

# 長期的気候変動予測のための高精度気候モデルの開発研究

課題責任者

河宮 未知生 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

著者

河谷芳雄\*<sup>1</sup>, 齋藤冬樹\*<sup>1</sup>, 河宮未知生\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

MIROC モデルと観測データを組み合わせ、エルニーニョ・南方振動に伴う赤道準 2 年振動の変調メカニズムを解明した。また非定常重力波パラメタリゼーションの問題点も示した。

三次元氷床モデルの特に頂上付近の流動再現の向上のため、高解像度の領域高次力学モデルを埋め込む氷床モデル開発を行っている。予備開発として全体モデルと領域モデルを同じ解像度にしたモデル開発を行い計算時間を測定し、今後の高速化のための調査を行った。

従来 MIROC で用いられている球面調和関数ライブラリの領域分割方法について改良開発を継続しているが、本年度は球面調和関数変換ライブラリとしての基本的な要件を完成した。実装したルーチンを用いて気候モデルで想定される模擬的な計算を行い、領域分割数を増やしても有効であることを確認した。

**キーワード**：赤道準 2 年振動, 氷床モデリング, 球面調和関数

## 1. エルニーニョ・南方振動と赤道準 2 年振動

平成 29 年度の Annual Report で初期解析結果を紹介した、エルニーニョ・南方振動 (ENSO) による QBO 変調に関する研究について、詳細な解析を行い、論文として発表した (Kawatani et al. 2019) ので記述する。熱帯域成層圏に存在する QBO は、対流圏-成層圏結合を引き起こし、赤道～極域、地表～高度 100km に及ぶ広範囲の力学・化学過程に影響を及ぼし、気象予報精度とも関連する、極めて重要な現象である。

2010 年に発表された観測的な研究論文 (Taguchi 2010) から、ENSO と QBO が連動し、エルニーニョ期ではラニーニャ期に比べ QBO 周期が短くなることが発見された。ラジオゾンデの一点観測データから発見されたが、そのメカニズムは不明な状況がその後約 10 年続いた。本研究では、各種観測データ・再解析データと高解像度 MIROC 気候モデル実験を有機的・相補的に組み合わせ、ENSO に伴う対流圏・成層圏循環、熱帯対流、重力波活動の変動が、どのようなプロセスを経て QBO 変調を引き起こすかを詳細に調べた。

気候モデル実験には 2 種類の MIROC 気候モデルを用いた。1 つは非定常重力波パラメタリゼーションを用いず、モデルで解像される重力波によって QBO を再現可能な MIROC-AGCM (Kawatani et al. 2011) で、もう一つは同パラメタリゼーションを組み込んだ、MIROC-ESM (Watanabe et al. 2011) の大気モデルである。観測データからエルニーニョ、ラニーニャの海面水温分布を作成し、書くモデルの下部境界条件として与え実験を行った。MIROC-AGCM ではラニーニャ期に比べてエルニーニョ期で QBO 周期が有意に短くなる観測と整合的な結果が得られたが、MIROC-ESM では両者で有意な差は得られなかった。

高解像度衛星観測データに瞬間的な時空間スペクトルを計算可能とするウェーブレット解析から、ラニーニャ

時に比べてエルニーニョ時には位相速度の遅い対流雲活動が活発であることを観測データから発見した。MIROC-AGCM モデルでも同様な特徴が再現されており、位相速度の遅い重力波がエルニーニョ期に多く励起され、特に下部成層圏 QBO 位相の下降速度を速めていることが分かった。

MIROC-AGCM モデルデータの詳細解析から、エルニーニョ期ではラニーニャ期に比べ、QBO 下降を妨げる赤道上昇流が大きいものの、重力波の効果がより大きいことを運動量収支解析から明らかにした。得られた結果の模式図を図 1 に示す。

重力波パラメタリゼーションを組み込んだ中解像度 MIROC-ESM モデル実験では、パラメタライズされた重力波ソースを時間・空間方向に一樣に取り扱っており、世界的に見ても標準的なものである。既存のパラメタリゼーションでは ENSO による重力波活動の時空間変化が表現されないため、QBO 変調は再現されない。パラメタリゼーションで仮定されている重力波の物理過程の問題点を具体的事象を通して指摘した。

本研究で得られた ENSO-QBO の新たな知見は、気象庁を含む世界の現業気象数値予報モデルにおけるエルニーニョ/ラニーニャ期の QBO 季節予報に役立ち、QBO と連動する MJO や中緯度天気予報精度向上にも繋がるとともに、気候モデルを改良する為の有益な情報になることが期待される。

## 2. 氷床流動モデルの開発(領域高次力学結合に向けて)

アイスコア掘削による古環境の復元はその高い分解能から古環境研究の重要な手法である。通常アイスコア掘削の対象となる氷床の頂上付近は、力学的性質の違いから局所的に周囲の領域より高次の力学に伴う流動の特徴を持つ。また、データの精度良い解釈のためには掘削点付近

の流動の変動を氷厚と同程度(2-3km)かそれ以上の水平高解像度で行うのが望ましい。

本研究では氷床モデル IcIES の拡張として、高解像度の高次力学領域モデルを南極ドームふじ近傍に埋め込んだ(nesting)流動計算をすることで、流動や年代、力学構造などを明らかにすることを目的とする。

本年は予備的実験として、水平解像度 8km の南極全体氷床モデル (Saito and Abe-Ouchi 2010) に同じ水平解像度 8km の高次力学氷床モデル (Saito et al. 2003) を埋め込み問題を単純化して開発・運用を行った(図 2)。南極全体は SIA (Shallow-Ice Approximation)、領域モデルは HOA (Higher-Order Approximation) と呼ばれる近似を採用している。全体モデル 761×761 格子の領域で、HOA を 10×10 格子に適用して(図の灰色の点線で囲まれた領域)計算時間を求めた。HOA を含んだ計算時間は 50000 年分の積分で 126 時間程度であり HOA を含まない場合の 35 時間の 3.6 倍程度の時間がかかることがわかった。昨年度のドームふじの位置に関する実験から高次力学の領域はこれより幾分広めの領域で行い、また今回より数倍程度高解像度かするのが望ましいが、さらに計算時間が必要であると考えられる。今後は領域高次力学モデルの高解像度化と長期積分のための高速化を行う予定である。

### 3. 並列化球面調和関数ライブラリ Flageolet の開発

気候モデル MIROC の大気モデル力学過程は球面調和関数変換を用いて波数空間で、また物理過程は格子空間で記述され、球面調和関数変換を行うことで両空間の表現を変換している。球面調和関数(=フーリエ変換 とルジャンドル陪関数変換) の特性とその実装の容易さのため、現行の MIROC 大気モデルの領域分割は緯度方向のみに制限され、これが並列化における分割数の制約となっていた。一方物理過程は格子空間で記述され、一部の例外を除きほぼ格子毎に独立した計算を行っている。従って力学過程で経度方向の領域分割が可能となれば、並列数を増やすことができ、結果的に計算時間を大幅に短くすることが期待される。本課題では主に MIROC の力学過程に適用するための並列化球面調和関数ライブラリ Flageolet の開発を行っている。

実装方法は一般的な多次元高速フーリエ変換ライブラリと同様である。すなわち、波数空間への変換前後で配列の転置を挿入する方法である。具体的には東西に分割された配列を、フーリエ変換の前に東西方向にすべての情報をもち、鉛直方向(あるいは南北方向)に分割された配列として整列する方法を採用した。ルジャンドル陪関数変換はその逆である。フーリエ変換とルジャンドル陪関数変換の間については従来通り全体全通信で整列する。

本年度は昨年度までのフーリエ変換およびルジャンドル陪関数変換の実装に続き、両者の間の多体多通信を用いた配列転置を設計実装し、球面調和関数ライブラリの雛形として完成させた。また、単純な変換に加えて、水平方

向の微分機能もあわせて実装した。

一例として図 3 に T85 L80 の解像度における格子から波数空間(GW) と波数から格子空間(WG) での計算時間を示した。いずれも MIROC で行われている変換を採用し、GW(WG) は三次元変数が 7 (6)、二次元変数が 1 (1)あり、いずれも空間微分を行う変数を含んでいる。格子空間での分割を 1×64, 1×128, 2×64, 2×128, 4×64 (それぞれ東西と南北)、それぞれで波数空間の領域分割を 4 種類行い(冗長なため省略)、計 20 の設定で実験した。結果、うまく領域分割方法を選択することにより概ね目標の高速化が出来たと考えられる(FLAGEOLET は気候モデル内での運用が想定されており、他の計算部分での高速化が見込まれる場合は必ずしも高効率でなくてもよい)。FLAGEOLET は拡張性のため、ある程度自由に波数空間の領域分割を設定できるよう設計してあるが、同じ格子空間の分割でも最適な分割方法に違いがあることがわかった。今後は MIROC への実装とさらなる最適化・高速化を行う予定である。

### 文献

- [1] Taguchi 2010: Observed connection of the stratospheric quasi biennial oscillation with El Niño-Southern Oscillation in radiosonde data. *J. Geophys. Res.*, 115, D18120, [doi:10.1029/2010JD014325](https://doi.org/10.1029/2010JD014325).
- [2] Kawatani, Y., K. Hamilton, K. Sato, T. J. Dunkerton, S. Watanabe and K. Kikuchi: ENSO modulation of the QBO: Results from MIROC models with and without non-orographic gravity wave parameterization, *J. Atmos. Sci.*, 76, 3893-3917, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0163.1>, 2019
- [3] Kawatani, Y., K. Hamilton and S. Watanabe, 2011: The quasi-biennial oscillation in a double CO2 climate, *J. Atmos. Sci.*, 68, 265-283, <https://doi.org/10.1175/2010JAS3623.1>.
- [4] Watanabe, S. T. Hajima, K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Okajima, T. Nozawa, H. Kawase, M. Abe, T. Yokohata, T. Ise, H. Sato, E. Kato, K. Takata, S. Emori, and M. Kawamiya, 2011: MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.*, 4, 845-872, <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>.
- [5] Saito, F. and Abe-Ouchi, A., Modelled response of the volume and thickness of the Antarctic ice sheet to the advance of the grounded area. *Ann. Glaciol.* 51(55), 41-48, 2010
- [6] Saito, F., Abe-Ouchi, A., and Blatter, H., Effects of first-order stress gradients in an ice sheet evaluated by a three-dimensional thermomechanical coupled model. *Ann. Glaciol.*, 37, 166-172, 2003

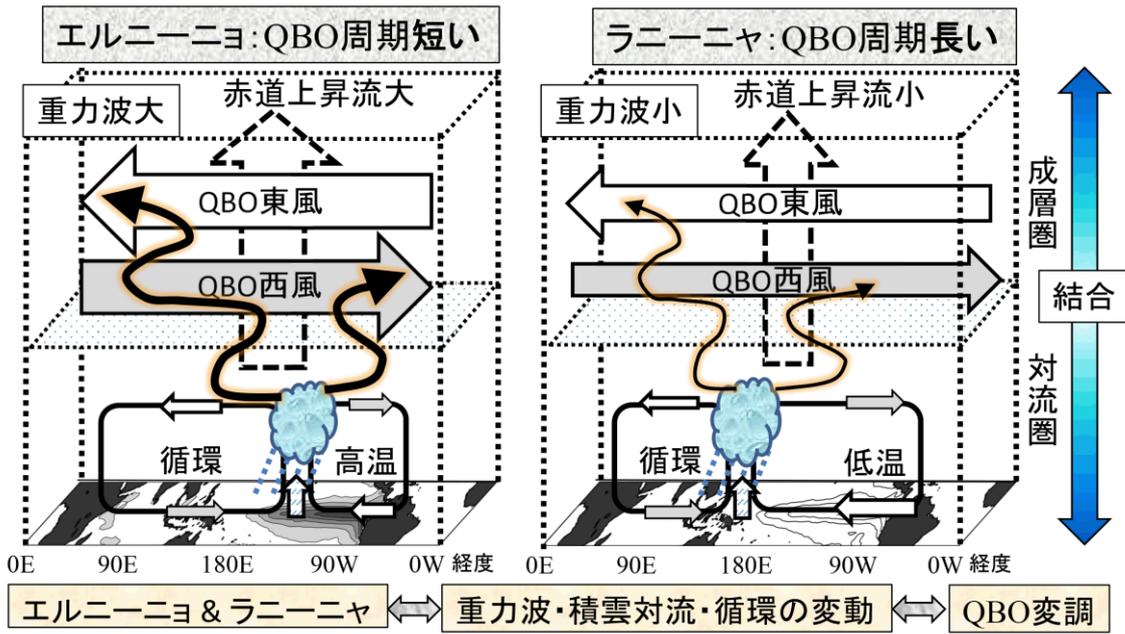


図1 エルニーニョ期とラニーニャ期における QBO の模式図。両者で QBO 周期、重力波活動、赤道上昇流、対流圏循環場、海面水温が異なる様子を示す。

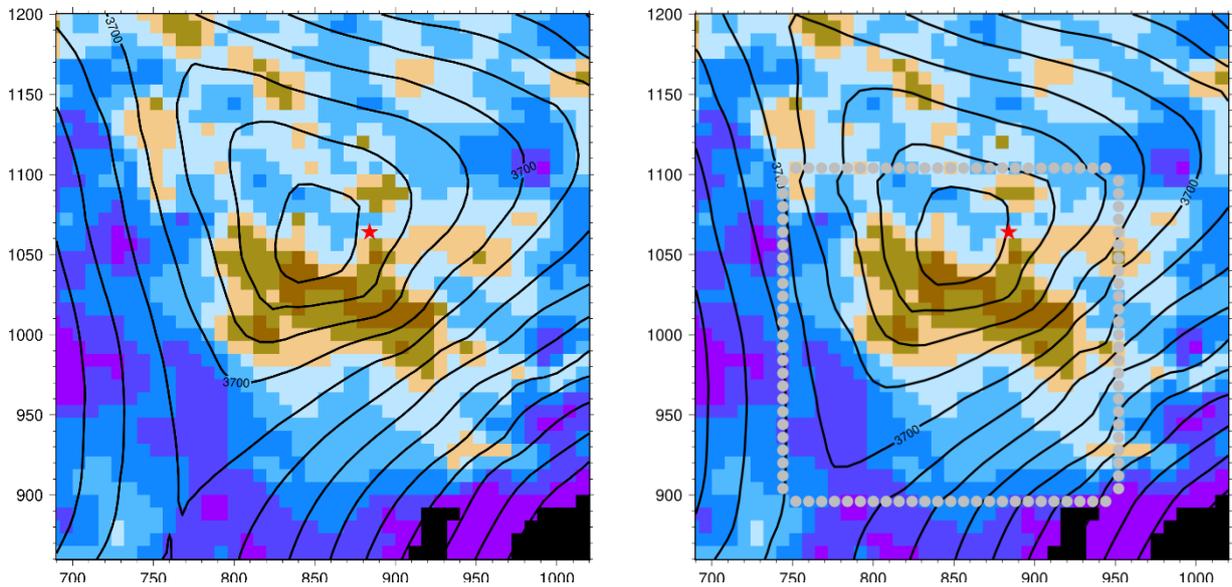


図2. 南極氷床モデル実験結果例。全体計算領域  $[-3040\text{km}, 3040\text{km}] \times [-3040\text{km}, 3040\text{km}]$  の Dome Fuji 付近の一部を示す。等高線は氷の標高、色は基盤地形を示す。左の図が従来モデルによる結果、右の図が高次領域力学モデルを灰色の点線で囲まれた領域に適用したモデルでの結果である。赤い星印は現実のドームふじの位置を表す。

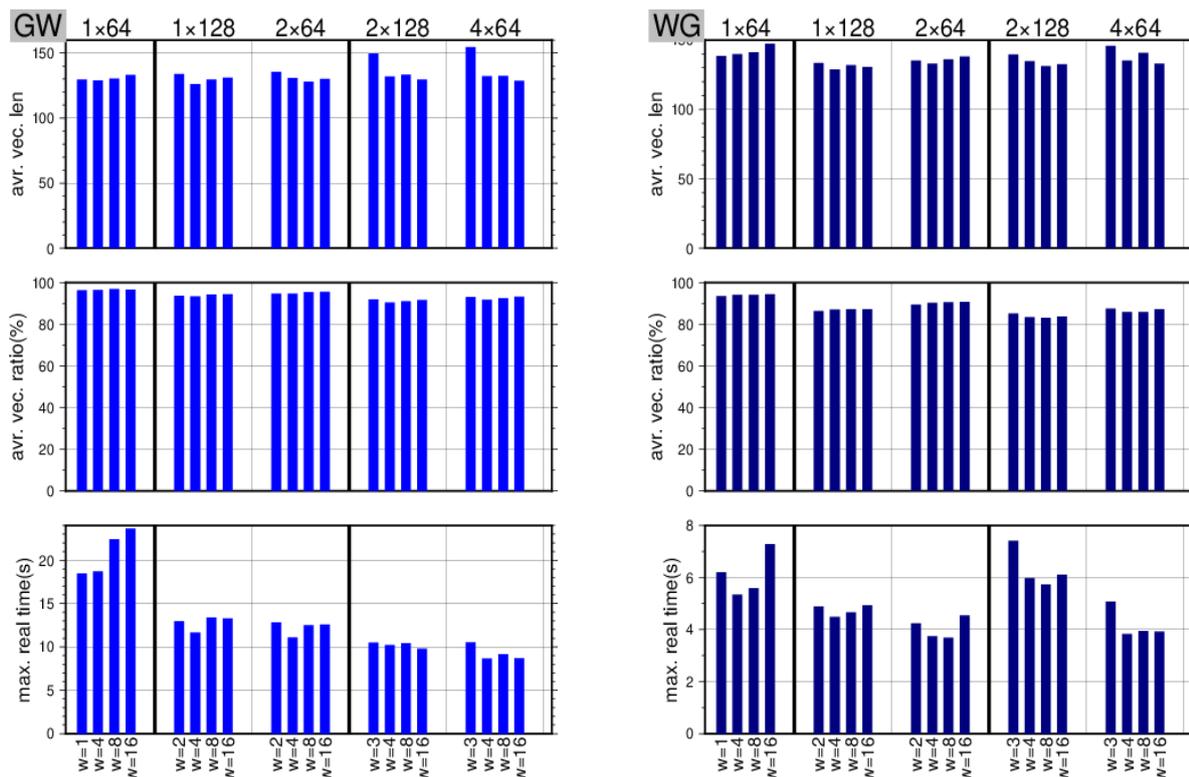


図3. 球面調和関数ライブラリ Flageolet による球面調和関数変換演算の計測結果例。T85, 80層の場合の(左)格子から波数空間(GW)、9変数、(右)波数から格子空間(WG)、7変数のある場合の結果を示す。格子空間の領域分割は東西×南北分割数として上部に示す。それぞれの領域分割で波数空間での領域分割を4種類試した(W=n で表す。詳細は省略)。上からそれぞれ平均ベクトル長、平均ベクトル化率、実時間を表す。

# Development Research of a High-quality Climate Model for Long-term Climate Change Projection Study

Project Representative

Michio Kawamiya      Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Yoshio Kawatani <sup>\*1</sup>, Fuyuki Saito <sup>\*1</sup>, Michio Kawamiya <sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The mechanism of El Niño Southern Oscillation modulation of the quasi-biennial oscillation was investigated using the MIROC climate models and observational data. The problem of current non-orographic gravity wave parameterization was also discussed.

A large-scale ice-sheet model with nesting a regional higher-order ice-sheet model has been developed for high-resolution simulation around the summit. Computation performance of a spherical harmonics transform library Flageolet is examined, which is shown to be enough practical for climate-modeling purposes.

Keywords : Ice-sheet modeling, Spherical harmonics transform.

## 1. El Niño Southern Oscillation modulation of the QBO

Observational studies have shown that, on average, the quasi-biennial oscillation (QBO) exhibits a faster phase progression and shorter period during El Niño than during La Niña. Here, the possible mechanism of QBO modulation associated with ENSO is investigated using the MIROC-AGCM with T106 (~1.125°) horizontal resolution. The MIROC-AGCM simulates QBO-like oscillations without any non-orographic gravity wave parameterizations. A 100-year integration was conducted during which annually repeating sea surface temperatures based on the composite observed El Niño conditions were imposed. A similar 100 year La Niña integration was also conducted. The MIROC-AGCM simulates realistic differences between El Niño and La Niña, notably shorter QBO periods, a weaker Walker circulation, and more equatorial precipitation during El Niño than during La Niña. Near the equator, vertical wave fluxes of zonal momentum in the uppermost troposphere are larger and the stratospheric QBO forcing due to interaction of the mean flow with resolved gravity waves (particularly for zonal wavenumber  $\geq 43$ ) is much larger during El Niño. The tropical upwelling associated with the Brewer–Dobson circulation is also stronger in the El Niño simulation. The effects of the enhanced tropical upwelling during El Niño are evidently overcome by enhanced wave driving, resulting in the shorter QBO period. The schematic figure is shown in Fig. 1. The integrations were repeated with another model version (MIROC-ECM with T42 horizontal resolution) that employs a parameterization of non-orographic gravity waves in order to simulate a QBO. In the MIROC-ECM the average QBO periods are nearly identical in the El Niño and La Niña simulations.

## 2. Development of an ice-sheet model with nesting of a regional higher-order model

A typical ice-core drilling for paleo-climate reconstruction is executed around ice-sheet summits. In order to simulate ice-sheet dynamics around a summit, a high resolution, higher-order mechanics modeling is expected, which is still computationally demanding and challenging topic.

In this project a numerical ice sheet model IcIES (Saito and Abe-Ouchi 2010) has been extended to include (*nest*) a regional higher-order ice-sheet model (Saito et al, 2003). A preliminary experiment of the nesting model is performed with the same 8km resolution for both the large-scale and regional models as an exercise. With the nesting model over 10 times 10 gridpoints, embedded into 761 times 761 gridpoints large scale model, it took 3.6 times longer computation time than the large-scale only model for 50,000 year simulation. For practical experiments, we are planning to perform hundred-thousand-year simulation with a few times higher resolution for wider region of nesting, which will demand even more computing resources. An optimization for more efficient computation is required, which is a next target of the development.

## 3. Development of FLAGEOLET, a parallel spherical harmonic transform library

A spherical harmonic transform library, Flageolet, has been developed. The library can perform the domain decomposition not only in latitudinal direction but longitude, which is expected to improve

the computation efficiency of MIROC, in particular for higher spatial resolution experiment. Following the Fourier transform modules and the Associate Legendre transform module development last year, a full spherical harmonics transform module has completed and examined. Various domain decomposition is designed to introduce, and the performance checks show that an enough efficiency for climate modeling purposes can be obtained with proper domain decomposition over the wave-space domain.

### References

[1] Taguchi 2010: Observed connection of the

stratospheric quasi biennial oscillation with El Niño–Southern Oscillation in radiosonde data. *J. Geophys. Res.*, 115, D18120, [oi:10.1029/2010JD014325](https://doi.org/10.1029/2010JD014325).

[2] Kawatani, Y., K. Hamilton, K. Sato, T. J. Dunkerton, S. Watanabe and K. Kikuchi: ENSO modulation of the QBO: Results from MIROC models with and without non-orographic gravity wave parameterization, *J. Atmos. Sci.*, 76, 3893-3917, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0163.1>, 2019

[3] Saito, F. and Abe-Ouchi, A., Modelled response of the volume and thickness of the Antarctic ice sheet to the advance of the grounded area. *Ann. Glaciol.* 51(55), 41–48, 2010

[4] Saito, F., Abe-Ouchi, A., and Blatter, H., Effects of first-order stress gradients in an ice sheet evaluated by a three-dimensional thermomechanical coupled model. *Ann. Glaciol.* 37, 166–172, 2003

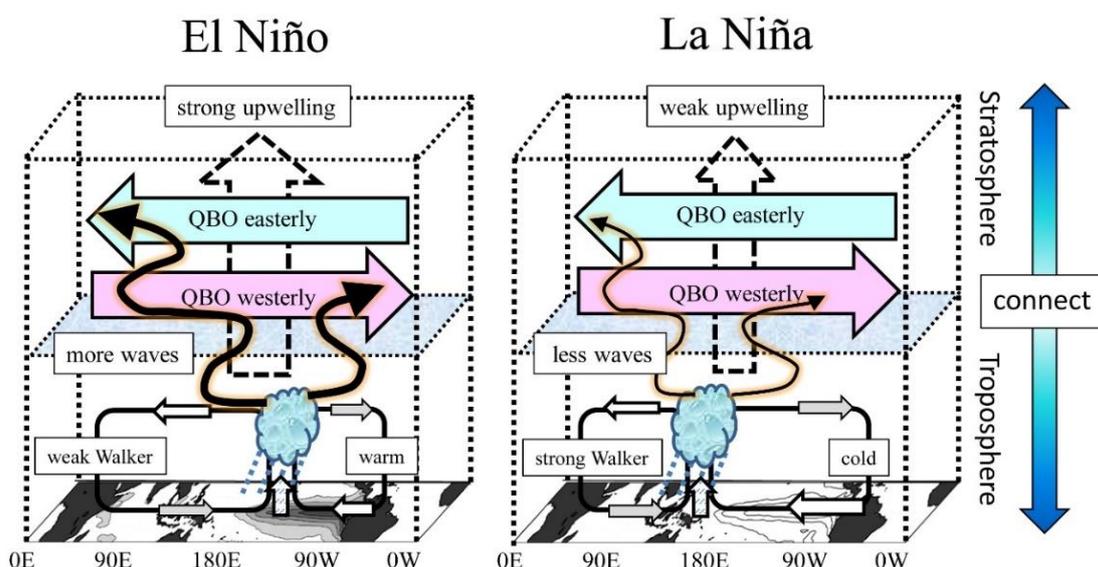


Fig.1 Schematic illustration of (thick vector) the Walker circulation, (black vector) gravity waves, (blue and pink) QBO zonal wind, and (dashed vector) equatorial residual vertical velocity for (right) El Niño and (left) La Niña.