

# 衛星データを用いた南極周極流の変動特性に関する研究

著者	程 洋磊
学位名	修士(海洋科学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2021
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00002429/">http://id.nii.ac.jp/1342/00002429/</a>

修士学位論文

衛星データを用いた南極周極流の変動特性に関する研究

2021 年度

(2022 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

程 洋磊



修士学位論文

衛星データを用いた南極周極流の変動特性に関する研究

2021 年度

(2022 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

程 洋磊

# 目次

<b>第一章</b>	<b>はじめに</b>	<b>…1</b>
<b>第二章</b>	<b>解析データ</b>	<b>…3</b>
2.1	Copernicus marine environment monitoring service 衛星データ	
2.2	National Centers for Environmental Prediction 再解析データ	
2.3	南極環状モード指数	
2.4	ETOPO1 海底地形データ	
<b>第三章</b>	<b>計算方法</b>	<b>…5</b>
3.1	渦エネルギー計算方法	
3.2	地衡流計算方法	
3.3	最小二乗法計算方法	
3.4	流量計算方法	
<b>第四章</b>	<b>結果</b>	<b>…7</b>
4.1	南極周極流季節流速変化と渦エネルギーの構造	
4.1.1	南極周極流季節流速変化	
4.1.2	渦運動エネルギーの構造	
4.2	南極周極流ドレーク海峡季節流速変化と渦エネルギーの構造	
4.2.1	南極周極流ドレーク海峡季節流速変化	
4.2.2	ドレーク海峡渦運動エネルギーの構造	
4.3	ドレーク海峡渦エネルギー年間変化	
4.4	ドレーク海峡流量年間変化	
4.5	ドレーク海峡月平均風速年間変化	

<b>第五章 考察</b>	<b>…15</b>
5.1 ドレーク海峡の月平均渦エネルギーとSouthern Annular Mode相関性	
5.2 ドレーク海峡の月平均渦エネルギーと月平均風速の相関性	
5.3 ドレーク海峡の月平均渦エネルギーと ENSO の相関性	
5.4 ドレーク海峡の月平均渦エネルギーと流量の相関性	
5.5 ドレーク海峡月平均風速と流量の相関性	
<b>第六章 まとめと今後の課題</b>	<b>…19</b>
6.1 まとめ	
6.2 課題	
<b>謝辞</b>	<b>…21</b>
<b>参考文献</b>	<b>…22</b>
<b>図表</b>	<b>…24</b>

## 第一章 はじめに

南極周極流(Antarctic Circumpolar Current 以下:ACC)は、南大洋における最も重要な流路であり、地球を一周する唯一の海洋循環である。大西洋、インド洋、太平洋の南部を西から東へと流れ、海の間の水、熱、塩の交換に重要な役割を果たしており、ACC の輸送量の変化が海洋間の水、熱、塩の交換の主要な源である[1]。

渦運動エネルギー(Eddy Kinetic Energy 以下;*EKE*)の解析は、海流と渦の時間的変動を調査する際によく使用されている。渦の状態は、一般的に時間平均状態からの偏差として定義される。ACC のエネルギー特性と一部分の海域海流循環については、これまでも多くの研究がなされてきた。例えば、漂流ブイのデータを用いて、20°S-68°S 海域の平均表面速度、*EKE*、運動量フラックスなどを判断することで、南半球の各海域の初期推定値を得ることができる[2]。また、南大洋におけるエネルギーと運動量の輸送を、モデルの統計値と高度計の観測値を比較した研究[3]や世界海洋循環実験(WOCE)の一環として、6 つセクションを用いて、東経 140 度付近の南極周極流の斜め方向の圧力輸送変動を推定した研究[4]などがある。南極周極流の特性に関するこれまでの研究は、主に放射計や漂流ブイのデータを用いて、運動エネルギーの分布を詳細に説明している研究が多い。これまでの研究では一部の海域における海流や渦運動エネルギーが調べて来ているが、本研究では、衛星データを用いて南極周極流全域の特性と局所的な渦運動の特徴を調べ、それらの関係を明らかにすることを目的としている。

ドレーク海峡(Drake Passage)は、南アメリカ大陸の南端とサウスシェットランド諸島(South Shetland Islands)の間に位置する、最大幅 970km、最大水深 4750m の世界で最も深くて広い海峡である。KLINCK[19]は、ACC の輸送量の変化が海洋間の水、熱、塩の交換の主要な源であり、熱交換の最も重要なプロセスはメソスケールの渦であるとしている。船舶、漂流ブイ、衛星による観測から、海面渦の運動エネルギーは ACC 軸に沿って最大となり、主に海洋境界域とアフリカ大陸先端部で最大値があることがわかった。ドレーク海峡で、熱や *EKE* の変動特性、運動学的・力学的量の子午線方向の交換に関する推定値は ACC 全体に対して代表性がある。また、ドレーク海峡の海水は、太平洋から大西洋に流れ込み、世界最大の海流である ACC の一部となっている。ACC は西風によって南極大陸の周りを東に向かって循環するもので、地球の海流システムにおいて重要な役割を果たしている。ACC の年間平均流量は 100-150 SV (Sverdrups, 1 SV =  $10^6 \text{ m}^3 / \text{s}$ )で、

ドレーク海峡に係留された流速計で観測された流速から算出されている[5]。

ACC は偏西風によって駆動される風海流であるため、風場が変化すると ACC の流速、EKE、流量にも影響がある。PETERSON[6]や WEARN et al. [7]は、風速が ACC に影響を与えることを示して、流量や EKE(1 ヶ月以上)の変動は、特に、半年や 1 年ぐらいに影響を与える。THOMPSON [8]によると、過去数十年の間に、南大洋では風速が増加していることがわかっている。したがって、風速が増加する中で、ACC 流量や EKE の変動を明らかにする必要がある。ドレーク海峡における 1993-2018年の再解析による月平均流れ場、海面高度アノマリー、海面風速など衛星データを用いて、風速場の変化に対する ACC の流量、EKE の反応をさらに調べた。そして、本研究は EKE、平均風速、流量を計算し、3 つの変数の相関を分析した。

Wang[22]は、東部太平洋赤道域の熱帯性不安定波(TIWs)は、赤道域の海面水温フロント付近の風速・風向に大きな影響を与えることを示唆しており、東部太平洋赤道域における EKE の変動は、赤道域の地表風が主な要因となっていると、述べた。東部太平洋の熱帯性不安定波(TIWs)の変動とエルニーニョ・南方振動(ENSO)との相互作用であるので、ENSO に対する南大洋の応答としては、大気場の変化ではなく、海洋場の変化を通して渦運動の変化がもたらされていると考えられる。Morrow[23]の研究は、1993-2008 年の SLA データから、南大洋の EKE は SAM と ENSO に関連していることを示している。1999 年のように、ラニーニャ現象(負の南方振動指数(SOI))と重なると、南太平洋の子午線方向の風の異常な強さが強まり、2~3 年後に EKE が強いことが観測される。しかし、エルニーニョ現象(正のSOI)と重なると、観測された EKE は弱くなることを述べた。

南東太平洋の貿易風が卓越しているときの太平洋海域の海の循環に関しては、赤道表面の東風ストレスは、暖かい表層水を西太平洋に運んで蓄積させ、その結果、海面が上昇し、太平洋の海水が温かくなる。南東貿易風が弱まると、表層の暖かい水が東側に逆流し、東太平洋赤道域の海面が上昇し、ベル海流が弱くなり、冷たい水の湧昇現象がなくなる。ENSO の値の変化は、南半球の東太平洋全体、さらに、ACC に影響も与える。また、ENSO 指標値の変化が ACC の EKE の変化に影響を与え、ACC の流れにも影響を与えているかどうかを理解するために、ドレーク海峡の研究は非常に重要である。

## 第二章 解析データ

### 2.1 Copernicus Marine Environment Monitoring Service 衛星データ

本研究の海面高度アノマリー(sea level anomaly, 以下:SLA)データは、フランスの CMEMS (Copernicus marine environment monitoring service)が提供される C3S (Copernicus climate change service)データセットを使用している。このデータセットの空間分解能は  $1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$  である。使用期間は 1993 年から 2018 年である。

CMEMS 海面データセットは、地球規模または地域規模での海洋モデリングや海洋循環の分析に関連したメソスケール信号に特化した実用的なデータセットである。

C3S の海面データセットは、CMEMS カタログに掲載されている海洋モニタリング指標(世界および地域の平均海面の変化など)の作成に使用されている。C3S が提供する海面データセットは気候指向のものであり、海面の長期的な変化の監視と海洋・気候指標の分析を目的としている。1 つの衛星は基準として機能し、データ記録の長期的な安定性を確保する。また、1 つの衛星(記録全体で変化する)は、精度の向上、メソスケールプロセスのサンプリング、高緯度地域のカバレッジのために使用される。

ドレーク海峡における南極周極流の流れを計算するために、CMEMS が提供する月平均流速データ(GLOBAL\_EANALYSIS\_PHY\_001\_030)の再解析を行った。このデータセットは、モデルデータから各種の観測データを同化したもので、空間分解能は  $1/12^{\circ} \times 1/12^{\circ}$ 、時間間隔は月、水深変動範囲は  $-0.5 \sim -5728\text{m}$ 、1993~2018 年の時間範囲で 50 層に分けられている。

### 2.2 National Centers for Environmental Prediction 再解析データ

本研究の風速のデータセットは、米国国立環境予測センター(National Centers for Environmental Prediction 以下は NCEP)が提供するグローバル再解析の月平均データである。使用の時間範囲は 1993 年から 2018 年である。NCEP データは複数のソースからの観測データの予測値を用いて、同化・融合した結果のデータである。米国国立大気研究センター(NCAR)が提供する月平均データのグローバル再解析は、1993 年から 2018 年までを 1 ヶ月間隔で、 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  の空間分解能で行っている。

## 2.3 南極環状モード指標

Southern Annular Mode(SAM)は、緯度  $40^{\circ}\text{S}$  と  $65^{\circ}\text{S}$  の間の気圧差に基づいて観測される。SAM 指数が正の値になると、中高緯度 ( $50^{\circ}\text{S}$  ~  $70^{\circ}\text{S}$ ) の偏西風が平均よりも強くなり、中緯度 ( $30^{\circ}\text{S}$  ~  $50^{\circ}\text{S}$ ) の偏西風が弱くなる。SAM は、月単位および年単位での大気循環の主要な変動モードである。SAM 指数は 1957 年までさかのぼり、 $65^{\circ}\text{S}$  付近の 6 つの観測点と  $40^{\circ}\text{S}$  付近の 6 つの観測点の記録をもとにしている。SAM の変動は、南極の地表温度や海洋循環など、気候の多くの側面に大きな影響を与える。本研究で使した SAM 指数データは Gareth Marshall (British Antarctic Survey) からダウンロードした。

## 2.4 ETOPO1 海底地形データ

本研究の海底地形データは、米国国立地球物理データセンター (National Geophysical Data Center) が公開している ETOPO1 Global Land Topography and Ocean Bathymetry データを、本研究では  $1/60^{\circ} \times 1/60^{\circ}$  の空間分解能で使した。ETOPO1 は 1 分間隔の全球 (陸域および海域) の DEM で、2009 年より NGDC (National Geophysical Data Center) から公開されている。世界各地の測深情報が統合されており、本研究においては南大洋のドレーク海峡におけるデータを使用した。

## 第三章 計算方法

### 3.1 渦運動エネルギー計算方法

渦運動エネルギー解析は、海流と渦の時間的変動を調査するためによく使用されている[8]。渦運動エネルギー(EKE)の方程式:

$$EKE = \frac{g^2}{2f^2} \left[ \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right]$$

ただし、 $g$  は重力加速度(9.80665m/s<sup>2</sup>)、 $\eta$  は力学的海面高度アノマリー(Surface Level Anomaly : SLA m)、 $x$  は東、 $y$  は北を示す。 $f$  はコリオリパラメータ、 $f = 2\omega \sin \varphi$  (ただし、 $\omega$  : 地球の自転角速度)である。(7.292115 x10<sup>-5</sup>rad/s)  $\varphi$  は緯度。

### 3.2 地衡流計算方法

流体の運動において、コリオリ力と圧傾度力のバランスだけで説明できる流速成分のことを地衡流と呼び、地衡流平衡の式は

$$u = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$
$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

ただし、 $u$ (m/s)は東を正東西方向の流速、 $v$ (m/s)は北を正南北方向の流速。

### 3.3 最小二乗法計算方法

最小二乗法(または、最小自乗法)とは、誤差を伴う測定値の処理において、その誤差の二乗の和を最小にすることで、最も確からしい関係式を求める方法である。

最小二乗法とは、モデル関数を $f(x)$ とするとき:

$$\sum_{i=1}^n \{y_i - f(x)\}^2$$

が最小となるように $f(x)$ を求めることである。

最小二乗法による回帰係数の計算方法:

回帰直線を  $y=ax+b$  とするとき

$$a = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

ここで、 $s_{xy}$ は  $x$  と  $y$  の共分散。 $s_x^2$ は  $x$  の分散。 $n$  は 2 変数データ( $x,y$ )の総数である。 $x_i$ と $y_i$ は個々の数値。 $\bar{x}$ と $\bar{y}$ はそれぞれの平均値を表す。

### 3.4 流量計算方法

流量の計算方程式:

$$V = \iint v \, dx \, dz$$

ここで、 $v$ は水平流速で、 $V$ は水平流速成分の流量(Sv)を表す。

## 第四章 結果

### 4.1 南極周極流の季節流速変化と渦運動エネルギーの構造

#### 4.1.1 南極周極流季節流速変化

ACC は、西から東に向かって緯度方向に流れ、複雑で変化に富んだ海洋フロントを伴っており、南大洋全体の海洋循環システムを支配している。本研究では、2011 年から 2018 年までの 8 年間の CMEMS 衛星データを用いて、南大洋における ACC の 8 年平均の表面流れ場を計算した。南大洋の異なる季節の海面流れ場をそれぞれ Figure 1 に示す。Figure 1-a は 9 月から 11 月までの南大洋 ACC 春の流れ場、Figure 1-b は 12 月から 2 月までの南大洋 ACC 夏の流れ場、Figure 1-c は 3 月から 5 月までの南大洋 ACC 秋の流れ場、Figure 1-d は 6 月から 8 月までの南大洋 ACC 冬の流れ場を示している。Figure 1(a, b, c, d)に見られるように、アガレス海流と東オーストラリア暖流は、南極周極流に流れている。ブラジル暖流とマルビナス寒流が形成する高気圧性循環は、年間を通じて比較的安定していることがわかる。

Figure 1-e は、異なる季節における経緯方向に沿った流量成分の変化を示している。その結果、南半球の緯度方向の流速は、経度平均、緯度平均ともに、夏よりも冬の方が  $2\sim 8\text{cm/s}$  大きく (Figure 1-e 左側)、夏には流速は最小値があることがわかる。緯度方向の流れに比べて、子午線方向の流れは変動が大きく、南半球では  $53^\circ\text{S}$ 以南と  $37^\circ\text{S}$ 以北の子午線方向の流れが夏より冬に強くなるが、 $37^\circ\text{S}$ と  $53^\circ\text{S}$ の間では逆の変動が起こる (Figure 1-e 右側)。また、 $60^\circ\text{W}$ と  $70^\circ\text{W}$ の間の極差は、主にドレーク海峡付近の強い緯度境界流と子午線境界流による影響で、極差が発生する。

ACC の平均流速の季節変動と南大洋の風速の季節変動は非常によく似ている (本研究の考察部分で風速と EKE の議論でも示されている)。最小速度 ( $22.4\text{cm/s}$ ) は 2 月に発生し、南半球の冬には、西風の増加に伴い速度 (最大  $32.3\text{cm/s}$ ) が大幅に増加する。また、表 1 には各海域の 8 年平均流速値を、Figure 2 には 8 年平均の海面平均流場を示した。表 1 と Figure 2 を合わせると、アフリカ南部から東に向かって ACC が徐々に弱まっていることがわかる。表 1 に示すように、平均流速の最大値 ( $40\text{cm/s}$  以上) はインド洋南西部で、平均流速の最小値 ( $18\text{cm/s}$ ) は大西洋南部で見られる。

#### 4.1.2 渦運動エネルギーの構造

海洋循環は、海洋の運動エネルギーの大部分を占めており、大規模な海洋循環に大きな影響を与えている[9]。衛星高度計による観測は、海洋 EKE とその大規模海洋循環や気候との相関関係を研究するための優れたデータを提供している。

本研究では、海面高度アノマリーデータ(sea level anomaly, SLA)から算出した ACC の渦運動エネルギーの結果から考察している。Figure 3-a は 2011~2012 年の南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図である。Figure 3-b は 2013~2014年の南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図である。Figure 3-c は 2015~2016 年の南大洋 ACC 渦運動エネルギー(EKE)平均値図である。Figure 3-dは 2017~2018 年の南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図である。南大洋の EKE 分布を見ると、南大洋で ACC に沿って高い EKE 値が存在することがわかる(Figure 3)。また、Figure 3(a, b, c, d)に見られるように、EKE の空間的な分布を示して、同じパターンの変動を示している。ACC の運動エネルギーの空間分布は Qiu and Chen[10]の計算結果と一致している。ACC では他の海域に比べて渦の運動エネルギーが著しく強く、 $200 \text{ cm}^2 / \text{s}^2$ を超えている。EKE の最大値はアガシ海流の海域とベース・マルビナス収東海域で見られる(Figure 3)。この結果は、Gordon [11]の論文に記載されている「南大洋は世界の海の中で最も強い渦エネルギーを持つ場所の一つである」という記述と一致している。

また、SLA データ(2011 年 1 月~2018 年 12 月)から、ACC の 4 つの季節の渦運動エネルギー平均値図を作成した。Figure 4(a, b, c, d)に示すように、ACC は南半球の夏に平均値[December - February (DJF)]が最小となる。ACC が南半球の夏に EKE 平均値が最小となることを示すために、8年間の季節の EKE 平均値を計算した。EKE の平均値も季節によって異なり、南半球の春[September-November (SON)]では  $105.012 \text{ cm}^2 / \text{s}^2$ 、南半球の夏[December -February (DJF)]では  $88.073 \text{ cm}^2 / \text{s}^2$ 、南半球の秋[March-May (MAM)]では  $94.373 \text{ cm}^2 / \text{s}^2$ 、南半球の冬[June-August (JJA)]の平均 EKE は  $102.005 \text{ cm}^2 / \text{s}^2$ であった。このように、EKE の季節変化のプロットと ACC の結果と合わせて見ると、EKE 平均値と ACC 平均流速の結果は一致しており、南半球の夏に最小値が発生していることがわかる。

ACC のエネルギー特性をより詳細に説明するために、南大洋 ACC 全体 EKE 平均値と季節変動を示す(Figure 4-e, f)。Figure 4-e, f から明らかなように、EKE は南大洋の全セクターの中で、インド洋セクターの EKE 平均値が最も高く、大西洋南部セクターと太平洋北部セクターの EKE 平均値

が最も低くなっている。すべての EKE パターンは、西から東に向かって弱くなる傾向がある。南大洋の EKE の季節変動グラフから見ると、夏に南半球で最小値を示すことがわかる。最大値は、インド洋、オーストラリア東部、ドレーク海峡であることがわかる。

EKE 図を ACC の流速図と合わせて見ると、平均 EKE 値は西から東に向かって減少し、平均 EKE 値が高いほど ACC の流速が高い海域に対応していることもわかる。Figure 3 に示すように、EKE 平均値が最も高いのは南西太平洋で、アガレス海流や東オーストラリア暖流で EKE 平均値大きくなっている、最も弱いのは南東太平洋である。Figure 3, 4 に示すように、ACC 全体は各海域における EKE 最大値の結果と ACC 流速最大値の結果と一致している。

## 4.2 南極周極流ドレーク海峡季節流速変化と渦エネルギーの構造

### 4.2.1 南極周極流ドレーク海峡季節流速変化

南大洋では、ACC がインド洋、太平洋、大西洋の循環を結びつけているため、海洋間の流れと EKE の伝達にグローバルな経路を提供している。

ACC は、温度勾配によって区別される連続的な極前線によって特徴付けられ、北側の明確な亜南極水と南側のより冷たい南極水塊を分けている[12]。これらの前線は、700km のドレーク海峡に密集している。ACC はドレーク海峡 を流れるため、ドレーク海峡における ACC の EKE や流量を容易に測定・研究できるとして良好な観測点となっている。

本研究では、2011 年から 2018 年までの 8 年間の CMEMS 衛星データを用いて、ドレーク海峡における南極循環極流の 8 年平均の表面流速場を計算した。ドレーク海峡の異なる季節の海面流れ場をそれぞれ Figure 5 (a, b, c, d) に示す。Figure 5-a は ドレーク海峡の春 [September–November (SON)] の平均流速値は  $0.262\text{m/s}$ 、Figure 5-b は ドレーク海峡の夏 [December – February (DJF)] では平均流速値  $0.252\text{m/s}$ 、Figure 5-c は ドレーク海峡の秋 [March–May (MAM)] の平均流速値は  $0.254\text{m/s}$ 、Figure 5-d は ドレーク海峡の冬 [June–August (JJA)] の平均流速値は  $0.261\text{m/s}$  あった。南半球の夏に最小値が発生していることがわかる。また、Figure 5 (a,b,c,d) に見られるように、ACC はドレーク海峡のほぼ全域を満たしており、流れ場の図からわかるように、地衡学的な偏向の影響により、北岸の流速が南岸よりも大きくなっている。

ドレーク海峡 ACC は西から東に向かって緯度方向に流れ、複雑で変化に富んだ海洋フロントを伴い、南大洋全体の海洋循環システムを支配している。ドレーク海峡では、ブラジル海流、フォークランド海流などが ACC と相互作用している。また、ドレーク海峡の流速の最大値は、ブラジル・フォークランド海流の交点で発生する。

### 4.2.2 ドレーク海峡渦運動エネルギーの構造

本研究では、SLA データ (2011 年 1 月～2018 年 12 月) から、南極循環極流の 4 つの季節の EKE 平均値図を作成した。Figure 6 (a, b, c, d) に示すように、ACC は南半球の夏に平均値 [December – February (DJF)] が最小となる。さらに、南極循環極流が南半球の夏に EKE 平均値が最小となることを示すために、8 年間の季節の EKE 平均値を計算した。EKE の平均値も季節によって異なり、南半球の春 [September–November (SON)] では  $83.52\text{cm}^2 / \text{s}^2$ 、南半球の夏 [December – February

(DJF)]では $80.54\text{cm}^2 / \text{s}^2$ 、南半球の秋[March-May (MAM)]では  $82.34\text{cm}^2 / \text{s}^2$ 、南半球の冬 [June-August (JJA)]の平均 EKE は $81.77\text{cm}^2 / \text{s}^2$ であった。

このように、EKE の季節変化のプロットと ACC の結果を合わせて見ると、ドレーク海峡における EKE 平均値と ACC の結果は一致しており、EKE 平均値は南半球の夏に最小値が発生していることがわかる。最大値は主にブラジル・フォークランドの交点で発生している。

### 4.3 ドレーク海峡渦運動エネルギー年間変化

本研究では、衛星データを用いてドレーク海峡(経度  $80^{\circ}$  W- $40^{\circ}$  W、緯度  $40^{\circ}$  S- $65^{\circ}$  S)の EKE 値を計算し、そのデータから見ると、EKE は季節変動を示すだけでなく、EKE の強い上昇が見られることがわかった。トレンドラインは直線的で、明確な経年変化を示している。本研究では、ACC の渦運動エネルギー特性を詳細に説明するために、25 年分のデータ(1993 年 1 月~2018 年 12 月)を利用した。ドレーク海峡の 25 年間の経年変動のグラフから、ドレーク海峡の EKE 経年変動の様子が示されている(Figure 7)。

本研究は、1993 年から 2018 年まで海面高度アノマリーデータ(SLA)を用いて、南緯 40 度から 65 度までの海域の EKE 平均値を算出した。EKE は Figure 7 に示すように、ドレーク海峡では渦によって EKE が増加傾向にあることを示している。トレンドラインの両端の値は  $75.12 \text{ cm}^2 / \text{s}^2$  と  $80.11 \text{ cm}^2 / \text{s}^2$  で、渦の運動エネルギーが  $4.99 \text{ cm}^2 / \text{s}^2$  増加していることがわかる。EKE の傾向は、前回の結果と合わせて分析することによって、ACC 地域の EKE 季節変動は小さくなく、年間変化が大きいことが分かった。

本研究で算出した ACC の EKE 値は、DONOHUE[13]の結論と一致している。Figure 7 の黒線は ACC における EKE の 12 ヶ月間の移動平均を示しており、主に  $70 \sim 80 \text{ cm}^2 / \text{s}^2$  の間で変動している。移動平均ラインを見ると、EKE 値には明確な経年変化があることがわかる。EKE 値の経時変化のトレンドラインを最小二乗法で求めたところ、Figure 7 の赤い実線で示された。グラフに見られるように、EKE の経年変化は増加傾向を示していることがわかる。ドレーク海峡における EKE も 1993 年から 2018 年にかけて、数年から十年程度の大きな変動を示していることがわかる(Figure 8)。例えば、EKE は 1995 年から 2002 年にかけて徐々に強まる傾向を示し、Figure 7 の黒線から見ると、2002 年にピークを迎え、2001 年から 2003 年には著しく高くなったが、2005 年には急激に低下していた。

#### 4.4 ドレーク海峡流量年間変化

これまでの研究のほとんどは、ACC 海域における境界流の伸長と EKE の変動を調べたものである。また、最近の研究では太平洋亜熱帯・太平洋海域におけるメソスケールの渦の活動についても調べられている。本研究は、これらの地域における EKE の変動と平均流量が相関していることを示唆している。

ACC の流量を計算するために、Figure 8(断面図)の赤の実線で示すように、ドレーク海峡の南端の南米と South Shetland Islands 諸島に、ETOPO1 を用いて Figure 9 の水深データを取得して、経度  $66^{\circ}$  W- $60^{\circ}$  W、緯度  $55^{\circ}$  S- $65^{\circ}$  S の区間 a-a'(Figure 9)を設定した。Figure 9は CMEMS による再解析月平均 3 次元流速値を Figure 8の区間 a-a'に補間し、区間に垂直な流速成分を抽出して、区間内の流速分布を解析し、区間内の流量を計算した。

ACCの水体は全域を満たしており、地衡学的な偏向力を受け、北岸の流速が南岸の流速よりも大きく、流れ場(Figure 5)にもよく反映されている。ACC 流量の計算結果を、通過区間 a-a'(Figure 9)上の平均流速(1993~2018 年)について Figure 10 に示す。平均流量は 171.12 SV であった。DONOHUE [13]によると、ACC の年間平均流量は 150 SV 以上、高い値では 170 ~ 180 SV とされている。したがって、本研究で算出した ACC の流量値は、DONOHUE[13] の調査結果と一致している。Figure 10の青線は ACCの流量の12ヶ月間の移動平均を示しており、その値は主に160 ~ 200Sv の間で変動しており、経年的にも大きな変動があることがわかる。Figure 10 の黒の実線で示されているように、最小二乗法を用いて、時間経過に伴う流量のトレンドラインを得た。Figure 10 では、ACC の流量の経年変化のトレンドラインは基本的に一定であり、1993 年から 2018 年にかけて ACC の平均流量がほぼ一定であったことを示している。

#### 4.5 ドレーク海峡月平均風速年間変化

ACC は風成海流であるため、その速度や流れの変化は風場の変化と相関があり、1993 年から 2018 年までの NCEP 月平均風場データを用いて、経度  $80^{\circ}$  W- $40^{\circ}$  W、緯度  $40^{\circ}$  S- $65^{\circ}$  S の偏西風帯内の風場の変化を分析した。

本研究のために計算された風速の値は、Figure 11で見ることができる。図から  $40^{\circ}$  S~ $65^{\circ}$  S 地域の平均風速は 3.82m/s。Figure 11 の赤い線は、風速の 12 ヶ月間の移動平均を示しており、その値は主に 3.7~4.0m/s 間で変化している。この移動平均から、風速には明確な経年変化があることがわかる。

風速の経年変化のトレンドラインを最小二乗法によるフィッティングで求めたところ、Figure 11 の緑の実線で示されるように、初期の 3.78m/s から 3.85m/s まで、明らかな経年変化を伴った上昇傾向が見られた。以上のことから、ドレーク海峡の風速と EKK の値は、1993 年から 2018 年の間、明らかに経年変動を示すことがわかる。

## 第五章 考察

### 5.1 ドレーク海峡の月平均渦エネルギーとSouthern Annular Mode相関性

Michael [21]の研究では、衛星高度計データの解析により、2000年から2002年にかけて南極循環極流(ACC)の渦動エネルギー(Eddy Kinetic Energy: EKE)が異常に高くなっており、その2~3年前(1998年)に、Southern Annular Mode (SAM)が顕著な正のピークを示し、これに呼応してACCも1998年頃にピークを迎えたことが示されている。また、渦を分解する海洋モデルを用いて、風の強さと渦の反応の遅れを調べ、その遅れがACCの深層循環に影響を与えるまでの時間によるものであることが示されていた。そこで、本研究では、ドレーク海峡のEKEとSAM相関性に関して検討した。

SAMインデックス12ヶ月移動平均の時系列(Figure 12 b)と風速12ヶ月移動平均の時系列を(Figure 12 a)に示す。2つのトレンドにはかなり高い一致が見られ、いずれも最大値と最小値が良く一致する様子が見られる。また、SAMと風速相関係数グラフ(Figure 13 a)によると、相関係数は0.62に達していることがわかる。

Figure 12 c はEKE12ヶ月移動平均の時系列、Figure 12 bと比較すると、EKEとSAM指数の相関は3年目に最も強くなり、相関係数は0.46に達した(Figure 13b)。SAM指数の極大/極小が発生するたびに、3年前後で渦運動エネルギーの極大/極小反応があることが明らかになっている。一方、SAM指数が弱い時、EKEの反応は遅くなる、変化が明らかになれない。そのため、SAM指数に対する渦の運動エネルギーの遅延応答時間は約3年と考えられる。

### 5.2 ドレーク海峡の月平均渦エネルギーと月平均風速の相関性

ドレーク海峡海域内における渦運動エネルギーの12ヶ月間移動平均と風速12ヶ月間移動平均時系列値を相関分析させた。また、Figure 13 から見ると、風速の極大値/極小値から8ヶ月前後で、渦運動エネルギーの極大値/極小値の反応があることがわかる。そして、EKEと風速相関結果はFigure 14 のとおりで、渦運動エネルギーが風速場に8ヶ月遅れているときの相関係数は0.28となった。このことから、風速場と渦運動エネルギーの間には弱い正の相関関係があり、風速とEKEは8ヶ月を遅れることを示している。Figure 14cの結果からわかるように、風速場が12ヶ月遅れているときの相関係数は0.36で、風速は渦の運動エネルギーに弱い正の影響も与えている。

風速は、海面に一定のエネルギーを表面応力で入力し、緯度平均流を駆動する一方で、等密度

面を傾けることができるので、等密度面の傾きが発生し、傾圧不安定(擾乱に対する成層した海洋の不安定性)によりある程度特徴づけることができる。傾きが大きいほど、成層が斜め方向に不安定になる傾向があることになる。地球の自転の下で風速が加速されると、海洋上層部の北向きのエクマン輸送が継続的に強化され、垂直運動も南で上昇、北で沈下というアノマリーを示すため、局所的な子午線循環が強化され、その結果、ACC 領域全体の等密度面の傾きが増大する[14]。等密度面の傾きが大きくなると、平均流の位置エネルギーが渦運動エネルギーに変換される可能性が高くなり、傾圧の不安定性が高まる。したがって、渦活動の調整メカニズムとしては、風速による等密度面の傾きが背景の海の層状構造を変化させ、斜めの圧力不安定性を強化することで、平均流の位置エネルギーをより多くの渦運動エネルギーに変換できるようになるということが考えられる。

### 5.3 ドレーク海峡の月平均渦エネルギーと ENSO の相関性

Morrow[23]の研究では、「1993-2008 年の SLA データで、南大洋の EKE は SAM と ENSO に関連していることを示唆している。ラニーニャ現象(負の ENSO)と重なると、南太平洋の子午線方向の風の異常な強さが強まり、2~3 年後に EKE が強いことが観測される。しかし、エルニーニョ現象(正の ENSO)と重なると、観測された EKE は弱くなる、そして、南大洋で EKE と ENSO は負相関があり、2 年遅れた時、明確な相関関係を示している。」ことが述べられている。本研究では、2014-16 年と 1997-98 年の期間のドレーク海峡の EKE 値は、他の年に比べて極端に減少しており、南大洋における ENSO インデックス値の経年変動のグラフ(Figure 15 a)を見ると、2014-16 年と 1997-98 年にそれぞれ強いエルニーニョが発生していることがわかる。そこで、本研究は月 EKE と ENSO インデックス値を使用して、相関係数を計算した。計算結果を Figure 16 に示す、渦運動エネルギーが ENSO に 10 ヶ月遅れているときの相関係数-0.58、エルニーニョと渦運動エネルギーには負の相関があることがわかった。これらの結果は、Morrow の研究結果とも一致している。

南半球における気候変動のパターンは、エルニーニョ南方振動(ENSO)と関連している。このモードは熱帯性のものだが、大気中にロスビー波を発生させ、その信号が高緯度地域に伝わり、風、海面温度、海氷面積の局所的な変動を引き起こす。平年は、太平洋上では南東の貿易風が卓越して、赤道表面の東風ストレスが暖かい表層水を西太平洋に運び、それが蓄積されることで、海面が上昇し、海水が温かくなる。一方、東太平洋では、沖合風の影響を受け、表層水の沖合漂流が生じ、その結果、ここの海水量が継続的に分散し、海面が低下する。ペルー寒流が低緯度に流れ

ることで、高緯度では下層から冷たい海水が湧き上がり、これらがすべて EKE に影響を与える。

そして、南東貿易風が弱まると、表層の暖かい水が東側に逆流し、東太平洋赤道域の海面が上昇し、海面水温が上昇し、ペルーやエクアドルの沿岸は冷たい海流から暖かい海流に変わり、冷たい水の湧き上がり現象がなくなる。そのため、ENSO のインデックス値が高くなると、その結果、EKE が低下することがわかる。この研究では(5.4 で説明)、EKE と流量には負の相関があることも述べられており、上記のようにペルーとエクアドルの沿岸で寒流から暖流に変化したことにより、ACC に海水が補給されるとともに EKE が低下し、ACC の流量が増加していると考えられる。

#### 5.4 ドレーク海峡の月平均渦エネルギーと流量の相関性

ドレーク海峡の EKE 値と流量の相関関係を調べるために、ドレーク海峡地域内における EKE の 12 ヶ月間移動平均と流量 12 ヶ月間移動平均時系列値として相関分析させた。本研究は経度  $110^{\circ}$  W- $10^{\circ}$  W、緯度  $45^{\circ}$  S- $65^{\circ}$  S の海域を選び、15 の小エリア(S1-S15)に分けて、各エリアについて EKE 値と ACC 流量の相関係数値 R は Figure 17 のように示す。Figure 17 の分析結果によると、ACC では S13 のエリアの相関係数がそれぞれ-0.41、他のエリアに比べて絶対値が大きい。s13 エリアはドレーク海峡にあるので、つまり、ドレーク海峡では EKE 値と流量に負の相関があることがわかる。Figure.17 より、ACC の北側海域のドレーク海峡の EKE と流量には相関がないことがわかる。さらにペルー海域の EKE と流量の相関係数(S2, S3)を見ると、両者の間にはほとんど相関がない。そして、ドレーク海峡海域の EKE 値がドレーク海峡の流れに影響を与えていることがわかる。また、Figure 18 は、S1-S15 エリアの相関係数グラフである。相関係数グラフから見ると、ACC エリア(S7, S8, S9, S13)の EKE と流量の間に遅延があることがわかる。

ドレーク海峡の EKE 値と流量の相関関係を計算した結果は Figure 19 の通りで、EKE とドレーク海峡の月平均流量との間には、相関係数が-0.41 となり、負の相関があることがわかった。また、相関係数グラフ(Figure 19)から見ると、流量が渦運動エネルギーに 5 ヶ月遅れているときの相関係数は-0.42 となり、渦の運動エネルギーに対する流量の反応は、5 ヶ月を遅れることを示している。そして、ドレーク海峡で、渦運動エネルギーが増加した後、流量が 5 ヶ月後応答することが分かった。

これは、Golibao[15]の示した「ACC の平均運動エネルギー(MKE)と渦運動エネルギー(EKE)の値は反比例しており、ACC の主流域の平均運動エネルギーが大きく、渦の乱れが効きにくく、主流域以外の平均運動エネルギーは主に渦の消散に使われる」ということ一致し、渦の運動エネル

ギーの増加は、平均的な運動エネルギーを減少させて、流量を減少させることを示している。

また、本研究では、SAMとENSO現象がEKEと流量の相関係数に影響を与えているかどうかを議論するために、SAMインデックス値とENSOインデックス値に応じて、(1)SAMインデックス値とENSOインデックス値の両方が正の場合の流量とEKE値、(2)SAMインデックス値とENSOインデックス値両方が負の場合の流量とEKE値、(3)SAMインデックス値が正で、ENSOインデックス値が負の場合の流量とEKE値、(4)SAMインデックス値が負、ENSOインデックス値が正の場合の流量とEKE値。以上の4つケースに流量とEKE値分類している。EKE値と流量の相関係数( $R^2$ )は、ケース1、2、3、4でそれぞれ0.0384、0.0143、0.0280、 $2E-06$ と計算され、EKEと流量の相関係数は非常に低く、ほとんど無相関であることがわかった。また、Figure 21a~dによると、EKE値と流量の散布分布とトレンドラインが分析されているが、EKEと流量の間にも相関関係が見られなかった。つまり、散布図と相関係数の値の結果から見ると、SAMとENSO現象は、EKEと流量の相関係数にほとんど影響を与えていないと考えられる。

## 5.5 ドレーク海峡月平均風速と流量の相関性

ドレーク海峡地域内における風速12ヶ月間移動平均と流量12ヶ月間移動平均時系列値から相関を調べた。結果はFigure 23のとおりで、ドレーク海峡では、風速と流量の間には相関関係が弱いことがわかる。風速と流量の相関係数は、1ヶ月遅れで0.18に達したが、6ヶ月後には-0.15になった。つまり、ドレーク海峡内では、風速が上がると短時間で流量が増加するが、6ヶ月後には流量が減少してしまうことがある。

風の風応力は、運動エネルギーを直接ACCに送り込むので、風応力の増加により、緯度方向の風応力も増加して、ACC緯度方向の速度を増加させ、短時間で流れが増加し、1ヶ月後にはACCの流れが増加する。しかし、傾圧不安定性が大きくなると、多くのメソスケールの渦が発生し、風速場から海洋に入力されるエネルギーの一部が渦によって散逸するため、6ヶ月後にはACCの流れが減少することになると考えられる。

## 第六章 まとめと今後の課題

### 6.1 まとめ

本研究では、複数の衛星データを用いて、南極周極流とドレーク海峡における渦運動エネルギーの平均構造、変動パターン、エネルギー特性を調べ、以下のような結論が得られた。

1. CMEMS 衛星データを用いて、南極周極流の表層流構造と変動性を解析した。南極周極流は、西から東へと緯度方向に流れ、南極周極流の最大流速は、主にアガレス・モザンビークとブラジル・フォークランド海流の交点で見られた。年間の衛星データから得られた平均的な流れ場は、アガレス・モザンビークと東オーストラリア暖流はともに、南極周極流の安定した流れと合流し、ブラジル暖流とフォークランド海流域に形成される高気圧性循環は年間を通じて比較的安定していた。南半球の冬期には、偏西風の強まりとともに ACC の流れが強まっていた。ACC は、アフリカ南部から西から東に向かって徐々に減少していき、最大平均流速(以上 40cm/s)はインド洋南西部に見られ、平均流速の最小値は 南大西洋(18cm/s)に見られた。
2. 本研究では、海面高度偏差データ(sea level anomaly, SLA)から算出した ACC の EKE 結論は EKE の空間的な分布を示し、同じパターンの変動を示した。南 ACC では他の海域に比べて渦の運動エネルギーが著しく強く、 $200\text{cm}^2/\text{s}^2$ を超えていた。渦の運動エネルギーの最大値は、アガシの還流域とベース・マルビナスの収束域で見られた。ACC 渦運動エネルギー平均値は西から東に向かって減少し、平均 EKE 値が高いほど ACC の流速が高い地域に対応していることも分かった。アガリスク還流や東オーストラリア暖流で EKE 平均値大きくなっており、最も弱いのは南東太平洋であった。この海面 EKE 最大値の結果は、ACC 流速最大値の結果と一致していた。また、EKE 平均値と ACC 流速値結果は一致しており、南半球の夏に最小値が発生していることが分かった。
3. ドレーク海峡では全域に ACC が分布しており、北岸の流速が南岸よりも大きくなっていることがわかった。ドレーク海峡の流速の最大値は、ブラジル・フォークランド海流の交点で発生していた。また、ドレーク海峡における南極周極流季節変化について南半球の夏に最小値(平均流速値  $0.252\text{m/s}$ )が発生していることが分かった。
4. ドレーク海峡における ACC の EKE 平均値の季節変化と ACC の結果と合わせて見ると、EKE 平均値と ACC 流速値の結果は一致しており、EKE 平均値は南半球の夏に最小値が

発生していることが分かった。最大値は主にブラジル・フォークランドの交点で発生していた。

5. 衛星データを用いて、ドレーク海峡を通過する ACC 流量、風速、渦運動エネルギーを計算し、風速と渦の運動エネルギーの相関関係を分析した。SAM と風速のトレンドにはかなり高い一致が見られた。また、EKE1 と SAM の相関関係は、3 年目に最も強くなり、0.4631 に達していた。SAM 指数の極大/極小が発生するたびに、3 年前後で渦運動エネルギーの極大/極小の応答があることが明らかになった。また、風速場と渦運動エネルギーの間には弱い正の相関関係があり、風速場と渦運動エネルギーは 8 ヶ月を遅れていた。
6. ENSO と EKE の相関係数は-0.58 に達し、ENSO と渦運動エネルギーには負の相関があることがわかった。ENSO の変動に対して、EKE が 10 ヶ月遅れて応答すると結論付けることができた。
7. 渦運動エネルギーとドレーク海峡の月平均流量との間には、相関係数が-0.41 となり、負の相関があることがわかった。また、ドレーク海峡で、渦運動エネルギーが増加した後、流量が 5 ヶ月後に応答することが分かった。
8. Figure 21 の散布図と相関係数の値の結果から、SAM と ENSO 現象は、EKE と流量にあまり影響を与えていないと考えられた。

## 6.2 課題

Gómez-Enri [20] で述べられているように、ドレーク海峡は、1998~2005 年の期間に海面変動 (SLA) で計算した EKE 値、クロロフィル濃度値からを見ると、濃度の高い海域と EKE の変動が小さい海域が一致し、EKE はこの海域の生物生産性に影響を与えていると考えられる。従って、今後の研究課題の一つとして、近年 10 年のデータを使用して、南極周極流全体の EKE 平均値とクロロフィル濃度との関係を調べるとよいだろう。また、本研究では、ドレーク海峡における EKE 値と ENSO インデックス値、流量相関性について考察しているが、ACC の全体的な解析過程について、インド洋セクターと東オーストラリアセクターでは、EKE の最大値も存在することを明らかにした。次に、近年 25 年のデータを使用して、インド洋セクターと東オーストラリアセクターにおける EKE 値と ENSO インデックス値、SAM インデックス値との相関性についても調べるとよいだろう。

## 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、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に深く感謝いたします。貴重なコメントをいただきました島田浩二教授に感謝します。そして、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、海面高度計による力学高度データは Copernicus-Marine environment monitoring service、米国国立環境予測センター(National Centers for Environmental Prediction NCEP)のホームページ、米国国立地球物理データセンター(National Geophysical Data Center)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

1. Ryan S, Melicie D, Sean W, et al. The Antarctic CP Current. *Ocean Surface Currents*, 2000.
2. Piola A R, Figueroa H A, Bianchi A A. Some aspects of the surface circulation south of 20°S revealed by first GARP Global Experiment Drifters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C5): 5101- 5114, Doi: 10.1029/JC092iC05p05101.
3. Wilkin J L, Morrow R A. Eddy kinetic energy and momentum flux in the Southern Ocean: Comparison of a global eddy resolving model with altimeter, drifter, and current meter data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99( C 4) : 7903— 7916.
4. Assireu A T, Stevenson M R, Stech J L. Surface circulation and kinetic energy in the SW Atlantic obtained by drifters. *Continental Shelf Research*, 2003, 23 ( 2) : 145— 157, doi: 10. 1016/ S0278-4343( 02) 00190-5.
5. BRYDEN H L, PILLSBURY R D. Variability of deep flow in the Drake Passage from year-long current measurements [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1977, 7(6):803 —810.
6. Bàrbara Barceló-Llull Evan Mason Arthur Capet et al. Impact of vertical and horizontal advection on nutrient distribution in the southeast Pacific *Ocean Sci.*12, 1003–1011, 2016
7. PETERSON R G. On the transport of the Antarctic Circumpolar Current through Drake Passage and its relation to wind [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1988, 93(C11):13993 —14004.
8. WEARN J R, BAKER J D. Bottom pressure measurements across the Antarctic Circumpolar Current and their relation to the wind [J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1980, 27(11):875 —888.
9. FAN JIA AND LIXIN WU. Seasonal Modulation of Eddy Kinetic Energy and Its Formation Mechanism in the Southeast Indian Ocean. [J]. *Journal of Physical Oceanography* 2011.4
10. Assireu A T, Stevenson M R, Stech J L. Surface circulation and kinetic energy in the SW Atlantic obtained by drifters. *Continental Shelf Research*, 2003, 23 ( 2) : 145— 157, doi: 10. 1016/ S0278-4343( 02) 00190-5.
11. Qiu B. Chen S. Decadal Variability in the Large-scale Sea Surface Height *J P O.*2006 1751-1762

12. Legeckis R, Gordon A L. Satellite observations of the Brazil and Falkland Currents: 1975— 1976 and 1978. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1982, 29( 3) : 375— 401, doi: 10. 1016/0198-0149( 82) 90101-7.
13. Orsi, A. H., T. Whitworth and W. D. Nowlin. 1995. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Res., Part 1*, 42, 641–673.
14. DONOHUE K A, TRACEY K L, WATTS D R, et al. Mean Antarctic Circumpolar Current transport measured in Drake Passage[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(22): 11760 –11767.
15. 杨小怡, 黄瑞新, 王佳等 南极绕极流对风应力强迫的延时斜压响应. *中国科学(D 辑)*2008.38(4):501-507
16. 高立宝, 于卫东. 太平洋低纬度西边界流和涡旋结构季节变化的观测分析. *海洋科学进展*, 2008, 26(3): 317—325。
17. Nishida H, White W B. Horizontal eddy fluxes of momentum and kinetic energy in the near-surface of the Kuroshio Extension. *Journal of Physical Oceanography*, 1982, 12( 2) : 160— 170, doi: 10. 1175/1520-0485( 1982) 012 <0160: HEFOMA >2. 0. CO; 2
18. Shaojun Zheng , Ming Feng, Yan Du, et al. Interannual Variability of Eddy Kinetic Energy in the Subtropical Southeast Indian Ocean Associated with the El Ni~no-Southern Oscillation Received 20 OCT 2017.
19. WORTH D. NOWLIN, JR., AND JOHN M. KLINCK The Physics of the Antarctic Circumpolar Current *REVIEWS OF GEOPHYSICS*, VOL. 24, NO. 3, PAGES 469-491, AUGUST 1986
20. Gómez-Enri, J. Quartly, G. D. et al. Characterizing and following eddies in Drake Passage
21. Michael P. Meredith, Andrew M. Hogg Circumpolar response of Southern Ocean eddy activity to a change in the Southern Annular Mode *Volume 33, Issue 16 August 2006*
22. R. Morrow, Marshall L. Ward et al. Eddy response to Southern Ocean climate modes *Journal of Geophysical Research: Oceans* October 2010 *Volume 115, Issue C10*
23. Minyang Wang Bo Qiu et al, Dynamics on Seasonal Variability of EKE Associated with TIWs in the Eastern Equatorial Pacific Ocean 01 Jun 2019 DOI: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0163.1>

## 図表

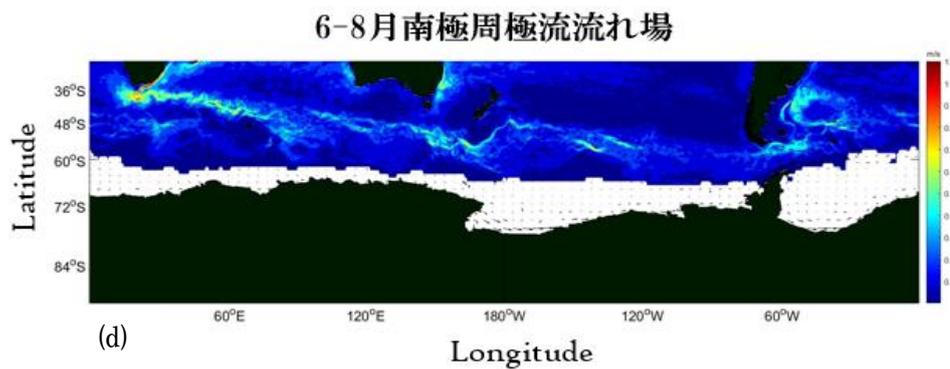
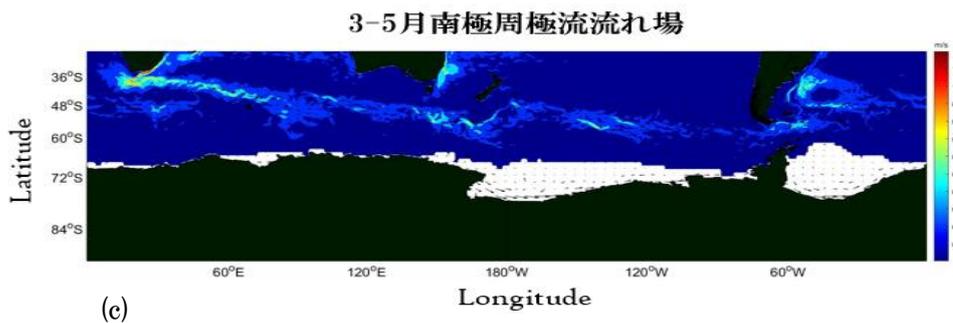
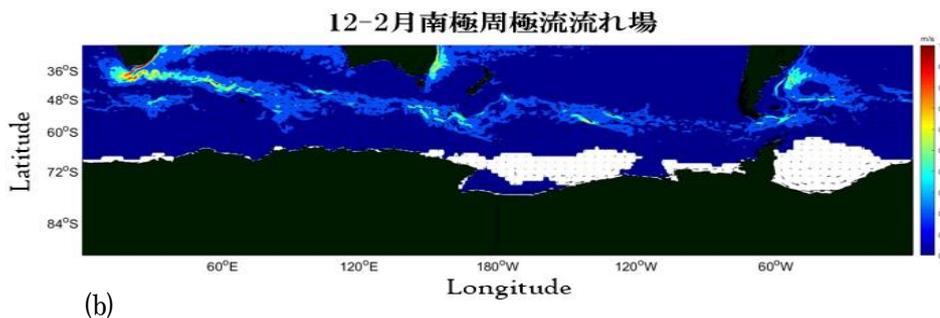
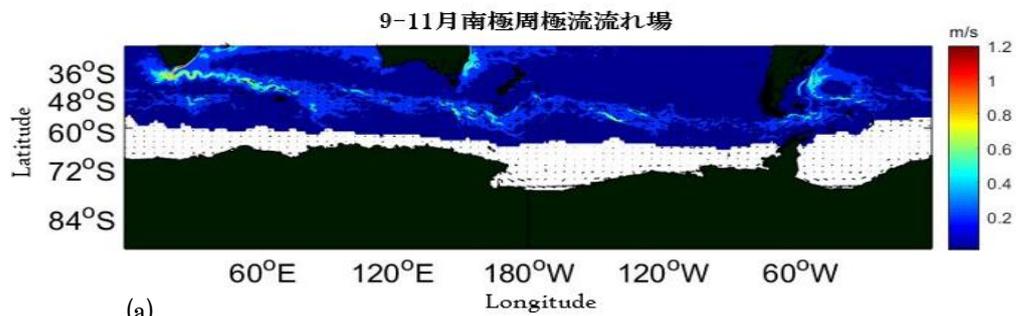
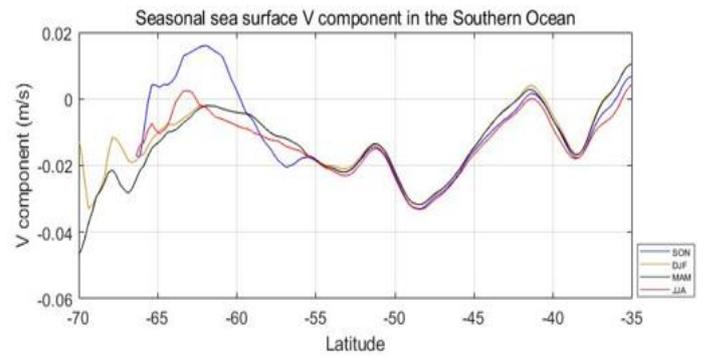
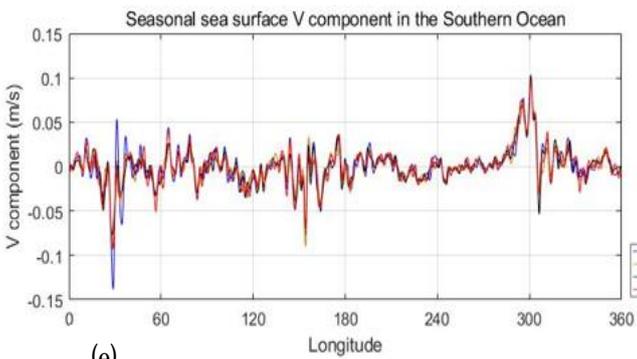
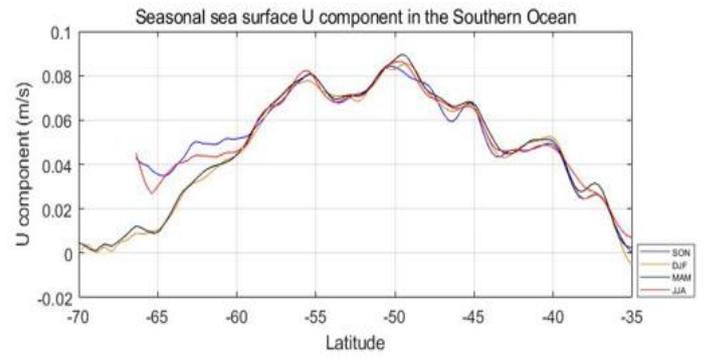
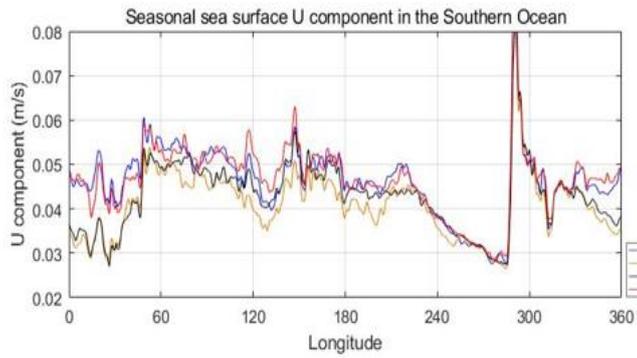


Figure 1 (a) 9-11 月南大洋 ACC 春の流れ場.

(b) 12-2 月-南大洋 ACC 夏の流れ場.

(c) 3-5 月南大洋 ACC 秋の流れ場.

(d) 6-8 月南大洋ACC冬の流れ場.



(e)

Figure 1(e) 緯度方向(左図)と経度方向(右図)の U 成分(上層)と V 成分(下層)の変動

Table.1 the ACC velocity

海域	35°S-65°S	35°S-65°S	35°S-65°S	35°S-65°S	35°S-65°S	35°S-65°S
	40°E-70°E	90°E-120°E	130°E-160°E	150°W-120°W	90°W-60°W	30°W-10°W
流速	44cm/s	40cm/s	39cm/s	36cm/s	36cm/s	18cm/s

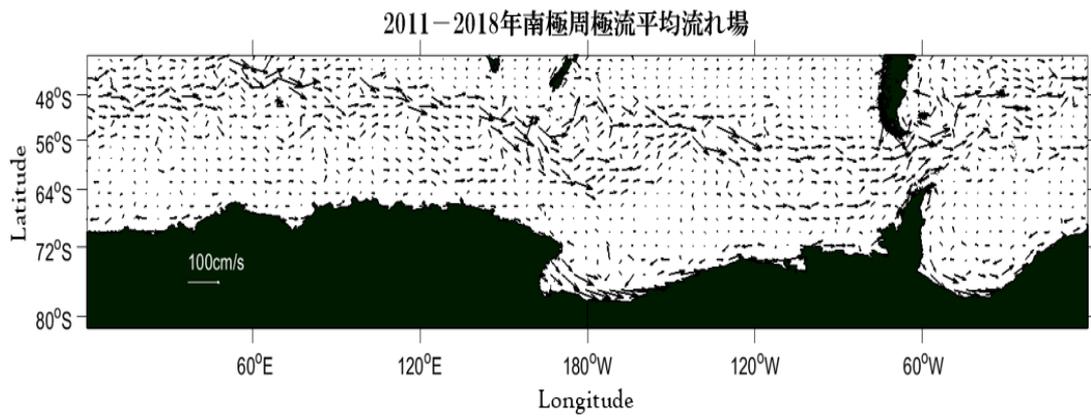


Table.1 には各海域の 8 年平均流速値.

Figure 2 には 8 年平均の海面平均流れ場.

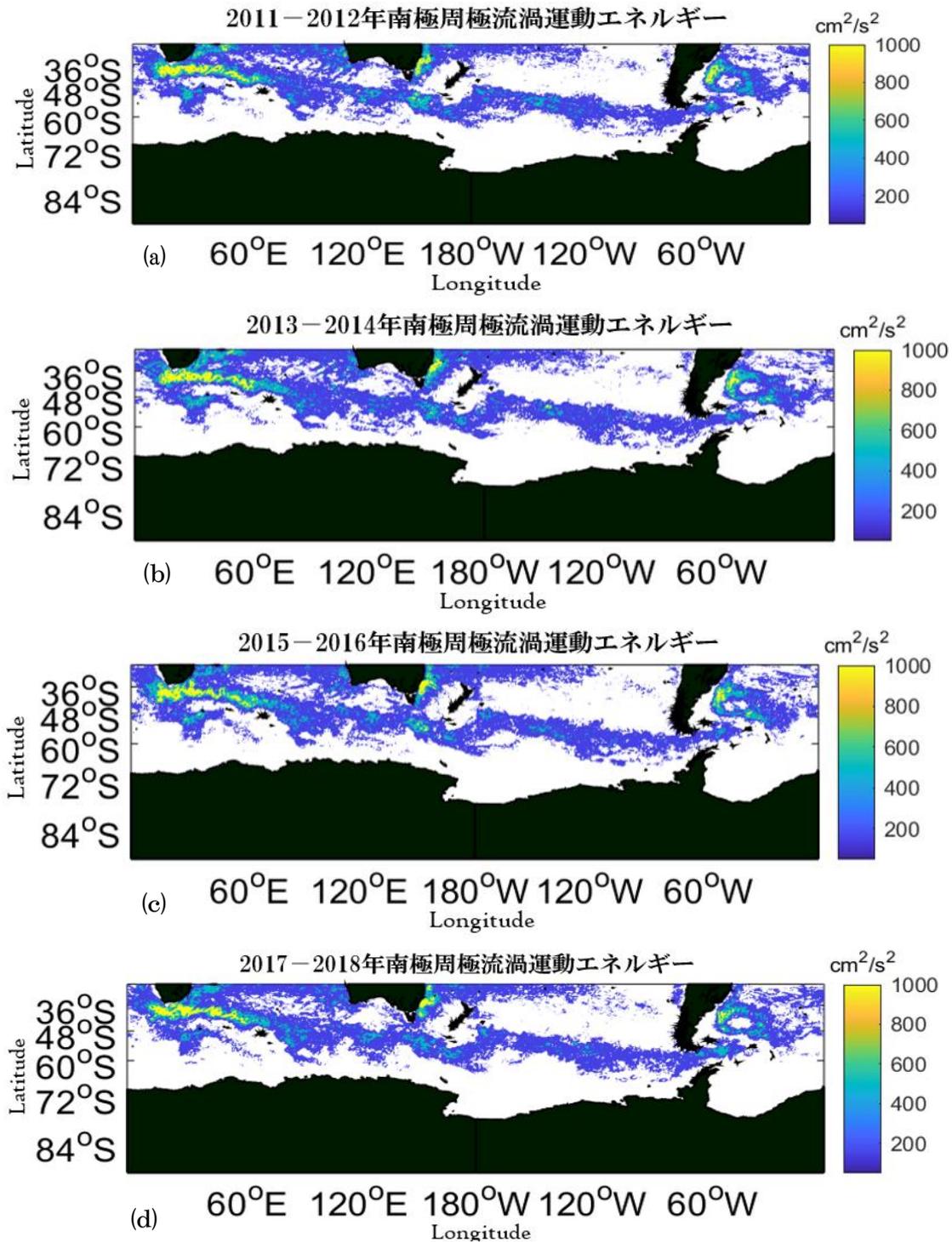


Figure 3 (a)2011-2012 の南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図.  
 (b)2013-2014の南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図.  
 (c)2015-2016 の南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図.  
 (d)2017-2018 の南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図.

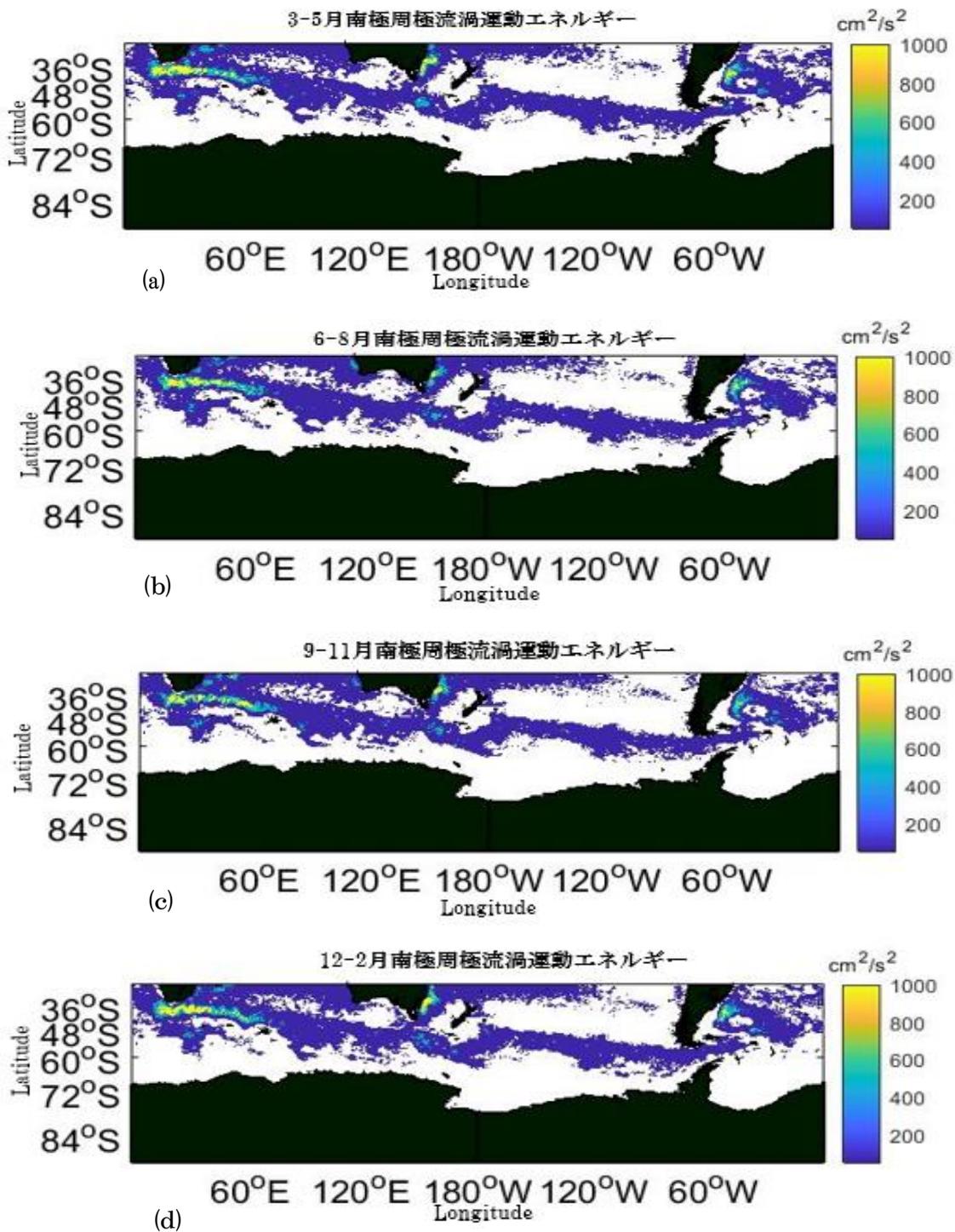
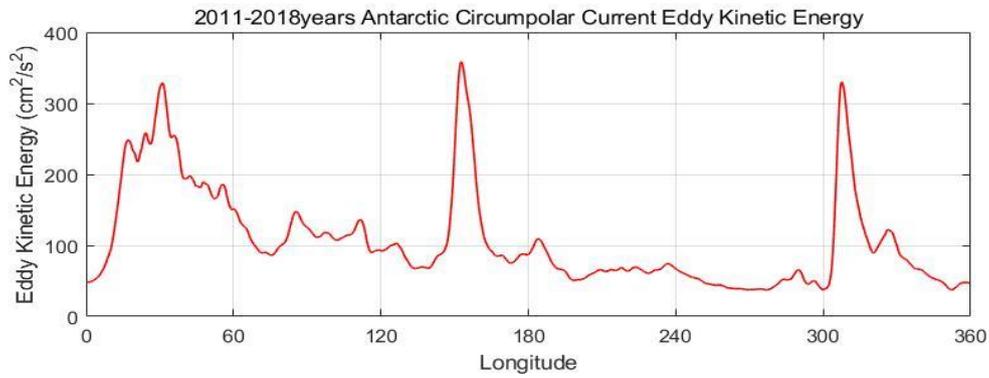


Figure 4(a)9-11月南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図.

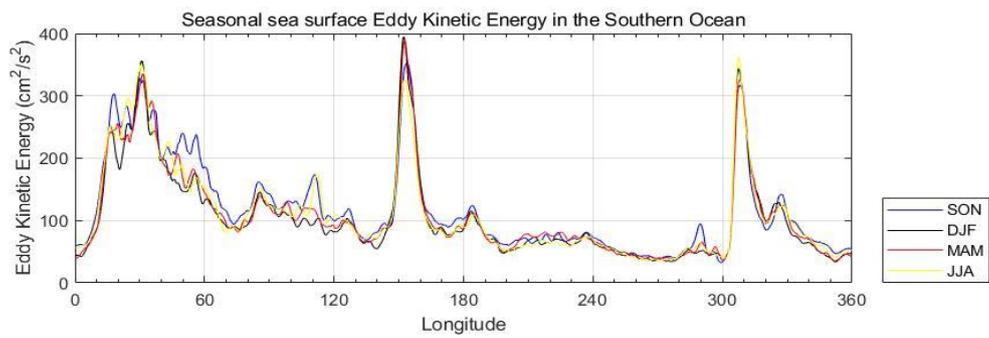
(b)12-2月南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図.

(c)3-5月の南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図.

(d)6-8月の南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図.



(e)



(f)

Figure 4(e)南大洋 ACC 渦運動エネルギー平均値図.

(f) 南大洋 ACC 渦運動エネルギー季節変動の平均値図.

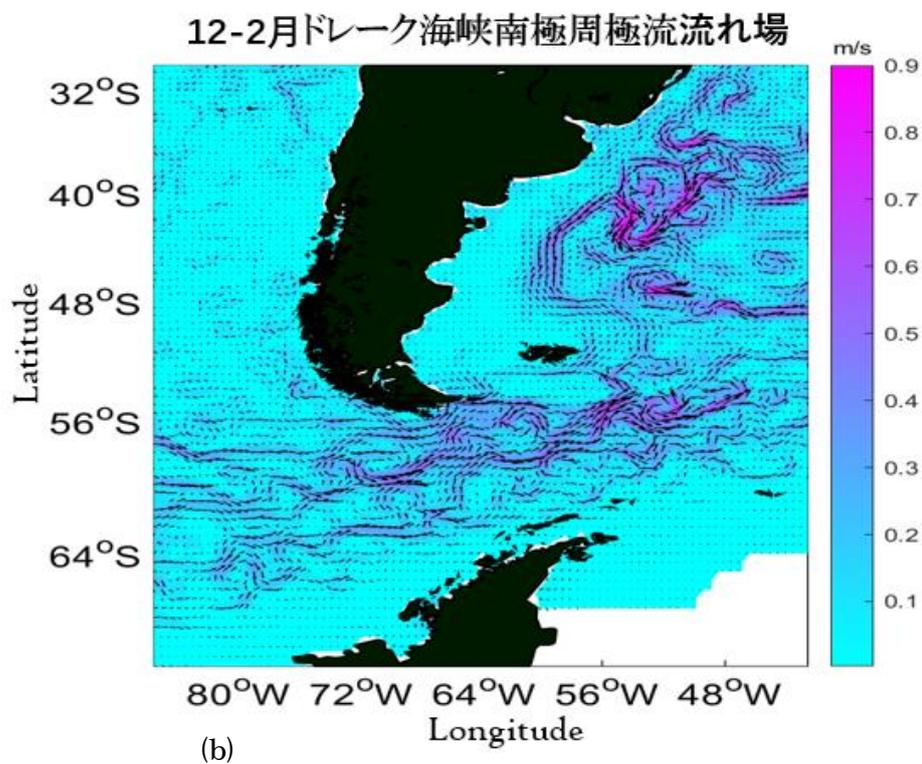
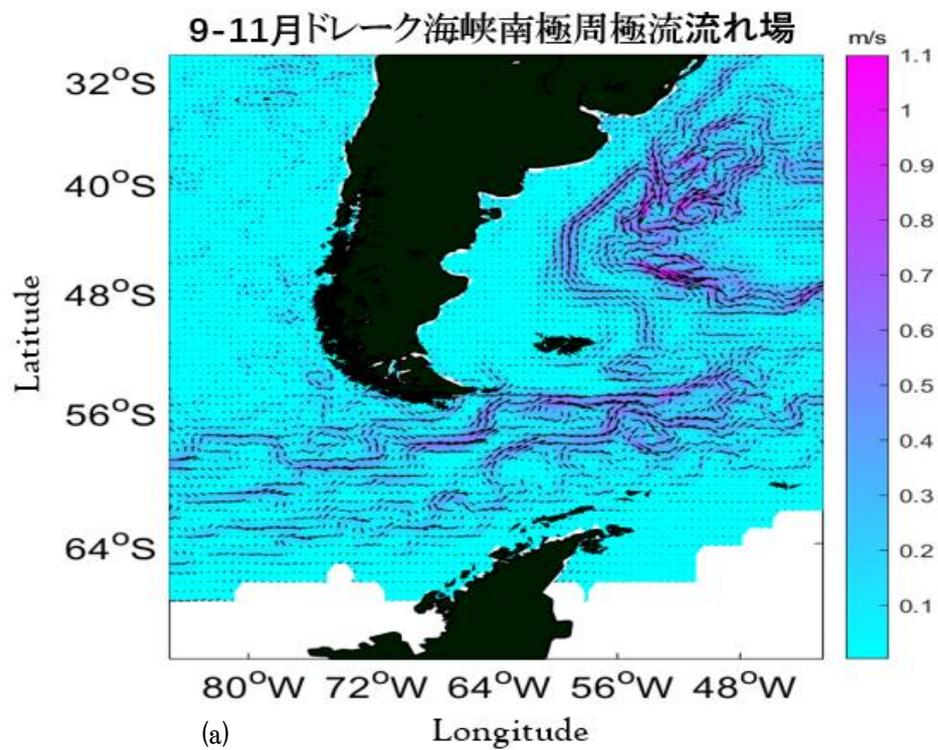


Figure 5(a)9-11月 ドレーク海峡南極周極流流れ場.  
(b)12-2月 ドレーク海峡南極周極流流れ場.

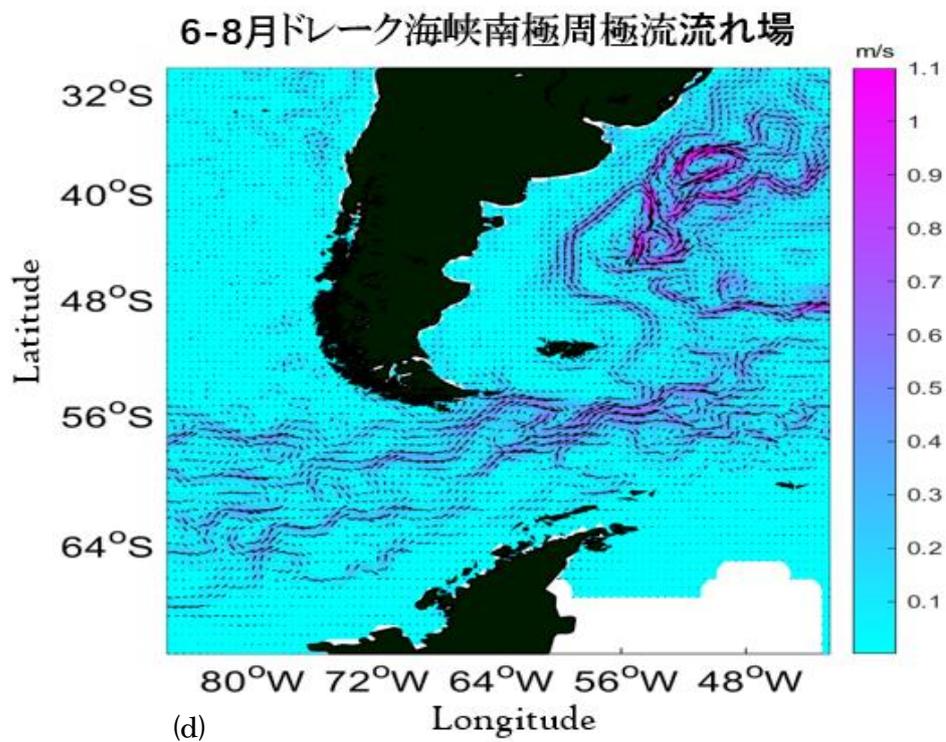
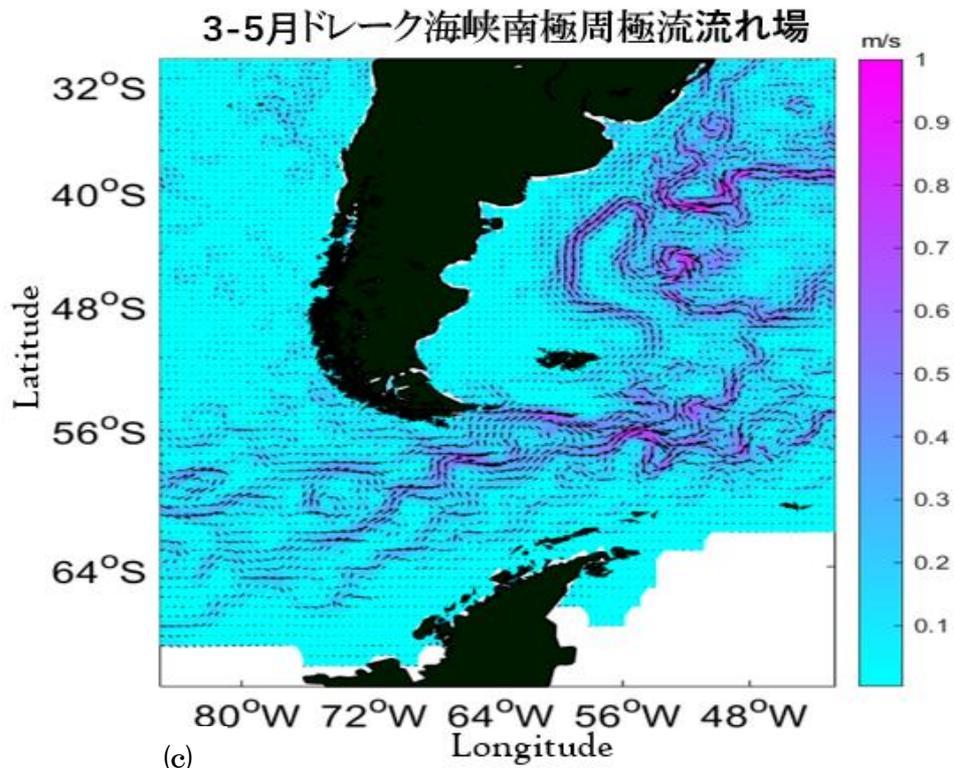


Figure 5(c)3-5 月 ドレーク海峡南極周極流流れ場.

(d)6-8 月 ドレーク海峡南極周極流流れ場.

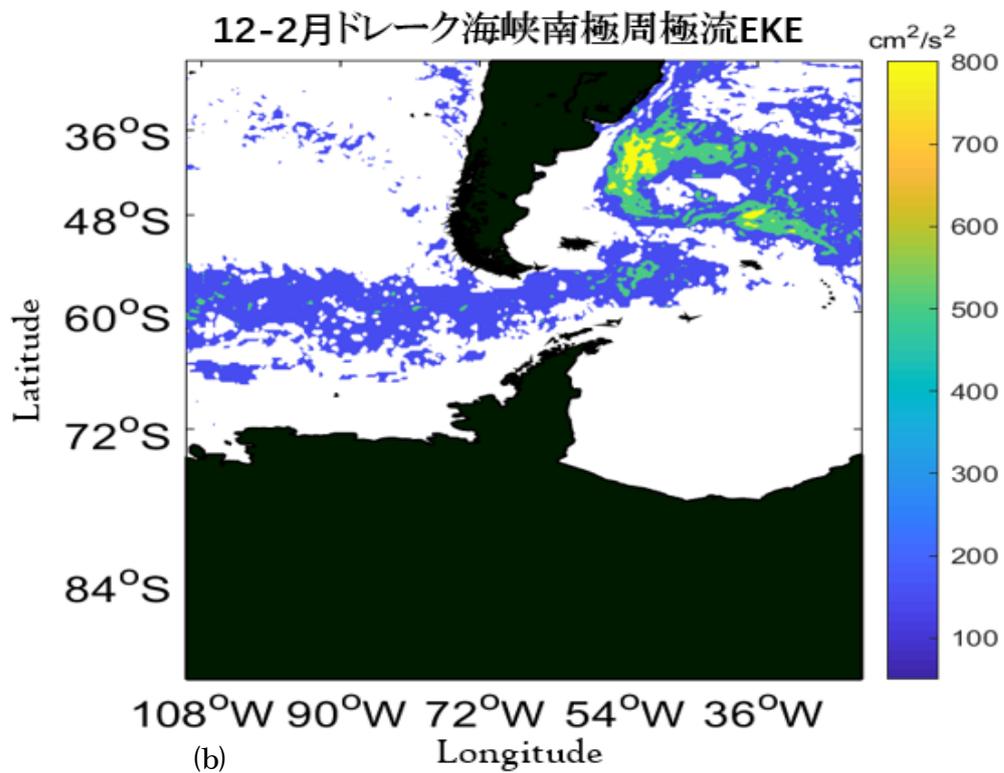
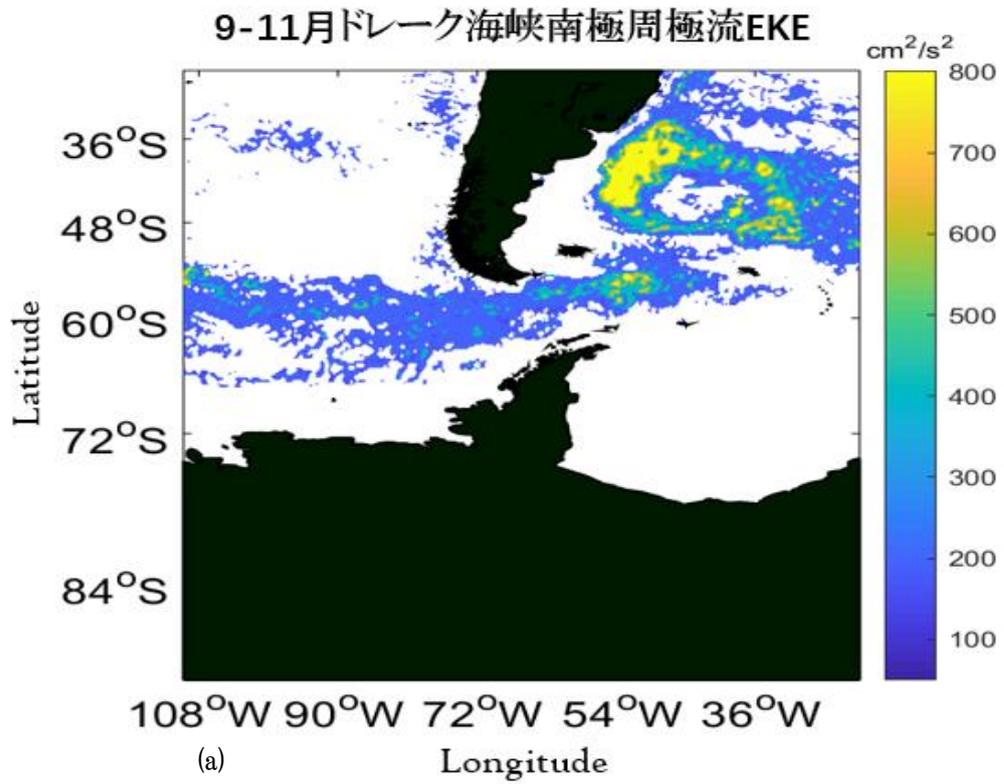


Figure 6(a)9-11月 ドレーク海峡南極周極流 EKE 図.

(b)12-2月 ドレーク海峡南極周極流 EKE 図.

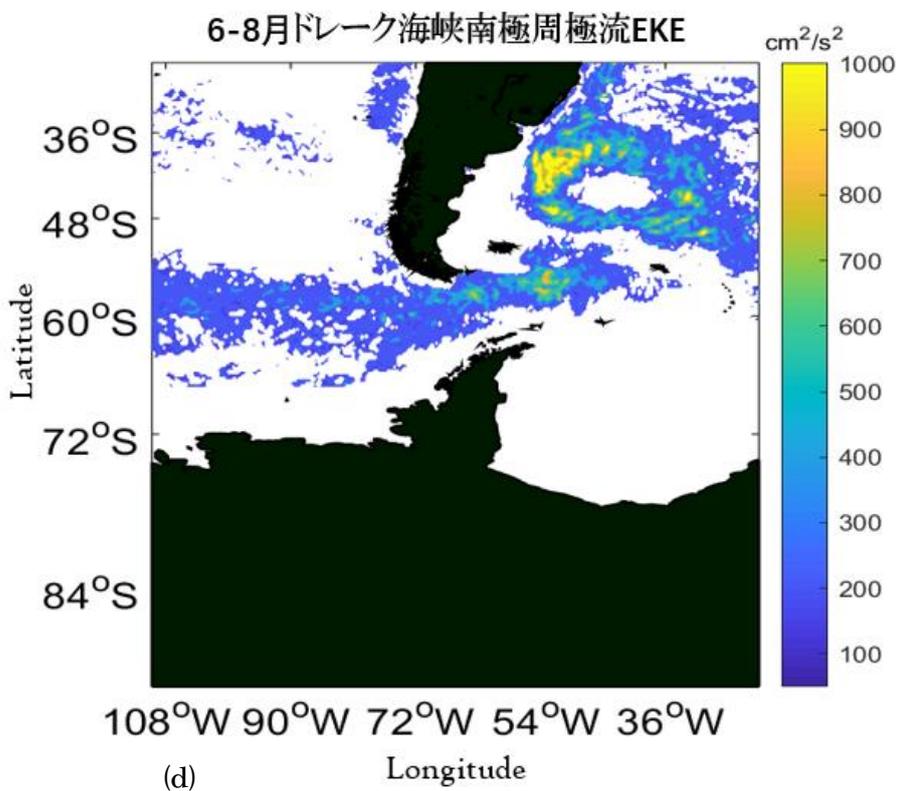
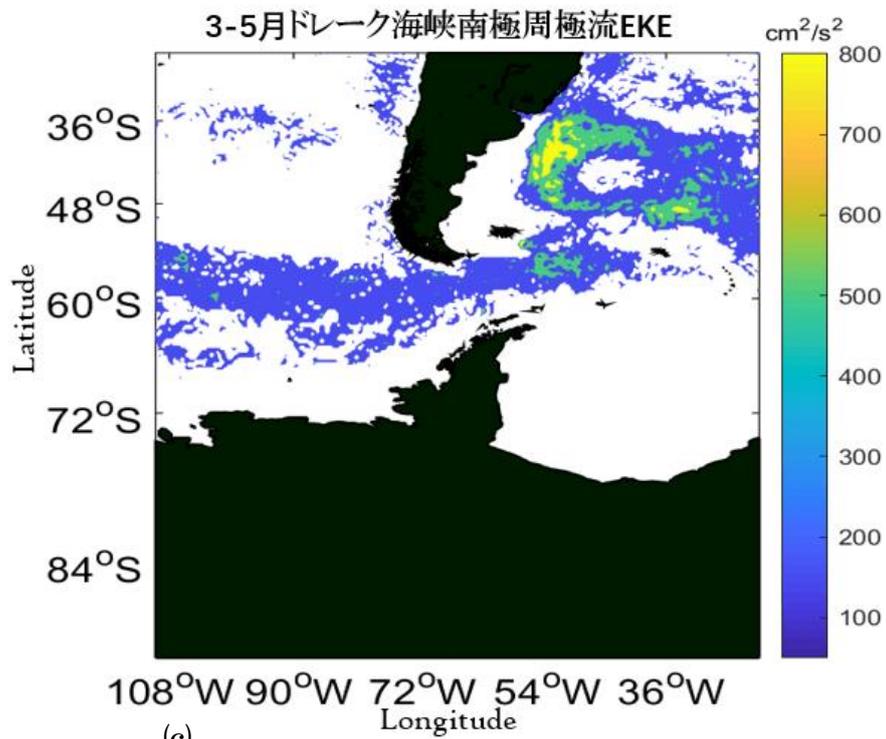


Figure 6(c)3-5月 ドレーク海峡南極周極流 EKE 図.

(d)6-8月 ドレーク海峡南極周極流 EKE 図.

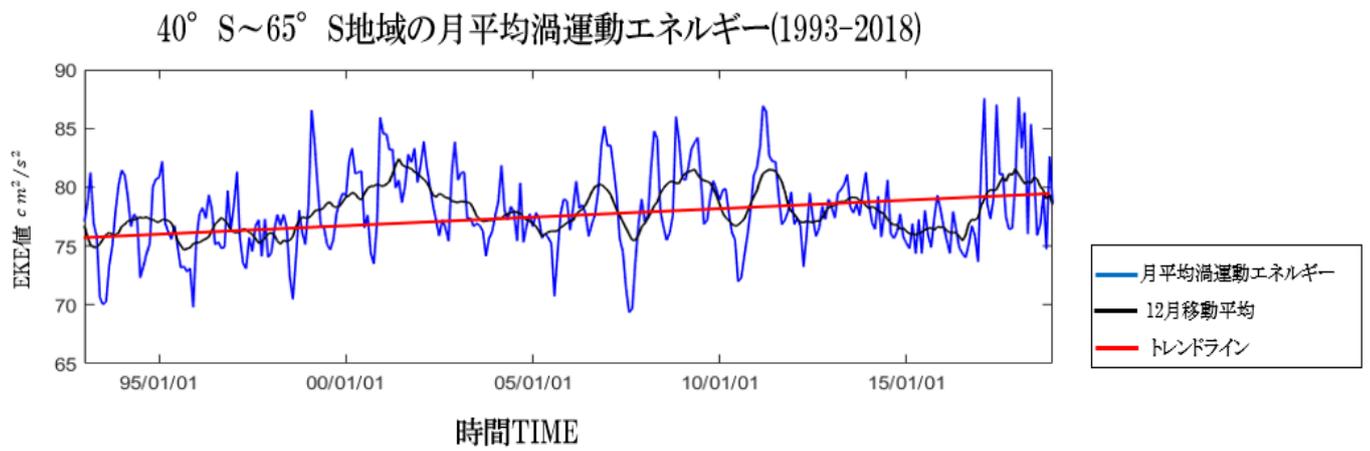


Figure 7 1993-2018 年までの月平均渦運動エネルギー.

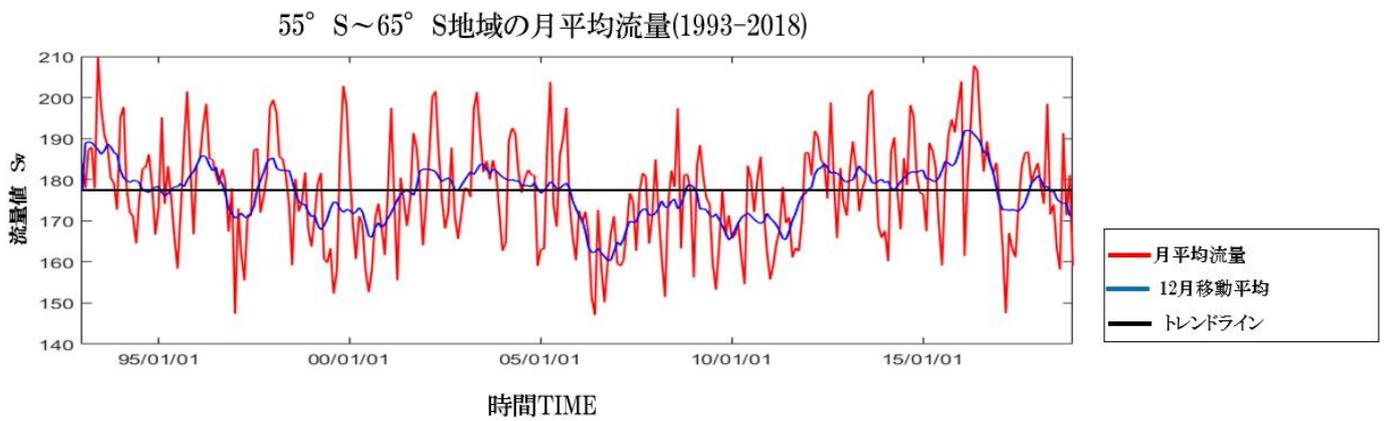


Figure 8 1993-2018 年までの月平均流量図.

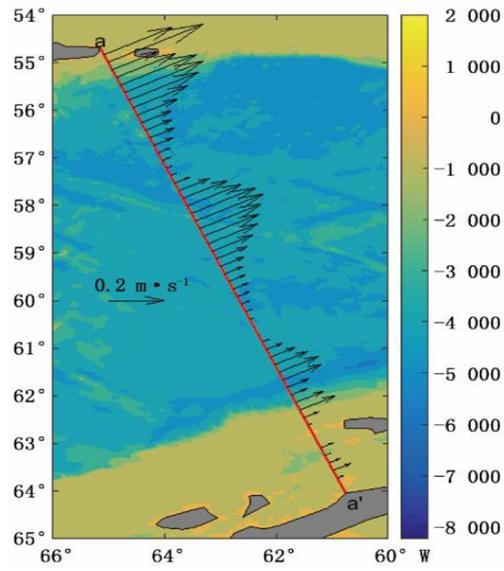


Figure 9 ドレーク海峡地形図.

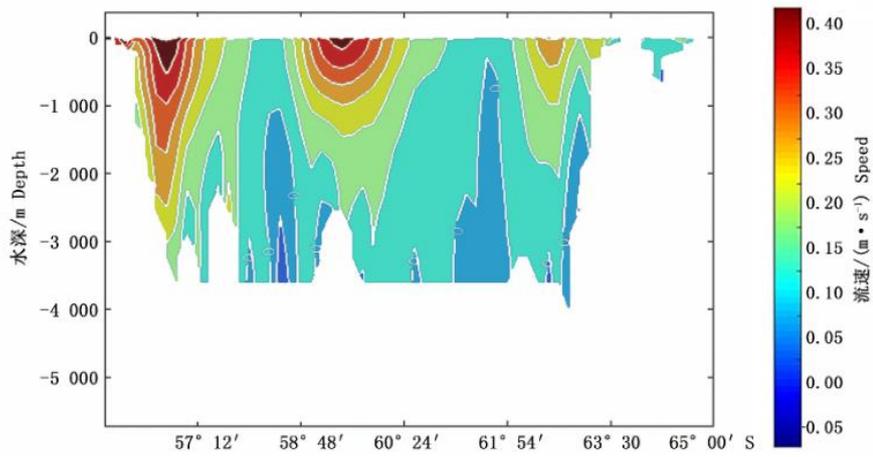


Figure 10 流速断面図.

40° S~65° S地域の月平均風速(1993-2018年)

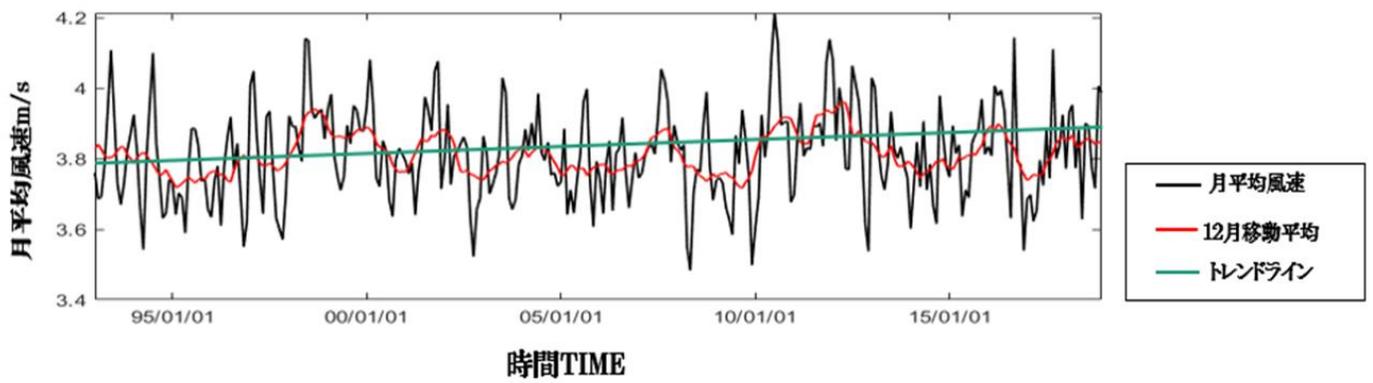


Figure 11 1993-2018年までの月平均風速図.

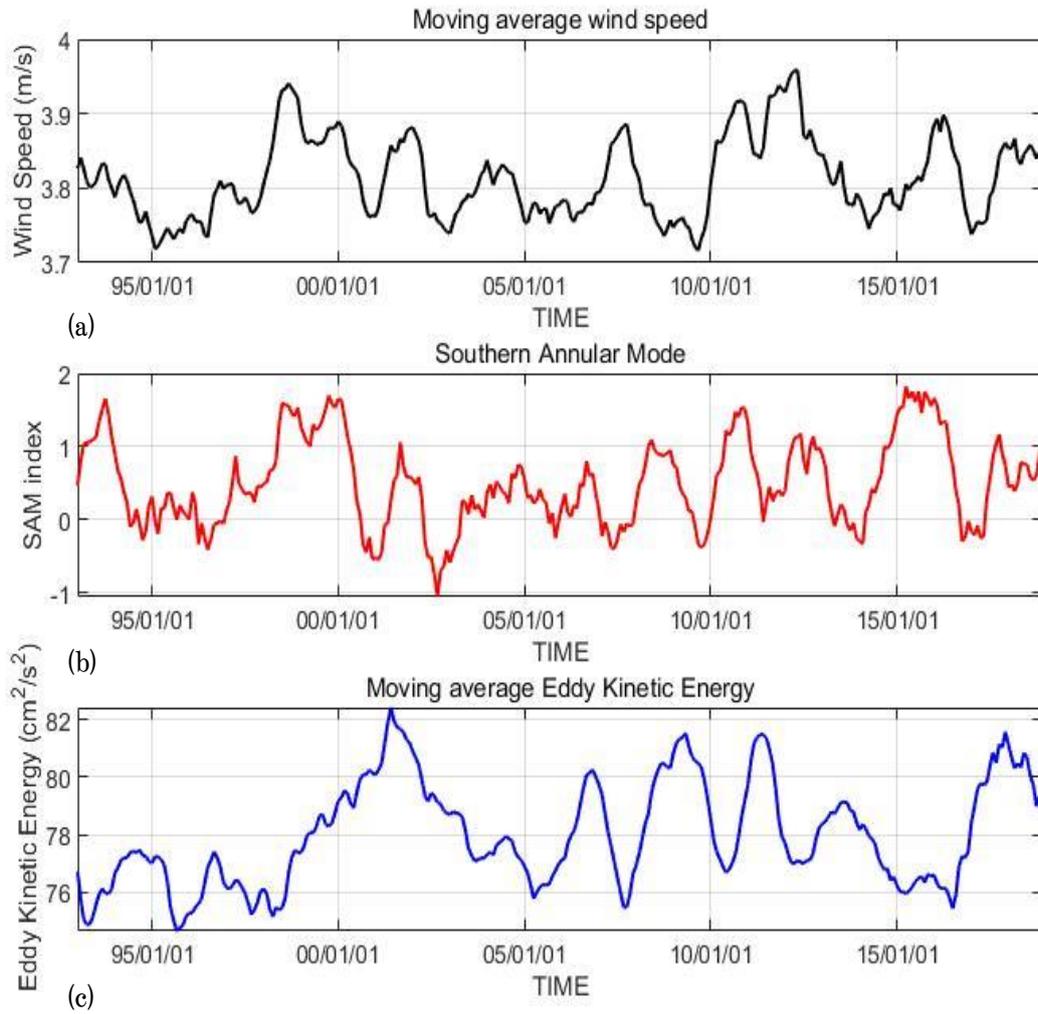
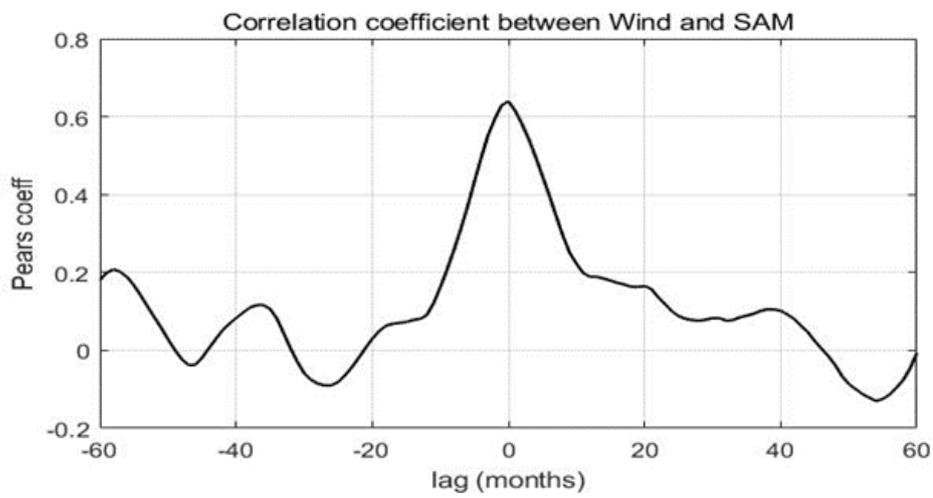


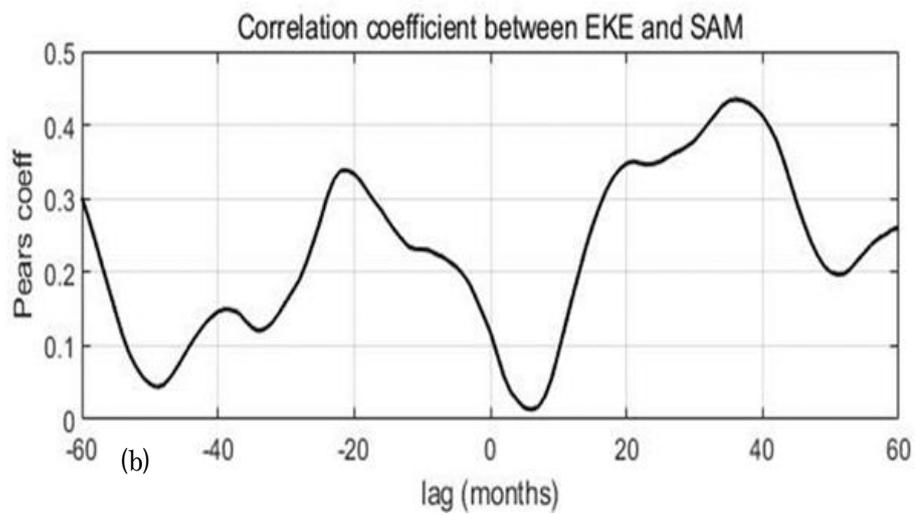
Figure 12 (a) 風速 12 ヶ月間移動平均時間序列.

(b) SAM平均時間序列.

(c)月平均 EKE12 ヶ月間移動平均時間序列.



(a)



(b)

Figure 13(a) SAMと風速相関係数.

(b) SAMとEKE相関係数.

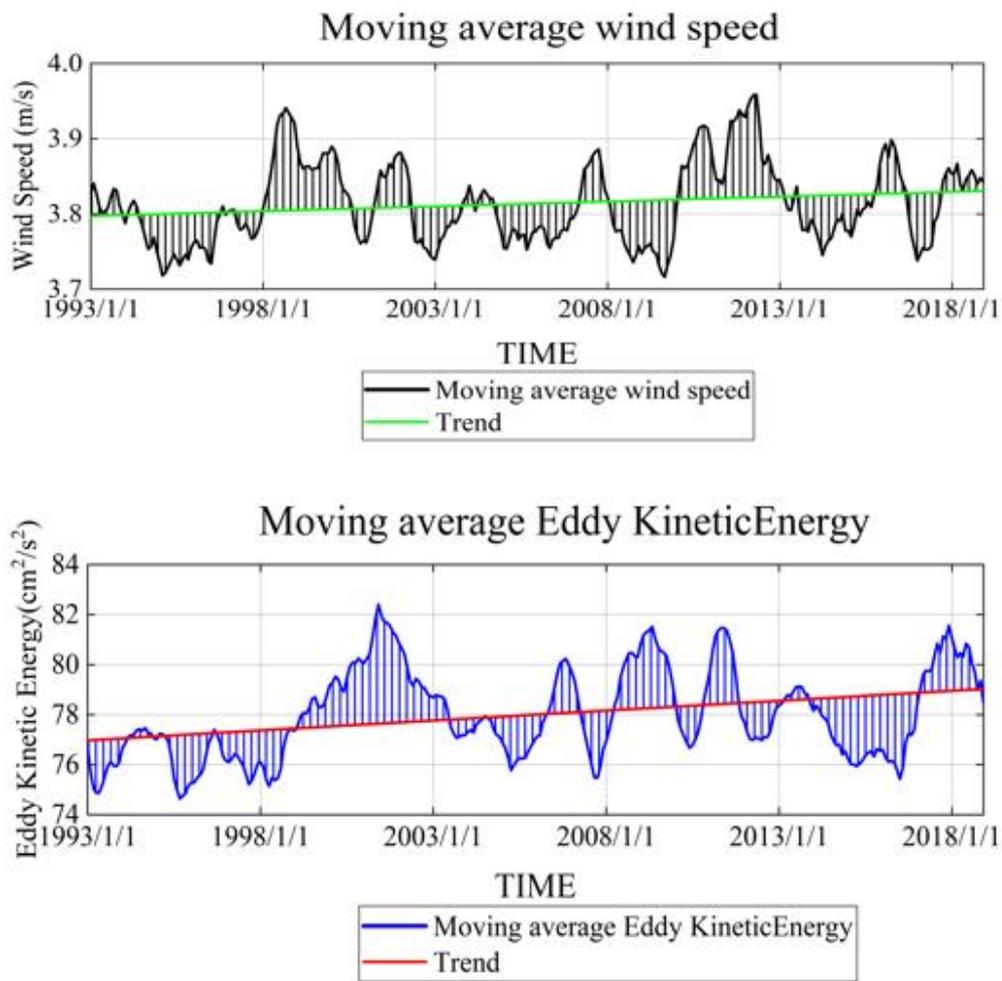


Figure 14 EKE12ヶ月間移動平均と風速12ヶ月間移動平均時系列値.

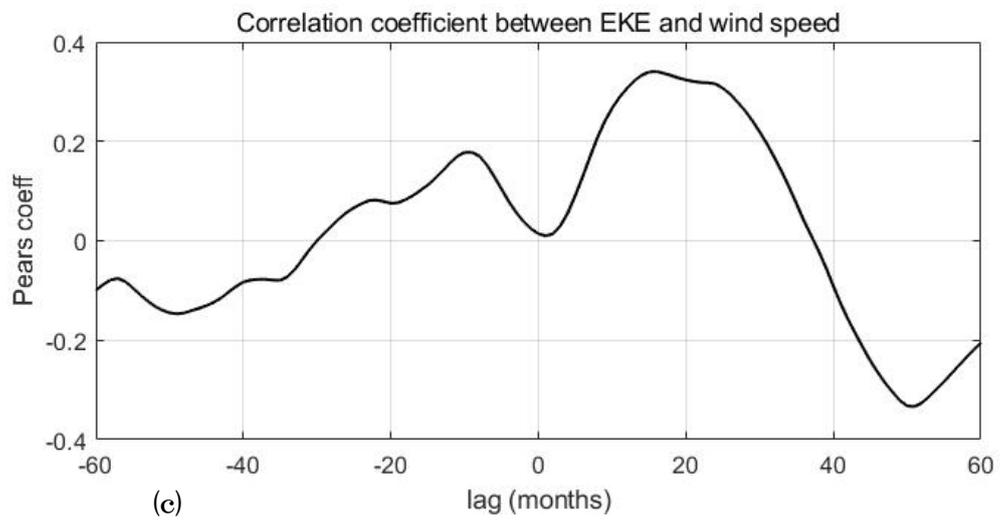
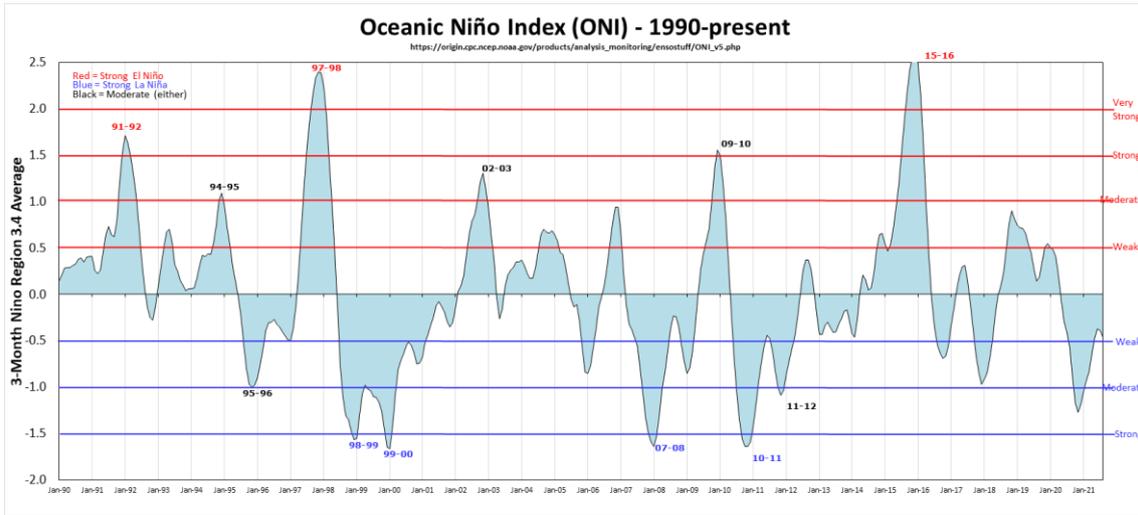
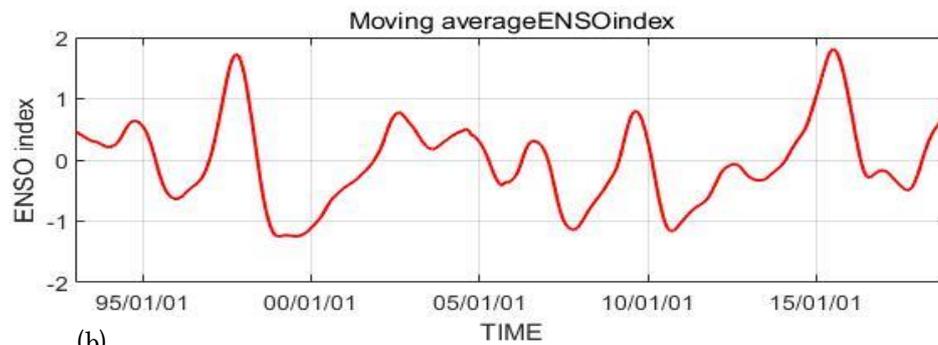


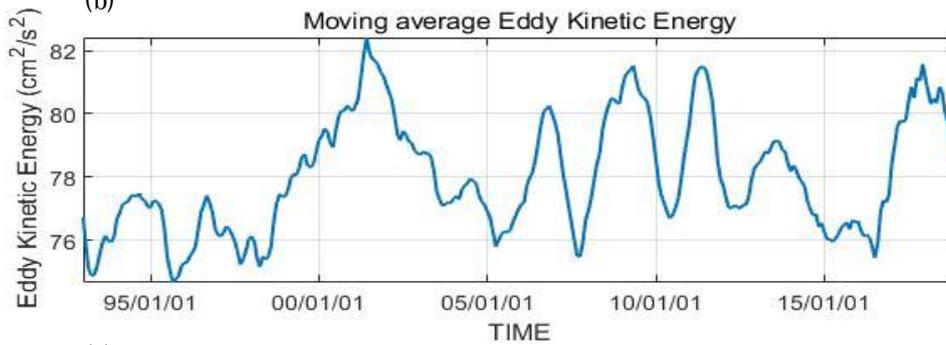
Figure 14(c) ドレーク海峡の EKE と風速の相関係数.



(a)



(b)



(c)

Figure 15 (a) ENSO index.

(b) ENSO index 12ヶ月間移動平均系列値.

(c) EKE12ヶ月間移動平均系列値.

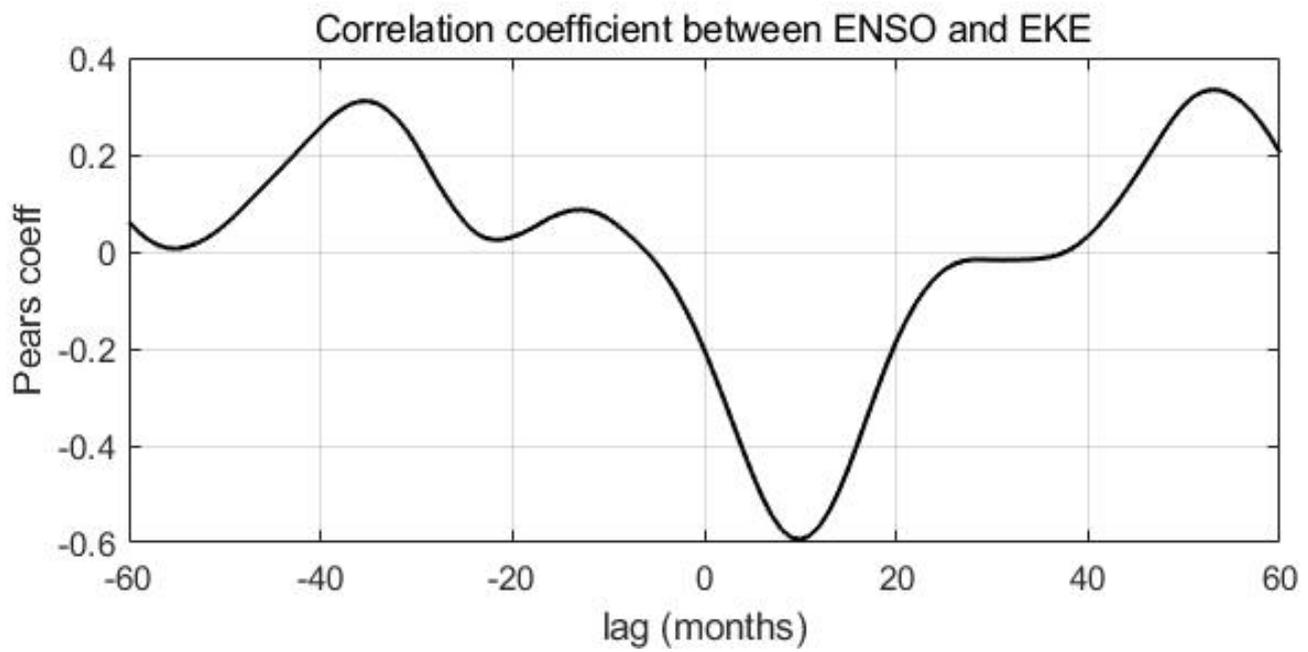


Figure 16 ドレーク海峡の EKE と ENSO の相関係数.

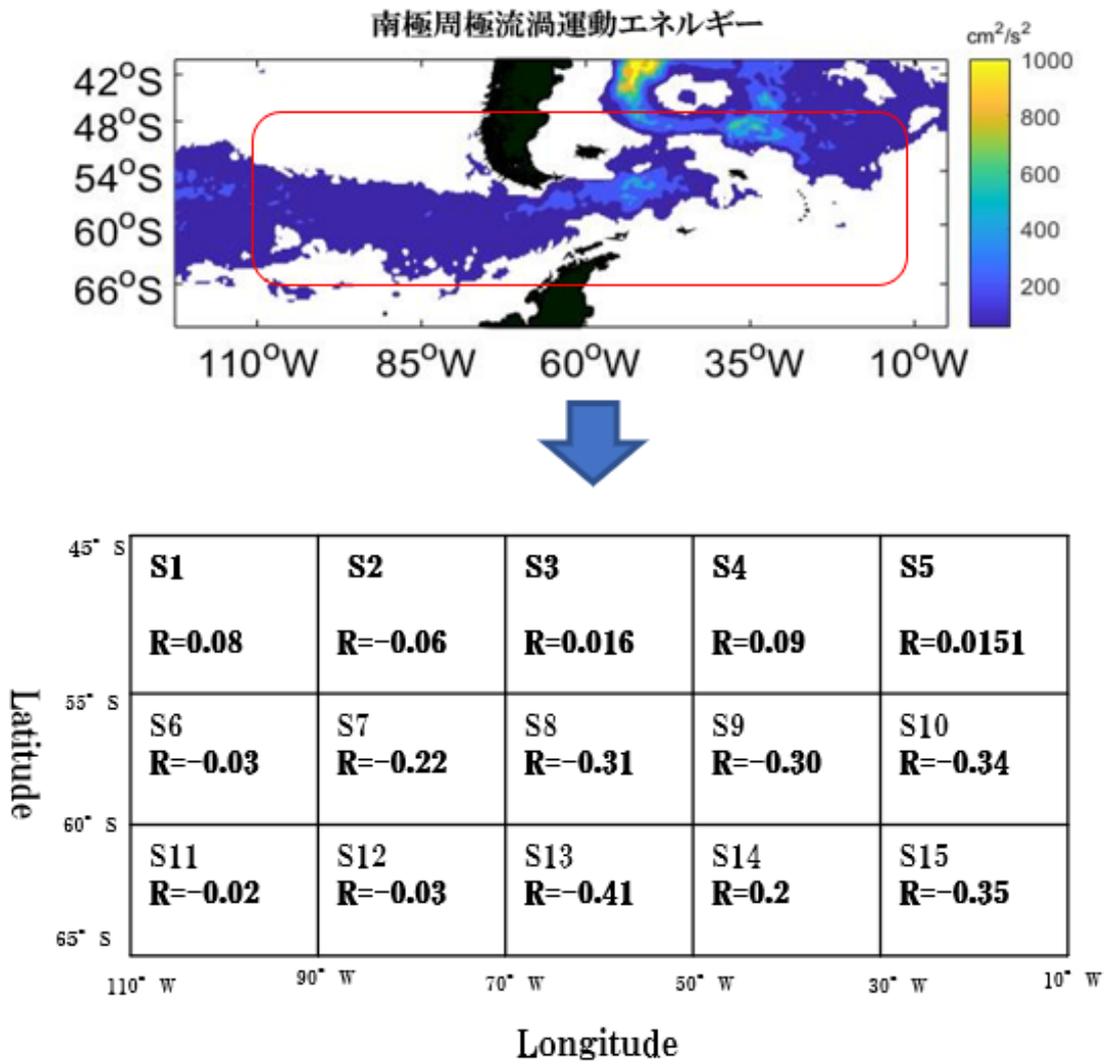


Figure 17 経度 110° W-10° W、緯度 45° S-65° S の海域を選び,15 の小エリア(S1-S15)EKE 値と ACC 流量の相関係数値 R.

### Correlation coefficient between EKE and Transport

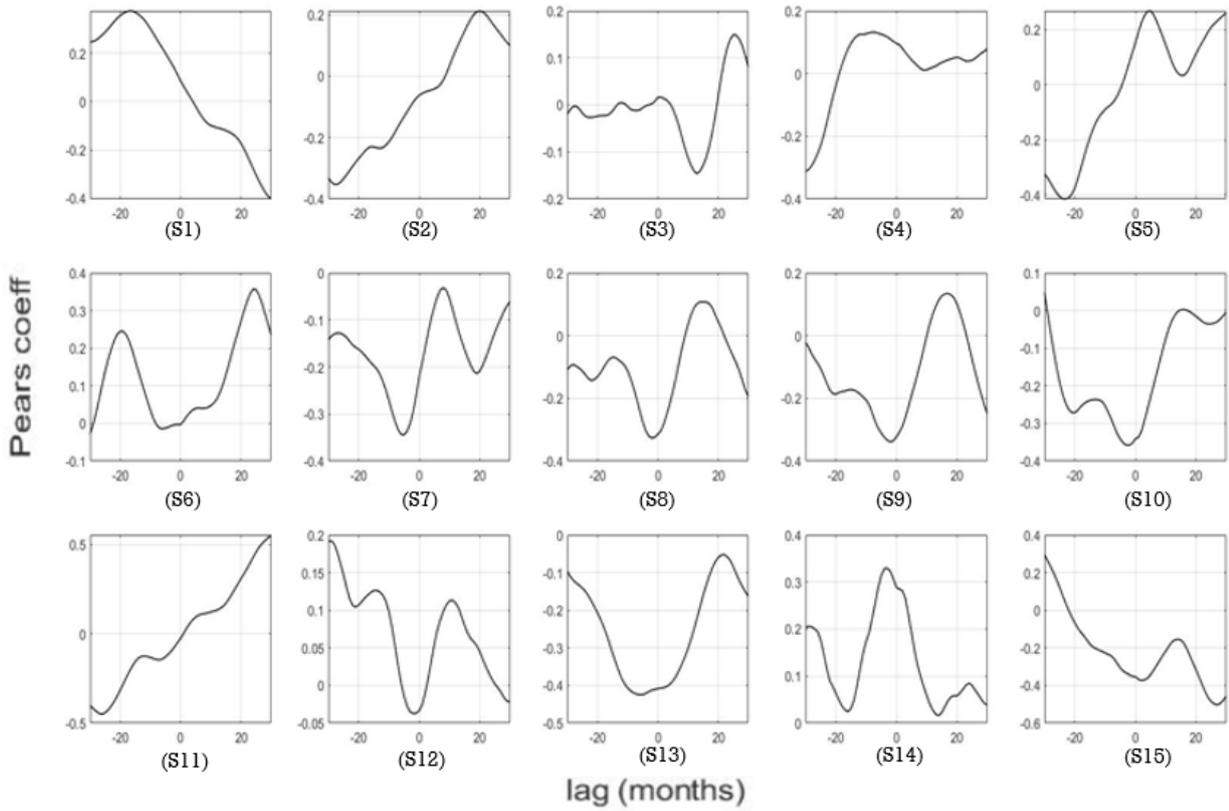


Figure 18 (S1-S15)海域 EKE 値と ACC 流量の相関係数グラフ.

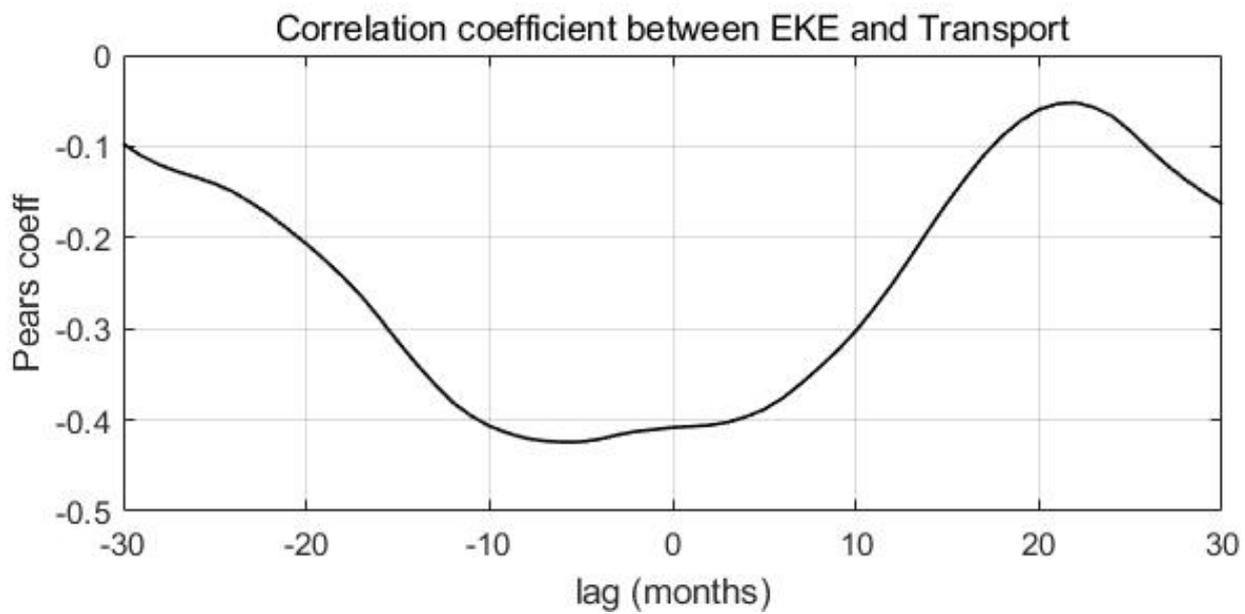


Figure 19 S13 海域 EKE 値と ACC 流量の相関係数グラフ.

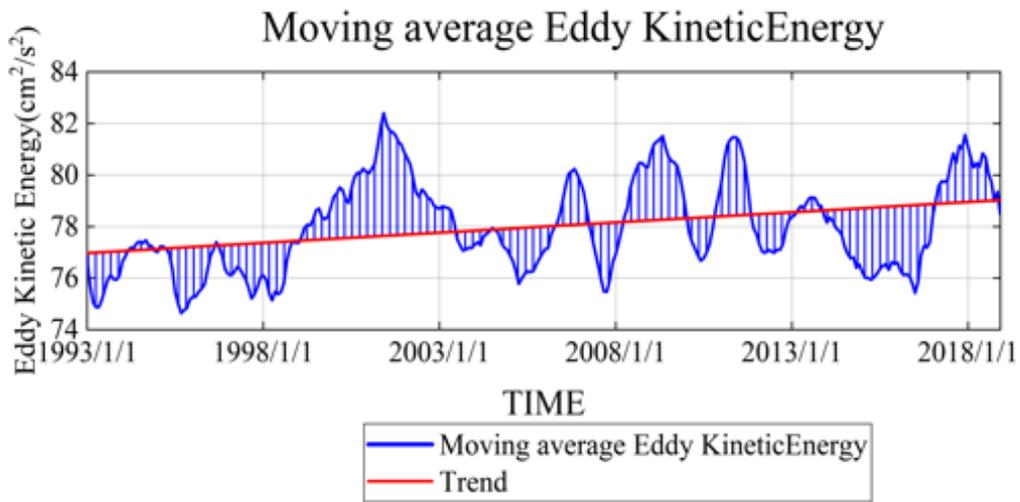
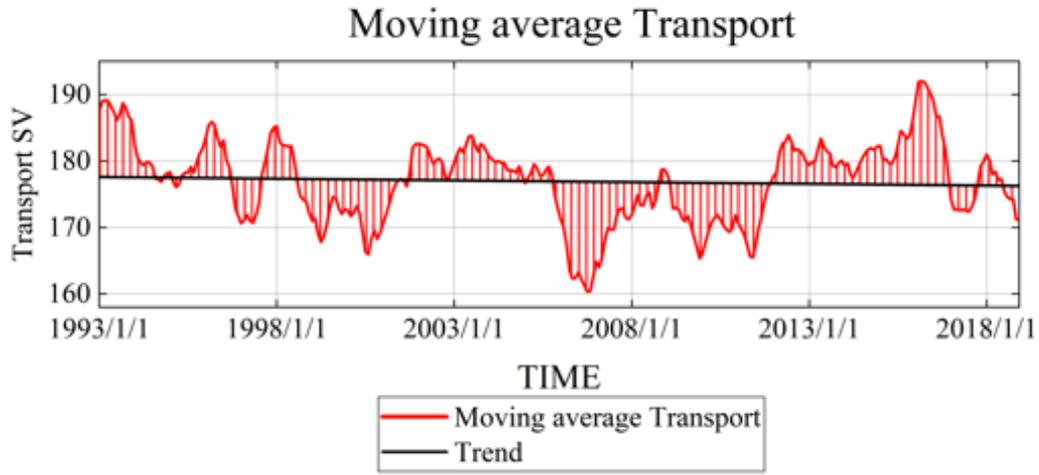


Figure 20 EKE12ヶ月間移動と平均流量12ヶ月間移動平均時系列値.

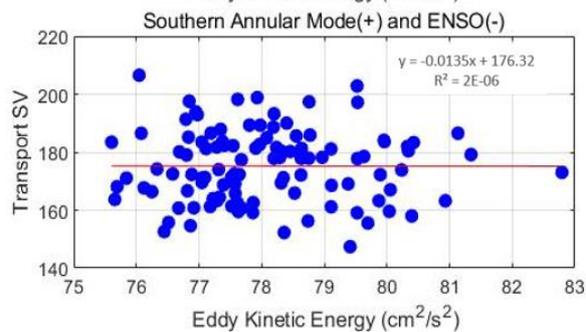
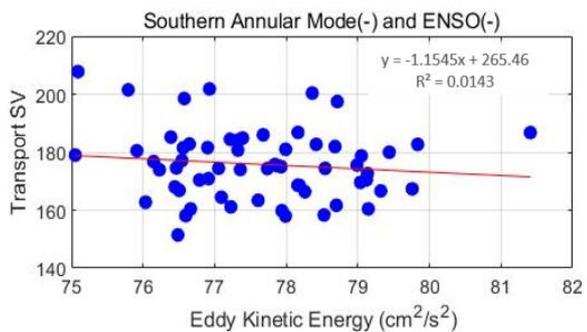
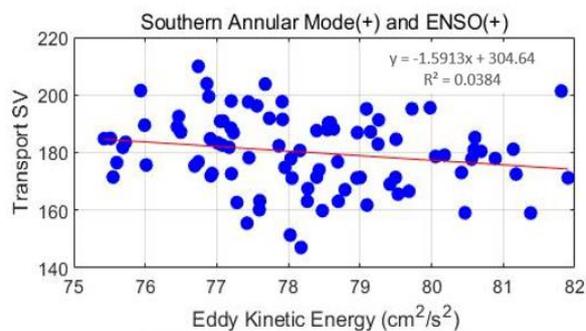
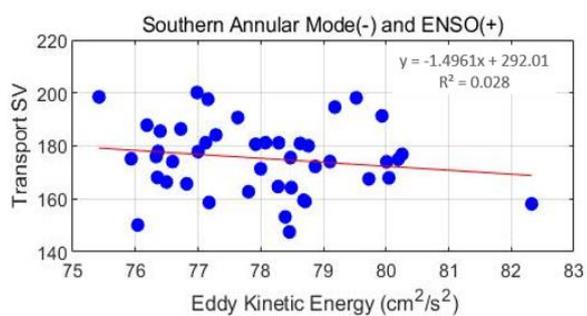
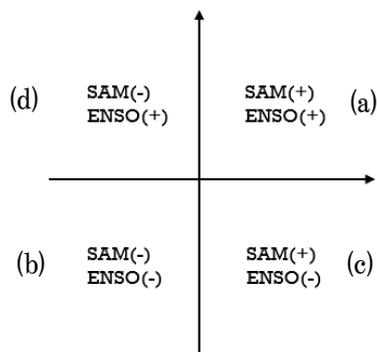


Figure 21(a)SAM (+)/ENSO(+)流量とEKE 散布図.

(b)SAM (-)/ENSO(-)流量とEKE 散布図.

(c)SAM (+)/ENSO(-)流量とEKE 散布図.

(d) SAM (-)/ENSO(+)流量とEKE 散布図.

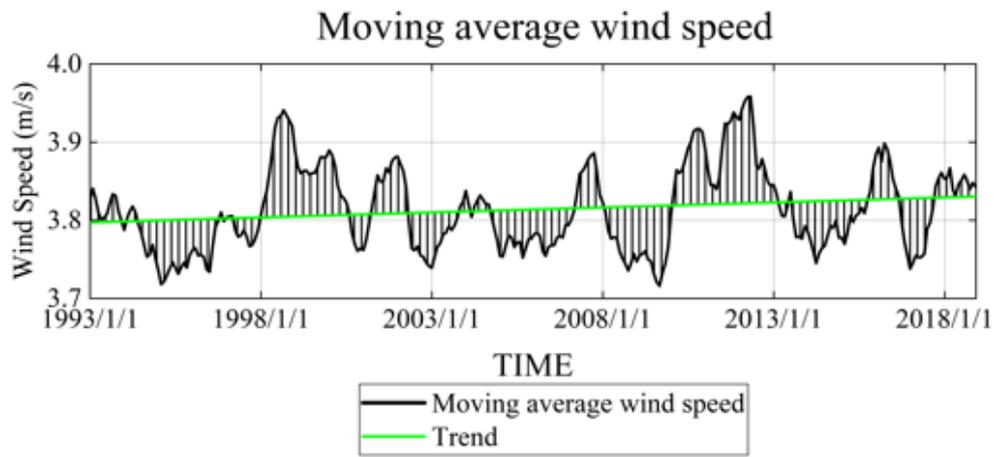
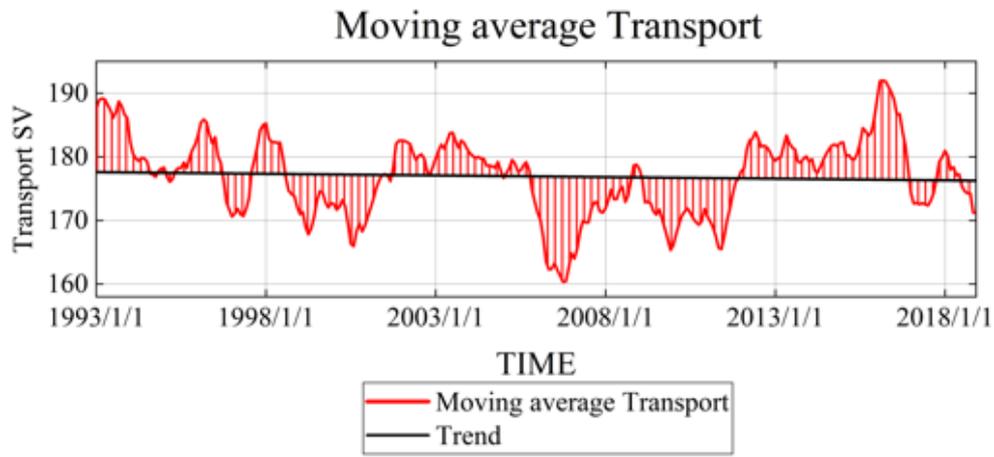


Figure 22 風速平均 12 ヶ月間移動平均と流量 12 ヶ月間移動平均時系列値.

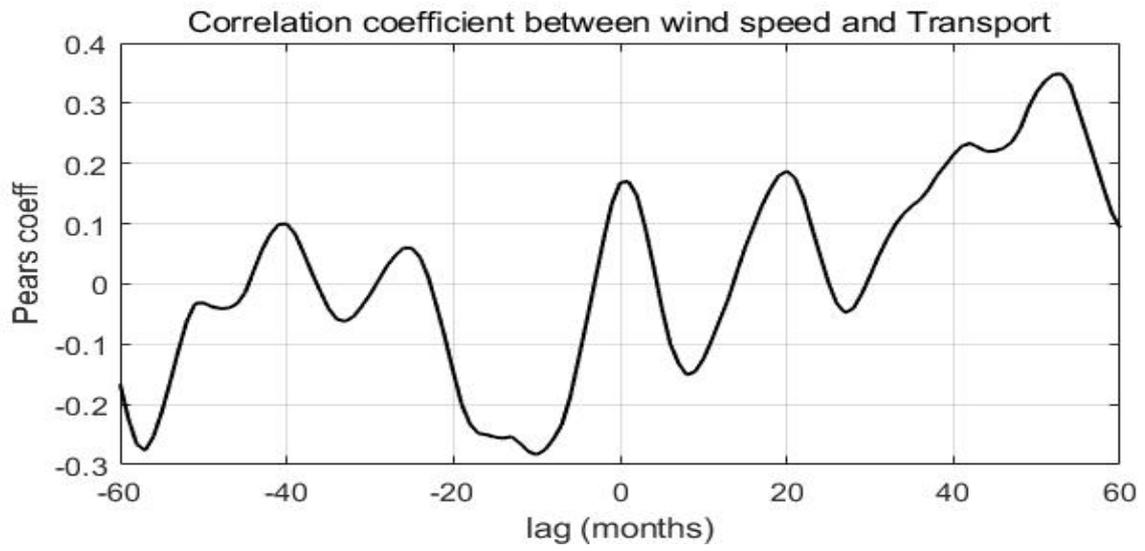


Figure 23 風速と ACC 流量の相関係数グラフ.

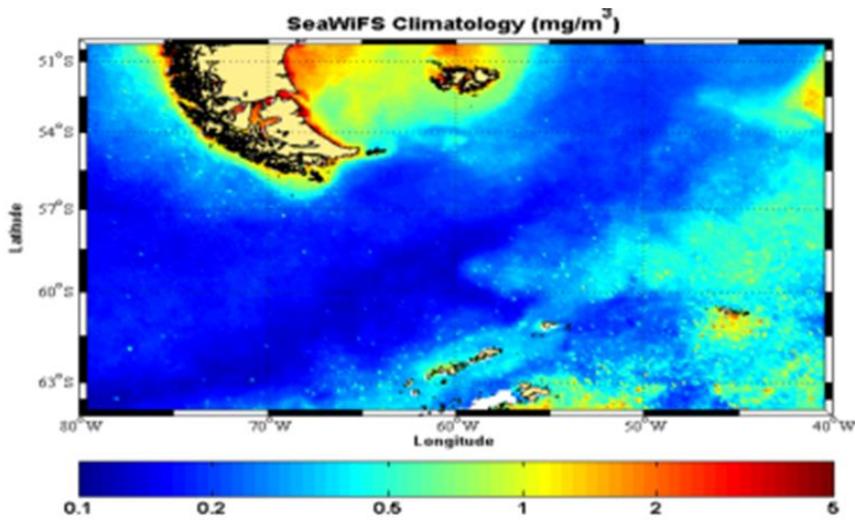
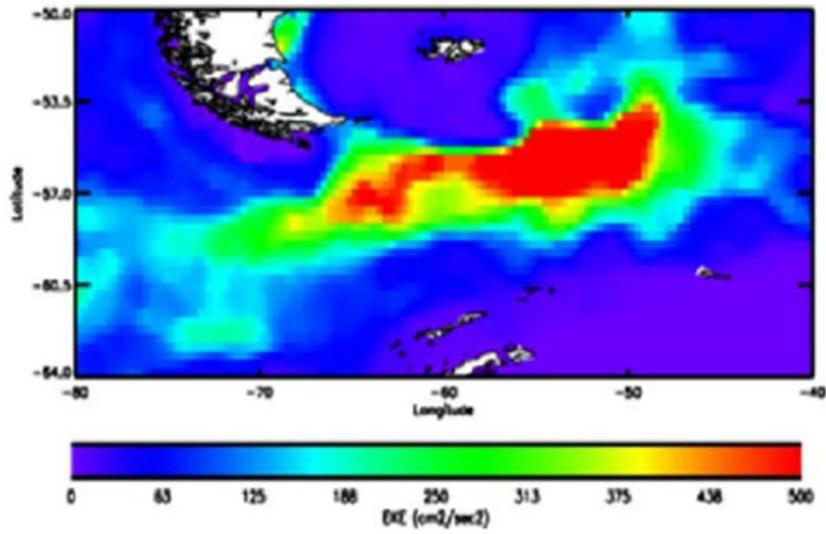


Figure 24 (a) : eddy kinetic energy from altimetry ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ).  
 (b) : mean chlorophyll distribution from SeaWiFS ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

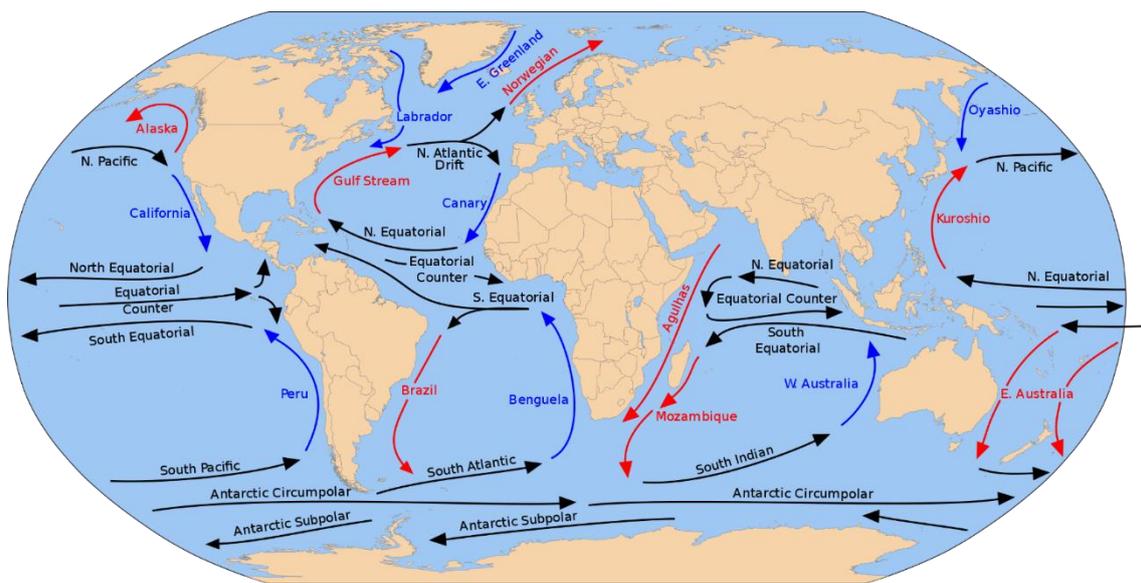


Figure 25 全球海流分布.