

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

Numerical Analysis on Effects of Wind on Flow dynamics and Water Quality
in Upstream Area of Nagaragawa Estuary Barrage

*

**

松尾直規 ・ 鶴田周作

by Naoki MATSUO and Shusaku TSURUTA

This study deals with effects of wind on flow dynamics and water quality in upstream area of Nagaragawa Estuary Barrage. Numerical analysis by one-dimensional multi-layered model is executed under various boundary conditions of wind stress and discharge. The simulation results indicate that the effects of the wind stress on the flow behavior and water quality change vary with the wind direction, the wind velocity and discharge conditions due to the barrage gate operation. The phenomena in the real field are also explained by the simulation results.
Keywords: Estuary barrage, Numerical simulation, Wind driven flow, Water quality change

1. まえがき

長良川河口堰では、気温が上昇し堰より上流方向への南向きの風が卓越する夏季に、表層でのクロロフィル a 濃度の増加や底層 DO 濃度の低下が一時的にみられることが報告されている。¹⁾ また、この時のクロロフィル a の高濃度域は下流から上流方向へ時間の経過とともに移動する傾向があること、一方、上流から堰へ向かう風が吹くときには水深方向の混合が生じて底層部の DO 濃度の上昇がみられることもわかっている。しかしながら、こうした堰上流域における風の影響については未だ十分な調査・解析が行われていない。そこで、本研究では堰上流域の流れと水質に対する風の関与に着目し、風速と風向が水質保全のためのゲート操作（フラッシュ操作）時を含めた流れの挙動と水深方向の水質分布に及ぼす影響を数値解析により検討した。

2. 解析方法

対象とする堰上流域の流れは流出入に起因する流れと風による吹送流とが複合する複雑な挙動を示すと考えられるが、いずれにせよ流下方向と水深方向の変化が卓越する一方向多層流れとみなしうる。このため、解析にあたっては連続式、水温及び水質濃度の収支式、流れ方向の運動量保存式、静水圧の式より成る一次元多層モデル²⁾を用いる。流れ方向の運動量保存式では水表面に作用する風応力 τ_w を

* 正会員 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (〒487 愛知県春日井市松本町1200)

** 学生会員 中部大学大学院工学研究科 建設工学専攻 (同上)

$$\tau_s = \rho_a r_a^2 W^2 \quad (1)$$

として与え計算を行った。ここに ρ_a ：空気密度、 r_a^2 ：風の水面摩擦係数、 W ：水面上10mの高さの風速である。なお、 r_a^2 は湖流解析等で用いられてきた値を参考に0.0013とした。また、水深方向の渦動粘性係数 Dz は局所リチャードソン数 Ri の関数とし、次式で与えた。

$$Dz = 0.001 \text{EXP}(-0.5 Ri) + 0.000001 \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2)$$

解析に用いるメッシュは500.0m×0.5mとし、河口堰（河口から5.4km地点）から35.5km地点までを計算区間とした。計算は平成7年8月の実測資料に基づいて、オーバーフロー操作が行われた8月2日（最大流出流量191m³/s、継続時間260分）とアンダーフロー操作が行われた8月22日（最大流出流量539m³/s、継続時間82分）の流況を対象に実施し、ゲート操作前後の風の影響を検討した。なお、風速については各ケースとも正負で0、2、4、8m/sの計8パターンとし、正の値を上流から堰方向に吹く風、負の値を堰方向から上流に吹く風として24時間連続でそれらの値を与えて計算した。なお、計算時間間隔は30秒とした。

3. 解析結果と考察

3.1 流動解析結果³⁾

3.1.1 ゲート操作前（通常操作時）の流動解析結果

流入河川流量（約50m³/s）をほぼそのままオーバーフローで流下させるフラッシュゲート操作前の通常操作時に得られた結果を図-1～3に示す。堰の上流3km地点で見た場合、表層の流速は、図-1の無風時において1.3cm/sであるのに対し、堰方向の風を吹かせた図-2では約32cm/sと大幅に増加している。また、低層部では、図-1において表層と同様に堰へ向かって流下していた流れが、図-2では堰から上流に向かう流れとなり表層の吹送流に伴う循環流が形成されている。一方、図-3に示した堰から上流へ向かう風が作用する場合には、上流方向への表層流が堰上流25km付近まで現れ、その直上流で流下した流入水が中低層へ潜入して図-2の場合とは逆向きの循環流を形成している。このとき、堰へ向かう中低層の流れは、表層水を連行して図-1に比べてかなり大きな流速を示す結果となっている。また、逆流する表層水と流入水が出会う付近では、流れが緩やかとなり、停滞性水域の様相を示している。

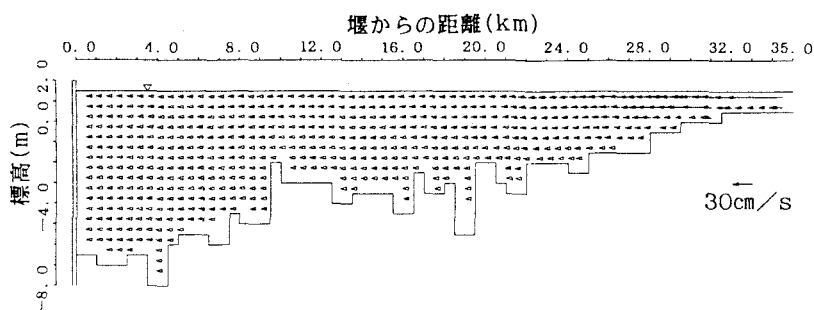


図-1 ゲート操作前の流動解析結果（ $W=0\text{m/s}$ ）

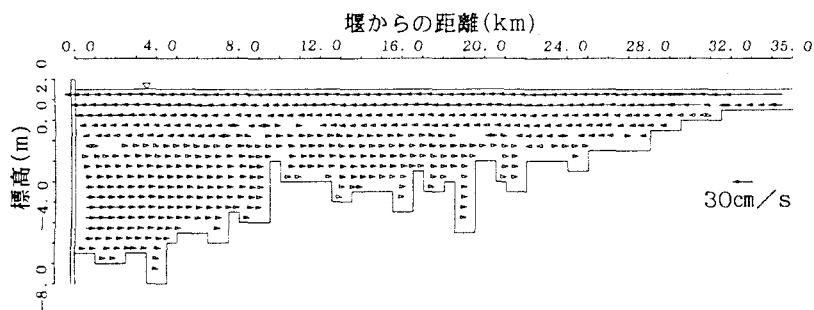


図-2 ゲート操作前の流動解析結果（ $W=+4\text{m/s}$ ）

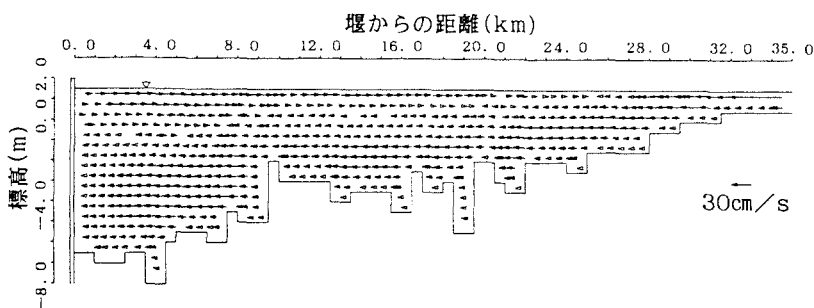


図-3 ゲート操作前の流動解析結果（ $W=-4\text{m/s}$ ）

図-3のような堰から上流へ向かう風の影響を受けた流れの状況は、現地の観測結果でも認められており、その一例を図-4に示す。図-4は、上流方向へ4m前後の風が吹いた時のものであるが、日時が計算対象ケースの1年後で流量条件やゲート操作条件等が異なるため直接の比較はできないが、定性的には図-3の計算結果とほぼ同様の流れの状況となっている。また、同図中のクロロフィルaの分布を見ると、図-3で述べた停滞性水域で高濃度となっており、上流方向への風に起因する藻類の集積を反映した結果が示されている。このような風に起因する流れと藻類の挙動との関係は、長良川河口堰における夏季の藻類増殖とその集積域の推移を考える上で重要な要素の一つであり、今後さらに検討を要する課題である。

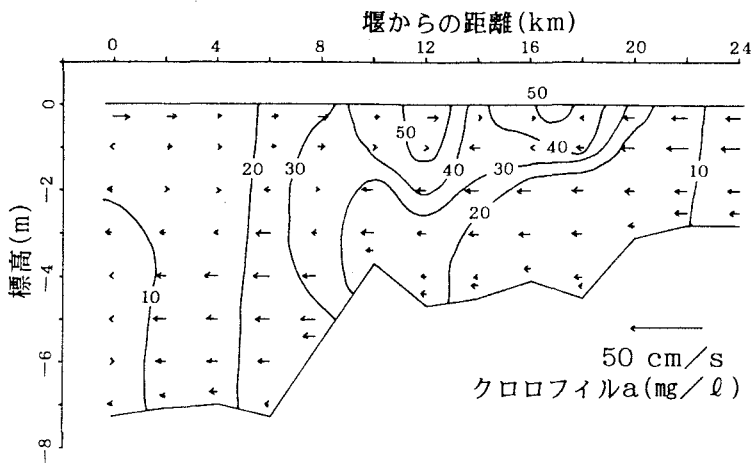


図-4 実測の流速・クロロフィルa分布図

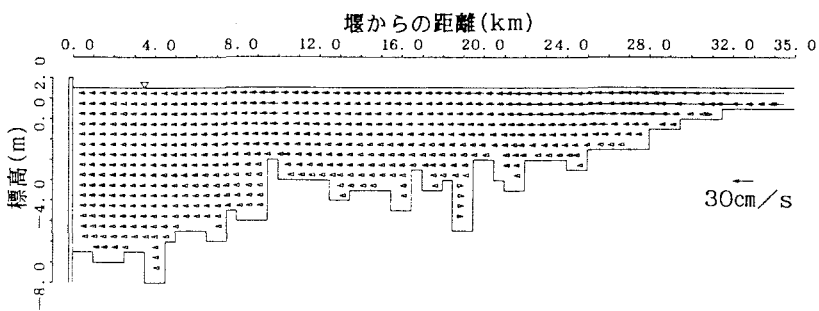


図-5 オーバーフロー操作時の流動解析結果 ($W=0\text{ m/s}$)

3. 1. 2 オーバーフローラッシュ操作時の流動解析結果

図-5～7にそれぞれ0、±4.0m/sの風を吹かせた時の流動解析結果を示す。図-1と図-5及び図-2と図-6を比較すると、オーバーフロー操作（最上層より放流）に伴い表層の流速が無風時では操作前の約4倍に増すのに対し、下流方向の風が影響するときには操作前の1.2倍程度になるに過ぎない。また、図-5と図-6とを比較すると、風の影響で後者の表層流速が7倍程度大きくなるが、流動状況はそれぞれ前述の図-1、2と同様である。ただし、

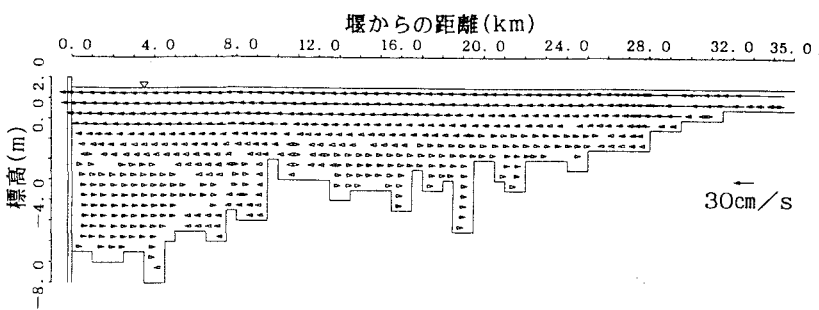


図-6 オーバーフロー操作時の流動解析結果 ($W=+4\text{ m/s}$)

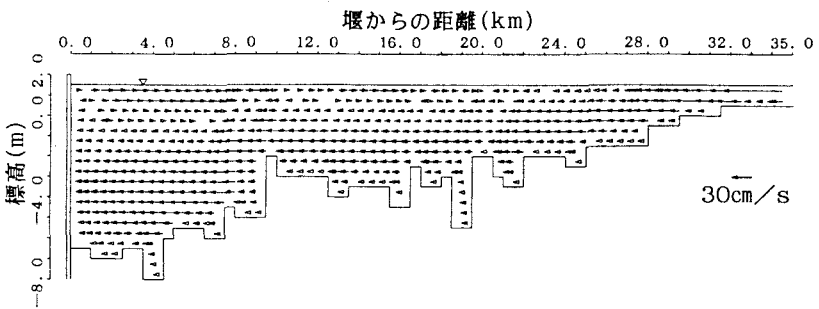


図-7 オーバーフロー操作時の流動解析結果 ($W=-4\text{ m/s}$)

上流へ循環する中低層の流速

は、同じ風を吹かせた図-2の場合より減少しており、フラッシュ操作による多量の放水を反映した結果となっている。一方、図-7では図-3と同様に上流方向への風的作用を受け表層で堰より上流に向かう流れ、中低層部で堰へ流下する流れとなるが、それぞれの流速はフラッシュ操作に伴う下流方向への加速の影響を受け、表層では図-3の場合より減少し、中低層では増大している。

3. 1. 3 アンダーフローフラッシュ操作時の流動解析結果

図-8～10に風を考慮しない時、ならびに $\pm 4.0\text{m/s}$ の風が吹く時の結果を示す。図-1と図-8、9とを比較すると、後2者ではいずれもアンダーフロー操作（底面から2層より放流）により下流方向へ流下する流れが増しているが、図-9では下流方向への風が作用することにより表層での流速が風を考慮していない図-8に比べ2.2

3. 1. 4 風速・風向の変化に伴う流動変化

図-11～13に、堰上流3Km地点で見たときの風速・風向と流速との関係を示す。前述の流動解析結果が示すとおり、上流から堰方向に吹く風の場合、いずれの図においても表層の流下流速は式（1）で与えた風応力に

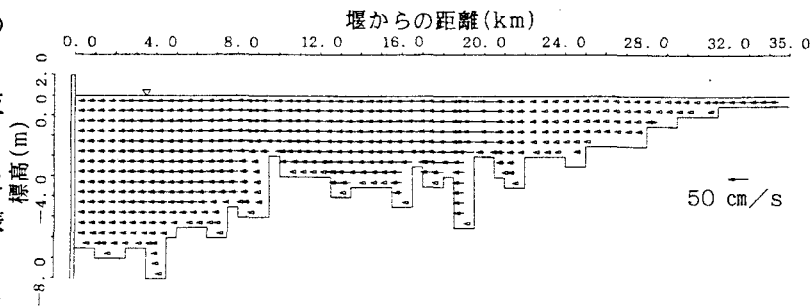


図-8 アンダーフロー操作時の流動解析結果 ($W=0\text{m/s}$)

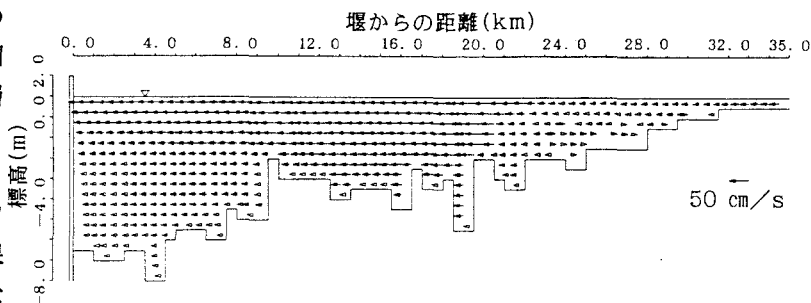


図-9 アンダーフロー操作時の流動解析結果 ($W=+4\text{m/s}$)

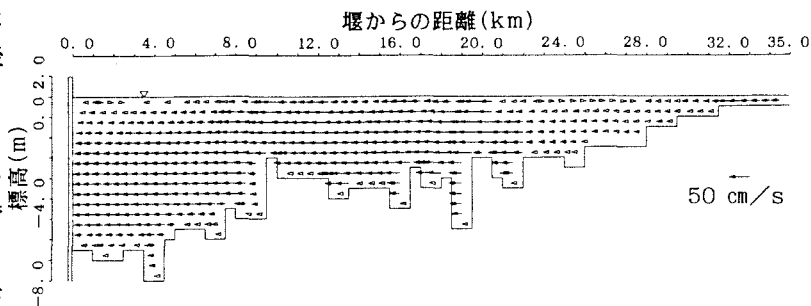


図-10 アンダーフロー操作時の流動解析結果 ($W=-4\text{m/s}$)

倍程度の値となっている。また、中低層部では表層での流速増加分が差し引かれる形で流速が図-8のそれより緩やかとなっている。一方、図-10では上流方向への風的作用により表層での流下が減ぜられ、一部の水域で表層水が逆流する状況が見られるが、中低層部での流速は無風時の図-8よりも増大している。こうした流動状況の変化は、前述のオーバーフロー操作時のそれと同様の傾向を持つものであるが、風の影響の程度は対象とした両操作時の流出流量の違い（最大値でアンダーフロー時がオーバーフロー時の2.8倍）を反映して異なるものとなっている。

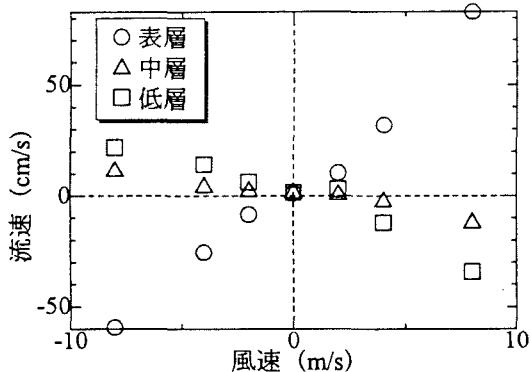


図-11 ゲート操作前の流速と風速の関係

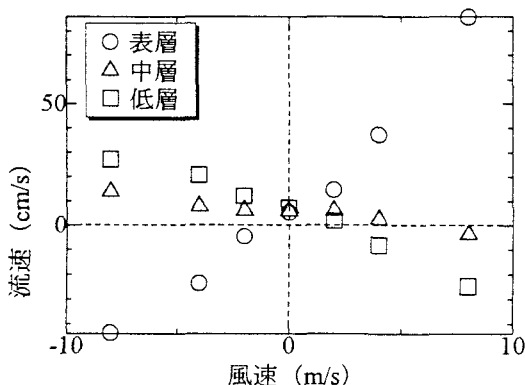


図-1 12 オーバーフロー操作の流速と風速の関係

比例するように風速の増加とともに増す傾向がある。それに対応して中低層の流下流速は減少し、流出入に起因する流れが小さい場合には風速が4m/s以上になると上流方向へ逆流する。また、低層では中層に比べ流下速度の低減が顕著となるが、アンダーフロー時にはその程度は比較的小さい傾向がある。なお、低流量時にこの向きの風速が大きくなると、表層を流下した高濃度のDOを含む水が堰で反転して低層部へ供給され、低層部のDO濃度の改善を促す要因の一つになると考えられる。

堰から上流方向への風が吹く場合には、対象としたアンダーフロー時の風速2m/sのケースを除くと表層流は逆流し、その値は風速に見合う風応力に対応して増す傾向が認められる。この場合、中低層部の流れはいずれも下流向きであり、風速の増加とともにその値を増すことも分かる。このような流れの変化は、図-4に示したようなクロロフィルa濃度の分布に関係するとともに、その風速が大きくなる時には低層部へのDO供給が期待できるものであろう。

3. 2 水質解析結果

図-1 4～1 6に、アンダーフロー操作前の風の有無に伴う水温・DO分布の解析結果を、図-1 7～1 9には同操作後のそれらをそれぞれ示す。なお、これらの計算では実測値を内挿補間して与えた初期値を

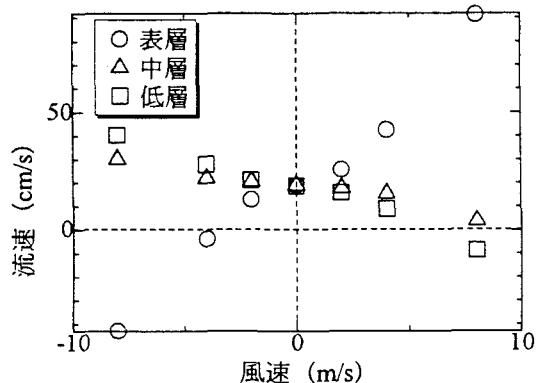


図-1 13 アンダーフロー操作の流速と風速の関係
堰からの距離 (km)

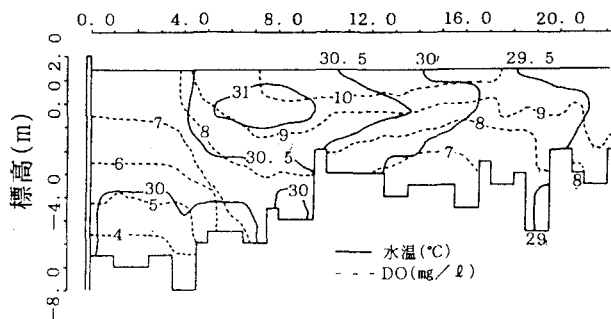


図-1 14 ゲート操作前の水温・DO図 (W=0m/s)
堰からの距離 (km)

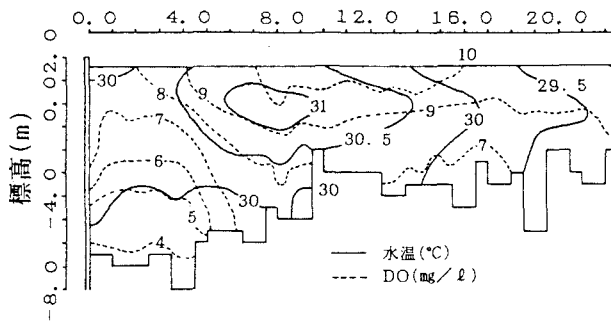


図-1 15 ゲート操作前の水温・DO図 (W=+4m/s)

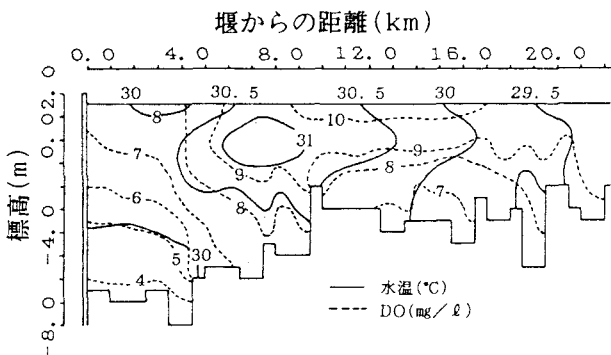


図-1 16 ゲート操作前の水温・DO図 (W=-4m/s)

用い、移流・分散による変化に加えて水温については日射及び水表面での熱収支を、DOについては藻類の光合成による生産、水面での再曝気、水中及び底泥中の有機物による消費を考慮した。

図-14と17の比較では、無風時でもアンダーフロー操作により低層部で流速が増すのに伴いDO値の低い水塊が流出し、それに連行される表層、中層水中のDOが低層部へ堰近傍において供給される状況が示されている。図-15と16では通常操作時に風的作用を受ける場合の変化が見られるが、堰へ向かう方向の風を与えた図-15では、前節で述べた流動状況に対応してアンダーフロー操作後の図-17に示されたと同じような低層DOの改善傾向が認められる。一方、図-18、19では、ゲート操作時の流出流量が大きかったためその増大に伴う変化が支配的で、風の影響はあまり顕著でない。しかしながら、堰より上流方向への風の場合には、水温、水質濃度が水深方向により一様化する傾向が見られる。

なお、ゲート操作時における流れと水質に及ぼす風の影響は、ゲートの操作条件やそのときの水温分布状況などにより異なるため一概に言うことはできず、より多様な条件下でのさらなる検討が必要である。

4. あとがき

風が長良川河口堰上流水域の流れと水質に及ぼす影響を解析した結果、その影響は風向に関わらず風速が増すほど大きいことが確かめられるとともに、少なくともその定性的特徴を明らかにすることができた。また、一部ではあるが、現地での流れと水質分布の実態を説明する結果も得られた。しかしながら、風の影響の定量的な検討や、多様な現実条件下での検討は今後の課題であり、より長期的な検討をも含めてさらに研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 建設省中部地方建設局、水資源公団中部支社；平成7年度 長良川河口堰モニタリング年報、第1巻
- 2) 岩佐義朗編著；数値水理学、丸善、pp.107-136
- 3) N.MATSUO, H.TOMARI, etc.; Water Quality Control by Gate Operation at Nagaragawa Estuary Barrage Proc. of International Conf. on Water Resources and Environmental Research, Vol. II, pp.407-414

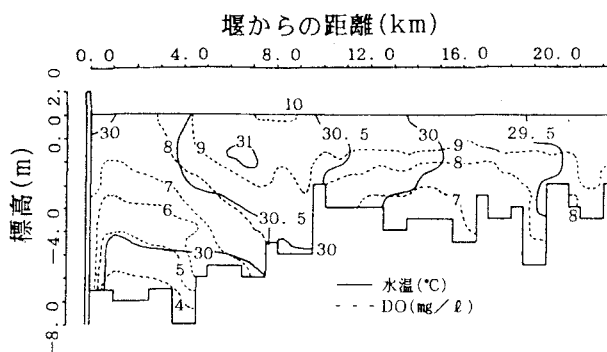


図-17 ゲート操作後の水温・DO図 ($W=0\text{ m/s}$)
堰からの距離 (km)

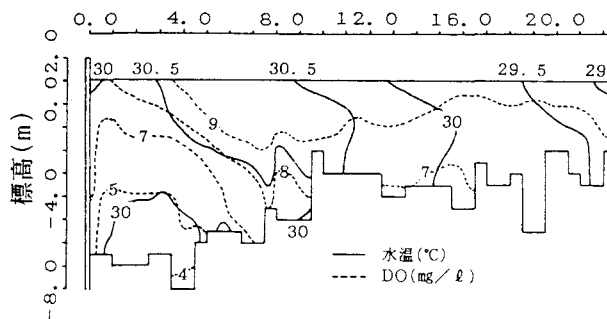


図-18 ゲート操作後の水温・DO図 ($W=+4\text{ m/s}$)
堰からの距離 (km)

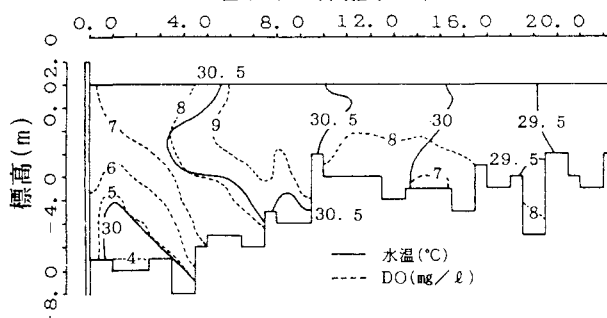


図-19 ゲート操作後の水温・DO図 ($W=-4\text{ m/s}$)