

琵琶湖富栄養化のモデルについて

—人間活動と栄養塩発生機構—

京都大学工学部 正員 井上頼輝

1. 水質汚濁の分類

水質汚濁には実に多くの型があり、原因物質、人間への影響が異なるので、対策やその評価も、それぞれの型に応じて選りわけなければならない。原因別には、物質型とエネルギー型、自然型と人間活動によるものにわけることができようし、水圏別には、湖沼、河川、地下水、海域の4つに分類できる。また、現象別に分類すれば、問題となった時期の早さから順に配列して、表1のような7型に分類することができよう。このうちIの濁質型からVIの富栄養型までが原因物質を持つものであり、VIIの温熱型のみが騒音や振動と同形のエネルギー汚染である。一方、Iの濁質型が主として自然汚染によるものなのに対し、他は人為汚染であるが、人為汚染にも自然原因が多少とも加わっているものが多い。これは表1の中にBackgroundの有無という形で示した。たとえば富栄養化の原因物質と考えられるリンや窒素は、家庭下水、工場廃水といった人間活動によるもののほかに、降雨、降塵（Chemical Fallout）、地下水、自然林の流出水中にも多量に含まれている。湖沼、河川、地下水、海域のどの水域に問題が起るかも、表1の第5欄に示している。

1.1 濁質型 は最も古くから有った汚染の型で、洪水時の高濁度水による貝などの Filter Feeder のへい死や、上水のろ過閉塞が見られる。また、しゃんせつ、埋立などの土木工事に伴って発生することがある。上水に対しては薬品、凝集剤の増量投与などで対処し、土木工事には凝集剤が使用されるようになってきた。

1.2 病原生物型 古来、最も恐れられて来た水質汚濁で、コレラ、チフス、赤痢などの腸管系伝染病菌により上水が汚染されると、病気の流行を見ることしばしばであった。このため欧米では下水道のない所には人間は住めないのだとする思想が定着している。しかし、抗生物質の発達と共に患者数が激減し、現在ではさほど恐ろしいものではなくなった。まだ患者の発生はあるが、年間死亡者数はほとんど零である。寄生虫も下肥を肥料として使用しなくなってから生活環境がたちまち減少した。飲料水により経口的に伝染する Virus による病気がとして Coxsackie, ECHO, Polio などか疑われており、この型の汚染は現在も存在する。下水処理、上水の滅菌処理が対策として有効で、特にオゾン滅菌が Virus に有効とされ、上水オゾン滅菌の開発が進められている。

1.3 有機物型 有機物質の生化学的な酸化により、水中溶存酸素が消費される現象で、主として BOD 物質により引き起こされるが、洗鉄廃水中に含まれる水酸化鉄のように無機物でも酸素を消費するものがある。溶存酸素が不足すると臭類はへい死し、全く酸素がなくなれば水は黒色を呈して、底泥から H_2S やメルカプタンなどの臭気を含むメタンガスが発生する。対策としては、下水の生物（2次）処理が有効である。

1.4 異臭臭 鉱物油により臭に悪臭のつく現象で、臭を煮たり焼いたりすると臭がますます強くなる。石油精製による鉱物油廃水が原因であり、API, PPI などの Oil Separator を用いて処理するが、臭の着臭限界が鉱物油分 0.02 ppm と考えられているのに対し、廃水を処理出来る限界が 10 ppm 程度であり、このため、大コンビナート周辺の海域で問題となっている所が多い。

1.5 化学汚染 (Chemical Pollution) 実に多くの原因物質と影響の型とがあり、今後も増加し続けるものと思われる。大きくわけると重金属等による無機型と PCB や農薬による有機型、それに放射性物質による三型があり、主として工業廃水、産業廃棄物、農薬によりもたらされる。この種の元素には天然に Background として存在するものも多く、たとえば水銀はかなりの量が地殻より火山活動により大気中に放出され、また、石炭、石油も水銀を含有し、燃焼と共に大気中に入り、降雨と共に水圏に流入する現象がみられる。水圏に入った水銀は、嫌気

表一-1 水質汚濁の分類

形式	原因物質	影響		対策		問題の起る水圏	Back-ground ground の有無	備考
		影響	検査項目	濃度	原因となる活動、物質			
I 濁質型	粘土・鉱物	貝類のへい死 上水の通過をく	濁度	100ppm	(自然)洪水 (自然)洪水	○ ◎	有	自然原因による古典 的汚染
II 病原性物型	寄生虫 病原菌(コレラ、赤痢) ウイルス(Cowable, ECHO)	人間の生理失調 腸胃系慢性位位感染 比較的好い腸管系の病気	虫卵 大腸菌 大腸菌	検査なし 検査なし	排泄 排泄	○ ◎	有	Backgroundは病原性物 とノゾン減菌有効
III 有機物型	BOD物質 時にCOD物質(洗剤・廃材)	水中の溶存酸素不足 生物の減少 悪臭	DO BOD	5ppm 5ppm	家庭下水、畜産廃水、工業廃水	○ ◎	有	
IV 異臭魚型	鉱物性油	臭に異常がつか 臭に異常がつか	ハルコバ サ細胞	0.03ppm	工業废水(石油精製、化学) 石油カンカー 洗車废水 モーターボート	○ △	有	臭と溶け込みにより 臭と臭気によりなる
V 化学汚染 V-1 無機型	重金属 Hg Cd Pb Cr As 有毒物質 CN	人間に及ぼす毒性作用 神経障害 腎臓障害 脳神経障害 反小腸管、血友 神経、低心、肝臓障害 人間に及ぼす毒性作用 果の交、頭痛 人間・鳥に及ぼす毒性作用	Hg Cd Pb Cr As CN	検査なし 0.1ppm 1ppm 0.5ppm 0.5ppm 1ppm	工業废水、農業の使用 工業废水 農業の製造、使用	○ ◎	有	影響濃度は環境 基準に使用したとき、本来は 生態学の影響評価 が必要
V-2 有機型	有機農業 含HDT・類 含HDT・類 含HDT・類	神経毒 肝臓障害 神経毒	有機物 有機物	1ppm 1ppm	工業废水 農業の製造、使用	○ ◎	有	地下水は特殊な汚染 汚染を待つ
V-3 放射能型	有毒有機物 PCB 放射能物質 Sr-90 Cs-137	遺伝的影響、発癌 魚種の变化 水の毒、赤潮	PCB Sr-90 Cs-137	10 ⁻⁷ g/L 2x10 ⁻⁶ g/L	工業废水 核実験廃水、原子力発電所	○ ◎	有	廃水爆発により 問題となり出した
VI 富栄養型	窒素、リン、炭素等	魚種の变化 水の毒、赤潮	窒素 リン	0.15ppm 0.02ppm	家庭下水、工場废水 肥料 畜産废水	○ ◎	有	原因物質確定せず
VII 温熱型	温熱废水	川の赤い水 生物相の変化	水温 水温	20℃ 10℃	冷却水(主に発電所)	△	有	生物相の変化により は水温上昇速度も問題

問題の起る水圏 ◎ よく起る ○ 起る △ あまり問題となる

的狀態で有機水銀となり、水産物に濃縮される。このように化学汚染には生態学的な食物連鎖や、地球化学的な元素の移行を考えて、安全性を評価しなければならぬことが多い。^{1) 2) 3)} DDTなどの含ハロゲン農業は、散布後蒸発して降雨と共に水圏に入るなどの複雑な挙動を示すが、水島に濃縮されて、これに基大な被害(無卵殻卵や無小化卵)を与える。このように食物連鎖の中で、人間より前の段階に弱い輪が存在する場合は、それが人間に対する警告として働くことがある。対策としては工業废水、廃棄物の処理、処分、弱毒性農業の開発と使用、農業としての天敵の利用などがあるが、毒物の製造を中止させることにより汚染を防止した場合もある。

なお、この型に属する自然汚染も多い。温泉などの化石水による酸性河川(北上川)や、Ca、Mgを多量に含む硬水、更にフッ素を3ppmも含有する地下水(兵庫県宝塚)などは、無機型の例である。有機型には、砂漠でサボテンが風化することによりフェノールを生成し、これが降雨時、高濃度で流出して、上水の活性炭処理を必要とさせる例(米国アリゾナ州 フェニックス市)がある。また、放射能型としては、三朝温泉などの放射能泉による河川の汚濁が考えられる。

1.6 富栄養化 湖沼や海域などで栄養塩(窒素とリン)が蓄積することにより、生物生産性が増大する現象を指すもので、粟穂はマス、ウグイ、アユ、ヤマメなどの冷水性の高級魚から、コイ、フナ、ナマズなどの暖水性の魚に遷移する。更に進めば、淡水の場合、水の華、海域の場合、赤潮といわれるプランクトンの大発生が見られ、これが死滅して腐敗すると一種のBOD物質として作用して、水中溶存酸素を減少させ、魚類をへい死させる。水は着臭、着色し、上水のろ過期そくが起る。原因物質はリン、窒素、あるいはその両者の比が重要だと見られるが、その他に炭素、鉄などの元素や Vitamine B₁₂、Biotine などが関係するとする説も有り確定していない。赤潮の場合、降雨があって海へ流入する河川の流量が増大した後に発生しやすいので、塩分濃度も利金の一つだと見られる。下水は通常の活性汚泥による2次処理では、リン、窒素はあまり除去されないため、特に処理水よりこれら栄養塩を除去する3次処理が必要である。また、家庭洗剤の中に多量のリンが含まれるので使用を制限する必要がある。

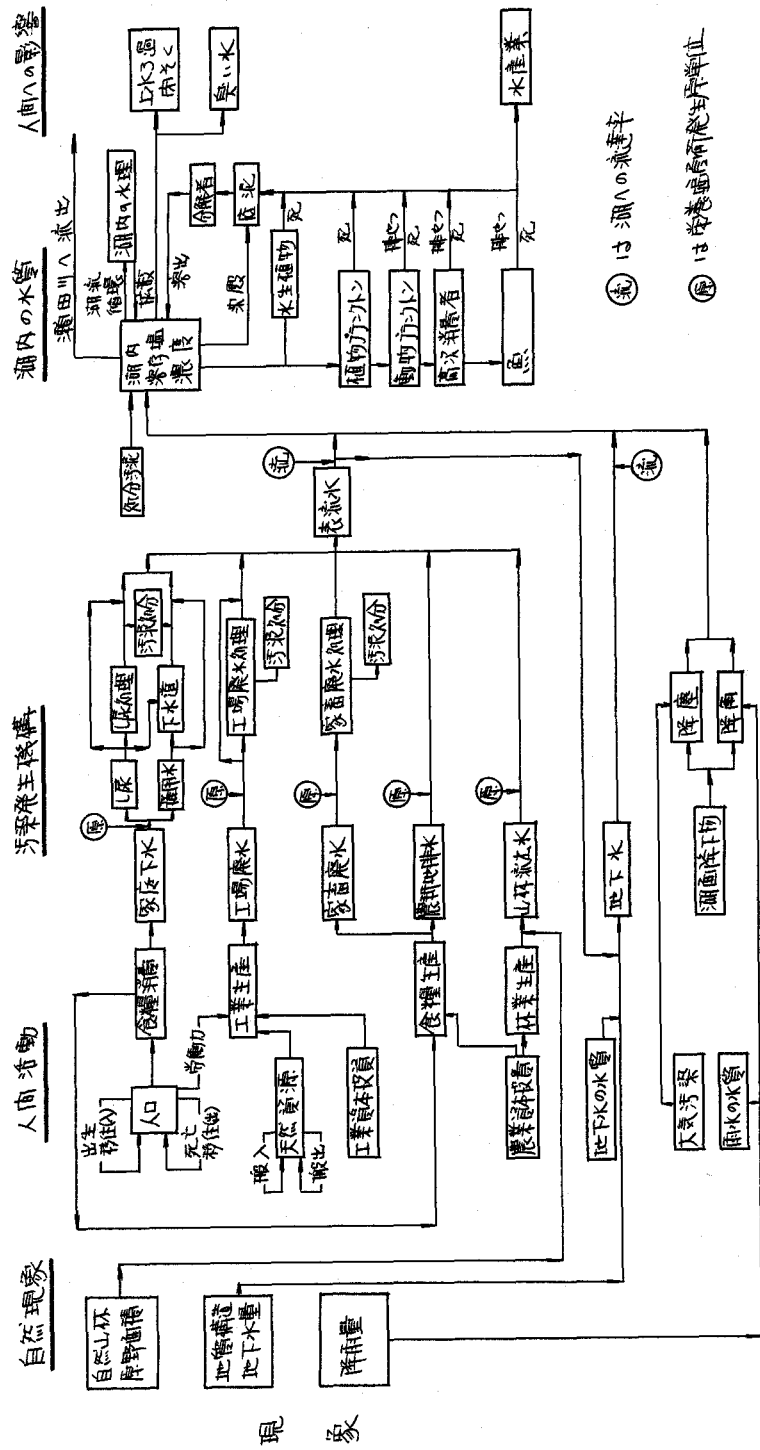
1.7 温熱废水 主として発電所の冷却水に起因する。発電所の熱効率率は33%(原子力発電)〜40%(火力発電)であり、残りは環境水より5〜7°C高い温熱废水として環境に放流される。これをさける為に、水温の低い深層から取水する場合がある。わが国においては、温熱废水の水産業への影響が問題となり、海苔の赤ぶくれ病の蔓延は、水温上昇が2°C以下でないといふ抑制されないとされている。米国においては、水圏の植物プランクトンなどの生物には普通水温があり、水温の変化により生物相が遷移するのは、一種の環境破壊であると考えて、1°Fの水温上昇をもって許容限度とする州がある。

2. システム、ダイナミックスの手法による水質汚染のシミュレーション

筆者等が若井教授の指導により、工業出荷額と人口に原単位とよばれる工業出荷額1億円当りのBOD負荷、および1人が1日に排出するBOD負荷をかけ、淀川の将来水質を予測したのは昭和39年のことである。^{4) 5)} その後、システム工学が進歩して System Dynamics の手法により、かなり大規模で複雑な現象でも、これを数式モデルで表わせるようになった。原単位法をさらに発展させて、表-1に示した水質汚染の7型を、自然現象、人間活動、汚濁発生機構、対策、水質変化、影響の各項目ごとに System Diagram に示すと図-1、図-2のようになる。図-1は富栄養化を除く汚濁を簡単に、また、図-2は富栄養化をやや詳しく示したものである。図-2について説明を試みる。

栄養塩発生機構としては、家庭下水、工業废水、家畜废水、農耕地废水、山林流出水、地下水の7原因が考えられる。家庭下水は人口を基数として、これに1人および雑用水の栄養塩負荷発生量をかけ、工業废水は各種工業出荷額をもとに業種別原単位を、家畜废水は牛、豚、鶏の頭数に原単位をかける。農耕地废水についてはこれを田と畑にわけ、栄養塩発生量として施肥料に比例する部分と、耕地面積に比例する部分とにわけて負荷発生量を考える。後者は主として降雨、降塵中の栄養塩に起因するものと考えられる。山林流出水は山林面積に原単位

富栄養化のシステム・ダイアグラム



① は湖への流速率
② は栄養塩の削減率



をかけ、地下水は地下水の流量にその栄養塩濃度をかけて求める。湖面降下物は、単位面積の湖面に年間に降下する降雨、降下塵中の栄養塩に湖面積をかける。

さて、土木学会琵琶湖の将来水俣小委員会には筆者も参画したが、将来の人口、工業出荷額、家畜頭数、農耕地面積、山林面積などの基数は、滋賀県により推定された数値を使用した。しかし、人口増加・工場立地の抑制、無機肥料の有機肥料への転換など、富栄養化防止の根本的な対策を考えるには、これら基礎となる数値も、人間活動の1種としてモデル化する必要が生ずる。このようなモデル化は社会学、経済学の知識をかなり必要とし、正確なモデルを得ることは容易ではないが、J.W. Forrester が *Industrial Dynamics*⁶⁾, *Urban Dynamics*⁷⁾, *World Dynamics*⁸⁾ にありてその基礎的な考え方を示し、D.L. Meadows はこれを発展させて有名なローマクラブの論文「成長の限界」のもととなった *DYNAMO III* の Model を作り上げた。⁹⁾ また、これを滋賀県に適用した例として西川等の研究がある。¹⁰⁾ しかし、図-2 に示し

表-2 家庭下水の栄養塩負荷発生量原単位

年 度			25	30	35	40	45	50	55	60
窒 素 (kg/日)	し 尿		7.5	8.0	8.5	8.8	9.0	9.0	9.0	9.0
	雑用水		2.1	2.3	2.5	2.7	3.0	3.2	3.3	3.5
	合 計		9.6	10.3	11.0	11.5	12.0	12.2	12.3	12.5
リ ン (kg/日)	し 尿		1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.13	1.17	1.20
	雑用水		0.40	0.40	0.40	0.62	0.70	0.93	0.97	1.00
	合 計		1.42	1.44	1.46	1.70	2.00	2.06	2.14	2.20

表-3 工業廃水の原単位

業 種	窒素負荷 kg/出荷額億円年	リン負荷 kg/出荷額億円年
食 品	1.53	0.1
織 維	0.55	0.056
紙・パルプ	0.726	0.0188
化 学	6.425	0.358
鉄 鋼	0.206	0.00448
非鉄金属	0.0869	0.00296
窯業土石	0.0670	0.00663
皮 革	8.065	0.251
機 械	0.188	0.0457

図-3 全県人口の経年変化

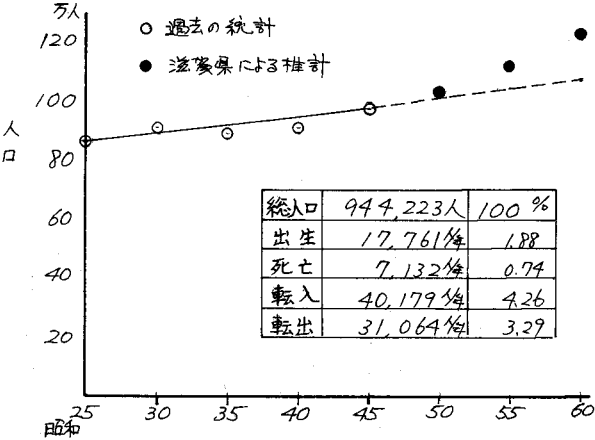


表-4 家畜廃水の原単位

種 別	窒素 (g/頭・日)	リン (g/頭・日)
牛	28	5.6
豚	31.3	20.5
鶏	0	0

た富栄養化の System のうち、次論文で定数予定の湖内の水俣の部分に、生物学的要素を多分に含むため精度が低く、従って全体の精度の Balance を考えるとき、人間活動の部分でいたずらに高い精度を求め、複雑な Model を使用するよりは

表-5 農耕地廃水の原単位

成分	土壌条件	算 出 式
窒素	水 田	$0.0576(\text{kg/ha}) \times \text{水田面積}(\text{ha}) + 0.10 \times \text{施肥成分量}(\text{kg/ha})$
	畑、樹園地	$0.0647(\text{kg/ha}) \times \text{畑面積}(\text{ha}) + 0.30 \times \text{施肥成分量}(\text{kg/ha})$
リン	水 田	$0.00354(\text{kg/ha}) \times \text{水田面積}(\text{ha}) + 0.013 \times \text{施肥成分量}(\text{kg/ha})$
	畑、樹園地	$0.00191(\text{kg/ha}) \times \text{畑面積}(\text{ha}) + 0.013 \times \text{施肥成分量}(\text{kg/ha})$

表-6 人間活動による栄養塩負荷発生量 (kg/d)

年度	昭和25年	30	35	40	45	50	55	60
窒素	16056	18207	19343	20359	21544	26806	31441	35723
リン	1724	1887	1905	2236	2711	3308	3903	4488

種々の対策が判定しやすいような、比較的簡単なModelを使用する方がよいことがわかる。そこで、人間活動の部分には単純なModelを考え、簡略化するために考慮しなかった要素についてはそれぞれ特記した。一例として、人口の変動について説明する。

2.1 人間活動

2.1.1 人口の変動 人口を $P(t)$ 、出生率を $BR(\text{‰/年})$ 、県外からの転入率を $MI(\text{‰/年})$ 、死亡率を $DR(\text{‰/年})$ 、県外への移住率を $MO(\text{‰/年})$ とすると

$$P_{n+1} = (1 + BR + MI - DR - MO) P_n \quad (1)$$

BR , MI , DR , MO は物価的な豊かさ、食糧、環境汚染、混雑度などにより変化することが予想されるが、ここでは一定としておく。滋賀県の人口は、過去40年間の平均で年間1%程度の微増を示しているだけであるから、これら係数を一定と考えても大きな誤差は無かろうが、ただ、将来汚染が進んだとき、滋賀県よりさらに環境汚染のはけい、大阪地方からの転入率が増加することが考えられる。

$(BR + MI) - (DR + MO)$ の数値として 0.00346 ととり、人口の変動を計算すると図-3 のようになる。

滋賀県による将来人口の推定は、過去の人口増の Trend よりは大きめに見積っていることがわかる。

2.2 原単位 原単位としては、土木学会琵琶湖の将来水債小委員会(昭和48年度)で用いた数値をそのまま適用する。

2.2.1 家庭下水 家庭下水の原単位を表-2に示す。し尿の単位は経年的にほとんど変化しないが、雑用水の単位は個人所得と大きく関連するので、かなり変化し、増大の傾向をみせる。雑用水に起因するリン負荷はほとんどが家庭洗剤のBilderとして使われるリン酸塩によるものである。

2.2.2 工場廃水 原単位を表-3に示す。中西¹⁾が瀬内海沿岸の工場について調査した結果を、滋賀県の工場廃水調査をもとにして若干修正したものである。食品、繊維、パルプ、化学、鉄鋼、非鉄金属、窯業・土石、皮革、機械の9業種の廃水の中にリン、窒素が見られるが、中でも食品、化学工業の原単位が大きい。皮革も大きな原単位を持つが、工業出荷額が小さいので、負荷発生量は少ない。

2.2.3. 家畜 牛、鶏、豚について考える。牛は牧場等の土地と直結して飼育されるので、その排泄物もほとんど土地に還元される。ここでは、排泄物の10%が流出するものとする。豚は土地と関係なく密集して人工飼料により飼育されるので、排泄物は100%流出してくるものと考えねばならない。豚の

表-7 転入を禁止した場合

負荷 kg/d								
年度	昭和25年	30	35	40	45	50	55	60
窒素	16056	18207	19343	20359	21544	25258	29046	32575
リン	1724	1887	1905	2236	2711	3032	3457	3828

表-8 洗剤を改良した場合

負荷 Kg/日								
年 度	25	30	35	40	45	50	55	60年
室 業	16056	18207	19343	20359	21544	26806	31441	35723
リ ン	1380	1546	1569	1708	1879	2318	2829	3294

原単位は残飯、厨芥、配合飼料のいずれによって飼われているかに大きく影響されるが、滋賀県では配合飼料によるものが多く、それに対応する表-4の値を採用しておく。鶏の糞はほとんど肥料として使用されるので、全く流出しないものとした。

2.2.4 農耕地 無施肥と施肥のライミキターに稲を植え、流出してくる滲透水中の栄養塩濃度を求めたところ、数年間無施肥の状態では放置されていたにもかかわらず、無施肥区からもかなりの栄養塩の流出が見られた。これは、施肥が数年以上という極めて長い期間にわたり土とイオン交換現象を起しつ、ゆつくりと溶出することや、土壤中にリンが含まれていることが主な原因と考えられるが、このほかにも降雨、降塵中にかなり大量の栄養塩が含まれており、これが寄与しているものと思われる。そこで、農耕地からの栄養塩流出は、表-5のように施肥量に比例する部分と、田畑の面積に比例する部分とにわけて考えた。

2.3 対策 栄養塩の負荷発生量を減少させる方法として、し尿、下水処理が考えられる。し尿処理は、窒素については便槽で10%、処理で30%が除去され、通算37%が除かれるものとする。リンは4割が除去される。下水処理は、し尿と雑用水を合わせたものに対し、窒素が35%、リンが50%除去されるものとする。これらの結果をまとめて、人間活動による栄養塩負荷量を示したものが表-6である。

3. 対策の効果

栄養塩負荷発生量を減少させる対策として、県内への人口転入の禁止と、家庭洗剤を原液で使用する手段の効果を検討してみよう。転入人口の規制は(1)式で $MI=0$ とおいてやればよい。この場合の栄養塩負荷発生量は表-7のようであり、この対策は栄養塩負荷をただか9%減少させるのみであまり有効でないことがわかる。これに対し、家庭洗剤をBilderを含みぬ液状のものと切りかえれば、表-2におけるリンの雑用水負荷原単位が零となり、負荷発生量は表-8のようになる。人口規制よりこちらの方がまだ幾分は効果的であるが、これもリン発生負荷量を26%減少させるのみであまり有効とはいえない。なお、このような対策は図-2の「人間への影響」の項で効果を判定すべきであり、そのためには、湖内の水質のモデル化を急がねばならない。これに関しては、衛生工学討論会で発表したいと考えている。

- (1) 井上頼輝 重金属を含む汚泥の海洋処分安全性について、水処理技術 12巻11号 25~31頁 昭46年11月
- (2) 井上頼輝 重金属を含む汚泥による埋立の安全性について、水処理技術 13巻8号, 17~25頁 昭47年8月
- (3) 井上頼輝 重金属を含む汚泥の海洋処分安全性について、水処理技術 15巻8号 昭49年8月
- (4) 岩井重久, 井上頼輝, 寺島泰 淀川の将来水質, 下水道協会雑誌 3巻25号 26~36頁 昭41年6月
- (5) 建設省近畿地方建設局, 淀川-その水質の将来- 昭和49年5月
- (6) Forrester, Jay W., Industrial Dynamics; The M.I.T. Press, Cambridge Mass., 1961
- (7) Forrester, Jay W., Urban Dynamics; The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1969
- (8) Forrester, Jay W., World Dynamics; Wright-Allen Press, Cambridge, Mass., 1971
- (9) Meadows, D. L. et al., Toward Global Equilibrium; Wright-Allen Press, Cambridge Mass., 1973
- (10) 西川禎一他 地域分析と計画のためのシステムシミュレーション, 日本自動制御学会 第18回学術講演会論文集, 137頁 49年5月