

長良川河口堰のフラッシュ操作に伴う水理現象と水質改善効果

Hydraulic Phenomena and Water Quality Improvement Effects
Produced by Flush Operations at Nagaragawa Estuary Barrage

泊 宏*, 西川友幸**, 柳川 晃***

By Hiroshi TOMARI, Tomoyuki NISHIKAWA and Akira YANAGAWA

The flush operation was carried out in the summer of 1995 under the high temperature and very dry weather to improve the water quality in the upstream area of Nagaragawa Estuary Barrage.

The flush operation consists of the overflow operation to wash down phytoplankton, and of the underflow operation to increase DO at the bottom. When the flush operation was introduced, the water quality was reasonably improved, which was due to the change of flow patterns and to the increase of turbulent mixing diffusion caused by seiches and bores.

Keywords : Nagaragawa Estuary Barrage, flush operation, water quality improved, seiche, bore

1. はじめに

長良川においては、計画高水流量を安全に流下させるために河道の大規模浚渫を実施することとしている。長良川河口堰は、この河道の大規模浚渫に伴い発生する塩害を未然に防止するとともに、中部圏の発展に不可欠な新たな都市用水を愛知県及び三重県地域に供給するものである。長良川河口堰は、昭和43年の閣議決定を経て、昭和46年に事業に着手し、昭和63年からは堰本体を施工してきたところであるが、平成7年3月末に工事が完了(写真-1)し、7月6日に全ゲートを降下させた。

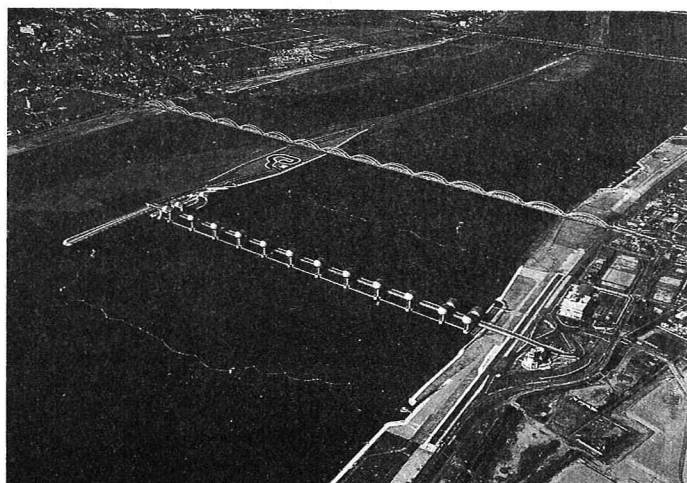


写真-1 長良川河口堰の状況

* 正会員 建設省中部地方建設局 河川部 河川調整課長 (〒460 名古屋市中区三の丸2-5-1)

** 建設省中部地方建設局 木曾川下流工事事務所 流水調整課長 (〒511 桑名市播磨字沢南81)

*** 水資源開発公団 長良川河口堰管理所 第一管理課長 (〒511-11 桑名郡長島町十日外面136)

事業最終年度であった平成6年度は、1年間かけて防災・環境・塩分等の調査を実施し¹⁾、運用開始後はモニタリングを実施している。これらの調査は公開で実施するとともに、その結果は公表してきている。

記録的な高温、少雨となった運用初年度の平成7年夏の水質は、各項目毎にみれば多くは良好に推移したが、一時的に局所的には底層DO（溶存酸素）の低下や、岸辺近くのヨシが自生している幅約4mの限られた水よどみ部で、数日間、アオコの発生等の現象が見られた。一方、本論文で述べるような堰上流水質の改善に注目したフラッシュ操作を試み、新しい知見が得られた。堰下流の水質については、フラッシュ操作の影響と潮汐の影響を同時に受け、かなり複雑に変化しており、フラッシュ操作の堰下流における水質改善効果については、さらにデータの収集が必要である。本論文では、平成7年夏に長良川河口堰で実施したフラッシュ操作によって堰上流で観察された水理現象と水質改善効果について述べる。

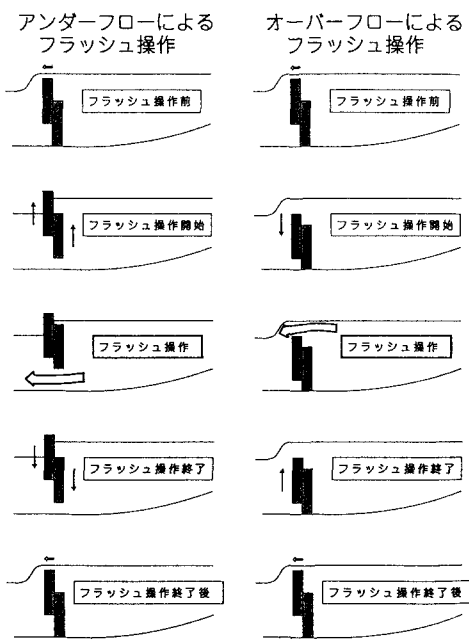


図-1 フラッシュ操作の概念図

2. フラッシュ操作の概要と水質変化

2. 1 フラッシュ操作の概要

長良川河口堰（河口から5.4km地点）は主ゲート（調節ゲート）の全てが2段式となっており、水をゲートの上から流すオーバーフロー、下段ゲートを上げてゲートの下を流すアンダーフローのきめ細かな操作が可能な構造となっている。平常時においては、魚道に必要な流量を確保したうえで、オーバーフローとアンダーフローの操作を行っている。平成7年夏には、堰上流水質の改善に着目し、1日のうち一時的に大きな流量を堰下流に流出させるフラッシュ操作（図-1）を実施した。フラッシュ操作は、オーバーフローまたはアンダーフローにより、継続時間1～3時間程度、最大流出量200～800 m^3/s 程度、総流出量1～3百万 m^3 程度で実施し（表-1）、1回のフラッシュ操作により1日の堰総流出量の3～5割程度を流出させた。フラッシュ操作実施期間中の水質改善対策と堰上流の水質変化を図-2に示す。なお、水質の変化に大きな影響を与える要因として、流量・降水量の増大、風による混合拡散、DO対策船の効果が考えられるが、フラッシュ操作の検討にあたっては、これらの要因について検討を行い、フラッシュ操作以外の影響が考えられる日のデータについては除外した。

表-1 フラッシュ操作実施状況表

月	日	操作方法	操作時間	継続時間 (分)	調節ゲート 最大流出量 (m^3/s)	調節ゲート 総流出量 (万 m^3)	イセくん底層DO (mg/l)	増	加
8	7/31	—	—	—	—	—	—	—	—
8	1	OF	16:00～19:00	180	2.93	2.22	5.3	8.5	3.2
8	2	OF	14:30～18:50	260	1.91	2.34	5.8	8.1	2.3
8	3	OF	14:20～17:30	190	1.91	1.99	4.4	5.7	1.3
8	4	OF	13:50～19:01	311	2.47	1.35	5.4	6.4	1.0
8	5	OF	13:55～17:10	195	2.09	2.15	4.7	5.9	1.2
8	6	OF	14:14～17:53	219	2.19	2.45	4.3	4.9	0.6
8	7	OF	14:01～16:30	149	1.92	1.65	3.8	5.4	1.6
8	8	UF	19:00～22:00	180	2.52	2.35	4.0	6.0	2.0
8	9	UF	19:00～22:00	180	3.00	2.42	3.6	4.9	1.3
8	10	UF	10:01～10:13	12	2.87	2.1	3.0	3.4	0.4
8	10	UF	12:57～14:00	63	3.07	1.05	3.2	4.9	1.7
8	11	UF	9:50～11:20	90	2.94	1.34	3.2	5.9	2.7
8	12	UF	10:03～11:20	77	4.01	1.42	4.9	5.9	1.0
8	13	UF	10:00～11:24	84	3.69	1.32	5.0	5.8	0.8
8	14	UF	10:37～11:26	49	5.01	1.25	4.3	6.4	2.1
8	15	UF	10:30～12:04	94	5.56	2.31	4.9	6.7	1.8
8	16	UF	10:50～11:45	55	6.03	1.74	5.3	6.1	0.8
8	17	UF	10:40～11:30	50	6.07	1.36	5.1	6.2	1.1
8	18	UF	13:30～14:19	49	8.13	1.36	4.3	5.0	0.7
8	19	UF	4:35～5:23	48	8.24	1.26	3.8	4.6	0.8
8	20	UF	4:30～5:35	65	6.25	1.44	3.9	6.0	2.1
8	21	UF	4:34～5:41	67	6.45	1.72	4.7	5.9	1.2
8	22	UF	4:30～5:52	82	5.39	1.56	4.3	6.1	1.8
8	23	UF	4:33～5:48	75	5.17	1.54	4.0	5.9	1.9
8	24	UF	4:30～6:36	126	3.45	2.18	5.1	6.1	1.0
8	25	UF	4:31～6:25	114	3.16	1.76	4.7	5.8	1.1
8	26	UF	6:35～7:34	59	3.52	9.0	4.6	6.1	1.5
8	27	UF	9:30～10:27	57	3.31	7.7	4.7	6.2	1.5
8	28	UF	9:35～10:14	39	4.00	6.2	5.8	6.3	0.5
8	29	UF	0:30～1:25	55	4.54	9.7	6.2	6.4	0.2
8	30	UF	22:47～4:10	323	2.28	2.91	6.5	7.0	0.5
8	31	OF	10:30～17:41	431	3.10	2.98	5.9	6.0	0.1
9	1	OF	4:30～13:04	514	3.17	7.09	6.2	6.2	0.0
9	2	OF	4:35～11:35	420	2.05	3.24	6.5	6.5	0.0
9	3	OF	4:30～8:28	238	2.42	2.72	4.2	5.0	0.8
9	4	OF	4:55～12:08	433	1.65	3.61	5.0	5.0	0.0
9	5	OF	5:47～10:26	279	1.00	1.26	5.1	5.6	0.5
9	6	OF	3:00～7:31	271	1.44	1.57	5.9	6.0	0.1

OF:オーバーフロー、UF:アンダーフロー
イセくん底層DO（開始前：フラッシュ操作開始時刻または、10分間のDO値の内小さい方
開始後：フラッシュ操作終了時刻の10分後までのDO値の内最大値
イセくん：河口から6.4kmにある水質自動監視装置の名称

2. 2 オーバーフローによるフラッシュ操作

オーバーフローによるフラッシュ操作を行っている場合の堰上流水域の流速分布は図-3に示すとおり表層付近で大きな流速となっている。クロロフィルa濃度は全般的に表層付近の濃度が高い。したがって、オーバーフローによるフラッシュ操作を行った場合、クロロフィルa濃度の高い水塊が堰下流に押し流されることとなり、水質改善に寄与することが期待される。特に、植物プランクトンの増殖が堰直上流付近で生じた場合には、水質改善効果が大きいものと考えられる。

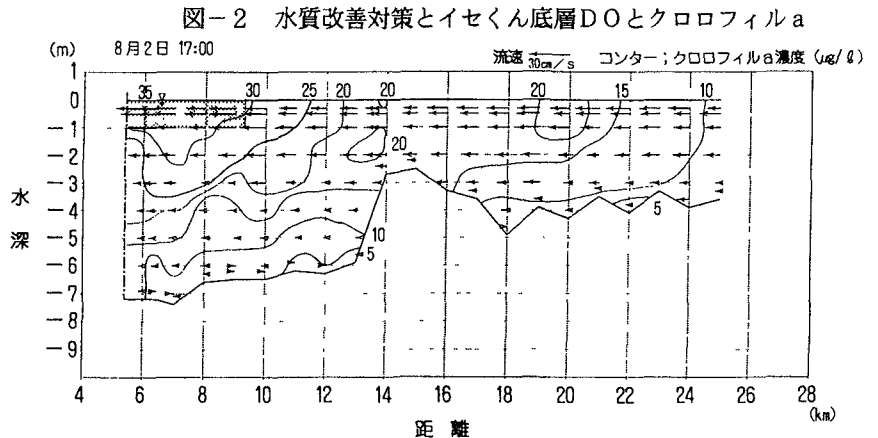
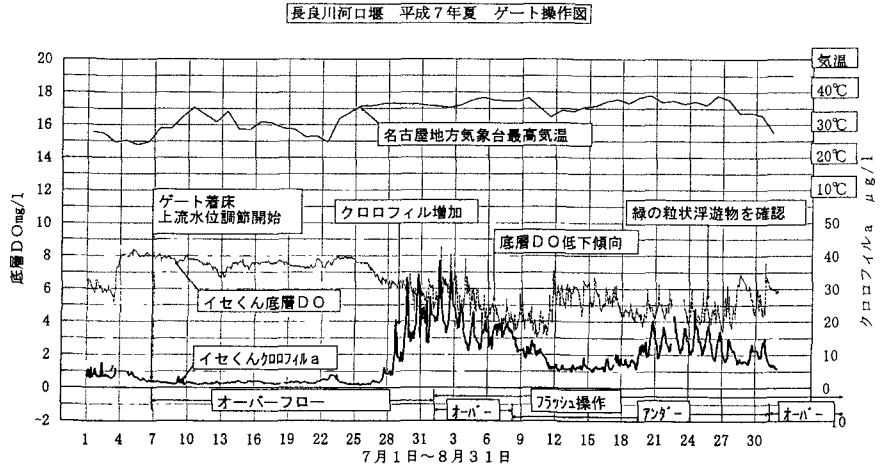
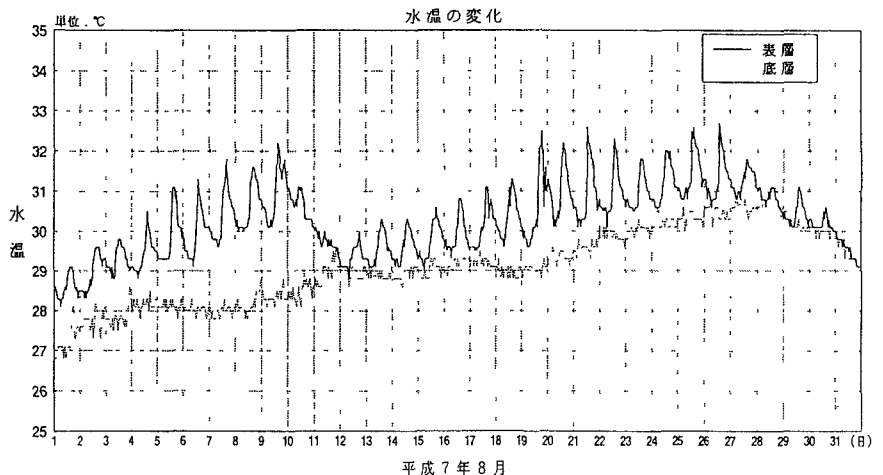


図-3 フラッシュ操作(オーバーフロー)時におけるクロフィルa、流速の分布(8月2日:17:00)
*矢印の長さが流速の大きさ、コンターがクロフィルa濃度を示している。

2. 3 アンダーフローによるフラッシュ操作

平成7年8月前半頃は、最高気温35℃以上の日が17日間(7月25日～8月10日)連続するという記録的な高温の日が続いた(図-2)。この期間の終り頃には、図-4に示すように堰上流域の表層と底層の水温差が最大3.8℃(伊勢大橋地点)となり、同地点の同日の最小水温差は1.8℃で、日中に形成された温度躍層が朝頃にも破壊されなかった。この期間の終り頃には、底層DOが低下するのが観察された。

堰上流水域において、底層DOの低下が見られた時に、アンダーフ



ローによるフラッシュ操作を実施することにより、D.Oが上昇した(図-5、表-1)。アンダーフローによるフラッシュ操作を毎日実施した8月後半頃は、最高気温35℃以上の日が14日間(8月14日～27日)連続し(図-2)、8月前半と同様に高温の日が続いた。この期間でも表層と底層の水温差が最大3.5℃生じたが、朝頃には表層と底層の水温差がほとんどなくなり、昼頃から夕方に温度躍層が形成されるものの、長時間にわたり形成されることはなく、1日のうちに破壊され、底層D.Oの低下はほとんど見られなかった。

3. フラッシュ操作 (アンダーフロー) によって生じた水理現象

3. 1 フラッシュ操作 (アンダーフロー) による流れ

アンダーフローによるフラッシュ操作を実施した場合の堰上流水域の流速を図-6に示す。オーバーフローの場合は表層付近の流速が非常に大きい(図-3)のに対し、アンダーフローの場合は大きい流速が表層から底層付近まで全体的に分布している。堰直上流の伊勢大橋地点

では、フラッシュ操作開始後すぐに流速が大きくなり、時間の経過とともに上流の地点において流速が増大し始めている。

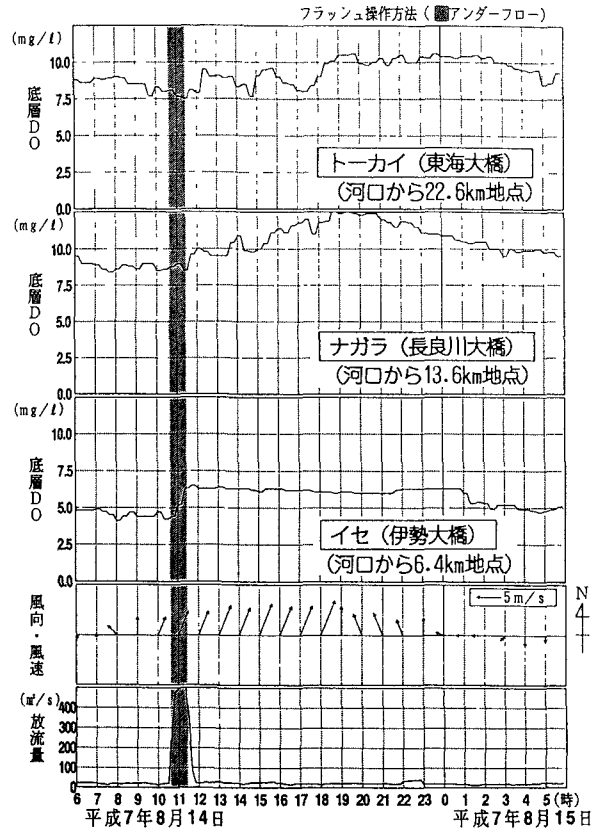


図-5 フラッシュ操作 (アンダーフロー) と各地点における底層D.O.の変化

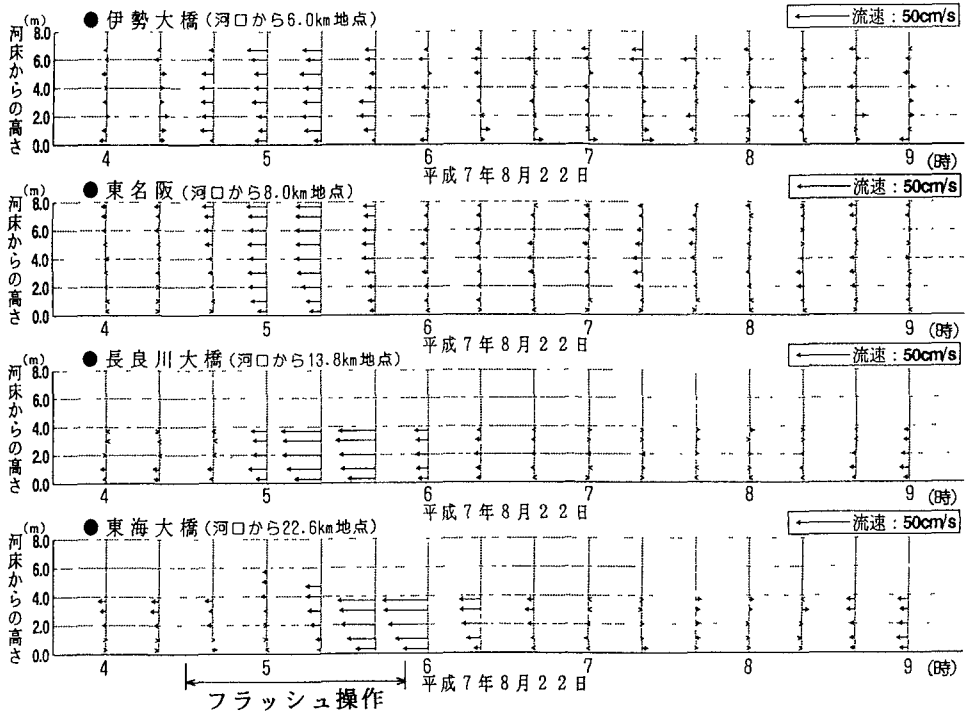


図-6 フラッシュ操作 (アンダーフロー) 時における各地点の流速分布

3. 2 段波の発生

堰上流の各水位観測所では、フラッシュ操作の開始時および終了時に時間遅れをもった水位の変化が生じている(図-7)。この現象は、以下の検討結果からフラッシュ操作時に図-8に示すような段波が生じたことによるものと考えられる。

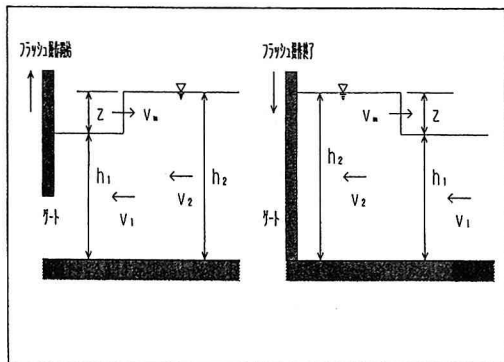


図-8 段波の模式図

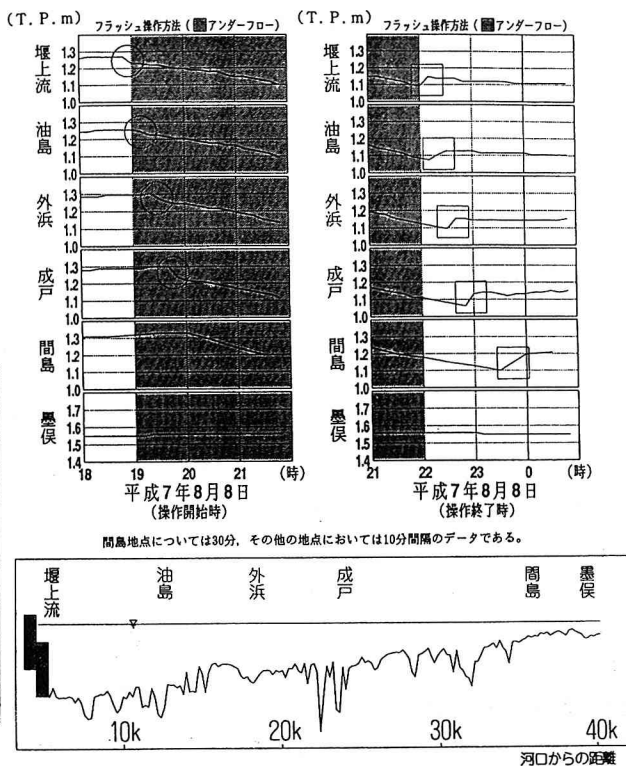


図-7 フラッシュ操作(アンダーフロー)時における各地点の水位変化

段波の伝播速度 V_m は(1)式で与えられる³⁾。

$$V_m = V_1 - C$$

$$C = \left\{ g \cdot \frac{A_2}{A_2 - A_1} \cdot \left[z + \frac{A_2 - A_1}{A_1} \cdot e \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 g : 重力加速度、 A_1 、 A_2 : h_1 、 h_2 に対応する流水断面積、 z : 段波の波高、 e : 段波により変化した面積 ($A_2 - A_1$) の図心までの深さ

(1)式で示す理論式を適用して算出した段波の進行速度と実測の進行速度を示すと図-9のとおりとなり、水位の観測が基本的に10分間隔であることに留意すれば、理論式による計算値と実測値は概ね一致しているといえる。

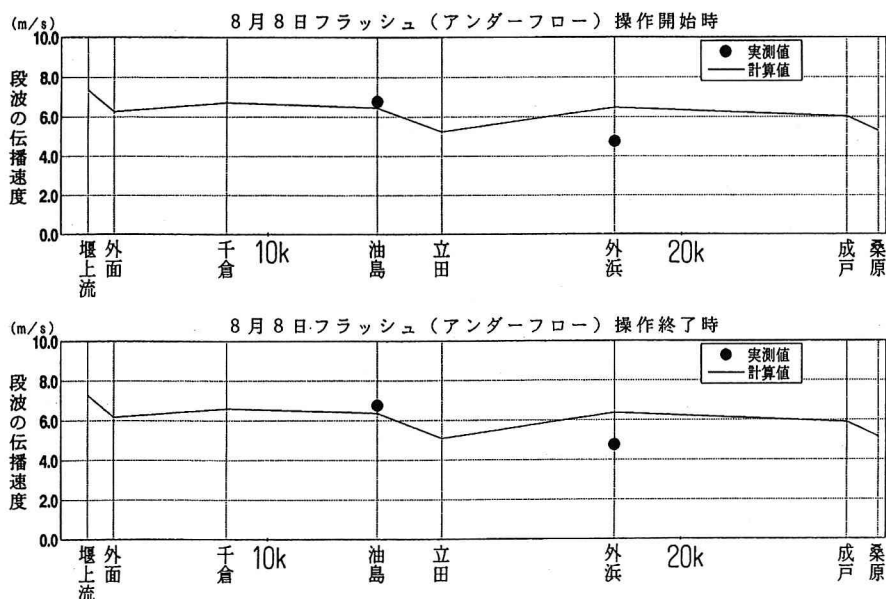


図-9 段波の進行速度の実測値と計算値の比較

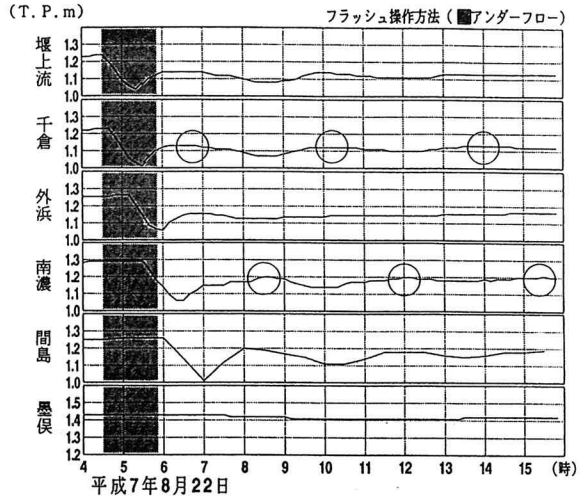
3. 3 セイシュの発生

フラッシュ操作終了による段波の後に、3～4時間周期の水位変動がみられた（図-10）。この現象は、以下の検討結果からフラッシュ操作の終了に伴って、堰上流水域において図-11に示すようなセイシュが発生したものと考えられる。

水位変動は、河口堰（河口から5.4km地点）から間島水位観測所（河口から35.9km地点）の間で観測され、この区間のうち下流側（例えば千倉水位観測所）と上流側（例えば南濃水位観測所）とでは位相が半周期ずれている。また、この区間の中間点付近である外浜水位観測所（河口から18.4km地点）はセイシュの節であると考えられ、水位の変動はほとんど見られない。

さらに、セイシュの節付近である長良川大橋地点及び東海大橋地点では、図-6に示すようにフラッシュ操作終了直後及び終了から約2.5～3時間後に全層で順流方向の流れが、またフラッシュ操作終了から約1～1.5時間後に全層で逆流方向の流れが生じており、図-11に示すようなセイシュに伴う水位変動により生じた流れが観測された。

セイシュの基本式は（2）、（3）式で与えられる²⁾。



南濃地点については1時間、間島地点については30分、その他の地点においては10分間隔のデータである。

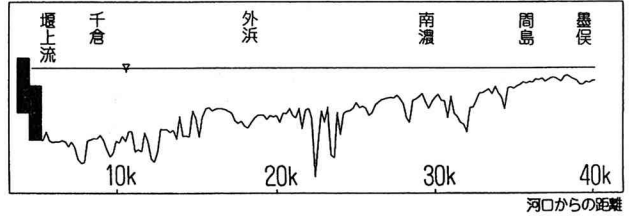


図-10 フラッシュ操作終了によるセイシュの発生

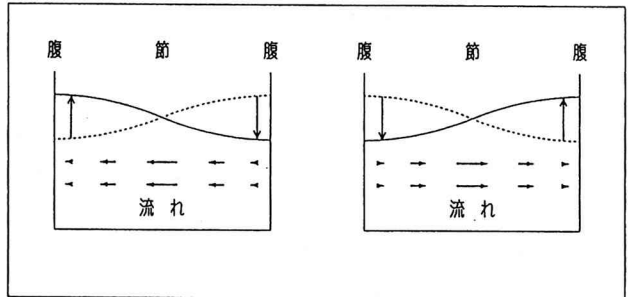


図-11 セイシュの模式図

$$\eta = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \varepsilon_{mn} \right) \quad (2)$$

$$T = \frac{2}{\sqrt{gh} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^{1/2}} \quad (3)$$

ここに、 η ：水位変動、 T ：周期、 t ：時間、 h ：水深、 a 、 b ：水域のそれぞれ x 方向（河川の縦断方向）、 y 方向（河川の横断方向）の長さ、 m 、 n ：0または正の整数で節数を表わし、 α_{mn} 、 ε_{mn} ：それぞれ初期条件によって決まる振幅と位相に関する定数。

対象水域では縦断方向のスケールが横断方向のスケールに比べて非常に大きく、横断面内のセイシュを無視すると、（3）式は（4）式となる。

$$T = \frac{2a}{m\sqrt{gh}} \quad (4)$$

理論式は閉じた水域のものであるが、長良川河口堰上流域は実際には上流端が閉じてはおらず、また、同時に発生した段波による影響や河床形状等による影響等が考えられる。水位変動については、間島観測所

(河口から35.9km地点)より下流で観測され、墨俣観測所(河口から39.4km地点)では見られないが、これはこの間で水深が浅くなっていること等が影響していると考えられる。河口堰から間島観測所の間が閉じた水域であると仮定して、(4)式を長良川河口堰上流域に適用し、 $m=1$ 、 $a=30.5\text{km}$ 、 $h=4\text{m}$ として試算すると、周期は2.7時間程度となり、理論式で算出した周期と実測された周期は概ね一致している。

また、(2)式を $m=1$ 、 $n=0$ とし実測値を参考に $x=0$ において $t=0$ で $\eta=0.05\text{m}$ 、 $t=T/4$ で $\eta=0$ と考えて、連続式(5)式を用いて変形すると(6)式が得られる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{h} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (5)$$

$$\bar{u} = -\frac{2\alpha_{10}a}{hT} \cdot \sin \frac{\pi x}{a} \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{T} t + \varepsilon_{10} \right] \quad (6)$$

ここに、 $\alpha_{10}=0.05$ 、 $\varepsilon_{10}=\pi/2$ である。

(6)式に $t=T/4$ を代入し、セイシュに伴って生じる流れの節における最大時の流速を試算すると、 $\bar{u}=7.8\text{cm/s}$ となる。長良川の上流から流入する流れもあることから、長良川の流量を東海大橋地点の流下断面積で除した値 1.8cm/s に 7.8cm/s を加減すると 9.6cm/s 、 -6.0cm/s (負の符号は上流向きの流速を示す)となる。図-6に示す東海大橋地点において、9時及び7時40分に実測した流速の全水深の平均は、それぞれ 9.5cm/s 、 -4.2cm/s となり、理論式で算出した流速と実測された流速は概ね一致する。

4. フラッシュ操作(アンダーフロー)による底層DO改善のメカニズムについて

フラッシュ操作(アンダーフロー)による底層DO改善のメカニズムとして、流れによる混合拡散、さらにセイシュに伴う水の動きによる改善効果の維持、また、段波に伴う運動エネルギーの消費等について、以下に述べる。

4.1 混合拡散の促進による底層DOの改善

フラッシュ操作によって堰上流水域底層部の低DO水塊が堰下流に流下したことに加え、流速の増大に伴って鉛直方向の混合拡散が促進され、底層DOが上昇したものと考えられる。開水路における二次元の拡散方程式、鉛直方向の乱流拡散係数、平均流速公式は、以下に示すとおりである²⁾³⁾⁴⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + F_c \quad (7)$$

$$K_x = (\kappa/6) h u^* = 0.068 h u^* \quad (8)$$

$$\frac{\bar{u}}{u^*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{k} \quad (9)$$

ここに、 C :濃度、 u 、 v :それぞれ x 方向(河川の縦断方向)、 y 方向(鉛直方向)の流速、

K_x 、 K_y :それぞれ x 方向、 y 方向の乱流拡散係数、 F_c :拡散量の単位時間あたりの増加率、 κ :カルマン定数(0.41)、 u^* :摩擦速度、 $\bar{u}$:平均流速、 R :径深、 k :粗度である。

鉛直方向の乱流拡散係数 K_y は(8)式に示すとおり流下方向の摩擦速度 u^* の関数であり、河川における摩擦速度は(9)式に示すとおり平均流速 $\bar{u}$ の関数である。フラッシュ操作を行った場合と行わない場合の平均流速(実測値)をもとに、粗度 k を 0.48m (manningの粗度係数 $n=0.035$ に相当²⁾)とした場合の鉛直方向の乱流拡散係数を試算すると、

フラッシュ操作実施時 平均流速 $\bar{u}=0.20(\text{m/s})$ $K_y=6.66 \times 10^{-3}(\text{m}^2/\text{s})$

フラッシュ操作未実施時 平均流速 $\bar{u}=0.01(\text{m/s})$ $K_y=3.33 \times 10^{-4}(\text{m}^2/\text{s})$

となり、フラッシュ操作を行うことによって、鉛直方向の乱流拡散係数は20倍となる。

4. 2 セイシュによる底層DOの改善

3. 2で述べたとおり、フラッシュ操作終了後にセイシュが発生しており、セイシュに伴う水位変動によって最大7.8 cm/sの流れが生じることが試算された。このセイシュに伴う水の動きによって鉛直方向の混合拡散が促進され、フラッシュ操作終了後に底層DOの改善効果を維持することに寄与していると考えられる。

なお、セイシュ半周期に伴って節付近で流動する水量は、(6)式を用いて $x = a/2$ において $t = 0$ から $t = T/2$ までの流量を積分すれば、(10)式で計算できる。

$$\int_{t=0}^{T/2} Q \, dt = B h \int_{t=0}^{T/2} \bar{u} \, dt = B h \int_{t=0}^{T/2} \left\{ -\frac{2 \alpha_{10} a}{h T} \cdot \cos \left(\frac{2 \pi}{T} t + \varepsilon \right) \right\} dt = \frac{B \alpha_{10} a}{\pi} \quad (10)$$

(10)式において、川幅 $B = 4.00$ (m)としてセイシュ半周期に伴って流動する水量を試算すると、19.4万 m^3 となった。

4. 3 段波による底層DOの改善

フラッシュ操作終了時には、それまで一定の流速をもって流下していた堰上流水域の水塊の運動エネルギーの一部が正の段波によって消費され⁵⁾、水の乱れに変換し、これによっても混合拡散が促進されられると考えられる。

4. 4 その他の要因

平成7年夏においては、堰上流水域では温度躍層による明確な二層化はほとんど見られなかったが、二層化していると仮定して、内部セイシュ、内部波について検討を行った。内部セイシュについては、基礎式⁶⁾を適用して基本周期を試算すると、約4.6時間となり、内部セイシュが卓越した現象であるとは考えられない。また、内部波（微小振幅波）と仮定し、Kelvin-Helmholtzの問題⁴⁾として試算した結果、内部波が生じている可能性のあることが考えられる。この他、内部波（内部進行波）の発生が考えられるが、現在までに観測しているデータのみでは検証が困難である。

5. おわりに

平成7年夏に長良川河口堰においてオーバーフロー、アンダーフローによるフラッシュ操作を実施した。フラッシュ操作（オーバーフロー）により、クロロフィルa濃度が高い表層付近の水塊を効率よく流下させることができたと考えられる。また、フラッシュ操作（アンダーフロー）を毎日実施した8月後半においては、堰上流域で表層と底層の水温差は1日のうちに解消され、底層DOの低下はほとんど見られなかった。これは、以上述べたように、フラッシュ操作に伴って、堰上流域で流れによる混合拡散、セイシュ、段波など様々な水理現象が複合的に発生したことによって、底層DOが改善されたことがわかった。

今後とも、データの収集に努め、より効果的なきめ細かいゲート操作方法を検討し、環境に十分配慮しつつ、長良川河口堰の適切な運用に努めていく所存である。最後に、本論文をまとめるにあたりご指導、ご助言いただいた長良川河口堰モニタリング委員会委員および関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社：長良川河口堰調査報告書，1995
- 2) 岩佐義朗：水理学，朝倉書店
- 3) 土木学会：水理公式集，1985
- 4) 玉井信行：密度流の水理，技報堂出版
- 5) 佐藤清一：技術者のための水理学，森北出版
- 6) 岡本巖：琵琶湖調査ノート，人文書院