

よる影響が大きくなりせん断応力は増加傾向がみられた。活性汚泥には MLSS という活性汚泥粒子（浮遊物質）と粘性が存在している。この活性汚泥粒子と粘性の影響によりせん断応力の値が水道水と比較しても非常に大きい値をとっている。これらの影響により、MLSS3767(mg/L) ,MLSS7500(mg/L)を比較して MLSS7500(mg/L)の方が全体的に大きな値を示した。

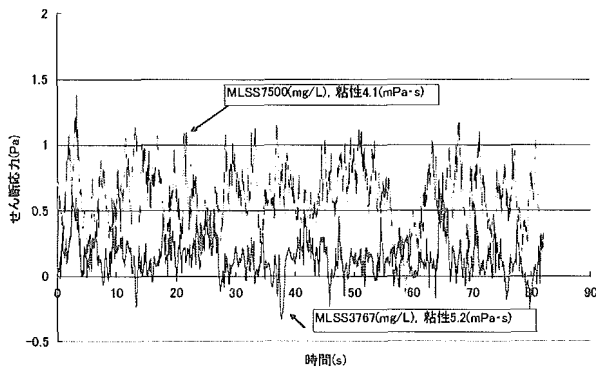


図-13 せん断応力経時変化図(0.911cm³cm⁻²s⁻¹)

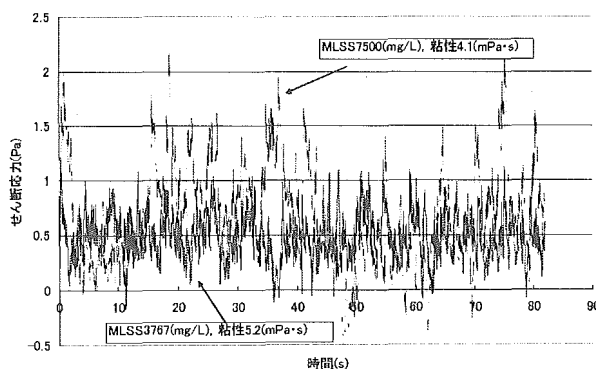


図-14 せん断応力経時変化図(2.47cm³cm⁻²s⁻¹)

図-15 に MLSS3767(mg/L) , MLSS7500(mg/L) , MLSS10835(mg/L) , 水道水におけるせん断応力と空気流速の関係図を、図-16 に空気流速と標準偏差の関係図を示す。全体の傾向として空気流速が増加すると、せん断応力が増加傾向を示していることが分かる。これは水道水と同様に空気流速が増加すると、水槽内の上昇流速が早くなること、気泡数の増大、径の増加による、せん断応力の増加によるものだと考えられる。また MLSS(活性汚泥粒子量) , 粘性がせん断応力に影響を及ぼす事も確認された。それぞれを比較すると、MLSS , 粘性が増加するとせん断応力が増加している事が分かる。また、MLSS3767(mg/L)と

MLSS7500(mg/L)を比較すると MLSS7500(mg/L)は粘性が 1.1(mPa·s)小さいにも関わらずせん断応力の値は大きな値をとっている。これは、活性汚泥粒子が壁面単位面積に接触する頻度の増加による影響が大きいためであると考えられる。その事から粘性に比べ MLSSの方がせん断応力に与える影響は大きいと考えられる。また、水道水に比較して標準偏差の値は大きい値をとった。粒子による影響、粘性による影響を受けていると考えられる。なお、空気流速、2.47(cm³cm⁻²s⁻¹)以上でせん断応力の値が減少してしまっているのは、水面からの反射波の影響を受けていると考えられ、せん断応力センサー付近に上昇流とは逆向きの流れが影響してしまうことが確認でき、装置内の循環が正しく行われていないと思われる様子が観察された。このことからセンサー付近の気泡流が均一ではなかったため、上昇傾向が確認できなかったのではないかと考えた。

そこで、粘性剤を用いて人工的に粘性を変化させたものと、活性汚泥粒子を見立てた試験用粒子を用いて、それぞれの要素がどの程度せん断応力、標準偏差に影響を及ぼすか実験を行った。

図-17、図-18 に空気流速、0.521(cm³cm⁻²s⁻¹)、2.08(cm³cm⁻²s⁻¹)の MLSS とせん断応力の関係図を示す。MLSS 0(mg/l)上の点は、水道水における結果である。MLSS 濃度が増加するにつれて、せん断応力は増加傾向を示している。MLSS が高くなるということは、活性汚泥中の浮遊汚泥粒子量が多いことを意味している。存在する活性汚泥粒子量が多くなったことで、壁面単位面積に接触する粒子の頻度が増加し、発生するせん断応力も増加したのであると考えられる。

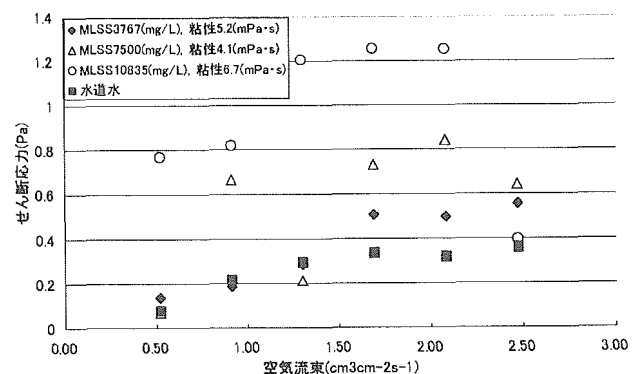


図-15 せん断応力と空気流速の関係

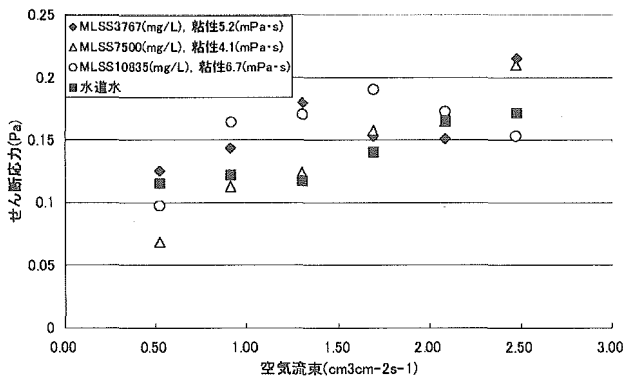


図-16 空気流速と標準偏差の関係

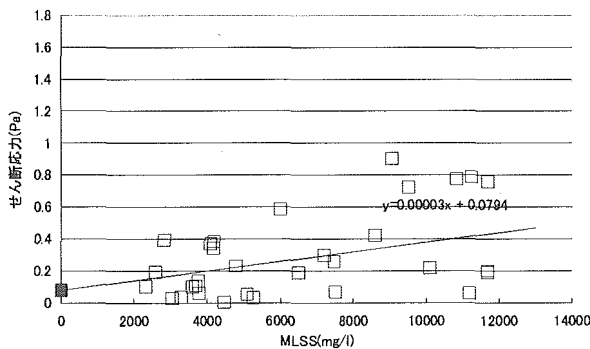


図-17 MLSS とせん断応力の関係 (0.521cm³cm⁻²sec⁻¹)

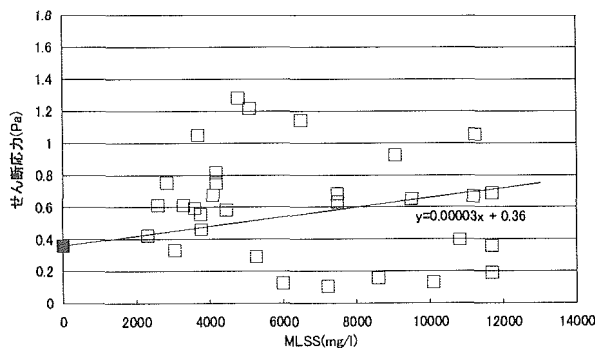


図-18 MLSS とせん断応力の関係 (2.08cm³cm⁻²sec⁻¹)

3.3 粘性剤を用いた気泡流のせん断応力実験

図-19 に粘性 4.8 (mPa·s), 図-20 に粘性 16.2 (mPa·s) における空気流速 1.30 (cm³cm⁻²sec⁻¹) における気泡形状を示す。全体の傾向として水道水に比べ気泡径が大きくなり、気泡数は減少した。また、粘性の抗力により 5mm 程度までの気泡が球状の形を留めているものも見られた。16.2 (mPa·s) では 4.8 (mPa·s) に比べ気泡が縦に伸び砲弾状になるものが少なく、球状に近い形状を留めているものが多くなった。また、球状の小気泡もみられなくなった。

図-21 に空気流速と気泡の平均径の関係図を示す。粘性 4.8 (mPa·s) と粘性 8.2 (mPa·s) は空気流速 0.911 (cm³cm⁻²sec⁻¹) を境に減少傾向を示した。これは空気流速の増大による球状の小気泡の存在の増加による影響が大きい。粘性 16.2 (mPa·s) においては低空気流速では球状の小気泡がみられたが、それ以外ではほぼ観測されなかった。そのため各気泡径が大きくなり、平均気泡径は増大していった。粘性による変形を阻止する抗力により、粘性が大きくなるほど気泡は変形しにくくなるためである^{14), 15), 16)}。

D 考察

図-22 に粘性 2.8 (mPa·s), 13.7 (mPa·s), 15.5 (mPa·s) それぞれの上昇流速と空気流速の関係図を示す。粘性 2.8 (mPa·s) は空気流速 0.911 (cm³cm⁻²s⁻¹) を境に上昇傾向が大きくなった。上昇挙動は水道水に極めて近かった。粘性 13.7 (mPa·s), 15.5 (mPa·s) は、空気流速 0.521 (cm³cm⁻²s⁻¹) から空気流速 2.47 (cm³cm⁻²s⁻¹) まで上昇流速が一定の割合で増加していった。気泡径が大きくなるにつれ上昇挙動が不安定になり、横ぶれが激しくなっていくが、図-22 に示すように流れの遅い壁面部から流れの速いコア部への遷移流が多く見られ、この影響が非常に大きかったためこのような上昇傾向になったと考えられる。また、高粘性になるほど流れの遅い壁面部から流れの速いコア部への遷移流がみられコア部の上昇流速はより早くなる傾向がみられた。

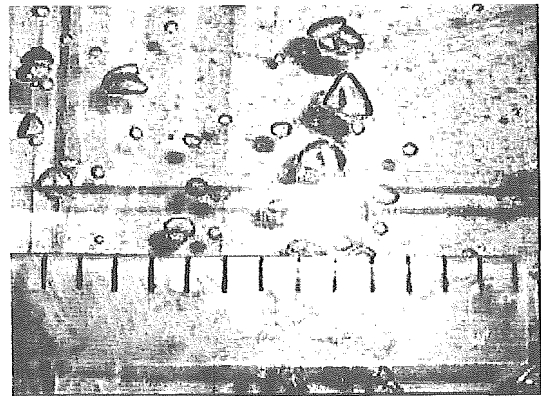


図-19 気泡形状 (4.8mPa·s, 1.30cm³cm⁻²s⁻¹)

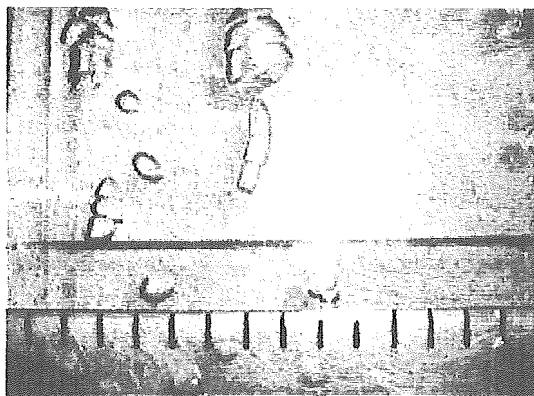


図-20 気泡形状 ($16.2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $1.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

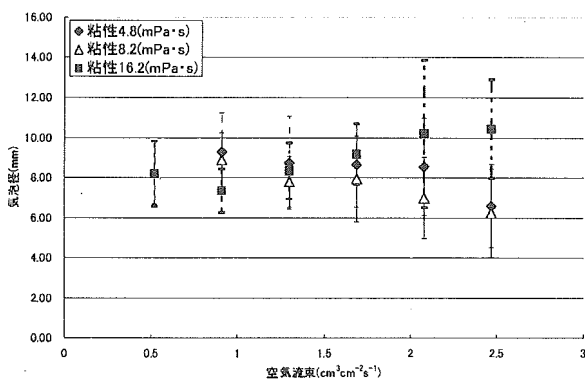


図-21 空気流束と気泡径の関係

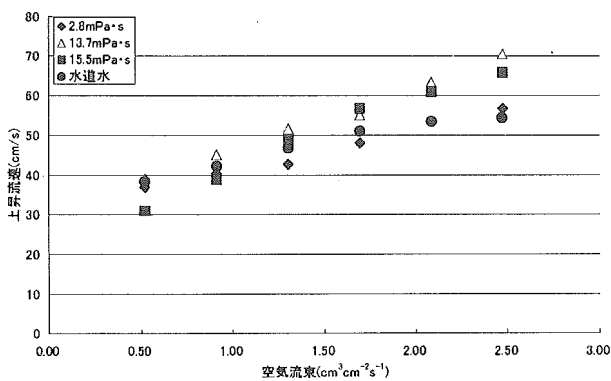


図-22 上昇流速と空気流束の関係

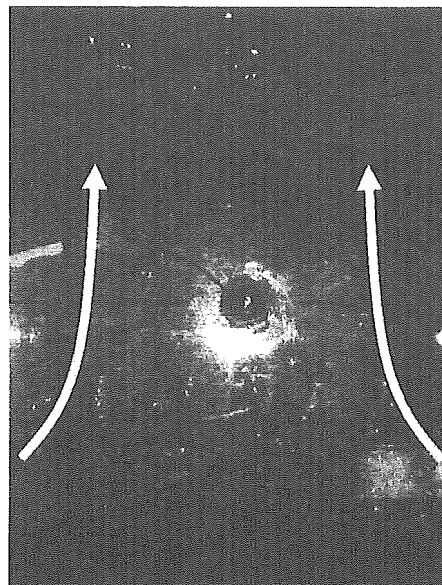


図-23 上昇経路

($15.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $2.47 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

図-24, 図-25 にそれぞれ空気流束 $0.521 \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$, $2.08 \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$ の時のせん断応力経時変化図を示す. それぞれの経時変化の特徴として, 水道水同様気泡通過時の特徴はせん断応力が一度下向きに働いてからピークに達する傾向があり, 空気流束の増大による気泡数の増大, 流れによる影響が大きくなりせん断応力は増加傾向がみられた. また, センサー付近に気泡が存在していない時間も多く, 存在している時とのせん断応力の差が大きく見られた. この事が標準偏差が非常に大きくなる一因であると考えた.

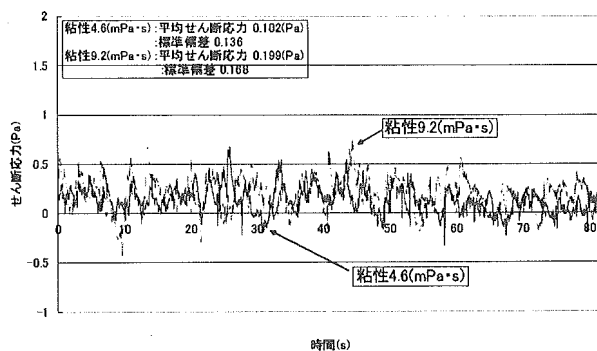


図-24 せん断応力経時変化図 ($0.521 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

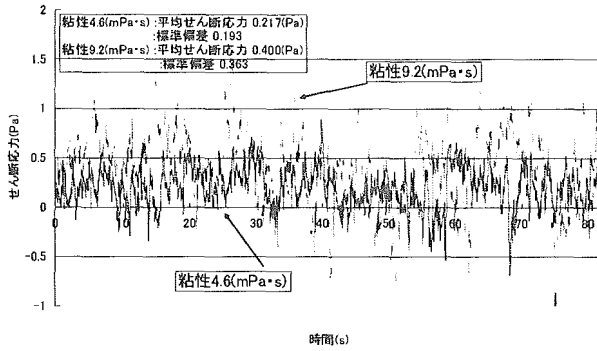


図-25 せん断応力経時変化図 ($2.08\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

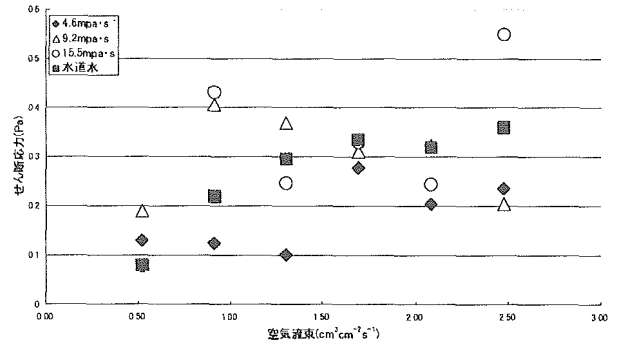


図-26 空気流速とせん断応力の関係

図-26 に空気流速とせん断応力の関係図を示す。空気流速の増大に伴いせん断応力は増加傾向を示した。空気流速が大きくなると水槽内の上昇流速が速くなるため、流れが及ぼすせん断応力は増加する。また、高粘性では流れの遅い壁面部から流れの速いコア部への遷移流が見られ、この事による流れが及ぼすせん断応力が増加したことが考えられる。しかし、水道水と比較してもせん断応力の増加分はそれほど大きくはなかった。水道水に比べ上昇流速が大きいいため流れが及ぼすせん断応力は増加するが、気泡数が少ないため、時間平均で見ると気泡が及ぼすせん断応力は小さい。この事から流れによるせん断応力は増加するが、気泡が及ぼすせん断応力の影響が小さくなるため、以下のような結果になったと考えた。

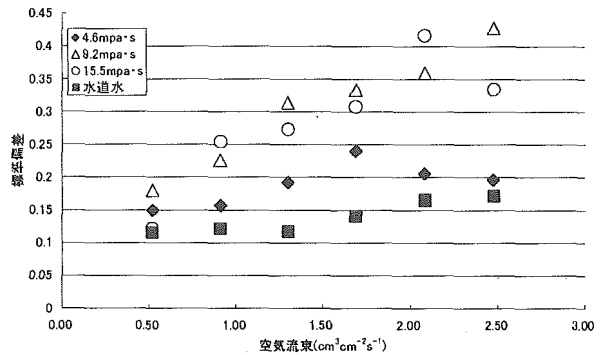


図-27 空気流速と標準偏差の関係

図-27 に空気流速と標準偏差の関係図を示す。全体的な傾向として空気流速の増大により標準偏差の値は増加し、水道水に比べ標準偏差の値は非常に大きくなった。センサー付近に気泡が存在していない時間が水道水に比べ多く、存在している時の極大値が大きい事からせん断応力の差が大きく見られた。この事が、標準偏差が増大した理由であると考えた。

このことから、粘性の影響は、標準偏差を増大させるが、せん断応力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.4 試験用粒子を用いた気泡流のせん断応力実験

図-28, 図-29 に試験用粒子 2000mg/L における空気流速 $0.52\text{ (cm}^3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$, $2.47\text{ (cm}^3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$ における気泡形状を示す。楕円状の小気泡 ($4\text{mm}-6\text{mm}$) が大部分を占め、空気流速が増加しても気泡数の増大、楕円状の気泡が横に大きくなる程度であった。水道水に比べ、気泡径も若干大きくなる程度で挙動の変化はほぼみられなかった。

図-30 に気泡径と空気流速の関係図を示す。空気流速の増大と共に気泡径は増加傾向を示したが、 2000mg/L と 3000mg/L 共にほぼ同じ気泡径、挙動を示したため、粒子量の違いによる気泡径の変化は見られなかった。これは 2000mg/L の時点で水槽内に粒子が十分に満たされていたためであると考えられる。また、平均気泡径は水道水に比べて非常に小さくなった。これは粒子が気泡の合体や成長を妨げたため、写真に示すように水槽内の気泡が楕円状の小気泡で占められる結果になったと考えられる¹⁰⁾。

図-31 に粘性 2.8 (mPa・s), 13.7 (mPa・s), 15.5 (mPa・s) それぞれの上昇流速と空気流束の関係図を示す。空気流束 0.52 (cm³cm⁻²s⁻¹) から空気流束 1.69 (cm³cm⁻²s⁻¹) までは上昇速度が大きく増加し、空気流束 1.69 (cm³cm⁻²s⁻¹)-2.08 (cm³cm⁻²s⁻¹) 辺りから上昇が緩やかなものとなった。これは、粒子が気泡の成長を妨げていることや、気泡数増大による気泡同士の衝突等による上昇の妨げが要因として考えられる。また水道水と比較しても、わずかに水道水の上昇速度が大きい程度で大差はみられなかった。

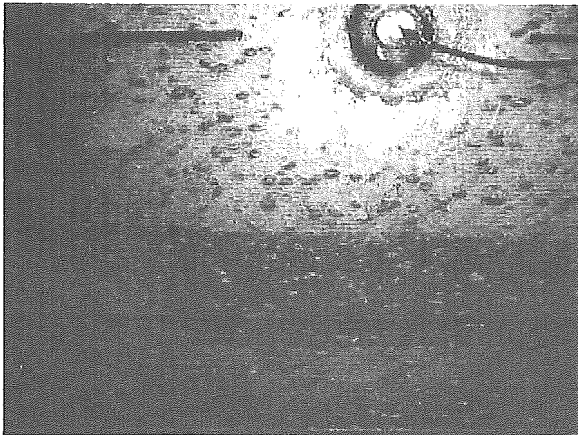


図-28 空気流束 0.52 cm³cm⁻²s⁻¹

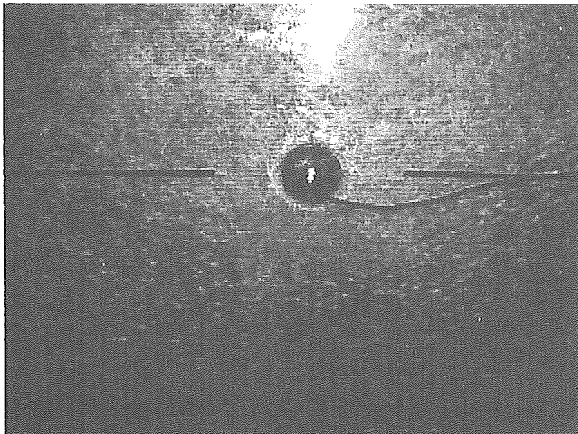


図-29 空気流束 2.47 cm³cm⁻²s⁻¹

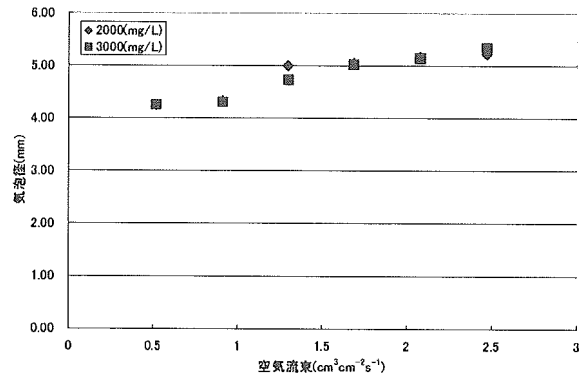


図-30 気泡径と空気流束の関係

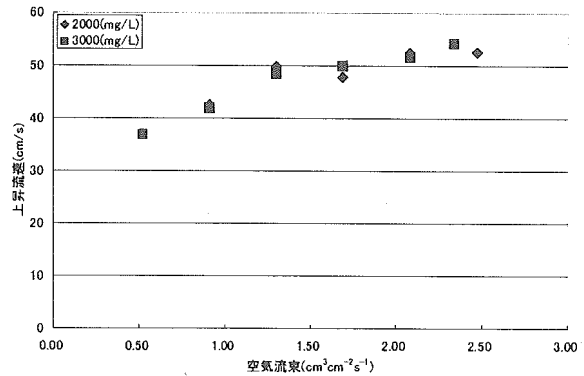


図-31 上昇流速と空気流束の関係

図-32, 図-33 にそれぞれ空気流束 0.521 (cm³cm⁻²s⁻¹), 1.69 (cm³cm⁻²s⁻¹) のせん断応力経時変化図を示す。粒子径が (100 μm-500 μm) と微小な球状なため、せん断応力センサー感受部に粒子が詰まり微細な変動に対しセンサーが応答しなくなってしまう事が多々見られ、ドリフト現象が頻繁に発生したため、測定前の静定状態と測定後の静定状態を測定し、補正を行った。水道水と比較してもせん断応力の値が非常に大きくなった。こ

図-34 に空気流束とせん断応力の関係図を示す。空気流速の増大に伴いせん断応力は増加傾向を示したが 1.69 (cm³cm⁻²s⁻¹), 2.08 (cm³cm⁻²s⁻¹) においてばらつきが見られた。空気流束が大きくなると水槽内の上昇流速が速くなるため、流れが及ぼすせん断応力は増加する。また、流れに乗って粒子がセンサーに及ぼすせん断応力は増加する。この事によりせん断応力が増加したことが考えられる。水道水と比較しても、上昇挙動, 上昇流束, 気泡形状がほぼ変わらない事から粒子が及ぼすせん断応力が非常に大きい

事が分かる。図-35 に空気流束と標準偏差の関係図を示す。全体の傾向として空気流束の増加に伴い標準偏差は増加傾向を示したが、水道水よりも若干大きい程度であった。その理由として、センサー付近に粒子が常に存在しているため、存在していない時とのせん断応力差が少ないため、標準偏差はあまり大きくはならなかった。その事から、粒子は標準偏差に及ぼす影響は小さいと考えられる。2000 (mg/L) の $2.08 (\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$, $2.47 (\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$ でのみ測定値が異常値をとってしまった。上述したようにせん断応力センサーの応答性の問題によるものである。

図-34 空気流束とせん断応力の関係

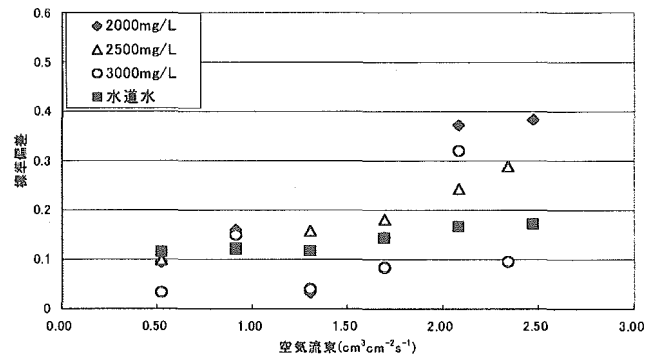


図-35 空気流束と標準偏差の関係

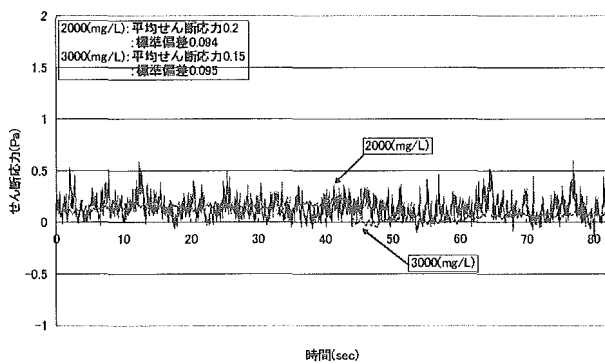


図-32 せん断応力経時変化 ($0.521\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

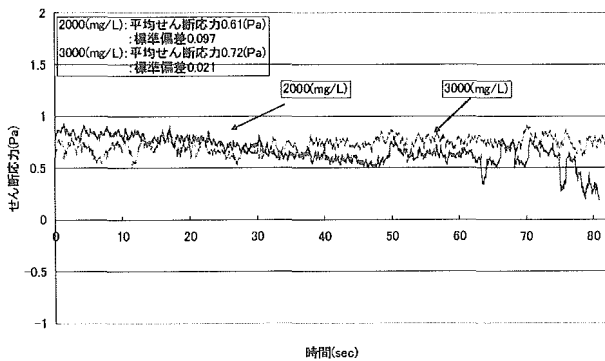
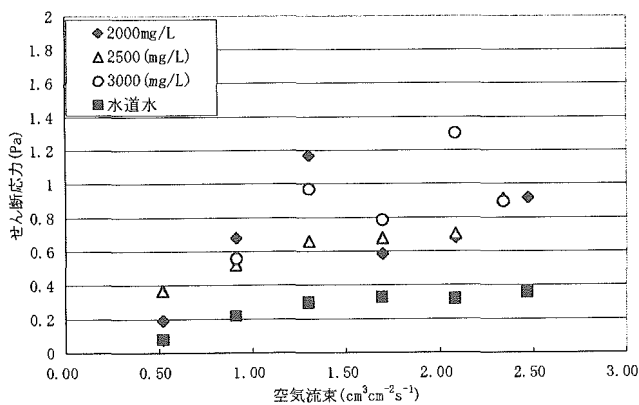


図-33 せん断応力経時変化 ($1.69\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)



E 結論

水道水、活性汚泥、粘性溶液、試験用粒子を用いた気泡流の実験からせん断応力、上昇挙動において以下の知見が得られた。

- 1) 気泡は気泡径が大きくなるにしたがい、球状型から楕円型そして砲弾型と変化した。高粘性になるほど気泡は球状を保ち、気泡径は増加した。粘性は気泡を成長させる大きな要因になる。また、粒子による影響により気泡の成長は阻害される。
- 2) 粘性による影響は上昇速度を増加させ、流れによるせん断応力の値を増加させる。
- 3) せん断応力の経時変化は波形状に変動し、上昇方向を正として、一度負の向きに力が作用してから正の向きにせん断応力が作用した。極大値では気泡が密な状態でセンサーを通過し、極小値では疎な状態でセンサーをすることによる影響による事が確認できた。
- 4) 空気流束の増大による気泡数の増大、流れによる影響が大きくなりせん断応力は増加傾向がみられた。
- 5) MLSS(活性汚泥粒子量)濃度、粘性が増加すると、せん断応力が増加傾向を示した。
- 6) 空気流束とせん断応力、 τ_{30} の関係から、気泡流において、粘性の影響は、標準偏差を増大させるが、せん断応力に及ぼす影響は小さい事が得られた。

れた。粒子の影響は、せん断応力を著しく増加させるが、標準偏差に及ぼす影響は小さいことが得られた。微細な粒子は壁面ごく近傍を流れる事から、このようにせん断応力を増加させる要因になっていると考えられる。

F 参考文献

- 1) Shapira, M and Haber, S., Low Reynolds Number Motion of a Droplet between Two Parallel Plates, *INT. J. Multiphase Flow*, 14, (1998), 483-506.
- 2) Harmathy, R. A. and W. R. Sears, *J. Fluids Mech.*, 3, 27, (1957)
- 3) Lawler, M. T. and Lu, P. C. (Zandi I. 編), *Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and its Application*, (1971), 39, Pergamon Press.
- 4) 竹村 文男・高木 周・松本 洋一郎, 壁面近傍における球形ガス気泡の上昇速度, *日本機械学会論文集 (B編)*, 66 巻, 648 号, (2000-8), 2087-2093.
- 5) 竹村 文男・高木 周・松本 洋一郎, 壁面近傍を上昇する球形ガス気泡に働く揚力, *日本機械学会論文集 (B編)*, 66 巻, 649 号, (2000-9), 2320-2326.
- 6) 竹村 文男・高木 周・松本 洋一郎, 壁面近傍を上昇する微小変形気泡に働く揚力, *日本機械学会論文集 (B編)*, 67 巻, 654 号, (2001-2), 60-65.
- 7) 佐藤 泰生・本田 達・世古口 言彦, 気ほう流の研究, *日本機械学界論文集*, 43 巻, 370 号, (1977), 2288-2296.
- 8) 只木 楨力・前田 四郎, 種々の静止液体中を上昇する単一気泡の形状および上昇速度について, 第 25 巻, 4 号, (1961), 254-264.
- 9) 世古口 言彦・佐藤 泰生・本田 達, 垂直上昇流における疎な気ほう群について, *日本機械学界論文集 (第 2 部)*, 40 巻, 333 号, (1974), 1395-1403.
- 10) 久保田 誠・明島 高司・白井 隆, 低粘度液中における単一気泡の挙動について, *化学工学*,

第 31 巻, 11 号, (1967), 1074-1080.

- 11) 統計のはなし, 大村 平, 日科技連編, (2002)
- 12) 膜分離活性汚泥法の技術評価に関する報告書, 日本下水道事業団, 2003 年
- 13) 流体の力学, 葛原道久, 朝倉書店(2001)
- 14) 気液二相流技術ハンドブック, 日本機械学会編, コロナ社, (1989).
- 15) 混相流体の力学, 日本流体力学学会, 朝倉書店, (1991)
- 16) 気液二相流, 赤川浩爾, コロナ社(1974)

G 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

Nagaoka, H., Nobusawa, Y: Prediction of Trans-membrane Pressure Increase in Membrane Bioreactor Using Extended Kalman Filter, IWA World Water Congress and Exhibition, marrakech, Technical Programm and Congress Library, 28494., 2004

Nagaoka, H., Nemoto, H: Influence of Extracellular Polymeric Substances on Nitrogen Removal in Intermittently-Aerated Membrane Bioreactor, IWA 4th Black Sea International Conference, Book of Proceedings, 327-336, 2004

Akoh, H, Sugiyama, S, Nagaoka, H.: Influence of EPS on permeability of nightsoil-treatment membrane bioreactor, IWA Water Environment-Membrane Technology, WEMT2004, P-4-7, 2004

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

流域における小規模分散型水供給システム導入の評価
 分担研究者 伊藤 禎彦 京都大学大学院工学研究科・教授

研究要旨

LCA 分析によって水供給システムのエネルギー消費量と CO₂ 排出量を算出し、小規模分散型の水供給システムの導入を検討する意義について評価した。まず、上水道システムでは、事業規模 5 万～10 万 m³/日に単位配水量あたりの環境負荷排出量が最小となる範囲が存在した。一方、下水道システムでは、規模が大きい方が単位処理量あたりの環境負荷排出量が小さかった。また、実際の例として滋賀県野洲川流域をとりあげ、上下水道システムのライフサイクル CO₂ 排出量およびライフサイクルエネルギー消費量を算出し特徴を把握した。

A. 研究目的¹⁾²⁾

ライフサイクルアセスメント(LCA)分析によって水供給システムを対象としてエネルギー消費量・CO₂ 排出量を算出し、現状における環境負荷排出量を定量的に把握する。これにより、流域において、小規模分散型の水供給システムの導入を検討する意義について評価することを目的とする。

特に、配水管または下水管渠の工事等では、多くの場合が管路の更新という形で行われ、廃棄・処分は建設段階に含まれてしまい、建設段階と廃棄・処分段階とを明確に分けることは難しい。また、浄水施設や下水処理場に関しても取り壊して撤去する例は少ないことから、ここでは廃棄段階と処分段階は除いた。

B. 研究方法

1. 対象範囲の設定

対象施設および評価範囲を図1に示す。対象施設は、上水道システムにおいては取・導水施設、浄水場、配水池、配水管とし、下水道システムにおいては管渠、処理場、ポンプ場とした。また、評価範囲としては建設段階と運転段階の2段階とした。

なお、廃棄・処分段階については、水道施設や下水道施設では、減・断水等の影響を最小限とするため、機能を維持させながら部分的な更新・改修等を繰り返し行う場合が多い。

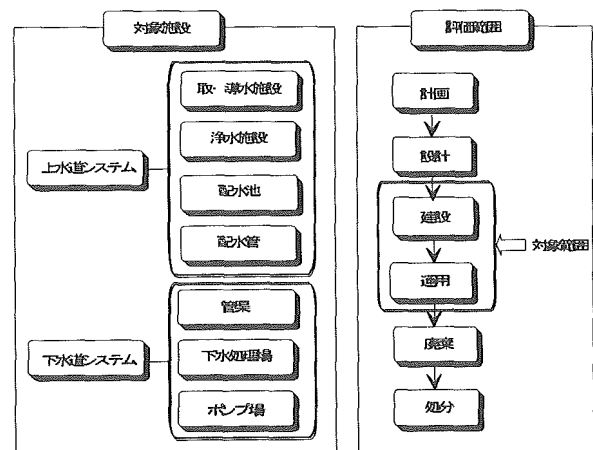


図1 対象施設および評価範囲

算出方法としては「積み上げ法」と「産業連関分析法」をあわせた方式を用いて、水供給システムにおける CO₂ 排出量とエネルギー消

費量を算出した。フローを図2に示す。

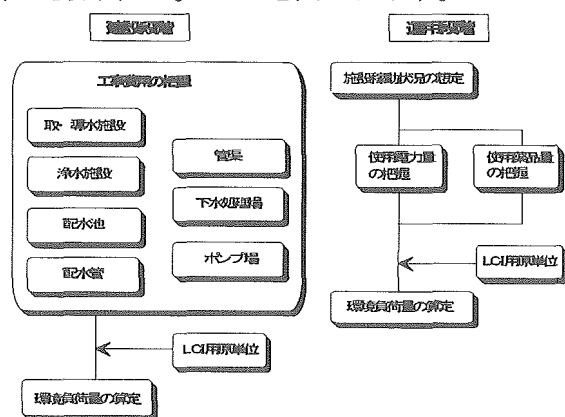


図2 環境負荷量算出フロー

建設段階(イニシャル)部分の環境負荷排出量、すなわち上水道施設や下水道施設の設備段階や設備設置などに費やされたエネルギー、CO₂の総量を「積み上げ法」により算出す

ることは困難なことから、浄水場の建設、管路の布設、設備の設置などに分け、表1の費用関数^{3) 4) 5)}を用いてそれぞれいくらの費用を要したかを計算した。そして、算出価格から表2に示したLCI原単位⁶⁾を用いてCO₂排出量またはエネルギー消費量へ変換した。

費用関数は建設工事費デフレーター⁷⁾を用いて1995年度価格に揃え、浄水場と配水池の費用関数を求める際には土木:設備=7:3という割合で、下水処理場とポンプ場の費用関数については土木:設備=1:1という割合で分割している。また、LCI原単位に関しては「産業連関分析法」の標準的な手法である(I-A)¹型の逆行列による計算結果を用いている。産業連関表としては1995年の統合表399部門を基本とした。

表1 費用関数

	対象施設	費用関数(95年度価格・百万円)
上水道	取導水施設(土木) ³⁾	$0.044 \times Q$
	取導水施設(設備) ³⁾	$0.0067 \times Q$
	浄水施設(土木) ⁴⁾	$73.9 \times (1.1 \times Q / 1000)^{0.915}$
	浄水施設(設備) ⁴⁾	$31.7 \times (1.1 \times Q / 1000)^{0.915}$
	配水池 ⁴⁾	$18.4 \times Q / 2000 + 32.8$
	配水管 ⁴⁾	$(7.79 \times 10^{-5}x^2 + 1.15 \times 10^{-1}x + 24.7) \times L(X)$
下水道	管渠 ⁴⁾	$(40 + 0.14x + 7.1 \times 10^{-5}x^2) \times L(X)$
	ポンプ場 ⁵⁾	$490 \times N$
	処理場 ⁴⁾	$588 \times (Q / 1000)^{0.719}$

Q:日最大配水量(m³/日) x:管径(mm) L(x):管渠延長(km) N:施設数

表2 LCI原単位⁶⁾(建設段階)

	部門	エネルギー消費	CO ₂ 排出
土木(上水道)	その他の土木建設	1.00TOE/百万円	1.05t-C/百万円
土木(下水道)	河川・下水道・その他の公共事業	0.914TOE/百万円	1.00t-C/百万円

設備	その他の一般産業機械及び装置	1.10TOE/百万円	0.98t-C/百万円
----	----------------	-------------	-------------

TOE=10⁷ kcal

表3 耐用年数

	対象施設	耐用年数
上水道 ⁸⁾	取導水施設(土木)	40年
	取導水施設(設備)	15年
	浄水施設(土木)	40年
	浄水施設(設備)	15年
	配水池	40年
	配水管	40年
下水道 ⁹⁾	管渠	50年
	ポンプ場(土木)	50年
	ポンプ場(設備)	15年
	処理場(土木)	50年
	処理場(設備)	15年

また、建設段階のCO₂排出量またはエネルギー消費量の算出の際には、耐用年数で除して1年間当たりの環境負荷量に換算した。耐用年数は表3のように定めた^{8) 9)}。

一方、運用段階(ランニング)部分では構成要素が比較的単純なので「積み上げ法」を用いた。電力、A重油、塩素、PAC、苛性ソーダ

を対象として、消費量にLCI原単位を乗じてCO₂排出量またはエネルギー消費量を算出することにした。環境負荷排出量への変換のために用いたLCI原単位を表4に示した。苛性ソーダのCO₂排出原単位は液体苛性ソーダの比重を1.25として変換した値を採用した。

表4 LCI原単位(運用段階)

	エネルギー消費	CO ₂ 排出
塩素	9.54 kcal/g ¹⁰⁾	299 kg-C/t ¹¹⁾
PAC	0.58 kcal/g ¹⁰⁾	299 kg-C/t ¹¹⁾
苛性ソーダ	7.23 kcal/g ¹⁰⁾	178 kg-C/t ¹¹⁾
A重油	9300 kcal/l ¹²⁾	0.736 kg-C/l ¹²⁾
電力	2250 kcal/kWh ¹²⁾	0.104 kg-C/kWh ¹²⁾

C. 研究結果および考察

事業規模別にCO₂排出量を算出した結果を述べる。上水道システムについては、水道統計¹³⁾の全データを事業計画 一日最大給

水量1万m³/日未満、1万~5万m³/日、5万~10万m³/日、10万~30万m³/日、30万m³/日以上5つの段階に分類し、CO₂排出量を算出した。下水道システムについても、下水道

統計¹⁴⁾の全データを日最大処理水量で1000m³/日未満、1000～5000m³/日、5000～1万m³/日、1万～5万m³/日、5万m³/日以上
の5段階に分類した。

1. CO₂ 排出量

(1) 上水道システム

・建設段階における CO₂ 排出量

事業規模と対象施設別に建設(イニシャル)段階におけるCO₂排出量を算出した結果を図3に示す。事業規模に関わらず、配水管の建設におけるCO₂排出量が大部分を占めることが分かる。また、取・導水システムを除く上水

道システムの対象施設において規模が大きくなるほどCO₂排出量が少なくなる傾向にある。特に、配水管の建設においては、規模が大きくなるほど配水管の建設によるCO₂排出量が少ない傾向が強く見られる。この理由を考えると、建設段階においては「産業連関分析法」を用いてCO₂排出量を算出していることから価格と費用は比例関係にあり、建設費が安くなればCO₂排出量が少なくなる。したがって、配水管の建設ではスケールメリットが働くことによって単位量あたりの建設費が安くなりCO₂排出量が少なくなると考えられる。

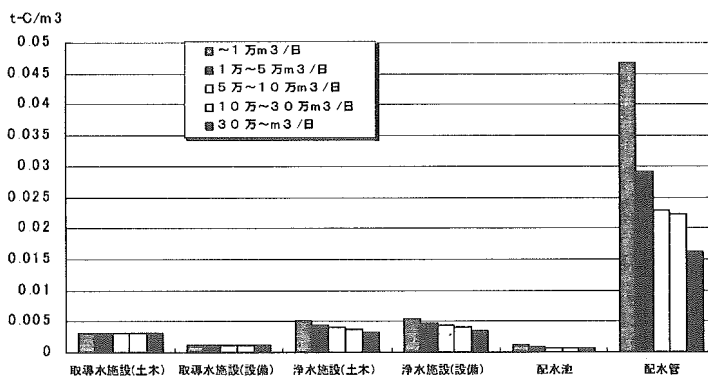


図3 上水道システムにおける事業規模別CO₂排出量(建設段階)

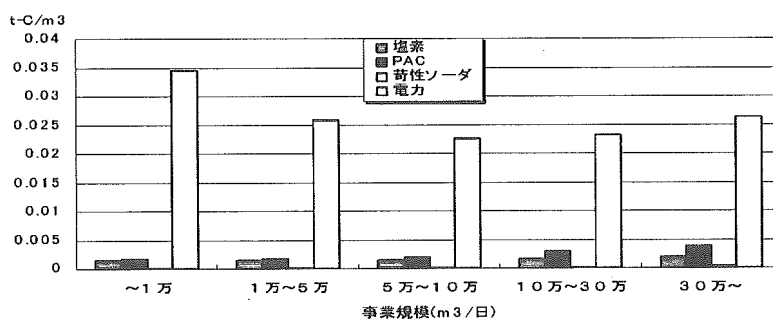


図4 上水道システムにおける事業規模別CO₂排出量(運用段階)

・運用段階における CO₂ 排出量

電力と薬品の消費量は水道統計¹³⁾から事業規模別に得られた実績値を用いた。事業規模と対象項目別に運用(ランニング)段階におけるCO₂排出量を算出した結果を図4に示

す。

図4から、事業規模に関わらず、電力消費によるCO₂排出量

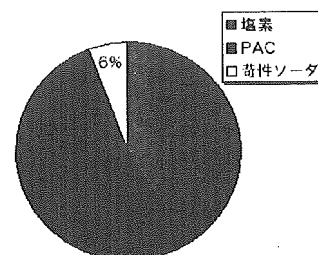


図5 薬品処理におけるCO₂排出量

が大部分を占めることが分かる。1 万 m^3 /日以下の小規模では効率が悪くなる傾向が見られ、5 万～10 万 m^3 /日程度の規模に極小がある。一方、あまり大規模になると逆に効率が悪くなる。この理由としては、その電力のほとんどがポンプ設備によるものであり、ある規模以上になると必要な量の原水を取水するため需要場所から遠く離れた取水点から長距離導水し、そして広い給水区域へ配水するため中継ポンプを設置しなければならないからだと考えられる。

また、薬品処理における CO_2 排出量の比率を図 5 に示した。薬品処理における CO_2 排出量のほとんどは塩素と PAC である。これらは電気分解によってつくられているため大きな電気

エネルギーが投入されている。

・ライフサイクル CO_2 排出量

ライフサイクル CO_2 排出量(=建設(イニシヤル)段階の CO_2 排出量+運用(ランニング)段階の CO_2 排出量)を事業規模別に求めたものを図 6 に示す。5 万～10 万 m^3 /日規模でもっとも小さい値となっている。また、建設段階では管路の建設、運用段階では電力が大きく占めており、事業規模別に関わらず運用段階の方が建設段階より大きいことが分かる。また 30 万 m^3 /日以上の上水道事業体においては薬品の消費による CO_2 排出量は全体の 14.1%を占めており、薬品処理における CO_2 排出量も無視することはできない。

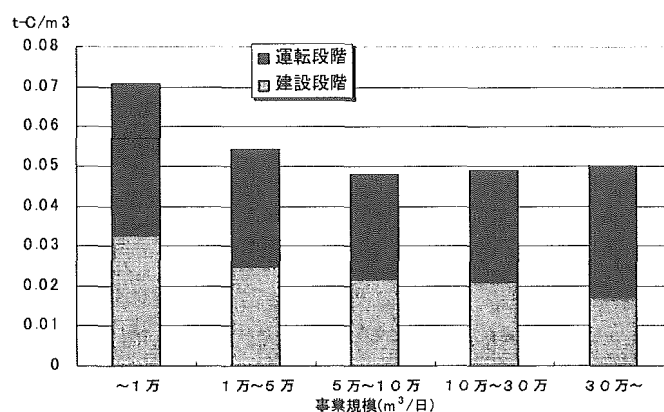


図 6 上水道システムにおける事業規模別ライフサイクル CO_2 排出量

(2) 下水道システム

・建設段階における CO_2 排出量

事業規模別に下水処理場と管渠の建設(インシヤル)段階における CO₂ 排出量を算出した結果を図 7 に示す。規模が大きくなるにしたがって単位処理量あたりの CO₂ 排出量は小さくなっている。日最大処理水量が 1000m³/日未満の場合と 5 万 m³/日以上の場合の CO₂ 排出量を比較すると、下水管渠に関して 5 万 m³/日以上の場合には 1000m³/日未満の場合の 0.173 倍、処理場に関しては 0.184 倍である。

この理由は、上水道システムの建設段階と同様なことが考えられる。「産業連関分析法」を用いて CO₂ 排出量を算出していることから価格と費用は比例関係にあり、建設費が安くなればなるほど CO₂ 排出量が少なくなる。したがって、下水管の建設ではスケールメリットが大きく働くことによって単位量あたりの建設費が安くなり CO₂ 排出量が少なくなる。

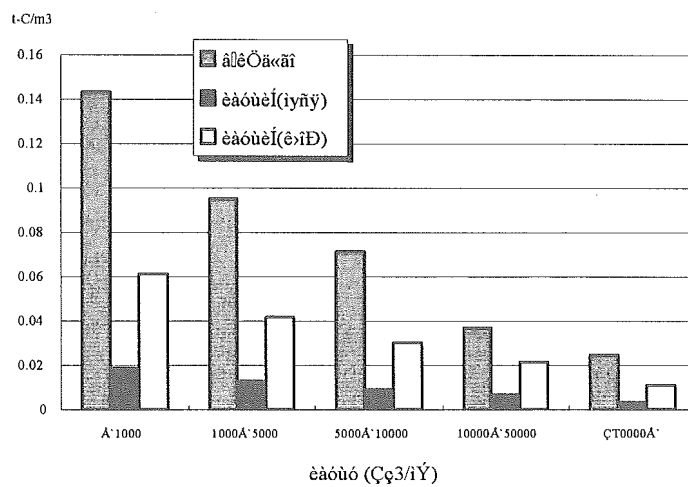


図 7 下水道システムにおける事業規模別 CO₂ 排出量(建設段階)

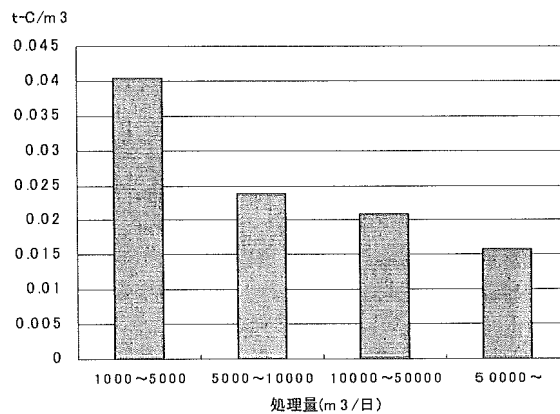


図 8 下水道システムにおける事業規模別 CO₂ 排出量(運用段階)

しかし、今回用いた下水道統計のデータでは合併処理浄水槽や農村集落排水処理施設

といった排水施設を考慮していない。したがって、実際には小規模側の CO₂ 排出量はさらに低い値となることも予想される。

・運用段階における CO₂ 排出量

下水処理場の電力を対象として運用(ランニング)段階における CO₂ 排出量の算出結果を図8に示す。A重油に関しては使用していない処理場が多いため規模別による解析はしないことにした。建設段階と同様に規模が大きくなるほど単位処理量あたりの CO₂ 排出量は小さくなることが分かる。この理由は大規模ポンプ設備の電力の消費効率が小規模なものと

比べて高いことから、大規模処理場では単位あたりの電力消費量が減少し、CO₂ 排出量は小さいと考えられる。

・ライフサイクル CO₂ 排出量

事業規模別結果を図9に示す。規模が大きいほど単位処理量あたりの CO₂ 排出量が小さいことが分かる。また、上水道システムの場合と異なり電力より下水管渠の割合が大きい。この理由として下水管渠に使用される鉄筋コンクリート管のセメント生産プロセスにおける石灰石起源の CO₂ 排出量が多いことが考えられる。

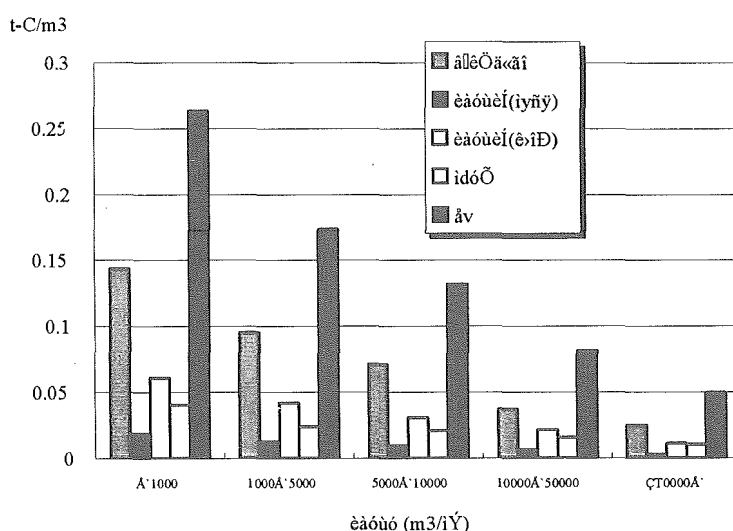


図9 下水道システムにおける事業規模別ライフサイクル CO₂ 排出量

2. エネルギー消費量

(1) 上水道システム

・建設段階におけるエネルギー消費量

事業規模と対象施設別に建設(イニシャル)段階におけるエネルギー消費量を算出した結果を図10に示す。CO₂ 排出量の場合と同様に、事業規模に関わらず、配水管の建設におけるエネルギー消費量が大部分を占め、取・

導水システムを除く上水道システムの対象施設において規模が大きくなればなるほどエネルギー消費量が少ない傾向にある。ここでもスケールメリットが働き、単位量あたりの建設費が安くなりエネルギー消費量が小さくなるといえる。なお、取・導水システムが規模に関わらず一定なのは、設定した取・導水システムの費用関数が配水量と費用が比例しているからで

ある。

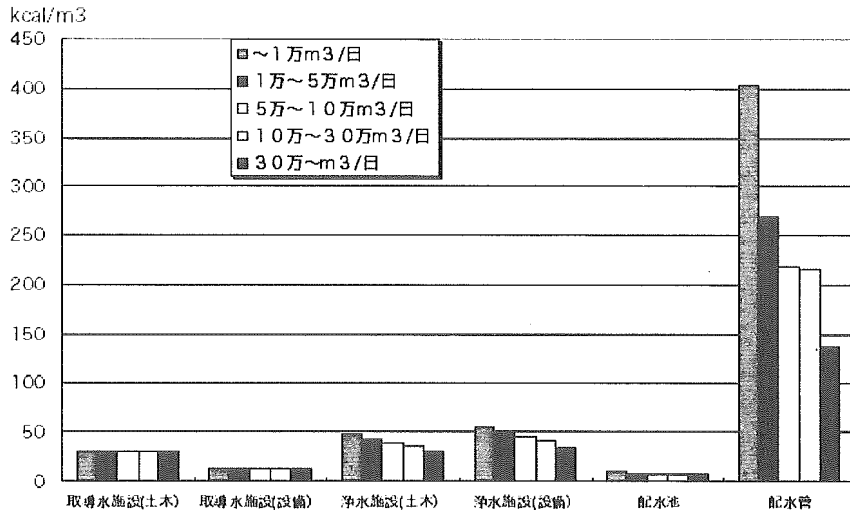


図 10 上水道システムにおける事業規模別エネルギー消費量(建設段階)

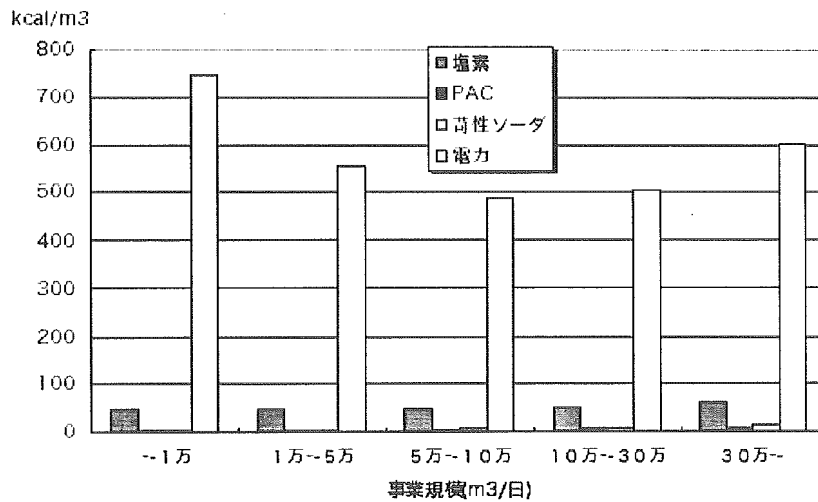


図 11 上水道システムにおける事業規模別エネルギー消費量(運用段階)

・運用段階におけるエネルギー消費量
 運用(ランニング)段階におけるエネルギー消費量を算出した結果を図 11 に示す。事業規模に関わらず、電力消費によるエネルギー消費量が大部分を占めている。また、薬品処理
 ・ライフサイクルエネルギー消費量

におけるエネルギー消費量の比率を図 12 に示した。薬品処理におけるエネルギー消費量のほとんどが塩素である。

ライフサイクルエネルギー消費量(=建設(イニシャル)段階のエネルギー消費量+運用(ランニング)段階のエネルギー消費量)を事業規模別に表わしたものを図13に示す。5万~10万m³/日をもっとも小さい値となっている。これはCO₂排出量の場合と同じ結果である。施設別にみると建設段階では管路の建設、運用段階では電力が大きく占めており、事業規模別に関わらず運用段階の方が建設段階より大きい。特徴的なこととして、運用段階の占める割合がCO₂排出量の場合よりも大きい傾向にあることである。この理由として、CO₂排出量の場合は電力のCO₂排出係数が他の項目と

の相対的に低いことから全体で見た場合に電力で占める比率は下がるが、エネルギー消費量の場合はエネルギー消費係数が高いことから全体で見た場合に電力で占める比率が上がるからだと考えられる。

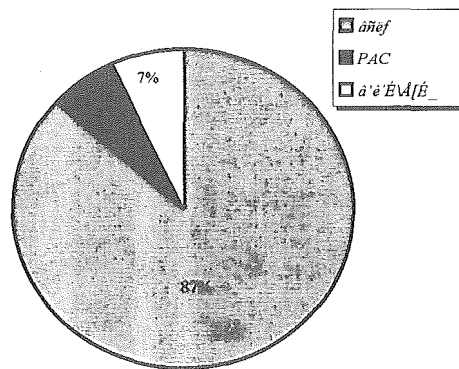


図12 薬品処理におけるエネルギー消費量

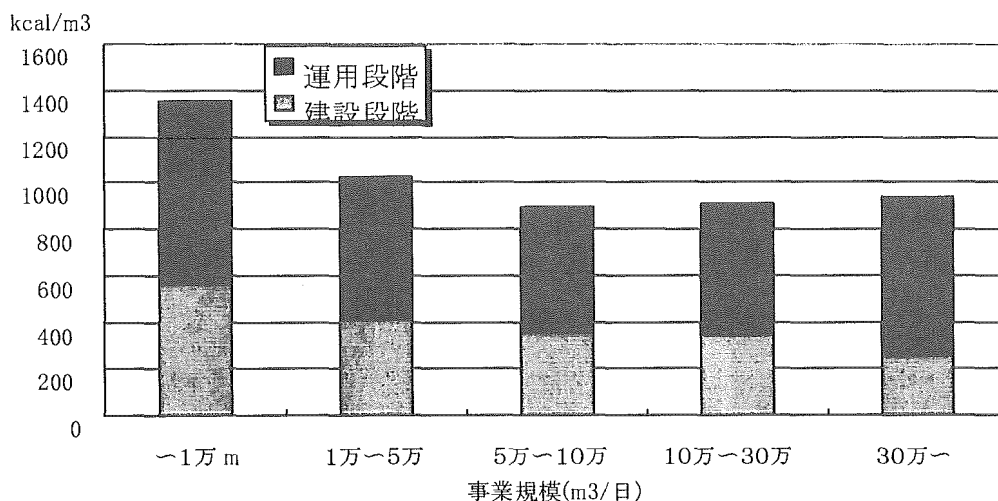


図13 上水道システムにおける事業規模別ライフサイクルエネルギー消費量

(2) 下水道システム

- ・建設段階におけるエネルギー消費量
事業規模別に下水処理場と管渠の建設(イ

ニシャル)段階におけるエネルギー消費量を図14に示す。規模が大きいほど単位処理量あたりのエネルギー消費量は小さい。

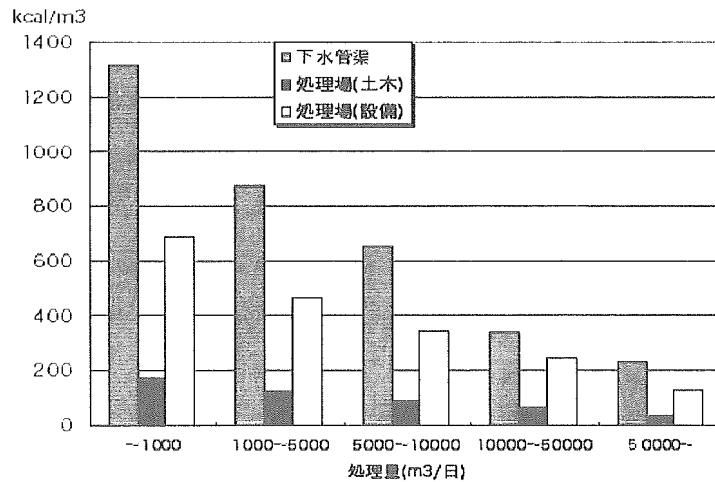


図 14 下水道システムにおける事業規模別エネルギー消費量(建設段階)

・運用段階におけるエネルギー消費量

事業規模と対象施設別に運用(ランニング)段階におけるエネルギー消費量を算出した結果を図 15 に示す。事業規模に関わらず、規模が大きいほど単位処理量あたりのエネルギー消費量が小さい。

CO₂ 排出量の場合と同様に、大規模ポンプ設備の電力の消費効率が小規模なものに比べて高いことから、大規模な下水処理場では単位あたりの電力消費量が減少し、エネルギー消費量が小さくなると考えられる。

・ライフサイクルエネルギー消費量

ライフサイクルエネルギー消費量 (= 建設

(イニシャル) 段階のエネルギー消費量 + 運用(ランニング) 段階のエネルギー消費量) を図 16 に示す。規模が大きいほど単位処理量あたりのエネルギー消費量が小さいことが分かる。また、上水道システムの場合と異なり電力より下水管渠の割合が大きい。このことは CO₂ 排出量の場合と同様に下水管渠に使用される鉄筋コンクリート管のセメント生産プロセスにおける石灰石起源のエネルギー消費量が大きいことによると考えられる。

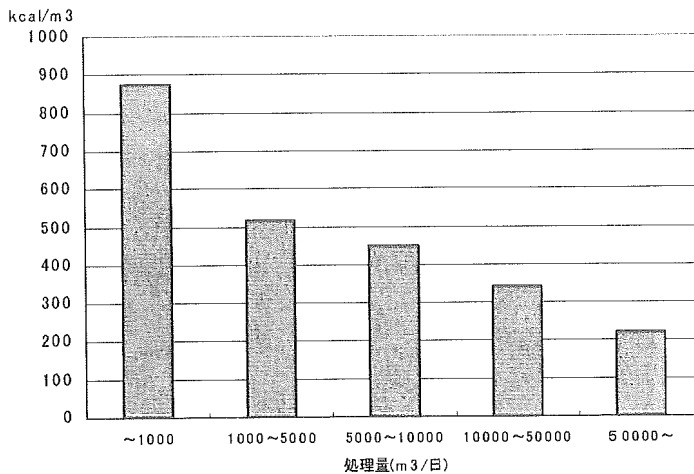


図 15 下水道システムにおける事業規模別エネルギー消費量(運用段階)

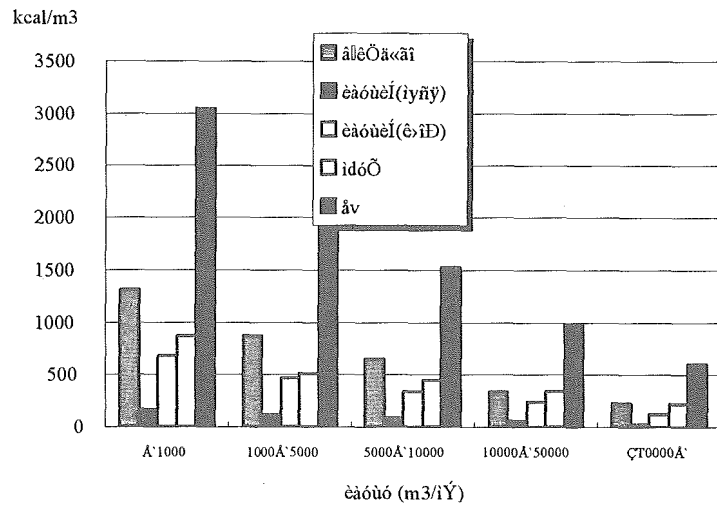


図 16 下水道システムにおける事業規模別ライフサイクルエネルギー消費量

3. 野洲川流域を対象とした評価結果

(1) CO₂ 排出量

滋賀県の野洲川流域を対象として、現状の上下水道システムについてCO₂排出量を算出した結果を示す。上水道システムに関しては、11箇所の浄水場とそれらに付属する取・導水施設と、配水施設(配水池と配水管)を対象とした。下水道システムに関しては下水処理場(下水滋賀県湖南中部浄化センター)、それら

に付属する下水道管渠と2箇所の中継ポンプ場を対象とした。図 17 に結果を示す。

割合をみると、上水道システム 61.3%、下水道システム 38.7%となった。項目では、上水道システムの電力 27.0%、下水管渠 21.9%、上水道システムの配水管 16.9%を占めている。また、下水処理場の重油も 6.43%であり、これは下水処理場の電力

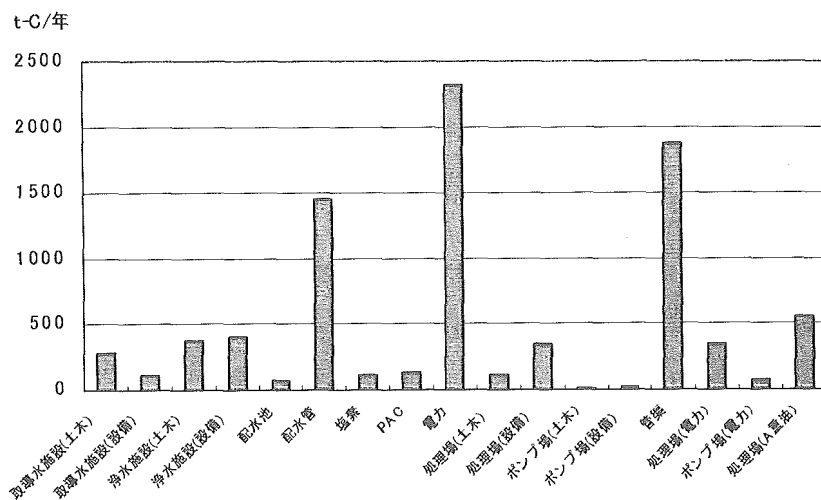


図 17 野洲川流域における上下水道システムの対象項目別 CO₂ 排出量

消費によるCO₂排出量よりも大きい。段階別にみると、建設段階 58.9%、運用段階 41.1%であり、建設段階の方が大きい。電力消費(31.8%)と、管渠(配水管と下水管渠)の建設

(38.8%)をあわせた CO₂ 排出量が全体の70.6%を占めていることから、CO₂ 排出量削減の観点からは重視する必要があるといえよう。

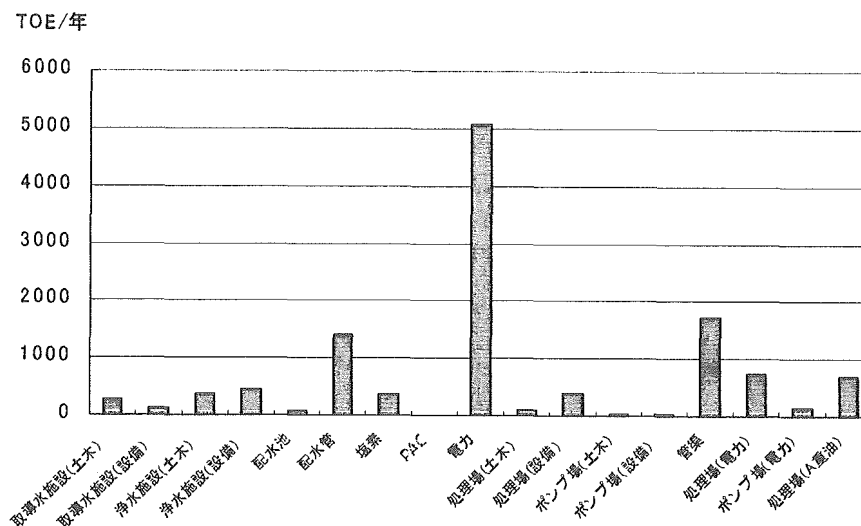


図 18 野洲川流域における上下水道システムの対象項目別エネルギー消費量

(2) エネルギー消費量

CO₂ 排出量の場合と同様に、エネルギー消費量を算出した。図 18 に結果を示す。上水道システムが 67.9%、下水道システムが 32.1%であった。項目別では、上水道システムの電力 42.6%、下水管渠 14.4%、上水道システムの配水管 11.6%の割合を占めている。また、CO₂ 排出量の場合とは異なり、下水処理場の電力消費によるエネルギー消費量の方が大きい値を示している。次に段階別にみると、建設段階 41.0%、運用段階 59.0%であり、CO₂ 排出量の場合と異なり運用段階の方が大きくなっている。電力消費によるエネルギー消費量が全体の 50.0%を占めていることから、省エネルギー化を図る上では電力が消費される機械動力を重視する必要があるといえよう。

D. 結論

- (1) 上水道システムを対象として建設段階における CO₂ 排出量とエネルギー消費量を算出した結果、どちらの場合も配水管の建設が最も大きな値を示した。一方、運用段階では、電力が大部分を占めることがわかった。
- (2) 上水道システムを対象として事業規模別にライフサイクル CO₂ 排出量とライフサイクルエネルギー消費量を算出した結果、ともに事業規模 5 万～10 万 m³/日で単位配水量あたりの環境負荷排出量が最小となった。
- (3) 下水道システムを対象として事業規模別にライフサイクル CO₂ 排出量とライフサイクルエネルギー消費量を算出した結果、規模が大きいと単位処理量あたりの環境負荷排出量が小さくなった。下水道システムでは上水道システム以上にスケールメリッ

トが大きく働くといえた。

- (4) 滋賀県野洲川流域における上下水道システムのライフサイクル CO₂ 排出量を算出した結果、まず、上水道システムにおける CO₂ 排出量の方が下水道システムよりも大きかった。段階別では、建設段階の方が運用段階より大きかった。また、電力消費と、管渠(配水管と下水管渠)建設に関わる CO₂ 排出量が大きかった。一方、ライフサイクルエネルギー消費量では、運用段階の方が大きな割合をしめること、また、電力消費による割合が大きいことなどを示した。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課:水道ビジョン、p13、2003
- 2) 井村秀文、銭谷賢治、中嶋芳紀、森下兼年、池田秀昭:下水道システムのライフサイクルアセスメント:LCE 及び LC-CO₂による評価、土木学会論文集 No.552 VII-1、p75-84
- 3) 水道と地球環境を考える研究会:地球環境時代の水道、技報堂出版、1992
- 4) 松本重行、山本和夫:都市における水循環システムの多目的評価～河川水循環利用と雨水浸透システムに関するケーススタディー～、環境工学研究論文集 vol.31、p137-148、1994
- 5) (社)日本下水道協会:効率的な汚水処理施設整備のための都道府県構想策定マニュアル、2002
- 6) 南齋規介、森口祐一、東野達:産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)、国立環境研究所、2002
- 7) 国土交通省総合政策局情報管理部建設調査統計課:建設工事費デフレーター、<http://www.mlit.go.jp/toukeijouhou/chojou/def.htm>、2004
- 8) 財団法人水道技術研究センター:環境影響低減化浄水技術開発研究(e-water)第2研究グループ報告書、p381-402、2004
- 9) (社)日本下水道協会:下水道施設改築・修繕マニュアル(案)―1998年版―、1998
- 10) エネルギーと環境制約下における水システム、水資源シンポジウム、1982
- 11) 岡村整、小林健一郎:水道事業におけるライフサイクルアセスメント(LCA)に関する調査―水道施設を対象とした LC-CO₂による評価―、水道協会雑誌、vol.70、No.11、2001
- 12) 近藤美則、森口祐一:産業連関表による二酸化炭素排出原単位、国立環境研究所地球環境研究センター、1997
- 13) 厚生省生活衛生局水道環境部水道整備課:水道統計―行政編―・水質編―(平成14年度)、(社)日本水道協会、2002
- 14) (社)日本下水道協会:平成12年度版 下水道統計―行政編―(社)日本下水道協会、2000

E. 研究発表

1. 学会発表

- 伊藤禎彦、千田祐一郎、流域における小規模分散型水供給システム導入可能性の解析、第39回日本水環境学会年会講演集、p.419,2005