

長良川河口堰上下流水域における クロロフィルaとDOの変化と流量との関係

RELATION BETWEEN CHANGE OF PHYTO PLANKTON AND DO
AND DISCHARGE IN THE UP-DOWN STREAM AREA OF
NAGARAGAWA ESTUARY BARRAGE

立松敦史¹・武田 誠²・松尾直規³

Atsushi TATEMATSU, Makoto TAKEDA and Naoki MATSUO

¹正会員 修士(工) 中日本建設コンサルタント株式会社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-8-6
ストークビル名古屋)

²正会員 博士(工) 中部大学准教授 工学部市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

³フェロー 博士(工) 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

The Nagaragawa estuary barrage was built for prevention of damage of salt breeze caused by entering saltwater due to the dredging in 1995. However, after construction of Nagaragawa estuary barrage, water quality problems (the decrease of the dissolved oxygen (DO) in the downstream area and the increase of the phytoplankton in upstream area of estuary barrage) occurred. In this study, the water quality changes from 1994 to 2005 are examined by the analysis of Nagaragawa monitoring data. From this study, it was shown that the phytoplankton changes by water temperature and sunlight, and is influenced strongly by the change of the river flow discharge, and the DO is influenced strongly by the stratification. Moreover, when there is little number of times of the gate operation, the DO in downstream area of estuary barrage decreases.

Key Words: Nagaragawa estuary barrage, Dissolved Oxygen, phytoplankton, Water Quality

1. はじめに

長良川河口堰は、治水対策として施された川底の浚渫による塩害防止と安定した用水の供給を目的に建設された。治水対策の効果として、例えば、平成10年10月の台風10号による出水では浚渫により1.3mの水位低下があったと推定されている¹⁾。しかし、一方で、河口堰建設による河口域の水循環や水質の悪化が問題視されている。

これらの問題に対し多くの研究が行われている。藤野ら²⁾は堰建設後の伊勢湾の貧酸素化が長良川河口の貧酸素化に及ぼす影響の物理機構について考察している。また、橋本ら³⁾は長良川河口堰建設が塩水侵入に及ぼした影響を河川水の混合形態から考察しており、有田ら⁴⁾は堰下流域の塩水侵入に伴う混合形態の変化からDO濃度の変動について考察している。また、丸山ら⁵⁾は堰上流域における植物プランクトンの増殖機構について、気象、河川流量等から考察している。これらの研究より、堰上下流水域内の貧酸素化や植物プランクトンの増殖に関する機構は明らかとなってきたが、長良川河口堰建設

後の水質の経年的な変化、および河口堰操作に伴う水質の変化について検討を行っている事例は少ない。

そこで本研究では、河口堰建設から現在までの長期的な水質変化について検討し、さらに堰操作(フラッシュ操作:長良川河口堰の本来の運用は、流入した水をそのまま流下させるものであるが、一時期に流出流量を抑え水を溜め込んで、一気に放出する操作のこと)による水質変化を明らかにすることを目的とする。

2. 検討方法

本研究では、図-1に示す長良川と木曾川に設置された水質自動監視装置(ヤープ・ナンノー・トーカイ・ナガラ・イセ・イーナ・ジョー、トミー(木曾川))で観測された、水温(表層・低層・底層)、DO(表層・低層・底層)、CL(表層・低層・底層)、COD、T-N、T-P、pH、濁度の平成6年から平成17年までの毎正時の観測値⁶⁾を用い、河川流量として河口堰での堰放流流量⁶⁾と墨俣観測所での河川流量⁶⁾を用いた。また日射量は気象庁⁷⁾

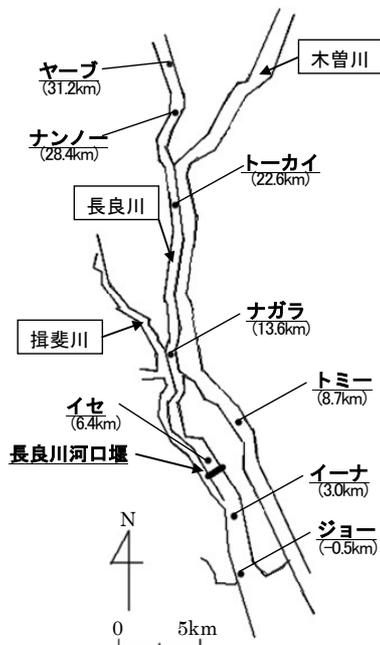


図-1 自動水質監視装置設置位置

および河口堰での観測値⁶⁾を用いた。

河口堰上下流域では、堰上流域の植物プランクトンの増殖と堰下流域の貧酸素化が問題視されていることから、本研究でもその二点に焦点を絞り検討する。

3. 堰建設による水質の変化

堰建設前後の水質の変化を検討するため、建設前の平成6年と建設後の平成8年の問題となる夏季のデータを扱った。ナガラ、イセの表層におけるクロロフィルaの月平均値と、イーナ、ジョーの底層におけるDOの月平均値を表-1に示す。また、当時の気象の基礎情報として、対象地域の近くにある愛西の気象データ（月平均値あるいは月の合計値）⁷⁾を表-2に示す。

まず、クロロフィルaについて検討を行った。表-1上より、平成6年のクロロフィルaに比べ平成8年の値が概ね高くなっている。平成6年は記録的な渇水年であり、表-2から分かるように気温や日照時間も高いことから、クロロフィルaが増加しやすい環境であったと考えられるが、その値より堰建設後の平成8年の値が概ね高くなっていることから、堰建設により滞留時間が増加したことでクロロフィルaの値が増加したと考えられる。

つぎに、DOについて検討を行った。表-1下の平成6年と平成8年のDO値を比較すると、イーナ、ジョーともに値が低下しているが、特にイーナで低下が顕著である。平成6年は先に述べたように記録的な渇水年であったことから、河川水の混合の低下や塩分値増加に伴うDO飽和値の低下があったと考えられるが、その平成6年の値より平成8年の値の方が低下している。これは、堰建設

表-1 河口堰建設前後の夏季における月平均値

		6月	7月	8月	9月	
堰上流域	ナガラ					
	クロロフィルa(μg/l)	平成6年	6.1	11.7	6.4	4.5
		平成8年	13.7	13.1	22.2	2.6
	イセ					
クロロフィルa(μg/l)	平成6年	7.0	15.5	6.7	3.2	
	平成8年	14.2	18.8	14.8	8.1	
堰下流域	イーナ					
	DO(mg/l)	平成6年	5.4	4.2	3.8	3.3
		平成8年	5.1	3.5	3.0	3.4
	ジョー					
DO(mg/l)	平成6年	5.7	4.1	3.7	3.5	
	平成8年	5.1	4.0	3.7	3.6	

表-2 愛西における気象データ

1994年	6月	7月	8月	9月
平均気温(°C)	22.3	28.6	29.1	24.3
総降水量(mm)	124	49	34	348
日照時間(h)	141	215.9	258.1	168.1

1996年	6月	7月	8月	9月
平均気温(°C)	22.2	26.6	26.6	21.7
総降水量(mm)	210	172	218	96
日照時間(h)	64.1	195.7	174.8	140.9

により河口から5.4km地点で河川水が堰き止められ、河川水の混合が低下し、塩分値増加に伴うDO飽和度の低下と成層発達により、DOが低下したと考えられる。

4. 堰建設後の水質の経年変化

河口堰建設後の水質の経年変化について検討を行った。ここでは、堰の影響を検討するため洪水時(200m³/s以上と仮定)のデータは対象外とした。

(1) クロロフィルaに関する検討

ナガラ、イセにおけるクロロフィルaの月平均値の経年変化を図-2に示す。本図より、堰上流域のクロロフィルaに増加傾向が見られ、特に、ナガラにおける増加の度合いがイセよりも大きいことが分かる。この増加の要因を日射によるものと考え、クロロフィルaと日射量の関係を検討した。図-3より、クロロフィルaと日射量には正の相関がみられたが、相関係数は比較的低い値となった。つぎに、日射量だけではなく植物プランクトンが流下するまでに要する時間も重要と考え、クロロフィルaと堰放出流量の関係を調べた。その結果を図-4に示す。本図より、低流量時にクロロフィルaの高い値が集中していることが示された。これらの結果から、クロロフィルaの増加は、日射量と流下に要する時間に強い影響を受けることが改めて示された。つぎに、経年

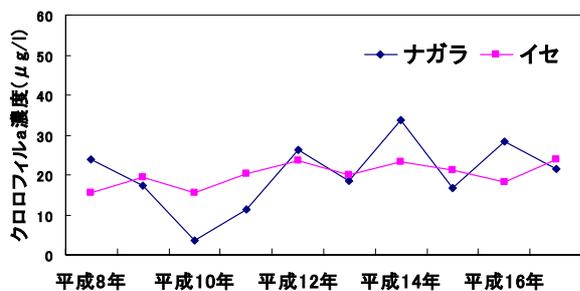


図-2 クロロフィルaの月平均の経年変化(8月)

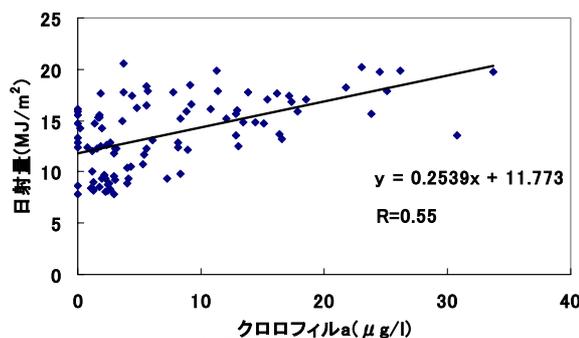


図-3 日射量とクロロフィルaとの関係

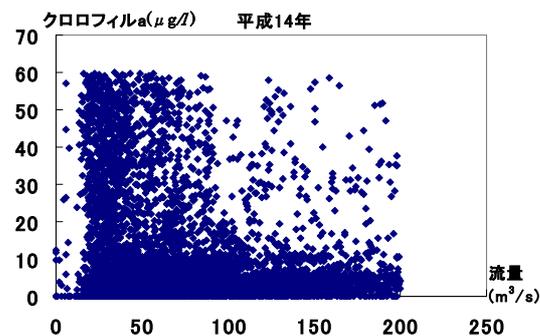


図-4 クロロフィルaと堰放出流量との関係

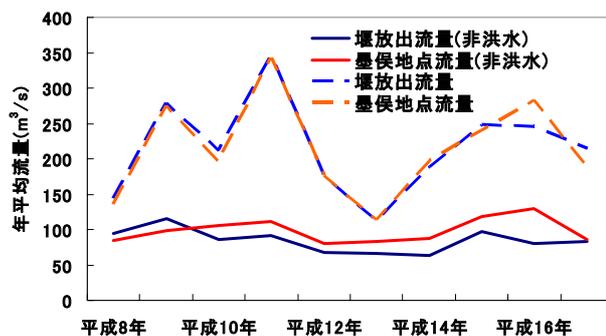


図-5 平均流量の経年変化

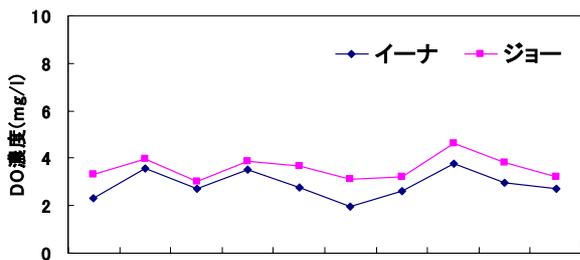


図-6 底層のDOの月平均の経年変化(8月)

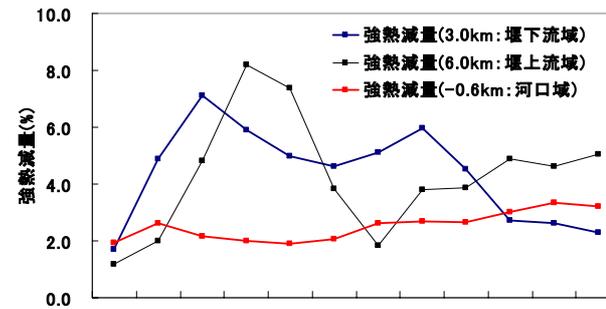


図-7 強熱減量の年平均値の経年変化

なクロロフィルaの増加を検討するために、平成8年から平成17年までの堰放出流量の変化を調べた。その結果の一例を図-5に示す。なお、200m³/s以下の流量の平均値を非洪水として記した。本図より、墨俣地点では増加傾向にもかかわらず、堰地点ではわずかながら減少傾向であることから、200m³/s以下の堰放出流量が経年的に減少していることが示された。このことから、堰建設に伴い、流れが緩やかになり、高い水温が維持され日射量も豊富に受けることができるため、植物プランクトンが増殖していると考えられる。なお、200m³/s以下の流量の変化には非フラッシュ操作時の流量低下の影響も含まれている。また、イセよりナガラでクロロフィルaの値が高くなっていることから、経年的に植物プランクトンの増殖場所が上流側へ広がっていることが示された。

(2) DOに関する検討

河口堰建設後の底層のDOに関する検討として、図-6にイーナおよびジョーにおけるDOの8月の月平均値の経年変化を示す。本図より、河口堰建設後、イーナの底層

で貧酸素化の目安である3mg/l以下のDO値が多く見られた。そこで、河口堰建設後のDO低下の検討として河床の有機物に着目し、強熱減量について検討を行った。用いたデータは、長良川の定期観測⁹⁾で得られたものであり、年によって異なるが、概ね2ヶ月に1回の割合で計測されている。図-7に強熱減量の年平均値を示す。本図より、+3.0kmと+6.0kmで堰建設後に強熱減量の値が増加しているが、-0.6km地点では大きな変化は見られない。

図-6と図-7を比べると、ジョー(-0.6km)のDOと-0.6km地点の強熱減量には、両者とも余り値の変化が無い。さらに、イーナ(3.0km)のDOと3.0kmの強熱減量に関係がみられない。

つぎに、クロロフィル分解物によるDOの消費について検討を行った。ここでは採泥日時より二週間以内に洪水がある場合と無い場合に分け、クロロフィル分解物⁹⁾、密度差(採泥日時前の二週間における底層の密度から表層の密度を引いた値の平均値)、酸化還元電位⁶⁾、貧酸データの割合(採泥日時前の二週間における3mg/l以下のDO値の割合)を図-8に図化した。本図より、洪水が

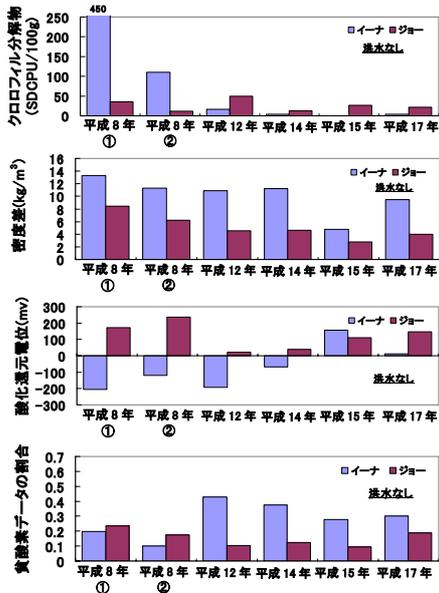


図-8 底質・密度差とDOの比較

ない場合では、平成8年のクロロフィル分解物が他と比べて非常に多くなっている。ここで、平成8年を除いて考えれば、クロロフィル分解物はジョーの方がイーナよりも多くなっており、密度差はイーナの方が大きく、貧酸素データの割合もイーナの方が大きいことが分かる。なお、洪水がない場合には、特にイーナにおいて、酸化還元電位の正負の値が混在している。一方、洪水がある場合には、平成8年を除いて考えれば、クロロフィル分解物が少なく、ジョーにおいては計測値が無い場合も見られる。さらに、酸化還元電位は概ねイーナで負値、ジョーで正値をとっている。そして、密度差と貧酸素データの割合は洪水によって大きく値が変化している。これらのことより、河口堰下流水域における底層のDOは、河床での有機物の増加に伴う酸素消費の影響は小さく、塩分増加による成層化に伴うDO供給の減少が大きく影響していることが推察される。

表-3 データ抽出期間

期間	年	開始日時	終了日時
期間①	平成8年	7/15 14:00	7/23 15:00
	平成11年	8/3 11:00	8/11 12:00
	平成12年	8/5 14:00	8/13 15:00
	平成13年	7/22 14:00	7/30 15:00
期間②	平成8年	7/25 14:00	8/15 7:00
	平成9年	8/18 15:00	9/8 8:00
	平成12年	8/12 14:00	8/14 6:00
期間③	平成13年	7/24 13:00	8/14 6:00
	平成8年	8/20 13:00	8/27 0:00
	平成10年	7/5 12:00	7/11 23:00
	平成11年	8/4 0:00	8/10 11:00
	平成12年	8/6 13:00	8/12 17:00
	平成14年	8/27 15:00	9/2 16:00
	平成15年	9/10 14:00	9/17 1:00

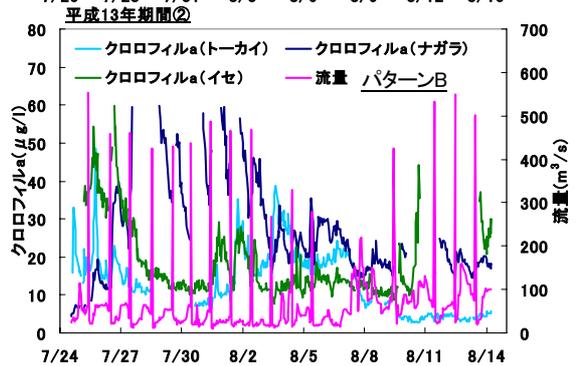
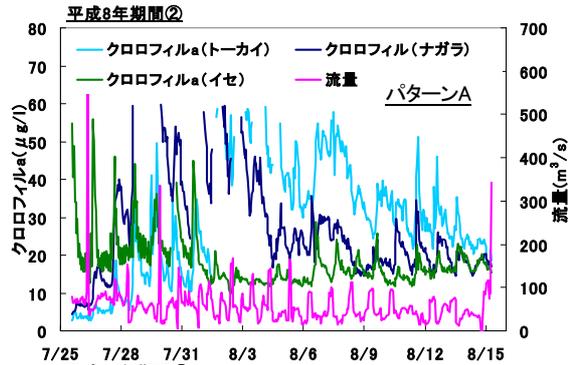


図-9 クロロフィルaの増加パターン

5. 流量および堰操作による水質の変化

(1) クロロフィルaに関する検討

武田ら⁸⁾や先に挙げた他の研究より、クロロフィルaと水温には強い相関があることが示されている。そこで、水温がクロロフィルaに与える影響を取り除くため、表-3のように夏季における平成8年の非洪水期間を3期間設定し、それらと平均2乗誤差が小さくなる水温の期間を平成9年から平成17年までの間から抽出し、それぞれのデータを比較することで、クロロフィルaの変化特性を検討した。抽出した期間を表-3に示す。

図-9にクロロフィルaと堰放出流量の時間変化を示す。本図より、トーカー・ナガラでクロロフィルaの値が高く、イセで値が低いパターン（以後、パターンA）と、ナガラ・イセでクロロフィルaの値が高くなるパターン

(以後、パターンB)があることがわかった。そこで、**図-10**にトーカイ、ナガラ、イセにおける1日あたりの堰放出総流量とクロロフィルaの日平均値の相関図を示す。本図より、トーカイでは1日あたりの堰放出総流量が増加することにより、クロロフィルaの日平均値が減少する傾向が見られる。ナガラでは両者の関係が見られないが、イセでは流量の増加と共にクロロフィルaも増加している。以上のことを踏まえ、この現象について考えると、パターンAのように、堰放出総流量が減少すると流速が低下し、日射の影響を受けてトーカイ付近でクロロフィルaが増加したと考えられる。また、この期間のイセにおけるクロロフィルaの低下の原因として、時間経過とともに植物プランクトンの死滅、河川内の栄養塩の減少に伴う植物プランクトンの増殖の抑制、上流向きの吹送流に伴う植物プランクトンの移動⁹⁾などが考えられる。一方、パターンBのように、堰放出総流量が増加すると、トーカイ付近でクロロフィルaの増加が生じず、下流のイセで増加することとなる。

つぎに、フラッシュ操作に伴う河口堰上流水域におけるクロロフィルaの変化について検討を行った。堰放出流量に占めるフラッシュ総流量の割合とクロロフィルaの相関を**図-11**に示す。本図より、トーカイ、ナガラ、イセにおいて相関は非常に低いことが分かる。フラッシュ操作は、急激な流量放出を行うことで強い流れを引き起こし、鉛直混合を促進させ、堰直上流のDOの低下やクロロフィルaの増殖を防ぐことを期待して実施されているが、本検討結果からは、堰上流のトーカイ、ナガラ、イセにおけるクロロフィルaの変化は小さいことが確認された。一方、フラッシュ操作を行うことで、逆に流量が低下する期間も多くなることから、特にトーカイなどでクロロフィルaの増加が生じる可能性もあり、注意が必要であろう。

(2) DOに関する検討

4.の検討から、DOの変化は、密度差に大きく支配されることが示された。堰下流域の密度差は、大潮、小潮などの潮汐変動の影響を強く受けることから、ここでも、潮汐による影響を取り除くため、表-4のように夏季における平成8年の非洪水期間を3期間設定し、それらと平均2乗誤差が小さくなる潮汐の期間を平成9年から平成17年までの間から抽出した。抽出した期間を表-4に示す。これらのデータを用いて、1日の堰放出流量に対するフラッシュ操作時の堰放出流量の割合とイーナの底層DO飽和度の日平均値の関係を**図-12**示す。本図より、フラッシュ操作の規模が増加することによりDO飽和度が高くなる傾向が見られる。つぎに、1日あたりのフラッシュ操作の回数とDO飽和度の日平均値の関係を**図-13**に示す。本図より、これらには正の相関が見られる。このことから1日あたりのフラッシュ操作の回数が多ければ、DO飽和値の日平均値は上がることが示された。つぎに、

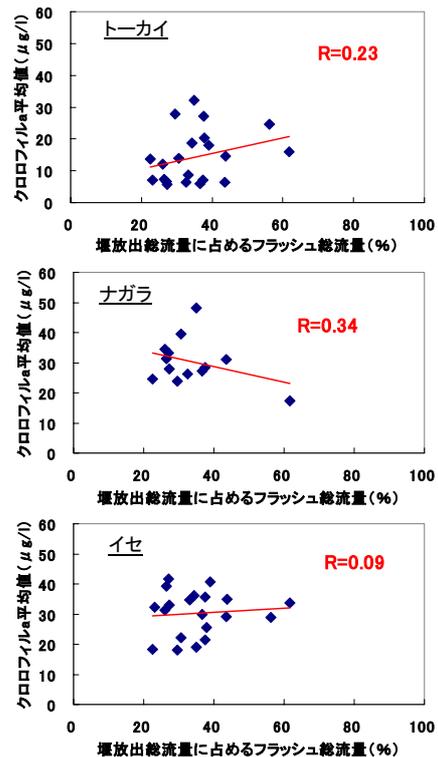


図-10 堰放出流量に占めるフラッシュ総流量の割合とクロロフィルaの相関図

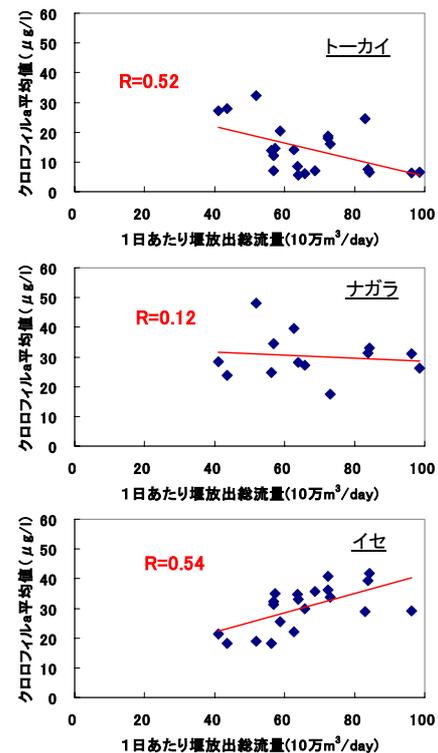


図-11 堰放出流量とクロロフィルaの相関図

1日あたりのフラッシュ操作の回数とDO飽和度が30%以下の割合との関係を**図-14**に示す。本図より、フラッシュ操作の回数が多いほど貧酸素の割合が低くなる傾向が見られる。ここで、参考のために、1日あたりのフラッシュ操作の回数が2.25回である期間①平成12年と

0.58回である期間②平成9年の流量データの一部を図-15に示す。これらの結果は、フラッシュ操作の回数が多いほどDOが改善することを示しているが、逆に、フラッシュ操作の回数が小さいほど、すなわち、図-15にみられる低流量の期間が長いほど、堰下流水域の河川水混合が弱まりDOが低下することも示している。

6. 終わりに

本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) 要因分析結果について

- ・ 河口堰により堰上流域の河川水位が高く維持されたことで、流速が低下し、日射の影響を受けやすくなり、クロロフィルaが増加したものと推察される。また、流量の関係により、クロロフィルaがトーカイで増殖するパターンとイセで増殖するパターンがあることが示された。
- ・ 河口堰により堰下流水域の河川水混合が低下したことで、成層が発達し、底層のDOが低下したことが示された。また、堰下流水域のDO変化は、河床における有機物による影響よりも成層化の影響が強いことが示された。

(2) 堰操作による影響について

- ・ 河口堰上流域のクロロフィルaの変化に対するフラッシュ操作の影響は小さいことが明らかとなった。
- ・ 河口堰下流水域における底層のDOは、フラッシュ操作を頻繁に行うことにより、DOの低下が緩和される傾向が明らかとなった。逆に、フラッシュ操作により流量低下が増えた場合にはDO低下が進む傾向が示された。

参考文献

- 1) 長良川河口堰ホームページ, 独立行政法人 水資源機構 長良川河口堰管理所, <http://www.gix.or.jp/~naga02/nagara/japanese/indexj.htm> (平成20年9月24日確認)
- 2) 藤野ら: 長良川河口堰下流部における貧酸素水塊に関する解析, 水工学論文集, 第46巻, 2002.
- 3) 橋本ら: 長良川河口堰が塩水侵入に及ぼした影響, 水工学論文集, 第48巻, 2004.
- 4) 有田ら: 長良川河口域の塩水侵入と水質変動特性, 水工学論文集, 第49巻, 2005.
- 5) 丸山ら: 長良川河口堰上流域における植物プランクトンの増殖に関する研究~モニタリングデータを用いた解析~, 水工学論文集, 第51巻, 2007.
- 6) 独立行政法人 水資源機構: 長良川河口堰環境調査データ, 平成6年~平成17年.
- 7) 気象庁 ホームページ: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 8) 武田ら: 統計学手法を用いた長良川河口堰モニタリング資料の解析, 環境工学研究論文集, pp.369-378, 2000.
- 9) 松尾ら: 長良川河口堰上流域の流れと水質に及ぼす風の影響に関する数値解析, 水工学論文集, 第41巻, pp.451-456, 1997.

(2008. 9. 30 受付)

表-4 データ抽出期間

期間	年	開始日時	終了日時
期間①	平成8年	7/12 2:00	7/20 11:00
	平成12年	7/13 2:00	7/21 11:00
	平成13年	7/31 2:00	8/8 11:00
	平成17年	8/12 2:00	8/9 11:00
期間②	平成8年	8/6 6:00	8/14 19:00
	平成9年	8/25 6:00	9/2 19:00
	平成13年	7/28 7:00	8/5 20:00
	平成17年	7/29 7:00	8/6 20:00
期間③	平成8年	8/17 0:00	8/28 1:00
	平成13年	8/7 0:00	8/16 1:00
	平成14年	8/26 0:00	9/6 1:00
	平成17年	8/8 0:00	8/17 1:00

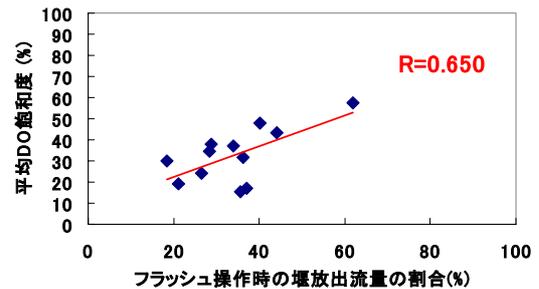


図-12 DO飽和度と堰放出流量に占めるフラッシュ操作時の放出流量の割合

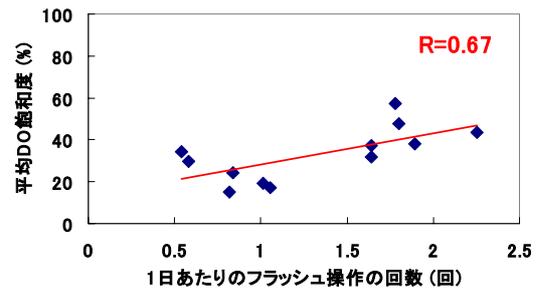


図-13 フラッシュ操作の回数とDO飽和度

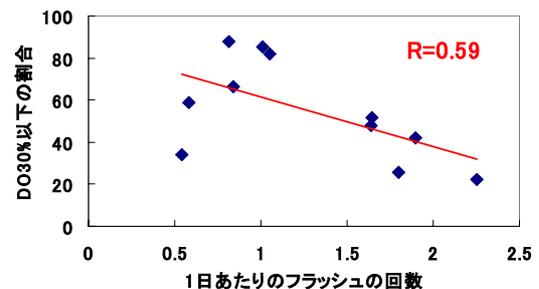


図-14 フラッシュ操作の回数と貧酸素の割合

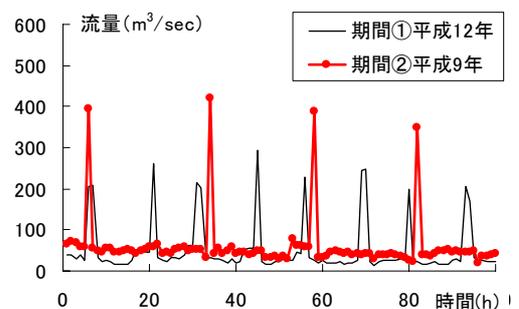


図-15 流量の時間変化