

OTEC 排水高度利用のためのスジアオノリ養殖技術開発Ⅱ

鹿熊 信一郎^{*1}

Developing *Ulva prolifera* aquaculture technology for utilization of OTEC discharges 2

Shinichiro KAKUMA^{*1}

^{*1}Institute of Ocean Energy, Saga University (Kumejima Satellite), 500-1 Maja, Kumejima, Okinawa, 901-3104, Japan

Abstract

OTEC discharges nutrient rich deep seawater. The rich nutrient is beneficial for seaweed aquaculture but has negative impacts to coral reefs. Culturing expensive, fast grow green algae *Ulva prolifera* is efficient and effective way to retrieve nutrient from OTEC discharge. To develop the aquaculture technology, 35 cultivation experiments were conducted under different conditions using four sets of tanks of 30L, 500L and 2 tons at Okinawa Deep Seawater Research Center from 2021 to 2024. As a result (1): DGR (daily growth rate) was higher (74%) in Kumejima than in Shikoku (about 40%); (2) Productivity was 12.8 g-dry/m²-d, which was higher than that of other seaweeds. The growth rate did not differ between generations, and the high growth rate was passed on to the next generation; (3) Comparative tests were carried out at water temperatures between 17 and 21 °C. The higher water temperatures up to 20 °C resulted in higher production. Nineteen and 20 °C seem to be the appropriate water temperature for the aquaculture; (4) DGR was higher with higher light intensity, and there was a strong positive correlation between the two; (5) Eightythree-91% of the nitrate nitrogen and 30-37% of the phosphate phosphorus in the culture water could be retrieved through cultivation of *Ulva prolifera*.

Key words : OTEC discharge, Nutrient rich, *Ulva prolifera* aquaculture, Growth rate, Water temperature

1. 緒 言

太陽光の届かない海洋深層水（以下、深層水）の深度では、植物プランクトンは光合成ができず、有機物の分解だけが進むため栄養塩濃度は高くなる。沖縄県海洋深層水研究所が取水した深層水では、2020年と2019年、硝酸態窒素濃度はそれぞれ0.45, 0.35mg/L（以下、単位はすべてmg/L）で表層水の20~30倍以上だった。リン酸態リンは0.065, 0.059で表層水の約30倍だった。深層水に含まれる高濃度の栄養塩は、海藻養殖には有利であるが、造礁サンゴには悪影響を与える。高濃度の栄養塩がサンゴに悪影響を与える理由は、間接的には次の3つである。1) 光をめぐってサンゴと競争関係にある海藻を増やす。2) 植物プランクトンが増え海水が濁り、サンゴ内の共生藻の光合成を阻害する。3) オニヒトデ幼生の餌料となる植物プランクトンが増え食害種の大発生につながる。直接的にも、最近、リンが稚サンゴの骨格形成を阻害することがわかってきた (Iijima et al., 2019)。

このため、沖縄や深層水と表層水の温度差が大きい熱帯のサンゴ礁域でOTECを展開していくには、何らかの栄養塩対策が必要になる。深層水中の栄養塩を回収するには、高価な海藻を養殖する方法が効率が良い。富栄養化した海域の環境改善や魚介類養殖排水中の栄養塩回収を目的とした海藻養殖の研究も行われている（平山他, 2020）。そこで、OTECの排水を多段利用し、高価で生長の速いスジアオノリ（*Ulva prolifera*, Fig. 1）を養殖するとともに、排水に含まれる栄養塩を回収する技術の開発に取り組んだ。

スジアオノリは、近年、主産地の徳島県、高知県が不作で価格が高騰しており、乾燥品でキロ約1万円、生換算でキロ千円となっている。生長もきわめて速く、日間生長率が平均約40%と報告されている（Hiraoka and Oka, 2008, ウミブドウの日間生長率は約4%）。1週間の養殖で重量が10倍になる計算である。ある試験では、スジアオノリの養殖により海水中の無機態窒素を80%回収できた（平岡私信）。スジアオノリは、網に遊走子を付着させ、それを河口域で養殖する方法もあるが、遊走子を集塊化させ、それを陸上のタンクで養殖する方法も開発さ

原稿受付 2024年12月5日

^{*1} 佐賀大学海洋エネルギー研究所（〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地）

E-mail of corresponding author: kakuma@ioes.saga-u.ac.jp

れている (Hiraoka and Oka, 2008). そこで, この方法を用い, 沖縄の久米島に所在する沖縄県海洋深層水研究所においてスジアオノリ養殖技術の開発試験を実施した.

前報 (鹿熊他, 2022) では, ウォーターバスシステム (細断したスジアオノリの入ったビーカーを屋外で深層水を使って冷やすシステム) による種苗生産技術の開発, 30L, 500L, 2 トン水槽で順次スジアオノリを培養する試験の結果を報告した. 培養試験は 2020 年 10 月~2021 年 9 月の 15 回で, 1) 全般的な生長速度は非常に速く, 日間生長率 DGR (Daily Growth Rate) の最高は 137% だった. これまで報告されていた平均的な DGR より 3 倍以上高く, 1 週間の養殖で重量が 420 倍になる計算である; 2) スジアオノリの生長速度は成熟の影響を強く受け, 成熟が進むと生長は遅くなった. 藻体の色は薄くなり, 太く平らになった. さらに成熟が進むと, 遊走子を出し藻体の先端から分解していった. 水温は高いほうが成熟しやすく, UV (紫外線) を多く受けると成熟した; 3) 15°C, 20°C, 25°C で比較した結果, 水温が高いほうが DGR は高く, 15°C と 20°C, 25°C の DGR には統計的に有意な差があった. 20°C と 25°C の DGR には有意な差はなかった; 4) 換水率 (= 栄養塩濃度) を変えて生長速度を比較した結果, 換水率を変えても DGR に差はなかった. また, UV をカットしても DGR に差はなかった. 今回は, 2021 年 11 月~2024 年 9 月に実施した 35 回の培養試験の結果を報告する.

2. 試料および方法

- 1) スジアオノリはすべて四国産のものを使った. シャーレに保存していたスジアオノリ発芽体を, プラスチックのスプーンと 300 μm のふるいを使って 50 μm のふるいにこし取った.
- 2) この発芽体を 1L のフラスコに培養液 (0.1% の栄養剤ポルフィランコンコを添加した滅菌海水) とともに入れ (Fig. 2), 22.5°C, 1 日 12 時間光のあたる環境の室内で, エアレーションをしながら 17 日間以上培養した.
- 3) 十分大きくなった藻体を, 屋外の 30L 水槽 (アルテミア孵化槽, Fig. 3) で 3~4 日培養した. 水温は深層水と表層水を使い 20~23°C に調整した.
- 4) 以後, 条件を変え, 30L 水槽, 500L 水槽 (アルテミア孵化槽, Fig. 4), 2 トン水槽 (FRP 水槽, Fig. 5) をそれぞれ 4 つ使い, 生長速度を比較する培養試験を行った. 30L 水槽, 500L 水槽はポリカーボネイト製で, 水槽の側面から光が入る. FRP 水槽は水槽の側面から光が入らない. 培養日数は, 3~5 日間にした. 条件は, スジアオノリの世代, 水温, 換水率 (= 栄養塩濃度) を変え試験を行った.
- 5) Onset 社の水温・照度ロガー MX2202 を用い, 水槽内外の水温と照度を 10 分間隔で測定した. 2023 年 7 月からは, より正確に水温を測定するため, 水温は T&D 社のおんどとり RTR-502 で測定した. また, 日本医化器械製作所の「ライトアナライザー LA-105」を用いて 30L 水槽, 500L 水槽内部の照度, 光合成光量子束密度 (PPFD), UV を比較した. PPFD は, 植物が光合成に利用できる 400~700nm の波長の光量子束密度である.
- 6) 水温を細かく調整するため, 2022 年 11 月から水温でバルブの開閉をコントロールできる Do バルブ (T&D 社) を導入した. これを, 全水槽の深層水注水ホースに交換しながら取り付け, 10 分間隔で水温が設定水温より高い場合はバルブを開く設定にした.
- 7) 湿重量は, 網袋に入れた藻体を洗濯機で 1 分間脱水後計量した. 生長速度は, 次の式から DGR を計算し比較した. $\text{DGR}(\%) = [(W_t/W_0)^{1/t} - 1] \times 100$ W_0 : 開始時の藻体湿重量, W_t : 終了時 (t 日後) の藻体湿重量. また, ある程度乾燥させたスジアオノリを, 伊万里サテライトにおいて 110°C で 8 時間乾燥する試験を 2 セット 3 回実施し, 乾燥重量と湿重量の比を求めた.
- 8) 2 トン水槽の注水側, 排水側各 500mL 採水し, 硝酸態窒素とリン酸態リンを 2024 年に 2 回測定した.

Fig. 1 *Ulva prolifera*.Fig. 2 Cultivation of *U. prolifera* in a flask.Fig. 3 Cultivation of *U. prolifera* in 30L tanks.Fig. 4 Cultivation of *U. prolifera* in 500L tanks.Fig. 5 Cultivation of *U. prolifera* in 2ton tanks.

3. 結果と考察

3・1 培養試験の概要

35回の培養試験の概要を Table 1 に示した。スジアオノリの世代は第2世代から第5世代のものを使ったが、第4世代、第5世代が多かった。Max DGR は、全培養期間を通じた全条件での最大 DGR である。2 トン水槽のときは1度もなく、30L 水槽のときが多かった。Max Prod. は、2 トン水槽回収時に最も多かった生産量である。35回の平均は2,145g だった。全培養日数は12日が25回、11日が6回、9日、10日、13日がそれぞれ1回だった。Whole DGR は、最大生産量の試験区における全期間の DGR で、同じ生産量でも培養日数が短いと高くなる。35回の平均は74%だった。ILL. (Illuminance) は全培養期間の水槽外の照度である(夜間を含む)。35回の平均は17,462Lux だった。Variable は条件で、水温が27回、換水率(=栄養塩濃度)が4回、スジアオノリの世代が3回、同条件が1回だった。

Table 1 Outline of cultivation experiments.

Max DGR is the maximum daily growth rate (DGR) in whole cultivation term. Max Prod. is the maximum production at the end of the cultivation. Whole DGR is the whole cultivation term DGR of the Max Prod. experimental plot.

NO	Year	Start date	Gen.	Max DGR	Max Prod. (g)	Whole DGR	ILL. (Lux)	Variable, Term
1	2021	NOV 14	3rd	99%	2,599	76%	14,041	Temp., 12 days
2	2021	DEC 12	3rd	106%	2,097	93%	12,427	Same, 10 days
3	2022	JAN 29	2nd	89%	1,658	71%	10,893	Nutrient, 12 days
4	2022	FEB 18	2nd	83%	1,346	74%	9,762	Nutrient, 12 days
5	2022	MAR 18	3rd	74%	1,050	70%	13,209	Nutrient, 12 days
6	2022	APR 13	3rd	77%	1,721	70%	19,222	Nutrient, 12 days
7	2022	JUL 6	4th	211%	4,260	119%	28,394	Temp., 9 days
8	2022	AUG 4	4th	140%	4,194	93%	28,290	Temp., 11 days
9	2022	AUG 27	4th	132%	714	64%	19,352	Temp., 11 days
10	2022	SEP 14	4th	141%	1,025	72%	22,330	Temp., 11 days
11	2022	OCT 11	4th	131%	757	65%	17,621	Temp., 11 days
12	2022	OCT 20	4th	127%	1,057	70%	17,652	Temp., 11 days
13	2022	NOV 21	4th	81%	571	56%	7,222	Temp., 12 days
14	2022	DEC 14	4th	87%	953	69%	7,708	Temp., 11 days
15	2023	JAN 25	2-4th	111%	1,944	72%	11,773	Gen., 12 days
16	2023	FEB 22	2-5th	127%	4,040	82%	15,040	Gen., 12 days
17	2023	MAR 18	2-5th	99%	2,738	76%	11,693	Gen., 12 days
18	2023	APR 13	5th	125%	4,088	82%	18,800	Temp., 12 days
19	2023	MAY 17	5th	113%	2,878	77%	21,426	Temp., 12 days
20	2023	JUL 1	5th	140%	2,458	75%	27,421	Temp., 12 days
21	2023	JUL 24	5th	106%	1,672	63%	15,678	Temp., 13 days
22	2023	AUG 28	5th	89%	938	62%	25,455	Temp., 12 days
23	2023	SEP 17	5th	116%	1,030	63%	25,935	Temp., 12 days
24	2023	OCT 1	5th	88%	1,689	70%	16,552	Temp., 12 days
25	2023	DEC 1	2nd	104%	1,138	67%	9,580	Temp., 12 days
26	2024	JAN 11	3rd	117%	2,504	75%	13,181	Temp., 12 days
27	2024	FEB 7	4th	90%	1,584	67%	12,375	Temp., 12 days
28	2024	FEB 25	5th	105%	1,992	72%	8,051	Temp., 12 days
29	2024	APR 26	5th	115%	2,286	74%	18,704	Temp., 12 days
30	2024	MAY 13	5th	161%	3,189	79%	18,462	Temp., 12 days
31	2024	JUN 2	4th	147%	2,602	76%	13,973	Temp., 12 days
32	2024	JUN 28	4th	165%	3,906	82%	27,973	Temp., 12 days
33	2024	JUL 31	4th	146%	3,978	82%	28,219	Temp., 12 days
34	2024	AUG 22	5th	119%	3,020	78%	23,997	Temp., 12 days
35	2024	SPT 16	4th	116%	1,398	67%	18,757	Temp., 12 days
AVG.				116%	2,145	74%	17,462	

3・2 Doバルブの導入

スジアオノリは成熟すると生長が遅くなり、色も薄くなって品質が低下する。このため、成熟させない技術の開発は重要な課題となっている。令和4年度の試験では、設定水温が20℃の試験区では何回も遊走子を出したが、17℃の試験区では1回も遊走子を出さなかった。DGRは17℃が20℃より明らかに低かった。17℃と20℃の間に最適水温がありそうであり、17-20℃で比較することが必要になった。しかし、Fig. 6に示したように、晴れると1日の間に水温が8℃以上変動することもあり、細かい水温のコントロールは困難だった。

このため、水温でバルブの開閉をコントロールできるDoバルブを導入した。これを、30L、500L、2トンそれぞれ4つの水槽の深層水注水ホースに交換しながら取り付け、10分間隔で水温が設定水温より高い場合はバルブを開く設定にした。この結果、水温・気温などの変化によって深層水・表層水の注水量を調整する必要があるが、導入前よりも水温をはるかに安定させることが出来るようになった (Fig. 7)。

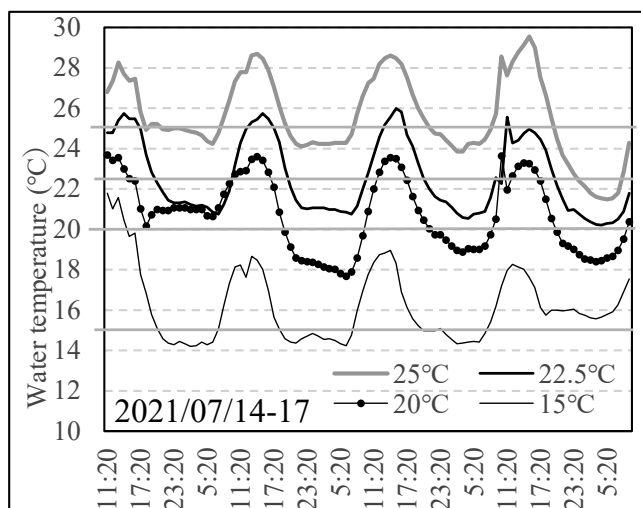


Fig. 6 Transition of water temperature in 4 tanks. 15, 20, 22.5, 25°C are set temperatures. 60 minutes running averages of 10 minutes interval raw data.

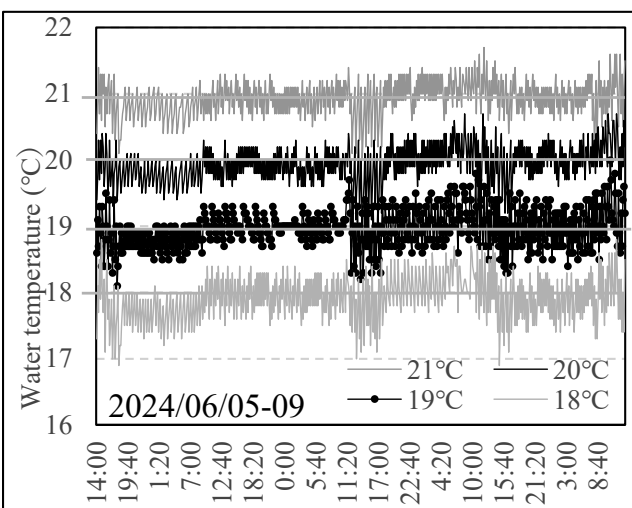


Fig. 7 Transition of water temperature in 4 tanks. 18, 19, 20, 21°C are set temperatures. Raw data of 10 minutes interval measurement.

3・3 非常に高い DGR

前報の 15 回の試験と同様に、非常に高い DGR を示した。最高の DGR は、2022 年 7 月 6 日～9 日の 30L 水槽 25°C の試験で、211% という驚異的な値を示した。計算上は 1 週間の養殖で重量が 2800 倍になる。四国ではスジアオノリの平均的な DGR は 40% と報告されており、2022 年の海洋深層水利用学会における高知県の発表でも、DGR は 40% 以下だった（鈴木他、2022）。Fig. 8 に、高知県と比較した久米島の代表的な生長の様子を示した。高知県は 2022 年 6 月 3 日～15 日、水温不明、久米島は 2022 年 8 月 4 日～16 日、設定水温は 20°C。久米島での 12 日間の全体 DGR は 83%、高知の深層水は 33%、表層水は 18% だった。

生長が速いと、実際の養殖では養殖の回転数を上げ年間生産量を増やすことが可能になる。四国のあるスジアオノリ陸上養殖業者は、30L, 100L, 1 トン, 7 トンの水槽を使い、スジアオノリを 7 日間同時並行で培養している。年間最大 52 回転の養殖が可能な計算になる。7 トンの水槽で 12kg のスジアオノリが生産できる。仮に DGR が 40% から 80% に上がると、同じ水槽を使い 4 日間で 12kg を生産できる計算になる。養殖サイクルは年間最大 91 回となり、生産量は 1.8 倍になる。

四国から輸送したものが第 1 世代、その母藻を使って種苗生産したものが第 2 世代、以下順に第 5 世代まで種苗生産を繰り返した。スジアオノリはほとんど単為生殖で増えるため、第 2～5 世代のスジアオノリはすべてクローンである。世代別の培養試験は 3 回しか実施しなかったが、第 2～5 世代の間で生長速度に差はなかった。

Fig. 9 に、第 2～5 世代の生長を比較した図を示す。速い生長速度は世代間で引き継がれていると考えられる。

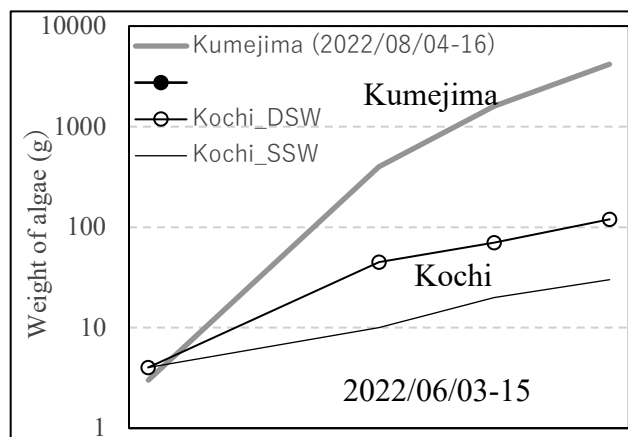


Fig. 8 Growth of *U. prolifera* in Kochi and Kumejima.

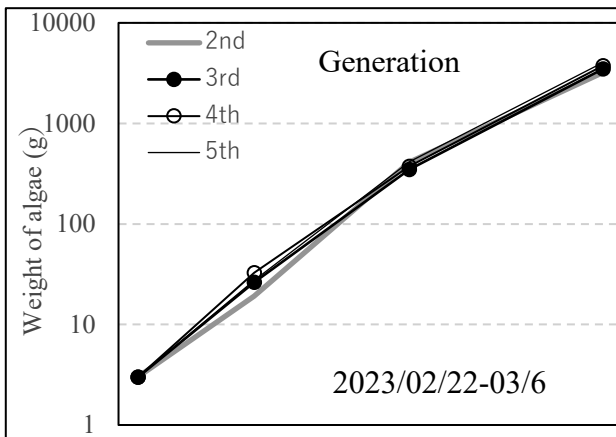


Fig. 9 Growth of *U. prolifera* by generations.

側面から光の入らない 2 トン水槽では、水槽の面積・1 日あたりの生産力（増殖速度）も調べた。初期投入量が多いほうが生産力は高くなるが、藻体の密度が増すと DGR は下がるので生産力も下がる。35 回の試験の生産

力は大きくばらつき、最低 31, 最高 358, 平均 130.5 g-wet/m²・d だった。これまでの最高は、2021 年 7 月 13 日～17 日の試験で 527g-wet/m²・d だった。伊万里サテライトで 6 回実施した乾燥試験の結果、乾燥重量と湿重量の比は 9.8% だった。したがって、35 回の試験の平均は 12.8g-dry/m²・d となる。この値は、スジアオノリとは別の *Ulva* 属藻類で生長が速いと報告されている（平山他, 2020）オオバアオサ（*Ulva lactuca*）の値 7.5～11.4 g-dry/m²・d よりも高い。

四国の養殖業者は 7 トン水槽でスジアオノリを 12kg 養殖しているの、藻体の密度は 0.17% になる（スジアオノリは、藻体の密度が海水の 0.1% を超えると生長が遅くなる、平岡・岡, 2004）。2 トン水槽では、藻体が 3.4kg で密度が 0.17% になる。このため、令和 4 年度からは 3.4kg を目標生産量に定めた。3g スタートで、12 日間の全体 DGR80% が目標となる。35 回の試験で目標生産量を超えたのは 6 回（17%）だった（Fig. 10）。

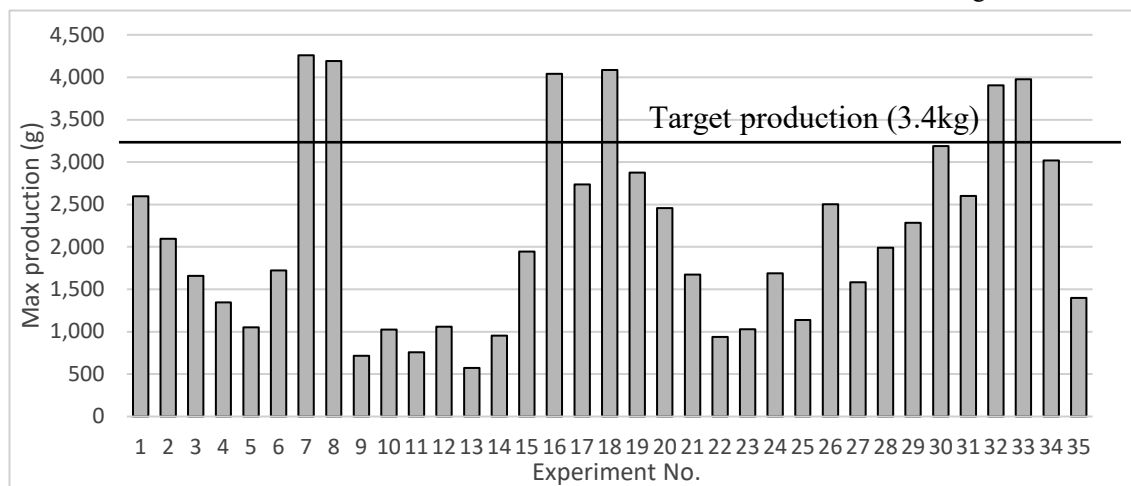


Fig. 10 Max production of *U. prolifera*.

3・4 水温別の生長と成熟

前報では、水温が 20℃ までは水温が高いほど全体 GDR は高かった。15℃, 20℃, 25℃ の設定水温で培養した結果、15℃ と 20℃, 15℃ と 25℃ の DGR には統計的に有意な差があった（Tukey, $p < 0.05$, 鹿熊他, 2022）。

令和 5 年度は、Do バルブを導入し温度を 17, 18, 19, 20℃ に設定して比較試験を実施した。Fig. 11 に 2024 年 1 月 11 日～23 日に実施した試験の結果を示す。縦軸は対数表示でなく実数表示にしている。令和 4 年度は、設定水温 20℃ の試験区は何回も成熟したが、令和 5 年度はほとんど成熟しなかった。この理由は、令和 5 年度は全般に生長が悪く、成熟するまでのステージに達していなかったこと、Do バルブの導入により水温が安定したことが考えられる。このため、令和 6 年度は温度を 18, 19, 20, 21℃ に設定して比較試験を実施した。Fig. 12 に 2024 年 6 月 28 日～7 月 10 日に実施した試験の結果を示す。

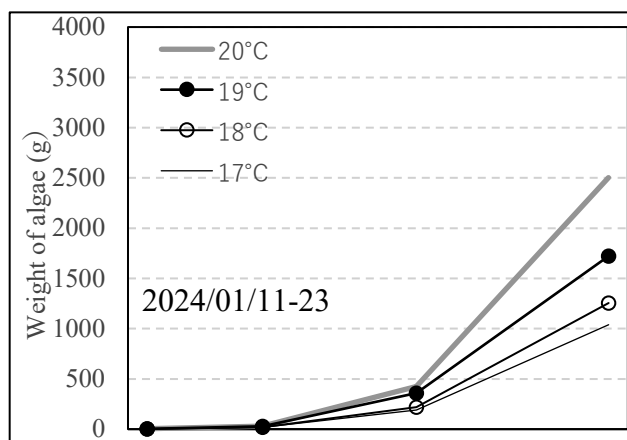


Fig. 11 Growth by water temperatures in JAN 2024.

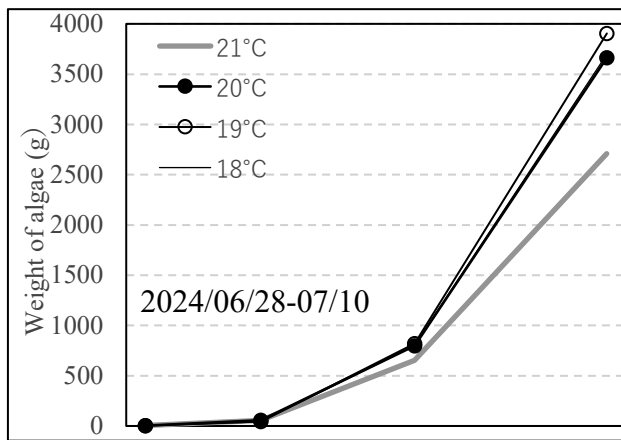


Fig. 12 Growth by water temperatures in JUN-JULY 2024.

生長が悪いときは、水温の違いにより生長速度に大きな差がでる傾向があった。2024 年 1 月の試験では、2 トン水槽の生産量は 17～20℃ それぞれ 1038, 1254, 1722, 2504g で 17℃ と 20℃ では 2 倍以上の差があった。生長

が良いときは、水温の違いによる生長速度の差は小さくなる傾向があった。2024 年 6 月の試験では、生産量は 18～21℃それぞれ 3698, 3906, 3665, 2708 g だった。21℃の生産量が少ないのは成熟したためである。

Fig.13 に令和 5 年度の設定水温別平均生産量を示した。設定水温が高いほど平均生産量は多くなった。光量の違いなどにより試験毎の生産量はばらつき、平均生産量の標準誤差は大きかった。このため、設定水温間で平均生産量に有意な差はなかった。しかし、試験毎に全水温の平均値からの偏差を比較したところ、設定水温 19℃と 17℃の間 ($P<0.05$, Tukey, 以下同じ)、20℃と 17℃の間と 20℃と 18℃の間 ($P<0.001$) に有意な差があった。

Fig.14 に令和 6 年度の設定水温別平均生産量を示した。20℃までは設定水温が高いほど平均生産量は多くなった。21℃は頻繁に成熟したため、平均生産量は少なかった。設定水温間で平均生産量に有意な差はなかったが、平均値からの偏差では、20℃と 18℃の間と 21℃と 20℃の間 ($P<0.05$) に有意な差があった。

Fig.15 に令和 5 年度・6 年度の設定水温別平均生産量を示した。設定水温が高いほど平均生産量は多くなった。設定水温間で平均生産量に有意な差はなかったが、平均値からの偏差では、19℃と 18℃の間 ($P<0.01$)、20℃と 18℃の間 ($P<0.001$) に有意な差があった。

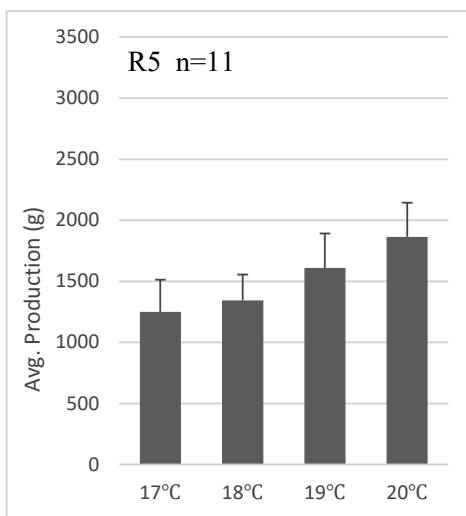


Fig. 13 Average production by set temperatures (R5).
T: Standard error.

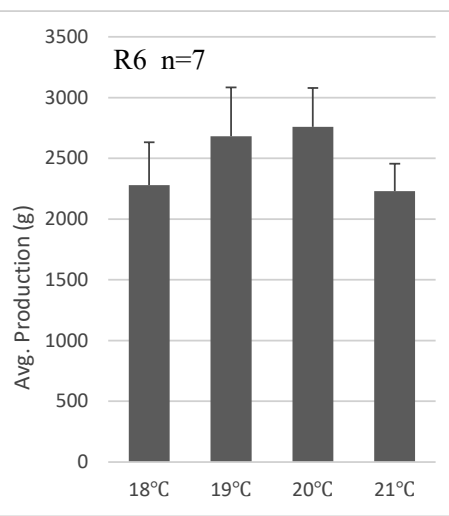


Fig. 14 Average production by set temperatures (R6).
T: Standard error.

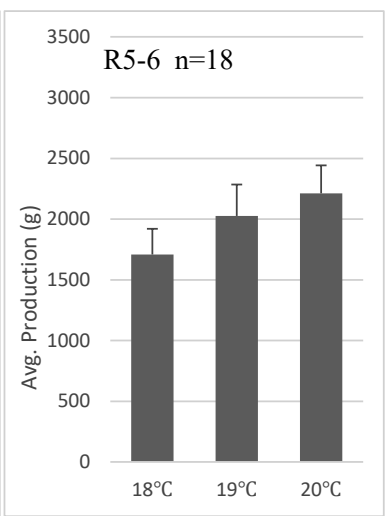


Fig. 15 Average production by set temperatures (R5-R6).
T: Standard error.

設定水温が 20℃までは水温が高いほど生産量は多くなったので、20℃が最適水温と考えられるが、どの年度の試験でも 20℃と 19℃の間には有意な差はなく、また、20℃の試験区は何回か成熟したため、光量が多いときは 19℃に設定することも考えられる。

令和 5 年度の試験では、Do バルブによる水温コントロールで水温振動幅を小さくするため、30L, 500L 水槽では表層水の注水量をかなり少なくした。その結果、光量は十分であるにもかかわらず DGR は低くなってしまった。このメカニズムはよくわからないが、表層水と合わせて深層水の注水量もかなり少なくなったため、栄養塩不足になった可能性がある。また、弱い強光阻害を起こした可能性もある。令和 2～4 年度の 4 回の試験では、栄養塩濃度が低く光量が多すぎると強光阻害を起こしていた。

3・5 光量と DGR

全体 DGR は光量が多いほうが高くなる。Fig.16 に令和 3～6 年度の水槽外の平均照度と全体 DGR の関係を示した。強い正の相関があった。令和 5 年度は、光量が十分であっても DGR は低い試験が多かった。Fig.17 に令和 5 年度の平均照度と DGR の関係を示した。両者に相関はなかった。Fig.18 に令和 5 年度を除いた関係を示した。正の相関関係はより強くなった。

日照時間も DGR に強く影響する。2023 年の夏至 6 月 21 日の昼の時間 13 時間 47 分に対し、冬至 12 月 21 日の昼の時間は 10 時間 31 分で、夏至よりも 2 時間 16 分 (24%) 短い。照度は、強すぎても光飽和点以上では光合成量は増えないが、昼の時間は光合成量に直接影響してくる。35 回の試験のうち、4 月～9 月の試験では平均生産量は 2236g, 平均照度は 22,202Lux だった。10 月～3 月の試験では平均生産量は 1639g (4 月～9 月の 73%), 平均照度は 14,867Lux (4 月～9 月の 67%) だった。両者の平均生産量には有意な差があった ($p<0.05$, t-test)。

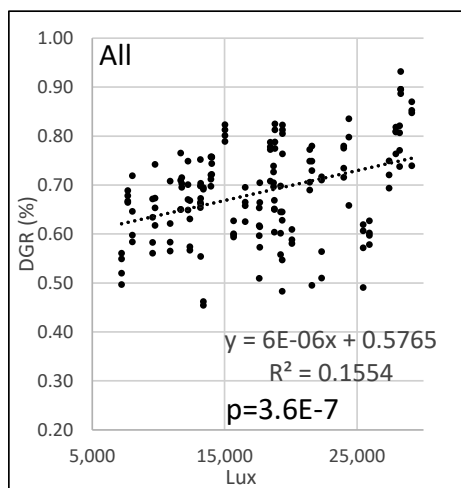


Fig.16 The relation between illuminance and production (all).

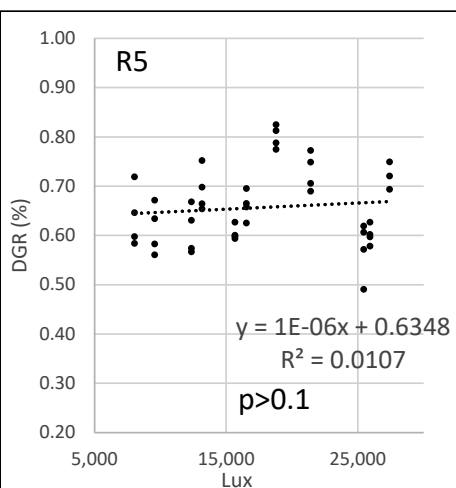


Fig.17 The relation between illuminance and production (R5).

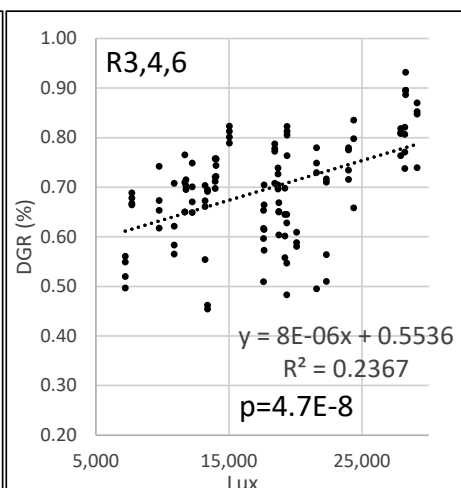


Fig.18 The relation between illuminance and production (R3, R4, R6).

Fig.19 に 2024 年 8 月 7 日～12 日の照度の推移を示した。スジアオノリの光飽和点は不明だが、仮にかなり高い 5 万 Lux だとしても、日中は照度が光飽和点を超えている時間が長く、光合成量はある量以上にはならなかったことになる。

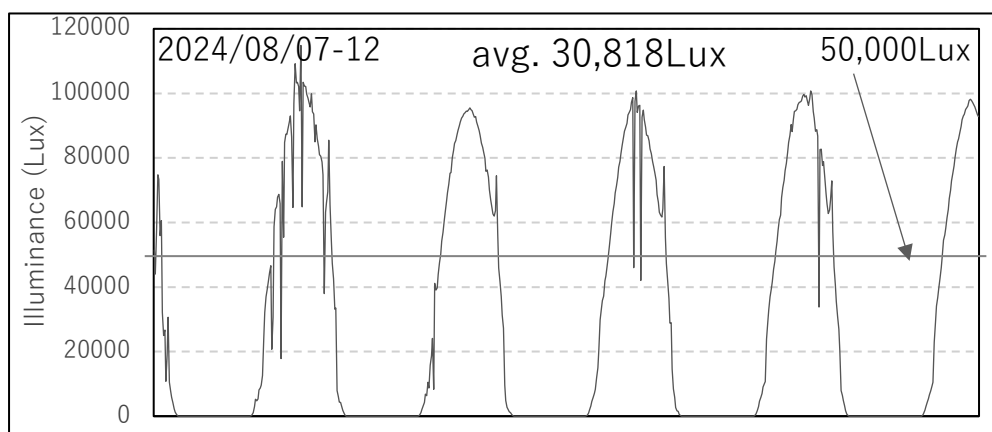


Fig.19 Illuminance transition on 7-12 August 2024.

2023 年 3 月に、500L 水槽の 1 つが劣化により壊れてしまったため、屋内で保管していた 2011 年購入の 500L 水槽に替えた。他の水槽と比べて明らかに透明度に差があったため、ライトアナライザー LA-105 を用いて内部の照度、光合成光量子束密度 (PPFD)、UV を比較した。4 つの水槽内部の照度は、外に対して 56～66% で、透明度の高い水槽で値が高くなることはなかった。PPFD の外との比は 52～56% で、これも水槽間で差はなかった。UV 量は水槽間で大きく異なった。透明度の低い 500L 水槽では UV は外の 18～22% だったが、透明度の高い水槽では 55% だった。

水槽内部では、水槽側面が透明の 500L より不透明の 2 トンの照度は低くなると予想される。しかし、2 トン水槽の内側は白色なので反射の影響が強い。令和 4 年度に実施した 12 回の試験では、水槽の底部と水槽外の照度の比は、8 回は 500L よりも 2 トン水槽のほうが高かった。藻体の密度が高く、最終段階で藻体の重量が海水の 0.1% より高い場合は、反射光の効果は弱くなり、この比は 500L のほうが 2 トンより高かった。

3・6 養殖による栄養塩回収効果

令和 6 年度に 2 回、スジアオノリ培養中の 2 トン水槽の注水側と排水側からそれぞれ 500mL 採水し、クール便で(株)南西環境研究所に送り硝酸態窒素 (深層水中の無機態窒素の大部分を占める) とリン酸態リンの濃度を調べてもらった。その結果、1 回目は、注水側の硝酸態窒素 0.35mg/L (以下、単位はすべて mg/L) が 0.06 に減少した (減少率 83%)。リン酸態リンは、0.047 が 0.033 に減少した (減少率 30%)。2 回目は、注水側の硝酸態窒素 0.34 が 0.03 に減少した (減少率 91%)。リン酸態リンは、0.038 が 0.024 に減少した (減少率 37%)。1 回目は Do

バルブを使っていたため正確な換水率はわからないが、およそ 1 日 7 回転程度だったと考えられる。2 回目は Do バルブを外し、四国の民間スジアオノリ陸上養殖業者と同じ 1 日 3 回転にした。

4. 結 言

OTEC 排水の高濃度栄養塩を回収する技術の一つとして、高価で生長速度の速いスジアオノリの効率的な培養技術を開発するため、令和 3～6 年度に条件を変えた培養試験を 35 回実施した。

- (1) 令和 5 年度からは、1℃の設定水温差で試験を実施するため、水温でバルブの開閉をコントロールする Do バルブを導入し、水温変動を大幅に小さくすることができた。
- (2) 四国（約 40%）と比べて高い DGR を示した（74%）。生産力（増殖速度）は 35 回の平均で 12.8g-dry/m²・d となり、他の海藻と比べて高かった。また、第 2～5 世代の発芽体を使い培養試験を行ったが、世代間で生長速度に差がなく、速い生長速度は次世代に引き継がれていた。
- (3) 水温を 17～21℃に設定し比較試験を行った結果、20℃までは水温が高いほうが生産量は多かった。他の水温より有意に生産量が多かった 19℃、20℃が養殖に適していると考えられる。
- (4) 令和 5 年度を除いて光量が多いほど DGR は高く、両者には強い正の相関があった。
- (5) スジアオノリの養殖により培養水中の硝酸態窒素の 83～91%、リン酸態リンの 30～37%を回収できることがわかった。

謝 辞

スジアオノリの乾燥重量と湿重量の比を求めるため、佐賀大学リージョナル・イノベーションセンター シニア URA 兼 海洋エネルギー研究所特命教授 平山伸氏、海洋エネルギー研究所技術専門員 浦田和也氏、技能補佐員 楠本美幸氏に乾燥重量を計測していただいた。ここに深謝する。

文 献

- Hiraoka, M., Oka, N., Tank cultivation of *Ulva prolifera* in deep seawater using a new “germling cluster” method (2008), pp.97-102, *Journal of Applied Phycology*, Springer.
- 平岡雅規・岡直宏, 室戸海洋深層水によるスジアオノリ養殖事業化実証試験, 高知県海洋深層水研究所報第 6 号 (2004), pp. 122-123.
- 平山 伸・田代修一・井上公平・浦田和也・飯間雅文・池上康之, 不稔性アオサ属植物の長期培養での生産性評価, 日本海水学会誌, 74 (2020), pp. 249-253.
- Iijima, M., Yasumoto, K., Yasumoto, J., Yasumoto-Hirose, M., Kuniya, N., Takeuchi, R., Nozaki, M., Nanba, N., Nakamura, T., Jimbo, M., Watabe, S., Phosphate Enrichment Hampers Development of Juvenile *Acropora digitifera* Coral by Inhibiting Skeleton Formation (2019), pp.291-300, *Marine Biotechnology*, Springer.
- 鹿熊信一郎・甲斐哲也・白樫美来・照屋清之介, OTEC 排水高度利用のためのスジアオノリ養殖技術開発, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター報告 OTEC, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター(2022), pp. 35-42.
- 鈴木大進・川北浩久・堀田敏弘・河野敏夫, 異なる海水で培養されたスジアオノリに含まれる β -カロテン量の比較, 海洋深層水研究 23 巻 1 号, 海洋深層水利用学会(2022), pp. 5.