

卒業論文

坑廃水中に生息するミドリムシ類の増殖と光合成機能に
及ぼす鉄、亜鉛、マンガンの効果

平成 22 年 3 月

北九州市立大学 国際環境工学部

環境化学プロセス工学科

2006511051 ブ テツ

目次

1. 概要/Abstract	・ ・ ・ ・ ・ 3
2. 緒言	・ ・ ・ ・ ・ 5
3. 調査	・ ・ ・ ・ ・ 7
3.1 サンプルリング	
3.2 測定方法	
3.3 結果	
4. 培養実験	・ ・ ・ ・ ・ 11
4.1 実験方法	
4.2 結果	
5. 光合成実験	・ ・ ・ ・ ・ 17
5.1 実験方法	
5.2 結果	
6. 結論	・ ・ ・ ・ ・ 18
7. 参考文献	・ ・ ・ ・ ・ 18
8. 付録	・ ・ ・ ・ ・ 19

1. 概要/Abstract

酸性坑排水中に生息する底生の *Euglena* (ミドリムシ) 種は、重金属に耐性を持つことが知られており、重金属を含む廃液の生物処理への利用が期待されている。しかし、その生理生態特性についての報告はほとんどなく、培養条件も確立されていない。本研究では、この種の培養条件を確立するにあたって重金属類の許容濃度を決定する事を目的とした。

研究は *Euglena* 種の増殖に及ぼす重金属の効果について調べ、福岡県鞍手町泉水の坑排水より得た *Euglena* 種を、Herman von Dace (1939) により提唱された培地を対照として、鉄(最大 15 μ M)、マンガン(最大 5 μ M)、亜鉛(最大 1 μ M)を添加した培養液中で培養し、増殖速度を計測した。pH=3.42 に調整した培地 40ml を 100ml フラスコに入れ、これに 7200 個体 ml⁻¹ となるように *Euglena* 種を加え、培養槽温度 20°C、振とう速度 50 回/min で 240 時間培養し、個体群密度の変化を求めた。それから、*Euglena* 種の光合成機能に及ぼす重金属の効果について調べ、培養開始 5 時間後に、培養液 20ml を試験管に移して酸素電極を浸し、密閉状態で温度 20°C、光合成有効波長域の光量子密度束 (PPFD)=373 μ mol m⁻²s⁻¹ で 15 分間の溶存酸素濃度の変化から純光合成速度を求めた。その後、暗黒条件下での溶存酸素濃度の変化から暗呼吸活性を求めた。

本研究で用いた *Euglena* 種の最大個体群密度は、培養液中の Fe, Mn, Zn 濃度がそれぞれ 1 μ M, 0.5 μ M, 0.01 μ M 以上で有意に低下し、それぞれ 15 μ M, 5 μ M, 0.01 μ M 以上では増殖が見られなかった。また、最大比増殖速度は、Fe, Mn, Zn 濃度がそれぞれ 15 μ M, 1 μ M, 1 μ M 以上で有意に低下した。*Euglena* 種の光合成速度は、培養液中の Fe, Mn, Zn 濃度がそれぞれ 1 μ M, 0.05 μ M, 0.01 μ M 以上で有意に低下した。呼吸速度は、それぞれ 15 μ M, 5 μ M, 0.01 μ M 以上で有意に低下した。以上で、*Euglena* 種は、Fe, Mn, Zn に対して、増殖に関してはそれぞれ 15 μ M, 5 μ M, 0.01 μ M 以下の濃度で、また生理的な機能に関してはそれぞれ 15 μ M, 5 μ M, 0.01 μ M 以下の濃度で耐性を持つことがわかった。

泉水の坑排水より得た *Euglena* 種は、鉄、マンガン、亜鉛に対する耐性を持ち、重金属を含む廃水の生物処理に利用可能な種として期待される。今後は培養条件をさらに正確に決定するため、多種類の金属を用い実験を行うことが必要である。

Benthic protozoa, *Euglena mutabilis* Schmitz, colonizes on the sediment making dense biofilm in acid mine drainage (AMD) which was drained from Sennsui, Kurate, Fukuoka. The AMD has low pH and high concentration of heavy metals and sulfate. AMD of Sensui contains 80.3 ppm of Fe, 42.2 ppm of Mn and 0.477 ppm of Zn. *E. mutabiris* was reported as a protozoa which has tolerance to heavy metals. We evaluated the tolerance of the species to Fe, Mn and Zn by measuring population growth rate and photosynthetic rate within the medium containing these heavy metal species. *Euglena* sp. was incubated in the medium proposed by Herman von Dace (1939), adding iron (15 μ M at max), manganese (5 μ M at max) and zinc (1 μ M at max), respectively. *Euglena* sp. from Sennsui AMD was added to the medium without any preliminary treatments and measured population growth. After adding 40mL culture medium into 100mL flask, the pH was adjusted to 3.2, and then 7200 unit mL⁻¹ *Euglena* was added. The incubation flask was kept shaking at a speed of 50 circle/ min for 240 hours at 20 °C, then the density of *Euglena* was determined under microscope. Effect of heavy metals on photosynthesis of *Euglena* was determined 5 hours after the beginning of incubation. 20mL of culture medium was transferred to the sealed test probe and then oxygen electrode was inserted. Temperature was kept at 20 °C and irradiated by two halogen lamps at PPFD (photon flux density of photosynthetically active radiation) = 373 μ molm⁻²s⁻¹ for 15 min. Photosynthetic rate was measured by reading changes in dissolved oxygen concentration in the medium. Dark respiration was also measured, and the rates were presented per individual of the *Euglena* sp. Population growth of the *Euglena* sp. was inhibited at Fe >15 μ M, Mn >5 μ M and Zn >0.01 μ M. Photosynthesis of the *Euglena* sp. was inhibited at Fe >15 μ M, Mn >5 μ M and Zn >0.01 μ M. Thus we concluded that this *Euglena* sp. has tolerance to Fe, Mn and Zn up to the concentration of 1 μ M, 0.5 μ M and 0.001 μ M, respectively. We found that the *Euglena* sp. from the Sensui AMD has tolerance to iron, manganese and zinc, and has a possibility to use for purification of waste water contaminating heavy metals.

2. 緒言

炭坑からの排水である坑排水は、しばしば強酸性で重金属濃度が高い、などの特性を持ち、このような坑排水を酸性坑排水と呼んでいる。福岡県鞍手町の南田川の流域にある泉水にも酸性坑排水の湧出が見られた。図 2.1 より。



図 2.1 南田川にある泉水の酸性坑排水

この坑排水が流出する水路には、底生のミドリムシ種の生育が確認されている。図 2.2 より。



図 2.2:ミドリムシ種 *E.mutabilis*

この底生のミドリムシ種は、世界各地の酸性坑排水中で確認されておいた。重金属を含む環境下に生息する種であるため、重金属廃液の生物処理への利用が期待されている。しかし、このミドリムシ種の生理生態特性についての研究例はわずか、培養条件は確立されていない。

2.1 ミドリムシについて、従来の研究

2.1-1 先行研究①:酸性坑廃水中に存在する低生微生物の水質形成作用(小松 健太)^[7-4]

目的:

泉水の酸性坑廃水には底生微生物ミドリムシが、水質形成作用にどのような影響をあたえることを明らかにすることを目的とした。

実験内容:

泉水の酸性坑廃水の水質を測定し、更に *E.mutabilis* は 12 時間明暗周期培養、明条件培養などの光が当たる条件では光照射によって培養し、水質 pH と Fe 溶存濃度の変化を測定した。

結論:

現地調査で酸性坑廃水と底質中には鉄酸化細菌の存在することを示唆し、酸性条件下で鉄イオンやその化合物を酸化させる事によって水酸化鉄(Ⅲ)を生成する働きによって、溶存鉄濃度を下げ、結果としてpH が低下する働きがあることがわかった。また、*E.mutabilis*の培養によって、培養1日目にpHを抑制することがわかった。これらのことが現場の酸性坑廃水で起こる現象と考えられる。さらに暗条件下では培養日数10日目以降で*E.mutabilis*+底質でpH が低下し、溶存鉄濃度を増加させる働きがあることがわかり、さらに酸性坑廃水中に存在する*E.mutabilis* が別の水質形成プロセスに関わる可能性があることが示唆される。このためさらに培養条件を変えさらなる検討が必要である。

2.1-2 先行研究②: *Euglena mutabiris* の生育環境と光合成機能の解析(田中麻莉)^[7-5]

目的:

泉水の坑排水水中の低生微生物 *Euglena mutabiris* の生育が適する pH 環境を解析するために、光合成機能を解析するための培養実験を行うことを目的とした。

実験内容: 分布調査と培養実験を行うことより、ミドリムシの生育が適する水質を明らかにした。また、培養液中 pH の変化によって、ミドリムシの増殖と生体機能(光合成活性と呼吸活性)を測定した。

結論:

分布調査から、*E.mutabiris* は Na、Ca、Fe を多く含む水質が適していることがわかった。*E.mutabiris* は好酸性にも関わらず、pH7.73 でも生育していることがわかった。また、*E.mutabiris* の光合成機能を解析すると、pH8 のとき生理活性が最大値を示した。培養を続けていくと生理活性は低下し、pH2 のとき活性は安定していた。

そこで、以上の研究によって、本研究では、このミドリムシ種は重金属に対し、増殖及び生理的な耐性を明らかに、重金属廃液の生物処理に利用する場合の培養条件を決定することを目的として、重金属に対する増殖と光合成機能の応答を調べた。

3. 調査

3.1 サンプルング

南田川の流域にある泉水の酸性坑廃水の中段の場所で大きな柄杓を用い、ゆっくり丁寧にミドリムシ形成したバイオフィーム部分だけをすくった。サンプルを採取した後、1L のポリビンに満タンに入れて、クーラーボックスに入れて、車の中に固定させて2時間で持ち帰った。実験室に帰ってから、採取したサンプルを3℃の冷蔵庫に保存した。ミドリムシ死んだ次第にサンプルングを繰り返した。

サンプルング日期:2009 年 6 月 3 日(水・晴)、6 月 29 日(月・晴)、7 月 16 日(木・晴)、8 月 17 日(月・雲)、9 月 25 日(金・晴)、10 月 15 日(木・雲)、11 月 6 日(金・雲)、11 月 18 日(水・晴)、12 月 4 日(金・雲)、12 月 22 日(火・雲)

3.2 測定

現場:水温、pH、EC(電気伝導度)、DO(溶存酸素濃度)

実験室:TN、TP、TOC、イオンクロ、溶存金属

3.2.1 水温、pH、EC(電気伝導度)、DO(溶存酸素濃度)

3.2.1.1 定量方法

温度はデジタルサーモメータ(iuchi,MODEL2455)で測定した。pH、EC は pHメータ(HORIBA,D-54)に pH 複合電極(プラスチックボディ電極、1962-10D)および、浸漬形導電率電極(9382-10D)を接続したもので測定した。pH はガラス電極法、EC は交流 2 電極方式で測定した。DO は溶存酸素計(HORIBA,OM-51)に防水溶存酸素電極を接続したもので測定した。測定方式は隔膜式ガルバニ電池法であった。

3.2.2TN 測定

3.2.2.1.測定原理

水中の有機体窒素、無機態窒素などさまざまな形態があるが、これらの状態の窒素をペルオキシ二硫酸カリウム水溶液によって酸化させ、 NO_3^- の形にする。これに水酸化ナトリウムを加えることによってN に分解し、この形状の窒素を220nm の

波長によって吸光度を測定し、定量を行う(ペルオキシ二硫酸カリウム・水酸化ナトリウム分解・紫外線吸光光度法(JIS K0102 45.2))。

3.2.2.2. 試薬調製

(1)混合試薬酸化剤:ペルオキシ二硫酸カリウム25g、ホウ酸15g、3.75M 水酸化ナトリウム水溶液50mLを超純水に入れ500mLに調製しガラス瓶に入れ、冷蔵庫で保存した。

(2)硝酸カリウム標準液:硝酸カリウム7.2182g をイオン交換水に溶かし調製し1Lに希釈し、ポリエチレン容器に保存した。この溶液は1000mg/Lとなるのでこれをもとに0,2,4,6,8mg/L の5つの濃度の水溶液を調製した。

3.2.2.3. 定量方法

(1)共栓付き口径18mmの試験管にポリエチレン容器に保存したサンプルと硝酸カリウム標準液(0ppm,2ppm,4ppm,6ppm,8ppmに調整したもの)をそれぞれ5mlずつとり、それらに混合試薬を5mlずつ加えた。

(2)これらを密封し、120℃で30分オートクレーブ処理を行った。

(3)次に分光光度計(日本分光Ubest シリーズV-530 型)を用いて220nm の波長でまず硝酸カリウム水溶液の濃度を測り、検量線を作成した。

(4)(3)で作成した検量線を元に、各サンプルの濃度の定量を行った。

3.2.3.TP測定

3.2.3.1.試薬調製

(1)ペルオキシ二硫酸カリウム水溶液:ペルオキシ二硫酸カリウムをイオン交換水に入れ5%水溶液を調製し、ガラス瓶に入れ冷蔵庫にて3℃で保存した。

(2)モリブデン酸アンモニウム水溶液:パラモリブデン酸アンモニウム3gを超純水に溶かし100mlに調製し、ガラス容器入れ冷蔵庫にて3℃で保存した。

(3)硫酸:濃硫酸35mlを225mlのイオン交換水に加え調製し、ガラス瓶に保存した。

(4)アスコルビン酸水溶液:L-アスコルビン酸2.7gを50mlのイオン交換水に混ぜ調製した。測定ごとに調製し、余りは廃棄した。

(5)吐酒石(酒石酸アンチモニルカリウム)水溶液:0.068gの酒石酸アンチモニルカリウムをイオン交換水50mlに溶かし水溶液を調製し、ガラス瓶に入れ、冷蔵庫にて3℃で保存した。

(6)混合試薬酸化剤:上で調製したモリブデン酸アンモニウム水溶液と硫酸、アスコルビン酸水溶液、酒石酸アンチモニルカリウム水溶液を2:5:2:1の割合(体積比)で混ぜ調製した。測定ごとに調製し、余りは廃棄した。

(7)標準リン酸塩溶液:105℃、24時間乾燥させた1.433gのリン酸二水素カリウムを水に溶かし溶解後、1Lに希釈しガラス瓶に入れ冷蔵庫にて保存した。この溶液は1000mg/L となるのでこれをもとに0,0.5,1,2,3mg/Lの濃度の溶液を作成した。

3.2.3.2. 定量方法

(1)共栓付き試験管にポリエチレン容器に保存したサンプルと標準リン酸溶液をそれぞれ10mLずつとり、それらに5%ペルオキソ二硫酸カリウム水溶液を1.6mLずつ加えた。

(2)サンプルと5つの濃度の標準リン酸溶液を120℃で30分オートクレーブ処理を行った。

(3)調製した混合試薬を1.16mlオートクレーブ後のサンプルと標準リン酸溶液に1.16mLずつ加えた。加えたら試験管振とう器で直ちに混ぜた。

(4)混合試薬を加えた後2時間以内に885nmの波長で測定した。標準リン酸溶液で検量線を作成したあとにそれを元にサンプルの濃度を測定した。

3.2.4 TOC測定

3.2.4.1 定量方法

全有機炭素計(島津製作所、TOC-VCSH)を使用して燃焼触媒酸化方式によりNPOC、TC を測定することによって TOC、IC を求めた。

3.2.4.2 測定原理

水中に存在する炭素には全無機体炭素(TIC)と全有機体炭素があり、これらをあわせたものを全炭素である。今回は燃焼触媒酸化方式を使用する。キャリアガスが流れ、酸化触媒を充填させた燃焼管を、680℃ に加熱させる。試料を、燃焼管内に注入すると、試料中のTC が燃焼、分解し二酸化炭素になる。これらのガスを含むキャリアガスを除湿機で冷却、除湿し、ハロゲンスクラバでハロゲンガスを吸収させる。残りのガスに含まれる二酸化炭素を、非分散型赤外線式ガス分析部(NDIR)で検出し、検出信号から得られるピーク面積から定量を行う。また、装置内のシリンジに試料を取り込み、pH3 以下になるように塩酸を加えると、炭酸塩はすべて二酸化炭素を遊離し、キャリアガスで曝気すると溶存性の二酸化炭素と共にガス中に遊離する。このようにTICを除いた試料のTCを定量することでTOC を求める。

3.2.5 溶存金属(Na,K,Ca,Fe,Mn,Zn)

3.2.5.1 定量方法

ICP 発光分光分析法で測定した。装置はパーキンエルマー・Optima 4300DV であ

る。

3.2.5.2測定原理

ICP－AES 法とは発光分光分析法の一つの手法である。分析試料にプラズマのエネルギーを外部から与えると含有されている成分元素が励起される。その励起された原子が低いエネルギー準位に戻るときに発光線が(スペクトル線)放出され、光子の波長に相当する発光線を測定する方法である。発光線の位置から成分元素の種類を判定し、その強度から各元素の含有量を求める。

3.3 測定結果

Table3.3.1:南田川にある泉水から湧出坑排水水質

T[℃]	pH[-]	EC [mS/mol]	TN[ppm]	TP[ppm]	TOC[ppm]
20	4.32	213	3.15	0.29	0.06

Table3.3.2: 南田川にある泉水から湧出坑排水の溶存金属

Na[ppm]	Mg[ppm]	K[ppm]	Ca[ppm]	Mn[ppm]	Fe[ppm]	Zn[ppm]
96.60	591.00	37.20	945.00	42.20	80.30	0.48

Table3.3.2 より、ミドリムシ種の存在が確認されている泉水の酸性坑排水中の金属濃度をICPで定量すると、鉄、マンガン、亜鉛が、この地域の河川水より高い濃度で検出されました。したがって、鉄、マンガン、亜鉛に注目して、これらの金属を含む培養液中でのミドリムシ種の増殖速度と光合成・呼吸機能の測定を行いました。

4 培養実験

4.1 実験方法

基本培地を調製し、オートクレーブで滅菌、冷却後、硫酸と水酸化ナトリウムで、pHを3.42に調整した。その後、培地40mLを100mL三角フラスコに入れ、金属濃度Fe:1,5,10,15,20,40,60,80,100μM、Mn:0.05,0.5,1,5μM、Zn:0.001,0.01,0.1,1,5μMを添加し、ミドリムシ種の個体群密度が7200個体/mLになるように、現場から採取したミドリムシ種を含む坑排水1mLを培地に加えました。恒温振とう水槽恒温槽(48cmx40cmx15cm(H)、水位:12cm、温度:20℃
振幅:20mm、振とう速度:50回/min)で培養した。培養開始後、時間ごとに培養液50μLを採取し、個体群密度を検鏡により計測した。

4.2 実験結果

実験は、普通の培地に何も添加しなかった培地でミドリムシの培養(重金属 0 倍地とする)、Fe を添加した培地、Mn を添加した培地、Zn を添加した培地でミドリムシの培養に分けて行った。結果は、以下の通りで、50 μ L の培養液中、ミドリムシの個体数を計測した。

Table.4.2.1 重金属が0のとき、ミドリムシの増殖結果

時間[h]	1 回	2 回	3 回	4 回
0	11 個体	11 個体	11 個体	11 個体
24	12 個体	12 個体	12 個体	12 個体
50	15 個体	16 個体	17 個体	12 個体
74	30 個体	29 個体	31 個体	17 個体
94	55 個体	53 個体	55 個体	30 個体
116	68 個体	67 個体	65 個体	56 個体
140	77 個体	80 個体	81 個体	66 個体
165	88 個体	91 個体	93 個体	79 個体
189	23 個体	24 個体	26 個体	90 個体
237	9 個体	10 個体	11 個体	24 個体
331	4 個体	5 個体	6 個体	9 個体

(数字は 50 μ L の培養液中、ミドリムシの個体数)

Table.4.2.2 Fe を含む培地でミドリムシの増殖結果

1 回目				
時間[h]	1 μ M	5 μ M	10 μ M	15 μ M
0	9 個体	6 個体	6 個体	3 個体
24	21 個体	15 個体	9 個体	6 個体
48	36 個体	15 個体	12 個体	18 個体
72	34 個体	12 個体	3 個体	0 個体
95	15 個体	6 個体	0 個体	0 個体
120	9 個体	3 個体	0 個体	0 個体
145	0 個体	0 個体	0 個体	0 個体
2 回目				
時間[h]	1 μ M	5 μ M	10 μ M	15 μ M
0	8 個体	9 個体	8 個体	7 個体

24	19 個体	17 個体	9 個体	8 個体
48	33 個体	15 個体	13 個体	14 個体
72	35 個体	11 個体	8 個体	6 個体
95	18 個体	4 個体	4 個体	0 個体
120	12 個体	2 個体	0 個体	0 個体
145	4 個体	0 個体	0 個体	0 個体
3 回目				
時間[h]	1μM	5μM	10μM	15μM
0	8 個体	7 個体	6 個体	6 個体
24	22 個体	16 個体	8 個体	9 個体
48	35 個体	14 個体	11 個体	15 個体
72	32 個体	10 個体	7 個体	8 個体
95	14 個体	5 個体	2 個体	7 個体
120	7 個体	3 個体	0 個体	0 個体
145	0 個体	0 個体	0 個体	0 個体

(数字は 50μL の培養液中、ミドリムシの個体数)

Table4.2.3 Mn を含む培地でミドリムシの増殖結果

1 回目				
時間[h]	0.05μM	0.5μM	1μM	5μM
0	8 個体	9 個体	9 個体	8 個体
20	9 個体	13 個体	13 個体	10 個体
45	13 個体	12 個体	13 個体	12 個体
70	14 個体	9 個体	8 個体	7 個体
95	12 個体	11 個体	6 個体	6 個体
115	8 個体	8 個体	4 個体	4 個体
140	8 個体	6 個体	3 個体	2 個体
165	4 個体	3 個体	1 個体	0 個体
186	3 個体	2 個体	0 個体	0 個体
210	1 個体	0 個体	0 個体	0 個体
225	0 個体	0 個体	0 個体	0 個体
2 回目				
時間[h]	0.05μM	0.5μM	1μM	5μM
0	7 個体	8 個体	9 個体	8 個体
20	9 個体	12 個体	12 個体	11 個体

45	12 個体	12 個体	13 個体	13 個体
70	13 個体	11 個体	7 個体	8 個体
95	11 個体	9 個体	6 個体	7 個体
115	8 個体	7 個体	3 個体	3 個体
140	7 個体	6 個体	3 個体	1 個体
165	3 個体	4 個体	1 個体	0 個体
186	2 個体	1 個体	0 個体	0 個体
210	0 個体	0 個体	0 個体	0 個体
225	0 個体	0 個体	0 個体	0 個体
3 回目				
時間[h]	0.05 μ M	0.5 μ M	1 μ M	5 μ M
0	9 個体	8 個体	9 個体	8 個体
20	10 個体	11 個体	10 個体	9 個体
45	15 個体	15 個体	13 個体	11 個体
70	14 個体	16 個体	8 個体	8 個体
95	11 個体	12 個体	5 個体	4 個体
115	9 個体	7 個体	3 個体	3 個体
140	8 個体	5 個体	3 個体	1 個体
165	4 個体	2 個体	1 個体	0 個体
186	4 個体	1 個体	0 個体	0 個体
210	1 個体	0 個体	0 個体	0 個体
225	0 個体	0 個体	0 個体	0 個体

(数字は 50 μ L の培養液中、ミドリムシの個体数)

Table4.2.4 Zn を含む培地でミドリムシの増殖結果

1 回目					
時間[h]	0.001 μ M	0.01 μ M	0.1 μ M	1 μ M	5 μ M
0	6 個体	7 個体	6 個体	6 個体	6 個体
20	8 個体	9 個体	4 個体	5 個体	3 個体
44	5 個体	7 個体	4 個体	3 個体	0 個体
70	4 個体	5 個体	3 個体	2 個体	0 個体
95	5 個体	4 個体	1 個体	0 個体	0 個体
120	3 個体	4 個体	0 個体	0 個体	0 個体

143	1 個体	2 個体	0 個体	0 個体	0 個体
2 回目					
時間[h]	0.001 μ M	0.01 μ M	0.1 μ M	1 μ M	5 μ M
0	6 個体	6 個体	7 個体	5 個体	6 個体
20	7 個体	9 個体	5 個体	4 個体	4 個体
44	5 個体	8 個体	5 個体	2 個体	0 個体
70	5 個体	6 個体	3 個体	0 個体	0 個体
95	4 個体	5 個体	1 個体	0 個体	0 個体
120	3 個体	4 個体	0 個体	0 個体	0 個体
143	1 個体	2 個体	0 個体	0 個体	0 個体
3 回目					
時間[h]	0.001 μ M	0.01 μ M	0.1 μ M	1 μ M	5 μ M
0	6 個体	7 個体	7 個体	6 個体	5 個体
20	7 個体	9 個体	6 個体	5 個体	2 個体
44	8 個体	11 個体	4 個体	5 個体	0 個体
70	6 個体	8 個体	4 個体	2 個体	0 個体
95	5 個体	6 個体	3 個体	0 個体	0 個体
120	3 個体	4 個体	1 個体	0 個体	0 個体
143	1 個体	2 個体	0 個体	0 個体	0 個体

(数字は 50 μ L の培養液中、ミドリムシの個体数)

以上のデータより、平均値を取って、ミドリムシの増殖曲線を求めた。

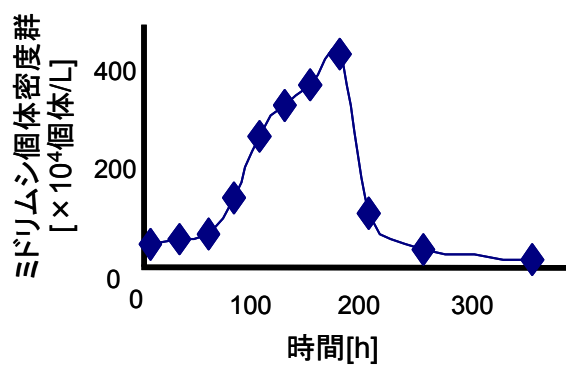


Fig.4.2.1: 重金属 0 培地でミドリムシ増殖曲線

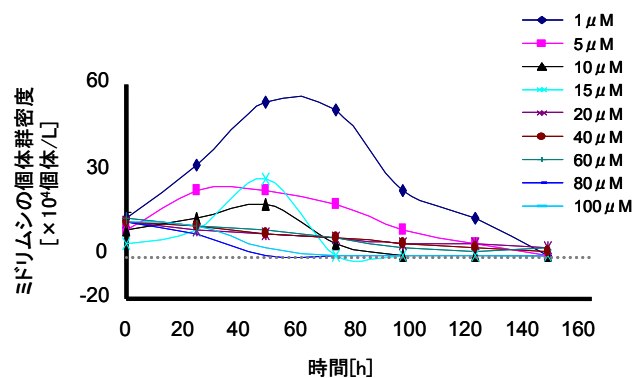


Fig4.2.2:Fe を含む培地でミドリムシの増殖曲線

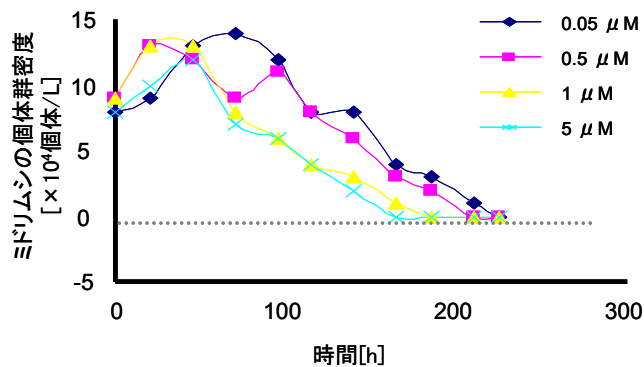


Fig4.2.3:Mn を含む培地でミドリムシの増殖曲線

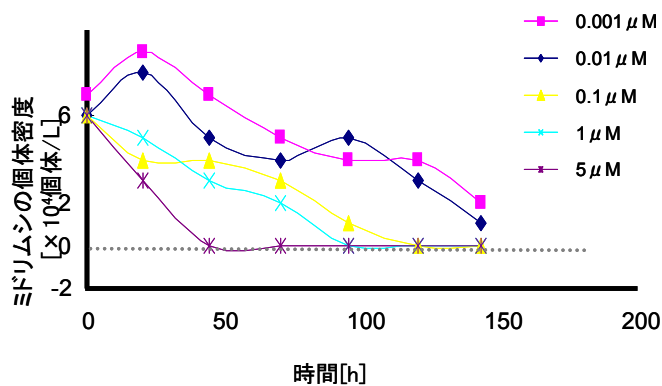


Fig4.2.4:Zn を含む培地でミドリムシの増殖曲線

増殖曲線の Logistic 方程式曲線をもとに、最大個体群密度、最大個体群密度までの培養時間、および最大比増殖曲線をパラメータとして求め、重金属添加の影響を、金属間で比較した。

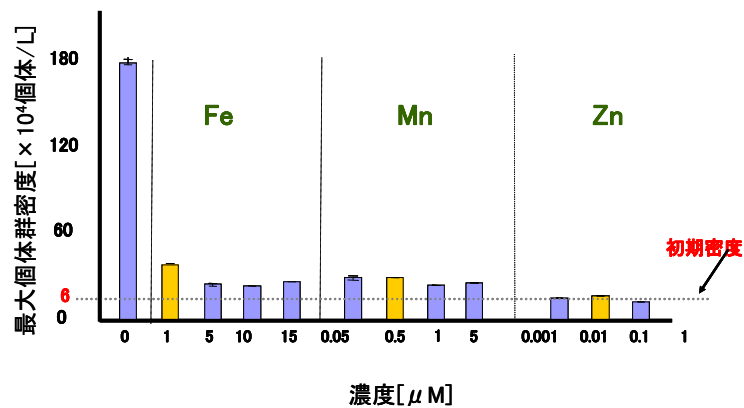


Fig4.2.5:最大個体群密度の比較

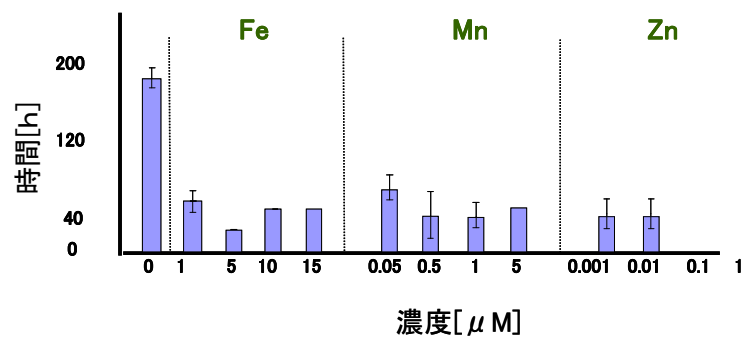


Fig4.2.6:最大個体群密度までの時間の比較

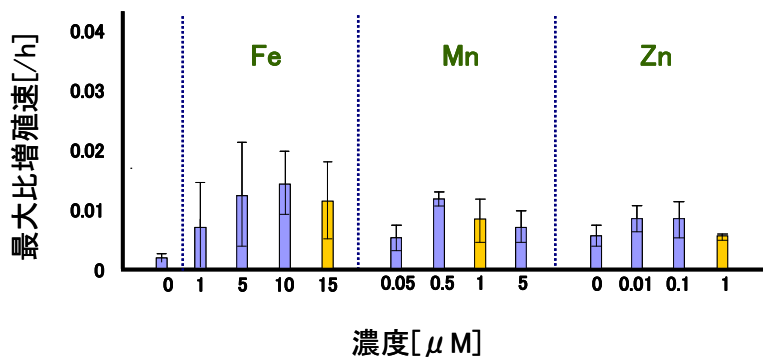


Fig4.2.7:最大比増殖曲線の比較

以上の結果から、本研究で用いたミドリムシ種は、Fe が 20μM以上、Mn が 5μM以上、Zn が 0.01μM以上になると、ミドリムシの増殖停止することが分かった。最大個体群密度は、培養液中の Fe,Mn,Zn の濃度がそれぞれ1μM,5μM,0.01μM以上で有意に低下し。また、最大比増殖速度は、Fe,Mn,Zn の濃度がそれぞれ 15μM,1μM,1μMで有意に低下することが分かった。

5 光合成実験

5.1 実験方法

対照実験重金属0として、濃度が400個体/mLのミドリムシを含む坑廃水を直接利用して、20mLを分取して、2分間乾燥空気でバブリング(流速:0.74mL/s)した後、試験管に移し、図 5.1.1 に示す光合成測定装置で水温が20℃、PPFDが373.8 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ポータブル溶存酸素計を用い、光照射した状態の光合成速度を15分間測定し、アルミホイルで覆い光を遮断した状態の呼吸速度を15分間測定した。

同様の方法で、イオン交換水を利用して、測定した。

最後は、それぞれ濃度の重金属塩を含む300mLの培養液に、泉水坑排水中のミドリムシを、個体群密度が400個体/mLとなるように加えて5時間培養した後、同様の方法で光合成速度と呼吸速度を測定した。



Fig5.1.1:光合成測定装置

5.2 実験結果

光合成及び呼吸の測定結果の300s~870s間の変化曲線の光合成活性・呼吸活性を求め、それぞれ重金属、濃度の10回測定値を平均値と標準偏差を求めた。イオン交換水だけの場合でも、酸素も消費するので、平均値と標準偏差の値からイオン交換水の明条件測定値を加算し、暗条件測定値を減らしたうえで、1個体ミドリムシの光合成活性、呼吸活性を求めた、図 5.2.1 より。

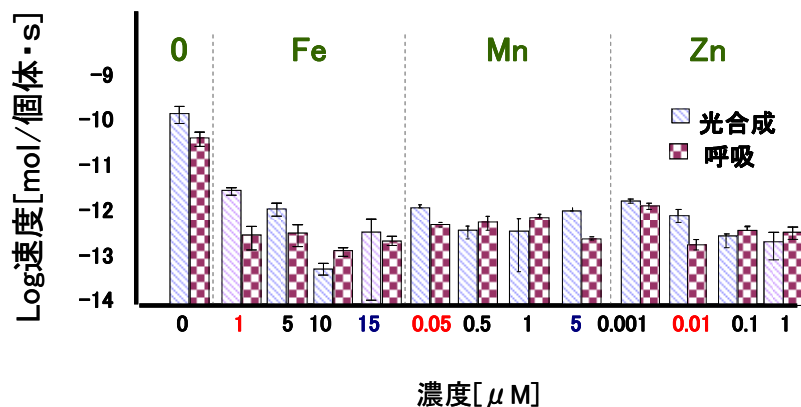


Fig5.2.1:光合成・呼吸活性

Fig5.2.1 より、本研究を用いたミドリムシ種の光合成速度は、培養液中のFe,Mn,Zn 濃度がそれぞれ1μM,0.05μM,0.01μM以上で有意に低下し、また、呼吸速度は、それぞれ10μM,5μM,0.01μM以上で有意に低下することが分かった。

6 結論

泉水の坑排水より得たミドリムシ種は、Fe,Mn,Zn に対して、増殖に関してはそれぞれ15 μM, 5μM, 0.01μM 以下の濃度で、また生理的な機能に関してはそれぞれ15μM, 5μM, 0.01μM 以下の濃度で耐性を持つことがわかった。したがって、重金属を含む廃水の生物処理への利用が可能であることがわかった。今後は、培養条件をさらに正確に決定するため、多種類の金属を用い実験を行うことと培養前後培養液水質成分の変化を測定することが必要である。

7 参考文献

- 1)HERMAN VON DACH,Department of Physiology,Georgetown University School of Medicine,Washington,D.C. 1939 THE EFFECT OF pH ON PURE CULTURES OF EUGLENA MUTABILIS¹
- 2)M.M. Olaveson & C.Nalewajko Division of Life Sciences, University of Toronto at Scarborough, 1265 Military Trail, Scarborough, Ontario, Canada, M1C 1A4. Effects of acidity on the growth of two Euglena species P51
- 3)Dieter Lessmann, Rainer Deneke, Remo Ender, Mike Hemm, Maria Kapfer, Hartwig Krumbeck, Kathrin Wollmann & Brigitte Nixdorf. Lake Plessa 107(Lusatia, Germany)–an extremely acidic shallow mining lake
- 4)小松 健太 2008 酸性坑廃水中に存在する低生微生物の水質形成作用 化学プロセス工学部 学士論文
- 5)田中 麻莉 2009 Euglena mutabiris の生育環境と光合成機能の解析 化学プロセス工学部 学士論文

8 付録

8.1Fe を含む培地での溶存酸素測定結果

Table8.1.1Fe(1μM)の光合成測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	3.12	3.18	3.23	3.15	3.17	3.16	4.76	4.72	3.96	3.94
30	2.61	3.03	3.21	2.82	2.91	2.86	4.42	4.23	3.66	3.54
60	2.58	2.99	3.19	2.78	2.88	2.83	4.38	4.17	3.63	3.50
90	2.57	2.95	3.18	2.76	2.87	2.81	4.35	4.14	3.61	3.47
120	2.56	2.95	3.19	2.75	2.87	2.81	4.35	4.13	3.61	3.47
150	2.58	2.95	3.20	2.76	2.89	2.82	4.36	4.14	3.62	3.48
180	2.59	2.95	3.20	2.77	2.89	2.83	4.37	4.15	3.63	3.49
210	2.61	2.96	3.22	2.78	2.91	2.84	4.39	4.17	3.65	3.50
240	2.62	2.96	3.23	2.79	2.92	2.85	4.39	4.18	3.65	3.51
270	2.65	2.98	3.26	2.81	2.95	2.88	4.44	4.22	3.69	3.55
300	2.67	2.98	3.28	2.82	2.97	2.89	4.46	4.23	3.71	3.56
330	2.71	3.01	3.30	2.86	3.00	2.93	4.51	4.29	3.75	3.61
360	2.72	3.03	3.32	2.87	3.02	2.94	4.53	4.31	3.77	3.62
390	2.76	3.05	3.35	2.90	3.05	2.97	4.58	4.35	3.81	3.66
420	2.79	3.07	3.35	2.93	3.07	3.00	4.60	4.39	3.83	3.69
450	2.82	3.09	3.39	2.95	3.10	3.02	4.65	4.43	3.87	3.72
480	2.86	3.09	3.39	2.97	3.12	3.04	4.67	4.46	3.89	3.75
510	2.88	3.12	3.41	3.00	3.14	3.07	4.70	4.50	3.92	3.78
540	2.91	3.13	3.43	3.02	3.17	3.09	4.73	4.53	3.95	3.81
570	2.94	3.15	3.46	3.04	3.2	3.12	4.77	4.56	3.98	3.84
600	2.97	3.17	3.47	3.07	3.22	3.14	4.80	4.6	4.01	3.87
630	2.99	3.19	3.50	3.09	3.24	3.16	4.84	4.63	4.04	3.89
660	3.02	3.20	3.51	3.11	3.26	3.18	4.86	4.66	4.06	3.92
690	3.05	3.23	3.54	3.14	3.29	3.21	4.91	4.71	4.10	3.96
720	3.07	3.24	3.55	3.15	3.31	3.23	4.93	4.73	4.12	3.98
750	3.10	3.26	3.57	3.18	3.33	3.25	4.96	4.77	4.14	4.01
780	3.12	3.27	3.58	3.19	3.35	3.27	4.98	4.79	4.16	4.03
810	3.15	3.30	3.61	3.22	3.38	3.30	5.03	4.83	4.20	4.06
840	3.18	3.30	3.62	3.24	3.40	3.32	5.05	4.86	4.22	4.09
870	3.19	3.31	3.64	3.25	3.41	3.33	5.07	4.87	4.24	4.10

Table8.1.2Fe(1μM)の呼吸測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	3.21	3.28	3.66	3.24	3.43	3.43	5.07	4.86	4.25	4.14
30	3.21	3.33	3.68	3.27	3.44	3.35	5.11	4.9	4.27	4.12
60	3.24	3.33	3.68	3.28	3.46	3.37	5.12	4.92	4.29	4.14
90	3.23	3.33	3.68	3.28	3.45	3.36	5.12	4.92	4.28	4.14
120	3.23	3.33	3.68	3.28	3.45	3.36	5.12	4.92	4.28	4.14
150	3.22	3.32	3.68	3.27	3.45	3.36	5.11	4.9	4.28	4.13
180	3.22	3.31	3.68	3.26	3.45	3.35	5.10	4.89	4.27	4.12
210	3.22	3.30	3.68	3.26	3.45	3.35	5.10	4.89	4.27	4.12
240	3.22	3.31	3.68	3.26	3.45	3.35	5.10	4.89	4.27	4.12
270	3.22	3.30	3.68	3.26	3.45	3.35	5.10	4.89	4.27	4.12
300	3.23	3.32	3.68	3.27	3.45	3.36	5.11	4.91	4.28	4.13
330	3.23	3.32	3.68	3.27	3.45	3.36	5.11	4.91	4.28	4.13
360	3.23	3.31	3.68	3.27	3.45	3.36	5.11	4.9	4.28	4.13
390	3.23	3.31	3.68	3.27	3.45	3.36	5.11	4.9	4.28	4.13
420	3.22	3.31	3.68	3.26	3.45	3.35	5.10	4.89	4.27	4.12
450	3.22	3.30	3.69	3.26	3.45	3.35	5.10	4.89	4.27	4.12
480	3.22	3.30	3.69	3.26	3.45	3.35	5.10	4.89	4.27	4.12
510	3.21	3.29	3.68	3.25	3.44	3.34	5.09	4.87	4.26	4.10
540	3.21	3.29	3.69	3.25	3.45	3.35	5.09	4.87	4.27	4.10
570	3.20	3.28	3.69	3.24	3.44	3.34	5.08	4.86	4.26	4.10
600	3.20	3.27	3.68	3.23	3.44	3.33	5.07	4.85	4.25	4.09
630	3.20	3.27	3.69	3.23	3.44		5.08	4.85	4.26	4.09
660	3.19	3.27	3.69	3.23	3.44	3.33	5.07	4.84	4.25	4.08
690	3.19	3.27	3.69	3.23	3.44	3.33	5.07	4.84	4.25	4.08
720	3.18	3.26	3.69	3.22	3.43	3.32	5.06	4.83	4.24	4.07
750	3.19	3.26	3.68	3.22	3.43	3.32	5.06	4.83	4.24	4.07
780	3.19	3.25	3.68	3.22	3.43	3.32	5.06	4.83	4.24	4.07
810	3.19	3.26	3.69	3.22	3.44	3.33	5.07	4.83	4.25	4.08
840	3.19	3.25	3.68	3.22	3.43	3.32	5.06	4.83	4.24	4.07
870	3.19	3.25	3.68	3.22	3.43	3.32	5.06	4.83	4.24	4.07

Table8.1.3Fe(5μM)の光合成測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	4.47	5.54	5.31	5.00	4.89	4.94	7.66	7.50	6.27	6.22
30	4.48	5.52	5.31	5.00	4.89	4.94	7.65	7.50	6.27	6.22
60	4.50	5.48	5.3	4.99	4.90	4.94	7.64	7.48	6.27	6.21
90	4.52	5.45	5.34	4.98	4.90	4.94	7.65	7.48	6.27	6.21
120	4.53	5.44	5.32	4.98	4.92	4.95	7.65	7.47	6.28	6.21
150	4.54	5.41	5.36	4.97	4.95	4.96	7.65	7.46	6.30	6.21
180	4.56	5.41	5.36	4.98	4.96	4.97	7.66	7.47	6.31	6.22
210	4.57	5.41	5.34	4.99	4.95	4.97	7.66	7.48	6.30	6.22
240	4.59	5.37	5.37	4.98	4.98	4.98	7.66	7.47	6.32	6.22
270	4.60	5.37	5.39	4.98	4.99	4.98	7.68	7.47	6.33	6.22
300	4.63	5.37	5.38	5.00	5.00	5.00	7.69	7.50	6.34	6.25
330	4.64	5.36	5.41	5.00	5.02	5.01	7.70	7.50	6.36	6.25
360	4.67	5.36	5.41	5.01	5.04	5.02	7.72	7.52	6.38	6.26
390	4.67	5.35	5.4	5.01	5.03	5.02	7.71	7.51	6.37	6.27
420	4.69	5.34	5.42	5.01	5.05	5.03	7.72	7.52	6.38	6.27
450	4.70	5.34	5.42	5.02	5.06	5.04	7.73	7.53	6.39	6.28
480	4.73	5.32	5.43	5.02	5.08	5.05	7.74	7.53	6.41	6.29
510	4.74	5.31	5.42	5.02	5.08	5.05	7.73	7.53	6.40	6.29
540	4.75	5.31	5.44	5.03	5.09	5.06	7.75	7.54	6.42	6.30
570	4.78	5.30	5.44	5.04	5.11	5.07	7.76	7.56	6.43	6.61
600	4.80	5.29	5.47	5.04	5.13	5.08	7.78	7.56	6.45	6.32
630	4.84	5.28	5.48	5.06	5.16	5.11	7.80	7.59	6.48	6.35
660	4.85	5.27	5.47	5.06	5.16	5.11	7.79	7.59	6.47	6.35
690	4.88	5.26	5.48	5.07	5.18	5.12	7.81	7.60	6.49	6.36
720	4.92	5.23	5.51	5.07	5.21	5.14	7.83	7.61	6.52	6.37
750	4.94	5.21	5.52	5.07	5.23	5.15	7.83	7.61	6.53	6.38
780	4.95	5.21	5.55	5.08	5.25	5.16	7.85	7.62	6.55	6.39
810	4.97	5.19	5.56	5.08	5.26	5.16	7.86	7.62	6.56	6.39
840	4.99	5.21	5.58	5.10	5.28	5.17	7.89	7.65	6.58	6.41
870	5.00	5.18	5.61	5.09	5.30	5.19	7.89	7.63	6.59	6.41

Table8.1.4Fe(5μM)の呼吸測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	5.26	5.15	5.47	5.20	5.36	5.28	7.94	7.8	6.65	6.54
30	5.30	5.18	5.46	5.24	5.38	5.31	7.97	7.86	6.67	6.58
60	5.29	5.18	5.46	5.23	5.37	5.31	7.96	7.85	6.66	6.58
90	5.29	5.20	5.47	5.24	5.38	5.31	7.98	7.86	6.68	6.58
120	5.29	5.18	5.47	5.23	5.38	5.30	7.97	7.85	6.67	6.57
150	5.29	5.18	5.46	5.23	5.37	5.30	7.96	7.85	6.66	6.57
180	5.31	5.18	5.46	5.24	5.38	5.31	7.97	7.86	6.67	6.58
210	5.30	5.17	5.46	5.23	5.38	5.30	7.96	7.85	6.67	6.57
240	5.29	5.17	5.46	5.23	5.37	5.30	7.96	7.84	6.66	6.57
270	5.30	5.17	5.46	5.23	5.38	5.30	7.96	7.85	6.67	6.57
300	5.29	5.16	5.46	5.22	5.37	5.29	7.95	7.85	6.66	6.57
330	5.28	5.16	5.45	5.22	5.36	5.29	7.94	7.83	6.65	6.56
360	5.27	5.15	5.45	5.21	5.36	5.28	7.93	7.81	6.65	6.54
390	5.27	5.14	5.46	5.20	5.36	5.28	7.93	7.80	6.65	6.54
420	5.26	5.15	5.45	5.20	5.35	5.27	7.93	7.80	6.64	6.53
450	5.26	5.14	5.45	5.20	5.35	5.27	7.92	7.80	6.63	6.53
480	5.26	5.13	5.45	5.19	5.35	5.27	7.92	7.79	6.63	6.53
510	5.26	5.13	5.44	5.19	5.35	5.27	7.91	7.79	6.63	6.53
540	5.25	5.15	5.45	5.20	5.35	5.27	7.92	7.80	6.63	6.53
570	5.25	5.12	5.44	5.18	5.34	5.26	7.90	7.77	6.62	6.51
600	5.24	5.12	5.46	5.18	5.35	5.26	7.91	7.77	6.63	6.51
630	5.24	5.11	5.45	5.17	5.34	5.25	7.90	7.76	6.62	6.50
660	5.22	5.11	5.45	5.16	5.33	5.24	7.89	7.74	6.61	6.49
690	5.22	5.10	5.45	5.16	5.33	5.24	7.89	7.74	6.61	6.49
720	5.22	5.12	5.45	5.17	5.33	5.25	7.89	7.75	6.61	6.50
750	5.21	5.09	5.45	5.15	5.33	5.24	7.87	7.72	6.60	6.48
780	5.21	5.08	5.45	5.14	5.33	5.23	7.87	7.71	6.60	6.47
810	5.22	5.10	5.45	5.16	5.33	5.24	7.88	7.74	6.60	6.49
840	5.21	5.10	5.45	5.15	5.33	5.24	7.88	7.73	6.60	6.48
870	5.20	5.10	5.44	5.15	5.32	5.23	7.87	7.72	6.59	6.47

Table8.1.5Fe(10 μ M)の光合成測定結果

単位: mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	3.41	3.21	3.2	3.31	3.24	3.30	4.91	4.73	4.10	4.13
30	3.24	3.1	3.14	3.17	3.19	3.29	4.74	4.75	3.96	3.96
60	3.16	3.07	3.09	3.14	3.12	3.23	4.66	4.67	3.89	3.89
90	3.08	3.02	3.05	3.08	3.06	3.17	4.57	4.59	3.81	3.81
120	3.03	3.00	2.96	3.01	2.99	3.11	4.49	4.57	3.74	3.76
150	3.00	2.99	2.94	2.99	2.97	3.04	4.46	4.49	3.71	3.73
180	2.96	2.96	2.92	2.96	2.94	2.98	4.42	4.43	3.68	3.69
210	2.93	2.94	2.92	2.93	2.92	2.95	4.39	4.41	3.65	3.66
240	2.92	2.94	2.92	2.93	2.92	2.92	4.39	4.39	3.65	3.65
270	2.90	2.93	2.91	2.91	2.90	2.90	4.37	4.37	3.63	3.63
300	2.90	2.92	2.92	2.91	2.91	2.91	4.37	4.36	3.64	3.63
330	2.91	2.91	2.92	2.91	2.91	2.91	4.37	4.36	3.64	3.63
360	2.90	2.90	2.91	2.90	2.90	2.90	4.35	4.35	3.62	3.62
390	2.89	2.91	2.91	2.90	2.90	2.90	4.35	4.35	3.62	3.62
420	2.90	2.90	2.92	2.90	2.91	2.90	4.36	4.35	3.63	3.62
450	2.91	2.90	2.92	2.90	2.91	2.90	4.36	4.35	3.63	3.62
480	2.92	2.90	2.91	2.90	2.91	2.90	4.36	4.36	3.63	3.63
510	2.91	2.90	2.91	2.90	2.91	2.90	4.36	4.35	3.63	3.62
540	2.90	2.90	2.92	2.90	2.91	2.90	4.36	4.35	3.63	3.62
570	2.90	2.90	2.92	2.90	2.91	2.90	4.36	4.35	3.63	3.62
600	2.91	2.90	2.91	2.90	2.91	2.90	4.36	4.35	3.63	3.62
630	2.91	2.90	2.92	2.90	2.91	2.90	4.35	4.35	3.63	3.62
660	2.91	2.90	2.91	2.90	2.91	2.90	4.36	4.35	3.63	3.62
690	2.90	2.91	2.91	2.90	2.90	2.90	4.36	4.35	3.63	3.62
720	2.90	2.90	2.91	2.90	2.90	2.90	4.35	4.35	3.62	3.62
750	2.91	2.91	2.92	2.91	2.91	2.91	4.37	4.36	3.64	3.63
780	2.91	2.90	2.92	2.90	2.91	2.90	4.36	4.35	3.63	3.62
810	2.93	2.91	2.92	2.92	2.92	2.92	4.38	4.38	3.65	3.65
840	2.92	2.90	2.93	2.91	2.92	2.91	4.37	4.36	3.64	3.63
870	2.92	2.91	2.93	2.91	2.92	2.91	4.38	4.37	3.65	3.64

Table8.1.6Fe(10μM)の呼吸測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	2.91	2.86	2.96	2.88	2.93	2.90	4.36	4.32	3.64	3.61
30	2.91	2.90	2.94	2.90	2.92	2.91	4.37	4.35	3.64	3.63
60	2.92	2.91	2.94	2.91	2.93	2.92	4.38	4.37	3.65	3.64
90	2.92	2.91	2.93	2.91	2.92	2.91	4.38	4.37	3.65	3.64
120	2.92	2.91	2.92	2.91	2.92	2.91	4.37	4.37	3.64	3.64
150	2.91	2.92	2.91	2.91	2.91	2.91	4.37	4.37	3.64	3.64
180	2.91	2.92	2.90	2.91	2.90	2.90	4.36	4.37	3.63	3.63
210	2.92	2.92	2.91	2.92	2.91	2.91	4.37	4.38	3.64	3.64
240	2.92	2.92	2.90	2.92	2.91	2.91	4.37	4.38	3.64	3.64
270	2.92	2.91	2.90	2.91	2.91	2.91	4.36	4.37	3.63	3.64
300	2.92	2.92	2.90	2.92	2.91	2.91	4.37	4.38	3.64	3.64
330	2.92	2.92	2.90	2.92	2.91	2.91	4.37	4.38	3.64	3.64
360	2.92	2.92	2.90	2.92	2.91	2.91	4.37	4.38	3.64	3.64
390	2.92	2.91	2.90	2.91	2.91	2.91	4.36	4.37	3.63	3.64
420	2.92	2.91	2.90	2.91	2.91	2.91	4.36	4.37	3.63	3.64
450	2.91	2.92	2.90	2.91	2.90	2.90	4.36	4.37	3.63	3.63
480	2.91	2.92	2.90	2.91	2.90	2.90	4.36	4.37	3.63	3.63
510	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91	4.36	4.36	3.63	3.63
540	2.91	2.92	2.90	2.91	2.90	2.90	4.36	4.37	3.63	3.63
570	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91	4.36	4.36	3.63	3.63
600	2.91	2.91	2.90	2.91	2.90	2.90	4.36	4.36	3.63	3.63
630	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91	4.36	4.36	3.63	3.63
660	2.91	2.91	2.9	2.91	2.9	2.9	4.36	4.36	3.63	3.64
690	2.91	2.92	2.91	2.91	2.91	2.91	4.37	4.37	3.64	3.64
720	2.90	2.92	2.91	2.91	2.90	2.90	4.36	4.36	3.63	3.63
750	2.90	2.91	2.90	2.90	2.90	2.90	4.35	4.35	3.62	3.62
780	2.89	2.92	2.89	2.90	2.89	2.89	4.35	4.35	3.62	3.62
810	2.90	2.92	2.89	2.91	2.89	2.90	4.35	4.36	3.62	3.63
840	2.89	2.92	2.87	2.90	2.88	2.89	4.34	4.35	3.61	3.62
870	2.89	2.91	2.87	2.90	2.88	2.89	4.33	4.35	3.60	3.62

Table8.1.7Fe(15μM)の光合成測定結果

単位: mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	4.51	3.66	4.01	4.08	4.26	4.17	6.09	6.12	5.17	5.14
30	3.85	3.40	3.84	3.62	3.84	3.73	5.54	5.43	4.69	4.58
60	3.40	3.26	3.69	3.33	3.54	3.43	5.17	4.99	4.35	4.21
90	3.16	3.16	3.55	3.16	3.35	3.25	4.93	4.74	4.14	3.99
120	2.97	2.99	3.51	2.98	3.24	3.11	4.73	4.47	3.98	3.79
150	2.89	2.94	3.47	2.91	3.18	3.04	4.65	4.37	3.91	3.70
180	2.77	2.90	3.42	2.83	3.09	2.96	4.54	4.25	3.81	3.60
210	2.70	2.89	3.41	2.79	3.05	2.92	4.50	4.19	3.77	3.55
240	2.66	2.88	3.38	2.77	3.02	2.89	4.46	4.15	3.74	3.52
270	2.62	2.85	3.37	2.73	2.99	2.86	4.45	4.10	3.70	3.48
300	2.59	2.85	3.36	2.72	2.97	2.85	4.40	4.08	3.70	3.71
330	2.57	2.84	3.35	2.70	2.96	2.83	4.38	4.05	3.69	3.69
360	2.55	2.84	3.34	2.69	2.94	2.82	4.36	4.04	3.68	3.67
390	2.54	2.83	3.34	2.68	2.94	2.81	4.35	4.02	3.66	3.41
420	2.53	2.82	3.33	2.67	2.93	2.80	4.34	4.01	3.63	3.40
450	2.52	2.83	3.33	2.67	2.92	2.79	4.34	4.01	3.63	3.40
480	2.51	2.82	3.33	2.66	2.92	2.79	4.33	3.99	3.62	3.39
510	2.51	2.82	3.31	2.66	2.91	2.78	4.32	3.99	3.61	3.38
540	2.51	2.82	3.32	2.66	2.91	2.78	4.32	3.99	3.61	3.38
570	2.50	2.82	3.31	2.66	2.90	2.78	4.31	3.99	3.60	3.38
600	2.51	2.82	3.30	2.66	2.90	2.78	4.31	3.99	3.60	3.38
630	2.51	2.81	3.32	2.66	2.91	2.78	4.32	3.99	3.61	3.38
660	2.52	2.82	3.30	2.67	2.91	2.79	4.32	4.00	3.61	3.39
690	2.52	2.82	3.30	2.67	2.91	2.79	4.32	4.00	3.61	3.39
720	2.52	2.81	3.30	2.66	2.91	2.78	4.31	3.99	3.61	3.38
750	2.53	2.82	3.30	2.67	2.91	2.79	4.32	4.01	3.61	3.40
780	2.52	2.81	3.29	2.66	2.90	2.78	4.31	3.99	3.60	3.38
810	2.53	2.81	3.29	2.67	2.91	2.79	4.31	4.00	3.61	3.39
840	2.54	2.82	3.31	2.68	2.92	2.80	4.33	4.02	3.62	3.41
870	2.54	2.82	3.31	2.68	2.92	2.80	4.33	4.02	3.62	3.41

Table8.1.8Fe(15μM)の呼吸測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	2.53	2.80	3.28	2.66	2.90	2.78	4.30	3.99	3.6	3.38
30	2.55	2.81	3.29	2.68	2.92	2.80	4.32	4.02	3.62	3.41
60	2.55	2.80	3.28	2.67	2.91	2.79	4.31	4.01	3.61	3.40
90	2.55	2.80	3.27	2.67	2.91	2.79	4.31	4.01	3.61	3.40
120	2.57	2.80	3.28	2.68	2.92	2.80	4.32	4.02	3.62	3.41
150	2.57	2.81	3.29	2.69	2.93	2.81	4.33	4.03	3.63	3.42
180	2.57	2.79	3.29	2.68	2.93	2.80	4.32	4.02	3.62	3.41
210	2.57	2.80	3.29	2.68	2.93	2.80	4.33	4.02	3.63	3.41
240	2.57	2.80	3.29	2.68	2.93	2.80	4.33	4.02	3.63	3.41
270	2.57	2.79	3.28	2.68	2.92	2.80	4.32	4.02	3.62	3.41
300	2.57	2.79	3.27	2.68	2.92	2.80	4.31	4.02	3.61	3.41
330	2.57	2.79	3.27	2.68	2.92	2.80	4.31	4.02	3.61	3.41
360	2.57	2.78	3.27	2.67	2.92	2.79	4.31	4.01	3.61	3.40
390	2.56	2.78	3.27	2.67	2.91	2.79	4.30	4.00	3.60	3.39
420	2.56	2.78	3.27	2.67	2.91	2.79	4.30	4.00	3.60	3.39
450	2.56	2.78	3.26	2.67	2.91	2.79	4.30	4.00	3.60	3.39
480	2.56	2.78	3.26	2.67	2.91	2.79	4.30	4.00	3.60	3.39
510	2.56	2.77	3.26	2.66	2.91	2.78	4.29	3.99	3.60	3.38
540	2.56	2.77	3.25	2.66	2.90	2.78	4.29	3.99	3.59	3.38
570	2.56	2.77	3.26	2.66	2.91	2.78	4.29	3.99	3.60	3.38
600	2.56	2.77	3.25	2.66	2.90	2.78	4.29	3.99	3.59	3.38
630	2.56	2.76	3.25	2.66	2.90	2.78	4.28	3.99	3.59	3.38
660	2.55	2.76	3.25	2.65	2.90	2.77	4.28	3.98	3.59	3.37
690	2.55	2.76	3.24	2.65	2.89	2.77	4.27	3.98	3.58	3.37
720	2.55	2.76	3.24	2.65	2.89	2.77	4.27	3.98	3.58	3.37
750	2.55	2.75	3.24	2.65	2.89	2.77	4.27	3.97	3.58	3.37
780	2.55	2.75	3.24	2.65	2.89	2.77	4.27	3.97	3.58	3.37
810	2.55	2.75	3.24	2.65	2.89	2.77	4.27	3.97	3.58	3.37
840	2.55	2.75	3.23	2.65	2.89	2.77	4.26	3.97	3.57	3.37
870	2.55	2.75	3.23	2.65	2.89	2.77	4.26	3.97	3.57	3.37

8.2Mnを含む培地での溶存酸素測定結果

Table8.2.1Mn(0.05 μ M)の光合成測定結果

単位 : mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	5.33	5.51	5.45	5.10	5.26	5.42	5.39	5.42	5.43	5.20
30	5.26	5.46	5.39	5.04	5.20	5.36	5.32	5.36	5.37	5.14
60	5.25	5.45	5.38	5.03	5.19	5.35	5.31	5.35	5.36	5.13
90	5.24	5.45	5.38	5.03	5.18	5.35	5.31	5.34	5.36	5.13
120	5.23	5.46	5.38	5.03	5.18	5.35	5.3	5.34	5.36	5.13
150	5.22	5.45	5.37	5.02	5.17	5.34	5.29	5.33	5.35	5.12
180	5.21	5.47	5.38	5.03	5.17	5.35	5.29	5.34	5.36	5.13
210	5.22	5.48	5.39	5.04	5.18	5.36	5.3	5.35	5.37	5.14
240	5.24	5.46	5.38	5.03	5.18	5.35	5.31	5.35	5.36	5.13
270	5.25	5.47	5.39	5.04	5.19	5.36	5.32	5.36	5.37	5.14
300	5.25	5.47	5.39	5.04	5.19	5.36	5.32	5.36	5.37	5.14
330	5.26	5.50	5.42	5.07	5.21	5.39	5.34	5.38	5.40	5.17
360	5.28	5.51	5.43	5.08	5.23	5.40	5.35	5.39	5.41	5.18
390	5.32	5.52	5.45	5.10	5.26	5.42	5.38	5.42	5.43	5.20
420	5.32	5.55	5.47	5.12	5.27	5.44	5.39	5.43	5.45	5.22
450	5.33	5.56	5.48	5.13	5.28	5.45	5.4	5.44	5.46	5.23
480	5.36	5.57	5.05	5.15	5.30	5.47	5.43	5.46	5.48	5.25
510	5.37	5.59	5.51	5.16	5.31	5.48	5.44	5.48	5.49	5.26
540	5.39	5.61	5.53	5.18	5.33	5.50	5.46	5.50	5.51	5.28
570	5.41	5.62	5.55	5.2	5.35	5.52	5.48	5.51	5.53	5.30
600	5.43	5.63	5.56	5.21	5.37	5.53	5.49	5.53	5.54	5.31
630	5.45	5.64	5.57	5.22	5.38	5.54	5.51	5.54	5.55	5.32
660	5.47	5.66	5.59	5.24	5.40	5.56	5.53	5.56	5.57	5.34
690	5.49	5.68	5.61	5.26	5.42	5.58	5.55	5.58	5.59	5.36
720	5.52	5.68	5.62	5.27	5.45	5.6	5.57	5.6	5.61	5.38
750	5.53	5.70	5.64	5.29	5.46	5.61	5.58	5.61	5.62	5.39
780	5.55	5.71	5.65	5.30	5.48	5.63	5.60	5.63	5.64	5.41
810	5.56	5.75	5.68	5.33	5.49	5.65	5.62	5.65	5.66	5.43
840	5.58	5.75	5.69	5.34	5.51	5.66	5.63	5.66	5.67	5.44
870	5.59	5.77	5.71	5.36	5.52	5.68	5.65	5.68	5.69	5.46

Table8.2.2Mn(0.05μM)の呼吸測定結果

単位 : mg/L

時間[s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	5.56	5.75	5.68	5.33	5.49	5.65	5.62	5.65	5.66	5.43
30	5.57	5.74	5.68	5.33	5.50	5.65	5.62	5.65	5.66	5.43
60	5.59	5.73	5.68	5.33	5.51	5.66	5.63	5.66	5.67	5.44
90	5.56	5.75	5.68	5.33	5.49	5.65	5.62	5.65	5.66	5.43
120	5.55	5.73	5.67	5.32	5.48	5.64	5.61	5.64	5.65	5.42
150	5.54	5.72	5.66	5.31	5.47	5.63	5.6	5.63	5.64	5.41
180	5.54	5.70	5.64	5.29	5.47	5.62	5.59	5.62	5.63	5.40
210	5.52	5.70	5.64	5.29	5.45	5.61	5.58	5.61	5.62	5.39
240	5.51	5.68	5.62	5.27	5.44	5.59	5.56	5.59	5.60	5.37
270	5.53	5.67	5.62	5.27	5.45	5.60	5.57	5.60	5.61	5.38
300	5.54	5.67	5.62	5.27	5.46	5.60	5.58	5.60	5.61	5.38
330	5.52	5.66	5.61	5.26	5.46	5.59	5.56	5.59	5.59	5.37
360	5.52	5.65	5.6	5.25	5.44	5.58	5.56	5.58	5.59	5.36
390	5.50	5.65	5.6	5.25	5.42	5.57	5.55	5.57	5.58	5.35
420	5.49	5.63	5.58	5.23	5.41	5.56	5.53	5.56	5.57	5.34
450	5.49	5.63	5.58	5.23	5.41	5.56	5.53	5.56	5.57	5.34
480	5.50	5.62	5.58	5.23	5.42	5.56	5.54	5.56	5.57	5.34
510	5.47	5.61	5.56	5.21	5.39	5.54	5.51	5.54	5.55	5.32
540	5.48	5.61	5.56	5.21	5.40	5.54	5.52	5.54	5.55	5.32
570	5.47	5.60	5.55	5.20	5.39	5.53	5.51	5.53	5.54	5.31
600	5.47	5.62	5.57	5.22	5.39	5.54	5.52	5.54	5.55	5.32
630	5.46	5.59	5.54	5.19	5.38	5.52	5.50	5.52	5.53	5.30
660	5.44	5.57	5.52	5.17	5.36	5.50	5.48	5.50	5.51	5.28
690	5.44	5.61	5.55	5.20	5.37	5.52	5.49	5.52	5.53	5.30
720	5.43	5.58	5.53	5.18	5.35	5.50	5.48	5.50	5.51	5.28
750	5.43	5.57	5.52	5.17	5.35	5.5	5.47	5.5	5.51	5.28
780	5.43	5.57	5.52	5.17	5.35	5.5	5.47	5.50	5.51	5.28
810	5.42	5.56	5.51	5.16	5.34	5.49	5.46	5.49	5.50	5.27
840	5.42	5.58	5.52	5.17	5.35	5.50	5.47	5.50	5.51	5.28
870	5.43	5.58	5.53	5.18	5.35	5.50	5.48	5.50	5.51	5.28

Table8.2.3Mn(0.5μM)の光合成測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	5.81	4.09	4.66	4.44	5.19	4.87	4.23	4.95	4.80	4.58
30	5.80	4.05	4.63	4.41	4.17	4.84	5.21	4.92	4.77	4.55
60	5.79	4.06	4.56	4.37	5.15	4.83	5.21	4.92	4.74	4.52
90	5.78	4.03	4.61	4.39	5.15	4.82	5.19	4.90	4.75	4.53
120	5.80	4.04	4.62	4.41	5.17	4.84	5.21	4.92	4.77	4.55
150	5.78	4.06	4.63	4.41	5.16	4.84	5.20	4.92	4.77	4.55
180	5.80	4.07	4.64	4.42	5.18	4.85	5.22	4.93	4.78	4.56
210	5.81	4.08	4.65	4.43	5.19	4.86	5.23	4.94	4.79	4.57
240	5.82	4.08	4.65	4.44	5.20	4.87	5.24	4.95	4.80	4.58
270	5.85	4.07	4.66	4.45	5.22	4.88	5.25	4.96	4.81	4.59
300	5.83	4.09	4.67	4.45	5.21	4.88	5.25	4.96	4.81	4.59
330	5.84	4.10	4.68	4.46	5.22	4.89	5.26	4.97	4.82	4.60
360	5.86	4.10	4.68	4.47	5.23	4.90	5.27	4.98	4.83	4.61
390	5.86	4.11	4.69	4.48	5.24	4.92	5.27	4.98	4.83	4.62
420	5.88	4.13	4.71	4.49	5.25	4.92	5.29	5.00	4.85	4.63
450	5.90	4.14	4.72	4.51	5.27	4.94	5.31	5.02	4.87	4.65
480	5.91	4.15	4.73	4.52	5.28	4.95	5.32	5.03	4.88	4.66
510	5.92	4.16	4.74	4.53	5.29	4.96	5.33	5.04	4.89	4.67
540	5.94	4.15	4.74	4.53	5.3	4.96	5.34	5.04	4.89	4.67
570	5.94	4.19	4.77	4.55	5.31	4.98	5.35	5.06	4.91	4.69
600	5.96	4.18	4.77	4.56	5.33	4.99	5.36	5.07	4.92	4.70
630	5.97	4.20	4.79	4.57	5.34	5.00	5.38	5.08	4.93	4.71
660	5.97	4.22	4.80	4.58	5.34	5.01	5.38	5.09	4.94	4.72
690	5.99	4.23	4.81	4.60	5.36	5.03	5.40	5.11	4.96	4.74
720	6.00	4.26	4.84	4.62	5.36	5.05	5.42	5.13	4.98	4.76
750	6.02	4.29	4.86	4.64	5.40	5.07	5.44	5.15	5.00	4.78
780	6.03	4.31	4.88	4.66	5.41	5.09	5.45	5.17	5.02	4.80
810	6.04	4.33	4.90	4.68	5.43	5.11	5.47	5.18	5.04	4.82
840	6.04	4.37	4.92	4.70	5.44	5.13	5.48	5.20	5.06	4.84
870	6.05	4.42	4.96	4.73	5.46	5.16	5.50	5.23	5.09	4.87

Table8.2.4Mn(0.5μM)の呼吸測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	6.05	4.38	4.93	4.71	5.45	5.14	5.49	5.21	5.07	4.85
30	6.04	4.39	4.94	4.71	5.44	5.14	5.49	5.21	5.07	4.85
60	6.06	4.36	4.92	4.70	5.45	5.13	5.49	5.21	5.06	4.84
90	6.05	4.37	4.93	4.71	5.45	5.14	5.49	5.21	5.07	4.85
120	6.05	4.36	4.92	4.70	5.44	5.13	5.48	5.20	5.06	4.84
150	6.04	4.36	4.92	4.70	5.44	5.13	5.48	5.20	5.06	4.84
180	6.03	4.36	4.91	4.69	5.43	5.12	5.47	5.19	5.05	4.83
210	6.01	4.37	4.91	4.69	5.42	5.12	5.46	5.19	5.05	4.83
240	6.01	4.37	4.91	4.69	5.42	5.12	5.46	5.19	5.05	4.83
270	6.02	4.38	4.92	4.70	5.43	5.13	5.47	5.20	5.06	4.84
300	6.00	4.37	4.91	4.68	5.41	5.11	5.45	5.18	5.04	4.82
330	6.00	4.38	4.92	4.69	5.41	5.12	5.46	5.19	5.05	4.83
360	5.99	4.39	4.92	4.69	5.41	5.12	5.45	5.19	5.05	4.83
390	6.01	4.39	4.93	4.70	5.42	5.13	5.47	5.20	5.06	4.84
420	6.01	4.40	4.93	4.70	5.42	5.13	5.47	5.20	5.06	4.84
450	5.98	4.40	4.92	4.69	5.40	5.12	5.45	5.19	5.05	4.83
480	6.00	4.38	4.92	4.69	5.41	5.12	5.46	5.19	5.05	4.83
510	6.00	4.38	4.92	4.69	5.41	5.12	5.46	5.19	5.05	4.83
540	5.99	4.38	4.91	4.68	5.40	5.11	5.45	5.18	5.04	4.82
570	5.98	4.38	4.91	4.68	5.40	5.11	5.44	5.18	5.04	4.82
600	5.98	4.38	4.91	4.68	5.40	5.11	5.44	5.18	5.04	4.82
630	5.97	4.37	4.90	4.67	5.39	5.10	5.43	5.17	5.03	4.81
660	5.96	4.38	4.90	4.67	5.38	5.10	5.43	5.17	5.03	4.81
690	5.96	4.37	4.90	4.67	5.38	5.09	5.43	5.16	5.03	4.81
720	5.96	4.36	4.89	4.66	5.38	5.09	5.42	5.16	5.02	4.80
750	5.95	4.37	4.89	4.66	5.37	5.09	5.42	5.16	5.02	4.80
780	5.94	4.37	4.89	4.66	5.37	5.08	5.41	5.15	5.02	4.80
810	5.93	4.36	4.88	4.65	5.36	5.07	5.40	5.14	5.01	4.79
840	5.93	4.35	4.87	4.64	5.35	5.07	5.40	5.14	5.00	4.78
870	5.93	4.35	4.87	4.64	5.35	5.07	5.40	5.14	5.00	4.78

Table8.2.5Mn(1 μ M)の光合成測定結果

単位 : mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	4.90	4.32	4.51	4.21	4.61	4.58	4.70	4.61	4.56	4.33
30	4.61	4.31	4.41	4.09	4.40	4.44	4.51	4.46	4.43	4.20
60	4.58	4.27	4.37	4.05	4.37	4.40	4.47	4.42	4.39	4.16
90	4.40	4.27	4.31	3.98	4.24	4.32	4.35	4.33	4.32	4.09
120	4.39	4.23	4.28	3.95	4.22	4.30	4.33	4.31	4.29	4.06
150	4.38	4.2	4.26	3.93	4.21	4.28	4.32	4.29	4.27	4.04
180	4.38	4.2	4.26	3.93	4.21	4.28	4.32	4.29	4.27	4.04
210	4.37	4.21	4.26	3.93	4.20	4.28	4.31	4.29	4.27	4.04
240	4.38	4.21	4.21	3.91	4.20	4.27	4.32	4.29	4.25	4.03
270	4.38	4.2	4.26	3.93	4.21	4.28	4.32	4.29	4.27	4.04
300	4.38	4.21	4.26	3.93	4.21	4.28	4.32	4.29	4.27	4.04
330	4.38	4.22	4.27	3.94	4.21	4.29	4.32	4.30	4.28	4.05
360	4.40	4.21	4.27	3.94	4.22	4.29	4.33	4.30	4.28	4.05
390	4.39	4.22	4.27	3.94	4.22	4.29	4.33	4.30	4.28	4.05
420	4.40	4.23	4.28	3.95	4.23	4.30	4.34	4.31	4.29	4.06
450	4.40	4.23	4.28	3.95	4.23	4.30	4.34	4.31	4.29	4.06
480	4.39	4.24	4.29	3.96	4.23	4.30	4.34	4.31	4.30	4.07
510	4.39	4.24	4.29	3.96	4.23	4.30	4.34	4.31	4.30	4.07
540	4.40	4.25	4.30	3.97	4.24	4.31	4.34	4.32	4.31	4.08
570	4.39	4.25	4.29	3.96	4.23	4.31	4.34	4.32	4.30	4.07
600	4.4	4.26	4.30	3.97	4.24	4.32	4.35	4.33	4.31	4.08
630	4.4	4.26	4.30	3.97	4.24	4.32	4.35	4.33	4.31	4.08
660	4.41	4.27	4.31	3.98	4.25	4.33	4.36	4.34	4.32	4.09
690	4.42	4.27	4.32	3.99	4.26	4.33	4.37	4.34	4.33	4.10
720	4.43	4.28	4.33	4.00	4.27	4.34	4.38	4.35	4.34	4.11
750	4.43	4.28	4.33	4.00	4.27	4.34	4.38	4.35	4.34	4.11
780	4.43	4.29	4.33	4.00	4.27	4.35	4.38	4.36	4.34	4.11
810	4.44	4.29	4.34	4.01	4.28	4.35	4.39	4.36	4.35	4.12
840	4.44	4.31	4.35	4.02	4.28	4.36	4.39	4.37	4.36	4.13
870	4.45	4.31	4.35	4.02	4.29	4.37	4.40	4.38	4.36	4.13

Table8.2.6Mn(1 μ M)の呼吸測定結果

単位 : mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	4.44	4.36	4.38	4.05	4.3	4.39	4.41	4.40	4.39	4.16
30	4.43	4.32	4.35	4.02	4.28	4.36	4.39	4.37	4.36	4.13
60	4.43	4.29	4.33	4.00	4.27	4.35	4.38	4.36	4.34	4.11
90	4.42	4.28	4.32	3.99	4.26	4.34	4.37	4.35	4.33	4.1
120	4.40	4.26	4.30	3.97	4.24	4.32	4.35	4.33	4.31	4.08
150	4.40	4.25	4.30	3.97	4.24	4.31	4.35	4.32	4.31	4.08
180	4.38	4.25	4.29	3.96	4.22	4.30	4.33	4.31	4.30	4.07
210	4.36	4.23	4.27	3.94	4.20	4.28	4.31	4.29	4.28	4.05
240	4.34	4.20	4.24	3.91	4.18	4.26	4.29	4.27	4.25	4.02
270	4.34	4.18	4.23	3.90	4.17	4.25	4.28	4.26	4.24	4.01
300	4.33	4.15	4.21	3.88	4.16	4.23	4.27	4.24	4.22	3.99
330	4.32	4.14	4.20	3.87	4.15	4.22	4.26	4.23	4.21	3.98
360	4.32	4.12	4.18	3.86	4.14	4.21	4.25	4.22	4.20	3.97
390	4.33	4.11	4.18	3.86	4.15	4.21	4.25	4.22	4.20	3.97
420	4.32	4.10	4.17	3.85	4.14	4.20	4.24	4.21	4.19	3.96
450	4.32	4.10	4.17	3.85	4.14	4.20	4.24	4.21	4.19	3.96
480	4.30	4.09	4.16	3.83	4.12	4.18	4.23	4.19	4.17	3.94
510	4.30	4.10	4.16	3.84	4.12	4.19	4.23	4.20	4.18	3.95
540	4.29	4.09	4.15	3.83	4.11	4.18	4.22	4.19	4.17	3.94
570	4.26	4.09	4.14	3.81	4.09	4.16	4.20	4.17	4.15	3.92
600	4.23	4.10	4.14	3.81	4.07	4.15	4.18	4.16	4.15	3.92
630	4.22	4.10	4.14	3.81	4.07	4.15	4.18	4.16	4.15	3.92
660	4.20	4.09	4.12	3.79	4.05	4.13	4.16	4.14	4.13	3.90
690	4.18	4.10	4.12	3.79	4.04	4.13	4.15	4.14	4.13	3.90
720	4.19	4.08	4.11	3.78	4.04	4.12	4.15	4.13	4.12	3.89
750	4.18	4.08	4.11	3.78	4.03	4.12	4.14	4.13	4.12	3.89
780	4.18	4.08	4.11	3.78	4.03	4.12	4.14	4.13	4.12	3.89
810	4.17	4.07	4.10	3.77	4.02	4.11	4.13	4.12	4.11	3.88
840	4.17	4.08	4.11	3.77	4.02	4.10	4.14	4.12	4.11	3.88
870	4.15	4.08	4.10	3.76	4.01	4.10	4.12	4.11	4.10	3.87

Table8.2.7Mn(5 μ M)の光合成測定結果

単位 : mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	4.96	4.36	4.56	4.26	4.67	4.63	4.76	4.66	4.61	4.38
30	4.76	4.34	4.48	4.17	4.52	4.53	4.62	4.55	4.51	4.29
60	4.65	4.31	4.42	4.11	4.43	4.46	4.53	4.48	4.45	4.22
90	4.55	4.27	4.36	4.04	4.40	4.39	4.45	4.41	4.38	4.15
120	4.48	4.28	4.34	4.02	4.38	4.37	4.41	4.38	4.36	4.13
150	4.42	4.29	4.33	4.00	4.34	4.34	4.37	4.35	4.34	4.11
180	4.37	4.30	4.32	3.98	4.30	4.32	4.34	4.33	4.32	4.09
210	4.33	4.30	4.31	3.97	4.26	4.31	4.32	4.31	4.31	4.08
240	4.31	4.31	4.31	3.97	4.23	4.31	4.31	4.31	4.31	4.08
270	4.29	4.32	4.31	3.97	4.19	4.30	4.30	4.30	4.30	4.08
300	4.26	4.33	4.30	3.96	4.18	4.29	4.28	4.29	4.29	4.07
330	4.23	4.34	4.30	3.96	4.16	4.29	4.26	4.29	4.29	4.07
360	4.22	4.35	4.30	3.95	4.15	4.28	4.26	4.28	4.29	4.06
390	4.20	4.34	4.29	3.94	4.14	4.27	4.24	4.27	4.28	4.05
420	4.18	4.36	4.30	3.95	4.12	4.27	4.25	4.27	4.28	4.05
450	4.19	4.35	4.29	3.94	4.11	4.27	4.24	4.27	4.28	4.05
480	4.17	4.37	4.29	3.94	4.10	4.26	4.26	4.26	4.27	4.04
510	4.16	4.37	4.30	3.95	4.11	4.27	4.25	4.26	4.28	4.05
540	4.16	4.38	4.30	3.95	4.09	4.27	4.26	4.26	4.28	4.05
570	4.17	4.40	4.31	3.96	4.10	4.28	4.26	4.27	4.29	4.06
600	4.18	4.41	4.31	3.96	4.09	4.28	4.27	4.27	4.29	4.06
630	4.19	4.43	4.32	3.96	4.09	4.28	4.28	4.27	4.29	4.06
660	4.20	4.44	4.33	3.97	4.09	4.28	4.28	4.27	4.30	4.07
690	4.20	4.46	4.34	3.98	4.09	4.29	4.29	4.28	4.31	4.08
720	4.21	4.47	4.34	3.98	4.09	4.29	4.29	4.28	4.31	4.08
750	4.23	4.51	4.37	4.00	4.09	4.31	4.29	4.30	4.33	4.10
780	4.22	4.52	4.37	4.00	4.09	4.31	4.30	4.30	4.33	4.10
810	4.23	4.54	4.38	4.01	4.09	4.32	4.30	4.30	4.34	4.11
840	4.24	4.58	4.40	4.03	4.09	4.34	4.30	4.32	4.36	4.13
870	4.24	4.59	4.41	4.04	4.10	4.35	4.30	4.33	4.37	4.14

Table8.2.8Mn(5 μ M)の呼吸測定結果

単位 : mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	3.94	4.58	4.36	3.98	4.01	4.28	4.15	4.26	4.31	4.08
30	3.95	4.58	4.37	3.98	4.01	4.28	4.16	4.26	4.31	4.08
60	3.94	4.55	4.34	3.96	4.00	4.26	4.14	4.24	4.29	4.06
90	3.95	4.55	4.35	3.97	4.01	4.27	4.15	4.25	4.30	4.07
120	3.93	4.52	4.32	3.94	3.98	4.24	4.12	4.22	4.27	4.04
150	3.92	4.51	4.31	3.93	3.97	4.23	4.11	4.21	4.26	4.03
180	3.91	4.51	4.31	3.93	3.97	4.23	4.11	4.21	4.26	4.03
210	3.91	4.47	4.28	3.90	3.95	4.21	4.19	4.19	4.23	4.00
240	3.90	4.47	4.28	3.90	3.95	4.20	4.09	4.18	4.23	4.00
270	3.89	4.47	4.27	3.89	3.94	4.20	4.08	4.18	4.22	3.99
300	3.88	4.46	4.26	3.88	3.93	4.19	4.07	4.17	4.21	3.98
330	3.86	4.45	4.25	3.87	3.91	4.17	4.05	4.15	4.20	3.97
360	3.85	4.43	4.23	3.85	3.90	4.16	4.04	4.14	4.18	3.95
390	3.84	4.44	4.24	3.86	3.90	4.16	4.04	4.14	4.19	3.96
420	3.83	4.44	4.23	3.85	3.89	4.15	4.03	4.13	4.18	3.95
450	3.83	4.43	4.23	3.85	3.89	4.15	4.03	4.13	4.18	3.95
480	3.81	4.40	4.20	3.82	3.86	4.12	4.00	4.10	4.15	3.92
510	3.81	4.39	4.19	3.81	3.86	4.12	4.00	4.10	4.14	3.91
540	3.80	4.41	4.20	3.82	3.86	4.12	4.00	4.10	4.15	3.92
570	3.78	4.40	4.19	3.81	3.84	4.11	3.98	4.09	4.14	3.91
600	3.78	4.39	4.18	3.79	3.83	4.08	3.98	4.05	4.11	3.88
630	3.77	4.37	4.17	3.79	3.83	4.09	3.97	4.07	4.12	3.89
660	3.78	4.37	4.17	3.79	3.83	4.09	3.97	4.07	4.12	3.89
690	3.75	4.36	4.15	3.77	3.81	4.07	3.95	4.05	4.10	3.87
720	3.74	4.36	4.15	3.77	3.80	4.07	3.94	4.05	4.10	3.87
750	3.75	4.34	4.14	3.76	3.80	4.06	3.94	4.04	4.09	3.86
780	3.73	4.32	4.12	3.74	3.78	4.04	3.92	4.02	4.07	3.84
810	3.73	4.34	4.13	3.75	3.79	4.05	3.93	4.03	4.08	3.85
840	3.70	4.32	4.11	3.73	3.76	4.03	3.90	4.01	4.06	3.83
870	3.71	4.33	4.12	3.74	3.77	4.04	3.91	4.02	4.07	3.84

8.3Znを含む培地での溶存酸素測定結果

Table8.3.1Zn(0.001 μ M)の光合成測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	6.79	6.88	6.92	6.91	6.97	6.90	6.94	6.96	6.91	7.03
30	6.76	6.87	6.91	6.90	6.97	6.89	6.94	6.96	6.90	7.04
60	6.78	6.87	6.90	6.89	6.95	6.89	6.92	6.94	6.89	7.01
90	6.76	6.86	6.90	6.89	6.95	6.88	6.92	6.94	6.89	7.02
120	6.77	6.87	6.91	6.90	6.97	6.89	6.94	6.96	6.90	7.04
150	6.80	6.89	6.93	6.92	6.98	6.91	6.95	6.97	6.92	7.04
180	6.78	6.89	6.93	6.92	6.99	6.91	6.96	6.98	6.92	7.06
210	6.79	6.89	6.93	6.92	6.99	6.91	6.96	6.98	6.92	7.06
240	6.79	6.89	6.93	6.92	6.99	6.91	6.96	6.98	6.92	7.06
270	6.80	6.90	6.94	6.93	7.00	6.92	6.97	6.99	6.93	7.07
300	6.82	6.92	6.96	6.95	7.02	6.94	6.99	7.01	6.95	7.09
330	6.84	6.93	6.97	6.96	7.02	6.95	6.99	7.01	6.96	7.09
360	6.85	6.95	6.99	6.98	7.04	6.97	7.01	7.03	6.98	7.11
390	6.84	6.95	6.99	6.98	7.05	6.97	7.02	7.04	6.98	7.12
420	6.85	6.96	7.00	6.99	7.06	6.98	7.03	7.05	6.99	7.14
450	6.87	6.98	7.02	7.01	7.08	7.00	7.05	7.07	7.01	7.16
480	6.87	6.99	7.03	7.02	7.09	7.01	7.06	7.08	7.02	7.17
510	6.91	7.01	7.05	7.04	7.10	7.03	7.07	7.09	7.04	7.17
540	6.89	7.00	7.04	7.03	7.10	7.02	7.07	7.09	7.03	7.18
570	6.91	7.02	7.06	7.05	7.12	7.04	7.09	7.11	7.05	7.19
600	6.93	7.03	7.07	7.06	7.12	7.05	7.09	7.11	7.06	7.19
630	6.95	7.05	7.09	7.08	7.15	7.07	7.12	7.14	7.08	7.22
660	6.95	7.06	7.11	7.10	7.17	7.09	7.14	7.16	7.10	7.25
690	6.93	7.06	7.11	7.10	7.18	7.09	7.14	7.17	7.10	7.27
720	6.95	7.07	7.12	7.11	7.19	7.10	7.15	7.18	7.11	7.28
750	6.99	7.11	7.15	7.14	7.22	7.13	7.18	7.21	7.14	7.30
780	6.98	7.10	7.14	7.13	7.21	7.12	7.17	7.20	7.13	7.29
810	6.99	7.11	7.15	7.14	7.22	7.13	7.18	7.21	7.14	7.30
840	7.00	7.12	7.16	7.15	7.23	7.14	7.19	7.22	7.15	7.31
870	7.01	7.13	7.17	7.16	7.24	7.15	7.20	7.23	7.16	7.32

Table8.3.2Zn(0.001μM)の呼吸測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	6.98	6.91	6.88	6.88	6.83	6.89	6.86	6.85	6.89	6.79
30	7.08	6.97	6.93	6.93	6.85	6.94	6.89	6.88	6.93	6.78
60	7.07	6.96	6.92	6.92	6.85	6.93	6.89	6.87	6.93	6.78
90	7.04	6.95	6.91	6.91	6.85	6.92	6.88	6.87	6.92	6.79
120	7.07	6.97	6.93	6.93	6.86	6.94	6.90	6.89	6.94	6.80
150	7.06	6.96	6.92	6.93	6.86	6.94	6.90	6.88	6.93	6.80
180	7.05	6.95	6.91	6.92	6.85	6.93	6.89	6.87	6.92	6.79
210	7.04	6.94	6.90	6.91	6.84	6.92	6.88	6.86	6.91	6.78
240	7.04	6.94	6.90	6.91	6.84	6.92	6.88	6.86	6.91	6.78
270	7.04	6.94	6.90	6.90	6.83	6.91	6.87	6.85	6.91	6.76
300	7.02	6.92	6.88	6.88	6.81	6.89	6.85	6.84	6.89	6.75
330	7.02	6.92	6.88	6.88	6.81	6.89	6.85	6.83	6.89	6.74
360	7.01	6.91	6.87	6.87	6.80	6.88	6.84	6.82	6.88	6.73
390	7.00	6.90	6.86	6.86	6.79	6.87	6.83	6.81	6.87	6.72
420	6.99	6.89	6.85	6.85	6.78	6.86	6.82	6.80	6.86	6.71
450	6.98	6.87	6.83	6.83	6.76	6.84	6.80	6.78	6.84	6.69
480	6.96	6.86	6.82	6.82	6.75	6.83	6.79	6.78	6.83	6.69
510	6.95	6.85	6.81	6.82	6.75	6.83	6.79	6.77	6.82	6.69
540	6.94	6.84	6.80	6.81	6.74	6.82	6.78	6.76	6.81	6.68
570	6.92	6.83	6.80	6.80	6.74	6.81	6.77	6.76	6.80	6.68
600	6.92	6.83	6.80	6.80	6.74	6.81	6.77	6.76	6.80	6.68
630	6.91	6.82	6.79	6.79	6.73	6.80	6.76	6.75	6.79	6.67
660	6.89	6.81	6.78	6.78	6.72	6.79	6.75	6.74	6.78	6.67
690	6.88	6.80	6.77	6.77	6.71	6.78	6.74	6.73	6.77	6.66
720	6.87	6.79	6.76	6.76	6.71	6.77	6.74	6.73	6.77	6.66
750	6.86	6.79	6.76	6.76	6.71	6.77	6.74	6.73	6.77	6.66
780	6.85	6.77	6.74	6.74	6.68	6.75	6.71	6.70	6.74	6.63
810	6.84	6.76	6.73	6.73	6.68	6.74	6.71	6.70	6.74	6.63
840	6.83	6.75	6.72	6.72	6.67	6.73	6.70	6.69	6.73	6.62
870	6.82	6.74	6.71	6.71	6.65	6.72	6.68	6.67	6.71	6.60

Table8.3.3Zn(0.01μM)の光合成測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	4.07	4.25	4.32	4.30	4.42	4.29	4.36	4.41	4.30	4.56
30	3.94	4.15	4.32	4.26	4.27	4.20	4.28	4.33	4.21	4.51
60	3.90	4.12	4.21	4.19	4.34	4.19	4.27	4.31	4.19	4.49
90	3.90	4.11	4.19	4.18	4.32	4.16	4.25	4.29	4.17	4.46
120	3.86	4.08	4.16	4.15	4.29	4.13	4.22	4.26	4.14	4.44
150	3.84	4.06	4.14	4.13	4.27	4.11	4.20	4.24	4.12	4.42
180	3.84	4.06	4.15	4.13	4.28	4.11	4.21	4.25	4.13	4.43
210	3.83	4.05	4.14	4.12	4.27	4.10	4.20	4.24	4.12	4.42
240	3.82	4.05	4.14	4.12	4.27	4.10	4.20	4.24	4.12	4.42
270	3.82	4.05	4.14	4.12	4.27	4.10	4.20	4.24	4.12	4.42
300	3.83	4.05	4.13	4.12	4.26	4.10	4.19	4.23	4.11	4.41
330	3.84	4.05	4.13	4.12	4.26	4.10	4.19	4.23	4.11	4.41
360	3.83	4.05	4.14	4.12	4.26	4.10	4.19	4.23	4.11	4.41
390	3.82	4.05	4.14	4.12	4.27	4.10	4.20	4.24	4.12	4.42
420	3.83	4.05	4.14	4.12	4.27	4.10	4.20	4.24	4.12	4.42
450	3.84	4.06	4.15	4.13	4.28	4.11	4.21	4.25	4.13	4.43
480	3.85	4.07	4.16	4.14	4.29	4.12	4.22	4.26	4.14	4.44
510	3.86	4.07	4.15	4.14	4.28	4.12	4.21	4.25	4.13	4.42
540	3.87	4.09	4.17	4.16	4.30	4.14	4.23	4.27	4.15	4.45
570	3.87	4.09	4.17	4.16	4.30	4.14	4.23	4.27	4.15	4.45
600	3.89	4.10	4.18	4.16	4.30	4.14	4.23	4.27	4.16	4.44
630	3.88	4.09	4.17	4.16	4.30	4.14	4.23	4.27	4.15	4.44
660	3.90	4.11	4.19	4.17	4.31	4.15	4.24	4.28	4.17	4.45
690	3.92	4.12	4.20	4.18	4.31	4.16	4.25	4.29	4.18	4.45
720	3.93	4.13	4.21	4.20	4.33	4.18	4.27	4.30	4.19	4.47
750	3.93	4.13	4.21	4.19	4.32	4.17	4.26	4.30	4.19	4.46
780	3.93	4.13	4.21	4.20	4.33	4.18	4.27	4.29	4.19	4.47
810	3.95	4.13	4.20	4.19	4.31	4.18	4.25	4.31	4.19	4.44
840	3.95	4.15	4.22	4.21	4.34	4.19	4.28	4.31	4.21	4.47
870	3.95	4.15	4.23	4.21	4.34	4.19	4.28	4.32	4.21	4.48

Table8.3.4Zn(0.01μM)の呼吸測定結果

単位 : mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	3.92	4.13	4.21	4.19	4.33	4.17	4.26	4.30	4.19	4.47
30	3.95	4.15	4.22	4.21	4.34	4.19	4.28	4.31	4.21	4.47
60	3.96	4.15	4.22	4.21	4.34	4.19	4.28	4.31	4.21	4.47
90	4.00	4.17	4.24	4.23	4.35	4.21	4.29	4.32	4.22	4.47
120	3.98	4.17	4.24	4.23	4.36	4.21	4.30	4.33	4.23	4.49
150	3.98	4.17	4.24	4.23	4.35	4.21	4.29	4.33	4.22	4.48
180	3.99	4.18	4.25	4.24	4.36	4.22	4.30	4.34	4.23	4.49
210	3.98	4.17	4.24	4.23	4.36	4.21	4.30	4.33	4.23	4.49
240	3.97	4.17	4.24	4.23	4.36	4.21	4.30	4.33	4.23	4.49
270	3.97	4.16	4.23	4.22	4.35	4.20	4.29	4.32	4.22	4.48
300	3.98	4.17	4.24	4.23	4.35	4.21	4.29	4.33	4.22	4.48
330	4.00	4.18	4.25	4.24	4.36	4.22	4.30	4.33	4.23	4.48
360	4.01	4.19	4.26	4.24	4.36	4.23	4.30	4.34	4.24	4.48
390	4.02	4.19	4.26	4.25	4.36	4.23	4.31	4.34	4.24	4.48
420	4.01	4.19	4.26	4.24	4.36	4.23	4.30	4.34	4.24	4.48
450	4.02	4.20	4.27	4.25	4.37	4.24	4.31	4.35	4.25	4.49
480	4.02	4.19	4.26	4.25	4.36	4.23	4.31	4.34	4.24	4.48
510	4.01	4.18	4.25	4.24	4.36	4.22	4.30	4.33	4.23	4.48
540	4.01	4.18	4.25	4.24	4.35	4.22	4.30	4.33	4.23	4.47
570	4.01	4.18	4.24	4.23	4.34	4.22	4.29	4.32	4.23	4.46
600	4.01	4.18	4.24	4.23	4.34	4.22	4.29	4.32	4.23	4.46
630	4.01	4.18	4.24	4.23	4.34	4.22	4.29	4.32	4.23	4.45
660	4.01	4.18	4.24	4.23	4.34	4.22	4.29	4.32	4.23	4.46
690	4.01	4.17	4.24	4.23	4.34	4.21	4.29	4.32	4.22	4.46
720	4.00	4.17	4.23	4.22	4.33	4.21	4.28	4.31	4.22	4.45
750	4.00	4.17	4.24	4.23	4.34	4.21	4.29	4.31	4.22	4.46
780	4.00	4.17	4.23	4.22	4.33	4.21	4.28	4.31	4.22	4.45
810	4.00	4.17	4.24	4.23	4.34	4.21	4.29	4.32	4.22	4.46
840	3.99	4.16	4.22	4.21	4.32	4.20	4.27	4.30	4.21	4.44
870	3.98	4.16	4.23	4.22	4.34	4.20	4.28	4.31	4.21	4.46

Table8.3.5Zn(0.1 μ M)の光合成測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	4.74	4.94	5.02	5.00	5.13	4.98	5.07	5.11	5.00	5.27
30	4.68	4.90	4.98	4.97	5.11	4.95	5.04	5.08	4.96	5.26
60	4.64	4.86	4.95	4.93	5.08	4.91	5.01	5.05	4.93	5.23
90	4.65	4.86	4.94	4.93	5.07	4.91	5.00	5.04	4.92	5.22
120	4.63	4.84	4.92	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.90	5.20
150	4.64	4.85	4.93	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.91	5.19
180	4.61	4.82	4.90	4.89	5.03	4.87	4.96	5.00	4.88	5.18
210	4.62	4.83	4.91	4.90	5.04	4.88	4.97	5.01	4.89	5.19
240	4.61	4.83	4.92	4.90	5.05	4.88	4.98	5.02	4.90	5.20
270	4.62	4.83	4.91	4.90	5.04	4.88	4.97	5.01	4.89	5.19
300	4.60	4.82	4.91	4.89	5.04	4.87	4.97	5.01	4.89	5.19
330	4.56	4.80	4.89	4.87	5.03	4.85	4.95	5.00	4.87	5.19
360	4.54	4.78	4.88	4.86	5.02	4.84	4.94	4.99	4.85	5.19
390	4.56	4.80	4.89	4.87	5.03	4.85	4.95	5.00	4.87	5.19
420	4.57	4.80	4.89	4.88	5.03	4.86	4.96	5.00	4.87	5.19
450	4.57	4.80	4.89	4.87	5.02	4.85	4.95	4.99	4.87	5.17
480	4.58	4.81	4.90	4.88	5.03	4.86	4.96	5.00	4.88	5.19
510	4.59	4.82	4.91	4.89	5.04	4.87	4.97	5.01	4.89	5.19
540	4.63	4.84	4.92	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.90	5.19
570	4.62	4.83	4.91	4.90	5.04	4.88	4.97	5.01	4.89	5.18
600	4.62	4.83	4.91	4.90	5.04	4.88	4.97	5.01	4.89	5.18
630	4.63	4.84	4.92	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.90	5.20
660	4.62	4.83	4.91	4.90	5.04	4.88	4.97	5.01	4.89	5.19
690	4.63	4.84	4.92	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.90	5.20
720	4.63	4.84	4.93	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.90	5.19
750	4.62	4.84	4.92	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.90	5.20
780	4.63	4.84	4.92	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.90	5.20
810	4.63	4.84	4.92	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.90	5.20
840	4.64	4.85	4.93	4.91	5.05	4.89	4.98	5.02	4.91	5.19
870	4.64	4.86	4.94	4.92	5.06	4.90	4.99	5.03	4.92	5.20

Table8.3.6Zn(0.1μM)の呼吸測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	4.58	4.80	4.88	4.87	5.01	4.85	4.94	4.98	4.86	5.16
30	4.57	4.80	4.89	4.88	5.03	4.86	4.96	5.00	4.87	5.19
60	4.60	4.82	4.90	4.89	5.03	4.87	4.96	5.00	4.88	5.18
90	4.59	4.81	4.90	4.88	5.03	4.86	4.96	5.00	4.88	5.18
120	4.61	4.82	4.90	4.89	5.03	4.87	4.96	5.00	4.88	5.17
150	4.61	4.82	4.90	4.89	5.03	4.87	4.96	5.00	4.88	5.17
180	4.61	4.82	4.90	4.89	5.03	4.87	4.96	5.00	4.88	5.17
210	4.61	4.82	4.90	4.88	5.02	4.86	4.95	4.99	4.88	5.16
240	4.61	4.82	4.90	4.89	5.03	4.87	4.96	5.00	4.88	5.17
270	4.60	4.81	4.89	4.88	5.02	4.86	4.95	4.99	4.87	5.17
300	4.61	4.82	4.90	4.88	5.02	4.86	4.95	4.99	4.88	5.16
330	4.60	4.81	4.89	4.88	5.02	4.86	4.95	4.99	4.87	5.16
360	4.60	4.81	4.89	4.87	5.01	4.85	4.94	4.98	4.87	5.15
390	4.60	4.81	4.89	4.88	5.02	4.86	4.95	4.99	4.87	5.17
420	4.60	4.81	4.89	4.87	5.01	4.85	4.94	4.98	4.87	5.15
450	4.60	4.81	4.89	4.88	5.02	4.86	4.95	4.99	4.87	5.17
480	4.59	4.80	4.88	4.87	5.01	4.85	4.94	4.98	4.86	5.16
510	4.58	4.79	4.87	4.86	5.00	4.84	4.93	4.97	4.85	5.15
540	4.58	4.79	4.87	4.86	5.00	4.84	4.93	4.97	4.85	5.15
570	4.58	4.79	4.87	4.86	5.00	4.84	4.93	4.97	4.85	5.15
600	4.57	4.78	4.86	4.85	4.99	4.83	4.92	4.96	4.84	5.14
630	4.57	4.78	4.86	4.85	4.99	4.83	4.92	4.96	4.84	5.14
660	4.58	4.79	4.87	4.86	5.00	4.84	4.93	4.97	4.85	5.14
690	4.57	4.78	4.86	4.85	4.99	4.83	4.92	4.96	4.84	5.13
720	4.57	4.78	4.86	4.85	4.99	4.83	4.92	4.96	4.84	5.13
750	4.56	4.77	4.85	4.84	4.98	4.82	4.91	4.95	4.83	5.13
780	4.56	4.77	4.85	4.84	4.98	4.82	4.91	4.95	4.83	5.12
810	4.56	4.77	4.85	4.84	4.98	4.82	4.91	4.95	4.83	5.12
840	4.55	4.76	4.84	4.83	4.97	4.81	4.90	4.94	4.82	5.11
870	4.55	4.76	4.84	4.83	4.97	4.81	4.90	4.94	4.82	5.11

Table8.3.7Zn(1 μ M)の光合成測定結果

単位: mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	4.34	4.66	4.78	4.76	4.97	4.73	4.87	4.93	4.75	5.19
30	4.26	4.46	4.52	4.52	4.65	4.50	4.59	4.62	4.52	4.78
60	4.21	4.36	4.41	4.40	4.50	4.39	4.45	4.48	4.40	4.60
90	4.11	4.25	4.30	4.29	4.38	4.28	4.34	4.36	4.29	4.47
120	4.04	4.17	4.22	4.21	4.29	4.20	4.25	4.28	4.21	4.38
150	3.99	4.13	4.18	4.17	4.26	4.16	4.22	4.25	4.17	4.36
180	3.93	4.07	4.13	4.12	4.21	4.10	4.17	4.19	4.11	4.31
210	3.90	4.04	4.09	4.08	4.17	4.07	4.13	4.16	4.08	4.27
240	3.88	4.02	4.08	4.07	4.16	4.05	4.12	4.14	4.06	4.26
270	3.87	4.01	4.07	4.06	4.15	4.04	4.11	4.13	4.05	4.25
300	3.88	4.01	4.06	4.05	4.13	4.04	4.09	4.12	4.05	4.22
330	3.81	3.96	4.02	4.01	4.11	4.00	4.06	4.09	4.01	4.21
360	3.77	3.93	3.99	3.98	4.09	3.97	4.04	4.07	3.98	4.20
390	3.76	3.92	3.98	3.97	4.08	3.96	4.03	4.06	3.97	4.19
420	3.74	3.91	3.98	3.97	4.08	3.95	4.03	4.06	3.96	4.20
450	3.74	3.91	3.98	3.97	4.08	3.95	4.03	4.06	3.96	4.20
480	3.73	3.90	3.97	3.96	4.07	3.94	4.02	4.05	3.95	4.19
510	3.72	3.89	3.95	3.94	4.05	3.93	4.00	4.03	3.94	4.17
540	3.74	3.91	3.97	3.96	4.07	3.95	4.02	4.05	3.96	4.18
570	3.75	3.92	3.98	3.97	4.08	3.96	4.03	4.06	3.97	4.19
600	3.76	3.93	3.99	3.98	4.09	3.97	4.04	4.07	3.98	4.20
630	3.76	3.93	3.99	3.98	4.09	3.97	4.04	4.07	3.98	4.21
660	3.77	3.94	4.00	3.99	4.10	3.98	4.05	4.08	3.99	4.21
690	3.78	3.95	4.01	4.00	4.11	3.99	4.06	4.09	4.00	4.22
720	3.78	3.95	4.01	4.00	4.11	3.99	4.06	4.09	4.00	4.22
750	3.79	3.96	4.02	4.01	4.12	4.00	4.07	4.10	4.01	4.23
780	3.79	3.96	4.03	4.02	4.13	4.01	4.08	4.11	4.02	4.25
810	3.79	3.97	4.04	4.02	4.14	4.01	4.08	4.12	4.02	4.26
840	3.80	3.98	4.05	4.03	4.15	4.02	4.09	4.13	4.03	4.27
870	3.77	3.90	3.99	3.97	4.12	3.96	4.05	4.13	4.03	4.27

Table8.3.8Zn(1 μ M)の呼吸測定結果

単位: mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0	3.72	3.94	4.02	4.01	4.15	3.99	4.08	4.12	4.00	4.30
30	3.69	3.92	4.01	4.00	4.15	3.98	4.08	4.12	3.99	4.31
60	3.68	3.92	4.01	3.99	4.15	3.97	4.07	4.12	3.99	4.31
90	3.67	3.91	4.01	3.99	4.15	3.97	4.07	4.12	3.98	4.32
120	3.68	3.92	4.01	4.00	4.16	3.98	4.08	4.12	3.99	4.32
150	3.69	3.93	4.02	4.00	4.16	3.98	4.08	4.13	4.00	4.32
180	3.70	3.93	4.02	4.01	4.16	3.99	4.09	4.13	4.00	4.32
210	3.68	3.92	4.01	3.99	4.15	3.97	4.07	4.12	3.99	4.31
240	3.68	3.92	4.01	4.00	4.16	3.98	4.08	4.12	3.99	4.32
270	3.68	3.92	4.01	3.99	4.15	3.97	4.07	4.12	3.99	4.31
300	3.68	3.92	4.01	3.99	4.15	3.97	4.07	4.12	3.99	4.31
330	3.66	3.90	4.00	3.98	4.14	3.96	4.06	4.11	3.97	4.31
360	3.66	3.90	3.99	3.98	4.14	3.96	4.06	4.10	3.97	4.30
390	3.68	3.91	4.00	3.99	4.14	3.97	4.07	4.11	3.98	4.30
420	3.66	3.90	3.99	3.98	4.14	3.96	4.06	4.10	3.97	4.30
450	3.66	3.90	3.99	3.98	4.14	3.96	4.06	4.10	3.97	4.30
480	3.66	3.90	3.99	3.97	4.13	3.95	4.05	4.10	3.97	4.29
510	3.65	3.89	3.98	3.97	4.13	3.95	4.05	4.09	3.96	4.29
540	3.66	3.89	3.98	3.97	4.12	3.95	4.05	4.09	3.96	4.28
570	3.65	3.89	3.98	3.96	4.12	3.94	4.04	4.09	3.96	4.28
600	3.65	3.89	3.98	3.96	4.12	3.94	4.04	4.09	3.96	4.28
630	3.65	3.88	3.97	3.96	4.11	3.94	4.04	4.08	3.95	4.27
660	3.65	3.88	3.97	3.96	4.11	3.94	4.04	4.08	3.95	4.27
690	3.64	3.87	3.96	3.95	4.10	3.93	4.03	4.07	3.94	4.26
720	3.63	3.87	3.96	3.94	4.10	3.92	4.02	4.07	3.94	4.26
750	3.64	3.88	3.97	3.95	4.11	3.93	4.03	4.08	3.95	4.27
780	3.63	3.87	3.96	3.94	4.10	3.92	4.02	4.07	3.94	4.26
810	3.63	3.86	3.95	3.94	4.09	3.92	4.02	4.06	3.93	4.25
840	3.63	3.86	3.95	3.94	4.09	3.92	4.02	4.06	3.93	4.25
870	3.63	3.86	3.95	3.94	4.09	3.92	4.02	4.06	3.93	4.25

Table8.3.9 重金属 0 のとき光合成測定結果

単位 : mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0s	7.21	7.2	7.2	6.31	6.18	5.46	6.03	6.14	6.26	5.7
30s	7.18	7.35	6.93	6.26	6.28	5.51	5.98	6.08	5.92	5.67
60s	7.17	7.35	6.61	6.25	6.34	5.59	5.94	6.01	5.79	5.66
90s	7.15	7.24	6.6	6.27	6.39	5.69	5.93	5.98	5.73	5.67
120s	7.16	7.06	6.53	6.29	6.45	5.78	5.92	5.97	5.67	5.7
150s	7.17	6.89	6.5	6.32	6.53	5.85	5.93	5.95	5.7	5.76
180s	7.18	6.79	6.47	6.34	6.62	5.94	5.94	5.96	5.75	5.76
210s	7.16	6.68	6.48	6.38	6.69	6.06	5.95	5.97	5.79	5.81
240s	7.18	6.6	6.51	6.45	6.75	6.12	5.98	6.03	5.84	5.87
270s	7.2	6.5	6.51	6.5	6.82	6.22	6.05	6.1	5.89	5.87
300s	7.23	6.53	6.58	6.56	6.89	6.32	6.05	6.14	5.95	5.91
330s	7.25	6.53	6.59	6.59	6.96	6.39	6.10	6.20	6.02	5.97
360s	7.27	6.56	6.68	6.64	7.03	6.50	6.17	6.25	6.08	6.02
390s	7.28	6.64	6.72	6.68	7.07	6.56	6.23	6.31	6.20	6.07
420s	7.28	6.70	6.75	6.74	7.14	6.65	6.30	6.38	6.26	6.11
450s	7.30	6.72	6.84	6.79	7.20	6.74	6.35	6.42	6.30	6.17
480s	7.33	6.78	6.88	6.86	7.23	6.82	6.42	6.49	6.36	6.21
510s	7.33	6.84	6.97	6.90	7.31	6.91	6.49	6.61	6.46	6.25
540s	7.36	6.90	7.04	7.01	7.35	7.01	6.54	6.68	6.52	6.31
570s	7.41	6.96	7.12	7.00	7.43	7.10	6.62	6.76	6.59	6.35
600s	7.41	7.02	7.19	7.05	7.52	7.17	6.71	6.84	6.63	6.41
630s	7.44	7.05	7.26	7.10	7.58	7.24	6.76	6.88	6.70	6.47
660s	7.45	7.11	7.31	7.16	7.60	7.33	6.82	6.95	6.80	6.48
690s	7.48	7.17	7.39	7.27	7.61	7.40	6.86	7.01	6.84	6.51
720s	7.52	7.22	7.47	7.27	7.64	7.49	6.93	7.06	6.92	6.55
750s	7.53	7.28	7.55	7.34	7.65	7.54	6.99	7.11	6.97	6.61
780s	7.55	7.35	7.61	7.40	7.66	7.63	7.06	7.16	7.03	6.66
810s	7.59	7.41	7.67	7.49	7.65	7.71	7.11	7.20	7.11	6.71
840s	7.60	7.48	7.73	7.56	7.66	7.76	7.19	7.25	7.17	6.72
870s	7.63	7.54	7.20	7.61	7.66	7.81	7.23	7.28	7.25	6.73

Table8.3.10 重金属 0 のとき呼吸測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0s	7.55	8.40	7.79	7.78	7.50	7.82	7.27	7.26	7.39	6.75
30s	7.54	8.35	7.82	7.75	7.51	7.84	7.35	7.31	7.38	6.85
60s	7.55	8.33	7.79	7.71	7.45	7.80	7.33	7.30	7.36	6.89
90s	7.55	8.29	7.81	7.68	7.43	7.82	7.31	7.33	7.38	6.85
120s	7.52	8.30	7.74	7.65	7.45	7.80	7.32	7.32	7.35	6.87
150s	7.53	8.27	7.70	7.63	7.43	7.77	7.30	7.31	7.34	6.83
180s	7.51	8.27	7.68	7.58	7.44	7.76	7.28	7.29	7.32	6.82
210s	7.49	8.25	7.67	7.59	7.38	7.72	7.27	7.28	7.32	6.80
240s	7.47	8.28	7.65	7.57	7.38	7.71	7.25	7.27	7.30	6.79
270s	7.44	8.25	7.61	7.53	7.37	7.70	7.23	7.27	7.30	6.78
300s	7.43	8.24	7.62	7.49	7.36	7.71	7.26	7.27	7.30	6.75
330s	7.42	8.22	7.62	7.46	7.34	7.69	7.24	7.23	7.27	6.75
360s	7.40	8.22	7.58	7.42	7.32	7.66	7.27	7.21	7.24	6.71
390s	7.36	8.24	7.54	7.40	7.30	7.64	7.22	7.20	7.25	6.71
420s	7.37	8.22	7.51	7.36	7.28	7.63	7.20	7.23	7.23	6.67
450s	7.33	8.20	7.49	7.34	7.25	7.60	7.20	7.22	7.24	6.66
480s	7.33	8.18	7.46	7.31	7.23	7.58	7.17	7.22	7.23	6.65
510s	7.30	8.17	7.47	7.29	7.22	7.56	7.16	7.21	7.22	6.63
540s	7.31	8.15	7.43	7.27	7.22	7.53	7.14	7.20	7.21	6.62
570s	7.30	8.15	7.42	7.30	7.19	7.53	7.13	7.19	7.18	6.61
600s	7.26	8.15	7.40	7.28	7.17	7.51	7.12	7.17	7.19	6.59
630s	7.27	8.17	7.37	7.24	7.20	7.48	7.10	7.18	7.18	6.59
660s	7.25	8.14	7.34	7.23	7.18	7.47	7.09	7.17	7.17	6.57
690s	7.23	8.11	7.32	7.22	7.15	7.44	7.08	7.17	7.16	6.56
720s	7.21	8.11	7.29	7.19	7.14	7.43	7.07	7.16	7.16	6.55
750s	7.22	8.09	7.27	7.18	7.14	7.41	7.05	7.13	7.15	6.55
780s	7.19	8.07	7.27	7.15	7.16	7.39	7.04	7.13	7.14	6.54
810s	7.18	8.08	7.25	7.12	7.13	7.38	7.02	7.12	7.14	6.52
840s	7.16	8.06	7.23	7.11	7.14	7.34	7.04	7.10	7.13	6.52
870s	7.14	8.04	7.20	7.08	7.11	7.32	7.03	7.10	7.12	6.50

Table8.3.11 イオン交換水場合の光合成測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0s	6.28	5.93	5.53	5.98	6.79	5.89	7.01	6.01	6.16	5.78
30s	6.25	5.91	5.48	5.74	6.76	5.86	6.83	5.84	6.01	5.76
60s	6.19	5.87	5.47	5.70	6.72	5.87	6.78	5.80	5.92	5.74
90s	6.13	5.83	5.45	5.68	6.68	5.85	6.71	5.75	5.87	5.72
120s	6.12	5.82	5.43	5.65	6.65	5.85	6.62	5.73	5.78	5.71
150s	6.05	5.78	5.43	5.62	6.62	5.84	6.57	5.70	5.74	5.70
180s	6.03	5.76	5.40	5.62	6.59	5.81	6.51	5.67	5.73	5.68
210s	6.01	5.72	5.38	5.58	6.53	5.82	6.48	5.64	5.67	5.68
240s	5.98	5.72	5.40	5.59	6.53	5.79	6.42	5.63	5.65	5.66
270s	5.98	5.70	5.37	5.56	6.50	5.79	6.39	5.64	5.61	5.65
300s	5.94	5.68	5.37	5.54	6.48	5.78	6.35	5.60	5.58	5.63
330s	5.94	5.64	5.34	5.55	6.53	5.77	6.33	5.60	5.57	5.62
360s	5.92	5.65	5.33	5.51	6.42	5.74	6.30	5.58	5.55	5.60
390s	5.91	5.63	5.34	5.51	6.40	5.73	6.25	5.58	5.55	5.58
420s	5.90	5.64	5.34	5.51	6.37	5.72	6.23	5.59	5.54	5.56
450s	5.88	5.63	5.33	4.92	6.35	5.72	6.20	5.57	5.49	5.55
480s	5.88	5.62	5.31	5.49	6.33	5.72	6.18	5.57	5.50	5.53
510s	5.82	5.60	5.31	5.50	6.31	5.72	6.15	5.57	5.48	5.53
540s	5.82	5.59	5.30	5.49	6.31	5.70	6.16	5.57	5.47	5.52
570s	5.81	5.59	5.31	5.46	6.28	5.69	6.14	5.55	5.46	5.50
600s	5.81	5.58	5.30	5.46	6.27	5.68	6.11	5.55	5.45	5.49
630s	5.80	5.59	5.30	5.45	6.26	5.68	6.10	5.52	5.45	5.48
660s	5.79	5.58	5.31	5.46	6.26	5.66	6.07	5.53	5.44	5.47
690s	5.79	5.58	5.30	5.45	6.24	5.66	6.06	5.51	5.44	5.45
720s	5.77	5.57	5.30	5.44	6.22	5.64	6.04	5.51	5.43	5.45
750s	5.77	5.57	5.30	5.45	6.18	5.63	6.02	5.50	5.42	5.43
780s	5.76	5.57	5.29	5.44	6.17	5.64	6.01	5.50	5.43	5.41
810s	5.74	5.56	5.30	5.44	6.18	5.63	5.98	5.49	5.42	5.40
840s	5.75	5.56	5.29	5.44	6.18	5.63	5.98	5.48	5.41	5.40
870s	5.72	5.55	5.29	5.44	6.16	5.62	5.96	5.49	5.42	5.38

Table8.3.12 イオン交換水場合の暗条件測定結果

単位:mg/L

時間 [s]	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0s	5.73	5.6	5.34	5.38	6.49	5.60	5.92	5.50	5.37	5.32
30s	5.71	5.58	5.31	5.41	6.26	5.58	5.89	5.48	5.35	5.30
60s	5.75	5.57	5.29	5.41	6.19	5.58	5.88	5.43	5.35	5.29
90s	5.74	5.59	5.32	5.41	6.13	5.56	5.88	5.45	5.35	5.28
120s	5.75	5.58	5.32	5.42	6.11	5.58	5.88	5.46	5.37	5.29
150s	5.75	5.58	5.31	5.42	6.13	5.57	5.86	5.46	5.39	5.28
180s	5.72	5.57	5.34	5.44	6.12	5.59	5.86	5.46	5.37	5.29
210s	5.74	5.56	5.35	5.46	6.09	5.60	5.88	5.47	5.40	5.31
240s	5.75	5.56	5.34	5.45	6.10	5.60	5.85	5.46	5.38	5.31
270s	5.73	5.58	5.37	5.47	6.10	5.62	5.84	5.47	5.38	5.31
300s	5.76	5.57	5.35	5.44	6.08	5.62	5.84	5.47	5.38	5.30
330s	5.74	5.57	5.38	5.48	6.09	5.66	5.83	5.48	5.40	5.29
360s	5.76	5.57	5.36	5.48	6.08	5.64	5.84	5.48	5.40	5.29
390s	5.75	5.56	5.36	5.47	6.09	5.66	5.83	5.47	5.39	5.30
420s	5.74	5.57	5.36	5.47	6.08	5.66	5.82	5.47	5.39	5.30
450s	5.73	5.56	5.38	5.46	6.07	5.69	5.81	5.47	5.38	5.29
480s	5.75	5.56	5.38	5.48	6.08	5.69	5.80	5.46	5.40	5.29
510s	5.75	5.55	5.38	5.48	6.07	5.68	5.79	5.45	5.40	5.27
540s	5.74	5.55	5.37	5.47	6.06	5.68	5.79	5.47	5.39	5.27
570s	5.74	5.55	5.36	5.47	6.04	5.67	5.81	5.47	5.39	5.25
600s	5.74	5.55	5.36	5.47	6.04	5.67	5.80	5.47	5.38	5.24
630s	5.73	5.55	5.36	5.46	6.06	5.70	5.79	5.46	5.38	5.23
660s	5.73	5.54	5.36	5.46	6.04	5.70	5.78	5.46	5.38	5.22
690s	5.75	5.54	5.37	5.45	6.03	5.70	5.77	5.45	5.37	5.20
720s	5.75	5.53	5.37	5.48	6.02	5.70	5.76	5.45	5.37	5.18
750s	5.74	5.54	5.37	5.49	6.01	5.69	5.76	5.46	5.36	5.18
780s	5.74	5.54	5.36	5.47	5.99	5.69	5.75	5.46	5.37	5.17
810s	5.74	5.30	5.35	5.47	6.02	5.68	5.74	5.45	5.36	5.19
840s	5.74	5.52	5.36	5.47	6.01	5.68	5.74	5.47	5.36	5.18
870s	5.73	5.53	5.35	5.47	6.00	5.67	5.73	5.46	5.36	5.17