

成層圏と対流圏をつなぐ極端気象変動

日々の気象変動のなかでめったに出現しない極端な現象がある。ジェット気流の大蛇行や熱帯域の対流雲活動の組織的活発化などが典型例であるが、はるか上空の成層圏の循環状態が重要な働きをしていることが解ってきた。

余田 成男

京都大学大学院理学研究科

教授

西本 絵梨子

京都大学大学院理学研究科

特定研究員

納多 哲史

京都大学大学院理学研究科

特定研究員

BUI Hoang Hai

京都大学大学院理学研究科

特定研究員

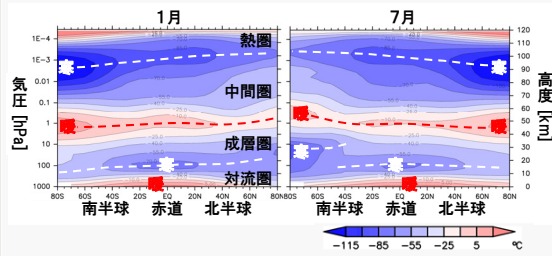
成層圏って知っていますか？

その役割を研究しています

大気に関する基本的知識とクイズ

大気の成層構造

東西帯状平均した気温の緯度-高度分布



◎ どこが暖かくて、どこが寒いか？

➢ 高度による違い：対流圏-成層圏-中間圏-熱圏
同じ高度で、一番寒いところはどこにある？

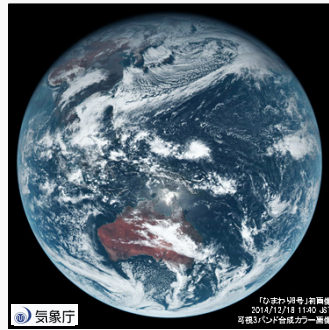
➢ 季節による違い
夏ののに、同一高度で一番寒いところはどこ？

◎ どこで、なにが、大気を温めているか、冷やしているか？

➢ 太陽放射エネルギーの吸収、地球(大気を含む)の熱放射
さらに、上昇(下降)運動が持続すれば何が起る？

雲の動きでみる大気の運動

静止気象衛星からみた雲画像



◎ 温帯域
➢ 低気圧
➢ 前線
➢ メソ現象
➢

◎ 熱帯域
➢ 積雲対流の組織化
➢ 熱帯低気圧(台風)
➢ スーパークラウド
クラスター(〜MJO)
➢

◎ 温帯域と熱帯域で大きく異なる雲の様子、運動形態
違いをもたらす原因(環境要因)は何にあるのか？

◎ 静止気象衛星による常時観測 → 時々刻々の大気の変化
なぜ、夜でも雲がみえるのか？

ちょっと注意！



◎ 非等方な大気

➢ (鉛直)/(水平) $\sim 100\text{km}/10000\text{km} = 0.01$
水平方向に薄くのびている
非等方になるのはなぜ？

◎ 非均質な大気

➢ 全球で一様に混ざっているわけではない
微量成分(水蒸気、オゾン 等)の生成と消滅
南北になかなか混ざらないのはなぜ？

◎ 現象の空間規模の拡がり:

➢ (地球規模) 10^7m ~ (分子規模) 10^{-9}m

最近の研究成果から：数値モデルや大気観測・解析で得られたデータの解析

古気候再現における成層圏-対流圏結合の重要性

完新世中期の気候再現シミュレーションにおける成層圏オゾン化学-気候相互作用のインパクト

Noda et al. (2016, submitted to JGR)

研究動機

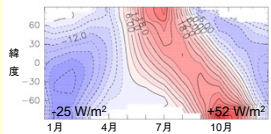
IPCC第5次評価報告書のために実施されたCMIP5実験では、完新世中期(6000年前)の気候再現シミュレーションに1850年のオゾン分布を用いたが、これらの間で地球軌道要素は異なっている(ミランコビッチ・サイクル)

➔ 地球に届く太陽エネルギー量が異なるので、成層圏のオゾン量が異なり、それが地表の気候にも影響を及ぼす可能性がある

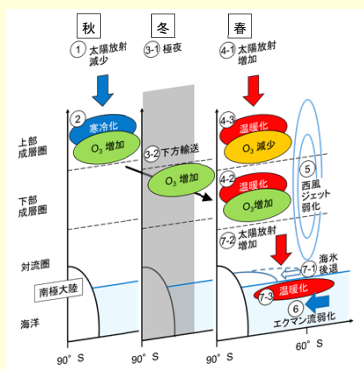
成層圏オゾン化学過程を陽に含む地球システムモデル MRI-ESM1 を用いて、当時の太陽エネルギー量で気候再現シミュレーションをすると、どんなインパクトがあるか？

地球に届く太陽エネルギーの差

(完新世中期) - (1850年)



成層圏オゾン化学-気候相互作用の地表気候へのインパクト(模式図)



秋・南半球上部成層圏でオゾン増加、温度下降

➔ 冬季の極渦内で増加したオゾンが下降

➔ 春季下部成層圏極域において

オゾン増加、温度上昇、西風ジェット弱

➔ 南半球環状モード変動で地表西風も弱

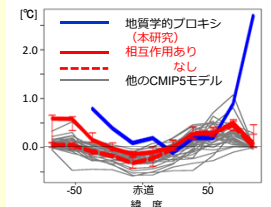
➔ 赤道向きエクマン流の弱

➔ 海面温度・地表気温上昇(←+太陽放射増加)

➔ 海面温度・地表気温上昇(←+太陽放射増加)

年平均海面温度差の緯度分布

(完新世中期) - (1850年)



1850年のオゾン分布を用いた完新世中期気候再現CMIP5実験では、全モデルで南半球低温バイアスが存在

↔ 本研究で、成層圏オゾン化学-気候相互作用過程を含めると、南半球低温バイアスが減少、温暖化

結論

◎ ここで得られた南極域の成層圏オゾンと地表気温との関係は、近年観測されている『南極域オゾンホール』の深化にともなう地表寒冷化と基本的に同じメカニズム。ただし、符号は逆

◎ 古気候再現シミュレーションでも、成層圏オゾンや海水を含めた相互作用が重要

熱帯域の内部変動における成層圏-対流圏結合の新事実

成層圏準2年周期振動(QBO)によるMadden-Julian Oscillation(MJO)の変調

Nishimoto and Yoden (2016, submitted to JAS)

赤道域の顕著な内部変動 QBO、ENSO、MJO の相互関連は？

赤道域の地球規模の年々変動として、

・成層圏東西風の QBO

・太平洋域の大気-海洋相互作用による

エルニーニョ-南方振動 ENSO

が卓越しており、季節内変動としては、

・インド洋から太平洋にかけて対流活動の

活発域がゆっくり東進する MJO

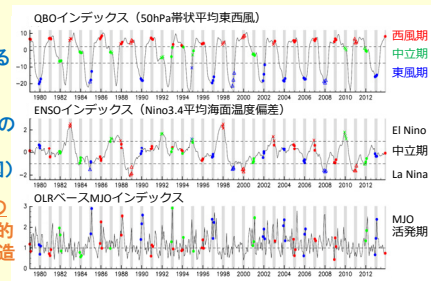
が、北半球冬季を中心に出現する (右図)

Yoo and Son(2016)は、QBO が東風期の

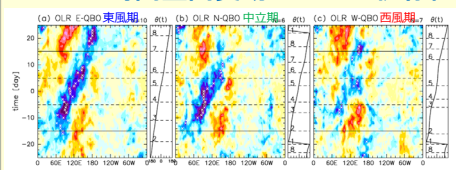
ほうが MJO が活発なことを指数の統計的

な差で示したが、その時間変動や空間構造

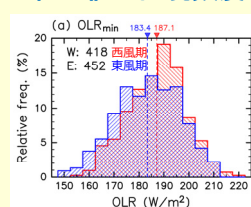
は QBO の位相にどう依存しているか？



MJO の時間空間変動の QBO 依存性



OLR極小値の出現頻度の差



日々のOLR分布図でインド洋・太平洋域での極小値を求め、QBOの位相でわけて出現頻度分布を描くと、

◎ QBO が東風期のほうが、より低温側に拡がった分布 → より対流活動が活発

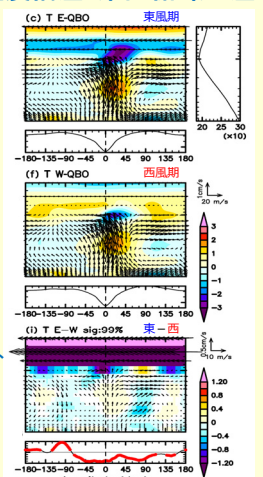
日々のOLR分布図での極小値の位置を重ねて合成図を描くと、

◎ QBO が東風期の合成図のほうが、極小域・対流圏界面付近で、より低温、より強い上昇流

◎ 東風期・西風期の統計的に有意な違いは、全球域に及ぶ

未解明な点: QBO のどの要素が MJO の対流活動の活発化をもたらしているのか? (因果関係は?) 予測可能性の差が存在するのか?

温度偏差・東西循環の差

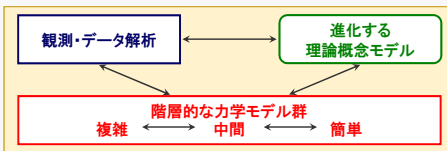


大気の数値モデルをどう構成するか、どう使うか

数値モデルの階層性

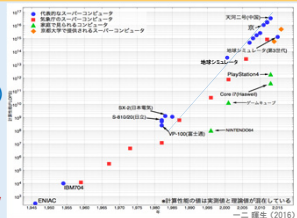
- 複雑モデル: 定量的予測; 高品質地球システムモデル
 - 中間モデル: メカニズム理解; パラメータ走査型実験用
 - 簡単モデル: 定性的記述; 新概念提案型モデル
- 計算機性能の飛躍的(～指数関数的)向上と密接に関連

Hoskins (1983) 気象学研究における最適な状況:
観測・理論・数値実験の緊密な連携による学問の発展



計算機性能の向上

- 演算速度は70年で 10^{14} 倍以上(最近は10年で約 10^3 倍)
- 『世界で唯一』の結果 VS 『誰でも参加できる科学』を実現する計算機インフラ



最近の研究成果から: 階層的な数値モデル群を用いた、理解のための数値実験

波と流れの相互作用で周期的振動をロバストに出現させる

成層圏-対流圏結合系におけるQBO的振動の最も簡略化した原型モデル

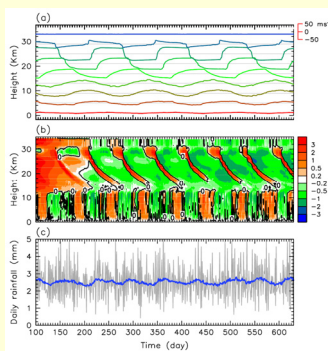
Yoden et al. (2014, SOLA), Nishimoto et al. (2016, JAS)

研究動機

Held et al. (1993) は、鉛直面2次元周期境界で雲システム解像の領域気象モデルで、放射-湿潤対流準平衡状態を求め、赤道域QBOに似た自励振動が出現することを初めて例証した。

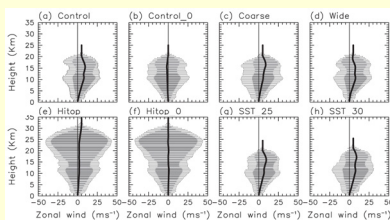
- それ以降、この周期的変動の系統的な研究はない。一方、計算機環境は飛躍的に向上
- 最も簡略化した原型モデルで得られるQBO的振動の全体像は? 実験パラメータ依存性は?
- 原型モデル内で生成される大気波動と帯状平均流の相互作用の実態は?
- 成層圏のQBO的振動が対流圏の湿潤対流とその組織化に及ぼす影響は?

両圏でみられるQBO的振動



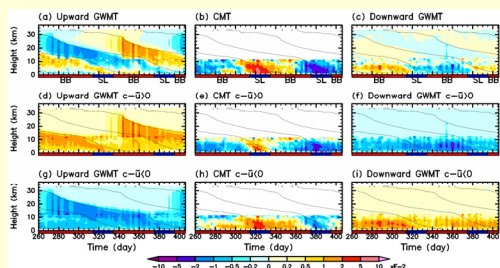
- ◎ 対流圏内でも帯状平均流変動が下方伝播
- 対流圏内の気温変動は時間遅れなし
- 日降水量もQBO的振動と同期して変動

実験パラメータ依存性



- ◎ QBO的振動は、計算領域、水平分解能、モデル上端での帯状平均東西風、モデル下端での海面温度、などの実験パラメータによらずロバストに出現(上図)

運動量収支解析



- ◎ 運動量収支から診断した振動メカニズム(右図)

- 成層圏: 対流圏から伝播する重力波と帯状平均流の相互作用
- 対流圏: 傾いた対流による運動量輸送 + 下方伝播重力波

未解明な点

- QBO的振動のどの要素が、対流活動の活発化をもたらしているのか?
- 因果関係は、どのような実験を行えばわかるのか?

成層圏突然昇温現象は強非線形な冬季周極渦の崩壊現象

成層圏-対流圏結合系の極端気象変動である冬季成層圏突然昇温現象の出現頻度統計

Yoden et al. (2002, JMSJ), Nishizawa & Yoden (2005, JGR)

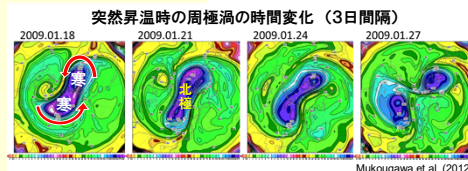
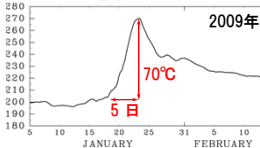
冬季成層圏突然昇温現象とは?

冬季の成層圏周極渦の変形・崩壊に伴い、北極域の気温が数日のうちに 30°C 以上も昇温する現象で、大規模なものは2~3年に一度の頻度で発生する。

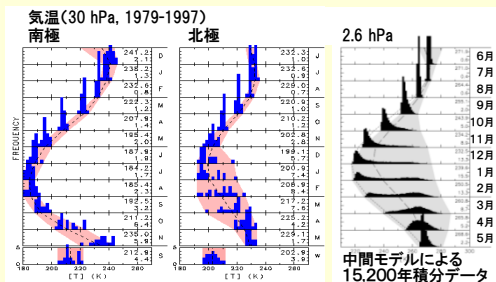
それは非線形性の強い力学現象であり、その出現予測と対流圏への影響評価は大変難しい問題である。

過去の観測は、北半球でも高々60年余りしかなく、極値統計を行うにも、数値モデルの実験データを組み合わせる研究が必須である。

北極上空 10hPa (~高度30 km) での気温 [K] の時間変化

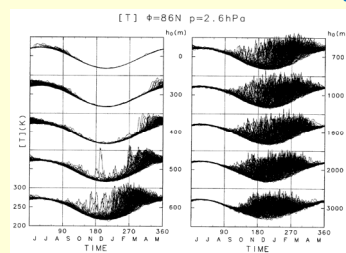


月平均気温のヒストグラム



- ◎ 長期間の数値モデル実験データで、頻度分布の詳細が得られる
- ◎ 月平均気温の頻度分布は、冬季には、成層圏突然昇温現象の発生の有無により大きく歪み、双山形にも
- ◎ 非ガウス型確率密度関数の先端部に関わる統計解析の必要性

季節内変動の惑星波強制振幅 h_0 依存性



- ◎ パラメータ走査型実験: 地表での惑星波強制を東西波数1成分のみで与え、振幅 h_0 を 0 m から 3000 m まで10通りで与えて、100年積分を繰り返す
- ◎ 北極での気温の重ね書き: $h_0 = 500\text{m}$ の結果は、春先に突然昇温が起こる南半球型で、1000m の結果は、冬季に突然昇温が起こる北半球型

理解の深化

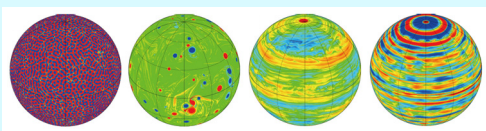
- ◎ 惑星波強制振幅に依存した突然昇温現象出現頻度の定量的把握を通して、現実大気の基本的特性に関する定性的理解を深化

気象学研究室メンバー

教授: 余田 成男 准教授: 石岡 圭一 特定研究員: 西本 絵梨子, 納多 哲史, BUI Hoang Hai

教育・研究の専門テーマ

- ◆ 余田 成男: 気象学、気候力学、地球流体力学
「成層圏-対流圏結合変動と気候」「非線形力学とカオス」「熱帯域の多階層連結変動」
- ◆ 石岡 圭一: 地球流体力学、気象学、計算流体力学
「地球流体運動に関する数値実験的・理論的研究」



現在推進中のプロジェクト

- ◆ 2012~2016 科学研究費補助金 基盤研究(S)
「成層圏-対流圏結合系における極端気象変動の現在・過去・未来」
<http://www.mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/kakenhi2012/>
- ◆ 2015~2019 科学研究費補助金 新学術領域研究
「太陽地球環境予測: 我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成」
A04班「太陽周期活動の予測とその地球環境影響の解明」
<http://www.pstep.jp/>
- ◆ 2015~2017 日本学術振興会 研究拠点形成事業
B. アジア・アフリカ学術基盤形成型
「海洋大陸における気候変動下の極端気象に関する国際共同研究」
http://www.mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/project/C2C_AASP/

