

(22) 新規発想に基づく高効率型液膜式酸素供給装置の開発に関する研究

寺岡 聡・今井 剛*・朱 花・樋口 隆哉・関根 雅彦

山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

* E-mail: imai@yamaguchi-u.ac.jp

下水処理において主流を占める活性汚泥法では、処理場における省エネルギー化の観点より、曝気効率の向上が重大な意味を持つ。このため、これまでの研究¹⁾では水表面からの酸素溶解効果に注目した液膜式酸素供給法を考案し、液膜形成(酸素供給能力)に関する因子に着目した装置開発を行ってきた。本装置は既設の曝気以外には外部電力を必要としない構造であるという特徴を有するため、本研究では少ない曝気量でも効率の良い酸素供給が行えるように、気体収束方法に関する検討を行うなど、本装置の総合的な設定条件についてさらなる検討を進め、ラボスケール装置の設定条件を決定した。さらに、それらの結果より実際の曝気槽への適用を考慮したパイロット装置の設計を行った。

Key Words : liquid film , aeration , oxygen supply , dissolved oxygen , activated sludge process

1. はじめに

現在の我が国の下水処理においては、好気性生物処理の代表的な処理法である活性汚泥法が主に採用されている²⁾。活性汚泥法は、活性汚泥への酸素供給と槽内の攪拌のために曝気操作が必要不可欠であるが、この曝気に使用される消費電力は、下水処理場全体で消費される総電力量の約40～50%を占める³⁾といわれている。省エネルギーの重要性が強調されている昨今、その対応策が強く求められており、前述のようにエアレーションによる電力消費量が極めて高いことから、いかに効率良く、より合理的なエアレーションを行うかが、省エネルギー対策を進めるうえで重要な課題となっている^{3), 4)}。

曝気槽内における溶存酸素(DO)の上昇は主に以下の二つの経路による。一つは、曝気装置から噴出された気泡が水表面まで上昇する間に気泡内から酸素が周囲の水中に拡散溶解する酸素輸送経路であり、もう一つは、気泡ブルームによって生じる水表面の乱流により大気中の酸素が水に溶け込む水表面での酸素輸送経路である。WilhelmsとMartin⁵⁾は、容積が3.72m³、表面積が3.38m²、水深が1.1mの槽内で、曝気量が1.134m³/hrの実験条件下において、純酸素輸送量の約2/3は気泡による酸素輸送の結果であり、約1/3は表面での酸素輸送の結果であると報告している。すなわち曝気槽における酸素供給量の

中で、表面からの酸素供給はかなり大きい割合を占めているといえる。従来、主に水中の気泡による酸素供給効率の向上に注目し、様々な曝気方法の開発やディフューザーの改良に関する研究が重ねられてきた⁶⁻⁸⁾。しかしながら、水表面での泡による酸素供給に着目した研究は少ないため、本研究では、水表面からの酸素供給に注目し、自然の水表面の乱流による酸素供給の代わりに、大気中で水の液膜を積極的に形成させて、その液膜の内外で空気と接触させることで、水と酸素との接触面積を飛躍的に増加させ、酸素溶解効率を向上させる液膜式酸素供給装置を考案した¹⁾。

これまでの研究¹⁾では、液膜式酸素供給装置の液膜形成(すなわち、酸素供給効率)に及ぼす影響因子に関する予備的実験を行い、それらの設定条件についての検討を行った。本研究ではさらに、それらの結果を踏まえて、本装置の液膜形成に及ぼす影響因子の適正值について検討を進め、ラボスケールにおける装置の設定条件を決定する。さらに、既存の曝気槽における曝気量を実際に測定し、本装置のパイロット装置の設計を行う。

2. 液膜式酸素供給装置の概略

図-1に液膜式酸素供給装置の概略を示す。本装置は底部から曝気を行い、発生した気泡を集積し、水面近くに

設置したエアリフト管を処理対象水と気泡がエアリフト効果^{9)・10)}により上昇して装置上部で液膜を形成し、液膜の内外から酸素溶解が起こること(図-2参照)によって酸素供給が行われ、装置から排出された処理水は槽内へ返流される。また、本装置の構造は極めて単純であり、既設の曝気装置による曝気を利用して液膜を形成させるため、既設の曝気装置以外には外部電力を必要としない。また、曝気水深についても従来のもの(4~5m)よりも浅い位置(数十cm程度)からの曝気で液膜を形成させることができる¹⁾ため、水压によるブロー(あるいはポンプ)にかかる負荷を低減することができ、曝気コストの削減が可能である。また、水面より高い位置(数cmから10cm程度)で液膜を形成させるため、水位差を利用した水の移送を行うことも可能であり、一過式の装置としても使用できることが特徴である。

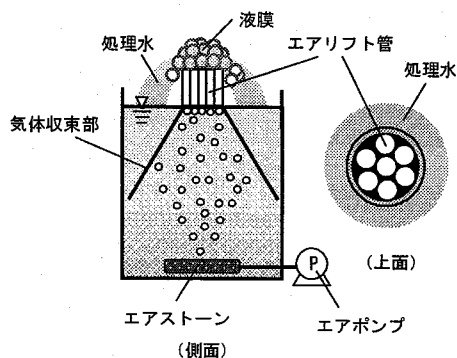


図-1 液膜式酸素供給装置の概略図

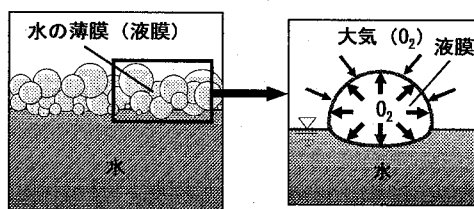


図-2 液膜式酸素供給法の概念図

3. 液膜形成(酸素供給効率)に及ぼす各因子に関するこれまでの予備的実験結果¹⁾

これまでの研究¹⁾により、本装置による液膜形成に及ぼす各因子についての影響度を把握するとともに液膜式酸素供給装置の一過式の装置としての有効性についての検討を行った。すなわち液膜形成に影響を与える因子として、エアリフト管径、曝気量、気泡径、曝気的水深、水面からの液膜形成部の高さについての予備的実験を行った。図-3に液膜形成に影響を与える因子を示す。

液膜形成に関する影響因子について検討した結果、エアリフト管径は大きく、気泡径は小さく、曝気量は小さ

く、曝気水深は60cm程度でよいこと、また、液膜形成部高さは低い方が装置の酸素供給効率が高くなる傾向が確認された¹⁾(表-1参照)。これらの因子のうち、影響度の高かった液膜形成部高さ、エアリフト管径、曝気量について実験を行った結果、表-2に示す装置の設定条件が得られた¹⁾。また、適正と推定されたエアリフト管径4cmにおいて、エアリフト管の配置形状(図-4参照)について検討した結果、エアリフト管はそれぞれ独立させた方がよいことがわかった。

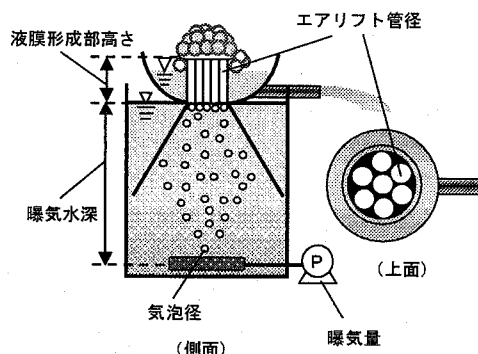


図-3 液膜形成に影響を与える因子

表-1 液膜形成(酸素供給効率)に及ぼす各因子の影響度

影響因子	影響	影響度
エアリフト管径	大きい方がよい	◎
気泡径	小さい方がよい	○
曝気量	小さい方がよい	◎
曝気水深	60cm程度	○
液膜形成部高さ	低い方がよい	◎

表-2 装置の適正設定条件及び酸素供給能力

液膜形成部高さ	1cm程度
エアリフト管径	4cm程度
適正曝気量	12L/min程度
液膜形成部面積1cm ² あたりの曝気量	1.11L/min・cm ²
曝気量1Lあたりの処理水流量	2.2L/L-Air
曝気量1Lあたりの酸素供給量	9.53mgO ₂ /L-Air

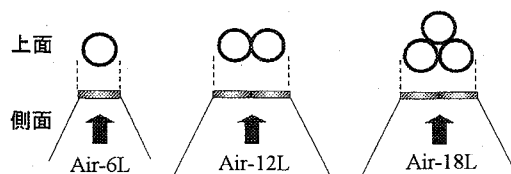


図-4 エアリフト管の配置形状

4. ラボスケールにおける液膜式酸素供給装置の設定条件に関する検討

前述のようにこれまでの研究¹⁾では、液膜式酸素供給装置の液膜形成に関する因子（エアリフト管径、液膜形成部高さ、エアリフト管の配置形状など）に着目した装置開発を行ってきた。しかし、本装置は既設の曝気以外には外部電力を必要としない構造となっているため、装置の液膜形成部に安定して気体を供給することができなければ、本装置による酸素供給能力が大幅に低下すると考えられる。よって、これらのことを考慮して、装置の液膜形成部への気体収束方法に関する検討を行い、また、本装置が少ない曝気量でも効率の良い酸素供給を行うことができるよう、その構造について検討を進める。

そこで、本研究では新たに液膜式酸素供給装置の設定条件として、気泡を装置の液膜形成部に安定して供給させるための気体収束部の形状（気体収束部の角度）についての検討を行った。また、実際の曝気槽内に設置する際に槽内の流れを考慮し、気体を装置に安定的に供給して確実に液膜を形成させるために、周囲の水を気泡が同伴して上昇するエアリフト効果を向上させる必要がある。したがって、水面下におけるエアリフト管の長さ（図-11参照）の変化が酸素供給効率（本研究では、液膜式酸素供給装置に供給される曝気量あたりの処理水（装置から排出される処理水）中に含まれる酸素溶解量とする）に与える影響について検討した。これらの検討を行うことで、ラボスケールにおける装置の適正設定条件（図-5参照）を決定するとともに、本装置の液膜形成部に供給すべき適正曝気量についての検討も行った。

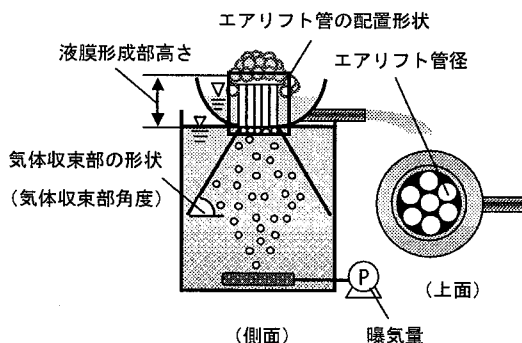


図-5 ラボスケールにおける装置の設定条件

(1) 気体収束部の形状の変化が酸素供給効率に与える影響

液膜式酸素供給装置を曝気槽に設置し、安定的に稼働させるためには気泡を装置の液膜形成部に効率的に収束させる必要がある。既存の曝気槽内において、曝気された気泡は槽内に広く拡散する。そのため、気泡を装置に収束させるための簡易な方法として、装置の気体収束部の角度を広げ、気泡の収束に必要な面積を確保する方法がある。そこで、気体収束部の角度の変化が、酸素供給

効率に与える影響を把握し、装置の液膜形成部への気体収束方法について検討する。

a) 実験方法及び条件

3. で適正と判断されたエアリフト管径4cm、液膜形成部高さ1cm、液膜形成部面積12.56cm²に設定した装置を用いて、水量80L、水深62cmの水槽に亜硫酸ナトリウムを0.1g/Lの濃度になるように添加して脱酸素させた水道水（溶存酸素濃度（DO）が1.5mg/L以下）を投入し、液膜式酸素供給装置を設置する（図-5参照）。水槽内のDO、水温を測定した後、曝気（曝気量6L/min）を行い、装置から流出する処理水（液膜を形成して装置から越流した水）のDO、流量を測定する。なお、曝気水深は常に一定となるように、上記のものと同様の脱酸素水を供給した。これまでの研究¹⁾では、気体収束部の角度（図-6参照）が76°の条件のものを使用していたため、これより気体収束部の角度を広げた角度60°の条件のものを用いて実験を行った。しかしながら、気体収束部の角度60°ではエアリフト効果が十分でなく処理水が得られなかった。したがって、本装置の適正条件であるエアリフト管径4cm、液膜形成部高さ1cmの条件において、気体収束部の角度を広げた形状（60°以下）では、エアリフト効果が極端に低減し、装置として適さないということがわかった。よって、気体収束部の角度が76°より大きい条件として、気体収束部の角度を90°、つまり水面下にエアリフト管を設置する形状（エアリフト管長さ10cm）を用いて実験を行った。また、角度90°の条件では、その部分だけで気泡を収束させるのは困難であったため、90°部分となるエアリフト管の下端に角度60°の収束部を接続する形状（図-7参照）とした。

実験の評価指標として、以下に示す酸素飽和率と酸素供給速度とを用いた。酸素飽和率（(1)式）は曝気装置の酸素溶解能力を示すものとして用いた。しかしながら、いかに高いDOの処理水を製造できても、その流量が極端に小さければ工学的な有用性は少ないと考えられる。そこでDOの上昇分に処理水の流量を乗じた酸素供給速度（(2)式）を主な評価指標として用いた。

$$\text{酸素飽和率 (\%)} = \frac{C}{C_s} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{酸素供給速度 (mgO}_2\text{/min)} = (C - C_0) \times Q \quad (2)$$

ここに、

C：処理水のDO(mgO₂/L)

C_s：実験時の水温における飽和溶存酸素濃度(mgO₂/L)

C₀：初期DO(mgO₂/L)

Q：処理水流量(L/min)

表-3 気体収束部角度に関する実験条件

気体収束部角度	液膜形成部高さ(cm)	エアリフト管径(cm)	曝気量(L/min)
60°	1	4	6
76°			
90°			

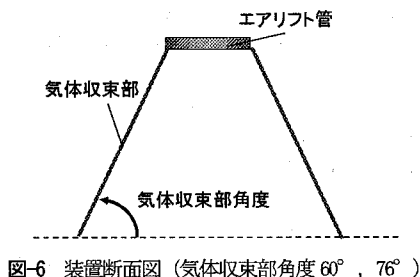


図-6 装置断面図（気体収束部角度 60°, 76°）

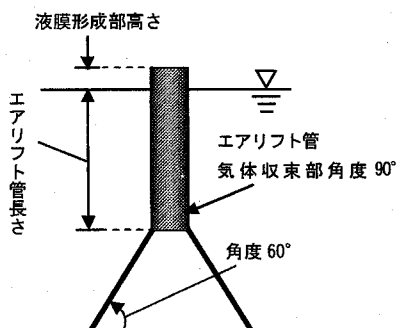


図-7 装置断面図（気体収束部角度 90°）

b) 実験結果及び考察

図-8に処理水流量、図-9に酸素飽和率、図-10に酸素供給速度を示す。実験結果に角度60°の条件の結果がないのは、前述の通り、装置から越流する処理水が得られず、測定が不能であったためである。図-8より、角度が大きくなるにつれ処理水流量が増加したことがわかる。これは気体収束部角度が小さい場合は、気泡の鉛直方向の駆動力が気泡と気体収束部との接触による摩擦により減少したためと考えられる。したがって、本装置の適正条件であるエアリフト管径4cm、液膜形成部高さ1cmの条件において、気体収束部の角度を広げた形状（60°以下）では、エアリフト効果が極端に低減し、装置から処理水が排出されないことがわかった。図-9より、酸素飽和率は気体収束部の角度76°より90°の方が低い値を示した。これは処理水流量の増加にともない、液膜形成の効率が低下したためと考えられる。図-10より、酸素供給速度は気体収束部の角度76°より90°の方が高い値を示した。これは角度が大きいほど処理水流量が増加したためと考えられる。これらの実験結果より、水面下に気体収束部の角度90°であるエアリフト管を伸ばすことで、処理水流量を増加させ、酸素供給効率を向上させること

ができることがわかった。また、気体収束部の形状は、本装置に必要な曝気量を確保するために、エアリフト管の下端に新たな収束部を接続する形状（図-7参照）がよいことがわかった。しかしながら、気体収束部角度90°の条件での水面下におけるエアリフト管の長さについては新たな影響因子として別途検討する必要があると考えられるため、以下でその検討を行った。

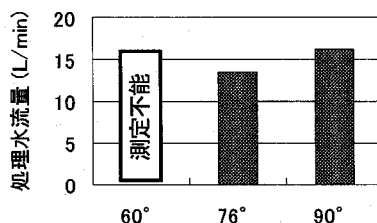


図-8 処理水流量

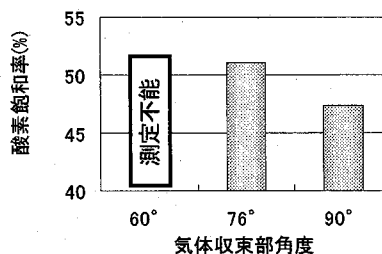


図-9 酸素飽和率

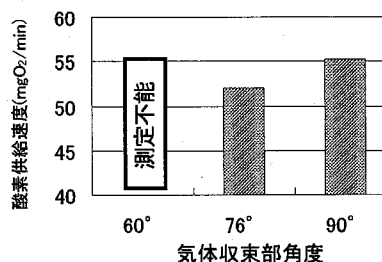


図-10 酸素供給速度

(2) エアリフト管の長さの変化が酸素供給効率に与える影響

a) 実験方法及び実験条件

4. (1)と同条件の水を使用し、エアリフト管径4cm、液膜形成部高さ1cmの条件のものを用い、4. (1)の実験と同様に気体収束部角度90°のエアリフト管の末端に角度60°の気体収束部を設置した装置を用いて実験を行った（図-11参照）。容量80L、水深62cmの水槽を用いて、装置の液膜形成部高さを1cm、曝気量を6L/minに設定し、曝気水深が一定の条件の下、装置のエアリフト管長さ（水面下における）を10, 15, 20, 25, 30, 45cmと変化させて実験を行った（表-4参照）。

表-4 エアリフト管長さに関する実験条件

エアリフト管長さ(cm)	液膜形成部高さ(cm)	エアリフト管径(cm)	曝気量(L/min)
10	1	4	6
15			
20			
25			
30			
45			

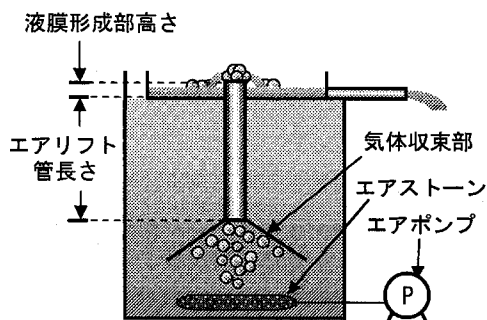


図-11 装置図 (エアリフト管長さに関する検討)

b) 実験結果及び考察

図-12に処理水流量、図-13に酸素飽和率、図-14に酸素供給速度を示す。図-12より、処理水流量はエアリフト管の長さが長くなるにつれて増加していることが確認された。これは、エアリフト管が長くなるにつれ、エアリフト効果が得られるエアリフト管の容積部分が増加したためと考えられる。すなわちエアリフトの原理より、エアリフト管内の空気が混入した水の重量と周りの水圧が釣り合わなければならない。また、本実験では、使用するエアストーンや曝気量が一定の条件の下で行い、エアリフト管内への気泡混入率が一定として実験を行った。このため、エアリフト管が長くなるにつれ、エアリフト管内の気泡が混入した水の容積が増加し、周囲からの水圧が大きくなったため、処理水流量が増加したと考えられる。図-13より、酸素飽和率はエアリフト管の長さが長くなるにつれて低下した。これは処理水流量の増加にともない、液膜形成の効率が低下したためと考えられる。図-14より、酸素供給速度は10～30cm まで上昇するが、30cm以降で低下した。これは処理水流量の増加により、10～30cmまでは酸素供給効率が增加するが、45cmになると処理水流量の過大な増加により、液膜形成の効率が低下し、酸素供給効率が低下したためと考えられる。よって、エアリフト管長さは30cm 程度が適当であると考えられる。また、これまでの研究結果¹⁾であったエアリフト管長さ0cm の条件(エアリフト管径4cm、気体収束部角度76°)と比較(表-2参照)して、曝気量1Lあたりの処理水流量を約3倍増加させ、曝気量1Lあたりの酸素供給量を約77%高めることができた。これらの結果より、水面下のエアリフト管の長さが長くなることにより、酸

素供給効率が上昇するという結果が得られた。しかし、本装置のエアリフト効果が過大すぎると、液膜形成が阻害されるため酸素供給効率が低下することがわかった。よって、以下において、本装置へ供給する曝気量の変化により、本装置の酸素供給効率にどのような影響を与えるかを検討した。

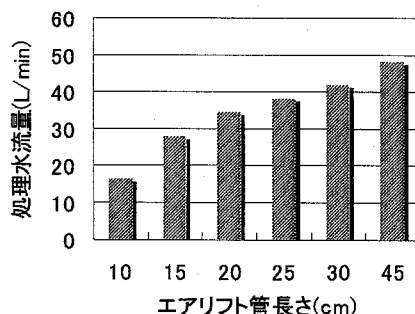


図-12 処理水流量

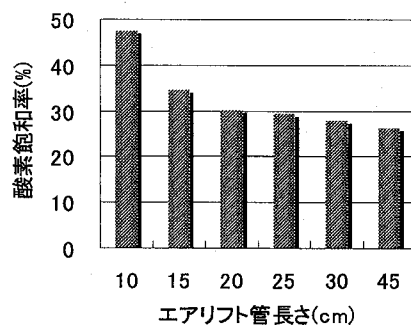


図-13 酸素飽和率

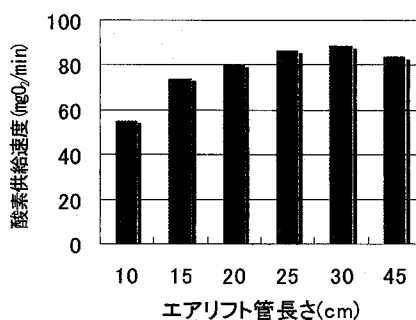


図-14 酸素供給速度

(3) 曝気量の変化が酸素供給効率に与える影響

a) 実験条件及び方法

実験方法は4. (1)と同様である。上記の結果を踏まえて、装置の設定条件をエアリフト管径4cm、液膜形成部高さ1cm、エアリフト長さ30cmとして、曝気量を2～12L/minの間で2L/minずつ変化させて実験を行った(表-5参照)。この実験で用いた評価指標は、次に示す(3)式の曝気量1Lあたりの酸素供給量である。また、曝気量2L/minの条件のみ、通常の曝気法との比較を行うために、

この条件で液膜式酸素供給装置から排出された処理水量と同量の水に通常の曝気を液膜式酸素供給法の処理時間と同じ時間だけ行い、DO を測定した。

曝気量1Lあたりの酸素供給量 (mgO₂/L-Air)

$$= \frac{(C - C_0) \times Q}{V_a} \quad (3)$$

ここに、

C: 処理水のDO (mgO₂/L)

C₀: 測定開始前のDO (mgO₂/L)

Q: 処理水流量 (L/min)

V_a: 曝気量 (L/min)

表-5 曝気量の変化に関する実験条件

曝気量 (L/min)	液膜形成部 高さ(cm)	エアリフト 管径(cm)	エアリフト 管長さ(cm)
1	1	4	30
2			
4			
6			
8			
10			
12			

b) 実験結果及び考察

図-15に処理水流量、図-16に曝気量1Lあたりの処理水流量、図-17に曝気量1Lあたりの酸素供給量を示す。図-15より、曝気量が増加するにつれ、処理水流量も増加していることが確認された。これは、曝気量の増加にともない、エアリフト管内に混入する気泡量が増加し、周囲からの水圧が大きくなったため、処理水流量が増加したと考えられる。図-16は曝気量1Lあたりの処理水流量であり、曝気量が増加するにつれ低下することが確認された。この結果と図-15より、曝気量の増加にともない、処理水流量は増加したが、過大な曝気はエアリフト効果による揚水効率を低下させたことが確認できる。図-17に曝気量1Lあたりの酸素供給量を示す。この図から、曝気量1Lあたりの酸素供給量は、曝気量が少なくなるにつれ増加したが、曝気量が1L/minでは十分なエアリフト効果が得られないことが確認された。実験結果として図示していないが、曝気量の違いによる処理水のDO濃度の差はほとんどなく、酸素濃度が2.4mg-O₂/L前後であったことから、曝気量1Lあたりの酸素供給量においては、図-16で確認された曝気量1Lあたりの処理水流量が最も多い曝気量2L/minの条件が最も高くなったと考えられる。このときの液膜式酸素供給装置の曝気量の適正值は、液膜形成部1cm²あたりの曝気量が0.16L/min・cm²程度となった。また、曝気量1Lあたりの酸素供給量が最も高い値となった曝気量2L/minの条件のみについて、比較対象として通常の曝気を行ったところ、液膜式酸素供給法が21.7 mg-O₂/L-Air、通常曝気が18.9 mg-O₂/L-Airとなり、液膜式酸

素供給法は通常曝気より酸素供給効率が約15%向上していることが確認された。これまでの研究結果より、ラボスケール実験の条件下において液膜式酸素供給装置を被せるだけでK_aが約40%向上する¹⁾ことが確認された。また、液膜式酸素供給法では数十cm程度の曝気水深からでも液膜を形成させることができるため、本装置の設置により散気装置の水深を従来より浅い位置に設置することが可能である。したがって、水圧によるブローアにかかる負荷を軽減することができるため、通常の曝気と比較して曝気効率を向上させるとともに、曝気コストの削減が可能である。しかしながら、本装置の設置により、散気装置の設置水深を浅く設定した場合、曝気による槽内の攪拌効果が十分に行われまい恐れがあるため、今後実規模スケールでの実験を行い、十分な検討を行う必要がある。

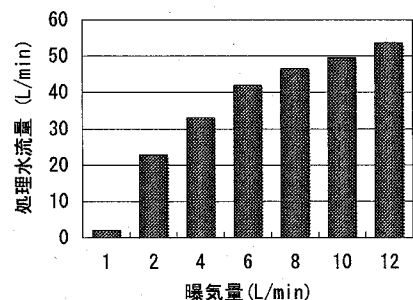


図-15 処理水流量

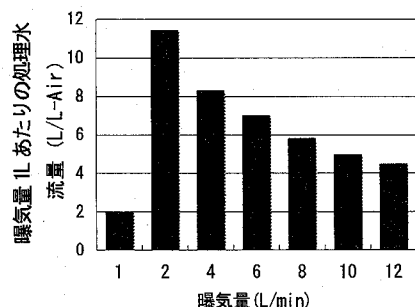


図-16 曝気量 1L あたりの処理水流量

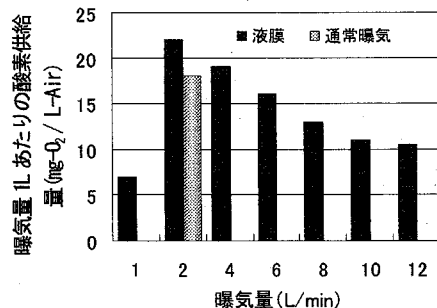


図-17 曝気量 1L あたりの酸素供給量

5. パイロット装置の設計条件に関する検討

4. より、ラボスケールにおける液膜式酸素供給装置の設定条件が把握できた。しかし、パイロット装置設計の際に、ラボスケールにおける装置の設定条件以外に、実際の曝気槽における曝気による本装置に供給可能な曝気量についての検討が必要であるため、既存の曝気槽における曝気量に関する調査を行った後に、パイロット装置の設計を行う。

(1) 既存の曝気槽における曝気量の調査

液膜式酸素供給装置を既存の曝気槽において良好な運転を行うには、装置に必要な曝気量を液膜形成部に収束させる必要がある。そのため、既存の曝気槽内で送気されている曝気量から装置の気体収束部の面積及び角度を設定しなければならない。しかしながら、通常下水処理場では、曝気槽内をD0で管理し、曝気量で管理していないため、どの程度の曝気が行われているか不明である。そこで、本研究では山口県宇部市の東部浄化センターにおいて、曝気槽内の曝気量の測定を行い、液膜式酸素供給装置の気体収束部の面積及び気体収束部の角度の設計を行う。

a) 測定装置の概略

図-18に曝気量測定装置の概略図を示す。この装置は、曝気された気体を気体収束部により装置に収束させ、気体貯留タンクに気体を集める。そして、気体を回収した気体量とその気体を集めるのに要した時間から、曝気量を算定するものである。

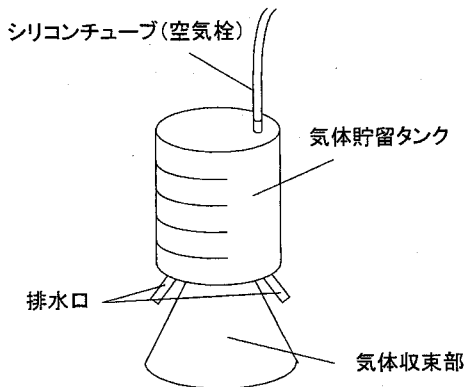


図-18 曝気量測定装置の概略図

- ・気体貯留タンク：容量5L
- ・気体収束部：高さ25cm
直径30cm(装置最下部)
気体収束部面積部707cm²
気体収束部角度60°

b) 調査地点

調査地点は、散気装置直上付近を測定地点②とし、そ

こから流出口に1mの地点を①とし、①とは反対方向に2mの地点を③とする。測定を行った地点を図-19に示す。

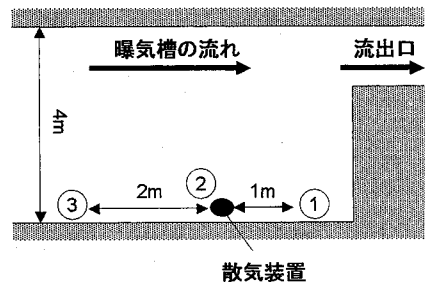


図-19 曝気量測定の調査地点

c) 測定結果

調査結果を表-6に示す。測定地点①においては、単位面積あたりの曝気量は0.012L/min・cm²となり、4.における装置の設定条件の液膜形成部1cm²あたりの曝気量0.16L/min・cm²を収束させるには、気体収束部面積約160cm²（一辺の長さ13cm程度の正方形の面積）が必要となる。測定地点②においては、単位面積あたりの曝気量は0.011L/min・cm²となり、液膜形成部1cm²あたりの曝気量0.16L/min・cm²を収束させるには、気体収束部面積約177cm²（一辺の長さ13cm程度の正方形の面積）が必要となる。測定地点③においては、単位面積あたりの曝気量は0.008L/min・cm²となり、液膜形成部1cm²あたりの曝気量0.16L/min・cm²を収束させるには、気体収束部面積約254cm²（一辺の長さ16cm程度の正方形の面積）が必要となる。測定地点③は散気装置から離れていることと曝気槽の流れにより気泡が拡散しているため、単位面積あたりの曝気量が他の地点に比べ少なくなっている。また、測定地点③は、表-6より、測定回数ごとの曝気量の変動が大きいことがわかる。よって、装置の気体収束部面積の設定は、散気装置の位置と曝気槽内の気泡の拡散を考慮し、余裕を持たせて設計する必要があることがわかった。なお、本装置を適用する際の曝気水深として、数十cm～1m程度と既設の曝気槽の曝気水深（4～5m程度）の二通りを想定している。しかしながら、今回の調査結果

表-6 曝気量の測定結果

	曝気量 (L/min)		
	地点①	地点②	地点③
測定1回目	8.9	8.3	5.9
測定2回目	8.8	8.6	6.1
測定3回目	8.7	8.6	7.4
測定4回目	—	7.4	3.9
測定5回目	—	7	4.6
平均	8.8	7.98	5.58
1cm ² あたりの曝気量 (L/min・cm ²)	0.012	0.011	0.008
曝気量2L/minに 必要な面積(cm ²)	160.4	176.9	254.3

では、装置に流入する際の気泡径を測定することができなかった。したがって、以下のパイロット装置の設計においては、曝気水深が数十cm～1m程度と仮定した場合についての検討を行った。

(2) パイロット装置の設計について

下水処理場の曝気槽内の曝気量の調査をした結果、散気装置付近では気体収束部面積は単位面積あたりの曝気量は $0.011\text{L}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$ となり、液膜形成部 1cm^2 あたりの曝気量 $0.16\text{L}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$ を収束させるには、気体収束部面積約 177cm^2 （一辺の長さ 13cm 程度の正方形の面積）が必要となる。しかしながら、散気装置から離れた地点や曝気槽内の流れにより、曝気量の変動が大きいことも考慮し、気体収束部面積の設計を行わなければならない。さらに、水面下にエアリフト管が伸びているため、曝気槽の流れも考慮し、装置の強度確保及び施工性の観点も加えて気体収束部面積はおよそ 400cm^2 （ $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 、液膜形成部面積 1cm^2 あたりの曝気量 $0.32\text{L}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$ ）と設定した。これを6機で1ユニットとし、曝気槽内の水面の乱れにより液膜形成を阻害させないために、装置固定板にエアリフト管を固定し、さらに、気体収束部同士を連結させるように設計した。また、装置からの処理水排出方法においては、処理水排出口を複数設置する、もしくは、装置固定版の仕切りをなくし、エアリフト管上端から処理水を越流させ曝気槽にそのまま返送させるようにすることもできる。図-20にパイロット装置の設計例を示す。なお、前述のように本研究では、曝気水深が4～5m程度の場合における装置に流入する気泡径や、槽内の気液混合水の流動状況や攪拌効果などについての検討がなされていない。したがって、今後実規模スケールでの実験を行う必要がある。

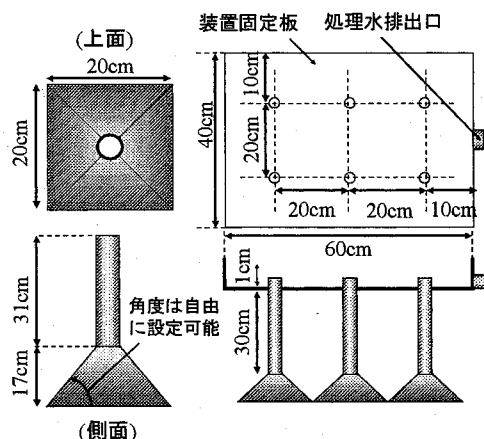


図-20 パイロット装置設計例

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 本研究では、液膜式酸素供給装置の気体収束部に関して、気体収束部の形状（気体収束部の角度）、水面下におけるエアリフト管長さ、液膜形成部面積 1cm^2 あたりの曝気量について検討した。また、本研究の成果と既往の研究成果¹⁾より、表-7に示す本装置のラボスケールにおける設定条件が得られた。
- (2) 本装置の気体収束部の形状は、水面下にエアリフト管を伸ばすことで、処理水流量を増加させ、酸素供給効率を向上させ得ることがわかった。したがって、気体収束部の形状は本装置に必要な曝気量を確保するために、エアリフト管の下端に新たに収束部を設ける形状がよいことが確認された。
- (3) エアリフト管長さについて検討した結果、エアリフト管長さ 30cm 程度が適正值であることが確認できた。また、これまでの研究結果¹⁾であったエアリフト管長さ 0cm の条件（エアリフト管径 4cm 、気体収束部角度 76° ）と比較（表-2参照）して、曝気量 1L あたりの処理水流量を約3倍増加させ、曝気量 1L あたりの酸素供給量を約77%高めることができた。
- (4) 曝気量について検討した結果、曝気量が少なくなるにつれ、揚水効率が高くなり、曝気量の適正值は液膜形成部 1cm^2 あたりの曝気量約 $0.16\text{L}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$ 程度であることが確認された。また、曝気量 1L あたりの酸素供給量が最も高い値となった曝気量 $2\text{L}/\text{min}$ の条件のみについて、通常の曝気と比較した結果、酸素供給効率を約15%向上させることができた。これまでの研究結果より、ラボスケール実験の条件下において液膜式酸素供給装置を被せるだけで $K_L a$ が約40%向上する¹⁾ことが確認されている。また、液膜式酸素供給法では数十cm程度の曝気水深からでも液膜を形成させることができるため、本装置の設置により散気装置の水深を従来より浅い位置に設置することが可能である。したがって、水圧によるブローアにかかる負荷を軽減することができ、通常の曝気と比較して曝気効率を向上させるとともに、曝気コストの削減が可能であると考えられる。しかしながら、本装置の設置により、散気装置の設置水深を浅くした場合、曝気による槽内の攪拌効果が十分に行われない恐れがあるため、今後実規模スケールでの実験を行い、十分な検討を行う必要がある。
- (5) 下水処理場の曝気槽内の曝気量の調査をした結果、散気装置付近では単位面積あたりの曝気量は約 $0.011\text{L}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$ 程度であり、液膜形成部 1cm^2 あたりの曝気量 $0.16\text{L}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$ を収束させるには、散気装置や曝気槽内の流れも考慮して、気体収束部面積約 400cm^2 （一辺の長さ 20cm 程度の正方形の面積）程度が必要

要であることがわかった。

- (6) パイロット装置の設計は、単位面積あたりの曝気量がわかれば装置の設計が行えることがわかった。しかしながら、散気装置や曝気槽内の流れによる気泡の拡散により、装置へ収束できる曝気量の変動が大きいことも考慮し、気体収束部面積の設計を行わなければならないことが示唆された。

表-7 ラボスケールにおける装置の設定条件

既往の研究成果	液膜形成部高さ	1cm程度
	エアリフト管径	4cm程度
	エアリフト管配置形状	独立させて設置
本研究の成果	気体収束部の形状(気体収束部角度)	90°程度
	エアリフト管長さ(水面下における)	30cm程度
	液膜形成部面積1cm ² あたりの曝気量	0.16L/min・cm ²

本研究により、ラボスケールの液膜式酸素供給装置の設定条件が把握できた。さらに、既存の下水処理場の曝気量の測定を行い、パイロット装置の設計を行った。今後は、既存の曝気槽でのパイロット装置の連続運転を行い、本研究の課題となる曝気槽での装置の運転条件、装置の性能評価を行い、実用化に向けた装置開発を行う予定である。

参考文献

- 1) 谷公輔, 今井剛, 朱花, 寺岡聡, 浮田正夫, 関根雅彦,

樋口隆哉: 水の液膜と空気との接触による新規酸素供給法の開発に関する研究, 環境工学研究論文集, 第43巻, pp. 535~542, 2006.

- 2) 須藤 隆一: 微生物による水処理技術の新しい展望, 産業公害, 1983.
- 3) 亀田泰武, 栗林秀人: 下水道施設の省資源・省エネルギー化に関する調査, 下水道協会誌, Vol. 17, No198, pp. 68-72, 1980.
- 4) 本間誠二: 散気装置の効率化に関する調査, 東京下水道局技術調査年報2002, pp. 135-145, 2003.
- 5) Wilhelms, S. C. and Martin S. K.: Gas transfer in diffused bubble plumes, Hydraulic Engineering: saving a threatened resource-in research of solutions, Eds: Jennings, S. M. and Bhowmilk, N. G., ASCE, New York, pp. 317-322, 1992.
- 6) 橋本奨: 気泡曝気性能とその経済性に関する研究, 水処理技術, Vol.10, No12, pp. 39-45, 1969.
- 7) 鎌田 修, 小島 守雄, 奥野 芳男: 活性汚泥法における各種曝気方式の曝気特性に関する実験的研究, 工業用水 第506号 Page31-40
- 8) 合葉修一: バック気における酸素移動について, 用水と廃水, Vol.3, No.5, pp. 17-25, 1961.
- 9) 上原義昭: 高濃度酸素を用いたH型散気装置による間接循環曝気法の実用的研究, 用水と廃水, Vol. 28, No.2, pp. 170-174, 1986.
- 10) 志水茂明: ダム事業における環境問題 貯水池水質改善の事例, 大ダム, No. 138, Page38-44 1991.

(2007.5.25受付)

Development of Novel Oxygen Supply Apparatus by Contacting Liquid Film with Air.

Satoshi TERAOKA, Tsuyoshi IMAI, Hua Zhu, Takaya HIGUCHI
and Masahiko SEKINE

Graduate School of Science and Engineering, Ymamaguchi University

In general, large amount of electric power in a sewage treatment plant is consumed exclusively by operating the aeration process. To save the electric consumption, a novel oxygen supply apparatus was designed to enhance oxygen transfer efficiency by contacting liquid film of target water and its surrounding atmosphere without external electric power needs. In addition to enhance the effective of interfacial contacting area between air and water, some important parameters viz. optimum shape of air bubble collecting parts, etc., were examined for more efficient supply of oxygen in the condition of low air supplied. In this paper, using of relevant parameters related to the performance results of lab-scale experiment was optimized for pilot-scale apparatus designation.