

日本沿岸西太平洋海域における同一海域での
海中水温・塩分プロファイルの時間的安定性の検証[†]

渡邊俊一^{*1}, 内田 徹^{*2}

Stable structures of temperature and salinity validated by the repeated measurements
in the few-miles-square regions off Japan coast in the western Pacific[†]

Shun-ichi WATANABE^{*1} and Toru UCHIDA^{*2}

Abstract

Compiling thousands of vertical profiles of temperature and salinity measured during the seafloor geodetic observation, we statistically revealed the temporal stability in the depth of more than 1200 m within a few-miles-square region. We also found the spatial variations of temperature and salinity profiles. Specifically, temperature at 1200 m depth in the seafloor geodetic site ASZ2 (about 100 km southern off the Cape Ashizuri) is systematically higher than the other sites, which is strongly affected by the Kuroshio Current. On the other hand, at the seafloor geodetic site MYGI (about 100 km eastern off the Miyagi Prefecture), temporal intrusion of cold water was observed in the winter, reaching to the depth of about 800 m.

1 はじめに

2000 年頃から海上保安庁が日本海溝や南海トラフ沿い陸側の海底で実施している GPS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測は、測量船底の音響トランスデューサから海底に設置した音響ミラートランスポンダまでの距離を音波の往復走時から算出する音響測距を利用し、海底トランスポンダの位置を測定する海底測地技術である。この技術の重要な要素となる音響測距においては海中音速が重要なパラメータであり、これを適切に推定することが高精度測位のために重要である(例えば、藤田・他, 2004)。そのため、数時間に

1 回の頻度で XBT (eXpendable BathyThermograph profiler) を投下して水温の鉛直プロファイルを、約 1 日に 1 回の頻度で CTD (Conductivity Temperature Depth profiler) を投入あるいは XCTD (eXpendable Conductivity Temperature Depth profiler) を投下して水温及び塩分の鉛直プロファイルを、それぞれ取得して音速構造を求めている。トランスポンダ位置を推定する際には、音速測定値を先験情報とした上で、音速を時間の関数として推定している(佐藤・藤田, 2012; 齋藤・佐藤, 2009)。

この水温・塩分測定について、現在当庁が使用

[†] Received September 11, 2015; Accepted November 5, 2015

*1 技術・国際課 海洋研究室

Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

*2 海洋調査課 海洋防災調査室 Geodesy and Geophysics Office, Hydrographic Surveys Division

している XCTD 及び XBT では、水深が 2000 m を超えるような海域では海底までの測定が不可能であり、こうした海域では CTD による測定が必要となっている。しかしながら、CTD による測定は甲板上での作業を必要とし、特に大水深海域では 1 回あたり 2–3 時間を要する。測定時は停船状態となるため、この間に音響測距観測を実施しても、有用なデータは得られない。さらに、甲板作業時の安全を確保するために原則として日中の測定に限定されるので、観測計画への制約も大きい。こうした理由により、観測の効率化・迅速化の観点から、CTD による測定の頻度を減らすことが求められている。

ここで、海中の水温等の時間的な変動幅は深さに対応しており、深海域では浅部に比べて温度や塩分の時間変化が小さくなることに注目する。例えば、東北地方太平洋沖の広域で複数の ARGO フロートによって 2011 年に得られた音速観測をまとめた後藤・他 (2015) の結果からは、深部ほど温度及び塩分が安定していることが確認できる。また、Oguri et al. (2015) は、大槌沖の水深約 1000 m の海底で 2012 年 8 月から 2013 年 10 月までの連続海況観測を実施しており、温度として $2.91 \pm 0.12^\circ\text{C}$ 、塩分として 34.41 ± 0.11 という安定した値を得ている。そこで、実際の海底地殻変動観測の実施海域においても音速の時間的安定性を定量的に評価し、海域の代表プロファイルを求めてその有効性を確認できれば、特に深部の音速について、その代表値を測位解析に用いることが可能となる。これは、長時間の CTD 測定を省略することを妥当化し、観測の効率化につながる。

そのため、我々は、各海域における音速プロファイルについて、過去に取得した水温・塩分データを統計的に処理することでその時間的安定性について調べた。本稿では、その結果について報告する。

2 水温・塩分データの統計処理

観測点の位置、水深及び観測期間は、Fig.1 及

び Table 1 に示した通りである。観測点はいずれも約 1000–3000 m の水深の海域であり、水温・塩分測定は、各海域の水深と同程度の半径を持つ領域内で実施した。

本研究で使用したデータは、2001 年から 2014 年までに取得した CTD, XCTD 及び XBT データである。各プローブのスペックについて、Table 2 にまとめる。XCTD 及び XBT は測線を航走しながらの音響測距観測中でも使用可能なため効率が良いが、2000 m 程度までの深さしか測定できず、2012 年以降に新設された水深 3000 m 級の「足摺沖 2 (ASZ2)」観測点や、それよりも深い海域にある東北大学設置の観測点 (渡邊・他, 2015) では、海底近傍までの観測が実施できない。一方の CTD は深部までデータを取得可能であるが、前節で述べたように効率の面で課題がある。

これらのプローブを用いて過去に実施した測定データについて、水深 z について 1 m ごとの水温・塩分プロファイルを作成し、各層の平均値と標準偏差を計算した。得られた平均水温 T 及び水温の標準偏差 σ_T 、平均塩分 S 及び塩分の標準偏差 σ_S を海域ごとに Fig.2 に示す。Fig.2 で、塩分の標準偏差と平均値に不連続性が見られる観測点がいくつかあるが、これは測定時のノイズが除去しきれていないものである。そのデータを除くと、水温及び塩分の標準偏差は、水深が増加するにつれて小さくなっていくことがわかる。さらに、Fig.2 には、得られた $T(z)$ 及び $S(z)$ を用いて求めた音速 $V(T, S, P)$ も示している。ここで、 P は圧力を示し、音速 V は、Del Grosso (1974) の経験式によって求めている。ちなみに、XCTD 及び XBT は圧力を直接測定できないため、Fofonoff and Millard (1983) の式を用いて、水深 z から圧力 P を求めている。また、水温・塩分のばらつきが音速に与える影響を知るため、水温のばらつきによる音速の変動、 $dV_T = V(T + \sigma_T, S, P) - V(T, S, P)$ 、及び水温・塩分の両方のばらつきによる音速の変動、 $dV_{TS} = V(T + \sigma_T, S + \sigma_S, P) - V(T, S, P)$ についても各層について求め、Fig.2

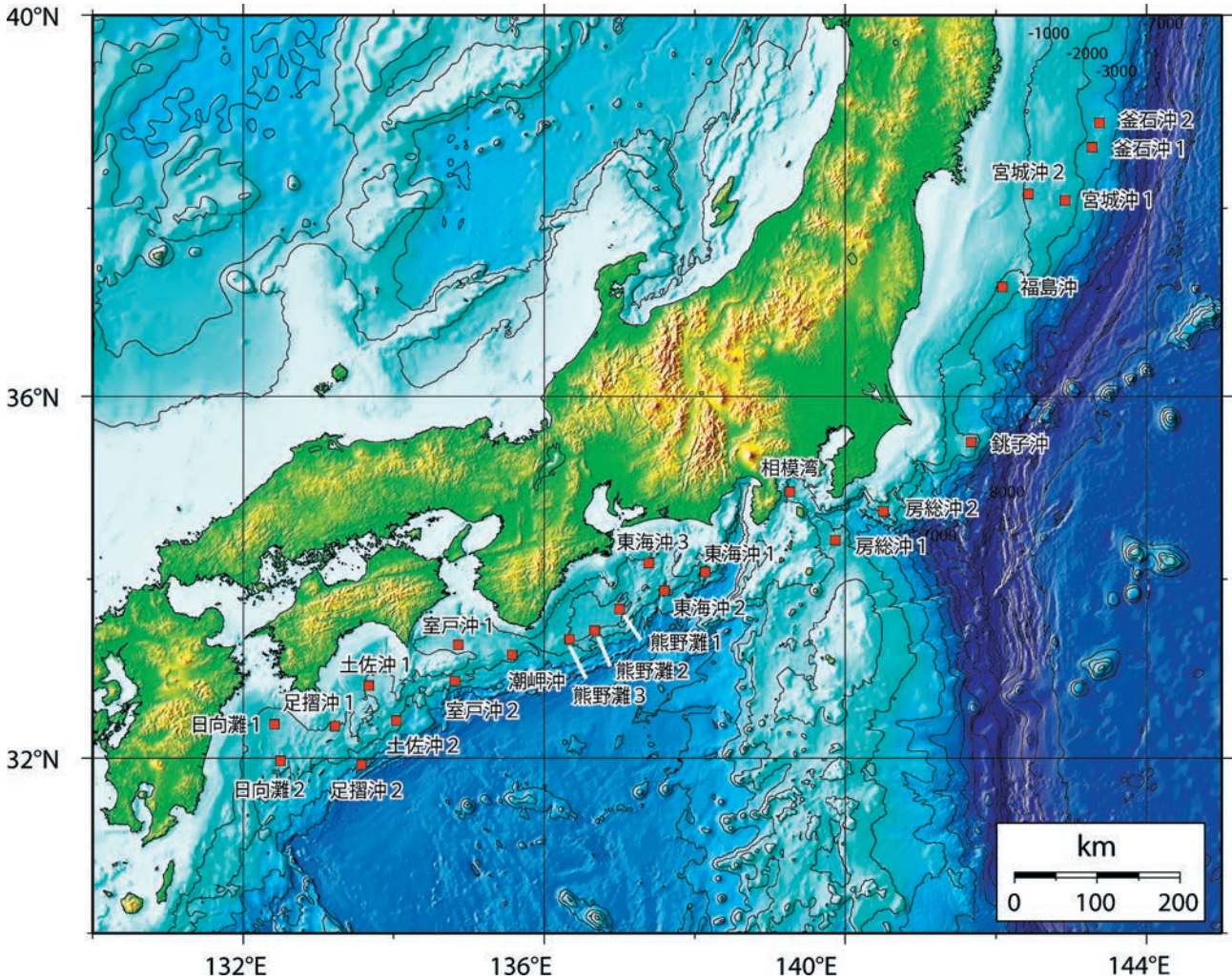


Fig. 1. Locations of observation sites.

図1. 観測点の位置.

に示した. なお, 塩分のばらつきによる音速の変動, $dV_s = V(T, S + \sigma_s, P) - V(T, S, P)$ についても求めたところ, 水深 800 m 以深について $dV_{TS} = dV_T + dV_s$ が 0.001 m/s の範囲で成り立つことを確認した. さらに, Fig. 2 について, $dV_{TS} - dV_T$ の範囲を示す薄い灰色の領域の幅が狭すぎて判別が困難であることから, ほぼすべての水深について $dV_T \gg dV_s$ であることが確認される. このことから, 音速の経時変動は, 主として水温からの影響であると考えられる.

3 特定的水深における水温・塩分の比較

次に, 深海における水温・塩分の安定性についてより具体的に調べるため, 代表的な深さとして, 各海域での水深 800 m, 1200 m 及び 1600 m

における水温・塩分・音速の平均値と標準偏差 $T, \sigma_T, S, \sigma_s, V, dV_T, dV_{TS}$, および統計処理に使用したデータ数を, Table 3 及び Fig. 3 にまとめた. Table 3 によると, 水深 1200 m 以深については, 「宮城沖 1 (MYGI)」を除いて, $\sigma_T < 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ となっている. 水温測定は 7 割以上は XBT によるものであり, その変動幅が, XBT の公称精度 (Table 2) を下回っていることから, 測定精度の範囲内で収束していると言える. この結果は, Oguri et al. (2015) で得られた結果と, 量的にも整合している. さらに, $dV_{TS} < 1 \text{ m/s}$ という結果も得られた. この結果から, ほぼすべての海域で, 1200 m 以深の音速は時間的に 1 m/s の精度で, ほとんど変化しないことが明らかになった.

Table 1. Positions of observation sites and observation periods.

表1. 観測点の位置およびデータ取得期間.

Site	Code	Latitude	Longitude	Depth [m]	Observation period
釜石沖 2	KAMN	38-53.2 N	143-21.7 E	2300	07/2001 - 08/2014
釜石沖 1	KAMS	38-38.2 N	143-15.8 E	2200	07/2001 - 08/2014
宮城沖 1	MYGI	38-05.0 N	142-55.0 E	1670	09/2001 - 08/2014
宮城沖 2	MYGW	38-09.0 N	142-26.0 E	1100	10/2004 - 06/2014
福島沖	FUKU	37-10.0 N	142-05.0 E	1200	08/2001 - 08/2014
銚子沖	CHOS	35-30.2 N	141-40.2 E	1500	05/2002 - 06/2014
房総沖 2	BOSN	34-45.0 N	140-30.0 E	1900	08/2001 - 08/2014
房総沖 1	BOSS	34-25.8 N	139-51.9 E	1450	02/2002 - 11/2013
相模湾	SAGA	34-57.6 N	139-15.8 E	1340	08/2002 - 12/2014
東海沖 1	TOK1	34-05.1 N	143-08.0 E	2400	08/2002 - 09/2014
東海沖 2	TOK2	33-52.6 N	137-35.7 E	1600	08/2002 - 04/2014
東海沖 3	TOK3	34-10.8 N	137-23.2 E	1200	02/2012 - 04/2014
熊野灘 1	KUM1	33-40.2 N	136-59.8 E	2000	09/2001 - 09/2014
熊野灘 2	KUM2	33-26.0 N	136-40.0 E	2000	02/2012 - 04/2014
熊野灘 3	KUM3	33-20.0 N	136-20.0 E	2000	09/2003 - 09/2014
潮岬沖	SIOW	33-09.6 N	135-34.3 E	1550	01/2003 - 09/2014
室戸沖 1	MRT1	33-21.0 N	134-56.7 E	1350	02/2012 - 09/2014
室戸沖 2	MRT2	32-52.3 N	143-48.8 E	1400	11/2004 - 09/2014
土佐沖 1	TOS1	32- 49.0 N	133-40.0 E	1050	01/2012 - 09/2014
土佐沖 2	TOS2	32- 25.7 N	134-01.9 E	1770	11/2011 - 04/2014
足摺沖 1	ASZ1	32-22.1 N	133-13.2 E	1100	01/2012 - 12/2014
足摺沖 2	ASZ2	31-55.9 N	133-34.6 E	2940	01/2012 - 09/2014
日向灘 1	HYG1	32-23.0 N	132-25.0 E	1640	01/2012 - 12/2014
日向灘 2	HYG2	31-58.4 N	132-29.7 E	1960	01/2012 - 09/2014

Table 2. Specifications of CTD sensor and probes of XBT and XCTD used in this study.

表2. 測定に使用したプローブとそのスペック (カタログ値).

	maximum depth	vessel speed	temperature accuracy	conductivity accuracy	pressure accuracy
CTD SBE 19	3500 m	N/A	0.01 °C	0.01 mS/cm	0.15-0.25% F.S.
CTD SBE 19plus V2	3500 m	N/A	0.005 °C	0.005 mS/cm	0.1%F.S.
XBT T-5	1830 m	6 kn	0.2 °C	N/A	N/A
XCTD-1	1000 m	12 kn	0.02 °C	0.03 mS/cm	N/A
XCTD-2F	1850 m	8 kn	0.02 °C	0.03 mS/cm	N/A
XCTD-4	1850 m	6 kn	0.02 °C	0.03 mS/cm	N/A

F.S.: Full scale

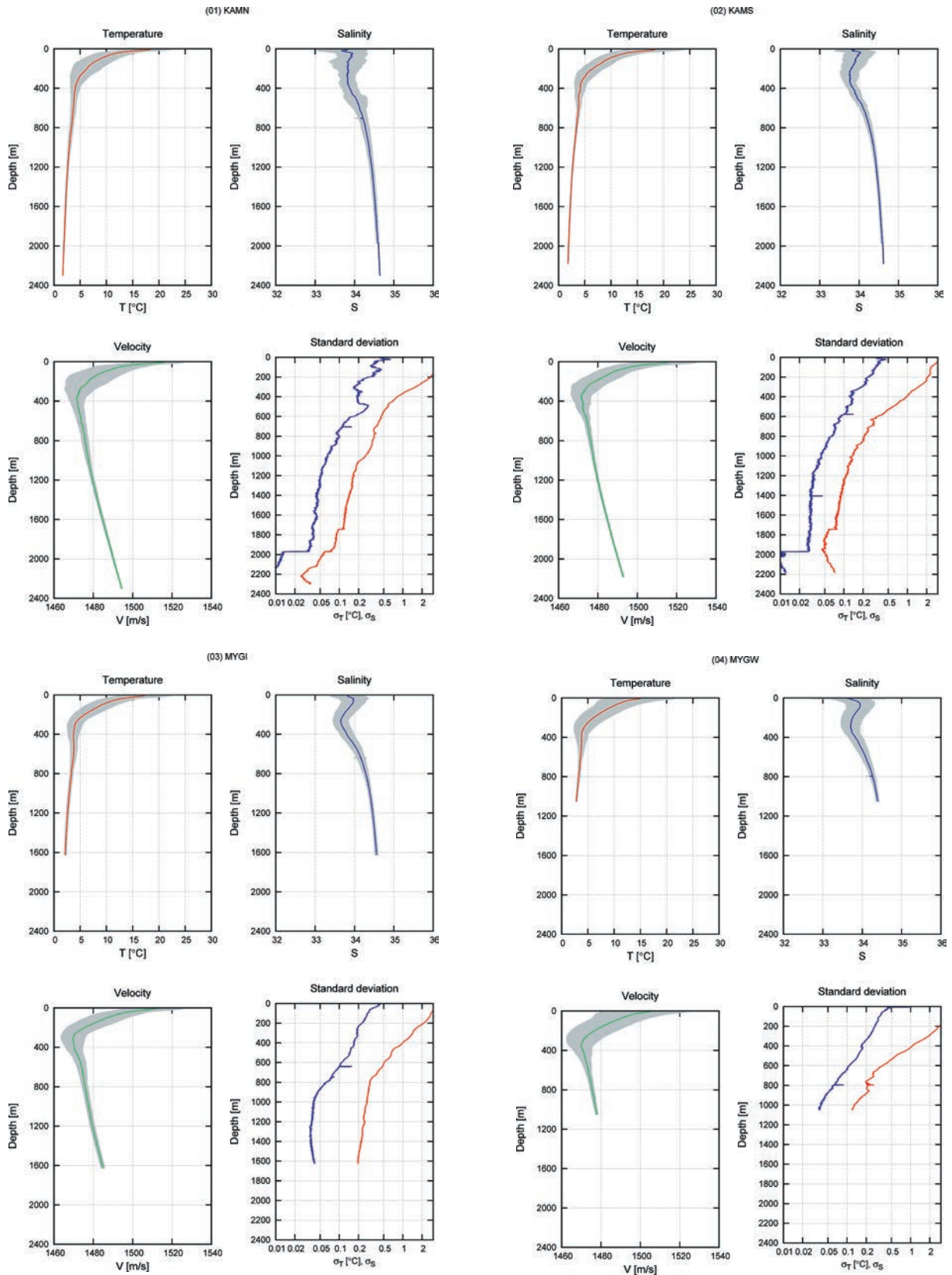


Fig. 2. Mean profiles of temperature, salinity, velocity and standard deviations of temperature and salinity at each site. Gray areas in the profiles of temperature and salinity indicate the range of the standard deviations. Dark gray and light gray areas in the velocity profiles indicate $dV_T = V(T + \sigma_T, S, P) - V(T, S, P)$ and $dV_{TS} = V(T + \sigma_T, S + \sigma_S, P) - V(T, S, P)$, respectively. Because the light gray areas are very narrow, it might disappear depending on the print condition.

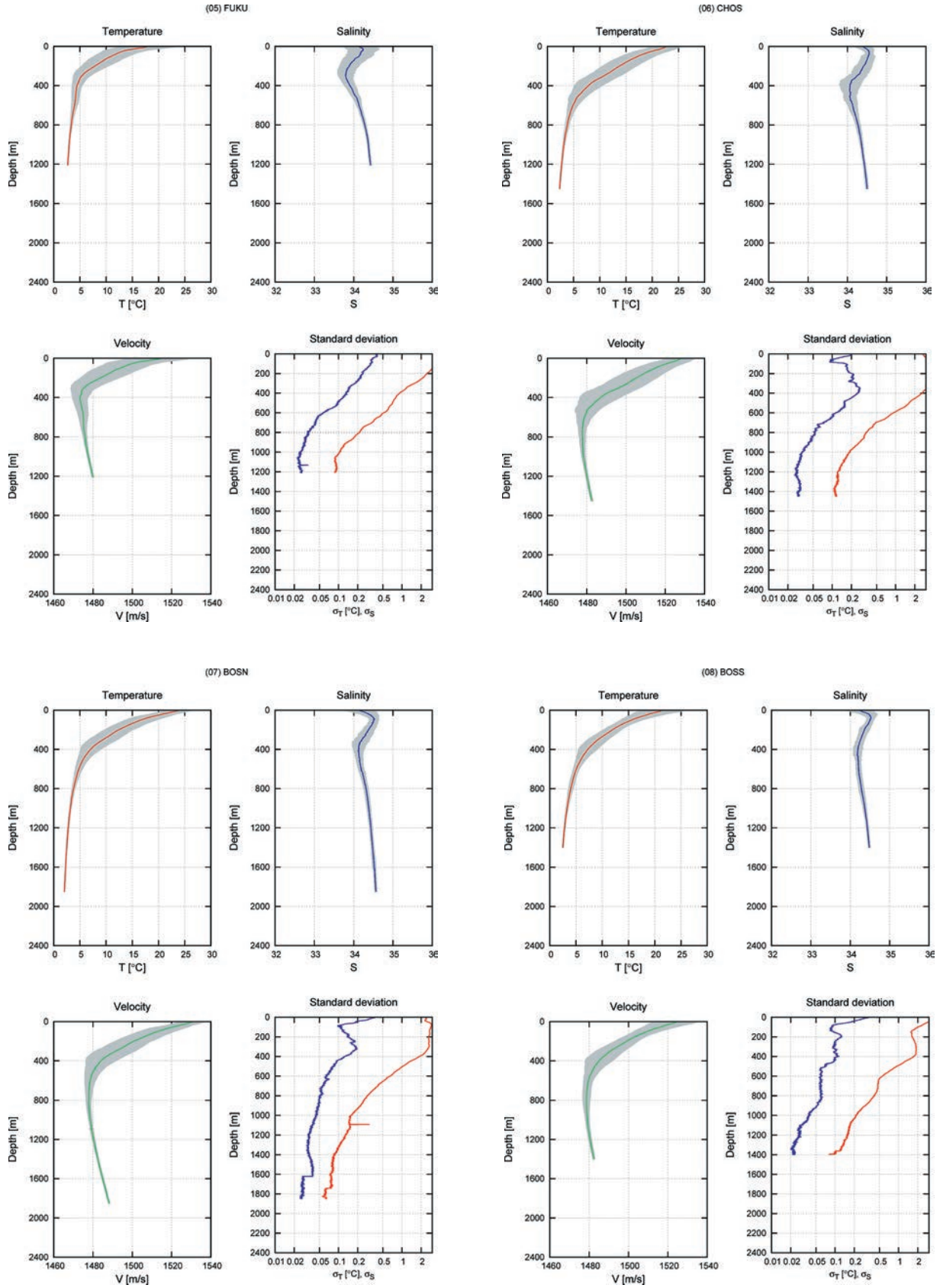
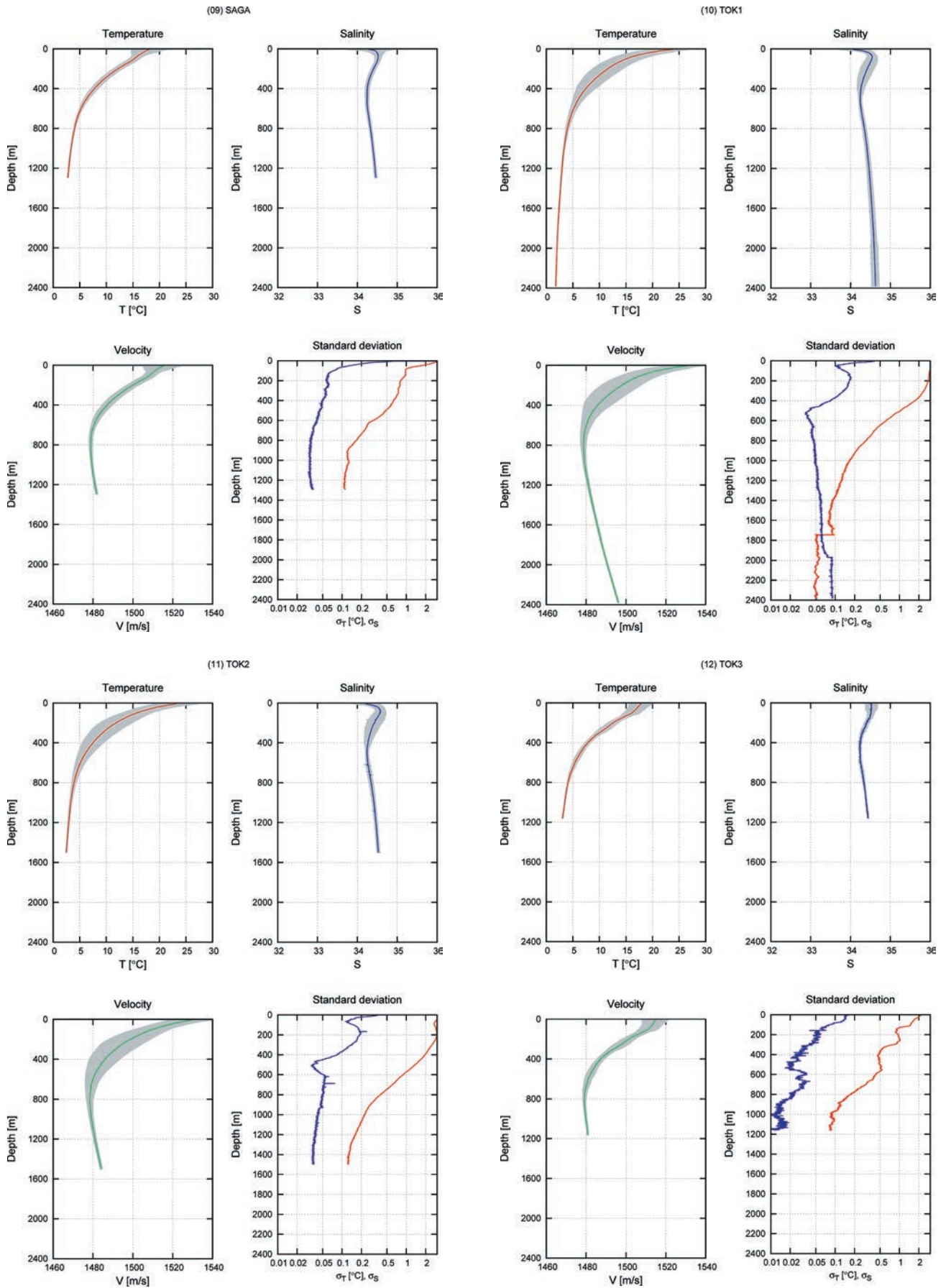
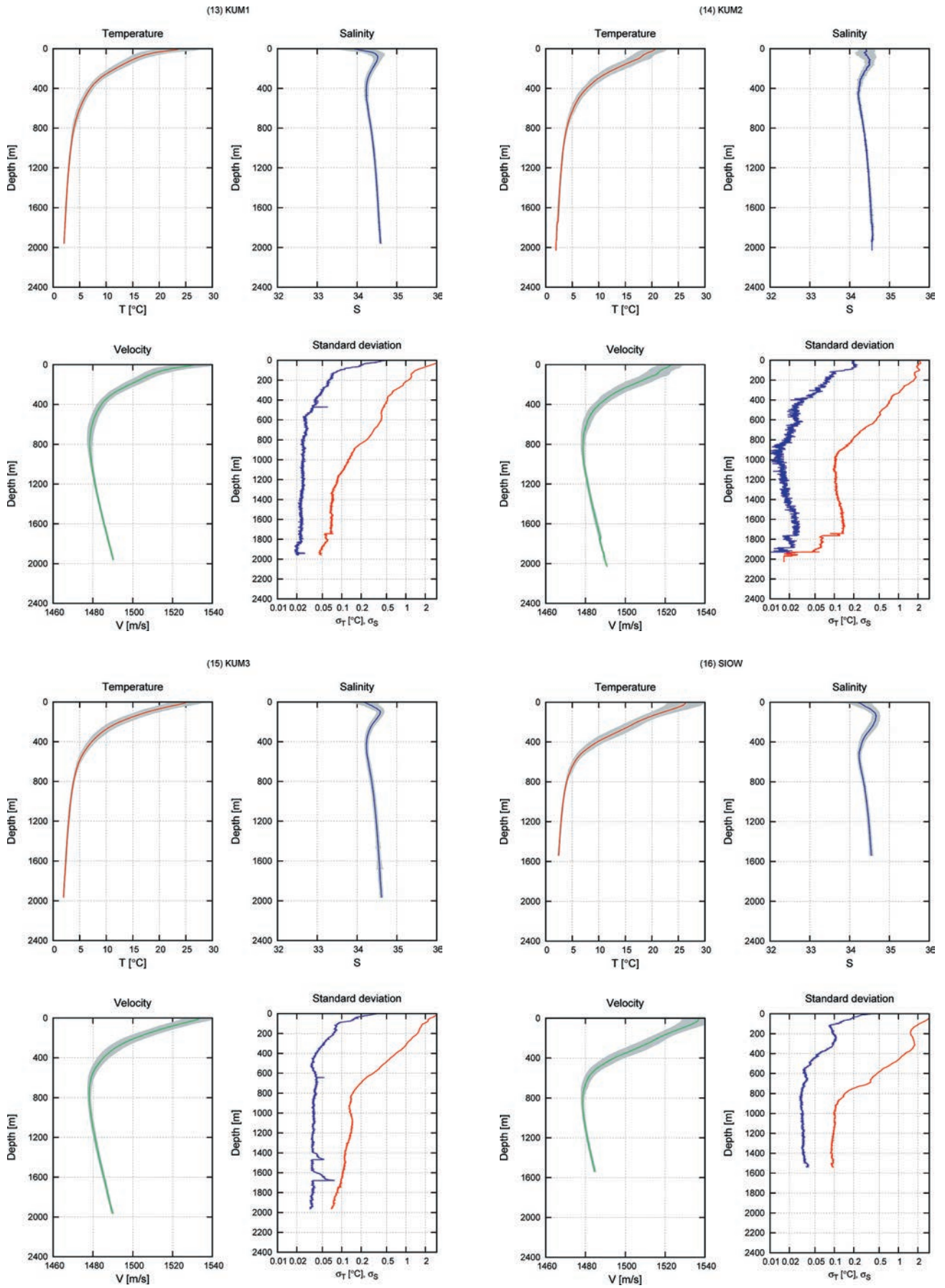
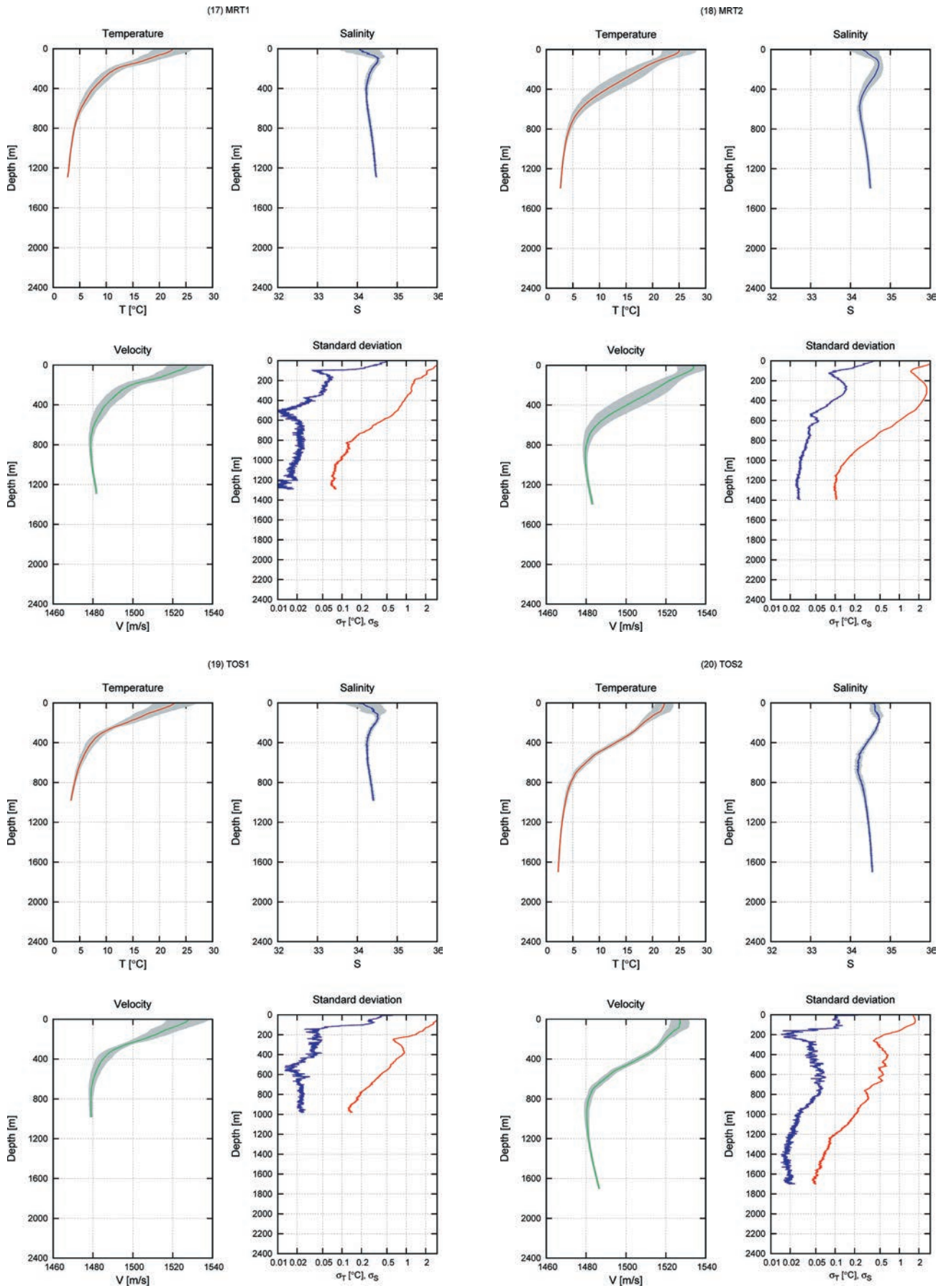


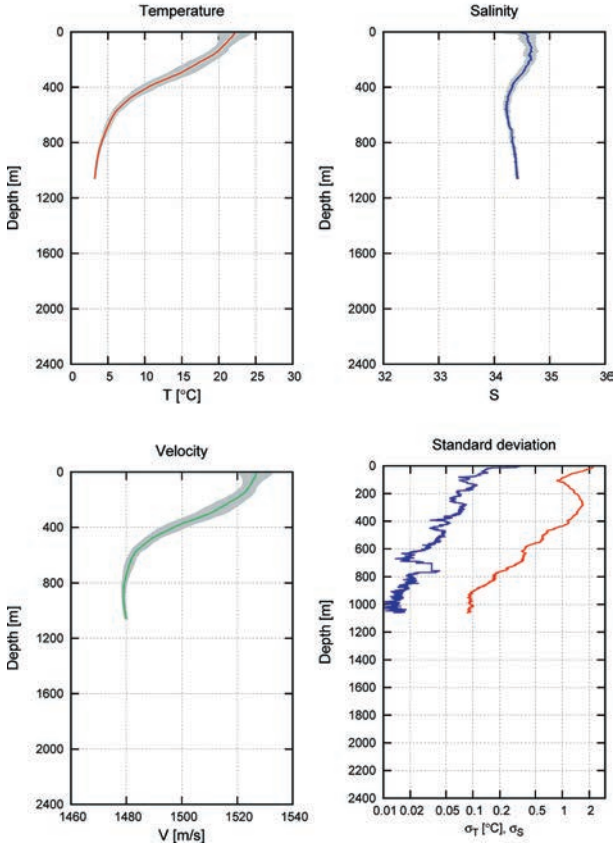
図 2. 水温・塩分・音速の平均プロフィールと標準偏差。水温・塩分プロフィール中の灰色の領域は、 $\pm 1\sigma$ の範囲を示す。音速プロフィール中の濃い灰色は $dV_T = V(T + \sigma_T, S, P) - V(T, S, P)$ の範囲を、薄い灰色の領域は $dV_{TS} = V(T + \sigma_T, S + \sigma_S, P) - V(T, S, P)$ の範囲を、それぞれ示す。後者は、非常に狭い領域となっており、縮尺によっては識別が困難なものもある。



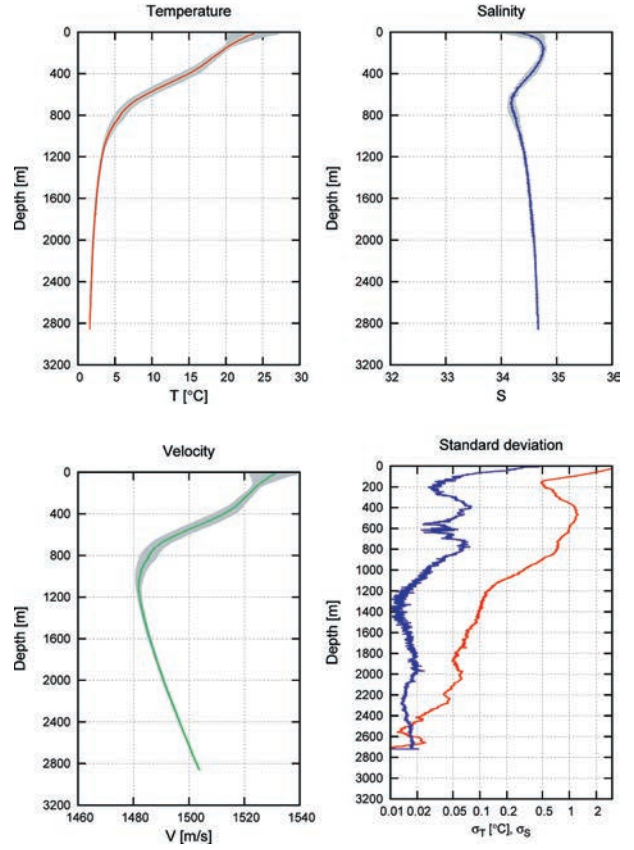




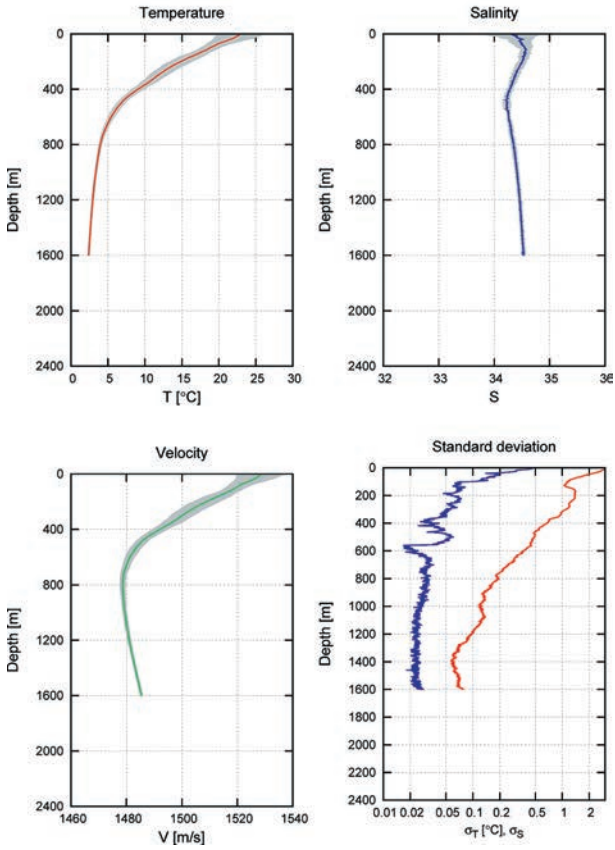
(21) ASZ1



(22) ASZ2



(23) HYG1



(24) HYG2

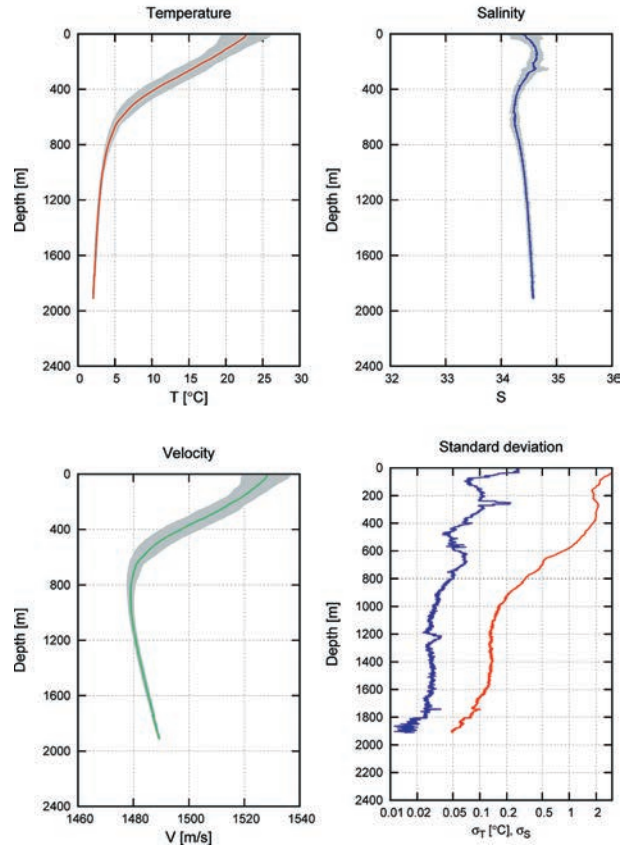


Table 3. Mean values and standard deviations of temperature, salinity, and sound velocity at (a) 800 m, (b) 1200 m, and (c) 1600 m depths.

表 3. 水深 (a) 800 m, (b) 1200 m, 及び (c) 1600 m における温度・塩分・音速の平均値及び標準偏差.

(a) 800 m

Site	T °C	σ_T °C	S	σ_S	V m/s	dV_T m/s	dV_{TS} m/s	data number of T	of S
KAMN	3.34	0.35	34.27	0.10	1475.87	1.49	1.62	302	84
KAMS	3.42	0.21	34.26	0.06	1476.22	0.88	0.97	171	67
MYGI	3.32	0.30	34.29	0.06	1475.81	1.29	1.37	823	308
MYGW	3.27	0.21	34.27	0.06	1475.56	0.88	0.96	558	248
FUKU	3.35	0.22	34.28	0.03	1475.94	0.91	0.96	393	75
CHOS	3.79	0.35	34.27	0.05	1477.78	1.45	1.52	138	48
BOSN	3.78	0.28	34.31	0.05	1477.80	1.19	1.26	123	50
BOSS	3.99	0.41	34.28	0.06	1478.64	1.72	1.80	128	41
SAGA	4.02	0.17	34.33	0.03	1478.82	0.70	0.74	440	202
TOK1	3.97	0.30	34.35	0.05	1478.66	1.26	1.31	218	79
TOK2	3.92	0.39	34.35	0.05	1478.43	1.65	1.71	277	104
TOK3	4.10	0.18	34.34	0.02	1479.19	0.74	0.77	30	9
KUM1	3.92	0.24	34.35	0.02	1478.43	1.03	1.05	159	48
KUM2	3.98	0.19	34.35	0.02	1478.68	0.79	0.82	37	9
KUM3	3.85	0.15	34.37	0.04	1478.18	0.62	0.67	372	153
SIOW	3.95	0.15	34.35	0.03	1478.57	0.61	0.65	287	112
MRT1	4.00	0.15	34.34	0.02	1478.74	0.62	0.64	37	11
MRT2	4.33	0.34	34.31	0.04	1480.10	1.43	1.47	210	94
TOS1	4.05	0.19	34.34	0.03	1478.95	0.81	0.84	42	7
TOS2	4.63	0.31	34.27	0.05	1481.29	1.29	1.36	43	10
ASZ1	4.14	0.17	34.33	0.02	1479.33	0.72	0.74	33	10
ASZ2	5.70	0.72	34.24	0.06	1485.63	2.87	2.95	34	10
HYG1	3.97	0.19	34.35	0.03	1478.65	0.79	0.83	52	9
HYG2	4.10	0.32	34.33	0.05	1479.17	1.35	1.41	48	12

(b) 1200 m

Site	T °C	σ_T °C	S	σ_S	V m/s	dV_T m/s	dV_{TS} m/s	data number of T	of S
KAMN	2.63	0.16	34.44	0.05	1479.71	0.70	0.77	265	82
KAMS	2.69	0.11	34.44	0.03	1479.94	0.47	0.51	170	66
MYGI	2.61	0.25	34.46	0.04	1479.63	1.07	1.12	818	304
MYGW	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
FUKU	2.68	0.09	34.43	0.03	1479.89	0.39	0.42	320	67
CHOS	2.72	0.12	34.43	0.03	1480.07	0.52	0.56	137	48
BOSN	2.77	0.13	34.44	0.03	1480.30	0.56	0.61	118	46
BOSS	2.81	0.16	34.43	0.03	1480.47	0.67	0.71	122	35
SAGA	2.92	0.11	34.44	0.03	1480.96	0.47	0.51	423	196
TOK1	2.96	0.13	34.46	0.05	1481.15	0.54	0.61	214	75
TOK2	2.92	0.16	34.47	0.04	1480.99	0.69	0.74	269	98
TOK3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
KUM1	2.95	0.09	34.46	0.03	1481.09	0.37	0.40	156	45
KUM2	2.95	0.11	34.46	0.01	1481.09	0.45	0.47	37	9
KUM3	2.92	0.14	34.48	0.04	1480.98	0.60	0.65	362	143
SIOW	2.90	0.10	34.48	0.03	1480.90	0.41	0.46	276	102
MRT1	2.96	0.08	34.45	0.02	1481.11	0.33	0.35	36	11
MRT2	2.97	0.10	34.46	0.03	1481.17	0.44	0.48	196	80
TOS1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
TOS2	2.98	0.10	34.45	0.02	1481.21	0.44	0.46	43	10
ASZ1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
ASZ2	3.23	0.12	34.43	0.02	1482.26	0.52	0.54	34	10
HYG1	2.93	0.10	34.46	0.03	1481.03	0.42	0.45	52	9
HYG2	2.89	0.13	34.46	0.03	1480.82	0.57	0.61	48	12

(c) 1600 m

Site	T °C	σ_T °C	S	σ_S	V m/s	dV_T m/s	dV_{TS} m/s	data number of T	of S
KAMN	2.23	0.12	34.53	0.04	1484.76	0.53	0.59	215	69
KAMS	2.24	0.08	34.53	0.03	1484.81	0.35	0.39	169	65
MYGI	2.19	0.20	34.56	0.04	1484.63	0.86	0.91	797	301
MYGW	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
FUKU	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
CHOS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
BOSN	2.27	0.08	34.52	0.04	1484.93	0.33	0.38	111	43
BOSS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
SAGA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
TOK1	2.41	0.08	34.54	0.06	1485.58	0.36	0.44	212	75
TOK2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
TOK3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
KUM1	2.42	0.07	34.53	0.02	1485.62	0.31	0.34	153	44
KUM2	2.44	0.14	34.53	0.03	1485.67	0.59	0.63	35	7
KUM3	2.38	0.10	34.55	0.04	1485.46	0.45	0.50	341	127
SIOW	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
MRT1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
MRT2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
TOS1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
TOS2	2.35	0.05	34.53	0.02	1485.31	0.22	0.24	43	10
ASZ1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0
ASZ2	2.49	0.07	34.52	0.02	1485.89	0.32	0.34	34	10
HYG1	2.38	0.08	34.53	0.03	1485.43	0.33	0.37	42	7
HYG2	2.37	0.11	34.54	0.03	1485.40	0.50	0.54	47	12

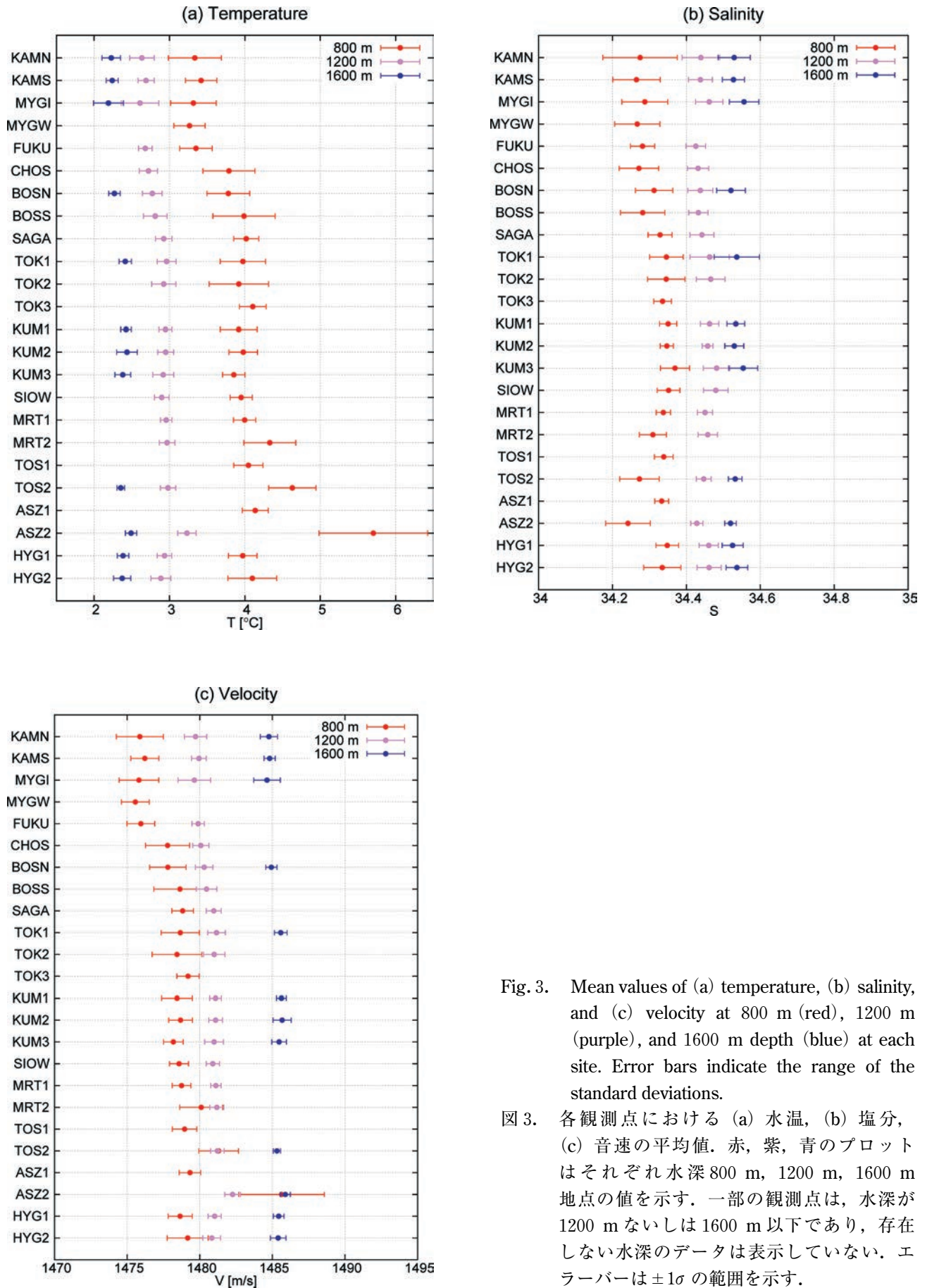


Fig. 3. Mean values of (a) temperature, (b) salinity, and (c) velocity at 800 m (red), 1200 m (purple), and 1600 m depth (blue) at each site. Error bars indicate the range of the standard deviations.

図3. 各観測点における (a) 水温, (b) 塩分, (c) 音速の平均値. 赤, 紫, 青のプロットはそれぞれ水深 800 m, 1200 m, 1600 m 地点の値を示す. 一部の観測点は, 水深が 1200 m ないしは 1600 m 以下であり, 存在しない水深のデータは表示していない. エラーバーは $\pm 1\sigma$ の範囲を示す.

水深 800 m の深層域における水温と塩分の絶対値については、Fig. 3 から明らかなように、海域ごとに異なっている。特に「足摺沖 2 (ASZ2)」では、他の海域と比べて水温が有意に高く、塩分は低い値を示す。この傾向は「土佐沖 2 (TOS2)」や「室戸沖 2 (MRT2)」においても見られる。これら 3 海域で得られた高水温は、黒潮の影響によると言える。また、低塩分についても、黒潮流域の水深 800 m 程度で観測されている塩分極小層 (e.g. Nakano et al., 2007) を見ているものと考えられる。さらに、「足摺沖 2 (ASZ2)」と、その北西側にある「日向灘 2 (HYG2)」を比較すると、高水温の領域は 1200 m でも有意であることがわかる。このことから、「足摺沖 2 (ASZ2)」において黒潮の影響は水深 1000 m 以上の深さまで達していると言える。

一方、釜石沖から福島沖にかけての東北沖の海域では、西日本沖の観測点と比較して、800 m における水温が低くなっている。これは高水温の黒潮の影響を受けないためと考えられる。

さらに、この黒潮の影響の有無は、音速プロファイルに特徴的な変化を生じさせる。Fig. 4 には、音速プロファイルの傾斜 dV/dz がゼロとなる水深をプロットした。その際、ノイズの影響を軽減するため、 dV/dz を計算する際は、60 m の移動平均をとっている。Fig. 4 から明らかなように、東北沖の海域では音速プロファイルの傾斜がゼロになるのは 300–400 m であるのに対し、銚子沖以南の海域では 800 m となっている。黒潮の影響を強く受けていると考えられる「足摺沖 2 (ASZ2)」、 「土佐沖 2 (TOS2)」及び「室戸沖 2 (MRT2)」では、さらに深くなっていることもわかる。

4 水温・塩分の空間変化

海域ごとの水温・塩分構造の違いについて確認するため、得られた平均水温・塩分プロファイルを用いて T-S ダイアグラムを作成した (Fig. 5)。その結果、宮城沖以北の海域と相模湾以西の海域で明瞭な差が見られた。前節では「足摺沖 2

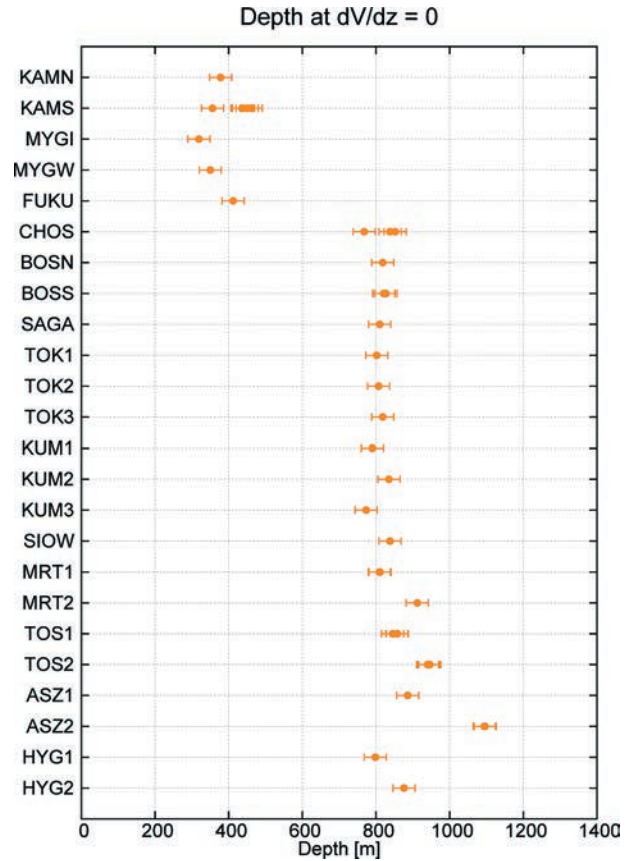


Fig. 4. Depth for dV/dz to be zero at each site. The profile of dV/dz is smoothed by 60-m moving average. Error bars indicate the range of 60 m.
 図 4. 音速プロファイルの変化率 (dV/dz) がゼロとなる水深。 dV/dz は、60 m の移動平均を取って平滑化しており、その移動平均の範囲をエラーバーとして示している。

(ASZ2)」等において、等水深における高水温が確認された (Fig. 3a) が、T-S ダイアグラム上では南海トラフ沿いの他の海域と大きな差が生じていない。このことは、相模湾以西の海域の水塊としては、いずれも黒潮水塊が支配的であることを示唆する。

一方、地理的に両者の間にある福島沖から房総沖にかけての海域では、浅いところで黒潮流域的、中間的な水深で東北沖的な分布を示している。さらに、これらの海域について、北東の観測点ほど東北沖的な分布を示しており、これらの海域では黒潮による暖水塊と東北沖からの冷水塊が混合していると考えられる。

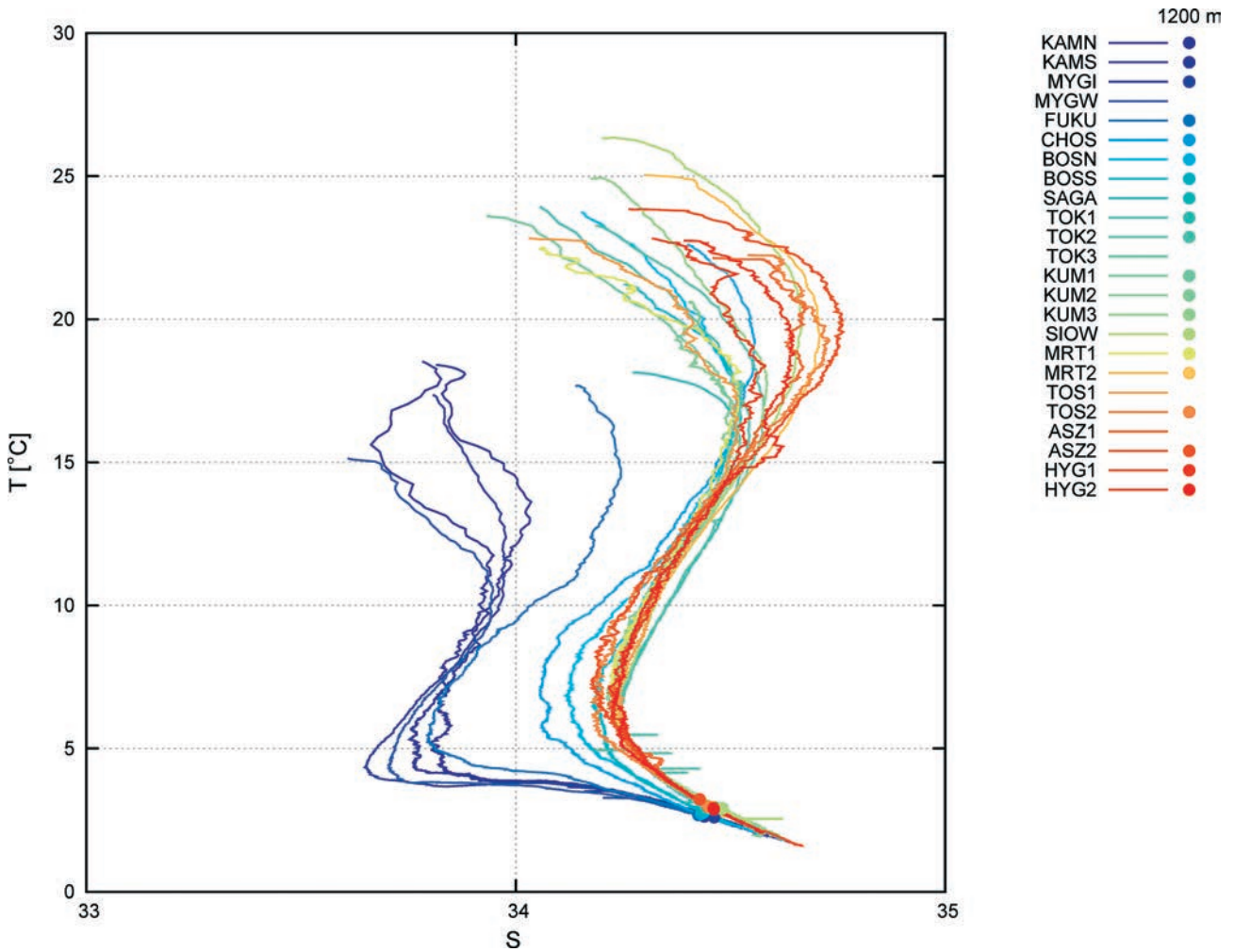


Fig. 5. T-S diagram of the mean profile at each site. Solid circles indicate the values at 1200 m depth.
 図5. 各観測点におけるT-Sダイアグラム. 円のプロットは、水深1200 m地点の値を示す。

5 水温・塩分の時間変化

最後に、データ数が多く、かつ比較的水深の大きな観測点である「宮城沖1 (MYGI)」と「熊野灘3 (KUM3)」について、観測月ごとの平均プロファイルを作成し、比較した。結果をFig.6及びFig.7に示す。データの数に月ごとのばらつきがあるものの、各月の傾向が見て取れる。特に「熊野灘3 (KUM3)」は、浅い部分では顕著な季節変動を示すものの、各月内でのばらつきは小さく、800 m以深では季節による変動が見られない。対照的に、「宮城沖1 (MYGI)」では1-2月や11月は特に月内でもばらつきが大きく、また、プロファイルの形状も月ごとに大きく異なっている。特に1月の結果については、水深800 mまで σ_T , σ_S が大きくなっている。データを精査

すると、これは、2013年1月末の観測データが原因であることがわかった。Fig.8に、2013年1月31日取得のXCTDデータと、比較のため、その前日と数日後のプロファイルとして2013年1月30日、2013年2月4日取得のXCTDデータ、及び違う年の同時期のプロファイルとして2015年1月25日のデータを示す。なお、2013年1月31日8時から19時までに3回のXBT投下及び1回のXCTD投下を実施しているが、そのいずれでも同様な温度プロファイルが取得されているので、このプロファイルはプローブ等の異常ではない。これらの測定結果から、2013年1月31日には浅いところに暖水塊、深いところに冷水塊が存在していたと解釈できる。この原因としては、冬季の親潮の南下による冷水塊の侵入がありうる。

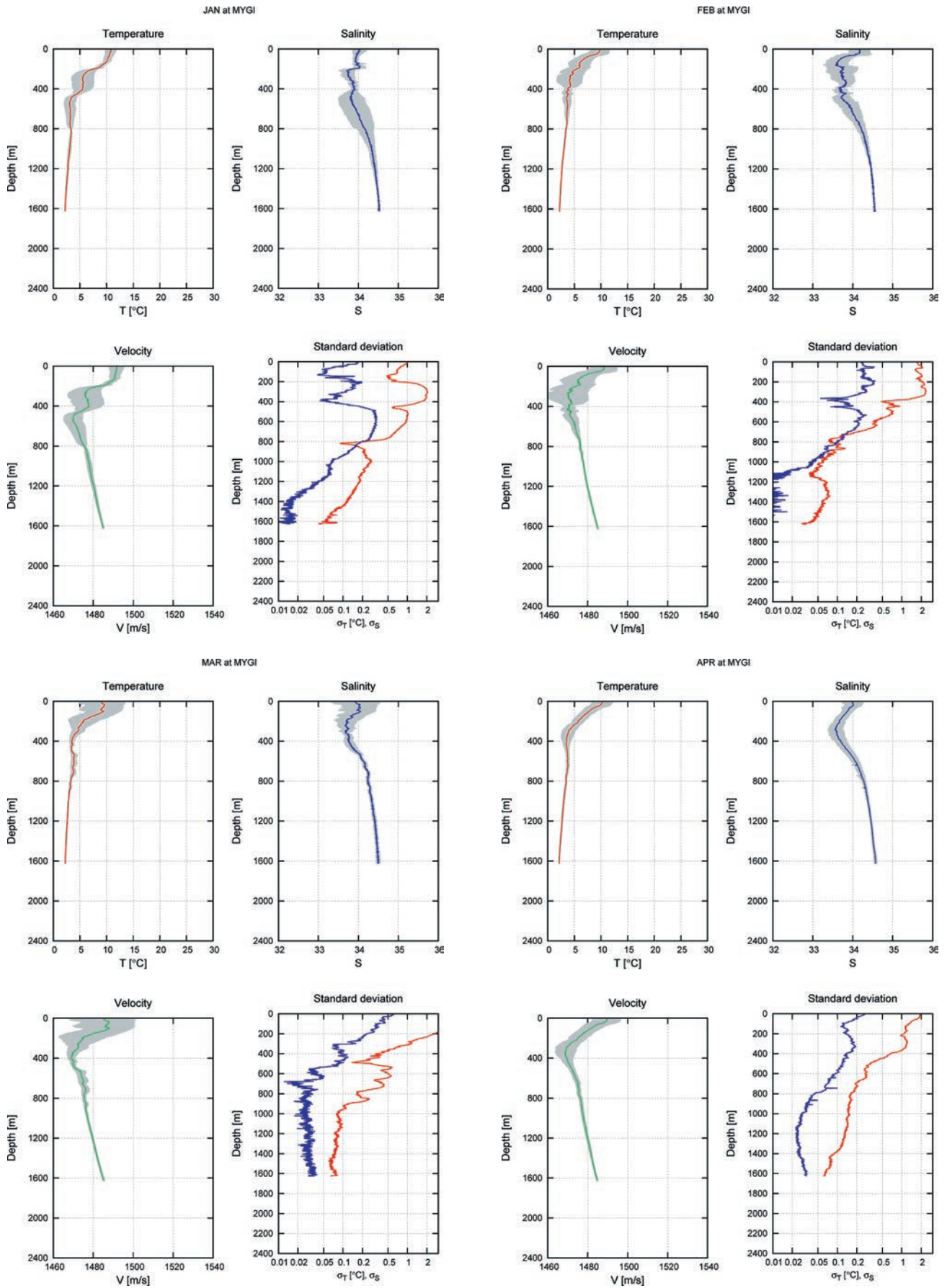


Fig. 6. Monthly mean profiles of temperature, salinity, velocity and standard deviations of temperature and salinity at MYGI and KUM3. Legends are the same as Fig. 2. No data has been obtained at KUM3 in March and April.

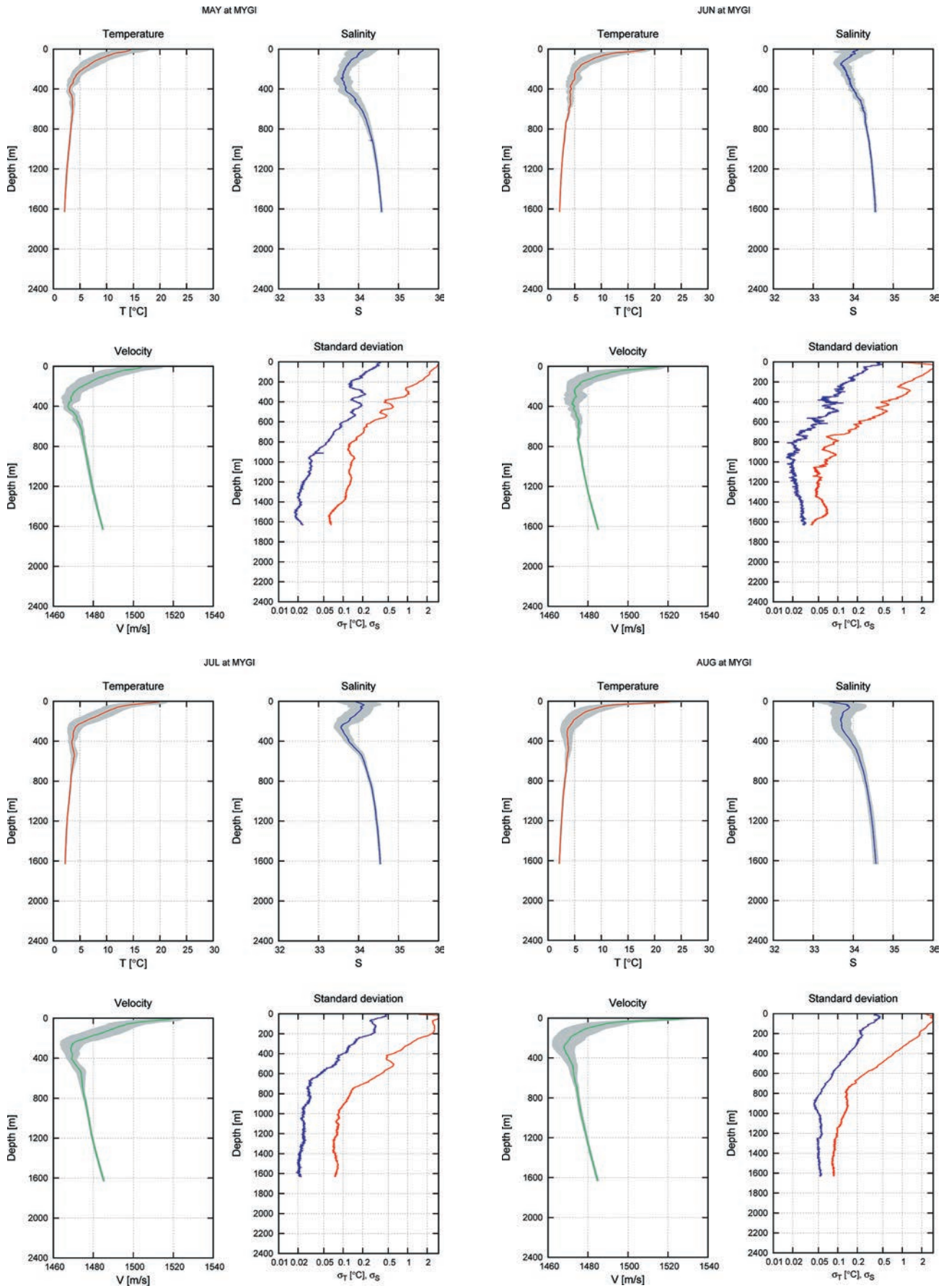
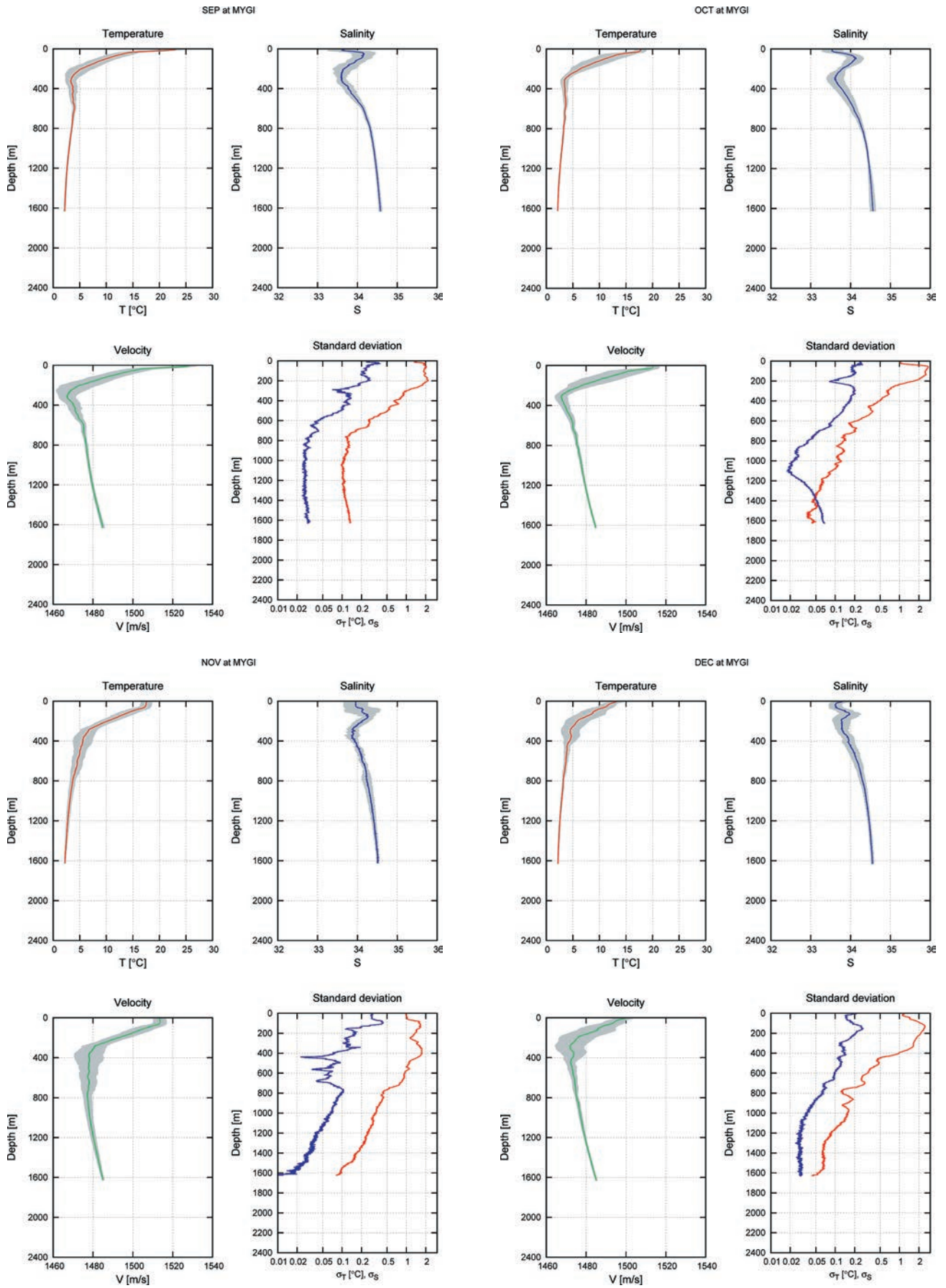
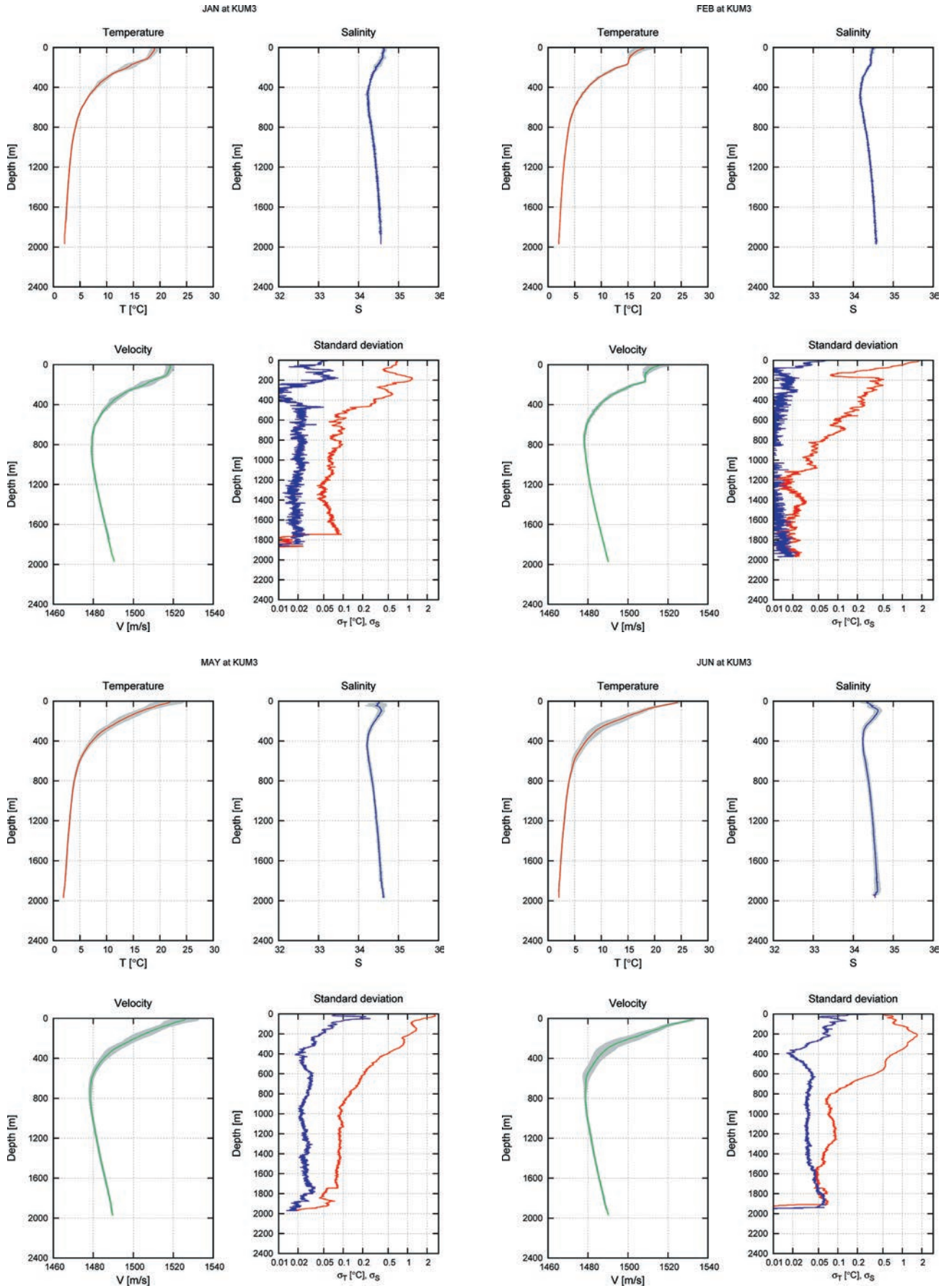
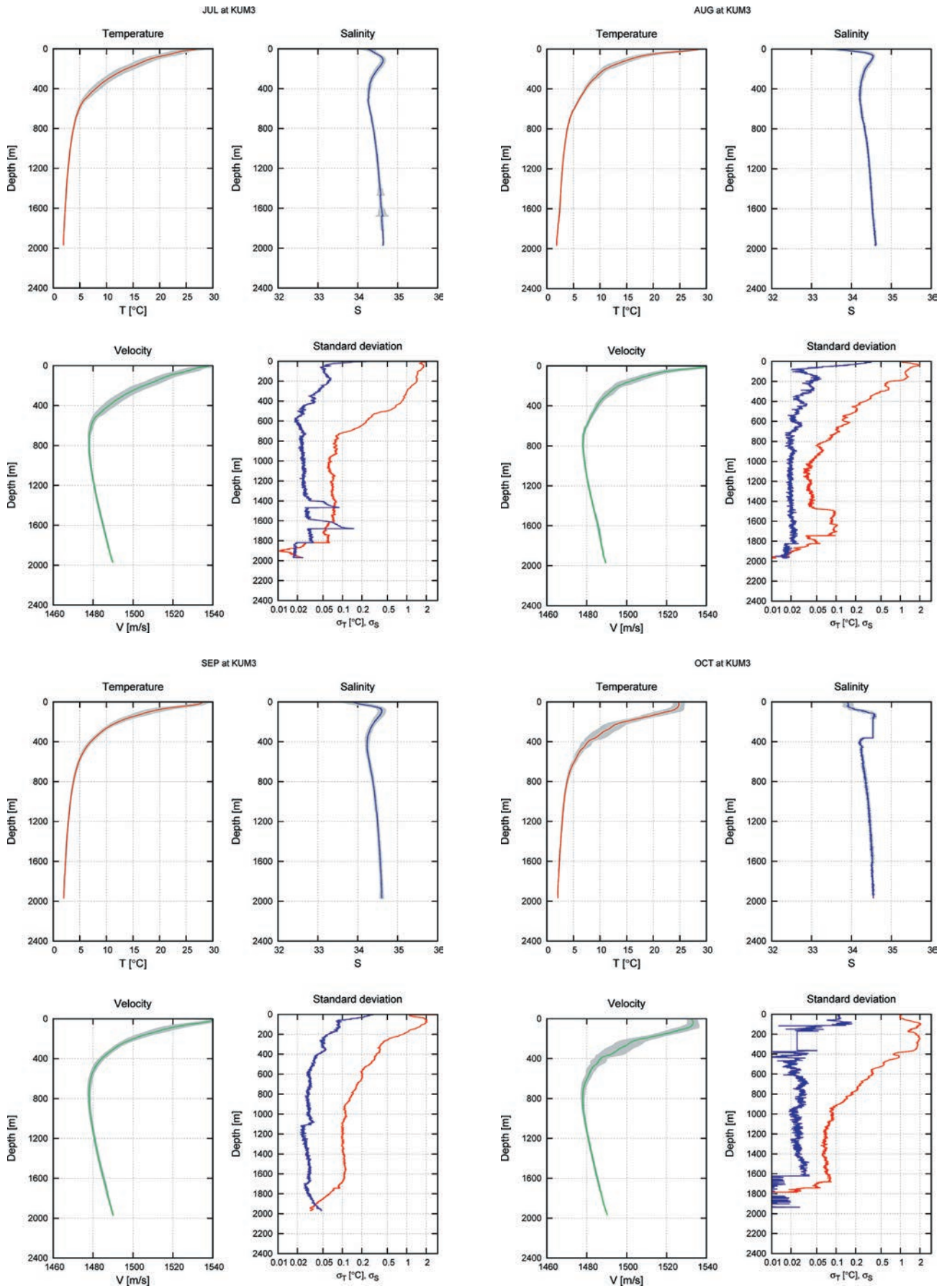


図 6. 宮城沖 1, 熊野灘 3 における, 月別の水温・塩分・音速の平均プロファイルと標準偏差. 凡例は Fig. 2 と同じ. なお, 熊野灘 3 については, 3 月及び 4 月のデータは取得されていない.







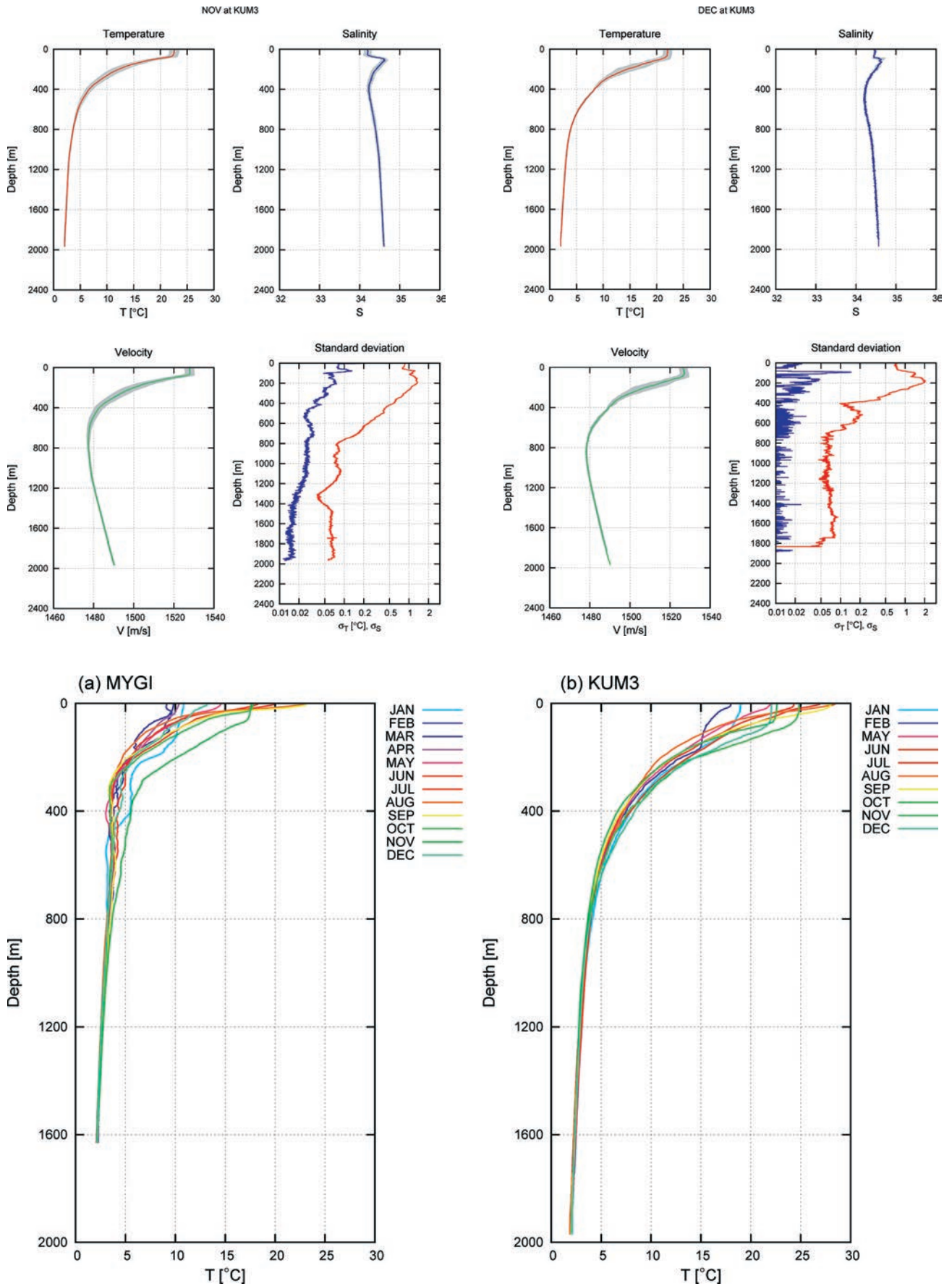


Fig. 7. Monthly mean profiles of temperature at (a) MYGI and (b) KUM3.
 図 7. (a) 宮城沖 1, (b) 熊野灘 3 における, 水温の月別平均プロファイル.

親潮は、1月から2月にかけて急激に南下する(吉田, 1992; 気象庁 WEB サイト)。その際、密度の大きい冷水塊が暖水塊の下に潜り込み、Fig. 8のようなプロファイルが得られると考えられる。ここで示した事例では、1月30日から31日にかけて冷水塊が侵入したことが示唆される。さらに、2月5日になると低水温層が見られなくなることから、この冷水塊侵入のイベントは1週間程度という短期的な現象であることがわかる。この事例は、水深800 mにおいても、水温に顕著な時間変化が生じることを示す有力な証拠である。

加えて、こうしたイベントの有無を知ることは、海底地殻変動観測においても極めて重要であ

る。ここで示した侵入イベントは、親潮水塊の境界の移動、あるいは親潮のフロントに生じた、より小規模な冷水塊の通過によって表現されると考えられるため、顕著な水温勾配が観測海域内に生じうることを意味する。現在の海底地殻変動観測の解析スキームでは音速の空間勾配を仮定していないが、こうした具体的な事例を集めることは、今後の解析スキームの開発に資するであろう。

6 結論

本研究では、これまでに蓄積された海底地殻変動観測時の水温・塩分プロファイルデータを統計的に処理することで、比較的狭い範囲での水温・塩分構造の安定性を評価した。その結果、水深が

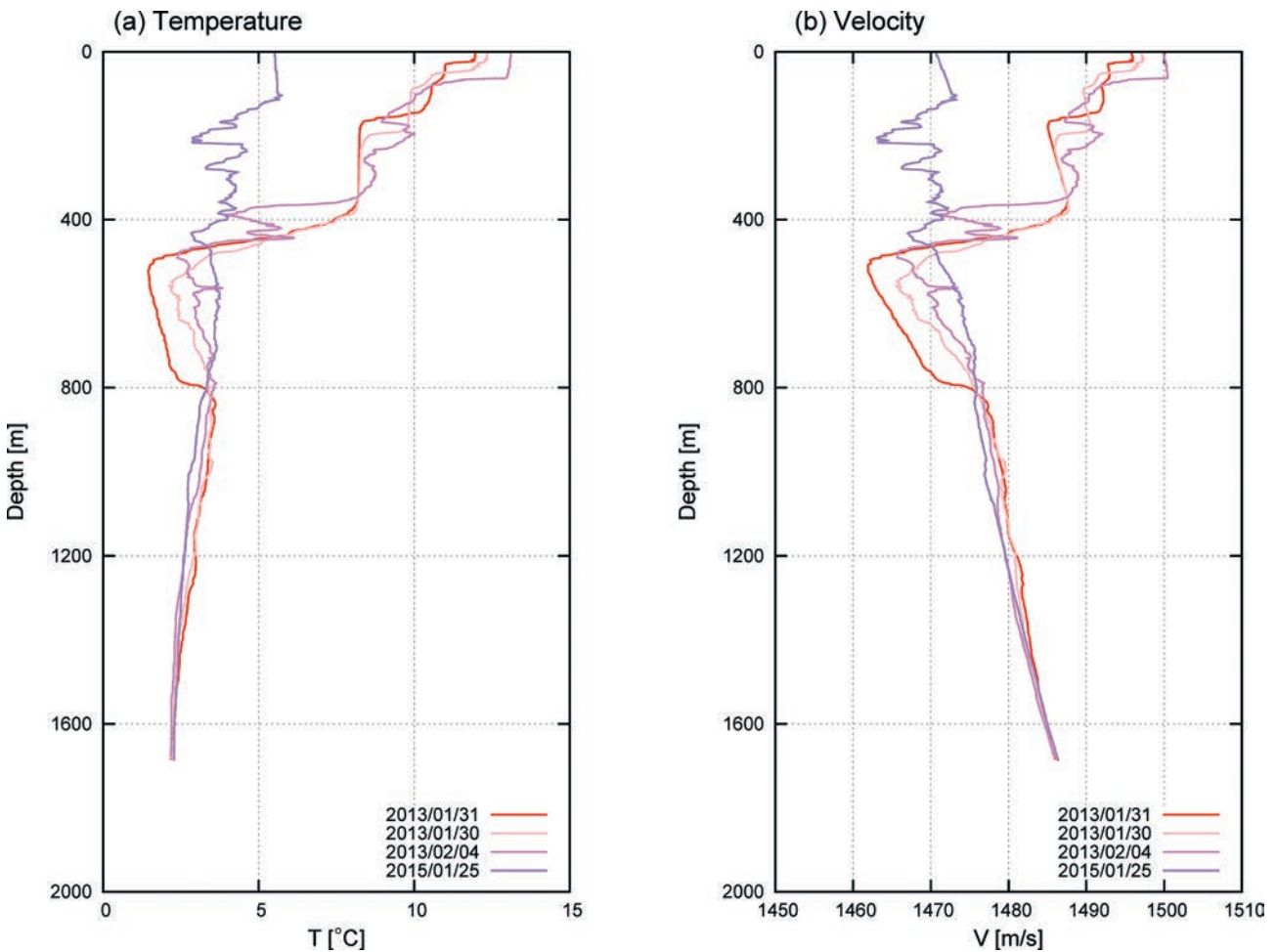


Fig. 8. Profiles of (a) observed temperature and (b) velocity obtained from XCTD profiler at MYGI in the end of January and the beginning of February, 2013 and 2015.

図 8. 宮城沖 1 で、2013 年と 2015 年の 1 月末から 2 月初めに実施した XCTD 実測値から得られた (a) 水温、(b) 音速プロファイル。

1200 m を超えると水温の時間変化は 1σ で 0.2°C となることがわかった。この値は測定プローブの公称精度と同程度の大きさであることから、測定精度の範囲で収束していると見なせる。さらに、黒潮流域と東北沖のプロファイルについて、大きな違いがあること、さらにそれが空間的に漸次的に変化することが確認された。これは各海域を代表する水塊が混合していく様子を表している。個別の海域での季節変化としては、宮城県沖の海域で、1月に冷水塊が暖水塊の下に侵入してくる様子が捉えられた。この冷水塊は、時に 800 m の水深にも影響を与えることもわかった。

本研究の結果から、海底地殻変動観測における海中音速構造の測定は、少なくとも 800 m 以浅については確実に実施する必要があると結論づけられる。1200 m 以深については、音速の経時変化が 1 m/s 程度以内であり、この程度の擾乱は現在の解析結果に有意な影響を与えることはないことが渡邊 (2016) によって示されたことも踏まえると、現状の観測精度では、深海までの CTD による水温・塩分プロファイル測定を統計値の使用で代替することで、観測の効率化を図ることは可能である。

一方で、新たに観測を開始した海域、例えば東北大学の設置した日本海溝近傍の観測点 (渡邊・他, 2015) での観測については、本研究で得られた深部音速構造の安定性が確認されたわけではない。そのため、既存の観測点から遠く離れた海域で観測を実施する際は、深部までの水温・塩分プロファイルを季節ごとに取得した上で統計的に処理をし、音速構造の安定性を個別に評価する必要がある。さらに、今後音速の傾斜構造等を考慮した新たな解析スキームを開発する際には、より小さな空間スケールでの音速変化を考慮する必要がある。そのために、数 km 四方の海域中に生じうる傾斜の大きさを見積もることも必要であり、例えば今回宮城沖で得られたような水塊の侵入過程など、局所的な水温勾配を生じうる現象にも注目していくべきであろう。

謝 辞

本研究で使用したデータは、歴代の航法測地室・海洋防災調査室員及び測量船「昭洋」「拓洋」「明洋」「海洋」乗組員により取得されたものである。データ整理にあたっては、海洋防災調査室の横田裕輔博士、糸井洋人氏の協力を受けた。また、匿名の査読者には本論文の改善に資する有益なコメントをいただいた。記して感謝する。

文 献

- Del Grosso, V. A. (1974) New Equation for the Speed of Sound in Natural Water (with Comparison to other Equations), *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56, No. 4, 1084–1091.
- Fofonoff, N. P. and R. C. Millard Jr. (1983) Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, *UNESCO technical papers in marine science*, 44.
- 藤田雅之・佐藤まりこ・矢吹哲一朗 (2004) 海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェアの開発, *海洋情報部技報*, 22, 50–56.
- 後藤慎平・土屋利雄・日吉善久・水谷孝一 (2015) 海洋観測フロートによって観測された大規模海底地震の震源近傍における音速プロファイルの変化, *海洋音響学会誌*, 42(3), 106–117.
- 気象庁, 親潮の面積の時系列, http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyoyoyashio/oyashio_area.html, Accessed July 2015.
- Nakano, T., I. Kaneko, T. Soga, H. Tsujino, T. Yasuda, H. Ishizaki and M. Kamachi (2007) Mid-depth freshening in the North Pacific subtropical gyre observed along the JMA repeat and WOCE hydrographic sections, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L23608, doi: 10.1029/2007GL031433
- Oguri, K., Y. Furushima, T. Toyofuku, T. Kasaya, M. Wakita, S. Watanabe, K. Fujikura and H. Kitazato (2015) Long-term monitoring of bottom

environments of the continental slope off Ottsuchi Bay, northeastern Japan, *Journal of Oceanography*, 71, 1–16, doi:10.1007/s 10872-015-0330-4

齋藤宏彰・佐藤まりこ (2009) 海底地殻変動観測における海中音速測定頻度の局位置への影響について, 海洋情報部研究報告, 45, 23–33.

佐藤まりこ・藤田雅之 (2012) GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測技術の進展, 海洋情報部研究報告, 48, 26–40.

吉田隆 (1992) 親潮水の分布の平均的な季節変動, *海と空*, 68(2), 79–88.

渡邊俊一・石川直史・横田裕輔・田代俊治・木戸元之 (2015) GPS-A 観測で得られた東日本の海底地殻変動, 日本測地学会第 124 回講演

会要旨集, 177–178.

渡邊俊一 (2016) 海底局位置決定における海中音速構造の影響と初期値依存性についての考察, 海洋情報部研究報告, 53, 82–89.

要 旨

海底地殻変動観測の実施の際にこれまで取得してきた水温・塩分プロファイルについて統計的に取りまとめた。その結果, 1200 m 以深の深海域で, 水温・塩分が時間的に安定している様子が, 数 km 四方という空間的に非常に狭い海域において確認された。また, 黒潮域と東北沖のプロファイルの違いについても特徴を見出し, 宮城県沖での短期的な冷水塊の侵入の様子も捉えられた。