

(31) 異臭味産生藻類のファジィニューラルネットワークによる増殖要因解析

石橋良信^{1*}・及川栄作²・本多裕之³・安達智広¹・中枘昌弘³

¹東北学院大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目13-1)

²呉工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒737-8506 広島県呉市阿賀南2-2-11)

³名古屋大学大学院工学研究科 化学・生物工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

* E-mail: yishi@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

かび臭物質を産生する藍藻類の *Phormidium tenue* および生ぐさ臭を産生する黄金藻類の *Uroglena americana* を対象に、ファジィニューラルネットワークを適用して両藻類の増殖要因の解析を行った。その結果、両藻類は相異なる発生状態を示した。*P. tenue* の増殖では、硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素やカリウムなどの他に、風速の影響、特に10日前前後2日間に平均風速3m/s以上の強い風が吹いたときに増殖が著しいことを指摘し、この現象の実証を試みた。一方、*U. americana* は、硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素は低い濃度で増殖がみられ、クロロフィルaが増殖に多少関係する傾向がみられた。また、平均風速が1~1.5m/sの微風が数日から10日前に吹いた際に増殖することを指摘した。

Key Words: musty odor, *Phormidium tenue*, *Uroglena americana*, fuzzy neural network, wind speed

1. はじめに

水道における異臭味水のうち、かび臭問題は高度処理の普及で一見解決したように思われている。しかし、貯水池では未だにかび臭は発生しており、中小の水道事業体の中には処理に苦慮しているところも多い。また、生ぐさ臭も各地で問題になっているが、発生要因についての知見は多くない。異臭味水の発生要因は日本水道協会の「生物起因の異臭味水対策の指針」¹⁾に示されているが、地域性や湖盆形態の違いなどで原因生物の増殖要因に統一性はなく、また理化学的水質項目が主な判断項目になっている。最近では、酵素学や遺伝子工学の発達によるかび臭物質産生機序、分子生物学的分類や同じ種であっても16SリボソームRNA遺伝子の塩基配列上の微細な差違の存在も理解されてきた^{2,3)}。このような背景から、異臭味問題は、発生要因の明確性や微視的なメカニズムを把握しない限り、根本的な解決を図ったことにはならないと考えている。

研究では、仙台市の水源、釜房湖で増殖し、かび臭物質を産生する藍藻類の *Phormidium tenue* (*P. tenue*) を主な対象に、また大倉湖で生ぐさ臭を産生する黄金藻類の *Uroglena americana* (*U. americana*) を参考に、人工ニューラルネットワークにファジィ推論を組み合わせたファジィ

ニューラルネットワーク (FNN) を用いた増殖要因の解析を試み、異臭味水の発生予測や制御の一助を示した。

2. FNN を適用した *P. tenue* の増殖要因解析

(1) FNN の概要^{4,5)} および解析方法

解析方法には、ファジィ推論 (Fuzzy Inference) と人工ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network: ANN) を組み合わせたファジィニューラルネットワーク (FNN) をアルゴリズムとして用いた。ファジィ推論とは、物事に含まれる“あいまいさ”を定量的に捉えさせることで、人間の思考状態をコンピュータ計算に反映させたツールであるが、ファジィ推論の計算に必要な最適なパラメータの決定は容易ではない。ANNは、脳のシナプス構造をモデルにした情報処理システムであり、学習機能をもっている。この学習機能により、ANNは任意の入出力関係を同定することが可能になる。この入出力関係は結合荷重によって表現されている。FNNは、ファジィ推論のパラメータをANNの結合加重に対応付けることによって、パラメータの調整を自動的に行うことを可能としている。

本解析で用いるFNNの構造には結果の解釈が容易なtype I FNNを用いた。ANNによるパラメータの更新方法

には、逆誤差伝播法 (Back Propagation method: BP 法) を採用した。また、BP 法による過学習を防ぐために、early stopping⁹⁾により適当なところで学習を終了させた。解析データは、学習データとブラインドデータにランダムに分割した。さらに学習データは、訓練データと評価データに分けた。訓練データとは、BP 法により FNN のパラメータの更新量を計算するために用いるデータであり、評価データとは、early stopping により学習の終了を判断する際に用いる予測正答率計算を行うためのデータである。ブラインドデータは学習には一切用いられないデータで、モデルの汎用性を確認するために利用される。本解析では、このブラインドデータの数を 5 個で固定している。ここで、ブラインドデータの 5 個とは、各月の総項目を 1 つのまとまり (個) として 5 ヶ月分のデータを使用することを意味している。

予測に有用な項目を探すために以下の 2 段階の方法を取っている。最初に、各モデルの構築に用いる最適入力組み合わせを、変数増加法を用いて探索する。変数増加法は入力に用いる項目を 1 つずつ予測し、正答率が高くなる項目から逐次追加する方法であるため、1 つの項目では低い正答率しか得ることは出来ないが、複数の項目を組み合わせることで高い正答率を得られる組み合わせの探索には向いていない。このように、有用な項目の組み合わせを見逃してしまう危険性を防ぐため、本節 (2) の使用データで示す 70 個の項目全てに対して、それぞれを 1 入力目に用いる項目として固定し、その状態で 2 入力目以降を変数増加法により組み合わせの探索を行っている。そのため、変数増加法により選択される項目の組み合わせの数は、全項目の数、すなわち 70 個得ることができる。次に、これらの 70 個の組み合わせの中から、ブラインドデータの予測正答率が高い組み合わせを選び出す。これら組み合わせを作るのに用いられた項目の数は、予測に有用な項目ほど多くなっていると考えられる。前述の通り、本解析ではブラインドデータが 5 個と非常に少ないため、誤って偶然に高い予測正答率を出してしまう可能性がある。しかしながら、ブラインドデータの数を増やすために、学習データの数を減らすという行為は、データの不足による予測正答率の低下を招く恐れがある。そこで、解析データから学習データ、ブラインドデータをランダムに選ぶ操作を何度か行い、複数種類のブラインドデータを作成し、それぞれの学習データで構築されたモデルに対して変数増加法で変数を選択し、個々のブラインドデータで評価を行っている。本解析ではこの振り分け操作を計 20 回行った。すなわち、ブラインドデータを 1 回の計算ごとに選び直しているが、計算ごとに学習に用いられるデータに多少の違いが出るため選ばれる項目の組み合わせが異なる。そのため、変数増加法で選ばれる変数の組み合わせは $70 \times 20 = 1400$ 個となる。これ

ら 1400 個の項目の組み合わせの中で正答率の高い組み合わせに対して、多く選ばれた項目を見つけ出す判断として、二項検定で計算される P 値を採用した。本解析では、P 値が 0.05 以下の項目を予測に有用な項目であるとして選択した。

表-1 に本解析での条件を示す。

表-1 FNN の解析条件

使用したデータ	水象データ、気象データ、回轉率 計: 34 ヶ月分
使用したデータ期間	平成 10 年 12 月から平成 13 年 10 月 (平成 12 年 12 月欠損)
使用した項目数	70 個
ブラインド回数	20 回
変数個数	8 個
計算回数	700 回
ブラインドデータ	5 個

(2) 使用データ

FNN を適用し、P. tenue の増殖への影響をみた。水象条件、気象条件および回轉率を考慮するなど、焦点を異にしたいくつかの計算を試みた結果、ほぼ同様の傾向が得られたので、ここでは水象条件、気象条件と回轉率を組み合わせた解析について報告する。なお、回轉率は滞留時間の逆数であり、それぞれの月単位の貯水池の水位差と貯水量から算出した⁷⁾。

解析に用いたデータは仙台市水道局水質年報⁸⁾、平成 10 年 12 月～平成 13 年 10 月を用い、硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素などの理化学水質項目 32 個を採用し、さらに気象データに関しては、釜房湖の気象データを使用した。解析には気温、水温、平均風速、日射量、雨量を適用し、採水日のそれぞれ 3 日、5 日 7 日、10 日前に遡り、かつ設定日の前後 2 日の範囲の平均等総計 70 項目を計算に用いた。なお、天気など数値のない項目には、晴れの場合は 1、曇の場合は 0、雨の場合は -1 のように置き換えた。また、かび臭のクラス分けは、かび臭が発生しない場合をクラス 1、発生する場合をクラス 2 とした。なお、クラス 1 とクラス 2 のどちらのクラスに属するかを予測した値が、FNN の出力値として表される。

一方、実証のためのデータは主に平成 9 年度から平成 14 年度までの釜房湖における気象項目、水象項目、生物項目約 100 項目を用いている。

(3) 解析結果および考察

表-2 滞留時間および回転率を考慮したFNN解析結果

項目名	選択回数	二項検定
硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素 (mg/L)	530	$< 1 \times 10^{-13}$
総窒素 (mg/L)	333	$< 1 \times 10^{-13}$
マンガン (mg/L)	237	$< 1 \times 10^{-13}$
10日前前後2日間の計5日の平均雨量 (mm)	168	$< 1 \times 10^{-13}$
蒸発残留物 (mg/L)	162	$< 1 \times 10^{-13}$
カリウム (mg/L)	160	$< 1 \times 10^{-13}$
鉄 (mg/L)	153	6.98×10^{-13}
回転率	147	4.00×10^{-11}
臭気強度 (TON)	143	5.08×10^{-10}
アルミニウム (mg/L)	142	9.40×10^{-10}
色度 (度)	138	1.01×10^{-08}
電気伝導率 ($\mu\text{S/cm}$)	129	1.29×10^{-06}
ナトリウム (mg/L)	128	2.11×10^{-06}
気温 ($^{\circ}\text{C}$)	119	0.000120
10日前前後2日間の計5日の平均風速 (m/s)	118	0.000180
3日前前後2日間の計5日の平均風速 (m/s)	109	0.00443
濁度 (度)	107	0.00813
塩化物イオン (mg/L)	103	0.0244
水温 ($^{\circ}\text{C}$)	102	0.0313

正答率 80%以上のセット数: 752

成功率: 0.1143

※ 成功率: 正答率が得られた要因の組み合わせのうち、所定の項目が選択された割合

解析結果を表-2に示す。表には選択された回数が多い項目で、かつ二項検定の値が0.05以下の項目を示している。

a) 水質項目の *P. tenue* 増殖への影響

解析結果から水象データとしての水質項目では、硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素や総窒素、マンガン、カリウムや鉄などが上位に位置し、栄養塩は *P. tenue* の増殖と関連性が強いことを示している。

硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素と *P. tenue* の藻体数の関係をデータベースから直接図示した結果を図-1に示す。左右の縦軸は *P. tenue* の藻体数 (普通目盛り) と硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の濃度を示している。図の横軸は硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の濃度が低い方から順に上方の曲線で示しており、それに相対する *P. tenue* の藻体数を折れ線で示してある。図より濃度が0.35~0.45 mg/Lの範囲にあると釜房湖では *P. tenue* が100個/mL以上に増殖しやすい傾向が示された。なお、過去のデータからは、濃度が0.45 mg/Lを越えた場合には顕著な *P. tenue* の増殖はみられていない。日本水道協会の指針¹⁾ではかび臭発生の目安は無機態窒素濃度が

0.3 mg/L以上で発生しやすいと記述してあるが、釜房湖ではより明確な範囲として示すことができた。

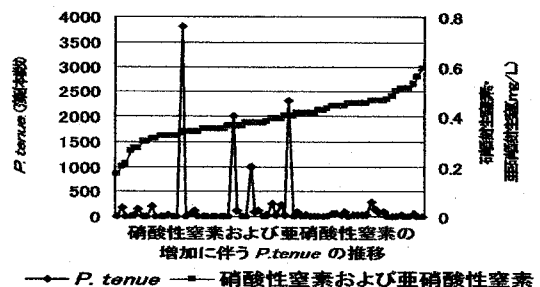


図-1 *P. tenue* の発生と硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の濃度範囲

カリウムは必須微量金属であり、少なければ酵素反応の阻害が、過剰では増殖を阻害する。一般に必須微量金属濃度は湖沼ではあまり変動せず、藻類の増殖との関係は統一的に示すことができない。したがって、湖沼のデータや実験から推測する必要がある。

釜房湖のカリウムについて、釜房湖の濃度は平均的

に0.5~0.8 mg/Lで高くはないが、この濃度範囲であれば、*P. tenue*が増殖すると思われる。図-2は図-1と同様な図化、すなわち、左右の縦軸に*P. tenue*とカリウム濃度を、横軸にカリウムの少ない濃度から高くなる順に描いたとき、カリウム濃度が0.5~0.6 mg/Lであれば*P. tenue*の藻体数が100個/mLを越える傾向がみられる。

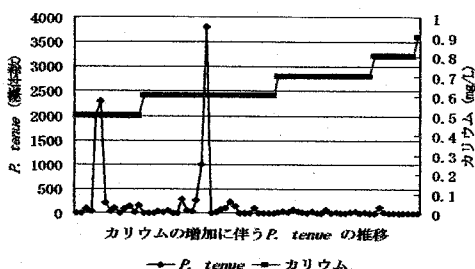


図-2 *P. tenue* の発生とカリウムの関係

一方、増殖に及ぼすカリウム濃度の実験を試みた。供試株は国立環境研究所 (NIES) 微生物系統保存施設の *P. tenue* NIES-512 株である。培養液は、NIES-Collection 5th Edition⁹⁾ に記載の CT 培地を基本組成としたが、窒素分としてカリウムを含む KNO_3 を外し、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ のみを加え、硝酸イオンとして 0.4 mg/L に固定した。カリウム成分については、 KNO_3 の代わりに CH_3COOK を添加し、カリウムとして 0.55、1.0 mg/L に調整した。培養は、*P. tenue* 供試株を培地 150 mL に対し 7.5 mL の割合で添加し、軽く振って混合し、温度 25℃、平均照度約 16,000~21,000 lx (1fc=10.8 lux) に設定したインキュベーター内で静置培養を行った。

P. tenue 供試株の増殖量 (藻体数) は、10 mm セルを用い、分光光度計 660 nm の波長で吸光度を測定し、事前に準備しておいた吸光度と *P. tenue* 藻体数の検量線から求めた。なお、コントロールは薬品を変えない通常の CT 培地⁹⁾とした。

実験の結果、カリウム濃度を 0.55 mg/L に調整した培地で培養したサンプルは、コントロールに比べて初期段階での増殖が速いことが確認できた。また、若干ではあるが、カリウム濃度を 1.0 mg/L に調整した培地でも培養したサンプルは、コントロールより増殖が速い傾向があった。しかし、コントロールは培養 11 日以降も増殖したが、カリウム添加の試料は 1 週間以後では定常状態になった。釜房湖においては、カリウム濃度が 0.55 mg/L になると *P. tenue* が増殖しやすいと推定される。

釜房湖のマンガンの濃度は平均 0.04 mg/L で微量である。マンガンは、*P. tenue* がかび臭物質を産生する非メバロン酸経路中の酵素である geranyl pyrophosphate の活性に必要な金属として知られているが¹⁰⁾、増殖には

関係については、カリウムと同様に、欠乏すれば酵素反応が阻害され、過剰では増殖を阻害すると考えられる。鉄もまた生物の生命維持や細胞を構成する際に必要な金属といわれており、これらは必須微量元素として *P. tenue* の増殖にも関係すると思われる。

水道協会の指針¹⁾では、色度や濁度もかび臭発生の目安になっている。解析データとした水質年報の図化において、色度が 3 度以下であるとき *P. tenue* が増殖しやすい傾向があることが示された。濁度に関しては、釜房湖の *P. tenue* の増殖は、 $1,000 \mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ 程度の弱い照度 (日射量など) が適するとの知見が得られており¹¹⁾、濁度が照度を調整する効果の可能性があるとして推論される。*P. tenue* と理化学試験項目との相関は、*P. tenue* の増殖の際の藻体数にばらつきが多いため有意な関係はみられなかった。以上、*P. tenue* の増殖要因を 1 つの個別指標で表現することは困難であり、*P. tenue* の増殖は多くの要因の組み合わせで生じると考えられる。なお、釜房湖でのリン濃度は 0.02 mg/L の測定限界以下であることが多く、FNN の解析結果には現れていない。

さらに、回転率が上位に選択されており、*P. tenue* の増殖には貯水池の水の流動も影響していることが示唆された。具体的には、回転率が 0.3 以下であるときに *P. tenue* が増殖している傾向があり、また回転率の逆数である滞留時間は 3~15 日間程度であると増殖する傾向がみられた。

b) 風速による影響

気象条件には平均の雨量、藻類の増殖適温に関係する気温や水温、風速が挙げられた。日射量は藻類の増殖に重要な要因となるはずであるが¹¹⁾、二項検定の値が 0.05 を超えたため、有意な解析項目からは外れている。風速に関する解析では興味深い結果が得られている。採水日の 10 日前前後 2 日間 (12, 11, 10, 9, 8 日前の平均風速) に平均風速が 3 m/s 以上の風が吹くと *P. tenue* が増殖しやすい傾向がみられた。図-3 は解析期間の 10 日前前後 2 日間の平均風速と *P. tenue* の増殖の関係を示している。図上部のプロットはこの期間で 3 m/s 以上の風が吹いたことを表している。*P. tenue* の増殖には時間を要し、10 日前後の風が採水時の増殖に影響すると思われる。

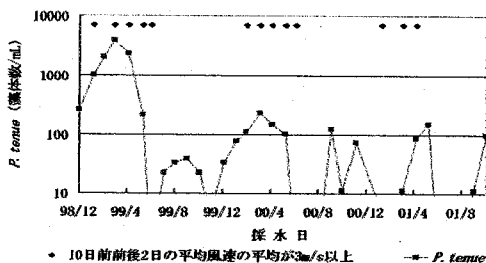


図-3 10 日前前後 2 日間の平均風速と *P. tenue* の関係

風速に関する既存の研究で、細見らはニューラルネットワークを適用し、かび臭の発生予測を行っているが、風速の影響の詳細な評価までの記載はみられない¹²⁾。一方、本多らは、FNNを用いて海域での赤潮の発生に風速が強く関係することの知見を得ている¹³⁾。

(4) 実証実験結果

a) 風速を考慮した実証実験

表-3 *P. tenue* と 10 日前前後 2 日間計 5 日の平均風速の関係

平成 11 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
<i>P. tenue</i> 藻体数	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
10 日前前後 2 日間の平均風速	○	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×
平成 12 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	
<i>P. tenue</i> 藻体数	×	○	○	○	○	×	×	×	○	×	×	
10 日前前後 2 日間の平均風速	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	
平成 13 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月		
<i>P. tenue</i> 藻体数	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×		
10 日前前後 2 日間の平均風速	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×		

P. tenue 藻体数

100 個/mL 未満：× 100 個/mL 以上：○

10 日前前後 2 日間計 5 日の平均風速

3 m/s 未満：× 3 m/s 以上：○

風速と *P. tenue* 増殖の実証

解析には使用していない平成 16 年度のデータを基に、風速と *P. tenue* 増殖の関係を図-4 に示す。図より、平均風速が 3 m/s 以上あると約 10 日後に *P. tenue* が増殖していることが確認できた。風が吹くことで、水面が攪拌され *P. tenue* が増殖、生存するために必要な酸素や二酸化炭素が表層水に供給されるためと考えられる。図において、図上部の点は平均風速が 3 m/s 以上吹いたことを、折れ線は *P. tenue* の藻体数 (個/mL) を示している。

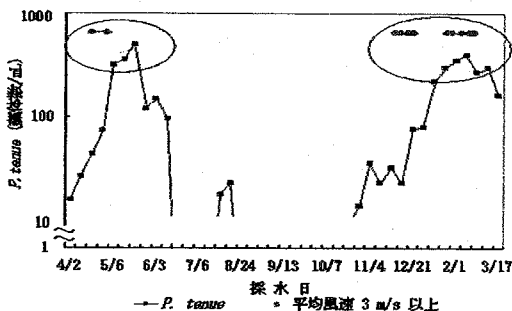


図-4 風速 3 m/s 以上の際の *P. tenue* 増殖状況

P. tenue と 10 日前前後 2 日間の平均風速の関係

表-3 は、*P. tenue* と 10 日前前後 2 日間の平均風速の関係である。*P. tenue* の藻体数が 100 藻体数/mL 以下であれば×、それ以上であれば○とし、また平均風速が 3 m/s 以下であれば×、それ以上であれば○と表示している。表-3 より両者の挙動は 33 ヶ月中 25 ヶ月、約 75% で一致しており、風速の影響が強調される。

全国的には『筑波おろし』『比叡おろし』のように風が吹き降ろすところでかび臭を産生する貯水池、湖沼が多いように感じられる。釜房湖の西部に位置する蔵王山からも『蔵王おろし』の強風が吹きつけ、*P. tenue* が増殖しやすい条件にあるとも推察される。

表面攪拌の有無による *P. tenue* の増殖のカラム実験

自然の水域では、多くの細菌や藻類が共存し、また捕食など複雑な現象が生じており、供試株のみでの増殖実験は現実とは一致しないが、風を考慮した室内実証実験を試みた。供試株は前述の *P. tenue* NIES-512 株である。カラムは直径 60 mm、高さ 700 mm のカラムに液体 CT 培地⁹⁾ 1.5 L 入れ、LABORATORY HIGH POWER MIXER (アズワン社、SM-103) を用いて、水面から 2 cm の位置を、昼間 5 時間程度 150 rpm で攪拌し、攪拌しないサンプルと比較した。両サンプルとも 1 日に 1 度静かに転倒攪拌し、*P. tenue* の付着を防いだ。

増殖量の測定は、2(3)のカリウムの影響をみた方法と同様であり、10 mm セルを用い、分光光度計 660 nm の波長で吸光度を測定し、事前に準備していた吸光度と *P. tenue* 藻体数の検量線から藻体数を求めた。図-5

にカラム実験による増殖状況を示す。上部の増殖曲線は攪拌した実験結果であり、下部は攪拌を施さない結果である。培養実験の結果、統計的有意性は検討していないが、両サンプルともに培養開始後10日目までは増殖が穏やかに進行し、10日目頃を境に水面を攪拌したサンプルの増殖が加速している。この結果は、光合成に係る酸素や二酸化炭素のガス交換の重要性を示しており、自然水域では風による吹送流がガス交換の役割を担っていると考えられる。

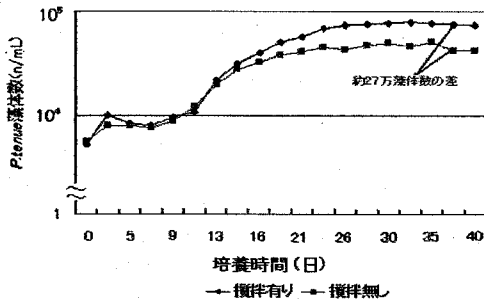


図-5 表面攪拌が *P. tenue* の増殖に及ぼす影響

b) 主成分分析による解析結果

FNN 解析のみで増殖要因を推定するのは信頼性を判断できないので、主成分分析を試みた。使用したデータは、平成10年12月から平成13年10月までの34ヶ月分であり、細菌、藻類を含む水質項目30項目、風速や気温など、かつ採水日から前に遡って平均を取った項目および台風の接近・上陸など気象項目15項目、計47項目である。なお、回転率はこの解析には加えていない。

主成分分析の結果より、第2主成分までの累積寄与率は45.07%で、自然水が対象であるゆえに寄与の度合いは高くないが、固有値は第1主成分、第2主成分ともに1以上であるので分析は正当であると考えられる。第2主成分の固有ベクトルでみると、主成分得点は低いものの、マンガン、硬度、蒸発残留物、アルカリ度、カルシウム、カリウム、硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素が水質の状況を表す正のグループとして、また、水位、値は小さいものの *P. tenue* 藻体数、10日前前後2日間の平均風速、溶存酸素など栄養塩以外で *P. tenue* の増殖に何かしら関係すると思われる負のグループに分けられるように思われた。散布図の相対的な位置関係でも、10日前前後2日間の平均風速、7日前前後2日間の平均風速、溶存酸素が *P. tenue* と近い位置関係にあり、*P. tenue* の増殖に風が影響され、別の要因として硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素をはじめとする栄養塩が増殖を助長すると推測された。

3. FNN を適用した *Uroglena americana* の増殖要因解析

(1) 解析条件および使用データ

FNN の解析概念は、*P. tenue* の場合と同様である。表-4に解析条件を示す。

表-4 *P. tenue* の発生要因に対する FNN の解析条件

使用したデータ	水象データ、気象データ、回轉率 計:45ヶ月 平成12年7,8月、平成13年9,10月欠損
使用したデータ期間	平成12年3月から平成16年3月
使用した項目数	47個
フラインド選択回数	5回
要因項目数	3個
計算回数	500回
フラインドデータ	5個

U. americana の產生する異臭味の種類は、水道協会の分類では、海藻臭、生ぐさ臭、魚臭などが使われているが、ここでは、“生ぐさ臭”と称することにする。

使用したデータは、仙台市水道局の水質年報⁹⁾ (平成12年度～16年度)であり、一般細菌、大腸菌群数、生物総数を含む理化学水質項目33項目、採水日から前に遡った5日前前後1日間 (採水日の4, 5, 6日前) の平均風速や7日前前後1日 (採水日の6, 7, 8日前) の平均風速や10日前前後1日 (採水日の9, 10, 11日前) の平均風速などの気象項目12項目、さらに回転率と滞留時間を加えた47項目である。ただし、水質年報における生ぐさ臭の表示は群体数ではなく、発生の有無のみ表示されている。したがって、FNNの解析手順におけるクラス分けは、生ぐさ臭が発生する目安で区分し、発生しない場合をクラス1、発生する場合をクラス2とした。

解析は、気象項目と水象項目、微生物との関連項目、気象項目と水象項目および滞留時間と回転率の関連性について解析したが、結果が近似しているので、ここでは滞留時間と回転率を含めた解析について記述する。

(2) 解析結果および考察

解析結果を、表-5に示す。表には選択回数が多い項目で、かつ二項検定の値が0.05以下の項目を示している。

a) 水質項目の増殖影響

理化学試験項目では、本解析からは、クロロフィルa、色度、カリウム、過マンガン酸カリウム消費量、総窒素が選択された。

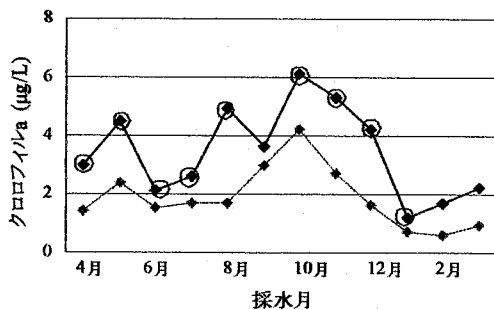
表-5 *U. americana* の発生要因のための FNN 解析結果

項目名	選択回数	二項検定
クロロフィルa(μg/L)	61	$< 1 \times 10^{-13}$
5日前前後1日の計3日の平均風速 (m/s)	57	$< 1 \times 10^{-13}$
色度 (度)	23	0.00039
カリウム (mg/L)	22	0.000922
7日前前後1日の計3日の平均風速 (m/s)	22	0.000922
10日前前後1日の計3日の平均風速 (m/s)	22	0.000922
過マンガン酸カリウム消費量 (mg/L)	21	0.002083
総窒素 (mg/L)	19	0.009241

正答率 80%以上のセット数: 180

成功率: 0.0625

図-6は、クロロフィルaは値が高く推移した年（平成15年度）を上部の折れ線に、クロロフィルaは値が低く推移した年（平成14年度）を下部の折れ線に示してある。また、生ぐさ臭が発生した月に○印を付してある。図よりクロロフィルaの値が高く推移した年に生ぐさ臭が発生している傾向がみられる。なお、大倉湖のクロロフィルaは経年的に平均3.3 mg/L程度であり、高い濃度でも10 mg/Lを越えることはない。また、クロロフィルaの増加は*U. americana*の増殖の結果とも考えられる。水質年報には前述のように生ぐさ臭の群体数は記載されておらず、生ぐさ臭が発生したか否かの表示であるので、代わりにクロロフィルaと生物総数との相関係数でみると、0.55の値であり、相関があるとみなす限界の0.6には至っていない。



上方のグラフ: 平成15年度。下方のグラフ: 平成14年度
(生ぐさ臭の発生を○で表示)

図-6 クロロフィルaと生ぐさ臭の関係

カリウムも必須微量元素として*U. americana*の増殖に大切であるが、水質年報を図化した場合、生ぐさ臭が発生しているときのカリウム濃度は0.5~0.6 mg/Lであった。しかし、カリウム濃度の変動が少ないために増殖の指標にはなり得ないと考えている。

色度はクロロフィルaやフィオフィチンなど*U.*

*americana*を含む藻類が増殖、死滅した結果とも考えられ、実証が必要である。なお、釜房湖の*P. tenue*の増殖要因とは異なり、生ぐさ臭のFNN解析に回転率および滞留時間は選択されていない。

一方、同時期に行った回転率や滞留時間を含めず、気象項目と水象項目のみを対象にしたFNNの解析により選ばれた項目として、鉄や硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素、濁度が選択されている。鉄は、すべての植物に不可欠な微量栄養素の一つであり、*U. americana*の増殖に関与していると考えられる。生ぐさ臭が発生しているとき硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の濃度は0.02~0.2 mg/Lであり、*P. tenue*に比べ、濃度が低いときに発生すると思われる。しかし、*U. americana*または他の藻類が硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素濃度を消費した結果、硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の濃度が低くなったことも考えられ、正当性については今後の課題である。なお、これらの選択された水質項目間の相関は、自然中での調査のために0.7程度の相関係数になっている。

b) 風速による影響

表-5から、5日前前後1日間（採水日の4、5、6日前）の計3日の平均風速や7日前前後1日（採水日の6、7、8日前）の計3日の平均風速や10日前前後1日（採水日の9、10、11日前）の計3日の平均風速（正答率80%以上）が選択され、広義には生ぐさ臭の発生には5~10日前の平均風速が影響していると考えられる。一般的に、*U. americana*は穏やかな日が数日続き、水温が15~25℃であると増殖しやすいといわれている¹⁴⁾。FNNの解析より平均風速が選択されていることから*U. americana*の増殖に関与していると考えられる。データを検討した結果、10~5日前の平均風速が1~1.5 m/sであるとき生ぐさ臭が発生している傾向があった。

ところで、釜房湖と大倉湖は約15 kmの距離で隣接している。図-7に両ダム湖の10日前の平均風速の経年

変化を示す。地形的な状況から、概して釜房湖の風速は強く、大倉湖では低い値を推移している。図では採水日の10日前前後2日間の平均風速が3 m/s以上の風が*P. tenue*の増殖に有効と推論する釜房湖と、数日から10日前の平均風速が1~1.5 m/sの微風が*U. americana*の増殖に好ましいと推論する大倉湖の風速の状況が現れている。長年、釜房湖では*P. tenue*が増殖し、かび臭に苦慮してきたが、生ぐさ臭を産生する*U. americana*は増殖していない。反面、大倉湖では*U. americana*は増殖するが、*P. tenue*はみられていないことが疑問であった。藻類の増殖は、栄養塩、湖盆形態、流動状況などに影響されるが、釜房湖と大倉湖の異臭味の違いや生物相の違いを風速の観点から考察することも現象把握の一助になると考えられる。

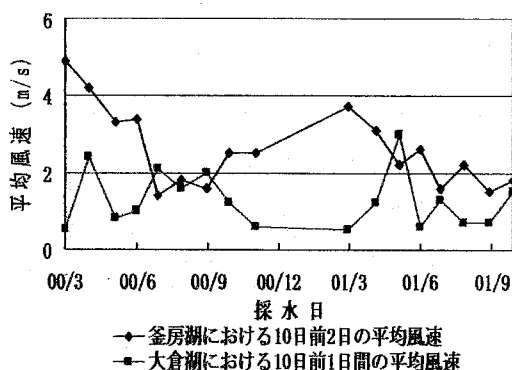


図-7 釜房湖と大倉湖の10日前前後5日および3日の平均風速の相違

c) 主成分分析による解析結果

主成分分析に使用したデータは、平成12年3月から平成16年3月の47ヶ月分であり、細菌、藻類を含む水質項目57項目、風速や気温など採水日から前に遡って平均を取った11項目である。回転率はこの解析には加えていない。

分析の結果、第2主成分までの累積寄与率は30.66%で、寄与の度合いは高くないが、固有値は第1主成分、第2主成分ともに1以上である。第2主成分の固有ベクトルでみると、正の成分ではpH値、過マンガン酸カリウム消費量、クロロフィルa、COD、主成分得点は低いものの、採水日前10日間の平均風速、10日前前後1日間の平均風速、生ぐさ臭が挙げられた。一方、塩化物イオン、溶存酸素が負の成分として挙げられ、また散布図では、前述の風速の他、5日間前後1,2日間の平均風速、7日間前後1,2日間の平均風速などは分散して表示され、顕著な傾向はみられていない。なお、生ぐさ臭との相関はあるとはいえないが、5日間前後1日間計3日の平均風速、クロロフィルa、COD、過マンガン酸カリウム消費量、10日前前後1日間計3日の平均風速な

どが正の相関傾向にあり、硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素が負の相関傾向にあった。

5. まとめ

ファジィニューラルネットワーク (FNN) により、かび臭を生み出し、釜房湖に生息する*P. tenue*の増殖要因を選択するとともに、生ぐさ臭を産生する大倉湖の*U. americana*の増殖要因を探った。

FNNの解析の結果、*P. tenue*と*U. americana*の増殖要因がいずれも風速が影響していることは特筆すべき点である。しかし、両藻類は相反する傾向があり、*P. tenue*にあつては、採水日の10日前前後2日間に平均風速が3 m/s以上の強い風が吹くと増殖が促進される傾向が認められ、*U. americana*では、数日から10日前に平均風速が1~1.5 m/sの穏やかな日が続く状況で採水日に生ぐさ臭が産生されている傾向があることを指摘できた。

水質項目でも異なる挙動が認められ、栄養塩としての硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の濃度は*P. tenue*では0.35~0.45 mg/Lの範囲で増殖しやすく、*U. americana*では0.02~0.2 mg/Lの低い濃度範囲で増殖しやすい傾向がみられた。必須微量元素としてのカリウム濃度は*P. tenue*と*U. americana*が釜房湖と大倉湖での通常の濃度である0.5~0.6 mg/Lの範囲にあるとき増殖しているが、どちらの貯水池でも濃度範囲が小さく指標にはなり得ないと考えられた。また、大倉湖では濃度変化は少ないが、*U. americana*のクロロフィルaの関連が示唆された。さらに、釜房湖の*P. tenue*の増殖では回転率が影響するのに対し、*U. americana*では影響しないことも明らかになった。

以上の結論から、*P. tenue*および*U. americana*の増殖の予測や制御を行う一助として、それぞれの貯水池で、風の強弱や硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素濃度などの挙動に注意を払う必要があることを提案した。

謝意：本研究を遂行するに当たり、適切なご助言をいただいた名古屋大学医学部細胞治療学基礎講座加藤竜司氏に感謝する。また、計算では本学卒業研究生内海裕文、仙葉博之両君の労に負うところ大きく記して感謝する。

参考文献

- 1) 生物起因の異臭味水対策に関する研究会：生物起因の異臭味水対策の指針、日本水道協会、pp.217-232、1999。
- 2) E. Oikawa and Y. Ishibashi : Species Specificity of Musty Odor Producing *Phormidium tenue* in Lake Kamafusa,

Water Science & Technology, 49 (9), 41-46, 2004.

- 3) Y. Ishibashi and E. Oikawa : Inhibitory action of musty odor substance by fosmidomycin, Seventh IWA Symposium on Off-Flavours in the Aquatic Environment, pp.24-28, 2005.
- 4) Sinichi Horikawa, Takeshi Furuhashi, Yoshiki Uchikawa and Takashi Tagawa : A Study on Fuzzy Modeling Using Fuzzy Neural Networks, IFES'91 Fuzzy Engineering Toward Human Friendly Systems, Part IV, pp.261-272, 1991.
- 5) 谷萩 隆嗣, 萩原 将文, 山口 亨 : ニューラルネットワークとファジィ信号処理, コロナ社, pp.3, pp.5-6, pp.18, pp.68-69, 1998.
- 6) SJOBERGJ and LJUNGL: Overtraining, regularization, and searching for minimum in neural networks, Preprint IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, Grenoble, France, pp.669-674. Available by anonymous ftp. 130.236.24.1. 1992.
- 7) 仙台市水道局 : 釜房湖, 大倉湖の貯水量に関する資料
- 8) 仙台市水道局給水部水質検査課 : 水質年報 平成10年度~平成13年度
- 9) NIES-Collection, LIST OF STRAINS, Fifth Edition : Microbial Culture Collection, National Institute for Environmental Studies, Environmental Agency, Japan, pp.30-31, p.38, 1997.
- 10) Eisaku Oikawa and Yoshinobu Ishibashi : Research on the Activity of Geranyl Pyrophosphate Synthase in Musty Odor Producing Cyanobacteria, Water Science & Technology, Vol.40, No.6, pp.195-202, 1999.
- 11) 石橋良信 : 釜房湖のかび臭発生要因と *Phormidium* の光抑制, 水道協会雑誌, 第57巻, 第5号, pp.9-15, 1988.
- 12) 国包章一, 細見正明, 石橋良信他 : 湖沼・貯水池におけるかび臭等発生予測と制御に関する研究8, 環境省地球環境保全等試験研究, 環境省環境保全成果集, Vol.2000, pp.8-1~8-10, 2002.
- 13) E. Nagamori, H. Honda et al.: Predication of Occurrence of *Heterocapsa circularisquama* Red Tide by Means of Fuzzy Neural Network, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.34, No.8, pp.998-1005, 2001.
- 14) 石橋良信, 木村憲司, 伊藤裕之他 : 水道水とおいしいのはなし, 技報堂出版, pp.95-102, 2001.

(2007. 5. 25 受付)

Analyses of Growth Factors of Taste and Odor Producing Algae by a Fuzzy Neural Network

Yoshinobu ISHIBASHI¹, Eisaku OIKAWA², Hiroyuki HONDA³,
Tomohiro ADACHI¹ and Masahiro NAKATOCHI³

¹Graduate School of Engineering, Tohoku Gakuin University

²Dept. of Environmental Urban Engineering, Kure College of Technology

³Graduate School of Engineering, Nagoya University

Growth factors of musty odor producing *Phormidium tenue* and fishy odor producing *Uroglana americana* were analyzed by a Fuzzy Neural Network. The factors of the two algae were contrary to each other. Wind speed acted on the growth of *P. tenue* with a high concentration of nitrate nitrogen and nitrite nitrogen, a certain region of potassium, and other water qualities. The growth of *P. tenue* was remarkable when over 3 m/s wind blew for approximately 10 days before periodic investigations. Furthermore, the information was proved through interpretation of the previous data and laboratory experiments. For *U. americana*, the required concentration of potassium was the same as that for *P. tenue*. However, growth of *U. americana* was conspicuous when the concentration of nitrate nitrogen and nitrite nitrogen was 0.02 – 0.2 mg/L. When a gentle wind, such as 1 – 1.5 m/s, blew for several to 10 days before periodic investigations, the wind was conducive to growth. The results will be helpful for the prediction and control of an occurrence of musty taste and odor in water sources.