東京理科大学理工学部 **出口 浩** 教授にきく

活性汚泥の先端研究を語る
――酸素消費速度と汚泥滞留時間

東京理科大学理工学部土木工学科の出口浩（でぐちひろし）教授に、汚水の生物処理に関する興味深い話をお聞きした。合成洗剤の自然分解、活性汚泥のフロックに微細なガラスビーズで重しを付ける研究、酸素消費速度OURと汚泥滞留時間SRTの関係、さらに原水に最適なSRTを選択することでエアレーションに要する電力量を節約できることなど、どの話題も非常に興味深い内容であった。

聞き手：本誌編集部

出口 浩 *DEGUCHI Hiroshi*
東京理科大学 理工学部 土木工学科 教授

――先生の研究分野は環境工学とお聞きしますが、はじめに自己紹介をお願いします。

出口：実は現在の天皇陛下と同じ日に生まれました。1960年のことです。生まれてまだ名前がない時に、風邪の治療をした小児科の先生が「名前はこれでいいじゃない」と浩宮さまの名前から「浩」と命名されました（笑）。出身は三重県松阪市で、地元の松阪高校を卒業しました。一浪して東京理科大学に入学し、大学院まで含めて9年在籍し博士号を取得しています（写真1）。

松阪高校化学部での研究

――水質関連の研究は大学生になってからですか。

出口：高校時代からです。1年生の終わり頃から2年生にかけて、合成洗剤ABS*1が大きな問題になっていました。高校の化学部が学園祭で、「合成洗剤による水の汚染があり、魚の味蕾（みらい）が機能しにくくなり、餌以外のものを摂取した結果、その影響として魚の背骨が曲がるなどの奇形が生じている」と発表していました。ABSは自然界で分解しないという話も本当かな、と思いました。当時、松阪には下水道がなかったので、生活雑排水は河川経由で伊勢湾に流れ込んで、最後は湾全体が洗剤の泡で覆われるかも知れない、と考えて、化学部に入部しました。

――水質汚濁が大きな問題になった当時は、ABSの濃度はどの程度でしたか。

出口：部員として、川の河口近くから上流に向かって5、6カ所の採水点を設定して、ABSを測定しました。すると、河口付近で5～6mg/LのABS濃度が検出されました。

――高校の化学部ではどのような研究をなさっていましたか。

出口：川の水が自然分解するかどうかの実験を工夫して設計しました。①川の水と想定したコイが棲息する池の水、ABSの親油基の影響を考慮して②蒸留水にミシン油を添加したもの、③蒸留水のみ、を比較対象と

写真１／東京理科大学理工学部がある野田キャンパス

しました。この①～③の３種類にABSの標準物質を添加して実験をしました。ABSは親油基と親水基があるので、油に吸着する性質があります。油にABSがくっついて水から消える現象も実験で検討しました。

――どのような結果でしたか。

出口：実験を１カ月継続したところ、①池の水からはABSが検出されなくなりました。②ミシン油添加の蒸留水と③蒸留水のみの実験では、ABSが水から除去されませんでした。この実験から、ABSは自然分解することが実証できたと考えています。部の顧問の先生が研究成果を発表しなさいと言うので、科学技術に関係する国の機関にレポートを提出したら表彰されました。このような研究や分析ばかりしていたので、受験勉強はほとんどせず、浪人することになりました。当時は、「二度とこんな研究はしない」と決意していました（笑）。

東京理科大学での研究

――東京理科大学での専攻を教えてください。

出口：土木工学科の衛生工学研究室だったのですが、学生のあいだでは、構造やコンクリート、水理、土質などは人気がありましたが、衛生工学研究室は土木の中では隅の方の存在で人気がなく、誰も行かない。卒研はどんなテーマでも構わないと思っていたので、配属のバランスを考えて私は衛生工学を専攻して、博士課程まで進みました。

――大学卒業後の進路はいかがでしたか。

出口：「卒業したら研究はもういいや、別の分野に進もう」と考えました。それこそお坊さんになろうかとも考えました（笑）。最近も、「定年後はお坊さんになりたい」「33代さかのぼると自分自身の先祖は85億を超える」といった文章を、下水道協会誌に寄稿しました。

博士課程終了を控えた年末には、助手、今でいう助教になる道をつけていただき感謝しております。その後、デンマーク工科大学の Poul Harremoës先生のところに1994年から１年間、留学する機会をいただきました。

――デンマーク工科大学での研究はいかがでしたか。

出口：生物膜による水処理を徹底的に学ばせていただきました。この生物膜のことを学んだ延長線上に、活性汚泥槽に投入される担体（支持体または接触材）の手法を用いて、さらに活性汚泥のフロック*2から種の上位である属レベルでバクテリアを40ほど特定しました。

――話は変わりますが、下水道協会の編集委員に就任されたのは、デンマーク留学に行かれる前ですか。

出口：下水道協会さんには何度も論文を出していましたが、デンマークから帰国した後、国交省土木研究所の方から委員に推薦されました。現在も編集委員をつとめています。

ガラスビーズのフロック

――次に、博士論文について教えてください。

出口：汚水の生物処理を効率化する建設省のプロジェクトがありました。反応タンクの中で生物量を非常に高く維持してスピーディーな分解処理をめざしていましたが、活性汚泥濃度MLSSを2,000～3,000mg/Lという高いレベルで維持するのは困難です。それを6,000～8,000mg/Lにするのが目標でした。簡単に言えば、高濃度を達成するためにフロックに重しを付ける研究です。

――微小フロックに重しを付けるのですか。

出口：フロックに重しを付けることで、高い活性汚泥濃度MLSSでも固液分離が容易になると考えました。研磨剤に使用されるような非常に微細なガラスビーズで、径が0.1mm（100μm）のものを使用しました。実験では、直径200μmでは微生物が付着しません。本当に見事に付かないのです。微生物がサイズを測っているのか、と最初は思いましたよ（笑）。

――径が大きいと微生物が付着しない理由は解明できましたか。

出口：はい。流体力学の観点から考察して、研究成果を博士論文にしました。当時の実験装置の諸条件では、0.2mm（200μm）以上では微生物のフロックが成長できません。それを、フロックの最大成長できるサイズに関して流体力学の側面から考察し、ガラスビーズを攪拌（かくはん）するために必要なエネルギー投入とその消費という考えを、流体力学の乱流渦によるエネルギー消費に組み込んで定式化しました。この結果、0.2mm（200μm）以上の担体（ガラスビーズ）には微生物が付着しないことを説明できました。

――研究成果は実際の処理プロセスでも利用されていますか。

出口：ガラスビーズの重さによって沈降速度を高めて、固液分離の効率を高めることができました。しかし、誰も実際の現場では利用してくれませんでした。生物処理を停止して再立ち上げをすると、うまくプロセスが機能しません。装置の再立ち上げができないこと、返送汚泥の際に支障が出ることが、実用化できなかった理由だと考えています。

実験や実測による研究の原点

――先生の研究は、現場での測定を徹底的に実施するケースが多いようですね。

出口：私は不勉強な男でして、あまり論文は読みません（笑）。自分の頭の中で疑問に思ったことを重視します。「なんだろう?」「仕組みはどうなっているのか?」、その解明に必要な技術や情報を持っている人に頭を下げて聞きに行く、そして仮説を立てて研究する（写真2）。自分で疑問に思ったことを調べて明確にすることのくり返しです。原点に戻ると高校の研究になります。わからないことを調べる。全部そうです。

――先生が疑問に思ったことの中で、生物処理に関する例はありますか。

出口：「いつどの段階で排水中の有機物が取れるのか」といった素朴な疑問があります。一般的なテキスト（教科書）によると、曝気をする活性汚泥槽では汚泥滞留時間SRT6～8時間で分解でき、曝気槽の末端では有機物が分解され微生物が飢餓状態になる。国の内外を問わず、この分野の先駆者でいらっしゃる大先生方も、多くは教科書に書かれたことに言及しているので、やたら反論はできません。

酸素消費速度OURについて

――先生の最近の研究でよく登場するOURについて、わかりやすく教えてください。

出口：OURは酸素消費速度ですが、好気性微生物（活性汚泥）の活動状態を定量的に把握するには、溶存酸素DOの消費速度を測定することが有効です。つまり酸素消費速度OURが大きいと、BOD（生物化学的酸素消費量）分解に大量の酸素が消費されていると考えられます。OUR測定前に活性汚泥タンクを十分曝気（ばっき）して溶存酸素DOを高くしてから、その一部を計測用リアクターに導入し、曝気のない状態でDOの低下速度を測定します。

――活性汚泥が有機物を分解するときの酸素を消費するスピードがOURですね。

出口：酸素消費には二つの種類があります。残存BODを分解するための酸素消費速度と、内生呼吸時*3の酸素消費速度です。後者は、過曝気して残留するBODを極力除去して、いわゆる「内生呼吸状態」にしてから酸素消費速度を測定します。内生呼吸状態になるまでにはかなりの時間が必要となります。

――酸素消費速度OURはどのような場合に測定するのですか。

出口：最近では下水処理場におけるOURを徹底的に調査しています。現在も千葉県さんと千葉県下水道公社さんとの共同研究で、実機を利用した共同実験をしています。SRT*4の制御で、SRTを長くすると酸素必要量が増え、SRT（汚泥滞留時間）を短くすると酸素必要量が減ります。

――汚泥滞留時間（SRT）の違いによる余剰汚泥の発生量は変化しますか。

出口：SRTを長くすると汚泥発生量が減少し、SRTを短くすると少し増えます。SRTが重要なパラメータであることを確信しました。現在も実験に取り組んでいますが、こういったことを数日前に確認することができました。

生物膜による分解実験

――生物処理実験の具体的な事例を教えてください。

出口：茨城県の霞ヶ浦処理場内の実験ヤードに設置した、パイロットプラントによる実験をしました。有機物には微粒子状のものと溶解しているものがありますが、微粒子状の有機物は凝集沈殿で除去し汚泥として引き抜きます。溶解しているものに対し、生物膜を利用して分解するという実験をしました。

――生物膜とはどのようなものですか。

出口：川底の石がヌルヌルしていることがありますが、それも一種の生物膜ですね。

――実験ヤードの装置と実験内容を教えてください。

出口：実験では、層厚さが2m程度のアンスラサイト*5のろ床に、下から空気を吹きながら下降流で排水を流しました。滞留時間が1時間程度でBOD40mg/L強のものが、2～3mg/Lまできれいになりました。浄化機能は素晴らしいものでしたが、どの部分でいつ有機物が分解され除去されるのかが疑問でした。そこで、表面から1.5mまで50cmごとにサンプルを取って詳細にOURを調べました。そうすると、一定のトレンドが解明でき、内生呼吸に移行する状況がわかりました。

――BOD40mg/Lが2～3mg/Lに浄化されましたが、ろ床内部は移動しますか。

出口：1時間に1回ずつ、圧搾空気による逆洗をして、アンスラサイトを上下に移動させる装置を作りました（図1）。ろ床が10cm/hの速度で移動し、1日で全体が更新されます。原水のBODは時間をかけて生物膜に移行します。原水の有機汚濁を微生物に渡して、あとは処理を頼みますね、という感じですね。

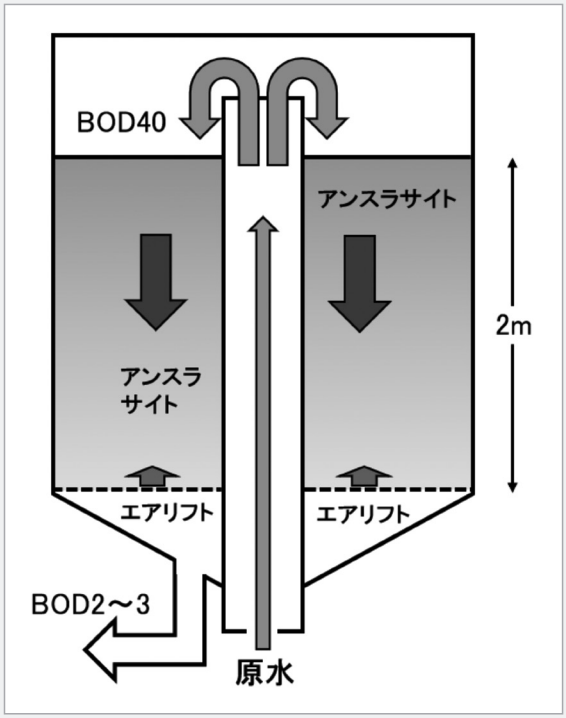
活性汚泥の内生呼吸期への移行

――その後の研究はどのように発展しましたか。

出口：霞ヶ浦のパイロットプラントを利用した研究の後で、微生物が有機物（BOD）を吸着しているが活性汚泥はどうなっているのか、と考えて調べました。さきほどお話したとおり、約8時間後には内生呼吸状態になっている、と教科書にあります。そのイメージは、図2(P006)生物処理の終了段階でサンプルを取ると内生呼吸に

写真2／「なんだろう?」と常に疑問をいだく出口教授

図1／実験装置のイメージ



（本誌編集部作成）

なっている、というものです。内生呼吸とは酸素利用があまり活発でない、ということです。活性汚泥濃度MLSSは重量ベースですが、微生物の中には、さぼっていて機能していないものも存在します。そこで測定結果を酸素消費速度OURと日数で表すと、図３のようなカーブになります。

――汚泥滞留時間SRTは重要で、一般的に平均５日から10日間といわれていますが。

出口：確かにSRTは重要なパラメータであることが確認できます。SRTを７日、10日、15日にするのか、という問題があります。５日の段階では、処理水に比較的多くのBODが含まれ処理水質が落ちるという心配があります。一方、汚泥滞留時間SRTを15日にすると、OURも変化することが分かります。このように、原水の性状に最適なSRTを選択することで、エアレーションに要する電力量を節約することもできます。従来から電力量を先に見て節電することがありますが、OURを測定して最適SRTを装置運転に適用できれば、処理目標を落とさずに合理的な節電につながります。単純にSRTを短くすると電気料金を安くできますが、処理水の水質を十分監視する必要があります。

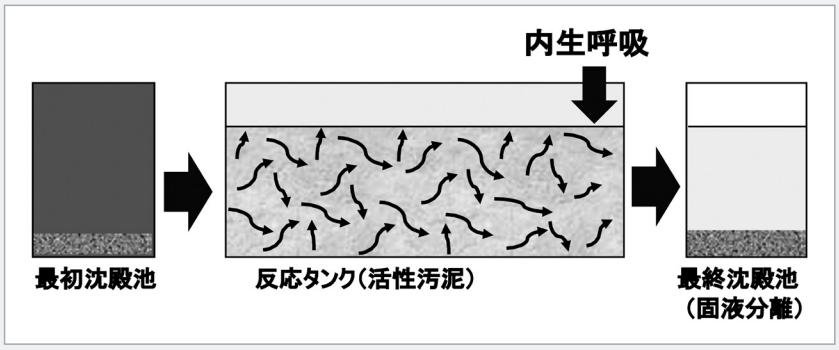
流入原水とOURの関係

――出口先生は流入原水とOURの関係も研究しているとお聞きましたが、簡単に教えてください。

出口：縦軸に累積酸素要求量OURを取り、横軸に日数を取ります。その関係をイメージとして表すと、図４のようになります。

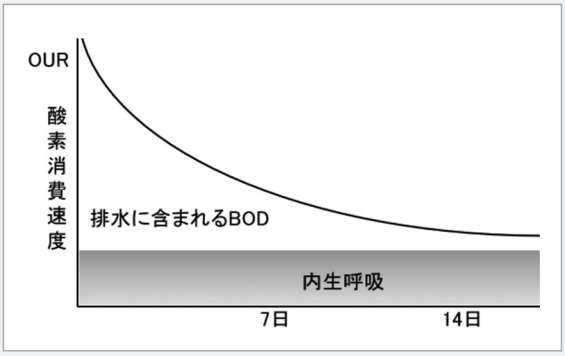
公定法は５日間のBOD_5ですが、私たちは１日、２日、３日…10日、…15日と累積酸素要求量とSRTの関係を調べました。当日投入された下水を分解すると同時に、前日に入った下水を分解、３日前に入った下水も分解

図２／活性汚泥の内生呼吸期への移行イメージ



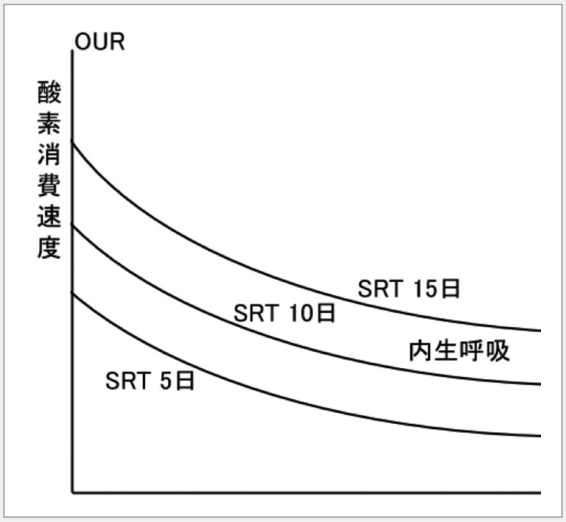
（本誌編集部作成）

図３／OURとBOD除去、内生呼吸のイメージ



（本誌編集部作成）

図４／酸素消費速度OURと汚泥滞留時間SRTの関係イメージ



（本誌編集部作成）

……というように、内生呼吸の影響もあり、SRTが5日間より長くなるほどOURが高くなり、分解処理は高まります。要はSRTが非常に重要なパラメータなのです。

公害防止管理者の受験者へアドバイス

――先生は公害防止管理者の受験者にも10年以上教えていらっしゃいますが、勉強のコツなどを教えてください。

出口：産業環境管理協会が発行する「新・公害防止の技術と法規」のテキストを利用するのが有効ですが、量が多いですね。過去の試験問題を解いて、わからないところを調べる方法であれば効率がよいと思います。私はいわば予備校の先生と同じように教えています（笑）。公害防止管理者の受験者むけの講義では、計算問題は間違わなければ正答を得られるので、満点をとるよう受講者に話しています。知識を問う問題より簡単だと思います。

生物処理に関しては、活性汚泥法の標準方法と循環法など変法、嫌気微生物による処理が重要です。嫌気と無酸素は使い分けていますよ、といったことも教えます。また、こういう意味で反応タンクなどが構成されている、などきちんと理解できるように教えています。有機物負荷を表す数式も、丸暗記しても試験でしくじることがあります。式にはこういう意味がある、ということを理解する必要があります。例えばBOD負荷といえば、流量×有機物濃度（負荷）で1日にどれだけ来るかわかるでしょう、というように理解します。処理施設で処理量は異なるので、単位容積あたりの処理量を考えます。

――水質の研究に関して、最後に一言お願いします。

出口：研究と教育の機関（大学）に籍を置き、長年にわたり教育研究の両方に取り組ませていただきました。顧みれば、高校時代にのめり込んだ、合成洗剤による河川の汚染からスタートした合成洗剤の自然分解の実証研究に、「研究」の原点を見ることができました。以後今日まで、疑問に思う事に向き合い、眼前の事象の本質に迫る取り組みをさせていただくことができました。事象の本質を抽出するために、条件を絞り込んでは実験を遂行する。必要な時には、他分野の方の協力をいただくということの繰り返しです。これを一言で言うと、「調べて書く」です。研究というまさに輪廻の世界です。

写真3／研究はいわば輪廻の世界と語る出口教授

【本誌編集部作成注釈】

＊1　ABSはドイツで1933年に開発された界面活性剤アルキルベンゼンスルホン酸塩。ABSのもつ分岐型アルキル基のために生分解性が悪い欠点があり、洗剤は完全に分解される前に河川に流出していた。電気洗濯機が普及した1964年頃には、住宅地の河川で泡が浮き出すという現象が生じ大きな問題になった。そこでアルキル基（直鎖）への転換が迫られ、1966年以降に主に使われる界面活性剤は、生分解性がよい直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩（LAS）となった。（日本石鹸洗剤工業会資料「石けん洗剤知識」より作成。https://jsda.org/w/03_shiki/senzaimemo_02.html）

＊2　フロックは集塊という意味であり、活性汚泥では寒天またはゼラチン状のものが多い。コロイド粒子などが凝集によって粗大粒子になったものをフロックと呼ぶ。凝集した大きなフロックは沈降性がよい。

＊3　汚水が浄化され分解する有機物が少なくなると、活性汚泥（微生物）は生命を維持するために、自分の体内に取り込んだ有機物や自己の細胞物質を酸化分解してエネルギーにする、そのような状態を内生呼吸という。内生呼吸で微生物内に蓄積した有機物や自分の細胞をエネルギーとして消費すると、菌体量が減少する。

＊4　SRTは汚泥滞留時間の略。活性汚泥の固形分が系内に滞留している平均日数を示す。一般的に5～10日といわれる。

＊5　アンスラサイトは、良質の無煙炭を細かく破砕し、ふるい分けし粒度調整したもの。粒度調整した砂やざくろ石（ガーネット）と同じようにろ過用のろ材に利用される。