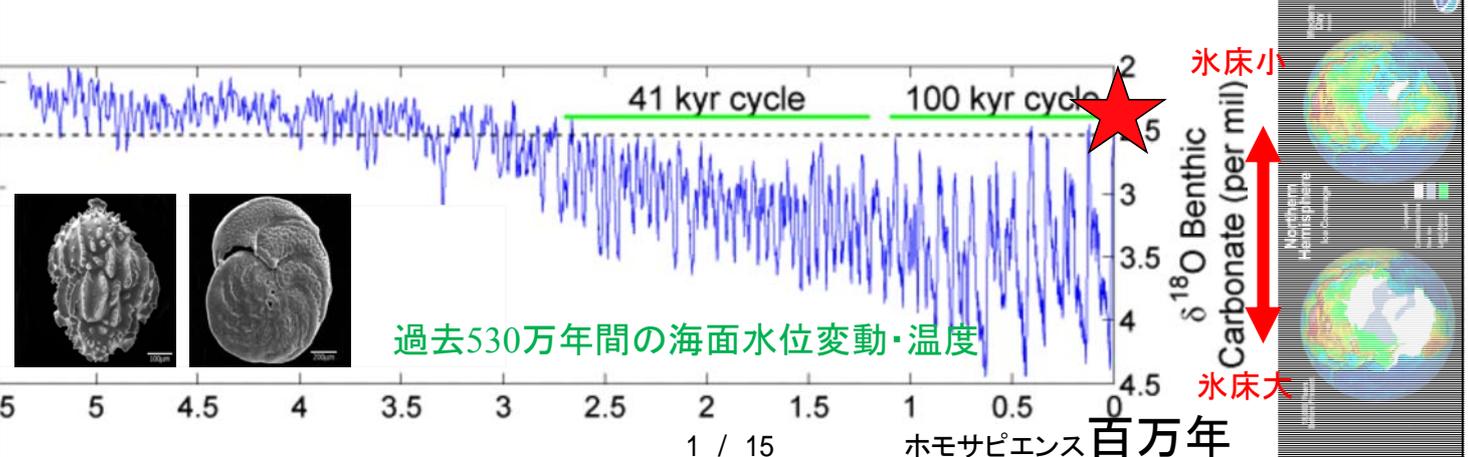
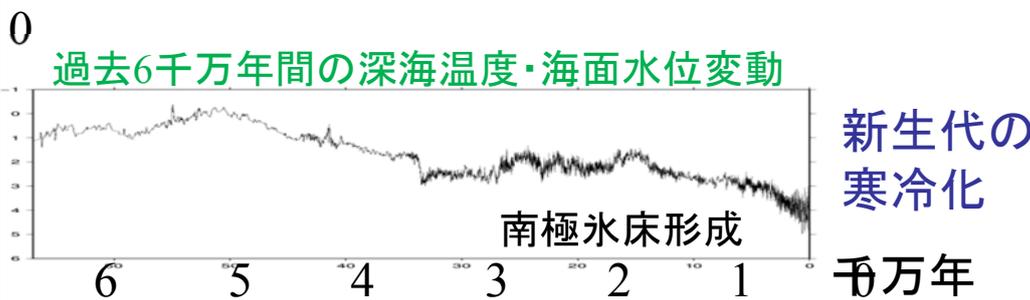
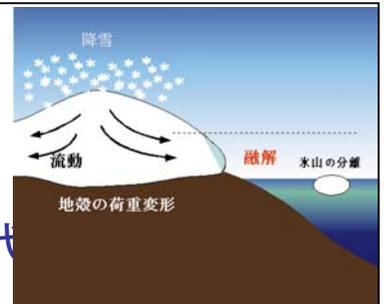
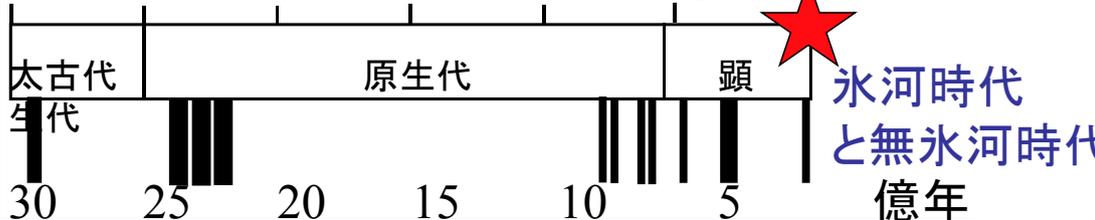


古環境研究および気候将来予測に資する気候数値実験

大気海洋研究所 阿部彩子

- 0. 地球史と気候変化
- 1. フィードバックの理解！(内因)と外因
- 2. 数値実験による気候研究: 気候モデル
- 3. 氷期サイクルはなぜ10万年周期か? なぜ現在と違う気候?
- 4. ネアンデルタール人を何度も襲った急激な気候変化
- 5. 数百万年前の過去の温暖期
- 6. 気候変化と氷床の安定性(tipping point)に関する研究
- 7. 気候変化と海洋酸素や物質循環
- 8. 将来や過去における高緯度から熱帯降水への影響

地球史と気候変化



フィードバックプロセスやシステムの性質の定量化

~外的条件に対する気候応答を数値実験~

大気海洋結合大循環モデル
(GCM)運動量の交換
熱・水の交換

海水モデル

海洋モデル

大気モデル

大気循環
放射計算

熱・水の交換

陸面モデル

河川流出

気温
雨量
風速

現在の気候をまずシミュレートし、さらに、条件を変えて、過去の任意の時代の再現や数値実験を行って、現在との違いを示す。

Earth Simulator

NEC SX parallel vector supercomputer.
Version 3 started in March 2015.

MIROC 4m

大気: 水平役 2.8度, 20層
海洋 256x128 約1~0.5度、43層
海水。氷床、植生、海洋物質循環
などオフラインモデルも組み合わせ



Typical times required to integrate MIROC4m (mid-resolution AOGCM) for 100 model years:

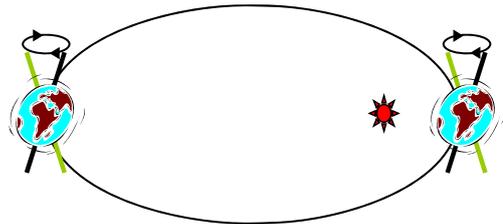
ES2: 76 hours (7 consecutive jobs, 1 node or 8 cpu cores)

ES3: 24 hours (2 consecutive jobs, 8 nodes or 32 cpu cores)

Does not include waiting time.

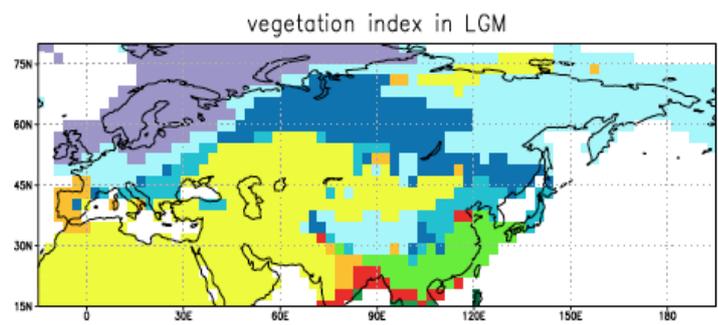
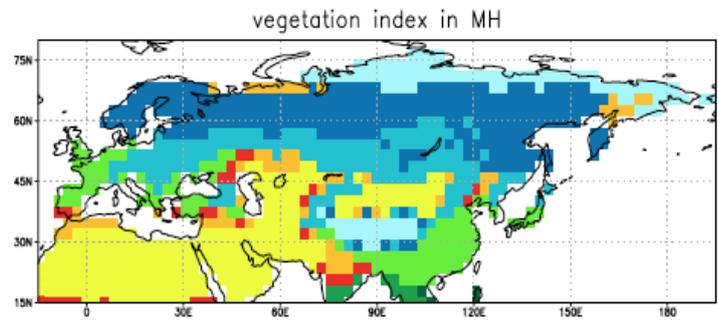
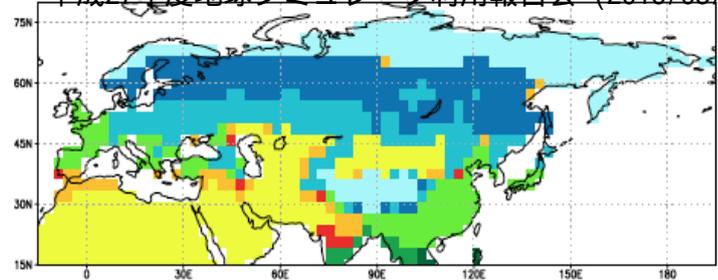
Biggest advantage: increase in the number of nodes

氷期と間氷期の植生



一植生が気候変化を増幅
 一植生や土壌や凍土も炭素循環に寄与

- | | | |
|--------------------|------------------|--------|
| Tropical evergreen | Boreal deciduous | Tundra |
| Tropical deciduous | Savanna | Ice |
| Temperate mixed | Grassland | |
| Boreal conifer | Desert | |

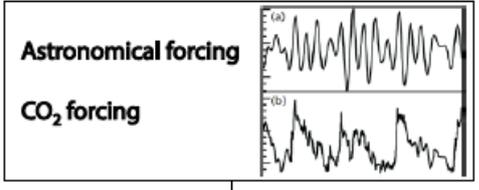
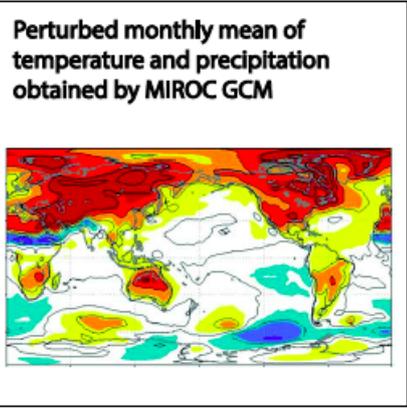


O'ishi and Abe-Ouchi,
 GRL, 2011, 2014

氷床-気候モデル IcIES-MIROC

(Abe-Ouchi et al,
 2007, CP,
 2013, Nature)

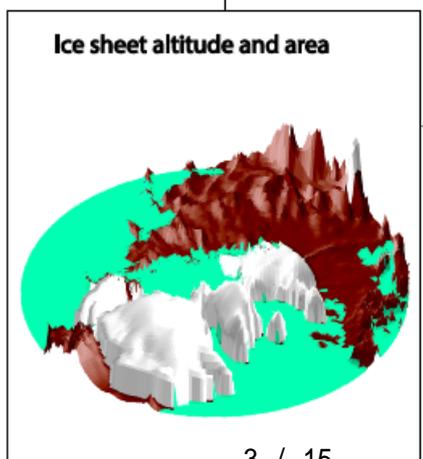
長期 と短期 時間ス
 ケールの気候
 フィードバックを
 物理的基礎に基づ



Climate parameterisation:

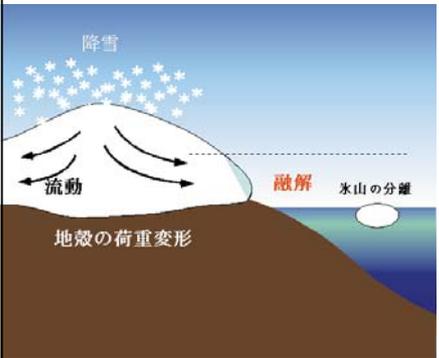
$$T = T_{ref}(\text{observed}) + \Delta T_{sol}(\text{astronomical forcing}) + \Delta T_{CO_2}(\text{CO}_2 \text{ forcing}) + \Delta T_{ice}(\text{ice sheet-atmosphere feedback}) + \Delta T_{nonlinear}(\text{other feedback})$$

$$P = P_{ref}(\text{observed}) \cdot f(\Delta T)$$



3-dimensional thermomechanical shallow ice sheet model IcIES
 with
 sliding dependent on basal temperature
 isostatic bed rebound
 grounding line flux for floating conditions
 degree day melt model

Geographical conditions:
 bed topography, geothermal heat flux,
 land-sea mask, sediment bed

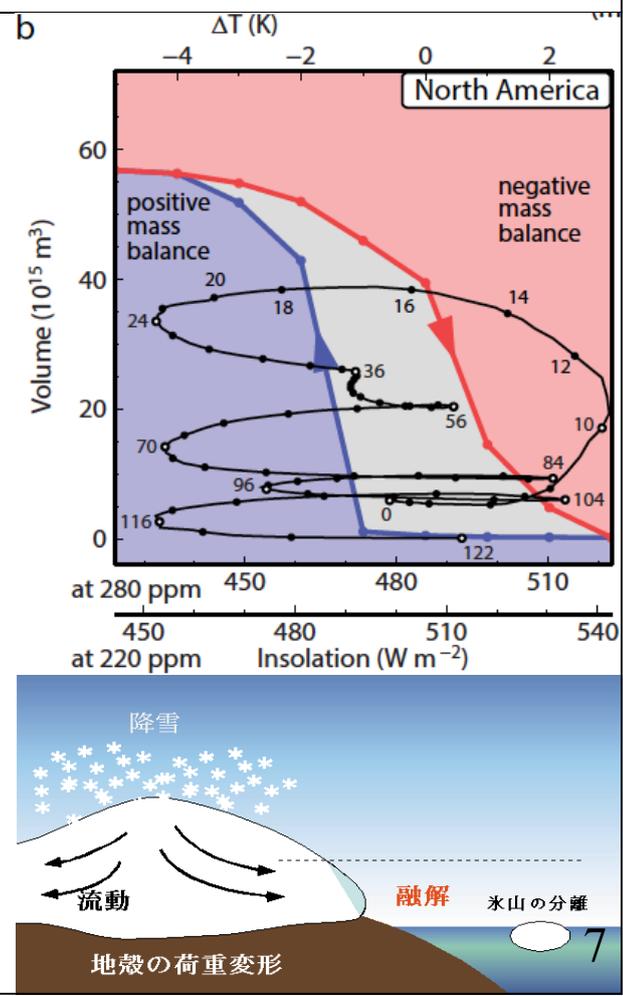


なぜ氷期は10万年周期なのか？

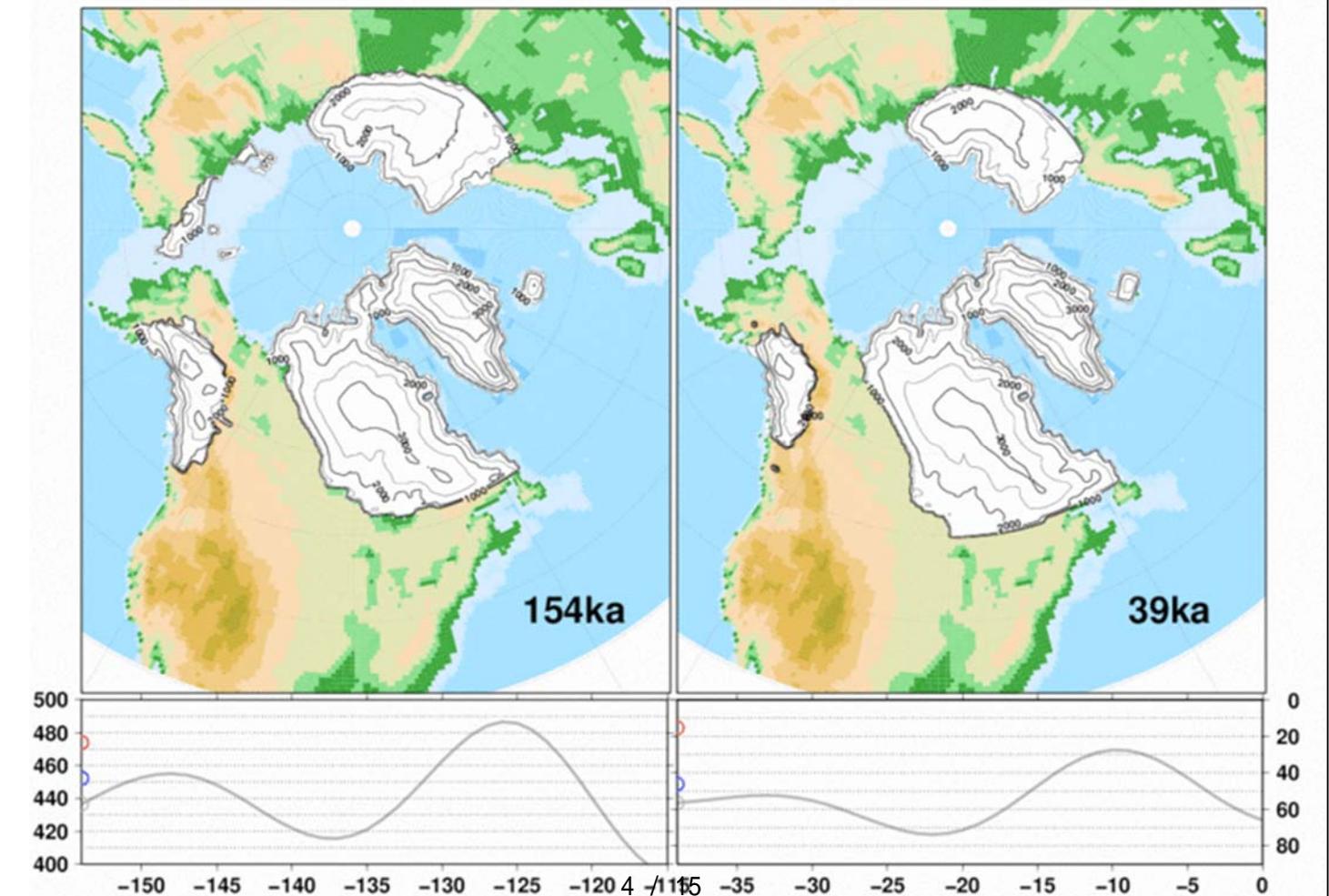
(1) 外的要因は必要(システムの自励振動ではない(定常応答解がある))→ミランコビッチフォーシング: 近日点の位置が北半球に来る**2万年歳差周期**の振幅が**離心率(=10万年周期)**に変調されることが重要。さらに氷期終了のタイミングは離心率が極小になったすぐ後にくる。自転軸の傾き由来の4万年周期は歳差周期を変調させる補助的役割。

(2) 内的要因その1: **氷床**が10万年周期の内的要因として大きな役割を果たすことがわかった。**炭素循環**は**増幅効果**としては重要。氷床の日射に対する応答のヒステリシス構造(右図)が重要——「氷床成長後しきい値に達して後退」開始条件を決めているのは、北米大陸の**氷床質量収支の気候応答**プロセスである。

(3) 内的要因その2: 氷期サイクル終焉プロセス: 後退開始の条件が整ったあとは、**大気—氷床—地殻マントル相互作用**が急激な氷床後退をもたらすため氷期終焉。



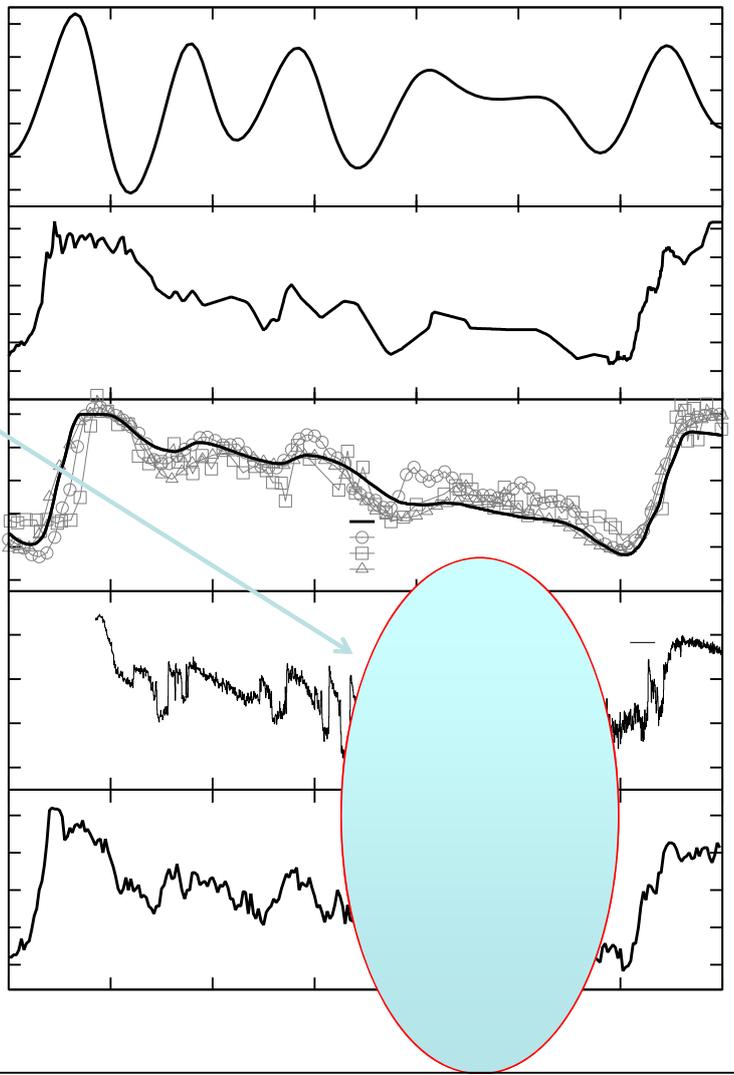
過去の数十万年の気候変化(過去氷期2サイクルの比較)



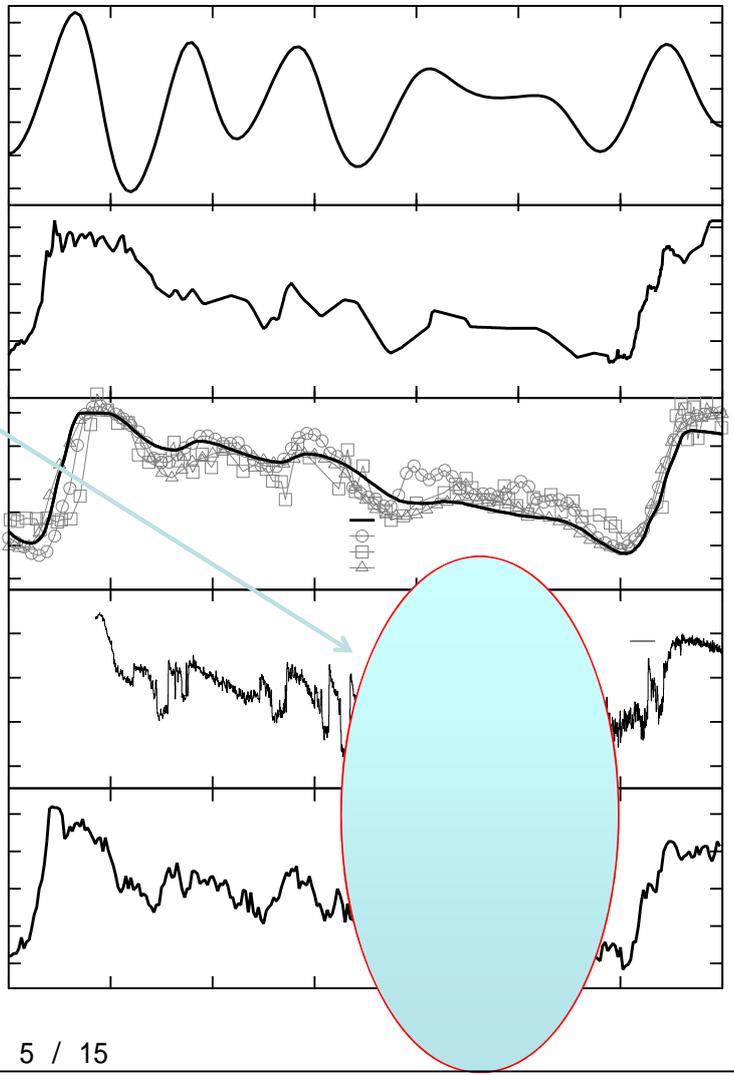
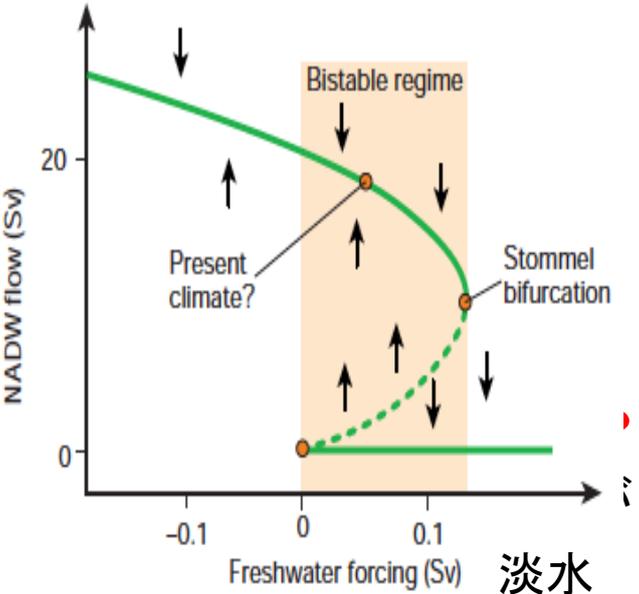
氷期サイクル中 DOサイクルや 南極AIMなどの 急激な気候変化

Dansgaard-Oeschger cycle
Heinrich events

Antarctic Isotope Maximum
なぜ氷期中期に頻繁？
先行研究では氷床不安定性が
原因といわれていた。



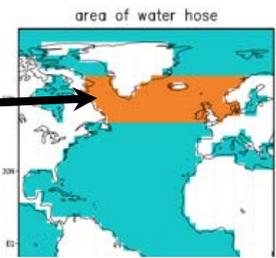
氷期サイクル中 DOサイクルや 南極AIMなどの 急激な気候変化



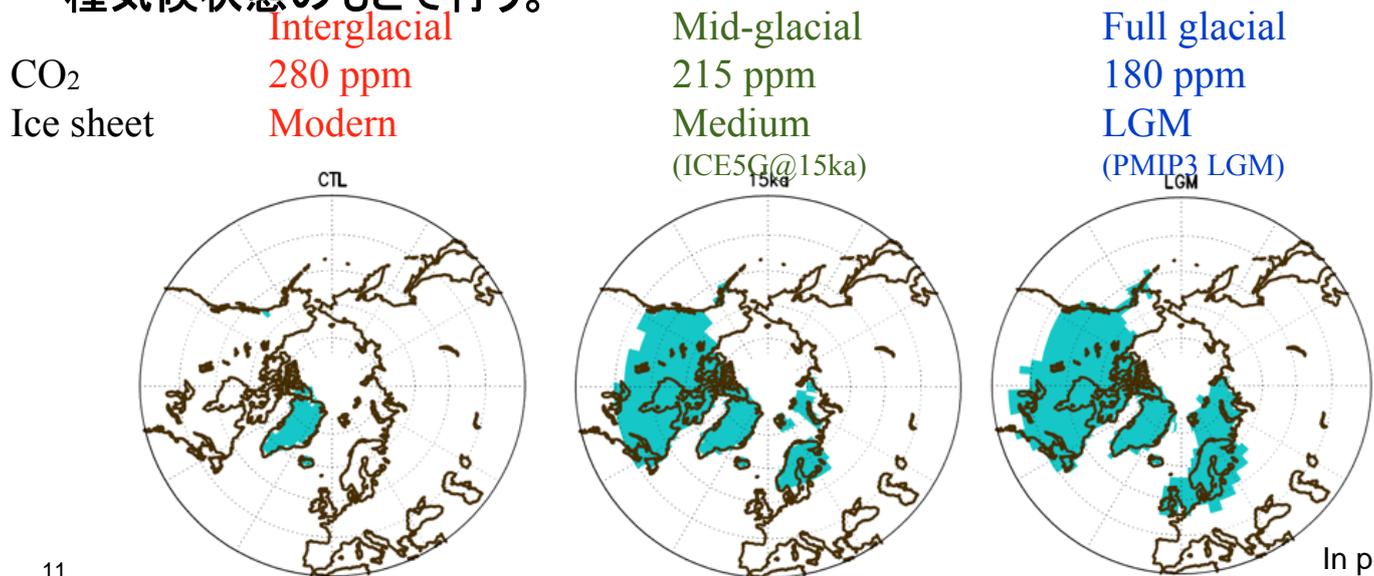
方法: Model and Experiments

AOGCM (MIROC) freshwater hosing experiments

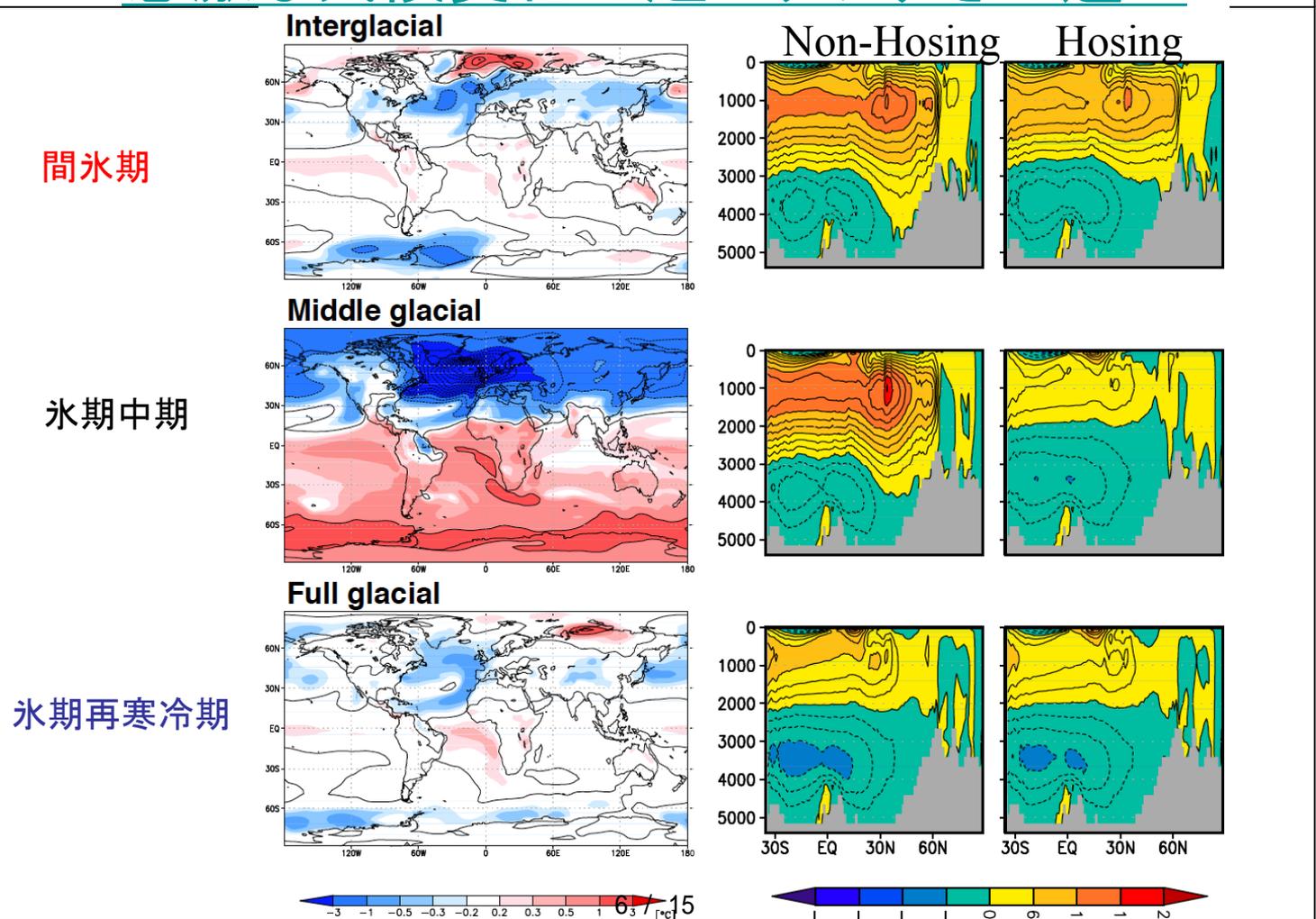
- Atmosphere: 2.8°, 20 levels; Ocean: 0.6-1.4°, 43 levels
- Freshwater perturbation: 0.05 Sv for 500 yr into North Atlantic 50-70°N
- 0.05 Sv ~ 2.5m sea level rise in 500years



Experimental design of Different background states 放水実験を各種気候状態のもとで行う。



急激な気候変化の起こりやすさの違い

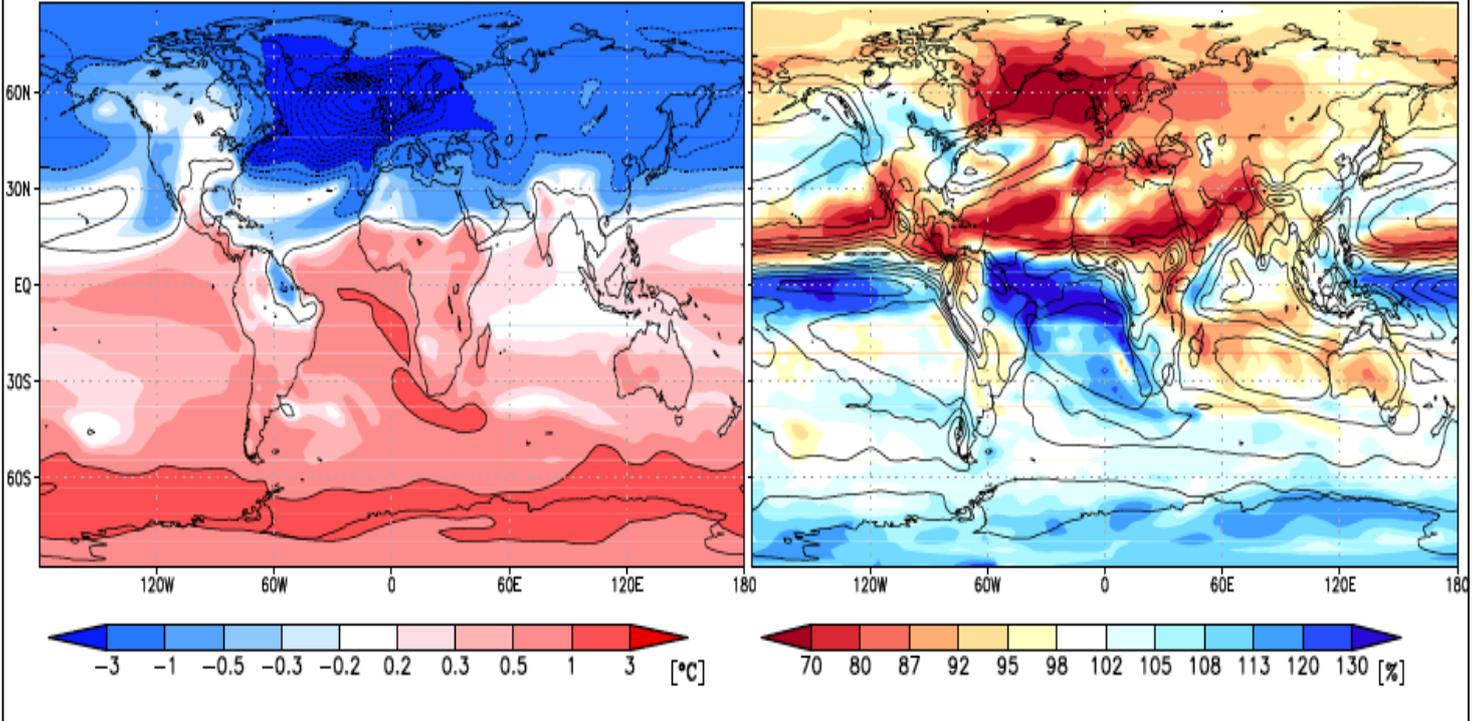


過去の急激な気候変化

Mid-Glacial Case: Surf. Climate Change (at 400-500 years after the start of hosing)

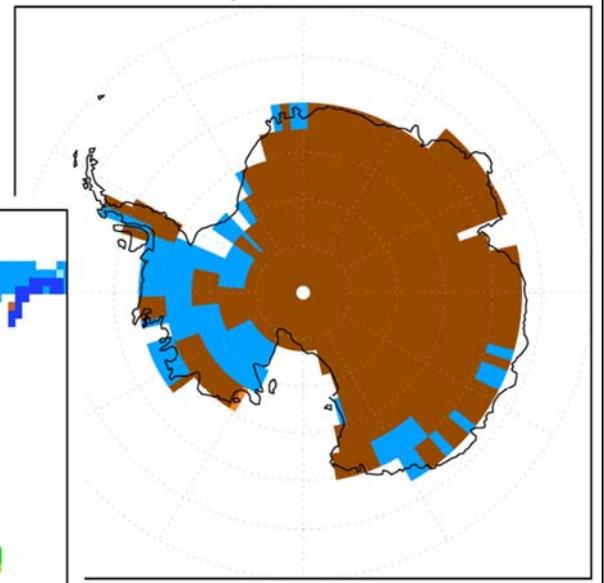
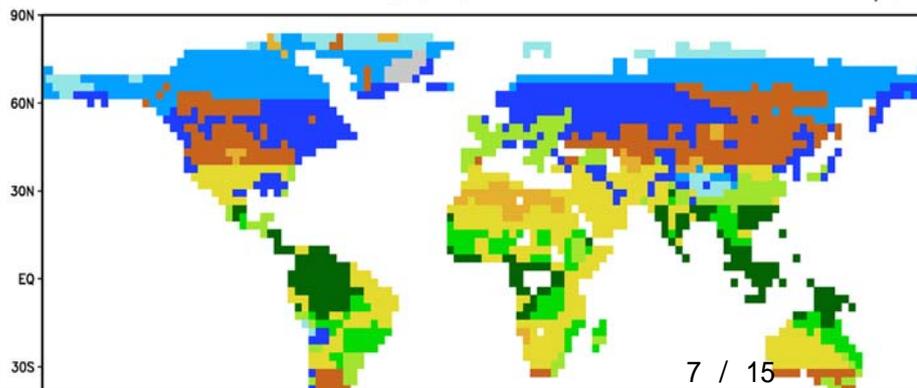
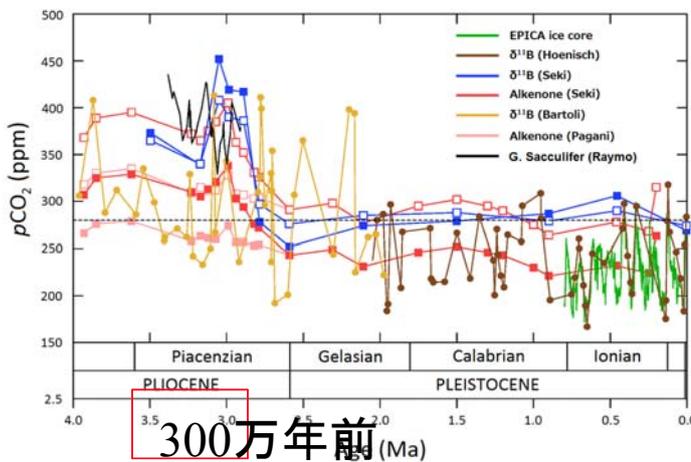
気温変化

降水量変化



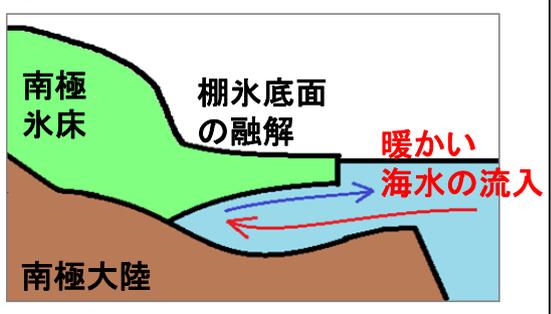
過去の温暖期の気候シミュレーションPMIP/Pliocene

- 国際比較CMIP/PMIP
- 世界中集中的データ収集
- モデルデータ比較
- 350万年前の気候
- 大気CO2高かった



気候変化と氷床の安定性(tipping point)に関する研究

•南極氷床の後退にとって重要である棚氷海洋間相互作用を、さまざまな気候条件のもとで調べた。

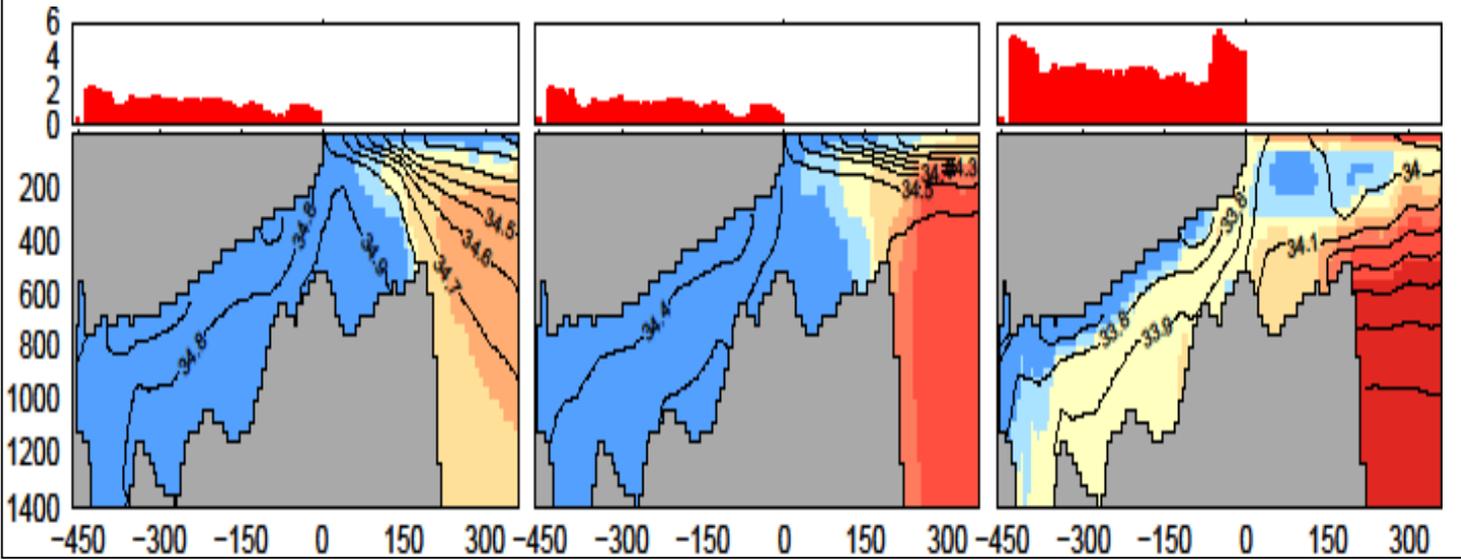


南大洋の水温に加えて、大気の熱的条件による海氷生産の強さが棚氷底面融解に対して重要 →ポスター:小長谷の博士研究

氷期気候

現在の気候

CO2濃度倍増気候



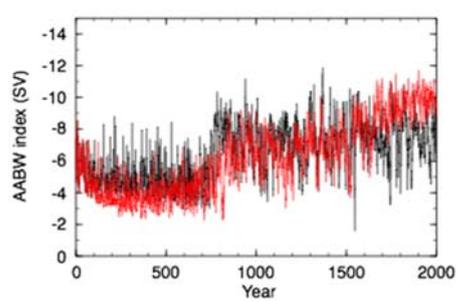
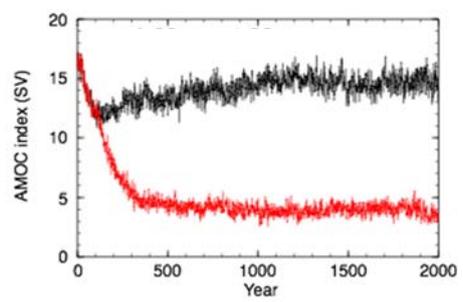
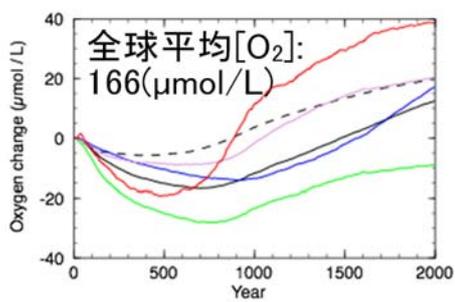
温暖化と海洋中酸素と海洋循環の長期変化

酸素と循環の変動

酸素[O₂] 変化量

AMOC(大西洋子午面循環)

AABW(南極底層水形成)



--- 全球 (2xCO₂) — 全球 (4xCO₂)
— 南大洋 — 大西洋
— 太平洋 — インド洋

— 2xCO₂ — 4xCO₂

・最初の500年は深層循環が弱化、全球的に酸素が減少

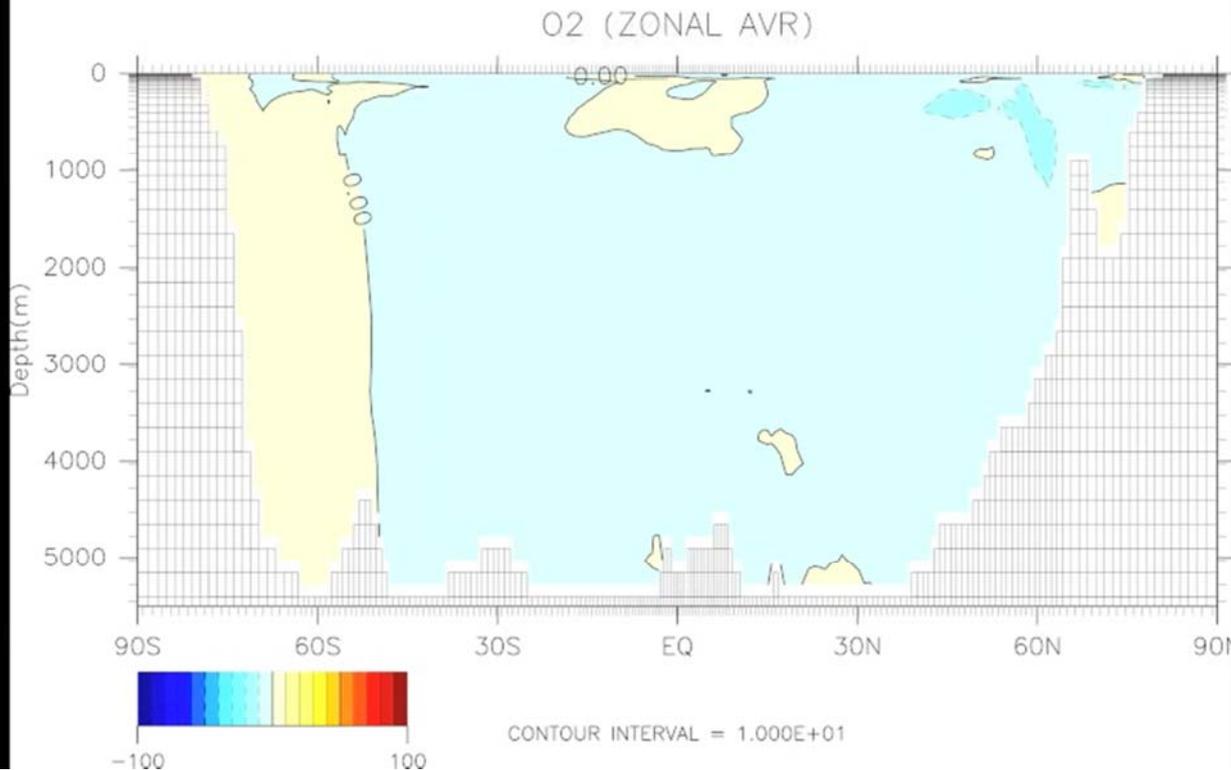
・500年以降、AABWの回復 & overshootに伴い[O₂] richな表層水が深層に運ばれ、南大洋から[O₂]の回復がはじまる。

・南大洋起源の[O₂] richな深層水が各海盆に運ばれて、全球的に酸素が回復 : 先行研究(3次元海洋や大気を考慮してこなかった)ではなかった結果

将来長期的気候変化と海洋酸素濃度変化

Yamamoto et al (2015), Global deep ocean oxygenation by enhanced ventilation in the Southern Ocean under long-term global warming. (published in GBC)

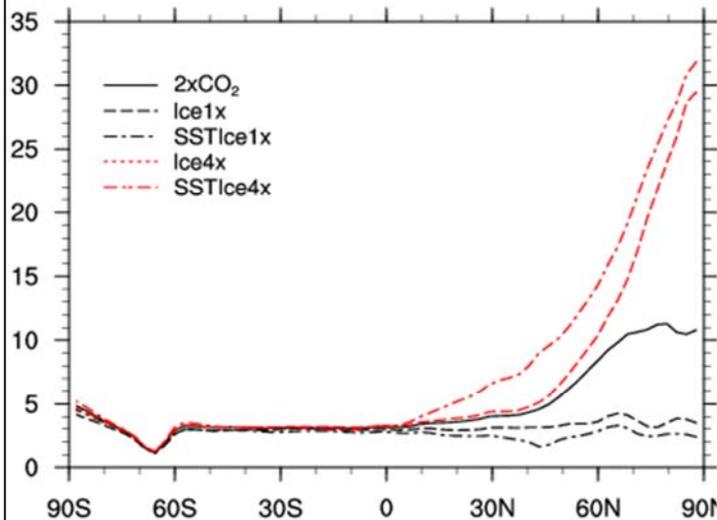
0025/01/01



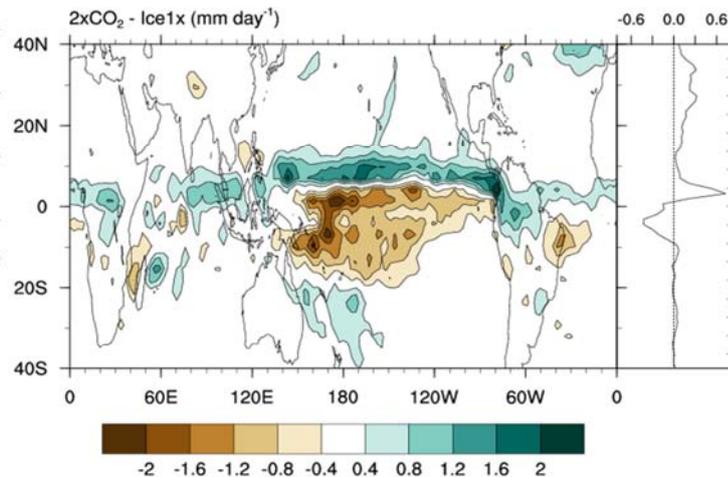
将来気候変化と高緯度域の熱帯への影響

気温の緯度変化

濱田:H28 北海道大学修士論文

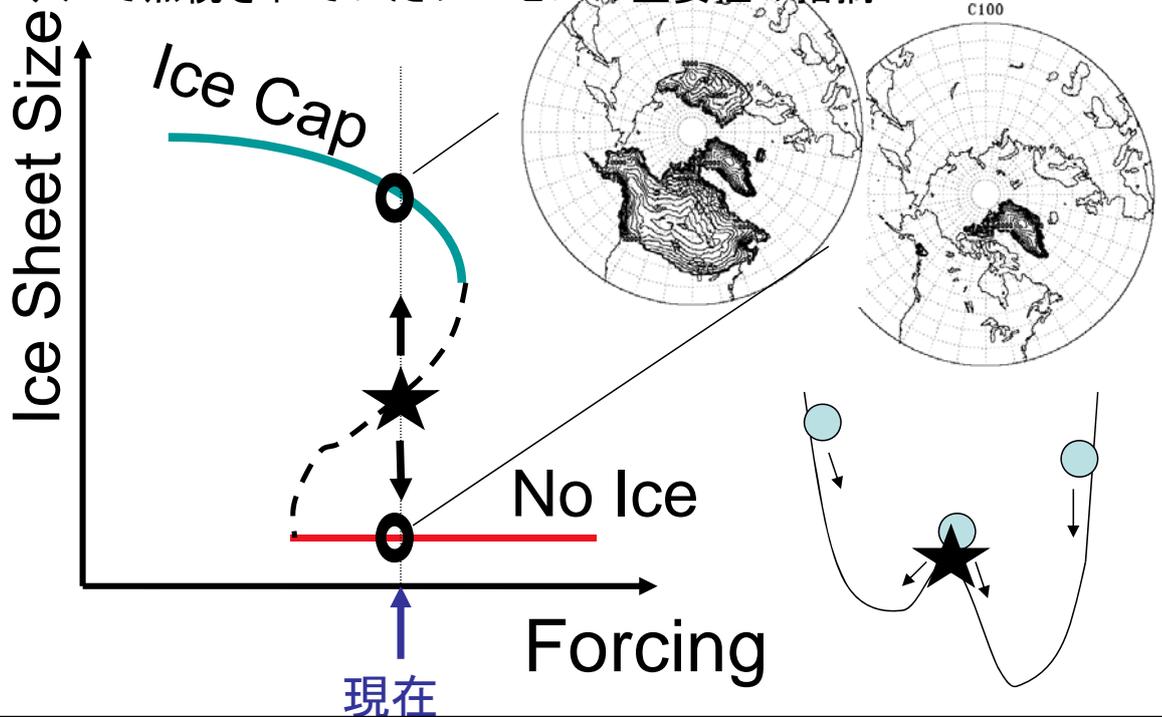


降水量パターンの変化



地球シミュレータによる気候計算意義

- (1) システムの安定性が気候の時間変化を左右：ほんの少しの外力の違いでも異なる環境になる—地球システム=大気、海洋、氷床、海氷、植生 etc
- (2) 複雑なフィードバックプロセス（水蒸気や雪氷アルbedo、雲等を通じたフィードバックの定量的見積もり）やテレコネクション
- (3) シンプルモデルで無視されていたプロセスの重要性の指摘



主な研究助成

基盤研究(A)(一般)(H25~H27):地球システムモデリングによる急激な気候変動と氷期サイクルとの相互作用の解明的臨界現象の総括 (阿部彩子)代表29,500

科学研究費補助金—特別研究員奨励費:氷期に発生した急激な気候変動の振幅に対する氷期氷床と二酸化炭素濃度の役割H28 (シェリフ多田野サム)代表 900

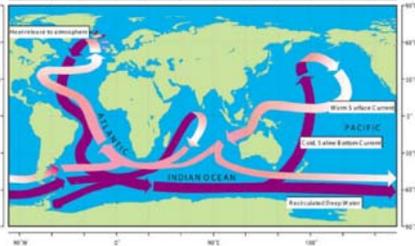
科研費新学術領域研究(領域型)(H22~26) :旧人・新人時空分布と気候変動の関連性の分析 (阿部分担)3,800 (19,000)

受託研究・環境省推進費(再委託):(H24~H28・環境省)クリティカルな気候変動解析に関する研究:サブ 寒冷圏を中心とした気候変動リスクの特性評価と地球物理学的臨界現象の総括 (阿部彩子)代表75,155/341,500

基盤研究(C)(一般)(H26~H28)将来の気候変動における熱帯外から熱帯へのテレコネクションメカニズムの解明(吉森正和)代表

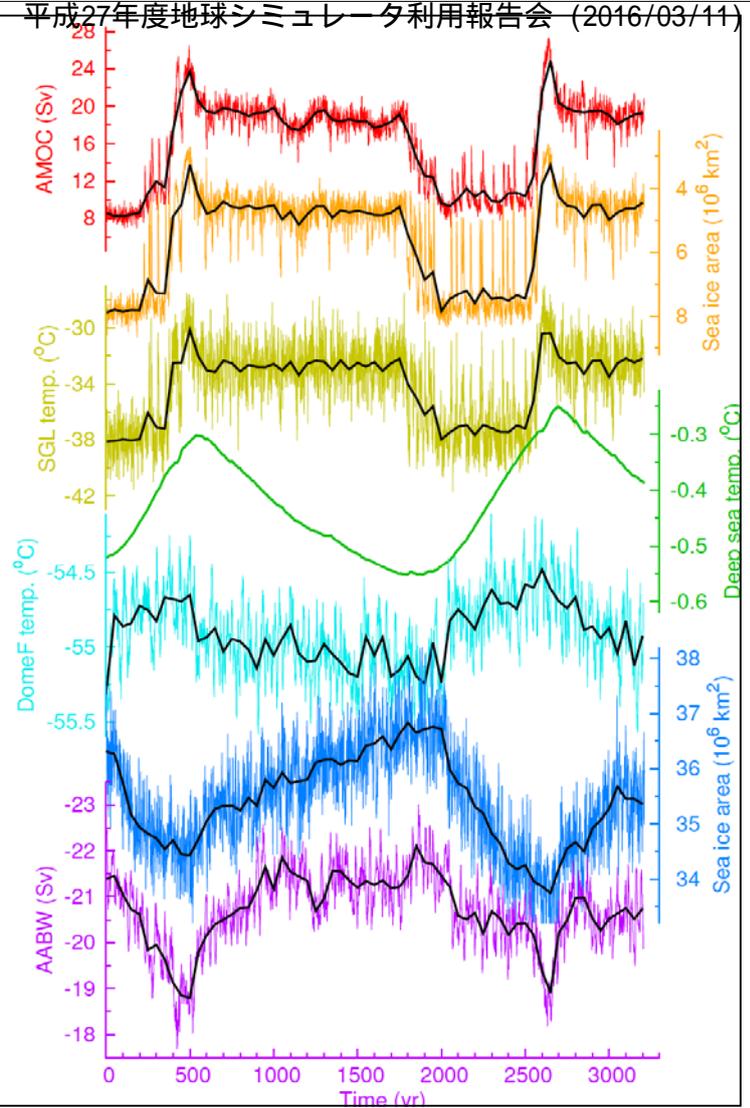
(応募中)平成28年度(2016年度)新学術領域研究(研究領域提案型)(H28~H32)熱-水-物質の巨大リザーバ:全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷11,100(124,900)

氷期条件 融け水がなくても 急激な気候変化！！



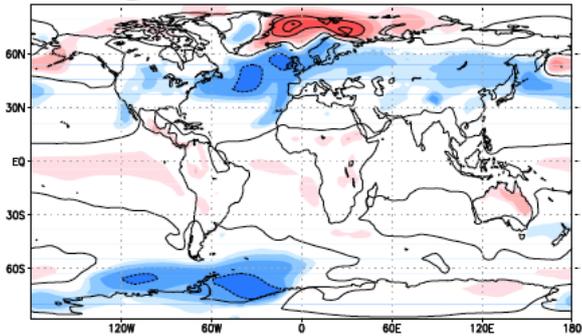
北大西洋と南極周
辺で沈む込み、深層
の流れを形成。
表層では風による
海流も生じる。

大気海洋大循環モデルで
実験中！(本日現在)

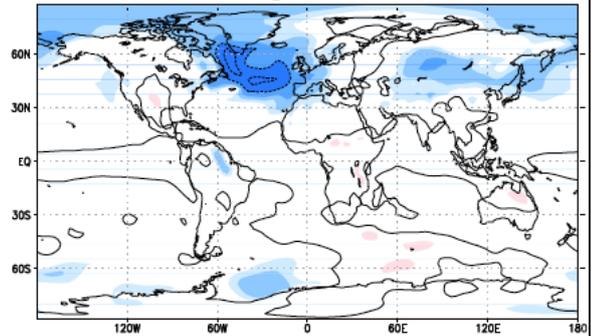


感度実験： どの要素で時代で異なる変化が生じるのか？ 氷床か、CO2か？ - 氷床存在

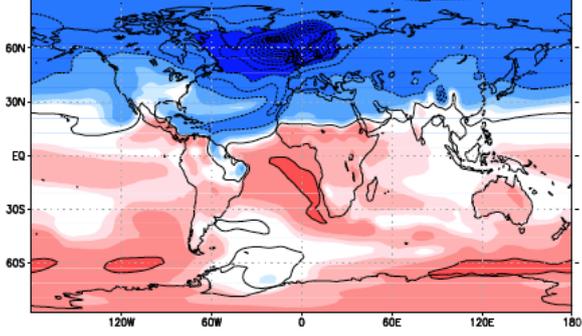
Interglacial



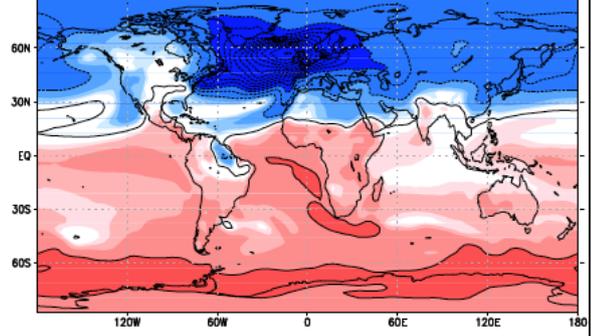
Ice sheet only



GHG only



Middle glacial

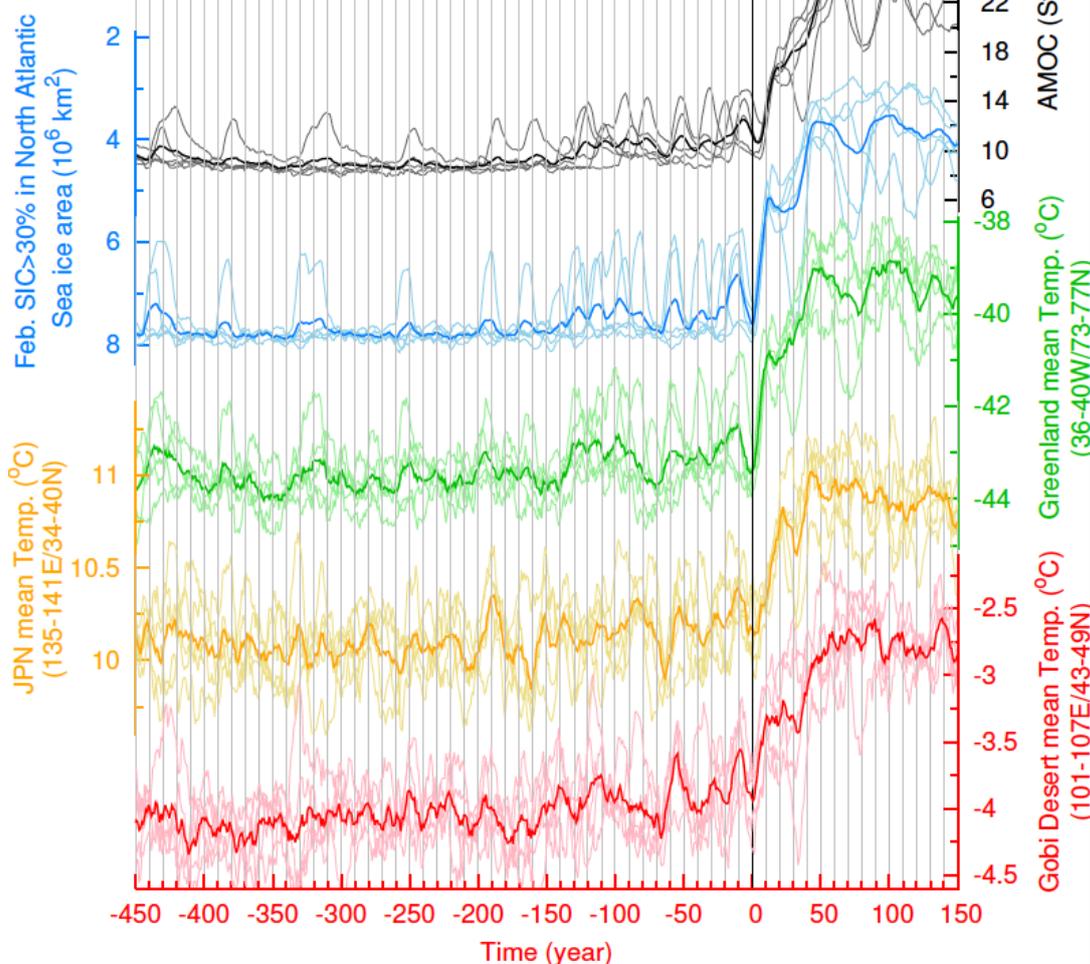


CO₂ 低下
215 ppm

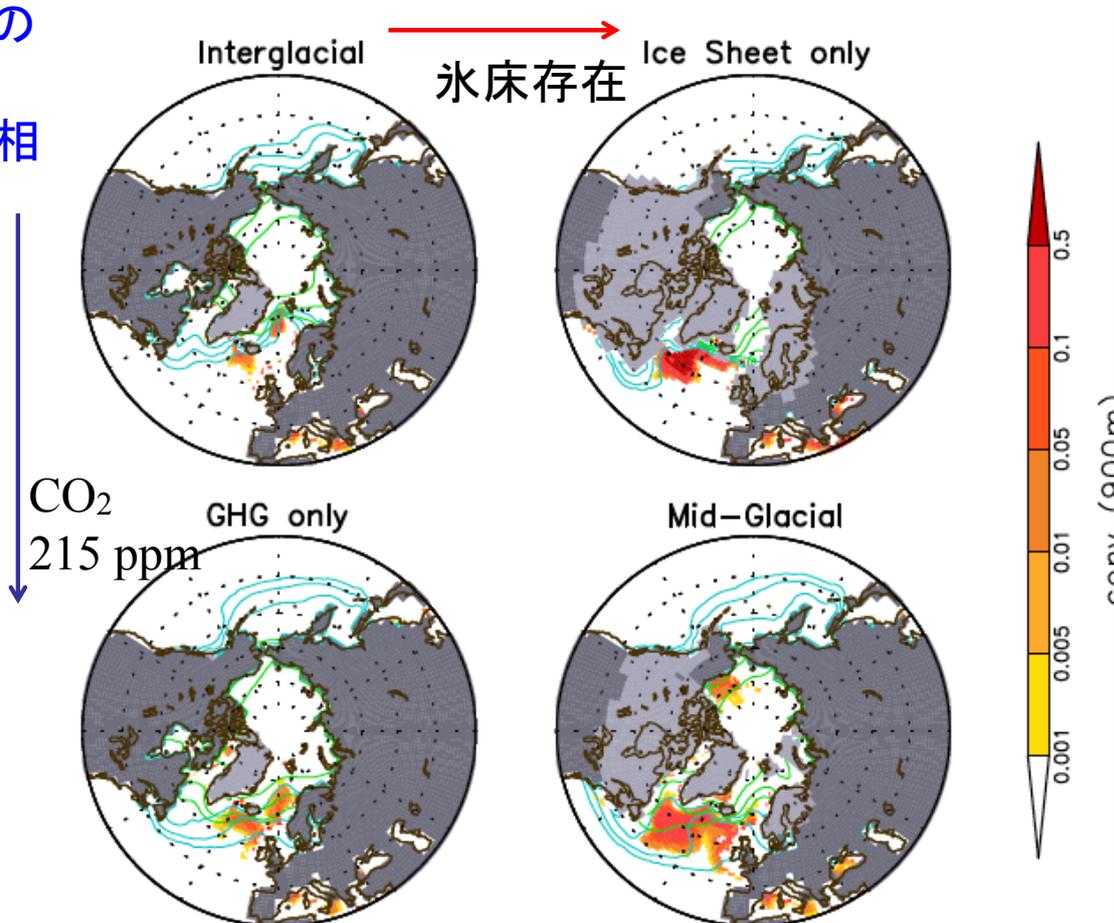
→ 氷床の不安定性ではなく、大気海洋循環の応答の仕方が重要
→ 大気中CO₂変化が重要

急激な温暖化イベント ～地域比較

北大西洋
(AMOC,
海氷、
グリーンランド)
VS
アジア
(日本、
ゴビ砂漠)



急激な気候変化の
起こりやすさ:
大気海洋海氷の相
互作用が重要



In prep.

→ Ice sheet prevents from expanding sea ice and ceasing the NADW, while CO₂ does not. Cool climate due to CO₂ drop is needed to allow sea ice expansion

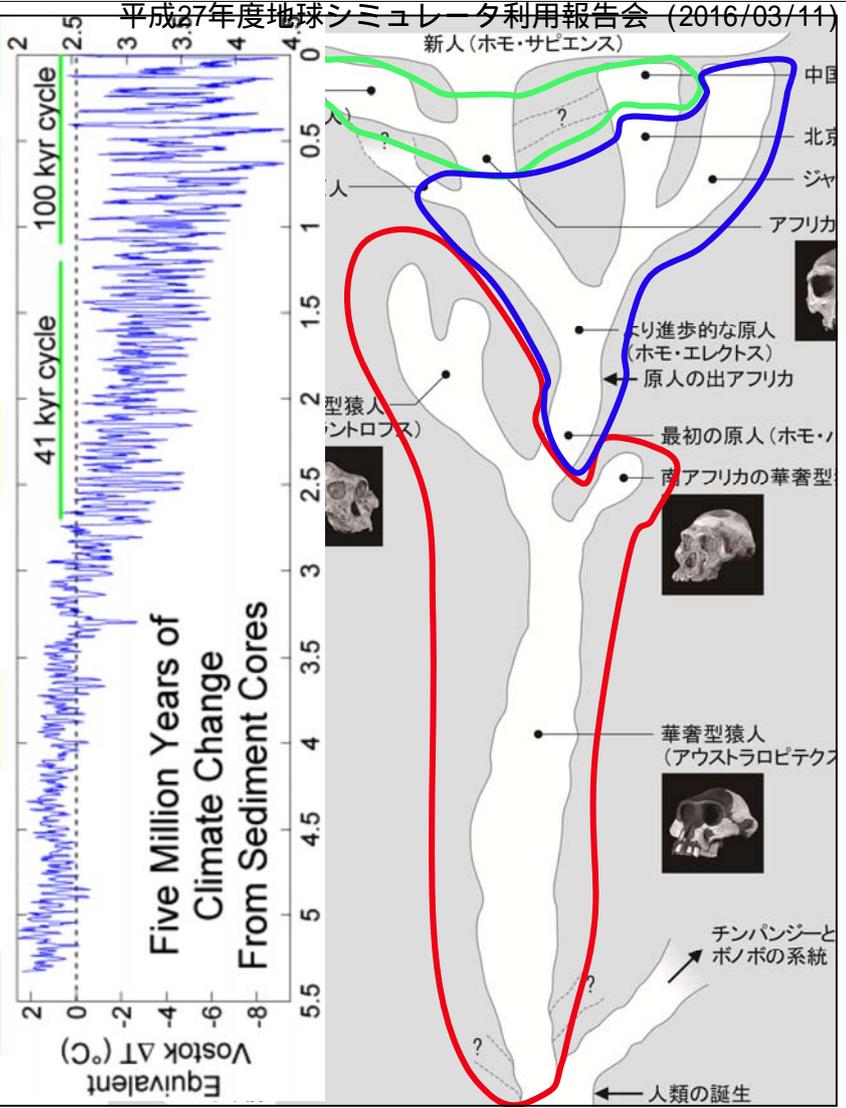
新人 骨格器・装身具
ヒト (*Homo sapiens*)

旧人 埋葬
ネアンデルタール人など 薄片石器
出アフリカ

原人 草原に適応
ホモ・エレクトルスなど 石器使用

草原に進出

猿人 森林
アウストラロピテクス
アルディピテクスなど



Insolation-driven 100-kyr glacial cycles and hysteresis of the ice sheet-volume, (Abe-Ouchi, et al, 2013, Nature)

Simulated ice sheet change for the last 400 kyr with IclES-MIROC model

氷期サイクルの 入力と結果

Abe-Ouchi et al, 2013, Nature

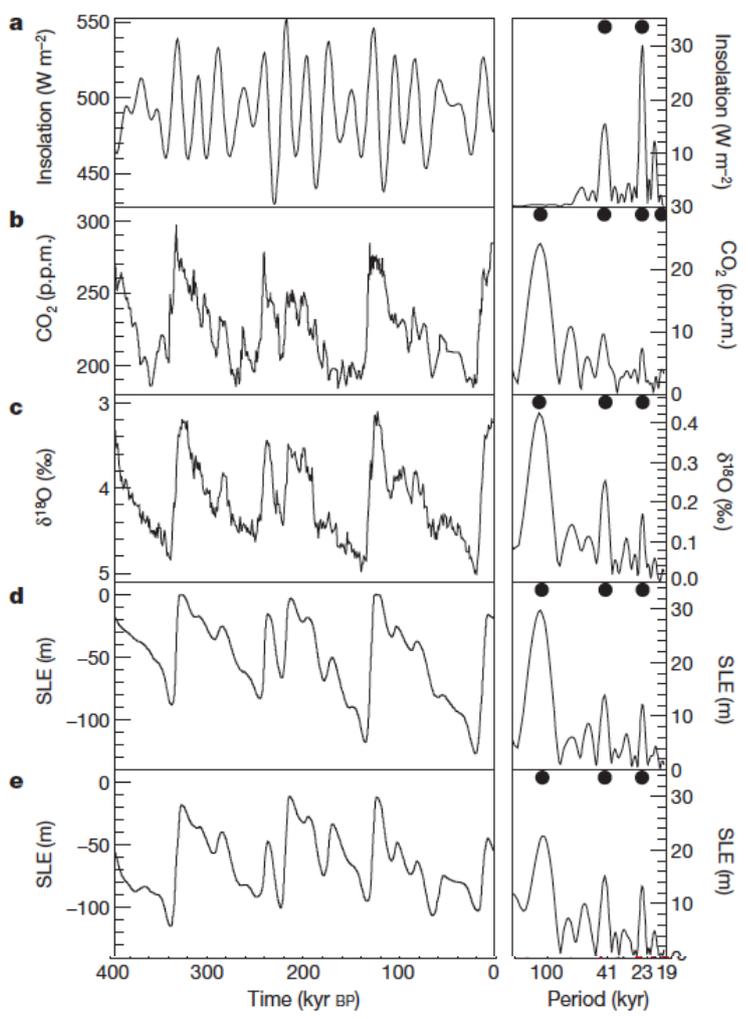
(a)夏の日射65N(19,23,
41kyr ピーク, Berger, 1978)

(b) 大気中二酸化炭素
CO₂(N₂/O₂Kawamura2007年
代)

(c)δO₁₈ (L&R, 2005)氷
床体積と深海温度を反映

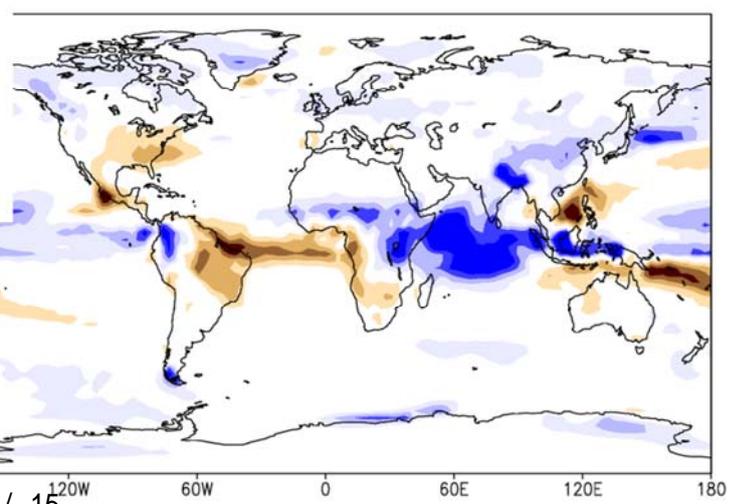
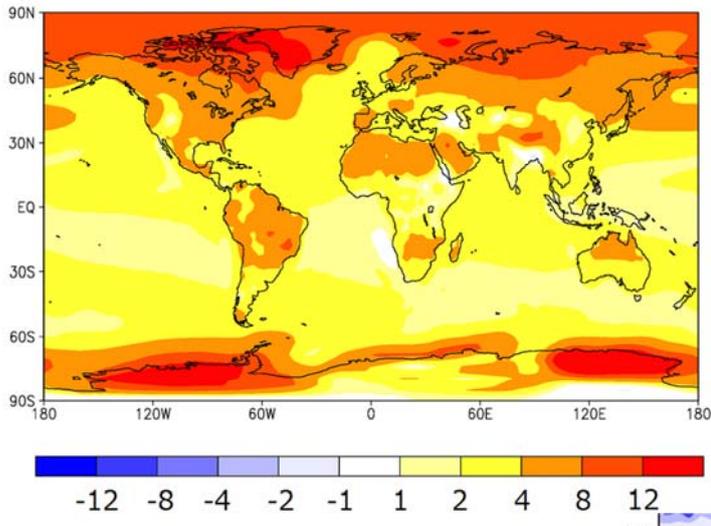
モデル結果 (氷床体積 =
Sea level相当)

(d)日射とCO₂変化を入力
した結果



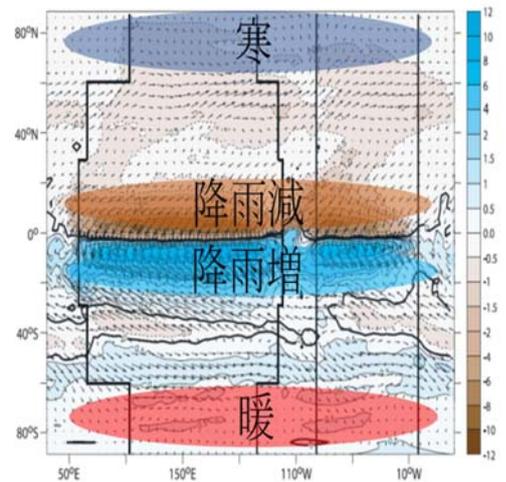
過去の温暖期の気候シミュレーションPMIP/Pliocene

PlioMIP1 - Pre-Ind SAT difference (°C)



気候変化と高緯度域の熱帯への影響

- 古気候：北半球寒冷化と熱帯降雨 (LeGrande et al., 2006)
- 20世紀：人為起源エアロゾル増加による熱帯降雨分布変化 (Friedman et al., 2013)
- 理想化実験：南北非対称温度強制 (Broccoli et al., 2006)



- **温暖化実験**：マルチモデル解析から、温暖化により生じる半球間温度差に応答し、大気熱輸送が変化→熱帯降雨分布が変化する可能性を示唆 (Frierson et al., 2012)

問題点

- CO₂濃度の増加による熱帯自身の応答の混在
 - 季節性の議論の欠如
- 中高緯度の温暖化による熱帯降雨への遠隔影響の存在は未解明**