

# 水産用種苗生産における地中熱利用とその効果 (水産用種苗生産における地下浸透海水による水温制御試験)

山本隆司\*, 平手康市, 伊藤寛治, 木村基文, 渡辺利明\*

栽培漁業センター (以下, 栽培セ) は, 敷地内に 2010 年度に設置した地下 30m の井戸から周年ほぼ一定水温 (23.6~23.8°C) の地下浸透海水 (以下, 地下海水という) を取水することが可能である.

その地下海水を熱源として使用した飼育水の熱交換により, 魚類 (マダイ) の種苗生産と餌料生物 (ナンノクロロプシス) の培養における効果を検討した.

本試験は, 沖縄県環境再生課の所管事業である「平成30年度地中熱を活用した省エネ技術の開発・普及事業」の一部として栽培セが実施したものである.

## 材料および方法

各水槽の水温は, 概ね朝9時頃に棒状温度計とデータロガー-RTR-502(T&D Corporation) で測定し, 流量はクランプオン式流量センサ (FD-Q シリーズ, 株式会社キーエンス) で計測した. 気温は概ね朝9時頃に, 培養棟海側入口の屋内に設置した棒状温度計により計測した.

### (1) 循環式マダイ種苗生産における地中熱利用効果試験 (加温)

試験には, 栽培セにある鉄骨スレート造の旧飼育棟 (C棟) 内にある円形 50kL 水槽 2 面と円形 100kL 水槽 1 面を使用した. 種苗生産は, 海水の利用に関して二種類の方式で行った. 一つは, 一般的な海水を掛け流す掛け流し式で, もう一つは, 濾過槽との間で海水を循環させる加温に適した循環式生産である. 50kL 水槽 1 面では, 2019 年 1 月 18 日から 2 月 16 日までの 40 日間掛け流し式種苗生産を行った (掛け流し区). 他の 50kL 水槽 1 面は濾過槽とし, 100kL 水槽と循環させ水量を 150kL とした. 100kL 水槽内に投げ込み式楕円巻きチタン熱交換器 (管の外径 24mm, 管の延長 47m) 4 基 (図 1) を設置し, 地下海水の



図1 投げ込み式楕円巻きチタン熱交換器

通水量は 4 基合計で毎分 47~49L とした. 100kL 水槽では, 2019 年 1 月 13 日から 2 月 21 日までの 40 日間循環式種苗生産を行った (熱交換区).

### (2) ナンノクロロプシス培養における地中熱利用効果試験 (冷却と加温)

栽培セにある容積 100kL のナンノクロロプシス培養水槽 6 面の内 2 面の底面に直径 20mm, 長さ 5m のチタン管 10 本をそれぞれ配管し, その中に地下海水を通水して熱交換システムとした (図 2). 夏期の地下海水の水温は 23.8°C, 冬季の地下海水の水温は 23.6~23.7°C で通水量は 1 面当たり毎分 21~23L とした.



図2 ナンノクロロプシス培養水槽の熱交換システム

ナンノクロロプシス培養は, 水槽の水位を 30~40cm にして水量を 30~40kL とし, 底面に配置した塩ビ管から適量通気して攪拌した. 培養海水の消毒は, 12%次亜塩素酸ナトリウムを海水 1kL 当たり 50ml 添加し, 1 時間後にチオ硫酸ナトリウムで中和した. 施肥は海水 1kL 当たり硫安 80g, 過リン酸石灰 15g, EDTA 金属複合塩 (クレワット 32) 5g を添加した. 各試験区の元種は, 濃縮ナンノクロロプシスを同量投入した.

## 結果及び考察

### (1) 循環式マダイ種苗生産における地中熱利用効果試験

\* 退職

熱交換区と掛け流し区の水温を表1と図3に示した。2月3日頃までの飼育前半は、掛け流し区は、ほとんど止水のため気温で飼育水が冷やされ、取水井戸（栽培施設前面海域の水深約3mから取水）よりも水温が低くなっている。熱交換器に流入する地下海水の温度は取水井戸の水温よりも高く23.8℃なので、熱交換区は多少加温されている。この間の熱交換区と掛け流し区との温度差は、1.4~2.7℃で熱交換区の方が高かった。一方、飼育後半では、掛け流し区の流量の増大に伴って水温は上昇し取水井戸の水温に近づいた。また、気温上昇による取水井戸水温の上昇で、飼育終盤には

表1 各試験区水温、取水井戸水温と屋内気温

日付 2019年	熱交換区	掛け流し区	熱交換区- 掛け流し区	取水井戸	気温
1月13日					-
1月14日					21.2
1月15日					-
1月16日	22.3				-
1月17日	22.0				16.9
1月18日	21.3	20.7	0.6	21.5	17.5
1月19日				22.2	18.5
1月20日	22.3			22.5	21.6
1月21日	22.0	20.6	1.4	21.2	17.7
1月22日	22.4	20.9	1.5	22.0	16.5
1月23日	21.0	19.6	1.4	21.7	17.0
1月24日	21.7	19.9	1.8	21.8	16.7
1月25日	21.9	20.0	1.9	22.0	17.7
1月26日	22.5	20.5	2.0	21.0	15.7
1月27日				21.3	17.5
1月28日	22.3	19.6	2.7	21.4	19.0
1月29日	22.6	20.4	2.2	21.5	18.0
1月30日	22.7	20.7	2.0	21.9	19.5
1月31日	23.1	21.3	1.8	22.0	21.0
2月1日	23.2	21.4	1.8	21.2	16.7
2月2日	23.3	20.8	2.5	21.4	18.7
2月3日	23.3	21.1	2.2	22.0	21.0
2月4日	23.5	21.9	1.6	22.0	22.0
2月5日	23.3	21.7	1.6	21.9	19.9
2月6日	23.2	21.7	1.5	22.0	21.0
2月7日	23.5	22.1	1.4	22.1	21.5
2月8日	23.5	22.1	1.4	22.1	21.5
2月9日		22.0		22.1	20.3
2月10日	22.2	21.5	0.7	22.0	19.3
2月11日	23.0	21.4	1.6	21.9	18.7
2月12日	22.9	21.1	1.8	21.6	19.0
2月13日	23.2	21.5	1.7	21.9	21.3
2月14日	22.8	21.5	1.3	22.9	20.3
2月15日	22.9	22.4	0.5	23.3	20.5
2月16日	23.5	23.2	0.3	23.2	21.1
2月17日	23.4	22.7	0.7	23.1	19.6
2月18日	23.1	22.3	0.8	22.6	19.5
2月19日	23.2	22.6	0.6	22.5	23.4
2月20日	23.5	22.6	0.9	22.6	21.8
2月21日		22.7		23.1	22.5
2月22日		22.8		22.9	21.0
2月23日		22.9		22.2	18.6
2月24日		22.4		22.3	21.0
2月25日		22.2		22.3	20.5
2月26日		22.4		22.6	20.0

熱交換区と掛け流し区の水温は、熱交換区の方が0.3~0.9℃

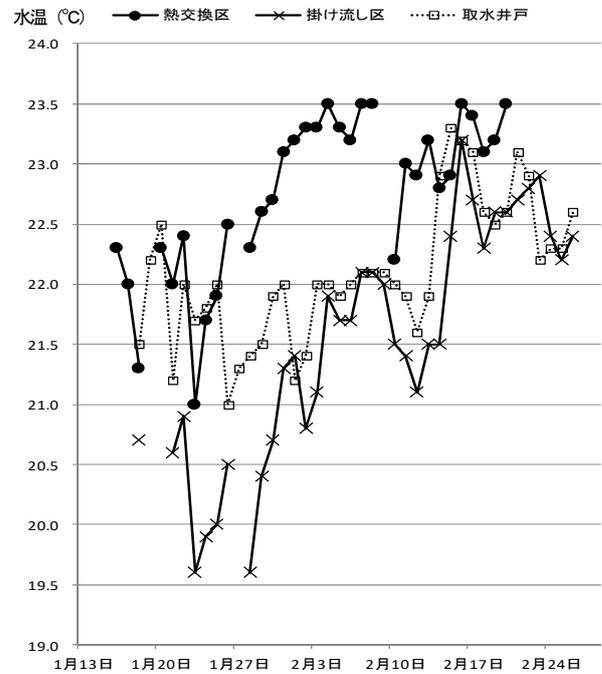


図3 各試験区と取水井戸の水温変化

と高く温度差は小さくなった。

熱交換区は、2019年1月13日（日齢0）からマダイ受精卵を収容し生産を開始した。受精卵は翌14日分を含め合計約330万粒収容し、日齢2における最終的な孵化率は57.8%であった。その後、日齢26及び日齢31にサイホンを利用した余剰魚の除去を行った（それぞれ、0.24万尾、1.1万尾）。

2月21日（日齢39）に、推定23.6万尾を取りあげた（平均全長21.46mm）。孵化仔魚からの生残率は12.4%となった。

掛け流し区は、2019年1月18日（日齢0）にマダイ受精卵を収容し生産を開始した。受精卵は約74.8万粒収容し、日齢1における孵化率は77.5%であった。その後、日齢26にサイホンを利用し余剰魚14.5万尾を除去した。2019年2月26日（日齢39）に、推定14.6万尾を取りあげた（平均全長20.3mm）。孵化仔魚からの生残率は25.1%となった。

採卵のロットや水槽規模、時期が異なるため、比較は難しいが、取り上げ時の平均重量は熱交換区の方が大きい傾向が見られた。

(2) ナンノクロロプシス培養における地中熱利用効果試験

夏期（2017年8月27日）と冬期（2018年2月28日）における通常止水区と熱交換区の1日の水温変化を図4と図5に示した。夏期は約3℃の冷却効果があり、冬期は約0.9℃の加温効果があった。

培養試験のデータは、8月から9月の期間中に培養が終了した回次を抽出した。

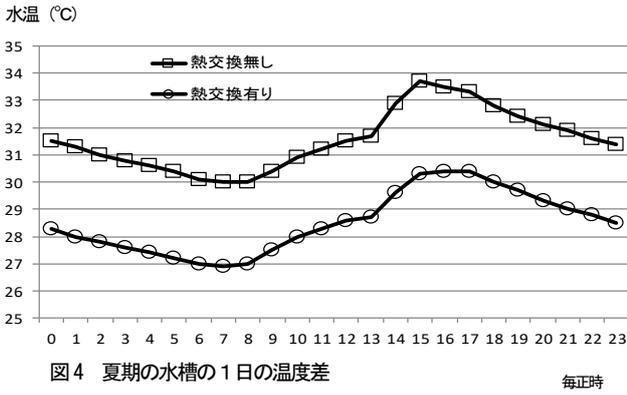


図4 夏期の水槽の1日の温度差

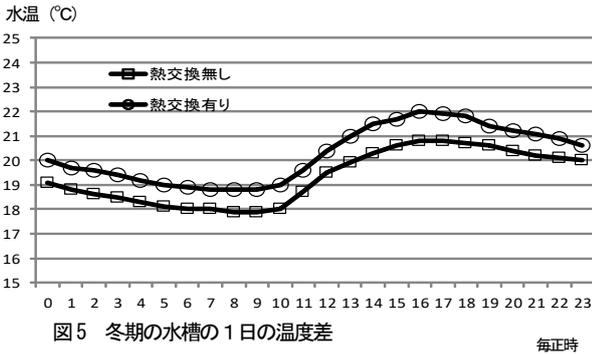


図5 冬期の水槽の1日の温度差

1) 廃棄率を指標とした比較試験

培養中のナンクロロプシスが不調により変色・枯死した場合は廃棄することとなる。廃棄率を指標とする夏期の熱交換区と通常区の培養比較試験結果は表2に示したとおりである。

表2 熱交換区と通常区の廃棄率の比較

2017年8月～9月

試験区	廃棄	正常	合計	廃棄率
熱交換区	0	6	6	0%
通常区	4	3	7	57.1%

2018年8月～9月

試験区	廃棄	正常	合計	廃棄率
熱交換区	0	8	8	0%
通常区	0	15	15	0%

取水井戸の8月の水温は、2018年は2017年に比べ0.5～2.0°C程度低かった(図6)。このため2018年は通常区で高水温に起因する廃棄事例が発生しなかったものと思われる。熱交換区と通常区で廃棄率の差を比べたところ、2カ年とも有意な差は見られなかった(フィッシャーの正確確率検定)。

2) 高濃度の培養達成率による比較試験

細胞数 1500 万細胞/mL 以上に達した培養を「成功」として、熱交換区と通常区で成功率の差を比べたところ、平成

30年是有意な差は見られなかったが、平成29年は  $P=0.02098 < P=0.05$  で有意な差となった。



図6 2017年と2018年の取水井戸の水温

表3 熱交換区と通常区の培養回数と成功率の比較

2017年8月～9月

試験区	成功	不調	合計	成功率
熱交換区	6	0	6	100%
通常区	2	5	7	28.6%

2018年8月～9月

試験区	成功	不調	合計	成功率
熱交換区	5	3	8	62.5%
通常区	7	8	15	46.7%

3) 熱交換区と通常区の培養比較試験

①第1回目 2018年9月21日～10月2日

熱交換区は、培養2日目から7日目までは1.0～1.7°C水温が低かった(冷却効果)。培養8日目には台風24号の直撃のため、その後は通常区と熱交換区の温度差はなくなった。(図7)

温度差による培養状況に大きな差は見られなかった。(図8)

②第2回目 2018年10月6日～10月15日

熱交換区は、培養1日目から5日目までは0.6～0.8°C水温が低く(冷却効果)、培養6日目から9日目までは0.2～1°C水温が高くなった(加温効果)。(図9) 温度差による培養状況に大きな差は見られなかった。(図10)

③第3回目 2018年12月6日～12月21日

熱交換区は、培養3日目から12日目までは0.9～1.8°C水温が高かく、培養13日目から14日目までは2.5～2.7°C水温が高くなった(加温効果)。(図11) 温度差による培養状況に大きな差は見られなかった。(図12)

④第4回目 2019年2月1日～2月14日

熱交換区は、培養期間を通して0.8~2.1℃温が高くなった(加温効果)。(図13)

温度差による培養状況に大きな差は見られなかった。(図14)

まとめ

- ・水温が高かった2017年は、通常区で培養不調による廃棄が発生したが熱交換区では発生しなかった。
- ・熱交換区は、夏期であっても高い細胞数まで培養が可能であった。
- ・熱交換区の冷却効果は年によって異なり、暑い夏では効果が顕著であった。

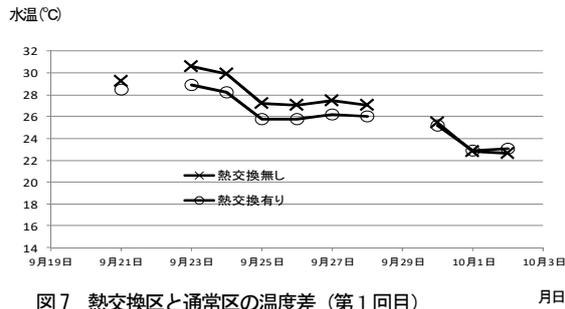


図7 熱交換区と通常区の温度差 (第1回目)

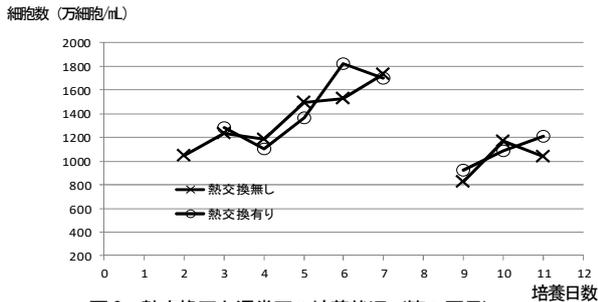


図8 熱交換区と通常区の培養状況 (第1回目)

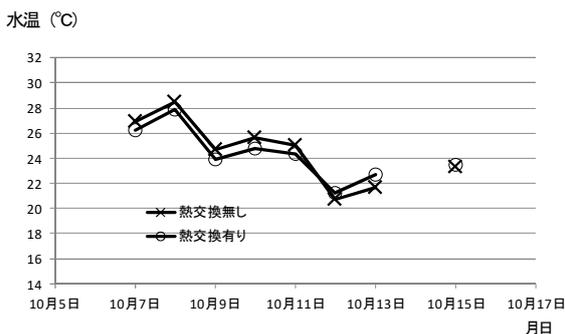


図9 熱交換区と通常区の温度差 (第2回目)

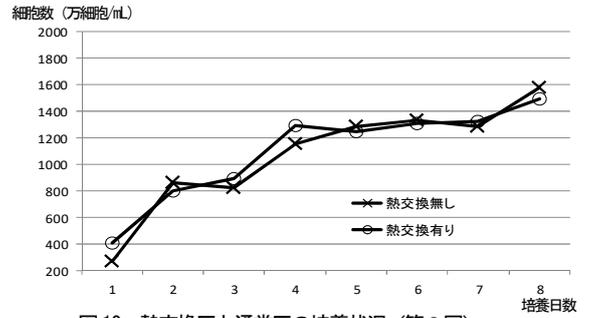


図10 熱交換区と通常区の培養状況 (第2回)

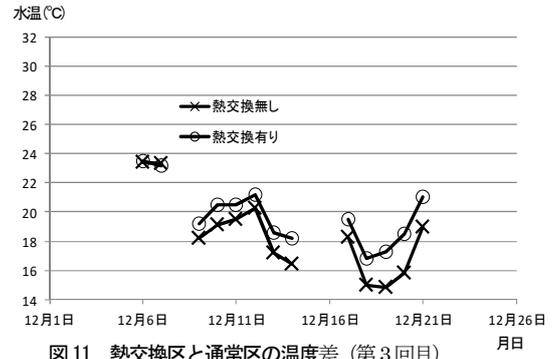


図11 熱交換区と通常区の温度差 (第3回目)

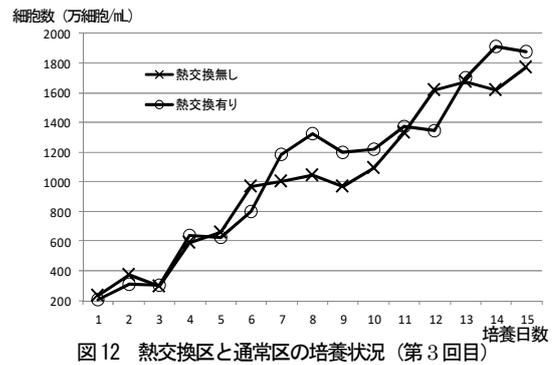


図12 熱交換区と通常区の培養状況 (第3回目)

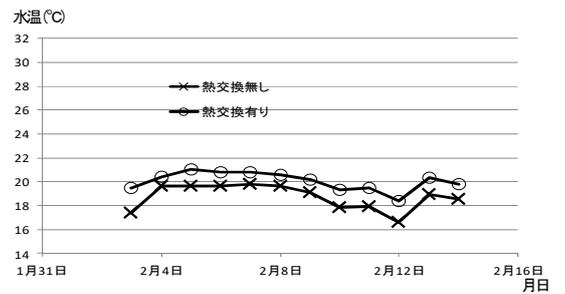


図13 熱交換区と通常区の温度差 (第4回目)

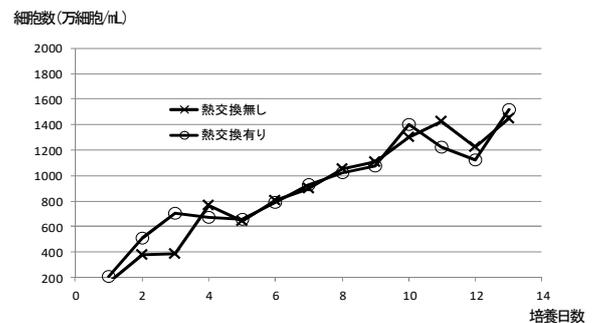


図14 熱交換区と通常区の培養状況 (第4回目)