



山本 義久 (やまもと よしひさ)

(株)水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所(屋島庁舎) 増養殖部 閉鎖循環システムグループ長。海洋科学博士。静岡県生まれ。東京水産大学大学院修士課程修了後、静岡県温水利用研究センター、(社)日本栽培漁業協会勤務を経て現職。専門は、海産魚介類の栽培漁業と閉鎖循環飼育システム開発。マダガスカルやUAE等での国際技術協力にも従事。個人活動では、食文化研究家として小学校等での食育活動を精力的に展開中。似顔絵は、「小学館ピックコミックスピリッツ」(美味しんば101巻「食の安全」より)。

閉鎖循環飼育による省エネ効果

魚介類の閉鎖循環飼育についての隔月連載を再開します。約1年の休載期間中、筆者は閉鎖循環式種苗生産システムについての研究成果を体系的に取りまとめ、「海産魚類の閉鎖循環式種苗生産システムの開発に関する研究」の論文題目で、東京海洋大学大学院から博士号を授与されました。また、閉鎖循環飼育に係る共同研究は、本誌2012年4月号で紹介した香川県、広島県に加え、沖縄県、山口県、さらに秋田県や鳥取県、愛媛県の西条市や八幡浜市などとも連携の輪が広がっています。閉鎖循環飼育システムの有効性への認知度、社会からの期待がそれだけ高まってきたと受け止めています。この2ndシリーズでは、閉鎖循環飼育システムの産業的普及を強く意識しながら、読者の皆さんに分かりやすい情報提供に努めますので、どうぞよろしくお願ひします。

さて、前シリーズではシステムのハード面が主体でしたが、本シリーズではソフト面を中心に、閉鎖循環飼育の有効性や関連事例を取り上げます。すなわち、閉鎖循環飼育の主なメリットと言える、①省エネ効果、②高生産性、③疾病防除、④環境保全効果、などについて詳解し、さらに海外での閉鎖循環式養殖の現状なども紹介していきます。

魚介類飼育における水温管理の重要性

閉鎖循環式養殖の経済性を高めるには、可能な限りの高密度飼育を行なながら、その養殖種に最適な水温や水質を維持し、養殖期間を短縮することがポイントとなる。

変温動物である魚介類の体温は環境水温とほぼ同じである。一方、生命現象の基本である生体内の生化学反応は温度によって規定される。そのため、飼育水温は魚介類の呼吸代謝や生理活性に大きく影響し、例えば10℃の温度上昇で呼吸代謝は2倍になることがよく知られている(Q_{10} の法則)。

けれども、海面の小割式網生簀による養殖では、飼育水温は大きく変化する環境水温に依存せざるを得

ない。養魚家が行える水温調整は、冬季は比較的水温の高い海域へ移動させたり、夏季は表層よりも低い水温の深さまで生簀を沈下させるくらいである。それと比べると、陸上養殖施設は水温調整が行える構造になっているが、掛け流し式だと、温度調整に投入したエネルギーがまさしく湯水のごとく失われてしまう。しかし、閉鎖循環飼育では、文字通り飼育水を循環させてほとんど換水しないため、水温調整のエネルギーコストを大幅に節約できる。

適正水温の“幅”

高い活性や成長が維持される適正水温は魚種によって異なり、さらに同一魚種・個体でも成長率や餌

料転換効率などの指標により、最大値を示す温度が異なる場合もある。

安藤によると、寒帶性のマツカワは20°Cで最も成長がよい。マダイは29°Cで最も成長がよいが、餌料転換効率等を考慮すると24°Cが最適になるという。また、会田によると、魚類が最終的に選択する水温は、寒帶性のサケやニシンなどは14°C前後、温帶性のマアジ、マダイ、シロギスなどは24~26°C、クロダイやスズキなどはその範囲が29~30°Cまで上方に広がる。これらは、餌料転換効率が最大になる温度とほぼ一致する。しかし、最大日間成長率を示す温度はそれより少し高く、最大日間摂餌率を示す温度はさらに高いという。

とはいっても、日本には四季があり、気温の年変動は30~50°C、海水温でも15~25°Cに及ぶ。したがって、陸上養殖施設において飼育水を常時適温に維持できれば、その効果は大きい。一例を挙げると、海面養殖や掛け流し式の陸上養殖では、トラフグを稚魚から約2年かけて1kgサイズに育てているが、閉鎖循環飼育システムで最適水温を維持すれば、半分の約1年で同サイズに達する。

生物ろ過槽の硝化能力と水温の関係

水温が上昇すると飼育魚の活性が高まり、代謝量や摂餌量の増加に伴ってアンモニア排泄量も増加する。呼吸の活発化により酸素消費量や二酸化炭素排出量も増加する。一方、14~27°Cの水温範囲内では、閉鎖循環飼育システムの生物ろ過装置の硝化細菌が活性化し、硝化能力は温度上昇とともに1.8倍も向上する。そのため、システムの仕様が適正であれば、水温上昇に伴うアンモニアの増加は、生物ろ過装置の硝化能力向上により相殺され、アンモニアの蓄積は起こらない場合が多い。

一方、活魚での輸送や短期蓄養を目的としたシステムでは、一般に、魚の収容量が極めて多く、ろ過槽は小さく設計されているため、そうはならない。このため、水温を20°C以下に抑え、魚のアンモニア排泄量を低減させるなどの措置を探ることになる。

閉鎖循環飼育システムにおける水温管理法

閉鎖循環飼育システムでの水温調整方法は2通りある。一つは、飼育水槽に設置した熱交換用の温冷水管などで飼育水を直に加温・冷却する方法。もう一

つは、外気温の影響を受け難い密閉型の室内に閉鎖循環飼育システムを設置し、その室温により水温をコントロールする方法である。

前者は、掛け流し式の陸上養殖施設でもよく採用されており、熱交換資材にはチタンコイルなどが使われているが、飼育水と気温の差が大きい場合は、飼育水の蒸発による湿気や、水滴の付着に伴う機器の腐蝕などが問題となる。

後者は、我が国での導入例はまだ限られているが、欧米では多くの事例があり、エアコン等で部屋全体を空調し、水温をコントロールしている。気温と飼育水温が同じになるため、飼育水の蒸発に伴う問題は回避できる。一つの室内に複数の飼育水槽があっても同一水温にしか設定できないといった弱点もあるが、多湿な労働環境を回避できるメリットは大きく、我が国の閉鎖循環式養殖においても今後は後者が主流になると筆者は考えている。

閉鎖循環飼育による省エネ効果の実例

1) 熱交換器の性能

近年の原油高は甚だしく、灯油を例にとると、2005年頃までは約50円/lで安定していたものが、今やその倍の100円/l前後で推移している(図1)。このため、適温維持のために油を焚く陸上養殖場や種苗生産場は光熱費の上昇に悩まされており、様々なやり方で熱回収するなどして省エネに努めている。

田嶋は、本誌2008年9月号において、陸上養殖施設における熱回収の実例を複数紹介している。その

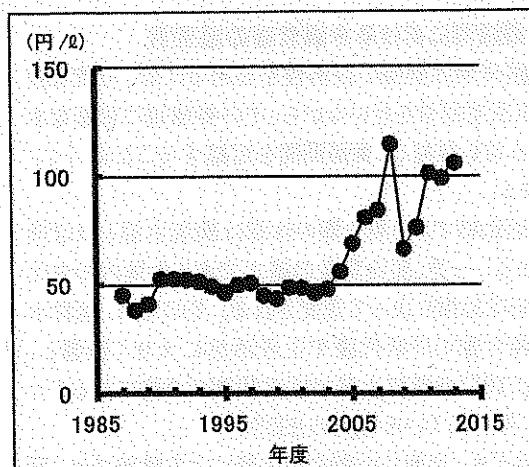


図1 灯油店頭価格(全国平均)の経年変動

中の一例では、掛け流し式の施設において、チタンプレート式熱交換器を用いて16~17°Cの排水と10°Cの新水(地先海水)の熱交換を行い、新水を3°C上昇させている。また、別な事例では、チタン管と塩ビ管による自作の二重管を用いて、年中ほぼ20°Cの地下水と冬季12°Cの新水(地先海水)の

熱交換を行い、後者を7°C上昇させている。こちらは循環ろ過方式の施設と記されており、地先の海水温が上昇して地下水のほうが低温になる夏季には逆の効果が期待できる。これだけの熱回収ができるほど、熱交換器の性能は向上している。

2)半閉鎖循環式のマダイ種苗生産施設

田嶋はまた、民間種苗生産場で行われている飼育水の循環再利用による省エネ効果について、その燃油節約量の試算も行っている。

その事例では、2.2kWのドラムフィルター1台、1.5kWのKA式泡沫分離装置4台、生物ろ過槽2槽、紫外線殺菌装置(50t/台処理)2台、各種ポンプ(0.75~5.5kW)9台などからなる大規模なシステムを用いて、48%の循環再利用+52%の新水注水でマダイの種苗生産を行っている。そして、地先海水温が14~16°C台、気温が4~16°Cで推移した2~3月に、飼育水温を20~21°Cに維持した場合、掛け流し式に比べて約27%の省エネがなされていると試算している。それは種苗生産1ラウンドあたり44kℓのA重油(その時点では約110円/ℓ)の節約、年間では800万円の燃費削減になる。

3)閉鎖循環式トラフグ親魚養成システム

筆者らは、㈱水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所屋島庁舎(以下、瀬戸水研屋島)において、

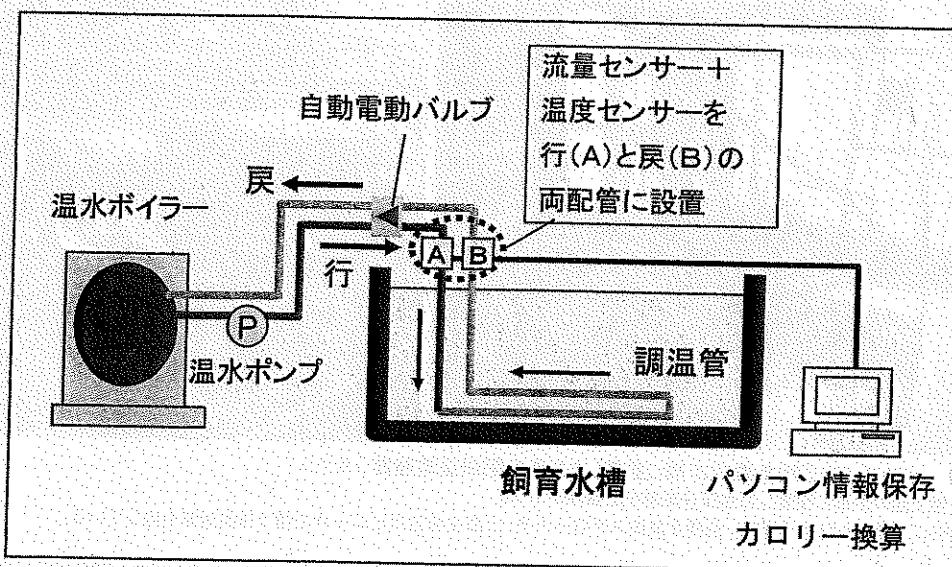


図2 トラフグ親魚養成での冬季加温時における消費カロリーの算出方法
ボイラーから飼育水槽に行く経路と、飼育水槽からボイラーに戻る経路に、温度センサーと流量センサーを設置。
そこからリアルタイムで送信されてくるデータをパソコンに蓄積して試算した。

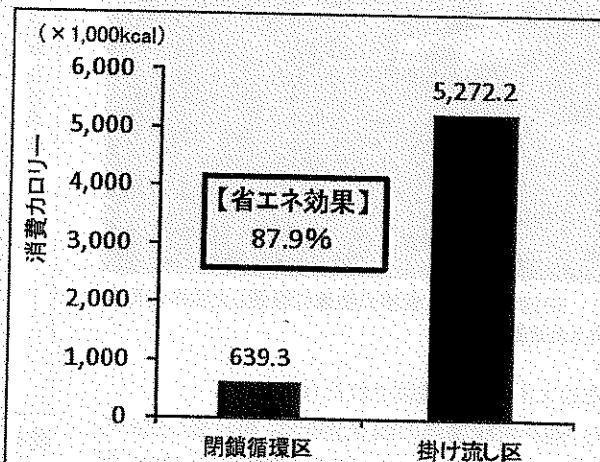


図3 トラフグ親魚養成での冬季の加温時における省エネ化の事例
(閉鎖循環飼育と掛け流し式飼育の比較)

トラフグの早期採卵のための冬季加温費の削減を目的とした試験を行った。図2のような実験系を作り、試験期間は52日間(2/17~4/10)、飼育水温は17°Cに設定し、5kℓ水槽を用いた掛け流し式の対照区と、廃水がほとんどない閉鎖循環飼育の試験区を設けた。対照区の取水水温は9.6~14.5°C(平均11.5°C)、気温は11.1~18.8°Cだった。その結果、適温維持に費やした熱量は、対照区で5,272,150kcal、試験区では639,254kcalとなり、閉鎖循環飼育による87.9%もの

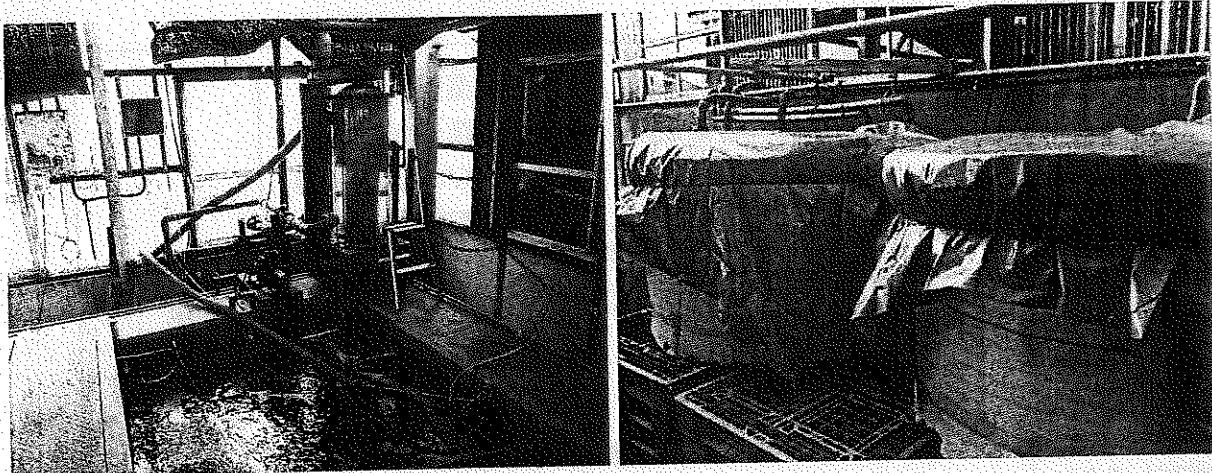


写真1 40kℓトラフグ親魚養成水槽に設置した自作の閉鎖循環飼育システム

左: 水槽上面の歩廊に設置した泡沫分離装置と循環ポンプ。
右: 屋外に設置した生物ろ過槽。側面を発泡スチロールで、上面を梱包用ビニールで覆う保温対策をしている。

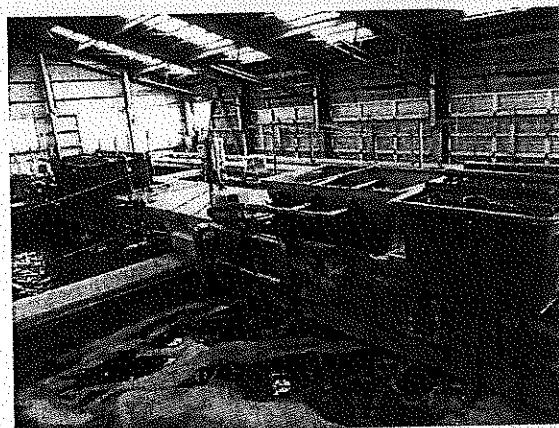


写真2 50kℓ親魚養成水槽の歩廊に設置した自作の簡易式生物ろ過装置

大幅な省エネ効果が確認された(図3)。

また、瀬戸水研屋島の飼育施設は、掛け流し式から閉鎖循環式への移行を2007年から順次行い、2010年以降は閉鎖循環式がほとんどを占めている。その多くが自作による様々な簡易タイプだが(写真1、2)、これに伴い、冬季の燃油消費量が大幅に削減されている。すなわち、2003～2009年までは、地先水温が低い年は燃油消費量が増えていたが、2010年以降は燃油消費量が低位安定し、地先水温の影響をほとんど受けなくなっている(図4)。ちなみに、2010年以降の1～3月における瀬戸水研屋島での飼育水槽全体の平均換水率は20%/日と注水をかなり絞り、“閉鎖度”を上げている。

なお、外気温が低い冬季は蒸発や放熱が起きやす

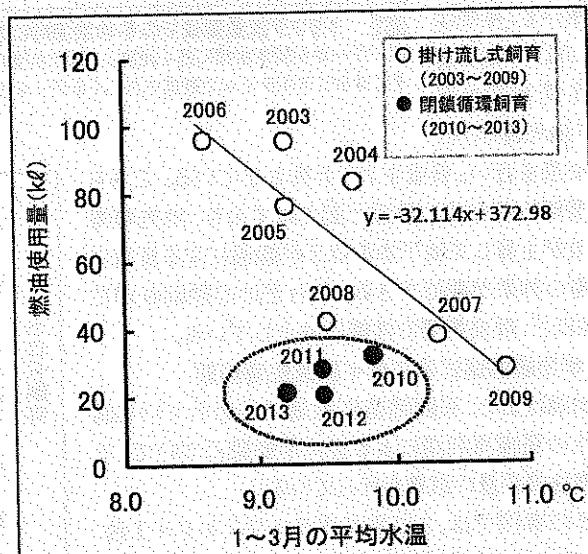


図4 瀬戸内海区水産研究所屋島庁舎での1～3月の平均水温と燃油使用量の関係(掛け流し式飼育と閉鎖循環飼育の比較)

く、蒸発すればするだけ気化熱で水温は低下する。そのため保温対策も重要である。写真3や写真1右のような簡単な方法でもかなりの効果がある。

閉鎖循環飼育システムによる省エネ効果を、瀬戸水研屋島での実績から定量的に示すと、40kℓ水槽2面、50kℓ水槽4面の閉鎖循環飼育システム設置に約350万円を要したが、冬季の燃油使用量大幅減により2～3年で償却できた格好だ。

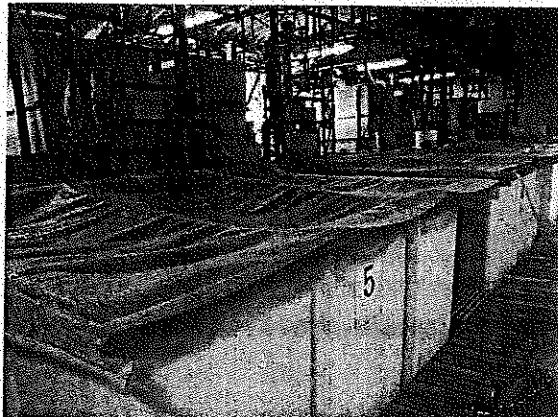


写真3 潤戸水研屋島における閉鎖循環飼育システムの保温対策の一例
キジハタ飼育水槽の上面を梱包用ビニールで覆い、蒸発と放熱を防いでいる。

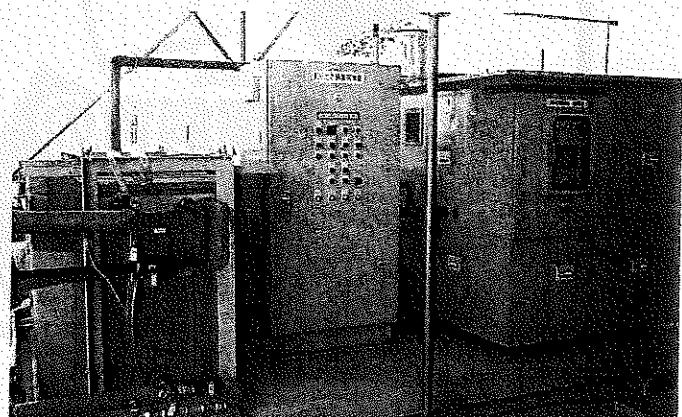


写真4 愛媛県西条市のクール・アースプロジェクト(経産省委託研究)で設置された水素吸蔵合金熱交換装置
3坪程度の設置面積でコンパクトに収容されている。

実用化が待たれる新たな省エネ技術

廃水がほとんど出ない閉鎖循環飼育システムが構築できれば、2次産業など異分野の企業等が参画する可能性が広がる。

九州電力総合研究所生物資源研究センターでは、割安な深夜電力を利用した熱交換の実証研究を実施した。青森県栽培漁業センターでは、工場や産廃処理場の廃熱を蓄えたトランスピートコンテナ(潜熱蓄熱材を充填したコンテナ)をトラックで輸送し、アワビ陸上水槽の加温に利用する実証試験に取り組んだ。

また、愛媛県西条市では、経済産業省の委託事業(平成20年度低炭素社会に向けた技術シーズ発掘・社会システム実証モデル事業)により、工場廃熱を利用したサツキマスの閉鎖循環式養殖の実証試験を筆者らと共同で行った。これは、水素吸蔵合金熱交換装置(MH冷水製造システム、写真4)という冷却装置を導入することで、工場地帯で恒常的に発生しながらこれまで再利用困難とされてきた200℃以下の廃熱を活用し、サツキマスの最適水温を維持しながら飼育するもの。1年半に及ぶ飼育期間を通じて50%の省エネ効果が確認された(特願2013-51900)。ヒートポンプなど電気で熱交換する場合の電気代との比較である。これらの技術はまだ、イニシャルコスト面などから実用化には至らないが、将来的には大いに有望と思われる。

他方、上述したように、閉鎖循環方式による省エネ効果は、小規模なシステムでも、半閉鎖循環式シス

テムにおいても明らかであることにも注目したい。様々な規模や方式による陸上での種苗生産、養殖、親魚養成等において、少しの手間と投資で大幅なコスト削減が期待できるからだ。

次回は、閉鎖循環飼育の高生産性(高成長・高生残・高密度飼育)について紹介する。
(つづく)

参考文献

- 1) (社)日本水産資源保護協会(1980): 水産生物適水温図, 63pp.
- 2) 田村保(1977): 魚類生理学概論, 恒星社厚生閣, 288pp.
- 3) 渡部終五・橋本周久(1980): 水生生物の酵素活性と水温、昭和54年度環境庁委託業務結果報告書, 環境容量算定基礎調査(財)海洋生物環境研究所, pp.136.
- 4) 安藤忠(2009): マダイ養殖が高水温化を克服するには、地球温暖化とさかな(財)水産総合研究センター編), 成山堂書店, 109-120.
- 5) 安藤忠(2010): 地球温暖化にそなえて魚類の高温耐性を探る、研究情報,(財)水産総合研究センター, 研究開発情報, 北の海から, 第9号。
- 6) 会田勝美編(2002): 魚類生理学の基礎, 恒星社厚生閣, 258pp.
- 7) 下茂繁・秋本泰・高浜洋(2000): 海生生物の温度影響に関する文献調査, 海生研研報, 2, 351pp.
- 8) 増本輝男(2004): システムと設計・管理, 養殖・蓄養システムと水管(矢田貞夫編), 恒星社厚生閣, 108-129.
- 9) 山本義久・鶴志田正晃・岩本明雄(2005): マダイを対象とした閉鎖系循環飼育-I 生物ろ過槽の機能向上について、栽培漁業センター技報3号, 30-36.
- 10) 田嶋猛(2008): 陸上増養殖施設における省エネ対策、アクアネット, 9, 30-36.
- 11) 越智一之・山本義久・今井正(2013): 高効率一環環境制御陸上養殖システム、特願2013-51900.