

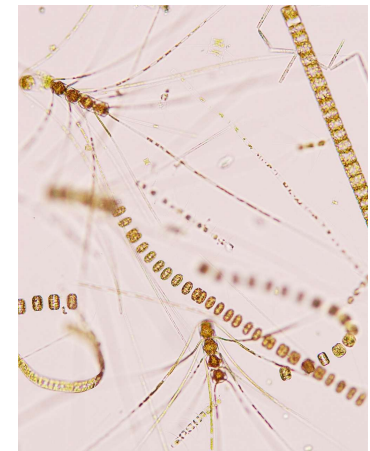
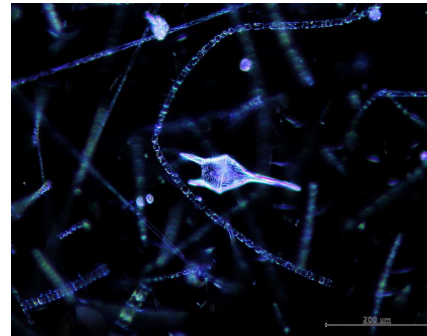
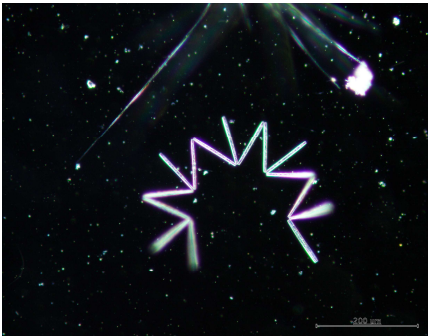
植物プランクトンの適応 を考慮した将来予測

増田 良帆 (JAMSTEC)

気候変動予測先端研究プログラムでは海洋生態系の
シミュレーションを担当しています

植物プランクトンとは？

植物プランクトン：
水中に生息し、光合成を行う微小な植物
典型的なサイズは0.0002 ～0.2 ミリメートル。



JAMSTEC杉江恒二さん提供

光合成の反応：
二酸化炭素 + 水 + 光エネルギー = 有機物 + 酸素

全海洋で合計した植物プランクトンによる光合成量は陸上植生による光合成量に匹敵する。

植物プランクトン研究の必要性①

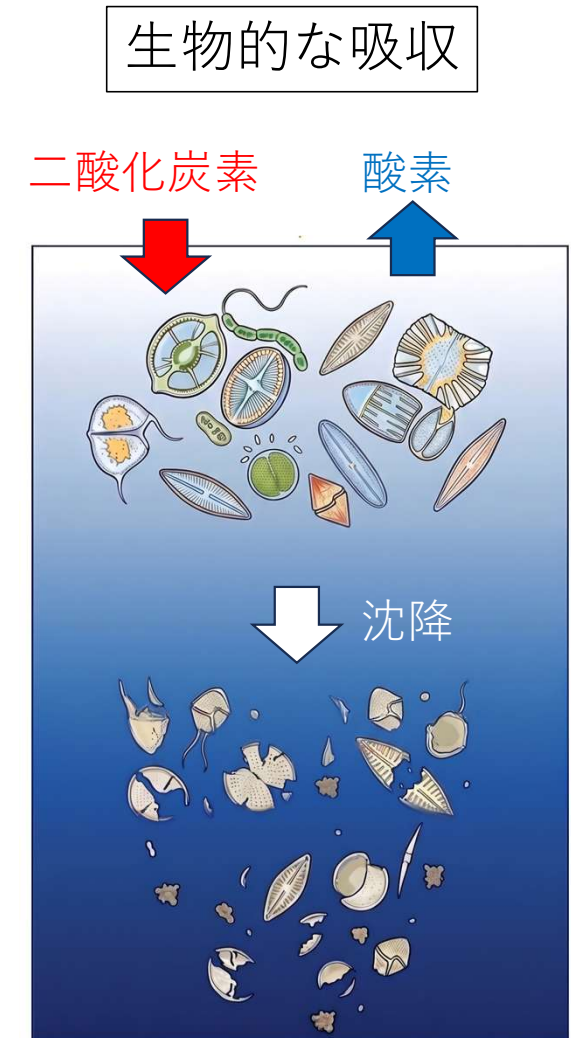
海洋による二酸化炭素吸収

1. 物理的・化学的な吸収

大気中の二酸化炭素が海水に溶け込み、冷やされた海水とともに深海へ沈み込む

2. 生物的な吸収

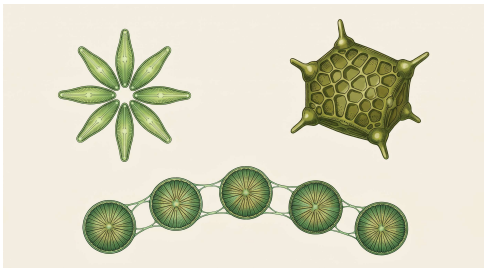
- 植物プランクトンが光合成によって二酸化炭素を吸収し、有機物に変換
- 死骸が沈むことによって二酸化炭素を深海へ輸送



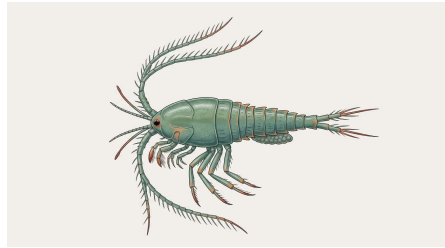
植物プランクトン研究の必要性②

海洋の食物連鎖の出発点なので、気候変動に伴って植物プランクトンが変化すると、その影響は最終的に魚類へ及ぶ。

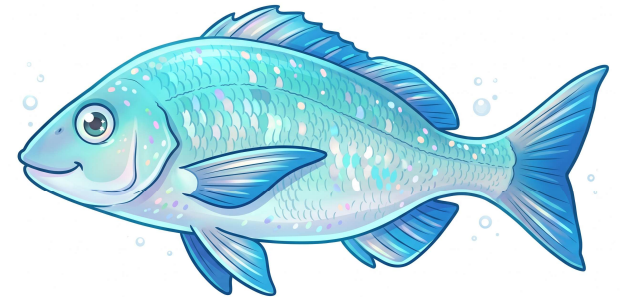
植物プランクトン



動物プランクトン



魚類



気候変動に伴って植物プランクトンの生産(光合成ー呼吸)が変わると、海洋の二酸化炭素吸収や魚類に影響する。



シミュレーションによる植物プランクトンの将来予測

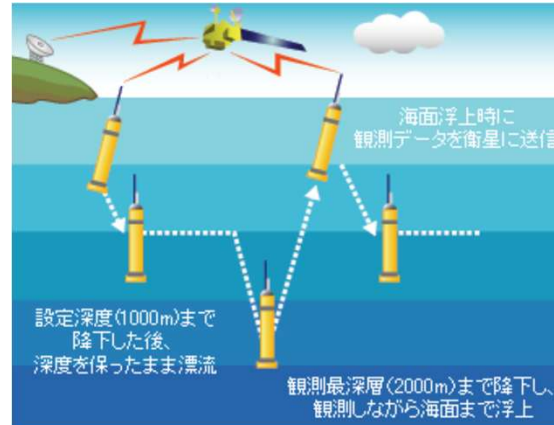
植物プランクトンを研究する手法

船舶による観測



出典: JAMSTEC
ホームページ

Argoフロートによる観測



出典: JAMSTEC
ホームページ

衛星による観測



出典: JAXA
ホームページ

データ

計算機を用いたシミュレーション



出典: JAMSTEC
ホームページ

室内実験、閉鎖環境実験



出典: 港湾技術
研究所ホーム
ページ

海洋生態系のシミュレーションに使うモデルとは？

海洋大循環モデル（物理）

水温・塩分を計算し、黒潮などの海流や深層へ沈み込む地球規模の海水の動きをコンピュータ上で再現

+

海洋生態系モデル（生物）

植物プランクトンの増殖や、それを食べる動物プランクトンなどの食物連鎖や二酸化炭素の移動を計算

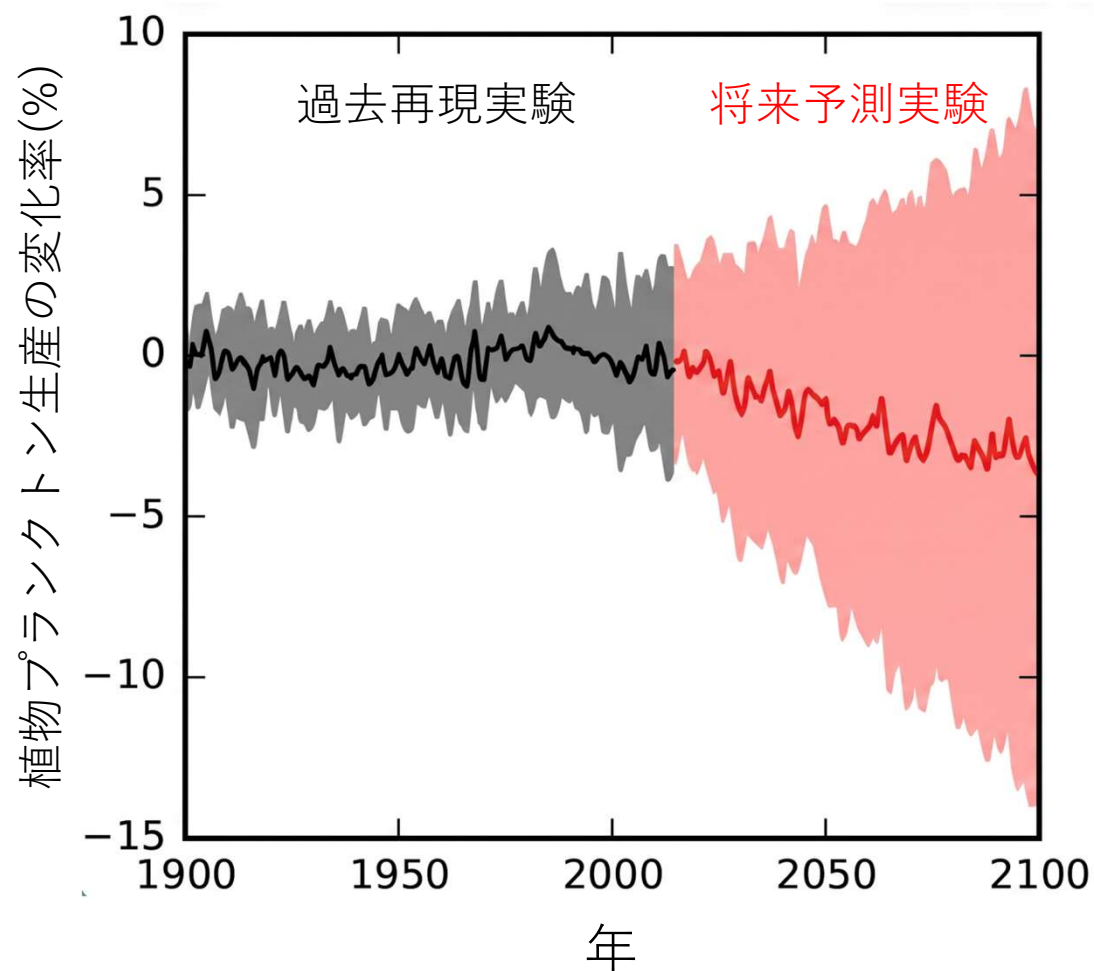
モデルで表現された日本周辺のイメージ



海を格子化して表現

植物プランクトンの生産(光合成ー呼吸)は将来どうなるか？

全海洋で合計した植物プランクトン生産の時間変化



- 黒線、赤線は世界各国のシミュレーションの平均
- シェードは世界各国のシミュレーションのばらつき(標準偏差)を示す

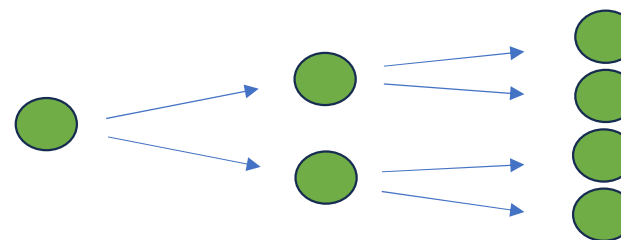
将来の植物プランクトンの生産はやや減少する可能性が高いが、各国の結果の差が大きく、不確定性が高い。

Kwiatkowski et al. (2020)の図を改変
将来予測シナリオはRCP8.5、生産の基準年は1870-1899。

何故、将来の植物プランクトン生産が減少する予測が多いか？①

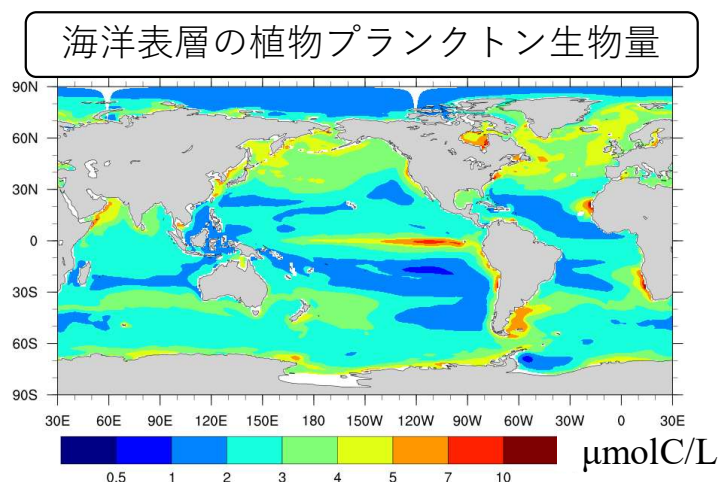
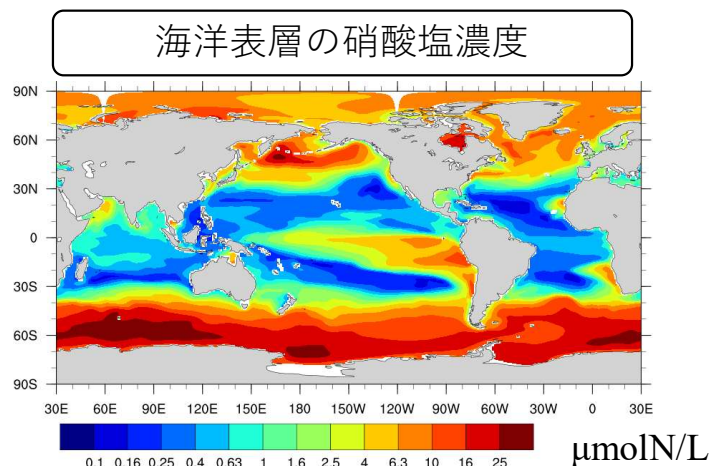
植物プランクトン成長の制限要因

植物プランクトンは単細胞生物で、
基本的には細胞分裂によって増える。
環境が良ければ1日で2倍以上に増える。



実際には以下の制限要因がある：

光と栄養塩（硝酸塩やアンモニア等、畑に肥料として与えられる物質）



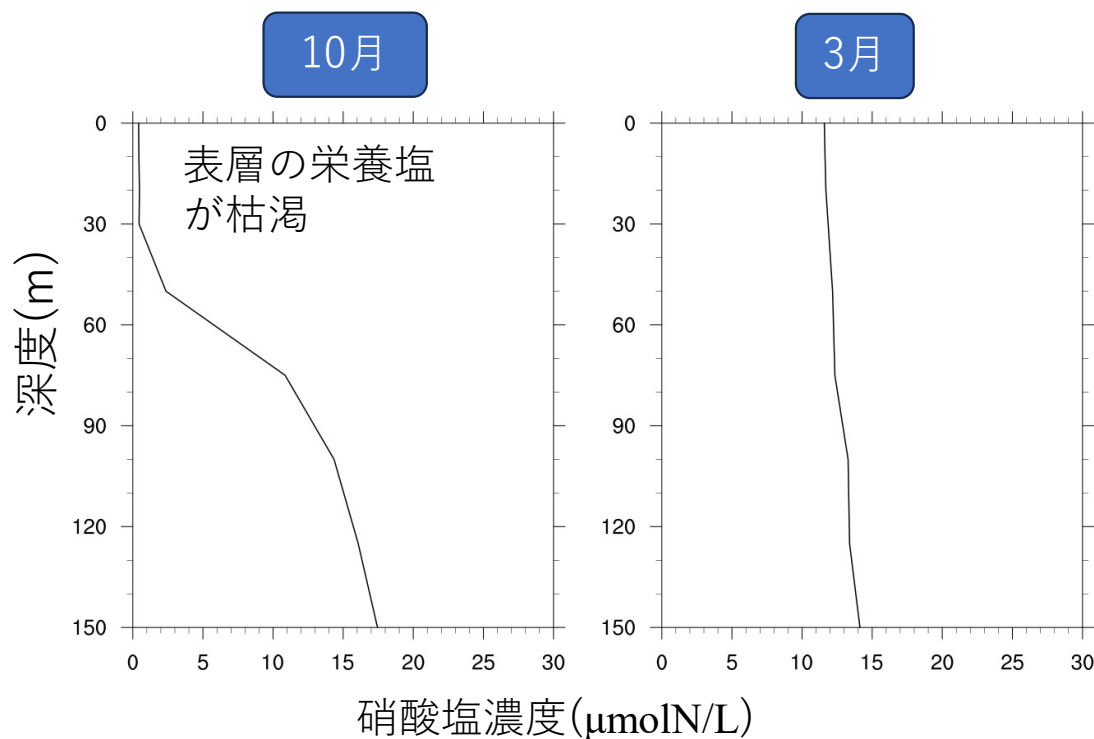
※シミュレーション結果、
年平均

栄養塩の多い場所で植物プランクトンは多い

何故、将来の植物プランクトン生産が減少する予測が多いか？②

亜寒帯における栄養塩鉛直分布の季節サイクル

温暖化の影響



1. 表層の海水が暖かくて密度が低い
ため、冬季に表層水が沈み込みに
くくなる
2. 深層の栄養塩が表層に供給されづ
らくなる
3. 植物プランクトンの生産（光合成
ー呼吸）が減少

冬季に表層の水が冷やされて重くなり、深層に沈む。
代わりに栄養塩の豊富な深層水が表層に上昇。

生産についての将来予測精度向上には**適応**が重要

- 環境が変われば、生物は新しい環境に適応する。
しかし、これまでのシミュレーションでは適応の導入が不十分。
- 近年の研究は適応を導入すると、現在気候下での再現性が上がることを示している。

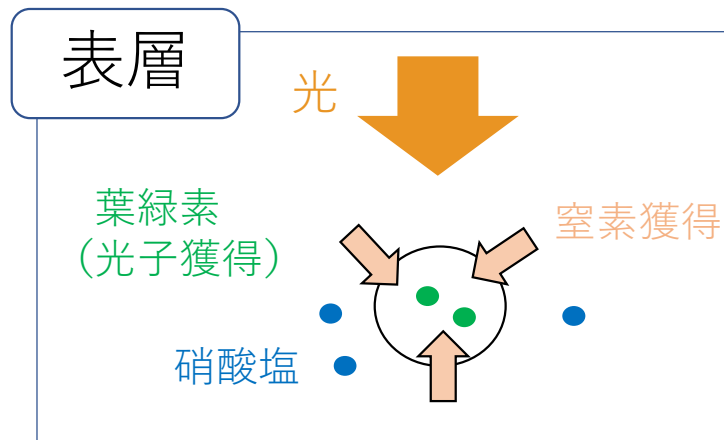
適応には2種類ある

- 個体レベルでの適応(馴化：acclimation):
一世代で完結 [人間だと、暗い環境で瞳孔が開く等]
- 群集、遺伝子レベルでの適応(adaptation):
世代を跨ぐ変化 [自然淘汰]

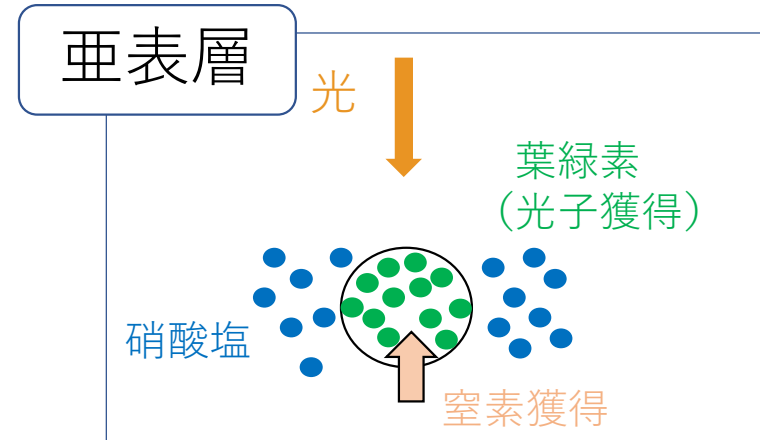
以下、個体レベルでの適応: 先端プロジェクトの成果を紹介 (スライド6枚)
群衆レベルでの適応: フランスのグループの成果を紹介 (スライド2枚)

個体レベルでの適応をシミュレーションに導入する

光獲得と栄養塩獲得の**トレードオフ** (Pahlow, 2004の理論)



光獲得より栄養塩獲得を
頑張る

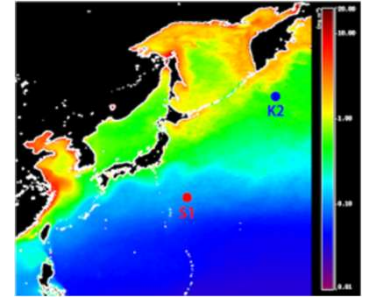


細胞内の葉緑素を増やし、
少しでも多くの光子を獲
得しようとする

この適応を導入すると、亜表層(30m-160m)と北極海の再現性が上昇するという話を以下でします。

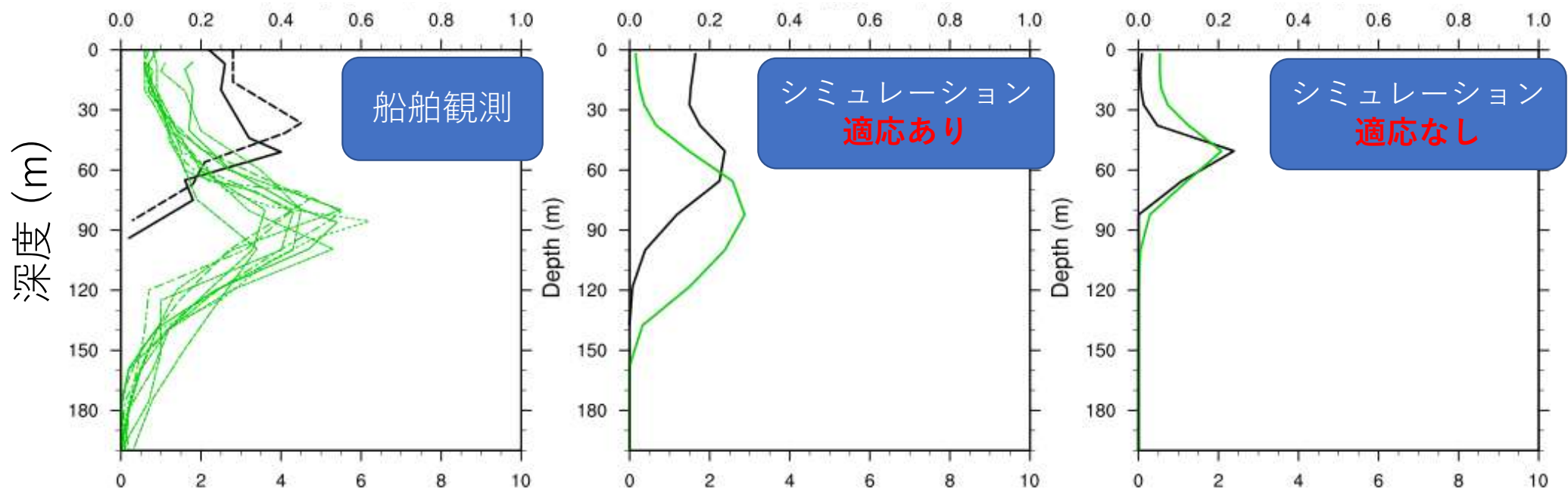
個体レベルの適応を導入すると、再現性が上がる

観測点S1 における観測とシミュレーションの比較 (7月)



出典: JAMSTECホームページ

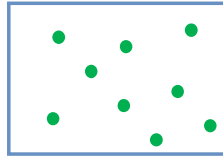
海水中の葉緑素濃度 ($\mu\text{g chl L}^{-1}$)



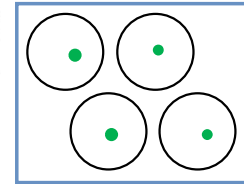
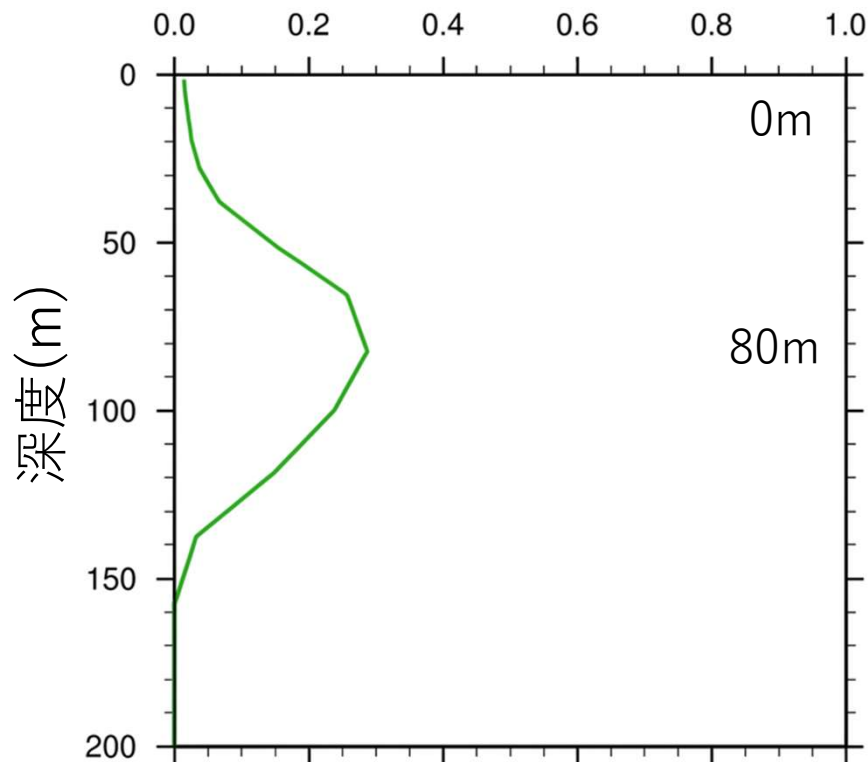
植物プランクトンの生産 ($\mu\text{g C L}^{-1} \text{ day}^{-1}$)

適応を入れると葉緑素分布の再現性が上がる理由

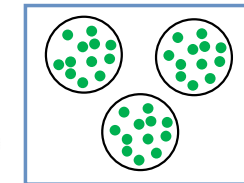
観測点S1の
鉛直分布（7月）



海水中の葉緑素濃度($\mu\text{g chl /L}$)



光獲得より栄養塩獲得を
頑張る

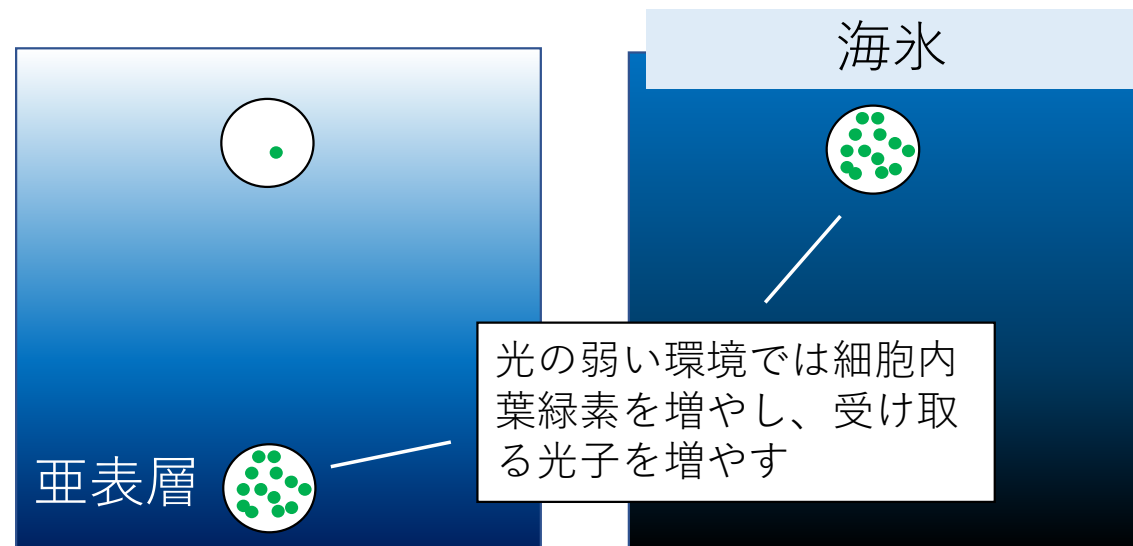


細胞内の葉緑素を増やし、
少しでも多くの光子を獲
得しようとする

適応は北極海の海氷下の生産にも重要①

- 北極海の海氷下に高濃度の葉緑素が存在し、植物プランクトンの生産が生じていることが船舶観測によって分かっていた。
- 従来のシミュレーションでは再現が難しかったが、個体レベルの適応の導入によって再現できるようになった。

適応の概念図



適応は北極海の海氷下の生産にも重要②

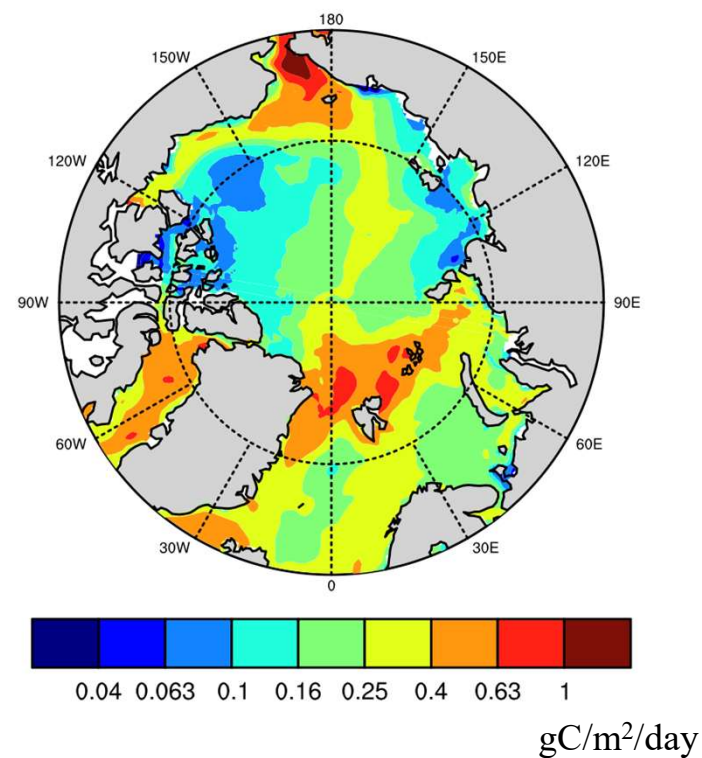
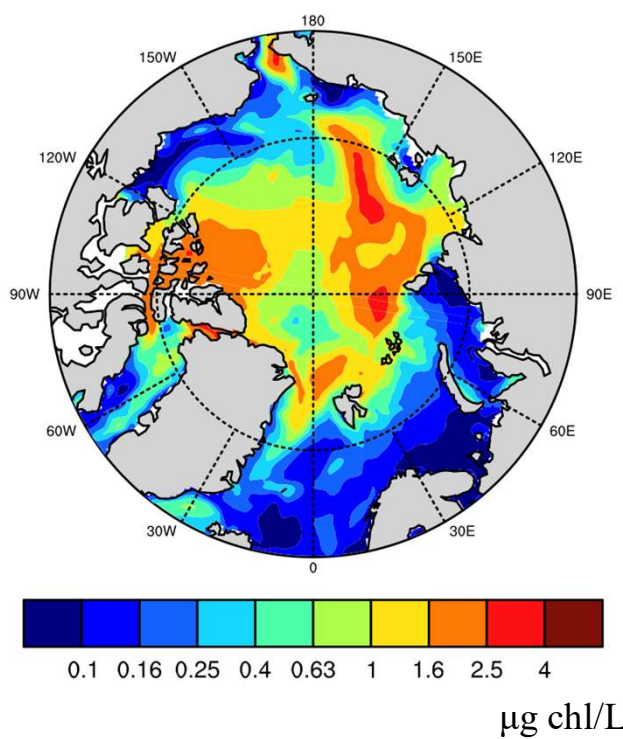
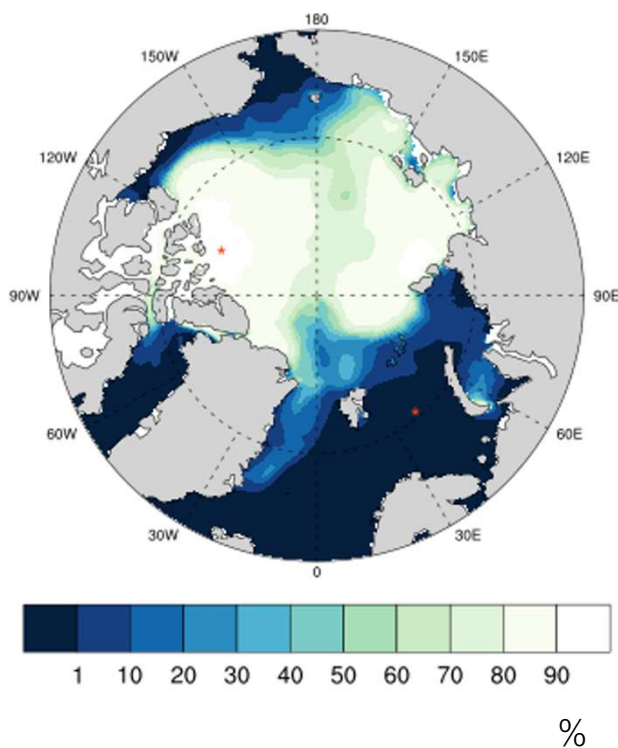
北極海の分布（8月）

Masuda et al. (2026)
より引用

海氷の
被覆率

葉緑素濃度
(海表面)

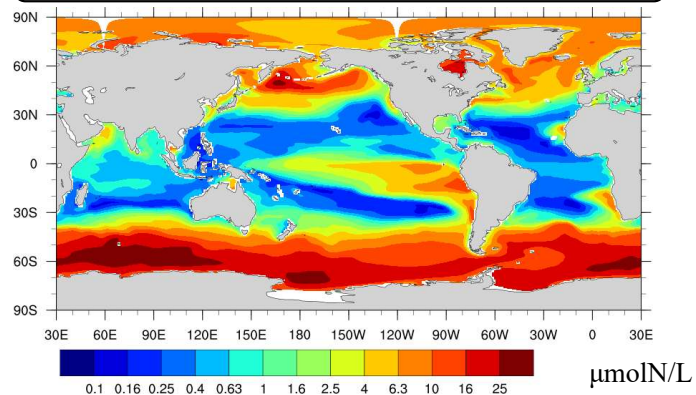
0m~200mの植物プ
ランクトン生産



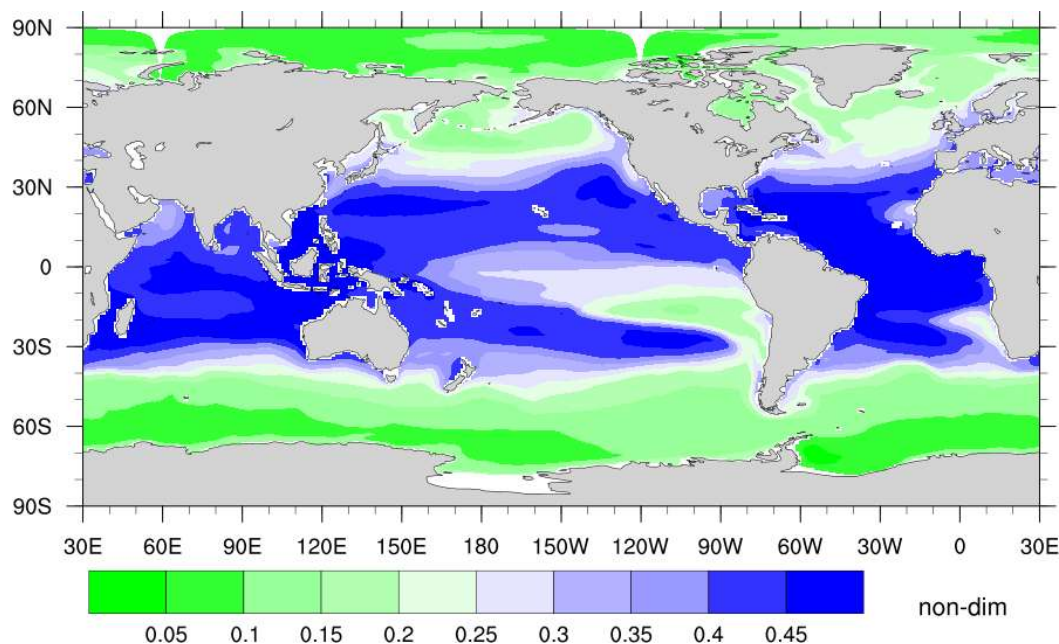
気候変動に伴って個体レベルの適応戦略はどう変化するか？

我々のシミュレーションが採用している理論では、植物プランクトンの適応戦略を数値化できる。➡ 将来予測実験で変化を検証。

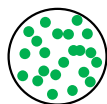
海洋表層の硝酸塩濃度(年平均)



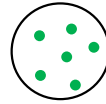
海洋表層での植物プランクトンの戦略(年平均)



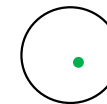
光吸収を優先



バランス型

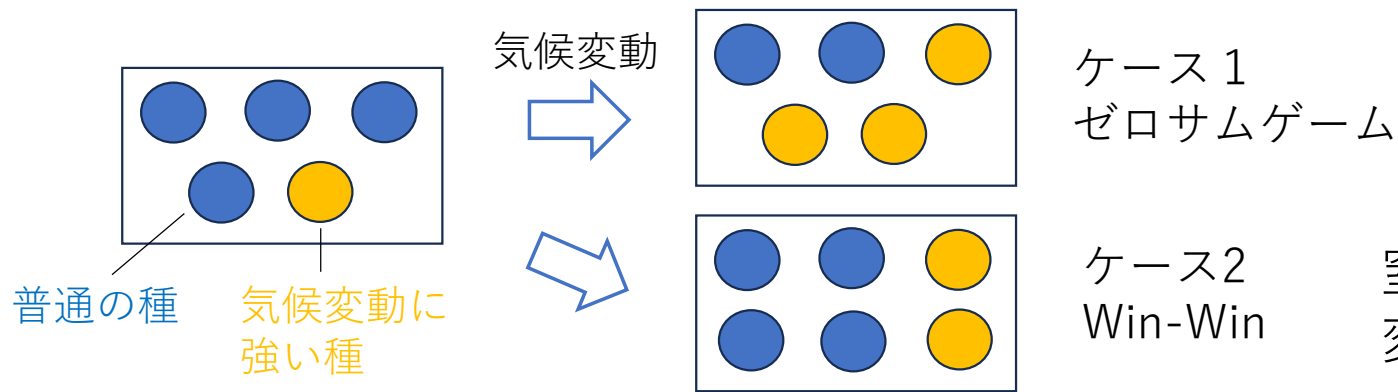


栄養塩吸収を優先



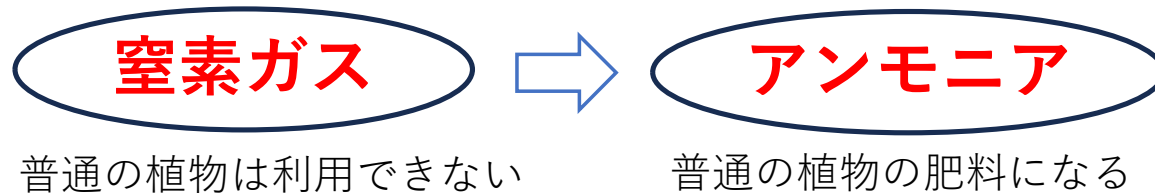
群集レベルの適応では、窒素固定ができる種が重要

群衆レベルの適応の概念図



窒素固定ができる種が気候変動に強い場合、ケース2が起こる可能性がある。

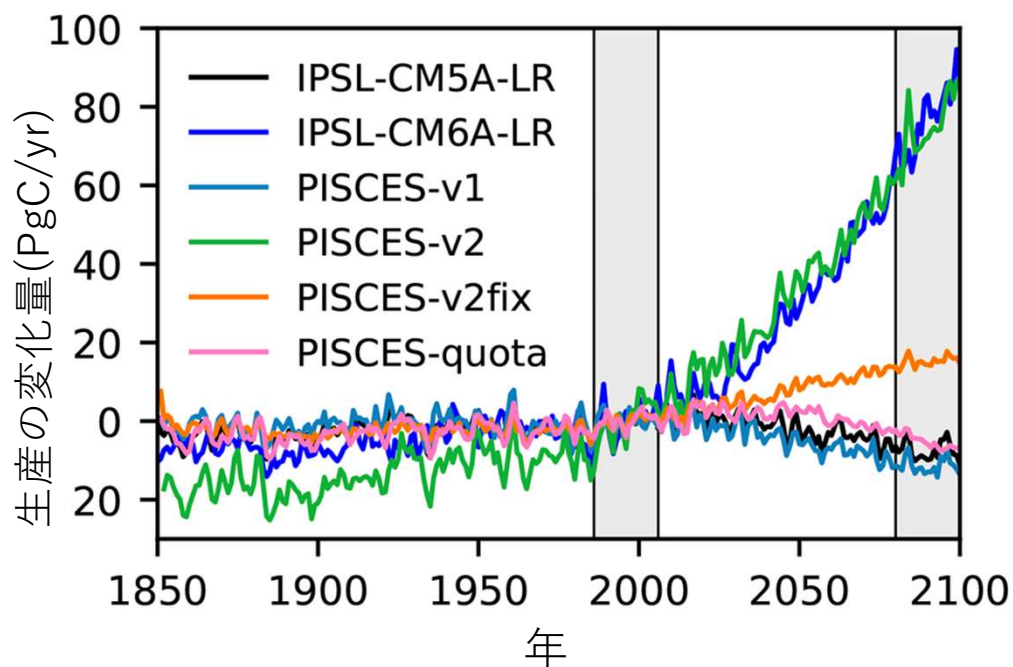
窒素固定：栄養塩(肥料)を作る



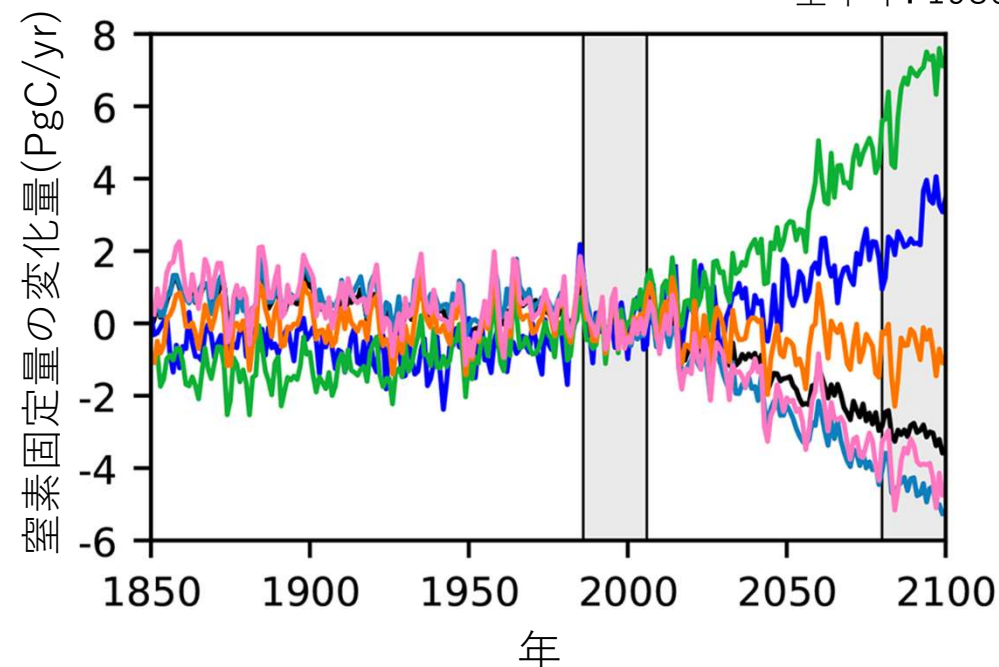
田畑の輪作では窒素固定菌を根に共生させている豆科植物(レンゲソウや大豆)を間に挟む

将来、窒素固定が増えるモデルほど、生産も増加する傾向がある

一次生産の変化



窒素固定の変化



Bopp et al. (2022)
より引用。
基準年: 1986-2005

線の色の違いはシミュレーションに使ったモデルの違いを表す。これらの間では窒素固定の計算式（例えば温度依存性）が異なる。

まとめ

- 海洋の植物プランクトンは以下の点で重要
 - 死骸が深海に沈むことで、二酸化炭素を深海へ輸送する
 - 食物連鎖の出発点
- 先端プロジェクトでは個体レベルでの適応を表現できるシミュレーションモデルを開発した
 - 亜表層や北極海の海水中葉緑素濃度、一次生産の再現性が向上した
 - 従来のシミュレーションでは不可能だった、適応戦略の将来変化を議論できるようになった
- 群集レベルの適応では、窒素固定生物が重要