

明暗繰り返し条件下における植物プランクトン 増殖能力に関する研究

STUDY ON THE MULTIPLY CAPABILITY OF PHYTOPLANKTON AT THE ARTIFICIAL REPETITION ON BLIGHT AND DARK CONDITION

和田芳樹¹・横寺宏²・山崎幸司³・豊永佳苗⁴

Yoshiki WADA, Hiroshi YOKOTERA, Kouji YAMAZAKI, Kana TOYONAGA

¹正会員 株式会社日水コン 河川事業部 技術第2部 (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原 2-1-3)

²正会員 工修 株式会社日水コン 河川事業部 技術第2部 (同上)

³正会員 工修 株式会社日水コン 河川事業部 技術第2部 (同上)

⁴株式会社太平環境科学センター 環境調査部 (〒816-0063 福岡市博多区金の隈 2-2-31)

This study shows experimental results of algal growth potential (AGP) that is executed under the artificial repetition on bright and dark condition to reveal the effects of destratification system, which is largely introduced for water quality control of reservoirs. It is concluded that Phytoplankton can't recover the original multiply capability once they are put in the repetition on bright and dark condition. Namely, light shield as an essential function of destratification system works effectively to control phytoplankton.

Key Words: *Destratification system, Multiply capability, Blight and dark condition, Microcystis, Algal growth potential, Record of light shield*

1. はじめに

ダム湖沼の水質保全対策の一つである曝気循環設備は、全国各地のダム湖沼で導入され、アオコ抑制等の実績を挙げてきた。これまでその効果は、主に植物プランクトンを循環流により水面から5~6m以深の無光層に引き込み、光を遮断することで光合成生産を抑制する遮光効果によるものと考えられてきた。しかしながら、一旦無光層に引き込まれた植物プランクトンは循環流に乗って再浮上し、再び増殖すると考えられることから、この考え方では曝気循環設備の効果のメカニズムを十分に説明しているとは言い切れない。

そこで、本研究では曝気循環設備の効果のメカニズムを明らかにするため、小島ら¹⁾が提唱する植物プランクトンの「遮光履歴」効果に着目した。これはすなわち、植物プランクトンは有光層と無光層を繰り返し往来させると、有光層に復帰してもしばらくは増殖能力を回復できない、という仮説である。この仮説が実証できれば、富栄養化しているダム湖沼において、曝気循環設備を抜

本的な対策として位置づけることができるだけでなく、現在導入されている曝気循環設備の効率的な運用を立案する一助ともなり、ダム湖沼における水質問題の解消に大きく貢献できるものと考えられる。

以上の背景から、本稿ではアオコの原因種である *Microcystis* を対象として明暗繰り返し条件下で AGP 試験を実施し、室内実験により「遮光履歴」効果の検証を試みた。

2. 藻類の明暗条件における増殖特性と仮説

藻類の増殖特性と照度の関係について、矢木ら(1981)²⁾、岡田ら(1988)³⁾が藍藻、緑藻、珪藻を対象として実験的に検討した事例がみられるが、明暗条件と増殖特性を関連づけた研究は少ない。その中で、古里ら(2001)⁴⁾は藍藻類: *Microcystis* 属、緑藻類: *Scenedesmus* 属、珪藻類: *Melosira* 属を、無光条件(24時間暗)下に5日間、10日間、15日間、20日間置いたあと、有光条件(16時間明8時間暗)に復帰させた際の藻類増殖能力の変

化について実験を行っているが、有光条件復帰後に藻類が最大増殖量に達するまでの速度に大きな差はないことを示している。

本研究では、曝気循環設備によって引き起こされる循環流により、植物プランクトンが無光条件、有光条件を数日ピッチで繰り返して移動することに着目した。すなわち、植物プランクトンが無光条件と有光条件を繰り返すうちに、有光条件復帰後に増殖能力が回復するまでのタイムラグが徐々に長くなる、という仮説である。

この仮説に基づくと、図-1のような植物プランクトン細胞数の推移変化が想定される。常時・有光条件下では最大増殖量に達するまで順調に増殖していく。無光条件を設定した場合で増殖能力の回復にタイムラグが無いと仮定すると、増殖量が定常状態に達するのは常時・有光条件下の約半分の日数と考えられる。これに対して、有光条件復帰後、増殖能力が回復するまでにタイムラグがあると仮定した場合は、定常状態に達するまでに多くの日数を必要とする。さらに、図-1に示すように有光・無光条件を5日間ピッチで繰り返す場合において、増殖開始のタイムラグが5日間以上とすると、植物プランクトンが全く増殖しなくなるという結果となることも考えられる。

以上の仮説に基づき、光条件を制御した場合の植物プランクトン増殖量の変化を把握するための実験を行った。

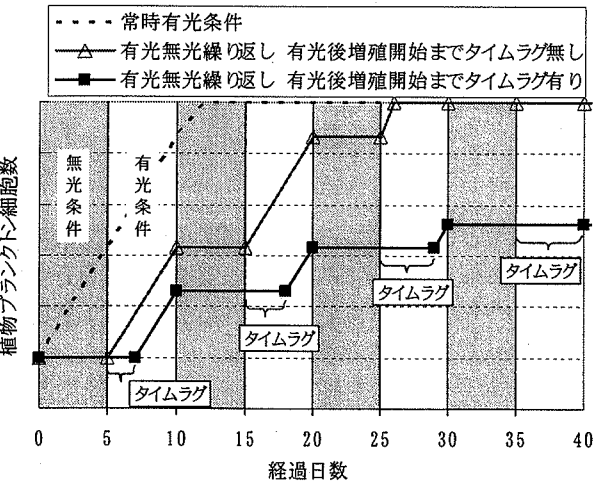


図-1 明暗繰り返し条件のタイムラグを考慮した場合における植物プランクトンの変動(仮説)

3. 実験内容

植物プランクトンが明暗条件を行き来する場合、図-1の仮説通りに増殖能力の回復が遅れるか否かについて検証するため、明暗条件を数日間ピッチで繰り返す条件のもと、藻類増殖試験(AGP 試験)を行った。

(1) 実験ケース

実験は表-1 に示すように大きく分けて、1) 実験期間を

通じて常に有光条件とするケース(対照区)、2) 実験開始時から連続して無光条件とし、その後は連続有光条件とするケース、3) 明暗条件を数日単位で繰り返すケースについて実施した。

明暗条件を繰り返すケースは、曝気循環設備によって引き起こされる循環日数が明確ではないことから、本研究では3日間、5日間の2つのケースについて実施した。

表-1 実験ケース

No.	ケース		明 暗 条 件
1	対照区		常時、有光条件
2	無光条件連続後、有光条件連続	暗所5日間	はじめの5日間連続無光条件 その後、連続有光条件
3	明暗条件の繰り返し	明暗3日間ピッチ	無光条件連続3日間 有光条件連続3日間のサイクル
4		明暗5日間ピッチ	無光条件連続5日間 有光条件連続5日間のサイクル

(2) 実験条件

明暗条件及び実験水温を表-2 に示す。植物プランクトンの培養はバッチ式とし、容器は硬質ガラス製 2000ml 三角フラスコを用いた。実験ケース毎に 10 本前後の三角フラスコを準備し、各ケース内での培養条件が同一となるように実験を行った。

実験は恒温室内で行い、水温は25℃で一定とした。各ケースの明暗条件に応じて、有光条件では蛍光灯を用い 1000lux での照射を 14 時間、消灯を 10 時間繰り返し、無光条件では光が当たらないようにフラスコにアルミ箔を巻き付け、さらに恒温室内のコンテナボックスに入れた。有光条件及び無光条件での実験の状況を、それぞれ図-2、図-3 に示す。

表-2 明暗条件及び実験水温

項 目	条 件
照度	1000lux (白色蛍光灯)
照射時間(有光条件時)	照射 14 時間、消灯 10 時間(24 時間中)
照射時間(無光条件時)	0 時間(24 時間中)
水温	25℃ (恒温室内にて制御)

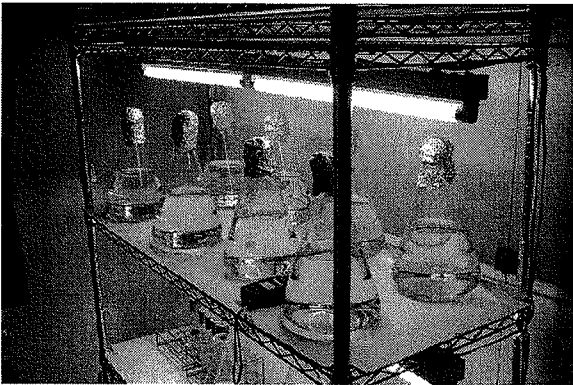


図-2 有光条件サンプル

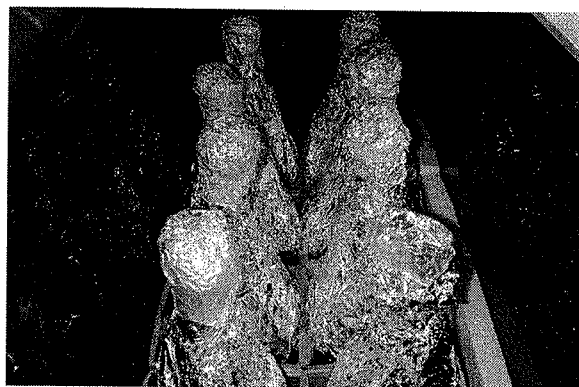


図-3 無光条件サンプル

(3) 実験対象藻類

本実験では藍藻類の *Microcystis* を対象藻類とした。使用した *Microcystis* 株は国立環境研究所の保有株 (*Microcystis aeruginosa* NIES-44) とした。研究所内での保存は水温 25℃、照度 1500lux、明 12 時間、暗 12 時間である。

(4) 培養条件

Microcystis 株は実験を開始する前に水温 25℃、照度 1000lux (14 時間明 10 時間暗) で前培養しておいた。実験に使用する培地は MA 培地とし、この培地に前培養した *Microcystis* 株を接種し、実験を開始した。

表-3 培養培地組成

M A 培 地	
Ca (NO ₃) ₂ ・4H ₂ O	50 mg
KNO ₃	100 mg
NaNO ₃	50 mg
Na ₂ SO ₄	40 mg
MgCl ₂ ・6H ₂ O	50 mg
β - グリセロリン酸ナトリウム・5H ₂ O	100 mg
Na ₂ EDTA	5 mg
FeCl ₃ ・6H ₂ O	0.5 mg
MnCl ₂ ・4H ₂ O	5 mg
ZnCl ₂	0.5 mg
CoCl ₂ ・H ₂ O	5 mg
Na ₂ MoO ₄ ・2H ₂ O	0.8 mg
H ₃ BO ₃	20 mg
Bicine	100 mg
蒸留水	1000 ml
pH 値	8.6

(5) 実験工程及び分析項目

実験は 30 日間実施し、表-4 に示す各採水ポイントにおいて採水・分析を行った。具体には各ケースの採水分析日に対応する三角フラスコを一つ取り出し、細胞数の分析を実施した。また、採水を実施しない日も含め毎日 1 回はフラスコを撹拌した。なお、表-4 中に示す明暗 5

日間ピッチのケースでは、10 日目までの実験結果は暗所 5 日間の結果を援用した。
また、実験開始時と終了時には、フラスコ内の収支を把握するため、TOC、T-N、T-P の分析を併せて実施した。

表-4 実験工程と分析実施日

ケース	経過日数	対照区	暗所5日間	明暗3日間 ピッチ	明暗5日間 ピッチ
初期状態	◎				
1	●				
2	●				
3	●		●	●	●
4	●			●	
5	●		●	●	●
6			●	●	(●)
7			●		(●)
8			●		(●)
9				●	
10	●	●			(●)
11					
12				●	
13					
14					
15	●	●			
16					
17					
18				●	●
19					
20	●				●
21				●	
22					
23					
24				●	
25					
26				●	
27					
28					
29					
30	●	●	●	●	●

4. 実験結果と考察

表-1 に示した各々のケースにおける細胞数の推移を図-4 に示す。対照区では実験期間中増加を続け、30 日後には約 2.8×10^6 cells/ml となった。暗所 5 日間条件では有光条件へ復帰した直後の約 5 日間程度は増加がみられなかった。その後、徐々に増加し始め、最終的には約 2.1×10^6 cells/ml まで増殖した。
一方、明暗 3 日間ピッチでは、有光条件に戻しても急激な増加はみられなかった。同様に、明暗 5 日間ピッチでも、有光条件に復帰した後の細胞数の増加は小さく、明暗繰り返しのケースでは、対照区と暗所 5 日連続に比べ、全体的に細胞数の増加は小さい結果が得られた。
なお、実験開始時と終了時におけるフラスコ内の物質収支の把握を目的とした分析結果(明暗 3 日間ピッチ)は表-5 の通りである。細胞数は光合成により増加しているが、TOC、T-N、T-P はいずれも大きな変化がなかった。

表-5 実験開始時と終了時の水質濃度分析結果

項目	単位	開始時	終了時
水温	℃	24.7	24.7
細胞数	cells/mL	6.10E+04	9.30E+05
TOC	mg/L	240	260
T-N	mg/L	76.8	72.9
T-P	mg/L	9.0	8.8

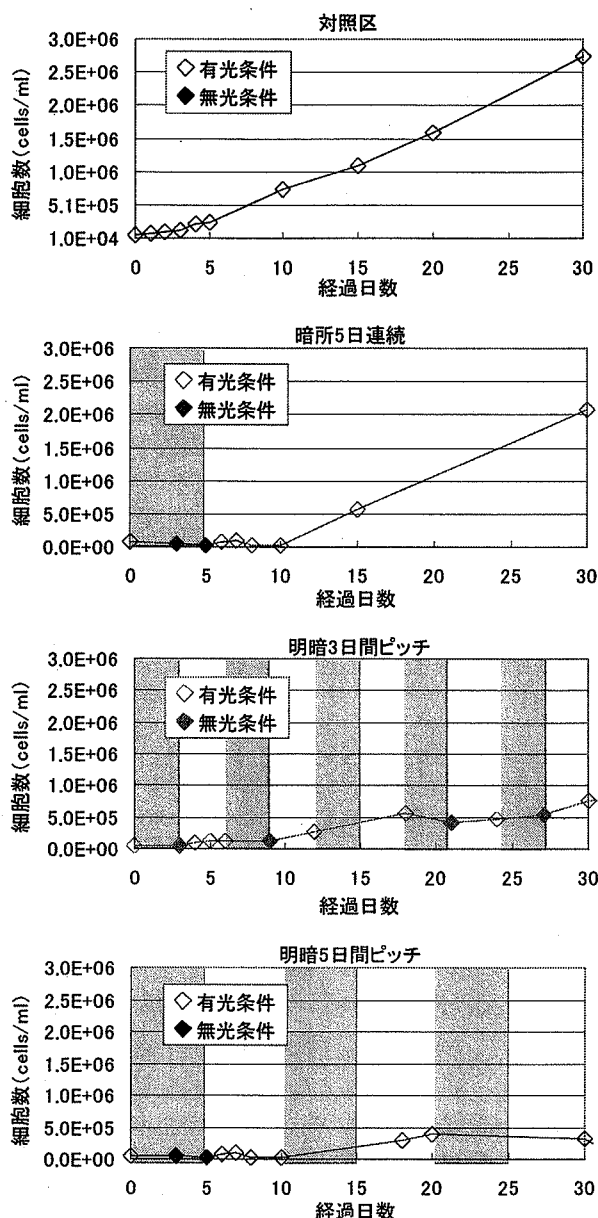


図-4 各実験ケースにおける細胞数の推移

暗所5日連続と対照区の実験結果(図-5 参照)から、暗所5日連続後に有光条件に復帰した際、増殖速度(図中矢印の傾き)は対照区と概ね同程度まで回復しているが、それまでに5日程度のタイムラグ(図中丸棒)を伴っていることが分かる。

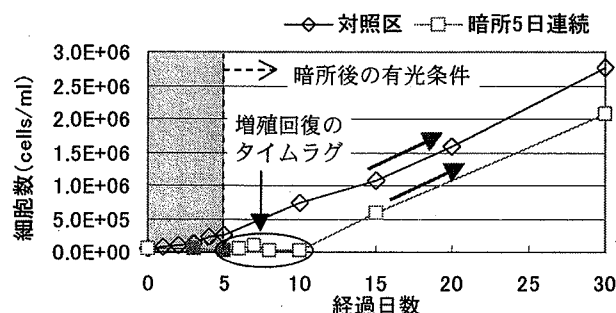


図-5 対照区と暗所5日連続の細胞数推移比較

これより、明暗条件を繰り返した場合には、増殖能力回復までのタイムラグが蓄積され、結果的に細胞数が増加しにくくなっていることが予想される。

5. 明暗条件下における植物プランクトン増殖能力のモデル化

以上の実験結果より、明暗条件を繰り返すことで植物プランクトンの増殖が低減していくものと考えられた。この現象を表現するために、生態系モデルを援用して植物プランクトン増殖のモデル化を行った。

(1) 対照区のモデル化

対照区における植物プランクトン増殖モデルは、(1)式に示すように植物プランクトンの増殖、死滅のみを考慮したモデルとした。

$$\frac{d[C]}{dt} = G[C] - D[C] \quad (1)$$

ここで、 C は細胞数(cells/ml)、 G は増殖速度(1/日)、 D は死滅速度(1/日)である。増殖速度 G については(2)式に示すように、最大増殖速度 G_0 (1/日)とスペース効果 β の関数で表した。なお、光条件の影響はモデル中に組み込んでいない。

$$G = G_0 \times \exp(-\beta[C]) \quad (2)$$

これらの式により、対照区の同定を行った。図-6にその結果を示す。本モデルによる計算値は、概ね実測値を再現できていると言える。このときの各パラメータは表-6に示すとおりである。

表-6 対照区モデルのパラメータ設定値

G_0	0.35
D	0.005
β	0.000001

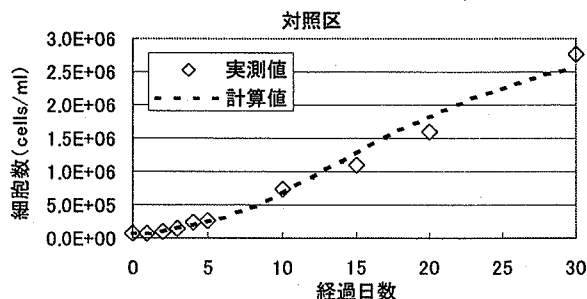


図-6 対照区における同定結果

仮に植物プランクトンが明暗繰り返し作用によっても増殖能力に影響を受けないとすると、光条件を制御した他のケースにおいても、このモデル式により再現が可能であると考えられる。

暗所5日連続、明暗3日間ピッチ、明暗5日間ピッチで、上記モデルを当てはめた場合の結果を図-7に示す。なお、無光条件下での増殖速度は0としている。

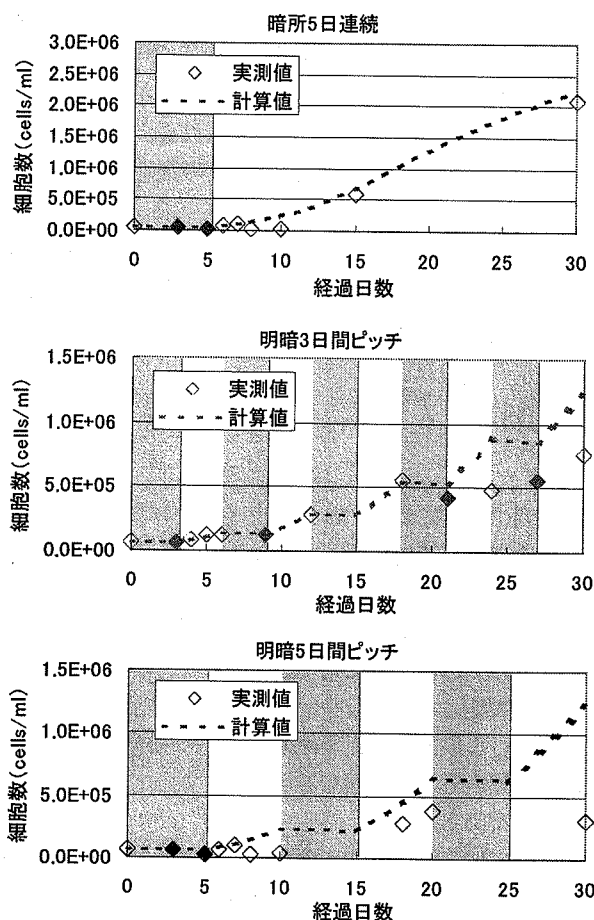


図-7 各ケースにおける増殖モデルの再現性検証

暗所5日連続では、対照区で同定された生態系モデルにより実験結果を概ね再現できる結果となった。一方、明暗3日間ピッチ及び明暗5日間ピッチでは、実験開始当初は比較的实验結果を再現したが、明暗条件が繰り返されるに伴い、実測値に対して計算値が逸脱する傾向が見られた。

この結果は、明暗条件を繰り返した場合には、増殖能力の回復にタイムラグが存在することを裏付けるものと考えられ、曝気循環設備による植物プランクトン増殖抑制効果を適正に評価するためには、光の履歴に伴う増殖制限項を導入する必要があるものと推測された。

また、実測値と計算値の差は明暗5日ピッチの方が大きくなっている傾向にあることから、無光条件の連続期間が長いほど、増殖能力回復に要するタイムラグが長くなることが推察される。

(2) 光条件の履歴を考慮したモデル化

本稿でここまで用いてきた増殖速度 G は、有光条件下と無光条件下で、図-8の太実線に示すような推移をする

ものとしていた。すなわち、有光条件下においては増殖し、無光条件下では全く増殖が起こらないモデルである。

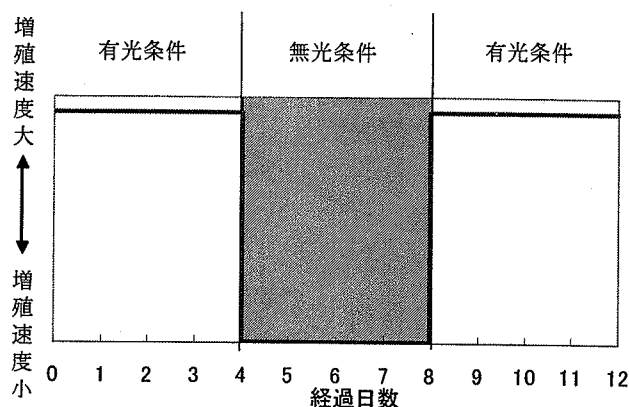


図-8 対照区モデルの有光・無光条件下における増殖速度の推移

図-7に示す実測値を再現するためには、有光条件から無光条件とした際の増殖能力の減退と、無光条件から有光条件に復帰した際の増殖能力の回復にタイムラグを持たせる必要がある。

本稿では図-9の点線に示すように、無光条件下での経過履歴が増大するに伴い増殖能力が徐々に減退し、有光条件復帰直後は、増殖能減退速度と同じ割合で増殖能力が徐々に回復していき、やがては元の増殖能力に回復する、と仮定してモデル化を行った。

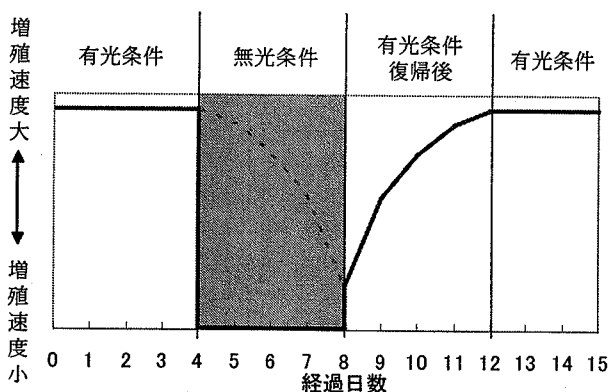


図-9 光履歴を考慮した増殖速度のモデル化

これを(3)式で示す。

$$G = G_0 \times \exp(-\beta[C]) \times \theta^i \quad (3)$$

ここで、 θ を光条件係数(パラメータ)とし、「無光条件影響日数」 i ($i \geq 0$)の指数関数として、(2)式の増殖速度 G に乗じる。

無光条件影響日数は、常時、有光条件下において0(日)とし、無光条件下で日数が経過する毎に+1(日)としていく。また、無光条件から有光条件に復帰した際には、その経過日数毎に-1(日)とするものであり、 i が0となった後は次に無光条件となるまで0が継続するものとした。

この式を用いて再度現況同定を行った。図-10 にその結果を示す。なお、このときの光条件係数は0.75として設定した。

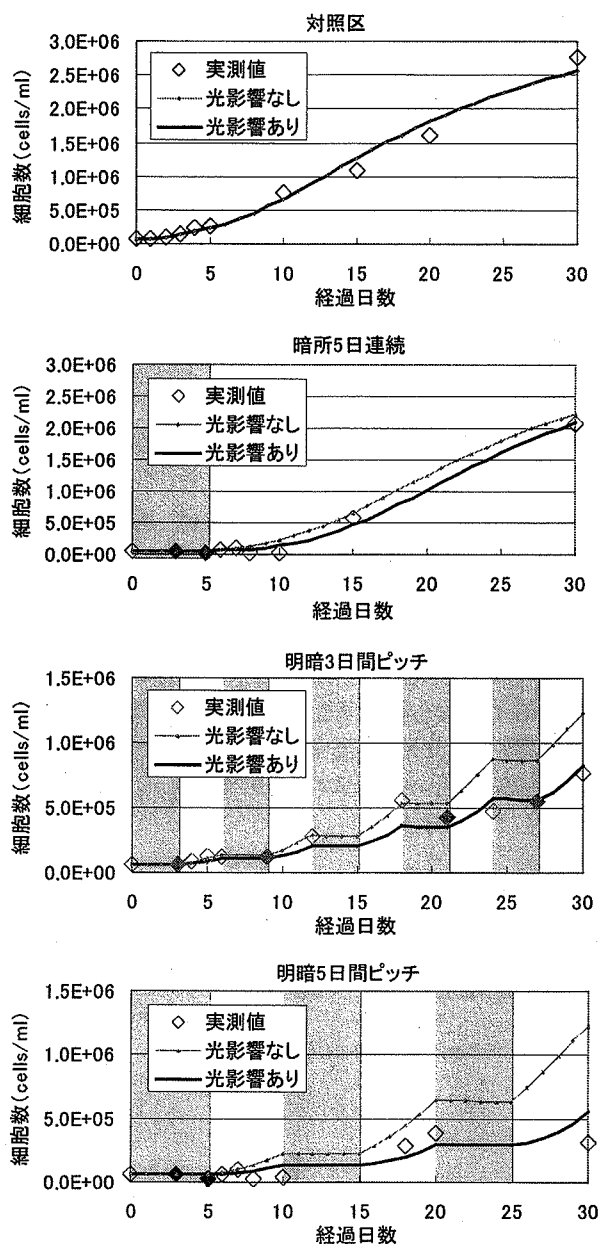


図-10 光履歴を導入した植物プランクトン増殖モデルによる検証結果

(3) 式の植物プランクトン増殖モデルでの計算により、暗所5日連続、明暗3日間ピッチいずれにおいても、光履歴を考慮していないモデル結果よりも再現性が向上していると言える。

ただし、明暗5日間ピッチについては、30日目の計算値よりも実測値が低くなる傾向がうかがえた。これは、無光条件の期間やその回数により、植物プランクトンの増殖能力が、本モデルの想定よりもさらに大きく減退する可能性を示唆するものであり、有光無光条件を繰り返すうちに、増殖開始のタイムラグが徐々に長くなる可能性があるものと考えられる。

6. 生態学的な視点からの考察

以上の検討結果から、明暗繰り返し条件下での植物プランクトンについて、増殖能力の回復に光履歴に応じたタイムラグを考慮しなければ、細胞数の推移を説明できないことが示された。この現象は古里ら(2002)⁹⁾が検討しているように、植物プランクトンに蓄積されたエネルギーの貯蔵量が関係していると考えられる。

すなわち、図-9 に示す無光条件時での細胞内蓄積エネルギーの消費、有光条件復帰後のエネルギー蓄積に要するタイムラグとして表現される現象であると考えられ、さらに、有光無光条件を繰り返すうちにエネルギーの消費、蓄積に要する時間が長くなる可能性も考えられた。

7. おわりに

本研究の実験により、*Microcystis* は明暗条件を繰り返すことで増殖能力が低下するものと考えられた。これより曝気循環設備は、明暗繰り返し条件に伴う「遮光履歴」効果により植物プランクトンの増殖能力を低減させ、ダム貯水池の水質改善に寄与していることが推測される。

今後の課題として、*Microcystis* 以外の植物プランクトンにおける検討、無光条件の期間やその回数に応じて増殖速度そのものが低減する可能性についての更なる検討が必要である。

最終的にはこれら課題事項を踏まえ、曝気循環流による遮光履歴効果を導入した水質予測モデルの開発を行い、実用に供していくことが必要であると考えます。

謝辞：本論文の作成に当たり、明暗条件と藻類増殖の関連について多くのご助言を頂いた(株)日水コン 小島貞男氏と、モデル作成時の検討方法についてご助言いただいた名古屋大学 辻本哲郎教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 小島貞男、飯田耕作、滑川明夫；局部遮光による藻類制御の実験的研究、用水と廃水、Vol42, No. 5, p389-396, 2000
- 2) 矢木、岡田、須藤、萩原、高村；*Microcystis* の増殖特性、国立公害研究所研究報告、第25号、P49-P50, 1981
- 3) 岡田、竹下、須藤；マイクロコズムを用いた水の華の発生機構とその制御に関する研究、水質汚濁研究、第11巻、第6号、P41-P43, 1988
- 4) 古里、浅枝、福渡、淡水植物プランクトンの耐暗性について；水環境学会、第24巻、第1号、P27-P34, 2001
- 5) 古里、浅枝；植物プランクトンの耐暗性に関する動的モデルの開発、土木学会年次学術講演会講演概要集、第57巻、部門7、PVII-258, 2002

(2004. 4. 7受付)