３－１　標準法活性汚泥と高度処理法活性汚泥の混合処理による りん除去効果と数値化による評価

北部第二管理事務所
中川水再生センター　小林克巳

1.はじめに

中川水再生センターでは、A_2O法（嫌気無酸素好気法）処理水りん濃度は夏冬とも良好に維持している。一方、標準法（標準活性汚泥法）処理水りん濃度は夏期以外に上昇が見られることから、標準法汚泥とA_2O法汚泥の混合処理による、標準法のりん除去効果について夏期以外を対象としてテーブルテストにより検討した。また、りん除去難易度を数値化するため、りん除去の新概念である「りん負荷」の導入を試み、標準法汚泥と高度処理法汚泥の混合処理の比較検討をした。

2.りん除去難易度の数値化の試み

活性汚泥法におけるりん除去は、種類の異なる反応で構成されている。菌体自身の生体構成用にりんを摂取する反応（仮に基本増殖反応）とポリりん酸蓄積細菌（りん蓄積菌）の関与した反応である。後者の反応は、ポリりん酸蓄積反応（仮にりん吸収反応）とりん蓄積菌が増殖する反応（仮にりん増殖反応）に分けられる。なお、考え方はＩＷＡ活性汚泥モデル（ＡＳＭ）による。また、ＡＳＭのパラメータ設定値を使用している箇所はアンダーラインした。

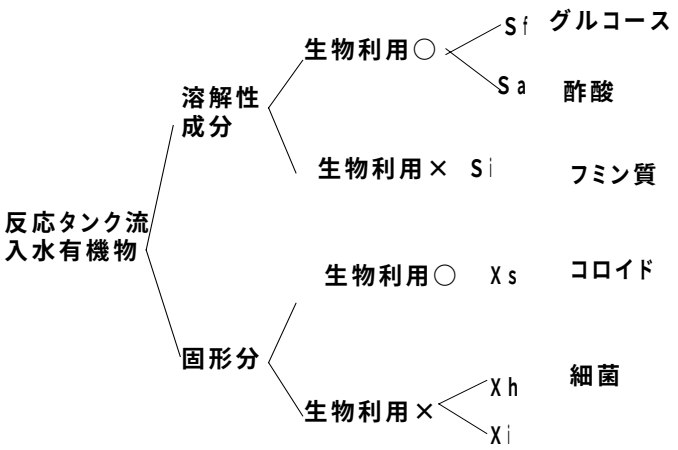

図１　反応タンク流入有機物の構成

表１反応タンク流入水分画

記号	中川	小菅	有明	りん含有
Sf	13	24	14	0.01
Sa	8	14	11	0
Si	11	16	23	0
Xs	98	93	137	0.01
Xh	23	22	33	0.02
Xi	20	19	26	0.01
T-P	2.5	3.9	4.8	---
PO4	1.4	2.2	2.6	---
ΔP	1.1	1.7	2.2	---
P0	-0.9	-0.7	-0.8	---

※りんは H13 水質管理年報の値

2.1　菌体生成時に必要なりん摂取量

基本増殖反応とりん増殖反応合計のりん摂取量を求めてみる。H12 生物学的高度処理法運転支援ソフトの適用性に関する調査委託報告書によると反応タンク流入水有機物は大きく６種類に分画される（表１太線内参照、数値は冬期の CODcr(mg/l)）。そのうち、生物易分解性有機物(Sf)、発酵生成物(Sa)，生物遅分解性の懸濁態有機物(Xs)の３種類（表１網

掛け）は、プロセスには差があるが、最終的にはバイオマスにより菌体となると予想される。この 3 種類濃度の合計に菌体収率 0.67(ｇCOD/ｇCOD)を掛けると菌体生成量が求められる。さらに、菌体りん含有率は、0.02(gP/gCOD)なので、(Sf＋Sa＋Xs)×0.67×0.02 0.013(Sf＋Sa＋Xs)が、菌体生成時に必要なりん摂取量となる。

2.2　菌体生成時のりんの過不足

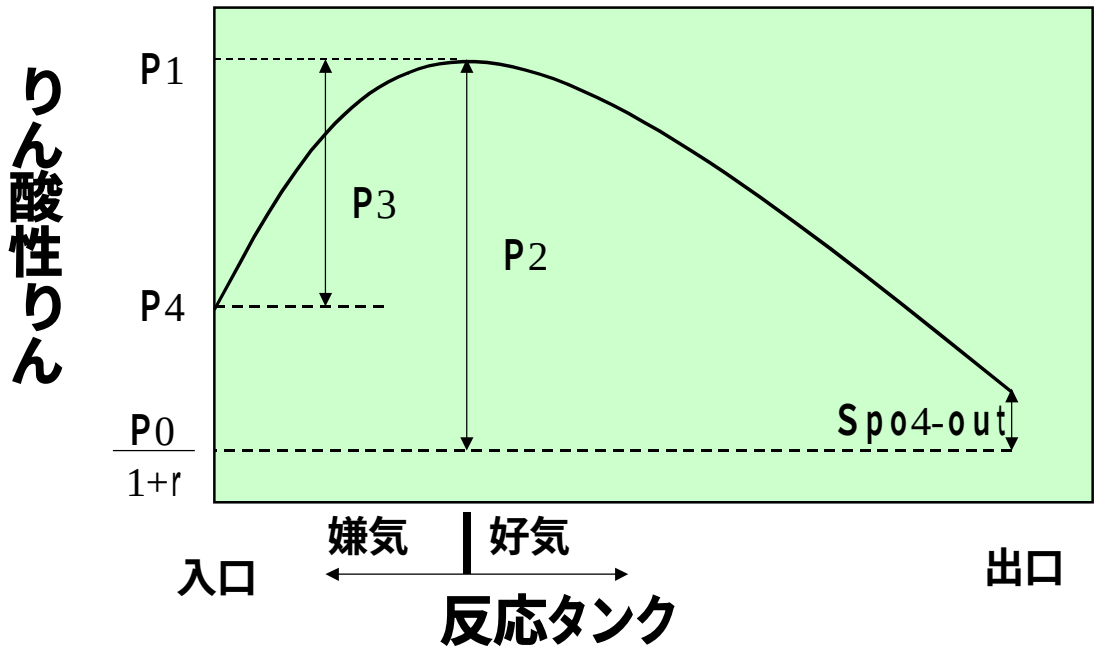

図２　りん吸収過程の概念図

りんは、りん酸性りんと有機性りんに分けて考えた。反応タンク流入水の全りんからりん酸性りんを引いた値(ΔP)が反応タンク流入水有機性りん濃度を表す。反応タンク流入水有機物全６種類とそのうちの菌体となる３種類のりん含有量比（Pr）をΔＰに乗じれば、ΔＰのうち菌体に取り込まれるりん濃度がわかる。例えば、中川水再生センターの冬期の場合、菌体となる３種類のりん（ｍｇ/ｌ）=0.01CODsf+0CODsa+0.01CODxs=0.01×13+0+0.01×98 =1.11 である、同様に考えて、反応タンク流入水有機物全６種類のりん(mg/l)= 0.01CODsf +0CODsa+0CODsi+0.01CODxs+0.02CODxh+0.01CODxi=1.77 である。1.11/1.73 を計算すれば 0.63 となる。同様の計算から、小菅 0.65、有明 0.61 とほぼ同じ値が得られたので Pr を 0.6 として使用した。好気工程が十分ある場合、菌体構成用のりんの過不足（P0）は生成菌体に受動的に摂取されるりん 0.6ΔP から菌対生成時に必要なりん 0.013(Sf＋Sa＋Xs)の差で求められ、P0=0.6ΔP－0.013(Sf＋Sa＋Xs)となる。P0 が 0 以下となった場合は、増殖用のりんが不足するので、不足分はりん酸性りんを吸収し、0 以上となった場合は、りん酸性りんを放出すると仮定した。表１に掲げる三水再生センターとも P0 は 0 以下であった。

2.3　標準法反応タンク出口のりん酸性りんの予想と嫌気好気法での必要なりん吸収

返送汚泥率をｒ、反応タンク流入りん酸性りんをＳｐｏ4-in、返送汚泥りん酸性りんをＳｐｏ4-ｒ、反応タンク出口りん酸性りんをＳｐｏ4-out とすると、反応タンク流入平均りん酸性りん(P4)=(Ｓｐｏ4-in +r×Ｓｐｏ4-ｒ)/(1+r)に P0/(1+r)を加えた値は、標準法の予想Ｓｐｏ4-out を表し、中川では 0.8mｇ/ｌとなり、冬期の実測値とほぼ同一となる。なお、返送汚泥の Sf, Sa, Xs 及び有機性りんは 0 と仮定した。以上の考え方をさらに発展させると、活性汚泥法に嫌気工程がある場合、嫌気後のりん酸性りん(P1)を 0 にするためには、りん吸収反応での必要なりん吸収(P2)=P1+P0/(1+r)となる。

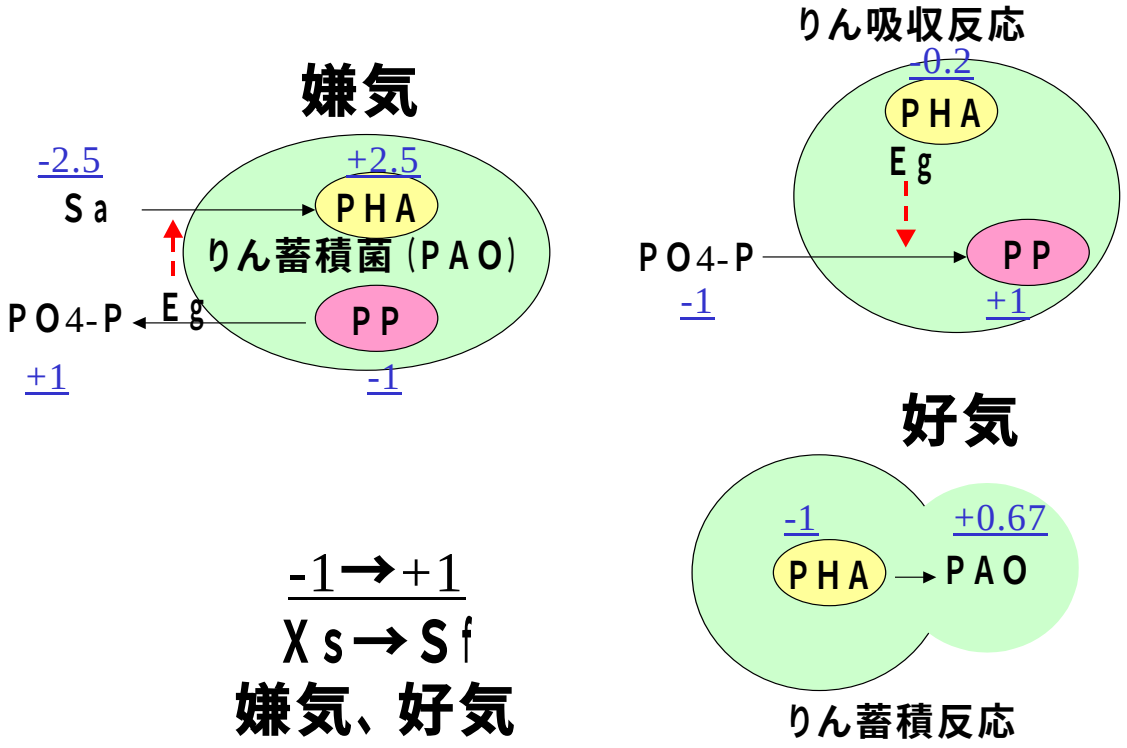

図３　りん除去反応の概念図

2.4　りん酸吐き出しと生成ＰＨＡ

反応タンク嫌気工程で、主に Sa からＰＨＡ（ポリヒドロキシアルカネート）がりん蓄積菌内に形成される。そのエネルギー源は菌体内のポリりん酸がりん酸になる反応であり、その際、りん酸が吐き出され、りん酸吐き出し∝生成ＰＨＡと考えることにした。りん酸吐き出し(P3)は P1－P4 で求められる。さらに、反応タンク好気部で、ＰＨＡを利用してりん酸性りんが、ポリりん酸としてりん蓄積菌内に取り込まれる（りん吸収反応）。

2.5　りん除去難易度の数値化

P2 を生成りん蓄積菌で除した値（りん生成りん蓄積菌負荷以下「りん負荷」）を求めることにより、りん除去難易度の数値化が可能となる。りん負荷が低い場合はＳｐｏ4-out を 0 にする可能性が高い。この考え方は、ＢＯＤ－ＭＬＳＳ負荷と類似しているが、りん蓄積菌の総量は不明なため、反応タンク流入水から生成が予想されるりん蓄積菌で代用している点が異なる。ＰＨＡはりん吸収反応とりん増殖反応に利用されるが、ＰＨＡ生成は P3×2.5 であり、りん吸収反応によるＰＨＡ使用は P2×0.2 なので、りん増殖反応でりん蓄

積菌生成に使用されるＰＨＡは P3×2.5－P2×0.2 となる。使用ＰＨＡに収率 0.67 を乗じれば生成菌体量になるので、りん負荷=P2/｛0.67×(P3×2.5－P2×0.2)｝となる。なお、りん負荷の簡略値は 0.65(1+r)P1/{(1+r)P1－Spo4-in}である。3.2 に後述してあるがりん負荷１以下で良好なりん処理が見込めることから、りん負荷＜1 を代入すると P1/ Spo4-in ＞3 という関係式が誘導される。これは、酢酸/りん酸性りん>8 で良好なりん除去が可能とした報告(H9 技術調査年報　251-)と類似点がある。ＰＨＡは備蓄されないと仮定したが、りん負荷が低い時は備蓄があると思われ、りん負荷が計算値より高くなると予想される。

3.実験結果

テーブルテストによる結果を示す。テーブルテストは、実験精度の高い振とう曝気法(H14 水質管理研修参照）によった。なお、実施設でもＡ$_2$Ｏ汚泥と標準法汚泥の混合によるりん除去効果を確認し、継続調査中である。

3.1 高度処理汚泥と標準法汚泥の混合処理の有効性

表２にＡ$_2$Ｏ法汚泥と標準法汚泥の混合によるりん負荷の計算結果を示す。中川水再生センターのりん酸性りんは返送汚泥Ａ$_2$Ｏ法 0.6、標準法 2.0、Ａ$_2$Ｏ法嫌気後 6.0(mg/l)、返送率はＡ$_2$Ｏ法 0.5、標準法 0.3 とし、流入水質は表１によった。両汚泥を 1:9 で混合しても中川水再生センターの場合、りん負荷は 10 倍にはならず、計算上は 2.05÷0.73=2.8 倍である。このように、高度処理汚泥と標準法汚泥の混合によるりん除去が、非常に有効であることがわかった。

3.2　りん除去難易度の水再生センター間比較

小菅水再生センターのデータ（Ｈ１３水質管理研修）を基に、試算した結果を参考まで表２に示してある（返送汚泥 P04-P は中川に等しいと想定)。このように、りん負荷を用いると、処理場間でりん除去の難易度が対比可能となる。

表 2 高度処理汚泥と標準法汚泥混合によるリン除去効果

センター名	混合比 高度	混合比 標準	PHA生成量/2.5 高度	PHA生成量/2.5 標準	PHA生成量/2.5 =P3	嫌気後平均りん濃度	必要りん吸収(P2)	りん負荷
中川	1	0	4.9	0.0	4.9	6.0	5.4	0.73
	0.1	0.9	0.5	0.0	0.5	2.0	1.3	2.05
小菅	1	0	16.3	0.0	16.3	18.0	17.5	0.70
	0.25	0.75	4.1	1.4	5.5	7.5	7.0	0.85

たとえば、中川のＡ$_2$Ｏ法：標準法=1:9 の混合処理は小菅のＡＯ法：標準法=1:3 の混合処理より高いりん負荷の可能性があることなどが推測できる。データ不足だが、りん負荷約１以下でＳｐｏ4-out が 0 になると見込まれる。

3.3　汚泥混合処理のりん除去効果と水温の関係

中川水再生センターのＡ$_2$Ｏ法汚泥と標準法汚泥を混合してりん除去効果を調査した。標準法汚泥のみの処理水りん酸性りんからＡ$_2$Ｏ法：標準法=1:9 の混合処理水のりん酸性りんを引くと春期は 0.3ｍｇ/ｌ(n=19)、冬期は 0.2ｍｇ/ｌ(n=9)であり、水温が高いと混合処理のりん除去効果も高い傾向がある。水温が高いと、醗酵が進みやすく、反応タンク流入水 Sa が高いのが主因と思われる。

3.4　Ａ$_2$Ｏ法汚泥の好気処理の結果（Ａ$_2$Ｏ法汚泥混合処理、ＡＯ法汚泥混合処理の比較）

中川水再生センターのＡ$_2$Ｏ法（又はＡＯ法汚泥）と標準法汚泥を混合して、回分連続好気処理した結果を図４に示す。図４③から、Ａ$_2$Ｏ法汚泥のみで処理した場合、嫌気工程がなくても、8 回分以上りん除去ができることがわかる。これは、Ａ２Ｏ法汚泥の備蓄

ＰＨＡが多く、その結果、好気条件でＰＨＡを原料とするりん増殖反応が長期間持続されるためと思われる。さらに、反応タンク流入水に返送汚泥を加え好気処理を開始した直後は、反応タンク流入水 Sa を利用する各種反応が競合すると予想され、その競合下でＰＨＡも若干補給されると想像される。A_2O法汚泥と標準法汚泥を混合処理したケースでは、りん除去効果の大きさはＡ２Ｏ汚泥混合比により決まる。また、図４①からＡＯ法汚泥もりん除去効果が高いことがわかる。

3.5　りん放出現象の原因

図４②で一時的に、処理水りん酸性りんが高くなるりん放出現象がみられる。A_2O汚泥のポリりん酸がりん酸性りんとして溶出すれば、この現象をりん収支上説明できる。ポリりん酸濃度をＸpp とすると、別の実験で、嫌気での汚泥からのりん溶出パターンから、Ｘpp/Xpao がかなり低いことが推察された。また、設定上のＸpp/Xpao 上限は 0.34 と高いので、りん蓄積菌のりん過食によるバーストがりん放出現象の原因とは考えにくい、さらに、ポリりん酸がりん酸性りんに多量に加水分解される際のエネルギーの利用先など不明点が多い。

4.まとめ

①ＡＳＭのパラメータから､冬期の標準法反応タンク出口りん濃度をある程度予測できた。この考え方をさらに発展させたりん負荷を用いると、高度処理汚泥と標準法汚泥の混合処理では、汚泥混合比よりかなり低いりん負荷となり、混合処理が非常に有効であることがわかった。

②りん負荷の計算により、りん除去の難易度を処理場間で対比可能である。

③テーブルテストの結果、ＰＨＡを生成する条件が良ければ、A_2O法、ＡＯ法ともに標準法汚泥との混合処理においてりん除去効果があった。また、高度処理汚泥の混合比又は、水温が高いほどりん除去効果が大きかった。

④テーブルテストの図４②で見られたりん放出現象の原因は、りん蓄積菌のりん過食によるバーストとは、考えにくかった。

5　おわりに

全系列を高度処理法としなくても、標準法との混在とすることにより、全系列高度処理と同じりん除去が可能な場合があり、建設コストの削減に有効である。高度処理法と標準法の最適混合比はりん負荷により求められ、データ不足だが、りん負荷１程度（嫌気槽末端 P04-P／流入 P04-P＞3）になる混合比が最適と推測される。

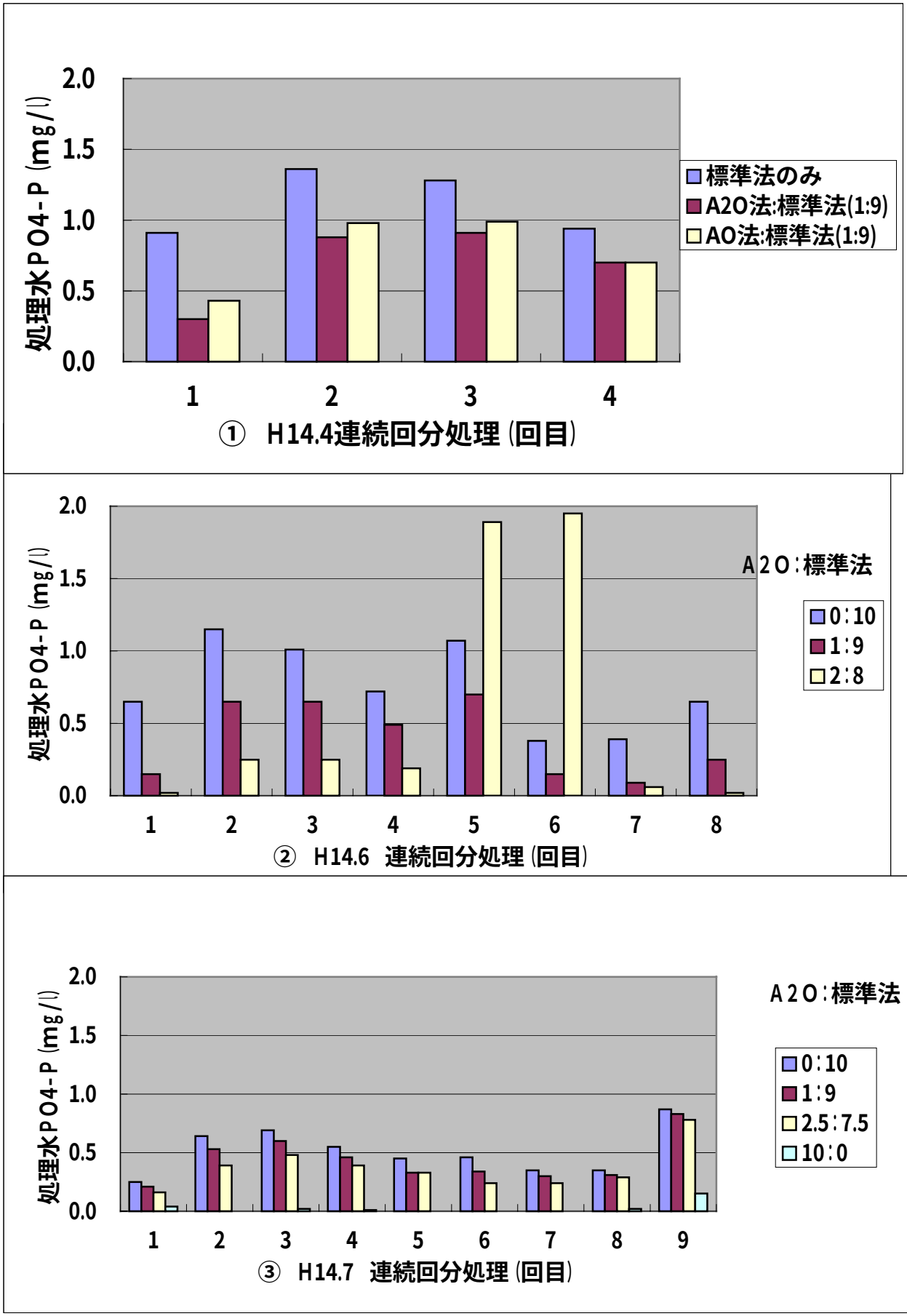

図４　振とう曝気を用いた連続回分好気処理実験