

令和4年度 卒業論文

熱帯大西洋起源のテレコネクションが  
北極域の海氷に与える遅延影響

三重大学 生物資源学部

共生環境学科 地球環境学教育コース

気象・気候ダイナミクス研究室

519355 平賀 詩之助

指導教員：立花 義裕 教授

## 目次

熱帯大西洋起源のテレコネクションが北極域の海氷に与える遅延影響.....	1
第1章 序論.....	3
第2章 使用データ.....	5
2-1 外向き長波放射 (OLR) .....	5
2-2 気象庁 55 年長期再解析データ JRA-55.....	5
2-3 HadISST (海洋データ) .....	5
第3章 解析手法.....	6
3-1 12 月の北極域海氷インデックス.....	6
3-2 10 月の熱帯大西洋 OLR インデックス .....	7
3-3 回帰分析.....	8
3-3-1 回帰計算.....	8
3-3-2 t 検定.....	8
3-4 線形傾圧モデル (Linear Baroclinic Model; LBM) 実験.....	9
第4章 解析結果.....	10
4-1 テレコネクションを介した北極域の海氷と熱帯大西洋の対流活動との関係 .....	10
4-2 熱帯大西洋の熱源に対する大気の定常応答.....	13
4-3 テレコネクションが北極域の海氷に対して遅れて影響を与える過程.....	16
第5章 まとめ・今後の課題.....	20
謝辞.....	21
参考引用文献 .....	22

## 第1章 序論

北極域の海氷は年々変動しており平年より多い年や少ない年が存在するが、北極域の海氷が少ない年に日本に寒波をもたらす可能性が示唆されている。このトピックは、近年研究者の間で活発に議論されている (Honda et al., 2009, Inoue et al., 2012 など)。従って、日本への寒波の予測の観点から、北極域の海氷の年々変動の原因を探ることは重要であると考えられる。

北極域の海氷は長期的には減少傾向、短期的には年々変動をしていることがわかる (Fig. 1)。また、海氷変動の原因としては海洋の影響や大気の影響などがあげられる。本研究では、大気の影響の中でもテレコネクションが北極域の海氷に与える影響について考察する。ここで、テレコネクションとは、遠く離れた複数の場所で気圧や気温などの気象要素が相関関係をもって互いに変動することを指す。このテレコネクションの作用により、遠く離れた地域に影響を与えることがある。北極域の海氷が年々変動する原因を考察した研究はいくつか存在する。Sato et al. (2014) では、メキシコ湾流の海面水温前線の極方向のシフトがテレコネクションを引き起こし、海氷減少を引き起こすことを示唆した。Nakanowatari et al. (2014) は数ヶ月前の海洋熱輸送や海面水温の状態が海氷域面積の経年変動に影響を及ぼすことを示唆した。

ここで、テレコネクションの励起源の一つとして熱帯大西洋がある。熱帯大西洋は南アメリカ大陸とアフリカ大陸の間に位置する熱帯海洋であり、熱帯収束帯による降水が卓越する (Fig. 2)。10月の熱帯大西洋の降水量は多い場所で 500 mm に達し、非常に雨の多い地域である。(Xie et al., 2004) では、熱帯収束帯の年々変動がテレコネクション (北大西洋振動) を変調することを示した。

今日までの研究により、テレコネクションや数ヶ月前の海洋熱が北極域の海氷変動に影響を与えること、熱帯大西洋がテレコネクションの励起源になり得ることが示されてきた。しかし、北極域の海氷変動に対して数ヶ月前の熱帯大西洋からの影響があるのか、またどのような過程で影響するのか、については十分な理解が得られていない。

以上を踏まえて本研究では、熱帯大西洋の対流活動に励起されたテレコネクションが数ヶ月遅れて北極域の海氷に影響するのかについて検証する。これにより、北極域の海氷変動に対して数ヶ月前からの予測につながる可能性がある。また、北極域の海氷変動への影響を解明することでその先の日本への寒波の予測精度向上が期待される。

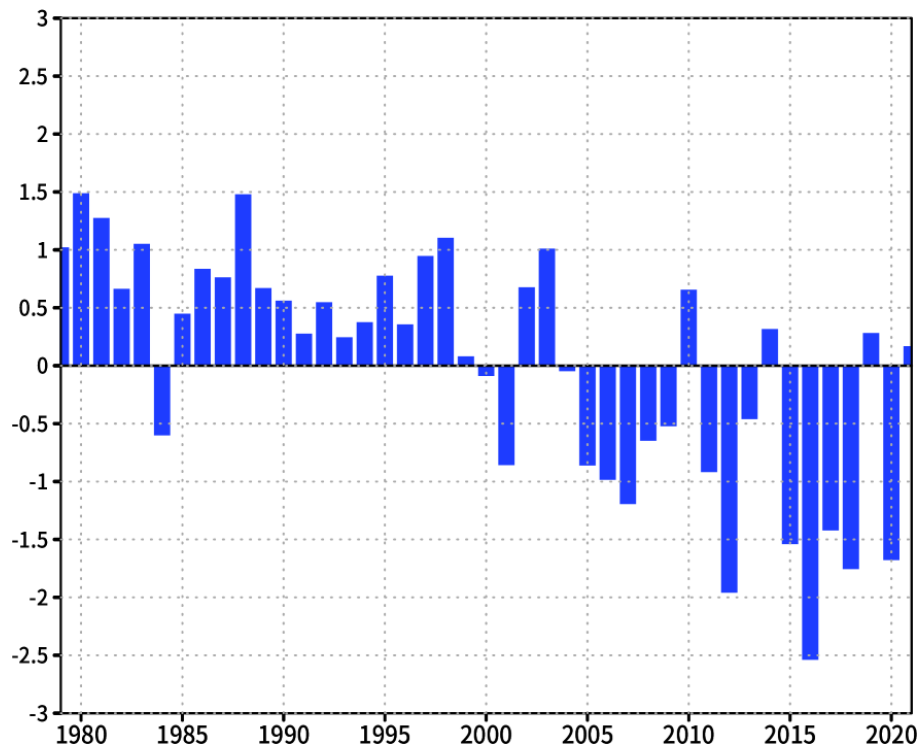


Fig. 1 12月の北極域海氷インデックス (1979-2021年)

縦軸：σ，横軸：年

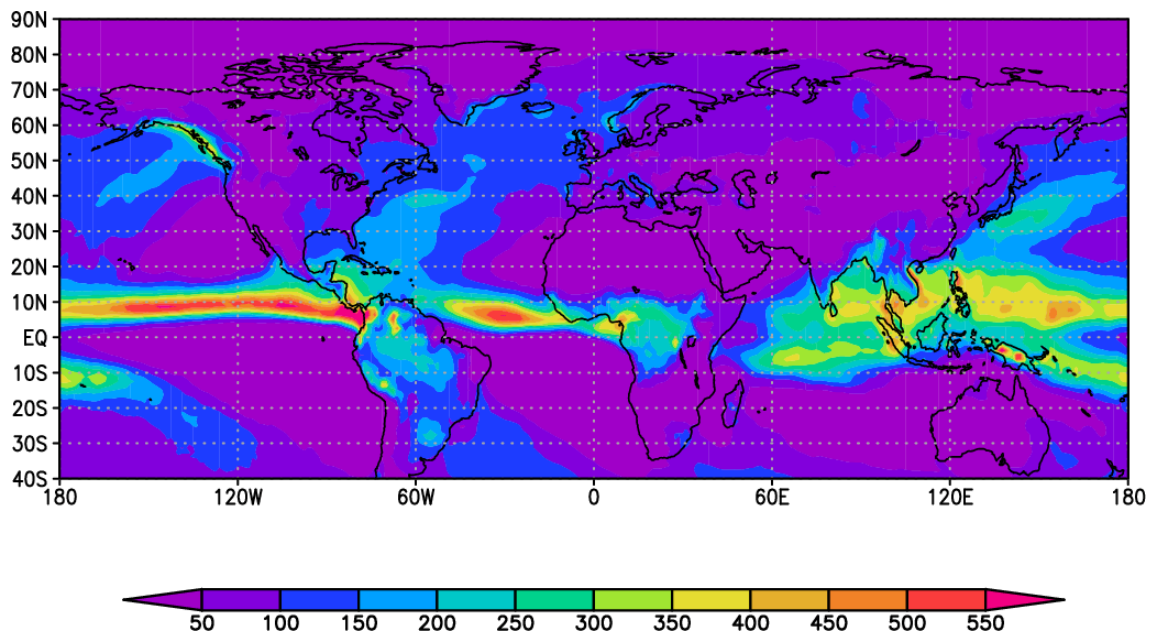


Fig. 2 10月の月平均降水量

色：降水量 (mm/month)

## 第2章 使用データ

### 2-1 外向き長波放射 (OLR)

本研究では、対流活動の指標としてアメリカ大気海洋庁 (NOAA) の外向き長波放射 ( $\text{W/m}^2$ ) (Outgoing Longwave Radiation, 以下 OLR) (Liebmann and Smith, 1996) を用いた。OLR とは、極軌道衛星によって観測された地表面や雲頂から放出される上向きの赤外線のエネルギー量のことである。すべての物質はその温度の 4 乗に比例して放射を放出していることから、OLR の値が小さいことは雲頂の高度が高い (温度が低い) ことを意味し、対流活動が活発であることに対応する。本データは、水平解像度 2.5 度 (緯度)  $\times$  2.5 度 (経度) の格子点データであり、1979 年から 2021 年までの 43 年分の 10 月のデータを使用している。

### 2-2 気象庁 55 年長期再解析データ JRA-55

大気場のデータには、気象庁 55 年長期再解析データ (JRA-55) (Kobayashi et al., 2015, Harada et al., 2016) を用いた。本データは、水平解像度 1.25 度 (緯度)  $\times$  1.25 度 (経度)、鉛直層は 37 層である。本データは、1979 年から 2021 年までの 43 年分の 10, 11, 12 月のデータを使用している。使用したデータは、ジオポテンシャル高度 (m)、潜熱フラックス ( $\text{W/m}^2$ )、顕熱フラックス ( $\text{W/m}^2$ )、非断熱加熱 (K/day) を使用した。非断熱加熱は、対流による加熱率 (K/day)、ラージスケールの降水による加熱率 (K/day)、鉛直拡散による加熱率 (K/day)、短波放射による加熱率 (K/day)、長波放射による加熱率 (K/day) の値を足し合わせたものである。

### 2-3 HadISST (海洋データ)

海面水温 (Sea Surface Temperature, 以下 SST)、海氷密接度 (Sea Ice Concentration, 以下 SIC) のデータには、イギリス気象庁 (UKMO) の Hadley Center Sea Ice Surface Temperature data set (HadISST) (Rayner et al., 2003) を用いた。海氷密接度とは、海面の面積に対する海氷が覆われている面積を比で表したものである。水平解像度は 1 度 (緯度)  $\times$  1 度 (経度) である。本データは、2-2 節と同様、1979 年から 2021 年までの 43 年分の 10, 11, 12 月のデータを使用している。

## 第3章 解析手法

### 3-1 12月の北極域海氷インデックス

本研究では北極域のうち北緯 70 度から 85 度，東経 0 度から 70 度の領域において SIC を領域平均し時系列データを作成した。この領域には，グリーンランド海・ノルウェー海・カラ海の一部，バレンツ海が含まれる。次に，12 月の北極域の海氷の年々変動に着目するため，この時系列データを線形トレンド除去および標準化をし，12 月の北極域海氷インデックスを作成した。

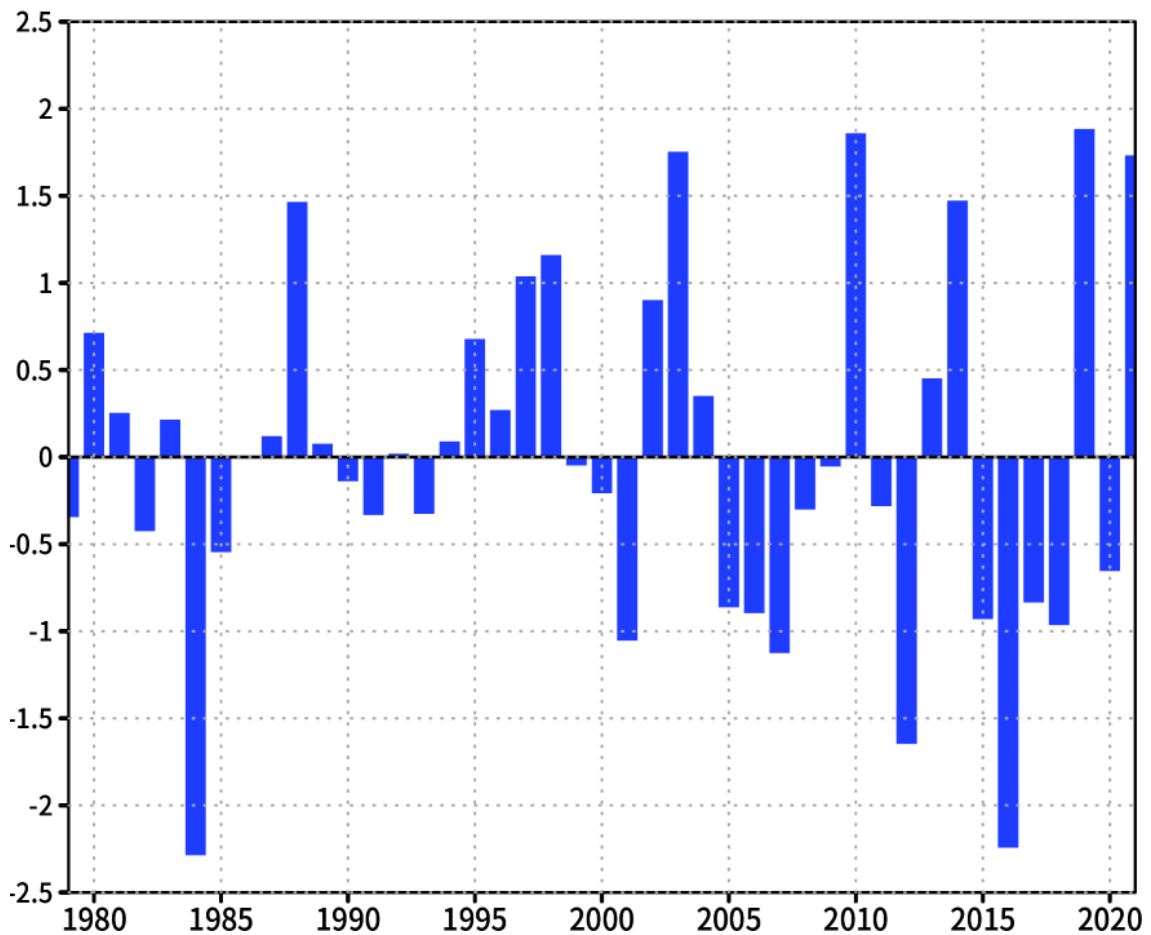


Fig. 3 12月の北極域海氷インデックス (1979-2021年)

縦軸： $\sigma$ ，横軸：年

### 3-2 10月の熱帯大西洋 OLR インデックス

熱帯大西洋のうち北緯 7.5 度から北緯 17.5 度，西経 50 度から西経 20 度の領域において OLR を領域平均し時系列データを作成した．この領域を設定した理由については，後述する．12月の海氷インデックスと同様にトレンドが見られるため，線形トレンド除去および標準化を行い，10月の熱帯大西洋 OLR インデックスを作成した．

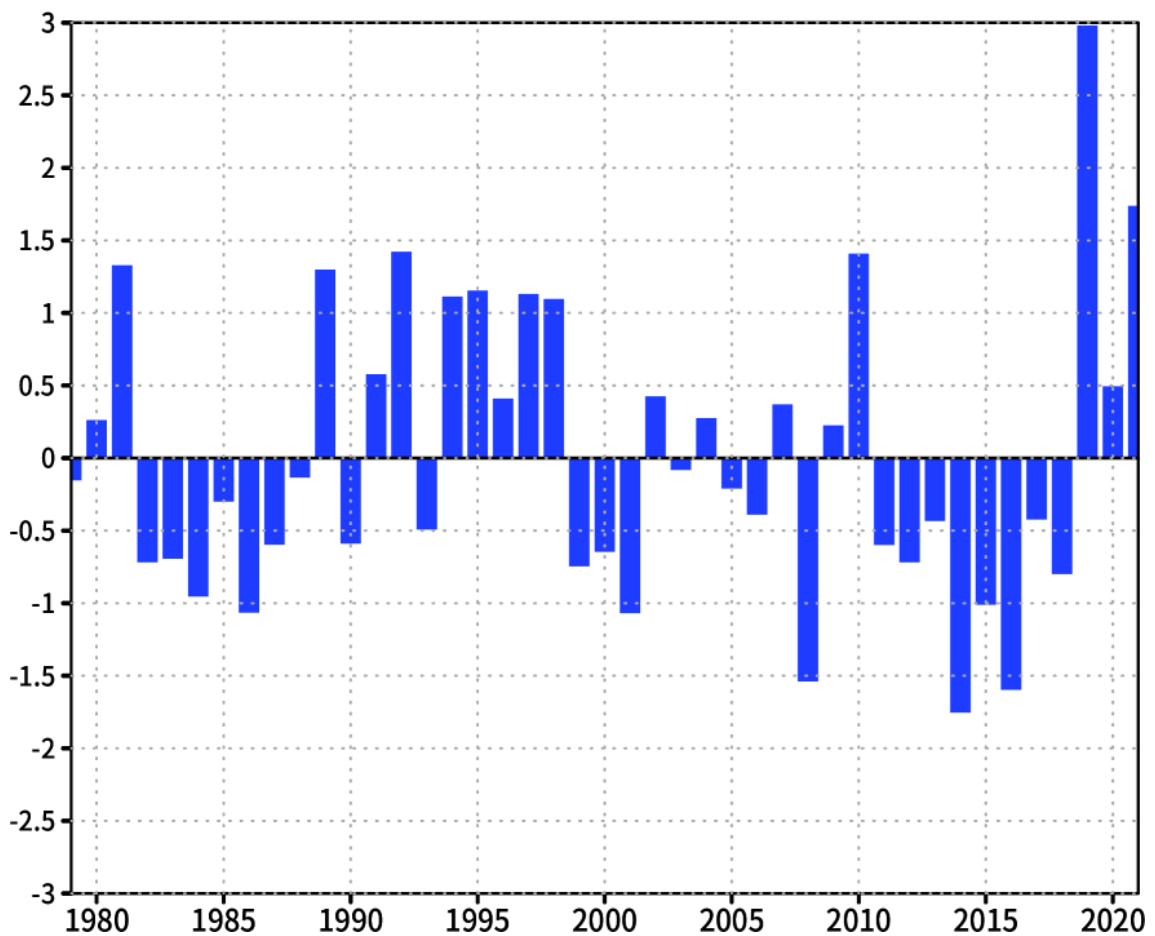


Fig. 4 10月の熱帯大西洋 OLR インデックス (1979-2021年)

縦軸： $\sigma$ ，横軸：年

### 3-3 回帰分析

#### 3-3-1 回帰計算

北極域の海氷変動や熱帯大西洋の対流活動と大気・海洋場との関係性を評価するために、格子点ごとに海氷インデックス、OLR インデックスとの線形回帰分析を行った。北極域の海氷変動に対する数か月前からの影響を考察するために、海氷インデックスに対して回帰計算を行う変数の月をひと月ずつずらしていき、回帰分析を行った。計算には以下の数式(1)を用いた。

$a$  = 回帰係数

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})(y(i) - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$N$  : 年数,  $x(i)$  : 北極域海氷インデックスまたは熱帯大西洋 OLR インデックス

$y(i)$  : 大気・海洋場データ

$\bar{x}$  : 北極域海氷インデックスまたは熱帯大西洋 OLR インデックスの平年値

$\bar{y}$  : 大気・海洋場データの平年値

#### 3-3-2 t 検定

回帰係数の有意性の検定には t 検定を用いた。検定統計量の計算式は以下の式(2)の通りである。

$t$  = 検定統計量

$$t = \frac{|a|S_x}{\sqrt{\frac{Se}{N-2}}} \quad (2)$$

$a$  : 回帰係数,  $S_x$  : 北極域海氷インデックスまたは熱帯大西洋 OLR インデックスの標準偏差

$N$  : 年数,  $Se$  : 残差分散( $Se = S_y^2 - a^2 S_x^2$ )

$S_y$  : 大気・海洋場データの標準偏差

有意水準は 10%以内 (つまり信頼係数 90%以上) とし、有意な領域を図中色で示す。



### 3-4 線形傾圧モデル (Linear Baroclinic Model; LBM) 実験

線形傾圧モデル (Linear Baroclinic Model; LBM) とは、熱源強制や渦度強制に対する大気の線形的な定常応答を計算するモデルである (Watanabe and Kimoto, 2000)。気候研究において大気大循環モデルのような非線形気候モデルが使われることが多いが、複雑なモデルは結果の解釈が難しいことがある。そこで、大気大循環モデルを線形化することで、与えられた強制に対する定常応答を求めることができ、モデルの中や現実で起きていることに対する解釈が容易となる。また、実験結果と回帰分析による結果を照らし合わせることで、因果関係を示すことが可能である。

本研究では、熱帯大西洋の活発な対流活動によって生じた熱源に対する大気の応答を確認することを目的として実験を行った。モデルでの熱源は、回帰分析の結果に従って熱帯大西洋の対流圏中層に与えた。詳細な熱源強制の設定については第 4 章にて述べる。使用データは 1979 年から 2020 年までの 42 年間の JRA-55 月平均データ (10 月) から作成した気候値である。水平格子間隔は 2.8 度 (経度) × 2.8 度 (緯度)、鉛直層は 20 層と設定した。実験結果として用いたのは、計算を開始してから 40 日後から 50 日後までの平均値である。

## 第4章 解析結果

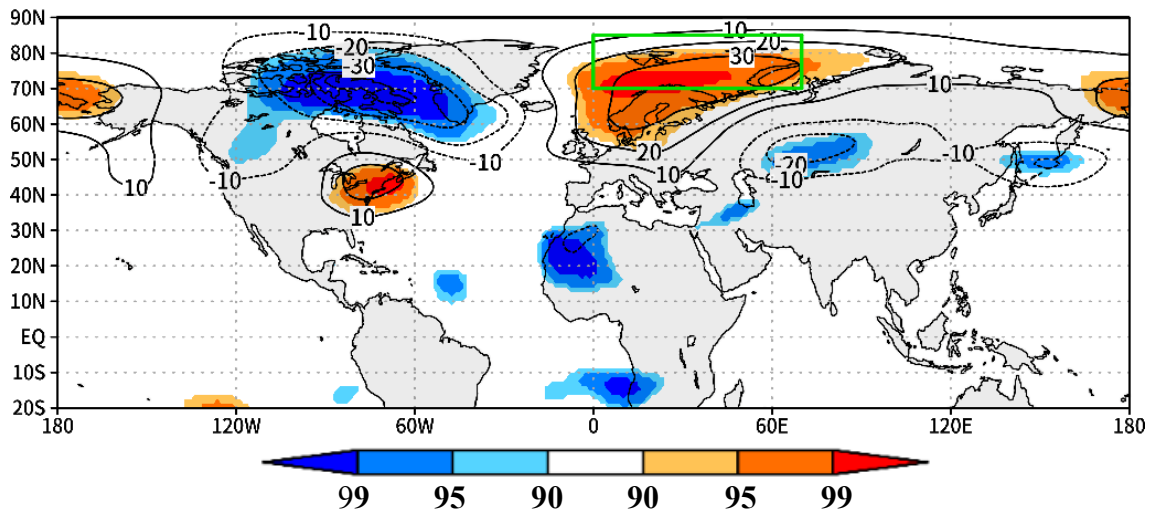
### 4-1 テレコネクションを介した北極域の海氷と熱帯大西洋の対流活動との関係

12月の北極域海氷インデックスに対して、12月、11月、10月、・・・、とひと月ずつ遡って回帰分析を行った。その結果、12月、11月、10月に波列パターンが現れ、10月のみ熱帯大西洋に顕著な OLR のシグナルが現れた。したがって、12月の海氷変動と10月の大気場、OLR との関係を検討する。

Fig. 5, Fig. 6 は12月の北極域海氷インデックスと10月の300 hPa ジオポテンシャル高度、OLR との回帰から得られた図である。ここで、少氷年に対応する場を示すため、符号を反転させて回帰していることに注意する。アメリカ東海岸に高気圧偏差、グリーンランド西部に低気圧偏差、スカンディナヴィア半島からバレンツ海にかけて高気圧偏差が確認できる。この波列パターン (Fig. 5) は、(Sato et al., 2014, Nakanowatari et al., 2014) における波列パターンと類似している。また、他の熱帯域に比べて熱帯大西洋での OLR の値が負となっており、対流活動が活発であることが分かる (Fig. 6)。そこで、熱帯大西洋の対流活発な領域に着目し (Fig. 6 の紫枠)、10月の熱帯大西洋 OLR インデックスを作成した。

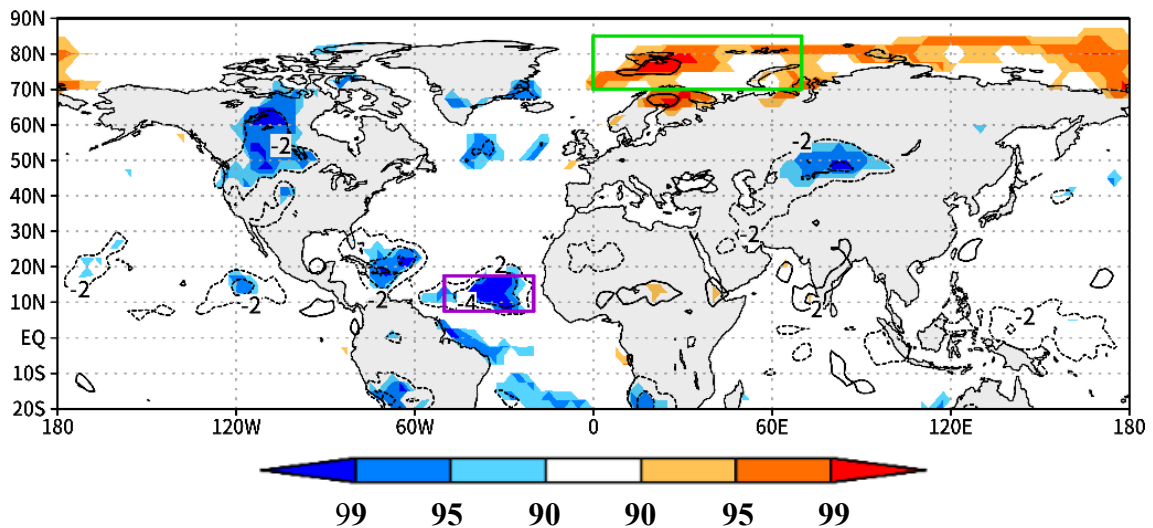
Fig. 7 は10月の熱帯大西洋 OLR インデックスを300 hPa ジオポテンシャル高度に回帰して得られた図である。ここで、対流活動が活発な場を示すため、符号を反転させて回帰していることに注意する。Fig. 7 においても、高・低・高の波列パターンが北大西洋中緯度からバレンツ海にかけて現れ、これは12月の海氷が少ないときに見られる波列パターン (Fig. 5) と類似している。

以上の解析から、12月の北極域の海氷、10月のテレコネクション、10月の熱帯大西洋の対流活動との間に有意な関係が存在することが示された。



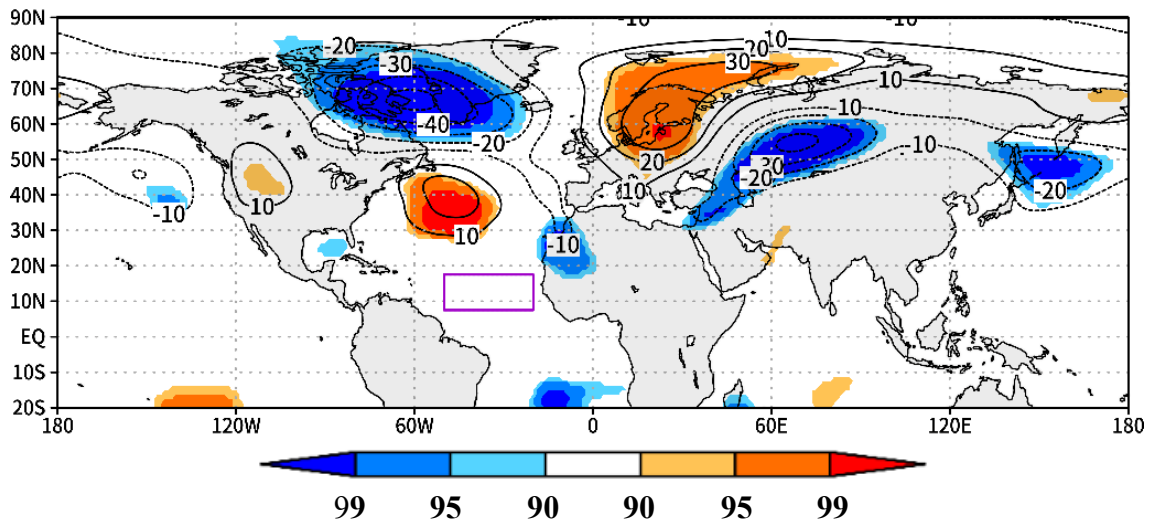
**Fig. 5** 12月の北極域海氷インデックスと10月の300 hPa面ジオポテンシャル高度との回帰

線：回帰係数 (m)，色：信頼係数 (%)，緑枠は北極域の領域。  
 少氷年に対応する場を示すため，符号を反転させて回帰させた。



**Fig. 6** 12月の北極域海氷インデックスと10月のOLRとの回帰

線：回帰係数 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )，色：信頼係数 (%)，緑枠は北極域の領域．紫枠は熱帯大西洋の領域。  
 少氷年に対応する場を示すため，符号を反転させて回帰させた。



**Fig. 7** 10月の熱帯大西洋 OLR インデックスと 10月の 300 hPa 面ジオポテンシャル高度との回帰

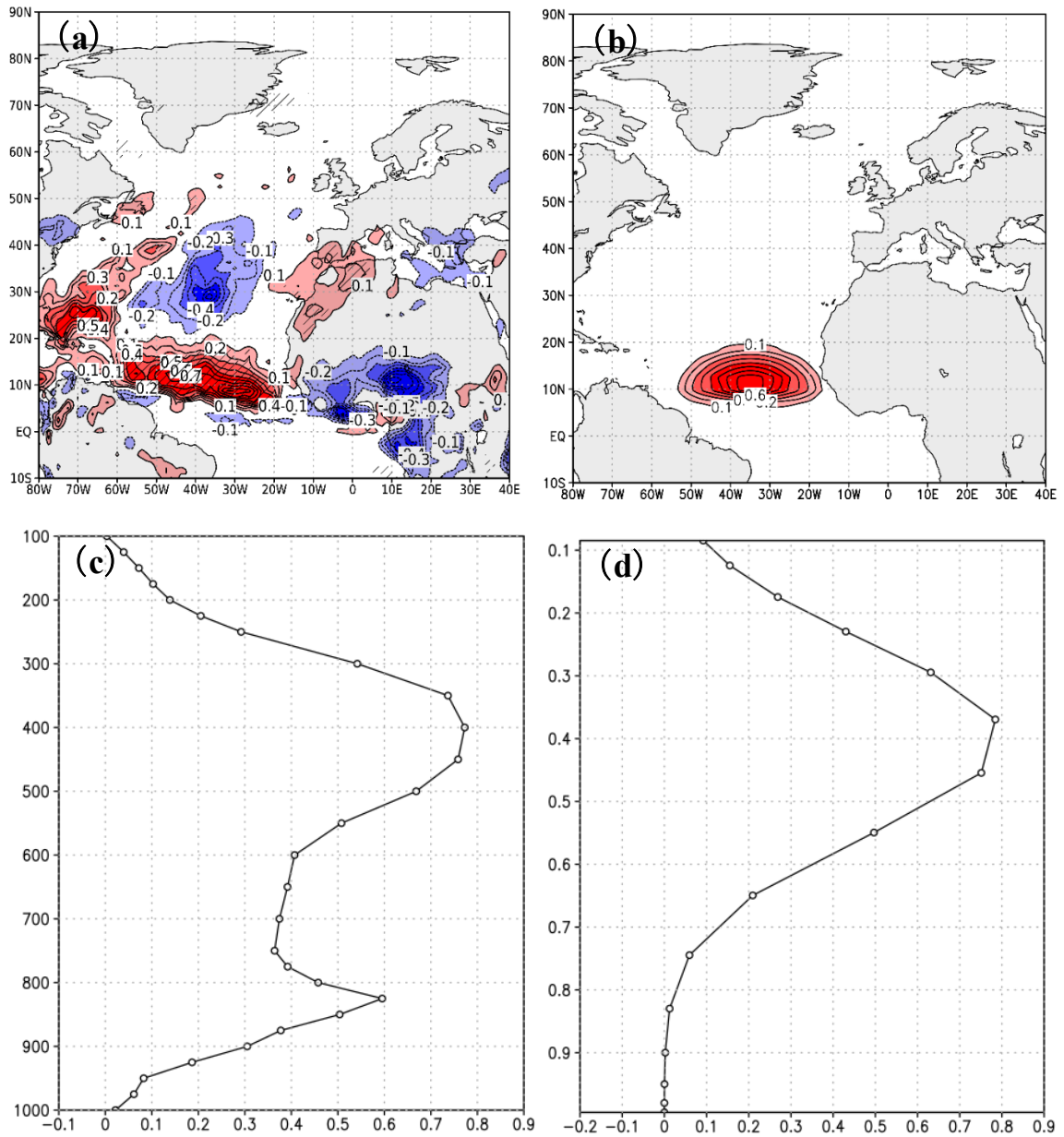
線：回帰係数 (m)，色：信頼係数 (%)，紫枠は熱帯大西洋の領域。

対流が活発な場を示すため，符号を反転させて回帰させた。

## 4-2 熱帯大西洋の熱源に対する大気の定常応答

熱帯大西洋の対流活動に伴う熱源に対する大気場の定常応答を確認するため、線形傾圧モデル (LBM) 実験を行った。この実験により、回帰分析によって示された熱帯大西洋の対流活動とテレコネクションの関係において、原因と結果の切り分けが可能となる。熱帯大西洋 OLR インデックスと非断熱加熱との回帰の結果に従って、北緯 10 度、西経 35 度、400 hPa 面付近が中心になるように熱源強制を与えた (Fig. 8a, b, c, d)。熱源の値の大きさは最大で約 0.75 K/day である。

結果として得られた図が Fig. 9 であり、熱帯大西洋から中央ユーラシアにかけて波列パターンが見られる。この波列パターンの位相は、回帰分析によって得られた図 (Fig. 7) と類似している。したがって、熱帯大西洋の対流活動によりテレコネクションが形成されたことが示唆された。しかしながら、モデルにおける偏差の絶対値が回帰係数の絶対値に比べ、オーダーが 1 小さい。この原因については以下のように考察することができる。まず、LBM による結果は線形の定常応答を示しているが、現実の大気は非線形である。そのため、中緯度の大気海洋相互作用や他の場所の非断熱加熱による強制など、別の要因が影響し、回帰係数の値が増幅した可能性が考えられる。



**Fig. 8** 線形傾圧モデル (LBM) における実験設定

10月の熱帯大西洋 OLR インデックスと非断熱加熱との回帰によって計算した (a) 400 hPa 面非断熱加熱偏差の水平分布図 (k/day) (c) 非断熱加熱偏差の鉛直分布図 (k/day). 非断熱加熱項として、対流による加熱、鉛直拡散による加熱、長波放射による加熱、短波放射による加熱、ラージスケール降水による加熱の値を合計した.

(b) 熱源の水平分布図 (k/day) (d) 北緯 12 度、西経 35 度における熱源の鉛直分布図 (k/day).

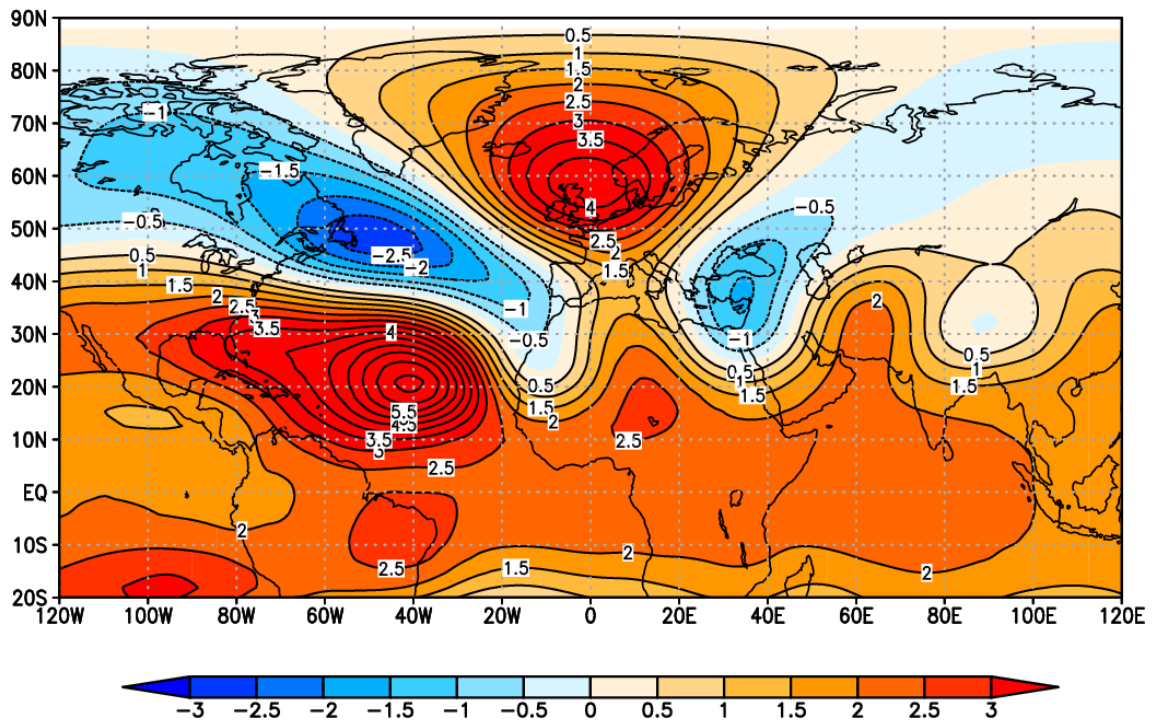


Fig.9 LBM 実験 (10 月) によって得られた 300 hPa 面ジオポテンシャル高度偏差  
 等値線, 色 : 300 hPa 面ジオポテンシャル高度の偏差 (m)  
 熱源強制を与えて 40 日後から 50 日後の結果を平均した図を示す.

### 4-3 テレコネクションが北極域の海氷に対して遅れて影響を与える過程

10月の熱帯大西洋の対流活動に励起されたテレコネクションが北極域の海氷に与える影響を考察するために、回帰分析を行った。

まず、Fig. 10aは10月の熱帯大西洋 OLR インデックスを10月の下向き顕熱+潜熱フラックスに回帰した結果、得られた図である。ノルウェー海からバレンツ海にかけて広く正偏差となっており、海洋が温められていることが推測される。先行研究では、北極域の温度上昇は対流圏下層の水平温度移流によるものだと述べられているが (Inoue et al., 2012 など)、回帰分析では水平温度移流はほとんど見られなかった (Fig. 10b)。したがって、潜熱+顕熱フラックスによって10月の北極域の SST が上昇することが示唆される (Fig. 11a)。また、海氷がある領域では正の下向き熱フラックスは見られないため、10月のテレコネクションの海氷変動に対する寄与は小さいと推測される。

Fig. 11a, b, cは10月の熱帯大西洋 OLR インデックスを10月、11月、12月の SST に回帰した結果、得られた図である。10月、11月、12月と SST の高温偏差が北極極に見られることから、SST が高い状態が秋から冬にかけて持続していることが示唆される。

Fig. 12 a, b, cは10月の熱帯大西洋 OLR インデックスを10月、11月、12月の SIC に回帰した結果、得られた図である。その結果、10月は SIC との有意な関係がほとんど見られなかったが、11月、12月と季節が進むごとに、有意な負偏差の領域が拡大している。この結果については以下のように考察する。まず、北極域の海氷域面積は9月に最小となり3月に最大となるが、10月から12月は、海氷域面積が拡大する時期にあたる。その時期に北極域の SST が高い状態が続くことで、海氷が張り出しにくい状態が続き、海氷が平年に比べ減少したことが示唆される。Nakanowatari et al. (2014) では、冬季北極域の海氷変動に対して2ヶ月前から同時期にかけての SST の状態が、海氷変動の予測因子となることが示唆されており、この結果と整合性がある。



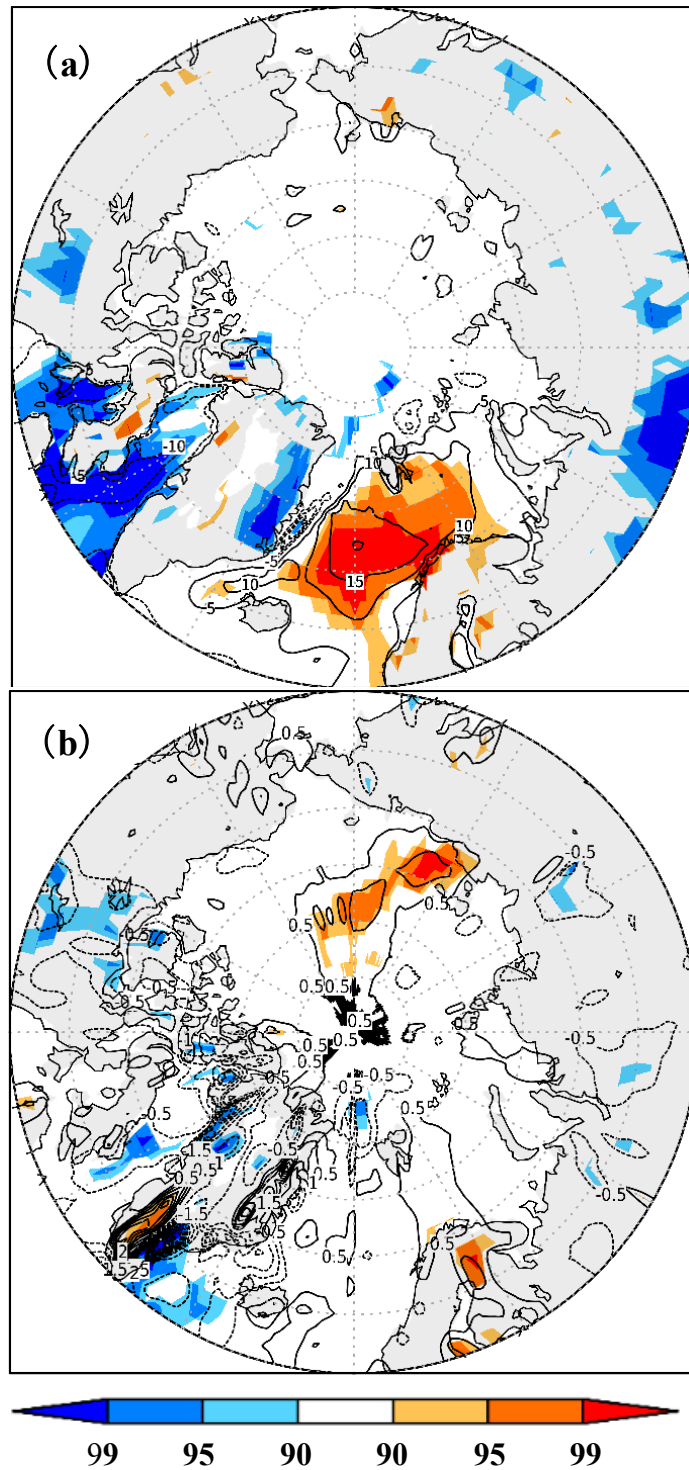
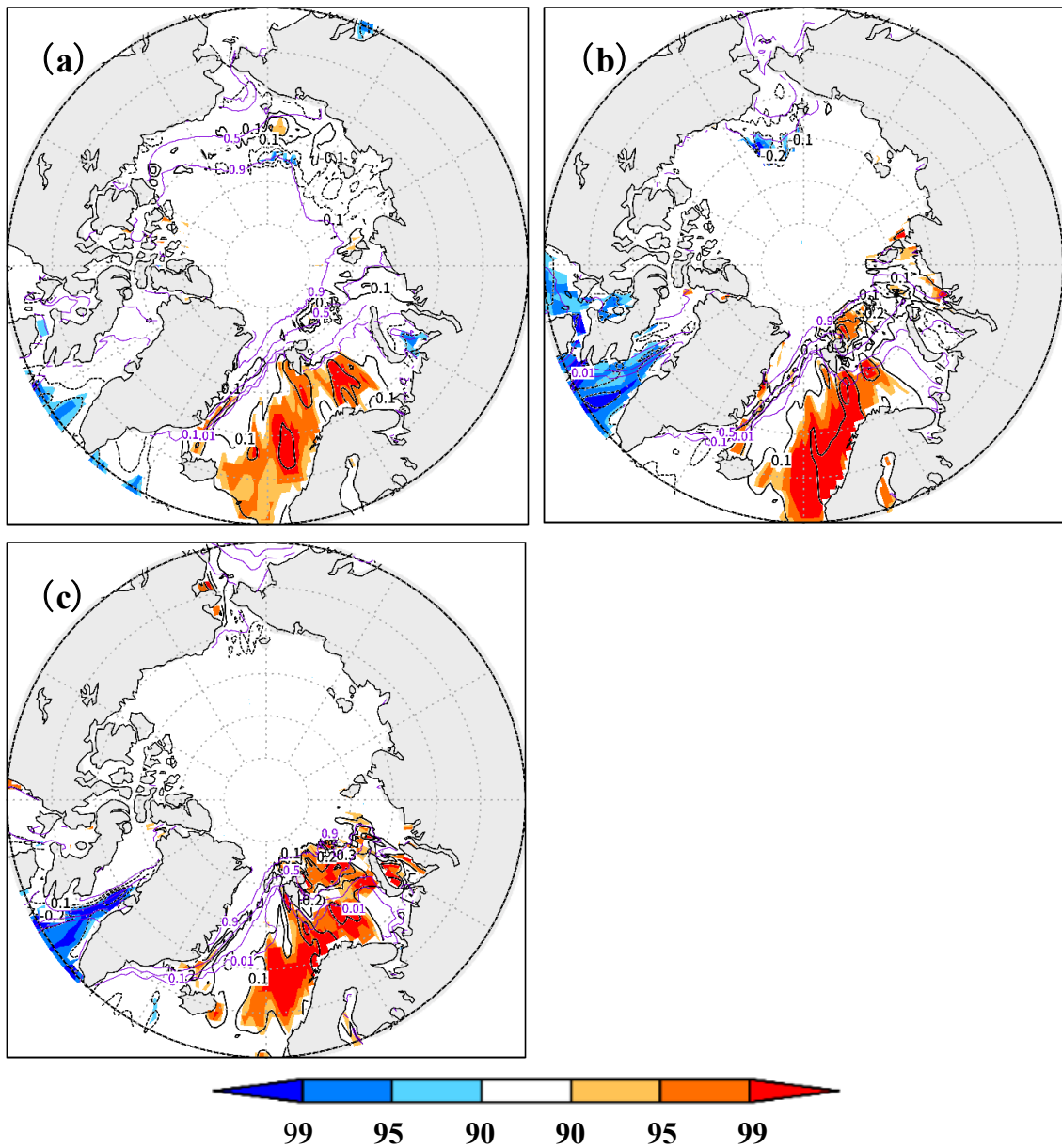


Fig. 10 10月の熱帯大西洋 OLR インデックスと (a) 10月の下向き潜熱+顕熱フラックス (b) 温度移流 (850-1000 hPa 平均) との回帰

線：回帰係数，上 (W/m<sup>2</sup>)，下 (K/day) 色：信頼係数 (%)  
 対流が活発な場を示すため，符号を反転させて回帰させた。



**Fig. 11** 10月の熱帯大西洋 OLR インデックスと (a) 10月, (b) 11月, (c) 12月の SST との回帰

線 : 回帰係数 (K), 色 : 信頼係数 (%), 紫線 : 海氷密接度の気候値  
対流が活発な場を示すため, 符号を反転させて回帰させた.

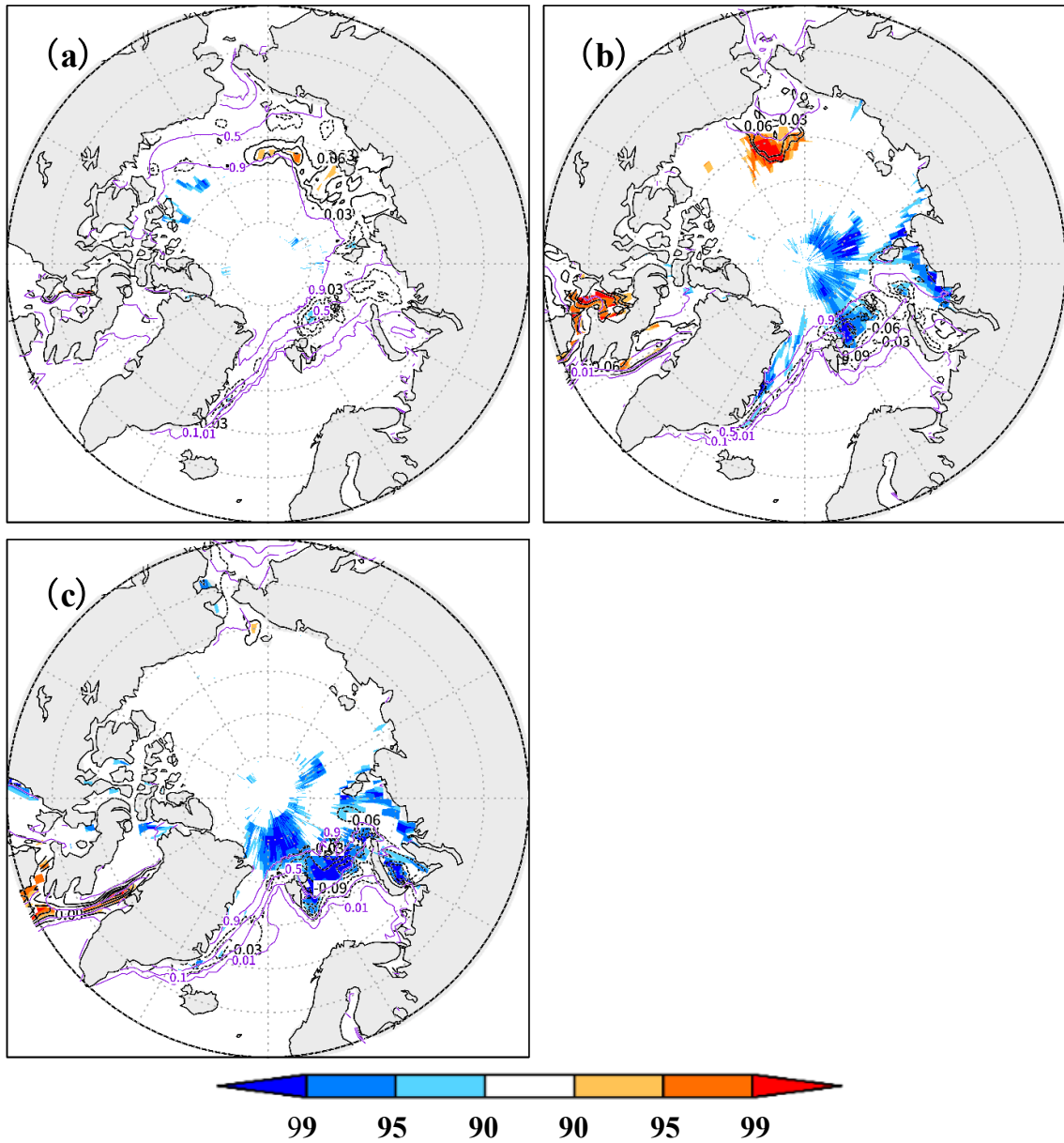


Fig. 12 10月の熱帯大西洋 OLR インデックスと (a) 10月, (b) 11月, (c) 12月の SIC との回帰

線 : 回帰係数, SIC, 色 : 信頼係数 (%), 紫線 : 海氷密接度の気候値  
 対流が活発な場を示すため, 符号を反転させて回帰させた.

## 第5章 まとめ・今後の課題

本研究では、熱帯大西洋の対流活動に励起されたテレコネクションが、海氷変動に対して遅れて影響するのか検証するために、解析を行った。まず、12月の北極域海氷インデックスを用いた回帰分析より、10月の熱帯大西洋の対流活動と10月のテレコネクションと12月の北極域の海氷変動との相関関係が示された。さらに、LBM実験の結果から熱帯大西洋の対流活動がテレコネクションを励起したことが示唆された。続いて、テレコネクションが海洋に与える影響を考察するために、10月の熱帯大西洋 OLR インデックスを用いた回帰分析を行った。その結果、潜熱+顕熱フラックスにより10月の北極域の SST が上昇した。その SST の高温偏差は、11月、12月と持続することで海氷が張り出しにくい状態を作る。その結果、10月から12月にかけて北極域の海氷の負偏差の領域が拡大し、海氷に影響することが示唆された。

しかし、本研究にはいくつか課題が残されている。まず、潜熱+顕熱フラックスによって北極域の海洋が温められると考察したが、実際に北極域の海洋上ではどのような現象が起き、熱の出入りがなされているのかは理解できていない。また、本研究では北極域の海氷に対して遅れて影響する原因として SST 偏差の持続について着目した。しかし、北極域の SST 偏差の持続といった観点から、海氷への遅延影響を全て説明できるとは考えにくい。別の要因を探る必要がある。最後に、熱帯大西洋の対流活動が変動する理由についても考察する必要がある。10月の熱帯大西洋 OLR インデックスを SST に回帰した結果、直下の SST や熱帯太平洋・インド洋との相関関係が見られなかった。すなわち、10月の熱帯大西洋の対流活動は、SST や他の熱帯海洋以外の要因で変動していることが推測される。対流活動から海氷減少までのメカニズムをさらに理解するため、これらの原因を考察する必要があると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、熱心にご指導をいただきました立花義裕教授には深く感謝いたします。ゼミにおいては、研究に対する基本的な心構えから、気象・気候に対する知識、考え方など数多くのことをご教授いただきました。また、学内のゼミだけでなく、海氷に興味をもつきっかけとなった北海道への流氷合宿や外部の研究者の方を三重大学に招待し開講していただいたセミナーなど、数多くの研究に触れ、様々な研究者の方と交流する機会をいただきました。

地球環境学教育コースの先生方には授業を通して、学問の基礎から地球環境に関することまで幅広い知識を学ばせていただきました。また、合ゼミや卒論中間発表会、卒論発表会では、重要なお指摘やご助言をいただきましたことにも大変感謝しております。

気象・気候ダイナミクス研究室の皆さまにも多大なるご協力を賜り、大変感謝しております。春日悟研究員には、ゼミでの的確なお指摘や、結果の解釈の仕方などたくさんのご助言をいただきました。竹端光希氏、松田佳奈氏、山中晴名氏、天野未空氏、加藤実紗氏、佐野芳氏、恒川知也氏、山本諒氏には、研究の進め方からプログラムの書き方、スライドの作り方や要旨の添削など、数多くのご助言をいただきました。3, 4年生の学生の皆さまには、たくさんの方の発表練習や議論などに付き合ってくださいました。

鈴鹿高専の安藤雄太氏には、LBM 実験のデータを提供していただきました。また、解析結果の解釈の仕方や基本的な気象の知識など、数多くのことを学ばせていただきましたことにも大変感謝しております。

最後に、振り返ると私は恵まれた環境で研究が出来ていたのだと感じます。この場を借りて上記全ての皆様に重ねて感謝いたします。

## 参考引用文献

- Honda, M. et al., 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36(8)**, L08707, doi: <https://doi.org/10.1029/2008GL037079>
- Sato, K. et al., 2014: Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter. *Environ. Res. Lett.*, **9(8)**, 084009, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084009>
- Nakanowatari, T. et al., 2014: Predictability of the Barents Sea ice in early winter: Remote effects of oceanic and atmospheric thermal conditions from the North Atlantic. *J. Clim.*, **27(23)**, 8884– 8901, doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00125.1>
- Xie, S. P. and J. A. Carton, 2004: Tropical Atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts. Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction. *Geophys. Monogr.*, **147**, 121-142, doi: <https://doi.org/10.1029/147GM07>
- Kobayashi, S. et al., 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48, doi: <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- Harada Y. et al., 2016: The JRA-55 reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94(3)**, 269-302, doi: <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-015>
- Rayner, N. A. et al., 2003: Global Analyses of Sea Surface Temperature, Sea Ice, and Night Marine Air Temperature since the Late Nineteenth Century. *J. Geophys. Res.*, **108(14)**, 4407-4410, doi: <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Watanabe, M. and M. Kimoto, 2000: Atmosphere-ocean thermal coupling in the North Atlantic: A positive feedback. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2247-2250, doi: <https://doi.org/10.1002/qj.49712657017>