

南極・北極に見る 地球温暖化の現状と将来 —南極・北極は本当に温暖化しているのか？

山内 恭

(国立極地研究所; 総合研究大学院大学極域科学専攻)

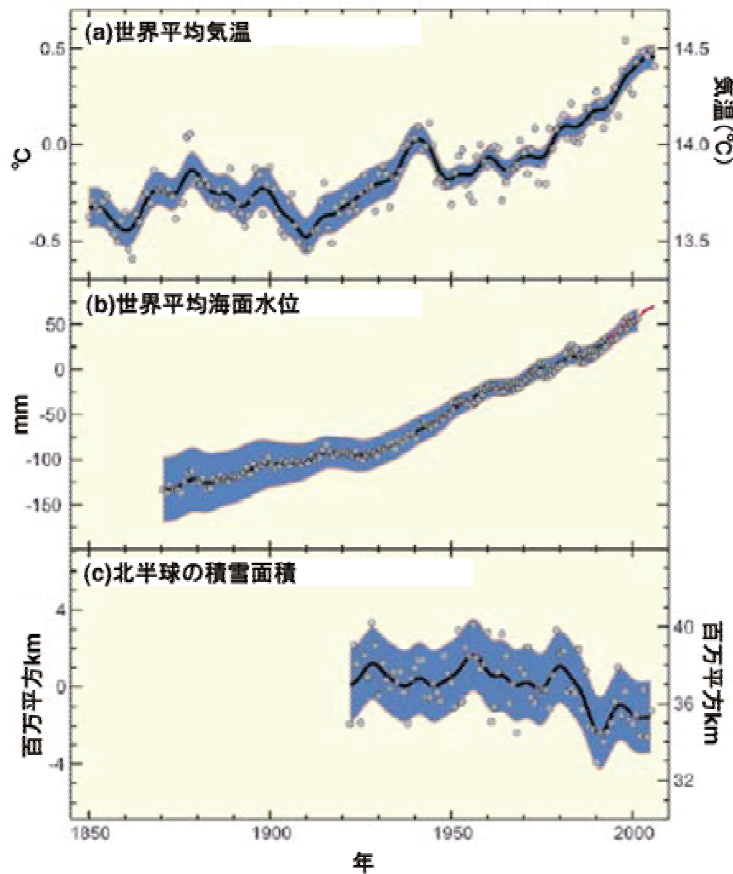
地球規模気候の温暖化

IPCC(気候変動に関する政府間パネル) 報告

世界平均地上気温、世界平均海面水位、北半球の積雪面積

1961～1990年
平均との差

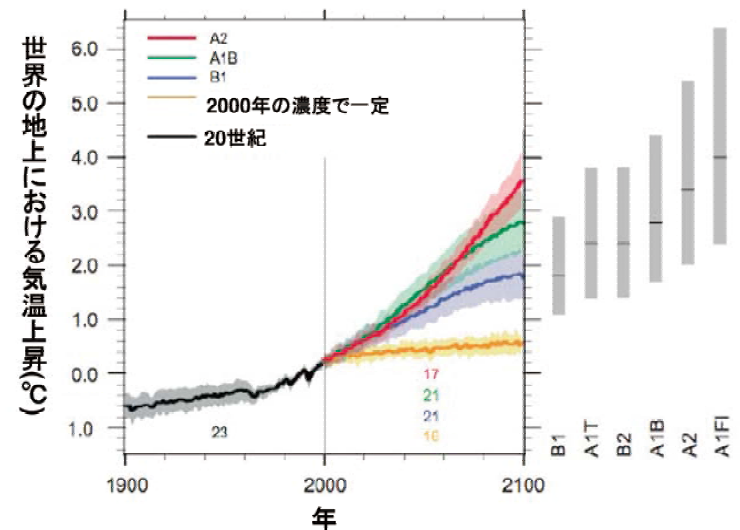
滑らかな曲線は
10年平均値、丸
印は各年の値、
青色の部分は
不確実性の幅を
示す。



温暖化による極地の変化

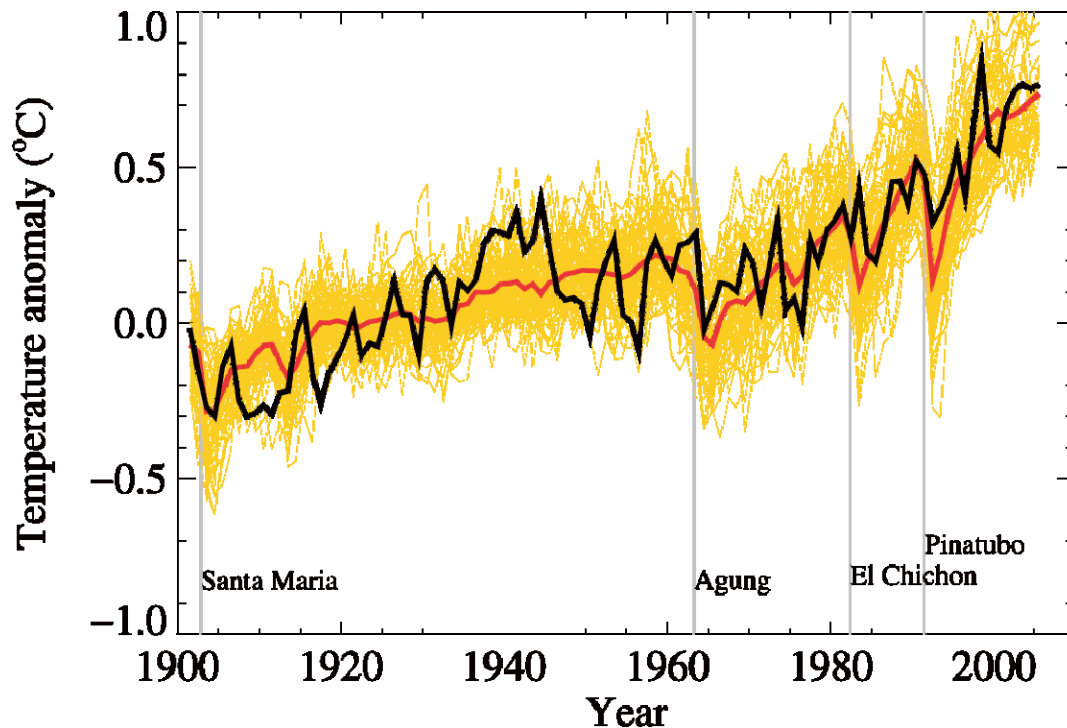
- ・北極海氷の減少
- ・グリーンランド氷床の融解

世界平均地上気温の温暖化予測結果
～1980-1999年平均との比較～

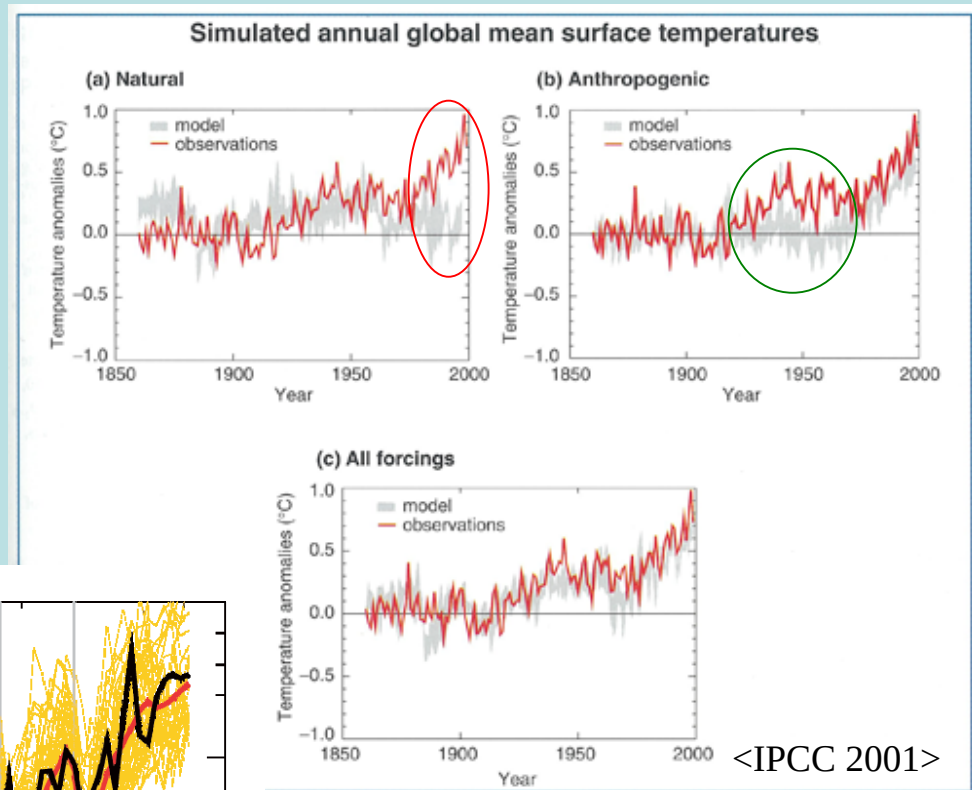


気候モデルによる再現(IPCC)

20世紀の全球平均地上気温観測値(黒)
と14の気候モデルによる再現値(黄)、
その平均(赤)



<IPCC, 2007>

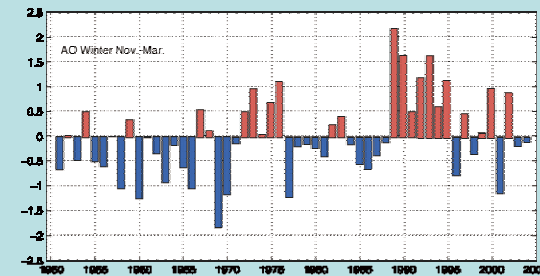
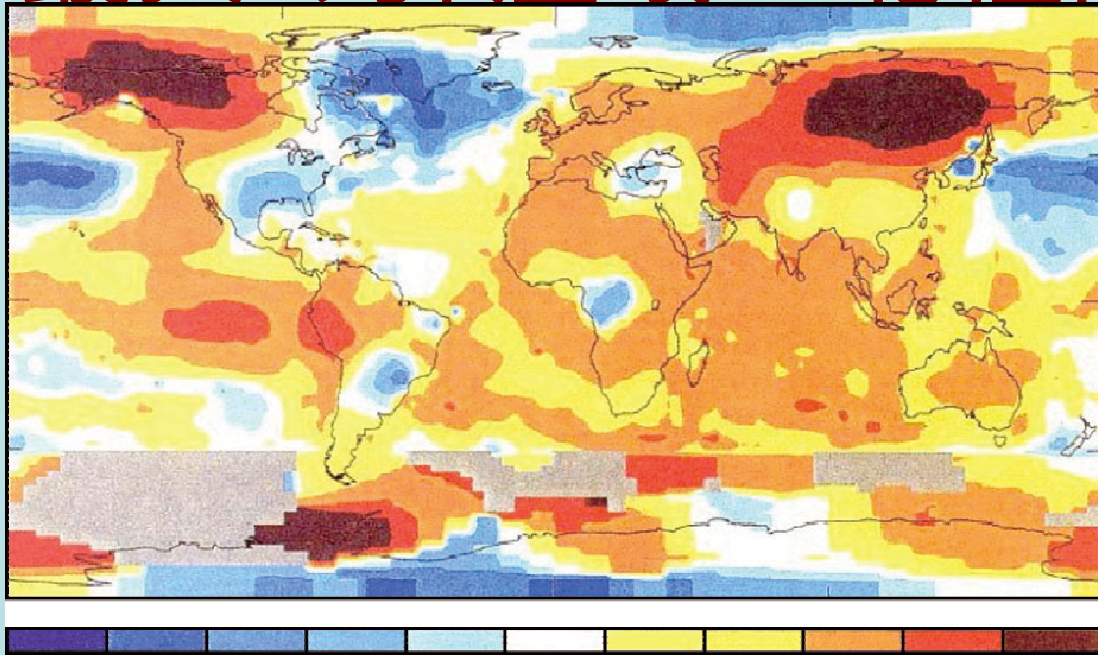


主な変動要因の評価。自然変動
要因のみによるモデルは最近の昇
温を説明できない(a)、人為変動
要因のみによるモデルは1930年代
の昇温を説明できない(b)、両方
の要因を入れると観測値の変化を
説明できる(c)。赤が観測値、灰色
がモデル。

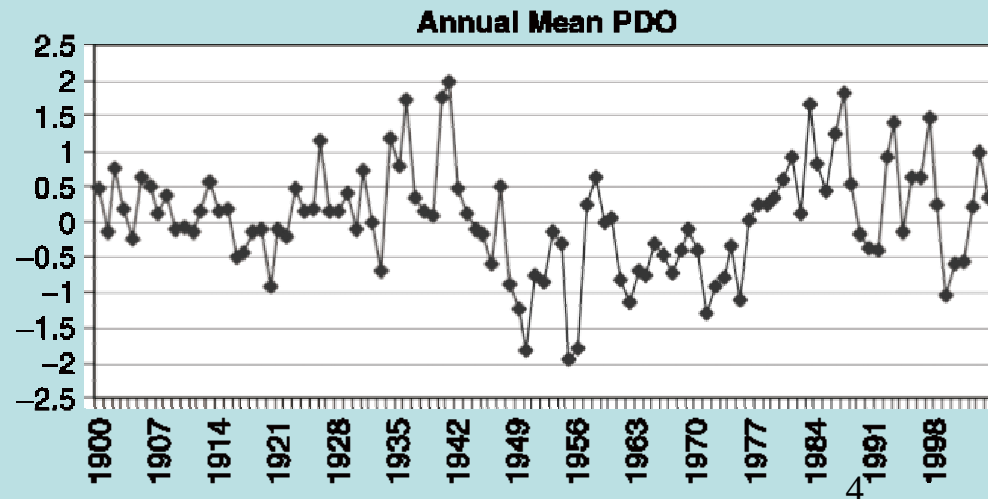
最大の昇温域—北極陸域と南極半島

環境レジーム

冬期の北極振動指数(AO)
(Turner et al., 2007)



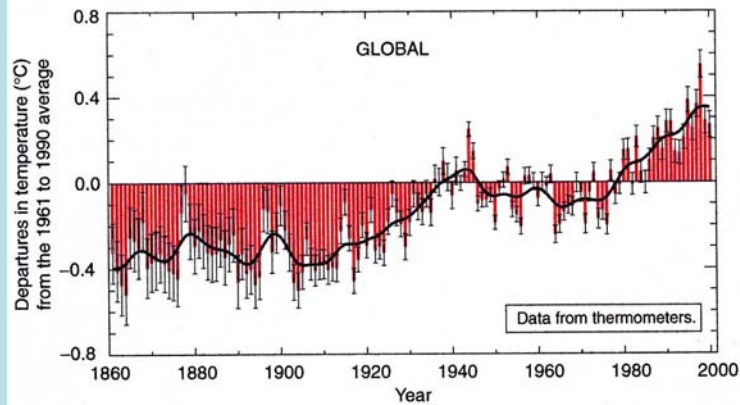
1950～1998年の地上気温変化傾向
(Turner et al., 2007; after Hansen et al.,
1999). アメリカ北西部、中央・東シベリアお
よび南極半島で「極域の増幅」が目立つ！
グリーンランド、南極内陸域は昇温していな
い。



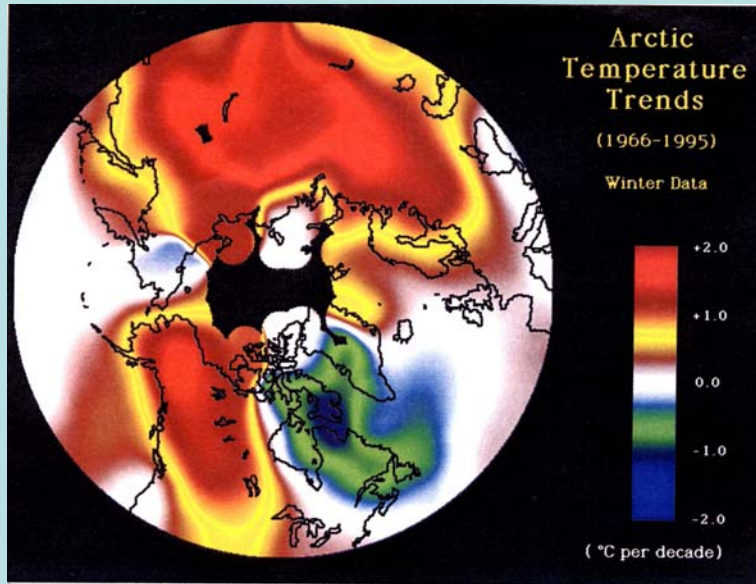
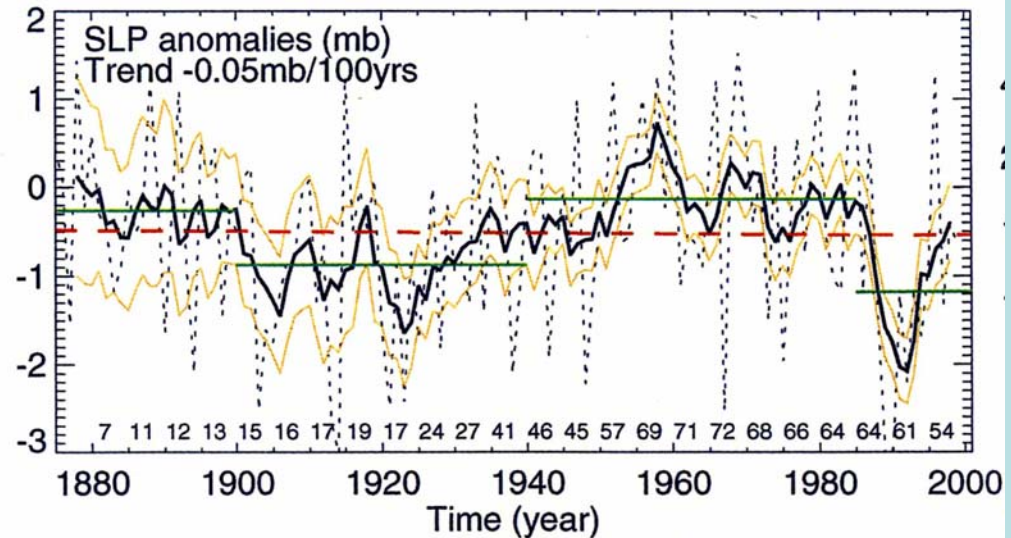
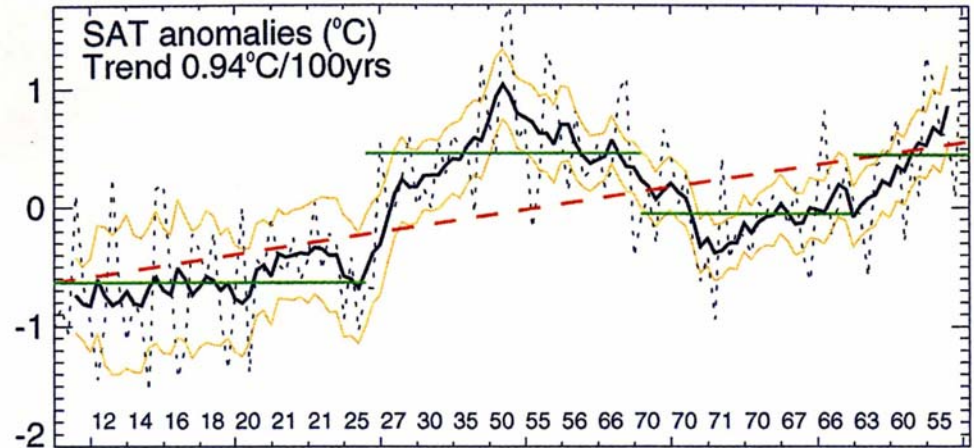
太平洋10年周期振動年平均値 PDO (Turner et al., 2007)

温暖化と北極

地球全体平均地上気温の変動

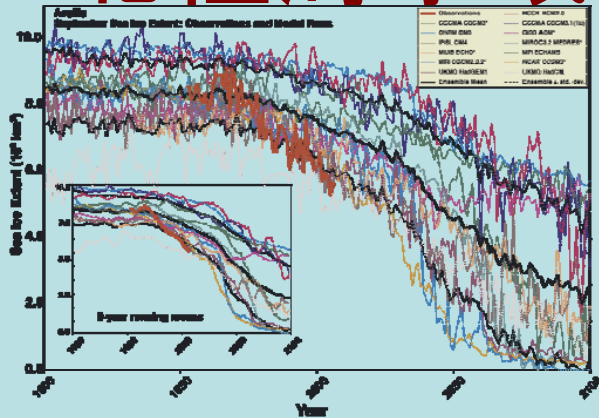


1875年以来の北極域地上気温変動

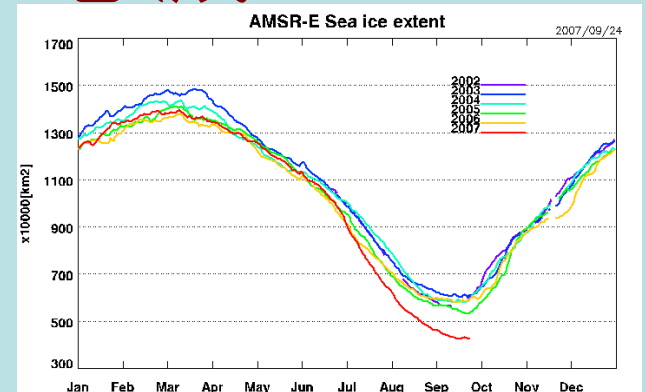


北極域の地上気温変動（30年） 北極では1920～40年にも強い温暖化があった

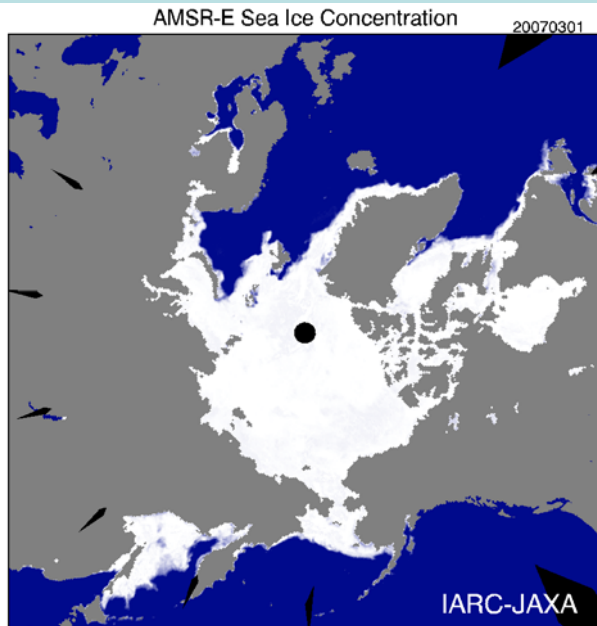
北極海水域面積の急減



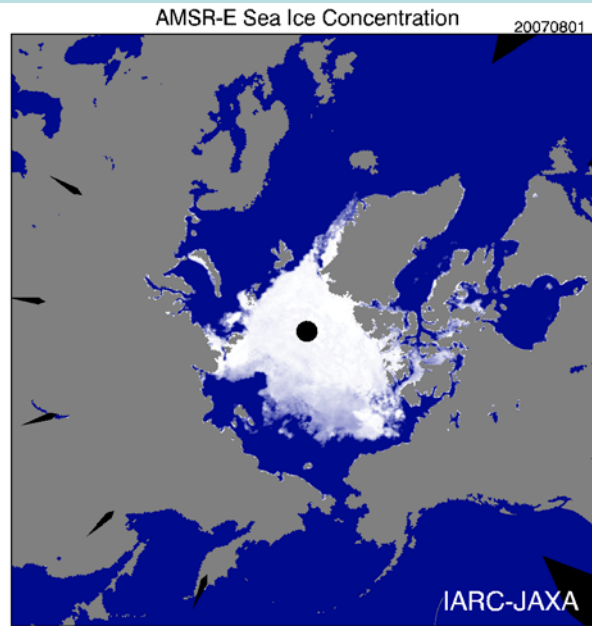
北極海氷の面積はは気候モデル予測よりはるかに早く減少している



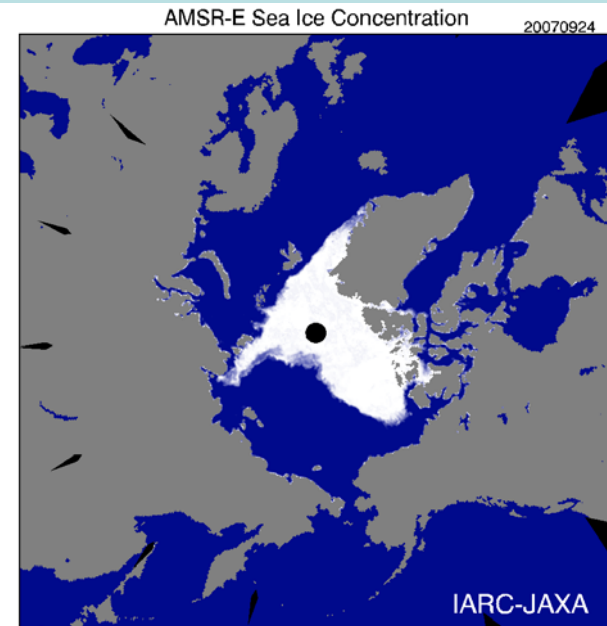
北極海氷面積、近年の観測値



2007年3月1日



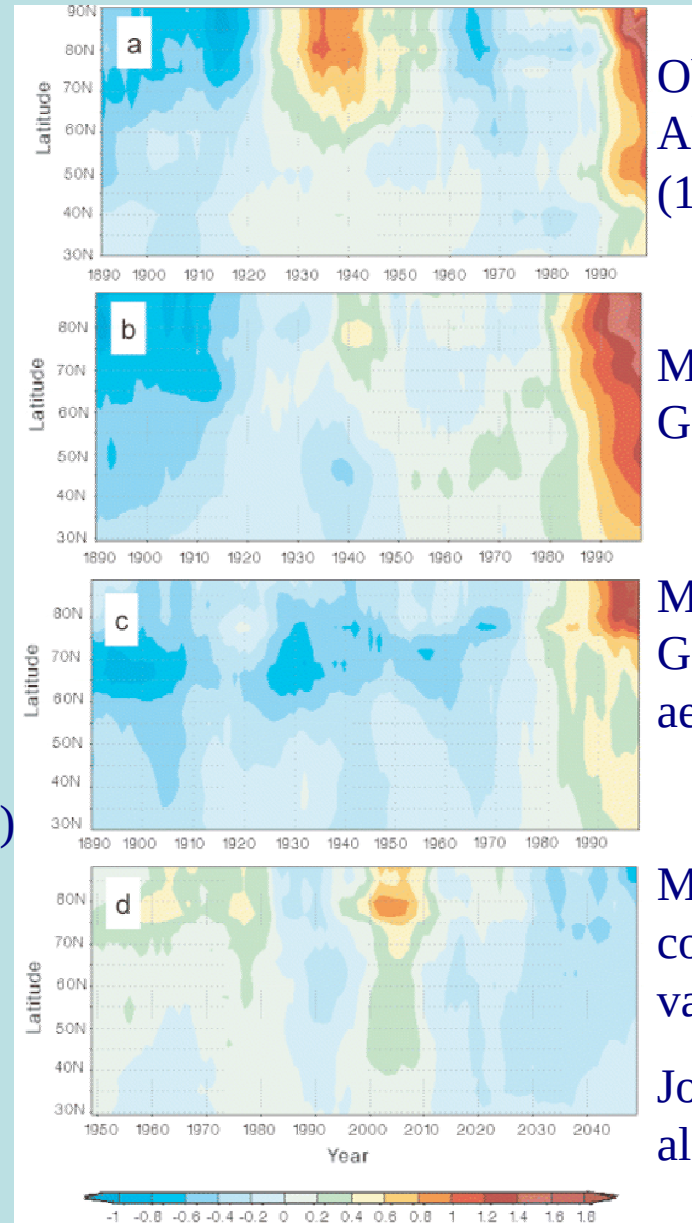
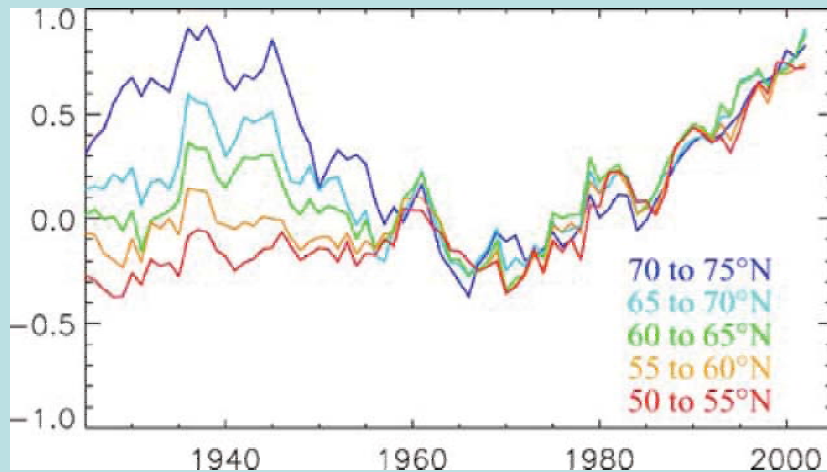
8月1日



9月24日

衛星からみた北極海氷の広がり、2007年9月24日、最大規模に縮小

北極温暖化—20世紀前半；観測とモデル



Obs. AARI data,
Alekseev et al.
(1999) + α

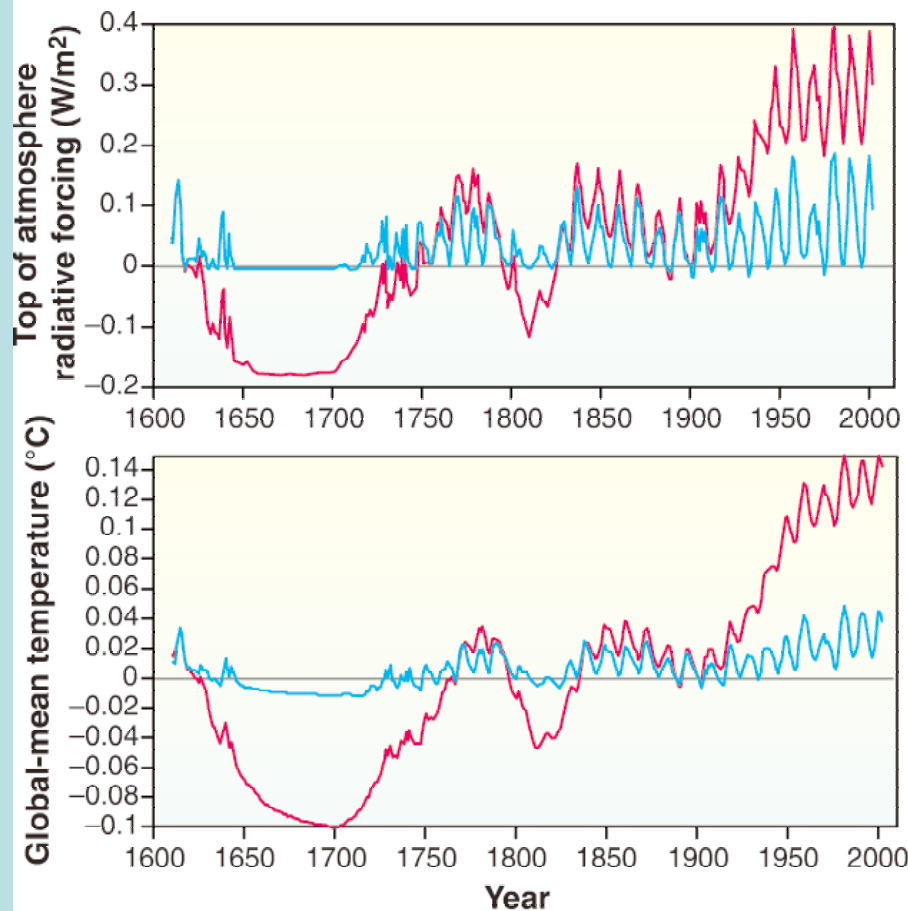
Modelled,
GHGs only

Modelled,
GHGs+sulfate
aerosols

Modelled
control run,
variability

Johannessen et
al. (2004)⁷

Forcing: solar, aerosol



Apparent magnitude of solar forcings. (Top) Top-of-atmosphere solar forcing (red) from (7), showing the sunspot cycle component separately (blue). (Bottom) Global-mean temperature responses to the forcings shown in the top panel, calculated with the MAGICC climate model using best estimate parameters (19). Forcings and responses are zeroed in 1900. The temperature response to the speculative long-term component is much larger than to the sunspot-cycle component alone.

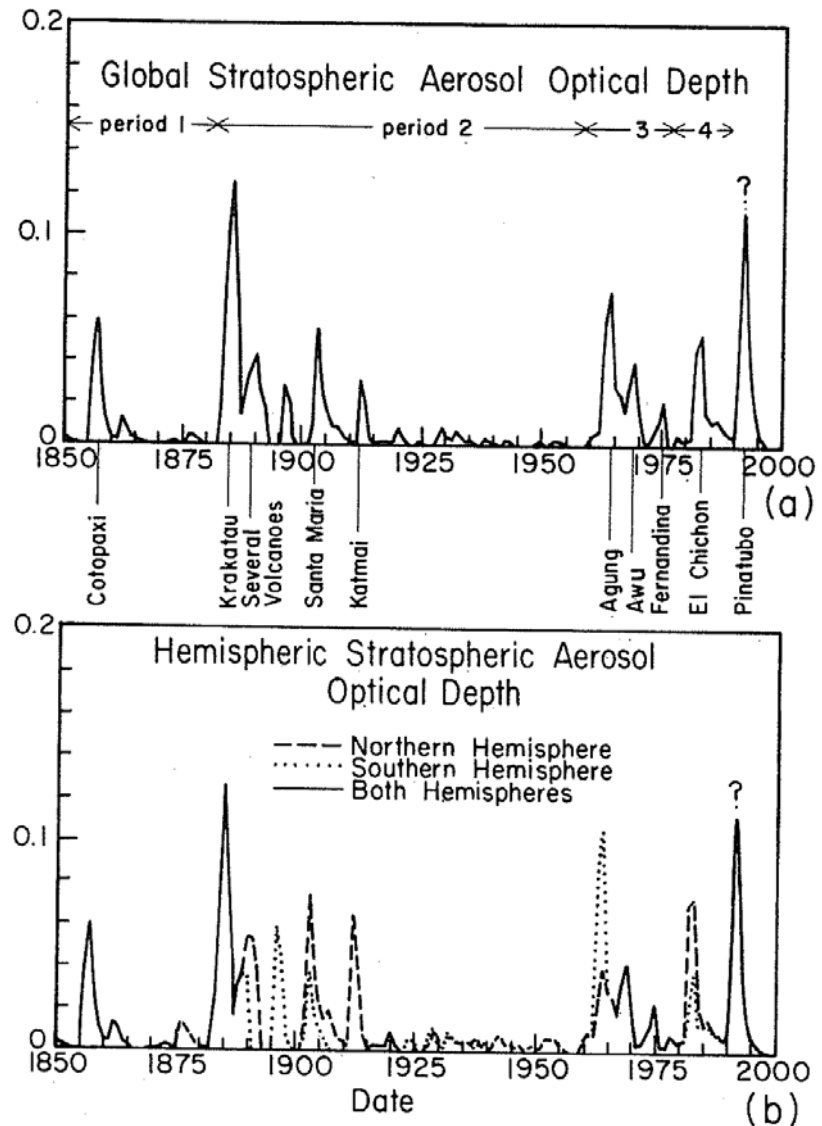
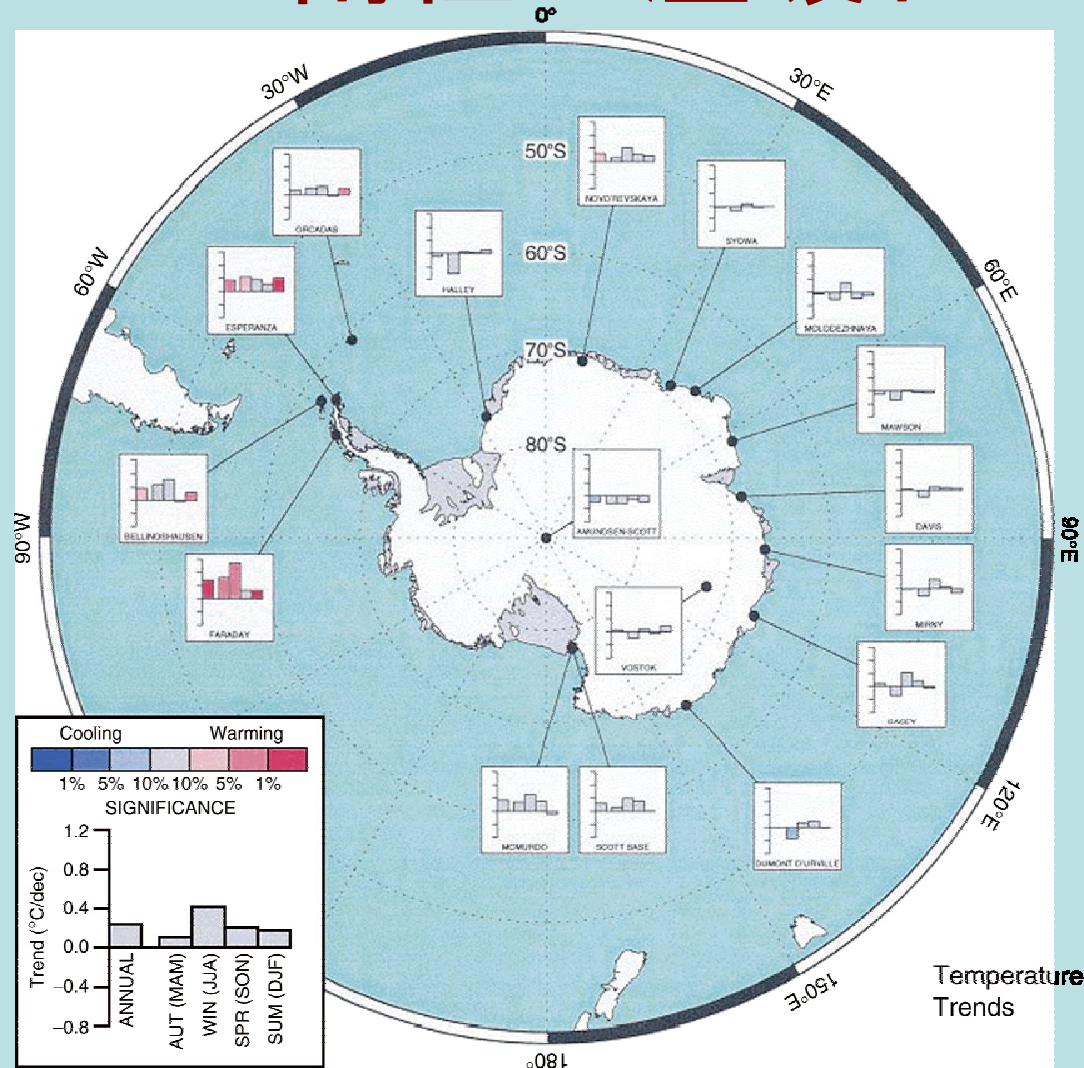
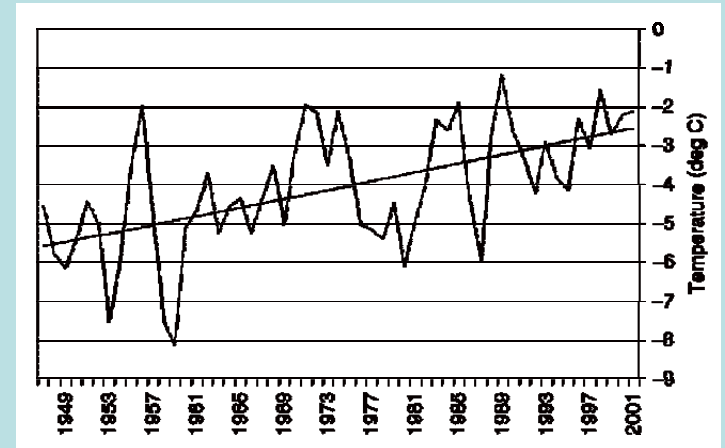


Fig. 1. Estimated stratospheric aerosol optical depth at $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$: (a) global mean and (b) hemispheric means.

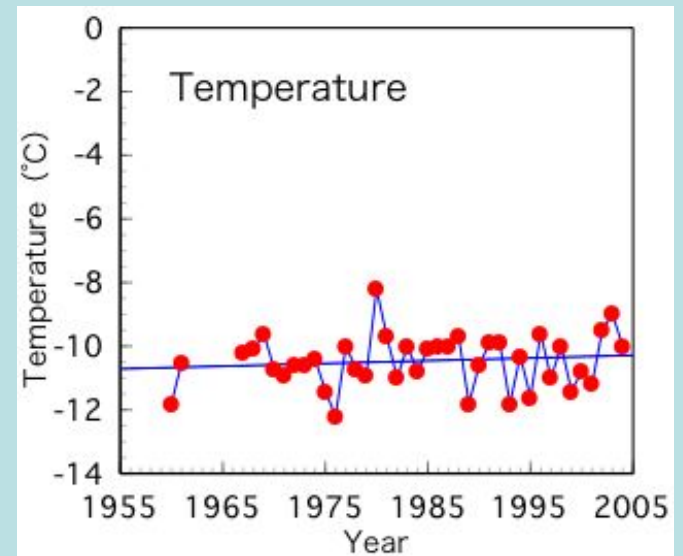
南極は温暖化しているか？



南極各基地の気温変化傾向 (Turner et al., 2007)
南極半島域は著しい温暖化、東南極は温暖化していない、内陸はむしろ寒冷化

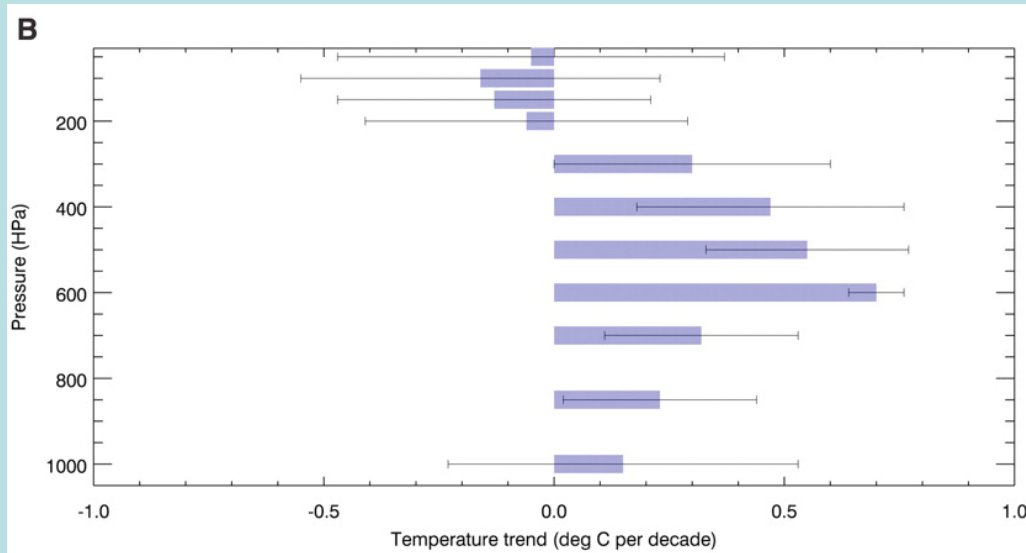


ファラデー基地の年平均気温変化



昭和基地の年平均気温変化⁹

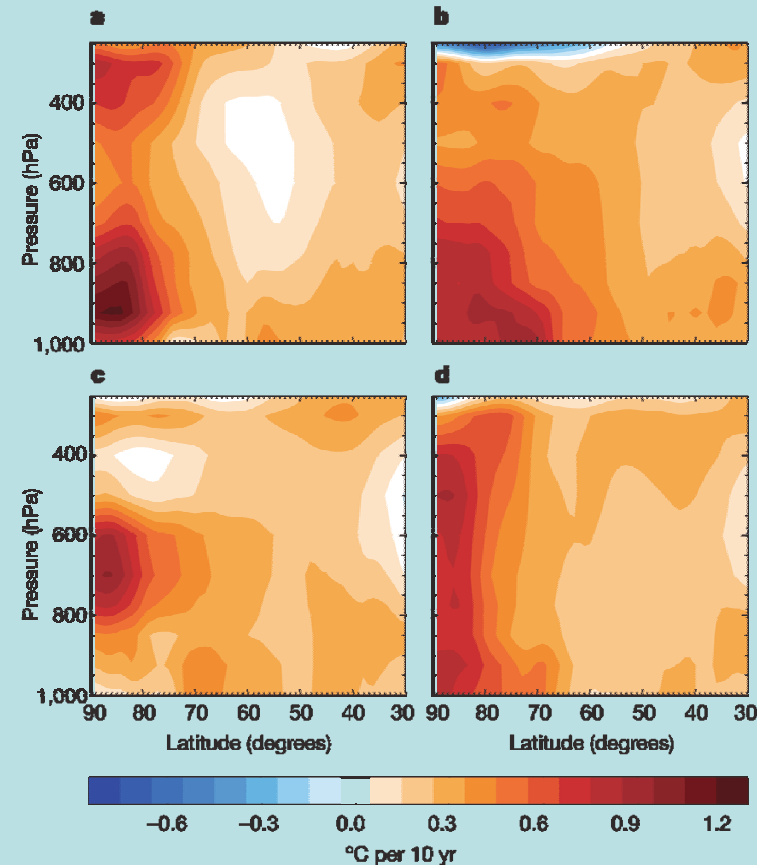
南極の温暖化？—上空の変化



南極9基地における冬の上空気温変化1971
～2003年 (Turner et al., 2006)

下層の温暖化、成層圏(高度10 km～50 km)
は寒冷化；

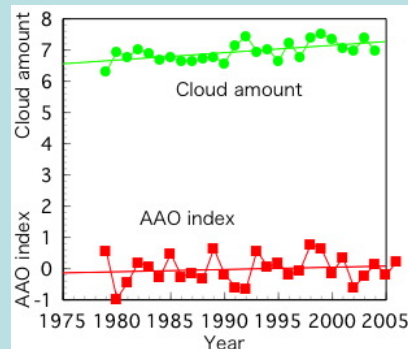
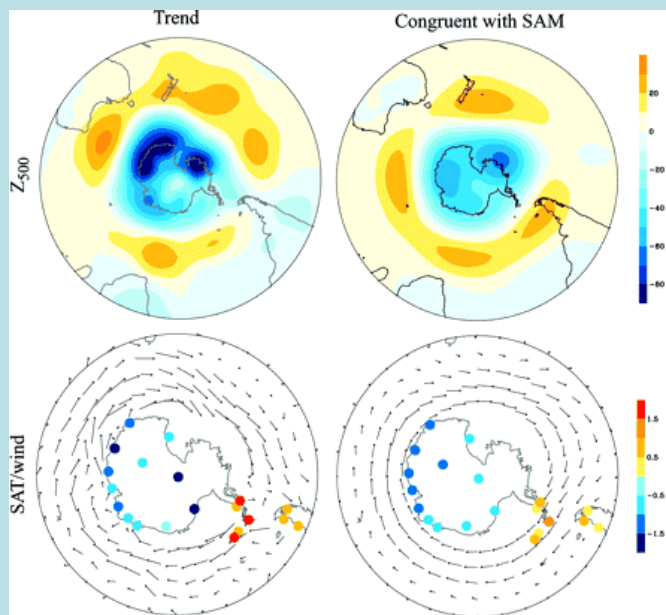
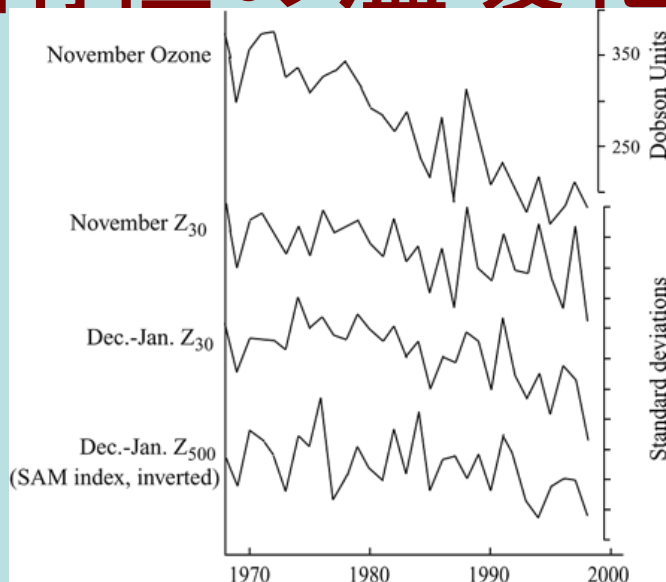
地上に比べ対流圏中層が激しい温暖化！



気温変化傾向の緯度一高度分布
(Graversen, 2007)

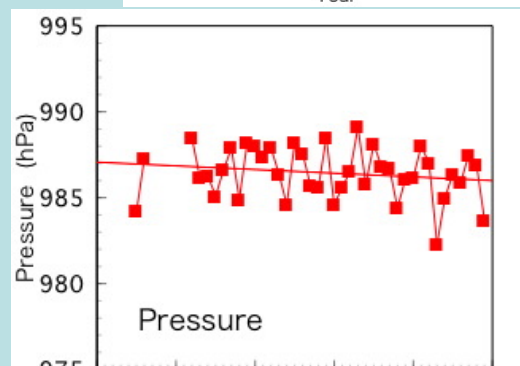
北極温暖化は大気中層から？
←氷・アルベードフィードバックでは
ない原因？

南極の温暖化？一極渦一南極振動

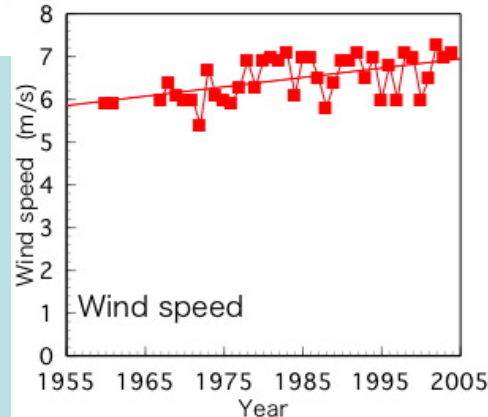


雲量増加

南極振動指数変化？



気圧低下
(有意でない)



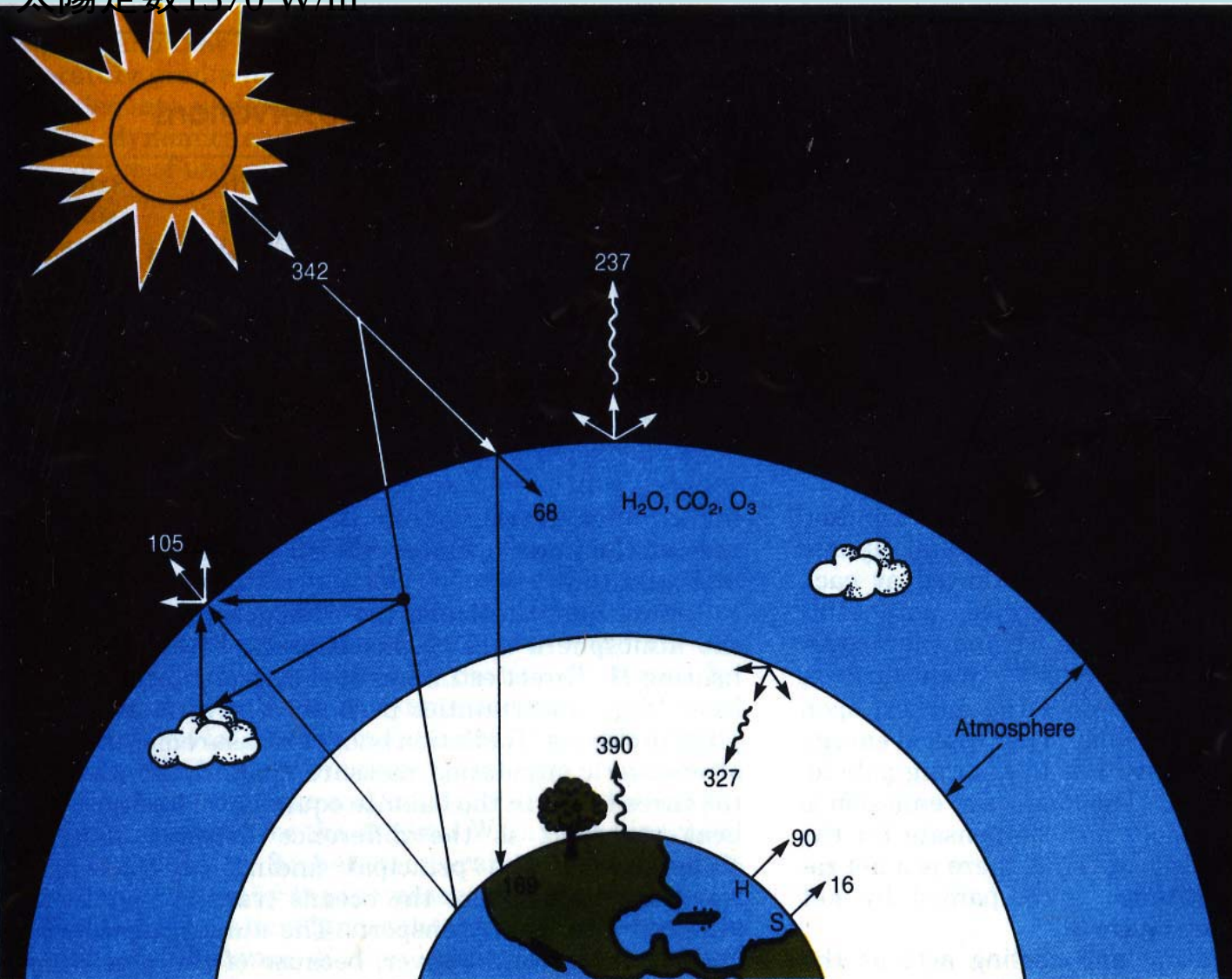
風速増加

大気循環場の指標、南極振動(AAO、SAM)

昭和基地の気圧、風速も整合的¹¹

温室効果とは？—地球の熱の出入り

太陽定数 1370 W/m^2



地球平均の姿

太陽からの放射エネルギー 342 W/m^2

その内 237 W/m^2 が吸収される

地表面から放出される長波放射 390 W/m^2 (15°C) に対し地球の外には 237 W/m^2 (-18°C) しか放出していない

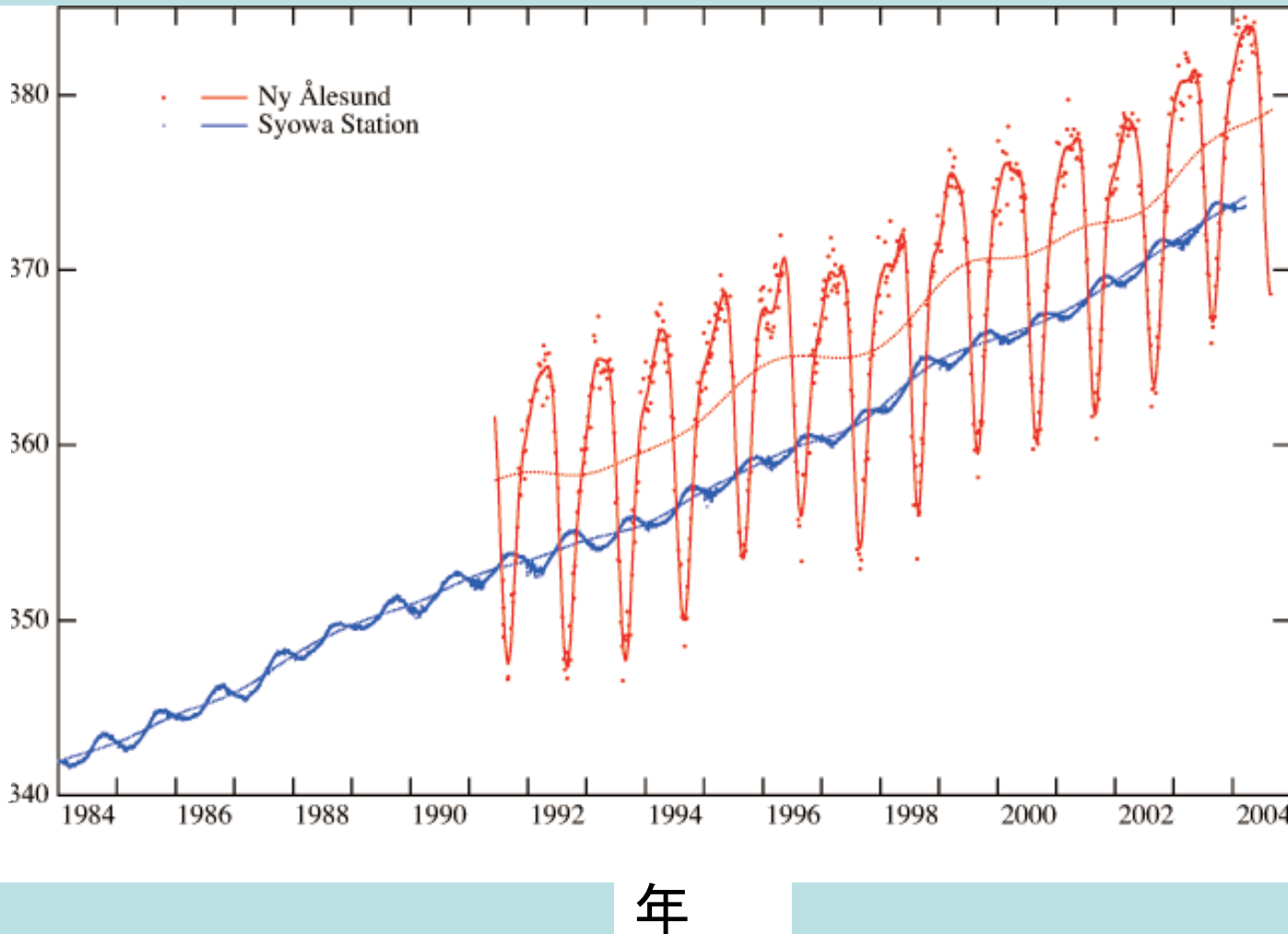
この差 (33°C) が温室効果である

⇕

二酸化炭素や水蒸気

二酸化炭素CO₂の変動

二酸化炭素濃度(ppmv)



季節変動

振幅の南北差

年々増加率
(平均1.5
ppmv/yr)

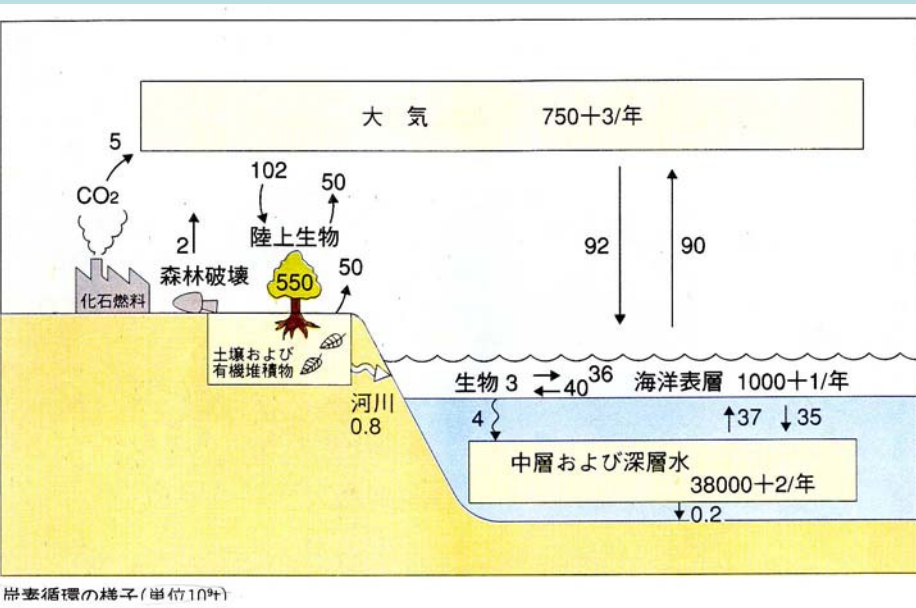
経年増加率
の年々の違い

南北の差

南極昭和基地での変動(青)を北極スバルバル(赤)と比較

炭素循環

二酸化炭素交換—炭素循環 (Gt C)

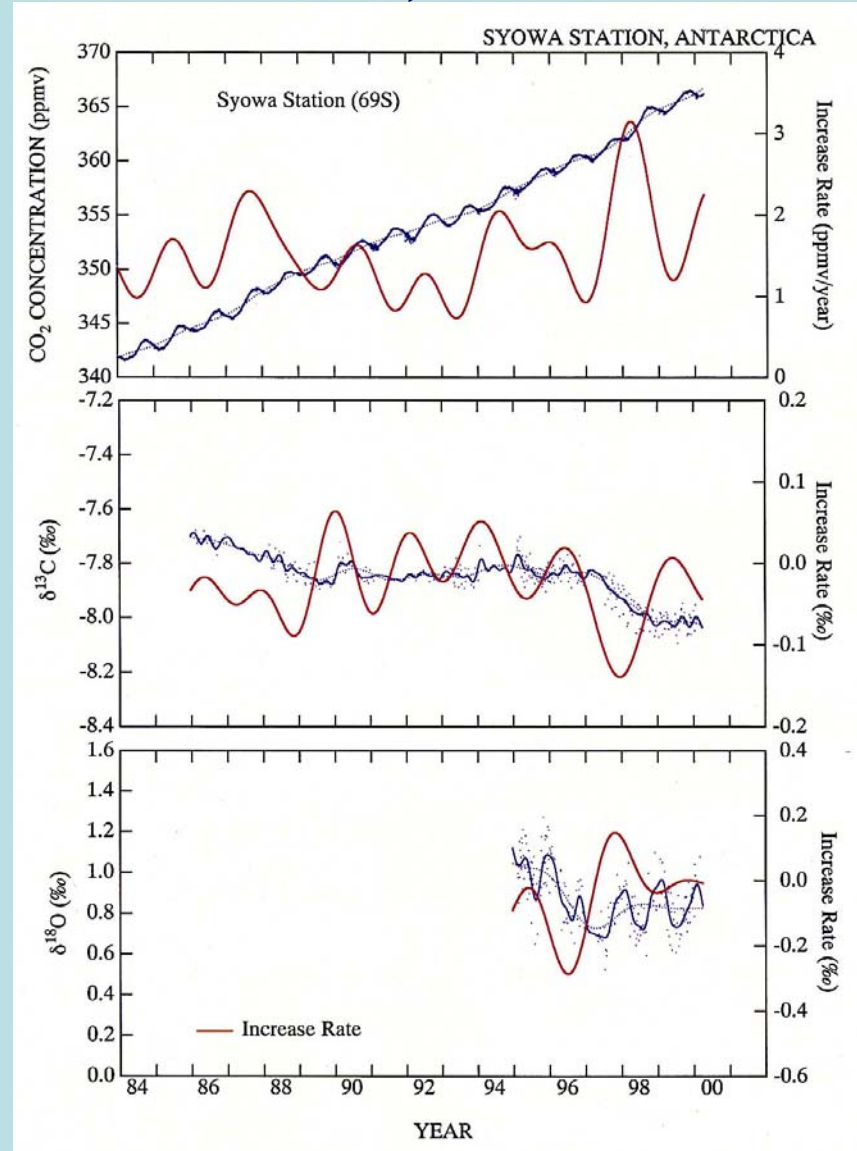


多量のCO₂のリザーバー、多量の交換、正味小さい交換が問題。人為発生7 Gtに対し、大気中残存3 Gt、海洋2 Gt、陸上生物圏2 Gt吸収

同位体比の変動は交換の指標

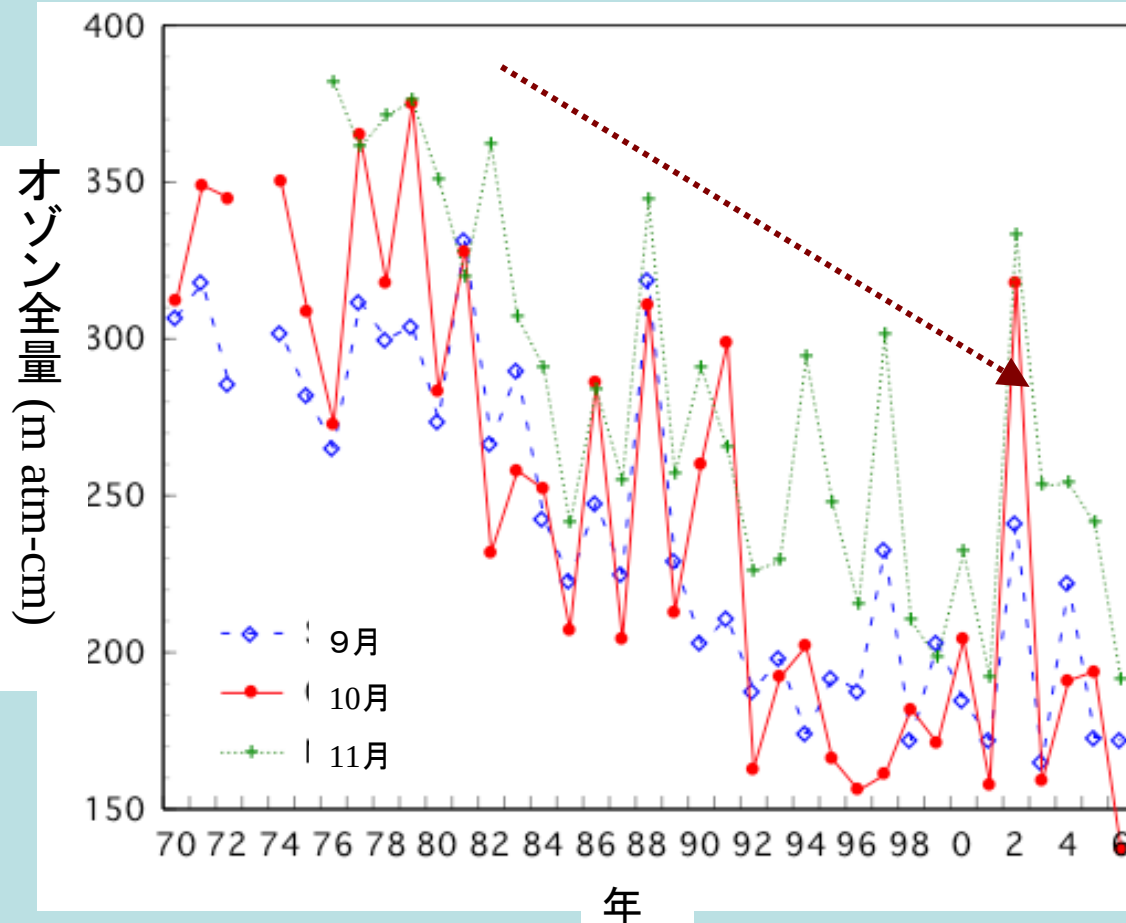
年増加率も年々変動

大気中二酸化炭素濃度および同位体比($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$)の変動



オゾンホールとは？

南極昭和基地におけるオゾン全量の年々変動(9、10、11月)



南極上空の春先の
オゾン量が急に減っ
てきた！

温暖化→成層圏寒冷化→
オゾン減少→さらに成層圏
寒冷化

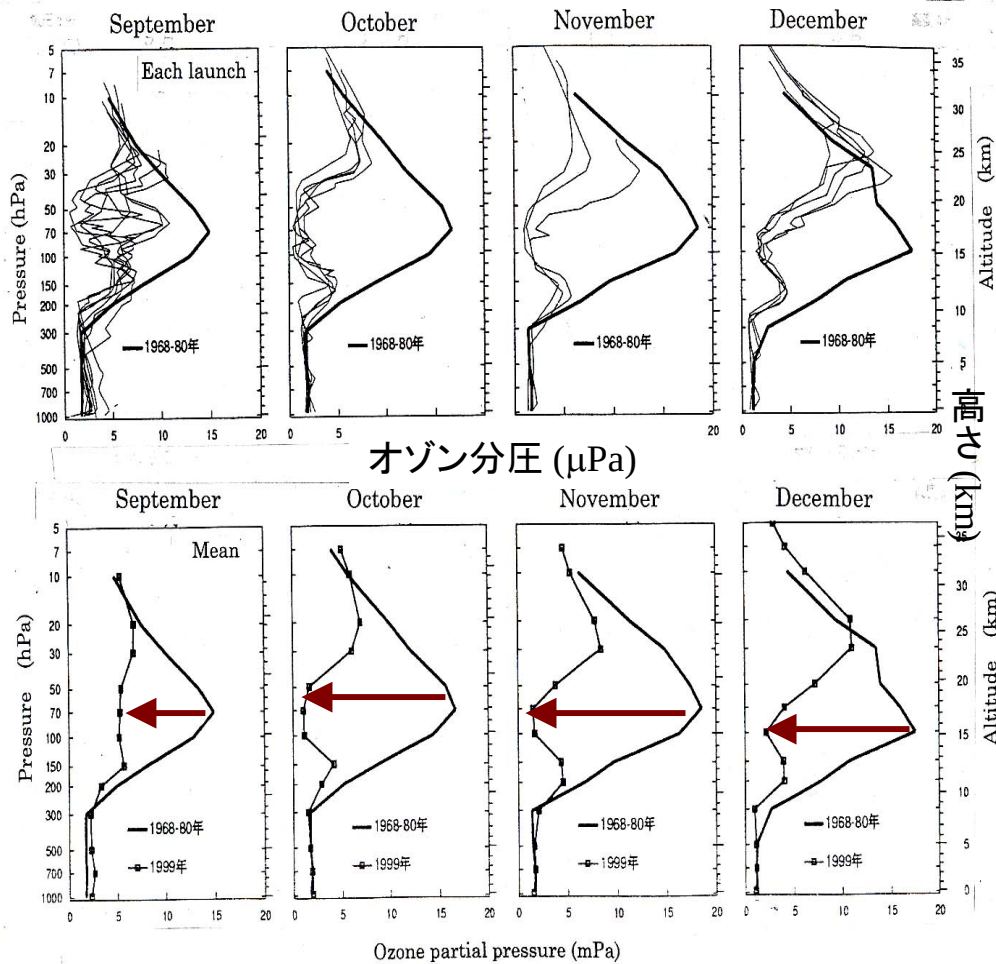
オゾン全量

地上から大気上端まで
の総量、1気圧に換算
した時の厚さ

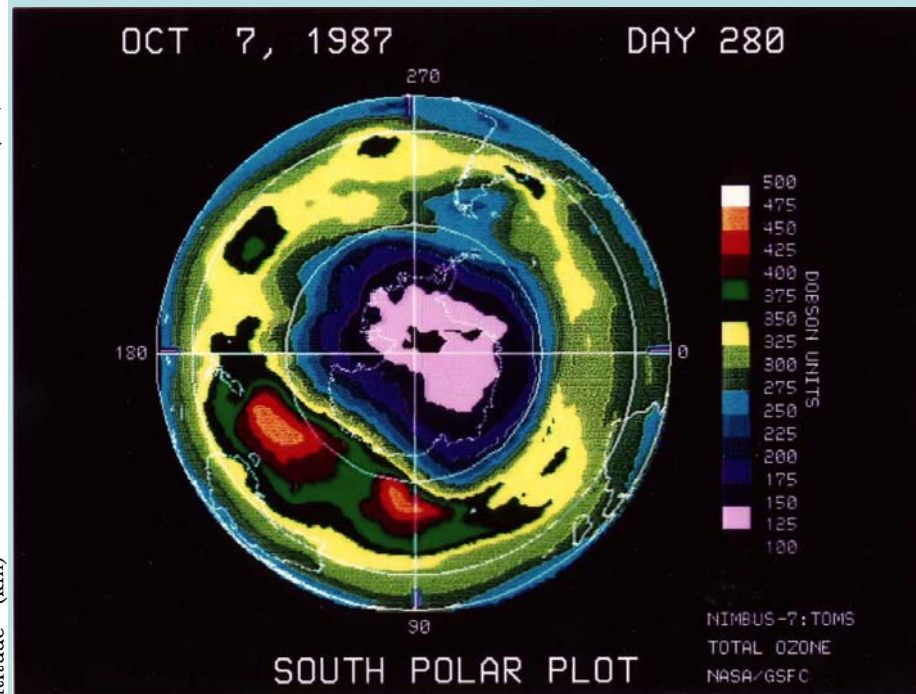
昭和基地では1966年(61年および)よりオゾン全量の観測が行われてきたが、1980年代に入って春先のオゾン量の減少が顕著になってきた＝オゾンホールといわれるようになった

オゾンホール広がり

オゾンの鉛直分布(1999年)



人工衛星(TOMS)から見た南極上空のオゾン水平分布

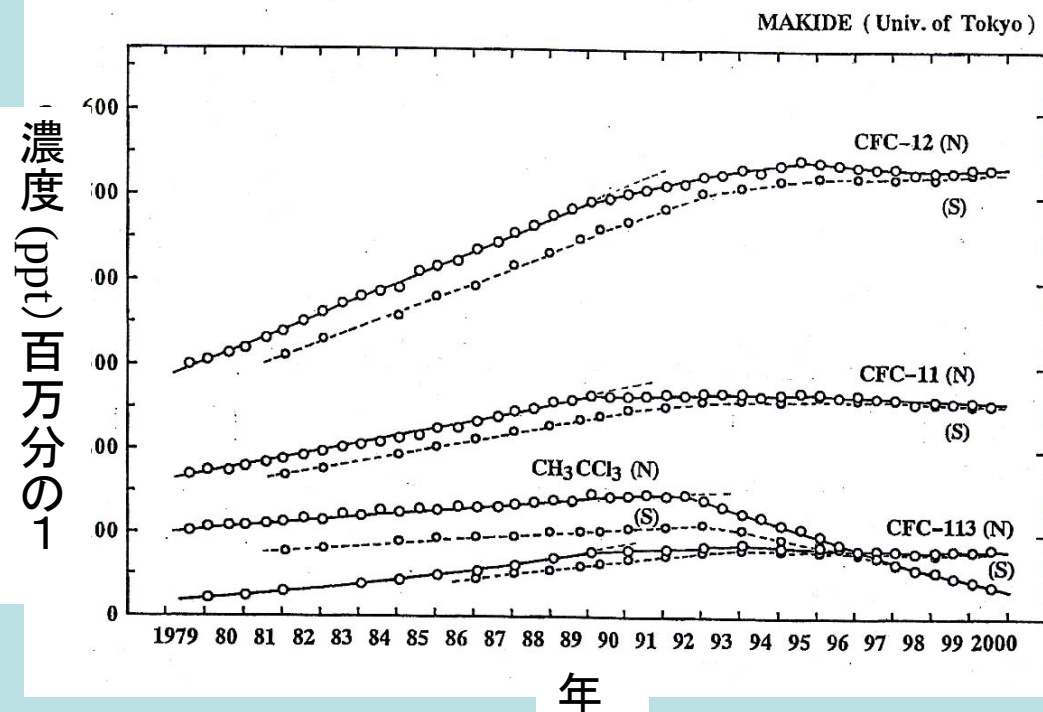


南極大陸上空にオゾン層に孔があいたようにオゾンの少ない領域が見える＝オゾンホール。上空の成層圏に強い西風の領域＝極渦が発達し、熱やオゾンの流入を妨げ、著しい低温、極成層圏雲PSC発達

オゾンホールの無かった頃に比べオゾン層(高度15-20 km)で著しいオゾン破壊が見られる

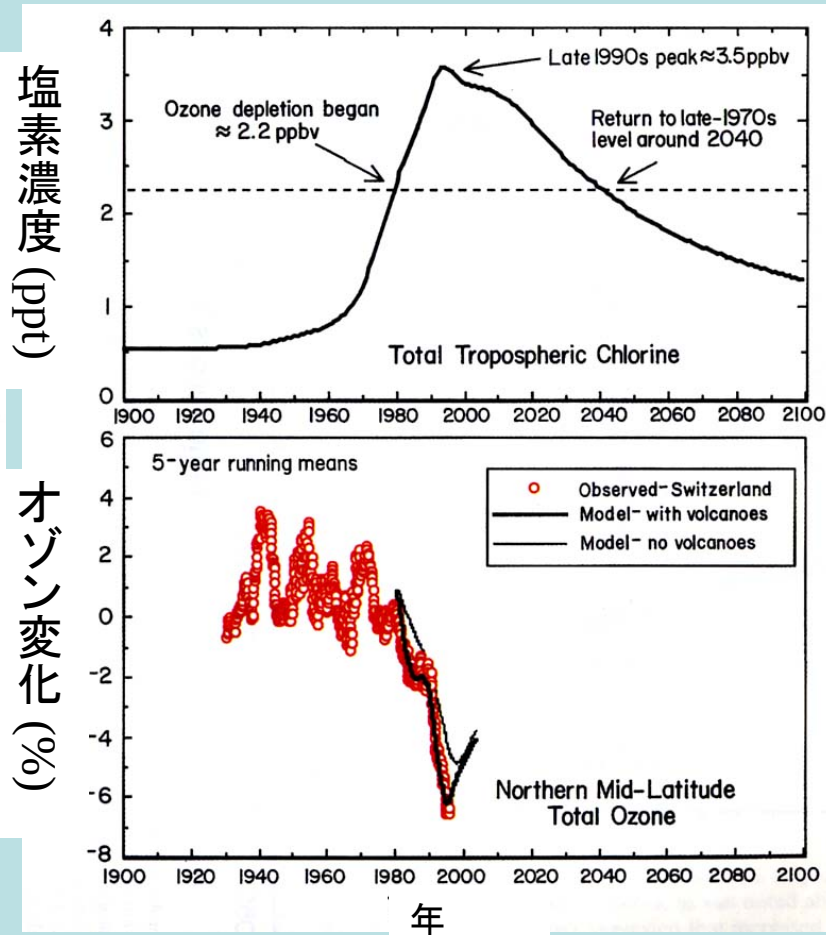
オゾンホールが行方—原因がなくなれば解消

フロンガス濃度の年々変動北半球(N日本)と南極昭和基地(S)の比較



オゾン破壊物質であるCFC11 (CCl_3F), CFC12 (CCl_2F_2), CFC113 ($\text{CCl}_2\text{F}-\text{CCLF}_2$)トリクロロエタンの南(S)北(N)での変化。南は北に数年遅れで追随、共に増加してきたが、規制が効いて増加の頭打ち、減少が見られはじめている。(巻出他)

オゾンホールの将来見通し



オゾン破壊の元凶であるフロン等の減少が進みオゾンホールは解消の見通し(WMO/UNEP報告1998)

「しらせ」からヘリで昭和基地へ

昭和基地



雪上車隊 物資70トンを1ヶ月かけ1000km運ぶ

航空機隊 ボーリングの専門家を1日で運ぶ

ドームC基地(仏、伊) 82万年(3200m)

ポストーク基地(露)
42万年(3650m)

ドームふじ観測拠点
80万年以上(2503mで32万年)
(12月5日～1月23日滞在)

コーネン基地(独)
年代は解析中(2552m)



ARP2

みずほ基地

雪上車

往路

Dornier

ノイマイヤー基地(独)

あすか基地

Dornier

ノボラザレフスカヤ基地(露)

IL76

11月27日

2月8日

ケープタウン(南ア)

昭和基地

12月17日
第1便

2月15日
最終便

観測船「しらせ」

3月20日入港

シドニー(豪)

12月3日出港

フリーマントル(豪)

3月27日
日本入国

11月28日
日本出国



11月24日
日本出国

雪上車隊の旅行

-50℃～-60℃での行動(人間と雪上車の行動限界)

短い日照時間

高い地吹雪と雪面の凹凸



風で雪が舞い上がり20m先までしか見えない



1993年



1997年

ドーム基地は雪の下

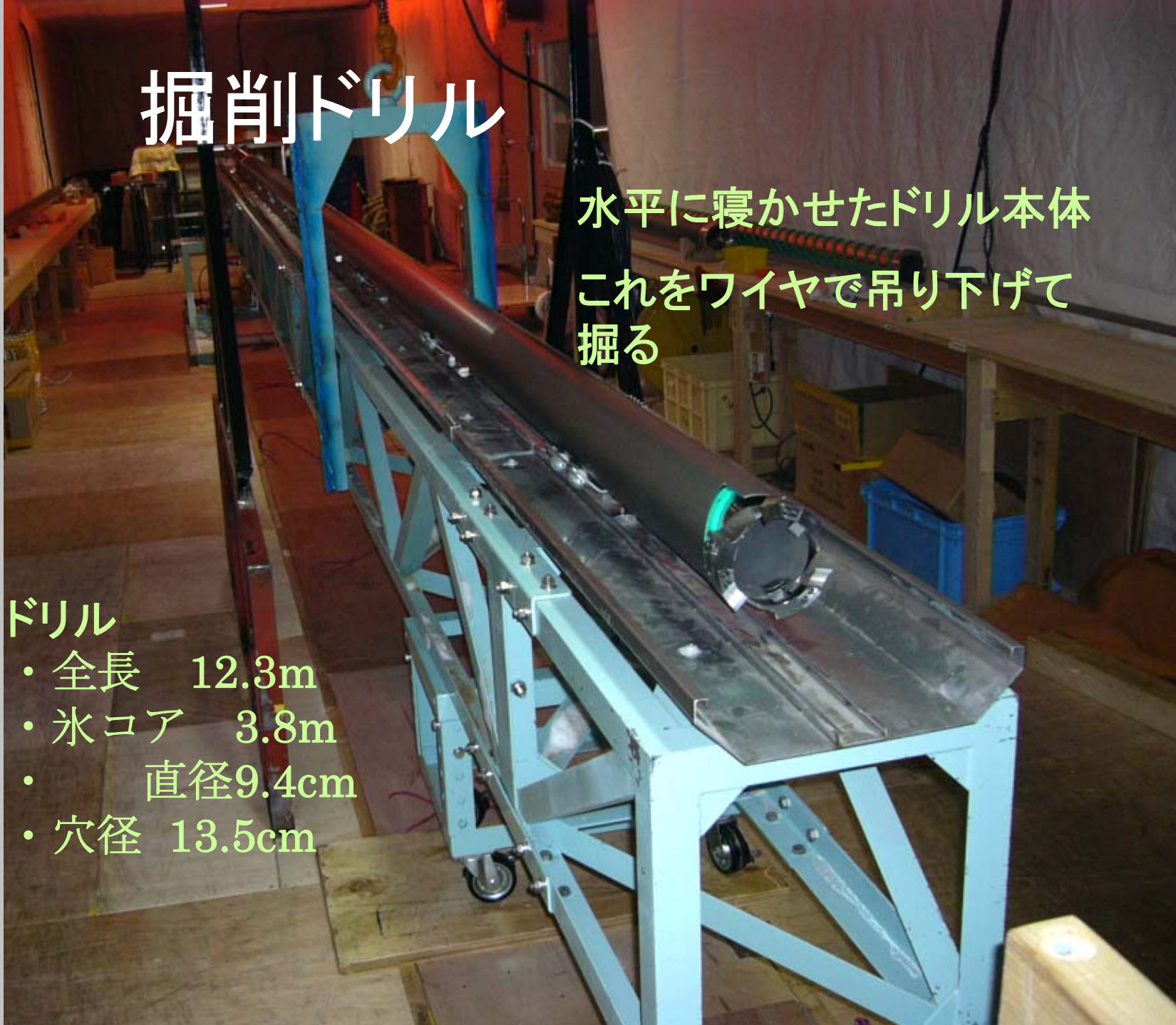


掘削ドリル

水平に寝かせたドリル本体
これをワイヤで吊り下げて
掘る

ドリル

- ・ 全長 12.3m
- ・ 氷コア 3.8m
- ・ 直径9.4cm
- ・ 穴径 13.5cm



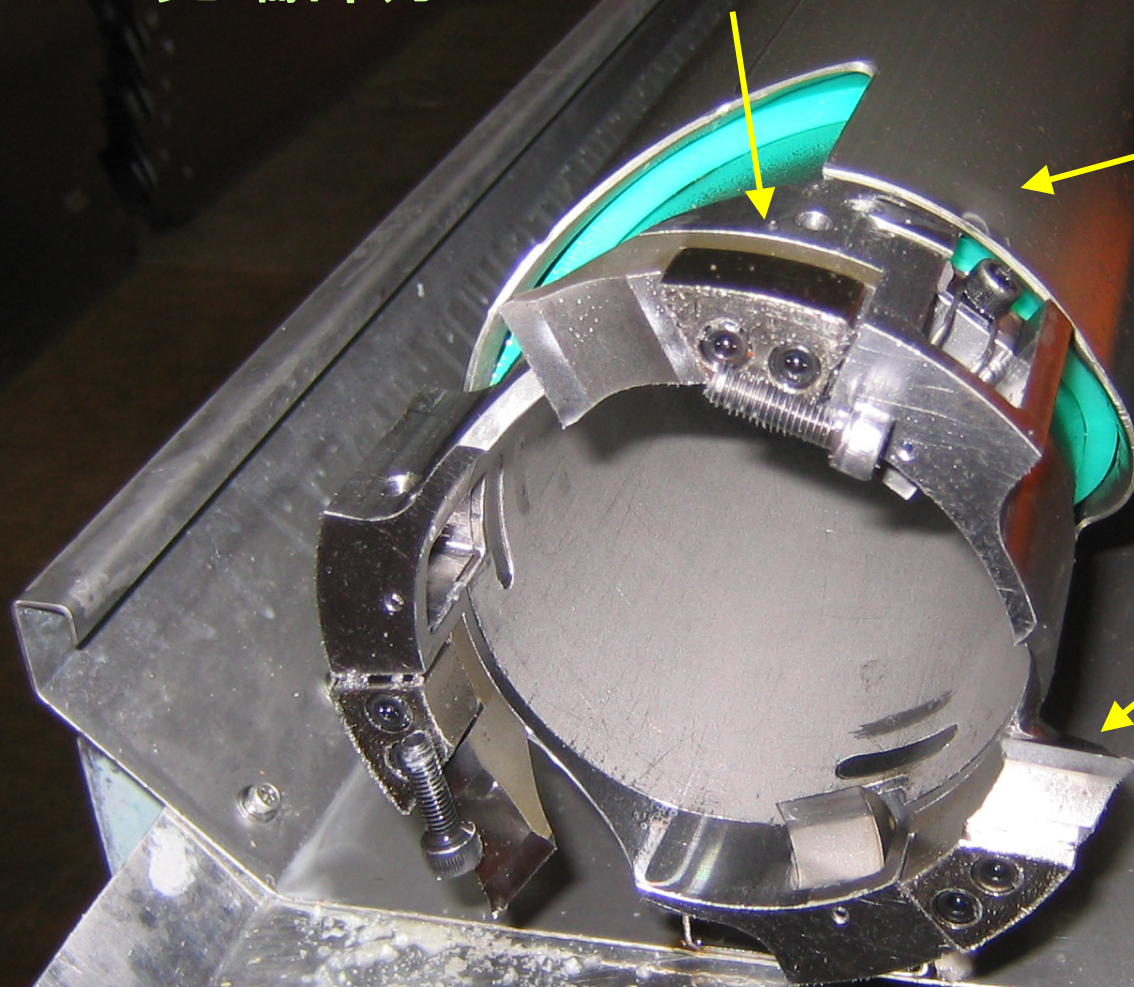
ドリルの先端部分

内側の筒

外側の筒

刃

毎秒1回転



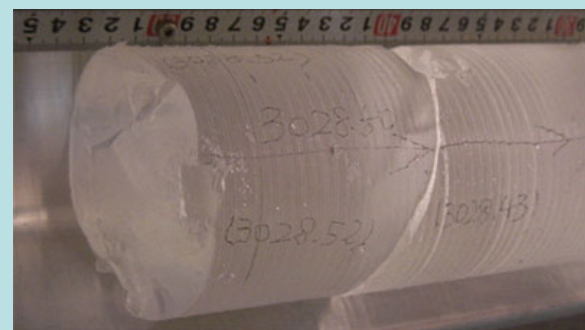
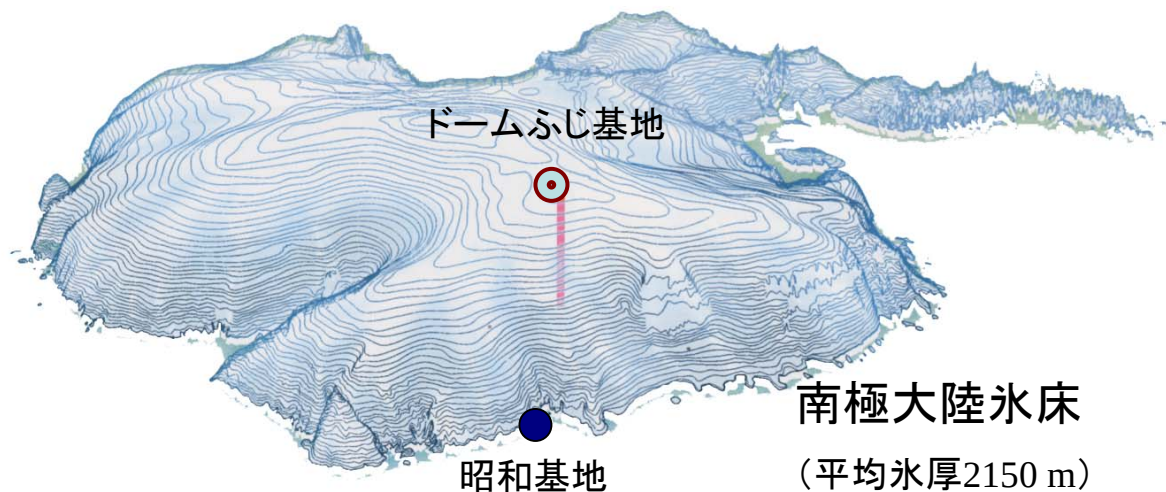


露天風呂

正月の楽しみ

—40℃の屋外で

内陸ドームふじ基地における氷床深層掘削

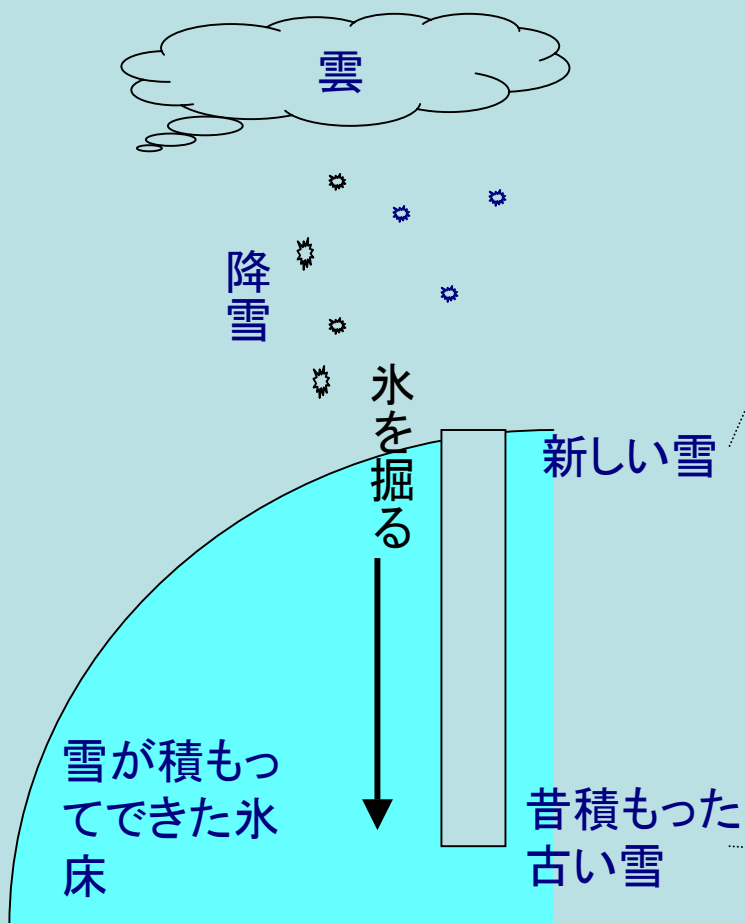


ドームふじ基地(標高3810 m、昭和基地から1000 km)平均気温 -54°C 、平均気圧590 hPa、氷厚3100 m?

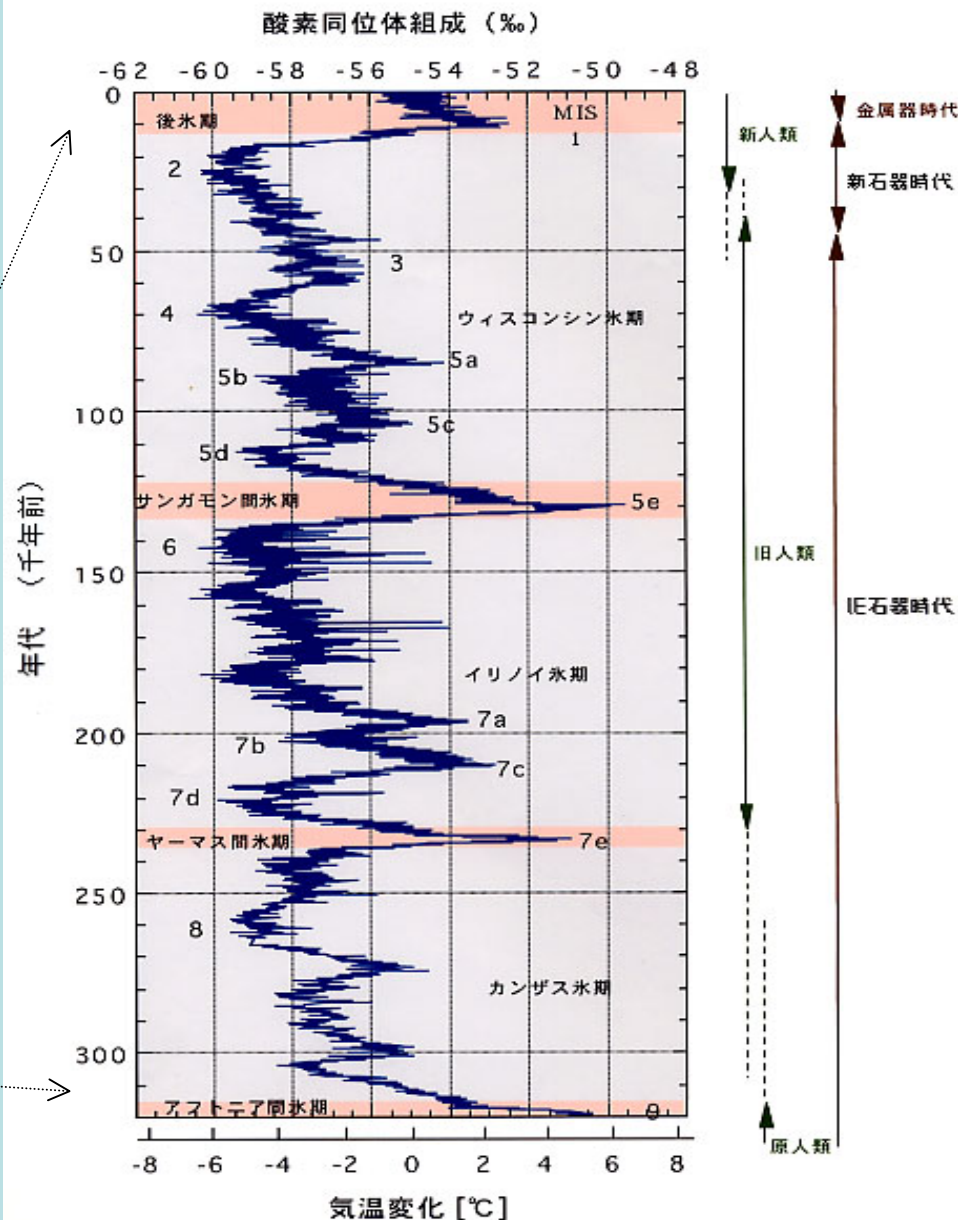
第1期深層掘削計画(～1996年)2053 mの氷床コアを採取、32万年の変動が明らかになった。

第2期深層掘削計画(～2007年)基盤までの3035.22 mの氷床コアを採取、72万年の変動が明らかになった。

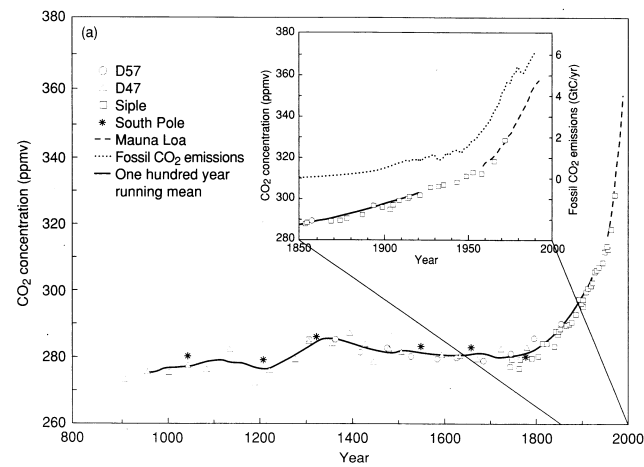
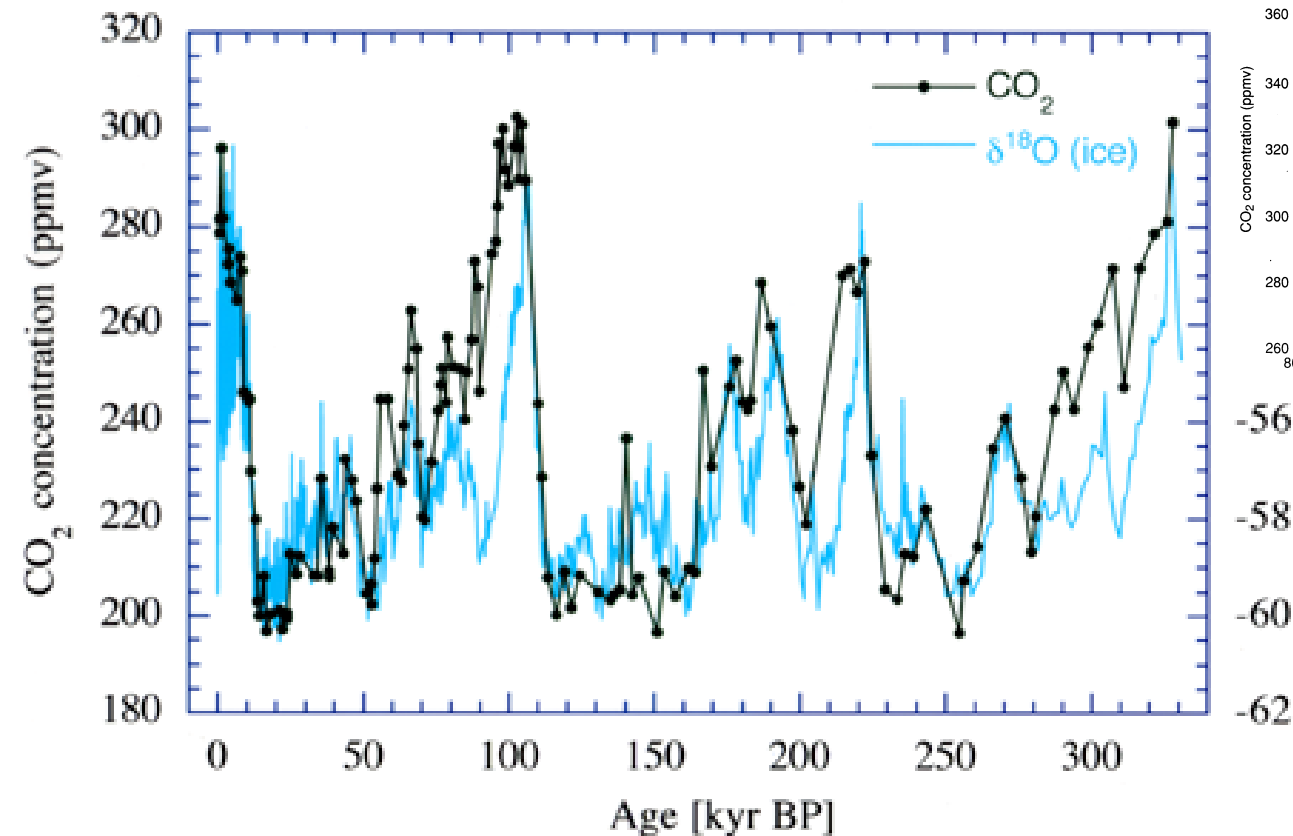
氷床コアから みる過去の環境



南極ドームふじコア解析から復元された
過去32万年の気温変動



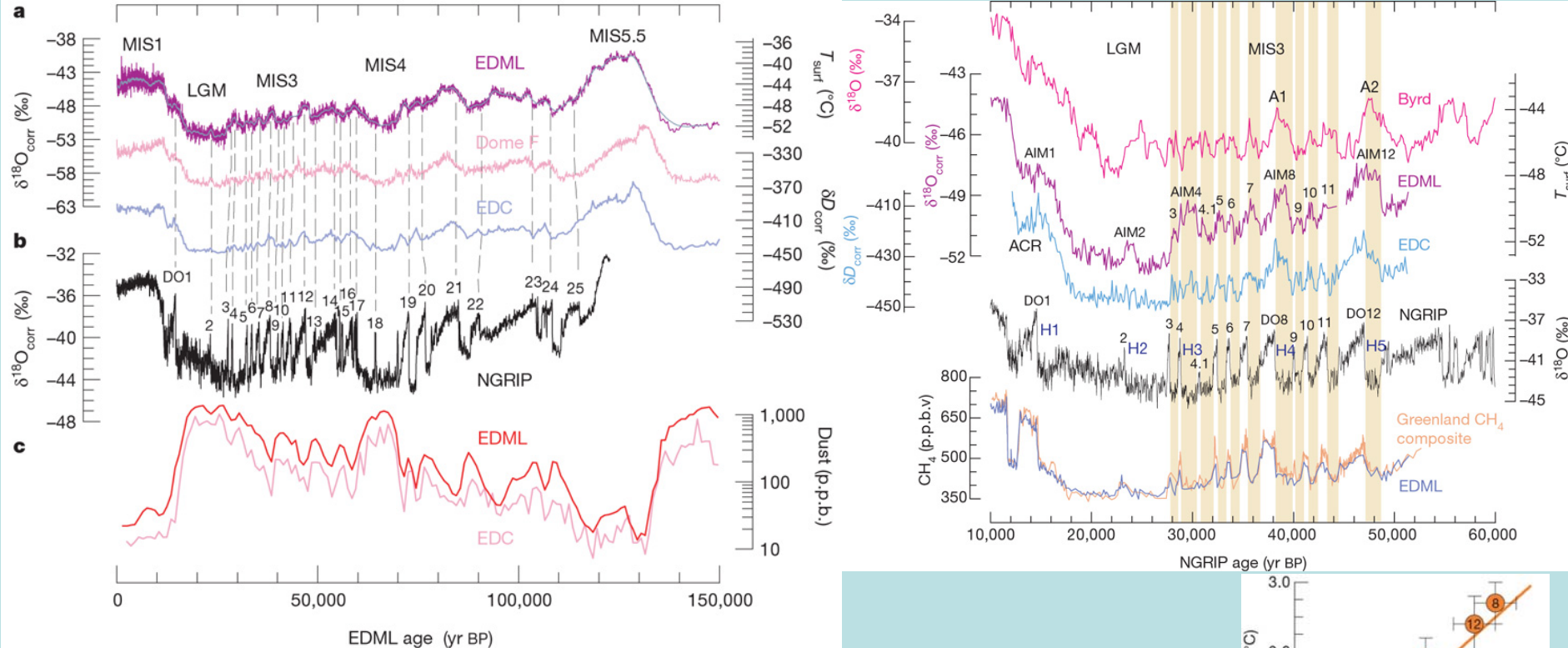
氷床コアからみる過去の大気中二酸化炭素濃度



最近1000年間のCO₂濃度
産業革命以前は280 ppm

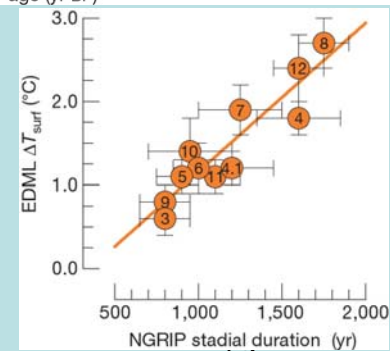
ドームふじコア気泡中のCO₂濃度と気温を反映する酸素同位体濃度 ($\delta^{18}\text{O}$)

南極とグリーンランドの 氷床コア比較



遥かに離れた北極と南極のコアが驚くべき一致！
そして、微妙な違い、シーソーを示す？！

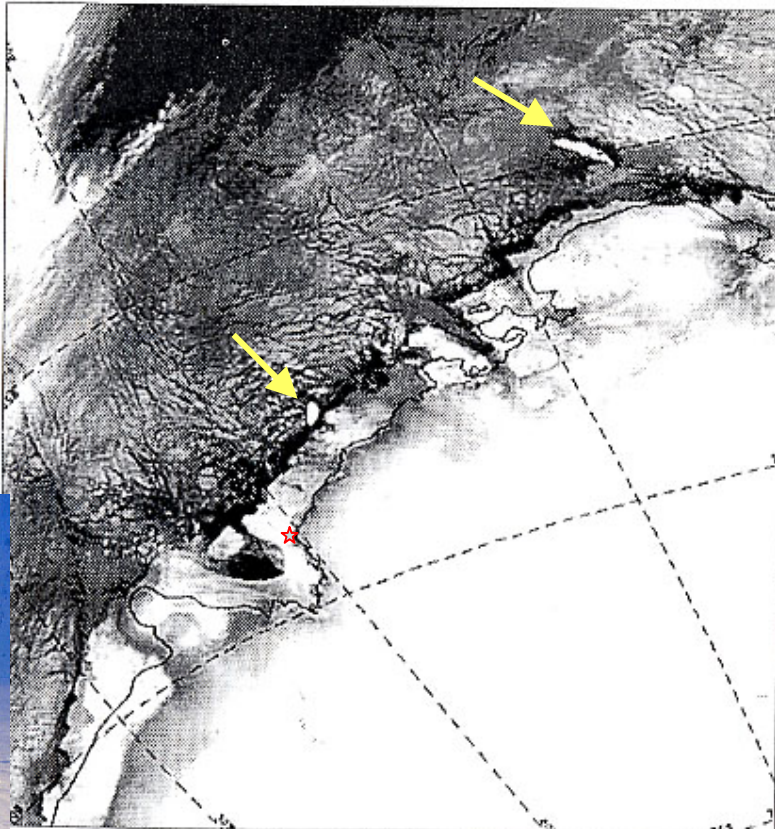
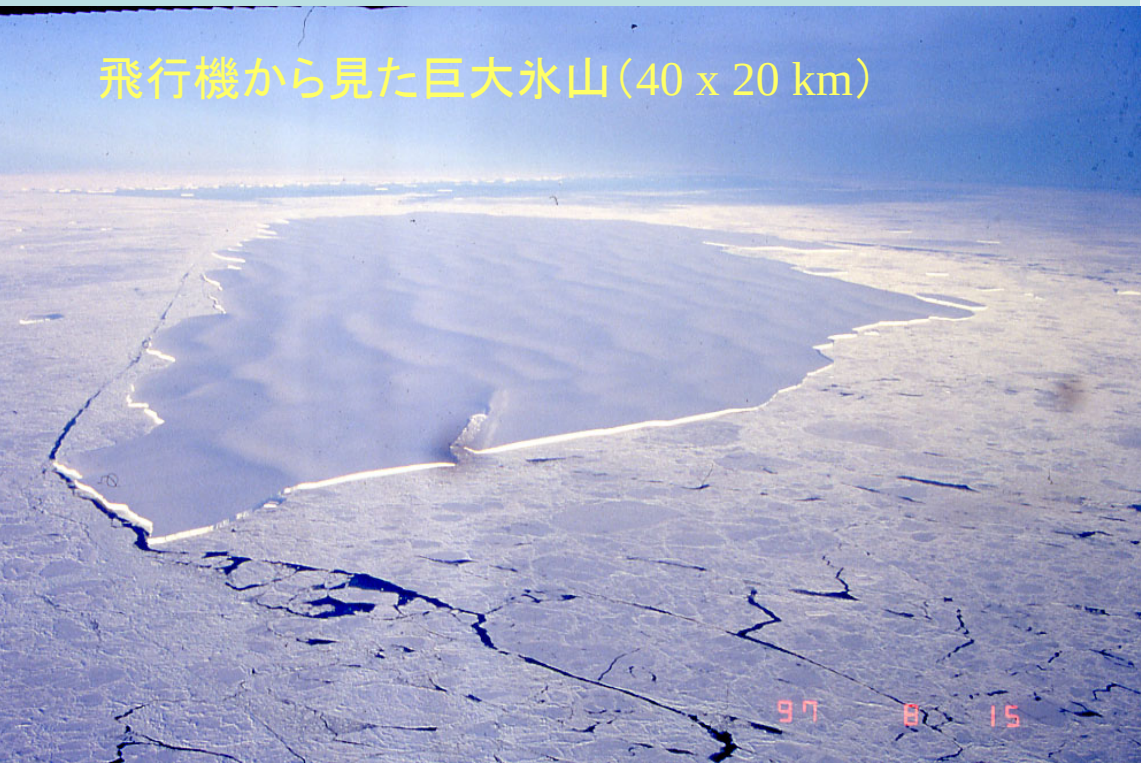
←世界の海流のコンベアーベルト？



南極の氷はどうか

棚氷の崩壊、巨大氷山の増加が言われるが(南極の氷が全部とけると、海面は60 m上昇する)?

飛行機から見た巨大氷山(40 x 20 km)



南極に巨大氷山2つ



東京都並みの大きさ
やはり温暖化進む?

文部省は二十九日、昭和基地に近づきつつある二つの巨大な氷山を確認した、と発表した。気象衛星ノアが撮影した画像には、バナナ型で東京都の大きさに匹敵する巨大氷山「D11」(長さ四十キロ、幅二十キロと、半円形の「D12」(長さ四十キロ、幅二十キロ)の二つが白く鮮明に写っている。写真。

第三十八次南極地域観測隊の山内恭隊長は現地から「温暖化の兆候という明確な証拠はないが、不気味な感じがする」とコメントを送ってきた。

現在の温暖化では南極の氷はとけない?

棚氷の崩壊（西南極、半島域）

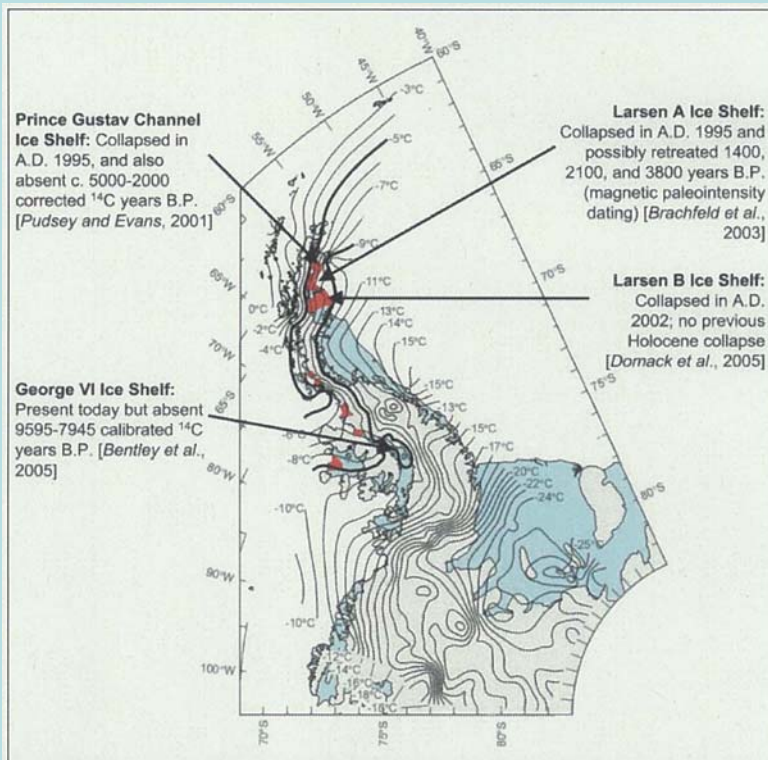
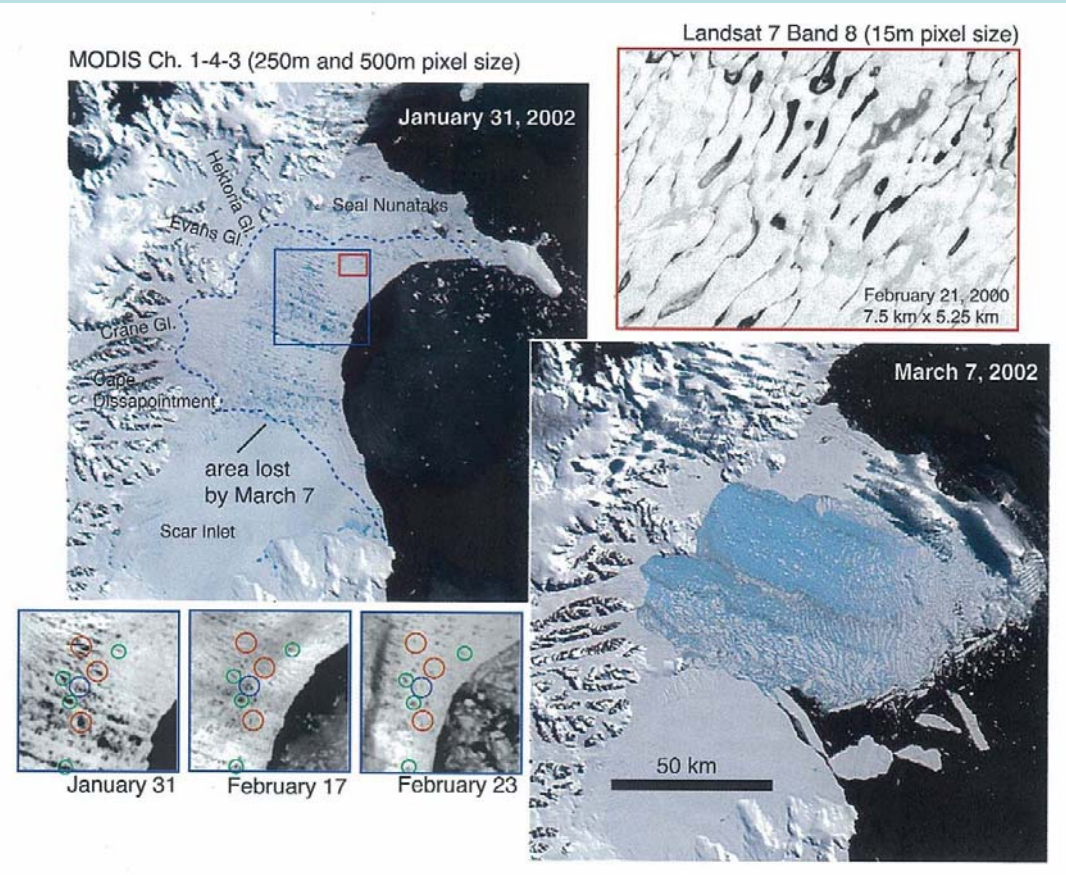


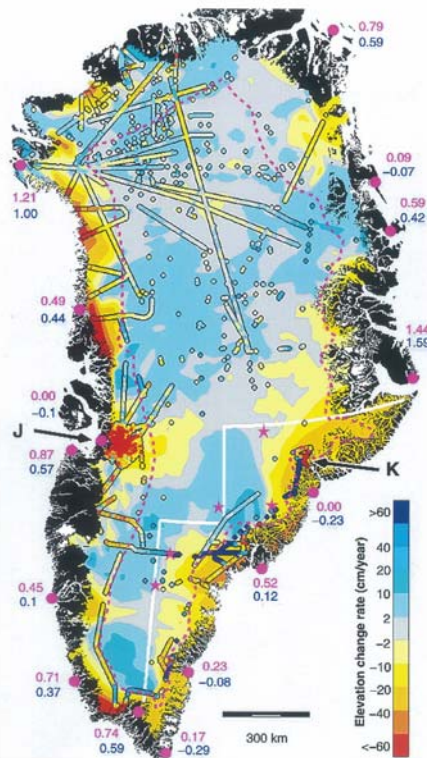
Fig. 1. Recent retreat of Antarctic Peninsula ice shelves shown together with the -9°C mean annual isotherm that marks the southern limit of ice shelf stability. Ice shelves that have recently retreated or collapsed are marked in red and extant ice shelves in blue. Locations of ice shelves studied are marked together with known Holocene retreat events. (Map courtesy of D. Vaughan, British Antarctic Survey.)



人工衛星画像からみたLarsen B棚氷の崩壊（2002年2～3月）

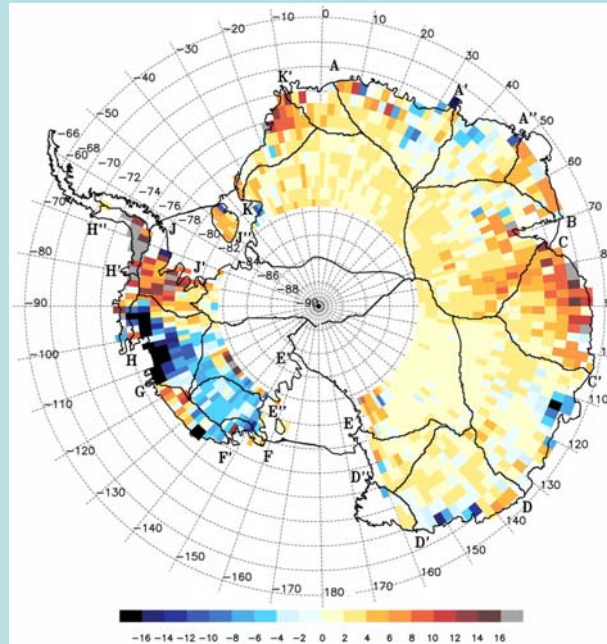
棚氷は海面に浮いているため、その崩壊は海面水位上昇には寄与しないが、後ろの氷河流動を促進し、ひいては氷床の流出につながる。

氷床変動の見通し



グリーンランド
氷床は周辺部
で消耗、内陸
部で増加傾向

正味氷床は縮
小し海面上昇
に寄与確実



南極氷床は西南
極は消耗(標高低
下)、東南極は標
高増加傾向(色付
逆)

南極氷床は温暖
化による降水の
増加で氷床は拡
大し海面上昇に
はつながらない
と
思われていたが、
氷河流動に伴う
氷床の流出が効
き、氷床はやはり
縮小する可能性;
つまり海面上昇に
寄与する可能性
出る(IPCC, 2007)

Source of sea level rise		Rate of sea level rise (mm per year)	
		1961–2003	1993–2003
Thermal expansion	海水の熱膨張	0.42 ± 0.12	1.6 ± 0.5
Glaciers and ice caps	氷河・氷帽	0.50 ± 0.18	0.77 ± 0.22
Greenland Ice Sheet	グリーンランド	0.05 ± 0.12	0.21 ± 0.07
Antarctic Ice Sheet	南極氷床	0.14 ± 0.41	0.21 ± 0.35
Sum of individual climate contributions to sea level rise	海面水位寄与計	1.1 ± 0.5	2.8 ± 0.7
Observed total sea level rise	観測水位上昇	1.8 ± 0.5^a	3.1 ± 0.7^a
Difference (Observed minus sum of estimated climate contributions)	評価と実測の差	0.7 ± 0.7	0.3 ± 1.0

まとめ

●地球規模温暖化が確実となるなか、南極・北極は？

・北極では最近2ー30年、激しい温暖化、海氷減少

氷河やグリーンランド氷床の消耗が進み、海面上昇に寄与

・南極では南極半島域では温暖化顕著だが、それ以外では小

降水(降雪)増加で海面上昇には効かないと思われていたが、棚氷崩壊に伴う氷床流出が効き、やはり海面上昇に寄与する可能性が出てきたというのが最近の評価

●長い時間スケールでは、10万年スケールの氷期―間氷期サイクルが卓越(氷床深層掘削から)。現在は間氷期にあり、いずれは寒冷化。