは5 m以浅に集中して分布し、20 m以深にはほとんど出現しなかった (Fig. 6)。TWは一年を通して出現したが、その出現頻度は、11月から2月までの間は高く (Fig. 4a, b, h), 4月から10月までの間は低かった (Fig. 4c-g)。一方、SWは一年を通して高頻度で出現し、前述の3つの水系と比較して季節変動が小さく、湾全体に比較的均一に分布していた (Fig. 4, Fig. 6)。

3.4. 女川湾におけるモード水系分布の季節変動

女川湾におけるモード水系の分布には、明瞭な季節変動が認められた。1月および2月には、SWが分布していた湾奥を除く、湾の全域をTWが占有していた (Fig. 7a, b)。しかしながら、4月になるとTWは完全に消失し、海表面から5 m (Sts. 1-5) あるいは10 m (St. 6) までにCW, 10 mにSW, それ以深にはOWが分布していた (Fig. 7c)。5月になるとOWは完全に消失したが、CWは依然として湾全域の海表面に分布しており (Fig. 7d), さらに7月にも St. 2を除いて同様に分布していた (Fig. 7e)。8月以降はCWも出現せず、SWが優占したが (Fig. 7f-h), 11月には湾全域の20 m以深をTWが占有していた (Fig. 7h)。

3.5. 女川湾と湾外の沿岸域との間における水系の季節変動の関係性

女川湾全体および湾外の沿岸域 (OGラインの最も岸に近い測点) のそれぞれで、月毎に各水系の相対出現頻度 (各月の全データ数に対する各水系の出現頻度の割合) を求め、その季節変動を両海域間で比較した (Fig. 8)。女川湾のみに存在するCW以外の水系のうち、TW, OWおよびSWの季節変動のパターンは、女川湾と湾外の沿岸域との間でよく類似していた。ただし、各月の値には両海域間で明瞭な違いが認められ、5月のOWを除いて、TWおよびOWの相対出現頻度が湾外の沿岸域よ

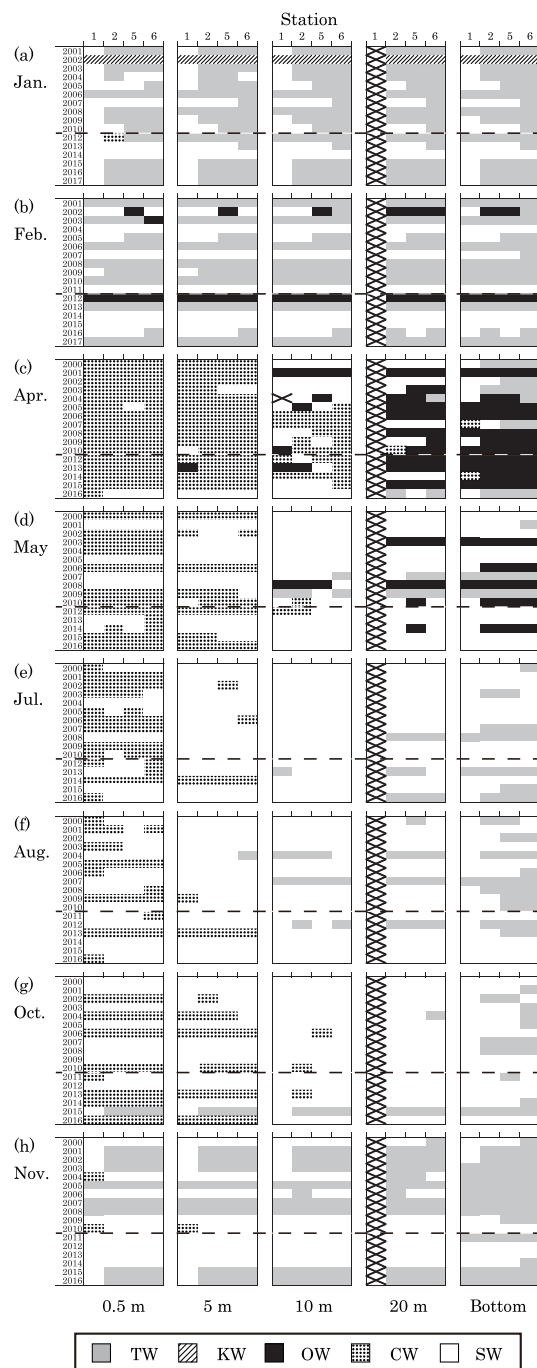


Fig. 6. Time-station diagram of water systems in (a) January, (b) February, (c) April, (d) May, (e) July, (f) August, (g) October, and (h) November in Onagawa Bay. The cross denotes no data. The dashed line denotes the division between the periods before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

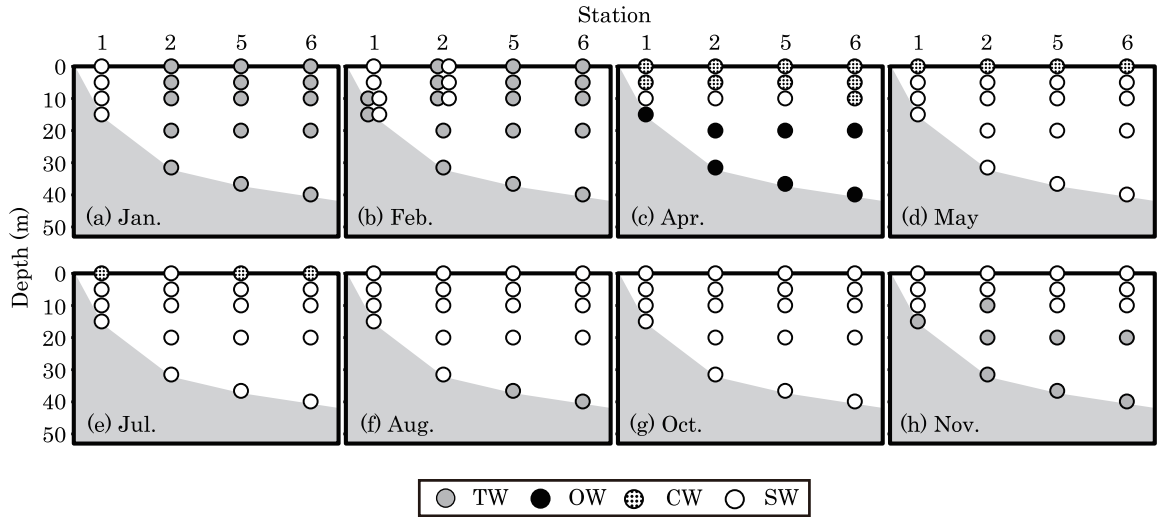


Fig. 7. Distribution of mode water systems in (a) January, (b) February, (c) April, (d) May, (e) July, (f) August, (g) October, and (h) November in Onagawa Bay. Partially overlapped symbols denote that two water systems appear with the same frequency at a point.

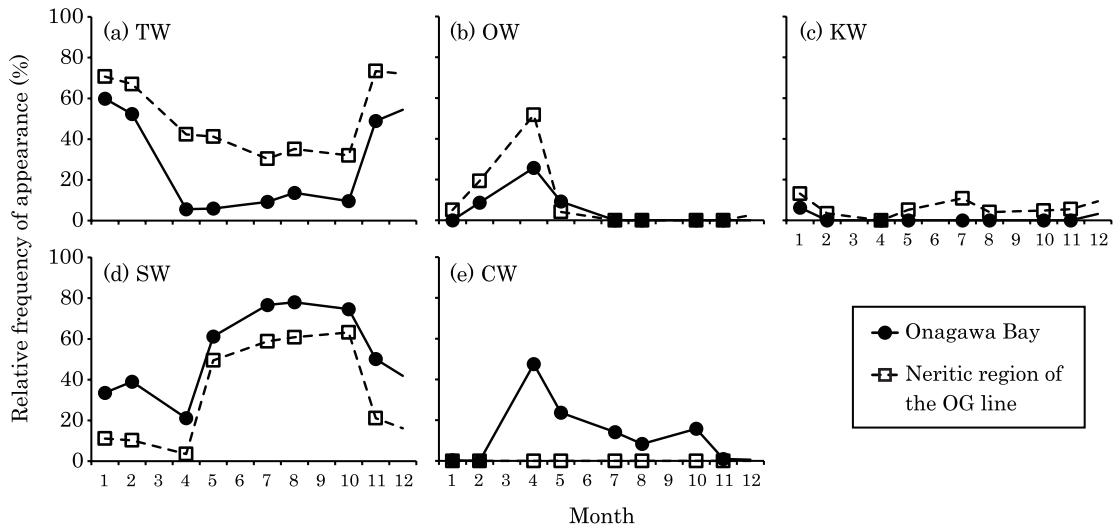


Fig. 8. Temporal variation in the relative frequency of appearance (%) for (a) the Tsugaru Warm Current water system (TW), (b) the Oyashio water system (OW), (c) the Kuroshio water system (KW), (d) the surface-layer water system (SW), and (e) coastal water (CW) in Onagawa Bay and the neritic region of the OG line.

りも女川湾で低かったのに対し (Fig. 8a, b), SW のそれは逆に湾外の沿岸域よりも女川湾で高かった (Fig. 8d)。一方, KW は, 先述したように女川湾では調査期間中一

度しか出現しなかったが, 湾外の沿岸域では4月を除く全ての月に出現した (Fig. 8c)。

4. 考察

4.1. 女川湾に出現した沿岸水の形成

CW は、塩分および／あるいは密度が沖合の OG ラインの海水よりも低く (Fig. 4, Fig. 5), おもに表層に分布していた (Fig. 6)。CW のうち, OG ラインの海水よりも塩分が低い CW の出現頻度は, 降水量が多くなる 4 月から 10 月 (Fig. 9a および第 4 章 2 節参照) に高かった。このような特徴から, OG ラインの海水よりも塩分が低い CW については, おもに河川を通じて陸域から供給された淡水と湾内の表層水とが混合することで形成されたものと考えられた。

一方, OG ラインの海水よりも密度のみが低い CW, すなわち, 海水の分類において σ_t の基準下限値のみが適用された CW (以下, 低密度 CW と称す) は, 陸域からの淡水供給だけでなく, 日射加熱により表層水が沖合域よりも湾内で大きく昇温することでも形成されうる。海面加熱期に海面の加熱時間が鉛直方向の熱の拡散時間よりも長い場合, 水深の浅い沿岸域では沖合域よりも水柱の単位面積当たりの熱容量が小さいため, このような現象が生じることが知られている (宇野木, 1993)。実際, 低密度 CW が観察された 4 月の海表面および 5 月の海表面から 5 m において, 低密度 CW の水温は OG ラインの海水のそれよりも高い傾向にあり, 平均水温は OG ラインの海水よりも低密度 CW で 1.0–1.6°C 高かった。

そこで, 4 月あるいは 5 月までに表層水が OG ラインよりも女川湾で大きく昇温する可能性を検証するために, 以下の関係式を用いて女川湾における鉛直方向の熱の拡散時間 (T_d) を求め, 海面の加熱時間 (T_h) と比較した。

$$T_d = \frac{D^2}{K_z}$$

ここで, D および K_z は, それぞれ代表的な鉛直方向のスケールおよび鉛直拡散係数であり, D に女川湾の最大水深である 40 m, K_z に沿岸域において一般的な値である 10^{-3} – $10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Valle-Levinson, 2010) を用いると, T_d の値として 1.9–18.5 日が得られた。一般的に海面加熱期は 3 月から始まるので, 4 月あるいは 5 月までの T_h はお

よそ 30–60 日あるいは 60–90 日となり, T_d を上回ることになる。したがって, 低密度 CW が観察された 4 月および 5 月までに, 表層水が OG ラインよりも女川湾で大きく昇温する可能性があることが示された。

次に, 低密度 CW の形成に対する日射加熱による昇温

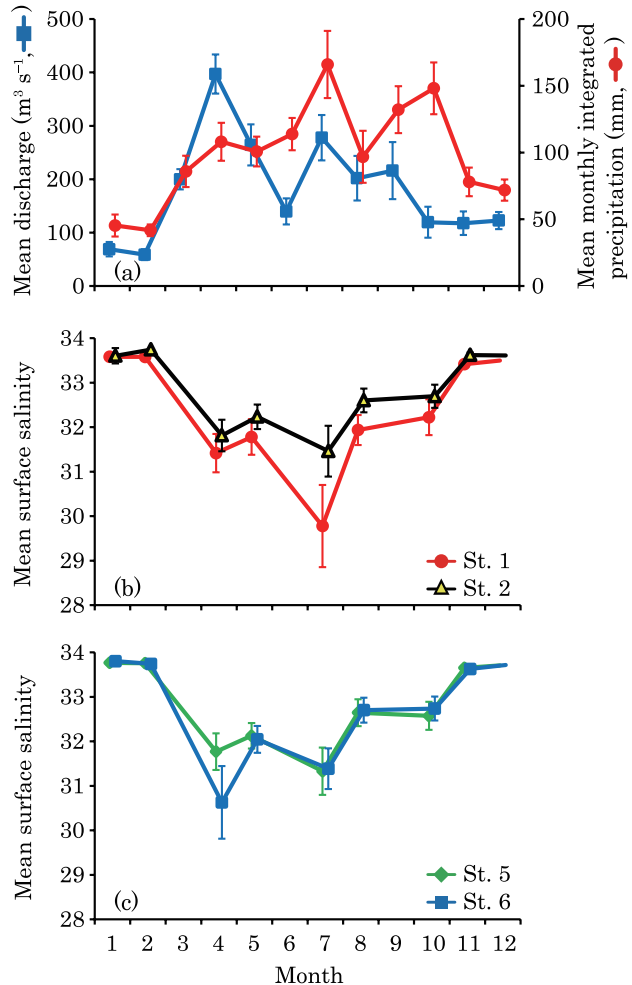


Fig. 9. Temporal variation in (a) monthly mean discharge of the Kitakami River from April 2000 to December 2014, mean monthly integrated precipitation at Enoshima from April 2000 to February 2017, and mean surface salinity at (b) Stations 1 and 2 and (c) Stations 5 and 6 in Onagawa Bay. Discharge of the Kitakami River was obtained from subtracting the discharge measured at the Kurazone station from that at the Tome station. Error bar represents the standard error.

および淡水供給による塩分低下の影響を評価するため、低密度 CW の密度に対する水温および塩分の効果を以下に調べた。

海水密度 (ρ) の変化に対する圧力の効果が小さい沿岸域では、任意の深度間の密度差 ($\Delta\rho$) は以下のように表現することができる。

$$\Delta\rho = -\rho\alpha\Delta T + \rho\beta\Delta S$$

ここで、 α , β , ΔT および ΔS はそれぞれ熱膨張係数、塩分収縮係数、任意の深度間の水温差および塩分差であり、 $-\rho\alpha\Delta T$ および $\rho\beta\Delta S$ はそれぞれ $\Delta\rho$ に対する水温および塩分の効果を表している。ここでは、低密度 CW が観察された海面加熱期の 4 月および 5 月のそれぞれで、低密度 CW およびその直下の海水それぞれの平均水温 (\bar{T})、平均塩分 (\bar{S})、平均密度 ($\bar{\rho}$)、 $\alpha (= -\rho^{-1} \frac{\partial\rho}{\partial T})$

および $\beta (= \rho^{-1} \frac{\partial\rho}{\partial S})$ 、ならびに二つの海水の間の水温差 (ΔT)、塩分差 (ΔS) を求め、さらにそれらから $-\bar{\rho}\alpha\Delta T$ および $\bar{\rho}\beta\Delta S$ を算出し、比較した (Table 2)。その結果、どちらの月でも、低密度 CW はその直下の海水よりも高水温、低塩分および低密度であり、 $-\bar{\rho}\alpha\Delta T$ よりも $\bar{\rho}\beta\Delta S$ のほうが大きかった。このことは、低密度 CW とその直下の海水との間の密度差はおもに塩分の効果によってもたらされたことを示しており、それゆえ低密度 CW の密度はおもに塩分に依存していたといえる。したがって、低密度 CW は、OG ラインの海水よりも塩分が低い CW と同様に、おもに河川水と湾内表層水との混合により形成されたものと考えられた。この考えは、本研究で水温の基準値が適用された CW が確認されなかったことから支持される。

Table 2. Contribution of difference in mean temperature and salinity to that in mean density between the less dense coastal water (CW) and the water just below CW.

April											
	\bar{D}	\bar{T}	\bar{S}	$\bar{\rho}$	α	β	ΔT	ΔS	$\Delta\rho$	$-\bar{\rho}\alpha\Delta T$	$\bar{\rho}\beta\Delta S$
	(m)	(°C)		(kg m ⁻³)	(10 ⁻⁴ K ⁻¹)	(10 ⁻⁴)	(°C)		(kg m ⁻³)	(kg m ⁻³)	
Less dense CW	5.8	7.7	32.8	1025.6	1.13–1.61	7.61–7.71					
Water just below CW	12.0	7.0	33.2	1026.0	1.05–1.57	7.62–7.73	-0.7	0.4	0.4	0.1–0.1	0.3–0.3
May											
	\bar{D}	\bar{T}	\bar{S}	$\bar{\rho}$	α	β	ΔT	ΔS	$\Delta\rho$	$-\bar{\rho}\alpha\Delta T$	$\bar{\rho}\beta\Delta S$
	(m)	(°C)		(kg m ⁻³)	(10 ⁻⁴ K ⁻¹)	(10 ⁻⁴)	(°C)		(kg m ⁻³)	(kg m ⁻³)	
Less dense CW	3.0	11.9	32.5	1024.7	1.48–2.01	7.54–7.64					
Water just below CW	7.9	10.5	33.0	1025.3	1.19–1.97	7.54–7.70	-1.4	0.5	0.6	0.2–0.3	0.4–0.4

\bar{D} : mean depth, \bar{T} : mean temperature, \bar{S} : mean salinity, $\bar{\rho}$: mean density, α and β : expansion coefficient for temperature and salinity, respectively, ΔT , ΔS and $\Delta\rho$: difference in mean temperature, salinity and density between the less dense CW and the water just below CW, respectively, $-\bar{\rho}\alpha\Delta T$ and $\bar{\rho}\beta\Delta S$: difference in mean density caused by that in mean temperature and salinity between the less dense CW and the water just below CW, respectively. The less dense CW is one type of CW, which is less dense than the lower limit of the criteria for σ , but within the limits for temperature and salinity.

4.2. 女川湾に出現した沿岸水の起源

CWはおもに河川水と湾内の表層水との混合によって形成されると考えられることから、そのおもな形成場所は、二級河川女川の河口域にあたる北側の湾奥部と考えられる。しかしながら、そこを唯一のCWの形成場所とすると、4月のモード水系の分布において、女川の河口から最も離れたSt. 6で海表面から最も深く(10 m)までCWが分布していたこと(Fig. 7c)、また7月のモード水系の分布において、女川の河口に比較的近いSt. 2にだけCWが分布していなかったこと(Fig. 7e)について説明が困難である。したがって、湾奥以外にもCWの形成場所があるものと考えられる。女川湾の北方約15 kmに位置する追波湾では、一級河川の北上川から流入した大量の淡水により、大量の低塩分水が形成されている(工藤ら, 2002; 石川ら, 2004)。この低塩分水は、地球の自転の効果を考慮すると、湾外では岸を右手に見ながら南方向へ流れることになるため(杉本, 1982)、女川湾で観察されたCWの一部は追波湾に由来している可能性がある。そこで、CWの起源を推定するために、女川湾の表面塩分と北上川あるいは女川からの淡水供給との関係を調べた。

北上川からの淡水供給として、河口から約30 km上流に位置する登米観測所(Fig. 1b)で測定された日流量から、登米観測所の約6 km下流にある旧北上川分流点からさらに旧北上川側の下流約1.5 kmに位置する倉埠観測所(Fig. 1b)で測定された日流量を引くことで得られたデータを用いた(国土交通省, <http://www.data.jma.go.jp/>)。なお、ここでは両観測所で測定が実施された2000年4月から2014年12月まで(2006年2月, 2013年4月から2013年12月まで, 2014年2月および2014年10月から2014年11月までの期間を除く)のデータを解析の対象とした。一方、女川の流量データは存在しなかったため、代わりに三陸で河川流量と有意な正の相関関係にある降水量のデータを用いた(Kakehi *et al.*, 2017c)。なお、ここで用いた降水量のデータは、女川湾の東方約45 kmに位置する江島(Fig. 1c)で、自動気象データ収集システム(AMeDAS)により2000年4月から2017年2月までの間に測定された。

江島の月積算降水量は一年の中で3月から10月に多

く、とりわけ7月および10月に顕著に多かった(Fig. 9a)。それにほぼ対応して、女川湾の表面塩分はいずれの測点でも4月から10月に低く、また、全測点のうち女川の河口に最も近いSt. 1では、降水量のピークに対応した顕著な塩分低下が7月に観察された(Fig. 9b)。このことは、女川から供給された淡水が北側の湾奥の表層水に強く影響を与えていることを示唆しており、女川湾の北側の湾奥でCWが形成されることを支持している。なお、10月の降水量のピークに対応する顕著な塩分低下は観察されなかったが、その理由は、他の月に比べて10月には調査前最後の雨の日から調査日までの間隔が比較的長い場合が多く(図表なし)、調査日にはすでに淡水供給の影響が弱まっていたことが多かったためと考えられる。一方、北上川の月平均流量は、一年の中で4月から9月、とりわけ4月に顕著に多く(Fig. 9a)、この流量のピークに対応した顕著な表面塩分の低下が湾口に位置するSt. 6で4月に観察された(Fig. 9c)。このことは、北上川から放出された淡水の影響が女川湾にまで及んでいることを示唆しており、女川湾で観察されたCWの一部が、北上川からの淡水供給により追波湾で形成されたものに由来することを支持している。以上のように、女川湾で観察されたCWの形成場所が女川湾の北側の湾奥および追波湾であることが示唆されたが、それらに加えて、河川がない女川湾の南側の湾奥においても、周辺の斜面から供給される淡水により、CWに該当する低塩分水が形成されることが報告されている(大友ら, 2019)。

4.3. 女川湾における水系の季節変動に対する湾外からの流入の影響

TW, OW および SW の相対出現頻度の季節変動パターンは、それぞれ女川湾と湾外の沿岸域との間でよく類似していた(Fig. 8a, b, d)。したがって、女川湾におけるこれらの水系の季節変動は、湾外からの流入の影響を強く受けていると考えられた。一方で、これらの水系の各月における相対出現頻度には、両海域間で明瞭な違いが認められ、TW および OW の相対出現頻度が湾外の沿岸域よりも女川湾で低かったのに対し(Fig. 8a, b)、SW のそれは湾外の沿岸域よりも女川湾で高かった(Fig. 8d)。このような状況は、湾内に流入したTW および OW の一部がSWに変化すること、および/あるいはTWやOW

よりもSWのほうが湾内へ流入しやすいことで生じうる。前者については、女川から流入した淡水や湾外から流入したCWとの混合や日射加熱による昇温などによって起こることが十分に考えられるが、後者を支持する解析結果や報告は現時点で得られておらず、その可能性は低いと考えられる。

17年間の調査期間を通じて、女川湾においてKWが確認されたのは一度(2002年1月)だけであり(Fig. 6a)、湾内にKWが出現することは極めてまれであることが示された。しかしながら、各水系について湾外の沿岸域における年間の相対出現頻度を求めたところ、KW(6.0%)とOW(9.0%)との間で大きな違いはなかった。したがって、黒潮統流から切離した暖水渦もしくは暖水ストリーマは、親潮第一分枝と大差ない頻度で三陸沿岸域に到達していたといえる。それにもかかわらずKWが湾内で確認されることがほとんどなかった原因として、暖水渦もしくは暖水ストリーマから派生したKWが湾外の沿岸域から湾内へ流入しなかった、あるいは湾外の沿岸域から湾内へ流入する過程で周囲の海水と混合し、KWから他の水系に変化したことが挙げられる。三陸沿岸域を流れる津軽暖流は、沿岸域への親潮系水の流入を妨げる障壁として機能することが報告されていることから(花輪・岩坂, 1987)、黒潮系水の流入に対しても同様に機能し、それにより湾内へのKWの流入が妨げられた可能性が考えられる。また、津軽暖流の流量は季節的および経年的に変動することから(西田ら, 2003)、流量が減少した際には津軽暖流の障壁機能が弱まり、後者の過程が起っていた可能性も考えられる。これらの可能性を確かめるためには、今後、三陸沿岸域近辺における暖水渦や暖水ストリーマの挙動と津軽暖流の消長との関係を明らかにする必要があるだろう。

4.4. 東北地方太平洋沖地震前後の女川湾における水系の季節変動および分布の変化

本研究の調査期間中(2011年3月11日)に発生した東北地方太平洋沖地震および津波により、女川では、約1mの地盤沈下が発生し(Adityawanら, 2014)、湾奥のSt. 1とSt. 2との間にあった防波堤が崩壊した(Fig. 1c)。これらの影響により、湾外からの海水流入や湾内の海水循環が変化し、湾内における各水系の季節変動や分布の

パターンが変化した可能性がある。もし、実際にそのような水系の変化が生じたのなら、それらは地震以降に報告されるようになってきた貝毒原因プランクトンの大量発生(加賀ら, 2012; 増田ら, 2014; 石川ら, 2015)や底層における貧酸素化の進行および貧酸素水塊の発生(高橋ら, 2016; 大越, 2018)の原因となりうるので、実際に地震前後で水系に変化が生じたかどうかを確認する必要がある。そこで、地震前と後のそれぞれで、月、測点および深度毎に各水系の相対出現頻度(各月、各測点および各深度の全データ数に対する各水系の出現頻度の割合)を求め、それを地震前後で比較することで、各水系の季節変動、水平および鉛直分布について地震前後の変化を検証した(Fig. 10)。

その結果、いずれの水系についても、各月、各測点および各深度において地震前後で相対出現頻度にいくらかの違いはみられたものの、季節変動、水平および鉛直分布のパターンは地震前後でよく類似していた。女川では、湾の形状が変化するほどの大きな地形変化は起こらなかったため、湾外からの海水流入や湾内の海水循環がそれほど変化せず、結果として、各水系の季節変動や分布もほとんど変化しなかったものと考えられた。ただし、新しい防波堤の完成(2016年3月)のやや前から、防波堤の内(St. 1)と外(Sts. 2-6)との間で、相対出現頻度の違いが大きくなる傾向が各水系でみられた(図表なし)。これは、防波堤の内と外との間の海水交換の変化を反映し、貧酸素水塊の発生と関係している可能性があるため、今後さらにデータを蓄積し、再評価する必要がある。

5. おわりに

本研究により、低塩分および/あるいは低密度のCWが、女川湾表層において春から夏に卓越することが明らかとなった。また、このCWの起源は、女川からの淡水が注ぐ女川湾の湾奥だけでなく、北上川からの淡水が注ぐ追波湾にあること、すなわち、女川湾で観察されたCWの一部は湾外から流入してきたことが示唆された。このような湾外からのCWの流入は、女川湾と同様に追波湾の南方に位置する雄勝湾や鮫浦湾でも起っている可能性が高い。内湾表層への低密度水の流入は、湾内の

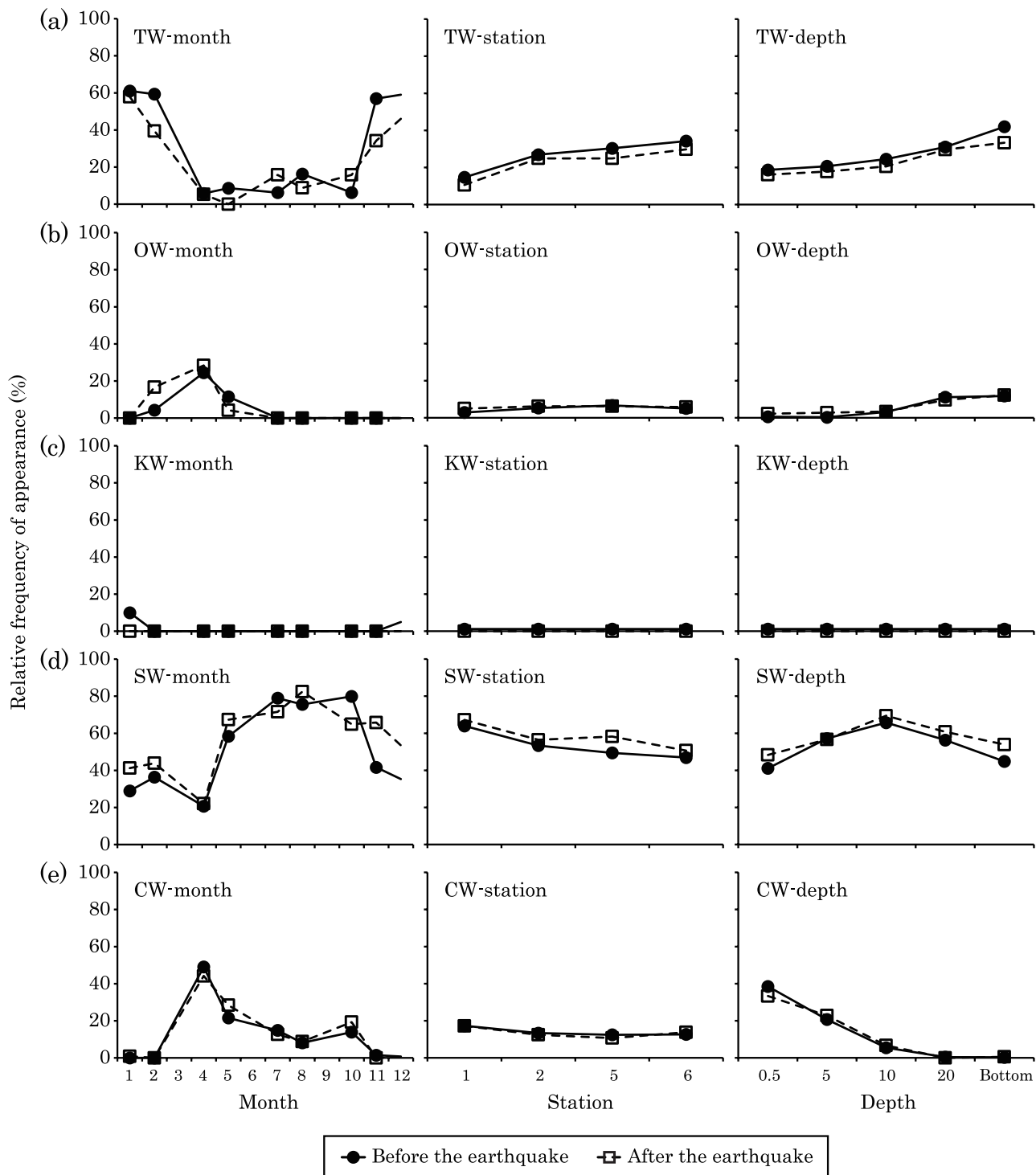


Fig. 10. Temporal variation and horizontal and vertical distribution in the relative frequency of appearance (%) for (a) the Tsugaru Warm Current water system (TW), (b) the Oyashio water system (OW), (c) the Kuroshio water system (KW), (d) the surface-layer water system (SW), and (e) coastal water (CW) in Onagawa Bay before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

海水循環に影響を与える重要な現象であり、河川から湾奥への淡水流入がエスチュアリー循環を引き起こすことはよく知られているが(藤原, 2007; 寛ら, 2012; Takahashi *et al.*, 2018), 近年, 湾外からの低密度水の流入も湾内の海水循環に影響を与えることが報告されている(Kakehi *et al.*, 2017a)。湾内の海水循環は水系分布に影響を与える重要な要因と考えられるので, 今後, CWの挙動, とりわけ湾外からのCWの流入が湾内の海水循環に与える影響について明らかにしていく必要がある。

女川湾におけるモード水系の分布は, 季節により大きく変動し, 秋の下層および冬にTW, 春の下層でOW, 春から夏の表層でCWが卓越することが明らかになった。このような変動と比較的類似した季節変動が大槌湾(Ishizu *et al.*, 2017), 大船渡湾(Yamada *et al.*, 2017)および志津川湾(Takahashi *et al.*, 2018)においても観察されていることから, 本研究の結果は, 三陸の諸湾における一般的な水系分布の季節変動をある程度表しているものと考えられる。その一方で, 津軽暖流の南下には季節変動があることや(武藤ら, 1969), 沿岸域への親潮系水や黒潮系水の流入頻度には南北差があることが知られていることから(武藤ら, 1969; Hanawa and Mitsudera, 1987), 水系分布の季節変動には, 湾による違いも存在することが予想される。今後, 三陸の諸湾で実施されているモニタリングにより蓄積されたデータを解析し, その結果を比較することで, 水系分布の季節変動について三陸の湾全体的一般性と各湾の特殊性が明らかにされることが望まれる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり, 宮城県水産技術総合センターから貴重な観測データを提供して頂きました。また, 原稿の改訂にあたり2名の査読者の方々および田中潔編集委員から有益なコメントを頂きました。ここにお礼申し上げます。

References

Abe, H., W. Sato-Okoshi, and Y. Endo (2011): Seasonal changes of planktonic polychaete larvae and chlorophyll *a* concentration in Onagawa Bay, northeastern Japan. *Ital. J. Zool.*, **78**, 255-266.

- Adityawan, M. B., 田中仁・H. Yeh (2014): 東日本大震災津波水位データを用いた地盤沈下時系列の推定. 土木学会論文集B2, **70**, 216-220.
- 藤原建紀 (2007): 河口域および内湾域におけるエスチュアリー循環流. 沿岸海洋研究, **44**, 95-106.
- Furuya, K., K. Takahashi, and H. Iizumi (1993): Wind-dependent formation of phytoplankton spring bloom in Otsuchi Bay, a ria in Sanriku, Japan. *J. Oceanogr.*, **49**, 459-475.
- 花輪公雄・岩坂直人 (1987): 冬季三陸沿岸域への親潮系の水の接岸と水温予報の試み. 月刊海洋科学, **19**, 53-59.
- Hanawa, K., and H. Mitsudera (1987): Variation of water system distribution in the Sanriku coastal area. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **42**, 435-446.
- Hayakawa, Y. (1990): Mean seasonal changes of dissolved inorganic nutrients in the Ofunato estuary. *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.*, **56**, 1717-1729.
- 日比野忠史・鶴谷広一・板橋直樹 (2004): 大船渡湾での水構造の季節変動特性と海水交換量の定量評価. 土木学会論文集, **761**, 69-80.
- 石川忠晴・工藤健太郎・坂井洋平・入江光輝・李炫錫・田中總太郎 (2004): 北上川融雪出水による追波湾の低塩分化について. 水工学論文集, **48**, 1225-1230.
- 石川哲郎・日下啓作・押野明夫・西谷豪・神山孝史 (2015): 東日本大震災後の宮城県気仙沼湾における*Alexandrium*属の栄養細胞とシストの分布パターンおよび二枚貝類の毒化. 日本水産学会誌, **81**, 256-266.
- Ishizu, M., S. Itoh, K. Tanaka, and K. Komatsu (2017): Influence of the Oyashio Current and Tsugaru Warm Current on the circulation and water properties of Otsuchi Bay, Japan. *J. Oceanogr.*, **73**, 115-131.
- 伊藤博・藤田則孝・千葉充子 (2006): 気仙沼湾湾奥部における漁場環境の季節変動. 宮城県水産研究報告, **6**, 51-57.
- 加賀新之助・渡邊龍一・長井敏・神山孝史・鈴木敏之 (2012): 東日本大震災後の岩手県大船渡湾における*Alexandrium tamarense*による貝類の毒化. 月刊海洋, **44**, 321-327.
- 寛茂穂・伊藤進一・八木宏・和川拓 (2012): 仙台湾における淡水および海水の平均滞留時間の推定. 土木学会論文集B2, **68**, 951-955.
- Kakehi, S., T. Takagi, K. Okabe, and K. Takayanagi (2017a): Circulation in a bay influenced by flooding of a river discharging outside the bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **187**, 204-215.
- Kakehi, S., S. Ito, and T. Wagawa (2017b): Estimating surface water mixing ratios using salinity and potential alkalinity in the Kuroshio-Oyashio mixed water regions. *J. Geophys. Res. Oce.*, **122**, 1927-1942.
- Kakehi, S., T. Kamiyama, Y. Kaga, K. Naiki, and S. Kaga (2017c): Improvement in the dissolved oxygen concentration and water exchange in Ofunato Bay, Japan, after the collapse of the bay-mouth breaker by the 2011 Tohoku Earthquake and tsunami. *Fish. Oceanogr.*, **26**, 114-127.
- 工藤健太郎・高坂香那・田中總太郎・石川忠晴 (2002): 北上川融雪出水の追波湾における挙動について. 海岸工学論文集, **49**, 361-365.
- 増田義男・奥村裕・太田裕達 (2014): 宮城県中南部海域における長期モニタリング調査(1993年~2013年)による貝毒原因プランクトンの変遷. 宮城県水産研究報告, **14**, 41-56.
- 宮城県・東北電力(株) (2002-2018): 女川原子力発電所温排水調査結果(平成12-28年度). 宮城県, 仙台.
- 武藤清一郎・佐野孝・平井正夫・工藤英朗・八百和子・山村弥六郎 (1969): 三陸沿岸水域の海況について. 東北区水産研究所研究報告, **29**, 93-123.
- 武藤清一郎・荒井永平 (1985): 第6章 三陸沿岸海域. 化学. p. 232-241, 日本全国沿岸海洋誌, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 東海大学出版会, 東京.

- 長澤一衛・高橋大介・伊藤直樹・高橋計介・尾定誠 (2016): 東日本大震災後の宮城県雄勝湾における垂下式養殖ホタテガイの水深による成育の違いと生産性の評価. 日本水産学会誌, **82**, 321-329.
- 西田芳則・鹿又一良・田中伊織・佐藤晋一・高橋進吾・松原久 (2003): 津軽海峡を通過する流量の季節・経年変化. 海の研究, **12**, 487-499.
- Oguma, S., T. Suzuki, and Y. Nagata (2002): Seasonal variations in the sea off Sanriku coast, Japan. *J. Oceanogr.*, **58**, 825-835.
- Oguma, S., T. Ono, A. Kusaka, H. Kasai, Y. Kawasaki, and T. Azumaya (2008): Isotopic tracers for water masses in the coastal region of eastern Hokkaido. *J. Oceanogr.*, **64**, 525-539.
- 大谷清隆 (1971): 噴火湾の海況変動の研究 II, 噴火湾に流入・滞留する水の特性. 北海道大農水産学部研究彙報, **22**, 58-66.
- 大友美智子・高橋大介・五味泰史・金子健司・藤井豊展 (2019): 宮城県女川湾における表層低塩分水の起源. p. 116. 2019年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集.
- 岡嶋守良 (1994): 三陸沿岸の海湾における海水交換と変動現象. 沿岸海洋研究ノート, **32**, 15-28.
- 大越和加 (2018): 地震・津波攪乱が砂泥底に生息するマクロベントス群集へ及ぼす影響と変化. 日本水産学会誌, **84**, 1062-1065.
- 奥田邦明・武藤清一郎 (1986): 東北海区の異常冷水現象の特徴とその発生要因. 水産海洋研究会報, **50**, 231-238.
- 尾定誠・長澤一衛・関澤彩真 (2018): 二枚貝の増養殖の復興への取組. 日本水産学会誌, **84**, 1070-1073.
- 杉本隆成 (1982): 開放型沿岸海洋の物理的諸問題. 沿岸海洋研究ノート, **19**, 121-130.
- 高橋大介・金子健司・原素之・木島明博 (2016): 宮城県沿岸域における湾内の海水流動調査. p. 19-26. 東北マリンサイエンス拠点形成事業(海洋生態系の調査研究)における課題「漁場環境の変化プロセスの解明」の成果報告書, 国立大学法人東北大学大学院農学研究科東北大学マリンサイエンス復興支援室編, 明倫社, 仙台.
- Takahashi, D., K. Kaneko, Y. Gomi, Y. Minegishi, M. Shoji, H. Endo, and A. Kijima (2017): Short-term flow fluctuations in Onagawa Bay, Japan, as revealed by long-term mooring observation. *J. Oceanogr.*, **73**, 67-86.
- Takahashi, D., H. Endo, Y. Minegishi, Y. Gomi, and K. Kaneko (2018): Wind- and density-driven circulation in a bay on the Sanriku ria coast, Japan: study of Shizugawa Bay facing the Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **74**, 81-100.
- Taniuchi, Y., T. Watanabe, S. Kakehi, T. Sakami, and A. Kuwata (2017): Seasonal dynamics of the phytoplankton community in Sendai Bay, northern Japan. *J. Oceanogr.*, **73**, 1-9.
- 宇田道隆 (1935): 昭和八年盛夏に於ける北太平洋の海況. 水産試験場報告, **6**, 1-130.
- 宇野木早苗 (1993): 第9章 成層海域の循環. p. 398-479. 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 東京.
- Valle-Levinson, A. (2010): *Contemporary issues in estuarine physics*. Cambridge University Press, New York, USA, 315 pp.
- Yamada, Y., S. Kaga, Y. Kaga, K. Naiki, and S. Watanabe (2017): Changes of seawater quality in Ofunato Bay, Iwate, after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *J. Oceanogr.*, **73**, 11-24.

Seasonal variation in distribution of water systems in Onagawa Bay of the Sanriku coast, Japan, with special reference to river water

Yasushi Gomi^{1a*}, Daisuke Takahashi², and Yoshinari Endo^{1b}

Abstract

Seasonal variations in water system distributions were examined in Onagawa Bay of the Sanriku area using long-term hydrographic data obtained from April 2000 to February 2017. In this study, we classified the waters in the bay into six water systems defined by Hanawa and Mitsudera (1987) and coastal water (CW), which appears in the nearshore region but not in the offshore region. The mode water system analysis revealed clear seasonal variations in the water system distributions in the bay, characterized by the predominance of the Tsugaru Warm Current water system in the lower layer in fall, the entire water column in winter, the Oyashio water system in the lower layer in spring, and CW in the surface layer from spring to summer. CW in the bay was less saline and/or less dense than the offshore water and mostly distributed in the surface layer from April to October, indicating that CW was formed by mixing freshwater discharged from the river with water in the bay. The relationship between surface salinity in the mouth part of Onagawa Bay and freshwater supply from the Kitakami River flowing into Oppa Bay indicated that a part of the CW in Onagawa Bay was derived from outside the bay.

Key words: Coastal water, Tsugaru Warm Current water system, Oyashio water system, Mode water system, Onagawa Bay

(Corresponding author's e-mail address: ygomi53@gmail.com)

(Received 25 April 2019; accepted 26 October 2021)

(doi: 10.5928/kaiyou.30.6_277)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2021)

1 Laboratory of Biological Oceanography, Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University, 468-1, Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0845, Japan

a *Present address:* #105, 1-18-8, Sagigamori, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 981-0922, Japan

b *Present address:* The Open University of Japan, 2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

2 Department of Marine and Earth Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1, Orido, Shimizu-ku, Shizuoka, Shizuoka 424-8610, Japan

* Corresponding author: Yasushi Gomi
e-mail: ygomi53@gmail.com