

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

5RF-1901 ワカサギを指標とした富栄養化湖沼の生態系の健全性評価手法の
提案

(J P M E E R F 2 0 1 9 5 R 0 1)

令和元年度～令和3年度

Development of the Indicator to Assess Ecosystem Health for Eutrophic Lakes by Using Wakasagi
Smelt (*Hypomesus nipponensis*)

＜研究代表機関＞
九州大学

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ．成果の概要」の図表番号は「0．通し番号」としております。なお、「Ⅱ．成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ．成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号．通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5－1. 成果の概要	
5－2. 環境政策等への貢献	
5－3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6－1. 査読付き論文	
6－2. 知的財産権	
6－3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
ワカサギを指標とした富栄養化湖沼の生態系の健全性評価手法の提案に関する研究	13
(九州大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	28
IV. 英文Abstract	30

I. 成果の概要

課題名 5RF-1901 ワカサギを指標とした富栄養化湖沼の生態系の健全性評価手法の提案

課題代表者名 藤林 恵 (九州大学大学院工学研究院環境社会部門助教)

重点課題 主：【重点課題⑮】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び
評価・解明に関する研究

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） (5-4) 湖沼における生態系保全を考慮した健全度を示す指
標や調査研究手法の開発

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

13,736千円（合計額）

（各年度の内訳：令和元年度：5,949千円、令和2年度：3,367千円、令和3年度：4,420千円）

研究体制

他のサブテーマはない。

研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード

湖沼生態系、健全性、脂肪酸、食物網、安定同位体比、ワカサギ、八郎湖、炭素転送効率、炭素転換効率、餌環境

1. はじめに（研究背景等）

湖沼は水源としての価値のみならず、漁業資源やレクリエーションの場の提供など多様な価値を有しており、さまざまな生態系サービスを人に提供している。しかしながら、閉鎖性水域である湖沼は、アオコの発生や漁獲量の減少など、水質のみならず生態系の劣化も問題として顕在化しており、湖沼をとりまく状況は芳しくない。湖沼環境の改善を進めていくためには、水質と生態系の両観点から湖沼の状態を評価することが必要である。しかしながら、これまでの湖沼の状態をあらわす指標は栄養塩濃度や有機汚濁（COD）など水質に特化した指標が主であり、生態系の健全性や生産者構造を示す指標はなかった。

本研究では生態系の健全性を評価できる指標として、食物連鎖に伴う炭素転送効率に注目した。湖沼生態系において、生産者から消費者への食物連鎖に伴う炭素転送効率が低下すると、漁獲量や消費者の種多様性の低下といった生態系の不健全化が生じる。そのため、炭素転送効率を調べることは湖沼生態系の健全性を評価する上で有用であるが、消費者の現存量や成長量を明らかにすることは困難な場合が多く、炭素転送効率を直接的に評価することは難しい。そこで本研究では、餌に含まれる高度不飽和脂肪酸が多いと効率的に炭素が消費者に転送されるという室内実験の観察結果（Müller-Navarra et al 2000）を踏まえて、生産者のような食物網の起点となる餌の脂肪酸組成が炭素転送効率、すなわち生態系健全性の代替指標になりうると考えた。

ただし、生産者の脂肪酸組成は時空間的に大きく変動することが知られている。一方で消費者の脂肪酸組成はある一定期間に同化した餌の脂肪酸組成を反映しているため、高次捕食者の脂肪酸組成を指標とすることで、対象とする生態系の時間・空間的に均一化された餌源の脂肪酸組成を評価できる可能性がある。加えて、さまざまな生産者が特有の脂肪酸を有していることから、食物連鎖を介してワカサギに伝わる脂肪酸組成を解析することで、湖沼の生態系の構造を類型化することができるものと期待される。そこで、本研究では我が国の富栄養湖に普遍的に出現するワカサギに注目し、ワカサギの脂肪酸組成を活用した新しい生物指標を開発し、湖沼生態系の健全性や構造を評価することを目的とする。

2. 研究開発目的

湖沼生態系の健全性を評価することが可能な指標を開発し、湖沼生態系の健全性を保全、あるいは必要に応じて修復していくための新しい湖沼管理の在り方を提言することを目的とする。

3. 研究目標

全体目標	湖沼では栄養塩類や有機物量などを指標とした水質管理が進められてきた。その一方で、藍藻や水草の異常発生、それに伴う食物連鎖における炭素転送効率の低下や、漁獲や生物多様性の減少といった生態系に関する様々な問題も顕在化しており、湖沼の状態を生態系の健全性や構造といった観点からも評価できる指標を開発し、新たな湖沼管理の在り方を考えていく必要がある。 本研究では、湖沼の様々な生産者や細菌ごとに特有な脂肪酸が存在し、それらの脂肪酸は食物連鎖を介して高次の動物に移行すること、必須脂肪酸であるエイコサペンタエン酸（20：5ω3）を多く含む餌は食物連鎖において高い炭素転送効率を示すことに着目し、動物の脂肪酸組成を調べることで湖沼生態系の構造や健全性を評価できる指標が開発可能であると考えた。本研究では日本の湖沼に広く生息するワカサギに注目し、ワカサギの脂肪酸組成から湖沼生態系の健全性や構造を評価することができる指標の開発することを目的として下記3つの研究目標を設定した。。 1) ワカサギの脂肪酸組成が食物網の起点となる湖沼懸濁物質を反映してい
------	--

	るか明らかにする。そのために、月1回の定期調査（6月～11月）を行い、秋田県八郎湖を対象としてワカサギを中心とした食物網を明らかにするとともに、ワカサギと懸濁物質の脂肪酸組成との関係を解析し、ワカサギの脂肪酸組成を指標として湖沼懸濁物質の脂肪酸組成を評価可能か明らかにする。（初年度目標） 2） ワカサギの脂肪酸組成を指標とすることの意義を明確にする。そのために、国内6か所以上の湖沼を対象として、ワカサギの脂肪酸組成と生態系の健全性を示すと考えられる指標（食物連鎖長、高次捕食者の比率、種数）との相関を調べる。（2年目、3年目目標） 3） ワカサギの脂肪酸組成をもとに生態系構造による湖沼の新たな類型化を行う。そのために、国内10か所以上の湖沼を対象としてワカサギと環境要因を調査し、統計モデルを開発する。（3年目目標）
--	--

4. 研究開発内容

本研究では、上述の通り3つの研究目標を設定し、それぞれについて下記の通り研究を行った。

研究目標1)

幅広い環境条件に適応し、国内の湖沼に広く生息するワカサギに注目し、ワカサギの脂肪酸組成が食物連鎖の起点となる湖沼懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率を反映しているか明らかにすることを目的として調査を行った。秋田県八郎湖を調査対象湖沼として、2019年に胃内容物、炭素・窒素安定同位体比、脂肪酸バイオマーカー、脂肪酸の炭素安定同位体比を用いた食物網解析を行い、ワカサギの餌源を調べた。

さらに、2019年から2021年の6月から11月に各月1回ワカサギと懸濁物質を採取し、両者の脂肪酸組成を分析し比較した。なお、解析には既往のデータ（2016年～2018年）も用いた。また、他湖沼における再現性を確認するために同様の調査を2021年に茨城県霞ヶ浦、佐賀県北山貯水池で行った。

研究目標2)

ワカサギ高度不飽和脂肪酸含有率と生態系の健全性との関係を解析し、ワカサギの高度不飽和脂肪酸含有率が湖沼生態系の健全性の指標となりうることを示すことを目指した。健全性の指標として、食物連鎖長、高次捕食者の占有率、成長速度を用いた。湖沼内比較として八郎湖で得られたデータを用いて、各年間のワカサギEPA含有率と漁獲に占める高次捕食者の割合、ワカサギの成長速度との関係を解析した。また、各月に得られたデータを用いて、食物連鎖長との関係を解析した。また、湖沼間比較として、八郎湖を含む10湖沼においてワカサギの高度不飽和脂肪酸含有率と食物連鎖長との関係を調べた。当初は「種数」も健全性の指標として導入する予定であったが、調査対象湖沼の種数に関する利用可能なデータが得られたなかったため、種数に注目した解析は見送った。

研究目標3)

八郎湖、霞ヶ浦、北山貯水池で各月に得られたワカサギのマーカー脂肪酸組成を対象として主成分分析を行い、ワカサギのマーカー脂肪酸組成から生態系構造、とくに生産者構造を判定できるか試みた。さらに、国内31湖沼からワカサギを採取し同様にマーカー脂肪酸を対象とした主成分分析を行い、ワカサギの脂肪酸パターンを類型化することを試みた。さらに、ワカサギの高度不飽和脂肪酸含有率が高まるための環境要因を探るために、水質（全リン、COD）との関係性を解析した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

研究目標 1) について

ワカサギ0歳およびワカサギ1歳の胃内容物を図1-4に示す。ワカサギ0歳では6月はカイアシ類とオナガミジンコのみが胃内から検出されたのに対して、ワカサギ1歳ではそれら動物プランクトンに加えて個体数は少ないものの魚や昆虫などが検出された。7月以降もワカサギ0歳、ワカサギ1歳ともに動物プランクトンが主要な胃内容物の構成要素であったが、1歳では魚類、アミ類、昆虫類などの寄与がワカサギ0歳よりも高い傾向にあった。

2019年8月に八郎湖で採取された懸濁物質、底泥、各水生動物の炭素・窒素安定同位体比の分析結果を図0-1に示す。動物の炭素・窒素安定同位体比はそれぞれ同化した餌よりも0~1‰、2~4‰値が大き

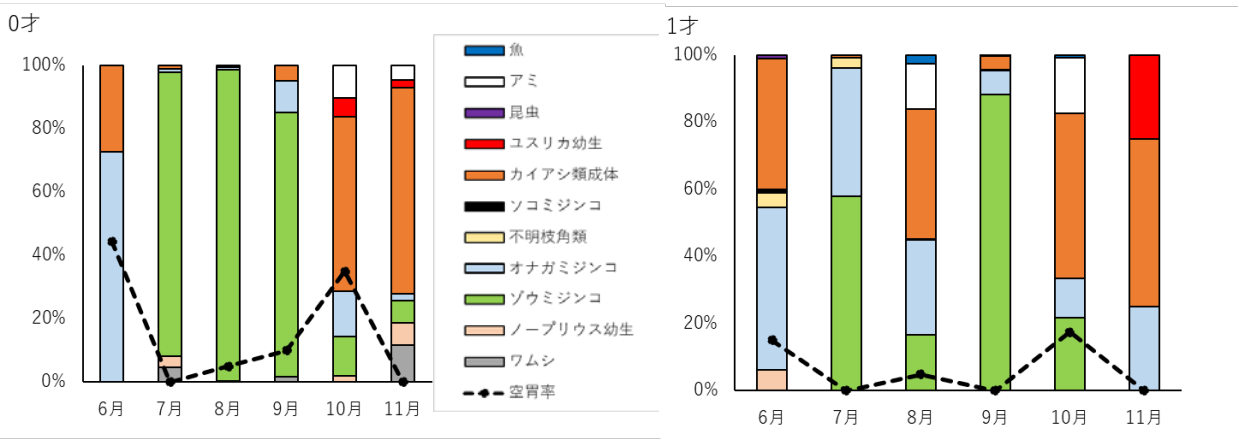


図1-4 ワカサギ0歳（左）およびワカサギ1歳（右）の胃内容物における餌種個体数割合の経時変化

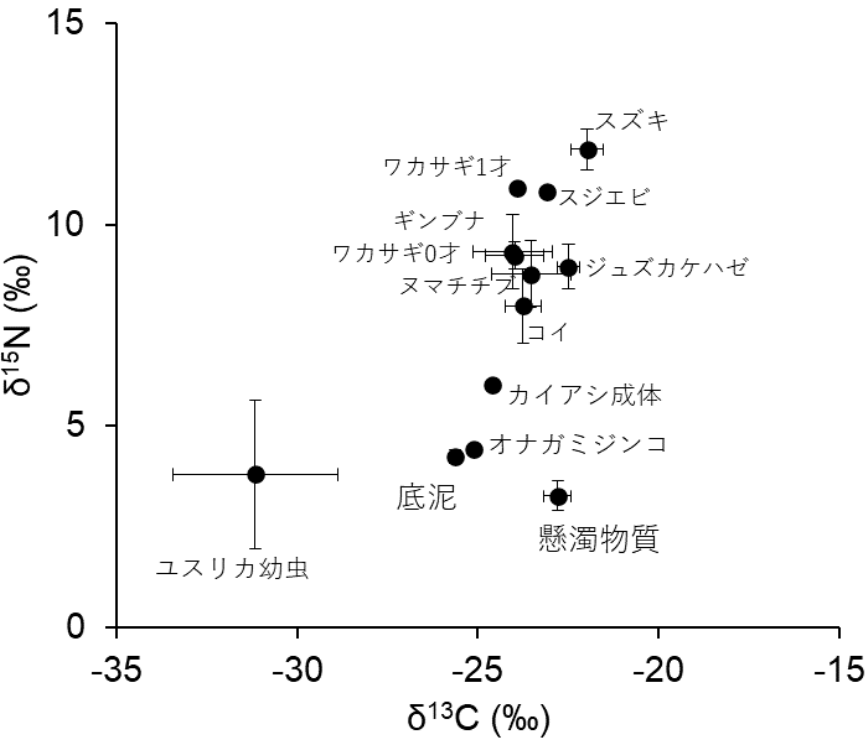


図0-1 8月における八郎湖で採集された懸濁物質、底泥、水生動物の炭素・窒素安定同位体比

くなることが広く知られている。そのため、動物の炭素安定同位体比は同化した餌の起源を知るための指標として広く利用されている。また、窒素安定同位体比は栄養段階を知るための指標として有用である。オナガミジンコやカイアシ類成体の窒素安定同位体比は懸濁物質と魚類の間に位置していることから、一次消費者として懸濁物質を食べていると考えられる。魚類に注目すると炭素安定同位体比はそれぞれ値が近く、同様の炭素源に依存しているものと推察される。ワカサギ0歳とワカサギ1歳を比較すると炭素安定同位体比はほぼ同等であったが、窒素はワカサギ1才の方が高く、ワカサギ1歳の栄養段階が高いことを示している。胃内容物、同位体比ともにワカサギ0歳とワカサギ1歳との間には相違が見られたことから、ワカサギは年齢間で摂餌生態が異なることが明らかとなった。ワカサギの脂肪酸組成を指標として用いる際に留意する必要がある。

ワカサギ1歳、ワカサギ0歳および懸濁物質中のアラキドン酸（ARA）、EPA、ドコサヘキサエン酸（DHA）含有率の2016年から2021年にかけての経月変化を図1-7に示す。各高度不飽和脂肪酸の含有率は、全脂肪酸に対する重量%で表している。

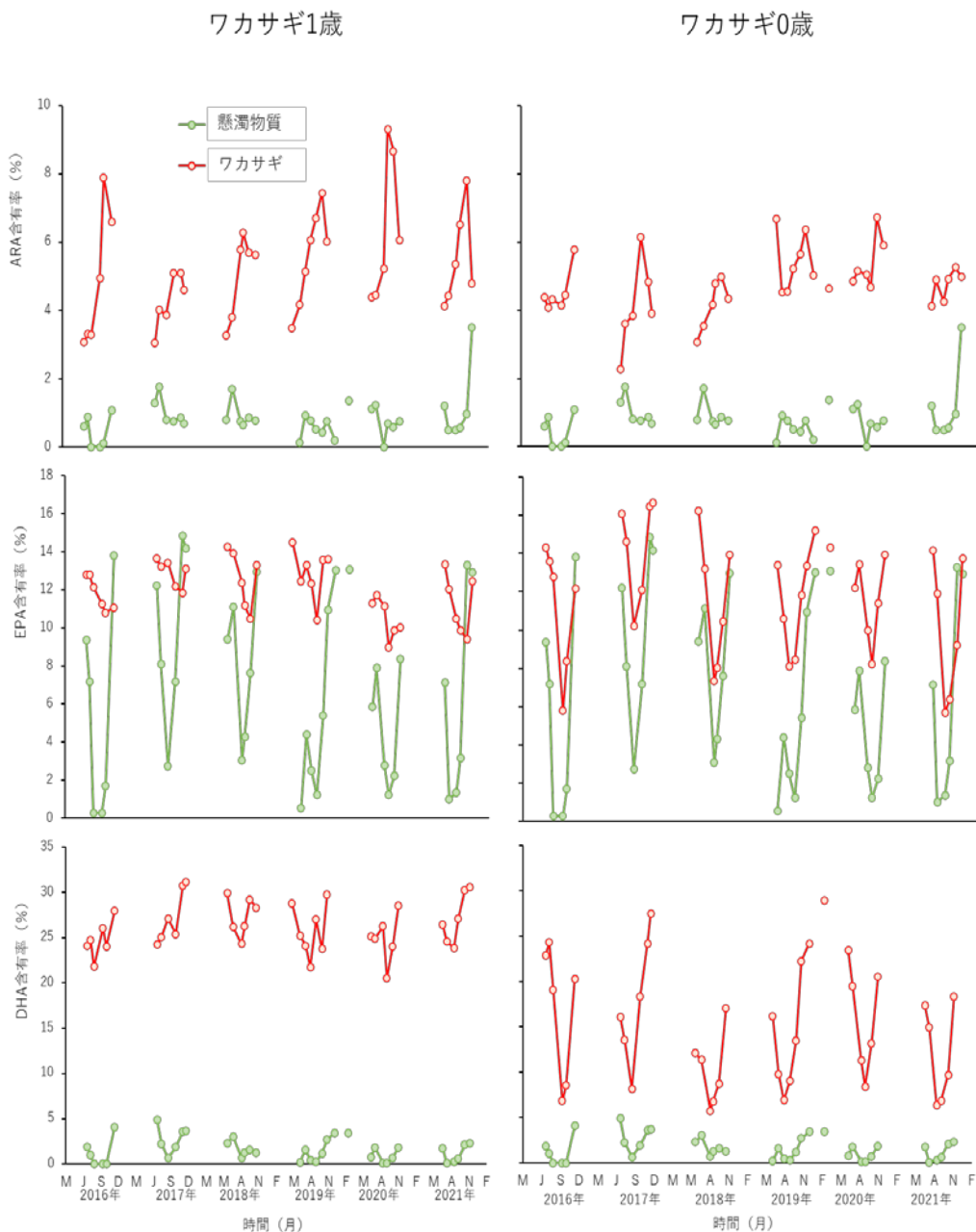


図1-7 2016年から2021年に八郎湖で採取されたワカサギ1歳、ワカサギ0歳、懸濁物質中に含まれる高度不飽和脂肪酸含有率の経時変化

懸濁物質のEPAとDHAに明瞭な季節変動パターンが見られ、夏季に減少している様子が確認される。ワカサギ1歳、ワカサギ0歳ともに同様の季節パターンが見られ、食物連鎖の起点である懸濁物質のEPAおよびDHA含有率をワカサギが反映しているものと考えられた。

ワカサギと懸濁物質中の各高度不飽和脂肪酸含有率との関係を図1-9に示す。動物の脂肪酸組成はある一定期間に取り込んだエサの脂肪酸の平均値を示していると考えられることから、図1-9では懸濁物質の脂肪酸含有率については1か月移動平均値（ワカサギを採取した同日と、その先月に採取した懸濁物質の各高度不飽和脂肪酸含有率の平均値）を用いた。EPA、DHAともにワカサギ1歳、0歳において有意な正の相関が検出され、ワカサギのEPA、DHA含有率から食物連鎖の起点となる懸濁物質のEPA、DHAの含有率を推測することが可能であることが示された。また、ワカサギ1歳よりもワカサギ0歳の決定係数が大きいことから、八郎湖でモニタリングツールとしてワカサギを活用するにはワカサギ0歳を利用することが望ましいことが示された。ワカサギ0歳はワカサギ1歳と比較して比増殖速度が大きく、餌の脂肪酸を反映しやすいためと考えられた。

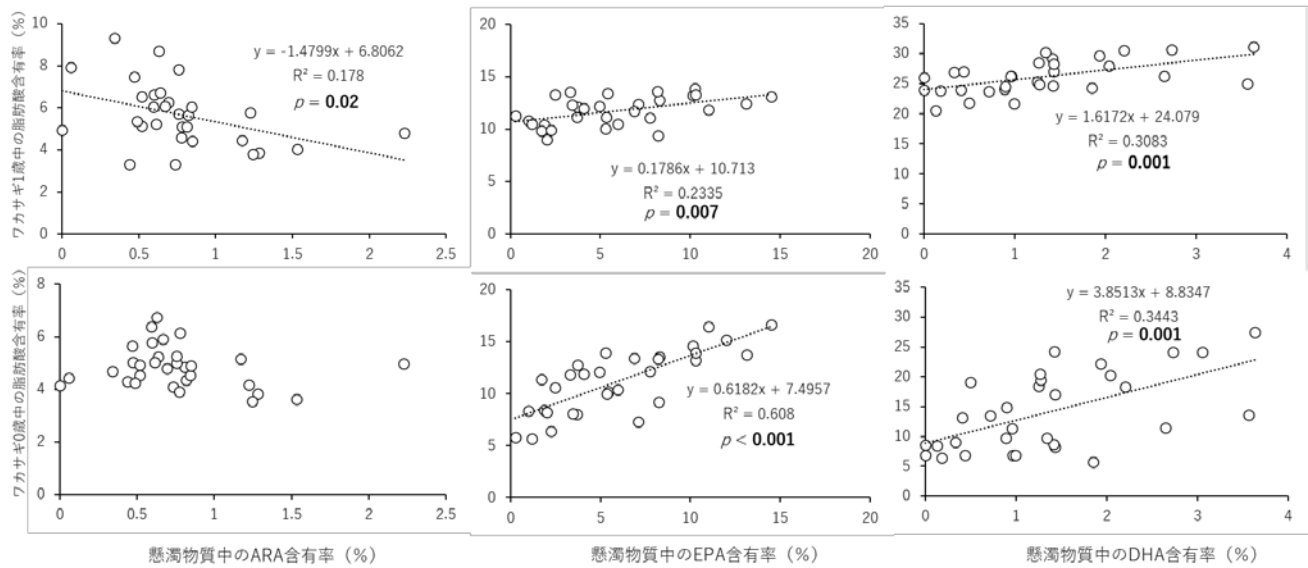


図1-9 八郎湖におけるワカサギと懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有率との関係
(懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率は1か月移動平均値)

八郎湖を対象とした検討において、ワカサギの脂肪酸組成が懸濁物質中のEPAおよびDHA含有率を反映していることが確かめられた。そこで、他の湖沼でも再現性があるか確認するために、霞ヶ浦および北山貯水池で同様の検討を試みた（図1-10）。

八郎湖の懸濁物質中のEPAやDHAで見られたような顕著な季節性は霞ヶ浦、北山貯水池ともに見られなかった。湖沼によって懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸組成の季節変動パターンが異なることが明らかとなった。霞ヶ浦と北山貯水池ともに懸濁物質中のEPA、DHA含有率は月を追うごとに増加する傾向が認められた。ワカサギのEPA、DHA含有率も上昇傾向にあった。

各湖沼における各高度不飽和脂肪酸に注目したワカサギと懸濁物質の散布図を図1-12に示した。図1-9と同様に懸濁物質の値は1か月移動平均を用いた。調査回数が6回と少なくサンプルサイズが小さい点に留意が必要であるが、八郎湖で見られた結果と同様の傾向が認められたことから、ワカサギを指標とした湖沼におけるEPAおよびDHAの供給量推定は様々な湖沼に適用が可能であると考えられた。

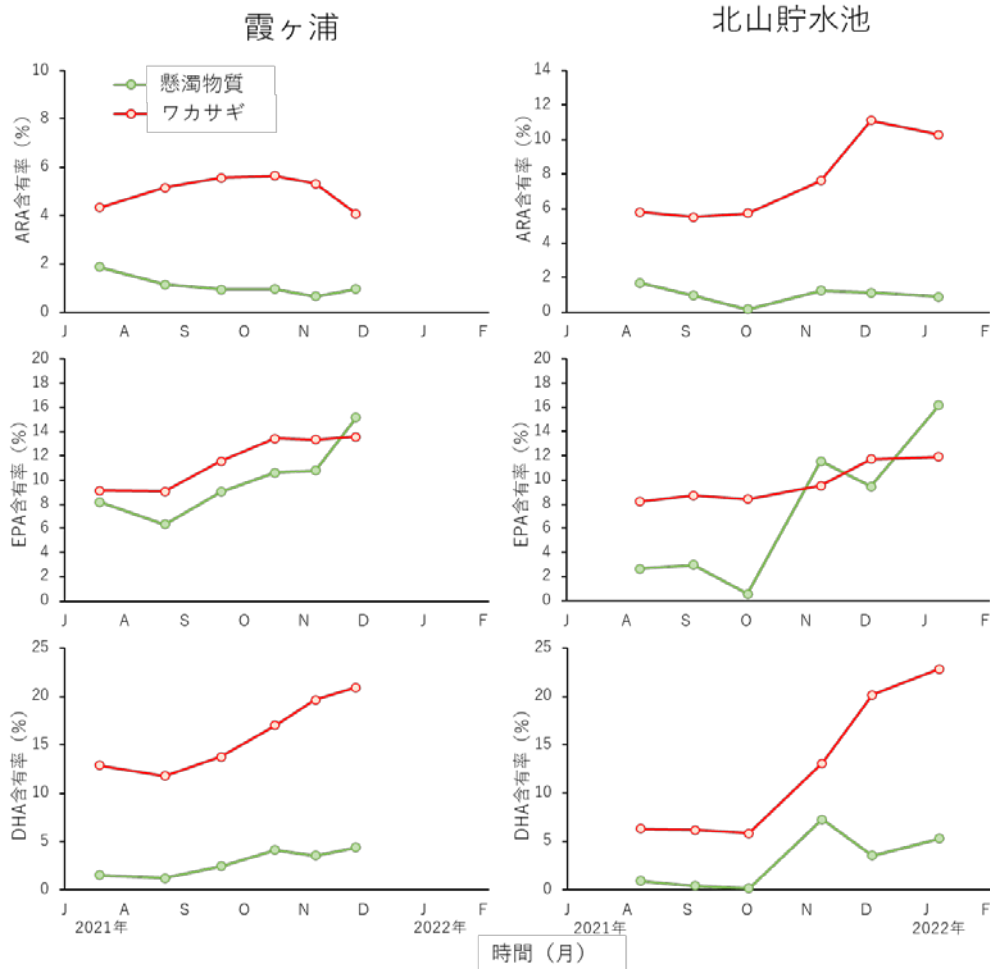


図1-10 霞ヶ浦および北山貯水池におけるワカサギと懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有率の経時変化

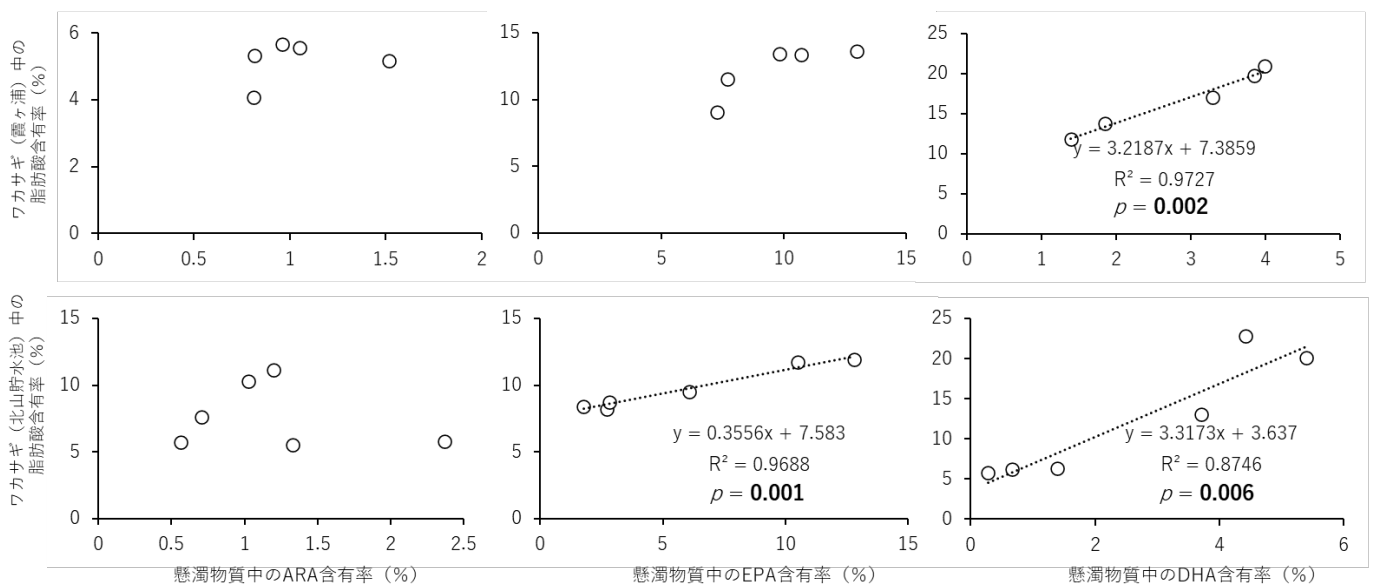


図1-12 霞ヶ浦と北山貯水池におけるワカサギと懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有率との関係 (懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率は1か月移動平均値)

研究目標 2) について

ワカサギEPA含有率と食物連鎖長について検討した結果を図1-13に示す。八郎湖ではワカサギのEPA含有率が高いと、食物連鎖長が有意に大きくなることが確認できた。対して、異なる10湖沼を対象に行った検討では有意な関係性は見られなかった。これら10湖沼の調査では各湖沼1回の調査で得られた懸濁物質の窒素安定同位体比および炭素含有量を計算に用いている。動物の窒素安定同位体比はある一定期間に食べた餌の窒素安定同位体比を反映していることから、一回の調査によって得られた値のみを解析に用いたことで、時間変動による影響を受けたために有意な関係を検出できなかったと考えられた。また、食物連鎖長は湖沼サイズにも影響を受けることが指摘されており、異なる湖沼間で食物連鎖長を比較する際には、様々な環境要因を考慮する必要がある。そのため、生産者のEPA含有率と食物連鎖長との関係については、室内実験等も含めたさらなる検証を行うことが必要である。

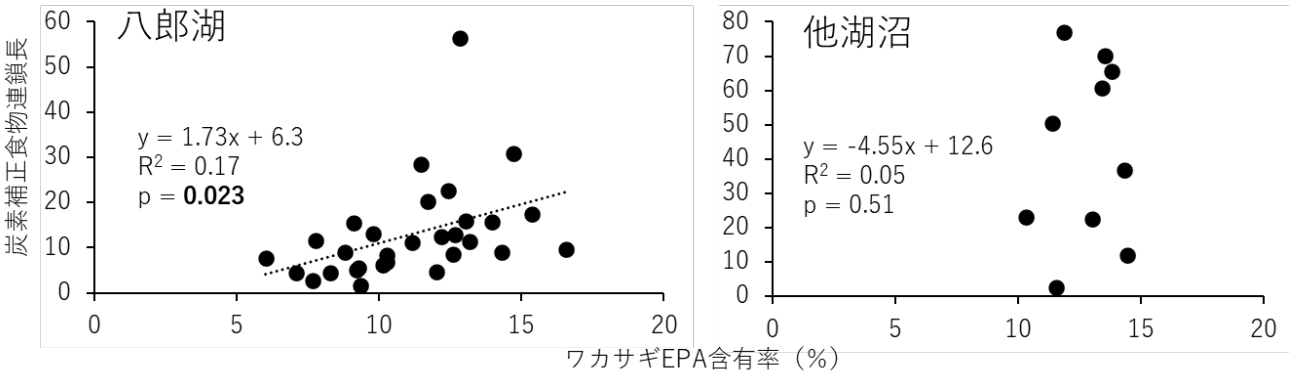


図1-13 八郎湖および他湖沼におけるワカサギEPA含有率と炭素補正食物連鎖長との関係

次に、八郎湖においてワカサギのEPA含有率とワカサギの成長速度（湿重量増加速度）との関係を解析した結果を図1-14に示す。懸濁物質中のEPA含有率が低下する8月において、ワカサギの成長速度とEPA含有率との間に有意な正の相関が検出された。また、ワカサギのEPA含有率が高い年に、八郎湖の全漁獲に占める高次捕食者（スズキ、オオクチバス、ライギョ、ナマズ）の割合が高まることが示された（図1-15）。これらの解析結果は、ワカサギのEPA含有率が高いと、湖内の炭素転送効率が高まり、物質循環が円滑化した可能性を示している。ただし、サンプルサイズがいずれも6点（2016年から2021年までの6年間）と小さいこと、また統計的な解析結果であり、因果関係に関する検証に課題が残されていることから、今後もさらに検討を継続し、EPAなどの高度不飽和脂肪酸含有率の高い餌源が供給されることでもたらされる湖沼生態系に対する健全化作用について定性的・定量的に評価していくことが望まれる。

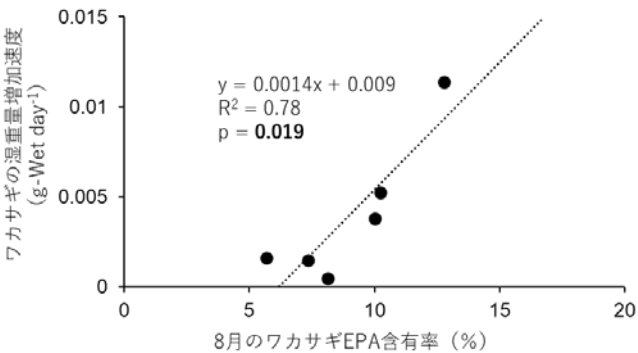


図1-14 ワカサギEPA含有率とワカサギ湿重量増加速度との関係

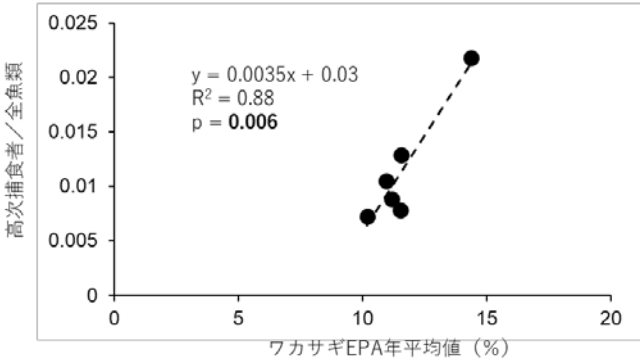


図1-15 ワカサギEPA含有率の年平均值と全漁獲に占める高次捕食者の割合との関係

研究目標3) について

全国31の湖沼で採取したワカサギのEPAおよびDHAの含有率はそれぞれ、9～22%（平均値±標準偏差：13.6±2.4%）、11～33%（平均値±標準偏差：20.2±5.0%）の範囲であり、湖沼によって高度不飽和脂肪酸含有率が異なった。ワカサギのEPA含有率と採取時の表層水温との間には有意な負の線形関係が見られた（ $R^2 = 0.45$, $p < 0.001$ ）ため、得られた回帰式によって、各湖沼の表層水温から予測されるワカサギEPA含有率に対する実測値との差分をEPA残渣として算出し、水質（TPおよびCOD）との関係を調べた。ワカサギのEPA残渣はTP、CODがそれぞれ0.02 mg L⁻¹、4.1 mg L⁻¹でピークが見られた（図1-17）。

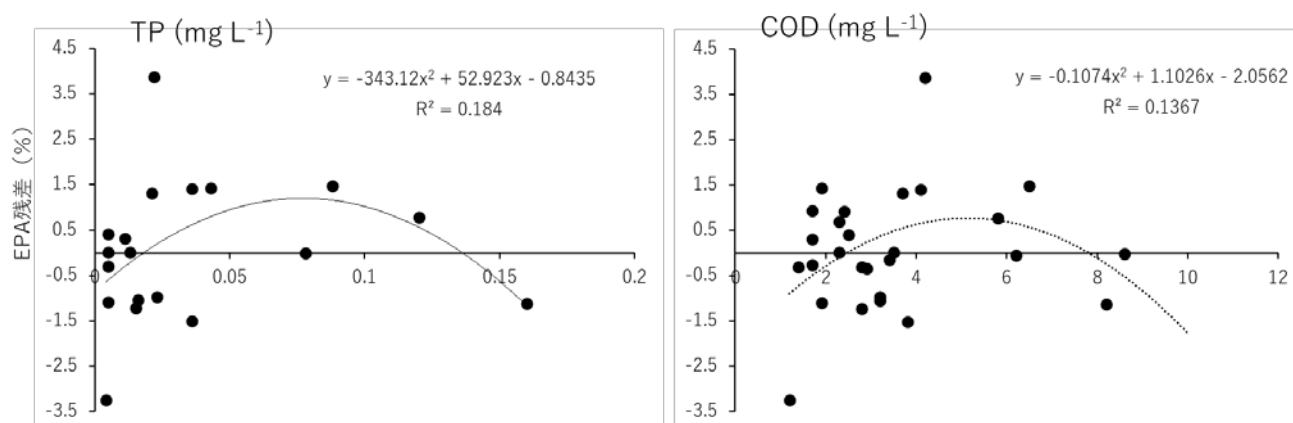


図1-17 水質（左：全リン、右：COD）とワカサギEPA残渣との関係

八郎湖、霞ヶ浦、北山貯水池を対象に、ワカサギに含まれるマーカー脂肪酸含有率による主成分分析を行った（図1-18）。ここでは、EPAは珪藻、DHAは渦鞭毛藻・珪藻、18:2ω6および18:3ω3は緑藻や藍藻、BacFAは細菌のマーカー脂肪酸として利用した。八郎湖では、6月はEPAやDHAのベクトルが示す図中右側にプロットされており、珪藻が多かったことが示唆されている。9月までプロットが図中の左方面に移動しており、夏季において緑藻・藍藻が優占し、その後10月、11月と再び右方面にプロットが移動していることから、珪藻が優占する生産者構造へとシフトしている様子が伺える。実際の懸濁物質の脂肪酸組成や検鏡結果からも整合性が確認されている。このように、ワカサギのマーカー脂肪酸を対象とした主成分分析を行うことにより採取日から1か月程度前までの生産者構造を推測することが可能である。北山貯水池では八郎湖と比較して細菌に由来する食物連鎖が調査期間を通して低いことが読み取れる。また、霞ヶ浦では調査期間中、他の湖沼と比較して珪藻が優占していたことや、プロットが同所的に集中していることから生産者構造の変動が他の湖と比較して小さかったことが分かる。

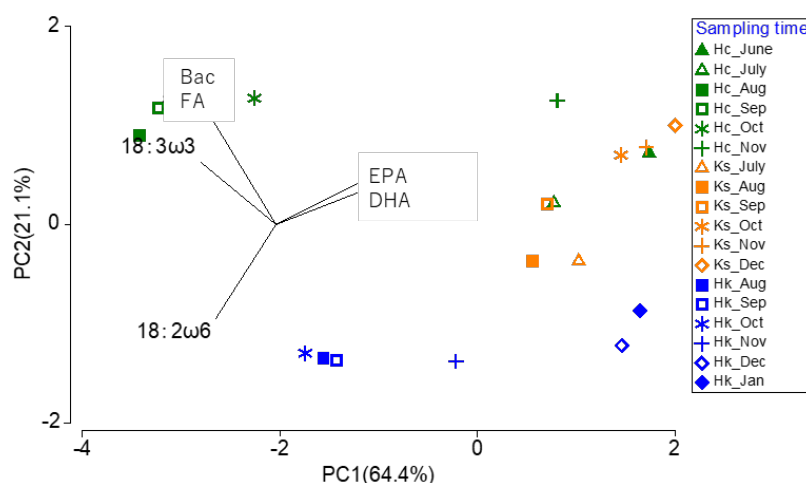


図1-18 八郎湖、霞ヶ浦、北山貯水池で採取されたワカサギ中のマーカー脂肪酸を対象とした主成分分析

5－2．環境政策等への貢献

現在湖沼では水質指標のみでは対応困難なさまざまな生態系の劣化に関する問題を抱えており、水質指標のみならず、生態系指標を導入し新たな観点から湖沼管理を進めていくことが求められている。その一方で生態系の健全性や構造は非常に多面的な側面を持つことから、一律の指標によって生態系の健全性や構造を評価することは困難であり、そのことが生態系指標導入の弊害になっていると考えられる。そのような状況の中で、日本全国の湖沼に広く生息するワカサギの脂肪酸組成に注目することで湖沼生態系の健全性や構造を評価可能な指標が開発されれば、環境政策への大きな貢献となる。ワカサギの脂肪酸組成から湖沼の生態系構造や健全性の評価につながり、得られた脂肪酸組成を考慮した具体的な湖沼管理の指針及び湖沼水質保全計画において講じる施策の方向性を提供できる可能性も見込まれ、政策ニーズへの適合性は高い。

<行政等が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

本研究ではワカサギの脂肪酸組成が湖沼の食物網の起点となる懸濁物質の脂肪酸組成を反映していることが明らかとなった。EPAやDHAなどの高度不飽和脂肪酸は動物の生息に不可欠な栄養素であることから、ワカサギ脂肪酸を指標として、湖沼生態系におけるEPAやDHA供給の実態をモニタリングするといった新しい湖沼管理の方向性が示された。例えば、本研究で対象とした八郎湖と霞ヶ浦は両者とも浅い富栄養化湖沼であるが、ワカサギEPA含有率を比較すると霞ヶ浦の方が高く、霞ヶ浦ではEPAが十分に供給されていると考えられる。しかし、八郎湖ではおそらく夏季のアオコ発生に起因してEPA供給量が少ない。そのため、八郎湖ではアオコ対策などを含む、EPA供給量増大に向けた湖沼管理が必要になると考えられる。一方で、霞ヶ浦では他の湖沼環境問題（外来種の侵入など）に焦点を絞った環境政策が効果的であることが、ワカサギ指標から考えられる。

また、高度不飽和脂肪酸のみならずマーカー脂肪酸としての特性に注目することで、湖沼生態系の生産者構造もワカサギの脂肪酸組成から推測できることが明らかとなった。湖沼のモニタリングツールとして継続的にデータをとることで、これまでの水質指標では評価できなかった湖沼の生態系構造が浮かび上がってくると期待される。

なお、得られた成果については、秋田県八郎湖環境対策室や秋田県水産振興センターへの情報提供を行った。

5－3．研究目標の達成状況

研究目標1)

八郎湖における詳細な食物網調査によって、ワカサギの脂肪酸組成が食物網の起点となる湖沼懸濁物質の脂肪酸組成を反映していることを明らかにすることができた（図1-9）。とくに、高度不飽和脂肪酸のEPAとDHAを反映していること、八郎湖においてはワカサギ1歳よりもワカサギ0歳の方が懸濁物質の脂肪酸組成を強く反映しており、指標として使う際にはワカサギ0歳がより適性が高いことも合わせて明らかとなった。これは、成長速度に依存するためと考えられたことから、他湖沼に適応する際には年齢によって個体を選出するのではなく、成長期にある個体を利用することが望ましいと考えられた。

当初は、八郎湖においてのみ検討する予定であったが、2021年度には、霞ヶ浦、北山貯水池も調査対象地として、ワカサギおよび懸濁物質を採取し、検討を行った。その結果、八郎湖で観測さ

れた結果と再現性ある結果が得られ（図1-12）、様々な湖沼においてワカサギが懸濁物質の脂肪酸組成を反映していることが明らかとなった。以上のことから研究目標1）は「目標を上回る成果をあげた」と判断している。

研究目標2)

ワカサギの脂肪酸組成を指標とすることの意義を明確にするために、ワカサギのEPA含有率が高い湖沼は健全性が高いことを示すことを目標とした。国内10湖沼を対象として、各湖沼のワカサギEPA含有率と健全性と関連があると考えられる食物連鎖長との関係を比較した。当初計画の6湖沼以上の条件については達成できたが、比較項目として想定していた「高次捕食者比率」および「種数」については対象湖沼のデータが得られず、現地調査で実測可能な食物連鎖長のみを対象として検討した。

その結果、EPA含有率と食物連鎖長との間に有意な正の相関は見られなかった（図1-13）。ただし、懸濁物質の窒素安定同位体比から算出される食物連鎖長は、懸濁物質の窒素安定同位体比の時間変動の影響により誤差が大きくなることが考えられたため、詳細な時系列データが揃っている八郎湖を対象として、ワカサギEPA含有率と食物連鎖長との関係を解析し、有意な正の相関を得ることができた（図1-13）。さらに、八郎湖では、EPA含有率が高いとワカサギの成長速度が大きくなる点や（図1-14）、EPA含有率の平均値が高い年に、逆に占める高次捕食者の割合が増加し、EPA含有率が高いと炭素転送効率が高まっていることを示す観測結果を得ることができた（図1-15）。食物連鎖長、ワカサギ成長速度、高次捕食者の割合とワカサギEPA含有率との間の因果関係については今後さらなる検証が必要であるものの、本研究仮説をサポートする結果が得られたことから、研究目標2）については「目標にはやや及ばないが、一定の成果をあげた」と判断している。

研究目標3)

ワカサギのマーカー脂肪酸を対象とした主成分分析を行うことで、湖沼の生産者構造を判定できることが八郎湖、霞ヶ浦、北山貯水池で得られた毎月の調査結果から示された（図1-18）。本解析によって、湖沼内で生産者構造が季節間で大きく変動することや、その変動幅が湖沼によって異なることを視覚的に示すことができた。また、国内31湖沼のワカサギを対象とした同様の解析によって、各湖沼のワカサギ脂肪酸組成の類似度から、各湖沼の生産者構造ごとにグループ化が可能であった（図1-19）。ただし、各グループと環境要因との関係性などについては今後もさらなる検討が必要である。また、ワカサギの脂肪酸組成は懸濁物質の脂肪酸組成の季節変化を反映して変動するため、継続的に調査を行い、各湖沼のワカサギの変動範囲なども含めて評価していくことが、本指標を活用する上で有効であると考えられた。

また、ワカサギのEPA含有率は中程度の栄養塩やCODの湖沼で高まることが明らかとなった（図1-17）。水質以外の環境要因との関係性を引き続き解析し、EPA生産の高まる環境条件を明らかにしていくことで、EPA生産増産に向けた新しい湖沼管理の方針を低減できると期待される。

以上のことから、今後の課題は残されているものの、ワカサギの脂肪酸組成で湖沼生態系の生産者構造を判断できる手法を提案できたこと、ワカサギEPA含有率と水質の関係性があきらかになったことより、研究目標3）は「目標どおりの成果をあげた」と判断している。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

1件

<主な査読付き論文>

- 1) 新田真弓、藤林恵、青森壮汰、岡野邦宏、宮田直幸：土木学会論文集G（環境）、76, 7, III_1-III_9（2020），八郎湖におけるワカサギのゾウミジンコに対する捕食の有無と選択性の評価

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	0件
口頭発表（学会等）	9件
「国民との科学・技術対話」の実施	2件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究に関連する受賞	0件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

藤林 恵

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻単位取得退学、博士（工学）、
現在、九州大学大学院工学研究院環境社会部門助教

II. 成果の詳細

II-1 ワカサギを指標とした富栄養化湖沼の生態系の健全性評価手法の提案に関する研究

九州大学大工院工学研究院環境社会部門

藤林 恵

[要旨]

高度不飽和脂肪酸であるエイコサペンタエン酸（EPA）やドコサヘキサエン酸は（DHA）は動物にとって不可欠な栄養素であり、湖沼では主に植物プランクトンが合成し、食物連鎖を通じて様々な動物に取り込まれる。様々な動物において、餌から供給される高度不飽和脂肪酸が不足することで成長、再生産、生残率が低下することが報告されている。また、底質中の高度不飽和脂肪酸の含有率が高い地点で堆積物食者の種数が増加することも内湾生態系において観察されている。そこで、本研究では高度不飽和脂肪酸供給量に注目した湖沼の生態系管理手法を開発することを目的として、ワカサギの脂肪酸組成を指標として湖沼の高度不飽和脂肪酸供給量の実態をモニタリングすることが可能か、秋田県の八郎湖を調査湖沼として2019年から2021年の6月から11月に各月1回、ワカサギと懸濁物質（植物プランクトンが主な構成要素）を採取し、脂肪酸組成を比較した。また、2021年には霞ヶ浦と北山貯水池においても同様の調査を行った。さらに、高度不飽和脂肪酸供給の豊かな湖沼が健全な生態系を形成しているか検討するために、ワカサギ中の高度不飽和脂肪酸含有率と懸濁物質からワカサギまでの食物連鎖長との関係を解析した。最後に、ワカサギの脂肪酸組成を指標とした湖沼の類型化が可能か検討するために国内31湖沼で採取したワカサギの脂肪酸組成の比較や、水質との関係性を解析した。

懸濁物質とワカサギ中の高度不飽和脂肪酸含有率との間には有意な正の相関が認められた。とくに、懸濁物質の高度不飽和脂肪酸の1ヶ月移動平均値をとることで相関係数が大きくなり、ワカサギの脂肪酸組成に注目することで、採取日から1か月程度前までの間に湖沼で供給された高度不飽和脂肪酸の実態を推測できることが可能であることが示された。霞ヶ浦や北山貯水池でも同様の傾向が確認され、ワカサギを指標とすることで湖沼の高度不飽和脂肪酸供給量の大小や季節的な変化をモニタリングできることが示された。さらに、八郎湖においてはワカサギのEPA含有率が高い年ほど漁獲に占める高次捕食者の割合が高まること、さらには食物連鎖長が長くなることが確認された。炭素転送効率が高まることを示唆しており、高度不飽和脂肪酸に注目することの有用性が示唆された。ワカサギの脂肪酸組成は水温に影響を受けることが明らかになったことから、各湖沼間のワカサギの高度不飽和脂肪酸含有率を比較する際には、水温による補正が有効であることが分かった。水温の影響を補正したワカサギのEPA含有率はCODやTPが中程度の湖沼でピークを示していたが、ばらつきも大きく水質以外の環境要因もワカサギのEPA含有率、すなわち湖沼のEPA供給量に影響を及ぼしていると考えられた。また、トロフィックマーカーとして利用されている脂肪酸に注目してワカサギの脂肪酸組成を対象にして主成分分析を行うことで、湖沼の生産者構造が判定できることが示された。

本研究によって、ワカサギの脂肪酸組成が湖沼生態系における高度不飽和脂肪酸の供給量のモニタリングツールとして利用可能なこと、さらには生産者構造についても推測可能であることが示された。その一方で、高度不飽和脂肪酸供給の高い湖沼において健全な湖沼生態系が形成されているかについては、仮説を支持する観測結果は得られているものの、実証するには至っていない。また、湖沼の高度不飽和脂肪酸供給を高めるための具体策についても検討が必要である。今後、調査対象湖沼を拡大しデータを蓄積することで、高度不飽和脂肪酸供給が生態系管理の有効な指標になることを示すことで、ワカサギを用いた新しい湖沼管理手法の考案へとつながっていくと期待される。

1. 研究開発目的

湖沼生態系の健全性を評価することが可能な指標を開発し、湖沼生態系の健全性を保全、あるいは必要に応じて修復していくための新しい湖沼管理の在り方を提言することを目的とする。

2. 研究目標

湖沼では栄養塩類や有機物量などを指標とした水質管理が進められてきた。その一方で、藍藻や水草の異常発生、それに伴う食物連鎖における炭素転送効率の低下や、漁獲や生物多様性の減少といった生態系に関する様々な問題も顕在化しており、湖沼の状態を生態系の健全性や構造といった観点からも評価できる指標を開発し、新たな湖沼管理の在り方を考えていく必要がある。

本研究では、湖沼の様々な生産者や細菌ごとに特有な脂肪酸が存在し、それらの脂肪酸は食物連鎖を介して高次の動物に移行すること、必須脂肪酸であるエイコサペンタエン酸（20：5 ω 3）を多く含む餌は食物連鎖において高い炭素転送効率を示すことに着目し、動物の脂肪酸組成を調べることで湖沼生態系の構造や健全性を評価できる指標が開発可能であると考えた。本研究では日本の湖沼に広く生息するワカサギに注目し、ワカサギの脂肪酸組成から湖沼生態系の健全性や構造を評価することができる指標の開発することを目的として下記3つの研究目標を設定した。

- 1) ワカサギの脂肪酸組成が食物網の起点となる湖沼懸濁物質を反映しているか明らかにする。そのために、月1回の定期調査（6月～11月）を敢行し、秋田県八郎湖を対象としてワカサギを中心とした食物網を明らかにするとともに、ワカサギと懸濁物質の脂肪酸組成との関係を解析し、ワカサギの脂肪酸組成を指標として湖沼懸濁物質の脂肪酸組成を評価可能か明らかにする。（初年度目標）
- 2) ワカサギの脂肪酸組成を指標とすることの意義を明確にする。そのために、国内6か所以上の湖沼を対象として、ワカサギの脂肪酸組成と生態系の健全性を示すと考えられる指標（食物連鎖長、高次捕食者の比率、種数）との相関を調べる。（2年目、3年目目標）
- 3) ワカサギの脂肪酸組成をもとに生態系構造による湖沼の新たな類型化を行う。そのために、国内10か所以上の湖沼を対象としてワカサギと環境要因を調査し、統計モデルを開発する。（3年目目標）

3. 研究開発内容

本研究では、湖沼の健全性をあらわす指標を開発することを目的として湖沼の高度不飽和脂肪酸供給に着目した。高度不飽和脂肪酸は植物プランクトンなどの藻類によって合成され、食物連鎖を介して水生動物に供給される。そのため、湖沼の懸濁物質を採取し、脂肪酸組成を分析することで、湖沼における高度不飽和脂肪酸供給量を把握できると考えられる。しかし、懸濁物質には空間的な不均一性や、大きな時間変動が想定される。そこで、本研究では食物連鎖に伴い、高度不飽和脂肪酸が高次の動物に移行することを踏まえて、国内の様々な湖沼に広く生息する動物プランクトン食魚であるワカサギの脂肪酸組成を指標とすることとし、上述の通り3つの研究目標を設定した。本研究では、各研究目標に対して下記の研究を行った。

3. 1. 研究目標1) に対する研究内容

3. 1. 1. 多波長励起蛍光光度計を用いた簡易的な高度不飽和脂肪酸のモニタリング

多波長励起蛍光光度計を用いた高度不飽和脂肪酸の簡易的な測定方法を開発し、湖沼懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有量の時間的・空間的ばらつきの評価を行った。この多波長励起蛍光光度計による高度不飽和脂肪酸濃度の簡易測定手法の開発は、当初の研究計画には含まれていなかったが、懸濁物質中の脂肪酸組成の動態を評価する必要性から、2021年に佐賀県北山貯水池をフィールドとして実施した。湖水試料に対する多波長励起蛍光光度計で得られる9つの励起光に対する放射光強度を説明変数、実際の脂肪酸分析によって得られた高度不飽和脂肪酸含有量を従属変数として重回帰分析を行い、得られた放射光の強度から高度不飽和脂肪酸の含有量を推測できる回帰式を作成した。また、各調査日の植

物プランクトン相を調べ、懸濁物質の脂肪酸組成と植物プランクトン相との関係を解析した。

3. 1. 2. 八郎湖におけるワカサギの餌源の解析

指標として注目したワカサギの食性を明らかにするために、浅い富栄養湖沼である秋田県八郎湖を対象として2019年に現地調査を行った。6月から11月まで毎月1回、湖心部付近でワカサギを採取し、胃内容物、炭素・窒素安定同位体比、脂肪酸バイオマーカー、脂肪酸の炭素安定同位体比を用いた食物網解析を行った。また、ワカサギ以外の魚類についても脂肪酸組成及び炭素・窒素安定同位体比を測定することで八郎湖食物網の全体像を明らかにし、ワカサギの食物網における位置を示した。さらに、栄養塩濃度および懸濁物質中の炭素・窒素含有量の測定も合わせて行った。

3. 1. 3. 八郎湖におけるワカサギと懸濁物質の脂肪酸組成の関係

2019年から2021年の6月～11月に毎月1回、八郎湖湖心部付近でワカサギと懸濁物質を採取し脂肪酸組成を分析した。高度不飽和脂肪酸である、アラキドン酸（ARA）、EPA、ドコサヘキサエン酸（DHA）に注目し、ワカサギと懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有率の相関を調べた。なお、八郎湖では代表者が2016年から2018年の6月～11月にもワカサギと懸濁物質の脂肪酸組成を測定しており、それらのデータも解析に用いた。

3. 1. 4. 北山貯水池および霞ヶ浦におけるワカサギと懸濁物質の脂肪酸組成の関係

八郎湖で示された結果が他湖沼でも観測されるか検討するために、霞ヶ浦において2021年7月から12月まで、北山貯水池で2021年8月から2022年1月まで毎月1回、ワカサギと懸濁物質を採取し脂肪酸組成を測定し、ワカサギと懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率との関係を評価した。

3. 2. 研究目標2)に対する研究内容

ワカサギの高度不飽和脂肪酸含有率が高い湖沼において生態系の健全性が高いか検討するために、八郎湖で得られたデータを用いて解析を行った。八郎湖で採取したワカサギの高度不飽和脂肪酸含有率は年によって若干ではあるものの変動が見られたことから、ワカサギの高度不飽和脂肪酸含有率の年平均値と該当する年の漁獲に占める高次捕食者の割合との関係を調べた。ここで、高次捕食者の割合に注目したのは、健全な生態系では食物連鎖に伴う炭素転送効率が高く、高次捕食者の相対量が増加すると期待されるためである。また、同様の観点から、懸濁物質とワカサギ間の食物連鎖長についても窒素安定同位体比を用いることで検討した。さらに、2021年に国内10湖沼から懸濁物質およびワカサギを採取し、各湖沼で採取されたワカサギの高度不飽和脂肪酸含有率と懸濁物質からワカサギまでの食物連鎖長との関係を調べた。食物連鎖長は次式で算出した。

炭素補正食物連鎖長 = $(\delta^{15}\text{N}_{\text{ワカサギ}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{懸濁1カ月平均}}) / \text{Log}_{10}(\text{懸濁物質炭素含有量1カ月平均})$
生産量を考慮して懸濁物質の炭素量で補正した。また、動物の同位体比がある程度の時間に同化した餌の平均値となることを踏まえて、懸濁物質の窒素安定同位体比、炭素含有量は1か月移動平均値を用いた。

3. 3. 研究目標3)に対する研究内容

2021年10月から12月にかけて、八郎湖、霞ヶ浦、北山貯水池、そして「3.2」で対象とした湖沼を含む全国31の湖沼でワカサギを採取し、脂肪酸組成を分析した。そして、水質との関係を調べた。

4. 結果及び考察

4. 1. 研究目標1)に対する研究内容

4. 1. 1. 多波長励起蛍光高度計を用いた簡易的な高度不飽和脂肪酸のモニタリング

多波長励起蛍光光度計で得られた放射光強度と、実測した高度不飽和脂肪酸との関係について解析

したところ、EPAについては有意な回帰式を得ることができた（図1-1）。得られた回帰式は、他湖沼では有効でなかったため、一般化するためには、原因を特定するとともに、様々な湖沼からデータを採取し、検討を継続する必要があるが、本研究においては調査期間中の北山貯水池におけるEPAの空間分布はおおよそ判定可能と判断した。

多波長励起蛍光光度計によってモニタリングされた2021年6月から1月までのEPA含有量の空間分布を図1-2に示す。各月同じトランセクト上で調査を行っているが、貯水位が変動するため、月によって水深は異なっている。EPA含有率は空間的に不均一に分布しており、6月や9月はそれぞれ水深4 m、2.5 m付近に明瞭なEPAのピークが見られる。また、ほとんどの月において深層部はEPAが検出されていない。しかし、1月には底層にEPA含有率のピークが見られている。これらの不均一なEPAの分布は、実際の湖沼において懸濁物質を採取する際、サンプリング地点や水深によってEPA含有率を過小・過大評価する可能性を示している。

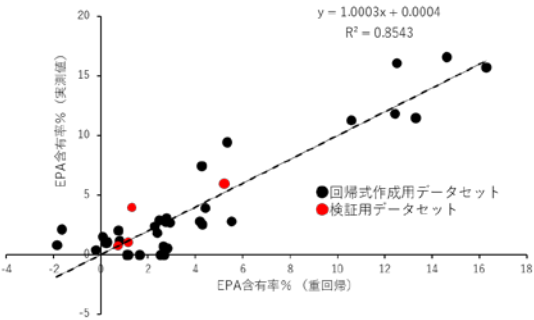


図1-1 計算値（重回帰分析）と実測値との関係

$$\begin{aligned} \text{EPA含有率 (\%)} = & 0.571 + (-5.601 \cdot \text{WL}_{375}) + \\ & (-0.295 \cdot \text{WL}_{400}) + (3.073 \cdot \text{WL}_{420}) + (5.248 \cdot \text{WL}_{435}) + \\ & (-6.257 \cdot \text{WL}_{470}) + (3.47 \cdot \text{WL}_{505}) + (8.93 \cdot \text{WL}_{525}) + \\ & (-4.27 \cdot \text{WL}_{570}) + (3.142 \cdot \text{WL}_{590}) \end{aligned}$$

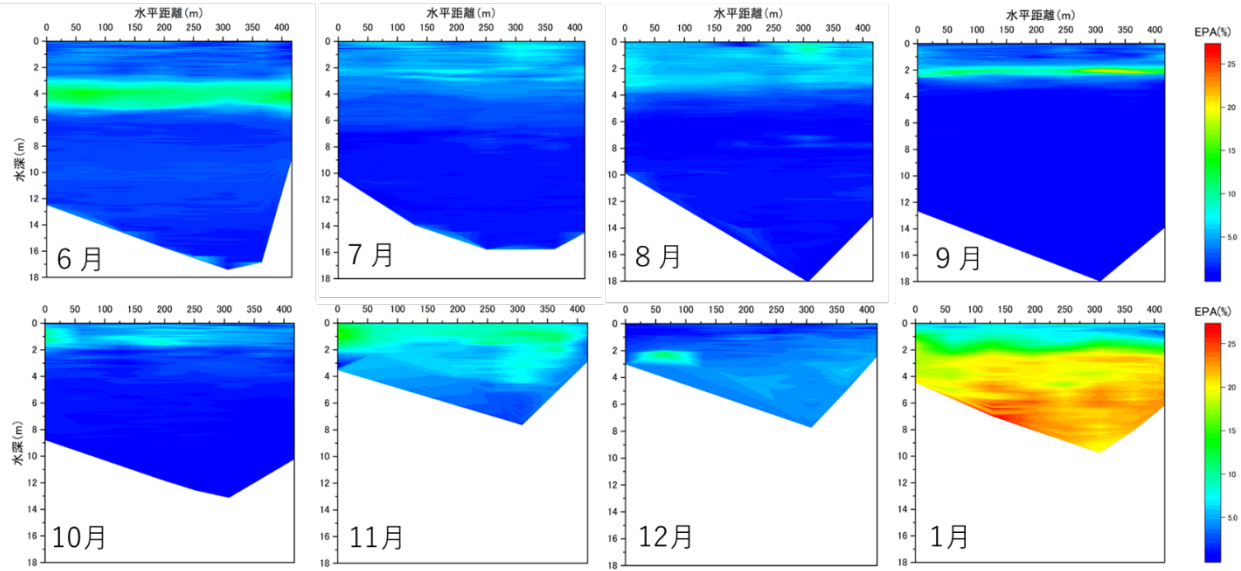


図1-2 多波長励起蛍光光度計によって算出された北山ダムのEPA含有率（%）の時空間分布

本研究では、ワカサギの脂肪酸組成が懸濁物質の脂肪酸組成を反映しているか検討するために、ワカサギと懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率との関係を散布図上にプロットし相関関係を解析する。ところが、上述の通り懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率は採水地点によって異なることが想定されるため、懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率のデータは不確実性が大きい。しかし、各月に多波長励起蛍光光度計で観測されたEPA含有率の面平均値（各月のコンター図上の100地点の平均値）と同日に表層の3地点で採水し、EPA含有率を実測した値との関係を調べると有意な正の相関が認められた（図1-3）。このことは

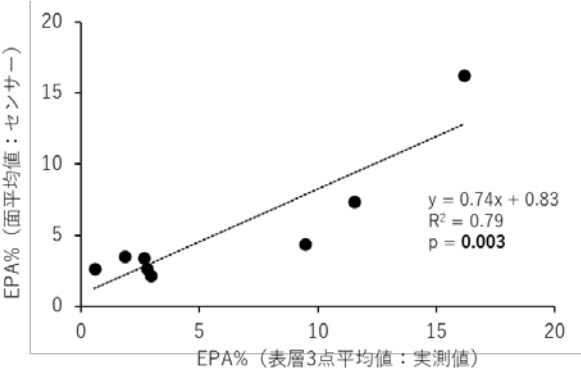


図1-3 多波長励起蛍光光度計によってもとめた全層EPA%と表層3点の懸濁物質実測値との関係

EPA含有率には空間的な変動性があるものの、月変動の方が空間変動より大きいことを示している。そこで、異なる月に同一湖沼で採取されたワカサギと懸濁物質を比較する際には、懸濁物質中のEPA含有率の空間変動は、月変動によってマスクされ、無視できると仮定し、「4.1.2」、「4.1.3」で示す散布図では、表層3地点で採取した懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率の測定値を湖沼の代表地と採用しても差し支えないと判断し、解析に用いた。

4. 1. 2 八郎湖におけるワカサギの餌源の解析

調査対象地の八郎湖ではワカサギは0歳魚と1歳魚が捕獲される。本研究では年齢ごとに分けて解析を行った。ワカサギ0歳およびワカサギ1歳の胃内容物を図1-4に示す。ワカサギ0歳、ワカサギ1歳ともに調査月によって胃内容物が異なった。ワカサギ0歳では6月はカイアシ類とオナガミジンコのみが胃内から検出された。7月から9月にかけてはゾウミジンコが胃内の9割程度を占めており、主な餌源がゾウミジンコであることが明らかとなった。10月、11月はカイアシ類成体が半数以上を占めていた。また個体数としては10%程度であるものの、動物プランクトンと比較して大型であるアミ類も胃内から検出された。また、ワムシの寄与も10%程度であるものの、他の月と比較して増加した。

ワカサギ1歳では6月はワカサギ0才と同様にオナガミジンコとカイアシ類成体が優占した。7月はゾウミジンコの寄与が60%程度にまで増加したがオナガミジンコの寄与も36%と大きかった。8月はカイアシ類成体、オナガミジンコの寄与が高く、ワカサギ0才とは異なりゾウミジンコの寄与は18%と低かった。9月はワカサギ0才と類似の傾向を示し、ゾウミジンコの寄与が高くなった。10月、11月は大型の餌であるアミ類とユスリカ幼虫の寄与が増加した。また、1歳からは0歳では見られなかった魚類や昆虫類などの餌源も検出されている。これらの餌源は、検出された個体数は少ないものの、サイズが大きく、炭素源として寄与は大きい可能性がある。

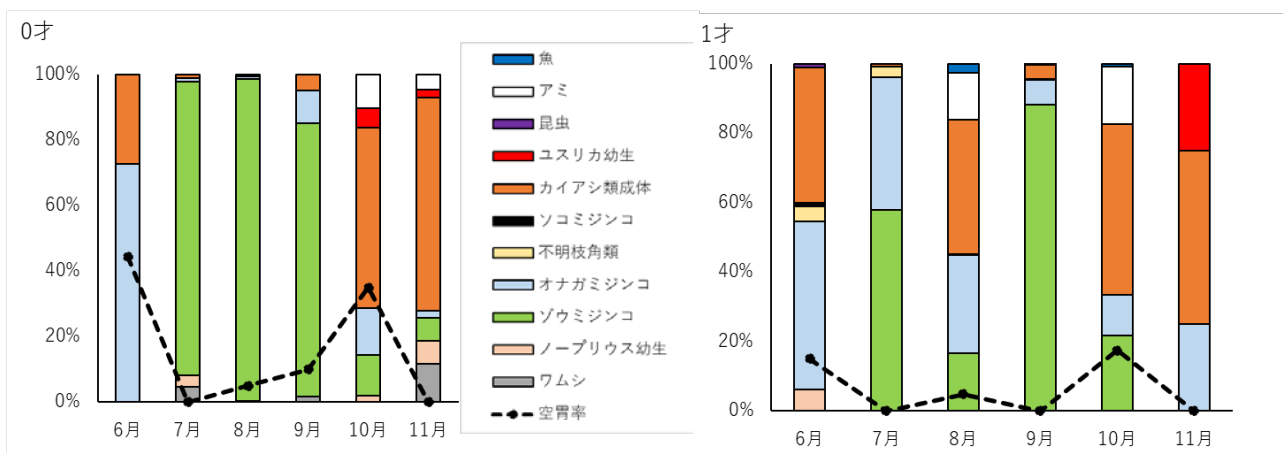


図1-4 ワカサギ0歳（左）およびワカサギ1歳（右）の胃内容物における餌種個体数割合の経時変化

2019年6月から11月に八郎湖から採取されたワカサギ、懸濁物質、底質、その他魚類などの炭素・窒素安定同位体比の分析結果を図1-5に示す。動物の炭素・窒素安定同位体比はそれぞれ同化した餌よりも0~1‰、2~4‰値が大きくなることが広く知られている。そのため、動物の炭素安定同位体比は同化した餌の起源を知るための指標として広く利用されている。また、窒素安定同位体比は栄養段階を知るための指標として有用である。窒素安定同位体比はワカサギ0歳が8~10‰程度、ワカサギ1歳が10~11‰程度で推移しており、各月ともワカサギ1歳が0歳よりもわずかに値が高く、ワカサギ1歳の栄養段階が高いことを示している。ワカサギ1歳の胃内容物は上述の通り時折魚類も検出されており、動物プランクトンが主な餌であったワカサギ0歳よりも栄養段階が高くなったものと推察される。ワカサギよりも窒素安定同位体比が高い魚種はスズキ、オオクチバス、ナマズ、ニゴイなどの魚類であった。これ

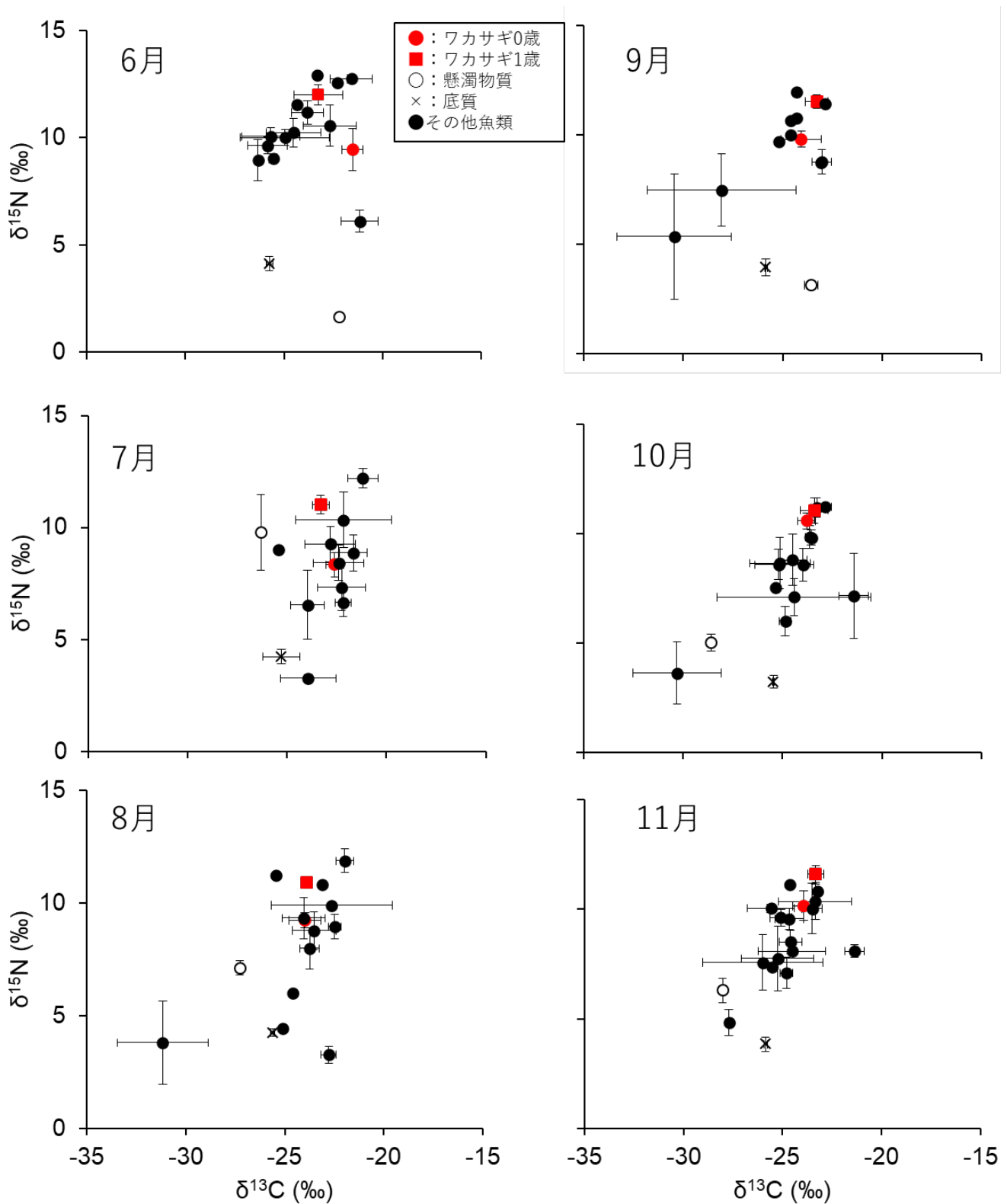


図1-5 2019年6月～11月における八郎湖魚類相の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ

らの魚類はワカサギを餌として利用している可能性が考えられた。

ワカサギ0歳、1歳の炭素安定同位体比は-25～-21‰の範囲内で推移しており、6月を除いて有意な差は検出されなかった。ワカサギが利用している餌の炭素源は0歳と1歳でほぼ同等であると考えられる。食物連鎖の起点と考えられる懸濁物質の炭素・窒素安定同位体比は調査月によって大きく異なっていたのに対して、底質の炭素・窒素安定同位体比はそれぞれ-25‰、3‰程度で安定していた。ワカサギの胃内容物から検出された動物プランクトンは主に植物プランクトンを餌として利用している。それにもか

かわらず、ワカサギの炭素安定同位体比が懸濁物質で見られたような大きな変動をしていないのは、ワカサギの炭素安定同位体比がある程度の期間に同化した炭素の平均値を反映しているためであると考えられる。

2019年6月に採取したワカサギ、藍藻、動物プランクトン、イサザアミ、ユスリカを対象にリノール酸の炭素安定同位体比を分析した結果を図1-6に示す。リノール酸の炭素安定同位体比は食物網に伴う同位体比の変動が小さく²⁾、動物は餌と近い値をとる。ワカサギ0歳は藍藻や動物プランクトンとほぼ同等の値を示していることから、藍藻を起点とする食物連鎖上に位置しており、藍藻を食べている動物プランクトンを餌として利用していると考えられた。対して、ワカサギ1才の炭素安定同位体比は-30‰程度であり、イサザアミやユスリカ幼虫に近い値を示した。ワカサギ1歳の6月の胃内容物は主に動物プランクトンであり、イサザアミやユスリカ幼虫は検出されていない。イサザアミやユスリカ幼虫が胃内容物から検

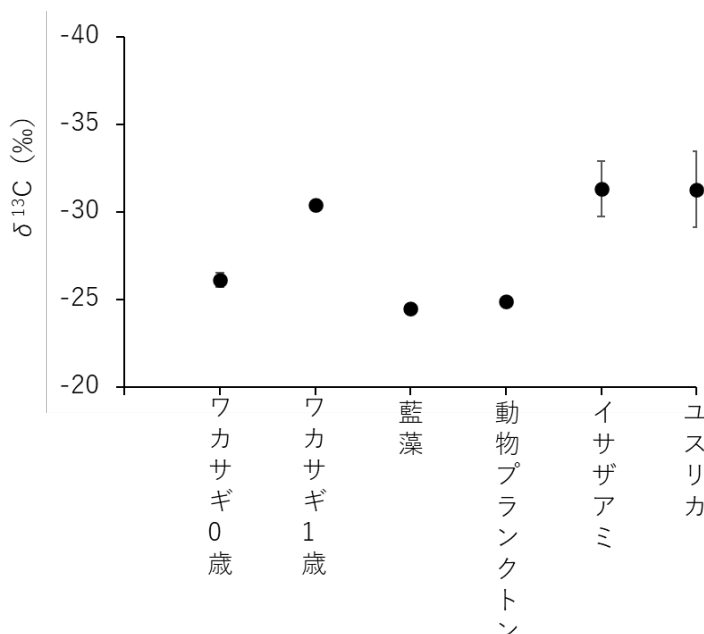


図1-6 2019年6月の八郎湖で採取した各検体のリノール酸の炭素安定同位体比

出されなかったのは、餌として利用する頻度が低いために、検査した個体からは検出できなかった可能性が考えられる。しかし、ユスリカ幼虫やイサザアミは動物プランクトンと比較してサイズが非常に大きく、個体数としての捕食頻度が小さくても、炭素源としての寄与が高かったものと考えられる。以上の結果は同じワカサギであっても、利用している餌源が異なることを示しており、ワカサギの脂肪酸組成を指標とする際には留意する必要がある。

4. 1. 3 八郎湖におけるワカサギと懸濁物質の脂肪酸組成の関係

ワカサギ1歳、ワカサギ0歳および懸濁物質中のARA、EPA、DHAの2016年から2021年にかけての経月変化を図1-7に示す。各高度不飽和脂肪酸の含有率は、全脂肪酸に対する重量%で表している。ARAはワカサギ1歳では各年とも調査開始月の6月に最も低く、9月あるいは10月まで上昇しているが、11月には低下する傾向が見られた。ワカサギ0歳では1歳と同様の傾向が2017年、2018年に見られたが、他の年では11月の上昇（2016年）、6月に最も高い値（2019年）など傾向が異なっていた。懸濁物質中のアラキドン酸の含有率は0～4%程度で推移しており、また明確な季節性も見られなかった。

EPAはワカサギ1歳、ワカサギ0歳ともに夏季に含有率が低下する傾向が認められたが、0歳の方が変動幅が大きかった。懸濁物質についても夏季に含有率が低下する同様の変動パターンが観測された。EPAは主に珪藻によって合成される脂肪酸であるが、八郎湖では夏季に藍藻が大発生し、相対的に珪藻の現存量が低下する。藍藻にはEPAが含まれないため、懸濁物質中のEPA含有率が夏季に低下したものと考えられる。なお、2019年では6月にEPA含有率がもっとも低かったが、2019年6月の調査時には藍藻のアファニゾメノンが大発生していた。また、湖水を検鏡した際にも珪藻はほとんど検出されなかった。

DHAもEPAと同様にワカサギ1歳、ワカサギ0歳ともに夏季に含有率が低下する傾向が見られ、とくに0歳で顕著であった。DHAの含有率が調査期間を通して、ワカサギ0歳よりもワカサギ1才の方に多く含まれていた。懸濁物質も夏季に含有率が低下する同様の傾向を示したが、含有率は0～5%程度と、EPAと比較すると含有率は小さかった。

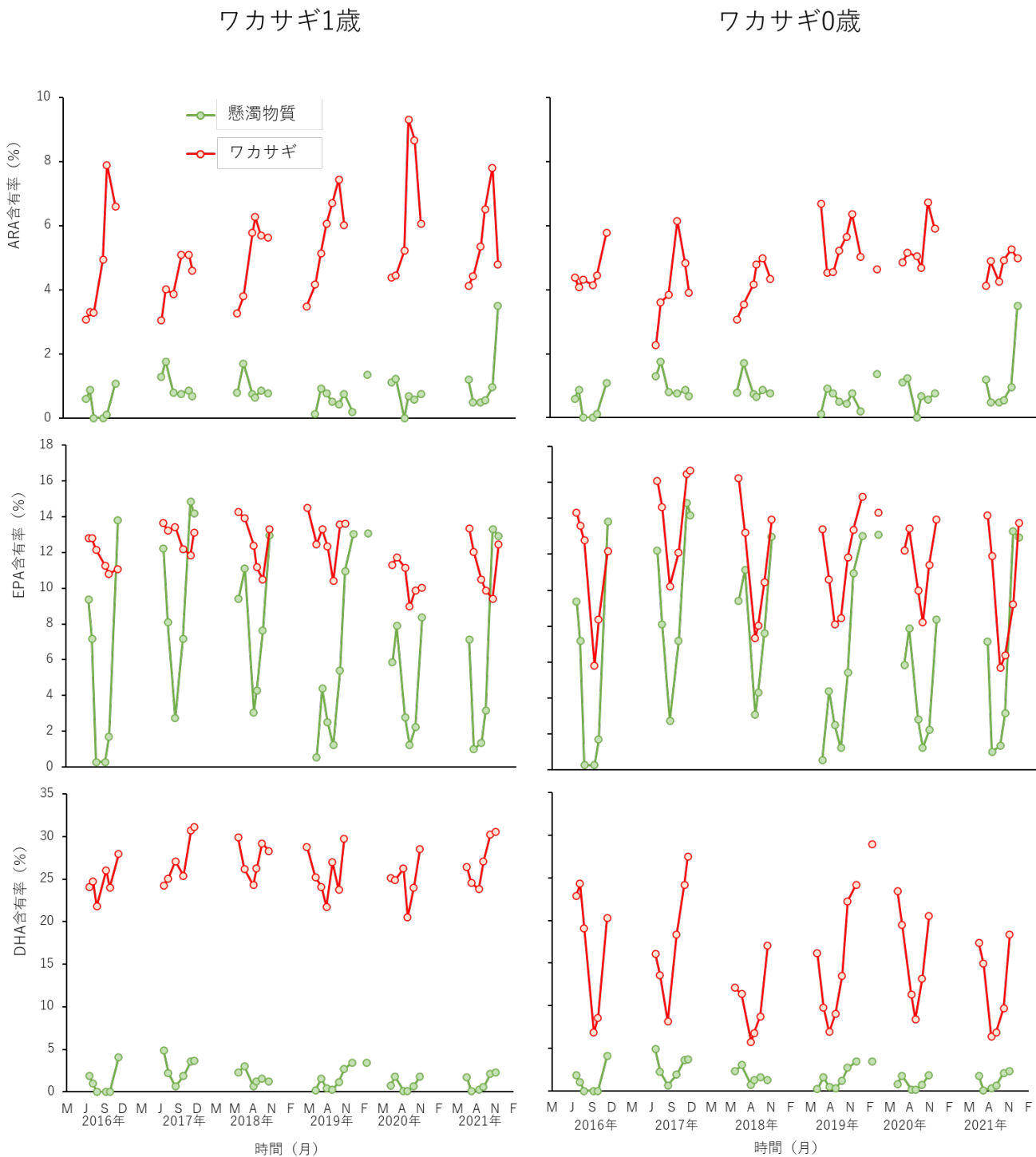


図1-7 2016年から2021年に八郎湖で採取されたワカサギ1歳、ワカサギ0歳、懸濁物質中に含まれる高度不飽和脂肪酸含有率の経時変化

各調査日に採取されたワカサギと懸濁物質中の各高度不飽和脂肪酸含有率との関係を図1-8に示す。ARAではワカサギ1歳、ワカサギ0歳ともに相関が見られなかった。EPAではワカサギ0歳において懸濁物質との間に有意な正の相関が認められた。DHAでは、ワカサギ1歳、ワカサギ0歳とも有意な正の相関が見られた。ワカサギ0歳の方が相関係数が高く、懸濁物質の脂肪酸組成をより反映していた。ところで、EPAにおけるワカサギ0歳の図を見ると、懸濁物質中にはほとんどEPAが含まれていなくても、ワカサギ0歳から13～14%程度と多くのEPAを検出される月があることが分かる。これは、調査を行った日にはアオコが発生していたために、懸濁物質中のEPA含有率は低かったが、同日に採取したワカサギはアオコが発生する前にEPAを獲得していたためと推察される。

そこで、懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率について、1か月移動平均値（ワカサギを採取した同日と、その先月に採取した懸濁物質の各高度不飽和脂肪酸含有率の平均値）を計算し、図1-9にプロットした。EPAではワカサギ1歳、0歳ともに懸濁物質との関係性がより明瞭になり、ワカサギ1歳においても有意な正の相関が検出された。動物の脂肪酸組成はある一定期間に摂食した餌の脂肪酸組成を反映しているため、潜在餌源である懸濁物質の1か月平均値に注目することで相関関係が明瞭になったと考えられた。その一方で、DHAではEPAに見られたような顕著な改善効果は見られなかった。DHAについては魚類種によっては自身で合成可能なこと³⁾や、選択的に餌から同化すること⁴⁾が知られている。本研究対象のワカサギがDHAの合成能があるか、また選択的にDHAを餌から同化するかは不明であるが、脂肪酸ごとの代謝や同化特性の違いがこのような結果の原因になっていると推測される。また、ワカサギ1歳よりもワカサギ0歳の決定係数が大きく、八郎湖でモニタリングツールとしてワカサギを活用する際にはワカサギ0歳を利用することが望ましいことが分かった。ワカサギ0歳はワカサギ1歳と比較して比増殖速度が大きく、餌の脂肪酸を反映しやすかったと考えられた。

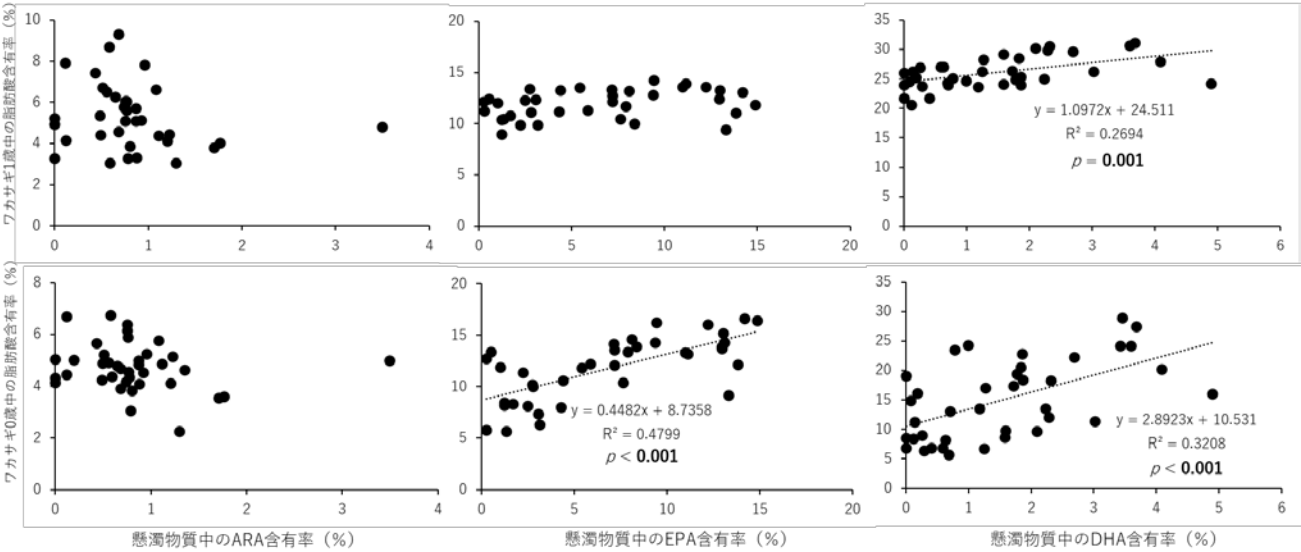


図1-8 八郎湖におけるワカサギと懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有率との関係

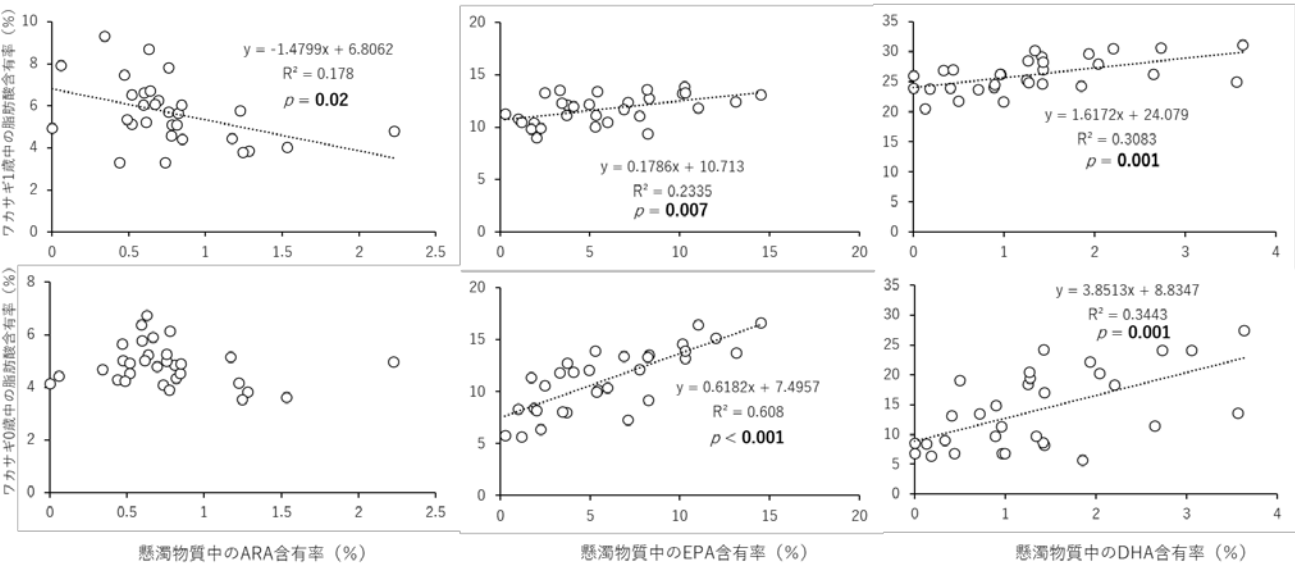


図1-9 八郎湖におけるワカサギと懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有率との関係
(懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率は1か月移動平均値)

4. 1. 4 北山貯水池および霞ヶ浦におけるワカサギと懸濁物質の脂肪酸組成の関係

八郎湖を対象とした検討において、ワカサギの脂肪酸組成が懸濁物質中のEPAおよびDHA含有率を反映していることが確かめられた。そこで、他の湖沼でも再現性があるか確認するために、霞ヶ浦および北山貯水池で同様の検討を試みた。

八郎湖の懸濁物質中のEPAやDHAで見られたような顕著な季節性は霞ヶ浦、北山貯水池ともに見られなかった（図1-10）。湖沼によって懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸組成の季節変動パターンが異なることが明らかとなった。霞ヶ浦と北山貯水池ともに懸濁物質中のEPA、DHA含有率は月をおうごとに増加する傾向が認められた。ワカサギのEPA、DHA含有率も上昇傾向にあった。ARAについては、霞ヶ浦では7月から11月にかけて、ワカサギは上昇、懸濁物質は減少する傾向が認められたが、12月にはそれぞれ逆転し、ワカサギで減少、懸濁物質で増加する傾向が見られた。北山貯水池では懸濁物質では2%未満の低含有率で推移を続けていたが、ワカサギは11月から増加する傾向が見られた。

各湖沼における各高度不飽和脂肪酸に注目した、ワカサギと懸濁物質の散布図を図1-11に示す。また、八郎湖と同様に懸濁物質の1か月移動平均を計算した結果も合わせて図1-12に示した。

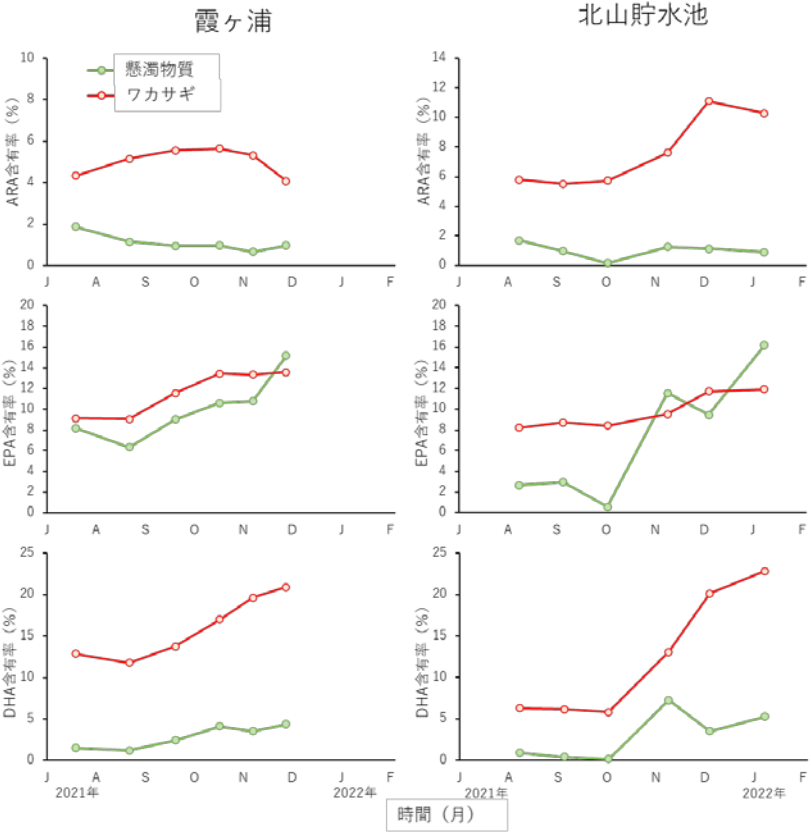


図1-10 霞ヶ浦および北山貯水池におけるワカサギと懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有率の経時変化

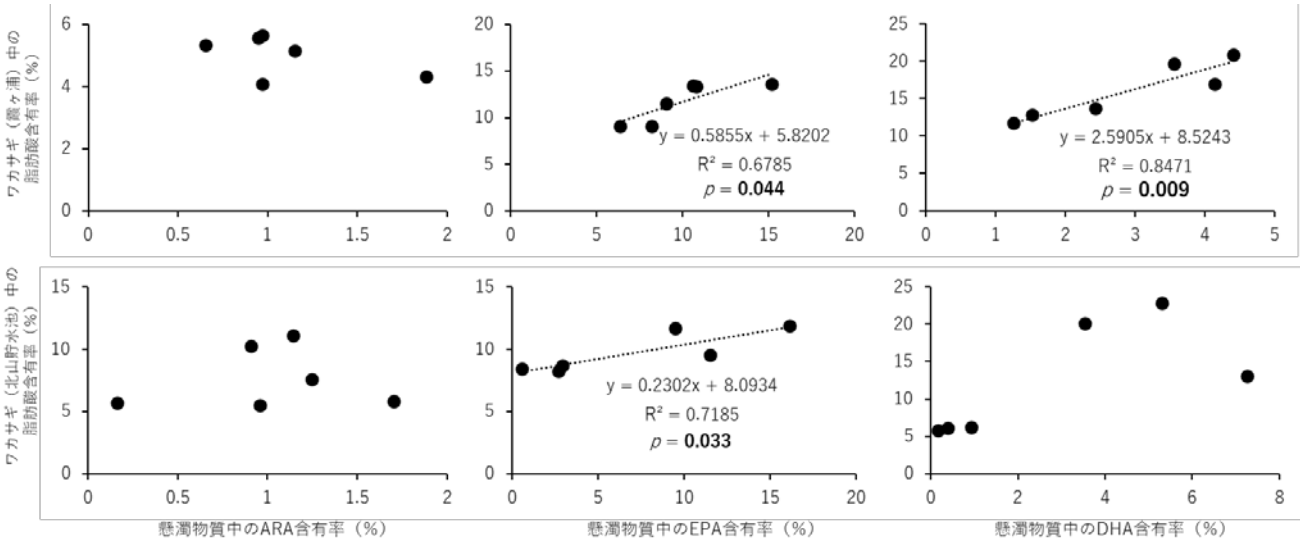


図1-11 霞ヶ浦と北山貯水池におけるワカサギと懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有率との関係

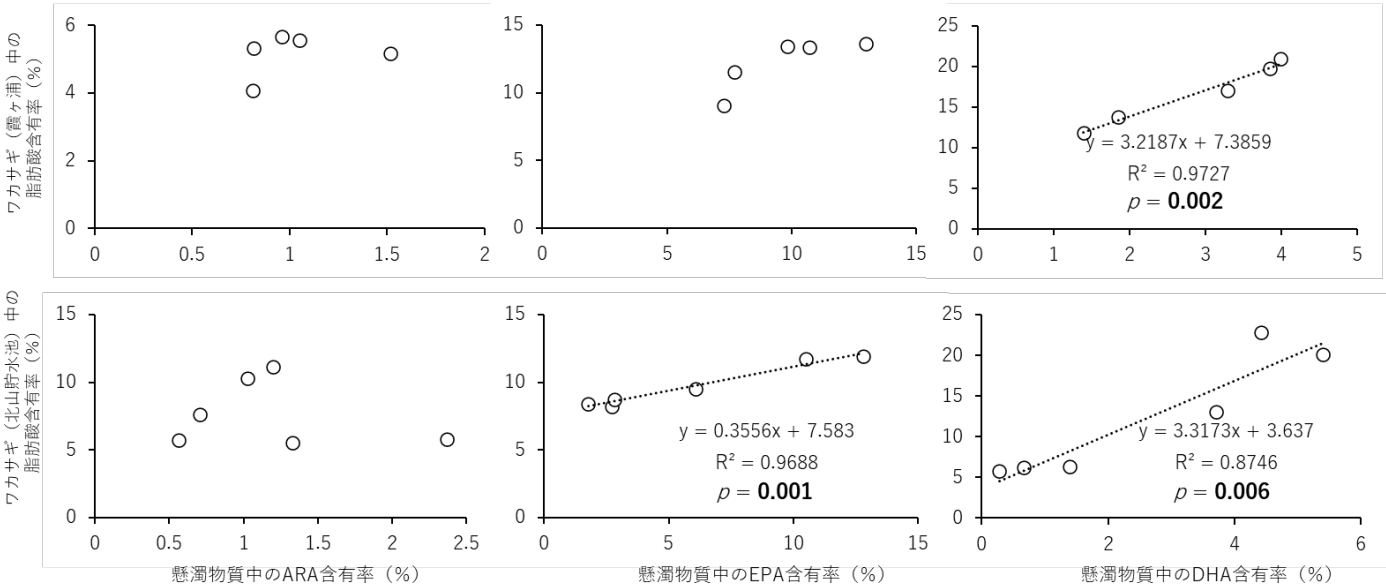


図1-12 霞ヶ浦と北山貯水池におけるワカサギと懸濁物質中の高度不飽和脂肪酸含有率との関係
(懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率は1か月移動平均値)

ARAでは有意な正の相関は見られなかったが、EPAおよびDHAでは当月比較におけるEPAで両湖沼、DHAで霞ヶ浦、一か月移動平均において北山貯水池でEPA、両湖沼でDHAに有意な正の相関が認められた。調査回数が6回と少なくサンプルサイズが小さい点に留意が必要であるが、八郎湖で見られた結果と同様の傾向が認められたことから、ワカサギを指標とした湖沼におけるEPAおよびDHAの供給量推定は様々な湖沼に適用が可能であると考えられた。

4. 2. ワカサギのEPA含有率と生態系の健全性との関係

ワカサギの脂肪酸組成から懸濁物質中のEPAおよびDHAの含有率が推定可能であることが明らかとなり、ワカサギのEPA含有率が高ければ食物連鎖の起点である懸濁物質のEPA含有率が高いと考えることができる。既往の研究から高度不飽和脂肪酸が多い餌を利用すると、炭素転送効率が高まることが示されていることから、ワカサギのEPA含有率が高い生態系においては、炭素転送効率が高まり、食物連鎖長や高次捕食者の相対重量が増大すると期待される。そこで、食物連鎖長について検討した結果を図1-13に示す。八郎湖ではワカサギのEPA含有率が高いと、食物連鎖長が有意に大きくなることが確認できた。餌のEPA含有率が高いと動物プランクトンに対する炭素転送効率が高まることが知られており¹⁾、生産者のEPA含有率が高くなることで、原生動物や小型・大型の動物プランクトン間の食物連鎖の炭素転送効率が高まり、結果として動物プランクトン食のワカサギまでの食物連鎖長が大きくなったと考えられる。対して、異なる10湖沼を対象に行った検討では有意な関係性は見られなかった。これら10湖沼の調査では各湖沼1回の調査で得られた懸濁物質の窒素安定同位体比および炭素含有量を計算に用いて

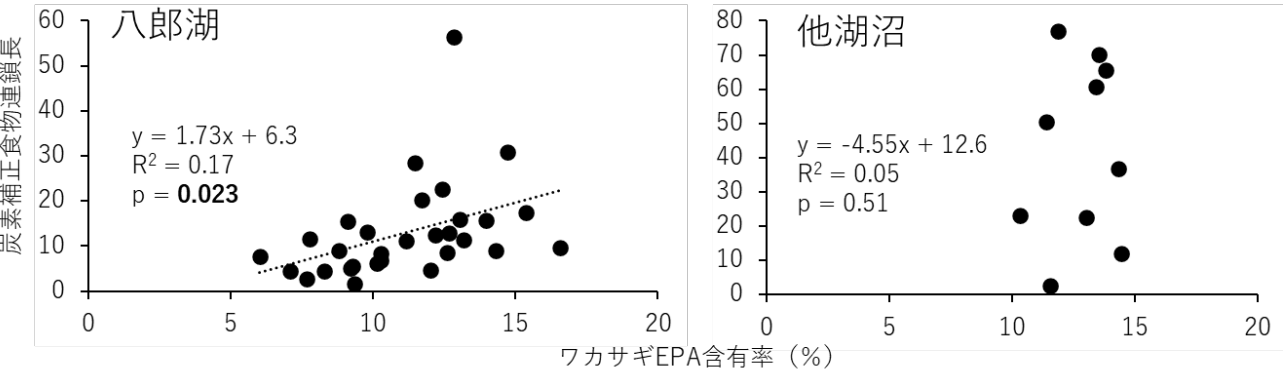


図1-13 八郎湖および他湖沼におけるワカサギEPA含有率と炭素補正食物連鎖長との関係

いる。八郎湖の懸濁物質の窒素安定同位体比が月によって大きく変動していたように、他湖沼においても懸濁物質の窒素安定同位体比は時間変動が大きかったと推察される。動物の窒素安定同位体比はある一定期間に食べた餌の窒素安定同位体比を反映していると考えられることから、一回の調査によって得られた値のみを解析に用いたことで、時間変動による影響を受けたために有意な関係を検出できなかったと推察された。また、食物連鎖長は湖沼サイズにも影響を受けることが指摘されており、異なる湖沼間で食物連鎖長を比較する際には、様々な環境要因を考慮する必要がある。そのため、生産者のEPA含有率と食物連鎖長との関係については、室内実験等も含めたさらなる検証を行うことが必要である。

次に、八郎湖においてワカサギのEPA含有率とワカサギの成長速度（湿重量増加速度）との関係を解析した結果を図1-14に示す。懸濁物質中のEPA含有率が低下する8月において、ワカサギの成長速度とEPA含有率との間に有意な正の相関が検出された。また、ワカサギのEPA含有率が高い年に、八郎湖の全漁獲に占める高次捕食者（スズキ、オオクチバス、ライギョ、ナマズ）の割合が高まることが示された（図1-15）。これらの解析結果は、ワカサギのEPA含有率が高いと、湖内の炭素転送効率が高まり、物質循環が円滑化した可能性を示している。ただし、サンプルサイズがいずれも6点（2016年から2021年までの6年間）と小さいこと、また統計的な解析結果であり、因果関係に関する検証に課題が残されていることから、今後もさらに検討を継続し、EPAなどの高度不飽和脂肪酸含有率の高い餌源が供給されることでもたらされる湖沼生態系に対する健全化作用について定性的・定量的に評価していくことが望まれる。

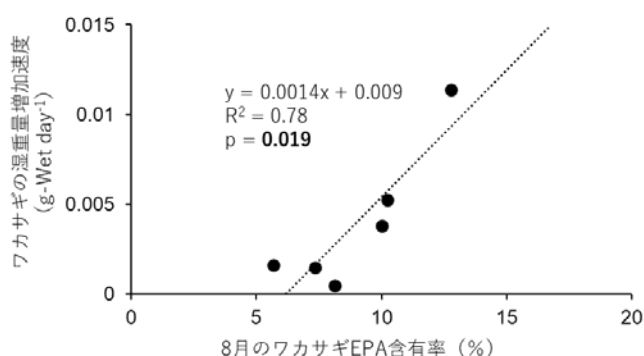


図1-14 ワカサギEPA含有率とワカサギ湿重量増加速度との関係

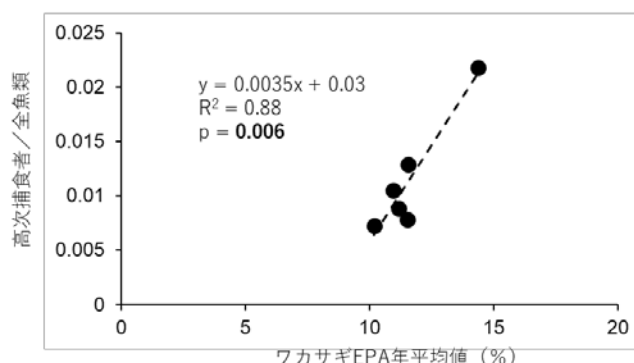


図1-15 ワカサギEPA含有率の年平均值と全漁獲に占める高次捕食者の割合との関係

4. 3. 様々な湖沼で採取したワカサギのEPA含有率と

全国31の湖沼で採取したワカサギのEPAおよびDHAの含有率はそれぞれ、9～22%（平均値±標準偏差：13.6±2.4%）、11～33%（平均値±標準偏差：20.2±5.0%）の範囲であり、湖沼によって同じワカサギでも高度不飽和脂肪酸含有率が異なった。八郎湖、霞ヶ浦、北山貯水池の経時的な調査で見たように、これらワカサギの高度不飽和脂肪酸含有率の違いは、懸濁物質の高度不飽和脂肪酸含有率を反映していると考えられる。本研究では高度不飽和脂肪酸含有率の高い餌源が供給される湖沼で生態系の健全性が高まると仮説をたて、食物連鎖長や漁獲に占める高次捕食者の割合を指標とした検討から、仮説を支持する結果を得た。そのため、EPAやDHA含有率の高いワカサギが採取された湖沼ほど炭素転送効率の高い健全な生態系が形成されていると期待される。しかし、八郎湖などの経時データで示されたように、同じ湖沼であっても季節によって高度不飽和脂肪酸の含有率は大きく異なるため、湖沼間の比較を行う際には、同じ季節で比較する、あるいは通年のデータを採取し、年平均值、季節平均値などの値によって比較することが望ましいと考えられる。本調査では10月中旬から12月初旬のおよそ2カ月の間に集中的にワカサギを採取したが、それでも採取時の水温が10℃～20℃と大きく異なってしまった。実際、ワカサギのEPA含有率と採取時の表層水温との間には有意な負の相関が見られた（図1-16）。そこで、図1-16で得られた回帰式によって、与えられた水温から予測されるワカサギのEPA含有率に対す

る実測値との差分をEPA残渣として算出し、水質（TPおよびCOD）との関係を調べた。TPおよびCODは令和2年度の公共用水域の水質調査結果の年平均値を採用した。ただし、公共用水域調査の対象となっていない湖沼においては、ワカサギを採取した際に採水した水試料のCOD分析値を用いている。ワカサギのEPA残渣はTP、CODがそれぞれ 0.02 mg L^{-1} 、 4.1 mg L^{-1} でピークが見られ、TPやCODが低すぎても高すぎても、EPA残渣は低下する傾向が認められた（図1-17）。TPやCODの高い富栄養化が進行した湖沼においては、EPAを合成できない藍藻が優占しやすく、懸濁物質のEPA含有率が低下したものと予測される。その結果と

して、湖沼食物網に対するEPA供給が減少し、ワカサギのEPA残渣の低下として捉えられていると考えられた。対して、TPやCODの低い貧栄養湖では、生産性は低いものの相対的に珪藻が優占化しやすいと考えられる。本研究ではワカサギと懸濁物質のEPA含有率とを比較し、有意な正の関係を検出してきた。すなわち、貧栄養湖においては生産量が低くても、珪藻が優占していればワカサギEPAの含有率は高まるはずである。それにもかかわらず、ワカサギのEPA含有率が低下しているのは、今回調査対象としている貧栄養湖において1) 優占している珪藻類のEPA含有率が低かった、2) EPA含有率の低い他の藻類群が優占していた、3) EPA含有率の高い藻類が優占していたが、絶対量が少ないと、食物連鎖に伴うEPAの転送効率が低下する、などの要因が想定される。今回の調査では、各湖沼の懸濁物質中の検鏡を行っていないため、藻類組成など詳細を検討することは難しいが、ワカサギのEPA含有率を指標として湖沼生態系の物質循環を理解するためには、今後も貧栄養湖から富栄養湖までの様々な栄養状態の湖沼を対象に、調査を進めていくことが必要である。

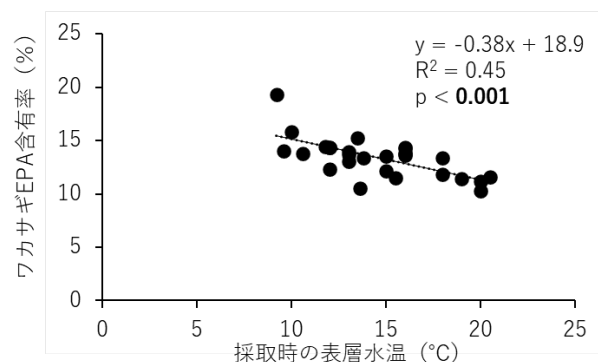


図1-16 ワカサギEPA含有率と表層水温との関係

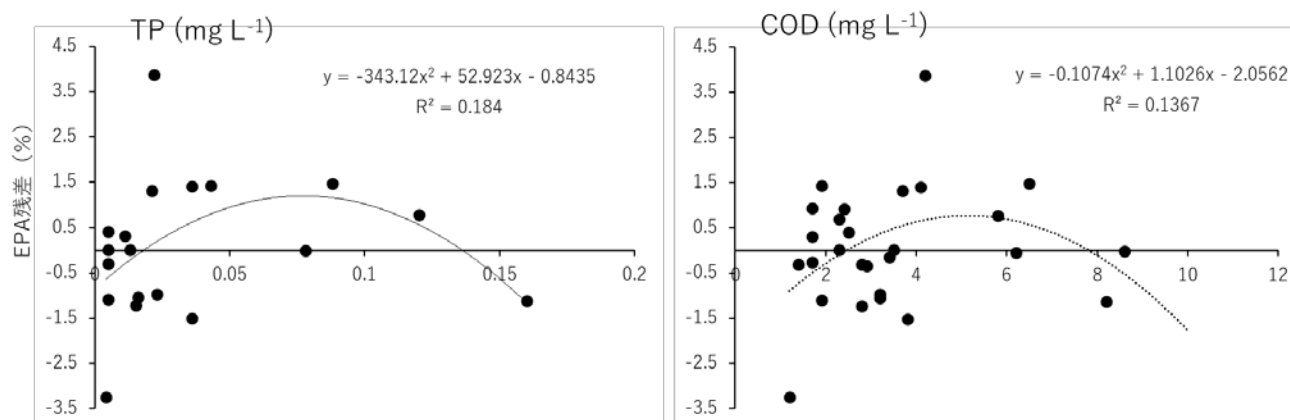


図1-17 水質（左：全リン、右：COD）とワカサギEPA残渣との関係

ワカサギの脂肪酸組成は同化した餌の脂肪酸組成を反映していることから、湖沼間のワカサギ脂肪酸組成を比較することで、各湖沼の生態系構造が推測できると考えられる。そこで、まずは懸濁物質も含め詳細な検討を行ってきた八郎湖、霞ヶ浦、北山貯水池を対象に、ワカサギに含まれるマーカー脂肪酸含有率による主成分分析を行った（図1-18）。ここでは、EPAは珪藻、DHAは渦鞭毛藻・珪藻、 $18:2\omega6$ および $18:3\omega3$ は緑藻や藍藻、BacFAは細菌のマーカー脂肪酸として利用した。八郎湖では、6月はEPAやDHAのベクトルが示す図中右側にプロットされており、珪藻が多かったことが示唆されている。9月までプロットが図中の左方面に移動しており、夏季において緑藻・藍藻が優占し、その後10月、11月と再び右方面にプロットが移動していることから、珪藻が優占する生態系へとシフトしている様子が伺える。実際の懸濁物質の脂肪酸組成や検鏡結果からも整合性が確認されている。このように、ワカサギのマーカー脂肪酸を対象とした主成分分析を行うことにより採取日から1か月程度前までの生産者構造を推測することが可能である。北山貯水池では八郎湖と比較して細菌に由来する食物連鎖が調査期間を通

して低いことが読み取れる。また、霞ヶ浦では調査期間中、他の湖沼と比較して珪藻が優占していたことや、プロットが同所的に集中していることから懸濁物質のマーカ脂脂肪酸組成の経月変化が小さかったことが分かる。

次に31湖沼のワカサギのマーカ脂脂肪酸を対象とした主成分分析の結果を図1-19に示す。Bray-Curtis類似度88%以上のプロットを囲むと、22:6 ω 3 (DHA) が多いグループ、Bac、18:3 ω 3、18:2 ω 6が多いグループ、両者の中間に位置するグループの3つのグループに分けられた。ワカサギの脂肪酸組成が懸濁物質の脂肪酸組成を反映していることから、各湖沼の生産者構造を反映した結果となっていると考えられ、プロットが近い湖沼同士は生産者構造が類似していると思われる。

上述の通り、ワカサギの脂肪酸組成は主に植物プランクトンによって構成されている懸濁物質の季節変化によって、変動する。その変動幅は、八郎湖と霞ヶ浦の例に見られたように湖沼によって異なる。そのため、今回の様に1回の調査によって得られたスナップショット的な解析結果は必ずしも湖沼間の比較としては適切ではなく、あくまでも調査日における各湖沼の生産者構造を反映している点に留意する必要がある。しかし、継続的にデータをとることで、各湖沼がプロットされる領域や変動幅を解析していくことで、当該湖沼の生態系構造に関する理解が深まると期待される。

5. 研究目標の達成状況

研究目標1)

八郎湖における詳細な食物網調査によって、ワカサギの脂肪酸組成が食物網の起点となる湖沼懸濁物質の脂肪酸組成を反映していることを明らかにすることができた(図1-9)。とくに、高度不飽和脂肪酸のEPAとDHAを反映していること、八郎湖においてはワカサギ1歳よりもワカサギ0歳の方が懸濁物質の脂肪酸組成を強く反映しており、指標として使う際にはワカサギ0歳がより適性が高いことも合わせて明らかとなった。これは、成長速度に依存するためと考えられたことから、他湖沼に適応する際には年齢によって個体を選出するのではなく、成長期にある個体を利用することが望ましいと考えられた。

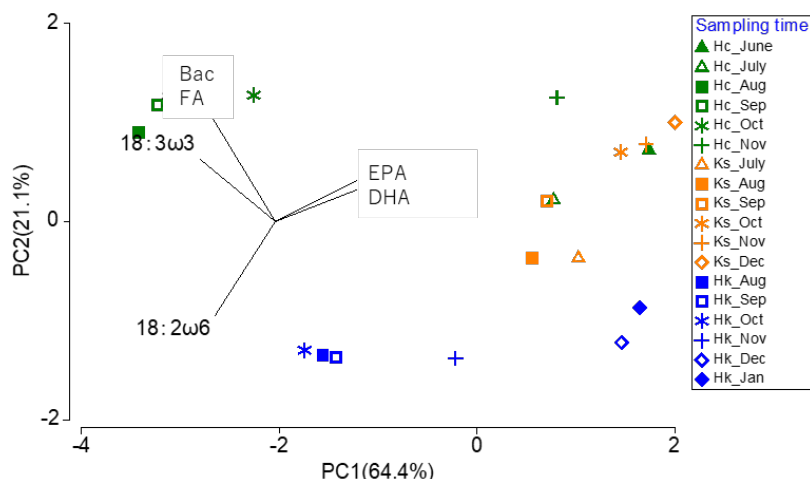


図1-18 八郎湖、霞ヶ浦、北山貯水池で採取されたワカサギ中のマーカ脂脂肪酸を対象とした主成分分析

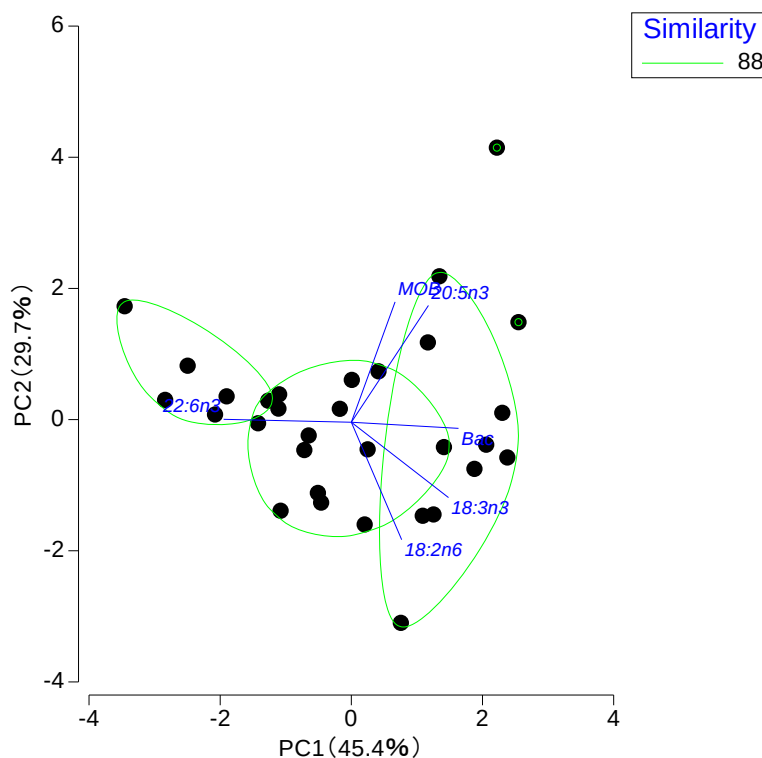


図1-19 全国31湖沼で採取されたワカサギ中のマーカ脂脂肪酸を対象とした主成分分析 (緑色の囲み線はBray-Curtis類似度が88であることを示す)

当初は、八郎湖においてのみ検討する予定であったが、2021年度には、霞ヶ浦、北山貯水池も調査対象地として、ワカサギおよび懸濁物質を採取し、検討を行った。その結果、八郎湖で観測された結果と再現性ある結果が得られ（図1-12）、様々な湖沼においてワカサギが懸濁物質の脂肪酸組成を反映していることが明らかとなった。以上のことから研究目標1）は「目標を上回る成果をあげた」と判断した。

研究目標2)

ワカサギの脂肪酸組成を指標とすることの意義を明確にするために、ワカサギのEPA含有率が高い湖沼は健全性が高いことを示すことを目標とした。国内10湖沼を対象として、各湖沼のワカサギEPA含有率と健全性と関連があると考えられる食物連鎖長との関係を比較した。当初計画の6湖沼以上の条件については達成できたが、比較項目として想定していた「高次捕食者比率」および「種数」については対象湖沼のデータが得られず、現地調査で実測可能な食物連鎖長のみを対象として検討した。

その結果、EPA含有率と食物連鎖長との間に有意な正の相関は見られなかった（図1-13）。ただし、懸濁物質の窒素安定同位体比から算出される食物連鎖長は、懸濁物質の窒素安定同位体比の時間変動の影響により誤差が大きくなることが考えられたため、詳細な時系列データが揃っている八郎湖を対象として、ワカサギEPA含有率と食物連鎖長との関係を解析し、有意な正の相関を得ることができた（図1-13）。さらに、八郎湖では、EPA含有率が高いとワカサギの成長速度が大きくなる点や（図1-14）、EPA含有率の平均値が高い年に、逆に占める高次捕食者の割合が増加し、EPA含有率が高いと炭素転送効率が高まっていることを示す観測結果を得ることができた（図1-15）。食物連鎖長、ワカサギ成長速度、高次捕食者の割合とワカサギEPA含有率との間の因果関係については今後さらなる検証が必要であるものの、本研究仮説をサポートする結果が得られたことから、研究目標2）については「目標にはやや及ばないが、一定の成果をあげた」と判断している。

研究目標3)

ワカサギのマーカー脂肪酸を対象とした主成分分析を行うことで、湖沼の生産者構造を判定できることが八郎湖、霞ヶ浦、北山貯水池で得られた毎月の調査結果から示された（図1-18）。本解析によって、湖沼内で生産者構造が季節間で大きく変動することや、その変動幅が湖沼によって異なることを視覚的に示すことができた。また、国内31湖沼のワカサギを対象とした同様の解析によって、各湖沼のワカサギ脂肪酸組成の類似度から、各湖沼の生産者構造ごとにグループ化が可能であった（図1-19）。ただし、各グループと環境要因との関係性などについては今後もさらなる検討が必要である。また、ワカサギの脂肪酸組成は懸濁物質の脂肪酸組成の季節変化を反映して変動するため、継続的に調査を行い、各湖沼のワカサギの変動範囲なども含めて評価していくことが、本指標を活用する上で有効であると考えられた。また、ワカサギのEPA含有率は中程度の栄養塩やCODの湖沼で高まることが明らかとなった（図1-17）。水質以外の環境要因との関係性を引き続き解析し、EPA生産の高まる環境条件を明らかにしていくことで、EPA生産増産に向けた新しい湖沼管理の方針を低減できると期待される。

以上のことから、今後の課題は残されているものの、ワカサギの脂肪酸組成で湖沼生態系の生産者構造を判断できる手法を提案できたこと、ワカサギEPA含有率と水質の関係性があきらかになったことより、研究目標3）は「目標どおりの成果をあげた」と判断している。

6. 引用文献

- 1) Müller-Navarra DC, Brett MT, Liston AM, Goldman CR (2000) A highly unsaturated fatty acid predicts carbon transfer between primary producers and consumers. *Nature* 403:74-77.
- 2) Fujibayashi, M., M. Ogino, and O. Nishimura. 2016. Fractionation of the stable carbon isotope ratio of essential fatty acids in zebrafish *Danio rerio* and mud snails *Bellamya chinensis*. *Oecologia* 180: 589-600.
- 3) Tocher DR (2003) Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish. *Reviews in Fisheries Science* 11(2):107-184.
- 4) Kainz M, Arts MT, Mazumder A (2004) Essential fatty acids in the planktonic food web and their ecological role for higher trophic levels. *Limnology and Oceanography* 49:1784-1793

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 新田真弓、藤林恵、青森壮汰、岡野邦宏、宮田直幸：土木学会論文集G（環境）、76, 7, III_1-III_9（2020）、八郎湖におけるワカサギのゾウミジンコに対する捕食の有無と選択性の評価

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 青森壮汰、藤林恵、新田真弓、高田芳博、岡野邦宏、宮田直幸：第54回日本水環境学会年会（2020）「八郎湖の食物網における藍藻由来有機物の移行経路の特定」
- 2) 新田真弓、藤林恵、青森壮汰、岡野邦宏、高田芳博、宮田直幸：第54回日本水環境学会年会（2020）「湖沼の餌環境がワカサギの脂肪酸組成に与える影響」
- 3) 橋本晃一、藤林恵、岡野邦宏、宮田直幸：第54回日本水環境学会年会（2020）「秋田県沿岸域の食物網における陸域由来有機物の餌としての寄与」
- 4) 新田真弓、青森壮汰、藤林恵、高田芳博、渡邊美穂、岡野邦宏、宮田直幸：第55回日本水環境学会年会（2021）「湖沼生態系の健全性評価指標の開発に向けたワカサギ脂肪酸組成の解析」
- 5) 藤林恵：日本生態学会第68回全国大会（2021）「水域生態系における脂肪酸濃度・炭素同位体比の利用」
- 6) Megumu Fujibayashi, Mayumi Nitta, Sota Aomori, Takashi Sakamaki, Kunihiro Okano, Hideki Sugiyama, Naoyuki Miyata: SIL2021(2021)「The relationship between fatty acid profiles of aquatic consumers and basal dietary sources: Can aquatic animals be used as an indicator of EPA and DHA supplies in Lakes?」
- 7) 新田真弓、青森壮汰、藤林恵、高田芳博、渡邊美穂、岡野邦宏、宮田直幸：日本陸水学会第85回大会（2021）「湖沼生態系における ω 3脂肪酸供給量の評価指標の開発に向けたワカサギ脂肪酸組成の解析」
- 8) 高島航太、藤林恵、久場隆広：令和3年度土木学会西部支部研究発表会（2022）「ワカサギを指標とした湖沼懸濁物質中のエイコサペンタエン含有率の評価」
- 9) 新田真弓、藤林恵、高田芳博、渡邊美穂、岡野邦宏、宮田直幸：第56回日本水環境学会年会（2022）「ワカサギを指標とした湖沼間の高度不飽和脂肪酸供給量の比較」

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開セミナー：秋田県の水圏生態系を対象とした脂肪酸および同位体を用いた食物網解析～物質循環を考慮した生態系管理に向けて～（主催：秋田県立大学生態工学研究室、カレッジプラザ、令和元年7月27日）
- 2) 令和元年度日本水環境学会東北支部セミナー：指定湖沼八郎湖の現状と課題（演題：八郎湖におけるアオコの動態につて）（主催：水環境学会東北支部、秋田県総合保健センター、令和元年11月30日）

(4) マスコミ等への公表・報道等＞

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Development of the Indicator to Assess Ecosystem Health for Eutrophic Lakes by Using Wakasagi Smelt (*Hypomesus nipponensis*)

Principal Investigator: Megumu FUJIBAYASHI

Institution: Kyushu University

E-mail: m.fujibayashi@civil.kyushu-u.ac.jp

[Abstract]

Key Words: Lake ecosystems, Ecosystem health, Fatty acids, Food web, Stable isotope ratios, Pond smelt, Lake Hachiro, Carbon transfer efficiency, Diet availability

Aquatic animals need to intake highly unsaturated fatty acids (HUFA) such as eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA) from dietary sources, which are important compounds for the normal growth, reproduction, and survival. Moreover, high species richness of benthic animals was observed where HUFA are supplied adequately from sedimentary organic matters in inner bay ecosystems. Thus, supply of HUFA can be considered as an important role of aquatic ecosystems, and monitoring of HUFA supply in lake ecosystems can be a new viewpoint for lake managements. Since fatty acid profiles of consumers reflects those of dietary sources, aquatic animals can be used as indicators of HUFA supplies in lake ecosystems.

Here, to test this hypothesis, pond smelts, *Hypomesus nipponensis* and basal dietary sources (i.e. suspended solids) were collected every month during June to November from 2019 to 2021 in Lake Hachiro, Japan. Correlation analysis between the HUFA contents of *H. nipponensis* and suspended solids showed significant positive relationship in EPA and DHA. This finding has also validated in other lakes, Lake Kasumigaura and Hokuzan Reservoir. These findings suggest that *H. nipponensis* can be used as the indicator of the EPA and DHA supplies in lake ecosystems.

We also found the significant positive relationships between the annual average of EPA contents of *H. nipponensis* and proportion of carnivorous fish to annual total fishery catch in Lake Hachiro. This can be explained that sufficient EPA supply from basal dietary sources enhance the carbon transfer efficiency through the food chain, and consequently relative abundance of carnivorous fish increased. Similarly, we also observed longer food-chain length when higher EPA contents of *H. nipponensis* was detected. These findings imply that EPA contents in *H. nipponensis* can be a useful monitoring tool for carbon transfer efficiency.