

# 未処理下水の熱利用における熱交換器性能把握実験とバイオフィーム付着による性能低下に関する研究

## RESEARCH ON PERFORMANCE OF HEAT EXCHANGERS IN UNTREATED SEWAGE FOR WASTEWATER HEAT RECOVERY AND REDUCTION IN PERFORMANCE DUT TO BIOFILM ADHESION

地域環境計画分野 崔林日

未利用エネルギーである下水熱を熱源として利用する場合、熱交換器表面へのバイオフィームの付着により、性能が低下することが問題になる。そこで、本研究では未処理下水環境下で実験を行い、初期状態の熱通過率及び時間経過に伴う汚れ係数を算出した。秋季、冬季、夏季の実験データを用いて、下水流速・温度を考慮した汚れ係数のモデル式を作成し、汚れ係数に対する下水流速・温度の影響を分析した。また、二重管熱交換器にモデル式の適用検討を行った。

In the process of thermal recovery from sewage waste heat, the attachment of biofilm to the heat exchanger causes a reduction in efficiency. In this research, experiments done in untreated sewage pipelines to determine the initial heat transfer coefficient and its change over time as well as the fouling factor. Using data from autumn, winter and summer; a model for the fouling factor considering sewage velocity and temperature was developed. Further, the application of the model to a double tube heat exchanger was examined.

### 1 研究の背景と目的

低炭素社会の実現に向けて行われている様々な取り組みとして、海水、河川水、工場排熱、下水など未利用エネルギーの有効利用が挙げられ、下水温度は外気温と比べ年間を通して温度変化が小さく、例えば大阪市では図1のように冬期は10K以上高く、夏期は日中2~3K低い。これより、ヒートポンプの熱源として利用価値が見込まれる。ヨーロッパ、中国では実環境下で未処理下水を熱源とした実用化事例があるが、国内では実施例がポンプ場における二つの利用例に留まっている。そこで中尾らは、都市インフラである下水管路を熱輸送管として活用することで、下水処理場の周辺だけでなく広範囲に下水熱利用を普及させることを目標に研究を行っている。

未利用下水の熱利用システムでは、熱交換器においてバイオフィームが付着し、熱交換器性能を低下させる問題が懸念されるが、その付着特性や性能低下の程度に関する知見がまだ少ない。そこで、本研究では未処理環境下で熱交換器性能実験を行い、汚れ係数経時変化、下水温度や流速との関係を把握することを目的とする。

北富ら<sup>[2][3]</sup>は、本実験設備において秋・冬季(2012年11月~2013年1月)に実施された測定値を用いて、下水流速0.25~0.75m/s、下水温度16.6°C~21.9°Cの条件下でバイオフィーム重量のモデル式提案を行い、付着するバイオフィーム重量は下水温度が高く、また、下水流速が小さいほど、バイオフィーム乾燥重量が大きくなる傾向が現れた。本研究では、夏季(2013年8月~9月)に実験を継続し下水温度24.9°C~29.6°Cにおける実験データを蓄積した。これを用いて、北富らモデルをベースに汚れ係数のモデル式を作成し、汚れ係数に対する下水温度・下水流速の影響について分析を行う。

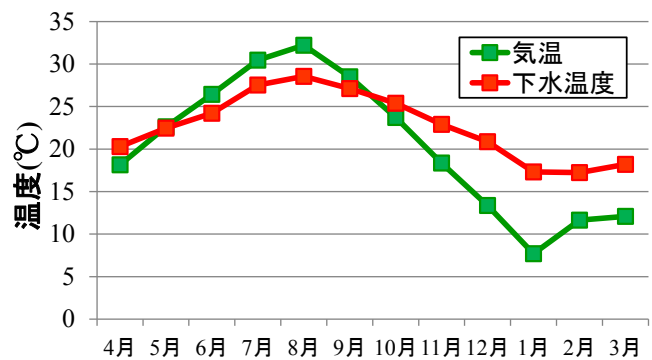
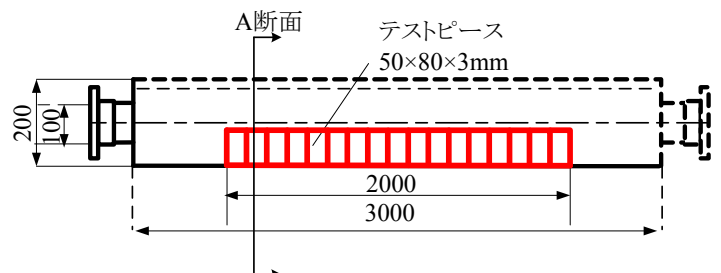


図1 気温と下水温度の比較<sup>[1]</sup>



図2 小型熱交換器実験設備



## 2 未処理下水中で熱交換器性能実験

### 2.1 実験概要と実験設備

本実験では、アクリルの密閉水密水槽（長さ3m，幅0.1m，高さ0.2m）の中に、チタンまたはステンレス製の直管（直径16mm，管厚さ0.5mm，長さ2.7m）伝熱管を1本設置する構造であり向流型の熱交換器を模している。管内に冷却水（熱源水）を通し、水槽には未処理下水を流す。伝熱管に付着するバイオフィーム重量は直接計ることが出来ないため、水槽内に別途テストピースを設置し、テストピース表面に付着するバイオフィーム重量を測定する。

図2に実験設備写真、図3(側面図)、図4(横断面図)で示すように、実験水槽内において、下水の流れと平行にテストピース（片側40枚×2列）を配置した。

### 2.2 実験条件とスケジュール

既往研究<sup>[4]</sup>によれば、熱交換器表面におけるバイオフィーム成長に影響する要因として下水温度・流速、水質、材質が挙げられる。本実験設備では、下水水質は制御出来ないため成り行きである。下水温度については、秋、冬、夏に渡る実験を行い、17℃～30℃の水温で測定データを得た。材質はチタン、ステンレスの2種類、下水流速は0.25m/s から 0.75m/s の範囲で変化させて実験を行った。以上から表1に実験条件とスケジュールを示す。

文献<sup>[5]</sup>によると図5のような成長をするので、各設定条件では汚れ係数が平衡期に達するまで実験を行うことを基本とする。

なお、実験で用いた伝熱管はチタン製とステンレス製の2種であるが、実験当初にチタンとステンレスによるバイオフィーム付着状況の比較を行ない、ほとんど違いがない(後述)ことが確認されたので、その後の実験では材料価格が安く実用的な材料であるステンレスを用いて実験を進めた。

表1 実験スケジュールと条件

実験実施日	2012年		2013年				
	11月	12月	1月	8月	9月	10月	
実験日数(日)	14	16	16	14	17	9	
伝熱管材料	チタン			ステンレス			
設定値	冷却水温度	10(℃)					
	冷却水流量	4(L/min)					
	下水流速 (m/s)	0.5	0.75	0.25	0.5		
測定値	下水温度(℃)	21.9	19.7	16.6	29.6	27.6	24.9
	pH	6.12	8.01	7.15	7.98	7.32	7.57
	BOD(mgO <sub>2</sub> /L)	96	130	156	88	67	46
	SS(mg/L)	79	137	115	161	162	239

### 2.3 実験結果

#### 2.3.1 バイオフィーム乾燥重量

図6に北富らによって測定されたバイオフィーム乾燥重量変化を示す。図6は2012年11月～2013年1月の秋・冬季における測定結果であるが、下水流速が速いと平衡時バイオフィーム乾燥重量が大きくなる傾向が現れている。ただし、流速のほかには下水温度も異なっている。この結果では両者の影響が複合している。

図7にチタンとステンレスを用いたテストピースに付着したバイオフィームの乾燥重量を比較する。乾燥重

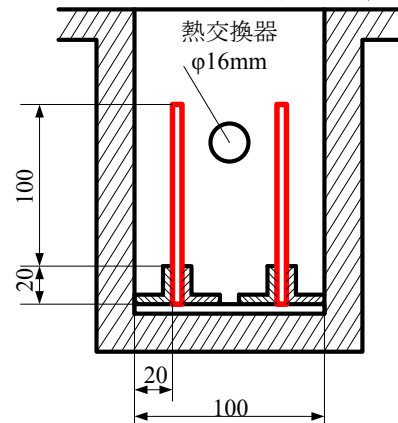


図4 テストピース設置 A 横断面図

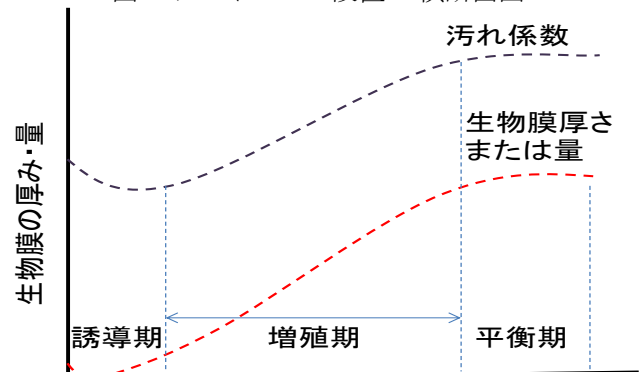


図5 生物膜の成長曲線

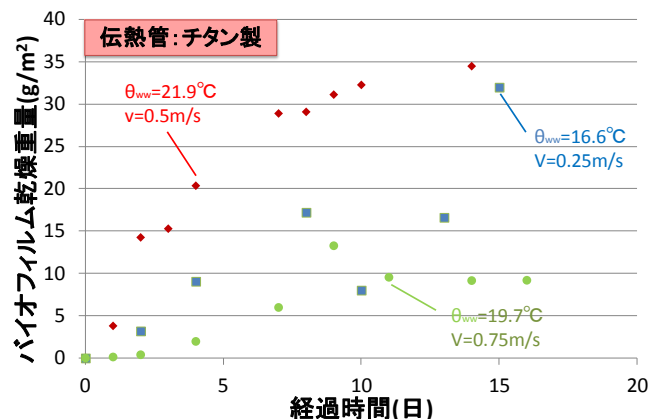


図6 バイオフィーム重量の経時変化  
(測定日：2012/11～2013/1，下水温度：16.6～21.9℃)

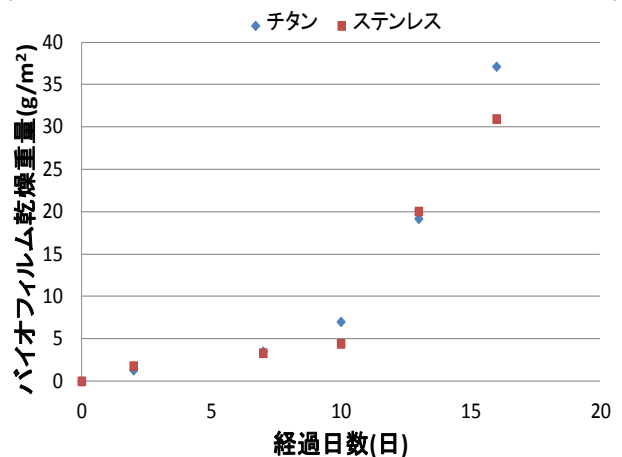


図7 チタン製とステンレス製バイオフィーム重量比較  
(下水流速0.4m/s，測定日：2013/11)

量は、北富らと同じ方法とし、水槽から採取テストピースからバイオフィルムを掻き取り、濾過した後乾燥させて電子天秤で重量を計測した。時間経過の伴うバイオフィルム重量の変化はほぼ同じであり、材質による違いは現れていない。

### 2.3.2 伝熱管の熱通過率

図6に対応する期間に測定した熱通過率を、図8に示す。熱通過率は文末の補足説明に示す。式15を用いて算定する。流速0.5m/sでバイオフィルム付着量の増加が大きいこと(図6)に対応して、熱通過率の低下も大きくなっている(図8)。流速0.75m/sでは付着量増加、熱通過率の低下がともに小さい。しかし流速0.25m/sについては、バイオフィルム付着量の増加に対して、熱通過率の低下が大きすぎるように思われる。

図9にステンレス製伝熱管を用いて、下水流速0.5m/sで得られた熱通過率を示すが、清浄時熱通過率はチタン製伝熱管と同じく約1000W/m<sup>2</sup>Kが得られたので、チタンとステンレスの材質の違いは、清浄時熱通過率についても同等との結果である。

また、チタン製伝熱管の清浄時(実験開始時)熱通過率は、下水流速0.75m/sで約1000W/m<sup>2</sup>Kであるのに対し、流速0.25m/s時は800W/m<sup>2</sup>Kと小さい値が得られた。流速0.5m/sについては、欠測のため清浄時熱通過率が得られていないが、変化の傾向からすると流速0.75m/sと同じく1000W/m<sup>2</sup>K程度と推測される。

## 3 汚れ係数モデル式検討

### 3.1 バイオフィルム重量と汚れ係数

熱通過率の測定結果を用いて、式16により係数を算出し図10に示す。図10は図6に対応する期間の汚れ係数である。バイオフィルム重量(図6)と汚れ係数(図10)は類似しており、両者の間に一定の関係があることが確認される。

### 3.2 北富らによるバイオフィルム重量のモデル

北富らは、図6の測定結果をもとにバイオフィルム乾燥重量と下水流速・温度との関係について、文末の補足説明2に示すモデル式(式17)を提案した。バイオフィルム重量と汚れ係数の間に、下水流速や温度に依存しない比例係数 $y$ を導入し式1のように表すことができれば、北富らのモデル式は汚れ係数に変換可能であると思われた。しかし、バイオフィルム重量と汚れ係数の関係を図11で整理すると、両者には比例的関係があるものの、その比例係数は下水流速・温度によって変化し、式1のような単純な関係では無いことがわかった。

$$R = yY \quad \text{式1}$$

R: 汚れ係数(m<sup>2</sup> k/W) Y: バイオフィルム量(g/m<sup>2</sup>) yは定数

### 3.3 北富らモデルの汚れ係数への適用

そこで本項では、北富らのモデル式を汚れ係数の実験値を直接適用し、改めてモデルパラメータを同定し直すことで、北富モデルの適用可能性について検討を行う。北富らに倣い、汚れ係数Rを式2と表す。

$$R = r(1 - e^{-kx}) \quad \text{式2}$$

$$k = k_{20} \alpha^{\theta_{ww} - 20} \quad \text{式3}$$

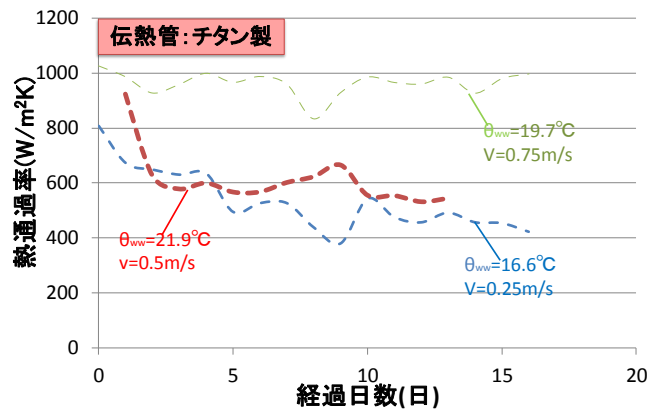


図8 熱通過率の経時変化  
(測定日: 2012/11~2013/1, 下水温度: 16.6~21.9°C)

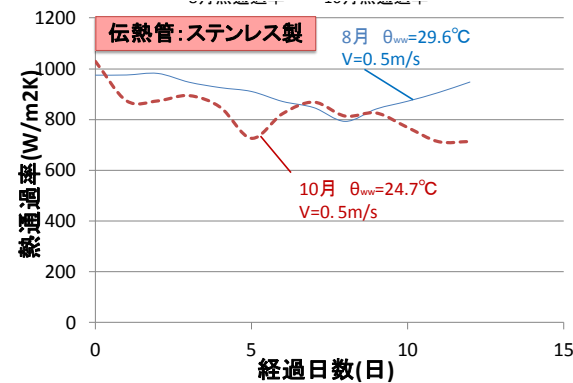


図9 熱通過率の経時変化  
(測定日: 2013/8~2013/10, 下水温度: 24.7~29.6°C)

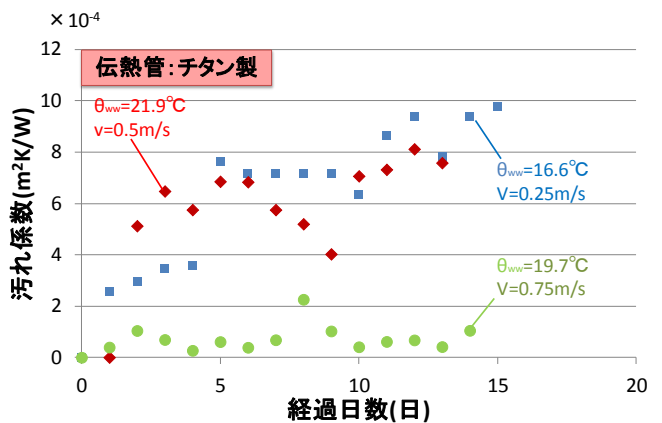


図10 汚れ係数の経時変化  
(測定日: 2012/11~2013/1, 下水温度: 16.6~21.9°C)

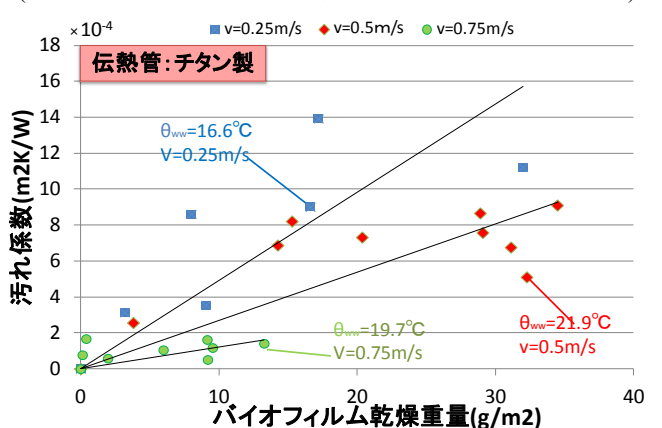


図11 汚れ係数と乾燥重量の関係  
(測定日: 2012/11~2013/1, 下水温度: 16.6~21.9°C)

$R$ : 汚れ係数( $m^2 k/W$ )、 $x$ : 経過日数(日)、 $k$ : 汚れの増殖係数(1/日)、 $r$ : 安定した汚れ係数( $m^2 k/W$ )である。この式において、 $k$ は下水温度 $\theta_{ww}$ の関数として表すこととし式3で与える。ただし、 $k_{20}$ は $\theta_{ww}=20^\circ C$ の時の増殖係数(1/日)、 $\alpha$ は温度係数(-)、 $\theta_{ww}$ は下水温度( $^\circ C$ )である。 $r$ は下水流速 $v(m/s)$ により決まる係数とする。北富らは、 $r$ は下水流速のみで関係があると決定し、一次式として表したが、流速が大きいときに汚れ係数が負の値をとる問題点がある。

### 3.4 モデル式の拡張

平衡時の汚れ係数は下水流速と下水温度に影響すると仮定して式4に示す指数関数で拡張する。汚れ係数 $r$ は図12と図13の実測値から求め、モデルパラメータ $a, b, c$ の同定を行った。

$$r = (a + b\theta_{ww})e^{-cv} \quad \text{式4}$$

$r$ は平衡時の汚れ係数、 $\theta_{ww}$ は下水温度( $^\circ C$ )、 $v$ は下水流速( $m/s$ )、 $a, b, c$ は定数である。

実測値よりパラメータ $a, b, c$ を同定して求めるとそれぞれ31.8, -0.84, 2.2になり、汚れ係数の式5に示される。

$$r = (31.8 - 0.84\theta_{ww})e^{-2.2v} \quad \text{式5}$$

表2に汚れ係数の実測値と式5のモデルにより算出した汚れ係数を示す。

表2 汚れ係数の実測値とモデルの比較

下水流速(m/s)	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75
下水温度( $^\circ C$ )	16.6	21.9	27.4	29.6	24.9	19.7
実験値( $m^2 K/W$ )	9.8	7.5	2.2	4.1	1.5	1.0
モデル( $m^2 K/W$ )	10.3	4.5	2.3	3.6	2.0	2.9

北富らのモデルは秋・冬季(下水温度 $16.6^\circ C \sim 21.9^\circ C$ )の実験データを用いて作成されており、下水温度が高いほど汚れ係数やバイオフィルム重量が増加する特性が表されている。一方、本研究において実験を継続した結果、図14に示すように、 $21.9^\circ C$ (北富らが使用)に加えて、夏季(下水温度 $21.9^\circ C \sim 29.6^\circ C$ )の実験結果を得た。図14では、北富らのモデルとは逆に、下水温度が高まるにつれて、汚れ係数が低下する傾向が発見された。そこで、モデルを夏季の下水温度にも適用できるように拡張を試みる。

汚れ係数と温度の相関が正から負に遷移する温度を $\theta_{tr}$ とし、次のようにモデル式を拡張する。

$\theta_{ww} < \theta_{tr}$ の時、

$$k = k_{\theta_r} \alpha_1^{\theta_{ww} - \theta_r} \quad \text{式6}$$

$\theta_{ww} \geq \theta_{tr}$ の時、

$$k = k_{\theta_r} \alpha_2^{-(\theta_{ww} - \theta_r)} \quad \text{式7}$$

また式6、式7は次のように書き直すことができる。

$\theta_{ww} < \theta_{tr}$ の時、

$$\log_e k = \log_e k_{\theta_r} + (\theta_{ww} - \theta_r) \log_e \alpha_1 \quad \text{式8}$$

$\theta_{ww} \geq \theta_{tr}$ の時、

$$\log_e k = \log_e k_{\theta_r} - (\theta_{ww} - \theta_r) \log_e \alpha_2 \quad \text{式9}$$

図12と図13の実験値に対して、式2を適用し最小二乗法により $k$ を決定し、 $k$ と下水温度 $\theta_{ww}$ の関係として整理すると図15が得られる。図15に示す近似直線①と②

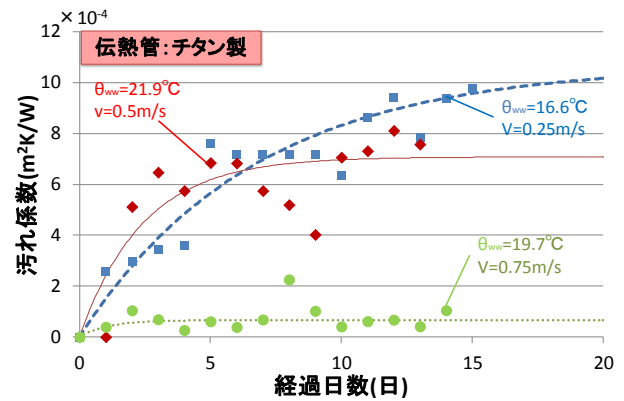


図12 汚れ係数実験値とモデル値  
(測定日: 2012/11~2013/1, 下水温度:  $16.6 \sim 21.9^\circ C$ )

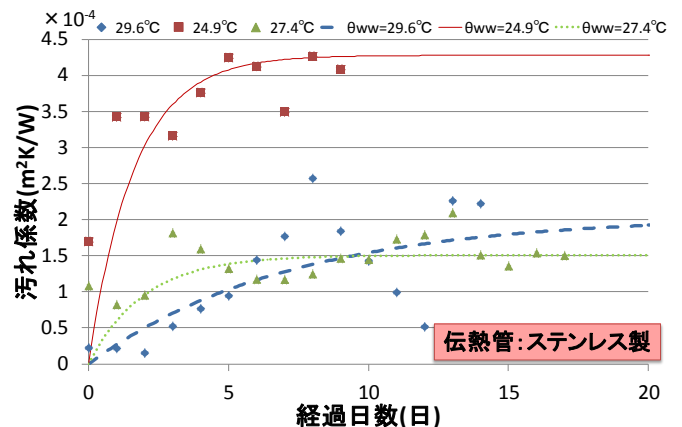


図13 下水温度と平衡時汚れ係数

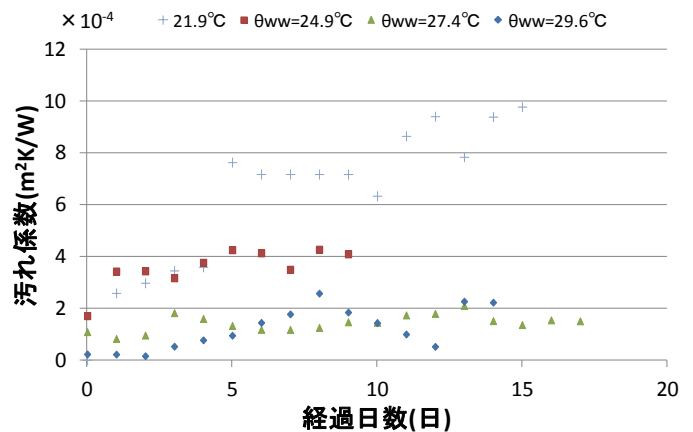


図14 下水温度による汚れ係数の変化

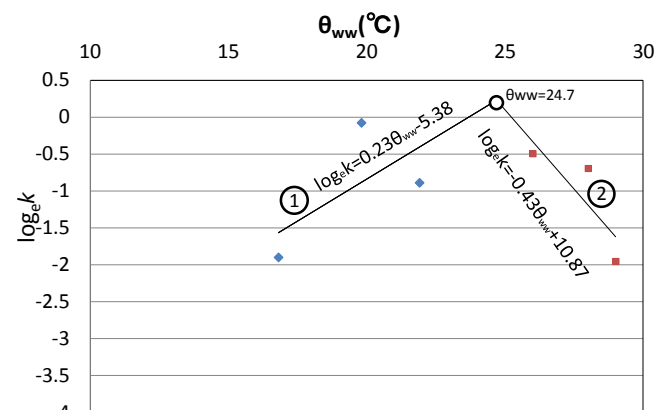


図15  $\log_e k$  と  $\theta_{ww}$  の関係

は、それぞれ式8と式9に対応するので、その切片と傾きからモデルパラメータである $k_{\theta_{tr}}$ と $\alpha_1, \alpha_2$ が決定され、式10と式11が得られる。

下水温度が24.7°Cより低い時

$$k=1.2 \times 1.25^{(\theta_{ww}-24.7)} \quad \text{式10}$$

下水温度が24.7°Cより高い時

$$k=1.2 \times 1.54^{(24.7-\theta_{ww})} \quad \text{式11}$$

本項で作成されたモデルを実験値と照合すると図16、図17となり、秋・冬・夏季(下水温度16.6°C~29.6°C)に渡る温度範囲、0.25m/s~0.75m/sの下水流速範囲の実験値について、汚れ係数に対する下水温度・流速の影響を説明するモデル式が作成された。ただし、本研究の範囲では、モデル式およびモデルパラメータの妥当性を議論するには、実験データが不足しており、今後実験結果を蓄積した後に検証が必要である。

#### 4 二重管熱交換器に対するモデルの提供

本章で作成した汚れ係数のモデル式が二重管熱交換器に適用出来るか検討を行った。

##### 4.1 実験設備と概要

二重管熱交換器は管内に下水、外側に冷却水が流れているタイプである。材料はステンレスで外管の外径は60.5mm、壁の厚さは2mm、内管の外径は48.6mm、壁の厚さは3.5mmである。本実験では下水側出入口温度、冷却水側出入口温度を測定するために、シース型熱電対を設置して1分間隔で測定を行った。図18と図19に二重管熱交換器構造図と実験設備概要図を示す。

##### 4.2 実験スケジュールと条件

本実験では下水流速3パターン(0.5m/s, 1m/s, 1.5m/s)で、熱交換器性能把握実験を行い、汚れ係数を算出して性能評価を行った。条件として熱交換器流量は29L/min、熱交換器入口温度は5°C、スクリーンは通してない未処理下水を使用して実験を行った。表3に実験スケジュールと条件を示す。

表3 実験スケジュールと条件

種類	二重管熱交換器		
	下水流量(L/min)	41	82
下水流速(m/s)	0.5	1	1.5
実験開始時間	6月3日	7月11日	7月4日
実験終了時間	6月17日	7月25日	7月11日
冷却水流量(L/min)	29		
冷却水流速(m/s)	0.75		

##### 4.3 モデル式への応用

図20に二重管熱交換器実験で下水流速と平衡時汚れ係数の変化を示す。図20より各流速で測定データは下水温度はほぼ一定の条件下で行った。下水流速が速くなると汚れ係数の平衡時の値が小さい。また、流速1.5m/s

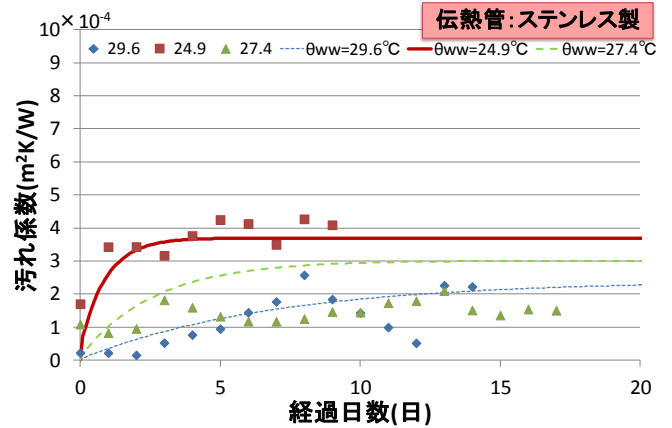


図16 夏季における汚れ係数実験値とモデル値 (測定日: 2013/8~2013/10, 下水温度: 24.7~29.6°C)

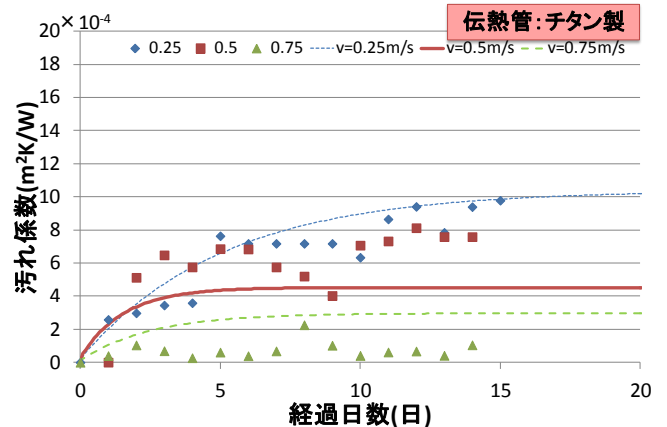


図17 秋・冬季における汚れ係数実験値とモデル値 (測定日: 2012/11~2013/1, 下水温度: 16.6~21.9°C)

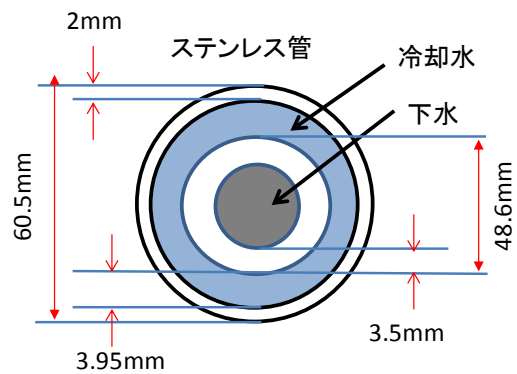


図18 二重管熱交換器構造図

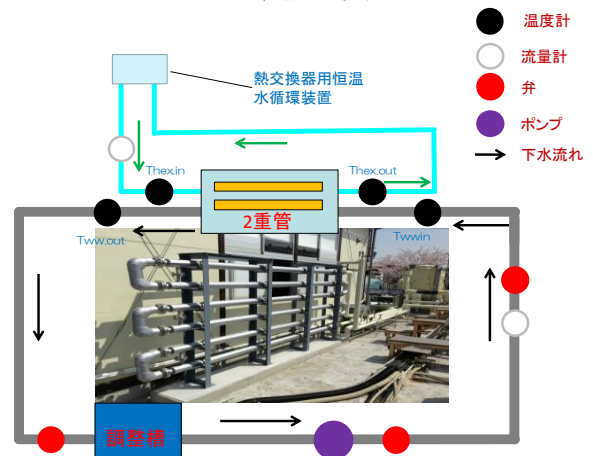


図19 二重管熱交換器実験設備概略図

では平衡時汚れ係数の値が小さいため、汚れにくいことが分かった。

図 20 から二重管の各流速での汚れ係数の実験値を用いて伝熱管熱交換器試験により作成した汚れ係数のモデル式(式 5,式 11)に代入すると式 12 と式 13 になる。

$$r = (31.8 - 0.6\theta_{ww})e^{-1.2v} \quad \text{式 12}$$

$$k = 0.42 \times 2.13^{(24.7 - \theta_{ww})} \quad \text{式 13}$$

式 12,式 13により算出した汚れ係数の値と実験値と照合すると図 21 となる。図 21 より実験値と算出した汚れ係数の値は合っていない。本研究の範囲では、モデル式およびモデルパラメータの妥当性を議論するには、実験データが不足しており、今後実験結果を蓄積した後に検証が必要である。

## 5 まとめ

- (1) 伝熱管熱交換器実験と二重管熱交換器の実験を通じて下水流速が速くなると汚れが付着しにくく、平衡時になる時間が短いことが分かった。
- (2) チタンとステンレスに付着実験より時間経過に伴うバイオフィーム重量変化は少なく、材料による違いは現れてなかった。また、下水流速 0.5m/s と 0.75m/s では清浄時の熱通過率の値は約 1000W/m<sup>2</sup>K になっているに対して流速 0.25m/s では 800 W/m<sup>2</sup>K になっていた。
- (3) 伝熱管熱交換器実験では下水流速 0.75m/s、二重管熱交換器実験では下水流速 1.5m/s を超えたら汚れ係数の経時的増加が起こらないことが示唆された。
- (4) 北富らが提案したバイオフィーム重量成長モデルから実験データを元に下水流速と下水温度の範囲を広げ、汚れ係数のモデル式を作成した。
- (5) 作成したモデル式で算出した汚れ係数は下水温度は 15°C~24.7°C 間では温度が高いほど汚れが付着しやすく、下水温度が 24.7°C~30°C の間では逆に温度が高くなると汚れが付着しにくい事が分かった。
- (6) 作成した汚れ係数のモデル式を二重管熱交換器に適用すると、下水温度が 24.7°C~30°C の間では伝熱管と同様の結果が再現出来た。

## 6 今後の課題

- (1) 本研究では下水流速と下水温度を考慮して汚れ係数のモデル式を作成したが、下水水質については考慮してないため、今後は水質を制御できるよう、人工下水設備を作成し、バイオフィーム付着と水質の関係を考慮したモデル式を作成する必要がある。

### 【参考文献】

- [1] 河合 弘樹 他、下水管路を活用した下水熱利用・熱融通システムの研究(第 1 報)下水管路における下水流量・水温実測について、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2011.9.14 ~16 (名古屋)、p2329-p2332
- [2] 北富 正晃 他、下水熱回収用熱交換器の性能に及ぼすバイオフィーム形成の影響、2013 年大阪市立大学 卒業論文
- [3] 崔 林日 他、下水熱回収熱交換器の熱通過率に関する実験(第 2 報)下水熱回収熱交換器の汚れに関する基礎的検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2013、1-58[4]
- [4] 李 鑫、下水熱ヒートポンプシステムにおける熱交換器内汚濁の成長特性研究 中国ハルビン工業大学 工学修士学位論文、2007
- [5] バイオフィーム本態に迫るには配管技術 小特集 バイオフィーム 2004 年 7 月 1 日発行

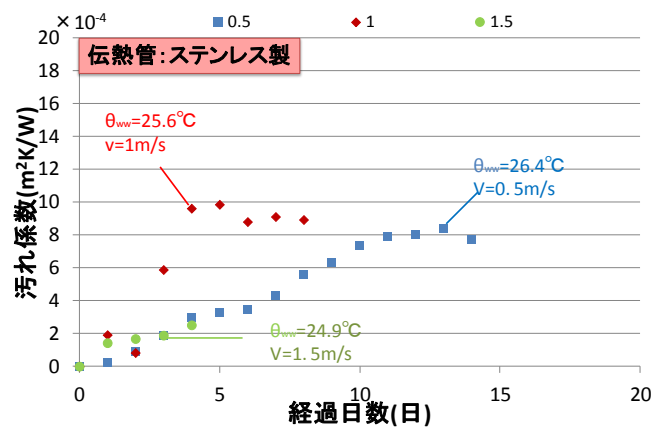


図 20 下水流速と平衡時汚れ係数

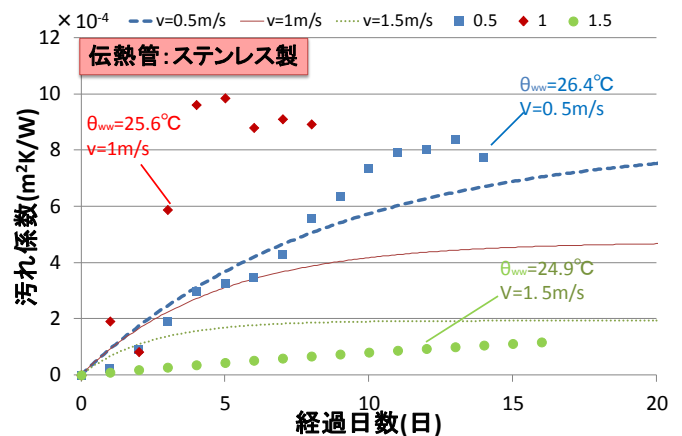


図 21 二重管における汚れ係数実験値とモデル値

### 補足説明 1 熱通過率と汚れ係数

$$\Delta\theta_m = (\theta_{HEX.out} - \theta_{HEX.in}) / \ln\left(\frac{\theta_{ww} - \theta_{HEX.out}}{\theta_{ww} - \theta_{HEX.in}}\right) \quad \text{式 14}$$

$$K = \frac{Gc(\theta_{HEX.in} - \theta_{HEX.out})}{\Delta\theta_m A} \quad \text{式 15}$$

$$r_f = \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_c} \quad \text{式 16}$$

K: 熱通過率(W/m<sup>2</sup>K) Δθ<sub>m</sub>: 対数平均温度差(°C)

A: 伝熱面積 (m<sup>2</sup>) G: 冷却水の流量(kg/s)

r<sub>f</sub>: 汚れ係数 (m<sup>2</sup>K/W)

θ<sub>HEX.in</sub>, θ<sub>HEX.out</sub>: 冷却水の熱交換器入り口温度(°C)

K<sub>c</sub>: 清浄時の熱通過率(W/m<sup>2</sup>K)

K<sub>f</sub>: 汚れ時の熱通過率 (W/m<sup>2</sup>K)

### 補足説明 2 北富らのバイオフィーム乾燥重量モデル

$$W = r_w(1 - e^{-k_w x}) \quad \text{式 17}$$

$$k_w = 0.107 \times 1.34^{\theta_{ww} - 20} \quad \text{式 18}$$

$$r_w = -70.5v + 70.6 \quad \text{式 19}$$

w: バイオフィーム乾燥重量(g/m<sup>2</sup>)

k<sub>w</sub>: 増殖係数(g/m<sup>2</sup>日)

r<sub>w</sub>: 平衡時バイオフィーム乾燥重量(g/m<sup>2</sup>)

### 【あとがき】

この成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。

### 【謝辞】

本研究を進めるにあたりご協力賜った大阪市建設局下水道河川部の皆様に感謝の意を表す。

1.汚れ係数の予測式(図 17, 20, 21)について、特に赤が外れているが要因に何かあるか?雨が降るとどのような結果に影響するのか?(貫上先生)

回答：図 17 に対しては下水流速 3 パターン、下水温度 3 パターンで実験を行い、その実験値から汚れ係数のモデル式を作成した。そのため、限られた実験で一たよりモデル式を作詞したため、モデル式の値と実測値は少し外れている。それは今後実験データを蓄積によってモデル式の精度を高める必要がある。

図 21 に対して下水流速 1m/s の時外れている原因は実験する際に雨が降っていたためだと考える。雨が降るとバイオフィームは付着しにくいと思うが、本実験ではスクリーンを通過していない下水を使用したため、雨が降る時ゴミが熱交換器表面に付着してしまい、汚れ係数の値が大きくなっている可能性がある。

2.20 日で汚れ係数が安定するのであれば、メンテナンスをしなくていいのでは?汚れ係数が一定値以上でメンテナンスを行うなどの基準はあるのか?メンテナンスの周期はあるのか?瀧澤先生)

回答：20 日で汚れ係数が安定しても熱通過率の値が初期状態に比べて極めて小さいので、洗浄をする必要はある。現在は汚れ係数が一定の値以上で洗浄を行わなければならない基準はないが、本実験では各流速ごとに熱通過率の低下率を算出し洗浄周期を提案した。表 1 に各流速での洗浄周期と低下率の関係を示す。表 1 より低下率 10%維持するとしたら下水流速 0.25m/s と 0.5m/s では毎日洗浄を行わなければならない。しかし、下水流速 0.75m/s では実験中ずっと 10%守っているので洗浄する必要がない。

3.下水の流速が上がると熱交換が小さくな

表 1 各流速での洗浄周期と低下率の関係

流速(m/s)	10%維持	20%維持	30%維持	40%維持
0.25	毎日	3日毎	5日毎	10日毎
0.5	毎日	毎日	毎日	9日毎
0.75	実験中 10%維持出来る			

るのでは?最適な流速があるのではないか?(貫上先生)

回答：本実験では下水流量が熱交換器に流れる冷却水流量より多すぎため、下水流速が上がる熱交換器の熱交換量も高くなるはずである。しかし、下水の流速が早過ぎたら熱交換器表面が研磨されすぎ壊れる恐れがあるので、設計上では最適な流速あるはずである。本研究では最適な下水流速を出すことまでは検討出来なかった。

4.表面温度の検討をしていない理由は?熱交換器によって違う指標で評価しないといけないのか?(鍋島先生)

回答：実験を開始してから熱交換器表面に汚れが付着し、時間経過によって熱交換器表面温度が徐々に低下している。表 2 に各流速での下水温度と表面温度の比較を示す。表 2 より各流速で初期状態では下水温度と壁面温度差は 2°C ぐらいが、実験終了時は下水温度と表面温度さが 4°C から 5°C 間にあることがわかる。そのため、表面温度を使用するとしたらどんな状態を基準にするかまだ不明なので、今度は下水温度を使ってモデル式の提案を行った。

表 2 各流速での下水温度と表面温度の関係

流速(m/s)	初期下水温度(°C)	初期表面温度(°C)	実験終了時下水温度(°C)	実験終了時表面温度(°C)
0.25	16.5	14.3	16.9	12.7
0.5	20.7	17.1	21.7	14.8
0.75	19.5	17.3	19.1	16.8