

# シンポジウム「エアレーション制限下での窒素除去」

## 1 安藤理事長挨拶

本日は大変お忙しい中、大勢の方にご参加をいただきましてありがとうございます。  
当法人はこの6月25日に総会を迎えますと、設立7年ということになります。会員数は現在80名弱でございますが、設立当初に比べますと2倍程度に増えております。今日お越しの皆様で、こうした活動に興味があるという方がお出でになれば、是非会員になっていただきたいと思っております。

さて、本日のテーマであります「エアレーション制限下での窒素除去」は、高度処理としての窒素除去についてであると思っております。ただ、いずれのご発表もレベルが高く、私にはなかなかついていけないのでありますが、新しい知見があると思っております。最後に総合討論が設けられていますので、積極的にご質問あるいはご意見を述べていただいて、実りのある有意義なシンポジウムになるように、よろしく申し上げます。

## 2 講演

### (1)「アナモックス反応を利用した窒素除去」

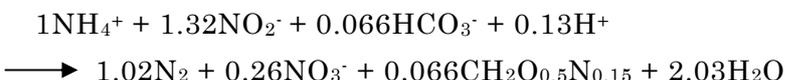
日本下水道事業団 中沢均氏

アナモックス反応は1990年代前半にオランダのデルフト大学で検討が始まり、1998年にアナモックス菌が同定された。そして、2002年にロッテルダム市の下水処理場で第1号機が稼働を始めた。

日本下水道事業団(JS)では2005年からアナモックス反応について検討を開始し、嫌気性消化汚泥の脱水ろ液を対象に実証実験を行ってきた。大阪市においても同様な実証実験が行われてきた。

これらの結果を踏まえて、JS技術評価委員会に「アナモックス反応を利用した窒素除去技術専門委員会」を設け、技術評価が行われてきたが、平成22年3月にその答申が出されたのでここで紹介する。

アナモックス(ANAMMOX:ANAerobic AMMonium OXidation)とは、アンモニアと亜硝酸を窒素ガスへ変換する反応である。



18

図-1 評価対象技術

▶ 評価対象技術

- ◇ 2槽式のアナモックスプロセスを対象とする。
- ◇ 適用範囲として下水処理場(汚泥集約処理施設を有する)の嫌気性消化汚泥脱水ろ液を個別処理して同一処理場の流入系統などへ返送するシステムを対象とする。
  - ※ アナモックスプロセスの処理水を直接放流するケースや他の排水へ適用するケースは対象外。
  - ※ 嫌気性消化汚泥脱水ろ液水質の例(4つの実証実験の平均水質)：  
 $\text{NH}_4\text{-N}$  630~900 mg/L、 $\text{SS}$  30~200 mg/L、 $\text{C-BOD}$  40~250 mg/L
- ◇ 評価に当たっては、我が国で嫌気性消化汚泥脱水ろ液を用いたパイロット規模での実証実験実績を有する3種類のプロセスの実験結果を主として使用する。
  - ※ 評価対象自体は3プロセスに限定せず一般性を務めた記述を行なう。

20

図-2 評価で使用したプロセス

	システムA	システムB	システムC
システム構成	2槽式	2槽式	2槽式
前処理	流調(BOD酸化)スクリーン	流調(液量沈殿)(BOD酸化)	流調(液量沈殿)(前曝気)
亜硝酸化槽	流動担体(包括固定)	固定床	流動担体(結合固定)
部分亜硝酸化方式	ワンパス方式	バイパス方式	ワンパス方式
亜硝酸化方法	担体加熱処理	水温・pH制御	水温・pH制御
$\text{NO}_2/\text{NH}_4$ 比制御方法	曝気風量制御	原水バイパス量制御	曝気風量制御
アナモックス槽	流動担体(包括固定)	固定床	グラニュール
pHの補制御因子	水温、pH	水温、pH	水温、pH

その反応の利点は反応に有機物が不要であること、アンモニア酸化の送風量を削減できること、汚泥発生量が削減できることなどがあり、一方、欠点としては反応の立上げに時間がかかること、水温が 25℃以下に下がるとアナモックス菌の活性が急激に低下すること、反応で硝酸が生成し窒素除去率に限界があることなどが上げられる。

図-1 は今回評価対象とした技術を示している。図-2 は評価で使用したプロセスを示している。

図-3 は処理機能上の特徴をまとめている。さらに、この答申では、設計上の留意事項、運転上の留意事項、適用上の留意事項、その他の留意事項についてもまとめている。

なお、この技術評価の詳細資料はこの 8 月頃に公表される予定である。

図-3 アナモックスプロセスの特徴  
処理機能上の特徴

30

	一般論としての記述	実証実験実績としての記述
部分亜硝酸化 + アナモックス工程	◆ 両工程の組合わせにより70~80%の窒素除去率が期待できる。	◇ 適用可能な窒素濃度および窒素容積負荷はプロセスにより異なるが、実証実験実績ではそれぞれ700~1,000 mg/L、0.7~2.0 kgN/(m <sup>3</sup> ・日)である。
部分亜硝酸化工程	◆ 前処理およびプロセス固有の条件設定を適切に行なうことで、硝酸性窒素の生成を概ね完全に抑制しながら安定的に亜硝酸化を行なうことが可能である。 ◆ ただし、流入水性状や条件設定によっては硝酸性窒素の生成が見られることもある。	◇ 亜硝酸化槽で期待できる亜硝酸化濃度はプロセスにより異なるが、実証実験実績では0.8~1.7 kgN/(m <sup>3</sup> ・日)程度である。
アナモックス工程	◆ 流入NO <sub>2</sub> -N/NH <sub>4</sub> -N比が適切に保たれていれば、80%以上の窒素変換率が期待できる。 ◆ ただし、反応した亜硝酸性窒素の一部は硝酸性窒素に酸化されるため、これを加味した窒素除去率は10%程度低くなる。	◇ アナモックス槽で適用可能な窒素負荷はプロセスにより異なるが、実証実験実績では2.8~5.4 kgN/(m <sup>3</sup> ・日)程度である。
その他	◆ 条件により、亜硝酸化槽やアナモックス槽で従来型脱窒による窒素除去が付加的に生じる可能性がある。	◇ プロセスの立上げ期間は初期に投入する汚濁の濃度およびプロセスにより異なるが、実証実験実績では亜硝酸化槽について0.5~1ヶ月程度、アナモックス槽について2~3ヶ月程度である。

## (2) 「NADH センサーを用いた風量制御による窒素除去」

九州共立大学 森山克美氏

NADH とは、ニコチンアミド・アデニン・ジヌクレオチドの略で、有機物の代謝（脱水素反応）に必須の補酵素（電子伝達体として機能）である。代謝過程に応じて電子受容体として働く酸化型（NAD<sup>+</sup>）と電子供与体として働く還元型（NADH）があり、NADH は波長 340nm の紫外線を吸収して、波長 460nm の蛍光を発することから、この特性を利用した NADH センサーで測ることが可能となる。図-4 は NADH センサーと ORP センサーの特性を比較したものである。海外では 1990 年代から NADH センサーに関する基礎的研究や同センサーを用いた窒素除去に関する論文が見られる。

図-4 ORPセンサーとの比較

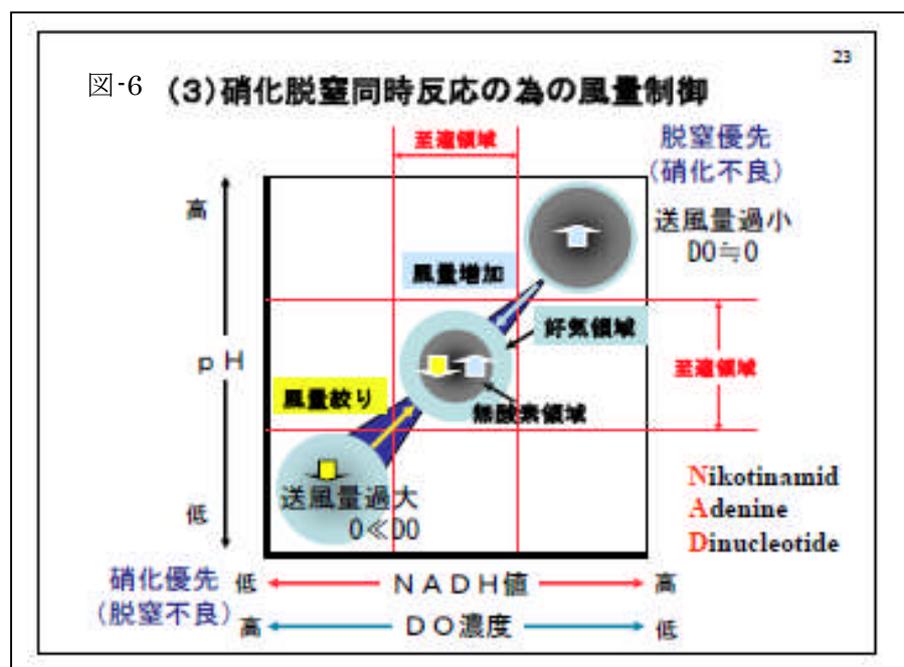
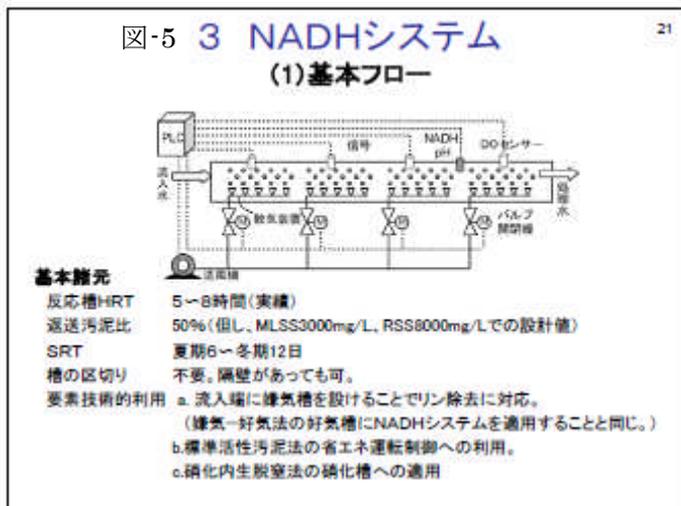
7

比較項目	NADHセンサー	ORPセンサー
検出機構(原理)	光学式	電極式
検出対象	活性汚泥中の酵素NADH (下図の代謝状態を検出)	活性汚泥の外部環境の酸化還元電位
検出値の時間的特性	瞬時に安定した一定値を出力	遅慢なレスポンスで一定値とならない
検出の意味と解釈	次の3つを相対的に区別 ①有機物の好氣的代謝 ②有機物の硝酸呼吸による代謝(脱窒) ③有機物の嫌氣的代謝 検出値は、①<②<③となる。	+は、好氣的代謝に適した外部環境  -は、硝酸呼吸および嫌氣的代謝に適した外部環境
校正原理	光学的比色分析と同一	校正出来ない。
センサー感度の個体差	校正原理からして個体差は無い。	個体により感度(指示値)差がある。

図-5 は NADH センサーを用いた活性汚泥システムの基本フローを示している。その特徴は、ORP や DO センサーでは困難な同時硝化脱窒反応を制御すること、一般的な押し出し流れ型反応槽の標準活性汚泥法に適用可能であること、槽分割の有無は問わず負荷変動に応じて送風領

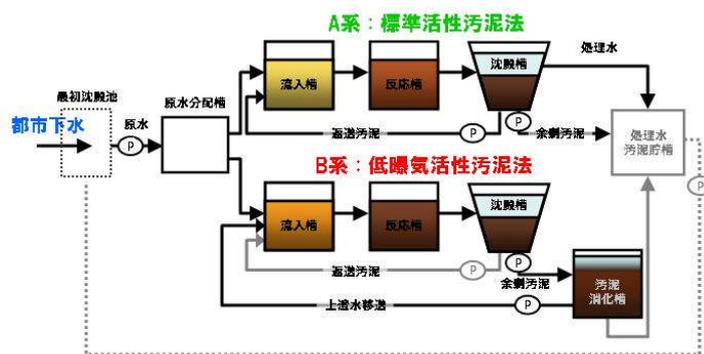
域別にバッキ風量を制御することなどが上げられる。

風量制御を模式的に示したのが図-6である。DOの至適領域は0.6~0.8mg/l程度である。韓国のアンサン市下水処理場は日最大385,000m<sup>3</sup>/日の処理場であるが、これがNADHシステムの適用されている世界最大の施設である。計画目標水質は全窒素15mg/l、全リン1.8mg/lである。韓国ではNADHシステムの導入を計画、建設、稼働中の処理場が現在25箇所ある。



(3)「低曝気活性汚泥法による窒素除去」  
 クラリス環境(株) 定家多美子氏  
 私は微生物が専門で、低曝気活性汚泥法に取り組んでから5年になるが、それ程長い経験があるわけではない。今日お話しするのは、活性汚泥微生物の生育生理条件をコントロールして、窒素の除去をするということである。具体的には、日本下水道事業団との共同研究において、反応槽の曝気風量を抑えることによって標準活性汚泥法よりも窒素除去率を上げることができることがわかった。それをこ

図-7 実際の実験フロー(日本下水道事業団との共同研究)



ここでは低曝気活性汚泥法と呼んでいる。図-7はその実験フローを示している。低曝気活性汚泥法では余剰汚泥を汚泥消化槽に投入し、そこで風量を抑えてDO1mg/l以下に保ちながら曝気し、沈殿させた上澄みを流入槽へ返すことが特徴になっている。

窒素除去の高効率化に関わる条件としては、流入窒素（アンモニア）の硝酸化と硝酸呼吸の促進が挙げられる。図-8は活性汚泥中の窒素循環を示している。流入窒素の硝酸化では硝酸菌の増殖（特に亜硝酸酸化菌）とアルカリ度の補給が重要である。アルカリ度の補給としては脱窒（硝酸呼吸）による回復と緩衝作用を持つ溶液を投入することであり、これを担当するのが汚泥消化槽上澄水の返送にあたる。硝酸呼吸の条件設定としては、酸素投入の制限をすること、バイオフィーム形成の条件を整えること、流入槽と反応槽の硝酸値を高めること、汚泥消化槽の上澄水を利用することである。

図-9は活性汚泥法の運転条件と窒素除去率を比較したものである。低曝気活性汚泥法では標準活性汚泥法に比べて窒素除去率が高い結果が得られている。さらに、低曝気活性汚泥法の運転管理上の利点と効果は、汚泥生成量が抑えられて、臭気も軽減すること、下水処理時間の変更も種汚泥の移植も必要ないこと、標準活性汚泥法を改良し、CO<sub>2</sub>削減に貢献することなどが挙げられる。

図-8 活性汚泥中の窒素循環 (主な細菌と反応条件)

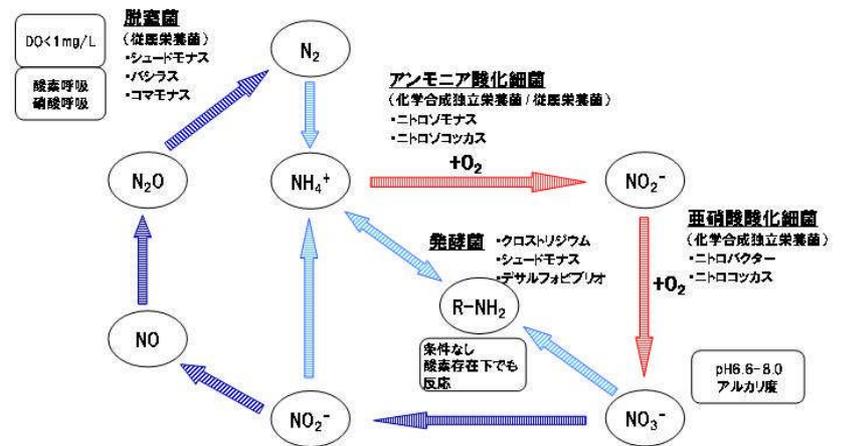


図-9 運転条件と窒素除去率の比較

運転条件	標準法	低曝気法	好・嫌・好気法	A <sub>2</sub> O法
流入水量 (m <sup>3</sup> )	20	20	900~1,100	
返送汚泥率 (%)	30	30	60~90	31~61
MLSS (mg/L)	1,500~2,000	1,500~2,000	2,800~3,200	1560~1930
BOD-SS負荷 (kg/kg・日)	0.2	0.2	0.1~0.16	0.08~0.14
TN-SS負荷 (kg/kg・日)	0.05	0.05	0.02~0.04	
滞留時間 (hr)	9 [流調:1.8→①-④反応各1.8]	9 [流調:1.8→①-④反応各1.8]	15~17 [①好8→②嫌6→③第2好2]	9.7~10.1 [①嫌1.3→②無O <sub>2</sub> :2.65→③好5.98]
DO (mg/L)	1.8	0.8	0.2~0.5	
アルカリ度	58.9	67.5		
T-N除去率 (%)	62	75	90 (80~90)	61~69
BOD除去率 (%)	96	96	85~100	

### 3 総合討論

司会 渡部春樹

#### (1) はじめに

講師御三方の話は、同じ窒素除去という講演でも少しずつ内容に違いがあったが、考えられる共通の検討課題として次の4点を挙げてみる。

1 水温の影響：硝化は通常夏に起り易い等水温の影響が強いが、これをどう考えるか。

2 N<sub>2</sub>O の発生量：硝化・脱窒では、地球温暖化の点で温暖化係数の高い N<sub>2</sub>O の発生量が常に問題とされるが、N<sub>2</sub>O 発生量についての知見・文献等はどうか。

3 プロセスの制御方法：一般的には低曝気だと活性汚泥の制御が難しいのではないかと思うがどうか。

4 汚泥の回復機能：季節の変わり目等で活性汚泥は不安定になり易いが、不安定になった時回復させるのにはどのようにするのか、どの程度で回復するのか。

これらのことを踏まえて質疑・総合討論に移りたいと思う。

#### (2) 質疑・討論

(Q1) 森山講師の資料 P21、NADH システムの基本フローでは、水路の 3/4 位の所に NADH センサーが設置され、各点にも DO 計が配置されている。これは、NADH センサーの値がある範囲に入るように、この位置の DO をコントロールするロジックがあるということか。また、センサーの横にある PH 計は何のためか。

(A) 1 点目であるが、そういうプログラムが組まれている。

(Q2) その点に関して何か文献等はあるのか。

(A) 文献等はない。

(A) 2 点目、PH 計は硝化の達成度をみるため設置している。NADH センサーは有機物の代謝の状態を見ているが、硝化の達成度を見ている訳ではない。NADH が適正值でも硝化が行き過ぎて PH が下がったりした場合、必要なコントロールを行うことになる。

(Q3) 都市域の下水処理場では昼夜間の変動で MLSS が変わり NADH の値も変わってくると思うが、MLSS 系の値とも連動させて制御しているのか。

(A) MLSS 系と連動していないが、モニタリングに入れパネルで見ることができる。

(Q4) アンサン処理場は 38 万 m<sup>3</sup>/日と大規模な処理場であるが、ここは分流式か。

(A) 基本は分流である。日本と同様に一部合流部分もあり雨天時には雨水も入ってくる。

(Q5) 中沢講師の資料 P37 で「既に導入されているのは下水処理場返流水」とあるが、返流水ではリン除去もターゲットになるのか。アナモックスとはどういう関係になるのか。

(A) 返流水は窒素濃度もリン濃度も高いが、リンの方は同時凝集や MAP 法等除去できる技術が既に確立している。残った課題が返流水の NH<sub>4</sub>-N の除去であり、リンを除去した上で NH<sub>4</sub>-N をどうするかが長い間の課題であった。

(Q6) アナモックスの実験では、リンを除去した後で実施しているということか。

(A) 色々な事例があるが、P21 の 4 つの実証実験の中では大阪市の中浜処理場の場合、リンの影響で実験中 MAP がかなり付着して問題があったため、前段で凝集剤によりリンを除去し実験を行っている。

(Q7) NADH センサーの価格はどうか。また、そのメンテや寿命はどうか。

(A) センサーの価格までは関与していない。メンテは、石英ガラスの窓部を月 1 回程度雑巾で拭くだけである。耐久性は、発光回数に関係してくるが、通例 10 年位はもつとのことである。

(Q8) 定家講師の低曝気活性汚泥法では、消化槽の上澄みを利用するとのことであるが、消化槽の DO の設定はどの位で行っているのか。

(A) 消化槽には沈殿槽から BOD も一緒に入ってくることを勘案し、DO は 1 mg/l 以下としている。要は低曝気状態で、アルカリ度を補完するため PH を下げたくない。反応槽でも消化槽でも同じだが BOD が入って来なければ DO が結構高く (3mg/l とかに) なって PH が低くなることがあるので、そういう時 1 mg/l 以下になるよう調整をしてやる。

(Q9) 上澄水の SS はどの位か。

(A) SS は 60 mg/l 位までと思っている。SS があると上澄水の性質が少しずつ変わってくるので、本当は SS、BOD とも 20mg/l 位のきれいな状態でやりたいのだが、DO との関係もあって沈みが悪い時もあるので、60mg/l 位であれば OK である。

(Q10) そうすると、通常攪拌をしていて、上澄水を採る前に沈殿させるのか。

(A) そのような運転をしている。

(Q11) 森山講師の資料 P27 の図では、MLSS が 3,000mg/l 位あるが、アンサン市では何故このように高くしているのか。固液分離などで問題はないのか。硝化細菌はどのような方式で保持されているのか。韓国では 25 の処理場が NADH で供用中、計画中とのことであったが、他の処理場もアンサン市と同じ考えでやっているのか。

(A) P27 は 3 年前の 1 年間のデータである。冬場は余剰汚泥の引き抜きや SRT の管理で 2,800mg/l 位に持っていくようにしている。SRT は日本と同じ方法で算定し、硝化菌の管理・保持を行っている。

沈降性は実は良くなる。一般的に NADH 制御すると、結果的に処理水 BOD が低くなり、汚泥の沈降性は改善されるようである。アンサン市の場合、機械表面曝気のため物理的なせん断力で活性汚泥が細かくなり、沈降性は悪かったが、NADH 制御に代えた途端劇的に改善され、SVI が 120~140 位になったデータもある。そうならない処理場もあったが、沈降性に関しては、米国のエンバイロクイップ社のホームページの資料にも、沈降性が改善するという報告がある。

標準活性汚泥法では MLSS を 2,500mg/l とか 2,800 mg/l に保持するのは難しいが、NADH 制御では対応できている。ただ、アンサン市だけは特殊なことをやっている。P26 の「適用後」の模式図の中の「0.9hr」槽の部分に固液分離装置がついていて、この装置を上向流で通過し終沈に流れていくが、その間に MLSS が 20~30%位は落ちていくということである。このような特殊なことをやっているのはアンサン市だけである。

(Q12) アンサン市で一部は曝気し一部は止まっている写真があったが、曝気制御はオンオフでやっているのか。

(A) アンサン市でも初期に作られたものはオンオフでやっている。しかし、その後は開度と

空気量が比較的リニアに制御できるグローブバルブを使い、10%刻みで制御している。

(Q13) アナモックス反応を下水処理場の返流水処理に適用すると、建設費・維持管理費を含め、大体これでいけるという認識で良いか。また、畜産排水等 CN バランスが N に偏った他の排水にも適用が考えられるが、その展望はどうか。

(A) アナモックス反応は部分亜硝酸化と併せてやると 1 日で処理できることが、普通の硝化・脱窒だと何日もかかり、薬品も必要なのでコスト的にはメリットがある。問題は処理場に直接消化脱離液を返し、水処理系で処理した時との比較であるが、放流先の N 基準が厳しければ効果があると思う。

次に、他の排水への適用だが、畜産排水の脱離液は窒素濃度が高く地下水汚染の問題もあるため、熊本大学の古川先生が、現在ある公共団体や組合と共同研究をしている。

また、特殊なところでは天然ガス製造所かん水への適用がある。千葉県海岸部では天然ガスやヨウドを採っているが、残った部分は  $\text{NH}_4\text{-N}$  がかなり高くそのままでは東京湾等に放流出来ない。熊本大学では、その排水を持ち帰り実験してみたが十分に対応できることが分かった。今は 1 日 10  $\text{m}^3$  位の処理だが、次に 100  $\text{m}^3$  位処理する施設を作り、アナモックス汚泥を 10 倍の量に持っていくという段階的な対応が必要になることが課題である。

(Q14) 冒頭に挙げた共通の検討課題について御意見を伺いたい。まず「水温の影響」であるが、アナモックスの場合、かなり高温が良いとのことであるが、通常嫌気性硝化の脱離液程度であれば、十分適応できる範囲と考えて良いか。

(A) 最適は 35°C 前後である。低くても 28°C 位あれば問題ない。高温消化の場合は問題ない。

(Q15) NADH 制御では、韓国は日本より寒いと思うが水温の影響はどうか。

(A) P27 で見ると水温 12 °C 位であるが、その温度で硝化菌を保持し  $\text{NH}_4\text{-N}$  の基準を満足している。これから福岡市で行う実験では、冬場の流入水で 20°C 位、低くなると 17°C 位になる。韓国は日本より寒いが問題なかったもので、福岡市の実験でも問題ないと考えている。

(Q16) 定家講師の低酸素活性汚泥法では、1 年を通し標準法と並行して実験をやり除去率も良かったということであるが、水温の影響はどうだったか。

(A) 実験を行ったのは真岡市で、結構寒く、建屋もなく吹きさらしの状態であった。外は凍ることもあり、水温も 10°C 位まで下がった。それでも両方式とも十分処理できた。生物が反応できる温度は結構低いものだと実感した。

(Q17) 次に「 $\text{N}_2\text{O}$  の発生量」であるが、アナモックスの場合  $\text{N}_2\text{O}$  は原理的に発生しないと考えて良いか。前段の亜硝酸化過程ではどの位発生するのか。通常標準活性汚泥法程度で考えれば良いのか、或いはその辺の知見はこれからということか。

(A) アナモックスでは理論的に発生しないが、数%の脱窒があるので発生したとしても普通の硝化・脱窒よりワンオーダー低い。部分亜硝酸化の段階では、アンモニアだけではなく BOD 細菌もいるし DO を下げたりするので、条件によって通常の硝化槽程度は出ることもあるし、低いこともある。亜硝酸化に最適な条件下でどうなるのかデータを集めているところであるが、全体としては硝化・脱窒法よりは低いと考えられる。

(Q18) NADH センサー制御は低曝気で DO を下げ脱窒する方式と思うが、 $\text{N}_2\text{O}$  はどうか。

(A) 知見がないので来年度以降実施する福岡市の実験でデータを取りたい。DO であるが、NADH 制御の結果として DO はかなり低い。高い所でも 0.8mg/l 低い所では 0.6mg/l であり、この範囲を超えないよう制御している。

(Q19) 定家講師は、N<sub>2</sub>O に関し何か知見はあるか。

(A) 測定をしていないので答えられない。

(Q20) 最後に「汚泥の回復機能」であるが、標準活性汚泥ではバルキングとか放線菌が発生するとかの問題がある。アナモックス菌は特別に培養されたものではあるが、例えば汚泥が不安定化し、それが回復したというような経験はないか。

(A) 亜硝酸化で担体を使えば問題ないが、接触材を入れたものでは BOD が多いと表面に BOD 酸化細菌が付着してうまくいかない場合がある。強制的に表面をはがすとすぐ立ち上がるが、前処理で BOD をできるだけ除去しておくことが必要である。アナモックス菌は、負荷をかなり増やしたり、数日間止めたりすると活性度が落ちてくる。しかし元に戻せば 1～2 日で元の状態になってくる。アナモックス菌は強い細菌だといえる。

(Q21) NADH 制御については、これから福岡市で実験をするということだが、韓国の視察などで何か知見はないか。

(A) 下水道新技術推進機構と一緒に韓国を訪問した時色々質問したが、汚泥管理で特に困っている話はなかった。基本的に低曝気というのは、汚泥の沈降性がよくなる方式だと思う。韓国ではエアレーション自体も微細で非常にマイルドな曝気をやっているのでフロックの解体もないし、過曝気の問題もなかった。

(Q22) 低曝気活性汚泥法ではどうか。

(A) P14 の食品加工工場の図でバクテリアの状況を見ると、時間の経過と共にブルーの部分のコマモナスという脱窒能を持つ細菌が増えてくる。しかし改良時から 1 ヶ月後位の時、コマモナスが増える前に別のバクテリアが増え沈降性が悪くなったり、色々なことが起こった。3 ヶ月後になると反応槽は割合安定してきた。

クロロフレクシーという硫黄を使うバクテリアがいる。DO がなくなり上澄水を返すのが遅れたりすると H<sub>2</sub>S が発生し、クロロフレクシーが上のほうに長く伸びて浮かび、バルキングを起こす。しかし、このバルキング原因のクロロフレクシーも、低曝気条件が確立すると少なくなる。この様に微生物の立場では、中身を小分けして分類し、制御するのが良いと思う。

### (3) まとめ

アナモックス反応も NADH センサーも 1990 年代、約 20 年前から研究され、今、やっとここまで来た。新技術の実用化には相当の時間がかかるのであるが、もう少し進めば広く応用できる非常に有望な技術である。今後も注目していきたい。