

ギンザケの陸上養殖 マニュアル（案）別添資料

目次

1-1	調査概要	1
(1)	背景	1
(2)	目的	1
(3)	概況	1
1-2	稚魚の入手	2
1-3	環境設備管理	3
(1)	設備	3
(2)	条件	6
(4)	作業	8
(5)	作業時間	10
1-4	養殖モニタリング結果	11
(1)	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（餌料効率の向上と水温調整コストの低減等）	11
(2)	飼育密度や溶存酸素濃度の違いが餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響	12
(3)	飼育水質が餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響	17
(4)	餌含有タンパク質の低減（炭水化物利用率の向上）に関する研究	18
(5)	光条件が餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響	19
(6)	種苗としての健康度・品質	20
1-5	年間スケジュール	22
1-6	ギンザケの陸上養殖における今後の課題	23
1-7	低コスト陸上養殖実施に向けた再生可能エネルギーの活用について	26
(1)	目的	26
(2)	検討手法	26
(3)	調査結果	27
(4)	収支計算	42
(5)	採算性確保に向けた取り組み	49
1-8	IoTを用いた監視方法の検討	50
(1)	簡易型IoTを利用するための検討	50
(2)	令和4年度の実施結果	50

第1章 ギンザケの養殖事例

1-1 調査概要

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

1-2 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（図1）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

図1 天然ギンザケ種苗養殖施設（AとCはGoogle map より引用）

<参考>



図2 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ペを並列使用。二トントラックで輸送。

1-3 環境設備管理

(1) 設備

遊泳特性のあるギンザケに合わせて、アース株式会社製の3.5トンオーバル型（長円形）FRP水槽（DF-3500SU-50t、断熱50mm）、開放型濾過槽（EF-1000SU-50t）、屋外型循環式調温装置（RXC-2200AR- T3=Z-EA）を選定し、屋根をつけたテント下（野外）に各2基を設置した。同システム図を図3に示す。全体的な仕様は、事業化を予定している某企業の陸上養殖施設の設置形態を考慮し、上部を大型のテントで覆うことにより雨と直射日光をさえぎる程度の屋根をかけるとともに、風の強い校内において陸上養殖を進めるために周囲に防風ネットを設置した。

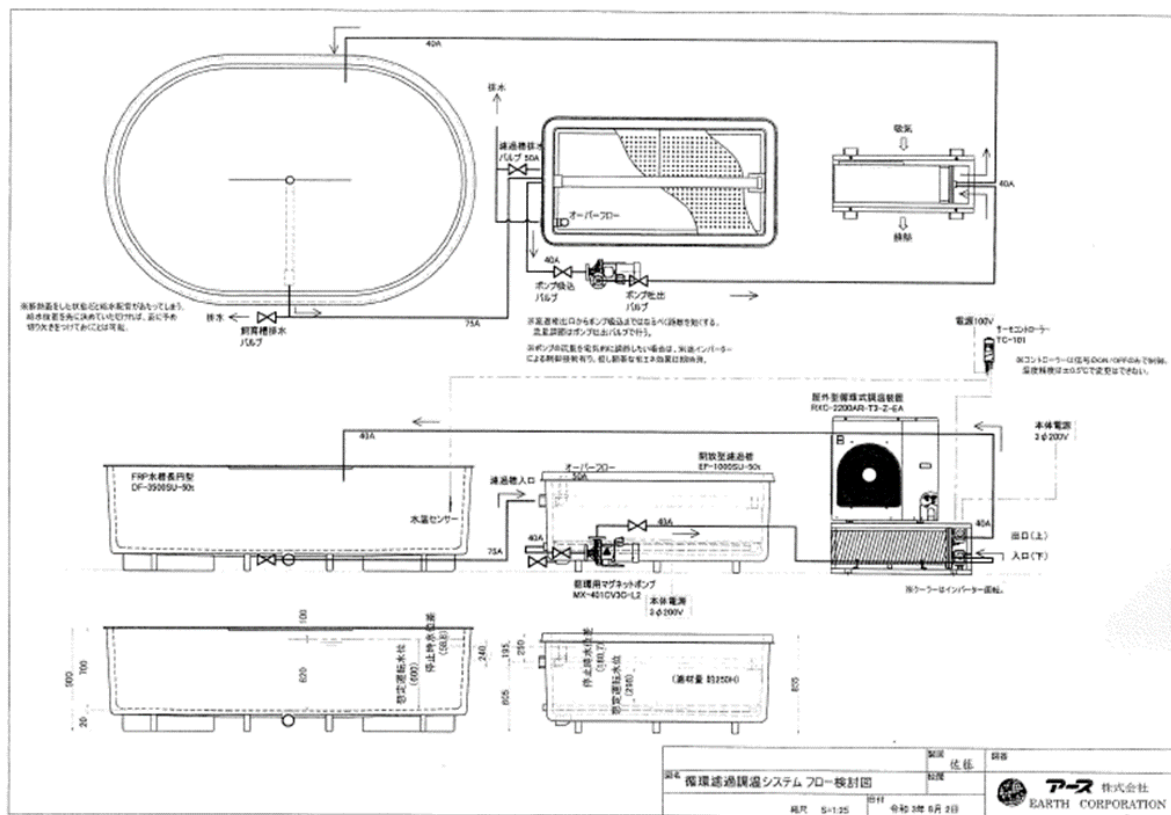


図3 循環ろ過調温システムフロー検討図（新規購入分）



図4 上記飼育設備全景

① 飼育水槽

ギンザケ稚魚の養殖用水槽 容量 3.5 トン

遊泳特性ある銀鮭に合わせ、アース株式会社製の 3.5 トンオーバル型（長円形）FRP 水槽（DF-3500SU-50t、断熱 50mm）を選定、設置した。今回は独立式屋外養殖仕様のため断熱水槽を選択したが、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。

なお初年度は、水槽、濾過槽、温度調節ユニットの発注から到着、および、その後の飼育水槽の設置・稼働の完了に至るまでの期間が長かったため、上記水槽施設を用いた調査期間は短くなった。そこで、既設の 2 トン方形型 FRP 水槽（断熱 50mm）2 基を順次使用して、ギンザケ養殖に掛かる各種調査を実施した。また、2 年度目は上述の 4 つの恒温水槽を調査目的に応じて適宜使用した。FRP 水槽への流量は新規購入したオーバル型が 2.1~2.9 L/s、既存の方形型が 0.8~1.8 L/s であった（完全換水時の所要時間は約 20~30 分）。

ところで、通常の飼育水槽の底面は地面に平行かつ平らであるが、底面をすり鉢上にする等の加工を施すことで、残餌や糞の回収が容易になる。

② 開放型濾過槽

FRP 断熱 50 mm厚 容量 1 トン（EF-1000SU-50t、濾材 500~700L 収容）を選定、設置した。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を採用。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。今回の調査・試験研究では、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（本濾材は密度が低く水に浮くため、濾過槽が浅い場合等は少なくとも密度の高い濾材の使用を推薦する）、その上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した状態で使用した（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が有効である。なお、持続的な濾過機能の維持を優先する場合、逆洗機構付き濾過槽の利用も検討すべきである）。

③ 屋外型循環式調温装置

加温冷却ユニット（RXC-2200AR-T3=Z-EA）を設置した。設定温度幅は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ であった。ギンザケの養殖可能水温内（数~ 20°C 程度）で調節可能なタイプで、温度調節幅は $\pm 1.0\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度の多少粗雑なものでも良い（日間変動が $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度であれば魚へのストレス負荷は小さい）。

④ 照明

LED ライト（緑・赤・青・白）

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としての利用が可能（有効）である。

⑤ 簡易型マイクロバブル発生装置

魚の健康維持や菌の増殖予防、摂餌向上等を通じ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台ずつ設置した。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するかのうしえがあるため、外部設置型の方が望ましい。

⑥ 酸素発生・供給装置

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である。

⑦ 自動給餌機

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した。実施企業の初期投資負担軽減を考慮。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ったりするので、餌の出方や量には注意が必要である。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〕

⑧ 濾材

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した。なお、途中より最上面（表面）に不織布を敷設した。

⑨ ビニールハウス

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（8 m × 4 m）2 棟を設置するとともに、周囲に防風ネットを設置した。

(2) 条件

①餌について

基本飼料として、フィード・ワン株式会社製のます稚魚用餌（鱒 EP セセラぎ d3&d4）を用いた。当該飼料の成分量は以下の通りである：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。また、同飼料の原材料名は以下の通りである：動物性飼料魚粉 57%、穀類小麦粉 20%等。当該飼料を、原則として週 5 日間、1 日に 3 回（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）、日間投与量が魚体重の 2%量となるように給餌しつつ養殖試験を行った。

給餌に際しては、調査飼育の初期は全てを手巻きにより行ったが、途中よりペット対応の給餌器（図 5；多頭飼いに向け自動給餌器、猫中小型犬用 7L 大容量、2WAY 給電、タイマー式定時定量、1 日 0～6 食、1 回 4～8 g、0～50 回、録音可、手動給餌可、乾燥剤内蔵；参考価格 11,295 円）を導入して、自動給餌式養殖に切り替えた。



図 5 ペット用給餌器（例）

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ったりする。そのため、室内や屋根付屋外に設置した小規模水槽等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）*。

*：給餌回数や頻度については、「1-4 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稚魚について（サイズ・量など）

本調査・県内の養殖関係業者から入手した種々のサイズのギンザケ稚魚（体長 10 cm 程度のものから当該施設にて養殖するとともに、必要に応じて各成長段階の魚を随時購入）を使用した。詳細は「1-2 稚魚の入手」の項に記載したので参照されたい。

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する。ストレス負荷の少ない魚の選分け（サイズ毎選別）策を検討中である。

＊＊：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

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、生物化学的酸素要求量 BOD 3 mg/L 以下、浮遊懸濁物質 SS 25 mg/L 以下、溶存酸素 DO 5.0 mg/L 以上、大腸菌群数 5,000 MPN/以下、天然湖沼の場合等は、pH は河川と同様であるが、化学的酸素要求量 COD 3 mg/L 以下、SS 14 mg/L 以下、溶存酸素 7.5 mg/L 以上、大腸菌群数 1,000 MPN/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 6.5 ppm 以上（通常 7.4 ± 0.3 mg/L）を維持。環境水の COD 値 3 mg/L は全有機体炭素量 TOC 値 0.474 mg/L（水中の酸化される有機物の全量を炭素の量で示したもの）相当。

収容密度（13 kg 体重/m³）を維持した場合、TOC 値が 0.39 ± 0.09 mg/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 以下に削減可能である）。

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 $4,800 \pm 2,700$ 、 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。限定的利用が推奨される。

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 0.2 mg/L 以下と 0.01 mg/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（既報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 10～30 cm/s 下で実施。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。

⑦光条件

飼育開始当初を除くと、短期的には、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。

(4) 作業

①水槽の状態チェック（項目）

- i) 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）。
 - ・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。緊急時には追加曝気や高圧散水等も効果的である。
- ii) 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。
 - ・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℃、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、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。
- iii) 水の濁りや悪臭、水漏れはないか。
- iv) 魚の行動に異常はないか、残餌や糞の状態はどうか。
 - ・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。

②斃死個体のチェック

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ず、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）。水中溶存酸素量の低下に注意するとともに、水温の上昇を抑制したり、給餌量を抑えたりすることも斃死率の低減対策として有効である。また、同時期の副次的感染症対策として、生体防御賦活効果のある素材等の投与もある程度有効である。

③環境指標チェック

- i) 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）
- ii) 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〕

④給餌

⑤糞・残餌の処理、換水

週5日間、1日に3回程度の給餌と給餌後の水槽掃除（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、数十g以上に成長した個体では、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程度でも良い（当該ギンザケの糞は散らばり難い）。小型稚魚の場合は糞粒も小さく、分散しやすいことから、濾過槽上面の清掃とともに、できるだけこまめな水槽掃除の実施が望まれる。残餌や糞の系外への自動排泄を促進するためには、水槽の底の形状（すり鉢状）を整えることが望ましい。なお、今回の試験では、残餌や糞の吸引には自作のサイホン式排水パイプを使用しているが、排水量が多い場合などにおいては、風呂から洗濯機への吸水用小型ポンプ等の利用も有効である。

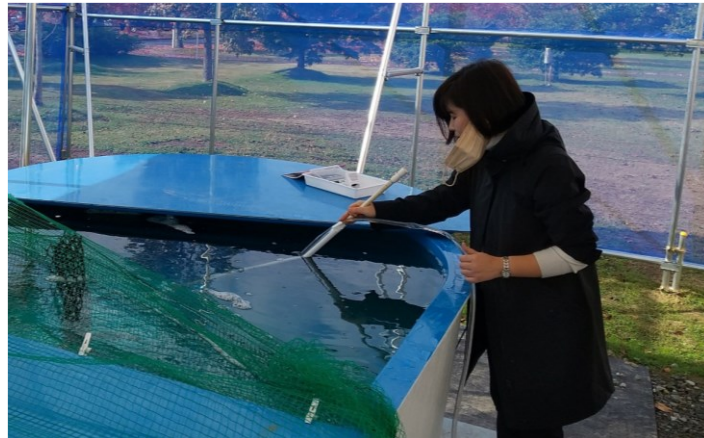


図6 自作のサイホン式排水パイプを使用した餌や糞の吸引除去

濾過槽の上面に加え、それらを覆っている不織布の洗浄（隔日～1週間に1回の頻度で実施）および全体（2～3ヶ月に1回程度）の清掃・転地返しが有効である。なお、負荷量が多くなる場合、逆洗機能付の濾過装置の併設も有効である（ただし、イニシャルコストは高騰する）。

14℃以上の適温期等では、日間投与量が魚体重の2（～4）%量を給餌する一方、低水温期は隔日投与でも良い（当該条件下での成長については、後述；「1-4 養殖モニタリング結果 -02 飼育密度や溶存酸素濃度の違いが餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響」を参照）。逆に、20℃以上の高温期等では、魚の摂餌行動の合わせた給餌ではなく、少し控えめな量の投与を心掛けること。

換水については、水質の測定結果や魚の状態を勘案して量を決定する必要があるが、通常は、水槽の10%程度を日間換水量の目安として実施すると良い。ただし、一時的には週に2回程度の換水でも対処可能である。濾過槽の浄化効率が高ければ、日間換水率は数%以下となる（換水量を記録しておくこと）。

⑤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〔ヌメ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。

(5) 作業時間

現地での作業時間は 1 ユニット（2 水槽）当たり 1.0～1.5 時間/日程度である。なお、給餌や環境指標のチェック等については人手を介する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作業程度である。

1-4 養殖モニタリング結果

- (1) 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（餌料効率の向上と水温調整コストの低減等）

図7に給餌条件（給餌回数、頻度）の違いが異なる温度下におけるギンザケ稚魚の成長に及ぼす影響を以下に示す。12℃飼育（左）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、成長速度はわずかにあるが有意に高くなった。一方、16℃飼育（右）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。

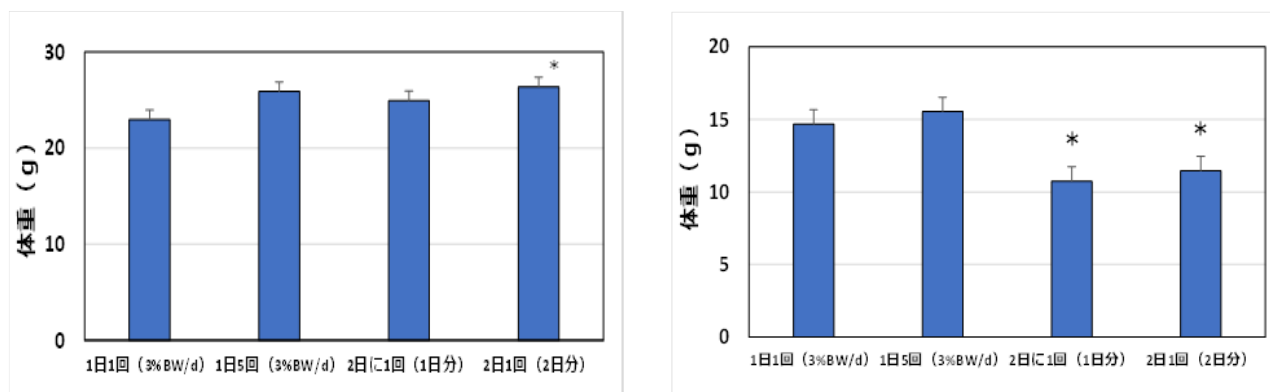


図7 給餌条件（給餌回数、頻度）の違いが異なる温度下におけるギンザケ稚魚の成長に及ぼす影響

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。

(2) 飼育密度や溶存酸素濃度の違いが餌料効率や魚の生理指標に及ぼす影響

図 8 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°C が最大で 80% 弱、同 18°C で約 75%、10°C と 13°C 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°C の時に餌料効率は最も高くなるが、同周辺温度（14°C や 18°C）でも多少の同効率低下はあるものの、生育に問題はないことを示す（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。

加えて、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を考慮した場合）19°C 程度の高水温での養殖も可能と考える（詳細は次項に記載する）。

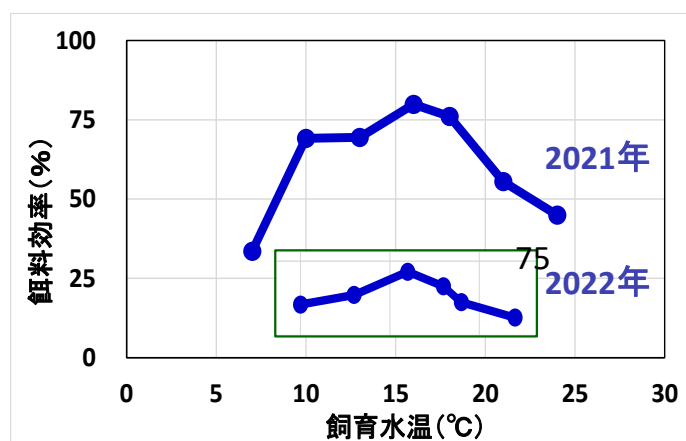


図 8 飼育水温の違いがギンザケの餌料効率に及ぼす影響

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

図 9, 10 に、飼育密度の違いがギンザケの餌料効率に及ぼす影響を示す。初年度の試験（図 9）では、飼育水温 16°C、週 5 日、1 日当たり体重の 2% の飼料を体重 40~70 g のギンザケ種苗に給餌した場合、飼育密度が 5~13 k g 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 5~13 k g 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（図 10）、上述の適正飼育密度はより高値（約 35 k g 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。

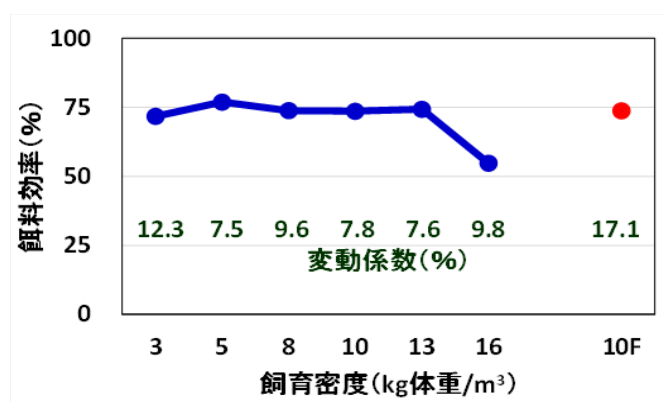


図 9 飼育密度の違いがギンザケの餌料効率に及ぼす影響（水温 16°C） — 初年度の結果 —
〔飼育密度 10F（赤丸）；自由遊泳（止水）下の結果〕

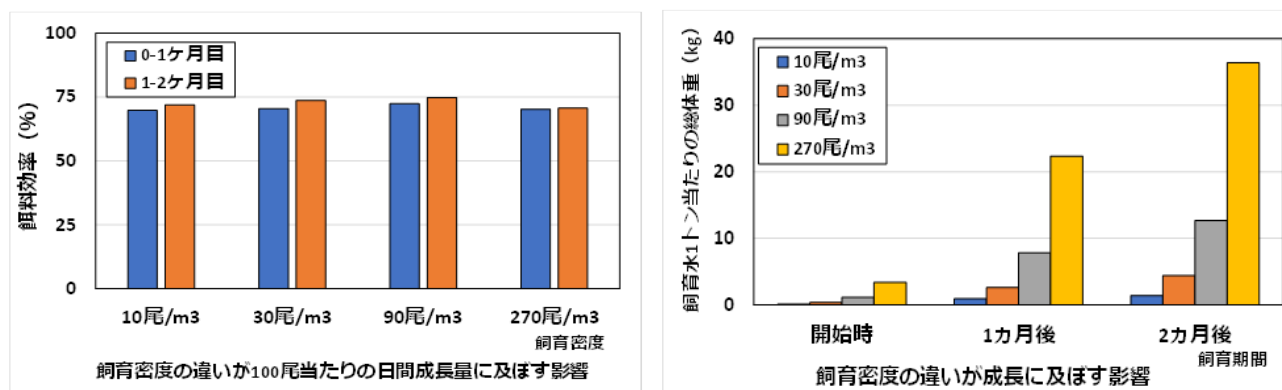


図 10 飼育密度の違いがギンザケの餌料効率と成長に及ぼす影響（水温 16°C）
— 2 年度の結果 —

図 11 に、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 6.5 ppm 以上であれば、飼育密度が 270 尾/m³程度（収容密度が 20 kg/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 9.0～11.0 ppm 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 6.5～8.0 ppm 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。

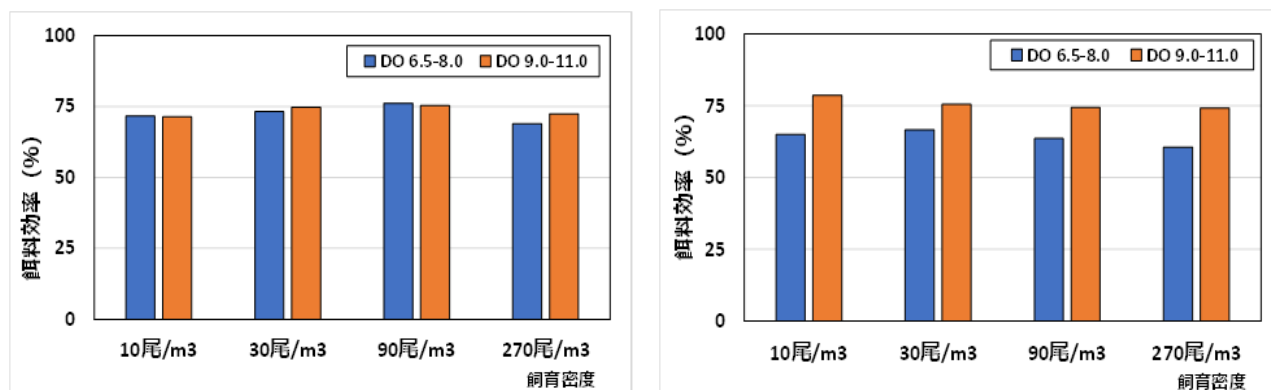


図 11 異なる温度下において、収容密度と溶存酸素濃度（ppm）がギンザケの餌料効率に及ぼす影響
（左；水温 16℃、右；水温 19℃） 実験開始時の魚体重は 50 g 前後
溶存酸素濃度は、曝気部分より 50cm 離れた、水深 40cm 部位の値

図 12 に、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℃と 16℃の間および 16℃と 19℃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℃と 19℃の間では、全飼育密度で値は有意に上昇）。給餌時期では、12℃と 16℃の間および 12℃と 19℃の間で、全飼育密度下の酸素消費量は有意に増加した。16℃と 19℃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。

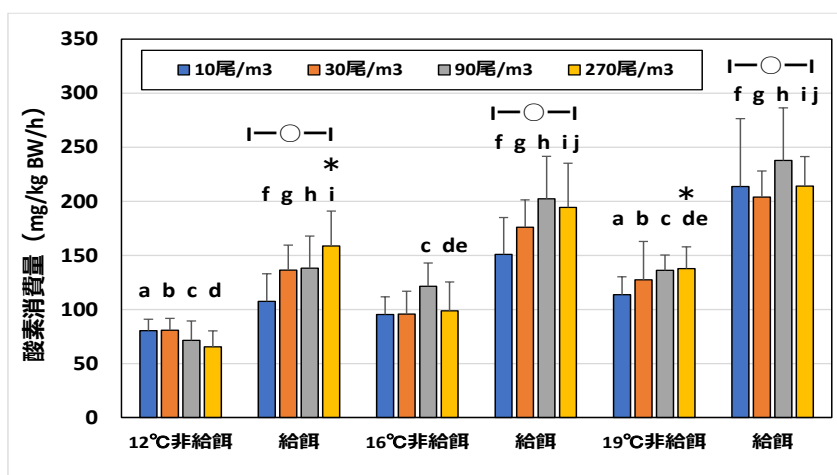


図 12 異なる水温下における飼育密度の違いと給餌の有無がギンザケの酸素消費量に及ぼす影響

* ; 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があること、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があることもわかった。

天然のギンザケ淡水飼育場（養魚場）では、5 月初旬（飼育開始時期）や秋季（沖出し時期；海面への移送時期に当たる 11 月頃）の水温は 10℃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℃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℃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、肥満度も低下傾向を示した。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℃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、図13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。

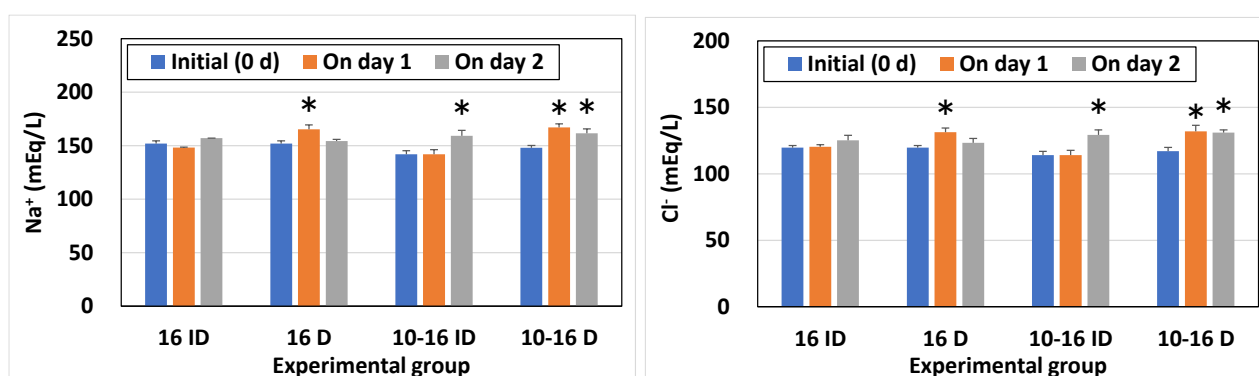


図13 淡水飼育場より海面養殖施設への移送に伴うギンザケの血液中ナトリウムと塩素濃度の変化
ID群；予備馴致処理群、D群；直接移送群
数字は水温（℃）、平均値±標準偏差（個体数5）

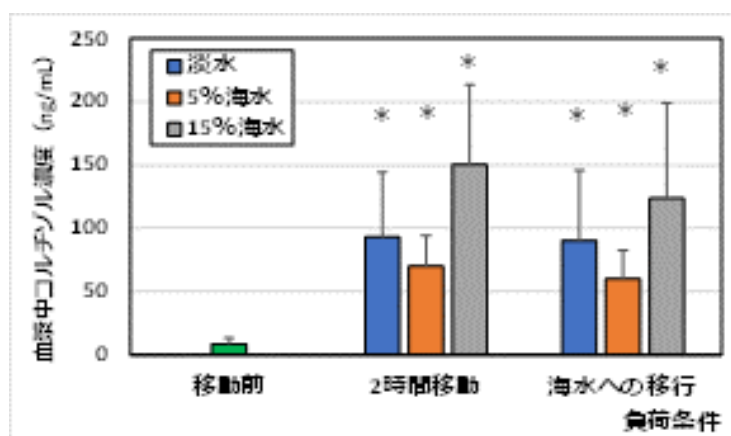


図14 淡水飼育から海面養殖施設への移動に伴う血漿中コルチゾル濃度の変化
平均値±標準偏差（個体数5）、*；移動前に対する差

図14に、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結果を示す。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66 mMと7.5 mM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。この結果は、輸送時に海水を使用する場合の濃度は5%以下が望ましいことが示唆された。なお、ストレス軽減効果を有する物質の事前投与も有効であると考えられた。

(3) 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6.5 ppm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80g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かった。

(4) 餌含有タンパク質の低減（炭水化物利用率の向上）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（図15）。

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。

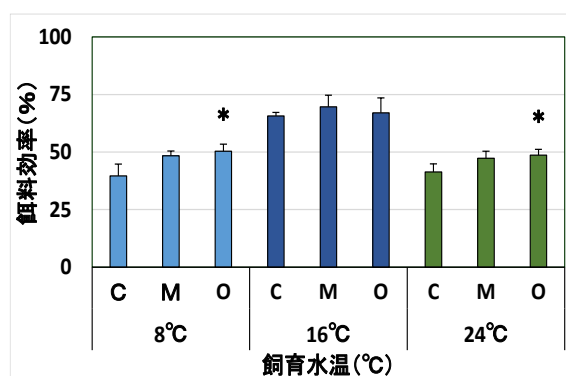


図 15 異なる飼育水温下での飼育時に、野生植物ミネラル、オリーブ採油粕発酵物等含有物を含む飼料の投与が、ギンザケ稚魚の餌料効率に及ぼす影響

C ; 対照群, M ; 野生植物ミネラル 0.5%添加

O ; オリーブ採油粕発酵物等含有物 0.5%添加

*; C (対照群) に対して有意差有り

(5) 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 80 g 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（図 16）。しかしながら、少なくとも短期間のスケールでは、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。

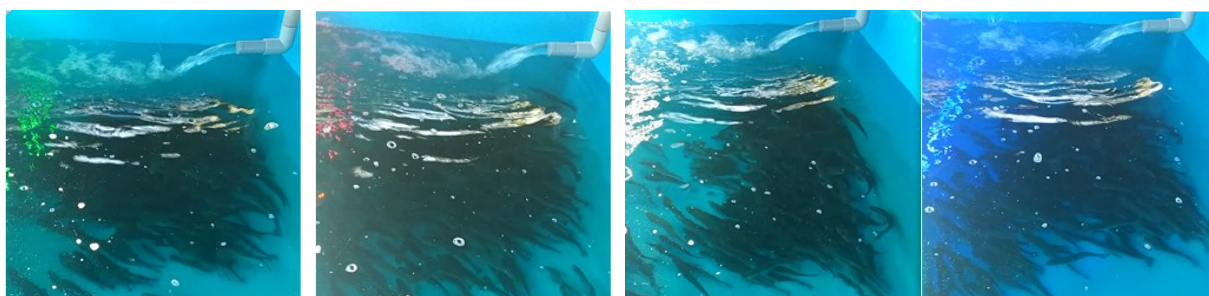


図 16 ギンザケの遊泳・群行動に及ぼす光波長の影響

左より、緑色光照射、赤色光照射、白色光照射、青色光照射

長期的な影響については（飼育期間が 1 ヶ月を越えと）、緑色光照射時には血漿中のコルチゾル濃度（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。

(6) 種苗としての健康度・品質

上述した如く、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と比較すると、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（表 1）。また、両種苗ともに一般生理指標・健康度（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。

表 1 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

平均値±標準偏差、 個体数 10.

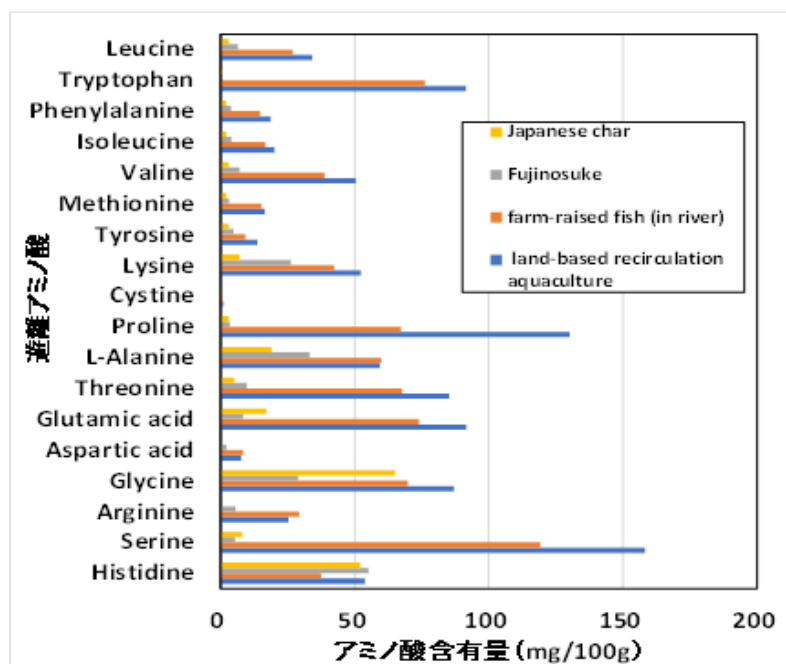


図 17 ギンザケ筋肉中の遊離アミノ酸含有量

land-based recirculation aquaculture ; 陸上養殖魚

farm-raised fish (in river) ; 河川産種苗

land-based recirculation aquaculture および farm-raised fish (in river)の数値は平均値 (n=5)

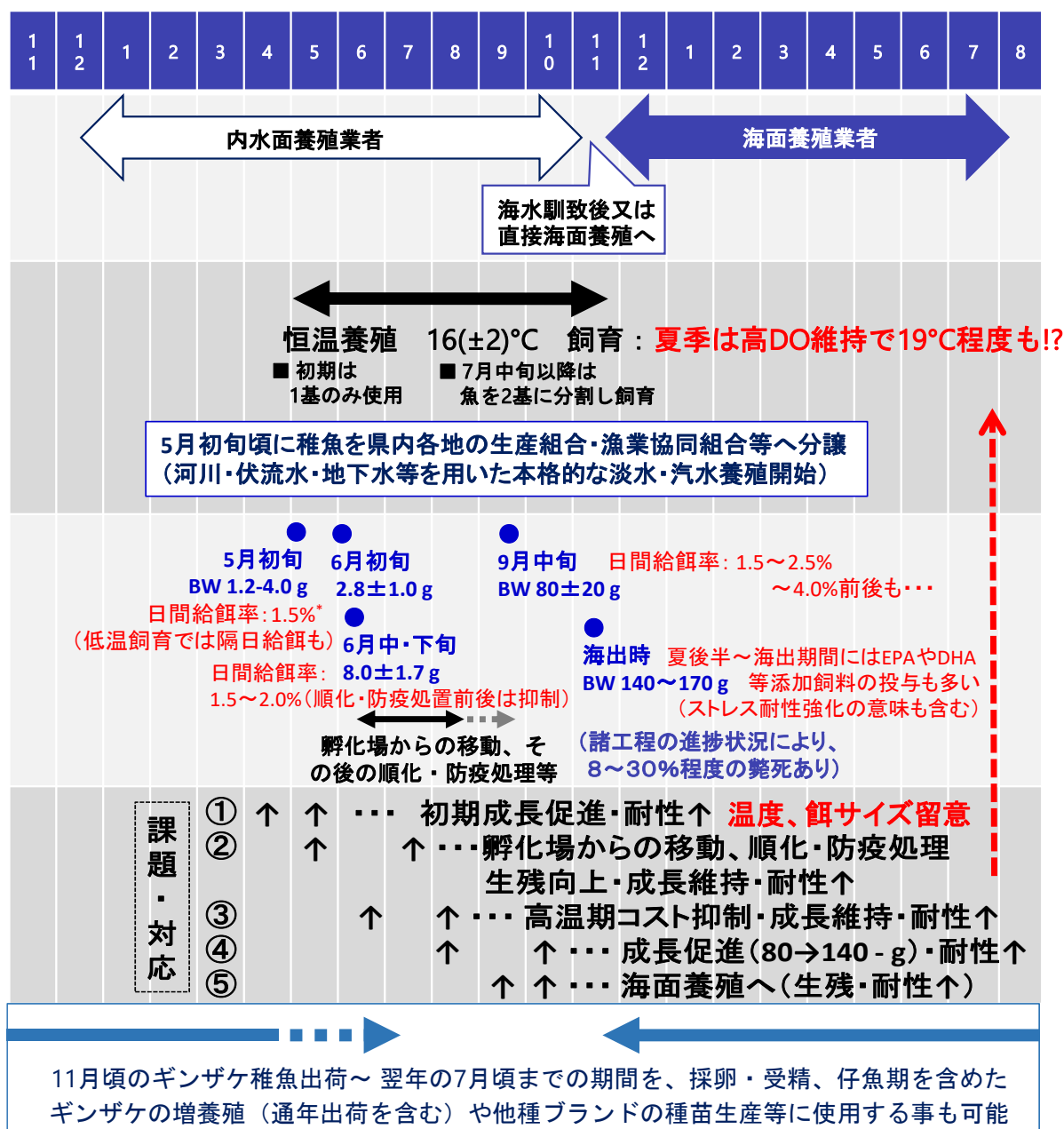
〔参考資料〕 Fujinosuke; 富士の介 (山梨県特産魚)、 Japanese char; イワナ

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（図 17）。

1-5 年間スケジュール

以下に年間スケジュールの一例として、本年度実施した養殖・調査のスケジュールを示す。通常養殖試験は10月中旬～12月初旬、付属する海水移送試験は10月中旬～12月初旬にかけてとなる。

通常養殖では、5月～11(12)月が基本となり、冬季間の成長を期待するのであれば、引き続き3月初旬までは淡水あるいは汽水での陸上養殖飼育を継続することとなる。



※ 赤字で記載された数字は1日当たりに体重の何%給餌させるかを示す

1-6 ギンザケの陸上養殖における今後の課題

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30 g/L）あるいは空気と酸素の併用曝気（高密度収容時；約30～70 g/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6.5 ppm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8～30 cm/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も十分に機能する。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〕

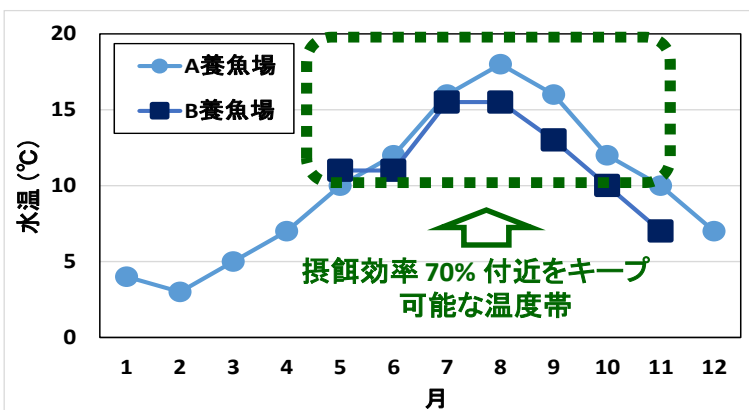
魚類養殖用飼料内のタンパク質含有量の削減は急務であるが、植物性タンパク質を用いた代替餌料やアミノ酸含有無タンパク質餌料の開発、脂質の利用促進等に関する研究に加え、飼料の改質や結合性向上、量増しなどの目的で混入されている炭水化物の利用度向上が必須であると考ええる。実際、生薬である紅参、知母や厚朴、ポリフェノールの一種である大豆イソフラボンやレスベラトロール、野生植物由来ミネラル、海藻由来ミネラル、そして、イノシトール（米糠由来のビタミン B 様物質）の投与も魚類筋肉のインスリン抵抗性を著しく改善する（糖利用率を向上させる）作用を有することを確認している。

【参考資料】

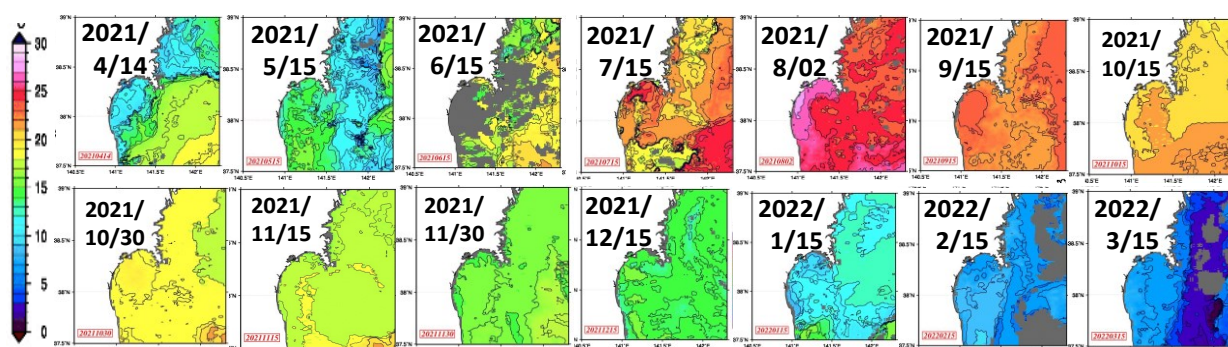
フィード・ワン株式会社製の鱒用飼料使用例

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)		
鱒飼付用顆粒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
鱒飼付用顆粒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ケランブル	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ケランブル	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ケランブル	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ケランブル	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】

1-7 低コスト陸上養殖実施に向けた再生可能エネルギーの活用について

(1) 目的

石巻専修大学の再生可能エネルギーに関する研究成果で得られた浅部地中熱や太陽光パネル、風力計等による計測データや蓄電池効率をもとに、ランニングコストの低い陸上養殖実施に向けた再生可能エネルギーの活用方法について検討する。

(2) 検討手法

①再生可能エネルギーによる発電電力量と使用電力量の関係

大学で養殖に要する電気利用量を測定し、再生可能エネルギーを導入した際の電力発電量の関係を整理する。

②風力・太陽光ハイブリッド発電システムによる発電能力向上検討

現設備の太陽光発電の能力増強の方法として、風力発電とのハイブリッドシステム化を検討する。

③再生可能エネルギーの導入による事業採算性の確認

各大学で養殖に要する電気利用量を測定し、再生可能エネルギーをどの程度の規模で導入すれば採算性の確保が可能であるか確認する。

(3) 調査結果

①調査概要

測定期間	【令和4年度】 10月から11月まで 【令和5年度】 6月前半から8月前半まで（8月後半以降も測定しているが、太陽光関連のパワコンの故障により、石巻専修大学の中庭に設置される太陽光パネルの観測データへ変更。その影響により、太陽光発電量の測定が積算値となったため今回は除外した）
測定間隔	10分ごと
日数	各月前半、後半で3日づつ

②調査結果

【R4年度 11月計測 電力使用量の推移】

10月前半計測 電力の推移

計測日時：10/13 9:00～10/16 8:30

表2 天候概要（10/13～10/16）

日時	天気	気温	日時	天気	気温
10/13 6:00	雨		10/15 0:00	晴れ	14.6℃
10/13 12:00	曇	17.1℃	10/15 6:00	晴れ	13.8℃
10/13 18:00	曇	15.6℃	10/15 12:00	晴れ	25.1℃
10/14 0:00	晴れ	14.1℃	10/15 18:00	曇	19.6℃
10/14 6:00	晴れ	13.2℃	10/16 0:00	曇	16.9℃
10/14 12:00	晴れ	23.5℃	10/16 6:00	雨	15.2℃
10/14 18:00	晴れ	17.2℃			

図18に、太陽光発電の出力と消費電力の合計（冷却器及び循環ポンプ）の30分毎の値を示す。天候が晴れであった10/14と10/15の11時30分頃に、太陽光発電の電力のピークが見られた。10/13の午前中と10/15の正午前後に、消費電力の大きなピークが見られた。10/14の日中は、太陽光発電の電力で消費電力を賄うことが確認できた。消費電力の合計は、定常的に1～1.5kW程度あるため、太陽光発電で電力を供給するためには、蓄電池などの設備が必要である。

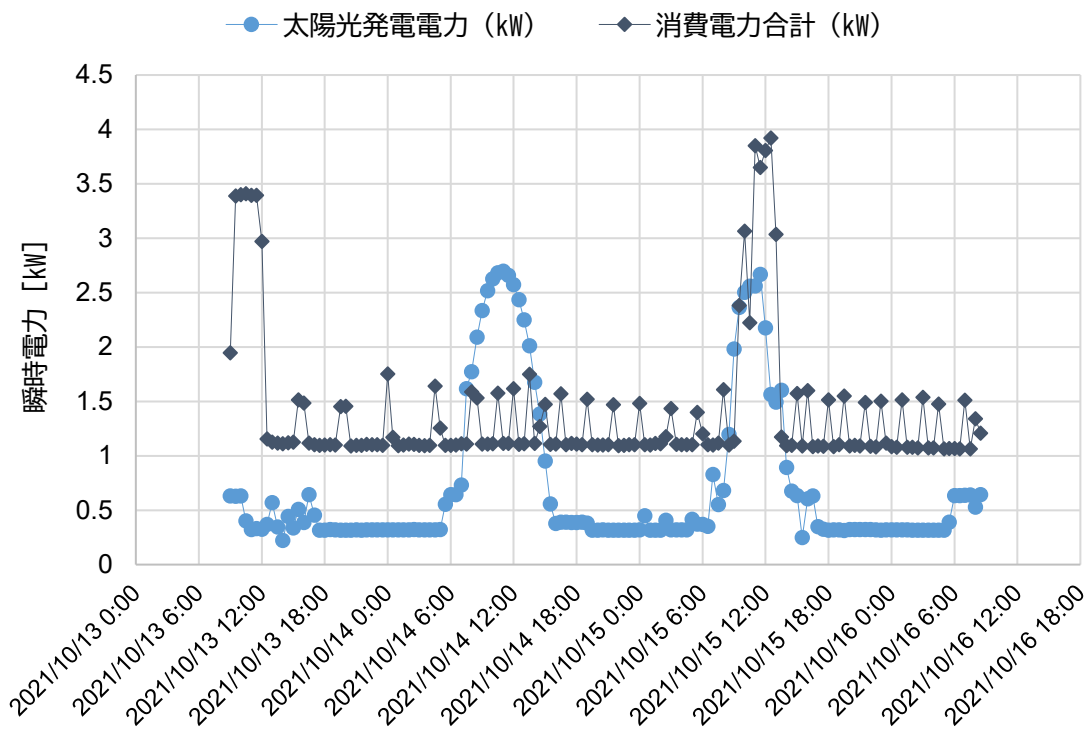


図 18 太陽光発電の出力と消費電力の合計の 30 分毎の推移 (10 月前半)

図 19 に、太陽光発電の出力と水槽 A=B 循環ポンプ消費電力の 30 分毎の値を示す。
 循環ポンプの電力はほぼ一定の値を保っていた。このことから、消費電力及び出力の変動が大きいのは冷却器であることが示された。

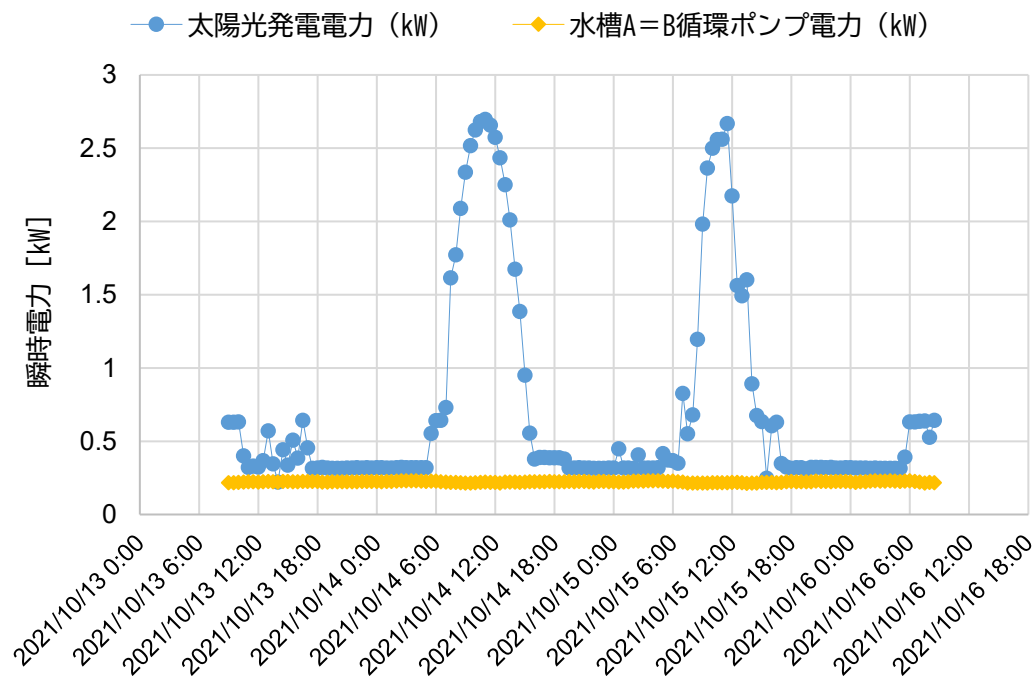


図 19 太陽光発電の出力と水槽 A=B 循環ポンプの消費電力

【R4 年度 10 月後半計測 電力の推移】

計測日時：10/29 0：00～10/31 23：30

表 3 天候概要（10/29～10/31）

日時	天気	気温	日時	天気	気温
10/29 0：00	晴れ	8.9℃	10/30 18：00	晴れ	10.9℃
10/29 6：00	晴れ	5.4℃	10/31 0：00	晴れ	8.4℃
10/29 12：00	晴れ	18.4℃	10/31 6：00	曇	6.9℃
10/29 18：00	晴れ	11.6℃	10/31 12：00	曇	17.6℃
10/30 0：00	晴れ	7.4℃	10/31 18：00	晴れ	12.2℃
10/30 6：00	晴れ	4.7℃	11/1 0：00	晴れ	8.7℃
10/30 12：00	晴れ	18.7℃			

図 20 に、太陽光発電の出力と消費電力の合計（冷却器及び循環ポンプ）の 30 分毎の値を示す。

天候が晴れであった 10/29 と 10/30 の正午前に、太陽光発電の電力のピークが見られた。曇であった 10/31 のピークは、比較的小さく、発電時間も短かった。

消費電力は、10/29 の 14：30 に最大値を計測したが、計測期間を通じて、概ね 1 kW から 1.5kW 強の間で推移した。

計測期間において、晴れの日の日中は、太陽光発電の電力で消費電力を賄えることが確認できた。太陽光発電で電力を供給するためには、蓄電池などの設備が必要である。

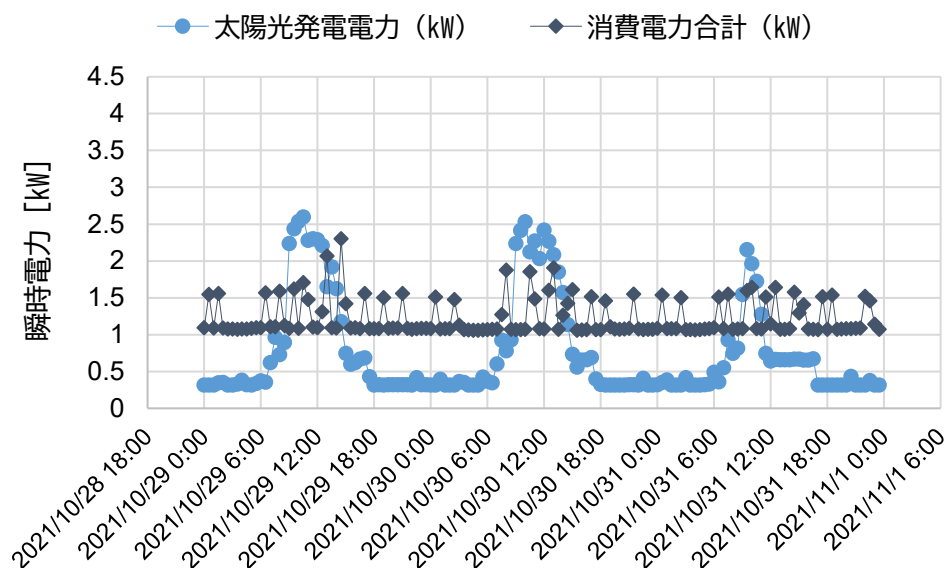


図 20 太陽光発電の出力と消費電力の合計の 30 分毎の推移（10 月後半）

【R4 年度 11 月前半計測 電力の推移】

計測日時：11/8 0：00～11/10 23：30

表 4 天候概要（11/8～11/10）

日時	天気	気温	日時	天気	気温
11/8 0：00	晴れ	7.3℃	11/9 18：00	雨	17.7℃
11/8 6：00	晴れ	6.6℃	11/10 0：00	雨	14.1℃
11/8 12：00	曇	16.1℃	11/10 6：00	晴れ	11.4℃
11/8 18：00	晴れ	15.8℃	11/10 12：00	晴れ	18.9℃
11/9 0：00	雨	16.4℃	11/10 18：00	晴れ	12.1℃
11/9 6：00	曇	16.4℃	11/10 0：00	晴れ	7.6℃
11/9 12：00	曇	21.9℃			

図 21 に、太陽光発電の出力と消費電力の合計（冷却器及び循環ポンプ）の 30 分毎の値を示す。天候が概ね晴れであった 11/10 の正午前に、太陽光発電の電力のピークが見られた。消費電力は、計測期間を通じて、正午前にピークが見られた。その他の時間帯は、概ね 1 kW から 1.5kW 強の間で推移した。

計測期間において、晴れの日の中は、消費電力を概ね太陽光発電で賄えることが確認できた。太陽光発電で電力を供給するためには、蓄電池などの設備が必要である。

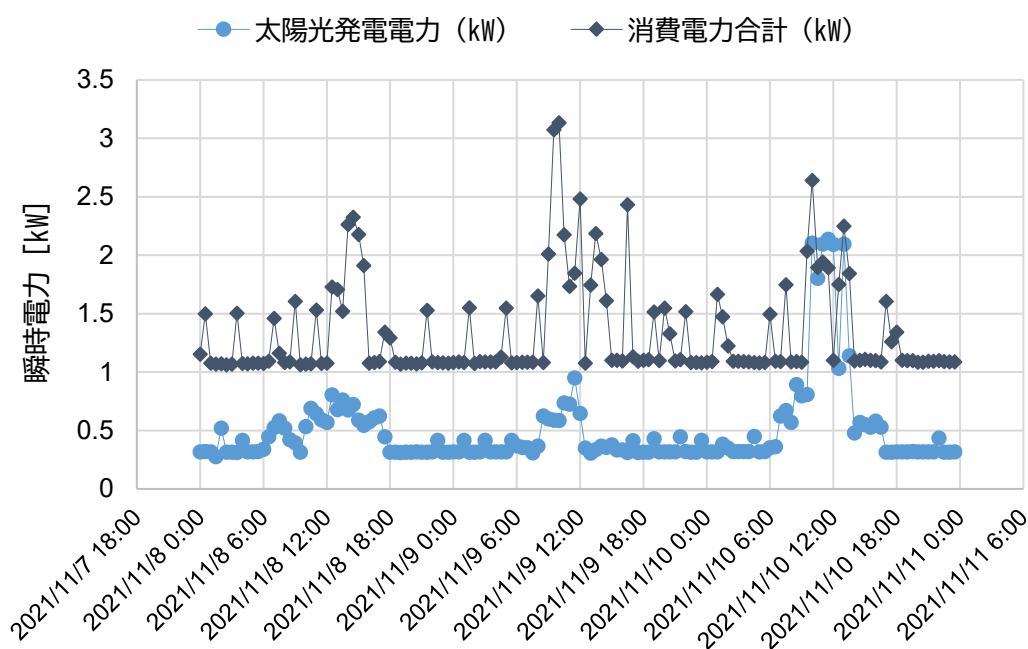


図 21 太陽光発電の出力と消費電力の合計の 30 分毎の推移（11 月前半）

【R4 年度 11 月後半計測 電力の推移】

計測日時：11/21 0：00～11/23 23：30

表 5 天候概要（11/21～11/23）

日時	天気	気温	日時	天気	気温
11/21 0：00	晴れ	4.1℃	11/22 18：00	雨	14.9℃
11/21 6：00	晴れ	3.1℃	11/23 0：00	雨	11.4℃
11/21 12：00	晴れ	14.1℃	11/23 6：00	晴れ	8.1℃
11/21 18：00	曇	8.8℃	11/23 12：00	曇	15.6℃
11/22 0：00	雨	8.2℃	11/23 18：00	晴れ	8.6℃
11/22 6：00	雨	8.1℃	11/24 0：00	晴れ	7.4℃
11/22 12：00	雨	9.8℃			

図 22 に、太陽光発電の出力と消費電力の合計（冷却器及び循環ポンプ）の 30 分毎の値を示す。
 天候が概ね晴れであった 11/21 と 11/23 の正午前または正午頃に、太陽光発電の電力のピークが見られた。しかしながら、10 月に比べると発電出力は低下傾向となった。
 消費電力は、計測期間を通じて、概ね 1 kW から 1.5kW 強の間で推移した。
 計測期間において、晴れの日の中は、太陽光発電の電力と消費電力がほぼ拮抗した。
 太陽光発電で電力を供給するためには、蓄電池などの設備が必要である。

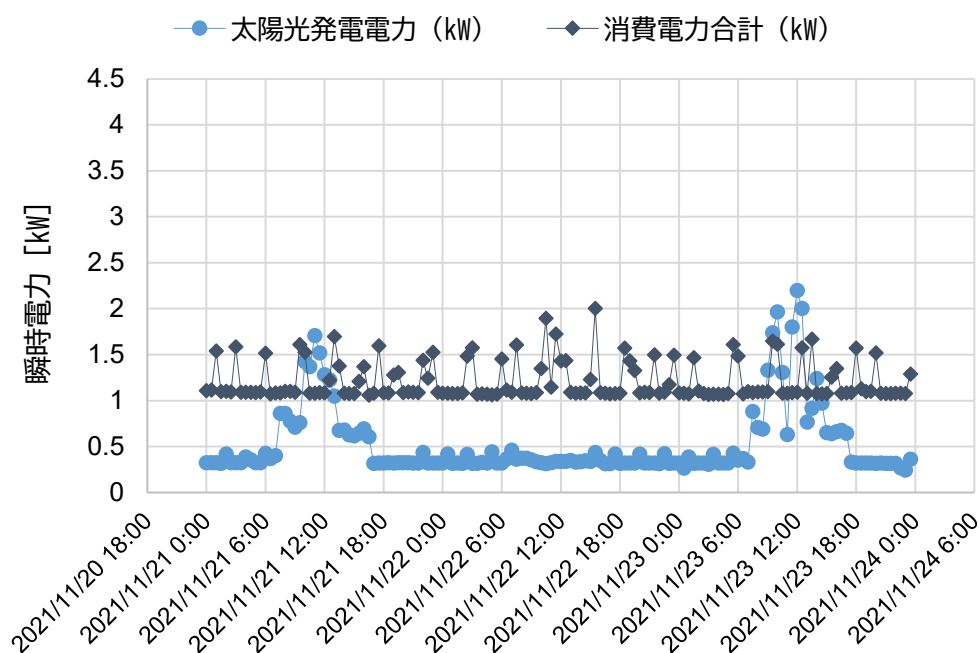


図 22 太陽光発電の出力と消費電力の合計の 30 分毎の推移（11 月後半）

R4 年度も消費電力量・太陽光発電電力量の測定を行ったが、太陽光発電電量がやや上昇しているのに対し、消費電力量はR3 年度ほぼ同等の値で推移した。太陽光発電電量が上昇した要因としては、昨年が冬季の測定であったのに対し、今年度は6～7 月の日差しが強く、日照時間が長い時期であったことだと推測される。

【R5 年度 6 月前半計測 電力の推移】

表 6 天候概要 (6/3～6/5)

日時	天気	気温	日時	天気	気温
6/3 0：00	晴れ	13.6	6/4 12：00	雨	20.7
6/3 6：00	曇り	15.9	6/4 18：00	雨	17.1
6/3 12：00	晴れ	17.7	6/5 0：00	曇り	13.9
6/3 18：00	曇り	14.1	6/5 6：00	曇り	14.2
6/4 0：00	曇り	11.6	6/5 12：00	晴れ	21.1
6/4 6：00	雨	13.7	6/5 18：00	曇り	15.2

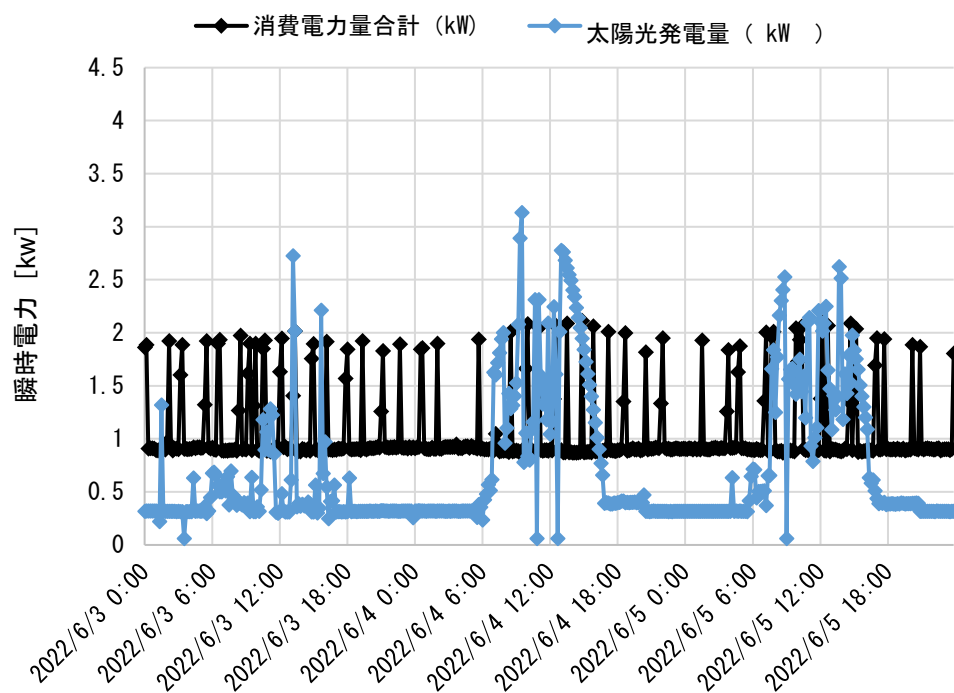


図 23 太陽光発電の出力と消費電力の合計の 30 分毎の推移 (6 月前半)

【R5 年度 6 月後半計測 電力の推移】

表 7 天候概要 (6/20~6/22)

日時	天気	気温	日時	天気	気温
6/20 0:00	曇り	21.1	6/21 12:00	晴れ	25.9
6/20 6:00	曇り	23.9	6/21 18:00	晴れ	21
6/20 12:00	曇り	29.4	6/22 0:00	曇り	19.2
6/20 18:00	曇り	26.9	6/22 6:00	曇り	21.2
6/21 0:00	晴れ	20.8	6/22 12:00	曇り	28.7
6/21 6:00	晴れ	21.7	6/22 18:00	曇り	21.3

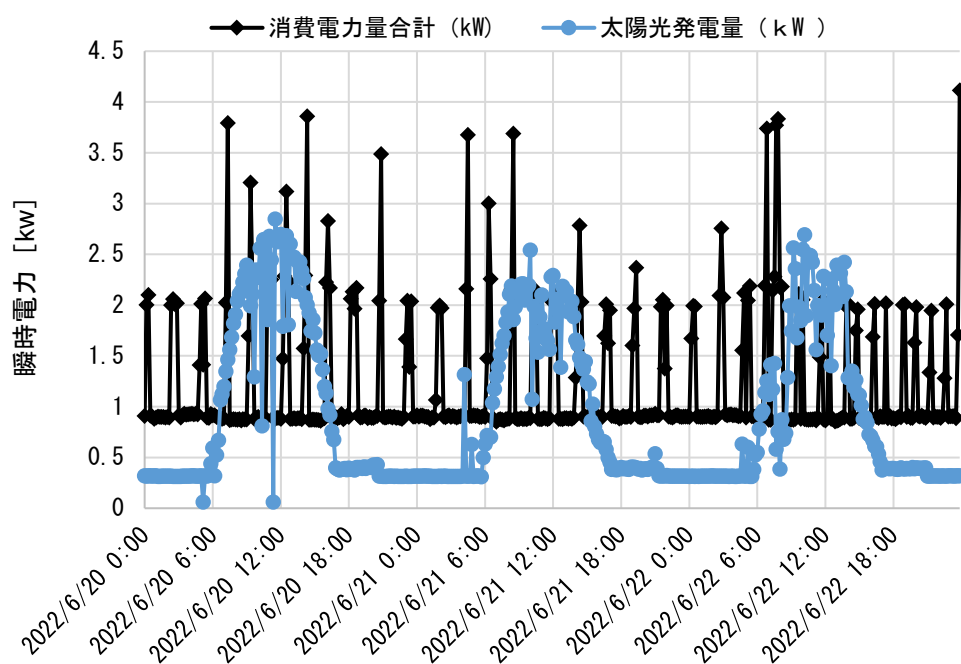


図 24 太陽光発電の出力と消費電力の合計の 30 分毎の推移 (6 月後半)

【R5 年度 7 月前半計測 電力の推移】

表 8 天候概要 (7/6~7/7)

日時	天気	気温	日時	天気	気温
7/6 0:00	晴れ	22.9	7/7 12:00	曇り	26.4
7/6 6:00	曇り	23.5	7/7 18:00	曇り	23
7/6 12:00	曇り	27.3	7/8 0:00	曇り	21.6
7/6 18:00	曇り	24.3	7/8 6:00	雨	24
7/7 0:00	晴れ	21.3	7/8 12:00	曇り	29
7/7 6:00	晴れ	22.9	7/8 18:00	晴れ	22.8

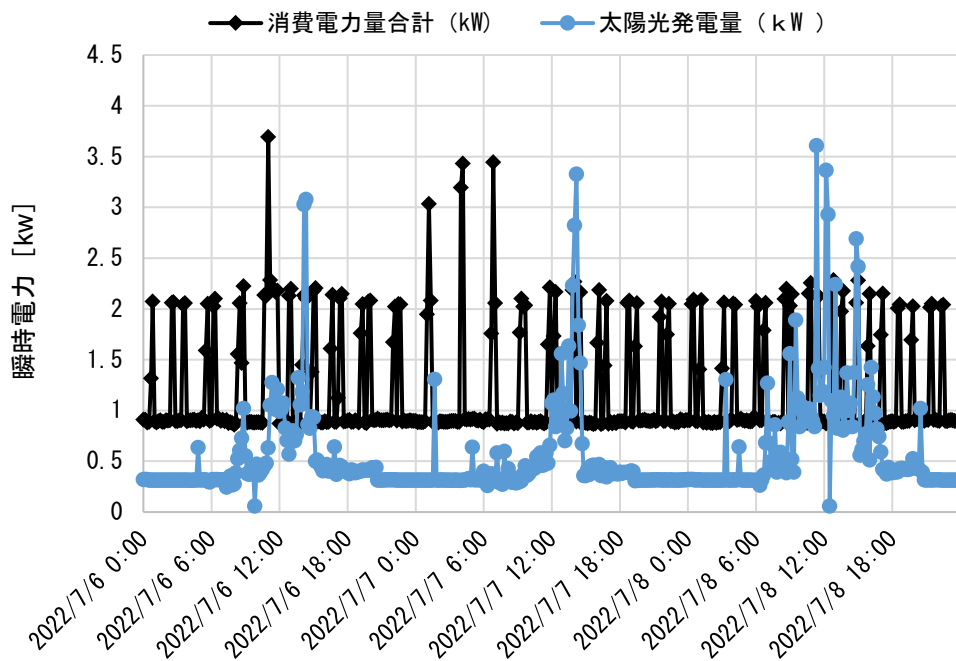


図 25 太陽光発電の出力と消費電力の合計の 30 分毎の推移 (7 月前半)

【R5 年度 7 月後半計測 電力の推移】

表 9 天候概要 (7/16~7/18)

日時	天気	気温	日時	天気	気温
7/16 0:00	雨	21.9	7/17 12:00	曇り	27.3
7/16 6:00	雨	21.7	7/17 18:00	雨	23.4
7/16 12:00	曇り	24.4	7/18 0:00	晴れ	23.6
7/16 18:00	曇り	22.1	7/18 6:00	曇り	23.3
7/17 0:00	雨	22.3	7/18 12:00	晴れ	32.5
7/17 6:00	曇り	22.2	7/18 18:00	曇り	25.7

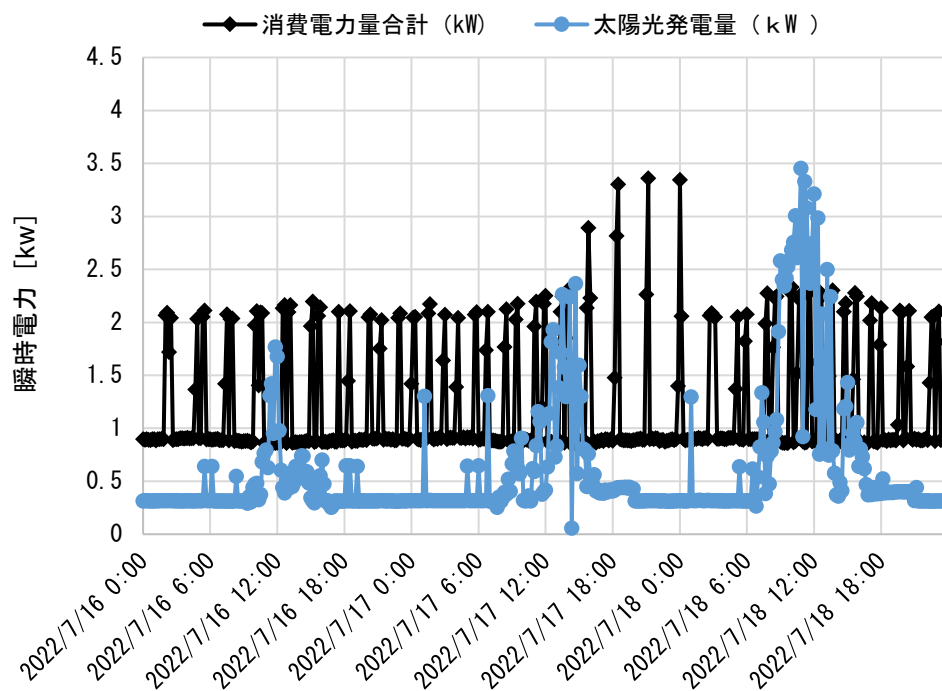


図 26 太陽光発電の出力と消費電力の合計の 30 分毎の推移 (7 月後半)

【R5 年度 8 月前半計測 電力の推移】

表 10 天候概要 (8/4～8/6)

日時	天気	気温	日時	天気	気温
8/4 0:00	雨	21.1	8/5 12:00	曇り	27.8
8/4 6:00	曇り	20.4	8/5 18:00	曇り	23.2
8/4 12:00	曇り	24.7	8/6 0:00	晴れ	18.6
8/4 18:00	曇り	22.2	8/6 6:00	曇り	20.2
8/5 0:00	曇り	21.3	8/6 12:00	晴れ	28.1
8/5 6:00	曇り	21	8/6 18:00	晴れ	23.3

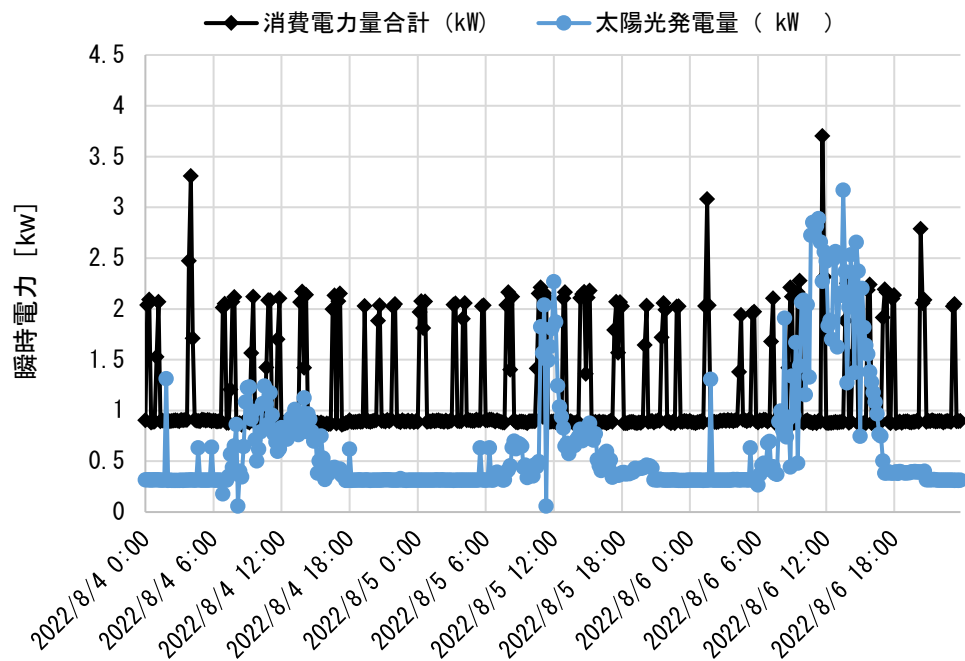


図 27 太陽光発電の出力と消費電力の合計の 30 分毎の推移 (8 月前半)

【計測期間における発電量と電力使用量】

計測期間における①太陽光発電量と②電力使用量の実績を図表 28 に示す。

太陽光発電量の平均 37.1 kWh に対し、電力使用量の平均は 87.9 kWh であった。太陽光発電によって電力を完全に自給するためには、現在の設備容量の約 3 倍の規模及び相当量の蓄電池が必要となる。

表 11 太陽光発電量と電力使用量実績

計測期間	①発電量	②電力 使用量	比 (②／①)
R4 年度 10 月前半 (10/13 9:00～10/16 8:30)	28.7 kWh	100.9 kWh	3.5
R4 年度 10 月後半 (10/29 0:00～10/31 23:30)	30.9 kWh	87.8 kWh	2.8
R4 年度 11 月前半 (11/8 0:00～11/10 23:30)	11.9 kWh	95.9 kWh	8.1
R4 年度 11 月後半 (11/21 0:00～11/23 23:30)	13.8 kWh	86.4 kWh	6.2
R5 年度 6 月前半 (6/3 0:00～6/5 23:50)	51.9 kWh	76.2 kWh	1.5
R5 年度 6 月後半 (6/20 0:00～6/5 23:50)	67.1 kWh	87.8 kWh	1.3
R5 年度 7 月前半 (7/6 0:00～7/8 23:50)	40.0 kWh	86.1 kWh	2.2
R5 年度 7 月後半 (7/16 0:00～7/18 23:50)	43.4 kWh	86.2 kWh	2.0
R5 年度 8 月前半 (8/4 0:00～8/6 23:50)	46.1 kWh	84.0 kWh	1.8
平均	37.1 kWh	87.9 kWh	2.4

③太陽光発電と風力発電のハイブリッドシステムの検討

現設備の太陽光発電の能力増強の方法として、風力発電とのハイブリッドシステム化を検討した。

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。

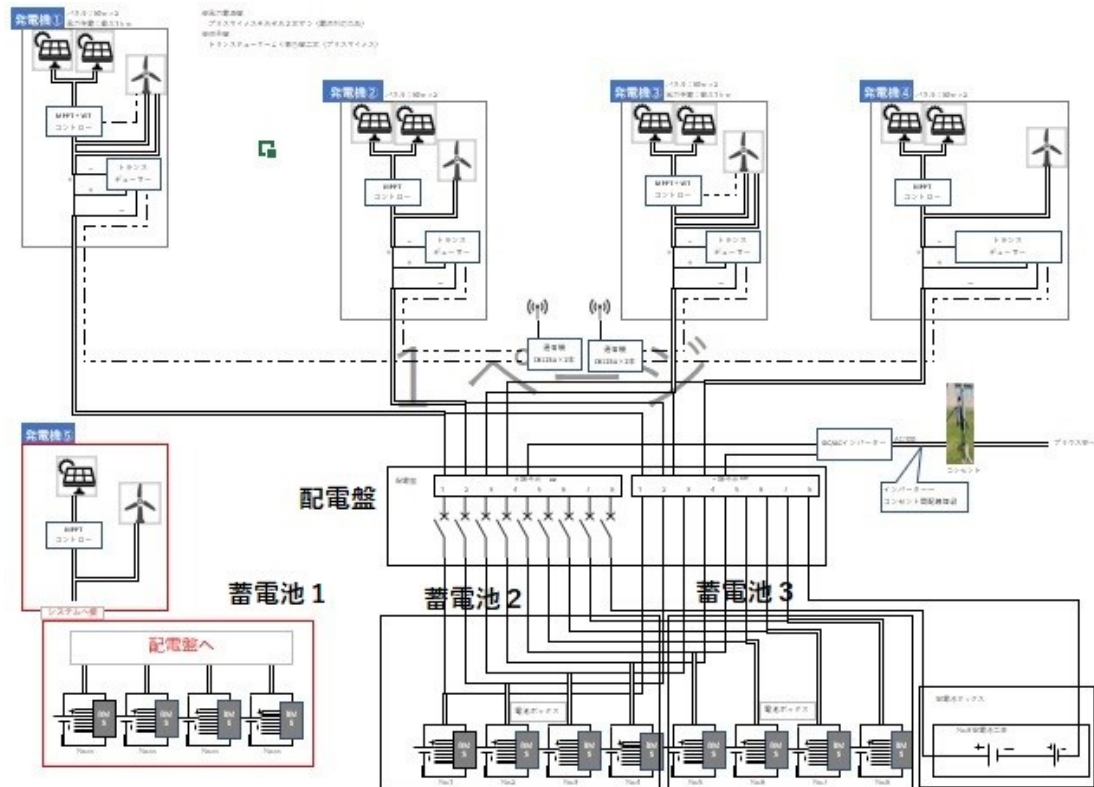


図 28 風力太陽光ハイブリッド発電システム

1時間の発電電力を棒グラフで表している。風の強い日であったこともあり、1日の積算発電量は9.6kWh（太陽光3.3kWh、風力6.3kWh）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。（2023年2月20日の結果）

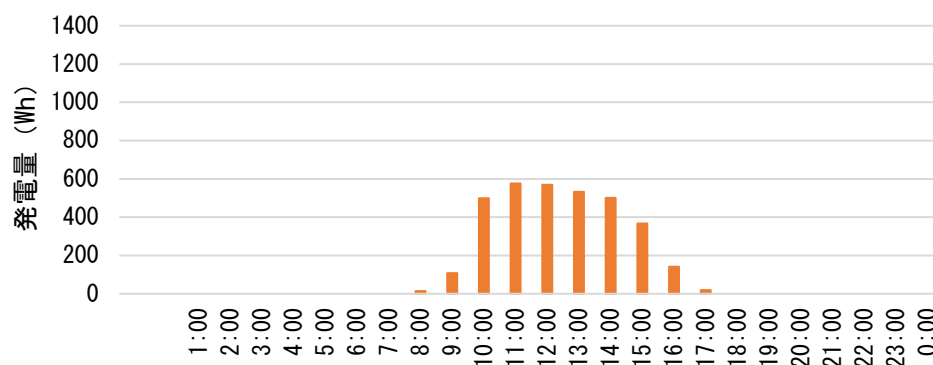


図 29 太陽光発電電力量

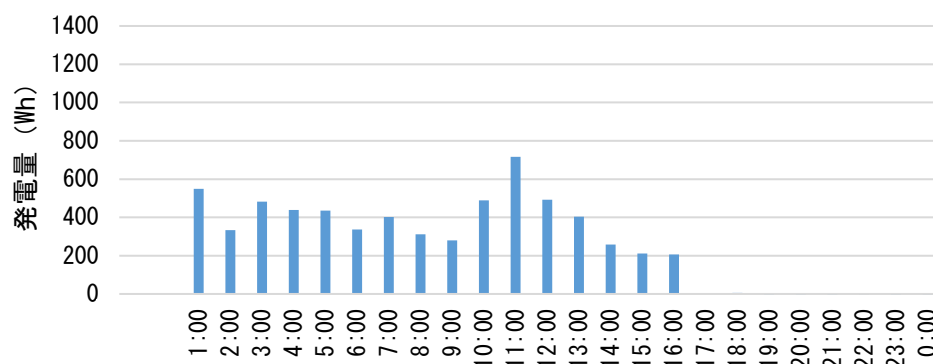


図 30 風力発電電力量

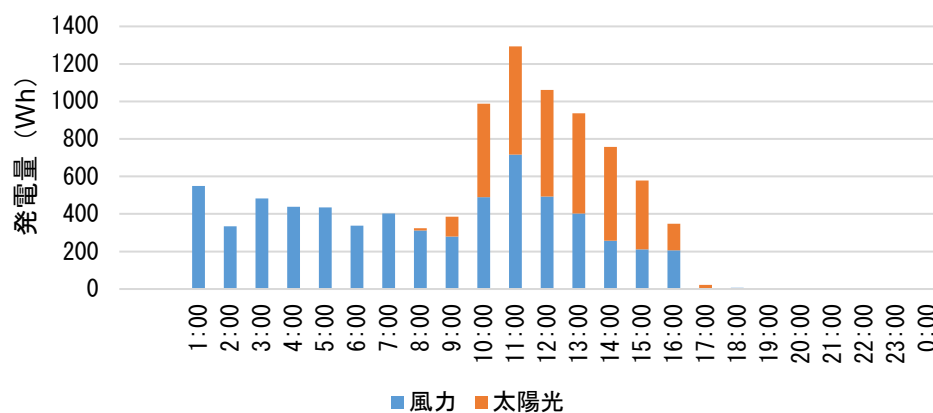


図 31 風力・太陽光ハイブリッド発電電力量

表 12 増強率

	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。また、蓄電池容量 9.6kWh は一日の発電量に見合う容量であり、夜間の消費電力を蓄える十分な容量である。

以上のことから、風力と太陽光のハイブリッドシステムにすると発電能力は増強できることが分かった。今回の結果では約 3 倍。適切なシステムについては今後見極めていく。

④電気料金の削減効果

計測期間における電気使用量の実績と測定した太陽光発電量を図に示す。なお、発電電力量実績は、電力使用量の合計と時間軸は同じであるが、別日のデータを重ねたものである。

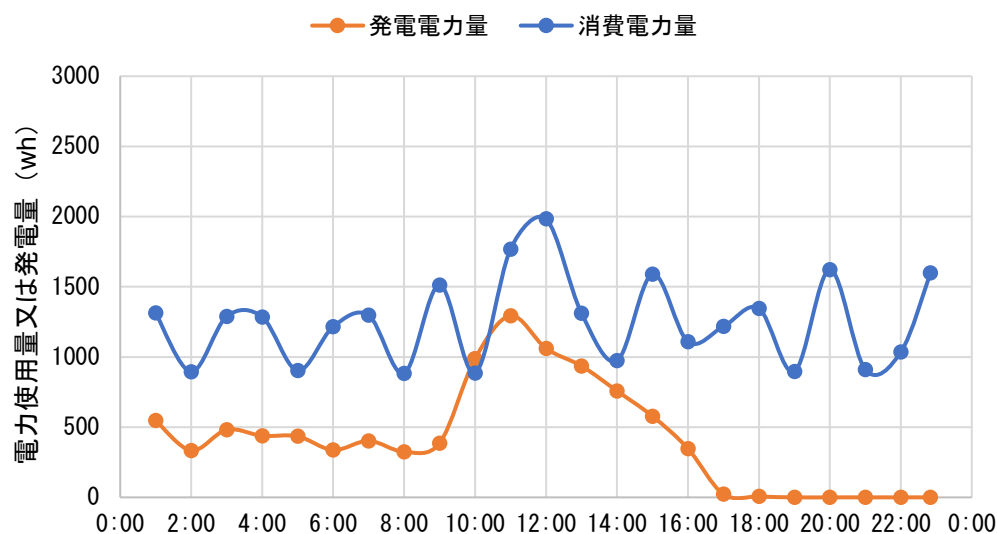


図 32 発電電力量と消費電力量の関係

計測した電力使用量（R5 7月分）から、1ヵ月あたりに必要な電力使用量は1日平均28kWh×約30日＝約840kWhと推測される。

また、今回設置した風力太陽光ハイブリッド発電システム（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）を活用した場合、1日の平均発電量9.6kw×30日＝288kWhの発電が期待される。

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、買電量は上記の差分である約552kWhとなる。

また、設置面積は約3倍程度に拡大した場合、養殖水槽1ユニット分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。

【太陽光発電の活用による電気料金の削減効果】

低圧 従量電灯Cを想定（契約容量6kVA～50kVA）

基本料金 330円/kVA ※今回は試算に含めない

- ・最初の120kWhまで 18.58円/kWh
- ・120kWhをこえ300kWhまで 25.33円/kWh
- ・300kWhをこえる 29.28円/kWh

[電気料金の削減金額]

上記条件より、1ヵ月あたり約8,432円の電気代が削減される。

(4) 収支計算

漁業者がウニ養殖を始めるにあたり、必要な経費と収入見込みを示す。一例として、育成期間 8 カ月、年一回の出荷を想定して試算を行った。しかし、今回の試算では人件費等の詳細な検討が含まれないため、事業実施時にはさらなる精査が必須である。

なお、以降は令和 3 年度のデータを基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。

①支出

【イニシャルコスト】

下記の表は半循環式養殖における設置機器や環境整備に要した費用であり、約 748 万円である。

表 13 イニシャルコスト

品 名	規 格	数 量	単 価	金 額
FRP水槽長円型 3.5t DF-3500SU-50t 断熱50mm厚 断熱蓋付		2	787,000	1,574,000
FRP開放型濾過槽 EF-1000S 断熱50mm厚 断熱蓋付		2	547,000	1,094,000
屋外型循環式調温装置 RXC-2200AR-T3-Z-EA		2	1,573,000	3,146,000
サーモコントローラー TC-101		2	24,000	48,000
循環用マグネットポンプ MX-401CV3C-L2		2	125,000	250,000
配管材・設置資材		1	330,000	330,000
運送費		1	242,000	242,000
工事費(交通費・出張諸経費含む)		1	800,000	800,000

このうち、飼育建屋（ビニールハウス）の断熱工事を自前で行った場合には、水槽部分の初期費用はほぼ半減し、1 ユニット当たり 100 万円程度の節減が可能になると期待される。その場合の初期設備費用は約 610 万円となる。

【ランニングコスト】

月々のランニングコストを試算すると、再エネ未導入時は約 9.3 万円、再エネ投入時は 8.7 万円となり、月 6500 円の削減が見込まれる。しかし石巻専修大学に設置されている太陽光パネルは 1kWh の太陽光発電（パネル面積 15 m²）であるため、今回は一般に用いられることの多い住宅用 30 m²（1/2 ユニット被覆分）仕様での発電量に換算する。

$$6500 \text{ 円} \times 2 = 13000 \text{ 円}$$

また、養殖設備の稼働状況として初期 3 ヶ月間は 2 基中 1 基のみ使用のため、月ごとに電気代が大きく変動する。実際の実験データより、養殖設備 2 基が稼働しているのは 6.5 ヶ月程度であることがわかっている。

そのため、13000 円×6.5 ヶ月＝8.45 万円が 1 ユニット養殖時の電気料金削減効果であるといえる。

表 14 ランニングコスト（8 ヶ月）

項目		金額（円）	
人権費	※1	①△316,800	
飼料代	※1	②△140,000	
稚魚代		③ △2,000	
水道代	※2	④ △39,391	
電気代		⑤△184,425	
	再エネ減額	⑥ ▼84,500	
再エネ未導入時		①+②+③+④+⑤	682,616
再エネ導入時		①+②+③+④+⑤-⑥	598,116

※1：実際の利用料金

※2 水道代：石巻専修大学で実施に利用した金額を用いる。

$$1,345 \text{ 円} \times 1 \text{ ヶ月} + 5,489 \text{ 円} \times 1.25 \text{ ヶ月} + 12,474 \text{ 円} \times 2.5 \text{ ヶ月} = 39,391 \text{ 円}$$

<電気料金単価>

低圧 従量電灯 C を想定（契約容量 6 kVA～50 kVA）

基本料金 330 円/kVA ※今回は試算に含めない

- ・最初の 120 kWh まで 18.58 円/kWh
- ・120 kWh を超え 300 kWh まで 25.33 円/kWh
- ・300 kWh を超える 29.28 円/kWh

②収入

ギンザケは1ユニットあたり2000尾の出荷を想定している。出荷目安重量を1尾160g前後とすると、売値は1600円/kgが一般的な市場価格となる。そのため、

$$0.16\text{kg} \times 2000 \text{ 尾} \times 1600 \text{ 円/kg} = \underline{512,000 \text{ (円/8 か月)}}$$

が1ユニットあたりの売り上げとなる。

表 15 販売数量

養殖期間	養殖数量 (匹)	歩留まり	販売個数 (匹)	出荷量 (kg)
8 か月	2222	0.9	2000	32

③収支計算

収支計算については、

【ケース 1】再エネ未導入の場合

【ケース 2】再エネを導入した場合

の 2 パターンで試算し、再エネが採算性確保へ与える影響の確認を行った。

それぞれにおいて初期設備費は最低限の養殖設備を用意した場合を想定し、610 万で試算を行った。

また、再エネを導入した場合では、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。なお、収支がマイナスからプラスへ転じた養殖規模を、採算性確保可能なユニット数とする。

表 16 試算条件

費用	
人件費	<ul style="list-style-type: none">・実験時に実際に要した金額を設定。・1 ユニット増加ごとの割増係数は 0.1 で設定。
設備費	<p>減価償却は 15 年とする。</p> <ul style="list-style-type: none">・イニシャルコスト 1 ユニット増加ごとに、設備費は×0.3 で増加していく。・再エネ設備導入費 設備導入費は約 50 万円とした。 設備導入費増加係数=ユニット数 再エネは、1 ユニットにつき 2 kW の太陽光発電（パネル面積 15m²）を用いるものとする

【ケース1：再エネ未導入】

再エネ未導入の場合について、21 ユニットまで試算を行った結果を示す。実験と同様の条件下において、再エネを導入しなかった場合の採算性確保可能な最低ユニット数は 21 ユニット以上となる。そのため、採算性を確保するためには相当量の養殖を行う必要があると考えられる。詳細な試算結果については以下に示す。

表 17 試算結果

採算性確保可能なユニット数
21 ユニット以上

(ii) 最低限の養殖設備を用意した場合（初期設備費 610 万）

売上	千円	512	1024	1536	2048	2560	3072	3584	4096	10752
ユニット数	個	1	2	3	4	5	6	7	8	21
販売数	kg	320	640	960	1280	1600	1920	2240	2560	6720
単価	千円	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
費用	千円	1089	1609	2128	2648	3167	3687	4206	4726	11479
人件費	千円	317	348	380	412	444	475	507	539	950
一人当たりの人件費	千円	317	317	317	317	317	317	317	317	317
割増係数	割	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	2.0
稚魚・餌代	千円	142	284	426	568	710	852	994	1136	2982
単価	千円	142	142	142	142	142	142	142	142	142
ユニット数	個	1	2	3	4	5	6	7	8	21
電気代	千円	184	369	553	738	922	1107	1291	1475	3873
基本料金	千円	184	184	184	184	184	184	184	184	184
ユニット数	個	1	2	3	4	5	6	7	8	21
水道代	千円	39	79	118	158	197	236	276	315	827
基本料金	千円	39	39	39	39	39	39	39	39	39
ユニット数	個	1	2	3	4	5	6	7	8	21
減価償却	千円	407	529	651	773	895	1017	1139	1261	2847
1ユニットの設備費	千円	407	407	407	407	407	407	407	407	407
係数	倍	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2	2.5	2.8	3.1	7.0
利益	千円	-577	-585	-592	-600	-607	-615	-622	-630	-727

図 33 採算性確保可能なユニット数

【ケース 2：再エネ導入】

再エネを導入した場合について、表 18 に示す条件で試算、感度分析を行った。

表 18 試算・感度分析条件

再エネ設備導入 補助率	売値（千円/kg）	再エネ導入による 削減効果（千円）
1/3	0.8、1、1.2、1.4、1.6、1.8、2	23、45、52、68、90

再エネを導入しなかった場合の採算性確保可能な最低ユニット数が 21 以上であることに對して、再エネを導入時には、再エネ設備導入補助 1/3 の場合、11 ユニット以上養殖を行えば採算性の確保が可能となる。よって、再エネを導入することで採算性の確保が容易になる可能性が高い。

また、感度分析の結果より売上単価及び再エネによる削減効果によっては、さらに小規模なユニット数でも採算性の確保が可能となることも確認された。しかし、そのためには養殖ギンザケの品質の向上による高価格化や、より効率的な再エネ設備の導入などが必要となる。

詳細な試算結果については次ページ以降に示す。

表 19 試算結果

条件	採算性確保可能なユニット数	
	実験条件	感度分析考慮時
初期設備費 610 万	11 ユニット	3 ユニット ※再エネによる削減効果 95（千円/年）、売上単価 2（千円/kg）

初期設備費 610 万（最低限の養殖設備を用意した場合）

【再エネ導入あり、再エネ設備導入補助 1/3】

売値単価（千円/kg）、再エネ削減効果（千円/年）の変動を考慮

売上	千円	512	1024	1536	2048	2560	3072	3584	4096	4608	5120	5632	6144	6656	7168	7680	8192	8704	9216	9728	10240	10752
ユニット数	個	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
販売数	kg	320	640	960	1280	1600	1920	2240	2560	2880	3200	3520	3840	4160	4480	4800	5120	5440	5760	6080	6400	6720
単価	千円	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
費用	千円	1027	1484	1941	2398	2855	3312	3769	4226	4683	5140	5597	6054	6511	6968	7425	7882	8339	8796	9253	9710	10167
人件費	千円	317	348	380	412	444	475	507	539	570	602	634	665	697	729	760	792	824	855	887	919	950
一人当たりの人件費	千円	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317
割増係数	割	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
稚魚・餌代	千円	142	284	426	568	710	852	994	1136	1278	1420	1562	1704	1846	1988	2130	2272	2414	2556	2698	2840	2982
単価	千円	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142
ユニット数	個	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
電気代	千円	100	200	300	400	500	600	699	799	899	999	1099	1199	1299	1399	1499	1599	1699	1799	1899	1998	2098
基本料金	千円	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184
ユニット数	個	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
再エネ削減効果	千円	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
ユニット数	個	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
水道代	千円	39	79	118	158	197	236	276	315	355	394	433	473	512	551	591	630	670	709	748	788	827
基本料金	千円	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
ユニット数	個	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
減価償却	千円	429	573	717	861	1005	1149	1293	1437	1581	1725	1869	2013	2157	2301	2445	2589	2733	2877	3021	3165	3309
再エネ導入設備費	千円	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	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	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0
1ユニットの設備費	千円	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	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	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6	4.9	5.2	5.5	5.8	6.1	6.4	6.7	7.0
利益	千円	-515	-460	-405	-350	-295	-240	-185	-130	-75	-20	35	90	145	200	255	310	365	420	475	530	585

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)				
売上単価 (千円/kg)		65	75	85	95	105
		2	-79.2739	-49.2739	-19.2739	10.72608
		1.8	-271.274	-241.274	-211.274	-181.274
		1.6	-463.274	-433.274	-403.274	-373.274
		1.4	-655.274	-625.274	-595.274	-565.274
		1.2	-847.274	-817.274	-787.274	-757.274
		1	-1039.27	-1009.27	-979.274	-949.274
		0.8	-1231.27	-1201.27	-1171.27	-1141.27

13ユニット 収益シミュレーション		再エネ削減効果(千円/年)				
売上単価 (千円/kg)		65	75	85	95	105
		2	1555.769	1685.769	1815.769	1945.769
		1.8	723.7686	853.7686	983.7686	1113.769
		1.6	-108.231	21.76858	151.7686	281.7686
		1.4	-940.231	-810.231	-680.231	-550.231
		1.2	-1772.23	-1642.23	-1512.23	-1382.23
		1	-2604.23	-2474.23	-2344.23	-2214.23
		0.8	-3436.23	-3306.23	-3176.23	-3046.23

20ユニット 収益シミュレーション		再エネ削減効果(千円/年)				
売上単価 (千円/kg)		65	75	85	95	105
		2	2700.298	2900.298	3100.298	3300.298
		1.8	1420.298	1620.298	1820.298	2020.298
		1.6	140.2983	340.2983	540.2983	740.2983
		1.4	-1139.7	-939.702	-739.702	-539.702
		1.2	-2419.7	-2219.7	-2019.7	-1819.7
		1	-3699.7	-3499.7	-3299.7	-3099.7
		0.8	-4979.7	-4779.7	-4579.7	-4379.7

図 34 採算性確保可能なユニット数

(5) 採算性確保に向けた取り組み

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、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。

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。

人件費については、IoT機器の活用や一定以上の規模を確保することで抑制は可能と考える。

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。

ただし、上記の電気代や水道代節約の方法はその多くが初期投資額の増加につながることから、当該装置等導入補助の有無・割合を勘案して決定する必要がある。

ところで、売上額を向上させるための戦略も検討しておく必要があるだろう。例えば、陸上養殖では調温養殖が可能のため、市場のニーズに応じて魚の出荷(販売)の時期やサイズの調整を図ることができる。また、ギンザケ稚魚の海出し後から次年度の同仔稚魚の搬入に至るまでの期間

(全水槽5ヶ月程、半数の水槽は+2ヶ月間程)は、飼育施設の自由度が高まることから、特に、ユニット数拡大時には、海面養殖時の冷海水期(餌食いが著しく低下する時期)対応としての成長継続飼育個体や成熟(秋以降生殖腺が発達し、体色も変化、身質も低下する)抑制処理個体の通年出荷も可能であろう。あるいは、この間に高級魚や放流魚の仔稚魚飼育やカーボン・オフセット対応を意図した微細藻類の養殖等を行うことも選択肢の一つであると考えている。

1-8 IoT を用いた監視方法の検討

(1) 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。

(2) 令和 4 年度の実施結果

①簡易型 IoT システムの概要

図 35 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。このシステムを図 36 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。

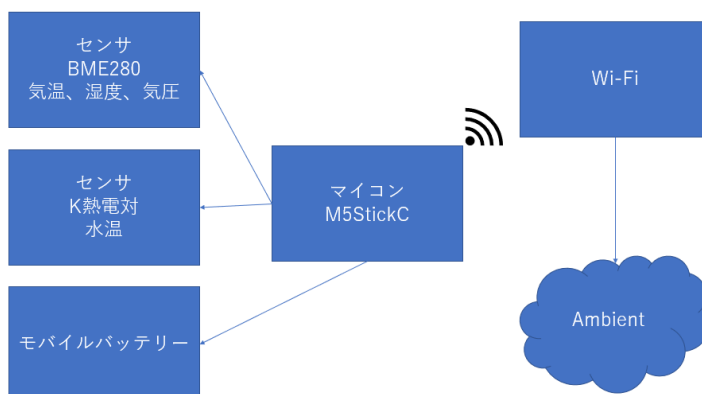


図 35 IoT システムの概略図

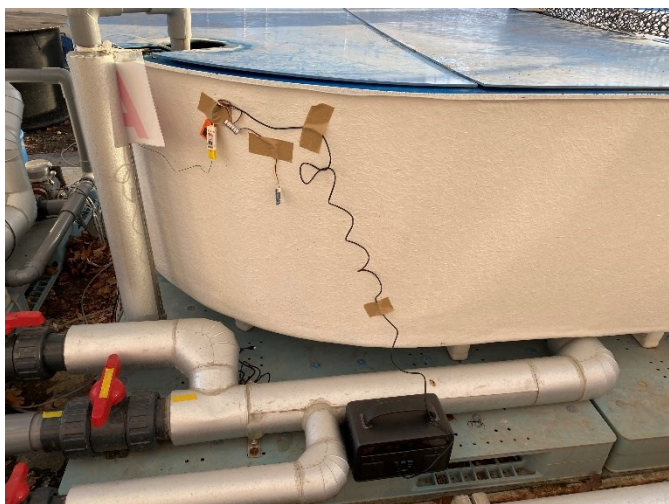


図 36 設置場所

②実施結果の一例

図 37 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。

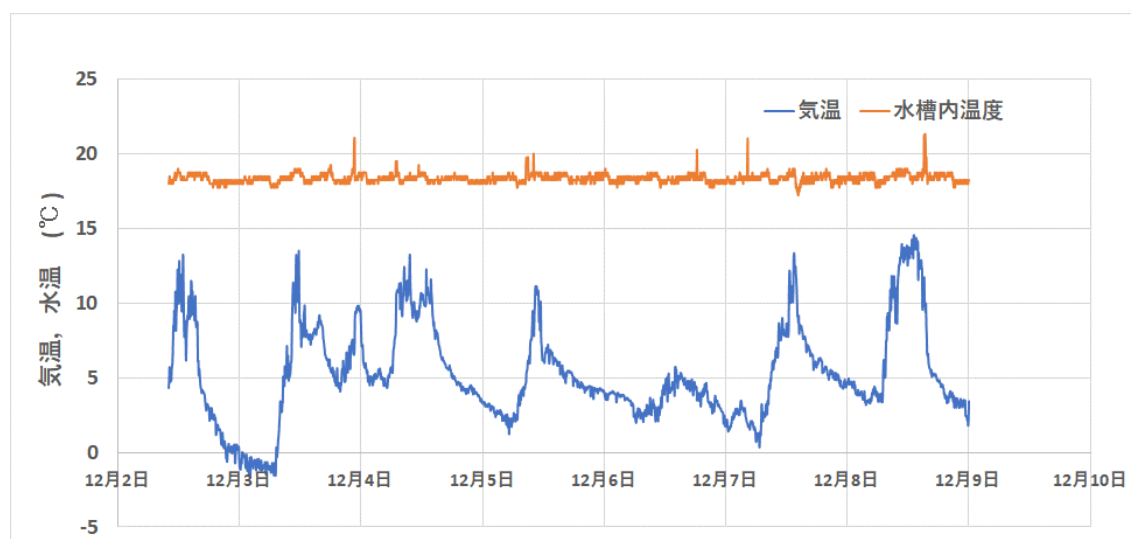


図 37 気温と水温の測定結果の一例

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。