

## 琵琶湖塩津湾の生態系モデルによる数値実験

焦春萌・余輝<sup>1)</sup>・日高平<sup>1)</sup>・津野洋<sup>1)</sup>

### 要約

本生態系モデルは、北湖に開けている鉛直方向に10層に分割し、北湖との水の出入りの開境界条件は、等温面法を用いて計算した。また、河川水流入スポットは、鉛直方向10層の湖水水温に応じて流入スポットを動的に変えられるようにした。本研究では、2005年夏に塩津湾で行った48時間連続調査の結果を用いて、当湾の生態系モデルを検証し、モデルの計算値は観測値の特徴をよく再現したことが分かった。検証された本モデルを用いて、塩津湾の水質形成過程における主な経路の影響、①北湖との交流による影響、②河川流入による外部負荷の影響、③底泥溶出による影響、④鉛直拡散による影響について数値実験をした。

### 1. はじめに

近年、琵琶湖北湖一部の湖岸帯において、藍藻類の増殖が見られる。北湖の一番大きい湖湾である塩津湾でも、藍藻類が優占種になった場合があり、その水質は変わってきている。



図1 琵琶湖塩津湾および48時間連続調査地点

塩津湾で増殖した藍藻類は北湖に拡散し、琵琶湖全体の水質に対して影響を与える可能性がある(焦, 2004)。一方、湖沼での水質形成過程の解明には、水理学的要因と生物化学的要因の両者を組み合わせて検討する必要があるので、本研究では水理学的要因を配慮する塩津湾生態系モデルを導入した。

本生態系モデルの特徴は、従来の1層あるいは2層の湖沼生態系モデルと違って、鉛直方向に10層に分割して、河川水流入水深は、鉛直方向10層の湖水水温に応じて流入水深を動的に変える点である。また、植物プランクトンの種群を三つに分け、湖流、水温、光日射量および栄養塩などの外部変数の変化に応じて、植物プランクトンの種間競争を再現するようになっている。また、本生態系モデルには12個の状態変数が含まれる(焦, 2004)。

本研究では、2004、2005年夏に行った48時間連続調査の結果をもとに(図1)、塩津湾の流れ数値モデルと生態系モデルの統合モデルを構築した。実際の観測値の初期条件と境界条件による当湾の生態系の週間変動の再現を主目的として、予備的な数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションの結果では、計算値と観測値とはほぼ一致しており、全体的によく再現していることが分

1) 京都大学大学院工学研究科

かった。この検証結果により、本モデルが高精度であることが証明された。このようにして検証された本モデルを用いて、塩津湾の水質形成過程における各因子の影響効果を数値実験によって評価することを本研究の目的とする。

## 2. 数値実験

### 2. 1 北湖と塩津湾の交流による影響評価の数値実験

北湖との開境界条件は湾内の水質形成に支配的な影響因子となっている。北湖との水交換の混合率 ( $Rr$ ) をコントロールすることにより、その影響を評価することができる。

$Rr$  を0~1の範囲内で調整し、各状態変数の変化を比べ、その影響を見る。この数値実験の目的は、以下の2つの課題である。

① 北湖との交換による影響の有無を確認し、その影響程度を評価する。

② 交換の混合率を推定する。

北湖から湾内に侵入してきた湖水は湾内で混合せずにそのまま北湖へ戻ると、つまり  $Rr=0$  の時、交換の影響がない。 $Rr=1$  の場合には、湾内の水は北湖から侵入してきた水と完全混合を起こし、希釈作用が最大となる。現実では、流動場の複雑さで、北湖との水交換混合率の算定は困難であり、モデルを用いて、混合率  $Rr$  の値を変えて数値実験をし、計算結果により最も現実に合った水の混合率を推定する。

まず、交換混合率を変えて、湾内栄養塩濃度の変化を見る。図2および図3に、交換混合率が0、1、0.7の順で設定しシミュレーションした全層の窒素およびリンの変化結果を示す。

$Rr=0$  の場合、湾内水は希釈せず交換による影響がまったくないため、湾内の窒素およびリンの栄養塩濃度が時間の経過とともに直線的に上昇する。層別における濃度変化速度および数値実験期間中(6日間)の変化率を計算し、その結果を表1に示す。全層において、特に、表層と深水層ではその変化が激しくなっていることが分かる。北湖との水交換混

合がないと仮定すると、6日間の塩津湾内の栄養塩濃度平均変化速度は全窒素および全リン濃度がそれぞれ0.012、0.002 mg/L/dとなり、変化率はそれぞれ21%および116%となる。北湖水の希釈作用がないと、塩津湾は非常に速いスピードで栄養塩濃度が高くなることが示される。逆に考えると、塩津湾は現状を維持できたことは、その分の汚濁が北湖へ拡散されたことを示し、これにより主湖盆と湖湾との相互影響関係を理解することができる。

リンの変動は窒素より大きくなっている。湾内のリン濃度レベルが低いいため、窒素に比べ、リンはより外部負荷の影響を受けやすいことが数値実験の結果で分かった。

$Rr=1$  の場合、完全混合を起こし、湾内の水は北湖から進入した水によって希釈され、結果としては湾内の栄養塩レベルが北湖と一様となる。

当然、以上2つの極端なケースは現実的にはありえない。より現実な水交換混合率を推定するために、 $Rr$  を0~1の範囲内で調整して数値実験をした。その結果、 $Rr$  は0.2~0.3の値域で最も適切であった。

植物プランクトンのシミュレーションにおいても、同様の結果が得られた(図4参照)。 $Rr=0$  の場合に、有光層の植物プランクトン量は栄養塩濃度の上昇とともに急激に増殖し、 $Rr=1$  の場合になると、増殖が一段と押された。窒素とリンと同様に、 $Rr=0.2\sim 0.3$ の範囲で最も適切な結果となっている。

よって、成層期においては、塩津湾と北湖との交換混合率は0.2~0.3であると推定される。

表1 Rr=0の時全窒素(N)と全リン(P)の増加率(%)

モデルの水層		第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層	第7層	第8層	第9層	第10層
N	変化速度 (mg/L・d)	0.011	0.012	0.016	0.007	0.003	0.009	0.012	0.013	0.014	0.021
	変化率(%)	25.9	29.0	36.0	10.8	3.7	13.6	18.3	20.9	21.1	26.3
P	変化速度 (mg/L・d)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003
	変化率(%)	116	92	89	79	76	111	132	144	158	161

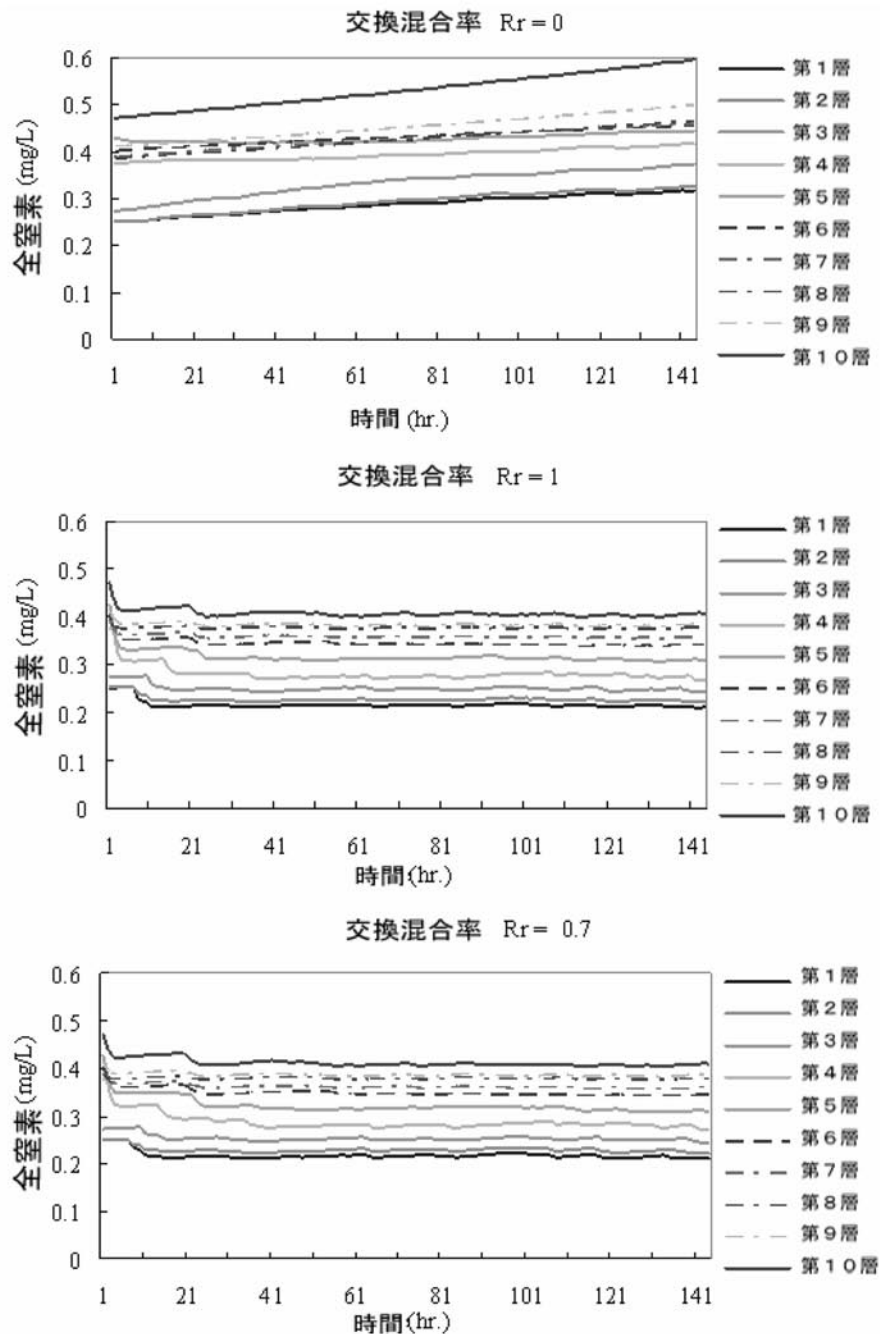


図2 交換混合率0, 1, 0.7の時、各層の全窒素濃度の週間変化  
(グラビア 5 頁参照)

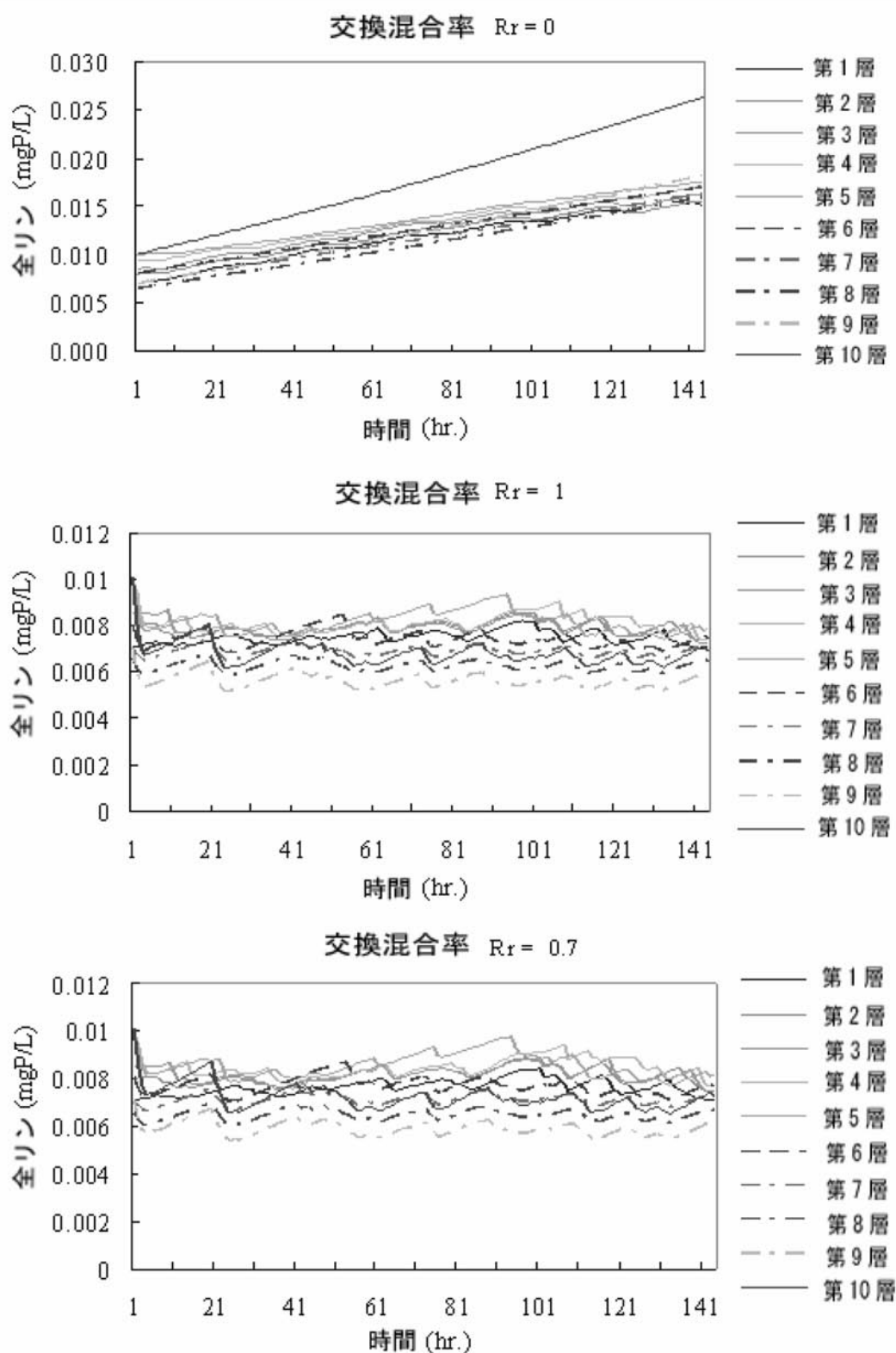


図3 交換混合率0, 1, 0.7の時、各層の全リン濃度の週間変化  
(グラビア5頁参照)

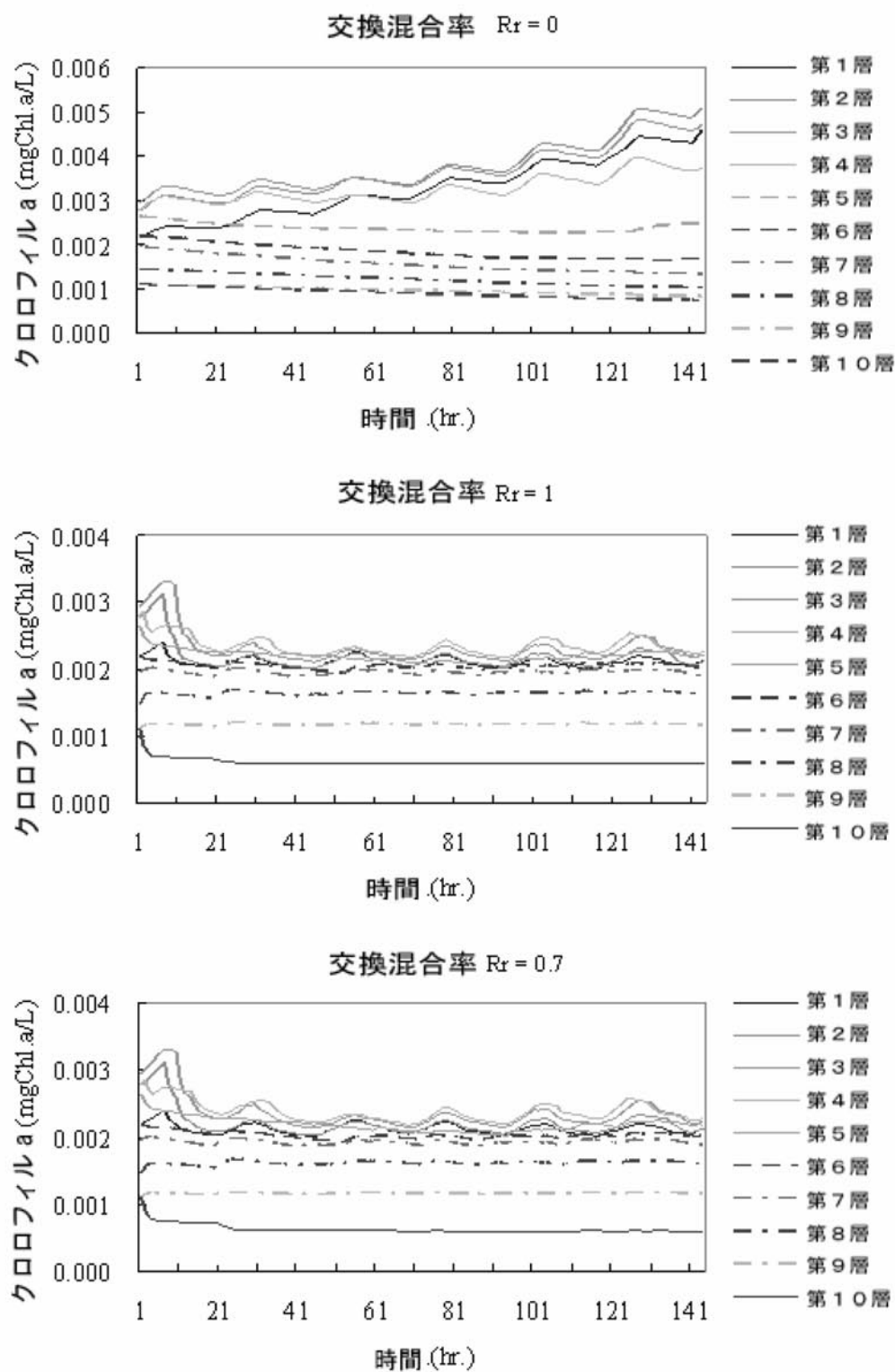


図4 交換混合率0, 1, 0.7の時、各層のクロロフィル-a濃度の週間変化  
(グラビア5頁参照)

## 2. 2 河川流入による外部負荷影響の評価の数値実験

河川流入外部負荷影響に対する評価を行う場合に、数値モデルはよく用いられる。外部負荷の削減による湖沼水質保全対策には特に有用である。

成層期では、河川水は、湾内に流れ込む際に、同温の表水層あるいは水温躍層上部の等温層に貫入し拡散する。成層期において、外部負荷流入の変動が湾内の有光層の植物プランクトン増殖に対する影響をみるために、河川の流入水深を2パターンに設定し、有光層以浅の各層の栄養塩および植物プランクトンに与える影響をシミュレーションし、その変化率を計算する。有光層以深は植物プランクトンの光合成が制限されるため、特に言及しない。

パターン①：河川水を表水層の第2層(5m~10m)に流入させ、流量をそれぞれ3倍および5倍に変え、流入層(第2層)およびその上下層(第1層および第3層)に与える影響を見る。

パターン②：河川水を水温躍層の上層第3層(10m~12m)に流入させ、流量をそれぞれ3倍および5倍に変え、流入層(第3層)およびその上下層(第2層および第4層)に与える影響を見る。

以上の設定は北湖との交換混合率を0.3とし、河川流量を実測値で入力する。

外部負荷量の変動による湾内流入層の主な状態変数の変動およびその上下層への鉛直拡散影響のシミュレーション結果を図5に示す。各層の主な状態変数の変化率は表2に示す。

外部負荷の変動に対する全リンの感度は全窒素より高いことが示され、湾内生物生産の制限因子となるリンは外部負荷により変動しやすいことが再び検証された。

外部負荷を表水層第2層に流入させる場合では、流入層が最もその影響を受け、鉛直拡散の影響は下層の水温躍層第3層(10~12m)より上方の表水層第1層(0~5m)へ拡散されやすい(第1層の容積は第3層の2.5倍)。逆に、外部負荷が水温躍層に貫入する場合には、鉛直拡散の影響は上方の表水層第2層ではなく、下方の水温躍層の第4層に及ぼしやすくなる。水温躍層の遮断効果がこの数値実験の結果から検証された。

現実においては、大雨による河川水氾濫および田植え時の濁水排出による影響はこのシミュレーションで把握することができる。

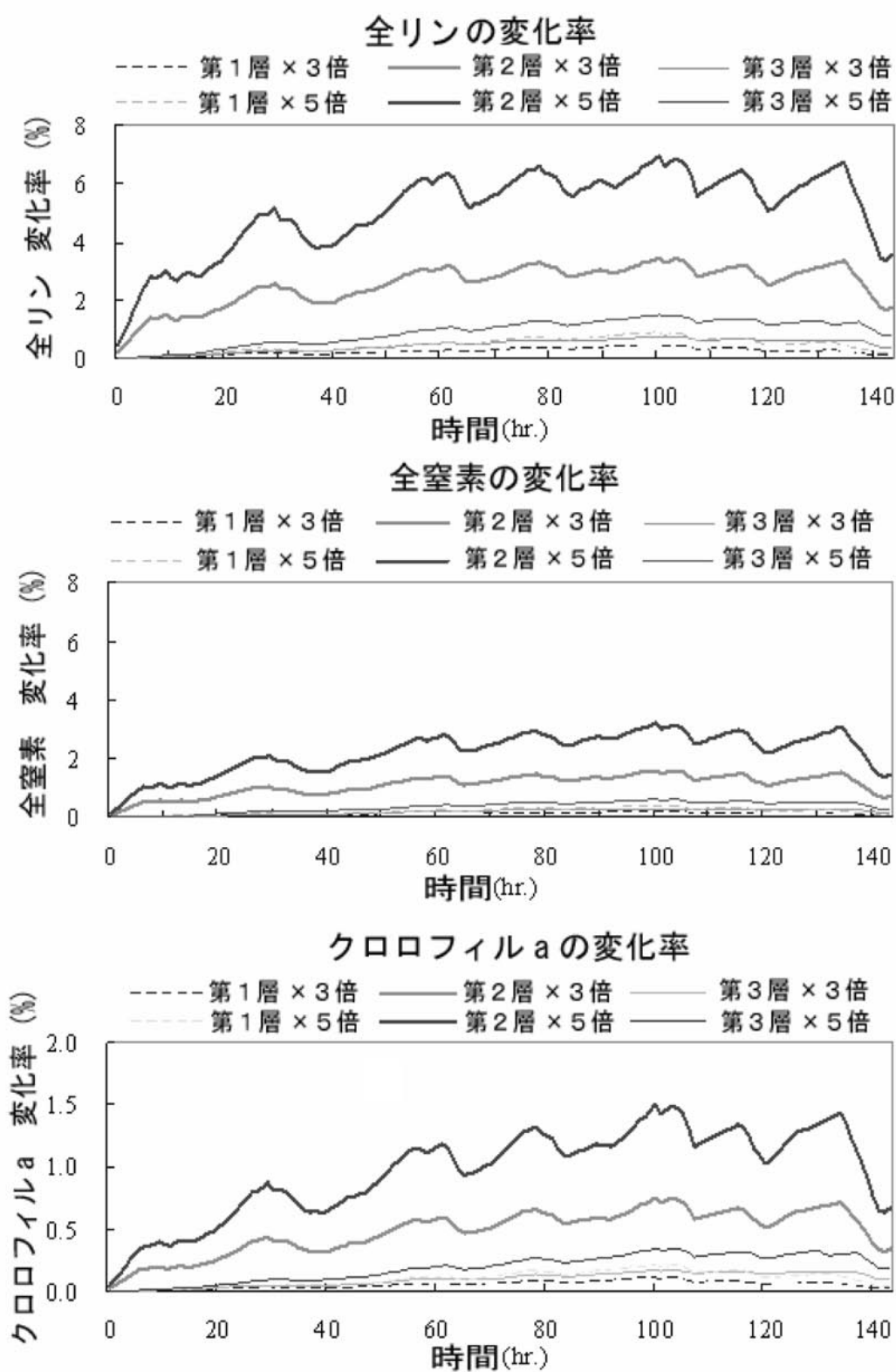


図5 河川水が1倍、3倍、5倍の流量で第2層（表水層）に貫入した時の第1層、第2層および第3層における全窒素、全リン、クロロフィル-aの変化率（%）  
（グラビア5頁参照）

表2 河川水が3倍、5倍の流量で第2層（表水層）、第3層（水温躍層）に貫入した時の全窒素、全リン、クロロフィル-aの変化率（%）

河川水が流入する層	湖の層	全リン変化率（%）		全窒素変化率（%）		クロロフィル-a変化率（%）	
		3倍	5倍	3倍	5倍	3倍	5倍
第2層	第1層（0-5m）	0.22	0.45	0.10	0.19	0.05	0.10
	第2層（5-10m）	2.55	5.11	1.11	2.21	0.48	0.96
	第3層（10-12m）	0.45	0.90	0.18	0.36	0.09	0.19
第3層	第2層（5-10m）	0.47	0.94	0.20	0.41	0.10	0.20
	第3層（10-12m）	6.17	12.3	2.46	4.92	1.08	2.15
	第4層（12-14m）	1.32	2.63	0.48	0.96	0.27	0.54

### 2.3 底泥からの栄養塩溶出による影響の評価の数値実験

湖沼の水質形成過程において、底泥からの溶出による内部負荷の影響は無視できない存在である。底泥の溶出量を4倍および8倍に変えて、深水層（第10層）の栄養塩、特にリン濃度の変化をみる。シミュレーション結果を図6に示す。深水層のリン平均濃度は変化前（1倍）の

0.009mgP/Lからそれぞれ0.012 mgP/L(4倍)、0.015 mgP/L(8倍)に上昇した。

通常の湖沼では、底泥の溶出はある程度安定しているが、底層栄養塩の増加は湖底境界層での再懸濁あるいは再浮上による寄与が大きい。主湖盆で発生した内部波は湖湾に貫入する際に、その振幅が大きくなりやすい。特に強風時に湖底でのスロッシングにより、再懸濁効果がおお大きいと考えられる。

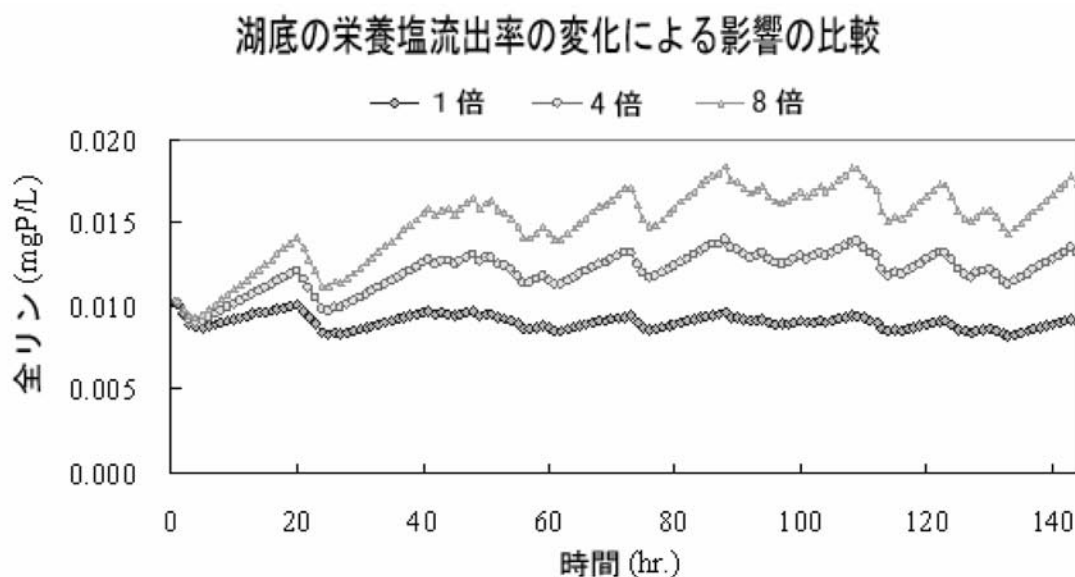


図6 湖底の栄養塩溶出率（1倍、4倍、8倍）の変化による深水層における全リンの濃度変化



## 2. 4 鉛直混合による影響の数値実験

まず、鉛直拡散の影響をまったく考慮しないケース(「拡散なし」と、実測水温より計算された鉛直拡散係数を用いるケース(「拡散あり」)の計算結果を比較し、「拡散なし」から「拡散あり」へ替える際に生じた各層の栄養塩濃度変化率の変動について評価する。

図7には、鉛直拡散の影響を考慮した際の各層の窒素濃度変化率の変動(上)およびリンの濃度変化率の変動(下)を示す。鉛直拡散影響を有することがはっきり確認される。窒素濃度の鉛直勾配は大きく、底層では蓄積され濃度が高く、表層では植物プランクトンに消費され低くなる特徴があり、鉛直拡散は濃度の高いほうから低い方へ拡散するため、その影響により、濃度の高い躍層中部以深(第5層以深)では濃度の減少が見られ、濃度が低い表水層の躍層以上(第4層以上)では濃度の増加が見られた。水温躍層の上下層に相当する第5層および第3層の濃度変化率が最も大きい。

リン濃度の鉛直成層分布が弱いと、各層の濃度変化率の変動は窒素と幾分異なる。鉛直拡散により最も影響されるのは第5層でのリン濃度の減少および第9層でのリン濃度の増加である。水温躍層内の第4層および第6層も、時間的な変動が大きい。

各層の濃度変化率は鉛直拡散係数による影響の程度が異なることをこの数値実験で確認された。

## 3. まとめ

本研究では、湖沼の成層期の特徴を究明するために、数値モデルを構築し、塩津湾の水質形成過程における主な経路の影響について4つの数値実験を行ったところ、以下のことが分かった。

### ① 北湖との交流による影響

- 北湖との水交換による影響が大きいことが確認された。北湖との交換がないと仮定すると、6日間の塩津湾内の栄養塩濃度平均変化(増加)速度は窒素およびリンがそれぞれ0.012、0.002 mg/L・dとなり、変化率はそれぞれ21%および116%となる。北湖水の希釈作用がないと、塩津湾は非常に速いスピードで栄養濃度が高くなることが示される。逆に考えると、塩津湾はいまの現状を維持できたことはその分の汚濁が北湖へ拡散されたことを示し、これにより主湖盆と湖湾との相互影響関係を理解することができる。
- 窒素と比べ、リンはより外部負荷の影響を受けやすいことが分かった。
- より現実にあった北湖と塩津湾との水交換混合率を推定するために、Rrを0~1の範囲内で調整して数値実験をした。その結果、Rrは0.2~0.3の値域で最も適切であった。

### ② 河川流入による外部負荷の影響

外部負荷による影響が確認された。河川水の流量によりその影響範囲が異なる。現実においては、大雨による河川水氾濫および田植え時の濁水排出による影響はこの数値実験で把握することができる。

### ③ 底泥溶出による影響

- 底泥溶出は深水層(第10層)の栄養塩、特にリン濃度の上昇に寄与する。底泥溶出量を4倍および8倍に増加させると、深水層のリン平均濃度は変化前の0.009mgP/Lからそれぞれ0.012 mgP/L(4倍)、0.015 mgP/L(8倍)に上昇した。

### ④ 鉛直拡散による影響

- 「拡散なし」と「拡散あり」とを比較し、実測水温分布から計算された各層の鉛直

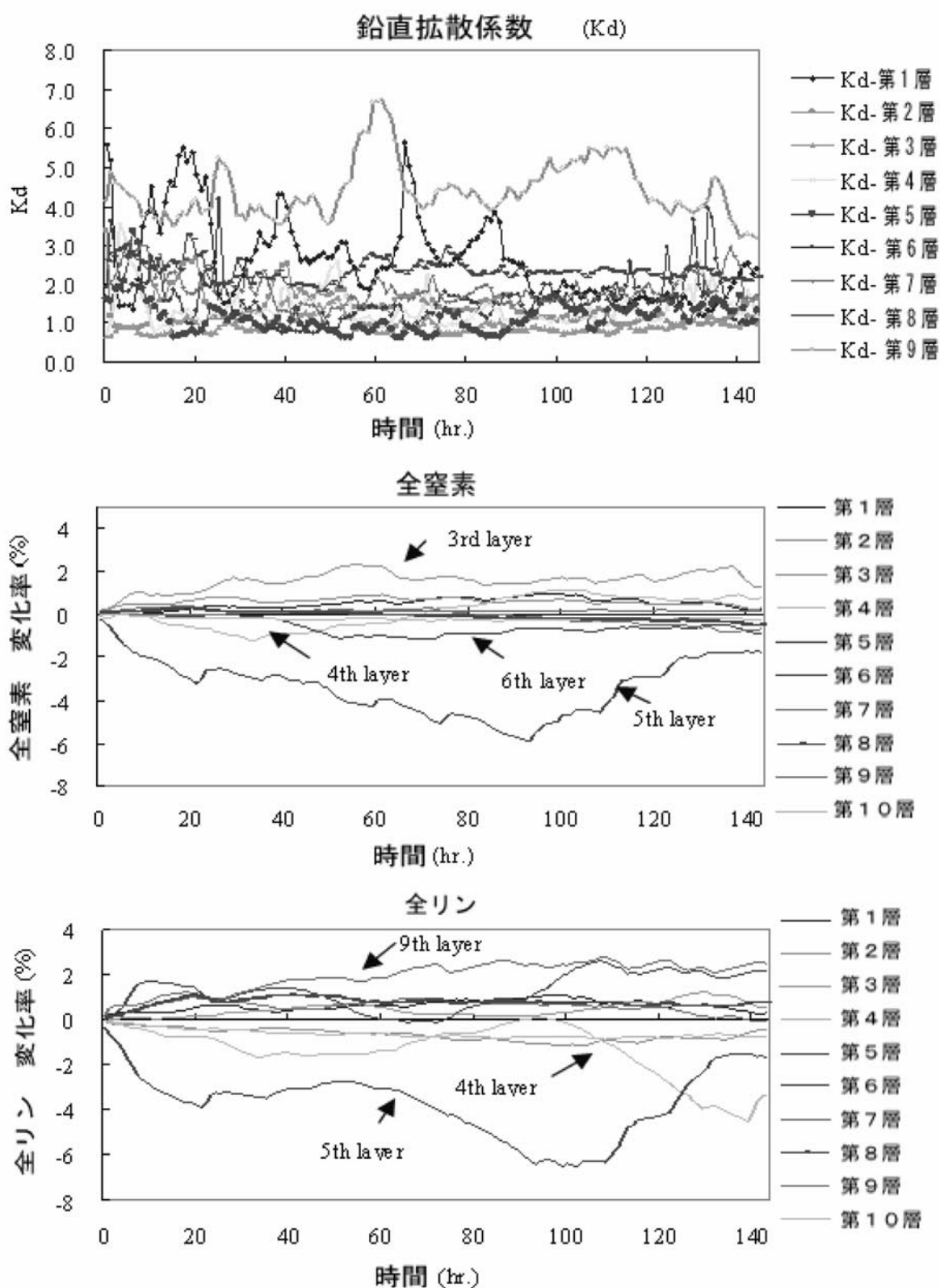


図7 湖水鉛直拡散による栄養塩（全窒素、全リン）の変化率（%）  
（グラビア6頁参照）

## 引用文献

- 焦春萌(2004) : 塩津湾の水質分布特性の短期変化. 滋賀県琵琶湖研究所報, No.21, 70-77.
- Imberger J. (1987) : Hydrodynamics of lakes. Proc. 12<sup>th</sup> Covention Australian Water and Wastewater Assoc. AWWA, 401-423.
- 余輝,焦春萌,岸本直之,日高平,津野洋(2005) : 等温面法による湖沼主湖盆と湖湾における水の移流交換機構の解析. 土木学会論文集, 804,23-32.
- Tsuno H., T. Hidaka and S. E. Jorgensen (2001): 2 layer-model development, planning and management of lakes and reservoirs, Model for Eutrophication on Management, PAMOLAR training package version 1.0, UNEP international Environmental Technology Centre and International Lake Environment Committee,50-73.
- Jorgensen, S.E.(1999) : State of the art If ecological modeling with emphasis on development of structural dynamic models. Ecol. Model. 120, 75-96.