

厚生労働行政推進調査事業（厚生労働科学特別研究事業）
水道システムにおけるカーボンニュートラル実現に向けた緩和策と
気候変動影響に対する適応策の推進のための研究
分担研究報告書

研究課題：水道事業における CO₂ 排出量削減ポテンシャルの推計

研究分担者 下ヶ橋雅樹 叡啓大学ソーシャルシステムデザイン学部 教授
研究代表者 小坂浩司 国立保健医療科学院生活環境研究部 上席主任研究官

研究要旨

本研究では国内の2事業体（2浄水場）を対象に導水・送水工程の運用管理による CO₂ 削減ポテンシャル推計を行った。その結果、ポンプ運転台数、送水速度、および調整池水位調整による CO₂ 削減ポテンシャルが具体的に算出され、またその手順が以下のように整理された。

- ・複数台のポンプを運転している場合、運転台数と単位消費電力量の関係を明らかとし、もし運転台数による差がみられるようであれば、その送水範囲で最も少ない台数で運用した際の電力消費削減量を算出
- ・流量（流速）と単位電力消費量の関係を明らかとし、もし流量増加に伴う単位電力消費量の増加がみられる場合には、流速低減による電力消費削減量を算出
- ・調整池などのポンプに背圧を与える池の水位変動を図示し、その差が大きい場合には、最低水位で送液した場合の損失水頭を算出し、さらに実際の運転時の電力消費量との差（削減電力量）を算出
- ・上記により算出された電力消費削減量に発電に伴う CO₂ 排出係数を乗じて CO₂ 削減ポテンシャルを算出

また、浄水施設の建物屋根に太陽光発電を導入する際の発電量の推定方法が示された。

A. 研究目的

我が国では、地球温暖化の対策として 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことが政府によって宣言され、2030 年に温室効果ガスを 2013 年度比で 46%削減することを目指すことが表明された。水道事業の電力使用量は国内総電力消費量の約 0.8%を占めており、温室効果ガスの排出を抑制する緩和策が求められる。本研究では、水道分野で気候変動の緩和を推進するための施策に有用な知見を蓄積することを目的に、水道事業における CO₂ 排出量削減ポテンシャルの推計の精緻化を行った。具体的には CO₂ 排出量が多い水輸送工程に注目し、国内の水道事業体から、その浄水場のポンプ種別や制御方法、消費電力量などを入手し、CO₂ 排出量削減ポテンシャルの精緻な推定を行うとともに、その手順を整理した。

B. 研究方法

本研究は河川水を水源とする浄水場の CO₂ 排出量削減ポテンシャル推定を行った。国内の2事業体（D、E）から、それぞれに属する2浄水場（D1、E1）についての導水および送水に関して、1時間あたりの導水・送水量、ポンプの電力消費

量と運転台数、各池の水位、ならびに設備に関する高低図や管路延長、ポンプ緒言等の関連情報を入手した。両浄水場ともに急速ろ過を行う浄水場である。D1 浄水場の浄水能力は約 3 万 m³/日であり、解析には 2021 年度及び 2022 年 7、8、12 月、2023 年 1 月のデータを使用した。E1 浄水場は約 20 万 m³/日であり、解析には 2022 年 8 月および 2023 年 2 月のデータを使用した。

ポンプ運転台数制御による CO₂ 排出量削減ポテンシャルの推定

D1 浄水場の導水系統では、3 台の取水ポンプを交互に使用し、原水をポンプ井から着水井に導水している。ここでは 1 時間ごとの導水流量と電力使用量、ならびにポンプ運転台数の関係を明らかとした。さらにその結果をもとに、ポンプ運転台数を変更させた場合の電力使用量削減に伴う CO₂ 排出量削減ポテンシャルを推定した。

ポンプ送水速度制御による CO₂ 排出量削減ポテンシャルの検討

D1 浄水場の送水系統では、2 台一組のポンプ 2 組（合計 4 台）の送水ポンプを交互に使用して、浄水を浄水池から 3 か所の調整池に送水してい

る。ここでは、1時間ごとの送水流量と電力使用量、ならびにポンプ運転台数の関係を明らかとした。さらにその結果をもとに、流量制御によるCO₂排出量削減の可能性を考察した。さらにE1浄水場導水系統の、8月の1時間ごとの取水ポンプの流量と電力使用量を整理した。

調整池水位制御によるCO₂削減ポテンシャル

E1浄水場では、23か所の調整池の1時間ごとの調整池の水位をもとに、8月および2月の各々の水位変化を整理した。さらに調整池水位を低くして送水ポンプに係る位置エネルギーに起因する背圧を低減することによる削減ポテンシャルを算出した。

太陽光発電(PV)導入ポテンシャル推計

D事業体のD1、D2、D3浄水場、およびE事業体のE1、E2、E3浄水場に関して、その敷地内建屋の屋上にPVを設置することを考え、それぞれの浄水場の設備をGoogle Earthにて確認し、屋上面積を算出した。また、計算にあたっては、環境省の資料¹⁾を参考として面積ごとに区分して整理した。

C. 研究結果およびD. 考察

ポンプ運転台数の検討

図1は、D1浄水場への導水系統の高低を示す。D1浄水場の導水(取水)は3台の両吸込渦巻ポンプ、およびインバータ回転制御方式の電動機を使用し、沈砂池に接続したポンプ井から約40mの水位差をもつ着水井に、内径600mmの導水管によって原水を送っている。ポンプ仕様は流量780m³/hr、全揚程52mである。また導水管の総延長は約2.3kmである。

図2はD1浄水場の導水系統の、1時間内に使用したポンプ台数ごとの流量とポンプ電力量の関係である。なお、運転台数は1時間内の積算電力量からみた運転実績を示しているものであり、同時に3台を運転することはない。図より、流量の増加とともに消費電力量がおおむね比例関係で増加することがわかった。これは同設備がインバータを導入しているため、流量低下に伴う電力量低下が軽減できているためと考えられた。また1時間内に運転した台数によって消費電力が異なっていた。導水された原水が得た位置エネルギーと、そのために消費された電力量の比、すなわち電力の利用効率を見るため、式(1)および(2)により、電力利用効率 η [-]を算出した。

$$\eta = \frac{U}{W} \quad (1)$$

$$U = Q \times \rho \times g \times h \times \frac{1}{3600} \quad (2)$$

ここで、 U は1時間に原水が得た位置エネルギー[kWh]、 W はポンプが消費した電力量[kWh]、 ρ は

水の密度(1.0×10³[kg/m³])、 g は重力加速度(9.8[m/s²])、 h は水位差[m]である。

図3は、上式で算出された電力利用効率 η と流量の関係をポンプ台数ごとにプロットしたものである。図より、おおむね400m³/hr以下では、プロットは少ないが流量が低下するとともに η が低下する様子が見られた。一方400~895m³/hrの範囲では1時間内に運転したポンプの台数により効率が異なる様子が見られた。図4は単位導水量あたりの電力消費量をポンプ台数ごとに示したものである。同図には、1台運転時と2台運転時の η について、分散が等しくなかった場合の t 検定の結果得られた p 値(両側)を示しているが、有意な差が見られた。1~2台運転と3台運転の間の差は明確である。上述のようにD1浄水場では3台同時運転は行っておらず、1~2台運転と3台運転の間の消費電力の差は、ポンプ切替によるロスの影響も大きいと考えられた。

2022年度のデータでは、記録上ポンプ1台運転が行われた範囲は895m³/hr以下である。ここで、同年度のポンプ運転台数管理によるCO₂削減ポテンシャルを算出するため、600~895m³/hrの範囲、および896~1,200m³/hrの範囲での電力消費と総導水量を表1および表2にそれぞれ示す。表1にて示される範囲での総導水量は5,395千m³である。この導水をすべて1台のポンプで実施したとすると、その電力消費量は989千kWhとなり、227千kWhの電力量削減となる。また、表2にて示される範囲での総導水量は1,708千m³である。この導水をすべて1台のポンプで実施したとすると、その電力消費量は358千kWhとなり、58千kWhの電力量削減となる。この電力消費量にCO₂排出係数0.000435t-CO₂/kWh²⁾を乗じると、その合計は124t-CO₂/年となる。

以上より、複数台のポンプを運転している際には、①運転台数と電力利用効率(単位電力消費量)の関係を明らかとし、もし運転台数による電力利用効率に差がみられるようであれば、②その送水範囲で最も少ない台数で運用した際の電力消費削減量を算出し、③その削減量に発電に伴うCO₂排出係数を乗じてCO₂削減ポテンシャルを算出する、という手順が提案できた。

ポンプ送水速度制御の検討

図5は、D1浄水場からの送水系統の高低を示す。同系統では両吸込渦巻ポンプ、およびインバータ回転制御方式の電動機を使用し、3か所の調整池に送水している。また送水管の総延長は約27.9kmであり、内径300~600mm(主に450mm)のダクタイル管あるいは鋼管を使用している。

図6は、D1浄水場の送水系統のポンプ運転台数毎の流量と電力使用量の関係を示す。図7は

ポンプ運転台数毎の流量と送水量あたりの電力量消費量（単位電力消費量）を示す。統計学的に有意な回帰式は得られなかったが、図 7 では、700m³/hr 程度以上で流量増加に伴う単位消費電力量増加傾向がみられた。この現象は導水系統では見られなかった。これは導水系統と比較して、送水系統では管路が長く、また管径が細いため、送水の流動抵抗が顕在化したためと考えられる。そのため、同系統では送水速度を制御することによる CO₂ 削減が考えられる。今回は送水先（調整池）の分配データがなかったため正確な計算はできず、参考までではあるが、2021 年度に 700 m³/hr 以上の送水が 600~700 m³/hr の送水時の平均電力消費量（0.092 kWh/m³）でなされたと仮定した場合の電力消費量を算出すると、実績 620 千 kWh に対して、578 千 kWh となり、42 千 kWh の削減となる。先のポンプ運転台数制御と同様に CO₂ 排出係数²⁾を用いて計算すると、18 t-CO₂ の削減となる。

E1 浄水場の導水系統は、河川から取水した原水を沈砂池を経由して 5 台の横軸両吸込渦巻ポンプ（定格流量 76.4 m³/min、揚程 83 m、効率 86%）、およびかご型全閉内冷電動機（出力 1,400 kW、効率 95.4%）にて、内径 1,800 mm の導水管により着水井（1 池）に導水している。送水量は弁の on/off により制御している。図 8 は E1 浄水場の 2022 年 7~8 月の導水系統の取水ポンプ吐出量（導水量）と電力量の関係を示す。また図 9 は、取水流量と取水量あたりの電力量消費量（単位電力消費量）を示す。一部の外れ値を除く流量（取水ポンプ吐出量）5.4 千 m³/hr 以上の範囲では、流量増加に伴う単位電力消費量の増加傾向がみられた。入手できたデータの制約から、これが D1 浄水場の導水系統に見られたポンプ台数に起因するものか、D1 浄水場の送水系統に見られた流量変化によるものか、あるいは別の要因によるものかは判断できないが、参考までに最も単位電力消費量が低かった 0.228 kWh/m³ ですべての導水が行われたものと仮定した場合の電力削減量を算出すると、206,453 kWh/(2 ヶ月)となった。前述と同様の CO₂ 排出係数²⁾で CO₂ 排出削減量を計算すると、89.8 t-CO₂/(2 ヶ月)=538.8 t-CO₂/yr の削減となる。

以上より、①流量（流速）と単位電力消費量の関係を明らかとし、もし流量増加に伴う単位電力消費量の増加がみられる場合には、②流速低減による電力消費削減量を算出し、③その削減量に発電に伴う CO₂ 排出係数を乗じて CO₂ 削減ポテンシャルを算出する、という手順を示すことができた。

調整池水位制御による CO₂ 排出量削減ポテンシャルの検討

図 10 は E1 浄水場の各調整池の水位変化を示す。調整池 09 を除いて、夏季（2022 年 8 月 3 日~31 日）と冬季（2023 年 2 月）の水位の平均値およびその変動幅に大きな差は見られなかった。また変動幅は調整池によって異なっていた。

調整池の水位は、送水ポンプに背圧として影響する。この背圧すなわち圧力水頭をできるだけ小さくするためには、調整池の水位を可能な範囲で最低に保つことが考えられる。そのときのエネルギー削減ポテンシャルとなる位置エネルギーを式(3)により計算した。

$$\Delta U_j = \frac{\sum_{i=1}^n [Q_{i,j} \times \rho \times g \times (h_{i,j} - h_{j,\min})]}{n} \times \frac{1}{3600} \quad (3)$$

ここで、 ΔU_j は、1 時間あたりの位置エネルギー分のエネルギー削減量[kWh/hr]、 $Q_{i,j}$ は調整池 j への時間 i の送水量 ($i=1\sim n$, n はその期間のデータ点数、 i のステップは hr) [m³/hr]、 ρ は水の密度 (1.0×10^3 [kg/m³])、 g は重力加速度 (9.8 [m²/s])、 $h_{i,j}$ は調整池 j の時間 i の水位[m]、 $h_{j,\min}$ は調整池 j においてみられた最低水深[m]である。

同式を用いて、E1 浄水場の 2022 年 8 月（3~31 日）、および 2023 年 2 月の、背圧削減に伴う省エネルギー量推算値を、各系統のポンプ効率および電動機効率にて除し、電力削減量を計算した。図 11 はその結果を示す。夏季（8 月）は 1.84 kWh/hr、冬季（2 月）は 2.02 kWh/hr の電力量削減となった。この平均をとって 1 年分を見積もると、 $(1.84+2.02) / 2 \times 24 \times 365 = 16.9$ 千 kWh となり CO₂ 排出係数²⁾を乗じると 7.4 t-CO₂ の削減効果と推算される。

以上より、①調整池などのポンプに背圧を与える池の水位変動を図示し、その差が大きい場合には、②最低水位で送液した場合の損失水頭を算出し、さらに③実際の運転時の電力消費量との差（削減電力量）を算出して、④その削減量に発電に伴う CO₂ 排出係数を乗じて CO₂ 削減ポテンシャルを算出する、という手順が提案できた。

太陽光発電（PV）導入ポテンシャル推計

環境省は、建物の屋根への PV 導入ポテンシャルの評価において 3 つのレベルを用いている²⁾。すなわち、レベル 1 はパネル設置に必要とする屋根面積 150 m² 以上、レベル 2 は 20 m² 以上、レベル 3 は 10 m² 以上である。ここで各浄水場についての建物屋根面積計算結果を図 12 に示す。この面積に設置容量 0.0833 kW/m²、および各都道府県ごとの年間予想発電量（1,095~1,339 kWh/年/kW³⁾を乗じて、D1~3 および E1~3 浄水場の年間発電量を算出したところ、D1~3 浄水場で 800 千 kWh/yr、E1~3 浄水場で 1,430 千 kWh/yr となった。これらの値から CO₂ 排出係数²⁾で算出される年間 CO₂ 排出削減量は、D1~3 浄水場で 350 t-

CO₂、E1～3 浄水場で 620 t-CO₂ となった。なお、上水施設の PV 設置係数（敷地面積あたりの設置面積）は 0.03（レベル 1）、0.06（レベル 2）、0.08（レベル 3）とされており³⁾、上述の設置容量や都道府県ごとの年間予想発電量を用いて PV 導入量を推算する方法も考えられる。

E. 結論

河川水を水源とする国内 2 水道事業体の 2 浄水場を対象として、1 時間ごとの詳細な運転データを用いて水輸送に係るポンプの運転管理による CO₂ 排出削減の精緻な推定、ならびにその手順（以下）が整理できた。

- ・複数台ポンプ運転下でもしポンプ運転台数による差がみられたら最も少ない台数で運用した際の電力消費削減量を算出
- ・流量増加に伴う単位電力消費量の増加がみられたら流速低減による電力消費削減量を算出
- ・ポンプに背圧を与える池の水位変動の差がみられたら、最低水位で送液した場合の損失水頭を算出し、さらに実際の運転時の電力消費量との差（削減電力量）を算出
- ・上記により算出された電力消費削減量に発電に伴う CO₂ 排出係数を乗じて CO₂ 削減ポテンシャルを算出

また、浄水施設の建物屋根に太陽光発電を導入する際の発電量の推定方法が示された。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

1. 論文発表
該当なし
2. 学会発表
該当なし
3. 図書
該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定も含む。）

1. 特許取得
該当なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

I. 参考文献

- 1) 環境省、平成 22 年度再生可能エネルギー導

入ポテンシャル調査報告書 第 3 章 太陽光発電の導入ポテンシャル. 2011.

- 2) 環境省、経済産業省. 電気事業者別排出係数 (特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)－R3 年度実績－. 2023; Available from: https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r05_coefficient.pdf.
- 3) 株式会社エックス都市研究所、アジア航測株式会社, 令和元年度環境省委託業務 令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書. 2020.

謝辞

本研究の遂行にあたり情報提供にご協力いただいた水道事業体様に、記して謝意を表します。

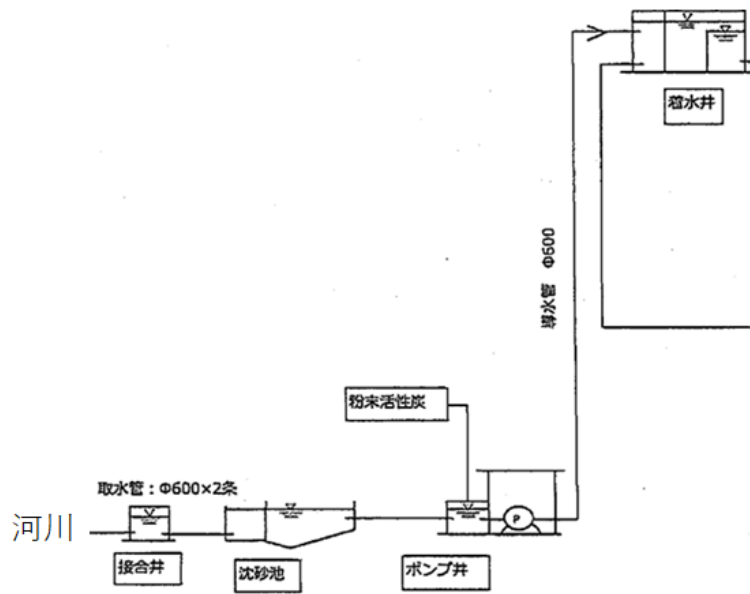


図 1 D1 浄水場の導水系統

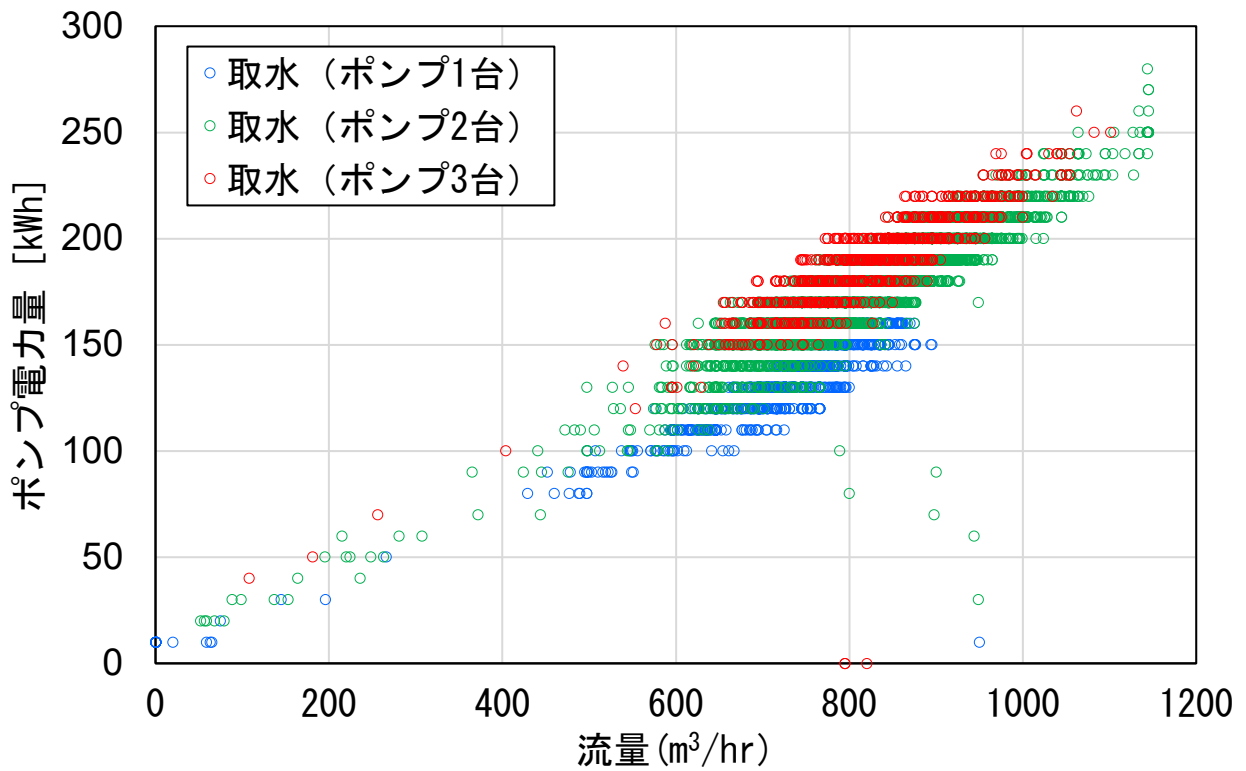


図 2 D1 浄水場の導水系統で 1 時間ごとに使用されたポンプ台数別の、導水流量と消費電力量の関係

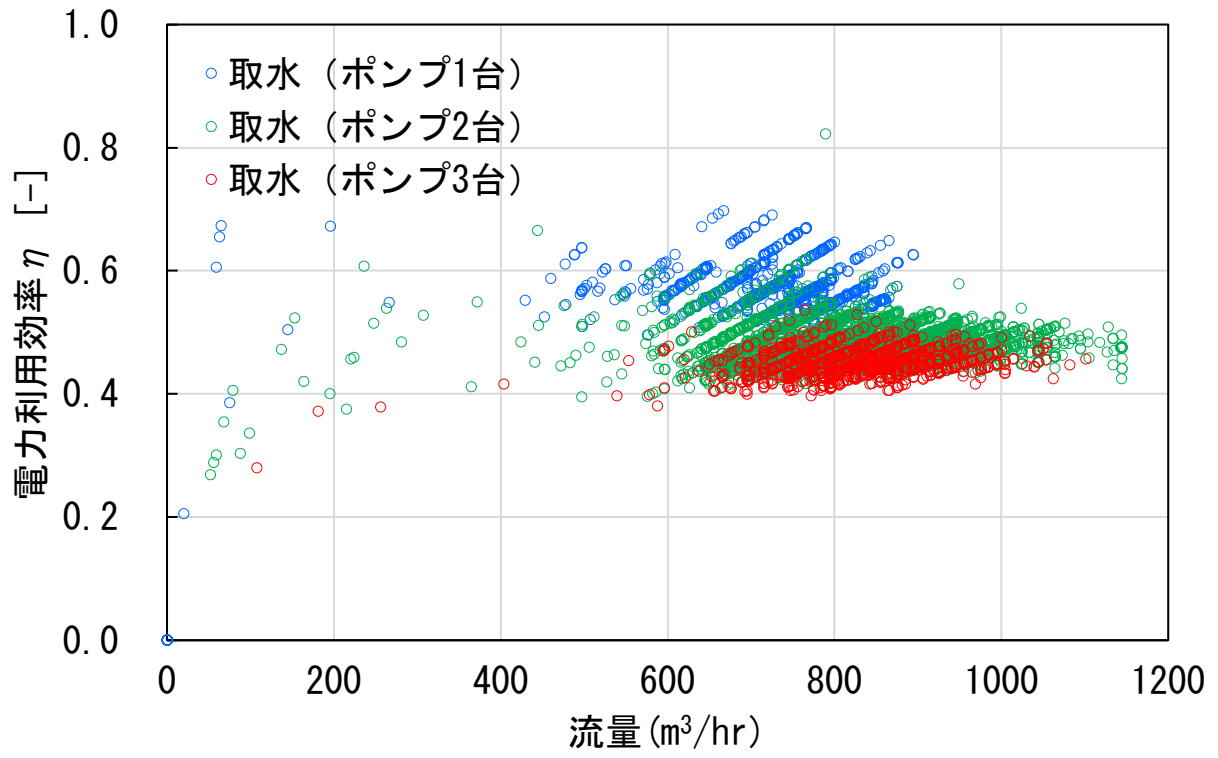


図 3 D1 浄水場の導水系統で 1 時間ごとに使用されたポンプ台数別の、導水流量と効率の関係

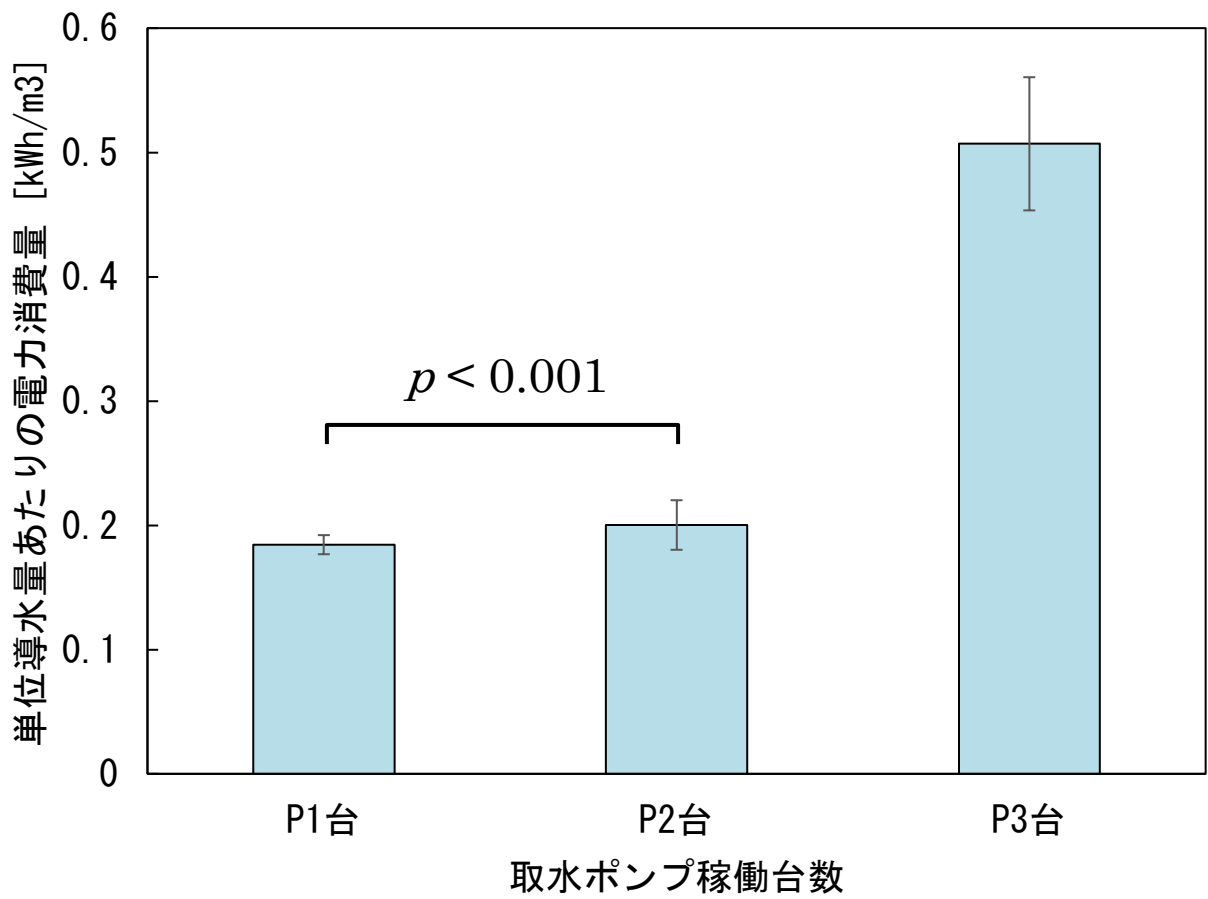


図 4 ポンプ稼働台数ごとの単位導水量あたりの電力消費量

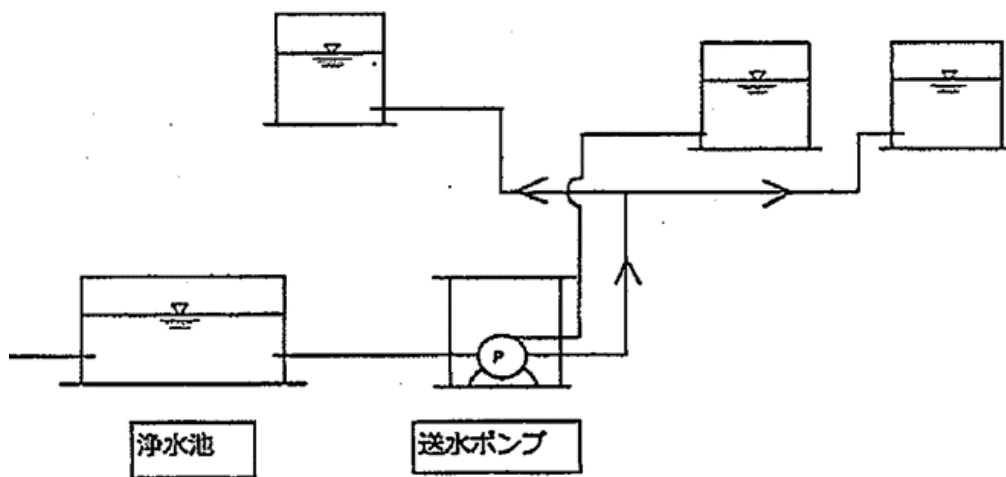


図 5 D1 浄水場の送水系統

表 1 D1 浄水場導水系統のポンプ稼働台数と電力消費量 (600~895 m³/hr)

	P1台	P2台	P3台	合計
単位電力消費量 平均	0.184	0.200	0.507	
[kWh/m ³] 標準偏差	0.008	0.020	0.054	
総導水量 [千m ³]	742	4,127	496	5,365
電力消費量 [千kWh]	137	828	252	1,216
総時間数 [hr]	1,003	5,121	615	6,739

(2021年度分のみ)

表 2 D1 浄水場導水系統のポンプ稼働台数と電力消費量 (896~1,200 m³/hr)

	P1台	P2台	P3台	合計
単位電力消費量 平均	-	0.210	0.535	
[kWh/m ³] 標準偏差	-	0.015	0.053	
総導水量 [千m ³]	-	1,530	178	1,708
電力消費量 [千kWh]	-	321	95	416
総時間数 [hr]	-	1,622	189	1,811

(2021年度分のみ)

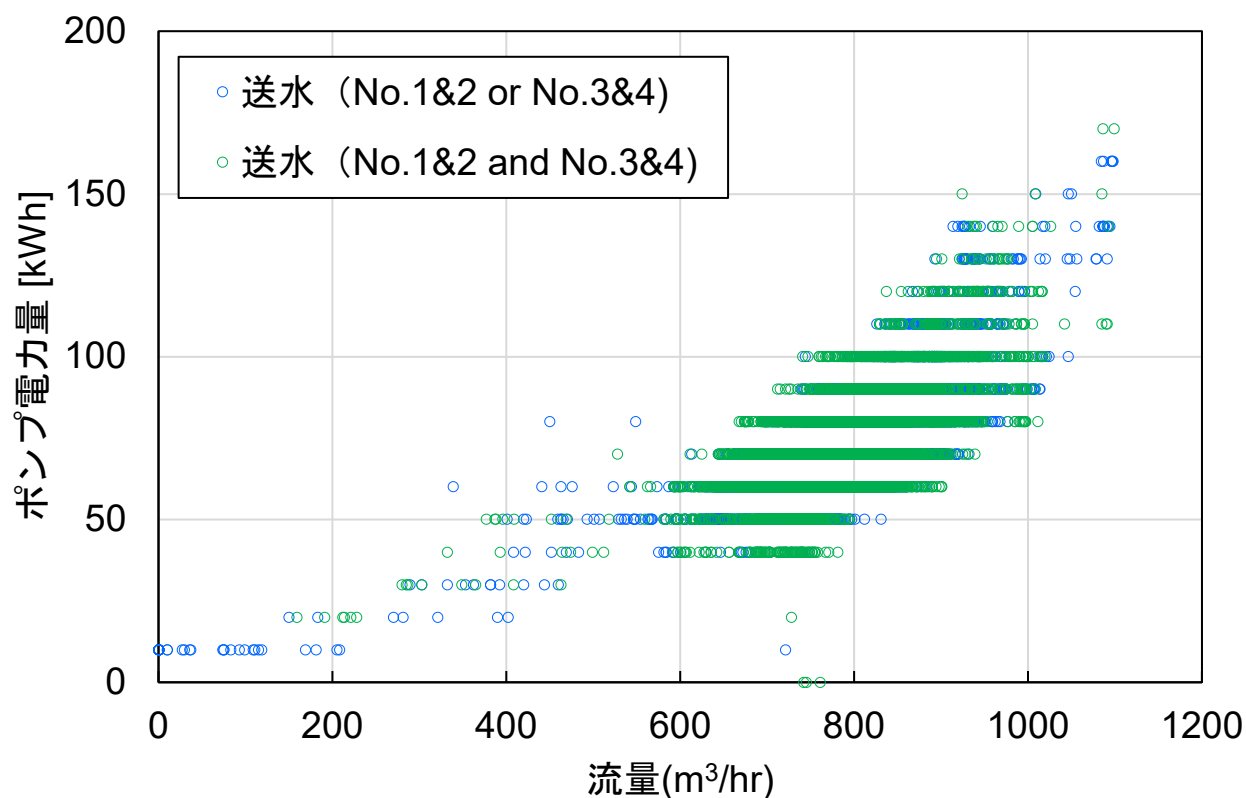


図 6 D1 浄水場の送水系統の流量とポンプ電力量の関係

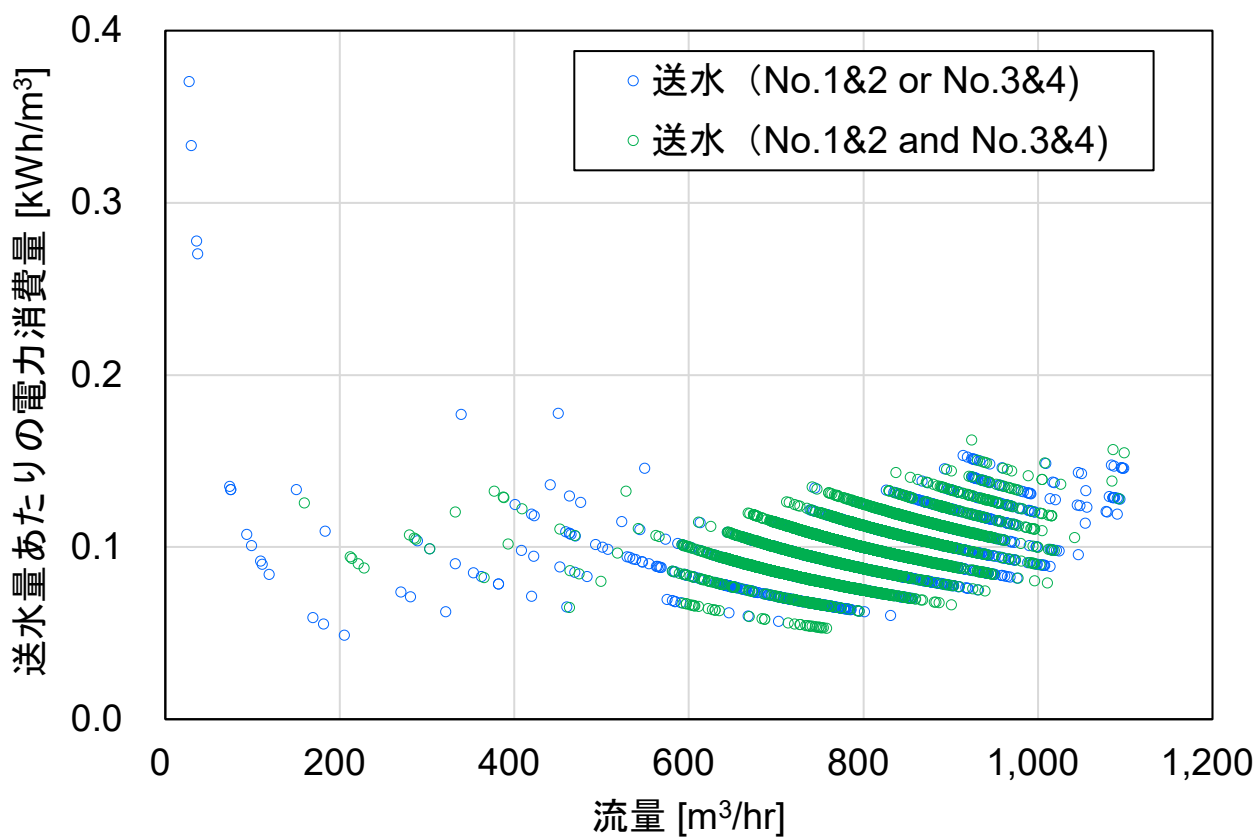


図 7 D1 浄水場の送水系統の流量と単位導水量あたりの電力消費量の関係

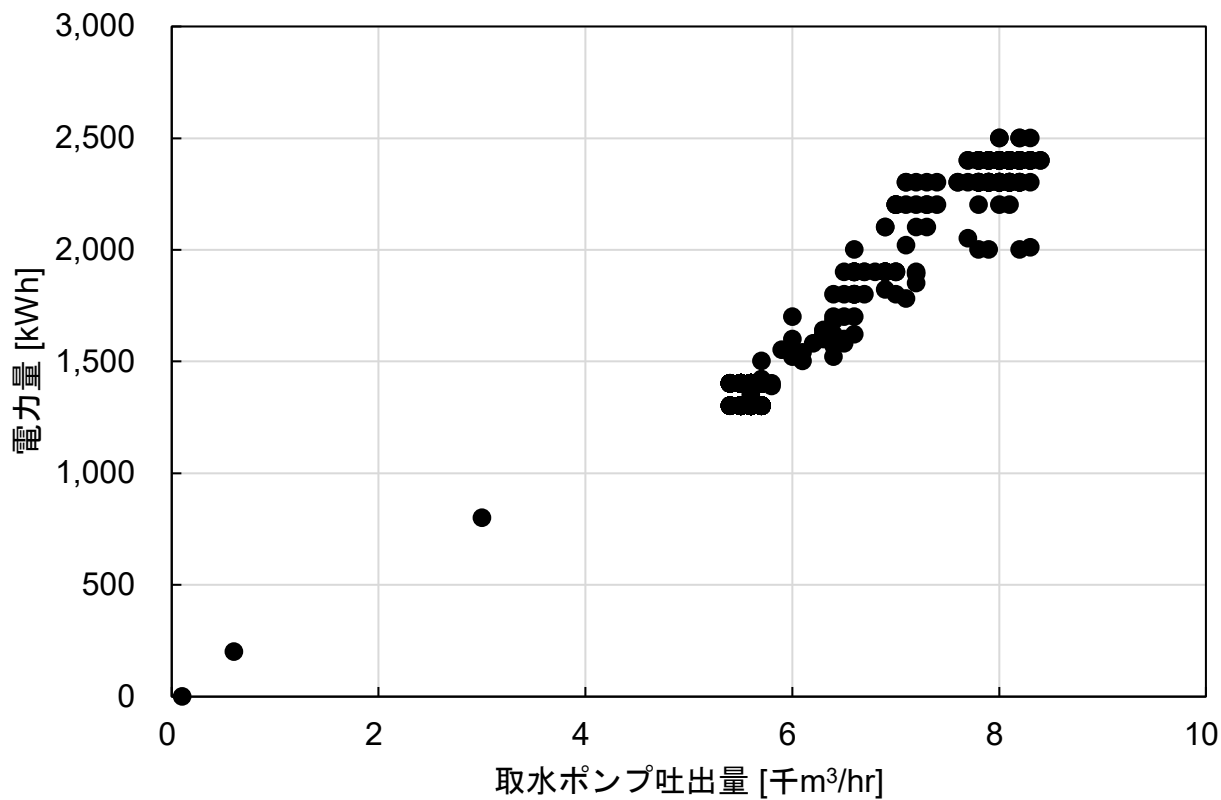


図 8 E1 浄水場の取水（導水）系統のポンプ吐出量と消費電力

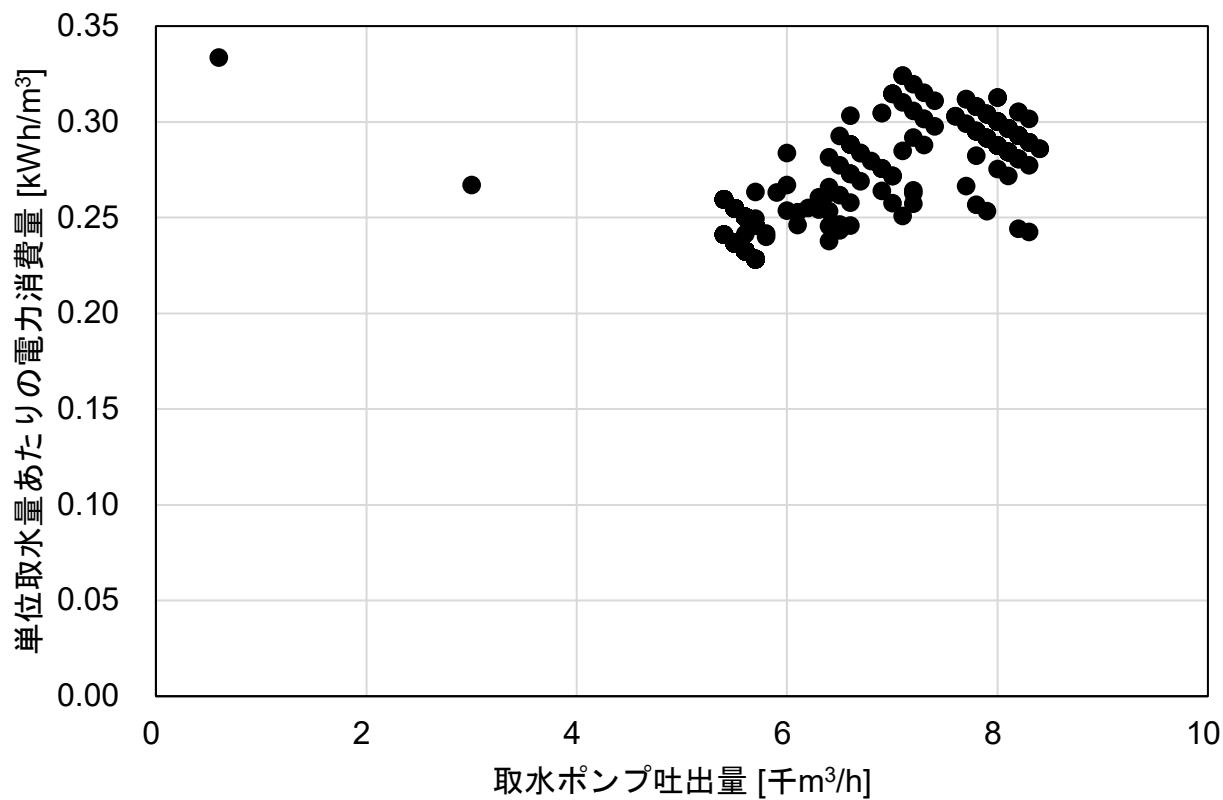


図 9 E1 浄水場の導水系統の流量と単位導水量あたりの電力消費量の関係

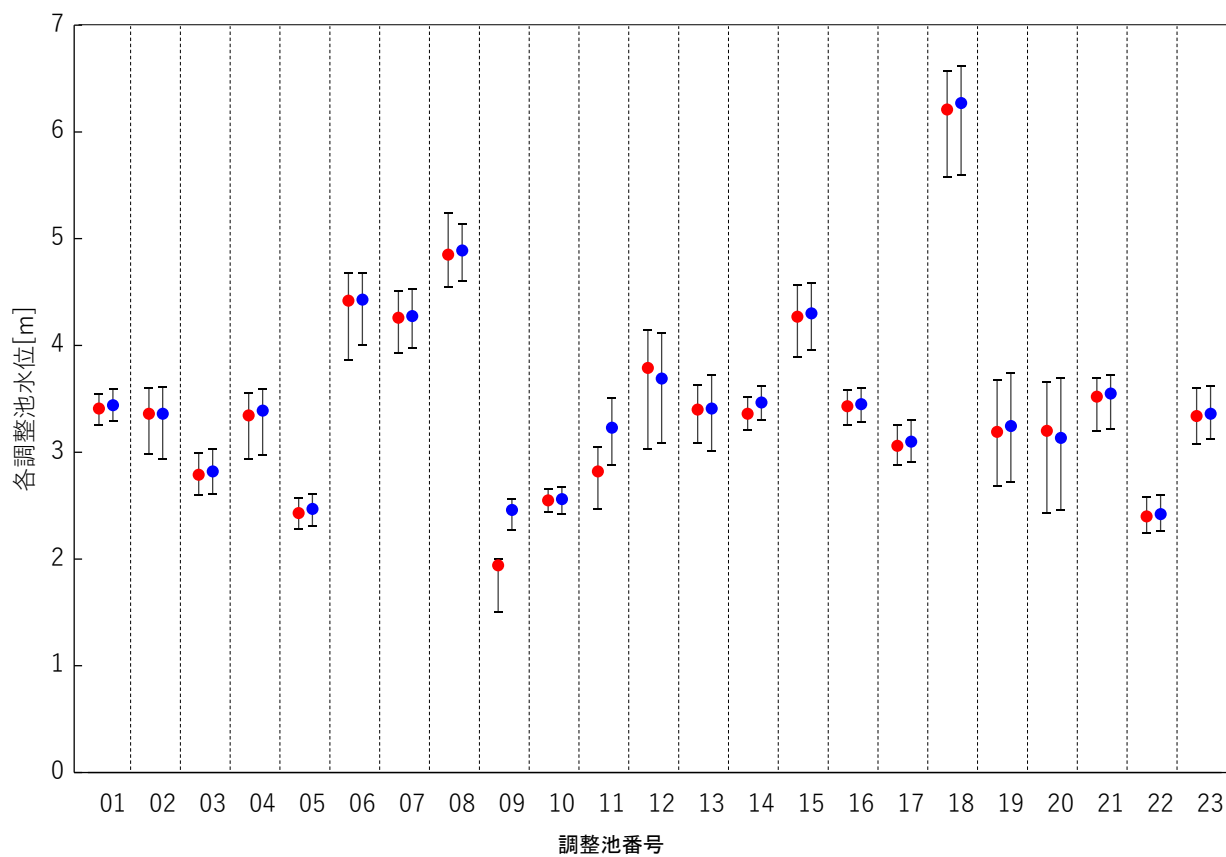


図 10 E1 浄水場の各調整池の水位変動 (赤：2022 年 8 月、青：2023 年 2 月)
 (プロットは平均値、上下の幅は最大値と最小値)

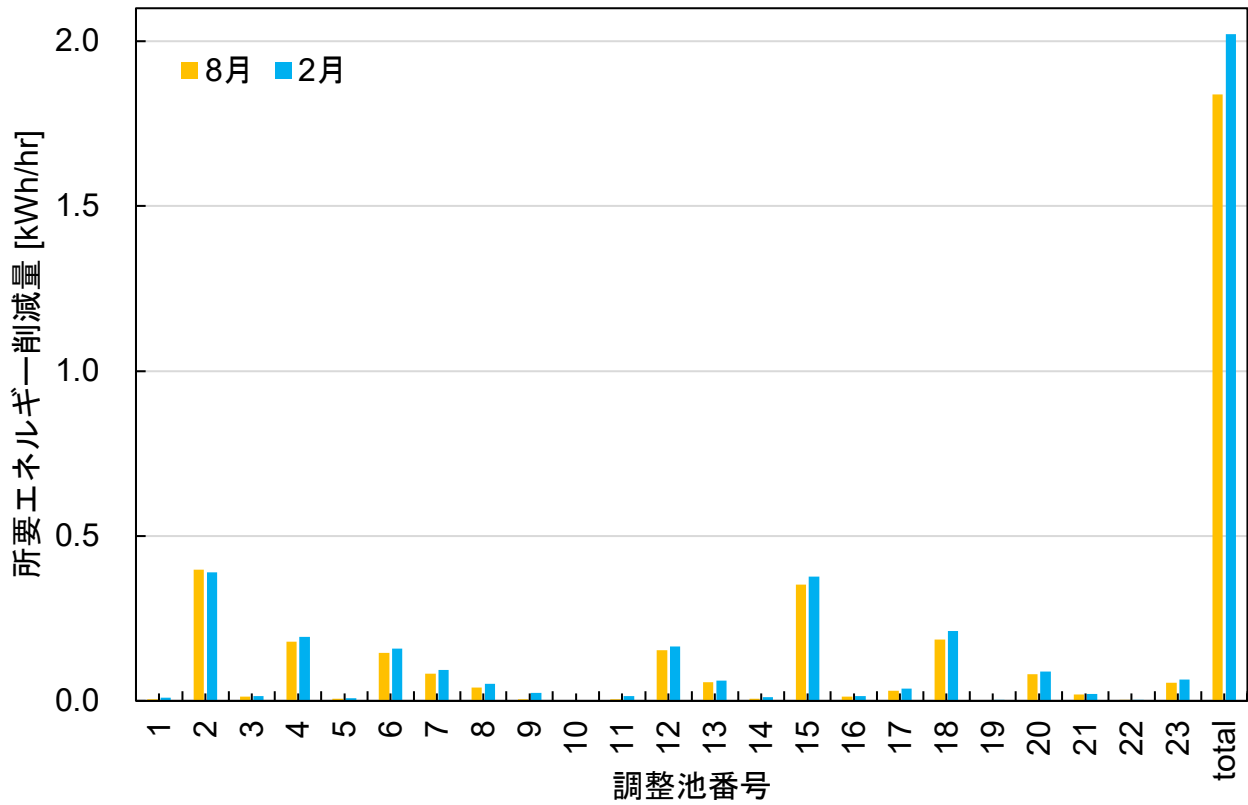


図 11 E1 浄水場の調整池水位調整による所要エネルギー削減量

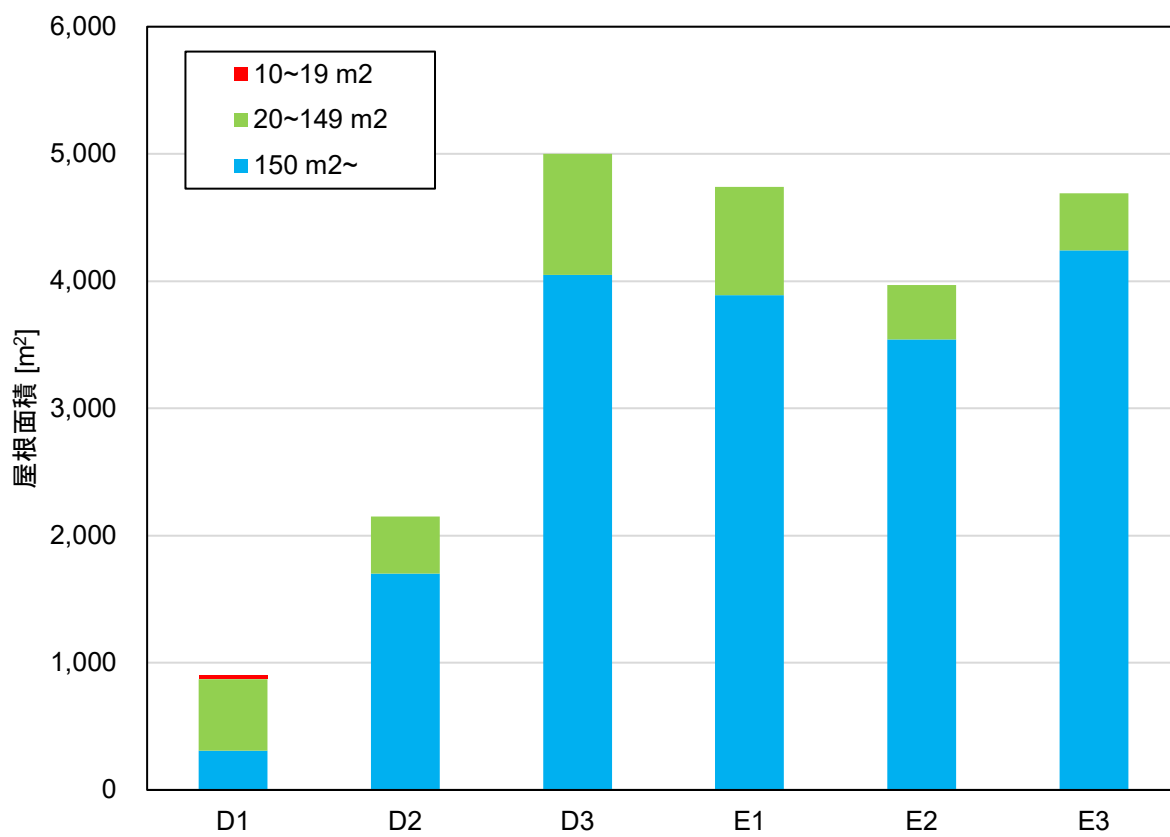


図 12 各浄水場の建物屋根面積