

閉鎖性湾としての浜名湖における汚濁解消の概念

松田義弘*¹

A Basic Concept for Dissolution of Contaminant in an Enclosed Bay, Lake Hamana

Yoshihiro MAZDA

Abstract

Using a simple concept constructed by a well-mixed and a stratified water models, it is introduced that in general enclosed bays long time is needed to dissolve contaminant after stopping the load of contaminant from the land. Contaminant once dispersed in water area is difficult to converge. Even if the load from the land stops, accumulation in the bay bottom before stopping the load plays a role of source of contaminant. In a center of Lake Hamana, the behavior of contaminant depends on the vertical bay-topography, tidal condition and freshwater discharge.

1. はじめに

内湾の水質汚濁，富栄養化が叫ばれて久しい。各水域でのシミュレーションに基づいて，陸域からの負荷が規制されている。しかし，期待が叶えられていない場合も多い。これには種々の原因が考えられる。その水域の特性がシミュレーションに生かされていない場合がある。その海域の物質拡散機構を十分に調べた上で，シミュレーションが実行されねばならないことは当然である。一方，シミュレーションの前提を理解していないための誤解も無視できない。例えば，現行のシミュレーションの多くは最終結果の予測を目的としており，最終結果は多くの場合が定常状態である。即ち，規制を行い，十分に時間を経て定常化したときの状況を予測（シミュレート）しているのである。現実には，規制が実施されてから次第に変化し，定常となるには長い年月を要する。定常状態のシミュレーションは，定常に達するまでの遷移過程およびその日数（年月）には触れていないのである。

本論文では，負荷削減後の汚濁解消の過程を認識する必要性を指摘する。

2. 水域に拡散した汚濁物質が消滅する機構

ある湾（水容積： W ）に流入する陸水流量（ q ），陸域からの単位時間当たりの汚濁物質負荷量（ m_L ），湾口での単位

時間当たりの海水交換量（海水交換係数： v ）をそれぞれ一定とし，湾内水は十分に混合し（完全混合），湾内の汚濁物質濃度（ C ）は一様となっているとする（Fig.1）。

ここで物質の負荷が止められたとする（簡単のため，ここでは削減でなく，負荷をゼロとする）。その後，湾内水の汚濁物質の濃度はどのように変化するだろうか。

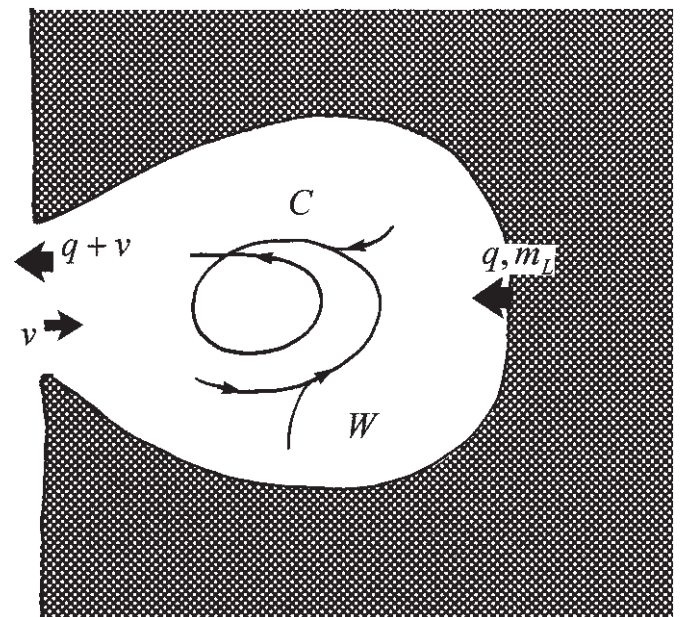


Fig.1 Water exchange model of an enclosed bay in steady and well-mixed condition

負荷停止後も、陸水の流入、湾口での海水の流入・流出が定常であり、湾内では常に完全混合しているとすれば、物質濃度(C)は(1)式に従ってFig. 2の実線のように減少していく。

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{1}{T} t\right) \quad (1)$$

ここで C_0 は負荷を止める前の物質濃度、 t は時間、 T はフラッシングタイムと呼ばれ、(2)式で与えられる。

$$T = \frac{W}{q+v} \quad (2)$$

(1)式によれば、 T は最初の物質濃度が37%に減少するまでの時間を意味する。例えば、浜名湖 (Fig. 4を参照) での

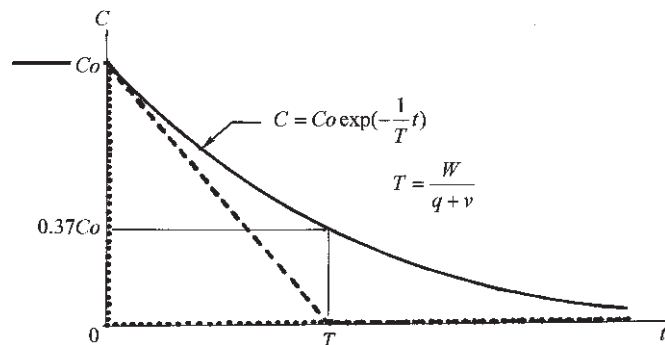


Fig. 2 Contaminant concentration change in a well-mixed bay after stopping contaminant discharge

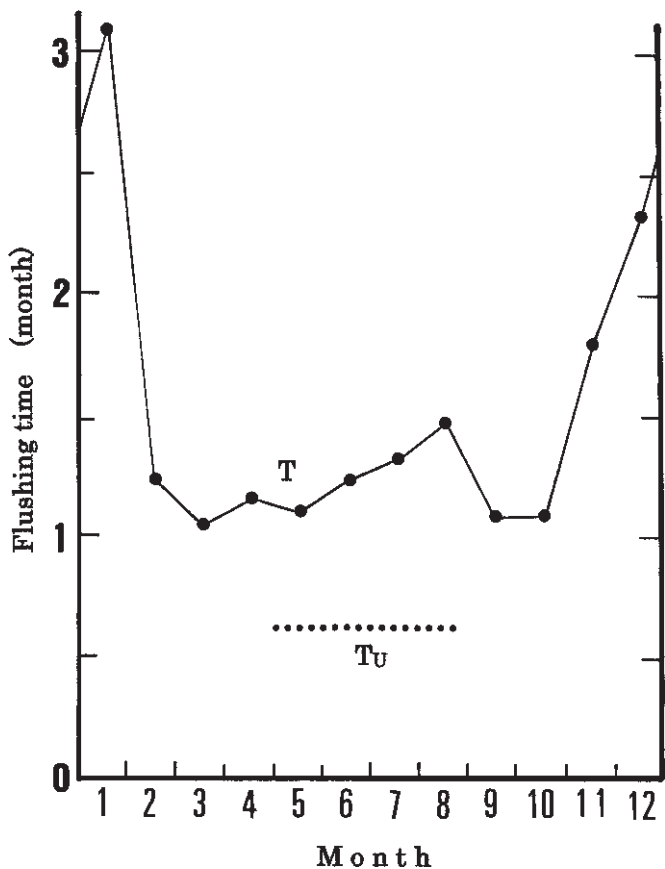


Fig. 3 Annual change in flushing time of Lake Hamana
Solid line: The bay is assumed to be well mixed vertically
Dotted line: Flushing time of the upper layer

測定値を用いると T は Fig. 3 のように算出される (松田, 1999)。即ち、浜名湖では、負荷が止められてから湖内の物質濃度が最初の値の37%に減少するまでには1~3ヶ月ほどを要するといえる。しかし、この値は厭くまでも最初の値の37%になるまでの時間であって、湖内から物質が完全に無くなるまでには無限の時間を要することを忘れてはならない (Fig. 2の実線)。決して Fig. 2の点線や破線のようにならない。陸上に投棄された物質はドラム缶に詰めこんで一気に排除できるが、水域中に一旦投入された物質は拡散し、希釈されつつもその水域に永遠に残る。

3. 浜名湖の水質変化の実態

上のモデルは極めて単純化した場合である。個々の湾がもつ特性により現象は複雑となる。

ここでは浜名湖の場合を考えよう。浜名湖 (Fig. 4) では現在、特に湖心、猪鼻湖の水質汚濁が話題となっている。しかし、湖心と猪鼻湖では海水交換の機構が大きく異なるので同一には論じられない (藤村, 松田, 1983; Mazda, 1985)。ここでは湖心を対象とする。

実測例として、静岡県水産試験場浜名湖分場による長年月にわたる調査結果 (静岡県環境衛生科学研究所, 1981~1999) に基づいて、湖心の層 (0 m 層と 2 m 層の平均) および下層 (8 m 層と 10 m 層の平均) の PO_4-P の変化を Fig. 5 に示した。なお、浜名湖内の水質は、湖口の改造により1954年から1965年頃の間で大きく変化してきたが (Mazda, 1984), それ以降は Fig. 5 のように大きな経年変化はみられない。

Fig. 5 では以下の特徴が見られる。

- ① 下層の濃度は夏季に大きく増大し、冬季には減少している
- ② 上層は年間を通じて 0.01mg/l を超えない
- ③ 下層が高濃度となるのは夏季の一時期のみである
- ④ 夏季には、上層と下層の間に大きな差 (上下層の隔離) が生じる
- ⑤ 顕著な経年変化はみられない

4. 湖心の汚濁解消について

松田 (1999) によれば、浜名湖の水質形成には以下の要素が大きな役割をしている。

- ① 浜名湖の特異な地形として (Fig. 4を参照), 外海寄りに位置する浅瀬 (sill)
 - ② 潮汐による湖内外水の交流
 - ③ 淡水供給量の季節変化による密度成層性
 - ④ 潮汐, 気象擾乱により密度躍層面で生じる内部波
- これらを考慮して、以下において、湖心の汚濁解消の機構を検討しよう。

4-1. 密度成層と湖心下層水の滞留性

沿岸水は夏季の陸水増大と太陽放射により極めて強く密度

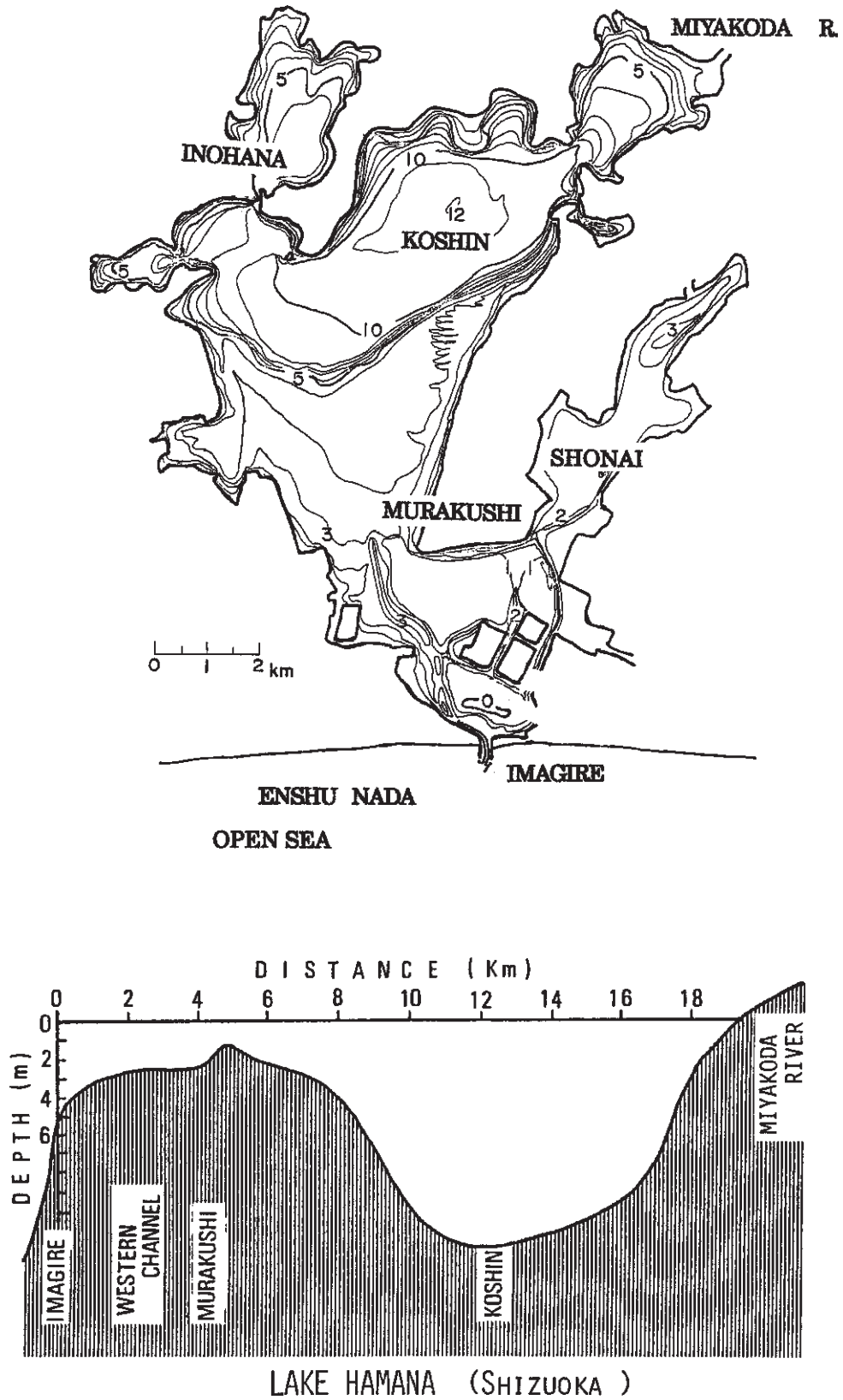


Fig. 4 Map of Lake Hamana
Upper: Submarine topography
Lower: Vertical cross-section between the bay mouth (Imagire) and the bayhead (Miyakoda)

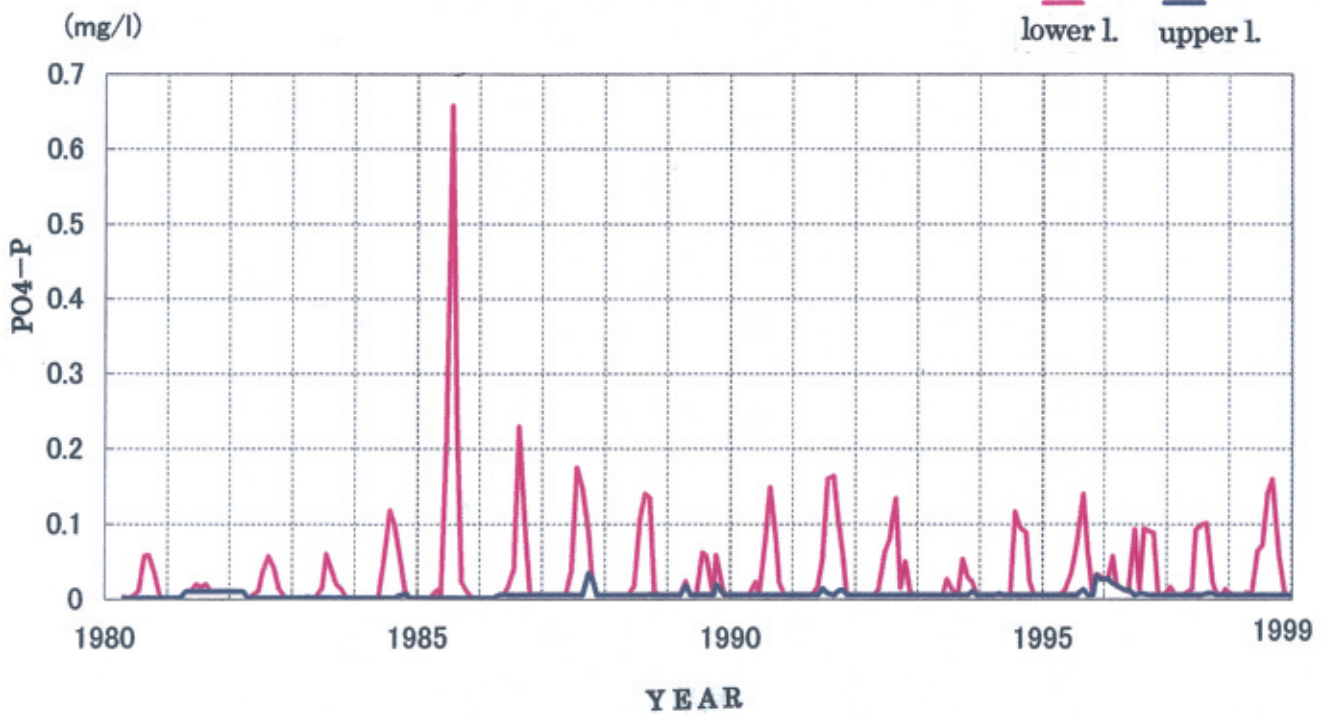


Fig. 5 Time series plots of $PO_4\text{-P}$ in a center of Lake Hamana
Blue line : upper layer
Red line: lower layer

成層化する。このようになると、陸から流入する軽い淡水は上層をそのまま外海へと流出する。浜名湖の南部域では潮汐による外海水の流入は大きい。しかし、密度成層化した夏季には、大潮期であっても、sill を越えて高密度の湖心下層には潜入できない (Mazda, 1985)。従って、sill の高さ以下の下層水は滞留傾向となる (Fig. 6)。

上層と下層とが密度躍層により隔離されると、下層水は sill の存在により外海からも孤立し、完全に停滞し、そのフラッシングタイム (T_L) は無限大となる。そして、上層水中の物質のみが陸水の流入 (q)、湖口での海水交換 (交換係数: v) によって減少する。上層の容積が小さいだけでなく、夏季には陸水量が多いことから、上層水のフラッシングタイム (T_U) は小さくなり、(2)式に従えば0.6ヶ月と概算される (Fig. 3の破線)。なお、Fig. 3に実線で示されたフラッシングタイム (T) は上層と下層を丸めて、均質として計算したものである。

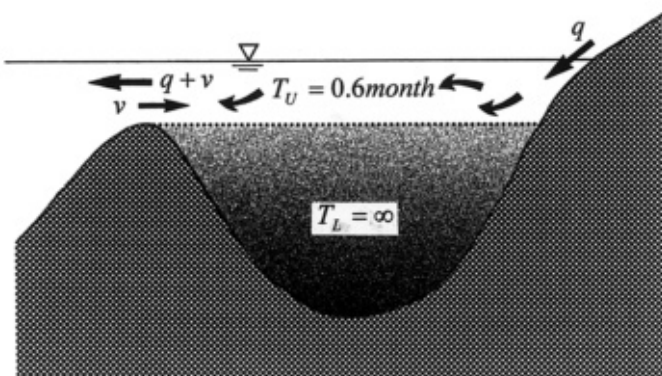


Fig. 6 Density stratification in summer in a bay with a sill

4-2. 底泥からの物質供給

長年月の間に陸域から流入した物質は sill に遮られて湖内の底 (湖心) に蓄積している。従って、陸からの負荷が止められても、この湖心の底泥が負荷源となり水中への物質の供給は続くことになる。しかし、底泥から水中に供給された物質の振舞いは対流期と成層期で以下のように異なる。

対流期モデル: 対流により鉛直混合が起こっているときに陸からの物質負荷 (負荷流量: m_L) が停止したとする。この時 ($t=0$) から対流により底泥が巻き上げられて水中の物質濃度が形成される場合を Fig. 7 に示した。Fig. 7において、 M は $t=0$ に湖底に存在している物質質量であり、 m_B は湖底から水中に単位時間に加える物質質量 (物質流量) である。水中へ物質が加入するとともに湖底の堆積物質量は(3)式に従って減少していく (Fig. 8のA領域)。

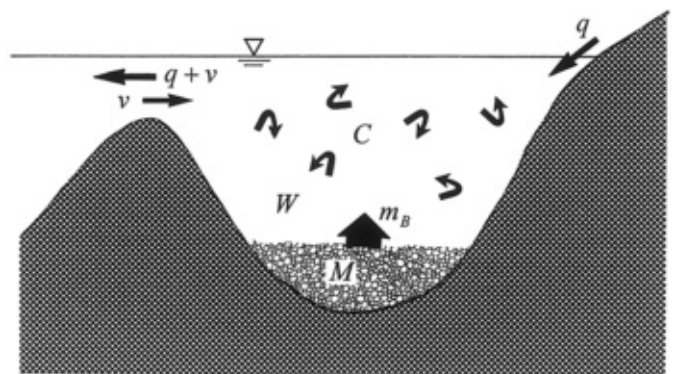


Fig. 7 Contaminant dispersion from the bottom floor in a season of convection

$$C = \frac{m_L}{q+v} \exp\left(-\frac{1}{T}t\right) + \frac{m_B}{q+v} \quad (3)$$

湖底に蓄積した物質が無くなった時 ($t=M/m_B$) から
は(4)式に従って Fig. 2 に示した振る舞いと
同様になる (Fig. 8 の B 領域).

$$C = C_2 \exp\left\{-\frac{1}{T}\left(t - \frac{M}{m_B}\right)\right\} \quad (4)$$

(4)式において、 C_2 は湖底に蓄積した物質が無くなった時
($t=M/m_B$) の物質濃度である。

成層期モデル：春から夏にかけてのほぼ1ヶ月の間に、浜
名湖湖心は、水面下3-4mに生じる密度躍層面から底まで
の8-9mの全層で貧酸素、富栄養化する (松田, 1999)。既
に述べたように、夏季の浜名湖湖心では、sill の存在によ
って密度躍層が形成され、上層と下層は隔離される。また、上
げ潮で流入する外海水は sill を越えても下層に潜入できず、
上下層の中間の密度躍層に貫入する。従って、密度躍層面より
下層には酸素の供給が行われない。潮汐による海水流動が
密度躍層面に内部波をつくると、これに伴う底層での強い往
復流が底泥 (有機物) を巻き上げる (松田, 中瀬, 2000)。
静岡県環境部生活環境課、芙蓉海洋開発 (株) (1998) は、浜
名湖の湖心におけるサーミスターチェーン観測に基づいて、
内部波による底層の強い往復流の存在を示している。しか
し、巻き上がった物質は密度躍層に押さえられて上層に達し

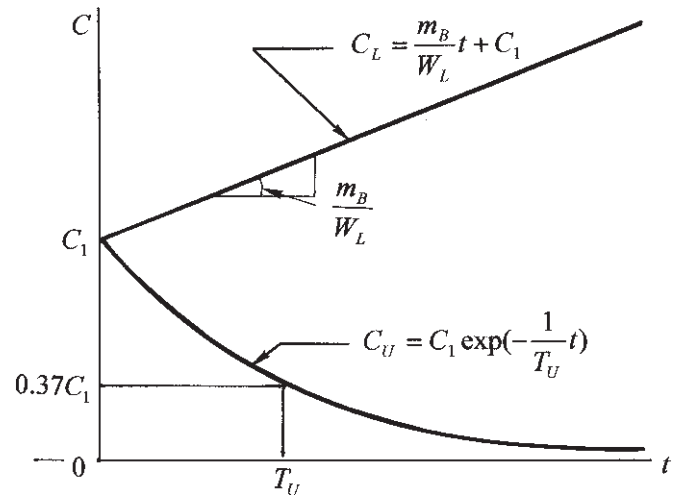


Fig. 10 Contaminant concentration changes in a season of stratification

ないので、Fig. 9 のように上層、下層はそれぞれ別個の振舞
いをする。即ち、底面から巻き上がった有機物表面での酸素
消費と栄養塩の溶出により、躍層面下の全層が貧酸素、富
栄養化する。従って、静水時における泥面上での分子拡散に比
べて、水中への巻き上がりによる酸素消費および栄養塩の溶
出は極めて速い。

上記の過程に従って、(5)式に示すように、躍層面から底
までの下層の物質濃度は Fig. 10 の C_L の変化をする。なお、
Figs. 9, 10 および (5)式において、 W_U , W_L はそれぞれ上
層水、下層水の容積であり、 C_U , C_L はそれぞれ上層水、下
層水の物質濃度、 C_1 は成層期が始まる直前の上下均一の物
質濃度である

$$C_L = \frac{m_B}{W_L}t + C_1 \quad (5)$$

一方、上層ではどこからも物質の供給がないので(1)式と
同様の(6)式に従って Fig. 10 の C_U の変化をする。

$$C_U = C_1 \exp\left(-\frac{1}{T_U}t\right) \quad (6)$$

年間モデル：浜名湖の湖心部では冬季には対流が発達し、
全層が一樣な水質となり、夏季には強い密度躍層が水面下
3-4mに発達する。そこで、上記の対流期モデルと成層期
モデルが交互に繰り返す場であると考えられる。

湖底に物質が残存している場合の年変動を対流期と成層期
を接続して Fig. 11 に示した。成層期の間は湖底からの巻き
あがりにより下層水の物質濃度は増大するが、上層の物質は
外海へと流出して濃度は低下する。成層期に下層水中に高濃
度で浮遊 (溶解) した物質は密度成層が解除されると、上層
にまで拡がり、対流期モデルに従って外海へと流出してい
く。再び成層期になると、湖底からの物質の巻きあがりによ
り下層水は高濃度となる。この間に、湖底の蓄積物質 (負
荷源) は着実に減少していくが、湖底に負荷源がある限り、
上層、下層とも年間の濃度変化の大きさは Fig. 11 に示した
ように経年的に変化しない。

湖底の堆積物質が総て無くなった場合の年変動は Fig. 12
のようになる。成層期には、湖底からの負荷がなく、また上

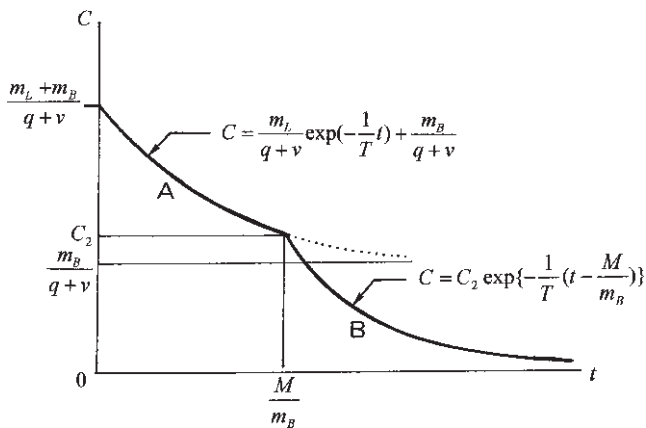


Fig. 8 Contaminant concentration change in a season of convection

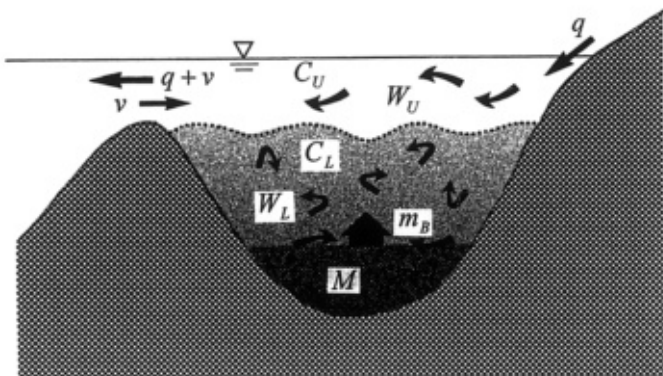


Fig. 9 Contaminant dispersion from the bottom floor in a season of stratification

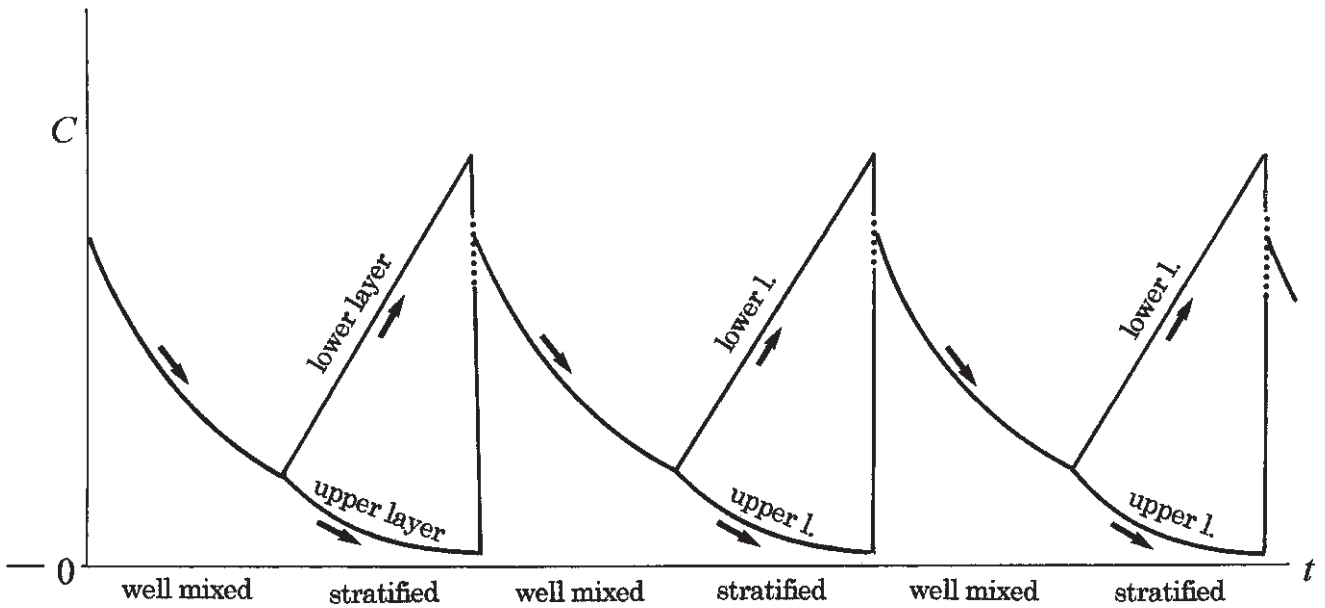


Fig. 11 Year-to-year changes of contaminant concentration with contaminant dispersion from the bottom floor

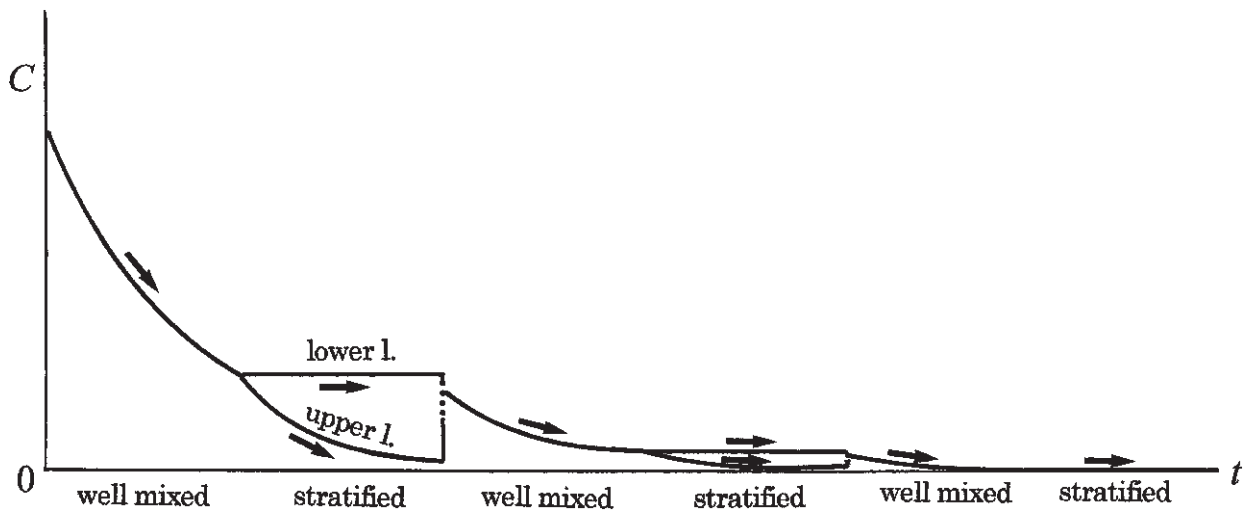


Fig. 12 Year-to-year changes of contaminant concentration without contaminant dispersion from the bottom floor

層と下層は隔離されているので、下層の物質濃度は変化しない。密度成層が解除され対流期になると、上下層は混合し、物質は外海へ流出していくので、次第に濃度は低下する。こうして、対流期の度に物質濃度は低下していく。

浜名湖では1972年に環境基準が定められ、周囲からの物質流入が規制されているが、流入負荷はゼロでなく、本論文の場合とは異なる。この流入負荷による春のブルーミングに起因して湖底にリンの供給が行われる。この場合は本論文とは異なった扱いが必要である。しかし、静岡県環境部生活環境課(1999)は、観測結果に基づく栄養塩収支の解析結果として、浜名湖湖心の夏季の富栄養化は陸上からの流入負荷では説明できず、湖底からの溶出に原因を求めなければならないと述べている。Fig. 5では、 $PO_4\text{-P}$ は気象などによる年毎の変動が大きいですが、少なくともFig. 12の減少傾向とはなっていない。これは、湖底の蓄積量はまだ消滅していないことを示唆する。消滅までの時間は過去に投棄してきた物質と巻きあがりの機構による。これらの定量的調査は、現

在、静岡県環境部生活環境課(1999)が精力的に行っている。その成果が待たれる。

5. まとめ

浜名湖をはじめ、多くの内湾で水質汚濁の解消が課題となっている。ここでは、陸からの負荷を規制してもその効果が現れるには長年月を要することを指摘した。一旦水域中に拡散した物質は外海との海水交換によって希釈されつつもその水域に永遠に残る。“覆水盆に返らず”という古人の教えが思い起こされる。さらに、陸からの負荷を止めても、これまでの過去の負荷による蓄積が負荷源となって存在することを忘れてはならない。これらの振る舞いは対象とする水域の地形、潮汐、陸水などに強く依存する。ここでは、浜名湖の湖心部を対象としたが、同じ浜名湖の一部であっても猪鼻湖には適用できない。全く異なった特性を有するからである。猪鼻湖については福本直樹ら(1998)が底層からの貧酸素水の

揚水によるエアレーション実験を現地で実施し、調査研究を続けている。

Fig. 5に見られるように、湖心の底に蓄積した過去の負荷を解消するにはさらに長年月を要すると思われる。例えば、sillの掘削などにより、外海との間の海水交換を強める手段も考えられる。しかし、それにより、湖環境の新たな変化が生じる。自然のもつフィードバック作用を十分に検討した上でなければ、これまでの人間活動の失敗を繰り返すことになる。浜名湖を汚してきたのは長い過去の人間活動である。一気に回復を願うのは身勝手である。百年河清を待つ心でじっと過去のつげに耐えることも必要であろう。

謝 辞

本論文は東京大学大学院農学生命科学研究科附属水産実験所が主催した第10回「浜名湖をめぐる研究者の会」での研究発表を整理したものである。1992年以来、例会を維持し、浜名湖の自然環境、また浜名湖の周囲の生活環境の保全に献身してこられた主催機関の関係各位に深く敬意を表す。

Fig. 5は静岡県水産試験場浜名湖分場による長年月にわたる調査結果を整理したものであり、また、Fig. 3は上記の静岡県水産試験場浜名湖分場による湖内水質調査、浜松測候所、湖西消防署での気象観測、静岡県大気保全課による土地利用状況調査、同水質保全課による産業系排水調査、同環境衛生課による水道給水量調査、同水対策課による河川流量調査などによる統計資料に基いて得られた。長年月にわたり測

定にあたられた関係機関の関係各位に敬意とともに深く感謝の意を表わす。

引用文献

- 福本直樹, 青木伸一, 岡本光雄(1998): 猪鼻湖における底層水揚水型エアレーション装置(バブルストリーマー)の現地実験. 第7回浜名湖をめぐる研究者の会, 30-31.
- 藤村昌彦, 松田義弘(1983): 浜名湖の海水交換(II) 湾曲した海峡部における海況変動とそれに対する遠心力の効果. 東海大学紀要海洋学部, 17, 1-12.
- 静岡県環境部生活環境課, 芙蓉海洋開発(株)(1998): 浜名湖富栄養化防止対策調査 一湖心における水温・流況観測結果一. 第7回浜名湖をめぐる研究者の会, 46-48.
- Mazda, Y. (1984): Year-to-year change in water exchange characteristics in a semi-enclosed bay, Lake Hamana. J. Oceanogr. Soc. Japan, 40(3), 199-206.
- Mazda, Y. (1985): Vertical two-dimensional mechanism of tidal exchange in a bay with a sill-entrance Part 1. Observations and preliminary discussion. J. Oceanogr. Soc. Japan, 41(4), 225-234.
- 松田義弘(1999): 浜名湖水のふしぎ. 静岡新聞社, 155pp.
- 松田義弘, 中瀬勝義(2000): 内湾養殖漁場における定常過程と一過性過程の役割. 水産工学, 37(2), 107-113.
- 静岡県環境衛生科学研究所(1981~1999): 静岡県公共用水域および地下水の水質測定結果.
- 静岡県環境部生活環境課(1999): 平成10年度浜名湖富栄養化防止対策調査報告書.

要 旨

閉鎖性湾においては陸からの負荷を規制してもその効果が現れるには長年月を要することが、対流期と成層期の流動モデルを結合した簡単な概念により紹介される。一旦海水中に拡散した物質は再び収束しない。また、陸からの負荷を止めても、それまでの過去の負荷による海底への蓄積が負荷源となって存在することを忘れてはならない。これらの振る舞いが水域の鉛直地形、潮汐、陸水などに強く依存することを浜名湖の湖心部を例として示した。