

1. はじめに

都市で発生する廃有機物と廃熱の有効な処理, 利用を図るためには下水道系と廃棄物収集・処理系を共通の指標で評価し, 両者を総合化した検討が必要である。本報告では, エネルギー再生の観点から, 下水処理過程における質交換の指標として下水処理場生産物である放流水についてはその顕熱, 汚泥については保有熱量を取り上げ, エネルギー効率を評価するために, 流入下水, 放流水, 汚泥の質を含有有機物の発熱量に注目し, 下水処理場の実績データを用いて現状の把握を試みた結果を述べる。また, 処理場の運転操作による汚泥保有熱量の制御可能性を生物反応モデルによって検討した結果についても報告する。

2. 下水処理場データを用いた現状把握

(1) 検討対象 処理能力約144000m³の標準活性汚泥法の処理場の実績データを検討に用いた。汚泥は濃縮後生汚泥薬注脱水法(塩化第2鉄および消石灰)で加圧脱水され, 大部分は焼却されている。排除方式は合流式である。

(2) 検討方法

・顕熱の推算 熱源からの熱利用は周辺温度に影響されることから, 本研究では周辺温度として月別の平均気温を用い, 単位体積の下水が保有する顕熱, q (J/m³)を

$$q = C_p \times \rho \times (T - T_0) \quad (1)$$

ここに, C_p :比熱(4.1868kJ/kg/Kとした), ρ :密度(1000kg/m³とした), T :水温, T_0 :平均気温より算出して流入下水と放流水の保有顕熱の変化を検討した。

・汚泥の保有熱量の推算 無機系凝集剤による脱水ケーキについて有機物含有率 $V(\%)$, 含水率 $w(\%)$, 凝集剤添加率と発熱量の関係が実測データを用いて整理されている¹⁾ので, これらの経験式を用いて推算した。

$$\begin{aligned} H_C &= (1-w/100)H_L' - 540w/100 & H_h &= (58.3 \times V - 193) \\ H_L' &= 0.93 \times \frac{H_h - 353(\alpha - 0.69\beta)}{1 + \alpha - 0.03\beta} - 33 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに, H_C :脱水ケーキの低位発熱量(kcal/kg-Cake), H_h :凝集剤添加前汚泥乾燥固形物あたりの高位発熱量(kcal/kg-DS)。

・下水中有機物の発熱量の推算 処理過程における有機物の酸化, 微生物増殖等の質変化によって汚泥が生成されることから, この過程の評価のためには流入下水, 放流水についても含有有機物のもつ熱量を推算する必要がある。合田ら²⁾による下水中有機物のBOD値(g/m³)と燃焼熱(酸化反応のエンタルピー変化量) H_O (J/m³)の関係:

$$H_O = (BOD/0.146) \times 4.1868 \times 10^3 \quad (3)$$

を用いて流入水, 放流水の有機物発熱量を推算した。

(3) 推算結果

・顕熱 はじめに, 流入下水, 放流水および気温の月別平均値の変化を図1に示す。検討対象とした札幌の下水処理場では夏期(7, 8月)を除いて下水温は気温よりも高く, 高熱源として位置付けられる。流入水と放流水の水温差は平均して約1℃あり, 処理過程で顕熱が増加している。この水温上昇は主としてエアレーションタンクで生じており, ヒートポンプによる熱回収を温度差4deg程度と想定すると, 処理系内水温上昇は回収熱の約25%程度を占めることとなる。この水温上昇による一日あたりの顕熱増加量ならびに水処理系消費電力(ポンプ, プロア)

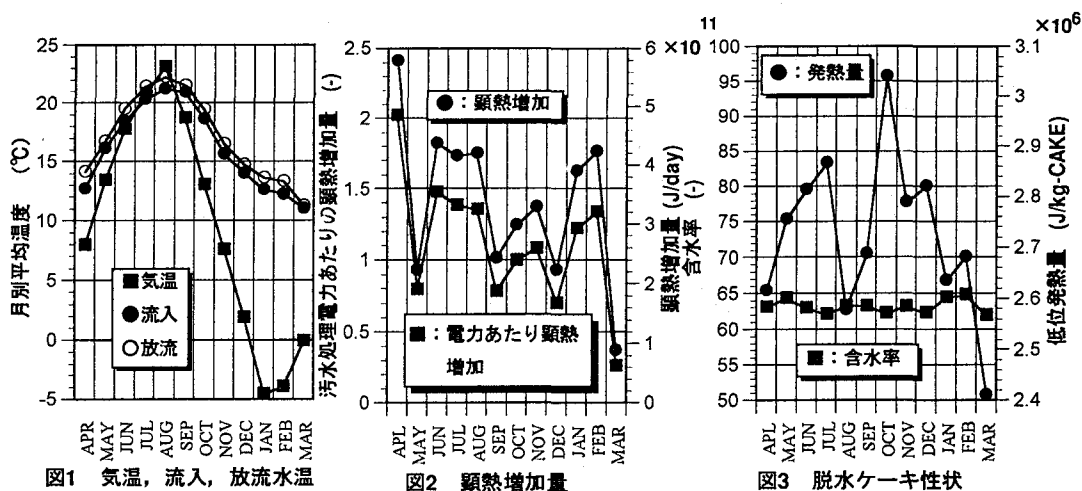
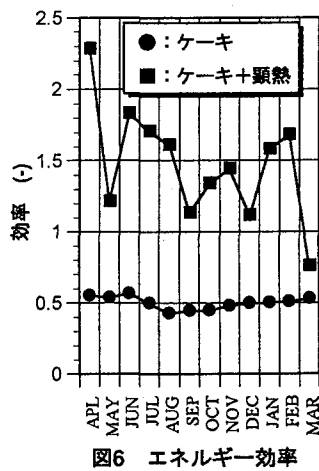
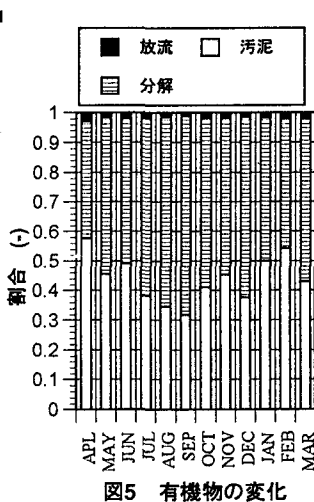
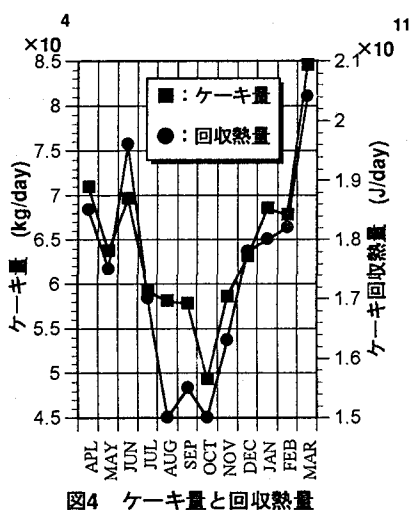


図2 顕熱増加量

図3 脱水ケーキ性状



あたりの顕熱増加量の変動を図2に示す。なお、本研究では電力量の単位換算の際に電力発生原単位（効率を35%と仮定）を考慮し、 $1\text{kWh}=2450\text{kcal}=10257.66\times 10^3\text{J}$ としている。対象の処理場では水処理系消費電力量はほぼ一定であり、消費電力量あたりの顕熱増加と顕熱増加絶対値の変動の相関は高い。顕熱増加は主としてプロア出口空気温度に影響されていると推測されるが、空気温度が不明のため今後の検討が必要である。

・脱水ケーキ保有熱量

はじめに、脱水ケーキの含水率とケーキの低位発熱量の月別平均値を図3に示す。対象処理場は無機系凝集剤を用いた加圧脱水のため、平均含水率は約62%と低い値をとり、年間の変動幅も小さい。ケーキの低位発熱量は夏期および融雪水の流入する3、4月に低下する傾向を示している。次に、ケーキ生成量、ケーキ回収熱量（ケーキの低位発熱量×ケーキ生成量）の月別平均値を図4に示す。ケーキ生成量は水温の高い夏期に少なく、逆に冬期に多くなっており、ケーキ回収熱量も同様の変動傾向を示している。流入下水中に含まれる有機物の発熱量の一日あたり総量を1とし、放流水中有機物、汚泥中有機物（凝集剤添加前汚泥の乾燥固形物あたりの高位発熱量）の割合を図5に示す。下水処理過程における有機物の変化を発熱量からみると夏期に分解量が多くなっている。汚泥への転換量は平均して流入量の約40%程度となっている。

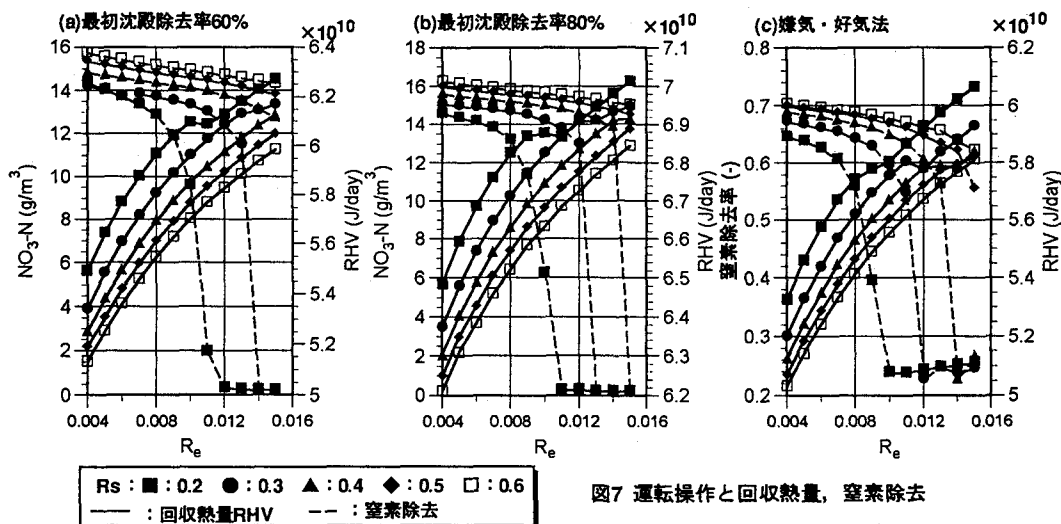


図7 運転操作と回収熱量、窒素除去

・総合エネルギー効率

処理過程における熱生産をケーキ回収熱量と顕熱増加、投入エネルギーを消費電力と凝集剤としてエネルギー効率を推算した結果を図6に示す。投入エネルギーに対して汚泥として回収している熱量の割合は約50%で年間を通して変動が小さい。顕熱増加量を含めた回収割合はほぼ150%程度となる。

3. シミュレーションによる汚泥保有熱量と運転操作の関係の検討

(1)モデルと想定条件 シミュレーションには水処理系（最初沈殿池、エアレーションタンク、最終沈殿池）と汚泥処理系（濃縮槽、脱水機）の定常特性をモデル化したものを用いた。本モデルは検討対象処理場の冬期間の処理性能の再現可能性が確認されている^{3), 4)}。シミュレーションでは運転操作条件として余剰汚泥引き抜き率（余剰汚泥引き抜き量／流入下水量） R_e と汚泥返送率（返送汚泥量／流入下水量） R_s をとりあげ、水処理系の一部とそこから発生する汚泥を対象とした。また、(a)最初沈殿池除去率を現状の実績値（約60%前後）とする場合に加えて、(b)凝集剤を添加し最初沈殿池除去率を大きくした場合（凝集剤添加後の除去率を約80%と仮定）と(c)エアレーションタンクを5分割し好気+嫌気+好気+嫌気+好気状態とし、第1, 2, 4槽目に下水とステップ流入（分配比1:1:1）させる場合も検討した。操作の評価項目としてはケーキによる回収熱量RHVならびに処理水質について硝化反応の進行（(a), (b)の場合）または窒素除去率（(c)の場合）をとりあげた。

(2)シミュレーション結果 結果を図7(a)~(c)に示す。汚泥による回収熱量は R_s が小さいほど、 R_e が大きいほど大きくなる傾向がある。硝化反応の進行や窒素除去率は逆の傾向となっている。現状の最初沈殿除去率（(a)の場合）と凝集剤を用いた場合(b)を比較すると凝集剤の使用により回収熱量の増加が図られ、かつ、硝化反応の進行については大きな変化が現れていない。ステップ流入式嫌気・好気法(c)と比較すると回収熱量を大きく減少させることなく窒素の除去が可能なのがわかる。このように、図7のシミュレーション結果を用いて処理性能と回収熱量を同時に評価して運転操作条件を定めることが可能となる。

[参考文献]

- (1)建設省都市局下水道部, 日本下水道事業団, 汚泥焼却炉の省エネルギー化に関する調査報告書, 昭和61年3月
- (2)合田健ら, 都市下水のエネルギー評価と有機物指標, 下水道協会誌, Vol.11, No.127, pp.21-31, 1974
- (3)船水尚行, 高桑哲男, IAWPRC活性汚泥モデルの低水温下水処理プラント実験への適用, 下水道協会誌論文集, Vol.31, No.375, pp.60-73, 1994
- (4)Funamizu N. and Takakuwa T., Simulation of the operating conditions of the municipal wastewater treatment plant at low temperatures using a model that includes the IAWPRC activated model, Wat. Sci. Tech. (submitted)