

課題名：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

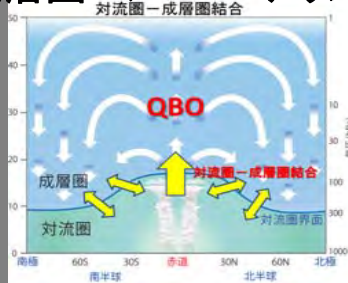
課題代表：河宮未知生（国立研究開発法人海洋研究開発機構）

高精度気候モデルMIROCの開発と気候数値実験
MIROC: Model for Interdisciplinary Research On Climate

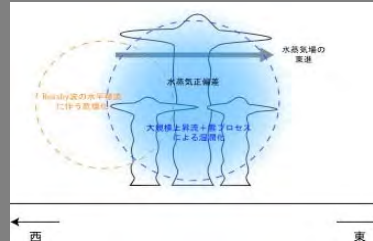
1. 大気、海洋、陸面の物理過程の評価・改良・高度化
2. 地球温暖化と対流圏－成層圏結合
3. 氷床・気候モデルによる古気候の再現実験

モデルの構成要素と実験課題

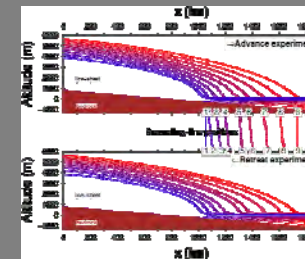
成層圏・QBO モデリング



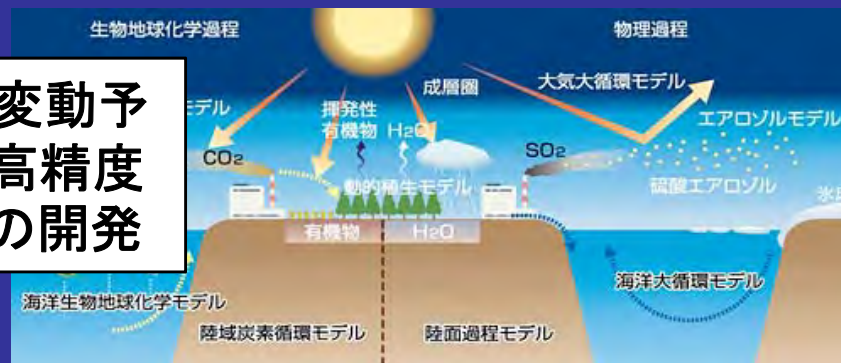
積雲過程



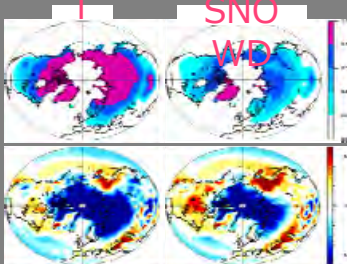
氷床・棚氷モデリング



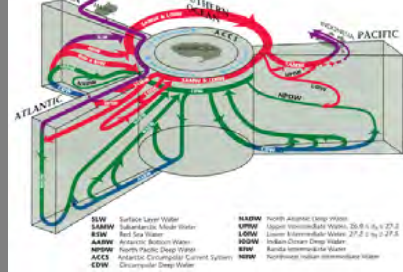
長期的気候変動予測のための高精度気候モデルの開発



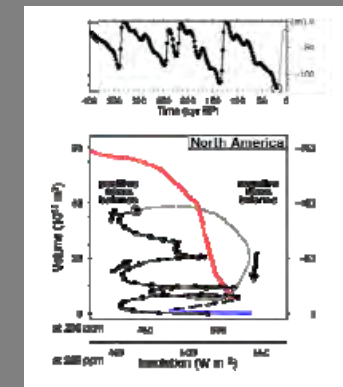
陸面モデリング



海洋・海水モデリング



古気候モデリング



モデル開発と運用

- 高解像度化・長期積分
 - 古気候モデリング(1000-100000年スケール)
 - QBO・成層圏モデリング
- 要素モデルの改良・追加
 - 氷床モデリング
 - 陸面モデリング
 - 海洋・海氷モデリング
 - 積雲モデリング
- 技術的な開発課題
 - 気候モデルの高速化

赤道準2年振動 (Quasi-Biennial Oscillation **QBO**)

2009年1月 西風

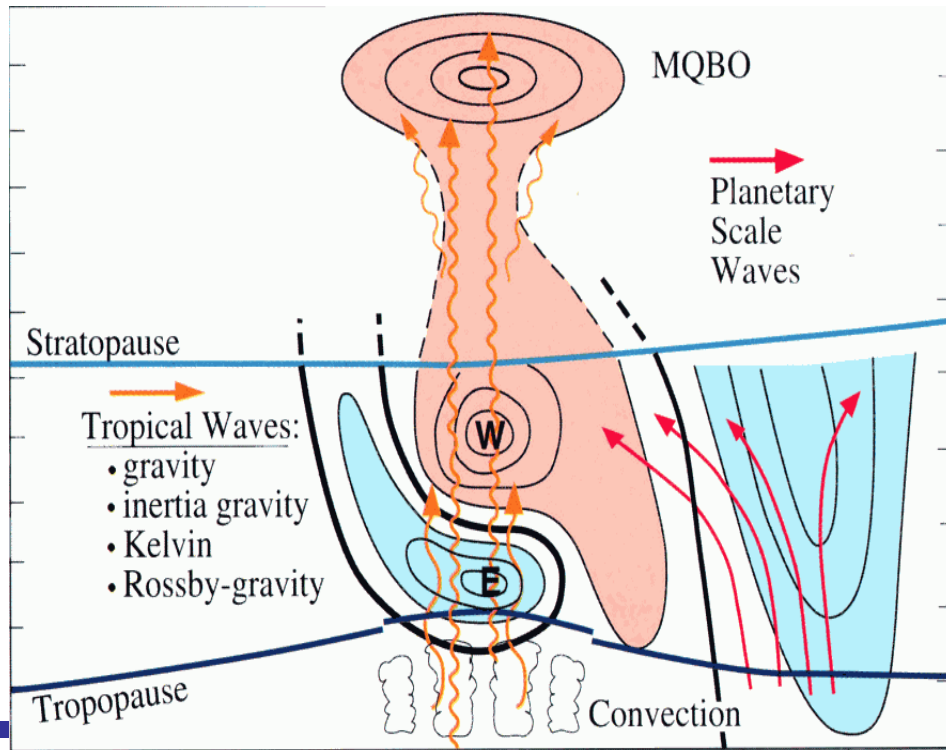
2010年4月 東風

2011年5月 西風



赤道域成層圏(高度18-50km)
西風と東風が交互に現れる
平均周期: 28ヶ月

QBOの力学・化学的影響: **北極—南極、対流圏—中間圏**の地球規模



QBOが及ぼす具体的な影響例

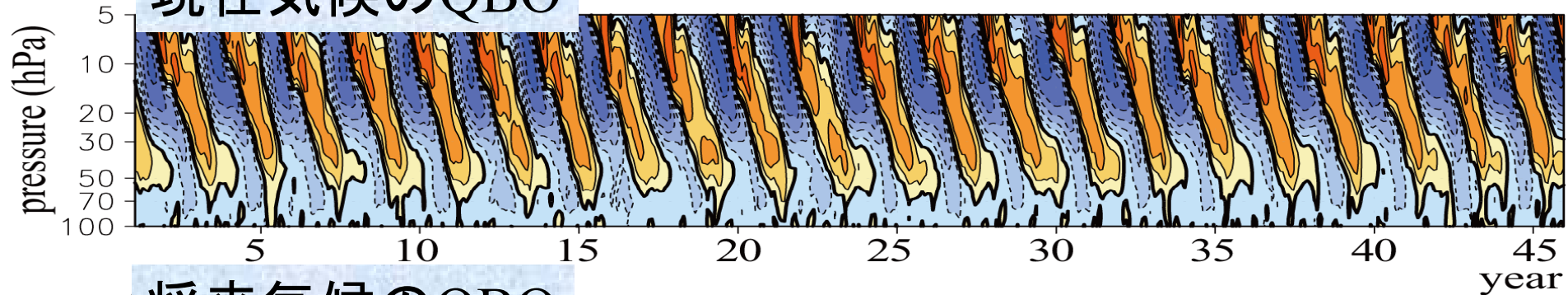
- ・大気波動伝播特性・成層圏の極渦を変化
- ・地表面の気圧配置等、中高緯度の気候に影響
- ・熱帯対流圏界面の温度構造・熱帯降水を変調
- ・オゾン・水蒸気・メタン等の化学組成

気候モデルで再現するのが難しい現象
IPCC第4次評価報告書(2007年)記述無し
全てのCMIP3モデルがQBO再現に失敗

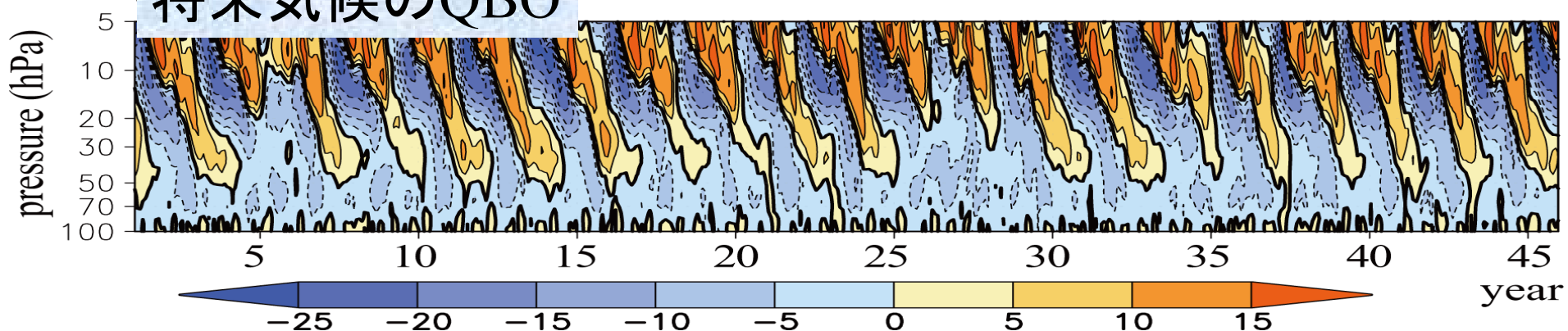
地球シミュレータを用いたMIROC気候モデルの長期積分

- ・MIROC気候モデルでQBOの再現に成功
→地球温暖化時のQBO変化を初めて詳細に調べた

現在気候のQBO (Kawatani et al. 2011, 2012, J. Atmos. Sci.)



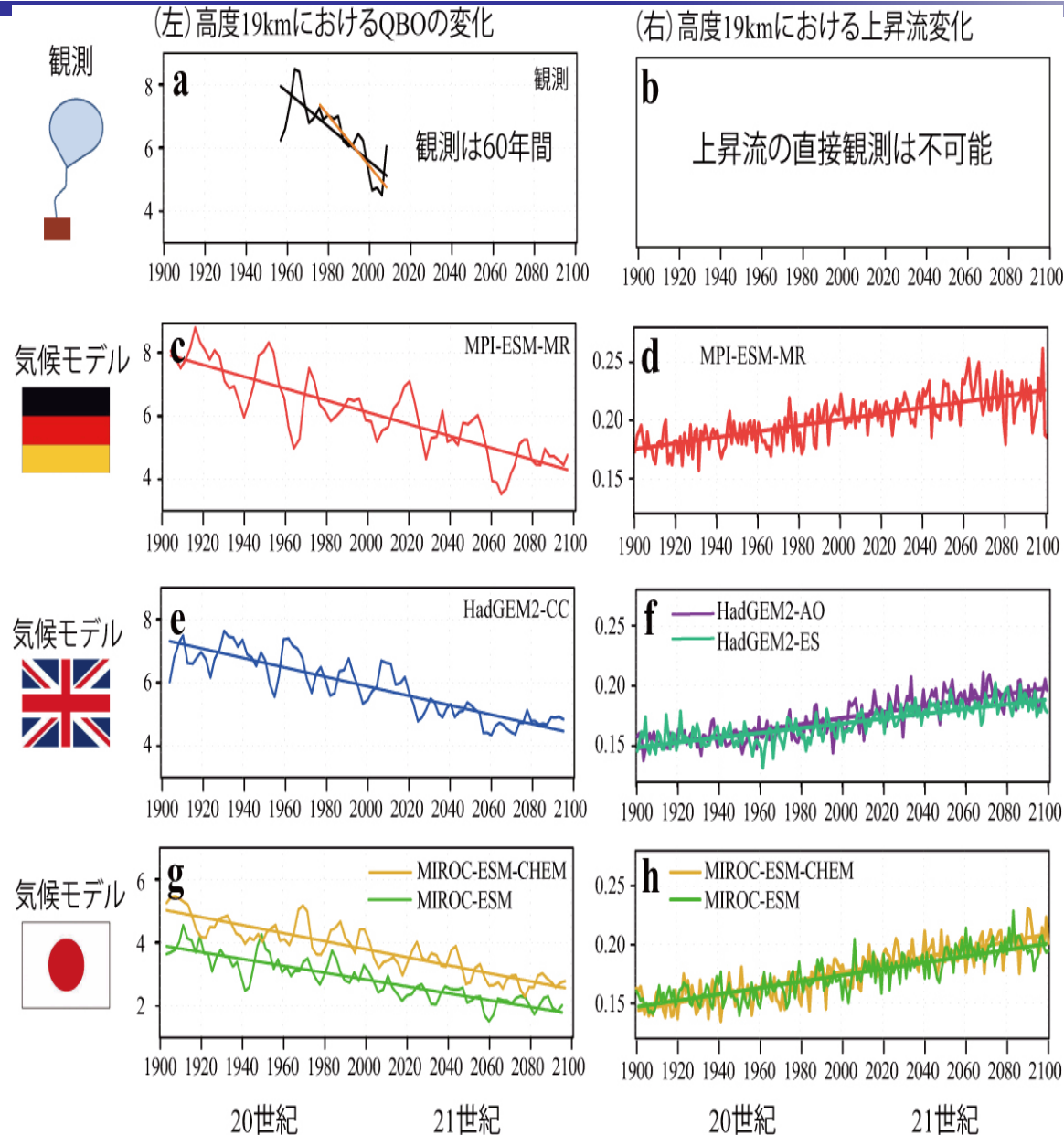
将来気候のQBO



地球温暖化に伴い、下部成層圏最下層のQBO振幅が弱くなる・QBO周期が伸びる
主原因: 成層圏の地球規模循環(BDC)の上昇流が温暖化に伴って強くなる為

- ・地球シミュレータを用いた成果がIPCC第5次評価報告書(2014年)に引用
Kawatani et al. 2011, 2012, J. Atmos. Sci.; Watanabe and Kawatani 2012, JMSJ
- ・本研究に関連して2017年度日本気象学会賞受賞(渡邊・河谷)

60年分の観測データ QBO振幅の弱化を発見



CMIP5モデル
4種類のモデルがQBO再現

地球温暖化に伴い
全てのモデルでQBO振幅が弱化
赤道上昇流が強まる
(Kawatani and Hamilton 2013, Nature)

一連の世界に先駆けた
QBO温暖化研究は地球シミュレータ
のおかげである

＜ここ数年で国際的に議論＞

- ・QBOを再現可能なモデルが少ない
- ・各モデルでQBOの再現性が異なる
- ・QBOモデル間比較が重要

↓
国際プロジェクトの重要性が指摘

QBOi - Towards Improving the Quasi-Biennial Oscillation in Global Climate Models

QBOi Participants

FEBRUARY 2017

Canada	James Anstey*, John Scinocca Charles McLandress	CCCma Toronto
Denmark	Bo Christiansen, Shuting Yang	DMI
France	Francois Lott, Riwal Plougonven, Albert Herzog	LMD
ECMWF	Tim Stockdale	ECMWF
Germany	Elisa Manzini, Hauke Schmidt, Holger Pohlmann, Wolfgang Mueller Daniela Domeisen Johanna Baehr Peter Braesicke	MPI GEOMAR Hamburg KIT
Italy	Chiara Cagnazzo, Federico Serva	CMCC
Japan	Shingo Watanabe, Yoshio Kawatani Takeshi Horinouchi Shigeo Yoden Kohei Yoshida, Hiroaki Naoe, Seiji Yukimoto Junichi Ishida, Takafumi Kanehama	JAMSTEC Hokkaido Kyoto MRI JMA
Korea	Hye-Yeong Chun, Young-Ha Kim	Yonsei
Spain	Javier Garcia-Serrano	BSC-CNS
United Kingdom	Scott Osprey*, Lesley Gray, Verena Schenzinger Neal Butchart*, Adam Scaife, Andrew Bushell Mark Baldwin	NCAS/Oxford Met Office Exeter
United States	Kevin Hamilton* Alan Plumb Tim Dunkerton, Laura Holt Marv Geller Tiehan Zhou Hanli Liu, Rolando Garcia, Anne Smith, Julio Bacmeister, Jadwiga Richter, Jack Chen, Isla Simpson Christiane Jablonowski David Rind Pu Lin	IPRC MIT NWRA Stony Brook Columbia NCAR Michigan NASA GISS Princeton

QBO気候モデル比較国際プロジェクト (QBOi)

WCRPのコアプロジェクトの1つであるSPARC
(成層圏-対流圏過程とその気候影響)

国際プロジェクトの1つ。2016年から正式開始

日英米加仏独丁伊西韓のQBO専門家が集結

(1)気候モデルによるQBO再現性

(2)気候変動に伴うQBOの変化

(3)QBOの季節予測可能性



2015年3月にカナダで開かれたQBO専門家による
ブレインストーミング

2. Experiment list and goals

a) **Present-Day Climate:** Identify and distinguish the properties of and mechanisms underlying the different model simulations of the QBO in present-day conditions:

EXPERIMENT 1: AMIP – specified interannually varying SSTs, sea ice, and external forcings

EXPERIMENT 2: 1xCO₂ - identical simulation to the AMIP above except employing repeated annual cycle SSTs, sea ice, and external forcings

These experiments will allow an evaluation of the realism of modelled QBOs under present-day climate conditions, employing diagnostics and metrics discussed in Section 5. The impact of interannual forcing on the model QBO can also be assessed, and Experiment 2 is a control for the climate projection experiments.

b) **Climate Projections:** Subject each modelled QBO contribution to an external forcing that is similar to that typically applied for climate projections:

EXPERIMENT 3: 2xCO₂ - identical to Experiment 2, but with a change in CO₂ concentration and specified SSTs appropriate for a 2xCO₂ world

EXPERIMENT 4: 4xCO₂ - identical to Experiment 2 but with a change in CO₂ concentration and specified SSTs appropriate for a 4xCO₂ world

c) **QBO Hindcast and process study:** Evaluate and compare the predictive skill of modelled QBOs in a seasonal prediction hindcast context, and study the model processes driving the evolution of the QBO.

EXPERIMENT 5: A set of initialized QBO hindcasts, with 9-12 month range. Observed SSTs and forcings specified as in Experiment 1, with reanalysis providing atmospheric initial conditions for a set of given start dates.

QBOi 共通実験

実験1. AMIP-type実験
30年 × 3アンサンブル

実験2. CO₂ × 1、現在気候実験
30年 × 3アンサンブル

実験3. CO₂ × 2、SST+2K
将来気候実験A
30年 × 3アンサンブル

実験4. CO₂ × 4、SST+4K
将来気候実験B
30年 × 3アンサンブル

実験5. 季節予報実験
9カ月 × 30年 × 5アンサンブル

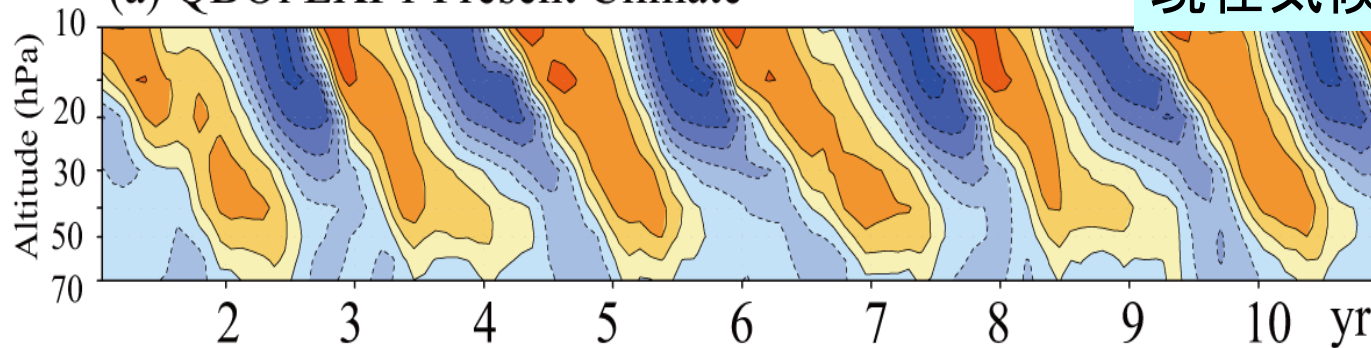
2016年度ES資源は上記実験に費やした
必要最低限のT106L72の解像度で実行



MIROC-AGCMによるQBOi実験: 実験2, 3, 4の初期結果

(a) QBOi EXP1 Present Climate

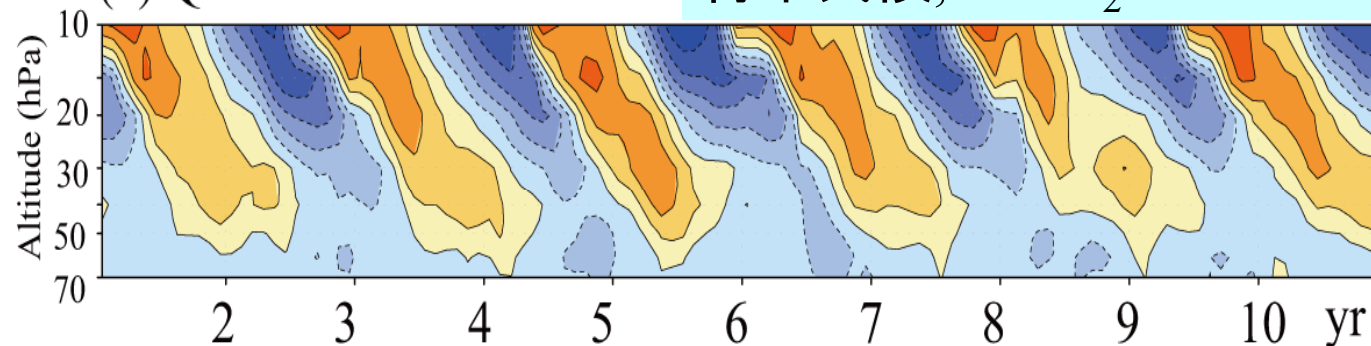
現在気候



(a) 現在気候

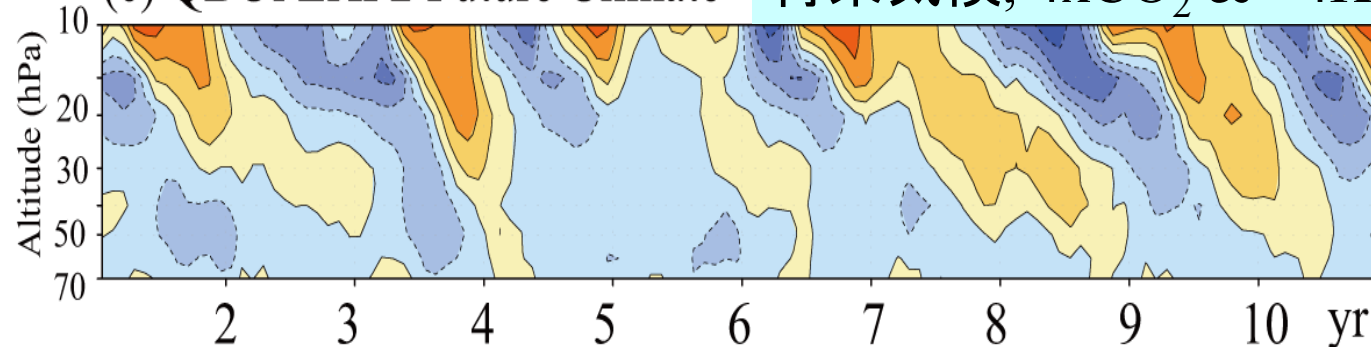
現実的なQBO再現に成功

(b) QBOi EXP2 Future Climate 将来気候, 2xCO₂ & +2K SST



(b) CO₂濃度2倍 & SST +2K
QBO振幅が弱くなり
周期が伸びる

(c) QBOi EXP2 Future Climate 将来気候, 4xCO₂ & +4K SST

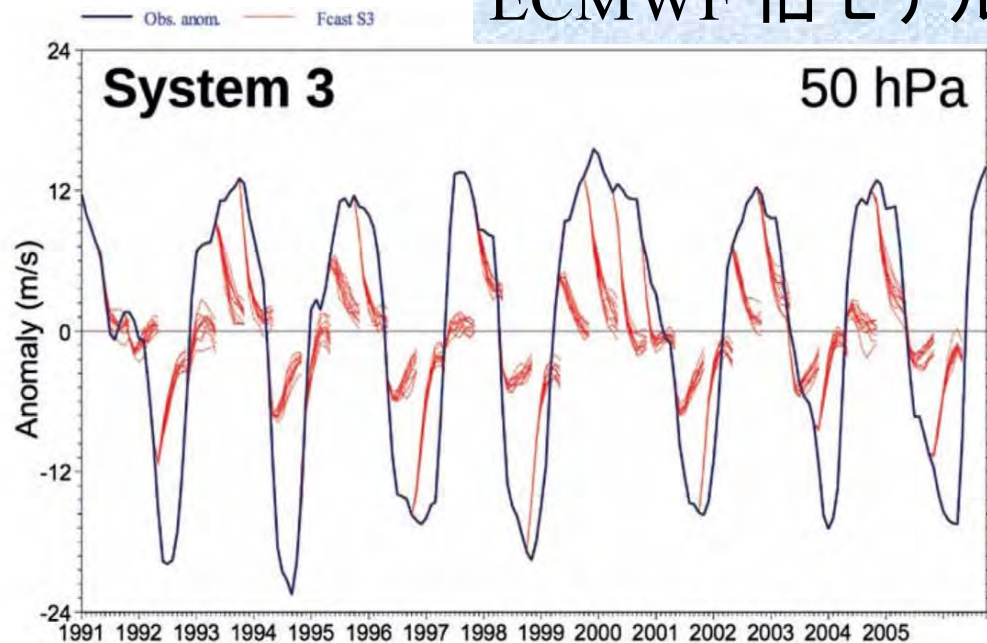


(c) CO₂濃度4倍 & SST +4K
QBO振幅が更に弱くなり
周期が伸びる
QBOの構造が時々壊れる

日英米独仏加伊韓
10種類のモデル相互比較
が開始

MIROC-AGCMによるQBOi実験5の初期結果

ECMWF 旧モデル



<高度50hPa赤道東西風のハインドキャスト>
黒線: 観測値、色: モデル

(左上) ECMWF旧モデル

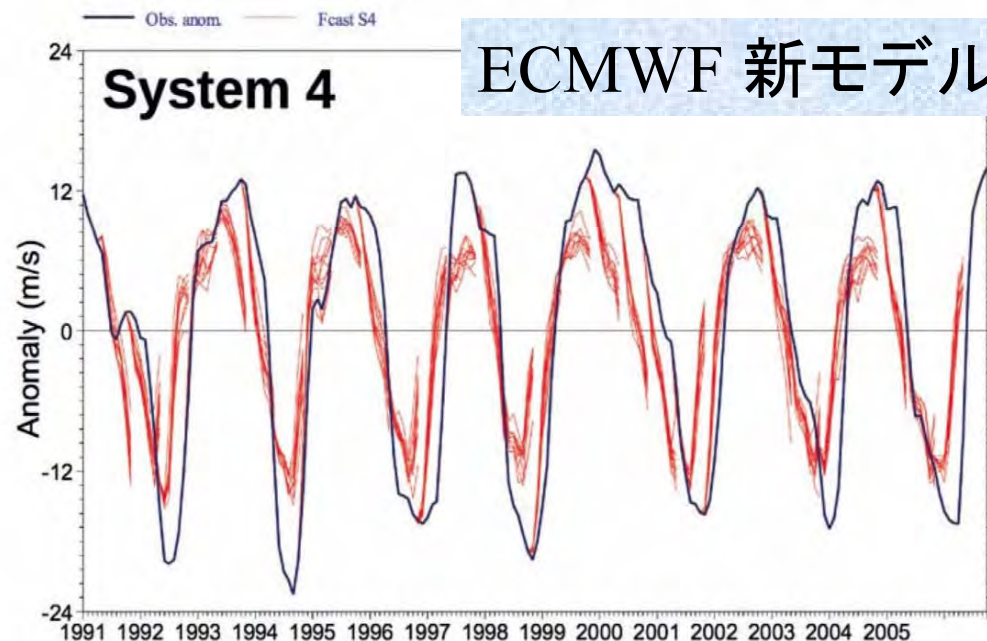
(左下) ECMWF新モデル(成層圏過程を改良)

(右下) MIROC-AGCM 解像度T106L72

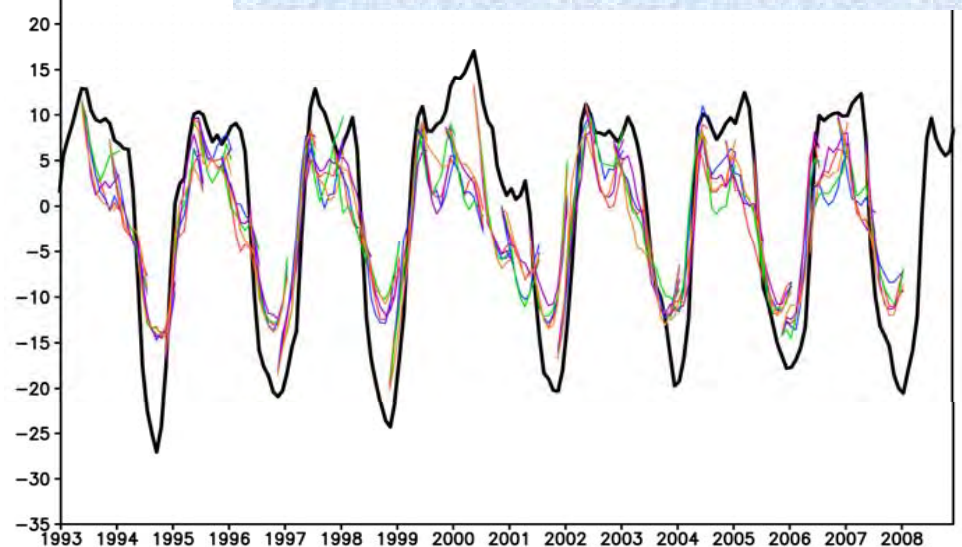
成層圏過程を改良し、空間解像度を上げた
ECMWF新モデルでは、QBOの予測可能性が
格段に改良。MIROC-AGCMも類似した結果

→ 解像度T213L168程度にして実験予定

ECMWF 新モデル

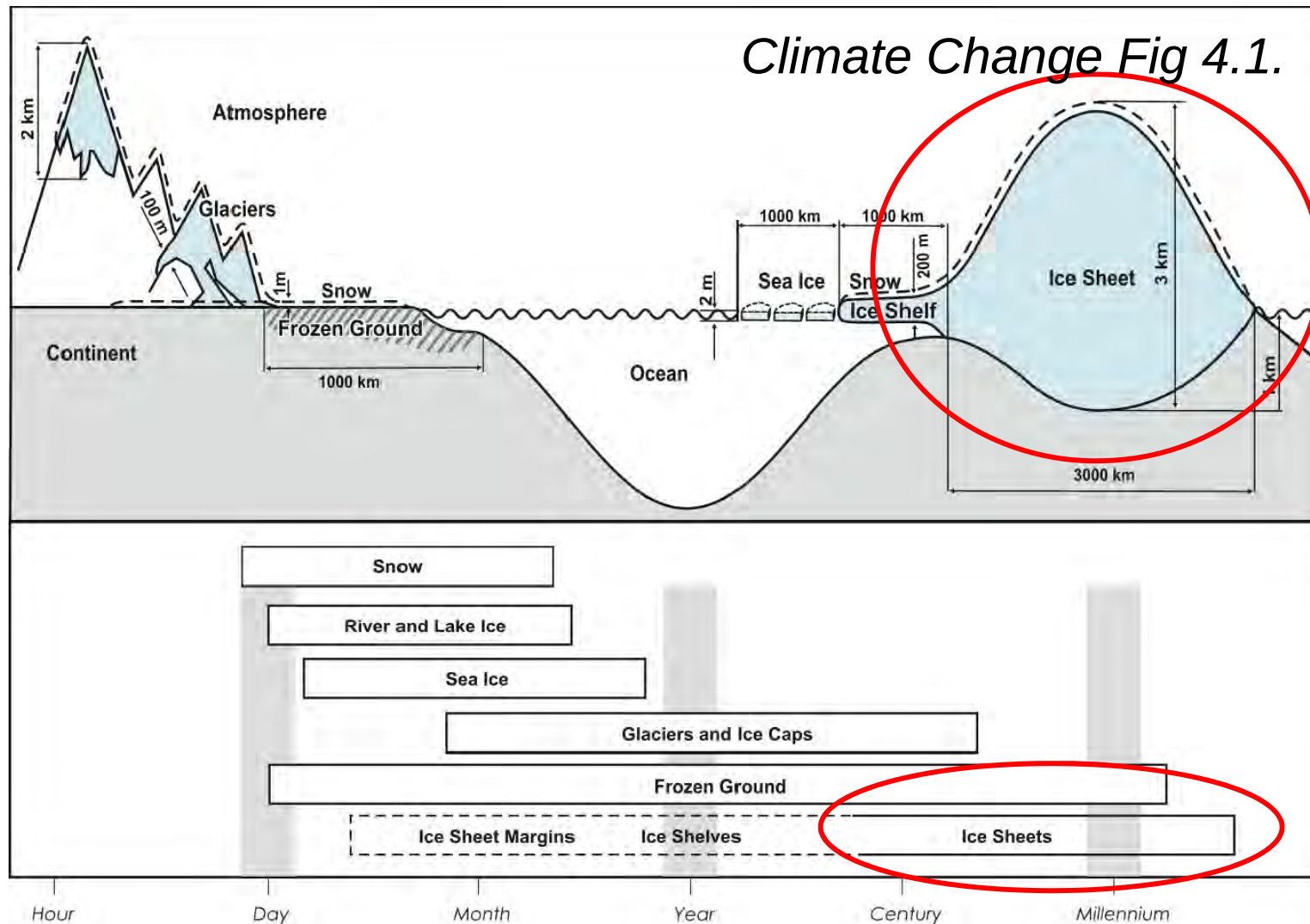


Ux0 ERA T106L72 MIROC-AGCM



氷床モデル開発

Climate Change Fig 4.1.



氷床:
大陸規模の流動する氷体

降雪・融解・氷山流出で水収支が決まる。

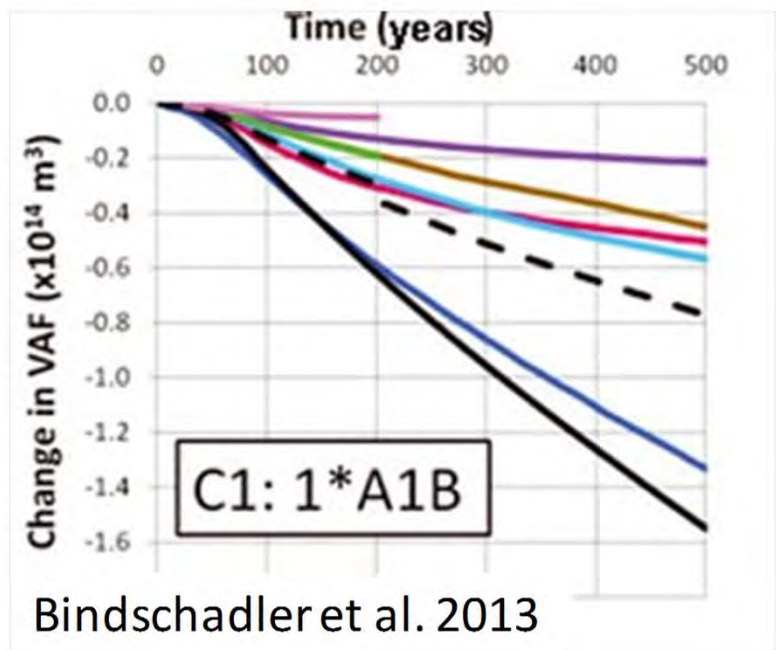
時間スケールの違いから単体モデル開発が主



徐々に気候-氷床結合モデル開発へ

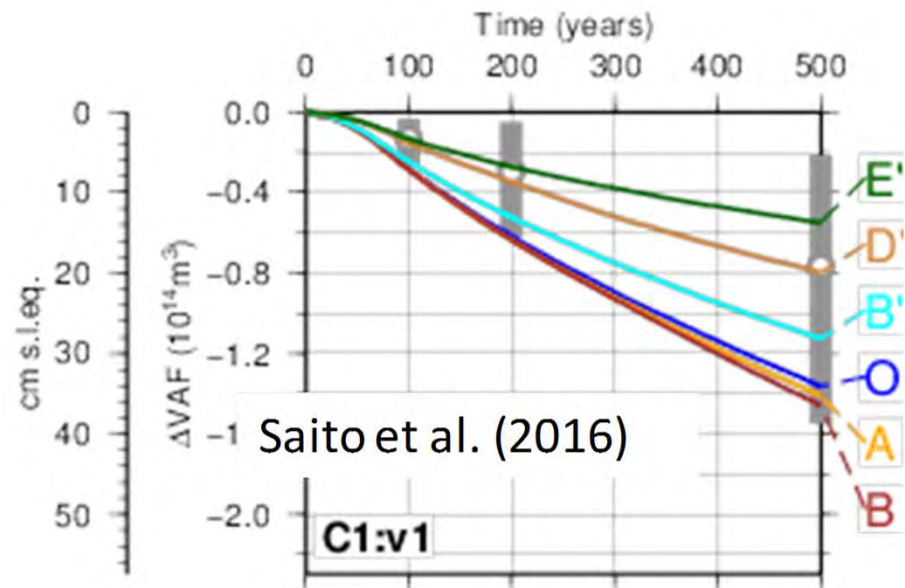
グリーンランド氷床の温暖化実験に関する不確定性の評価

氷床比較プロジェクト SeaRISE (Bindshadler et al. 2013) のグリーンランド氷床温暖化実験
各モデルの構造の違いが結果のばらつきに与える影響を定量的に評価



Legend for the graphs:

- IcIES
- ISSM
- PISM
- SICOPOLIS
- UMISM
- AIF1a
- AIF2a
- Elmer/Ice
- CISM-2
- Average



A1B シナリオに対するグリーンランド氷床の応答(500年)。

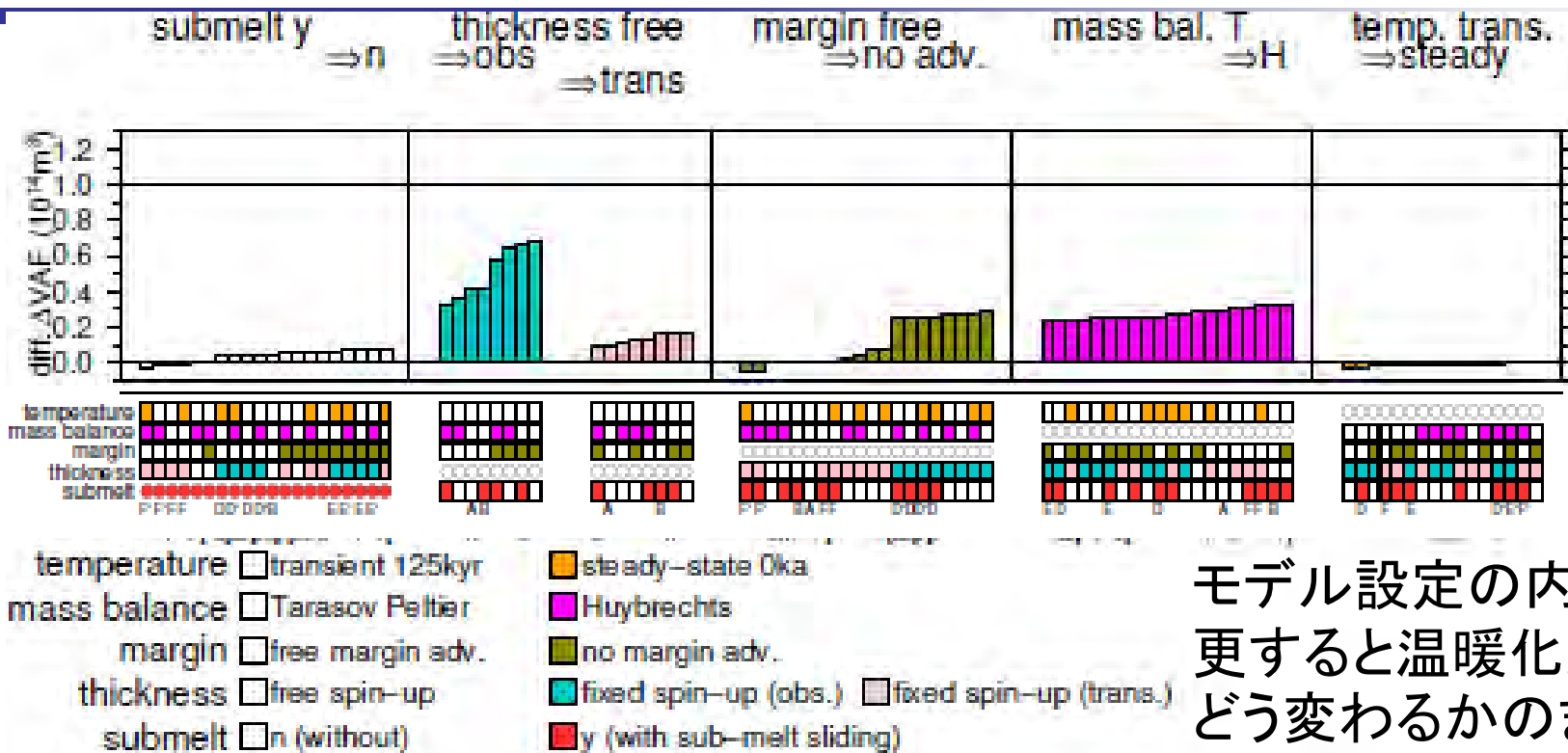
それぞれのモデルで採用されている手法をIcIES に導入し、結果への影響を調べた。

SeaRISE の感度のばらつきが、現在氷床の表面質量収支の計算手法や現在氷床の再現手法の違いに大きく依存することが明らかになった。

O-A-B-B'-D'-E' の順で、温暖化実験で使われている方法の一つずつ変更した実験

実はこの論文のために大量の数値実験を行っている

氷床モデルによるアンサンブル実験例



モデル設定の内ある一つを変
更すると温暖化応答の感度が
どう変わるかのまとめ

温暖化応答の不確定性に影響のあるパラメータの割り出し

⇒氷床初期値作成

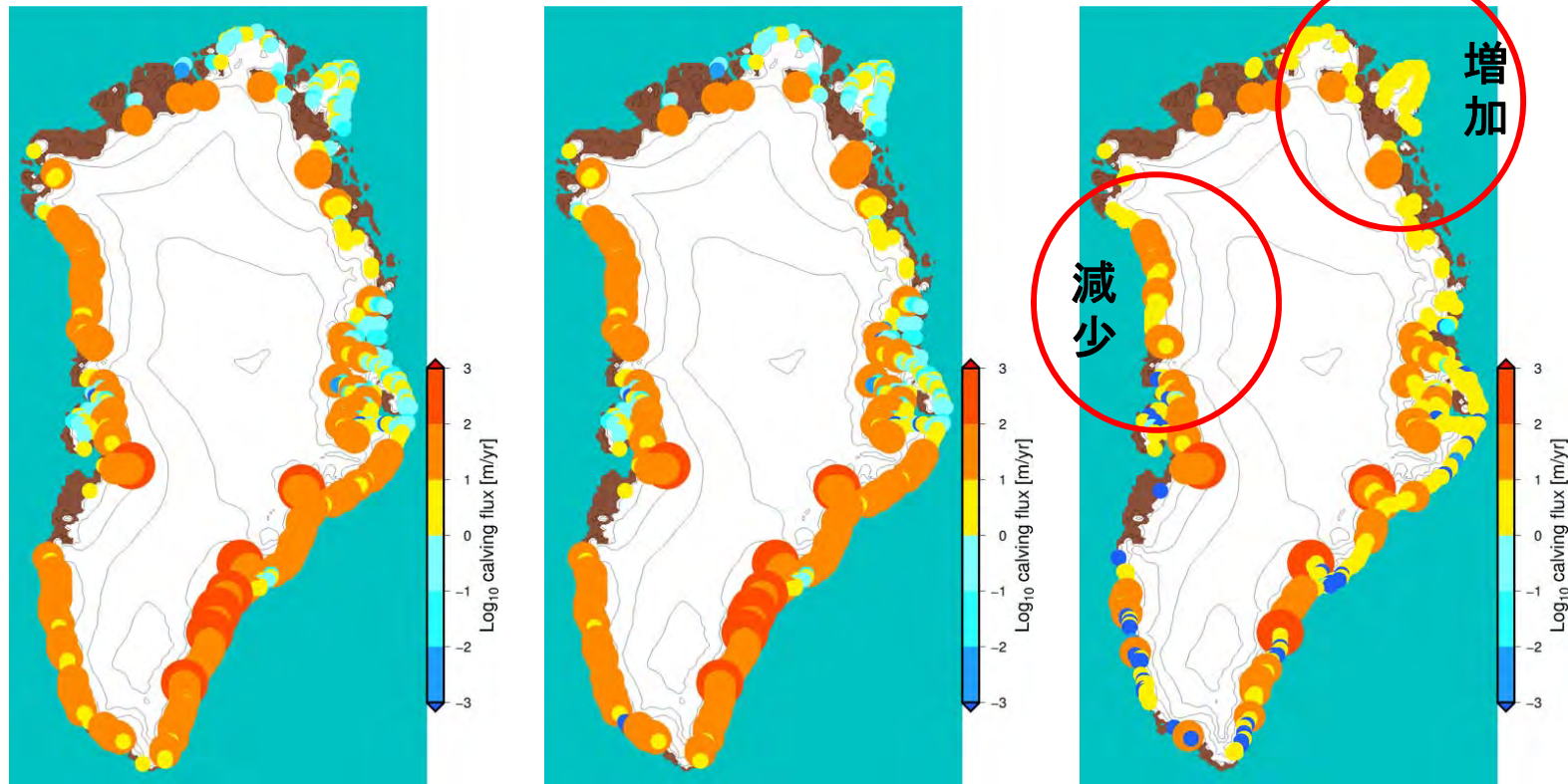
- パラメータ数種
- スピンアップ手法複数
- 各組み合わせでそれぞれ十万年積分

⇒それぞれで温暖化実験

単体の実験は比較的軽微ではあるが、
大量に行うためにかなりの資源が必要

氷床気候結合モデル開発に向けて

氷流出量計算の実装 ⇒ 気候モデルへの入力



初期状態

温暖化なしの
場合(100年)

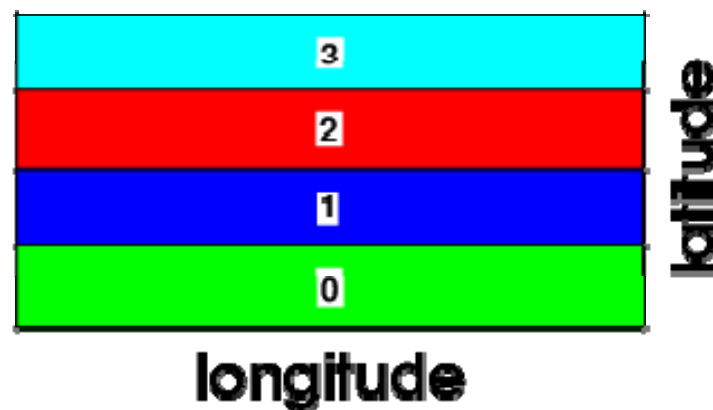
温暖化の
場合(100年)

温暖化で淡水供給のパターンが変化する

initMIP
(Nowicki et al.
2016)の設定
に基づくグリー
ンランド氷床
の温暖化応答
実験。氷の流
出量を円と色
で示す。

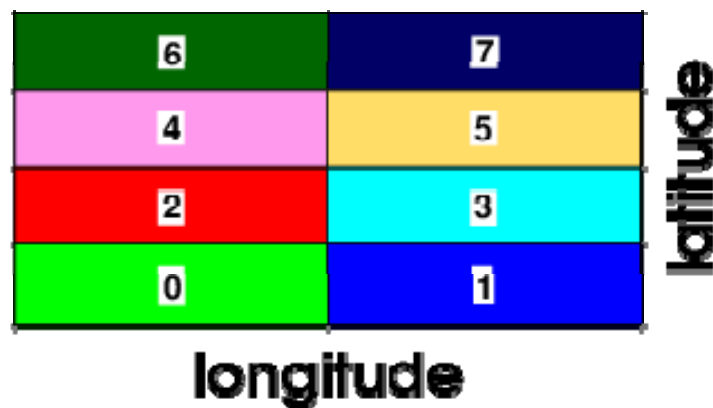
MIROC高速化に向けた開発(着手)

現状の領域分割
(南北分割のみ)



FFTの都合で東西分割
が許されていない
⇒並列数の上限

領域分割改良案
(東西も可)



並列数が緩和

力学過程は遅くなるが
物理過程は高速化を期待

球面調和関数展開の前段のFFTのみ東西領域分割導入、ESで試験運用
⇒高速化にむけて改良中

課題名：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

課題代表：河宮未知生（国立研究開発法人海洋研究開発機構）

まとめ

- 気候モデルによるQBO比較国際プロジェクト、QBOiが立ち上がり、地球シミュレータを用いてQBOi実験を行った。気候変動に伴うQBO変化及びQBO季節予報可能性について解析を開始した。今後より高解像度での実験を行う必要がある
- 氷床変動再現のため高解像度氷床モデル開発を続けている。今後は気候氷床間の相互作用をよりよく表現するために結合モデル開発に向かう
- 気候モデルのより高解像度化、より長期積分のため、さらなる高速化を検討している

＜ESを用いたQBO研究のまとめ＞

- ・気候モデルでQBOを再現するのは難しい
CMIP3ではゼロ、CMIP5では4つ程度、CMIP6では増えると予想
- ・地球シミュレータを用いて、MIROC-AGCMでQBOを再現させ、世界に先駆けて気候変動に伴うQBO変化の研究を発表、IPCC第5次評価報告書に引用(Kawatani et al. 2011, 2012, Watanabe and Kawatani 2012)
- ・シミュレーションで得られた現象は、後に観測でも発見された。世界の他のモデル結果もMIROCと整合的(Kawatani and Hamilton 2013, Nature)
- ・気候モデルによるQBO比較の重要性が指摘。SPARC QBOiプロジェクトが立ち上がる。地球シミュレータを用いて、大量のQBOi実験を行った
- ・特にQBO予測可能性については、より高解像度にすることで改良されることが見込まれる為、今後さらなる実験を行う必要がある