

第四紀の65万年間の夏の日射と気候

(ケッペンとウェゲナー1922->ミランコビッチ仮説1941)

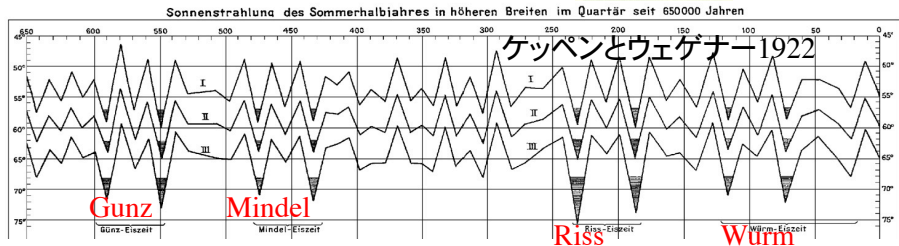
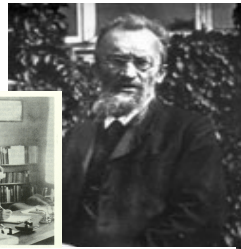
Milutin Milankovitch



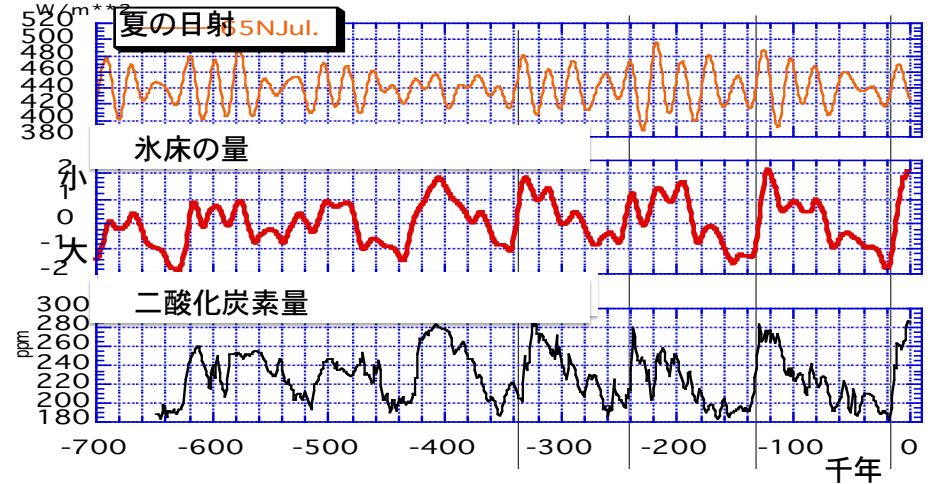
Alfred Wegener



Vladimir Köppen



古気候データの充実 (Haysら1970年代): 氷床サイクルは日射だけでは説明できない!



10万年周期の応答、氷床と気候変化のしくみが鍵
----> 気候モデリング

謎:なぜ10万年周期なのか?

●内因か?外因か?

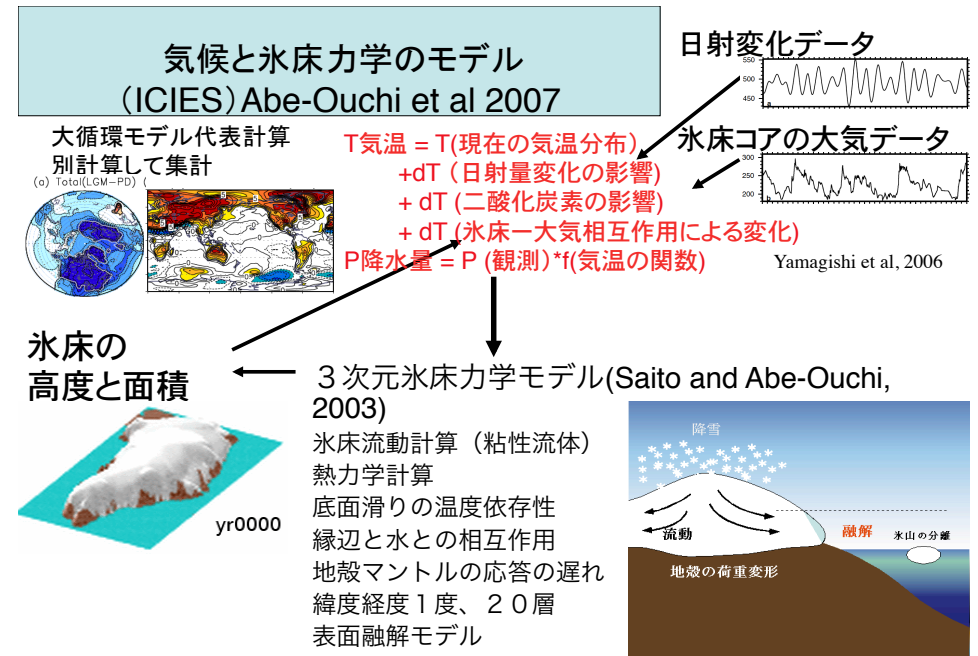
フォーシングなくてもシステム自体の性質で振動: 自励振動 (Saltzman, 1983, LeTreut, 1981)

●日射のどういう要素?

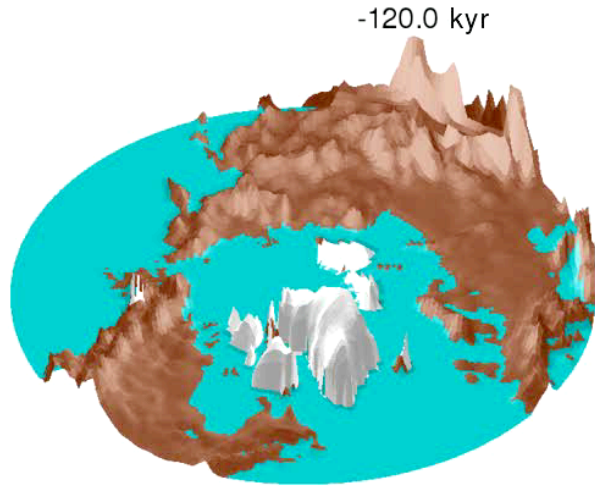
- ・ミランコビッチフォーシング: 離心率=10万年周期、しかし、0~0.05の変化は年平均日射に小さい影響、夏の日射量、2万、4万年周期卓越、本当に十分か? どうして10万年? (Imbrie 1993, Suarez, 1977)
- ・自転軸の傾き由来の4万年周期の2倍、3倍 (Huybers, Wunsch, 2005)

●内因は何か?

- ・二酸化炭素濃度変化が原因 (Pisias, 1994, Shackleton, 2001)
- ・氷床が十分大きくなると、しきい値に達して崩壊 (Imbrie, 1980, Raymo, 2007)
- ・急激な氷期終焉にはどのプロセスが大事なのか? (氷床荷重-マントル、海洋循環、ダストなど) (Oerlemans, 1980, Pollard, 1982, Peltier and Marshall, 1995, Ganopolsky, 2011)



過去12万年の氷床変動のシミュレーション結果

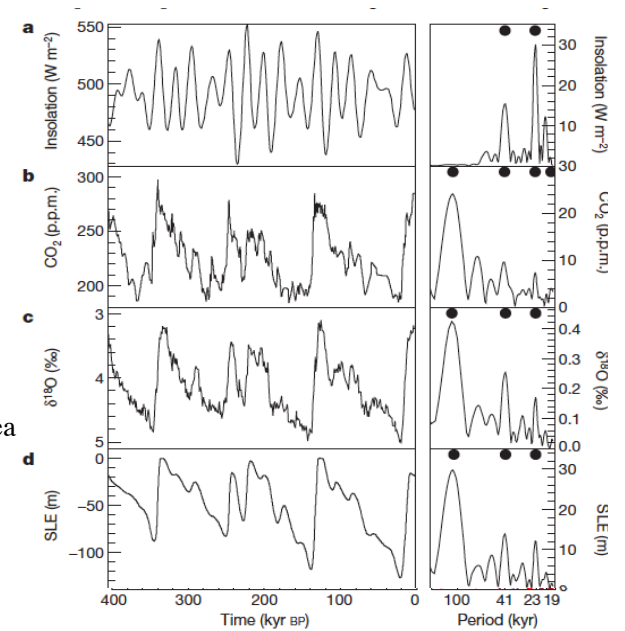


入力と結果

Fig.1 Abe-Ouchi, 2013

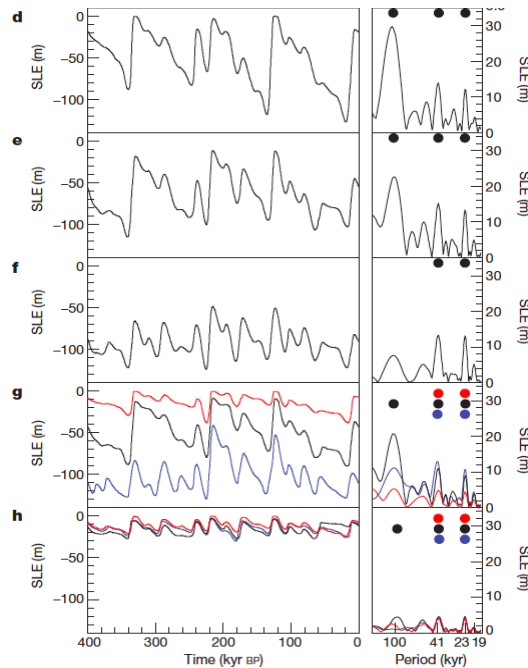
- (a) 夏の日射65N(19,23, 41kyr ピーク, Berger, 1978)
- (b) 大気中二酸化炭素 CO₂(N₂/O₂, Kawamura 2007年代)
- (c) δO₁₈ (L&R, 2005) 氷床体積と深海温度を反映

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

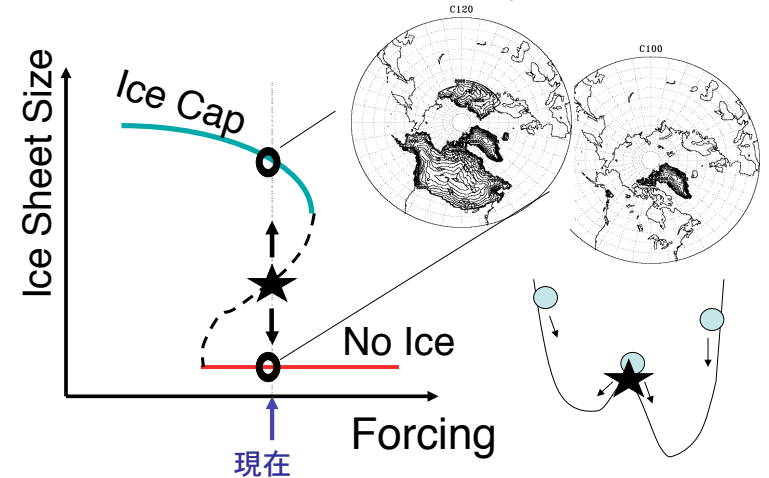


入力と結果 Fig.1

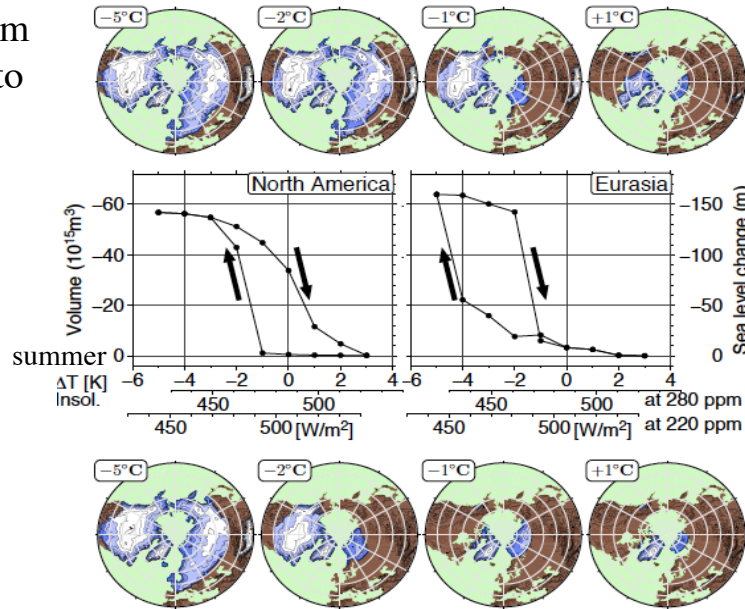
- 結果 (体積=Sea level相当)
- (d) 日射とCO₂変化を入力した
- (e) 日射のみ、CO₂ = 220 ppmで一定の場合
- (f) 基盤の応答の緩和時間がゼロの場合 (地球の粘弾性の性質が重要)
- (g) CO₂ = 160, 220, 260 ppm一定の結果、北米の場合 (200~240ppmのみ10万年周期、他は4万年周期)、
- (h) (g)同様、ユーラシアの場合 (結果は4万年周期)



システムの安定性が
 気候の時間変化を左右：
 ほんの少し外力の違いでも異なる環境に？

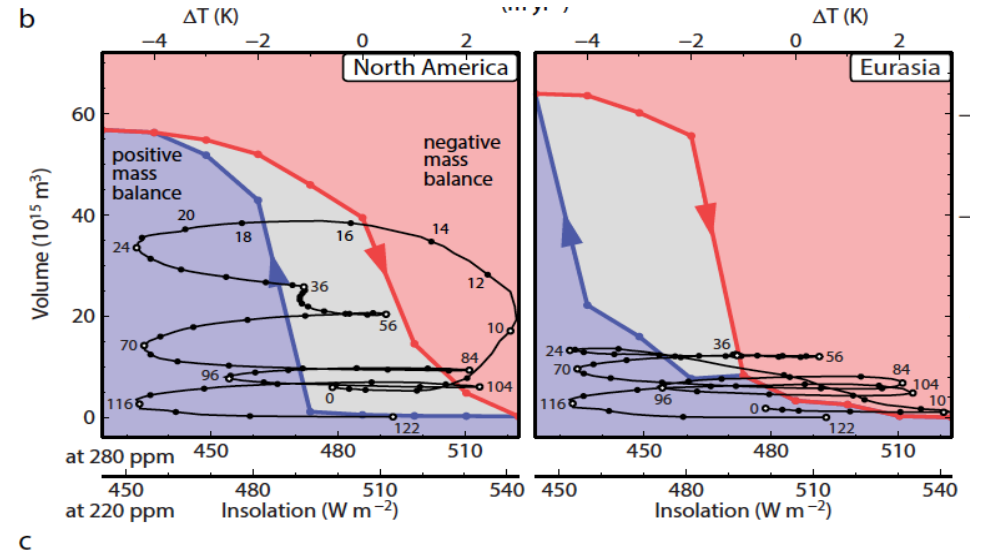


Equilibrium response to forcings



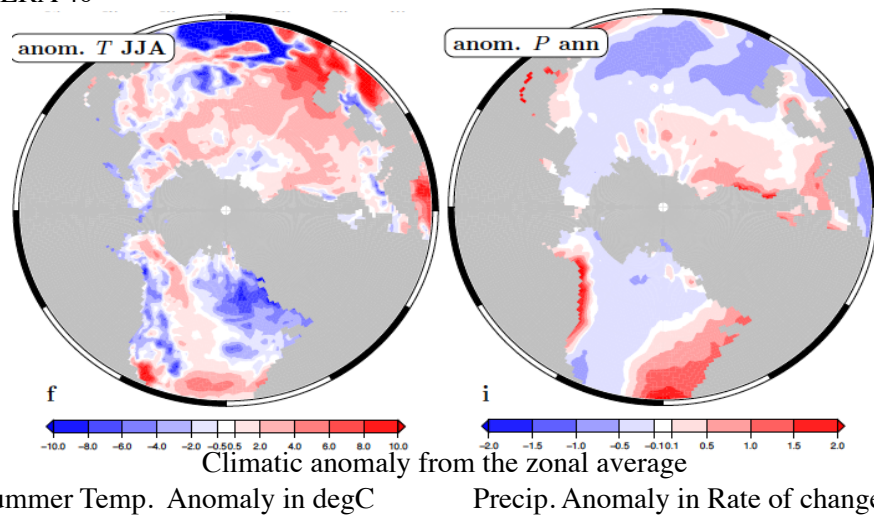
The shape of equilibrium response (multiple equilibria) depends on continents!

定常応答と実際の氷期サイクル応答 (氷床 vs 夏気温)

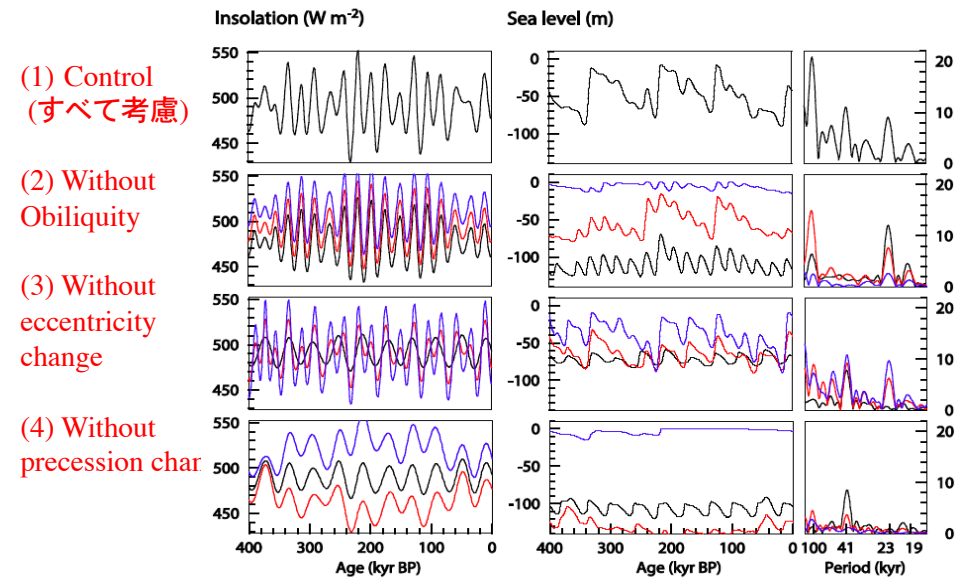


北米とユーラシアの違い (現在気候)

Climatic anomaly from the zonal average ERA 40



数値実験: 軌道要素の各役割

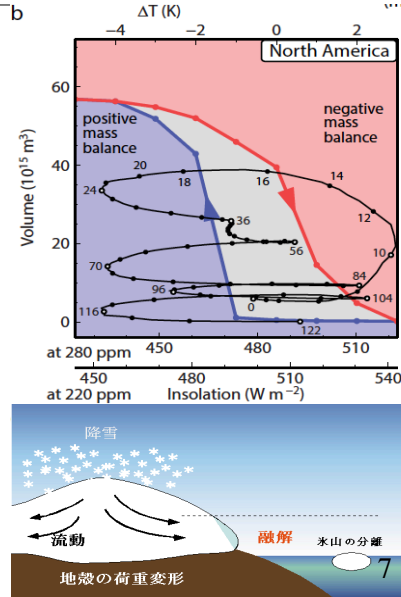


なぜ氷期は10万年周期なのか？

(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。

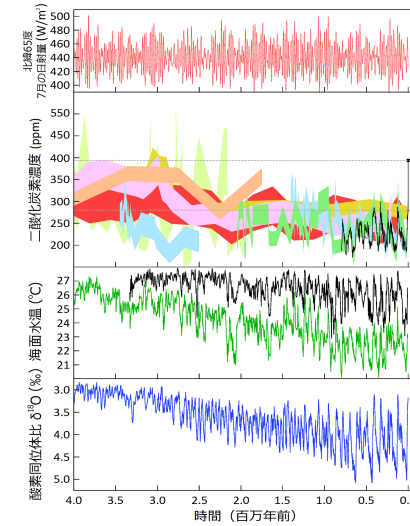
(2) 内的要因その1: **氷床**が10万年周期の内的要因として大きな役割を果たすことがわかった。**炭素循環は増幅効果**としては重要。
氷床の日射に対する応答のヒステリシス構造(右図)が重要—「氷床成長後しきい値に達して後退」開始条件を決めているのは、北米大陸の**氷床質量収支の気候応答プロセス**である。

(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。

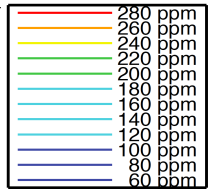


今後の課題

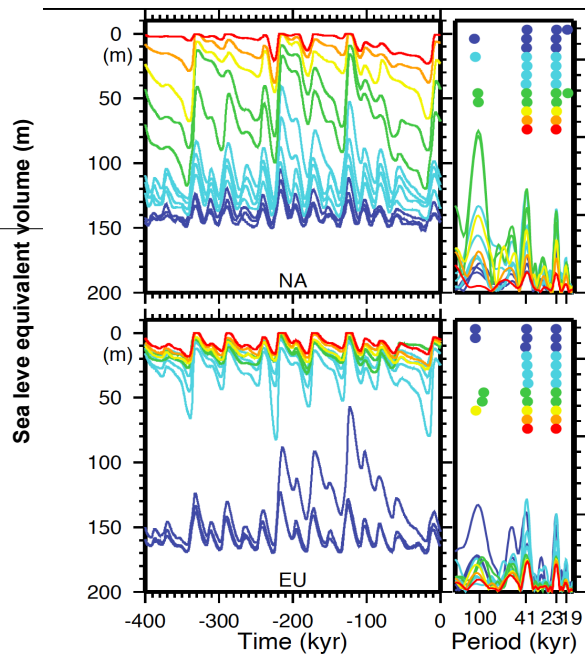
なぜ氷河期に、そして4万年周期から10万年周期に遷移したか?(第四紀遷移)



10万年周期はいつも出るのか?
(CO₂一定実験)
NA 北米 (上)
EU ユーラシア (下)

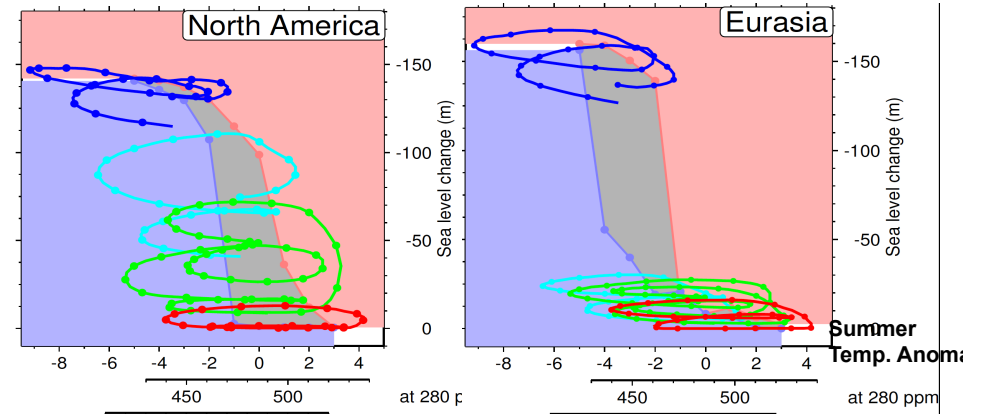


- With the decrease of CO₂ and ice sheet becomes larger, shift from 40-kyr to 100-kyr cycle and larger amplitude.
- Only in the North America case.

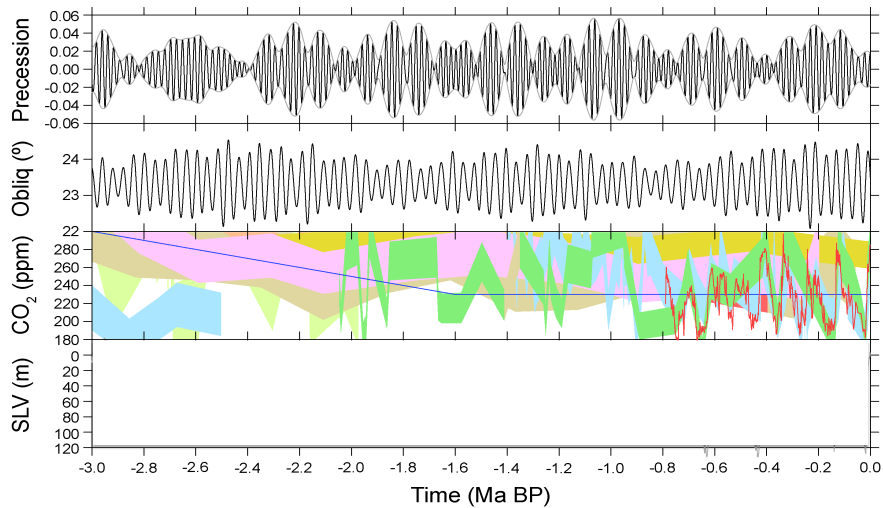


氷床の定常応答と非定常応答 (80, 180, 220, 280ppm)

- Type 1: 小氷床(振幅小) 4万年周期卓越(Pre-MPT NH)
- Type 2: 10万年周期卓越(Post-MPT NA)
- Type 3: Large ice sheet with 40 ka cycle (Antarctic)

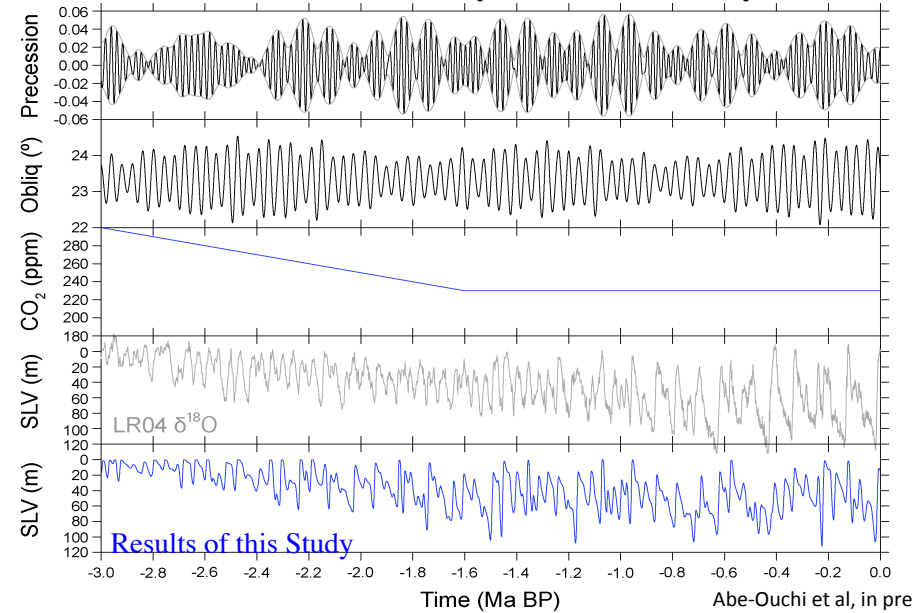


過去300万年間の軌道要素とCO₂の変化傾向



Astronomical Forcing: Berger and Loutre, 1991, CO₂ reconstruction: Pagani, 2010, Hoenisch 2009, Bartoli, 2011, Seki, 2010, Tripathi, 2009, Martinez-Boti et al, 2015, Luthi et al, 2008, Oxygen Isotope, sea level/ocean index: Lisiecki and Raymo, 2005

“予備的計算結果(最下段)40 kyr world” vs “100kyr world”?



Abe-Ouchi et al, in prep.

氷床の分布: モデルvs. 観測(地形、 地球物理)

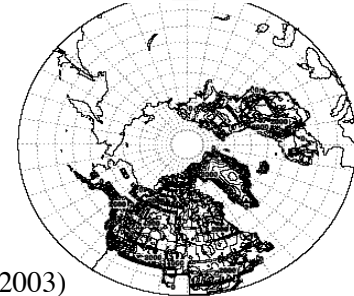
Model
(This Study)



ICE4G (Peltier, 1994)



ICE5G (Peltier, 2003)



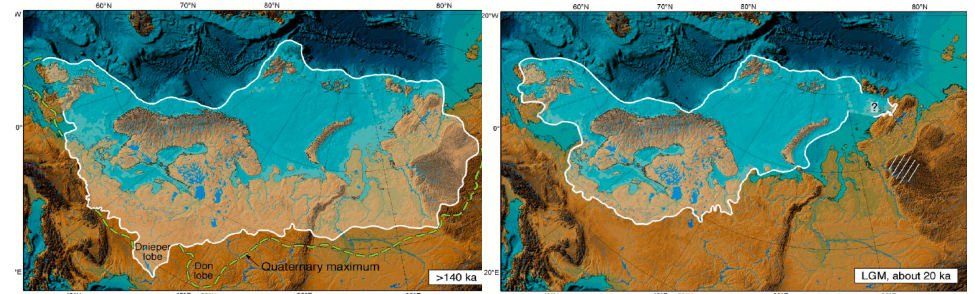
ユーラシアの氷床の氷期による違い

Penultimate vs Last ice age

Terrestrial evidence (Svendsen et al 2004 QSR)

140ka

20ka



Qなぜ、ユーラシア氷床、LGMよりPGMで大きかったのか?

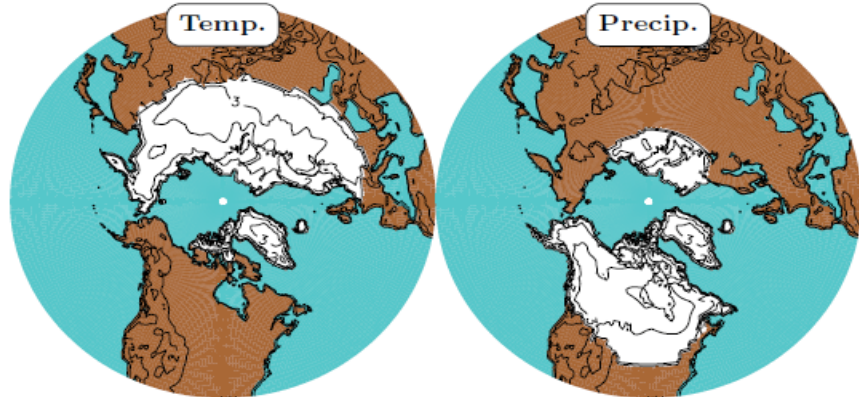
->シベリアの氷床湖のせい、中央アジアのダストによる融解

-Because of high eccentricity and aphelion during early summer

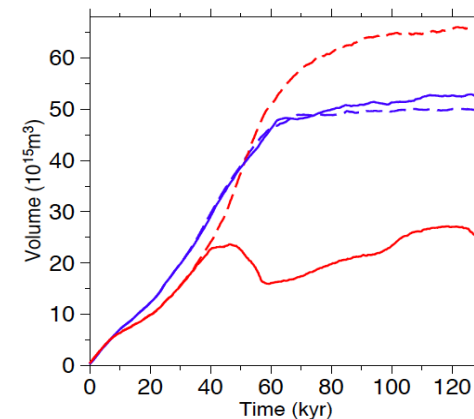
(Krinner et al, 2004Nature, 2006CD, 2011QSR)

氷期氷床の分布形成の数値実験: 気温と降水量のどちらが効くか?

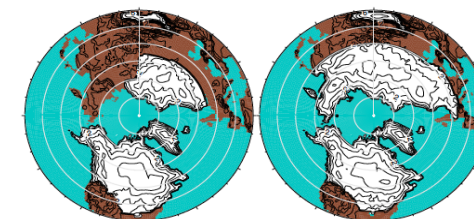
1.0 deg, zonally uniform obs. reference
 気温を東西一様にした場合 降水量を東西一様にした場合



寒冷な気候に対する
 氷床の応答 (-3K)
 (1) 時間発展の体積
 (2) 平衡状態の氷床分布

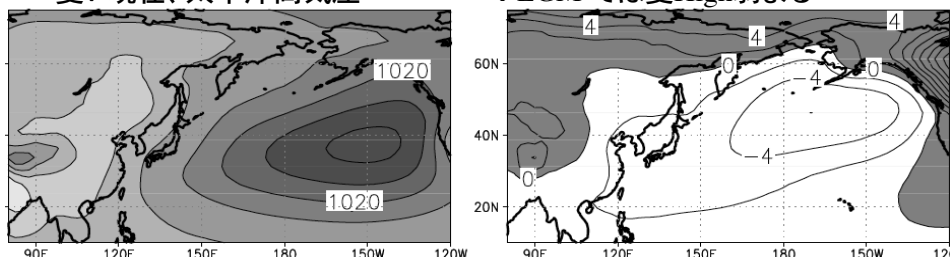


北米 青
 ユーラシア 赤

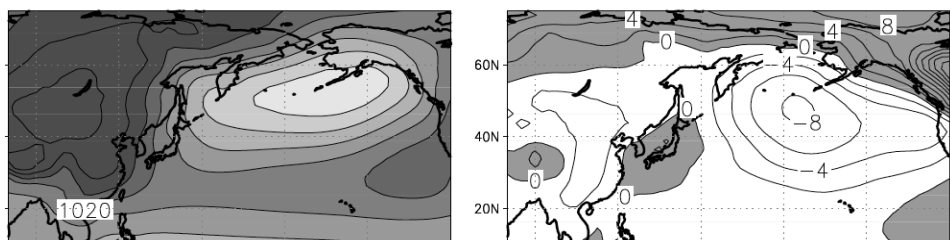


おまけ:LGMと現在の違い (地上気圧) 東アジア/北太平洋
 モデル 現在vs 差(Yanase and Abe-Ouchi, 2007, CP)

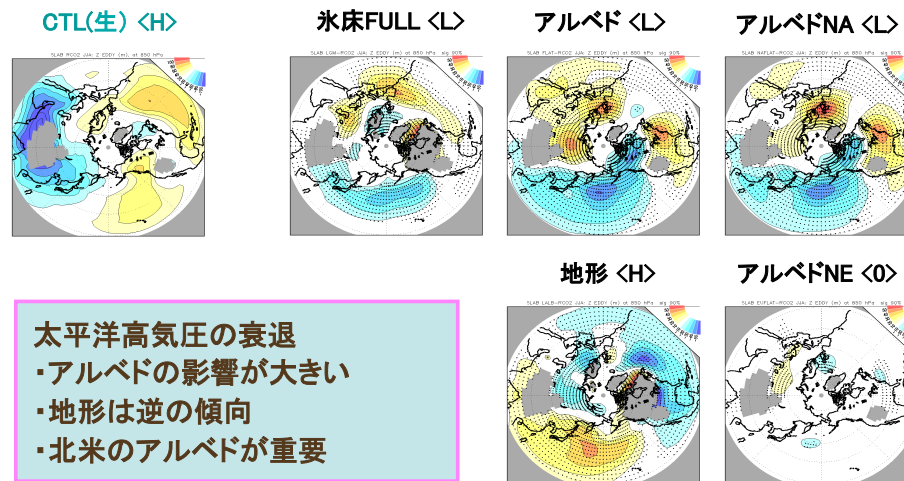
夏: 現在、太平洋高気圧----->LGMでは夏High弱まる



冬: 現在、アリューシャン低気圧----->LGMでは冬Low強まる



高度偏差 (850hPa)の差(夏)



太平洋高気圧の衰退
 ・アルベドの影響が大きい
 ・地形は逆の傾向
 ・北米のアルベドが重要

<H>: 太平洋に高気圧傾向, <L>: 太平洋に低気圧傾向, <0>: 太平洋の傾向は不明瞭
 Yanase and Abe-Ouchi, 2009, Journal of Climate

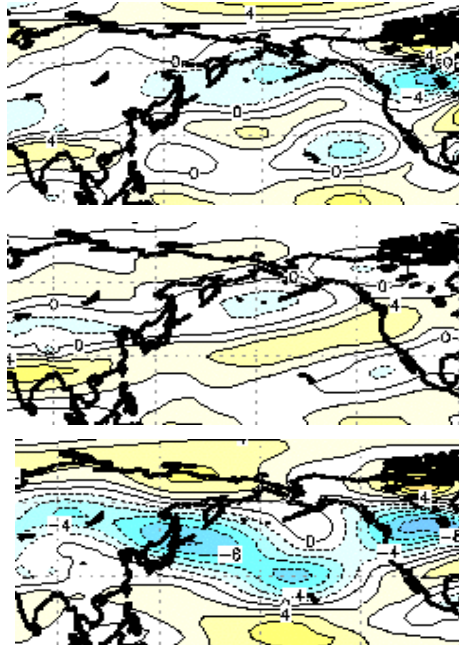
氷床の風の影響

500hPa wind

アルベド効果



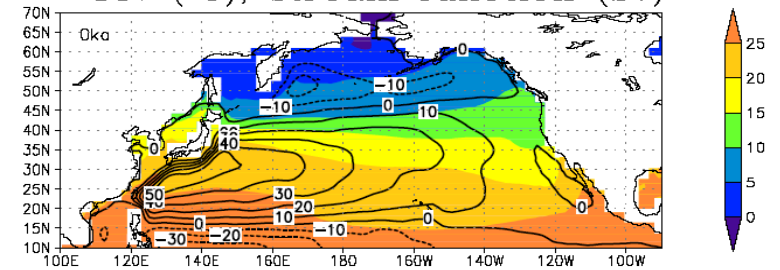
地形効果



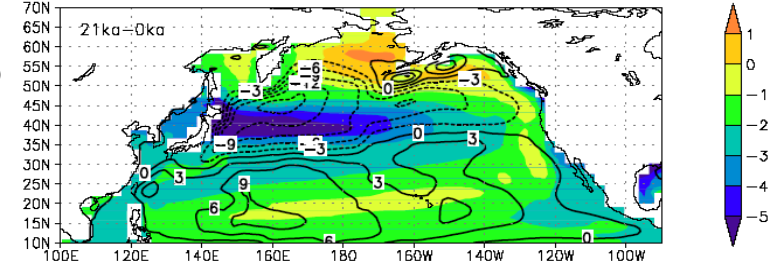
LGMの風->黒潮の流路と海面水温

SST (°C), stream function (Sv)

現在

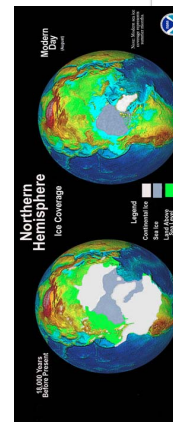


氷期と現在の差



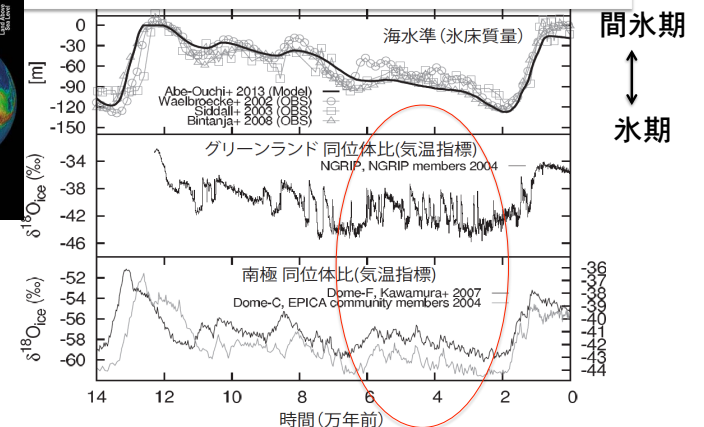
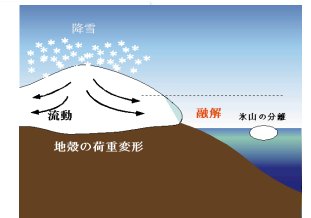
まとめと課題

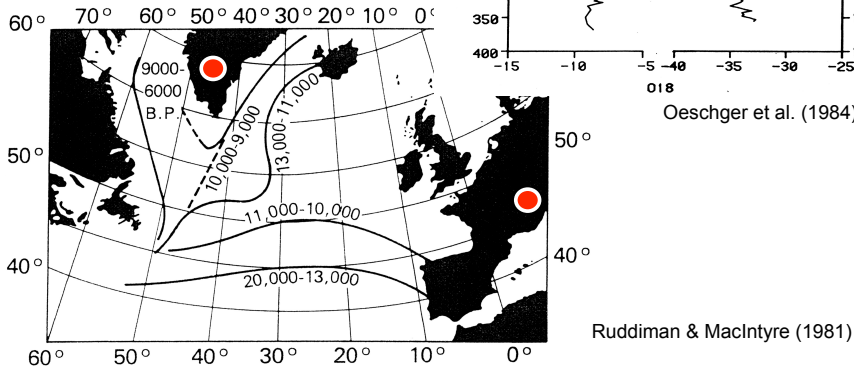
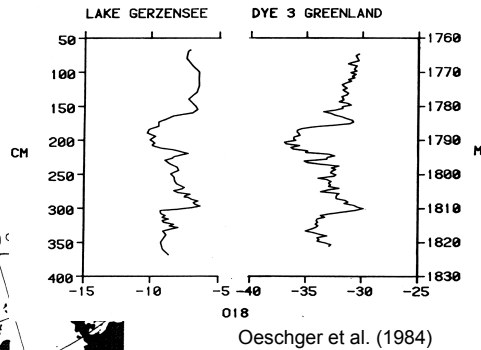
- (1) 複雑なモデルで氷期サイクルの氷床と気候を再現。長期気候と氷床の数値実験の基礎ができた。
- (2) 地球軌道要素による日射の変化は、観測された氷床変動の振幅を引き起こすのに十分である。これには、無理な未知のプロセスを導入する必要はない。これまで知られている大気/氷床/地殻・マントルで十分であるが、その非線形結合が重要である。氷期サイクルが10万年周期になるのは限られた条件があるらしいことがわかってきた。
- (3) さらに、大気-氷床-海洋循環、植生、炭素循環システムを研究する必要あり。4万年周期になるか、10万年周期になるか、その条件は、軌道要素の時期による微妙な違いや長期的CO2変化によるのではないか。今後の課題として、地球システムモデルとデータの研究のコラボで解き明かされるべき。



氷期中の急激な気候変化:

DO event 20回以上: グリーンランド定義
H event 5回以上: 北大西洋の氷山

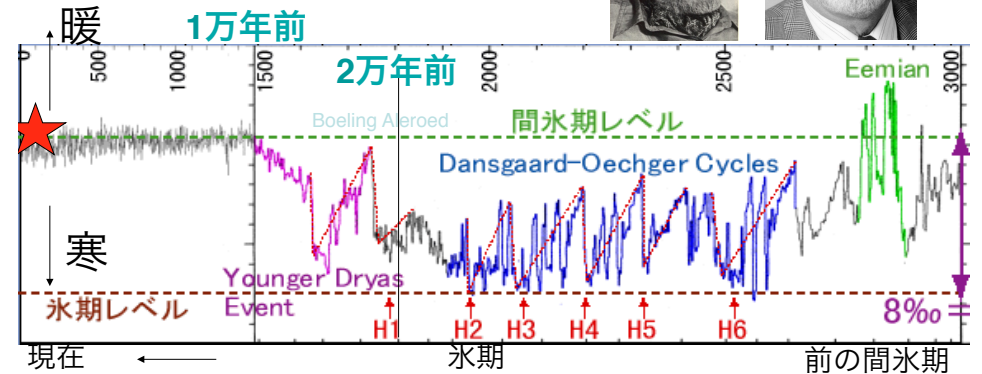
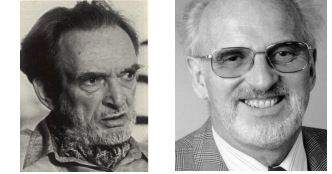




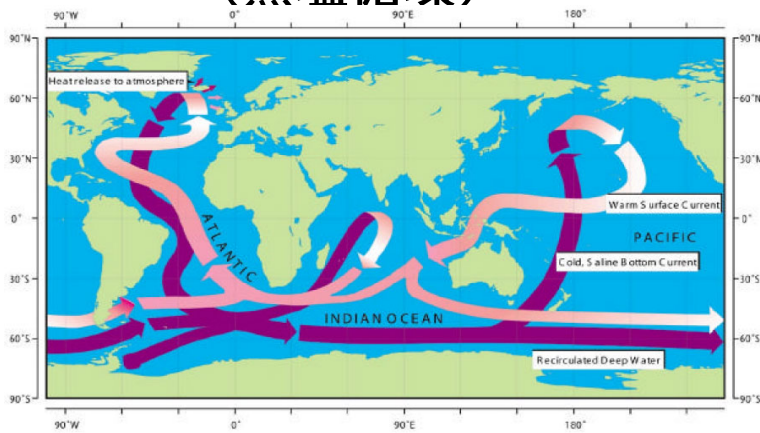
Greenland 氷床コアによる氷期／間氷期の気候復元

グリーンランド欧米プロジェクト
GRIP, GISP, 1993で確定

Dansgaard氏とOeschger氏



深層を含む海洋大循環 (熱塩循環)



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。

Yonger Dryas

ヤングドライアス事件: 約1万2千年前

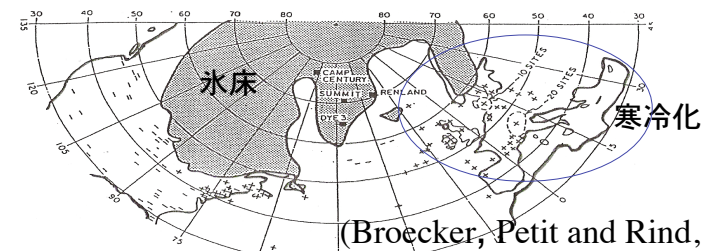
温暖化--->氷床が融ける

--->融け水が淡水として北大西洋に流入

--->深層水沈む込みの循環が弱くなる

--->メキシコ暖流の弱化

--->北大西洋周辺で寒冷化

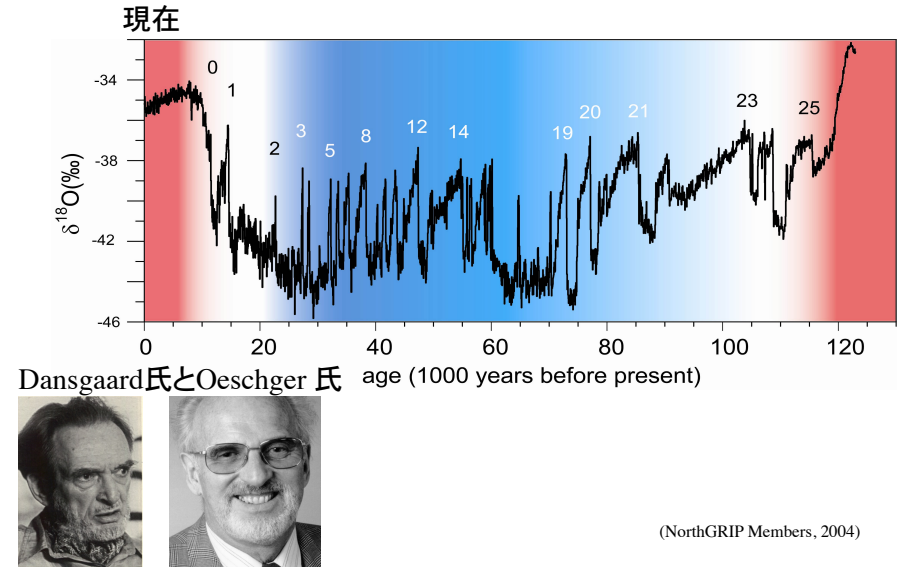


(Broecker, Petit and Rind, 1985, Nature)

温暖化すると氷河期に？



ダンスガード/オシュガー イベント 25 Dansgaard-Oeschger events in Greenland



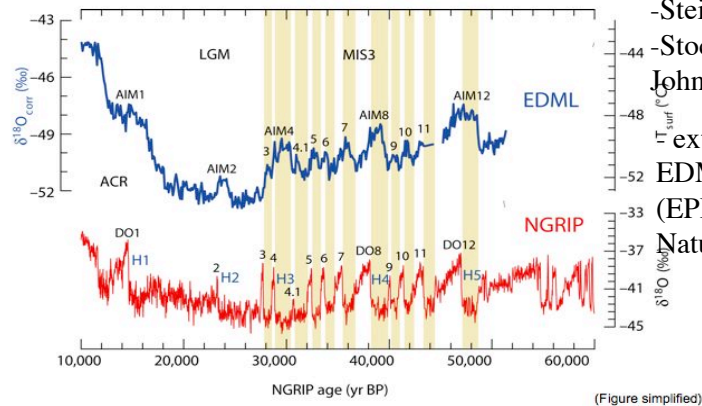
バイポーラーシーソー仮説

Greenland-Antarctica ice core ---> “Bipolar See-saw”

One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica

EPICA Community Members*

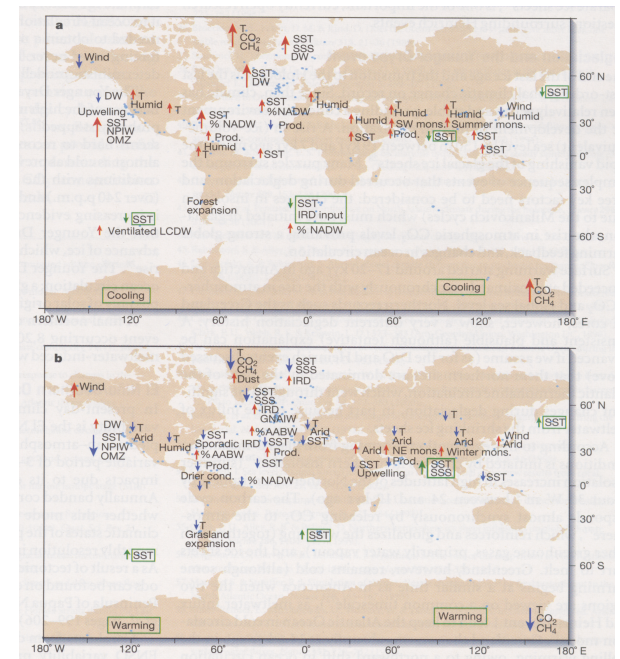
- Blunier et al 1998,
- Steig et al 1998
- Stocker and Johnson, 2003
- extended in EDML-core (EPICA, 2006 Nature, Nov.9)

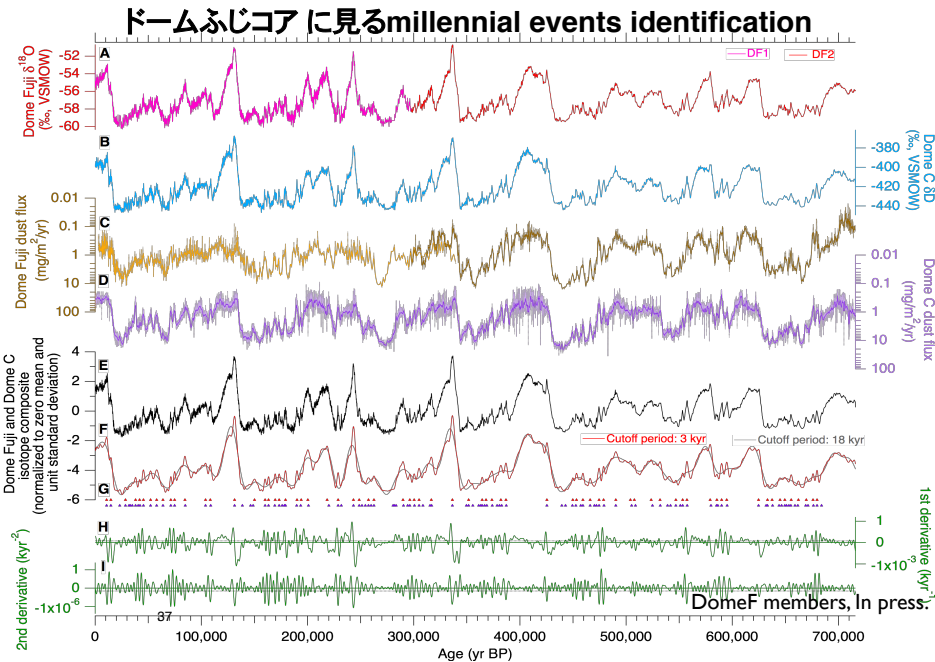


熱塩循環の役割を示唆

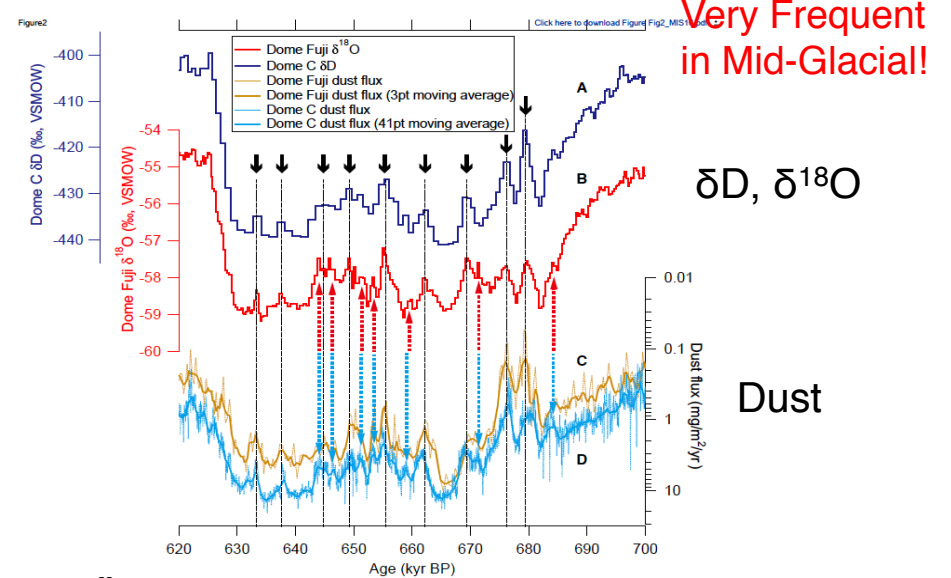
D/O eventの空間分布
cold phase vs warm phase

→南北逆位相
Bipolar シーソー





Millennial-scale events (MIS 16): DomeF, DomeC



Very Frequent
in Mid-Glacial!

$\delta D, \delta^{18}O$

Dust

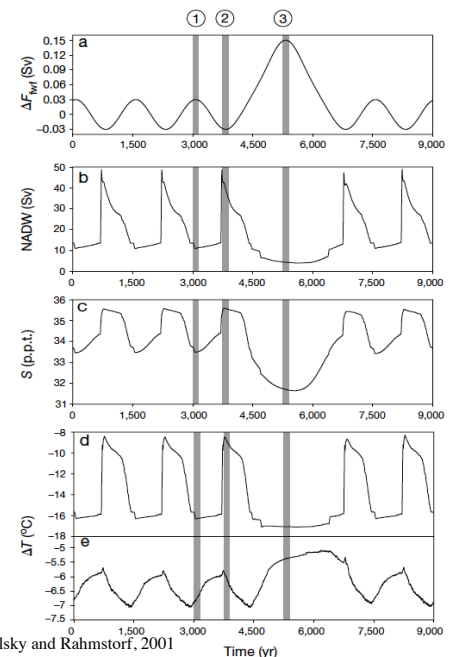
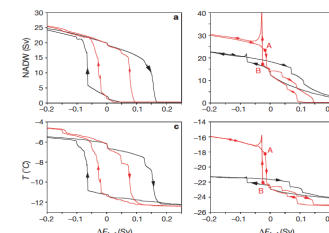
Kawamura et al, DomeF members, 2017, Science Advances

これまでの仮説やモデルへの批判

- 淡水流入に対して北大西洋は冷えるが地域的な変化が必ずしもでていない。南極周辺のBipolar warmingがでてない。
 - 淡水流入量が何度もあるのは説明できない(non-Deglaciationやnon-Heinrich eventはどうする?)
 - 急激な気候変化の「急激さ」が数百年くらいでなく、100年以内なのを説明できるか?
 - 北大西洋中心の視点でよいのか?アジアのダストが先などの観測を説明できるのか?
- >高精度な気候モデルでたくさんの実験実行

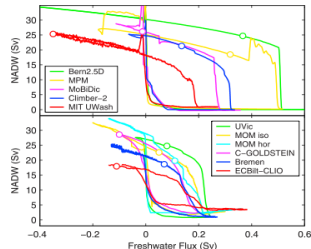
DO のメカニズム?

- (1) 強制的振動
 - 弱い周期的外力に対する大変化 (Ganopolsky and Rahmstorf, 2001)
 - ユーラシア氷床の淡水供給の応答 (Menviel et al, 2014)
- (2) 自励的振動
 - 塩分振動子 (Broecker, 1985)
 - 氷床の高度の周期的変動 (Zhang et al, 2014)
 - 大気海洋の自然変動 (Peltier and Vettoretti, 2014)

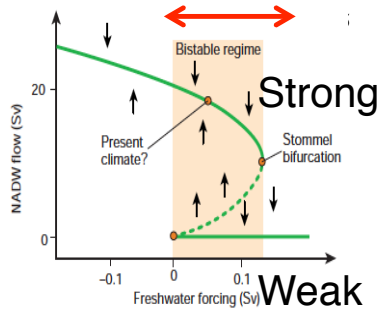


Ganopolsky and Rahmstorf, 2001

Studies on AMOC stability (Hysteresis or Oscillation?)



Rahmstorf, et al, 2005 GRL



1 淡水に対する海洋循環と気候の応答 (これまで多数実験) AMOCの安定性を調べる、DOは外部条件の淡水が上下するため。

Ganopolski and Rtahmstorf, 2001

2. 条件が変わったら振動する(CO2や氷床, Zhang et al, 2014, 2017, Banderas, 2015, DomeF 論文)

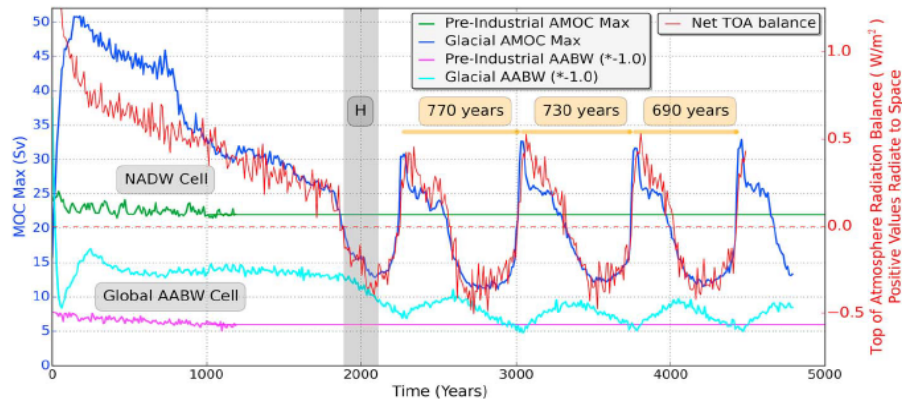
3. 自励振動という結果もあるがそれと外部条件との関係はよくわかっていない Peltier, Vettoretti, 2014, 2015, 2017, Brown and Galbraith, 2016

4. Deglaciation のB/AやYDと DO の関係がまだ統一的に説明されていない。

(Liu et al, 2009, Science, NCAR)

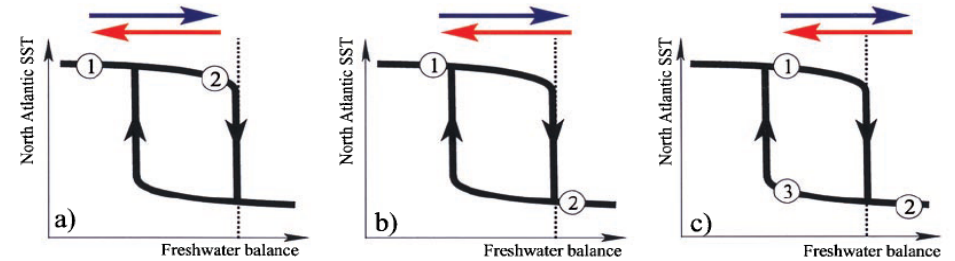
大気海洋内部の自励振動? AOGCM を用いた研究

Peltier and Vettoretti, 2014, GRL



Background climate condition and AMOC stability?

Stocker et al, 2001



2つのモードを行ったり来たり?

This study

実験

外的条件や背景気候の違いに対する大気-深層海洋の応答を調べる。

CO2 の違い、Fresh water flux の違いによる応答を見る。

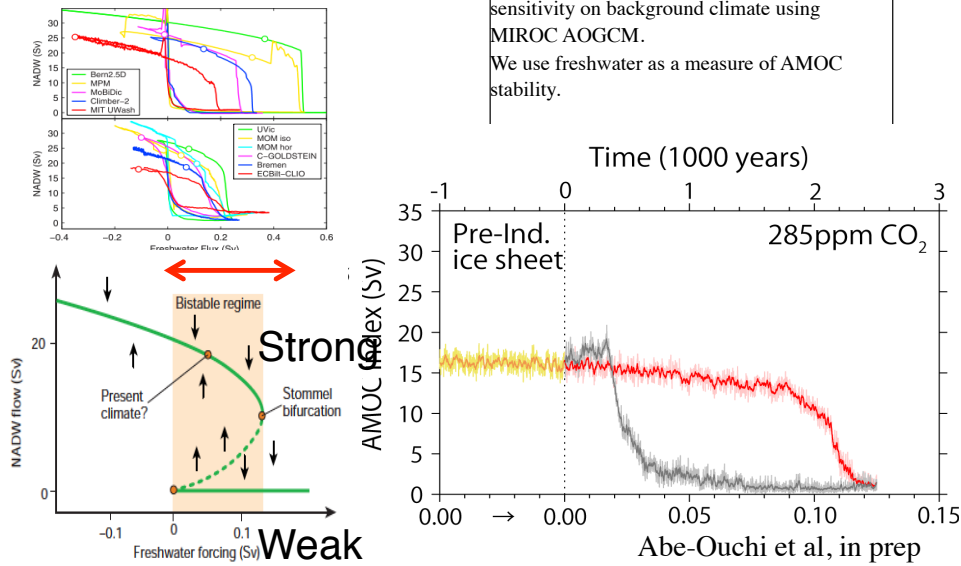
実験(1) ゆっくり Fresh water を変化
→ (伝統的な)ヒステリシス構造を見る実験 (AOGCMでは初、条件違いでは初!)

実験(2) Fresh water を一定にして、平衡状態をみる。

Experiments on AMOC stability (Hysteresis diagram)

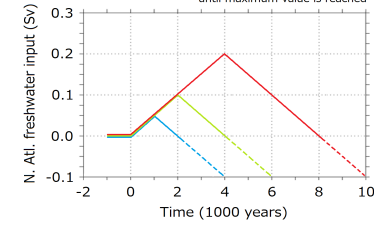
Freshwater from ice sheet

We investigate dependency of AMOC sensitivity on background climate using MIROC AOGCM. We use freshwater as a measure of AMOC stability.

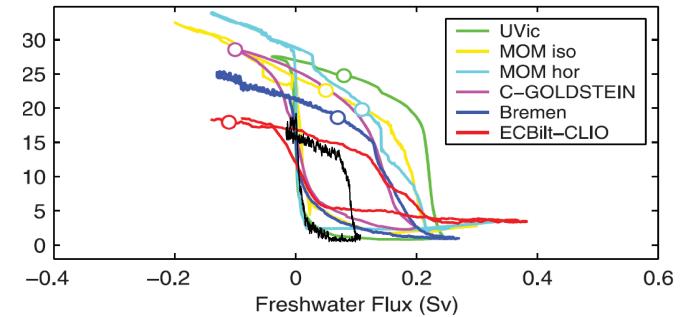


AMOC stability diagram

Freshwater increase of 0.0025Sv every 50 years until maximum value is reached

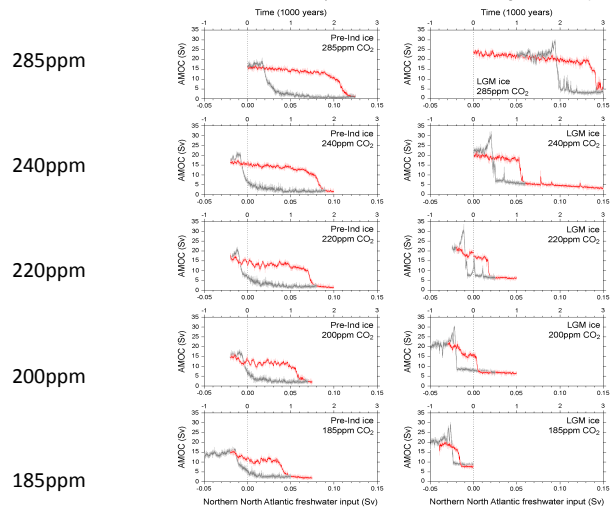


MIROC4m (black curve) superimposed on figure from Rahmstorf et al (2005)

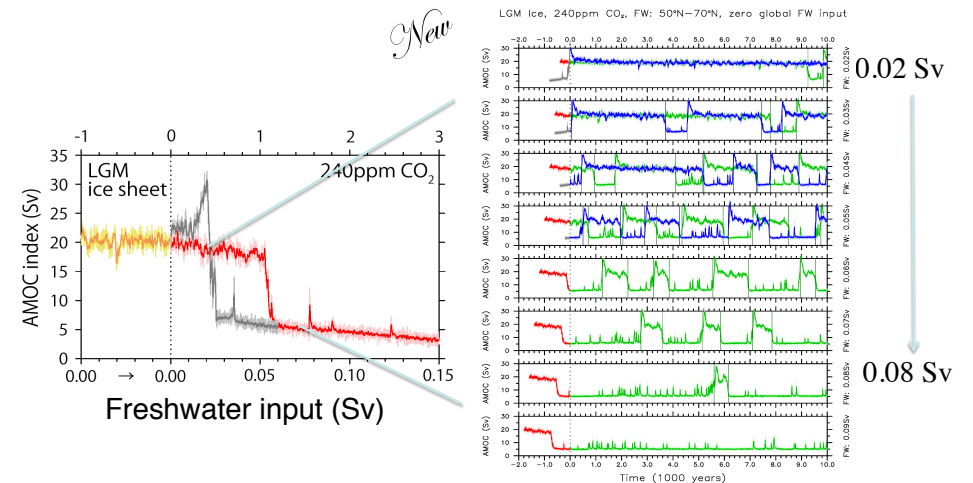


AMOC and climatic stability under different CO2 (without and with Ice sheet)

FW rate +0.0025Sv/50yr in 50°-70°N Atlantic, zero global FW input



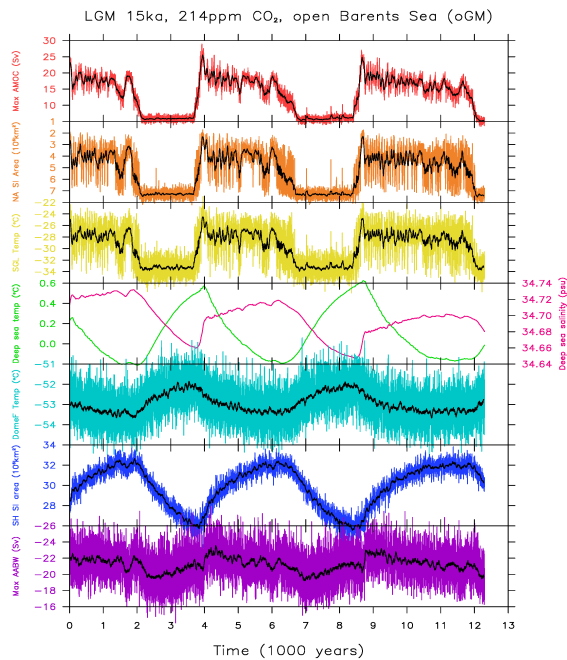
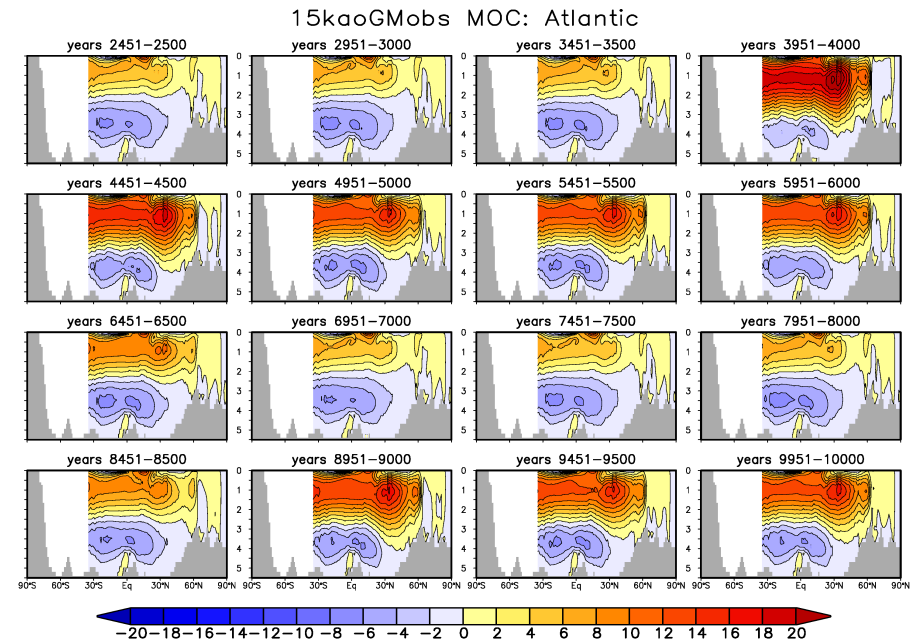
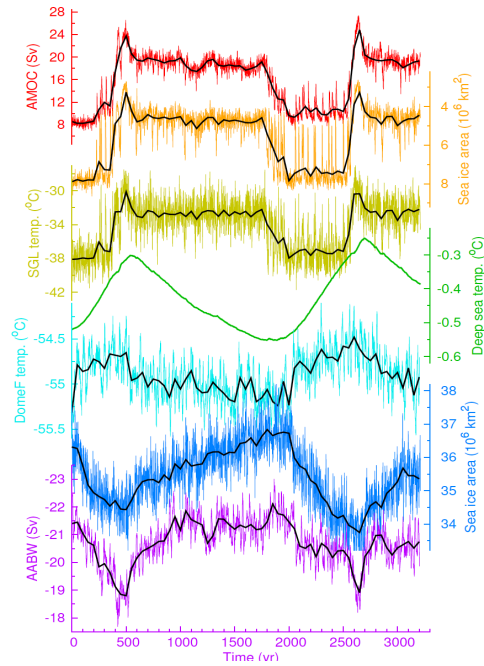
AMOC response to freshwater input under glacial ice sheets (Steady forcing)



DO oscillations in MIROC AOGCM: Without freshwater!! CO2 = 200 ppm (200 ~220ppm)

- (1) 南大洋プロセス: AMOC弱化
→南大洋 warm → Brine rejection弱化→ 深層 warm→Stability weak → AMOC 回復
- (2) 北大西洋プロセス: AMOC弱化
→北大西洋で海水が冬に拡大→ → 亜表層warmに、氷床風下の風強く→Stability weak → AMOC 回復

(3) Sterrif Tadano 2017 風

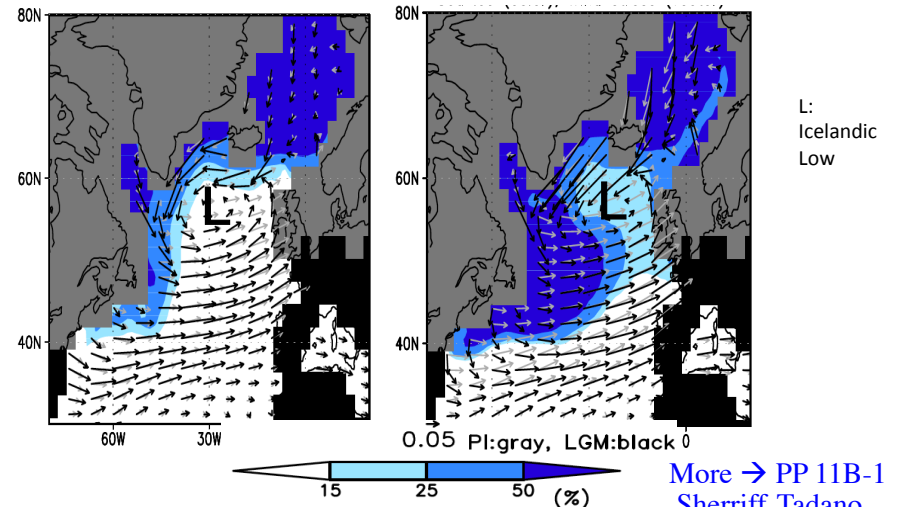


Why stronger AMOC for almost all PMIPs?

Multi-model mean: Wind stress and sea-ice

(Wind arrows: Pre-Industrial in silver, LGM in black)

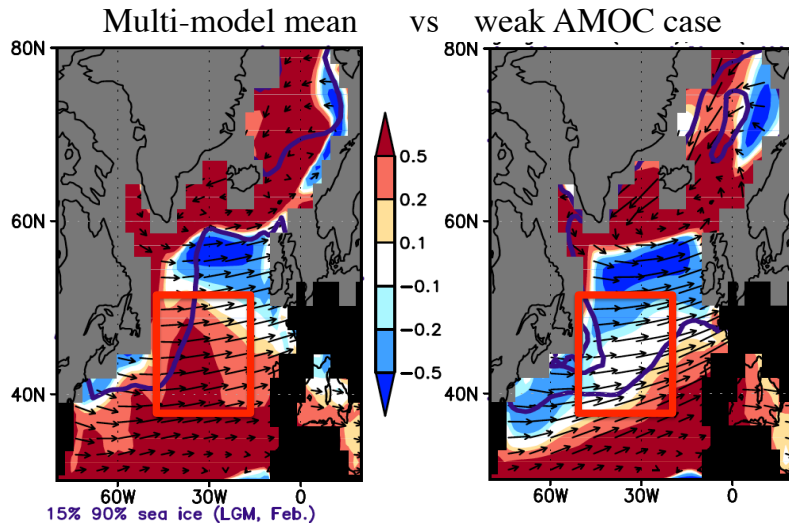
Multi-model mean vs weak AMOC case



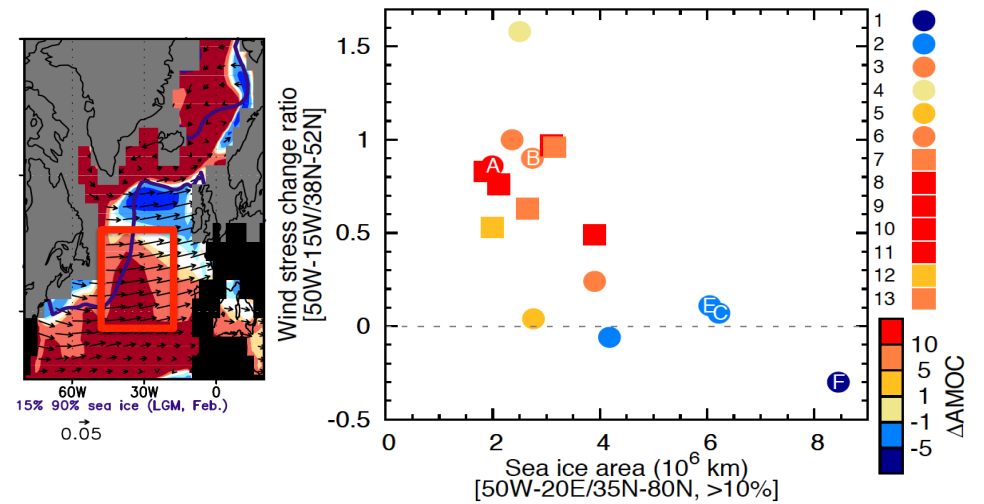
More → PP 11B-1
Sherrif Tadano

Why stronger AMOC for almost all PMIPs?

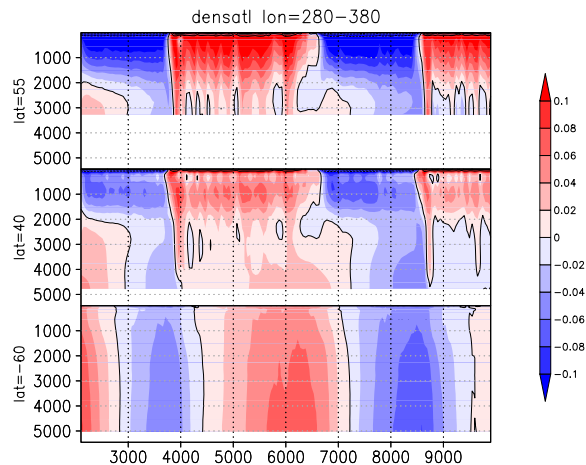
Large Ice sheets strengthens the wind stress, which advects salty water.
But Sea ice cover weakens the wind stress!



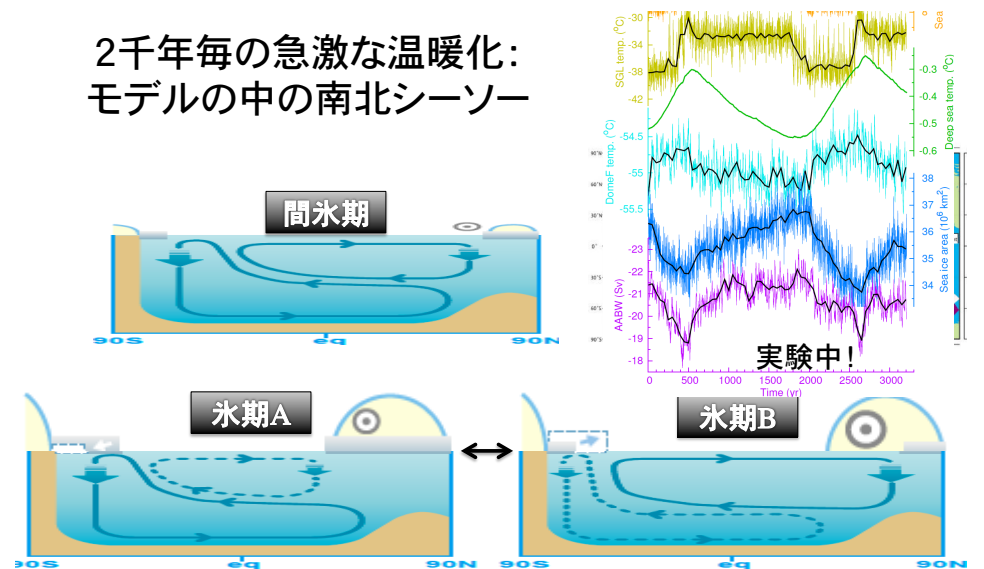
Why stronger AMOC for almost all PMIPs? Feedback among wind, seaice and AMOC!



振動を引き起こす鍵は、海洋の南北間／鉛直方向の密度(温度、塩分)変化にある

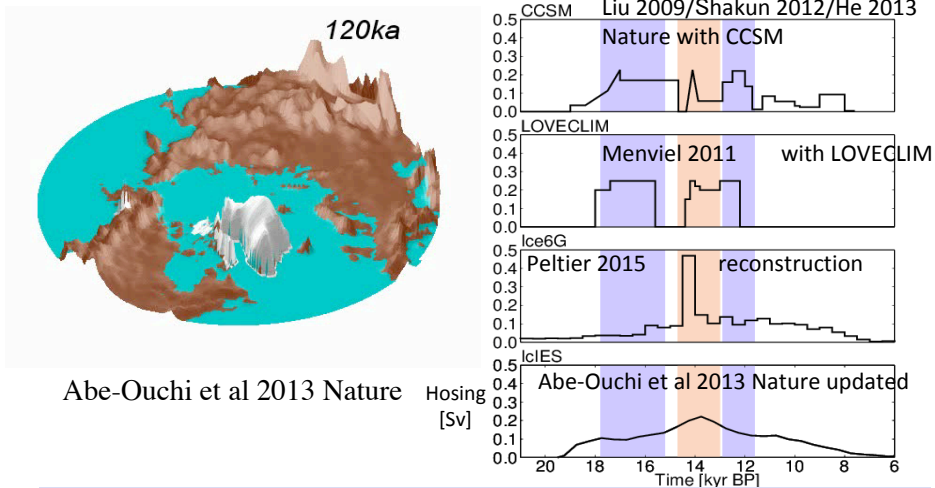


2千年毎の急激な温暖化:
モデルの中の南北シーソー



氷床、大気中二酸化炭素の影響の大小が大事
海洋循環の振動と氷床変動が両方関係一今後の課題

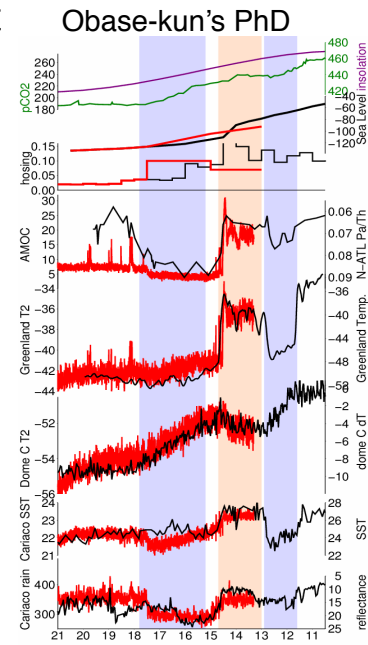
氷期から間氷期の急激な気候変化にも関係?



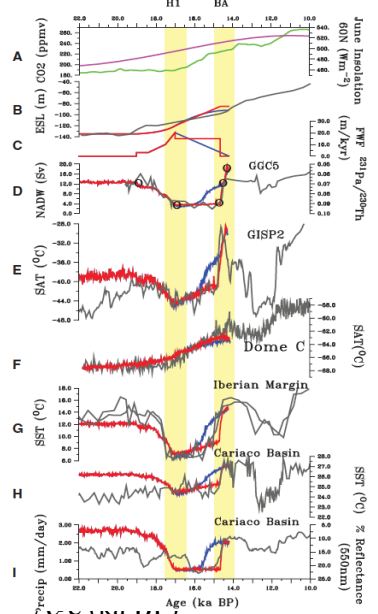
Question: Did the Northern Hemisphere ice sheet stop melting before the onset of Boeling/Alleroid abrupt climate change?

氷期から現在のシミュレーション(赤) vs. proxy records

McManus 2004
Buizert 2015
Jouzel 2007

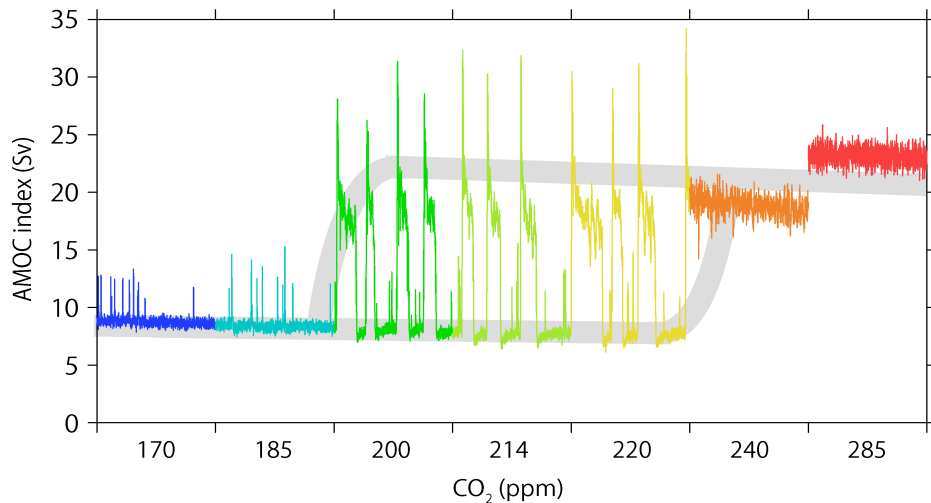


Liu et al, 2009, Science



自励振動(DO振動)の起こる条件~ CO₂ levelと関係!

-> no multiple equilibria, but oscillatory state
Glacial ice sheet, 170-285ppm CO₂, 10,000 year data for each experiment



出版準備中

おわりに

- 非常に小さい外的要因の変化に対して地球気候が敏感に変化するしくみが見えて来た。
- 気候の変化には様々な時間スケールの外的要因と内的要因の考察が重要
- 過去の地球史の解釈には地球システムの内因を考慮した気候モデル実験と気候システムの自然科学的理解が必要。