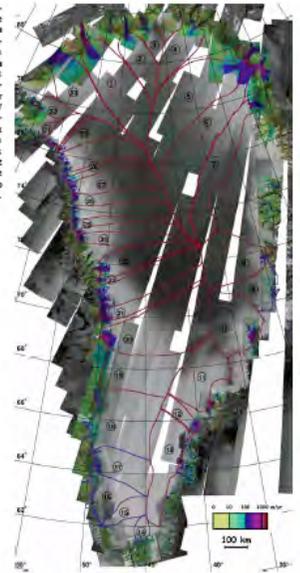


極域の氷床変化に伴う海面上昇 ～将来見通とその不確実性

阿部彩子

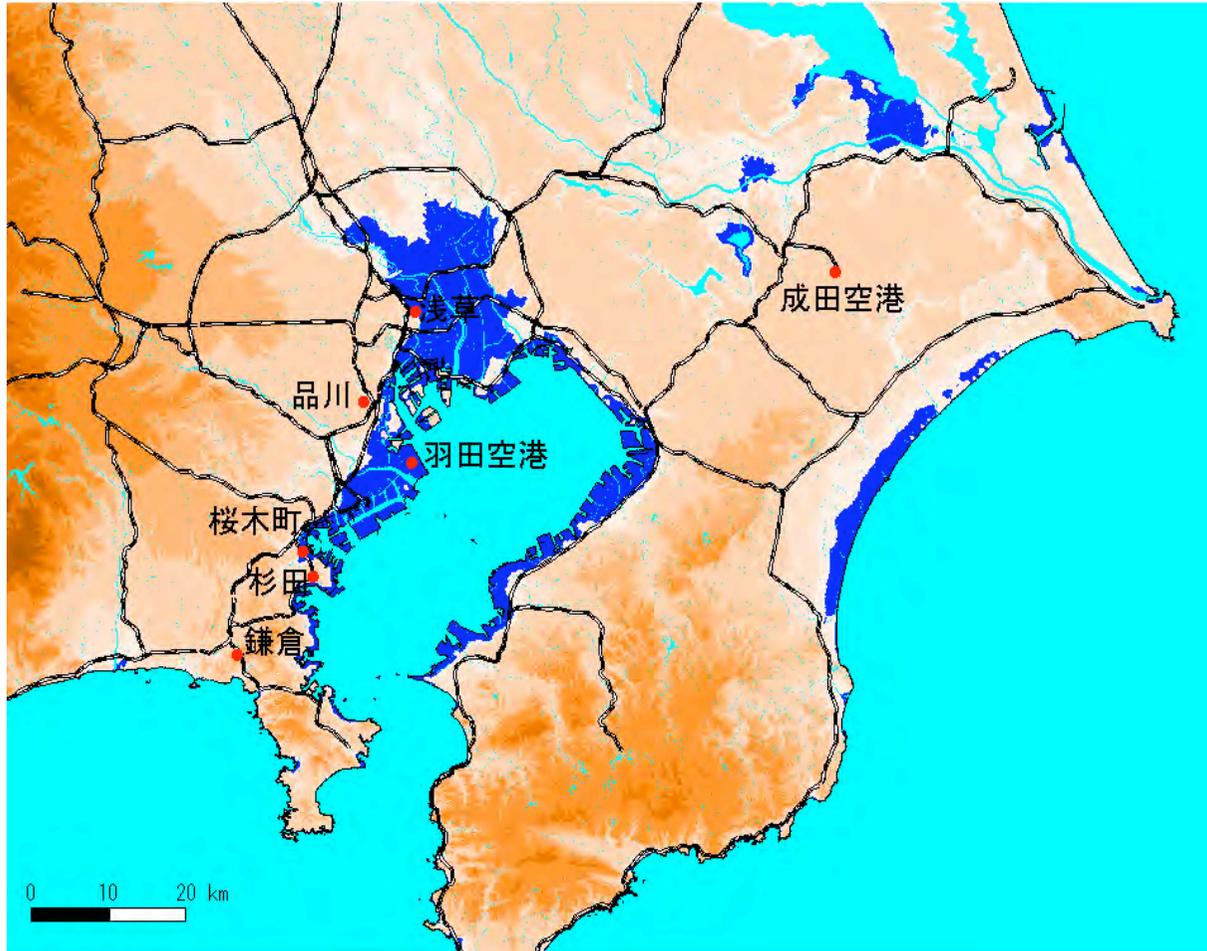
東京大学大気海洋研究所
海洋研究開発機構

Fig. 1. Ice-velocity mosaic of the Greenland Ice Sheet assembled from year 2000 Radarsat-1 radar data, color coded on a logarithmic scale from 1 m/year (brown) to 3 km/year (purple), overlaid on a map of radar brightness from ERS-IV Radarsat-1. Drainage boundaries with no flow estimates but discussed in the text are in blue. Numbers refer to drainage basins in Table 1.



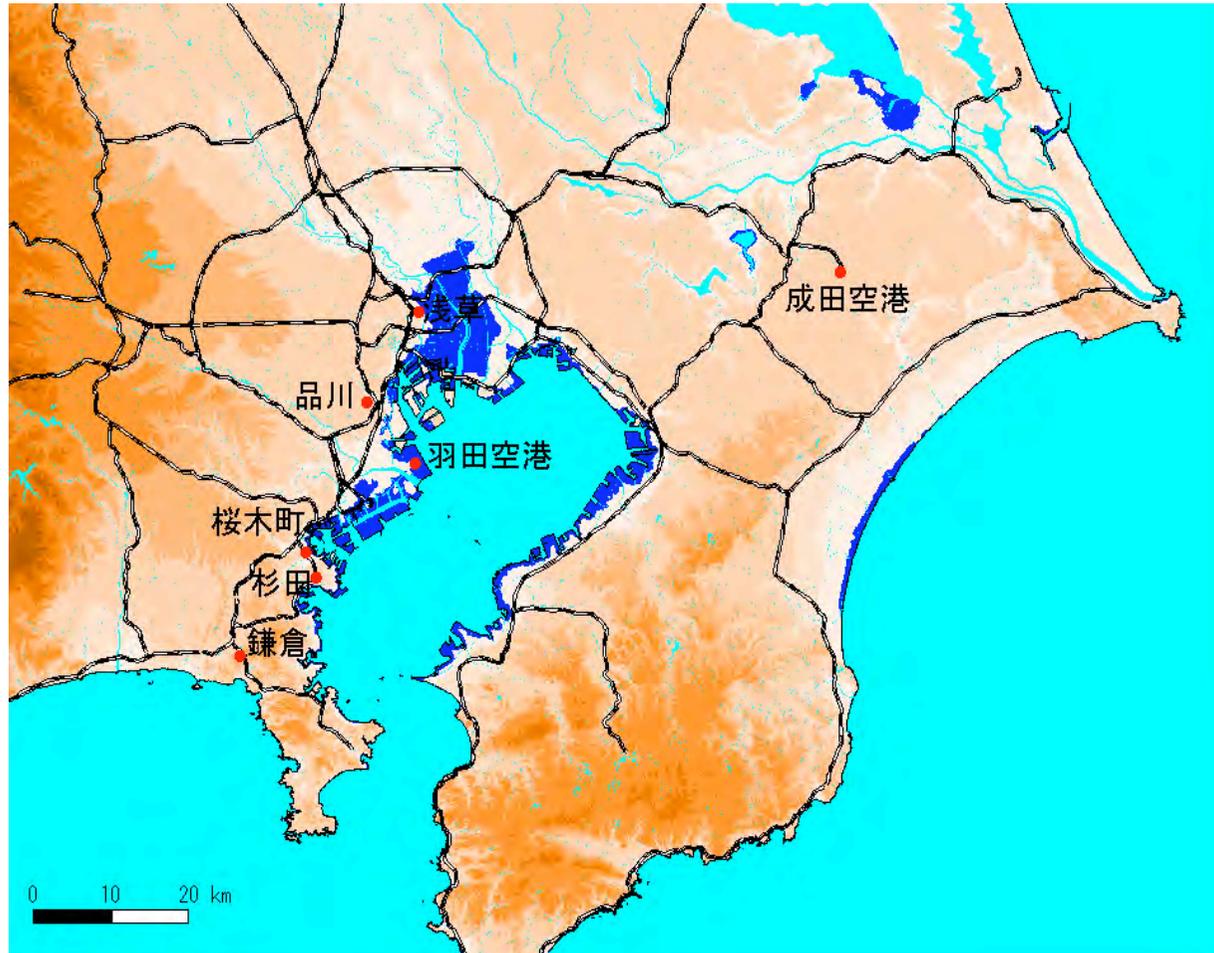
協力: 齋藤冬樹

Sea level influence of 3 m 海水位 3 m 上昇の浸水域



北海道地図株式会社のGISMAPを使用

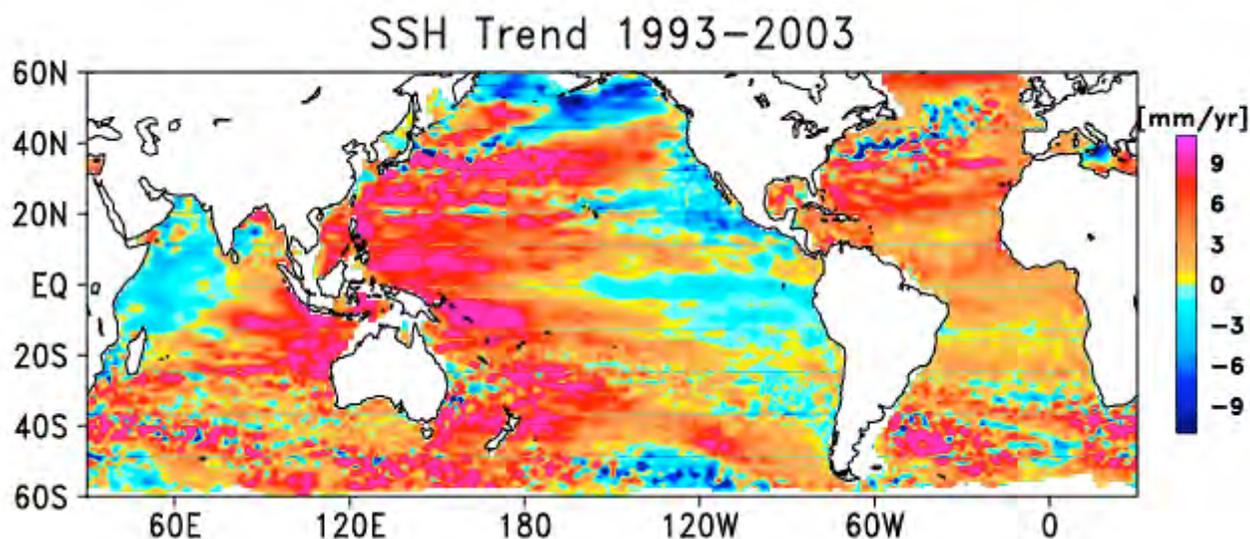
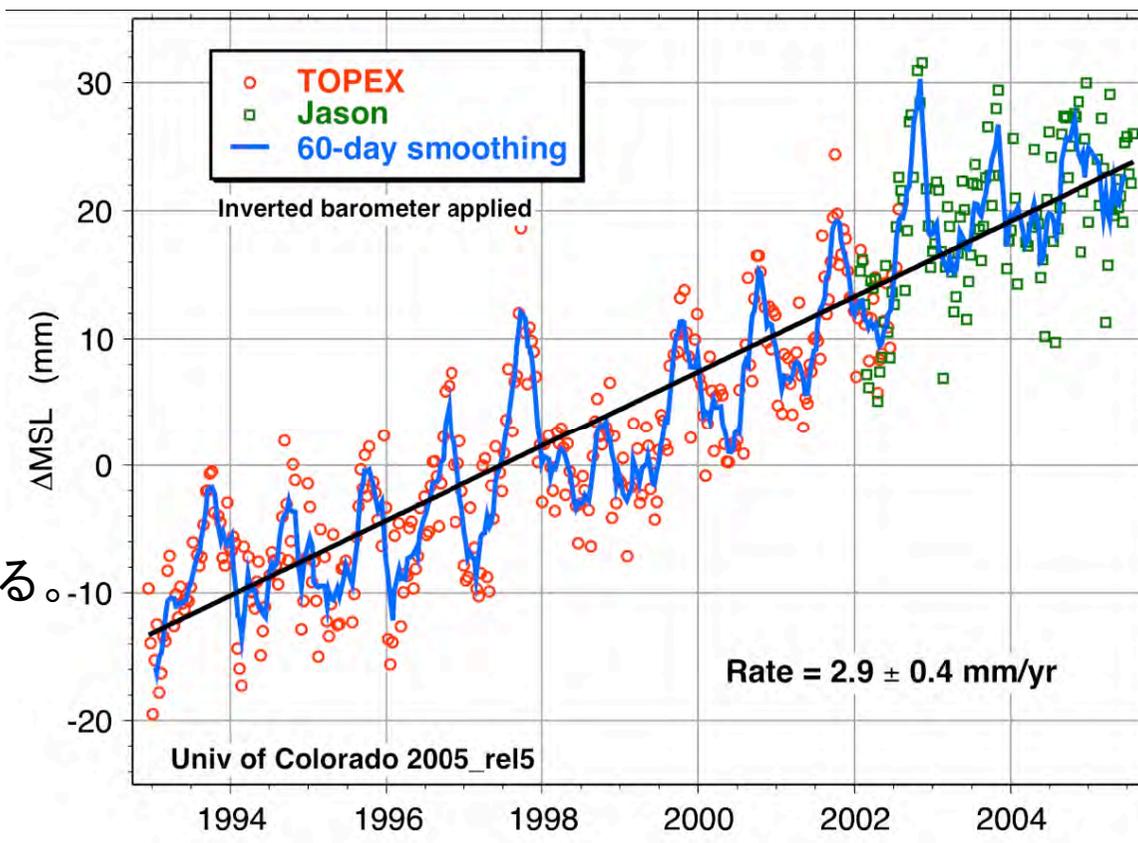
Sea level influence of 1m 海水位 1 m 上昇の浸水域



北海道地図株式会社のGISMAPを使用

衛星データによる 海水位観測

平均した海面上昇が観測されている。
~ 3 mm / 1 年



海水位変化の原因

1. Thermal Expansion of ocean water(海水の熱膨張)
2. Mass change of Antarctica and Greenland ice sheet
(南極やグリーンランド氷床の質量変化)
3. Mass change of Mountain Glaciers
(山岳氷河の質量変化)
4. Long term change due to tectonics and post-glacial rebound
(固体地球の変形による長期変化、テクトニクス変動や後氷期による地球変形)

海水位変化の内訳

(IPCC第四次報告書)

海洋熱膨張

山岳氷河

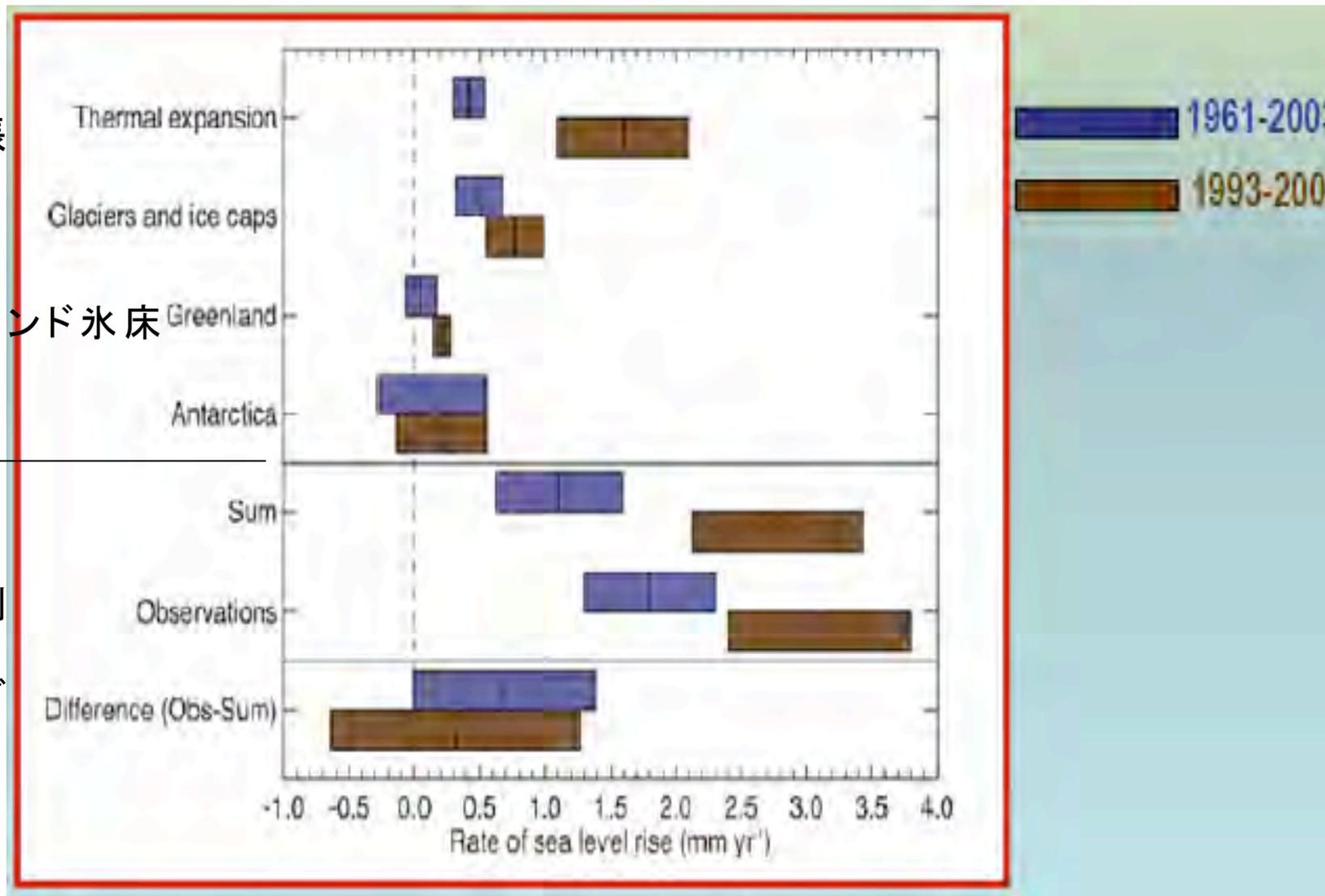
グリーンランド氷床

南極氷床

合計

海水位観測

ミッシング



雪氷圏

数字は平均厚さ

海水 (2 m)

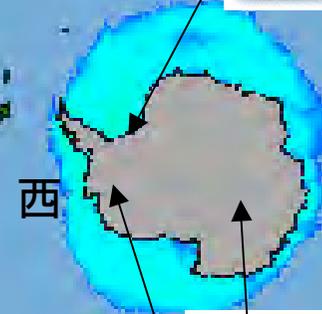
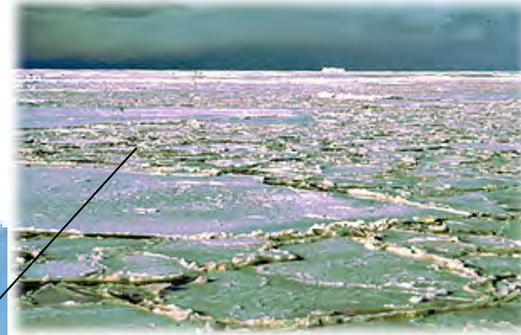
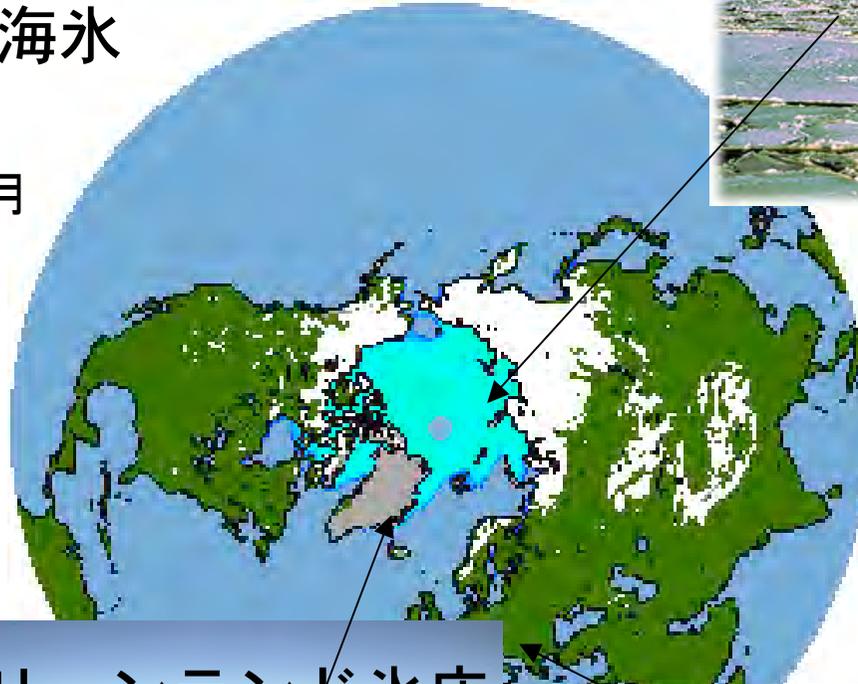
南極氷床 (棚氷部)

800 m

○積雪-->氷河・氷床

○海水

11月

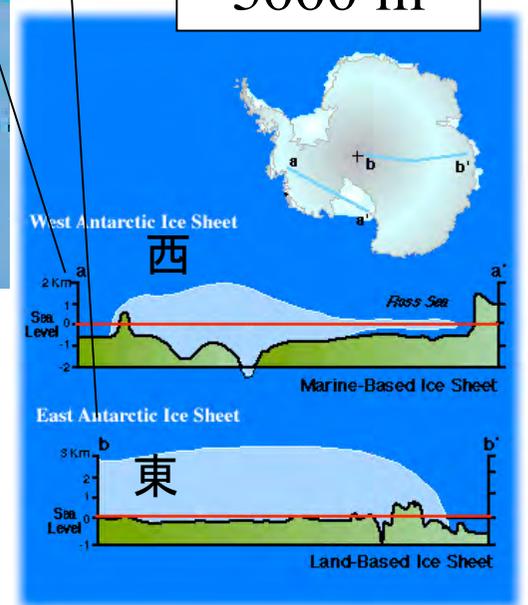
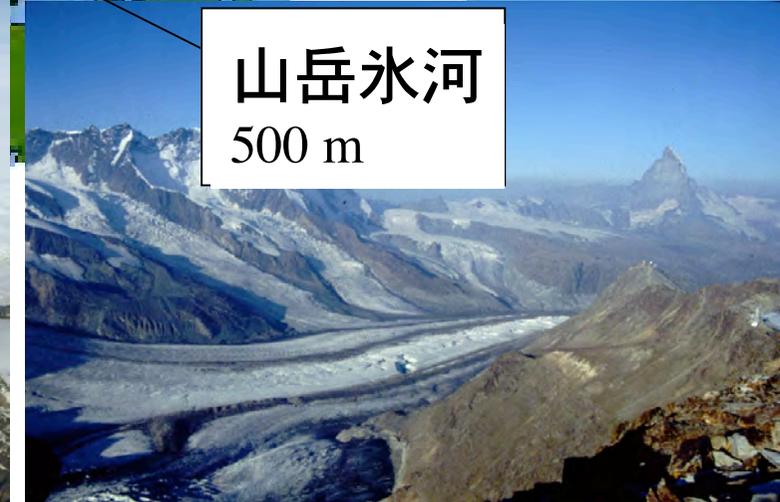


東

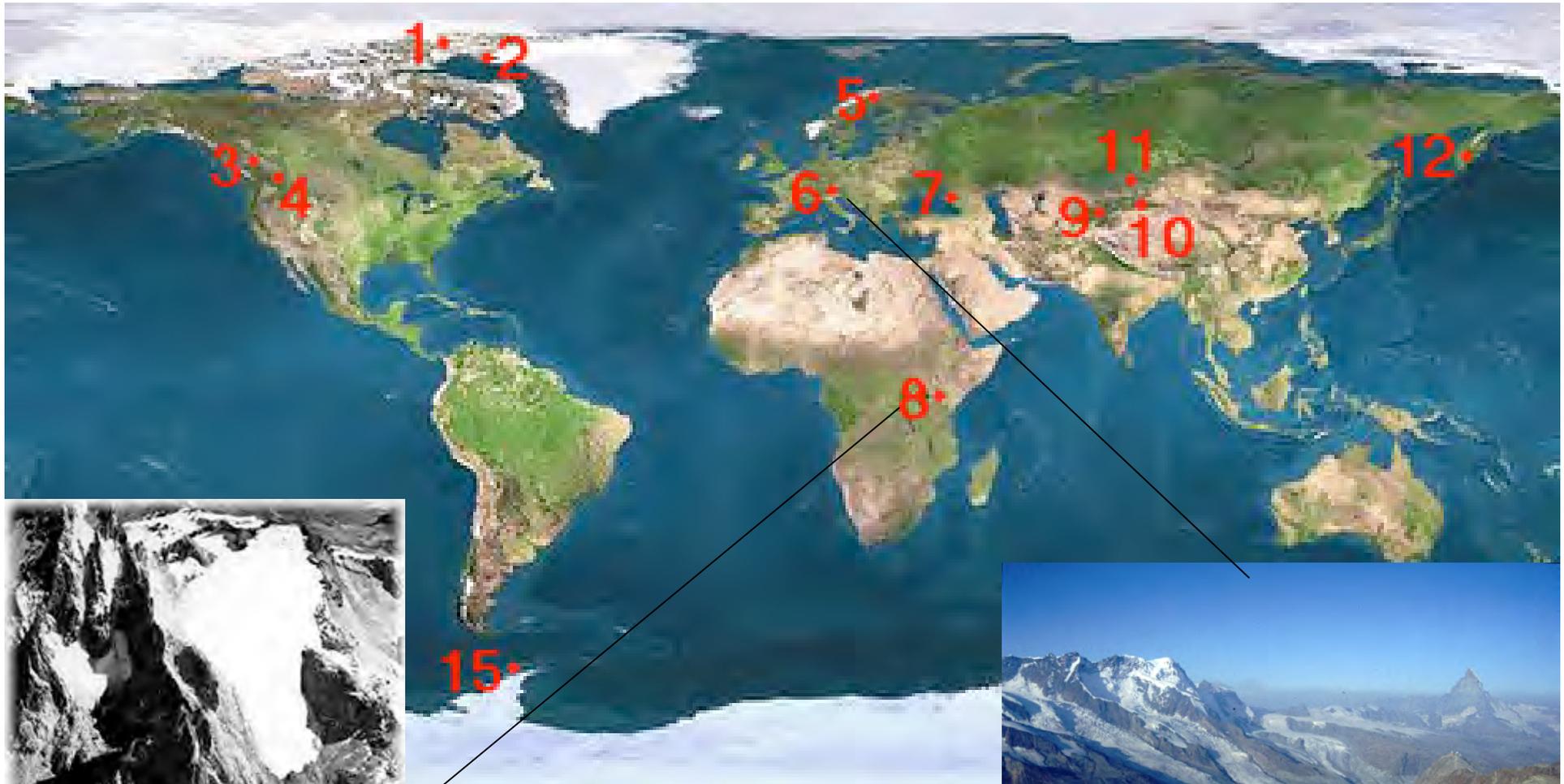
南極氷床
3000 m

グリーンランド氷床
2000 m

山岳氷河
500 m



世界の氷河



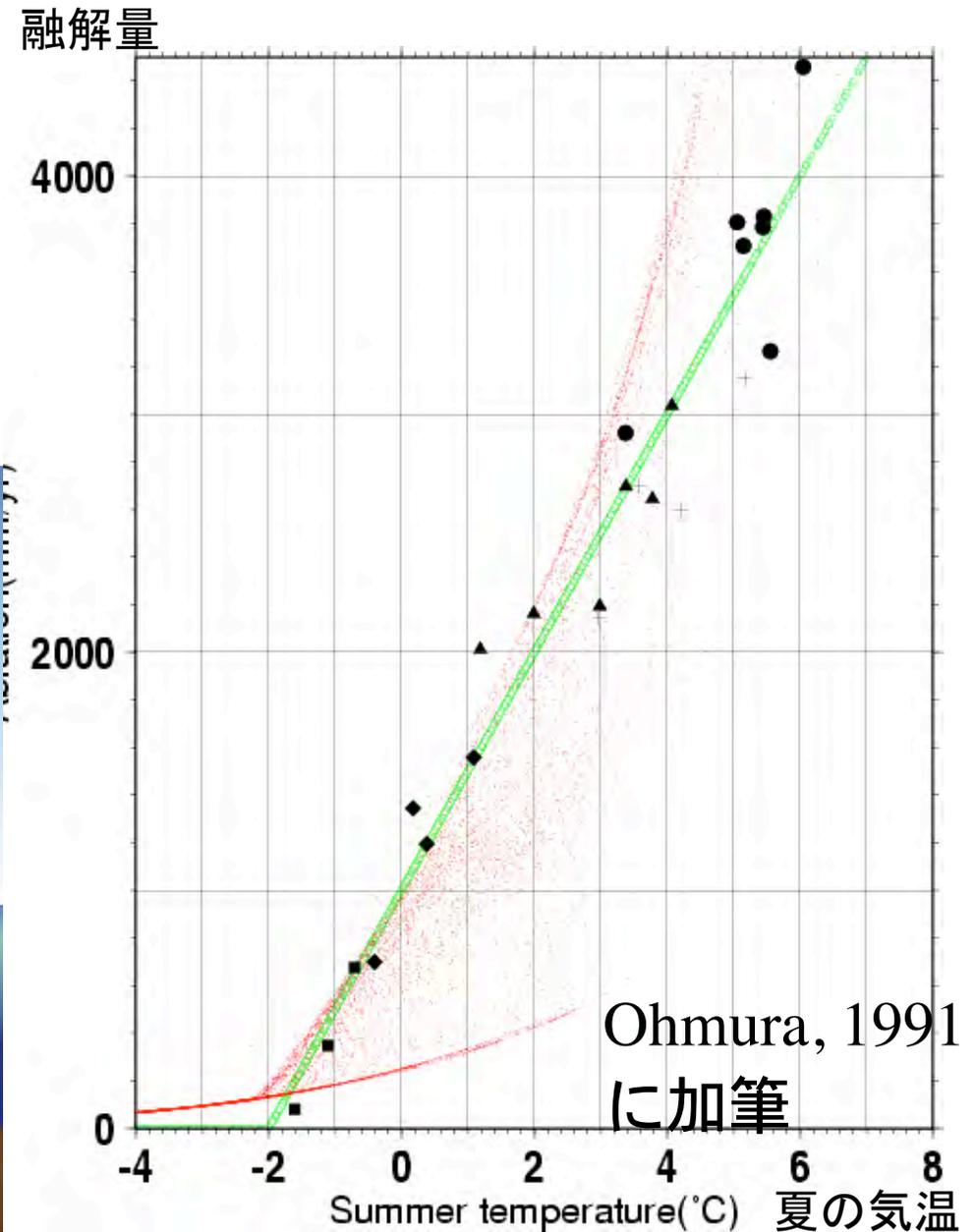
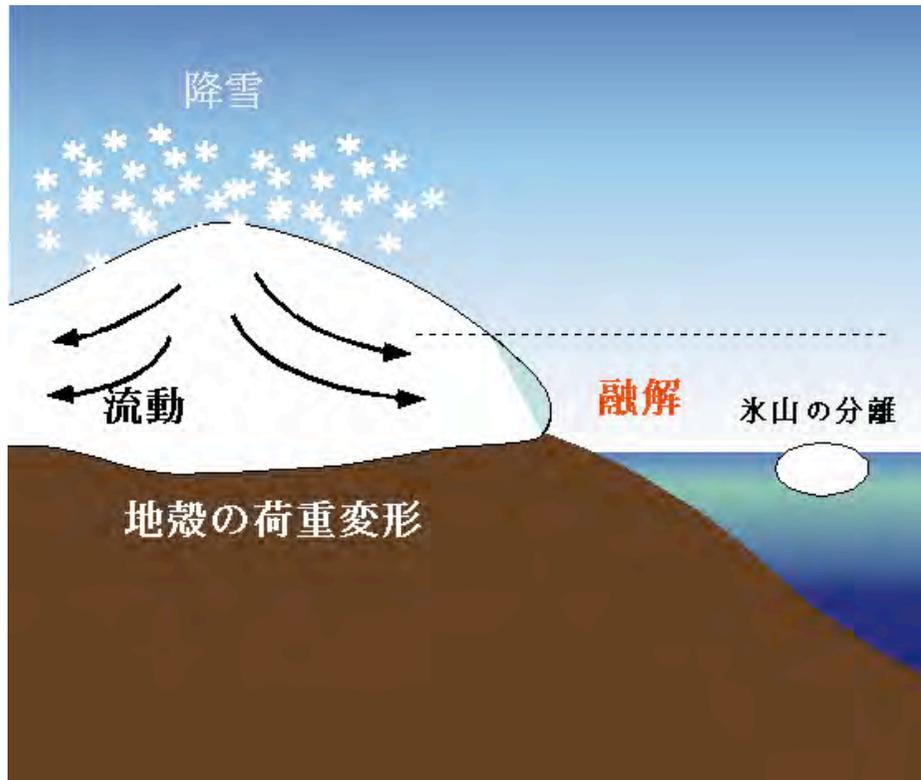
ルース氷河（ケニア）
標高約5000メートル



ゴルナーグラート氷河（スイス）
標高約3000メートル

氷床の質量収支(1)

- 氷床のかん養：降雪による。
- 氷床の消耗：
 - (1) 融解（夏の気温 >0 度C）
 - (2) 氷山の分離による。



氷床 Ice sheet

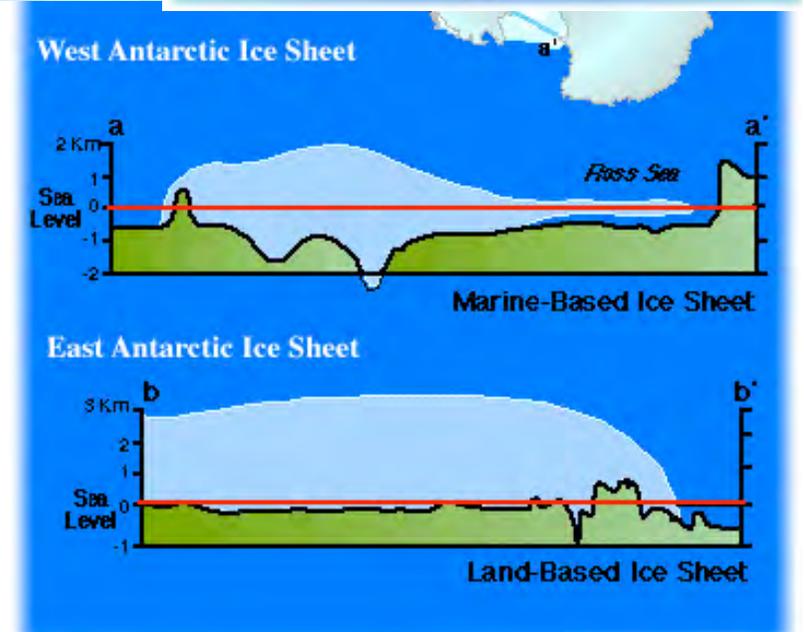
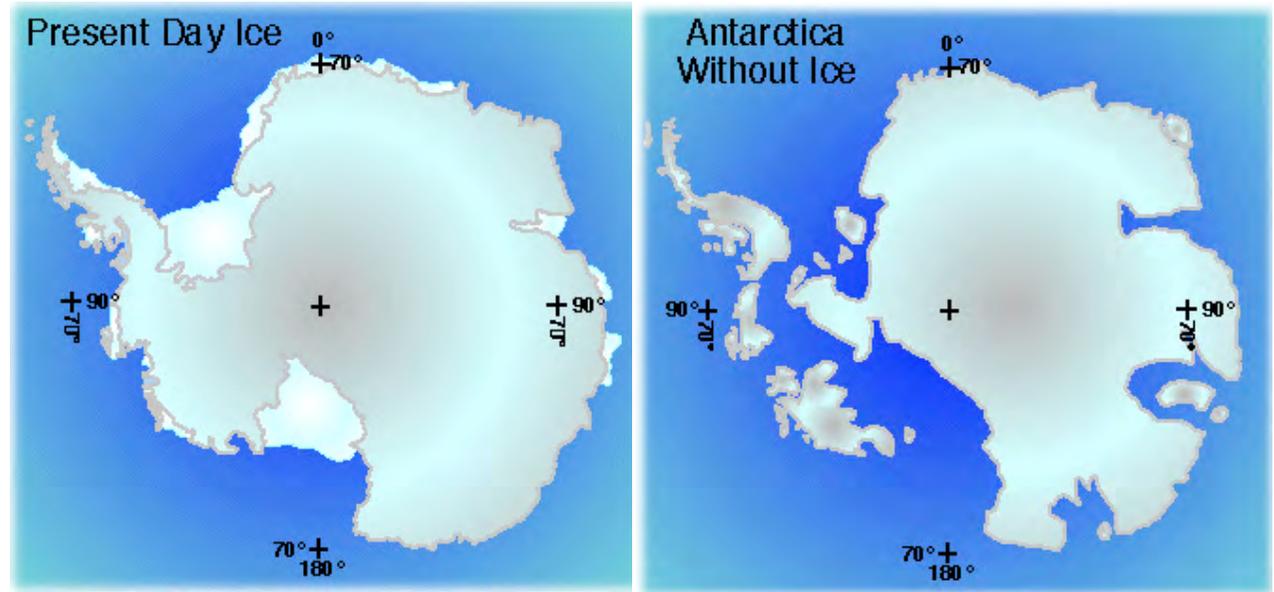
=大陸規模氷河
90%の淡水は氷床にある。

南極氷床：
面積：1200万km²
海水位：65m相当

グリーンランド氷床
面積：170万km²（日本の5倍）
海水位：7.2m相当

山岳氷河
海水位：0.5m 相当

http://www.glacier.rice.edu/land/5_tableofcontents.html



氷床の質量収支 (2)

- 氷床の流動と底面すべりで上流から下流へ。

グリーンランド氷床の断面の
流動／温度／氷の古さの分布

Abe-Ouchi, 1993

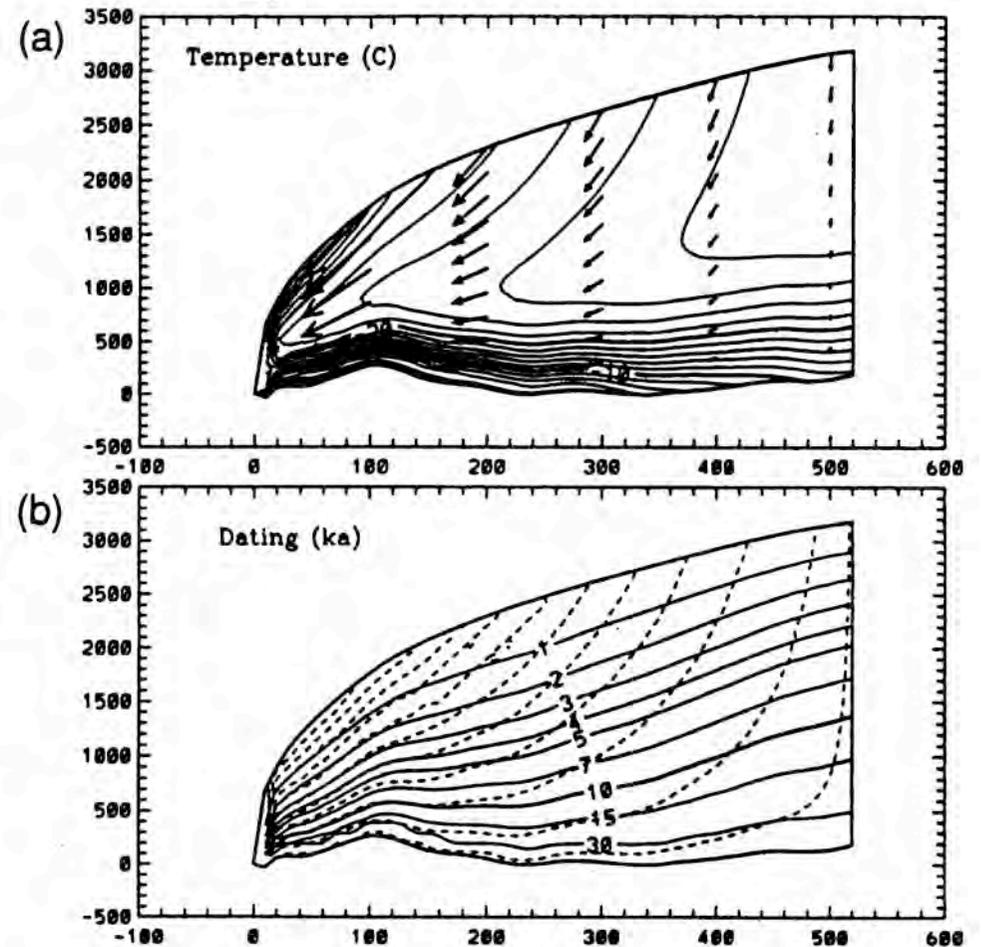
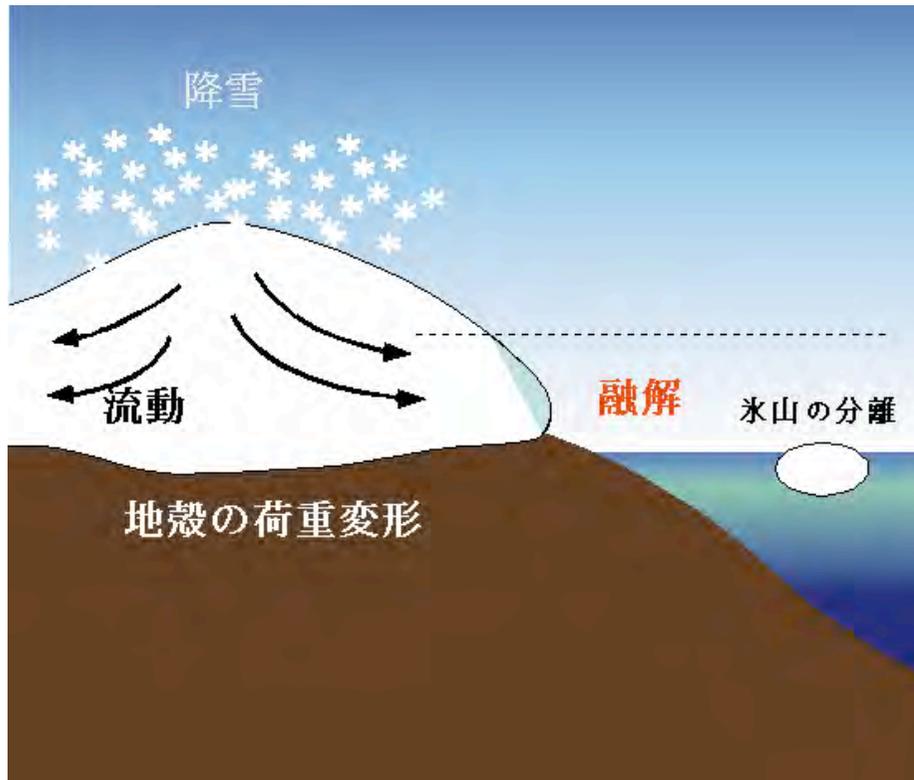
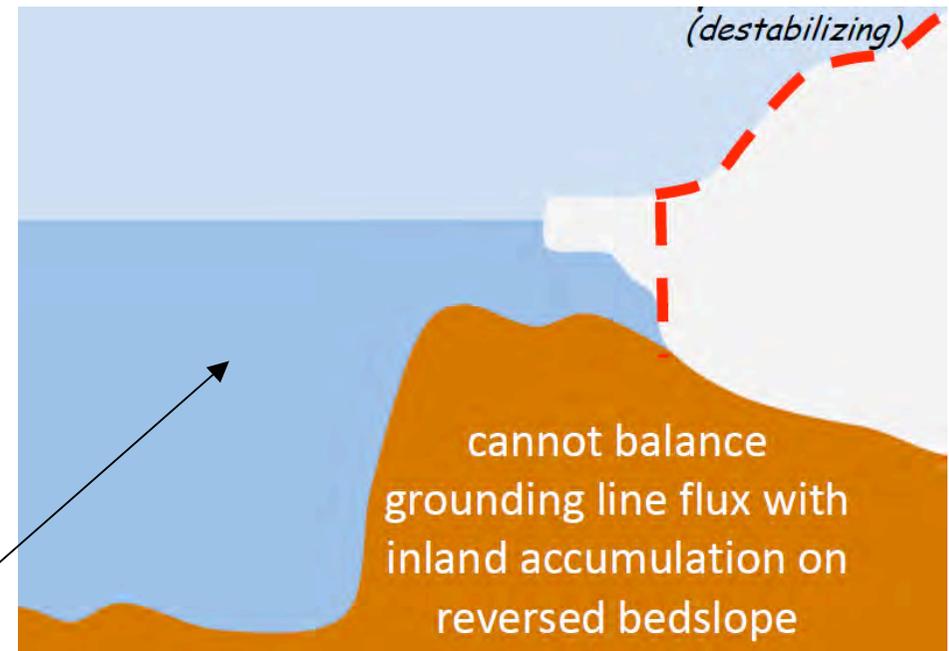
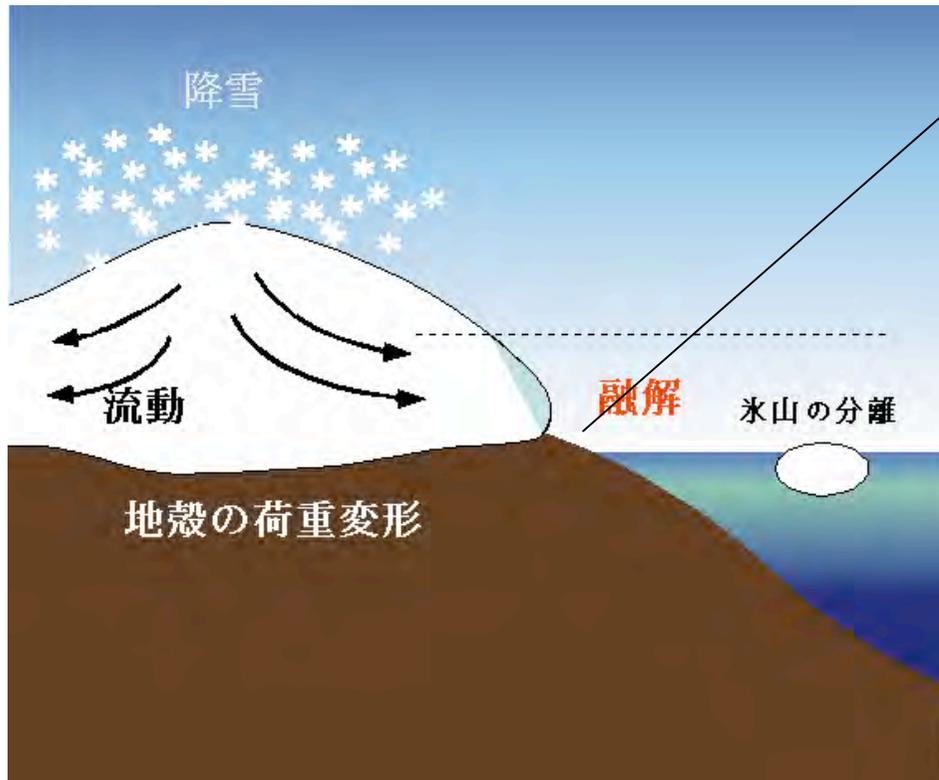


Fig. 4.2 Steady-state Greenland distribution of temperature (from Figure 4.1) and dating (Abe-Ouchi, 1993).

氷床の質量収支 (3)

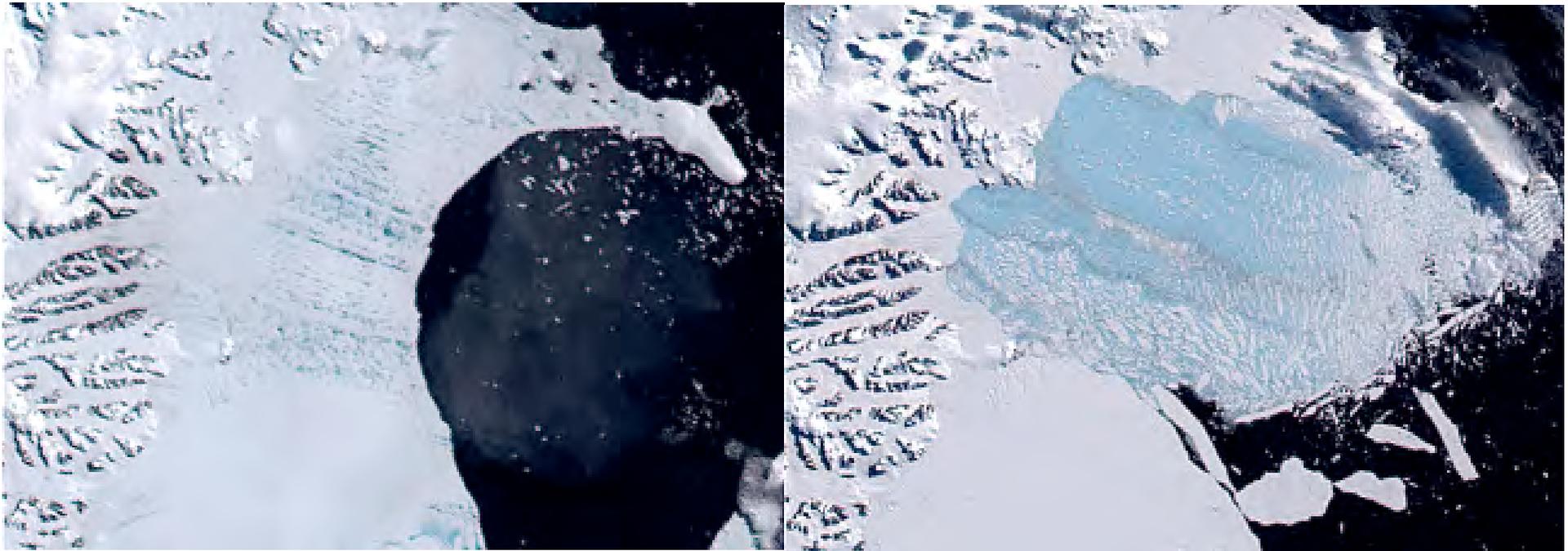
- 海洋と氷床相互作用
(西南極氷床やグリーンランド氷床
フィヨルドでの不安定生)



- 海洋が氷床を融かすらしい。
- 海底に着床している氷床は、条件が整って一旦後退し始めると後退が早いと考えられる。
- モデル化は難しく、今後の課題である。

西南極：棚氷の急速な消失-->冰山分離 (2002年) (Larsen Ice Shelf 棚氷)

- 南極半島のLarsen 棚氷：数ヶ月で3250km²が消失した。(東京都2100 km²)
- 棚氷消失後、背後の氷河流動の流速は2倍以上のスピードになった。



2002. 1. 31

後退 3250 km²

2002. 3. 17

(衛星写真MODIS, <http://wwwnsidc.colorado.edu/sotc/iceshelves.html>)

グリーンランド氷床の棚氷から冰山分離

2010年8月

1962年以来 北半球最大

北緯80度

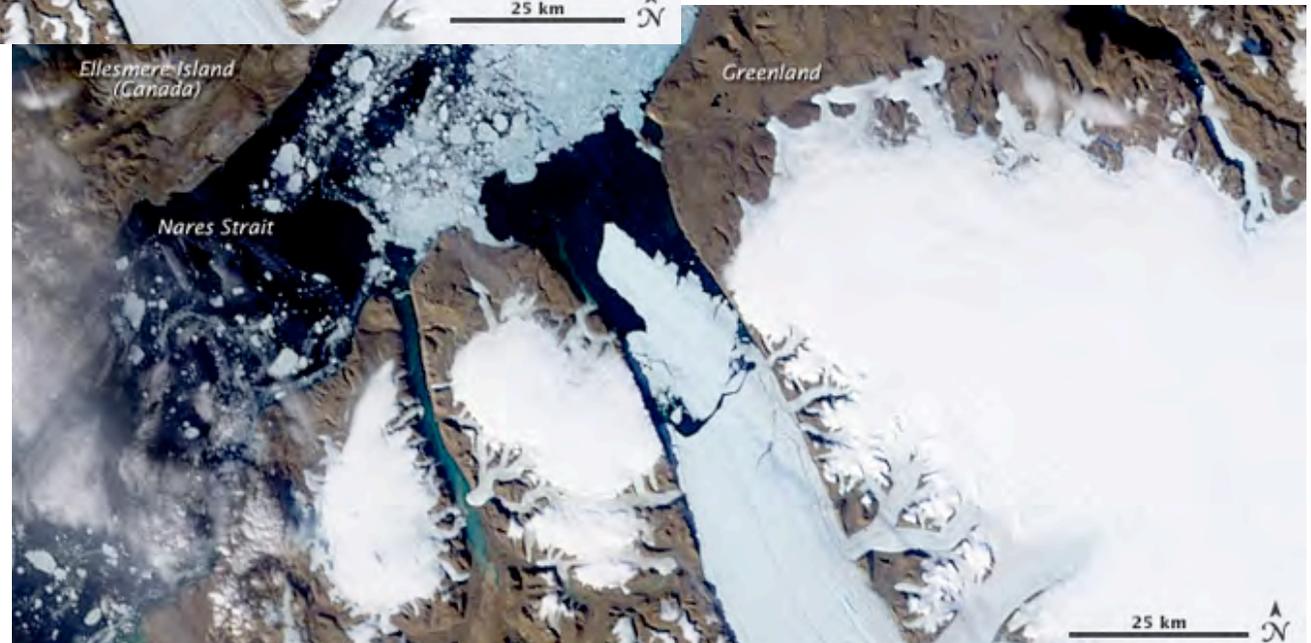
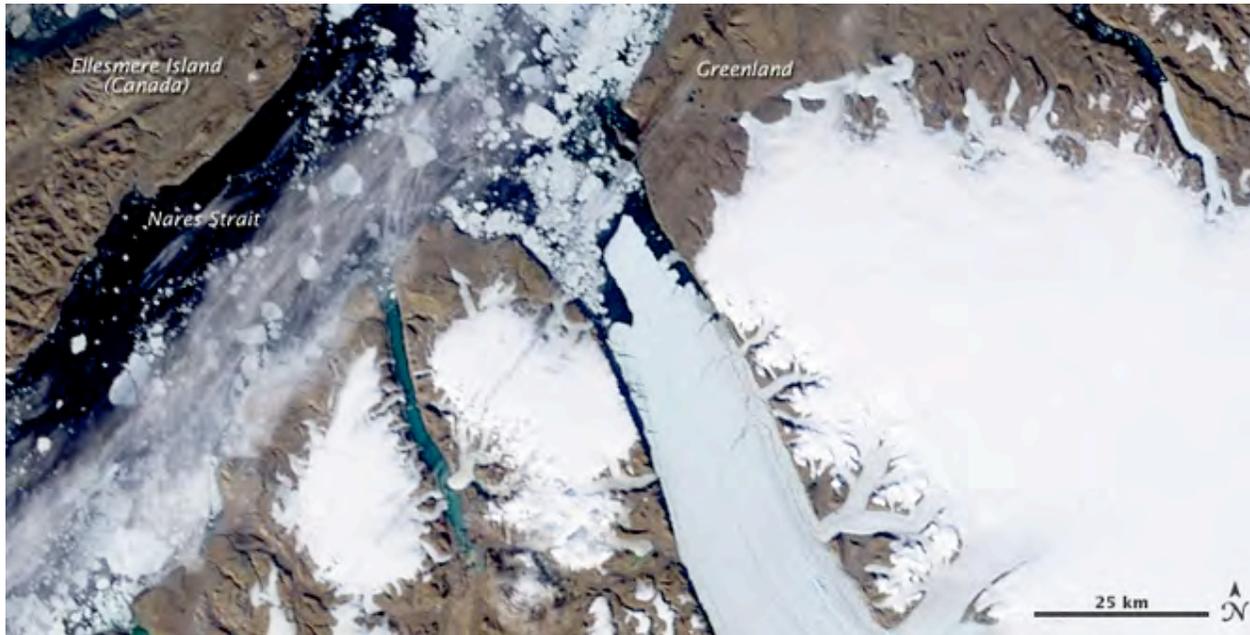
300 km²

(山の手線内側の4倍)

長さ60km

幅15km

厚さ200 m



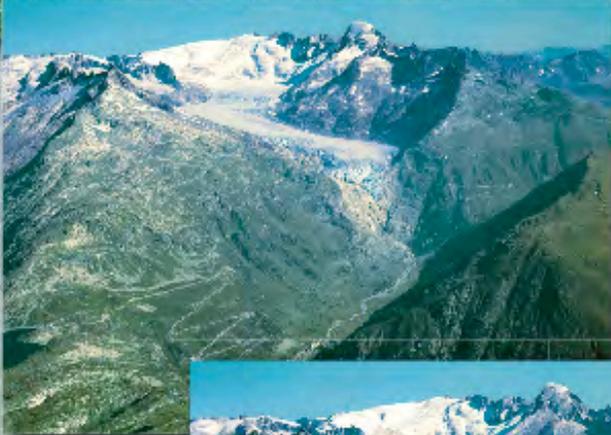
Rhone Glacier
In Switzerland
スイスのローヌ氷河

Rhonegletscher

Konsequenzen der Klimaerwärmung



1856
Rekonstruktion des letzten Hochstandes (kleine Eiszeit) nach den ersten topographischen Kartierungen (Dufourkarte)



heute

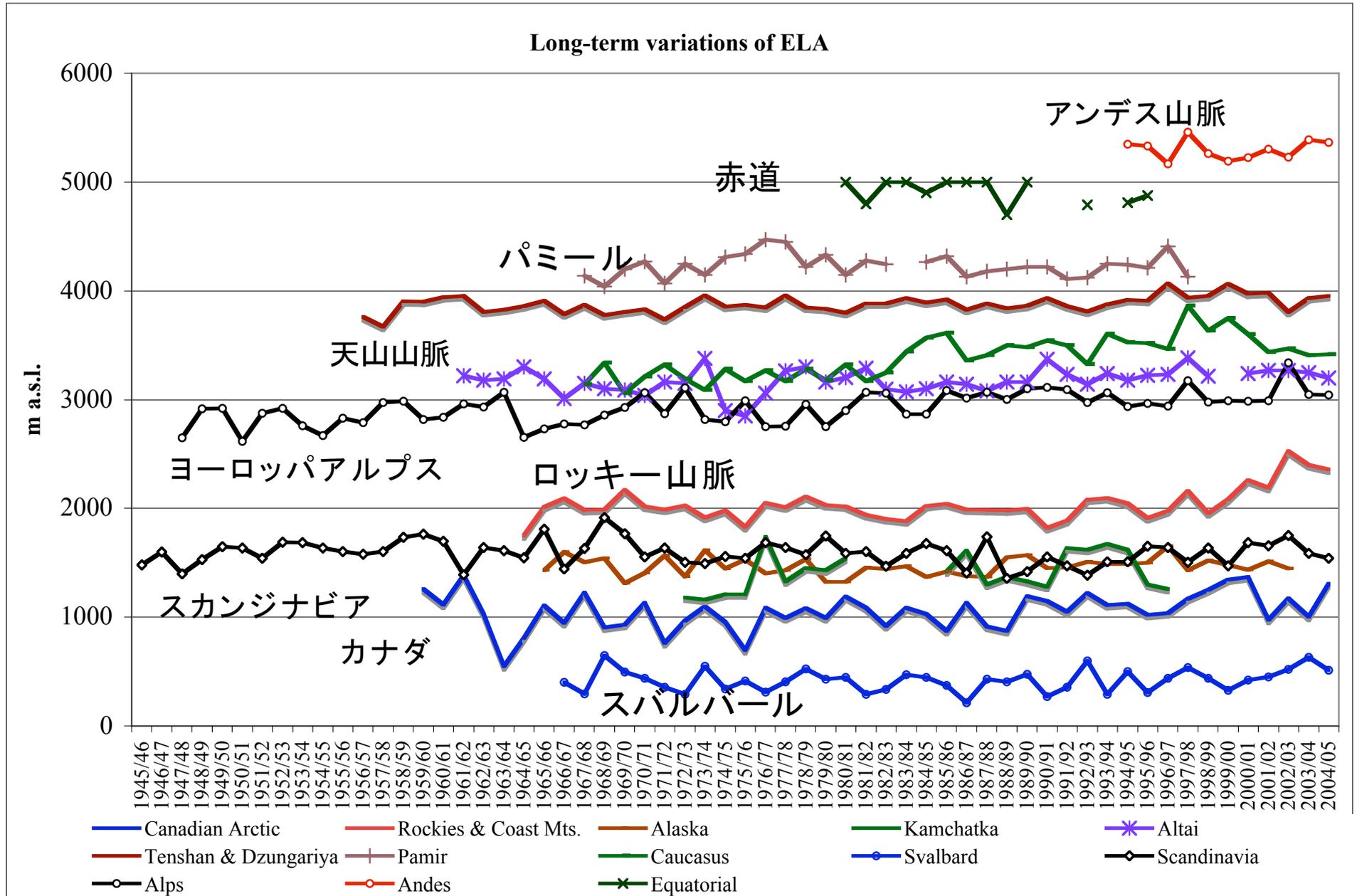


2050
Zukunftsszenario mit klimatischen Bedingungen wie im Extremjahr 2003

Foto: U. Gengen, Flims

世界の氷河の標高と長年変化

(スイス: 氷河モニターセンターによる、50氷河の台帳)



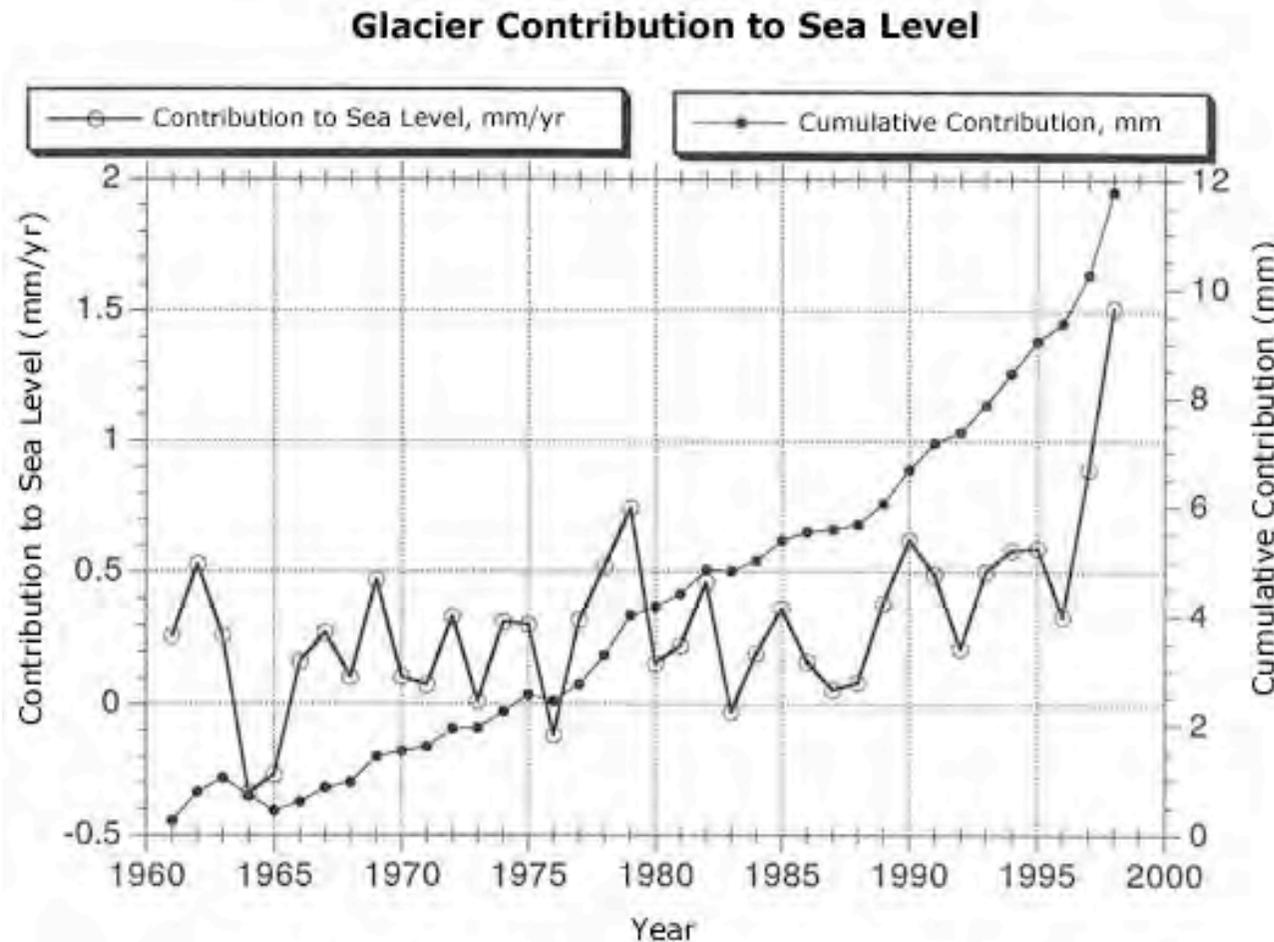
山岳氷河による海水準の変化

Meier (1984), IPCC AR4

~ 0.1~0.2 mm / 1 year

---> Large uncertainty
But small contribution
to sea level

質量が元々小さい
海水位50cm



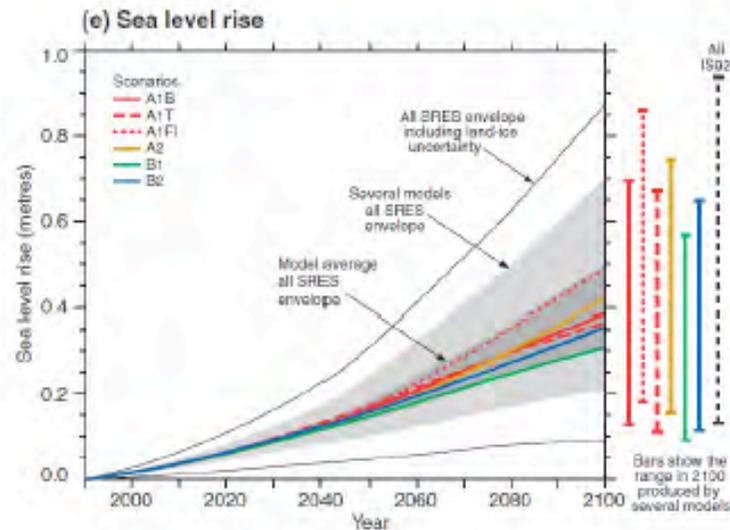
海水準への貢献は
小さいだろう。

大気海洋結合モデルと氷床モデルを用いた 予測・予見

IPCC 第四次報告書

IPCC (2007):

- *Warming in the climate system is unequivocal, ...*
- *The last time the polar regions were significantly warmer than present [...] (about 125,000 years ago), reductions in polar ice volume led to 4 to 6 m of sea level rise.*

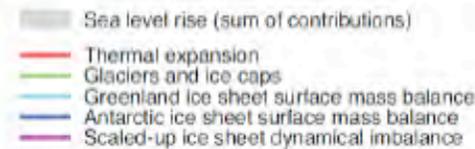
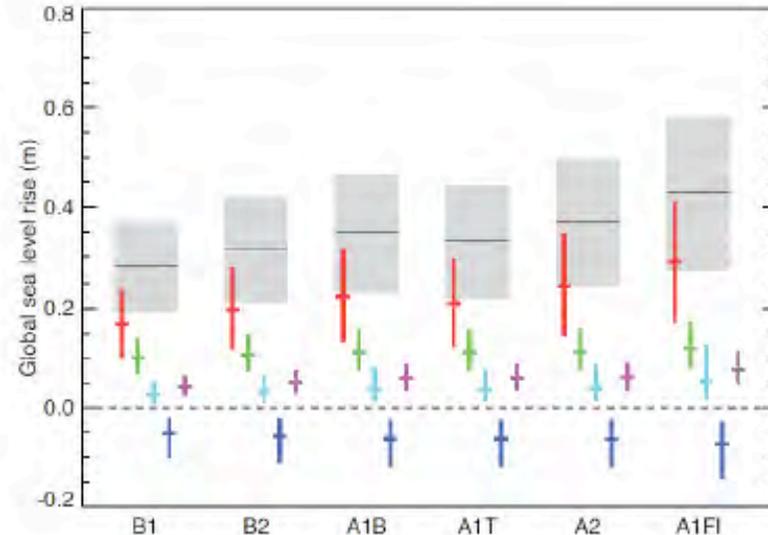
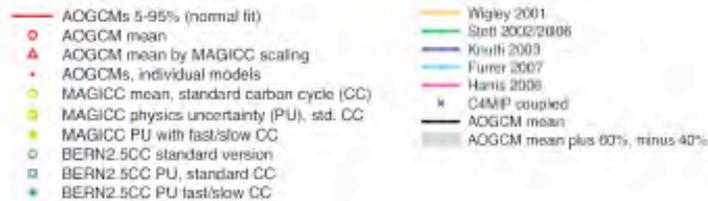
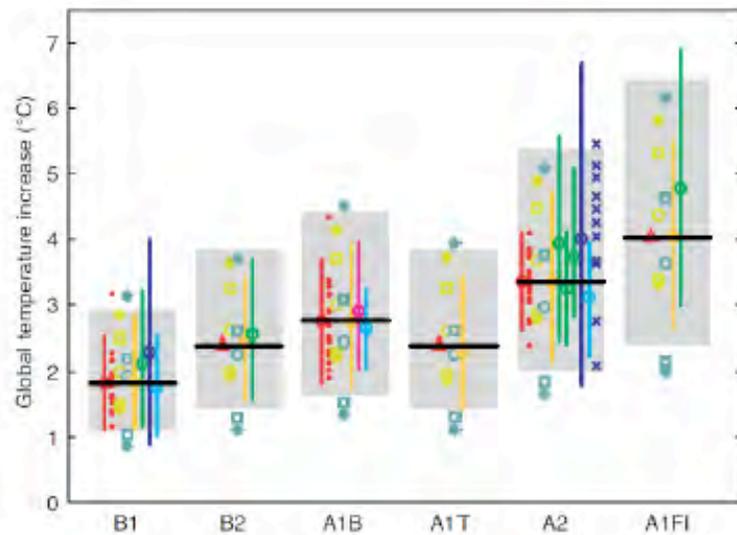


(TAR, 2001, SPM Fig. 5e)

Case	Temperature Change (°C at 2090-2099 relative to 1980-1999)		Sea Level Rise (m at 2090-2099 relative to 1980-1999)
	Best estimate	Likely range	Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
Constant Year 2000 concentration	0.5	0.3-0.9	NA
B1 scenario	1.6	1.1-2.9	0.18-0.38
A1T scenario	2.4	1.4-3.8	0.20-0.45
B2 scenario	2.0	1.1-3.8	0.20-0.43
A1B scenario	2.5	1.7-4.4	0.21-0.48
A2 scenario	3.4	2.0-5.4	0.23-0.51
A1FI scenario	4.0	2.4-6.4	0.26-0.59

(AR4, 2007, Tab. SPM.3)

IPCC 第四次報告書



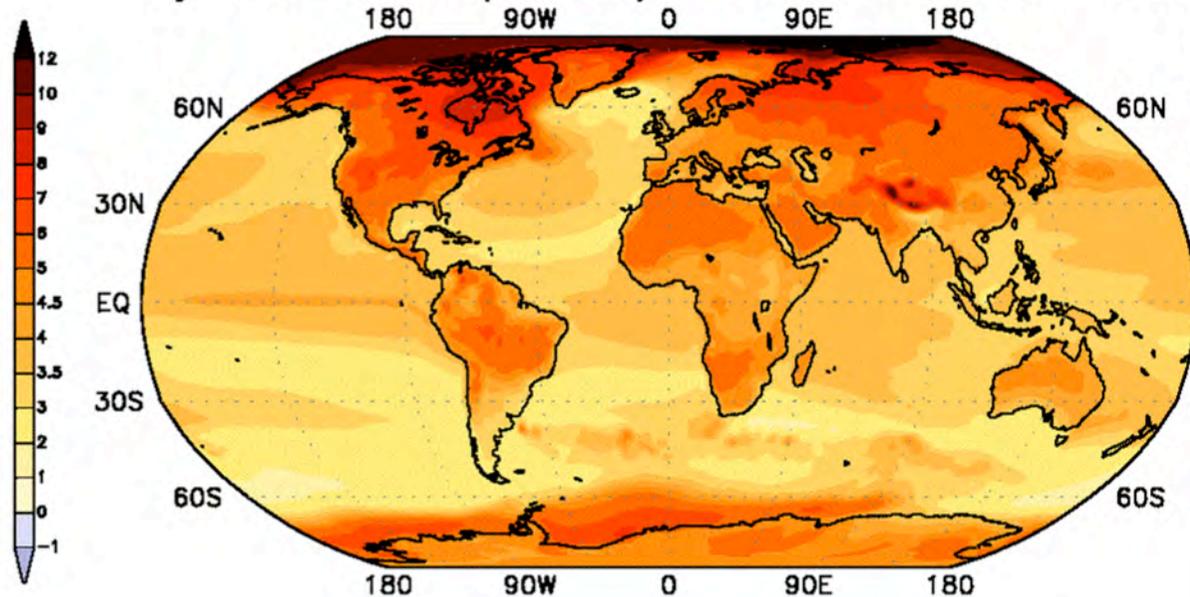
(AR4, 2007, Fig. TS.27)

(氷床流動の増加効果が加わるともっと大きくなる可能性も書かれている、)

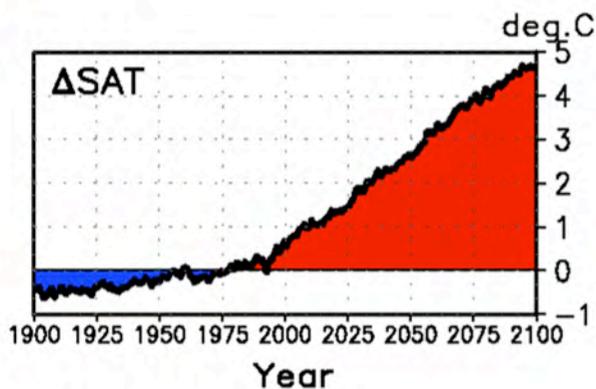
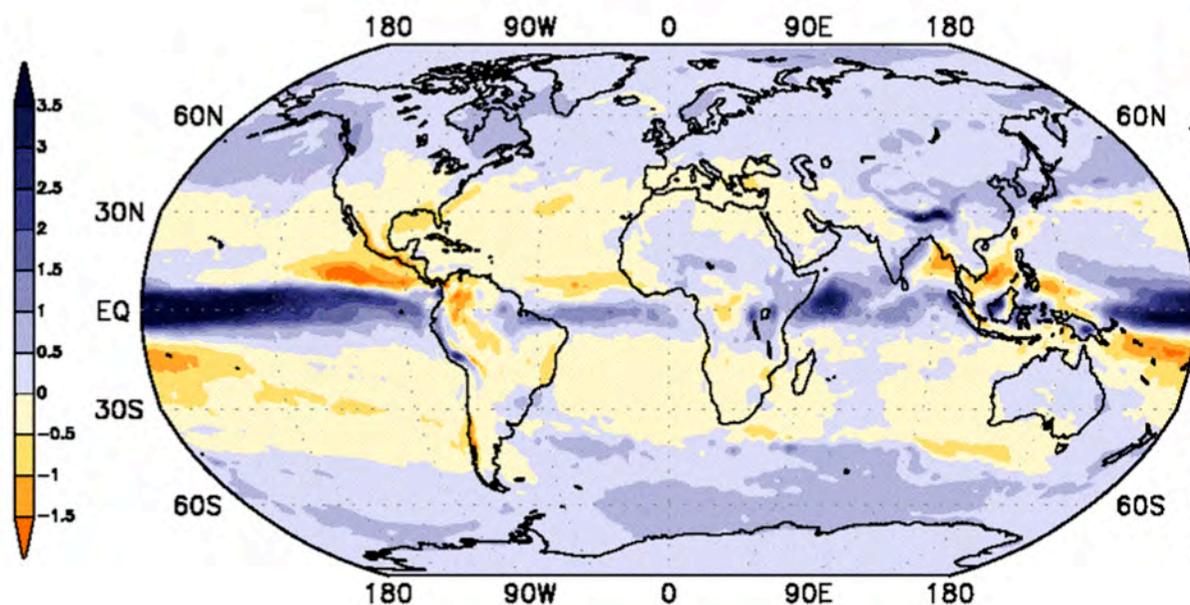
21世紀末の予測結果



Global Warming Simulation by the CCSR/NIES/FRCGC Climate Model



気温変化
 ΔSAT
A1b(2071-2100)
-20C3M(1971-2000)



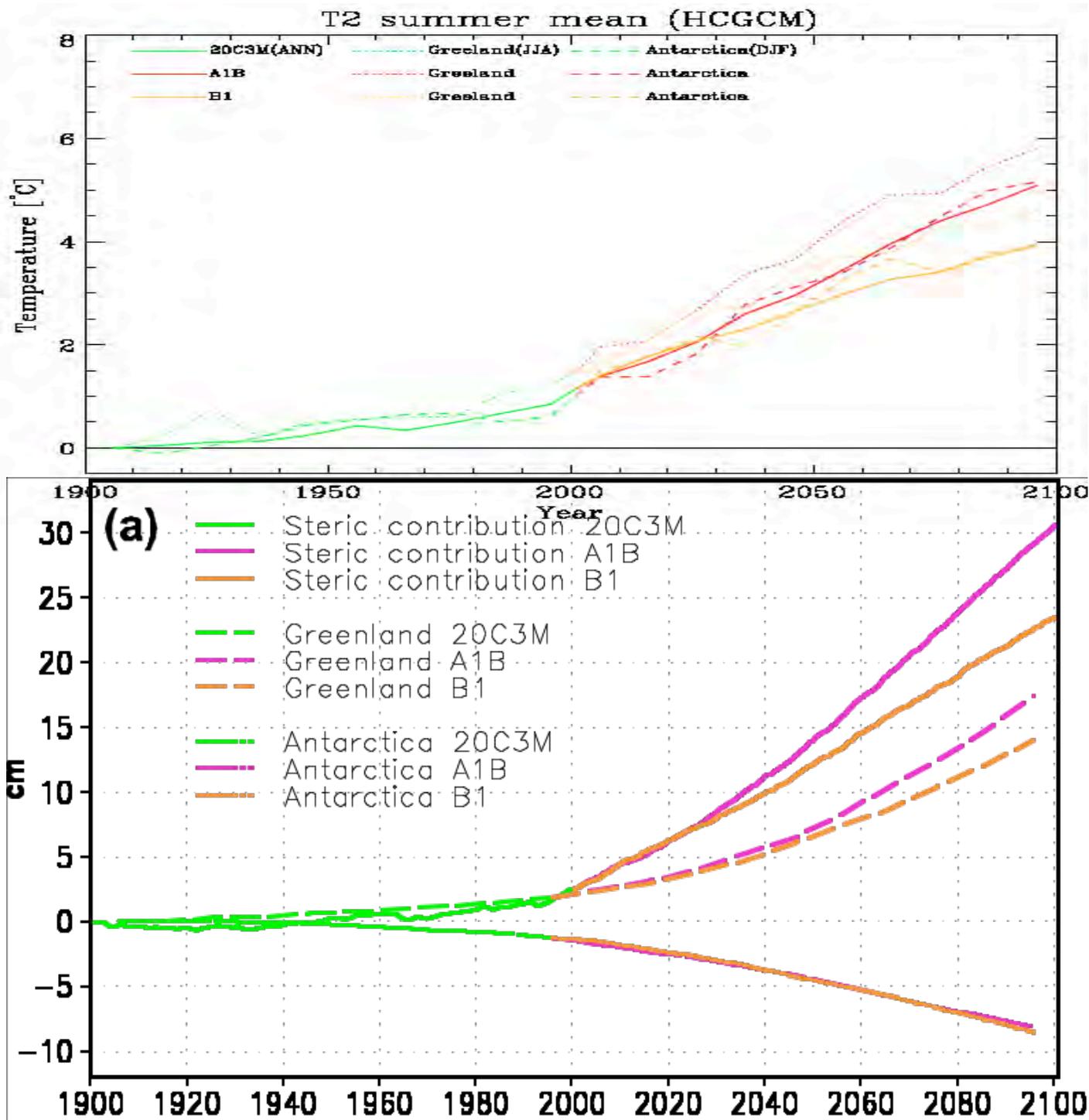
降水量変化

$\Delta Rain$ (木本ら)
A1b(2071-2100)
-20C3M(1971-2000)

21世紀 の気温と 海面上昇 予見

(Suzuki et al,
2005 GRL)

MIROC3.2
高解像度版
(T106AGC
M+1/4x1/6
度OGCM)



正味表面 氷床質量 収支変化

最近の観測事実と傾向が合致

(1) 氷の流出：南極半島や
西グリーンランド縁辺部

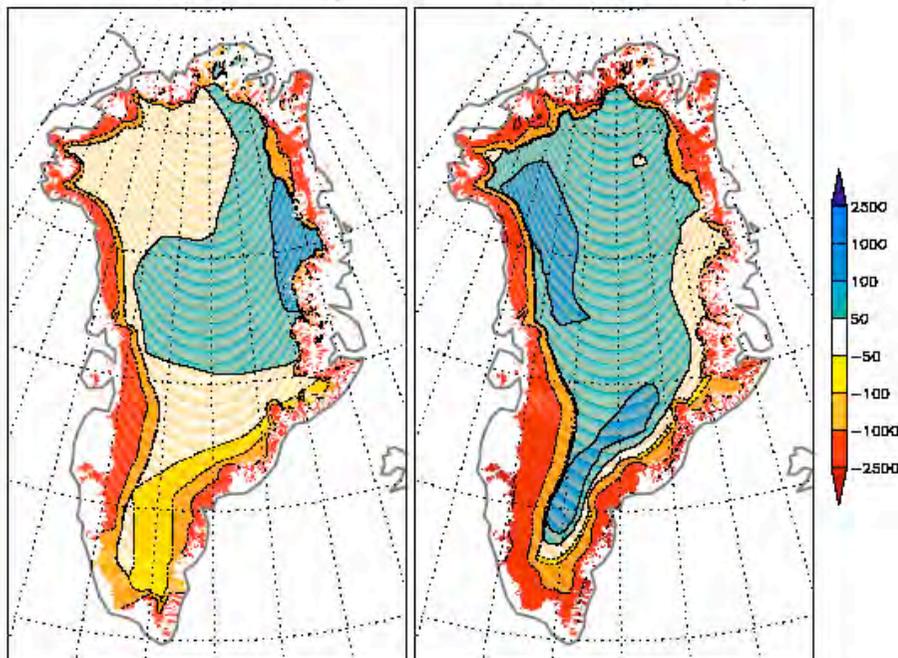
(2) 氷床内部での質量収支の
増加と高度の高まり。

中

高

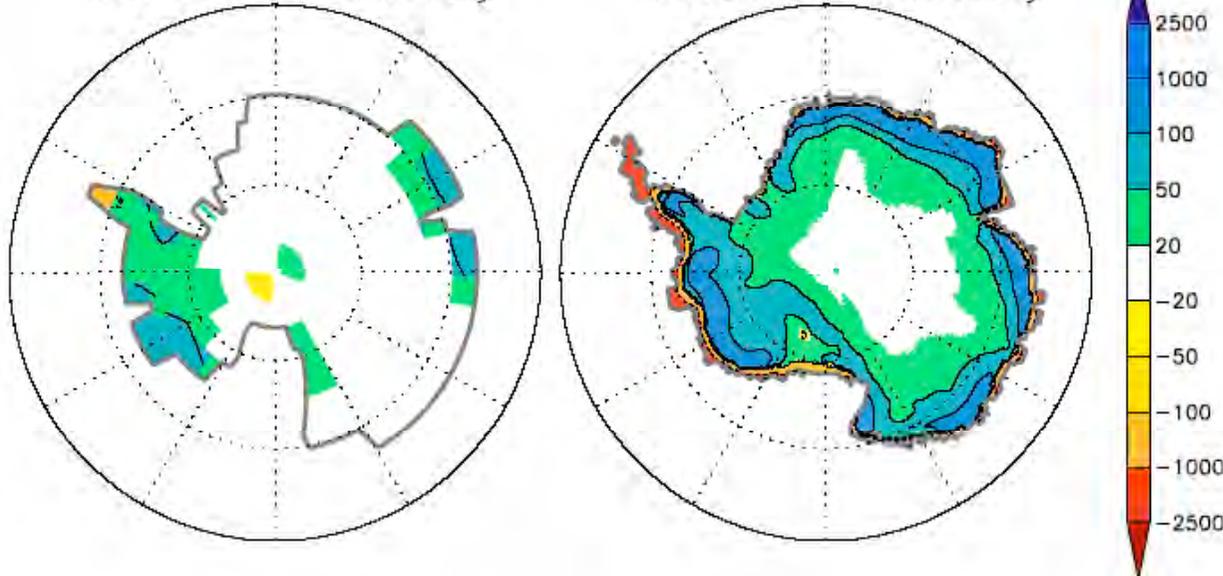
MCGCM A1B anomaly

HCGCM A1B anomaly



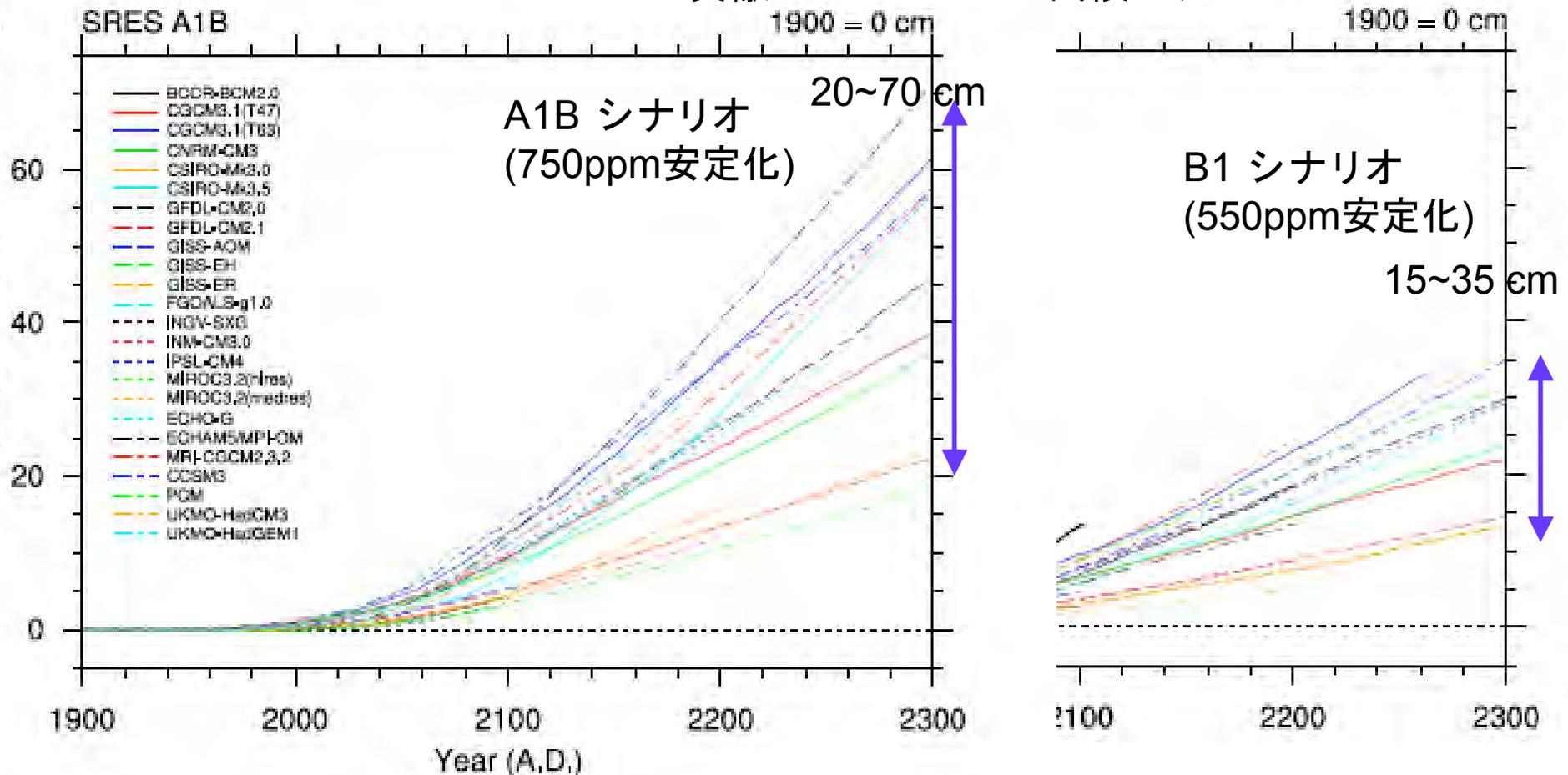
MCGCM A1B anomaly

HCGCM A1B anomaly



23世紀までの海水位上昇予見 (グリーンランド氷床の貢献、 ただし流動効果は含まない)

IPCC AR4に貢献した24のGCM気候モデル

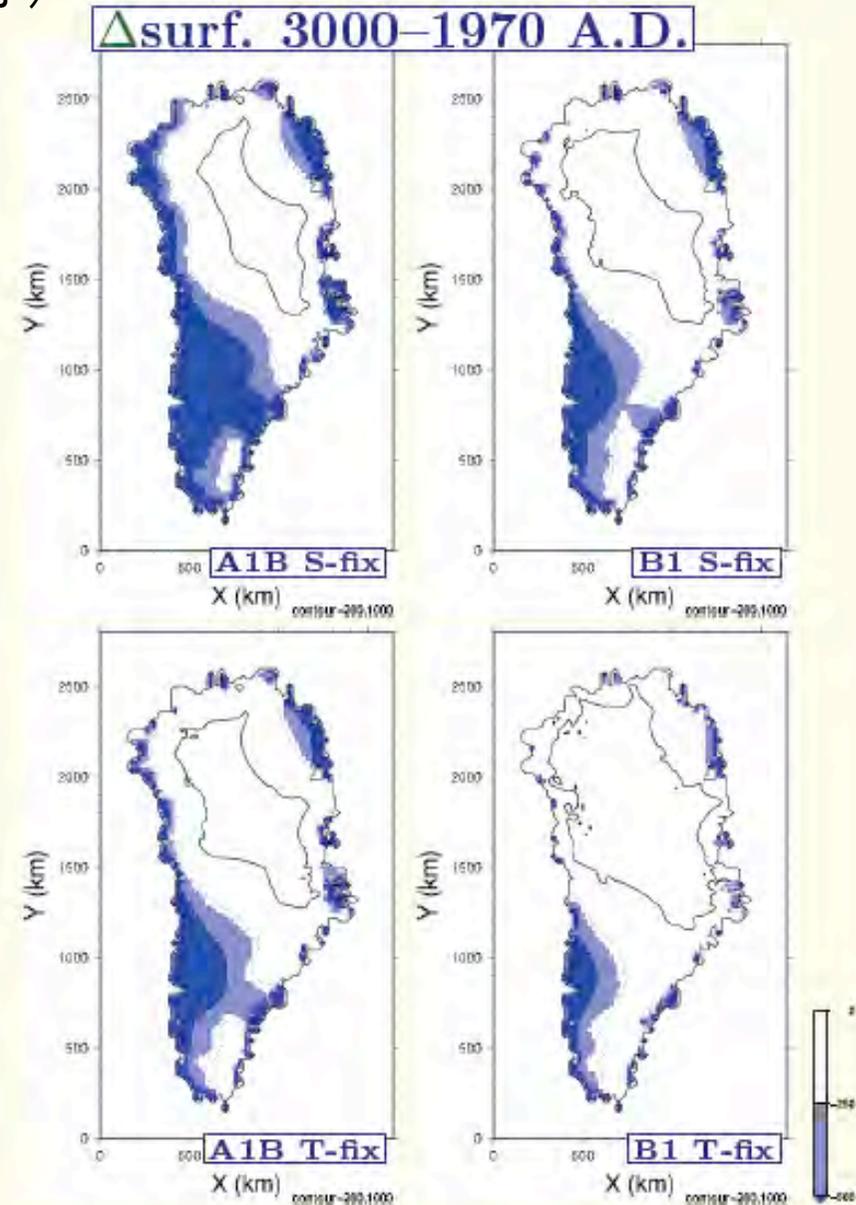
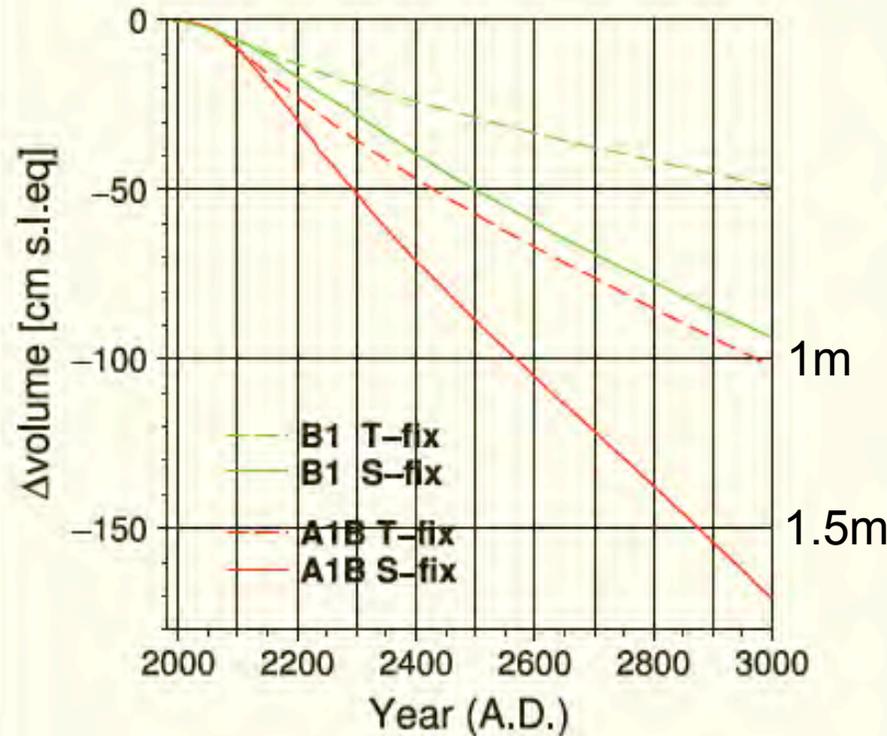


(Yoshimori and Abe-Ouchi, Journal of Climate投稿中)

1000年後のグリーンランド氷床予見

(流動を含む)

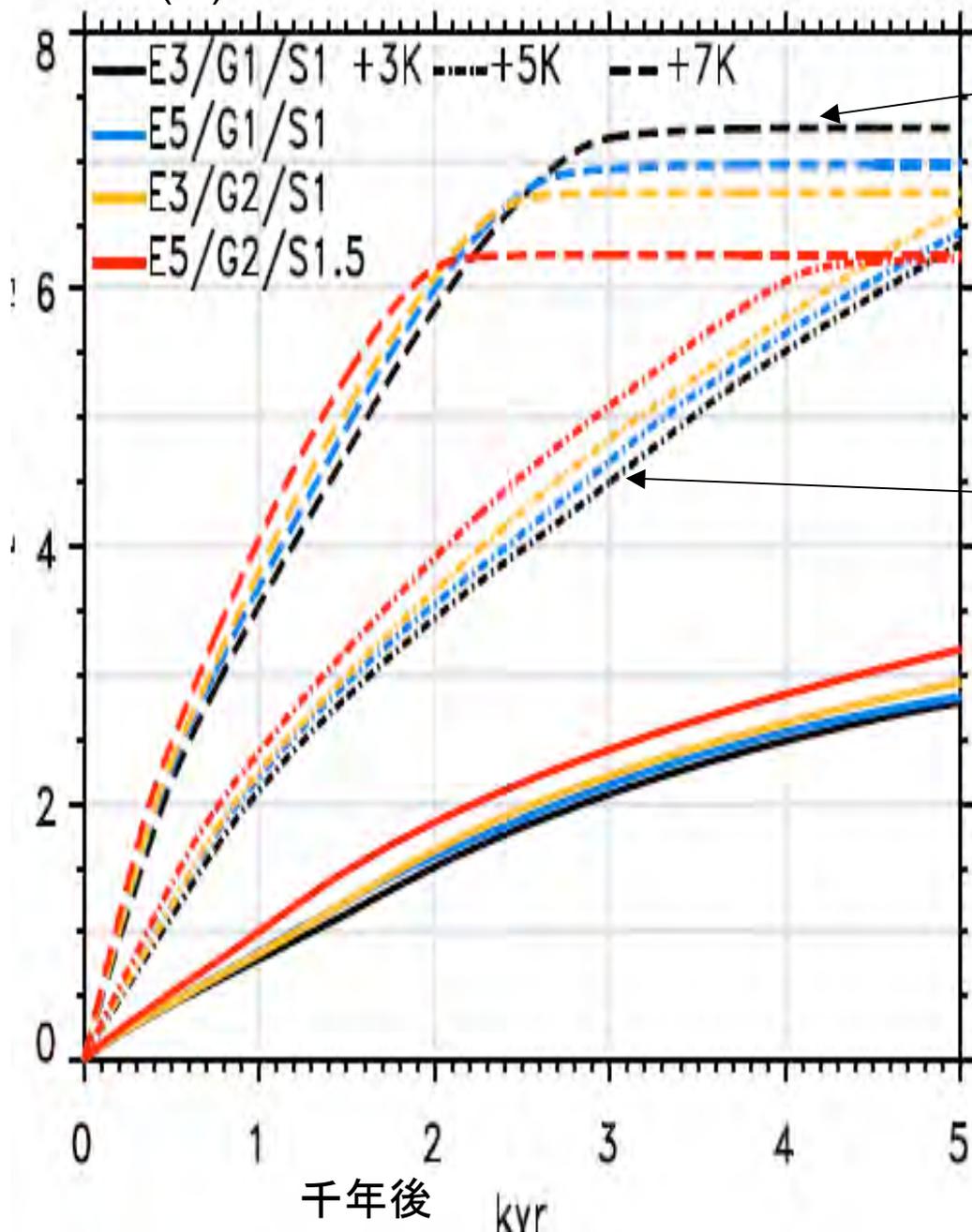
海水位熱膨張分は 0.5~0.8 m



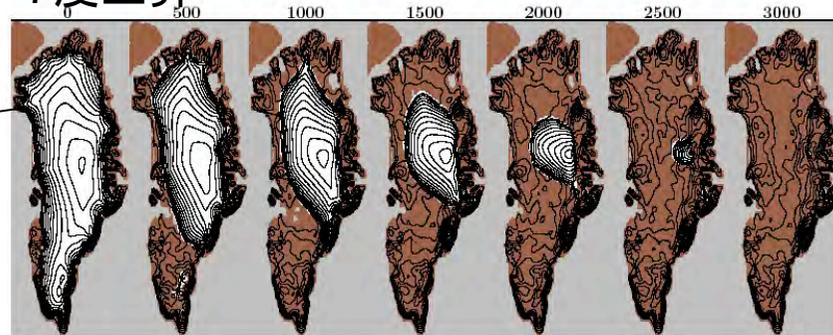
21世紀末にガス濃度を
A1Bシナリオに安定化させても、
千年後に2メートル近く海面上昇
(長期的負の遺産)

数千年後までの氷床変化の気温依存性

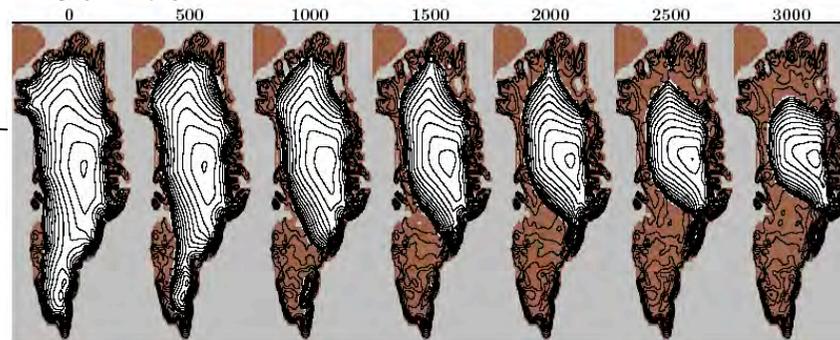
海水位 (m)



7度上昇



5度上昇



1千年

2千年

3千年

色の違いは、
氷床の不確実性の高いパラメタの違い

最近の観測 : 予想より変化が早い。 氷床の流動増加が観測される

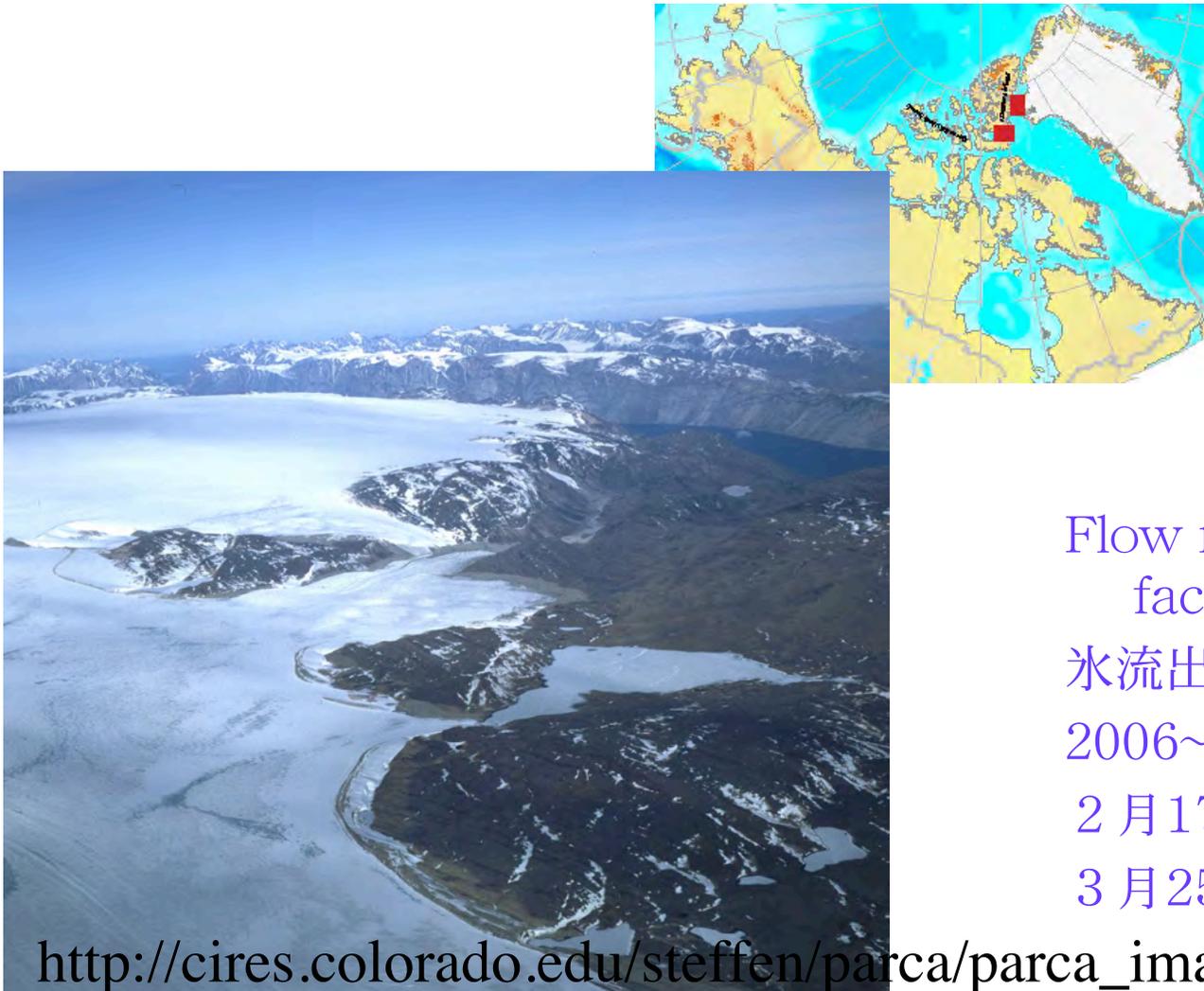
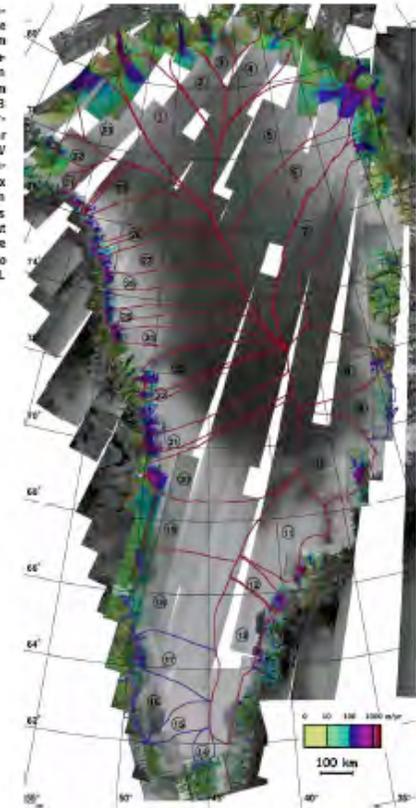


Fig. 1. Ice-velocity mosaic of the Greenland ice Sheet assembled from year 2000 Radarsat-1 radar data, color coded on a logarithmic scale from 1 m/year (brown) to 3 km/year (purple), overlaid on a map of radar brightness from ERS-1/2 Radarsat-1/Envisat. Drainage boundaries for flux gates in Table 1 are in red. Drainage boundaries with no flux estimates but discussed in the text are in blue. Numbers refer to drainage basins in Table 1.

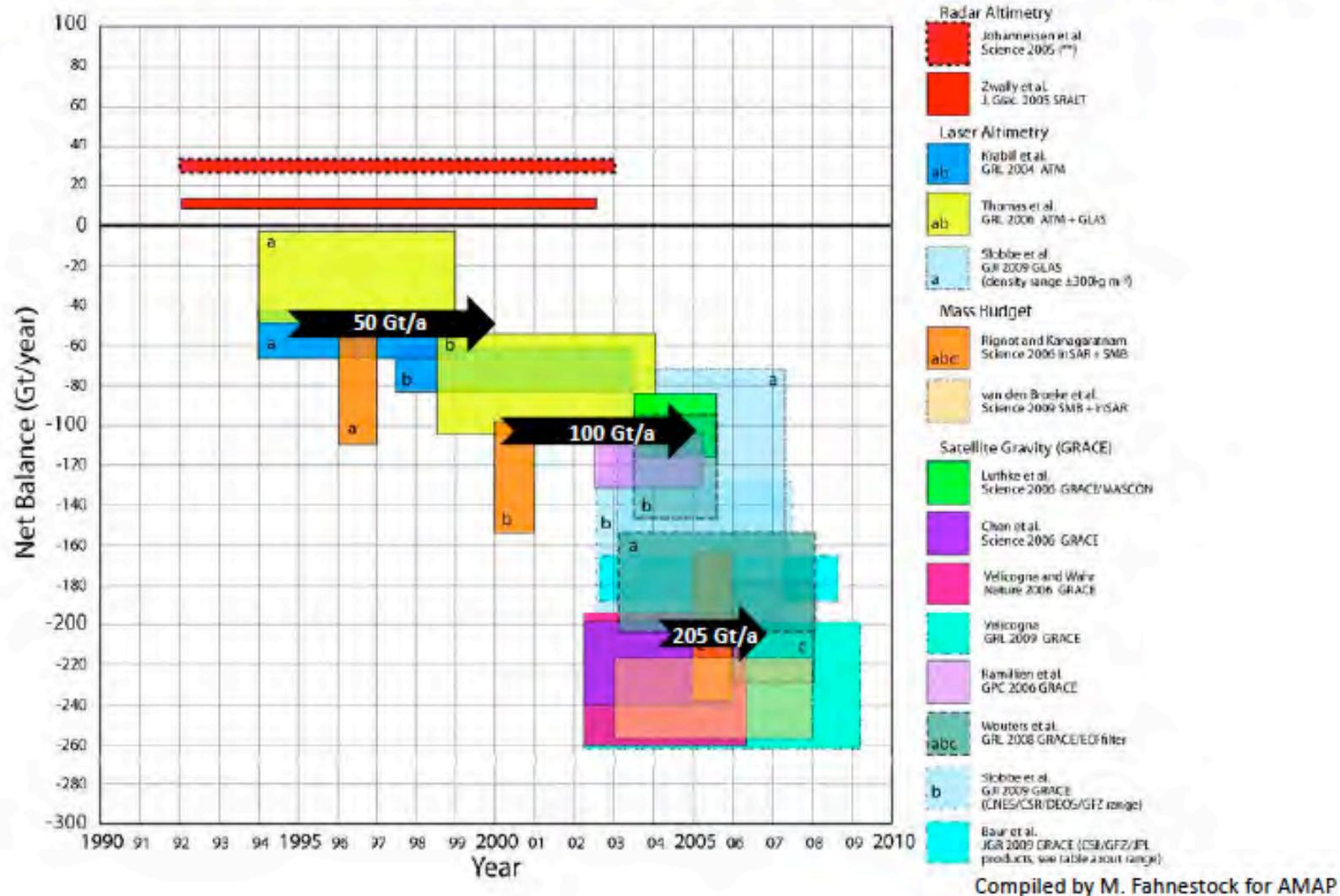


Flow rate increased by
factor 2.5 in 10 years
氷流出10年で2.5 倍の報告
2006~ Science誌など
2月17日朝日新聞
3月25日朝日新聞

http://cires.colorado.edu/steffen/parca/parca_images.html

近年の氷床質量変化：衛星観測 (1990~2009)

Greenland Ice Sheet Mass Balance

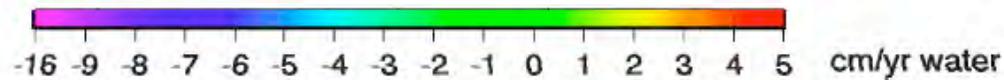
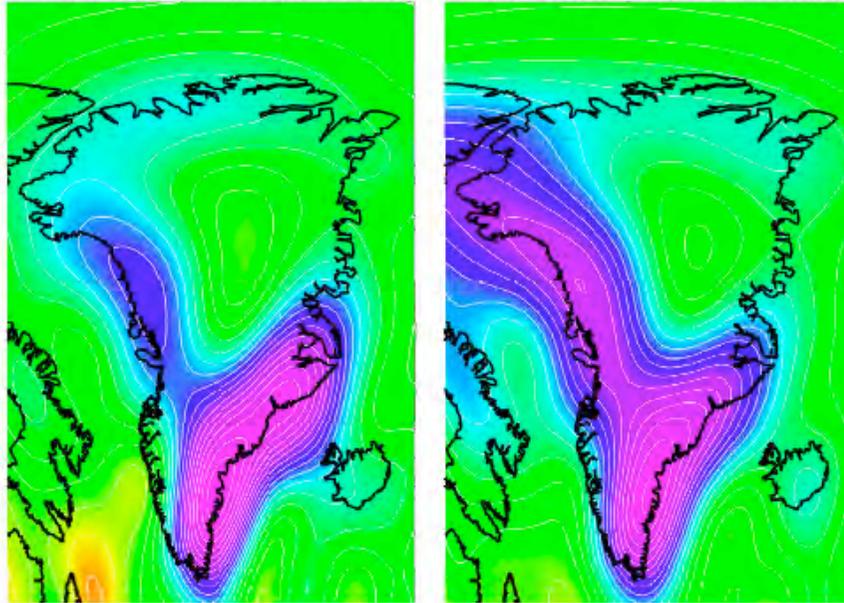


衛星重力計観測とモデル

GRACE Rate of Mass Change

Feb 2003 - Feb 2007.

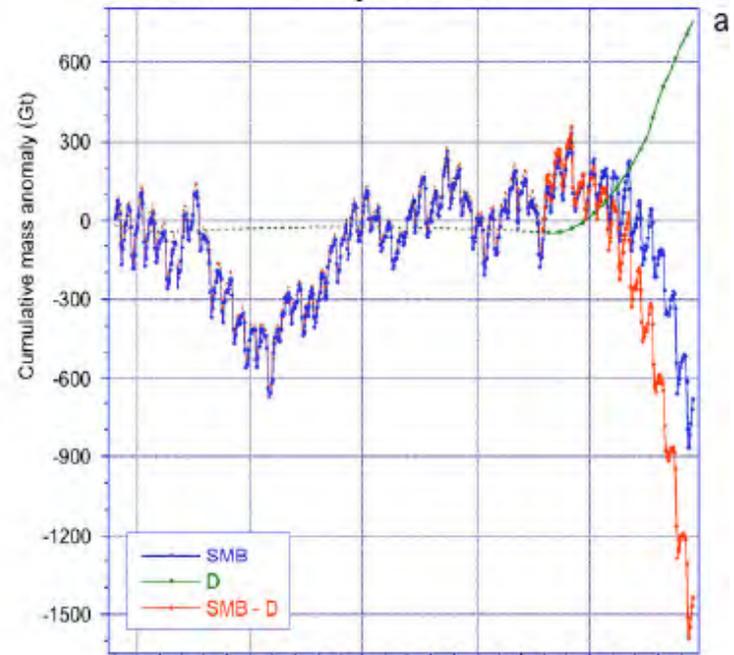
Feb 2003 - March 2010.



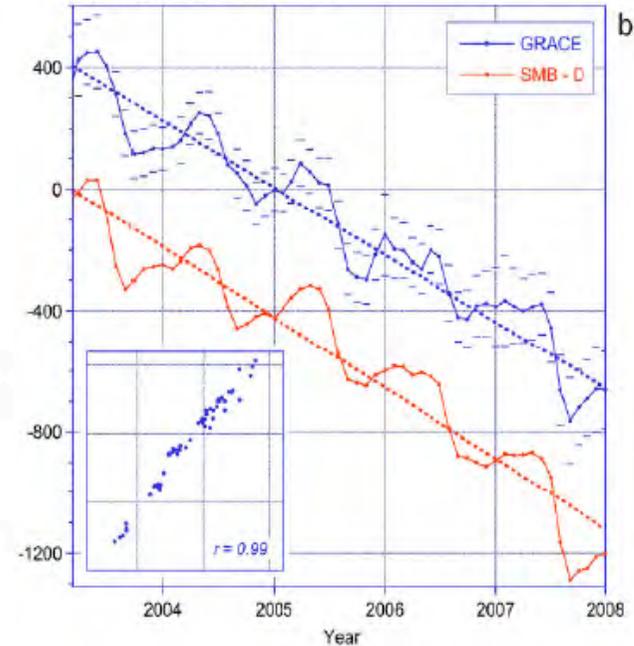
the mass loss has been spreading up the northwest coast the last 2-3 years.

J. Wahr, I. Velicogna

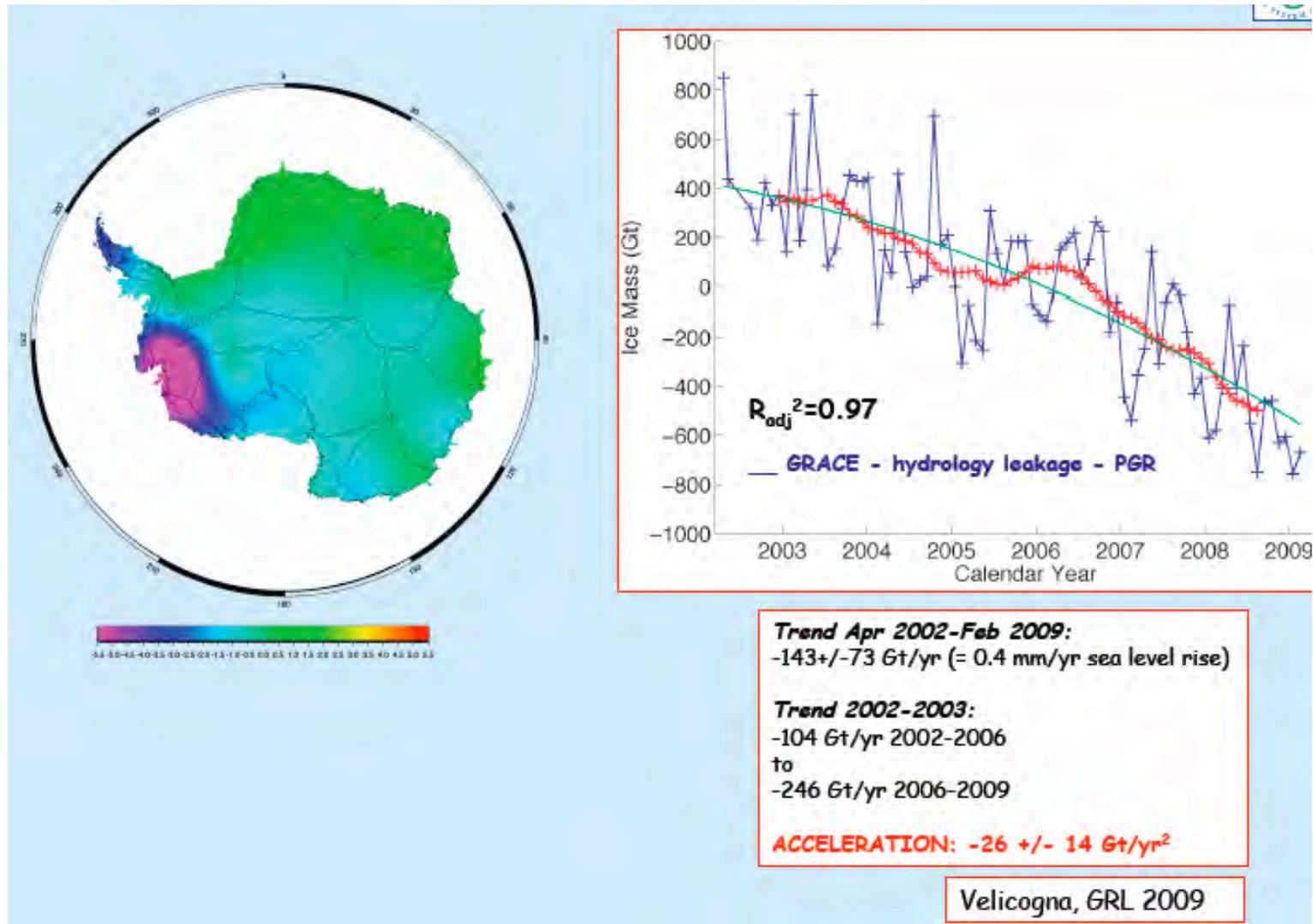
Model forced by ERA40



Model vs. GRACE



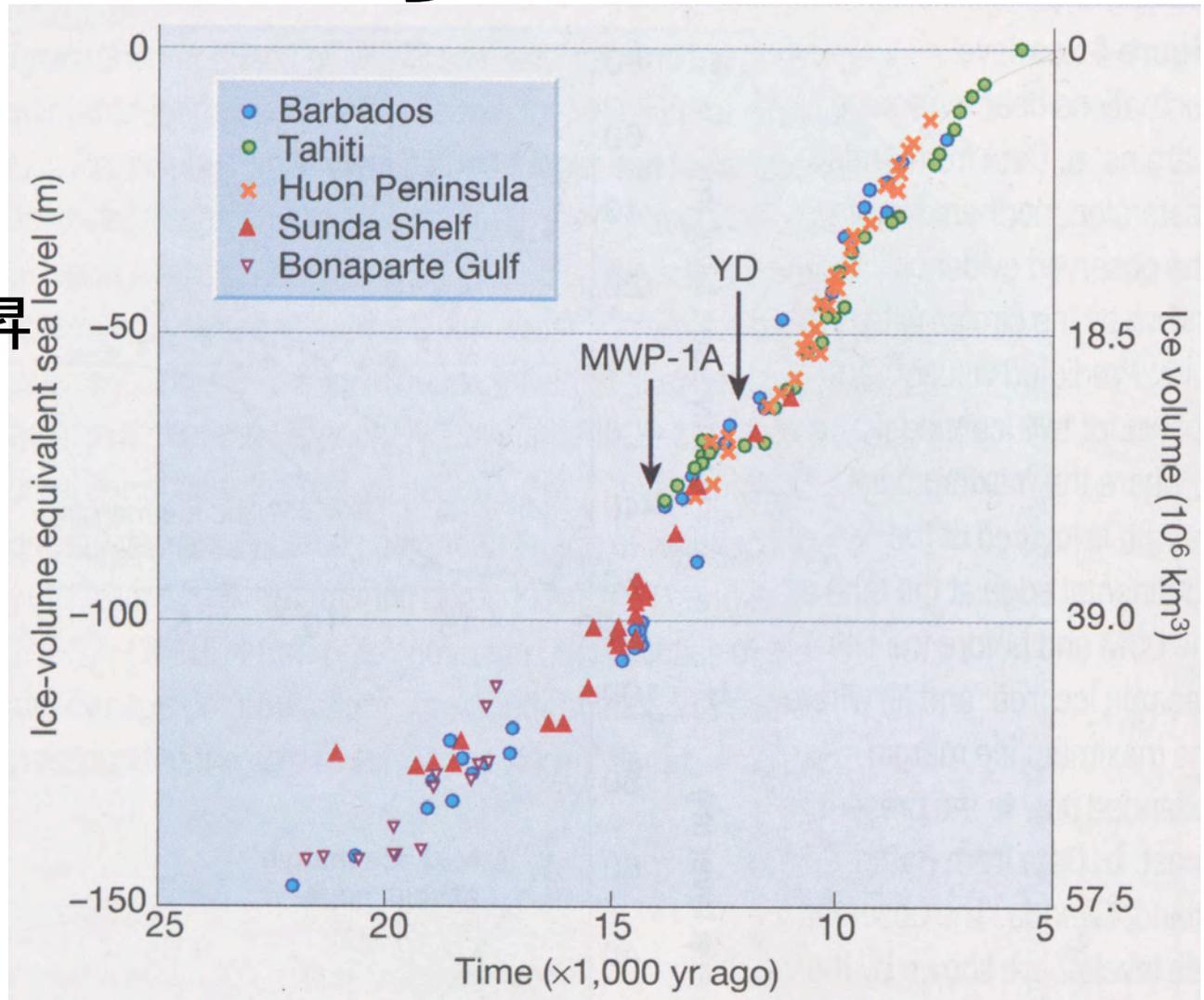
南極氷床の衛星観測



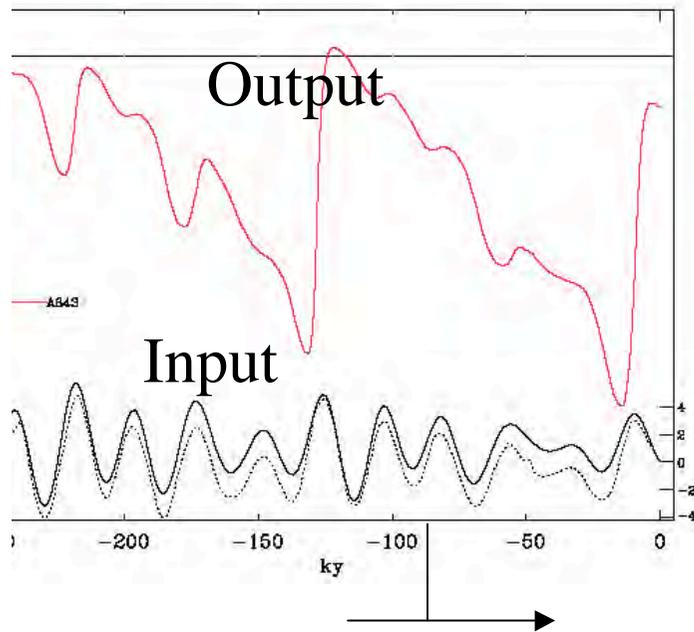
過去2万年の海水位の高精度データ (海岸段丘の解析による) Lambeckら2002

2万年前から氷床が
融けはじめた！
100年につき
1メートル海水準上昇

(1) 海水酸素同位体比
データより早くから
海面上昇始まる(19ka)
(2) 氷床ごとに後退の
Timingが違えば及ぼす
影響も異なる。

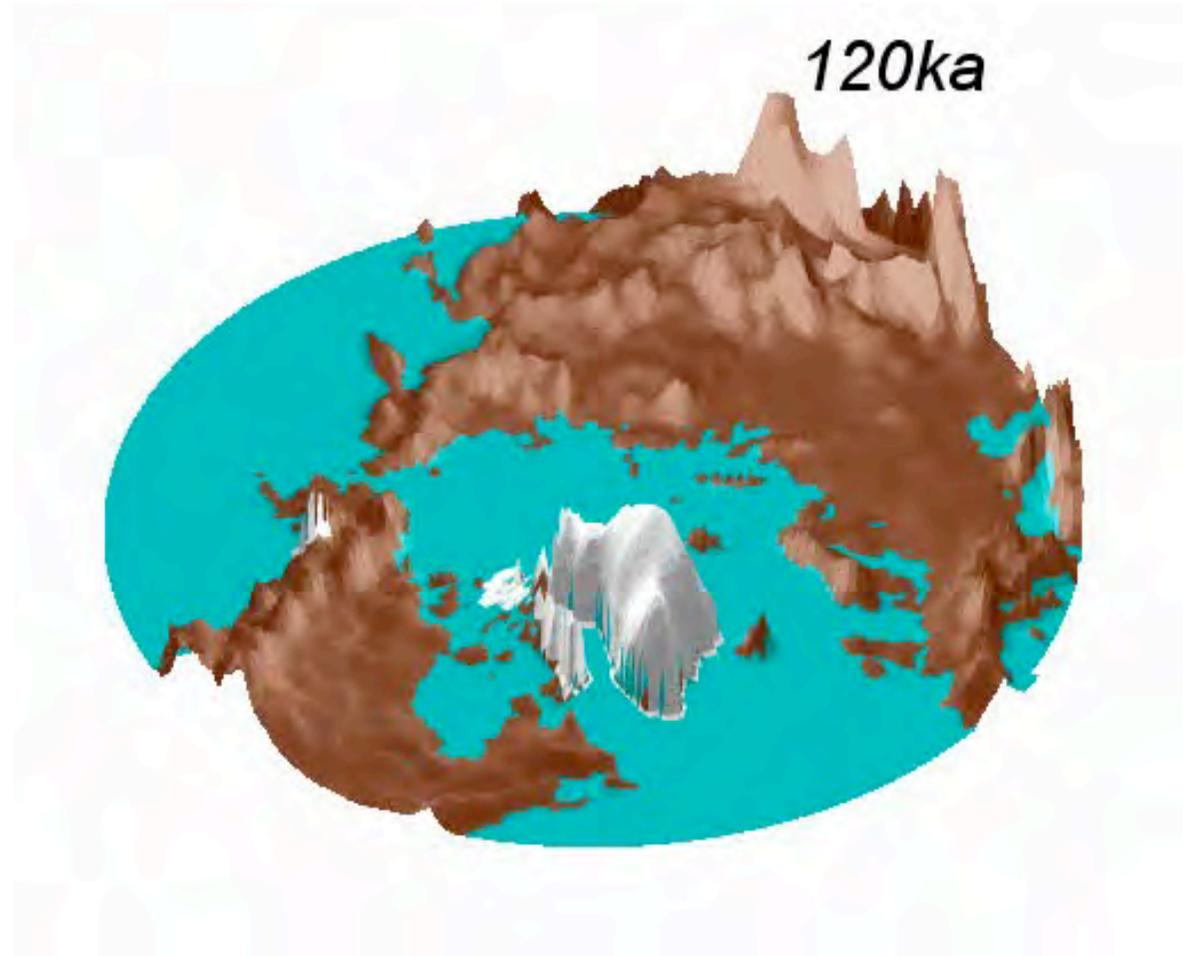


過去12万年の変動計算 (Abe-Ouchi et al 2007)

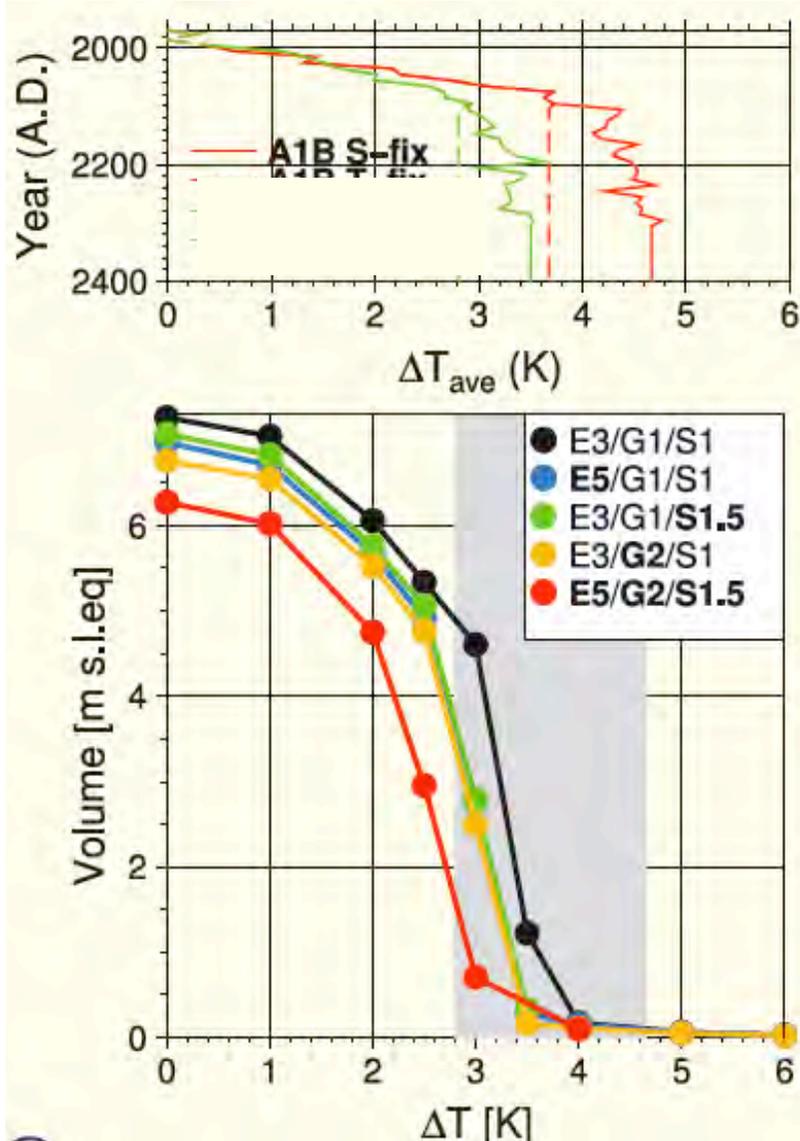


Start of the movie

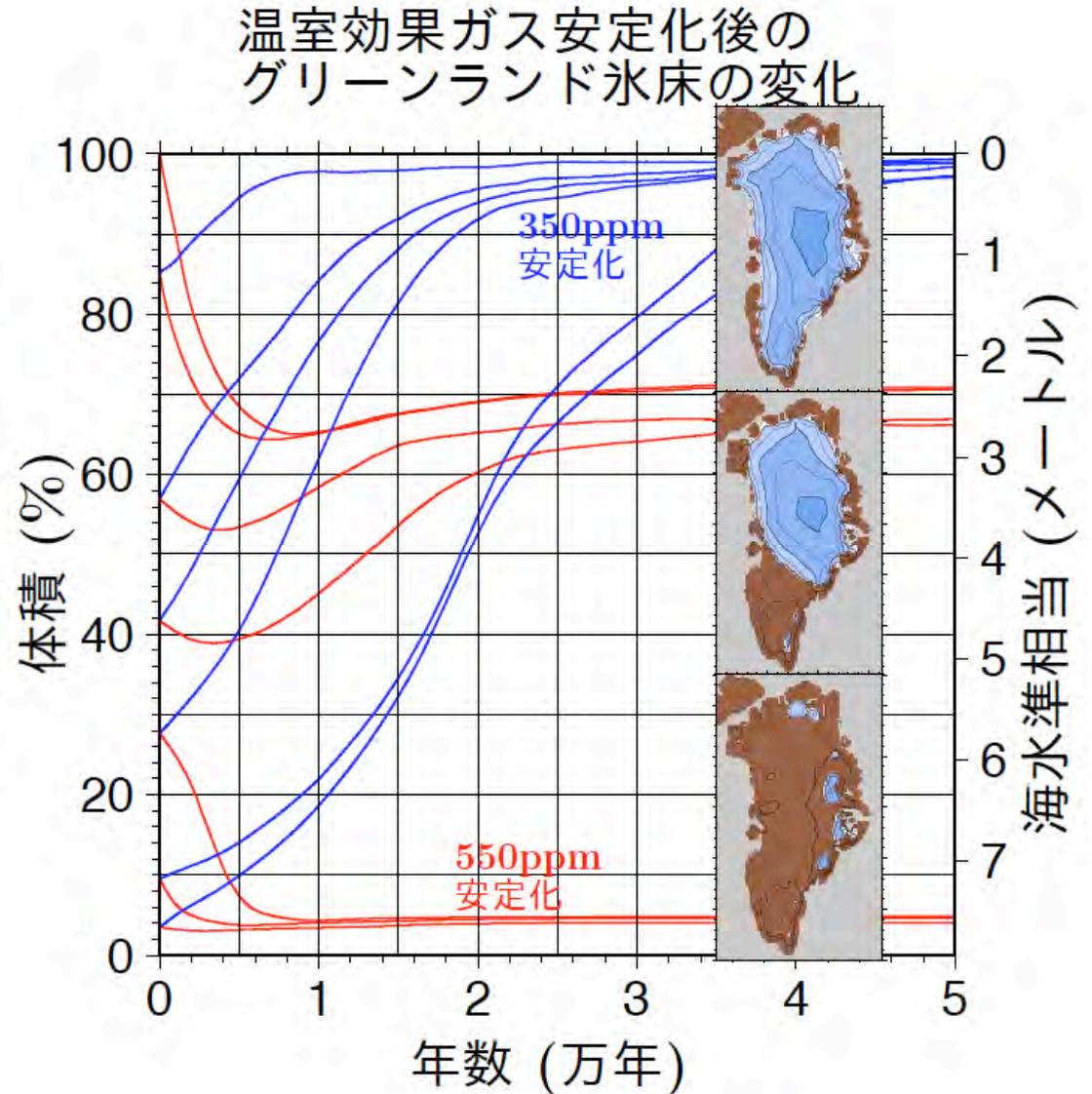
軌道要素と温室効果ガスを
モデルに与えた数値実験
ゆっくり成長、早い後退が
再現



氷床の感度と安定化シナリオ



(Saito and Abe-Ouchi, 2006, 2008)



(阿部と齋藤による)

IPCC 第5次報告書執筆予定

- WG1 (4章) 雪氷圏の観測
- WG1 (5章) 古気候の情報
- WG1 (12章) 海水位に関する見通し
- WG 横断テーマ 海水位と氷床

ご清聴ありがとうございました。



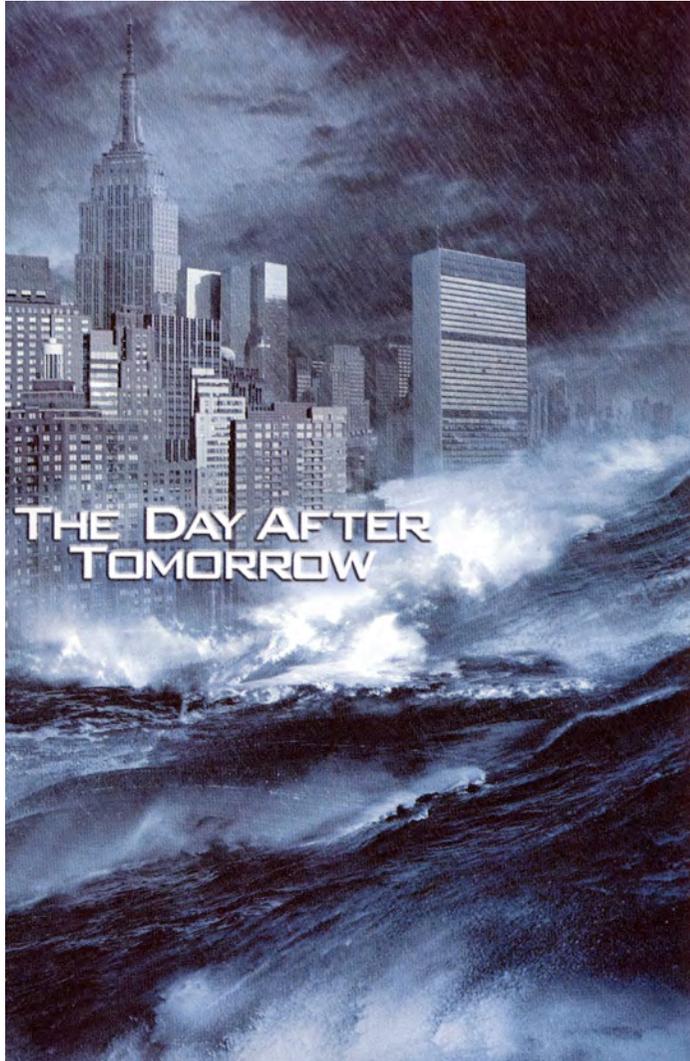
さいごに

- 過去や最近の環境変化の観測データをよく解析することが大事。
- 同じ外的要因でも気候システムの応答がかなり異なることがあります。
- 気候システムプロセスを考慮した気候モデルによる解釈や予測が必要。

ご清聴ありがとうございました。



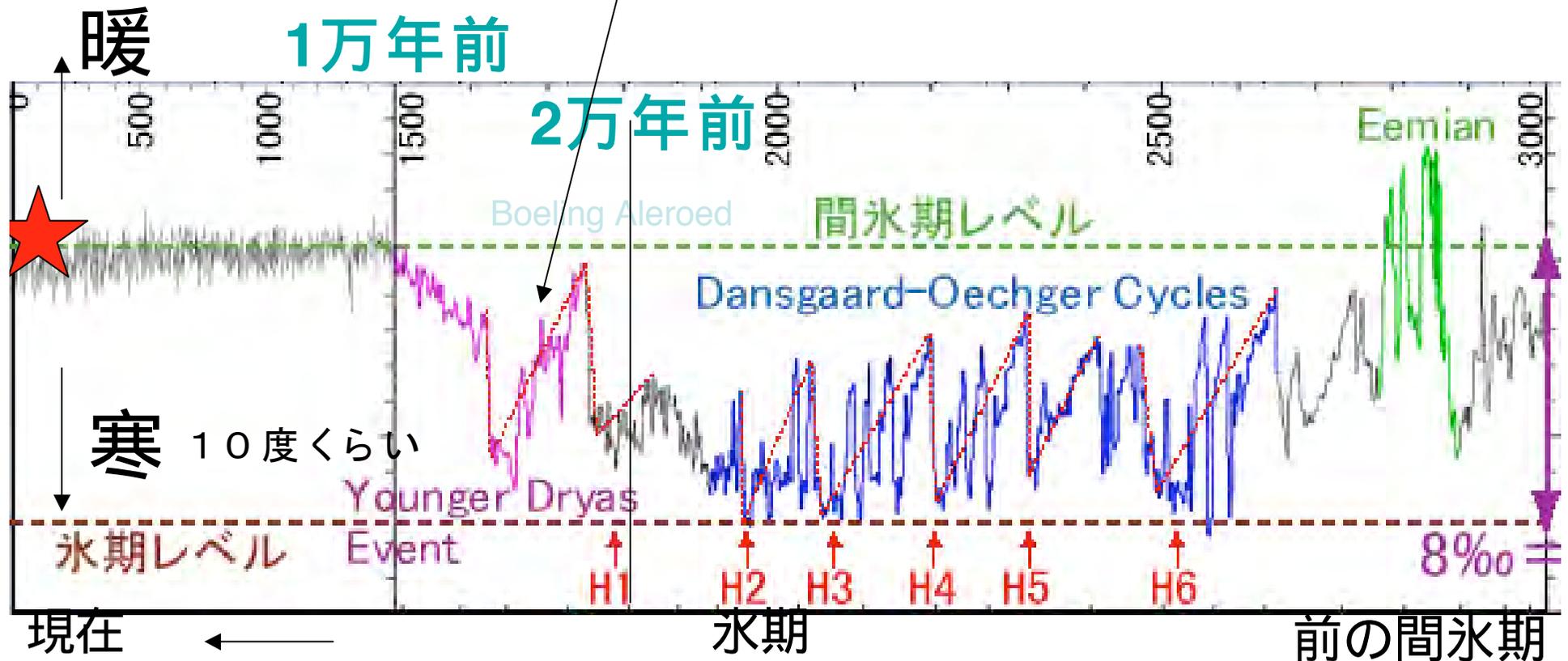
温暖化すると氷河期に？



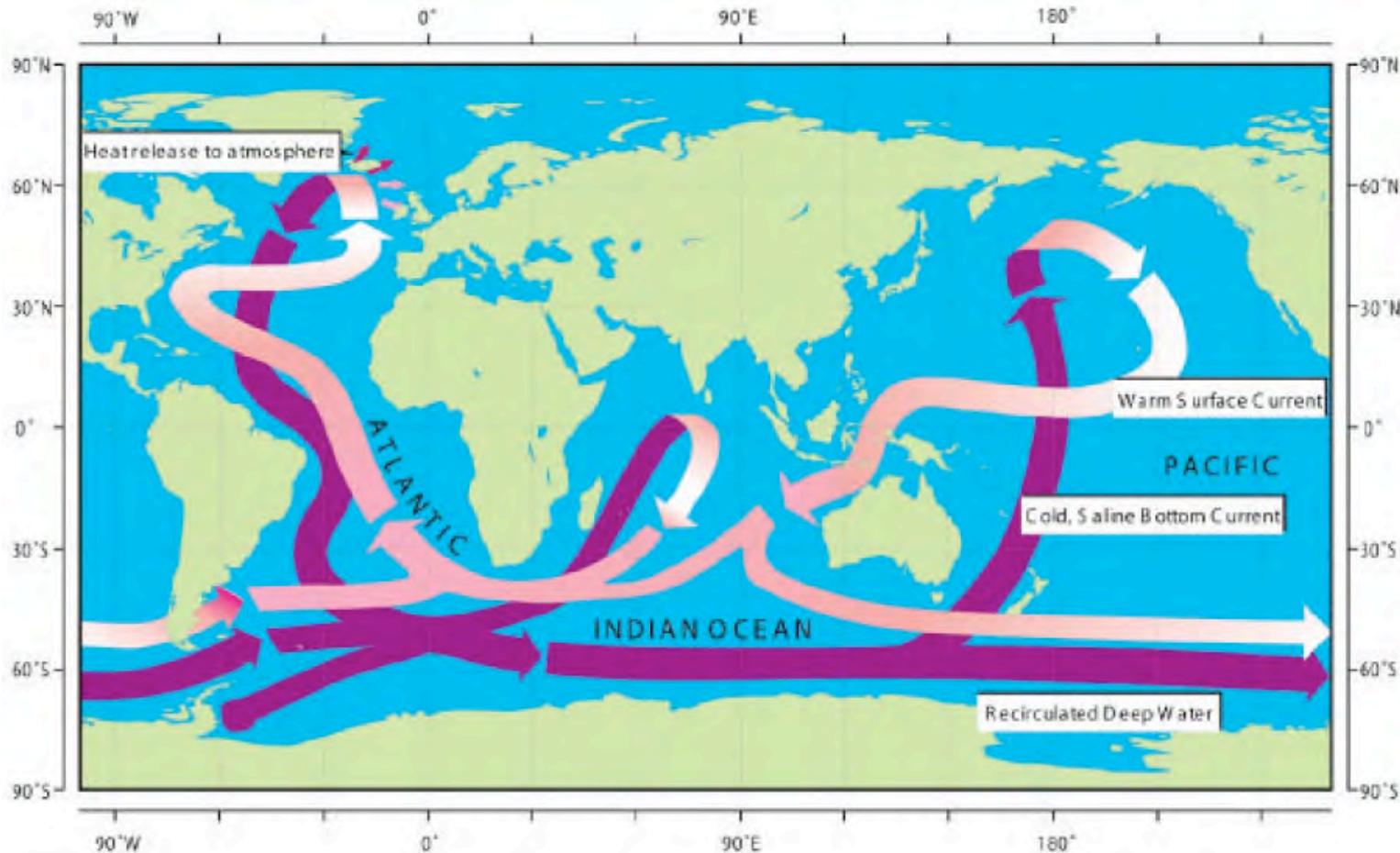
温暖化中の寒の戻り＝ ヤンガードライアス事件：



- Greenland 氷床コアによる氷期／間氷期の
気候復元



深層を含む海洋大循環 (熱塩循環)

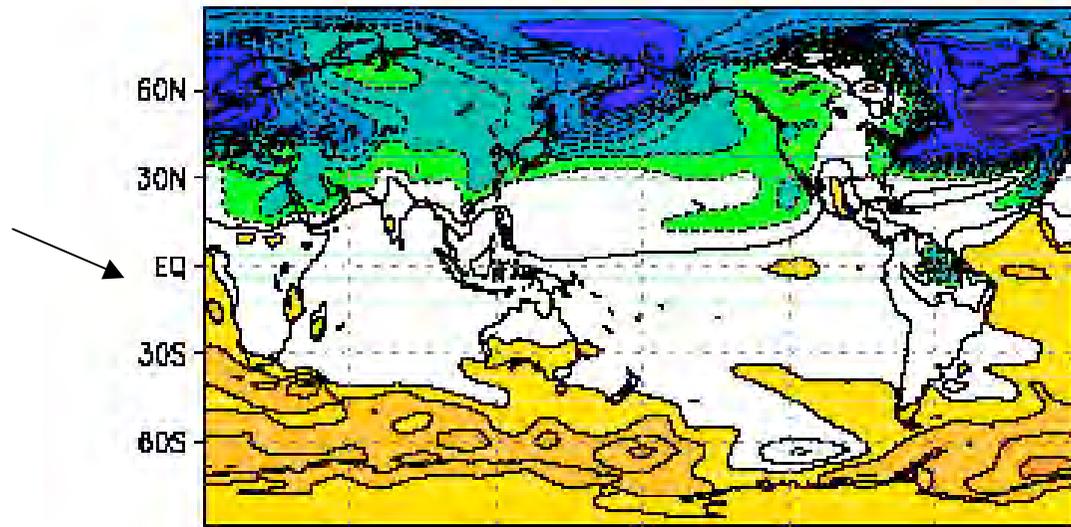
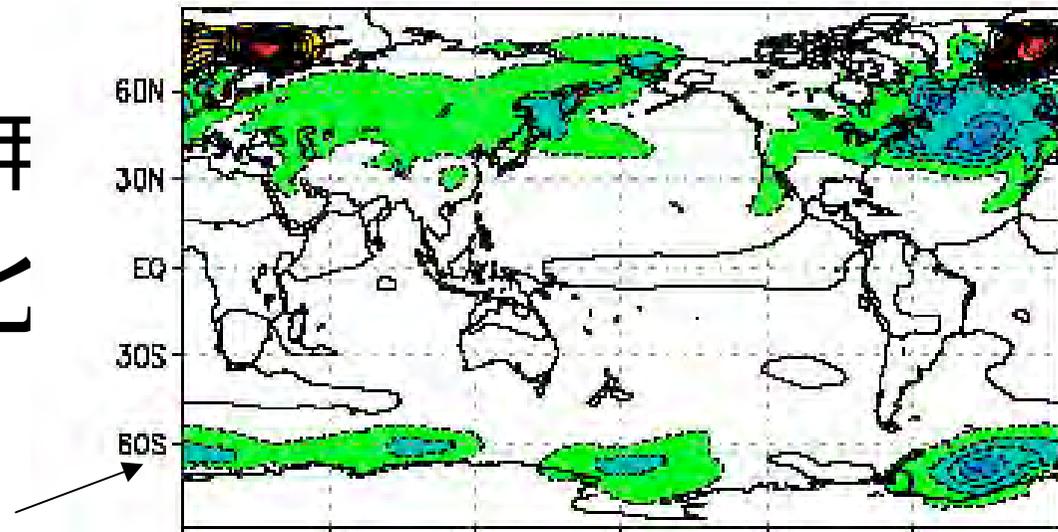


北大西洋と南極周辺で沈む込み、深層の流れを形成。
表層では風による海流も生じる。

淡水流入500年後の気温変化

- 現在気候の場合
古気候データよりずっと小さい変化
- 寒冷気候の場合

古気候データをよく説明



過去の気候イベントからの類推で
将来予測するのは危険！

