環境工学研究論文集・第47巻・2010 (Environmental Engineering Research. Vol. 47, 2010)

(24) モデル生態系による水圏生態系の一次生産者種組成に及ぼす環境温度上昇の影響解析

村上　和仁[1]*

[1]千葉工業大学工学部生命環境科学科（〒275-8588 千葉県習志野市津田沼2-17-1）

* E-mail: *kaz_murakami@sky.it-chiba.ac.jp*

水圏生態系において一次生産者として重要な役割を担っている植物プランクトンに着目し，室内培養型マイクロコズムを用いて，培養温度の上昇と植物プランクトン相の遷移について実験的検討を行った．その結果，同一の微生物相を含有する湖水においても培養温度の上昇に伴い優占種が異なり，特に高温条件下ではアオコが優占化し，上水道源などでは利水上の問題が生じる可能性があること，温度上昇に伴い生態系遷移の遷移期から定常期（極相）に到達する時間が短縮されること，環境温度が高すぎても低すぎても，生物の多様性は低下すること，温度上昇（温暖化）により生態系構造が温度低下（寒冷化）と同様に影響を受けること，が示唆された．

Key Words : *microcosm, temperature, biota, ecosystem structure, global warming*

1. はじめに

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第4次報告書（2007年）によると，0.74℃／100年の速度で地球温暖化が進行しており，これは第3次報告書（2001年）における0.6℃／100年を上回っている．すなわち，近年になるほど温暖化が加速していることが示されている[1]．

地球温暖化は生態系に対しても極めて深刻な影響を与えると予測されており，例えば，4℃の気温上昇で地球上の全生物種の40%が絶滅の危機に瀕すると考えられている．温暖化は，同時に生態系における物質循環やエネルギーフローにも大きな影響を及ぼし，生態系構造が壊滅的なダメージを受ける可能性も否定しきれない．生態系には動的平衡機能が備わっており，環境の変化に対してある程度は緩衝作用を示す．しかしながら，地球温暖化のような環境温度の急激な上昇に伴う生態系構造の変化・遷移に関しては，十分なデータが蓄積されておらず，したがって，予測や対策も整備されていない．

本研究では，水圏生態系において一次生産者として重要な役割を担っている植物プランクトンに着目し，モデル生態系である室内培養型マイクロコズムを用いて，同一の種組成である水圏生態系における培養温度の上昇と植物プランクトン相の遷移について実験的検討を行った．

2. 方法

(1) 供試マイクロコズム

千葉県北西部に位置する手賀沼（千葉県我孫子市）から春季（3月）に底泥と湖水を採取し，図-1に示すような480mL容ガラス容器に手賀沼の湿泥100 g を容器に平坦になるように入れ，手賀沼湖水380mLを静かに底泥を乱すことなく充填した水・泥質系フラスコマイクロコズムを作成した．底泥は栄養塩類の溶出源としての機能を考慮して表層3cmの黒色底泥を充填し，湖水は植物プランクトン相が多様性に富むと考えられる表層水を用いた．

(2) 培養条件

培養は定温インキュベータにより，10℃（低温条件）20℃（常温条件），30℃（高温条件）にて，静置培養，明期（20,000lux）／暗期＝12／12hr.の条件で行った．培養期間は60日間とし，培養開始後，0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60日目に採水し，生物顕微鏡（Nikon Eclipse E800）にて植物プランクトン相を観察した．なお，各培養系はそれぞれ3連で培養した．

(3) 評価方法

観察された植物プランクトンを分類・同定し，優占種から生物学的水質汚濁階級を，個体数，種類数から多様

性指数および類似度指数を求めた．多様性指数はShannon Index（H'）により各系における植物プランクトンの多様度を，類似度指数はNomura-Simpson coefficient（NSC）により各系間の相違の度合いを評価した．なお，各指標の概要は以下のとおりである．

a) 生物学的水質汚濁階級

生物は水質汚濁の程度に応じて，それぞれ異なった種類が生息しており，これらは水質指標生物表としてまとめられている[2]．これによると，水域は，強腐水性，α-中腐水性，β-中腐水性，貧腐水性の4段階に区分され（ザプロビ性），また，各種プランクトンは，それぞれに適合した栄養度があり，これまでの観察例から，富栄養，中栄養，貧栄養などの栄養度（トロフィー性）に対する出現範囲が整理されている[3]．指標生物による水質判定はきわめて定性的であるといわれているが，過去長期間の平均的な環境条件を把握できるという長所がある．

b) 多様度指数 Shannon Index（H'）

情報理論に基づくShannonの多様度指数（H'）は広く用いられており[4]，多様性を不確かさと同義であると捉え，不確かさの尺度としての1個体当たりの情報量をもって指数としている[5]．H'は(1)式により求められる．

$$\cdot H' = -\sum Pi \log Pi \qquad \ldots\ldots(1)$$

ここで，Pi：Ni／N

Ni：i番目の種の個体数

N：総個体数

生物種が1種類になった場合，H'は0になり，この指数が小さくなるほど有機物による汚濁や富栄養化が進行したと評価する[2]．

c) 類似度指数 Nomura-Simpson coefficient（NSC）

Nomura-Simpsonの類似度指数（NSC）は，群集間の共通種数を用いる指数であり[6][7]，群集間の差異が大きくなるとNSCは小さくなる．NSCは(2)式により求められる．

$$\cdot NSC = c/b \quad (a>b) \qquad \ldots\ldots(2)$$

ここで，a，b：両地域の種数

c：両地域の共通種数

一般に，共通種数を用いた指数では，地域内の面積が同一ではなく種数が相違する場合には，類似度が低くなる傾向にある．NSCも例外ではなく，調査対象となる面積に留意して地域設定を行う必要がある[8]．

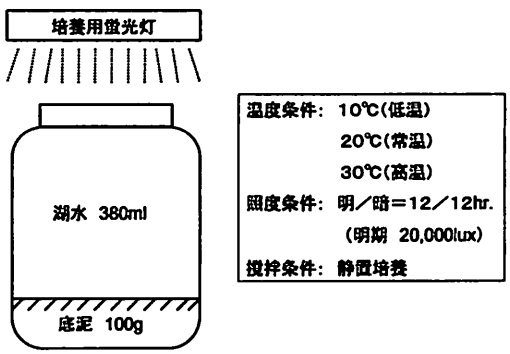

図-1 水・泥質系フラスコマイクロコズムの概要

3. 結果および考察

(1) 常温条件（20℃）における植物プランクトンの変遷

各系において観察された植物プランクトンを表-1に示す．

常温条件にて培養したマイクロコズムにおいて，培養開始後60日目に出現した植物プランクトンは，藍藻類8属10種，珪藻類9属14種，緑藻類15属18種，鞭毛藻類2属2種の合計34属44種であった．ミクロメーターの目盛りから観察された植物プランクトンの細胞体積を算出し，個体数を乗じて湖水1ml中に占める容積割合を綱別に比較したところ，図-2に示すように，常温条件では主に珪藻類と緑藻類が優占化する結果となった．このうち，優占種として観察されたのは，珪藻類*Auracosera italica*，*Melosira varians*，緑藻類*Scenedesmus quadricauda*であり，これらを生物学的水質汚濁階級に当てはめると，α-中腐水性・富栄養性となった．優占種である*A.italica*，*M.varians*，*S.quadricauda*のいずれも最適増殖温度は20～25℃であり，日本の湖沼では中～富栄養湖で年間を通じて普通に観察される種である．なお，常温条件で培養したマイクロコズムにおける植物プランクトン相を手賀沼における植物プランクトンデータ[9]と照合すると，春季および秋季の観察結果と概ね一致しており，本研究で用いたマイクロコズムが実湖沼を十分に反映していることが確認された．

(2) 低温条件（10℃）における植物プランクトンの変遷

低温条件にて培養したマイクロコズムにおいて，培養開始後60日目に出現した植物プランクトンは，藍藻類7属7種，珪藻類9属13種，緑藻類8属11種，鞭毛藻類2属2種の合計26属33種であった．湖水1ml中に占める容積割合を綱別に比較したところ，図-3に示すように，低温条件では主に珪藻類と鞭毛藻類が優占化する結果となった．このうち，優占種として観察されたのは，珪藻類*Auracosera italica*，*Melosira varians*，鞭毛藻類*Chlamydomonas* spp.であり，これらを生物学的水質汚濁階級に当てはめると，α-中腐水性・富栄養性となった．優占種である*A.italica*，*M.varians*，*Chlamydomonas* spp.のい

表-1　各培養条件における植物プランクトン相の比較

	植物プランクトン	10℃(低温)	20℃(常温)	30℃(高温)
藍藻類	*Anabaena spiroides*	+	+	++
	Anabaena affinis	−	++	+++
	Anabaenopsis arnoldii	+	−	+
	Aphanizomenon spp.	+	+	+
	Aphanocapsa sp.	−	+	+
	Arthrospira maxima	+	−	−
	Chroococcus sp.	+	+	+
	Merismopedia spp.	+	+	+
	Microcystis aeruginosa	−	++	+++
	Microcystis wesenbergii	−	+	+++
	Myxosarcina sp.	−	−	−
	Oscillatoria spp.	+	+	+
	Phormidium spp.	−	−	+
	Raphidiopsis curvata	−	+	+
鞭毛藻類	*Chlamydomonas* spp.	++	+	+
	Cryptomonas spp.	++	+	+
珪藻類	*Attheya zachariasi*	+	++	+
	Auracoseira ambigua	+	++	+
	Auracoseira distans	+	++	+
	Auracoseira granulata	++	++	+
	Auracoseira italica	+++	+++	++
	Gyrosigma sp.	+	++	+
	Melosira varians	+	+++	+
	Nitzschia acicularis	+	++	+
	Nitzschia spp.	++	+++	++
	Skeletonema potamos	+	++	+
	Surirella spp.	+	++	+
	Synedra rumpens	−	+	+
	Synedra spp.	++	++	+
	Thlassiosis spp.	+	++	+
ユーグレナ藻類	*Euglena* spp.	−	+	−
	Phacus spp.	−	+	+
緑藻類	*Actinastrum hantzschii*	+	−	−
	Ankistrodesmus falcatus	−	+	+
	Coelastrum spp.	−	+	+
	Crucigenia crucifera	−	+	−
	Dictiosphaerium spp.	+	++	+
	Golenkinia radiata	+	−	+
	Kircheneliera sp.	−	+	+
	Micractinium spp.	++	+	+
	Monoraphidinium sp.	−	+	+
	Oocystis sp.	+	−	+
	Pediastrum duplex	+	+	+
	Pediastrum simplex	+	+	−
	Pediastrum tetras	+	−	+
	Scenedesmus quadricauda	+	+	+
	Scenedesmus sp.	+	+	+
	Tetraedoron spp.	−	++	−
	Tetrastrum hetericanthum	−	++	+
	Tetrastrum staurogeniaeforme	+	+	+
	Treubaria sp.	−	+	+
	Volvox sp.	−	+	−

+++：＞100N/ml，++：＞10N/ml，+：＞1N/ml，−：出現せず

ずれも最適増殖温度は20～25℃であるが，日本の湖沼では中～富栄養湖で年間を通じて普通に観察される種である．この現象は，*A.italica*，*M.varians*，*Chlamydomonas* spp.が低温条件を好んで増殖できるということではなく，他の植物プランクトンが低温ではほとんど増殖できないために，比較的広範囲の温度条件で増殖できるこれらの種が優占化したものと考えられる．低温条件で培養したマイクロコズムにおける植物プランクトン相を手賀沼における植物プランクトンデータ[9]と照合すると，冬季の観察結果と概ね一致していた．

(3) 高温条件（30℃）における植物プランクトンの変遷

高温条件にて培養したマイクロコズムにおいて，培養開始後60日目に出現した植物プランクトンは，藍藻類10属12種，珪藻類10属14種，緑藻類14属16種，鞭毛藻類2属2種の合計36属44種であった．湖水1ml中に占める容積割合を綱別に比較したところ，図-4に示すように，高温条件では主に藍藻類と珪藻類が優占化する結果となった．このうち，優占種として観察されたのは，藍藻類 *Microcystis aeruginosa*，*Anabaena affinis*，珪藻類*Auracosera italica*，*Melosira varians*，であり，これらを生物学的水質汚濁階級に当てはめると，強腐水性・富栄養性となった．優占種である*M.aeruginosa*，*A.affinis*のいずれも最適増殖温度は30℃程度であり，日本の湖沼では富栄養湖で特に夏季に異常増殖してアオコを形成する種として知られている．高温条件で培養したマイクロコズムにおける植物プランクトン相を手賀沼における植物プランクトンデータ[9]と照合すると，夏季の観察結果と概ね一致した．

(4) 温度上昇に伴う微生物相の変化

本研究では，低温（10℃），常温（20℃），高温（30℃）条件のように，培養温度を変えてマイクロコズムを培養したが，培養開始時（0日目）に同一の微生物相を含有する湖水（春季に採水）を充填したにもかかわらず，植物プランクトン相は培養温度によって異なる遷移が生じて異なる優占種が出現し，特に高温条件下では藍藻類の異常増殖によるアオコが優占化した．高温条件で優占化したアオコは*M.aeruginosa*と*A.affinis*であった．これらは，それぞれ有毒物質であるmicrocystinとanatoxinを産生する有毒種であることが知られている[10]．したがって，上水道源などでこれらのアオコが異常増殖した場合には，利水上の問題が生じる可能性が示唆される．

各系における共通種（珪藻類*A.italica*および*M.varians*）に着目して，各温度条件における活性を比較してみると，図-5に示したように，高温条件では低温条件に比べて比増殖速度（μ）が速くなっており（*A.italica*；低温条件 $0.3day^{-1}$→高温条件 $0.7day^{-1}$，*M.varians*；低温条件 $0.2day^{-1}$→高温条件 $1.1day^{-1}$），温度上昇に伴い生物活性が上昇していることが示された．同様の現象は，単独培養[11]のみならず，構成生物種が完全既知のGnotobiotic型マイクロコズム[12]やフラスコサイズでのバッチ培養による種間競争[13][14][15]においても観察されており，種間競争をはじめとする生物間相互作用の有無にかかわらず，生物個体の活性のみならず，生態系全体の活性が上昇することを示している．このような環境（培養）温度が上昇した条件下では，洗剤（LAS；Linear Alkylbenzene Sulfonate）のような化学物質[16]や遺伝子組換え細菌（GEM；Genetically Engineered Microorganism）のような外来（非土着）細菌[12]の系内における消長も短期間で減衰することがわかっている．さらに，生態系全体の活性が上昇するということは，環境温度の上昇に伴い，生態系の遷移において遷移期から定常期（極相）に到達する時間が短縮されることを示唆しており[17]，安定した生態系が早期に構築される

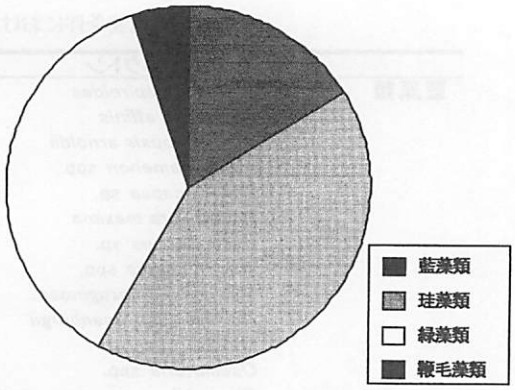

図-2　常温（20℃）条件における植物プランクトンの優占割合

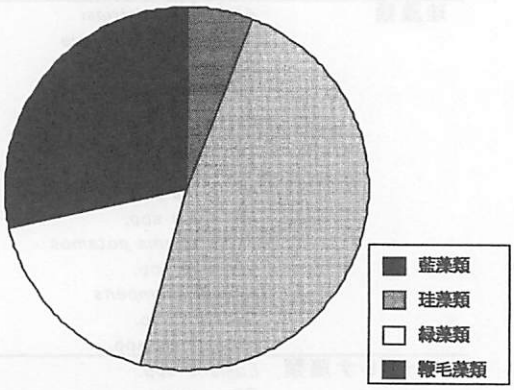

図-3　低温（10℃）条件における植物プランクトンの優占割合

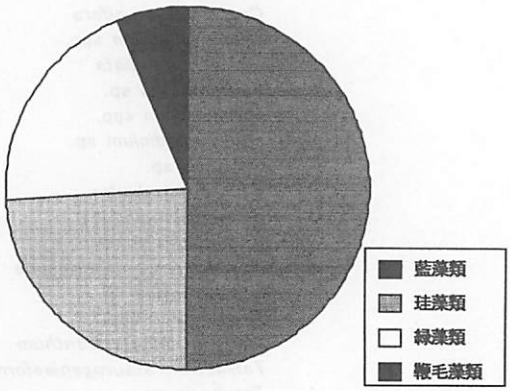

図-4　高温（30℃）条件における植物プランクトンの優占割合

ものの，強大かつ急激な環境変化が生じたときには動的平衡機能のキャパシティーを超えて崩壊してしまう可能性が考えられる．

また，各系間における植物プランクトン相の違いについてみてみると，Shannon Indexによる多様性指数では，図-6に示したように，常温条件が最も多様性が高く，次いで高温条件，低温条件の順となった（SI；高温条件 2.02，常温条件 2.71，低温条件 1.76）．すなわち，現状の温度条件に対して環境温度が高すぎても低すぎても，生物の多様性は低下することが示された．一方，Nomura-Simpson coefficientによる類似度指数では，図-7に示したように，常温条件～高温条件間と常温条件～低温条件間で同程度の値となった（NSC；常温条件～高温条件 0.62，常温条件～低温条件 0.59）．これは，常温条件から低温条件に温度低下した場合と，常温条件から高温条件に温度上昇した場合の植物プランクトン相の変化が同程度であることを示しており，温度上昇（温暖化）により生態系構造が温度低下（寒冷化）と同様に影響を受けることを示唆している．本研究では手賀沼から採水した湖水を用いて検討を行ったが，同様の結果は東京湾船橋港から採水した海水を用いて作成したマイクロコズムにおいても得られている[18]．すなわち，温度上昇に伴い赤潮形成プランクトンが優占化し，利水上問題が生じる可能性が示唆されている．

食物連鎖という生態系構造の，基本部分を支える生産者である植物プランクトンの種構成に変化が生じることにより，消費者である動物プランクトン，さらには魚類を含めたより高次な消費者の生存にも影響が生じる可能性があり，最終的には人間の社会経済活動にも影響を及ぼしかねない．今後，捕食者（一次消費者）である動物プランクトン群集も考慮した解析をおこなうことにより，環境温度の上昇が生態系構造の変化に及ぼす影響に関するより詳細な影響予測データを検討する必要があると考えられる．

また，藻類増殖や組成変化に及ぼす水温の影響に関しては，従来より，数理モデル，統計解析，室内・屋外実験など様々な研究が行われているが，いずれも一長一短がある．本研究で示したモデル生態系のようなマイクロコズムでの培養実験は，そのハンドリングの利便性から，これらの異なる手法による解析結果のインターフェイス的なツールとしても活用できるものと期待される．

4. まとめ

本研究は，水圏生態系において一次生産者として重要な役割を担っている植物プランクトンに着目し，室内培養型マイクロコズムを用いて，培養温度の上昇と植物プランクトン相の遷移について実験的検討を行ったものである．得られた成果は以下のようにまとめられる．

(1) 同一の微生物相を含有する湖水においても，培養温度の上昇に伴い優占種が異なり，特に高温条件下ではアオコが優占化した．

(2) 高温条件で優占化したアオコは有毒種である*Microcystis aeruginosa*と*Anabaena affinis*であり，上水道源などでは利水上の問題が生じる可能性が示唆された．

(3) 各系における共通種に着目すると，高温条件では比増殖速度が速くなり，生物活性が上昇していることが示された．生態系の遷移において遷移期から定常期（極相）に到達する時間が短縮されることが示唆された．

(4) Shannon Indexによる多様性指数では，常温条件が最も多様性が高く，次いで高温条件，低温条件の順となり，環境温度が高すぎても低すぎても，多様性は低下するこ

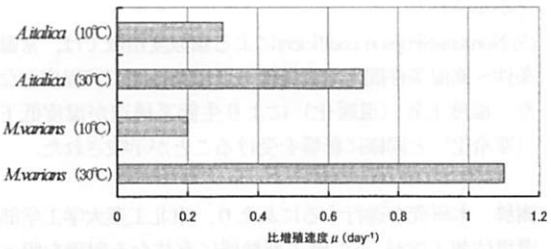

図-5 低温条件（10℃）と高温条件（30℃）における共通出現種（珪藻類）の比増殖速度の比較

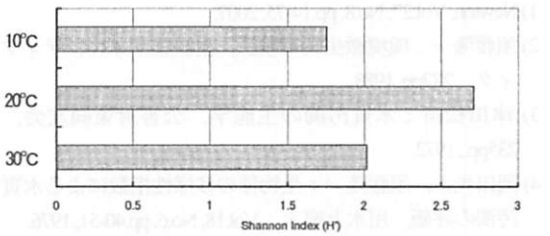

図-6 各培養温度における植物プランクトンの多様性（Shannon Index）の比較

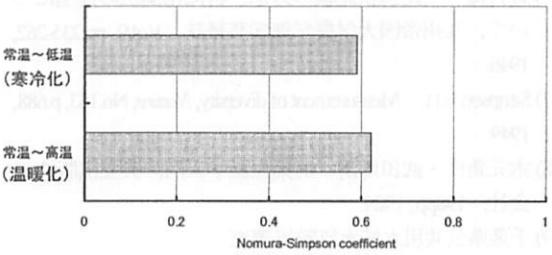

図-7 低温化（寒冷化）および高温化（温暖化）における類似度（Nomura-Simpson coefficient）の比較

とが示された.

(5) Nomura-Simpson coefficientによる類似度指数では，常温条件～高温条件間と常温条件～低温条件間で同程度となり，温度上昇（温暖化）により生態系構造が温度低下（寒冷化）と同様に影響を受けることが示唆された.

謝辞：本研究を遂行するにあたり，東北工業大学工学部環境情報工学科 小浜暁子准教授に有益なる討議を賜った．ここに記して感謝の意を表する.

参考文献

1) Newton, Vol.27, No.8, pp.14-75, 2007.
2) 須藤隆一：環境微生物実験法，講談社サイエンティフィク，282pp, 1988.
3) 津田松苗：水質汚濁の生態学，公害対策同友会，235pp., 1972.
4) 岡田光正，須藤隆一：生物種の多様性指数による水質汚濁の評価，用水と廃水，Vol.18, No.6. pp.40-51, 1976.
5) Shannon C.E. : The Mathematical Theory of Communication, University of Illinois Press, pp.48-53, 1949.
6) 野村健一：昆虫相比較の方法，特に相関法の提唱について，九州帝国大学農学部学芸雑誌，Vol.9, pp.235-262, 1940.
7) Simpson E.H. : Measurement of diversity, *Nature*, No.163, p.688, 1949.
8) 木元新作・武田博清：群集生態学入門，共立出版株式会社，198pp., 1989.
9) 千葉県公共用水域水質監視調査 http://www.pref.chiba.jp/syozoku/e_suiho/3_kansi/report/2004/pdf/siryo/04_s13_tega.pdf#search='手賀沼プランクトン'
10) 渡邊眞之：日本アオコ大図鑑，誠文堂新光社，159pp., 2007
11) Hayashi N., Murakami K., Fujimoto N., Mizuochi M., Inamori Y. : Effect of Environmental Factors on Growth Characteristics of the Ciliate Protozoan *Colpidium campylum*, *Nat.Hist.Res.*, Vol.7, No.2, pp.203-210, 2003.
12) Murakami K., Inamori Y., Sudo R., Kurihara Y. : Effect of Temperature on Prosperity and Decay of Genetically Engineered Microorganisms in a Microcosm System, *Water Science and Technology*, Vol.26, No.9-11, pp.2165-2168, 1992.
13) 村上和仁，瀧　和夫，松島　眸：富栄養化湖沼における植物プランクトン優占種の遷移機構－優占種の遷移に及ぼす温度および照度の影響に関する実験的検討－、環境情報科学論文集，Vol.17, pp.331-334, 2003.
14) Fujimoto N., Nishimura O., Inamori Y., Sudo R. : Nutrient-limited Growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and Competition under Various N:P Supply Ratios and Temperatures, *Limnology and Oceanography*, Vol.42, No.2, pp.250-256, 1997.
15) Amano Y., Takeya K., Machida M. : Influence of Mineral Source on the Growth of *Microcystis aeruginosa* and *Cyclotella* sp., *Proceedings of Water and Environmental Conference*, p.4, 2010.
16) Takamatsu Y., Nishimura O., Inamori Y., Sudo R., Matsumura M. : Effect of Temoerature on Biodegradability of Surfactants in Aquatic Microcosm System, *Water Science and Technology*, Vol.34, No.7-8, pp.61-68, 1996.
17) Beyers R.J., Odum H.T. : Ecological Microcosm, Springer-Verlag New York Inc., 557pp., 1993.
18) Murakami K. : Phytoplankton Species Succession in Tokyo Inner Bay under Global Warming using Experimental Microcosm System, *Proceedings of 8th International Conference on the Environmental Management of Enclosed Coastal Sea*, p.51, 2008.

(2010.5.21.受付)

Effect of Temperature on Phytoplankton Species Composition in Microcosm System

Kazuhito MURAKAMI[1]

[1]Dept. of Life and Environmental Sciences, Chiba Institute of Technology

This study was conducted to investigate the effect of temperature on microbial community structure, especially phytoplankton flora, using flask-size microcosm system. The results obtained can be concluded as follows; 1) The dominant species was different in each temperature condition with same lake water, and water bloom was observed under high temperature condition, 2) *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena affinis* which produce toxic matter were dominated under high temperature condition, and the possibility of some trouble was suggested in water use for tap water, 3) The common species of phytoplankton in each microcosm indicated high specific growth rate in high temperature condition, 4) The bio-diversity became lower in both high and low temperature condition from the viewpoint of Shannon Index (H') analysis, and 5) Temperature increasing influences to ecosystem structure as same as temperature decreasing from the viewpoint of Nomura-Simpson's coefficient (NSC) analysis.