

プランクトンの季節的遷移から見た水質評価手法の検討

藤原直樹・一瀬 諭・廣瀬佳則・古田世子・池田将平¹⁾・大前信輔²⁾・池谷仁里³⁾

要約

琵琶湖では、1977年の淡水赤潮発生以降、汚濁負荷削減の取組を進めてきた結果、湖水中の窒素・りん濃度はピーク時に比べて減少しており、プランクトンの現存量も減少傾向にある。しかし、琵琶湖は、2012年6～7月の *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* (スタウラストルム) に見られたような大增殖 (ブルーム) を発生させるだけの生産能を未だ有している。2012年のスタウラストルム大增殖時には、植物プランクトン量が多いにもかかわらず、動物プランクトン、魚類が少なかった。これは、スタウラストルムは大型の植物プランクトンであり、その多くが動物プランクトンに摂食されずに沈降あるいは分解してしまったためと考えられる。こうしたことから、琵琶湖の生態系における効率的な食物連鎖には、植物プランクトンが動物プランクトンに摂食されやすいことが重要な要素であり、大型緑藻のスタウラストルムが優占するプランクトン組成は望ましくないと考えられる。

また、琵琶湖で操業中の刺網に付着していた藻類のほとんどが、付着性藻類ではなく、プランクトン性の藻類であり、その中でもっとも付着量 (体積) が大きかったのは *Mougeotia* spp. (ヒザオリ) だった。刺網の汚れ度合の月別分布を見ると、6月の刺網汚損が著しかった。

1. はじめに

滋賀県では、琵琶湖の定期的な水質モニタリングと併せてプランクトンのモニタリングを35年以上実施してきている (一瀬ら, 2012)。プランクトンは食物連鎖の基底を成すほか、アオコや赤潮の発生の要因になるなど、水質形成の重要な要素であり、水質を評価するためには、窒素・リン・BOD・COD といった理化学的調査結果と併せてプランクトンの変動を見ることが不可欠である。

また、近年、琵琶湖における在来魚介類の減少など、生態系の変化が顕在化してきていることから、その要因を解明し、健全な琵琶湖の生態系保全と回復を図る上でも、プランクトンの継続的なモニタリングが重要な課題となっている。

本研究では、プランクトンの発生状況を定期的に把握し、水質に異常がないか現状を監視するとともに、プランクトンのモニタリングデータをもとに、プランクトンの季節的遷移とその変化の要因となりうる水質・気象変動などがどのような関係にあるのかを整理し、水質評価手法の検討を行った。

また、近年、操業刺網に短時間で多量の付着物が発生することが問題化していることから、県水産試験場と連携して漁網付着藻類に関する調査を行った。

2. 方法

2.1. 琵琶湖・瀬田川プランクトン等モニタリング調査

琵琶湖のプランクトン調査は、北湖の今津沖中央 (北緯 35° 23' 41" , 東経 135° 07' 57") (図 1:A 地点) における水深 0.5m (植物プランクトン)、水深 5m (動物プランクトン) および南湖の唐崎沖中央 (北緯 35° 02' 40" , 東経 135° 53' 36") (図 1:B 地点) における水深 0.5m (植物、動物プランクトン) において月 2 回の頻度で採取した湖水を用いて行った。一瀬ら (1995, 2007) の方法により同定・計数および体積換算を行い、Strathmann (1967) の式を用いて炭素量換算を行った。動物プランクトンについては一瀬ら (2011) の方法により同定・計数および炭素量換算を行った。

瀬田川のプランクトン調査は、瀬田唐橋 (北緯 34° 58' 27" , 東経 135° 54' 22") (図 1:C 地点) において週 1 回の頻度で採取した河川水を用いて行った。植物プランクトンについては琵琶湖と同じ方法で同定等を行い、動物プランクトンについては、プランクトンネット (NXXX25, 目合 41 μm) に河川水を通して 1000 倍濃縮した試水を固定せずに光学顕微鏡を用いて同定・計数した。

1) 滋賀県南部環境事務所 2) 滋賀県農政水産部水産課 3) 兵庫県立大学大学院 生命理学研究科

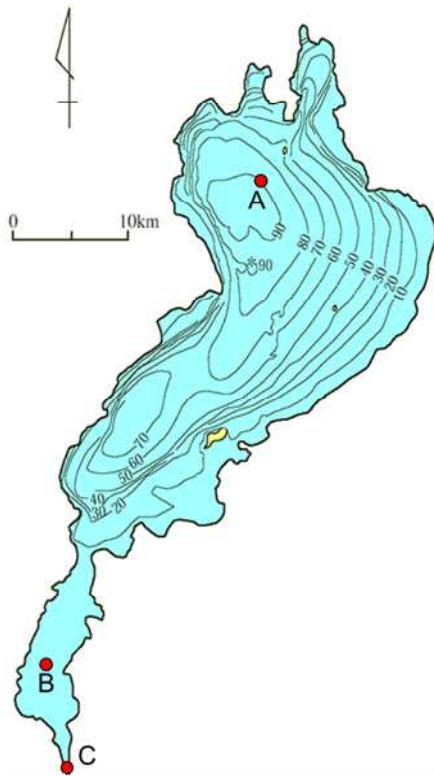


図1 調査地点

- A: 今津沖中央(北緯 35° 23' 41" , 東経 135° 07' 57")
 B: 唐崎沖中央(北緯 35° 02' 40" , 東経 135° 53' 36")
 C: 瀬田唐橋(北緯 34° 58' 27" , 東経 135° 54' 22")

2.2. プランクトン季節遷移モデル (BPEG-model) の構築

1978年から継続して実施している琵琶湖における植物プランクトンの計数結果を体積換算し、各調査で最も量の多い種を優占種とした。その季節遷移を年ごとにプランクトンカレンダーとしてとりまとめ、富栄養化以前のプランクトンカレンダー(根来, 1958)との比較を行った。

また、植物プランクトン、動物プランクトンの計数結果を炭素量換算し、年ごとの季節遷移グラフを作成した。併せて、水質(滋賀県, 2013ほか)、気象(彦根地方気象台, <http://www.jma-net.go.jp/hikone/>)のグラフを作成し、年ごとの気象、水質、プランクトンのイベントを整理し、PEG-model (Sommer et al., 1986, 2012)を基に琵琶湖版プランクトンモデル(BPEG-model)の構築を試みた。

2.3. プランクトン組成と物理的・化学的要因との関係の把握

近年、琵琶湖では、細胞の周りに粘質鞘と呼ばれる多糖類をまとった植物プランクトンの比率が増加している(一瀬ら, 2013)ことから、栄養塩濃度と粘質鞘産生量との関係を調べるため、琵琶湖から分離培養した *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* (スタウラストルム)を用いた培養実験を行った。具体的には、琵琶湖から分離培養したスタウラストルムを、100 mg/Lの窒素または10 mg/Lのリンを添加した人工池水、両方を添加した人工池水を用いて、20°C、12-12h明暗サイクルでインキュベーターし、粘質鞘産生量について調べた。コントロールとして、人工池水を用いた。さらに、リン濃度0.1 mg/Lに対して窒素/リンの濃度比を1、10、100と変化させ、スタウラストルムの粘質鞘産生量に対する影響について調べた。なお、窒素は硝酸ナトリウム、リンはリン酸カリウムを用いた。

また、琵琶湖北湖における植物プランクトンのブルームの発生と水質との関係について解析を行った。

2.4. 動・植物プランクトンの相互関係の把握

Daphnia pulicaria (琵琶湖産ミジンコ)に異なる種類の植物プランクトンを餌として与え、餌に対する応答実験を行った。ミジンコの餌には、荻原ら(1984)の方法により琵琶湖から分離した植物プランクトン15種類を用いた。応答実験には、琵琶湖の深水層から分離したミジンコを継代培養して得られた1頭のミジンコから生まれた生後24時間以内の仔虫を用いた。15区画を設け、各区画にはミジンコの仔虫5頭ずつを入れ、それぞれ15種類の異なる餌を1種類のみ与え続けた。各区画に最初に入れた仔虫を親とし、親の死亡数、産仔数を計測した。実験は10日間の毎日、給餌と観測を行い、親の生死を確認し、生まれた仔虫は産仔数としてカウントして区画から取り除いた。

2.5. 漁網付着藻類に関する調査

2.5.1. 刺網付着藻類の種組成調査

2010年4月~11月、2011年5月~11月および2012年5月~12月にかけて漁業者から回収した操業刺網付着物の一部を用いて刺網付着藻類にかかる種組成調査を行った。この際、漁業者から刺網の設置場所、設置時間、網の汚れ具合等の情報を得た。その結果、刺網の設置場所は、おもに琵琶湖北湖東岸~沖合(彦根市~近江八幡市の沿岸および沖合)で、設置時間は1時間から4時間半であった。また、刺網の汚れ具合は、5段階のレベルで表した(レベル0:汚れなし, レベル1:網地が色づく, レベル2:網地からみつき網目を覆いはじめる, レベル3:網目を覆

う、レベル 4: マット状に付着しぼたぼたになる)。刺網付着物については、5ml を蒸留水で 100ml に希釈したのち、プランクトン計数板 (1mm ピッチ 20 マス×50 マス界線入り、容量 1ml 外枠付: 松浪硝子工業株式会社製) に取り、光学顕微鏡下で藻類の種同定および細胞数の計数を行った。検出された藻類は、一瀬ら (1995, 2007) の方法で種類ごとに体積換算して組成比を算出した。

2.5.2. 刺網への藻類付着実験

試験湖水を入れたガラス水槽 (底面 59cm×28cm、高さ 29cm) 内に 10cm×10cm の枠に固定した刺網地 (0.3 号、22 節、ナイロン製) を設置し、毎分 45 回転の振とうを行って 15、30、60、120、180、300、480 分後に 1 枚ずつ網地を回収した。試験湖水は、GF/B ガラス繊維ろ紙でろ過した湖水 24L に操業刺網付着物剥離液 1L を加えて混和したものを用い、生じたフロックが底に沈むまで静置したのち実験を開始した。回収した網地は 10ml の遠沈管内で蒸留水洗浄したのち、網地を取り除いて 10ml にメスアップし、プランクトン計数板に試水を取って光学顕微鏡下で藻類の同定・計数を行った。また、振とう開始直後に試験湖水を採取して藻類の同定・計数を行った。

3. 結果および考察

3.1. 琵琶湖・瀬田川プランクトン等モニタリング調査

【琵琶湖・植物プランクトンの遷移】

2011 年度から 2013 年度までの北湖今津沖中央における植物プランクトンの遷移を図 2 に示した。

2011 年度には、6 月および 11 月～1 月に大型緑藻スタウラストルムの増加が見られた。2012 年度には、6 月～7 月にスタウラストルムの大增殖 (ブルーム) が見られ、その後は少ないプランクトン量で推移した。2013 年度には、植物プランクトンの大きな増加は見られなかった。毎年、夏季から秋季には藍藻類が優占することが多く、2011 年 8 月には *Gomphosphaeria lacustris* (ゴンフォスフェリア)、2011～13 年の 10 月には、アオコ形成種の *Microcystis aeruginosa* または *M. wesenbergii* (ミクロキスティス) が優占種となった。冬季は、2011 年度 (2012 年 1 月～3 月) には緑藻のスタウラストルムが優占種となったが、2012 年度には珪藻の *Fragilaria crotonensis* (オビケイソウ)、*Aulacoseira nipponica* (アウラコセイラ・ニッポニカ、琵琶湖固有種)、*Stephanodiscus suzukii* (スズキケイソウ、琵琶湖固有種) が多くを占め、2013 年度にはスズキケイソウが優占種となった。2013 年 11 月には、緑色鞭毛藻 *Merotorichia capitata* (メロトリキア) が、1978 年度から実施している本調査の中で初めて観測され、11

月 18 日の調査では本種が優占種となった。

南湖唐崎沖中央における植物プランクトンの遷移を図 3 に示した。南湖唐崎沖中央においても北湖今津沖中央と同様、2011 年度には 6 月および 11 月～1 月にスタウラストルムの増加が見られ、2012 年度の 6 月～7 月にはスタウラストルムの大增殖 (ブルーム) が見られた。北湖とは異なり、2011 年 5 月、2012 年 11 月、12 月には黄色鞭毛藻の *Uroglena americana* (ウログレナ) が優占種となり、2012 年 2 月、2013 年 4 月～5 月には同じく黄色鞭毛藻の *Dinobryon bavaricum* (ホソヒダサヤツナギ) が優占種となった。2012 年 2 月、2013 年 2 月、12 月、2014 年 2 月、3 月には小型の中心目珪藻 *Cyclotella* spp. (ヒメマルケイソウ) が優占種となった。2013 年の秋季には、北湖と同様、緑色鞭毛藻のメロトリキアが初観測され、10 月～12 月にかけて優占種となった。

【琵琶湖・動物プランクトンの遷移】

図 4、5 に北湖今津沖中央 (水深 5m 層) および南湖唐崎沖中央 (水深 0.5m 層) における動物プランクトンの遷移 (2011 年度～2013 年度) を示した。

1 リットル当たりの動物プランクトン量を比較すると、北湖今津沖中央よりも南湖唐崎沖中央の方が多く、その差は主として原生動物の量の違いによるものであった。北湖ではカイアシ類の *Eodiaptomus japonicus* (ヤマトヒゲナガケンミジンコ) が最も大きな炭素量を占めていたが、南湖では繊毛虫が最も大きな炭素量を占めた。また、北湖では、2011、12 年度には動物プランクトンの大きな増加は見られず、年間を通して小さな炭素量であったが、2013 年度には 8 月、9 月、2 月にヤマトヒゲナガケンミジンコの増加がみられ、9 月にミジンコ類の *Diaphanosoma brachyurum* (オナガミジンコ)、10 月に同じくミジンコ類の *Daphnia galeata* (カプトミジンコ) の増加がみられた。

【瀬田川・植物プランクトンの遷移】

2011 年度から 2013 年度までの瀬田川における植物プランクトンの遷移を図 6 に示した。2011 年度には、琵琶湖と同様に 6 月と 11 月～1 月にスタウラストルムの増加がみられたのと、1 月、2 月に黄色鞭毛藻の *Dinobryon cylindricum* (ツツサヤツナギ) やウログレナがやや増加した以外は非常に小さい植物プランクトン量であった。2012 年度には、4 月に *Synedra acus* (ハリケイソウ)、5 月にウログレナの増加がみられたのち、6 月～7 月にかけてスタウラストルムの大增殖 (ブルーム) が起こった。8 月、9 月には *Microcystis* spp. (ミクロキスティス)、*Anabaena* spp. (アナベナ)、*Oscillatoria kawamurae* (オシラトリア・カワムラエ) 等の藍藻アオコ形成種が多く見

られ、10月～2月にはウログレナやツツサヤツナギなどの黄色鞭毛藻がみられた。2013年度には、4月、3月にホソヒダサヤツナギ等の黄色鞭毛藻の増加がみられたが、8月に藍藻アオコ形成種の *Anabaena flos-auae* (アナベナ)、11月には緑色鞭毛藻のメロトリキア、1月には珪藻のハリケイソウ、2月には *Asterionella formosa* (ホシガタケイソウ) が少し増えた程度で、年間を通して小さな植物プランクトン量であった。

瀬田川プランクトン調査におけるウログレナの年度ごとの季節遷移を図7に示した。ウログレナは、淡水赤潮の原因藻類で、水道水の生ぐさ臭の原因ともなっている。春季の細胞密度については、2003年度の5月に大きくなったのちは比較的小さくなっている。一方、秋季から冬季の細胞密度については、1990年代の後半以降大きくなり、出現が長期化する年度が多くなっている。2004年度以降、淡水赤潮の発生はほとんど見られなくなっている一方で、秋季から冬季にかけてのウログレナの長期出現により、湖水の生ぐさ臭発生が長期化している。しかし、2013年度については、秋季から冬季にかけてのウログレナの細胞密度は低い状態で推移した。なお、瀬田川のプランクトン調査結果は、滋賀県のホームページで公開している (http://www.pref.shiga.lg.jp/d/biwako-kankyo/lber/02shiraberu/02-04plankton/02-04-02setagawa_plankton/02-04-02setagawa_plankton.html)。

3.2. プランクトン季節遷移モデル (BPEG-model) の構築

1978年から継続して実施しているプランクトンのモニタリング結果をもとに、琵琶湖北湖今津沖中央における植物プランクトン炭素量 (mgC/L) の長期変動を図8に、網別年平均値の長期変動を図9に示した。北湖における植物プランクトン量は、1980年代から徐々に減少しており、年平均値の変遷を見ると、主体である緑藻は減少傾向にあり、黄色鞭毛藻は1981年以降少ない量で推移し、珪藻は増加傾向にある。藍藻は1980年代後半に急増し、その後漸増もしくは横這いである。

また、琵琶湖北湖今津沖中央における年毎の優占種の遷移パターンをプランクトンカレンダーとしてとりまとめた (図10)。

【優占種となる回数】

1978年から2013年の846回の調査の中で最も優占種となる回数が多かった種は、318回 (38%) を占めたスタウラストルムであった。次いで、スズキケイソウが62回 (7.3%)、*Closterium aciculare* var. *subprorum* (クロステリウム) が57回 (6.7%) であった。網別にみると最も頻繁に優占種となったのは緑藻綱60%で、次いで珪藻綱

19%、渦鞭毛藻綱6.5%、藍藻綱5.2%、黄色鞭毛藻綱5.0%、褐色鞭毛藻綱4.4%の順であった。

【季節別の優占種】

季節別に見ると、1月～4月および12月にはスズキケイソウ、オビケイソウなどの珪藻綱が優占する頻度が高く、特に3月、4月には緑藻綱の頻度を上回った。5月にはウログレナ主体の黄色鞭毛藻綱が最も多く優占種となった。6月～11月には緑藻綱の優占頻度が高いが、7月～10月の間には藍藻綱の優占種となる比率が10%以上あった。

【期間別の優占種】

1978年～2013年を3つの期間に分けて見る (図11) と、5月に黄色鞭毛藻が優占する比率は、第1期 (1978年～1989年) には57%だったが、第2期 (1990年～2001年) には48%、第3期 (2002年～2013年) には22%と低下傾向にある。一方、藍藻が優占種となる比率は、第1期に1.8%、第2期に2.8%、第3期に11%と増加している。特に9月を見ると第3期には藍藻が優占種となる比率は42%であった。

最も頻繁に優占種となるスタウラストルムは、第1期では優占種となる比率が7月～11月には50%以上、3月～6月には5%未満と出現季節が明瞭であったのに対し、第3期では50%以上となるのは11月 (71%) のみ、4月17%、5月22%、その他の月には29～46%と出現季節が不明瞭となっている。

富栄養化が大きく進行する以前だと考えられる、1952年の植物プランクトン優占種の季節遷移 (根来, 1956, 1981) (表1) を見てみると、7月～9月を除く月で、スズキケイソウ (*Stephanodiscus suzuki*)、アウラコセイラ・ニッポニカ (*Aulacoseira nipponica*)、ジャバラケイソウ (*Acanthoceras zachariasii*) 等の珪藻が優占種となっている。1978年以降の優占種として上位1位と3位の種である、スタウラストルムとクロステリウムについて、根来 (1981) は、琵琶湖のプランクトンとしては以前から見られたが、クロステリウムが1958年に、スタウラストルムが1961年に初めて大増殖を起こすまでは、優占種になることはなかったと記している。36年間の植物プランクトン組成を見ても、直近5年間で見ても、最も優占種となる頻度が高いのは大型緑藻であるスタウラストルムであり、また、2012年に本種の大増殖が起こっていることから、プランクトン種構成、現存量いずれから見ても、琵琶湖北湖の水環境は珪藻が優占していた富栄養化以前のレベルまでにはまだ戻っていないと評価できる。

【プランクトン季節遷移モデル (BPEG-model)】

Sommer ら (1986, 2012) は、湖沼におけるプランクトンの季節遷移を、PEG-model として記述的に表現している。ここでは、1980年と2010年および2012年の琵琶湖における植物・動物プランクトン、窒素・りん、月間降水量平

年差、月平均風速平年差のグラフを示した(図 12, 図 13)。これらのデータをもとに、PEG-model を参考としてに、琵琶湖における各年のプランクトン季節遷移を以下の通り記述した。

<1980 年のプランクトン季節遷移>

冬季: 光量・水温が低いのでプランクトン量は少なく、植物プランクトン優占種は珪藻であった。

春季: 光量・水温の上昇により、黄色鞭毛藻が増加し、りんの流入に伴いウログレナのブルームが起きた。植物プランクトンの増加に伴い、ヤマトヒゲナガケンミジンコを主体とする植食性の甲殻類が増加した。

夏季: 窒素枯渇により、小型藻類から、藍藻、大型緑藻へと遷移し、餌となる小型藻類の減少と水温上昇によるプランクトン食魚の捕食圧増加により、植食性の甲殻類が減少した。

秋季: りんの流入に伴い大型緑藻スタウラストルムのブルームが起きた。晩秋、光量・水温の低下に伴いプランクトン量は減少した。

<2010 年のプランクトン季節遷移>

冬季: 光量・水温が低いのでプランクトン量は少なく、植物プランクトン優占種は渦鞭毛藻であった。春季、光量・水温の上昇により、珪藻が増加し、続いて黄色鞭毛藻が増加した。植物プランクトンの増加に伴い、動物プランクトンはわずかに増加した。

夏季: 初夏、動物プランクトンの捕食により、植物プランクトンが減少し、透明度が上昇した。夏季、窒素枯渇により、小型藻類から、藍藻へと遷移した。

秋季: 引き続き藍藻が優占し、栄養塩濃度が低く、植物プランクトンの大きな増加は起こらなかった。晩秋、鉛直混合による栄養塩回帰に伴い珪藻が増加した。

<2012 年のプランクトン季節遷移>

冬季: 前半は前年末に増加した大型緑藻が残存し、後半は光量・水温の低下に伴い植物プランクトン量が低下した。

春季: 植物プランクトンの増加は小さかった(北湖南部ではウログレナの増加がみられた)。種組成は珪藻に続いて黄色鞭毛藻であった。小型の植物プランクトンのわずかな増加に伴い、動物プランクトンもわずかに増加した。

夏季: 大型緑藻スタウラストルムのブルームが発生した。スタウラストルムはミジンコの可食サイズよりはるかに大きく、餌として利用できないため、動物プランクトンは低濃度で推移したと推察された。8月、スタウラストルムが一気に沈降し、生産層から消失した。

秋季: これに伴い、表水層のりん濃度が大幅低下し、以降、植物・動物プランクトンともに低濃度で推移した。

1980 年は富栄養湖のプランクトン遷移パターンであり、2010 年は貧栄養湖のパターンであった。これは、1980 年代以降、富栄養化対策により、琵琶湖の栄養塩濃度の低下してきた効果であると考えられる。しかし、2012 年に、1978 年以降のモニタリングで観測されたことのない大規模な植物プランクトンのブルームが発生した。このときには、植物プランクトン量が多いにもかかわらず、動物プランクトン、魚類が少なかった。これは、スタウラストルムは、大型の植物プランクトンのため、多くが動物プランクトンに摂食されずに沈降あるいは分解してしまったためと考えられる。このように、琵琶湖の生態系における効率的な食物連鎖には、植物プランクトンが動物プランクトンに摂食されやすいことが重要な要素であり、大型緑藻のスタウラストルムが優占するプランクトン組成は望ましくないと考えられる。

3.3. プランクトン組成と物理的・化学的要因との関係の把握

スタウラストルムの粘質鞘産生に対する窒素、リンの影響について調べた結果を図 14 に示す。スタウラストルムを窒素を添加した人工池水で培養すると、細胞外に分泌される粘質鞘は大きくなった。一方、リンを添加した人工池水の場合、コントロールに比べ、粘質鞘分泌量に大きな影響は見られなかった。次に、窒素/リンの濃度比におけるスタウラストルムの粘質鞘産生について調べたところ、リン濃度 0.1 mg/L に対し、窒素/リンの濃度比 10 を添加した時に、大量の粘質鞘が分泌された。この結果は、湖水中の窒素濃度の上昇によって粘質鞘由来の湖内有機物生産量が増加する可能性を示している。

琵琶湖北湖では、1979 年度以降、湖水中のリン濃度は漸減傾向、2003 年度以降窒素も減少傾向にあり(滋賀県琵琶湖環境科学研究センター, 2013)、富栄養化は抑制されて水質改善に向かっていると考えられる。一方、植物プランクトンについてみると、1980 年頃に毎年のように植物プランクトンのブルームが見られたが、植物プランクトン量の最大値は減少傾向にある。しかし、1992 年の 7 月にクロステリウム、2012 年 6 月~7 月にかけてスタウラストルムによるブルームが見られた(図 15)。プランクトン現存量の年最大値と、その前年度の全りん濃度の平均値を比較すると、植物プランクトンの最大値が 1.5mgC/L を超えるときには必ず前年度の全りん濃度の平均値が 0.01mg/L 以上であることが分かった(図 16)。

3.4. 動・植物プランクトンの相互関係の把握

琵琶湖産ミジンコに餌として与えた植物プランクトン種を表 2 に、応答実験の結果を図 17 に示した。カビ臭を

出す小型藍藻の *Phormidium tenue* (フォルミディウム) (PTG と PTB) や微細なピコプランクトン (PP) は、ミジンコの餌としては不適であり、実験に用いたミジンコは仔虫を生む前に全滅した。藍藻の中でも、浮上性群体を形成する *Anabaena macrospora* (アナベナ) や *Microcystis wesenbergii* (マイクロキスティス) 群体形成株 (MK) はミジンコ成長阻害とはならなかったが、産仔数は少なかった。中型珪藻の *Asterionella formosa* (ホシガタケイソウ) (AST①と AST②) がミジンコの餌として優れており、産仔数も多かった。大型緑藻の *Closterium* sp. (クロステリウム) (CLO) では、その分解物などがミジンコの餌となり、産仔数が多かった。大型緑藻の *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* (スタウラストルム・ドルシデンティフェルム) (STD) と *Staurastrum arcticon* (スタウラストルム・アークティスコン) (STA) では、ミジンコの多くが生息したが、繁殖は行われなかった。ミジンコの餌としてよく用いられる小型緑藻の *Chlorella* sp. (クロレラ) (CHL) では、ミジンコの成長阻害は見られず、産仔数も多かった。これらのことから、一部の緑藻や珪藻はミジンコの餌として適しており、藍藻類や大型緑藻のスタウラストルムは適していないと考えられた。

3.5. 漁網付着藻類に関する調査

3.5.1. 刺網付着藻類種組成調査

図 18-1~18-13 に操業刺網設置場所、汚れ度合、付着藻類組成 (細胞容積比) を示した。月毎の汚れ度合の度数分布を表 3 に表した。全 84 サンプルのうち最高レベルの汚れ度合レベル 4 を記録したのは 5 回で、いずれも 6 月であった。図 19 に操業刺網付着藻類の構成比率を月毎の平均値で示した。刺網付着藻類の中で最も付着量 (細胞容積) が大きかったのは糸状群体を形成する緑藻の *Mougeotia* spp. (ヒザオリ) だった。そのほかに、珪藻のオビケイソウ、*Aulacoseira granulata* (スジタルケイソウ)、渦鞭毛藻の *Ceratium hirundinella* (イケツノオビムシ)、秋には緑藻の *Gonatozygon* sp. (ゴナトジゴン) 等の付着がみられた。付着していた藻類のほとんどがプランクトン性の種だったことから、刺網付着藻類の起源は湖水中のプランクトンが主体であると考えられた。琵琶湖において、湖水中にヒザオリの細胞容積が最も大きい時季は 6 月~7 月頃であり、操業刺網の汚れ度合が大きい時季と一致する。また、最も大きな比率を占めたヒザオリの付着量は、琵琶湖のプランクトン調査で湖水中の総細胞容積に占める割合がより高いスタウラストルムの付着量よりもはるかに大きいことから、スタウラストルムよりも刺網に付着しやすい性質を持っていると考えられた。

3.5.2. 刺網への藻類付着実験

付着実験の結果を図 20 に示した。操業刺網付着物を湖水中に再懸濁した後、試験刺網に再付着させる実験を行った結果、振盪開始から 30 分後には、刺網に藻類が付着し始め、1~3 時間後には網に色が付き、5 時間後には網目を覆い始めた。短時間に多量の藻類が刺網に付着することが実験で確認できた。

4. まとめ

以上の結果をまとめると、

- ・2011 年度には、琵琶湖への流入負荷が大きく、6 月と 12 月に大型緑藻スタウラストルムが増加した。2012 年度には、6~7 月にスタウラストルムの大規模なブルームが発生した。2013 年度には、通年でプランクトン量が少なかった。
- ・富栄養化以前には、琵琶湖北湖のプランクトン相は珪藻主体であったことが知られているが、現在は緑藻主体である。北湖における植物プランクトン量の年平均値の変遷を見ると、主体である緑藻は減少傾向にあり、珪藻は増加傾向にある。黄色鞭毛藻は 1981 年以降少ない量で推移している。藍藻は 1980 年代後半に急増し、その後漸増もしくは横這いである。
- ・優占種の変遷を見ると、緑藻、特にスタウラストルムの比率が高いが、徐々に緑藻の比率が下がっており、夏から秋に藍藻の比率が上がっている。
- ・近年、春季のウログレナ増加のピークは小さくなっているが、秋季~冬季の長期間ウログレナが発生し、水道原水の異臭味が生ずることが利水上の問題となっている。なお、2013 年度の秋冬には、ウログレナが非常に少なかった。
- ・北湖において、総細胞容積が減っているのに対して、総粘質顆粒容積は増加している。窒素濃度の上昇によって粘質鞘が増加する可能性が実験により示された。
- ・植物プランクトン最大値が 1.5mgC/L を超える年の前年度の全りん北湖表層平均値は 0.01mg/L 以上であった。湖水中のりん濃度のわずかな上昇により、植物プランクトンのブルームが引き起こされることがわかった。
- ・刺網付着藻類の中で最も付着量 (細胞容積) が大きかったのはヒザオリであり、湖水中にヒザオリの細胞容積が増加する 6 月に特に操業刺網の汚れが顕著になった。刺網付着藻類の起源は湖水中のプランクトンが主体であると考えられた。また、短時間に多量の藻類が刺網に付着することが実験で確認できた。

5. 結論

琵琶湖の生態系における効率的な食物連鎖には、植物プランクトンが動物プランクトンに摂食されやすいことが

重要な要素であり、この点から、大型緑藻のスタウラストルムが優占するプランクトン組成は望ましくないと考えられる。琵琶湖の北湖では、富栄養化以前には、珪藻主体のプランクトン相であったことが知られており、琵琶湖の生態系における効率的な食物連鎖には、珪藻主体の植物プランクトン相が望ましいのかもしれない。今後、効率的な食物連鎖という観点から琵琶湖のプランクトン量と種組成の評価を行っていく必要がある。

6. 引用文献

- 一瀬諭・藤原直樹・古田世子・池田将平・岸本直之(2011): 琵琶湖におけるプランクトン等の長期変遷に関する解析モニタリング-動・植物プランクトンおよび細菌を含む微生物の変動解析-. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書, 7: 196-218.
- 一瀬諭・池谷仁里・古田世子・藤原直樹・池田将平・岸本直之・西村修(2013): 琵琶湖に棲息する植物プランクトンの総細胞容積および粘質鞘容積の長期変動解析. 日本水処理生物学会誌, 49: 65-79.
- 一瀬諭・若林徹哉・松岡泰倫・山中直・藤原直樹・田中勝美(1995): 琵琶湖の植物プランクトンの形態に基づく生物量の簡易推定について. 滋賀県立衛生環境センター所報, 30: 27-35.
- 一瀬諭・若林徹哉・古田世子・吉田美紀・岡本高弘・原良平・青木茂(2007): 琵琶湖北湖における植物プランクトン総細胞容積量の長期変遷と近年の特徴について-2001年度から2005年度を中心に-. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書, 2: 97-108.
- 根来(1958): 琵琶湖主湖盆の植物性プランクトン. 陸水学雑誌, 18: 37-46.
- 根来健一郎(1981): 琵琶湖の富栄養化に伴うプランクトン・カレンダーの乱れ. 水温の研究, 25: 5387-5391.
- 荻原富司, 矢木修身, 高村義親, 須藤隆一(1984): 霞ヶ浦に発生する *Microcystis aeruginosa* の純粋分離. 水質汚濁研究, 7(7): 437-442.
- 滋賀県(2013): 滋賀の環境 2013 (平成 25 年版 環境白書) -資料編-
- 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター(2013): 平成 22 年度琵琶湖水質調査報告書
- Sommer, U., Adrian, R., De Senerpont Domis, L., Elser, J. J., Gaedke, U., Ibelings, B., Jeppesen, E., Lürding, M., Molinero, J. C., Mooij, W. M., van Donk, E., Winder, M. (2012). Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 43: 429-448.

Sommer, U., Gliwicz, Z.M., Lampert, W., Duncan, A. (1986): The PEG model of a seasonal succession of planktonic events in fresh waters. Arch. Hydrobiol., 106: 433-71.

Strathmann, R. R. (1967): Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. Limnology and Oceanography, 12: 411-418.

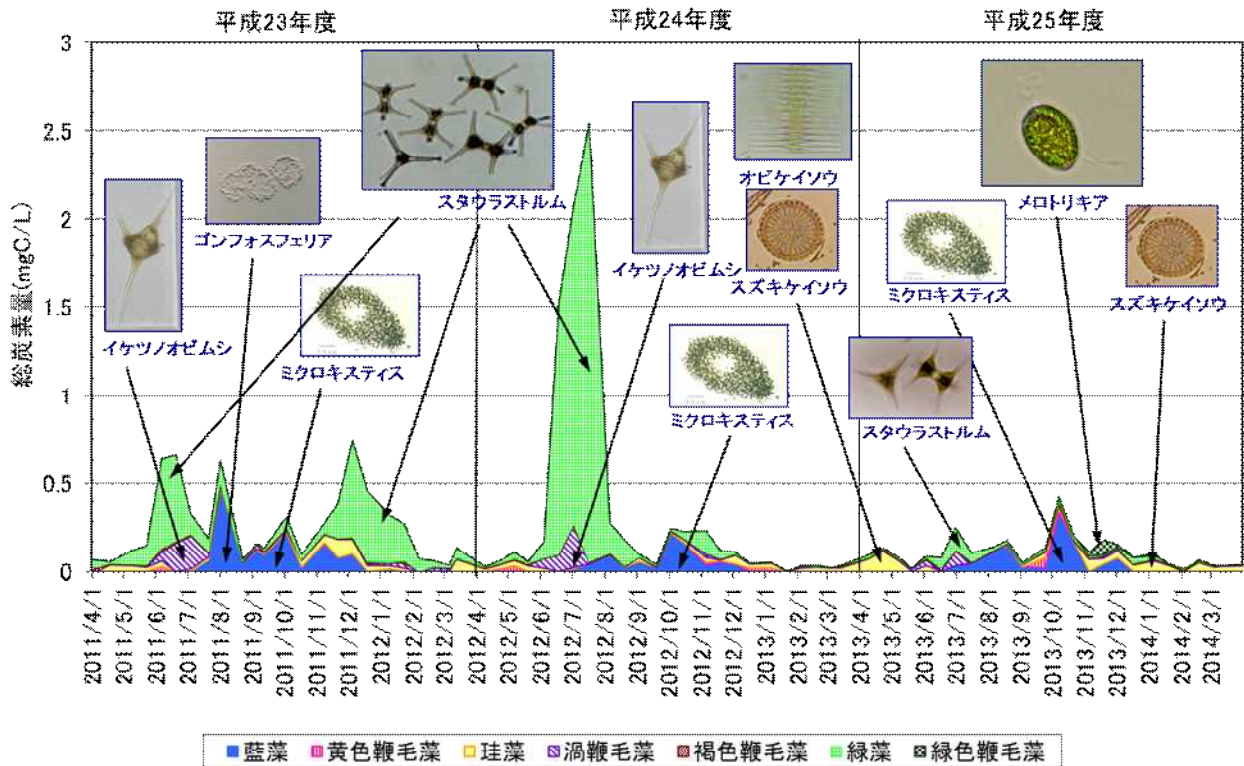


図2 北湖における植物プランクトン総炭素量の変動(今津沖中央、水深0.5m層)

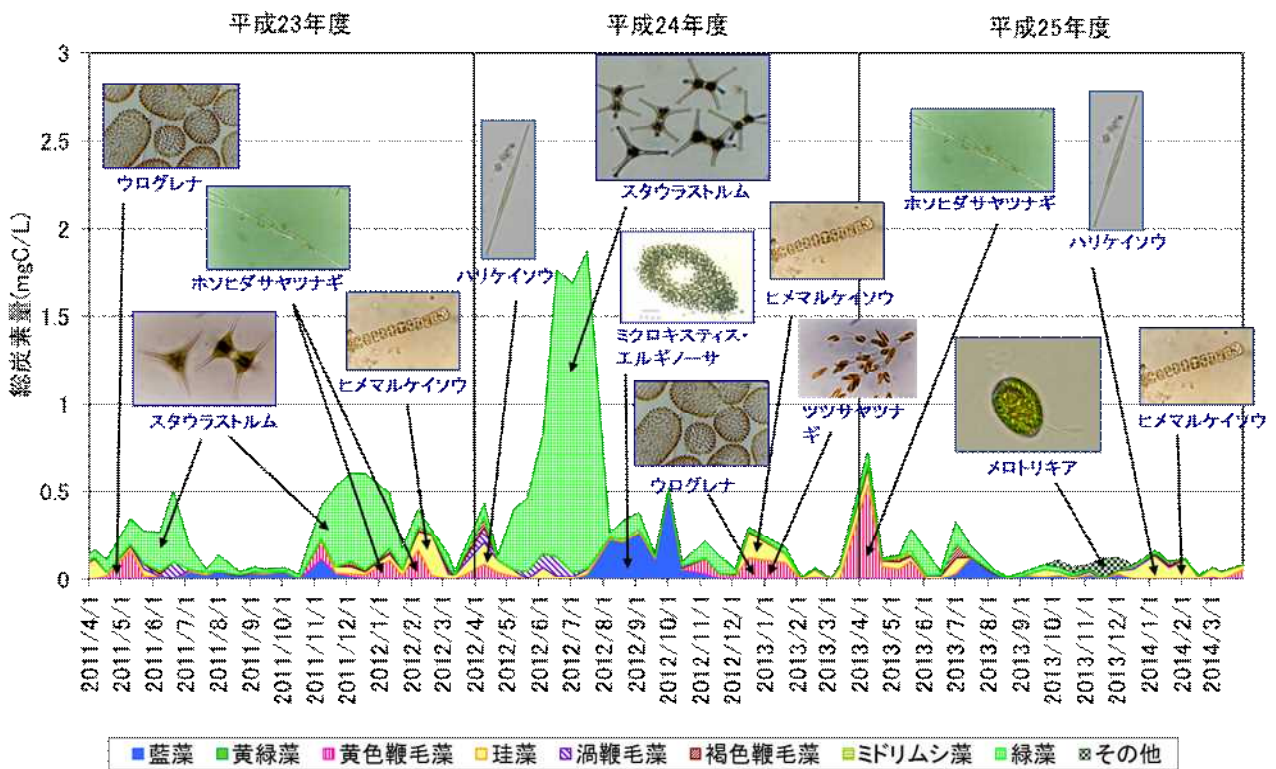


図3 南湖における植物プランクトン総炭素量の変動(唐崎沖中央、水深0.5m層)

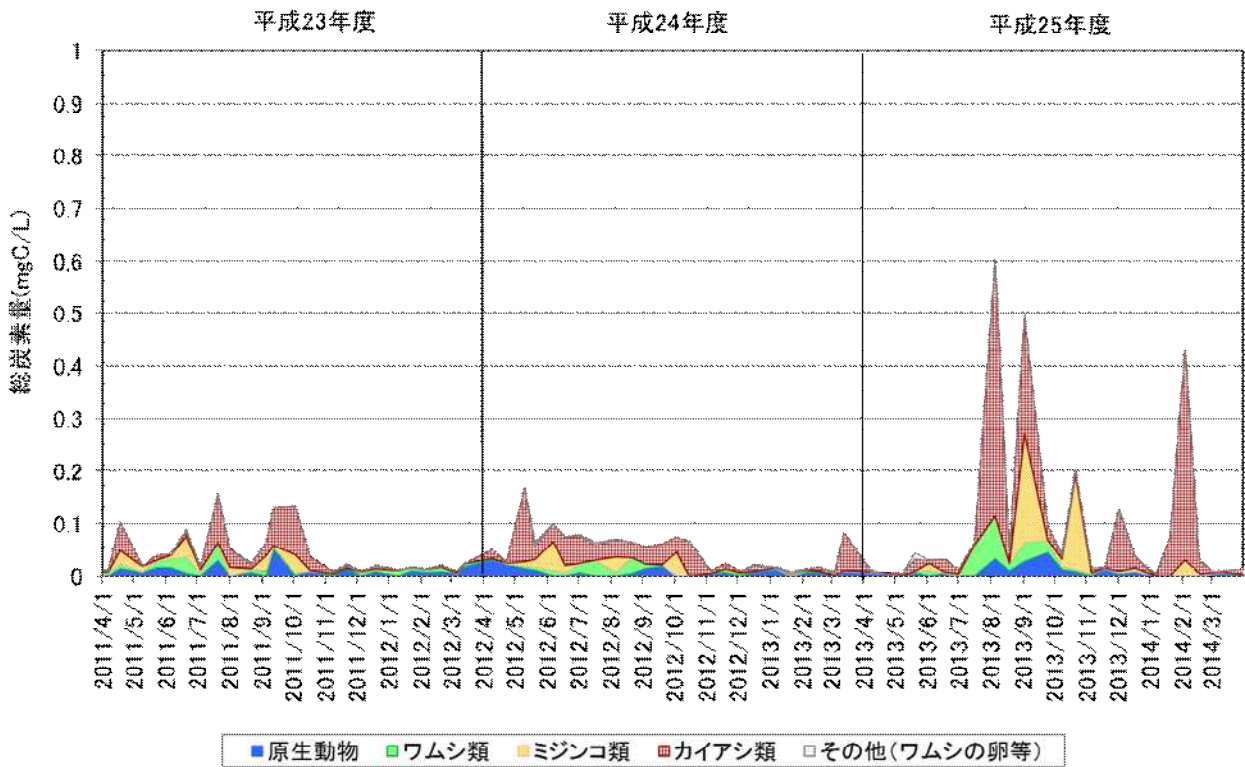


図4 北湖における動物プランクトン総炭素量の変動(今津沖中央、水深5m層)

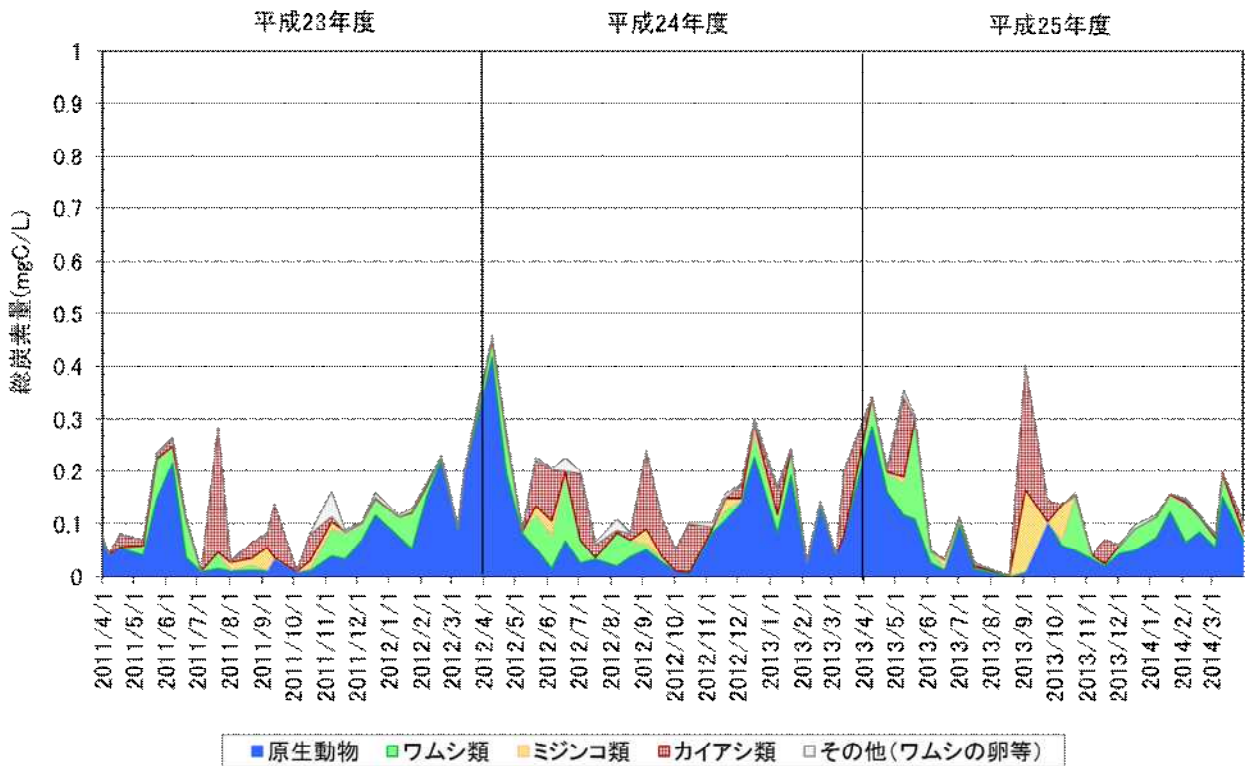


図5 南湖における動物プランクトン総炭素量の変動(唐崎沖中央、水深0.5m層)

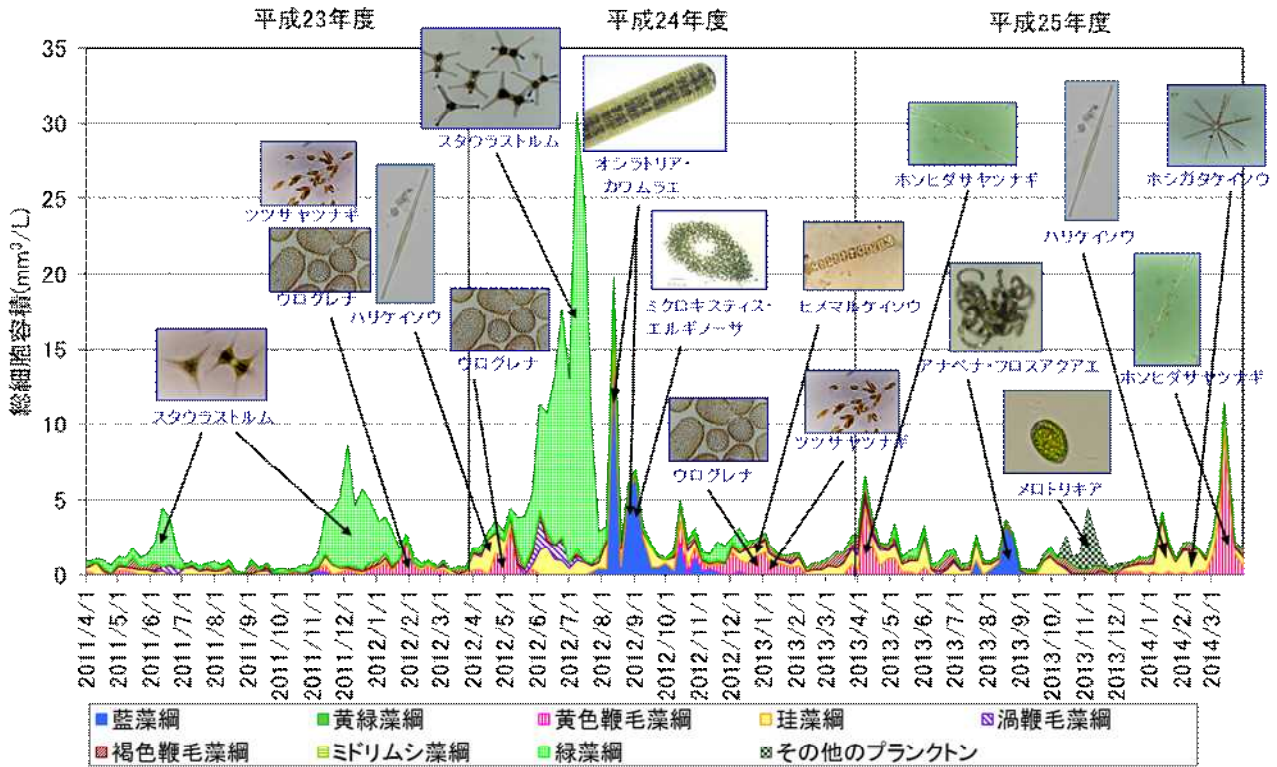


図6 瀬田川における植物プランクトン総細胞容積の変動(瀬田唐橋、水深0.5m層)

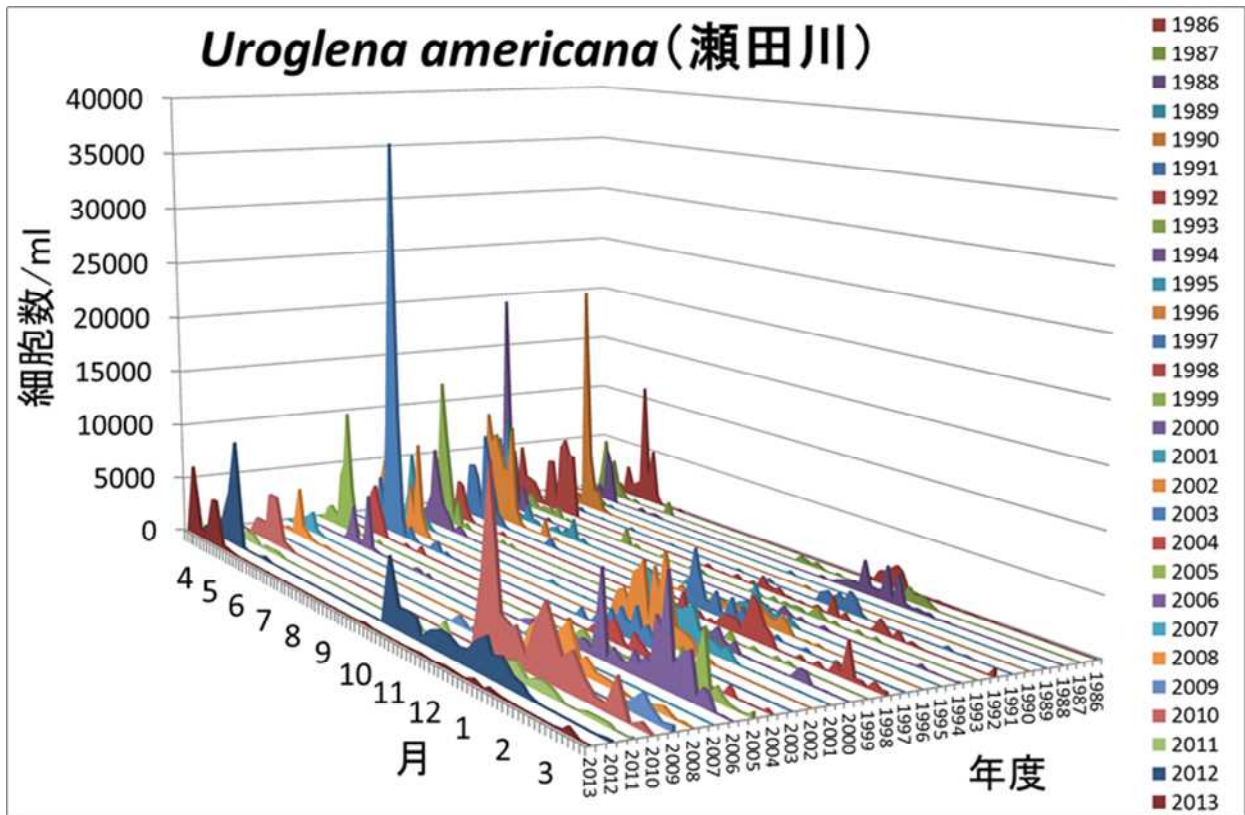


図7 瀬田川における *Uroglena americana* の細胞密度の変動(瀬田唐橋0.5m層)

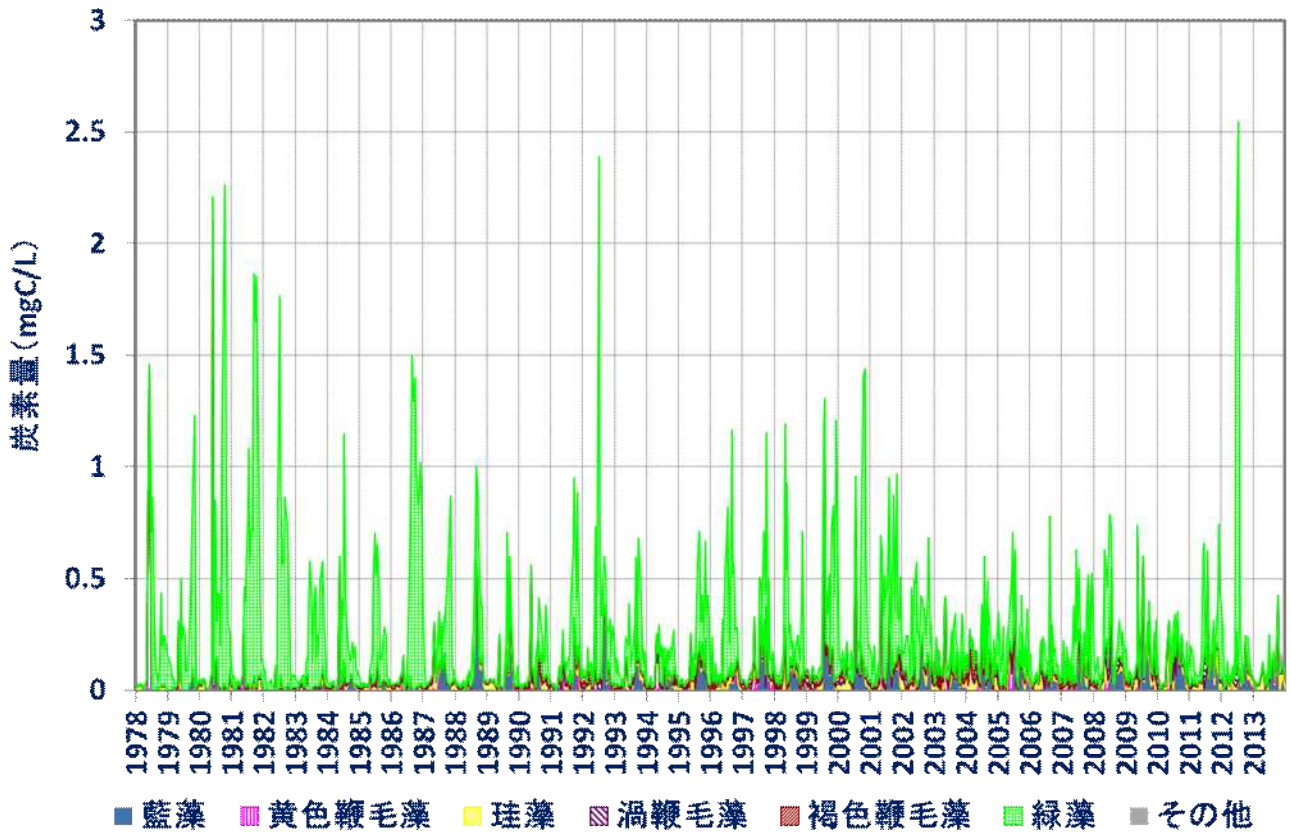


図8 琵琶湖北湖における植物プランクトン炭素量 (mgC/L) の長期変動 (今津沖中央、水深 0.5m 層)

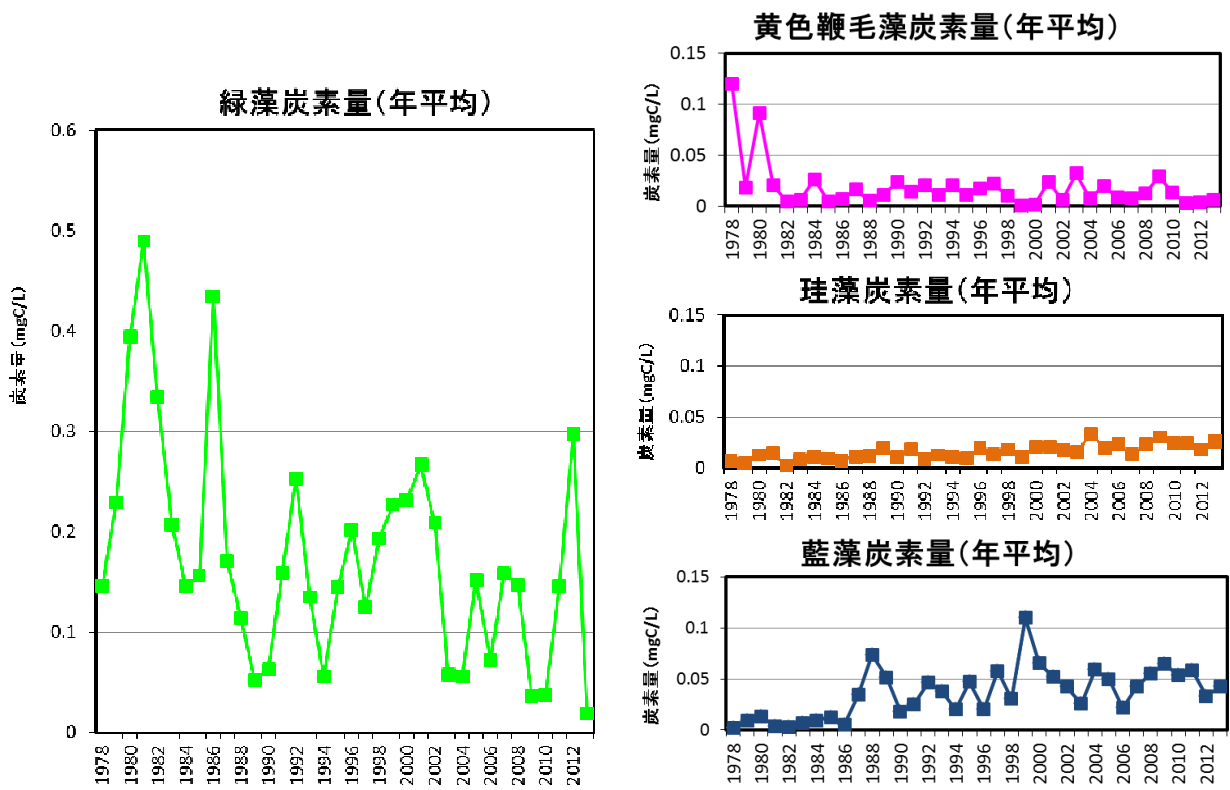
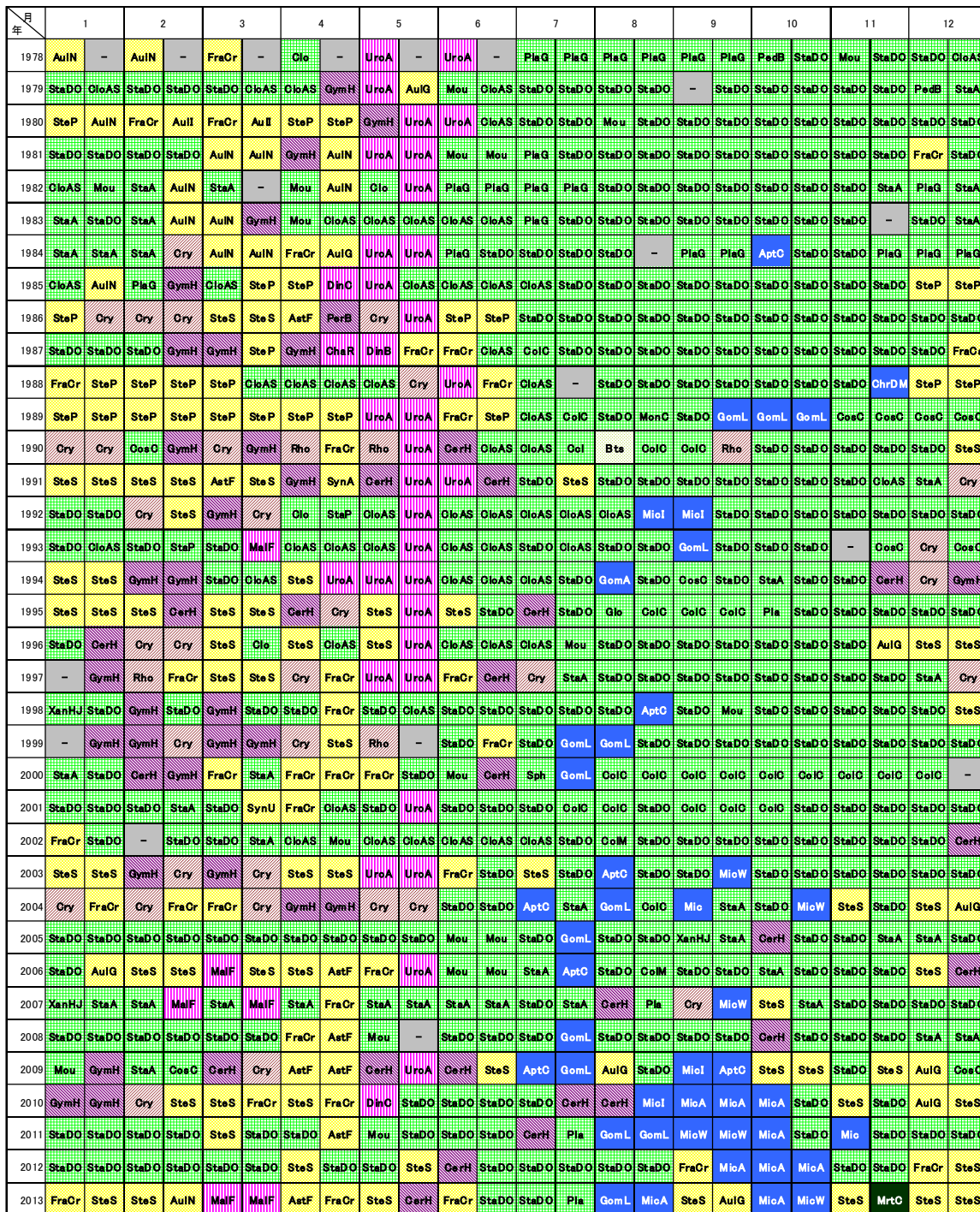


図9 琵琶湖北湖における植物プランクトン炭素量 (mgC/L) 網別年平均値の長期変動 (今津沖中央、水深 0.5m 層)



凡例	藍藻	珪藻	緑藻	
9	MicA	Microcystis aeruginosa	1 Sph	Sphaerocystis sp.
6	MicW	Microcystis wesenbergii	1 Glo	Gloecystis sp.
4	MicI	Microcystis incerta	20 PlaG	Planktosphaeria gelatinosa
2	Mic	Microcystis sp.	4 Pla	Planktosphaeria sp.
7	AptC	Aphanothece clathrata	1 Col	Coenochloris sp.
1	ChrDM	Chroococcus dispersus var. minor	1 MonG	Monoraphidium contortum
14	GomL	Gomphosphaeria lacustris	2 PadB	Pediastrum biwae
1	GomA	Gomphosphaeria aponina	22 ColO	Coelastrum cambricum
	黄緑藻		2 CalM	Coelastrum microporum
1	Bta	Botryosphaerella sp.	19 Mou	Mougeotia sp.
	黄色鞭毛藻		57 CloAS	Closterium aciculare var. subprorum
32	UroA	Uroglena americana	4 Clo	Closterium sp.
1	ChaR	Chrysoamoeba radans	3 XanHJ	Xanthidium hastiferum var. javanicum
6	MalF	Mallomonas fastigata	318 StaDO	Staurastrum dorsidentiferum var. ornatum
2	DinC	Dinobryon cylindricum	39 StaA	Staurastrum arcticum
1	DinB	Dinobryon bavaricum	2 StaP	Staurastrum pingue
			10 CoasO	Co smocladium constrictum
				緑色鞭毛藻
			1 MrtC	Merotrichia capitata

図 10 プランクトンカレンダー（北湖における植物プランクトン優占種の変遷（今津沖中央 0.5m 層、細胞容積換算））

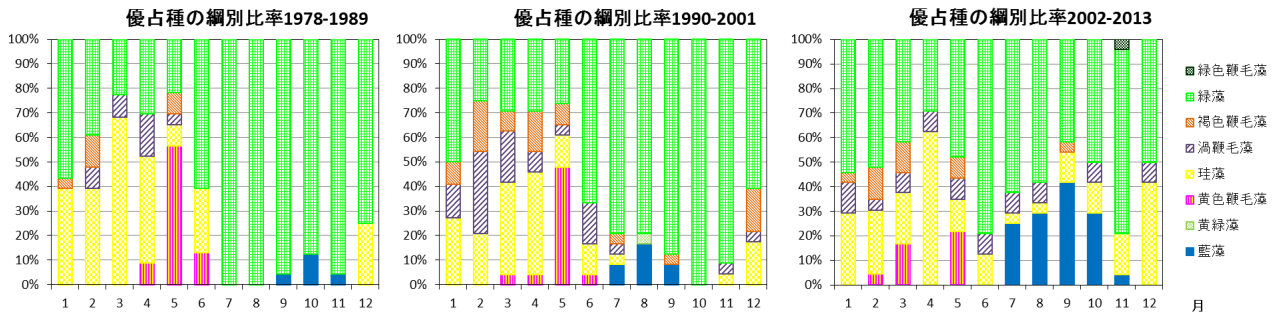


図 11 北湖における植物プランクトン優占種の網別比率の変化（今津沖中央 0.5m 層、細胞容積換算）

表 1 北湖における植物プランクトン優占種の年間遷移（1952 年）

データ: 根来 (1950, 1981)

1~3月	<i>Stephanodiscus suzukii</i>	
4月	<i>Aulacoseira nipponica</i>	
5月	<i>Asterionella formosa</i>	
6月	<i>Acanthoceras zachariasii</i>	
7月	<i>Ceratium hirundinella</i>	
8~9月	<i>Pediastrum biwae</i>	
10月	<i>Acanthoceras zachariasii</i>	
11~12月	<i>Aulacoseira nipponica</i>	

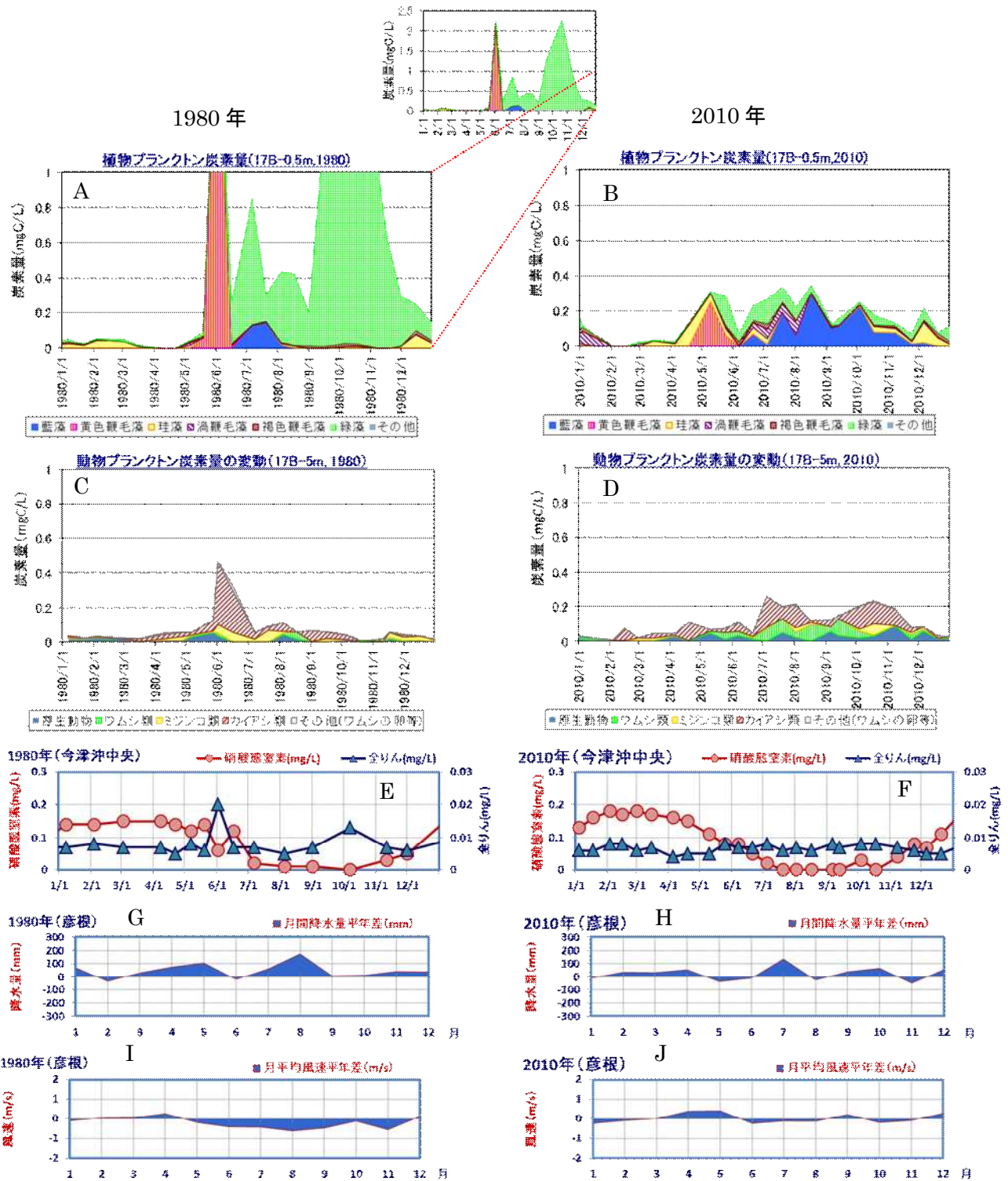


図12 植物 (A, B)・動物プランクトン (C, D) 炭素量、窒素・りん濃度 (E, F)、月間降水量年差 (G, H)、月平均風速年差の変動 (I, J) (1980年 (A, C, E, G, I)、2010年 (B, D, F, H, J)) (平年：1990～2010年)

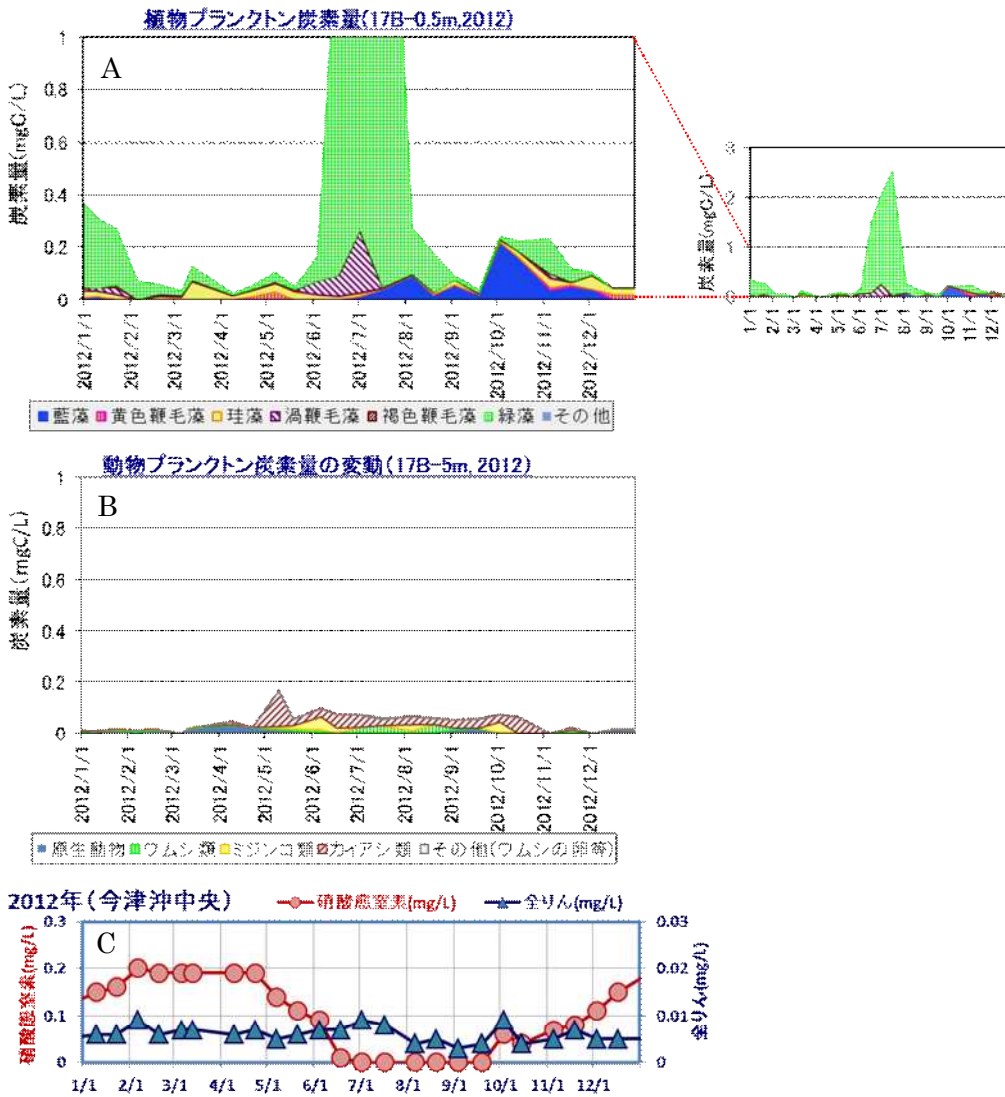


図 13 植物 (A)・動物プランクトン (B) 炭素量、窒素・りん濃度 (C) (2012 年)

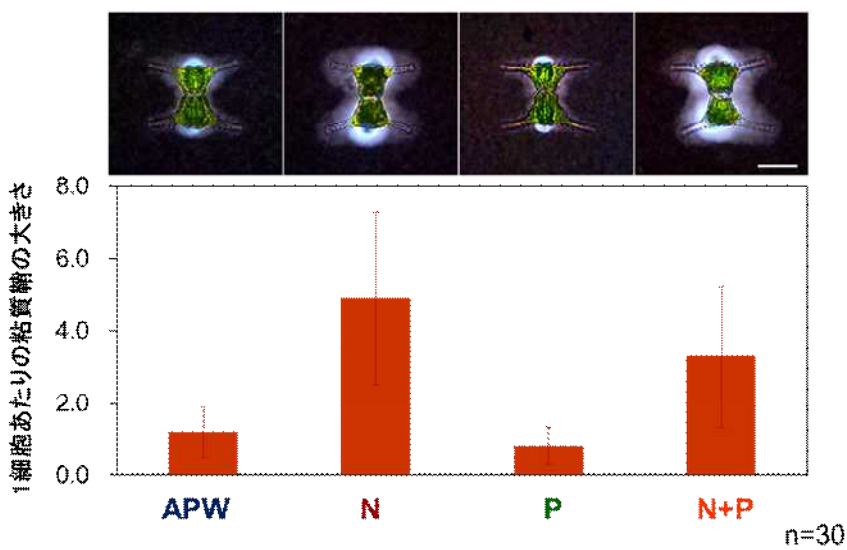


図 14 窒素・りん添加によるスタウラストルムの粘質鞘の大きさの比較
APW: 人口池水, N: 窒素添加, P: りん添加, N+P: 窒素・りん添加

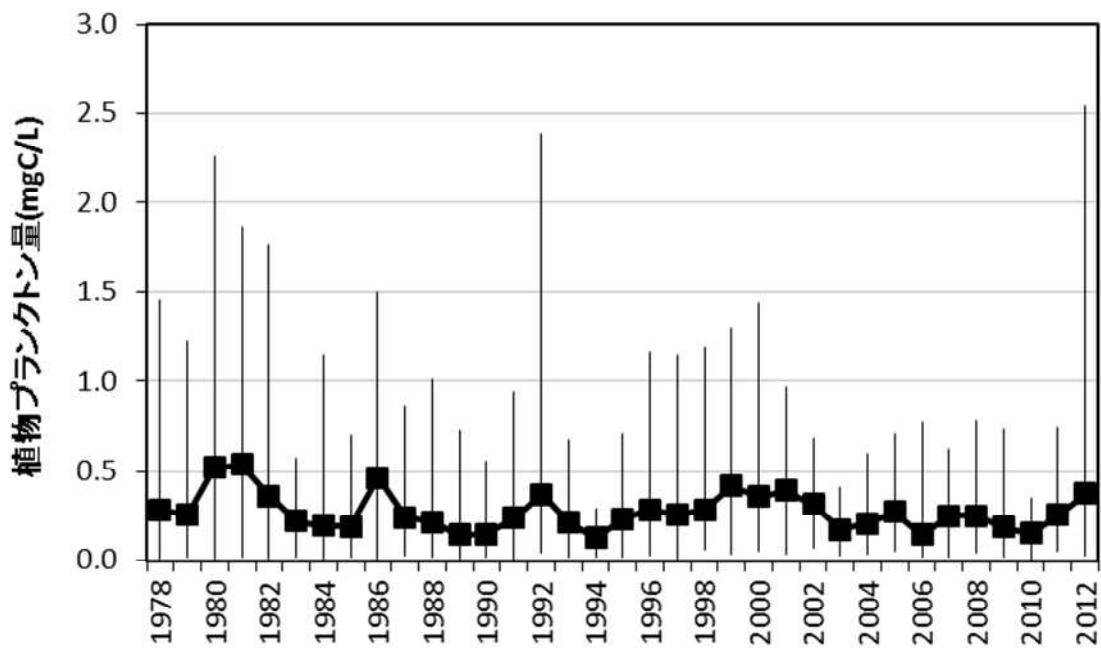


図 15 植物プランクトン現存量の変動（北湖今津沖中央地点 0.5m 層）
 ■は平均値、高低線は最大最小値

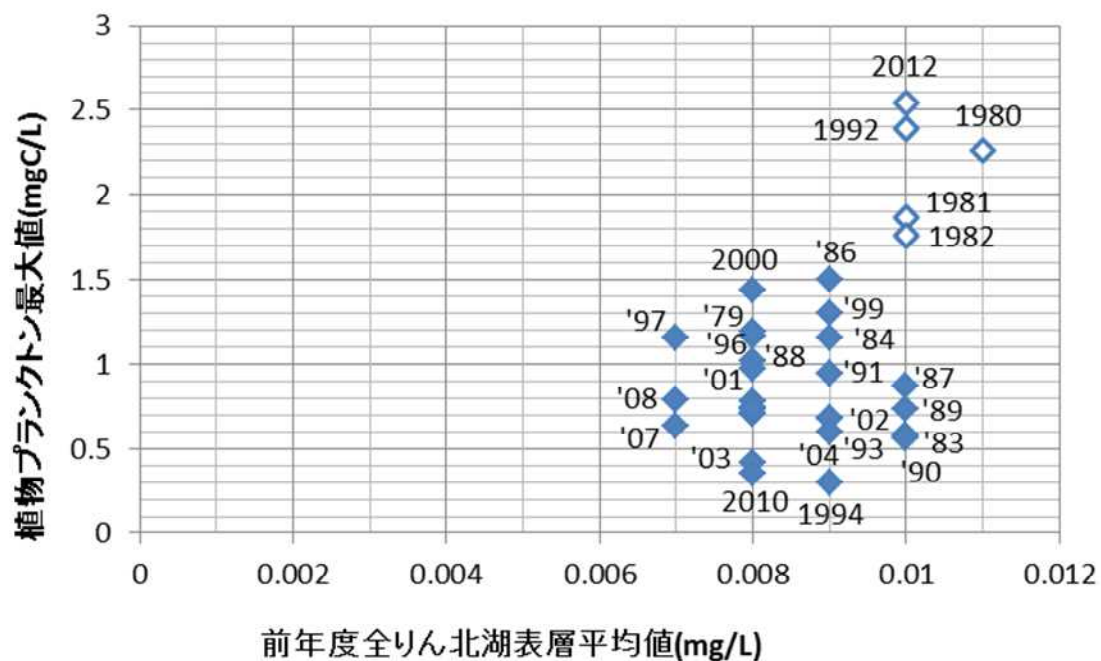


図 16 植物プランクトン年間最大値（北湖今津沖中央地点 0.5m 層）と
 前年度の全りん北湖表層 (28 地点) 平均濃度との関係
 ◇は植物プランクトン最大値が 1.5mgC/L を超える年。

表 2 応答実験に用いた餌（植物プランクトン）

略称	綱類	種名	細胞の大きさ
PP	藍藻	Picoplankton (<i>Synechococcus</i> sp.)	小型
PTG	藍藻	<i>Phormidium tenue</i> (緑色株)	小型
PTB	藍藻	<i>Phormidium tenue</i> (茶色株)	小型
AM	藍藻	<i>Anabaena macrospora</i>	中型
MW	藍藻	<i>Microcystis wesenbergii</i> (群体非形成株)	中型
MK	藍藻	<i>Microcystis wesenbergii</i> (群体形成株)	中型
AST①	珪藻	<i>Asterionella formosa</i> (低濃度)	中型
AST②	珪藻	<i>Asterionella formosa</i> (高濃度)	中型
CHL	緑藻	<i>Chlorella</i> sp.	小型
SCE	緑藻	<i>Scenedesmus</i> sp.	小型
SEL	緑藻	<i>Selenastrum</i> sp.	中型
CC	緑藻	<i>Coelastrum cambricum</i>	中型
CLO	緑藻	<i>Closterium</i> sp.	大型
STD	緑藻	<i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i>	大型
STA	緑藻	<i>Staurastrum arcticon</i>	大型

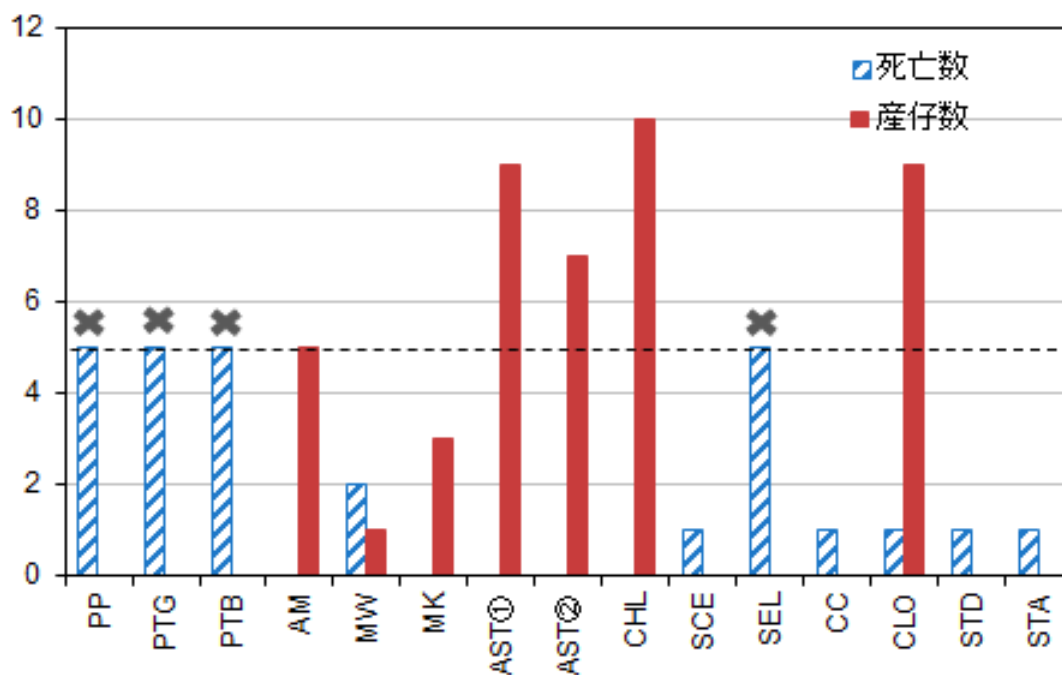


図 17 琵琶湖産ミジンコ (*Daphnia pulicaria*) を用いた餌（植物プランクトン）に対する応答実験結果
 ×：親ミジンコ全滅

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2010年4月)

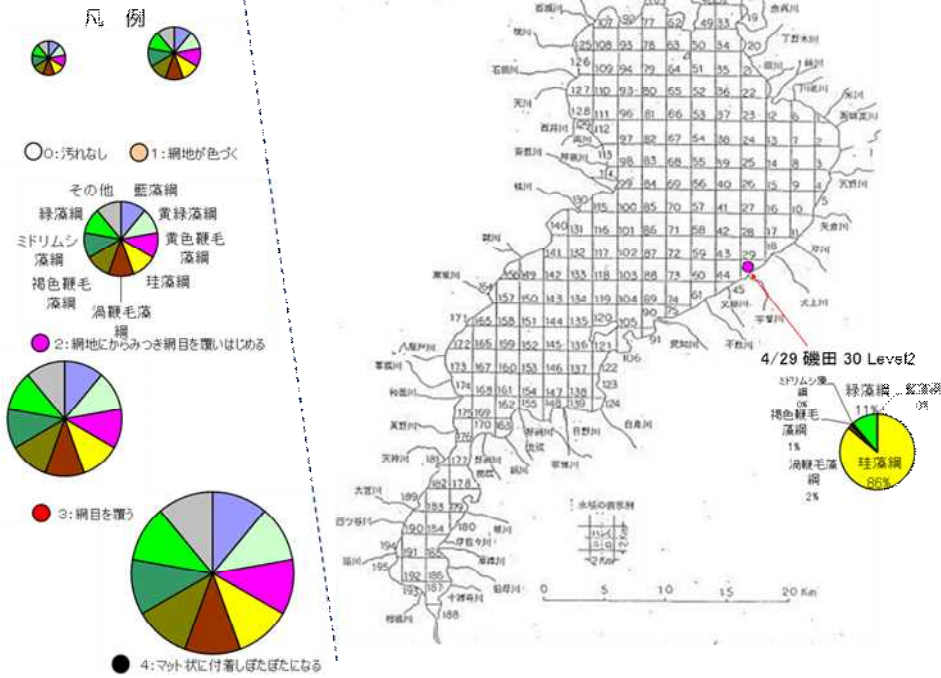


図 18-1 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2010年4月)

凡例 レベル0: 汚れなし, レベル1: 網地の色づく, レベル2: 網地からみつき網目を覆いはじめる, レベル3: 網目を覆う, レベル4: マット状に付着しぼたぼたになる

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2010年5月)

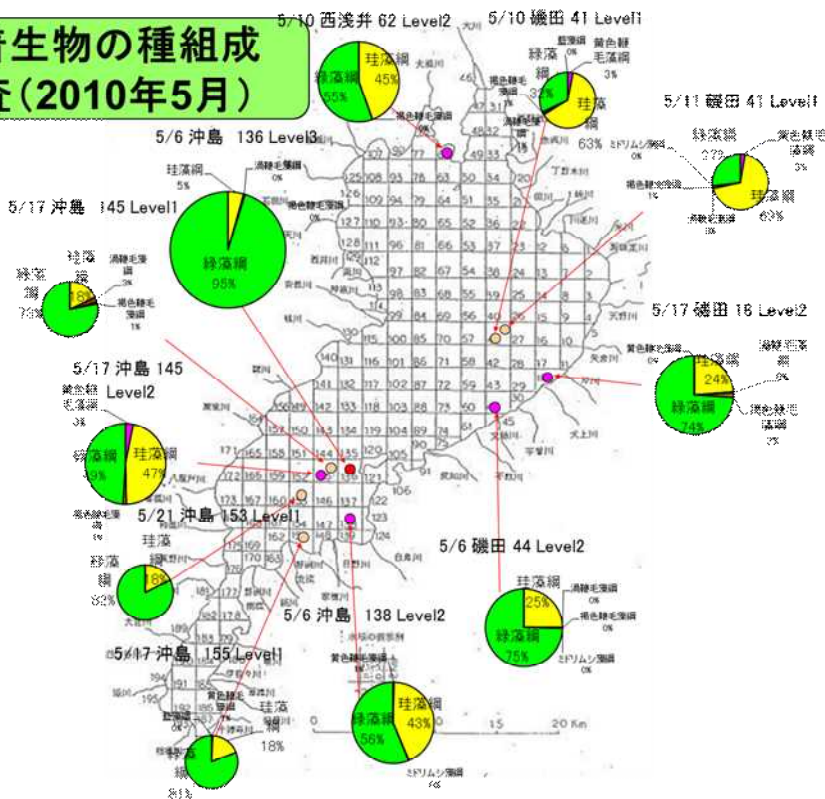


図 18-2 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2010年5月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2010年6月)

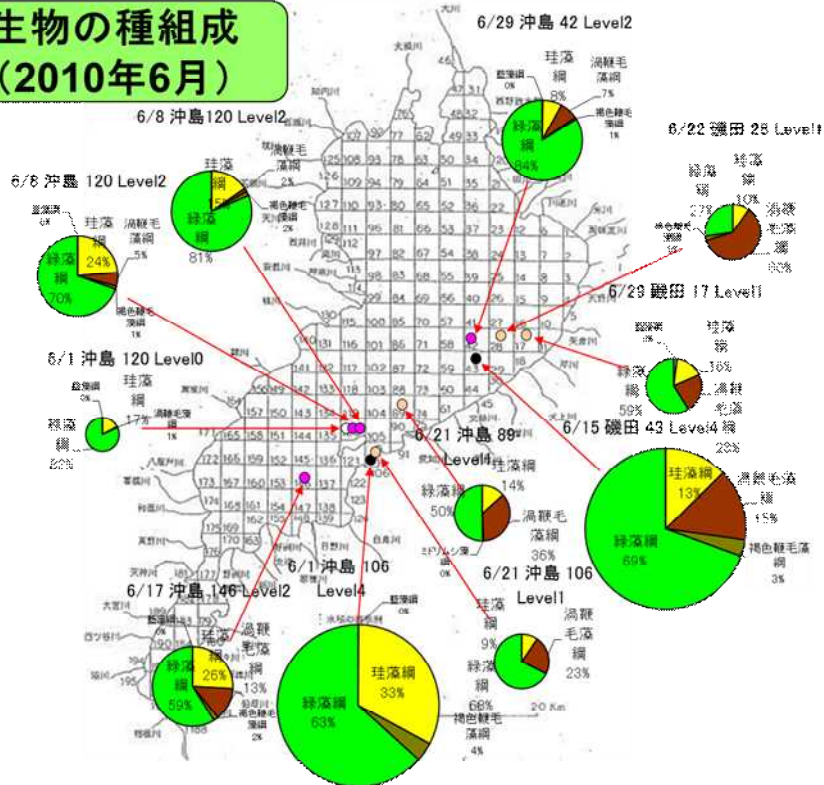


図 18-3 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2010年6月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2010年7月)

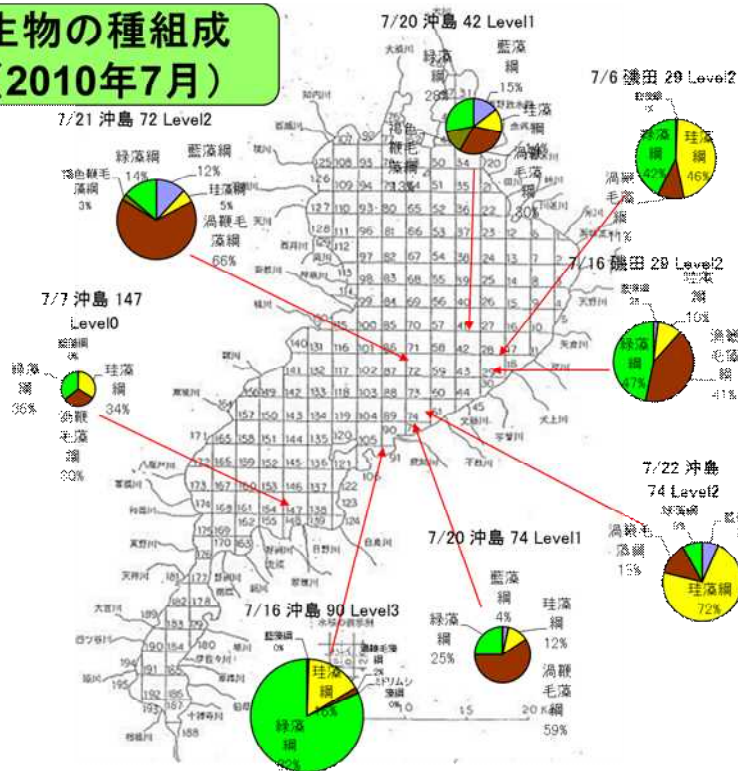


図 18-4 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2010年7月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2010.8~11)

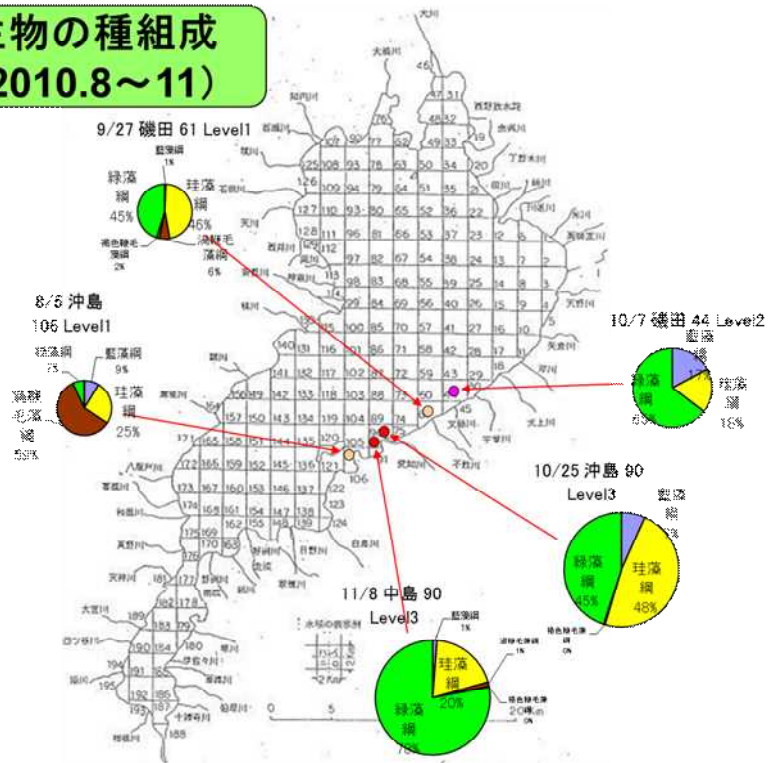


図 18-5 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2010年8月~11月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2011年5月)

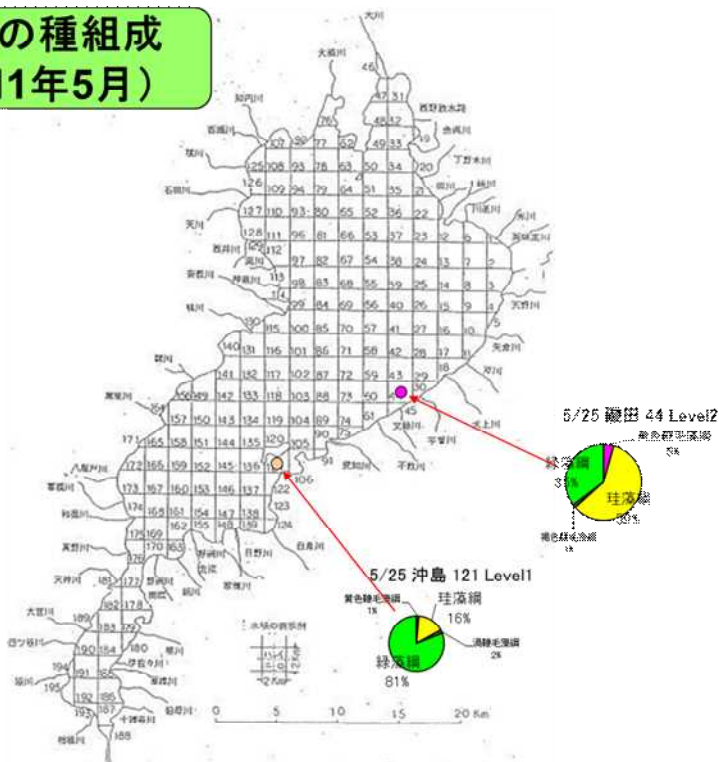


図 18-6 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2011年5月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2011年6月)

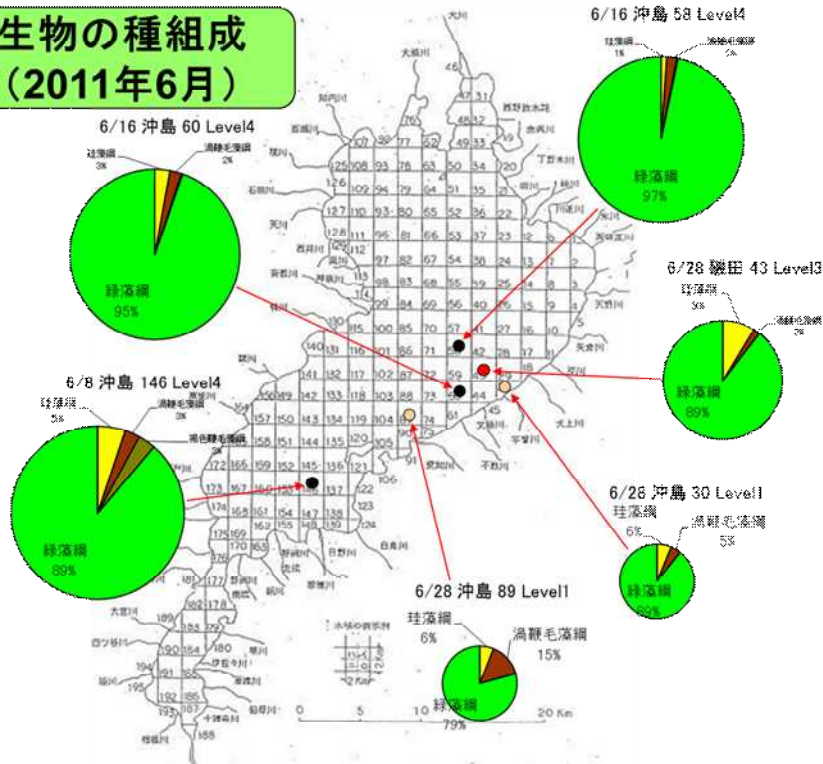


図 18-7 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2011年6月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2011年7月)

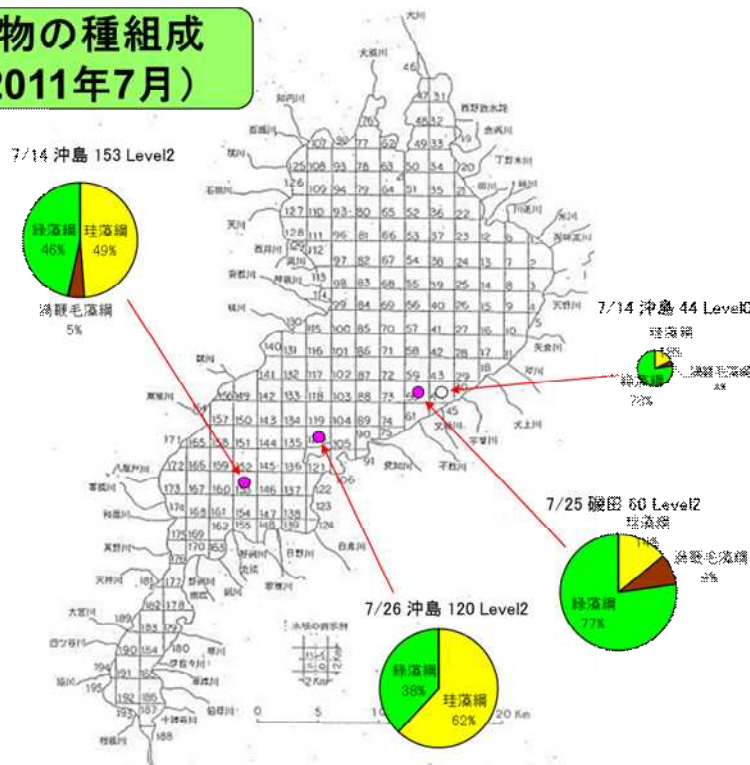


図 18-8 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2011年7月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査 (2011.10~11)

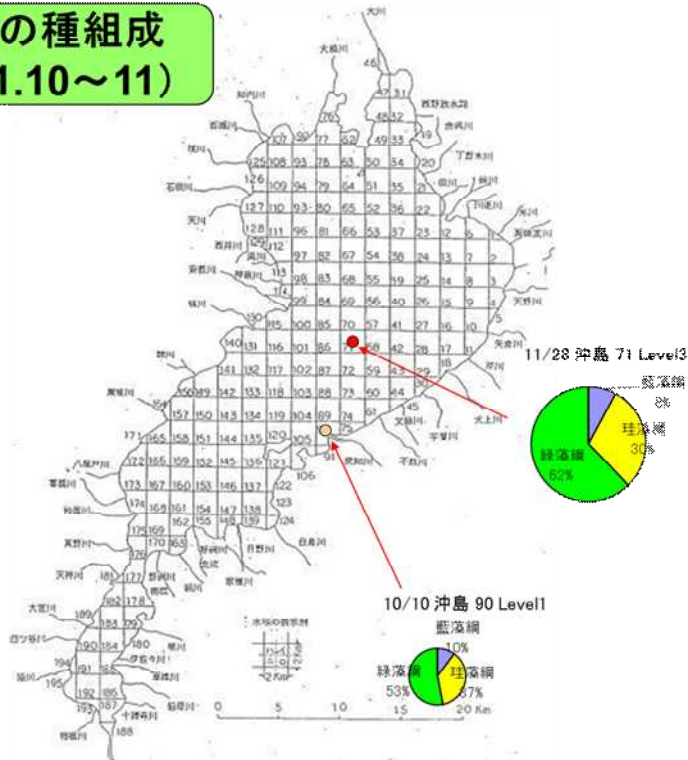


図 18-9 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2011 年 10 月~11 月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査 (2012.5)

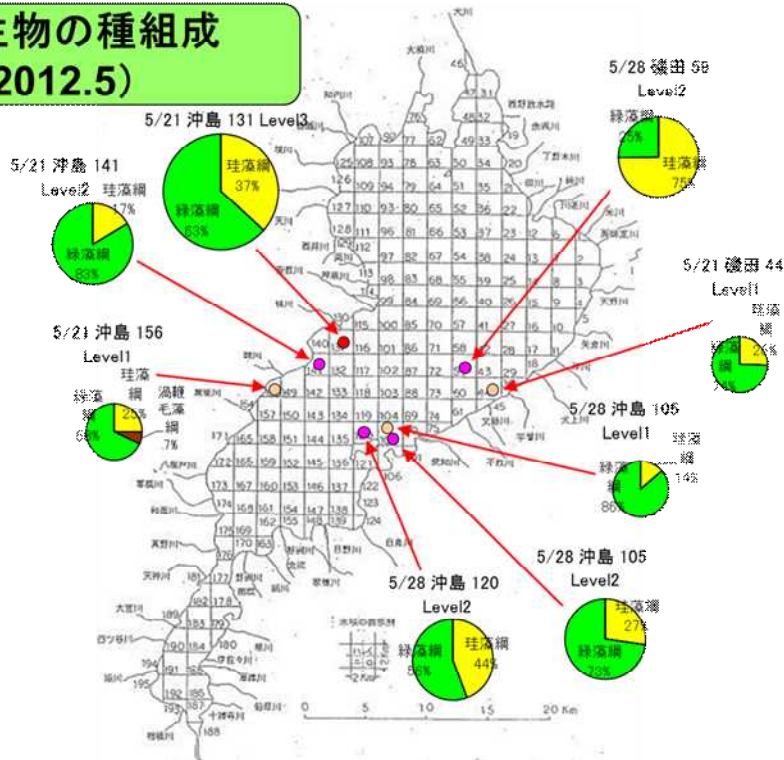


図 18-10 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2012 年 5 月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2012.6)

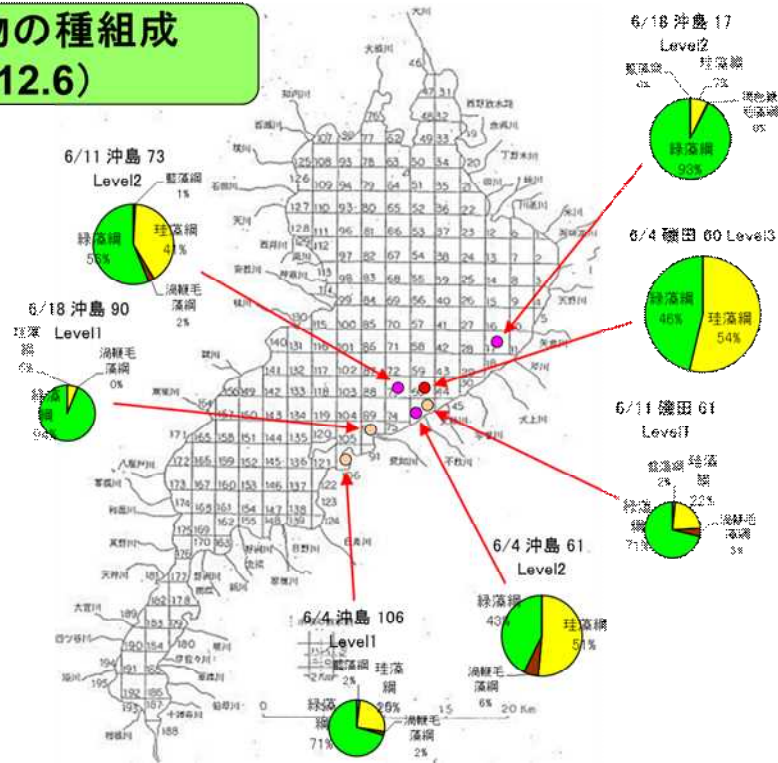


図 18-11 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2012年6月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2012.7)

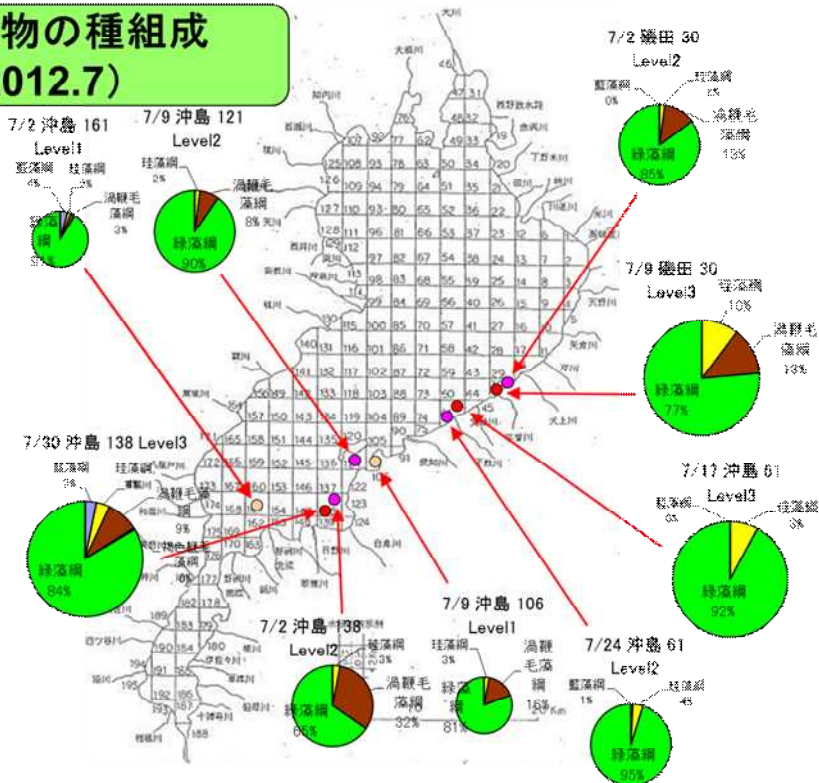


図 18-12 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2012年7月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2012.10)

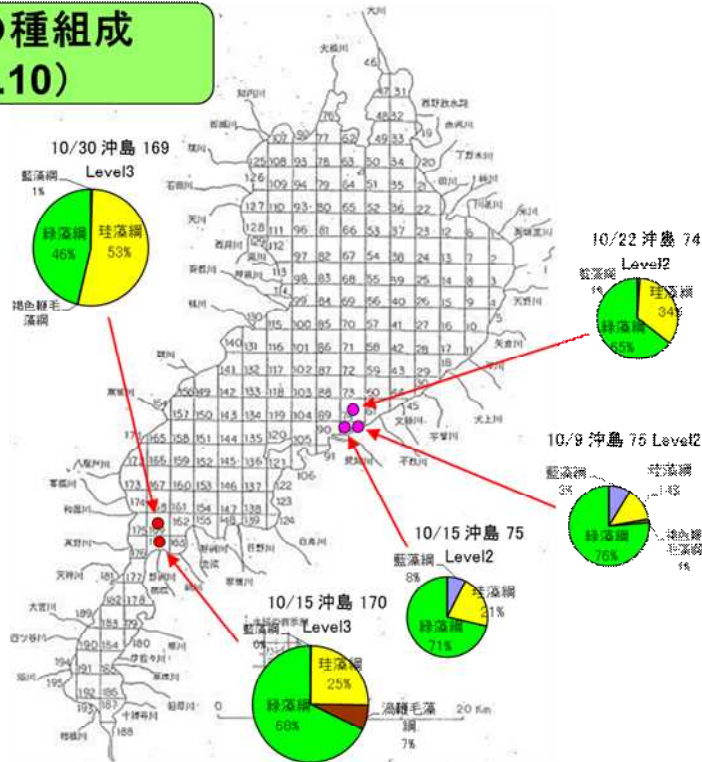


図 18-13 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2012年10月)

刺網付着生物の種組成 遷移調査(2012.11~12)

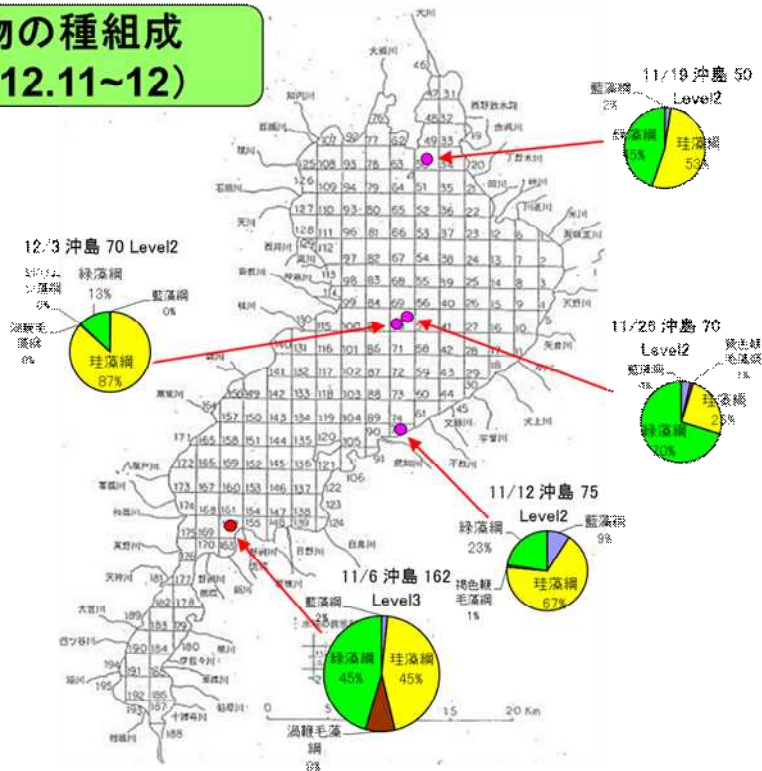


図 18-14 刺網付着藻類種組成遷移調査 (2012年11月~12月)

表3 刺網汚れ度合の分布 (2010年~2012年)

凡例 レベル0: 汚れなし, レベル1: 網地の色づく, レベル2: 網地にからみつき網目を覆いはじめる,
レベル3: 網目を覆う, レベル4: マット状に付着しぼたぼたになる

汚れ度合	Level0	Level1	Level2	Level3	Level4
4月	0	0	1	0	0
5月	0	9	10	2	0
6月	1	9	7	2	5
7月	2	4	11	4	0
8月	0	1	0	0	0
9月	0	1	0	0	0
10月	0	1	4	3	0
11月	0	0	3	3	0
12月	0	0	1	0	0
計	3	25	37	14	5

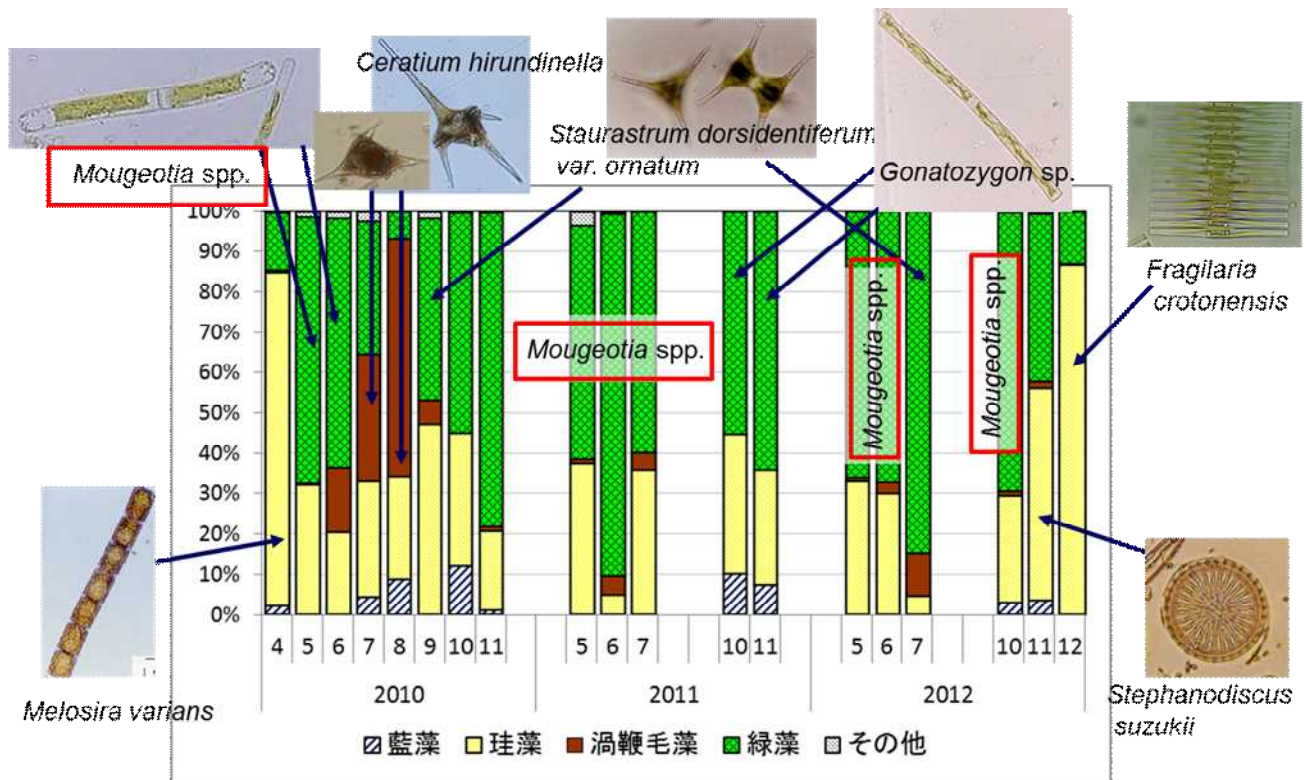


図19 操業刺網付着藻類の構成比率 (月平均値)

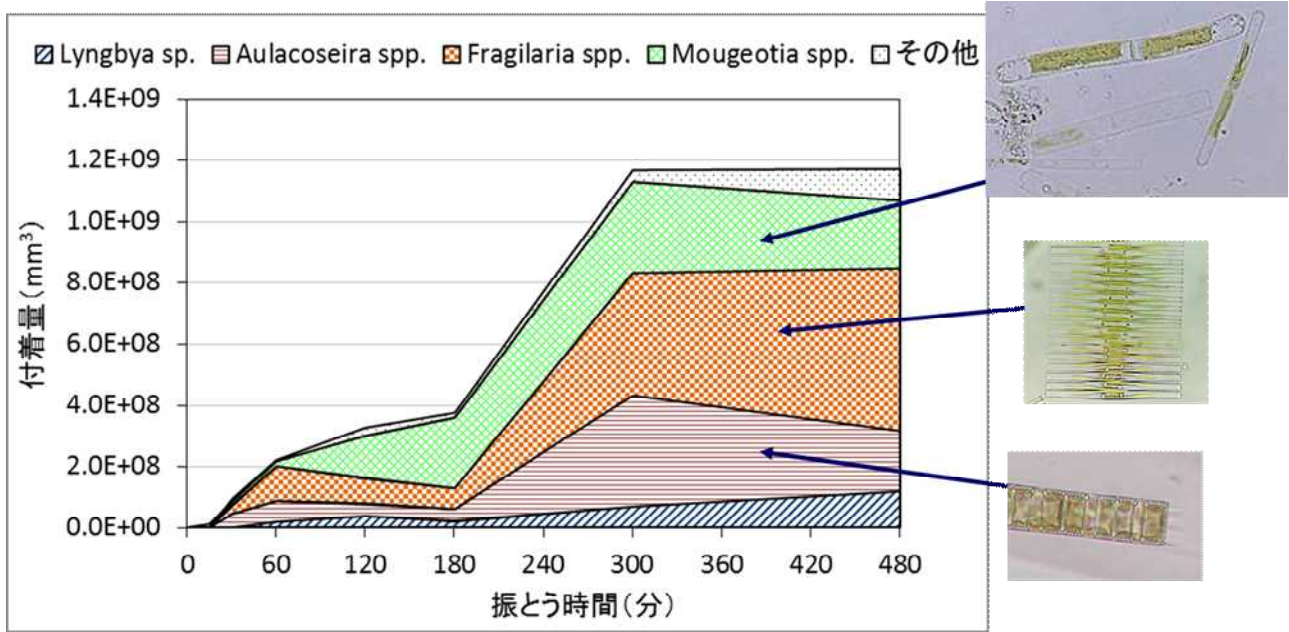


図 20 刺網への藻類付着実験結果