

# TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

## 南極周極流南限域における流速構造の変動

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-06-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 渡部, 和帆 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1922">https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1922</a>

修士学位論文

南極周極流南限域における流速構造の変動

2019 年度

(2020 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海洋資源環境学専攻

渡部 和帆

## 目次

第1章	はじめに	...1
第2章	解析データ	...3
	2.1. 係留系観測データ	
	2.2. Aviso-altimetry 海面高度計 再解析データ	
	2.3. ERA interim 再解析データ	
	2.4. AMSR2 海氷密接度データ	
第3章	結果	...5
	3.1. 観測海域の基本構造	
	3.2. 潮汐、慣性周期変動	
	3.3. 鉛直モード構造の解析	
	3.4. 流速変動と水温変動の相関	
	3.5. SSH と比較した時系列変動	
	3.6. 海面流速場の空間変動	
第4章	考察	...10
	4.1. 数十日周期の変動	
	4.2. 季節変動の形成される要因について	
	4.3. 熱フラックスの推算	
第5章	まとめと今後の課題	...14
	5.1. まとめ	
	5.2. 今後の課題	
	謝辞	...16
	参考文献	...17
	図表	...19

## 第1章 はじめに

南大洋では南極大陸陸棚上で海水生産に伴って生じる高密度陸棚水(以下、DSW: Dense Shelf Water)と、南極周極流(以下、ACC: Antarctic Circumpolar Current)に由来する周極底層水(以下、CDW: Circumpolar Deep Water または Modified CDW: MCDW)が混合しながら底層へ沈み込むことで南極底層水(以下、AABW: Antarctic Bottom Water)が形成される(e.g. Jacobs et al. [2004])。特に南緯 60 度帯では北側で吹く西風と南側で吹く東風によるエクマン輸送の影響で発散帯となり、中層から CDW が湧昇することで DSW と CDW の混合が励起される。これによって生産された AABW は CDW の南向き輸送との収支を保つように北側の底層に輸送されるという子午面循環が存在するとされている(e.g. Speer et al. [2000]) (Fig. 1)。

子午面循環は Fig. 1 に示すように、水塊分布や海面力学高度場によって特徴付けられたいくつかのフロント (Orsi et al. [1995] 等) と対応している。しかし、これらフロントは定常なものではなく、特に ACC の南側に位置し、強い東向きの流れを有する Southern Circumpolar Current Front (以下、SACCF) では、渦による輸送や、フロントの蛇行によって刻一刻と循環構造やフロントの分布が変化しているとされている(Thorpe et al. [2002])。

特に、子午面循環による CDW の南向き輸送について、西南極にドレイク海峡が位置する南緯 60 度付近の緯度帯では東西に強い密度勾配が存在しないため、フロントを横切る輸送が地衡流によるものではなく、渦による輸送であると考えられている(e.g. Speer et al. [2000])。Gille [1996] では ACC 域での代表的な渦のスケールを 90km、1 ヶ月と示しているが、実際に現場観測で渦構造の通過や鉛直構造を捉えた観測は限られている。特に、渦等による流れ場の変動成分の鉛直構造に関しては、南大洋では密度成層が弱く、強い順圧的な流れが卓越しているとされており、Pena-Molino et al. [2015] では実際に順圧構造が最も寄与していることが示されている(Fig. 2)。その為、断面観測から得られる地衡流の算出だけでは南大洋における流動を説明するには不十分であり、直接的な流速の観測が必要である。

これまで、東南極に位置するオーストラリア-南極海盆域では Phillips & Rintoul [2000] による Subantarctic Front (以下、SAF) 域における渦によるエネルギー輸送についての係留観測や、Pena-Molino et al. [2015] による陸棚斜面域における沿岸流量の係留観測はなされてきたが、ACC 南限域における全層的な係留観測の実績は少ない。そのため、ACC の流軸が位置する北側から AABW が生産される南側への CDW 輸送が、ACC 南限域で実際にどのような流れによって輸送されているのかを明らかにすることは、子午面循環のメカニズムにおいて、南北の熱輸送を見積もる上で重要である。

また、ACC 南限域は季節海氷域であり、海水に覆われている場合、衛星海面高度計では海水下の海面高度を測定できない上に、冬季の現場観測の実施は少ないため冬季における流速や水温のプロファイルは少ない。そのため、これまでの研究では ACC 南限域において、夏季におけるスナップショットの水塊分布や輸送量の推定はされてきたが、海水分布に伴った流れ場の季節変動や、海上風の季節変動との関係については未だ不明な点が多い。

このような背景のもと、東京海洋大学の研究練習船「海鷹丸」では 2017 年 1 月と 2018 年 1

月の南大洋観測航海において、大型係留系の設置、回収が東南極 Vincennes 湾沖の ACC 南限域で行われた。この係留系観測では、一年間を通した水平流と水温の連続的なデータが底層から約 500dbar 深までの間で観測された。冬季には氷縁域の北上に伴い、表層が海氷によって覆われている期間の流動も捉えていた。

本研究では一年間の係留観測によって得られた各層の水温、水平流速時系列データを用いてそれぞれの変動成分についてその鉛直構造および、流速と水温分布の変動要因について解析する。さらに、海面高度の衛星観測データを用いることで海面高度の場の変動と、鉛直構造の関係性を明らかにし、変動の空間スケールについても明らかにする。加えて、海上風、海氷密接度の衛星観測データから海氷分布の変動、それに伴う風応力場の変化を解析する。これにより季節海氷域における流動の季節変動を捉える。これらの解析によって、本研究では中規模スケールの変動から季節変動まで、それぞれが ACC 南限域の流れ場に与える影響を明らかにする。

## 第2章 データと解析手法

### 2.1. 係留系観測データ

本研究では、海鷹丸によって南緯 61 度、東経 110 度、水深 4240m の地点(Fig. 3)に、2017 年 1 月から 2018 年 1 月の期間で設置、回収された係留系の観測記録を用いて各プロファイルの鉛直構造について時系列変化を解析した。

この係留系を用いた観測は計 16 台の測器によって海底付近から表層までの水温・電気伝導度・圧力あるいは水平流速が測定された。系に取り付けられた観測測器は、SonTek 社製の流速計 ADP 1 機、SEA-BIRD 社製の CSBE 37-SM/SMP/SMP-ODO MicroCAT 4 機、AANDERAA 社製の SeaGuard RCM 流速計 4 機、RCM11 流速計 1 機、RBR 社製の RBR solo<sup>3</sup>T 水温計 6 機であった。係留系の構成、観測プロファイル、およびデータインターバルは Fig. 4, Table1 に示すとおりである。このうち、RBR 水温計の観測データに関しては他の測器とデータインターバルを合わせるため、1 時間おきのデータのみを扱った。また、RCM11 流速計については本研究では解析に用いていない。本研究で解析した観測期間は投入・回収時に測定値が乱れた期間を除いた、2017 年 1 月 8 日~2018 年 1 月 8 日とした。なお、流向については生データに対して角度の磁気補正を施した上で解析した。

水温、電気伝導度、圧力から算出した塩分については、後述する海鷹丸による CTD 観測のデータと比較したところ、想定深度 859m 深と 1715m 深の SEAGURD 流速計に取り付けられた電気伝導度計で、時間経過と共に塩分が高くなるトレンドを示した。投入・回収時の CTD 観測値ではこのような変動は見られず、測器の状態悪化が原因として考えられる。そのため本研究では、投入・回収時の CTD 観測値と係留された SEAGURD の投入・回収時の観測値が一致するように、SEAGURD によって得られた塩分の時系列に対して線形トレンドを除去した。

係留系は最伸張時に海面付近まで到達していることが、最上部に取り付けられた圧力計の時系列データから分かった(Fig. 5)。特に海氷で覆われる冬季に測器の沈み込みにより、各センサーで得られたデータが一定での値を捉えているとは言い難い。そこで、線形補間によって得られた 500, 1000, 1900, 4100dbar 深における水平流速を解析に用いた。水温については各タイムステップで内挿可能な場合に限り、100dbar 深おきに線形補完し、内挿不可能な場合は欠損としたデータセットを作成し解析に用いた。

### 2.2. 現場観測 CTD データ

係留系観測点とその南北における子午面断面の構造を把握するために、係留系の投入・回収時の海鷹丸による東経 110 度に沿った CTD 観測データを水塊分布の解析に用いた。観測期間と範囲は、投入時が南緯 55 度~65 度の範囲で 2017 年 1 月 5 日~1 月 11 日に行われた観測、回収時が南緯 55 度~64.6 度の範囲で 2018 年 1 月 6 日~1 月 11 日に行われた観測である(Fig. 3)。データは海面から海底直上 20m 以内の範囲で観測された CTD データと、各キャストで 24 層のボトルデータが得られる。CTD センサーは、SBE 社製 SBE9plus が使用され、溶存酸素量は RINKO-III、SBE43 によって観測されている。データの校正は Global Ocean Ship-Based

Hydrographic Investigation Program (GO-SHIP)の推奨する方法で校正されている。また、前述したように、本研究では南緯 61 度における CTD 観測の塩分プロファイルに係留観測によって得られた塩分プロファイルの補正に用いた。

### 2.3. 衛星海面高度計 再解析データ

観測期間における海面高度、流れ場の空間分布を把握するため、Copernicus-Marine environment monitoring service (以下、CMEMS) 配布の衛星観測、再解析データセットを解析に使用した。CMEMS では Absolute Dynamic Topography (以下、ADT), Sea Level Anomaly (以下、SLA) 及び、これらのデータから算出された地衡流と地衡流のアノマリーがグリッドデータとして提供されている。空間解像度は 0.25 度、時間解像度は 24 時間である。本研究ではこれらのデータを用いて CMEMS から得られた海面地衡流速と、係留観測によって得られた各層の流速の時系列変化を比較した他、後述する定義に即したフロントの分布を確認するため、Sea Surface Height (以下、SSH)の算出に SLA を用いた。また、係留点付近における海面高度の分布と変動の空間スケールから、係留観測データから得られた鉛直的な構造の変化とその現象の空間スケールを推察した。

### 2.4. ERA interim 再解析データ

本研究では、海上風から海面に加えられる応力が与える影響についての解析を行うために海上 10m での風速の衛星観測、再解析データセットを用いた。空間解像度は 0.75 度格子、時間解像度は 6 時間である。ここでは、係留系観測データとの時系列変化の比較を行うために、各タイムステップ前後の記録を用いて 1 時間おきのデータとなるように線形内挿補間を施した。

### 2.5. AMSR2 海氷密接度データ

前述した海面高度や海上風のデータセットを用いた議論について、より正確な現象理解をするために、衛星から得られた海氷密接度のグリッドデータを合わせて解析に用いた。このデータセットは NIPR/ADS によって公開されており、空間解像度は 10km 格子のポーラステレオ座標、時間解像度は 24 時間で、海氷の密接度が百分率で示されている。観測は Ascending と Descending の 2 回が 1 日に行われており、海氷密接度の値はこの 2 回の観測の平均値である。しかし、2017 年 9 月 28 日と 2017 年 11 月 25 日は東南極では一度のみの観測だったため、2 回の平均値ではなく、1 回の値を直接用いた。本研究では、これを CMEMS の海面高度データセットと同様の緯度経度 0.25 度格子に再グリッド化することで解析に用いた。

## 第3章 結果

### 3.1. 観測海域の基本構造

係留点を含む東経 110 度に沿った CTD 観測から得られた水温、塩分、密度のプロファイルを Bindoff et al. [2000]で示された水塊定義(Table 2)と比較したところ、係留点に位置する東経 110 度、南緯 61 度には 4000dbar 以深で AABW、約 500~3000dbar の深度帯に MCDW または CDW、上層の約 200dbar 以浅に AASW が分布していることが分かった(Fig. 6)。

次に、係留系投入、および回収時における海鷹丸の CTD 観測の結果から、水温、塩分、溶存酸素量、および中立密度面について、係留点を含む子午面方向の断面構造の特徴を比較した(Fig. 7)。

これらの断面図について、水深 50~150dbar において、低温低塩な AASW が南北に広がり、南緯 61 度以北に 2°C以上の水温極大が水深 500dbar 付近に見られる。溶存酸素量についても同様の深度に極小値が等密度線に沿う形で見られる。塩分は 1000~1500dbar 付近で最も高塩を示している。これらの中層で見られる高温低酸素水塊の下に高温高塩な水塊が分布する構造は Speer et al. [2000]で Fig. 1 のように示されている Upper CDW と Lower CDW の特徴に一致している。また、海底地形に沿うように南緯 60~65 度に分布する、0°C以下、中立密度  $28.27\text{kg/m}^3$  以上で低酸素の水塊は AABW が低緯度側に向かって広がっていく構造であることがわかる。このような子午面方向の水塊分布は、Fig. 1 に示される子午面循環の模式図に酷似した構造であることがわかる。

また、回収時における水温の断面図に見られるように 500dbar 付近に見られる CDW、MCDW は連続的な湧昇構造を示しているわけではないことが分かった。係留系に取り付けられた測器の水温、圧力から各時間における深度 100dbar おきの水温を線形内挿法によって補間し、時系列断面図で表す(Fig. 8)。この水温の時系列断面図から、係留点において約 500dbar 深で数十日の周期で 2°C以上に昇温するイベントが複数回見られた。前述した南北断面図との比較から、係留点の北側に分布する CDW、MCDW が係留点に輸送された場合に見られる時系列変化として考えられる。また、底層に着目すると結氷期前の 6 月下旬には底層の水温 0°C以下の海水の厚さが増加し、0°C以下の海水が海底から約 3700dbar 深まで達していることがわかる。

ここで、係留観測によって得られた流速の時系列データが解析をする上で信頼性の高いデータセットであるかを確かめる必要がある。そこで、係留観測によって得られた各層の流速変動と ADT から算出された海面での流速を比較した。なお、係留点での海水密接度も合わせて比較することで、氷縁に覆われている期間に ADT の精度が低下している可能性も考慮した。その結果、特に海水に覆われていない期間で係留観測データと ADT から得られた地衡流で全層的に一致した変動が見られた (Fig. 9 および Fig. 10)。

また、スティックダイアグラムによって見える流向の時系列変化から全層で同時に流向が数十日の周期で回転していることがわかる(Fig. 11)。その内、5 月までは南北方向に流れの変動が大きく、その中でも南東向きに約 10cm/s ほどの強い流れが多くみられる。一方で 5 月以降は流れが弱まり、流向の変動は東西成分が強くなる。



次に、Sokolov & Rintoul [2007] で定義された SSH と各フロントの関係(Table 3)を用いて、対象海域付近において観測期間で平均した SSH から PF-M, PF-S, SACCF-n, SACCF-s, Bdy の位置を求めた。ここで、SSH は CMEMS で公開された SLA の係留期間平均値と Olbers et al. [1992] で公開された 2500dbar 深基準の mean surface dynamic height climatology を合算して求めた。この結果、基本場として係留点は SACCF-n, SACCF-s の間に位置していることがわかった(Fig. 12)。

一年間を通しての流れ場と空間的な特徴を比較すると、係留期間中の平均流速場は上層 500dbar 深で南東向き、海底直上の 4100dbar 深で南西向きの背景流が存在することがわかる(Fig. 13)。この流向は、上層では SSH の平均場によって定義された SACCF-n の向きに一致する(Fig. 12)。また、底層での流向は海底地形の等深線に沿う向きである(Fig. 13)。一方で、各深度における流速の進行ベクトル図(Fig. 14)から、1 月から 4 月までは全層で南向きの流れが卓越することが分かる。その後、5 月から 9 月までは 500dbar、1000dbar、1900dbar 深では東向きの流れが卓越し、4100dbar 深では強い流れは見られない。その後は 500dbar、1000dbar、1900dbar 深では東西に流れの向きが変動しながら翌年 1 月までに南西向きに流れており、海底付近の 4100dbar 深では強い南西向きの流れとなっている。

### 3.2. 潮汐、慣性周期変動

係留観測期間に卓越する周期的な現象を調べるため、係留系データについて各層における水温、流速のプロファイルでスペクトル解析を行った。投入、回収時の系の上下動による大きなデータの乱れが見られる期間を除き、2017 年 1 月 8 日から 2018 年 1 月 8 日の 1 時間おきの連続的な時系列データに、高速フーリエ変換法によって得た生のスペクトルに等価自由度 5.8 のスペクトルウィンドウを施し平滑化し、パワースペクトル密度を推定した(Fig. 15)。その結果、各流速成分、水温について約 14 時間前後の周期帯にピークが見られた。加えて、流速の東西成分では 24 時間~25 時間の周波数帯に卓越したピークが見られた。さらに、各層の流速について、東西・南北成分から回転スペクトルを解析したところ、反時計周りにのみ 14 時間前後の周期帯にピークが見られた(Fig. 16)。これらの強いピークについて、24~25 時間の周期は主要分潮に一致する。さらに、各プロファイルのスペクトル、回転スペクトルで反時計回りにのみ見られる 14 時間前後の周期は慣性周期に一致する。ここで慣性周期は理論値から、 $T_f = 2\pi/|f| = 13.68$  (h) となる。また、約 1000 時間の周期でエネルギーレベルは極大を示した。

本研究では流れ場と水温分布の変動とそれに伴う、子午面方向の熱輸送について注目するため、Thompson [1983]で紹介された「120i913 filter」によって潮汐、慣性周期、による変動成分を除去した。このフィルターは 241 時間のウィンドウ幅で、観測時系列の最初と最後の 5 日間ずつが失われるが、 $O_1, K_1, Q_1, P_1, M_2, N_2, S_2$ 分潮と 40 時間以下の短周期の変動が消去される。

### 3.3 鉛直モード構造の解析

鉛直構造の変動成分について、卓越する構造の力学的要因を分析するため、流速の各成分、水温について、鉛直構造を主成分分析によって統計的に示した(Fig. 17)。一般的には内部領域の力学モード構造と主成分分析によって得られる各 EOF モード構造を比較するため、順圧成

分として各時分の鉛直平均流を差し引いた各層の流速に対して主成分分析を行う。しかし、本研究ではまず変動の形態を統計的に調べるため、Pena-Molino et al.[2015]の解析方法と同様に鉛直平均流を差し引かず主成分分析を行った。

この結果、水平流速の東西、南北成分で共に EOF 第一モードとして順圧的な構造が得られ、東西成分では 92 %、南北成分では 94%の寄与率であった。EOF 第二モードは上層と下層で流向きが逆転する傾圧構造が見られ、東西成分では 6%、南北成分では 4%の寄与率であった。このことから、係留点における流動は順圧的な構造が卓越していることが分かった(Fig. 17(a), (b))。

一方、水温の変動成分について主成分分析の結果は、EOF 第一モードが 88%の寄与率であり、全層で昇温・低温の変動成分が一貫していることを示す構造だった。また、第二、第三モードでは 700dbar 以浅、中層、底層でことなる水温変動であった(Fig. 17(c))。

また、各 EOF モードの時間係数(Fig. 18)に対して、前述した水温、流速と同様の手法でスペクトル解析を行ったところ、流速の各成分の第一モードでは、特定の周波数ピークは見られなかったが、10 日以上で、第二モードに比べて高いエネルギーレベルを示し、約 40 日周期で極大となった。次に、流速の EOF 第二モードのスペクトルについては全ての周期性で有意なスペクトルは見られなかった。水温については、全てのモードで有意なスペクトルが見られなかった(Fig. 19)。

次に、水平流速の変動について回転成分を踏まえたモード構造を示すため、4 層の流速の東西成分と南北成分を合わせた主成分分析を行った。その結果、第一モードは南東向きに順圧成分が卓越した構造で 55%の寄与率であり、観測期間平均の海面高度場に交差する向きであった。第二モードは順圧成分が卓越した構造であり、各層で第一モードの流向から反時計回りに約 90 度回転した北東向きで、38%の寄与率であった。また、第三モードは上層で南東、底層で北西向きの傾圧構造で 2.7%の寄与率、第四モードは上層で北東、底層で南西の傾圧構造で 1.9%の寄与率であった(Fig. 20), (Fig. 21)。

### 3.4. 流速変動と水温変動の相関

各層の流速の時系列プロファイル(Fig. 9)や水温、流速の EOF 第一モードのスペクトル(Fig. 19)から数十日周期の流速の変動や昇温・低温イベントが存在することは明らかである。次に、この水温、流速変動についての相互依存性の有無と、応答の時間差を検証するため、水温と流速の相互相関について解析した。各層の東西・南北流速と水温について、以下の式でラグ相関係数 $r_{xy}$ を求めた。

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x}_-) (y_{i+\tau} - \bar{y}_+)}{\frac{1}{N} \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right\} \left\{ \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \right\}}}$$

ここで、

$$\bar{x}_- = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} x_i, \quad \bar{y}_+ = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} y_{i+\tau}$$

$x_i, y_i$ は毎時の水温、流速の時系列で、 $\tau$ はラグの時間である。水温と流速のラグを-1200 時間から 1200 時間まで位相をずらして相関係数を算出している。なお、ここで母相関係数の信頼区間は有効無相関時間 $T_e$ と 1 時間おきに得られるデータサンプル数 $N$ より、有効自由度 $N_e$ を

$$N_e = N/T_e$$

として定め、フィッシャーの  $z$  変換を用いて求めた。 $T_e$ は Davis[1976]より

$$T_e = \sum_{\tau=-N}^N \left(1 - \frac{|\tau|}{N}\right) [r_{xx}(\tau)r_{yy}(\tau) + r_{xy}(\tau)r_{yx}(\tau)]$$

として求めた。ここで $r_{xx}(\tau), r_{yy}(\tau)$ はそれぞれラグ $\tau$ とした水温と流速の自己相関係数、 $r_{xy}(\tau), r_{yx}(\tau)$ は水温に対するラグ $\tau$ の流速の相関係数、流速に対するラグ $\tau$ の水温の相関係数を示す。積分期間 $\pm N$ は Nowlin et al.[1985]を参考に観測全期間の 20%で積算している。

ラグ相関解析の結果、ラグの値と相関の変化の関係は全層で同様だったが、1900dbar 深における南北流と水温の間に最も高い相関が見られ、水温と 240 時間先行した流速の間に負の相関( $r_{xy} = -0.45$ )が、水温と 240 時間遅れた南北流速の間に正の相関( $r_{xy} = +0.58$ )が見られた。これは南向きの流れが昇温に 240 時間先行していることを示す。南北流と水温の間では 1000dbar 深でも 1900dbar 深と同程度の相関が見られた。東西流と水温の相関は、南北流の場合と同様に $\pm 240$  時間のラグで相関が高くなるが、相関係数は約 $\pm 0.2$ 程度と、南北流に比べて低かった(Fig. 22)。

また、水温、流速の各 EOF モード時間係数について同様の方法でラグ相関を求めた。その結果、南北流の EOF 第一モードと水温の EOF 第一モードの間に最も強い相関が見られ、水温と 240 時間先行した流速の間に負の相関( $r_{xy} = -0.41$ )が、水温と 240 時間遅れた流速の間に正の相関( $r_{xy} = +0.49$ )が見られた。東西流と水温の鉛直モード構造の間の相関については、東西流の EOF 第一モードと水温の各モード構造の間には目立った相関は見られなかった。一方、流速の各成分の EOF 第二モードと水温の各モードとの相関関係については、水温の EOF 第二モードと 600 時間遅れた東西流 EOF 第二モードの間にのみ、比較的強い負の相関( $r_{xy} = -0.40$ )が見られた(Fig. 23)。また、係留点付近の、中心点(110.125° E, 61.125° S), (110.125° E, -60.085° S)のグリッドにおける SLA と海面の南北流速アノマリーは、Fig. 20(b)と同様に、約 $\pm 240$  時間のラグで相関のピークが見られた(Fig. 24)。これらのことは、昇温、低温化の現象が 480 時間周期の順圧的な南北流の振動によってもたらされることを意味するが、そのメカニズムについては後で考察する。

### 3.5. SSH と比較した時系列変動

フロントの南北変動と、より小さい空間スケールの水塊構造が変動に与えている影響を区別するため、SSH 変動場の空間スケールと係留期間における各層の水温偏差を比較した。

SSH の時間変動性と空間スケールを合わせて比較するために、係留点の他に、係留点を中心

として幾つか距離半径内に中心座標が含まれるグリッドで平均化した SSH の時系列変化を表した(Fig. 25)。この結果、係留点の SSH は半径 100km 以下で見られる時間変動が卓越していることがわかる。特に海氷に覆われていない時期を見ると、係留系の水温データの全層的な変動は主に半径 200km の空間平均の SSH に対する係留点の SSH 偏差と一致している(Fig. 26)。これらのことから、全層で一様な水温変動のイベントに対して半径約 100km のスケールの力学的構造が寄与していることが分かった。ここで、係留点が位置するグリッドの海氷密接度が高い期間における SSH については第 1 章で述べた通り、海氷が混在する海域ではデータセットの海面高度の推定値が実際の海面高度と大きく異なると考えられるため、議論の対象としない。

また、各層の水温変動と海面高度の変動の関係を調べるため、係留点における SSH と各層における水温のラグ相関を結氷期前の 6 月 11 日までの時系列で求めた。解析の結果、各層でラグ 0 時間の時に最も相関が高く、海底付近の 4100dbar 深を除いて 0.5 以上の相関係数だった(Fig. 27)。

### 3.6. 海面流速場の空間変動

中規模スケールの流れ場について時間変動を把握するため、衛星データの SLA を用いて東西、南北方向に拡張した時系列変動を解析した。そこで、SLA から得られた海面地衡流速アンマリーの東西成分から、係留点より低緯度側では数か月に渡り定常的な流れ場が見られる一方で、係留点の位置する南緯 61 度では、中規模スケールの流れ場の構造が西進する特徴が見られた(Fig. 28)。この西進する現象は特に海氷に覆われていない夏季に見られる。Hovmöller 図より、係留点を含む南緯 61 度では平均的な西進する速度は 0.058 (m/s) と推算された。また南北流の東西方向の変動は約 220km の波長としてとらえることができる。衛星観測から得られる海面流速の変動は、係留点において係留観測から得られる鉛直的な流れの変動と同期していることがわかっている(Fig. 9)。この波動の力学的な要因と循環構造への影響については後で考察する。

## 第4章 考察

### 4.1. 数十日周期の変動

衛星海面高度計から得られた海面流速場の変動は、波動が西進する特徴から、ロスビー波の西進による現象と考えられる。そこで、本研究ではロスビー波としての現象の妥当性を議論した上で、海面で見られる流速場と係留系観測によって捉えられた水温、流速の鉛直構造の変動関係について考察する。

初めに観測期間で一様な東西流が存在する場合の渦度方程式を導き、ロスビー波の伝播速度と波長の分散関係式を導出する。

まず、東向きの流速を $u$ 、北向きの流速を $v$ 、海面高度を $\eta$ 、コリオリパラメータ $f$ の緯度変化率 $\beta = df/dy$ として $f = f_0 + \beta y$ より、 $\beta$ 平面における二次元非圧縮流体における東西・南北成分の運動方程式は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right] u - (f_0 + \beta y)v &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \left[ \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right] v + (f_0 + \beta y)u &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{aligned}$$

この二式をもとに、渦度方程式は流線関数 $\psi$ を用いて

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta \psi + \frac{\partial(\psi, \Delta \psi)}{\partial(x, y)} + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$$

と表される。ここで、一様な東西流 $U_0$ を考える場合、東西流の時間平均成分 $\bar{u} = -\partial \bar{\psi} / \partial y = U_0$ より、流線関数を

$$\psi(x, y, t) = -U_0 y + \psi'(x, y, t)$$

として、微小擾乱 $\psi'(x, y, t)$ に対する線形化した支配方程式を求め、次式を得る。

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right) \Delta \psi' + \beta \frac{\partial \psi'}{\partial x} = 0$$

次に、正弦波解 $\psi'(x, y, t) = \text{Re}[\Psi_0 e^{i(kx + ly - \omega t)}]$ を上式に代入し、分散関係式

$$\omega = U_0 k - \frac{k\beta}{k^2 + l^2}$$

を得る。ここで、伝播速度  $c$  と角速度  $\omega$  の関係  $c = \omega/k$  であり、波長が東西、南北に一樣と仮定すると、伝播速度は

$$c = U_0 - \frac{\beta}{k^2 + l^2} = U_0 - \beta \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2$$

と表される。

この式をもとに、SLA から得られた海面流速アノマリー場の変動から得られた伝播速度と波長の関係を比べる。基本場としての東西流速は係留観測期間中における鉛直平均流速から、 $U_0 = 0.061 \times 10^{-2}(\text{m/s})$ とした場合、伝播速度  $c=0.058 (\text{m/s})$ に即したロスビー波の波長  $\lambda$  は  $\lambda = 228\text{km}$ 、周期は 1092 時間となる。この波長は南北流の東西分布の一波長分とおおよそ一致しており、Hovmöller 図(Fig. 28)で見られた西進する特徴はロスビー波の伝播と考えられる。

次に、ロスビー波の西進と 3.4.節で得られた水温、流速の鉛直構造の相関を比較し、ロスビー波によってもたらされる鉛直構造の変化について考察する。

水温の時系列変化と中規模スケールの SSH の変動の一致(Fig. 26)から、水温場の変動は順圧的流れ場によるものと考えられる。水温と南北流速の EOF 第一モードの相互相関において、 $\pm 240$  時間のラグで相関係数のピーク見えることから、南北流と水温に相関のある力学的構造は構造の西端から東端までが係留点を通るまでに 480 時間掛かっていると考えられる。先の衛星データから得られた西進する伝播速度  $c=0.058 (\text{m/s})$ から、480 時間での移動距離は 100.22km であり、これはおよそロスビー波の半波長分に一致する。また、主成分分析の結果得られた流速の EOF 第一モードの時間関数と各時分における鉛直平均流速の時系列を比較したところ、変動パターンは一致していた(Fig. 29)。このことから、主成分分析によって得られた第一モードの構造がほぼ順圧的ロスビー波によるものであると考えられる。これらの関係から、係留点で見られる変動は、直径約 220km の構造を持った順圧ロスビー波の伝播によるものであり、その流れに伴い CDW が南下していると考えられる。

#### 4.2. 季節変動の形成される要因について

第 3 章 1 節で示したように、進行ベクトル図(Fig. 14)より、係留点における流れの構造に季節的な変動が見られた。この季節変動を形成する力学的な要因として、海水域の広がりに伴う海面応力の変化について考察した。

まず、海水の分布をもとに夏季、冬季を定義する。AMSR2 から得られた係留点における海水密接度(Fig. 10)をもとに、期間を結氷期前の 2017 年 1 月 13 日~6 月 11 日まで、海水期の~11 月 7 日まで、海水融解期の~2018 年 1 月 3 日までの 3 期間に分けて解析した(Fig.30)。最初の期間では流速が反時計回りのスパイラル構造であり、前述した全期間を通じた基本場の流速構造に類似していた。冬季（海水期）には中層から上層まで真東に近い流向であり、底層での流れは海底地形勾配に沿う方向ながらも極めて弱い流れだった。融解期は全層的に海底地形の勾配に沿った流れで、底層で上層よりも強く傾斜流のような鉛直構造であった。

次に、季節的な海水分布の変化に伴って、海面に加わる風応力が季節的に変動する可能性に

ついて考察する。

風応力 $(\tau_x, \tau_y)$ を計算するとき用いる抗力係数は Large and Pond[1981]より、非海氷域において、

$$C_{Do} = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-3} & (4 \leq V_{10} < 11[m/s]) \\ (0.49 + 0.065V_{10}) \times 10^{-3} & (11 \leq V_{10} \leq 25[m/s]) \end{cases}$$

と定めた。

さらに、Edgar et al.[1984]で提唱された南大洋氷縁域における海上風と海氷の観測値から得られた海氷密接度に依存する抵抗係数の補正值 $C_D$ を用いる。また、Edgar et al.[1984]では海氷密接度 $c_{ice}$ が 0.8 以上の場合は海氷密接度の増大に伴って、 $C_D = C_{Do}$ に近づけることを推奨しているためこれらをもとに $C_D$ を以下のように設定した。

$$C_D = \begin{cases} C_{Do}\{1 + 2.4 \tanh(2.5 \times c_{ice})\} & (0 \leq c_{ice} \leq 0.8) \\ C_{Do}\{3.314 - 57.85 \times (c_{ice} - 0.8)^2\} & (0.8 \leq c_{ice}) \end{cases}$$

これらをもとに、Large and Pond[1981]より、風応力の東西、南北成分 $\tau_x$  ,  $\tau_y$  について

$$\tau_{x[N/m^2]} = \rho C_D \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \times u_{10}$$

$$\tau_{y[N/m^2]} = \rho C_D \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \times v_{10}$$

として求めた。ここで、 $\rho$ は大気密度であり、ここでは $\rho = 1.22(kg/m^3)$ で一定とした。また、海上風の変動は海洋に比べて激しく、短周期の変動を多く含んでいるため、241 時間の移動平均を施した上で解析に用いた(Fig. 31)。この結果、係留点では海氷期の東向きの風応力が強化され、6 月下旬、9 月上旬において特に東向きの風応力が卓越した(Fig. 32)。ACC は強い偏西風から与えられる風応力によって、東向きの流れが強化されていることは広く知られている。海氷分布を考慮した風応力場の変動から、季節海氷域でもある ACC 南限では、冬季において氷縁に存在する流氷によって東向きの応力が強化されている。このことによって冬季に東向きの流れが強くなっている可能性がある。

ここで、定常状態を仮定した場合、内部領域における傾圧的な南北流について、 $\beta$ 平面における線形の渦度方程式

$$f \frac{\partial w}{\partial z} = \beta v$$

で表される。風応力の発散・収束によって生じるエクマン湧昇・沈降の鉛直流速 $w_E$ は

$$w_E = \frac{1}{f\rho_0} \left( \frac{\partial\tau_y}{\partial x} - \frac{\partial\tau_x}{\partial y} \right)$$

対象海域において、海底地形勾配を無視し、水深を  $H$  とすると、 $\partial w/\partial z = w_E/H$  より、

$$\frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial\tau_y}{\partial x} - \frac{\partial\tau_x}{\partial y} \right) = \beta v$$

となり、風応力の渦度と  $\beta$  効果による渦度の伸縮が釣り合うことに伴った内部領域における南北流によるスベルドラップ輸送が示され、鉛直平均流速が上式の  $v$  となる。ここで、風応力の渦度については、夏季には風応力の回転成分が発散場となる。一方で冬季には氷縁域で収束場となる (Fig. 33)。ここでは、現場観測値より  $\rho_0 = 1030(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、 $H = 4300\text{m}$  とおいて、スベルドラップ輸送による鉛直平均流速  $v$  を求めた。この方法を基に、スベルドラップ輸送による南北輸送量推定と、500dbar 以浅は外挿したうえで求めた係留観測による各期間の鉛直平均流速を比較した (Table 4)。その結果、各期間での南北流の流向は解析解と実測値と一致し、夏季に南向き、冬季に北向きの流れだった。しかし、スベルドラップ輸送による流速は夏季では実測値より一桁小さく、冬季では実測値より一桁大きかった。

#### 4.3. 熱フラックスの推算

観測点における熱輸送の子午面方向の循環を考察するために係留観測から得られた各層の水温と流速から一年間の熱フラックスを推算した。ここで、全層で等しい条件で熱フラックスを推算するために、結氷水温の  $-1.8^\circ\text{C}$  を基準値をとって毎時の東西、南北方向の熱フラックス  $F_{(x,y)}(\text{cm} \times \text{C}/\text{s}) = (uT_r, vT_r)$  の観測期間平均値を求めた (Table 5)。この結果、熱フラックスの鉛直構造は、平均流速の鉛直流速におおよそ一致する構造で、流速の変動成分による熱輸送に比べ、平均流による熱輸送の寄与が大きいことが分かった。また、平均海面高度場に沿った向きをフロントとした場合に、いずれの深度でもフロントを横切って南へ熱を輸送する成分を示した。一方で、500dbar, 1000dbar 深において、フロントに直交する成分に比べフロントに沿った成分の熱フラックスが大きいことが分かった (Fig. 34)。一般的に、極域全体の昇温について議論する際にはフロントを横切る熱フラックスを評価するが、このような南東向きの恒常的な熱輸送は、高緯度の局所的な海域への熱輸送には大きく関与している可能性があり、その影響の評価は今後の重要な課題であると考えられる。



## 第5章 まとめと今後の課題

### 5.1. まとめ

本研究では、一年間の係留観測データを主とした時系列解析の結果から、ACC 南限域における流れ場と輸送量の変動を説明する上で大きく分けて二つの周期性が見られた。これまでの研究では海面における力学高度場のみから変動性を議論するに留まっていたが、長期係留観測によって中層から底層までの水温分布、鉛直流速構造を捉えることで以下の5点が明らかになった。

- 1- 主成分分析の結果から、10cm/s以上に及ぶ順圧的な流れが卓越することがわかった。その変動は数十日周期であり、特に南北方向の流れで卓越して見られた。
- 2- SSH から係留点は SACCF 域にあり、係留観測で得られた水温変動と、半径 100km 以下の空間スケールの海面高度変動が一致していた。
- 3- 海面流速場の西進について考察した結果、ロスビー波の西進によるものであると考えられた。また、ロスビー波に由来する南北流の変動は順圧的であり、水温との相関関係から、熱の南北輸送に寄与していることが分かった。
- 4- ACC 南限域における流れは季節変動性があり、夏季には南向きの輸送が卓越し、冬季には東向きの流れが卓越する。この要因として風応力場と海氷分布の季節変動の影響が考えられたが、詳細な機構については今後の課題である。
- 5- 全層でフロントを横切る南向きの熱輸送成分が示された。500, 1000dbar 深では南東向きのフロントに沿う恒常的な熱輸送が卓越していた。

### 5.2. 今後の課題

本研究の結果から、フロント域でロスビー波となって西向きに伝播されることによって SACCF のさらに南側へ断続的な熱輸送がされていることが示唆された。一方で、このロスビー波の構造について中規模渦としてフロントから完全に分離したものなのか、蛇行としてフロントに拘束されたままの構造との区別は出来ていない。Phillips & Rintoul [2000]では、ACC の流軸に近い SAF において、タイムステップごとに鉛直シアが最も卓越する流向を用いて座標系を回転させることでフロントの蛇行と渦を分離していた。しかし、より順圧性が卓越する SACCF 域では、タイムステップごとに座標軸の方向が大きく変化するため、この方法によって座標系を設定することは実用的ではなかった。そのため、渦構造による CDW の輸送量を積算するためには、この2つの構造を区別することが今後の課題である。

衛星データの解析について、本研究では係留観測から得られた流速構造の変動とフロントの空間構造の変動を比較する上で衛星海面高度計を用いたが、季節海氷域では冬季の海面高度分布についてはデータセットの信頼性が改善は出来ていない。特に、本研究の結果から、海氷に覆われている期間とそうでない期間における定常的な流速構造に違いがある事が明らかになったので、この流速構造の季節変動性についてより詳細な議論をするためには、海氷域における衛星データの解析について、補正が必要とされる。

本研究では、係留観測によって得られた流速構造の季節変動について、季節海氷域と解放海域における風応力の違いを考慮した上でスベルドラップ輸送にもとづいて冬季の輸送量推定を行ったが、季節的な輸送量の特徴の一致は見られた一方で、推算された南北流速は係留観測の結果と大きく異なった。この要因として順圧ロスビー波が卓越しているため、正確な風成循環の構造を捉えるためには時間変動成分を考慮した非線形の効果と、海底における形状抵抗の効果を考慮した渦度方程式の解析が必要と考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、これまで丁寧かつ根気強くご指導、ご鞭撻をいただきました北出裕二郎教授に多大なる感謝の意を表します。また、プログラミングや人工衛星データセットの解析等について多くのご助言をいただいた溝端浩平助教、解析手法についてのご助言をいただいた嶋田啓資特任助教に深く感謝いたします。

南極観測におきましては、非常に厳しい航海の中で係留観測、CTD 観測の実施にご協力いただいた海鷹丸乗組員、専攻科の皆様に深くお礼申し上げます。

そして、これまでの観測航海、日々の研究で苦楽を共にしてきた Matheus Azevedo さんをはじめとした海洋物理学研究室の先輩後輩、同期の皆様に心より感謝申し上げます。

本研究に使用したデータのうち、海面高度計による衛星観測データは Copernicus-Marine environment monitoring service、海水密接度は国立極地研究所・Arctic Data archive System (NIPR/ADS) のホームページ、海上風は European Centre for Medium-Range Weather Forecasts のホームページからダウンロードし、使用させていただきました。ここに深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- Bindoff, N.L., Rosenberg, M.A., Warner, M.J., On the Circulation and Water Masses over the Antarctic Continental Slope and Rise between 80 and 150°East, *Deep-sea Research II*, Vol.47, 2299-2326, 2000.
- Davis, R.E, Predictability of Sea Surface Temperature and Sea Level Pressure Anomalies over the North Pacific Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, Vol.6(3), 249-266, 1976.
- Edgar, L.A., Walter, B.T. III, Stephen, F.A., Atmospheric boundary-layer modification, drag coefficient, and surface heat flux in the Antarctic marginal ice zone, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol.89(C1), 649-661, 1984.
- Gille, S.T., Scales of spatial and temporal variability in the Southern Ocean, *Journal of Geophysical Research*, Vol.101, 8759-8773, 1996.
- Graham, J.W, Karen, J.H, David, P.S, Eddy heat fluxes from direct current measurements of the Antarctic Polar Front in Shag Rocks Passage, *Geophysical Research Letters*, Vol.35, L06602, 2008
- Jacobs, S.S., Bottom water production and its links with the thermohaline circulation, *Antarctic Science*, Vol.16(4),427-437,2004.
- Large, W.G., and Pond, S., Open Ocean Momentum Flux Measurements in moderate to Strong Winds, *Journal of Physical Oceanography*, Vol.11, 324-336, 1981.
- Nowlin, W.D., Jr., Worley, S.J., and Whitworth, T. III, Methods for Making Point Estimates of Eddy Heat Flux as Applied to the Antarctic Circumpolar Current, *Journal of Geophysical Research*, Vol.90, 3305-3324, 1985.
- Olbers, D., V. Gouretski, G. Seiß, and J. Schröter, *Hydrographic Atlas of the Southern Ocean*. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, 17 pp,82 plates,1992.
- Orsi, A.H., T.W. Whitworth III, and W.D. Nowlin Jr., On the Meridional Extent and Fronts of the Antarctic Circumpolar Current, *Deep-sea Research*, Vol.42(5), 641-673, 1995.
- Peña-Molino, B., McCartney, M.S., Rintoul, S.R., Direct observations of the Antarctic Slope Current transport at 113°E, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol.121, 7390-7407, 2015.
- Phillips, H.E., Rintoul. S.R., Eddy Variability and Energetics from Direct Current Measurements in the Antarctic Circumpolar Current South of Australia, *Journal of Physical Oceanography*, Vol.30, 3050-3076, 2000.
- Sokolov, S. and Rintoul S.R., Multiple Jets of the Antarctic Circumpolar Current South of Australia, *Journal of Physical Oceanography*, vol.37, 1394-1412, 2007.
- Speer, K., Rintoul, S.R., Sloyan, B., The Diabatic Deacon Cell, *Journal of Physical Oceanography*, Vol.30,3212-3222,2000.

Thorp, S.E., Heywood K.J., Brandon M.A., Stevens D.P., Variability of the southern Antarctic Circumpolar Current front north of South Georgia, Journal of Marine Systems, Vol.37, 87-105, 2002.

CMEMS のホームページ

<http://marine.copernicus.eu/faq/ssaltoduacs-integrated-sealevel-anomalies-products-changes-updates/>

ECMWF のホームページ

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

国立極地研究所・Arctic Data archive System (NIPR/ADS) のホームページ

<https://ads.nipr.ac.jp/portal/kiwa/Summary.action?selectFile=A20170123003&downloadList=&scr=top>

## 図表

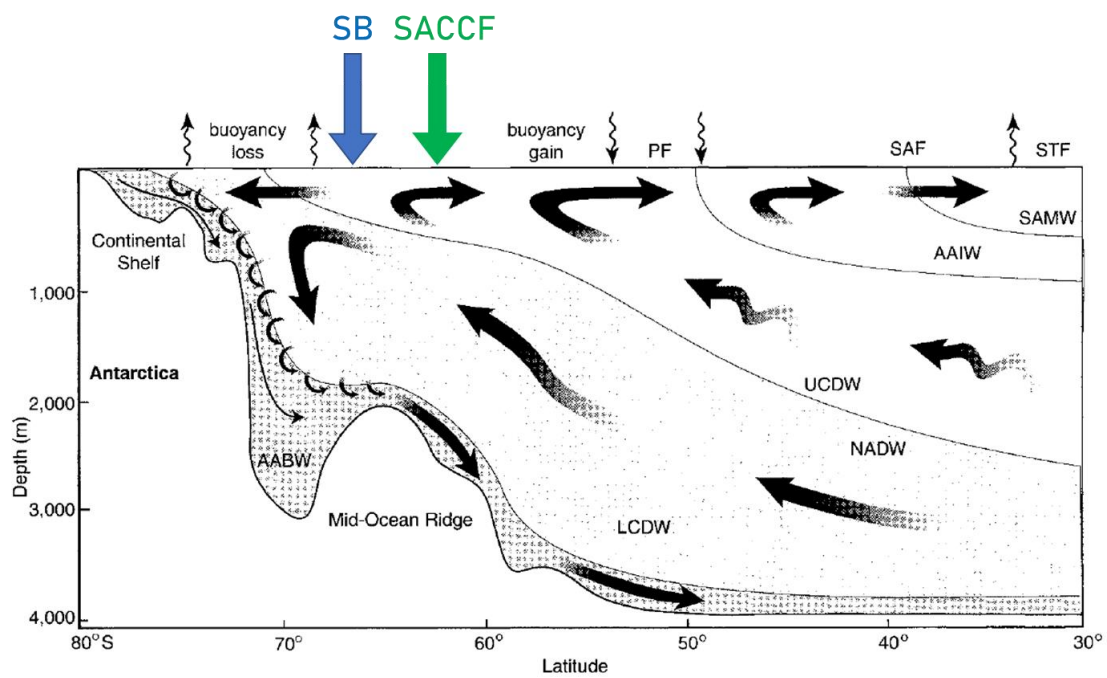


Fig. 1 南大洋における子午面循環の模式図と ACC 南限域のフロント位置 Speer et al. [2000] に加筆。

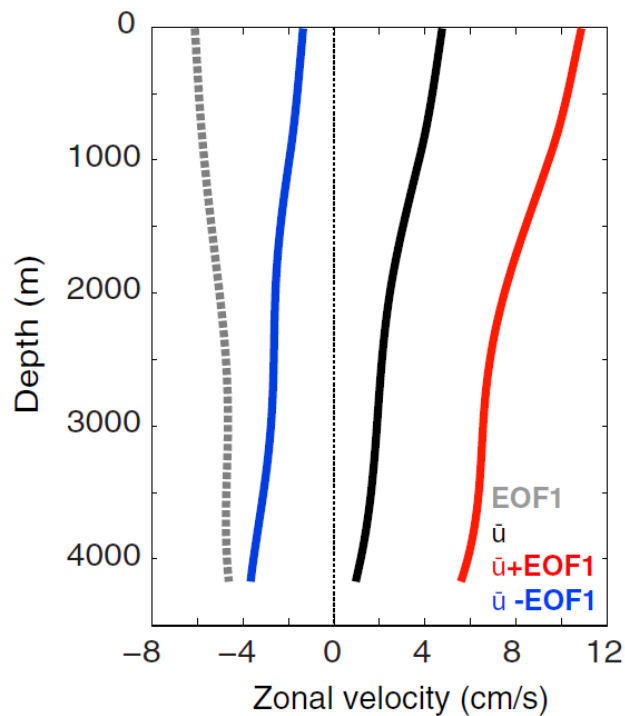


Fig. 2 南緯 62 度，東経 112 度における係留観測から得られた東西流の EOF 第一モードと時間平均流の鉛直プロファイル。EOF 第一モードの寄与率は 97% Pena-Molino et al.[2015]より引用。

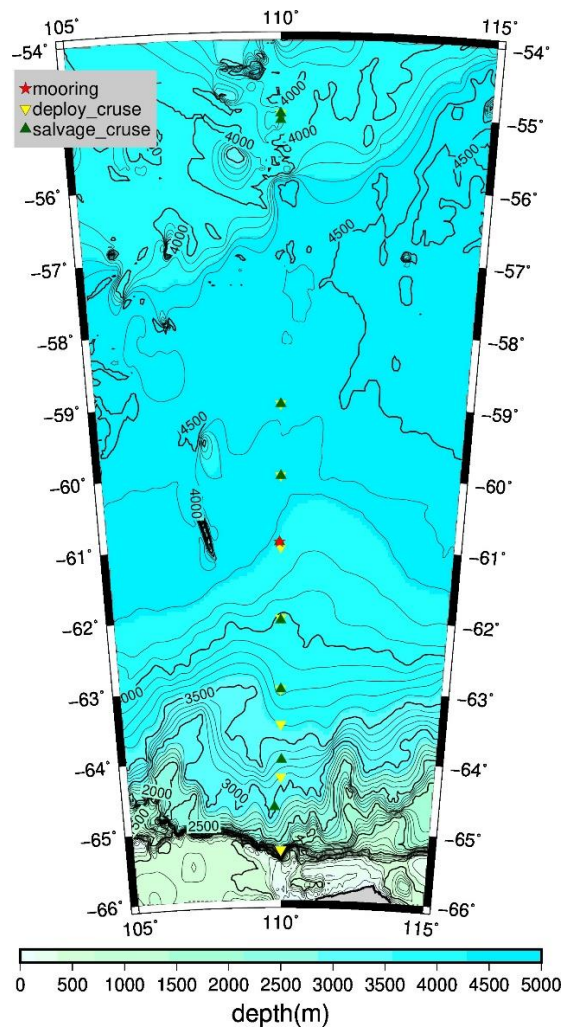


Fig. 3 海鷹丸による CTD 観測及び係留系の観測点と海底地形。



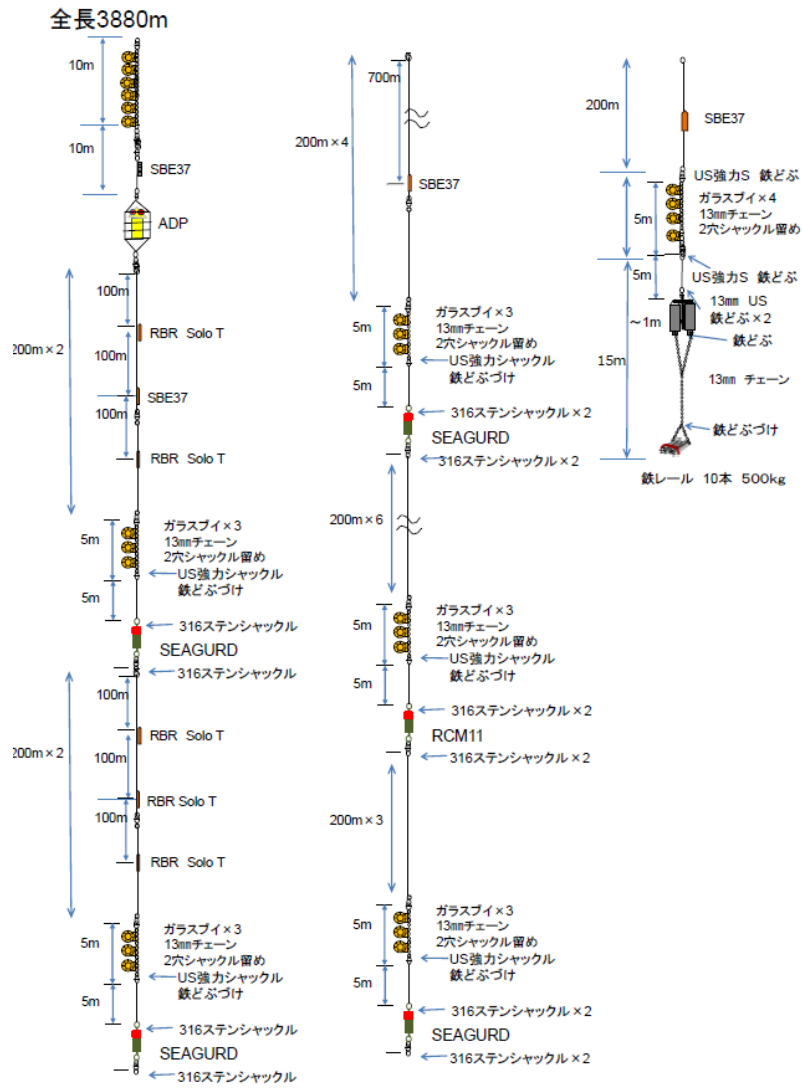


Fig. 4 係留系構成図。

Table 1 係留系に取り付けられた測器の一覧、想定深度は設計時に想定された観測深度、伸張時平均圧力は観測期間において、系の沈み込みがない期間の平均圧力深度を示す。各測器の圧力、水温、塩分、水平流速の観測記録の有無を○と-で表した。

測器名	想定深度(m)	伸張時平均圧力(dbar)	データ間隔	圧力	水温	塩分(電気伝導度)	流速
SBE37	430	10.3	1h	○	○	○	-
ADP	440	19.1	1h	○	-	-	○
RBR	520	-	5min	-	○	-	-
SBE37	620	221.2	1h	○	○	○	-
RBR	720	-	5min	-	○	-	-
SEA GURD	849	489.7	1h	○	○	-	○
RBR	950	-	5min	-	○	-	-
RBR	1050	-	5min	-	○	-	-
RBR	1150	-	5min	-	○	-	-
SEA GURD	1279	962.0	1h	○	○	○	○
RBR	1490	-	5min	-	○	-	-
SEA GURD	2135	1915.2	1h	○	○	○	○
SBE37	2880	2729.5	1h	○	○	○	-
RCM11	-	-	-	-	-	-	-
SEA GURD	4051	4084.3	1h	○	○	-	○
SBE37	4230	4291.9	1h	○	○	○	-

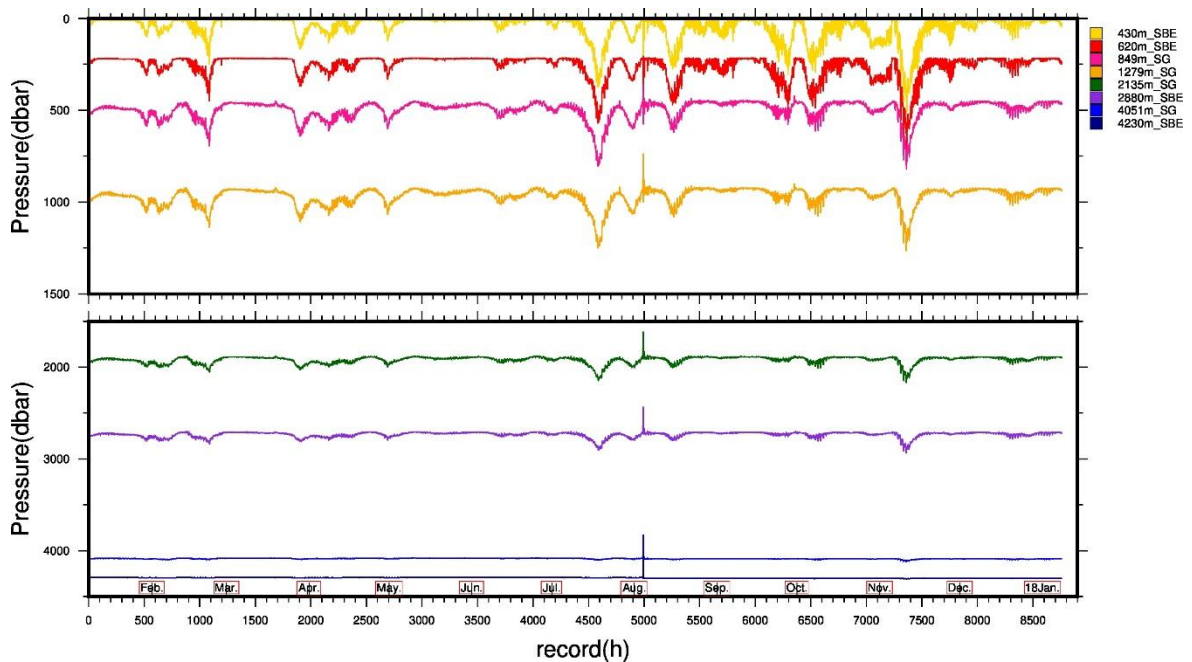
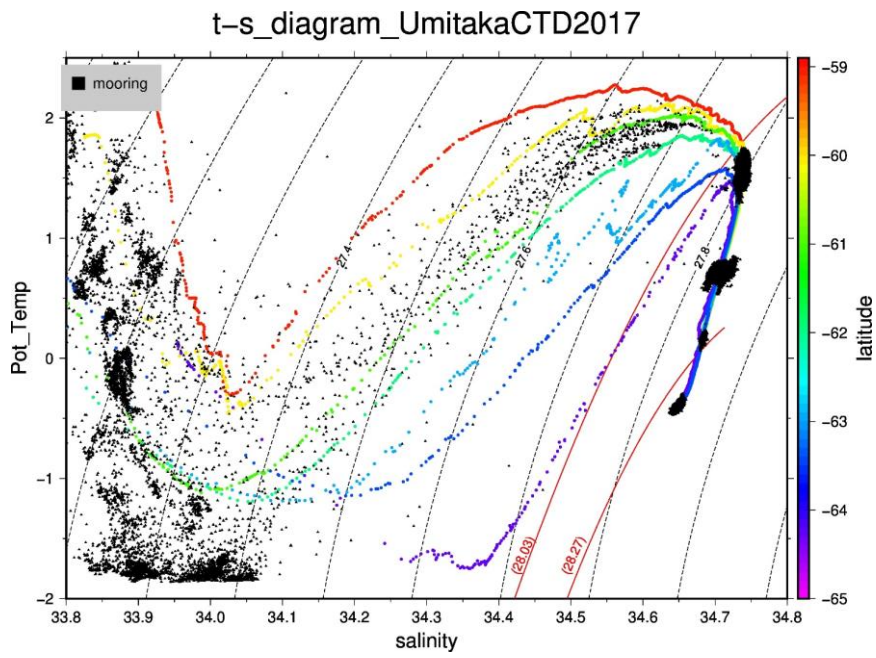


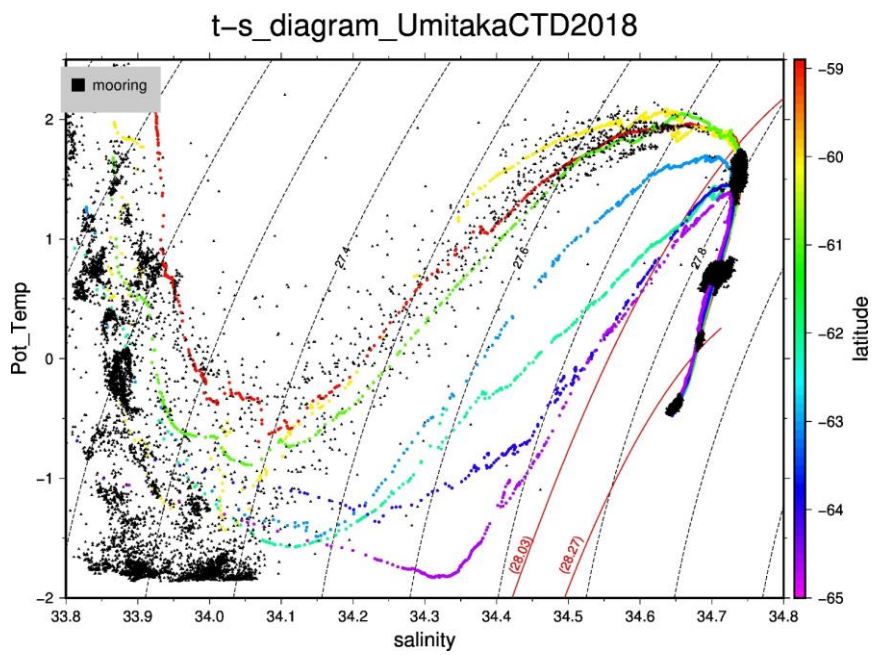
Fig. 5 係留系に取り付けられた各圧力計から得られた圧力の時系列データ、凡例は Table 1 に示した想定深度と測器名(SBE=SBE37, SG=SEA GURD)を表す。

Table 2 Bindoff et al. [2000]で示された南大洋の水塊定義。

	$\gamma$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$S$ (pss)
AASW	$< 28.03$	$-1.84-2.0$	$> 34$
CDW	$28.03 < \gamma < 28.27$	$> 1.8$	$\sim 34.7$
MCDW	$28.03 < \gamma < 28.27$	$< 1.8$	$< 34.7$
AABW	$> 28.27$	$-1.7 < \theta < 0$	$34.65 < S < 34.72$
RSBW	$> 28.27$	$\sim -0.4$	$> 34.68$
ADLBW	$> 28.27$	$< 0.5$	$34.66 < S < 34.68$
SW	$> 28.27$	$< -1.7$	$< 34.72$



(a)



(b)

Fig. 6 海鷹丸による CTD 観測と 1 年間の係留系観測から得られた T-S 図、黒点線は 0dbar 基準のポテンシャル密度、赤線は中立密度 $\gamma^n=28.03, 28.27$  の等値線を示す。(a) 係留系投入時の航海での CTD 観測と係留観測全期間の T-S 図、(b) 係留系回収時の航海での CTD 観測と係留観測全期間の T-S 図。

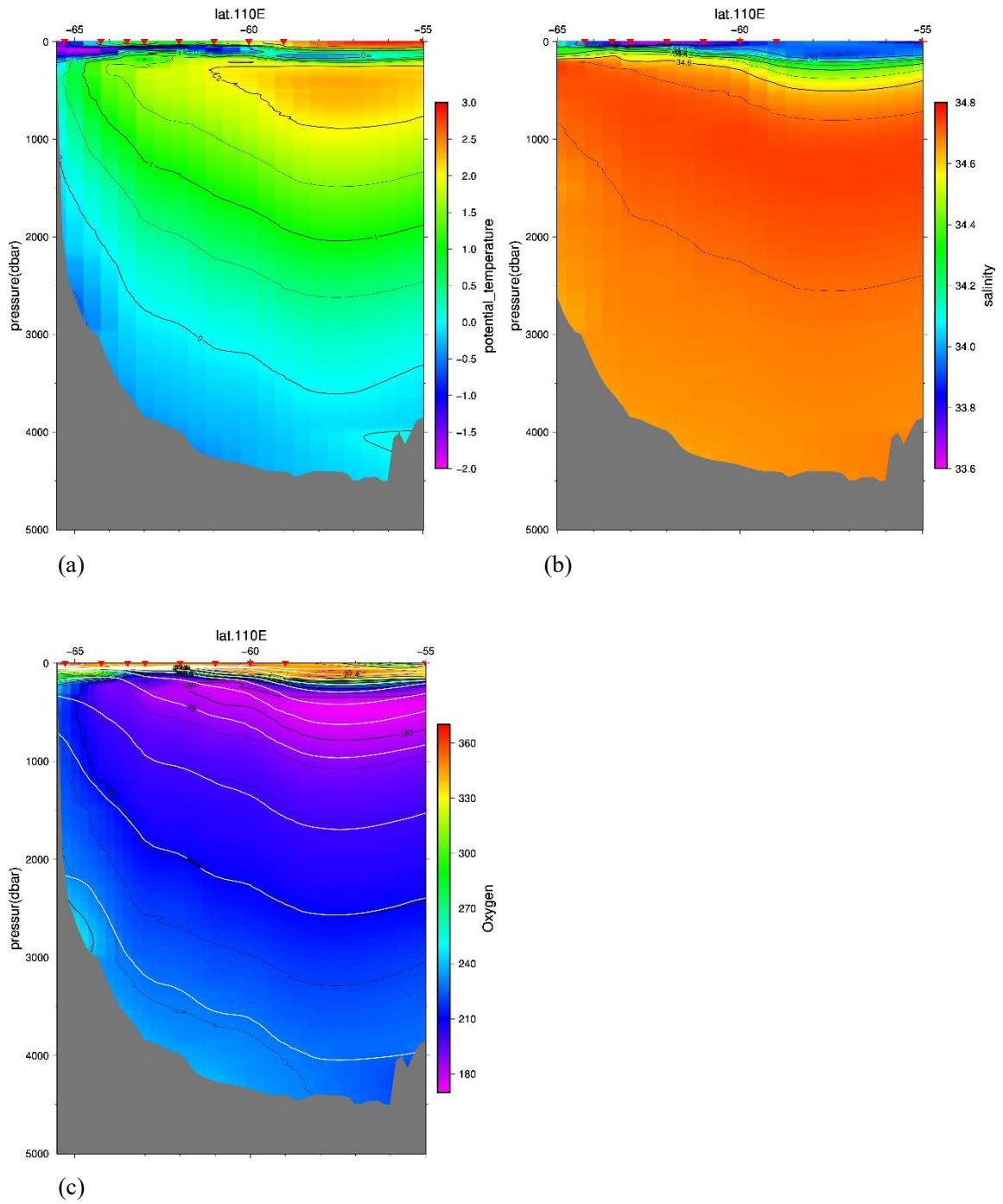
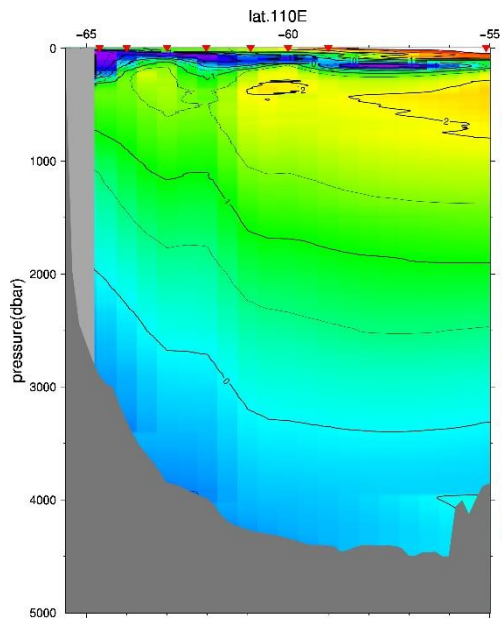
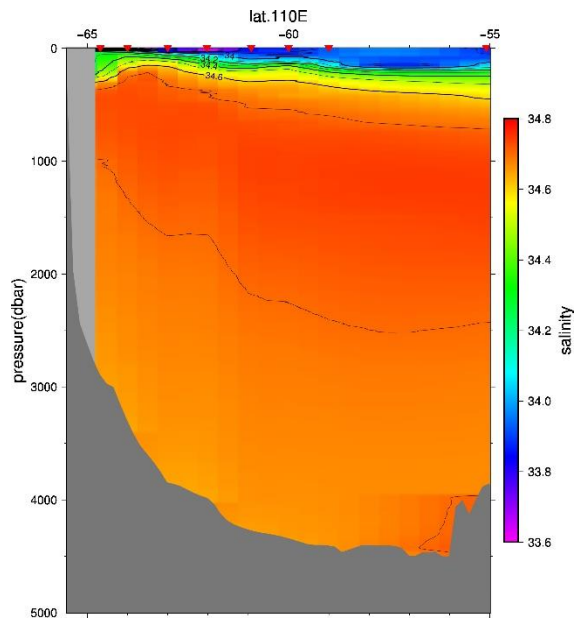


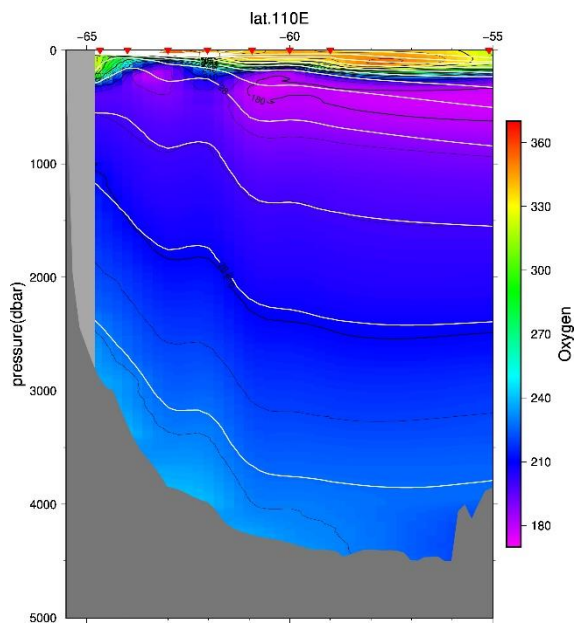
Fig. 7 海鷹丸 CTD 観測の水温、塩分、子午面断面図 (a) 係留系投入時、ポテンシャル水温断面図, (b) 係留系投入時、塩分断面図, (c) 係留系投入時、溶存酸素量と中立密度(黄色線)の断面図, (d) 係留系回収時、ポテンシャル水温断面図, (e) 係留系回収時、塩分断面図, (f) 係留系回収時、溶存酸素量と中立密度(黄色線)の断面図。



(d)



(e)



(f)

Fig. 7 のつづき

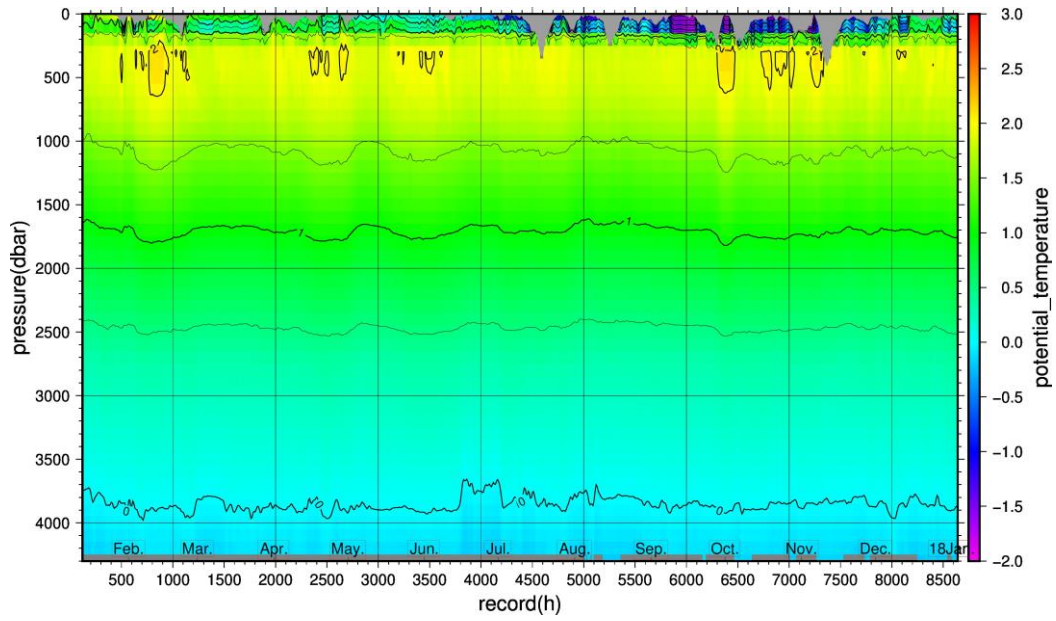
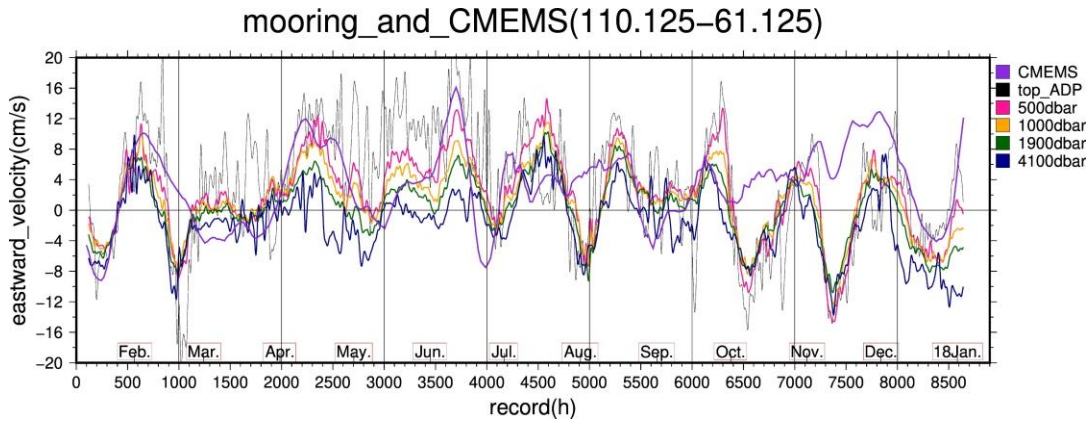
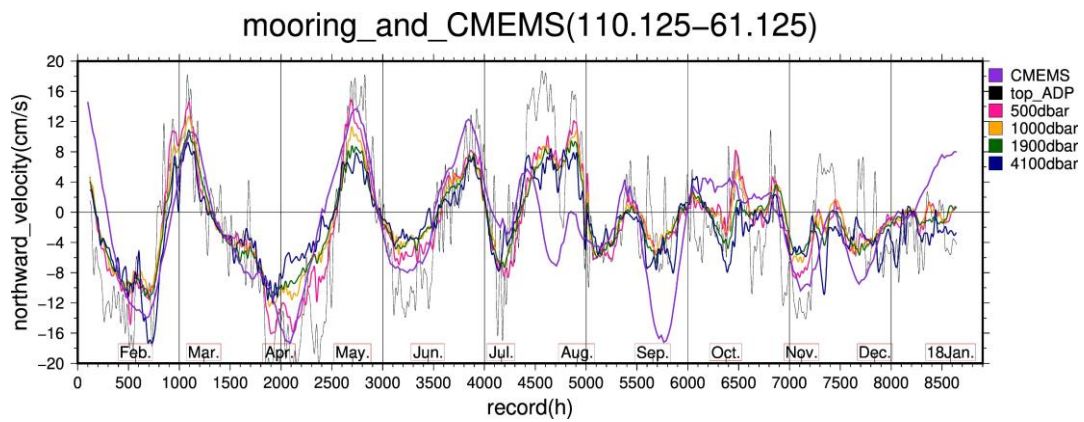


Fig. 8 係留系観測によって得られたポテンシャル水温の時系列断面図、係留系に取り付けられた測器の水温、圧力から各時間における深度 100dbar おきの水温を線形内挿法によって補完した。欠損値は灰色で示す。



(a)



(b)

Fig. 9 係留観測と海面高度から得た各層と海面における流速の時系列、(a)東西成分、(b)南北成分。

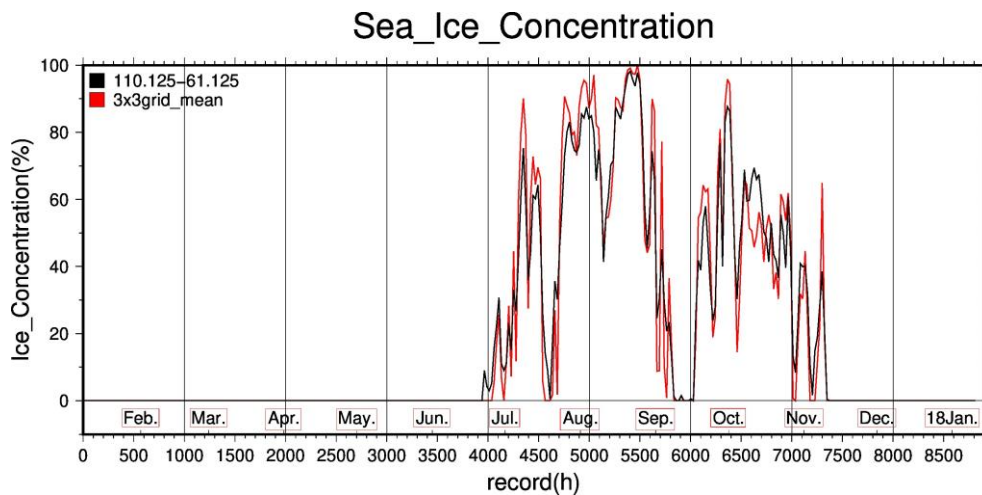
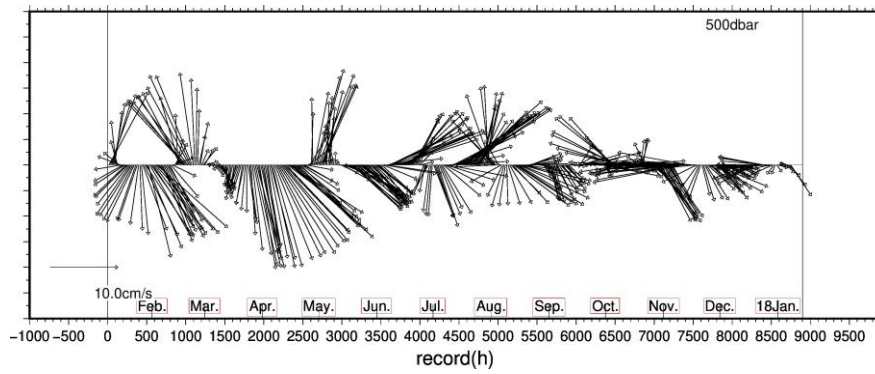
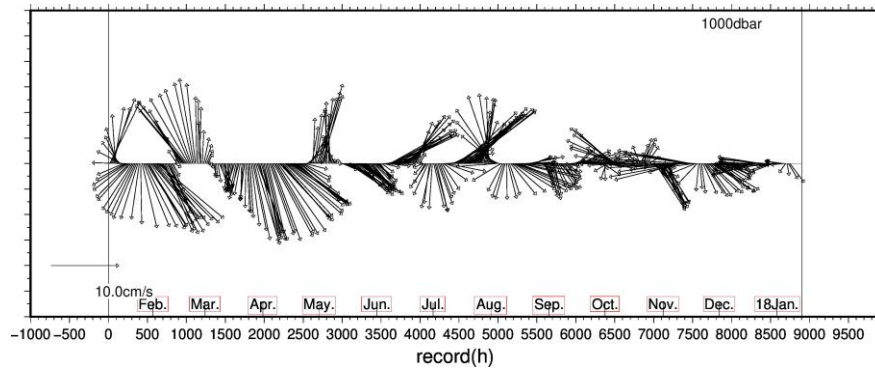


Fig. 10 AMSR2 から得た係留点における海氷密接度の時系列。中心が(110.125°E,61.125°S)のグリッド一点での時系列と 3×3 グリッドの移動平均した値の時系列。

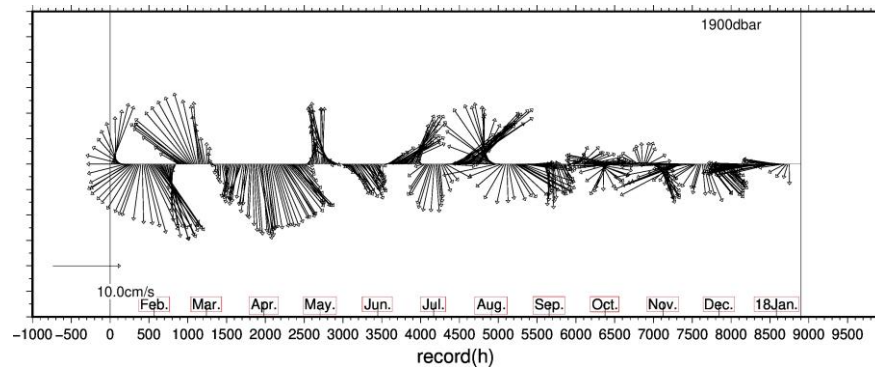




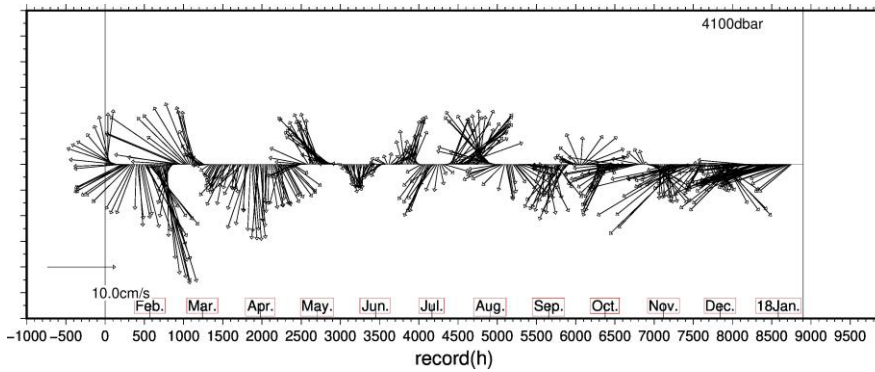
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 11 係留系観測から得た各層の流速のスティックダイアグラム、(a) 500dbar 深, (b) 1000dbar 深, (c) 1900dbar 深, (d) 4100dbar 深。

Table 3 Sokolov & Rintoul [2007] で定義された SSH と各フロント（Subantarctic Zone, Subantarctic Front, Polar Front, Southern Circumpolar Current Front, Southern boundary of the ACC, -N,-M,-S はそれぞれ北限、中心、南限を意味する）の関係。

Fronts	Sector 100°-130°E			Sector 130°-160°E			Sector 160°E-180°			100°E-180° region
	Mean	Total std dev	Mesoscale std dev	Mean	Total std dev	Mesoscale std dev	Mean	Total std dev	Mesoscale std dev	Mean
SAZ	2.21	0.036	0.022	2.18	0.035	0.018	2.16	0.040	0.024	2.18
SAF-N	1.98	0.024	0.019	2.00	0.029	0.020	1.93	0.035	0.026	1.97
SAF-M	1.69	0.026	0.020	1.70	0.030	0.023	1.69	0.030	0.024	1.69
SAF-S	1.44	0.023	0.019	1.46	0.023	0.016	1.47	0.026	0.020	1.45
PF-N	1.27	0.019	0.016	1.28	0.022	0.014	1.30	0.020	0.016	1.28
PF-M	1.14	0.017	0.014	1.14	0.017	0.013	1.17	0.015	0.013	1.15
PF-S	1.04	0.016	0.013	1.03	0.015	0.012	1.05	0.014	0.012	1.04
sACCF-N	0.94	0.017	0.014	0.93	0.015	0.012	0.93	0.016	0.013	0.93
sACCF-S	0.84	0.021	0.016	0.83	0.018	0.015	0.82	0.017	0.014	0.83
Bdy	0.75	0.026	0.020	0.74	0.020	0.017	0.73	0.021	0.016	0.74

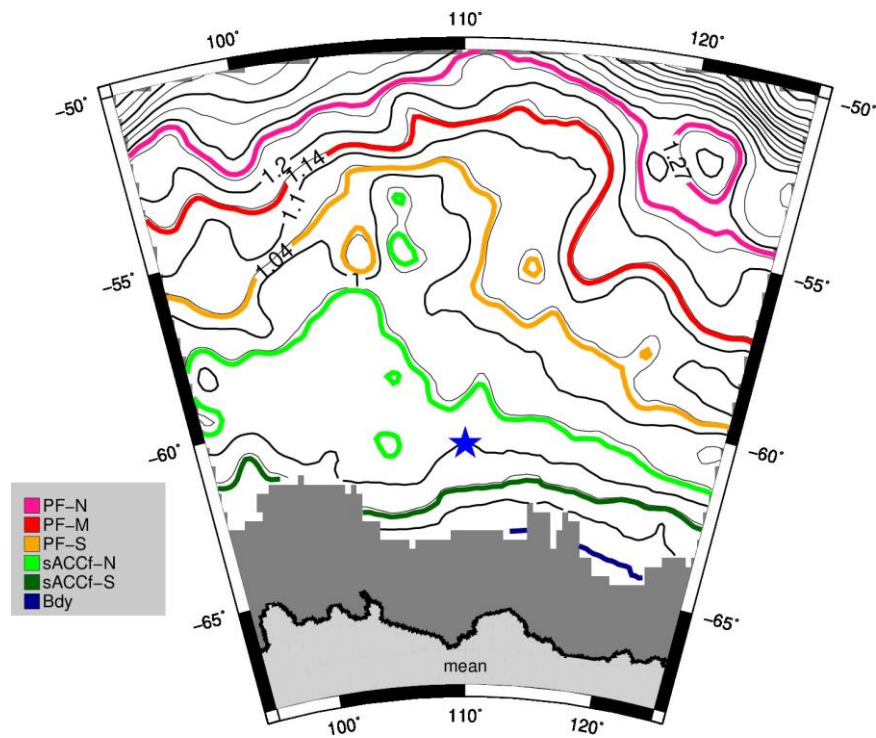


Fig. 12 SSH から得た各フロント(Table 3 参照)の平均場、青星は係留点、灰色は Olbers et al. [1992] で公開された 2500dbar 深基準の mean surface dynamic height climatology の欠損値を示す。

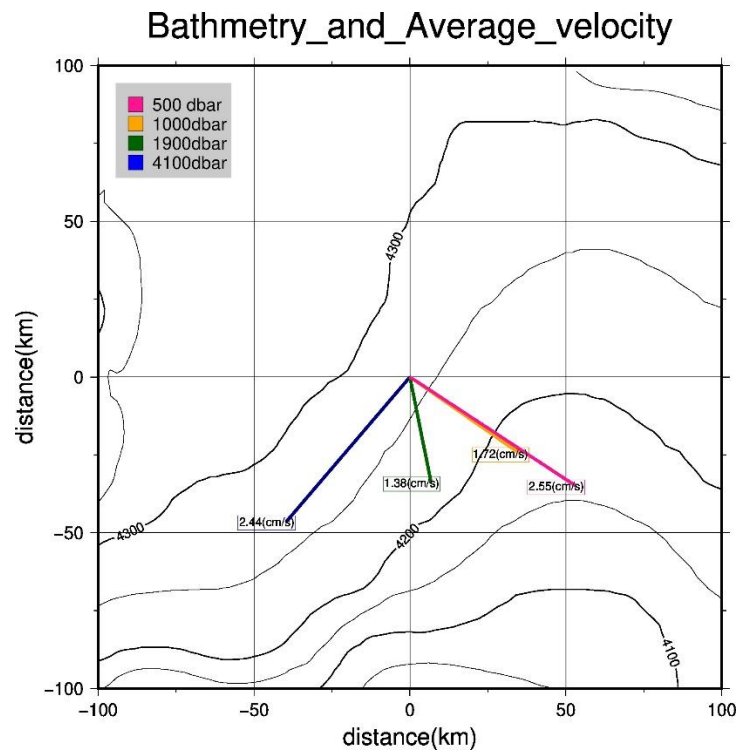


Fig. 13 係留系から得た各層の観測期間平均流速と海底地形の比較。

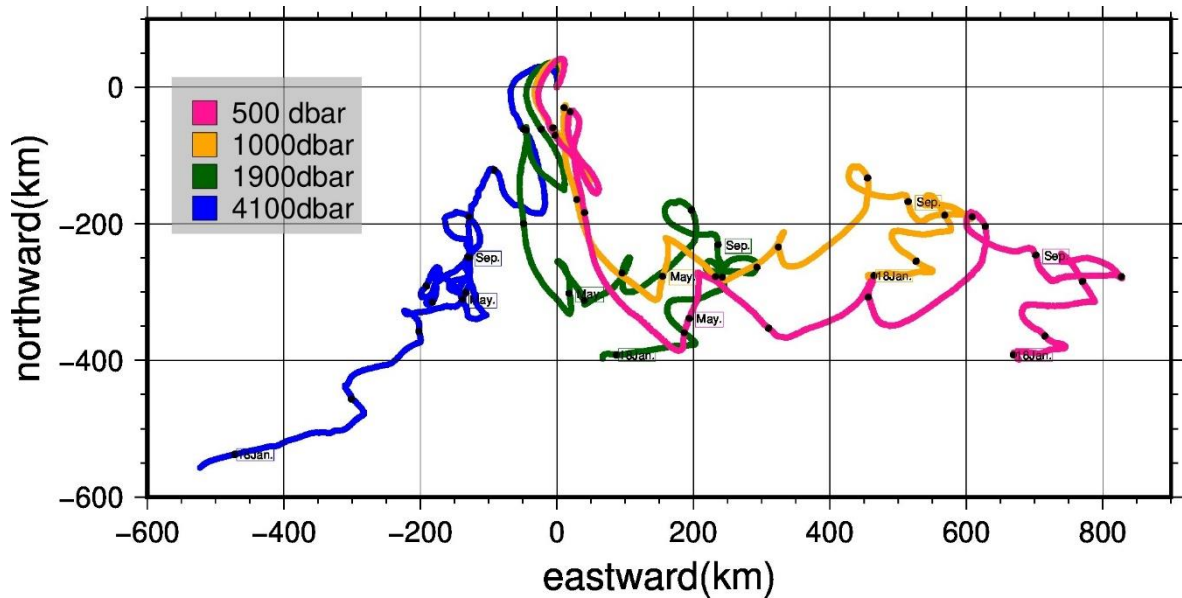
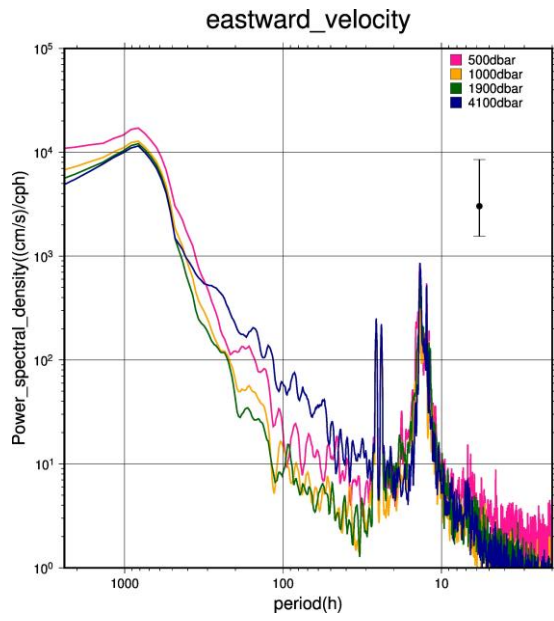
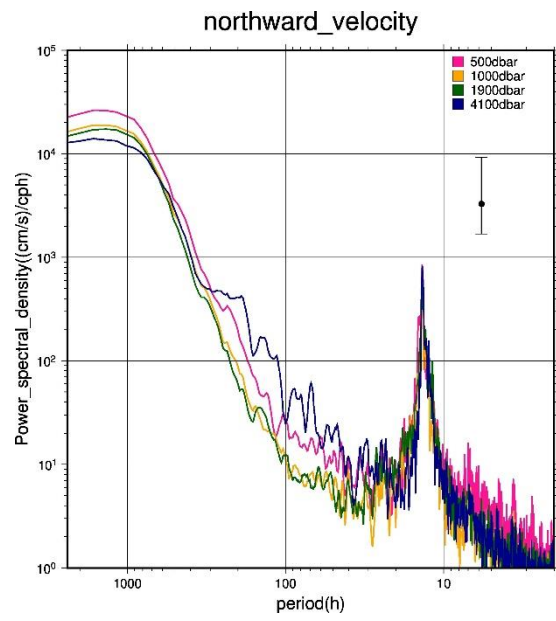


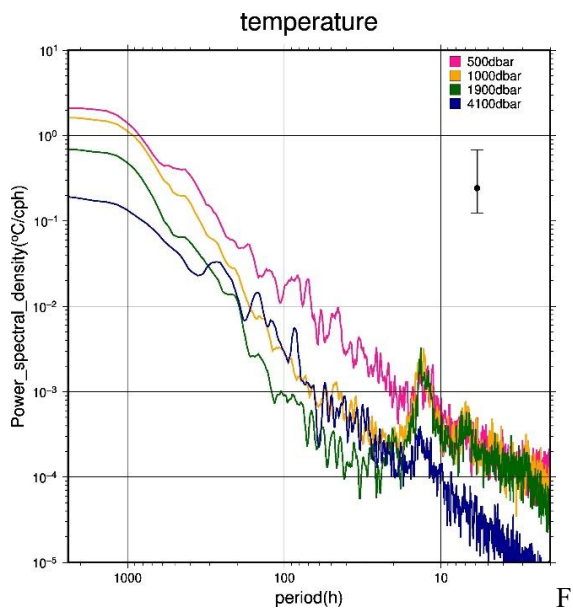
Fig. 14 係留系観測から得た各層の進行ベクトル図、黒点は各月の初日を示す。



(a)

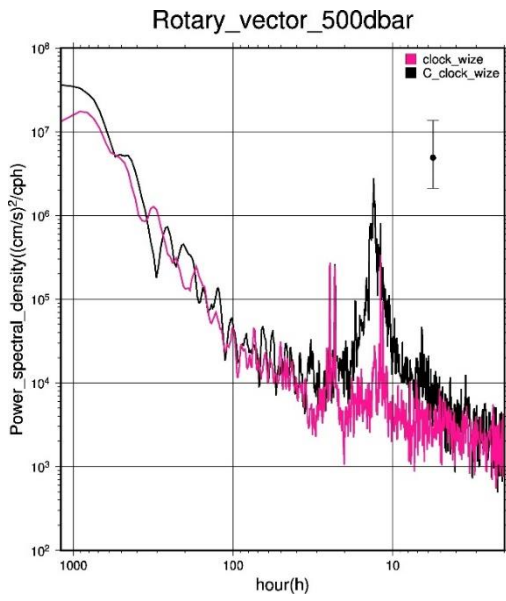


(b)

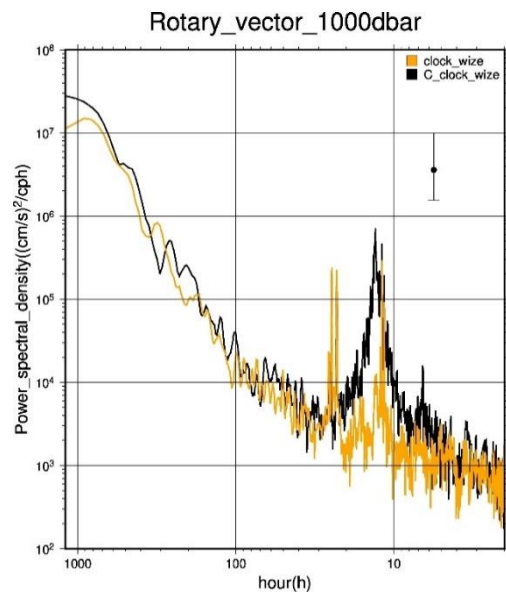


(c)

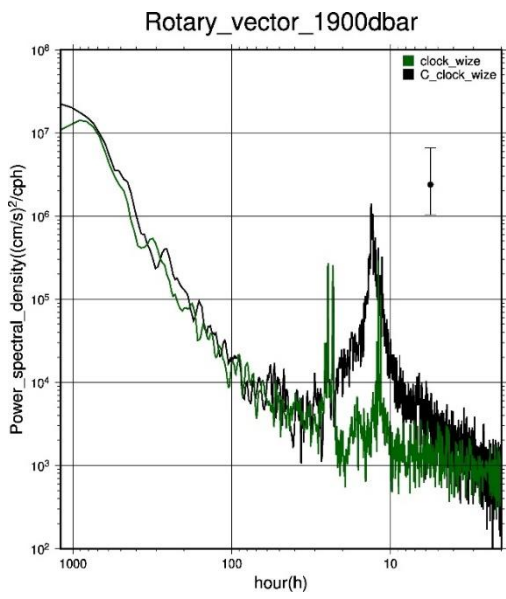
Fig. 15 (a)係留系から得た各層の東西流速のパワースペクトル密度, (b) 係留系から得た各層の南北流速のパワースペクトル密度, (c) 係留系から得た各層の水温のパワースペクトル密度。



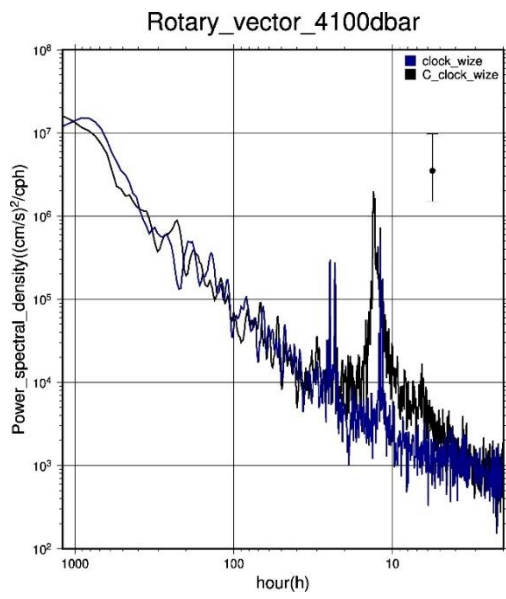
(a)



(b)

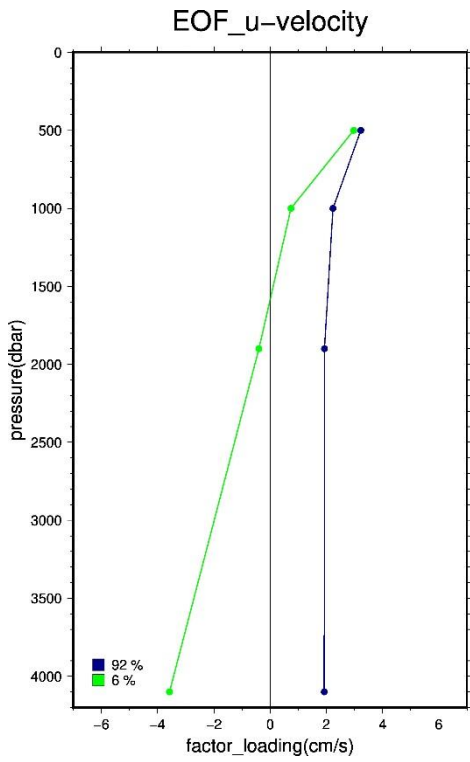


(c)

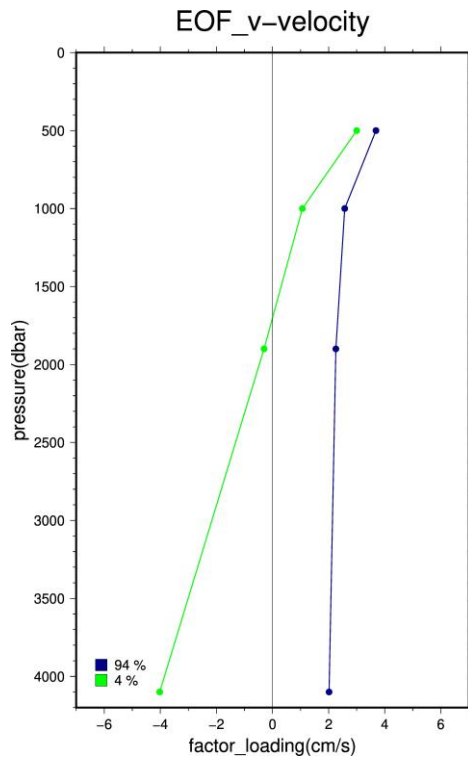


(d)

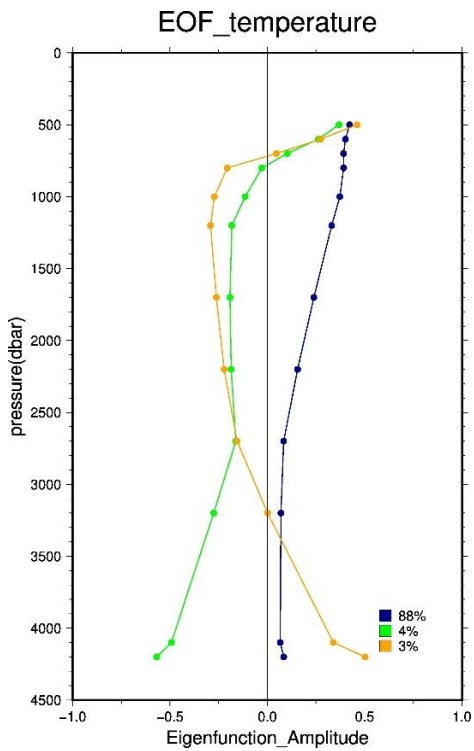
Fig. 16 各層の東西・南北流速から得た回転スペクトルのパワースペクトル密度、(a)500 dbar 深, (b)1000 dbar 深, (c)1900 dbar 深, (d)4100 dbar 深。



(a)

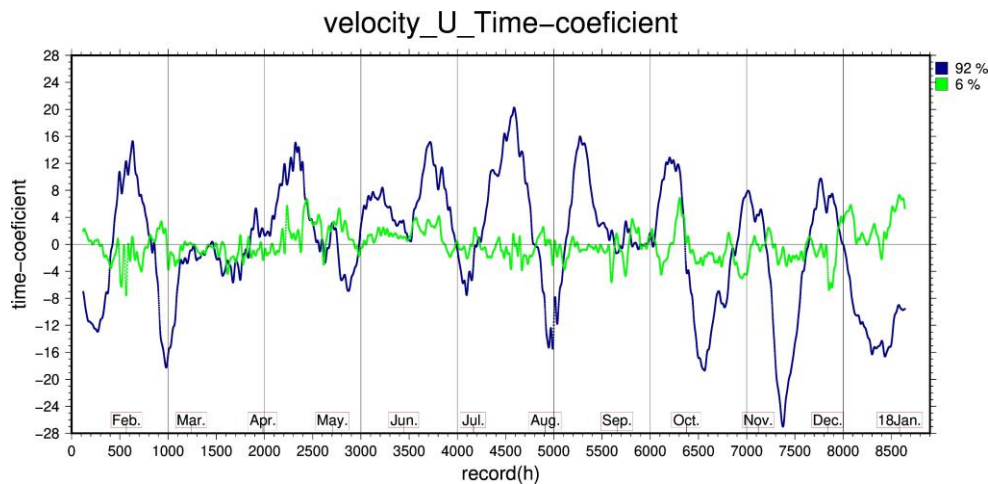


(b)

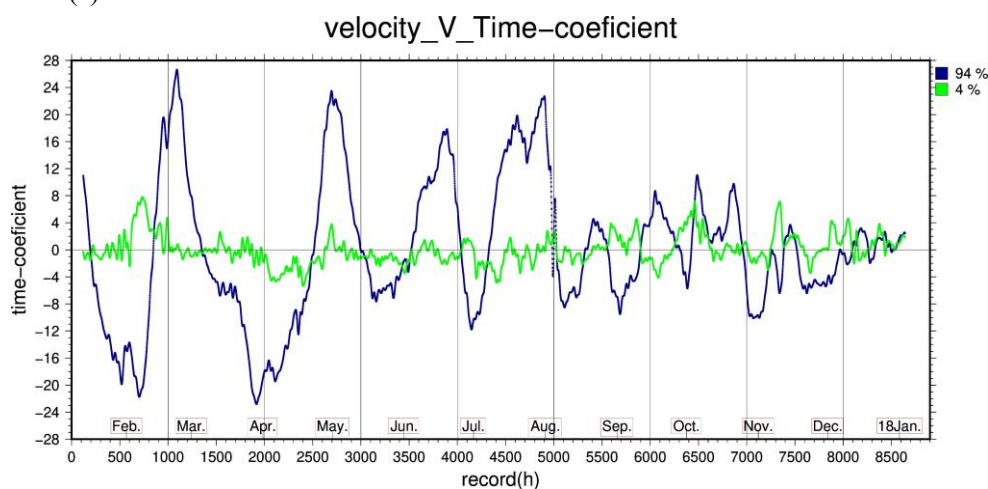


(c)

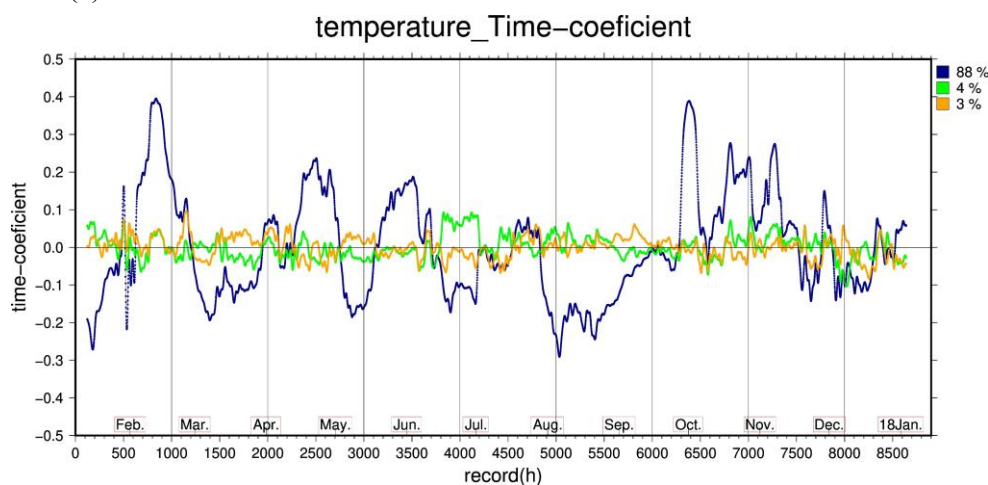
Fig. 17 係留観測データに主成分分析を行った各モードの固有値ベクトル、(a)流速東西成分の EOF 第 1, 2 モード, (b) 流速東西成分の EOF 第 1, 2 モード, (c)水温の EOF 第 1, 2, 3 モード。



(a)



(b)



(c)

Fig. 18 係留観測データに主成分分析を行った各モードの時間係数(a)流速東西成分の EOF 第 1, 2 モード(b) 流速東西成分の EOF 第 1, 2 モード(c)水温の EOF 第 1, 2, 3 モード。

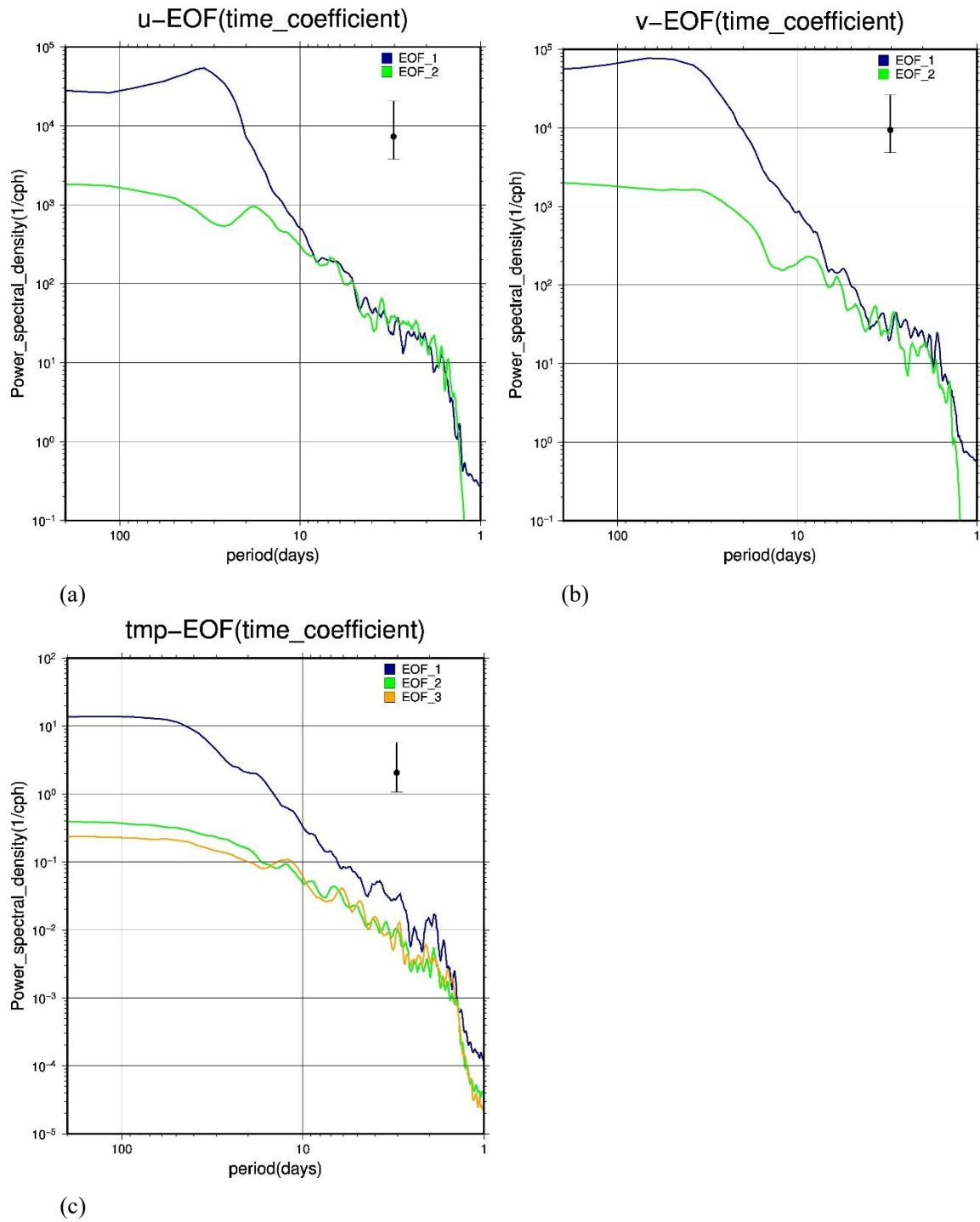


Fig. 19 係留観測データに主成分分析を行った各モードの時間係数のパワースペクトル密度、(a)流速東西成分の EOF 第 1, 2 モード, (b) 流速東西成分の EOF 第 1, 2 モード, (c)水温の EOF 第 1, 2, 3 モード。



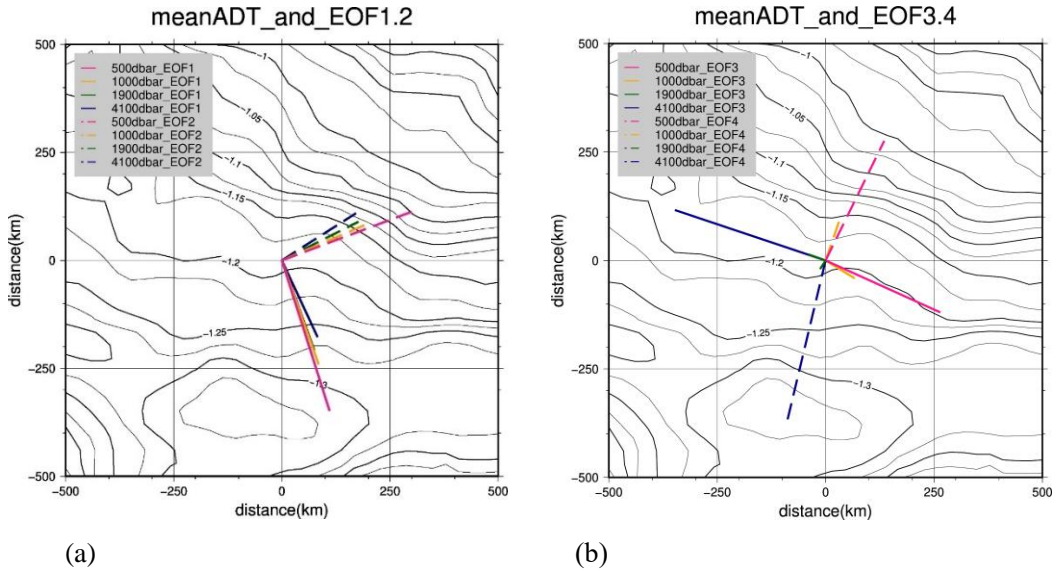


Fig. 20 各層の東西流速と南北流速を合わせた主成分分析の各モードの流速ベクトルと観測期間平均の力学海面高度場の比較。(a)EOF 第 1, 第 2 モード (b)EOF 第 3, 第 4 モード。

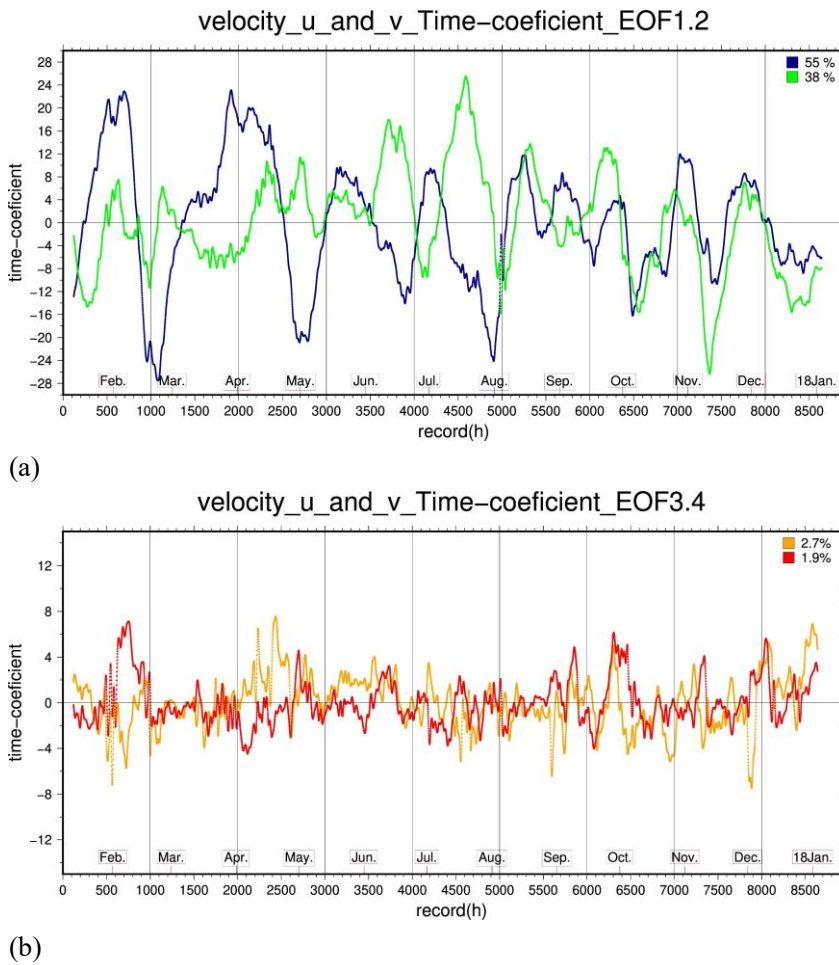
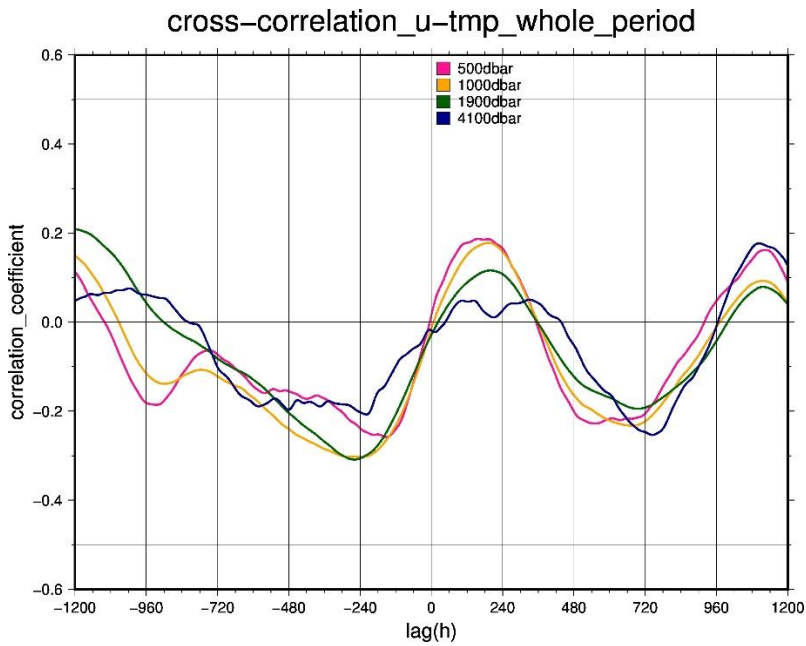
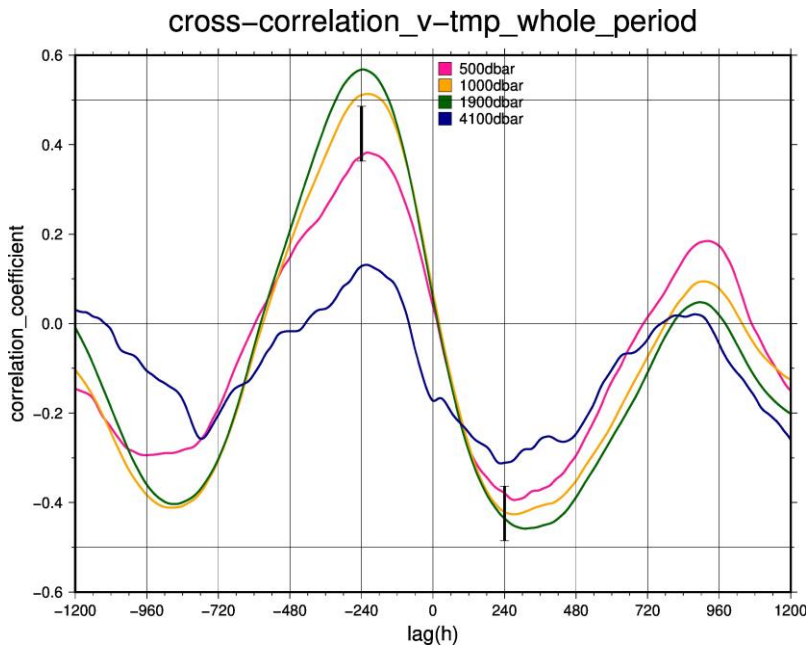


Fig. 21 各層の東西流速と南北流速を合わせた主成分分析の時間係数。(a)EOF 第 1, 第 2 モード (b)EOF 第 3, 第 4 モード。

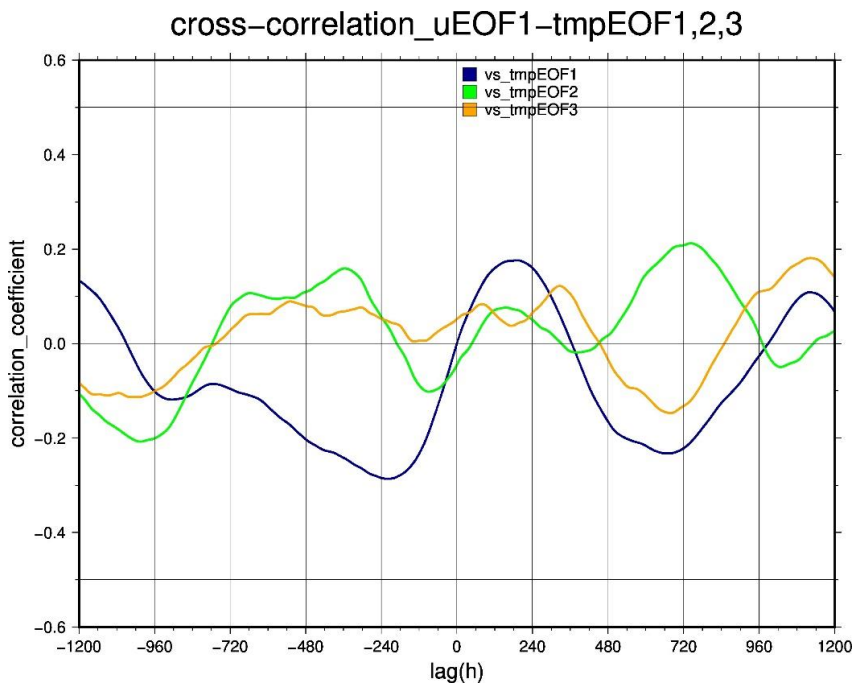


(a)

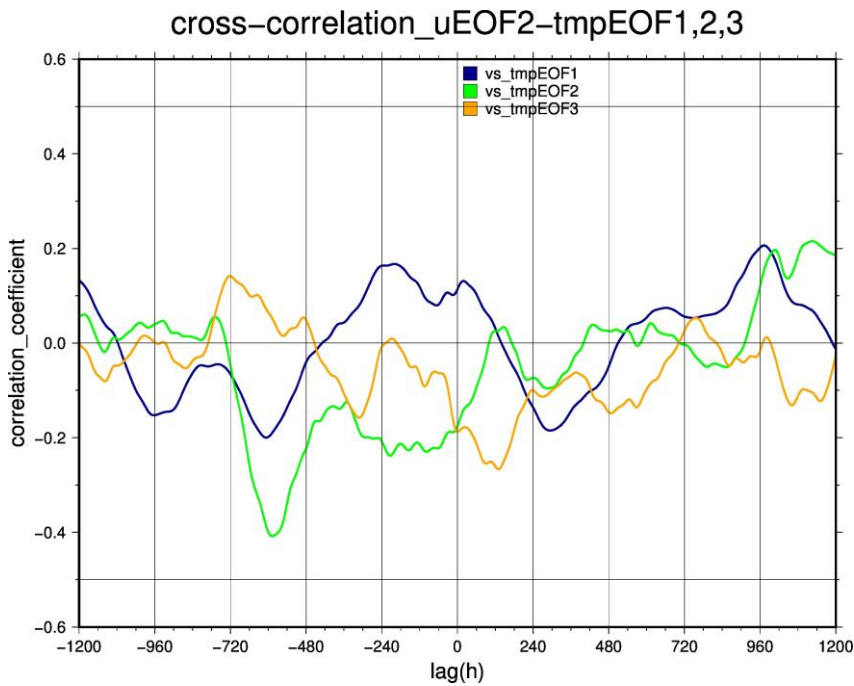


(b)

Fig. 22 係留系各層の水温と流速のラグ相関 (a)各層の水温と流速東西成分のラグ相関, (b)各層の水温と流速南北成分のラグ相関、代表値として、相関係数 $\pm 0.4$  の場合の信頼区間をバーで示した。

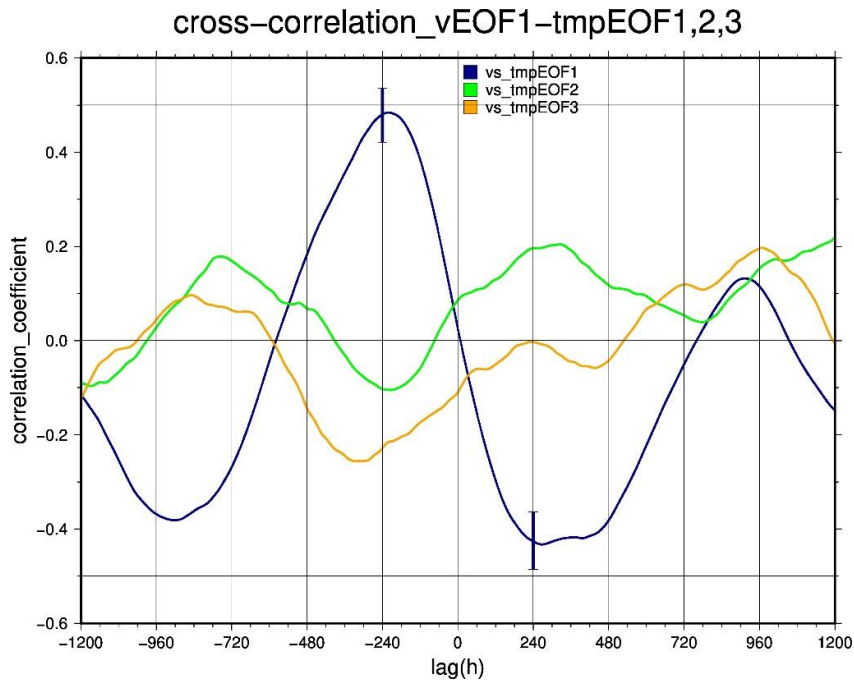


(a)



(b)

Fig. 23 水温の各 EOF モードと流速の各 EOF モードのラグ相関 (a)水温の各 EOF モードと東西流 EOF 第 1 モードのラグ相関, (b)水温の各 EOF モードと東西流 EOF 第 2 モードのラグ相関, (c)水温の各 EOF モードと南北流 EOF 第 1 モードのラグ相関、水温 EOF 第 1 モードとの  $\pm 240$  時間のラグの相関係数の信頼区間をバーで示した。



(c)

Fig. 23 のつづき

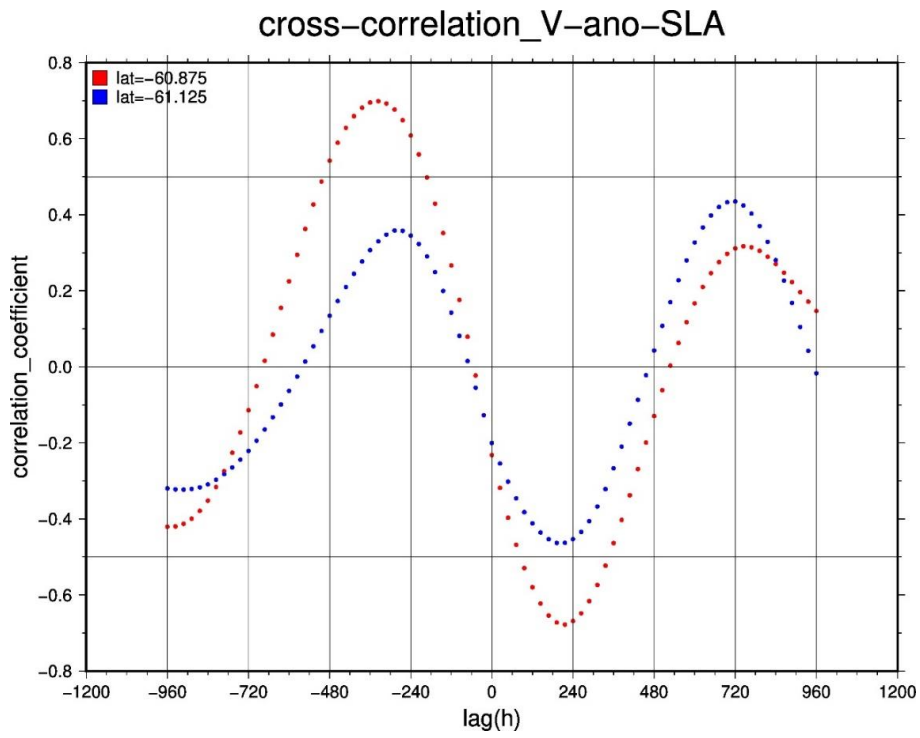


Fig. 24 中心点 (110.125° E, -60.085° S)のグリッドにおける SLA と海面の南北流速アノマリーのラグ相関(海面が海氷に覆われていない 6/11 までの時系列のみで解析)。

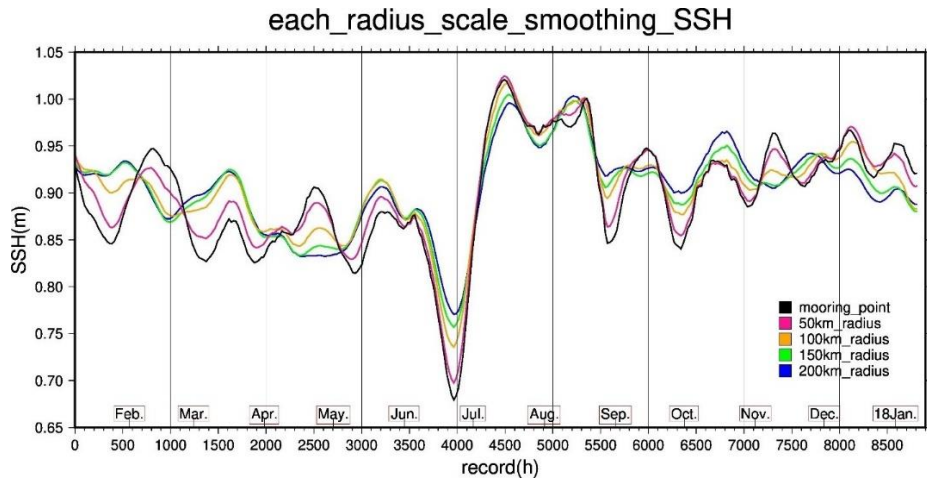
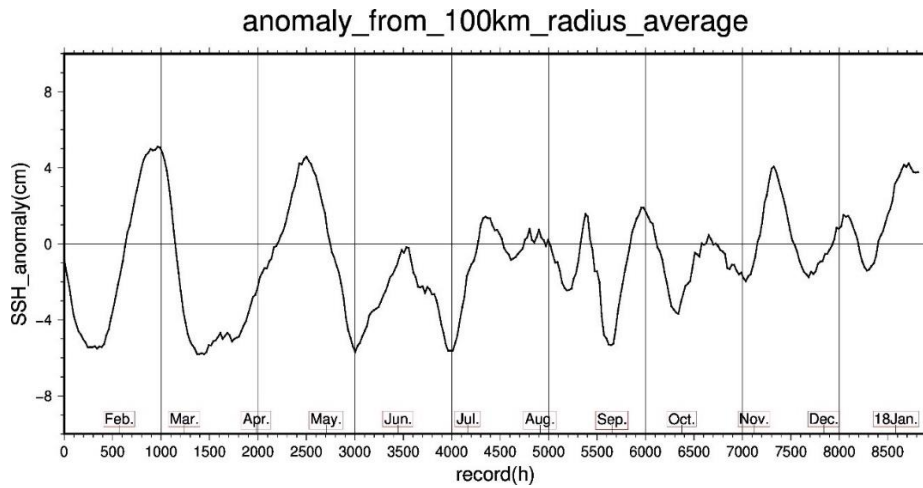
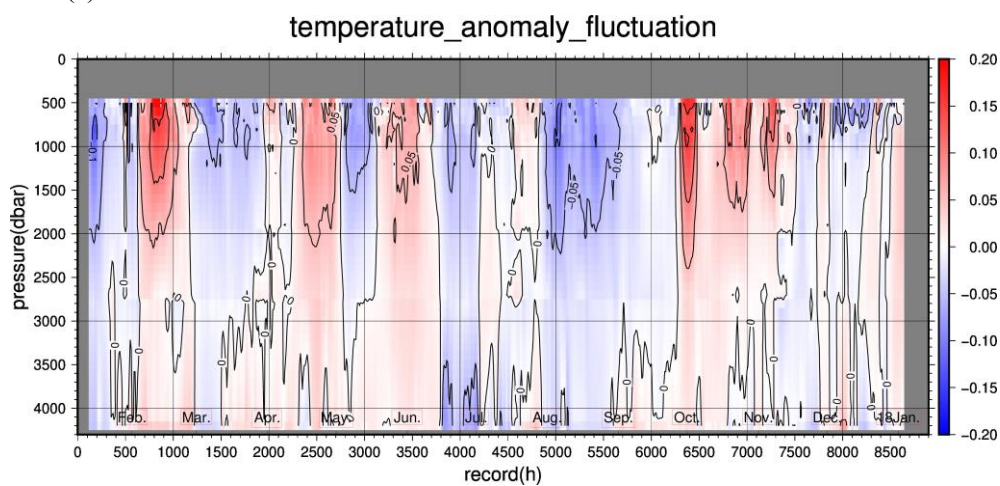


Fig. 25 係留点を中心として幾つか距離半径内に中心座標が含まれるグリッドで平均化した SSH の時系列。



(a)



(b)

Fig. 26 (a)係留点のグリッド SSH の 100km 半径の SSH 平均からの偏差(b)係留系から得られた各層水温の時間平均に対する偏差の時系列断面図。

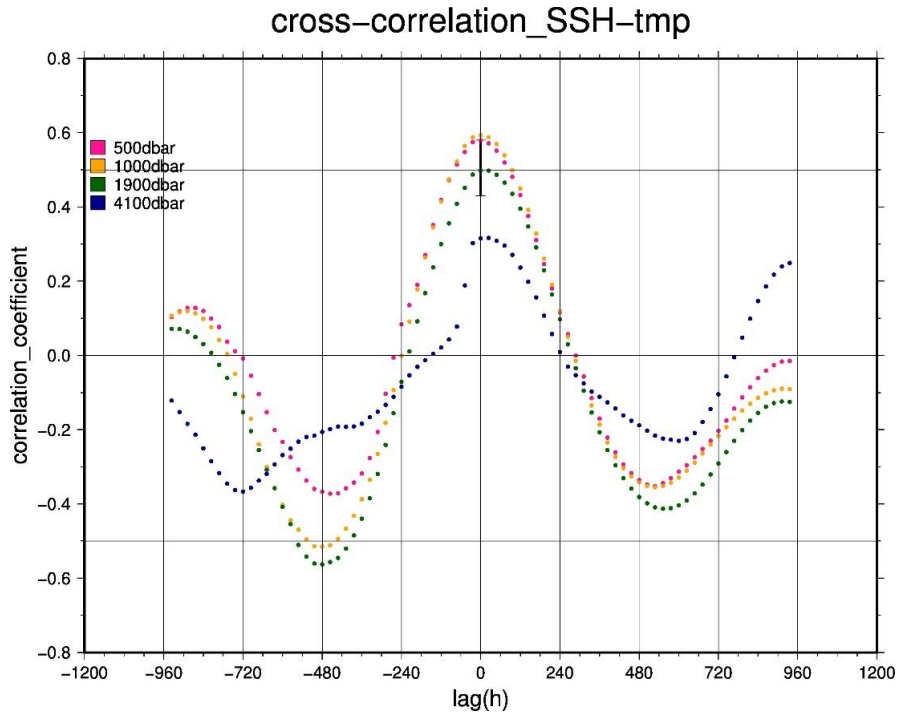
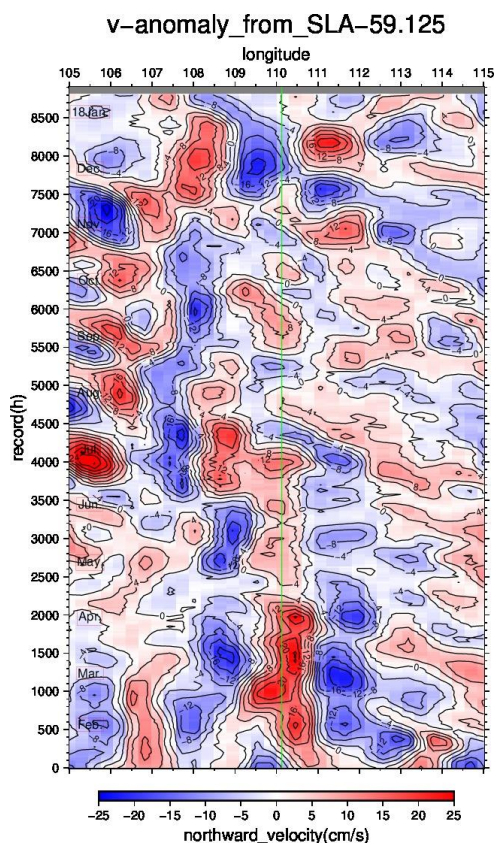
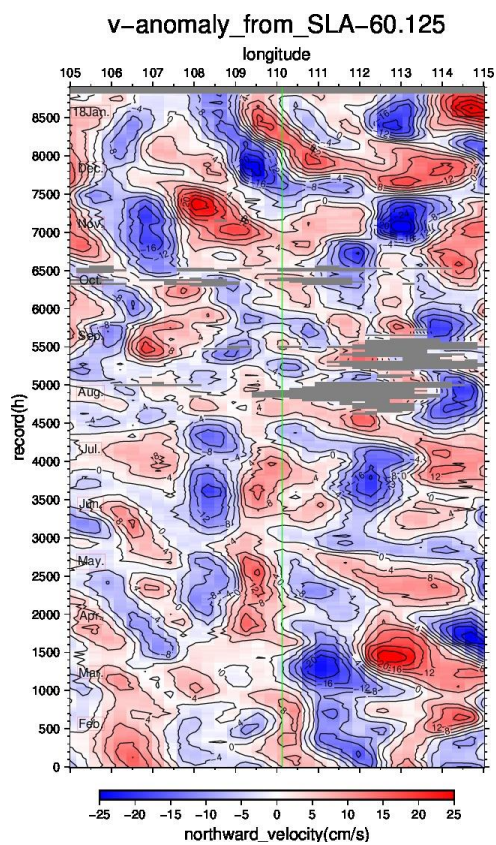


Fig. 27 係留点における SSH と係留各層における水温のラグ相関(海面が海氷に覆われていない 6/11 までの時系列のみで解析)。



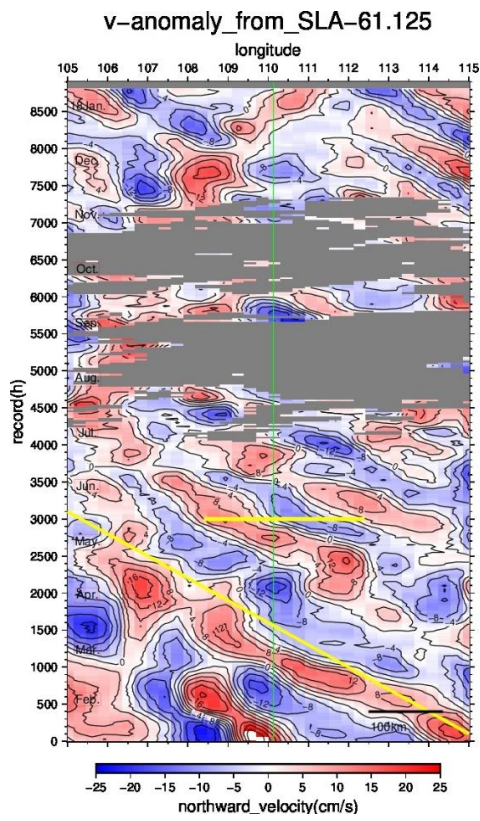
(a)



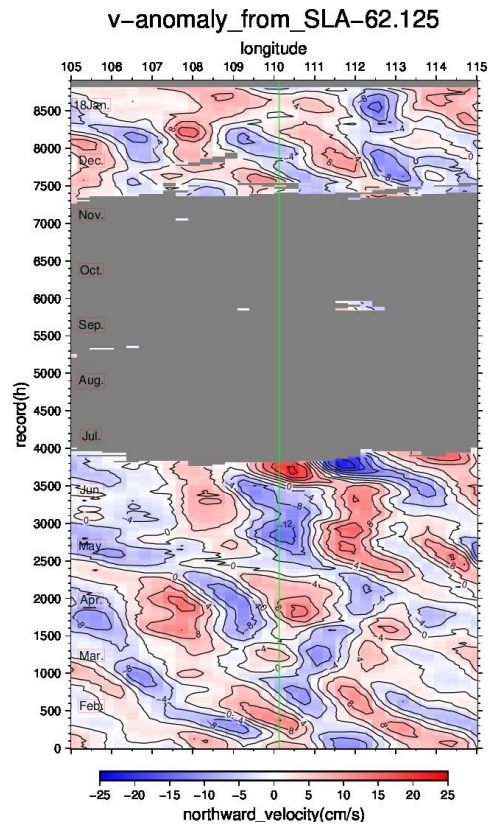
(b)

Fig. 28 SLA から得た南北流速アノマリー、各緯度における東経 105~115 度の範囲の東西 Hovmöller 図 (海水密度 20%以上は欠損) (a)南緯 59.125 度, (b)南緯 60.125 度, (c)南緯 61.125 度(係留点を含む)黄色線は 0.058(cm/s)の西進する速度と、波長 220km の距離を示す, (d)南緯 62 度, (e)南緯 63.125 度。

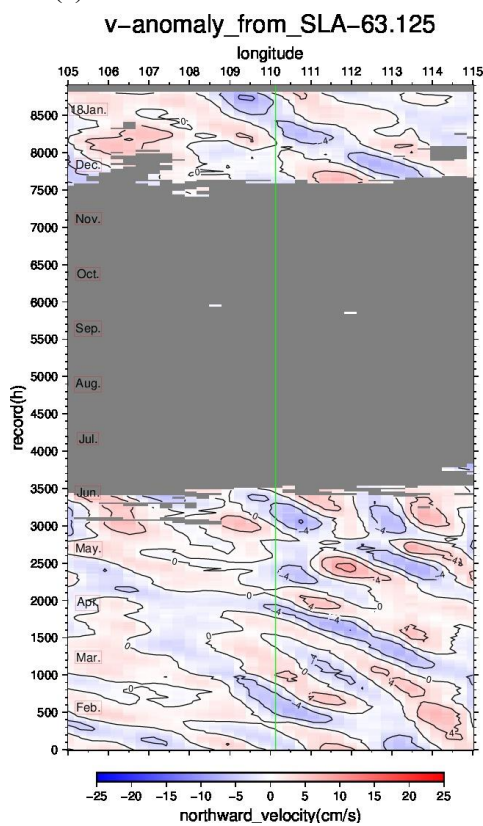




(c)

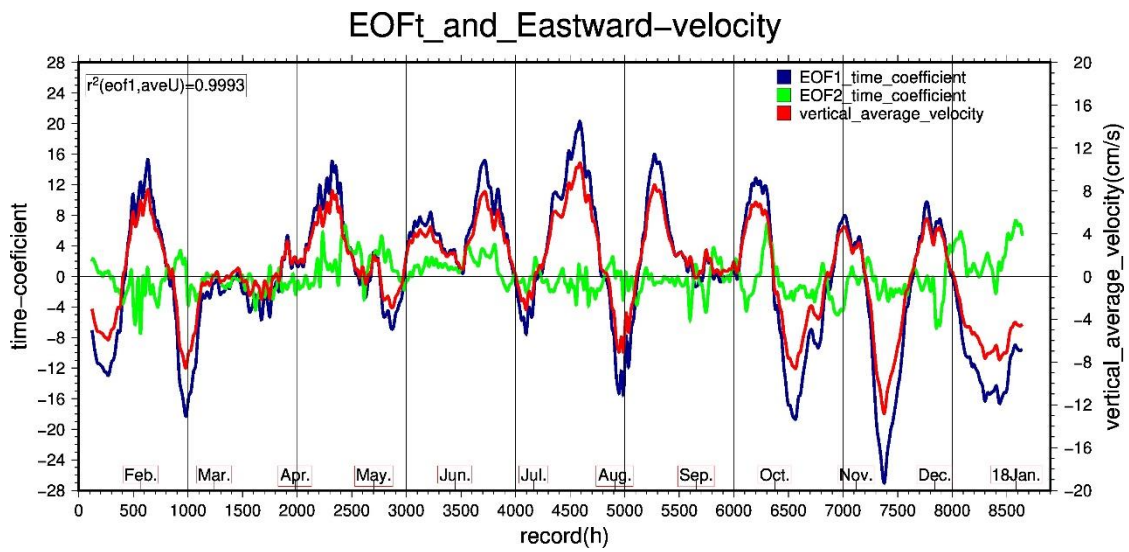


(d)

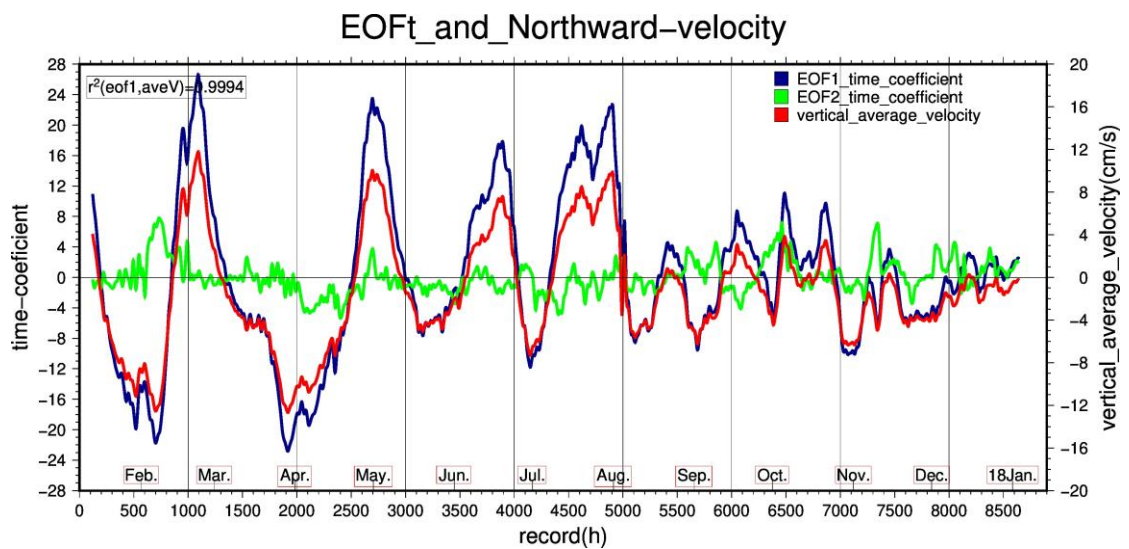


(e)

Fig. 28 つづき



(a)



(b)

Fig. 29 係留観測データに主成分分析を行った各モードの時間係数と鉛直平均流速(a)流速東西成分の EOF 第 1, 2 モード, 鉛直平均流(b) 流速東西成分の EOF 第 1, 2 モード, 鉛直平均流。

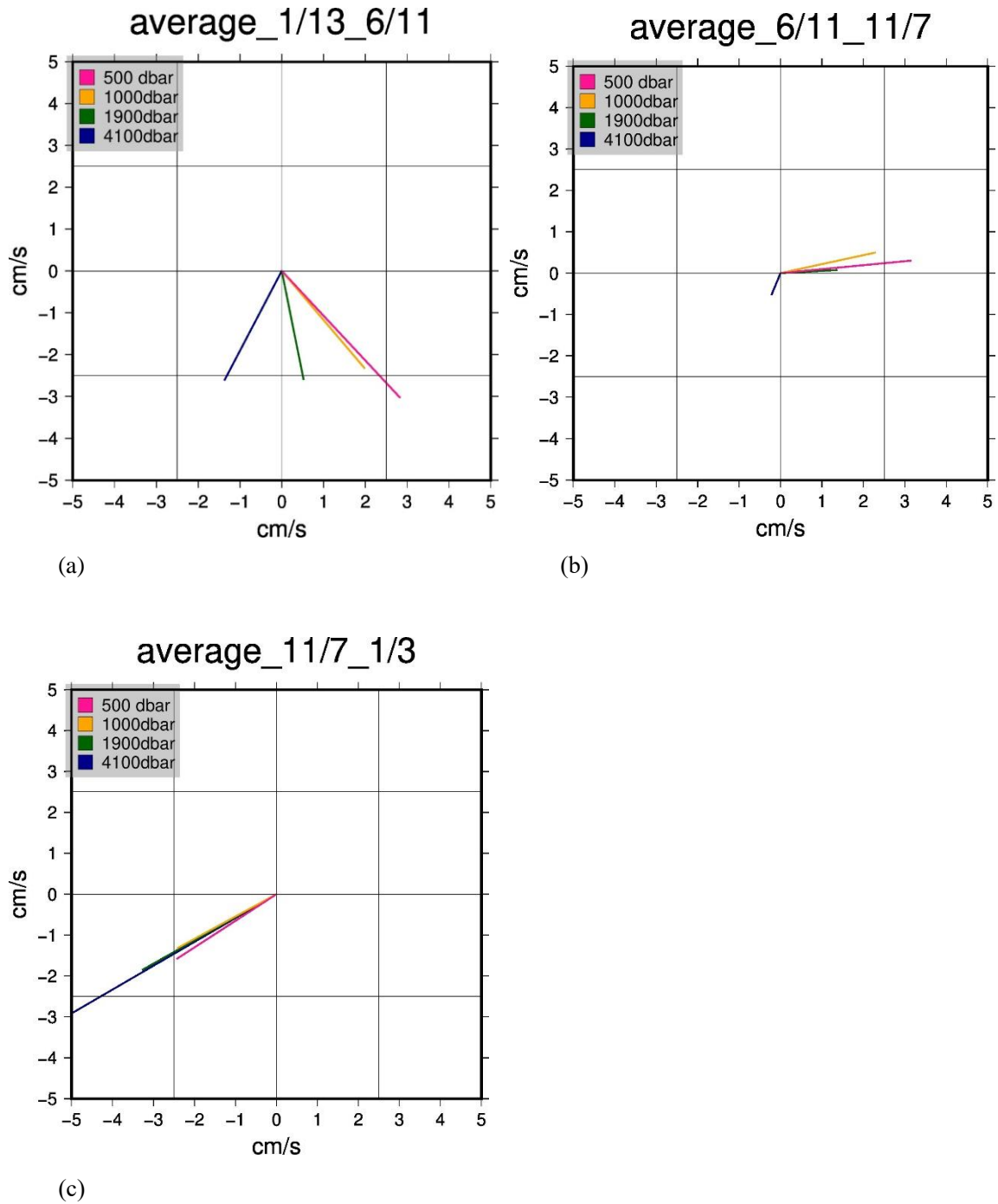


Fig. 30 係留観測期間を季節で分けた各層の平均流速、(a) 2017年1月13日~6月11日の平均流速、(b) 6月11日~11月7日の平均流速、(c) 11月7日~2018年1月3日の平均流速。

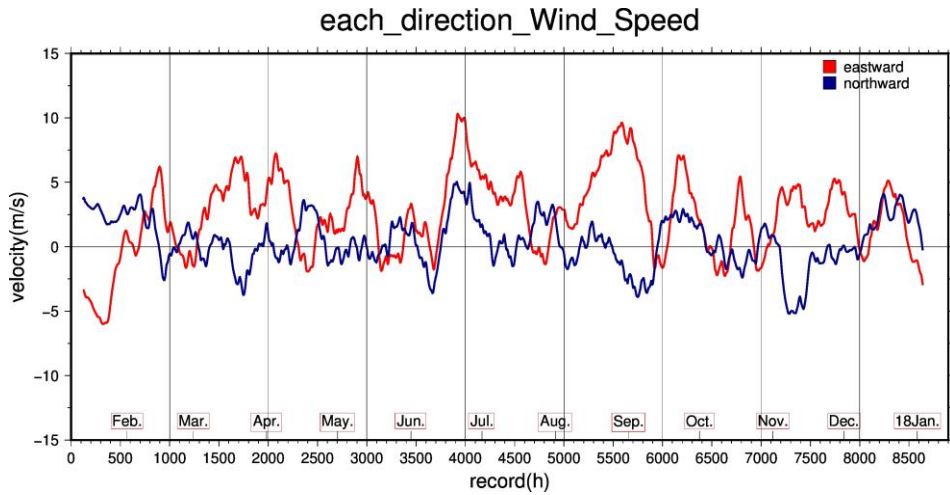


Fig. 31 係留点における海上風の241時間の移動を施した風速、東西・南北成分。

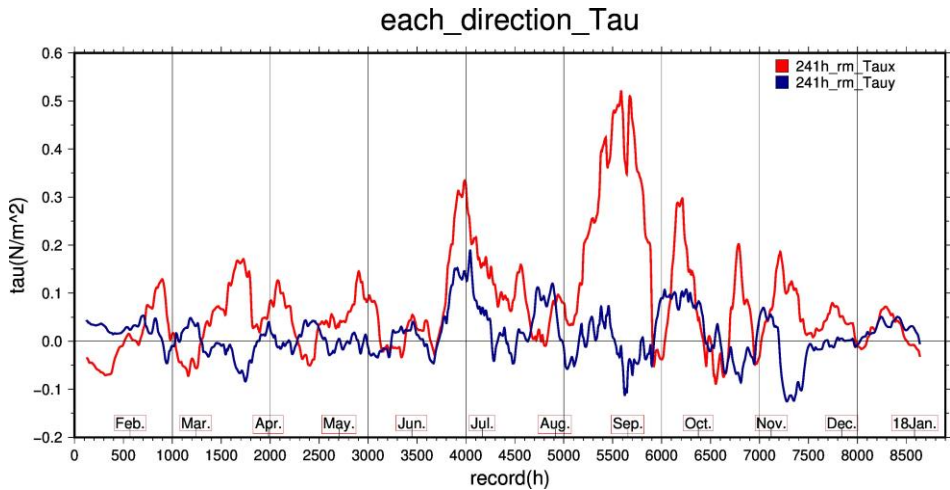


Fig. 32 係留点における海上風から計算した風応力、241時間の移動を施した東西成分(図中241h\_rm\_Taux)と、241時間の移動を施した南北成分(図中241h\_rm\_Tauy)。

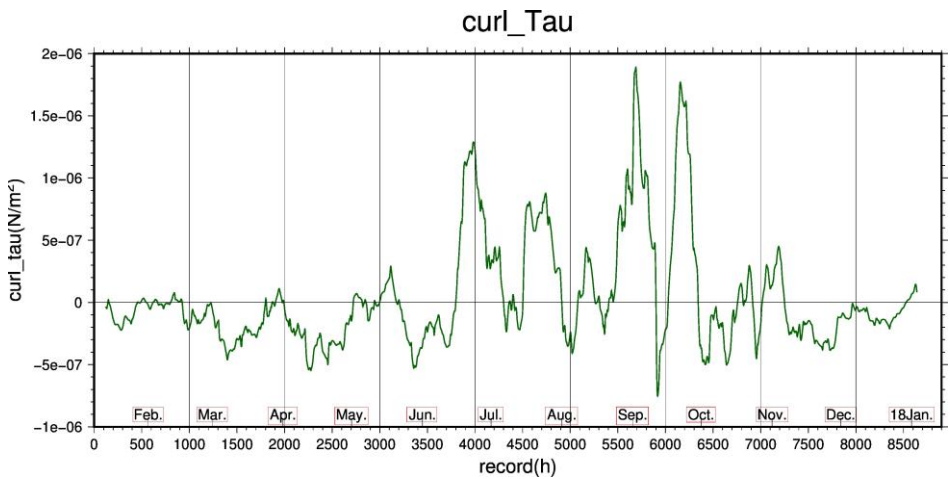


Fig.33 係留点における風応力回転成分の時系列。

Table 4 各期間における風応力の回転成分、およびスベルドラップ輸送による鉛直平均南北流速と、係留観測から得られた鉛直平均南北流速の比較。

period	$curl\tau(\times 10^{-7} N/m^2)$	$v(cm/s)$ [sverdrup transport]	$v(cm/s)$ [mooring record]
1/13~6/11	-1.54	-0.314	-2.640
6/11~11/7	3.06	0.622	0.020
11/7~18. 1/3	-1.54	-0.314	-2.180

Table 5 各層における熱フラックス $F_{(x,y)}(cm \times ^\circ C/s) = (uT_r, vT_r)$ の観測期間平均値。

depth(dbar)	$\overline{uT_r}(cm \times ^\circ C/s)$	$\overline{vT_r}(cm \times ^\circ C/s)$
500	7.88	-5.16
1000	4.75	-3.29
1900	0.72	-3.59
4100	-2.73	-3.22

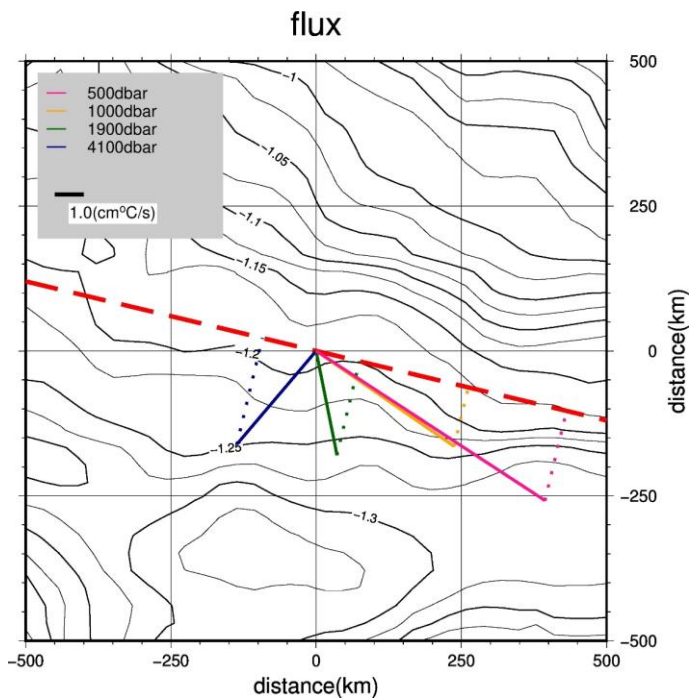


Fig. 34 各層の観測期間平均熱フラックスのベクトルと海面高度の比較。平均力学海面高度を等値線、海面高度に沿った方向の赤点線、各層のフラックスのフロントに沿う成分を各色の点線で示した。1.0(cm×°C/s)を凡例で示した。