

・極域海洋と地球温暖化

極域海洋→地球温暖化の高感度域 →全球への影響

正のフィードバック

- 北極海の海水の激減
 - 夏には海水がなくなってしまう？
 - 温暖化を加速する？

中深層水の形成

- 北大西洋深層水の低塩化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- 南極底層水の低塩・低密度化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- オホーツク海での海水生産減少
 - 北太平洋の中層循環が弱まってしまう？

極域海洋→地球温暖化の高感度域 →全球への影響

- 北極海の海水の激減
 - 夏には海水がなくなってしまう？
 - 温暖化を加速する？
- 北大西洋深層水の低塩化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- 南極底層水の低塩・低密度化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- オホーツク海での海水生産減少
 - 北太平洋の中層循環が弱まってしまう？

南極氷床は石鹼

降り積もる雪が氷になる

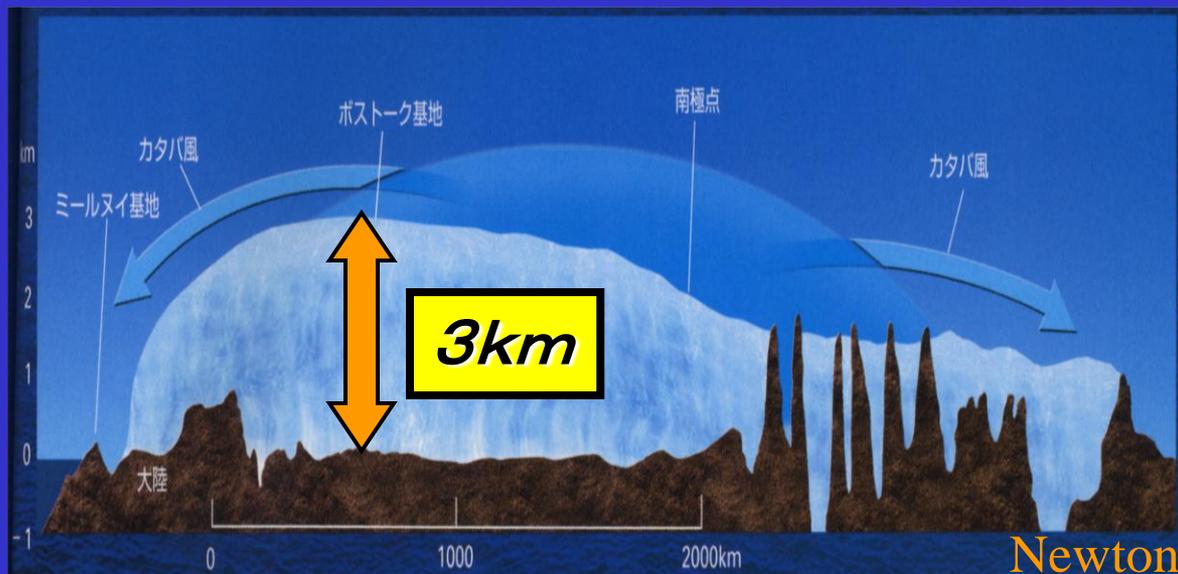
割れにくい～変化が緩やか

北極海氷はシャボン玉

海が氷になる

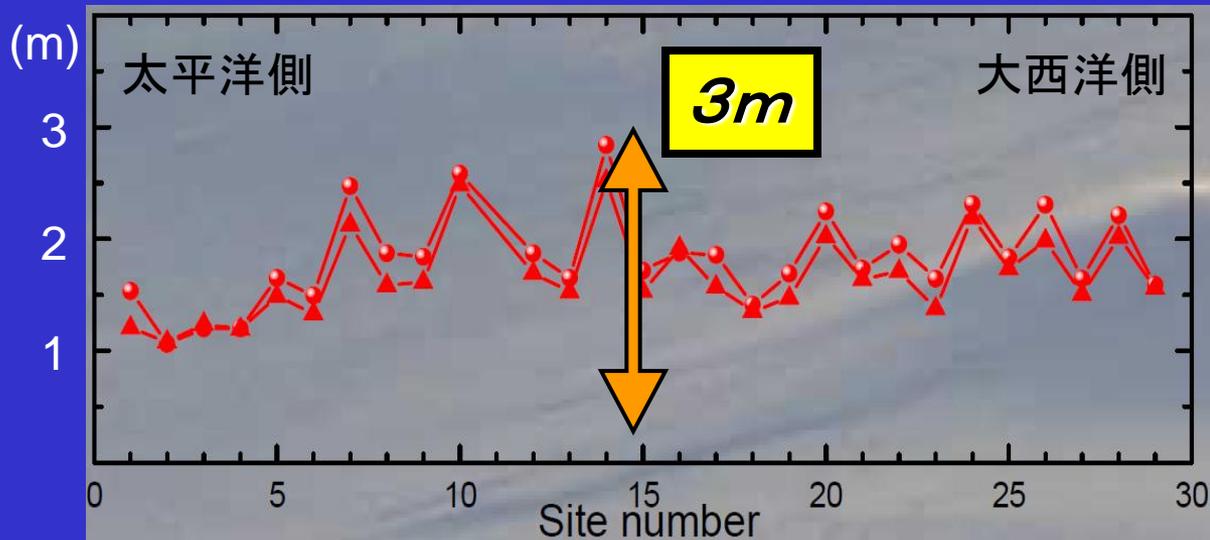
割れやすい～急激な変化

南極大陸 氷床厚分布



北極海 海水厚分布

2005年北極海横断
航海データ



減っていく 北極海の海水

地球最北の北極に近づいていくと、夏に、24時間太陽が沈まない「白夜」という日があります。年に1日以上白夜がある地域を北極圏と呼びます。北極圏は、北緯66度33分から北極点までの地域です。北極圏には北極海という海と、グリーンランド、アラスカ、シベリアなどの陸地が広がっています。

最近、北極圏の環境が注目を集めています。人間の活動で、大気中の二酸化炭素が増え、地球全体の「温暖化」が進んでいるといわれていますが、北極圏は、特に敏感に温暖化の影響を反映していると考えられているからです。

たとえばアラスカの冬の気温は過去50年で3〜4度上昇しました。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の報告書では、100年後に地球の平均気温が4度上がるとすると、北極圏は6〜7度上がると推定されています。

グリーンランドは厚い氷河におおわれていますが、その氷河は温暖化の影響で、次第に小さくなっています。米航空宇宙局（NASA）などが、人工衛星データを分析したところ、氷河が海に流出した量は、96年の50立方キロから、05年は1500立方キロに増えていました。

氷が海に流れだして解けると、海面が上昇します。温暖化による海面上昇は年に3センチ程度といわれていますが、そ

温暖化に敏感に反応、海面上昇まねく

のうち0.5センチは、グリーンランドの水が解けた分と推定されました。3度以上の気温の上昇が何千年も続くと、グリーンランドの水は全部解け、海面は7メートル上昇すると推定されています。



北極海をおおる海水の面積も減っています。海水は、北極海の表面が凍ってでき、厚さは2.5メートルほどです。

05年の夏は530万平方キロと、観測を始めてから最小になりました。79〜00年の平均から、約130万平方キロ、日本列島3個分以上も小さくなりました。

海水のそばでアサリを食べるホッキョクグマは、海水が減ってエサをとりにくくな

エサ不足など生き物に影響も

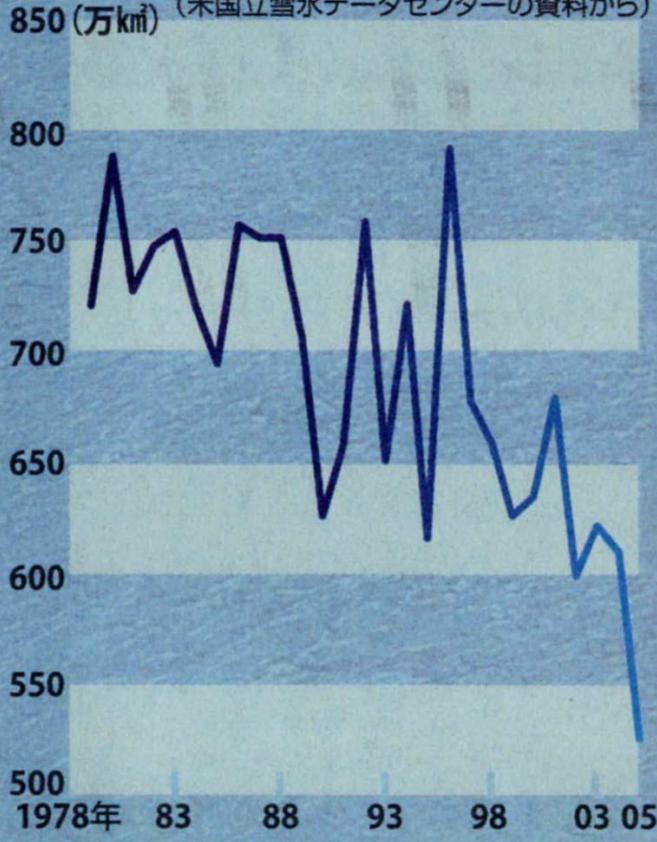
量によって、この働きが変わり、地球全体の気候にも影響が出ます。氷は白いので、太陽光を反射しやすいのですが、解けて海になると表面が黒っぽくなり、太陽光を集めやすくなって、温暖化がさらにすすむことになります。

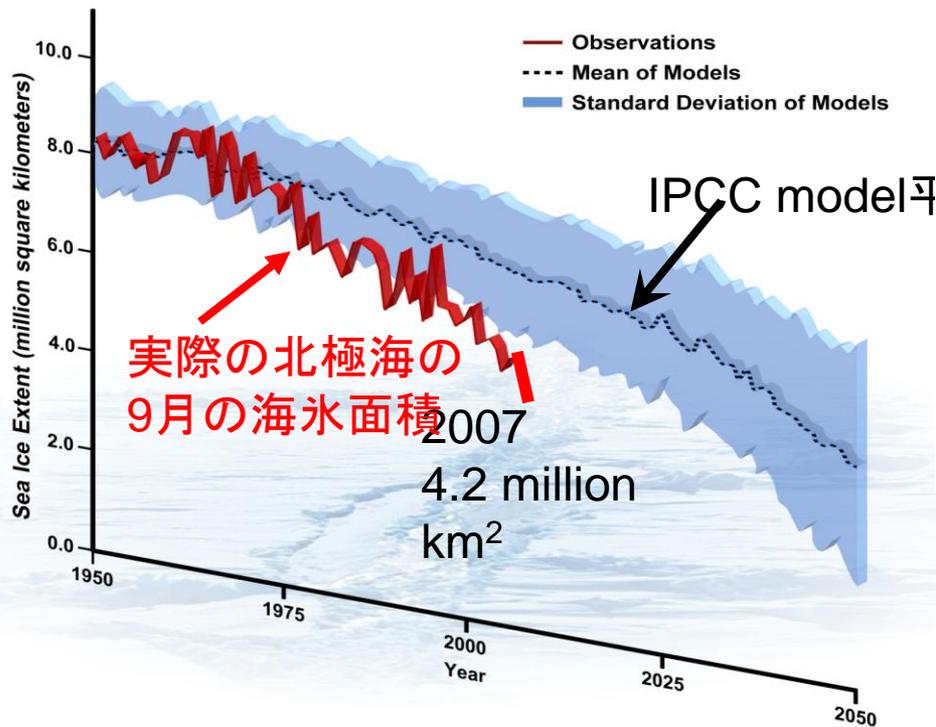
海洋研究開発機構の島田浩二・地球温暖化情報観測研究プログラムサプリーダーは、北極海を詳しくみて、太平洋側の海水が特に小さくなっているのに注目しています。

観測すると、夏に暖まった太平洋の水が北極海の内部に運ばれ、海水が減ったとわかりました。いったん夏に海水が減ると、冬に海水ができるのが遅れ、氷の密度が低くなって、氷が回転しやすくなります。すると、海流が流れやすくなって、暖かい太平洋の水が流れ込むという具合に、

9月の北極海の海水面積

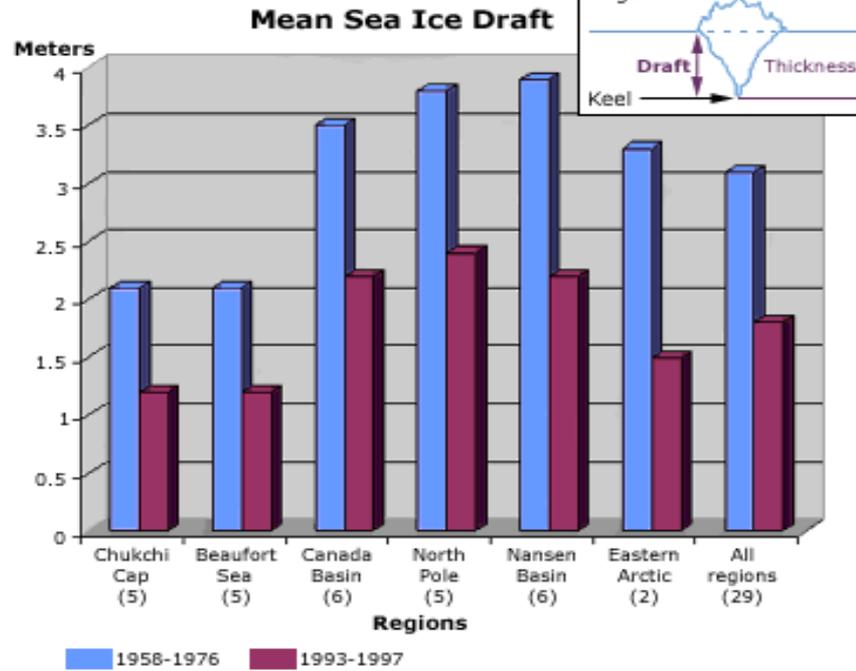
(米国立雪氷データセンターの資料から)





海氷の厚さ

NSIDC data/UCAR i



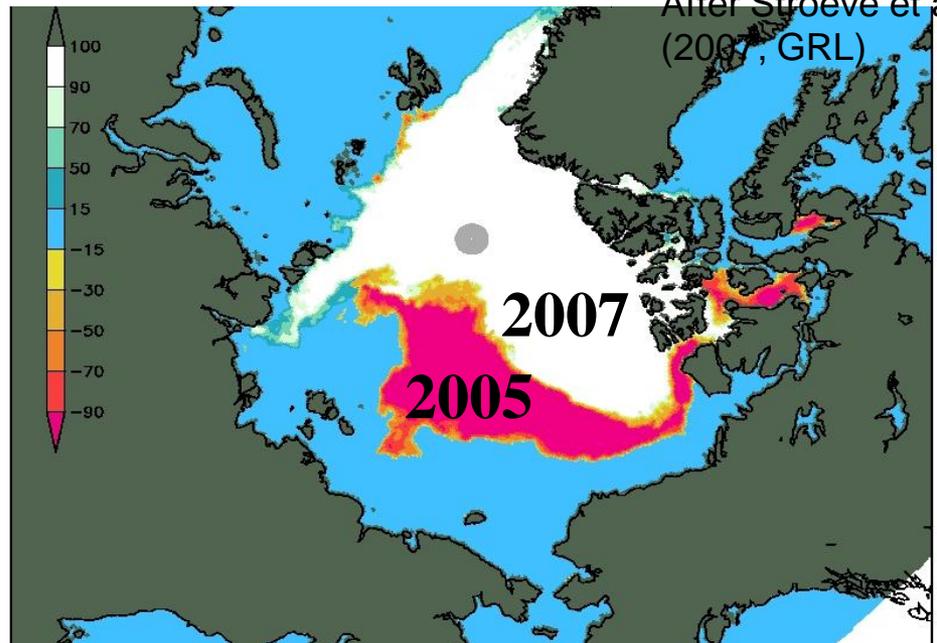
Rothrock (1999)

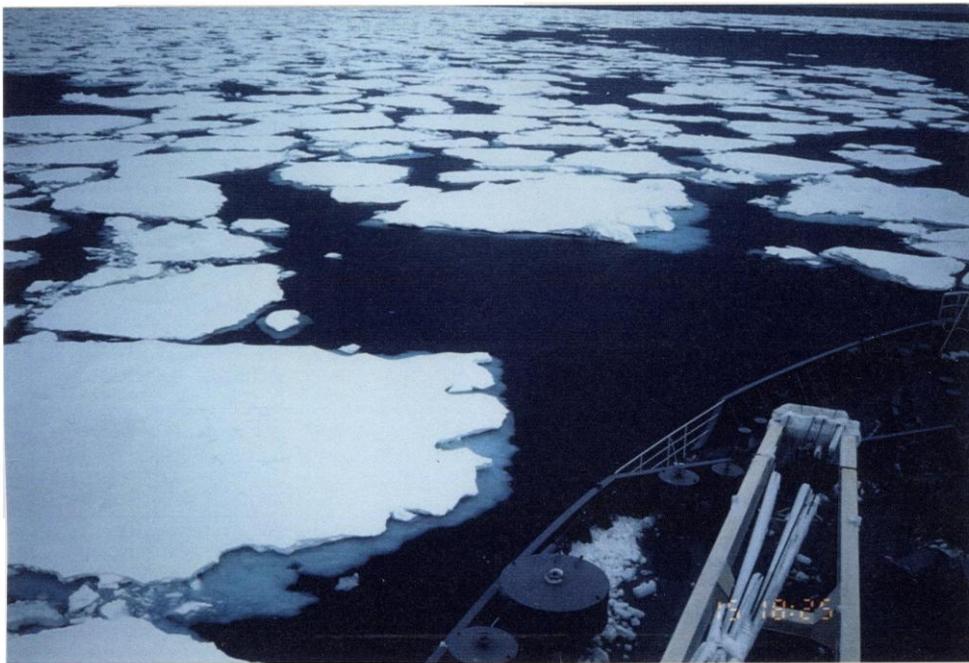
1958-76 1993-97

潜水艦ソナーの観測

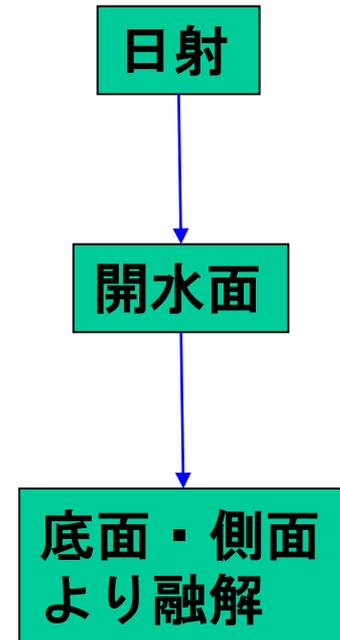
北極の海氷(衛星と潜水艦の観測)
面積・厚さとも減少(面積は特に夏)

面積は10年で9%の減少
この10年での減少大





季節海氷域での 海氷融解



アルベド

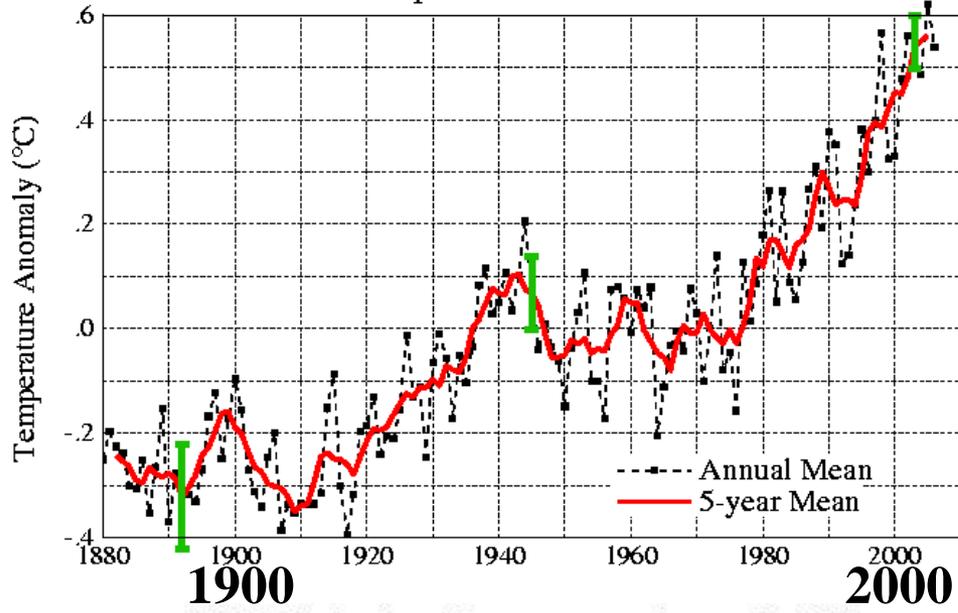
開水面 : 0.07

海水 : 0.7

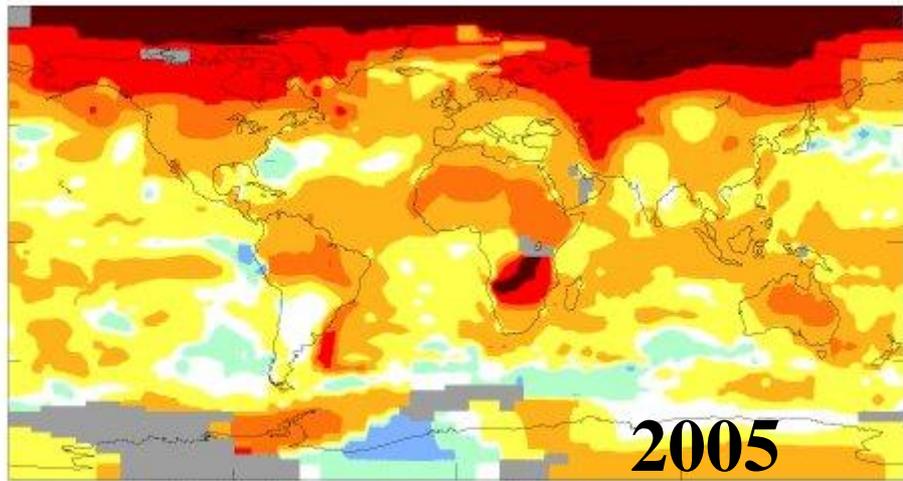
NASA Goddard Institute for Space Studies

GISS Surface temperature analysis web site (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>)

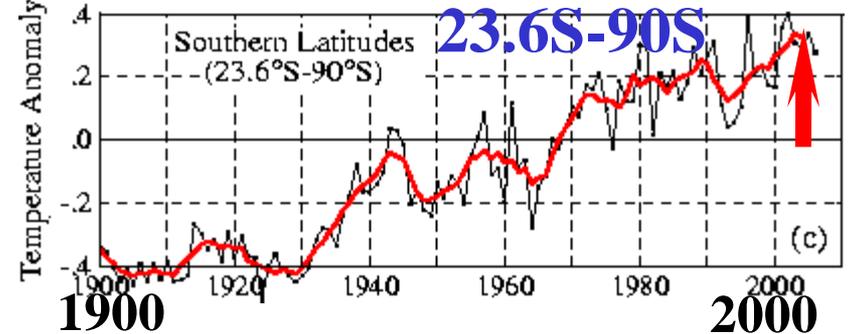
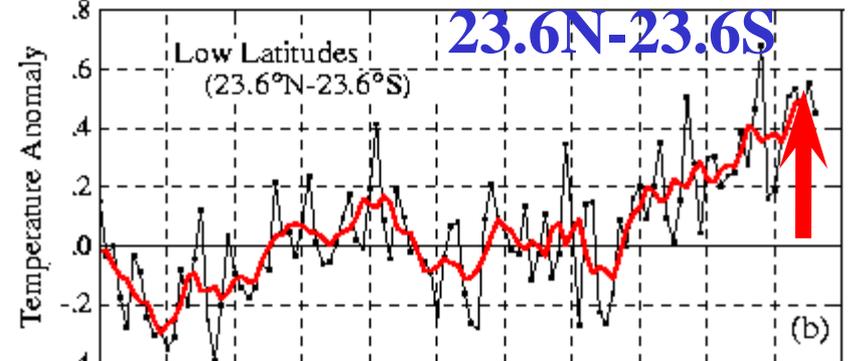
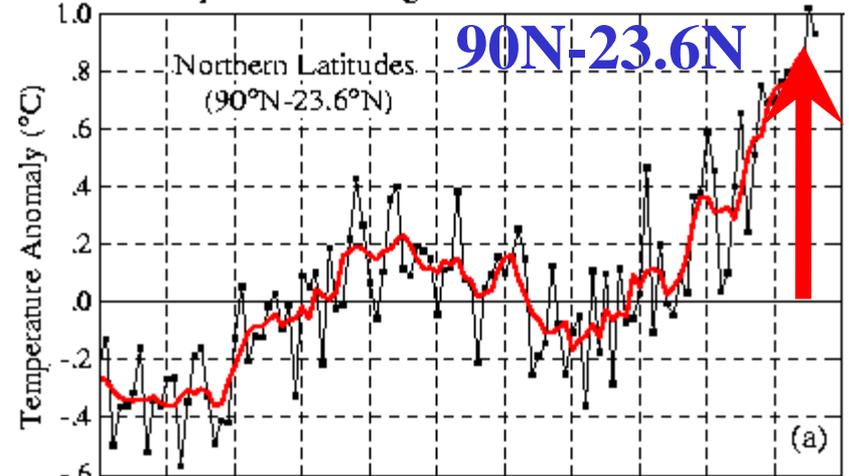
Global Temperature: Land-Ocean Index



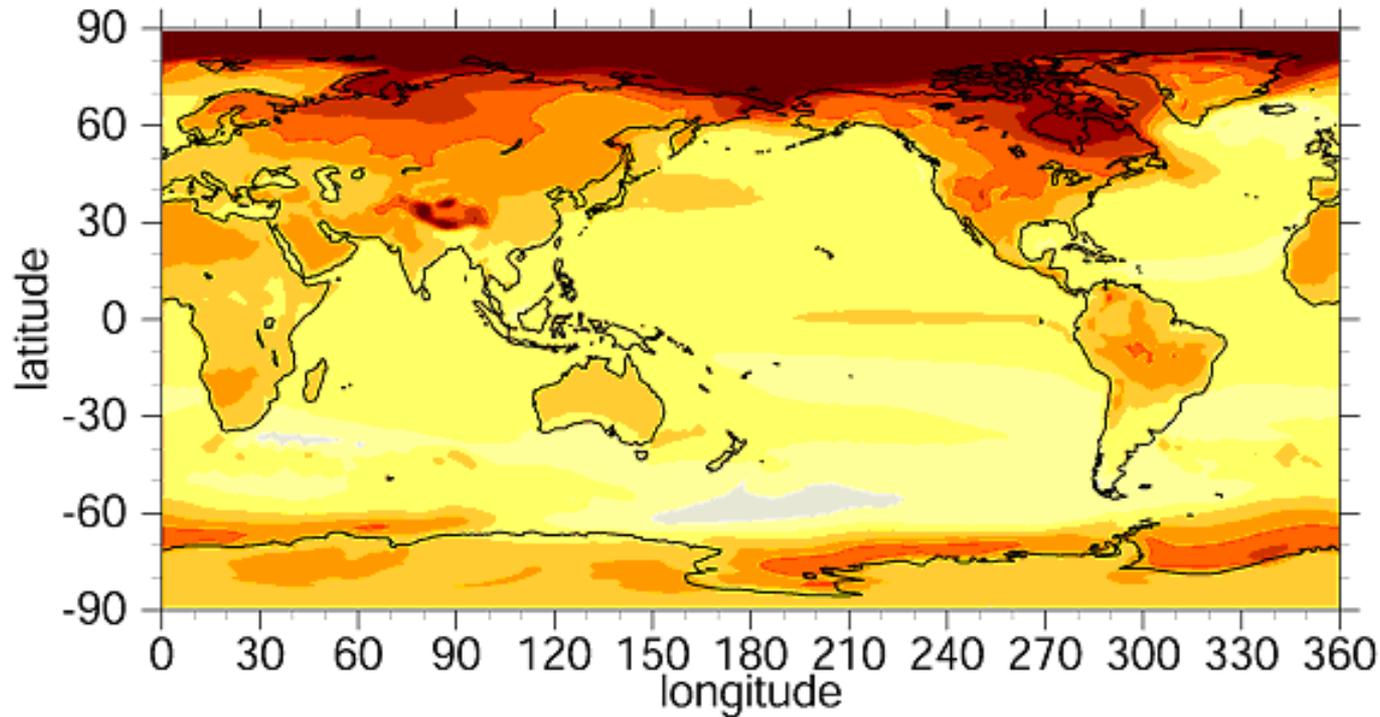
(b) 2005 Surface Temperature Anomaly (°C)



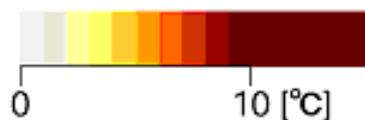
Temperature Change for Three Latitude Bands



地球シミュレーターによる温暖化予測実験



(2071～2100平均気温)－(1971～2000平均気温)

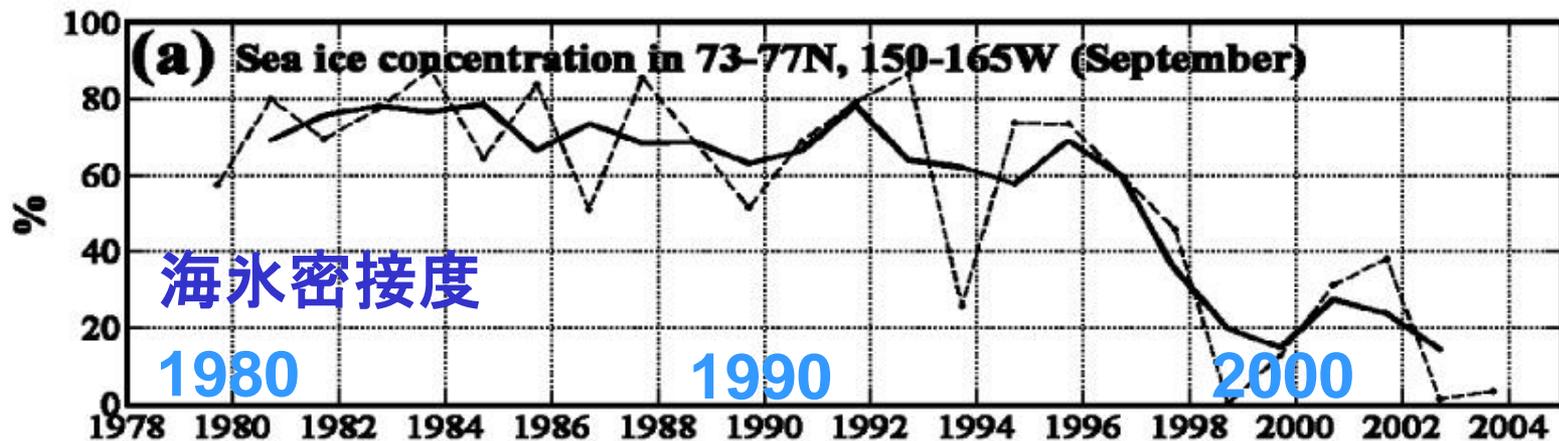
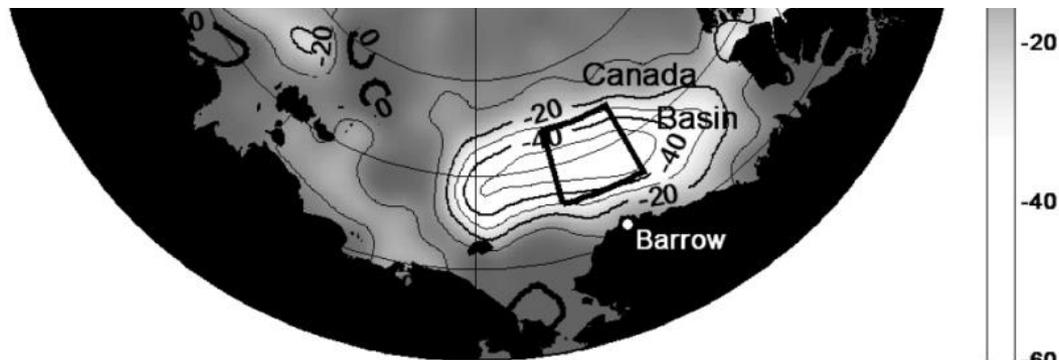
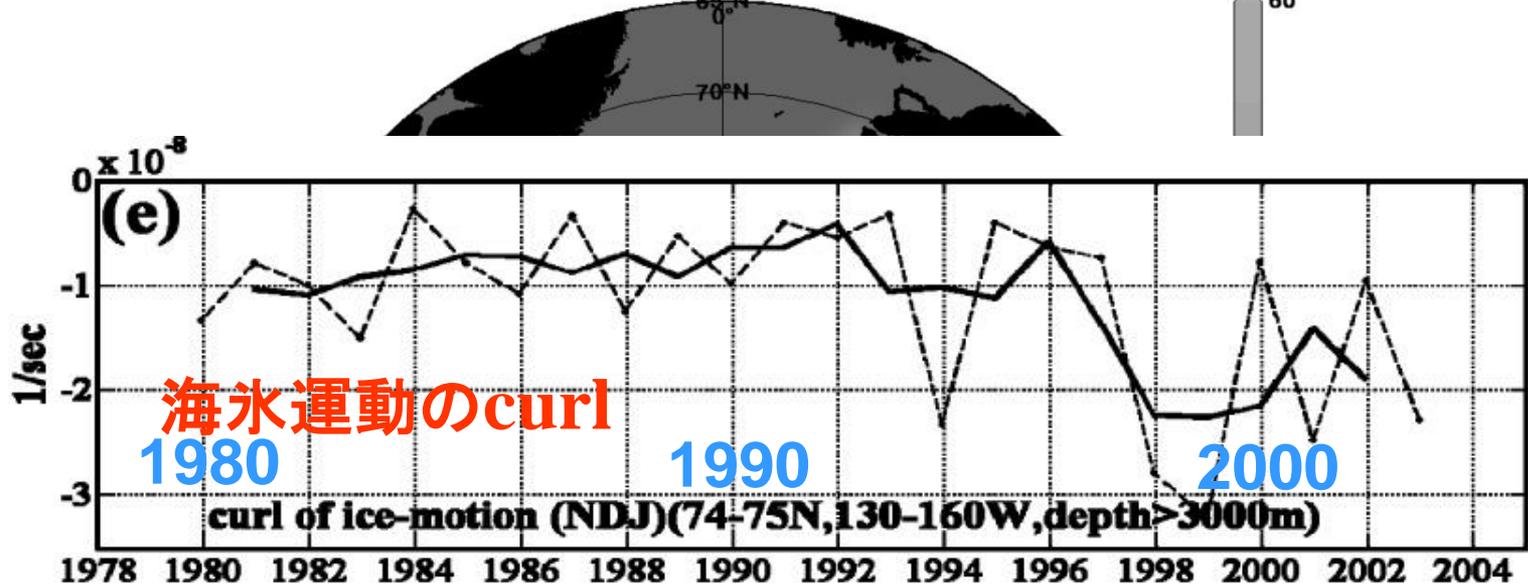


北極域が特に昇温
北極の海氷が減少

正のフィードバック効果

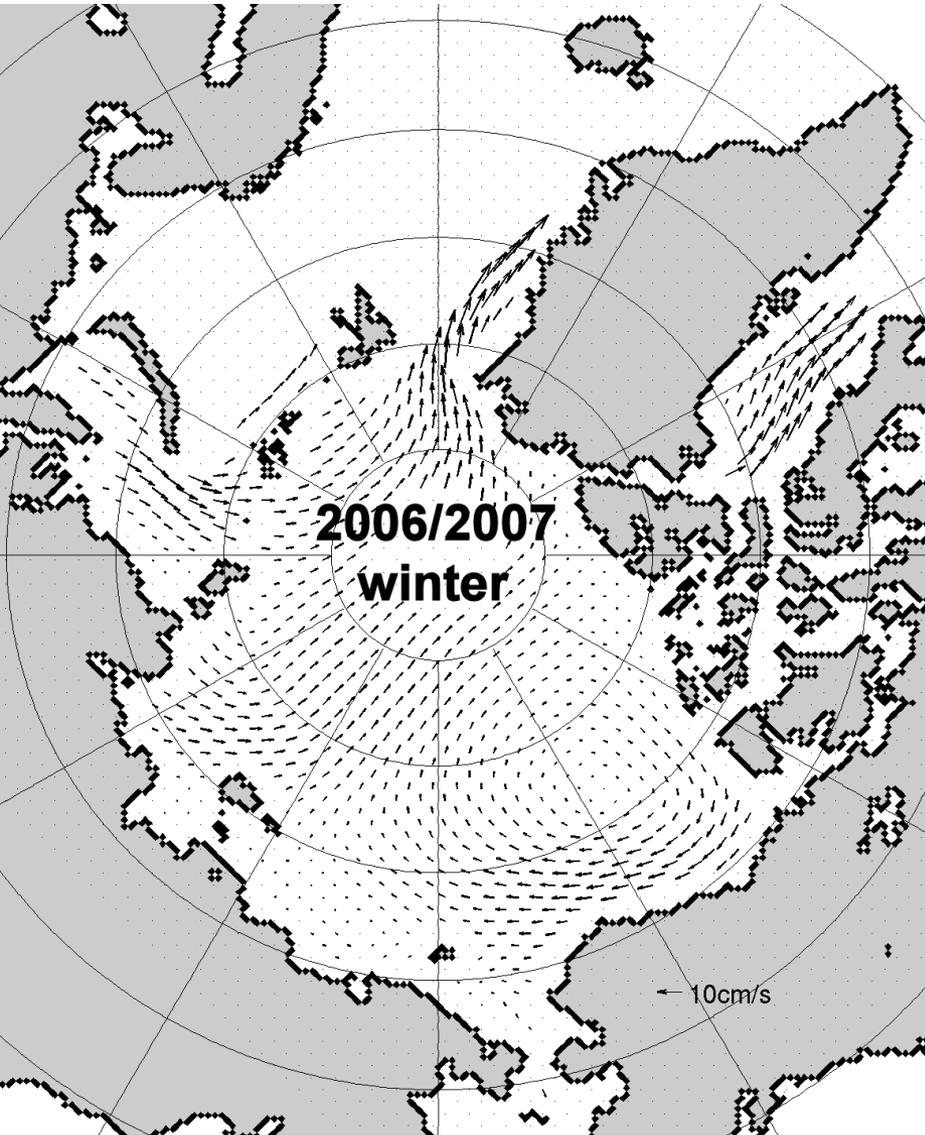
→アルベド低下 → 日射の吸収大 → 融解促進

→海氷の断熱効果減 → 海からの熱 → 大気を加熱

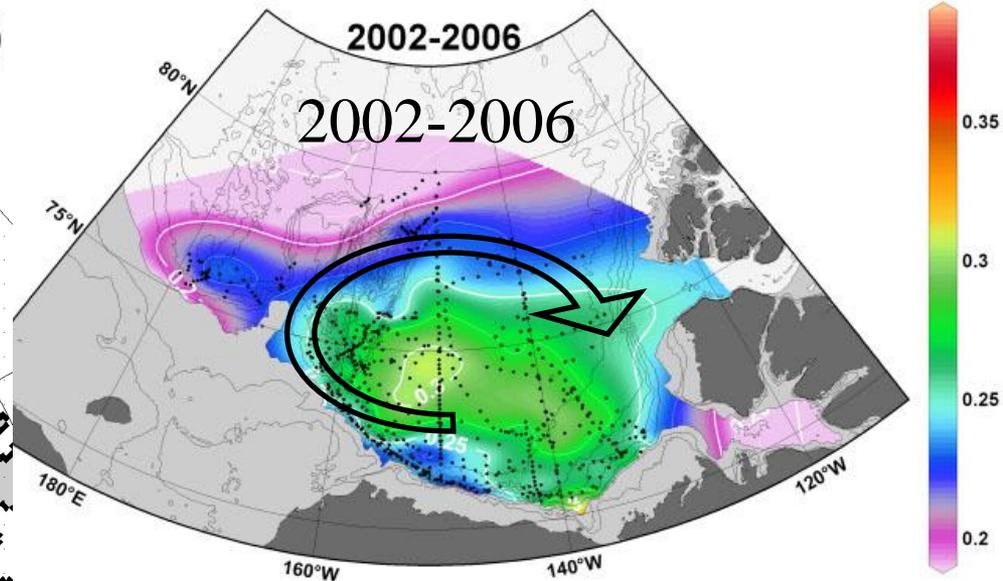


2006/2007冬の平均海水速度 海水速度の強化

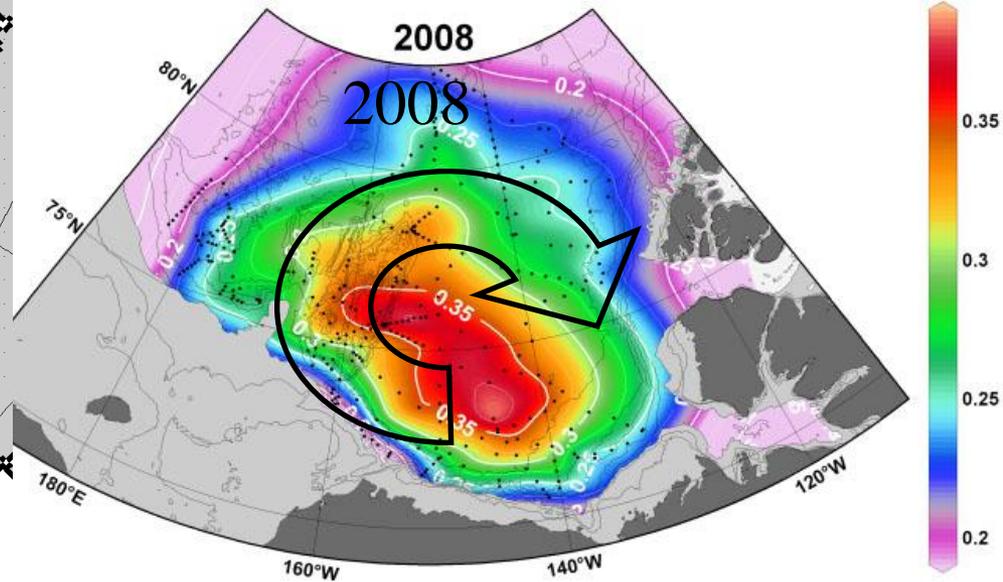
(a)



海洋力学高度(地衡流線)



by K. Shimada



不均一な海氷減少

大気循環場の変化
地球規模の気候変化

①氷が融ける

氷が減少

②氷ができない

③北極海から氷が出てゆく

大西洋側
北極海

氷が動く

太平洋側
北極海

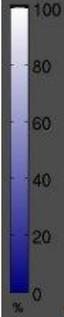
海の温暖化

海流が強くなる

力学的フィードバック

mada (2009)

Sep.1, 1997



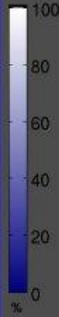
氷も海も“静的な”北極海



Sep.1, 2007

氷の放出

海の
温暖化



氷も海も“動的な”北極海



冷たく固まったアイス
をスプーンでまわせない



北極海氷はシャボン玉

Arctic Ocean

少しの変化→急激で大きな変化

アイスクリーム理論: Shimada et al., (2006)

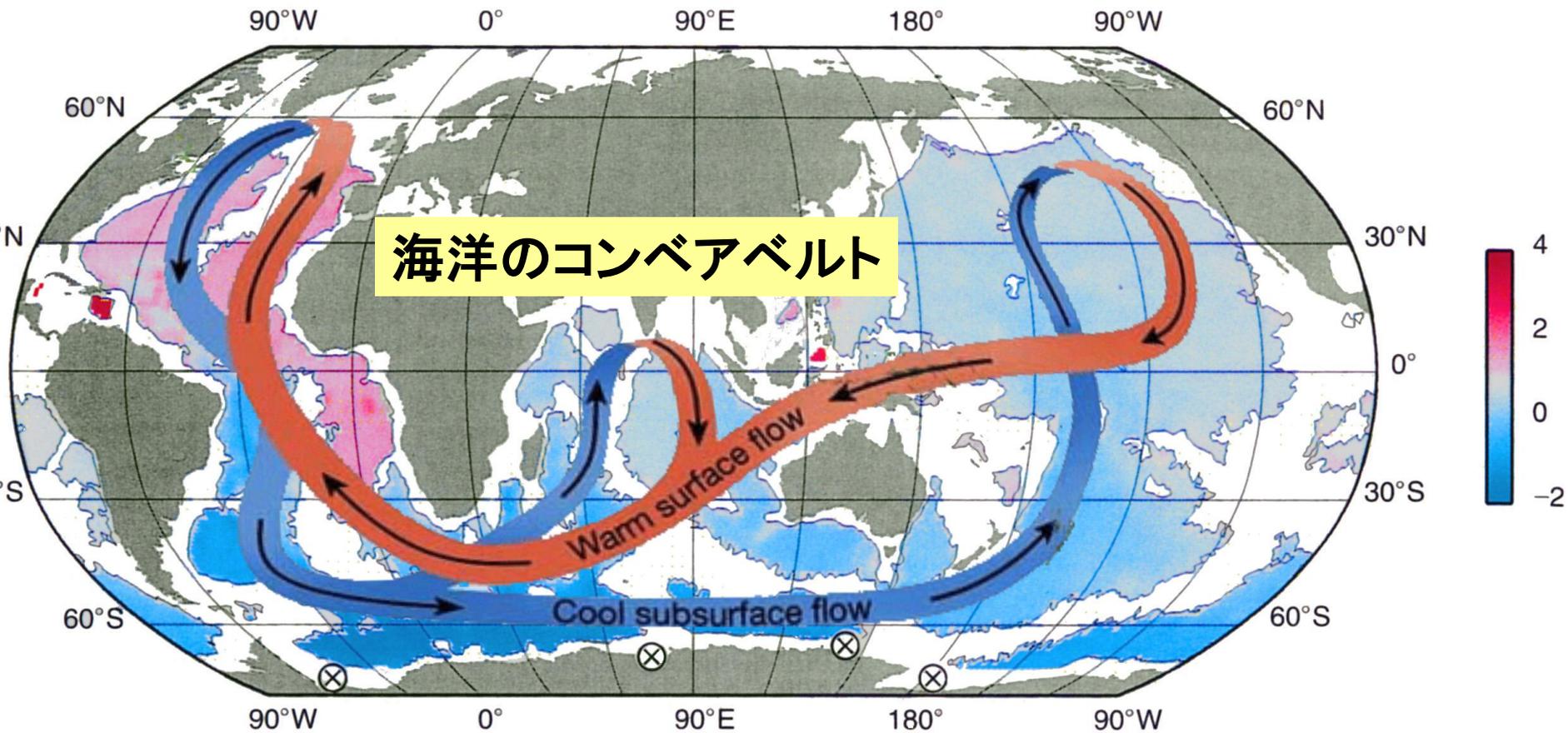
北極・夏の海氷の激減のメカニズム

- 熱力学的: アルベドフィードバック効果
多くが定性的な議論が→定量的な議論へ
海氷・海洋結合システムとしての理解
- 力学的: 風応力→海氷運動→海洋運動
→海氷運動

極域海洋→地球温暖化の高感度域 →全球への影響

- 北極海の海水の激減
 - 夏には海水がなくなってしまう？
 - 温暖化を加速する？
- 北大西洋深層水の低塩化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- 南極底層水の低塩・低密度化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- オホーツク海での海水生産減少
 - 北太平洋の中層循環が弱まってしまう？

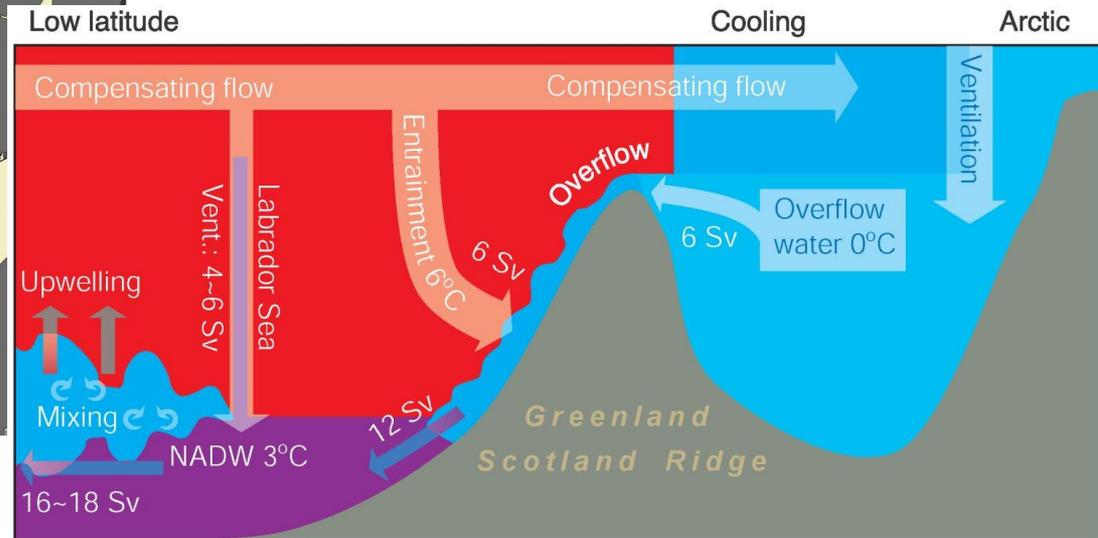
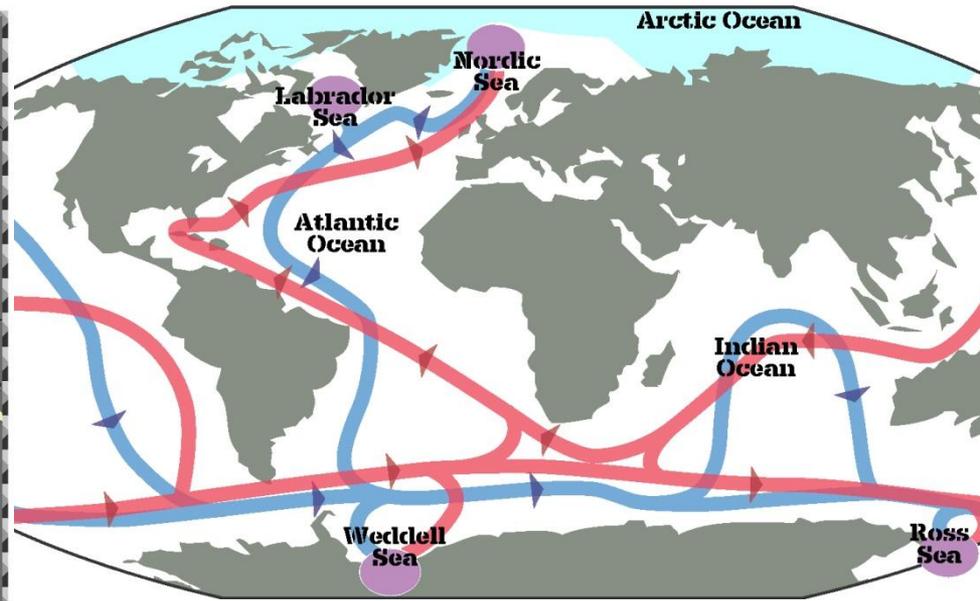
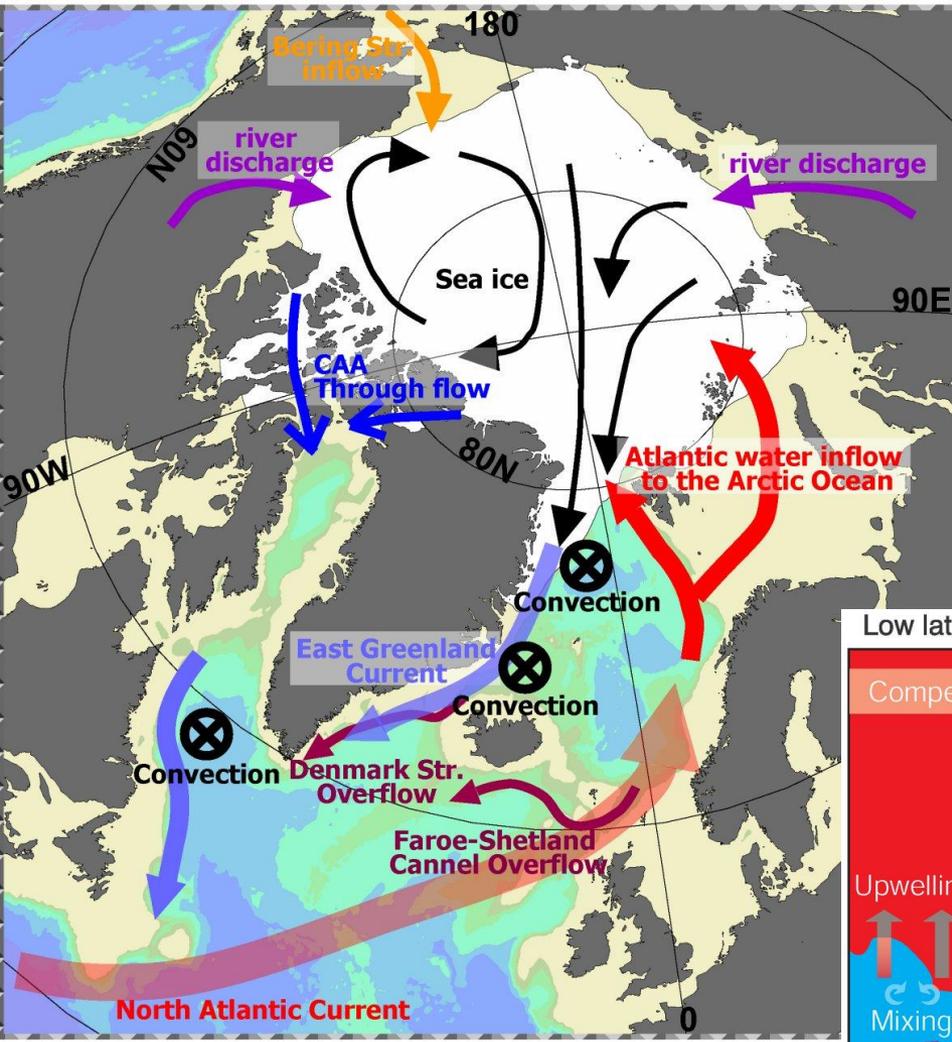
世界の海洋の海底近くの水温分布



世界の海洋深層水の起源

- ・ 北大西洋深層水（グリーンランド海周辺）
- ・ 南極底層水（南極大陸周辺）

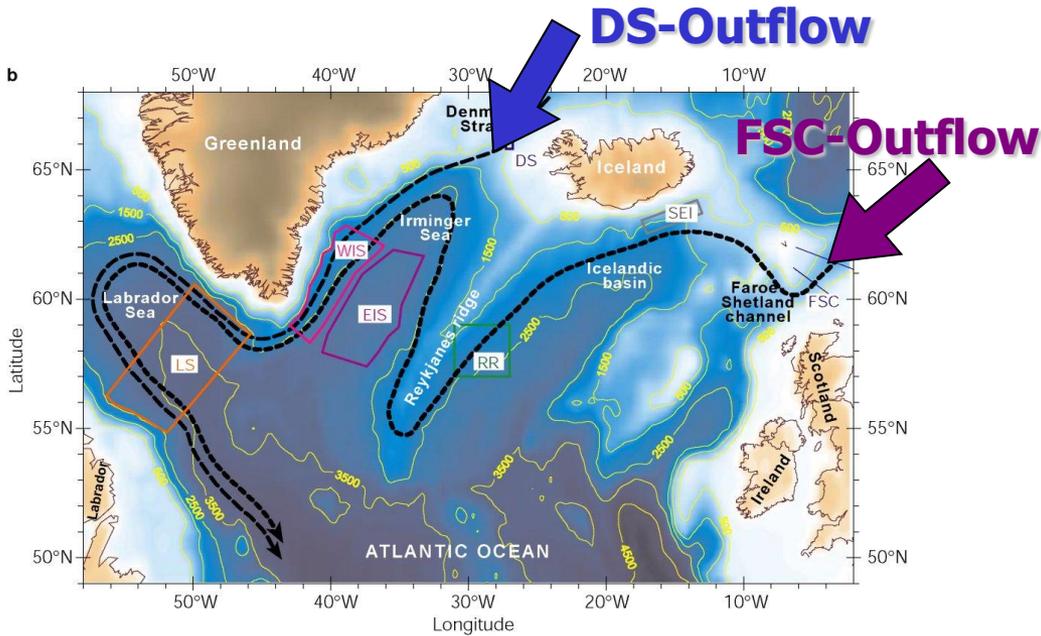
北大西洋深層水 (North Atlantic Deep Water)



Dye et al. (2007, CLIVAR Exchanges)より

Hansen et al. (2004, Science)

北大西洋深層水の変動



Dickson et al. (2002, Science)

1970年代からNADWの流路での塩分が、
 おおよそ 0.01 per decade (もしくはそれ以上)の
 割合で、広い範囲で減少し続けている。

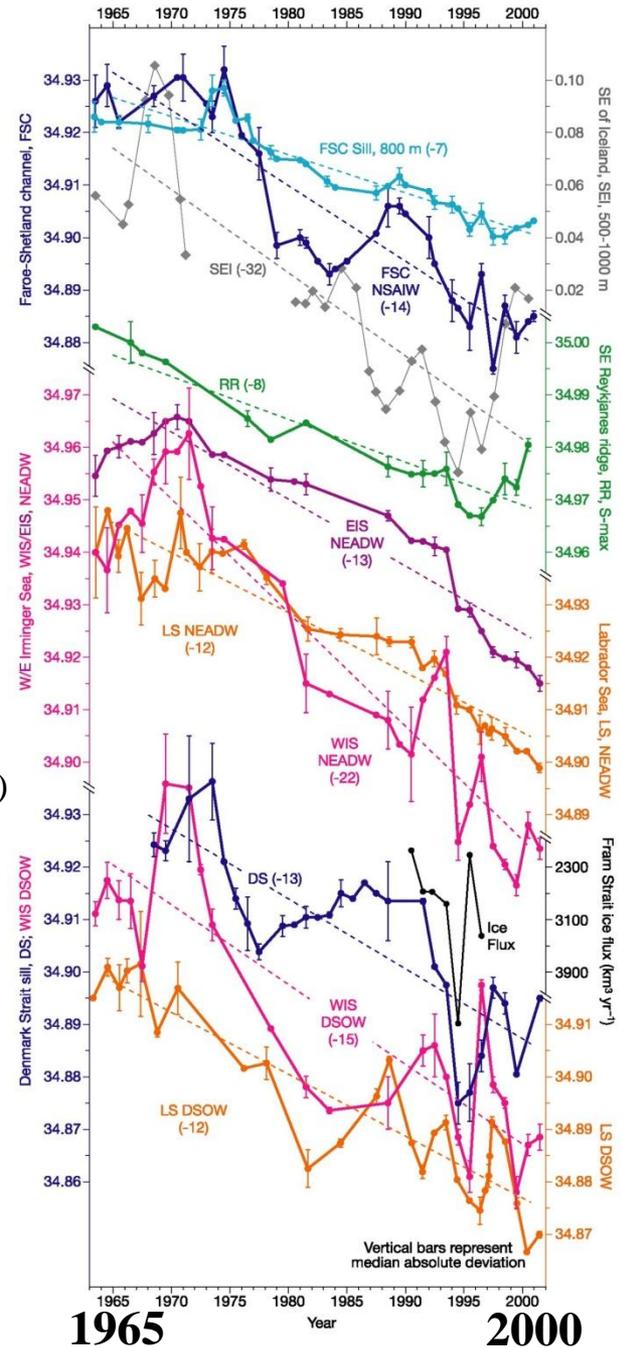
⇒ **NADWの継続的な広範囲での低塩分化**

Denmark Strait Outflow (DS-Outflow)

一様な塩分減少傾向と共に、海水輸送量変動に伴う
 比較的短期の変動が見られる

Faroe-Shetland Cannel Outflow (FSC-Outflow)

一様な塩分減少傾向が見られる。Iceland付近では
 より強い低塩分化の傾向も見られる。



FSC-Overflow

DS-Overflow

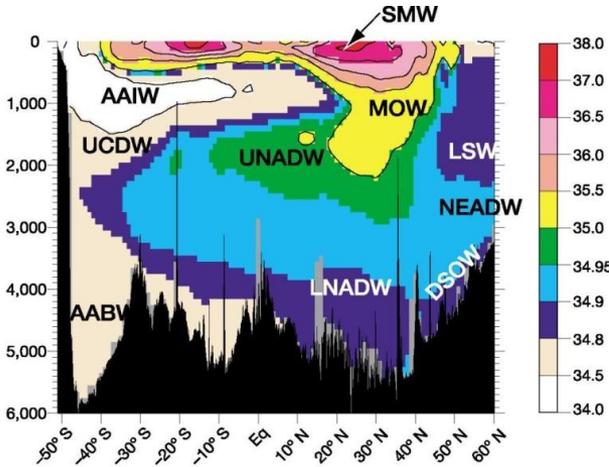
1965 Year 2000

北大西洋深層水の変動

JAMSTEC菊地さんのスライド

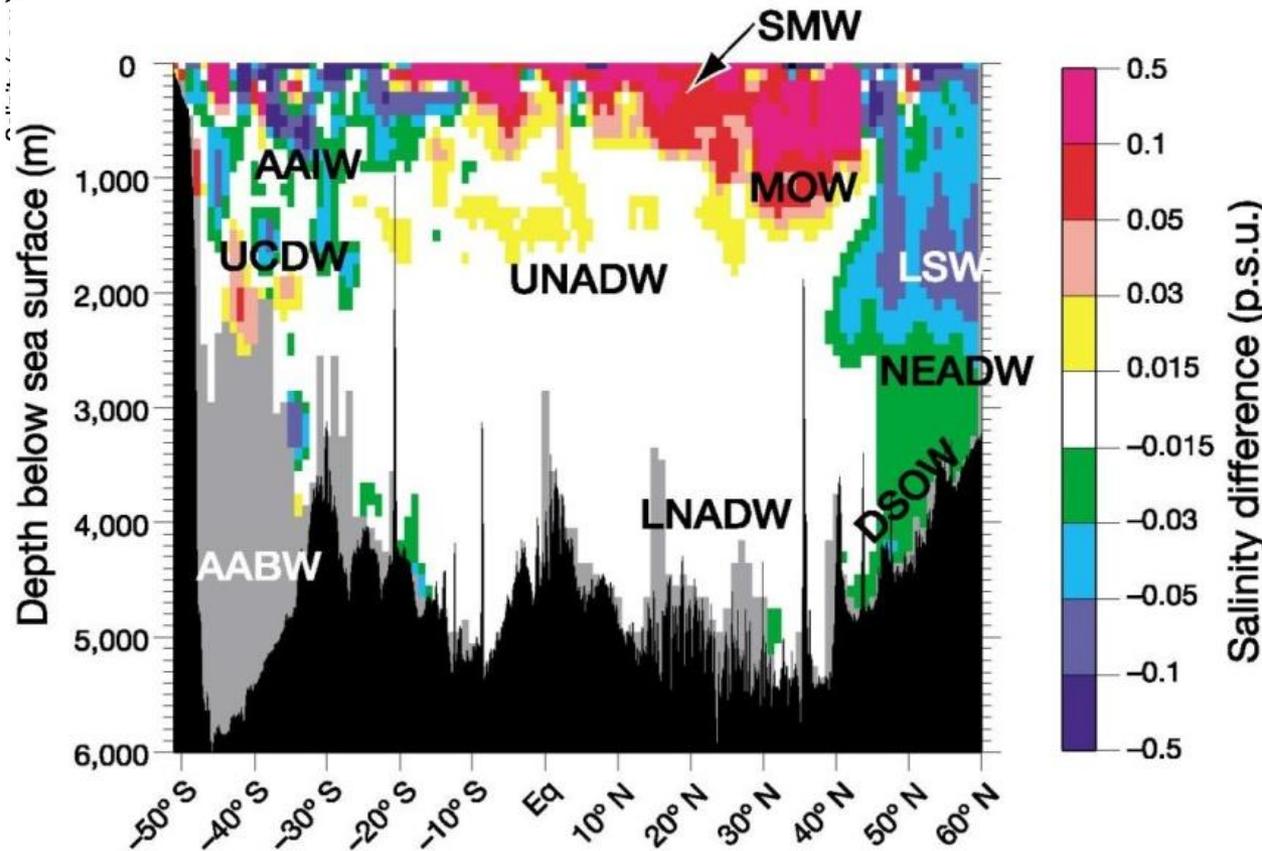
大西洋西部での1955-69と1985-99の間の塩分比較

低塩分化・低温化したLSW,NEADW,DSOWが北緯40付近まで広がっている。



平均塩分断面

Curry et al. (2003, Nature)
(1985-99) - (1955-69)の塩分差

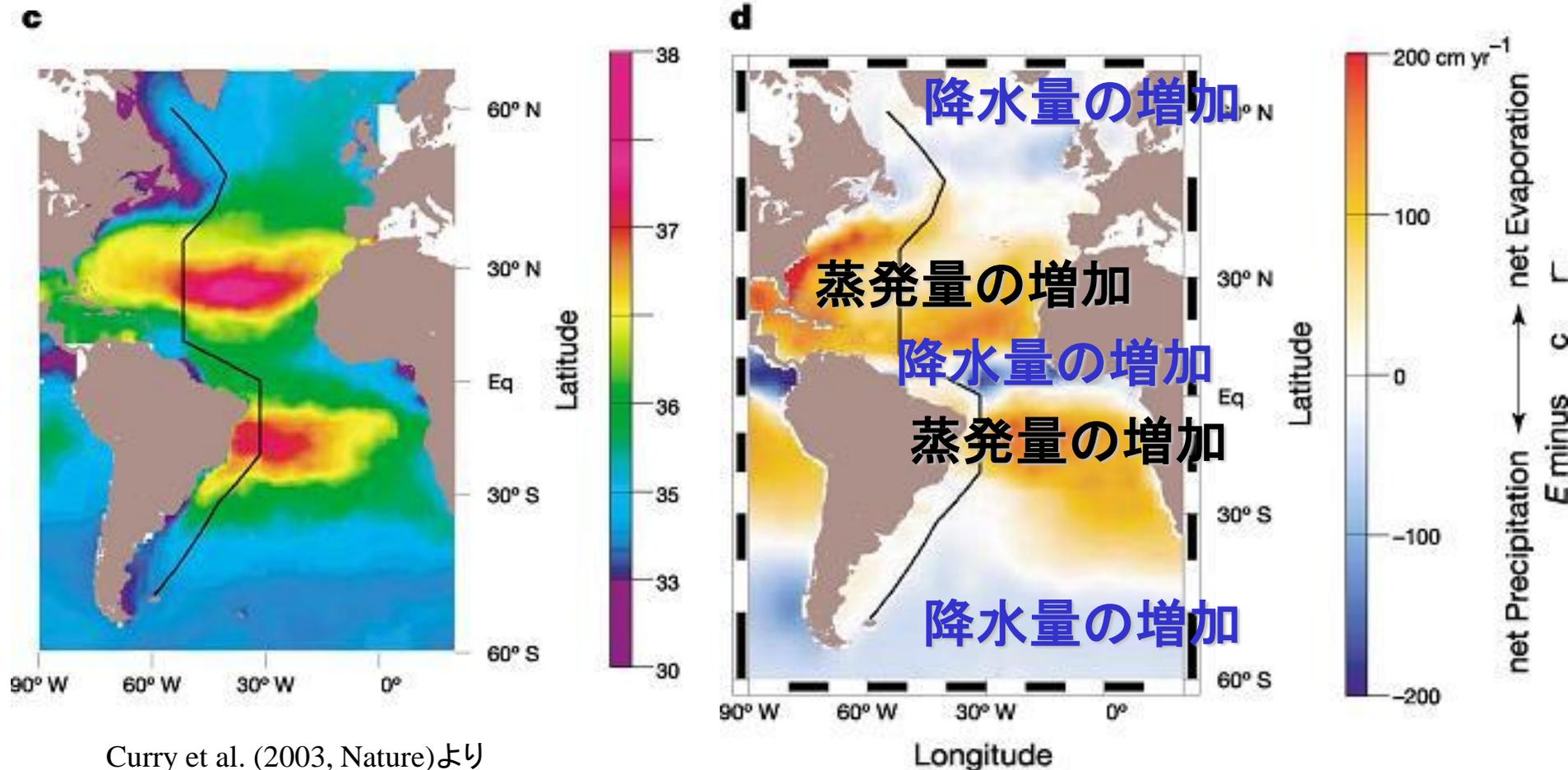


- 大西洋全体で見ると、
- ・25S以南の海域で低塩分化が見られる。
 - ・熱帯、亜熱帯域表層水の高塩分化も顕著である。

北大西洋深層水の変動

降水過剰域(両極側)での低塩分化と、蒸発過剰域(熱帯・亜熱帯)での高塩分化

Global Warmingと全球的な水循環の変化の影響



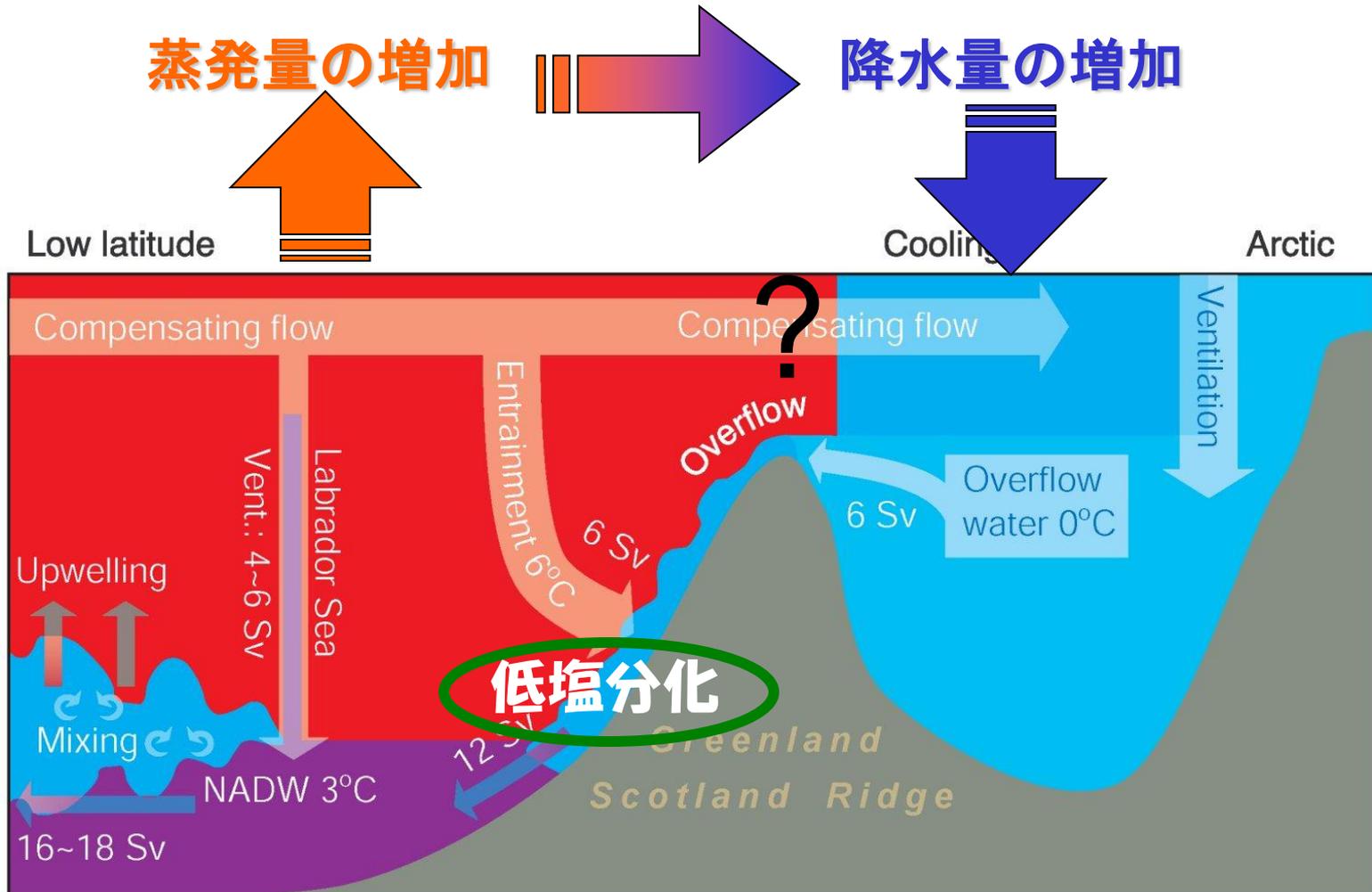
Curry et al. (2003, Nature)より

左、Fig. 1c 表層塩分(気候値); 右、Fig. 1d 年平均のE-P

北大西洋深層水の変動と関連して...

JAMSTEC菊地さんのスライド

Global Warmingと全球的な水循環の変化の影響



Already the Day After Tomorrow?

By Hansen et al.

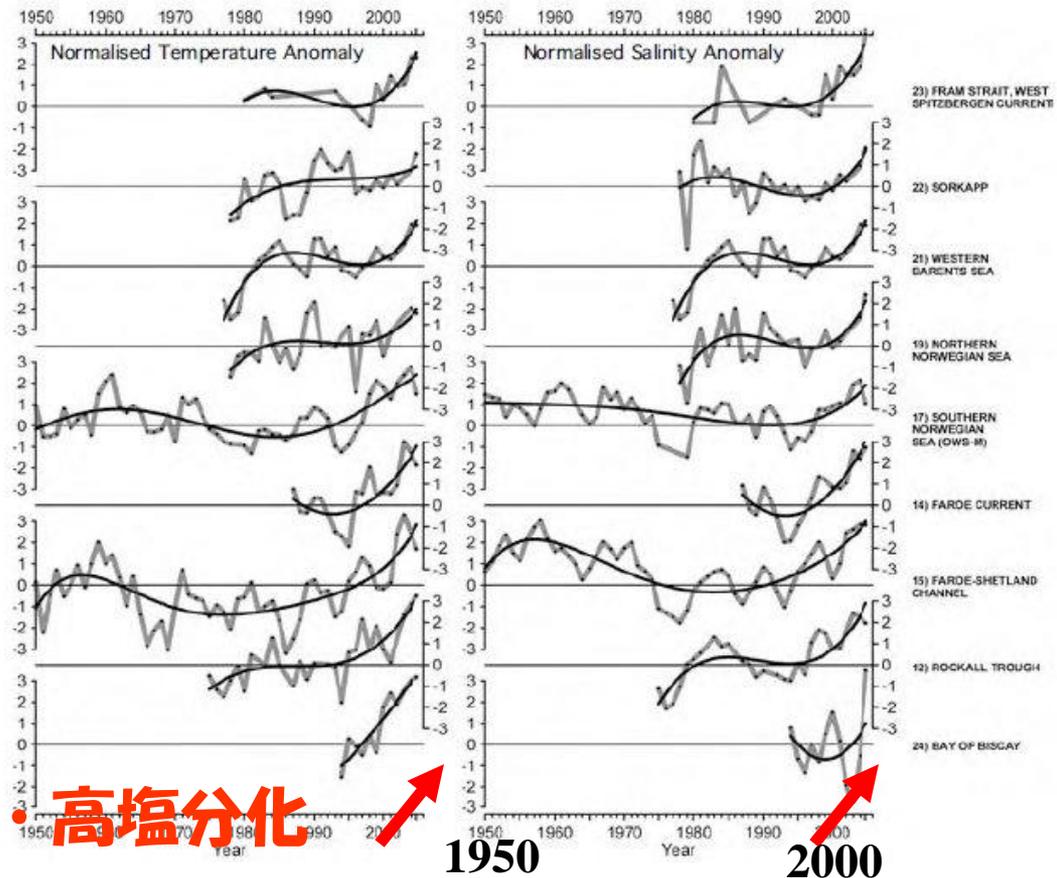
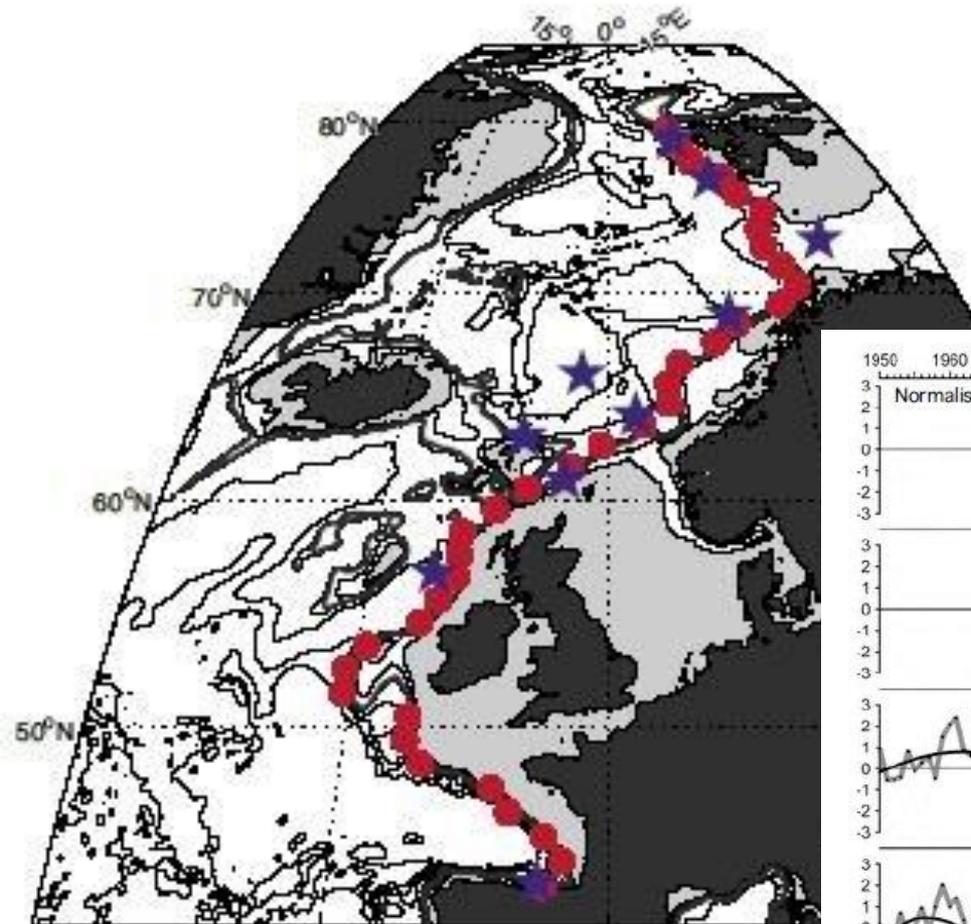
Science, 305, 953-954 (2004)

北大西洋深層水の変動と関連して...

Holliday et al. (2007, CLIVAR Exchange)より

左: 観測地点を示した地図

右下: 観測地点の地図地図の星印の観測点における
水温(左)と塩分(右)の時間変化

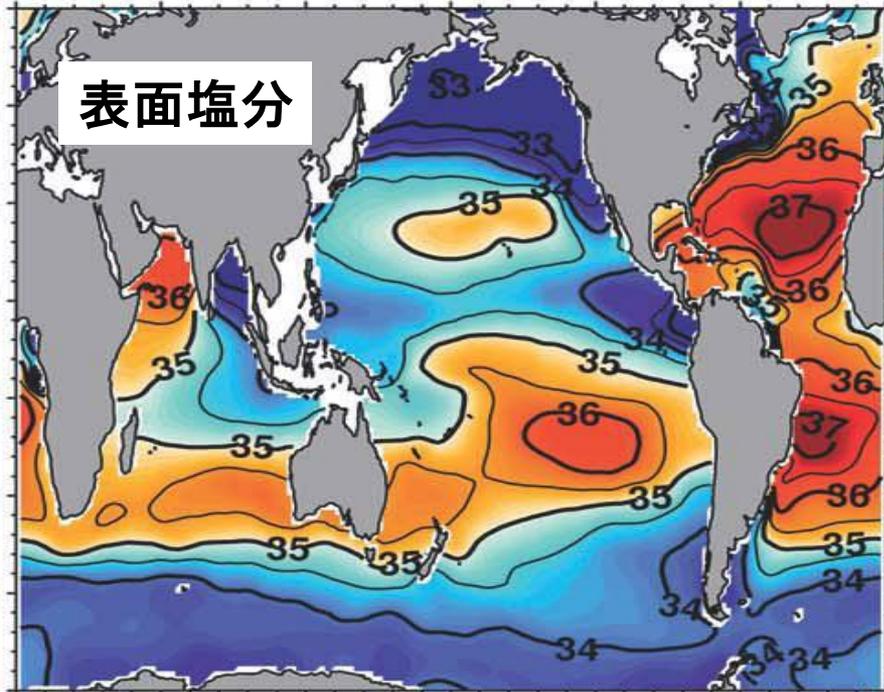


1990年代後半からの高温・高塩分化

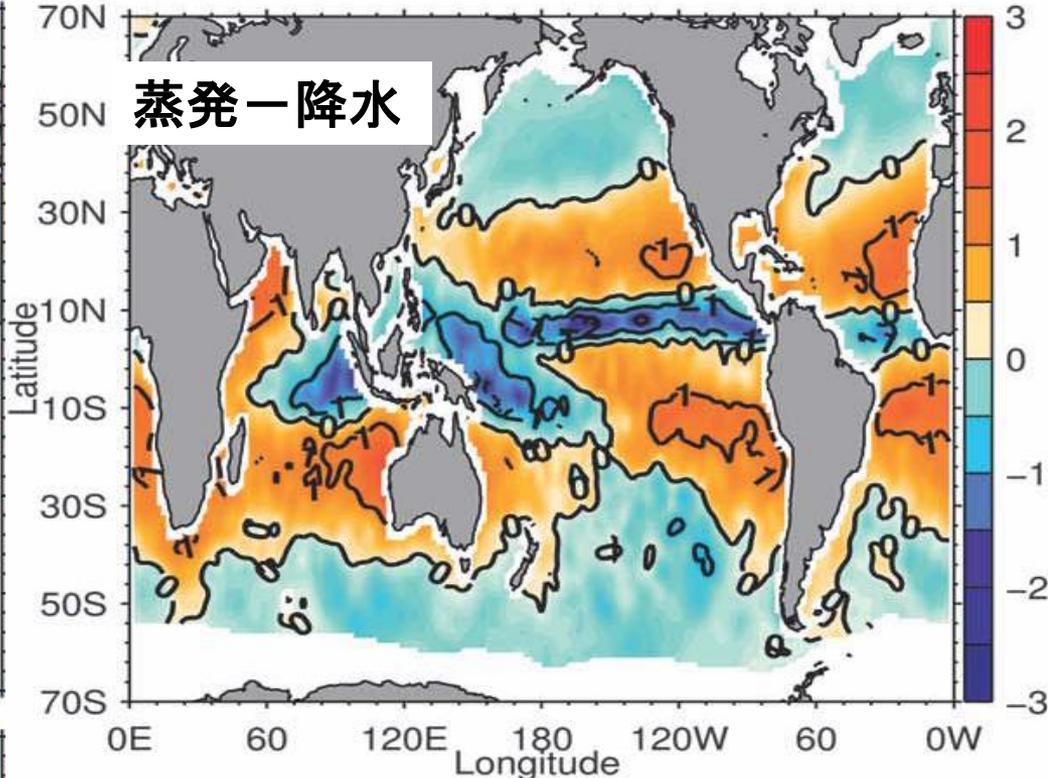
今後どうなる北大西洋深層水？

- 低塩化により深層水の生成が減少
→熱塩循環が弱化→停止
(ゆっくりとDay After Tommorrowへ)
- 高塩化した亜熱帯系水が北上し、
低塩化は止まり、深層水も元のように生成

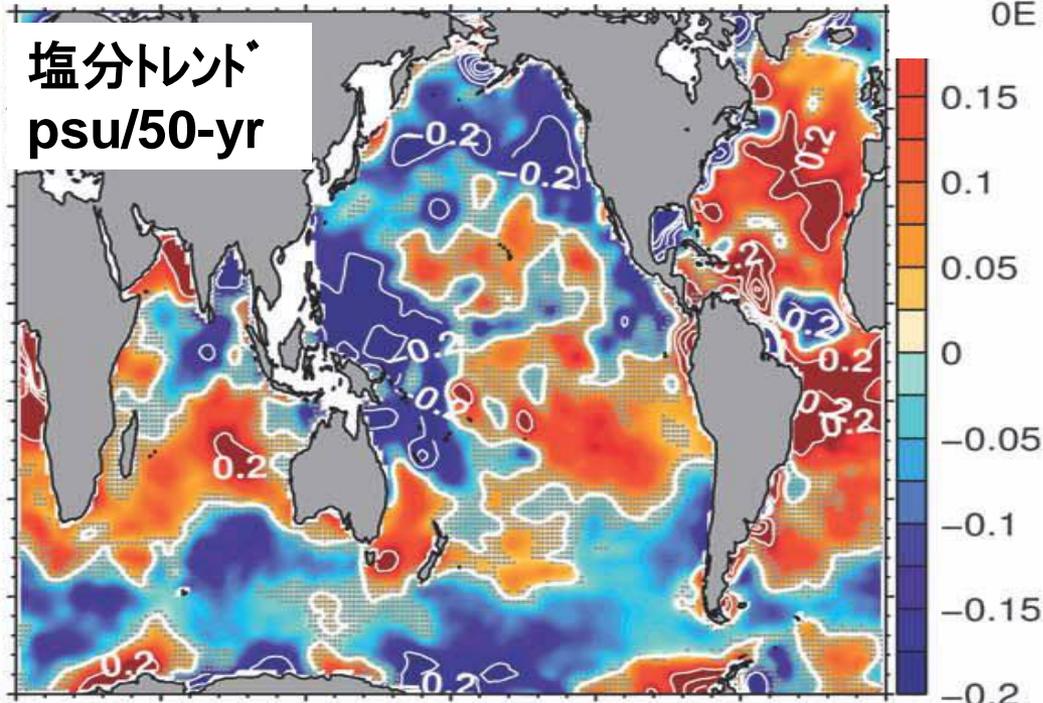
表面塩分



蒸発-降水



塩分トレンド
psu/50-yr



Durack and Wijffels(2010)

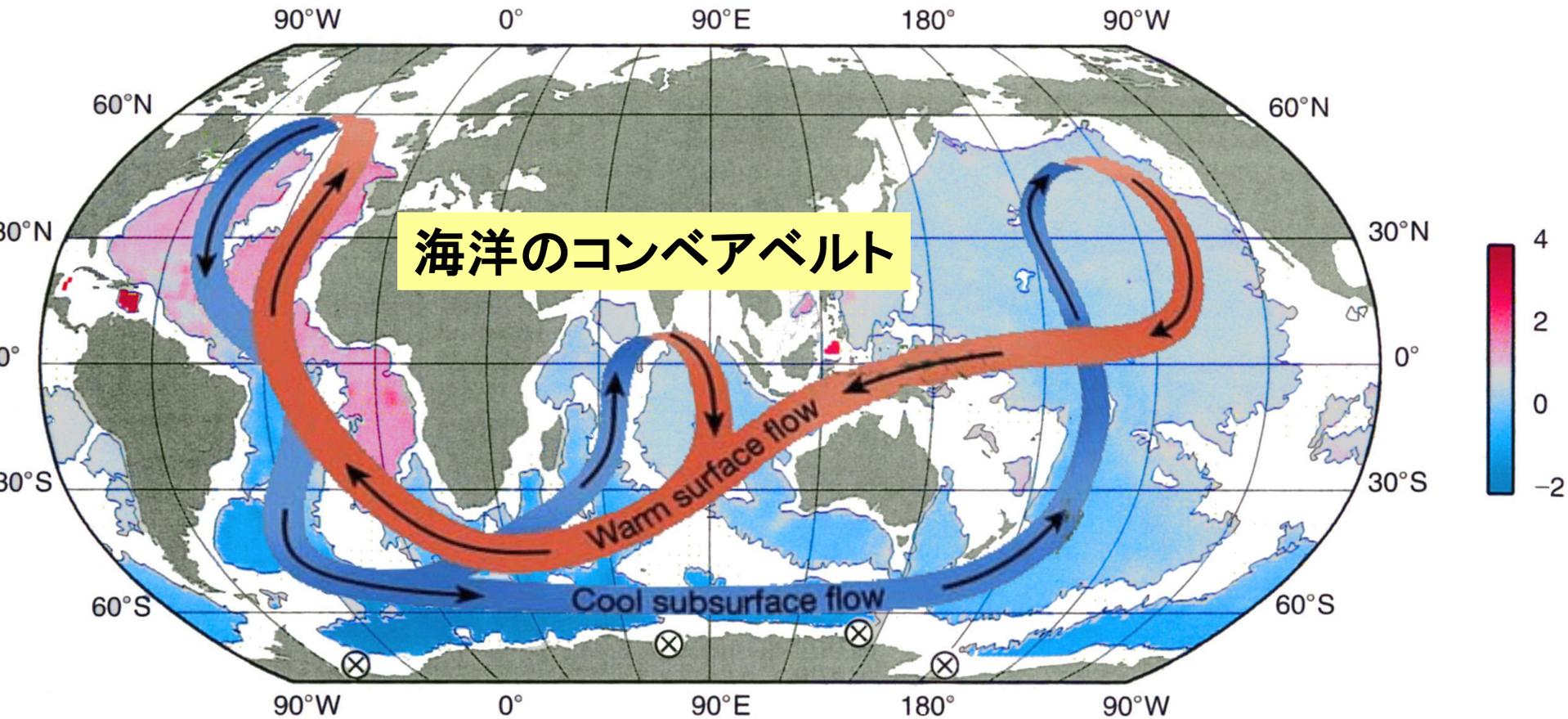
降水過剰域(両極側)での低塩分化と、
蒸発過剰域(熱帯・亜熱帯)での高塩分化

**Global Warmingに伴う
全球的な水循環の活発化**

極域海洋→地球温暖化の高感度域 →全球への影響

- 北極海の海水の激減
 - 夏には海水がなくなってしまう？
 - 温暖化を加速する？
- 北大西洋深層水の低塩化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- 南極底層水の低塩・低密度化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- オホーツク海での海水生産減少
 - 北太平洋の中層循環が弱まってしまう？

世界の海洋の海底近くの水温分布

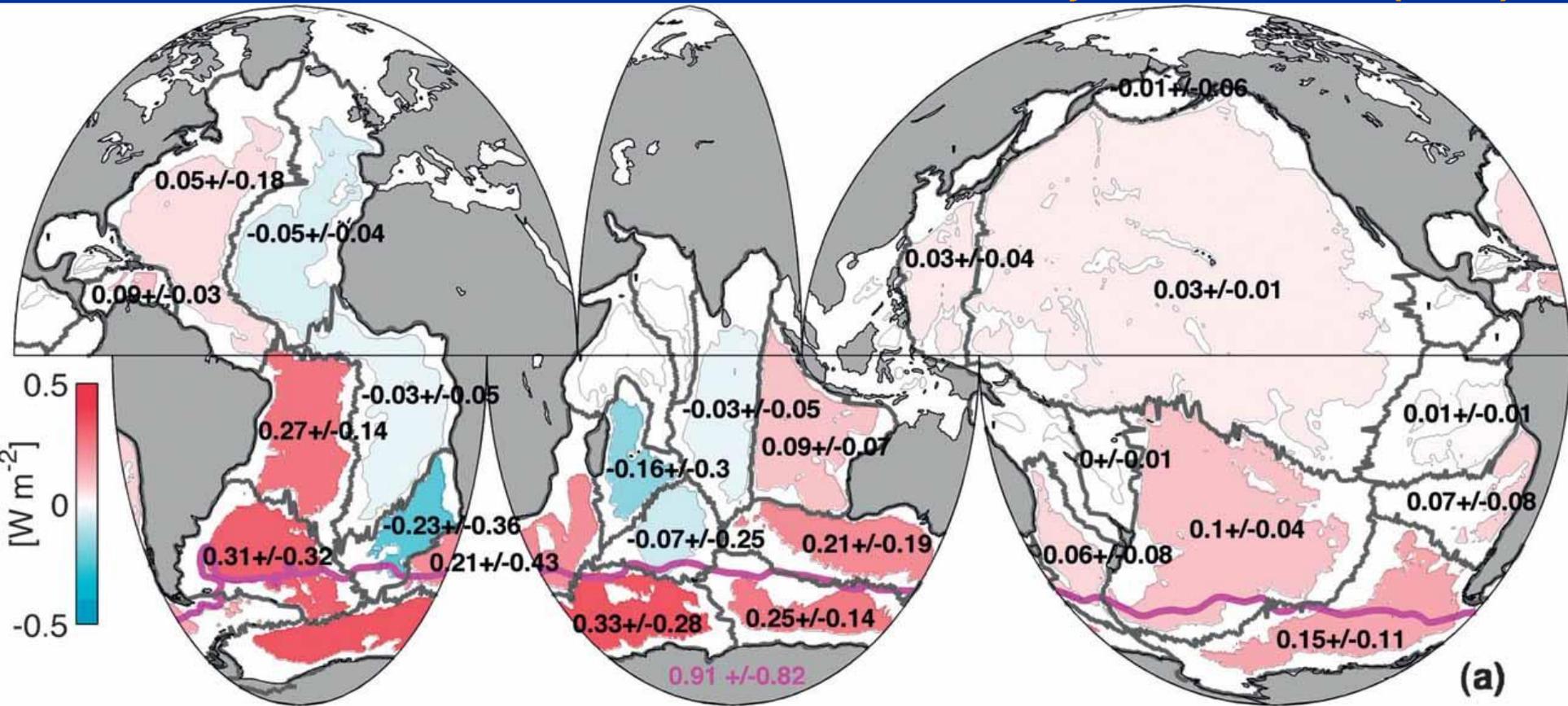


全海水の約75%は4°C以下。世界で一番重い冷たい水は南極海で作られ(南極底層水)、全世界の底層に広がっていく。

= 深層循環(2000年の時間スケール)の源

Abyssal warming below 4000m from 1990s to 2000s

Purkey and Johnson (2010)



Warming trend of bottom water (AABW)

Weddell Sea: Fahrbach et al.(2004)

Ross Sea: Ozaki et al. (2009), Jacobs and Giulivi (2010)

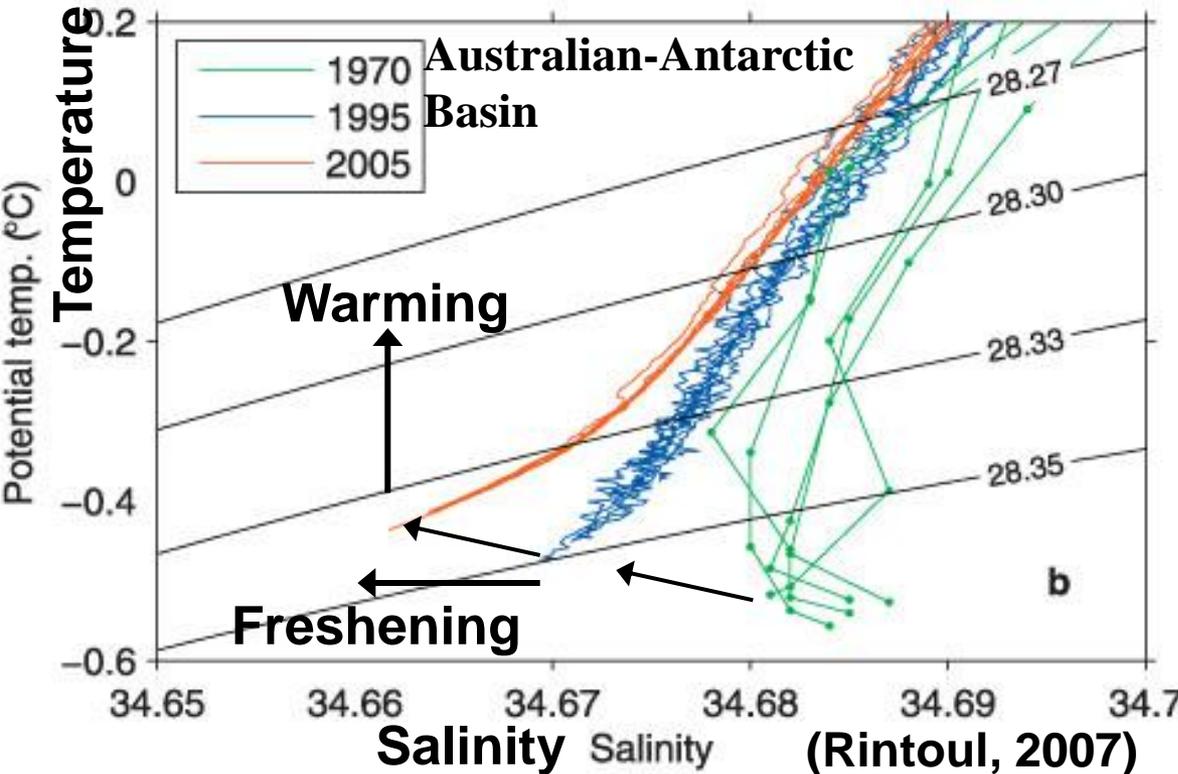
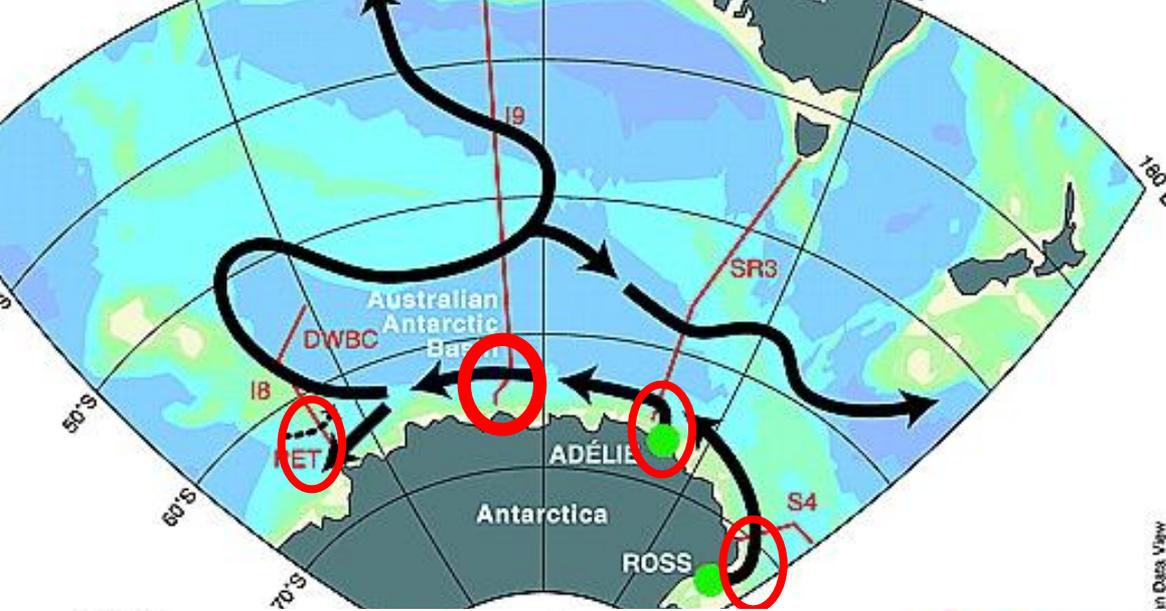
Adelie Coast: Aoki et al. (2005), Rintoul (2007)

Freshening of AABW

Ross Sea: Jacobs (2004)

Australian-Antarctic Basin
: Rintoul (2007)

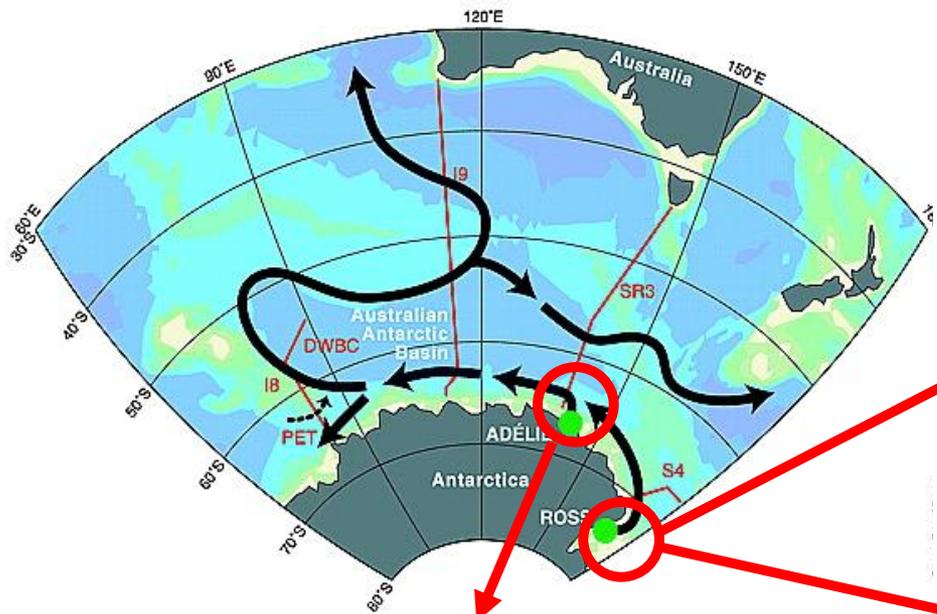
Adelie Coast: Aoki et al (2005)



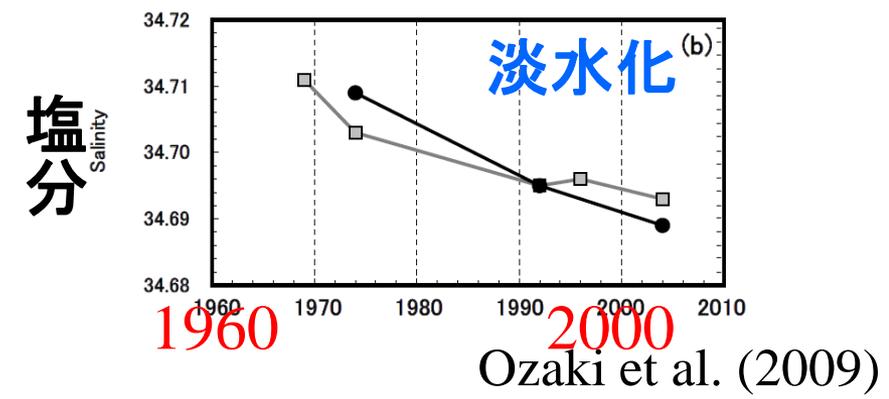
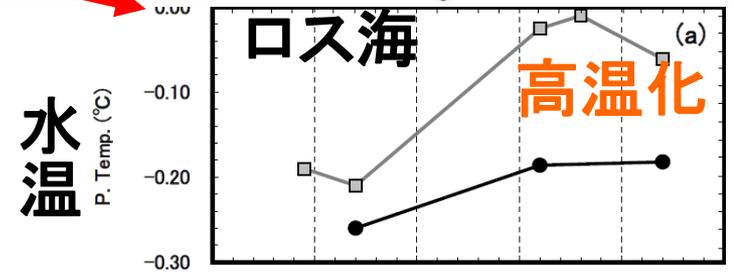
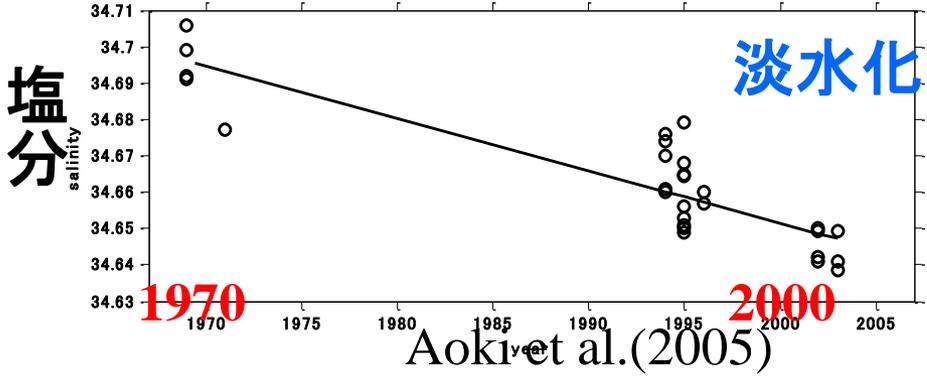
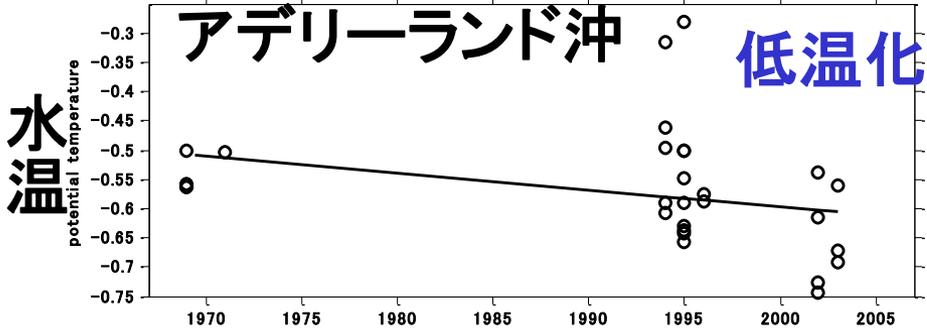
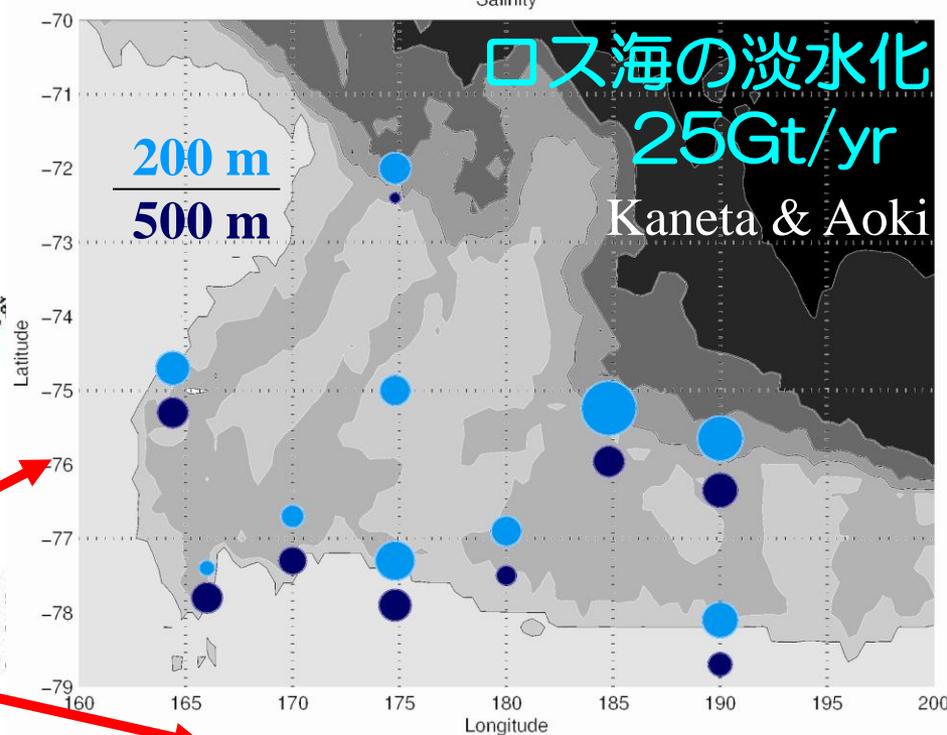
Cause of Freshening

- Enhanced melting of Ice Shelf
- Increase of P-E (Precipitation-Evaporation)
- Deduced sea ice prod. in the polynya

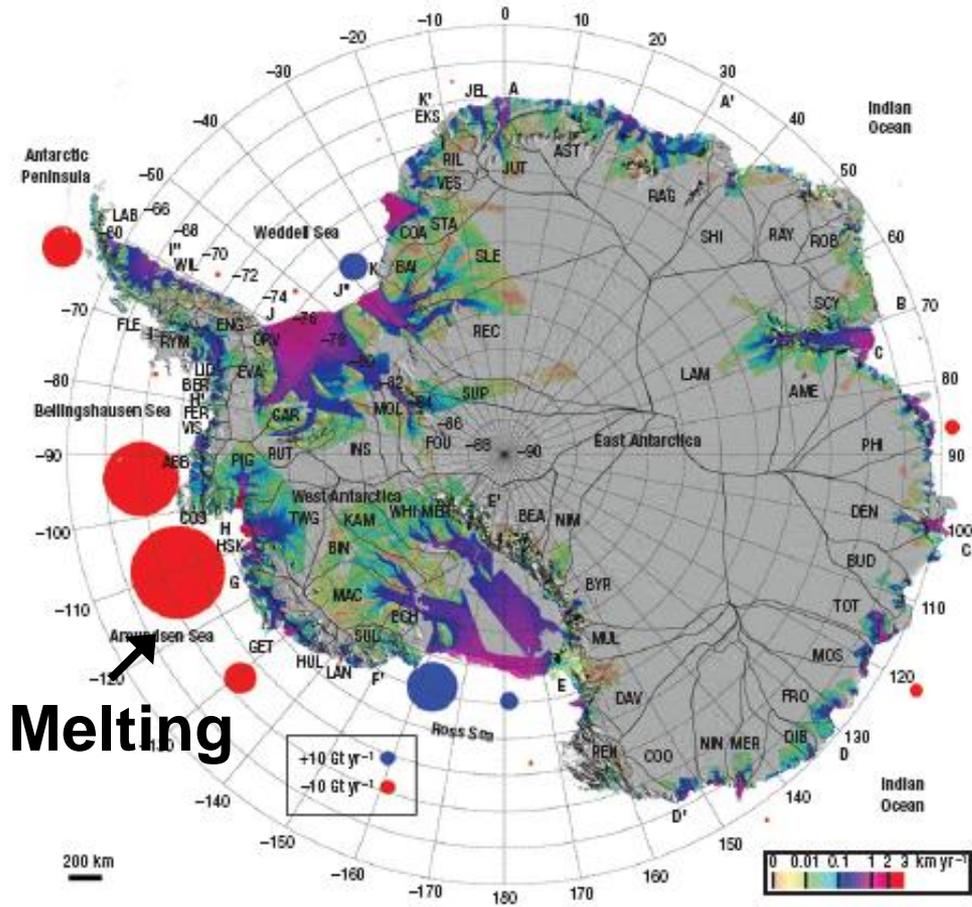
南極底層水の変質



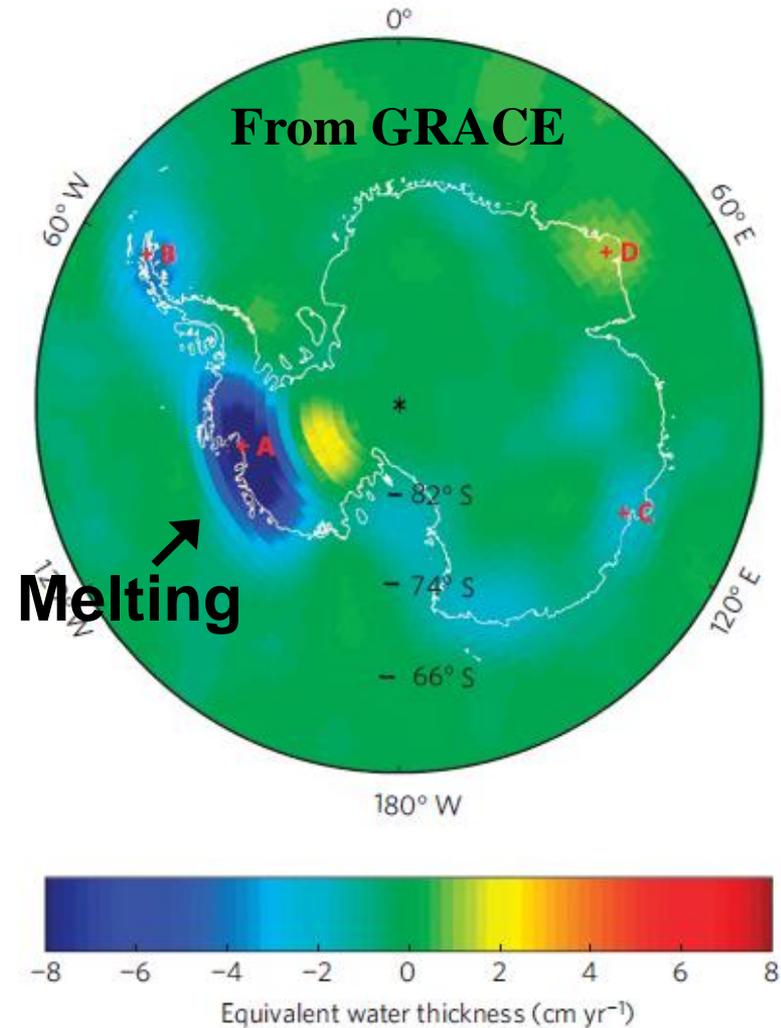
ロシア海の淡水化
25Gt/yr
Kaneta & Aoki



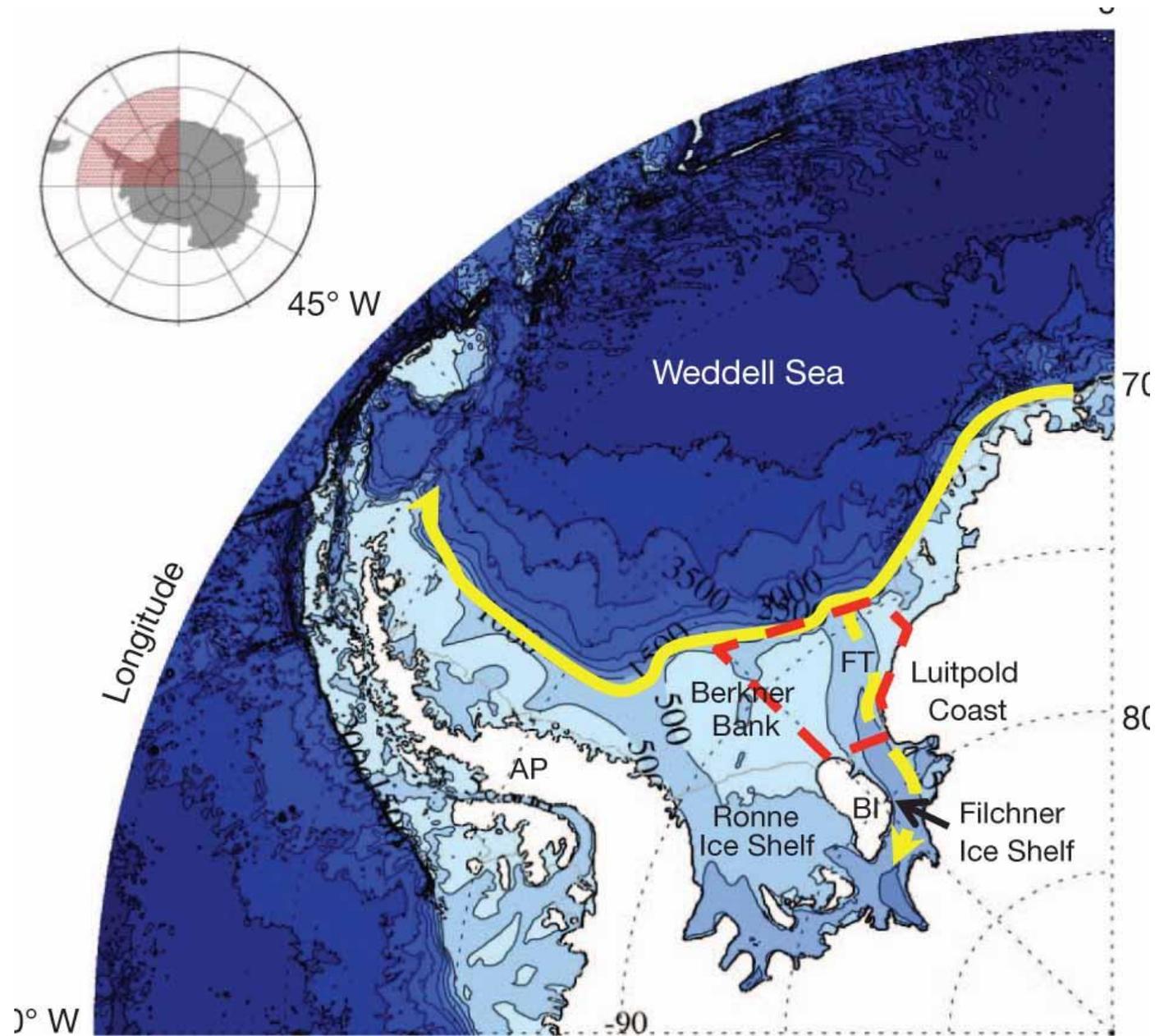
Increase/Decreased rate of Ice Shelf, Ice Sheet



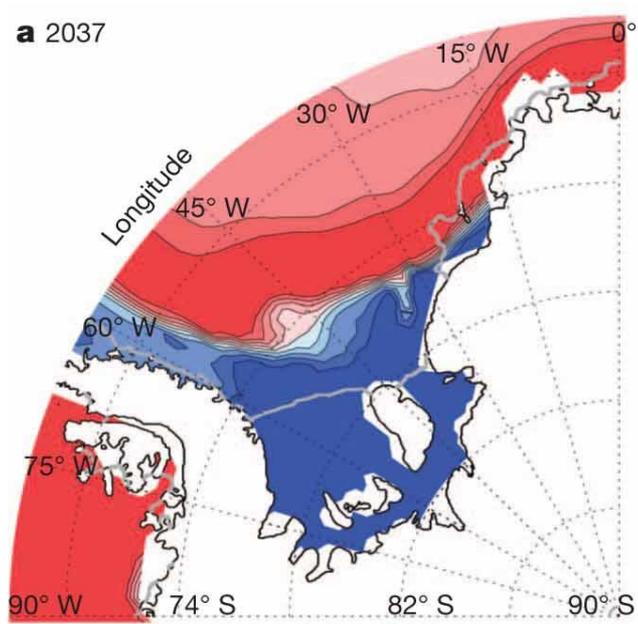
(Rignot et al. 2008)



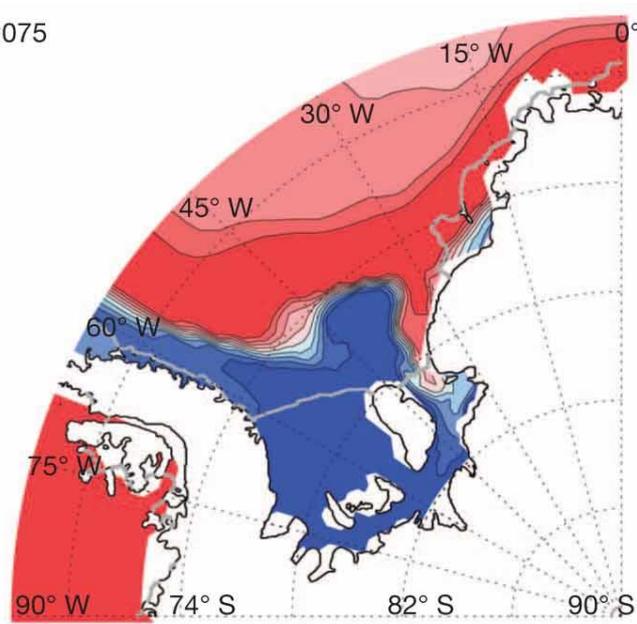
(Chen et al., 2008)



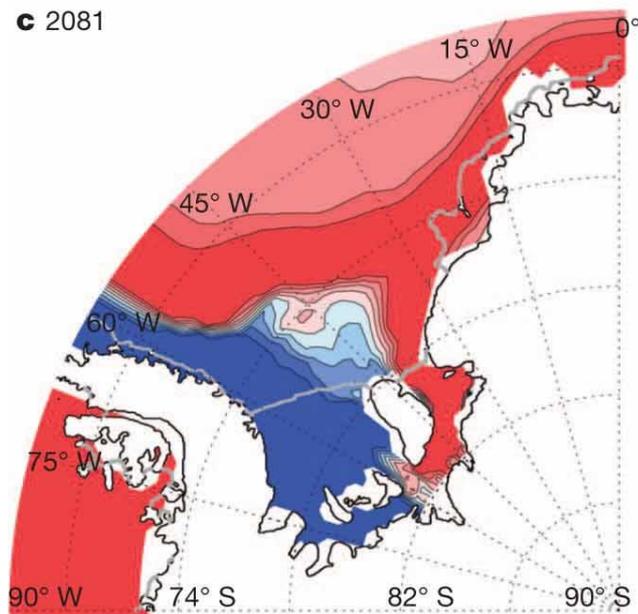
a 2037



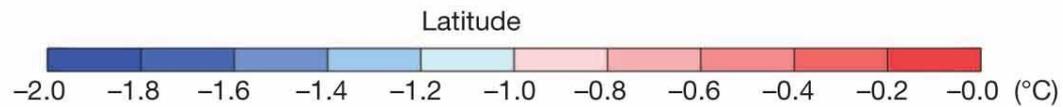
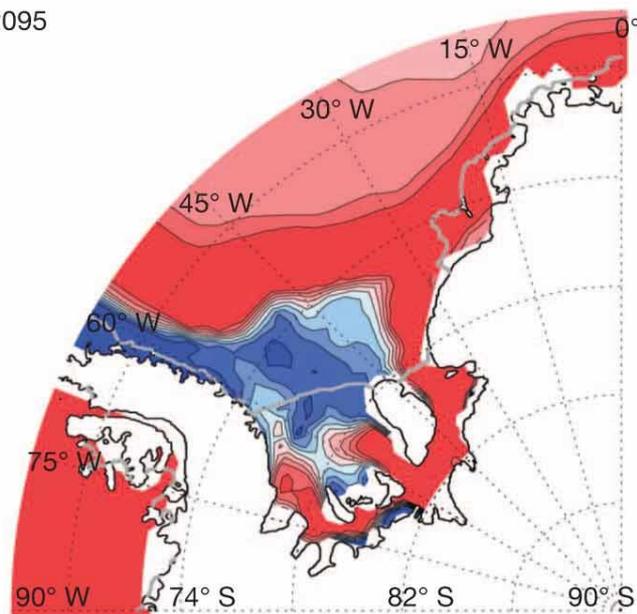
b 2075

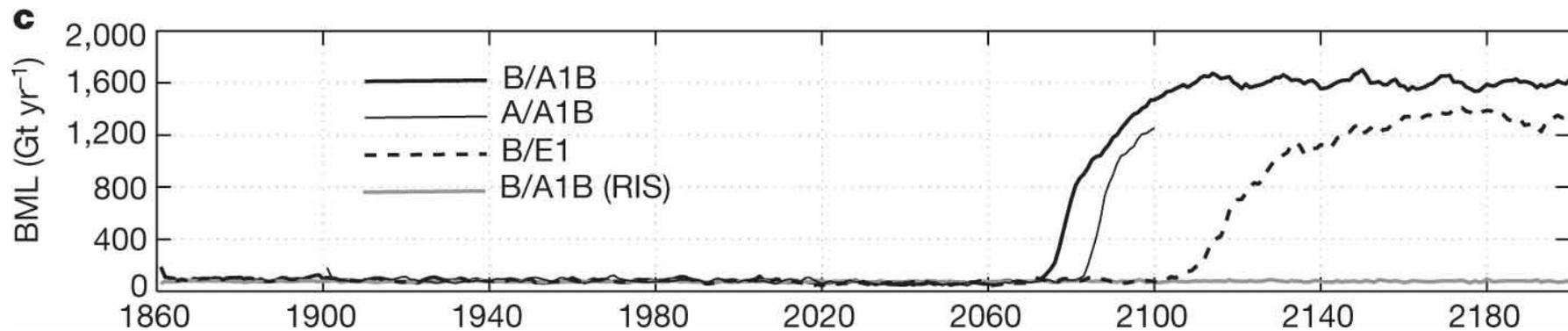
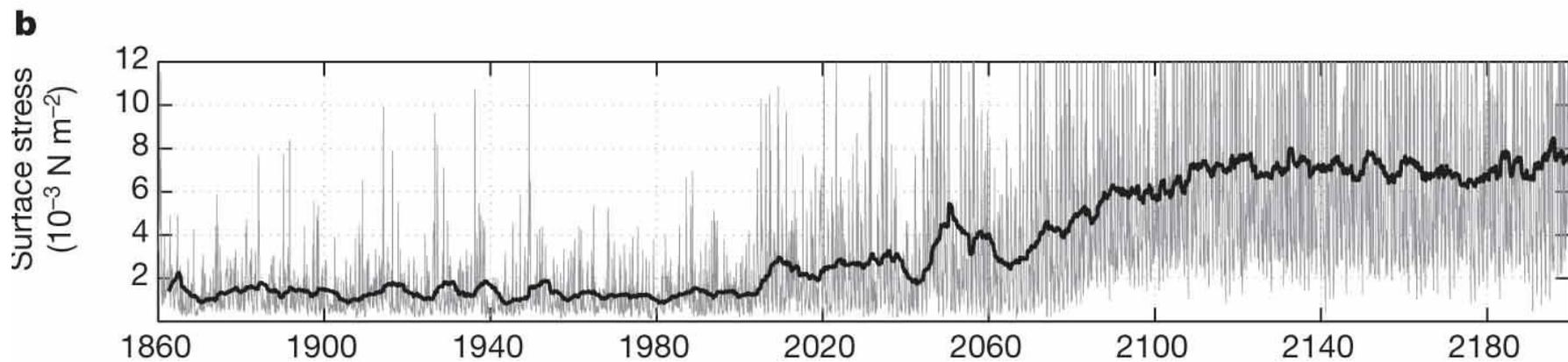
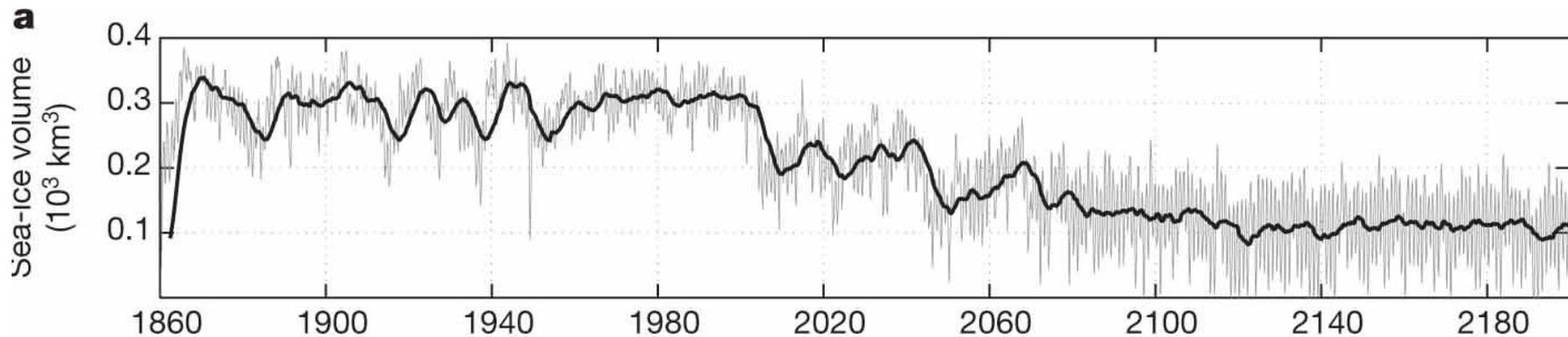


c 2081



d 2095

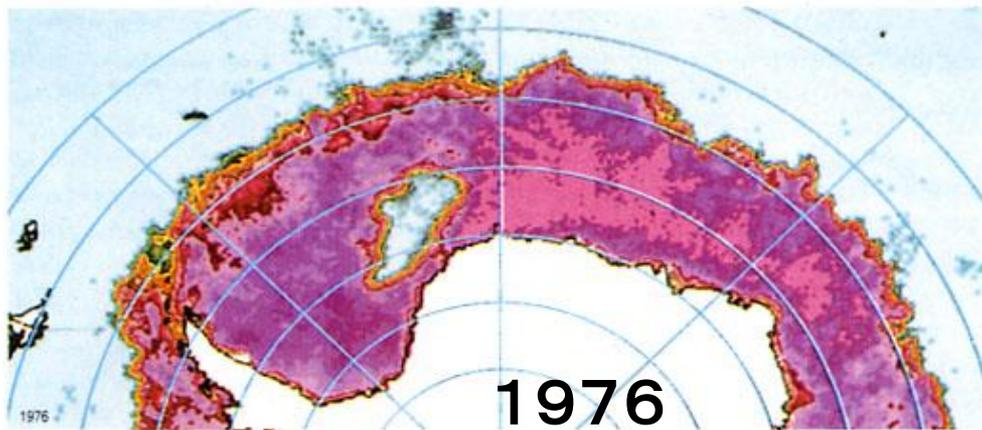
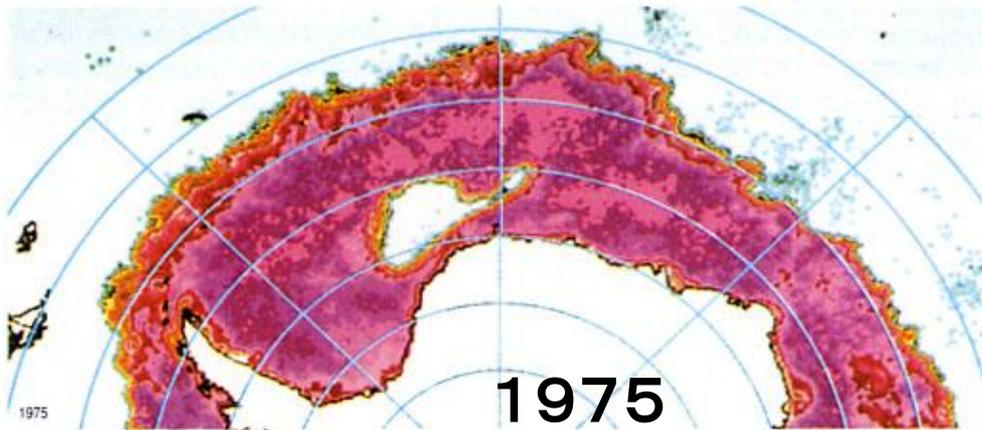
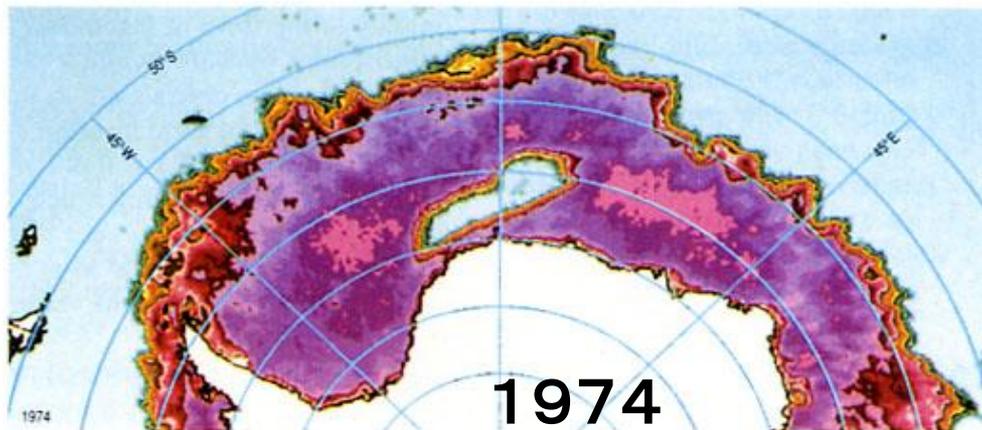


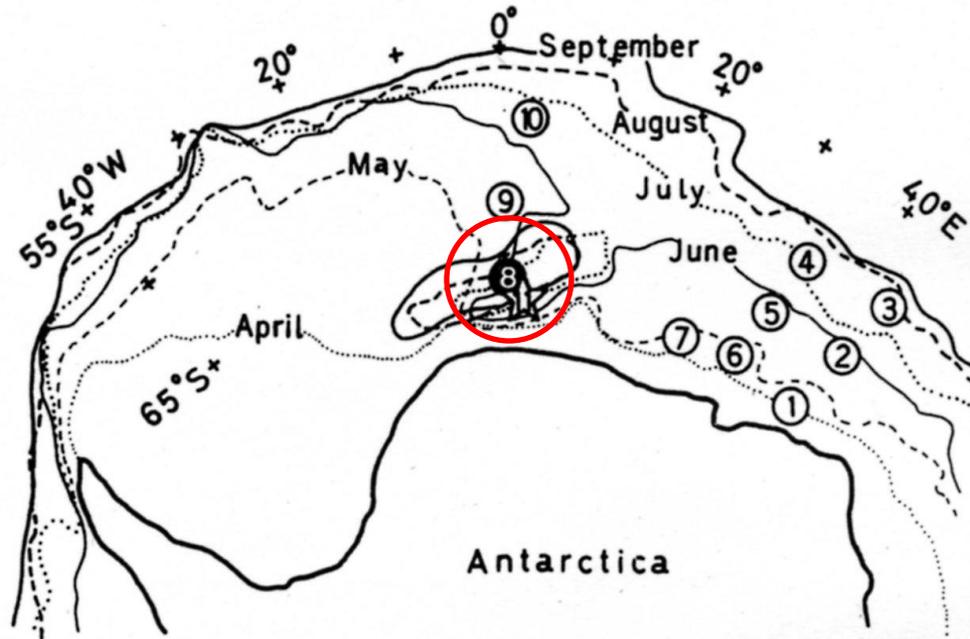


ウェッデルポリニヤ

(冬季:9月)

マイクロ波放射計による



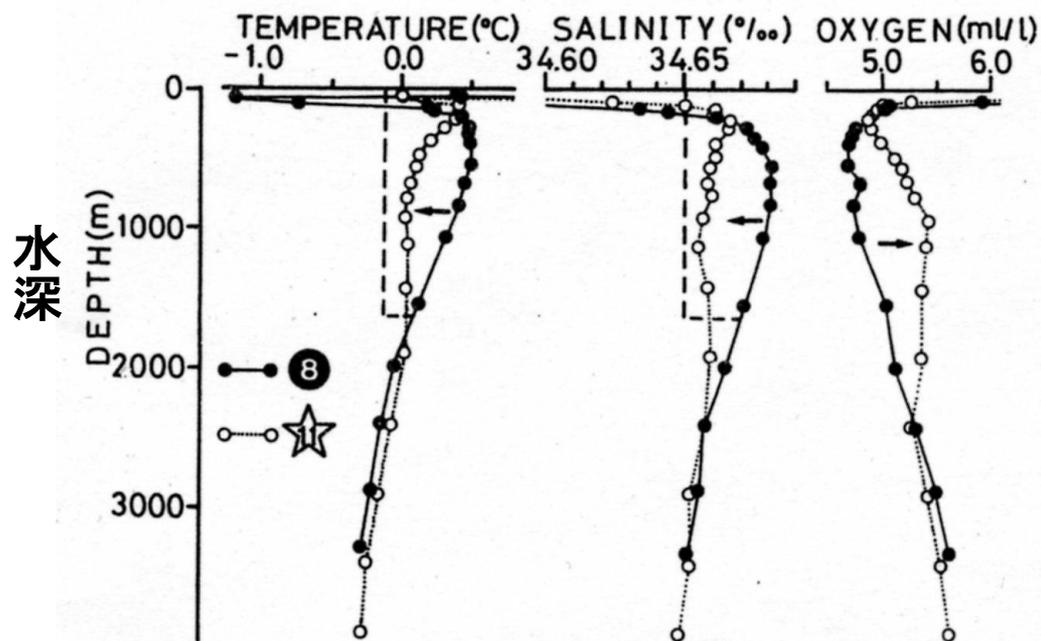


水温

塩分

溶存酸素

JAREデータ
による



Motoi et al., 1987

ポリニヤ形成メカニズム

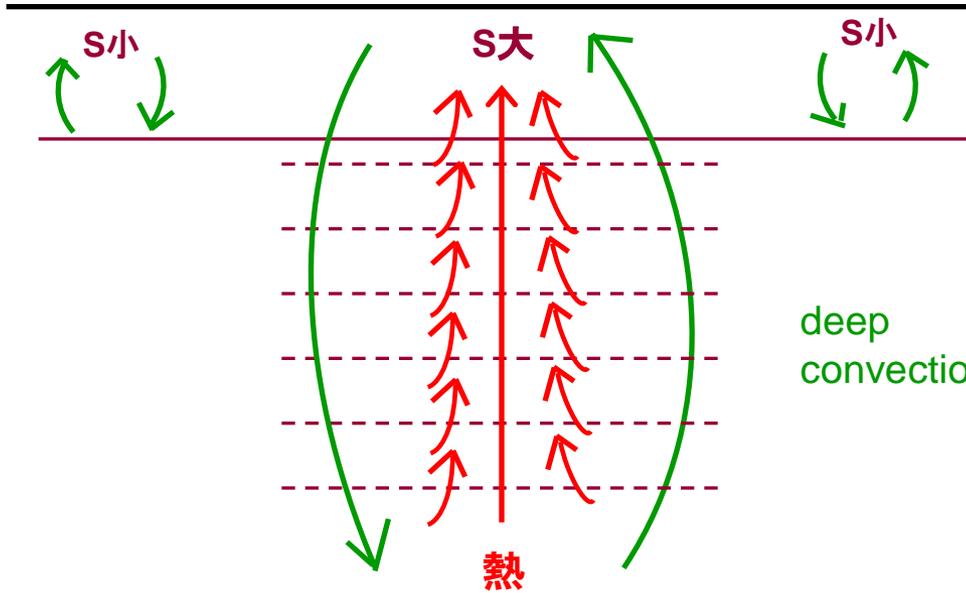
熱、水蒸気、CO₂など



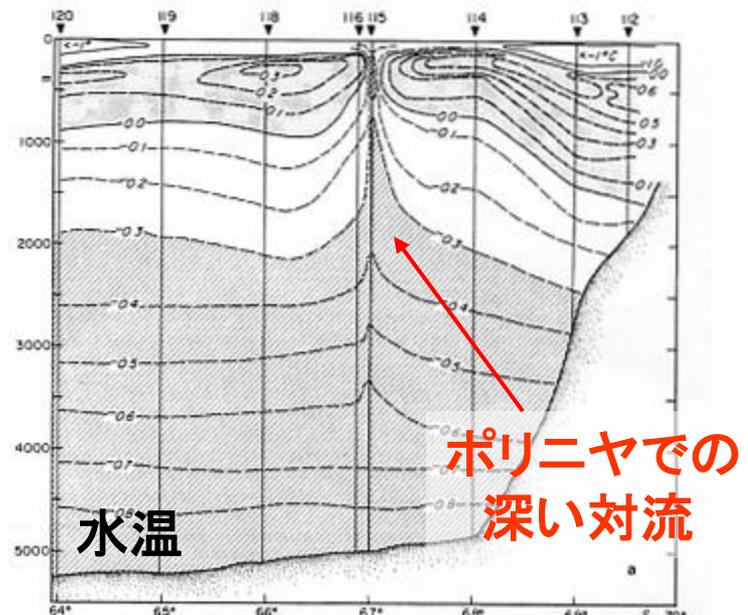
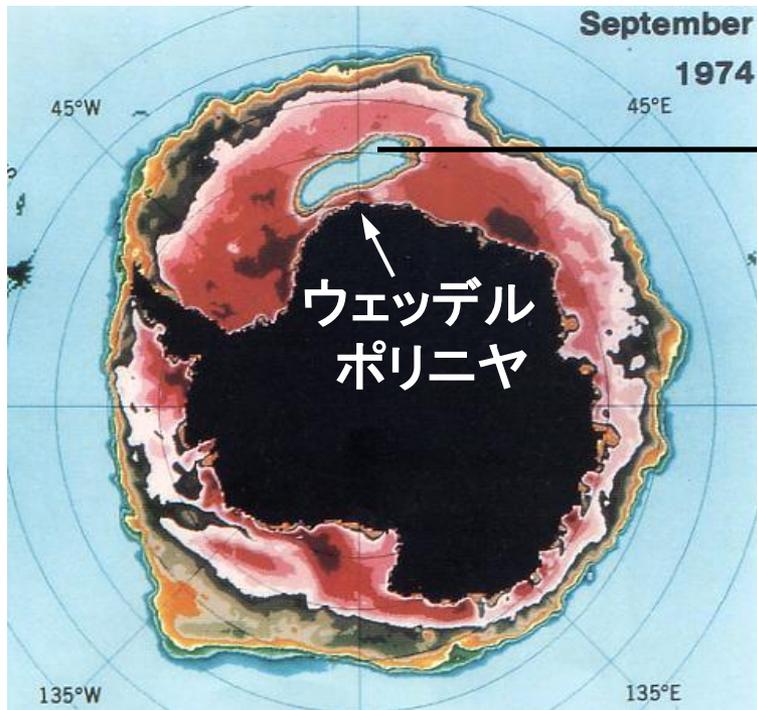
大気

冷却

海面

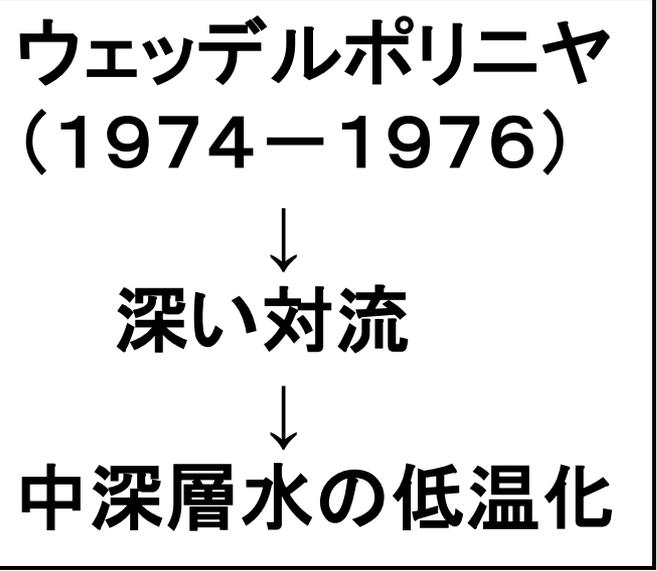
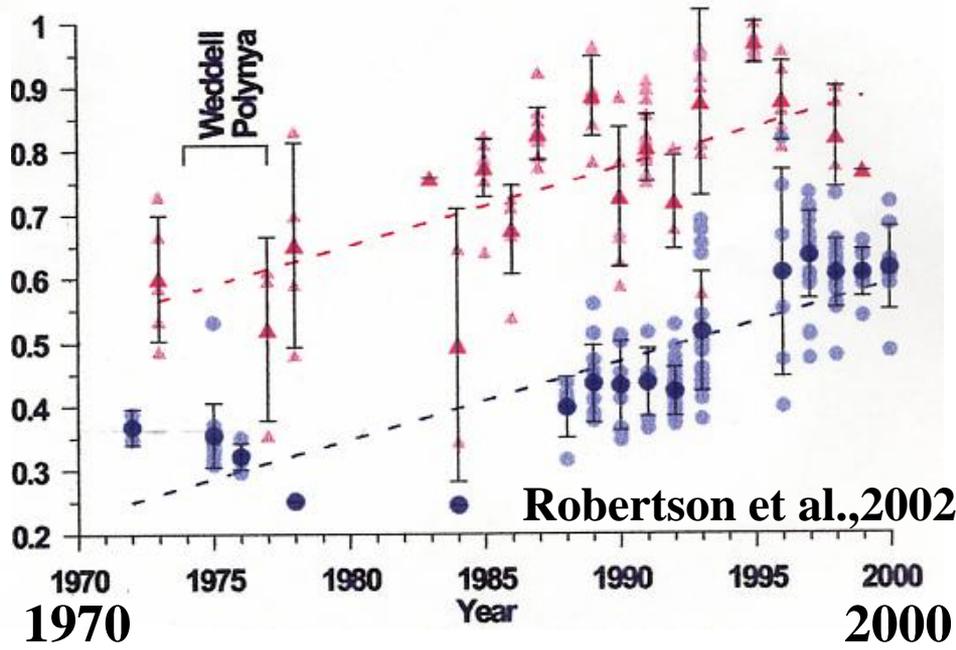


deep convection

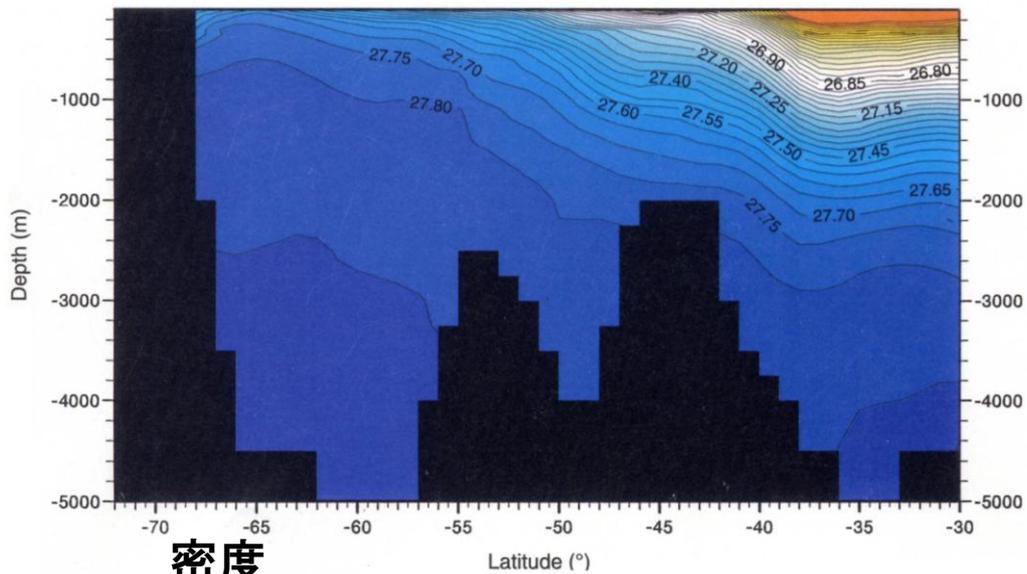


Gordon, 1978

深層水の最大水温

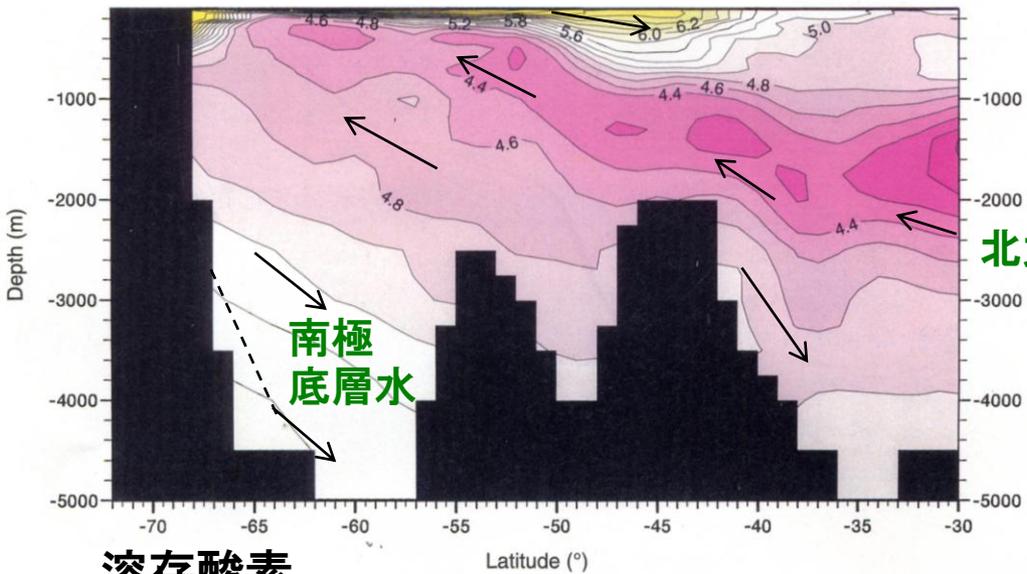


季節海水域



密度
POTENTIAL DENSITY (SECTION 40° E)

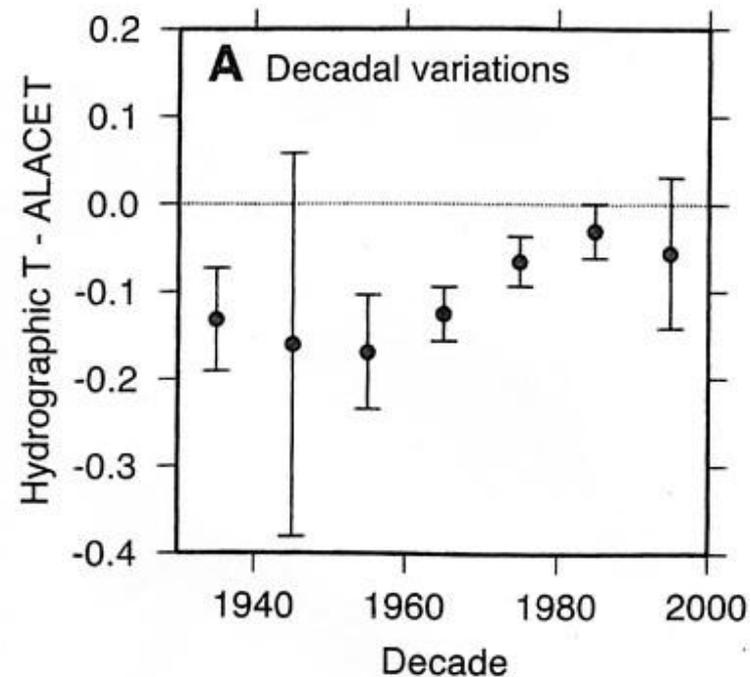
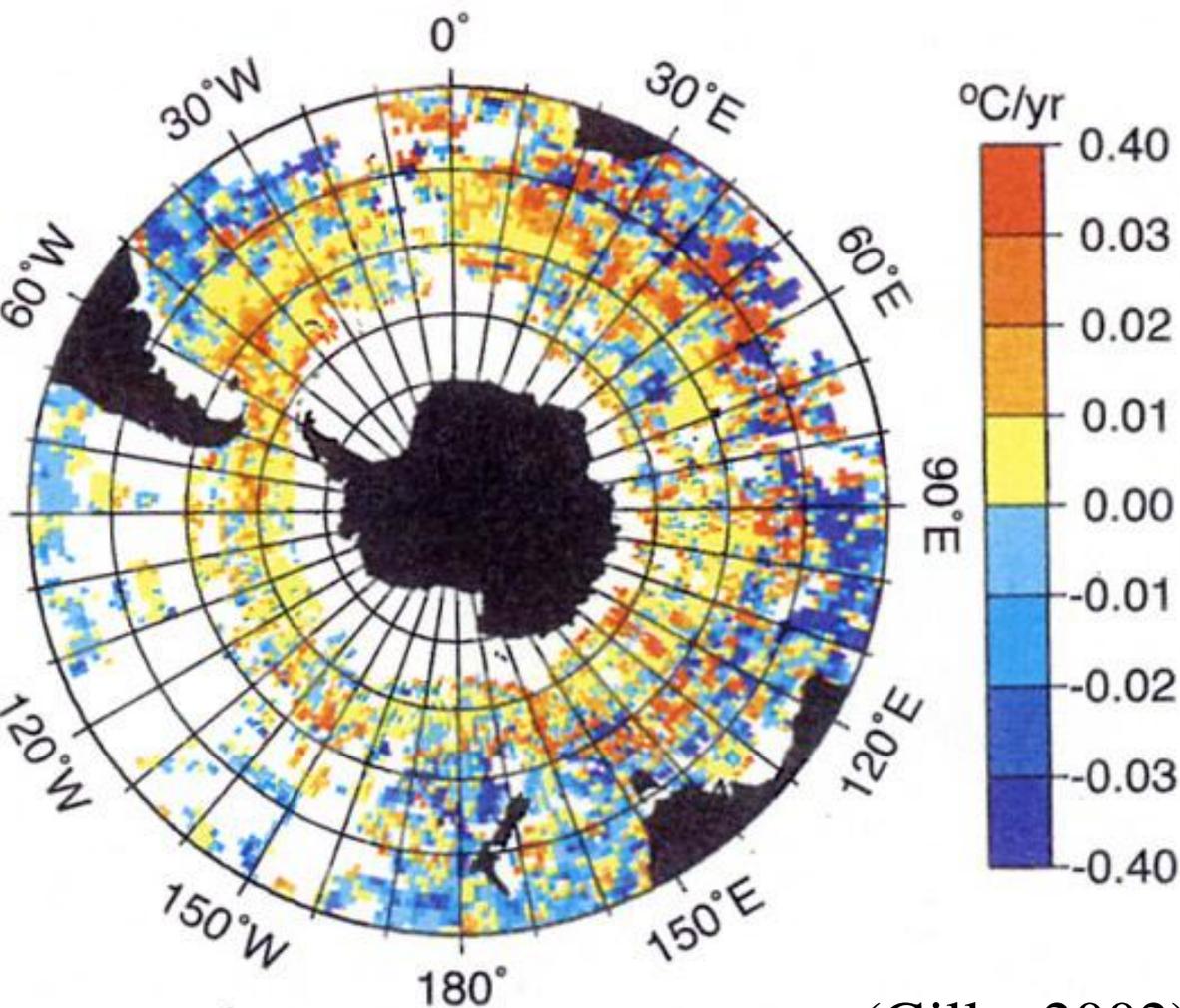
南極大陸



溶存酸素
DISSOLVED OXYGEN (SECTION 40° E)

北大西洋深層水

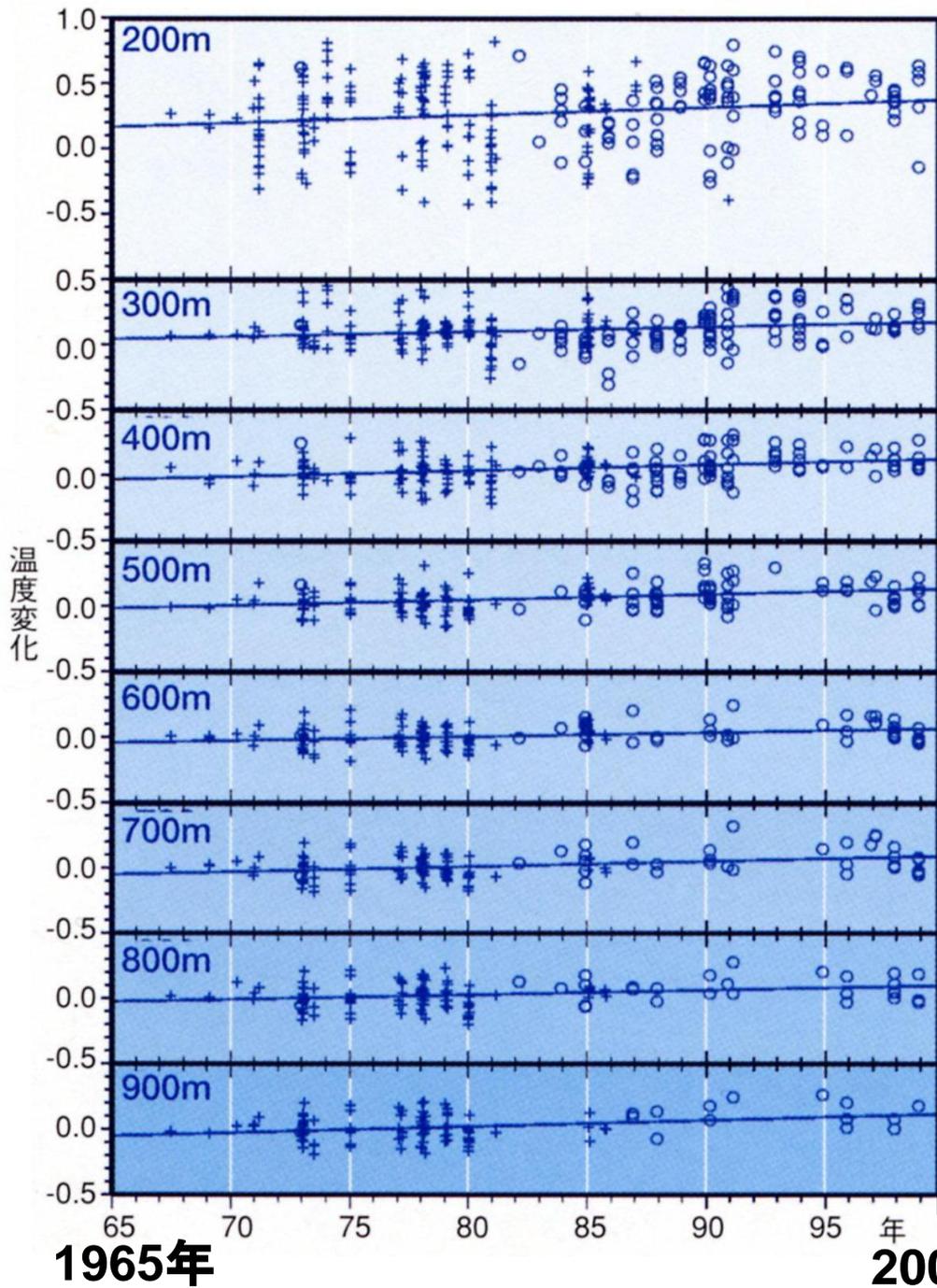
南極中層での昇温率



(Gille, 2002)

南極中層(700-1100m深)での昇温化

水温変化



日本の南極観測がとらえた水温の長期変化

200m深から900m深までの水温偏差の時系列。ここ40年間で約0.2°C昇温している。

Aoki et al., 2002

温暖化による南大洋の変化

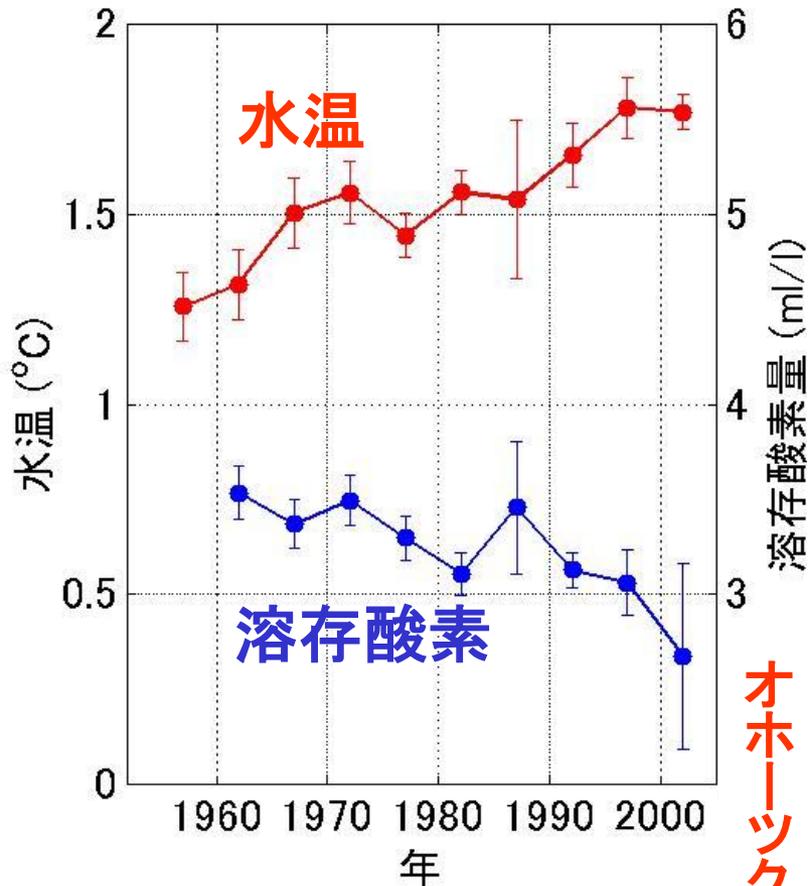
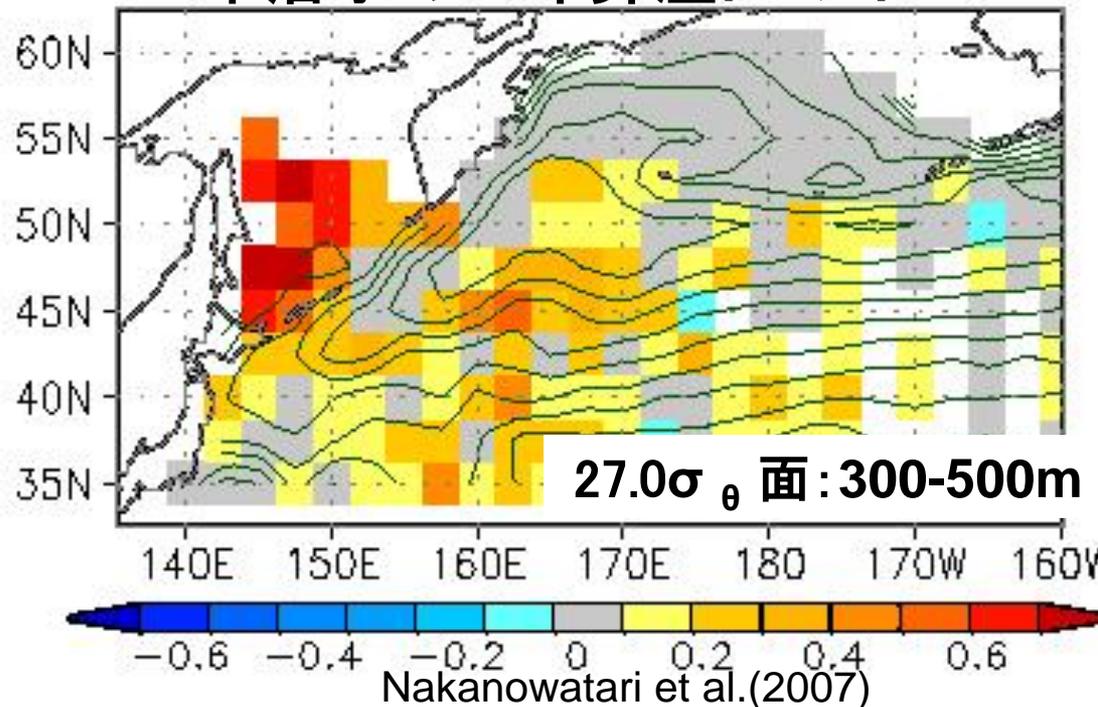
- 南極底層水の低塩・低密度化
- ウェッデルポリニヤを境とする中深層水の変化
- 中層水の昇温化

- 棚氷・氷床の後退・融解
- 沿岸ポリニヤでの海氷生成の減少
- 外洋性(ウェッデル)ポリニヤの出現

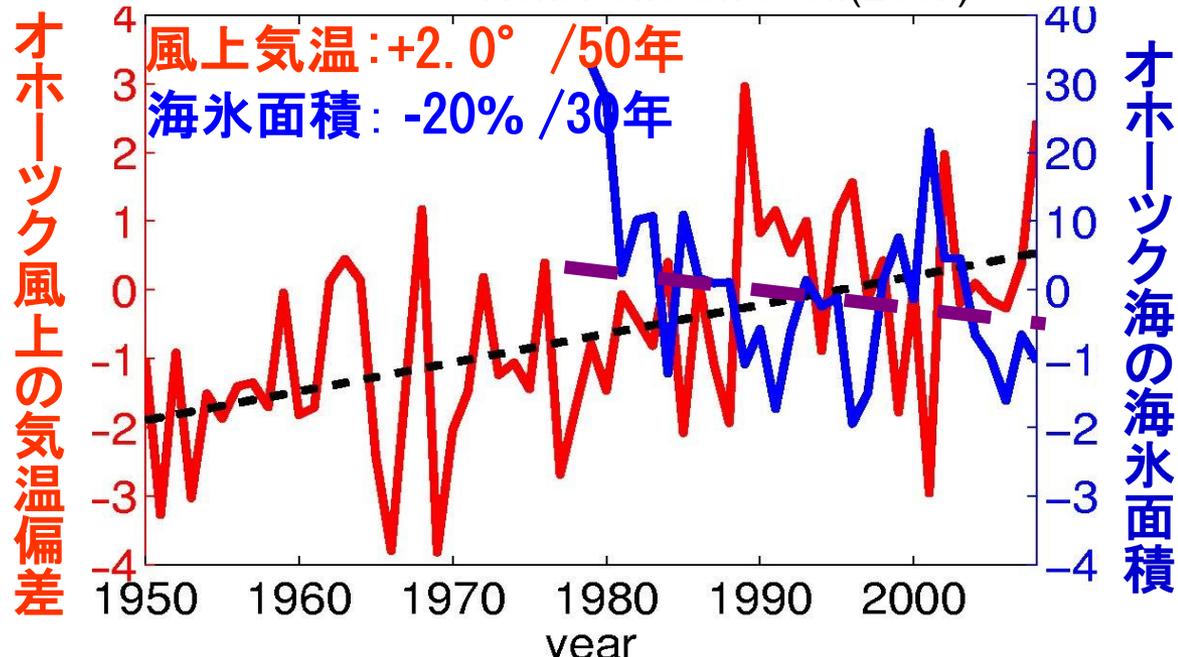
極域海洋→地球温暖化の高感度域 →全球への影響

- 北極海の海水の激減
 - 夏には海水がなくなってしまう？
 - 温暖化を加速する？
- 北大西洋深層水の低塩化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- 南極底層水の低塩・低密度化
 - 熱塩循環が弱まってしまう？
- オホーツク海での海水生産減少
 - 北太平洋の中層循環が弱まってしまう？

中層水の50年昇温トレンド

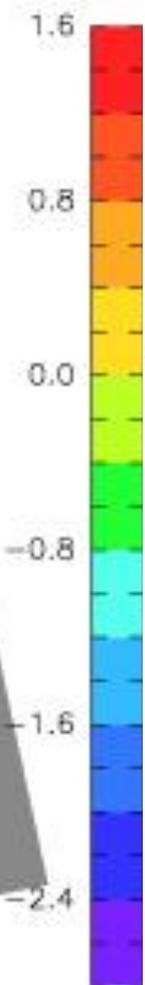
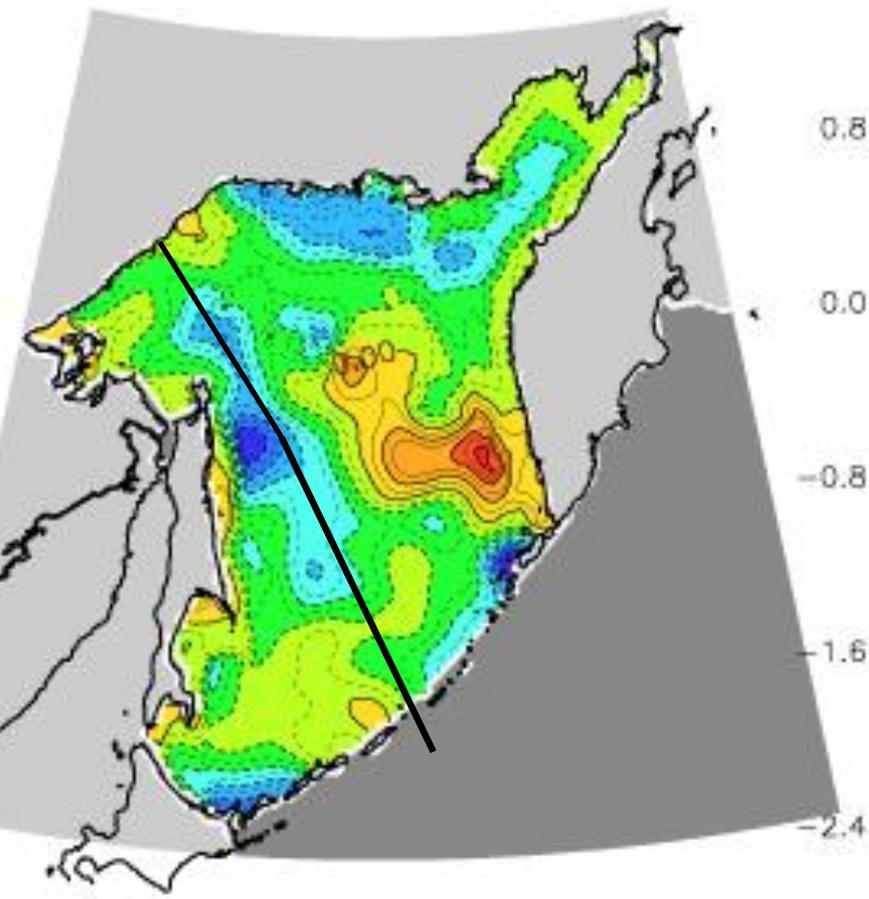


オホーツク海の中層水の50年間の変化



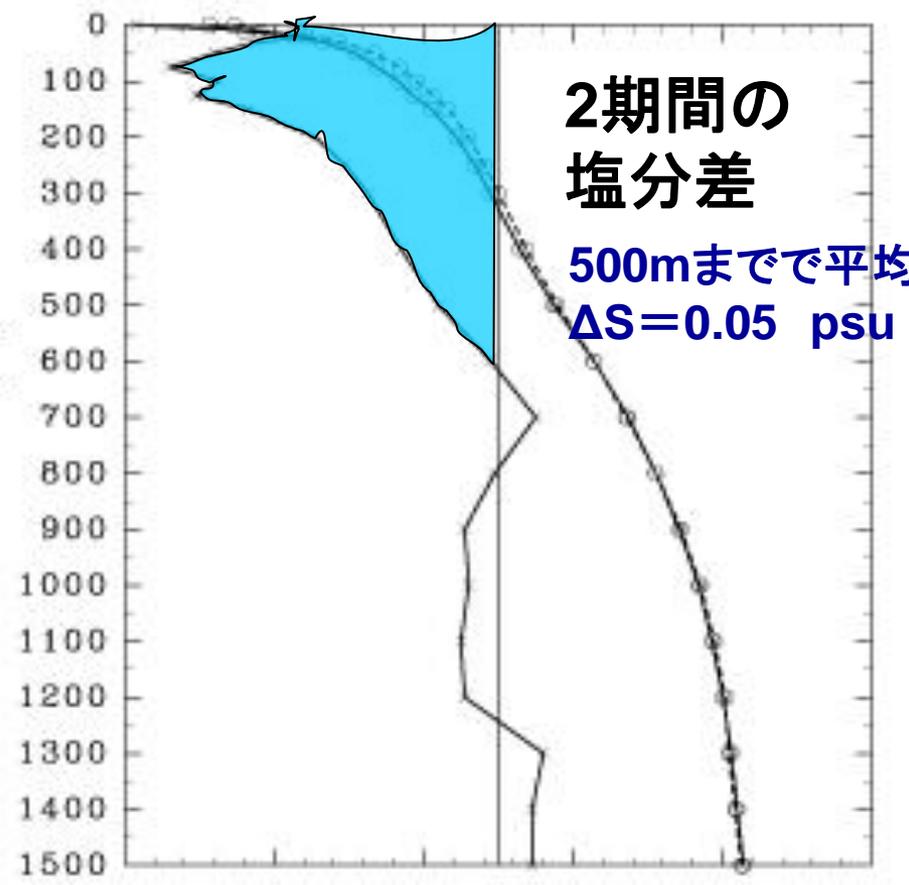
[(1990-2009) - (1930-1980)]
水柱全体の塩分変化を
淡水フラックス(m)に換算

Fresh Water 00000



平均すると0.52mの淡水化

Salinity
32 32.6 33.2 33.8 34.4 35

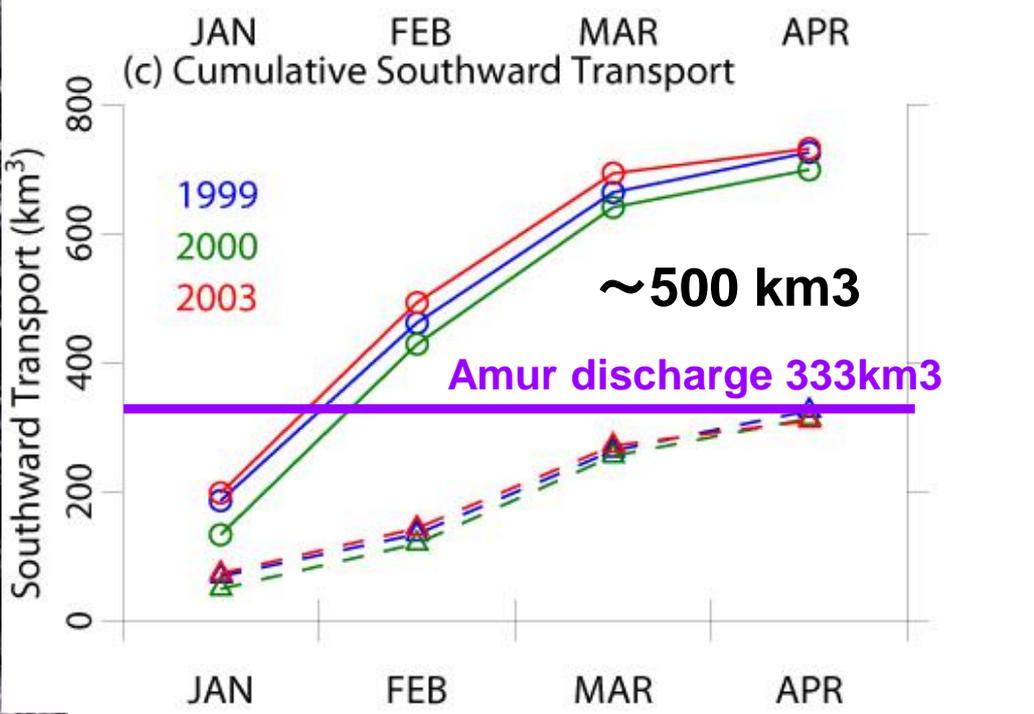
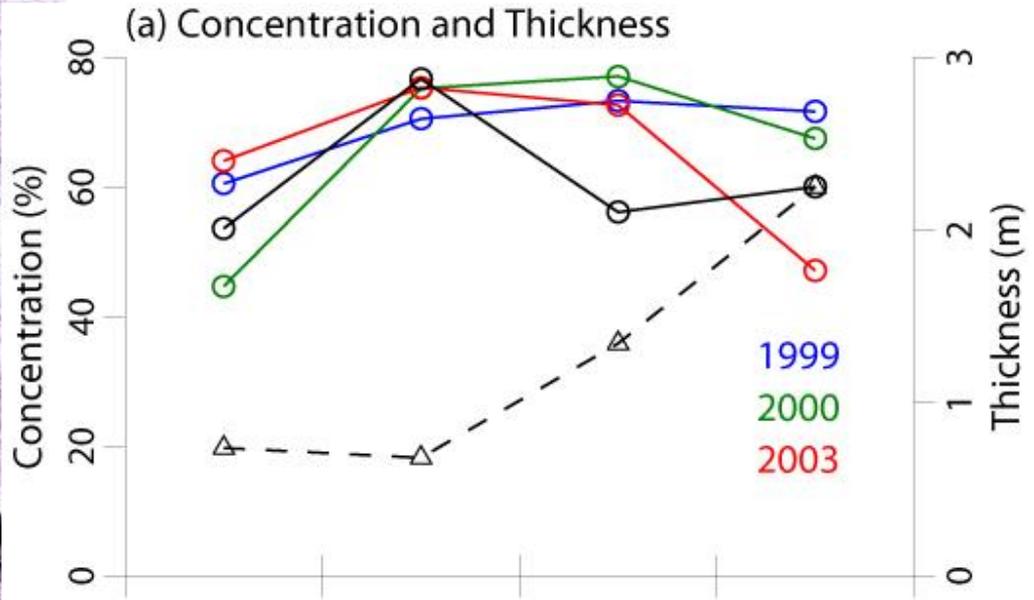
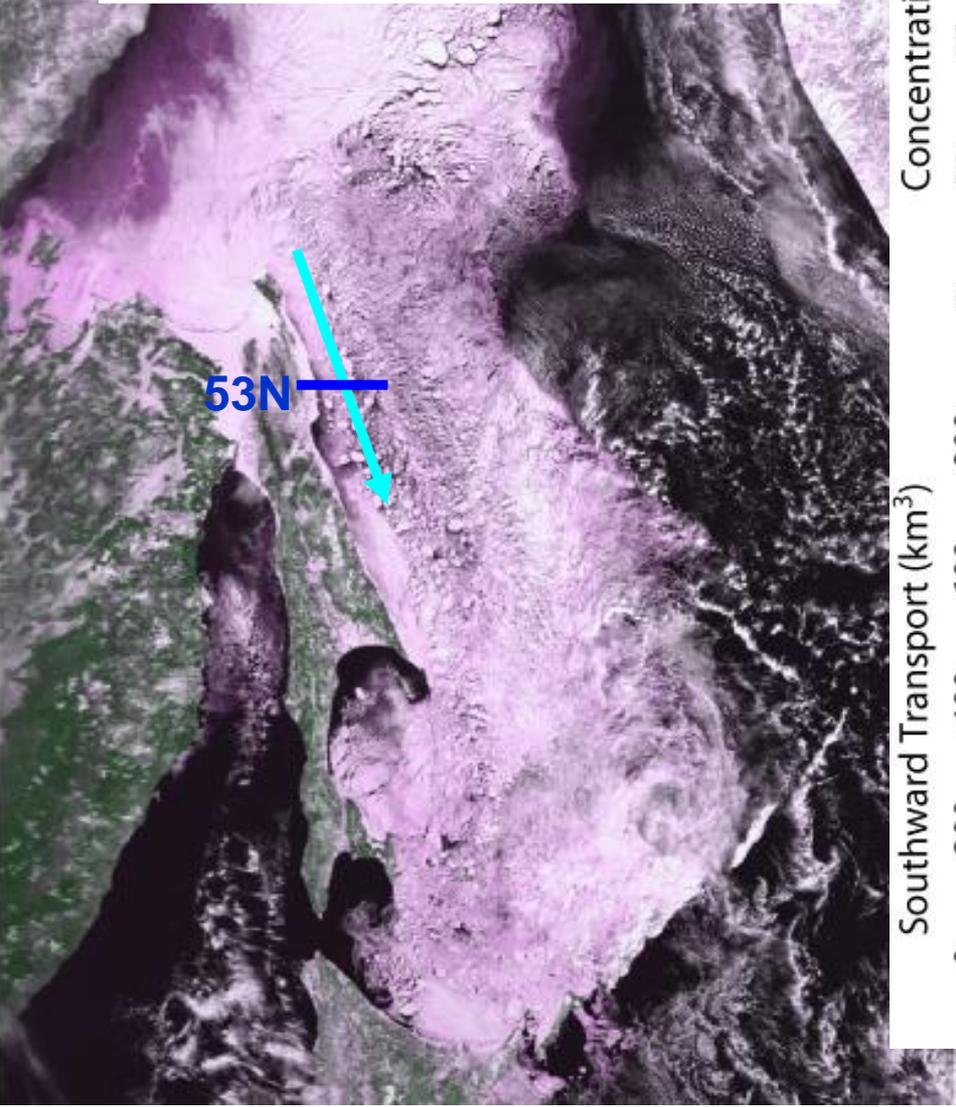


2期間の
塩分差

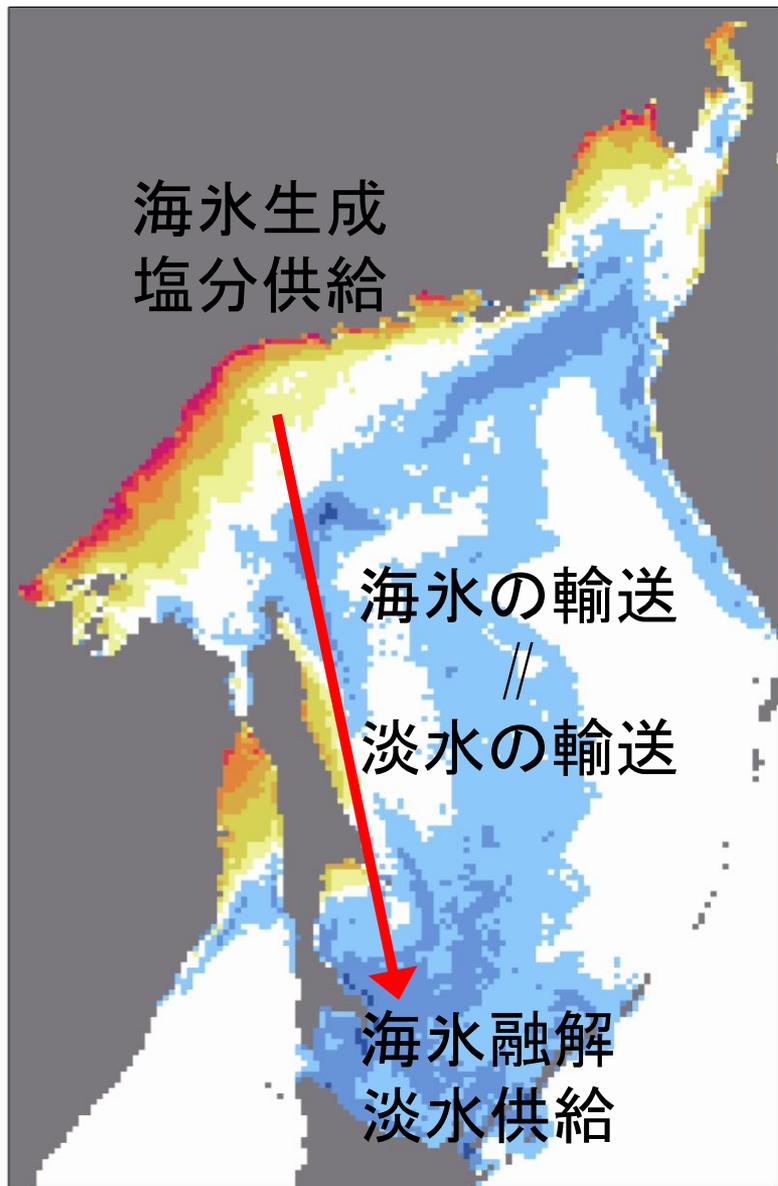
500mまでで平均
 $\Delta S = 0.05$ psu

Diff.

(b) 海氷の南方への輸送量の見積もり
 厚さ: 係留氷厚計
 密接度: 衛星マイクロ波
 漂流速度: ADCP

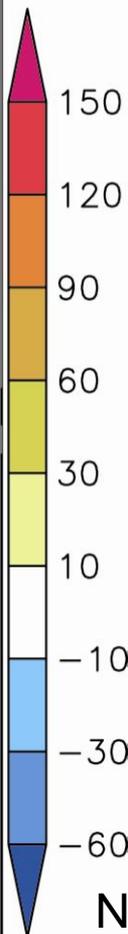


年間の正味の塩分収支 (Kg m⁻²)



海水の塩分: 33psu

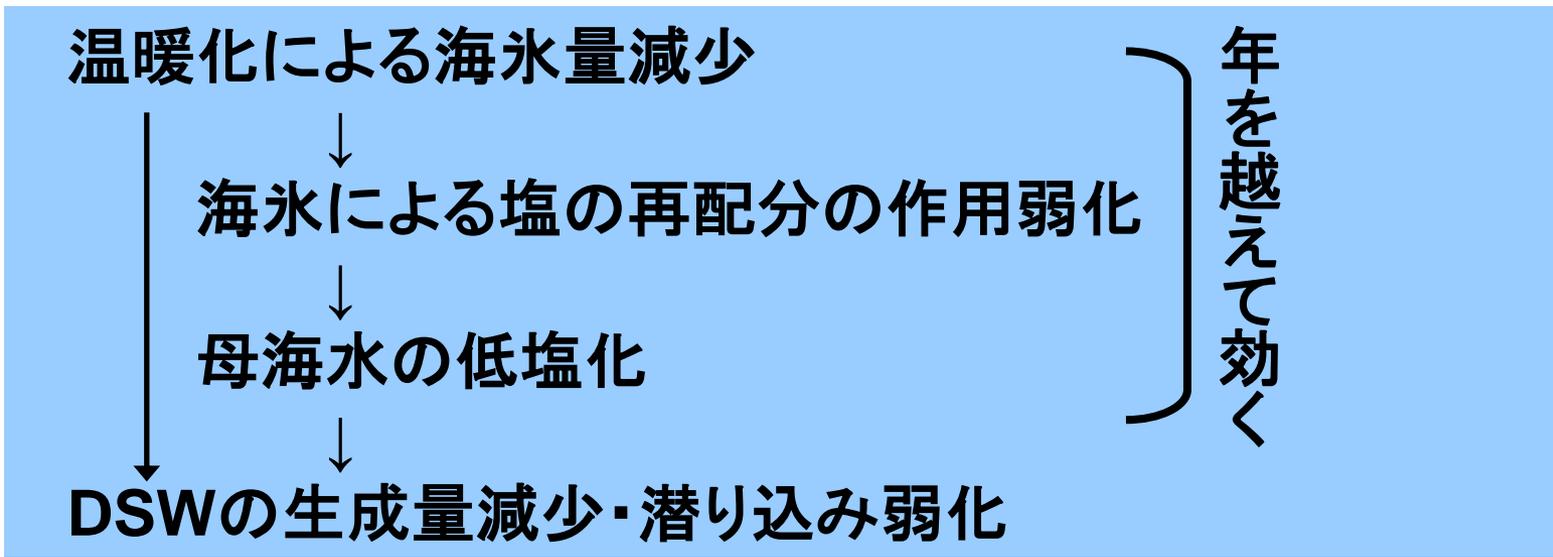
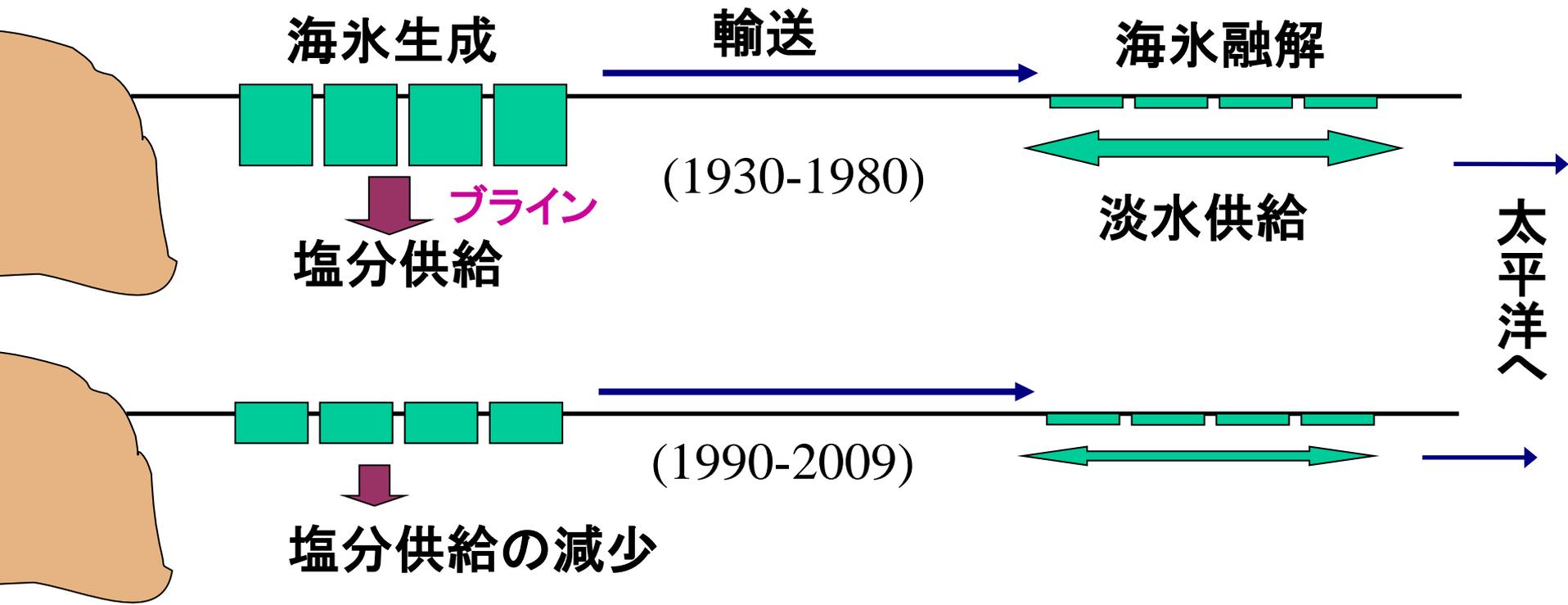
海水の塩分: 3-10psu

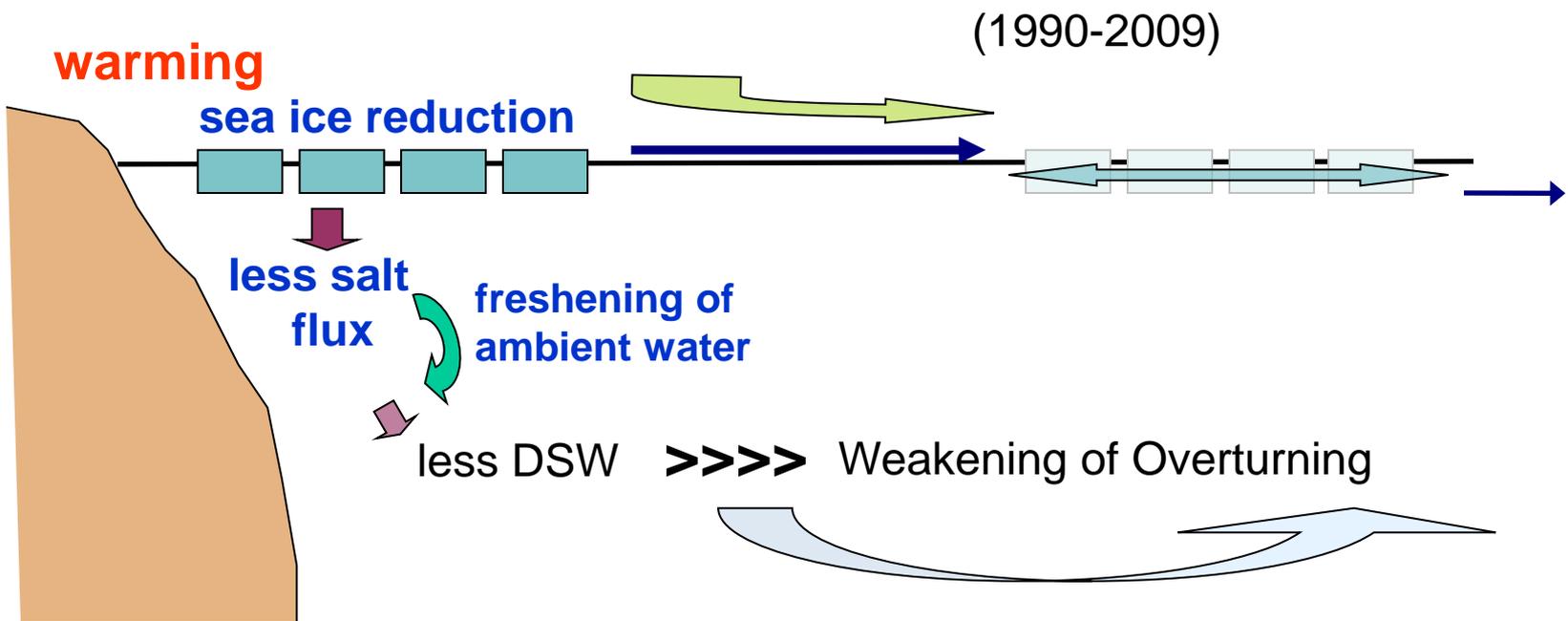
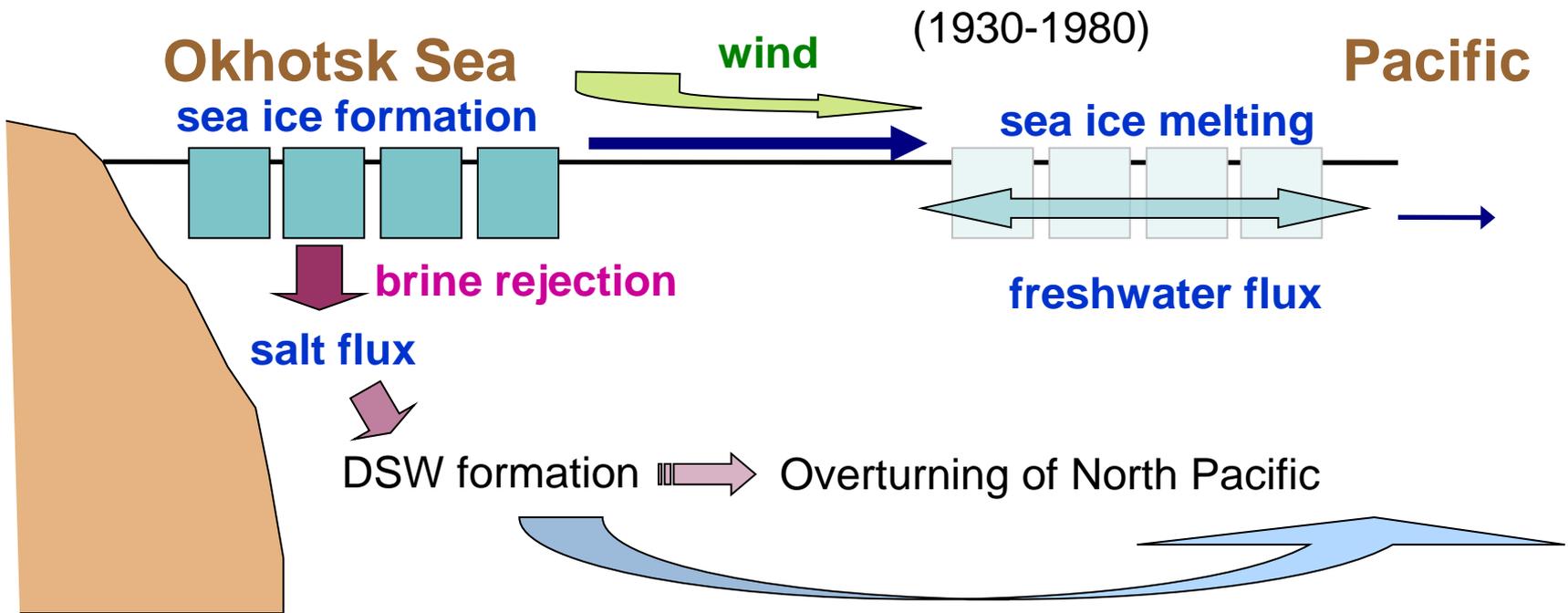


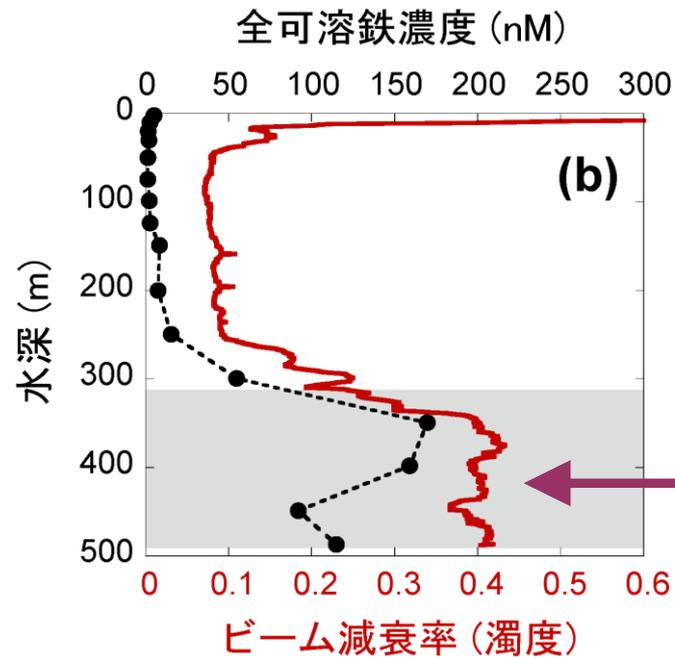
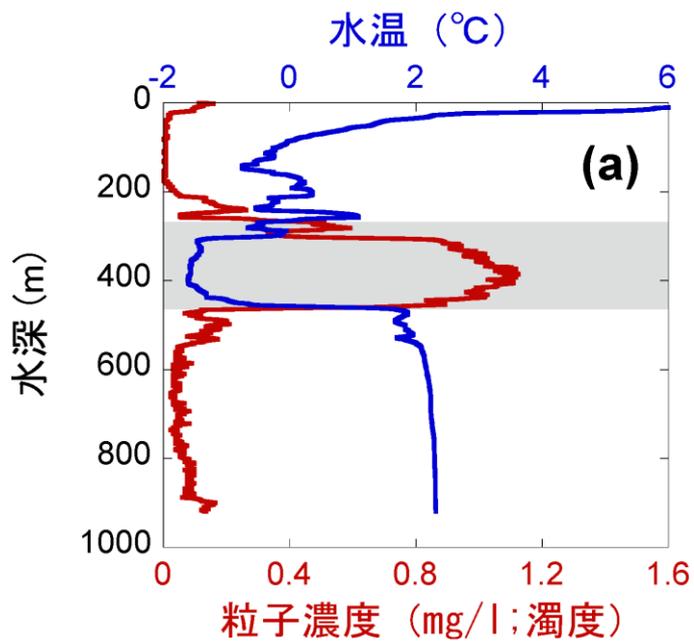
↑ 塩分供給

↓ 淡水供給

Nihashi et al. (submitted)

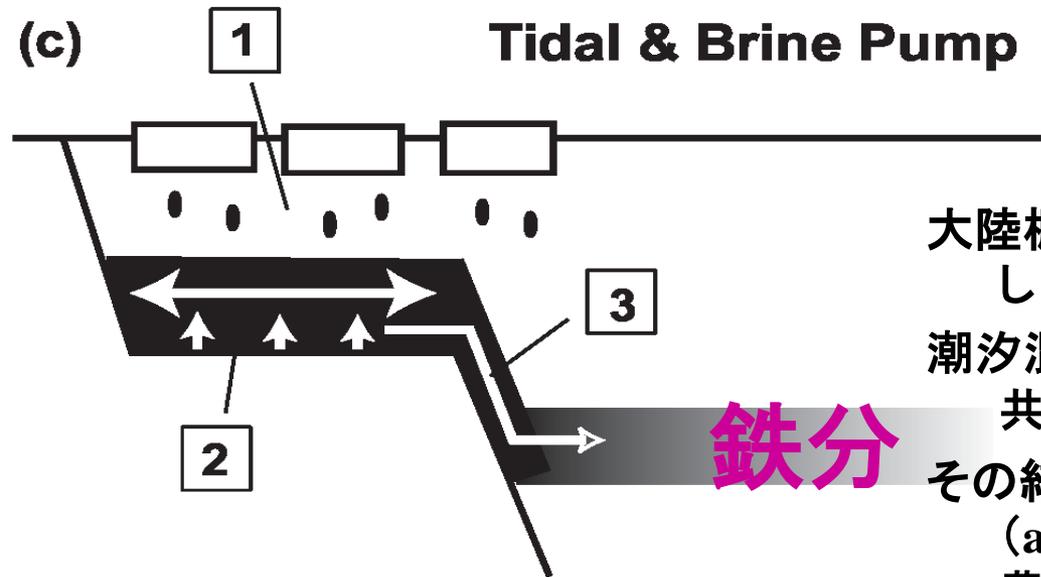






鉄分

(西岡氏提供)



大陸棚の海底には、海氷からブライン水が沈降し(c-1)、

潮汐混合(c-2)によって巻き上げられた粒子と共に、大陸斜面の中層に流出している(c-3)。

その結果、中層水は極度に低温で濁っており(a)、植物プランクトンの生育に必要な鉄が豊富に含まれる(b)。

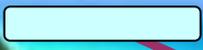
(Nakatsuka et al., 2004)

巨大魚付林：
アムールオホーツクシステム

アムール川

鉄

海水生成による重い水生成



オホーツク海

北太平洋

中層への潜り込み

鉄

鉄

生物生産に不可欠
西部北太平洋の高い
生物生産を支えている

温暖化

海氷生産量減少

中層循環の弱化

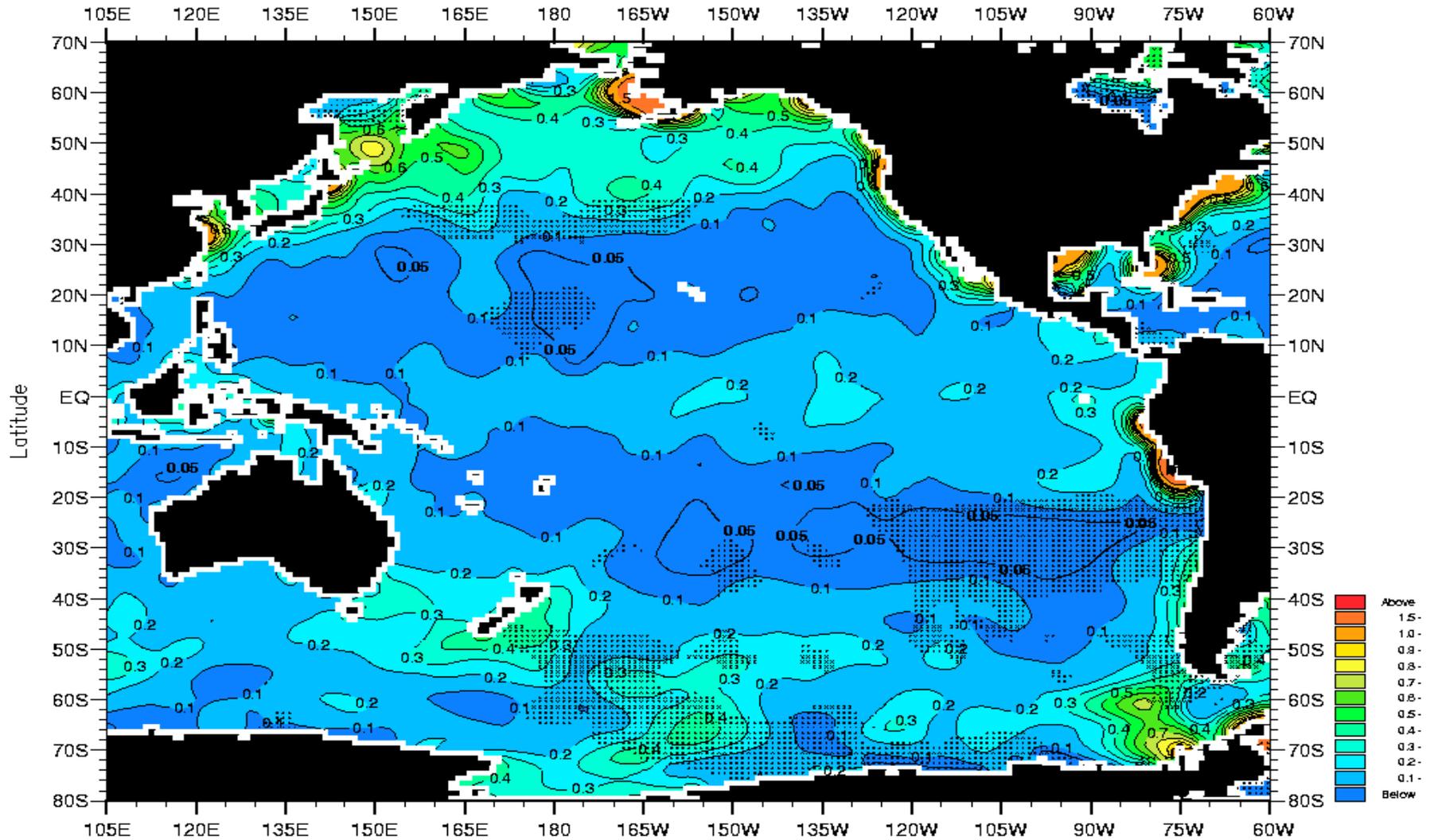
鉄分の供給の弱化？

生物生産への影響？

中層鉄仮説

植物プランクトン色素(クロロフィルa)濃度

Longitude



オホーツク海・西部北太平洋は生物生産が大きい

極域・海氷域の変動



中深層循環の変動



**物質循環へのインパクト
(鉄・CO₂・他)**



生態系へのインパクト