

特集 水産養殖研究の最前線—持続可能な養殖業を目指して—

魚類・水環境の恒常性評価と予測科学

理化学研究所 環境資源科学研究センター

名古屋大学大学院 生命農学研究科

横浜市立大学大学院 生命医科学研究科

菊地 淳

はじめに

20 世紀は工業化社会の発展と、窒素肥料を含む“緑の革命”によって人口増加と食料需要を満たしてきた。日本を含む先進国の多くは、食料の過剰供給と生活習慣病が大きな課題である一方、多くの新興国では未だに栄養状態の不均衡（特に蛋白源不足）が続き、食料の主要供給源である農業は非効率な肥料投入による環境汚染、過剰な地下水利用と森林生態系の開拓など、多くの問題を抱えている。こうした問題の多くは亜熱帯・熱帯地域に顕著であり、その圧倒的な太陽熱照射量から光合成産物、つまり多糖類は多く生産できるが、動物系蛋白源の食料供給が課題となっている¹。

他方で水産物は、畜産物で問題となる水ストレス無しに蛋白源供給できる一方、宗教的な摂食制限も少なく、世界の食料需要に重要な役割を演じると期待されている。21 世紀に入り、既に世界全体の牛肉生産量より水産物の養殖生産量が超越しており、20 世紀の緑の革命に次ぐ 21 世紀の“海を耕す”時代を到来させることが出来れば、今世紀中盤に 90 億人を超える予想される世界人口の増加に伴う食料（蛋白源）需要、さらに農業に起因する世界規模の水ストレス問題に切り込むことが出来ると期待されている²。

日本は陸地とくに農耕可能面積に乏しく、ヒトが直接摂食する食料のみならず家畜や水産物の飼料源についても、輸入依存性が高い。しかし海洋に目を転じれば世界第 6 位の排他的経済水域面積を有し、南北からの豊かな潮流と急峻な河川から注がれる栄養塩は、世界有数の生物多様性ホットスポットを育んでいる。こうした生物多様性から育まれた水産物は、世界文化遺産に登録された和食を構成する重要な素材として欠かすことができないだけでなく、国際競争力のポテンシャルもある。しかしながら、北欧の養殖サーモンにその主要な座を奪われつつあり、日本の水産物が世界市場を視野に入れ、国際競争力を持つためには MSC (Marine Stewardship Council) や ASC (Aquaculture Stewardship Council) 等の国際認証化が必須であり、かつ、増肉係数の低い新たな水産物供給スタイルを確立する必要がある。海外のサーモン養殖では、飼料の利用効率が 80% 以上（増肉係数 1.25 未満）なのに対し、現状の国内の単一種（マグロやハマチ等）の海面養殖では、飼料の利用率は一般的に 30% 未満（増肉係数 3 以上）で、投入飼料の 2/3 近くが利用されずに、糞や残餌として海中に散逸、蓄積し、海洋

の環境負荷増、如いては赤潮発生などの自家汚染につながっている³。

1 遺伝要因と環境要因解析

日本近海は世界有数の生物多様性資源に恵まれながらも、消費者が調理法等を知らずに売れない魚種も多いことから、漁獲の約 1/2 はすぐに廃棄され、沿岸富栄養化の一要因ともなり、市場流通される魚種は一部の人気魚種に限られている。さらに水産加工の過程でも多くの残渣が産出されている。従来の養殖が不可能であった魚種も含めて、多様な魚種から肉質向上の重要因子を探索し、これまでに無い付加価値向上の鍵因子を抽出することで、世界的に見て持続性の高い水産業へのイノベーションを興し、安定した蛋白供給がなされる社会を実現していきたいものである。

こうした課題意識から、筆者らは蛋白質の立体構造解析、低分子代謝物や高分子バイオマス混合物の構造・組成・および物性解析の経験を、水産業や環境研究へ展開していくことに早くから着眼してきた⁴。精製蛋白質や天然化合物の研究スタイルがプロテオームやメタボロームへ、また環境微生物も単離せずマイクロバイオーム研究へと展開されるように、複雑系を扱う情報科学戦略こそ鍵技術と狙いを定め、所謂ウェット/ドライ研究手法を両立させることに腐心してきた⁵。

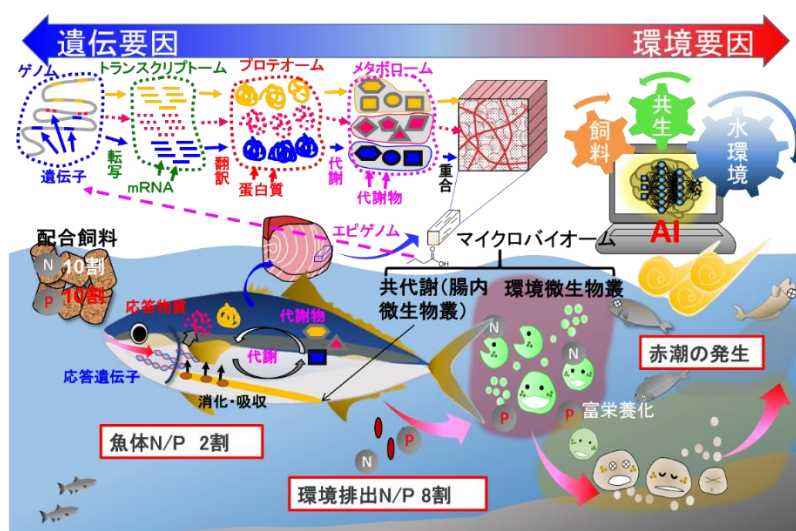


図1 遺伝・環境要因解析と魚類・水環境評価

かつては遺伝子や転写産物解析が主流だった生物学研究も、代謝物組成や微生物組成を追跡することで、飼料の消化・吸収や環境微生物叢の変動といった、複雑な環境要因と組み合わせて評価することが可能になり始めている。つまり魚類やヒトも微生物叢など、他の生物と共生する超有機体として捉える必要がある。超有機体内では、例えば腸内微生物叢が産生する短鎖脂肪酸がエピゲノム修飾に関わるなど⁶、新たな生命観が創成しつつある。

2 IoT と AI 水産への鍵技術としての「フィードバック制御」

今世紀に進行する第 4 次産業革命では情報技術、とりわけ IoT (Internet of Things)、ビッグデータ、AI (Artificial Intelligence) 関連技術の進展により、一次産業にデジタル化および将来予測化とフィードバック制御を導入し得る。しかし AI 関連技術が発展する一方、その学習データ取得のために試料数を多くすると分析コストが高くなるため、いわゆる「予測科学」領域において多因子数データを産出するオミクス手法の導入は鈍い。

例えば天然魚は、生育する海域の水温や栄養塩、さらに餌となるプランクトンや小魚によって「肉質」が変化し、結果として市場価値も大きく異なる。言い換えれば、天然魚の「肉質」分析データから、産地判別を簡便に行うことが出来れば、ブランド価値を維持・評価することにも貢献できるであろう。筆者らは核磁気共鳴 (NMR) 装置が近年、従来のハイエンド仕様のみならず普及型装置まで市場開拓が進んでいることに着目し、こうした小型の NMR 装置からのピーク分離手法の開発や、肉質特性の分類法も報告してきた⁷。一方でハイエンド装置を用いれば、産地や餌の違いによる筋肉中の物質組成の差異も、さらに明瞭に判別することが可能となる⁸。そこで深層学習、アンサンブル深層学習といった先鋭的な機械学習計算を NMR 解析に導入することによって、天然魚の産地判別に関わる重要因子 (NMR ピーク:代謝物) 抽出、あるいは魚類成長に関与する重要因子や予測モデル選抜手法をも報告してきた^{9, 10}。こうした解析手法は、例えば肉質を左右する水温や酸素濃度といった養殖環境管理や、成長性に関わる飼料中の重要成分絞り込みといった、水産業における重要課題にも貢献し得る^{5, 7, 11}。

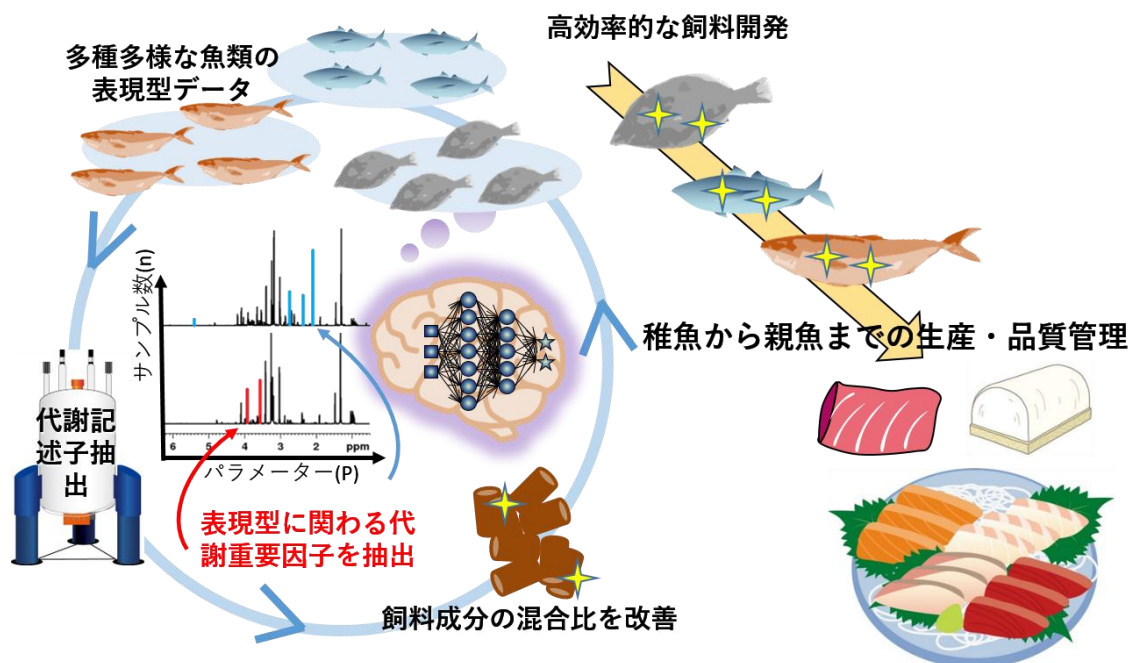


図 2 魚類表現型に関わる重要因子を抽出し、機械学習によるフィードバックで飼料開発と肉質制御を推進する。

3 環境恒常性の評価手法としての IoT/AI 予測科学とエコインフォマティクス

筆者らは既に、多様な魚肉分析データに AI 解析を適用してきたが、水質分析データへも類似のアプローチを適用することも重要な意義があると考え。そこで我々のグループでは、日本各地の環境水、底泥、天然海藻や天然魚類を対象とし、試料数が因子数より多い場合、あるいは試料数が因子数よりも少ない場合について、それぞれ環境評価法と将来予測法の開発を試みてきた¹²。赤潮の主要プランクトン増殖に同調する物理化学因子を時系列モデリング法で可視化するという手法開発を報告してきた。

世界随一の生物多様性ホットスポットたる日本近海には優れた生物資源が埋もれている。豊かな日本の“海を耕し”国際競争力を打ち出すためには、前出のように MSC や ASC などの国際的な水産認証をクリアし得る環境低負荷型の水産業が必要である。従って競争力のある養殖業には、生態系評価技術や海外輸入の魚粉に頼らない飼料開発が必要とされる。我々が着手してきた環境試料のビッグデータ蓄積と深層学習といった評価手法は、各種分析情報の分類、関係性、マーカー情報の同定を可能にし得る。これらの手法を用いて、養殖場付近の生態系の恒常性維持に関わるルールと鍵因子の抽出も可能となり得る。また、養殖生産から更に、一連の環境予測技術を用いて、鍵因子の変動から生態系のバランスが崩れる前に、環境の変動を予測・早期警告をすることが期待できる。

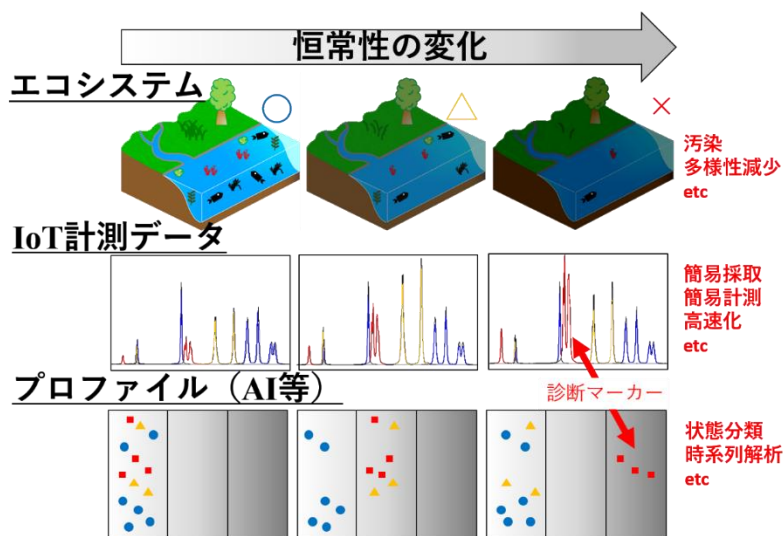


図 3 環境恒常性の変化と IoT/AI 予測科学

ヒトの健康診断が恒常性変化の診断マーカーで評価できるように、超有機体や水圏エコシステムも「環境診断」が可能である。まず時系列での IoT 計測データを蓄積し、AI 解析等のプロファイル分類により、例えば赤潮のように恒常性が逸脱した際の診断マーカーを得ることができる。

おわりに

モノやコトがインターネット接続される (Internet of Things : IoT) と、蓄積された大量データはいわゆるビッグデータとなり、機械学習 (AI) が有効となる。情報化社会によってモノ×ヒト、機械×ヒト、生産×消費といった様々な繋がりによるビッグデータを、AI 等によって新たな付加価値や製品・サービスを創出し、高齢化／人手不足／資源循環・持続性等の総合的な社会課題解決、つまり Connected Industries (CI) への取り組みが望まれてくる。

水産業に限らず農畜産物も同様であるが、昨今は食の生産と消費の間に関わるデジタル情報を蓄積・活用し、一次産業のバリューアップ、さらには排水・廃棄物をも飼料や肥料として循環させることで、サーキュラー・フロー社会を構築しようとする提案が多々見られる。こうした動向において、消費者の要求を巧みにとらえた肉質等の高付加価値戦略は重要であり、また従来は廃棄されていた食品残渣等を巧みに流通させ、飼料としてバリューアップさせるような仕組み創りが重要と思われる。飼料と肉質向上、および環境低負荷への IoT/AI の予測科学研究はまだ始動したばかりであり、今後の展開を期待したい。

謝辞

今回紹介した筆者らの具体的な研究成果は、理研 CSRS の環境代謝分析研究チームのメンバーらによって得られた。一連の研究遂行には、農林水産技術会議および水産庁補助事業の支援を戴いた。また、日本農学アカデミー・シンポジウムでの登壇機会を戴いた水産研究・教育機構の和田時夫理事、北里大学海洋生命科学部の渡部終五教授に感謝いたします。

参考文献

- 1 菊地淳, 食の来た道還る道. *バイオインダストリー* **31**, 37-44 (2014).
- 2 菊地淳, 武部孝行, エコインフォマティクスによる難養殖魚種の持続的生産管理構想. *アグリバイオ* **28**, 344-347 (2018).
- 3 和田時夫ら, 持続可能な水産養殖業を目指して 一研究開発・事業・政策の現状と展開方向一. *生物の科学 遺伝*, in press (2019).
- 4 菊地淳, 食と代謝のメタボノミクス. in *実験医学増刊*, 大野博司, 服部正平, 編 (羊土社, 2014), vol. 32, pp. 699-705.
- 5 J. Kikuchi, K. Ito, Y. Date, Environmental metabolomics with data science for investigating ecosystem homeostasis. *Prog Nucl Magn Reson Spectrosc* **104**, 56-88 (2018).
- 6 Y. Furusawa et al., Commensal microbe-derived butyrate induces the differentiation of colonic regulatory T cells. *Nature* **504**, 446-450 (2013).
- 7 J. Kikuchi, Practical aspects of the analysis of low- and high-field NMR data from environmental complexities. *Methods in Molecular Biology*, (in press).

- 8 M. Mekuchi, T. Asakura, J. Kikuchi, New aquaculture technology based on host-symbiotic co-metabolism. *Marine Metagenomics* (Springer, Ed.; Gojobori, T., Mineta, K., Wada, T., Kobayashi, T., in press).
- 9 Y. Date, J. Kikuchi, Application of a Deep Neural Network to Metabolomics Studies and Its Performance in Determining Important Variables. *Anal Chem* **90**, 1805-1810 (2018).
- 10 T. Asakura, Y. Date, J. Kikuchi, Application of ensemble deep neural network to metabolomics studies. *Anal Chim Acta* **1037**, 230-236 (2018).
- 11 J. Kikuchi, S. Yamada, NMR window of molecular complexity showing homeostasis in superorganisms. *Analyst* **142**, 4161-4172 (2017).
- 12 菊地淳, 葭田征司, 坪井裕理, 伊達康博, 環境変動の情報を生物の代謝プロファイリングから捉える試み. *ケミカルエンジニアリング* **56**, 38-43 (2011).