10. 気候モードと太平洋(数)十年振動，北極振動

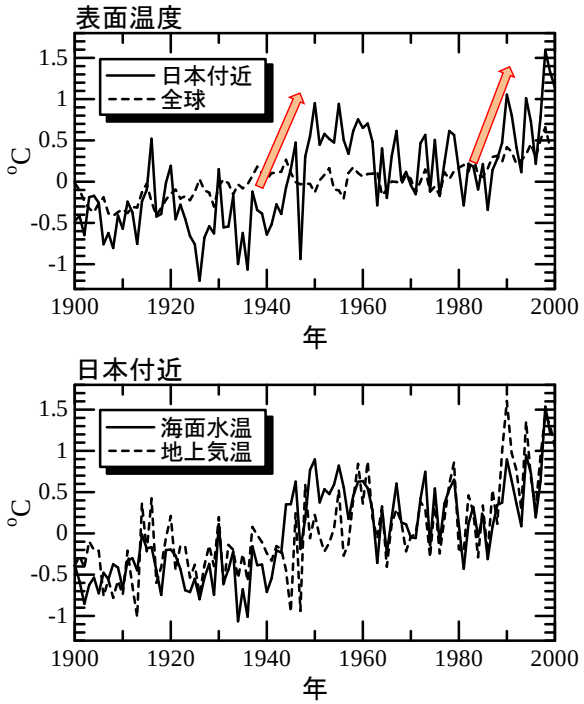
見延　庄士郎（海洋気候物理学研究室）

本日の目標

- 気候変動を同定するには，これまでに学んだ相関・回帰だけでは不十分であり，多くの量を一度に解析できる解析方法（多変量解析手法）を使う必要がある．
- その中でも，大気海洋でよく使われる方法が主成分分析（統計学での呼び名）または経験的直交関数展開（大気海洋での呼び名）である．
- 今回は，この手法で同定された，北太平洋の主要な気候変動パターンである太平洋十年規模振動および北半球冬季の主要な気圧パターンである北極振動について学ぶ．
- また，これまでの話題はほぼ確立した内容であったが，今回を含めて残り三回は，未確立の面についても触れていきたい．なぜなら，そこに生の科学研究があるためだ．

地球と日本付近の温暖化

- 日本付近は1930年代までは温暖化の程度は低かったが，1940年代と1980年代末にどーんと上昇
- これらの温度上昇は今日学ぶ気候モードと関係している．



見延 (2001 海と環境)

準備：標準偏差，分散，相関の復習 & 分散の足し合わせ

平均ゼロの場合の，標準偏差，分散，相関

- あらかじめ平均を引いて，平均ゼロの時系列 $u'(n) = u(n) - \bar{u}$ (n=1, …, N) を作っておく．
- この場合，振幅の大きさ表す標準偏差は

$$s = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \square}$$

- またその２乗である，分散は

$$v = \square$$

- で表せる．標準偏差の方が直感的だが，分散にも利点がある．
  - ２乗に比例するので，エネルギーに比例すると考える．
  - 独立な現象（相関係数がゼロ）の分散を足し合わせると，もとの分散になる．
- 相関係数は，第一回の定義から

$$\text{相関係数} = \frac{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u_1' u_2'}{u_1'\text{の標準偏差}\cdot u_2'\text{の標準偏差}}$$

- したがって，無相関(相関=0)なら

$$\sum_{n=1}^{N} \square = 0$$

分散の足し合わせ

- Q.　$u(n)=u_1(n)+u_2(n)$で，u_1とu_2が無相関（前スライド一番下）であるとき，全分散vが，u_1の分散v_1と，u_2の分散v_2との和で表される($v = v_1 + v_2$)ことを証明せよ．ただし簡潔さのために，u, u_1, u_2の平均はゼロとする．

$$v = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u(n)^2,\ v_1 = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u_1(n)^2,\ v_2 = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u_2(n)^2$$

A.　$v = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u(n)^2 =$

分散の足し合わせの性質

- ある時系列の分散は，独立（ $\square$ 相関 ）な成分の分散 $\square$ で表される．
- 分散は必ず，正である．
- したがって，ある成分が他のどの成分よりもその分散が大きいことの十分条件は，その成分の分散が全分散の $\square$ よりも大きいことである．

気候モード

エル・ニーニョ以外の気候現象

- 気候現象
  - 月よりも長い時間スケールの変動
  - 月よりも短い時間スケール現象の長期的な振る舞い：平均，長期変化，他の気候変動現象との関係
- IPCC第五次評価報告書・第一作業部会報告書にも，14章「気候現象と地域的な気候変化との関係」が新たな章として加わっている
  - 平均的な気候状態がどう変化するかだけでなく，[　　]，の重要性が増している

IPCC-AR6　2章登場の気候変動モード

2.4. モード的変動の変化（variability は上下変動，change は一方方向の変化）

- 環状モード
  - 北半球環状モード（=[　　]）/北大西洋振動
  - 南半球環状モード
- エルニーニョと南方振動
- インド洋全域モードとダイポールモード
- 大西洋の南北モードと東西モード
- 太平洋十年規模変動(～[　　], Pacific Decadal Oscillation PDO)
- 大西洋数十年変動

[　　]を理解せずに，現代の気候科学は理解できない．

IPCC評価報告書で言うモードは次のどれに最も近いか？（挙手）

1. 形式や様式や形態や方法。テレビ及びパソコンにおける省電力モードや格闘ゲームのストーリーモードなど。
2. 最頻値 - 統計の指標の一つ
3. モード（物理学）- 境界条件で両端が定められる区間に存在できる波動の基本振動と倍振動のこと。
4. モード（MODE）とはフランス語で流行やファッションを意味し、英語のファッション（FASHION）である。

物理学でのモード @ you tube

- 連成振動
  - https://www.youtube.com/watch?v=YyOUJUOUvso
- 弦の振動
  - https://www.youtube.com/watch?v=BSIw5SgUirg
- 膜の振動
  - https://www.youtube.com/watch?v=v4ELxKKT5Rw

異なるモードは直交する

単純な物理システムで外力が働かないなら，（減衰）振動

いずれの場合も，外力無しなら，特定の周期（減衰可）を持つ[　　]（固有[　　]）が定義でき，外力が働く場合でも運動はその固有関数 の 重ね合わせで表される．

$$u(x,t)=\sum_{n=1} S_n(x)T_n(t)$$

$$u(x,y,t)=\sum_{n=1} S_n(x,y)T_n(t)$$

S_n: n番目の[　　]の[　　]関数

T_n: n番目の[　　]の[　　]関数

モードで表すことの利点

- 物理的に [ ] 現象に，切り分けることができる．
- [ ] のモードの振る舞いを知れば，系全体の振る舞いが近似的に理解できる．
  - https://www.sci.hokudai.ac.jp/~minobe/class/phys_math/dif_fft_rct.html
  - 気候変動もモードで表せるなら，同様の利点がある．
- [ ] は一般に，特定の [ ] と [ ] とで定義される．

主成分分析=経験的直交関数展開

- 時間・空間に分布するデータ $u(x,y,t)$ を，

[ ] (10.1)

- と展開したい．このとき，通常用いられる方法が，一般の統計学では [ ] と呼ばれる方法である．同じ方法を，気象学・海洋学では [ ] (Empirical Orthogonal Function, EOF, イー・オー・エフ)と呼ぶ．
- 後者の呼び名には，データに基づいて物理的な固有モード（直交関数）を，同定したいという気持ちが表されている．
- 第nモードは，空間関数S_nと時間関数T_nの組で表される．
- 第nモードによる，uの成分は，

$$u_n(x,y,t) = \boxed{} \quad (10.2)$$

EOFモードの分散の足し合わせ

- $u(x, y, t)$（簡潔さのため平均ゼロ）の全分散は

$$V \equiv \boxed{} \quad (10.3)$$

- と表される(Lは時間の長さ)．EOFの第nモードによる分散は

$$V_n = \boxed{} \quad (10.4)$$

- であり，第一EOFモードは，最も大きい分散を持つ．
- また，全分散は，各モードの分散の和で表される．つまり

$$V = \boxed{} \quad (10.5)$$

太平洋（数）十年振動

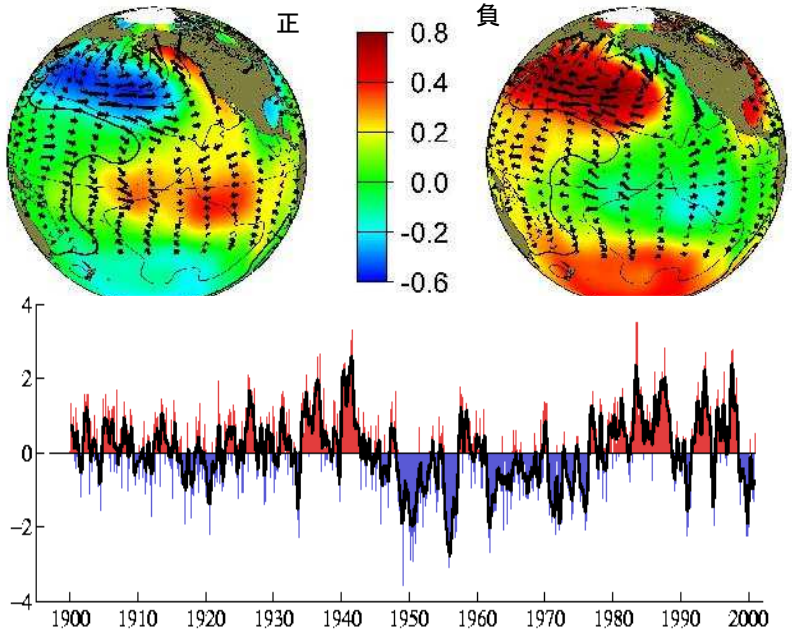
定義

- [　　](北緯20°N以北)の，[　　]についての，[　　]．
  - ただし，地球温暖化の影響を避けるために，EOFを計算する前に，全球平均海面水温偏差を，それぞれの地点の水温偏差から除いている．
- この計算で得られるEOF第一モードには，数十年変動が卓越するために，提案したMantua et al. (1997)が，
  - [　　]，
  - [　　]，略して[　　]（ピー・ディー・オー）と名づけた．

Pacific (inter-)Decadal Oscillation (PDO)

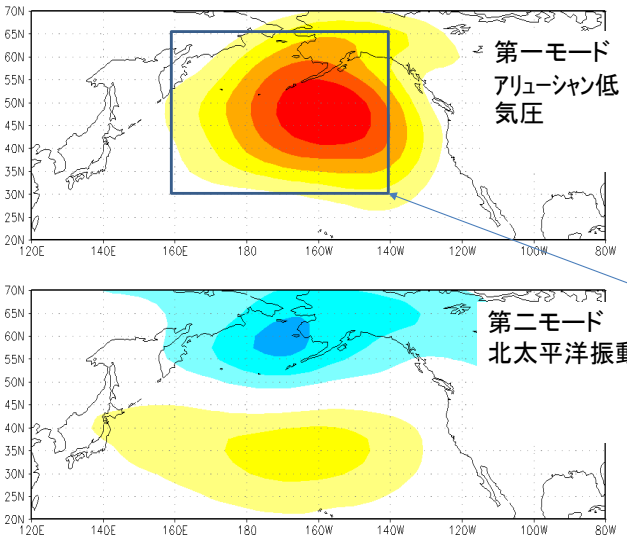
太平洋(数)十年振動

- カラー：海氷表面水温
- 等値線：海面気圧
- 矢印：海上風
- 図はMantua & Hare (2002 JO)より



PDOと関係する大気・

大気（海面気圧）の第一モード・第二モード



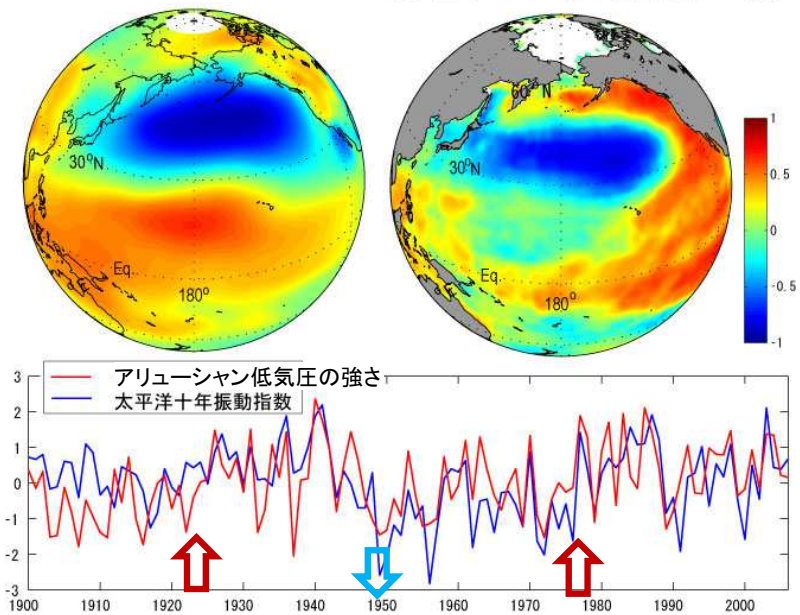
第一モードと関係するパターン

- 上空では，テレコネクションパターンである．[　　]

海面水温：[　　]

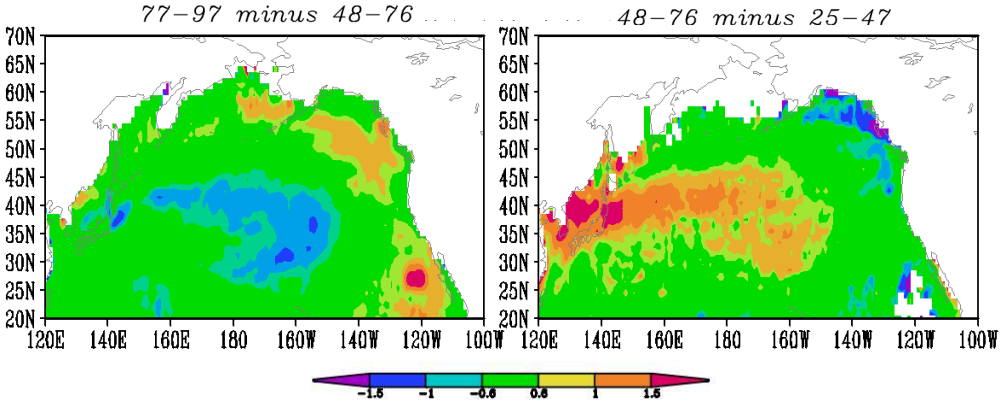
北太平洋指数：領域平均海面気圧(160°E-140°W, 30°-65°N)

表面気圧と負の北太平洋指数との相関　海洋表面水温と太平洋十年振動指数との相関



ある気候状態から他の気候状態への急峻な遷移＝[　　]

1940年代のレジームシフト

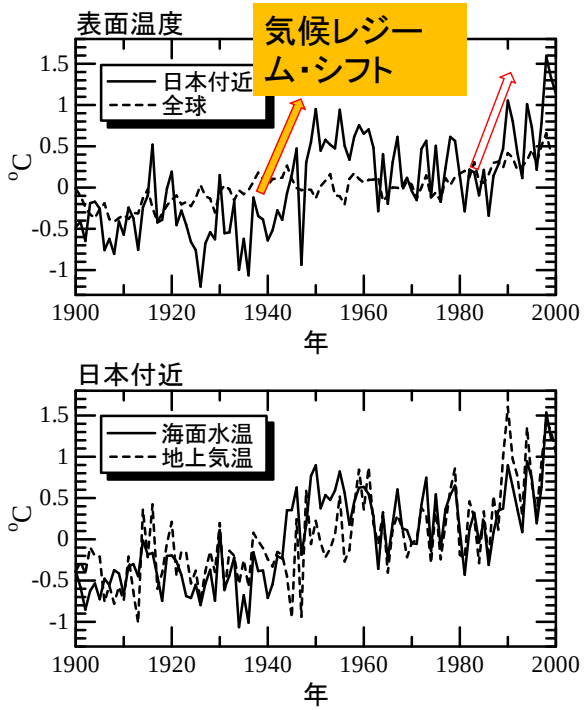


- 1970年代と40年代のシフトの海面水温の差
  - 40年代のシフトは日本付近で一番変化が大きかった．
  - 日本周辺で大幅な水温上昇

Minobe and Maeda 2005

地球と日本付近の温暖化

- 日本付近は1930年代までは温暖化の程度は低かったが，1940年代と1980年代末にどーんと上昇
- 1940年代の昇温は，気候レジーム・シフトの影響
  - なぜ，このとき特に日本に影響が強かったのかは不明．

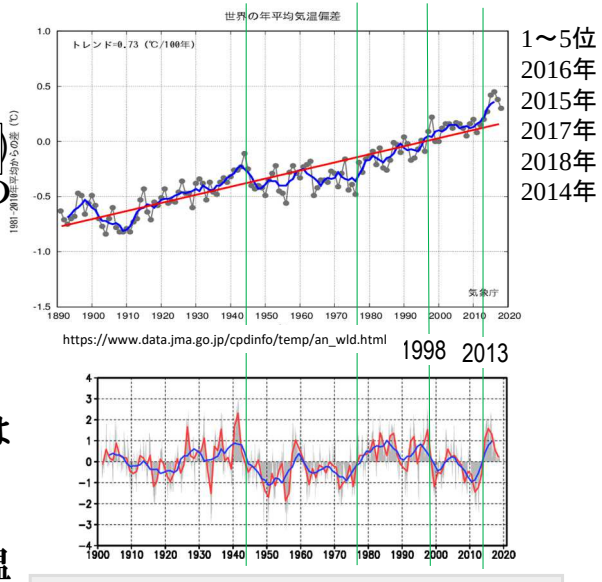


見延 (2001 海と環境)

温暖化の加減速とPDO

- 1998年から2013年に［　　］（［　　］）と呼ばれる，温暖化の進展が［　］い時期があった．
- その後温暖化が［　］くなっている．
- 温暖化が速い時期にはPDOが［　］となる傾向がある．この関係は，PDOに伴う熱帯の水温上昇が大気を暖めるためと考えられている．

世界の年平均気温の偏差の経年変化（1891～2018年），気象庁
(12月後半には今年の値を含めた速報値が出る予定)



https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html

• 2018年のPDO指数（年平均値）は+0.2でした。10年以上の長い周期の変動に注目するとPDO指数は2000年頃から2010年代前半にかけておおむね負の値で推移していましたが、2014年以降は正の値が続いています。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/b_1/pdo/pdo.html

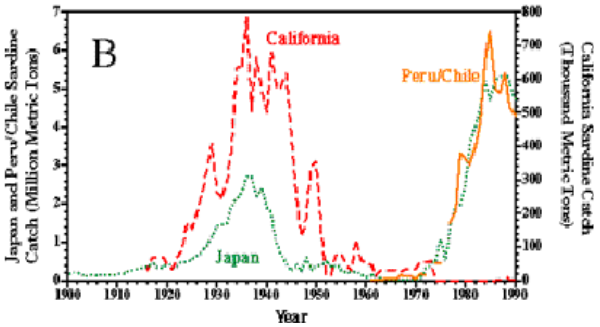
• 風が吹くと

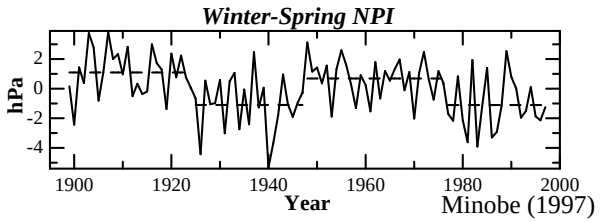
［　　］が獲れる

マイワシとの関係

- マイワシは[　　]低気圧が強い時期に多い．
- PDOが正の場合はアリューシャン低気圧が強いので，広範に海洋の冬季の[　　]が促進され，[　　]が表面に運ばれて，[　　]を増やす，と考えられている．

after Kawasaki (1992)

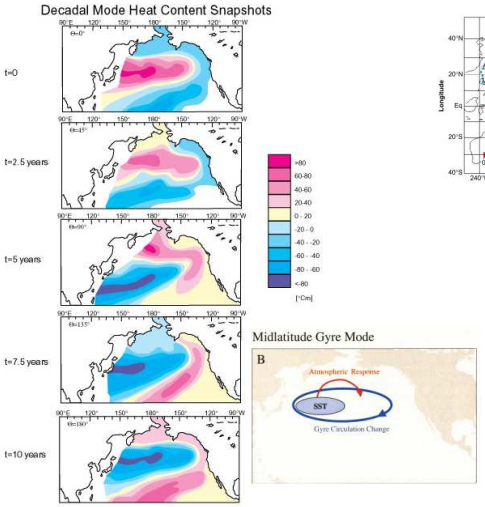




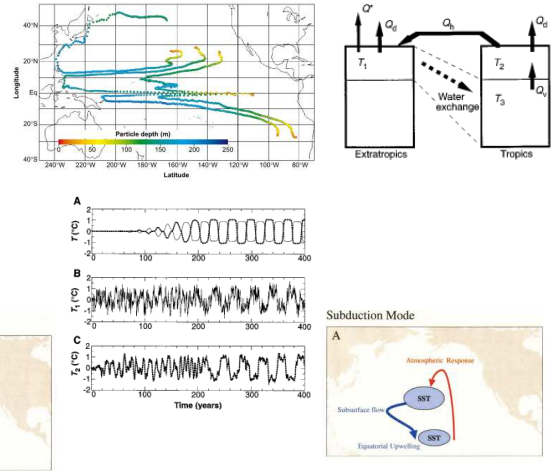
Minobe (1997)

PDOメカニズム仮説

中緯度内の遅延振動子

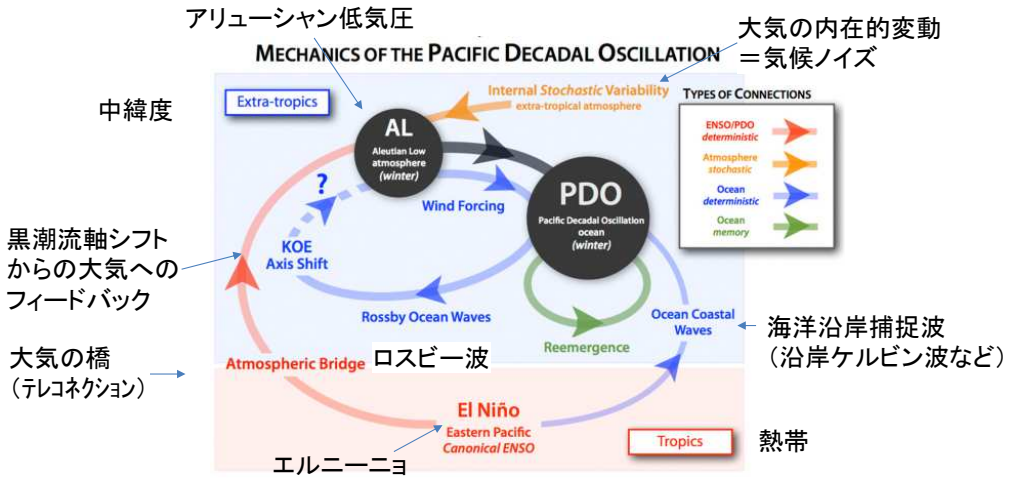


中緯度・低緯度遅延振動子



どちらも，エルニーニョ理論で提案された，遅延振動子を基本とする考えである．

今日の一応のコンセンサス



The Pacific Decadal Oscillation, Revisited　2016年出版

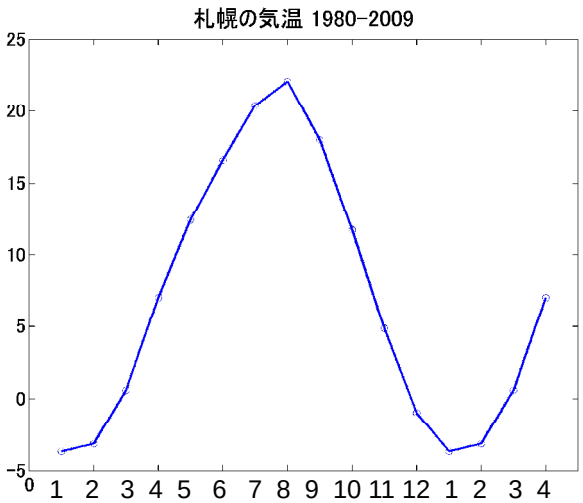
MATTHEW NEWMAN,[a,b] MICHAEL A. ALEXANDER,[b] TOBY R. AULT,[c] KIM M. COBB,[d] CLARA DESER,[e] EMANUELE DI LORENZO,[d] NATHAN J. MANTUA,[f] ARTHUR J. MILLER,[g] SHOSHIRO MINOBE,[h] HISASHI NAKAMURA,[i] NIKLAS SCHNEIDER,[j] DANIEL J. VIMONT,[k] ADAM S. PHILLIPS,[e] JAMES D. SCOTT,[a,b] AND CATHERINE A. SMITH[a,b]

コミュニティー型レビュー論文
単なる解説ではなく，太平洋十年変動研究の主要研究者が著者に入ることで，ここまでは科学コミュニティとして合意できるという線引きを示した．

このいまひとつはっきりしない理解をどう超えるか，が新たな挑戦に

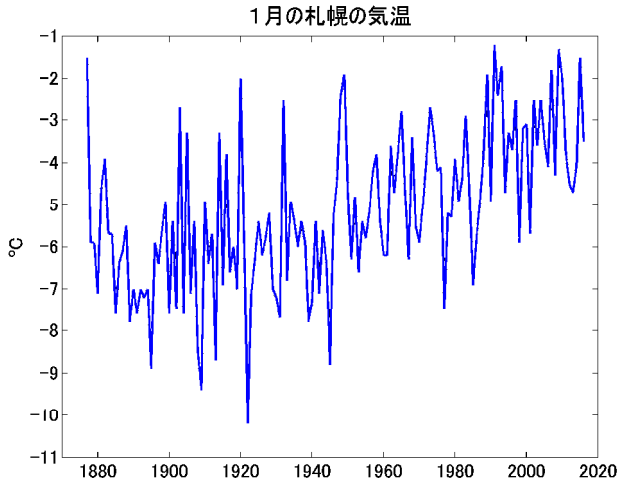
北極振動

札幌の平均気温



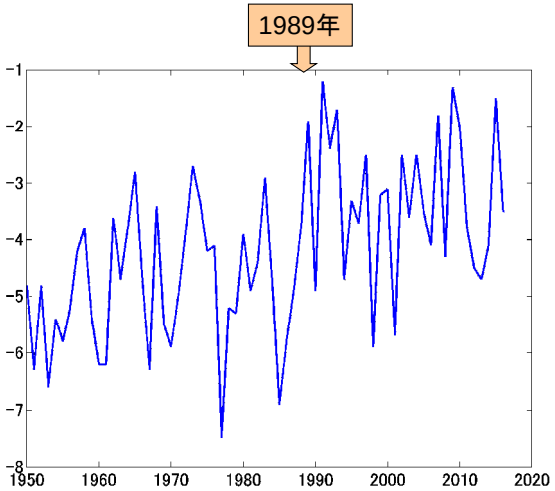
▶ 氷点下は12月:-0.97, 1月: -3.67, 2月:-3.14,

札幌の１月の気温



- 地球温暖化？都市化？それともそれ以外の気候変動？

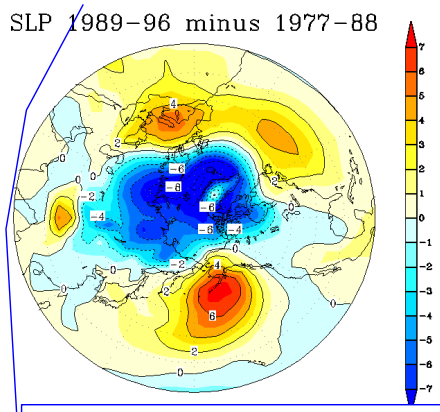
札幌の１月の気温:1950年以降

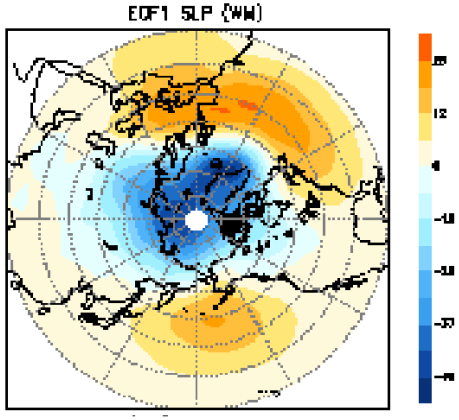


- 地球温暖化？都市化？それともそれ以外の気候変動？

温度上昇に対応する海面気圧差と
ある気圧モードの空間構造はほぼ同一

1989-96年と1977-88年の海面気圧の差

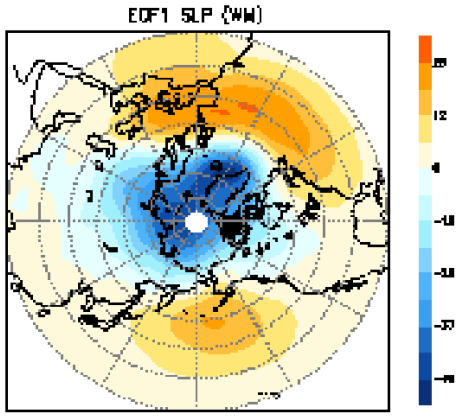




海面気圧とは観測地点の地上気圧と気温，そして気温減率から，海面（海抜0 m)での気圧を推定したものである．

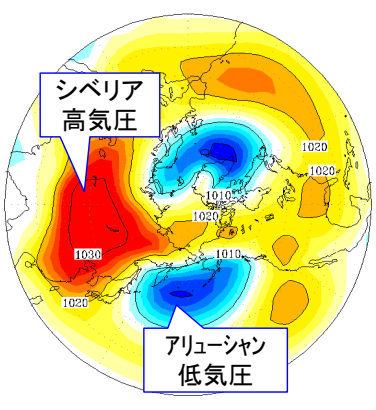
北極振動(Arctic Oscillation)

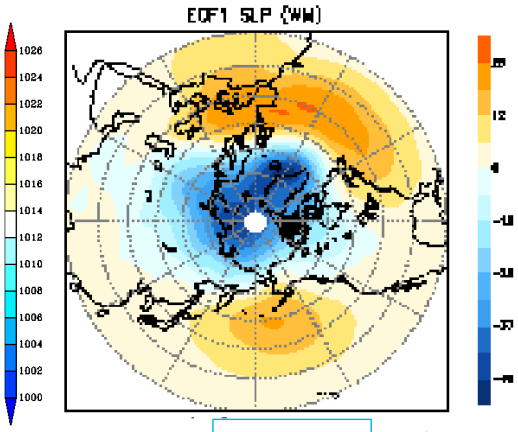
- は，北半球20°N以北の海面気圧の第一経験的直交関数( )展開モード．
- とも呼ばれる．
- 正の場合に北極海で 北大西洋と北太平洋北部で の気圧偏差を持つ．
- Thompson (当時大学院生) & Wallace (1998)



北極振動と平均気圧配置

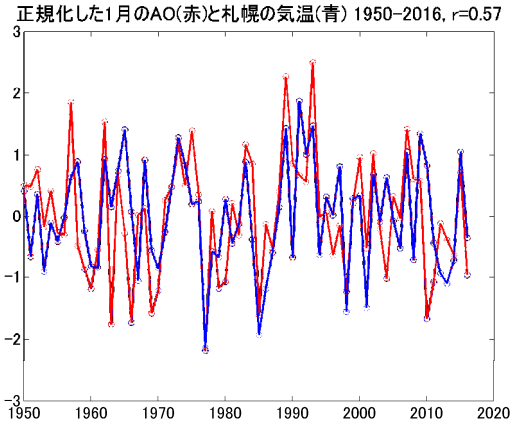
冬の海面気圧の平年値





- 正の北極振動は、ユーラシア上の 高気圧、太平洋上の 低気圧という冬型の平均的な気圧配置を める．
- その結果，大陸からの寒気の吹き出しを め，日本付近では気温が くなる．

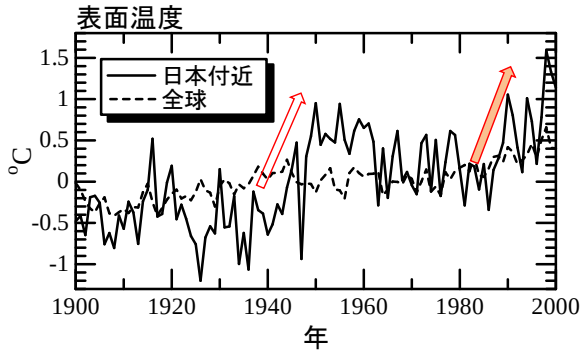
札幌の気温と北極振動

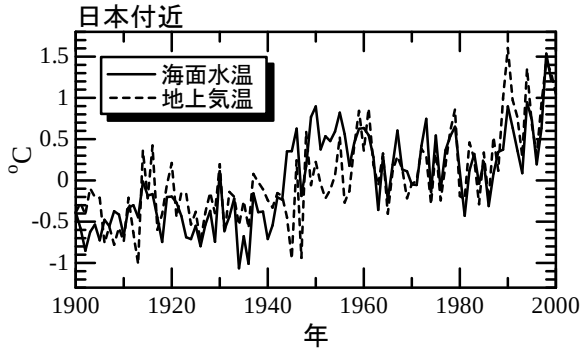


- 北極振動が，
  - 1989-1993年の 冬をもたらした．
  - 2011-2014年の 冬をもたらした．
- ことが（強く）示唆される．

地球と日本付近の温暖化

- 日本付近は1930年代までは温暖化の程度は低かったが，1940年代と1980年代末にどーんと上昇
- 1980年代末の昇温は， の影響

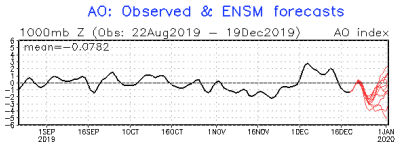




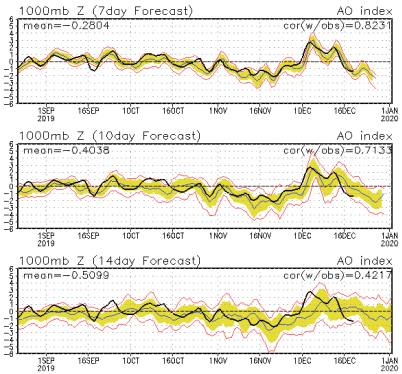
見延 (2001 海と環境)

北極振動予報(米国気候予測センター)

観測値 ── 11の試行 ──



7日，10日，14日予測での，
試行平均 ── 試行平均±1標準偏差
試行の最大最小 ── 観測値 ──



- 気候予測センターは数値モデルで複数回の予測の[　　](アンサンブル）を行うことで，北極振動の予測を行っている．
  - https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao_index_ensm.shtml
- 北極振動の予報と，北極振動と日本の気象との関係を組み合わせて，14日先までの気象のおおまかな予測が可能である．
- 予測期間が長いほど，試行の間のばらつきが[　　]なり，予測の不確実性が[　　]なる．

第10回のまとめ1/3

- ある時系列が二つの無相関な成分からなるとき，両者の分散の[　　]が，全体の分散となる．
- 気候モードは，特定の[　　]と[　　]とで定義される．
- 気候モードを見出すのに最もよく使われる手法が，一般の統計学で言う[　　]であり，この手法は気候学・気象学・海洋学などでは[　　]，英語の頭文字３文字では[　　]という．
- 全分散は，EOFモードの個々の成分の分散の[　　]で表される．

第10回のまとめ 2/3

- 北太平洋の，海洋表面水温偏差のEOF第一モードを，[　　]と呼び，英語の頭文字３文字で[　　]という．
- 上の変動は，[　　]低気圧の強さと密接な関係を持つ．
- この変動が，1920年代，1940年代，1970年代に急にその符号を反転させた現象を，[　　]と呼ぶ．
- 特に[　　]年代の変化は，日本の気温にも大きな影響を与えた．
- これらの変動に関係してこれは熱帯太平洋が冷たい時期，地球温暖化の[　　]（[　　]）が生じる．
- ここ数年温暖化のペースが[　　]おり，この傾向は[　　]年以降顕著である．

第10回のまとめ 3/3

- 北極振動は，北半球[　　]以北の[　　]の，EOF第一モードである．
- 北極振動のことを，[　　]とも呼ぶ
- 北極振動が正の状態は，北極海上で[　　]の，北太平洋北部と北大西洋北部で[　　]の気圧偏差となる．
- 北極振動が正の状態では，シベリア高気圧が[　　]まり，アリューシャン低気圧が[　　]まるため，大陸からの寒気の吹き出しが[　　]まり，日本付近は[　　]温偏差となる．
- 北極振動が正に大きく振れたことで，1980年代末の日本付近の温度[　　]がもたらされた．