

— 論 文 —

三陸沖海域における上層海況の長期変動*

轡田 邦夫[†]・服部 政志[†]・山田 容子[†]

要 旨

三陸沖海域における海況の長期変動の時空間的特性をほぼ毎月1回観測されている岩手県水産技術センターの1967年以降39年間の定線観測資料を用いて調べた。水温・塩分の時系列に見られる1年周期の変動を除去した時系列に対するEOF解析の結果、水温・塩分ともに寄与率70%を越える第一モードは、全海域で同符号をもち、水温は沖合測点の亜表層、塩分は同じく沖合の表層で高振幅をもつ。その時間変動特性は、水温・塩分ともに年々低下する傾向がみられ、1980年代初めに水温および塩分に見られる急激な低下と、1990年代後半に塩分のみに見られる急な低下に特徴づけられる。これらの急激な変化を挟む前後5年間の平均差を求めたところ、前者は水温・塩分ともに沖合の亜表層で顕著な低下が見られ、親潮水系の南限緯度変化と高相関をもつことより、大規模な変動場に関係づけられる。一方1990年代後半の塩分だけに見られる急低下は、表層で顕著であり海面を通じた淡水フラックス変動に起因することが示唆された。

キーワード：三陸沖，長期変動，上層海況

1. はじめに

三陸沖海域は、親潮水系、黒潮水系、津軽暖流水系が混在しており (Kawai, 1972 など)、それらの水系の消長は季節または経年スケールで変動することが指摘されており (吉田, 1996; 上野・山崎, 1987 など)、こうした複雑な海況によって、水産・漁業面からも注目される海域と考えられる。小川ら (1987) は、親潮水系の勢力の指標となる親潮第一貫入の変動と東北海域の水産生物への影響について検討を行い、異常南下発生年に関わらず親潮第一貫入の変動の影響があることを指摘した。また、二平 (2006) は、東北海域の水産資源を代表する魚類変動と大気・海洋系のレジームシフト (ア

リュウシヤン低気圧指数と北太平洋指数) との関連性を検討し、符号反転によって水産資源も変動することを示した。

一方物理環境が生態系に大きく与える三陸沖海域の物理的見地からの研究としては、水系変動に注目した解析や、海上大気場と親潮の変動との関係として、海況の特に水温に対する長期変動に注目した研究が挙げられる。前者の水系解析としては、Hanawa and Mitsudera (1986) が岩手県水産試験場 (現岩手県水産技術センター) の1977~1981年までの5年間の定線観測資料中の水温・塩分を用いて、三陸沖海域中に存在する水系をT-Sダイアグラムに基づき津軽暖流水系、黒潮水系、沿岸親潮水系など計六つの水系に分類した。小熊ら (2000) は、同一資料の25年間の定線観測資料を用いて、Hanawa and Mitsudera (1986) で定義された水系分類を基に、対象海域における水系の季節変動を調べた。その結果、

* 2007年2月12日受領；2007年9月11日受理
著作権：日本海洋学会, 2008

[†] 東海大学海洋学部海洋科学科

〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1

主著者 e-mail address : kkutsu@scc.u-tokai.ac.jp

1~4月までは沿岸親潮水系が支配し5月になると津軽暖流水系の特徴が見られ始め、7~9月は津軽暖流水系が混合や変質を受けたと考えられる特性が見られるが、12月のT-Sダイアグラム上には水系分類では判断が困難な水系が認められ、上記の分類に加えた方が良いことを指摘した。また永田ら(2000)およびOguma and Nagata(2002)は、小熊ら(2000)と同期間の南から対象海域に侵入してくる高塩分の黒潮水系の出現現象について調べ、対象海域の南東部で大規模な高温・高塩分の黒潮水系の侵入が起きやすいことを結論づけた。

一方、海上大気場と親潮の南下について、冬季の北太平洋の風応力場との関係で議論された研究もなされている。花輪(1991)およびHanawa(1995)は、日本近海の海面水温(Sea Surface Temperature: SST)アノマリが冬季季節風の強弱に支配されているとし、小川(1989)による100m深水温分布から読み取った親潮第一貫入南限緯度の時系列と冬季風応力場から作成された風成海洋循環流量(スベルドリップ輸送量)の時系列を比較し、北太平洋亜寒帯海洋循環系の強さが変化(スピンアップ・スピンダウン)するプロセスに親潮第一貫入の南限緯度が支配されることを示した。またSekine(1988)は、親潮異常南下現象の発生と北太平洋上の海面応力場の変動との関係性に注目し、春季に親潮の異常南下が発生する年においてそれに先行する冬季における海面応力の回転場(curl τ)がゼロとなる緯度が、親潮異常南下の非発生年と比較して北西太平洋全域で緯度にして3~5°南下することより、親潮異常南下発生と大気大循環場の変動との間の対応を指摘した。これらの結果をもとに、関根・鈴木(1990)およびHanawa(1995)は親潮南下現象の予測可能性について議論した。

様々な水系が混在する三陸沖海域の長期変動の解析には、水温が主な対象とされてきた。水野(1984)は、17年間の東北水産研究所が毎月発行している100m深水温図に対して経験的直交関数(EOF)解析を行い、東北海域の時空間変動特性を調べた。その結果、寄与率約30%の第一モードは、黒潮に関する大規模な変動に支配され、対象海域において同符号で三陸沖海域中部(岩手県沖)に変動の中心を持ち、その時系列からゆっくり変動するパターンを有し、寄与率がそれぞれ19%、

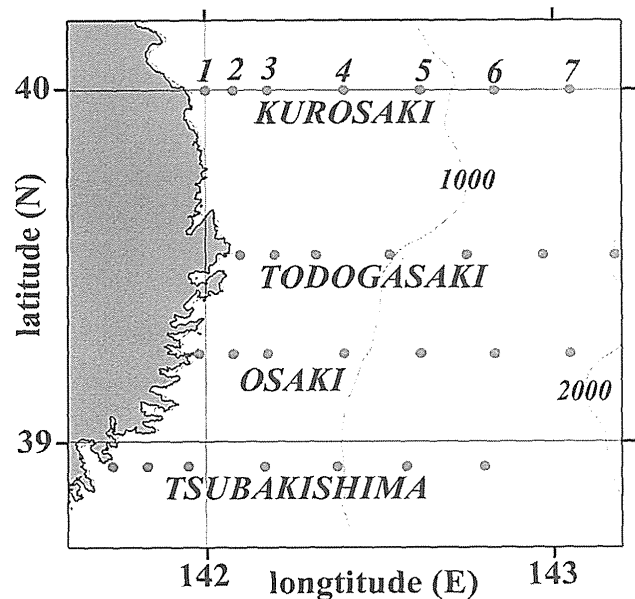


Fig. 1. Map of the study area off the Sanriku coast. Locations where routine hydrographic observations have been made by Iwate Prefectural Fisheries Experimental Station are indicated by dots.

10%の第二・第三モードは暖水塊の移動に伴う空間パターンをもち約4か月の時間スケールで変動することを示した。親潮の勢力の指標として、小川(1989)は、水野(1984)と同じ100m深水温図から親潮第一貫入南限緯度時系列を1964~1987年まで作成し、その時系列から親潮第一貫入が解析期間の間、段階的に南下傾向にあることを示した。水温の長期変動としては、村上(1994)が、水野(1984)のEOF解析の第一モードにおいて変動の中心である海域の100m水温の長期変動特性と黒潮続流・親潮第一貫入南限緯度との関係を調べた結果、100m水温には数年~数十年スケールをもつ周期的変動が存在する事を示し、第一モードの変動の中心海域は黒潮続流よりも親潮の変動の影響を強く受ける海域であると結論づけた。ローカルな海況変動については、響田(1992)が岩手県水産試験場(現岩手県水産技術センター)の定線観測資料を用いて数十年スケールの特性を調べた。その結果、1960年代後半から1980年代半ばにかけて低温化・低塩分化傾向が見られ、低温化の要因として亜寒帯循環系の強化によるものと示唆した。また、響田(1990)は、平井・安田(1988)が導出した三陸沖海域における100m深水温の第一EOF

モードの時系列に対してスペクトル解析を行い、1年周期の他に約3年半の周期をもつ変動が存在することを指摘すると共に、100 m 水温時系列とエルニーニョの発生海域に相当する熱帯太平洋東部における SST の時系列との間の相関解析を行い、約3年半の周期帯で有意に高いことより、三陸沖海域における水温が大気・海洋系の大規模変動と連動していることを示唆した。

これら三陸沖海域における長期変動に注目した過去の研究では主に水温変動が対象とされてきたが、様々な水系が混在する三陸海域では塩分変動も重要である。しかし、塩分を対象とした研究が多いとは必ずしも言えない。そこで、長期変動の解析に適した長期間のデータが存在し、かつ欠測が非常に少ないデータである岩手県水産技術センター(旧岩手県水産試験場)の定線観測データを用いて解析を行った。本研究では、水温・塩分の年々変動の時空間特性に注目し、数年から十年スケールの長期変動に注目した。また、轡田(1992)が報告した1960年代後半から1980年代半ばにかけて低塩化・低塩分傾向がその後継続されたのか否かについても注目した。

2. データおよび解析方法

本研究で扱ったデータは、岩手県水産技術センター(旧岩手県水産試験場)が毎月1回行っている定線観測資料(Fig. 1)である。この定線観測は戦前から行なわれており、本研究対象である長期変動の解析に有用である。本研究では、北から黒埼測線、トドヶ崎測線、尾崎測線、椿島測線の計4測線において、毎月一回ほぼ定期的に観測が行われ始めた1967年以降のデータについて解析を行った。採水層は、0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300 m の10層であり、沿岸から沖へ測点1, 2, と測点8まで存在するが、岸近くの測点は海底水深に応じて最大観測深度は浅くなっている。また、各測線の最も沖合の測点は冬季を主に観測されない時期が多いこと、同様に最大深度(300 m)は欠測が1970年代以前は多かったため、時系列の作成対象から除外した。こうした定線観測は、原則として月初めに実施されているが、数日前後するケースも少なくない。本研究では、毎月1回のデータから成る長期間の時系列として

解析を行うことを目的とすることから、年による実施日の相違を軽減するため、毎月の中間日、即ち15日における値を、その日を挟む前後の観測データの線形内挿によって求めた。即ち、1月のデータは1月初旬と2月初旬に実施された観測値によって求められた。解析期間は、1967年1月から2005年12月までの468か月間である。本研究では対象海域における長期変動の有効な指標とされる親潮水系の南限緯度データを用いた。これは、毎月の100 m 水温分布図上における5°Cの南限緯度として東北海区水産研究所から提供されているデータであり、以下親潮南限緯度データと表記する。

3. 平均場および標準偏差場

予備的作業として、全期間における水温・塩分の平均場を求めた。まず、平均水温の鉛直断面図(Fig. 2)をみると、各測線のほぼ全ての測点において海面付近が高水温であること、また全測線の沿岸近くで高水温であることが分かる。海面付近で平均水温が高いのは、海面を通した加熱・冷却効果による水温変化が支配的であること、また沿岸域で平均水温が高めであることは津軽海峡を通過して岸沿いに三陸沖海域に流入する津軽暖流を反映している。水温変動の空間特性を見るために、各測点・深度における毎月の時系列より標準偏差を求めた(Fig. 3)。その結果、標準偏差はどの測点においても表層で大きく、沿岸よりも沖合測点で相対的に大きい値を示しているが、前者は海面を通した水温変動が支配的であることを反映している。

次に、塩分に注目してみる。水温と同様に全期間での平均場の特徴を見ると(Fig. 4)、全測線において沿岸寄りと沖合側の水深100 m 付近で高塩分であることを示している。また水温との違いとして、最も北方の黒埼測線において、東経142°40' 付近の表層で平均塩分の低い海域が見られることである。沿岸の垂表層で平均塩分が高い理由は津軽暖流の影響であり、沖合の垂表層で平均塩分が高いのは暖水渦の影響ではないかと推察される。塩分の標準偏差場を見ると(Fig. 5)、水温と同様に高振幅であるのは沖合側の測点の表層であり、塩分変動も海面を通した変動の影響を受けることが推察される。

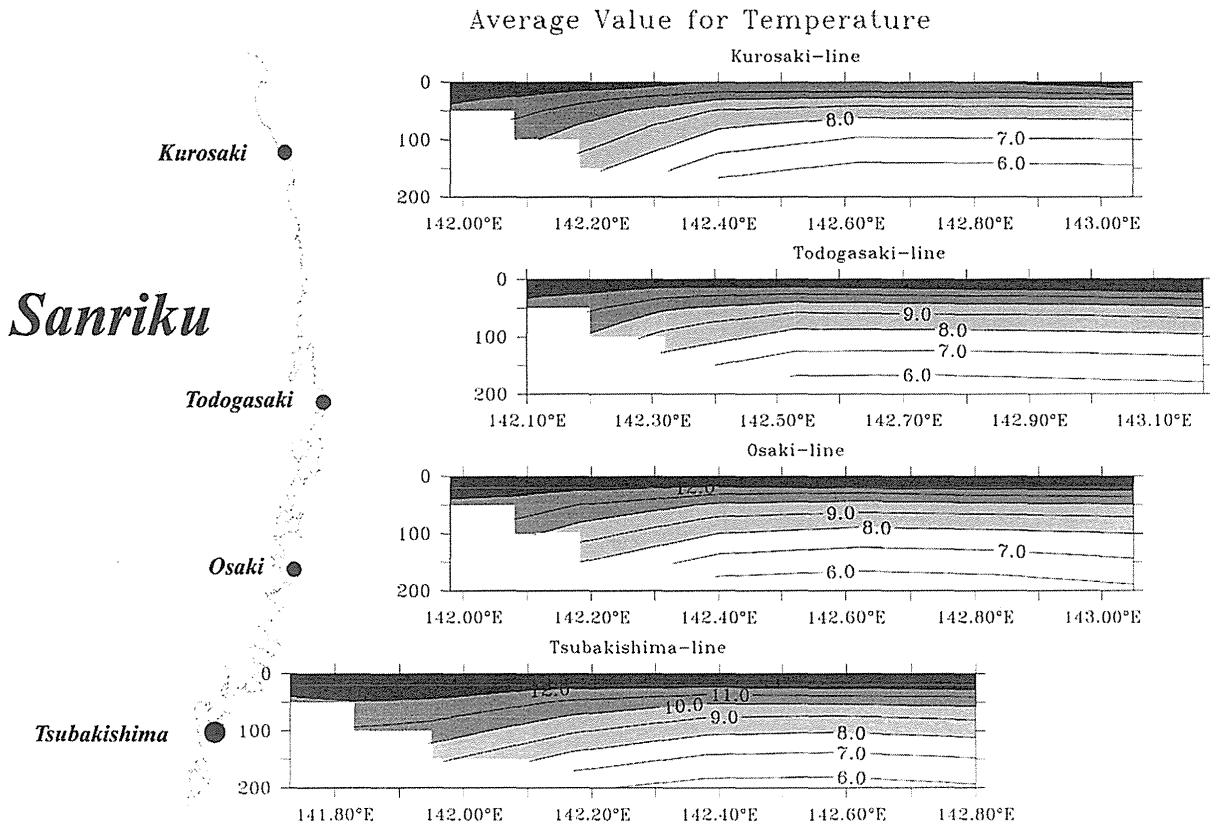


Fig. 2. Cross sections of 39-year(1967–2005) average temperature field along four zonal lines. (Kuroasaki, Todogasaki, Osaki and Tsubakishima lines from the top)

水温・塩分の標準偏差場で大きい値を示した測点の時系列 (Fig. 6a, b) を見ると、共に毎年極大・極小をもつ季節変動の卓越が示されるが、水温はほぼ各年1回の極大・極小であるのに対して、塩分は複数の極大もしくは極小が見られ、より短周期の変動の存在も示唆される。これら卓越する変動の周期を見つけるために、各測点・深度の時系列に対するパワー スペクトルを求めた。その結果、水温には季節変動に相当する1年周期に有意なピークが認められるほか、30~50か月の周期帯でエネルギーが高く、数年程度の周期をもつ変動が卓越していることを示している (Fig. 7)。塩分に対する同様な解析を行った結果、季節変動に相当する1年周期のピークのほか、30~70か月の周期帯で高いエネルギーが見られ、水温と同様に数年程度の周期変動の卓越を示しており、これらの結果は轡田 (1990) の結果と同様である。両者のスペクトル特性を比較してみると、水温の1年周期におけるピークは塩分のそれに比べて顕著であるが、これは時系列に見られる特徴と対応する。一方、塩分のスペクトルでは、1年の周期帯と

数年の周期帯におけるエネルギーに顕著な差が見られず、塩分変動における経年変動は季節変動に匹敵すると言える。

4. 数年スケールの変動

本研究では年々変動に注目するため、こうした季節変動を含む短周期変動を除去する必要がある。そこで月データに対して1年移動平均を施し、各水温の標準偏差を求めた (Fig. 8)。水温の標準偏差が大きい値を示したのは、全測線ともに水深100 m付近の亜表層であり、沖合の測点ほど大きい値を示し、月データから求めた標準偏差分布とは明らかに異なる特性を示している。こうした水温の経年変動が亜表層の沖合で最高振幅をもつことは、経年変動の要因が海面を通したのではなく、外洋もしくは大洋スケールでの変動によるものであることを示唆する。この水温の経年変動において卓越する変動の空間特性を抽出するため、1年移動平均した時系列に経験的直交関数 (EOF) 解析を行っ

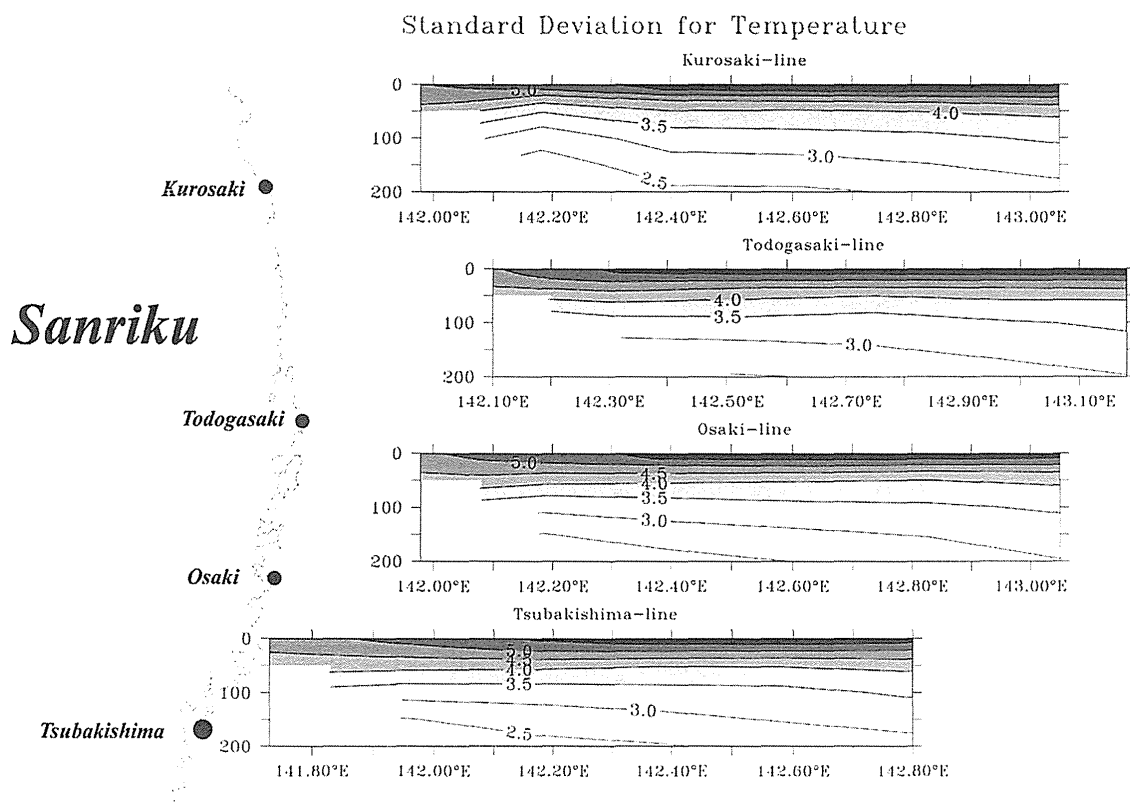


Fig. 3. Cross sections of standard deviations for monthly time series of temperature along four zonal lines. (Kurotsaki, Todogasaki, Osaki and Tsubakishima lines from the top)

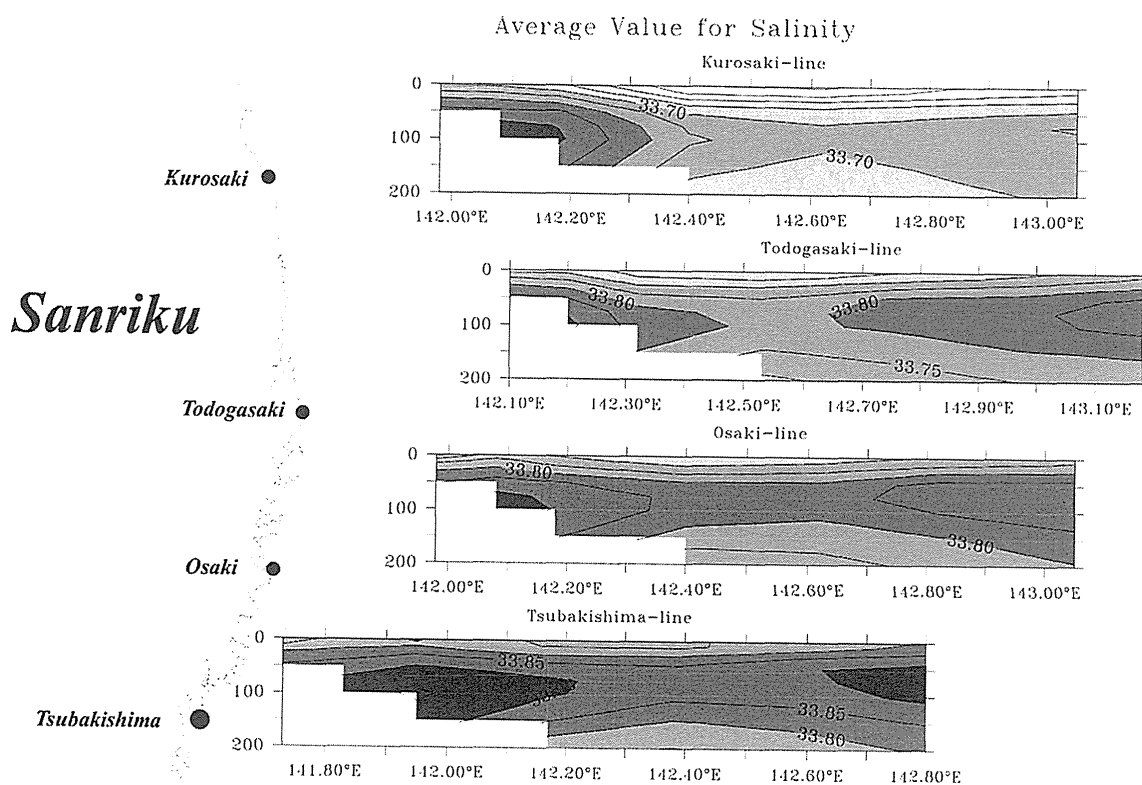


Fig. 4. The same as Fig. 2 except for salinity field.

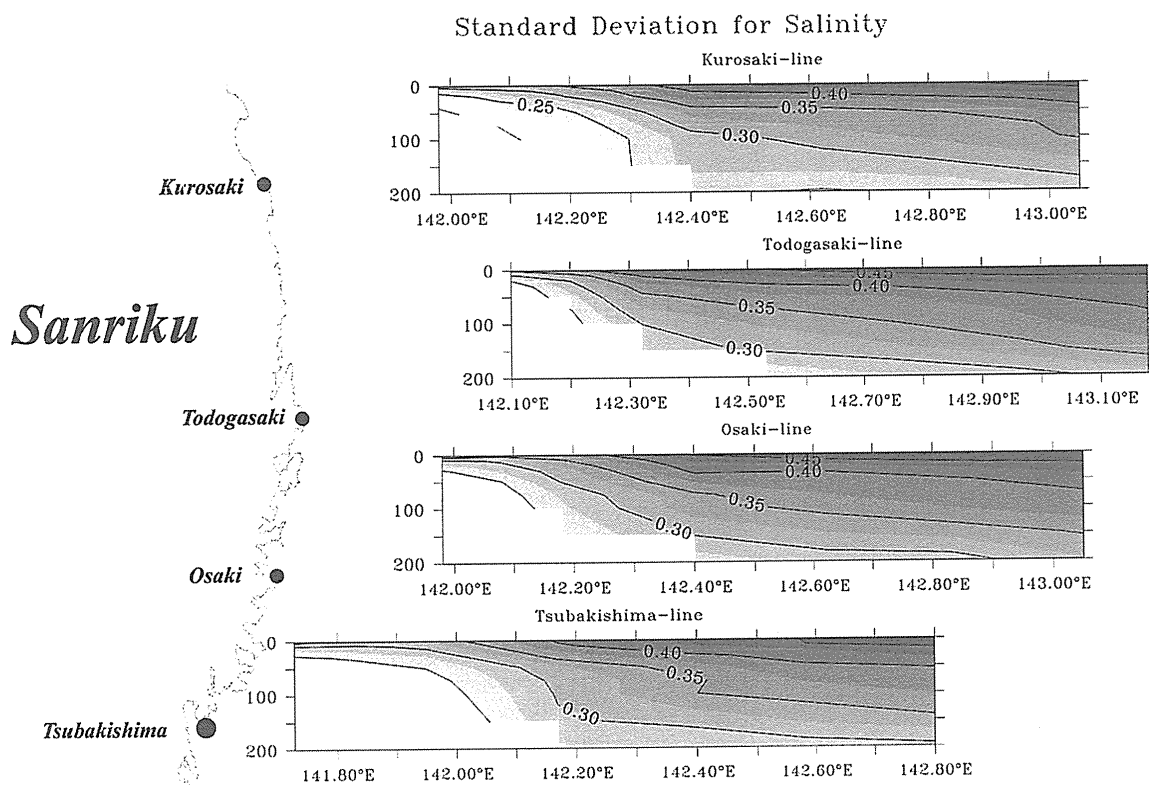


Fig. 5. The same as Fig. 3 except for monthly time series of salinity.

た。その結果、寄与率75%の第一モードの空間分布は対象海域全域で同符号を示し、水温の経年変動には同位相の変動が卓越することが分かる (Fig. 9)。特に振幅が高いのは、沖合表層と亜表層であり、これは標準偏差分布にみられた特性に対応する (Fig. 8)。そこで、第一 EOF モードの時間関数と標準偏差が大きい値を示した尾崎測線測点7における100 m 水温の時系列を比較して見ると (Fig. 10)、両者はよく対応し互いに高い相関を示す (相関係数 = 0.92, 95%で有意) ことは、対象海域における水温の経年変動が外洋域の亜表層が起源であることを示唆する。

次に季節変動を除去した塩分データの標準偏差分布 (Fig. 11) をみると、月データとほぼ同じ測点の表層で大きく、かつ沖合の測点ほど値が大きいことがわかる。水温とは異なり、塩分では、月データと1年移動平均データに対する標準偏差分布 (Fig. 5, 11) の間に顕著な相違が見られない。寄与率77%の第一モードの空間パターンは、海域全体において同符号で変動が一樣であり、沖合の表層と亜表層で高振幅を示している (Fig. 12)。そこで標準偏差が最も大きい値を示した尾崎測線測点7

の10 m 塩分の時系列をこの第一モードの時間関数と比較してみると (Fig. 13)、両者間の相関は高い。これは、塩分の年々変動においては、水温と同様の亜表層起源の変動のみならず、海面を通じた変動要因が支配的であることを示唆する。その変動傾向をみると、1980年以前は高塩分であったが、1980年代前半に急激な低塩分化が起きた後数年は同程度の状態が継続し、その後1990年代になって低塩分になることが分かる。第一 EOF モードの時間関数に注目すると (Fig. 13の破線)、1980年代以前は高塩分偏差にあり、1980年代半ばから1990年代半ばまでは変動の小さい状態が継続した後低塩分偏差になった。標準偏差が大きい値を示した時系列を見ても第一モードと同様であることより、1980年代前半と1990年代後半に低塩分化が起きていることが分かる。水温と塩分の数年スケールの変動をみると (Fig. 10, Fig. 13)、1980年代以前は両者ともに正偏差にあり、その後急激に低下し暫く変動幅が小さい状態を維持していた。しかし、1990年代半ばになると水温は同様の低振幅の状態を継続するが、塩分は負偏差に転じる傾向が伺われる。

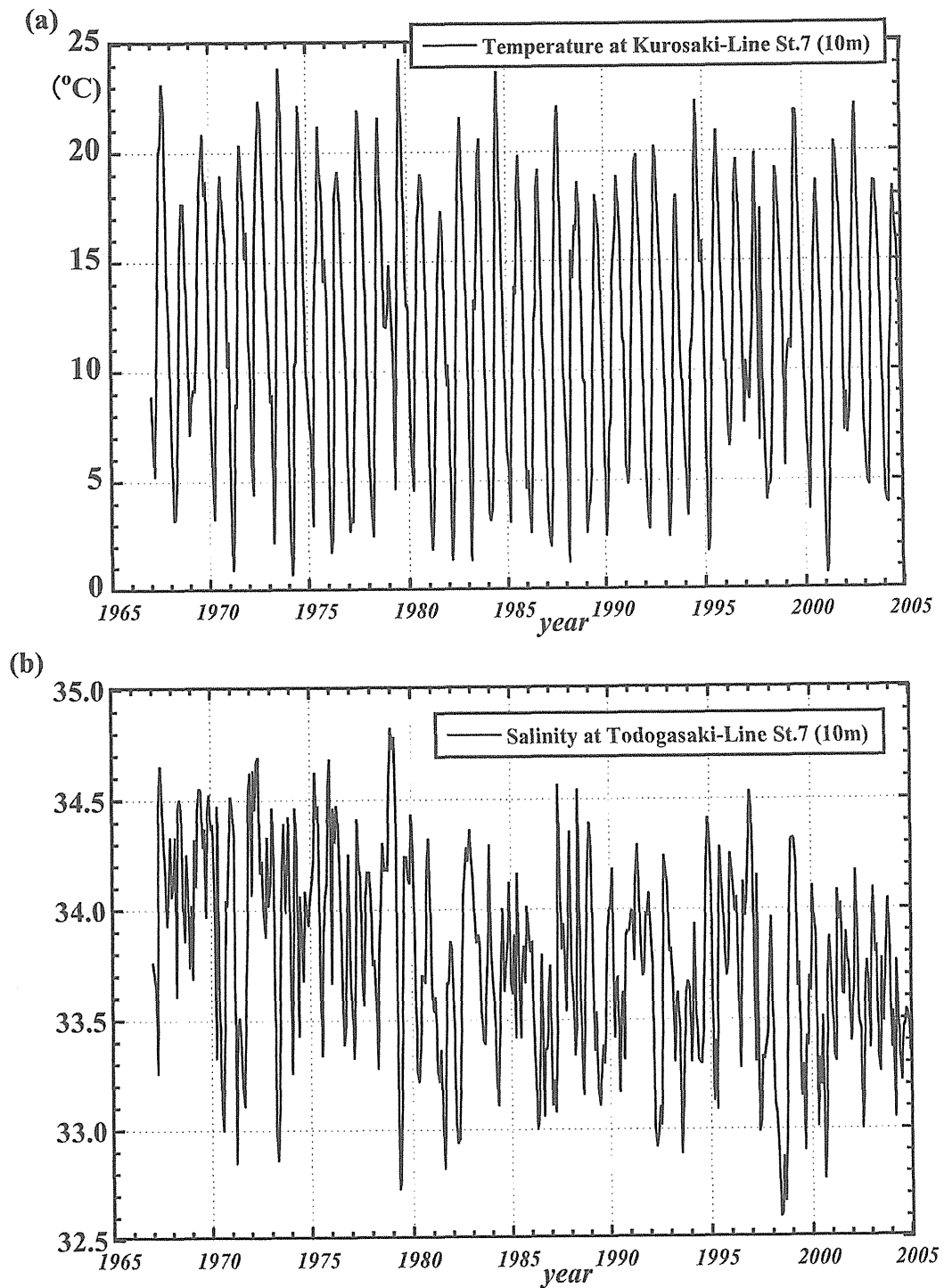


Fig. 6. Time series of temperature (a) in the near-surface layer (10 m) at Sta. 7 in the Kuroasaki line and salinity (b) in the near-surface layer (10 m) at Sta. 7 in the Todogasaki line.

5. 十年スケールの変動

本章では、数年よりもさらに長い時間スケールの変動に注目するため、水温・塩分に4年移動平均を施した。その水温に対する標準偏差分布(図省略)は、1年移

動平均データ (Fig. 8) と同様に水深 100 m 付近の亜表層で大きい値を示す。EOF 解析による寄与率 79% の第一モードの空間分布においても、沖合の表層および亜表層で高振幅がみられた。この第一モードの時系列(図は省略)は1年移動平均と同様に標準偏差で最大値を

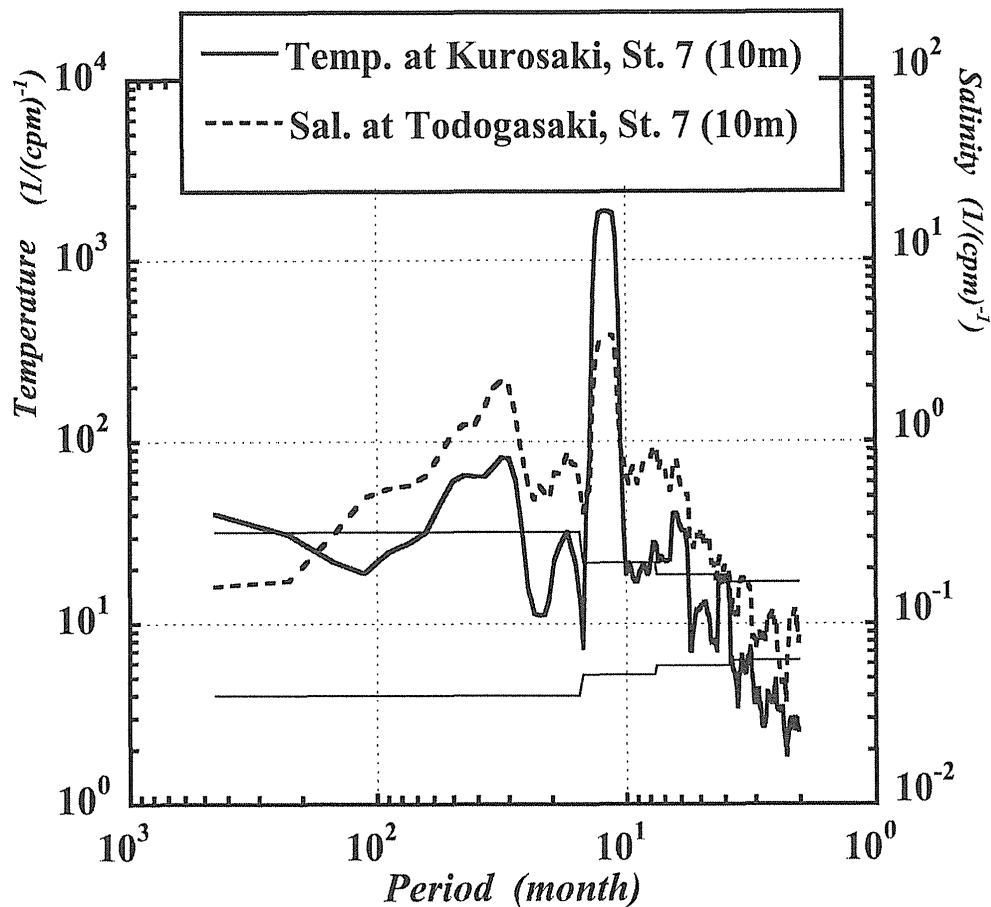


Fig. 7. Spectra for time series of temperature (solid line) in the near-surface layer (10 m) at Sta. 7 in the Kurosaki line and salinity (broken line) in the near-surface layer (10 m) at Sta. 7 in the Todogasaki line. Horizontal bars depict 95% confidence intervals.

示す尾崎測線測点7の100 m水温の時系列 (Fig. 14の破線) と高い相関をもつ。その変動傾向を見ると、1980年以前の8–10°Cから1980年代初頭に急激に低下し、その後1982年以降は、1990年代半ばを除いて8°Cを越えない低温の状態が2000年代まで継続する。

塩分の4年移動平均時系列に対する標準偏差場分布 (図省略) では、沖合の表層および亜表層において大きい値を示し、1年移動平均時系列に対するそれ (Fig. 11) と同様な特性を有する。EOF解析による第一モードは寄与率75%を占め、その空間分布は海域全体において同符号、沖合の表層と亜表層で高振幅を示し、1年移動平均時系列に対する結果 (Fig. 12) に類似する。標準偏差が大きい値を示す尾崎測線測点7の表層 (10 m) 塩分の時系列を見ると (Fig. 14の実線)、1970年代から徐々に低塩分化が起き1980年代初めに急激に低塩分化し、その後33.7~33.9で推移する変動の少ない期間を経た

後、1990年代後半に再び低塩分化が起き、2000年代は33.7前後の低い値を維持する。こうした塩分の長期変動が表層で最も顕著にみられることから、海面を通しての変動の影響が考えられる。

以上より、沖合測点の時系列 (Fig. 14) において顕著に見られる1980年代初めの急激な低温化および低塩分化はほぼ同時期に発生しており、互いに連動した現象であることが示唆される。また1990年代半ばに水温・塩分共に上昇した後1990年代後半にも低温化および低塩分化が見られるが、その後の2000年代における水温が1980年代半ば以降の状態 (7–8°C) であるのに対して、塩分は対象期間で最も低い状態 (33.7前後) を示しており、水温変化と異なる要因の存在が示唆される。

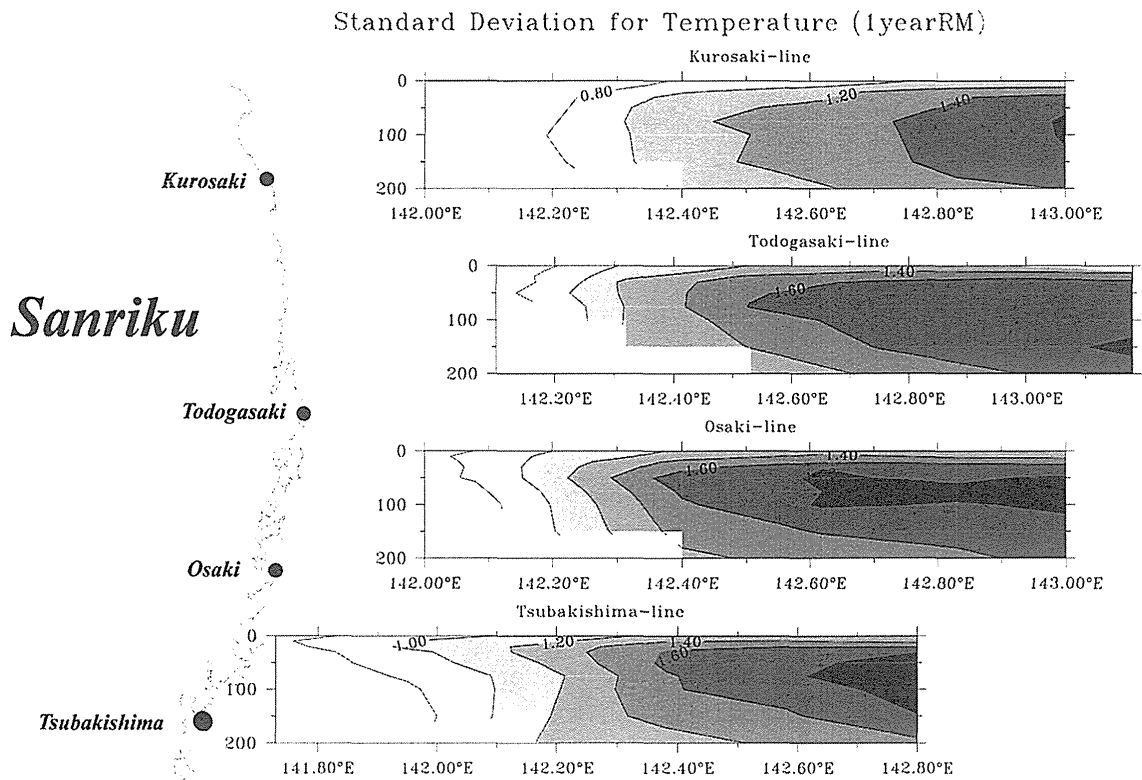


Fig. 8. The same as Fig. 3 except for 1-year running mean time series of temperature.

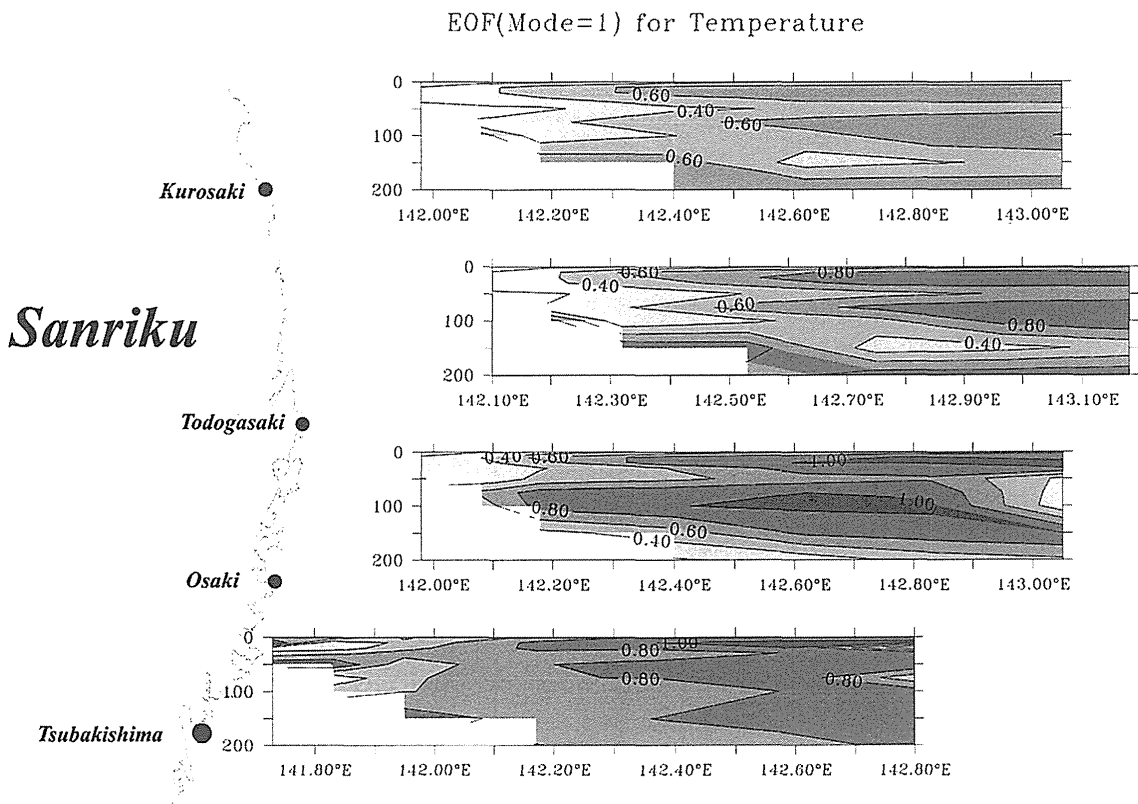


Fig. 9. Spatial distribution of first EOF mode (contribution ratio=75.1%) for 1-year running mean time series of temperature. (Kuroaki, Todogasaki, Osaki and Tsubakishima lines from the top)

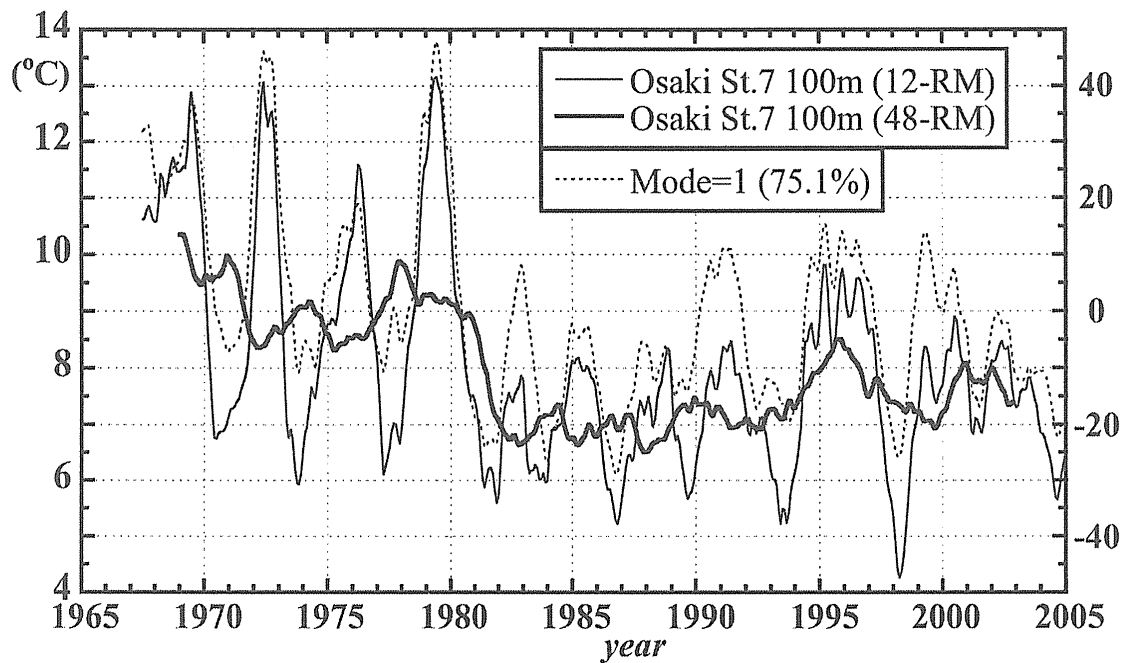


Fig. 10. Time series (1-year and 4-year running means: thin and thick solid lines) of temperature in the subsurface layer (100 m) at Sta. 7 in the Osaki line (thick broken line) and one for first EOF mode (solid line) shown in Fig. 9.

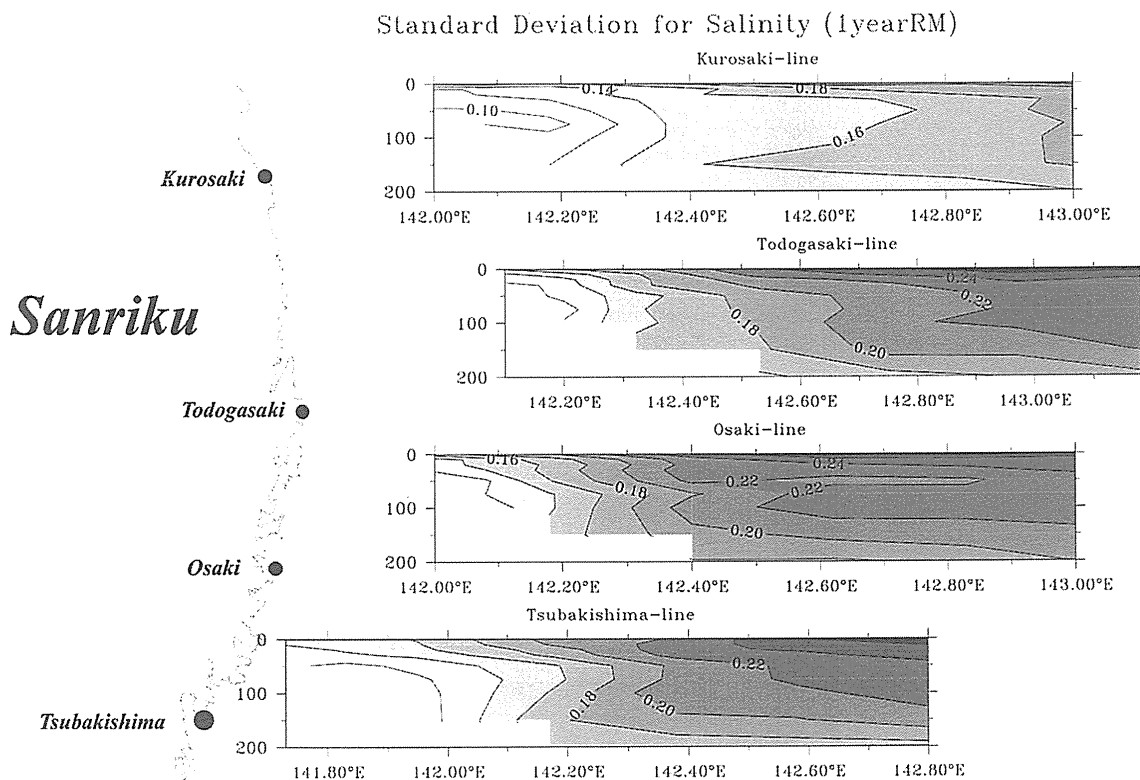


Fig. 11. The same as Fig. 5 except for 1-year running mean time series of salinity.

5.1. 急激な低温化および低塩分化

上述のように、水温・塩分共に急激な低下の発生が特徴的にみられた。本節では、それらの期間に注目す

る。低温化および低塩分化が1980年代初めのほぼ同時期に起こっていることが、沖合測点の時系列で明らか

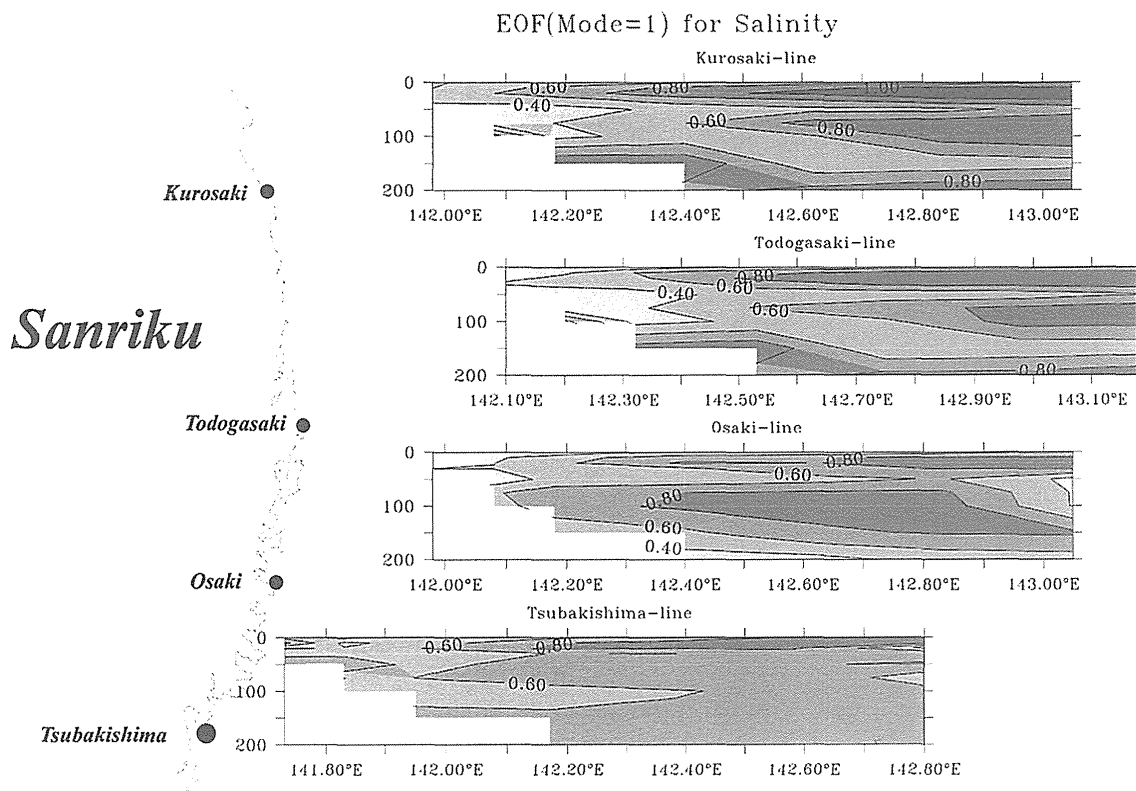


Fig. 12. Spatial distribution of first EOF mode (contribution ratio=77.1%) for 1-year running mean time series of salinity. (Kurotsuki, Todogasaki, Osaki and Tsubakishima lines from the top)

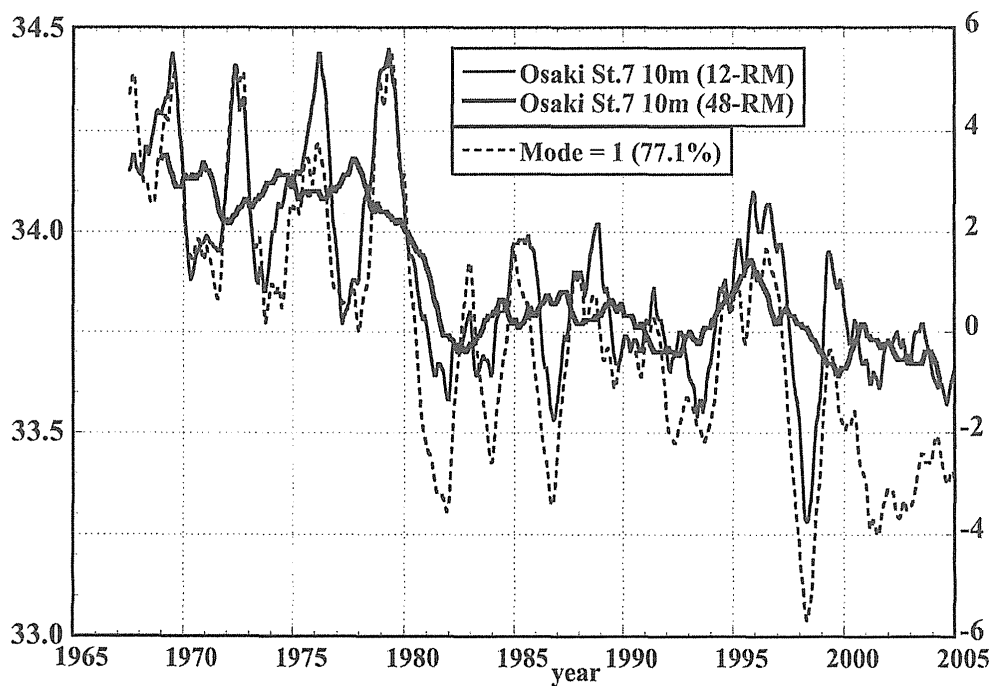


Fig. 13. Time series (1-year and 4-year running means: thin and thick solid lines) of salinity in the surface layer (10 m) at Sta. 7 in the Osaki line (thick broken line) and one for first EOF mode (solid line) shown in Fig. 12.

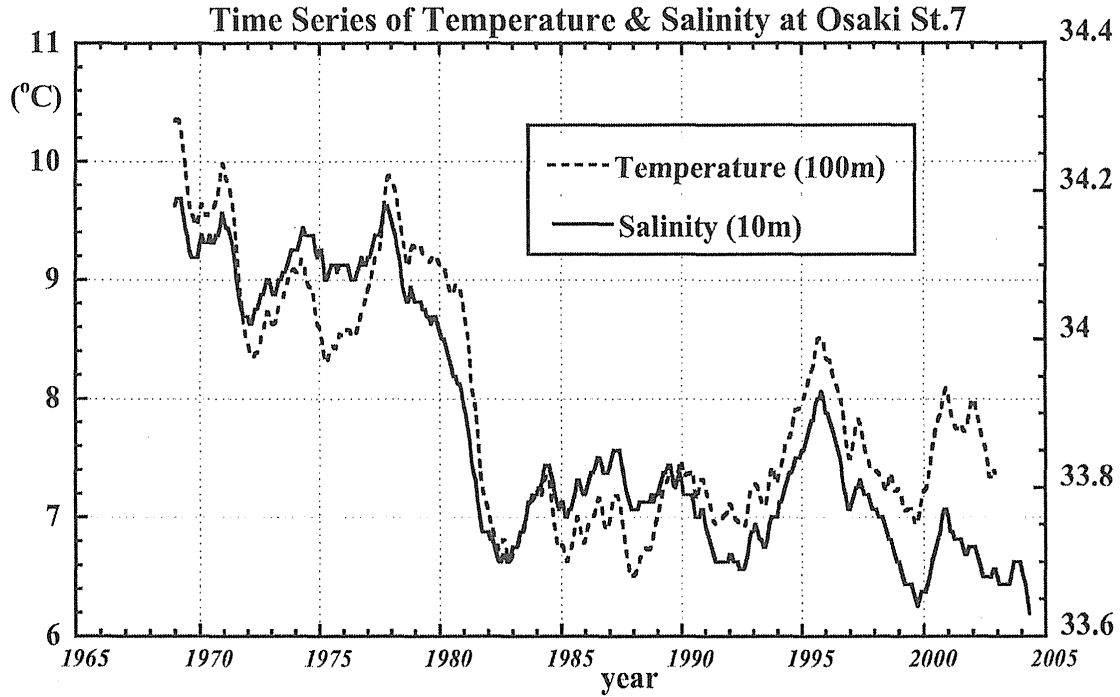


Fig. 14. Time series (4-year running mean) of temperature in the subsurface layer (100 m) at Sta. 7 in the Osaki line (thick broken line) and salinity in the surface layer (10 m) at Sta. 7 in the Osaki line (solid line).

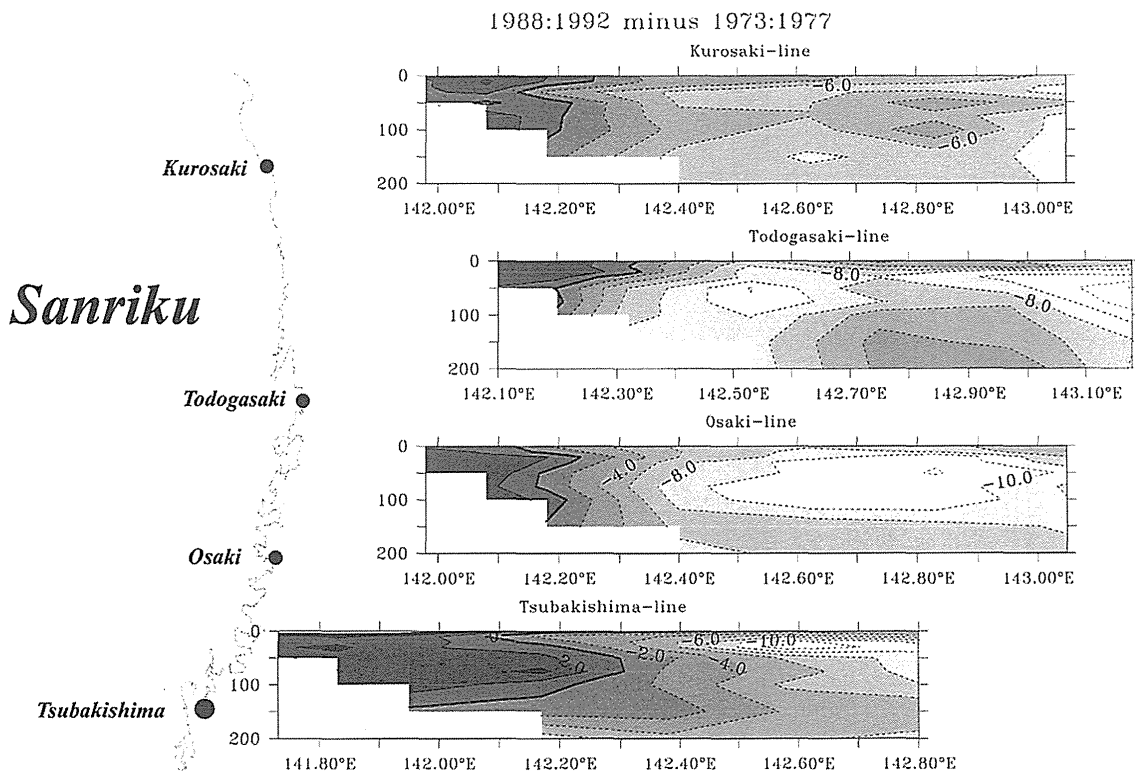


Fig. 15. Cross section of difference between 5-year mean temperature fields (1988-92 minus 1973-77). (Kurosaki, Todogasaki, Osaki and Tsubakishima lines from the top)

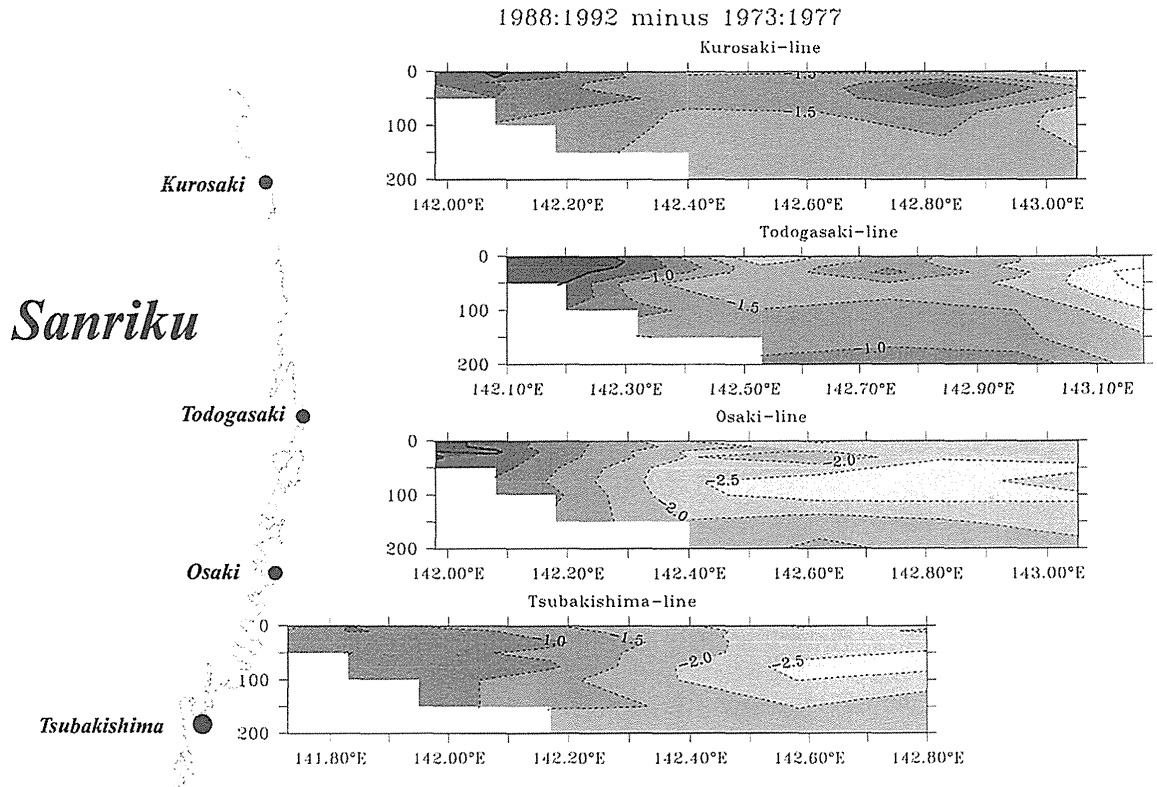


Fig. 16. The same as Fig. 15 except for 5-year mean salinity fields. Ten-times values are depicted in figures.

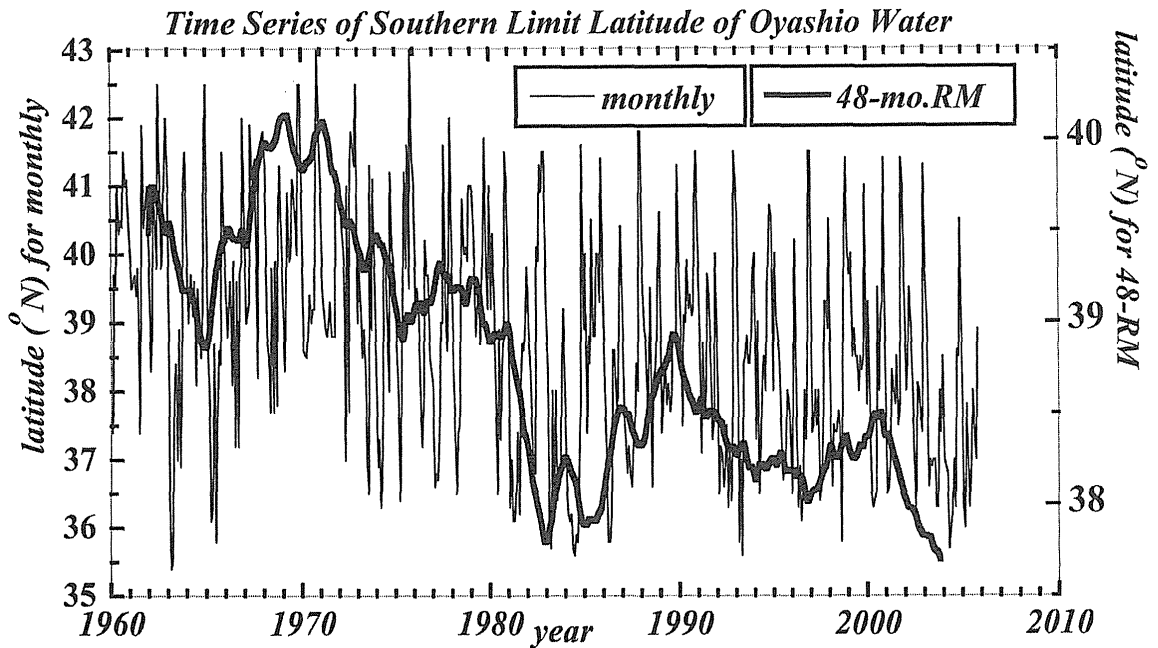


Fig. 17. Time series of southern limit latitude of Oyashio Water. Monthly and 4-year running means are depicted by thin and thick solid lines, respectively.

であった (Fig. 14)。その特性をみると、比較的短期間に水温・塩分が低下する傾向が認められる。対象海域に見られた急激な低温化の空間特性の詳細に注目する

ため、急激な低下が起きた時期を挟む前後の各五年間における平均水温を求め、その差の空間分布に注目した (Fig. 15)。これを見ると、どの測線も沿岸側で水温

上昇が見られるものの、沿岸以外の測点では水温低下が顕著であり、特に南方測線における沖合側測点の亜表層で著しい低温化がみられる。塩分についても同様に、前後五年間の平均塩分場を求め、それらの差の分布に注目した (Fig. 16)。それを見ると、概ね水温の平均差の鉛直断面図と同様な特性を有し、沿岸寄り測点で上昇、沖合側で低下傾向にある。また、著しい低下が起きた測点位置が水温差および塩分差の分布で、ほぼ同様であることがわかる。即ち、本研究が対象とした三陸沖海域において 1980 年代初めに起きた水温および塩分の急激な低下現象の原因として、大洋スケールの現象が関係していることが推察できる。

こうした長期変動の特性に対して、対象海域における海況変動を支配すると考えられる親潮水系の勢力の指標である 100 m 水温の南限緯度データ (東北水研提供) を用い、その変動との関係に注目した。まず、親潮南限緯度データの月ごとの時系列に注目すると、季節変動が卓越している (Fig. 17 の細実線)。実際、この時系列のスペクトル (図省略) には、1 年周期の他に数年周期にピークが見られ、外洋域における亜表層水温と同様なスペクトル特性 (Fig. 7) を示す。また 1 年周期のエネルギーは数年周期帯のエネルギーに対して顕著な差が見られないことから、親潮水系の経年変動は季節変動に匹敵する振幅をもつことがわかる。親潮南限緯度データに対しても 4 年移動平均を行い、その長期変動に注目すると (Fig. 17 の太実線)、1970 年代以前に親潮水系は北上する傾向にあったが、1970 年代になると一転して南下傾向となり、ほぼ樺島測線まで達している。1980 年代に入ると再び南下傾向になるが、1970 年代前半における南下よりも急激である。また 1980 年代半ばから 1990 年代にかけては、数年スケールで北上・南下を繰り返すが、1980 年代半ば以前に見られるような南下の傾向は見られない。これと尾崎測線における測点 7 の 100 m 深水温とを比較すると (Fig. 14 の破線)、両者の変動傾向がほぼ一致する (相関係数 = 0.80) ことから、同測点付近では親潮水系の変動に支配される水温変動が起きたと考えられる。一方 1990 年以降をみると、親潮水系が南下傾向にあるにも関わらず、水温の低下傾向は見られない。また、1990 年代後半に親潮水系が南下しているのに対して、水温は上昇傾向に

あるという相違点がみられる。以上より、1980 年代初めに見られた急激な低温化は、親潮水系の勢力の南方への拡大傾向に支配されたと考えられ、これは従来の研究結果を踏襲する (Sekine, 1988; 花輪, 1991)。

同様に塩分変動との関係に注目すると、同じ尾崎測線測点 7 における時系列において (Fig. 14)、低塩分化が低温化とほぼ同時期に見られる。即ち、水温・塩分共に見られる 1980 年前後の急激な低下は、親潮水系の南方への拡大に関係づけられると言える。各測点の 4 年移動平均した時系列と親潮南限緯度データの時系列の相関係数を求めた結果、どの測点においても高い相関を示した。これは、4 年移動平均した EOF 解析の空間分布が、水温・塩分共に全海域において同符号で一様に変動するという結果と矛盾ない。また、1980 年前後の急激な低温化は、100 m 塩分よりも 10 m 塩分の低下が顕著であることが分かる。このことから、塩分の低下は親潮水系の南下の影響を受けるものの、海面を通した他の要因も作用していることが示唆される。

次に、塩分の時系列に顕著に見られた 1990 年代後半における急激な低下に注目する。この時期は、親潮南限緯度には同様な変動が顕著に見られないことに注目すべきである。1991-1995 年の 5 年間と 1999-2003 年の 5 年間の平均差の分布をみると (Fig. 18)、黒崎測線の沖合表層を除くほぼ全海域で低塩分化していることが分かり、上述した 1980 年前後における低塩分化とは異なる機構に支配されたことが示唆される。

以上より、塩分の経年変動に対する標準偏差 (Fig. 11) が大きな値をもつ沖合側の亜表層と表層に対して、前者は、親潮水系の南下に起因する低温化および低塩分化が起きた 1980 年前後の水系変動に関係づけられ、一方後者は、1990 年代後半に起きた低塩分化に関係付けられる。またそれらの要因として、前者は主に親潮水系の南下傾向に特徴づけられる海況変動に起因し、後者はそれ以外の要因が考えられる。

5.2. 大洋スケール変動との関係

前節では比較的短期間に水温・塩分が低下する傾向に注目したが、こうした変動特性に対して近年大気・海洋・海洋生態系で提唱され、大洋スケールで起きているレ

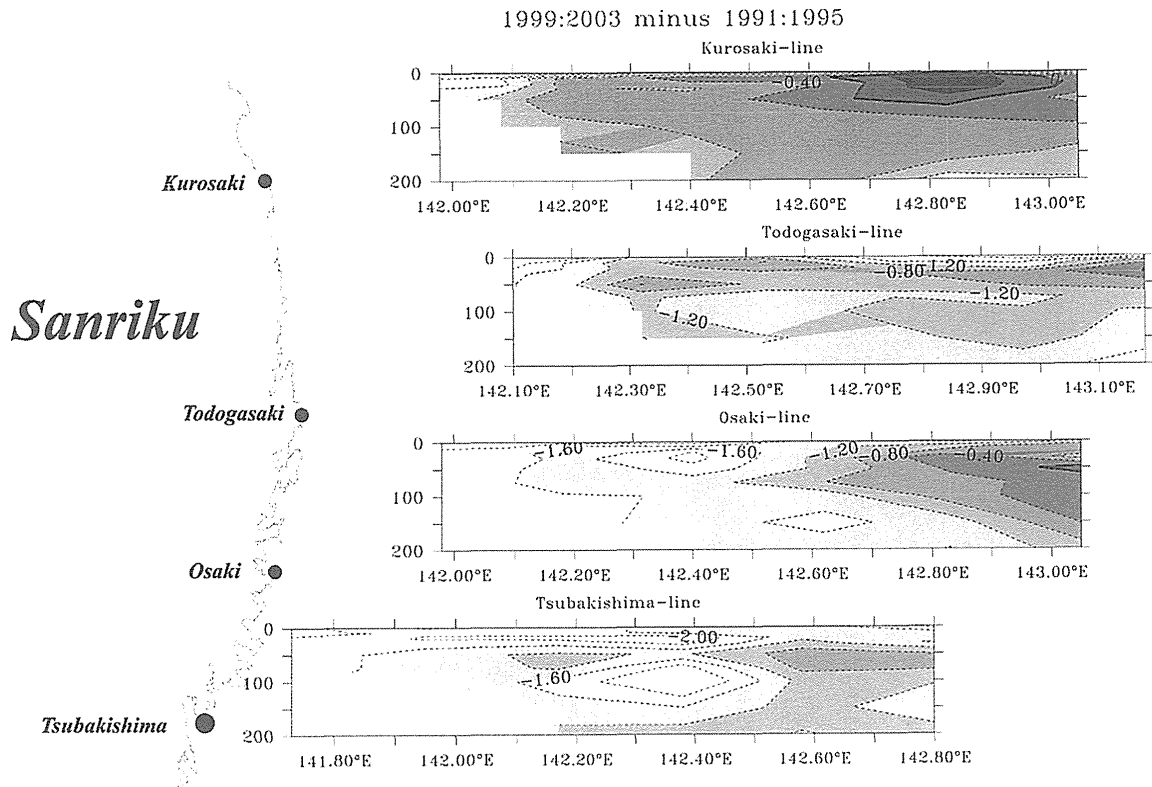


Fig. 18. Cross section of difference between 5-year mean salinity fields (1999–2003 minus 1991–95). Ten-times values are depicted in figures.

ジームシフトとの関係が示唆される。そこで、過去の研究でレジームシフトの発生が指摘されている期間と本研究で明らかになった低温化・低塩分化の期間を比較してみる。Yasunaka and Hanawa (2002), 花輪・安中 (2003) は、長期間の時系列として編集されている歴史的データである神戸コレクションおよび統合大気海洋データセット (Comprehensive Ocean and Atmosphere Data Set: COADS) を用いて作成した緯度経度ともに 5° 格子の海面水温 (Sea Surface Temperature: SST) データを用いて、過去 100 年間に発生したレジームシフトを検出した。その結果、少なくとも 6 回発生している (1925/26, 1945/46, 1956/57, 1970/71, 1976/77, 1988/89) ことを示した。本研究の解析期間内では、1970/71 年, 1976/77 年, 1988/89 年が該当する。本研究における時系列をみると、急激な低温化が 1980 年代初めに見られ、花輪・安中 (2003) が指摘したレジームシフトと比較して三陸沖海域では数年遅れて発生したとの解釈が可能である。この時間差に対する一つの解釈として、北太平洋

で起きる大気-海洋系変動に対する応答時間とみなすことが可能である。Hanawa (1995) は、親潮第一貫入の年平均緯度変動が北太平洋中緯度海域上における冬季の海上風から評価される風成海流流量 (スベルドラップ流量) に大きく支配されていることを指摘した。即ち、北太平洋上の偏西風の南北移動および強弱による亜寒帯循環系の変化を通じて、親潮南限緯度の変化が起きると考えられる。実際、1970 年代半ばに起きたレジームシフトでは、北太平洋中央部における水温低下が検出されているが (Nitta and Yamada, 1989), その要因として冬季における中緯度偏西風の南偏が推測された (Hanawa, 1995)。これに伴う亜寒帯循環系の南偏に伴い、親潮第一貫入緯度の南下が起きたことが示唆される。

一方、表層塩分に顕著に認められた 1990 年代後半における低塩分化に関しては、Yasunaka and Hanawa (2002) が指摘するレジームシフトとの対応がないことより、上述の大洋スケールでの変動との関係は明らかでない。

5.3. 海面淡水フラックス変動との関係

前節で、1980年代の水溫・塩分に見られる急激な変化は、対象海域を代表する親潮水系の南方拡大によって発生したと考えられる一方、塩分に顕著にみられた1990年代後半の低塩分化現象は、過去の研究で指摘されたレジームシフトとは対応せず、また親潮南限緯度変化との関係も明らかでなかった。また、この発生前後の期間における平均差の分布に表層で顕著な低下傾向が見られることは、海面を通した要因の重要性が示唆される。そこで当該海域における海面を通した淡水フラックス変動との関係に注目する。

一般に、ある海域における塩分 S の変化は以下の式で与えられる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{V} \nabla S = F_R + Diff \quad (1)$$

上式の $\vec{V} \nabla S$ は移流フラックス、 F_R は海面を通した淡水フラックス、 $Diff$ は拡散項である。まず、対象とする数年程度の時間スケールにおける塩分は保存的と考え、拡散項(即ち(1)の右辺第2項)は無視する。また左辺第2項、即ち移流項を本研究内のデータから評価することは困難であるので、対象海域表層における平均塩分 S に対して(1)を適用し、左辺第1項の時間変化項と右辺第1項の淡水フラックス項のみに注目する。

淡水フラックスの導出には、蒸発量および降水量データが必要である。蒸発量は海面潜熱フラックスから導出されるが、ここでは長期間をカバーする潜熱フラックスデータとして、ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) 中の潜熱パラメータデータを用い、以下のバルク式を用いて算出した。

$$Q_E = \rho L C_E V (q_s - q_a) \quad (2)$$

ここで、 Q_E : 潜熱フラックス ($W m^{-2}$)、 ρ : 大気密度 ($1.2 kg m^{-3}$)、 L : 水の単位質量当たりの潜熱 ($2.49 \times 10^6 J kg^{-1}$)、 V : 風速、 $q_s - q_a$: 比湿差であり、抵抗係数 C_E は Kondo (1975) による。ICOADS における $V(q_s - q_a)$ の月平均値データを用いて Q_E を算出し、水の蒸発潜熱 L および密度 ($1.0 \times 10^3 kg m^{-3}$) を用いて降水量に換算した。

次に海上降水量データであるが、長期間をカバーする実測データの取得は困難である。本研究では予備的

作業として、①数値気象予報 (NWP) モデル: NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再解析データ、②衛星搭載センサーによる CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) データ、③気象庁の測候所および自動気象観測システム (アメダス) による地上観測データを対象に比較検証した。ここで①および③は本研究の対象期間をカバーするが、②の CMAP データは1980年以降しか存在しない。これら3種類の降水量データ間の比較に際し、①および②は対象海域に相当する $141-144^\circ E$, $38-41^\circ N$ での海域平均値を、③の地上降水量は青森・岩手・宮城3県の太平洋岸に存在する四つの地上気象観測点および12個のアメダス観測の各測点における日積算値を月平均値に換算した後、それらの平均値として地上降水量月データとした。3種類の降水量変動の比較より、地上降水量と CMAP 降水量との対応は良いが、NCEP 降水量は他と顕著な相違があることが分かった。該当海域上における実測降水量が殆どないこと、上記の②および③は独立に取得されているにも拘わらず、類似した特性を有することから信頼性が高いと判断できる。よって対象期間をカバーする信頼性のある降水量データとして、地上観測値③を用いた。

上述の蒸発量および降水量から算出される海面での上向き淡水フラックスの時系列を作成し、表層塩分変動との関係に注目した。Fig. 19 は共に4年の移動平均値での比較を示している。なお、表層塩分は10 m における全測点の平均値である。これをみると、水溫・塩分共に急激に低下した1980年前後の期間において、上向き淡水フラックスの減少が顕著であることが分かり、亜表層を上回る表層での顕著な塩分低下の要因になったと考えられる。また親潮水系の南限緯度変動に関係づけることが困難であった1990年代後半における表層塩分の急激な低下時期にも、上向き淡水フラックスが低下していることが分かる。以上より、1980年前後に起きた塩分低下は、表層塩分において親潮第一貫入の南下とともに海面を通した上向き淡水フラックスの減少も影響したことが示唆される。これに対して、塩分に顕著に見られた1990年代後半における低塩分化の時期にも、上向き淡水フラックスの低下が顕著である。このことは、当該時期における表層塩分の低下の

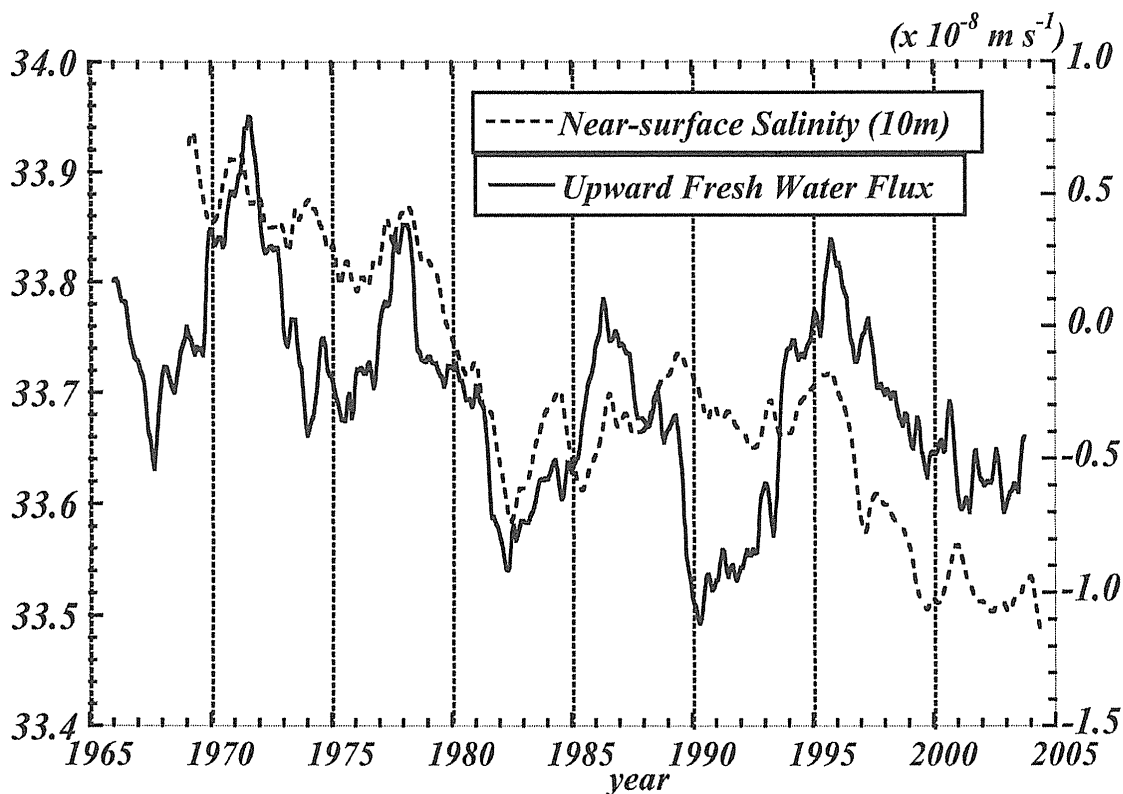


Fig. 19. Time series of near-surface (10 m) salinity (broken line) and upward fresh water flux defined by the evaporation- minus-precipitation (solid line). Near-surface salinity is averaged over the entire region.

要因として上向き淡水フラックスの減少に伴う海面過程が重要であることを示唆している。なお、対象とした二つの時期共に降水量の増大が顕著に見られた。また、Fig. 19では1990年代初めに淡水フラックスの低下が見られるが、表層塩分には対応する時期に顕著な塩分低下が認められない。この時期における上向き淡水フラックスの低下要因として、降水量の増大と共に蒸発量の減少があげられる。表層塩分に対応する変化が見られないことは、両者の変動における空間規模の相違などが関係するのかも知れない。

塩分変化の要因に関する厳密な議論を行うには、(1)における移流効果を含めると共に、変動の空間規模を考慮した定量的な検討が必要である。しかしながら、主に降水量に起因する信頼性ある淡水フラックスデータの取得が困難であることから、その評価は困難である。実際、移流効果が無視できる場合、(1)より表層塩分の時間微分と淡水フラックスが同位相になることより、両者の変動の間には位相差が生じることになるが、Fig. 19において両者の時系列の間には必ずしも顕著な位相差

があるとは言い難く、これは移流項が無視できないことを示唆しているとも言える。よって、本研究では当該海域における表層塩分変動の要因として、淡水フラックス変動の重要性について指摘するに留める。

6. 結論

本研究は、岩手県水産技術センターがほぼ毎月実施している定線観測による39年間(1967-2005年)の水温・塩分データを用いて、三陸沖海域における海況の長期変動を対象とした解析を行った。平均場では、表層ほど高水温となる一方、塩分の平均場には50-100mの亜表層に極大が存在し、それより表層および深層で低塩分となる層状構造が顕著である。月平均時系列による標準偏差分布は、水温・塩分共に表層ほど大きい値を示すが、これは1年周期の季節変動を反映し、海面を通じた変動要因に支配されると考えられる。実際、スペクトルには水温・塩分共に1年周期に顕著なピークが存在するが、数年付近にもピークが見られ、年々変動の卓越を示した。

数年～十年スケールの変動に注目するため、1年および4年の移動平均時系列による標準偏差を導出したところ、水温では100 m前後の垂表層で大きく、特に沖合側測点で最大を示した。この空間特性はEOF解析による寄与率70%を越える第一モードで特徴づけられ、水温の年々変動は対象海域で一様な位相関係をもつと共に、外洋海況変動に支配されることが示唆された。その検証として、同海域における海況の代表的指標である親潮水系の南限緯度変動と比較したところ高い相関を示し、同海域では親潮水系の勢力に支配される年々変動が卓越することが明らかになった。一方塩分の年々変動は、水温と同様にEOFの第一モード特性から全域で同位相となる変動が卓越し、その振幅は沖合側で高くなるが、垂表層よりも表層における振幅の方が高いという水温とは幾分異なる特性を示した。

これら水温・塩分にみられる長期変動には共に低下傾向が認められ、特に1980年前後に急激な低温化および低塩化の発生が顕著にみられた。これは上述の親潮南限緯度の変動との対応がよいことより、親潮水系勢力の変動に支配された水系変動に起因すると考えられる。また、親潮が北太平洋亜寒帯循環系の西岸境界流であり、その変動要因として北太平洋上の海上気象変動の重要性が考えられることから(花輪, 1991; Hanawa, 1995; Sekine, 1988; 関根・鈴木, 1990), 大規模な大気・海洋場に起きるレジームシフトとの関係が示唆された(Yasunaka and Hanawa, 2002; 花輪・安中, 2003)。

もう一つの顕著な低塩分化現象が1990年代後半に認められた。同時期の水温には顕著な変化が見られないこと、またその変動幅が表層ほど大きい特性をもつことより、海面を通じた淡水フラックス変動との関係が調べられた。外洋上における信頼性の高い降水量データが欠如していることより、沿岸気象観測による降水量データと洋上気象観測に基づく蒸発量(海面潜熱フラックス)データによる淡水フラックス変動を導出し、表層塩分変動と比較した結果、主に降水量の増加に起因する上向き淡水フラックスの顕著な低下が上述の表層塩分低下の要因であることが示唆された。

こうした表層塩分変動に対する海面を通じた淡水フラックス変動の重要性に関して、大洋スケールでの考察や(Lukas, 2001; Overland and Salo, 1999), 沿岸・

内湾域での定量的な検討がなされている(柳ら, 1989; 長谷川・磯田, 1997)。本研究での議論は定性的な記述に留まったが、これは信頼性の高い淡水フラックスデータ、特に降水量観測値の取得が困難であることと無縁ではない。洋上において信頼性の高いこれらのデータの確保には、近年有効となりつつある人工衛星データの活用が期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、元東海大学 宇野木 早苗教授、(独) 海洋研究開発機構 水野 恵介博士には貴重なご助言を頂いた。また、岩手県水産技術センターおよび東北区水産研究所提供のデータが本研究の遂行に欠かせなかった。記して謝意を表します。

References

- Hanawa, K. and H. Mitsudera (1986): Variation of water system distribution in the Sanriku coastal ocean area. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 435–446.
- 花輪 公雄 (1991): 北太平洋上の大気大循環と親潮の長期変動. *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst.*, **55**, 125–139.
- Hanawa, K. (1995): Southward penetration of the Oyashio water system and the wintertime condition of midlatitude westerlies over the North Pacific. *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst.*, **59**, 103–120.
- 花輪 公雄・安中 さやか (2003): 過去100年の北半球海面水温場に出現したレジームシフト. *月刊海洋*, **35**, 80–85.
- 長谷川 伸彦・磯田 豊 (1997): 噴火湾の水収支. *海と空*, **73**, 11–19.
- 平井 光行・安田 一郎 (1988): 100 m 深水温分布からみた東北近海の経年的な海況変動. *大槌臨海研究センター報告*, **14**, 184–186.
- Kawai, H. (1972): Chapter 8, Hydrography of the Kuroshio extension, p. 235–352. In *The Kuroshio*, edited by H. Stommel and K. Yoshida, Univ. Tokyo Press.
- Kondo, J (1975): Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Boundary-Layer Meteor.*, **9**, 91–112.
- 轡田 邦夫 (1990): 三陸沖海域の海況・気象の長期変動特性. *海と空*, **66**, 15–25.
- 轡田 邦夫 (1992): 三陸沖海域における数十年スケールの変動特性. *月刊海洋*, **24**, 237–240.

- Lukas, R. (2001) : Freshening of the upper thermocline in the North Pacific subtropical gyre associated with decadal change of rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3,485-3,488.
- 水野 恵介 (1984) : 東北海区の海況変動について. *Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab.*, **46**, 61-80.
- 村上 眞裕美 (1994) : 東北海区近海における海況の長期変動について. *Bull. Tohoku Natl. Fish. Res. Inst.*, **56**, 47-56.
- 永田 豊・小熊 幸子・鈴木 亨・渡辺 秀俊・山口 初代・高杉 知 (2000) : 三陸沿岸海域への黒潮系水の侵入について. 月刊海洋, **32**, 800-807.
- 二平 章 (2006) : 東北海域における底魚類資源の変動と気候レジームシフト. 月刊海洋, **38**, 192-199.
- Nitta, T. and S. Yamada (1989) : Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship with Northern Hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 375-383.
- 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. *Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab.*, **49**, 1-15.
- 小川 嘉彦 (1989) : 親潮第一貫入南限緯度の変動. *Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab.*, **51**, 1-9.
- 小熊 幸子・鈴木 亨・永田 豊・渡辺 秀俊・山口 初代・高杉 知 (2000) : 三陸沿岸域海況の季節変化について. 月刊海洋, **32**, 815-823.
- Oguma, S. and Y. Nagata (2002) : Skewed water temperature occurrence frequency in the sea off Sanriku, Japan, and intrusion of the pure Kuroshio water. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **58**, 787-796.
- Overland, J. E., S. Salo and J. M. Adams (1999) : Salinity structure of the Pacific Decadal Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1,337-1,340.
- Sekine, Y. (1988) : Anomalous southward intrusion of the Oyashio east of Japan 1. Influence of the seasonal and interannual variations in the wind stress over the North Pacific. *J. Geophys. Res.*, **93** (C3), 2,247-2,255.
- 関根 義彦・鈴木 義光 (1990) : 親潮の異常南下の発生と大気大循環の変動. 海と空, **67**, 11-23.
- 上野 康弘・山崎 幹雄 (1987) : 三陸沿岸域における津軽暖流の季節変化. *Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab.*, **49**, 111-123.
- 柳 哲雄・中嶋 昌紀・工藤 勝宏 (1989) : 冬季豊後水道の熱・塩分収支. 海と空, **65**, 11-17.
- Yasunaka, S. and K. Hanawa (2002) : Regime shifts found in the Northern Hemisphere SST field. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 119-135.
- 吉田 隆 (1996) : 親潮水分布の時空間変動特性. 月刊海洋, **28**, 51-55.

Long-term Variability of Upper Oceanic Condition off the Sanriku Coast

Kunio Kutsuwada *, Masashi Hattori *, and Yohko Yamada *

Abstract

Observational data in the regular sections over 39 years (1967–2005) which have been performed by the Iwate Fisheries Technology Center are used to investigate long-term variabilities of temperature and salinity fields in the upper ocean off the Sanriku Coast. The leading EOF modes calculated from 1-year running mean time series to remove variations with periods of 1 year which are dominant in the monthly temperature and salinity fields, have a contribution ratio exceeding 70% and the same sign over the entire domain. The amplitudes are highest in the subsurface layer of the off-shore region for the temperature and in the near-surface layer of the off-shore region for the salinity field. The time variations are characterized by rapid depressions in the first half of the 1980's both in the temperature and salinity fields and in the last half of the 1990's only in the salinity field. The differences between two 5-year mean fields prior and subsequent to the shifts exhibit that the cooling and freshening in the former case (1980's) are dominant in the subsurface layer of the off-shore region and have a high correlation with the southern limit latitude of Oyashio Water, suggesting a relationship with a large-scale variation. On the other hand, the salinity depression in the latter case (1990's) is dominant in the near-surface layer of the on-shore region, suggesting that it is caused by a change of fresh water flux through the sea surface.

Key words: off Sanriku, long-term variation, upper ocean

(Corresponding author's e-mail address: kkutsu@scc.u-tokai.ac.jp)

(Received 12 February 2007; accepted 11 September 2007)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2008)

* School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1, Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan