レーザー生物粒子カウンターによる植物プランクトン サイズスペクトルの計測

田中祐志[1)], 津田良平[2)], 紀本岳志[3)], 古澤一思[4)], 原島 省[5)]

1) 東京水産大学
2) 近畿大学
3) 海洋化学研究所（財）
4) 日本海洋生物研究所（株）
5) 国立環境研究所

要旨：植物プランクトンのサイズ分布を空間的に高密度で計るため、レーザー生物粒子カウンター用いた観測を、1994 年 夏季にフェリーさんふらわあ２（別府→大阪間）で行った。同時に計測した他のデータ（栄養塩分布、植物プランクトン検鏡結果）との比較により、植物プランクトンの動態に関する考察を行った。同航海時には、夏季のため瀬戸内海全般では栄養塩濃度、植物プランクトン現存量ともに小さかったが、備讃瀬戸と大阪湾では異なった。備讃瀬戸では、植物プランクトンの現存量が大きく、しかもその大部分は大粒径のケイ藻で占められ、小粒径のものがむしろ周辺域よりも少ないことが分かった。この理由は、強い鉛直混合で栄養塩が継続的に補給され、夏季にもかかわらず大型の植物プランクトンの増殖が支えられていたためと考えられる。大阪湾では、サイズスペクトルは大小の粒径にまたがった分布を示し、珪藻類と渦鞭毛藻類がともに多かった。栄養塩濃度は高かったが、溶存態窒素（DIN）や溶存態リン（DIP）に対する溶存態ケイ素（DSi）の相対比が小さかった。これらから、高い栄養塩濃度はサイズの大きい植物プランクトンの増殖に有利に働くこと、および各栄養塩の相対比が植物プランクトンの種組成に影響を与えていたことが考えられた。

キーワード: 植物プランクトン, レーザー生物粒子カウンター、サイズスペクトル

1. まえがき

水域の浮遊生物は時間的にも空間的にも不均一に分布している（Bainbridge, 1957[1)]）。例えば植物プランクトンの現存量を指標するクロロフィル *a* の分布は、100 m 規模の乱流に起因する微細なパターンを示す（例えば Platt, 1972[2)]， 中田・石川, 1989[3)]）。通常の海洋観測で設定される数十 km 毎といった測点配置では、このような微細分布の実態を明らかにすることは出来ない。衛星の海水色センサーからのデータを利用すれば、広域にわたる植物プランクトンの空間分布パターンや現存量が瞬時に観測し得るとはいえ、空間分解能が数百 m よりも粗いだけでなく、生理生態学的に重要な植物プランクトンのサイズ組成や種組成が分からないという制限がある (Malone, 1980[4)])。植物プランクトンの種組成やサイズ組成が、時間的、空間的に変動する環境にどのように応答するかは、気候変動や陸海相互作用の変化などの地球規模の変動が現場に海洋の生態系にどのような影響を与えるか、といった問いに解を見いだす試みの基礎となるであろう。

我々は、地球環境の長期的変動のモニタリングと植物プランクトンの動態のメカニズム解明を関連づけて行うことを目的とし、フェリーによる通常モニタリング項目の測定と並行して、植物プランクトン属性の計測を行ってきた。特に、角井ほか（Kakui *et al.*, 1985[5]）によって開発されたレーザーを利用した植物プランクトン粒子カウンターをフェリー上で稼動することにより、植物プランクトンのサイズ組成について空間的に連続性の高い観測を行った。本報告では、1994 年夏季の乗船調査の際に、同装置によるデータ、同時に得られた栄養塩などの連続計測データおよび植物プランクトンの検鏡データに基づき、植物プランクトンの動態と環境要因の関連について考察する。

2. 材料と方法

フェリー「さんふらわあ２」では、大阪-別府間の航路で継続的な無人モニタリングを行っている。通常計測項目（Fig.1(a)および (b), (c), (d), (e)の○で示したサンプリング・陸上分析によるデータ）に加え、1994 年 7 月 9-10 日に同船への乗船航海を行い、前述の植物プランクトン粒子カウンター（PROCSS: Phytoplankton Remote Optical Counting and Sizing System)により、5 分間隔（約 3km 間隔）で、植物プランクトンの粒子数を粒径別に積算した（Fig.1-(f)）。PROCSS は光ファイバーを経由したレーザービームを、連続通水している光学セルに当て、通過する植物プランクトン粒子からの蛍光パルス強度でサイズを推測しながら、パルス数により粒子数を計測するシステムである。計測サイズ範囲は球体換算等価粒径 (ESD: equivalent spherical diameter)を 2-28μm に設定した。さらに、植物プランクトン種組成の検鏡のための試水を、概ね 1～2 時間ごとにサンプリングし、固定保存した。この他に、参考データ取得のため、栄養塩濃度の連続計測用試作機および海水溶存二酸化炭素分圧 (pCO_2)の測定装置（Kimoto and Harashima, 1993[6] および報文 6）を稼動させ、リン酸塩（Fig.1-(c)の折線部）、ケイ酸塩（Fig.1-(d)の折線部）および pCO_2 の空間的な連続記録を行った。リン酸塩とケイ酸塩について、サンプリング・陸上分析によるデータと連続計測機器によるデータとが概ねよい相関を示していた。

3. 結果と考察

航海時が夏季にあたったため、全体としては栄養塩濃度およびクロロフィル（植物プランクトン現存量）ともに低かった。ただし、備讃瀬戸（Fig.1 中、2:00～3:30 に通過した部分）と大阪湾（6:30 以降）では高い値を示した。

Fig.1-(a)からは、備讃瀬戸を中心とする数十 km の海域では、周辺と比べて表層水が低温、高塩分、高栄養塩濃度になっており、鉛直混合が強かったことを示唆している。この海域は、日韓フェリー以来 1990 年から継続しているモニタリングにより、成層期である夏季に表面海水の pCO_2 が高く pH が低いなど、特異な性状を持つことで知られている（Harashima *et al.*, 1997[7]）。本航海でも植物プランクトンの現存量が大きかった。この理由としては、鉛直混合で下層から継続的に供給される栄養塩が、植物プランクトンの増殖を支えていたことが考えられる。PROCSS のデータ（Fig.1-(f)）は、高い植物プランクトン現存量の大部分は大粒径のもの（太線）であったことを示し、検鏡からそれらは大型の珪藻で優占されていたことが分かった(Table 1)。ここで、大粒径のものが極大を示している海域で小粒径のものがむしろ周辺域よりも少なくなっていることは重要である。

大阪湾では、クロロフィル *a* 濃度は急激に増大した．この海域の植物プランクトンは、先述

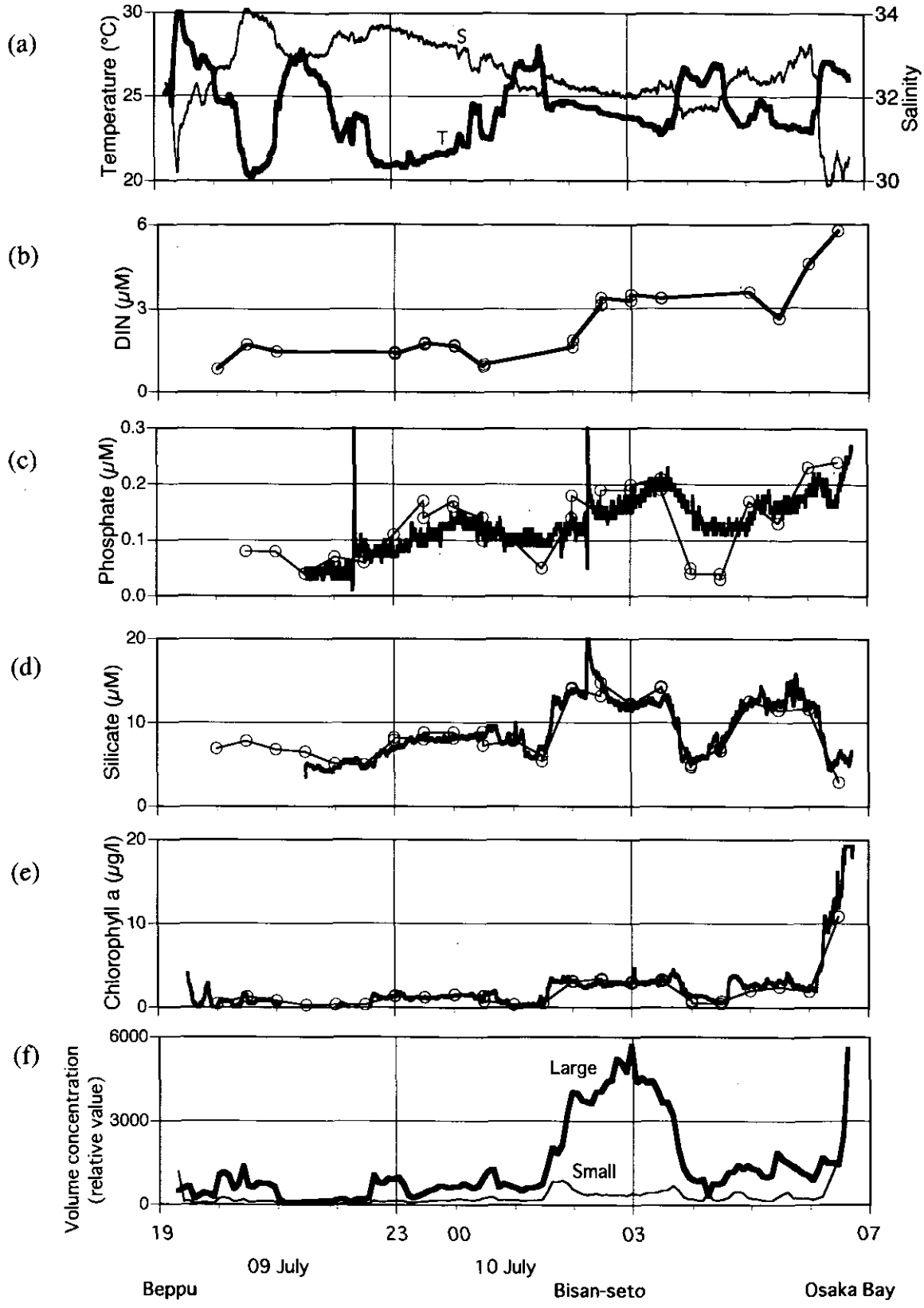


Fig.1 Spatial distributions of seawater properties. (a) Water temperature (thick line) and salinity (thin line); (b) Dissolved inorganic nirtate; (c) Phosphate as continually recorded and manually analyzed;(d) Silicate; (e) Chlorophyll *a*, and (f) volume concentration (relative value) of small (0-10 μm ESD) and large (10-28 μm ESD) phytoplanktons.

Table 1. Density of Phytoplankton cells (inds/l) , 9-10 July, 1994.

分類群	Species	群体性	20:00 P-1	20:40 P-2	23:04 P-3	1:00 P-4	2:30 P-5	3:30 P-6	5:00 P-7	6:20 P-8	9:00 P-K
不等毛植物門 HETEROKONTOPHYTA											
珪藻綱 BACILLARIOPHYCEAE	*Melosira sulcata*	●		2545	7277						
	Skeletonema costatum	●					1532	3191	59636	686298	469213
	Leptocylindrus danicus	●	766	364				1277	13818	196085	509663
	Leptocylindrus mediterraneus	●			383					2043	
	Guinardia flaccida	●	6128	4364				638	1091		
	Detonula pumila						1532				
	Thalassiosira sp. (cf. mala)	●					10723				
	Thalassiosira sp. 1	●									2451236
	Thalassiosira sp. 2				383				1818	6128	32360
	Thalassiosira sp. 3		1532		766	383	1532		364		
	Thalassiosiraceae 1									414638	
	Thalassiosiraceae 2	●				766	1532		1091	1245957	
	Coscinodiscus asteromphalus			364			766	638	364		
	Coscinodiscus sp.			1818			383		364		
	Asteromphalus flabellatus			364				638	727		
	Rhizosolenia fragillima	●	1532	1455	1532		766	2553	2182	6128	
	Rhizosolenia indica		383			383					
	Rhizosolenia stolterfothii	●		727	1532	1149	766				
	Rhizosolenia styliformis	●			383						
	Bacteriastrum hyalinum	●	11489					2553			
	Bacteriastrum varians	●	1532			766		3191			
	Chaetoceros affine	●		2909		1149	1532	15957	1091		
	Chaetoceros compressum	●	15702	3636		28340	3064	15957	2182		
	Chaetoceros constrictum	●	27957		1915	9191	2298	7021			
	Chaetoceros danicum	●					383	4468	364		
	Chaetoceros decipiens	●	4213		1149			1915	364		
	Chaetoceros denticulatum	●						5745			
	Chaetoceros distans	●	2681	1455		19915	1149	53617	5818		
	Chaetoceros debile	●	2681	15636	12638	1915	61660	5106	18909		
	Chaetoceros didymum	●	1149								
	Chaetoceros laciniosum	●				11872	766	15957			
	Chaetoceros lauderi	●						1277			
	Chaetoceros lorenzianum	●	4213	1818	3064	2298		24894	727		4045
	Chaetoceros pseudocurvisetum	●				766		3830			
	Chaetoceros sociale	●		9455	11489	3447	34851	7660	4000	4085	20225
	Chaetoceros van heurckii	●	1149	1455		1915			2545		
	Chaetoceros teres	●			766						
	Chaetoceros tortissimum	●							1091		
	Chaetoceros sp. (cf. constrictum)	●	10340	364	383	15702	1149	28723		6128	
	Chaetoceros sp. (cf. paradoxum)	●	1149			383		2553			
	Chaetoceros sp. (cf. van heurckii)	●	7277			1532		5106	2182		
	Chaetoceros sp. 1	●		1455					6909		76854
	Chaetoceros sp. 2	●					1532			263489	428764

Table 1. (continued)

分類群	Species	群体性	20:00 P-1	20:40 P-2	23:04 P-3	1:00 P-4	2:30 P-5	3:30 P-6	5:00 P-7	8:20 P-8	9:00 P-K
	Chaetoceros sp. 3	●		364		1532		1915	2909		44494
	Chaetoceros sp. 4	●	1532								
	Cerataulina pelagica	●							2545		
	Ditylum brightwellii						766			681	8090
	Ditylum sol					766	766				
	Eucampia zoodiacus	●	2298	1455			1532	4468	1455	110298	412584
	Asterionella glacialis	●			2298		383				
	Thalassionema nitzschioides	●			3064	1532		1915			
	Thalassiothrix frauenfeldii	●	1532				383	1277			
	Stauroneis menbranacea			364	766						
	Navicula spp.						383				
	Diploneis splendica				1149		383	638			
	Pleurosigma sp.				383		383		364		
	Nitzschia pungens	●		727	1149	1532	1149		364		
	Nitzschia spp.	●		727	383		1915	638			
	Cylindrotheca closterium			364	383	383	2298		2182	8170	4045
黄金色藻綱 CHRYSOPHYCEAE	*Dictyocha fibula*			364			383				
	Ebria tripartita										8090
渦鞭毛植物門 DINOPHYTA											
渦鞭毛藻綱 DINOPHYCEAE	*Prorocentrum compressum*										4045
	Prorocentrum dentatum								364		
	Prorocentrum triestinum			364						2043	
	Dinophysis acuminata									2043	
	Dinophysis fortii									2043	4045
	Gymnodinium sp.										4045
	Gymnodiniales 1		766			383	766	1915	364	26553	8090
	Gymnodiniales 2									26553	44494
	Scrippsiella trochoidea									1021	
	Protoperidinium bipes									4085	4045
	Protoperidinium conicum						383				
	Protoperidinium pellucidum									2043	
	Protoperidinium sp.										4045
	Ceratium fusus		383			383		638			4045
	Ceratium kofoidii					766		638	727	2043	20225
	Peridiniales								364	2043	
クリプト植物門 CRYPTOPHYTA											
クリプト藻綱 CRYPTOPHYCEAE	*Cryptophyceae*				383		383		727	36766	32360
ハプト植物門 HAPTOPHYTA											
ハプト植物綱 HAPTOPHYCEA	*Haptophyceae*					1149					
	出現種類数		23	25	23	27	34	33	33	24	23
	総細胞数 (cells/l)		108384	54913	53618	110298	140172	228507	140002	3057364	4599102

の備讃瀬戸海域とは様相が異なり、サイズスペクトルは大小の粒径にまたがった分布を示した。また、種組成については珪藻類とともに渦鞭毛藻類が多かった(Table 1)。また、溶存態無機窒素は高濃度だが珪酸塩はむしろ減小していた。

備讃瀬戸と大阪湾における植物プランクトン種組成の違いは、植物プランクトンの成長がそのサイズに依存すること、および優占種が栄養塩組成比に影響されて決まること(Tilman, 1982[8])を考慮に入れると説明することができるであろう。備讃瀬戸海域では、珪藻類の増殖に必要なケイ酸塩を含む各栄養塩が、鉛直混合により供給されていたが、鉛直混合が弱い大阪湾では、ケイ酸塩が珪藻類の増殖のために消費し尽くされたた後、それを必要としない鞭毛藻類が優占するようになる、という種組成遷移の過渡期にあったものと思われる.

我々が使用したPROCSSの利点として、

1. 従来の蛍光センサーでは植物プランクトンの量だけしか測れないが，本装置ではサイズ組成の情報も得ることができること、
2. 諸々の懸濁物の中から、蛍光を持つ粒子（すなわち植物プランクトン）だけを選択的に計測できること、
3. 光源にレーザーを用いることにより高い感度が得られること、

が挙げられる。本調査では、この装置をフェリーに搭載して他の物理・生物・化学的諸項目のデータと組み合わせ、システム化にすることにより、海洋生態系の解明に有用な情報をもたらすことが例示された.

4. あとがき

海洋観測にフェリーを用いることの利点は、時・空間的に連続性の高い計測の場が得られることにある．さらに、海洋観測項目の分析機器としてフロースルー型でありさえすれば、目的に合わせた任意のセンシング手法を導入することができる。これらの利点に着目して、我々は、PROCSS により植物プランクトンの粒径組成の連続的記録を実施し、他の観測項目と併せて比較することにより、従来の観測手法では検知できなかった特性をとらえることが出来た。データを蓄積・分析すれば種組成の遷移、赤潮発生機構の理解等に有効であると考えられる（津田ほか, 1989[9])。

近年、植物プランクトンの濃度とサイズ組成とを同時に計測する手法として、フローサイトメトリーが応用されるている(Ormerod, 1999[10]) 。従来は、装置が大がかりであるため、フィールド計測には適していなかったが、同様の装置が、小型化され、現場への応用が試されつつある（例えば、Dubelaar *et al.*, 1998[11])。本研究では、そのような試みを世界に先駆けて実行し、その有効性、特に、フェリーという安定したプラットフォームとの組み合わせの有効性を実証できたといえるだろう。

謝辞

PROCSSの開発、実用化に尽力いただいた角井嘉美博士（電子技術総合研究所）に感謝する．本報告は、故津田良平近畿大学農学部教授が長年に亘り精力を傾注して得られた結果の一部をまとめたものである.

引用文献

1) Bainbridge, R. (1957): The size, shape and density of marine phytoplankton concentrations. Biol. Rev., 32, 91-115.
2) Platt, T. (1972): Local phytoplankton abundance and turbulence. Dee-Sea Res., 19, 183-187.
3) 中田喜三郎, 石川公敏 (1989): 光ファイバークロロフィルセンサーによる海域計測, 海洋工学コンファレンス論文集, 1, 65-71.
4) Malone, T. C. (1980): Algal size, In Morris, I. (ed.) Studies in Ecology Vol. 7, The Physiological Ecology of Phytoplankton, 433-463, Blackwell.
5) Kakui, Y., Nishimoto, A., Hirono, J. and Nanjo, M. (1985): Underway analysis of suspended biological particles with an optical fiber cable, Advances in Chemistry, Ser. 209, 275-292.
6) Kimoto, T. and Harashima, A. (1993): High-resolution time/space monitoring of the surface sea water CO_2 partial pressure by ship-of-opportunity, WMO Global Atmospheric Watch, 89, (Proceedings of the 4th International CO_2 Conference, Calquerane), 88-91.
7) Harashima, A., Tsuda, R., Tanaka, Y., Kimoto, T., Tatsuta, H. and Furusawa. K. (1997): Monitoring algal blooms and related biogeochemical changes with a flow through system deployed on ferries in the adjacent seas of Japan, In Kahru, M. and Brown, C.W. (eds.) Monitoring Algal Blooms - New Techniques for Detecting Large-Scale Environmental Change -, 85-112, Springer.
8) Tilman, D. (1982): Resource Competition and Community Structure, Princeton Univ. Press, 297 pp.
9) 津田良平, 角井嘉美, 斉藤俊幸 (1989): 光ファイバークロロフィルセンサーによる培養植物プランクトンの粒径解析, 海洋工学コンファレンス論文集, 1, 59-63.
10) Ormerod, M. G. (1999): Flow Cytometry, second edition, BIOS Scientific Publishers, 109 pp.
11) Dubelaar G. B. J., Tangen, K., Gerritzen, P. L., Beeker, A. E. R. and Jonker, R. R. (1998): CytoBuoy: In situ optical scanning of individual particles with a buoy mounted flow cytometer, In Barthel, K.-G. *et al.* (eds.), Third European Marine Science and Technology Conference, Lisbon, Project Synopses, Vol. IV., 1500-1511, Advanced Systems.

Measurement of size spectra of phytoplankton by a bio-particle counter

Yuji TANAKA[1], Ryohei TSUDA[2], Takashi KIMOTO[3], Kazushi FURUSAWA[4] and Akira HARASHIMA[5]

1) Tokyo University of Fisheries
2) Kinki University
3) Research Institute of Oceano-Chemistry
4) Marine Biological Research Institute of Japan
5) National Institute for Environmental Studies

Abstract: A bio-particle counter was used to obtain the distribution of size spectra of phytoplankton in a cruise of ferry "Sunflower-2" in summer of 1994 to grasp the dynamics of phytoplankton. Also, simultaneously measured data such as nutrient distribution and taxonomic information of phytoplankton were used. Because of the nutrient depletion, standing stock of phytoplanktons was low in most of the Seto Inland Sea except for the following two regions. In Bisan-Seto, phytoplankton mainly composed of large-sized diatom was abundant compared to the surrounding areas possibly because of the supply of nutrients from below by the strong vertical mixing. In Osaka Bay, an eutrophicated area, both of small-sized and large-sized phytoplankton were abundant. They were mainly composed of diatom and flagellates. Concentration of phosphate and nitrate were high but that of silicate was low. These results show that the high concentration of nutrients favors the growth of large-sized cells implying the validity of size-dependent growth model and dominance of phytoplankton species based on nutrient ratios.