

B-19

海水の浸透圧を用いた浸透プロセスによる下水の高度処理システムの試算

東京工業大学 土木工学専攻 浦瀬太郎

1. はじめに

わが国の下水処理場のかなりの割合のものが、海のそばに立地している。海水から淡水を取り出そうとして逆浸透処理をすると海水と処理水の浸透圧差以上の駆動力（すなわちエネルギー）が必要となるが、逆に下水あるいは下水処理水という淡水が海水に混合する場合には、エネルギーを取り出すことができるか、少なくとも、なんらかの方法で駆動力を有効に使うことができる可能性がある。一方、近年、環境中の化学物質に対する人々の関心が高まっており、環境ホルモンの問題は、重大な問題となっている。下水処理水の場合には、合成有機化合物に加え、人畜由来のエストロジェンの方が重要であるという指摘もあるが、逆浸透法を用いればほとんど例外なく問題となっている物質群を除去可能と見込まれる。本発表では、海水と下水の浸透圧差を駆動力とし、逆浸透処理並の処理水質を海中に放流できるプロセスについて非平衡熱力学に基づく簡単な計算結果をもとに実用の可能性を検討した。

2. 理論と計算の前提

図-1 が、本研究で提案するプロセスの例である。嫌気性処理との組み合わせ(A)、好気性処理との組み合わせ(B)、二次処理水を供給する場合(C)が考えられる。いずれにしても、流入下水のうち80%程度を浸透によって海水側へ透過させることを考えている。省エネルギーの観点からは、メタン発酵を利用できる(A)法、活性汚泥の高濃度化が図れる(B)法、単なる排水ポンプの代替でしかない(C)法の順に望ましいと考えられる。しかし、実際の実現可能性を考えると、膜の目詰まりの心配の小さい(C)法、既存の膜分離活性汚泥法の技術(膜曝気など)が使える(B)法、激しい目詰まりの予想される(A)法の順で実現の可能性がある。もちろん(C)法でさえ、2次処理水レベルの水を直接逆浸透膜に通水することに相当するので、膜の目詰まりの問題は大きなネックとなる。(A)から(C)のいずれの方式においても、膜を透過させる駆動力は、海水と下水との浸透圧差である。また、80%の処理水については、逆浸透法で高度処理したことに相当する処理水質を期待できる。ただし、高度処理水は海中に放流され、有効に利水することはできない。

膜プロセスの輸送方程式として、逆浸透法では、非平衡熱力学に基づく次式で与えることが一般的である¹⁾。この関係式は、浸透の場合もそのまま利用できると考えられるが、逆浸透の場合と異なり、この式の J_v

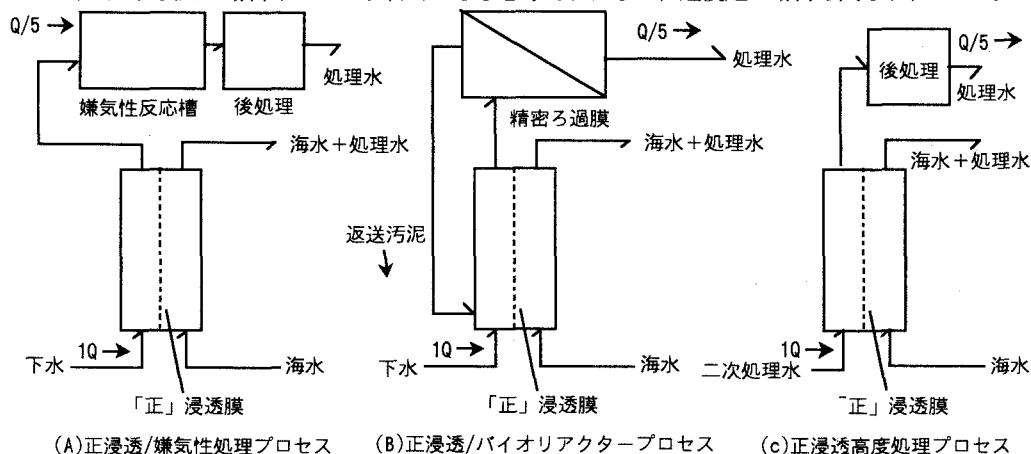


図-1 本研究で検討するプロセスの概念図

と J_s の符号は必ずしも自明でなく、溶媒の輸送方向と溶質の輸送方向が異なることもある点が異なる。

$$J_v = L_p (\Delta P - \sigma \Delta \Pi) \quad (1)$$

$$J_s = P(C_1 - C_2) + (1 - \sigma) C^* J_v \quad (2)$$

また、浸透圧差は、次の式であらわされる。

$$\Delta \Pi = (C_1 - C_2) RT \quad (3)$$

ここで、 $\Delta \Pi$ は浸透圧差、 R は気体定数、 T は、絶対温度、 σ は膜の反射係数、 P は膜の透過係数、 ΔP は、膜の両端における圧力差である。また、 C^* は膜内部の濃度である。さらに、各点での濃度を図-2 のように定義する。

本計算では、仮に $\Delta P = -0.2 \text{ MPa}$ (20m 下水を汲み上げて海水側に排水する) と仮定し、処理場におけるポンプ動力の削減を目指すことにする。この場合、膜に破損があった場合には、海水が下水側へ流れ込むことから、不慮の海洋汚染の防止に有効であり、かつ下水側の電気伝導率などをモニターすることによって膜の破損の早期発見が可能となる。

下水側から海水側へのかなり大きな容積フラックスがあるため、逆浸透同様の片スキン構造の膜を用いることとし、実際の輸送パラメーターが得られることを考慮し、モデル計算では、日東電工製の逆浸透膜 NTR-759HR 膜を用いることを仮定した。この膜の輸送定数は、逆浸透実験より $L_p = 5 \times 10^{-12} (\text{m/s/Pa})$, $P = 5 \times 10^{-8} (\text{m/s})$, $\sigma = 0.99$ と与えられる²⁾。もちろん、浸透の場合でも逆浸透の場合と同じパラメーター値を用いることができるかどうかは、実験により確認をする必要がある。また、分離に寄与しない支持層部分の膜構造パラメーターとしてやや現状より理想的な値である厚さ Δx_2 を $40 \mu\text{m}$ 、開口率 A_k を 0.5 と仮定した。また、下水中の総溶解物質濃度は 0.05% で、浸透圧を計算する場合には、NaCl に相当するとして計算した。また、膜プロセスでの濃縮倍率は 5 倍とし、分子拡散で計算する仮想的拡散境界層厚さは、 $\Delta x_1 = \Delta x_3 = 100 \mu\text{m}$ とした。NaCl の分子拡散係数を $1.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

3. 計算

3. 1 容積フラックスの計算と濃度差駆動力の消費構造

溶質の流れが溶質の濃度勾配に影響しないと仮定すると次式が成立する。

$$C_1/C_0 = \exp(J_v \Delta x_1/D) \quad (4)$$

$$C_3/C_2 = \exp(J_v \Delta x_2/D/A_k) \quad (5)$$

$$C_4/C_3 = \exp(J_v \Delta x_3/D) \quad (6)$$

これらの式を(1)(3)式と連立させることにより、容積フラックスが $J_v = 5.3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (0.46m/d) と求まる。また、この場合に海水下水間の濃度差がどこで消失したかを図-3 に示す。下水側の濃度境界層抵抗は、濃度が低いためにあまり小さくなく、20m の揚水に使われる部分も 7% である。大半の濃度差は、膜内部と膜に海水を拡散させる部分で消費

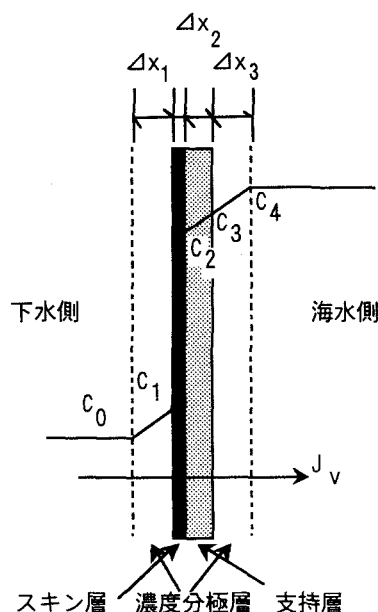


図-2 正浸透膜周辺の塩分濃度分布の模式図

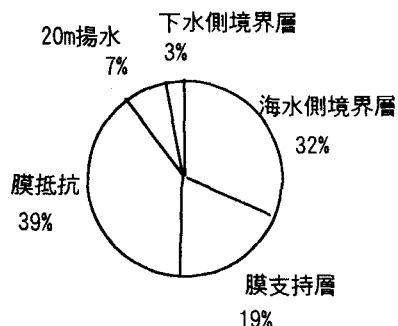


図-3 モデル計算結果による海水の浸透圧差の消失構造

されていることがわかる。本研究では、膜の目詰まり抵抗を考慮していないが、 $J_v=5.3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 程度のフラックスであれば、塩類以外の下水側に含まれるコロイド状物質の膜面でのゲル層形成によるフラックスの律速はないものと考えられる。

3. 2 塩のフラックス

塩のフラックス J_s については、(2)式の第一項(拡散項)が、海水側から下水側への向き、第二項(移流項)が下水側から海水側への向きとなる。ここでは、第一項を評価することにより、最大限どの程度の塩分が海水側から下水側へ透過する可能性があるかについて検討する。第一項の大きさは、(2)式より $7.6 \times 10^{-4} \text{ g NaCl/m}^2/\text{s}$ と計算され、この量は、下水にもともと溶解している塩濃度を 0.05% として、その下水を 5 倍濃縮した 0.25% の濃縮水に 0.07% の濃度で混入することに相当する。したがって、濃縮水中の総塩濃度は、0.32% と計算され、このうち海水からの透過塩分の寄与は、約 2 割となる。

4. 膜モジュールの設計

膜モジュールは、逆浸透膜では、スパイラル型や中空糸型が一般的であるが、浸透法では、膜の両側に濃度分極が発生するために、透過側(海水側)に連続的に海水を供給する必要がある。スパイラル型は、この点では不利であり、また、中空糸型も糸内側を下水側にするにしても海水側にするにしても液を流通させるのにエネルギーがかかる。約 100 万人分の下水流量に相当する $5 \text{ m}^3/\text{s}$ の下水を処理する膜モジュールの例として図-4 の平膜タイプを考えた。膜モジュールは、長さ 1,000m の平膜型流路 8 本で構成され海水中に浸漬する。 $\Delta x_1=100 \mu\text{m}$ とするためには、平均膜面流速が 0.5 m/s

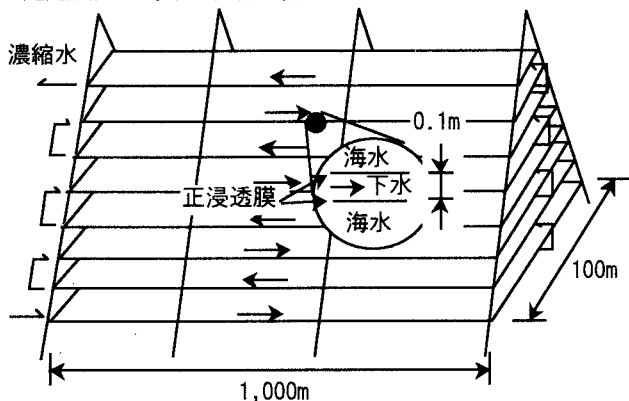


図-4 海面下に設置する正浸透モジュールの例

程度必要であることから、下水の流路厚さを 10cm とし、モジュールの上面と下面は、浸透膜によって海水と仕切られる構造とした。モジュールとモジュールの間の上下の間隔は、計算していない。潮流の激しいところであれば狭くできる。一段目で約 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ の水が海水側へ透過するため、二段目の膜モジュールは、奥行きを 80m とすれば、膜面平均流速を一段目と同じに保つことができる。図のように上へ行くほど奥行きの狭くなる 8 枚のモジュールを重ねることにより 5 倍濃縮が達成される。なお、このモジュールでは、下水の入口から濃縮水の吐き出し口までの間で 18m ほどの損失水頭を生じる。

5. まとめ

逆浸透膜を「正」浸透的に用いて、都市下水と海水との浸透圧差を駆動力として、エネルギーをかけずに下水を濃縮し、逆浸透処理並の高度処理水を得ることが可能であるかどうかについて非平衡熱力学に基づく計算をおこなった。5 倍濃縮(流量の 4/5 を高度処理)をするプロセスについて、既存の逆浸透膜の膜透過係数を用いて計算したところ、下水と海水の浸透圧差を駆動力として下水を 0.5 m/d 程度のフラックスで汲み上げることが可能であることがわかった。また、膜を介して海水側から下水側へ浸入する塩の量は、下水がもともと持っている塩分量に比較して小さいことが示された。ただし、膜の目詰まりおよび膜モジュールの耐久性、海中構造物の設計・施工など実際の実現性には様々な困難があり、また、逆浸透法で測定された膜の輸送パラメーターによって浸透現象がどこまで記述できるのかなど、理論的にも不明確な要素がある。

参考文献

- (1)S. Kimura(1992): Transport phenomena in membrane separation process, J. of Chem. Eng. of Japan, 25, 5, 469-480.
- (2)中尾真一(1996): 高回収率逆浸透法海水淡水化の提案, 日本海水学会誌, 50, 6, 406-412.