

## 循環流式エアレーションによる酸素移動の観測

Observation of dissolved oxygen in stagnant  
water body by use of airlift

和泉 清<sup>\*</sup>、山崎正和<sup>\*\*</sup>、吉川秀夫<sup>\*\*\*</sup>

Kiyosi Izumi, Masakazu Yamazaki and Hideo Kikkawa

This observation was carried out to improve water quality in the tidal reach by aeration where pollutant settles down and accumulates on a river bed because of low river velocity. We found out by field test flow, an airlift type is useful to improve water quality as remedy of these problems in such reach. A few typical results are presented mainly referring to the dissolved oxygen in the placid water by using the circulated flow of the airlift.

Keyword, tidal reach, improve water, circulated flow, airlift

### 1、緒言

本文は、気泡循環流を応用したエアレーションによる曝気方法を現地に適用し、水質、底質の改善策の一つとしての循環流式エアレーションによる酸素移動に関する現地観測を行ない、水質浄化対策としての効果について検討したものである。

この方法は、矩形型筒の下端に取り付けた散気管から散気し、下向流を発生させるための側壁を両サイドにもつ装置により気泡循環流を発生させ酸素を効果的に水中移動または滞留させるものである。

その方式には、自走式巡回装置によるものと固定型装置による方式があるが、今回は後者の場合について現地観測を行なったもので、対象とした河川は、滞留時間の長い水域の江東内部河川の一つで、雨天時における下水道や路面からの排水によるヘドロ等が堆積する仙台堀川である。

これら江東内部河川は、下水道の整備、未整備に拘らず流域からの生活系・工場系からの排水並びに路面等からの雨天時流出による汚濁物質が堆積する汽水域で、水質浄化対策として、現状では、浚渫工による堆積物の除去が唯一の方策となっていてところである。

---

\* 正会員 東京都土木技術研究所主任研究員

(〒108 港区港南1-1-18)

\*\* 学生員 早稲田大学理工学部土木工学科

(〒160 新宿区大久保3-4-1)

\*\*\* 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

(〒160 新宿区大久保3-4-1)

## 2、現地実験の概要及び観測方法

実験は、予備実験において効率的な気泡循環流を発生させる方法<sup>1)</sup>により現地に適用する場合の実験条件を決め、東京都江東区清澄地先の仙台堀川の清澄排水機場の導水溝(幅3m、長さ5m、水深約3m)において、図-1に示すようなエアリフトによる気泡循環流の特性と酸素移動の状況について測定した。また、同時に丹羽、関根、吉川らによる静止水中における気泡噴流に関する研究<sup>2)</sup>を参考に、長さ5m、外径60mm、 $\phi 1\text{mm}$ の孔106コ(孔間隔5cm)の散気管による方法についても測定を行なった。

この箇所は、潮汐の影響により最大時14~15cm/sの流れがある。そこで、水位変化が少なく流速の遅い条件を選択し、測定時の流速が、1~3cm/s程度の日時において、表-1に示すエアリフトの場合、散気量3ケース、リフトの高さ(以下、リフト長とする)を2ケースの計6ケースと散気管により空気量のみを変化させた3ケースの実験を行なった。

表-1 現地における実験条件など

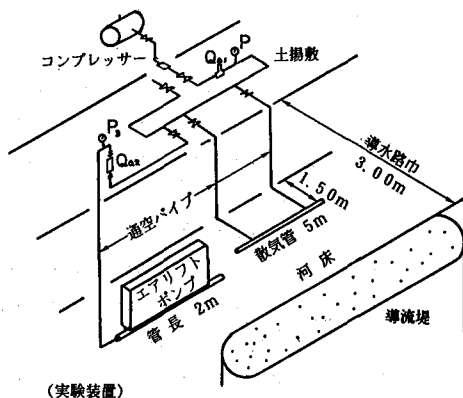
| 実験<br>ケース | 水深<br>(cm) | 散気量<br>(l/min-m) | リフト<br>長 (cm)                                            | $h_a$<br>(cm) | $h_1$<br>(cm) | $\Delta H$<br>(cm) |
|-----------|------------|------------------|----------------------------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|
| Case ①    | 350        | 0                |                                                          |               | 15            |                    |
| Case ②    | 326        | 250              | 300                                                      | 11            | 15            | 20                 |
| Case ③    | 328        | 150              | 300                                                      | 13            | 15            | 8                  |
| Case ④    | 347        | 50               | 300                                                      | 32            | 15            | 7                  |
| Case ⑤    | 350        | 150              | 200                                                      | 135           | 15            | 7                  |
| Case ⑥    | 324        | 250              | 200                                                      | 109           | 15            | 20                 |
| Case ⑦    | 335        | 350              | 200                                                      | 120           | 15            | 13                 |
| 散気管       |            |                  | $h_1$ : リフト下端から<br>底面までの長さ<br>$h_a$ : リフト上端から<br>水面までの長さ |               |               | 4~<br>6            |
| Case1     | 341        | 212              |                                                          |               |               |                    |
| Case2     | 341        | 318              |                                                          |               |               |                    |
| Case3     | 333        | 636              |                                                          |               |               |                    |

(注)  $\Delta H$ :水面の盛上り高さ

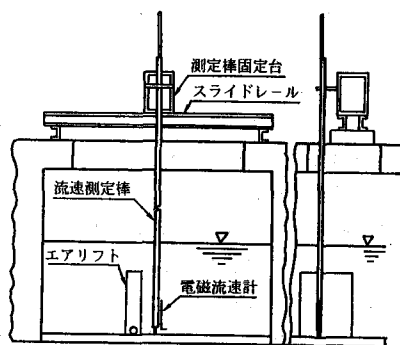
観測方法は、図-1に示すような水路横断面方向のハリを利用し、その上に流向流速計(電磁型)を移動させるスライドレールを組立て、さらに、水深方向に対して流向流速計が移動可能なアルミニウム性二重中空製角柱とそれを固定する装置を2台用意し、循環流について6測線、5水深、計30点の計測を行ない、エアリフトへの注入量を正確にするための流速測定を各実験ケースごとに行なった。また、リフト設置位置点を挟み流速測定と反対側においてDO、Cl、水温等の測定を同時に行なった。さらに、循環流に関する測定終了後に河川縦断方向における水質測定も行なった。

## 3、循環流の特性の概要

水中のDOは、リフト間での水と空気との接触およびリフトから吹き出した気泡噴流のリフト外側での水の循環に伴う細かい気泡の巻き込みによって定まるものであり、水中での酸素移動を明らかにするために水の循環流の特性<sup>1)</sup>を明らかにする必要があるが、本文では、循環流による酸素移動に関するものの概要を示



(実験装置)



(流速測定)

図-1 現地実験における装置及び測定方法

す。リフトによる循環流は、水深3.33m~3.50mの状況において散気量を変化させることによって流向、流速が異なる。図-2は、一例としてリフト長、3m、散気量 250(l/min-m)の表-1に示すCASE②及びリフト長、2m、散気量 350(l/min-m)のCASE⑦並びに散気管によるCASE2の各流速ベクトルを示したものである。

リフト長3mの場合、表面水平流、下向流、底面流の各流速は、散気量の多い方が早く、散気量 250(l/min-m)の(CASE②)における平均流速を 1とした場合、散気量 150(l/min-m)の(CASE③)における流速は、その約 2/3、散気量 50(l/min-m)の(CASE④)におけるそれは、1/4程度である。また、最大流速では、CASE②の散気量 250(l/min-m)の場合と比べ、CASE③の散気量 150(l/min-m)におけるそれは、約1/2、CASE④の散気量 50(l/min-m)の場合、約1/5である。

次に、リフト長を2m(水深に対するリフト長の比、0.6)の場合は、散気量が 150(l/min-m)のCASE⑤の場合の表面水平流の平均流速を 1とすると、散気量 250(l/min-m)のCASE⑥の平均流速は、同値であるが、散気量 350(l/min-m)のCASE⑦におけるそれは、約 1.3である。また、壁面に沿う下向流の平均および最大流速の値は、それぞれ、1.1倍、1.3倍である。

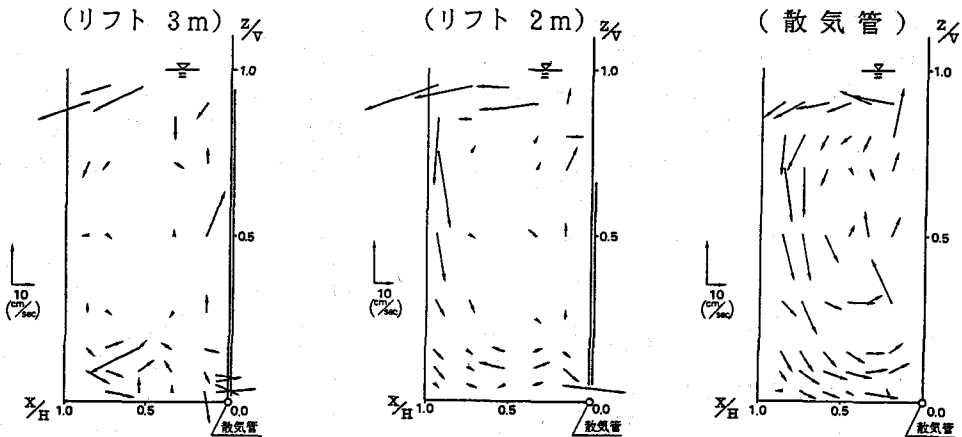


図-2 リフト及び散気管による気泡循環流の流速ベクトル

次に、散気量が、250(l/min-m)の同一量でリフト長が異なる場合、リフト長が3m(水深との比が約 0.9)のCASE②の場合は、リフト長が2m(水深との比が約 0.6)のCASE⑥の場合に比べ、表面水平流の平均流速並びに最大流速は、前者が後者の3~4倍と大きい。しかし、壁面に沿う下向流は、CASE②の方が明瞭でない。また、底面における加速領域における流速流向には、両者に差がない。さらに、散気量が 150(l/min-m)のCASE③及びCASE⑤の場合についても同様であった。以上の観測結果から、水路幅にもよるが水深とリフト長の比あるいは、表-1の  $h_1$  の大きさを考え、散気量を決めることにより効率的な循環流を発生させることができるものとする。すなわち、リフト長と水深の比が小さい場合は、散気量を多くし、両者の比が大きい場合は、散気量を少なくすることによって効率よく、一様な循環流を発生させることができる。よって、水路幅が約 3mの本実験例においては、図-2に示すリフト長が 2mで散気量 350(l/min-m)のCASE⑦の場合が最も効果的な循環流であったと考える。

また、散気管のみによる場合については、丹羽、関根、吉川ら<sup>2)</sup>によれば、底面近傍の加速領域を除けば、気泡の直径及び上昇速度は、散気量や水深によらず、ほぼ一定値であり、アスペクト比が 2の場合に流速が最も大きくなり効率よく循環することを指摘している。

本実験箇所は、水深と水路幅の比が約 1であるが、水路中央に長さ 5m、直径 60mmの塩ビ管に  $\phi 1$ mmの穴 106個をもつ散気管から散気量 212 l/min-m、318 l/min-m、636 l/min-mをそれぞれ散気した。この場合の循環流は、表面水平流、壁面に沿う下向流、散気管方向に吸収される流れの平均流速及び最大流速が散気量

の大きさによって支配されていることを現地観測からも確かめることができた。しかし、水深が大きいため、散気量が少ないCASE1では、上層部における壁面に沿う下向流の流速が小さくなる。しかし、底面附近の加速領域においては気泡噴流に伴う吸引作用により流速が早くなり、そのために、連行された気泡が滞留されている状況が見られた。

次に、各実験ケースにおける気泡噴流に伴う水面の盛り上がり(以下、 $\Delta H$ と略す)は、表-1に示すとおりであるが、エアリフトによる場合、 $\Delta H$ (7~20cm)の大きさは、散気量の大きさにほぼ比例している。しかし、散気管のみによる場合は、散気量の大きさによる影響を確認することができなかった。しかし、気泡を集中的に放散する位置と水面までの長さ、表-1の  $h_2$  と散気量との関係が大きいことを確認することができた。

従って、同程度の散気量を対象とした場合、散気管による循環流は、エアリフトによる循環流に比べ小さく、少ない散気量で、効率的な循環流を発生させるためには、水路幅や水深などの条件に支配されるが、エアリフトを用いた方が得策であることを確かめることができた。

#### 4、気泡循環流による酸素移動

本実験箇所の水質状況は、水温が28℃前後の状況において、表-2に示すように DOの値で見ると淡水と海水の境界面、すなわち水深が、1.5m~2.0mにおける値が、0.4~1.1(mg/l)で、水面下0.5m、底面3.5mにおける値が2.0(mg/l)程度の状態にある。このような状況において、各実験ケースによるDO濃度の付加状況は、図-3のようになった。表-1に示すリフト長が 3mのCASE②では、散気終了後(約1時間20分後)の各半横断面測

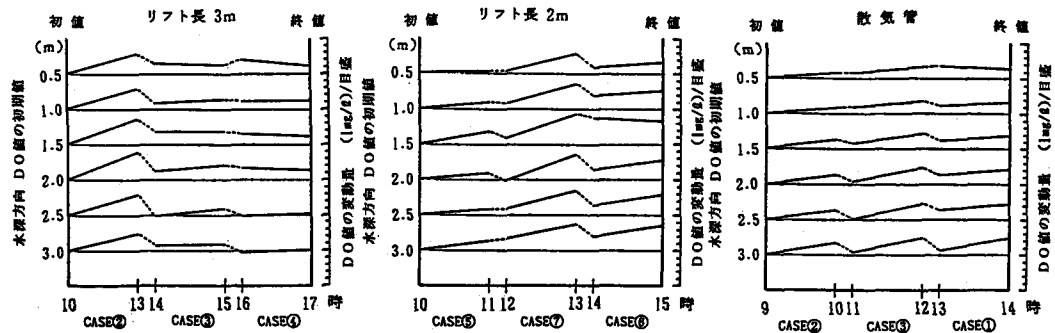


図-3 リフト及び散気管による散気量とDO濃度の変動

点(5測線、6水深点の計30点)のDO値が、平均値で平常時における値の約 3倍に相当する4~6(mg/l)となり、散気前には塩淡水の二層を形成していたものが散気後、一様化し、Clの値は、約11,000(mg/l)となった。また、図-3から明らかなように、CASE②の実験終了後、4時間後

表-2 平常時における河川水質

(単位:mg/l)

| 水深<br>(m) | リフト長 3m |       | リフト長 2m |       | 散気管のみ |       |
|-----------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|
|           | DO      | Cl    | DO      | Cl    | DO    | Cl    |
| 0.5       | 1.57    | 8100  | 2.15    | 8400  | 1.01  | 8480  |
| 1.0       | 1.44    | 8760  | 1.20    | 9990  | 0.91  | 9800  |
| 1.5       | 1.03    | 9890  | 0.38    | 11400 | 0.49  | 10500 |
| 2.0       | 0.75    | 10400 | 1.14    | 11900 | 0.44  | 11000 |
| 2.5       | 1.84    | 10900 | 1.34    | 12000 | 0.39  | 11500 |
| 3.0       | 1.98    | 11300 | 0.85    | 13000 | 0.07  | 12500 |

に再開したCASE③の開始時点におけるDOの値は、CASE②の影響が残っているため、平常時における値の約2倍に相当する、1.7~3.0(mg/l)となっており、CASE③の効果を平常時における場合と比較することはできないが、このケースは、散気量が少なかったため、水面および底面におけるDOの値は、循環流による効果を確認することができなかった。しかし、水面下2m以下の平常のDOの値が低い箇所においては、DO値を 1(mg/l)程度上げることができた。また、三回目の実験、CASE④の場合も同様に、CASE ③の実験の影響により、水面下2.5m以下の部分での効果は確認

できたが他の測点では、変化が見られなかった。次に、リフトの長さが 2m の場合については、CASE⑤、CASE⑦、CASE⑥の順で実験を行なった。リフト長 3m の場合の実験から 1 日経過した実験開始時における水質状況は、前回より悪い状態で、DO の値は、0.4~2.2 (mg/l) の状況にあり、CASE⑤の場合、散気量が小さいため、表面水の 2.0 (mg/l) 以上の箇所における効果は、0.3~0.8 (mg/l) 程度、他の箇所においては、1 (mg/l) 程度、上昇したにすぎなかった。二回目のCASE⑦の場合、CASE⑤の影響が残っていたが、散気量が大きいので、各測点において、2 (mg/l) 以上 DO の値が上がり、平常時の 2.5 倍以上の上昇効果があった。

また、三回目のCASE⑥の場合は、散気量の大きいCASE⑦の影響で、散気開始時の DO の値が通常の値に比べ、1.5~4 倍の値となっており、CASE⑥の実験効果を明らかにすることはできなかった。しかし、水質の良い測点において約 0.8 (mg/l)、悪い箇所では 1.6 (mg/l) 以上、DO の値を上げることができた。

以上のように、CASE⑦における付加量が大きかった。また、散気管による場合については、現地の水深が深いので、上層部の噴流が弱くなり、その結果、図-3 から明らかなように上部の DO 値の付加は小さい。しかし、下層部における DO 値の付加は大きい。この場合、既述のように散気した空気が水平噴流になり放散し底面加速領域における流速が散気位置からの吸引作用により早くなり、そのために気泡が水中の深部に滞留するためと考える。以上のように、今回の現地実験結果からも散気量の大きさによって DO 濃度の付加効果が支配されており、このことから循環流の流速が早い方が DO 濃度の付加効果が良いものとする。

次に、図-3 に示すように各実験ケースの終了から次のケースの開始までの間が、約 1 時間以上あり、その間における DO 濃度の減少現象から測定値による酸素消費速度を推定すると散気量の大きい場合で、2.5 (mg/l) / hr となった。これに対比するために、総酸素移動容量係数<sup>3)</sup> (以下、KLa と略) の推定を行なった。非定常法

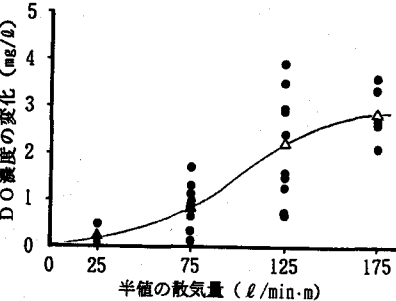


図-4 単位長さ当りの散気量と DO 濃度

によるエアレーションタンク内における酸素供給能力を表す KLa は次式によって算定される。

$$\frac{dC}{dt} = KLa (C_s - C) \tag{1}$$

$$KLa = \frac{2.303}{t_2 - t_1} \log \frac{C_s - C_1}{C_s - C_2} \tag{2}$$

ここに、 $C_s$ : エアレーションタンク内の飽和酸素濃度 (mg/l),  $C_1$ :  $t_1$  時間後の酸素濃度 (mg/l),  $C_2$ :  $t_2$  時間後の酸素濃度 (mg/l),  $t_1$ ,  $t_2$ : 時刻

現地実験における条件は、水温 28℃、 $C_l=11000$  (mg/l)、よって、飽和酸素濃度である  $C_s$  は、7.671 (mg/l) と推定される。そして、

各実験ケースにおける実験終了直後の DO 値  $C$  の値などをもつて、(2) 式により算定すると  $KLa=1.08$  (mg/l) / hr となる。この結果から、対象水量等により異なるが、既述の酸素消費速度と対比させることにより補充すべき酸素量を推定することができる。次に、気泡循環流によって供給した酸素量がどの程度、河川の DO 濃度の上昇に寄与したかということについて単位奥行き長さ当りの散気量 (l/min-m) の半値と DO 濃度の変化量との関係から推定した結果が、図-4 である。

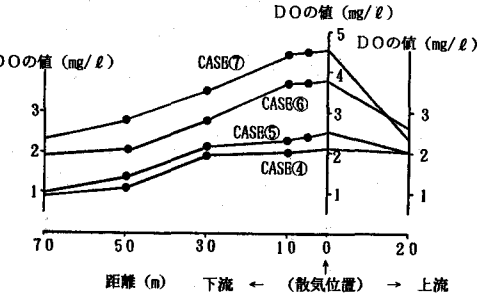


図-5 酸素移動範囲と DO 濃度の減少

これは、循環流の中央部における各測点の原水の DO の濃度が散気することによってどの程度 DO 濃度が付加したかを示すもので、全体を通じて散気量の多寡により DO 濃度の値に違いがあることが解る。しかし、必ずしも散気量の多い方が DO 濃度の付加効率が良いということではない。現地の状況によって異なるが、付加効率の高い最適な散気量があるものと考えられる。次に、各散気量による平面的な波及効果を検討するた

めに、河川沿いの縦断方向の水深1.5m地点のD0測定を行ない、一時間当りの総散気量の大きさとそれによる影響範囲の関係を示したものが図-5である。リフトによるCASE②およびCASE⑦の場合、河川流速が約 1~3 cm/sの状況のもとで影響圏が下流側、70m以上、上流側、30m程度に及び、下流側 70m地点における状況は、D0の値が元の河川水の2倍以上の状態となった。また、散気量が150(mg/l-m)のCASE⑤の場合、影響範囲は、上流へ50m、下流へ20m程度であり散気量が 50(l/min-m)のCASE④の場合は、それぞれ、30m、20m程度であっ

表-3 散気量とD0の付加効率 (1hr当り)

| ケース                    | 影響水量 (m³) | D0の総負荷量 (g) | 総空気量 (l/hr)     | 総O₂重量 (g)       | D0付加率 (%)     |
|------------------------|-----------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|
| CASE④                  | 630       | 112.5       | 6000            | 1700            | 5.9           |
| CASE③⑥                 | 810       | 338         | 18000           | 5100            | 6.6           |
| CASE④⑥                 | 810       | 495         | 30000           | 8500            | 5.2           |
| CASE⑦                  | 1080      | 1080        | 42000           | 11900           | 9.1           |
| 散気管<br>CASE1~<br>CASE3 | 270       | 92~146      | 63600<br>~19080 | 18000<br>~54000 | 0.03<br>~0.05 |

た。一方、散気管による場合は、既述のように散気した気泡が上層の水平流により放散するために、散気量の大小による差が表れず、散気管長の3倍程度、すなわち、上下流方向に15m程度の範囲に影響が表れたにすぎない。

そこで、これら現象から各ケースにおける散気量を基に 1時間内の各総供給空気量から総供給酸素量を推定し、散気による平面的な影響範囲について、測定値から推定される影響水量(水深×水路幅×縦断距離)と平均 D0値の上昇濃度から平均総D0負荷量を求め、D0

付加率を推定した結果が表-3である。これは、散気後一時間後の状況におけるD0付加効率を表すものであるが、リフトによる場合は、散気量の大きさにより付加効率が異なることを確認することができた。しかし、散気管による場合は、散気量の大きさによる効率を観測結果から判定することはできなかった。以上のような結果から、エアリフトを用いた循環流式エアレーションの方が江東内部河川のような滞留時間の長い河川域における水質浄化方法としては、実用性が高いものと考えられる。

6、結論

本文は、気泡循環流を利用した曝気方法の現地実験における観測結果について検討したものである。観測精度の問題はあるが、この観測結果から得た主な結論は、(1)、リフトを用いた場合における気泡循環流の流速は、散気量の大きさに支配され、D0付加率に影響していることを確かめることができた。(2)、水深及び水路幅に関係することではあるが、散気管による気泡循環流に比べ、リフトを用いた場合の気泡循環流の方が効率的な流れが得られ、その結果、水路の上下流方向に与える効果が大きいことが解った。(3)、水深が大きい場合、すなわち、アスペクト比が 1以下のような状態における散気管による気泡循環流は、底面における加速領域の流れにより気泡が滞留し、D0濃度の付加効率に影響を与えていることなどを確かめることができた。(4)、エアリフトを用いた循環流式エアレーションは、滞留時間の長い河川における浄化方法として実用性があることを確かめることができた。

以上であるが、課題としては、循環流の早さに影響されない水質測定方法に工夫が必要であることである。最後に本実験に当り測定装置の制作等実験の全般にわたり、ご協力を頂いた早稲田大学理工学部流体管理室の佐々木六造氏に深く謝意を表します。

参考文献

1、服部 敦、和泉 清、吉川秀夫：エアリフトによる循環流の現地試験のための基礎的研究、第35回土木学会水理講演会論文集  
2、丹羽克彦、関根正人、吉川秀夫：気泡流を伴う開水路流れの水理特性に関する実験的研究、土木学会論文集、第411号/II-12 P117~125  
3、合田 健著：水質工学、基礎編、丸善 p182