

ギンザケの陸上養殖 マニュアル（案）

令和5年3月

石巻専修大学 角田研究室
石巻市 産業部 水産課

はじめに

01 | 背景

人口増加や新興国の経済的発展に加え、地球温暖化や海洋ゴミ問題、生物多様性の消失等として顕在化しつつある環境変化のため、世界規模での食糧や水の供給不足が深刻化することが危惧されている。食糧資源の中でもタンパク質については、需要と供給のバランスが2025～30年頃に崩れ始めるとの予測もあるほど、当該資源の確保は緊急の課題となっている。

タンパク質の供給源を水産物に求める声は高いが、天然の水産物の漁獲量は既に頭打ち状態となっており、今後の天然水産資源の増加は見込めないことから、水産物の供給源として養殖が注目されている。中でも、陸上養殖は環境制御がある程度可能であり、環境負荷も抑えることができるため、タンパク質の安定供給手段として有望である。

しかしながら、陸上養殖事業を推進するには幾つかの解決すべき課題・解決策が必要となる。1) 養殖対象魚種の生理・生態機構の解明、および、健全種苗の生産。2) イニシャルコストおよびランニングコストの低減に向けた、再利用可能・未利用エネルギーを活用した低コスト型温度調節機構付き循環養殖システムと飼育条件。3) 飼料中の魚粉含有率の削減（養殖魚の大半はタンパク質含有量の多い飼料を給餌する必要があるため、魚粉を植物やフェザー由来代替タンパク質等に置き換える、脂質の添加率を高める、利用率の著しく低い炭水化物の消化・吸収率を高める等）。4) 環境や養殖状況のモニタリング。

02 | 目的

石巻市では、低コストで採算性が確保された陸上養殖の実現に向け、市内における再生可能エネルギーを活用した陸上養殖について調査・実証試験を行い、その調査結果を地元事業者に周知することにより、市内における陸上養殖事業の実現、事業者の所得向上、担い手や雇用の確保をはじめ、水産加工業者への加工原料の安定供給、本市水産業の地域経済の安定化・活性化等を目指している。そこで、本報告では、背景で述べた課題の1)～3)の解決に向けて、ギンザケ（稚魚）を対象とした陸上養殖の調査・実証試験を行った結果を基に述べる。



目次

第 1 章	養殖方法	1
01	概況	1
02	養殖の流れ	2
第 2 章	稚魚の入手	3
01	稚魚の入手	3
第 3 章	環境設備管理	4
01	設備	4
02	条件	7
03	作業	9
04	作業時間	11
第 4 章	養殖モニタリング結果	12
01	飼育温度、給餌条件、収容密度の違いが餌料効率や魚の 生理指標に及ぼす影響	12
02	飼育密度が餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響	13
03	飼育水質が餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響	16
04	餌含有タンパク質の低減に関する研究	17
05	光条件が餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響	17
06	種苗としての健康度・品質	18
第 5 章	年間スケジュール	20
01	年間スケジュールの例	20
第 6 章	養殖方法のまとめ	21
第 7 章	再生可能エネルギーの活用	24
01	太陽光発電と風力発電のハイブリッドシステムの検討	24
02	太陽光利用による買電量の削減効果	26
03	収支計算	27
04	採算性の確保へ向けた取り組み	29
第 8 章	IoT を用いた監視方法の検討	30
01	簡易型 IoT を利用するための検討	30
02	令和4年度の実施結果	30

養殖方法

01 | 概況

石巻専修大学敷地内に閉鎖循環式陸上養殖設備を設置し、飼育条件の設定に至る各種予備試験を6月から実施するとともに、養殖試験への移行を含めた養殖試験を2021年7月から2023年1月まで実施した。水温、塩分、溶存酸素量等の生育環境を観測し、歩留まり率、生育状況、生理状態、体成分等を測定した。また、冷却、加温等に必要な電力、使用水量を計測し、閉鎖循環式陸上養殖のコストを算出した。加えて、実証試験を通じて、IoT技術を用いて生育環境や飼育魚の状態を記録・モニタリングし、状況に応じて行うべき具体的な対処方法を確認し、ギンザケ稚魚の陸上養殖方法（案）を提案する。

本報告は、上記実証試験・調査結果を踏まえ、ギンザケ漁業者に対し、出荷可能なレベルまでの事業採算性のある陸上養殖方法の一例を提示するものである。

● 閉鎖循環式

閉鎖循環式養殖とは、掃除や蒸発分以外は新たな飼育水は入れずに飼育水はポンプなどで循環しながら使用するものである。



【調査試験実施場所概要】

石巻専修大学敷地内

住所：宮城県石巻市南境新水戸1

02 | 養殖の流れ



稚魚の入手

01 | 稚魚の入手

2021年6月、9月、10月、2022年6月、10月、11月に、東北地方にある漁業生産・協同組合等から、ギンザケ稚魚を約6,000尾を入手した。また、購入価は魚1g当たり1.0～2.0円（税込み）であった。魚は、野外の飼育場から大学の飼育施設まで、容量500Lあるいは1,000Lのポリエチレン製の給水・散水用タンクや活魚輸送用タンクに収容（～70g/L）し、空気曝気あるいは空気および酸素曝気を併用（～約30g/L）しつつ運搬した。



A 養殖場（Google map より転載）



B 養殖場



C 養殖場（Google map より転載）



D ギンザケの稚魚



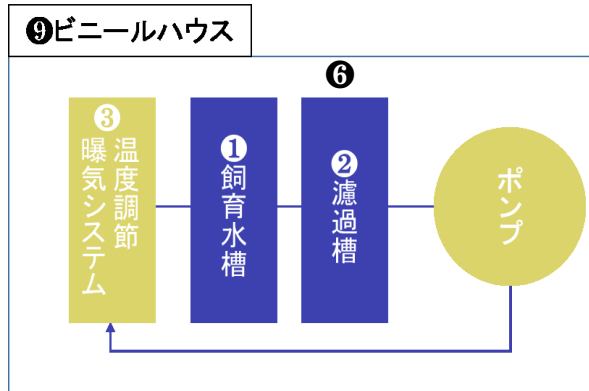
ギンザケ稚魚の輸送セット

※500L または 1,000L のタンク（活魚輸送用タンク）、通常の曝気装置、通気用部材（チューブ、ストーン）、ポータブル電源（容量 10000mAh/400Wh 程度）、高密度輸送の場合は酸素ポンプを並列使用。ニトントラックで輸送。

環境設備管理

01 | 設備



● 平面図・機器設置場所





● 写真

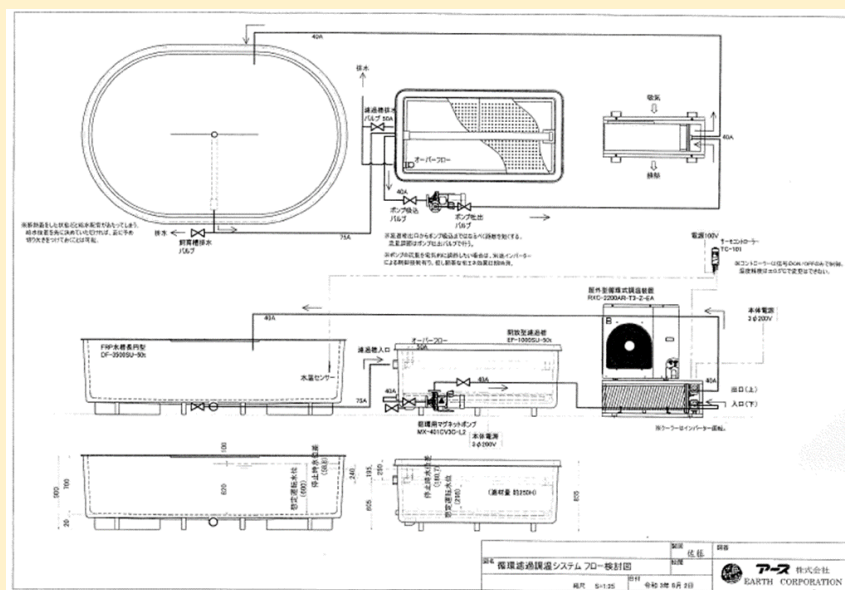


【設置機器】

	機器名	数量	説明
①	飼育水槽（3.5t）	2	<p>ギンザケ稚魚の養殖用水槽 遊泳特性のある銀鮭に合わせ、アース株式会社製の3.5トンオーバー型（長円形）FRP水槽（DF-3500SU-50t、断熱50mm）を選定、設置。今回は独立式屋外養殖仕様のため断熱水槽を選定したが、温度調節装置を付設したビニールハウスや屋内、地下温室等への設置時は、通常仕様の水槽でよい。底面をすり鉢上にする等し、残餌や糞の回収に配慮も検討。</p> 
②	開放型濾過槽（1t）	2	<p>FRP断熱50mm厚（EF-1000SU-50t、濾材500～700L収容）。構造は、上部のシャワー管から原水を流入し、濾材を通した濾過水を底面からポンプで吸い上げる方式。高密度養殖時には飼育水槽と同程度の大きさ・浄化能力を有するものを選択するとよい。また、濾材最上面に不織布等の着脱・洗浄が容易なカバーの設置も有効。逆洗機構の付設も要検討。</p> 

	機器名	数量	説明
③	屋外型循環式 調温装置	2	加温冷却ユニット（RXC-2200AR-T3=Z-EA）を設置。 設定温度幅の縮小、温度調節幅は多少粗雑でも良い。
④	LED ライト （緑・赤・青・ 白）	2	照射光の色により、魚の行動が変化することが知られて いる。照射光の波長の違いが魚の行動、生理状態等を及 ぼす影響を把握し、健全で成長に適した光条件を探る。 飼育開始初期のみで、餌になれた魚は自然光下で良い。 ただし、秋季以降の陸上養殖延長時は日長管理に利用。
⑤	簡易型マイクロバ ブル発生装置	2	魚の健康維持や菌の増殖予防、摂餌向上等を通した成長促 進と歩留まり向上のため、比較的安価な簡易型の耐海水用 マイクロバブル発生装置を養殖槽2基に各1台ずつ設置す る。なお、当該装置はバブル放出による水流を起こすこと もできるため、水流発生機器は使用しない。内部投入型は 水温上昇に寄与。外部設置型がベター。
⑥	酸素発生・供給装 置	1	酸素発生・供給装置（フィッシュサンソ A6E）魚を設置 し、高密度飼育時の飼育水の溶存酸素不足に対応し、水中 酸素濃度の向上を図る。高密度養殖時には必須。
⑦	自動給餌機	2	小規模陸上養殖を想定した場合、ペット用自 動給餌機に簡単な改造を施すことでも十分に 機能することが過去の実験で判明しているこ とから選定。実施企業の初期投資負担軽減を 考慮。タイマー付きでスマホ管理対応型。 
⑧	濾材	2	濾材として日本建設技術株式会社製のクリスタルバイオ CB-1000(S) 250 kg を下層に、上部に新東北化学工 業株式会社製のゼオポート U 150 kg および珊瑚砂を敷 き、最上部に物理的濾過用のウールマットと不織布を設 置。表面ろ材必須。3～5 倍量のろ材投入、逆洗機能付 加がベター。
⑨	ビニールハウス	1	風雨や寒冷等による養殖槽の生育環境変化リスクの軽減 及び電気機器類の故障防止などに必要な保護被覆とし て、一般的農業用ビニールハウス(8m×4m) 2棟を設 置するとともに、周囲に防風ネットを設置した。 

【設置機器参考模式図】



① 餌について

フィード・ワン株式会社製のます稚魚用餌（鱒 EP せせらぎ d3&d4：成分量表示… 粗たん白質 46.0%以上；粗脂肪 10.0%以上；粗灰分 15.0%以下；粗繊維 3.0%以下；カルシウム 1.50%以上；りん 1.20%以上、原材料名等… 動物性飼料 魚粉 57%、穀類 小麦粉 20% 等）等を使用。

注意事項

自動で給餌する場合には、一度に塊的に餌が供給されると、魚は驚いて逃避したり摂餌行動自体が減退してしまう。そのため、室内や屋根付屋外に並立設置した小規模養殖水槽を複数用いて養殖を行う際は、1 回当たり数 g 単位の少量配餌を何度か繰り返して 1 セットとし、それを 1 日当たり 3～5 回程度の多回セット給餌に対応した安価な給餌器を利用することが望ましい（広範囲に多回散布）。※1

② 稚魚について

県内の養殖関係機関から入手。サイズは 10 cm 程度のものから段階を分けて入手。

③ 密度管理

飼育密度：通常曝気下（溶存酸素が 6.5～8.0ppm 程度）では、十数 kg 体重/m³ 以下が望ましい。酸素曝気下（溶存酸素が 9.0ppm 程度を維持できる状況）では上記の 2～3 倍程度の収容・飼育が可能である**。一般に、高密度飼育下では、魚はストレス状態に陥りやすいとの報告があるが、溶存酸素濃度が高い場合はその影響は軽減される傾向にある。ただし、溶存酸素濃度の高い状態が長期間続くと体内の酸化状態が進む傾向のあることも認められており、同期間の短縮や抗酸化物質の投与を併用する等の対策も重要と考えられる。なお、低密度あるいは自由遊泳状態での飼育では、餌料効率に差はみられない場合でも、群れ内個体間の成長差が拡大。ストレス負荷の少ない魚の選分け（サイズ毎選別）策を検討中。

④ 水について

現状では水道水を使用。窒素除去した井戸水の使用も有効。生活の場が河川の場合は pH 6.5 以上～8.5 以下、BOD 3mg/L 以下、SS25mg/L 以下、溶存酸素 5.0mg/L 以上、大腸菌群数 5,000MPN/以下、天然湖沼の場合等は、pH は河川と同様であるが、COD 3mg/L 以下、SS14mg/L 以下、溶存酸素 7.5mg/L 以上、大腸菌群数 1,000MPN/100mL 以下（それぞれ日間平均値）であることが推奨されている。

ただし、当該試験では pH 6.5 以上（常時 7.5±0.1）、DO 6.5ppm 以上（通常 7.4±0.3mg/L）を維持。環境水の COD 値 3mg/L は TOC 値 0.474mg/L 相当。

収容密度（13kg 体重/m³）を維持した場合、TOC 値が 0.39±0.09mg/L を維持するように、濾過槽の上部洗浄処理を兼ねて給水（日間換水率は約 8.5%：濾過槽の能力向上により 1/3 以下に削減可能）。

水中細菌数（CFU/mL）は、UV 殺菌処理をした場合、総細菌、大腸菌群と大腸菌数は 4,800±2,700、298±242、77±135。UV 殺菌処理なしでは、30～50%増し。処理は飼育水の細菌数抑制に有効だが、菌組成に顕著な影響は及ぼさない。推奨値を大きく超えてい

たが、飼育魚の生理指標・健康状態に問題はない。UV 処理装置はランニングコストが高い。マイクロバブル発生装置も同様。限定的利用推奨。

全窒素と全リンは水産一種に包含され、年間平均値でそれぞれ 0.2mg/L 以下と 0.01mg/L 以下との基準が設定されている。今回の試験では、 0.75 ± 0.28 mg/L、 0.11 ± 0.04 mg/L（調査文献によると養殖場の値は上記の 3 倍程度との記載あり）。現状でも、飼育魚の健康に異常はない。

⑤ 流速

流速 10～30cm/s 下で実施。群れの形成は少なくとも流速が 5～30cm/s 時に確認されたが、8cm/s 以下では個体間距離が広く、緩やかな群れ形成状態にあった。

⑥ 光条件

飼育開始当初を除くと、短期間的には、照射光の色の違いは摂餌行動にあまり影響せず、いずれの波長でも旺盛な摂餌行動が認められた。

長期的影響には、緑色光照射時には血漿中コルチゾル濃度（ストレス応答指標）が、他色の光照射時に比べて低く出る傾向にあり、それに伴って摂餌効率も有意ではないものの高めに推移。給餌期以外の行動もゆったりしている様子も伺えることから、通常時のストレス負荷が軽減された状態になっている。

*1：給餌回数や頻度については、「養殖モニタリング結果 01 飼育温度や給餌条件の違いが餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響」の項を参照のこと。

*2：収容密度や水中酸素濃度と餌料効率・成長の関係については、別途後述する。

03 | 作業

● 毎日の作業

	水槽の状態チェック
	へい死個体のチェック
	環境指標チェック
	給餌
	糞・残餌の処理、換水
	センサー・データロガー等の管理・清掃

水槽の状態チェック

- ① 給水口から水は出ているか、エアストーンから十分な量の泡（気泡数）が出ているか、機器の動作異常がないか（水槽の作動チェック）
- ② 水温、溶存酸素濃度（DO 値：通常時は測定不要。魚の行動が平常でない場合（鼻上げ行動、摂餌行動低下、群れの形成不良等）や高密度飼育時等は酸素不足に陥りやすいので、要確認）、その他の水質指標（現場で確認ができる項目・方法が有効：亜硝酸、硝酸、アンモニア等の代謝産物をドロップ・ペーパー・パックテスト等により簡易チェックしても良い）に問題はないか
- ③ 水の濁りや悪臭、水漏れはないか
- ④ 魚の行動に異常はないか、残餌や糞の状態はどうか

注意事項

- ・ 水中の溶存酸素濃度に問題がなければ、飼育温度が 16℃の時に餌料効率是最も高くなるが、同周辺温度（14℃や 18℃）でも多少の同効率低下はあるものの、生育に問題はない。
- ・ 季節により、消費電量の抑制を考慮した調温も有効（例えば、夏季は 16～19℃、5,6,10,11 月等は 14～16℃に養殖温度を設定する等）。
- ・ 季節により、消費電量の抑制を考慮した調温も有効（例えば、夏季は 16～19℃、それ以外、5,6,10,11 月等は 14～16℃に養殖温度を設定する等）。
- ・ 水槽システムが正常に作動していない場合は速やかに対処する。
- ・ 水温、DO 値が異常値の場合、測定機器が汚れている場合は汚れを取り除く（方法は後述）、汚れを除去しても正常値にならない場合は別の測定機でも計測する。
- ・ 上記以外の水質項目の異常、水の濁り、悪臭、魚の行動異常等の場合濁りや悪臭の原因（へい死個体や糞、飼料の腐敗の可能性大）を取り除き、換水と掃除を行う。

異常・へい死個体のチェック

- へい死個体を発見したら速やかに取り除く（稚魚購入の際に形態異常等の認められた個体は、成長速度が遅く、群れとしての動きも上手くできない。飼育途中で欠落する可能性が高いため、特に長期飼育に際しては、早々に取り除くことが推奨される。孵化場からの移動やその後の順化・防疫処理等の諸工程の実施状況によっては、8月頃までへい死率の高い状態が続くことがあるが、同数値はそれ以降急激に低下する。今回も、9月以降の通常運転期間中のへい死率は3%以下である）。

環境指標チェック

- ① 水の濁り、泡の有無、臭い、水温、pH、DO、BOD（TOC）、総菌数・大腸菌群数、全窒素、全リン等を確認〔通常管理下では、水の濁り、泡等はほとんど認められないので、日常的には水温、代謝性窒素成分、DO等を必要に応じてチェックする程度で十分である〕
- ② 魚の体色と行動〔遊泳行動、鼻上げ行動、群れの状態等を摂餌行動とともにチェック〕や残餌量の確認〔自動給餌機の稼働時間に合わせて確認する程度でよい〕

給餌

- 週5日間、1日に3回程度の給餌（8,12,16時に給餌し、給餌の1時間後に残餌や糞の除去・掃除を実施することが望ましい。ただし、ギンザケの糞は散らばり難いことから、糞の掃除は1日に1回程度、1日の最終給餌に合わせて実施することでも対応可能）。日間投与量が魚体重の2（～4）%量となるように給餌。低水温期は隔日投与でもある程度対応可能、14℃以上の適温期には上記対応。

注意事項

室内や屋根付屋外に並立設置した小規模養殖水槽を複数使って養殖を行う際は、1回当たり数g単位の少量給餌を複数回繰返して1セットとし、それを1日当たり3回行うこと（今回は3回の給餌）を含めた多回セット給餌に対応した安価な給餌器を利用することが望ましい〔p.5 ⑦ 自動給餌機等を使用すると、日常的には餌の追加作業のみとなる〕

糞・残餌の処理、換水

【底・ろ過槽の掃除等】

- 自作の吸引装置（サイホンの応用）を用いて、糞や残餌等を除去。給餌終了から1時間後を目処に除去〔水槽の底の形状（すり鉢状）を整えることが望ましい。なお、糞の吸引には風呂から洗濯機への吸水ポンプ程度の小型ポンプの利用も有効〕。
- 濾過槽の上面・ろ過布（隔日～1週間）および全体（2～3ヶ月に1回程度）の清掃・・・逆洗機能があればベター（ただし、コスト高騰）。



【換水】

- ① 換水（水質の測定結果や魚の状態を勘案して換水量を決定。通常は、水槽の10%程度を日間換水量の目安とするが、週に2回程度の換水でも一時的には対応可能）
- ② 換水量を記録

センサー・データロガー等の管理・清掃

- 各種センサー類・データロガーの管理・清掃〔メモリや水垢等の汚れが付着している場合は濡れた柔らかい布や紙で拭取るか、中性洗剤又は 0.1N 程度の塩酸等に浸漬（数時間以上）後、水道水で同時間程度流水洗浄〕、データ収集。

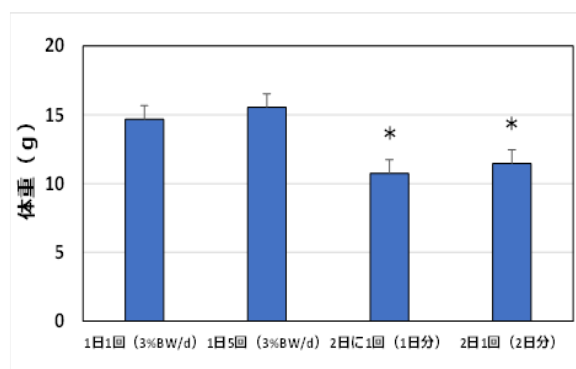
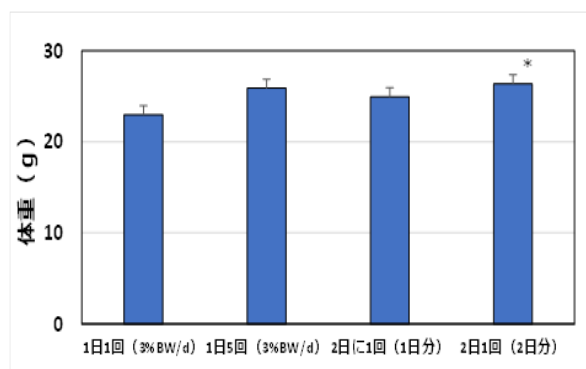
04 | 作業時間

現地での作業時間は1ユニット（2水槽）あたりに1.0～1.5時間／日程度となる予定給餌や環境指標のチェック等については人手を介すことなく実施することを想定しているため、人が飼育場所に張り付いて行うことは、糞や残餌の処理、および、換水程度となる。

養殖モニタリング結果

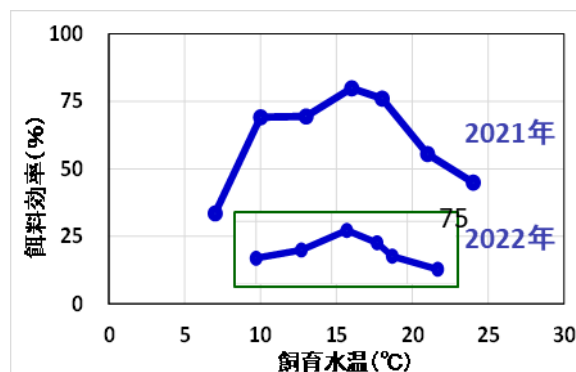
01 | 飼育温度、給餌条件、収容密度の違いが餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響

水温 12℃（左）と同 16℃（右）において、給餌条件（頻度）の違いがギンザケの成長に及ぼす影響を以下に示す。12℃飼育では、日間給餌量を体重の 3%とした時、給餌頻度を 1 日に 1 回、1 日に 5 回、2 日に 1 回のいずれの場合でも魚の成長に差はなかった。2 日 1 回体重の 6%量（2 日分を一括）投与した際には、1 日 1 回体重の 3%給餌区に対し、成長速度はわずかであるが有意に高くなった。一方、16℃飼育では、1 日に 1 回、5 回の給餌区には差がなく、2 日に 1 回の給餌では 1 日の給餌量が体重の 3%、6%の区で、ともに 1 日 1 回や 5 回の給餌区に比べ、成長速度は有意に低下した。すなわち、魚の摂餌状況が通常範囲内に維持され得る場合、低温環境下では隔日給餌でも成長停滞を引き起こすことはなく（飼料の節約）、また、成長促進を優先する場合には（飼料の無駄遣いは否めないが、低温期に成長を優先させる必要がある場合などには）、隔日で通常の日間給餌量を超える給餌するとよいこと、餌量効率の高い適正成長水温期には隔日給餌よりも毎日（連日あるいは週 5・6 日）給餌の方が魚の成長は良好であることがわかった。



異なる温度下での飼育時に給餌条件（給餌回数、頻度）の違いがギンザケの成長に及ぼす影響

右図に飼育水温の違いがギンザケの餌料効率に及ぼす影響を示す。群れの形成は少なくとも流速が 5~30 cm/s 時に確認されたが、8 cm/s 以下では個体間距離が広く、緩やかな群れ形成状態にあった。日間給餌量が体重の 2%量に設定した場合の各飼育温度下での餌料効率は、水温 16℃が最大で 80%弱、同 18℃で約 75%、10℃と 13℃では 70%程度であった。しかし、上述の温度範囲より低温あるいは高温域では、著しく低下した。すなわち、飼育温度が 16℃の時に餌料効率は最も高くなるが、同周辺温度（14℃や 18℃）でも多少の同効率低下はあるものの、生育に問題



飼育水温の違いがギンザケの餌料効率に及ぼす影響

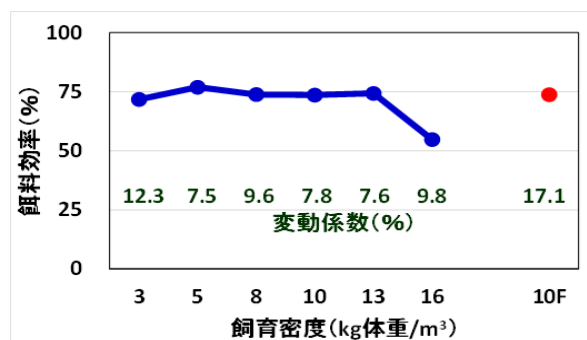
魚体重：40~60g
給餌回数：週 5 日、2~3 回/日
給餌量：2.0%体重/日
飼育密度：10kg/m³
流速：5~20cm/s（群れ形成）

はないことを示す（消費電量を加味しての判断が必要であるが、少なくとも冬季等の電力消費の激しい時期においては、多少温度を上下しても良い）と考える。夏季におけるギンザケの淡水養殖期には、溶存酸素濃度を飽和濃度以上に高く保つことができれば、（コストパフォーマンスに配慮し）19℃程度の高温下での養殖も可能*。

*詳細は次項に記載。

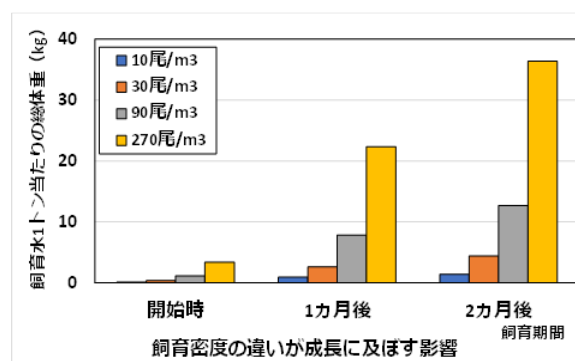
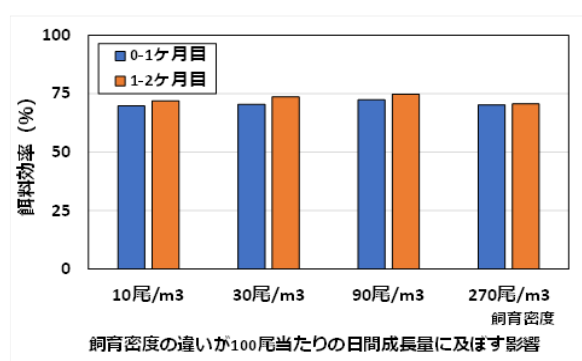
02 | 飼育密度が餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響

飼育密度の違いがギンザケの餌料効率に及ぼす影響を左図に示す。初年度の試験では、飼育水温16℃、週5日、1日当たり体重の2%の飼料を体重40～70gのギンザケ種苗に給餌した場合、飼育密度が5～13kg体重/m³では餌料効率は高く維持されたが、同値を超える密度では餌料効率は著しく低下した。高密度飼育では、魚はストレス状態に陥りやすいとの報告がなされていることから、当該条件下における餌料効率の低値は極めて高い密度での飼育によって魚に惹起されたストレス状態に起因すると考えられる。また、低密度あるいは自由遊泳状態での飼育では、餌料効率に差はみられない場合でも、群れ内個体間の成長差が拡大した。本結果は、当該設定条件下において高い餌料効率の下でギンザケを養殖するには、飼育密度5～13kg体重/m³程度での実施が適していることを示唆する。ただし、次年度（2年目）に散気状態や飼育槽内の水流分布適正化、換水率（頻度）や水質の向上等に配慮した上で、由来の異なる種苗を用いて同様の試験を行ったところ、上述の適正飼育密度はより高値（約35kg体重/m³を超える値）となった。ここでは、適正飼育密度の違いには触れず、結果のみの記載に止めたい。



飼育密度の違いがギンザケの餌料効率に及ぼす影響（水温16℃）－初年度の結果－
〔飼育密度10F：自由遊泳（止水）下の結果〕

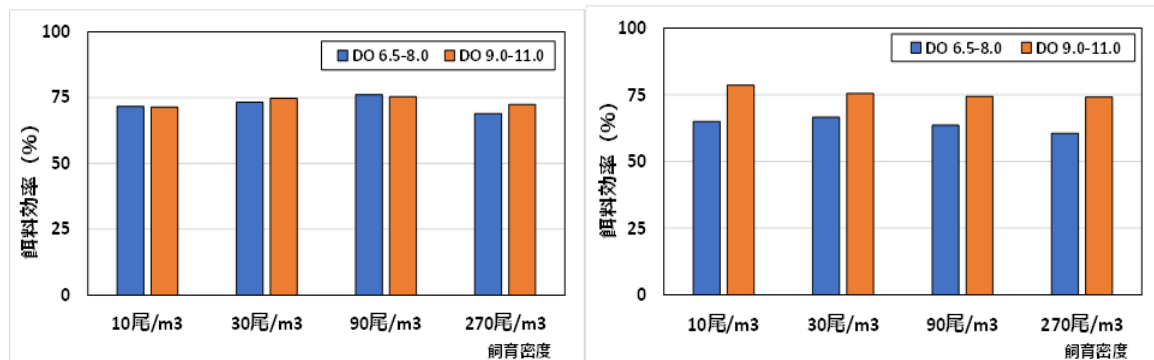
飼育密度の違いがギンザケの餌料効率に及ぼす影響（水温16℃）－初年度の結果－
〔飼育密度10F：自由遊泳（止水）下の結果〕



収容密度の違いがギンザケの餌料効率と成長に及ぼす影響（水温16℃）－2年度の結果－

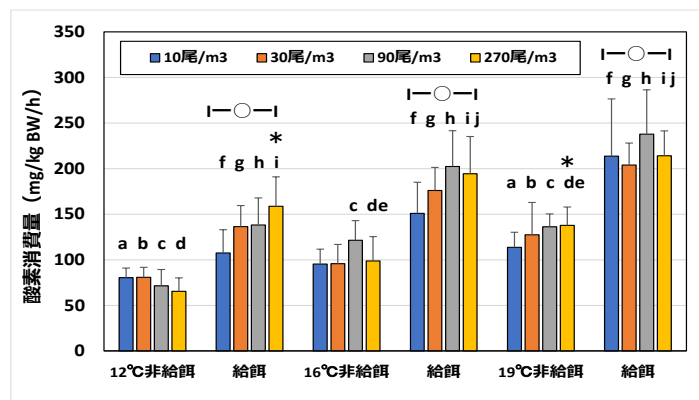
異なる温度下において、収容密度と溶存酸素濃度がギンザケの餌料効率に及ぼす影響を示す。飼育適温範囲内の16℃では、溶存酸素濃度が6.5ppm以上であれば、飼育密度が270尾/m³程度（収容密度が20kg/m³以上）となっても餌料効率に大きな変化は認められないが、水温19℃では、溶存酸素濃度が9.0～11.0ppmと高い場合は餌料効率は高く維持されていたにも関わら

ず、同 6.5~8.0ppm では当該値は低くなった。すなわち、高温下で高密度飼育を行う場合には、少なくとも溶存酸素濃度を高く維持する必要性のあることが示唆された。



異なる温度下において、収容密度と溶存酸素濃度 (ppm) がギンザケの餌料効率に及ぼす影響 (左; 水温 16°C、右; 水温 19°C) 実験開始時の魚体重は 50 g 前後
溶存酸素濃度は、曝気部分より 50cm 離れた、水深 40cm 部位の値

異なる水温下における飼育密度の違いおよび非給餌時期と給餌時期のギンザケの酸素消費量を右図に示す。非給餌時では、12°Cと16°Cの間および16°Cと19°Cの間で、1m³当たりの飼育尾数が90と270の時に同値は有意に増加した(12°Cと19°Cの間では、全飼育密度で値は有意に上昇)。給餌時期では、12°Cと16°Cの間および12°Cと19°Cの間で、全飼育密度下の酸素消費量は有意に増加した。16°Cと19°Cの間では、飼育密度下が270尾/m³の時のみ値は有意に上昇した。また、非給餌時に比べ、給餌時期の酸素消費量の増加割合が有意に高い(1.5~2.5倍)こともわかった。また、飼育密度が高いと温度上昇による酸素消費量の増加が著しかった。

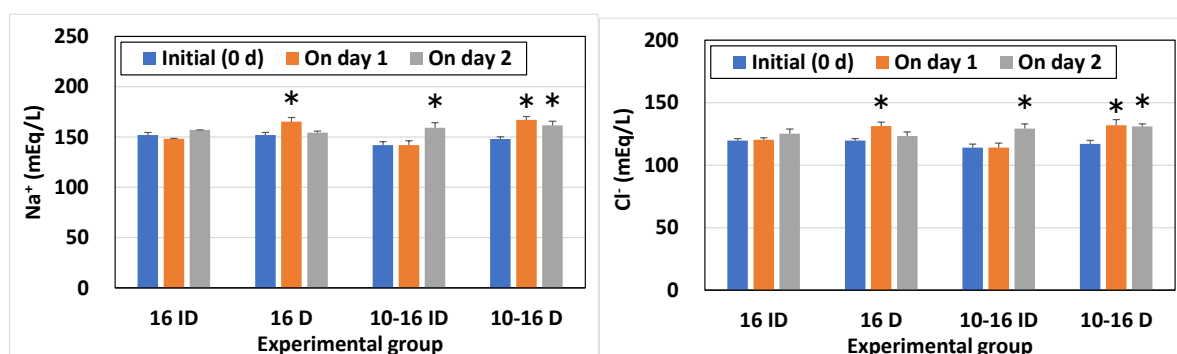


異なる水温下における飼育密度の違いと給餌の有無がギンザケの酸素消費量に及ぼす影響
*: 各温度・給餌条件で10尾/m³区との間に差あり
—○—: 同温度条件下で非給餌区との間に差あり
アルファベット; 同一文字間に有意差あり
平均値±標準偏差(個体数5)

以上のことから、飼育密度に合わせて、飼育槽への酸素供給量を勘案する必要のあること、その際には、特に給餌時期の水中酸素濃度の確保が重要であり、その値は非給餌時期の2倍以上を見積る必要のあることもわかった。移送時期に当たる11月頃)の水温は10°Cあるいはそれ以下になる。特に秋季においては、摂餌行動の低下に対応して1日当たり1回程度の給餌で済ませているところも多い。なお、この時期の天然魚と16°Cでの飼育魚の間で、血液の一般性状、肝臓や脾臓のサイズ、顆粒球の貪食活性等の生理的指標に有意差は認められなかったが、前者は16°Cでの陸上飼育時に比べて、赤血球数がやや低めに出るほか、肥満度の低下は否めない。したがって、少なくとも天然養殖で給餌量の減少する水温低下期間に16°C付近での養殖が継続できれば、海面養殖用

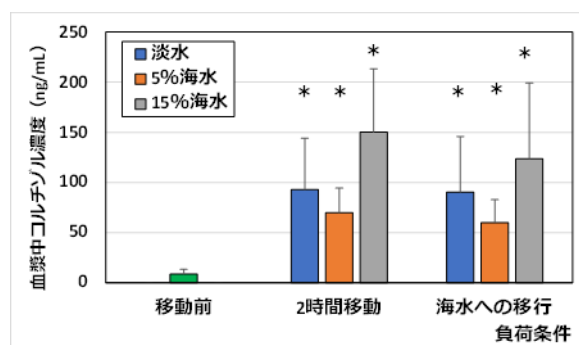
に出荷する若魚のサイズがより大きくなり、冬季の低温下での海面養殖に伴う成長遅延を許容したとしても、春季の出荷等に対応できる種苗を育てることも可能であろう。

さらに、淡水飼育魚を海面養殖のために移送する際には、移動に伴うストレス負荷に加えて、飼育場所の塩分差と水温差が課題となる。そこで、10 または 16℃の淡水で飼育中のギンザケ（体重 120 g 程度）を、水温 16℃の海水に移送する際に、一旦 25%海水に移送し、1 日経過後に 100%海水に移送して 1 日後（予備馴致処理群；ID 群）と、淡水から直接 100%海水に移送した場合の 1 日後と 2 日後（直接移送群；D 群）の魚から採血し、血液中のナトリウムと塩素イオン濃度を測定したところ、下図のようになった。16℃の淡水から 16℃の海水への移送に際し、予備馴致処理を行うと血液中の両イオン濃度に有意な変化はみられず、直接移送は海水への移送から 1 日後には両イオン濃度は有意に上昇したが、同値は翌日にかけて淡水飼育時と同等の値に戻った。これに対し、10℃の淡水から 16℃の海水への移送では、血液中の両イオン濃度は予備馴致処理群では移送から 2 日後に、直接行送群では移送から 2 日後まで高値を示した。すなわち沖出し時に生じる 6℃の水温変化は魚の塩分調節機能にも大きな負荷をかけることが分かった。換言すると、16℃（沖出し時の海水温度に近い水温）での陸上養殖は、海水移行に伴う温度差によって生じるストレス負荷を軽減でき、沖出し時の魚の健全性維持にも貢献し得る。



淡水飼育場より海面養殖施設への移送に伴うギンザケの血液中ナトリウムと塩素濃度の変化
ID 群；予備馴致処理群、D 群；直接移送群、数字は水温（℃）、平均値±標準偏差（個体数 5）

淡水飼育施設より海面養殖施設への移動を想定し、同移動に伴うギンザケのストレス負荷状態を血漿中のコルチゾル濃度（ストレスホルモン濃度）を指標として調べた。淡水飼育施設から海面養殖施設への移行に 2 時間を要すると仮定し、その移動時にギンザケを収容する水を通常の淡水、5%海水、15%海水とし、その後に 100%海水に移行後 2 時間目（移動開始から 4 時間を経過）の魚から採血し、上記指標を調べたところ、淡水、5%海水、15%海水群ともに、2 時間の移動後でも、その後の海水への移行から 2 時間後においても、各群間に統計的な有意差は認められなかった。ただし、各群の平均値では、淡水群に比べて、5%海水群



淡水飼育から海面養殖施設への移動に伴う血漿中コルチゾル濃度の変
平均値±標準偏差（個体数 5）
*；移動前の値に対して有意差あり

は低い、15%海水群は高くなる傾向がみられた。なお、15%海水に収容して運搬した場合、斃死個体がわずかに増加した（2回のみの試験結果では、死亡率は以下の通り：淡水；1.3%、5%海水；0.7%、15%海水；2.0%）。15%海水中のNaやMgの濃度は66mMと7.5mMであり、各値は一般魚類の値の1/2.5倍と5~8倍程度にあたる。故に、海水使用時は5%以下の濃度での使用が望ましい。ストレス軽減効果を有する物質の事前投与も有効。

03 | 飼育水質が餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響

今回の飼育試験では、pHは6.5を下回る事はなく、常時 7.5 ± 0.1 の範囲にあった。また、淡水の飽和溶存酸素量（mg/L）は10℃で11.3、16℃で9.9、24℃で8.4であるが、水槽内全域の溶存酸素量も6.5ppmを切ることはなく、通常の通気条件下では 7.4 ± 0.3 mg/Lを保っていた。BOD値については、当該値が有機物の指標であるものの測定に時間を要する等、常時の測定・評価項目としては扱い難い面があるため、ここでは全有機体炭素（TOC）値を用いた。BOD値やCOD値と全有機体炭素（TOC）値の間には相関関係が認められており、TOC値は水道水質基準項目として平成17年4月に採用されている。なお、環境水におけるCOD値3 mg/LはTOC値0.474 mg/L相当となる。今回の試験では、新規購入した2水槽内飼育水の当該値が 0.39 ± 0.09 と 0.40 ± 0.09 mg/Lの範囲を維持するように、濾過槽の上部洗浄処理の意味も含めて、飼育密度が約13 kg体重/m³の時、例えば容量3.5トンの水槽に体重80 gの魚を550尾収容した場合、原則として1日当たり300 L程度（270~370 L）の注水（水道水あるいは貯留水を使用）を、週5~6回の頻度で行った。この時の日間給水換水率は約8.5%（7.7~10.6%）となる。

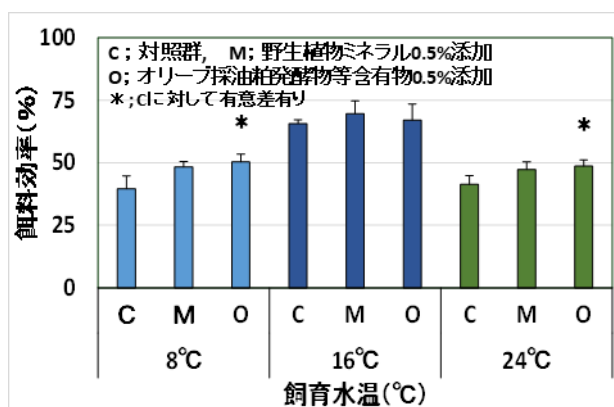
紫外線殺菌処理をした場合、魚収容前および上記の収容密度（13 kg体重/m³）を維持した条件下での飼育水中の総細菌数、大腸菌数、大腸菌群数（CFU/mL）は、それぞれ、 132 ± 109 、 8 ± 6 、 2 ± 3 、および、 $4,800 \pm 2,700$ 、 298 ± 242 、 77 ± 135 となった。一方、紫外線殺菌処理を行わない場合、魚収容前および上記同様の収容密度で飼育を行った場合の飼育水中の総細菌数、大腸菌群数、大腸菌数（CFU/mL）は、それぞれ、 195 ± 164 、 13 ± 13 、 5 ± 7 、および、 $3,900 \pm 4,060$ 、 491 ± 636 、 192 ± 305 となった。これらの数字を水産用水基準値と比較する（測定方法は異なるが、本試験の方が正確な数字が出るため、同列で比較）と、100 mL当たりの大腸菌群数は紫外線殺菌処理装置を付設した水槽で29,800、同装置未設の水槽で49,100となり、紫外線殺菌装置の付設により大腸菌群数は約40%減となった。すなわち、同殺菌処理は飼育水の細菌数抑制に有効であることが分かった。なお、飼育水中の大腸菌群数は紫外線処理装置付設の有無に係わらず、いずれも推奨値を大きく超えていたが、現状の菌数下において飼育魚の生理指標（赤血球数や血球組成、顆粒球の貪食活性、血漿中のタンパク質・グルコース・総脂質・コルチゾル濃度やALT・ALP活性等）に異常は認められず、健康状態に問題は生じていないと考えられる。

なお、紫外線酸化法は有機物を二酸化炭素や水等にまで酸化分解でき微量有機物の除去に通しているため、これまでも低濃度有機排水処理に用いられてきたが、電力消費量が大きいためランニングコストの低減が求められているとの報告があることから、今後、同関連装置の浄化能力と電力消費量の関連についての検討は必要であろう。

飼育水質が魚の餌料効率に及ぼす影響については、生理的な許容範囲内では同指標に顕著な影響を及ぼすことはない。

04 | 餌含有タンパク質の低減に関する研究

魚類のタンパク質要求量は高く、炭水化物の利用率は極めて低い。しかしながら、世界中で食糧難が進む中、タンパク質不足は回避し難い事実である。このような世相下において、食料増産のために養殖魚の生産拡大が必須であるとは言え、魚類養殖用飼料内のタンパク質含有量の削減は急務である。現在、植物性タンパク質を用いた代替餌料やアミノ酸含有無タンパク質餌料の開発、脂質の利用促進等に関する研究が



進んでいる。しかし、これらとは別に飼料の改質や結合性向上、量増しなどを目的として調製時に混入されている炭水化物を魚に効率よく利用させる方法を確認し、実用化することは必須であろう。

魚類における糖利用能の低さには、哺乳類の糖尿病と同様に、インスリン分泌量の低さや筋肉組織等におけるインスリン抵抗性の高さが関与していると考えられている。そのためには、高いストレス状態を解消させたり、体内の抗酸化や抗炎症活性を高めたりすることを含めて、筋肉組織等における高いインスリン抵抗性を下げる必要がある。例えば、生薬である紅参、知母や厚朴、ポリフェノール的一种である大豆イソフラボンやレスベラトロールは2型糖尿病の症状改善に効果があるとの報告がある。また、野生植物由来ミネラル、海藻由来ミネラル、そして、イノシトール(米糠由来のビタミンB様物質)の投与も魚類筋肉のインスリン抵抗性を著しく改善する作用を有することが報告されている。それゆえ、それらの素材を添加した餌を用いた飼育試験を行ったところ、ギンザケの筋肉への糖の取り込み速度が高まり、餌料効率も低温や高温域では有意に高くなったほか、中温域でも上昇傾向を示した。

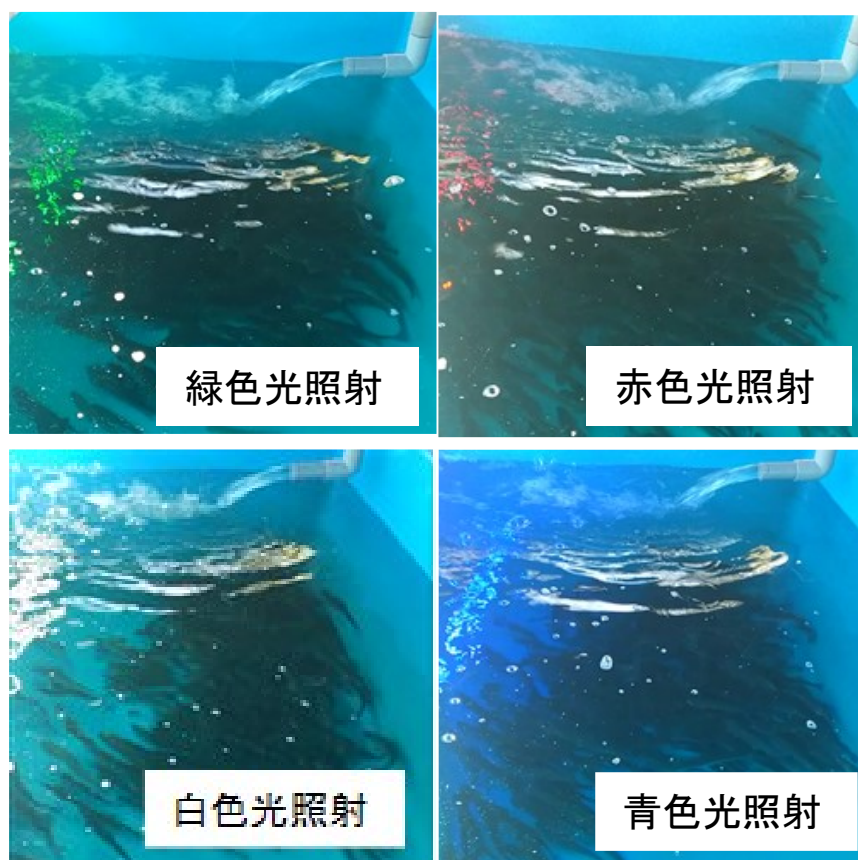
なお、上記の添加物を含む餌を与えることで低水温下や高水温下でも餌食いは改善することが確認されており、今後は消費電力や添加物の価格も勘案して最適な温度や餌組成を決定する必要がある。

05 | 光条件が餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響

魚は照射する光の波長や強度により種々の影響を受ける。飼育試験に用いたギンザケ(体重80g前後)のでは、水槽表面での光の強さが50~450ルクスの場合、緑色光照射時は光に集まり、密集的行動がみられるのに対し、白色光や青色光照射時には光から遠ざかるとともに、群れが分散する傾向にあった。なお、赤色光照射群では群れの密集度は多少低下するものの、光から逃避する等の行動は認められなかった。ただし、少なくとも3000ルクス以上の照度では、いずれの色の光照射時でも、一定の距離をおいて群れをつくったり、遊いだりする個体が多くみられた(下図)。しかしながら、少なくとも短期的スケールでは、通常時には給餌を開始すると照射光の色の違いはほとんどなく、いずれの波長下でも旺盛な摂餌行動が認められた。

長期的な影響については(飼育期間が1ヶ月を越えると)、緑色光照射時には血漿中のコルチゾール濃度(ストレス応答指標)が、他色の光照射時に比べて低く出る傾向にあり、それに伴って摂餌効率も有意ではないものの高めに推移するようになった。給餌期以外の行動もゆったりしている様子

も伺えることから、通常時のストレス負荷が軽減された状態になっており、それが代謝活性にも影響して、成長促進に振り分けられているものと推察された。



06 | 種苗としての健康度・品質

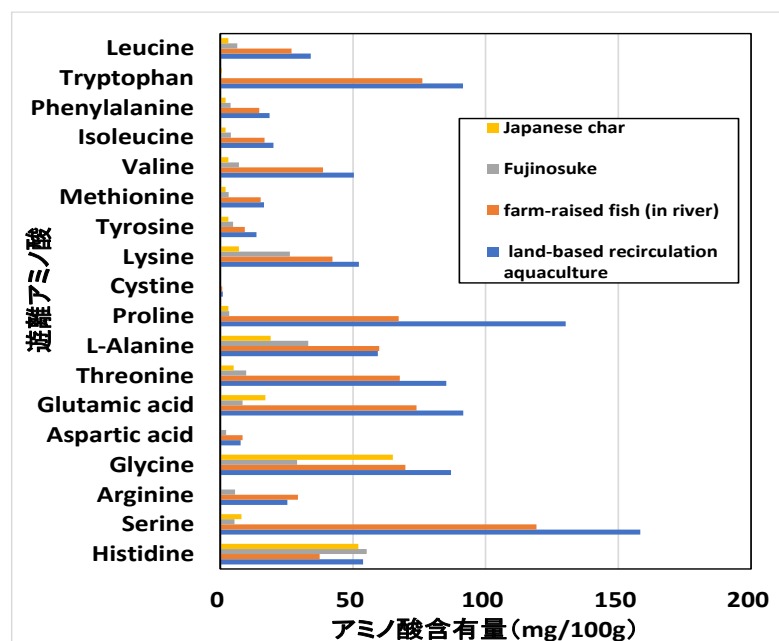
河川飼育種苗は飼育水温の低下やそれに伴う代謝活性低下等の影響を強く受けているため、それと今回の養殖魚から得られた各種数値を単純比較はできないが、沖出しサイズの種苗で比較すると、陸上養殖ギンザケは、河川産と比べて、肥満度がわずかに高いほか、比肝臓重量や比脾臓重量等もわずかに高くなる傾向にあった（両者に統計的な差は認められない）。

河川産と陸上養殖ギンザケの肥満度、比肝臓重量、比脾臓重量の比較

	体重 (g)	肥満度	比肝臓重量	比脾臓重量
farm-raised fish (in river)	168±74	12.4±2.6	1.3±0.7	0.24±0.09
land-based recirculation aquaculture	178±34	14.4±0.6	1.7±0.2	0.27±0.04

両種苗ともに一般生理・健康指標（赤血球数、血球組成、顆粒球貪食活性、血漿中のコルチゾル・タンパク質・グルコース濃度や同 ALT・ALP 活性等）に異常は認められなかった。また、筋肉の一般体成分（栄養成分項目）についても、河川産に比べて、陸上養殖種苗で筋肉の脂肪含量がわずかに高かった（河川産 0.2～0.7%、陸上養殖魚 1.0%前後）ものの、その他の項目として、水分（77.1

～77.8%)、タンパク質(20.5～20.7%)、灰分(1.3～1.4%)等に差は認められなかった。同部位の遊離アミノ酸組成に関しても、河川産と陸上養殖魚の間に有意差は認められなかった(下図)。



ギンザケ筋肉中の遊離アミノ酸含有量

餌(配合飼料)を摂餌できる個体か否かにより、成長が著しく変わるため、初期成長期の餌サイズに留意するとともに、必要に応じて、サイズによる魚の選別操作も検討する必要がある。また、初夏から夏期を通じて水中溶存酸素の不足や同接種効率の低下によって、魚の環境変動等に対する魚の耐性や生残率は大きく変わるので、この時期は水温のみでなく水中の溶存酸素濃度や魚の酸素摂取効率等の変化に留意しつつ飼育することが肝要である。

養殖方法のまとめ

本調査・研究では、陸上養殖事業推進に係わる以下の課題について検討したので列挙する。

- 1) 養殖対象魚種の生理・生態機構の解明、および、健全種苗の生産。
- 2) イニシャルコストおよびランニングコストの低減に向けた、再利用可能・未利用エネルギーを活用した低コスト型温度調節機構付き循環養殖システムと飼育条件。
- 3) 飼料中の魚粉含有率の削減。
- 4) 環境や養殖状況のモニタリング。

石巻専修大学敷地内に閉鎖循環式陸上養殖設備を設置し、飼育条件の設定に至る各種予備試験を6月から実施するとともに、養殖試験への移行を含めた養殖試験を2021年7月から2023年1月まで実施した。すなわち、2021年6月、9月、10月、2022年6月、10月、11月に、東北地方にある漁業生産・協同組合等から入手したギンザケ稚魚約6,000尾を、前述の養殖施設から大学の飼育施設まで、ポリエチレン製タンクに収容し、空気曝気（～約30g/L）あるいは空気と酸素の併用曝気（高密度収容時；約30～70g/L）条件下で運搬した。10月末～11月の同移送時には、水温や塩分濃度（淡水～5%海水を使用）に留意すると、海面への直接投入でも大きな問題は生じないと考えられる。

閉鎖系循環式陸上養殖設備として、今回は事業化希望先の仕様に合わせて、屋外型循環式調温装置・開放型濾過槽付き飼育水槽（3.5トン長円形FRP飼育水槽、濾材500～700L収容の1トン濾過槽、断熱タイプ）を選定した。基本タイプでは、日間換水率は約8.5%程度であるが、濾過槽の能力向上により1/3以下に削減が可能である。また、高密度養殖時には、飼育水の溶存酸素不足に対応し、水中酸素濃度の向上を図る必要があり、酸素発生・供給装置の付設（水槽外設置型が推奨される、水槽内各所の溶存酸素濃度を通常時で6.5ppm以上、19℃等の高温飼育時や高密度飼育時には飽和状態に維持）が必要である。また、濾過槽は上記の3～5倍程度のサイズ（飼育水槽と同程度の大きさ）と浄化能力を有するものが推奨される。なお、飼育槽内の流速は8～30cm/s程度が望ましい。また、高密度飼育時には残餌と糞量に対応するため、濾材最上面に不織布等の着脱・洗浄が容易なカバーの設置も有効である。資金的に余裕があれば、逆洗機構の付設も要検討である。

加温冷却装置に関しては、ギンザケの養殖可能水温範囲（数～20℃程度）に調節可能なタイプで、（日間変動が2～3℃程度であれば魚へのストレス負荷は小さいことから）温度調節幅は±1.0～1.5℃程度の多少粗雑なものでも良い。餌料効率は、飼育温度が16℃の時に最も高くなるが、同周辺温度（14℃や18℃）でも多少の同効率低下こそみられるものの、生育に問題はない。特に、夏季におけるギンザケの淡水養殖期には、溶存酸素濃度を飽和濃度以上に高く保つことができれば、（コストに配慮し）19℃程度の高温下での養殖も可能である。

給餌装置は、小規模陸上養殖を想定した場合はペット用自動給餌機に簡単な改造を施すことで十分に機能する。ただし、餌が一度に塊的に供給されると、魚は驚いて逃避したり摂餌行動自

体が減退してしまうため、室内や屋根付屋外に並立設置した小規模養殖水槽を複数用いて養殖を行う際は、少量配餌（広範囲に多回散布）を何度か繰り返して 1 セットとし、適水温時にはそれを 1 日当たり 3～5 回程度の多回セット給餌することが望ましい。給餌量は体重の 2%程度で良く、成長優先時は 4%程度としても問題はない。なお、12℃以下の低水温下養殖時には隔日給餌でも成長にあまり差の無い（餌の節約も可能である）こともわかった。

養殖時の光条件については、飼育開始初期のストレス軽減には緑色 LED の使用が推薦されるが、通常時（餌になれた魚等）には自然光で良い。摂餌効率や成長、健康度ともに良好で差はない。ただし、長期飼育時には緑色 LED の使用により通常時のストレス負荷が軽減された状態にあった。秋季以降の陸上養殖延長時の日長管理には同照明の利用も有効である。

日々の確認作業としては、魚の遊泳や摂餌行動（状態）や残餌や糞の状態、水中の温度や溶存酸素濃度（曝気状態の確認のみで良い）、水の濁りのチェック程度で良い。

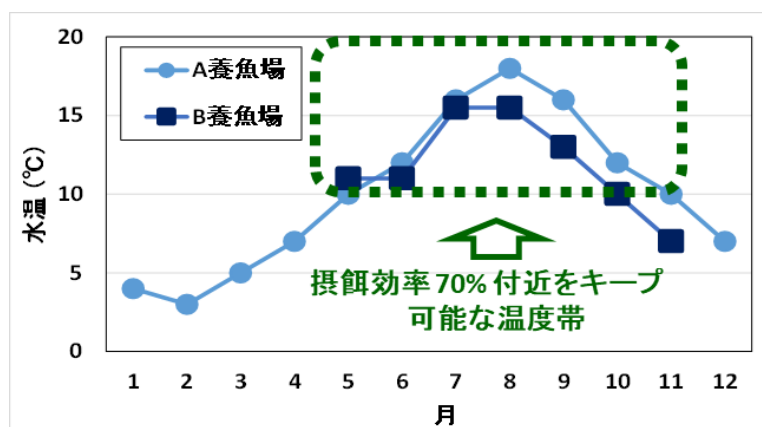
簡易型 IOT 装置の使用により、遠隔チェック（予算により、タイマー付きでスマホ管理や屋外用 Wifi 利用によるパソコンでの管理）も可能になると考える。〔IOT 関連記事参照〕

魚類養殖用飼料内のタンパク質含有量の削減は急務であるが、植物性タンパク質を用いた代替餌料やアミノ酸含有無タンパク質餌料の開発、脂質の利用促進等に関する研究に加え、飼料の改質や結合性向上、量増しなどの目的で混入されている炭水化物の利用度向上が必須であると考ええる。実際、生薬である紅参、知母や厚朴、ポリフェノール的一种である大豆イソフラボンやレスベラトロール、野生植物由来ミネラル、海藻由来ミネラル、そして、イノシトール（米糠由来のビタミン B 様物質）の投与も魚類筋肉のインスリン抵抗性を著しく改善する（糖利用率を向上させる）作用を有することを確認している

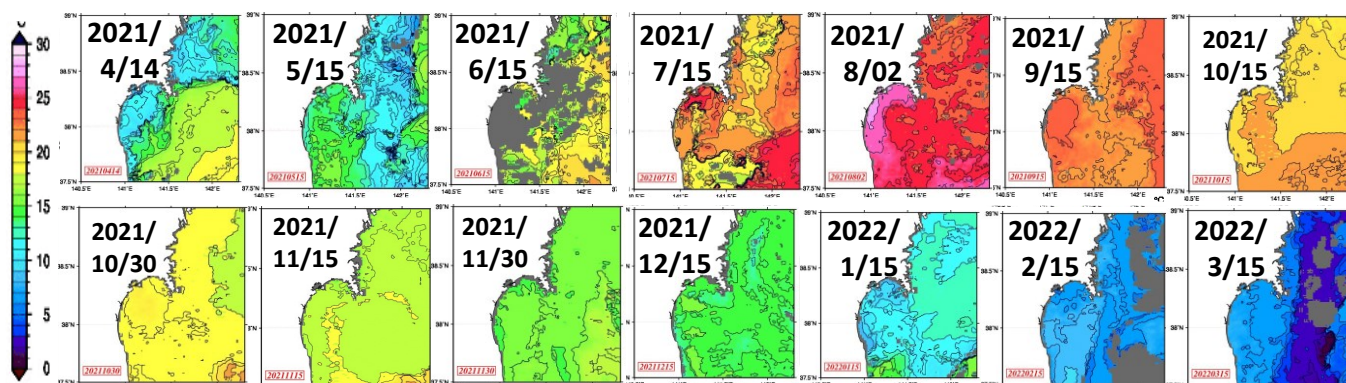
【フィード・ワン株式会社製の鱒用飼料使用例】

製品名	形態	平均粒度 (mm)	入目 (kg)	各種成分量(%)		給餌対象		動蛋白 (%)	用途
				粗蛋白	粗脂肪	体長(cm)	体重(g)		
鱒餌付用顆粒A	顆粒	0.3~0.8	10kg/箱	50.0	7.0	~3.0	餌付~0.4	83.0	餌付用 顆粒
鱒餌付用顆粒B	顆粒	0.5~1.5	10kg/箱	50.0	7.0	3.0~4.5	0.3~2.0	83.0	"
鱒稚魚用EC 1C	EPケラブル	0.3~0.6	20kg	49.0	4.5	~3.0	餌付~0.4	68.0	稚魚用 EC
鱒稚魚用EC 2C	EPケラブル	0.6~1.0	20kg	49.0	4.5	3.0~4.5	0.3~2.0	68.0	"
鱒稚魚用EC 3C	EPケラブル	0.8~1.3	20kg	49.0	4.0	4.0~7.0	1.5~4.0	67.0	"
鱒稚魚用EC 4C	EPケラブル	1.0~1.8	20kg	49.0	4.0	5.5~8.5	3.0~7.0	67.0	"
鱒育成 d2.5	ペレット	2.5	20kg	45.0	3.5	8~12	6~20	54.0	育成用 DP
鱒育成 d3	ペレット	3.0	20kg	45.0	3.5	10.5~19	15~80	54.0	"
鱒育成 d5	ペレット	5.0	20kg	45.0	3.5	17~23	70~	54.0	"
鱒育成 d7	ペレット	7.0	20kg	45.0	3.5	28~	250~	54.0	"
鱒 せせらぎ d2	EP	2.0	20kg	46.0	10.0	8~12	6~20	57.0	高性能 EP
鱒 せせらぎ d3	EP	3.0	20kg	46.0	10.0	10.5~19	15~80	57.0	"
鱒 せせらぎ d4	EP	4.0	20kg	46.0	10.0	16~26	60~200	57.0	"
鱒 せせらぎ d5	EP	5.0	20kg	46.0	10.0	26~	200~	57.0	"
鱒 せせらぎ d6	EP	6.0	20kg	46.0	10.0	28~	250~	57.0	"
鱒 せせらぎ d8	EP	8.0	20kg	46.0	10.0	35~	500~	57.0	"
鱒 せせらぎHR d8	EP	8.0	20kg	46.0	10.0	28~	250~	57.0	"
鱒 せせらぎHR d10	EP	10.0	20kg	46.0	10.0	35~	500~	57.0	親魚・大型鱒 色揚げ

【養魚場（河川・地下水）における飼育水温（月平均値）】



仙台湾海面表面水温（東北ブロック沿岸水温速報



国立研究開発法人 水産研究・教育機構 より抜粋引用

<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN2/kaisyo/suion/sendaiwan/frame.html>

＊16°Cでの陸上養殖は、餌料効率が高く、11月頃に実施される稚魚の海出し時の海水温にも近い。そのため、淡水から海水への移行を、塩分馴致期間を設けず、直接行っても、ストレス負荷が小さくて済む。

⇒ 海出しに伴う魚への影響は小さい！

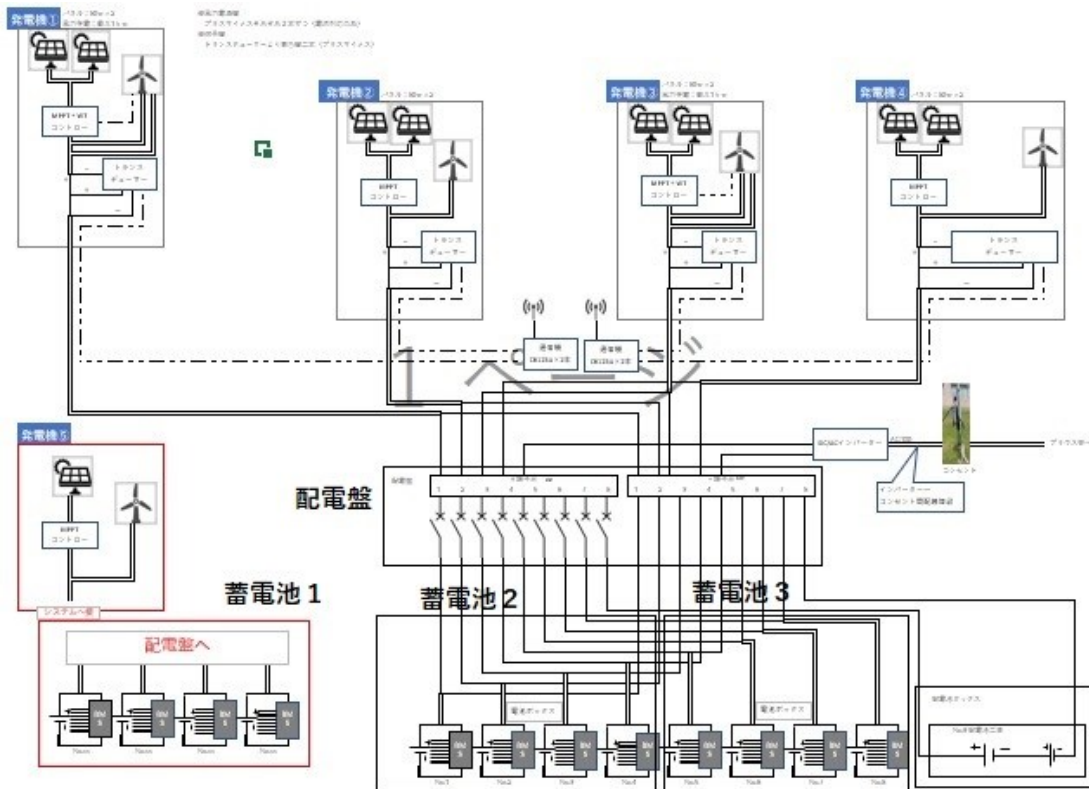
通常養殖：塩分変化と水温変化を受ける

陸上養殖：塩分変化のみを受ける

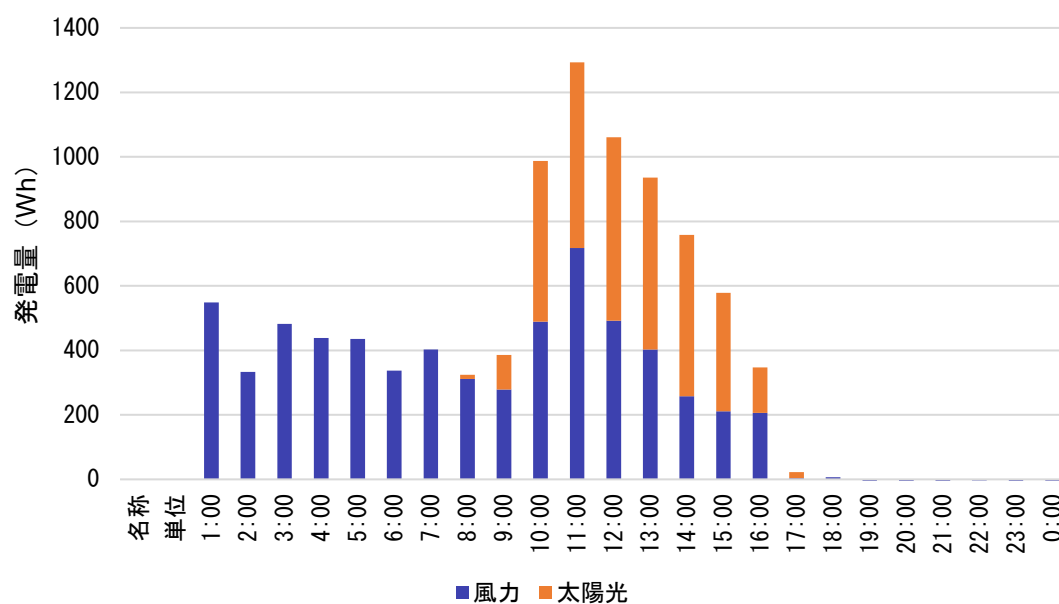
再生可能エネルギーの活用

01 | 太陽光発電と風力発電のハイブリッドシステムの検討

太陽光パネル(160W~200W)と小型風力発電(最大400W~1kW)のセットを5基、3.2kWh蓄電池3基を備えた風力太陽光ハイブリッド発電システムを構築してデータ収集を実施した。



1時間の発電電力を下記に示す。風の強い日であったこともあり、1日の積算発電量は9.6 kWh（太陽光3.3 kWh、風力6.3 kWh）となった。気象にもよるが、太陽光パネルの上空をうまく使うことにより、同等の施設占有面積で発電能力を増強することができる。



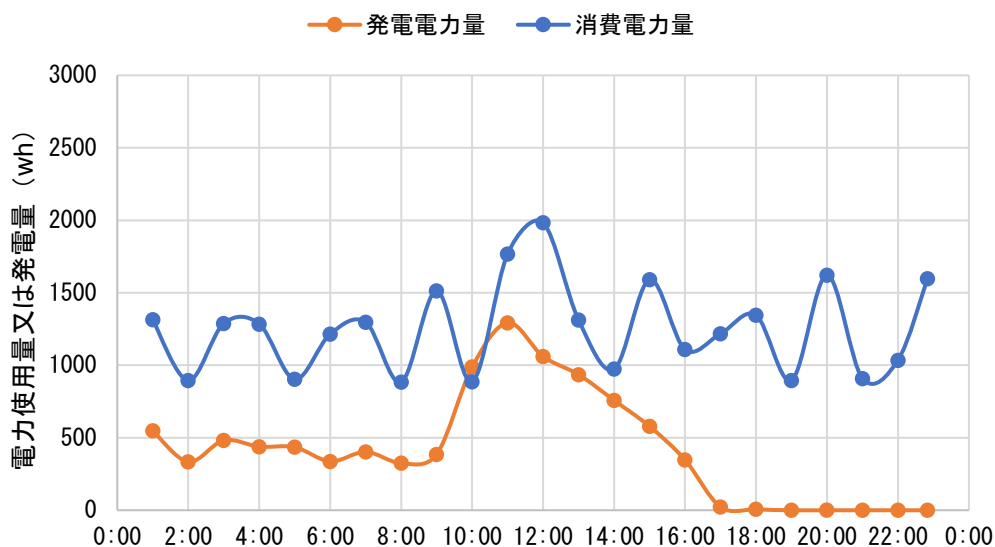
	① 合計	② 太陽光	③ 風力	増強率 (①／②)
1日の発電量	9.6 kWh	3.3 kWh	6.3 kWh	2.9

今回の増強率 2.9 は、現システムの太陽光パネルによる電力使用量／発電量の 2.4 を上回る結果であり、一定の風がある条件では再生可能電力で賄うことができる結果となった。風力・太陽光発電のハイブリッド化により、再生可能電力の供給能力向上に対して十分な効果が期待できる。

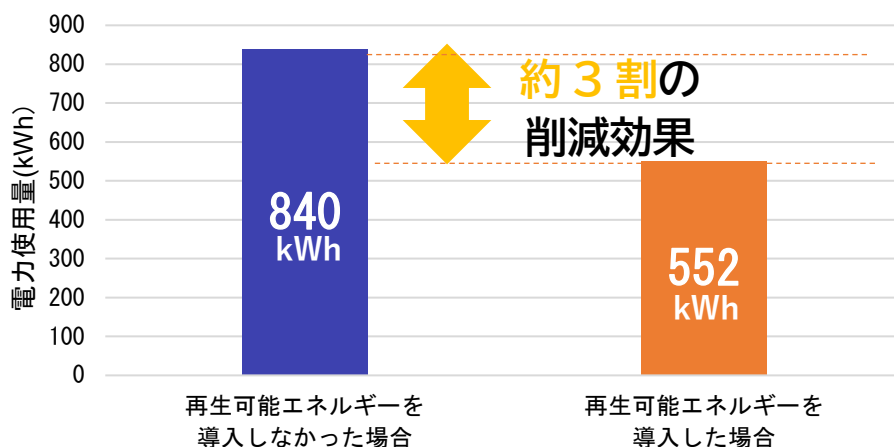
02 | 太陽光利用による買電量の削減効果

本実証試験での電力消費量、発電量を基に太陽光発電と風力発電のハイブリッドシステムを活用することでどの程度費用を削減できるのか試算を行った。

1 ユニット当たりの消費電力量が 1 日約 28kWh であるのに対し、再生可能エネルギーによる積算発電量は 9.6kWh となる。これを 1 カ月当たりに換算すると、消費電力量が約 840kWh であるのに対し、発電量は 288kWh が期待される。理想的に蓄電池を用いて夜間や晴れの日以外の電力供給ができたと仮定すると、買電量は約 552kWh となる。また、設置面積は約 3 倍程度に拡大した場合には、養殖水槽 1 ユニット分ほぼすべての消費電力量を再生可能エネルギーで賄うことも可能となる。



発電量・電力使用量を一カ月換算し、削減可能な電気料金を試算した。



仮定の太陽光発電設備による再生可能エネルギーを用いることで

削減可能なランニングコスト

1 カ月約 **8,432 円**

03 | 収支計算

事業者がギンザケ稚魚の養殖を始めるにあたり、どれくらいの費用がかかり、どれくらいの規模で採算性の確保が可能となるか、養殖に必要な最低限の設備を導入した場合を想定し試算する。また、再エネ設備導入補助率、再エネ導入による電気代金削減効果、ギンザケの売上単価について感度分析を行った。本マニュアルには、その一例を示す。

なお、以降は令和3年度のデータをもとに試算したものである。令和4年度においては、社会情勢等から電力利用料金の変動が大きく流動的であったことから再検討を実施しないこととした。

●試算条件

	種目		金額	補足
支出	イニシャルコスト	養殖設備	610.0 万	減価償却 15 年
		再エネ設備	50.0 万	減価償却 15 年（補助金の活用を想定）
	ランニングコスト	人件費	31.7 万	
		電気代（再エネ導入）	10.0 万	1 ユニットにつき 2kW の太陽光発電を用いる
		電気代（再エネ未導入）	18.5 万	約 6.5 カ月
		水道代	3.9 万	約 6.5 カ月利用
		稚魚代	0.2 万	
		餌代	14.0 万	
収入			51.2 万	2223 尾×0.9（歩留まり）＝2000 尾/ユニット×ギンザケの売価＝1600 円/kg＝51 万円（1 尾: 160 g）

※1 ユニット＝2000 尾の養殖

※1 ユニット増加ごとに、設備費は×0.3 の増加で設定

●収支計算

条件：初期設備費 610 万、再エネ導入あり、再エネ設備導入補助 1/3

売上	千円	512	1024	1536	2048	2560
ユニット数	個	1	2	3	4	5
販売数	kg	320	640	960	1280	1600
単価	千円	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
費用	千円	1027	1484	1941	2398	2855
人件費	千円	317	348	380	412	444
一人当たりの人件費	千円	317	317	317	317	317
割増係数	割	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4
稚魚・餌代	千円	142	284	426	568	710
単価	千円	142	142	142	142	142
ユニット数	個	1	2	3	4	5
電気代	千円	100	200	300	400	500
基本料金	千円	184	184	184	184	184
ユニット数	個	1	2	3	4	5
再エネ削減効果	千円	85	85	85	85	85
ユニット数	個	1	2	3	4	5
水道代	千円	39	79	118	158	197
基本料金	千円	39	39	39	39	39
ユニット数	個	1	2	3	4	5
減価償却	千円	429	573	717	861	1005
再エネ導入設備費	千円	22	22	22	22	22
再エネ導入設備費増加係数	倍	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
1ユニットの設備費	千円	407	407	407	407	407
1ユニットの設備費増加係数	倍	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2
利益	千円	-515	-460	-405	-350	-295

売上	千円	3072	3584	4096	4608	5120	5632
ユニット数	個	6	7	8	9	10	11
販売数	kg	1920	2240	2560	2880	3200	3520
単価	千円	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
費用	千円	3312	3769	4226	4683	5140	5597
人件費	千円	475	507	539	570	602	634
一人当たりの人件費	千円	317	317	317	317	317	317
割増係数	割	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
稚魚・餌代	千円	852	994	1136	1278	1420	1562
単価	千円	142	142	142	142	142	142
ユニット数	個	6	7	8	9	10	11
電気代	千円	600	699	799	899	999	1099
基本料金	千円	184	184	184	184	184	184
ユニット数	個	6	7	8	9	10	11
再エネ削減効果	千円	85	85	85	85	85	85
ユニット数	個	6	7	8	9	10	11
水道代	千円	236	276	315	355	394	433
基本料金	千円	39	39	39	39	39	39
ユニット数	個	6	7	8	9	10	11
減価償却	千円	1149	1293	1437	1581	1725	1869
再エネ導入設備費	千円	22	22	22	22	22	22
再エネ導入設備費増加係数	倍	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0
1ユニットの設備費	千円	407	407	407	407	407	407
1ユニットの設備費増加係数	倍	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0
利益	千円	-240	-185	-130	-75	-20	35

※再エネ導入設備費の減価償却については、50 千円／年間・ユニットとなるところ、浜の活力再生・成長促進 交付金等の活用を想定し、22 千円／年間・ユニットとしている。

【感度分析】

売値単価（千円/kg）、再エネ削減効果（千円/年）の変動を考慮

3ユニット 収益シミュレーション		再エネ削減効果(千円/年)					
		-1512	65	75	85	95	105
売上単価 (千円/kg)	2	-79.2739	-49.2739	-19.2739	10.72608	40.72608	
	1.8	-271.274	-241.274	-211.274	-181.274	-151.274	
	1.6	-463.274	-433.274	-403.274	-373.274	-343.274	
	1.4	-655.274	-625.274	-595.274	-565.274	-535.274	
	1.2	-847.274	-817.274	-787.274	-757.274	-727.274	
	1	-1039.27	-1009.27	-979.274	-949.274	-919.274	
	0.8	-1231.27	-1201.27	-1171.27	-1141.27	-1111.27	
9ユニット 収益シミュレーション		再エネ削減効果(千円/年)					
		-75	65	75	85	95	105
売上単価 (千円/kg)	2	901.7516	991.7516	1081.752	1171.752	1261.752	
	1.8	325.7516	415.7516	505.7516	595.7516	685.7516	
	1.6	-250.248	-160.248	-70.2484	19.75158	109.7516	
	1.4	-826.248	-736.248	-646.248	-556.248	-466.248	
	1.2	-1402.25	-1312.25	-1222.25	-1132.25	-1042.25	
	1	-1978.25	-1888.25	-1798.25	-1708.25	-1618.25	
	0.8	-2554.25	-2464.25	-2374.25	-2284.25	-2194.25	
10ユニット 収益シミュレーション		再エネ削減効果(千円/年)					
		-20	65	75	85	95	105
売上単価 (千円/kg)	2	1065.256	1165.256	1265.256	1365.256	1465.256	
	1.8	425.2558	525.2558	625.2558	725.2558	825.2558	
	1.6	-214.744	-114.744	-14.7442	85.25583	185.2558	
	1.4	-854.744	-754.744	-654.744	-554.744	-454.744	
	1.2	-1494.74	-1394.74	-1294.74	-1194.74	-1094.74	
	1	-2134.74	-2034.74	-1934.74	-1834.74	-1734.74	
	0.8	-2774.74	-2674.74	-2574.74	-2474.74	-2374.74	

再エネを導入した場合、再エ導入補助率が 1/3 以上で 11 ユニット以上養殖を行うと採算性の確保が可能となる。また、感度分析の結果から、売上単価及び再エネによる削減効果によっては、さらに小規模でも採算性の確保も可能になる。

04 | 採算性の確保へ向けた取り組み

支出（ランニングコスト）で大きな比重を占めるのが餌代、その後に電気代、人件費、水道代と続く（5ユニット以上の場合）。

餌代を節約するためには、魚粉由来タンパク質の含有量を減らすとともに、安価で、餌料効率（摂餌効率を含む）を高く保つ餌の選定や開発に加え、給餌間隔を制御（給餌休止期間を挟む）することで給餌量自体を減らしても高い成長率を維持する方法の活用、照射光の波長（色）を制御する等の手法によって低ストレス状態（消化・吸収効率の上昇や無駄なエネルギー消費を抑制）下での飼育法を確立することが重要と考える。また、酸素曝気システムの導入は高密度飼育にとって有用な設備であると考えられる。ただし、高酸素状態下での長期間飼育は魚体内における酸化物価を高めたりする、すなわち、体内酸化を促進する方向に作用することもあるため、收容されている魚の酸素消費速度を勘案して同曝気装置の使用期間をある程度限定するとともに、抗酸化物を餌に今後して投与する等の対策も検討しておくことが望ましい。

電気代の削減にあたっては、昨年度及び今年度の成果より、再生可能エネルギーの導入が有効であることが分かっている。また、太陽光パネルのみで養殖に要する消費電力量すべてを賄おうとした場合、それなりの規模でパネル設置が必要であるのに対し、太陽光パネルの上空を活用して小型風直発電などとのハイブリッドシステムを構築することで、供給効率を約3倍にまで引き上げることが可能となることを確認した。現時点では検討段階の要素のため、今後はこれらのシステムの最適化が課題となる。また、上述の酸素曝気システムの導入により、夏季における魚の飼育水温を19℃位まで上昇させても餌料効率の著しい低下を伴うことなく養殖が可能（外気温との差を3度程度は縮小が可能）であることがわかったので、電気代の節約条件は多少緩和されるものとする。

人件費については、日々のチェック項目が限定できたことから多少の削減は可能となったが、今後は消化・吸収の良い飼料の開発に加え、飼育水槽底面をすり鉢上に加工して残餌や糞の除去を促進し、その下流に的受皿、資源の再利用に資する小規模施設の併用も効果があると考えられる。また、IoT機器の活用や一定以上の規模を確保することで当該費用の抑制もある程度まで可能と考える。

水道代については、飼育水槽に設置する濾過槽の容量を増やす（現在の飼育水槽と濾過槽容積比約7:2を2:1程度とする）ことや脱窒装置（および、泡沫分離装置）を付設することで補給水量を半減することが可能であり、また、地下水の利用が可能であれば水道水の購入比率を下げるができるため、節約は可能である。

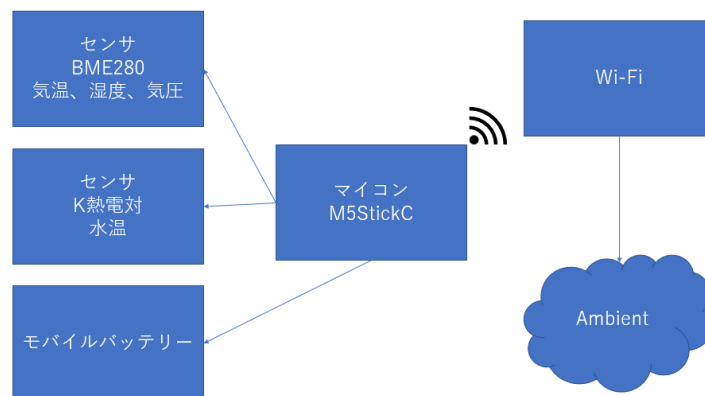
加えて、安価な簡易型IoTの活用により、高価な市販の装置や維持・管理に費用の掛かる既存のシステムを導入することなく、飼育環境や魚の飼育状態等の遠隔チェックの可能性が示唆されたことから、今後のIoTシステム導入や同利用時の選択幅がひろがるものと考えられた。

IoT を用いた監視方法の検討

01 | 簡易型 IoT を利用するための検討

遠隔監視用のデータ記録用機器と現在使用中の各種センサは、その入出力方式が異なるため直接接続することはできない。また、遠隔監視用のデータ記録用機器に直できるセンサは、一般的に高額であり陸上養殖を低価格で実現するためのセンサとしては不向きである。従って、簡易型 IoT を構成するためには、より汎用的で安価なセンサを利用した組み込みシステムを別途開発する必要がある。しかし、市販の遠隔監視用のデータ記録用機器を使用した場合、機器の不具合やメンテナンスに対し販売業者が対応することができるが、自主開発した場合はそれらは全て自前で行う必要がある。これらのことを踏まえて簡易型 IoT を構築し利用するための問題点等を検討していきたい。

02 | 令和4年度の実施結果



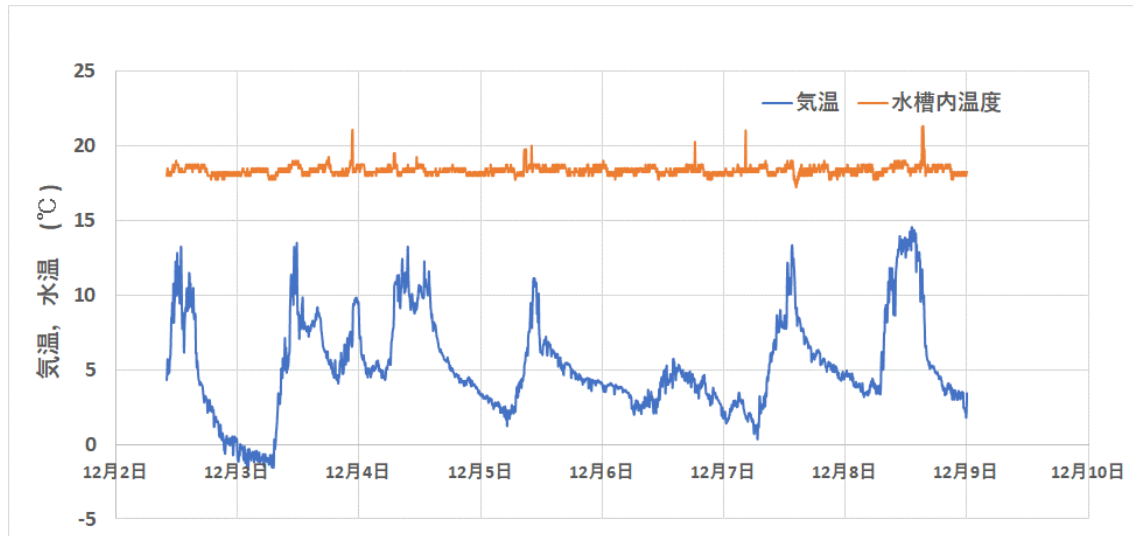
① 簡易型 IoT システムの概要

上図は本年度実施した環境モニタリングの実験に用いた簡易型 IoT システムの概略図である。M5stickC マイコンに、気温、湿度、大気圧を測定できるセンサ（BME280）と水温を測定するための K 型の熱電対を接続した。また、マイコンを長期間駆動するために大容量（108,000mAh）のモバイルバッテリーを使用した。マイコンは学内の Wi-Fi と接続され Ambient サイトから各種データを5分毎にリアルタイムで測定できるようにプログラムした。このシステムを右図に示すように、1号館南側に設置されている陸上養殖用の水槽の側面に設置した。



② 実施結果の一例

下図は令和4年12月3日から9日の気温と水温の測定結果の一例である。一日を通じて、気温は10℃以上の変化があるが、水温はほぼ18℃一定に保たれている。



気温と水温の測定結果の一例

③ 今後の検討事項

気温や水温などのデータは、比較的容易に取得することができたが溶存酸素や塩分などの水質データは、センサの出力形式が異なるため直接マイコンに接続することはできない。今後、それらのセンサをマイコンに接続するための組み込みシステム等を開発していく必要がある。