

研究展望

衛生工学研究から環境工学研究へ

TOWARD A NEW RESEARCH FIELD OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING FROM SANITARY ENGINEERING

宗宮 功

Isao SOMIYA

正会員 京都大学大学院工学研究科 教授

環境工学専攻水環境工学分野担当

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Key Words: *environmental ethics, action norm, technology reevaluation, zero-discharge, resources saving, technology innovation*

1. 衛生工学から環境工学へ

これからの環境工学が学問領域として取り扱う分野はどこで、何が求められるのだろうか?という論議を始めるとき、昭和40年代中頃の学生が卒論を書き始めたときに、“我々は不幸だ。”と言い出したことを思い出している。というのも、いわゆる衛生工学的技術は、水道であれ、下水道であれ、あるいは河川の汚濁であれ、昭和40年代中頃には問題点が浮き彫りになり、一応それなりの調査手法、解析手段あるいは設計法などが完成域に近づいた時期でもあった。“有機物量を示す BOD とか COD とは何か”とか、あるいは“河川の汚濁を BOD の増減を計量し、特性化”してもあまり新しい興味深い結果はでそうにない時代になったためである。京都大学の衛生工学科が誕生してから 10~15 年目の公害対策技術に対する社会的ニーズが高まった時期であり、学生は“難しい問題しか残っていない”と感覚的にとらえ、愚痴をこぼしたものであり、新たな理論、発想や材料、あるいは手法が求められ始めた時期でもあったと言えよう。旧態然とした技術を受け継ぎ、次世代へ受け継ぐことを根っからの仕事とする立場からすれば、与装置・施設の機能の効率化を図る程度の技術改良が中心的研究課題であって、発想の転換を求められる時代ではなかったことからでた発言であったかもしれない。

今、新たな千年の年頭にあたり、新しい価値観に基づく技術開発が求められ始めているという、同じような時期に差し掛かっていると言えよう。水道の普及率は 96% 以上に及び、下水道の普及もすでに 60% に達しようとしている。農村集落廃水処理設備が開発され、合併浄化槽も実用化されている。いわゆる公害の時代の水質汚濁事

象である有機性汚濁や重金属汚染は、それなりに対処する処理技術の発展と規制の徹底である程度の成果が上がってきた。都市河川では魚が戻り、水辺では花火大会が開かれ、夏の夜の夕涼みに川風を遊び、ボートレースに戯れる時代となっている。問題は、人の意識は既に河川の汚濁から離れてしまっている事を肌で感ぜざるを得ない。公害を代表する mg/l オーダーの汚染を浄化し、比較的好い安全な水を供給する時代の技術を継承する立場の衛生工学が懐かしい思いがする。その守備範囲は往々にして、人の健康に直接関連するであろう水道・下水道・ゴミ(尿尿)を相手にすることがはっきりしていた。医学と工学との知識を融合させつつ、安全な水を供給し、都市社会の公衆衛生条件を改善し、水系伝染病を駆逐し、蚤や蚊の発生のない快適な生活空間を創造するという命題が明確であった。その意味では、近代的な都市環境を創造するため、追い付け、追い越せの行動で済み、社会的使命がはっきりとしていたし、需要が決まっていた。海外で開発された技術を吸収し、改良し、適用技術を高度化するという方向が決まっていたので、技術者は対応が比較的容易に出来た。対処目標が次々と現れ、新技術開発をするとともに、従来の技術の改善改良で、目先の小さな改良はでき、仕事はあった。学生の教育にあっても、需要としての仕事場のでかなりの量の仕事予想され、バブル崩壊までは労働力の売り手市場が長く続いてきた。その後の縮小する市場は、環境関連市場についても旧来技術の継承だけでは、新たに生じる問題を乗り越えられなくなり、また従来と異なる技術畑からの環境問題へのアプローチが強くなり、新たな市場を探し、創造すると言う意味で逼迫しつつある。

今は、我々自体も衛生工学から環境工学へ変革するこ

とが出来るのか、あるいは対象とする環境とは何か、どうあるべきなのかと言った問題に対し、新しい価値観による展望が求められている。ここで、“我々は不幸な時代に研究しなければならない”と愚痴っても問題解決につながらない。多分近未来の日本のあるべき姿を追い求めても、我々分野だけの努力では明確な展望を提示することなど期待できない。ただ、今考えねばならない条件を明確にし、公害を経験し、これがある程度克服した日本人だからこそ考え、人の行動する方向や手順を列挙し、提示することが可能なのではないであろうか。少なくとも我が国と生活場としての外界環境条件が同程度である極東から東南アジアにかけての人口高密度地域で、農耕を生活の糧としてきた地域での人々の生活のあり方については、ハード面とソフト面からの援助が可能であろう。確実に方向性を見通し、高度な消費生活化が近代的生活の名の下に希求される中で、人々に豊かな環境を実感でき、環境も保全できる生活のあり方を展望できるような方向の模索に協力できよう。発展途上国で、豊かな生活が、機能の先進化や効率化で代表される思想や使い捨ての思想で展開されるのであれば、身近な公害を招き、先進国の歩んだ惨めな浪費を繰り返すだけで能がないことになる。むしろ、単純に便利さを追い求め、使い捨て思想による近代化の道を通るのではなく、一足飛びに環境の時代へと誘導する方策を模索し、提示する義務があるのかもしれない。

2. 環境工学での目標設定は

今我々が目標にしている「ゼロ・デスチャージ」や「ゼロ・エミッション」は、今後の人の行動目標としての確かな言葉であるが、なかなか現実的内容を伴って理解されることは少ない。多くの会社が、環境問題が商売になるとの臭いを嗅ぎつけ、にわか環境技術対策会社として登場しつつあるが、本当に何が出来るのかを見極めねばならない。それには次世代（高々10年後ほど）の技術目標を明確にする必要があろう。

「環境」あるいは「環境管理」という呼び名で技術者に何が求められているのであろうか？対象域や学問領域についても、あらゆる地球環境問題に対応できる幅広い環境工学などありうるのだろうか？そこで何をするか？何のために？どうも学問としての位置づけが薄弱である。学問的基礎はどこにおくのか？地球規模での現象の実測や因果関係の解析など今の計測・管理体制で出来るのか？本当に経費を出せるのか？世界中の水や空気を

集め、世界で何が起きているかを、平和を維持するための環境作りと言う名目で、本当に金が引き出せるのか？世界の番人としての米国であれば、軍事戦略的意味から、世界中の水や空気を集め、その質を把握し、事あるときのデータとして活用するために、なければならない必修項目と位置づけられるのであろう。日本で本当にこのような行動に文部省的発想で援助が可能であろうか？島国根性に、気遣い扱いはされるのが落ちではないか？私自身、一時、日本でも汚れた水、おいしい水などなど、時代を象徴する水の缶詰を作り、歴史的事実として残す「水のライブラリー」を作ってはとの発想から科学研究に研究計画を提出したことがあったが、さっぱり認められなかった。日本人はいわば、現実的で、真面目すぎて、面白みがない。と言うか、突飛と思える発想やもっと遊びの要素があってもいいのではないだろうか？今になって、メタンガスがぼこぼこ発生する田子の浦の海水など、もう一度作れと言われても作れるものではない。環境基準点での水質値への適合性を判断するために計測された月一度のデータだけでは実感できないし、汚染状況を再現できない。水俣へのドロや海水にしたってそうではないだろうか？きれいなものだけを見つめるのも一つであるが、過去を直視し、それを身近に実感できることも技術者の環境教育としては必要なものではなかったらうか？

極度に先端化し、機能化し、人工材料で身の回りを固めた生活の中で、安全で、安定した生活場の確保・創造など可能なのだろうか？自分自身が多くの毒物の中で、危険なもの知らず与えられ、生活で使用し、エンジョイしているのではないか？豊かな生態系の中での生活の確保とはどんな条件を満さねばならないのか？人が作った農薬で育てられた野菜や食品類、あるいは化学有機物群の多くは便利で、難分解性で、機能性の高い素材群であり、それから作られた家具や衣服に囲まれ、その真直中で生活し、便利になったと評価してきたが、それらの“人にとって豊かさを満たす物質群や条件と共存しうる安定した生態系などあるのだろうか？”など誰も評価していない。はなはだ肌寒い。山となった産業廃棄物群（宝の山か毒物の山か）はその走りを啓示しているのかもしれない。生態系における人の関わりをどのような領域と幅で把握すればいいのかを考えると、環境倫理ないし人の行動規範と対比して考えてみる必要がある。ただ、地球上で生じている生物学的、化学的、あるいは物理的活動のすべての事象を把握することなど到底出来るものではない。人の長い歴史の中で積み重ねられた、生

存のために開発した生活文化の中で、多くの原理・原則が発見され、文明が作られてきたが、人の生き様を明確に指し示す規範など求めるすべもない。あるとすれば、哲学や宗教による啓示であろうが、一般論として誰でもが拠り所とするものはまだ示されていない。あるいは、「出来るところから始める」という方向性、言い換えると環境の時代の諸問題を足下から見直し、実行する、いわゆる“隗より始める”しかないのかもしれない。身に付いてしまった大量消費、大量廃棄の生活パターンを見直し、少なくとも出来ることとして、歴史上の生態系変化から人の生活態度の変化が環境にどのような影響を与え、どのような変質をもたらしたかを明確に把握することである。結果として、自然の太陽エネルギーの中で出来る最大の消費体系を構築し、出来る限り循環ないし繰り返しが可能な生態系へと回復を計るか、何とか現状維持を試みるかしか手段が残されていないようである。

正に、20世紀の工学が開発したのは、限られた条件下での快適生活空間の創造、機能的で効率的な装置、道具、施設などの設計・製造が中心であった。ある程度の豊かさを入手するまでと、入手してからの人の生活態度や考え方とは180度変わることもある。今日を生きるために汲々とする時代の生活場と、物質的に満ち足りて、ゆったりと生活する場では、当然経費のかけ方も異なる。今、環境・環境のかけ声のもと、多くの環境工事を手がけようと各種の工学が挙手してくるが、仕事の成果としてもたらされるものの創造意義や役割に関する評価を誰が、どのような方法で実施するかが問題である。従来のように、社会施設として不足しているものを補完すると言った旧来型の発想で事足りるのか、あるいは単純にベネフィット対コストの比だけでいいのか、全く歯止めはないのが話題となり、また、改変した自然の変遷や安定性をどう評価するか、学術情報や資料が完備できているのか？などの問題点が提起されよう。我が国では今、便利さと機能性を満足させるための多くの建設現場で猛禽類の取り扱いが話題となり、工事の度にその存在意義、存在場所と生存域が問題になり、工事手法や工事場所の変更を余儀なくされる場も多々でてきている。人の自然に対する行為に対し、生態学的な安定性からの歯止めがかけられ始めている証左であり、多くの知見の積み重ねと、経験・努力・教育が必要なことを示している。

いわゆる環境工学は衛生工学が対象としてきた環境とどこが違うのだろうか？従来、衛生工学は、いわば人の命を守る工学して機能し、公害の時代には典型7公害を解消するために、諸方策を考慮し、工学的対策手法の確

立や、法規や条例、規制など行政を通じての都会の安全化に努力してきた。その意味で、環境工学では、旧来の衛生工学が公衆衛生の医学関連研究者と進めてきた経緯のある事象群、水、大気、廃棄物（液状・固形状）など伝染病等疫学的問題を引き起こしやすい事象だけに注目するのではなく、さらに騒音、振動、放射線障害へと、直接に人の健康へ影響を及ぼす可能性のある事象へと対象事項を広げ、さらに地域・地区から地方、あるいは隣接県、ひいては隣国間にまたがり、ときには地球環境として影響し合う事象まで、計測・制御・管理する場を広げてきた。これらを対象とする環境工学は、いわば地域性が高く、個人の生命財産が直接脅かされ、因果関係が比較的明白な公害問題から、発生源が不特定で、街や都市、国を越えた広域で影響を与え、しかも継続して長い年月影響を被る問題、いわゆる地球規模での環境汚染問題までをも概観し、単に人の生活場を保全するだけでなく、生態系確保の意味から異常に拡大化した人の活動を制限し、監視するシステムを構築することまでを視野に入れなければならない時代となっている。近代化や文化的素養がそれぞれ異なる国々と、一遍に国を越え、同じレベルの管理まで国際関係を構築することは困難であり、少なくとも自国の各地域内での総合管理、水問題でいえば流域内水量・水質総合管理体系を構築し、管理・監視し、有効利用・循環利用するようなシステム作りが求められる。必要となると考えられる。少なくとも、従来のように個々の市町村が水道施設や下水道施設の設置・管理をそれぞれ独自に、あるものは公共事業として独立採算で実施するだけでなく、流域内での水消費形態を場所的と時間的に把握し、質に応じた水配分を有効に実施し、水辺管理を徹底するような管理体系を作る必要がある。その中で、初めて、メダカや水草や草花に富む、人に優しい水辺の形成が出来、生態系の確保、安らぎの場の形成ができることになろう。さらに管理対象域を広域化すれば、国としての管理があり、将来にわたる隣接影響国間での相互管理・監視体制の構築、豊かで安全な、継続して保持可能な生活の場の維持ができることになる。

いわゆる新たな生活の場としての快適環境を量と質との両面から見ると、今後においては、十分な量の管理とともに、特に人の五感に係わる水質評価、あるいは安全性に関する評価が重要な話題となってきている。中身はもはや公害の時代のBODやCODではなく、発ガン性物質であったり、新たな病原性原生動物であったりする。その意味では、学問領域がより詳細に現象把握をすることが出来るようになり、問題点を浮き彫りに出来ること

から顕在化しているものであろうが、どうしても“生態系との共生”，あるいは“自然との共生”といった綾のある内容不在の言葉で目先をごまかされてしまう。環境工学としてどのような工学ベースの技術を追求するか，問題意識の発掘，問題探求のための道具作り，問題事象解明，対応技術への探求などから始めねばならない。

開発する技術目標は，結局は従来型の機能の向上，効率化からスタートするものの，処理対象がいつまでも同じであるはずもなく，時代毎の意識の中で変革を求められる。今の水道や下水道は都市施設として豊かさを実感できる技術と位置づけられているのだろうか？水道水以外に，どうして人は値段が 500 倍もするボトルドウォーターを購入し，消費しているのか？あるいは，浄水器はなぜ家庭に入り込んでいるのか？また街に水辺がなくても，金と遊び場があれば，精神的にも安定し，満足して生きていけるのか？土地が狭いことから，水辺や緑の復活など元々不可能と考えているのだろうか？ヒートアイランド化した都市で，夏はクーラーを使わざるを得なくなってしまうのが，当たり前と受け取り，致し方ないと受け入れているのか？かつての風鈴や浴衣で夏を涼しく過ごすという日本人の知恵や経験はどこに行ったのだろうか？夏の風物詩は「昔のこと」と切り捨てていいのだろうか？みんなで便利なクーラーを使い益々温暖化を進めているので仕方ないよと言えばそれまでであるが，出来ることなら自分から省エネルギーに関し出来ることからはじめ，日本的風物詩を残し，子供に受け継いでもらいたいものである。夏の夕立時に，ブーンと土の臭いを嗅ぎ，自然を感じた経験は今の子にはないのではなかろうか？抗菌性物質で身を固め，自然生態系から遠のき，自分の体内細菌の構成群が変化し，身体の細菌耐性が低下していることに気づいていない。それでいて自然との共生を口にする時代である。まったく能天気な時代と言って過言ではない。いわば，自然の中に生きるという自然の判断適応力を欠き，盲目的に他人の意見に従ってしまっているのではないか？

今，技術開発の視点が転換しつつある。少なくとも，資源有効活用・資源再利用・省エネルギーが技術開発の目標に入っていなければ，まず無視されてしまうであろう。今まで，20 世紀に営々として築き上げてきた，環境関連社会施設の多くは，迅速性と便利さを追求して設置されたものが多く，今ある目先の問題解決のために資源・エネルギー浪費型で組み上げられたものがほとんどである。その意味では今の社会生活に組み込まれている

システムやプロセスに関するあらゆる既存の技術が，資源有効利用ないし循環利用の立場と省エネルギーの立場から幅広く見直されねばならない。資源大量消費行動からの脱皮を題目に，社会基盤環境施設の機能の見直しを始める必要がある。一般論では，20 世紀は大量生産，大量消費，大量廃棄の消費社会の形成により，豊かで，安全な都市を作り上げ，豊かさと利便さを満喫して，優雅に生活してきたとされる。個人の活動域を遙かに越えた所での地球環境問題の発生は，より広域化した汚染の立場から，一国だけが独立して豊かさを謳歌することは許されず，連携して行動することを求め，生活態度自体に変化を求めることを強く示唆し，この時代の浪費の常軌から決別することを求めている。

ただ，残念ながら都市社会生活者に，資源有効利用を心がけることを依頼しても，何をしたらいいのかかわからない人がほとんどであろう。すべきことを教育されていない。半世紀前のごとく，草・木や紙ゴミを自分の「おくど」で自家処理することは出来ない家屋構造となっており，ましてやダイオキシンなどの発生から小型焼却炉の使用は禁じられる方向とすると，結局都市生活者としては，適切な処分体系を形成するかなりの高額な負担を出す必要に迫られる。つまり都市生活者は豊かな環境管理の立場からそれ相当の環境税を出さないと都市空間（緑，水，気温，空気など）自体を快適に維持できないことに出くわすはずである。

3. 水環境関連技術の方向性

以下テーマを水環境にかかわる技術的展望に限ることとする。環境の時代における都市内水関連施設にかかわる技術開発の方向について概観することとする。どの程度の将来を見据えるかによってかなり視点は変わってくるが，ここは高々 10 年ないし 15 年程度将来を展望し，対象技術を把握することとする。

(1) 都市内水環境施設の役割

ここ 50 年にわたって営々として先輩諸兄が築き上げ，水道普及率 96%以上，下水道普及率 58%台達成という成果は関係各位のかけがえのない勲章である。国が技術を決め，統一して建設を推進し，公益事業として予算を投入し，効果的な普及と技術の一般化を計った結果である。ただ，結果として国が技術を保証するシステムを作り上げてしまった。従って，これからの新たな概念や新技術が，公共事業の名のもとでどれほど受け入れられる

かが技術開発の速度を支配しよう。

最も可能性が少ないと思われていた国立大学のエイジェンシー化が平成 15 年に始まろうとしている。エイジェンシー化は、一層工学を実用技術に追いやり、目の前で使える技術を開発せざるを得ない方向へ押し流しそうである。多くの公営企業が民営化されたように、いずれ水道事業や下水道事業など水関連施設も公益企業のエイジェンシー化の波と規制緩和の波の中で大きく方向転換しなければならなくなりそうな雲行きにある。1980 年代後半から 1990 年代初頭にかけてイギリスで吹き荒れたエイジェンシー化の動きがやっと日本にも訪れかけている。水道施設におけるエネルギー供給部門の PFI 化はまさにその前兆であり、この流れは止めることは出来ないのではなからうか。水道においても、ボトルドウォーターの普及は目を見張るものがあり、その売り上げはすでに水道の売り上げの数%台に達し、1つの市場を形成し、確立してきている。人が口にする水の量で比べると、値段の差ほどには肩を並べているとは考えられない。だが、なぜ価格差が 500 倍もあるのか？付加価値がなぜこれほど異なるのかを水道事業体として解析したことがあるのだろうか？あるいは対策を考えているのか？など公式に表した資料は見たことがない。金持ちはボトルドウォーターを飲めばいい。庶民に水道を満遍なく配る義務があり、これこそ水道の最大の使命だと言われるかもしれない。だからといって、なぜボトルドウォーターを自前で売り出すことは出来なかったのか。水道法を信奉すること自体尊いことではあるが、自己の改変のため堅い枠をもっと懸命に切り開く努力がいるのではなかったろうか？エイジェンシー化の波は当然水道事業体によるボトルドウォーターの販売を可能にする切っ掛けの一つとなり、競争相手の出現による処理技術やサービスで切磋琢磨が始まることを意味する。下水道も、建設から管理の時代にはいつて、施設更新の時代に入りつつある。その建設には一般庁費を使い、多額の起債を持ち、長期間かけて返済していく必要があるが、公害防止施設としての目標からいつ抜け出す気なのだろうか？下水道の持つ多角的な機能をもっと広角的な視野から再検討し、そのために必要な技術的変貌を遂げなければならない。下水を捨てるための施設とすれば、昔の 3K 時代のままで、観念的にも、概念的にも何も進歩していない。足早な時代の趨勢に乗り遅れつつあるのではないだろうか？どちらかと言えば、国が保証した技術に甘え、他人の金で仕事をし、責任転嫁が出来た時代の産物と考えられる。各都市の事業管理者は環境の時代における自分の都市のある

べき姿を明確に描き、水関連施設をエイジェンシー化することで、付加価値が出る社会システムへと変質させるという選択を迫られるはずであり、その準備をすべき時であろう。

(2) 大型プロジェクトのアクアルネッサンスとバイオフォーカスの残したものの^{1), 2), 3)}

1985 年から 1990 年の 5 年間建設省によるバイオフォーカスと呼ばれた技術開発研究が実施され、また 1991 年までの 6 年間通産省によるアクアルネッサンスと命名されたプロジェクトが展開された。これらの主眼はバイオテクノロジーが社会の中で大きな話題となり、何かをしてくれるのではないかとの期待から、多くの企業がバイオテクノロジーによる仕事を模索始めた時期と一致している。

建設省主導で進められたバイオフォーカスでは、およそ 30 億円の研究費に民間負担分を上乗せして研究展開がされた。下水処理にあつては微生物を利用した処理が主流であり、その処理機能アップのためにバイオテクノロジーを使えないかとの問いかけに始まっている。そのために、エネルギー自立型下水処理システムの提案をすることであった。

- 1) 省エネルギー型処理バイオリクターの開発、
- 2) 効率的固液分離装置の開発、
- 3) 創エネルギー型汚泥処理、
- 4) ガス発電

などが検討対象となっている。結果として、1) 小規模下水用下水処理システム、2) 省エネルギー型、3) 省面積型、4) 窒素除去用、5) 窒素・リン同時除去用システムなどが検討素材となった。

機能性微生物群の発掘と利用、並びに生物反応器の機能強化と固液分離操作の簡易化のために微生物の固定化技術の導入が試みられた。機能性微生物群の集積保存が計画され、利用可能細菌群の種のライブラリー化が進められたはずであるが、今どうなっている事やら。同時に、省エネルギーの立場と創エネルギーの立場から、エネルギー自立型下水処理場の検討が進められた。当時の結果では、下水中の有機物をうまくエネルギーに転換しても、処理場で必要なエネルギーの高々 40 数%までしか発生できないことが示された。

また、反応器の機能解析と新たな操作法の開発が進められ、微好気微嫌気活性汚泥法や接触酸化処理法の開発が進められた。高濃度の細菌群を効果的に反応器に維持し、固液分離を容易にするために、細菌群の化学薬剤に

よる固定化処理が進められた。固定化剤としては、PVA（ポリビニールアルコール）や PEG（ポリエチレングリコール）、カラジナンなど数多くの素材が利用され、固定化形状も、球状からキューブ状、長方形状、円柱状など、安価な手法で所要量を生産するために、各種の形状の包括固定化作成法が工夫された。処理対象は、初期には有機物処理機能の強化であったが、生物学的な窒素除去機能の付加が加わり、幅広く微生物を活用する場の探求が進められた。結果として、固定化微生物の機能はその作成コストや機能面から、それほど機能化できなかったことから、一般化した技術として広がりを見せなかった。また同時に微生物群を容易に固液分離できることから、付着性微生物群を高濃度にリアクターに保持する目的で微生物担体の開発が進められた。この方向での努力は、今日もより機能性の高い担体の開発が進められている。一方では、好気性反応槽や無酸素反応槽の開発などが進められた。この研究の中で、有機物除去用のリアクターとして次のようなリアクターが開発されてきた。

- 1) 好気付着型リアクター（担体固定）
- 2) 好気流動型リアクター（担体浮遊）
- 3) 微好気・微嫌気汚泥塊型リアクター
- 4) 嫌気付着型リアクター
- 5) 嫌気流動リアクター
- 6) 嫌気汚泥塊型リアクター

などである。開発目標は、標準活性汚泥法に比し、滞留時間を 1/2 以下、エネルギー消費 1/2、発生汚泥量 1/2 程度を目指していた。この過程で多くの処理過程が検討されたが、今も機能している処理法と言えは 2 種類に集約されよう。一つは日立プラント社製の通称“ペガサス”と呼ばれる処理法で、建設省土木研究所との共同研究で開発され、商品化された。また途中からの参加であったと記憶するが、西原環境衛生研究所製のいわゆる“SBR(Single Batch Reactor)”が建設省で技術評価され、小規模用の生物学的硝化脱窒法として市販された。今も世界中で本法の最適操作法の研究が続けられている。

一方、アクアルネッサンスは、6 年間で研究費およそ 120 億円と言われた。開発の意図は、汚水中の有機物をメタンに変えてエネルギー源として回収し、膜処理を導入して処理水を再利用水として利用できる装置の開発であった。この装置（いわば魔法の箱）を各家庭において、資源の有効利用、循環利用を進めることを目指した。機能を標準活性汚泥法と比較してみると、1) 発生汚泥量は 1/4 以下、2) 設置面積 1/4 以下、3) 水処理コスト 1/2 以下、また、4) BOD は 2/5 以下となっている。対

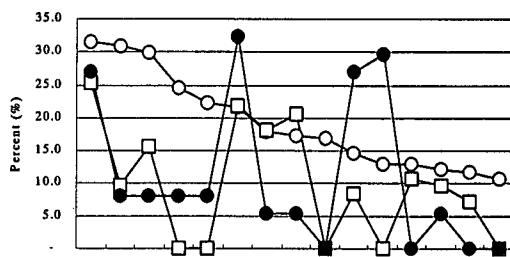


図-1 保持技術群の適用域 (凡例および横軸は図-2 参照)

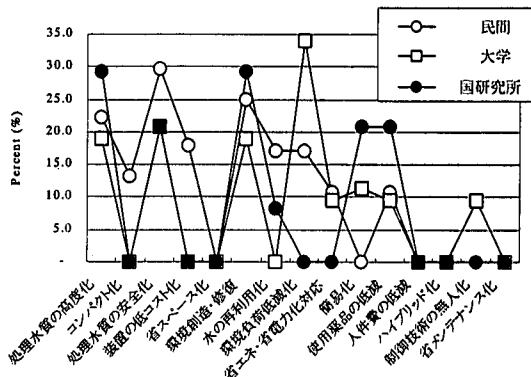


図-2 開発予定の技術群

象が各家庭用の有機物対策装置であり、規模が小さいことを勘案しても、バイオフィォーカスに比し、かなり大胆な提案であることがわかる。

このためメタン発酵菌を包括固定する技術開発が進められた。当時新たに開発が進んできた“UASB”との機能比較から、化学薬品による固定化技術はやはり自然の固定化技術ほど安価でないこと、あるいは家庭下水を対象とするとメタンは発生するが水に溶解したままで回収できないことなどから、実用化があきらめられた。少なくともこのプロセスを成立させるためには、下水の BOD が 400~500 mg/l 程度の有機物を含んでいることが必要であることが判明した。一方固液膜分離法では、有機性膜から無機性膜まで幅広く検討され、その技術は今も機能性膜の創造へと発展し、さらに水道事業における膜利用研究 (MAC21 や ACT21) へと受け継がれている。

(3) 技術変化の方向

一般論として、最近通産省が実施した将来期待される水処理技術についてのデルファイト法による調査⁴⁾では、これからの技術として図-1 および図-2 のような結果を示している。調査対象の国立研究所、大学、民間では少しずつ温度差があるが、今有している技術の適用につ

表—1 下水処理と細菌群

	浮遊性細菌群	付着性細菌群
好気性、通性嫌気性細菌群	活性汚泥法 活性汚泥法変法 純酸素活性汚泥法 超深層曝気活性汚泥法、 生物学的硝化法	回転円板法 散水ろ床法 接触酸化処理法 固定化担体処理（流動層法、流動接触槽法、懸濁粒子法）、包括固定化生物酸化法（ベガス）
好気・通性嫌気・嫌気性細菌群	酸化池、酸化藻（OD法） SBR	生物接触ろ過法
無酸素ないし嫌気性細菌群	生物学的脱窒法 生物学的リン除去法 メタン発酵（嫌気性消化） 有機酸発酵	UASB 固定化嫌気性消化法 高温発酵

いては図—1にみられるように、処理水の高度化や安全化、等が中心であるのに、国の研究所や大学の技術は環境創造・修復、コンパクト化、使用薬品の低減などに関心が高いことがわかる。一方、これから求められる技術についても、下水処理技術をより高度化していこうとする方向がみられる。ただ、民間と大学・国立研究所とでは若干興味の焦点が異なっている。いずれにせよ、水の再利用、省スペース、省エネルギーあるいは省資源に関しては、全体としてそれほど大きなファクターと考えていない様子が見とれる。その意味では、技術開発の方向性が見えていない、あるいはどこを切り口とすればいいか判断しかねているようにも見える。結果として、自前で技術開発するより、海外から適時に導入する方が、より手っ取り早く、効果的であるといった方向へ流れるのではなかろうかと懸念される。

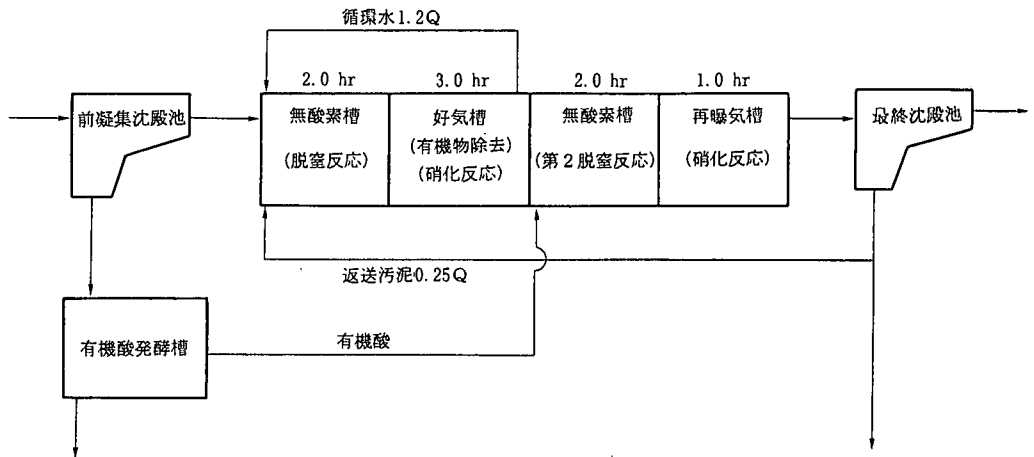
現実には多くの処理場で利用されている活性汚泥法にしても、公共下水道である限り、これさえ使っていれば高級処理として国が認め、予算を計上し、援助してくれるシステムであり、改善補修も一般町費が利用できる。昭和45年の公害国会以来、下水処理は水質汚濁を防止する最後の切札として、多額の予算が計上されてきたが、多くの規制や努力のかけがあつて、有機性汚濁はかなり解消してきた。有機性汚濁の後には、水域の富栄養化現象が顕在化し、下水からの栄養塩除去が問題となり、処理法の改善を促しつつある。さらに今日では、有機塩素化合物やトリブチルスズなどで代表されるような、微量だが、生態系に大きな変化をもたらす物質への対応が求められつつある。ちなみに、水処理工程で利用されている土壌微生物群を区分けしてみると、表—1のようになる。

(4) 終末下水処理場の機能の見直し

現在、我が国のほとんどの下水処理場で「下水の高級処理」が採用され、下水道の施行令に記された技術的水質基準であるBOS 20mg/l以下、SS 70mg/l以下、大腸菌群数 3000 個/ml以下という水質値をほぼ満足するものとなっている。処理場の放流水質基準については、各地方毎に条例によってより厳しい基準が適用されているところもあるが、これらは水域の有機性汚濁問題解消を求めるとの社会的基盤施設として、公害の時代に設定されたものが多い。今後は、環境の時代へ向けての新たな基準（もしくはガイドライン）作りが求められる。

そのためには、全国一律でなく、地方の特性を加えた処理の目的を明確にする必要がある。環境の時代ではどのレベルの水質が求められ、単に有機性汚濁対策用の施設でいいのか、栄養塩除去も求められるもの、あるいは都市内水環境改善施設・水循環管理施設の一部と見なし、水供給源として水道水質並の水質を出しうる機能を持たせるのかなど、施設がおかれるであろう位置づけによって、保持すべき機能は変化し、維持管理体系自体が変化するのである。この意味からすると、下水収集施設並びに終末処理場（この呼び名が問題でもあるが）に求められる条件はどのようなものかを列挙してみる。

- 1) 対象流域の利水状況、水文条件から高度処理の必要性はどの程度あるのか？
- 2) 都市内面源汚濁対策としての下水（雨水）貯留機能や処理場機能は如何にあるべきなのか？
- 3) 下水の有機物含量は変わらないか？ディスプレイの利用は？生ゴミとの同時処理は？
- 4) 水処理工程での有機物の無機化率をもっと上げるのか？有機物再利用とどう整合させるか？
- 5) 環境ホルモン、病原性原生動物（ジアルジアやクリプトスポリジウムなど）やウイルス対策などについて、安全な処理水が得られているか？十分か？
- 6) 有機資源利用の立場から、もっと有効利用できる汚泥の生成方法はないのか？汚泥処理工程の機能を有効活用する手はないのか？
- 7) 環境施設としてエネルギー消費量の低減は可能か？水道事業で始まったPFIの可能性は待ったなしではないのか？
- 8) 資源有効利用の意識は？水の利用は？リンは？窒素は？その他売れるものはないか？
- 9) 安全な焼却灰は合法的に減らせないか？無機イオンなどは放流処分できないか？
- 10) 処理を要する有機性汚泥の発生はあるのか、その



図一 3 処理システムのフローチャート

有効利用の方向はあるのか？

- 11) 効率的な管理運転のため、各種情報の計測でさらなる自動化の可能性はないか？

下水管や流集システムの改善は議論を後に譲るとして、ここでは都市下水の処理技術に関する問題を整理してみる。

- 1) 活性汚泥法の利点は何か？本当に将来の技術として生き残れるのか？有機物除去だけでいいのか？
- 2) 余剰汚泥と呼ばれる生産される細菌蛋白は有効利用できないのか？例えばビタミンB₁₂のように。
- 3) 今の処理基準の処理水や汚泥の有効利用の可能性はあるのか？飼料や肥料などに加工できないか？
- 4) 富栄養化対策は本当にいるのか？どこまで必要なのか？
- 5) これまでの汚泥処理工程は資源回収の意味で維持する必要があるのか？
- 6) 省資源・省エネルギーはどこで実施しようとするのか？プロセスの改善・改良は可能か？
- 7) 微量汚染化学物質に対する対策はどうするか？
- 8) 塩素処理以外で、確実な消毒はどうするか？

少なくとも、80 数年前に開発された活性汚泥法は、水中の有機物を土壌細菌群に食べさせると水が澄んでくることから、これをプロセスとして開発したものである。

水は近場に捨て、生成汚泥は山や海に固めて捨てれば済む時代に開発されたものである。いわば、水を排水する場所と、汚泥を捨てる場を変え、人の生活圏から汚泥を遠ざけることで事足りた時代の技術に他ならない。汚泥を山や海に捨てられない時代になり、目の前の問題解決のために、初期の技術体系に汚泥処理工程を付加したのが現代の処理場である。が、環境の時代の価値観に合わなくなり出している。少なくとも、省資源・省エネルギー

の発想からすべての体系を見直し、生物処理、化学処理と物理処理をうまく組み合わせた処理法を想定し、それぞれを何のために、どう利用するか、新たな概念を立て、処理プロセスのあり方を検討する必要がある。

(5) 新規開発の処理プロセスの意図

大阪府 K 処理場は、将来の下水水量増加を見越し、拡張工事を続行中であるが、さらに既存施設の処理機能を高度処理へと高めるため、新たな処理システムの技術的検討がなされつつあった。このため、数年間 K 処理場で新処理システムの基礎実験が展開され、処理機能と処理条件に関する検討が加えられた。その結果、平成11年度に（財）下水道新技術推進財団の1 研究テーマとして取り上げられ、本処理場の施設の一部を改造してパイロット実験を進めることとなった。本年度（平成11年）に基本設計から施設変更工事の発注にまで実施し、12年夏ないし秋に通水を開始し、実下水の実験に取りかかることになっている。

実験した一つの処理システムは、従来の活性汚泥法による処理プラントを改善するが、主要な処理の流れが、前凝集沈殿+嫌氣的脱窒槽+好気槽（返流付き）+嫌気槽+仕上げ槽であり、汚泥の取り扱いが凝集沈殿汚泥の回収+有機酸発酵槽+膜による分別+従来の汚泥処理（メタン発酵ないし脱水+焼却）からなっている。

フローシートの概要を図一 3⁵⁾に示す。

なお、このプラント実験における目標および期待される効果は以下の様である。

- 1) 有機物、栄養塩など超高度処理が可能で目標水質は日間平均値として
BOD 5.00mg/l, T-N 6.7mg/l, T-P 0.49mg/l
- 2) 既存の標準活性汚泥法に係わる処理場面積内で対

表-2 処理システムの特徴

各処理槽	効果把握項目	機能特徴
前凝集沈殿	生物反応槽への負荷軽減	コンパクト化
	利用可能汚泥の生成	資源有効利用
	難分解性有機物の軽減	省エネ、コンパクト化
	リン除去機能	コンパクト化
担体利用	滞留時間短縮	コンパクト化
	返送汚泥不要	省エネ化
	最終沈殿値省略	省面積
最終沈殿池省略	好気性ろ床採用	コンパクト化
	難処理性汚泥減少	省エネ化
	溶解性基質の回収	汚泥有効利用
有機酸発酵槽	メタノール添加不要	汚泥有効利用
	汚泥の減溶	省エネ化

応可能であり、なお余裕ができること。

- 3) 処分を要する汚泥量は2分の1以下になる。
- 4) 処理費用はおおよそ活性汚泥法による標準処理場の2ないし3割増し程度で済まうこと。
- 5) 余剰に生産される有機酸は資源として活用できる。

(メタン発酵や紅菌増産、生物分解性高分子生産)などである。

また、本対象処理システムに期待できる改善効果は、以下の表-2のように総括できる。

結局、本プロセスの主題は、前処理として凝集操作を入れ、オルトリン酸性リンを凝集させ、コロイド次元以上のサイズの物質を凝集させ、沈殿処理して除く。いわば、有機物の効率的な汚泥化、従って回収をする。上澄み液は溶解性有機物群とアンモニア性窒素が中心となる。続く無酸素槽では、返流されてくる液中の硝酸性窒素を凝集沈殿後の下水に溶解している有機物を基質として脱窒を生じさせ、続く接触酸化槽で残留有機物の分解とアンモニア性窒素の硝酸化を進める。

続く脱窒槽では、汚泥の有機酸発酵槽から分離された有機酸を基質として、脱窒を生じさせる。なお回収有機酸に入っているアンモニア性窒素については、最終的な仕上げ槽である好気性接触生物ろ過槽で硝酸化して放流する。これらの操作により、安定した処理水が得られる。

ちなみに、図-3に示す処理フローで得られた成果の一部を表-3に示す。また、実施設の改良ではさらに改良型が使われる予定であり、各生物処理槽における微生物の増加はそれほど高いものでなく、最終沈殿池からの生物反応槽への返送工程は考えられていない。

この表-3からわかるように、流出水の水質は、目標水質を満足している。特に、T-N、T-Pの除去率は86%であり、十分目標を達している。一方、T-Nの除去率約86%は生物学的消化脱窒法では400%近い循環をかけなければ達成できない値である。それぞれの生物処理槽のHRT

表-3 流入原水と各処理水の水質 (単位 mg/l)

	流入	凝集	流出	除去率 (%)
SS	72.6	18.4	4.8	93.4
T-COD	215	82.8	26.9	87.5
T-BOD	71.1	24.0	4.5	93.7
T-N	22.3	20.7	3.2	85.7
T-P	2.6	1.2	0.37	85.7

は図-3に記載してあるが、標準活性汚泥法の時間に順じ、全体で8時間、無酸素槽2時間、好気槽3時間、無酸素槽(第2脱窒槽)2時間、再曝気槽(仕上槽)1時間となっている。ここでは、好気槽には担体を投入したが、生物処理槽での担体法と浮遊法とを比較したとき、担体法の方が効果的である結果を得ている。図では、25%の返送をしているが、「既存施設にある機能を有効利用することも期待されている」ことから、実験的に検討されたものである。このように、単に有機物の処理だけを目的とするのではなく、栄養塩対策も施し、発生汚泥量をも低下できるような総合的な処理プロセスを、物質収支的概念のもとで、各地域毎に地域特性を勘案して開発する必要がある。

4. おわりに

環境の時代では、身近な環境の適切な管理に社会の意識が集中し、住人の協力を得ず行政が環境の仕事を展開することは不可能になる。いわゆる住民参加型の事業が考えられないと、環境を汚染しているのは自分だという認識、意識化がなければ、財政的にみて適切な水環境など確保できない。また、我々環境工学を仕事場として選んだものの責務として、他の学問領域とどこが異なるのかとの問いに対し、何らかのはっきりした意識的な確信を持っておらねばならない。少なくとも現象を把握し、そこに普遍的な原理や新たな生物を見つけだす理学的な視点も持っていなければならないが、そこに止まっては環境管理や改善に連がらない。とすると、環境工学では、問題となった事象や環境問題を注視し、具体的な数値として把握し、解析し、現象を理解し、再現し、因果関係を明らかにした上で、適切な施策や対策を実効的で、実施可能な提案をする事が求められる。従って、生物学的、化学的、物理的基礎素養が求められ、得られた結果を物質収支的に把握し、因果関係を把握した上、将来への変化の数理モデルを駆使して、予測シミュレーションを実施して、効果を把握し、リスク解析をすすめ、妥当で、実施可能な必要な案件を提示することが出来る能力が求

められる。時代の価値観の変化が比較的早いのに対し、環境施設の建設には時間を要し、一端始めたものの方向を変更することは容易ではないことが多い。モデリングを活用し、時々刻々事業の評価を幅広い視野から出来る技術者でなければならない。

いずれにせよ、情報、エネルギーそして環境が次世紀の大きなテーマであると言われている。しかし、どこに切り口を入れれば最も効果的であるかなど、場所と時間によって変化し、変動するもので、どこにも決まった解決などないであろう。“省エネルギー”や“省資源”の立場から、足下から一人一人が気をつけるのが最も早い解決策であろうし、先端性や効率性を最大目的とした開発の時代から、若干効率性は下がっても、自然の物質循環系に乗りにくいものは使わない、あるいは開発しないスタンスを明確にする必要がある。

参考資料

- 1) 通商産業省工業技術院研究開発官室、大形プロジェクト 1985年、パンフレット、p.19 “水総合再生利用システム”。
- 2) アクアルネッサンス技術研究組合、アクアルネッサンス'90 計画、小型試験装置による実排水試験、パンフレット。
- 3) 建設省・バイオフィーラス W.T.共同研究企業、新たな世代のために、バイオテクノロジーを活用した新廃水処理システムの開発（下水道編）、1986、パンフレット。
- 4) 資源リサイクルシステムセンター、第1次デルファイト調査結果報告、通産省分野別技術戦略、水関連分野技術戦略調査、平成11年11月22日、委員会資料のデータを改変。
- 5) 大阪府東部流域下水道事務所、財団法人下水道新技術推進機構、平成10年度新技術活用モデル事業、“前凝集と担体を用いた下水高度処理システムの実用化研究”、1993.3。

(2000.1.5受付)