

水質シミュレーションモデルに関する研究（第7報）

— 内場ダム —

Studies on Simulation Model of Water Qualities (VII)

— In case of Naiba Dam —

久保 正弘
Masahiro KUBO

冠野 禎男
Yoshio KANNO

山本 務
Tsutomu YAMAMOTO

増井 武彦
Takehiko MASUI

県内の主要湖沼である内場ダムを対象に、水質シミュレーションモデルの作成を検討した。流況モデルとしては、1ボックス2層モデル、物質循環モデルとしては、溶解性、非溶解性の2態からなるモデルとした。予測項目としては、COD、T-N、T-P、DO、クロロフィル-aとした。現況の再現性の検討は、平成元年度について行い、COD、DOについては比較的良好な結果が得られたが、T-N、T-P、クロロフィル-aについては十分な再現性は得られなかった。その原因として、(1)内場ダムの場合、浸透水として流入する水質の影響と思われるが、T-Nの大部分はNO₃-Nであり、その流入量の把握が十分できていない、(2)当モデルでは、NO₃-Nが大量に存在し、生物の利用できるPO₄-Pが非常に少ないという条件下では、生物による内部生産を適切に表現できない、等が考えられる。内場ダムにおけるモデルを充実させるためには、浸透水に関する調査、当モデルの生物の内部生産に関する項を生物種も考慮したモデルへの変更などが必要であるように思われた。

はじめに

本県では、昭和62年度より湖沼富栄養化対策事業を実施しているが、その事業の一環として、湖沼の水質シミュレーションモデルの作成を検討してきた。すでに、府中湖、満濃池については、当センター所報^{1)~6)}等で報告している。今回は、県下では3番目の規模の湖沼である内場ダムについてモデル化を試みたので、その結果について報告する。

解析方法

1. 解析対象湖沼

内場ダムの周辺図および諸元については、図1および表1に示すとおりである。

2. 解析のための現地調査地点および調査項目

調査地点は図1に示すとおりであり、調査期間は平成元年4月から平成2年3月までの1年間である。

調査項目は前報⁸⁾で報告したとおりである。

3. 解析期間

平成元年4月から平成2年3月までの1年間とした。

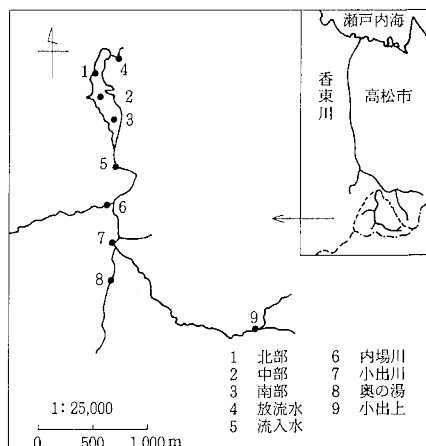


図1 調査地点図

表1 内場ダムの諸元

河川名	香東川支流 内場川	河川名	香東川支流 内場川
集水面積	28.0 km ²	洪水調節容量	2,500,000 m ³
湛水面積	486,000 m ²	かんがい用 容	5,750,000 m ³
周長	6,500 m	上水道用容量	1,450,000 m ³
洪水距離	2,300 m	計画洪水流量	420 m ³ /sec
総貯水量	7,400,000 m ³	最大放水量	500 m ³ /sec
有効貯水量	7,200,000 m ³		

4. 解析項目

COD, T-N, T-P, DO, クロロフィル-a(Chl-a)の5項目

結果および考察

1. 現地調査結果について

現地調査の詳細なデータは、前報⁸⁾で報告したとおりであるが、内場ダムの上流域からダムへ流入する水質の各項目の変動を示したのが図2である。図によると、ほとんどの項目が流入口より上流では、流入口水質よりは悪いが、流入口まで流下する間に浄化されていることがわかった。この水質がダム内に入ると、 PO_4-P 以外の項目については悪くなる傾向が認められた。このことは、ダム内での生物活動等によるものと考え、モデルの作成を行った。

2. 予測モデルに使用する貯水量等について

県内場ダム管理事務所の記録⁹⁾から月平均貯水量、流入量、流出量、および降雨量をもとに水の収支を合わせ、流入量については次式のような配分を行った。

$$\text{流入量} = \text{集水量} + \text{直接降雨量} + \text{事業場排水量}$$

図3に水の収支を示す。

3. 予測モデル

前報⁶⁾に従い、流況モデルおよび物質循環モデルを作成した。

3-1 流況モデル

内場ダムは、図1のとおり細長い形状をしており、河川の流入している側から図1の調査地点3付近までは水深13m程度と比較的浅く、地点1、地点2では水深が20mを越えるような地形になっていること、さらには、地点1、2、3における測定項目の濃度差がほとんどないこと、地点1、2と地点3とでは、底質に違いがあることなどから図4に示すような1ボックス2層モデルを作成した。

3-2 物質循環モデル

前報⁶⁾と同様に、図5に示すようなモデルを作成した。

3-3 流入負荷

内場ダムへの流入負荷は次のとおりとした。

$$\text{流入負荷} = \text{集水} + \text{降雨(直接, 降下物)} + \text{排水}$$

集水, 直接の降雨(降下物), 排水は上層へ入るとした。

た。

流入負荷(集水, 排水)は、前報同様に、溶解性および非溶解性に分け、クロロフィル-aによる変換を行い、COD, T-N, T-Pは次のような式とした。

$$\text{COD} = \text{dcod} + \text{pcod} + \text{chl-a中のCOD}$$

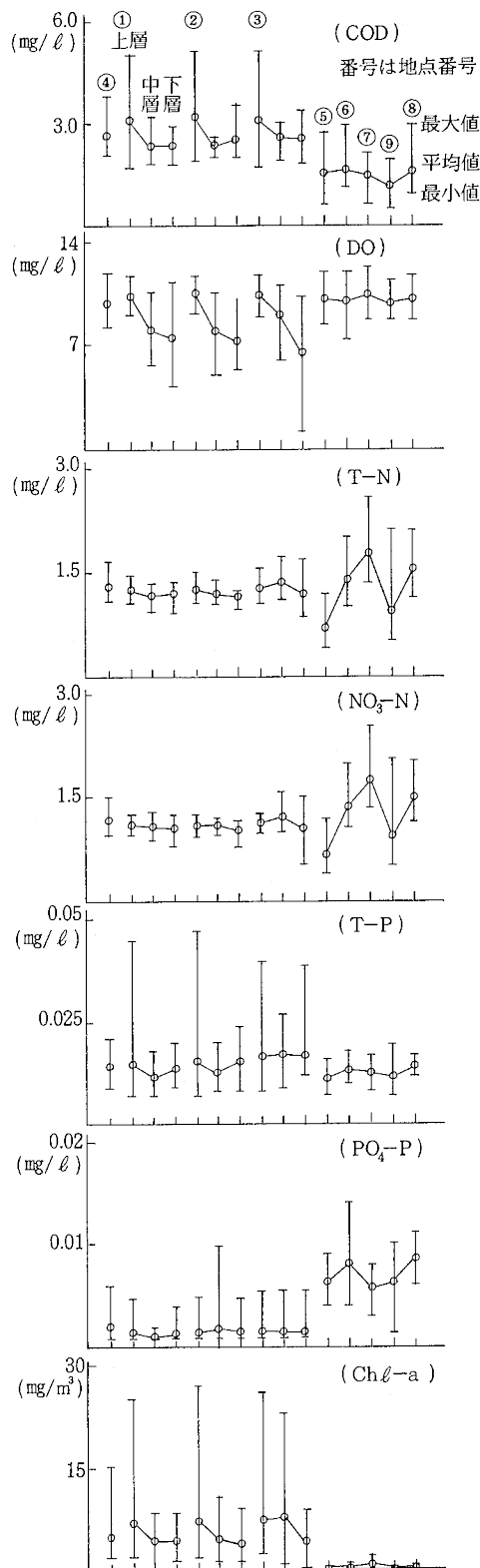


図2 現地調査結果図

$T-N = dtn + ptn + chl-a$ 中の $T-N$

$T-P = dtp + ptp + chl-a$ 中の $T-P$

3-4 入力データ

入力データの主なものは、表2のとおりである。

3-5 パラメータおよび物質収支

シミュレーションに使用したパラメータおよび物質収支式は、表3に示すとおりである。個々のパラメータは前報⁶⁾を参考にしたが、最終的には、再現性テストを繰り返す中で、最適値とした。

なお、予測計算プログラム内では、集水による流入負荷については、L-Q曲線モデルを用いて、水量による重みづけを行った。係数のうちbについては、1.00~1.20としたが、これは表4に示す現地調査結果をもとに、再現性チェックを行って決定したものである。

3-6 計算結果

計算機はPC-9801シリーズを用い、プログラム言語はC言語を用いた。

計算方法は前報⁶⁾と同様に、12時間ステップで、1年間の計算を行った。結果を図6に示す。

◇CODについて

CODは濃度レベルとしては、実測値と同程度の計算結果となり比較的よい再現性が得られた。

◇T-Nについて

T-Nは濃度レベルとしては、実測値より低い計算結果となり、経月変化もほとんど再現できなかった。

◇T-Pについて

T-Pは濃度レベルとしては、実測値よりやや高い程度の計算結果となったが、経月変化は10月以降でずれが大きくなった。

◇DOについて

DOは濃度レベルとしては、実測値とほぼ同程度の計算結果であり、経月変化もほぼ再現できているように思われる。

◇chl-aについて

chl-aは濃度レベルとしては、実測値よりやや低い計算結果となり、経月変化についても、T-Pと同様に実測値の大きな変動は再現できなかった。

◇底泥中のCOD, T-N, T-Pについて

今回、図には入れていないが、底泥中のCOD, T-N, T-Pは上層側、下層側ともわずかながら増加傾向であり、増加の割合としては、上層側のほうがやや大きいという計算結果となった。

以上、内場ダムについて予測した結果について述べたが、十分な再現性は得られていない。

3-7 当モデルの問題点についての考察

まず、T-Nの濃度が年間を通じて高濃度でほとんど変

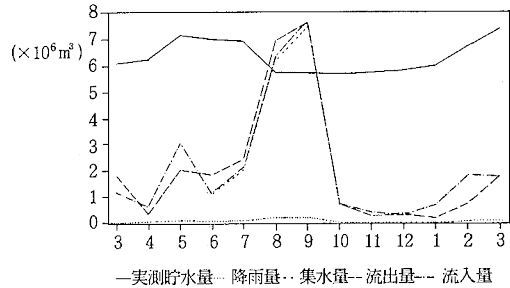


図3 水収支図

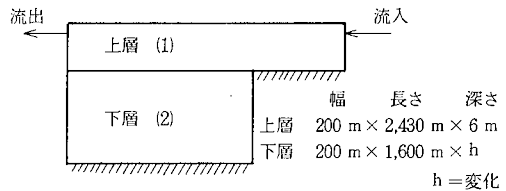


図4 流況モデル図

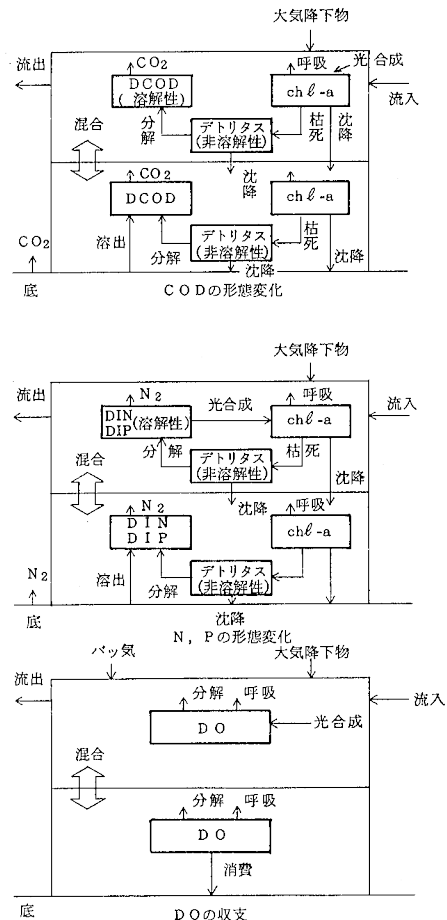


図5 物質循環モデル図

表2 入力データ一覧

No	項目	単位	入力データの 数	データの出所
1	貯水量	m ³	13カ月分	県内場ダム管理事務所(実測値)
2	排水量	m ³ /月	"	届出値から計算
3	全流入量	m ³ /月	"	県内場ダム管理事務所(実測値)
4	全流出量	m ³ /月	"	"
5	集水量	m ³ /月	"	"
6	日射量	MJ/m ² /日	"	高松地方気象台(実測値)
7	降雨量	mm/月	"	県内場ダム管理事務所(実測値)
8	上層水温	°C	"	現地調査(実測値)
9	下層水温	°C	"	"
10	透明度	m	"	"

表3 パラメータおよび物質収支式

ダム長(m)	la=2430
ダム幅(m)	200
上層の長さ(m)	ln1=2430
下層の長さ(m)	ln2=1600
上層水深(m)	hu=6.0
下層水深(m)	貯水量により変化する
上層底面積(m ²)	sl=ln1*200-ln2*200 (全ダム面積 486,000m ²)
下層底面積(m ²)	s2=ln2*200
集水面積(m ²)	ashusui=28,00,000
上下混合係数(m/day)	ex
	ex1, ex2, ex3 3種の係数
	ex1=0.3, ex2=0.6, ex3=1.2
混合係数の選択温度差	tmp1=6.0°C tmp2=12.0°C
tms < tmp1の場合	ex=ex3
tms > tmp2の場合	ex=ex1
tmp1 < tmp2の場合	ex=ex2
飽和酸素濃度(g/m ³)	mo=475.0/(33.5+tm[i])
温度係数(-)	ft=tm[i]/27.0
嫌気度(-)	ken=(mo-tdo[i])/mo
死亡率(1/day)	pl=0.05
	pd=pl
呼吸速度(1/day)	pr0=0.03
	pr=pr0*ft*tdo[i]/mo
変換率	
COD/chl-a(-)	zr=70.0
T-N/chl-a(-)	zn=6.0
T-P/chl-a(-)	zp=1.0
沈降速度(m/day)	h0=0.12
COD分解速度(1/day)	k20=0.02
	k2=k20
デトリタスからのCODの回帰速度(1/day)	c20=0.01
	c2=c20*ft
デトリタスからのNの回帰速度(1/day)	n20=0.002
	n2=n20*ft
デトリタスからのPの回帰速度(1/day)	p20=0.001

底泥からの溶出COD(g/m ² /day)	p2=p20*ft
	cb0=0.005
底泥からの溶出T-P(g/m ² /day)	cb=cb0*ken
	pb0=0.001
底泥からの溶出T-N(g/m ² /day)	pb=pb0*ken
	nb0=0.002
	nb=nb0*ken
底泥からの溶出係数(-)	
上層の場合	kan=0.125
下層の場合	kan=0.25
光合成速度(1/day)	
深さ(m)	z=2.0
比増殖速度定数(1/day)	k=1.40
日射量(cal/cm ² /day)	rr=sd ^x [6]*100/4.184
光の消散係数(1/m)	e=1.0/sd ^x [10]
日射量に関する係数(-)	fr=rr*(1-exp(-e*z))/(356.0*e*z)
	t_n=dtn[i]/v[i]
	t_p=dt ^p [i]/v[i]
	ph=k*fr*ft*t_n/(0.01+t_n)*t_p
	/(0.0009+t_p)
底泥中でのCOD分解速度(1/day)	kb=0.0005
有機物の分解によるDO消費速度(1/day)	kc=0.005
脱窒に関する係数(1/day)	nn=0.02
降下COD, T-N, T-P量(g/m ² /day)	
COD	rn ^{cod} =0.2
T-N	rn ^{tn} =0.08
T-P	rn ^{tp} =0.002

各ボックスの各態の初期濃度(g/m³)現地調査の上中層の平均値を使用

溶解性 COD	d ^{cod} =2.0
非溶解性COD	p ^{cod} =0.5
溶解性 T-N	d ^{tn} =1.2
非溶解性T-N	p ^{tn} =0.1
溶解性 T-P	d ^{tp} =0.0009
非溶解性T-P	p ^{tp} =0.012
クロロフィル-a	bc=0.0047
DO	so=11.0

底泥中の各態の初期濃度(g/kg) 底泥の実測値(現地調査による)

上層底泥COD	csc[1][1]=15.5
T-N	csn[1][1]=2.07
T-P	csp[1][1]=0.31
下層底泥COD	csc[2][2]=22.7
T-N	csn[2][2]=2.53
T-P	csp[2][2]=0.53

水温の初期値 現地調査の3月のデータ

排水による流入濃度(g/m³)各濃度は平均値より (排水量 2事業場分 4920m³/月)

溶解性COD	haid ^{cod} =10.0	非溶解性	haip ^{cod} =3.0
溶解性T-N	haid ^{tn} =12.0	非溶解性	haip ^{tn} =0.0
溶解性T-P	haid ^{tp} =2.6	非溶解性	haip ^{tp} =0.0
クロロフィル-a	haich=0.0		
DO	haido=10.0		

集水による流入濃度(g/m³)各値はL-Q曲線モデルの係数aより

溶解性COD	shud ^{cod} =0.5	非溶解性	shup ^{cod} =0.17
溶解性T-N	shud ^{tn} =1.07	非溶解性	shup ^{tn} =0.01
溶解性T-P	shud ^{tp} =0.0046	非溶解性	shup ^{tp} =0.0034
クロロフィル-a	shuch=0.000057		
DO	shudo=12.0		

バク気によるDOの負荷量(g/day)
 $airf=4.32*0.05$ (表層ばく気層5cm)

注) 各パラメータの値は、主に文献6)を参考にした各記号はプログラム内で使用している変数名である。

各ボックスにおける計算式⁹⁾

生物量(クロロフィル-a)=現存量+流入分+(光合成-枯死-呼吸)-流出分-沈降+混合+上層からの沈降

溶解性COD=現存量+流入分+デトリタスの分解+溶出-無機化-流出分+混合+降雨

非溶解性COD=現存量+流入分+生物の枯死-沈降-デトリタスの分解-流出分+混合+上層からの沈降

溶解性N=現存量+流入分+デトリタスの分解+溶出-生物による利用-無機化-流出分+混合+降雨

溶解性P=現存量+流入分+デトリタスの分解+溶出-生物による利用-流出分+混合+降雨

非溶解性N=現存量+流入分+生物の枯死-沈降-デトリタスの分解-流出分+混合+上層からの沈降

非溶解性P=現存量+流入分+生物の枯死-沈降-デトリタスの分解-流出分+混合+上層からの沈降

DO量=現存量-有機物の分解によるDOの消費+(光合成-呼吸)+流入分-流出分+バク気+混合-底泥での消費+降雨

底泥中のCOD=現存量+沈降-溶出+生物の沈降-分解

底泥中のN=現存量+沈降-溶出+生物の沈降-分解

底泥中のP=現存量+沈降-溶出+生物の沈降

$COD濃度(g/m^3)=(溶解性COD+非溶解性COD+生物量のCOD換算値)/ボックス容積$

$T-N濃度(g/m^3)=(溶解性N+非溶解性N+生物量のN換算値)/ボックス容積$

$T-P濃度(g/m^3)=(溶解性P+非溶解性P+生物量のP換算値)/ボックス容積$

$クロロフィル-a濃度(g/m^3)=クロロフィル-a量/ボックス容積$

$DO濃度(g/m^3)=DO量/ボックス容積$

底泥中のCOD濃度(g/kg)=底泥中のCOD/(底面積*泥層10cm)

底泥中のT-N濃度(g/kg)=底泥中のN/(底面積*泥層10cm)

底泥中のT-P濃度(g/kg)=底泥中のP/(底面積*泥層10cm)

化しない現況について考えてみると、T-NのほとんどがNO₃-Nであること、これは、前報⁶⁾の満濃池への流入水についても見られたことであり、地質による影響ではないかと考えられる。そこで、内場ダム周辺の地質¹⁰⁾を調べてみると、図7のとおりである。内場ダムは、讃岐山地の麓に位置し、その地質は泥質頁岩であり、透水性は小さい。上流域の地質は砂岩頁岩互層ということで、透水性のよい地質¹²⁾となっていることがわかる。このことから、上流域での降雨の多くが浸透水の形でダムへ流入しているのではないかと考えられる。また、浸透水の場合NO₃-Nの濃度が高いと言われていることから¹¹⁾、ダム内部の濃度と同程度のNO₃-Nが流入しているのではないかと考えられる。このように考えると、ダム内部のT-Nの濃度が降雨量にあまり影響されず、ほとんど一定濃度であるという現況の説明がつくように思われる。また、NO₃-Nの濃度がプランクトンの異常増殖⁷⁾などがあっても減少しないのは、常に過剰に存在するためであろうと考えられる。今回行った現地調査での流入水は、

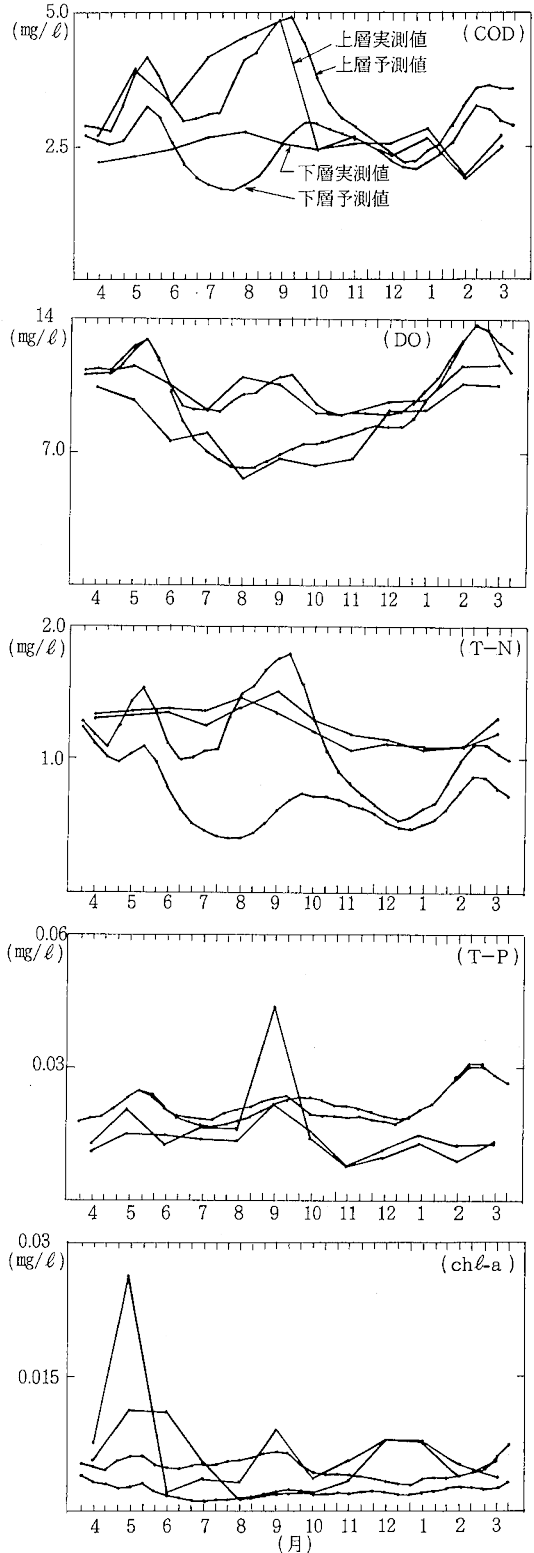


図6 予測結果図

表面水だけの調査にとどまっております、浸透水についての調査が必要である。

次にT-Pであるが、ダム内部の濃度は通常0.01 mg/ℓ程度と低く、PO₄-Pは0.001 mg/ℓ以下である場合が多かった。このりん不足の影響で生物の増殖がおさえられ、よい水質が維持されているものと思われる。りんは土壌粒子などへ吸着されやすいため、浸透水よりは、多量降雨の場合の表面水からの流入が多いものと考えられ、降雨量の多かった9月にT-P、PO₄-P濃度とも高くなっていることの説明ができるように思われる。今のところ、流入するりんの量が少ないために、ダム内に入った場合、PO₄-Pはすぐに消費され、低濃度で推移している。しかし、りんが多量に流入した場合、NO₃-Nが大量に存在していることから生物の大増殖の恐れがあり、水質の悪化が懸念される。

次にchl-aであるが、5月の淡水赤潮発生⁷⁾の時以外は5 mg/m³の低濃度で推移している。一般に生物の増殖は水温、日射量の関数として表現される。すなわち、夏場に増殖し冬場は減少するということであるが、内場ダムの場合この傾向がほとんど見られない。ただ、5月の淡水赤潮の発生した時に高濃度となっただけであった。この時の水温は17°C、日射量は16MJ/m²/日であり、6月から9月の水温22~27°C、日射量12~18MJ/m²/日に比べて、生物の増殖にとって好条件とは言えない時期に発生したことになり、発生要因の究明が待たれるところである。このようなケースについては、当モデルでは、組み込めなかったが、光合成速度に関する係数から温度係数はずすと、図8のように5月の増殖の傾向が幾分見られる。現地調査の測定項目としてプランクトン沈でん量を測定しているが、これによると、5月~9月の期間は生物の増殖が認められ、chl-aとの相関はよくない。このことは、内場ダムの場合、chl-aだけでは内部生産に関する説明はできないことを示唆しており、生物種を考慮したモデルにする必要があるように思われる。しかし、現状では、生物量が少ないため、生物の活動による水質への影響は小さいものと思われる。

COD、DOについては、当モデルでも現況をほぼ再現できるが、先にも述べたように、生物による寄与は小さく、CODでは流入水(表面水)、DOでは水温が大きく関与しているものと考えている。

以上、内場ダムでの当モデルの計算結果あるいは問題点について述べたが、さらに検討しなければならないものとして流入水(浸透水)の濃度であり、次がモデルにおける生物に関する部分の見直しである。

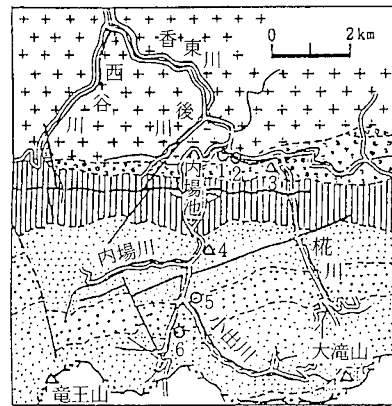
表4 L-Q曲線モデル

(実測値による係数)

項目	a	b	r
DO	11.8	0.95	0.993
COD	0.67	1.23	0.990
T-N	1.07	1.07	0.993
DIN	1.07	1.06	0.994
T-P	0.008	1.13	0.994
PO ₄ -P	0.0098	0.93	0.956
chl-a	0.000057	1.48	0.975

n = 12

$L = a \times Q^b$ L : 流入負荷量(kg/day)
Q : 流入水量(*1000m³/day)
a, b : 係数



1. 塩江新温泉 3. 樺川温泉 5. 東山温泉
2. 塩江温泉 4. 中の湯温泉 6. 奥の湯温泉

火山岩類 堆積岩類(和泉層群)
花崗岩類 花崗岩質砂岩 砂岩頁岩互層 黑色頁岩
礫岩など 石英粗面岩 (泥質)頁岩 頁岩優勢部

図7 塩江の地質略図(内場地下工業発行(香川県地質図より))

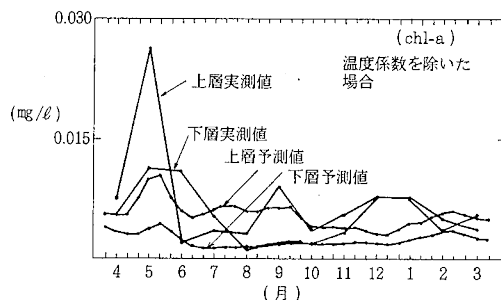


図8 クロロフィル-aの予測結果図

まとめ

前報等を参考にしながら、内場ダムを対象とし、シミ

ュレーションモデル作成の検討を行い次のことがわかった。

1. 内場ダムへの流入水(表面水)は、上流から流入口までの間でかなり浄化されていることが分かった。
2. 内場ダム内部のT-N、ほとんどがNO₃-Nであるが、年間をとおして、ほとんど変化しないのは、流入水(浸透水)の濃度がダム内部と同程度のレベルとなっているのではないかと考えられた。
3. 今回作成したモデルの計算結果ではCOD、DOは比較的よい再現性が得られたが、T-N、T-P、chl-aは十分な結果は得られなかった。
4. 当モデルは物質循環モデルであるが、chl-aとプランクトン沈でん量との間に相関がないことから、生物の内部生産に関する項を生物種を考慮した生物系モデルにする必要があるように思われた。

終わりに、本研究にあたり、御指導をいただいた山口大学工学部教授浮田正夫先生、内場ダムでの採水等でご協力を頂いた県内場ダム管理事務所の白井敏雄氏をはじめ職員の方々に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 山本 務, 藤田淳二, 多田 薫, 他: 香川県公害研究センター所報, 11, 29 (1986).
- 2) 山本 務, 藤田淳二, 浮田和也, 他: 香川県公害研究センター所報, 12, 29 (1987).
- 3) 山本 務, 藤田淳二, 冠野禎男, 他: 香川県公害研究センター所報, 12, 37 (1987).
- 4) 山本 務, 浮田和也, 中野 智: 香川県公害研究センター所報, 13, 11 (1988).
- 5) 山本 務, 三好健治, 浮田和也: 香川県公害研究センター所報, 14, 11 (1989).
- 6) 久保正弘, 冠野禎男, 山本 務, 他: 香川県公害研究センター所報, 14, 23 (1989).
- 7) 冠野禎男, 藤田久雄, 久保正弘, 他: 香川県公害研究センター所報, 14, 35 (1989).
- 8) 冠野禎男, 藤田久雄, 久保正弘, 他: 香川県公害研究センター所報, 14, 93 (1989).
- 9) 内場ダム管理年表 平成元年, 平成2年
- 10) 毛利孝明, 黒田弘之: 香川県衛生研究所報, 13, 91(1984).
- 11) 四国農業試験場: 四国地域農業の動向と技術的諸問題, 116 (1988).
- 12) 徳留昭一: 四国農業試験場報告書, 50, 62 (1988).