

水塊クラスター解析ソフトの開発と東北近海域の水塊変動解析への適用 —漁況変動解析への応用に向けた事例解析—

田中雄大^{1†}, 今村 豊², 児玉琢哉³, 及川利幸³, 矢倉浅黄⁴, 佐伯光広⁴, 真壁昂平⁵,
鈴木裕也^{6,11}, 大畑 聡⁷, 金子 仁^{1,10}, 岡崎雄二¹, 黒田 寛⁸, 和川 拓⁹,
長谷川大介¹, 笥 茂穂¹, 奥西 武¹

Development of water-mass cluster analysis software to analyze the water-mass variations off the coast of Tohoku Japan: A case study for future application to analyze fisheries catch variation

Takahiro TANAKA^{1†}, Yutaka IMAMURA², Takuya KODAMA³, Toshiyuki OIKAWA³, Asagi YAGURA⁴, Mitsuhiro SAEKI⁴,
Kouhei MAKABE⁵, Yuuya SUZUKI^{6,11}, Satoshi OHATA⁷, Hitoshi KANEKO^{1,10}, Yuji OKAZAKI¹, Hiroshi KURODA⁸,
Taku WAGAWA⁹, Daisuke HASEGAWA¹, Shigeho KAKEHI¹ and Takeshi OKUNISHI¹

2018年9月6日受付, 2019年3月27日受理

¹ 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 東北区水産研究所
〒985-0001 宮城県塩釜市新浜町3-27-5

Tohoku National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 3-27-5 Shinhama-cho, Shiogama, Miyagi 985-0001, Japan

² 地方独立行政法人 青森県産業技術センター 水産総合研究所
〒039-3381 青森県東津軽郡平内町大字茂浦字月泊10

Fisheries Research Institute, Aomori Prefectural Industrial Technology Research Center, 10 Tsukidomari, Moura, Hiranai-machi, Higashi Tsugaru, Aomori 039-3381, Japan

³ 岩手県水産技術センター
〒026-0001 岩手県釜石市大字平田3-75-3

Iwate Fisheries Technology Center, 3-75-3 Hirata Kamaishi, Iwate 026-0001, Japan

⁴ 宮城県水産技術総合センター
〒986-2135 宮城県石巻市渡波字袖ノ浜97-6

Miyagi Prefecture Fisheries Technology Institute, 97-6 Sodenohama, Watanoha, Ishinomaki, Miyagi 986-2135, Japan

⁵ 福島県水産海洋研究センター
〒971-8101 福島県いわき市小名浜字横町35

Fukushima Prefectural Fisheries and Marine Science Research Centre, 35 Yoko-machi, Onahama, Iwaki, Fukushima 971-8101, Japan

⁶ 茨城県水産試験場
〒311-1203 茨城県ひたちなか市平磯町三ツ塚3551-8

Ibaraki Prefectural Fisheries Research Institute, 3551-8 Mitsuduka, Hiraiso-cho, Hitachinaka, Ibaraki 311-1203, Japan

⁷ 千葉県水産総合研究センター
〒295-0024 千葉県南房総市千倉町平磯2492

Chiba Prefectural Fisheries Research Center, 2492 Hiraiso, Chikura-cho, Minamiboso, Chiba 295-0024, Japan

⁸ 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 北海道区水産研究所
〒085-0802 北海道釧路市桂恋116

Hokkaido National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 116 Katsurakoi, Kushiro, Hokkaido 085-0802, Japan

⁹ 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 日本海区水産研究所
〒951-8121 新潟県新潟市中央区水道町1丁目5939-22

Japan Sea National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 1-5939-22 Suido-cho, Chuou-ku, Niigata, Niigata 951-8121, Japan

¹⁰ 現所属: 東京大学大気海洋研究所
〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5

(Current affiliation) Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, Japan, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8564, Japan

¹¹ 現所属: 茨城県水産試験場内水面支場
〒311-3512 茨城県行方市玉造甲1560

(Current affiliation) Freshwater Branch Office, Ibaraki Prefectural Fisheries Research Institute, 1560 Tamatsukuriko, Namekata Ibaraki 311-3512, Japan

† takahiro@affrc.go.jp

クラスター解析によって水塊分類を行うソフトウェアを開発し、東北沖海域および千葉県近海域の水温・塩分データを用いて、水塊の分布、出現率の経年変動の解析を行った。夏季東北沖海域における表層・亜表層水塊の出現率の経年変動は、親潮第1分枝の南限緯度との関係が深いことが示され、親潮系の冷たい水塊（黒潮系の暖かい水塊）に対応するクラスターは、親潮第1分枝が南偏（北偏）する年に出現が増加する傾向にあった。この傾向は、既存の方法では分類が困難な表層の水塊についても認められた。春季千葉県近海域では、黒潮流軸離岸時に、冷水系水塊の出現が増加する傾向にあった。クラスター解析による水塊解析結果を漁況変動解析へ応用するにあたって、各魚種の水温適正等生理的特徴を考慮したクラスター数の設定が必要となる可能性がある。今後、他の海域や魚種も含めて知見を蓄積することで、水塊変動・漁況変動の解析に有用なツールとなることを期待する。

キーワード：クラスター解析, 東北海域, 水塊分類, 漁獲量変動

Hydrographic data off the Pacific coast of Tohoku and off the Boso Peninsula were analyzed using newly developed software that conducts a statistical cluster analysis to reveal the spatial distribution and temporal variation of occurrence frequency of water-masses in surface and subsurface layers. The interannual variation of water-mass occurrence frequency off the coast of Tohoku in summer was most associated with the interannual meridional shift of the Oyashio first branch, and the cold, fresh (warm, saline) clusters were more frequently observed when the Oyashio first branch shifted southward (northward). This tendency was also detected at a 10-m depth, where the previous water-mass classification method was difficult to apply. At a 100-m depth, multiple clusters were classified as Tsugaru Warm Current water, but those that could not be formed by isopycnal mixing between Kuroshio and Oyashio waters were limitedly distributed along the coast of Tohoku. It was suggested these clusters originated from the Tsugaru Strait. Off the coast of the Boso Peninsula in spring, the occurrence frequency of cold water-mass tended to increase when the Kuroshio axis departed from the coast. To relate the water-mass variations to fisheries catch variations, the number of clusters may need to be determined by considering the physiological characteristics of each fish species, such as optimum temperature range. By expanding the analysis to different regions and fish species and accumulating knowledge, the software is expected to provide a useful tool for extracting characteristic water-mass variations and clarifying the relationship between water-mass and fisheries catch variations.

Key words: cluster analysis, Tohoku region, water-mass classification, fisheries catch variation

はじめに

青森県から茨城県にかけての太平洋沿岸海域（以下、「東北沖海域」と表す）は、親潮、黒潮、津軽暖流等の水塊が混合し、水塊分布が大きく時空間変動する海域である。本海域は、三陸沖をはじめとした好漁場が形成される海域であり、海況変動と漁獲量変動・漁場形成との関係については、古くから関心が持たれている（辻田, 1966; 佐藤, 1974等）。東北沖海域での水産有用種の漁獲量変動は、水温変動の影響を受けていることが知られ、例えば、回遊性のマサバについては、親潮第1分枝の南限緯度の変動（小川ほか, 1987）や三陸近海の暖水域の分布（小川, 1987）等との関係が指摘されている。また、春先に発生する異常冷水現象は、三陸沿岸でのワカメの養殖等に深刻な影響を与え（奥田・武藤, 1986等）、一方で茨城県沖でのツノナシオキアミが豊漁になる（小達, 1979）等、水温変動と水産生物の漁獲量変動との関係については、定性的・定量的に様々な報告がなされている。この異常冷水現象の発生には、低温低塩分の沿岸親潮水の波及が大きく影響しており、その分布を調べるためには、塩分情報が利用される（大谷, 1971; 奥田・武藤, 1986等）。また、漁場形成との関連について、例えば、親潮前線がサンマ漁場と関係することが指摘されているが（Yasuda and Watanabe, 1994）、親潮前線の指標水温は塩分情報を基に作成されている（川

合, 1972）。このように、塩分は、本海域に出現する水塊を区別するために有用な情報を提供するが、水温・塩分両方の情報を基にした水塊変動と、漁獲量変動の関係を解析した研究は乏しいのが現状である。

1963年以降、沿岸定線・沖合定線と呼ばれる全国的な観測網が整備され、各都道府県の水産試験研究機関において、毎月もしくは季節ごとの海洋観測が実施されている。得られた海洋観測データは、漁業情報サービスセンター（JAFIC）に設置されたサーバーで管理されているデータベース「FRESCO2」に登録され、水温・塩分データを中心に、50年以上のデータの蓄積がある。FRESCO2に登録されているデータのうち、1963–1993年のデータについては、海洋情報研究センター（MIRC）が品質管理を行うMIRC Ocean Dataset 2001に登録され（MIRC, 2001）、三陸沖水塊の季節変動の解明に利用される等（Oguma et al., 2002）、我が国周辺海域の水産海洋研究において大きな貢献を果たしてきた。CTD観測が普及した現在、基準層データに加え、1 m間隔のプロファイルデータの登録が増加し、東北沖海域の定線観測においても、特に1998年頃から水温・塩分のプロファイルデータの登録が多くなされている。

こうした観測網の整備にもかかわらず、東北沖海域を含む北日本太平洋沿岸域の平均的な水塊分布に関する知見は、偏在しているのが現状である。北海道沿岸に出現する

水塊の水温・塩分特性について、大谷（1971）による噴火湾での低温低塩分の沿岸親潮水の流入に関する報告、Rosa et al. (2007)、Kusaka et al. (2013) による、気候値データを用いた水塊の季節変動・月変動の報告がなされている。また、岩手県の三陸沿岸については、Hanawa and Mitsudera (1987, 以下「HM87」) や Oguma et al. (2002) によって、月別の平均水塊特性・分布が報告されている。一方、宮城県以南の沿岸域については、水塊特性を体系的に記述した報告はなく、ある水塊の分布、出現率等の変動特性を示すことは容易ではない。

水塊は、水温、塩分、溶存酸素濃度等の値が、比較的一様な海水の集まりとして定義される。水塊の分類には、比較的豊富な水温・塩分データが用いられることが多く、古くから、水温-塩分 (T-S) ダイアグラムが有用なツールの一つとなっている (Sverdrup et al., 1942 等)。T-S ダイアグラムを基にした HM87 による水塊分類基準は、三陸沖海域にとどまらず、北日本太平洋沿岸域の水塊を分類する際の標準的な方法として、広く参照されている (Oguma et al., 2002; Rosa et al., 2007; Kusaka et al., 2013)。しかし、HM87 は、広い水温・塩分範囲に及ぶ表層水塊を、「表層水」という単一の区分でのみ分類しており、詳細に分類できない等の欠点が指摘されている (HM87)。

本稿では、クラスター解析による水塊の分類ソフトを開発し (以下、「水塊分類ソフト」と称す)、これまで蓄積されてきた東北沖海域の定線観測データに適用する。水温・塩分データを用いたクラスター解析による水塊分類は、北海 (Honghai et al., 1989) や 黄海・東シナ海域 (Hur et al., 1999 等) でも行われており、各海域での特徴的な水塊特性・水塊分布を客観的に抽出できることが報告されている。本稿では、HM87 およびクラスター解析の双方による水塊分類結果を用いて、各水塊・クラスターの分布特性や出現率の経年変動について比較を行い、各々の手法の有用性や注意点について考察・言及する。また、千葉県近海の水塊変動の解析も併せて行い、千葉県の房総沖カツオ漁獲量変動を例に、クラスター解析による水塊解析結果を漁況変動解析に用いる際の注意点や今後の解析の方向性について考察した。

材料と方法

水塊分類ソフトの開発

本研究では、MathWorks 社の MATLAB を利用して、教師なしの階層クラスター解析により水温、塩分の情報から客観的に水塊を分類し、可視化するソフトを開発した。本ソフトでは、 i 番目および j 番目のサンプル間の類似度として、標準化ユークリッド距離

$$d(i, j) = \sqrt{\left(\frac{T_i - T_j}{\sigma_T}\right)^2 + \left(\frac{S_i - S_j}{\sigma_S}\right)^2} \quad (1)$$

を用いた。ここで、 T は水温値、 S は塩分値、 σ_T, σ_S は、水温、塩分の母集団の標準偏差を各々表す。また、クラスター間の連結は群平均法 (UPGMA) を用い、以下の式により、クラスター p, q に含まれる全サンプル間の平均距離

$$d_{\text{avg}}(p, q) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d(p_i, q_j) \quad (2)$$

を計算した。ここで、 m, n は、クラスター p, q に含まれるサンプルの総数を各々表す。 d_{avg} が小さいペアからクラスターを結合し、指定のクラスター数以下になるまでクラスターの結合が続けられる。

このソフトでは表計算ソフト等で一般的に利用できるカンマ区切り形式 (CSV; Comma-Separated Values) の入力データを用意し、Windows OS 環境のパーソナルコンピューター上で GUI (Graphical User Interface) から入力ファイル名、最大クラスター数等を指定して実行することで、水温・塩分を縦軸・横軸に取った図 (T-S ダイアグラム) として水塊分類が可視化され、PNG 形式 (Portable Network Graphics) の画像ファイルが出力される (Fig. 1)。CSV 形式で各水温、塩分に対応する密度 (sigma-t) と分類されたクラスター名 (数字)、テキストファイル形式で各クラスター別の水温・塩分の最小値、最大値、平均値も出力される。本ソフトでは、データ中の外れ値を除外するため、以下に述べる前処理を行っている。前処理では、指定された最大クラスター数でクラスター解析を行い、全体のデータ数の 1% 未満となるクラスターを外れ値として除外する。外れ値が除外されたデータを用いて再度クラスター解析を実行し、データ数が 1% 未満となるクラスターが出現しなくなるまで、外れ値の除去を繰り返す。外れ値の一部には測器のエラー値を含んでいる可能性がある。基本的には品質管理 (例えば、MIRC, 2005) されたデータを利用するのが望ましいが、品質管理を行っていないデータを用いてもエラー値を解析から除去することが可能となっている。

ソフトは MathWorks 社の MATLAB を利用して構築およびコンパイルされ、実行形式となっている。ユーザーは MATLAB の共有ライブラリのスタンドアロンセット (MATLAB Runtime) を使用することにより、MATLAB がインストールされていないコンピューターでも水塊分類ソフトの実行ファイルを利用できる。水産海洋分野における CTD データの利活用が本ソフトにより促進されることを期待して、水産研究・教育機構東北水産研究所にダウンロードサイト (<http://tnfri.fra.affrc.go.jp/kaiyo/kaiyoubu/watermass/index.html>, 2018 年 9 月 4 日) を開設し、ソフトを公開した。ソフトの詳しい使用方法については上記サイトを参照いただきたい。

水塊・海況・漁獲量データ

本稿では、水塊分類ソフトの適用例として、東北沖海域および千葉県近海に出現する水塊の分類と各水塊の経年変動

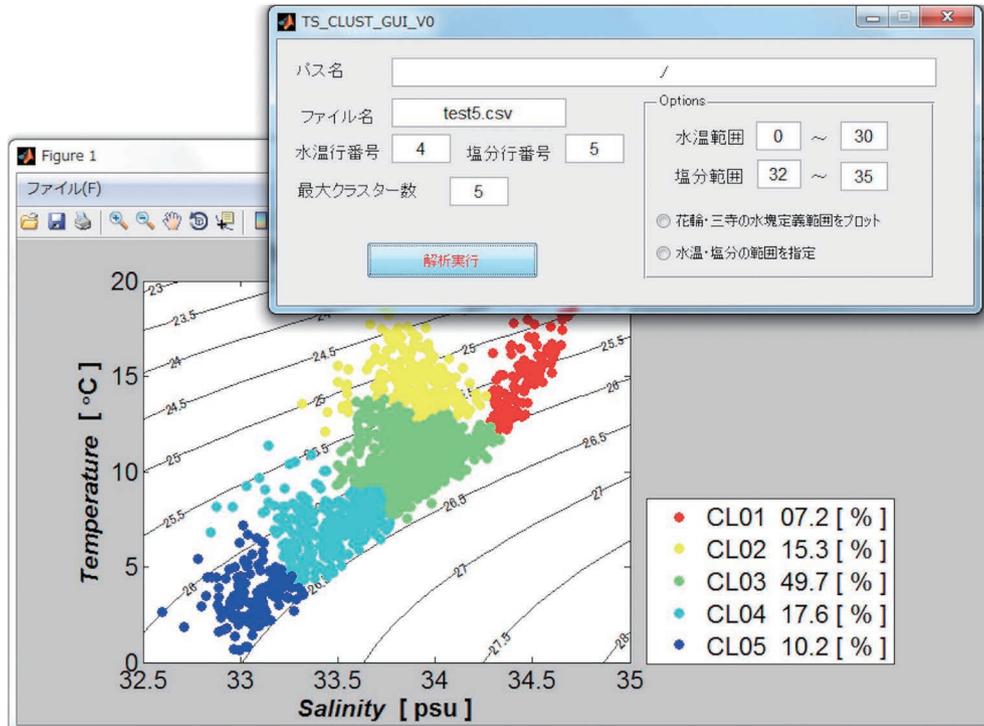


Figure 1. A main window of the water-mass cluster analysis software. The Temperature–Salinity (T–S) diagram is an example of the output whose analytical and graphical settings can be controlled in the toolbox on the upper right.

の解析を行う。海洋観測データベース (FRESCO2) に収録された水温・塩分データのうち、夏季 (7–9月) の東北ブロック太平洋側各県 (青森, 岩手, 宮城, 福島, 茨城) の定線CTD観測データを用いた (Fig. 2(a)). 1980年から2016年の期間に夏季東北沖海域で取得された水温・塩分データ数は、10 m深では7372, 30 m深では7044, 50 m深では6846, 100 m深では6362あり、特に全県のデータが揃う1998年以降に、データ数が飛躍的に増加していた (Fig. 2 (b)). 千葉県近海の水塊解析では、2006–2015年の千葉県沿岸定線観測20測点で取得された観測データのうち、千葉県のカツオ曳縄漁業の最漁期に当たる4–6月の水温・塩分データ (データ総数581) を用いた。各水温・塩分プロファイルデータは、World Ocean Database 2001 (WOD01) の品質管理手順を基にしたMIRC (2005) に従って、以下に述べるように、レンジチェック、勾配チェック、密度逆転チェックを行ったのち、基準層データを作成し、10 m, 30 m, 50 m, 100 m深のデータを解析に用いた。レンジチェックは、観測された水温、塩分値が、北太平洋で観測される妥当な値の範囲内にあるかを判定するものであり、MIRC (2005) の表L.1.に記載された値を判定の基準に用いた。勾配チェックに用いる勾配値は、

$$(\text{勾配値}) = (V_2 - V_1) / (Z_2 - Z_1) \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 V_1, Z_1 は、チェックされる層の観測値および深度を表し、 V_2, Z_2 はその直上の層の観測値および深度を表す。この勾配値が、MIRC (2005) の表1.6に記載された範囲内にあるかを判定した。最後に、密度逆転チェックは、深度 Z_1 での密度を ρ_1 、その直下の層の水塊を Z_1 に断熱的に移動させた時の密度を ρ_2 として、密度差

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$$

が、MIRC (2005) の表1.9に記載された値以内かどうかを判定した。

東北沖海域の水塊変動の解析では、水塊出現率の経年変動に影響する要因として、親潮、黒潮、津軽暖流勢力の強弱の経年変動に着目し、1998–2016年の親潮フロント緯度、黒潮フロント緯度、深浦–函館間水位差の解析も併せて行った。親潮フロント緯度は、「日本周辺太平洋域の海況予測システム (FRA-ROMS, Kuroda et al., 2017) による親潮第1分枝出現領域の100 m深5°C南限位置」、黒潮フロント緯度は、「FRA-ROMSによる140°E–146°Eの200 m深14°C北限位置」として各々定義し、7–9月の平均値を使用した (Fig. 2(c)). 深浦–函館間の水位差は、津軽暖流流量との相関が報告されており (西田ほか, 2003)、本稿では、毎時水位データに対して潮汐補正および気圧補正を施した

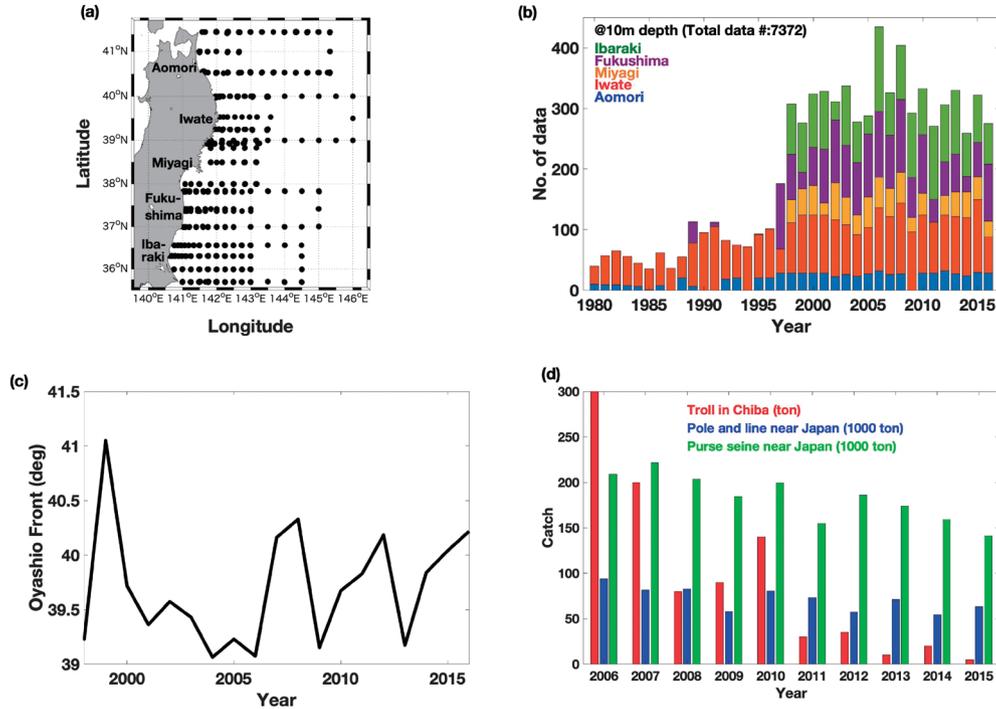


Figure 2. (a) Observational stations used for the analysis. (b) Time series of the number of hydrographic data at a 10-m depth. Green: Ibaraki Pref., Purple: Fukushima Pref., Orange: Miyagi Pref., Brown: Iwate Pref., and Blue: Aomori Pref. (c) Time series of the latitude of the Oyashio front. (d) Time series of fisheries catch of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in Chiba Pref. by trolling (red), near Japan by pole and line fishing (blue), and near Japan by purse seine (green).

Wagawa et al. (2015) の水位差データを2016年まで拡張し、7–9月で平均した値を使用した。本稿では、1998–2016年の19年分のデータを用いて、これらの時系列と各クラスター出現率との相関解析を行った。サンプルサイズ $n=19$ 、有意水準 $\alpha=0.05$ の下で、検定力が0.80 (Cohen, 1992) を超えるような2変数間の相関係数の絶対値の下限 r_{\min} を、フリーソフトウェア G*Power3.1 (Faul et al., 2007, 2009) を用いて見積もったところ、 $r_{\min}=0.59202$ となった (ソフトウェアの設定は、Test family は「Exact」、Statistical test は「Bivariate normal model」、Tail は「Two」を使用)。

千葉県近海の水塊変動の解析では、4–6月の観測実施日における房総半島南端の野島埼からの黒潮流軸離岸距離のデータ (<http://cb-sjtcenter.o.oo7.jp/kt/kt-frame.htm>, 2018年5月25日) を用いて、各クラスターの出現率との相関解析を行った。上述と同様に、サンプルサイズ $n=10$ 、有意水準 $\alpha=0.05$ の下で、検定力が0.80を超えるような相関係数の絶対値の下限 $r_{\min 2}$ を見積もったところ、 $r_{\min 2}=0.76116$ となった。

千葉県近海の水塊解析結果を基に、千葉県の房総沖カツオ (*Katsuwonus pelamis*) 漁獲量を例にとり、水塊変動と漁況変動との関係を論じる上での注意点について考察を行った。日本近海のカツオ漁業の主漁法は竿釣り漁業、ま

き網漁業であるが、千葉県近海 (房総海域) では10トン未満の小型船の曳縄漁業が盛んであり、千葉県におけるカツオ曳縄漁業の最漁期に当たる4–6月の漁獲量データを用いた (Fig. 2(d))。日本近海の竿釣りおよびまき網による年間漁獲量データ (WCPFC, 2017) についても、比較のため使用した (Fig. 2(d))。

結果

東北沖海域の水塊分布と変動

夏季東北沖海域では、水塊のエンドメンバーとして親潮水 (OW)、津軽暖流水 (TW)、黒潮水 (KW) を想定し、その混合水 (KW+OW, KW+TW, OW+TW, KW+OW+TW) を含めると、7つのクラスターに分けられると考え、水塊分類ソフトにより分類した。各クラスターの平均スパイシネス (spiciness, Flament (2002)) を基に、高スパイシネス (つまり、高温・高塩分) のクラスターから順に1から7へとクラスター番号を割り当てた。今回解析した夏季東北沖海域では、最大数を占めるクラスターは、おおむねHM87によって津軽暖流水 (TW) と定義される区分に属し、沿岸親潮 (COW) や下層冷水 (CLW) に属するデータ数は少なかった (Fig. 3)。10 m深や30 m深では、表層水 (SW) に多くのデータが分布する一方 (Fig. 3(a), (b))、50 m深、

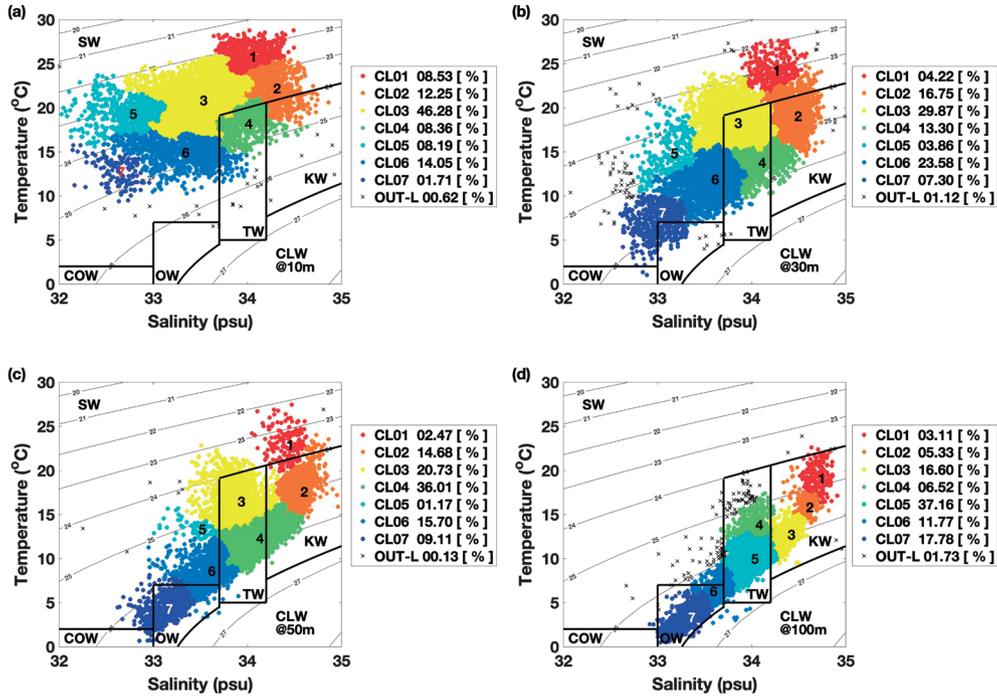


Figure 3. T-S diagrams at (a) 10-m, (b) 30-m, (c) 50-m, and (d) 100-m depths with colors showing each cluster and occurrence frequency for the whole period of analysis shown on the right panel. The thin black lines are the isopycnal lines, and the thick black lines are the boundaries of different water-masses determined by Hanawa and Mitsudera (1987). SW, TW, KW, OW, and COW denotes the Surface Water, Tsugaru Warm Current Water, Kuroshio Water, Oyashio Water, Coastal Oyashio Water, respectively.

100 m深では、OW, TW, KWに多くのデータが分布していた (Fig. 3(c), (d)). また、HM87の各水塊区分に複数のクラスターが存在する場合や、複数の水塊区分に跨るクラスターが存在する場合も見られた。例えば、100 m深では、TWの区分内にクラスター4, 5 (以下、「CL04」等と表記)の2つのクラスターが見られた。どのクラスターにも属さない外れ値 (OUT-L) は、全データ数の2%未満であった (T-Sダイアグラム中の「X」)。

各クラスターおよび水塊の分布について、100 m深を例に、全期間内で1度以上出現した測点を Fig. 4の赤点で示した。HM87で区分されたKW, OW, TWの水塊は、東北沖海域の広い範囲で出現していた (Fig. 4(a)–(c))。一方、クラスター解析で分類された各クラスターの分布を見ると、KW内で最も高温高塩分のCL01は、青森県や岩手県北部沖での出現は少なく (Fig. 4(d))、OW内で最も低温低塩分のCL07は、福島県沖以南での出現が少なかった (Fig. 4(e))。TWに属するCL05は、KWとOWのクラスターの等密度面混合によって形成されうるクラスターであるが (Fig. 3(d))、TWと同様、東北沖合の海域を含めて広く分布していた (Fig. 4(f))。同じTWに属するクラスターでも、CL05よりも密度が軽いCL04は、同じ密度帯に隣接するKWおよびOWのデータが存在しないため (Fig. 3(d))、KWとOWの等密度面混合では形成されない。このCL04

は、青森県から茨城県の沿岸に沿って分布していた (Fig. 4(g))。

本稿では、10 mと100 m深を例にとり、各クラスターの出現率の経年変動と親潮・黒潮・津軽暖流勢力との関係を解析した。各クラスターの出現率は、

$$\frac{\text{(各年の各クラスターに属するデータ数)}}{\text{(各年の総データ数)}}$$

として定義し、東北ブロック太平洋側全県の実線観測データが揃う1998年以降について算出した (Fig. 5)。各クラスターの出現率は大きな経年変動を示し、例えば、1999, 2001, 2007, 2016年等は、高温・高塩分のクラスター (CL01, CL02, CL03) の割合が増加する一方で、2002, 2013, 2014年等は、低温・低塩分のクラスター (CL06, CL07) の割合が増加していた (Fig. 5(a), (b))。HM87の水塊区分で定義した水塊出現率と比較をすると、100 m深では、暖水のKWの出現率が1999, 2001, 2007, 2016年等に多い一方、冷水のOWの出現率は2002, 2003, 2013年等に多く、おおむねクラスター解析で得られた結果を反映していた (Fig. 5(d))。一方、10 m深では、水温・塩分データの大半がSWに分類されており、広い水温・塩分範囲を取るSWの出現率の経年変動から、どのような性質を持った水塊が本海域

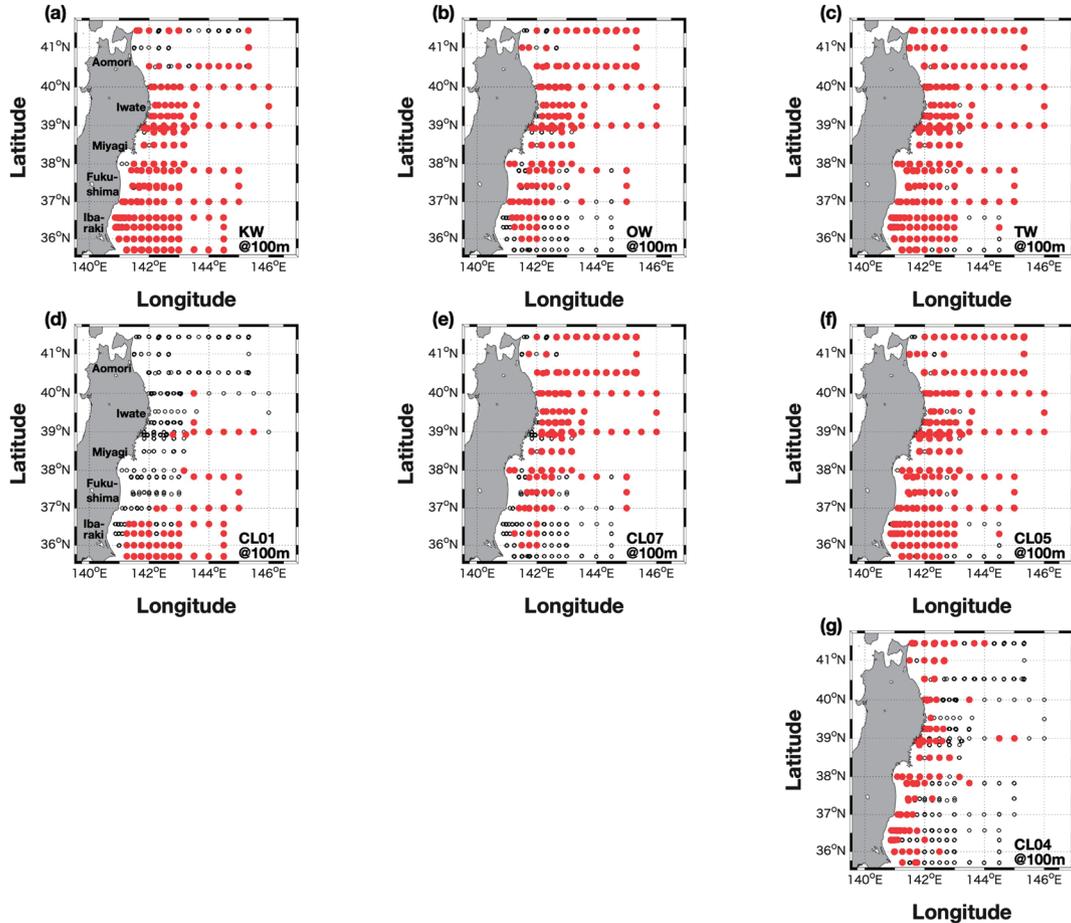


Figure 4. Distributions of (a) the Kuroshio (KW), (b) Oyashio (OW), (c) Tsugaru Warm Current (TW), (d) CL01, (e) CL07, (f) CL05, and (g) CL04 at a 100-m depth. Red dots (black circles) indicate stations that observed (did not observe) each cluster or water-mass.

に分布しているかを読み取るのは難しかった (Fig. 5(c)).

FRA-ROMSの計算結果から取得した親潮フロント緯度の時系列と各クラスターの出現率との相関解析の結果をTable 1に示した. 100 m深では, CL01とCL07は相関係数の絶対値が r_{\min} を超えており, 高温高塩分(低温低塩分)のCL01 (CL07)は, 親潮フロントが北(南)にある年ほど出現率が有意に高い傾向にあった. 検定力が0.80未満のため統計的に示すことができない層もあるが(10 m深や50 m深のCL01), 上述の傾向は, 少なくとも定性的にはすべての層において認められた. 50 m深や100 m深では, HM87の水塊区分を用いても, 親潮フロントと関連したKW, OWの出現率変動傾向が同様に確認された一方で, 津軽暖流水(TW)に属するクラスターの出現率は, 親潮フロント緯度との明確な相関関係は認められなかった(Table 1). また, 親潮フロント緯度変動と有意な相関を持つクラスターが各深度に存在することは, false discovery rate (FDR)法による多重比較補正(Benjamini and Hochberg, 1995)を施した後でも認められた(Table 1).

FRA-ROMSから取得した親潮フロント緯度および黒潮フロント緯度, 函館-深浦間の津軽海峡水位差についても同様に, 各クラスターの出現率との相関を取った結果をTable 2に示した. なお, Table 2に示した親潮フロント緯度との相関係数の値は, 黒潮フロント緯度および津軽海峡水位差の影響を除いた偏相関係数であり, 黒潮フロント, 津軽海峡水位差との相関係数も同様に, 他2つの影響を除いた偏相関係数である. 親潮フロント緯度については, 親潮フロント緯度北偏(南偏)年に低温低塩分(高温高塩分)クラスターの出現が増加するという傾向が見られたが, 黒潮フロントや津軽海峡水位差との間には, 特定のクラスターや水塊に対する明確な相関関係は認められなかった.

親潮フロント南偏(北偏)年に低温低塩分(高温高塩分)クラスターの出現が増加するという上述の傾向は, クラスター数を6個および8個に変えた場合でも概ね認められた(Table 3). 一方, TWに属するクラスターについて, 100 m深を見ると, クラスター数が7個の場合, TWの大半は2つのクラスター(CL04, CL05)によって占められて

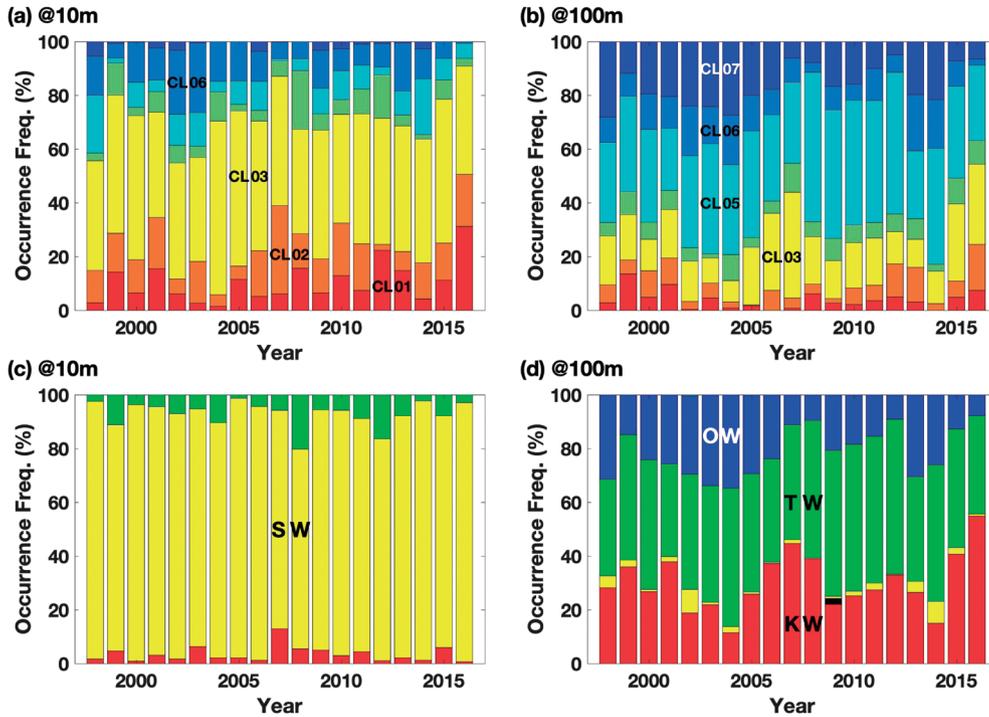


Figure 5. Time series of occurrence frequency of each cluster (CL) at (a) 30-m and (b) 100-m depths. Also shown are the time series of occurrence frequency of each water-mass defined by Hanawa and Mitsudera (1987) at (c) 30-m and (d) 100-m depths.

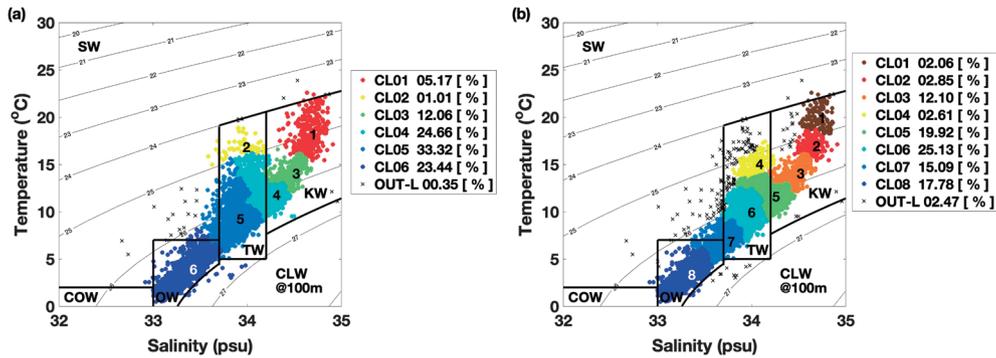


Figure 6. T-S diagram identical to that in Fig. 3 but for the case of (a) 6 clusters and (b) 8 clusters at a 100-m depth.

いたが (Fig. 3(d)), クラスタ数が6個および8個の場合, HM87で定義されたTWの境界線を跨るようなクラスタが抽出された (Fig. 6(a), (b)). クラスタ数6個の場合, 統計的に示すことができないが, KWとTWに跨るCL04の出現率と親潮フロント緯度との間には正相関 ($p < 0.05$) が見られた. また, クラスタ数を8個にした場合の10 m深では, 多重比較補正後に, 有意な相関を持つクラスタは見られなくなった (Table 3).

千葉県近海における水塊分布と変動

2005年以降, 曳縄漁業での千葉県でのカツオ漁獲量の減少傾向が続いており (図未記載), さらに2011年以降に漁

獲量が極端に減少していた (Fig. 2(d)). 2006–2010年と2011–2015年の漁獲量間の不連続な変化を統計的に検出するため, ラページ検定 (Lepage, 1971) をかけたところ, 有意水準5%で統計的に有意な漁獲量変化が認められた. 一方, この期間の日本近海における竿釣り漁業, まき網漁業漁獲量 (Fig. 2(d)) は2011年を境にした大きな変動は検出されなかった ($p > 0.05$, ラページ検定).

2006–2015年4–6月の千葉県沿岸定線観測20測点で観測された水深50 mの水温, 塩分データを用いて, 水塊分類ソフトにより9個のクラスタに分類した (Fig. 7(a)). このクラスタ数を選んだ理由については, 考察で言及す

Table 1. Correlation coefficients between the variation of the Oyashio front latitude and occurrence frequency of each cluster.

Cluster/Water-mass	10 m		30 m		50 m		100 m	
1	0.48*	(0.04)	0.60**	(0.01)	0.56**	(0.01)	0.61**	(0.01)
2	0.28	(0.25)	0.40	(0.09)	0.29	(0.23)	0.16	(0.52)
3	-0.13	(0.59)	0.11	(0.65)	-0.06	(0.79)	0.27	(0.27)
4	0.48*	(0.04)	0.20	(0.42)	0.19	(0.44)	0.28	(0.24)
5	-0.44	(0.06)	-0.36	(0.13)	-0.31	(0.20)	0.25	(0.30)
6	-0.63**	(0.004)	-0.51*	(0.03)	-0.62**	(0.004)	-0.50*	(0.03)
7	-0.42	(0.08)	-0.63**	(0.004)	-0.51*	(0.03)	-0.72**	(0.001)
OW	—		-0.55*	(0.02)	-0.79*	(<0.001)	-0.77*	(<0.001)
TW	0.46*	(0.05)	0.25	(0.31)	-0.16	(0.51)	0.23	(0.35)
KW	0.30	(0.21)	0.37	(0.11)	0.47*	(0.04)	0.52*	(0.02)

Values in parentheses are p -values. * indicates $p < 0.05$, and ** indicates significant correlation after the false discovery rate (FDR) correction. Note that the FDR correction is not taken into account for OW, TW, and KW waters.—means available data are not sufficient for evaluation.

Table 2. Partial correlation coefficients between the occurrence frequency of each cluster and the variation of the Oyashio front latitude, Kuroshio front latitude, and the sea level difference in the Tsugaru Strait between Hakodate and Fukaura.

Cluster/ Water-mass	Oyashio front				Kuroshio front		Tsugaru strait					
	10 m		100 m		10 m	100 m	10 m	100 m				
1	0.52*	(0.03)	0.62**	(0.01)	-0.19	(0.47)	-0.07	(0.77)	0.25	(0.32)	0.06	(0.82)
2	0.30	(0.25)	0.25	(0.34)	-0.22	(0.39)	-0.19	(0.46)	-0.05	(0.86)	0.44	(0.08)
3	-0.14	(0.60)	0.31	(0.23)	-0.02	(0.94)	-0.38	(0.14)	-0.06	(0.83)	-0.39	(0.12)
4	0.45	(0.07)	0.32	(0.22)	0.19	(0.46)	-0.15	(0.55)	-0.28	(0.28)	0.16	(0.54)
5	-0.43	(0.09)	0.22	(0.40)	0.05	(0.85)	0.17	(0.50)	0.12	(0.64)	-0.15	(0.58)
6	-0.67**	(0.003)	-0.51*	(0.04)	0.34	(0.19)	0.13	(0.62)	-0.07	(0.78)	0.30	(0.24)
7	-0.42	(0.10)	-0.75**	(<0.001)	0.06	(0.82)	0.37	(0.14)	0.02	(0.94)	0.07	(0.80)
OW	—		-0.79*	(<0.001)	—		0.31	(0.22)	—		0.07	(0.79)
TW	0.44	(0.08)	0.23	(0.38)	0.13	(0.61)	0.24	(0.36)	-0.13	(0.61)	0.15	(0.55)
KW	0.29	(0.26)	0.59*	(0.01)	-0.07	(0.80)	-0.44	(0.07)	-0.38	(0.13)	-0.25	(0.33)

Values in parentheses are p -values. * indicates $p < 0.05$, and ** indicates significant correlation after the false discovery rate (FDR) correction. Note that the FDR correction is not taken into account for OW, TW, and KW waters.—means available data are not sufficient for evaluation.

る。データの大半は黒潮水 (KW) に属していた。出現率が高い CL02, CL07, CL08 の塩分は 34.4–34.8 の狭域の範囲であるが、水温は 13.2–23.7°C とその範囲は広がった。CL08 は、沿岸に近い Stn. 1–3, 13–15, 17–18, 21–22 において出現率 (ある測点での CL08 のデータ数/ある測点の全データ数) が 20% 以上と高く (Fig. 7(b) の青丸), CL02 は、離岸 30 マイル以上の沖合にある Stn. 4–12, 15–16 において出現率が高かった (Fig. 7(b) の赤丸)。CL07 は Stn. 18 以外に広く出現する水塊で、Stn. 1–5, 13–15 において 20% 以上の高い出現率が見られた (Fig. 7(b) の緑丸)。カツオ漁獲量が比較的多い 2006–2010 年と少ない 2011–2015 年の各 5 年間で各クラスターの出現率を比較したところ、後半の

2011–2015 年には、沖合での出現率が高く 18.8°C 以上の高温の CL02 と、沿岸に出現率が高く 17.1°C 以下の低温の CL08 は出現率が減少し、その中間の水温特性を持つ CL07 は出現率が増加していた (Fig. 7(c), (d))。

曳縄漁業の主対象である勝浦地区漁業者の操業範囲のうちやや沖に位置する海域 (Stn. 4–12) での 4–6 月の 50 m 深平均水温と、観測日における房総半島南端の野島埼からの黒潮流軸離岸距離の平均値とを比較したところ、黒潮が大きく離岸している 2011 年と 2015 年は、低温となっており (Fig. 7(e)), 漁獲量は少なかった (図未記載)。低温のクラスターである CL07 の出現率は、黒潮流軸離岸距離との強い正の相関が見られ、黒潮流軸が離岸するほど出現率が

Table 3. Correlation coefficients between the occurrence frequency of each cluster and the variation of the Oyashio front latitude.

Cluster/ Water mass	6 Clusters				8 Clusters			
	10 m	30 m	50 m	100 m	10 m	30 m	50 m	100 m
1	0.54* (0.02)	0.59** (0.01)	0.56** (0.01)	0.57** (0.01)	0.48* (0.04)	0.59** (0.01)	0.63** (0.004)	0.46* (0.05)
2	0.42 (0.07)	0.43 (0.07)	0.29 (0.23)	0.09 (0.71)	0.40 (0.09)	0.40 (0.09)	0.21 (0.39)	0.47* (0.04)
3	-0.62** (0.005)	0.11 (0.67)	-0.06 (0.79)	0.16 (0.53)	0.20 (0.40)	0.11 (0.66)	-0.03 (0.89)	0.15 (0.54)
4	-0.19 (0.43)	-0.37 (0.12)	0.19 (0.44)	0.46* (0.05)	-0.40 (0.09)	0.11 (0.66)	0.36 (0.13)	-0.36 (0.13)
5	-0.33 (0.17)	-0.36 (0.13)	-0.63** (0.004)	-0.25 (0.31)	-0.54* (0.02)	-0.41 (0.08)	-0.16 (0.51)	0.41 (0.08)
6	-0.44 (0.06)	-0.63** (0.003)	-0.51* (0.03)	-0.77** (<0.001)	-0.17 (0.50)	-0.37 (0.12)	-0.42 (0.07)	0.10 (0.68)
7	—	—	—	—	-0.49* (0.03)	-0.31 (0.19)	-0.60** (0.01)	-0.44 (0.06)
8	—	—	—	—	-0.42 (0.08)	-0.62** (0.004)	-0.51* (0.03)	-0.72** (<0.001)

Values in parentheses are p -values. * indicates $p < 0.05$, and ** indicates significant correlation after the false discovery rate (FDR) correction.—means available data are not sufficient for evaluation.

高い傾向が認められた ($r > 0.90, p < 0.01$). 一方、高温の CL02 の出現率は、黒潮流軸離岸距離と弱い負の相関があった ($r = -0.51, p = 0.13$).

考察

東北沖海域の水塊分布と変動

本稿では、夏季東北沖海域の水塊データに統計的なクラスター解析を適用し、表層・亜表層での水塊分布および出現率の経年変動を解析した。その結果、本海域での水塊変動は、親潮フロント緯度と関係が深いことが示され (Table 2)、親潮フロントが南偏 (北偏) する年は、低温低塩分 (高温高塩分) クラスターの出現が増加する傾向にあった。HM87 の水塊区分を参照すると、低温低塩分 (高温高塩分) クラスターは、親潮系冷水 (黒潮系暖水) もしくはその変質水と考えられた。HM87 の水塊区分では、本海域の夏季表層データ (特に 10 m 深) の大半は、表層水 (SW) という 1 つの区分に分類される。SW は、取りうる水温・塩分の範囲が広く、SW の出現率の多寡から、本海域にどのような水温・塩分特性を持った水塊が占めているかを推察するのは、容易ではない。本稿で適用したクラスター解析を用いると、SW 内にある異なる水塊特性を客観的に区分し、親潮フロント緯度と関連して出現する水塊を抽出することができたと考えられる。一方、津軽暖流水 (TW) に属する水塊の出現率については、親潮フロント緯度や深浦-函館間水位差との明確な相関は得られなかった。TW は黒潮水 (KW) と親潮水 (OW) の等密度面混合でも形成され

ることから、TW 内には、(1) 津軽海峡から東北太平洋側へ流出してきた水塊、および、(2) 親潮水と黒潮水の混合によって形成された水塊等、起源や形成過程が異なる水塊が混在していると考えられる。実際、100 m 深では、KW と OW の混合で形成される CL05 の分布範囲は、東北沖合の広い範囲に及ぶのに対し (Fig. 4(f)), KW と OW の混合では生じない CL04 の分布は、沿岸付近に限定される (Fig. 4(g))。夏季の津軽暖流水は、津軽海峡を出て時計回りの渦モードを形成した後、東北沿岸に沿って南下することから (e.g., Conlon, 1982), CL04 は、上記 (1) の分布をより反映したクラスターであると考えられる。しかし、この CL04 の出現率も津軽海峡水位差との相関は明確ではなく (Table 2)、津軽海峡から流出する水塊の特性が経年変動している可能性等が考えられる。

このクラスター解析の問題点として、クラスター数の決め方に恣意的な要素が残る点がある。本稿では、本海域に現れる KW, OW, TW とその混合水を考慮し、7 個のクラスターを用いて主に解析を行ったが、クラスター数を 6 個および 8 個に変えた場合でも、親潮フロント南偏 (北偏) 年に親潮系 (黒潮系) クラスターの出現が増加するという傾向は、おおむね認められた (Table 3)。しかし、クラスター数 8 個の場合の 10 m 深では、FDR 法による多重比較補正 (Benjamini and Hochberg, 1995) を行うと、統計的に有意な相関を持つクラスターが認められなかった (Table 3)。クラスター数を多く取りすぎると、より厳しい多重比較補正を施す必要があるため、本稿のように、対象海域に

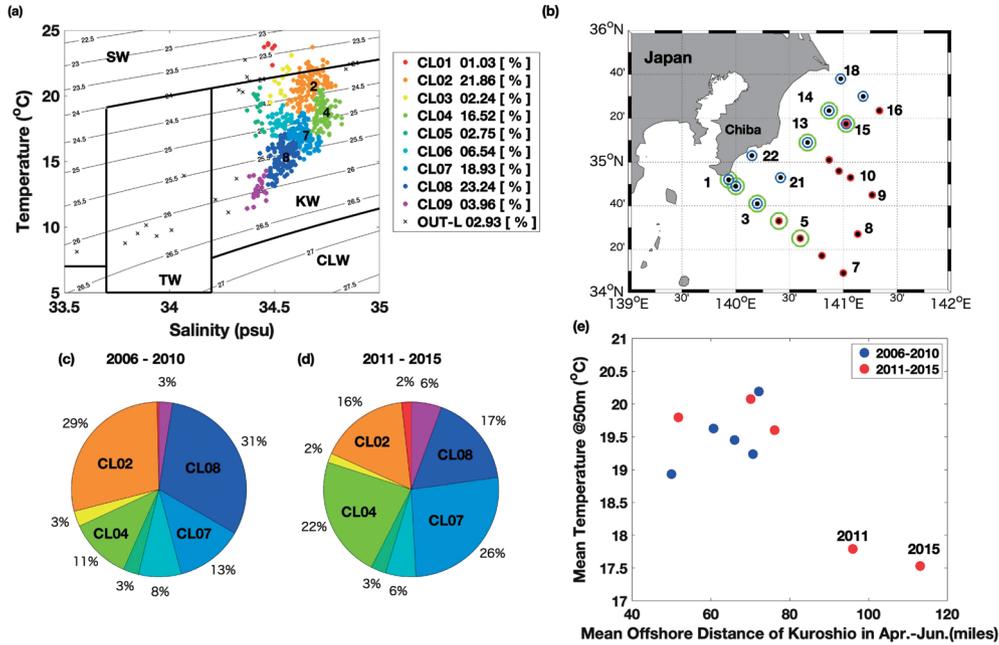


Figure 7. (a) T-S diagram identical to that in Fig. 3 but for data taken by Chiba Pref. in 2006–2015 in Apr.–Jun. at a 50-m depth. (b) Observational stations in Chiba Pref. with station numbers (Stn. 1–18, 21, 22). Stations with blue, red, and green circles indicate more than 20% of occurrence frequency for CL08, CL02, CL07, respectively. The occurrence frequency of each cluster in (c) 2006–2010 and (d) 2011–2015. (e) Relation between the mean offshore distance between Cape Nojima and the Kuroshio Axis in Apr.–Jun. and the mean temperature at Stations 4–12 in Apr.–June at a 50-m depth. Note that the offshore distance is averaged over the period corresponding to the hydrographic observation.

出現する代表的な水塊の情報等がある場合は、その知見を活かしてクラスター数を絞り込むことが有用と考えられる。また、TWに属するクラスターの境界については、選択したクラスター数によって顕著な違いが見られた (Fig. 6(a), (b))。既に述べたように、TWに区分される水塊には、異なる起源を持つ水塊が混在し、同じ水温・塩分範囲を取りうることから、境界が曖昧になってしまい、クラスター数の変化によって結果が変わってしまうと考えられる。クラスター数7 (6, 8) 個の場合のCL04 (CL02, CL04) のように、津軽海峡由来の水塊の一部を抽出できる場合もあるが、KW+OW混合水から完全に分離して抽出することは、水温・塩分データだけでは難しい。今後データセットが充実していけば、他のパラメータ (溶存酸素、栄養塩濃度、アルカリ度等) も加えてクラスター解析を適用することで、上述の方法では抽出できなかった津軽海峡由来の水塊を抽出できるかもしれない。例えば、Kakehi et al. (2017) によると、親潮水、黒潮水の平均的なポテンシャルアルカリ度 (PA) は、各々 2235, 2246 $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 程度である。津軽暖流水のPAが、親潮水 (黒潮水) より低い (高い) のであれば、津軽暖流水起源の水塊は、低 (高) PA を持つ水塊として区別できるであろう。

漁況変動解析への適用の試み—千葉県近海カツオ曳縄漁業を例として—

本節では、クラスター解析による水塊解析手法を用いて漁況変動との関係を論じるうえでの注意点や、今後の解析の方向性を、千葉県近海のカツオ曳縄漁業を例にとり考察する。カツオの生理的特徴として、岡本ほか (2013) はカツオの体温保持機構から 18–19°C 以下の水温帯では長時間遊泳することはできないと推察している。この知見を基にすると、黒潮流軸が離岸し、低温のクラスターが増加した後半5年間 (2011–2015年) の千葉県近海は、カツオの漁場形成にとって好適でなかった可能性がある。本稿では、19°C 以上の水温データが異なるクラスターに区分されるようにクラスター数9個を選択した (Fig. 7(a))。その結果、後半5年間で高温クラスター (CL02) の出現の減少が見られたが (Fig. 7(c), (d))、例えば、クラスター数が7個の場合、19°C 以下のデータも同じクラスターに含まれてしまうため (未記載)、この関係が明瞭に示されなかった。このことから、漁況変動との関係を論じるうえでは、対象となる魚種の適水温等、生理的特徴を考慮したクラスター数の選択が必要になる可能性が考えられる。

房総沖を含む日本南岸黒潮域の表層では、沿岸水の取り込みによる低塩分水塊 (友定, 1985; 岩松ほか, 2003) が見られ、生物分布に影響する等 (Kasai et al., 2002; Okazaki

et al., 2003), 黒潮域に限らず水塊と低次生態系・仔稚魚分布との関係を報告する知見は多い (e.g., Takasuka et al., 2014; Watanabe et al., 2016; Miyamoto et al., 2017). このことから, 水塊分布がカツオの餌となるいわし類等 (二平, 1996) の分布と関係している可能性が推察される. 水温に加え, 餌環境についても, カツオの遊泳深度や漁獲に影響すると考えられていることから (岡本ほか, 2013等), 今後, 塩分情報を含んだ水塊分布と餌環境との関係を精査することで, 漁況変動の解析に有用な情報が得られる可能性がある. また, 今回解析したカツオ曳縄漁業では, 4-6月期のカツオ水揚量は, 2011年を境に有意に減少したが (Fig. 2(d)), 後半5年の漁獲努力量 (4-6月の出漁船数) の平均値は, 前半5年の約23%と減少していた. このため, 漁獲量の減少には海況の変化の他に漁獲努力量の減少も影響した可能性が高い. このことから言えば, 今後クラスター解析手法を漁況変動解析へ応用するにあたっては, 漁獲変動に対する環境 (水塊) 変動の影響を的確に抽出するため, 事前に対象となる魚種の資源変動, 漁獲努力量の変動が漁獲量に与える影響を評価する必要があると言える. 多くの資源研究では, 漁獲量の情報から, 漁獲努力量, 環境変動, 漁具等の影響を除いた資源量指数を表現する標準化CPUEの算出がなされている (e.g., 庄野, 2004). これとは逆に, 漁獲量から漁獲努力量と資源変動等の影響を除いた海洋環境要因に依存する漁獲効率を示すインデックスを求め, 水塊変動との関係性を評価すれば, その変動が漁況に与える影響をより明確に評価することが可能となるであろう.

本稿で用いたクラスター解析による水塊分類手法をソフト化して公開することにより, そのような取り組みに発展することを期待する.

謝 辞

本稿は水産研究・教育機構東北区水産研究所にて, 2017年6月に開催された「海況解析技術研修会」で実施した解析実習の結果を基に纏めたものである. 本稿で用いた水塊分類ソフトは, 東北区水産研究所の長谷川大介博士を中心に開発された. 東北区水産研究所の木所英昭博士および2名の査読者の方々には, 有益なコメントを頂いた.

引用文献

- Benjamini, Y. and Y. Hochberg (1995) Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *J. R. Statist. Soc. ser. B*, **57**, 289–300.
- Cohen, J. (1992) A power primer. *Psychol. Bull.*, **112**, 155–159.
- Conlon D. M. (1982) On the outflow modes of the Tsugaru Warm Current. *La mer*, **20**, 60–64.
- Faul, F., E. Erdfelder, A.-G. Lang and A. Buchner (2007) G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav. Res. Methods*, **39**, 175–191.
- Faul, F., E. Erdfelder, A. Buchner and A.-G. Lang (2009) Statistical power analysis using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analysis. *Behav. Res. Methods*, **41**, 1149–1160.
- Flament, P. (2002) A state variable for characterizing water masses and their diffusive stability: Spiciness. *Prog. Oceanogr.*, **54**, 493–501.
- Hanawa, K. and H. Mitsudera (1987) Variation of water system distribution in the Sanriku coastal area. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **42**, 435–446.
- Honghai L., J. J. M. van Haren and H. M. van Aken (1989) Cluster Analysis as a method to discriminate water masses in shelf seas. *International Council for the Exploration of the Sea, ICES C. M. 1989/C:3*, 14 pp.
- Hur H. B., G. A. Jacobs and W. J. Teague (1999) Monthly variations of water masses in the Yellow and East China Seas. November 6, 1998. *J. Oceanogr.*, **55**, 171–184.
- 岩松一郎・山崎秀勝・石丸 隆・木原興平・小池義夫・喜多沢彰・林 敏史 (2003) 黒潮フロント域の低塩分水塊の起源. *海の研究*, **12**, 477–486.
- Kakehi S., S. Ito and T. Wagawa (2017) Estimating surface water mixing ratios using salinity and potential alkalinity in the Kuroshio–Oyashio mixed water regions. *J. Geophys. Res. Oceans*, **122**, doi:10.1002/2016JC012268.
- Kasai, A., S. Kimura, H. Nakata and Y. Okazaki (2002) Entrainment of coastal water into a frontal eddy of the Kuroshio and its biological significance. *J. Mar. Syst.*, **37**, 185–198.
- 川合英夫 (1972) 黒潮と親潮の海況学. 「海洋物理II」海洋科学基礎講座編集委員会編, 東海大学出版会, 東京, 129–320.
- Kuroda, H., T. Setou, S. Kakehi, S. Ito, T. Taneda, T. Azumaya, D. Inagake, Y. Hiroe, K. Morinaga, M. Okazaki, T. Yokota, T. Okunishi, K. Aoki, Y. Shimizu, D. Hasegawa and T. Watanabe (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio–Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open J. Mar. Sci.*, **7**, 62–90.
- Kusaka, A., T. Azumaya and Y. Kawasaki (2013) Monthly variations of hydrographic structures and water mass distribution off the Doto area, Japan. *J. Oceanogr.*, **69**, 295–312.
- Lepage, Y. (1971) A combination of Wilcoxon's and Ansari–Bradley's statistics. *Biometrika*, **58**, 213–217.
- MIRC (2001) MIRC Ocean Dataset 2001. MIRC Technical Report No. 1, 169 pp.
- MIRC (2005) MIRC Ocean Dataset 2005. MIRC Technical Report No. 2, 158 pp.
- Miyamoto, H., H. Itoh and Y. Okazaki (2017) Temporal and spatial changes in the copepod community during the 1974–1998 spring seasons in the Kuroshio region; a time period of profound changes in pelagic fish populations. *Deep Sea Res. I*, **128**, 131–140.
- 二平 章 (1996) 潮境域におけるカツオ回遊魚群の行動生態および生理に関する研究. *東北水研研報*, **58**, 137–233.
- 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.
- 小達和子 (1979) 三陸・常磐沿岸水域におけるオキアミ漁業について. *東北水研研報*, **40**, 15–25.
- 小川嘉彦 (1987) 東北海区における多獲性浮魚漁況の変動様式. *東北水研研報*, **49**, 17–33.
- 小川嘉彦・平井光行・安田一郎 (1987) 親潮第一貫入の変動とその水産生物への影響. *東北水研研報*, **49**, 1–15.
- Oguma, S., T. Suzuki and Y. Nagata (2002) Seasonal variations in the sea off Sanriku Coast, Japan. *J. Oceanogr.*, **58**, 825–835.
- 岡本 俊・清藤秀理・竹井光広・福田漢生・石川洋一・五十嵐弘道・増田周平・杉浦望実 (2013) アークイバルタグデータに基づいた冬季北太平洋亜熱帯海域でのカツオ当歳魚の鉛直遊泳行動と生息環境. *水産海洋研究*, **77**, 155–163.

- Okazaki, Y., H. Nakata, S. Kimura and A. Kasai (2003) Offshore entrainment of anchovy larvae and its implication for their survival in a frontal region of the Kuroshio. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **248**, 237–244.
- 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.
- 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. *北大水産彙報*, **12**, 58–66.
- Rosa, A. L., Y. Isoda, K. Uehara and T. Aiki (2007) Seasonal variations of water system distribution and flow patterns in the southern sea area of Hokkaido Japan. *J. Oceanogr.*, **63**, 573–588.
- 佐藤祐二 (1974) 道東・三陸漁場におけるマサバの生息環境2. 水塊配置と漁場形成の関連. *東北水研研報*, **34**, 31–57.
- 庄野 宏 (2004) CPUE標準化に用いられる統計学的アプローチに関する総説. *水産海洋研究*, **68**, 106–120.
- Sverdrup, H., M. W. Johnson and R. H. Fleming (1942) *The oceans, their physics, chemistry, and biology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1087 pp.
- Takasuka A., H. Kuroda, T. Okunishi, Y. Shimizu, Y. Hirota, H. Kubota, H. Sakaji, R. Kimura, S. Ito and Y. Oozeki (2014) Occurrence and density of Pacific saury *Cololabis saira* larvae and juveniles in relation to environmental factors during the winter spawning season in the Kuroshio Current system. *Fish. Oceanogr.*, **23**, 304–321.
- 友定 彰 (1985) マサバ卵・稚仔輸送の場としての海洋構造の研究. *東海水研報*, **117**, 47–119.
- 辻田時美 (1966) 異常低温海況が漁業生物に及ぼす影響について. *東北水研研報*, **26**, 1–8.
- Wagawa T., H. Kuroda, S. Ito, S. Kakehi, T. Yamanome, K. Tanaka, Y. Endoh and S. Kaga (2015) Variability in water properties and predictability of sea surface temperature along Sanriku coast, Japan. *Cont. Shelf Res.*, **103**, 12–22.
- Watanabe T., Y. Taniuchi, S. Kakehi, T. Sakami and A. Kuwata (2016) Seasonal succession in the diatom community of Sendai Bay, northern Japan following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *J. Oceanogr.*, **73**, 133–144.
- WCPFC (2017) *Western and Central Pacific fisheries Commission (WCPFC) tuna fishery yearbook 2016*. 149 pp.
- Yasuda I. and Y. Watanabe (1994) On the relationship between the Oyashio front and saury fishing grounds in the north-western Pacific: A forecasting method for fishing ground locations. *Fish. Oceanogr.*, **3**, 172–181.