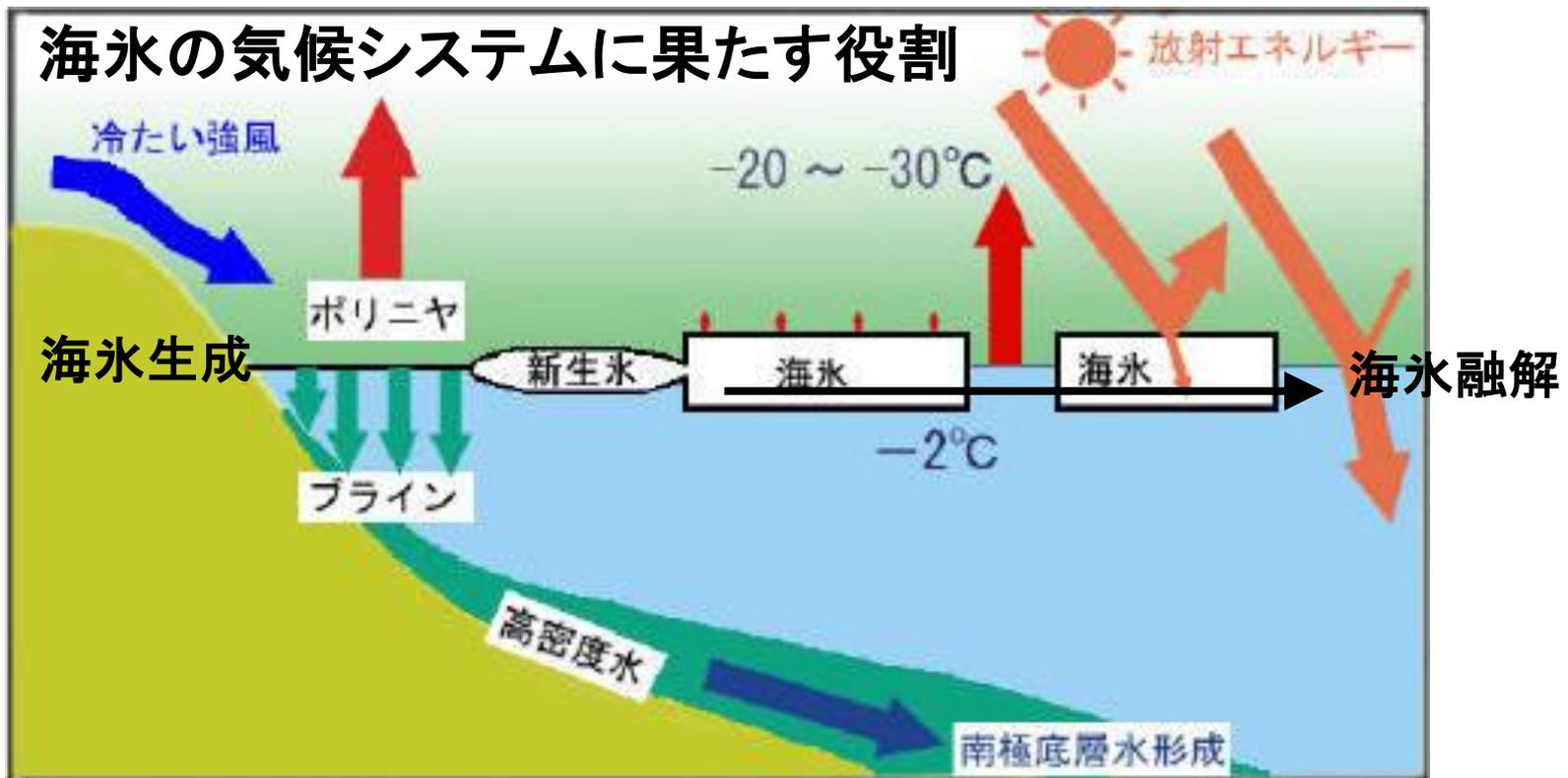


・オホーツク海:海氷生成と中層循環

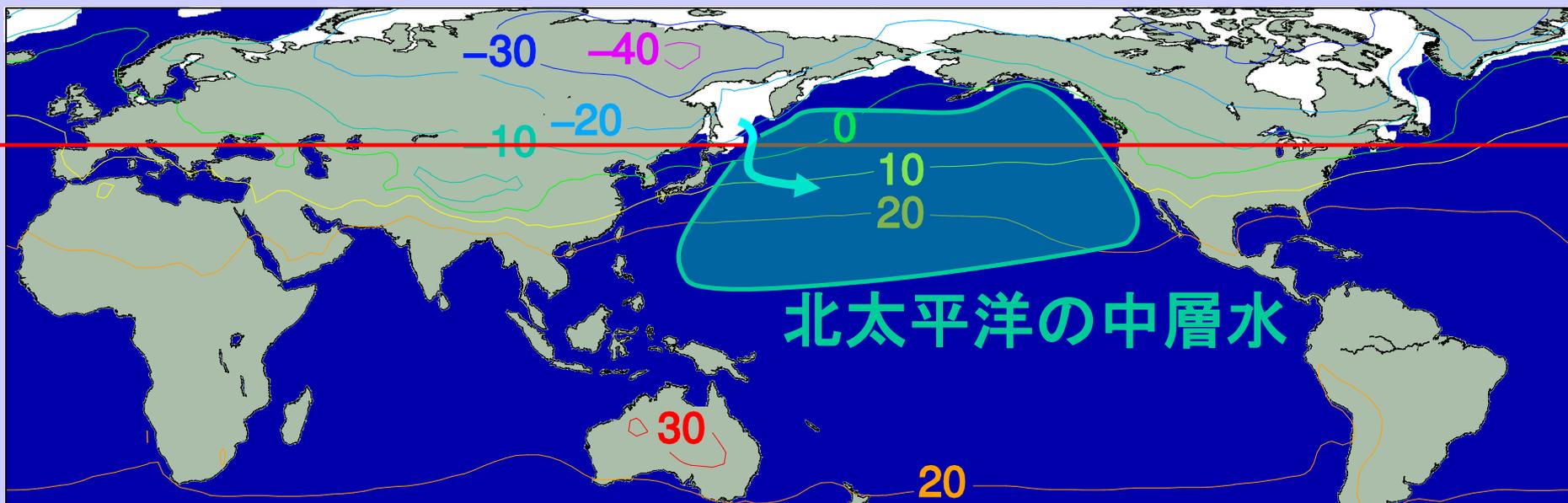


熱と塩の再分配・輸送：中深層水の生成

- ・北太平洋の中層水の起源
- ・海水の南方輸送(負の熱と淡水の輸送)
- ・温暖化に対する応答(海水域は影響大)
- ・物質循環・生態系との関係

グローバルな目でみたオホーツク海

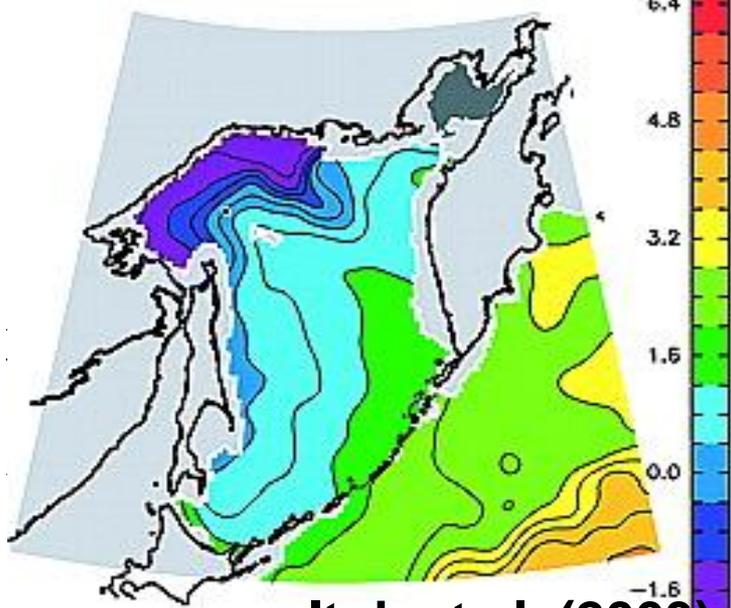
2月の海氷分布と平均気温(2001年)



Nihashi et al., 2009

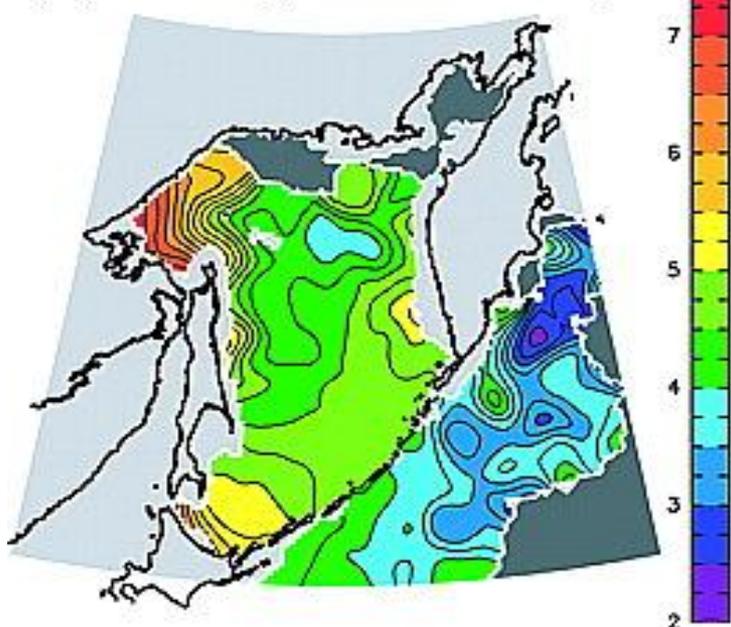
- ・風上が北半球の寒極 → 北半球における海氷域の南限
- ・多量の海氷生産 → 北太平洋で一番重い水ができる場所
→ 大気・陸からの熱・物質を北太平洋中層水(200-800m)へ

(a) Potential Temperature 26.8 σ_θ

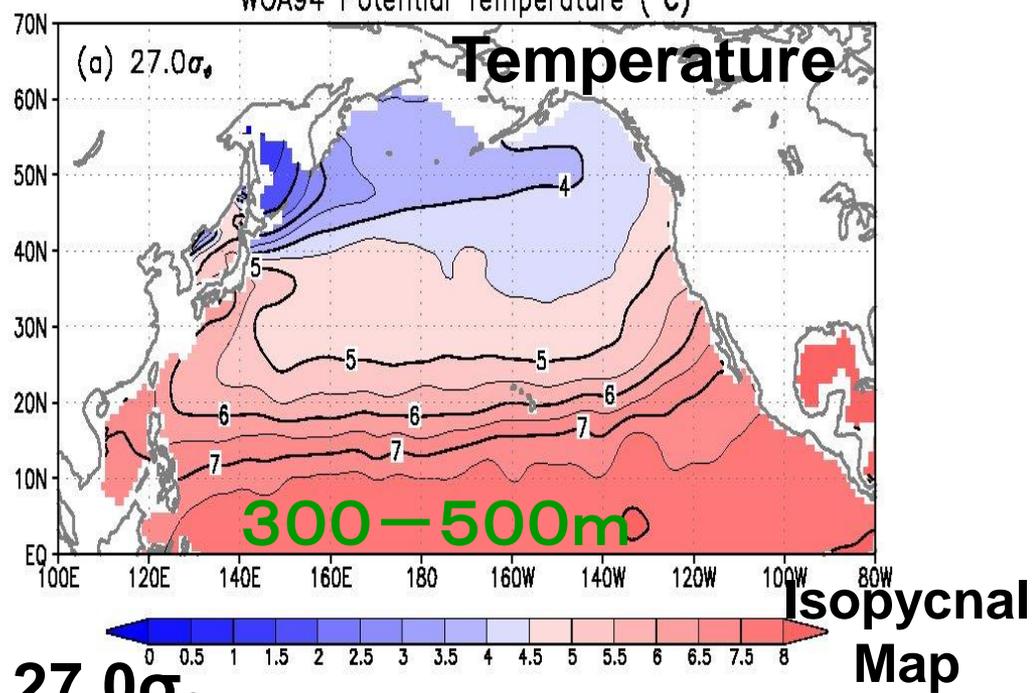


Itoh et al. (2003)

(c) Oxygen 26.8 σ_θ

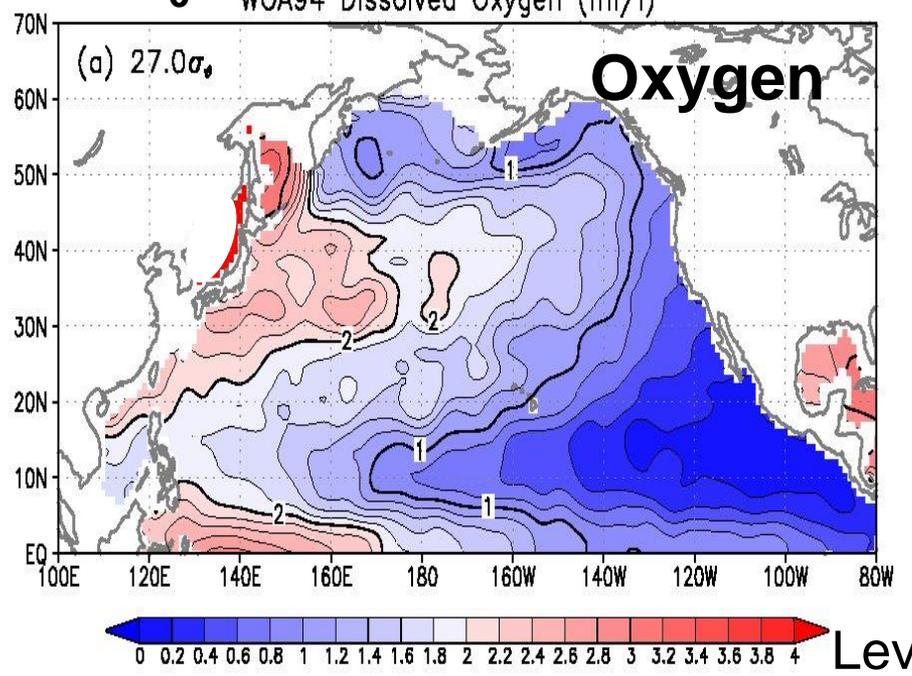


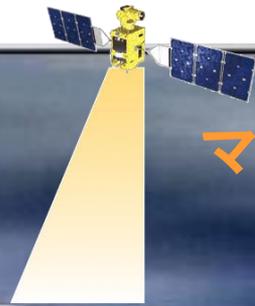
WOA94 Potential Temperature ($^{\circ}\text{C}$)



27.0 σ_θ

WOA94 Dissolved Oxygen (ml/l)

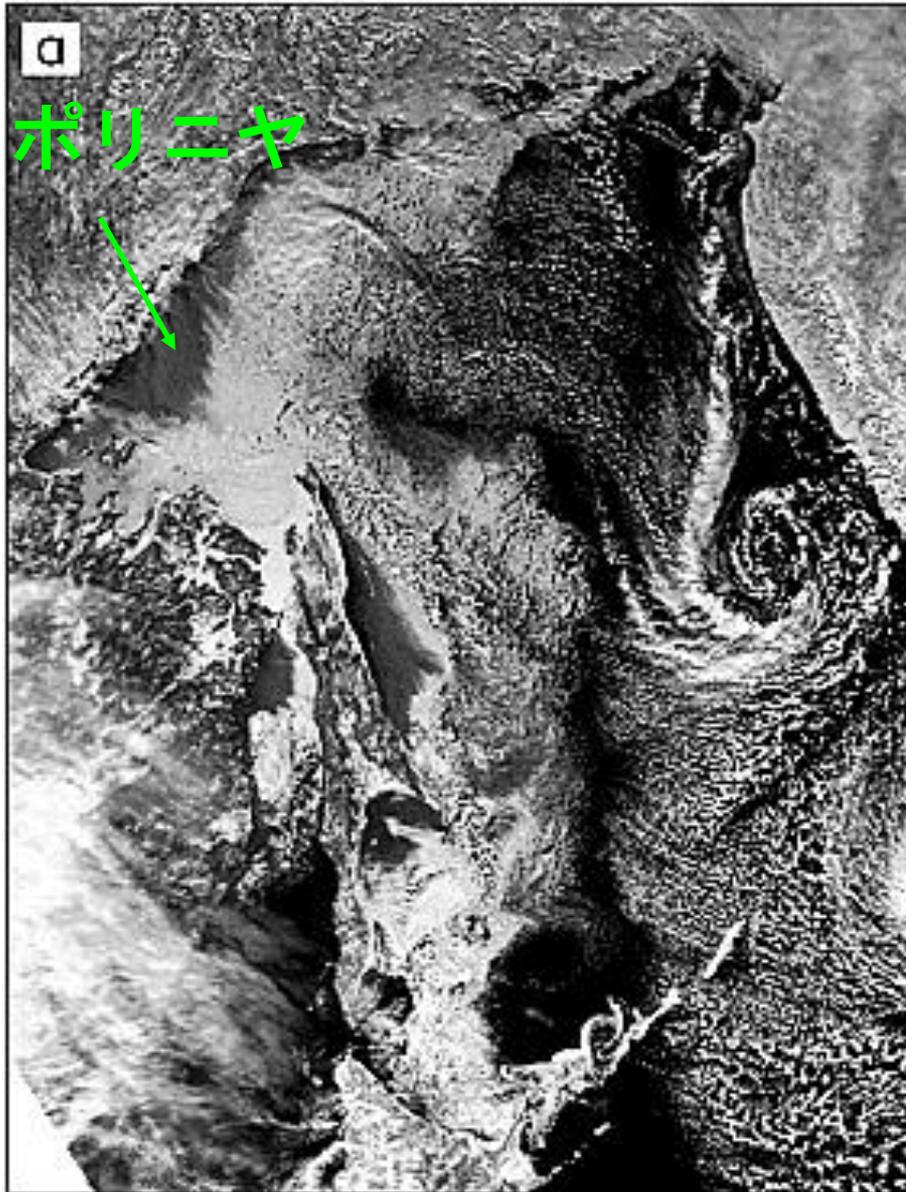




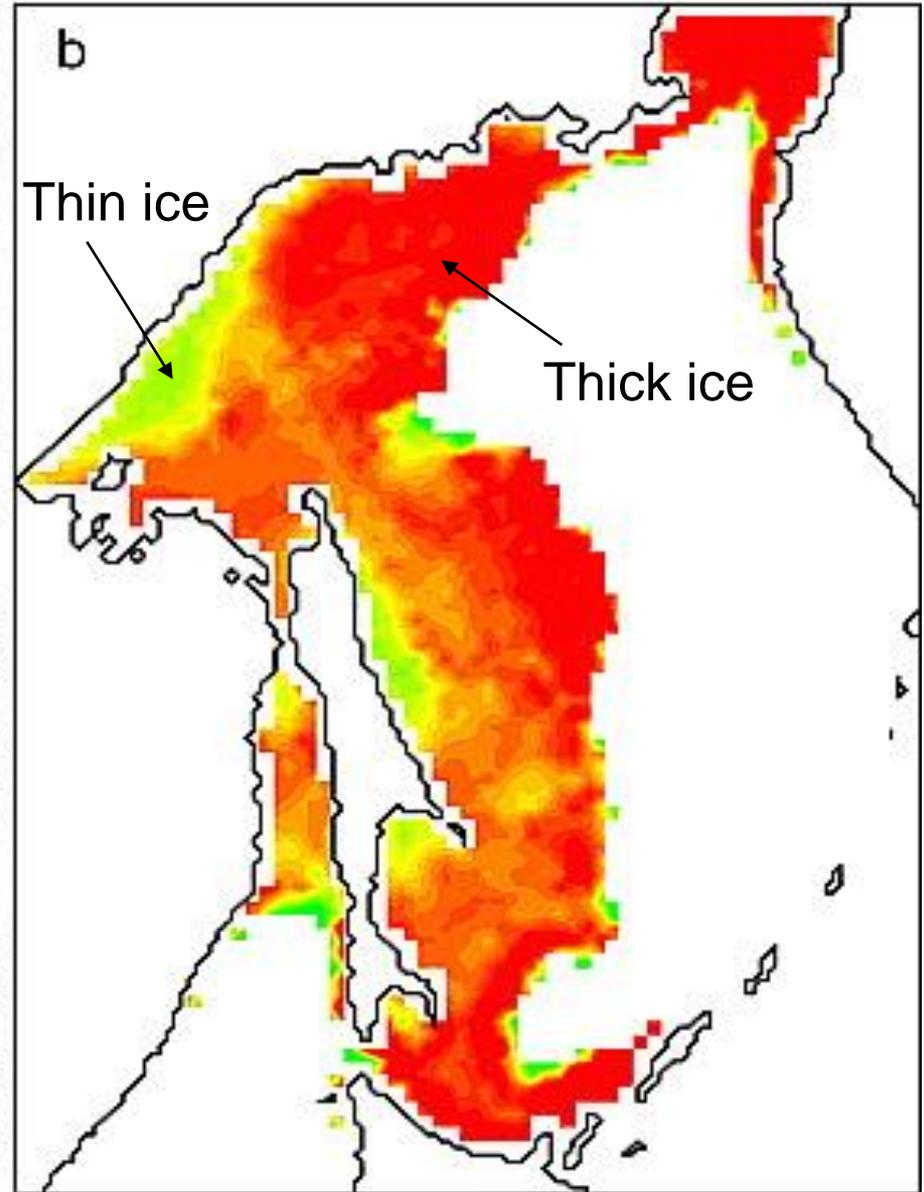
マイクロ波放射計

沿岸ポリニヤ＝薄氷域
衛星(マイクロ波放射計)から薄氷厚推定
熱収支計算: 奪われた熱量＝海氷生産量

表面温度(AVHRR)



マイクロ波放射計(SSM/I)



沿岸ポリニャとは？

- 氷厚0~0.2mの薄氷域
- 幅約数十km

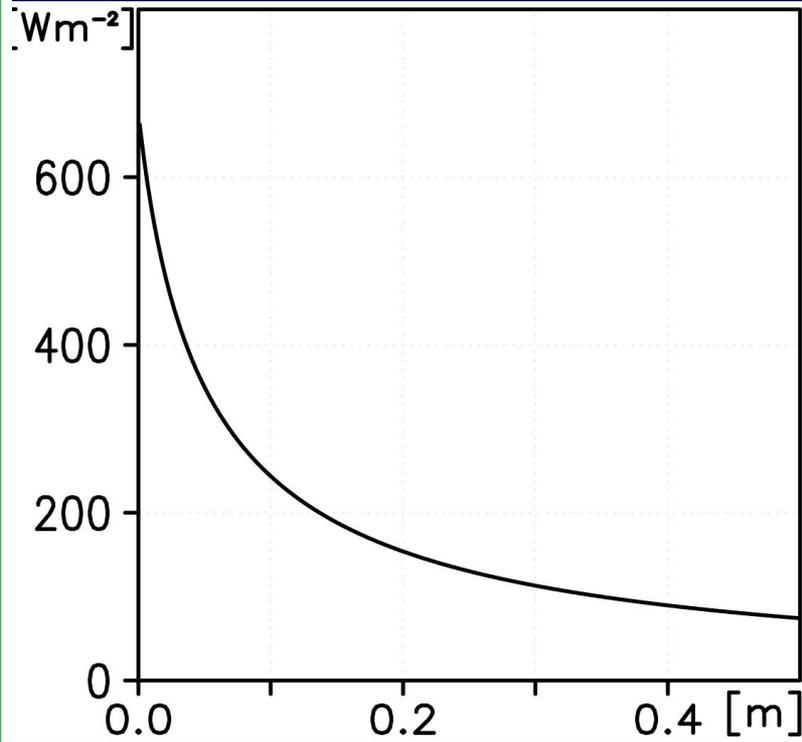
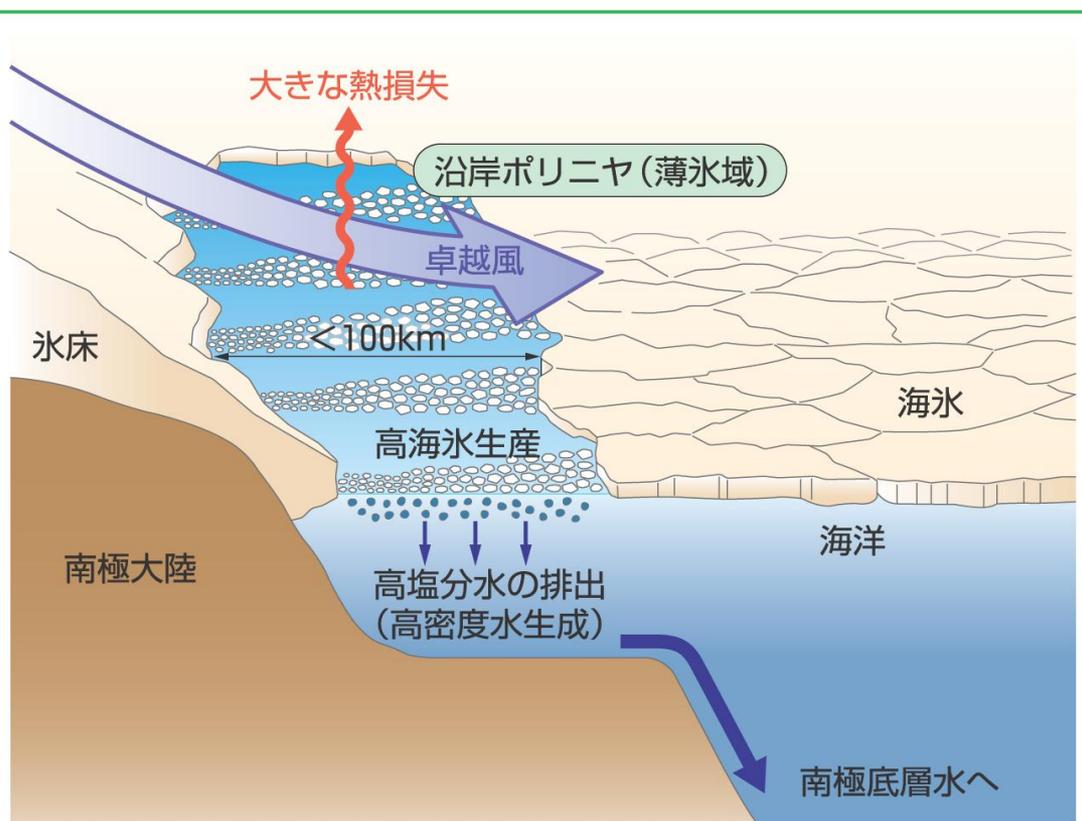
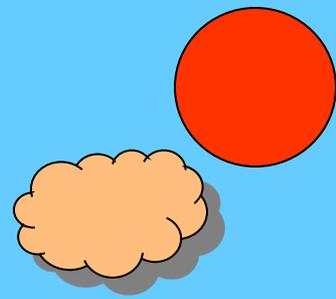


図3 南極海での沿岸ポリニャの模式図
 (Morales Maqueda et al. (2004) ⁴を参考に描画)

海氷厚と熱損失との関係

大気海氷表面間熱交換の様子



2m高気温

$$H = K_i (T_w - T_s) / F_i$$

K_i : 海氷熱伝導係数

乱流フラックス

放射フラックス

海氷表面温度 (T_s)

海氷

海氷内熱伝導フラックス (F_i)

氷厚 (H)

海

-1.86°C (T_w)

Yu and Rothrock (1996) に従って氷厚を導出

熱収支計算 @海氷面

α : アルベド SE: 顕熱フラックス
SW: 短波放射 LA: 潜熱フラックス
LW: 長波放射 FC: 海氷内熱伝導

$$Q = (1 - \alpha) SW + LW + SE + LA + FC$$

- ・氷厚データ : マイクロ波放射計データによる氷厚アルゴリズム
- ・気象データ : ERA-40 (2m気温・露点温度, 10m風速, SLP)
+ ISCCP (雲量) + NCEP2 (2m気温・絶対湿度, 10m風速, SLP)

熱収支がバランスする($Q=0$)ような海氷面温度を決めると
熱伝導FCも求まり、 $FC=$ 海氷から大気へ奪われる熱量

海氷生産量

$$V = FC / (\rho_i L_f)$$

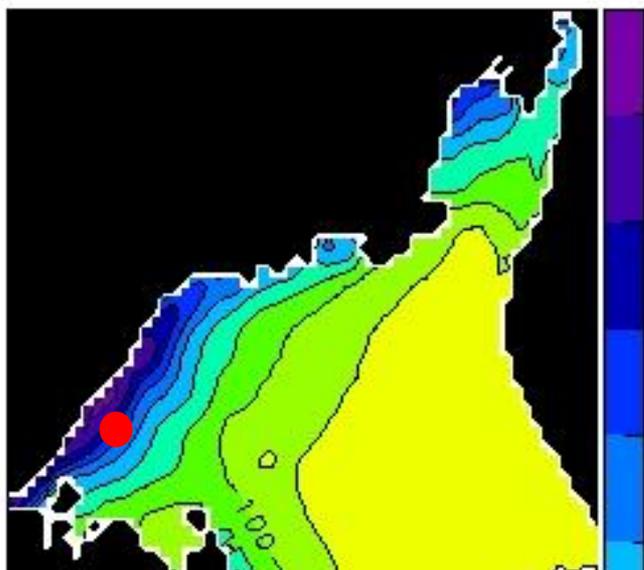
FC: 海氷の熱損失, ρ_i : 海氷の密度, L_f : 海氷融解の潜熱

結氷点の海氷域で大気に奪われる熱 → 全て海氷生産へ

(海洋下層からの熱流入は無視)

海氷生産量の見積もり

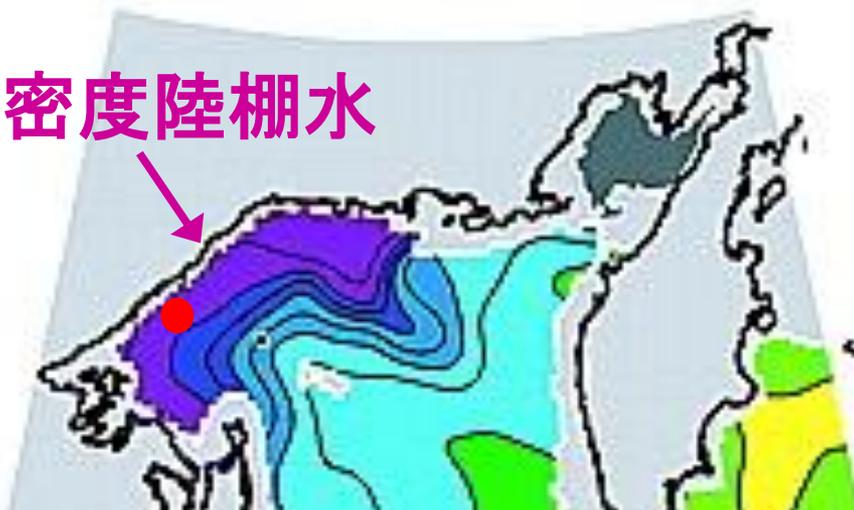
(熱収支と衛星データより)



中層(等密度面上)での水温

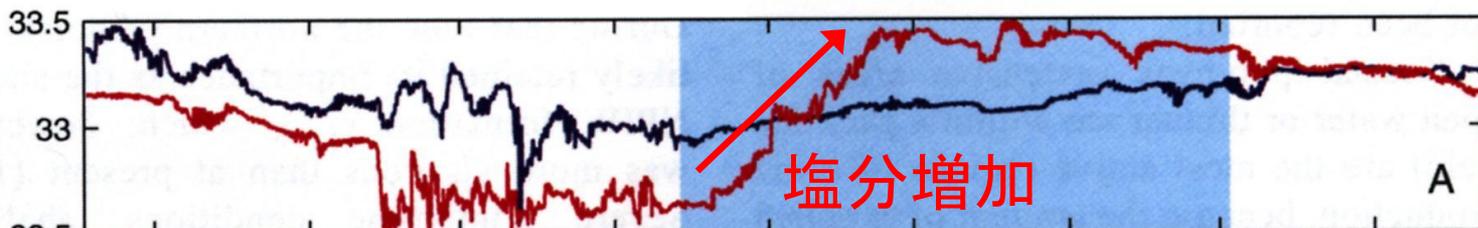
(a) Potential Temperature 26.8 σ_θ

高密度陸棚水

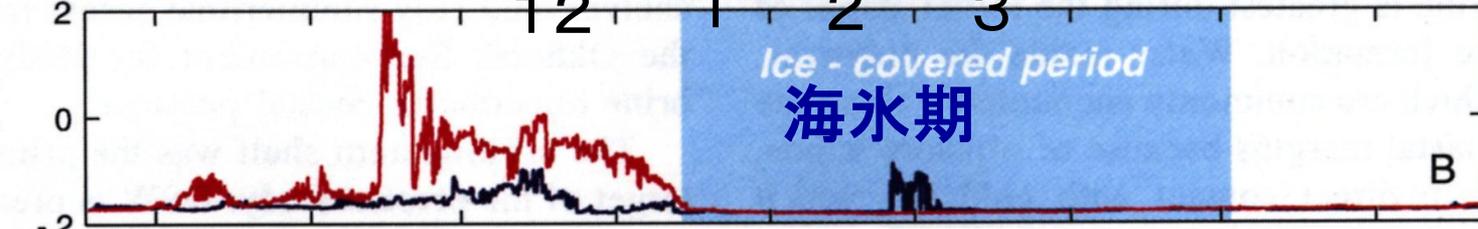


高密度陸棚水生成を捉えた観測

塩分

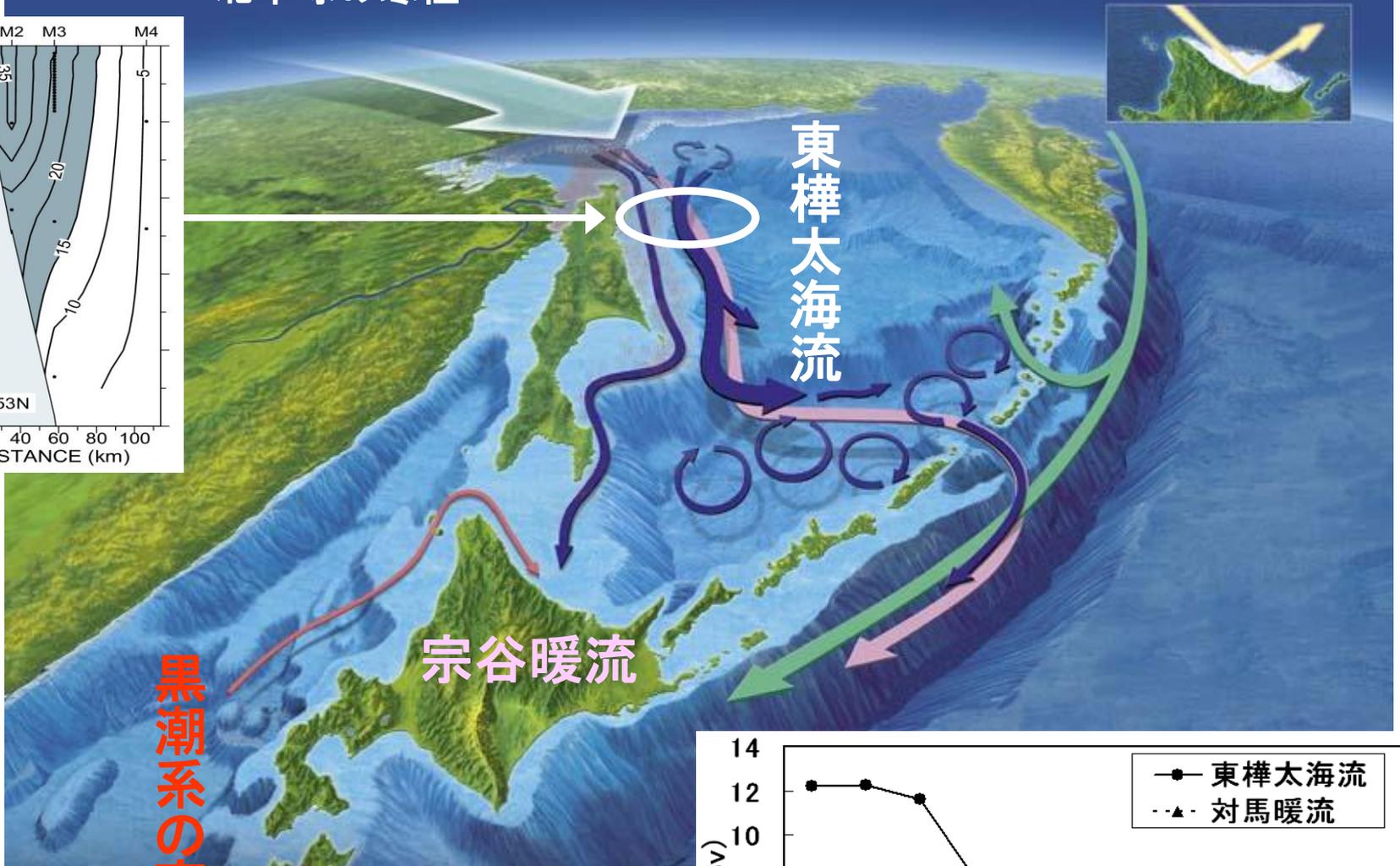
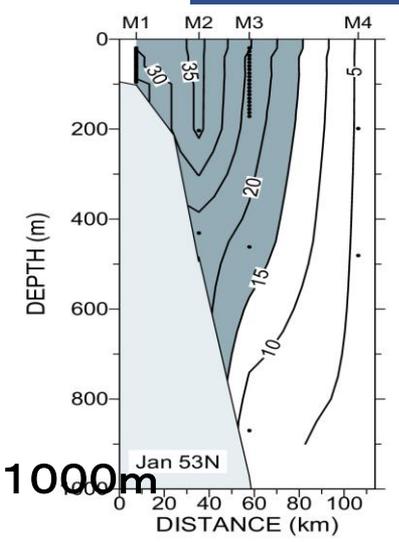


温度

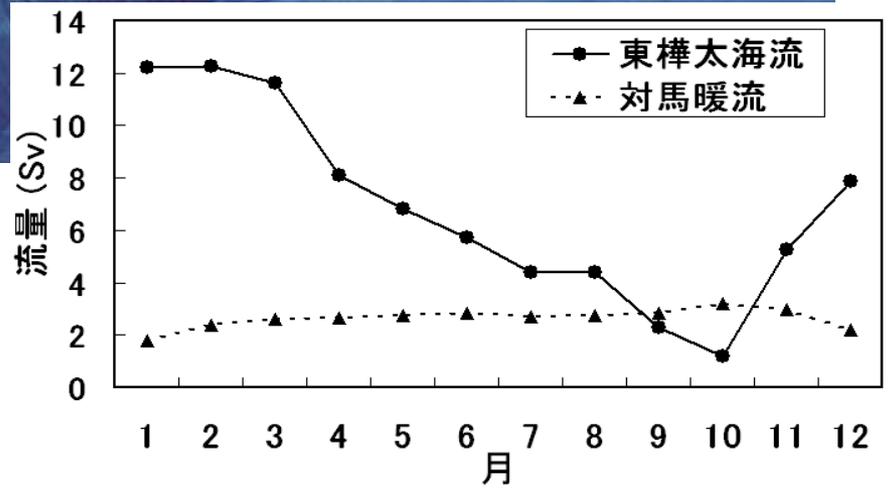


(Shcherbina et al., 2003; Science)

北半球の寒極

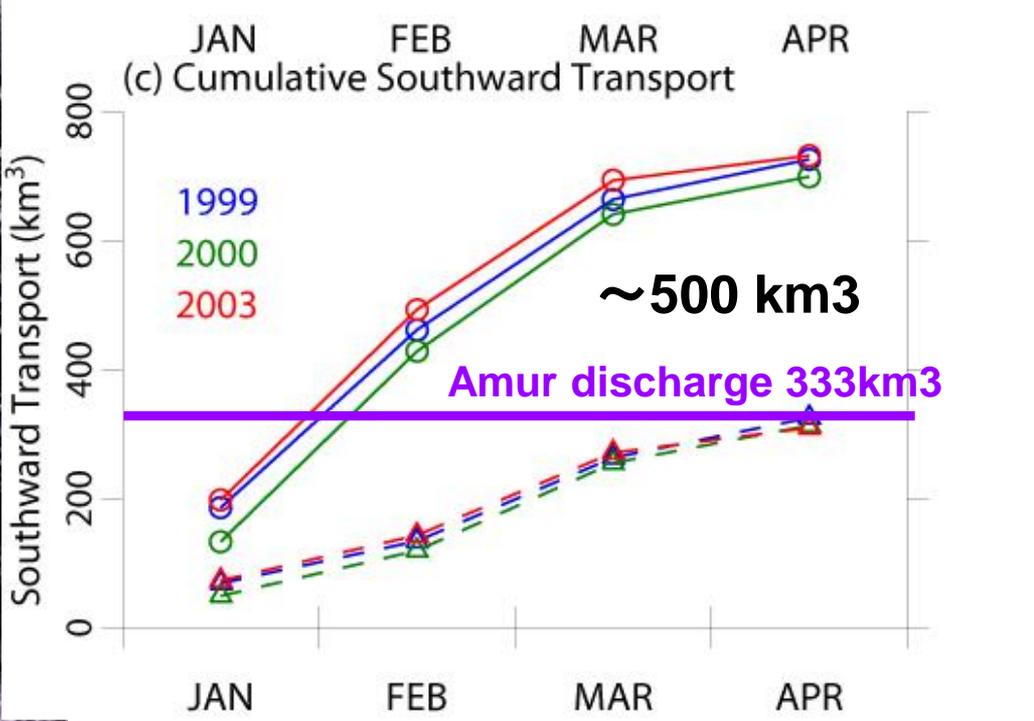
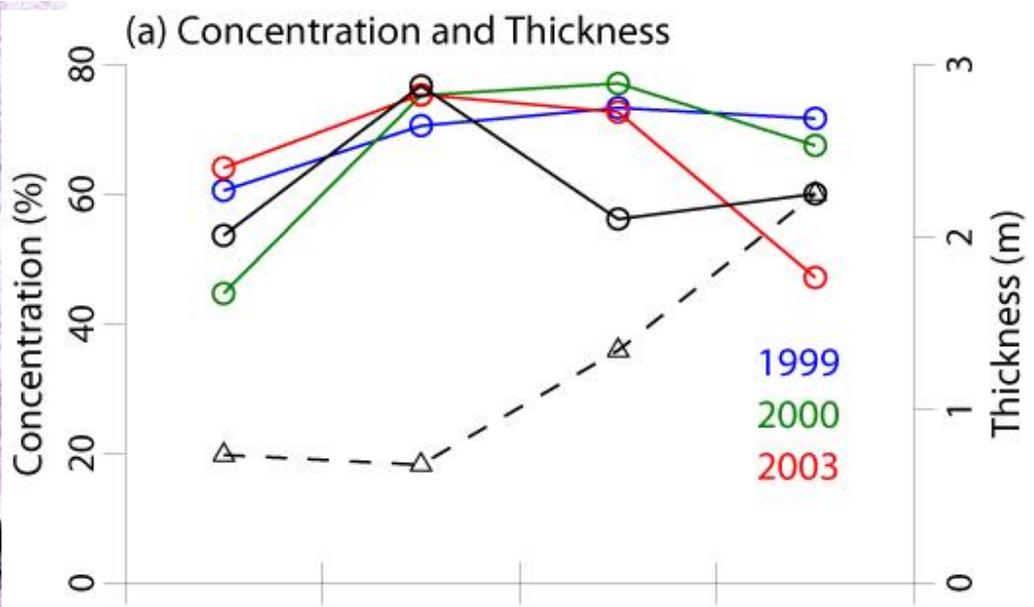
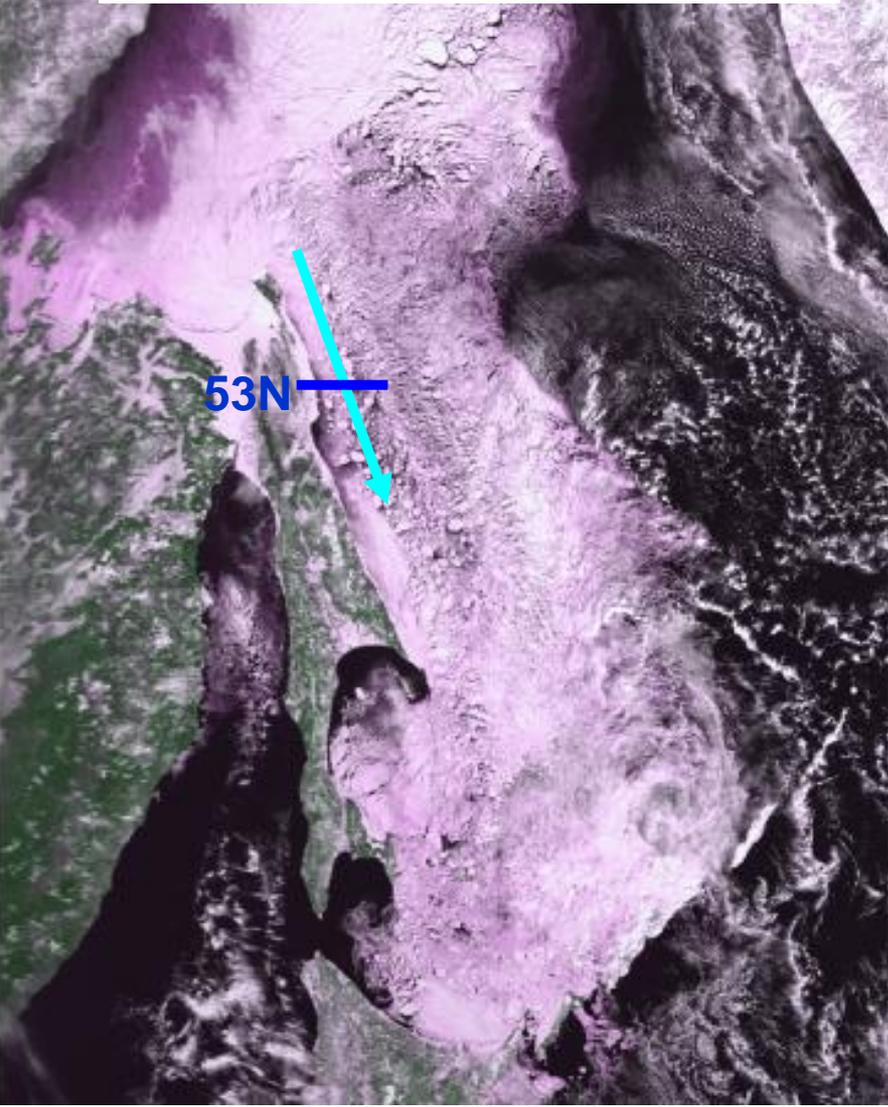


黒潮系の高塩・高温水



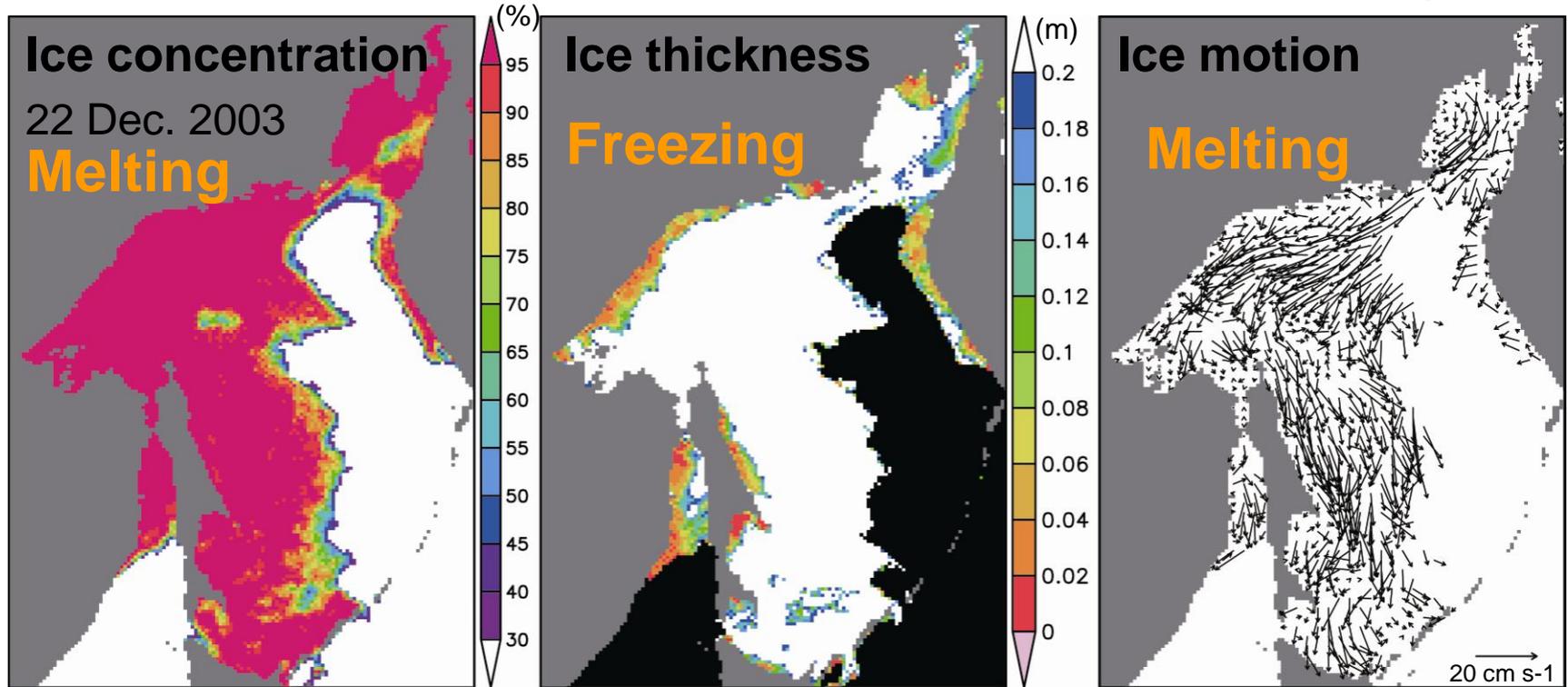
海氷による熱塩の輸送・再配分

(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



海氷生成・融解に伴う熱塩フラックスのデータセット作成

Sea ice data are derived from AMSR-E data (daily)



by NT2 algorithm
(Markus and Cavalieri, 2000)

by ice thickness algorithm
(Nihashi et al., 2009)

by maximum correlation method
(Kimura and Wakatsuchi, 2004)

ECMWF: Air temp. Humidity, Wind speed, and SLP (daily)

ISCCP: Cloud (monthly)

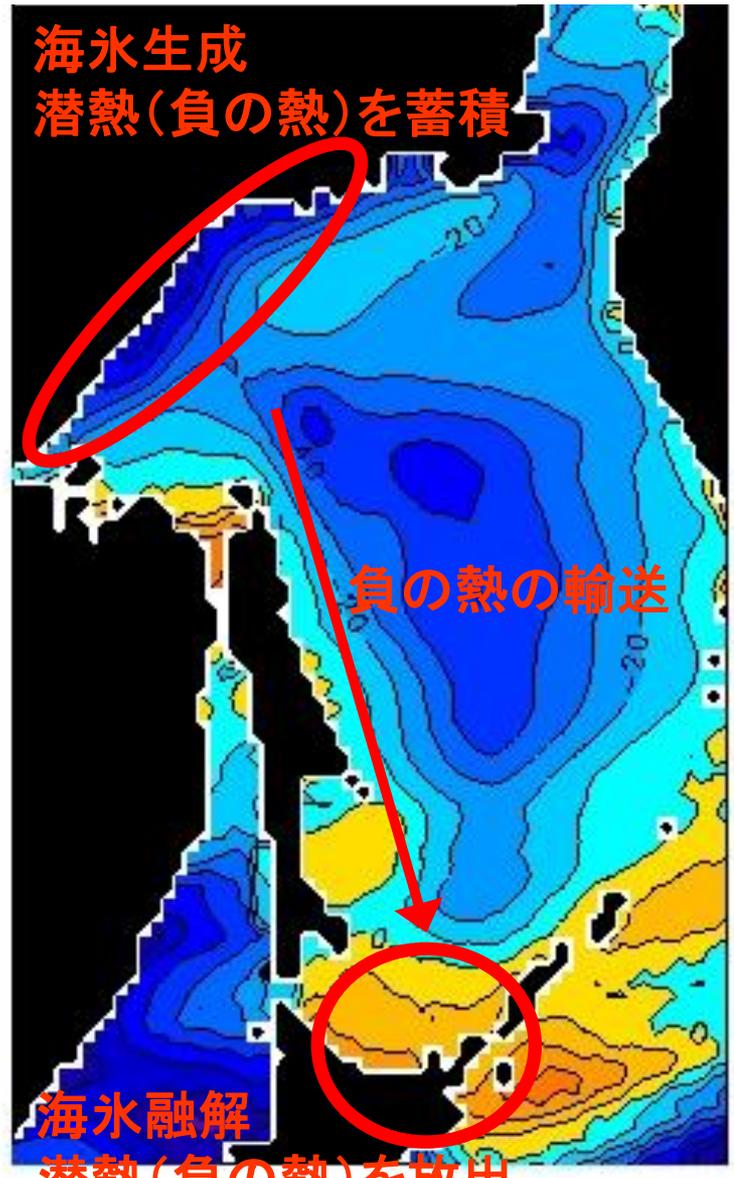
HadISST: SST (monthly)

Nihashi, Ohshima and Kimura, J. Climate (2012)

年間の正味海面熱収支

大気から海洋が熱をもらう場合を正

(W/m²)



海水生成
潜熱(負の熱)を蓄積

負の熱の輸送

海水融解
潜熱(負の熱)を放出

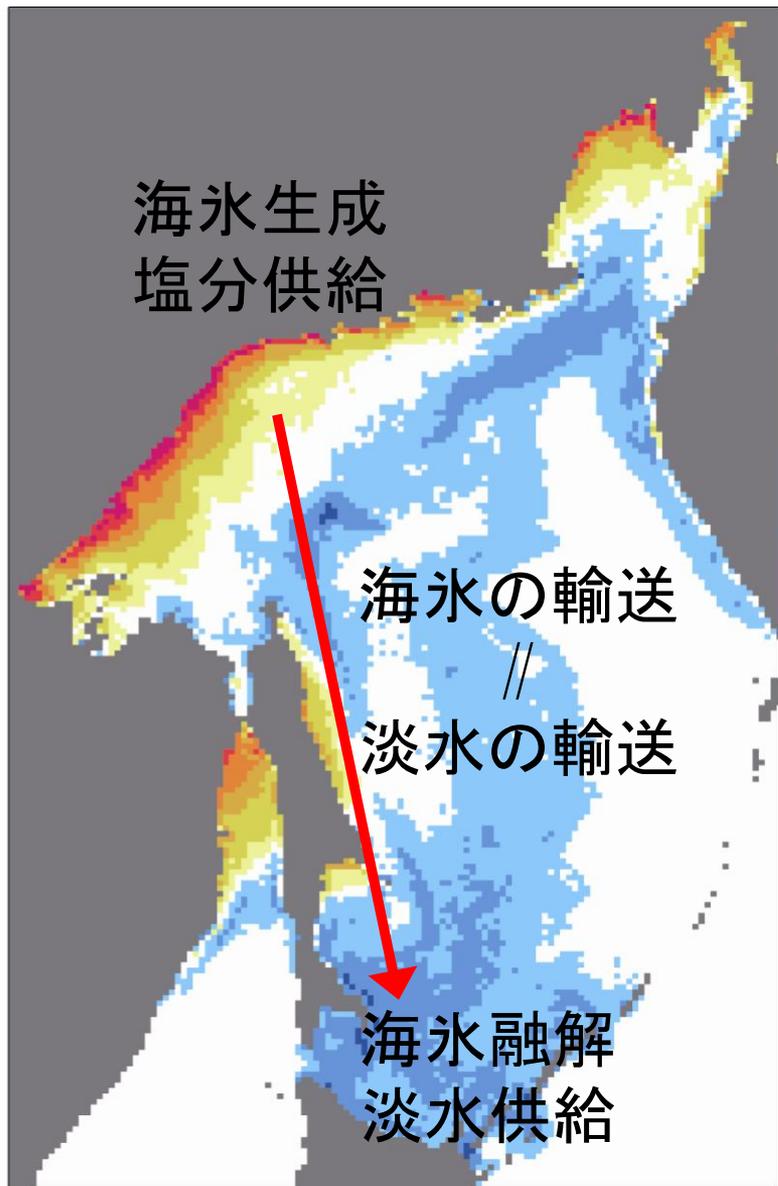
海氷による気候形成

1mの海氷の融解(潜)熱
= 全大気柱25-30度を昇温

北海道北部・東部域の
寒冷な気候(特に夏季)は、
海氷(+東樺太海流)が
運ぶ負の熱によって形成

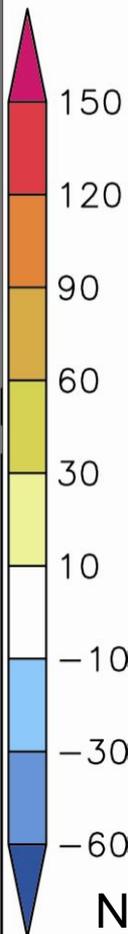
(Ohshima et al.,2003)

年間の正味の塩分収支 (Kg m⁻²)



海水の塩分: 33psu

海氷の塩分: 3-10psu

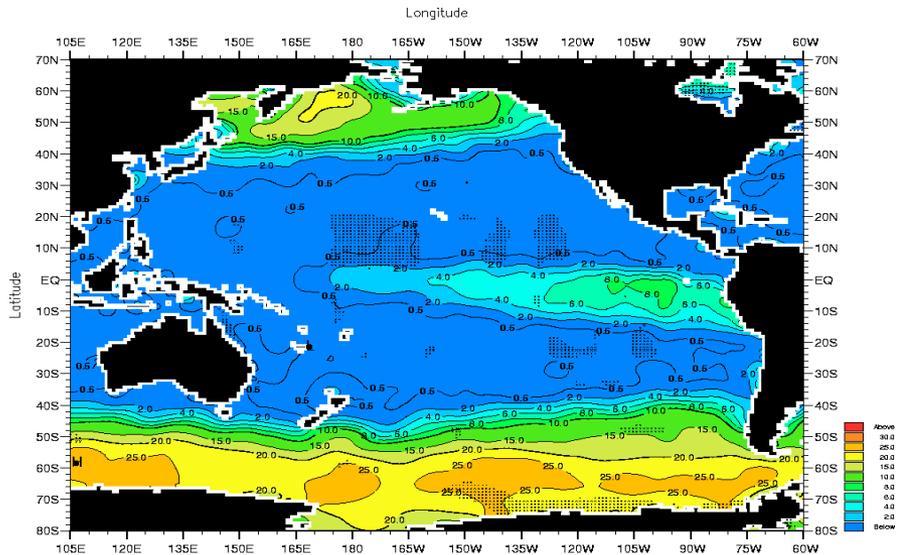


↑ 塩分供給

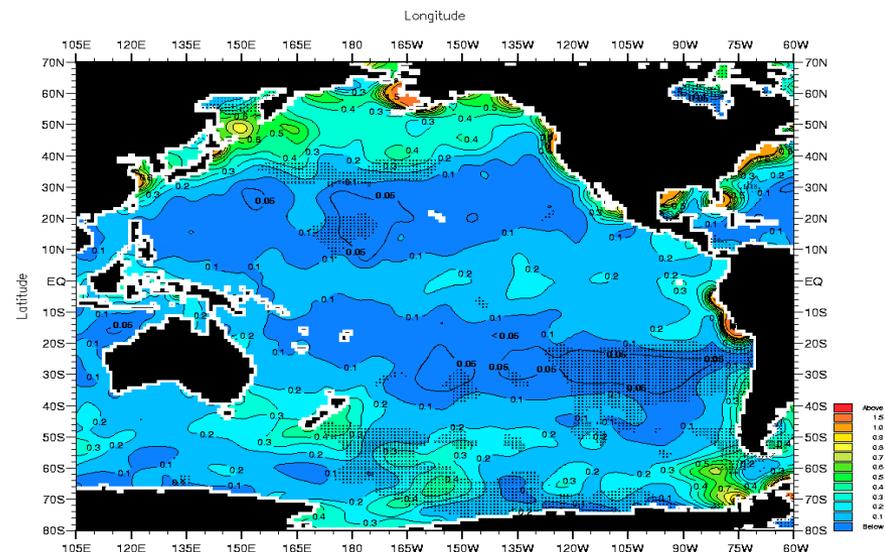
↓ 淡水供給

Nihashi et al. (submitted)

海氷・中層水の生物生産への影響



硝酸塩濃度



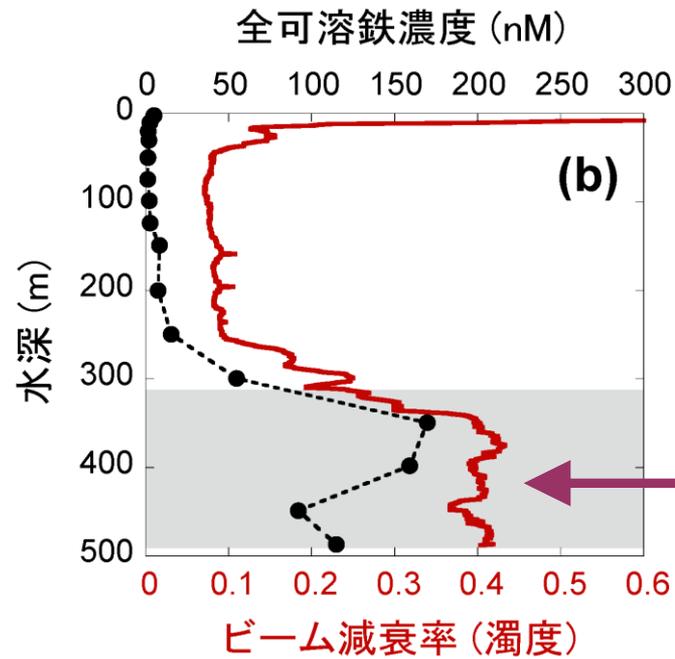
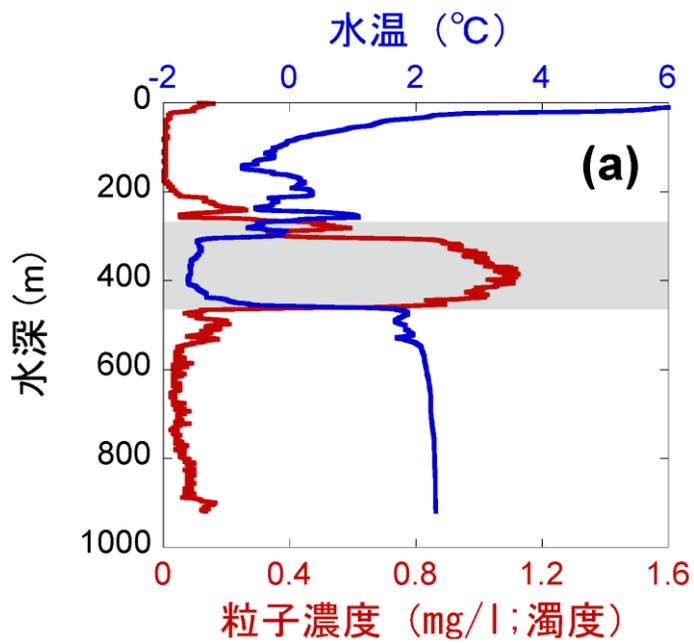
植物プランクトン色素(クロロフィルa)濃度

北太平洋亜寒帯域、南極海には、夏でも大量の栄養塩が
残存している海域が存在している。

→ High Nutrient & Low Chlorophyll (HNLC) 海域

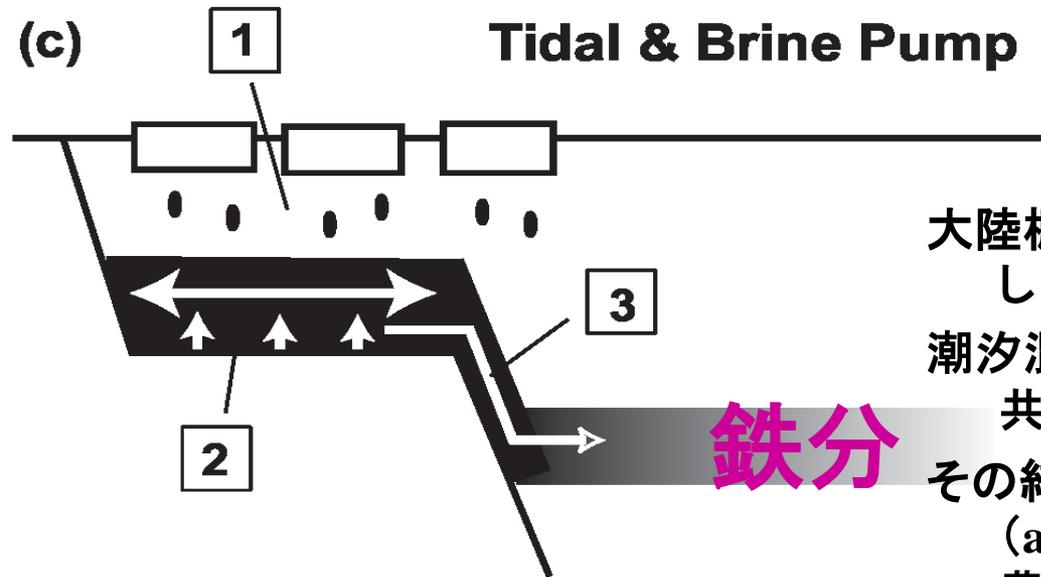
HNLC海域で夏季における植物プランクトンの生産を制限している
要因は、微量元素の1つ、「鉄」であった。

★鉄添加実験(培養ボトル～現場海域)の結論



鉄分

(西岡氏提供)



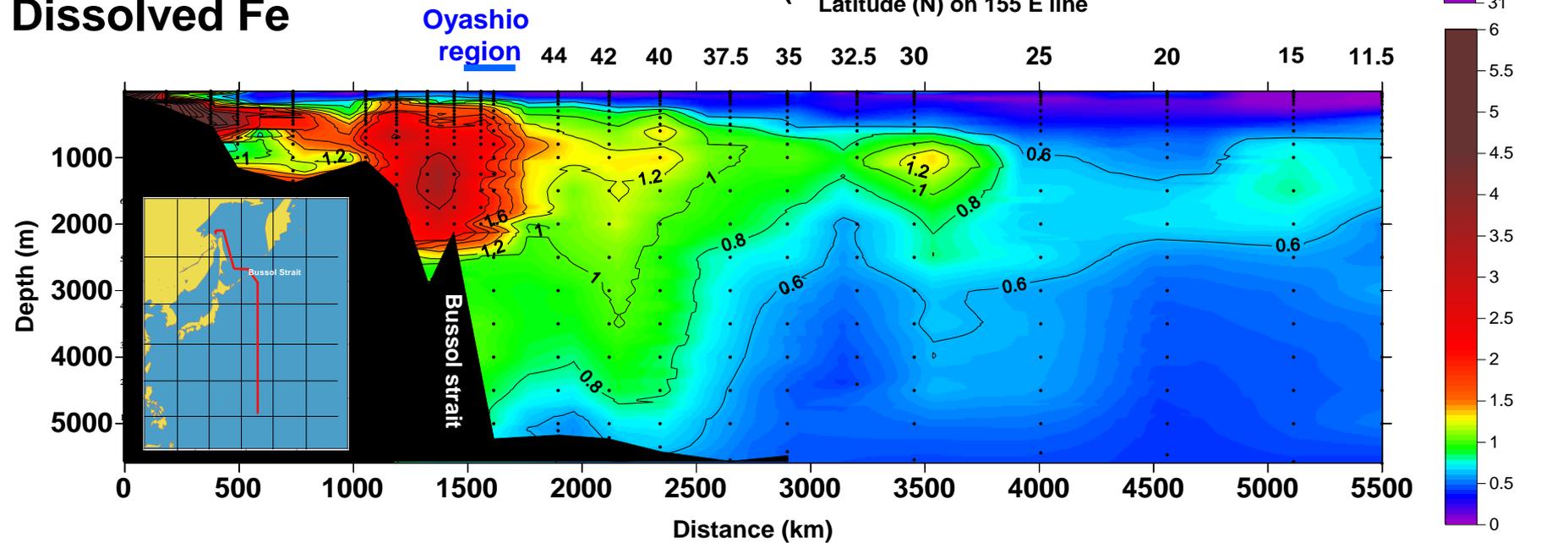
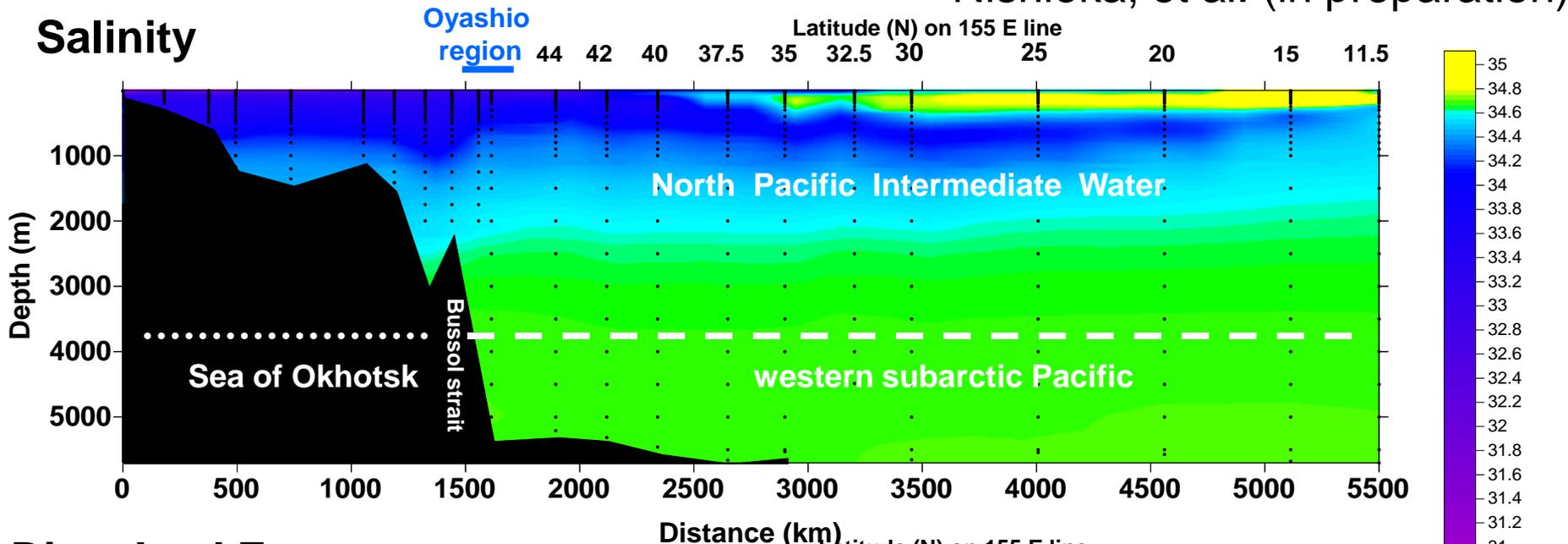
大陸棚の海底には、海氷からブライン水が沈降し(c-1)、

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)

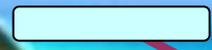
◆ オホーツク海から西部北太平洋への鉄の供給 Nishioka, et al. (in preparation)



Vertical section profiles of Salinity and Dissolved Fe from the Okhotsk Sea to along 155 E

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

Nishioka et al.(2007)

中層鉄仮説

巨大魚付林：
アムールオホーツクシステム

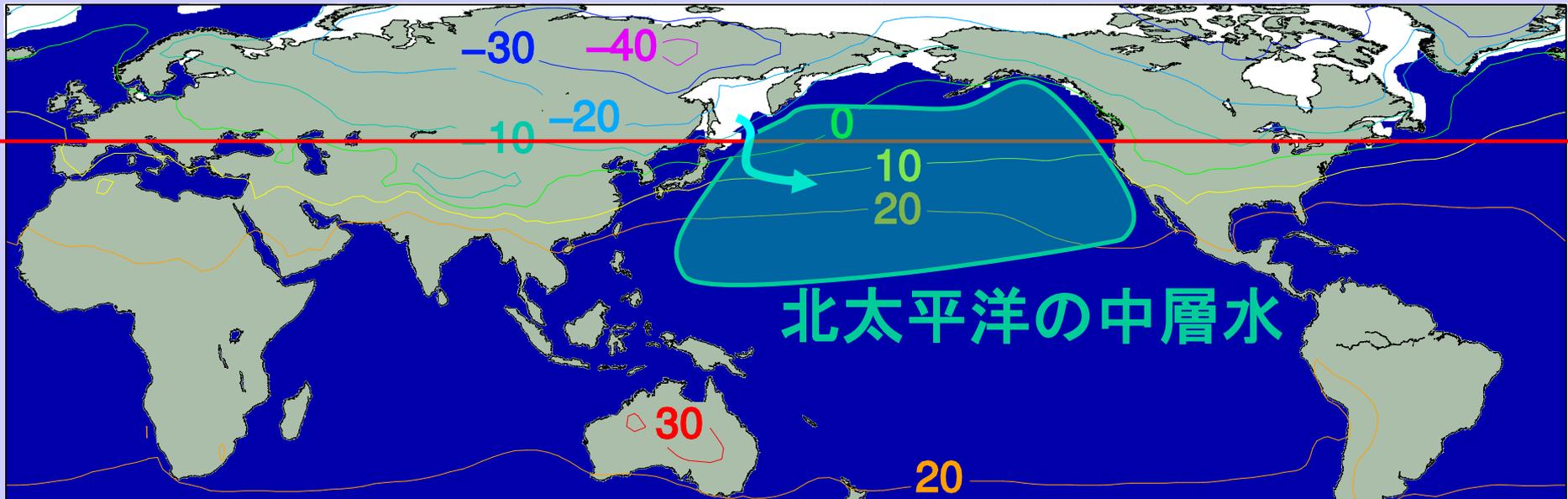
Nakanowatari et al.(2007)

JST提供

温暖化の影響

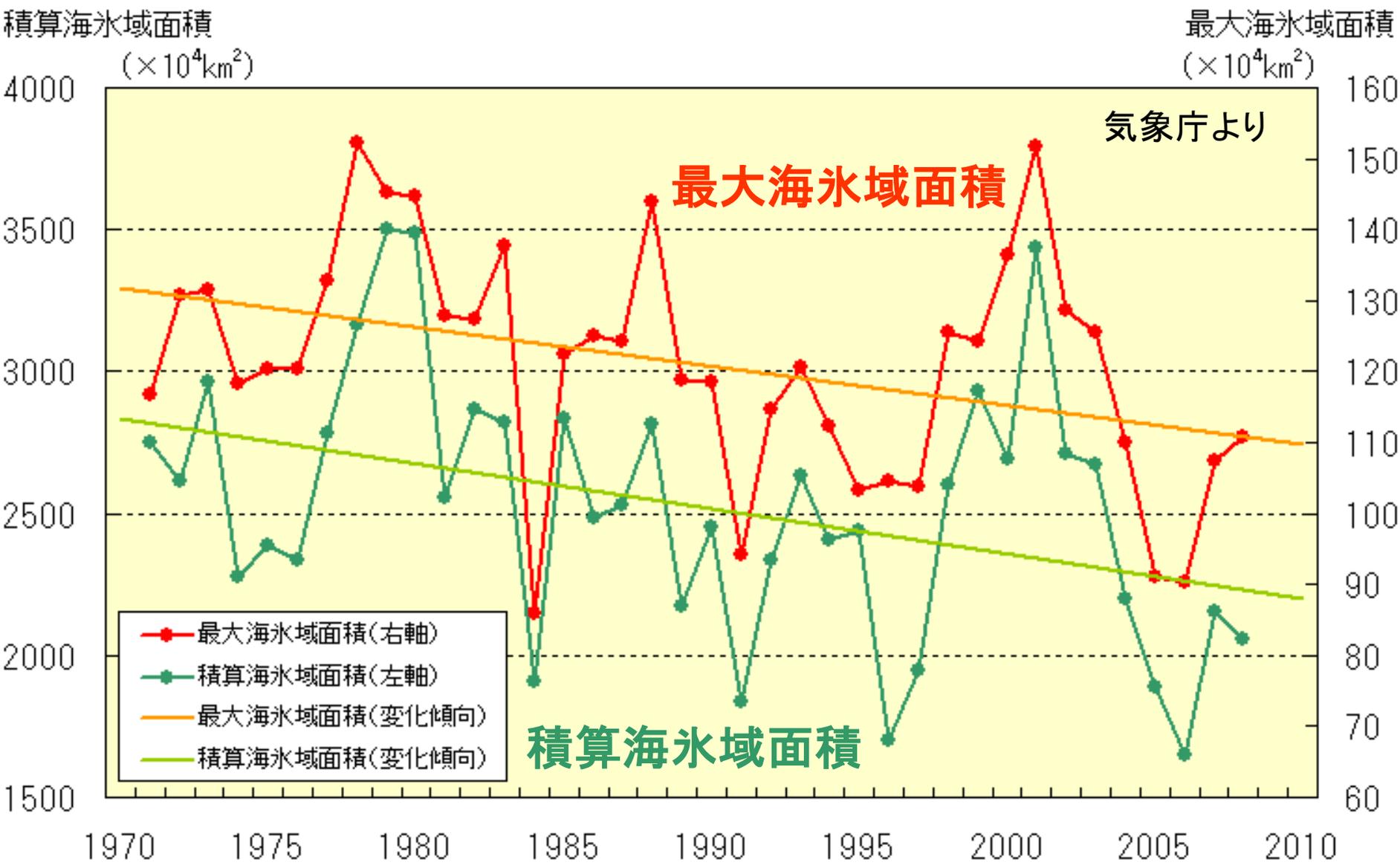
グローバルな目でみたオホーツク海

2月の海氷分布と平均気温(2001年)



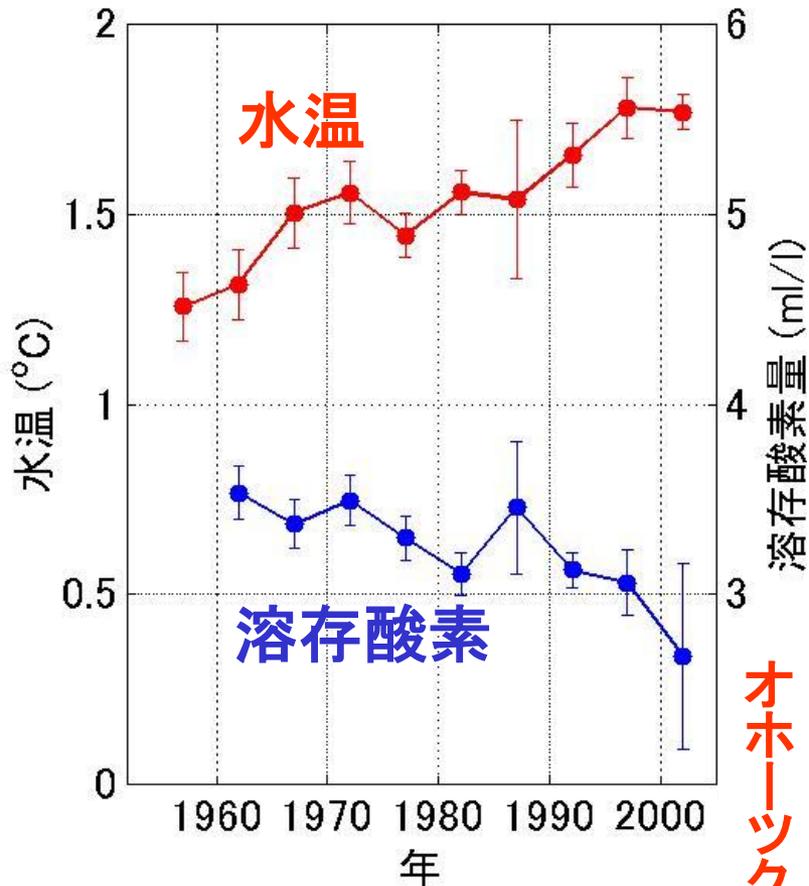
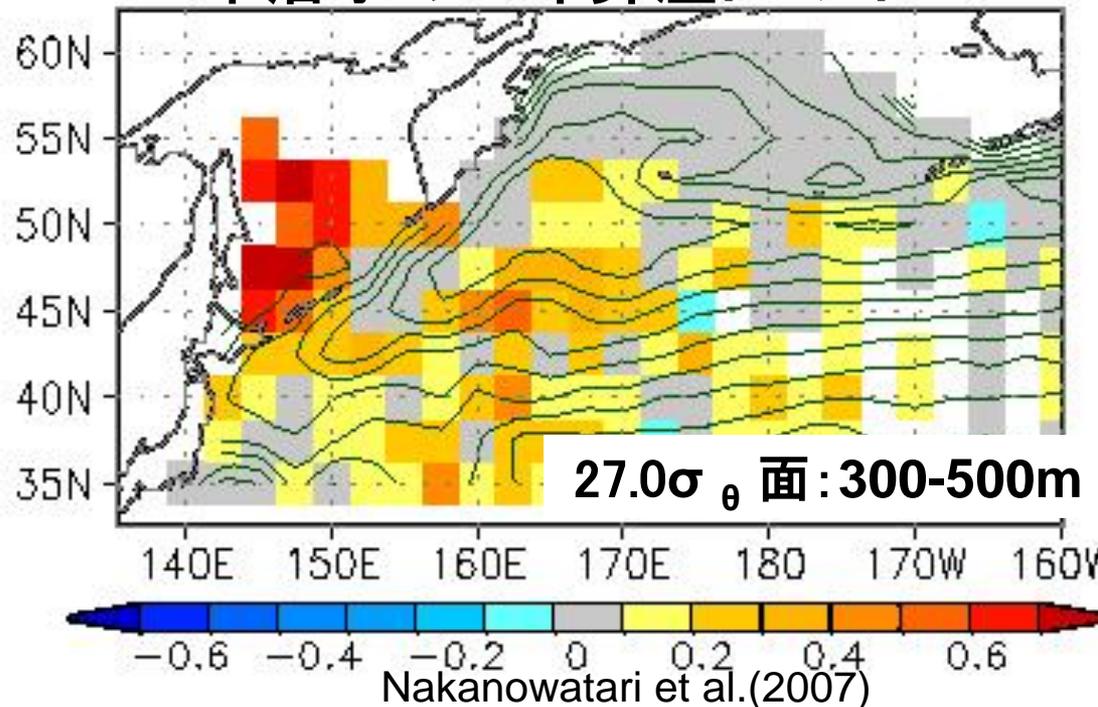
Nihashi et al., 2009

- ・風上が北半球の寒極 → 北半球における海氷域の南限
- ・多量の海氷生産 → 北太平洋で一番重い水ができる場所
→ 大気・陸からの熱・物質を北太平洋中層水(200-800m)へ

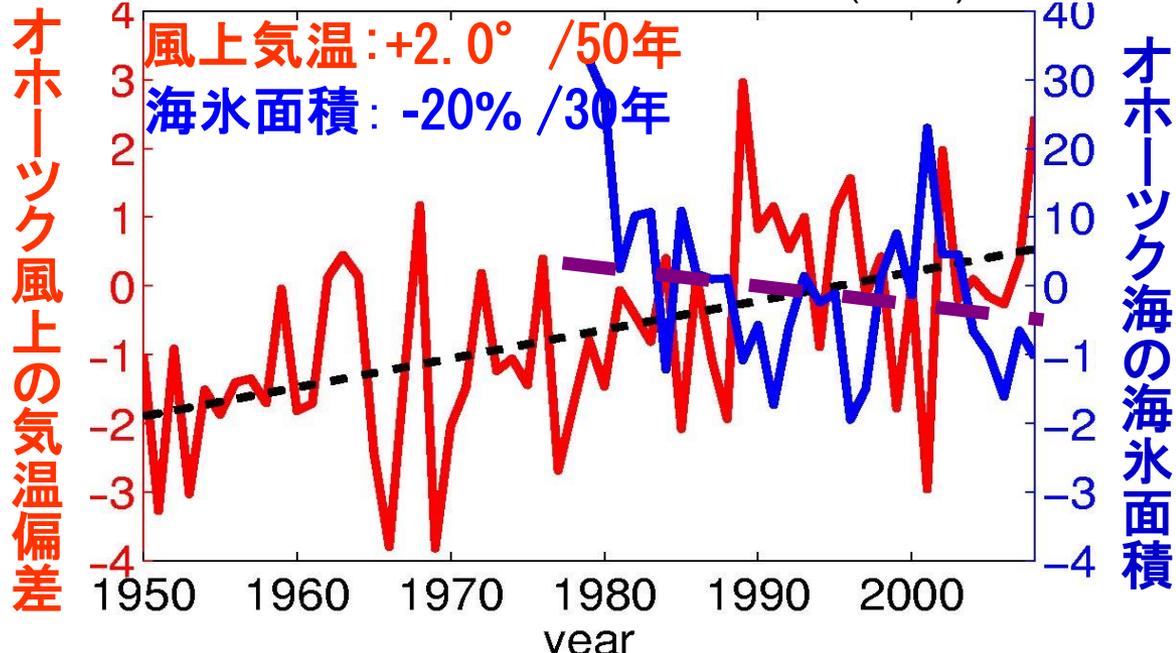


オホーク海の海氷面積は30年で約20%減少している

中層水の50年昇温トレンド



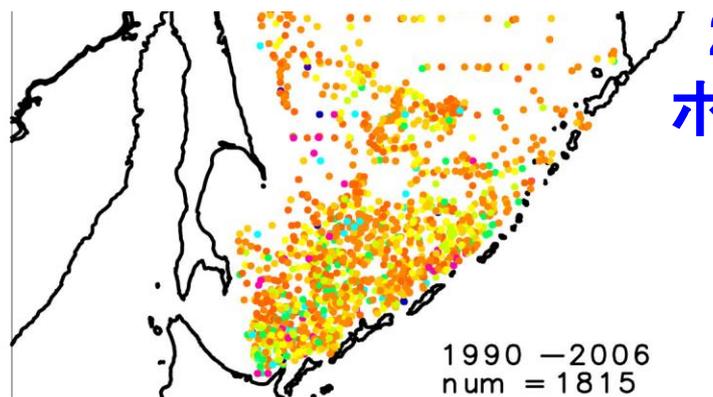
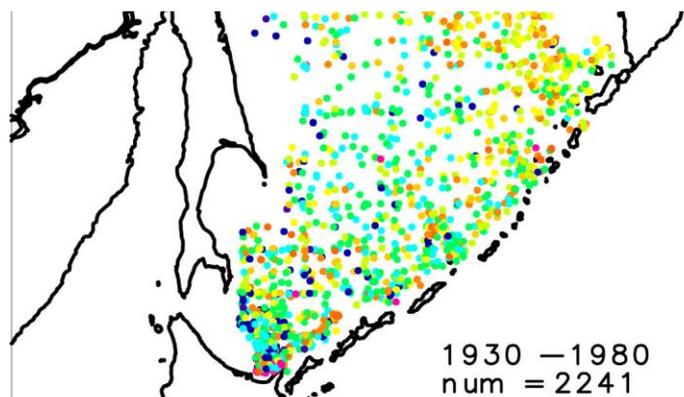
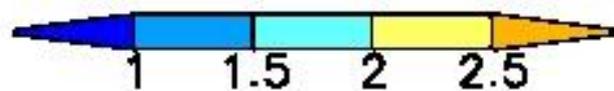
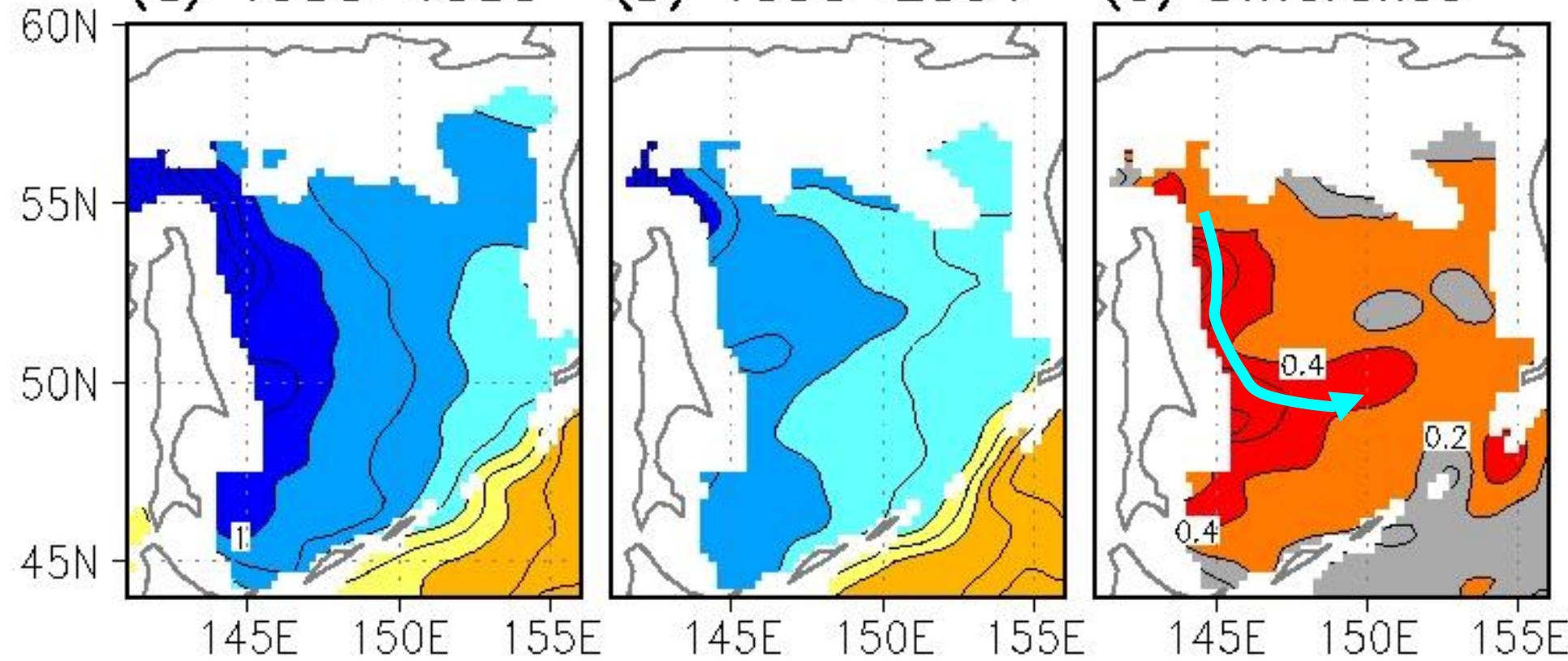
オホーツク海の中層水の50年間の変化



(a) 1930–1980

(b) 1990–2004

(c) Difference



26.9σ₀ 面での
ポテンシャル温度

アムール川

鉄 海水生成による重い水生成



鉄

中層への潜り込み

オホーツク海

北太平洋

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

Nishioka et al.(2007)

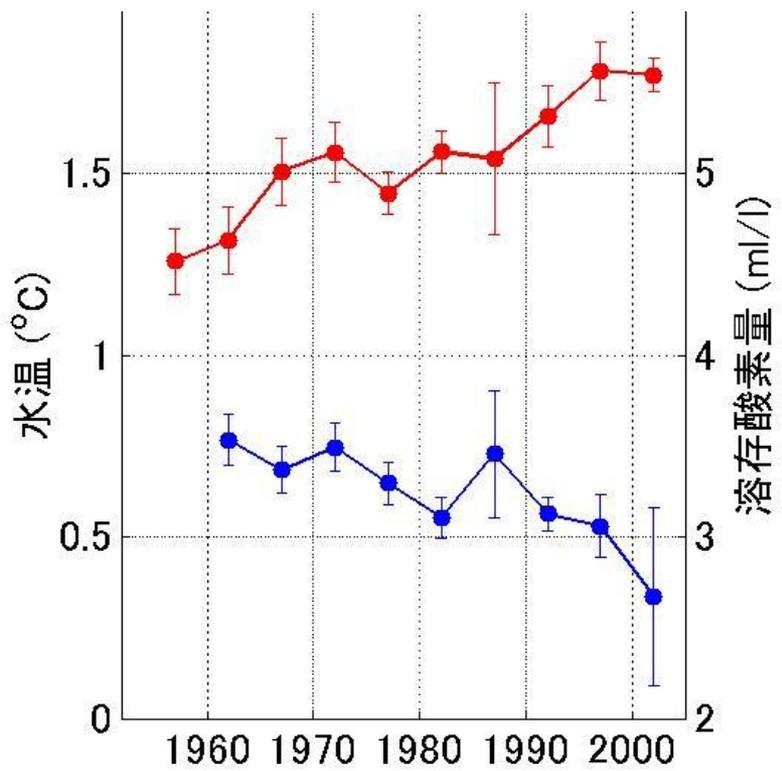
温暖化

海水生産量減少

中層循環の弱化

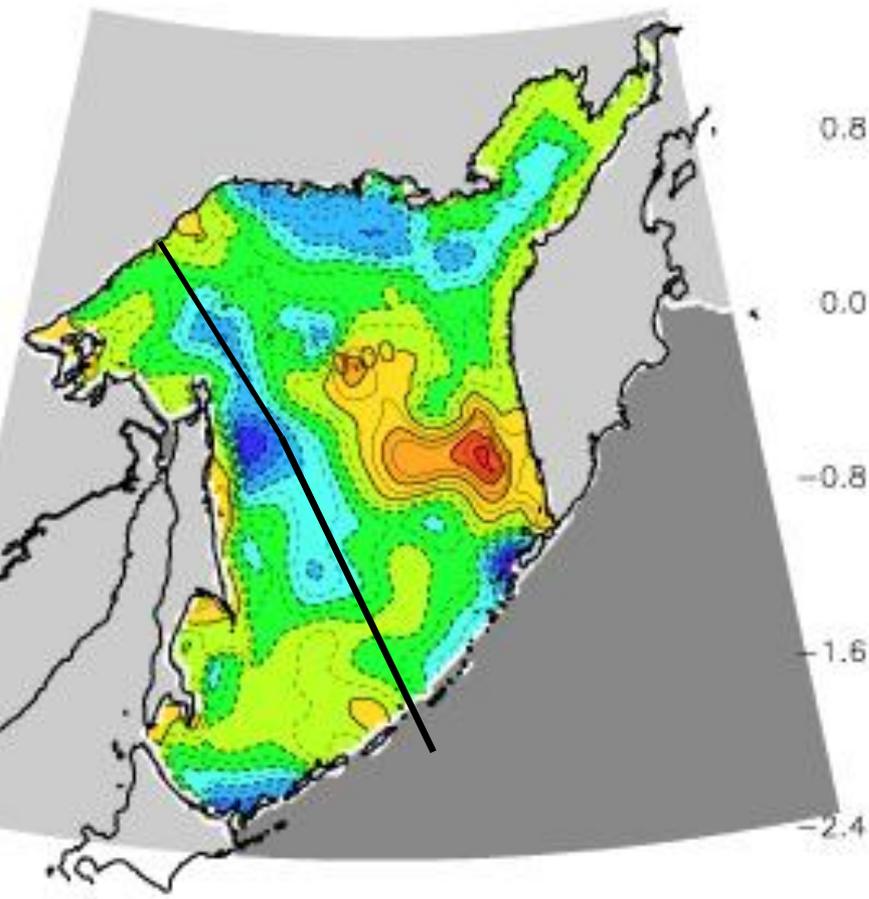
生物生産への影響?

中層水昇温 = 潜り込み減少

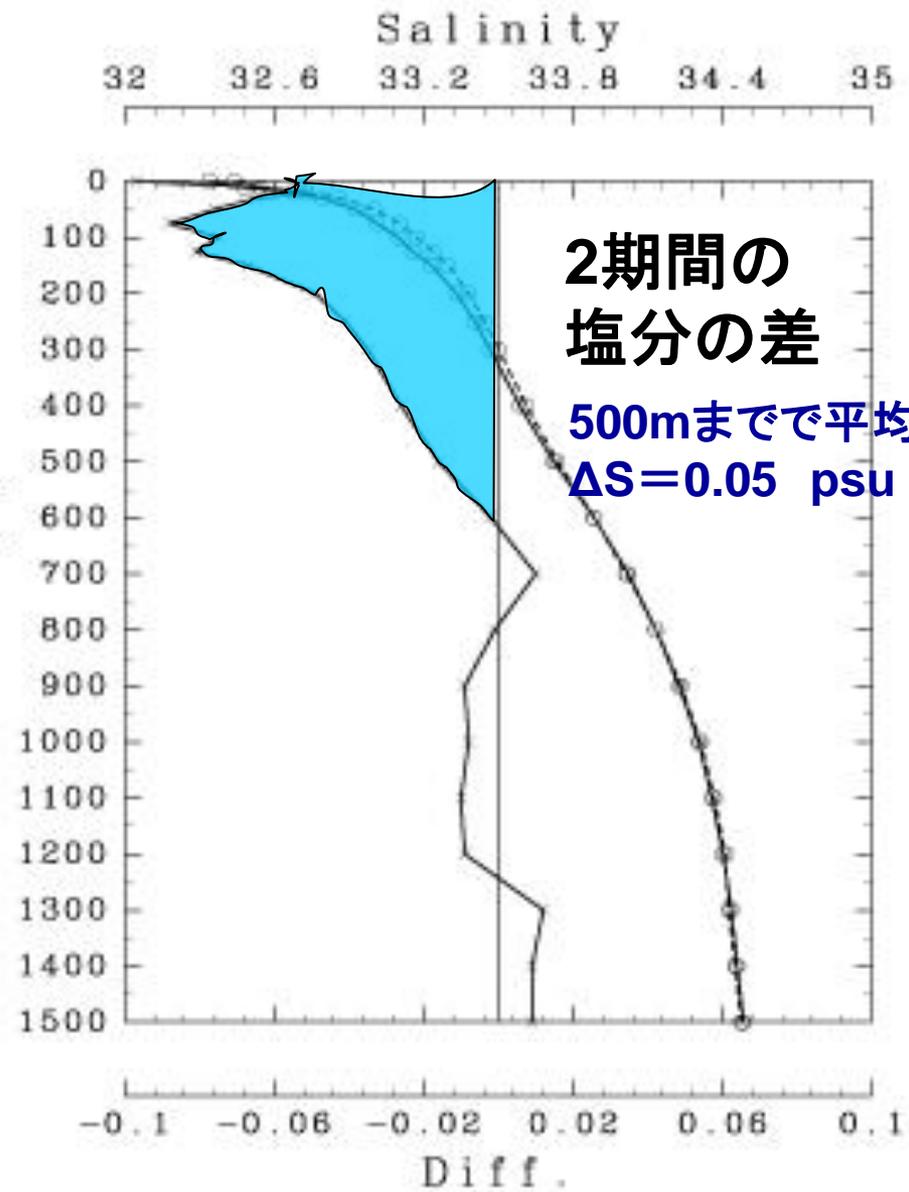


[(1990-2009) - (1930-1980)]
水柱全体の塩分変化を
淡水フラックス(m)に換算

Fresh Water 00000



DEPTH (m)



平均すると0.52mの淡水化

低塩化の原因は何か？

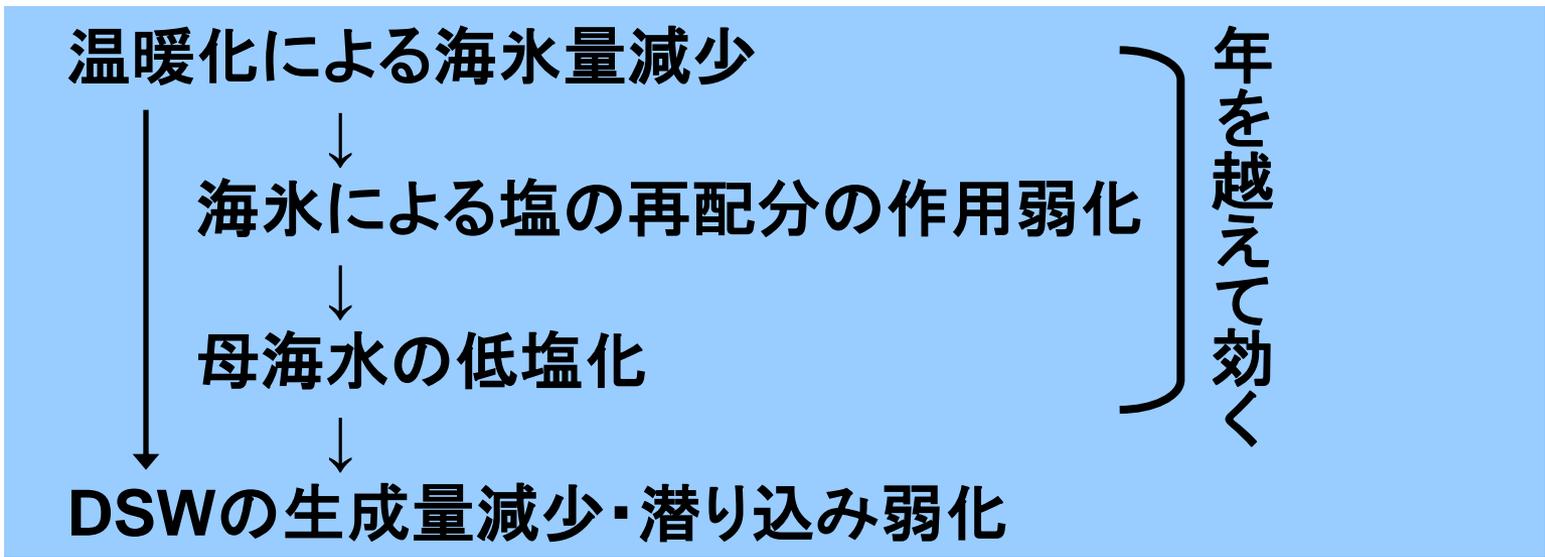
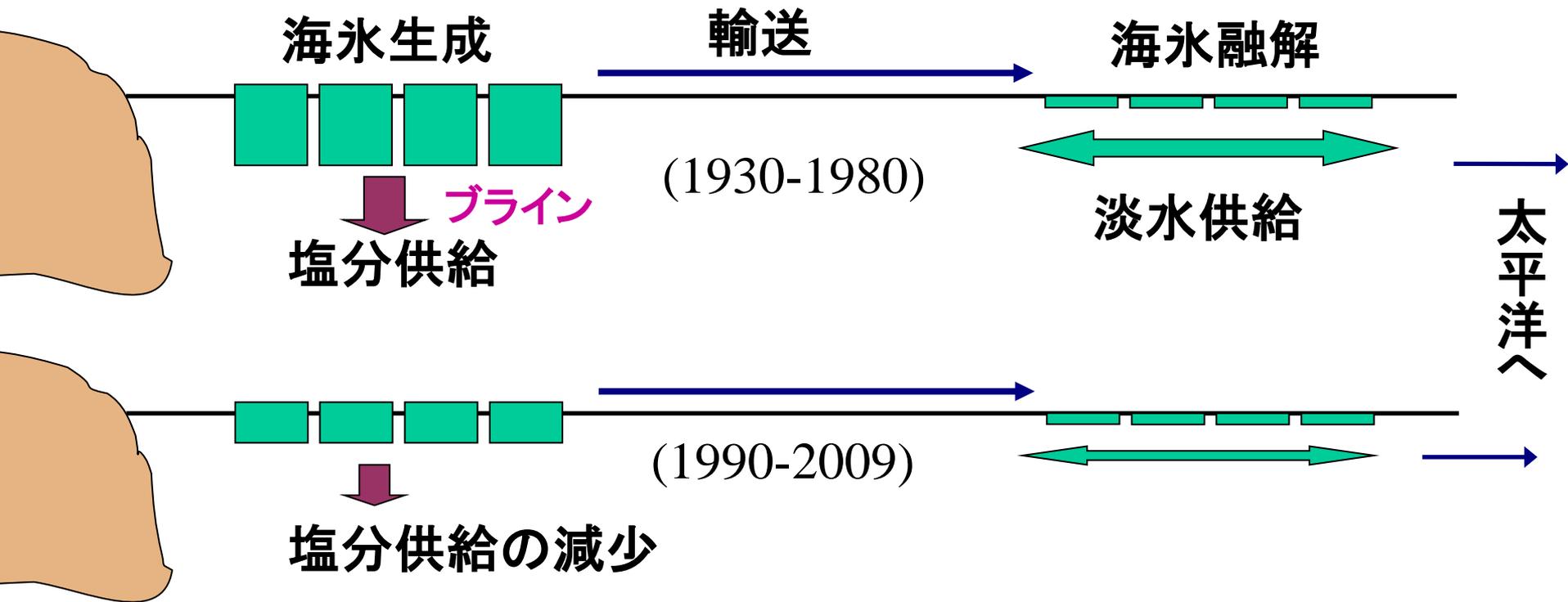
1. 地球温暖化に伴う水循環の活発化による高緯度域での降水増加（北大西洋と同様な機構が北太平洋でも起こっている？）

- ・北西部北太平洋には顕著な低塩化はない
- ・アムール川のフラックスにもトレンドはない (Tachibana et al., 2008)
- ・(降水－蒸発)のトレンドも大きくない（信頼性？）

2. 海氷による塩の再配分の弱まり

北西部で生成された海氷が南部へ輸送・融解されることで、北西部に塩を南部に淡水を供給

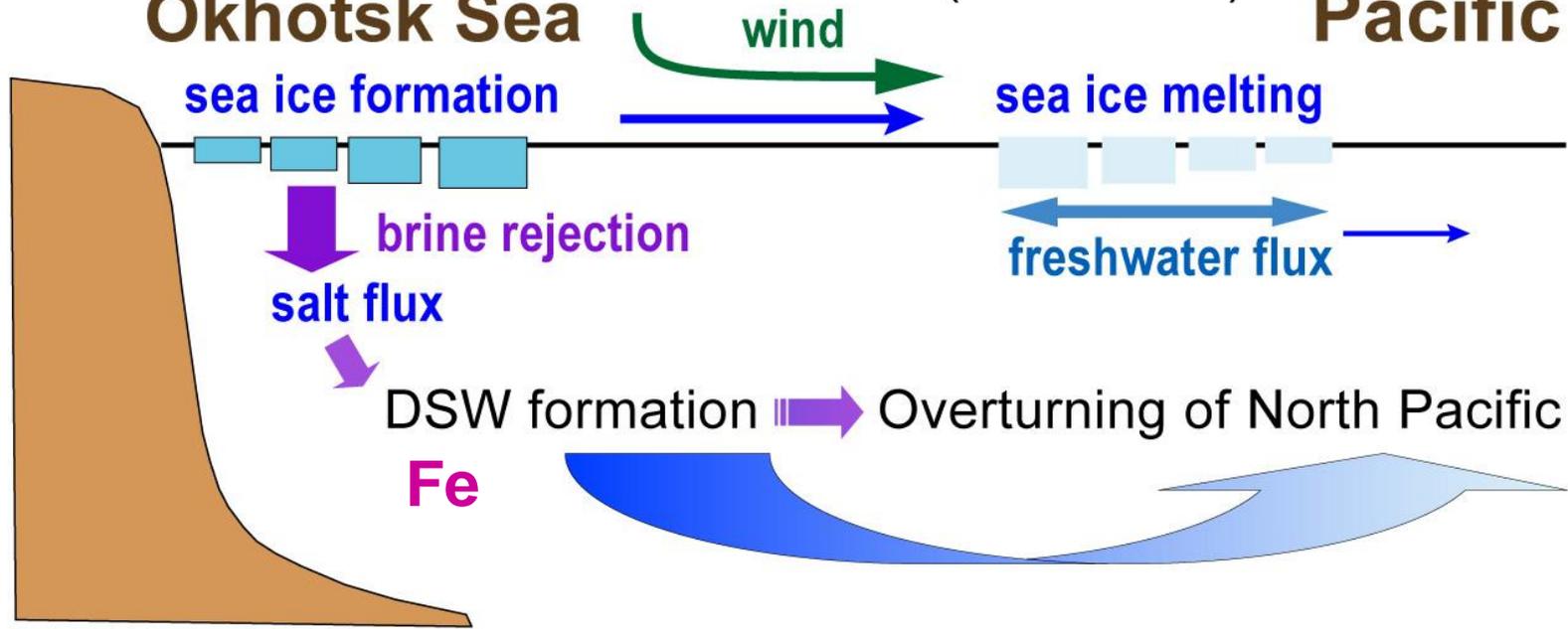
→ 海氷生成の減少 (-20% / 30yr) によりそれが弱化



Okhotsk Sea

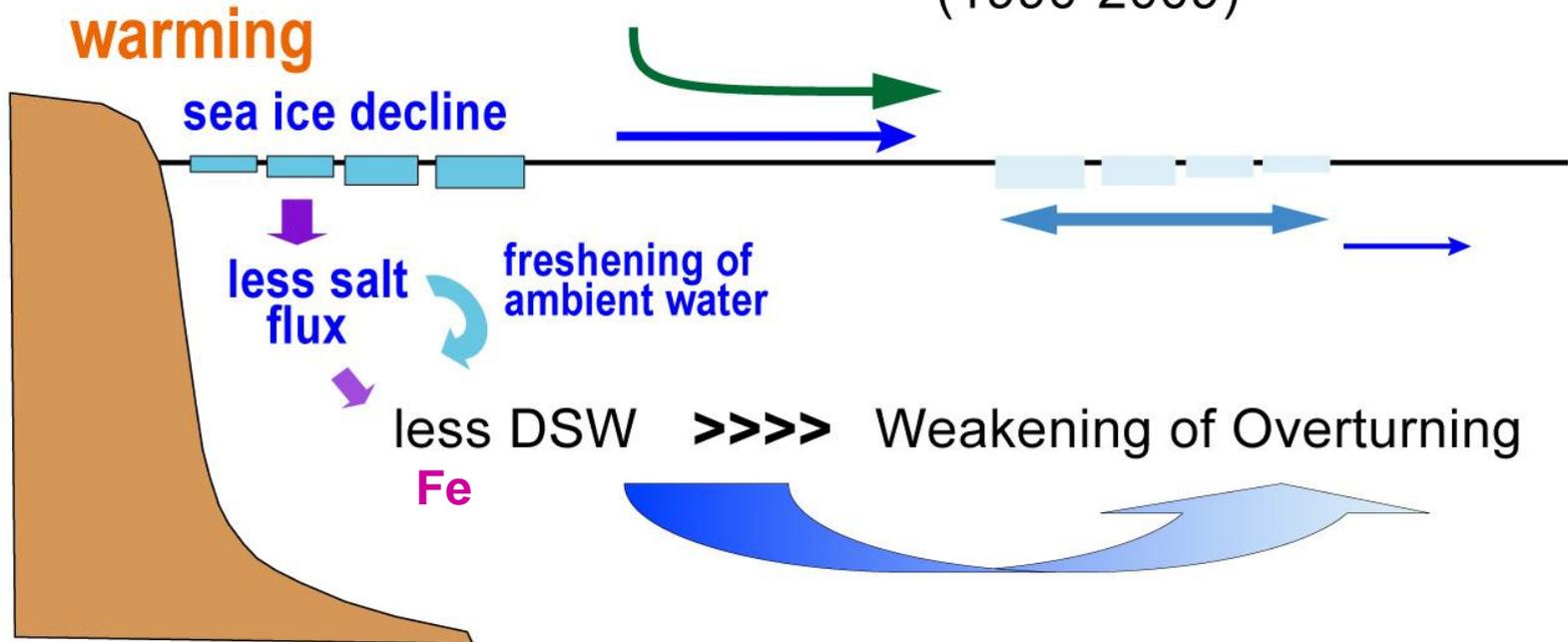
(1930-1980)

Pacific



(1990-2009)

warming

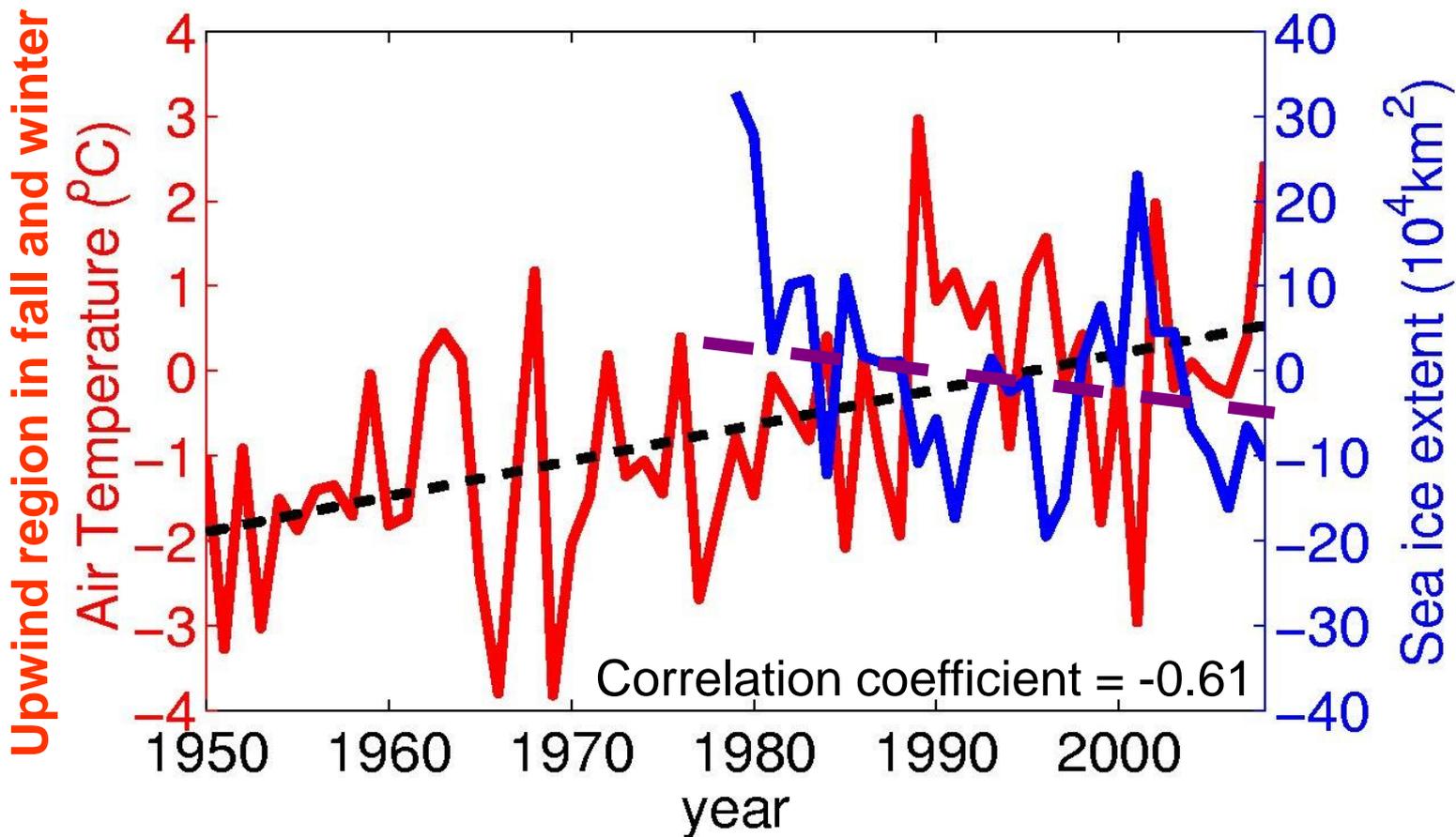


春の海洋データから海氷の厚さを推定する

Spring salinity profiles taught us thinning of sea-ice cover
in the Okhotsk Sea

Temperature increase: 2.0 K /50-yr

→ Sea-ice decrease: -20% /30-yr

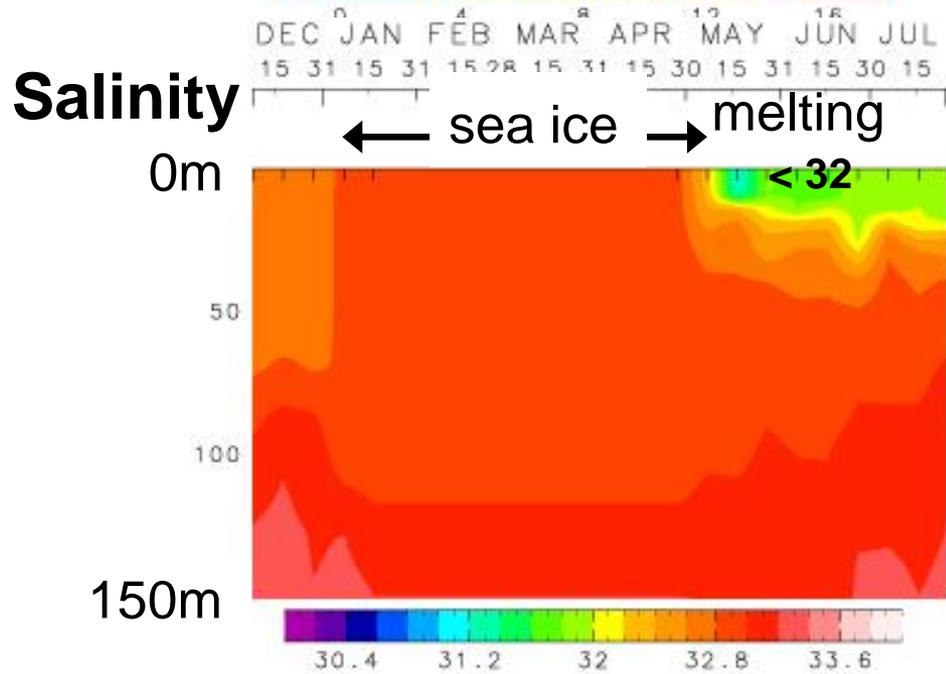
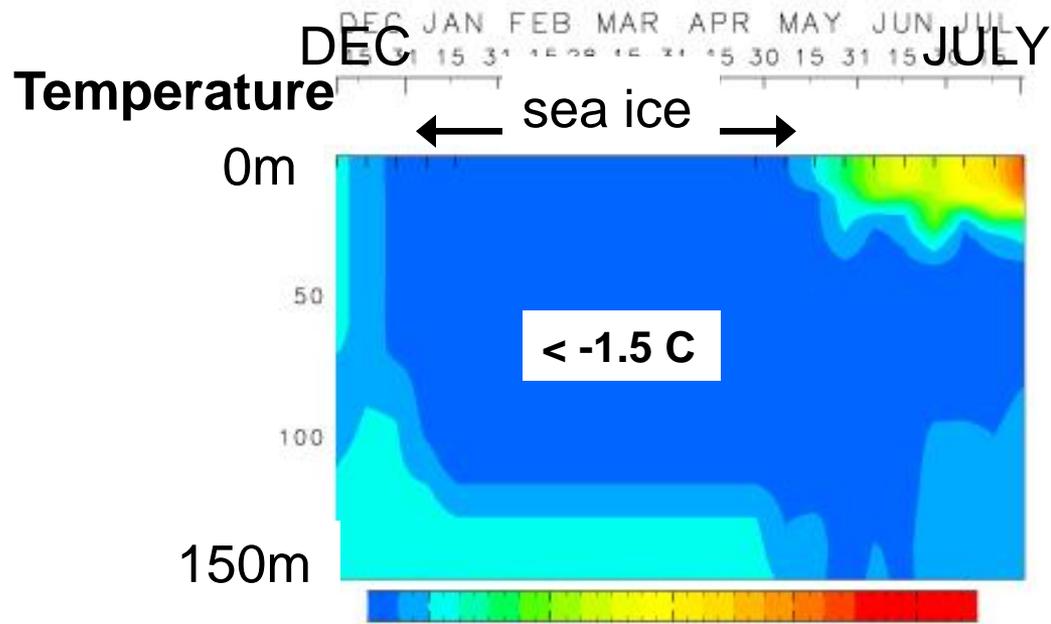


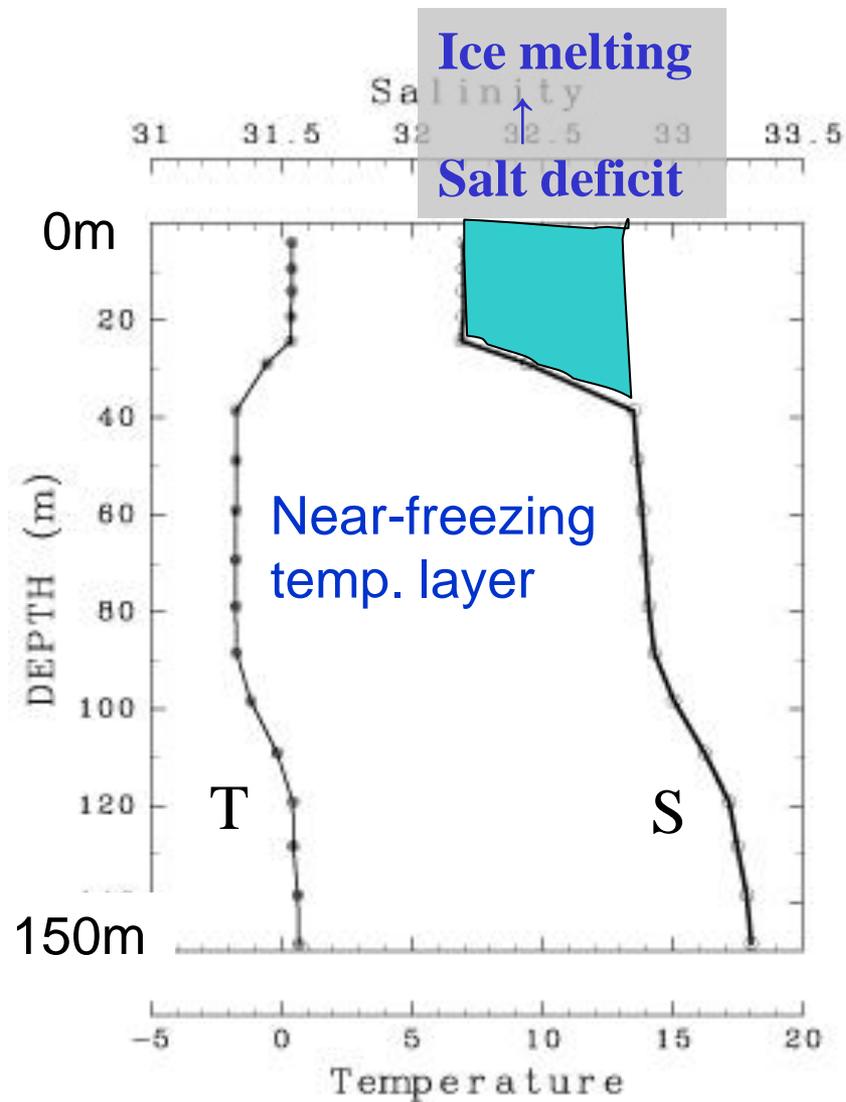
海氷面積は約30年の衛星データあり(20%減少)

海氷の厚さはどうなのか？

量的な議論には厚さの情報が不可欠

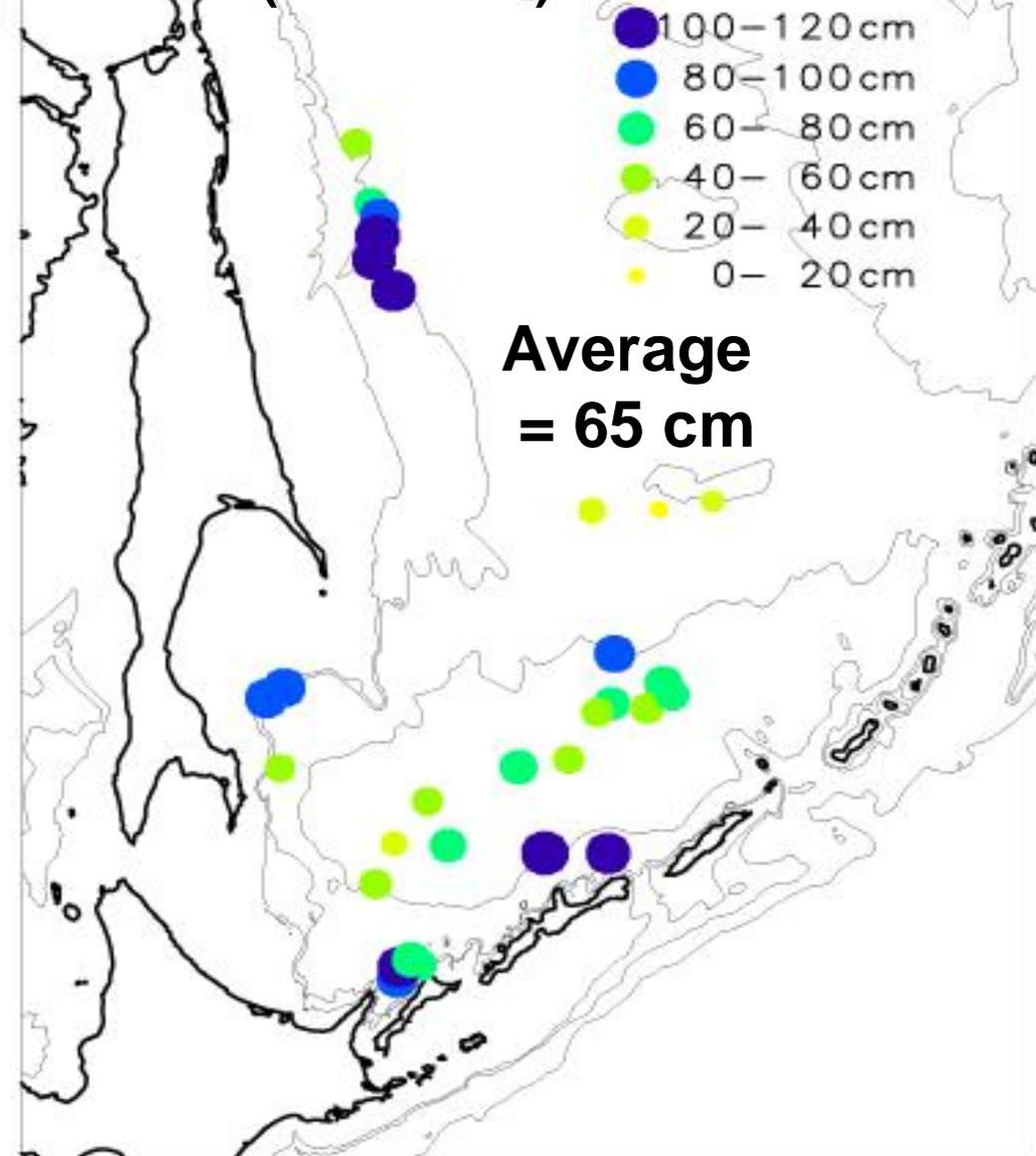
Time series of T, S vertical profile from a profiling float

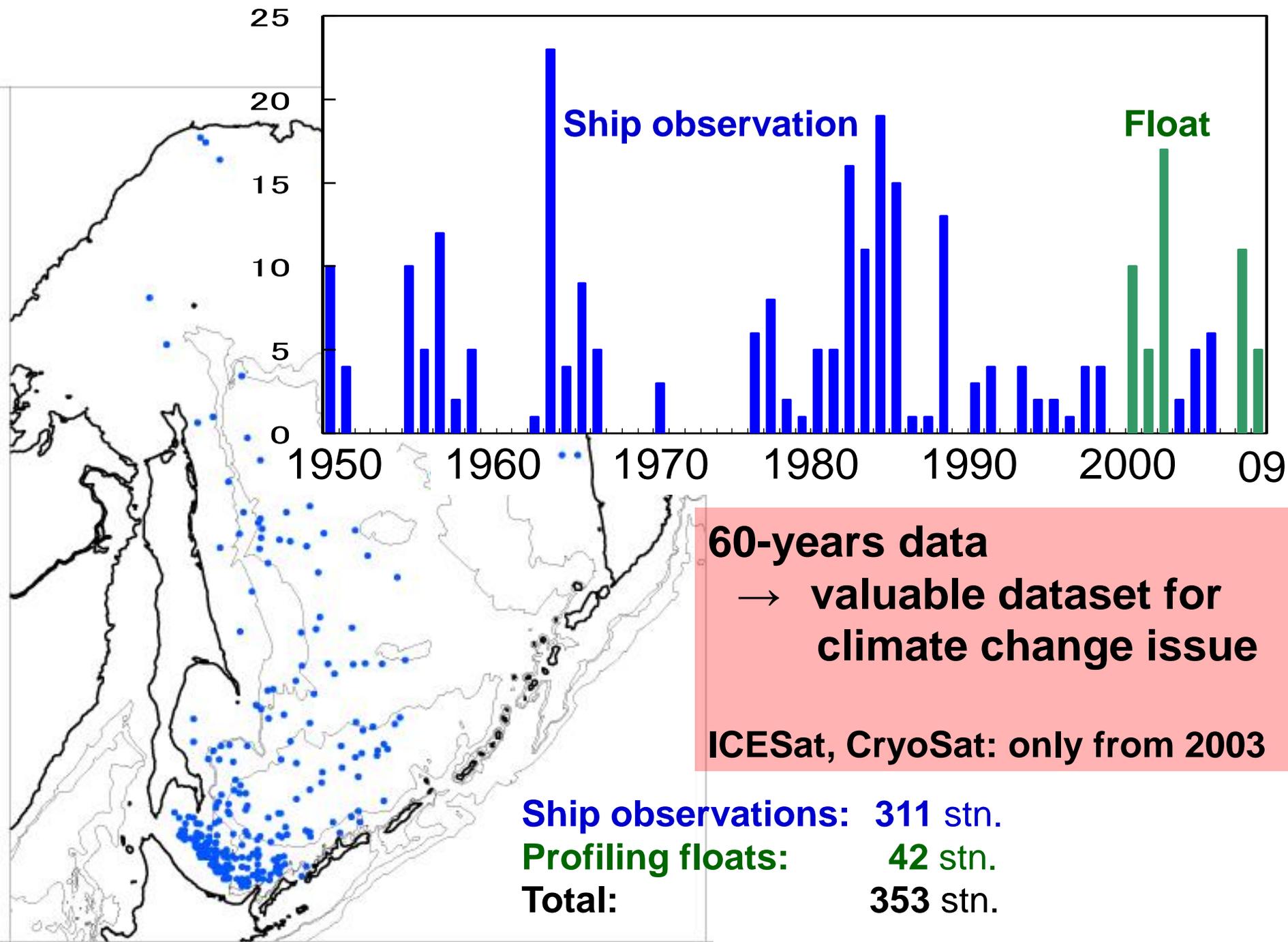


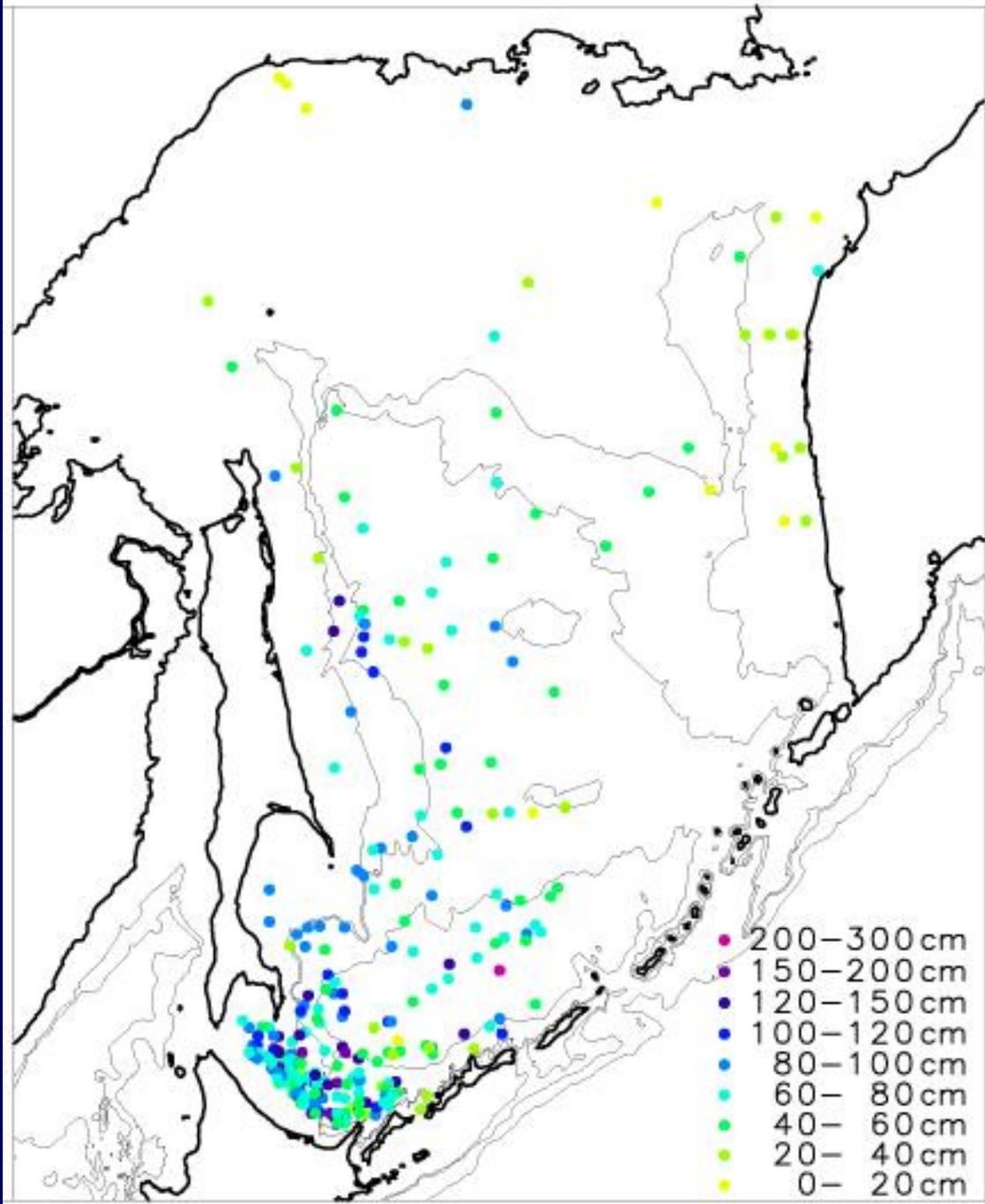


Ice thickness inferred from salinity profile from floats

(2001-2009): 42 stn.

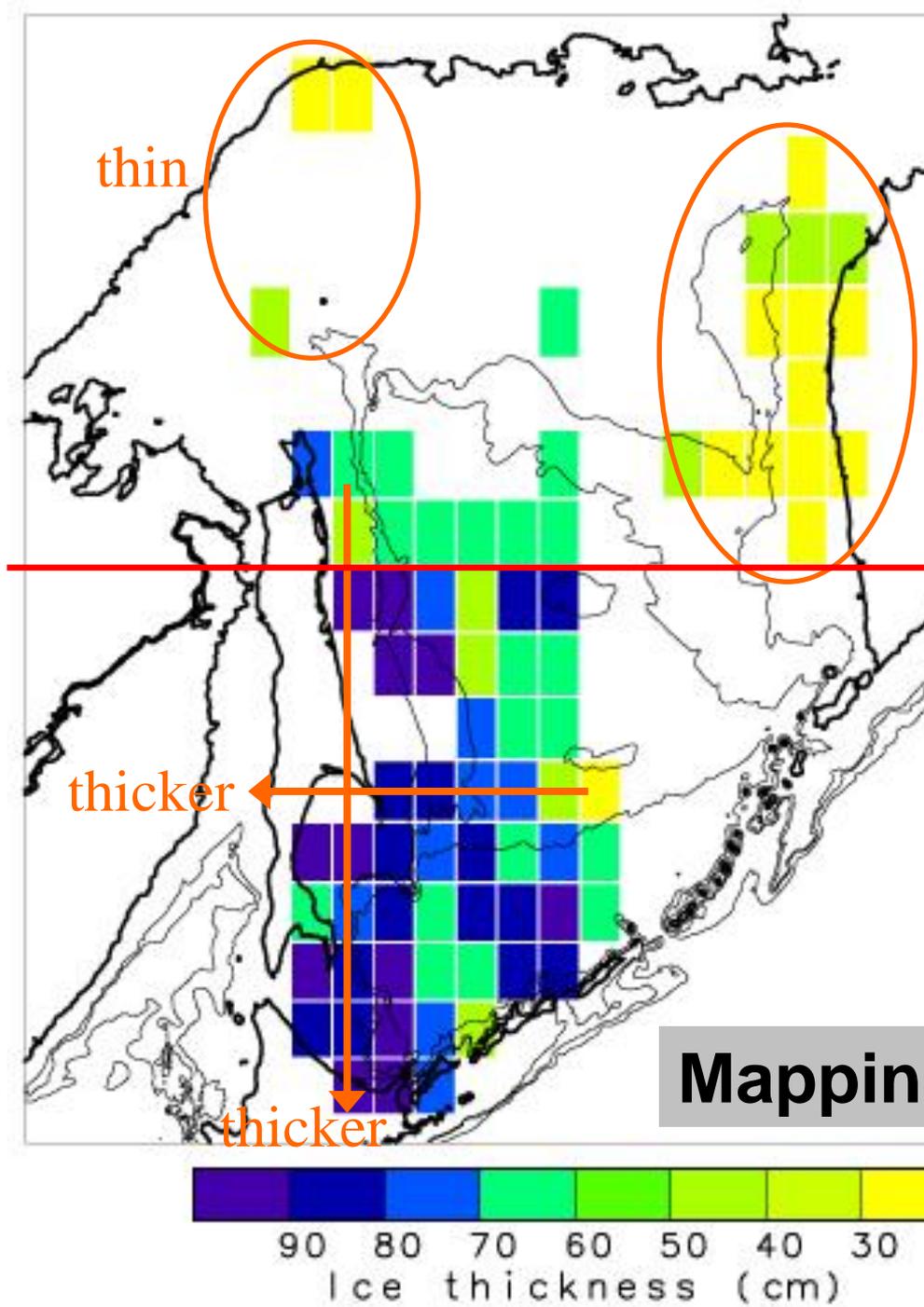




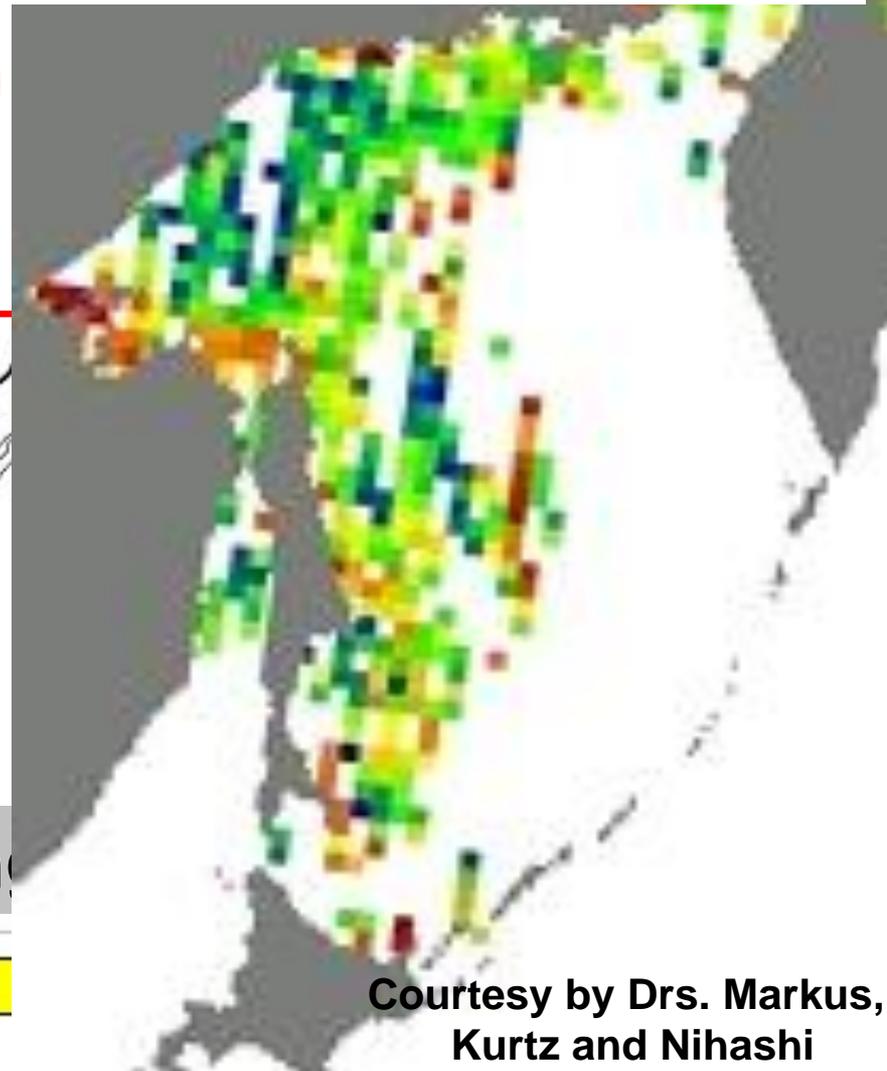


**Average thickness
= 77 cm
from 353 stn.**

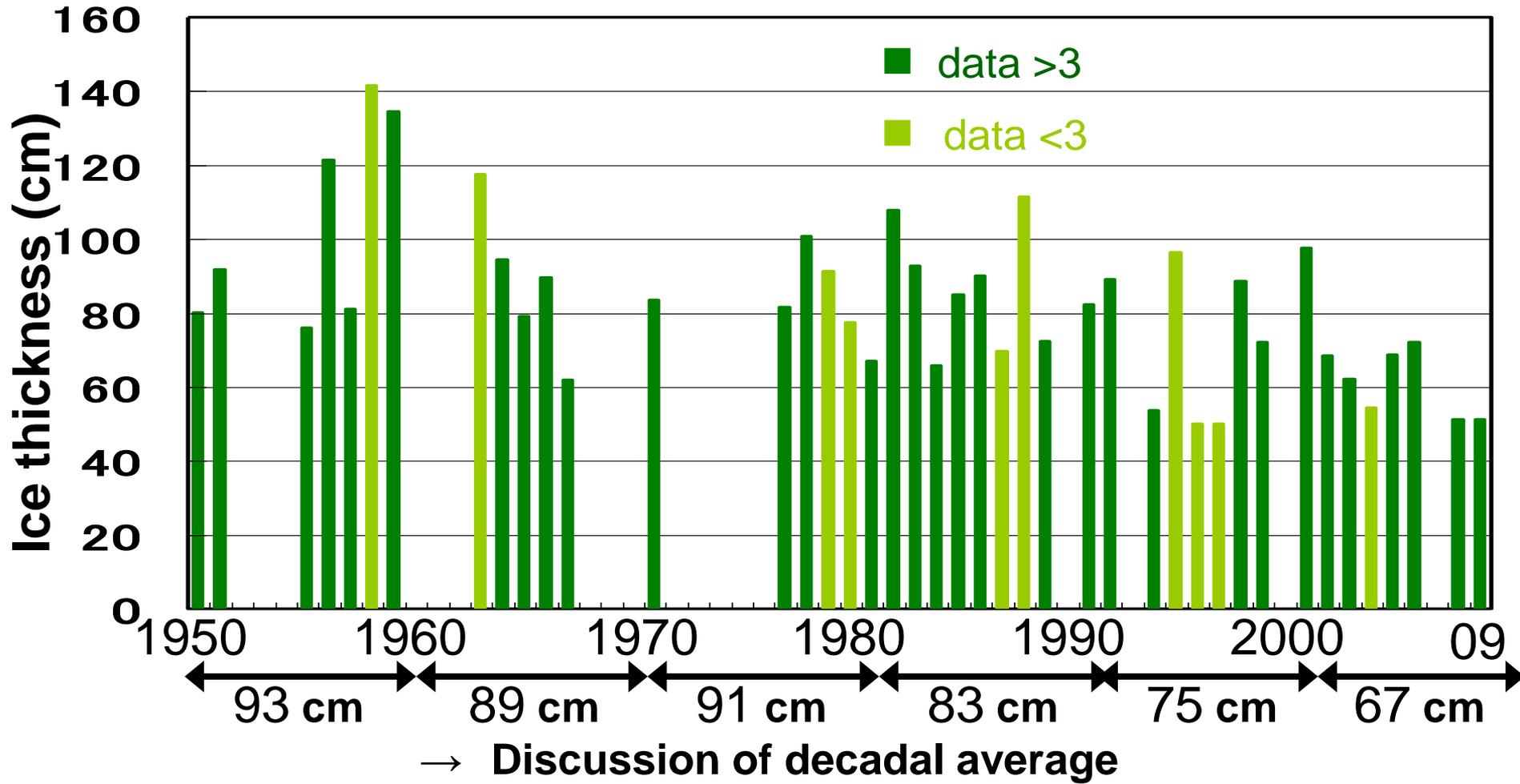
**comparable to
direct observations
of 60 - 120 cm**



ICESat snow-ice freeboat

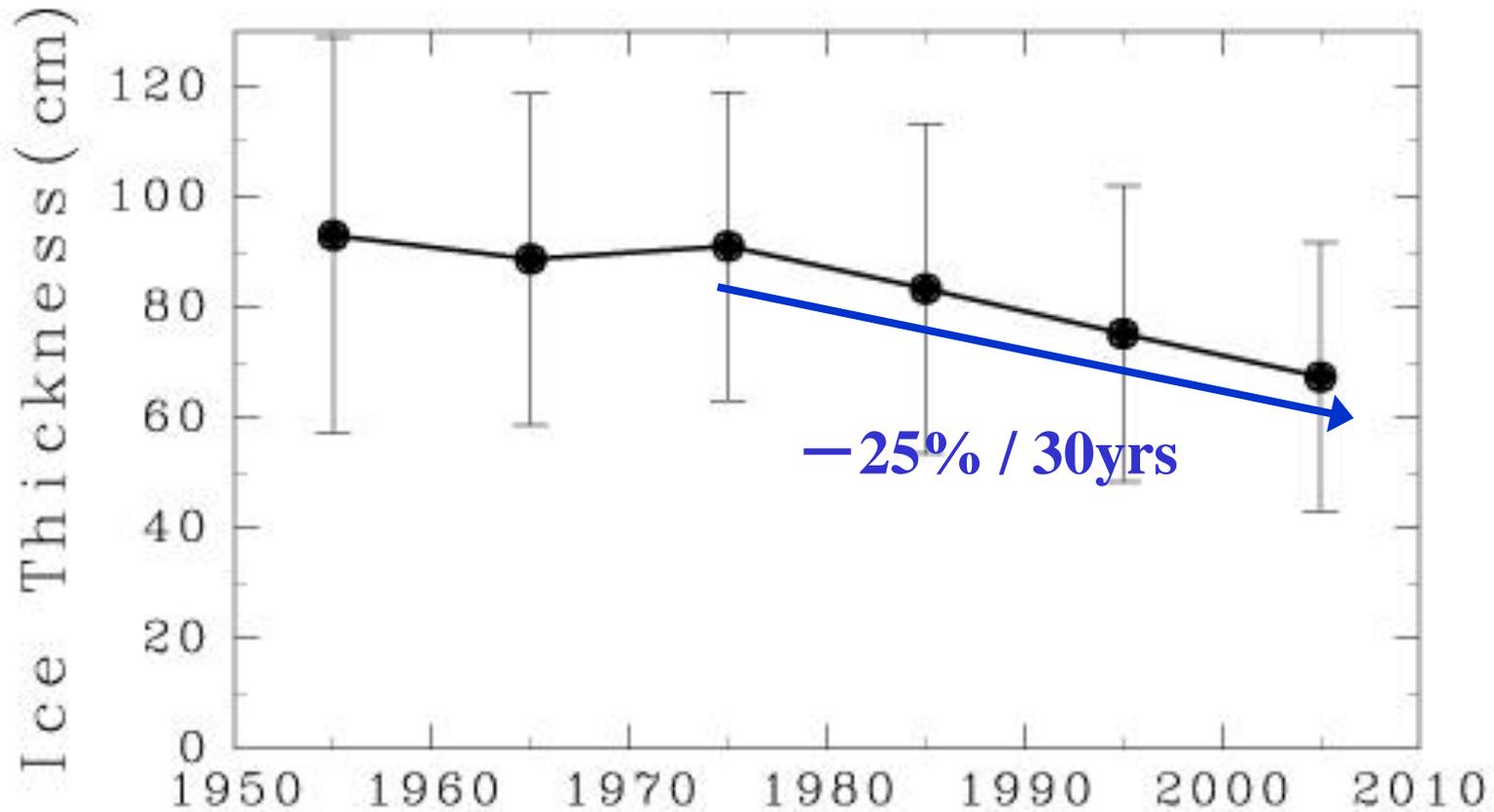


Yearly averaged ice thickness



Data number is limited for statistical discussion of year- to – year variability

Decadal averaged ice thickness



Ice thickness -25% / 30yrs
Ice area -20% / 30yrs

→ Ice volume -40% / 30yrs

Sea ice in the Okhotsk Sea is sensitive to current global warming !