

(1) 芦田川河口堰堤湛水区間の水質予測——現地模型試験による解析——

建設省土木研究所 村 上 健

1. まえがき

芦田川は広島県東部に位置し福山市において瀬戸内海にそそぐ一級河川で、流域面積は 870 Km^2 、流域人口約 25 万人であり、流域内主要都市としては、府中市、福山市の一部がある。芦田川の河口においては現在、河口部における計画高水流量 $3,000 \text{ m}^3/\text{S}$ の流下に必要な疎通能力を河道改修によって行なうことに伴う塩害の防除と、河口堰による有効貯水量 496 万 m^3 を利用した新規の水開発を目的とした河口堰の建設が進められている。河口堰貯水池の諸元を表-1に示す。芦田川は上記のように福山市の一部を流域として持つが、福山市の旧市街地を含む大部分は流域外であるため極端に大きな負荷の流入はなく、河口部の環境基準はB類型であって現在はこれがほぼ守られている。しかし、中流部の府中市、福山市近郊の町村、あるいは流域内の福山市域からの負荷量も決して小さくはなく、芦田川の水質汚濁は軽視できない問題であるので、河口堰による湛水がいかなる水質変化をもたらすかを十分調査しておく必要があった。一般に、河口堰で湛水した場合の水質上の問題点としては、藻類の異状増殖など富栄養化の影響の顕在化、有機性浮遊物質の沈澱による底質の悪化、湛水池の成層化などによる局部的な溶存酸素の欠乏などがあげられるが、これらの現象は理論的に予測できる程には明らかになっていない。このため、一種の水質模型実験ともみなし得るような現地試験を行ない、湛水後の水質の予測を行なうことにした。現地試験は建設省中国地建福山工事々務所によって昭和48年12月より50年11月までの約2年間行なわれ、結果の解析を著者の所属する研究室が担当した。

2. 調査方法

2.1 試験池の概要

この種の水質模型実験の手法には未だ不明な点が多く、模型実験のアウトプットとなるべき水質および水棲生物の状況を実物と同じにするために、模型の規模、負荷量条件、気象条件、水理条件などをいかにすべきかについては全く定説がない。しかし、この程の模型実験において最も支配的な因子は、一般的には負荷量の相似性と温度、日照、風などの気象条件と考えられるため、試験池の製作、試験条件の設定に当っては以下の点について配慮した。

- (i) 実物と模型との単位水体横当りの流入負荷量に相似を持たせること。
- (ii) 与件たる気象状況を同一にするため試験池は現地に設置すること。
- (iii) 試験池内の温度成層状況、光の透過状況を等しくするため、試験池の水深を実物と同一にすること。
- (iv) 発生する水棲生物の種類は池の大きさによっても異なると考えられるので、試験池の大きさはできるだけ大きくすること。

上記のような考え方にに基づき、図-1に模式的に示すような構造の直径 3.5 m 、有効水深 3.5 m の池を湛水予定区間の上流端附近の洪水敷に2池（A池およびB池）設けた。有効水深 3.5 m は実際の湛水区間の常時満水位における平均水深にほぼ相当する。試験池の容量は 3.37 万 m^3 であり、実際の湛水区間の総貯水容量は 546 万 m^3 であるから、約 $1/16$ 万分の1の模型となる。

2.2 試験池の運転条件

表-1 河口堰貯水池諸元

集水面積	870 Km^2
湛水面積	25 Km^2
計画高水位	TP 2.614 m
常時満水位	TP 2.0 m
死水位	TP-1.0 m
利用水深	3.0 m
総貯水容量	$5,460,000 \text{ m}^3$
有効貯水容量	$4,960,000 \text{ m}^3$
死水容量	$500,000 \text{ m}^3$
計画取水量	$170,000 \text{ m}^3/\text{日}$

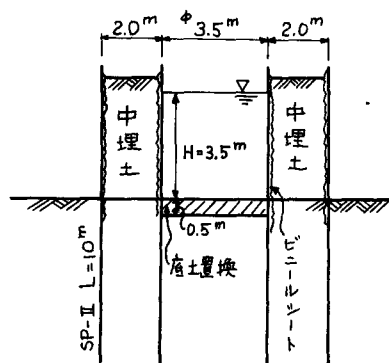


図-1 湛水試験池模式図

このような生物活動が関係する現場試験は少くとも1年間の周期で行なうことが望ましいので、昭和48年12月から49年11月までの1年間と、昭和50年1月から11月までの約1年間の2期にわけて試験を行なうこととし、A池、B池の2池の試験池を用い、合計4ケースの試験を行なった。いづれの試験においても負荷の注入を行ない、河川水をできるだけ連続的に注入し、等量を引き抜くという形で実験を行なった。注入水量は、実際の湛水区間へ流入する低水流量に、試験池の容量と湛水区間の総貯水量との比を乗じたものにほぼ等しくなるよう、概ね1日、1池当たり 2 m^3 とした。但し、河川水を毎日注入することは困難であったので、多少変則的ではあるが月、水、金曜日にそれぞれ 4 m^3 ずつ、1週間 12 m^3 注入した。河口堰湛水区間には本川のほか、高屋川、瀬戸川の2本の支川が直接流入するので、これら3川の河川水を混合して注入することとした。芦田川本川の流量は渇水時には極めて少なくなるため、支川の流量が相対的に大きくなるが、低水、平水時になると本川の流量比率が大きくなり、上記3川の流量比率は一概には定め難い。また、3川の汚濁の程度が異なるので、3川の河川水の注入比率をかえることによって試験池への負荷量を変えた実験が行なえることから、A池、B池に対して1回当たり 4 m^3 注入する河川水の構成比率を表-1.のようにして各ケースの試験を行なった。ただし、50年のA池では、夏季の渇水期に流入流量が減少して水位が低下する場合を想定し、夏季のみ注入水量を少なくし湛水位を低下させている。各ケースにおける注入負荷量については後に詳述するが、最も負荷量が多いのは49年のB池、次いで49年A池、50年B池、50年A池の順であり、49年B池の負荷量は50年A池の約1.5倍程度になっている。

各ケースの試験開始前には試験池の底土を本川河口部の河床に堆積している底土（比較的清浄な砂質土）で置換し、終了時に堆積した浮泥量および底質を測定した。

2.3 観測項目および頻度

観測は表-2のような測定計画に基づいて行なった。水深方向の採水は、予め定められた位置に設けた採水管を通じてポンプによって採水した。水深方向7点の採水位置は表面、0.5 m、1 m、……以下3 mまで0.5 m毎の7点であり、4点の場合は表面、0.5 m、2.5 m、3 mの位置である。

表-2の観測のほか、49年の試験においては、2、5、8、11の各月にそれぞれ1回、50年の試験においては2、5、7、8、10の各月にそれぞれ1回試験池内のプランクトンの調査を行なった。

3. 試験結果および考察

3.1 試験池内水質の年間の変化

試験池内の水質変化の例として49年および50

年のA池における水温、DO、BOD、COD、T-N、T-Pの年間の変動を図-2に示す。図において、実線は表面における水質、点線は河床から0.5 mの位置における水質であり、また、棒グラフは注入した河川水の月平均水質を示す。

水温の変化図によれば、3月初旬から温度成層が起き始め、4～8月の間は表層と底層の温度差が4～6℃あって比較的安定な温度成層が形成されている。実験期間中数回行なった24時間調査によれば、この温度成層は夜間においても乱されることはなく、概ね安定であった。このため、4～8月の間の底層のDOは非常に少なくなっており、特に49年の場合は殆んど皆無であった。湛水試験池では風の影響をあまり受けないのに反し、実際の湛水区間では吹送流による混合もある程度起こると考えられるため、実際池における

		本川	高屋川	瀬戸川
49年	A池	0.6	0.2	0.2
	B池	0.4	0.4	0.2
50年	A池	0.8	0.1	0.1
	B池	0.7	0.1	0.2

注) 6月13日～7月18日はB池と同じ注入比率
7月19日～8月5日の間で水流量を1.5mに低下させ
8月6日～8月31日は水流量1.5mに保ち、注入せず
9月1日に水流量を3.5mに回復させ、以降は通常流量

表-3 観測項目および頻度

試験池内水の観測			
観測区分	観測項目	水深方向観測点	観測頻度等
毎日観測	DO、pH	7点	1日2回(午前10時、午後2時)
	電気伝導度、水温、水中硬度	4点	
	気温、風向、風速		
定期観測	BOD、COD、SS	4点	1週1回
	T-N、NH ₄ -N、NO ₃ -N、NO ₂ -N T-P、PO ₄ -P、Fe、Mn、Cl ⁻ アルカリ度、S ²⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、クロロフィル	4点	2週1回
	DO、水温	7点	2時間間隔
通日観測	pH、電気伝導度	4点	
	気温、風向、風速		
	定期観測に同じ項目	4点	24時間混合試料

注入水の観測

観測項目	観測頻度	備考
BOD、COD、SS	各注水時	各河川水毎
T-N、NH ₄ -N、NO ₃ -N、NO ₂ -N T-P、PO ₄ -P、Fe、Mn、Cl ⁻ 、アルカリ度 S ²⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、クロロフィル、電気伝導度	1週1回	注入水室隣、1箇所の混合試料

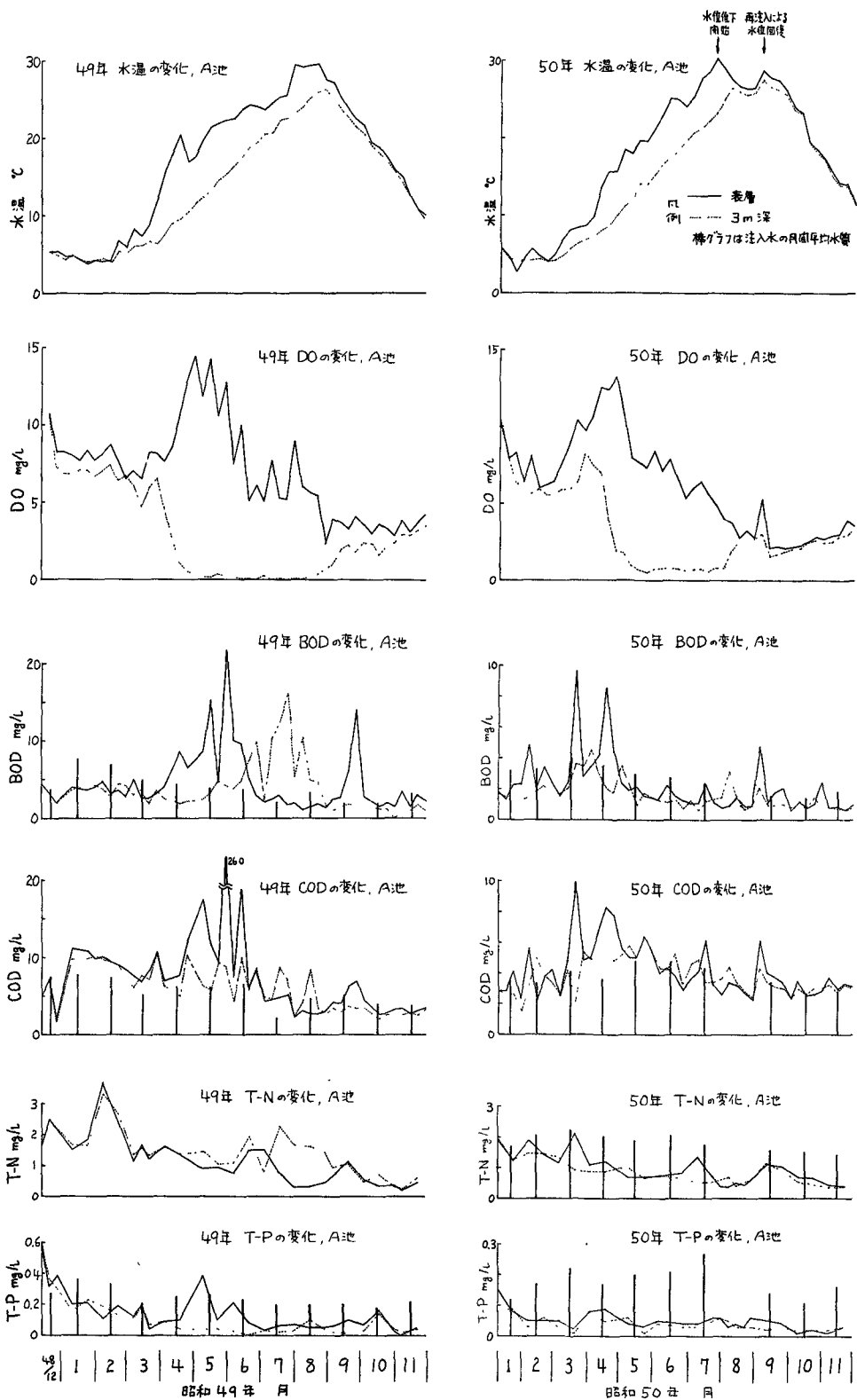


図-2 湛水試験池内水質の年間変化

底層水の DO 不足は試験池の場合ほどは厳しくならないと思われるが、実際池においても底層水の DO 欠乏は十分起り得るものと考えなければならない。BOD, COD の変化については、49 年においては 5～6 月に、50 年においては 3～4 月に高くなっており、この期間に植物性プランクトンの発生がかなり起ったことを示している。49 年の試験において、7～8 月頃底層の特に BOD が高くなっているのは、5～6 月に表層で発生した藻類の死骸に起因するものと考えられる。試験池の水の BOD は、植物性プランクトンの著しい増殖の影響がある期間を除けば、注入した河川水の BOD よりも若干低く、生物分解、沈澱などによる純浄化もある程度は期待できることを示している。COD については、プランクトンの発生が比較的少ないとみられる期間でさえ、注入河川水と試験池内水とが同程度であり、純浄化は期待できない。

栄養塩類については、図に示す如く注入河川水の窒素、リン濃度はかなり高く、この意味からすれば植物性プランクトンの大增殖が起っても不思議ではない。しかし、これら栄養塩類、特にリンについては試験池内での沈澱除去がかなりあるようであり、試験池内水のリンは注入河川水中に較べてはるかに低くなっている。本文には図示していないが、プランクトンが直接利用できる形のオルトリン酸塩濃度は、49 年の試験では 0.1 ppm 程度になることもあったが、50 年の試験では年間を通じてほぼ 0.01 ppm 以下であり、50 年の試験でプランクトンの発生が比較的少なかったのはリンが制限因子になったものと思われる。

無機性窒素の変化も 49 年と 50 年とではかなり異なっており、49 年の場合はアンモニア性窒素の方が硝酸性窒素よりも全般的には多いが、夏季には表層では硝酸性窒素、底層ではアンモニア性窒素が支配的になるという成層型の湖でみられるような変化を示した。一方、50 年の場合は、アンモニア性窒素は全期間を通じて比較的濃度で一定しており、全般的には殆んど硝酸性窒素の形で存在している。ただし、いずれの年においても植物性プランクトンの大增殖に必要なだけの窒素は十分存在している。

なお、49 年と 50 年の注入河川水の水質を比較すると、BOD, COD, リンなど殆んどすべての項目で 49 年の方が 1.5 倍程度大きく、これが 50 年の試験池内水質の悪化の 1 つの大きな原因になっているものと思われる。

3.2 試験池内の生物相

前述のように 49 年の試験においては年 4 回、50 年においては年 5 回の生物調査を行なった（生物種の同定および定量は福山市水道局による）。綱目別の個体数を表-4 にまとめて示す。ただし、これらは試験池の表層における個体数である。表-4 によれば、植物性プランクトンが多量に存在しているのは 49 年 2 月と 5 月の調査のみであり、他の調査日では高々 1 ml 当り千個程度である。49 年 2 月の植物性プランクトンの優先種は珪藻類の *Melosira distans* であり、49 年 5 月の場合は珪藻類では *Synedra rumpens*、緑藻類では 90% 以上が *Chlamydomonas*（ここでは緑藻類に分類）であり、その他若干 *Akistrodesmus* が存在した。これら大発生した藻類のうち珪藻類は表層ばかりでなく、1 m、2 m の深さにおいても表層と殆

表-4 試験池内の微生物現存量（表層水）
単位：1ml 中の個数

細目	昭 和 4 9 年								昭 和 5 0 年									
	2月13日		5月15日		8月13日		11月14日		2月24日		5月27日		7月29日		8月21日		10月15日	
	A池	B池	A池	B池	A池	B池	A池	B池	A池	B池	A池	B池	A池	B池	A池	B池	A池	B池
藍藻類	2	9	-	-	8	2	2	-	2	-	4	-	-	-	-	-	-	-
珪藻類	8234	5090	27184	158	76	32	68	28	58	136	26	330	8	8	-	-	-	-
緑藻類	120	152	60116	872	208	850	268	344	78	64	70	126	114	92	28	194	48	48
黄緑・紅黄藻類	4	24	1500	32	-	-	112	108	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-
渦鞭藻類	388	-	530	8	2	4	-	8	6	-	4	-	24	-	2	10	112	8
原生動物	66	18	10	-	2	2	20	-	22	22	2	-	-	2	178	2	12	-
絨毛虫類	38	410	1290	-	-	-	6	-	14	4	52	-	-	2	-	-	6	-
輪虫類	-	-	14	-	-	-	-	-	6	2	-	6	2	-	-	2	-	-
合 計	8852	5694	90644	1070	296	884	476	488	186	228	158	464	148	104	222	208	172	56

んど同じ個体数が存在していたが、Chlamydomonas は表層にしか存在していなかった。これらの生物調査結果と図-2の49年のBODおよびCODの変化と比較すると、2月には池内水のCODは高いがBODは低く、また5月においては、表層水はCOD、BODともに高いのに反し底層水のBODはさ程高くないことから、Chlamydomonas はBOD、CODの双方を高くするが、珪藻類はBODに対してはそれ程きかないとも推定される。いずれにしても、49年の2月、5月以外の調査当日の植物性プランクトン現存量は1ml当り千個以下であり、この場合には池内のBODは環境基準B類型の3ppm以下になっている。従って、植物性プランクトンの異常増殖が起らなければBODに関する環境基準は維持できるものと考えられる。

なお、B池の負荷量は後述のように49年、50年ともにA池より大きいのに反し、B池のプランクトン現存量はA池に較べて少ない傾向があるが、この理由としては、B池の方は採水用に設けた建屋の影が出来易く、日照時間が平均的には幾分小さかったことが考えられる。

3.3 試験池内の負荷量収支

注入した河川水の水量・水質、排水した池内水の水量・水質から注入および排出負荷量を求め、これに試験池内の現存量の変化を考慮して試験池内の負荷量収支を求めた。これらを取りまとめて、各実験期間中の注入負荷および負荷量収支を計算した結果を表-5に示す。注入負荷量はA池、B池ともいずれの項目についても50年の方が49年よりも少なく、約30%程度になっている。50年の方が実験期間が約1ヶ月短かったが、それを考慮しても50年の負荷量が小さく、所期の目的通り負荷量を変えた実験ができた。

表-5において収支の欄で負となっている物質は、リンのような保存物質については沈澱して底泥になったことを意味し、BODやCODのような非保存の物質については沈澱や生物分解によって水中から除去される量の方が池内で生産されるものよりも大きいことを意味する。BODは注入された負荷の12~43%に相当する量が池内で減少しており、それだけ浄化されていることを示している。A池とB池との比較ではB池の方が多少減少量が大きい。云いかえれば、A池の方が生産量が大きい。この傾向はCODについても明らかに現われており、A池では49年、50年とも純生産があるのに反し、B池では減少している。これは前述のようにB池では幾分日陰が出来易かったためと考えられるので、A池の方が実際に近い結果ではないかと思われ、年間平均水質でみると湛水によってBODは10~20%減少、CODは10%程度増加するといえる。但し、これらの値は季節的に大きく変動するものであり、特に植物性プランクトンの異常増殖が起っている場合には非常に大きな純生産となることはいうまでもない。

SSは6~9kg/年減少しており、湛水によってSSの60~70%が沈澱除去されている。SSの除去量に植物性プランクトンの死骸の量を加えた量が底泥の生成量になる筈である。

窒素の除去量もかなり大きく、約50%減少を示しているが、河川水に含まれていた固型物としての有機性窒素の沈澱の他に、無機性窒素が藻類に転換された後に沈澱した量も相当大きいものと考えられる。

試験池内でのリンの減少は非常に大きく、全リンとしては70~80%、オルトリンとしては90~95%除去されており、水中の濃度は極めて小さくなっている。49年、50年とも7~8月の盛夏にプランクトンの発生が少ない

表-5 注入負荷量および試験池内負荷量収支 単位 g/年

項目	49年 試験				50年 試験			
	A 池		B 池		A 池		B 池	
	注入負荷量	収 支	注入負荷量	収 支	注入負荷量	収 支	注入負荷量	収 支
BOD	1,978	-237	2,194	-552	1,257	-328	1,562	-667
COD	2,943	318	3,374	-180	1,790	138	2,161	-226
SS	14,478	-9,183	12,637	-7,930	8,892	-6,102	11,752	-8,411
NH ₄ -N	439	-147	565	-173	176	-120	227	-168
NO ₃ -N	68	-46	59	-27	30	-20	34	-23
NO ₂ -N	370	-223	413	-206	364	-274	401	-328
T-N					865	-463	949	-463
PQ ₄ -P	76	-68	89	-81	45	-43	51	-49
T-P	128	-94	159	-124	84	-66	100	-81

注: 収支の欄の付号は、要はどの物質も試験池内で沈澱除去・消費したことを示し、正は純生産があったことを示す。

のは、リンが制限因子になったものと思われる。また、49年に較べて50年のプランクトン発生量が少ないのは、他の条件である水温や照度は実測結果によれば殆んど同じであっ

たので、リンの負荷量の相違以外の原因は考え難い。

Vollenweider は多くの湖のデータを整理して、湖の水深を水の滞留年数で割った値と、湖の単位表面積当りのリン負荷量の2つのパラメータによって対象とする湖が富栄養化するかないかを判断できることを示している。¹⁾ Vollenweider の整理結果をこの湛水試験池に適用して、富栄養化の危険負荷量を求めると約 1.5 grP/m²/年 となる。一方、表-5の49年、50年のA池の全リン負荷量を単位表面積当りに換算するとそれぞれ 1.33, 8.7 grP/m²/年であるから、上記の危険負荷量よりかなり大きい値になっている。

3.4 試験池に堆積した底泥

試験開始時の底土は河口堰湛水予定区間の河床から採取したものであり、有機分を殆んど含まない砂質土（強熱減量 1.07%, COD 0.145 ㎎/g 乾泥, リン 0.093 ㎎/g 乾泥）である。各年の試験の終了時に水を抜いて、上記砂質土の上に堆積した浮泥状の堆積物量およびその底質を測定した。堆積物量および堆積物中の汚濁物質量を表-6に示す。堆積物量は、池底 1m を枠でかこい、枠内の堆積物をつぼ掘りして全量採取してその重量を測定し、これに1池当り40点以上の点で測定した堆積厚の平均値と1m²のつぼ掘り部での平均堆積厚との比を乗じて求めた。採取した堆積物にはかなり砂分が多かったので、採取した際に当初底に置いた砂質土を多少含めて採取した可能性があり、堆積物量の目安としては堆積厚の方が正確と思われる。

堆積物生成の原因としては、注入河川水中の浮遊物の沈澱と、池内で発生したプランクトンの死骸の沈澱とが考えられる。浮遊物が沈澱した量は表-5に示したように6~9 Kg/年である。一方、プランクトンの死骸については推定する以外方法はないが、底泥中の強熱減量がすべてプランクトンに起因するとすれば 0.9~4.8 Kg/年、また、リンはすべて一旦プランクトンに変換して沈澱していると考えても 20~8.2 Kg/年 であり、プランクトンに起因する堆積物量は最大限見積っても全体の5%以下である。

表-6 堆積物中の汚濁物質量

項 目	49年		50年	
	A池	B池	A池	B池
つぼ掘り部堆積厚(mm)	40.63	20.0	11.25	16.0
つぼ掘り部堆積量(kg)	23.99	8.99	4.83	8.02
全池面平均堆積厚(mm)	40.67	28.29	12.28	14.4
全池堆積量(kg)	231.0	122.3	50.7	69.4
堆積物含水率(%)	77.5	65.7	76.47	62.95
全堆積乾重量(kg)	60.0	41.9	11.9	25.8
全強熱減量(kg)	4.81	1.99	0.89	1.83
BOD量(g)	546	48.2	239	294
COD量(g)	2,760	1,010	862	2,103
T-N量(g)	50.9	33.0	27.6	66.7
T-P量(g)	105	67.9	25.3	70.5

表-5の窒素、リンの収支と表-6の堆積物中の窒素、リンの量を比較すると、窒素については堆積物中に存在する量は水から除去された量の1割程度に過ぎず、分析値を正しいものとすれば脱窒が相当起っていることになる。リンについては、49年のB池と50年のA池ではかなり両者に差があるが、49年のA池と50年のB池とでは非常によく一致している。

実際の河口堰の操作はある流量以上の洪水のときは堰を開放するという形になり、堆積した浮泥は洪水時に殆んどすべてフラッシュされるので、実際の堆積量は表-6の値よりかなり小さくなる。しかし、プランクトンの死骸に起因する有機分に富んだ堆積物は大部分が3~8月に生成されるため、梅雨期または台風期の最初に堰を開放する際には相当量の汚濁負荷が海域に一時に放流されることになる。

4. 結論および今後の問題点

芦田川河口堰の湛水後の水質を予測するために現地模型実験を試み、良好な水質を維持するためには藻類の異常増殖を防がなければならないこと、藻類の異常増殖に対してはリンが制限因子になると思われ、50年A池程度の水質は許容するとすれば、面積負荷量にして 9 grP/m²/年以下、実際の3河川からの負荷にして約 30 Kg/日以下にする必要があることがわかった。しかし、この種の試験では風による水の混合など再現できない現象もあるので、河口堰完成後に調査を行ない、試験の有効性と限界を調べる必要がある。

参考文献 1) P.J.Dillon, Sci. Series No.46, Canada Center for Inland Waters.