フェリー取得データに基づく海洋生態系変動短期予測モデルの可能性

原島 省*, 林 美鶴**, 柳 哲雄***

* 国立環境研究所
** 神戸商船大学
***九州大学応用力学研究所

要旨：フェリーによる海洋モニタリングの利点はその計測間隔を短くできることにある。さらに、得られたデータを初期値として短期の生態系変動等を予測する実用的なモデルを確立できる可能性がある。本報告では林・柳（2000a）[1]による数値生態系モデルと、フェリーによる短期変動の観測例を基礎にして、その可能性を検討した。林・柳モデルによれば、大阪湾奥のリン循環に関する主要な過程は、植物プランクトンが有光層において溶存態無機リン（DIP）を比較的速く消費して一次生産を行うことと、下層において有機物が分解されて再度有光層に戻ることであるという結果が得られている。また、観測例からは、実際の生態系変動の時間スケールが比較的短く、間欠的な栄養塩入力とそれに続く植物プランクトンブルームで特徴づけられる。このため、短期予測モデルにおける境界設定として、栄養塩の河川流入、風応力による下層からの鉛直混合輸送、太陽光入射強度等を気象予測からとりいれて、１週間～半月間程度の予測計算を行うことが有効になると考えられる。また、卓越するプランクトン種がケイ藻類になるか非ケイ藻類になるか等の予測のため、ケイ素、リン、窒素の変動をそれぞれモデルに反映させることも必要になる。

キーワード：数値生態系モデル、フェリーデータ、短期予測モデル、境界条件、初期条件

１．はじめに

海洋のうちでも、沿岸海域あるいは半閉鎖海域は、本来的に生物生産が高く、人為影響の結果も顕在しやすい。このため、水産、運輸、利水、汚濁の評価、余暇利用など、総合的な環境管理に対するニーズが高くなっている。そのためには、環境を支配するメカニズムの理解と同時に、環境変動に対しての予測を行うことが必要である。大気現象についてはすでにAMeDAS システムが整備され、それに基づいて、データの迅速な呈示と、取得データを初期条件としたモデルによる予測が行われている。海洋環境の変動に関する予測が未発達なのは、メカニズムの解明が複雑なことにもよるが、データの常時取得体制が未発達であることにもよる。

海洋のデータ取得に関しては、GOOS（Global Ocean Observing System: 全球海洋観測システム計画）により、"Real time, On Demand"の理念があげられており、また、そのサブプログラムである Coastal GOOS に示されるように沿岸域の重要性もうたわれている。常にボトルネックとなるのは常時、高頻度のデータを取得するためのプラットフォームである。本報告書の序論に示すように、フェリーをプラットフォームとすることにより、このニーズが満たされる部分は大きい。したがってフェリー取得のデータを利用した予測モデルを構築するこ

とが有効な手法になると考えられる。現在、海洋生態系モデルについては、目的と対象により多様化が進んでいるが、メカニズムを理解する研究を指向したモデルと、実利用を念頭においたモデルでは、その設定にある程度の差異があると考えられる。

林・柳（2000a）[1]は、瀬戸内海のうち大阪湾奥部（Fig.1、表面積 600 km^2，平均水深 15.1 m）を対象とし、数値生態系モデルを構築してリン循環に関する考察を行った。本報告では、このモデル（以後、林・柳モデルと略記する）の方法と結果、およびこれまでのフェリー観測で得られている短期変動例を基礎として、ありうべき短期予測モデルの設定条件と可能性について検討を行った。ここでは、予測すべき環境要因として植物プランクトン量と栄養塩濃度など、いわゆる生物地球化学項目を念頭におき、予測期間として１週間～半月先程度を想定する。

2. 林・柳モデルの設定

城(1991)[2]、林ら(2000)[3]、林・柳(2000b)[4]などにより、大阪湾の基礎生産はリンに律速される傾向にあることが推定される。したがって、林・柳モデルでは，リンを主変数とし、Yanagi and Onitsuka(2000)[5]のボックスモデルを改良し、有光層（上側ボックス）と無光層（下側ボックス）からなる鉛直２層の設定とした（Fig.2）。詳細は林・柳（2000a）[1]を参照されたい。

物理的なメカニズムとして、エスチャリー（河口域）循環を考える。すなわち、湾奥（Fig.2では右側）に河川流入（流入量を R とする）が加わると、塩分が希釈されて軽くなり、海水は上層を通って湾外に出て行く。それを補うように湾外からの海水が下層を経由して流入してくる。栄養塩などの物質の輸送を担うのは、この鉛直循環による水平移流、鉛直移流および水平拡散、鉛直拡散である。

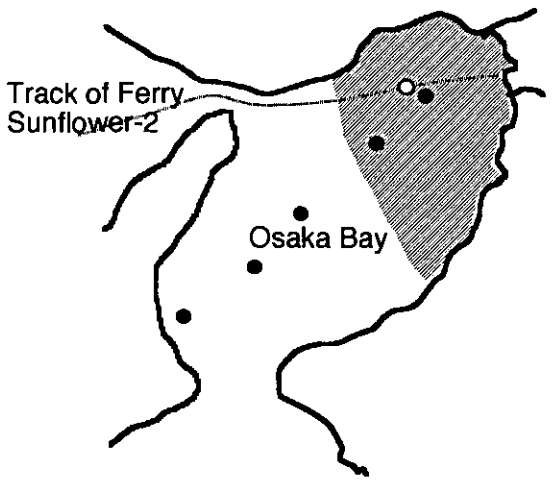


Fig.1 Analyzed area (grey zone) and observation points by Hashimoto *et al.* (1996)[7] and Harashima *et al.*(1997)[11] (reproduced from Ref.1) .

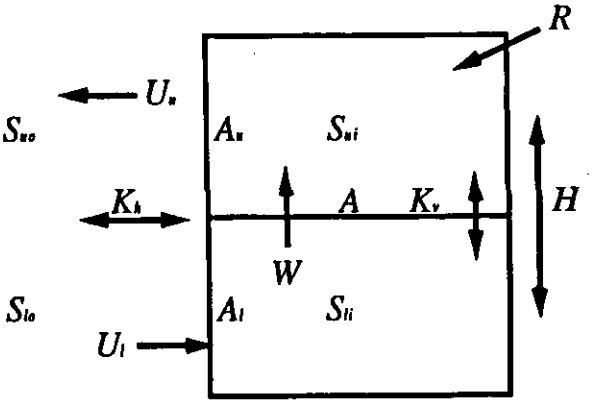


Fig.2 Physical model diagram (reproduced from Ref.1) .

林・柳モデルでは、水平拡散計数 Kh は一定とする。鉛直拡散計数 Kv は、水温成層および塩分成層が強いほど小さくなる。これを表現するため、水温成層強度の年変化をサイン関数で、塩分成層強度を R の逆数で表した。これらの、拡散係数及び移流流速は，塩分保存式及び流量保存式を使って、河川流量計測値(建設省河川局，1993，1994[6])と海域の塩分観測値(大阪府水産試験場，1993，1994[10])のデータをあてはめて最小法二乗法により決定した。

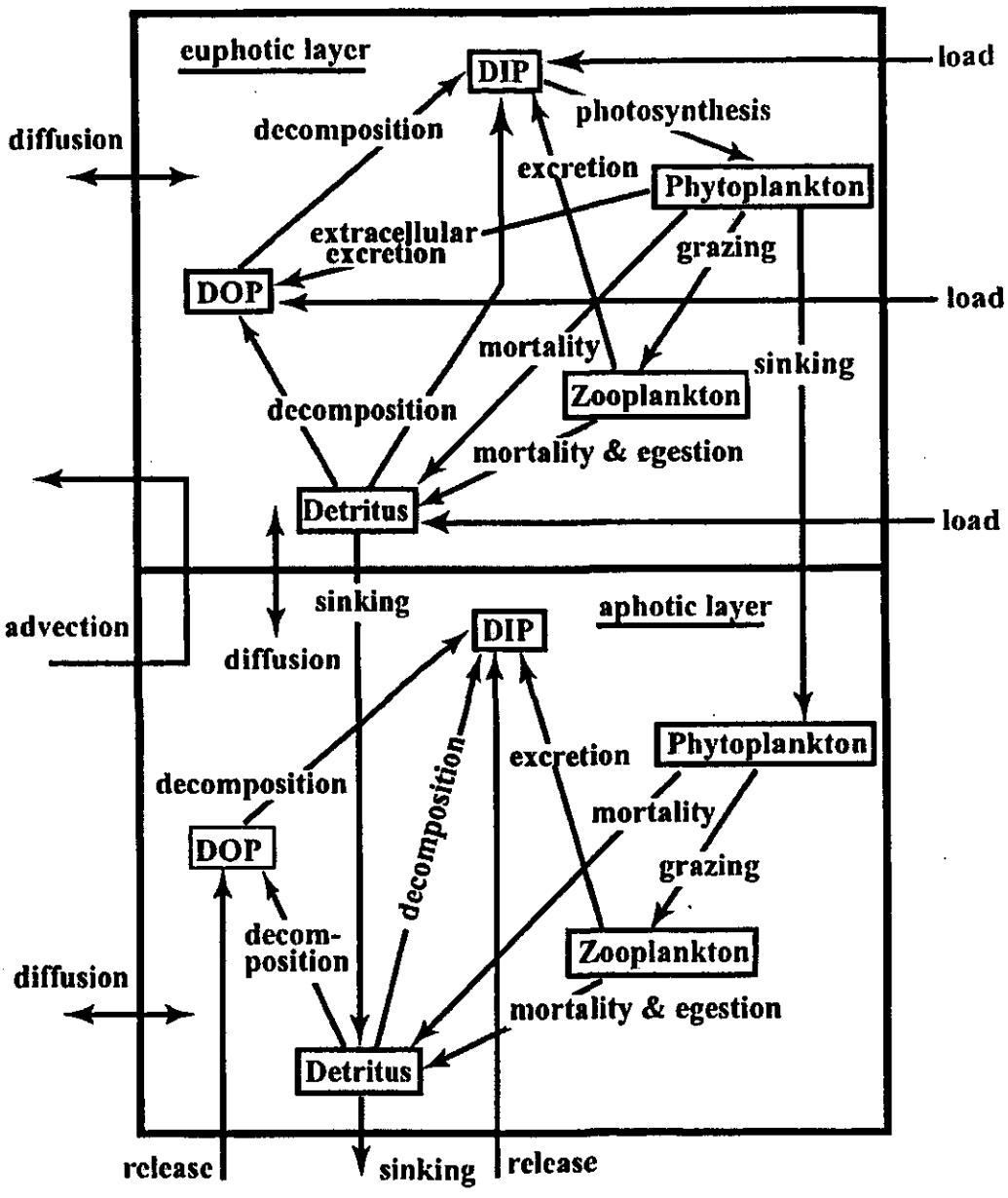


Fig.3　Numerical ecosystem model diagram (reproduced from Ref.1).

生物化学的なメカニズムとしては、リンを主変数とし、Fig.3 に示すような過程を考えた。すなわち、リンの収支として水平移流・拡散のほか，上部ボックスには河川及び降雨からの負荷を，下部ボックスには底泥からの DIP（溶存態無機リン）と DOP（溶存態有機リン）の溶出，及びデトリタス（生物死骸）の海底への堆積を考慮した。上下ボックス間のやり取りとして鉛直移流・拡散の他，植物プランクトンとデトリタスの沈降を考慮した．光合成は，有光層である上部ボックスでのみ行われる．有光層水深は，Hashimoto and Takeoka(1998) [7] が示した大阪湾での各季節の有光層水深を線形補間して各月の値を求め、これに準じて上部ボックス・下部ボックスの断面積を求めた。

これらの設定のもとに、DIP，DOP，植物プランクトン含有リン濃度(PHY)，動物プランクトン含有リン濃度(ZOO)、及びデトリタス含有リン濃度(DET)の５つの変数の微分方程式を、

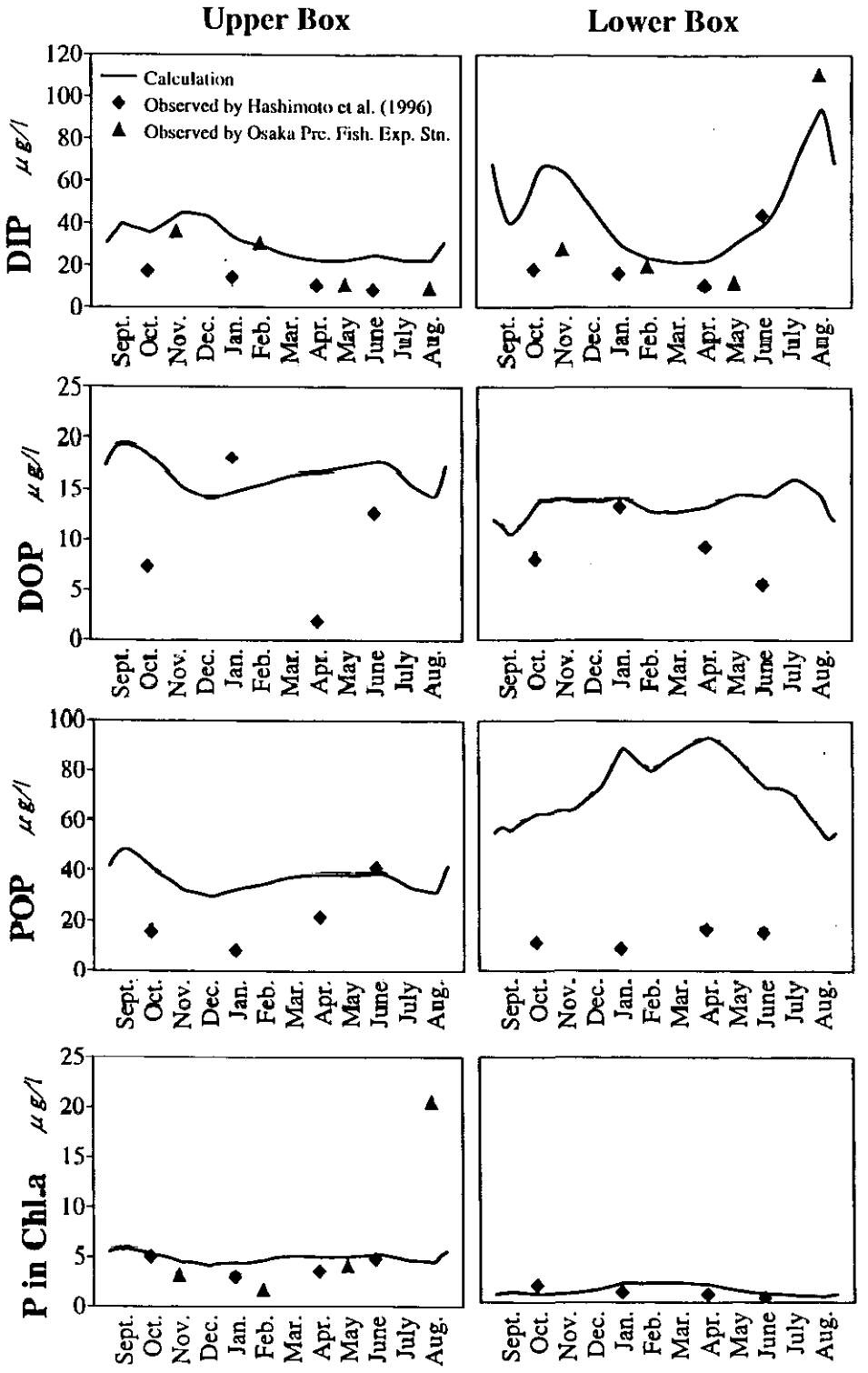


Fig.4 Calculation results of DIP, DOP and POP concentrations with observed values (reproduced from Ref.1).

上部ボックス、下部ボックス合計で 10 個定義した。これらの生物化学過程に関わるパラメータは、以下のように定式化した。

光合成速度 A1 は，DIP 濃度，水温，日射量に依存する。したがって、パラメータとして、最大光合成速度（V_{max}），リン濃度に関する半飽和定数（K_p），温度依存係数（k），光合成の最適光量（I_{opt}）を定義した。その他に、植物プランクトンからの DOP 浸出係数（A2）、植物プランクトンの枯死速度（A3）を主に水温依存の関数として定義した。

また、動物プランクトンによる二次生産については、植物プランクトン摂取速度（B1）、尿生産速度（B2），糞生産速度（B3）、死亡速度（B4）を定義した。

また、分解過程については、デトリタスの DIP への分解速度（C1），同じく DOP への分解速度（C2）、DOP の DIP への分解速度（D1）が主に水温の関数として定義した。

境界条件として、ボックス外のリン濃度を，橋本ら(1996)[8] の観測値を用いた。DOP は全溶存態リン（DTP）と溶存態無機リン（DIP）の差から計算して使用した。また，単位クロロフィルａ当たりの炭素の重量濃度比を C:Chl.a=25:1 とし，レッドフィールド比（C:N:P=106:16:1 元素比）と観測されたクロロフィルａ濃度から、植物プランクトン含有リン濃度（PHY）を推定した。光合成のための全天日射量は、気象要覧（気象庁, 1993.5～1994.8[9]）より求めた。

以上の条件の下，時間間隔 1/5 日で計算を行った．初期値として境界条件に用いたボックス外のリン濃度の年平均値を与えた。計算開始後 4 年目で，定常的な季節変動状態となった。

3. 林・柳モデルの結果

本報告では林・柳モデルの結果のうち、短期予測モデルの可能性に関連する部分の概要を紹介する。主要なリン循環の経路について確認されたことは以下である。すなわち、DIP が植物プランクトンの光合成で取り込まれて POP となり、これがデトリタスとなって沈降する。これが分解により直接 DIP に、あるいは DOP を経由して DIP に回帰する。この分解速度は、夏期の温度上昇で強まる。

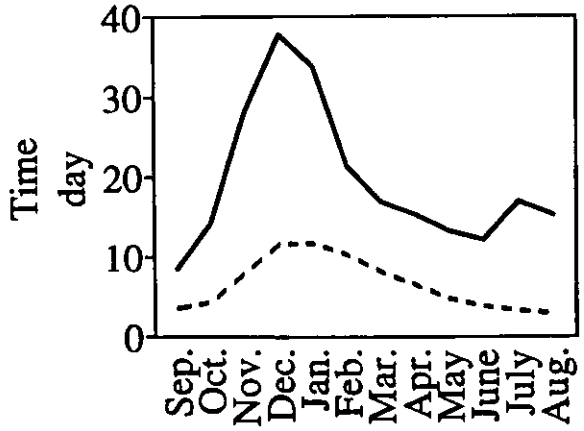


Fig.5 Seasonal variations of [DIP]/[Primary Production] and [DIP]/[Rate of DIP Load] (reproduced from Ref.1).

時間的な変動に関しては、Fig.4 に、計算の結果得られた DIP、DOP、POP 及び植物プランクトン含有リン濃度の変化を、観測値（大阪府水産試験場、1993, 1994[10]）と共に示した。計算で得られた DIP 濃度の季節変動は観測値をほぼ再現したが、DOP 濃度の再現性は十分ではなかった。

巨視的にみて、一次生産を律速しているのは夏期においては上層の DIP 濃度、冬期においては水温であるといえる。なお、窒素やケイ素などの濃度が律速条件になることもあり（Hashimoto and Takeoka, 1998[7]）、この方面でのモデルの発展の余地もある。

もう１つの重要なポイントは、有光層に存在する DIP の寿命である。有光層の DIP 現存量を光合成による消費率で割って得られる時間スケールを DIP の寿命と定義し、その変化を Fig.5 に示す。参考として、現存量を河川・降水による負荷率で割って得られる時間スケール（滞留時間）の季節変動も示す。これによれば、DIP の寿命は 3～12 日，年平均 6 日となり、DIP の寿命が一年を通じて比較的短いことが見て取れる。

4.フェリーによる植物プランクトン組成の短期変動の観測例

海洋の生態系変動の１つの例として、これまでのフェリーによる観測結果（Harashima *et al.*, 1997[11]）の一部を Fig.6 に示す。この調査では、フェリーによる通常の無人モニタリングとは別に、近畿大学津田研究室の人員が 1995 年 6 月に１ヶ月連続的に乗船し、一日おきに大阪湾、備讃瀬戸、燧灘の３地点でサンプル海水を取水した。得られたサンプルを顕微鏡により分類、計数、サイズ計測を行い、Strathmann(1967) [12] の方法により、植物プランクトンの分類群ごとの炭素換算量を算出した。この期間の状況としては、春季ブルームは終了しており、大阪湾以外の２点では栄養塩は枯渇していて植物プランクトン濃度も低かった。そして、６月３日、８日、13 日 19 日に降水があり、ほぼ同日に平均風速も高くなった。

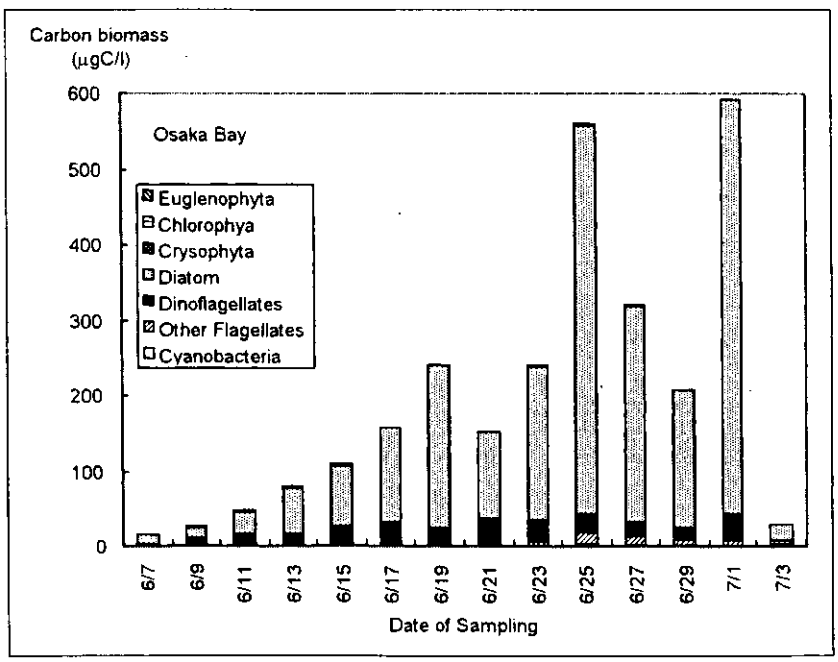


Fig.6 A sample of the change of taxon-specific carbon biomass in a sporadic bloom detected in a series of repeated measurements aboard of Ferry Sunflower-2 in July 1995 by Tsuda's Laboratory, Kinki University. The carbon biomass was calculated by the method of Strathman(1967) [12] from the microscope analysis (reproduced from Ref. 11).

Fig.6 によれば、ケイ藻類がこの期間に顕著な増殖（ブルーム）を示しており、その時間スケールが半月ほど、あるいは１ヶ月以内であることがわかる。しかもバイオマス量の変化が指数関数で近似できることが見て取れ、この関数型から、増殖開始時においては栄養塩資源が十分存在したこと、すなわち、栄養塩枯渇の状態からなんらかの栄養塩の一時的な負荷があったことが推定される。そして最終的にはブルームが終了し、植物プランクトンバイオマスの大半は沈降してデトリタスとなったことも推定される。また、ケイ藻類の増殖率は渦鞭毛藻類やその他の鞭毛藻類（黄金色藻類、クリプト藻類等）の増殖率に比べると格段に高く、（ケイ素を含む）栄養塩がありさえすればケイ藻類が卓越して増殖することがわかる。

なお、航海ごとに通過時刻が若干異なるため、水平位置については最大 3～4km 程度の差異があるが、それにもかかわらず、Fig.6 を見る限り同一の水塊を捕捉しているようである。

以上のようなことを考慮すると、大阪湾のような海域において推定される短期の海洋環境変動の１つのシナリオが次のように示される、すなわち、低気圧の通過ごとに降雨と河川流入により栄養塩流入が短期的に増加する。また風の応力が増加して鉛直混合による下層からの栄養塩補給が増大する。それに続く好天時に光合成が強化される。そして、栄養塩が比較的速く消費された後、静穏な状態では、植物プランクトンやデトリタスの沈降が進んで、栄養塩と植物プランクトンの濃度ともに再び低くなる。これは１つの例にすぎず、海域の特性や季節ごとに異なるシナリオが考えられるが、短期予測モデルとしては、そのような変動を表現できることが要件になるだろう。

5. 短期予測モデルの設定に関する考察

林・柳モデルでは、境界条件、すなわち、計算領域外側のリン・クロロフィル濃度、河川流量、降水量、底層からのリン溶出量と、内部的な物理条件としての水温は、ほぼ月ごとの値として与えられている。結果も当然のことながら年サイクルとしての変動を反映したものとなっている。この年サイクルに関する知見は、海洋環境変動の１次近似として必要不可欠のものであり、この基礎なくしては短期予測の段階に進むことができない。

そして、この一次近似の範囲においても、DIP の寿命が比較的短く、植物プランクトンの活発な光合成により消費されてしまうという考察が得られている。さらに、前項の観測結果で示されるように、海域への様々な栄養塩の流入とこれに引き続いて起こる植物プランクトンの増殖の実態は、年サイクル変動以上に、短期間の擾乱の集合として考えることができると考えられる。

したがって、ありうべき短期予測モデルの設定への要件は次のように整理されるだろう。

1)モデルの初期条件として、フェリーで計測される栄養塩、植物プランクトン量を考え、しかも計測間隔を数日～10 日程度以内としてモデルの予測精度を確保する。このために、データのオンライン化あるいはリアルタイム化を進める。

2)予測モデルの時間積分の際、降水、河川流入、鉛直混合など海洋上層への栄養塩流入に関連した境界条件と、全天日射量など光合成に関連する境界条件が必要になる。これらの値については、計算開始時には未知であり、しかもフェリー観測で得られるものではない。したがって、それらは気象予測から推定値を求めるか、または複数の選択肢としての境界条件を用意して場合ごとの予測を行うことが必要になると考えられる。

3)本報告では、１つのモデル海域として、エスチャリー循環という物理モデルが推定される大阪湾を考えたが、Hashimoto and Takeoka（1998）[7]に示されるように、異なる海域・季節に

ついていくつか異なる物理モデルが適応されるべきである。
4)栄養塩のうちでも、リン、窒素、ケイ素それぞれに循環過程が異なり、しかもケイ素が存在するか否かによってケイ藻類（増殖率は速いが無害な種が多い）か非ケイ藻類（有害性をもつ種が含まれる）のどちらが卓越するかという問題（例えば、Egge and Aksnes, 1992[13]）にもかかわるので、３種の栄養塩を含める必要がある。

引用文献

1) 林美鶴, 柳哲雄(2000a): 数値生態系モデルによる大阪湾奥部のリン循環過程の解析, 海の研究（投稿中）.
2) 城久(1991): 大阪湾の開発と海域環境の変遷, 沿岸海洋研究ノート, 29, 3-12.
3) 林美鶴, 柳哲雄, 橋本俊也(2000): 瀬戸内海における窒素・リンの現存量比率, 海の研究, 9, 83-89.
4) 林美鶴, 柳哲雄(2000b): 伊予灘南部・大阪湾における DIN ・ DIP 濃度と N/P 比の変遷, 海の研究, 9, 125-132.
5) Yanagi, T. and Onitsuka, G.(2000) : Seasonal Variation in Lower Trophic Level Ecosystem of Hakata Bay, Japan., J. Oceanogr., 56, 233-243.
6) 建設省河川局(1993,1994): 流量年表(1993 年, 1994 年), 日本河川協会.
7) Hashimoto, T. and Takeoka, H. (1998): Analysis of primary production in Seto Inland Sea, Japan, using a simple ecosystem model, J. Oceanogr., 54, 123-132.
8) 橋本俊也, 山本民次, 多田邦尚, 松田治, 永末寿宏, 多田充利, 郷秋雄, 中口和光(1996): 瀬戸内海全域の季節別水質調査結果, 広島大学生物生産学部紀要, 35, 243-278.
9) 気象庁(monthly publication): 気象要覧(1993.5～1994.8), 1125-1140.
10) 大阪府水産試験場(1993, 1994) : 平成 5 年度, 平成 6 年度大阪府立水産試験場事業報告.
11) Harashima, A., R. Tsuda, Y. Tanaka, 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 "Monitoring Algal Blooms - New Techniques for Detecting Large-Scale Environmental Change", Kahru, M. and Brown, C. (eds.), 85-112, Springer.
12) Strathmann, R. R. (1967): Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume, Limnology and Oceanography, 12, 411-418.
13) Egge, J. K. and Aksnes, D. L. (1992): Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition, Marine Ecology Progress Series, 83, 281-289.

Possibility of a short-term prediction model using biogeochemical data obtained by ferry monitoring

Akira HARASHIMA*, Mitsuru HAYASHI and Tetsuo YANAGI*****

*National Institute for Environmental Studies
** Kobe University of Mercantile Marine
*** Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University,

Abstract: One of the merits of using a ferry as a monitoring platform is its high temporal resolution, which will enables us to construct a short-term prediction model based on the moitoring data as initial conditions. We discuss its possibility based on an ecosystem model for Osaka Bay by Hayashi and Yanagi(2000) and a sample of the time series data obtained from the ferry. The former showed that the main mechanism consists of the relatively rapid consumption of DIP by primary production in the upper layer and the temperature-dependent remimeralization in the lower layer. The latter showed that an actual biogeochemical variation, from perpetual nutrient inputs due to wind mixing or riverine inflow and succeeding phytoplankton bloom, is characterized by relatively short time scales such as ten days or less a month. Therefore, it will be appropriate to construct a short-term prediction model for such a period based on the boundary conditions processed from the wind steress, riverine inflow, insolation processed from the meteorological forecasts for the prediction period. Also, the inclusion of N, P, and Si as variables is essential to predict which of diatom-species or non-diatom species blooms.

Keyword: short-term prediction, ecological model, ferry monitoring, initial condition, boundary condition