

— 論文 —

北海道南東沖 A ライン上における春季の毎日 CTD 観測に基づく 1 か月より短い水温・塩分の変化と年変化との比較*

佐藤 政俊**・河野 時廣†・清水 勇吾‡

要 旨

親潮をモニタリングするために設計された北海道南東沖 A ライン上の測点で 2007 年 4 月に行われた毎日 CTD 観測から日々スケールの水温・塩分の変化を調べ、2006 年 11 月–2007 年 10 月に行われた 1–3 か月間隔の通常の A ライン観測による 1 年間の変化と比較を行った。短期変化における水温、塩分の標準偏差は、表層 10 m では水温 0.88–1.34°C、塩分 0.11–0.19 で、26.6–27.2 σ_θ 層では水温 0.18–0.88°C、塩分 0.02–0.11 であった。この値は、年変化の標準偏差に対して、表層 10 m では 11–30%に達し、27.0 σ_θ 層では 100%を超えていた。人工衛星資料から、短期変化は 9–16 日の周期を持っており、高気圧性渦の移動、および、渦の周りを移流していた沿岸親潮水、黒潮系暖水の測点への出現によって引き起こされていた事が示された。したがって、A ライン資料を用いて親潮の季節、経年変動を把握するためには、親潮域に出現する中規模渦や沿岸親潮水、黒潮系暖水の分布に注意して解析する必要がある。

キーワード：A ライン観測，短期変化，年変化，親潮，毎日 CTD 観測，中規模渦

1. 緒 言

西部亜寒帯循環の西岸境界流である親潮は、北海道南岸または北部本州東岸を南西向きに流れた後に北東向きに反転して離岸し、親潮続流となって東方に流れる。こ

の続流に沿って親潮前線が形成され、親潮前線の北には低温、低塩の「親潮域」と呼ばれる海域が広がる(川合, 1972; Shimizu *et al.*, 2009)。親潮を構成している水(親潮水)は、親潮前線の南に渦状、帯状になって貫入し(Shimizu *et al.*, 2001)、亜熱帯循環から波及する高温、高塩の黒潮水と等密度面混合して混合水域を広く形成するほか、北太平洋中層水(NPIW)の起源となる(Yasuda *et al.*, 1996)。

親潮の南下に伴う海面水温の低下は、日本沿岸の気温に直接影響を及ぼし(e.g. 野口, 2001)、サンマなどの回遊経路にも影響を及ぼす(e.g. Yasuda and Watanabe, 1994)。親潮水は、海面からの鉛直混合が深くまで到達するオホーツク海で形成される低渦位の水が北太平洋に流出し、西部亜寒帯循環水に合流、混合する

* 2012 年 11 月 6 日受領; 2013 年 4 月 8 日受理
著作権: 日本海洋学会, 2013

† 東海大学 生物学部 海洋生物科学科
〒005-8601 札幌市南区南沢 5 条 1 丁目 1-1

‡ 水産総合研究センター 中央水産研究所 海洋・生態系研究センター
〒236-8648 横浜市金沢区福浦 2-12-4

** 北海道立総合研究機構 函館水産試験場
〒042-0932 函館市湯川 1-2-66
Tel: 0138-57-6075 Fax: 0138-57-5991
e-mail: satou-masatoshi@hro.or.jp

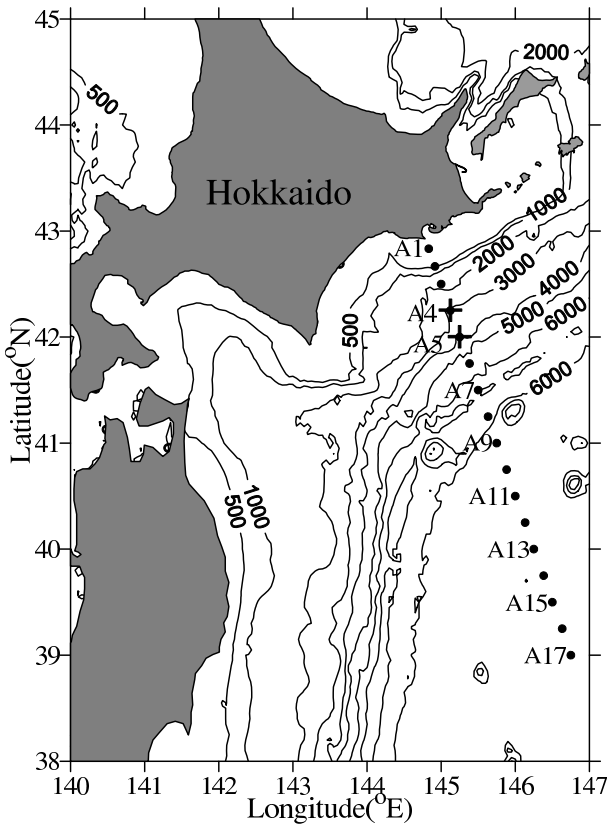


Fig. 1. Location of A-line stations (dots) with bottom topography (contours; m). The crosses denote stations A4 and A5 which were observed almost daily in April 2007.

ことによって形成されるため、北太平洋の中層は、親潮水およびNPIWを通じてオホーツク海で換気されている (Talley 1991; Yasuda 1997). Nakanowatari *et al.* (2007) は、地球温暖化の高感度海域とされるオホーツク海において過去50年ほどの間で昇温・低酸素化が進み、そのトレンドが北太平洋中層に広がっていることを示した。したがって、親潮および親潮水の時間変動を長期にモニタリングすることは、今後進むと考えられる地球温暖化が、北太平洋の海洋循環、気候変動、および、海洋生態系変動に与える影響を調べる上で大変重要である。

水産総合研究センターでは、Aラインと呼ばれる観測定線で (Fig. 1), 水温、塩分、溶存酸素、栄養塩、植物・動物プランクトンなどの調査を行っている。A

ラインの観測は1988年から行われており、近年では、地球温暖化が主に親潮域の物理、化学、生物学的変量の時空間変化に及ぼす影響を調べるため、各季節に一度は観測が行われるように、1-3か月程度の間隔で年5回程度行われ、データの蓄積と一般への公開がなされている (<http://hnf.fra.affrc.go.jp/a-line/>)。それらを用いて、北海道沿岸の水塊構造の季節・経年変動 (日下ら, 2009) や、流量の1年間の変化 (Kono and Kawasaki, 1997) などが記述されている。

しかしながら、1-3か月に一度のAライン観測で検出される時空間変化には、より短い時間スケールの海洋現象の信号が含まれている可能性がある。例えば、春季親潮域において、Kono and Sato (2010) は、低温、低塩、低密度の沿岸親潮水の流入と沖合表層への広がり数日程度で起こり、春季ブルームの始まりを引き起こす可能性があることを示した。そのほかの顕著な中規模海洋現象として、中規模渦の通過、発達、消失が影響することも考えられる。人工衛星による週平均の海面高度偏差場からは、中規模渦は低気圧性、高気圧性ともに、水平スケールは数10-100 km程度で、移動速度1-2 cm/s程度で日本海溝に沿って北上、あるいは北海道沿岸を南下することが知られており (Yasuda *et al.*, 1992; Itoh and Yasuda, 2010), これらの渦は数10-100日程度でAラインを通過すると見積もられる。このような渦は、例えば暖水塊の場合、中心部は周囲よりも高温で高塩分であり、縁辺部では小規模の湧昇に伴い周囲よりも高い生物生産が見られるため (岩田・鈴木, 1999), 通過する時間、もしくはより短いスケールで物理、化学、生物的環境が変化することが考えられる。したがって、Aライン観測よりも高い時間分解能を持った観測によって、より短い時間スケールで起こりうる海洋現象と変化幅を調べ、季節変化および季節内変化と比較する必要がある。

本研究では、2007年4月にAライン上の測点A4とA5 (Fig. 1) で1か月間ほぼ毎日行ったCTDの水温・塩分観測の結果から、日々スケールの水温、塩分の変化の变化幅を調べた。得られた日々スケールの変化を、この観測期間を含む通常のAライン観測 (2006年11月-2007年10月) から得られる1年間の変化幅と比較し評価をおこなった。また、日々スケールの時間変化を引き

Table 1. Standard deviation for the temporal variation of temperature (°C) and salinity at each depth /isopycnal surface at the station A4. The range indicates the confidence interval of 95%. In case of the calculation of daily standard deviation, the monthly trend is ignored by A-line observations (Mar., Apr., May)

Depth	Annual (Nov. 2006 - Oct. 2007)		Daily (Apr. 2007)		Daily / Annual	
	Temperature	Salinity	Temperature	Salinity	Temperature	Salinity
Surface(10m)	3.08 < 4.66 < 6.28	0.21 < 0.32 < 0.43	0.68 < 0.88 < 0.96	0.09 < 0.11 < 0.12	11~31%	21~59%
26.6 σ_θ	0.7 < 1.05 < 1.42	0.07 < 0.11 < 0.15	0.68 < 0.88 < 0.96	0.09 < 0.11 < 0.12	48~138%	58~166%
26.8 σ_θ	0.31 < 0.47 < 0.63	0.03 < 0.05 < 0.07	0.21 < 0.27 < 0.29	0.02 < 0.03 < 0.03	33~94%	32~92%
27 σ_θ	0.15 < 0.23 < 0.31	0.02 < 0.03 < 0.03	0.31 < 0.4 < 0.44	0.04 < 0.05 < 0.05	101~292%	106~305%
27.2 σ_θ	0.16 < 0.24 < 0.32	0.02 < 0.03 < 0.04	0.15 < 0.2 < 0.21	0.02 < 0.02 < 0.03	47~135%	47~136%

Table 2. Same as Table. 1 but at the station A5.

Depth	Annual (Nov. 2006 - Oct. 2007)		Daily (Apr. 2007)		Daily / Annual	
	Temperature	Salinity	Temperature	Salinity	Temperature	Salinity
Surface(10m)	2.5 < 3.78 < 5.09	0.23 < 0.34 < 0.46	1.02 < 1.34 < 1.49	0.14 < 0.19 < 0.21	20~60%	30~91%
26.6 σ_θ	0.96 < 1.46 < 1.96	0.11 < 0.17 < 0.22	0.64 < 0.84 < 0.94	0.06 < 0.08 < 0.09	33~97%	28~83%
26.8 σ_θ	0.26 < 0.39 < 0.53	0.03 < 0.04 < 0.05	0.15 < 0.19 < 0.22	0.01 < 0.02 < 0.02	28~82%	27~80%
27 σ_θ	0.26 < 0.39 < 0.52	0.03 < 0.05 < 0.06	0.22 < 0.29 < 0.33	0.03 < 0.03 < 0.04	43~128%	41~123%
27.2 σ_θ	0.24 < 0.36 < 0.48	0.03 < 0.04 < 0.06	0.14 < 0.18 < 0.2	0.02 < 0.02 < 0.02	28~84%	28~83%

起こしている海洋現象を把握するため、人工衛星による週平均の海面高度偏差場を用い、さらに偏差場に現れない定常成分を海面水温場で補いつつ、毎日CTD観測で見られた短期変化の説明を試みた。本稿においては、これらの結果を以下に報告する。

2. 資料と方法

JAMSTEC 白鳳丸により 2007 年 4 月 5 日から 5 月 1 日まで、悪天候だった 4 月 14-15 日, 21-23 日, 27-28 日を除き, A ライン上の測点 A4 (42°15'N, 145°7.5'E) と測点 A5 (42°N, 145°15'E) において (Fig. 1), 1000db までの CTD 観測を毎日行い, 測点 A4 では 22, 測点 A5 では 20 の水温塩分プロファイルを得て, 日々スケールの水温, 塩分の時間変化を調べた。

また, 水産総合研究センター若鷹丸 (WK) と北光丸 (HK) により, 2006 年 11 月 9-14 日 (HK), 2007 年 1 月 24-28 日 (HK), 3 月 4-14 日 (WK), 4 月 17-24 日 (WK), 5 月 9-14 日 (WK), 6 月 8-10 日 (WK), 7 月 12-21 日 (WK), 10 月 18-22 日 (HK) に A ライン観測を行い, CTD で水温・塩分の観測値を

得て, 毎日観測と比較した。すべての航海において, Sea-Bird Electronics (SBE) 社 911-plus の CTD センサーを用い, 1 m ごとに平均化したものを解析に用いた。SBE 社によると, 水温の観測精度は 0.001°C である。また, 採水サンプル測定値との比較の結果, 塩分の観測精度は 0.005-0.02 と見積もられている。また, 等密度面上の水温・塩分の変化を調べるため, 1 m ごとのデータを鉛直方向にスプライン内挿し, 等密度面上の値にしたものをあわせて解析に用いた。

A ライン観測結果と毎日観測結果の変化幅を比較する為に, 両者の時間変化に対する標準偏差を計算した。毎日観測には日々変化だけではなく, 冬季から夏季にかけての月変化のトレンドも含まれるため, 4, 5, 6 月の A ライン観測結果による一次線形近似に基づき月変化の勾配を計算し, 勾配を除いた値で毎日観測結果の標準偏差を計算した。さらに標準偏差の 95% 信頼区間を (1) 式を用い, その範囲も共に表に記した (Table 1, 2)。

$$\sqrt{(n-1)S^2/\chi^2_{(\frac{\alpha}{2}, n-1)}}, \sqrt{(n-1)S^2/\chi^2_{(1-\frac{\alpha}{2}, n-1)}} \quad (1)$$

ここで, n は自由度, S^2 は標本分散, α が有意水準を

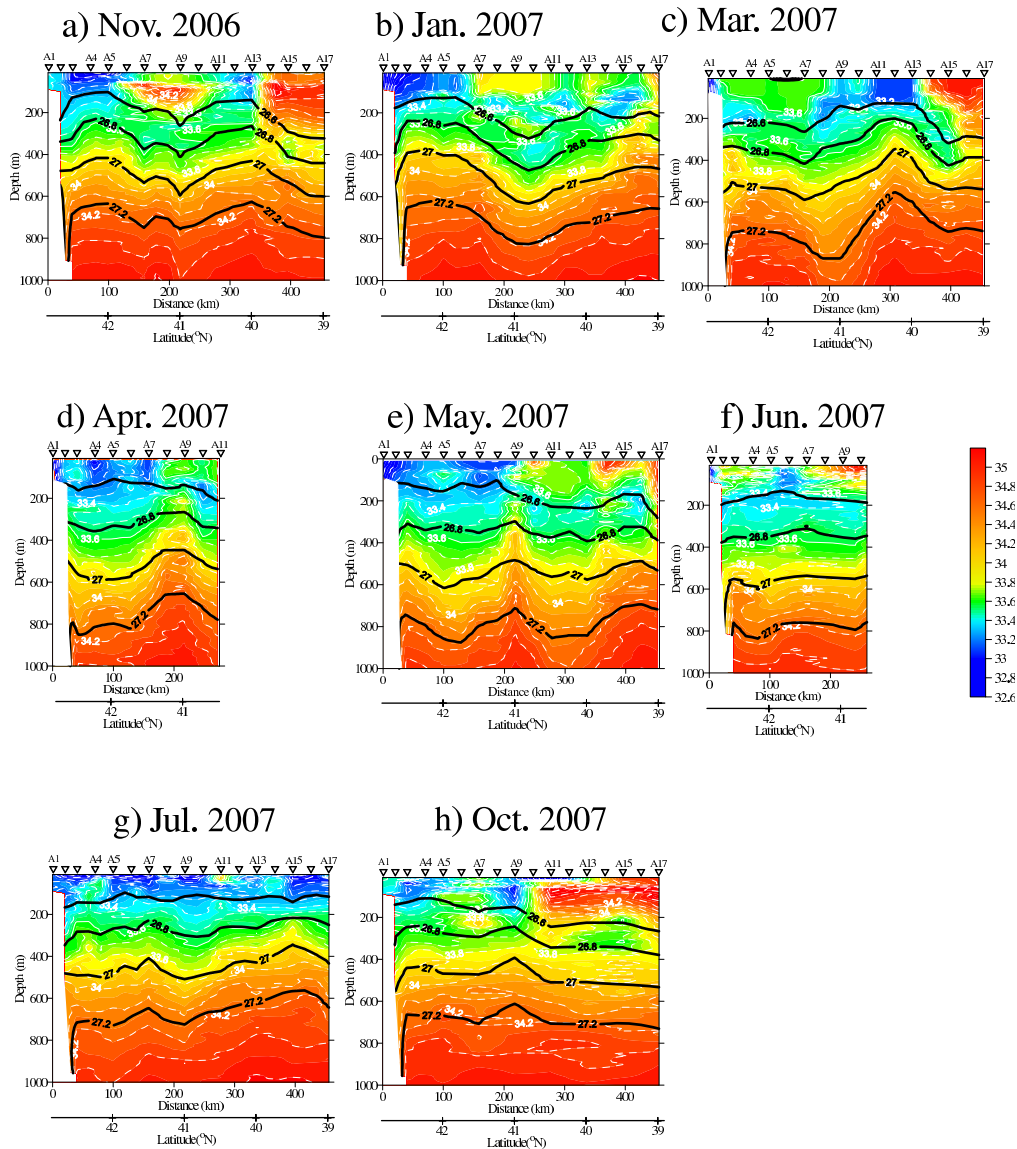


Fig. 2. Vertical sections of salinity (color shades and white contours) from A-line observation in (a) November 2006, (b) January, (c) March, (d) April and (e) May, (f) June, (g) July and (h) October 2007. Contours of potential densities 26.6 , 26.8 , 27 and $27.2 \sigma_{\theta}$ are denoted by the thick lines in each panel.

示す。

測点 A4, A5 周囲の海洋現象を水平的に把握するため、NASA website (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) より、人工衛星 MODIS/AQUA による週平均の海面水温を、AVISO/CLS (<http://www.aviso.oceanobs.com/>) より週平均の海面高度偏差場をそれぞれダウンロードして解析を行った。

3. 結果

3.1 A ライン 8 航海における年観測結果と春季毎日観測結果との比較

2006 年 11 月 - 2007 年 10 月 A ライン観測航海におけ

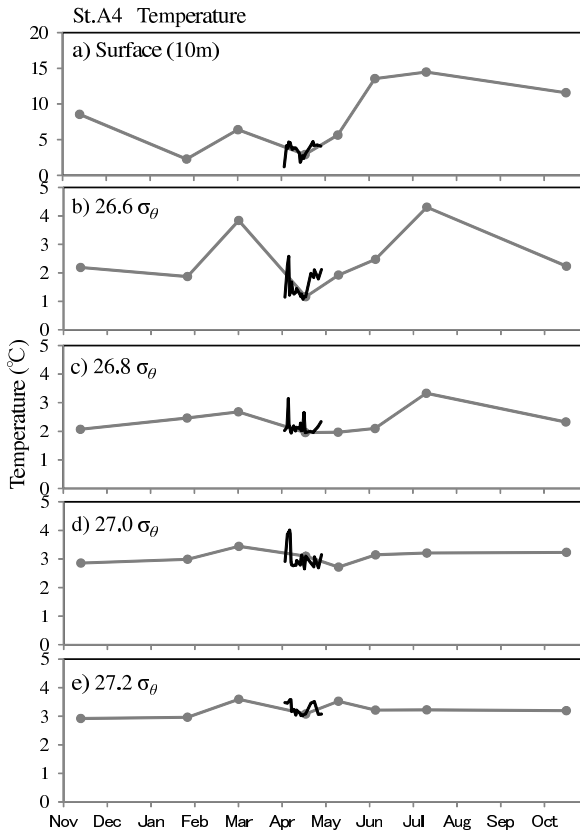


Fig. 3. Time series of temperature ($^{\circ}\text{C}$) at a) 10 m depth and at the isopycnal surfaces of b) 26.6, c) 26.8, d) 27.0 and e) 27.2 σ_{θ} at the station A4. The daily CTD observations are denoted by the black line. The gray line indicates the linearly connected A-line observations performed from November 2006 to December 2007. The day of the A-line observations are denoted by gray dots.

る塩分の断面図を Fig. 2 に示す。親潮前線は 50–200 m 深までに観測される塩分 33.6 の等値線を含む前線で定義できる (川合, 1972)。それによれば, 2007 年 3 月と 6 月を除いて, 前線は A5 よりも南に位置していた。しかしその中でも A4 と A5 が完全に親潮水の中に位置していたのは, 2006 年 11 月, 2007 年 1 月, 4 月であり, その他の観測時 (2007 年 5 月, 7 月, 10 月) には両点あるいは片方の点が親潮域の中の比較的高温, 高塩の暖水の中に位置していた。2007 年 3 月と 6 月, 断面上に前線が二つ以上見られ, 定点は二つの前線の中の暖水の中に位置していた。

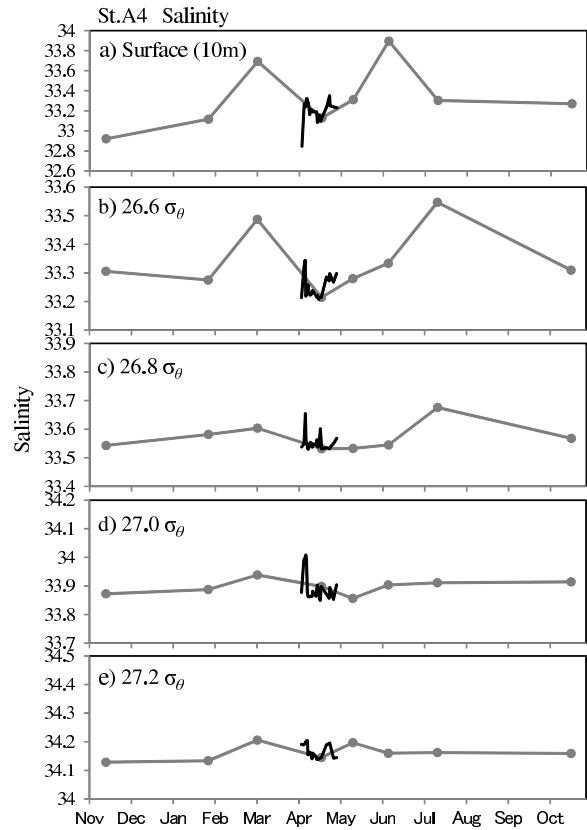


Fig. 4. Same as Fig. 3 but for salinity at A4.

2006 年 11 月–2007 年 10 月 A ライン観測航海における A4, A5 の観測結果を Figs. 3–6 の灰線で示す。A4, A5 とともに, 密度 26.6–27.2 σ_{θ} の等ポテンシャル密度面上の水温と塩分の時間変化は, 前述のような親潮水と暖水の分布の違いの影響が見られた。表層 10 m での塩分の時間変化は初夏以外にも 3 月に極大を持つなど, 26.6 σ_{θ} 面上のそれと対応していた。一方で, 水温は冬季から春季にかけて低温になり夏季から秋季にかけて高温となっており, 季節的な加熱と冷却の影響も見られた。1 年を通じた変化幅は上層ほど大きい傾向があり, 年間の変化幅を反映して, 上記の A ライン観測 (2006 年 11 月–2007 年 10 月の 8 航海) から求めた標準偏差は, A4, A5 とともに表層 10 m で水温約 4 $^{\circ}\text{C}$, 塩分約 0.3, 26.6 σ_{θ} では水温約 1 $^{\circ}\text{C}$, 塩分 0.1–0.2, 26.8 σ_{θ} 以深では水温は 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 塩分は 0.05 以下であった (Tables 1, 2)。

一方, 2007 年 4–5 月に A4, A5 で行った CTD 毎日

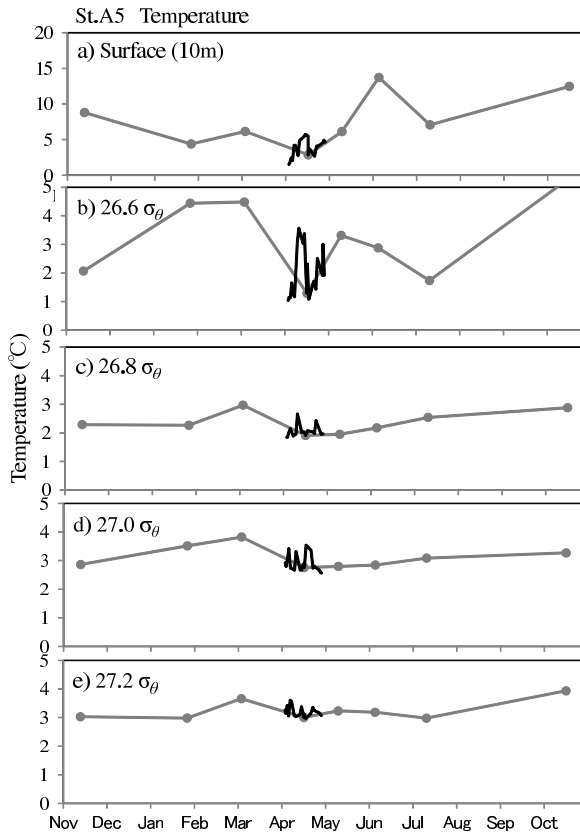


Fig. 5. Same as Fig. 3 but for temperature at A5.

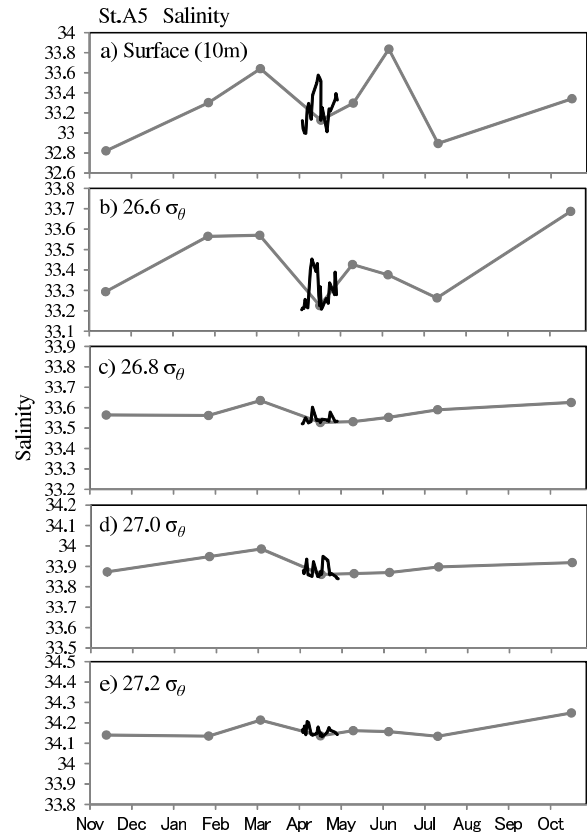


Fig. 6. Same as Fig. 3 but for salinity at A5.

観測の観測結果を Figs. 3–6 の黒線で示す。この約1か月間の変化は、1年を通じた変化と異なり、表層10 mでも水温と塩分がほとんど同期して変化していたことが分かる。変化幅は表層10 mで最も大きい点は1年間の変化と同じだが、 $27.2\sigma_\theta$ に次いで $26.8\sigma_\theta$ が小さい点は異なっていた (Tables 1, 2)。2006年11月–2007年10月の8航海の水温、塩分の標準偏差に対して、毎日観測の標準偏差は、A4 (A5)において、低く見積もっても表層10 m水温で11% (20%)、表層10 m塩分で21% (30%)であり、 $27\sigma_\theta$ では100%を超えていた。

さらにA4, A5ともに表層10 m水温は、毎日観測を開始した4月5日においてはAライン周年8航海のどの値よりも低い値に達していた (Fig. 3a, 5a)。また、A4の表層10 m塩分も、毎日観測の4月5日の観測値は、Aライン周年8航海のどの値よりも低かった (Fig. 4a)。一方、A4の $27.0\sigma_\theta$ 面では、毎日観測の4月

19日の水温、塩分観測値はそれぞれAライン周年8航海のどの値よりも高かった (Fig. 3d, 4d)。

3.2 春季における表層での日々スケールの変化を引き起こした海洋現象

本節では、前節で示した $26.6\sigma_\theta$ 以浅における毎日観測での水温、塩分変化を引き起こした現象を詳しく調べる。Fig. 7に、3–5月までのAライン観測および毎日観測の期間を含む、人工衛星による週平均の海面水温場と海面高度偏差場を示す。Fig. 7bを見れば、毎日観測が開始された4月5日頃には、 41°N , 146°E 付近に高気圧性渦の中心があり、測点A4, A5周辺はその高気圧性渦の北東の縁にあり、北海道沿岸から伸びている低温域の中に位置していた。両測点での水温・塩分の時系列断面 (Fig. 8) から、4月5日頃には海面から $26.6\sigma_\theta$ 面の間には水温 2°C 以下、塩分33.2以下の水が分布し

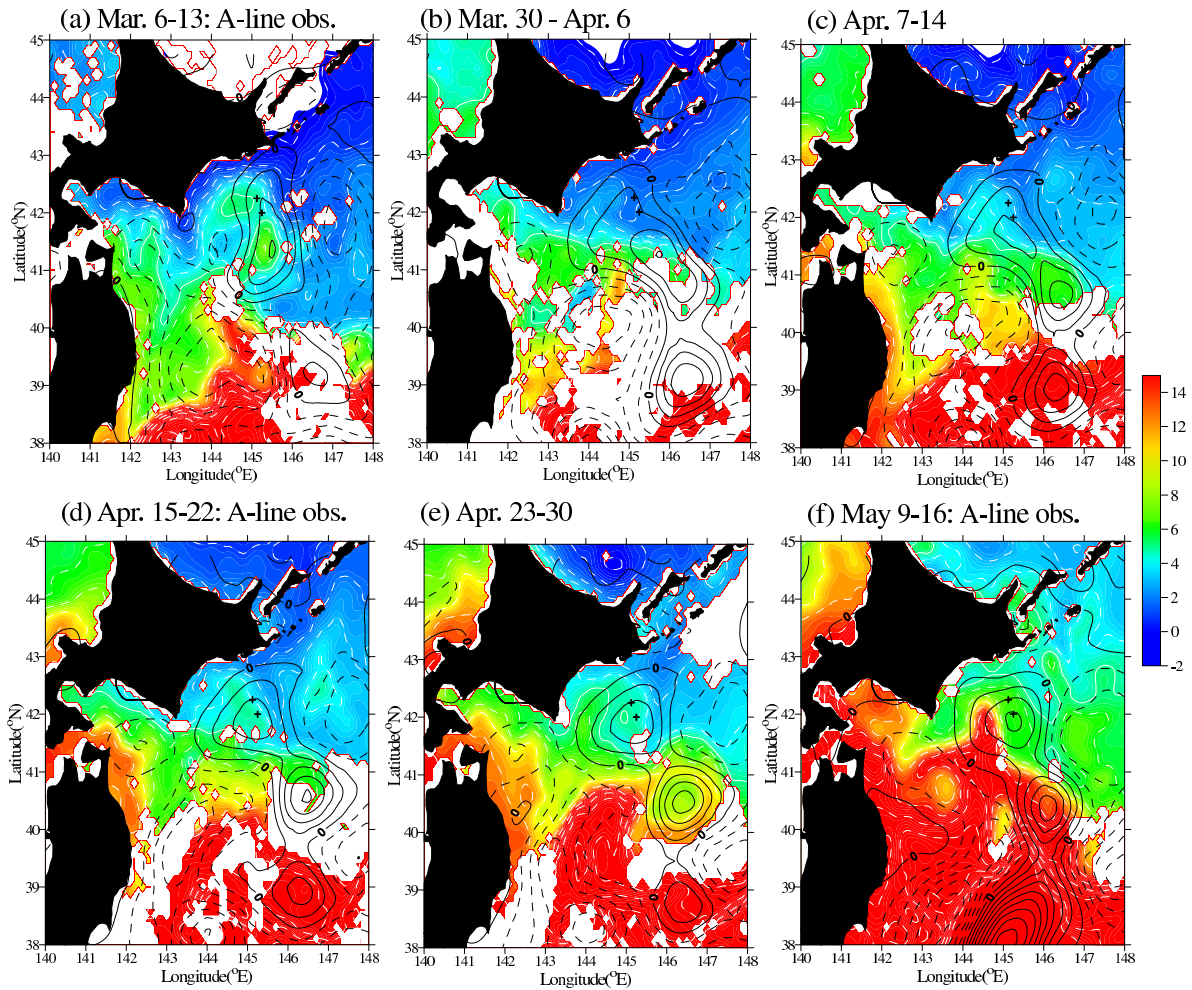


Fig. 7. Weekly mean sea surface temperature from MODIS/AQUA (color tone) for average periods (a) March 6–13, (b) March 30–April 6, (c) April 7–14, (d) April 15–22, (e) April 23–30, (f) May 9–16. The black solid and dashed curves are positive and negative weekly-mean AVISO/CLS sea level anomaly respectively. The crosses denote stations A4 and A5 which were observed almost daily in April 2007.

ており、この水は水温と塩分範囲から、Kono and Sato (2010) で示した沿岸親潮水、もしくはその影響を強く受けた水と判断された。また流れも南西向きであったため (Fig. 9)、北海道沿岸から高気圧性渦の縁辺に沿って南下した沿岸親潮水が、観測点を覆っていたと推測された。

4月7–14日には、高気圧性渦の中心が $41^{\circ}30'N$, $145^{\circ}30'E$ 付近まで北上して、測点 A4, A5 付近に近づいた (Fig. 7c)。各点の時系列をみると、 $26.6\sigma_{\theta}$ 以浅において A4, A5 とこの期間に水温、塩分は上昇し、

特に A5 では、4月10日頃、100 m 深付近で温度 $6^{\circ}C$ 、塩分 33.7 を超え、極大値を示した (Fig. 8b, d)。また、この期間に測点 A4 と A5 間の地衡流速は、北東向きに転じた (Fig. 9)。前述の高気圧性渦の時計回り循環に沿って、高気圧性渦の西縁を暖水が北上してきたために水温、塩分が上昇したと考えられた。

4月15–22日には、A4 の $26.6\sigma_{\theta}$ 以浅で、前週に比べ水温、塩分が下がった (Fig. 8a, 8c) が、A5 付近では、水温、塩分はさらに上昇していた (Fig. 8b, 8d)。前述の高気圧性渦の中心がさらに北上しほぼ A5 付近に

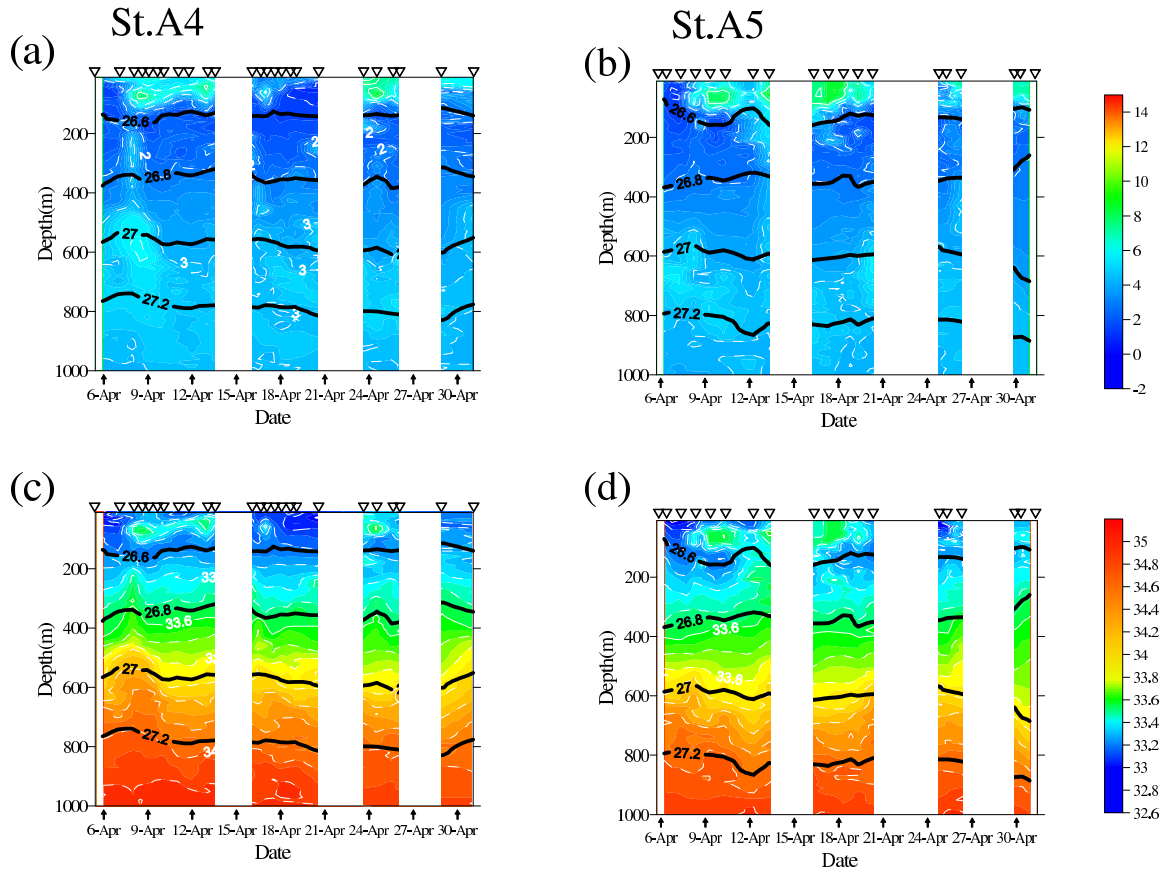


Fig. 8. Temporal change of vertical profiles in temperature ($^{\circ}\text{C}$), at (a) A4 and (b) A5, and salinity in (c) A4 and (d) A5 from the sequential CTD observations during April 5 to May 1, 2007. Isopycnal of densities 26.6, 26.8, 27 and $27.2\sigma_{\theta}$ are denoted with the thick lines in each panel.

到達したため (Fig. 7d), A5 の $26.6\sigma_{\theta}$ 以浅における水温, 塩分が上昇したものと推定される. Fig. 7c と d からは, A4 での水温, 塩分の低下は, 北海道沿岸から延びる冷水帯がわずかに A4 に近づいたためであると推定された.

4月23–30日には, A4, A5 は高気圧性渦の中心部付近に位置しており (Fig. 7e), 地衡流の向きが再度南西向きになった (Fig. 9). また, 4月25–26日頃に A4 の $26.6\sigma_{\theta}$ 以浅で前週に比べ水温, 塩分は上昇した一方 (Fig. 8a, 8c), A5 では水温, 塩分は下降した (Fig. 8b, 8d). 北海道沿岸から延びる冷水帯が高気圧性渦の東側を通り A5 側のほうに回り込んで移流しているように見え (Fig. 7e), その結果, A5 の水温, 塩分が下がったと推定された.

ここで, 3月4–10日, 4月17–21日, 5月9–14日に行われた A ライン観測と比較する. 海面高度偏差分布 (Fig. 7) でみると, これらの時期には, A4, A5 の両点は高気圧性渦の中にあっただよに見えるが (Fig. 7a, 7d, 7f), 塩分の断面 (Fig. 2) では各月で大きな違いがあり, A4, A5 の表層付近は3月には高塩 (Fig. 2c), 4月は低塩 (Fig. 2d), 5月には A4, A5 の 100 m 深付近を中心にやや高塩の水塊がみられ (Fig. 2e), 塩分は3月と4月の間程度であった (Fig. 4a, Fig. 6a).

したがって, A4, A5 の 2007 年 3–5 月の $26.6\sigma_{\theta}$ 以浅の水温, 塩分, 地衡流の変化は, 高気圧性渦の移動, および, 高気圧性渦の周りを移流する沿岸親潮水などの低温, 低塩水と黒潮系暖水などの高温, 高塩水の入れ代わ

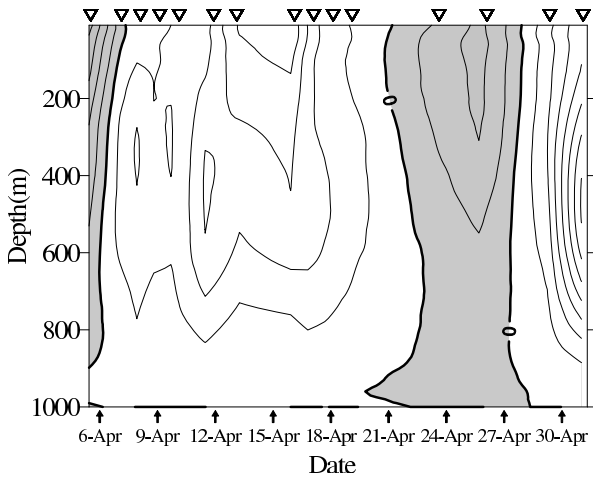


Fig. 9. Temporal change of vertical profiles in geostrophic velocity (ms^{-1}) referred 1000db between St.A4 and St.A5 from the sequential CTD observations. The gray/white area is southwestward/northeastward velocity, respectively. The interval of contour is 0.02 ms^{-1} .

りによって引き起こされていたものと考えられる。ここで、この時期に観測点周辺に現れた水温変化の時間スケールを調べるために、衛星海面水温の時系列を用いてスペクトル解析を行った (Fig. 10)。2007年3–5月の3か月分の時系列から、線形トレンドを除き、FFT法を用いてパワースペクトル (自由度 (N=20)) の解析を行った結果、測点 A4 と A5 には9日、さらに測点 A4 は6日、A5 には16日にも有意なピークが見られた。このうち6日の短い周期を持つ変動は、上記のような渦では説明できないが、9–16日の周期は、衛星水温と断面で示したような渦による水塊の入れ替わりの時間スケールと対応していた。この様に高気圧性渦の移動、および、高気圧性渦の周りを移流する水塊の出現によって生じる海面水温変化の時間スケールは、1–3か月のAライン観測間隔では捉えられないものであった。

3.3 中層以深での日々スケールの水温、塩分変化

前節では主に衛星データを用いて表層付近の水温、塩分変化について描写したが、本節では毎日観測で見られた中層以深の水温、塩分の時間変化について記述する。

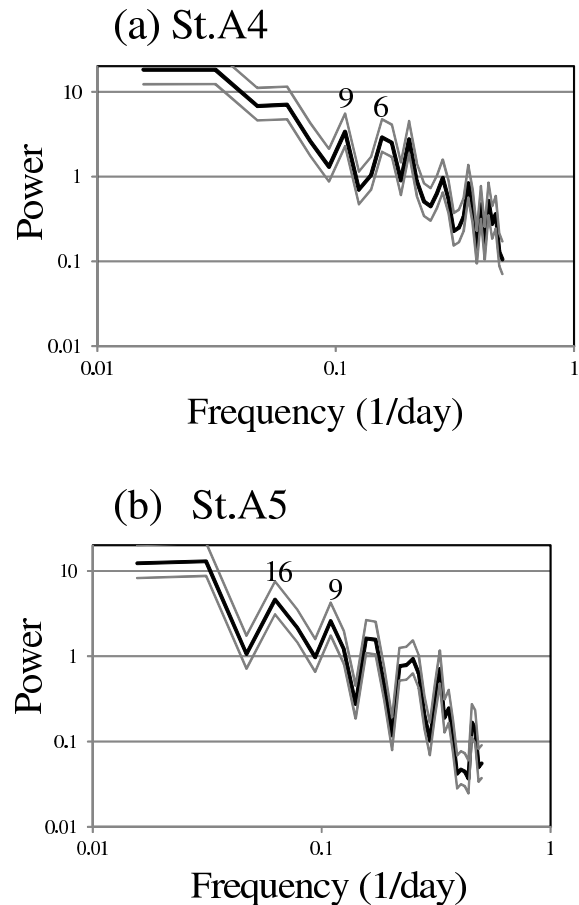


Fig. 10. Spectral analysis of the time series of sea surface temperature from the MODIS/AQUA during March to May 2007 at (a) St. A4 and (b) St. A5. The 95% significance ranges are denoted by gray line.

まず、 $26.6 \sigma_\theta$ 面上における水温、塩分の毎日観測値で見られた時間変化パターンは、海面の変化と相関が高く (Figs. 3–6, Table 3, 相関係数 $r=0.45-0.56$)、この層では、前節で記述した高気圧性渦の移動と渦の周りを循環する異なる水塊の出現がある程度反映されていたものと考えられた。

次に、 $26.8 \sigma_\theta$ 面上における水温、塩分の毎日観測値で見られた時間変化パターンの海面との相関係数は $r=-0.07-0.21$ であり (Table 3)、この層で見られた水温、塩分の短期変化は、海面付近のものほとんど連動していないと考えられた。また、本観測期間中の水温と塩分

Table 3. Correlation coefficients of each isopycnal surface versus the 10 m depth in the time series of temperature and salinity at stations A4 (N=22) and A5 (N=20). Correlation coefficients with * are higher than significance level (95%).

Isopycnal Surface	St.A4		St.A5	
	Temperature	Salinity	Temperature	Salinity
26.6 σ_θ	0.52*	0.45*	0.56*	0.55*
26.8 σ_θ	-0.07	-0.02	0.21	0.08
27 σ_θ	0.25	0.31	-0.40	-0.43
27.2 σ_θ	0.49*	0.38	0.02	-0.05

の標準偏差は、解析した5層の中では最下層の27.2 σ_θ 面上に次いで小さく (Tables 1, 2), 26.7–27.9 σ_θ で渦位 $10 \times 10^{-11} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 以下の水が断続的に見られた (図は省略). これは Itoh *et al.* (2011) で示されたような、高気圧性渦の中層に、低温、低塩、低渦位のオホーツク海系の水 (Yasuda 1997) の断続的な流入と同様な現象と推測された.

さらに下層の27.0 σ_θ 面上の時間変化は、海面のものとA4では弱い正相関であった一方、A5では弱い負相関がみられた (Table 3). また、27.2 σ_θ 面上では、A4の水温において海面と正相関がみられた. これらの正相関、逆相関は、高気圧性渦の移動と直接関連を示すものかどうかは分からないが、前述の通り、毎日観測の水温、塩分の標準偏差はAライン周年8航海のものと同程度か上回ることもあり (Table 1, 2), これらの密度層にも、変化幅は小さいながらも、海面と同様に1か月以内の水温、塩分の有意な時間変化があったと考えられる.

4. まとめと考察

2007年4–5月に約1か月間行われた北海道東沖観測定線Aラインの2測点 (A4, A5) の毎日CTD観測結果から水温、塩分の時間変化とそれを引き起こす海洋現象を調べ、2006年11月–2007年10月まで1–3か月間隔で行われたAライン周年8航海の観測結果と比較し、以下のことが分かった:

1) 毎日観測で得られた水温、塩分値の標準偏差は、Aライン周年8航海の標準偏差に対して、表層10mでは十分下回ったものの、11–30%となり、無視できる

とは言えない大きさであった. また、26.6–27.2 σ_θ 層では同程度か100%を超える層もあり、無視できないことが分かった. さらに、本毎日観測において、深度によっては、Aライン周年8航海のどの観測値よりも低い、あるいは高い水温、塩分の値も記録され、最高、最低値は、長周期の季節の進行に必ずしも一致せず、より短期的に出現する事が示された.

2) 人工衛星の海面水温および海面高度計資料なども加えて解析した結果、高気圧性渦の移動、そして、その渦の周りを移流する異なる水塊の出現によって、毎日観測で見られた表層–26.6 σ_θ 層の水温、塩分の変化が引き起こされていたことが分かった. また、2007年3月–5月の衛星海面水温をスペクトル解析した結果、9–16日に海面水温変化のピークが見られたため、その変化は1–3か月間隔の観測では捉えられないことも分かった.

3) 26.8 σ_θ 面上での変化幅は上下層に比べて小さく、オホーツク海系の水の断続的な流入があったと考えられた. 27.0, 27.2 σ_θ 面上での水温、塩分の変化は、表層の変化との対応は不明瞭で、高気圧性渦との関連は不明であった. しかし、前述のとおり深度によっては変化幅がAライン周年8航海に比べて同程度か上回り、また、毎日観測中にAライン周年8航海のどの時期よりも高い水温、塩分が見られたことから、海面と同様に亜表層でも水温、塩分に1か月以内の大きな時間変化があったと考えられた.

ここからは、2007年4月に表層で見られた短期変化が2007年春季に特異的なものかどうかと、Aラインの長期観測データ解析に際してサンプリング間隔よりも短

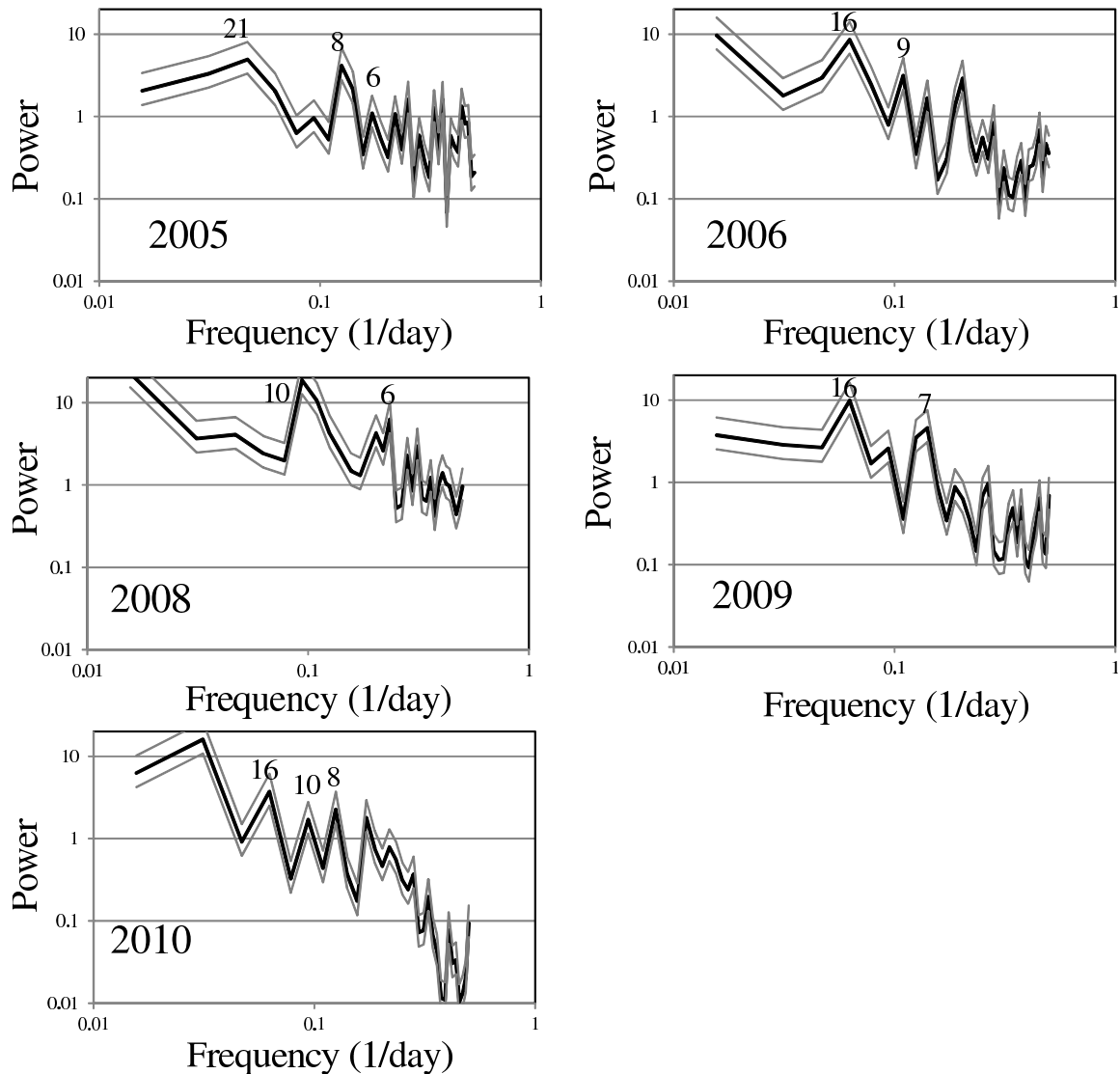


Fig. 11. Spectral analysis of time series of sea surface temperature from MODIS/AQUA during March to May at St.A5 in 2005, 2006, 2008, 2009 and 2010. The 95% significance ranges are denoted by gray line.

い変化が与える影響について考察を行う。まず、本毎日観測で示された6日、9日、16日周期の海面水温の変化が、常時みられる現象かどうか調べるために、2005年–2010年の各年3月–5月の測点A5付近の衛星海面水温の時系列を用いて、スペクトル解析を行った (Fig. 11)。その結果、全ての年で、6日–21日の間に2–3つの有意なピークが見られた。すなわち、今回と同程度に短い周期の変動はいずれの年でも存在していたことが分かる。

さらに、いずれの年の春季にも、A4、A5の周辺には直径50–200 km程度の冷水塊、暖水塊がみられ (図は省略)、春季にA4、A5の周辺に中規模の渦の移動、および、渦周りの異なる水塊の移流によって、1か月よりも短い周期で水温の増減が起こる変化が引き起こされた事が示唆された。また本海域でのこのような中規模渦の通過は、春季のみの特徴ではなく、季節を問わず多く観測されている (Isoguchi and Kawamura, 2003; Itoh and

Yasuda, 2010). すなわち、今回の観測された様な短期変化は、2007年春季の特異的な現象では無く恒常的に起こっていると考えられる。

今回の観測された様な短期変化は、Aラインの観測間隔(28-96日間)よりも短い周期を持っていた。その為Aライン観測資料には、実際の長期変化以外に短期変化によるエイリアシングノイズが加算される(e.g. 日野, 1977)。ただし一般的なエイリアシングとは異なり、海洋における定線観測は観測間隔が不定な為、短期変化によって生じるノイズが特定の周期を持つかどうかまでは分からない。しかし少なくとも、現在のAラインの観測間隔に伴う、ナイキスト周期(2か月-6か月)以上の長期変化に影響を及ぼし、そのノイズの最大幅は短期変化の振幅と同じになるはずである。その為、Aライン観測結果から得られた長期変化を評価する上では、両者の振幅の比較が重要となる。

比較する際に注意すべき点は、今回得られた短期変化の振幅はあくまである特定の期間のものであり、季節や海況によってどの様に变化するかは検証できていない点である。しかしながら、今回の様な渦の移動、および、渦の周りを移流する水塊による短期変化の振幅は渦の空間スケールと周囲の水温・塩分の水平勾配に依存すると考えられる。今回、毎日観測期間中にAライン観測8航海のどの時期よりも高い水温、塩分が見られたことから、少なくとも得られた振幅はこの海域において極端に小さいものでは無いと推定される。以降の比較では、今回と同程度の振幅の短期変化が恒常的に生じていると仮定して、現時点で明らかになっている長期変化幅との比較を行った。

過去17年間(1990-2006年)の4月におけるAラインのA4, A5で観測された水温・塩分の標準偏差は、海面付近で水温2-3°C、塩分0.2-0.3、200mで水温1°C未満、塩分0.2未満と見積もられている(日下ら, 2009)。これに対して今回観測された10mと $26.6\sigma_\theta$ 面上での短期変化の標準偏差(Tables 1, 2)は低く見積もっても20%を超えており、季節内変化と同様に無視できるとは言えなかった。また、親潮水の起源であるオホーツク海の中層では、近年50年で $0.64^\circ\text{C}/50\text{yr}$ 程度の昇温トレンドがある事が示されている(Nakanowatari *et al.*, 2007)。このようなトレンドは親潮を通して下流で

あるAライン観測にも現れると考えられる。毎日観測の中層($26.8\sigma_\theta$)で見られた短期変化の周期性は弱くパルス的であるものの、水温は1か月間で $1.8-3.0^\circ\text{C}$ の間で変化しており(Fig.3,5)、その標準偏差はA4とA5でそれぞれ 0.26°C と 0.19°C であった(Tables 1, 2)。このような短期変化が継続した場合、50年間程度の観測期間では上流域で見られるトレンドに対して無視できない値となる。空間的な固定点で長周期変化を解析した場合、今回のような短期変化は長期変化に対しても無視できないノイズとして現れ、長期変化を把握する事を難しくする。

しかし、これらの結果はAラインの観測資料を用いて親潮の長期・経年変動を捉える事が必ずしも不適當である事は示さない。本研究結果は、毎日観測の定点に設定した場所において、種々の渦や水塊が週程度の時間スケールで出現し、その点における年変化幅を凌ぐほどの変化が引き起こされていることを示しただけである。すなわち、数か月間隔のAライン観測から親潮の水塊特性、流量などの季節・経年変動を調べるためには、観測期間に存在する小-中規模の渦や他の水塊の分布を明らかにし、これらを親潮と分離して解析する必要がある。そのような解析が難しい場合は今回の様な短期変化によるノイズを考慮する必要がある。

謝 辞

本研究における毎日観測はOECOS-WESTプロジェクトの一環として行われた。観測に携われた関係者の皆様に厚く感謝申し上げます。またAライン観測資料を提供して下さった北海道水産研究所日下彰主任研究員をはじめとする観測者、関係者の皆様に厚く感謝申し上げます。また東北水産研究所資源海洋部の皆様には研究に関して貴重な意見を頂いた。本研究は、農林水産技術会議プロジェクト研究「地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響の評価と高度対策技術の開発」・「農林水産分野における地球温暖化対策のための緩和及び適応技術の開発」および科学研究費若手(A)19684016などによってサポートされたものである。

References

- 日野幹雄 (1977): スペクトル解析. 300 pp.
- Isoguchi, O. and Kawamura H. (2003): Eddies advected by time-dependent Sverdrup circulation in the western boundary of the subarctic North Pacific. *Geophys. Res. Lett.* **30**, 1794, doi : 10.1029/2003GL017652.
- Itoh, S. and I. Yasuda (2010): Water Mass structure of Warm and Cold Anticyclonic Eddies in the Western Boundary Region of the Subarctic North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 2624–2642.
- Itoh, S., Y. Shimizu, S. Ito and I. Yasuda (2011): Evolution and decay of a warm-core ring within the western subarctic gyre of the North Pacific, as observed by profiling floats. *J. Oceanogr.*, **67**, 281–293.
- 岩田樹哉, 鈴木款 (1999): 栄養塩から見た暖水塊 93A の構造の検討. 静岡大学地球科学研究報告, **26**, 83–89.
- 川合英夫 (1972): 黒潮と親潮の海況学. 海洋科学基礎講座 (海洋物理 II). 129–320 pp.
- Kono T. and Y. Kawasaki (1997): Results of CTD and mooring observations southeast of Hokkaido I. Annual velocity and transport variations in the Oyashio. *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst.* **61**, 65–81
- Kono, T. and M. Sato (2010): A mixing analysis of surface water in the Oyashio region: its implications and application to variations of the spring bloom. *Deep-Sea Res. II*, **57**, 1595–1607.
- 日下彰, 小埜恒夫, 東屋知範, 葛西広海, 小熊幸子, 川崎康寛, 平川和正 (2009): 北海道東部太平洋陸棚域における海洋構造の季節変動. 海の研究, **18**, 135–156.
- Nakanowatari, T., K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi (2007): Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955–2004. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L04602.
- 野口泰生 (2001): 東北地方太平洋岸の海面水温と気温の年々変動. 天気, **48**, 747–757.
- Shimizu, Y., I. Yasuda and S. Ito (2001): Distribution and Circulation of the Coastal Oyashio Intrusion. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 1561–1578.
- Shimizu, Y., K. Takahashi, S. Ito, S. Kakehi, H. Tatebe, I. Yasuda, A. Kusaka and T. Nakayama (2009): Transport of subarctic large copepods from the Oyashio area to the mixed water region by the coastal Oyashio intrusion. *Fisheries Oceanography*, **18**, 312–327.
- Talley, L.D. (1991): An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific *Deep-Sea Res.* **38**, S171–S190.
- Yasuda, I. (1997): The origin of the North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **102**, 893–909.
- Yasuda, I. and Y. Watanabe (1994): On the relationship between the Oyashio front and saury fishing grounds in the north-western Pacific. *Fisheries Oceanography*, **3**, 172–181.
- Yasuda, I., K. Okuda and M. Hirai (1992): Evolution of a Kuroshio warm-core ring-variability of the hydrographic structure. *Deep-Sea Res.*, **39** (Suppl. 1), S131–S161.
- Yasuda, I., K. Okuda and Y. Shimizu (1996): Distribution and modification of the North Pacific Intermediate Water in the Kuroshio-Oyashio Interfrontal zone. *J. Phys. Oceanogr.*, **26**, 448–465.

Temperature and salinity variability shorter than one month based on daily CTD observation in spring off the southeast coast of Hokkaido and its comparison with annual change from repeat observations on A-line

Masatoshi Sato** Tokihiro Kono† Yugo Shimizu‡

Abstract

We examined short-term variability in temperature and salinity in the Oyashio south of Hokkaido on the basis of daily CTD observations conducted during April 2007 at the two of the stations on A-line, which has been observed repeatedly with a few months interval since 1988. The standard deviations of temperature and salinity from the daily CTD observation were 0.88–1.34°C, 0.11–0.19 at the sea surface (10 m) and 0.18–0.88°C, 0.02–0.11 at the examined density surfaces 26.6 σ_θ , 26.8 σ_θ , 27.0 σ_θ and 27.2 σ_θ , respectively. The standard deviation of the daily observation was 11–30% of the annual standard deviations at the sea surface and over the 100% at densities 26.6–27.2 σ_θ , where the annual standard deviations were estimated from regular observations on A-line during November 2006 to October 2007. The short-term variations in April 2007 were dominated by 9–16 days periods in the satellite-derived sea-surface temperature. These variations are explained by the movements of an anti-cyclonic eddy, the advection of the Coastal Oyashio Water and warm water from Kuroshio around the observation sites. We should pay attention to these processes in this area when analyzing the regular A-line observation data.

Key words: A-line observation, short term change, annual change, Oyashio, daily CTD observation, mesoscale eddy

(Corresponding author's e-mail address: satou-masatoshi@hro.or.jp)

(Received 6 November 2012; accepted 8 April 2013)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2013)

** Hokkaido Research Organization, Fisheries Research Department, Hakodate Fisheries Research Institute, 1-2-66 Yunokawa-cho Hakodate, Hokkaido 042-0932, Japan
Tel: 0138-57-6075 Fax: 0138-57-5991
E-mail: satou-masatoshi@hro.or.jp

† TOKAI University, School of Biological Sciences, Department of Marine Biology and Sciences, 1-1-1 5-Jo Minami-sawa, Minami-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 005-8601, Japan

‡ National Research Institute of Fisheries Science, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama 236-8648, Japan