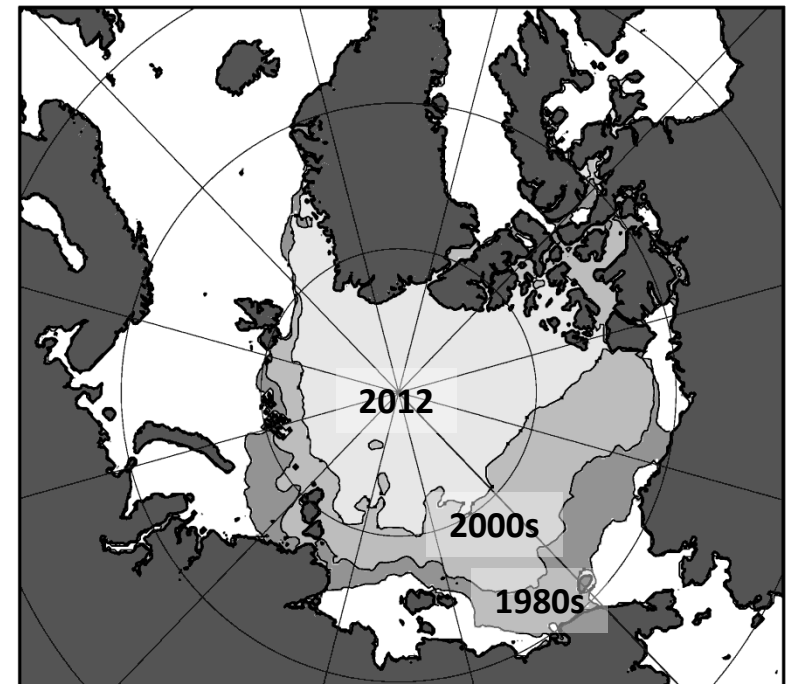
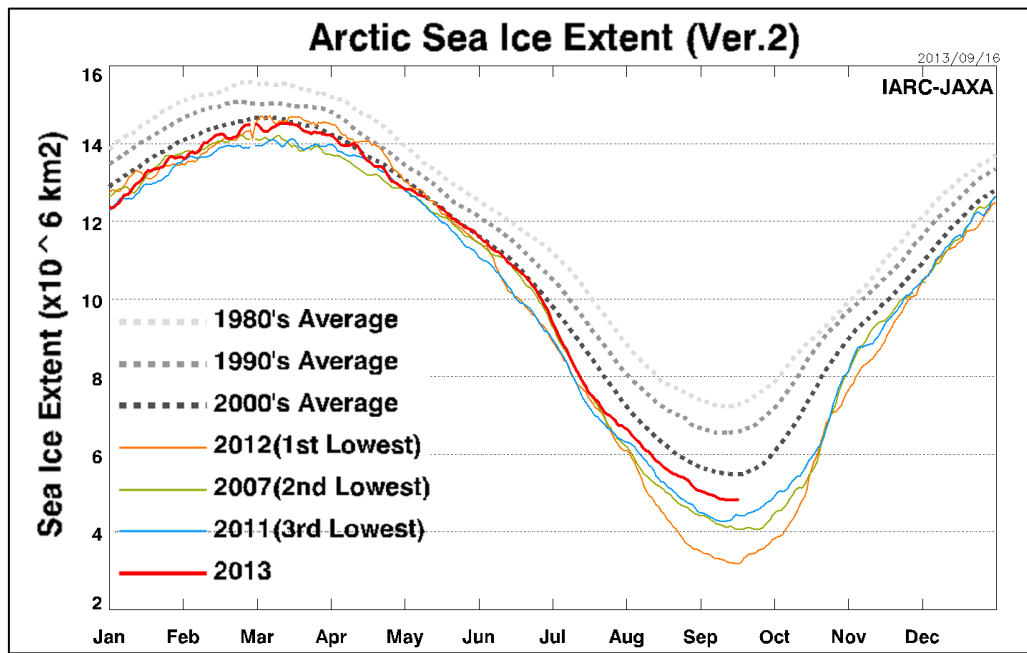


# 6. 海氷・海洋アルベドフィードバック: 北極海氷激減のメカニズム?

## 気候変動に伴う北極海の海氷域の変化

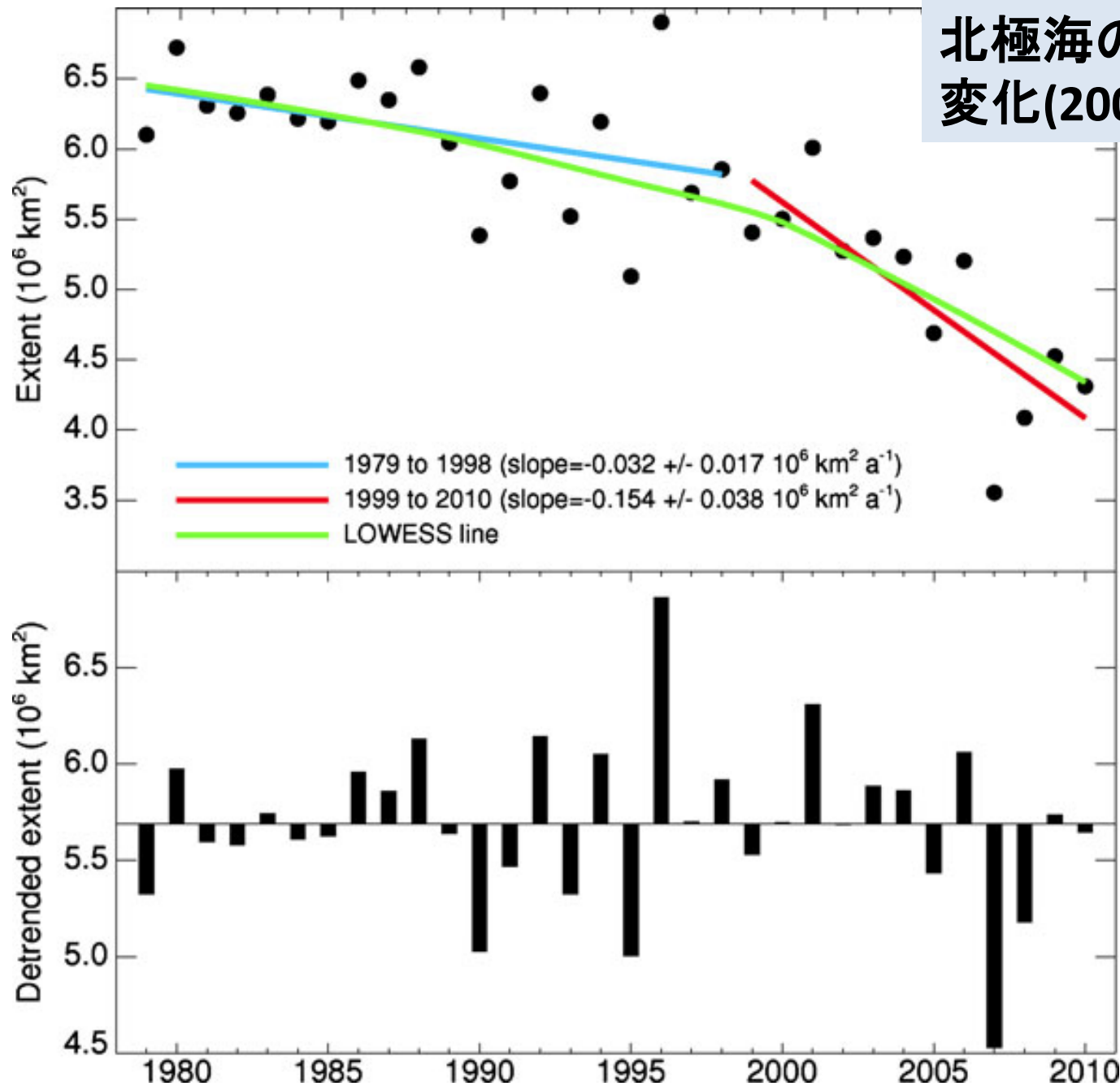
- ・夏季の海氷面積が2000年代以降激減 [e.g. Comiso et al., 2008]
- ・海氷厚の減少 [e.g. Rothrock et al., 2008]
- ・多年氷の減少(季節海氷域化) [Comiso, 2012]

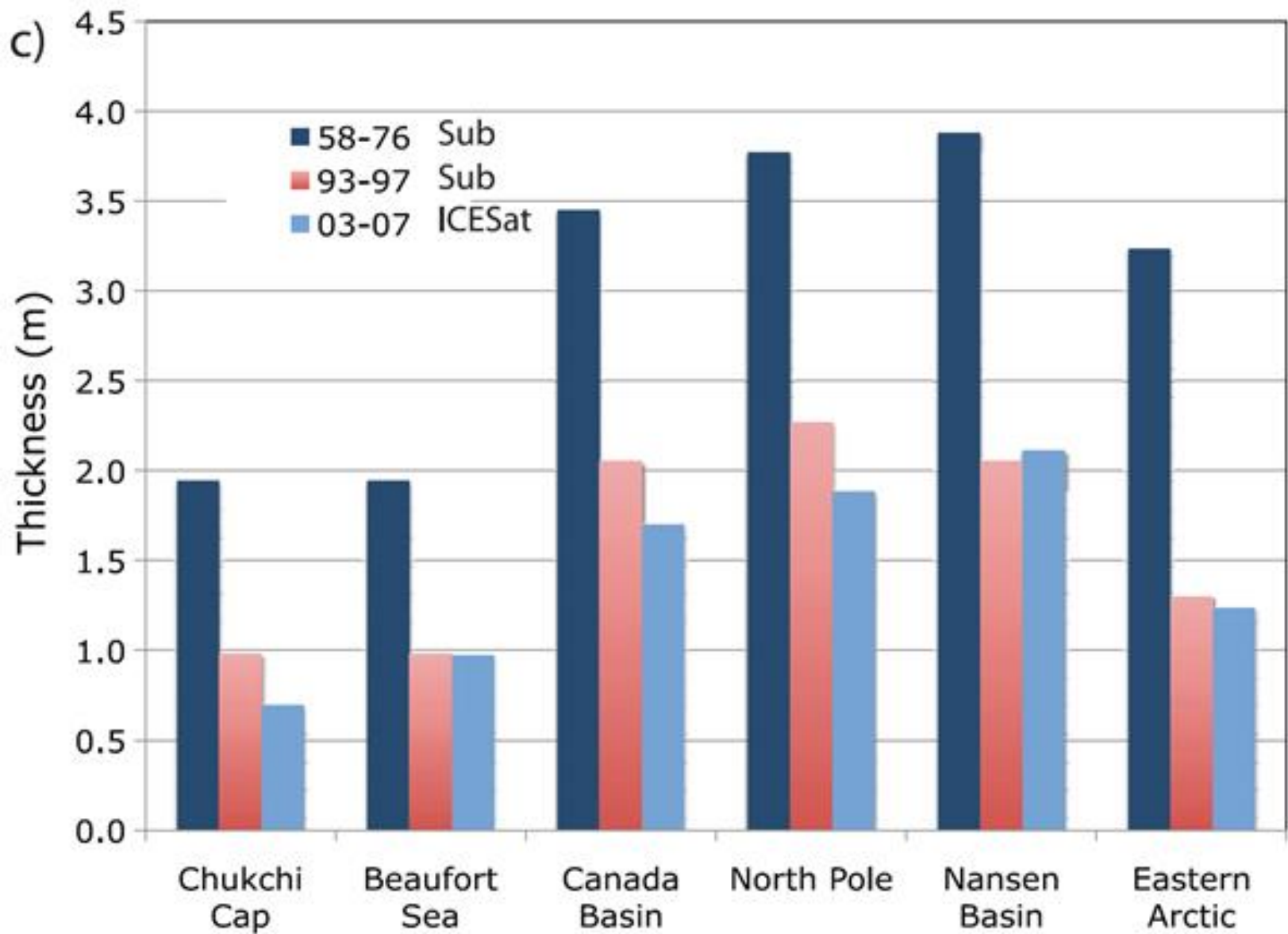
近年の北極海の海氷激減には、様々な要因が関係していると考えられている  
(流出量の増加、融解期の長期化、熱流入の増加など)



近年の季節海氷域化に関連して、  
海氷－海洋アルベドフィードバックが働くようになったかも

# 北極海の夏の海氷面積の変化(2000年以降加速)



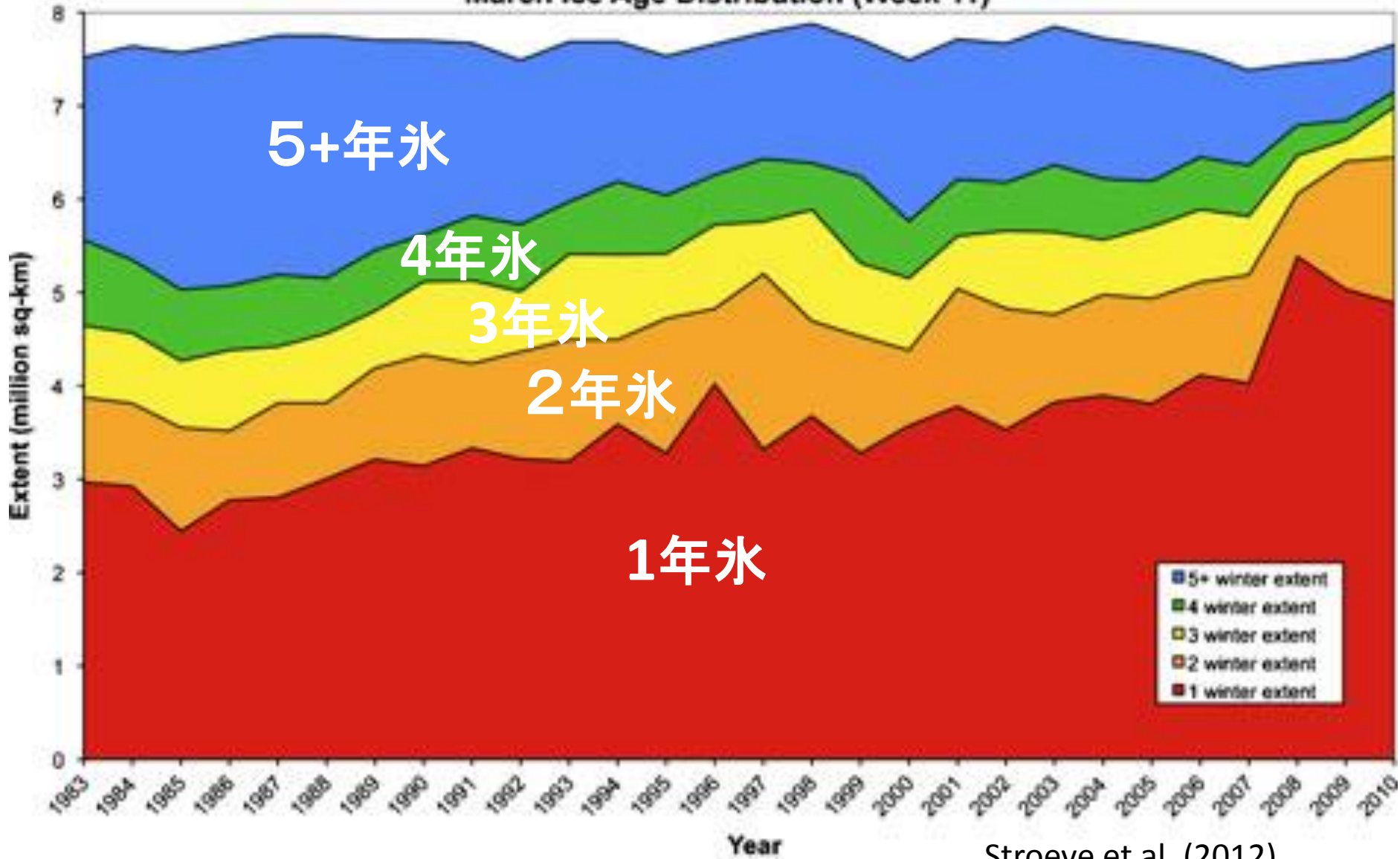


## 潜水艦及びICESatによる北極海の海氷厚

# 北極海の海氷の年齢の変化（多年氷が減り一年氷が増加）

a

March Ice Age Distribution (Week 11)

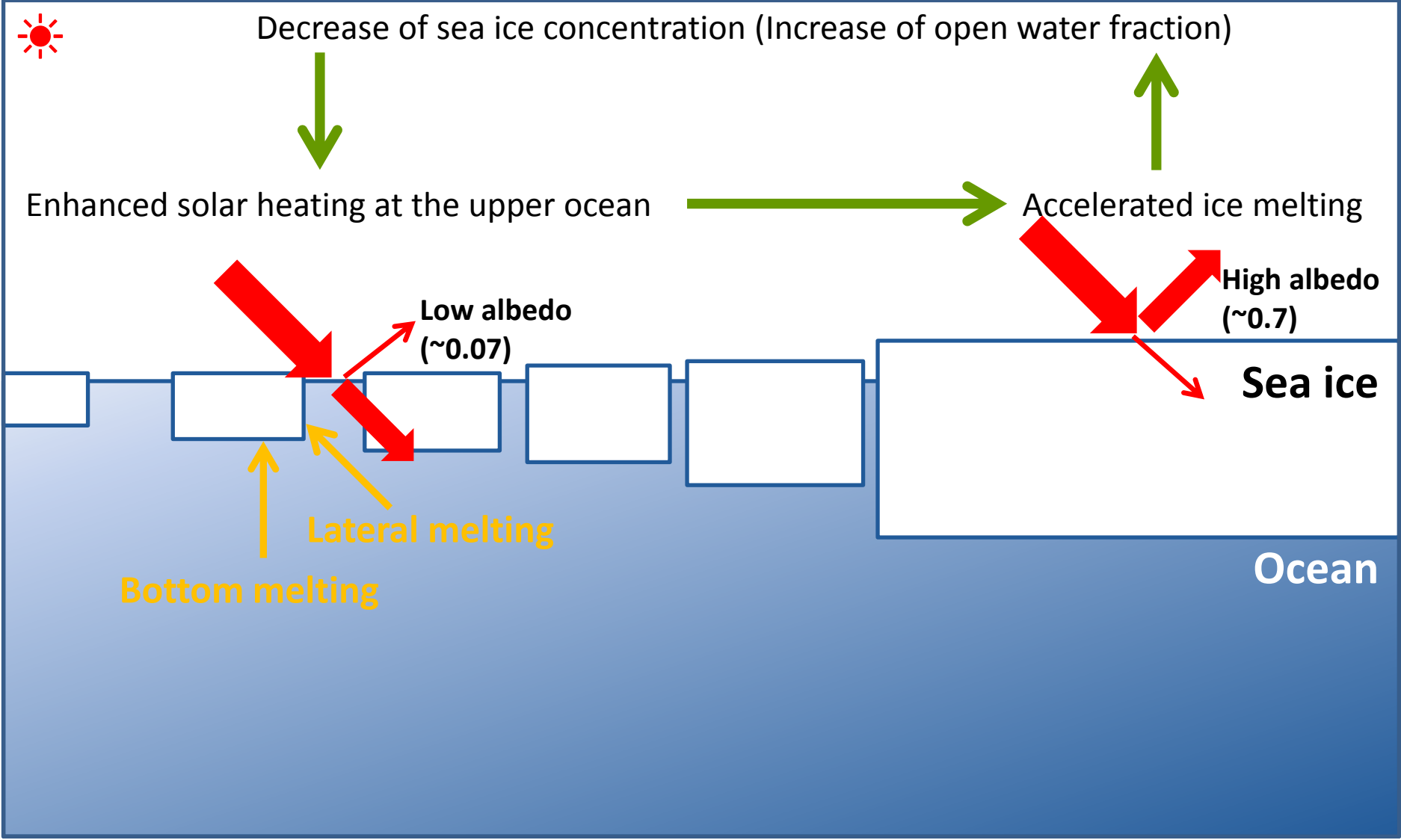


Stroeve et al. (2012)

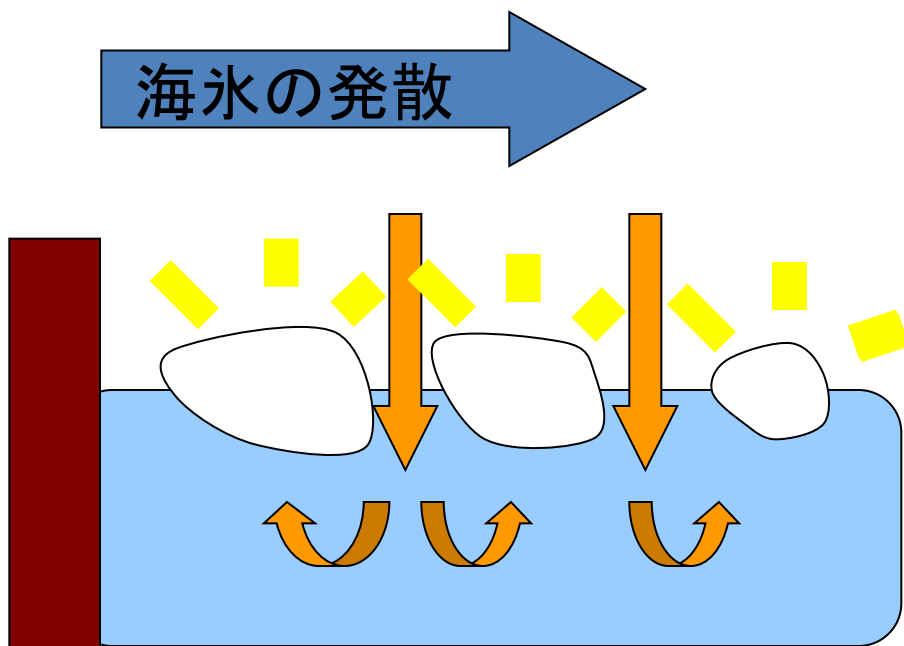
b

# 海水ー海洋アルベドフィードバックとは？

・季節海氷域(南極海やオホーツク海)において、一旦海氷密接度が低下すると開水面から日射が吸収されることで融解が促進され、さらに密接度が減少する正のフィードバック



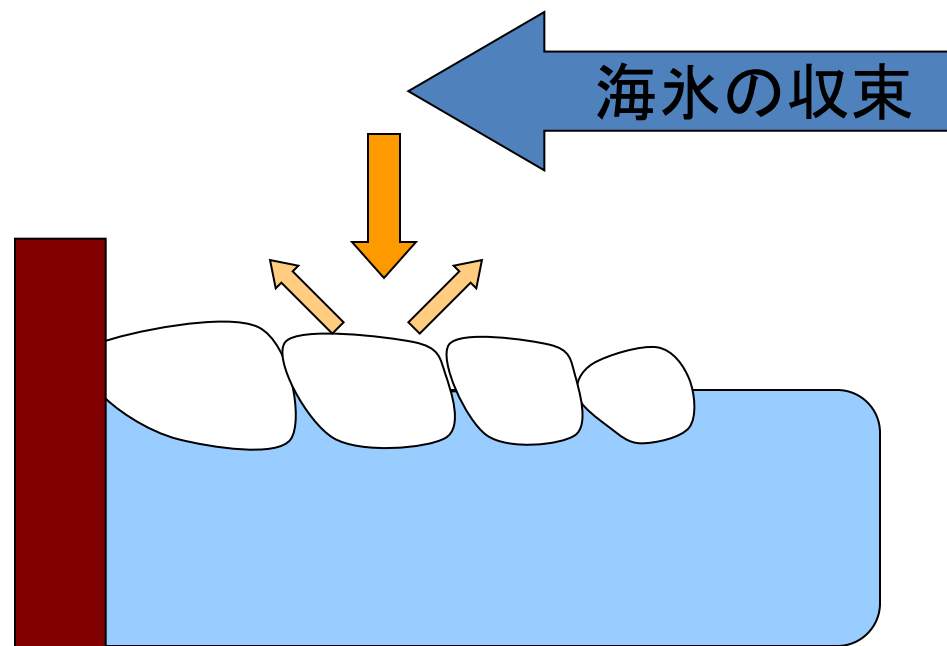
# 海氷・海洋アルベドフィードバック効果



密接度 **低**

開水面での熱の吸収 **大**

海氷融解 **促進**



密接度 **高**

開水面での熱の吸収 **小**

海氷融解 **抑制**

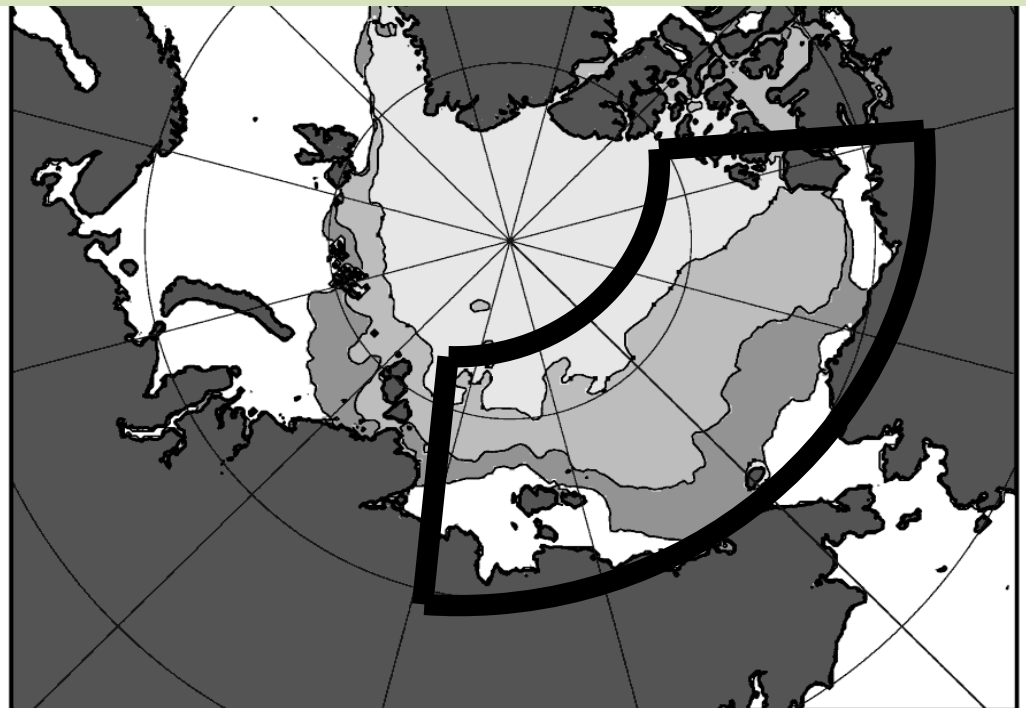
## 北極海では

- ・フィードバックが働く前提条件が満たされているか？
- ・フィードバックを誘発するトリガーとして何があるか？  
海氷が激減している太平洋セクターに着目して解析を行う

## 熱収支解析

$$F_{w,i} = (1 - \alpha_{w,i}) S + Ln_{w,i} + Fs_{w,i} + Fe_{w,i} + Fc_i$$

Net heat flux      Shortwave radiation      Longwave radiation      Sensible heat flux      Latent heat flux      Conductive heat flux

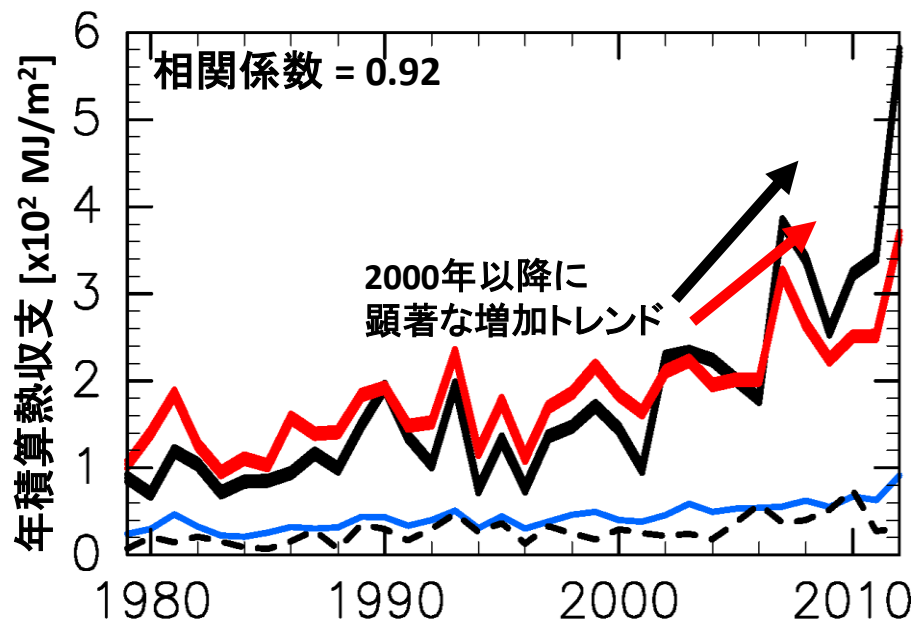
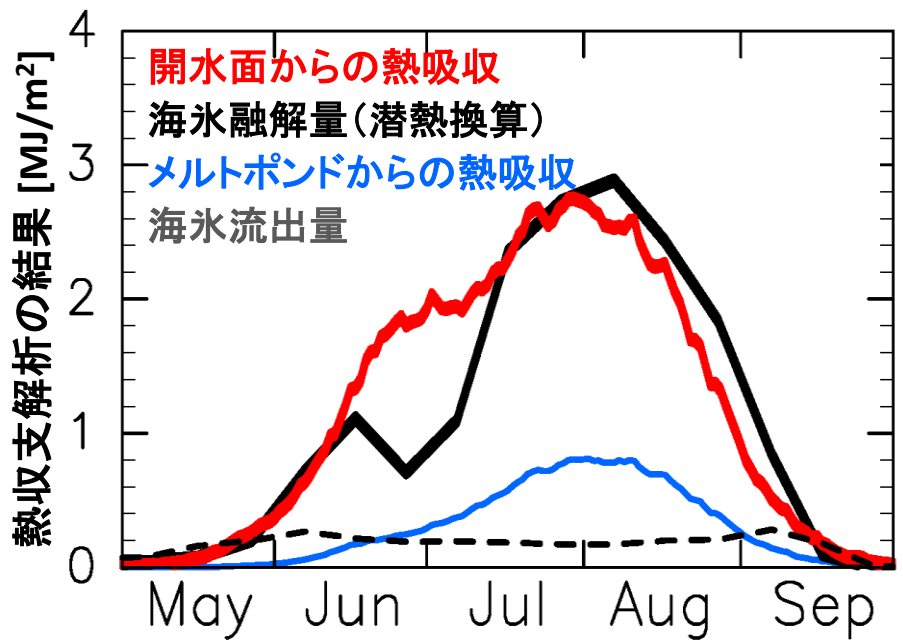
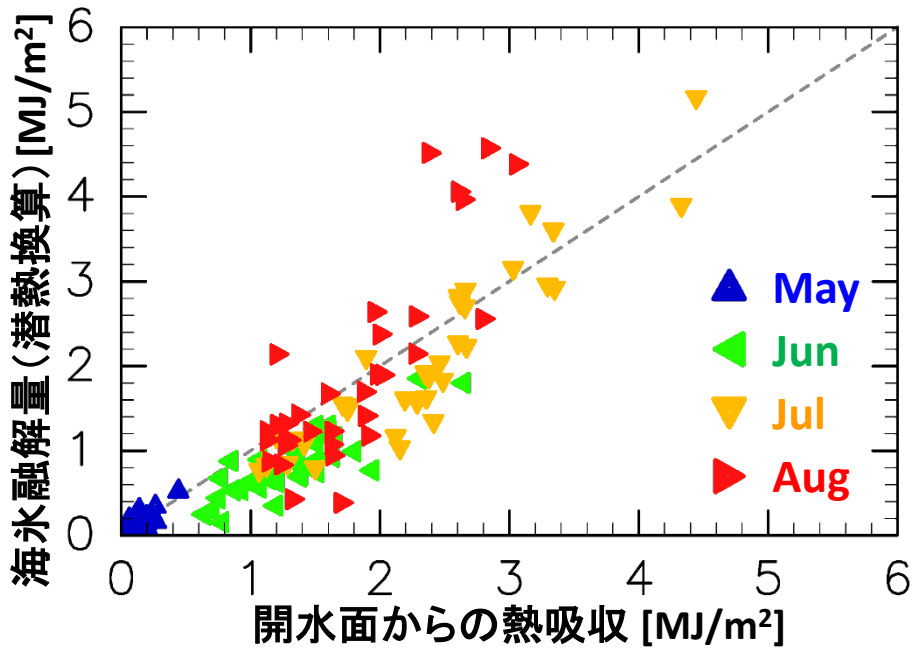




# ☆北極海海氷域(海氷密接度 ≥ 30%)での熱収支解析

- ・海氷域では開水面から吸収される熱(主に日射)が支配的である。
- ・海氷後退は融解によるものがほとんどであり、流出の影響は小さい。
- ・開水面から吸収される熱(日射)と海氷融解の季節変動/経年変動が良い対応を示す。

海氷ー海洋アルベドフィードバックが働いたための前提条件が満たされている



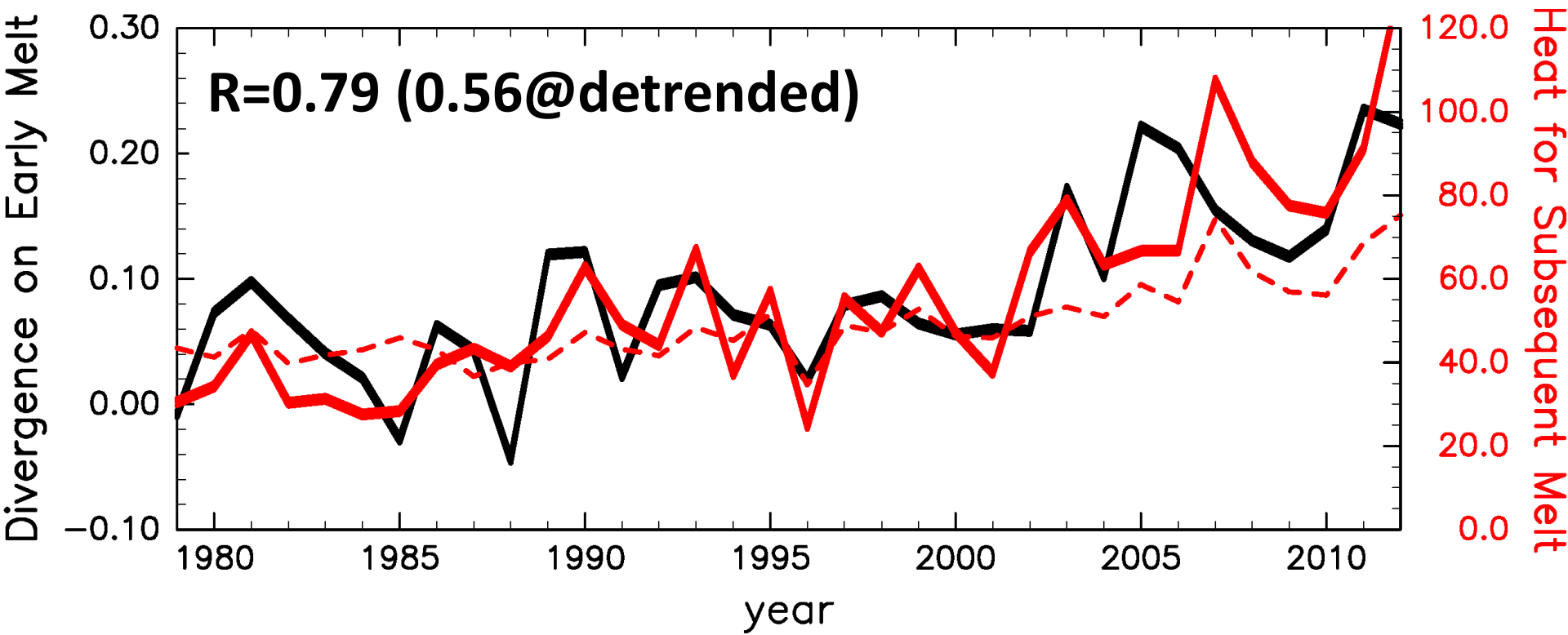




# 海水発散 (5月中旬-6月上旬) vs. 海水融解 (6月中旬-8月上旬)

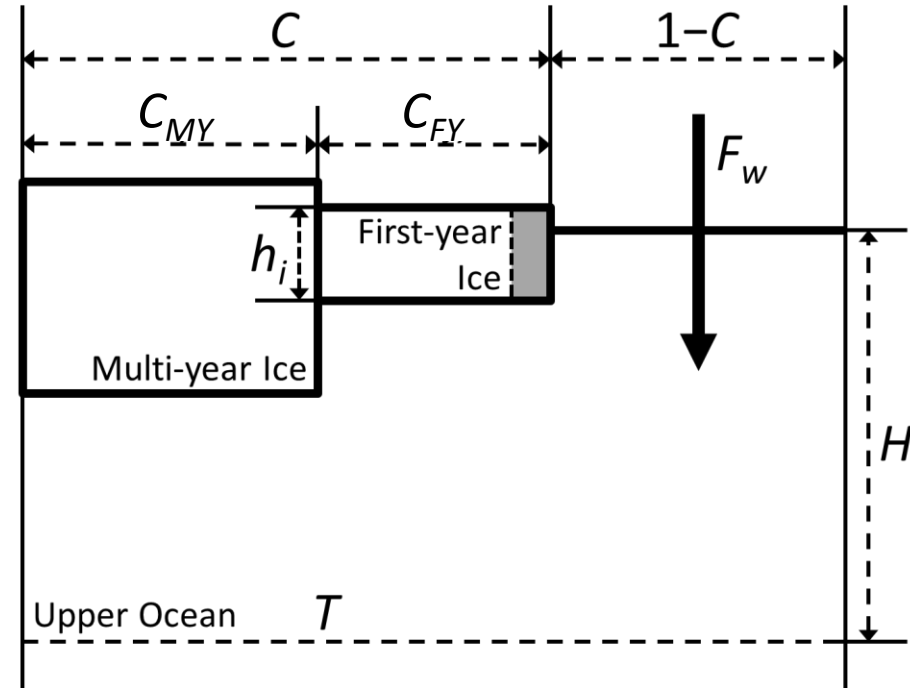
- 融解初期の海水発散は、1-2ヶ月後の海水融解と(北極海全体とも)良い対応関係を示す
- ※2000年以降は海水発散にも有意な正のトレンドが見られる

海水-海洋アルベドフィードバックがより効きやすくなったことが近年の海水激減にも影響していることを示唆する



## 簡略化モデルの概要

- (1) 開水面から吸収された熱量は海水温の上昇および海水融解に使用される
- (2) 海水密接度 ( $C$ ) は1年氷の融解のみによって減少、多年氷の融解は無視する
- (3) 海水融解は海水温の結氷点 ( $-1.83^{\circ}\text{C}$ ) からの差によって決定する



- (1) および (2) より、

$$c_w \rho_w H \frac{dT}{dt} = F_w (1-C) + \frac{C}{C_{FY}} L_f \rho_i h_i \frac{dC}{dt} \quad (4)$$

- (2) および (3) より、

$$-L_f \rho_i h_i \frac{dC}{dt} = c_w \rho_w K_b C_{FY} (T - T_f) \quad (5)$$

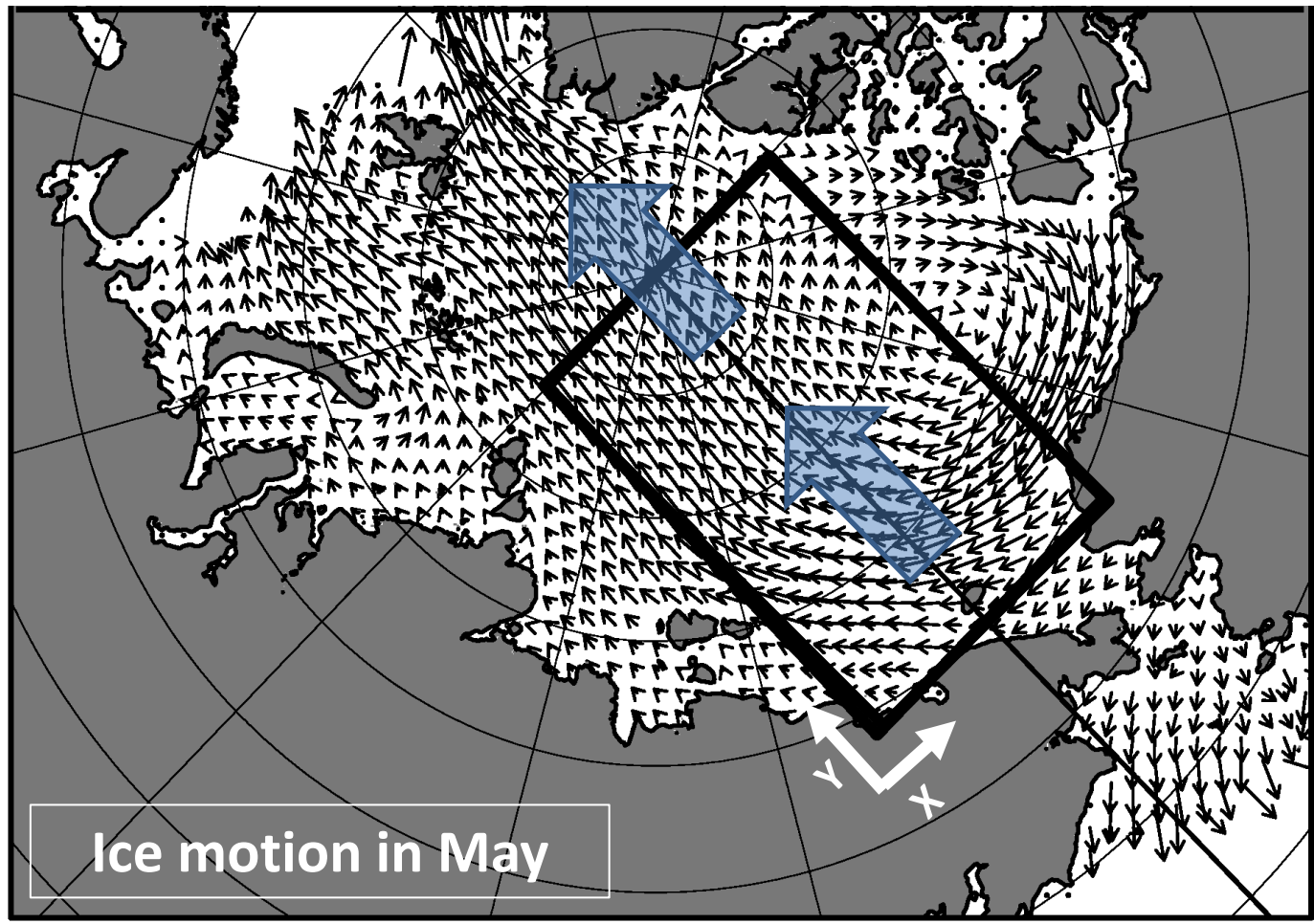
- (4) および (5) より、

$$H \frac{dT}{dt} = F_w \frac{1-C}{c_w \rho_w} - K_b C (T - T_f) \quad (6)$$

・モデルに漂流速度の効果を導入する

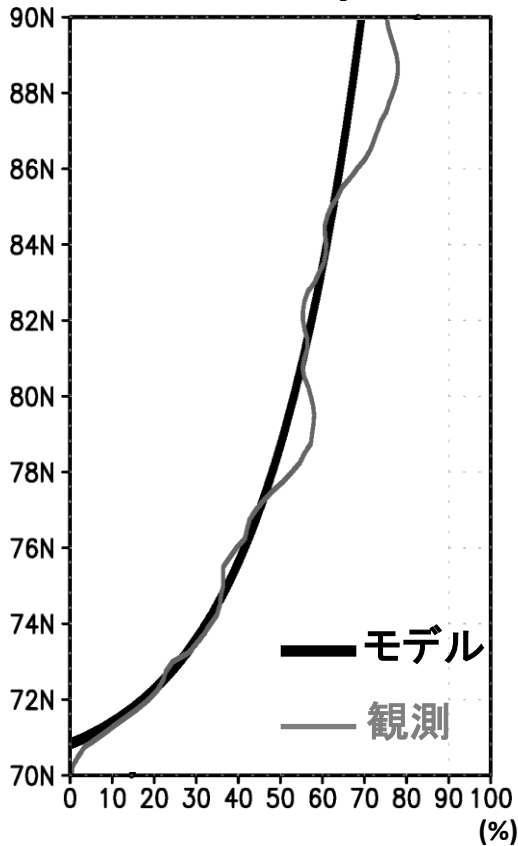
$$\frac{dC}{dt} = \underbrace{-a_0 C_{fy} \frac{T-T_f}{h_i}}_{\text{Melting of ice}} - \underbrace{U \frac{\partial C}{\partial y}}_{\text{Advection of ice}} + \underbrace{A_H \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}}_{\text{Horizontal diffusion of ice}} + \underbrace{\psi_c}_{\text{Ice resistance (internal stress)}} \quad (7)$$

Melting of ice      Advection of ice      Horizontal diffusion of ice      Ice resistance (internal stress)

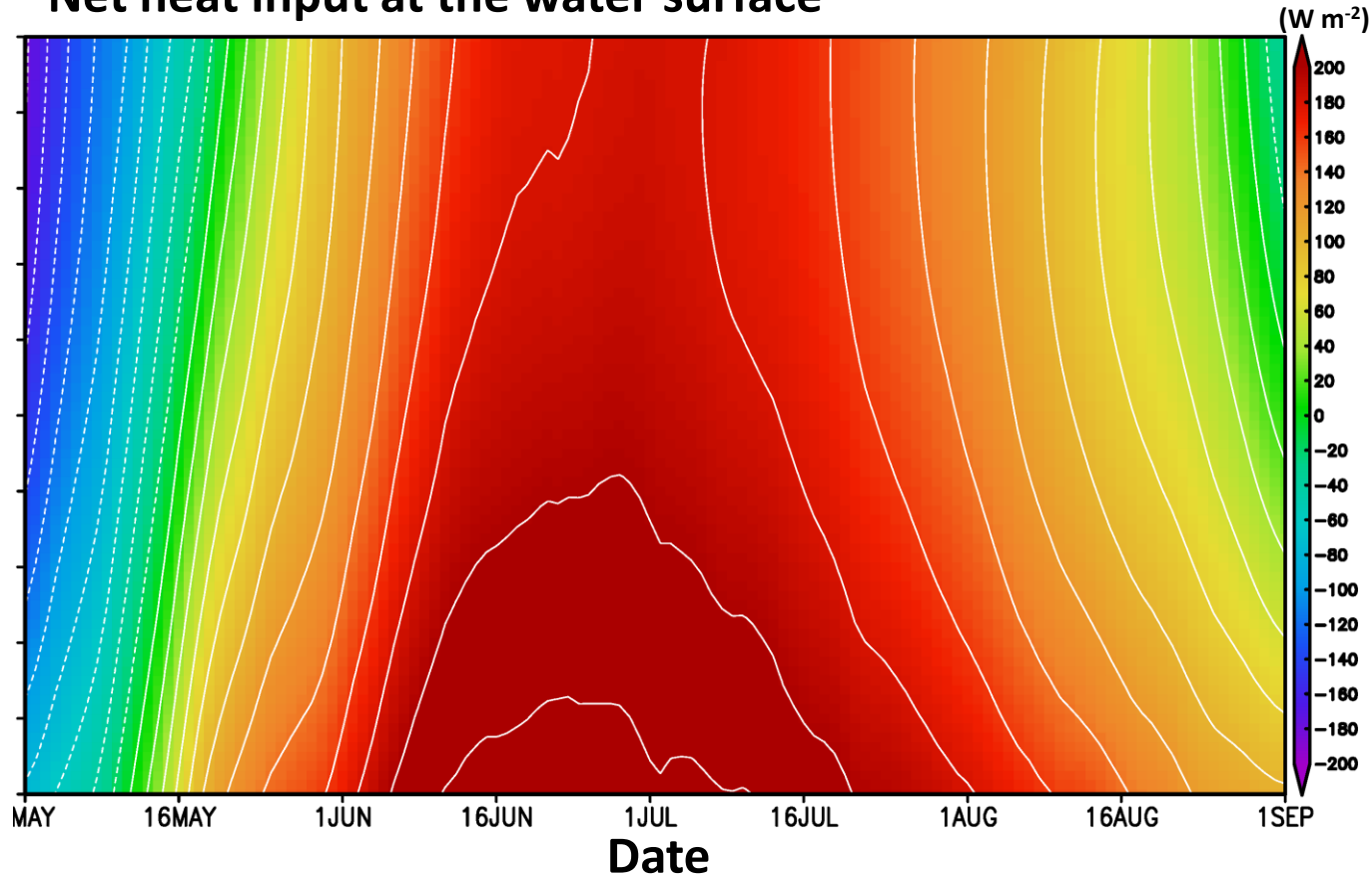


- ・平均氷厚を1m、初期の海氷密接度を99%、表面混合層の厚さを15mとした。
- ・バルク熱交換係数  $K_b$  を  $1.2 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  とした。
- ・ $C_{MY}$ の初期値および熱フラックス $F_w$  を衛星観測データに基づいて与えた。

Initial Multi-year ice



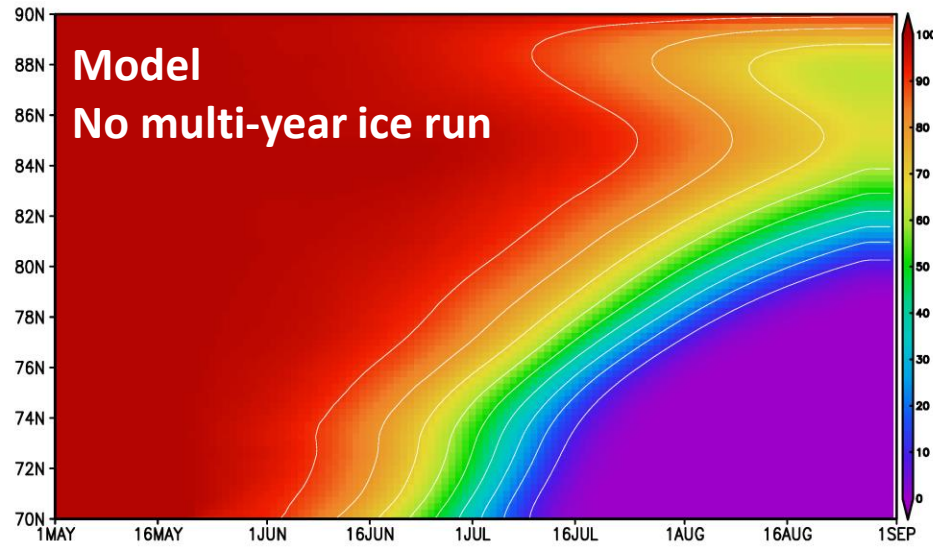
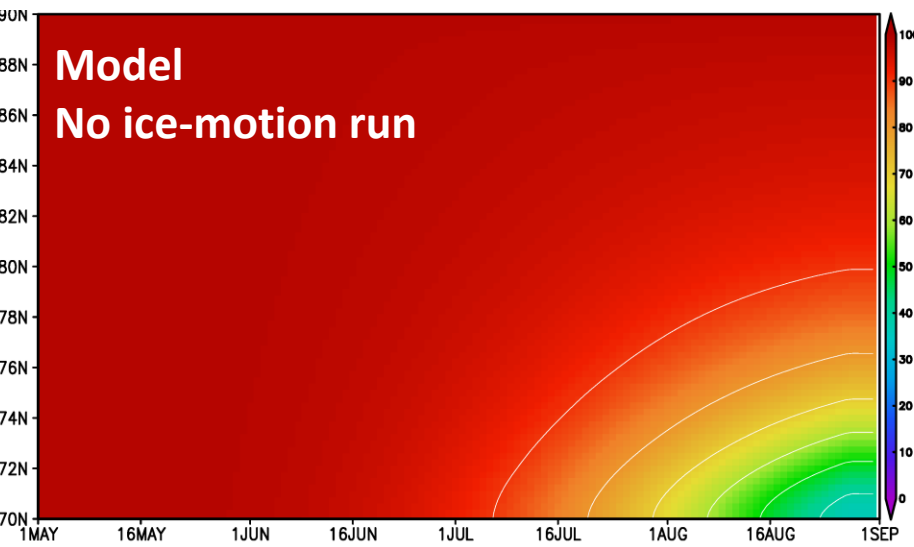
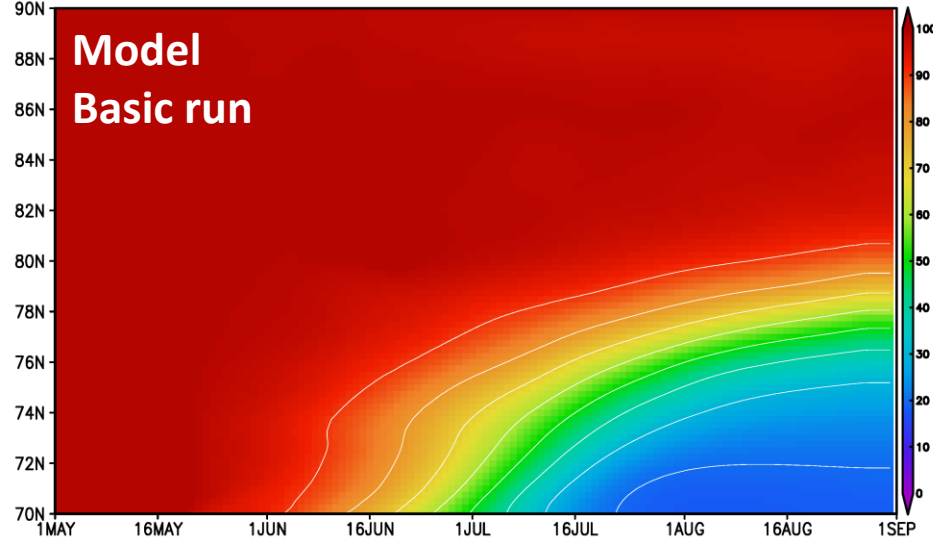
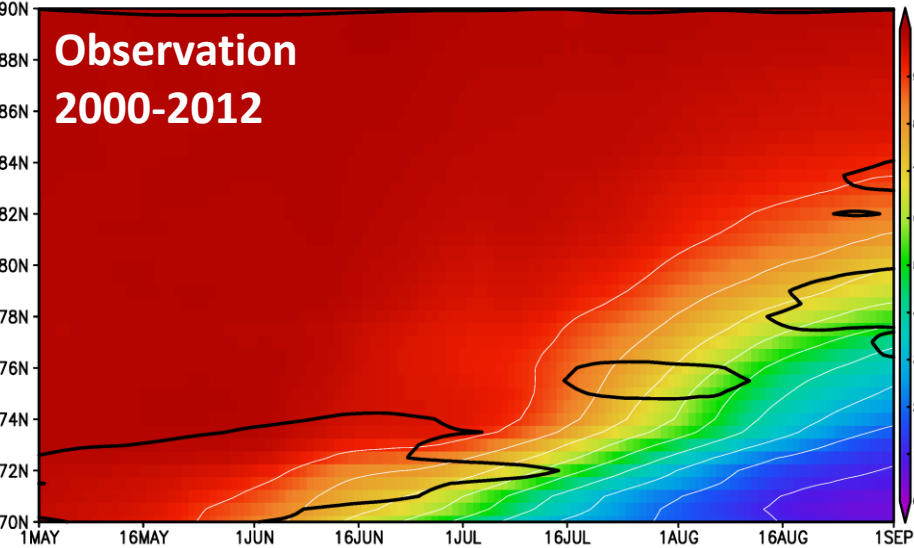
Net heat input at the water surface



# 気候値(2000-2012年)におけるモデル実験

・簡略化モデルに熱フラックス、漂流速度および多年氷分布を与えることにより、海氷後退を再現することに成功した。

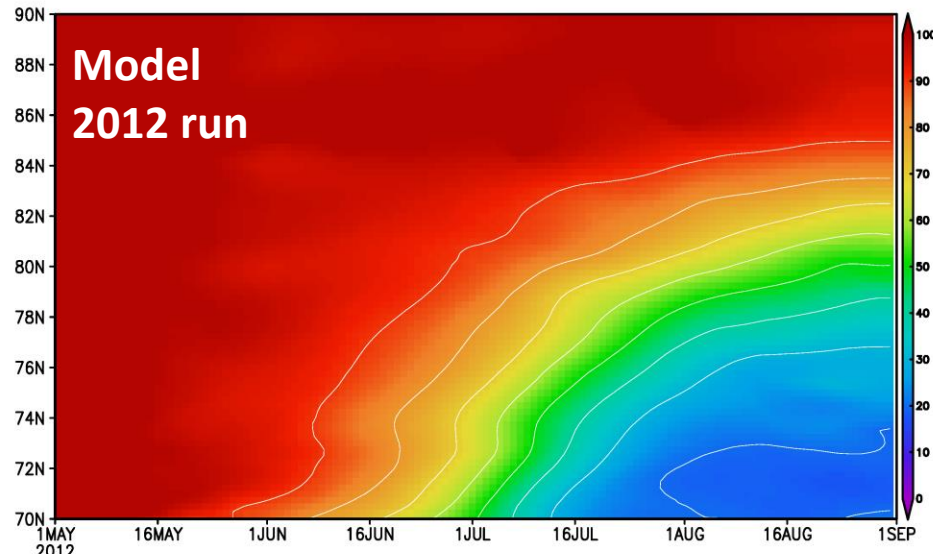
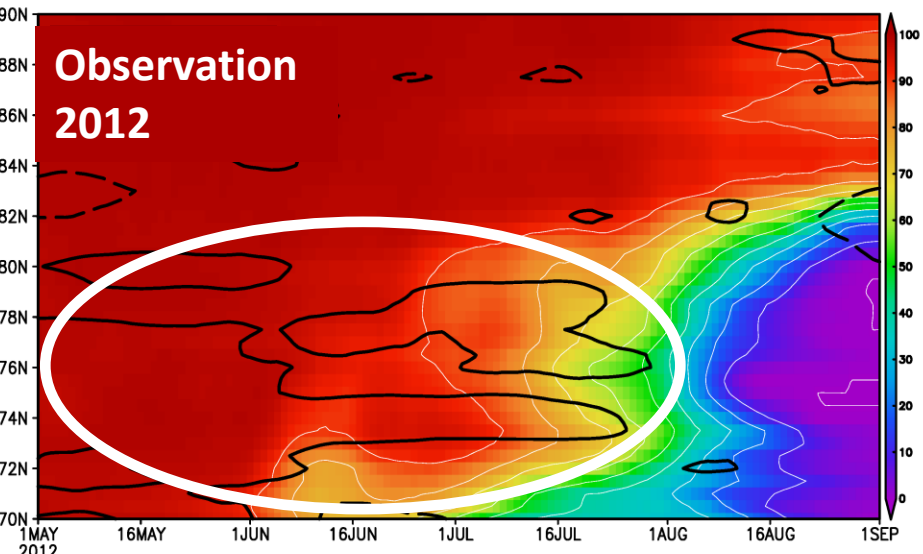
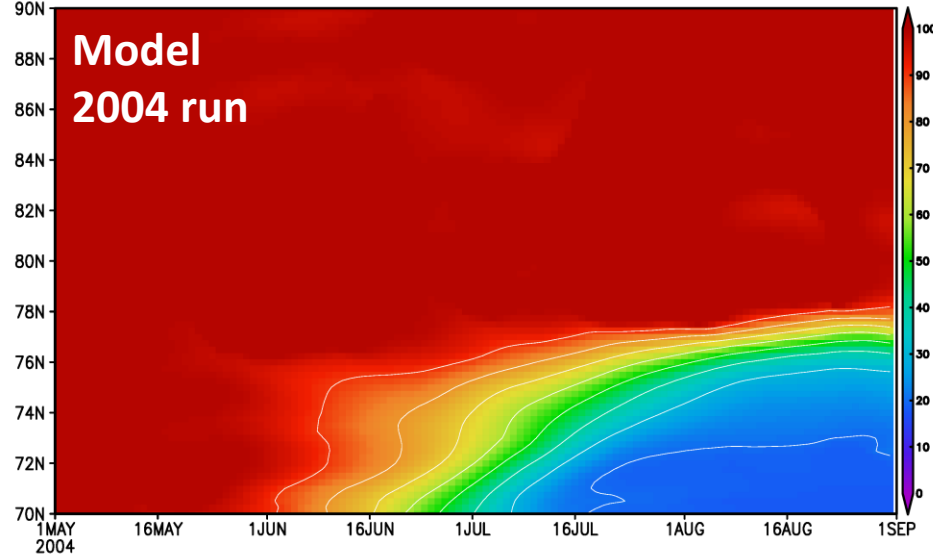
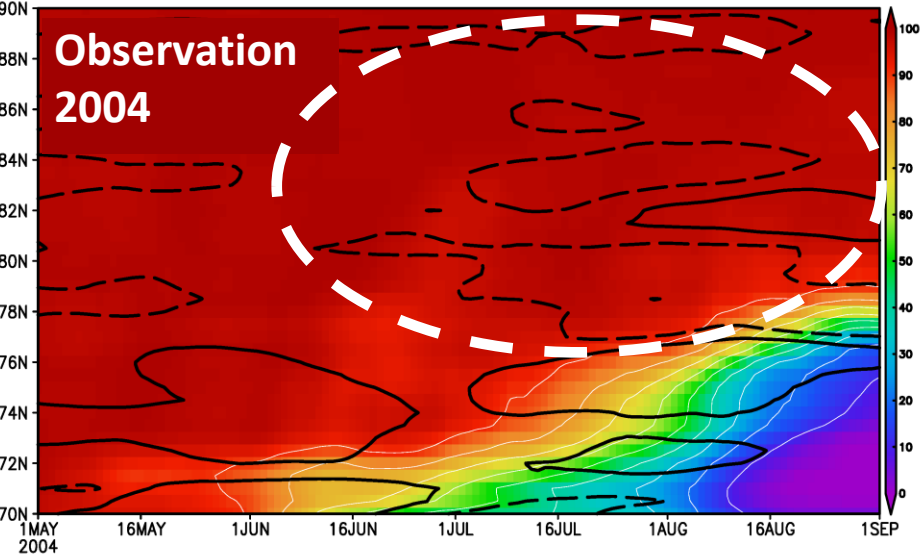
→海氷-海洋アルベドフィードバックが北極海の海氷後退の季節変動に影響している



# 2004年および2012年の再現実験

・漂流速度のみの変更によって、極端な年の海水後退を再現することができた。

→海氷－海洋アルベドフィードバックが北極海における海水後退の経年変動もコントロールしていることが示唆される





# 海氷後退の時間スケールについて

簡略化モデルより

$$-L_f \rho_i h_i \frac{dC}{dt} = c_w \rho_w K_b C_{FY} (T - T_f) \quad (5)$$

$$H \frac{dT}{dt} = F_w \frac{1-C}{c_w \rho_w} - K_b C (T - T_f) \quad (6)$$

式(5)および(6)をまとめると

$$\frac{d(1-C)}{dt} = \frac{F_w}{L_f \rho_i h_i} (1-C) - \frac{c_w \rho_w H}{L_f \rho_i h_i} \frac{d(T - T_f)}{dt} - \frac{c_w \rho_w K_b C_{MY}}{L_f \rho_i h_i} (T - T_f) \quad (7)$$

$F_w = const$  を仮定すると

$$(1-C) = \beta e^{\left(\frac{F_w}{L_f \rho_i h_i}\right) t} + \gamma(t) \quad (8)$$

海氷後退の時間スケールは  $\frac{L_f \rho_i h_i}{F_w}$  であり、初夏 ( $F_w = 100 \text{ W m}^{-2}$ ) の場合29日となる。

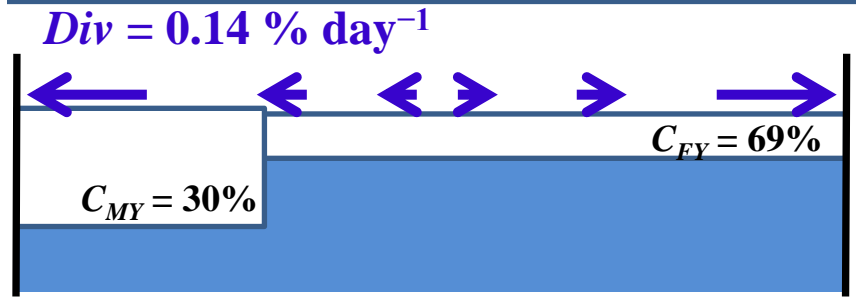
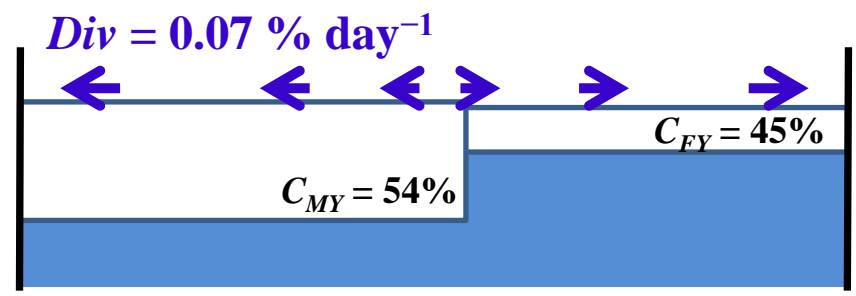
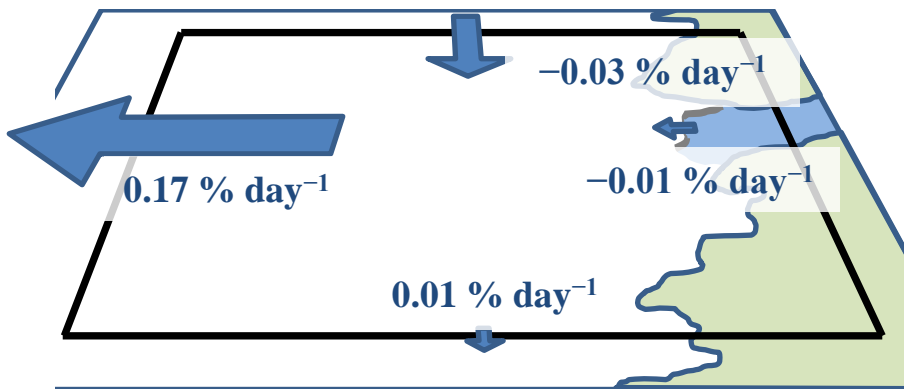
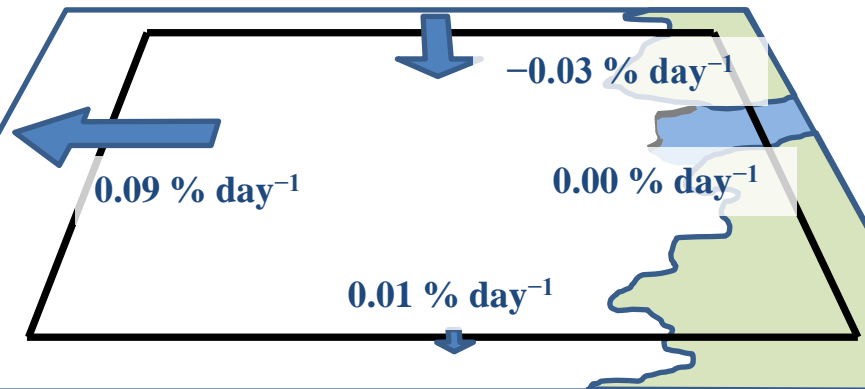
→この結果は海氷発散が融解に影響するラグタイムとも整合的である

まとめ

mid-May to early-June

(a) 1979-1999

(b) 2000-2012



End of August

