HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	日本海表層の塩分変動に及ぼす長江希釈水の影響
Author(s)	千手, 智晴
Citation	低温科学, 74, 77-84
Issue Date	2016-03-31
DOI	10.14943/lowtemsci.74.77
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/61187
Type	bulletin (article)
File Information	p077-084.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 74 （2016） 77-84
doi: 10.14943/lowtemsci. 74. 77

日本海表層の塩分変動に及ぼす長江希釈水の影響

千手　智晴[1)]

日本海内部の長江希釈水の移流時間スケールを，2008 年夏季に得られた定置塩分データから見積もった．対馬海峡東水道から流入した長江希釈水は，対馬海流沿岸分枝によって輸送され，対馬海峡から能登半島まで約１ヶ月，さらに津軽海峡まで約１ヶ月の，合計約２ヶ月の時間スケールで日本海を通過していると推定された．これに基づき，対馬海峡と能登半島北西沖海域での塩分の経年変動について特異値分解解析を行った．その結果，両海域には１ヶ月のラグをもって同位相で変動する経年変動が存在することが示された．このことは，長江流量の変動に関連した塩分変動が，少なくとも日本海中部海域にまで及んでいることを示している．

Impacts of the Changjiang diluted water on the variability of surface layer salinity in the Japan Sea

Tomoharu Senjyu[1]

Advection time scale of the Changjiang diluted water (CDW) in the Japan Sea was estimated from the surface layer salinity data at some coastal fixed points in summer 2008. The CDW from the eastern channel of the Tsushima Strait is transported by the coastal branch of the Tsushima Current, and spends about one month to Noto Peninsula and further takes about one month to the Tsugaru Strait. This indicates that the CDW takes about two months to pass through the Japan Sea. Singular value decomposition analysis was applied to the long-term salinity data in the Tsushima Strait and northwest of Noto Peninsula. The results show the in-phase interannual salinity variations in both regions with one month time lag. This fact indicates that the interannual variation in the Changjiang discharge affects on the surface layer salinity in the mid-Japan Sea region.

キーワード：日本海，長江希釈水，表層塩分，対馬海流沿岸分枝，特異値分解解析
The Japan Sea, Changjiang diluted water, surface layer salinity, coastal branch of the Tsushima Current, singular value decomposition analysis

1．はじめに

日本海には，東シナ海から大陸河川（主に長江）の淡水に起源をもつ低塩分水（長江希釈水）が大量に流入している（Isobe et al., 2002; Senjyu et al., 2006）．長江希釈水として日本海に輸送される淡水量は長江流量の７割以上と推定され，長江流量が増大する夏季を中心に流入量も増大する（Chang and Isobe, 2003；千手ほか，2007）．長江希釈水は東シナ海から日本海への物質輸送のみならず（Morimoto et al., 2009, 2012；森本ほか，2013），日本海内部の物質循環や生態系にも大きな影響を与えており，例えば千手ほか（2013）は，日本海岸に沿った低塩分水の挙動と，定置網への大型クラゲ入網数との関連を指摘している．

対馬海峡から日本海に流入した長江希釈水は，対馬海流によって北方へと輸送され，最終的には津軽海峡から北太平洋へと流出する．日本海内部での長江希釈水の挙動については，桑原ほか（1983）による沖合での船舶観測資料に基づく研究がある．彼らは 1973 年に得られた上層 50 m の平均塩分分布から，６月に対馬海峡に現れ

連絡先
千手　智晴
九州大学応用力学研究所
〒816-8580　福岡県春日市春日公園 6-1
Tel. 092-583-7668
e-mail：senjyu@riam.kyushu-u.ac.jp
１）九州大学応用力学研究所
Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga, Japan

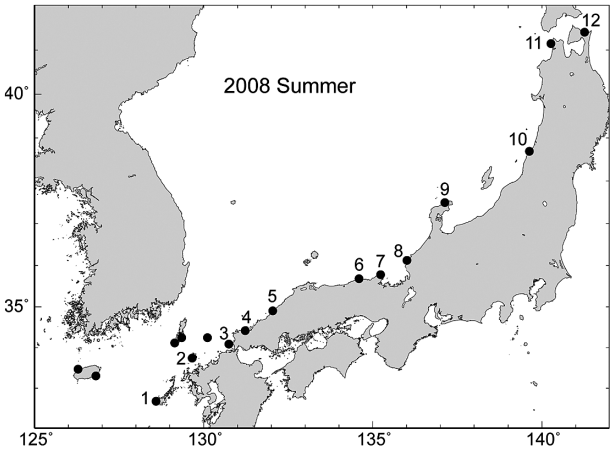

図 1：観測点（2008 年夏季）．黒丸が水温・塩分計の係留点を表すが，解析には番号をつけた測点の塩分データを使用した（1．玉之浦，2．郷ノ浦，3．蓋井島，4．通，5．浜田，6．余部，7．経ヶ岬，8．鷹巣，9．曽々木，10．三瀬，11．横磯，12．関根浜）．

Figure 1：Map of the monitoring stations in summer 2008. Solid circles indicate the location of T-S meter moorings. The salinity data obtained at stations with number are analyzed: 1．Tamanoura, 2．Gohnoura, 3．Futaoi Island, 4．Kayoi, 5．Hamada, 6．Amarube, 7．Kyoga Misaki, 8．Takasu, 9．Sosogi, 10．Sanze, 11．Yokoiso, and 12．Sekinehama.

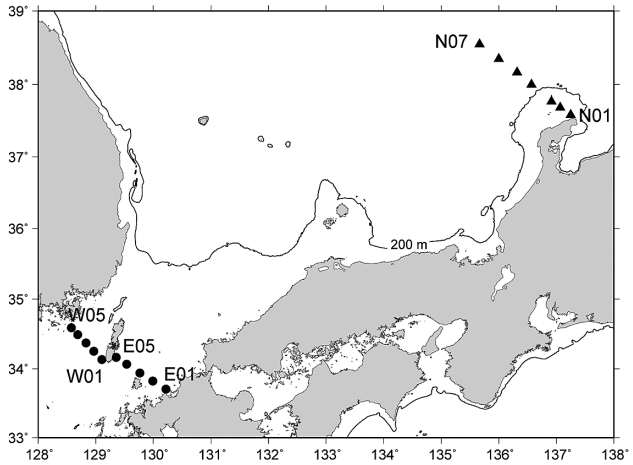

図 2：SVD 解析に使用した対馬海峡（Sta. E01-E05，W01-W05）と能登半島北西沖海域（Sta. N01-N07）における観測点．陸棚地形の目安として 200 m 等深線を描いてある．

Figure 2：Hydrographic stations in the Tsushima Strait (Stas. E01-E05 and W01-W05) and northwest of Noto Peninsula (Stas. N01-N07) for SVD analysis. The isobath of 200 m represents the shelf break area.

た 34.0 以下の低塩分水が，9 月には津軽半島付近にまで達していたことを報告しており，その移動速度として 0.26～0.63 ノット（0.13～0.32 ms^{-1}）を推定している．しかしながら，1 ヶ月単位の沖合での疎らな観測資料に基づく移流速度の算定には，かなりの誤差が含まれていると考えられる．また，長江流量あるいは上流域での長江希釈水の経年的な変動が，日本海内部の塩分環境にどの程度の影響を及ぼしているのかについては，過去に研究例がない．

そこで本論文では，漁業用定置網等に設置した水温・塩分計の記録から，日本海岸に沿った長江希釈水の移流速度，移流時間スケールを明らかにする．また，対馬海流の流程のほぼ中間に位置する能登半島沖での塩分の経年変動が，上流域である対馬海峡の塩分変動とどの程度関連しているのかを統計的に議論し，長江の「遠隔効果」について考察する．

2. 解析データ

九州大学応用力学研究所では，対馬海峡から津軽海峡に分布する漁業用定置網に水温・塩分計を設置し，2008 年夏季から表層水温・塩分のモニタリングを実施している．モニタリングは夏季を中心に現在でも継続しているが，津軽海峡内部に測点（関根浜）を設けたのは 2008 年のみである．そこで本研究では，2008 年夏季の資料を用い，長江希釈水の移流時間スケールを推定する．2008 年は 17 測点で計測を実施したが（図 1），対馬海流沿岸分枝を意識して，日本沿岸の 12 測点（1：玉之浦，2：郷ノ浦，3：蓋井島，4：通，5：浜田，6：余部，7：経ヶ岬，8：鷹巣，9：曽々木，10：三瀬，11：横磯，12：関根浜）のデータを解析した．

各測点では，アレック電子（現 JFE アドバンテック）社製のワイパー式水温・塩分計（ACTW-CMP）を表層のブイからロープで吊るし，海面下約 5 m における水温，塩分を 1 時間ごとに記録した．ただし関根浜（Sta. 12）については，関根浜港外の日本原子力研究開発機構の灯標ブイに Seabird 社製の水温・塩分計（SBE 37-SM）を取り付け，計測を行った．計測深度，計測時間間隔は，他の点と同様である．潮汐などの短周期変動を取り除くため，得られた計測値に花輪・三寺（1985）による 48 時間タイドキラーフィルターを施したものを解析の基本データセットとした．

一方，長江希釈水の経年変動については，福岡県水産海洋技術センターと韓国水産科学院による対馬海峡における塩分データと，石川県水産総合センターによって得られた能登半島北西沖での定線観測データを利用した（図 2）．解析期間は，対馬海峡については 1971～2000 年の 30 年間，能登半島北西沖海域については 1972～2000 年の 29 年間である．ただし，対馬海峡については偶数月，能登半島北西沖海域については毎月のデータセットとなっている．本研究では経年変動に興味があるので，各測点，各深度における塩分値について累年月平均値を

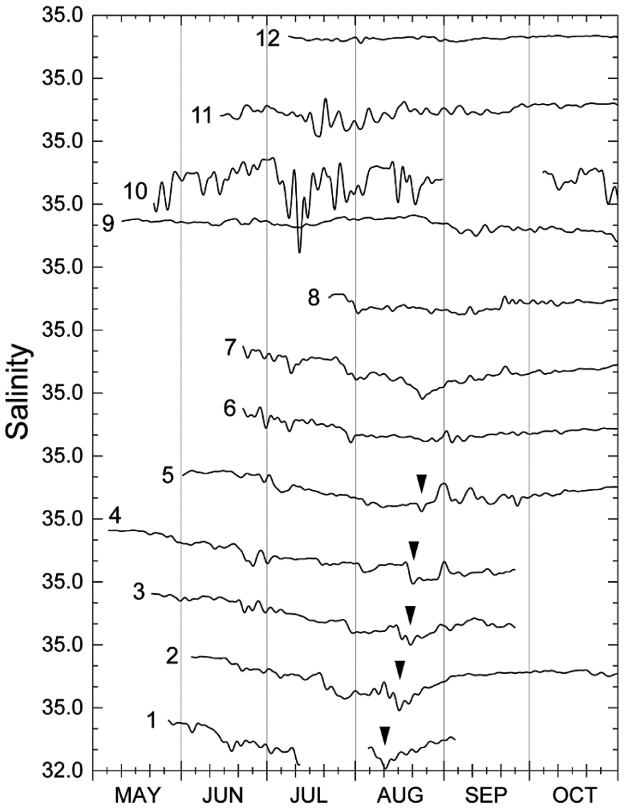

図 3：表層塩分の時系列（2008 年 5～10 月）．グラフの番号は図 1 の測点番号に対応し，見やすくするため 3.0 ずつ順に高塩分側へずらして描いている．Sta. 1～5 の三角印は塩分極小を示す．

Figure 3：Time series of the surface layer salinity during the period from May to October 2008. Numerals near the graph indicate station numbers shown in Figure 1. Each graph is shifted to higher salinity side by 3.0 in order. The triangle at Stas. 1 through 5 shows the minimum salinity.

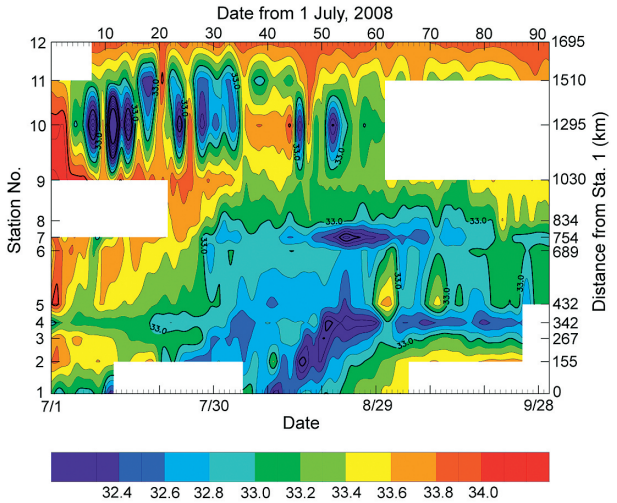

図 4：表層塩分の時間―空間ダイヤグラム．下と上の軸は，それぞれ日付と 2008 年 7 月 1 日からの経過日数を表す．左と右の軸は，それぞれ図 1 の測点番号と玉之浦（Sta. 1）からの岸に沿った距離を表す．等値線の間隔は 0.2 で，図の下のカラーバーは塩分のスケールを表す．

Figure 4：Time-space diagram of the surface layer salinity. The lower and upper axes represent the date and elapsed days from 1 July 2008, respectively. The left and right axes indicate station numbers shown in Figure 1 and the distance from Tamanoura (Sta. 1) along the coast, respectively. The contour interval is 0.2. The color bar under the diagram shows the salinity scale.

求め，それを観測値から差し引くことにより季節変動を除去した偏差の時系列を解析の基本データセットとした．なお，各海域における観測状況やデータセットの詳細，水温・塩分構造の季節変動は，対馬海峡については Senjyu et al.（2008）に，能登半島北西沖海域については千手・大慶（2012）にそれぞれまとめられている．

3. 長江希釈水の移流

各測点における表層塩分の時系列を図 3 に示す．三瀬（Sta. 10）と横磯（Sta. 11）を除く測点では 8～9 月に最低塩分を示しており，特に玉之浦（Sta. 1）から浜田（Sta. 5）までは最低塩分の起時（図 3 の三角印）が順に遅れており，東シナ海からの低塩分水が日本海岸に沿って運ばれている様子がわかる．玉之浦と浜田の最低塩分の起時（8 月 11 日 12：00 と 8 月 24 日 03：00）の時間差と，海岸に沿った両地点間の距離（約 432 km）から算出される長江希釈水の移流速度は約 0.4 ms^{-1} である．一方，三瀬（Sta. 10）と横磯（Sta. 11）では 7 月に最低塩分を記録しており，変動の振幅も大きい．また関根浜（Sta. 12）では，変動の振幅が他の測点に比べて非常に小さいという特徴がみられる．

最低塩分を示す 7～9 月の表層塩分の時間―空間ダイヤグラムを図 4 に示す．先に述べた玉之浦（Sta. 1）から浜田（Sta. 5）にかけての塩分極小の伝播が明瞭であるが，浜田以北についても例えば 33.4 の等値線（黄緑と黄色の領域の境界線として示される）に注目すると，7 月中旬から 8 月上旬にかけて，浜田（Sta. 5）から曽々木（Sta. 9）に向かって 33.4 以下の低塩分水がほぼ一定速度で運ばれている様子が確認できる．等値線の傾きから推定されるこの区間の移流速度も約 0.4 ms^{-1} である．これに対して，7 月に三瀬（Sta. 10）と横磯（Sta. 11）に現れている低塩分水は南から伝播してきたようには見えない．また，この時期には能登半島以北の河川流量がピークを示すことから（長沼，2000），これらの低塩分のシグナルは信濃川や最上川などの北日本の河川水の影響と考えられる．以上述べたような塩分変動の特徴は，2009 年夏季においても認められる（千手ほか，2013）．

日本海に流入した長江希釈水は，移流の過程で周りの海水と混合し，徐々に変質してゆく（千手・大慶，2012）．また，観測深度や成層の状態も観測点毎にバラツキがあ

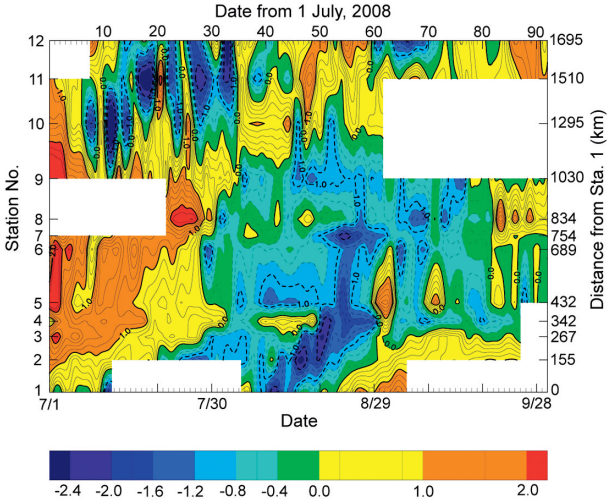

図 5：規格化した塩分の時間―空間ダイヤグラム．等値線の間隔は 0.2 で，負の等値線は破線で描いてある．
Figure 5：Same as Figure 4 except for the normalized salinity. The contour interval is 0.2 and negative contours are drawn by dashed line.

るため，長江希釈水の移流を議論する場合には，塩分の絶対値よりも，各測点における期間平均値と標準偏差で規格化した塩分値を用いた方がよいと考えられる．規格化した塩分値による時間―空間ダイヤグラムを図 5 に示す．負偏差の全体的なパターンは図 4 の 33.0 以下の領域と類似しているが，曽々木（Sta. 9）にも負偏差が現れ，7 月下旬から 8 月中旬にかけて余部（Sta. 6）から三瀬（Sta. 10）に負偏差が伝播していることがわかる．さらに関根浜（Sta. 12）にも 9 月上旬に負偏差が現れており，余部から三瀬に連なる負偏差の延長上に位置している．これらのことは，長江希釈水は能登半島以北の海域においても日本海岸に沿って輸送されており，津軽海峡を通して北太平洋に流出していることを示している．

以上の結果から，対馬海峡東水道から日本海に流入した長江希釈水は，対馬海流沿岸分枝によって移流されていると考えられる．対馬海流沿岸分枝は，日本沿岸の陸棚地形（図 1）にほぼ沿うように流れており，陸棚の途切れる富山湾口付近までは比較的安定した流路をとることが知られている（Hase et al., 1999；中田・磯田，2000）．長江希釈水の対馬海峡から能登半島周辺海域までの移流時間スケールは，約 1 ヶ月と見積もられる．これは，気候値に基づく両海域の表層塩分の季節変動の比較からも妥当な値と考えられる（千手・大慶，2012）．さらに図 5 から，能登半島から津軽海峡までの移流時間スケールも 1 ヶ月程度と見積もられることから，長江希釈水は約 2 ヶ月の時間スケールで日本海を通過していると考えられる．

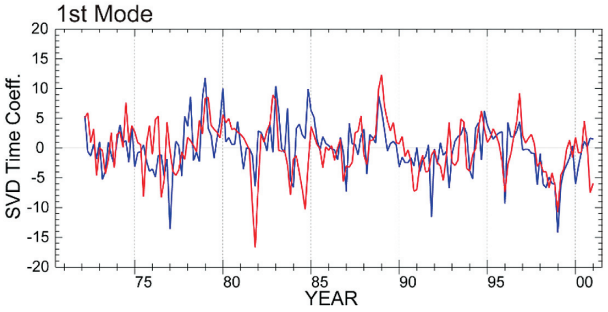

図 6：SVD 1 の時係数．青と赤のグラフは，それぞれ対馬海峡と能登北西沖海域についてのもの．
Figure 6：Time coefficients of the SVD first mode. The blue and red graphs are for the Tsushima Strait and northwest of Noto Peninsula, respectively.

4. 対馬海峡と能登半島北西沖海域の塩分の経年変動

日本海への長江希釈水の入り口である対馬海峡の塩分には大きな経年変動が存在し，その原因として長江流量や東シナ海上空の風の経年変化が考えられている（Senjyu et al., 2006; Chang and Isobe, 2003）．そこで本節では，対馬海峡と能登半島周辺海域の塩分の経年変動を比較することにより，対馬海峡での塩分変動が日本海中部の塩分環境に与える影響を評価する．

両海域の塩分変動の関係を調べるために，特異値分解解析（Singular Value Decomposition analysis，略して SVD 解析）を行った．SVD 解析とは，2 つの変量の間に存在する共変成分を抽出し，その時空間的な構造を明らかにする手法である（伊藤・見延，2010）．ここでの 2 つの変量は，対馬海峡と能登半島北西沖海域の塩分偏差の時系列であるが，前節までの結果を考慮し，対馬海峡の塩分偏差の時系列に対して，1 ヶ月遅れた能登半島北西沖の塩分偏差を対応させる．すなわち，対馬海峡の 2，4，6，8，10，12 月の塩分偏差に対して，能登半島北西沖海域の 3，5，7，9，11，1 月の塩分偏差を対応させた 2 ヶ月毎のデータセットを作成し，それに対して SVD 解析を適用した．

最も強い共変成分である第 1 特異成分（SVD 1）の時係数を図 6 に示す．なお，SVD 1 の二乗共分散寄与率（squared covariance fraction）は 0.758 である．対馬海峡と能登半島北西沖海域の時係数は類似した変動を示しており，両者の相関係数は +0.42 である．図 7 に SVD 1 の異質相関マップを示す．異質相関マップとは，図 6 の能登半島北西沖海域の時係数と対馬海峡の各点における塩分偏差時系列との相関，あるいは対馬海峡の時係数と能登半島北西沖海域の各点における塩分偏差時系列と

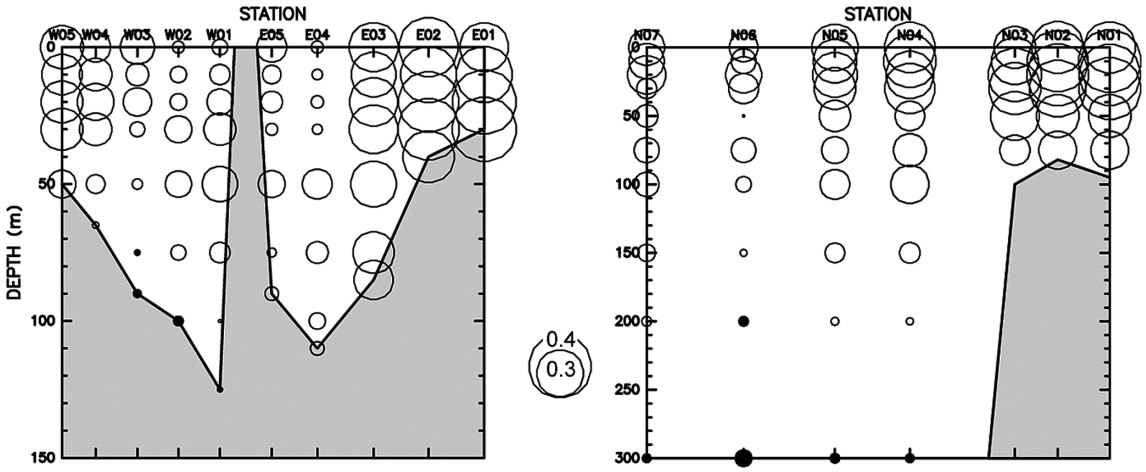

図 7：SVD1 の異質相関マップ．左が対馬海峡，右が能登半島北西沖海域についてのもの．図中の円の大きさが相関係数の大きさを表し，例として相関係数 0.3 と 0.4 の円を両図の間に示す．また白抜きの円は正値を，黒陰の円は負値を表す．

Figure 7：Heterogeneous correlation maps for the SVD first mode. The left and right panels are for the Tsushima Strait and northwest of Noto Peninsula, respectively. Circle size in the maps is proportional to the absolute value of correlation coefficients. Two circles of correlation coefficients of 0.3 and 0.4 are displayed between the maps as examples. Open and shaded symbols indicate positive and negative correlations, respectively.

の相関の分布を示したもので，それぞれの海域における共変成分の空間構造を表す．両海域の広い範囲に正の相関が現れているが，これは両海域で 1 ヶ月のラグをもって同位相で変動する経年変動が存在することを示している．特に相関が高い領域は，対馬海峡では東水道の東部，能登半島北西沖海域では沿岸に近い陸棚上とその沖合の表層 50 m までに認められる．このことは，対馬海峡東水道の沿岸部を通過した海水が，1 ヶ月後には能登半島北西沖の陸棚上とその沖合表層に輸送されていることを示唆している．

SVD 解析は相互関係の強い変動のみを抽出するため，抽出された変動がそれぞれの場で卓越する変動であるとは限らない（伊藤・見延，2010）．そこで，対馬海峡と能登半島北西沖海域の塩分偏差に対して個別に経験的直交関数解析（Empirical Orthogonal Functions analysis，略して EOF 解析）を行い，抽出された卓越変動成分と SVD1 との比較を行った．

対馬海峡の塩分偏差場については，既に Senjyu et al.（2006）が EOF 解析を行っており，その第 1 モード（EOF 1）の時係数と固有ベクトル分布を図 8 に示す．EOF 1 の固有ベクトルは海峡のほぼ全域で正符号を示しており，SVD 1 の異質相関マップ（図 7）と類似した構造を示している．また両者の時係数の間には非常に高い相関（相関係数 r = +0.95）が認められることから，対馬海峡における EOF 1 と SVD 1 は同じ変動を表すものと判断される．

能登半島北西沖海域については，新たに EOF 解析を行った．EOF 1 の時係数と固有ベクトル分布を図 9 に示す．EOF 1 の固有ベクトルは断面全域で正値を示し，特に陸棚上と沖合の 50 m 深までで絶対値が大きくなっている．これらの特徴は，SVD 1 の異質相関マップにもみられるものである．また，両者の時係数の相関は r = +0.86 と非常に高いことから，能登半島北西海域においても EOF 1 と SVD 1 はほぼ同じ変動を表すものと考えられる．

以上より，対馬海峡と能登半島北西沖海域には 1 ヶ月のラグをもって同位相で変動する塩分の経年変動が存在し，しかもそれは，それぞれの海域で最も卓越した変動であると結論できる．

5. まとめ

本研究によって得られた主な結果は以下の通りである．

1）対馬海峡東水道から日本海に流入した長江希釈水は，対馬海流沿岸分枝によって約 1 ヶ月かけて能登半島付近に輸送され，さらに約 1 ヶ月後に津軽海峡から流出する．すなわち，長江希釈水の日本海内部の移

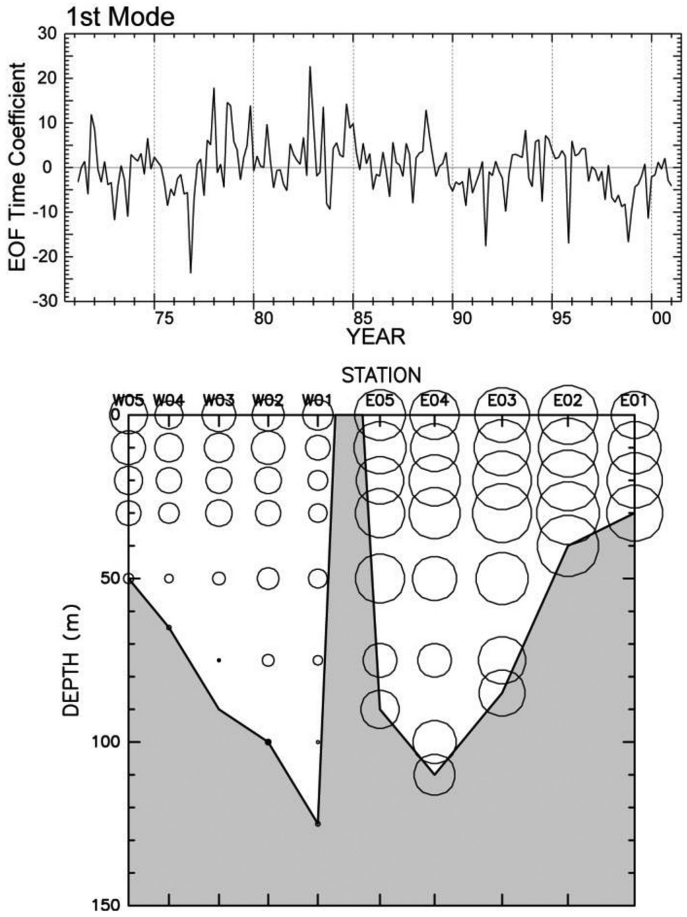

図 8：対馬海峡における EOF1 の時係数（上図）と固有ベクトル分布（下図）．円の大きさが固有ベクトルの相対的な大きさを表し，白抜きの円が正値を，黒陰の円が負値を表す．
Figure 8：Time coefficient (upper panel) and eigenvector distribution (lower panel) for the EOF first mode in the Tsushima Strait. Circle size is proportional to the absolute value of eigenvectors. Open and shaded symbols indicate positive and negative values, respectively.

流時間スケールは約 2 ヶ月である．

2）対馬海峡と能登半島北西沖海域には，約 1 ヶ月のラグをもって同位相で変動する塩分の経年変動（SVD 1）が存在する．

3）SVD 1 で記述される塩分の経年変動は，対馬海峡においても，能登半島北西沖海域においても，最も卓越した変動である．

対馬海峡の塩分場の EOF 1 は，長江流量の経年変動を反映したモードと考えられている（Senjyu et al., 2006）．このことは，長江流量の変動に関連した塩分変動は，少なくとも能登半島北西沖海域の表層にまで及んでいることを示している．今後は，能登半島以北の下流域，さらには津軽海峡から北太平洋へ流れ出る津軽暖流の塩分変動についても調べる予定である．

これに関連して，本研究では主に対馬海峡東水道を通過して，対馬海流沿岸分枝によって輸送される長江希釈水について考察したが，日本海に流入する淡水量は，対馬海峡西水道の方が大きい（千手ほか, 2007）．西水道を通過した海水は，対馬海流沖合分枝，あるいは東韓暖流により輸送されると考えられる．また，西水道では東水道とは異なる塩分変動が卓越しているが（Senjyu et al., 2006, 2009），日本海全体での淡水収支を議論するためには，これら西水道からの淡水輸送についても調べる必要がある．

謝辞

本研究で用いた塩分データは，石川県水産総合センターの大慶則之博士および福岡県水産海洋技術センターの松井繁明氏から提供頂いたものである．また，定置網等への水温・塩分計の設置には，九州大学応用力学研究所の松野健教授を始め，以下の方々のご協力を賜った．ここに記して感謝の意を表します．福江市梁脇氏，郷ノ浦町漁業協同組合，水産大学校，山口県水産研究センター，島根県水産技術センター，兵庫県立農林水産技術

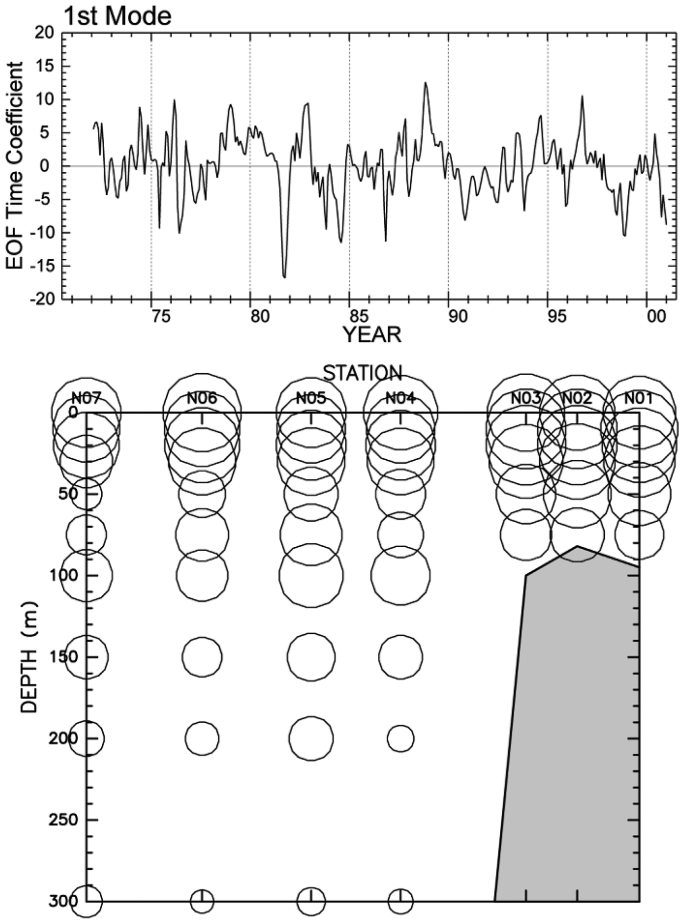

図 9：能登半島北西沖海域における EOF 1 の時係数（上図）と固有ベクトル分布（下図）.
Figure 9：Same as Figure 8 except for the northwest of Noto Peninsula.

総合センター但馬水産技術センター，京都府農林水産技術センター海洋センター，福井県水産試験場，石川県水産総合センター，山形県水産試験場，深浦漁業協同組合横磯漁業生産組合，日本原子力研究開発機構青森研究開発センター．本研究は科学研究費補助金（課題番号：20540426）の補助を受けた.

参考文献

Chang, P.-H. and A. Isobe (2003) A numerical study on the Changjiang diluted water in the Yellow and East China Seas. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JC001749.

花輪公雄，三寺史夫（1985）海洋資料における日平均値の作成について－日平均潮位を扱う際の留意点－．沿岸海洋研究ノート，**23**，79–87.

Hase, H., J.-H. Yoon and W. Koterayama (1999) The current structure of the Tsushima Warm Current along the Japanese coast. *J. Oceanogr.*, **55**, 217–235.

Isobe, A., M. Ando, T. Watanabe, T. Senjyu, S. Sugihara and A. Manda (2002) Freshwater and temperature transports through the Tsushima-Korea Straits. *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2000JC000702.

伊藤久徳，見延庄士郎（2010）気象学と海洋物理学で用いられるデータ解析法．気象研究ノート，**221**，日本気象学会，東京.

桑原昭彦，鷲尾圭司，鈴木重喜（1983）日本海表層域における高塩分水と低塩分水の移動速度について．京都海洋センター研報，**7**，41–47.

Morimoto, A., T. Takikawa, G. Onitsuka, A. Watanabe, M. Moku and T. Yanagi (2009) Seasonal variation of horizontal material transport through the eastern channel of the Tsushima Strait. *J. Oceanogr.*, **65**, 61–71.

Morimoto, A., A. Watanabe, G. Onitsuka, T. Takikawa, M. Moku and T. Yanagi (2012) Interannual variation in material transports through the eastern channel of the Tsushima/Korea Straits. *Prog. Oceanogr.*, **105**, 38–46.

森本明彦，後藤暁，滝川哲太郎，千手智晴，伊藤雅，鬼塚剛，渡邉敦，杢雅利（2013）対馬海峡を通過する溶存態無機窒素の水平輸送量．海と空，**89**，69–77.

長沼光亮（2000）生物の生息環境としての日本海．日水研報

告，**50**，1–42.
中田聡史，磯田豊（2000）富山湾沖対馬暖流の季節変化．海と空，**76**，145–152.
Senjyu, T., H. Enomoto, T. Matsuno and S. Matsui (2006) Interannual salinity variations in the Tsushima Strait and its relation to the Changjiang discharge. *J. Oceanogr.*, **42**, 681–692.
千手智晴，松井繁明，韓仁盛，滝川哲太郎（2007）東シナ海から日本海への熱・淡水輸送．海と空，**83**，47–54.
Senjyu, T., S. Matsui and I.-S. Han (2008) Hydrographic conditions in the Tsushima Strait Revisited. *J. Oceanogr.*, **64**, 171–183.
Senjyu, T., I.-S. Han and S. Matsui (2009) Connectivity between the interannual salinity variation in the western channel of the Tsushima Strait and hydrographic conditions in the Cheju Strait. *J. Oceanogr.*, **65**, 511–524.
千手智晴，大慶則之（2012）日本海能登半島沖海域の海洋構造と対馬海流モニタリングに対する重要性．海と空，**87**，33–48.
千手智晴，奥野充一，大慶則之，辻俊宏（2013）2009 年夏季の日本海沿岸域における表層低塩分水の挙動とエチゼンクラゲ（*Nemopilema nomurai*）出現の関係．海と空，**80**，53–60.