

## 序

土木学会誌 2017 年 7 月号に東京大学福士健介教授による「持続可能な開発目標 (SDGs) の意味」という論説が掲載された。途上国の課題を対象にしたこれまでのミレニアム開発目標 (MDGs) に代わり、SDGs では、途上国と先進国が共通の目標にとともに取り組むことになる。これは、人為の活動が増大し、地球環境の持続可能という観点から世界共通の努力が求められているからである。これに関連して Rockström 氏の「地球システムの限界」(planetary boundaries) の論文内容が紹介され、気候変動の最大要因である CO<sub>2</sub> 濃度がこの限界を超えてしまっており、今後は火力発電所の建設には大きな制約があり、エネルギー確保が難しくなるだろうとしている。

以上は尤もではあるが、次の論旨の展開が「おや!」と思うのである。活性汚泥法というエネルギーを大量に投入する必要があるプロセスを用いてきた下水道を途上国に整備するのは問題があり、もっと低エネルギーで生態系への影響が少ない社会インフラを開発し、これを途上国に適用するとともに先進国にもこれを逆輸入すべきではないかという主張である。

Rockström 氏による「地球システムの限界」はこのところよく耳にするが、氏の定量的な検討結果によると、気候変動、生物多様性、窒素循環の 3 項目が、既に地球システムの限界を超えているとしている。窒素循環の問題については、窒素肥料の工業合成等により、以前に比べ 2 倍の反応性窒素が地球を循環し、種々の環境問題の元凶となり、既に限界に達しているという。ここで注目したいのは、窒素の問題が、CO<sub>2</sub> と同様に大きく取り上げられていることである。

下水道は都市の雨水及び雑排水そしてし尿の問題を解決するために発展してきた。そして現在、膨張する人口は世界の都市部に集中している。この都市における水と食料、そしてその代謝物である下水をどう管理していくのかは、保健衛生の次に控える喫緊の課題である。都市における C,N,P の管理をどうしていくのか、それは下水道システムによりリサイクルをベースとし地球環境に則した処理を実施していくことであり、この処理プロセスには活性汚泥法を基礎とした生物処理が必須であると考えられる。

なぜそのように考えるのかは、次に示す章立てで順次説明していきたい。

1章 国土の富栄養化をどう捉えるか

2章 下水処理とエネルギー

3章 リン・窒素のリサイクル

4章 窒素処理と地球環境

この試論が環境や下水道を学ぶ若い世代の科学・技術者の皆さんとの接点になれば幸いと考えている。

## 1章 国土の富栄養化をどう捉えるか

瀬戸内海が貧栄養化！という新聞記事に目を疑った。何故なら、戦後この方私たちの身の周りの自然環境は富栄養の方向をまっしぐらに進んできたと思えないからだ。はげ山がとても目についた近郊の山は今は鬱蒼とした森の山となった。そしてきれいに澄んでいた水辺は、水が停滞する箇所ではアオコなどの影響で透明度は極端に下がり、水の流れている箇所でも水生植物が繁茂してその様相は変わった。

富栄養で景観が変わると言えば、松林のことがある。マツは植物群落の遷移から見るとススキ等しか生えない土地に一番早く飛び込んでくる樹林のパイオニアである。殆ど栄養のないところでも生長できるのであろう。しかし、マツ林は他の種の木々が入り込んでくると途端にその勢いを失い最後には枯れてしまう。関東平野では嘗ては松林がどこでも見られたが、現在は急速に消滅している。白砂青松はわが国の風土を表す典型的な表現であったが、貧栄養をベースとした日本の国土の状況に根差していたと考えられる。

しかし、こうした状況は何時のころから一変したのであろうか。それは多分日本の高度経済成長期と言われる昭和30年代後半、1960年代あたりからなのではないかと思われる。

このようなわが国における富栄養現象の年代的推移を、実際の数値データで追いかけてみる事ができるのか。これが意外と難しいようだ。湖沼や内湾の富栄養化問題が大きく取り上げられるようになった1970年代、その中で滋賀県琵琶湖の富栄養化防止条例（1979年）が定められ、続いて湖沼、内湾に窒素、リンの項目を含む環境基準、排出基準が定められるようになり、公共用水域の窒素、リンデータがこの年代から整備されるようになった。よって、わが国の水域における窒素、リンデータが集積されるのは1980年代からということになる。1980年代はどうも窒素、リンデータのピークとなる年代であるようで、(財)河川環境管理財団によって整理された全国河川の水質データによると<sup>1)</sup>、1980年頃と1995年頃とでは窒素では若干減少するものの殆ど変わらず(平均値1.97→1.81 mg/L、中央値1.24→1.10 mg/L)、リン濃度はこれに較べ減少している(平均値0.139→0.104 mg/L、中央値0.071→0.052 mg/L)。以上の値は日本の1級河川の約450測地点での比較である。日本の湖沼における環境基準の一番緩い基準が、T-N 1 mg/L、T-P 0.1 mg/Lであるが、窒素については半数以上の測地点でこの水準を超えており、リンについては3割くらいの地点で超えている。因みに窒素(T-N)1 mg/Lというのは農業用水基準値でもある。水稻用の用水はこれ以下が望ましいということで作られた基準であるが、最近ではこの基準を満足するのが難しくなっている地点が続出しているので、農業サイドにおいてもこの基準値をアンモニア性窒素1 mg/L、あるいはケルダール性窒素1 mg/Lと読み替えて対処している。

このように最近の河川水質値が示すことは、日本の水系の多くの箇所が富栄養化の影響下にあるということではないかということである。この原因は何かということでは、まず生活排水、そして畜産排水、それから農地からの面現負荷の影響ということが考えられる。これに加えて窒素については大気汚染経路の負荷も無視できず、既に雨水中の窒素濃度は1 mg/Lを超えていることはそう珍しいことではないという状況にある。

それではこうした富栄養環境になる前の水質データはないのかということについて、実は1950年頃（昭和30年代以前）の日本における河川水の窒素、リン濃度の実態を示す貴重なデータとして、

小林の研究成果<sup>2)</sup>が注目される。小林の採水地点と近年の1級河川での環境基準点が対比できる地点は限定されるが、これが対比して図2, 3に示される。1950年頃の栄養塩濃度は近年のものに比べて随分と低いレベルにあり、窒素では近年のもの約3分の1、リンでは約5分の1から10分の1のレベルにある。これは正に当時のわが国の水環境の栄養レベルをデータで示すものである。

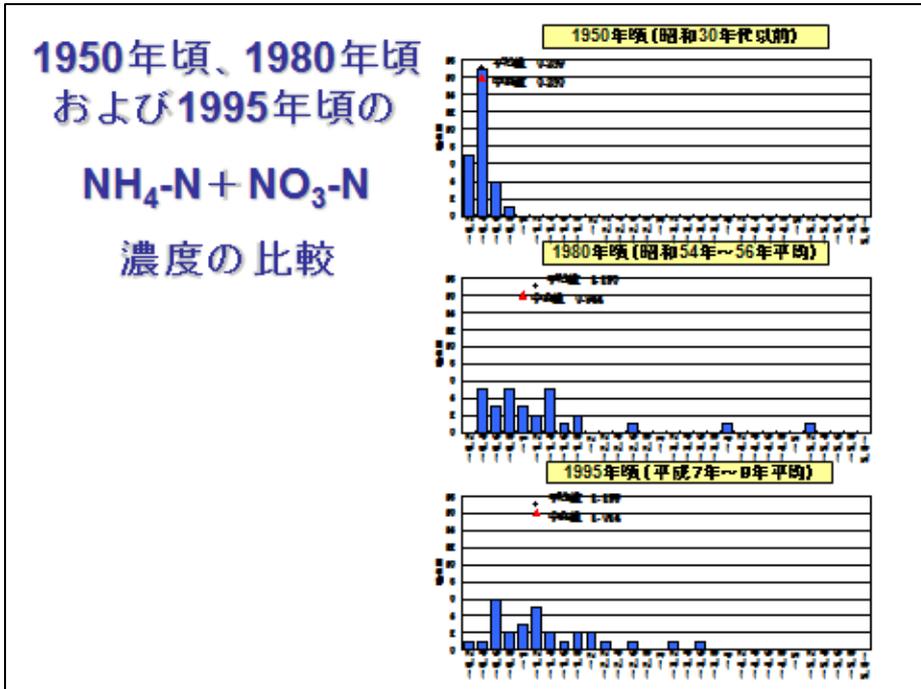


図 1 河川水の窒素濃度の年代別変遷<sup>1)</sup>

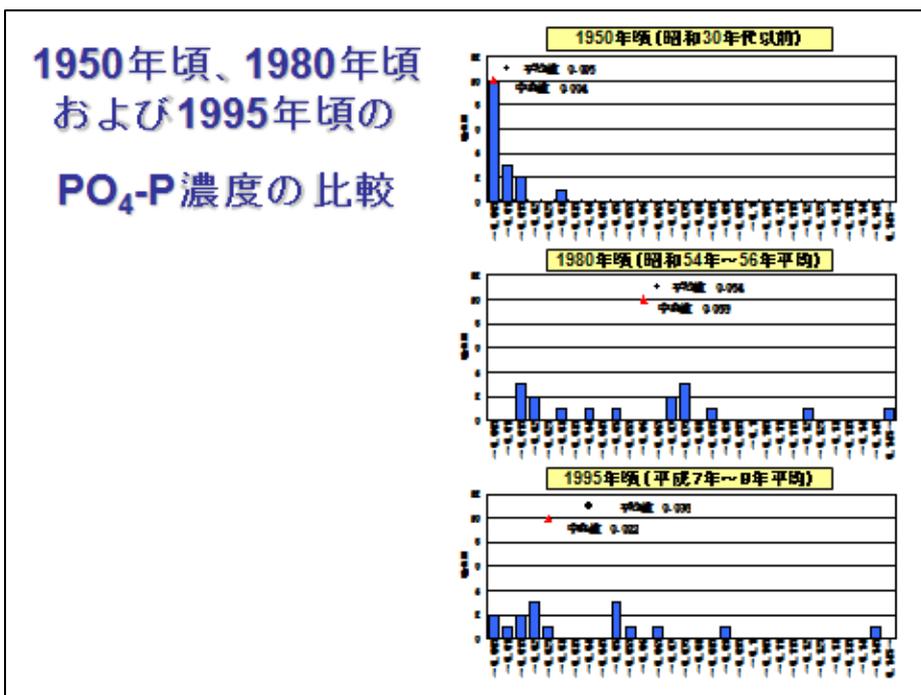


図 2 河川水のリン濃度の年代別変遷<sup>1)</sup>

さて、現代ではきれいな水環境と同時に豊かな水環境を求める声が強くなっている。昭和 30 年、高度成長期に連なる公害現象が顕著になる少し前、大部分の水環境は随分ときれいであったと推察される。私の小学校時代、東京近郊の赤塚田園のため池ではメダカやドジョウが群れていた。また、多摩川では堰堤の水面下の石積み付近には魚が群れ、毛鉤でハヤやヤマベを釣っている人を多く見かけた記憶がある。当時の多摩川は清澄でしかも豊かであったと思う。

水環境をどのように回復していくのかということについては多くの議論があると思う。多摩川を例にとってみれば、近年数百万匹に上るアユの遡上が見られるようになってきている。多くの関係者がアンモニア性窒素濃度の減少との関連を指摘しており、下水処理水が平常流量の約半分を占める多摩川では、流域の下水処理場の高度処理運転との因果関係は明白である。

ここで内湾の保全に関する米国東海岸チェザピーク湾の取り組みを紹介すると、そこでは湾内の透明度を確保するために富栄養化対策ならびに微粒土砂流入対策が進められている<sup>3)</sup>。透明度を確保するのは、それにより海藻の生育面積を増やし、結果としてワタリガニ等の漁獲量を増やすという戦略が基本となっている。わが国でもアマモの生育地確保による海域環境の保全の取り組みがあり、これに少し共通するところがあるが、透明度の確保という基本戦略は明確でないように思える。

ここで、水域の富栄養化と生物生産ということを変更して考えてみたいが、生物生産が多い水域に共通することはいずれも水深がそれほど深くない場所であるということだ。水深が浅いということに因って、一度沈殿した栄養塩が再び上層の水塊に戻ってきやすい、即ち栄養塩の循環が起りやすいという場が提供されることになる。このあたりのメカニズムについては種々議論のあるところかもしれないが、OECD 関連諸国の多くの湖沼の富栄養化データを基として、Vollenweider による湖沼の富栄養化評価指標は著名である<sup>4)</sup>。下記の式は湖沼の富栄養化程度は湖沼の面積当たりのリン負荷によるが、その程度は湖沼の水の回転率と水深で補正されるとしている。端的に言えば滞留時間が長く浅い湖沼ほど富栄養化現象が著しいとうことを表している。

#### Vollenweider モデル式

$$p = 0.368 \times L / (z \cdot P) \times 1 / (1 + 1/\sqrt{P})$$

ここに

p : 湖沼の平均 T-P 濃度 (mg/L)

L : 湖沼面積当たりの年間リン負荷 (lbs/ac/yr)

z : 平均水深 (feet)

P : 湖沼の水の回転率 (1/yr)

湖沼や内湾の水質保全即ち富栄養化コントロールを議論するとき、流域からの負荷量の低減に加えて内部生産量の評価が課題となる。流域負荷量を低減していても内部生産量がそのままであったりすると負荷量低減の努力が半減するからである。よって流域からの流入負荷を減殺すると同時に、底質から回帰してくる栄養塩を減少することが必要である。嘗て 1970 年代スウェーデン南部に位置する Trummen 湖 (100ha) で実施された底質の浚渫は、湖沼保全に対して底質の浚渫が有効な一方法であることを示した最初の事例として紹介されてきた<sup>5)</sup>。わが国においても諏訪湖における 1990 年代の水質回復が随分と顕著で、下水道整備による流域汚濁負荷の削減が功を奏した例として、

当水倶楽部の研究集会(「湖沼水質の保全と下水道」H21.10.20 <http://www.2lwater.jp/k1/2009au2/>)でも取り上げたが、この諏訪湖においてもかなり広範囲に浚渫が行われてきた経緯があり、水質改善に有効な対策であったことが想定される。

この諏訪湖において水質改善によりアオコの問題などが解決され水泳大会が復活するなど地元住民や観光客には好評であるが、湖のワカサギの漁獲量という点ではかなりマイナスの影響が出ているということである。ワカサギは水面を泳ぐ浮魚であるので、アオコが出て湖内の溶存酸素等の状況が少し悪くなくてもむしろアオコという餌が増えた分だけ生長するように思える。

本論で私は水環境がきれいであることと豊かであることは相反しないのではないかとことを主張したいのであるが、これはその反証の事例である。しかし、ここで立ち止まって考えていただきたいのは、嘗ての諏訪湖の漁業生産の実態である。聞き及んだ話で定量的な議論を準備するには至っていないが、諏訪湖は嘗ては琵琶湖からセタシジミを持ちこんでかなりのシジミ生産量があったようである。加えてテナガエビなどの生産量もかなりあったようで、ワカサギなどの魚種に加えてシジミ、エビの漁獲も加えた漁業が行われていたようである。こうした良好な底質あるいは沈水植物の繁茂を基礎とした漁業生産、透明度が確保されたきれいな水環境での生産性がどのようであるかの検討が必要であるが、恐らくワカサギを主とした生産性と比肩できるのではないかと類推される。

振り返って、最初の瀬戸内海の貧栄養化の問題に戻ろう。

環境省は平成 17 年 5 月 16 日、中央環境審議会第 14 回水質環境部会に「第 6 次水質総量規制の在り方について」諮問し、これを基に専門委員会が設置され、約 1 年間の検討の結果が、平成 18 年 7 月 6 日に報告され、第 6 次総量規制に対する基本的方向が了承された。これらの部会、専門委員会の議論の概要は環境省のホームページに掲載されている

(<http://www.env.go.jp/council/09water/yoshi09.html>)。

平成 12 年 2 月、中央環境審議会より答申がなされた「第 5 次水質総量規制の在り方について」を踏まえ、平成 16 年度を目標年度とする第 5 次水質総量規制制度が発効したが、これまで COD 項目のみの総量規制に始めて窒素、リンの項目が加えられ、第 6 次総量規制はこれを継ぐものであった。

しかし、第 6 次の基本的なスタンスは、これまで東京湾、伊勢湾、瀬戸内海と 3 海域に分けて総量規制の施策を講じていたが、瀬戸内海の主要部分では既に環境基準が達成されているので、まだ達成されていない大阪湾の部分の切り離すことにより、瀬戸内海についてはこれまで以上の総量規制の強化はせず暫く様子を見るというものである。確かに環境基準が達成されているのであればそうした判断になるのかもしれないが、窒素、リンの総量削減にとりかかったばかりの時点で、随分と性急な基本政策の転換が行われたのは、漁業団体からの陳情によることが大きかったようである。漁業団体とりわけノリ漁業者は総量規制が進展すると海域の環境が貧栄養になり、漁獲量に甚大な被害を及ぼすということで第 5 次総量規制の始動当時から反対の動きを示していた。

瀬戸内海でのノリ養殖は戦後ノリ養殖技術の進展に伴って普及したらしい。例えば播磨灘においては昭和 40 年代は限られた生産量であったが昭和 50 年代はこの生産量が大きく上がった。当時、九州への出張の航空路線で、瀬戸内海の真ん中でもノリ棚らしきものが並んでいるのを機内から見て驚いたことがある。しかし、この地域のノリ養殖は平成年間に入ると色落ちなどの現象が起き生産が不安定になった。この時期、瀬戸内海流域では下水道が整備され生活雑排水の負荷が減少する

と同時に、水質総量規制の影響により窒素、リン負荷量は昭和 50 年代に較べると減少してきたのではないかと推察される。ノリの生産は栄養塩濃度に強く影響され、栄養塩があればあるほど品質の良いノリが多く生産されることになる。よってノリ漁業者にとって栄養塩の減少は死活問題である。

瀬戸内海の栄養塩のレベルは、貧栄養という用語を当てはめるのには相応しくない。瀬戸内海の大部分の海域に当てはめられている海域の窒素、リンの環境基準のⅡ (TN 0.3 mg/L, TP 0.03 mg/L) を辛うじてクリアーしているレベルであり、最近の水質動向を国土交通省の瀬戸内海総合水質調査のホームページ (<http://www.pa.cgr.mlit.go.jp/chiki/suishitu/index.html>) でみると、そうした状況が確認でき、海域によっては窒素、リン濃度が最近増加していることが伺える。

瀬戸内海は恐らく明治、大正、昭和前期の時代から豊かな海で、種々の海産物の漁獲量は多かったものと思える。その時代の栄養塩のレベルは現在よりずっと低かったのではないかと推察される。これは昭和 30 年当時の日本の河川水質の栄養塩レベルが前に述べたようにずっと低かったことから類推できる。陸地から供給される栄養塩が低レベルであるのにどうして豊かな海が生まれるのであろうか。それはまさに閉鎖性海域で水深が大きいという特性により、一度負荷された栄養塩がプランクトンとなり沈降し、それが底質を介してまた循環することにより、何度も何度も生物生産に寄与することによるのではないかと考えられる。

諏訪湖のワカサギ生産とのアナロジーで言うならば、瀬戸内海では十分な透明度を確保して海藻の生育条件を整え、底質も良好な状況を確保することにより、多様な海産資源を求めることを基本とすることがよいのではと思われる。ノリ産業ということのみに目を奪われ、場にそぐわない栄養レベルの追求をし、海域の透明度を犠牲にするようなことがあってはならないと思う。

わが国の人口は現在 1 億 2,700 万人と言われている。江戸時代の人口はそれに較べ約 3 千万人、し尿の農地還元など徹底した栄養塩のリサイクルで、辛うじて食料等の自給自足が成立していたとされている。現在、わが国では多量の窒素、リンの化学肥料を使って農業生産がなされているが、その食料自給率は 40% 程度であとは輸入に頼っている。原料の殆どを海外に頼っているリン肥料についてと同様、食料輸入に伴って供給される窒素、リンも多量にわが国に集積している。こうした栄養塩は畑土壌に蓄積したり、畜産の廃棄物負荷となったり、近年普及率の高まった下水道に集まってくる。こうした、わが国の食料生産、貿易量の窒素・リンの収支と下水道の関係を図 3、4 に整理してみた。この図から日本で生産あるいは輸入される食料に含まれる窒素・リン量の 40% 強が、下水道に集約されていることがわかる。この図は 2002 年度、下水道接続人口が 7,547 万人の時点のものであるので、この集約量は現在もう少し伸びている。

このような状況からも明らかなように、わが国にはかつてないほど栄養塩が集積している。窒素についてはこうした食料起源のものに加えて、工場や自動車の燃焼排ガスからの負荷も大きいというのでなお問題だ<sup>7)</sup>。

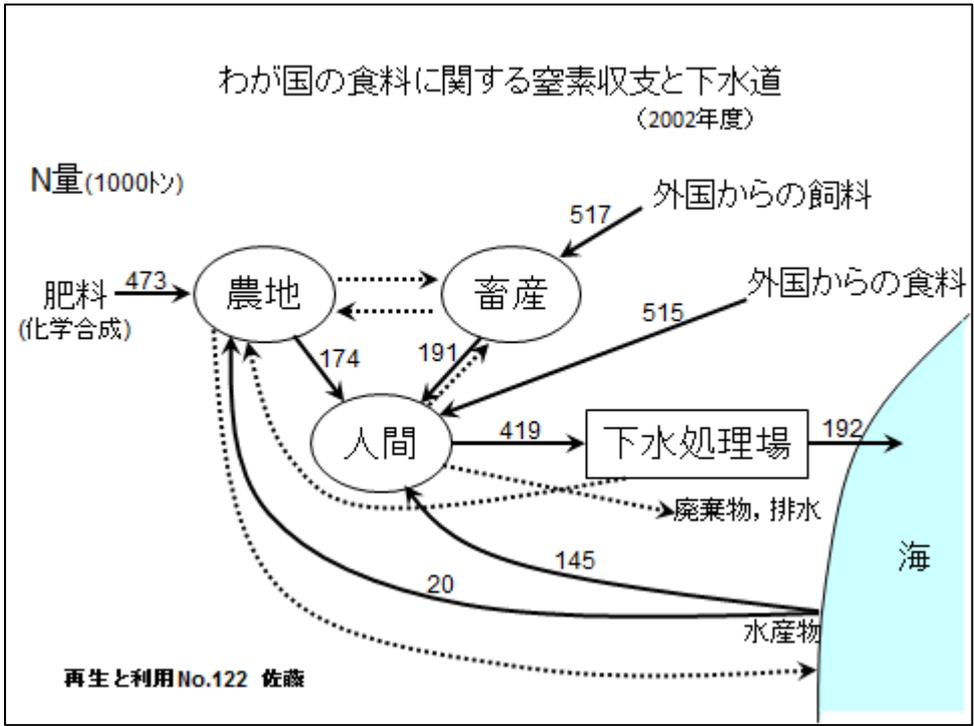


図 3 わが国の食料に関する窒素収支と下水道の関係<sup>6)</sup>

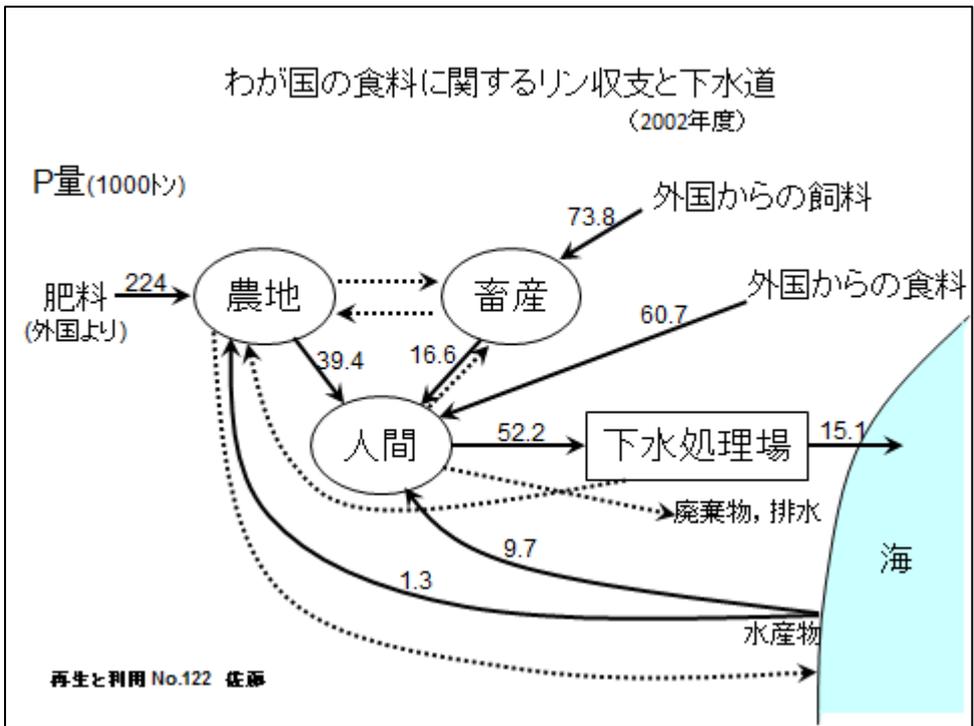


図 4 わが国の食料に関するリン収支と下水道の関係<sup>6)</sup>

以上のことを俯瞰して言えることは明白だ。こうした栄養塩の問題を解決するために、下水道の役割は見過ごすことができない。肥料や畜産廃棄物という農業分野に係る栄養塩問題は確かに比較するとより大きいだが、栄養塩の問題をできるだけ早く且つ確実に対策が取れるという観点からは、多分下水道システムの能力はより高いのではないかと思われる。下水処理の分野では富栄養化防止のための窒素・リン除去技術の開発は1960年代からかなり広範に取り組み、当初の物理化学処理の開発に続いて、活性汚泥処理を基盤とした生物学的窒素・リン除去技術が開発され、1970年代これが順次実規模の下水処理場に適用されてきたという歴史があるからだ。そして現在では、生物学的窒素除去プロセスにおける温室効果ガスとなる一酸化二窒素 N<sub>2</sub>O の挙動が研究され、その発生量を極力抑える運転方法も提示されている。

10年ほど前の当水倶楽部の研究集会「閉鎖性海域と下水高度処理—どこまでやるのか！」

(<http://www.21water.jp/k1/2007au/>) は以上に議論してきたことの端緒であった。今再びこれを問われれば、私はできるだけ下水高度処理を進めることが肝要であると答えたい。それには高度処理とエネルギーの課題、リン・窒素のリサイクルの課題、そして窒素処理と地球環境問題についてなお説明が求められるだろう。次回以降これらの問題を順次考察していきたい。

参考文献：

- 1) 大垣眞一郎監修、財団法人河川環境仮財団編：河川と栄養塩類—管理に向けての提言、技報堂出版 2005, pp179.
- 2) 小林 純：日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究、農学研究、第48巻、第2号、pp.63-106, 1960.
- 3) 佐藤和明：栄養塩類等の流域マネジメントに関する米国事情調査、河川 2004-11月号、pp.89-92.
- 4) Vollenweider, R. A. : Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication, OECD, DAS,CSI 168, 27, Sept, 1968 (邦訳. 湖水および流水の富栄養化, 資源調査所資料第15号, 科学技術庁資源調査所, 昭.46.5)
- 5) Cook G.D., Welch E.B., Peterson S.A., Nichols S.A.(2005): Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, third edition Taylor & Francis 591pp.  
20.8.1 Lake Trummen, Sweden pp.544-548.
- 6) 佐藤和明：わが国の食料生産、貿易量の窒素・リン収支と下水道の関係、再生と利用、Vol.33, No.122, pp.82-88, 2009/1.
- 7) Galloway J. N. et al. : Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions, SCIENCE Vol 320 16 May 2008. pp.889-892.

## 2章 下水処理とエネルギー

下水処理にはいったいどの程度のエネルギーが消費されるのであろうか。ある人は言うかもしれない。安定化池 (Waste Stabilization Pond) の技術を使えばエネルギーは要らないよ。またある人は言うかもしれない。嫌気性処理の技術を使えばエアレーションの動力を節約でき、通常の活性汚泥処理よりはよっぽど省エネルギーで下水処理することができるよ。そうかもしれないが、まず安定化池の処理場のことを考えてみよう。安定化池は図 1 に示すように最初に嫌気性池 (Anaerobic pond)、次に通性池 (Facultative pond)、そして最後に熟成池 (Maturation pond) で構成されている<sup>1)</sup>。下水中の浮遊物は嫌気性池で沈殿しその有機分は底部で嫌気性分解を受ける。嫌気性池は最初沈殿池と嫌気性消化槽を兼ねているプロセスと考えられよう。そのために嫌気性池は他の池より深い水深で設計される。次の通性池ならびに熟成池で下水中の有機分は酸化分解を受ける。この時の酸素の供給は通性池では大気中の酸素の溶解、熟成池では大気からの供給に加えて藻類の光合成から生成する酸素が使われる。いわば太陽エネルギーによる酸素の供給である。このような自然エネルギーによるエアレーションを基本とする安定化池は随分と広い面積を必要とする。アフリカ諸国で用いられているマニュアルの設計諸元を基にすると下水 1 m<sup>3</sup>/日当たり 10 m<sup>2</sup> と活性汚泥法の 0.5 m<sup>2</sup> に比べ 20 倍ほどの面積を必要とする。一般の都市を想定すると都市面積の 5~10% もの面積を必要とする本処理法は自ずからその適用は限られてこよう。前記のマニュアルでは土地の価格が 5US\$/m<sup>2</sup> 以下の場合に他の処理法に対し優位となるとの記述がある。

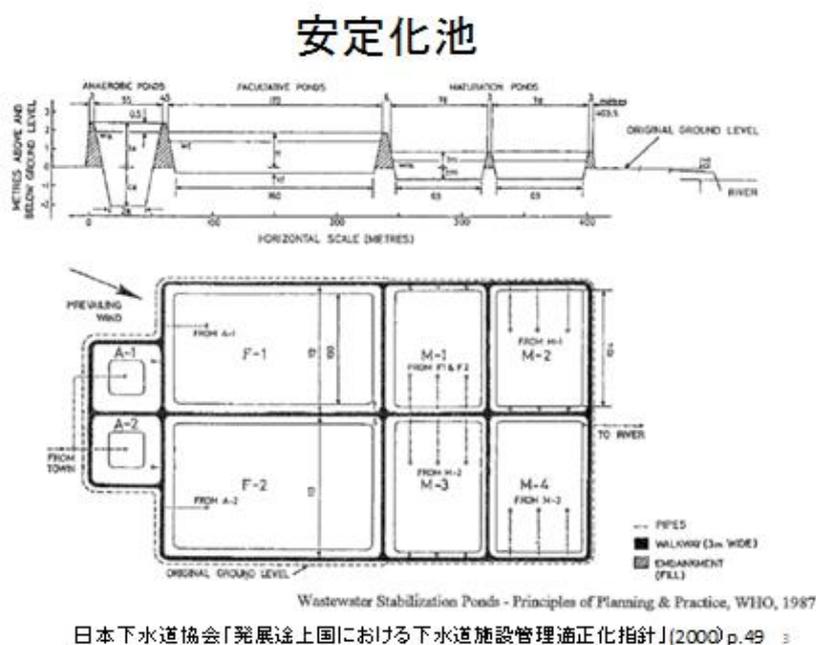


図 1 安定化池 (Waste Stabilization Pond) の構造

十分な土地があればエネルギーを使わない地球にやさしい下水処理ができる、という理解をされる方も多いのではないかとと思われるが、現在懸案となっている地球温暖化対策という観点からは必ずしもそう

とは言い切れないことを指摘しておきたい。それは、嫌気性池で発生するメタンである。メタンは温室効果を持つガスで二酸化炭素に対し 21 倍の温室効果を有すると理解されている。つまり、有機物を嫌気条件下で分解すると温室効果の高いメタンを生成してしまうということである。詳しい検討は後章に譲るが、下水を処理するときに、エアレーションをして有機物を二酸化炭素にするときの電力エネルギーに起因する温室効果ガス発生量より、その有機物の嫌気性分解の生成メタンに起因する温室効果ガス発生量の方がかなり大きいことが分かっている。

このことを少し先回りして解説すると、1 m<sup>3</sup>の下水処理、通常の活性汚泥法で処理すると概ね 0.3 kWh の電力が消費される。これは火力発電所の二酸化炭素発生量の原単位 0.555 kgCO<sub>2</sub>/kWh を用いると 167 g CO<sub>2</sub>に相当する。一方、安定化池の場合下水中の半量の有機物が嫌気性分解されるとすると、流入水 BOD 200 mg/L とすると 1m<sup>3</sup>あたり 100 g の BOD が分解ガス化することになり、下水の嫌気性分解では大体等量のメタンと二酸化炭素が発生するので二酸化炭素（分子量 44）50g にメタン（分子量 16）18 g が生成することとなる。地球温暖化係数 21 を用いると 18g のメタンは 378 g CO<sub>2</sub> となる。つまり地球にやさしい処理と一見考えられる安定化池では、通常の活性汚泥法の下水処理に対し 2 倍以上の温室効果ガスを発生するということになることが分かる。

以上のことは何を暗示しているのであろうか。それは下水処理の根幹は有機物を酸化して二酸化炭素にすることを基本とすべきであるということではないかと思われる。これまで下水処理の基本は下水中の有機物すなわち BOD を除去することと言われてきた。これは下水放流先の水環境の溶存酸素がゼロになるかあるいは極めて低くなれば、魚や水生生物に甚大な影響を及ぼすととも臭気も発生するようになり、水利用、水環境の観点から望ましくない状況が生ずるためである。そして有機物汚濁がなお進行するとメタン発生を伴う嫌気性分解が始まる。わが国でも昭和 30 年代に遡れば東京の隅田川を始め至る所でメタンの発生を伴う水質汚濁は顕著であった。そして現在、発展途上国において同様の水質汚濁が進んでいる。

地球環境時代において、下水処理は水環境に溶存酸素を確保するため下水中から BOD を除去するというだけでなく、水環境における有機物分解に関しメタン発生を伴う嫌気性分解が卓越することがないようにするといった点が付加されることになるとと思われる。この観点から同様に、下水処理における処理生成物は二酸化炭素を基本にし、メタンが放出されないようなプロセス構成を考慮することが必要である。誤解のないようにはあるが、これは嫌気性処理が全てダメだと言っている訳ではなく、メタンは必ず捕集して燃焼（酸化）し、二酸化炭素として排出することが必須であるということである。下水のような BOD が比較的低い排水の嫌気性処理では生成したメタンのかなりの部分が処理水中に溶解して残存するので課題が残る。また嫌気性処理排水はその他種々の還元性物質が存在し、これを後段で酸化処理しようとするとかかなりのエアレーションが必要となる。このようなことから嫌気性処理は濃度の高い一部の排水を除いて一般の都市下水への適合性は低いと考えられる。都市下水への嫌気性処理の適用は、有機物濃度の高い汚泥に対してむしろ適合すると思われる。汚泥の嫌気性消化（メタン発酵）に伴う消化ガス発電の場合、メタンが熱源として回収利用され化石燃料消費に置き換えられるので、この場合はむしろ温室効果ガスの観点からプラス評価となる。

さて、下水処理でどの程度の電力を消費するのかについて、米国 WEF の上下水道処理施設の省エネルギーマニュアル<sup>2)</sup>ではその Appendix C に下水処理に使用される電力量見積りとして、処理プロセス（散水ろ床法、活性汚泥法、高度処理法（硝化運転なし）、高度処理（硝化運転あり）、処理規模別に、各ユ

ニット処理プロセス毎の消費電力量の見積値を示している。表 1、表 2 は、二次処理法（活性汚泥法）、と窒素リン除去高度処理法（生物学的硝化脱窒法に凝集剤添加プラス砂ろ過法）に対する単位消費電力量の内訳を示している。この中には消化ガス発電による電力回収量も示され、この回収量を差し引いた単位消費電力量も示されている。米国の水量単位ガロン当たりで表記されているので m<sup>3</sup> で計算し直した数値を示した。

表 1 二次処理法（活性汚泥法）に係る処理ユニット別消費電力量の内訳<sup>2)</sup>

	消費電力量 kWh/d					
	4,000m <sup>3</sup> /d 1 mgd	20,000m <sup>3</sup> / 5 mgd	40,000m <sup>3</sup> / 10 mgd	80,000m <sup>3</sup> / 20 mgd	190,000m <sup>3</sup> / 50 mgd	380,000m <sup>3</sup> / 100 mgd
主ポンプ	171	716	1402	2559	6030	11818
スクリーン	2	2	2	3	6	11
曝気沈砂池	49	87	134	250	600	1200
最初沈殿池	15	78	155	310	776	1551
散気エアレーション	532	2660	5320	10640	26600	53200
返送汚泥ポンプ	45	213	423	724	1627	3131
第二沈殿池	15	78	155	310	776	1551
重力濃縮タンク	6	15	25	37	75	138
浮上濃縮	na	na	1805	2918	6257	11819
好気性消化	1200	2400	na	na	na	na
嫌気性消化	na	na	1400	2700	6500	13000
ベルトフィルタープレス	na	192	384	579	1164	2139
塩素消毒	1	5	27	53	133	266
照明、空調	200	400	800	1200	2000	3000
計	2236	6846	12032	22283	52544	102824
単位消費電力量 kWh/m <sup>3</sup>	0.591	0.362	0.318	0.294	0.278	0.272
消化ガス発電回収量	na	na	3500	7000	17500	35000
正味消費電力量 換算単位消費電力量 kWh/m <sup>3</sup>	2236	6848	8532	15283	35044	67824
	0.591	0.362	0.225	0.202	0.185	0.179
	na:不適					

わが国においてはこうした下水処理に関する電力消費量の標準見積り値はこれまで示されてこなかったように思える。上記に見てきたように下水道統計等で公表されている実績値を基にその平均値等が専ら議論されてきた。しかしながら実績値の中には往々にして正当な値とは思われない値があるのが常で、これらを含めて平均値を求めてもそれにどのくらいの意味があるのか議論のあるところである。WEFのマニュアルに示されている各ユニットプロセスの消費電力量の数値は、各ユニットプロセスに装備されているポンプやブローアの機械類の定格出力 (kW)、負荷率、稼働時間を積算して求めたものと考えられる。このようにして求められた見積値が実際の消費電力値と比較されることにより、より確からしい消費電力量が定まってくるものと考えられる。

表 2 窒素・リン除去高度処理法に係る処理ユニット別消費電力量の内訳<sup>2)</sup>

	消費電力量 kWh/d					
	4,000m <sup>3</sup> /d	20,000m <sup>3</sup> /	40,000m <sup>3</sup> /	80,000m <sup>3</sup> /	190,000m <sup>3</sup>	380,000m <sup>3</sup>
	1 mgd	5 mgd	10 mgd	20 mgd	50 mgd	100 mgd
主ポンプ	171	716	1402	2559	6030	11818
スクリーン	2	2	2	3	6	11
曝気沈砂池	49	87	134	250	600	1200
最初沈殿池	15	78	155	310	776	1551
散気エアレーション	532	2660	5320	10640	26600	53200
硝化	346	1724	3446	6818	16936	33800
返送汚泥ポンプ	54	256	508	869	1952	3757
第二沈殿池	15	78	155	310	776	1551
凝集剤添加	80	290	552	954	2187	4159
砂ろ過用ポンプ	143	445	822	1645	3440	6712
砂ろ過	137	247	385	709	1679	3295
重力濃縮タンク	6	15	25	37	75	138
浮上濃縮	na	na	2022	3268	7008	13237
好気性消化	1200	2400	na	na	na	na
嫌気性消化	na	na	1700	3200	7800	15600
ベルトフィルタープレス	na	228	457	689	1385	2545
塩素消毒	1	5	27	53	133	266
照明、空調	200	400	800	1200	2000	3000
計	2951	9631	17912	33514	79383	155540
単位消費電力量						
kWh/m <sup>3</sup>	0.78	0.509	0.473	0.443	0.419	0.411
消化ガス発電回収量	na	na	3500	7000	17500	35000
正味消費電力量	2951	9631	14412	26514	61883	120840
換算単位消費電力量						
kWh/m <sup>3</sup>	0.78	0.509	0.381	0.35	0.327	0.319
	na:不適					

WEF マニュアルによる二次処理（活性汚泥法）と高度処理（窒素・リン除去）に対する処理規模別の単位消費電力量をグラフとして示すと、図 2 のとおりである。電力消費量に対する処理規模のメリットということでは、WEF マニュアルでは 20,000 m<sup>3</sup>/日以下の規模で規模のメリットが顕著に出ているが、20,000 m<sup>3</sup>/日以上では特に二次処理で殆ど規模のメリットが出ないような関係となっている。

ここに茨城県下の下水処理場の単位消費電力量（2009 年度下水道統計より）をプロットしてみた。WEF の単位消費電力グラフと、二次処理、高度処理ともかなり近い関係にある箇所もあるが、箇所によっては 2 倍の数値の差がでていいる。これは先に考察したような要因に起因するのであろうが、こうした処理場間のデータのばらつきは他の下水処理場の実測値の統計でも一般的に見られるものである。

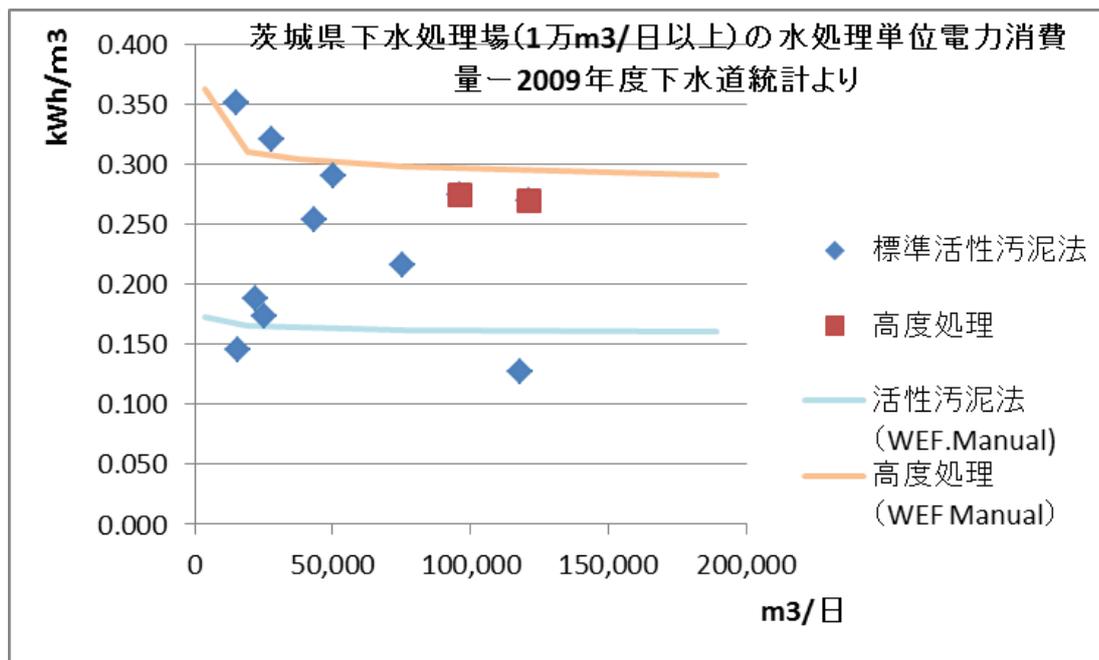


図2 茨城県下の下水処理場の水処理単位電力消費量とWEFマニュアルに示される単位電力消費量の関係

ここで一番着目したい点は、二次処理と高度処理の電力消費量の差である。例えば、200,000m³/日の規模の処理場では、二次処理の水処理の単位消費電力量 0.161 kWh/m³ に対し高度処理では 0.291 kWh/m³ の単位消費電力量となっている。その差は 0.130 kWh/m³ であるが、この内訳として窒素除去関係（硝化のためのエアレーションと返送汚泥量の増加）0.091 kWh/m³ とリン除去関係（凝集剤添加、砂ろ過ポンプ、ろ過操作）0.039 kWh/m³ に分けることができる。

筆者は、わが国の下水道統計データ（1996年度）を基に流入水量が設計施設能力の半量以上となっている箇所 289 処理場を対象に、標準活性汚泥法の平均的な単位消費電力量 0.401 kWh/m³、この内、水処理施設については 0.194 kWh/m³ であることを示し、また、当時の窒素・リン除去の高度処理導入処理場 5 箇所を対象にして、その平均的な単位消費電力量は 0.684 kWh/m³、水処理施設については 0.362 kWh/m³ であることを示し高度処理導入処理場の電力消費の内訳についてその調査結果を示した<sup>3)</sup>。これから類推できることは、窒素・リン除去の高度処理を適用すると、水処理施設に関してエアレーション量の増加と硝化液の循環ポンプ動力、嫌気槽、無酸素槽の攪拌動力の加算で、約 0.17 kWh/m³ の単位消費電力量の増加となるということである。しかし、こうした統計数値を使って論を進めていくことの危うさについては前項に指摘したとおりである。

標準活性汚泥法と高度処理法の電力消費量の比較ということでは、IWA タスクグループによって提示されている活性汚泥モデルを用いてそれぞれのエアレーション量を計算比較することができる。著者らはこの方法を用いて、わが国の標準的な下水水質、水温を前提として標準活性汚泥法と循環式硝化脱窒法の春夏秋冬それぞれの季節のエアレーション量を比較した<sup>4)</sup>。この比較により、循環式硝化脱窒法は標準活性汚泥法に対し、年間平均で 1.25 倍量のエアレーション量になり、標準活性汚泥法のエアレーション単位消費電力量 0.20 kWh/m³ に対し 0.25 kWh/m³ となった。循環式硝化脱窒法では、無酸素槽の

攪拌動力ならびに硝化混合液の循環ポンプについて上記に示した高度処理の実態調査結果を勘案して 0.08 kWh/m<sup>3</sup>の数値を加えて 0.33 kWh/m<sup>3</sup>の単位消費電力量になると評価された。前掲の WEF マニュアルの二次処理と高度処理の単位消費電力量、0.161 kWh/m<sup>3</sup>と 0.291 kWh/m<sup>3</sup>の値と微妙な差があるが、わが国では水温が比較的高いため標準活性汚泥法でも夏季等で部分的な硝化が生じ、それに起因するエアレーション量が生ずるということにも留意する必要がある。また高度処理でわが国の単位消費電力量が少し高く出ているがこれは循環ポンプ等の適切な設計でもう少し低く設定できる可能性がある。

以上の消費電力量のモデル計算や実態調査結果に基づいて考察してみると、標準活性汚泥法の水処理に対する単位消費電力量の実勢値 0.20 kWh/m<sup>3</sup>に対し、硝化脱窒の窒素除去運転ではこれに 0.10 kWh/m<sup>3</sup>の電力消費が加わり、0.30 kWh/m<sup>3</sup>の単位電力消費量となるという関係を一般的な理解とすることができるといえよう。即ち下水処理において、BOD 除去に加えて窒素除去を達成する場合、0.10 kWh/m<sup>3</sup>の単位消費電力量が嵩むこととなるが、こうした水処理に対するエネルギー消費を、水環境の改善あるいは温室効果ガスの観点も含めてどのように理解し評価していくのかは、現代の下水道技術者に投げかけられている重要な課題であると考えられる。

高度処理に必要なエネルギーを下水道自体の資源から回収していくというのは一つの解法であると考えられる。WEF の省エネルギーマニュアルの付表に示されるように、消化ガス発電による回収電力量は処理水量 1 m<sup>3</sup>当たり概ね 0.1 kWh となっており、高度処理により嵩む電力量にほぼ匹敵している。わが国の状況を基にしたガス発電シミュレーションモデル計算でも、回収電力量は処理水量 1 m<sup>3</sup>当たり 0.096 kWh と試算されており<sup>5)</sup>、同様な結果を示している。

参考文献：

- 1) Mara D.D. et al. Waste Stabilisation Ponds – A Design Manual for Eastern Africa, ODA(UK) 1992.
- 2) WEF Manual of Practice No.32, Energy Conservation in Water and Wastewater Treatment Facilities, WEF Press 2009 pp. 400.
- 3) 佐藤和明：下水の高度処理と国土保全、土木研究所講演会講演集、土木研究所資料第 37271 号 pp.13-26. 2000.
- 4) Sato K., Goto M. and Gan C., Study of power consumption and GHG generation to control nitrogen in advanced wastewater treatment, presented to the IWA-ASPIRE Conference, Tokyo, Japan. 2011.
- 5) 佐藤和明：下水汚泥の嫌気消化法の機能改善に関する研究、土木研究所報告 172 pp.43-55. 1987.

### 3章 リン・窒素のリサイクル

下水の主成分は有機物（BOD）と窒素・リンの栄養塩で代表される。BODは放流先水域の溶存酸素（DO）低下を防止するため、栄養塩は水系の富栄養化を防止するため、下水処理場で処理される。通常の活性汚泥処理による二次処理では、BODは90%以上除去されるが、窒素、リンについては30%程度しか除去されないとされてきた。そこで窒素、リンを除去するために活性汚泥処理に窒素・リンの除去機能を付加した生物学的窒素・リン除去の高度処理法が開発され、わが国でも順次適用されてきている。リン除去法である嫌気好気活性汚泥法は、活性汚泥法の前段に嫌気槽を設けることによりリン含有量の高い活性汚泥を馴養し、余剰汚泥としてリンを除去するものである。この前段に嫌気部分を設ける方法は活性汚泥のバルキング対策としても一般に適用されてきた運転方法であった。このような関係もあって、洗剤の無リン化が進み流入下水のリン濃度が低下した1980年代では、標準活性汚泥法の処理場でもリン除去率が70～80%に上るケースが多く出て来た。一方、窒素の除去については、エアレーション時間を十分確保して所定の汚泥滞留時間で運転することにより始めて窒素除去率を上げることができた。1980年代標準活性汚泥法107箇所を対象にして窒素、リン除去率を調べた資料<sup>1)</sup>によると、平均的な窒素及びリン除去率はそれぞれ45%ならびに61%であった。筆者は2002年度の下水道統計に示されている全国1810箇所の下水処理場の流量および水質データを基に窒素、リンの流入負荷量、流出負荷量を求めた結果、表1に示される関係を得た<sup>2)</sup>。このとき都道府県別データをみると、高度処理の普及率の高い滋賀県では窒素、リンの除去率はそれぞれ79%、97%であった。窒素、リンの削減率は当然、高度処理普及率に影響されるが、国交省がまとめている高度処理普及率の状況は図1のとおりである。表1に示された全国の下処理場の平均的な除去率は、窒素54%、リン71%であるが、当時の10%強の高度処理普及率の関与もあることを理解しておく必要がある。

表1 下水処理場によるN、P負荷の削減（2002年度）

	流入負荷 t/年	流出負荷 t/年	削減率 %
T-N	418,622	192,121	54.1
T-P	52,220	15,072	71.1

リン負荷については最近のデータを用いて同様な集計を行った結果があるので表2に示す<sup>3)</sup>。この表には表1に示した2002年度の数値も入れているが、近年のデータは特に流入水の水質データの欠損が多いのでこれを補正している。2002年度のデータも同様に欠損値の補正をした結果、少し数値が動いている。これからみて分かるように、リン負荷については下水処理場で既に平均して77%の負荷の除去が行われている。リンは処理をしても無くなるわけではないので、除去された量は全て汚泥に移行することになる。リンの回収利用については、一部吸着法や晶析法を除いて汚泥部分に移行したリンが対象となる。

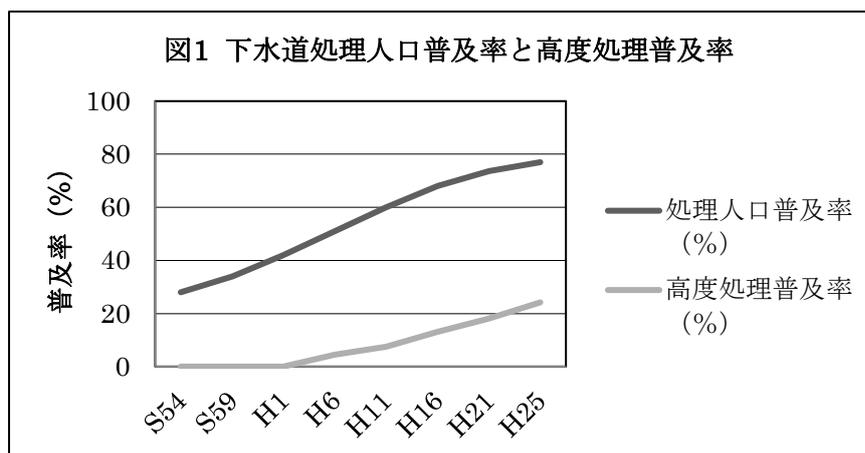


表2 下水処理場におけるリン負荷量の削減率の経年変化

	流入負荷 t-P/年	流出負荷 t-P/年	削減率 %
2002	53,581	15,211	71.6
2005	55,845	12,993	76.7
2006	56,157	13,024	76.8
2007	54,977	12,822	76.7
2008	53,564	12,586	76.5
2009	54,097	12,207	77.4
2010	54,686	12,444	77.2
2011	55,670	12,569	77.4
2012	54,083	12,322	77.2

では窒素はどうなるかという、流入下水の浮遊性物質に含まれていたものがそのまま汚泥部分に移行するものがあるが、溶解性の形態で流入してくる窒素成分の方が断然多く、一部活性汚泥の増殖に利用される外は、通常の二次処理ではそのまま流出してしまう。それなので下水中の窒素成分が汚泥に移行する割合は恐らく3割以下になっているのではないかと考えられる。汚泥にトラップされた窒素成分は、嫌気性消化処理の分解過程でかなりの部分アンモニア性窒素となり溶解してくる。この脱離液は汚泥返流水として水処理系に戻され再度処理されることになるが、一部の汚泥集約処理場ではこの脱離液にアルカリ剤を添加しpHを上げアンモニアガスとして気相に飛ばし（アンモニアストリッピング）これを硫酸などの酸で固定回収するプロセスを適用している。しかしこれは積極的な窒素回収というより除去プロセスの構成上の要請によるものである。汚泥を焼却すれば、リンは焼却灰中に残存するが、窒素は無くなる。排ガス中に移行した窒素分は完全燃焼で窒素ガス（N<sub>2</sub>）となるが、通常一部NO<sub>x</sub>や温室効果ガスのN<sub>2</sub>Oとなるので、前者は排ガス処理で、後者は燃焼温度調節により濃度低減を図っている。このように、窒素成分については、汚泥コンポスト利用として有機物、リンの成分と一緒に肥料成分として利用していく方法はあるものの、窒素成分そのものを下水あるいは汚泥から回収していく方策については現実の取組みとして行われていない。MAP法によるリン回収では窒素成

分が同時に回収されるが、対象となる消化汚泥脱離液中の窒素濃度はリン濃度より数倍高いため、リン成分が90%近くで回収されるのに対して窒素成分は10~20%のオーダーに留まる。このように窒素に関して、現下の下水処理の取組みとしては、水処理における生物学的な脱窒法、もしくは汚泥焼却による窒素ガスへの変換、いずれも回収除去ではなく分解処理による対応が主流となっていると理解される。

下水道におけるリン、窒素のリサイクルを考えるにあたって、その成分の出自を見ておく必要がある。下水道への栄養塩の負荷量の第一は家庭排水で次に工場排水等産業系の排水由来である。わが国における家庭排水の負荷量原単位の数値は、下水道の基本計画、流域別下水道整備総合計画（流総計画）の策定指針に示されてきた。1975年（昭和50年）の最初の流総指針の数値から近年の2015年（平成27年）のものまでのBOD,T-N,T-Pの負荷量原単位の数値の推移を図2に示す。これを見ると栄養塩負荷に関しては、2003年（平成5年）の第7版の流総指針で、リンの原単位が大幅に見直されており、それまでの1.8g/人・日の値から1.2g/人・日となった。これはそれまで用いられてきたリン酸をビルダーとするリン含有合成洗剤の無リン化が徹底したことによって起きている。また、この第7版より、家庭汚水の汚濁負荷量原単位の算定に当たって、家庭系排水が主と考えられる10箇所の処理場の流入負荷量をベースとしていることが説明され、そのデータの平均値、標準偏差が示されるようになった。表3にこの第7版の家庭排水負荷量原単位の表を示す。ここで注意をしたいのは、各汚濁負荷量のし尿と雑排水の内訳である。し尿に関する数値は1980年の第3版で改訂されたが、その後の版ではその数値を踏襲してきている。BOD負荷についてはし尿に対し雑排水の負荷が2倍程度になっているが、窒素、リンについてはし尿起因の負荷が断然大きくなっている。つまり私達の食生活の結果として排出されるし尿、即ち下水道ではトイレ排水が窒素、リン負荷の大半を占めるというものである。

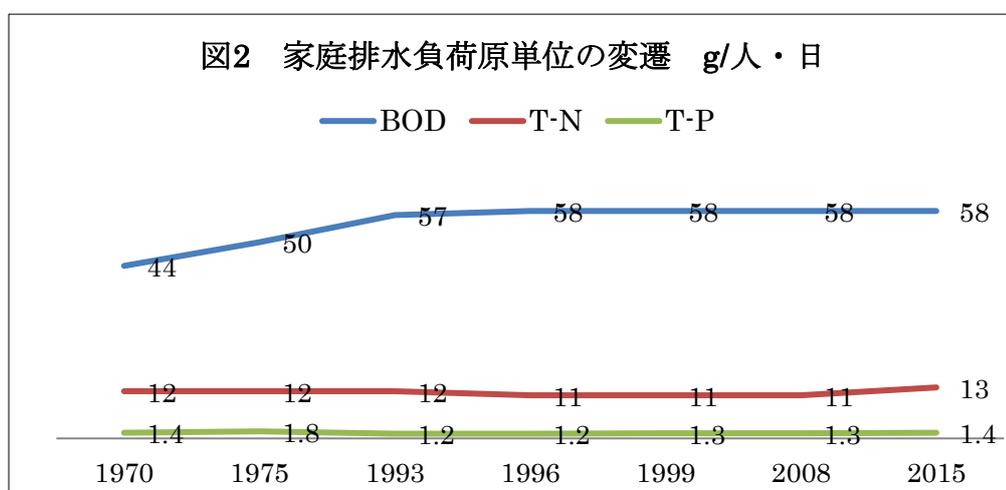


表3 1人1日当たり汚濁負荷量の参考値 (流総指針 H5)

	全量 (平均値)	(標準 偏差)	データ数	内訳	
				し尿	雑用
BOD <sub>5</sub>	57	13	43	18	39
COD <sub>MN</sub>	28	6	29	10	18
SS	43	15	31	20	23
T-N	12	2	7	9	3
T-P	1.2	0.3	8	0.9	0.3
				単位：g/人・日	

わが国では下水道の整備が随分と遅れたこともあり、し尿処理システムがこれを補うものとして発展してきており、し尿処理場はBODや衛生学的指標の大腸菌を高率的に除去するのみならず、窒素、リンについても90%除去レベルの技術が適用されている場合が多い。そのような状況から、窒素、リンの観点でみるとし尿処理場で対応した方が有利ではないかといった議論が出たこともあったが、住民が水洗トイレを渴望し不完全なし尿浄化槽（単独浄化槽）が急速に普及し、家庭排水による汚濁の問題がなお大きくなったのが現実であった。こうした状況を踏まえ、下水道が無理なく整備できる場所は下水道で、その他の区域は雑排水も処理できる合併式浄化槽で対応していくことが、国の基本方針となった。しかしこのし尿に関する問題は環境を重んじるグループの間では依然燻っている課題である。世界へ目を転ずれば、排水処理システムの分散化を基本として、省エネルギー的な処理システムと処理水の利用および有価物の回収を目指すDE S A R (Decentralized Sanitation and Reuse) が近代上下水道システムにとって代わるべきであるとする論調は根強い。確かに近代上下水道システムを開発途上国に適用していくには大きな困難が伴うが、都市域における問題の大きさは先進国と同じである。分散化したシステムが本当にうまく適用できるのか、実証を伴った十分な検討が必要である。このDE S A Rについては、その概念、システムそしてその実施事例を紹介する本が出版され、その翻訳本<sup>4)</sup>が出ている。この本の中では、家庭排水の起源としてトイレ排水をし（尿）と尿に分別し、また雑排水を風呂、台所、洗濯にそれぞれ分けて汚濁負荷量の内訳を示した表が掲載されている。元の表は一人年間当たりの負荷量で示してあるが、わが国とも比較しやすいように1人1日当たりの負荷量に計算しなおして表4に示す。この表からも家庭排水中の窒素、リン負荷はし尿に大部分起因すること、それもイエローウォーターと分類される尿に多いことが示されている。ここからし（尿）と尿を分離してその有効利用を図る尿分離式トイレの概念が作り出される。本の中では、そのシステム構成と実践的経験について記述されている。住民にし（尿）と尿を分離できる便器を使用してもらおうケーススタディが出てくるが、尿を貯留しこれを収集するというシステムは簡単に普及できるものではないようだ。し尿という廃物を早く水に流して自由になりたいという人間の基本的要求と相容れないように思えるからだ。

表 4 家庭排水の典型的な汚濁負荷の内訳 [g/ (人・日)]

種別	内容	BOD	T-N	T-P
クラシック	トイレ,風呂,台所,洗濯	60	14	2.5
ブラック	トイレ	25	12	1.9
グレイ	風呂,台所,洗濯	35	2	0.5
ライトグレイ	風呂,洗濯	1.8	1	0.3
イエロー	尿	5	11	1.4
ブラウン	糞便	20	1	0.5

出典：Decentralized Sanitation and Reuse Table 4-13 より計算

わが国では、他国に類を見ないほど、し尿の農地還元が広く行われてきた歴史がある。仏教の関係かあるいは米食の関係か、畜産というものがあまり発達してこなかったことにも関係していると思われる。し尿の農地還元の起源は明らかではないが、12世紀後半頃には既に全国的に普及し、江戸時代（1603～1868）にはさらに拡充し、し尿は非常に価値のあるものとして扱われ、し尿を媒体とした都市と農村の独特な関係が生まれた。そしてし尿の農地還元システムは、日本独特の文化を形作ってきたとしている<sup>5)</sup>。このように千年に近いし尿リサイクルの歴史を持つ日本民族の末裔である我々であるが、循環型社会への貢献のためし尿タンクを再び各戸に付けてくださいといわれても今は誰も相手にしてくれないであろう。古代ローマの時代に遡って発達してきた上水道、下水道は現代都市において必須のインフラである。私たちはこの下水道インフラを基本として循環型社会を構成し環境保全に貢献していかなければならないと思う。

下水道からのリン資源回収に関しては、少し前に「下水道におけるリン資源化の手引き」<sup>6)</sup>が国交省から出ているので、これが大いに参考になると思う。この手引きにはまだ紹介されていない事例として、日本磷酸（株）による磷酸製造原料としての下水道焼却灰のリン鉱石一部代替え使用がある<sup>9)</sup>。当社では愛知水と緑の公社と焼却灰利用の契約を締結し、焼却灰貯蔵設備を工場内に建設後、平成25年度より流域下水道の矢作川浄化センターの焼却灰を対象に実用運転に入った。焼却灰受け入れに当たっては現行のリン酸製造工程の製品（リン酸液と石膏）の品質を確保するため、焼却灰の要求品質をP<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 30%以上、Pb 60 mg/kg以下と定めている。受け入れ焼却灰の性状としては乾灰（ジェットパック車運搬）、受入量としてはリン鉱石比2～3%を考慮して3000 t/年、引取条件は有償（輸送費は公社持ち）としている。これまで約100 t/月で安定的に使用している。もう一つリン資源回収に係る新しい動きとして、東京都下水道局が打ち出している分離焼却の導入実施がある<sup>10)</sup>。下水汚泥焼却灰をセメント原料とする場合はリン成分がセメント性状に悪影響を及ぼすことが知られている。初沈汚泥と余剰汚泥ではリン含有量として2倍以上の差があるので、初沈汚泥の焼却灰をセメント原料、余剰汚泥の焼却灰をリン原料と分別することができれば、資源の有効利用という観点から極めて合理的である。

この例に限らず、下水汚泥の資源利用という観点からは、初沈汚泥と余剰汚泥の性状、成分の差に着目していくことでよりよい結果に結びつくことがある。

リンについては 2008 年の世界的な価格の高騰（リンショック）の影響を受けて、その状況が大きく変わってきたと言われている。2015 年に設立された早稲田大学リンアトラス研究所では近年のリンに係るわが国のマテリアルフローならびに経済フローを描き直す作業を始めており、その一端が「再生と利用」誌に紹介された<sup>6)</sup>。この中で紹介されるマテリアルフロー図は、数値はまだ確定値ではないという注書きがついているが、下水汚泥の 42,000 t-P/年に対し、家畜糞尿 94,000 t-P/年、食品廃棄物 32,000 t-P/年、製鉄スラグ 114,000 t-P/年の数値が出ている。下水汚泥のリン資源としての数値はそれなりに大きい（硫安、肥料、リン鉱石で計 16 万 t-P/年）、他にもリサイクル資源があり、それが競合するということは常に頭に入れておかなければならない。また同報文ではリン資源に関する世界の動向も解説されている。USGS（米国地質調査所）のデータに基づいて、リン鉱石の耐用年数（経済埋蔵量÷年間採掘量）を計算すると 260 年となり、とりあえず今世紀中の枯渇はないようだ。しかし、リン鉱石の埋蔵はモロッコなど地政学的に問題の多い個所に集中すること、また品質の良いものは既に採掘され、リン鉱石の品質の低下が顕著であるようだ。現在、多くのリン鉱石にはカドミウムやヒ素などの有害重金属類やウランなどの天然放射性物質が含まれている。そして厄介なことに世界最大の経済埋蔵量を誇るモロッコのリン鉱石が、カドミウムと天然放射性物質を多く含んでいるという。

リンアトラス研究所の大竹客員教授は、欧州で起きている新しい循環型経済（Circular Economy）への動きと、2016 年の欧州肥料法の改正をめぐる動きを以下のように解説している<sup>8)</sup>。

「2014 年以降、欧州では EU 全体の経済改革として直線型経済から循環型経済への移行が頻繁に叫ばれるようになる。循環型経済では、生産物、原料および資源を可能な限り長期に使用し、廃棄物の排出量を最小化することにより、持続可能性、低炭素化および資源利用効率において競争力のある経済を発展させる。廃棄物発生量の最小化では、これまでの廃棄物を二次資源として循環再利用を可能にすることを長期的なターゲットとする。二次資源を経済にフィードバックすることで経済成長を資源、エネルギーおよび環境の制約を受けない産業の育成に寄与することが期待された。そしてこの循環型経済への関心の高まりの中で、欧州委員会は 2014 年 5 月にリン鉱石を 20 の戦略物質（critical materials）の一つに加えることを決定する。

2016 年 3 月に欧州委員会より発表された欧州肥料法改正案は、2016 年 5 月 12 日まで意見公募が行われ、2017 年 1 月現在欧州議会において審議中である。今回の肥料法の改正は、これまでの天然資源に依存した化学肥料を直線型経済の産物として、循環型経済の新時代に適合する未利用資源を有効活用したイノベーション肥料（Innovative fertilizer）のための市場を開設するねらいがある。改正案のポイントは以下の通り。

有機肥料および二次資源を利用したイノベーション肥料が、既存の化学肥料と対等に戦える市場を構築する。改正法の規格を満たす肥料に CE（Circular Economy）マークを与える。最大のねらいは、家畜糞尿や食品廃棄物などの biowaste（下水汚泥は含まない）を活用した肥料の欧州共同市場を開設することであるが、EU 加盟各国の国内のみで流通させる肥料は、各国の肥料法の規定を満たせばこれまで通り販売できる。したがって、下水汚泥の肥料利用を認めて

いる国では、汚泥肥料等も引き続き国内で流通することになる。リンのリサイクルへの関心が高まっている今が、biowasteの肥料化を推進する好機と判断できる。有機肥料にも化学肥料と同様に品質等の規格を定め、より安全で安価な肥料を提供する。例えば、有機肥料のカドミウム規制値は1.5 mg/kg 乾重量とし、5%以上のP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を含む場合無機肥料（リン酸肥料）は60 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>であるが、12年後には20 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>まで引き下げる。コンポストに使用できるbiowasteの中に下水汚泥や産業汚泥は含めない。肥料登録等の事務作業の簡素化も図る。」

以上の法改正が通れば、モロッコ産のリン鉱石は実質市場から締め出されることになる。ある意味ではこれがこの法改正の意図で、それだけモロッコ起源の化学肥料に対する危機感が一般にあると考えられる。大竹教授は、こうした循環型経済への指向と欧州肥料法改正へのロジックをまとめた報告書の代表的なものとして、以下の二つを挙げている。一つはThe Global Partnership on Nutrient Management(GPNM)が2013年に発表した報告書「Our Nutrient World-The challenge to produce more food and energy with less pollution」<sup>11)</sup> および2016年3月にRISE Foundationが出版した解説書「Nutrient Recovery and Reuse (NRR) in European Agriculture」<sup>12)</sup>である。これらのレポートを一読して感じることは、食料増産のために施用された窒素肥料、リン肥料が原因で窒素、リンの環境への漏出が生じ、地球上至る所で富栄養に関する環境問題が生じ、人への健康障害を引き起こすと共に、地球温暖化の原因物質となり、生物の多様性にとって重大な危機を与えているという認識が重ねて書かれているということである。前者のレポートでは本論の序で紹介したRockströmらによる地球システムの限界(Planetary boundaries)の論も丁寧に紹介されている。

翻ってわが国の場合、この窒素、リン過多の問題がどの程度の危機感をもって語られてきたのであろうか。一時は湖沼、ダム湖の富栄養化による利水障害が大きな問題であった時期があったが流域負荷への下水道等の対策やダム湖内の植物プランクトンの増殖抑止対策あるいは高度浄水処理を適用するなどにより、かなりの部分問題の解決がなされて来たように考えられる。また、窒素に起因する大気汚染については窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)や光化学スモッグの問題は依然として存在していると思われるがPM問題などに隠れてしまっている感が強い。しかし、そういう中で窒素に関する流域管理という観点から現代に生じている問題とその対策まで論じた研究成果が古米ら<sup>13)</sup>により著書としてまとめられている。これまで河川流域の栄養塩管理については下水処理場等事業所からの点源発生源や田畑等からの面源発生源の負荷を対象にしていたが、大気経路で負荷される窒素負荷が無視できないほど高く、家畜排せつ物、自動車排ガスの管理まで視点に加える必要性を説いている。また同時に河川上流域でも大気降下物の影響で森林の窒素飽和現象が生じ上流域の河川水質が富栄養化の目安となる濃度を超えるケースが出ることなどを紹介している。

わが国は海域に囲まれた島国であるので、上掲のレポートに示される広域的な窒素汚染問題は出にくい環境にあるかと思われるが、それでも降雨中の窒素濃度の増加や硝酸濃度の高い地下水問題など随所にその影響は確実に出ています。欧州では以前は大気汚染に係る酸性雨問題が大きく取り上げられていたが、現在は窒素、リンの栄養塩に起因する水域の富栄養化あるいは地下水の窒素汚染を含めた広域的な窒素汚染がより深刻な問題となっているように思える。そしてこの問題は農地における肥料のマネジメントとも密接に関係して議論されている。また

この栄養塩過剰の問題は二酸化炭素と同じく地球環境に繋がる問題として理解されている。栄養塩の管理はグローバルな問題であり、この問題の解決にはこれまでの廃棄物を二次資源としてリサイクルしていく取り組みが欠かせない。栄養塩のマテリアルフローで重要な位置を占める下水道システムは、この問題解決のキーポイントとなるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 佐藤和明, 谷戸善彦 (1988) : 下水道高度処理計画及び高度処理土入プログラムに関する研究報告書、土木研究所資料第 2633 号
- 2) 佐藤和明 (2008) : 下水道を介する窒素・リン負荷量の集計—平成 14 年度下水道統計より—、下水道協会誌 Vol.45 No.550, pp.78-85.
- 3) 佐藤和明、南山瑞彦、大竹久夫、常田聡 (2016) : 下水道に集約されるリン資源量の最近の動向、再生と利用 Vol.40 No.152 pp.70-73.
- 4) 虫明功臣監修、船水尚行/橋本健監訳 (2005) : 分散型サニテーションと資源循環—概念、システムそして実践—、技報堂出版 pp.653.
- 5) 東京大学工学部都市工学科国際環境計画 (クボタ) 講座 (1994) : 日本のし尿・雑排水処理 第 1 編 歴史 pp.72.
- 6) 国土交通省都市・地域整備局下水道部 (2010) : 下水道におけるリン資源化の手引き、平成 22 年 3 月 pp.106.
- 7) 大竹久夫、常田聡 (2017) : リン最前線—リサイクルはどこへ—、再生と利用 Vol.42 No.156 pp.6-12.
- 8) 大竹久夫 (2017) : 持続的リン利用への取り組みをめぐる海外の動向、平成 28 年度リンアトラス研究所研究報告書 第 1 章 pp. I -1-26.
- 9) 用山徳美 (2014) : 燐酸製造原料としての焼却灰利用の取り組み、再生と利用 Vol.38 No.142, pp.25-28.
- 10) 冠城敏之、曾根啓一 (2017) : 「分離処理システム」による焼却灰の資源化技術の開発、再生と利用 Vol.41 No.154 pp.64-69.
- 11) Sutton, M.A.et al.(2013) : Our Nutrient World-The challenge to produce more food and energy with less pollution  
<http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/1/N500700BK.pdf>
- 12) RISE Foundation : Nutrient Recovery and Reuse(NRR) in European agriculture  
[http://www.risefoundation.eu/images/files/2016/2016\\_RISE\\_NRR\\_Full\\_EN.pdf](http://www.risefoundation.eu/images/files/2016/2016_RISE_NRR_Full_EN.pdf)
- 13) 古米弘明、川上智規、酒井憲司 (2012) : 森林の窒素飽和と流域管理、技報堂出版 pp.144.

## 4 章 窒素処理と地球環境

### 4. 1 活性窒素 (reactive nitrogen) による環境影響

下水道にはこれまで見てきたように我々の食生活と直結して、大量の有機物 (BOD) 並びに窒素 (N)、リン (P) の栄養塩が流入してくる。そして当初 BOD の除去を目的として設置されてきた下水処理施設に対して、昨今ではより広域な水域、湖沼や湾などの閉鎖性海域の富栄養化対策を目的として、N,P の除去を課せられるケースが多くなってきている。

しかしこれから紹介する話は、こうした水系の汚濁とは別に、窒素 (N) については、大気汚染や温室効果ガス問題を含んだ地球環境問題が喫緊の課題となり、この対策が求められている中、下水道システムがその一役を期待されているというものだ。

地球環境問題の根源は近年の世界人口の爆発的増加にある。20 世紀初頭におよそ 16 億人であった世界人口は 1950 年には 25 億人そして 20 世紀末には 60 億人 (1998 年) となり、現在 (2011 年) は 70 億人に達したと言われている。そしてこの人口を支えるため、食料増産が、耕地開発、水資源開発、肥料適用による単収増などの施策を伴って強力に押し進められてきた。肥料に関して窒素 (N)、リン酸 ( $P_2O_5$ )、カリウム ( $K_2O$ ) が三要素と言われているが、窒素については 20 世紀初頭、ドイツの Harber と Bosch によって空気中の窒素を工業的にアンモニアに固定する方法が開発され、これが比較的安価な窒素肥料生産に大きく寄与するところとなり、農業生産の大革命を引き起こしたことは周知のことである。

活性窒素 (reactive nitrogen) とは、生物生長に直接あるいは間接的に関係している窒素化合物で、代表的なものは大気中の  $NO_x$ ,  $NH_3$ ,  $N_2O$  及び水圏の硝酸塩 ( $NO_3^-$ ) であり、この活性窒素は第一に集約農業に付随して生成してくる。活性窒素の生成量は、窒素の工業固定の開発以前の時代では地球上で 15 Tg/y (1860 年) 程度であったが、1995 年では 156 Tg/y となったと見積もられている。そしてこの量は 2005 年では 187 Tg/y となった。この期間で年間の穀物生産量が 1897 M トンから 2270 M トンと 20% 増加し、肉類の生産量が 207 M トンから 260 M トンと 26% 増加した。この食料生産量の増加は、Harber-Bosch プロセスによる活性窒素生産が 100 Tg/y から 121 Tg/y に増加したことと照合する。

Galloway らによって *SCIENCE* に発表された論文<sup>1)</sup> では、こうした活性窒素の増加による地球環境問題がかなり進行しており、例えばオランダでは自国の 2 倍の人口に対する食糧生産を集約農業の形態で行ってきた結果、深刻な地下水汚染問題、アンモニアと粒子状物質 (PM) による環境汚染、そして大気からの窒素成分降下が生じていること等が例示されている。そしてこのような窒素汚染が進行する地域は世界に広がっており、人為的影響のない地区での窒素成分降下量  $< 0.5 \text{ kgN/ha/y}$  に対して現在の地球上のかなりの部分でこの窒素成分降下量が環境影響が懸念される  $10 \text{ kgN/ha/y}$  の値を超えるようになってきていることが示されている。

わが国の場合も、このシリーズ前回に紹介した本<sup>2)</sup> の中に出てくる関東地方の利根川上流域の 2005 年を基準とした調査結果では、 $6,010 \text{ km}^2$  の流域面積に対して窒素化合物の大気からの降下量が  $9,970 \text{ t-N/y}$  であるとしている。これは  $17 \text{ kg-N/ha/y}$  の降下量と計算されるので十分環境影響が懸念されるレベルである。

大気中の活性窒素の濃度が高くなると、主に窒素酸化物 ( $NO_x$ ) の作用によりオゾン ( $O_3$ ) が生成され、同時にパーオキシアセチルナイトレート (PAN)、過酸化水素などを含む酸化性物質 (光化学オキシダ

ント) が生成される。私たちが生存する対流圏大気のオゾン濃度の上昇は農作物に悪影響を及ぼすと同時に、光化学オキシダントは呼吸器系の疾患の原因となり人の健康に影響を与える。そしてもう一つの活性窒素の成分、一酸化二窒素 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) は二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ )、メタン ( $\text{CH}_4$ ) に続く温室効果ガスであり、 $\text{CO}_2$  の 310 倍の温室効果を持つ。 $\text{CO}_2$  と同様、徐々に大気中の  $\text{N}_2\text{O}$  濃度が上昇しているのでこの対策は国際的にも喫緊の課題だ。 $\text{N}_2\text{O}$  についてはもう一つ重要な影響が指摘されている。それは成層圏のオゾン層に対する影響だ。これまでオゾンホールという現象とともにオゾン層を破壊する物質としてフロンガスが取り上げられ、その生産、使用を規制する国際的な取り組みが行われてきた。この取り組みはかなり実効を挙げたと評価されているが、この次は  $\text{N}_2\text{O}$  の規制が成層圏オゾン層の保全に関し最も重要な取り組みになると指摘されている<sup>3)</sup>。

そして活性窒素に関するもう一つの大きな課題は生物多様性への影響である。活性窒素濃度が高くなれば、その環境下での植物相は栄養濃度を欲し酸性への耐性に強いものになってしまう。前掲のレポート“*Our Nutrient World*”<sup>3)</sup> では低栄養塩の環境で炭素を固定してきたピート層を構成する地衣類や苔類の生存に大きな影響を及ぼしていることを紹介している。本シリーズの第 1 章で示した松林の消滅もこの活性窒素濃度の上昇による栄養環境の変化に大きく関係しているのではないかと考えられる。

以上、活性窒素なるものの影響について見てきた。私たち下水道技術者は、窒素と言えば水系の富栄養化原因物質あるいは飲料水原水でこの濃度が高くなると乳児にメトヘモグロビン症を起こす、という程度の認識であるが、いま窒素は活性窒素というかたちで、地球環境からも大きな課題となっていることを再認識すべきであろう。

さて、話を Galloway らの *SCIENCE* 掲載論文に戻そう。彼らはこうした活性窒素の近年の動向あるいは今後より明確にしていくべき問題の諸点について述べた後、この活性窒素に対して取りえる対策について提示している。活性窒素に関する問題の所在とその対策のポイントを示した彼らの論文中の図を図 1 に紹介する。図中にも示されている対策は次の 4 項目である。

- ① 化石燃料燃焼時の  $\text{NO}_x$  対策
- ② 穀物生産の窒素利用率の向上
- ③ 畜産マネジメントの向上
- ④ 32 億の都市人口の半分に普及している下水道からの窒素除去

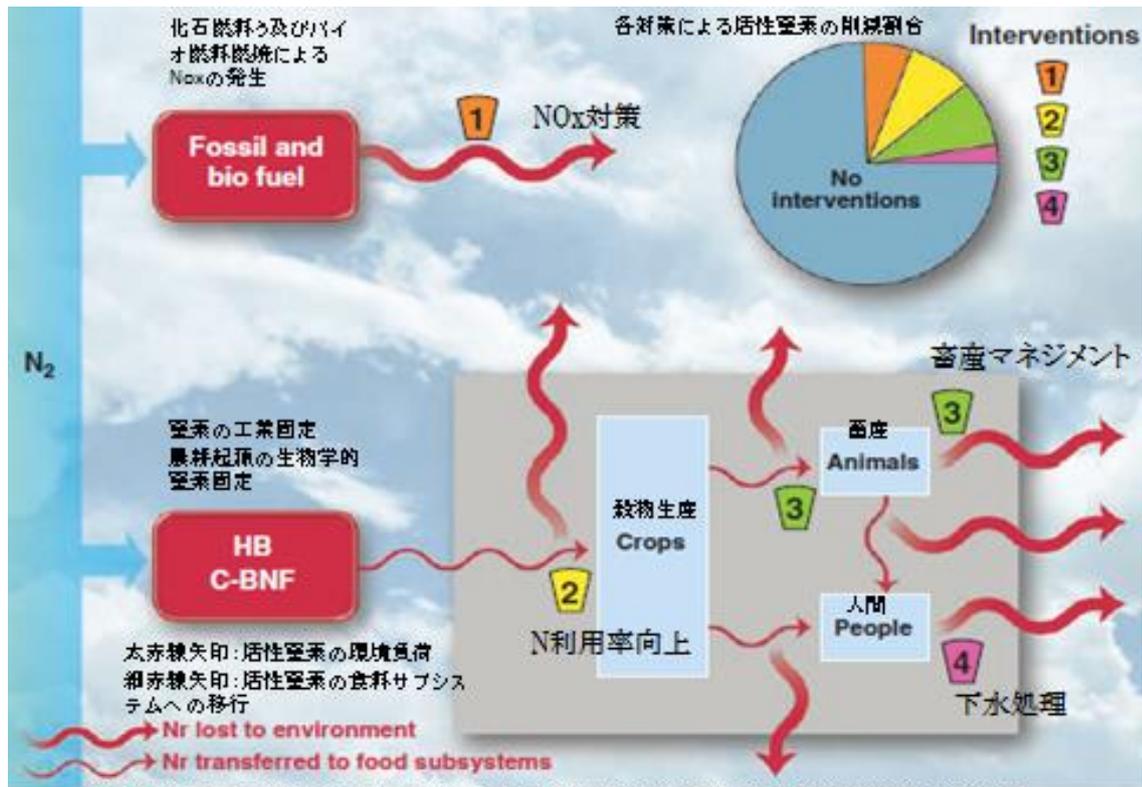


図1 窒素サイクルにおける各対策による活性窒素(Nr)の削減と環境への負荷  
Galloway et al (2008)による図に注釈を付加

項目①は一般に認識されている NOx 対策である。この化石燃料（バイオ燃料も含む）燃焼時の NOx 対策により活性窒素は 25 Tg N/年～7 Tg N/年の範囲で減少できる。項目②の肥料利用効率の向上対策では 15 Tg N/年の削減、項目③の畜産マネジメント向上対策では 15 Tg N/年以下程度の削減量が見込める。そして項目④の都市下水道による脱窒素対策では 5 Tg N/年の削減量となっている。それぞれの対策の寄与は右上の円グラフに示され、全体の活性窒素負荷量（187 Tg N, 2005 年時点）の 4 分の 1 が削減できるとしている。

ここで注目していただきたいのは、地球環境問題に直結する活性窒素対策に下水道の寄与が示されていることである。論文の原文では「もし都市に住む 32 億の人口の半分が下水処理へアクセスできたとしたら、5 Tg N/年を窒素ガス（N<sub>2</sub>）に変換できるであろう。」と表現されている。ここでは当然下水処理によって窒素除去が行われることが前提となっている。この 5 Tg N/年（5 百万トン N/年）は大きさとしてどうなのかということは、次のような検算によって確かめられる。

本シリーズ 3 章の表 4 に欧州における家庭排水の汚濁負荷量を示したが、窒素については 14 g/(人・日) の値であった。通常の生物学的窒素除去法による下水処理を考えて、まず最初沈殿池による窒素除去率は 13%、生物学的硝化脱窒法によって窒素が窒素ガスに脱窒される率を 70%とすると、脱窒素される窒素の率は  $0.87 \times 0.70 = 0.61$  となる。都市人口 32 億人の半分 16 億人の人口の年間窒素負荷量は

$$14\text{g}/(\text{人} \cdot \text{日}) \times 365 \text{日} \times 16 \text{億人} = 8.18 \text{Tg}/\text{年}$$

下水処理による脱窒素量は、 $8.18 \times 0.61 = 5.0 \text{Tg}/\text{年}$  となる。

表 1 世界地域別人口、都市人口、下水道接続人口の 1970,1995,2030 年の推計値と対応する窒素排出量 (A.F.Bouwman et al.(2005)による)

	1970	1995	2030	1970	1995	2030
	人口 ×10億			各人口からのN排出量, Tg/年		
発展途上国	2.7	4.4	6.9	8.8	15.4	27.2
先進国	0.7	0.8	0.9	3.7	5.1	6.2
中進国	0.4	0.4	0.4	1.3	1.5	1.6
世界	3.7	5.7	8.2	13.8	22.0	35.0
	都市人口, %			下水道接続人口N排出量, Tg/年		
発展途上国	25	37	49	0.7	2.5	7.5
先進国	73	77	82	2.6	3.9	5.2
中進国	54	65	71	0.5	0.8	0.9
世界	37	45	54	3.9	7.2	13.6
	下水道接続都市人口, %			下水道からのN排出量, Tg/年		
発展途上国	8	15	26	0.7	2.3	5.0
先進国	70	77	82	2.2	2.3	1.6
中進国	41	50	55	0.5	0.7	0.6
世界	23	27	34	3.4	5.2	7.2

ここで参考のため、世界の下水道からの窒素負荷について言及している Bouwman et al.の論文<sup>4)</sup>に掲載されている世界の下水道接続人口の推計値と対応する窒素排出量に関する数値を表 1 に示す。本論文は世界の河川を通して海洋に負荷される窒素量を推計しているが、肥料、畜産、窒素降下量の増加とともに、都市人口の伸び、下水道の普及そして不十分な処理が窒素負荷を上げているとしている。表に示されるように下水道接続人口の窒素負荷量は 1995 年時点の 7.2 Tg/年に比べ 2030 年時点での推計値は 13.6 Tg/年と倍近くになるが、主に先進国における窒素除去処理の普及により 2030 年時点の下水道からの窒素排出量は 7.2 Tg/年に留まると推計している。

以上に Galloway らによる *SCIENCE* 論文を紹介してきたが、こうした地球環境保全に係る事項に下水道が大きく取り上げられているのが私には新鮮であった。9 名の著者からなり、米国、オランダ、ウガンダ、中国、オーストラリア、ブラジル、英国と国際色豊かなメンバーである。そしてこの論文は International Nitrogen Initiative (INI, ホームページ: [www.initrogen.org](http://www.initrogen.org)) に寄稿され、2007 年にブラジルで開催された第 4 回 International Nitrogen Conference の特別参考論文であることが論文末で紹介されている。なお著者の一人の Mark A Sutton 氏は、現在 INI の会長でこの分野の総括的報告書 “Our Nutrient World”<sup>3)</sup> の主著者である。

以上に示した窒素に係る環境問題は、私たちの周りでも大変身近な問題となっている。隣国中国が電気自動車 (EV) に大きく舵を切ろうとしているのも、欧州その他でディーゼル車の生産にピリオドが打たれようとしているのも窒素酸化物が重大な環境問題と認知されているからだと思われる。このシリーズで書いてきたように下水道システムが出来上がれば、私たちの食生活と直結して毎日莫大な窒素負荷量が下水処理場に流入してくる。この流入してくる窒素負荷のマネジメントを誤れば、下水処理場あるいは放流水域は活性窒素の発生源となってしまうであろう。もし下水処理施設での窒素負荷の十全な処理が保証されれば、下水道システムには、これまでの都市住民の快適な生活を守り、水環

境を守るといった従来の効用に加えて、地球環境の保全に寄与する効用が付加されることとなる。次節では、窒素除去に関する十全な下水処理について検討した結果を紹介する。

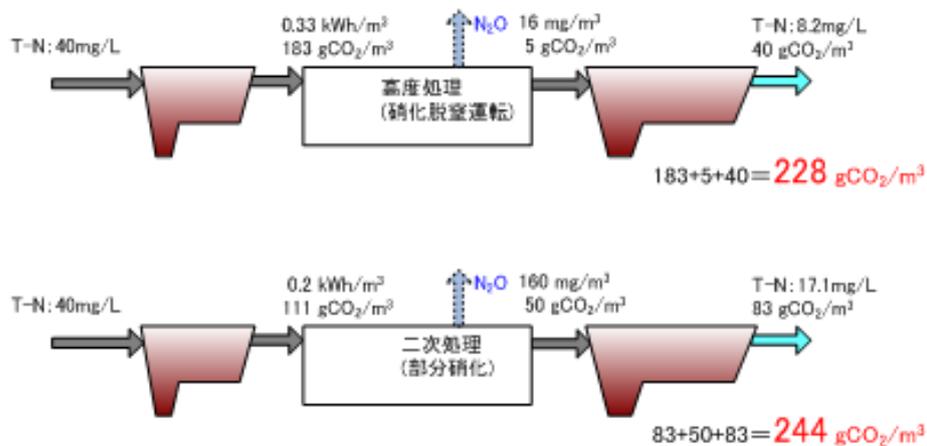
#### 4. 2 窒素除去プロセスの LCA 検討

窒素除去を行う下水の高度処理について通常の二次処理法とどのように比較するのかについては、費用と便益の観点から比較していくことが一般的に行われていると思う。同時に、下水道事業の全体からみて、地球環境とくに二酸化炭素発生量の観点からどのように評価されるのかといったライフサイクルアセスメント (LCA) の方法も適用されることがある。ここでは生物学的窒素除去法で運転される高度処理プロセスが、通常の標準活性汚泥法の二次処理プロセスに対して、温室効果ガスの発生という観点からどのような比較になるのかについてモデル計算手法を用いて比較検討した私たちの論文<sup>4)</sup>の主要な点について紹介したいと思う。高度処理プロセスは当然それだけ電力を消費するので、より多くの温室効果ガスを発生すると考えられるが、下水処理プロセス及び放流先水域で発生する一酸化二窒素 ( $N_2O$ ) を考慮するとそうでもなさそうということが明らかとなっているのだ。これは本シリーズの 2 章で紹介した、下水処理に要する電力エネルギーに因る温室効果ガス量と比較して下水処理を行わなかった場合の放流先水域でのメタン発生の温室効果ガス量がこれを上回るといった関係に類似している。もちろん LCA では下水道施設の建設時の  $CO_2$  をも考慮することになるので、高度処理施設の建設に対するより大きな  $CO_2$  量が前提となるが、下水処理施設の場合、 $CO_2$  発生量は建設時に比べ運転管理時が圧倒的に大きくなるので、運転管理時の温室効果ガス発生量の比較が基本的に重要となる。

図 2 に示したのが、窒素除去の高度処理、循環式硝化脱窒法と通常の二次処理法、標準活性汚泥法の間での、処理運転時の温室効果ガスの発生量を単位処理水量当たりで比較したものである。春、夏、秋、冬の 4 季節に対する流入水量、水温を設定し、活性汚泥モデル式により処理水の水質濃度、エアレーション量を求めた。図に示した処理水濃度の数値はそれを年間平均したものである。水処理消費電力量の数値は標準活性汚泥法の単位消費電力量  $0.2 \text{ kWh/m}^3$  を基としてエアレーション量の比率ならびに無酸素槽の攪拌ならびに硝化液循環ポンプに係る消費電力量を加えて、高度処理法の単位消費電力量  $0.33 \text{ kWh/m}^3$  を計算している。これらの消費電力による  $CO_2$  発生量は、わが国の平均的な二酸化炭素換算係数  $0.555 \text{ CO}_2/\text{kWh}$  を用いて換算する。

図2 高度処理と標準法の温室効果ガスの比較

GHGs emission comparison between N removal treatment and SASM



Sato et al., IWA ASPIRE Conference, Tokyo, 2011.

さて懸案となる窒素起源の温室効果ガス二酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) は、窒素の硝化過程および脱窒過程から生成することが解っている。そこで IPCC の温室効果ガス目録作成ガイドライン(2006)では、下水処理水の窒素負荷量による処理水放流先での N<sub>2</sub>O の発生 (Indirect Emission) について計上するとともに、窒素除去を実施している下水処理場に対しては、下水処理場の生物反応槽から発生する N<sub>2</sub>O (Direct Emission) を計上することを薦めている。また、放流水域における処理水起因の N<sub>2</sub>O 発生についてガイドラインでは下記のように窒素の年間放流負荷量に N<sub>2</sub>O 転換率を掛けて算出する手法を提示している。

$$\text{N}_2\text{O Emission (kg N}_2\text{O /yr)} = \text{N}_{\text{EFFLUENT}}(\text{kg N/yr}) \cdot \text{EF}_{\text{EFFLUENT}} \cdot 44/28$$

N<sub>2</sub>O 転換率 (EF<sub>EFFLUENT</sub>) については範囲を 0.0005- 0.25 デフォルト値で 0.005 即ち 0.5% を提示している。このデフォルト値は 1996 年版では 1.0% であったものが、2006 年版で半分の値となったものである。自然界ではこのような割合で水中の窒素成分が N<sub>2</sub>O になっていくと理解される。

それでは下水処理場の生物反応槽ではどうなのかというと、わが国では N<sub>2</sub>O 発生の排出係数のデフォルト値を 160 mgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> と置いていた。この水処理からの排出値は、過去に計測された多くの数値を平均化した値であり、転換率としては約 0.25% に相当する。私たちの論文では、標準活性汚泥法からの N<sub>2</sub>O 排出量はこの値を用いた。わが国の標準活性汚泥法の処理場では水温の高い夏季を中心としてかなり硝化反応が進行しており、こうした部分硝化の状況下でかなり N<sub>2</sub>O が生じていると考えられる。一方、硝化脱窒処理を実施している高度処理法の処理場では案外と N<sub>2</sub>O 発生量が低いという調査結果が出ていた。そこで、これを参考に循環式硝化脱窒法のケースでは 16 mgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> の値を使うこととした。そして放流水域での N<sub>2</sub>O の発生量は転換率 1.0% の値を用いて計算した結果を示した。それは下記に示した温室効

果ガス増減（ $\Delta$ GHG）に関する大小関係が成り立つことをまず確認したかったからである。そして図2に示すように、その大小関係は以上に示した条件の下では成立している。

$\Delta$ GHG（高度処理による電力増加分） <  $\Delta$ GHG（処理場における  $N_2O$  発生減少分） +  $\Delta$ GHG（放流水域における  $N_2O$  発生減少分）

比較の前提となる係数の取り方に議論はあるものの、下水の窒素除去に要する電力エネルギー消費は、下水中の窒素に起因する  $N_2O$  の発生抑制の効果という点からも十分その正当性を主張できそうである。

標準法に比べ高度処理法の処理場で  $N_2O$  の発生は小さいということは、国の研究機関においても注目されてきており、新たな全国の調査結果を基に、これまで下水処理に一律に適用していた  $160 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$  の排出係数を、標準活性汚泥法（ $142 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ ）、嫌気好気活性汚泥法（ $29.2 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ ）、循環式硝化脱窒法等窒素除去法（ $11.7 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ ）、窒素除去 MBR 法（ $0.5 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ ）と分けて適用することとし、下水道からの温室効果ガスインベントリに反映されることとなった<sup>6)</sup>。

以上に見てきたように、窒素については水域の富栄養化原因物質であるのに加えて大気汚染の元凶となる要素があり、農業や工業の活動の盛んな地域では活性窒素の制御について取り組みがなされるべき時点に来ている。下水道に負荷される窒素量は穀物生産に係る肥料や畜産廃棄物に因る窒素量には及ばないが、世界的な都市人口の増加により、将来的にその割合は大きくなっていくものと考えられる。そしてこの項で示されたように、下水処理として確立されている生物学的硝化脱窒法を適用すれば、自然域におけるよりも随分と小さい  $N_2O$  の発生量で窒素負荷を大気中の窒素（ $N_2$ ）に還元できる見通しがついているのだ。そして同時にこの節で見てきたようにエネルギー消費起源の  $CO_2$  は窒素処理の  $N_2O$  削減で相殺される可能性は大きい。本シリーズの2章「下水処理とエネルギー」の最後の部分で言及したように、この高度処理エネルギーを消化ガス発電などの下水道からの回収エネルギーでカバーできれば、環境に寄与する下水道の姿を明確に示すこととなろう。次節では汚泥消化による回収電力と水処理系への窒素負荷の増大が処理場全体の電力消費にどのような影響を与えるのか、汚泥焼却における  $N_2O$  発生に絡めて検討した結果を紹介する。

#### 4. 3 汚泥焼却に係る $N_2O$ と汚泥消化法の評価

下水道に係る窒素についての議論では、汚泥焼却時に発生する  $N_2O$  について言及する必要がある。これはわが国で一般に用いられている流動焼却炉の下水汚泥焼却において排ガス中にかなり高濃度の  $N_2O$  が含まれていることが明らかになったからだ。下水汚泥は脱水汚泥で固形分中約5%窒素が含まれているが、この窒素成分が転換率10%という高率で  $N_2O$  に変換されていた。こうした汚泥焼却における  $N_2O$  の発生挙動とその削減手法については1990年代、当時の建設省土木研究所が名古屋市との共同研究で精力的な研究が行われ、 $800^\circ\text{C}$ の焼却温度を  $850^\circ\text{C}$ 程度に上げることにより  $N_2O$  転換率を4%程度に縮減できることが明らかにされた<sup>7)</sup>。このような汚泥焼却起因の温室効果ガス量（GHG）は、わが国の下水道事業に起因する全体のGHGに対して約2割を占める大きさであると評価され、「下水道温暖化防止推進計画の手引き（H21.3）」において高温焼却（ $850^\circ\text{C}$ ）の導入によりGHG削減対策を行うことが推奨された。もちろん高温焼却にはそれだけ多くの補助燃料が必要となるが、補助燃料のGHGは  $N_2O$  削減によって十分カバーされる。

ここで下水道に負荷される窒素を汚泥消化法を介して、水処理（高度処理）と汚泥処理（焼却）にどのように按分するとGHGの観点から最適解が得られるのかということを検討した筆者の報告<sup>8)</sup>を紹介

する。図3に示すのは、汚泥処理が上からⅠ標準消化法、Ⅱ分離消化法（初沈汚泥のみ消化）Ⅲ直接脱水法、に対する汚泥の固形物量と窒素負荷を処理場フローの中に書き加えたものだ。処理規模は50,000m<sup>3</sup>/日、水処理施設はA<sub>2</sub>O法でⅢの直接脱水法での単位電力消費量は0.36 kWh/m<sup>3</sup>の値を用い、Ⅰ、Ⅱに対しては窒素負荷に比例してこの単位消費電力量を設定した。この水処理の消費電力量に加えて汚泥処理の消費電力量を加えて全体の消費電力量を計算しているが、消化プロセスからのメタン1 m<sup>3</sup> (35.9MJ)は3.3 kWhの電力量に変換され処理場の消費電力量を節減する。こうした条件の下で計算された汚泥処理3方式のGHG計算結果は表2に示されるとおりだ。標準消化法のケースで一番GHG発生が少なくなっているが、水処理の窒素負荷増加に係る消費電力の増加が消化ガス発電量で十分相殺されているということが、まず指摘できるし、脱水汚泥の窒素量が消化によって減少したのもその分焼却起因のN<sub>2</sub>O量が少なくなったことがかなり効いていると見て取れる。このように、下水道に集約される窒素負荷を水処理と汚泥処理でどのように按分して処理するかという問題に取り組むことにより、この時代に相応しい下水処理の概念をより明確にしていくことができるのではないかとと思われる。

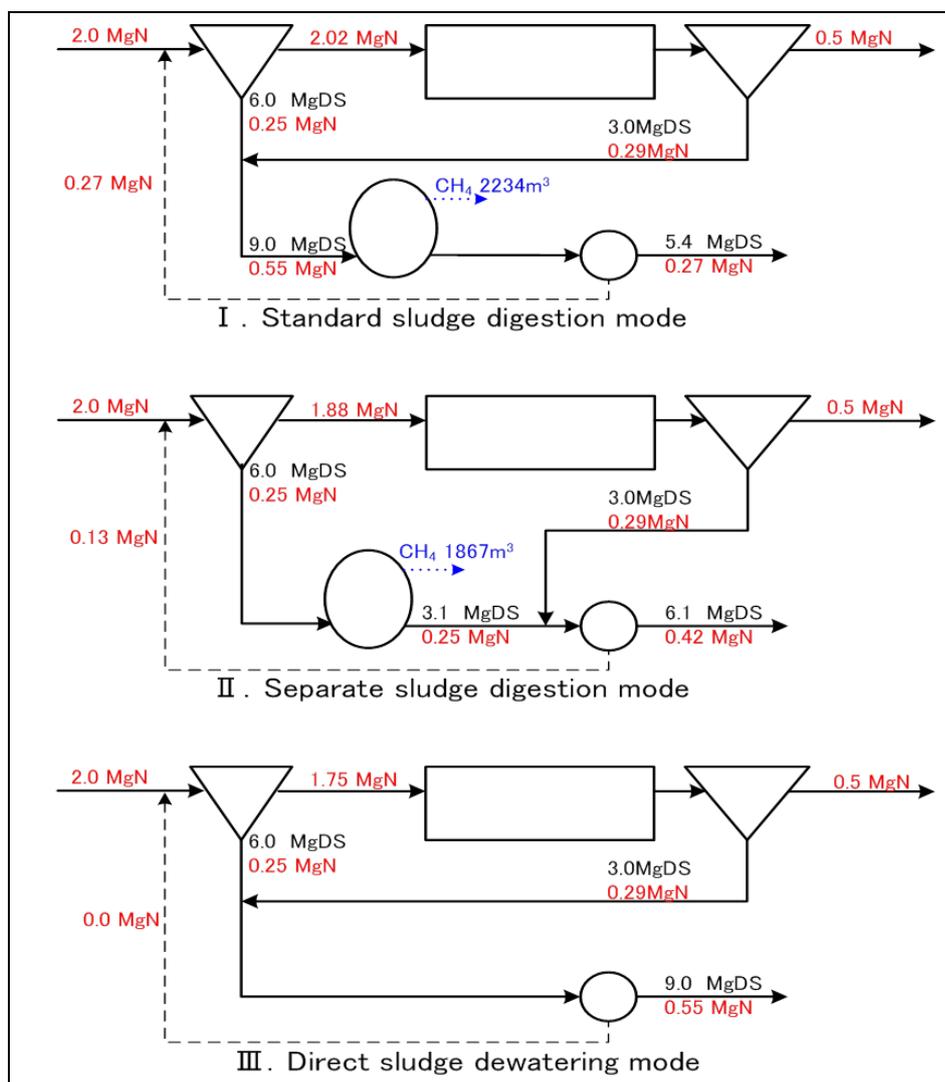


図3 モデル高度処理下水処理場における3種の汚泥処理モードでの汚泥固形物量 (DS/d) と窒素負荷(N/d)

表2 3種の汚泥処理モードに焼却を付加した場合の温室効果ガス発生量の比較

	Power consumption kWh/d	CO2 conversion Mg/d	N2O generation from water treatment Mg/d	CO2 conversion Mg/d	N2O generation from incineration Mg/d	CO2 conversion Mg/d	CO2 Total Mg/d
Standard digestion mode	16,644	9.24	0.0159	4.92	0.017	5.26	19.42
Separate digestion mode	16,416	9.11	0.0148	4.58	0.0264	8.18	21.87
Direct dewatering mode	21,880	12.14	0.0138	4.26	0.0346	10.72	27.12

1000kWh =0.555MgCO2                      N2O conversion ratio: 310                      N2O conversion ratio: 310

参考文献：

- 1) Galloway J.N. et al. (2008) : Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions, *SCIENCE* Vol.320, 889-892.
- 2) 古米弘明、川上智規、酒井憲司 (2012) : 森林の窒素飽和と流域管理、技報堂出版 pp. 144.
- 3) Sutton, M.A. et al. (2013) : Our Nutrient World-The challenge to produce more food and energy with less pollution、Chapter 4 Environmental threats of too much and too little nutrients pp32-51.  
<http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/1/N500700BK.pdf> よりダウンロード可
- 4) Bouwman A.F., Van Drecht G., Knoop J.M., Beusen H.W., and Meinardi C.R. (2005) : Exploring changes in river nitrogen export to the world's oceans, *GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES*, Vol.19, GB1002
- 5) Sato K., Goto M. and Gan C. (2001) : Study of power consumption and GHG generation to control nitrogen in advanced wastewater treatment, presented to the 4th IWA-ASPIRE Conference, 2-6 Oct.2011, Tokyo, Japan.
- 6) 道中敦子 (2014) : 終末処理場水処理プロセスにおける N2O 排出係数の見直し、下水道協会誌 Vol.51, No.622, pp.35-37.
- 7) 松原誠、平山孝浩、若杉泰宏、吉川開二 (1998) : 下水汚泥流動焼却炉における N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub> の挙動解明および削減に関する研究、下水道協会誌論文集 No.19, pp57-71.
- 8) Sato K. (2013) : Evaluation of Sludge Digestion for the Advanced Wastewater Treatment from the Viewpoint of Energy Consumption/Production and GHGs Emission, presented to Holistic Sludge Management 6-8 May 2013, An IWA Specialist Conference, Västerås Sweden.

## 終章 地球インフラとしての下水道

本論では、地球上の都市人口の半数に普及しようとしている下水道が、水道で給水された大きな水量の受け皿となるとともに、大量の有機物（BOD または C（炭素）、栄養塩（N（窒素）、P（リン））を集約する施設となっており、この物質を適正に処理あるいは利用していく施設として、その役割がますます重要になっていくことを示した。とくに N,P 負荷の起源は私たちの食生活と密接に関係している、食品加工排水、台所排水そしてトイレ排水を受け入れることを本来の使命としている下水道には、食料起源の N,P 負荷のかなりの部分が集約される。わが国を対象して 2002 年の統計資料を基にこの関係を整理してみると 1 章で示したように、食料起源の N,P 負荷の約 4 割が下水道に集約されていた。この時点のわが国の下水道接続人口は 7,547 万人（総人口 12,744 万人）であったので、現時点の下水道による N,P 収集率はもう少し高いものとなる。下水道においては、水とエネルギーに加えて食料を加えた Nexus（関係、繋がり）で議論すべきということが言われているが、まさにこうしたことに困っている。

下水処理については、主に放流先水域の DO 低下による環境悪化を回避するため、下水中の有機物（BOD）を除去する処理法が開発され、20 世紀初頭には現在も用いられている活性汚泥法が出来上がった。そして近年ではより広域な水環境の富栄養化に対処するため、下水処理水から窒素・リンを除去する方法が検討され、活性汚泥法をベースとする生物学的窒素・リン除去法が 1970 年代に実用化され広汎に適用されることとなった。これらのことは単に下水処理の発展の筋道を辿っているのであるが、現在、下水道あるいは下水処理には新しい責務が課せられているように思われる。それは下水道により収集されてきた物質の利用リサイクルと地球環境問題への対応である。

リンについては肥料としての必須元素、即ち「生命の栄養素」であると同時に、電子部品、自動車、医薬品や食料品等広汎な製造業分野においても重要な「産業の栄養素」との指摘がなされている<sup>1)</sup>。リン鉱石の埋蔵量は、モロッコ、イラク、中国など限られた国に限定されており、リン資源の安定的確保は世界共通の課題である。下水道に集まるリン量は随分と大きな量であり、比較的簡単に汚泥部分に濃縮されるので、下水道からのリン回収利用は実用化の域にあり、わが国でも汚泥消化液からの MAP 回収あるいは焼却灰からのリン酸液あるいはリン酸カルシウムとしての回収が一部実施されている。汚泥利用としてはコンポスト処理等をしてこれを直接農地、緑地に利用する方法があるが、この場合はリン成分の他、窒素成分、有機成分が利用されることになり、汚泥成分のリサイクルとしては総合的な取り組みとなる。しかしながら、汚泥発生量と受け入れ緑農地のアンバランス、他の畜産由来の堆肥利用等との競合などもあり、大都市下水道の汚泥利用の選択肢としてはかなり限定的なものとなる。

他方、窒素については、空気中窒素の工業的固定法があるので、下水道からのリサイクル物質としての注目度は低い。むしろ工業的に産出され農作物増産に用いられる窒素（アンモニア）は、自動車や産業活動に由来する酸化窒素（NO<sub>x</sub>）と相まって地球的な規模での汚染物質として、地球環境保全の観点から要注意物質となっている。工業化以前の時代に比べ、この活性窒素の循環フラックスが 2 倍となり、様々な影響が表れているというのだ。本論の序章に紹介した「地球システムの限界（planetary boundaries）」もこの窒素循環系の肥大を一番大きな問題としている。窒素循環系の肥大は食糧問題と表裏一体である。そして上にも書いてきたように、下水道は食料消費に付随して大きな窒素負荷を集約している。もし窒素循環に係る地球環境問題が喫緊の問題であるならば、下水道システムはこの問題を解決するポテンシャルを有しており、4 章で示したように地球環境学者のグループもそうした期待をしてい

る。下水道は大きな窒素負荷を集約していると同時に、生物学的硝化脱窒法という技術的にも習熟し経済的にも実施可能な高度処理法を手に行っているからである。

下水処理はエネルギー消費と裏腹な関係にある。より水をきれいにしようとするればエネルギーがそれだけかかる。有機物やリンに対しては省エネ的な生物吸着、生物濃縮法が適用可能なのに対し、窒素の除去については除去率を上げる分だけエネルギーが掛かってしまう。窒素除去の前提となる窒素酸化に係るエアレーション量は正直だ。しかし、本論でも示したように有機物の酸化を無下にすれば、水環境でメタン発生が生じ、エアレーション動力に起因する二酸化炭素より大きな温室効果ガス発生に結びついてしまう。そして窒素についても、中途半端な処理過程や放流先水域での窒素成分の挙動による一酸化二窒素 ( $N_2O$ ) の発生は、エアレーション動力の増分に因る温室効果ガス発生を増分を超えることが予測される。こうしたことを考慮すれば、下水道システムによる窒素除去、窒素処理は地球環境問題の観点から大いに推進されるべき課題であると思う。

わが国では下水道事業に伴う温室効果ガス排出抑制に効果的に取り組むために、近年に「下水道における地球温暖化対策マニュアル」<sup>2)</sup> が整備されている。このマニュアルでは、各種下水処理プロセスおよび焼却等の汚泥処理・処分プロセスからの温室効果ガス排出係数が示されると共に、温室効果ガス排出抑制対策のメニュー等も示されている。本シリーズ 4 章で示した各高度処理プロセスにおける  $N_2O$  の排出係数、ならびに汚泥焼却炉の高温焼却導入ならびに形式別の  $N_2O$  排出係数も詳しく紹介されており、温室効果ガス排出抑制に対し有効な情報が満載だ。こうした下水道に係る温室効果ガスの検討マニュアルに関し、国レベルの資料が用意されているのはかなり限定的で、恐らくこの分野でのわが国の取組みは他国をかなり凌駕しているのではないかと思われる。

高度処理プロセス下で  $N_2O$  発生量が低くなるというのは、これまでの硝化脱窒プロセスで  $N_2O$  が出るという世界の常識に反する。わが国において硝化脱窒の条件をコントロールすることにより  $N_2O$  の発生が極小になるということ、多くの高度処理の現場データから抽出してきたことは、水処理プロセスの今後の発展の試金石である。同様に、汚泥焼却プロセスにおける  $N_2O$  の挙動はわが国の現場データから抽出されてきたものであり、汚泥焼却が欧米の下水処理場でその箇所数を増やす中、温室効果ガスに関する重要な情報がわが国から発信されることになる。

安価で経済的な下水処理、これは当然現代の下水道事業の基本的な命題である。しかし、地球環境問題に直面しつつある時代に臨み、私たちはもう一度下水道の使命を吟味することが必要であると思える。それは多分、環境インフラとしての下水道の価値、能力を見つめ直すことではないかと思う。

地球環境問題の元凶は人口問題に帰結する。人口が増えていることで、新たな農地と水資源の開発そして肥料の適用が必要となる一方、都市への人口の集中が加速している。人口集中地区の排水問題、し尿問題をどうするのかということでは、これまでの世界史が如実に示すように下水道システムの適用に行きつく。地球環境問題を考慮してこれからの下水道システムを考えると、エネルギー、資源、温室効果ガスの新しい評価指標からの評点の高い下水道システムの追求が必要になってこよう。このとき新しい下水道システムへの取組みは程度の差こそあれ、先進国、途上国で大きく変わることはないように思える。わが国で最良と思われる下水道システムを原型に途上国の将来を見越して、同様な地球環境時代に相応しい環境インフラとしての下水道システムを提示し、これを順次適用していくことが基本となるのではないかと考える。私は本論を括るに当たりここに改めて“地球インフラとしての下水道”という概念を提案させていただこうと思う。

以上が本論序に示した私の問題提起への解答である。ここに書いてきた私の下水道論は、力点の置くところにバイアスが掛かり、なかなか多くの方々に支持されないかも知れないが、下水道の将来を考える皆さまに、もって他山の石として戴ければ幸いである。

2018年7月了

参考文献：

- 1) 大竹久夫：工業分野におけるリン利用 リンの事典 pp.236-237. 朝倉書店 2017年
- 2) 環境省・国土交通省：下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等指針の解説～、平成28年3月