

鶴岡浄化センターでのあゆ養殖

— 持続可能な食の地域づくりプロジェクト —

鶴岡市上下水道部下水道課浄化センター主査 松浦正也

1. はじめに

鶴岡市は6市町村が、平成17年10月に合併し、新たな鶴岡市として誕生した。その行政面積は1,311km²で東北第1位、人口は12.4万人余で、県都山形市に次ぎ県内第2位である。

本市は、山形県の日本海側、庄内地方の南部に位置し、東に月山・羽黒山・湯殿山の出羽三山、南は朝日連峰の山々に囲まれ、北西部に日本有数の穀倉地帯である庄内平野、西側には約42kmにわたる日本海の海岸線が広がる、四季折々の多彩な自然環境に恵まれた都市である。地域の豊かな食材や伝統的な料理などを活かした食文化を継承・発展するため「ユネスコ食文化創造都市」ネットワーク加盟が認定されている。

市は昭和47年公共下水道事業に着手し、現在は、公共下水道8処理施設、集

落排水22処理施設、市設置型浄化槽を合わせて汚水処理施設整備普及率は93.6%、接続率93.7%となっている。

鶴岡浄化センターは旧鶴岡市街地の汚水処理を担当しており、計画人口74,600人、計画汚水量37,000m³、標準活性汚泥法の浄化センターで、昭和55年に供用を開始した。

2. BISTRO下水道の取り組み

鶴岡浄化センターの処理方式は嫌気好気法(A0法)であり、1日に約27,000m³の汚水を処理している。昭和61年からコンポストセンターで脱水ケーキの肥料化を始めるなど、下水道と食・農の循環を図る「BISTRO下水道」に取り組んでいる。

平成27年には「FIT制度」を活用した民設民営による消化ガス発電事業を開始し、平成29年度からは鶴岡市、山形大学、JA鶴岡、下水道関連事業者など産

官学が連携し、下水道資源農業利用の共同研究や実証実験を進行中である。発電で発生する余剰熱でビニールハウスを加熱し、そこで収穫された「じゅんかん育ち」の野菜を学校給食に提供しているほか、肥料成分を多く含んだ下水処理水で飼料用米栽培にも取り組むなど、下水道に由来する資源やエネルギーを活かした新たな循環や地産地消の形を模索している。

処理水のさらなる活用手法について検討している中で、水産関係者と情報交換した際に「処理水の持つ栄養塩類により鮎の主食となる珪藻類を繁殖させれば、天然ものが持つ独特の風味をだすことができるのでは」との発想が生まれ、令和元年度から山形県水産振興協会からの協力も頂きながら下水処理水による鮎養殖実験に挑戦した。



図-1 BISTRO下水道と資源循環イメージ

3. 養殖実験の方法（令和元年度）

鶴岡浄化センター敷地内に養殖池（飼育槽水量約86m³×2池）を建設し、珪藻繁殖用の底石を約2t投入した。処理水供給フローを図-2に示す。

当初計画では処理水を最終沈殿池より直接投入する予定であったが、仮設水槽による試験を行った結果、約40分で鮎の稚魚がへい死した。その原因は、硝化抑制運転のために処理水のアンモニア態窒素濃度が20～30mg/lと高かったことにある。中間育成事業基本マニュアルでは0.1mg/l以下とされている¹⁾。そこで、休止中の反応槽を利用してこの濃度を10mg/l以下とし、さらに井戸水で希釈して5mg/l以下に抑えることで育成水質条件を整えた。令和元年6月21日に山形県栽培漁業センターより体長約8cm（10g）の稚魚150匹を放流したところ順調に生息した。処理水を井戸水で希釈した池（図-2の2池）の水温は21～24℃、pHは6.1～7.8、DOは5～7mg/lであった。7月25日は体長約10cm（15g）の稚魚を1,500匹追加で放流した。なお、井戸水で希釈する前の処理水を流した池（図-2の1池）では、放流した稚魚50匹は最長で約2週間しか生息できなかった。

4. 養殖実験結果の評価

(1) 鮎の生育経過

鮎をどの程度まで成長させるかは、藻類以外に与える人工餌の量によりコントロールした。給餌装置を用いて6月24日より1回あたり200gの餌を1日2回与えた。鮎の成長にとまないこの給餌量を順次増加させた（最大3,230gまで）。8月19日には鮎は体長約13cm（50g）まで成長し、この時点で関係者による試食会を行った。その後、9月11日には体長約15cm（55g）の鮎を420匹、19日には体長約16cm（60g）の鮎を300匹、最終の10月21日には体長約19cm（90g）の鮎を450匹それぞれ漁協に出荷し、冷風干しなどの加工試作を行った。

池の水温が自然河川より高いことから、池内の鮎は順調に生育した。食も旺盛であり盛夏期には池内で発生した藻類はほとんど食べ尽くされる状態となった。鮎は水温が低い清流で生きているイメージがあるが、実際には水温が30℃くらいまで生息可能である。藻類は栄養塩が十

分であれば、強い日射が得られる方が増殖に適していることから、夏季に処理水を用いて鮎を養殖することは理にかなっていると言える。

(2) 池内の藻類

鮎が好むであろう藻類（一般には珪藻と言われている）を増殖させる目的で、鮎釣りで有名な山形県五十川から河川にある底石を採取して池へ投入した。8月下旬に池の底石を3個ランダムに採取し、そこに付着した藻類の同定を専門業者に委託して行ったところ、同定された細胞数の99%が緑藻であった（表-1）。特に、カエトフォラ科の緑藻が優占していた。鮎は緑藻でも支障なく食べることが

ら、成長に問題は見られなかった。また、試食会では天然もののような爽やかな香りがあり美味しいとの評価が得られた。

(3) 養殖鮎に含まれる有害金属類による健康リスクについて

① リスク評価の概要

鶴岡浄化センターの養殖池の鮎（試験魚）を9月6日に採取し、有害金属（Cd, Pb, Cr⁶⁺, As, Hg, Se）の含有量を調べた。その含有量をもとに、体重70kgの成人が年間に5回、1回あたり200gの鮎を食べるときの健康リスクを評価した。比較のために、一般に販売されている愛知県産の体長30cmの鮎（対照魚）についても同様にリスクを評価した。

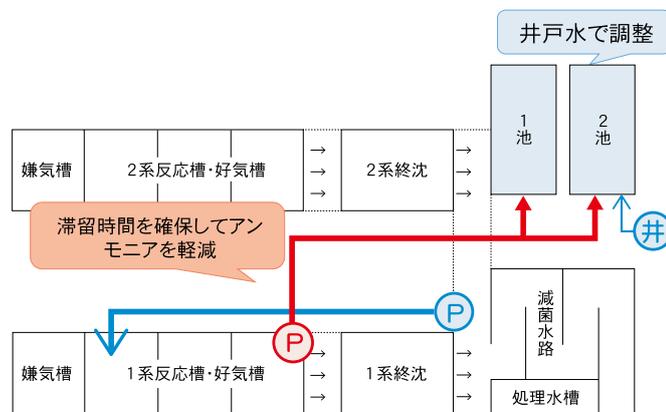


図-2 処理水供給フロー

養殖池の底石に付着していた藻類

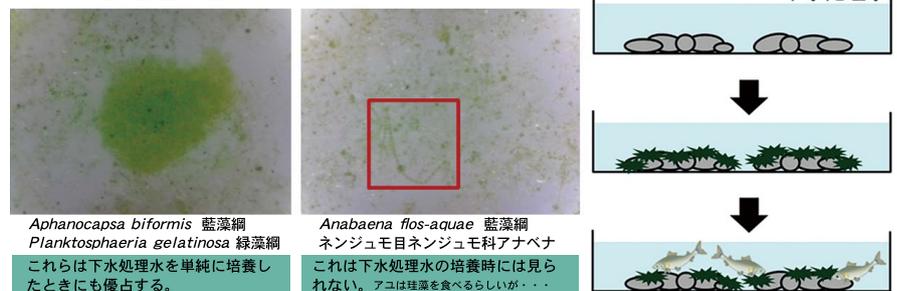


図-3 顕微鏡写真および養殖のイメージ

表-1 付着藻類分析結果²⁾

分類等	学名等	生活様式	1m ² あたり細胞数		
珪藻綱	ナビクラ科	<i>Gomphonema parvulum</i>	群体性	40	0.01%
		<i>Gomphonema pseudosphaerophorum</i>	群体性	200	0.05%
		<i>Navicula minima</i>	単独性	40	0.01%
		<i>Navicula subminuscula</i>	単独性	80	0.02%
緑藻綱	カエトフォラ科	<i>Chaetophoraceae sp.</i>	群体性	380,000	99.83%
		サヤマドロ科	<i>Oedogonium sp.</i>	群体性	280
合計				380,640	

リスク評価の方法としては、まずすべての有害金属について非発がんのリスクを評価した。すなわち、鮎を食べることによる「体重当たりの金属摂取量」が「参照用量」を超えない限り、健康リスクはゼロと考える^{3,4)}。

次に、Cd, Pb, Cr⁶⁺, Asについては、「体重当たりの金属摂取量」と「スロープファクター」を用いた発がんリスクの評価も行った^{3,4)}。

②リスクの結果

表-2のとおり試験魚、対照魚とも有害金属のいずれについても非発がんリスクはゼロであった。しかも、それぞれの金属に関する参照用量に比べると、1日摂取量は十分に小さかった。発がんリスクについては、許容リスクを10⁻⁵とすると、Asによるリスクはこれを若干上回っていたが、日本の水産物ではよく見られる程度であり、対照魚を食べるケースのリスクとほぼ同等であった。Cr⁶⁺による発がんリスクについては、試験魚、対照魚ともにこの金属が検出されなかったために許容リスクとの比較ができなかった。分析に用いるサンプル量を増やしてこの点の結論を得たい。

表-2 健康リスクの評価結果一覧

	体重当たり金属摂取量		非発がんリスク		発がんリスク	
	試験魚	対照魚	試験魚	対照魚	試験魚	対照魚
	mg/kg/日	mg/kg/日	-	-	-	-
Cd	$< 2.4 \times 10^{-6} *$	$< 2.4 \times 10^{-6} *$	なし	なし	$< 8.9 \times 10^{-7}$	$< 8.9 \times 10^{-7}$
Pb	7.8×10^{-6}	1.0×10^{-5}	なし	なし	6.7×10^{-8}	8.7×10^{-8}
Cr(VI)	$< 3.9 \times 10^{-5} *$	$< 3.9 \times 10^{-5} *$	なし	なし	$< 2.0 \times 10^{-5}$	$< 2.0 \times 10^{-5}$
As	1.4×10^{-5}	1.2×10^{-5}	なし	なし	2.1×10^{-5}	1.8×10^{-5}
Hg(無機)	2.0×10^{-6}	4.3×10^{-6}	なし	なし		
Se	9.4×10^{-6}	1.1×10^{-5}	なし	なし		

※検出限界以下

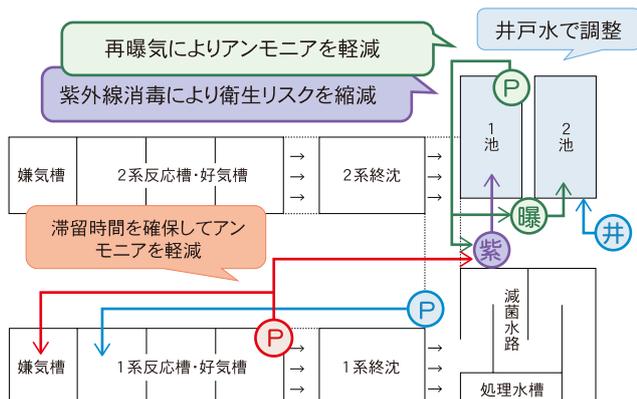


図-4 処理水供給フローの改良

5. 2年目の養殖実験

(1) 鮎養殖池の改良

図-4のとおり浄化センター内には2つの池があり、これを有効に利用するため、1池を水質改善用として用いる。池内には担体を設置し硝化を促進することで、アンモニア態窒素を低減させる方法を行う。

併せて処理水の農業利用の観点から、野菜（クレソン、せり、バジル等）の水耕栽培を行うことで、窒素濃度の一層の軽減を図る。また、休止中反応槽に循環ラインと水耕栽培池の返流循環ラインを構築した。1池で一定の安全な水質を確保しさらに餌となる藻類を増殖させてから、その水を鮎が生息する鮎養殖池へ供給するイメージである。

処理水は滅菌処理をしていないため、大腸菌対策として水耕栽培池ラインに紫外線滅菌装置を設置し運用した。その他、攪拌する水流が無いため表層部と下層部に溶存酸素濃度差があったことから、約2mの通気管により池底部の水をエアリフトし上部へ送水し池の溶存酸素濃度分布の均一化と濃度を上げることができた。井戸水も溶存酸素濃度は低いことから水

流ポンプによる給気を行った。

(2) 実験結果と考察

令和2年6月、稚魚を2回に分け令和元年と同様に2,000匹受け入れた。溶存酸素対策など改良を加えた結果、令和元年は表層部を回遊していたが主に池の底部を回遊する変化が見られた。

鮎養殖池に使用する処理水は水耕栽培池を通過した結果、亜硝酸態窒素の減少が確認された。観察水槽では水耕栽培池を通過させた処理水100%（アンモニア態窒素10mg/l程度）でも生育し、藻類の繁殖も順調であった。鮎養殖池に供給されている水耕栽培池水と井戸水の割合等が不明であり、水耕栽培池における窒素除去の効果は定量的に整理することは困難であるが、水耕栽培池を利用するシステムは有効であったと考えている。

紫外線滅菌装置の効果は処理水に含まれるSSの影響が大きいため水耕栽培池でSSを沈降除去した後に反応槽からの再曝気水と合わせて滅菌した結果、大腸菌群数を低減させることができた。

養殖鮎に含まれる有害金属類による健康リスクについても1年目と同様な数値結果が出ている。

人工餌量は1年目と同様に給餌量を徐々に増加させた。より天然物に近い香りを出すことを目的に合計給餌量160kg（令和元年度180kg）と約1割抑えた。稚魚受入れ時、平均体長約10cm（14g）が10月出荷時は平均体長18cm（75g）であった。1年目と比較し小さめとなったがスイカの香りがする天然物と同様の美味しい鮎との評価を関係者より頂いた。安全性を加味し池のアンモニア態窒素は3mg/l以下に抑え、対策改良を施した状態で藻類を繁殖させたが、稚魚受入れ時に1時間程度で食べ尽くされた。鮎の



写真-1 実験池の様子（左：2池・鮎養殖、右：1池・水耕栽培）



図-5 大腸菌群対策供給フロー



写真-2 冷風干しと塩焼き

大きさは給餌量によりコントロールできるため、人工餌の給餌は不可欠であり、今後は藻類の増やし方を改善し人工餌の比率を下げられるか、また、アンモニア態窒素、大腸菌群数等について水産用水基準値内の養殖が課題となる。

6. 3年目の養殖実験

2,000匹の鮎を受け入れたが、池放流1週間後にピブリオ病が発生し約600匹がへい死、薬の投入により回復し残りは順調に生育した。発生原因は不明である。藻類の繁殖力維持のために、板や石だけでなく細かい目の網を用いて定着力の実験を行った。藻類の付着に成功し一定の定着繁殖が見られ、鮎放流後全てきれいに食い尽くされたことから藻類の供給には効果があった。

大腸菌群対策として塩素滅菌後の処理水を使用、さらにオゾン発生装置を処理水供給ラインに設置し、水産用水の安全確保として改良を行った(図-5)。また、山形大学と共同で定期的大腸菌群の分析を行った。

供給水については一定の大腸菌群数の削減効果が得られた。アンモニア態窒素については、水耕栽培池と井戸給水希釈により1.9mg/ℓ (pH=7.0、水温20℃)以下となるよう調整し定期的計測を行った。次年度へ向け池構造を改良し、さらなる安全対策を行う予定である。

藻類定着対策として網等を改良し、人工餌と繁殖藻類の供給バランスにより、天然に近い香りが得られ成長したものと考える。また観察水槽試験(処理水のみ)では、人工餌を給餌することなく藻類のみで生育した。令和3年度は養殖匹数が令和2年度の3分の2となったことから、体長も大きくなったが、藻類は供給が追いつかない状況は変わらず、藻類繁殖方法の改良として付着しやすい資材の検証が必要である。事業化へ向け継続し実験する予定である。

7. おわりに(今後の展望)

養殖された鮎は鶴岡市加茂水族館レストラン料理長より鮎の炊き込みごはん、蒲焼、塩焼き、子持ち鮎の甘露煮を試作。

天然のものと同様香りもあり、質の高い鮎との評価を頂いた。県漁協由良水産加工場では冷風干し、甘露煮等へ加工し関係者で食味の評価も実施し、天然ものと変わらない美味しい鮎との評価を3年目も得ることができた。食品としての安全性と分析等を行い4年目は市民への販売を目標とする。下水処理水のもつ熱利用として冬季間の養殖池活用方法を検討するとともに、さまざまな水産系への事業化可能性調査に引き続き取り組む予定である。水耕栽培池での野菜についても多品種について高収量を得ることができており、分析評価を実施し、併せて下水道資源の農水産業への活用を図りたいと考えている。

重金属、大腸菌などマイナスのイメージについては山形大学と引き続き検証を継続し、より「安全」「安心」な食材提供へ結び付けたい。マイクロプラスチックを含む化学物質については、その健康リスクが十分に解明されておらず、安全を保証するための基準値等はないが、商品化に向けて、消費者の安心を得るために、調査は実施したいと考えている。

「下水=汚い」ではなく「下水=資源」になることが、未来の人たちのためになると思う。今まで捨てていたものを全て活かしていくという目的をもって行い、それを追求していくことが大切である。

これまでのBISTORO下水道の取り組みを含め、食文化創造都市鶴岡から持続可能な食の地域づくりプロジェクトを推進していく。

【参考文献】

- 1) 弘助山形県水産振興協会: アユ中間育成事業基本マニュアル(平成27年改訂)
- 2) 水情報国土データ管理センター: 河川水辺の国勢調査平成26年度版生物リスト
- 3) United States Environmental Protection Agency: Integrated Risk Information System <https://www.epa.gov/iris>
- 4) Gebeyehu HR, Bayissa LD (2020) Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia. PLoS ONE 15(1): e0227883