

筑波大学

朝永振一郎記念

第19回「科学の芽」賞 応募用紙

受付番号 : SH0011

応募部門 : 高校生部門

応募区分 : 個人応募

題名 : 日焼け止め成分ベンゾフェノンが淡水域生態系に及ぼしうる深刻な影響

学校名 : 東京都 私立順天高等学校

学年 : 3年生

代表者名 : 内藤 醒希

※ 個人情報保護のため、入力された項目から抜粋して出力しています。

日焼け止め成分ベンゾフェノンが

淡水域生態系に及ぼしうる深刻な影響

氏名：内藤 醍希

学校名：順天高等学校

1. 研究の背景

私たちが日常使用する日焼け止めや衣服、食品包装などの製品には、紫外線吸収剤としてベンゾフェノン（以下 BP と略す）が広く使われている¹⁾。日焼け止めにおいては、約80%の製品に BP が含まれていることが知られており¹⁾、世界中の排水の約95%で BP が検出されている¹⁾。フランスの海岸における調査では、1人あたり平均約 17.5g/day の日焼け止めを使用し、その中には約 5.2g の BP が含まれ、これらを洗い流すことで環境中に BP が流出することが報告されている²⁾。日本では、環境省の調査によって、淡水域・海水域いずれにおいても BP が検出され、これらの濃度は淡水域において平均 0.02 ppm（最大で 0.3 ppm）、海水域において平均 0.01 ppm 以下（最大で 0.02ppm）と、海水域よりも淡水域で高いことが明らかにされている³⁾。

BP が海水域へ及ぼす影響としては、サンゴの白化現象がよく知られている。サンゴの白化現象はメディアなどで取り上げられ、世界的に注目を集めたことで調査・研究が進んだ。その結果、私たちが使用した製品に含まれる BP が海水域に流出することで、サンゴと共生する褐虫藻を死滅させ、サンゴの白化現象を引き起こしていることが明らかになった。BP の海水域生態系への流出に対する影響が問題視されるようになり、米国ハワイなどの地域では BP 類（オキシベンゾン）の使用が禁止されている。

BP が海水域に及ぼす影響とは対照的に、BP が淡水域に及ぼす影響については先行研究が少なく、未だ顕在化していない淡水域における BP の危険性について調べることは非常に重要である。淡水域生態系における先行研究では、主に魚類の生殖や内分泌への BP の影響について調査が行われているが、それらの多くは BP 濃度が 30~1000ppm などの高濃度 BP による影響を調べており^{4)、5)}、実際の自然環境における BP 濃度とはかけ離れているため、BP が淡水域生態系に及ぼす影響を考察するには適切ではない。また、淡水域生態系における生産者である藻類や陸上植物に対する BP の影響を調べた研究もほとんどない。

2. 研究の目的

海水域での悪影響が知られている BP が、実は海水域よりも淡水域において高濃度で検出されているにもかかわらず、淡水域生態系に及ぼす BP の影響は明らかになっていない。そこで、本研究では、淡水域生態系を支える生産者である淡水性藻類や陸上植物に対する BP の影響を明らかにし、BP が生態系に及ぼす影響を考察することを目的とした。この研究は、BP が淡水域の生物に及ぼす影響についての重要な基礎研究である。特に、実際に淡水域で検出されたようなごく低濃度の BP が生物にとって安全なのかどうかを確かめることは、非常に重要である。

さらに、BP による生態系への影響を低減する方法についても検討することとした。

3. 実験方法

[材料と培養方法]

はじめに、淡水域生態系に対する影響を考察するため、淡水域で一般的に見られる藻類であるミドリムシ(*Euglena gracilis* z)を淡水藻類のモデルとして使用した。*Euglena gracilis* zは明治大学の末松信彦教授から譲渡されたものを使用した(図1)。ミドリムシは、「強力わかもと」錠剤(わかもと製薬株式会社)2錠をすりつぶして1Lの蒸留水に溶かし、圧力鍋を用いて高压蒸気滅菌(120℃、20分)したものを培養液として培養した⁶⁾。培養には人工気象器(日本医科製作所、LH-120PFD-RD)を用い、培養条件は25℃、約3000Lux、12時間明期、12時間暗期とした。

[ミドリムシの個体数計測]

約140個体/10 μ Lに調製したミドリムシ培養液に対して、BP濃度が0.01、0.1、1、10 ppmとなるよう、ジメチルスルホキシド(以下DMSOと略す)に溶かしたBPを適宜加えた(図2)。BPを添加しないControlには100% DMSOのみをBP添加時と同量加えた。BP添加後、人工気象器内で7日間培養(25℃、約3000Lux、12時間明期、12時間暗期)した後、各種計測を行った。ミドリムシの培養は、20mLの三角フラスコに10mLの培養液を入れて行った(図3)。

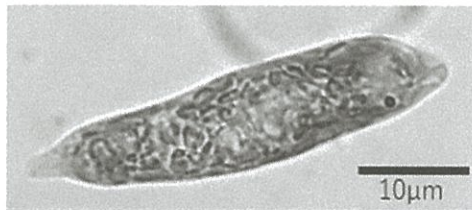


図1 実験に用いたミドリムシ(*Euglena gracilis* z)

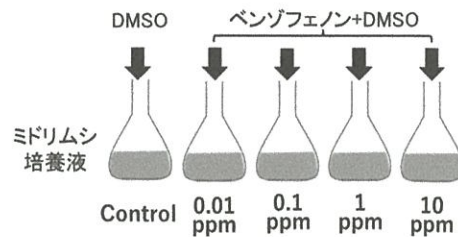


図2 実験概略図。ミドリムシに培養液にベンゾフェノンを添加して培養した。

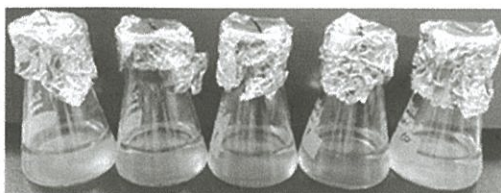


図3 ミドリムシ培養の様子
左から Control, ベンゾフェノン濃度 0.01, 0.1, 1, 10 ppm

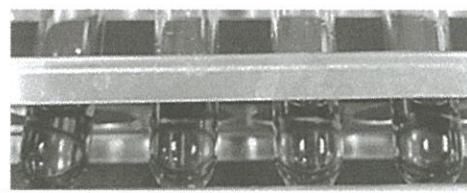


図4 抽出したクロロフィル色素
左からベンゾフェノン濃度0.01, 0.1, 1, 10 ppm

[ミドリムシの個体数の測定]

ミドリムシの個体数は、ミドリムシ培養液をよく振り混ぜた後2.5 μ Lを取り出し、そこに含まれるすべてのミドリムシの数を光学顕微鏡下で目視で数えて計測した。また、BP添加後7日間毎日個体数を数えることにより、ミドリムシの個体数増加速度を調べた。

[クロロフィル量の測定]

クロロフィル量は、BP添加直前及び添加後7日目にクロロフィル色素をアセトンにより抽出し、分光光度計を用いて計測し、先行研究で示された公式⁷⁾を用いて総クロロフィル量を算出した。具体的な実験手順は以下のとおりである。ミドリムシ培養液9 mLを遠心分離(1500 g、5 min)し、ミドリムシを沈殿させた。上澄み液を捨て、沈殿した細胞を2 mLの氷冷した蒸留水で洗浄した。この手順をもう一度繰り返した。遠心分離(1500 g、5 min)をさらにを行い、上澄み液を捨て

た。残った沈殿に 2 mL の 80 %アセトンを加えて攪拌し、保冷剤上に 5 分静置したのち、遠心分離 (1500 g、5 min) を行い、色素以外の細胞小器官などを沈殿させた。クロロフィル色素を含む上澄み液をセルに 1.5 mL 入れ、分光光度計 (OPTIMA SP-300 SPECTRO-PHOTOMETER) を用いて 645 nm、663 nm、730 nm における吸光度を測定した。全クロロフィル量は次の式で求めた。

全クロロフィル量算出公式⁷⁾：総クロロフィル量 = $20.2 \times (OD_{645} - OD_{730}) + 8.02 \times (OD_{663} - OD_{730})$

さらに、このクロロフィル量をミドリムシ個体数で割って、ミドリムシ 1 個体あたりのクロロフィル量を求めた。

[光合成速度 (電子伝達速度 (Electron transport rate、以降 ETR と略す)) の計測]

BP 存在下での光合成速度 (ETR) を、Water PAM (Walz 社) という液体中の試料におけるクロロフィル蛍光測定装置を用いて測定した。この原理について簡単に説明する。植物に対して光合成に有効な光を照射した場合、植物に吸収された光エネルギーは光合成に利用されるか、熱として放出されるか、クロロフィル蛍光として放出されるかのいずれかとなる。吸収されたエネルギーが同一の場合、この 3 つの合計は一定である。そのため、光合成が効率よく進む場合には蛍光が減少し、光合成が阻害されると蛍光は増加する。Water PAM ではパルス変調 (pulse amplitude modulation, PAM) を利用し、熱放出と蛍光を分離して測定することが出来るため、光合成系が駆動したことによる蛍光の変化だけを測定できる。ある一定の光合成に有効な光 (Photosynthetic active radiation, PAR) 下で光合成している際の蛍光 F と、その時に強い飽和光を照射して光合成系を一時的に飽和させてストップさせた際に放出される蛍光 F_m との差 $F_m - F$ は、その PAR において光合成系の電子伝達に使われていたエネルギーと考えられる。 $F_m - F$ を F_m で割った割合 ($F_m - F$) / F_m を実効量子収率 ($Y(II)$) と呼び、これに照射した光強度 (光量子束密度) を乗じると、光合成の電子伝達速度 (ETR) に近似する⁸⁾。この論文においては、 $Y(II) \times PAR \approx ETR$ として求めた ETR を光合成速度として用いることとした。

個体数測定時と同様に BP を添加して培養したミドリムシにおける光合成速度を、上記の方法により算出した。この実験では、冬季水中と同程度の弱光 ($PAR_{47} \mu mol m^{-2} s^{-1}$) と、真夏の直射日光程度の強光 ($PAR_{1190} \mu mol m^{-2} s^{-1}$) を照射した場合の 2 つの光条件での光合成速度を計測した。

[生産量の算出]

上記実験で測定したミドリムシの個体数および 1 個体あたりのクロロフィル量、ならびに光合成速度の変化が淡水域生態系に及ぼす影響を考察するため、BP 存在下におけるミドリムシ群集全体としての生産量を算出した。生産量は次の式で求めた。

生産量算出公式：生産量 = その群集に存在する個体数 \times 1 個体あたりのクロロフィル量 \times 光合成速度

[陸上植物の成長、細胞分裂、光合成速度の測定]

BP が陸上植物に及ぼす影響を調べた。本実験では、タマネギを用いて BP が陸上植物の発芽期の成長と細胞分裂に与える影響を、また、タバコを用いて BP が陸上植物の光合成速度に及ぼす影響を調べた。タマネギを実験に用いたのは、押しつぶし法による細胞の観察が容易であり、染色された核や細胞壁の形などの変化から BP の影響を観察できることが期待されたためである。また、タバコを用いたのは、光合成速度の計測に一般的に用いられているためである。

BP がタマネギの発芽期に及ぼす影響を以下の手順で行った。試験管の中で水耕栽培ができるように、試験管内に吊るせる、種子を乗せるための網（種子用ラック）を作成した。種子用ラックを試験管内に吊るし、そこにタマネギ種子を5つずつ載せ、種子が半分浸る程度まで BP 水溶液(0.01、0.1、1、10 ppm)を加えた。7日間人工気象器内で栽培（25℃、約3000Lux、12時間明期、12時間暗期）した後に、根と茎の長さを測定した。栽培中に水が蒸発した場合は、蒸留水を適宜加えた。

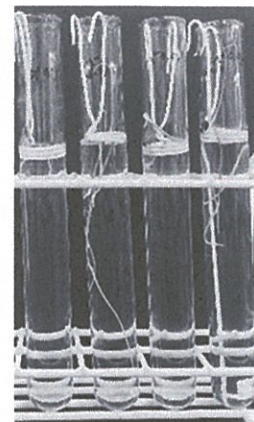


図5 発芽実験の様子

タマネギの根における細胞分裂の観察は、押しつぶし法により行った。まず、タマネギの根を約1分30秒間1M塩酸に浸した。塩酸処理が終わった後、根の先端を1cm程切り取りとってスライドガラスに載せ、蒸留水で3回洗浄した。水気を拭き取った後に酢酸カーミンを2滴たらし、5分放置した後に酢酸カーミンを拭き取り、根の先端部分数mmを切り取った。その根の先端部分にカバーガラスを載せ、スライドガラスを用いてカバーガラスの上から垂直に押しつぶし、細胞を光学顕微鏡により観察した。

タバコ葉における光合成速度は、8~12週間栽培したタバコの葉をリーフパンチ（φ5.35mm）で採取し、BP溶液（0.5、1、2、5、10 ppm）に浸して浸透させた後に Imaging-PAM (Walz社) を用いて $PAR64 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ の光条件でクロロフィル蛍光を測定して算出した⁸⁾。Imaging-PAMの原理は、Water PAMのそれと同様であり、 $Y(II) \times PAR \approx ETR$ として求めたETRを光合成速度とした。

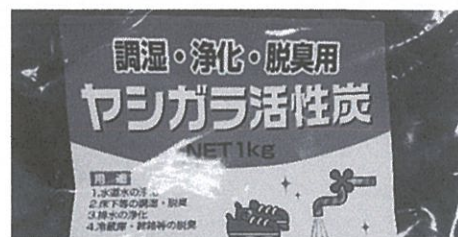


図6 実験に使用した活性炭

[ベンゾフェノンの影響を低減する方法の検討]

BP 添加によるミドリムシへの影響を低減するため、本実験では有機物質を吸着する性質を持つ活性炭⁹⁾ (図6) に着目した。活性炭は多孔質であるため、有機物質であるBPを吸着することが期待された。

ミドリムシ培養液にBPを添加して1ppmとした後、それぞれ異なる量の活性炭（0.002、0.02、0.2 g/10 mL）を加えた。7日間人工気象器内で培養（25℃、約3000Lux、12時間明期、12時間暗期）した後に、ミドリムシの個体数及び1個体あたりのクロロフィル量を調べ、ミドリムシ群集全体としての生産量を算出した。

[統計解析]

統計解析は統計解析ソフト「R」(version R-4.3.2)を用いて行った。ミドリムシの個体数及び1個体あたりクロロフィル量、光合成速度、生産量については Kruskal-Wallis 検定により群間比較検定を行った。有意水準が5%未満のものを「有意差あり」と判定した。

4. 結果と考察

[BP がミドリムシの個体数に及ぼす影響]

BP がミドリムシの個体数やクロロフィル量に及ぼす影響を調べた。ミドリムシの個体数は、BP 溶液を添加しない場合には7日間の培養で培養前と比較して約6.4倍に増加した(図7)。BP濃度が高くなるにつれ個体数は減少し、高濃度BP(10 ppm)存在下ではミドリムシの個体数は7日間で培養前の約0.4倍にまで減少した(図7)。

ミドリムシの個体数増加速度に注目すると、低濃度BP(0.01、0.1 ppm)存在下では、BP添加後3日間程度は増加速度が低下したが、その後は増加速度が回復し、正常に増殖しているように見えた(図8)。一方、高濃度BP(10 ppm)存在下では個体数は増加せず、BP添加後すぐに減少に転じた(図8)。

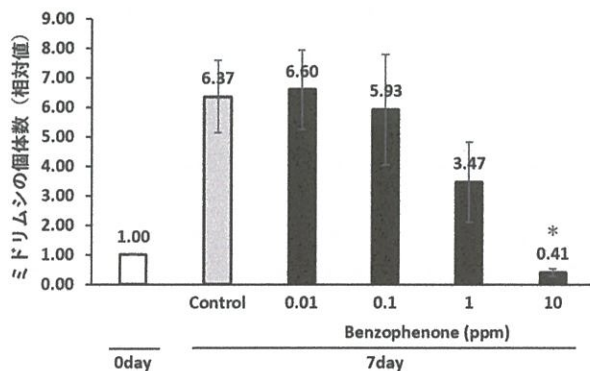


図7 ベンゾフェノン添加時のミドリムシの個体数

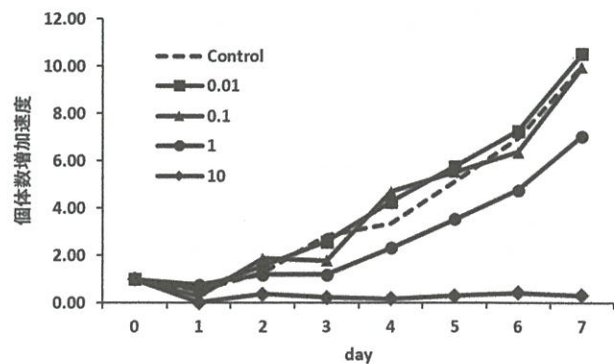


図8 ベンゾフェノン添加時のミドリムシの個体数増加速度

[BP がミドリムシのクロロフィル量に及ぼす影響]

ミドリムシ1個体あたりのクロロフィル量は、BPを添加しない場合、1週間の培養で変化は見られないが、低濃度BP(0.01、0.1 ppm)存在下では無添加時(Control)と比較して約0.8倍に減少した。また、高濃度BP(1 ppm)存在下ではミドリムシ1個体あたりのクロロフィル量は増加し、Controlと比べて約1.5倍になった(図9)。高濃度BP(10 ppm)においてはミドリムシが増加せず、クロロフィル抽出に必要な個体数が確保できなかったため、クロロフィル量は計測できなかった。

これらのことから、低濃度BP(0.01 ppm)存在下では、7日間の培養で個体数は約6.6倍にまで増加し、Controlと比べて微増するが、1個体あたりのクロロフィル量はControlの約0.8倍に減少することが明らかになった。高濃度BP(10 ppm)存在下では、個体数は約0.4倍に減少した一方、1個体あたりのクロロフィル量はControlの約1.5倍に増加した。このことから、高濃度BPには、ミドリムシの細胞増殖を強く抑制すると同時に、クロロフィル合成を促進する効果があると考えられる(図10)。一般的に、植物プランクトンの増殖には栄養源として窒素が必要だが、光条件と栄養条件が一定の場合、増殖速度が遅くなると増殖に本来使われるはずだった窒素が余り、その余剰分の窒素を細胞増殖以外の部分に分配し、結果として窒素を必要とするクロロフィル合成が増える傾向にある¹⁰⁾。今回の実験で観察されたBPによる細胞増殖の抑制と1個体あたりのクロロフィル量の増加については、BPが細胞増殖とクロロフィル合成に独立して影響を与えた

可能性も考えられるが、BP による細胞増殖の抑制が結果的にクロロフィル合成の増加を引き起こした可能性も考えられる。

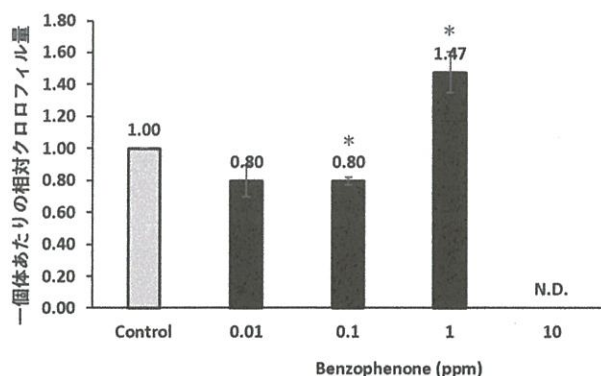


図 9 ベンゾフェノン添加時のミドリムシ 1 個体あたりのクロロフィル量

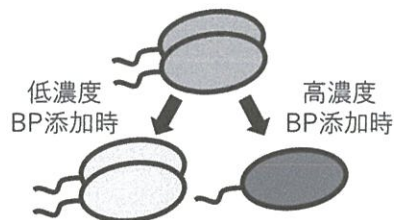


図 10 ベンゾフェノンを添加した際のミドリムシ増殖とクロロフィル量

細胞の色の濃さでクロロフィル量を表した。高濃度ベンゾフェノン添加時には細胞増殖は抑制され、1個体あたりのクロロフィル量は増加した。

[光合成速度の測定]

BP によって細胞増殖やクロロフィル合成に影響がみられたことから、BP が光合成にも影響を及ぼしているのではないかと考え、光合成速度を測定した。弱光と強光の 2 つの光条件で光合成速度を測定したところ、弱光時 ($\text{PAR}47 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) には BP 添加による変化が見られなかった (図 11)。一方、強光時 ($\text{PAR}1190 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) では、低濃度 BP 溶液 (0.01、0.1 ppm) 添加時に光合成速度の減少が見られた (図 12)。弱光時には BP による光合成速度への影響は見られなかったが、より光合成速度が大きくなる強光条件では、低濃度の BP により光合成速度が低下する現象がみられた。BP は紫外線吸収剤であり、光合成に関わる光化学系 II に何らかの影響を及ぼしていることが推測される。このような光合成速度の低下により、有機物の合成が減少し、クロロフィル量の減少につながっている可能性が考えられる。一方、高濃度の BP 存在下では光合成速度の低下は見られなかった。これは、高濃度の BP は低濃度 BP 存在下とは別のメカニズムにより光合成速度に影響を及ぼし、低濃度 BP の影響を打ち消している可能性が考えられた。

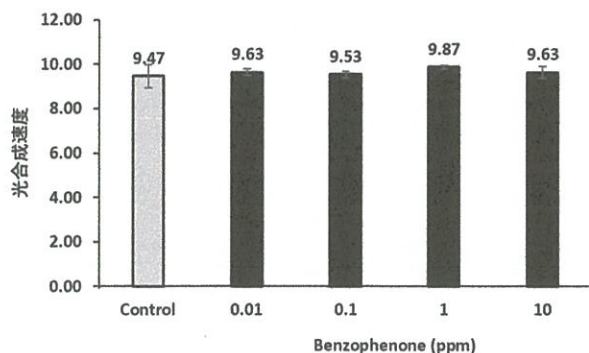


図 11 ベンゾフェノンを添加した際の光合成速度 弱光時 ($\text{PAR}47 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

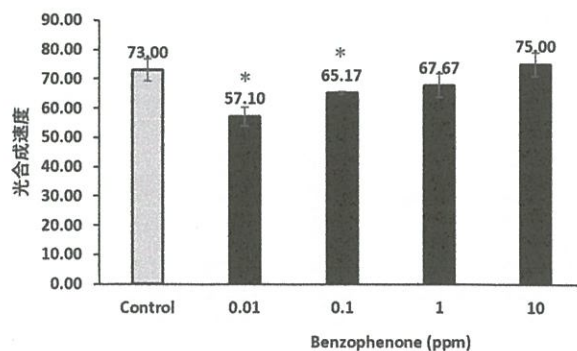


図 12 ベンゾフェノンを添加した際の光合成速度 強光時 ($\text{PAR}1190 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

[BP がミドリムシ群集全体としての生産量に及ぼす影響]

BP はミドリムシの個体数やクロロフィル量、光合成速度に影響を及ぼすことから、群集全体の生産量が変化しているのではないかと考え、ミドリムシ群集全体の生産量を算出した。その結果、ミドリムシ群集全体としての生産量は、弱光時 ($\text{PAR}47 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、強光時 ($\text{PAR}1190 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) のいずれにおいても、添加した BP の濃度にかかわらず、BP 存在下では全て統計的に有意に減少した (図 13, 図 14)。弱光時の生産量は、BP 無添加時 (Control) の約 7 割にまで減少した。さらに、強光時の生産量は、BP 無添加時 (Control) と比較して低濃度 BP (0.01 ppm) 存在下において約 5 割にまで減少した (図 14)。BP が無い場合、真夏の直射日光に相当するような強光時の生産量は弱光時の約 8 倍となり (図 13, 14)、自然環境においては 1 年のうち強光時の生産量の割合は非常に大きい。強光時、つまり夏期の最も生産量が高くなる時期に生産量が約 5 割も減少してしまうことは生態系に非常に大きなインパクトを与えられとされる。生態系の下位にいる生物の生産量の減少により、生態系の上位にいる生物を支えきれず、生存数、生存種数が減少してしまう可能性も考えられる (図 15)。これらのことから、0.01ppm というようなごく低濃度の BP でさえも生態系に深刻な影響を及ぼすことが示唆された。

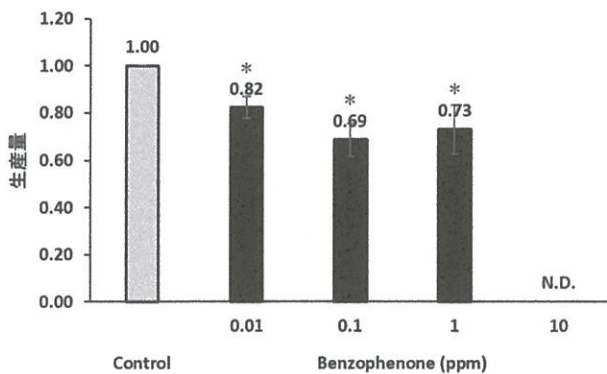


図 13 ベンゾフェノン添加時のミドリムシ群集としての生産量 弱光時 ($\text{PAR}47 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

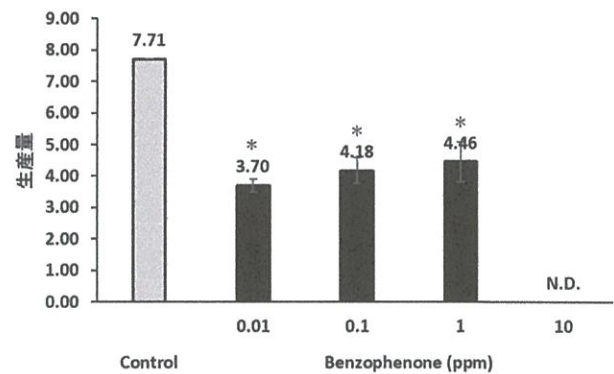
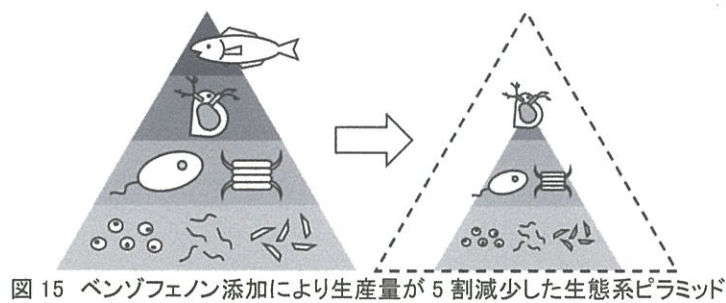


図 14 ベンゾフェノン添加時のミドリムシ群集としての生産量 強光時 ($\text{PAR}1190 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)



[ベンゾフェノンが陸上植物に対して及ぼす影響]

河川やため池などから BP が検出されたことから、それらを農業用水として用いた際の陸上植物に対する影響を調べようと考えた。タマネギを用いて BP が陸上植物の発芽期に及ぼす影響を調べたところ、BP 濃度が増加するにつれ植物の成長が抑制された (図 16, 17)。タマネギの根端の細胞を押しつぶし法により観察したところ、BP 無添加時には細胞分裂の前期から終期の細胞が多数観察された (図 18A)。一方、0.1 ppm の BP 存在下で育てたタマネギでは分裂期にある細胞の数が減少し、1 ppm の BP 存在下では分裂中の細胞がほとんど観察されなかった (図 18B)。また、細胞の形

態においても、1 ppmのBP では核や細胞壁がいびつな形をしたものが多く見られた。さらに、タバコの葉を用いてBP が光合成速度に及ぼす影響を調べたところ、10 ppmのBP 存在下で光合成速度に減少が見られた (図 19)。ミドリムシにおいては高濃度 BP (10 ppm) 存在下で光合成速度に影響が見られなかったことから、BP が光合成速度に及ぼす影響は種によって異なると考えられた。

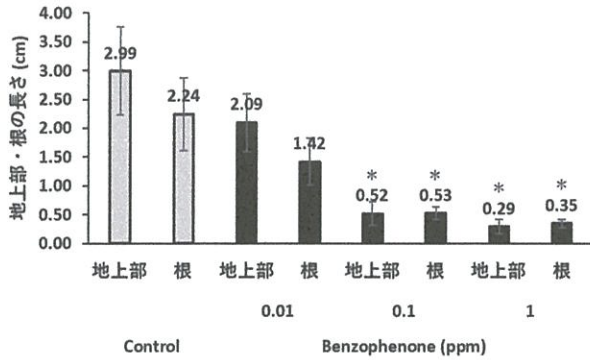


図 16 ベンゾフェノン添加した際のタマネギの発芽期の地上部と根の成長量

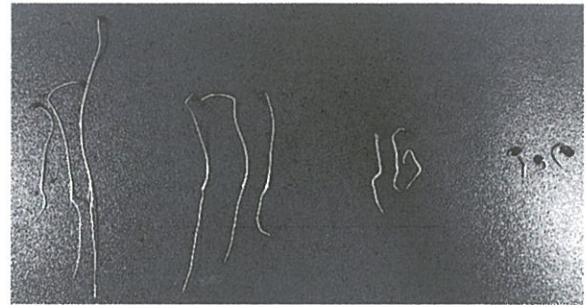


図 17 ベンゾフェノンを添加して育成したタマネギ
左から、Control, ベンゾフェノン濃度 0.01, 0.1, 1 ppm 存在下で栽培したもの

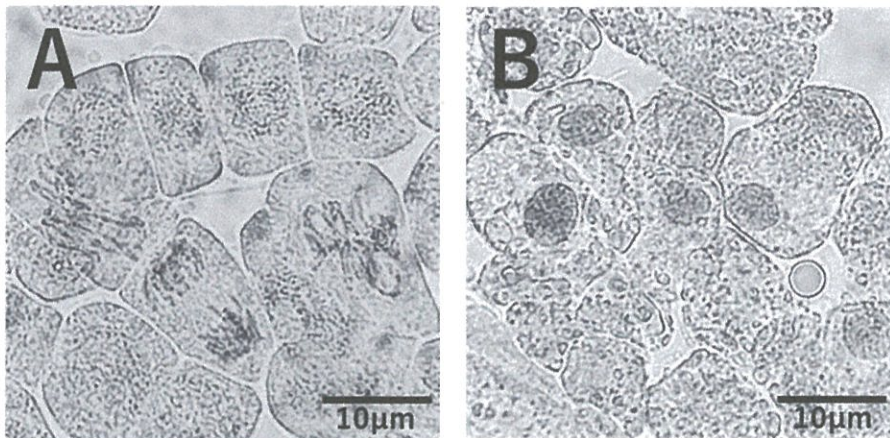


図 18 ベンゾフェノンを添加して育成したタマネギの細胞

A: BP 無添加時、B: ベンゾフェノン濃度 1 ppm。正常な根では染色体が確認できる分裂期の細胞が多数見られた(A)が、1 ppm ベンゾフェノン存在下では分裂期の細胞はほとんど見られなかった(B)。

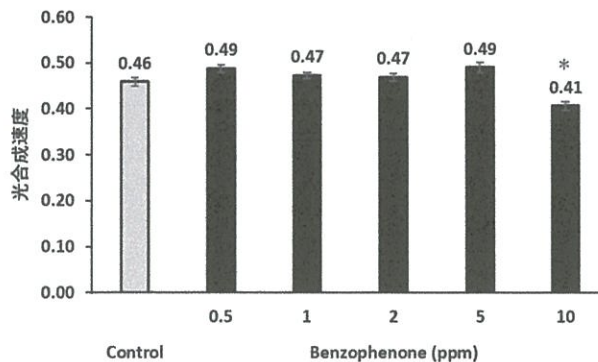


図 19 ベンゾフェノンを添加した際のタバコ葉の光合成速度 (PAR64 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

[ベンゾフェノンの影響を低減する方法の検討]

これまでの実験から、BP は淡水藻類および陸上植物に対して生産量の低下、細胞分裂の抑制、成長抑制など様々な悪影響を及ぼすことが明らかになった。そこで、BP の悪影響を低減するための方法を検討した。活性炭は多孔質の物質で有機物をよく吸着することが知られている。BP 存在時に活性炭を添加することで、活性炭にBP を吸着させ、BP の悪影響を低減することができるのではないかと考え、BP と活性炭を同時に添加してミドリムシの培養を行い、その影響を調べた。その結果、ミドリムシの個体数は加えた活性炭の量にかかわらず、BP のみを加えた場合よりも増加した (図 20)。添加した活性炭量が 0.002 g/10 mL の場合には、BP のみを加えた場合に比べ個体数が約 1.5 倍に増加・回復した。一方、ミドリムシ 1 個体あたりのクロロフィル量は、大きな変化は見られなかった (図 21)。ミドリムシ群集全体の生産量については、添加した活性炭の量の多少にかかわらず、弱光、強光いずれの条件においても常に増加し、最大約 3 割増加・回復した (図 22, 23)。

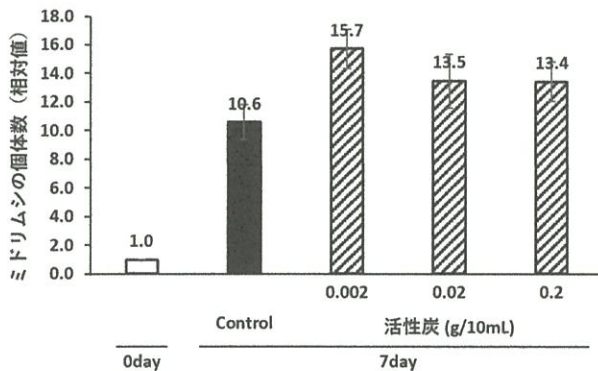


図 20 ベンゾフェノン添加と同時に活性炭を添加した際のミドリムシの個体数

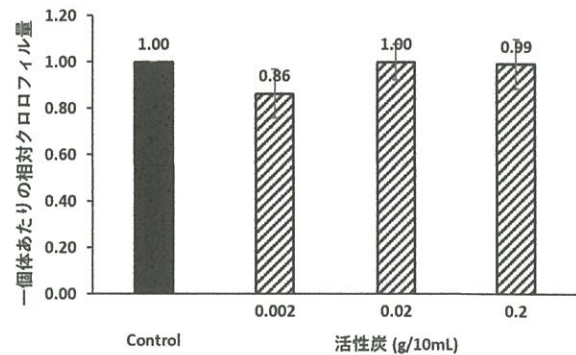


図 21 ベンゾフェノン添加と同時に活性炭を添加した際のミドリムシ 1 個体あたりのクロロフィル量

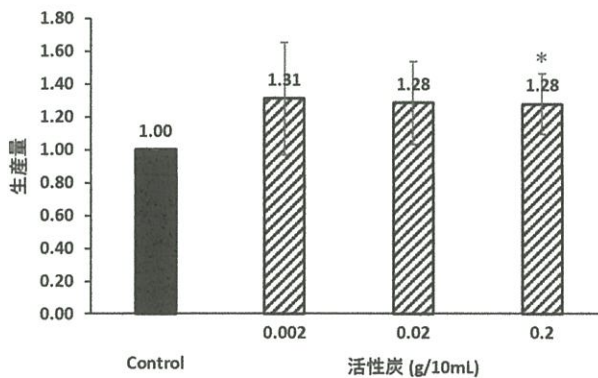


図 22 ベンゾフェノン添加と同時に活性炭を添加した際のミドリムシ群集全体の生産量 弱光時 (PAR47 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

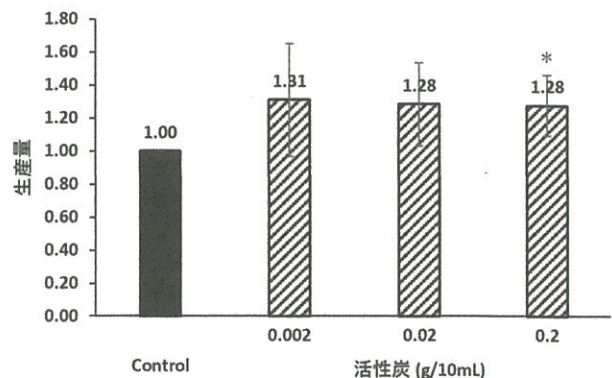


図 23 ベンゾフェノン添加と同時に活性炭を添加した際のミドリムシ群集全体の生産量 強光時 (PAR1190 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

5. 結論

本研究において、BP により淡水藻類の増殖が抑制され、生産量が減少することが明らかになった。特に、日本の河川で検出された BP の平均濃度 0.02 ppm の半分の濃度である 0.01 ppm BP 存在下に

においてさえも、淡水藻類の生産量が最大約 5 割減少することが新たに明らかになった。これは、BP が淡水域生態系に対して深刻な影響を及ぼしうる、という危険性を示すものである。

また、BP による汚染の影響を軽減する物質として、活性炭が有効である可能性が示唆された。排水処理場において BP は完全には除去されず、残りは河川に放出されてしまう可能性がある。たとえば、排水処理場において活性炭を利用することによって、河川に流出する BP を減少させ、淡水域生態系に及ぼす悪影響を軽減できるのではないかと考えられる。

6. 参考文献

- 1) Scheele A et al. Environmental impacts of the ultraviolet filter oxybenzone. *Sci Total Environ.* 2023 Mar 10; 863:160966.
- 2) Jérôme Labille et al. Assessing UV filter inputs into beach waters during recreational activity: A field study of three French Mediterranean beaches from consumer survey to water analysis. *Sci Total Environ.* 2020 Mar 1;706:136010.
- 3) 環境省. 「化学物質の環境リスク評価第 6 巻ベンゾフェノン」平成 20 年 5 月.
- 4) Weisbrod CJ et al. Effects of the UV filter benzophenone-2 on reproduction in fish. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2007 Dec 15;225 (3) :255-66.
- 5) Kim S et al. Effects of benzophenone-3 exposure on endocrine disruption and reproduction of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) --a two generation exposure study. *Aquat Toxicol.* 2014 Oct; 155:244-52.
- 6) 山名 (中野) 憲明. 「ゾウリムシの簡易な培養法」, <https://www.mnc.toho-u.ac.jp/v-laBParamecium/index.html>, (アクセス日 2024 年 8 月 21 日)
- 7) 松本隆仁ら. ユーグレナの光合成生育に与える光質と CO2 濃度の影響. *Eco-Engineering*, 2007, 19 (1), 27-32.
- 8) 日本光合成学会編「光合成」朝倉書店, 2021 年 12 月.
- 9) 山下博史. 活性炭の一般特性と用途について *資源処理技術*, 1990, 37 (2), 82-86.
- 10) Inomura K et al. A Mechanistic Model of Macromolecular Allocation, Elemental Stoichiometry, and Growth Rate in Phytoplankton. *Front Microbiol.* 2020 Feb 28;11:86.

謝辞

本研究は以下の方々にご助言、ご協力いただきました。ここに心から感謝の意を表します。

早稲田大学 園池公毅教授、 東京大学 矢守航准教授、 東京大学 能瀬聡直教授、 明治大学 末松信彦教授、 神戸大学 風間武宏博士、 順天高等学校 亀田麻記子博士、 中谷医工計測技術振興財団、 下中科学研究助成、 日本学術振興会奨励研究