

三陸沿岸各地におけるワカメ養殖への温暖化影響

筧 茂穂・瀬藤 聰・木所英昭

(水産資源研究所)

鬼塚 剛

(水産技術研究所)

環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費
(JPMEERF20S11809, JPMEERF25S12424)



気候変動影響予測・
適応評価の総合的研究



気候変動適応の社会実装
に向けた総合的研究

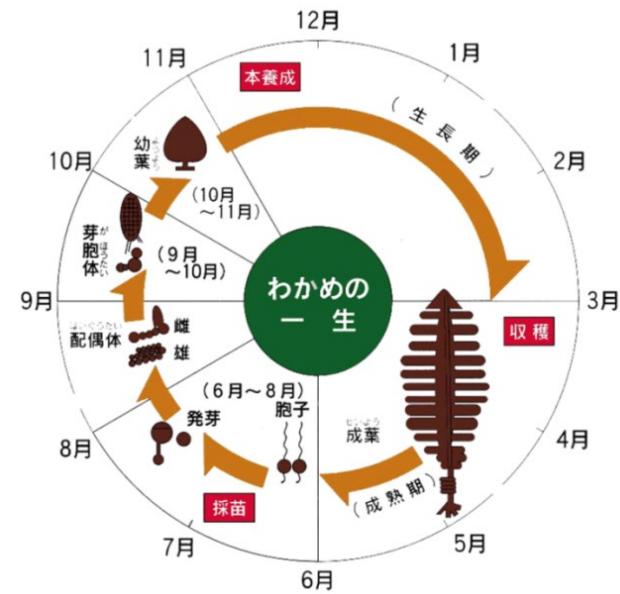
Kakehi, S., Kidokoro, H., Setoh, S., Onitsuka, G. (2025) Assessment of climate change impacts on large brown seaweed (*Undaria pinnatifida*) growth in the Sanriku coastal area, Japan. *Journal of Applied Phycology*.

Kakehi, S., Kidokoro, H., Onitsuka, G. (2025) Impacts on brown macroalgae *Undaria pinnatifida* farming under changing ocean climate. In: Mimura, N., Takewaka, S. (Eds.) *Climate Change Impacts and Adaptation Strategies in Japan - Integrated Research toward Climate Resilient Society* -. Springer.



ワカメ養殖と栄養塩

- ・ワカメ養殖は三陸沿岸の主要な養殖生産物（岩手県と宮城県で全国シェア7割弱）
- ・秋季には養殖施設に芽を巻き付ける作業が行われ、本養成（生育期）がスタート
- ・芽付け時期の栄養塩不足は「**芽落ち**」と呼ばれる生育不良を引き起こす。
- ・冬季の間、生長させる。
- ・3～4月頃、栄養塩が枯渇する前に収穫を終わらせる。収穫期の栄養塩不足は「**色落ち**」による品質低下を引き起こす。

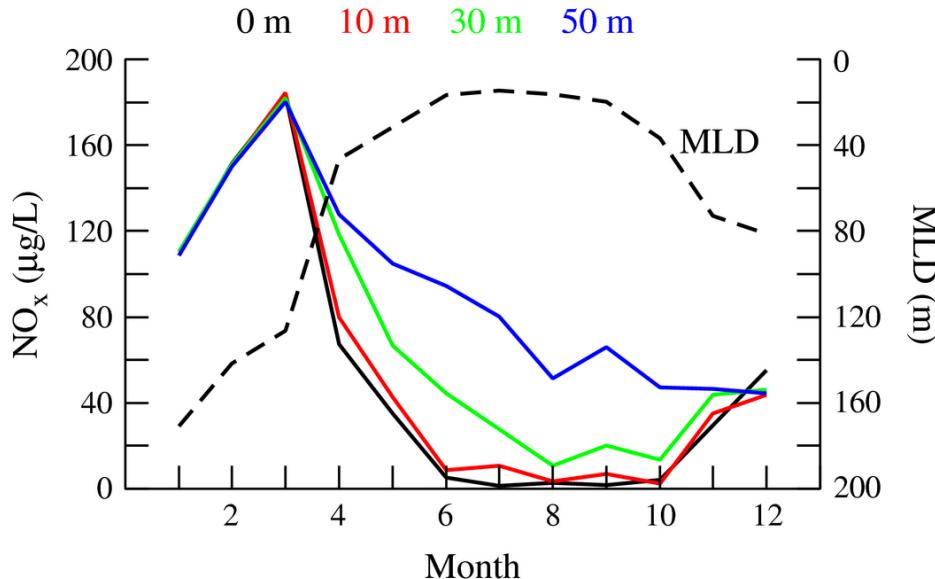


ワカメ養殖ハンドブック(岩手県, 2003)

ワカメの生長にとって硝酸態窒素と亜硝酸態窒素の総和濃度が
20µgL⁻¹以上が望ましい

(ワカメ養殖ハンドブック. 岩手県, 2003) .

ワカメ養殖場における栄養塩濃度の季節変化



ワカメ養殖場の栄養塩濃度は、「夏季に枯渴、秋季から冬季にかけて増加、春にかけて減少し、6月には再び枯渴」という季節変動。(Kakehi et al., 2018)

夏季は成層が強く、表層で枯渴。

成層が崩れることで下層の高濃度の栄養塩が海面に供給される。

春季になると、成層が発達し、植物プランクトンブルームにより栄養塩が消費されて枯渴する。

気候変動により栄養塩供給・枯渴のタイミングが変化し、ワカメ養殖可能期間が変化し、収量への影響が懸念される

目的

三陸海域におけるワカメ養殖への気候変動の影響を評価する。
なかでも、場所（南北）の違いがあるのかに着目する。

方法

- ・ワカメの生育環境の連続モニタリング
- ・ワカメの生長モデルの構築
- ・気候変動予測モデルのRCPシナリオのアウトプットによる生長モデルの駆動

栄養塩、水温の観測データがあり、予測モデルのバイアス補正ができる複数の地点において、ワカメの生長量、養殖可能期間、養殖環境について影響を調べる

ワカメ生長モデル

ワカメの生長に関するIndividual growth modelを構築する.

ワカメの全長 (TL) の時間変化

$$dTL/dt = P - R$$

生長 $P = P_{max} [DIN/(K_N + DIN)]$

- $[(I/I_m) \cdot \exp(1 - I/I_m)]$
- $Q_{01}^{(t-16)}$

$K_N = 17$: Michaels-Menten constant half saturation constant ($\mu\text{g/L}$)

$I_m = 670$: optimum PAR (photosynthesis available radiation) intensity ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)

$Q_{01} = 1.09$: temperature effect for N uptake

来代・門脇 (2004) に準ずる.

呼吸 $R = k_R \cdot R_d$

$$R_d = R_{22} \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{295.15}\right)\right) \quad (\text{Sato et al., 2020; Sato et al. 2021})$$

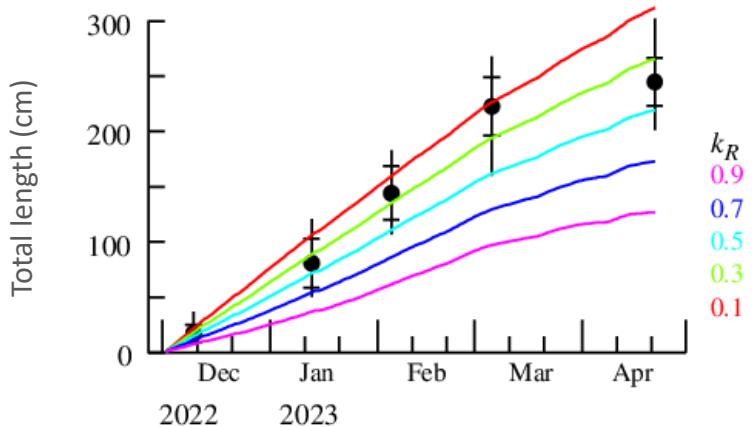
P_{max} は全長の最大生長速度 (cm/day) , k_R は呼吸による全長の減少, これらを調整して観測されたワカメの全長を再現する値を決める.

そのためにワカメの生育環境のモニタリングを生長過程の測定が不可欠.

→

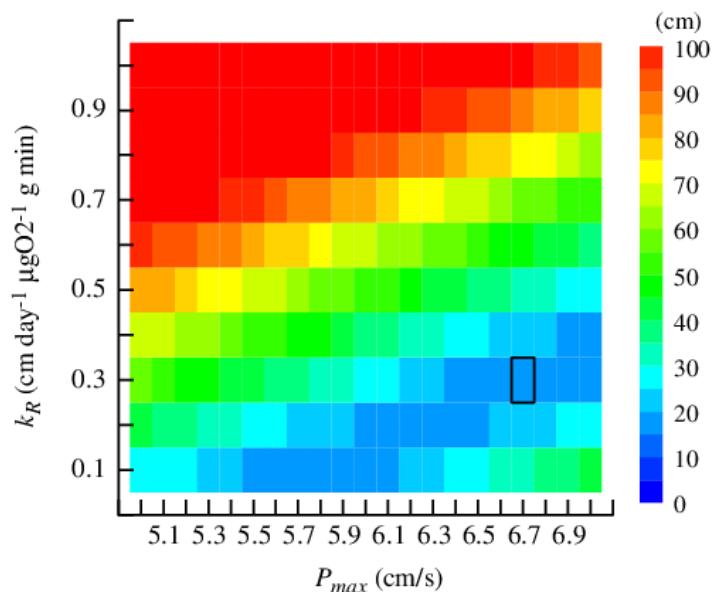
岩手県大槌町船越湾で係留観測 (水温, 硝酸塩), 全長モニタリングを実施.

係留観測で得られた、水温・硝酸塩濃度を生長モデルに与え、測定した全長を再現する P_{max} , k_R をケーススタディにより推定



P_{max} : 5.0~7.0, 0.1刻み.
 k_R : 0.1~1.0, 0.1刻み.
 実測のワカメ全長のRMSEを算出.
 左図は $P_{max} = 6.7$, k_R : = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 のケース

光はNCEP/DOEの下向き短波長放射のdailyデータ。
 放射照度 (W/m^2) のデータに4.57を乗じて光量子束密度 ($\text{mmol}/\text{m}^2/\text{s}$) に変換。さらに0.45をかけてPARに変換



最も再現性がよかつた (RMSEが小さかつた) のは
 $P_{max} = 6.7 \text{ cm/day}$
 $k_R = 0.3 \text{ cm day}^{-1} \mu\text{gO}_2^{-1} \text{ g min}^{-1}$

気候将来予測モデルの出力値を用いた気候変動影響評価

- MIROC5, MRI-CGCM3の2モデル
- RCP2.6と8.5の2シナリオ
- Output : scenario projection (2006～2100年) . 予測値.
historical simulation (1970～2005年) . 過去計算値.

○バイアス補正

scenario projection – historical simulation (daily mean) + observation (2022)

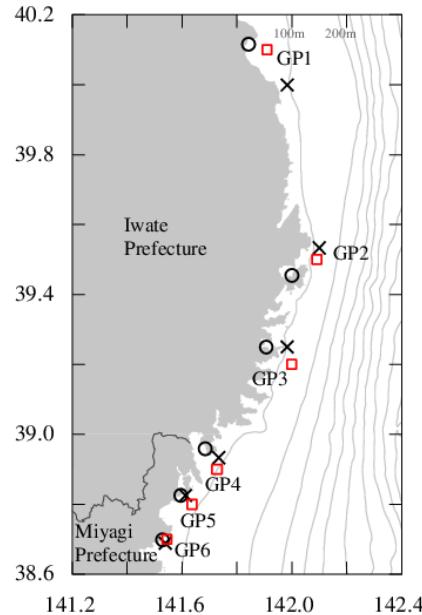
水温と栄養塩の観測データが必要.

○生長計算

- 現場観測に基づき $P_{max} = 6.7 \text{cm/day}$, $k_R = 0.3 \text{ cm day}^{-1} \mu\text{gO}_2^{-1} \text{ g min}$
- 養殖開始 : 栄養塩濃度 (DIN) $\geq 20 \mu\text{g/L}$, 全長1cm
- 養殖終了 : DIN $\leq 20 \mu\text{g/L}$

※ DIN $\leq 20 \mu\text{g/L}$ は芽落ち, 色落ちの目安

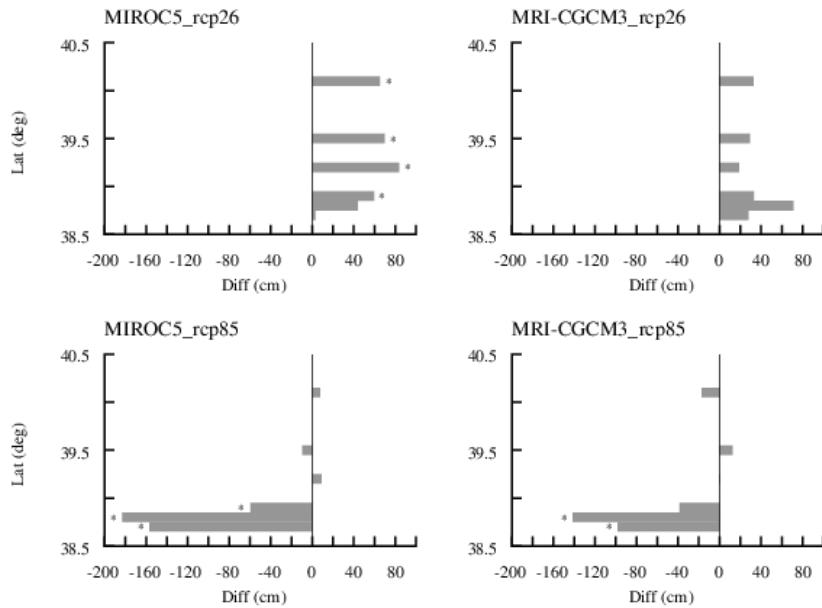
岩手県, 宮城県の6地点における水温, 栄養塩の観測データを使用



https://www2.suigi.pref.iwate.jp/research_log/nutrient,
<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kesenmumas/kesennnumawannsuishitsu.html>
<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kesenmumas/shidugawawansuishi.html> <https://www.suigi.pref.iwate.jp/teichi>
https://suisan-navi.pref.miyagi.jp/suion_top

○：水温, ×：栄養塩, □：将来予測モデルのグリッド点.

2090年代と2010年代の全長の差 (*:p<0.01 by Welch's t-test)

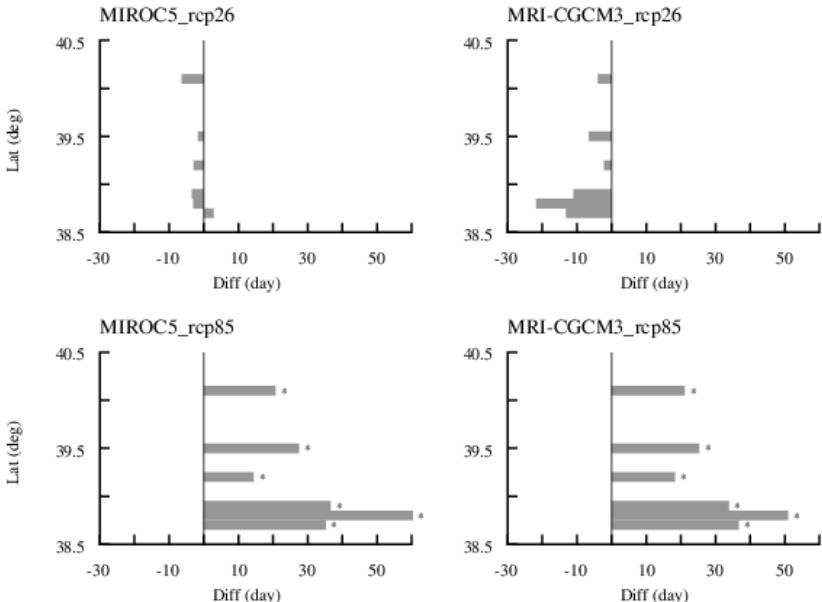


養殖終了日における全長の比較.

MIROC5のRCP2.6では有意に生産量増大.
MRI-CGCM3のRCP2.6でも生産量増大の可能性.

RCP8.5では、39°N以南で2090年代には全長が有意に短くなると予測された（高水温による呼吸↑、栄養塩濃度↓、養殖可能期間↓）.
→宮城県のワカメ養殖に負の影響が生じる恐れ.

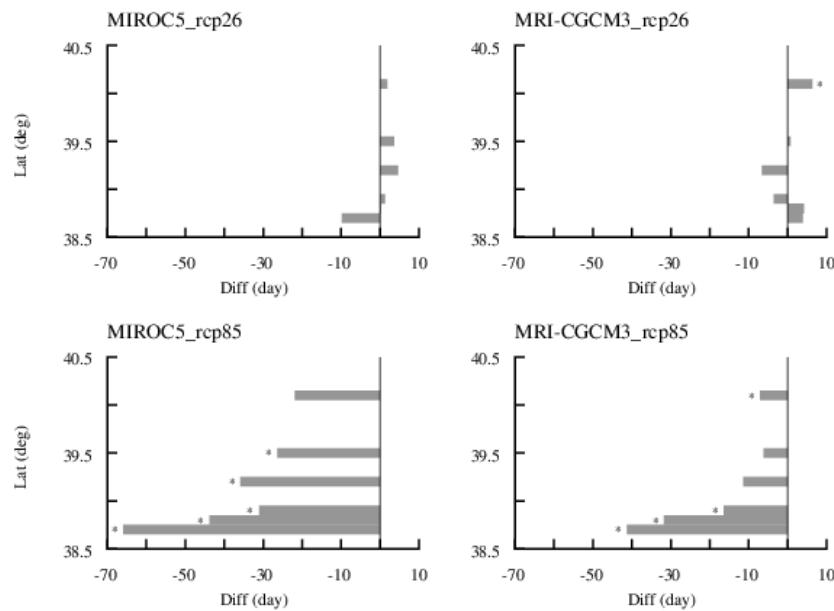
2090年代と2010年代の養殖開始日の差 (*:p<0.01 by Welch's t-test)



硝酸塩濃度 $\geq 20\mu\text{g/L}$ で定義.

RCP2.6では20日程度前倒し.
RCP8.5では全地点で有意に遅れる.
50~60日も遅くなる地点もある.
栄養塩供給が遅くなっている.
混合層発達の遅れに由来.

2090年代と2010年代の養殖終了日の差 (*:p<0.01 by Welch's t-test)

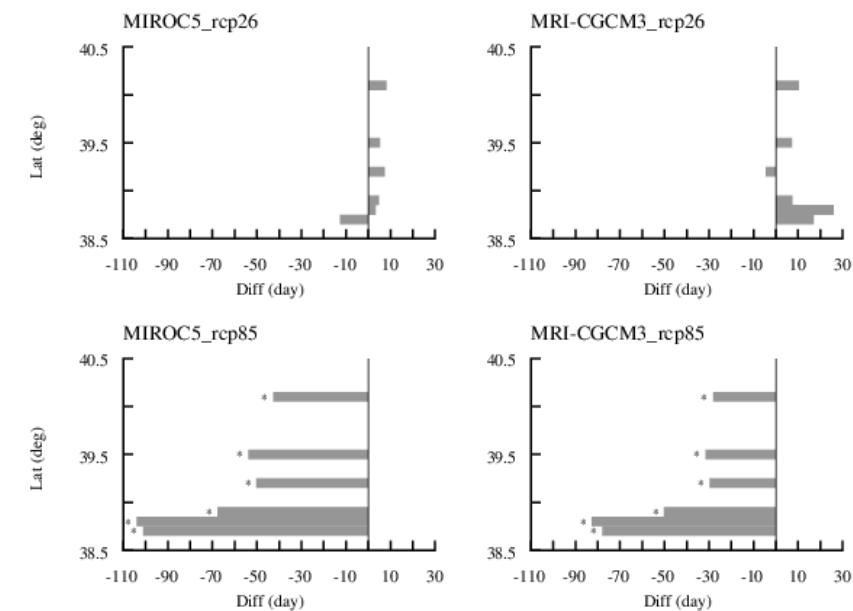


硝酸塩濃度 $\leq 20\mu\text{g/L}$ or 水温 $\geq 20^\circ\text{C}$ で定義。
前者のみで終了が決まった。

RCP2.6ではMRI-CGCM3のGP1 (40.1°N) で有意な遅延 (6日)。

RCP8.5では、全地点で早期化し、多くが有意。最大66日早期化。
→収穫時期が大幅に前倒し (栄養塩の枯渇が早まるため)。

2090年代と2010年代の養殖可能期間の差 (*:p<0.01 by Welch's t-test)



養殖終了日 - 養殖開始日で定義。

RCP2.6では有意な変化なし。

RCP8.5では全地点で有意に短縮。

100日以上も短くなる地点・ケースもある。

南の2地点GP5, 6 (宮城県北部) で影響が大きい。

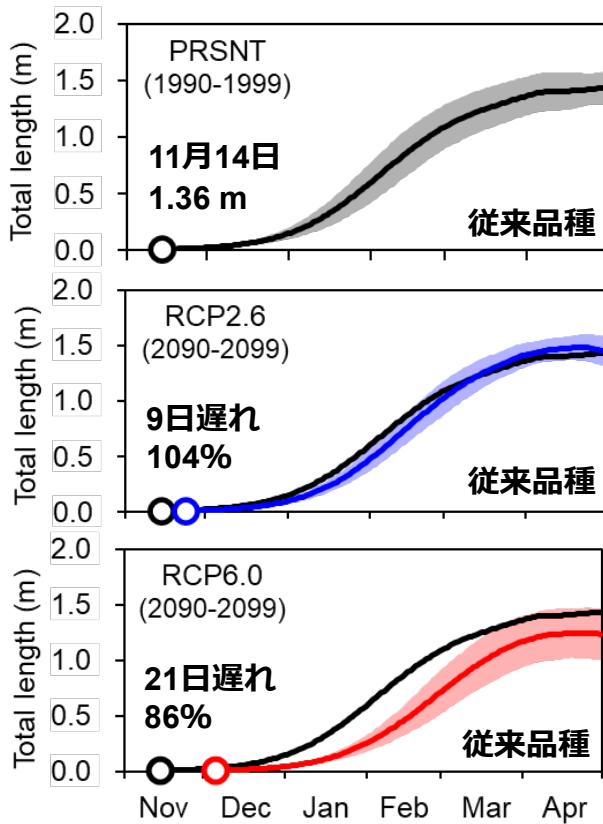
まとめ

- ・生長モデルの構築
　現場観測に基づいたワカメ生長モデルを構築
- ・温暖化影響評価
　生長モデルに将来予測モデル（MIROC5, MRI-CGCM3）によるRCP2.6・8.5の2シナリオで予測された海洋環境を与え、影響を評価した。
　同じシナリオでもモデル間で差があった。
　MIROC のRCP2.6シナリオでは、生産量増大が予測された。
- RCP8.5シナリオでは、宮城県で生産量が低下すると予測された。
　また、養殖終了日が1~2ヶ月早期化する。
　収穫作業や販売（入札）等のスケジュールの大幅な前倒しが必要となる。
- ・宮城県では栄養塩濃度の低下により、ワカメの生長悪化が予測される。
　→養殖種の転換、給餌養殖との併用など適応策の検討が必要。
- ・今後の課題
　養殖期間中の水温が上昇することから、未枯れや食害などの影響が顕著になる可能性あり（本モデルには組み込んでいない）

瀬戸内海におけるワカメ養殖業（全国シェア約14%）でも生長モデルを用いた将来予測を実施。

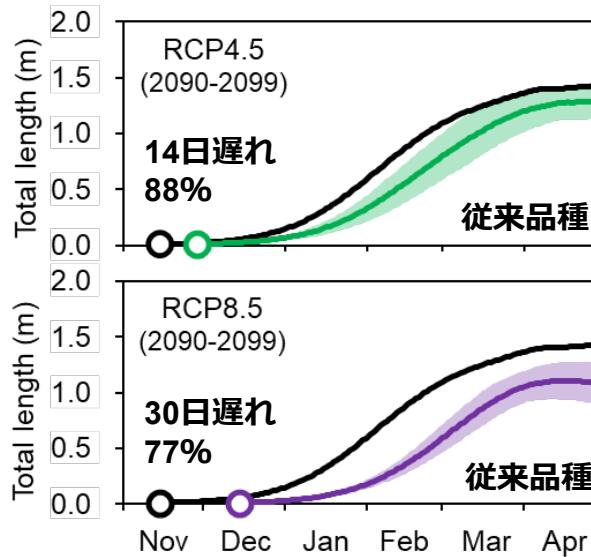
Onitsuka, G., Yoshida, G., Shimabukuro, H., Takenaka, S., Tamura, T., Kakehi, S., ... & Higashi, H. (2024). Modeling the growth of the cultivated seaweed *Undaria pinnatifida* under climate change scenarios in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Applied Phycology*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03291-1>

鳴門海域のワカメ全長の時間変化



○印は本養殖開始日
(10年間の平均値)

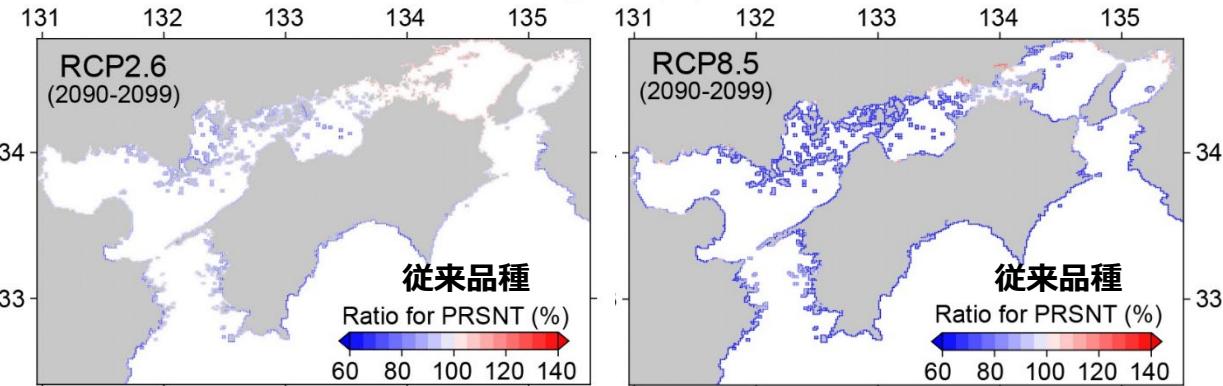
本養殖開始日
3/31時点の全長



養殖開始時期の遅れとDIN濃度低下によってRCP2.6を除いて全長が減少

Q. 海域による気候変動影響の違いは？

現在気候に対するワカメ全長の割合（3月31日時点）

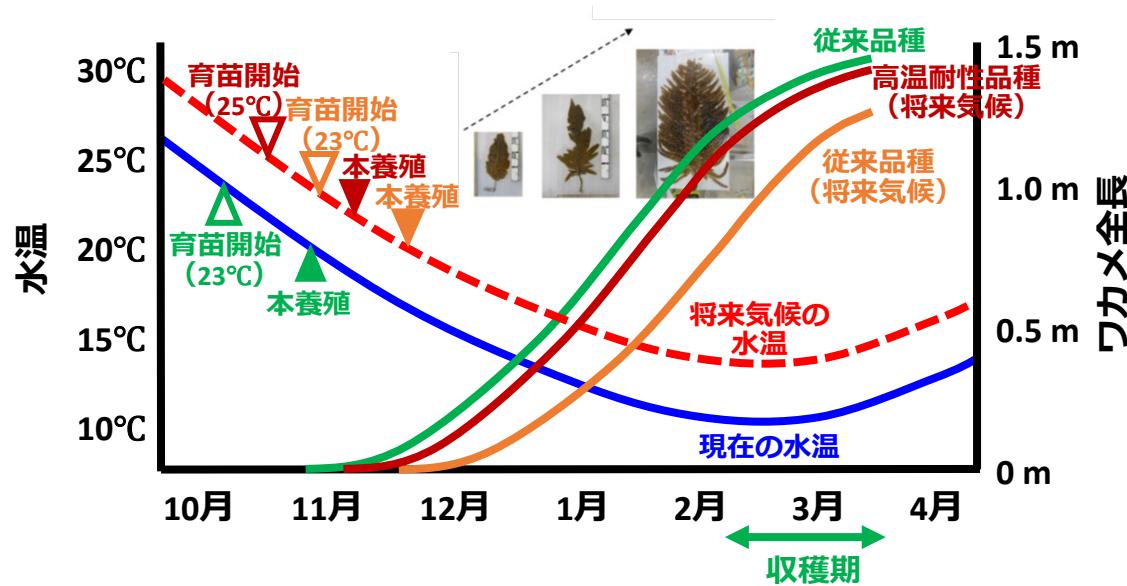


✓ 従来品種では瀬戸内海西部で全長の減少が大きい

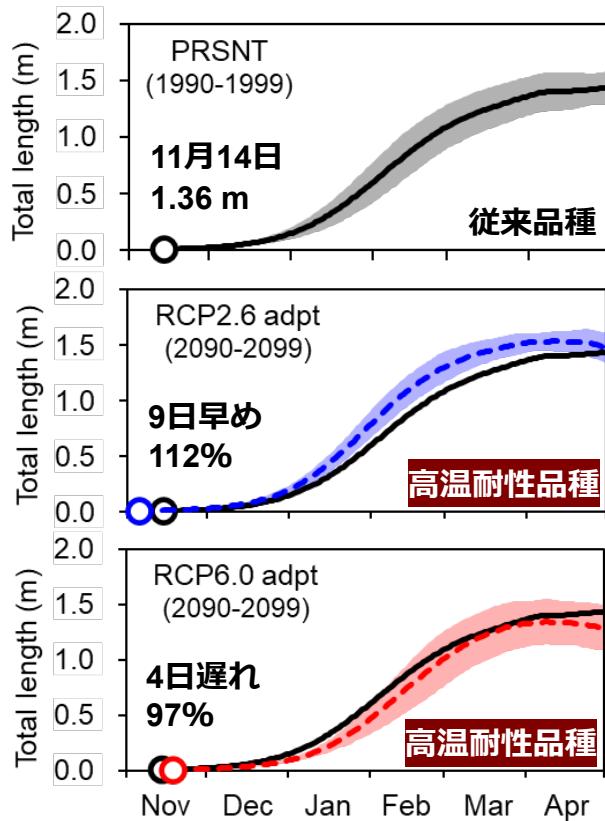
海域による違いの要因は？

ワカメの高温耐性品種が開発されている。

育苗開始水温が高い。従来：23°C, 高温耐性品種：25°C

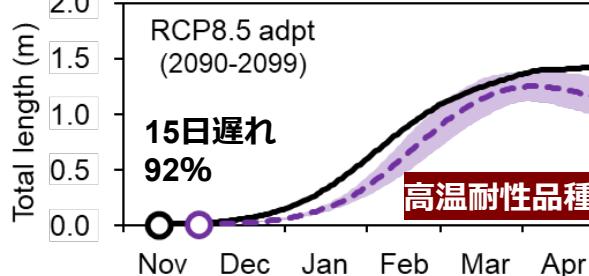
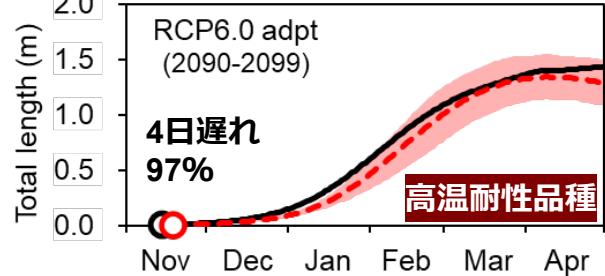
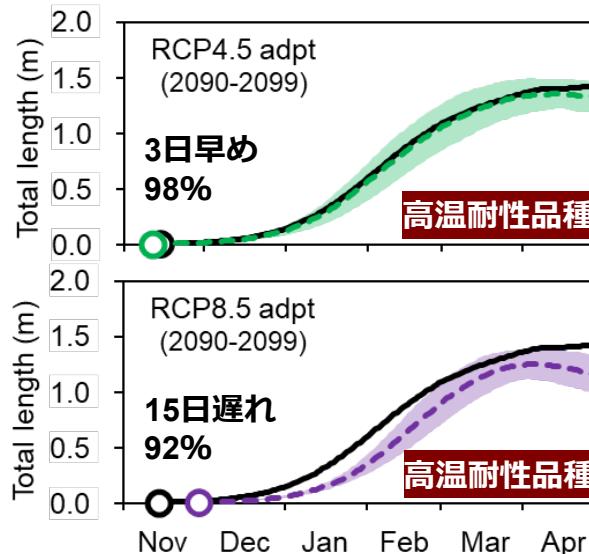
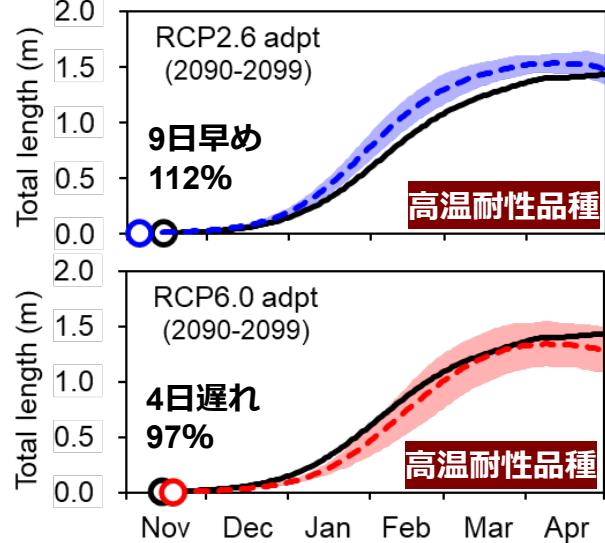


鳴門海域のワカメ全長の時間変化



○印は本養殖開始日
(10年間の平均値)

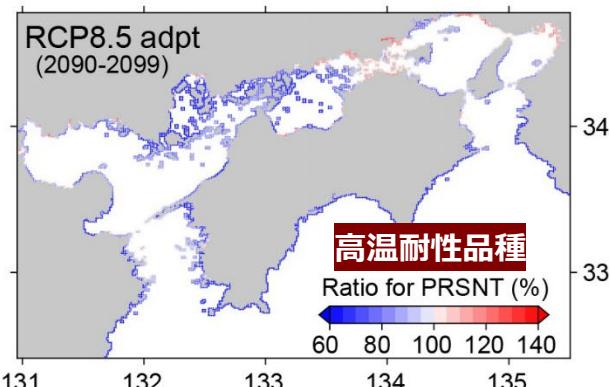
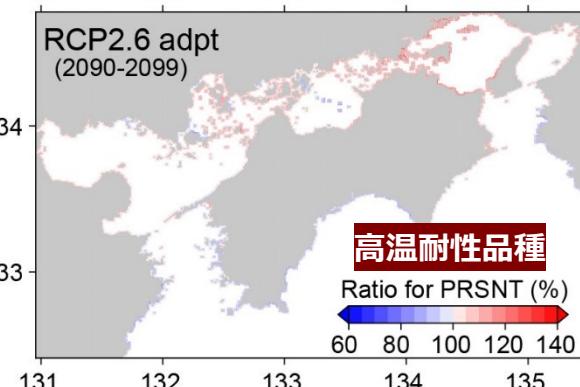
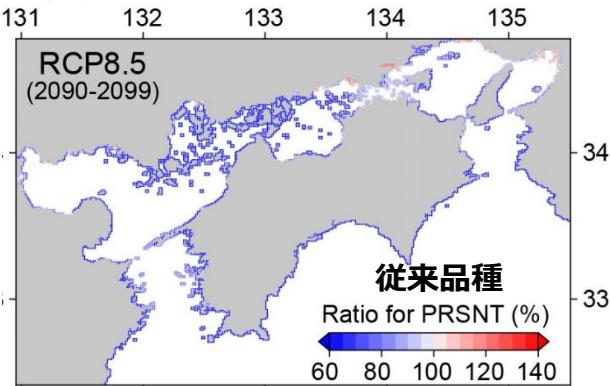
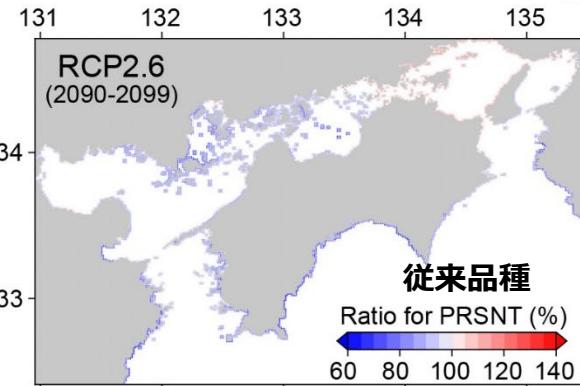
本養殖開始日
3/31時点の全長



高温耐性品種によって養殖開始時期を早めれば全長の減少を抑えられる
(適応策として有効)

Q. 海域による気候変動影響の違いは？

現在気候に対するワカメ全長の割合（3月31日時点）



- ✓ 従来品種では瀬戸内海西部で全長の減少が大きい
⇒高水温・低DIN濃度のため

- ✓ 高温耐性品種ではRCP2.6だと現在気候よりも高生長
- ✓ RCP8.5でも瀬戸内海東部では全長減少が抑えられ、むしろ増加する海域も

適応策オプション

- ・三陸（特に宮城県）では栄養塩濃度の低下により、ワカメの生長悪化が予測される。
→養殖種の転換、給餌養殖との併用など。
- ・瀬戸内海
→高温耐性品種の導入で高水温化に伴う生長減を軽減できる