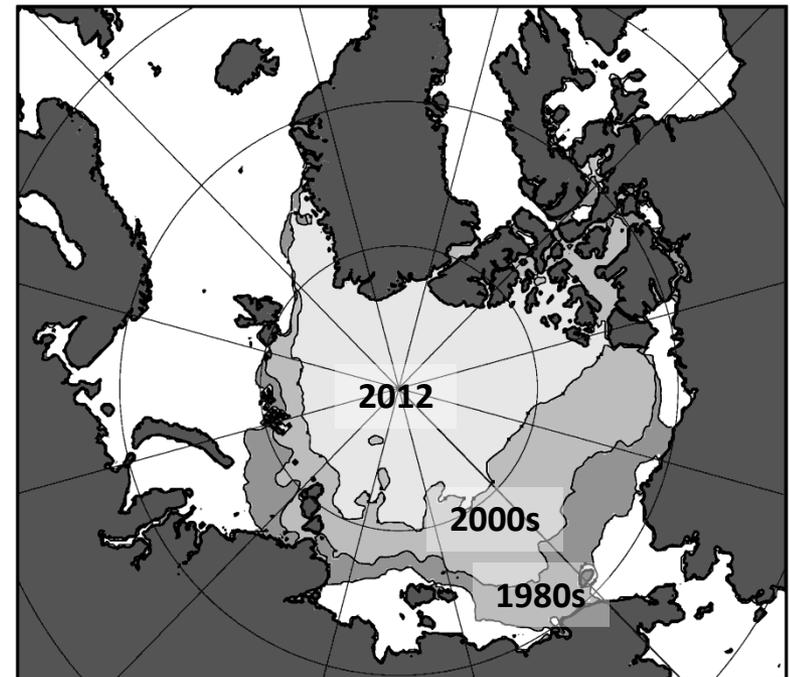
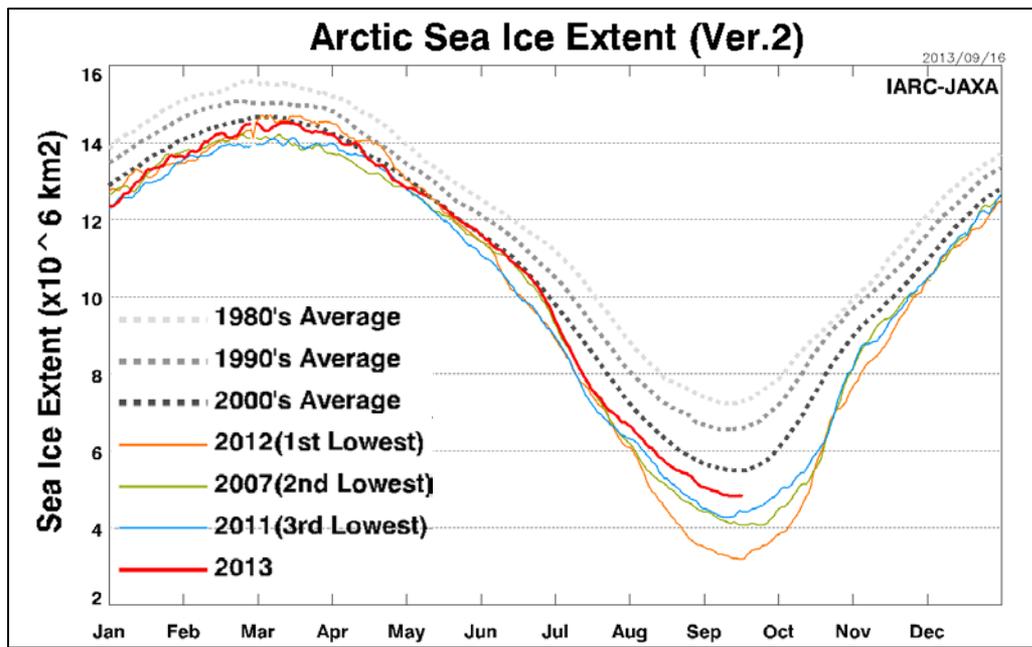


6. 海氷・海洋アルベドフィードバック: 北極海氷激減のメカニズム?

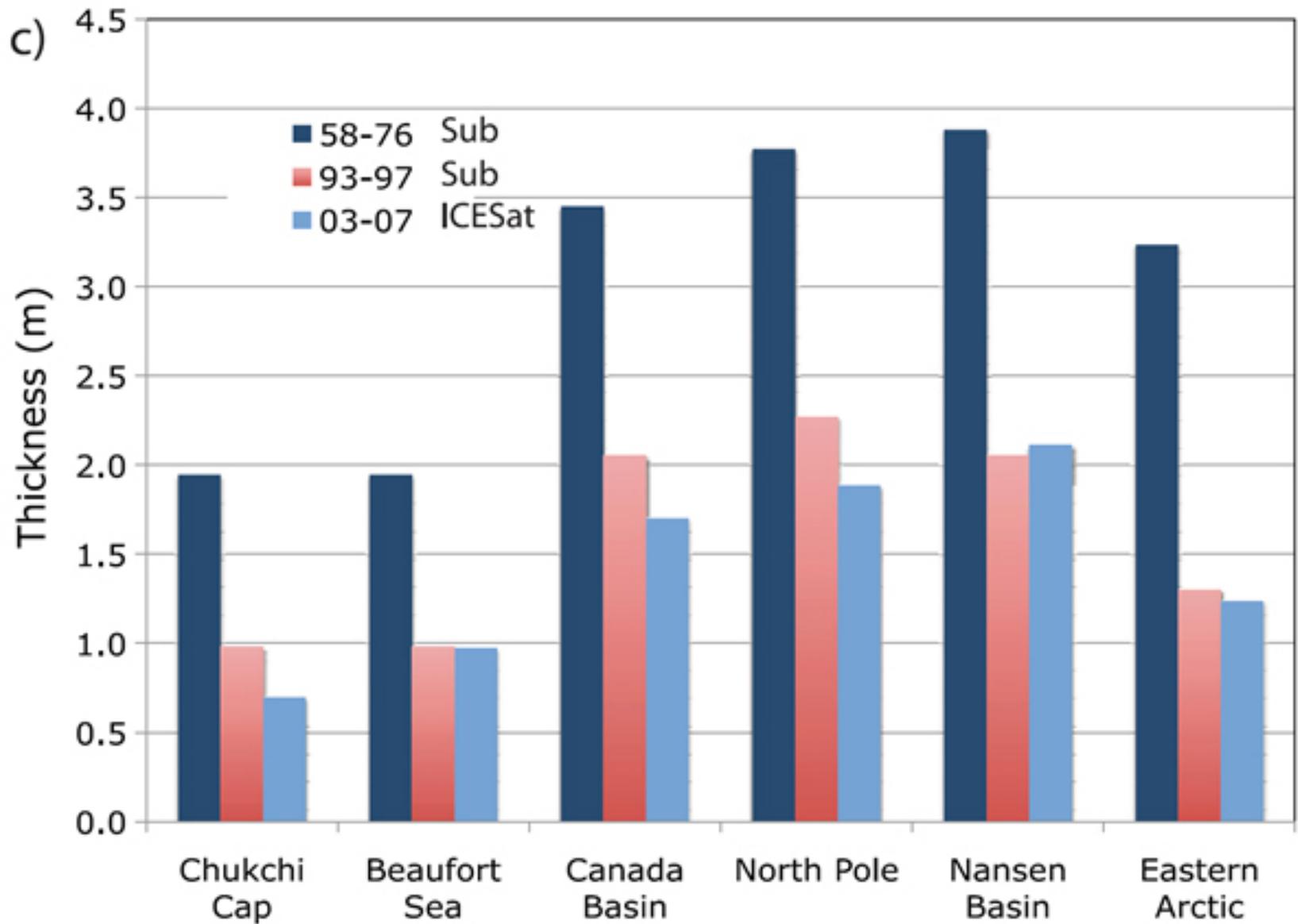
気候変動に伴う北極海の海氷域の変化

- ・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

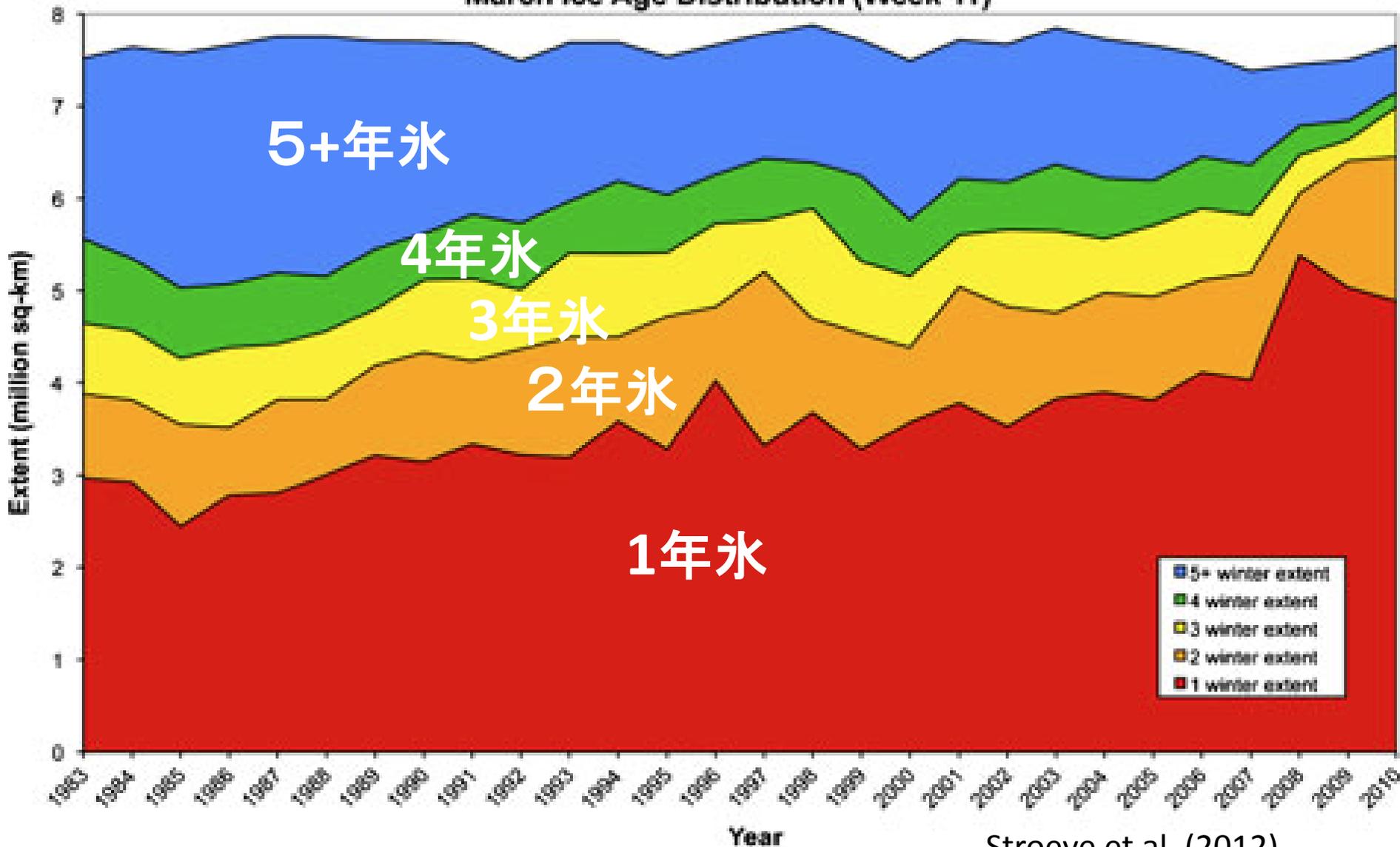


潜水艦及びICESatによる北極海の海氷厚

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)

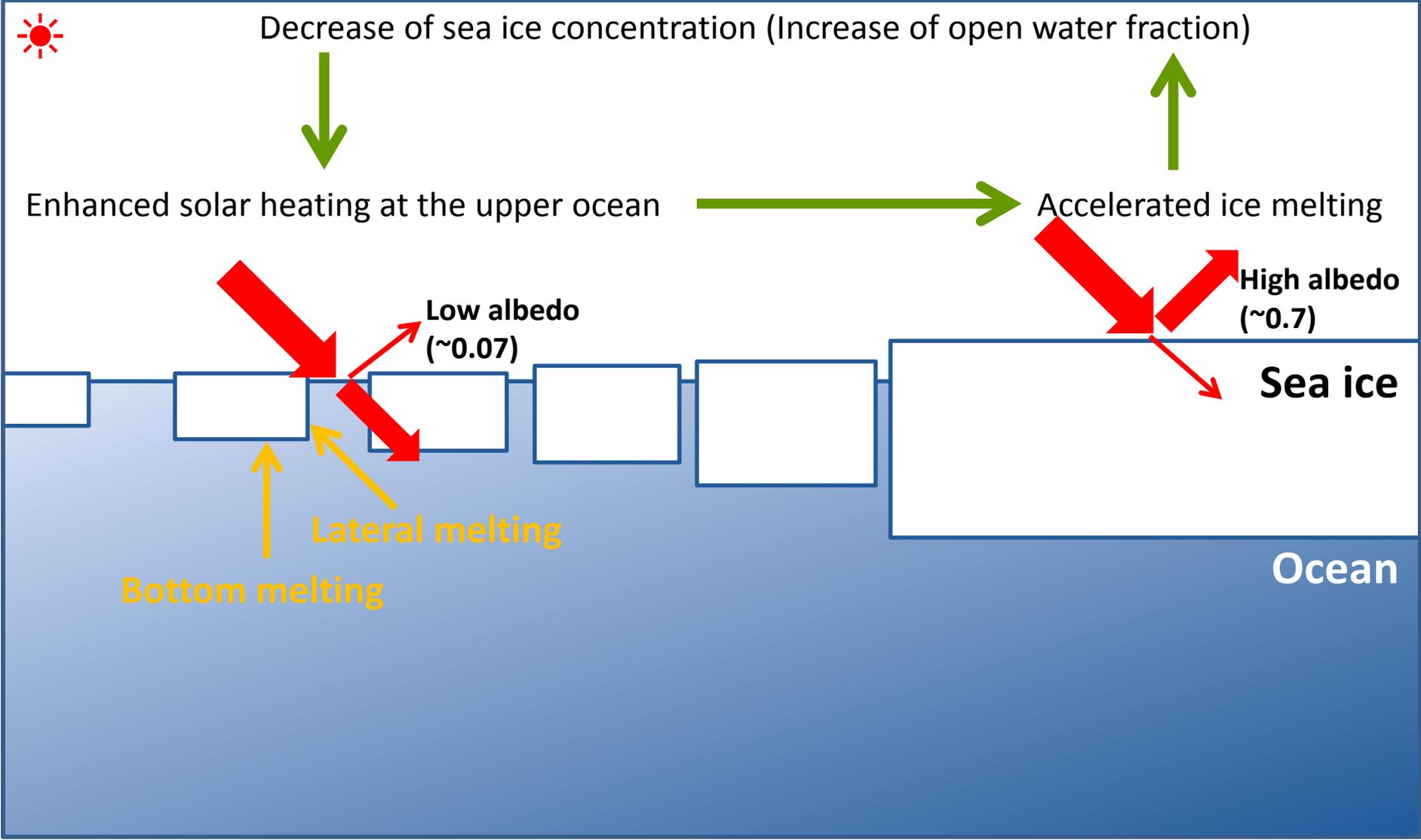


Stroeve et al. (2012)

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



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

- ・熱収支解析は海氷域（海氷密接度 $\geq 30\%$ ）で1日毎・25km \times 25km のポーラーステレオグリッド上で行った
- ・海水温は夏季（4－9月）は $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冬季（10－3月）は $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ とした。

本研究では海氷域の熱収支を、開水面および海氷表面それぞれに計算した
※海氷表面のアルベドはmelt onset dateからの時間経過から推定した

- Heat input into the upper ocean through the open water fraction

$$Q_u = (\sum_n [(1 - C_n) F_{wn} S_g]) / S_e$$

(1 - C_n): Open water fraction
 F_{wn}: Net heat flux at the water surface
 S_g: Unit grid cell area (≈ 25km x 25km)
 S_e: Ice extent (= Σ_n (S_g))

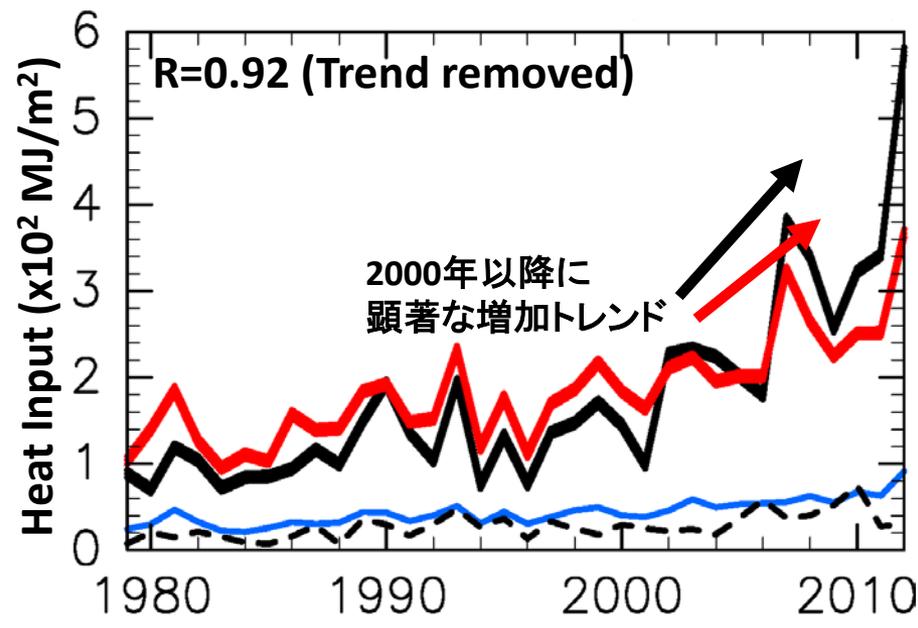
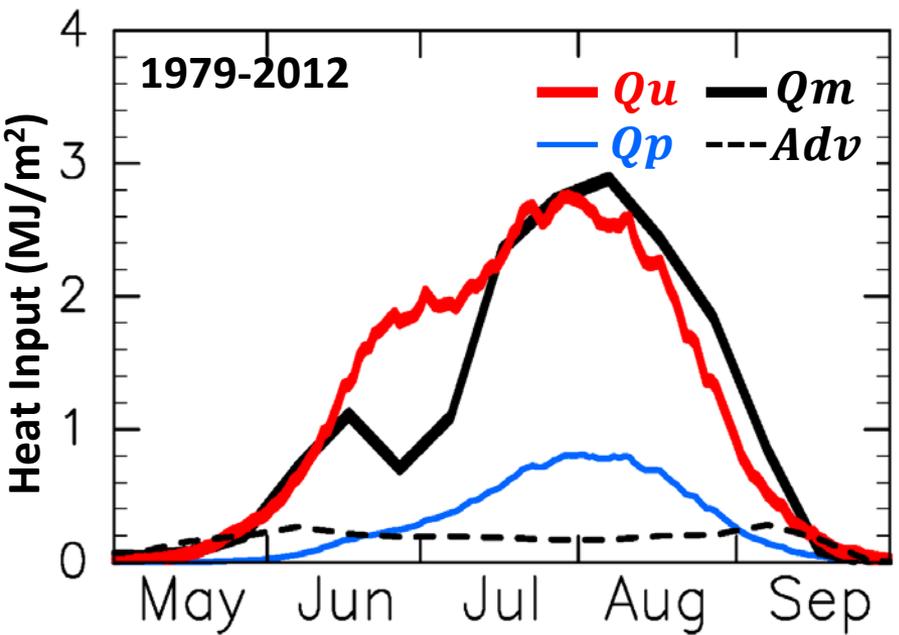
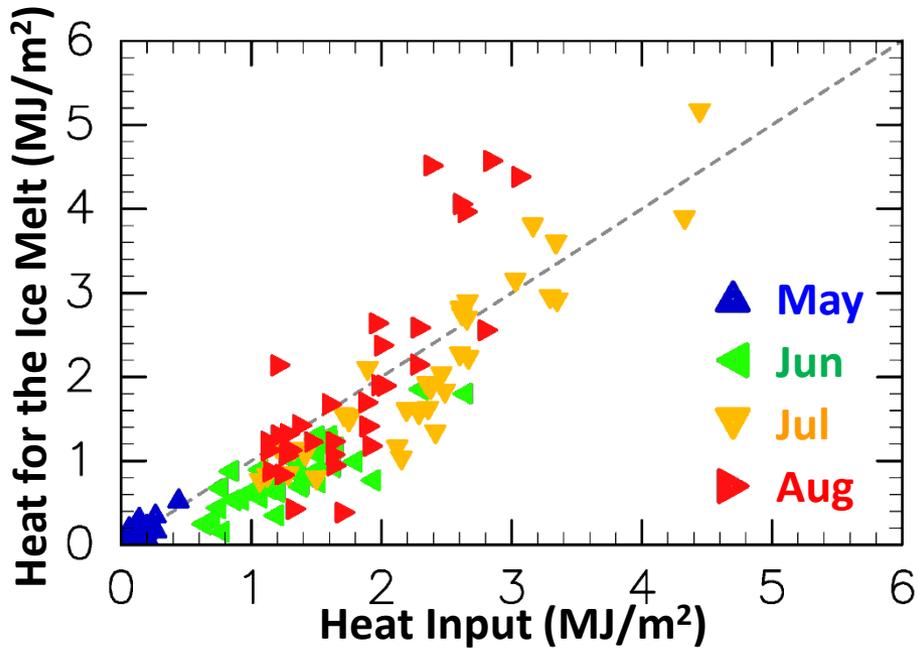
- Heat input through the melt pond

$$Q_p = (\sum_n [f_p C_n F_{wn} S_g]) / S_e$$

- Heat required for the ice melt

$$Q_m = (\rho_i L_f h_i dS_a / dt) / S_e$$

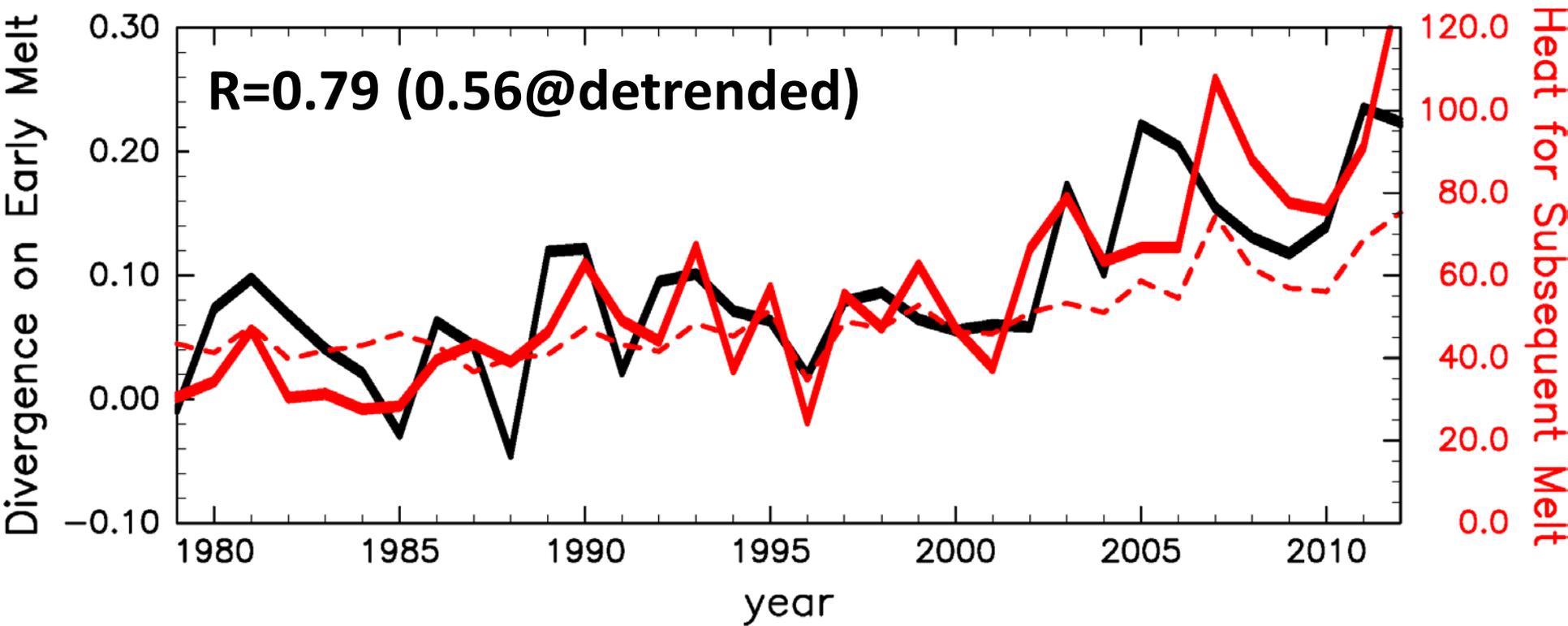
ρ_i: Density of ice (= 920 kg m⁻³)
 L_f: Latent heat for fusion of ice (= 0.276MJ kg⁻¹)
 h_i: Mean ice thickness (**assumed to a constant value of 1m**)
 dS_a/dt: Decrease rate of net ice area (**ice export is removed**)



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

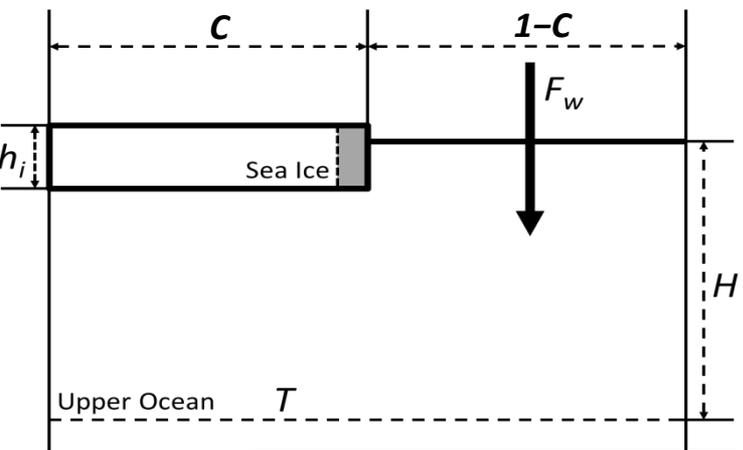
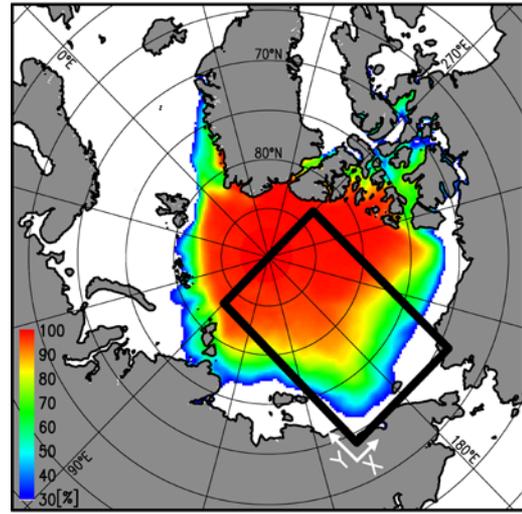
海水-海洋アルベドフィードバックがより効きやすくなったことが近年の海水激減にも影響していることを示唆する



簡略化モデルによるフィードバック効果の定量化

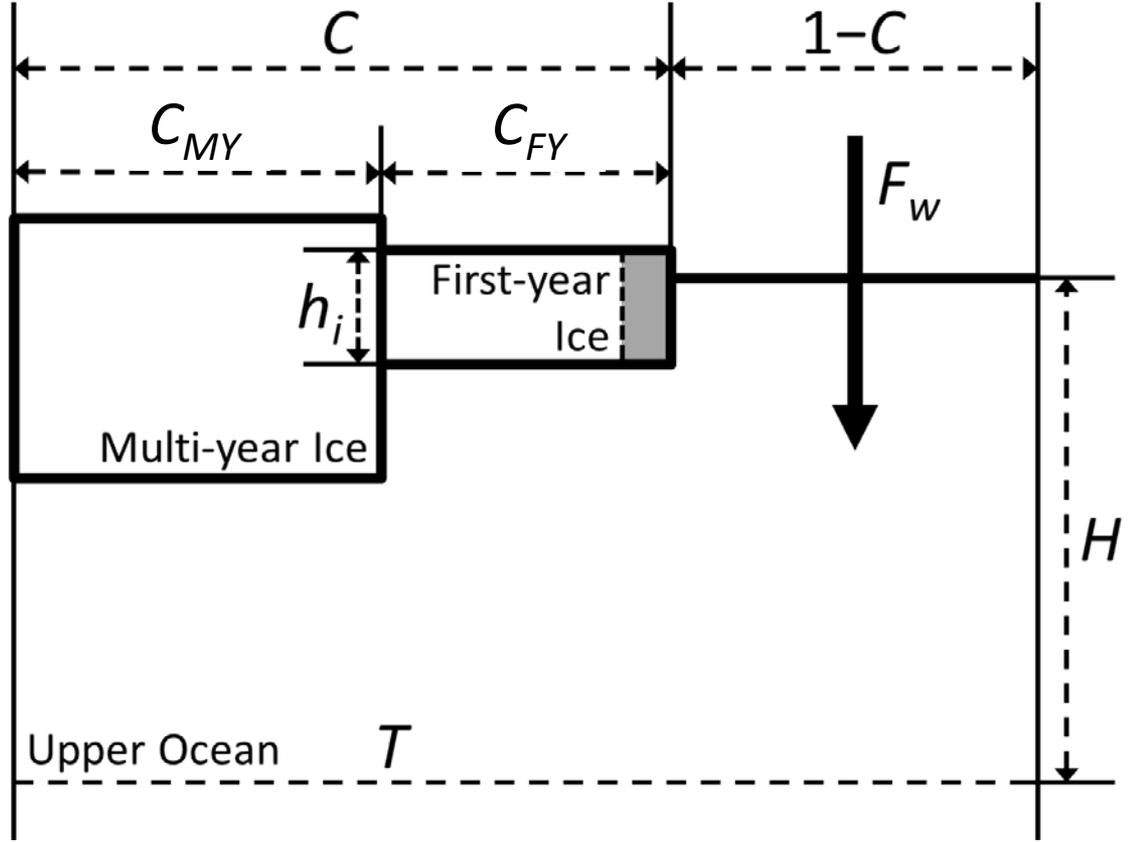
- ・簡略化モデルを使用して海氷後退の2次元(Y軸 - 時間方向) な変化を再現し、海氷 - 海洋アルベドフィードバックがどの程度影響しているかを明らかにする。

※Ohshima and Nihashi (2005) で使用されたモデルを基に、多年氷を導入することで北極海の家氷変動を再現した。



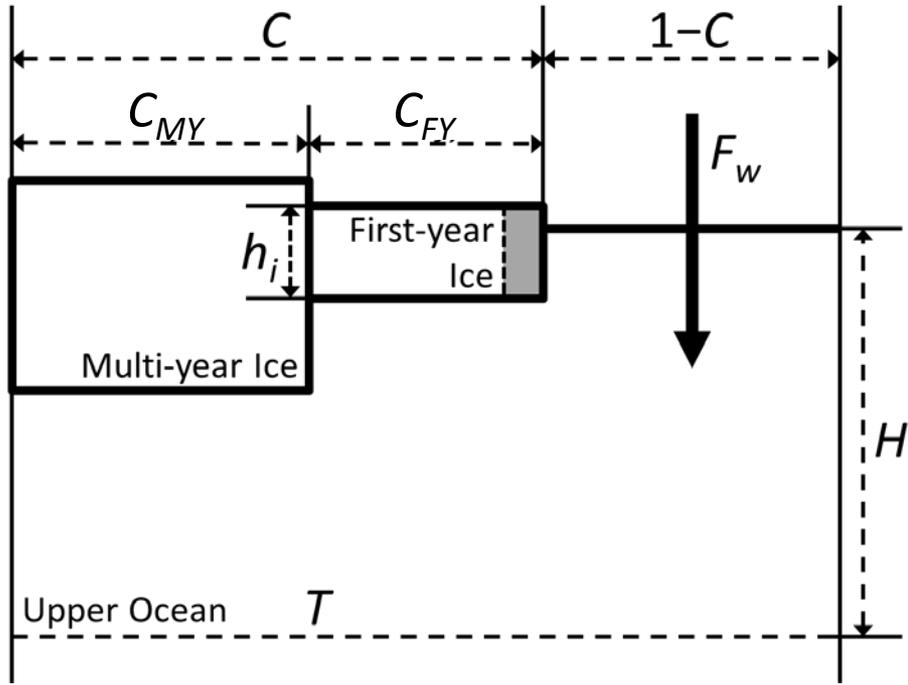
Ohshima and Nihashi (2005)

Modified for the Arctic Ocean



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°C) からの差によって決定する



(1) および (2) より、

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

(2) および (3) より、

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

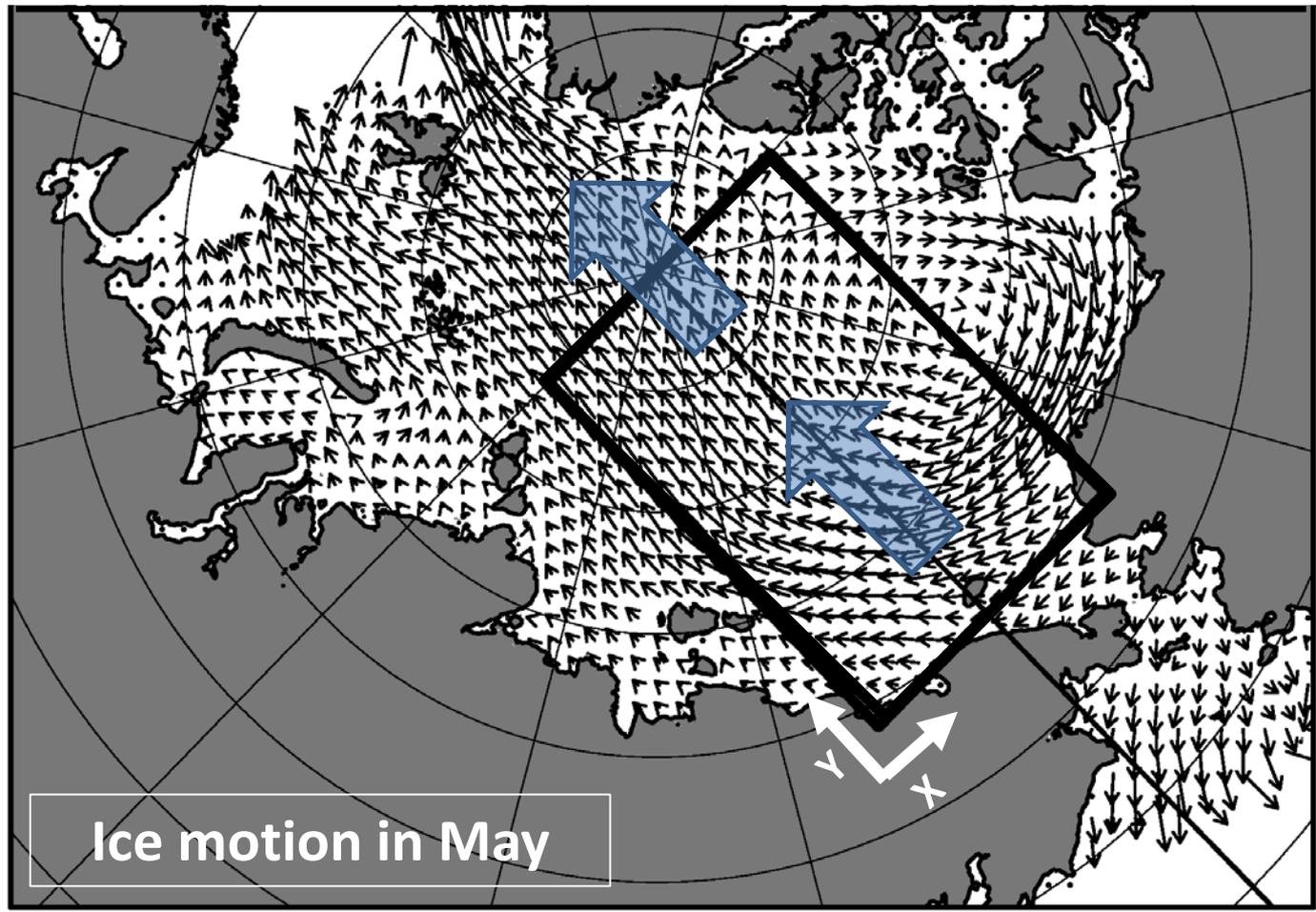
(4) および (5) より、

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

・モデルに漂流速度の効果を導入する

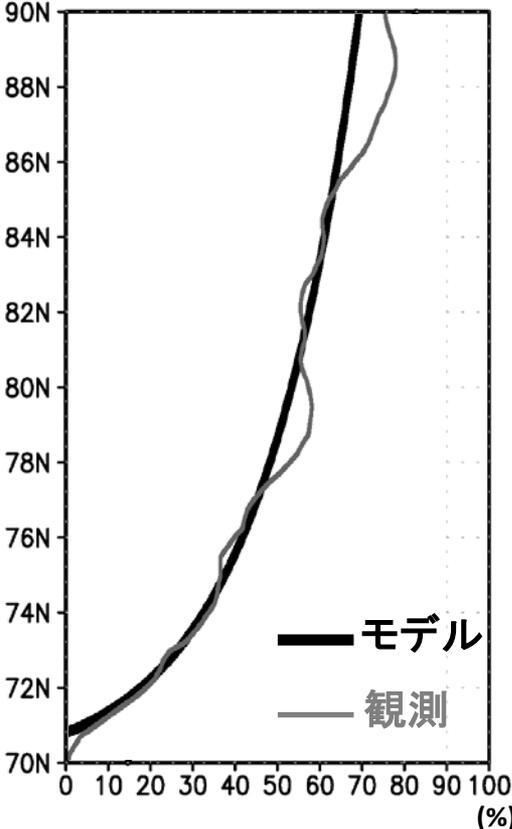
$$\frac{dC}{dt} = \underbrace{-a_0 C_{fy} \frac{T-T_f}{h_i}}_{\text{Melting of ice}} - \underbrace{U \frac{\partial C}{\partial y}}_{\text{Advection of ice}} + \underbrace{A_H \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}}_{\text{Horizontal diffusion of ice}} + \underbrace{\psi_c}_{\text{Ice resistance (internal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

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

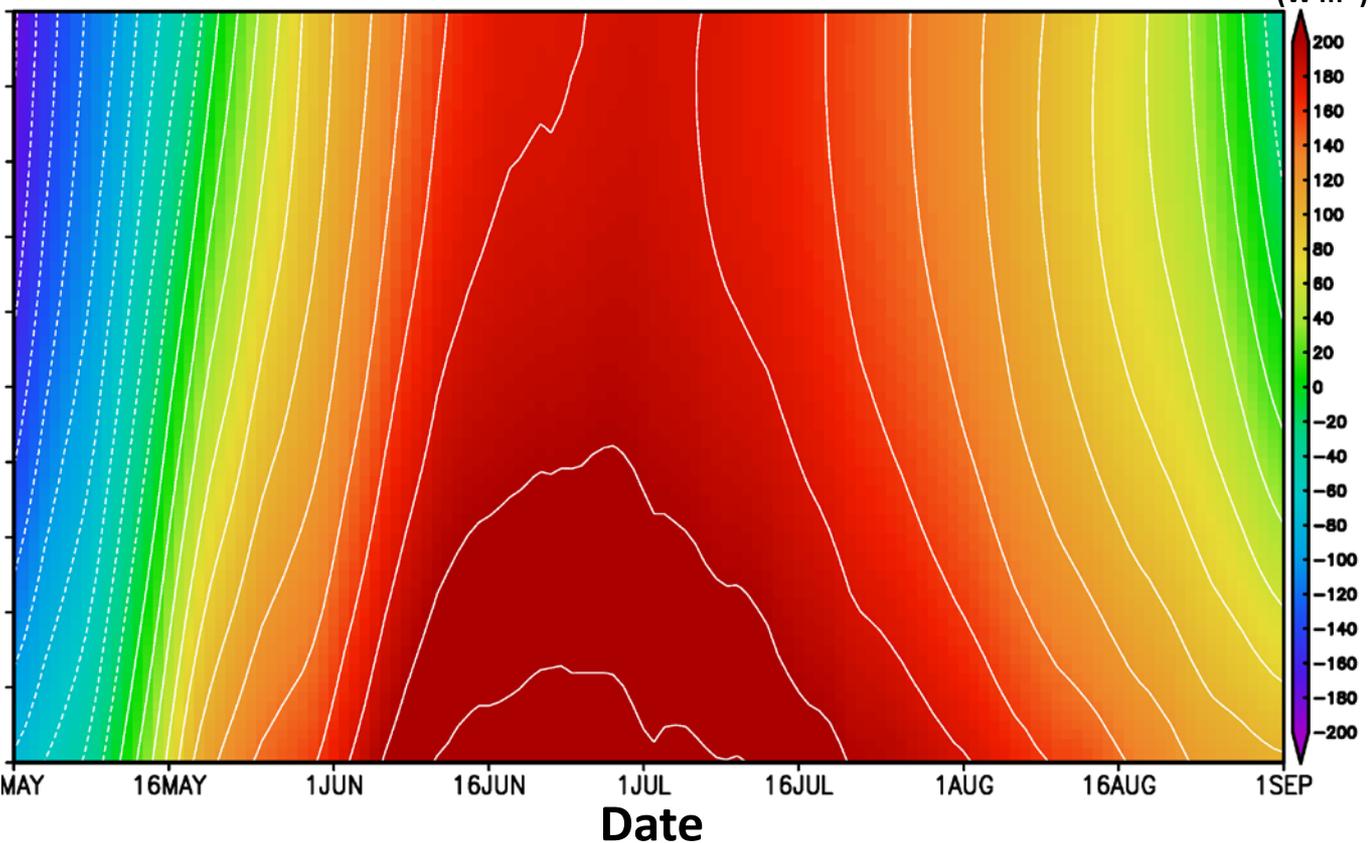


- ・平均氷厚を1m、初期の海氷密接度を99%、表面混合層の厚さを15mとした。
- ・バルク熱交換係数 K_b を $1.2 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ とした。
- ・ C_{MY} の初期値および熱フラックス F_w を衛星観測データに基づいて与えた。

Initial Multi-year ice



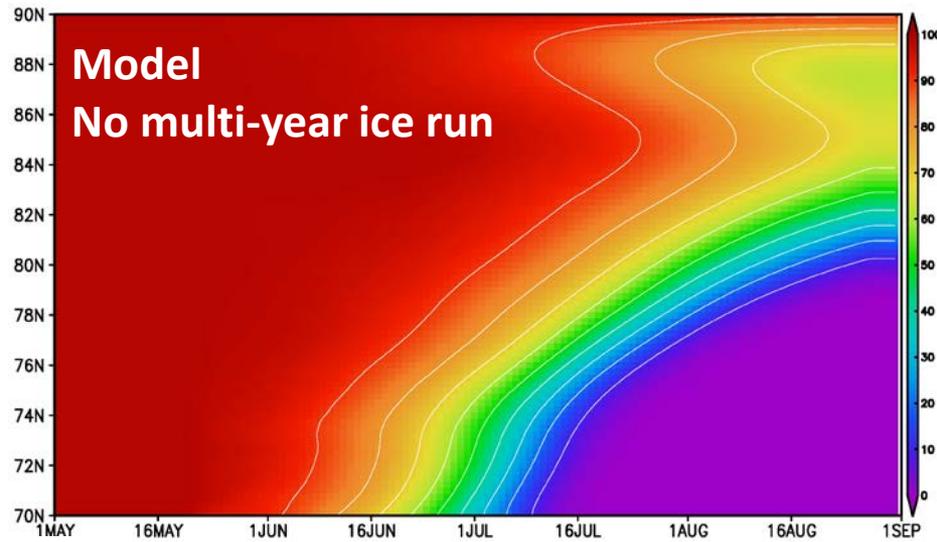
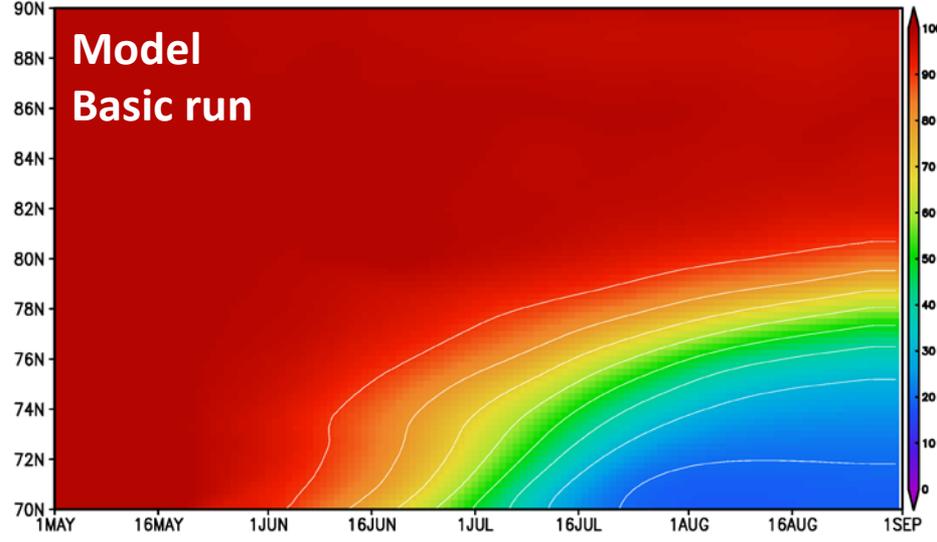
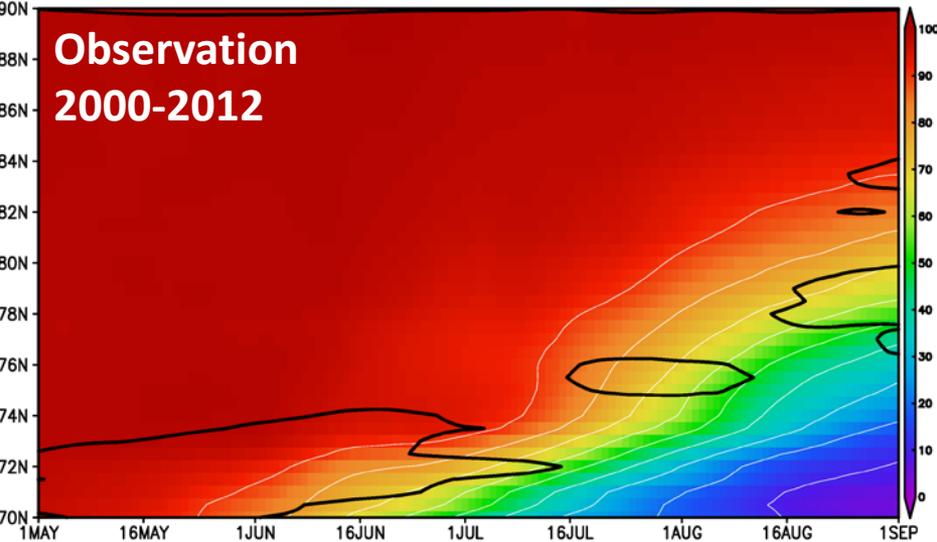
Net heat input at the water surface



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、海水後退を再現することに成功した。

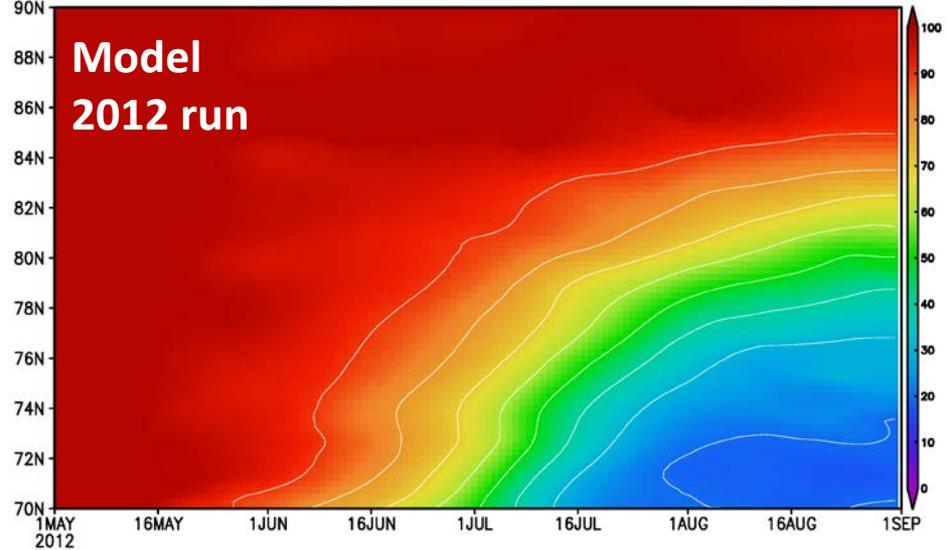
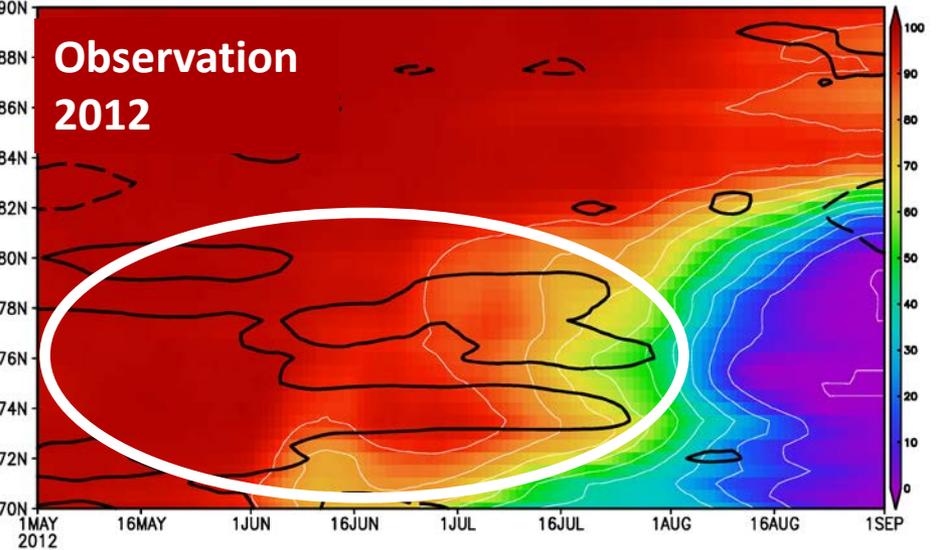
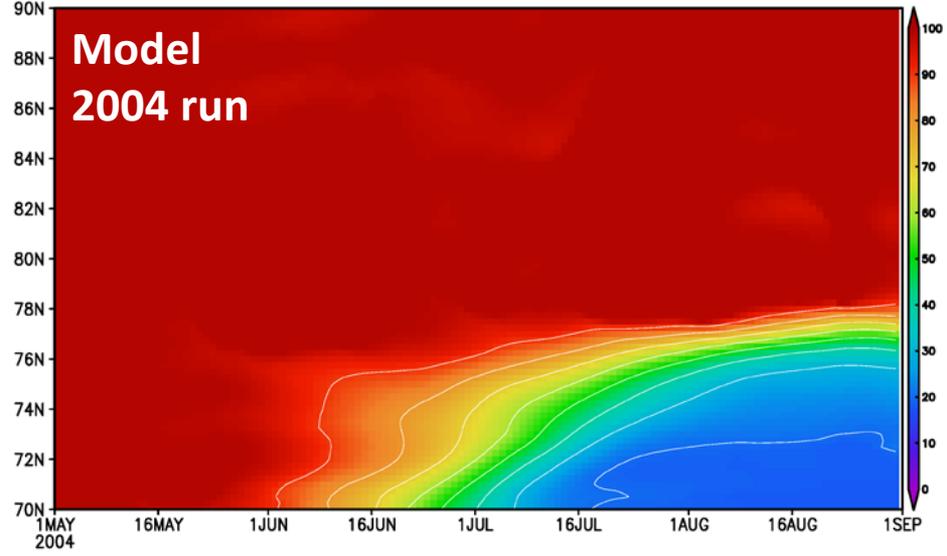
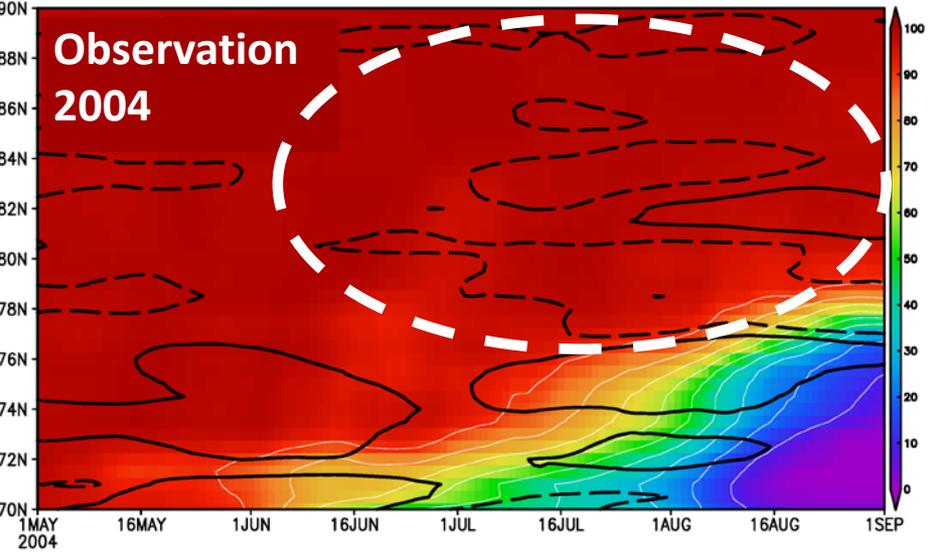
→海水-海洋アルベドフィードバックが北極海の海水後退の季節変動に影響している



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

○北極海の海水激減の要因の一つとして海水－海洋アルベドフィードバックに着目。

○海水が激減している北極海太平洋セクターでは、開水面から入る熱(主に日射)が海水融解の主要な熱源であることが熱収支解析によって示された。

→北極海でも海水－海洋アルベドフィードバックが働きうることを意味する。

○融解初期の海水発散は1－2ヶ月のラグで海水融解量と有意な相関を示す。

また初夏の海水発散、開水面から入る熱量、および海水融解量には2000年以降に顕著な増加トレンドが見られる。

→海水発散が強まったことによる、アルベドフィードバックを通じた海水融解の促進が近年の海水激減の一因であることが示唆される。

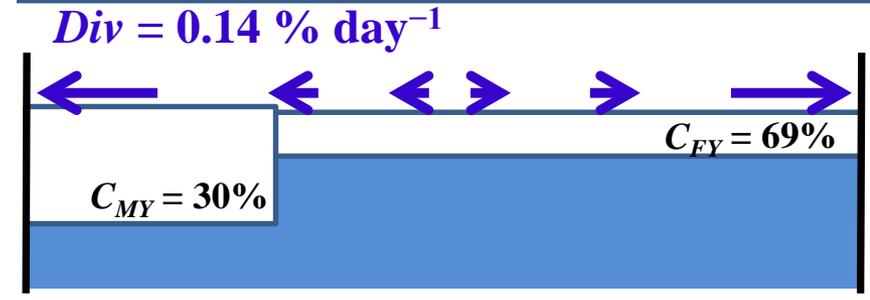
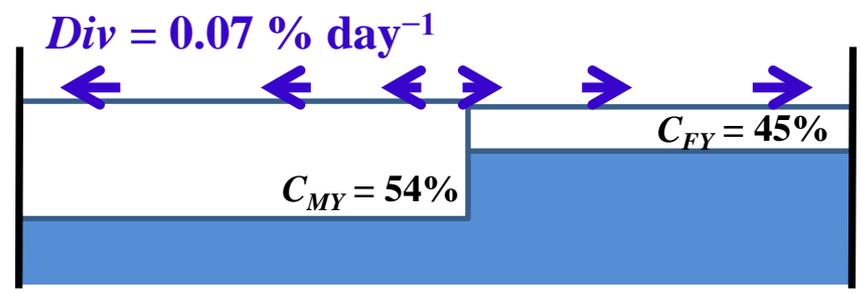
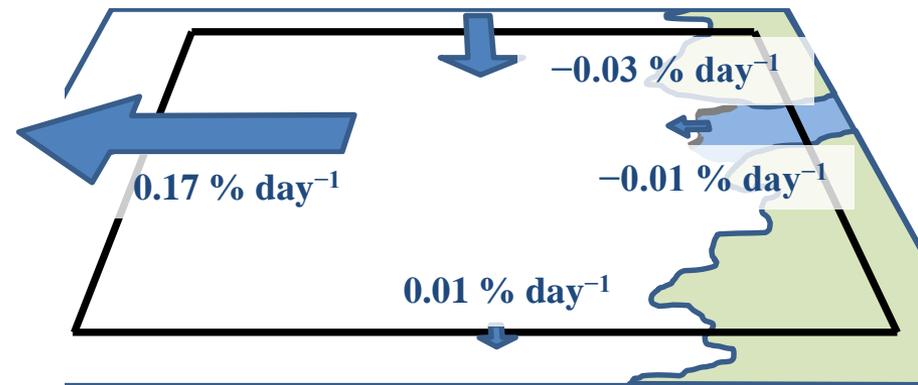
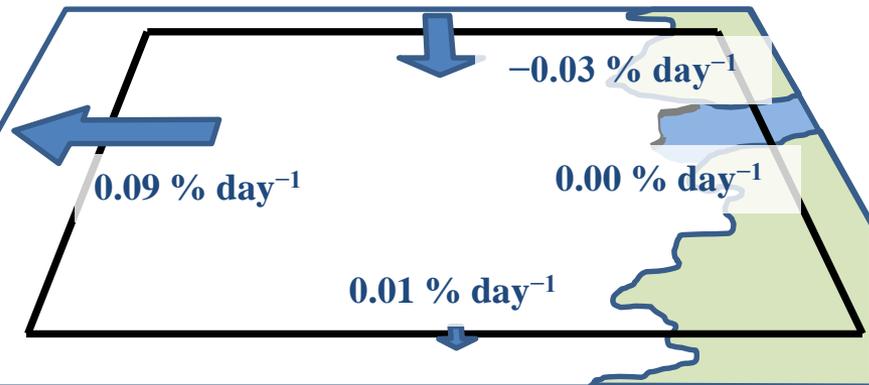
○簡略化モデルを使用して北極海の海水後退を再現した。モデル実験の結果からも海水漂流速度が海水後退の季節・経年変動に重要な役割を持つことが示された。

まとめ

mid-May to early-June

(a) 1979-1999

(b) 2000-2012



End of August

