

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
社会文化環境学専攻

2017 年度

修士論文

小規模施設の排水熱ポテンシャルの推定と

その利用計画の検討

- 柏市卸売市場をケーススタディとして -

Estimation of wastewater thermal potential of  
small-scale facilities and examination of its use plan  
- case study of Kashiwa city wholesale market -

2018 年 1 月 22 日提出

指導教員 味埜 俊 教授

杉山 大騎

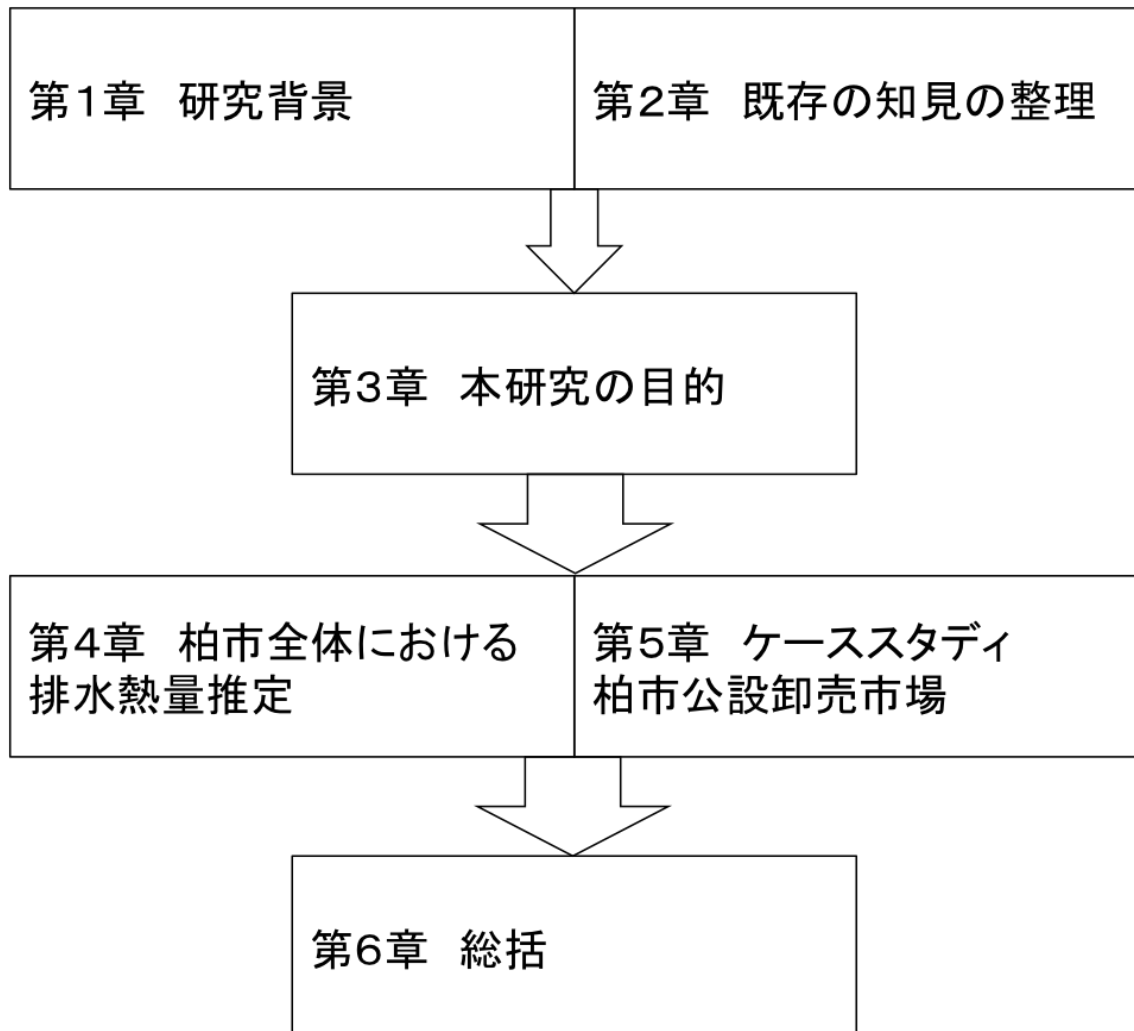
Sugiyama, Daiki

# 目次

本論文の構成 .....	3
第 1 章 研究背景 .....	4
1.1 日本のエネルギーバランス .....	4
1.2 再生エネルギーによる分散型エネルギー回収システムの構築...6	6
1.3 新下水道ビジョン加速戦略 .....	7
第 2 章 知見の整理 .....	8
2.1 未利用エネルギー .....	8
2.2 下水熱エネルギー .....	9
2.3 下水熱回収機器 .....	11
2.3.1 下水熱交換器 .....	11
2.3.2 ヒートポンプ .....	12
2.4 先行事例 .....	13
2.5 下水熱に関する既往研究 .....	15
2.5.1 下水流量や下水温度について .....	15
2.5.2 下水熱活用への研究 .....	16
第 3 章 研究の目的 .....	17
第 4 章 柏市全体における排水熱量推定 .....	19
4.1 柏市概要 .....	19
4.2 下水熱ポテンシャルマップ作成.....	20
4.2.1 概要 .....	20
4.2.2 下水熱ポテンシャルエネルギー .....	22
4.2.3 手法と結果.....	23
4.3 1 日における時刻別の下水流量推定 .....	25
4.4 下水量推定における課題 .....	26

4.5 施設における運用を想定した計画 .....	27
4.6 施設における回収可能熱量推定の考察 .....	33
<b>第5章 ケーススタディ .....</b>	<b>34</b>
5.1 対象地域 .....	34
5.1.1 概要 .....	34
5.1.2 排水事情 .....	35
5.2 データ収集手法 .....	36
5.2.1 概要 .....	36
5.2.2 気温データ .....	39
5.2.3 排水量データ .....	39
5.2.4 水温データ .....	41
5.3 日別における排水熱ポテンシャル量 .....	45
5.3.1 結果 .....	45
5.3.2 考察 .....	48
5.4 回収地点と利用地点の距離による熱減衰 .....	49
5.4.1 市場周囲に流れる下水道が持つ熱量ポテンシャル .....	49
5.4.2 市場内における位置関係 .....	50
5.4.3 熱移送で減衰する熱量 .....	52
5.4.4 熱移送に要求されるポンプ動力 .....	54
5.5 市場における設計 .....	56
5.6 考察 .....	60
5.6.1 他の卸売市場について .....	60
5.6.2 課題 .....	60
<b>第6章 総括 .....</b>	<b>4</b>
6.1 結論 .....	61
6.2 課題 .....	61
<b>参考文献 .....</b>	<b>62</b>

## 本論文の構成



第1章で研究背景として、日本のエネルギー事情や下水道行政事情についてまとめた。

第2章で下水熱に関する研究やそこで用いられる技術について既存の知見をまとめた。

第3章で本研究の目的についてまとめた。

第4章で柏市全体の下水熱ポテンシャルを計算するとともに、柏市に存在する小規模施設からの回収についてまとめた。

第5章でケーススタディとして柏市公設卸売市場を選定した上で、そこで行ったデータ収集と熱量推定、利用計画の検討をまとめた。

第6章で総括として本研究全体についてまとめ、今後の課題を述べた。



# 第1章 研究背景

## 1.1 日本のエネルギーバランス

2011年3月に東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所の事故が発生したことが日本のエネルギー政策全体の転換点となった。海外からの資源に対する依存度が高いことで国際情勢に影響されやすいことがエネルギー政策の課題となっている。化石燃料に依存したエネルギー政策から再生可能エネルギーを活用していくことで依存を減らし、資源の乏しい日本においてエネルギーの自給率を向上させ、安定供給を確保することができる。また温室効果ガスの削減という点でも重要な課題である。(エネルギー白書 2017)

現在の日本の一次エネルギー国内供給構成は下の図のようになっている。

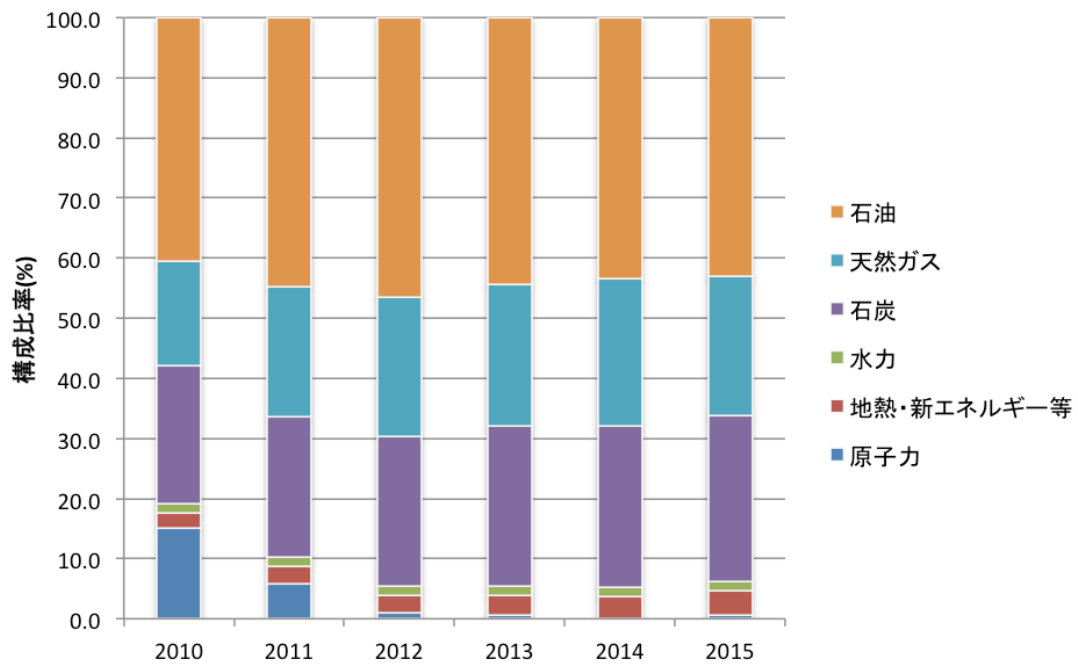


図 1 日本の一次エネルギー国内供給構成比率(エネルギー白書 2017 より作成)

エネルギー自給率は2010年には19.9%だったが、2015年には7.0%となっている。2011年の東北大震災以降、大多数の原子力発電が稼働停止して2015年には0.6%となっていることが大きな要因である。地熱・新エネルギー等、水力を除いた自然エネルギーは年々伸びてきているがそれでも2015年に4.0%と全体における割合は小さい。

2014年に決定された「エネルギー基本計画」の中では2012年度から2030年度までの約20年間の間にエネルギー消費効率(最終エネルギー消費量/実質GDP)を35%改善することを見込んでいる。下の図は経済成長(1.7%/年)を達成した上での最終エネルギー需要目標である。

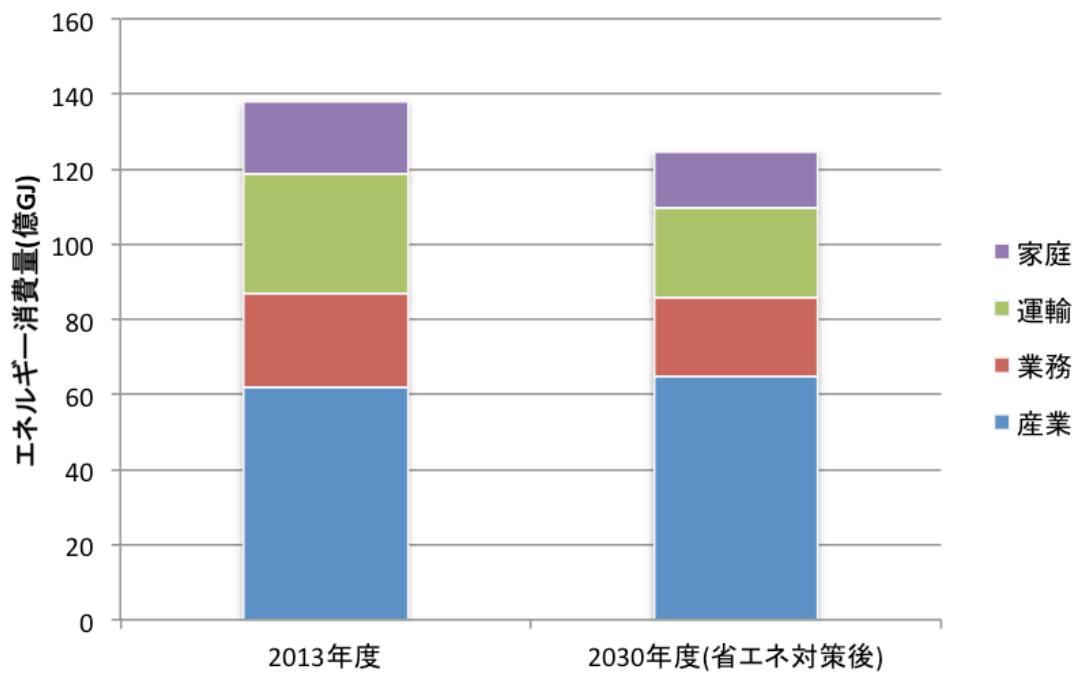


図 2 エネルギー消費量(エネルギー白書 2017 より作成)

## 1.2 再生エネルギーによる分散型エネルギー回収システムの構築

分散型エネルギーシステムの意義は、大きく分けて2つある。一つは今まで利用価値がないと考えられて破棄されてきたエネルギーを有効活用することで地域全体でのCO<sub>2</sub>排出量を削減することができる。もう一つは緊急時に大規模電源などからの供給に困難が生じた場合でも地域において一定のエネルギーを確保することに貢献できる。(空気調和・衛生工学会, 1994)

機器が広く普及するようになればコスト面でもバランスの良い分散型エネルギー回収システムとして重要な位置付けとなる可能性がある。小規模な再生可能エネルギー源を組み合わせた分散型エネルギーシステムの構築を考える際に、個人や小規模事業者も参加しやすくてできるような枠組みが必要である。

例えば、コージェネレーションは都市ガスや石油などを燃料とした発電の際に生じる排熱を有効活用することで高いエネルギー総合効率を実現することができる仕組みである。これはスケールメリットが重要であるため、各需要家である施設や家庭に適切な設備を配置する必要がある。

分散型熱回収の中でも排水熱利用は省エネとして大きな期待ができる未利用エネルギーである。既存研究によって都市内に存在する排水にはエネルギーとして大きなポテンシャルが存在することがわかっている。都市圏で利用されたエネルギーの1割弱が排水として排出されていると考えられており、そのエネルギーのうち土壌への熱伝導によって夏季では40%が下水道中で失われている。冬季では土壌との温度差が小さいために下水の熱輸送には大きな影響を与えずほぼ熱を失わない。(中山ほか,2007)

下水道は全国の電力消費量の約0.7%(約70億kWh)の電力を消費し、全体の温室効果ガスの0.5%(約621万t-CO<sub>2</sub>)を排出している。一方で下水汚泥の有機物や下水熱は大きなエネルギーポテンシャルを有している。この下水熱を有効活用することで全体のエネルギー消費を抑えることができる。下水処理量が年間約147億m<sup>3</sup>でここから熱量ポテンシャルを計算すると7,800Gcal/hとなる。これは全量使用することが可能になれば約1,500万世帯の年間冷暖房熱源に相当する。変換効率や放熱を考慮すると最終的な使用可能量は減少するがそれでも大多数の施設を賄うことができる可能性を秘めている。

### 1.3 新下水道ビジョン加速戦略

平成 26 年に「新下水道ビジョン」が取りまとめられたあと、人口減少による個々の自治体の経営の悪化や施設の老朽化などがさらに進行し、一方で海外の水ビジネス市場の活性化や公共施設の運営方式の変化などを踏まえた上で平成 29 年 8 月に「新下水道ビジョン加速戦略」が策定された。(新下水道ビジョン加速戦略, 2017)

加速戦略重点項目は以下のようになっている。

- I 官民連携の推進
- II 下水道の活用による付加価値向上
- III 汚水処理システムの最適化
- IV マネジメントサイクルの確率
- V 水インフラ輸出の促進
- VI 防災・減災の推進
- VII ニーズに適合した下水道産業の育成
- VIII 国民への発信

この中の「重点項目 II 下水道の活用による付加価値向上」の欄において管渠更新や熱需要者に合わせた熱交換器整備による下水熱利用の案件作成支援という項目が存在する。

下水道事業における老朽化施設は増大しており、布設後 50 年以上を経過した管渠延長は平成 27 年度末で約 1.3 万 km、20 年後には 10 倍に増加する見込みと示されている。(新下水道ビジョン加速戦略, 2017)

## 第2章 知見の整理

### 2.1 未利用エネルギー

未利用エネルギーとは夏に大気よりも冷たく、冬は大気より暖かい河川水や下水などの温度差エネルギー、工場などの排熱といった今まで利用されていなかったエネルギーである。資源エネルギー庁では、未利用エネルギーの具体的な種類として生活排水や下水・下水処理水の熱、清掃工場の排熱、変電所の排熱、河川水・海水・地下水の熱、工場排熱、地下鉄や地下街の冷暖房排熱、雪氷熱などをあげている。(エネルギー白書 2017)

未利用エネルギーの賦存量と活用可能量の推計結果を下に示す。

表 1 未利用エネルギーの賦存量&活用可能量

未利用エネルギー	賦存量		活用可能量		備考
	TJ/年	(%)	TJ/年	(%)	
ごみ焼却排熱	323,245	2.7	91,357	1.51	全国の一般廃棄物処理清掃工場を対象
下水汚泥焼却炉排熱	11,066	0.09	3,625	0.06	全国を対象
下水汚泥消化ガス	7,444	0.06	2,285	0.04	全国を対象
工場排熱	1,286,971	10.74	1,029,509	16.99	エネルギー多消費6業種の1種管理指定工場を対象
火力発電所排熱	2,829,097	23.6	2,546,187	42.03	全国の一般+共同を対象
変電所排熱	4,256	0.04	4,256	0.07	全国の5万KVA未満対象
下水熱	451,666	3.77	314,271	5.19	全国を対象
海水	743,434	6.2	743,434	12.27	首都圏、近畿圏のみ
河川水	6,297,806	52.54	1,299,484	21.45	全国の1級河川を対象
地下水	32,199	0.27	24,310	0.4	首都圏、近畿圏のみ

(三菱総合研究所, 2012)

すでに火力発電所排熱や工場排熱は需要地点と一体化していることもあり、実際に熱回

収されている。活用可能量が大きい海水や河川水は需要地点と距離が離れていることが多く活用が難しいというデメリットがある点に対して、下水熱は活用可能量が非常に多いことや比較的、都心行きの消費に近いところにあることから、活用が期待されている。エネルギーを利用する方法としては主に熱交換器によって下水管外または下水管内で熱回収を行った後にヒートポンプによって利用する温度に変換して用いることを想定している。(エネルギー白書 2017)

熱エネルギーは電気エネルギーとの違いとして以下の点が挙げられる。①離れた距離への輸送が難しい、②まとまった熱需要を得られる地点が限定されている、③電気に比べて比較的容易に貯蔵することができる、④気候や用途に対する影響が大きい。

これらの特徴より熱需要は個別性を加味して考慮することが必要である。また上記の特徴から需要地に対して接近していることが重要である。他にも関係者が多数に及ぶことがあるため、関係者間の調整や許認可手続きに注意しながら進めることが必要である。

## 2.2 下水熱エネルギー

下水熱エネルギーとは都市内に存在する未利用エネルギーのうち下水中に熱の形で貯蔵されるエネルギー熱量のことである。

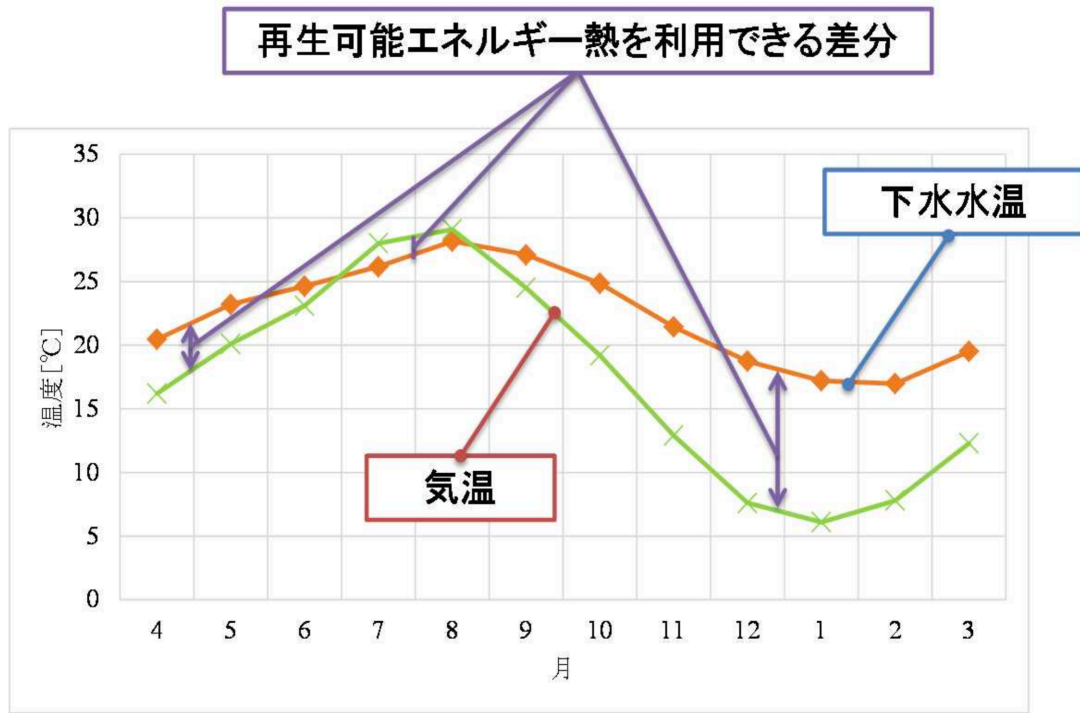
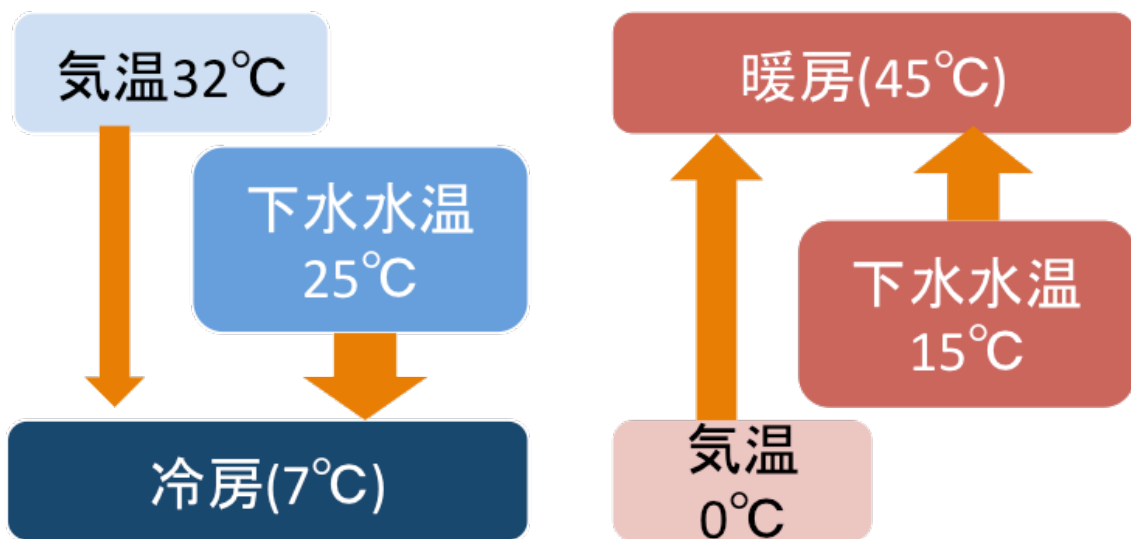


図 3 下水熱利用における温度差概要

(国土交通省, 下水熱利用マニュアルより引用)

水温と気温の差を利用して、夏に大気よりも冷たく、冬は大気より暖かい下水からヒートポンプを利用して回収する。下の図のように温度差が少なくなることで、電気使用量を削減することができるため、需要家にとっては費用の削減が、都市全体としては温室効果ガスの削減が期待できる。



#### 図 4 下水熱利用のイメージ

都市の低炭素化の促進に関する法律(2012 年)(通称エコまち法)のなかで下水道法の特例として下水熱を利用するために、低炭素まちづくり計画区域で民間事業者が下水道の排水施設に接続設備を設けて未処理下水を取水することが可能になった。(国土交通省, 2012)



## 2.3 下水熱回収機器

### 2.3.1 ヒートポンプ

ヒートポンプは冷媒を強制的に膨張、蒸発、圧縮、凝縮させながら循環させて熱交換を行うことによって低温物体から熱を吸収して高温部へ組み上げるシステムである。エネルギー効率が従来のシステムより高いことが特徴となっている。欧米では熱利用を再生可能エネルギーとして評価する動きもある。現在では家庭でのエアコンの空調に多く導入されているが給湯機器や冷蔵・冷凍庫など多様な種類の製品にも使用されている。高効率で大規模施設に対応できるヒートポンプはオフィスビルの空調や病院・ホテルの給湯などにも利用されており、工場や農場などまだ実例が少ない場所でも利用が期待されている。暖房や給湯でヒートポンプを使用する際には必要なエネルギーを1とすると、その約 5/6 を空気から取り出した熱エネルギーで賄うことができるので消費電力は必要な熱エネルギーの 1/6 で済む。

初期投資がかかるが、ランニングコストを低く抑えることができるために試用期間全体でコストを見積もる必要がある。また蓄熱システムを考慮することで電力負荷の平準化が図られて設備の利用率が改善されて電力利用料金が引き下げられることにつながる。(日本エレクトロヒートセンター)

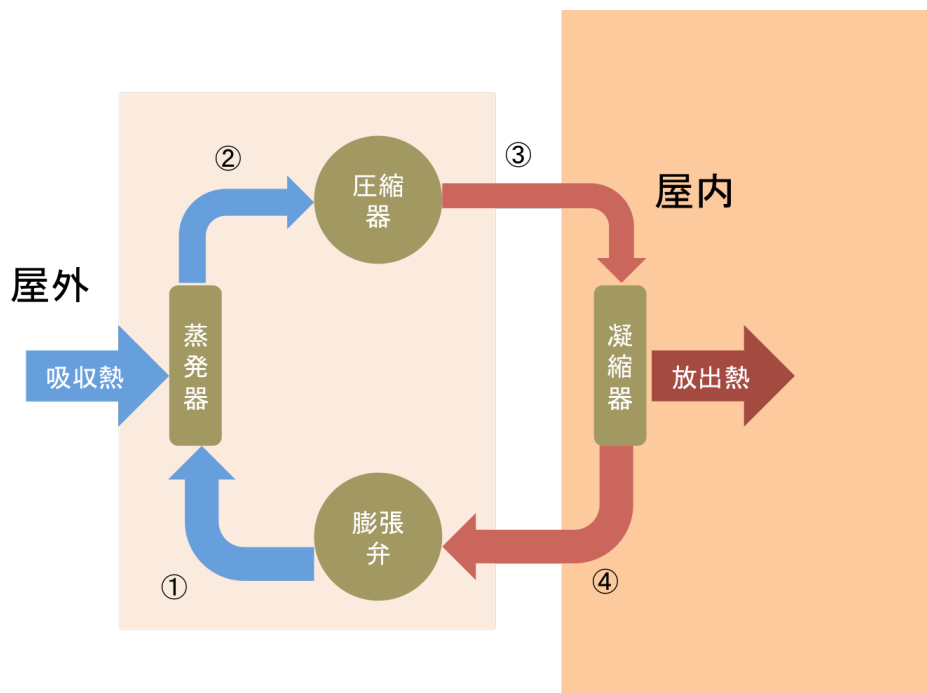


図 5 ヒートポンプの仕組み

膨張弁が④の状態の冷媒を急激に膨張させて低温低圧にさせて①の状態へ、それを蒸発器によって外部から熱を吸収し、蒸発させた状態が②である。圧縮器によって②を高温高圧にした状態が③である。凝縮器によって③が液化されて熱を外部に放出する。そして④の状態になる。（日本エレクトロヒートセンター）

### 2.3.2 熱交換器

下水熱を回収する方式としては以下の7つが考えられる。（下水道新技術研究所年報, 2011）

① コンパクト型管外熱交換器方式

マンホールにポンプを設置して取水した下水を地上にある熱交換器に流入させる方式。

② 二重管熱交換器方式

直接熱交換器へ圧送する方式。

③ 二重管式下水管方式

下水管とヒートポンプの間に地中に二重管式下水管（熱交換器）を入れる方式。

④ 管組み込み方式

下水管の中に熱媒を流す配管を入れて下水と熱交換を行う方式。インバート部分に組み込むため実現が難しい場合が多い。

⑤ 既設管設置方式

下水管の中に2枚のステンレス製の板を敷いて、板の下に熱媒用の配管を入れる方式。

⑥ 更生管組み込み方式

下水管と更生管の間に熱媒を流す熱交換器を敷設する方式。更生時期と時期を合わせる必要がある。

⑦ ロードヒーティング

融雪利用の場合にヒートポンプによって加熱した温水をそのまま流す方法や、下水熱をそのまま利用する方法。

施設や場所によって事情は異なるが下水道からの熱回収は現在のところ①と③が一般的である。技術の発展、また更新時期に差し掛かっていた場合④や⑥を検討する価値がある。

熱交換器の場所における排水熱回収メリットとデメリットを下に示す。

表 2 設置場所による熱交換器の利点・欠点

	メリット	デメリット
家庭	比較的高温 熱輸送距離が短い 需要家と供給者が同じ 雨水の影響が小さい 供給量 100kW まで	時間によって供給量が不規則 排出物によって破損 維持管理費用などのコスト
下水管	大量の排水 熱輸送距離が比較的短い 維持管理が安全 供給量 1000kW まで	下水管網に依存する 水処理に影響がでる可能性
処理場	水処理に影響しない 大量の排水 排水が綺麗 水が冷やされる 供給量 10MW まで	需要家と距離が遠くなる傾向にある

## 2.4 先行事例

下水熱エネルギーや排水熱エネルギーの活用事例としては以下のようなものがある。

国内の下水道施設での利用が 35 箇所（平成 24 年度）存在し、近年の事例だと境市鉄砲町(平成 28 年度)の事例では、大型商業施設で給湯用の温熱利用を行ったあとに空調用で冷熱利用をする「カスケード利用方式」を採用している。流量としては 1500(m<sup>3</sup>/日)となっている。平成 29 年に予定されている名古屋市ささしまライブ 24 地区では、近隣にある下水処理施設から再生水 30,000m<sup>3</sup>/日を送水する。空調用熱源が利用用途で、地域冷暖房としての熱源用水を供給する予定である。（下水熱利用マニュアル）

新潟市では市役所前のバスターミナル整備に下水熱を利用した歩道融雪に下水熱を利用することを効果検証している。ヒートポンプを用いておらず、温められた不凍液を歩道の

下に循環させている。(国土交通省,新潟市の取組)

他にも行楽1丁目でポンプ所から熱を供給する事業や芝浦再生水センターの下水処理水を利用しているソニーシティの事例、仙台市のスーパーマーケットで管渠に熱回収管を巻いて再熱している事例などがある。(下水熱利用マニュアル)

海外の事例としては、フィンランドのヘルシンキでは市内インフラの90%が地域熱供給で賄われており、2006年から稼働している。カナダの選手村では10度から15度の下水を熱源として低温熱供給を行なっている(三菱総合研究所, 2012)。ドイツのボーフム市では公営温水プールに下水熱を供給して熱需要の73%を賄っている。下水最少流量が300m<sup>3</sup>/時と大量の供給源となっている。(下水熱利用マニュアル)

次に施設排水熱についての事例を紹介する。

東京都の後樂園や札幌での融雪で排水熱を回収して利用するという試み(Funamizu et al, 2001)があり、この中で熱回収機器の維持管理のための洗浄技術と配置場所が重要だということを示唆している。他にもホテルの排水を用いて圧縮ヒートポンプシステムを設計し、シミュレーションにより冬の週末以外は完全に賄うことができるという研究(Baek et al, 2005)、ドイツの学生ホテルでの熱回収の実証実験(S. Alnahhal et al, 2016)や、中国での共同風呂における排水熱利用の事例(Chao et al, 2012)、ゴルフクラブハウスでの浄化槽温排水(排水量最大2.5m<sup>3</sup>/h)を利用する事例(三和ほか, 2009)、ホテルでの浄化槽温排水(排水量18m<sup>3</sup>以上/h)を利用する事例(東洋製作所ほか, 2014)などがある。

日本と海外の熱需要の違いとしては、欧州では温熱需要が大きい日本では冷熱需要が大きい。そのため温熱と冷熱の配管が必要となってコストが増大してしまう。熱需要量も相対的に小さくなってスケールメリットを發揮しづらい。また、都市計画的に公共熱供給ネットワークが欧州等ではあるのに比べて日本では存在せず民間が主体であるため事業コストがかかり、大規模な開発に合わせる必要がある。他にもエネルギーセキュリティや脱石油、環境問題への関心の高さがある。(三菱総合研究所, 2012)

## 2.5 下水熱に関する既往研究

### 2.5.1 下水流量や下水温度について

下水熱に巨大な熱量ポテンシャルがあることは過去の研究からすでにわかっており(三好、1990)、一例として福岡市で消費される全消費エネルギーのうち水系に捨てられる割合は4.3%、北九州市の場合は1.9%である。(山下ほか、1991)

GIS によって温熱需要と下水からの回収熱量をシミュレーションによってマッチングさせるというような手法が提案されている(一ノ瀬ほか、1996)。この研究はメッシュごとに排出量や需要量を算出している。また同筆者は、東京 23 区内において GIS 上で処理区単位でのヒートポンプ設置数に伴う利用可能熱量や需給関係を示した。(一ノ瀬ほか、2000)

不正な接続によって流れ込む雨水の存在は本流の温度変化にほとんど影響を及ぼさない(Schilperoort et al, 2012)。合流式下水道の場合においては、日単位で通常時に対する流動の変動性は比率でいうと 0.25~1.50 だとわかり、一方で水温は 0.90~1.05 とほぼ変動性がない。(Cipolla et al, 2014)

夏場の温度上昇の影響で下水熱の冷却水としての利用は熱源効率の工場に繋がりにくい可能性があるが、都市排熱削減によるヒートアイランド抑制効果は期待されている。(地域エネルギーマネジメントシステムの構築に係る実現可能性調査事業, 2012)

熱回収によって下水温度が下がることで処理場での硝化脱窒反応にどの程度影響を与えるかシミュレーションする研究結果(Wanner et al, 2005)から、大きな影響を与えない可能性が高い。ただし多数の地点で実際に回収した場合の結果ではないため将来的に複数の施設が導入した際に問題が発生する可能性がある。この論文では下水管の温度は流入時に最も高く流下するにつれて温度が低下することが示された。

下水熱利用のためには管路内における流量を推定する必要がある。実測値を計測する事前段階として計画をするための推定手法が開発された。(三毛ほか、2014) この推定手法が下水熱ポテンシャルマップ作成の手引きに直接採用されている。

## 2.5.2 下水熱活用への研究

下水熱利用を検討するために温度と流量から最適な回収地点を決定する評価フレームワークを提示してケーススタディを行った事例では(Kretschmer et al, 2016)、回収の際に処理場への熱減衰への影響を考える必要があると述べられており、都市における分散給エネルギー源としては有効だが、熱による処理への影響を懸念している。

家庭内の排水から熱を回収する際には、下水道へ家庭で使用する 90%のエネルギーが流れ出ており、家庭で下水熱回収をすることで家庭全体の温熱エネルギー消費の 40%を全体で抑えることができる。(Timea et al, 2010)

下水熱回収におけるCO<sub>2</sub>排出量やライフサイクル評価まで行われており(池上ほか, 2008; 池上ほか, 2009)、この中で利用温度差が2℃以下という結果が出ているため、5℃という設定は過大評価されている可能性を示唆しておりこの点において注意が必要である。

下水熱回収のために都市開発の方からアプローチをかけて、下水ポンプ所周りの土地用途を変更して熱需要と熱供給のマッチングを行い、CO<sub>2</sub> 排出量削減を目指すといった方向性の研究が存在する。(長谷川ほか、2013)

### 第3章 研究の目的

既存研究から、下水排水から熱回収をするという試みは各地で行われていることがわかる。しかし基本的にスケールメリットの点から大規模な熱回収を行うことができる箇所に限られている。一方で施設単体において排水から熱回収を行っている事業団体が複数存在する。ここで二つの排水回収を重ね合わせることで小中規模施設でも熱回収の効果が向上するのではないかと考えた。

また社会的な背景として人口減少と下水管の老朽化を踏まえると、下水道に接続されていない地域は今後増加していくと予想できる。そこで既存の下水道だけではなく地域における排水全体を考慮した排水からの熱回収を検討していく必要があると考えた。

他にも施設排水からの熱回収のメリットとしては計画、設置、維持管理が施設主導で行うことができるため楽であること、多数の施設が下水管から熱を回収しようとした場合に予想される下水管の持つ熱量低下に依らないことなどが施設排水からも回収することを同時に考慮するメリットといえる。

都市内の下水流量や水温の計測による都市規模に応じた傾向の把握 (Cippolla et al, 2014)、都市全体の水収支、熱収支を計算すること (澤部ほか,2012) など都市全体の排水評価はすでに複数行われている。また下水熱冷暖房導入による CO<sub>2</sub> 削減評価 (池上ほか, 2009) やフイージビリティスタディ (FS) (下水道新技術研究所年報,2011) も複数見られる。浄化槽施設 (三和ほか, 2009) や下水管からの熱回収 (梅野ほか, 2015) といった単体施設からの熱回収事例についても複数存在する。これらの排水熱利用のためのケーススタディは主に大規模施設に集中している。排水からエネルギーを回収する際にはスケールメリットが効いてくるためである。需要量と供給量がともに大きい大規模施設での活用が主に検討の対象となっている。

一方で都市全体において分散的に小中規模施設での排水熱利用が可能になれば大幅なエネルギー削減を見込むことができる。ここで、小中規模施設での下水熱エネルギー利用の見込みがどの程度あるかという点と、小中規模施設から排出される排水、熱回収地点と熱需要施設の位置関係に着目してどの程度排水熱エネルギーを回収できるかという点を検討する。これによって現在では難しいとされている小中規模施設での下水熱利用の可能性を論じる。

本研究では小中規模施設で排水熱回収導入を検討する際に位置関係がどれほど影響を与えるかということ熱量の点から検討し、下水管からの熱回収と施設排水からの熱回収を同じ枠組みで考えた場合の効果を時間単位で着目して推定することを目的とした。

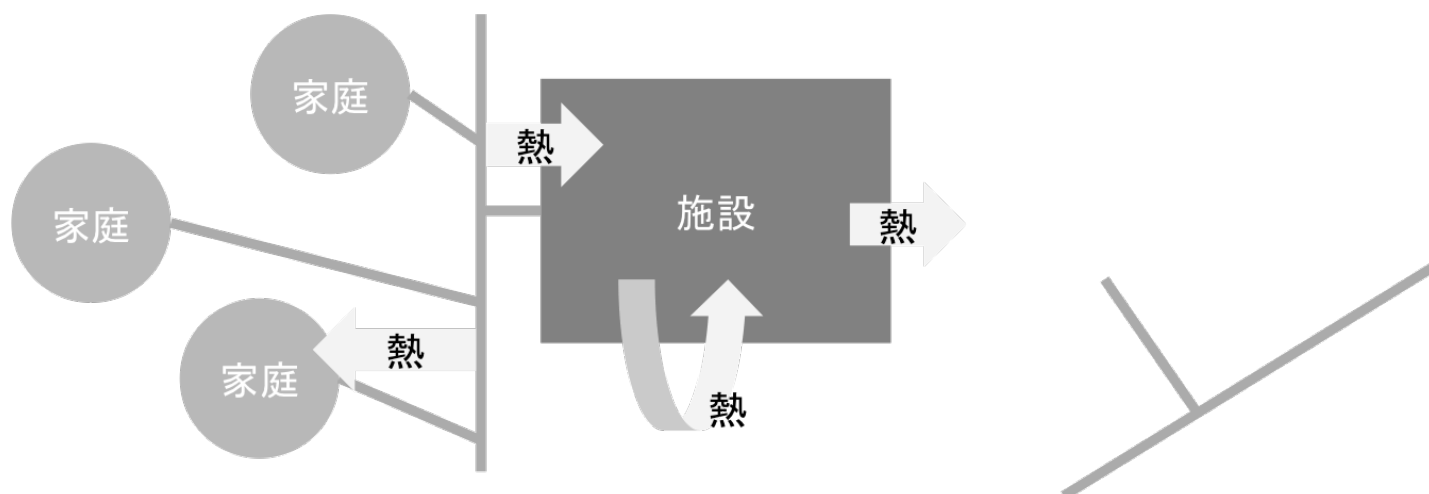


図 6 小規模施設における熱回収の概念図



## 第4章 柏市全体における排水熱量推定

### 4.1 柏市概要

対象地域として柏市を選定した。柏市は千葉県の北西部に位置し、面積 114.74km<sup>2</sup>、人口は 421,600 人(平成 30 年)の都市である。地形は概ね平坦で、商業施設が多く立地している市街地や幹線道路沿いにある工場や事業所、離れた場所には田畑などが多く存在しており、利根川や大堀川など複数の川が市内に見られる。

手賀沼処理区と江戸川左岸処理区という二つの処理区域をもっている。平成 28 年度における下水道整備状況は下の表のようになっている。

表 3 下水道整備状況

行政区域面積	11,474	ha
市街化区域面積	5,453	ha
行政区域人口	413,657	人
処理面積	4,643	ha
処理人口	372,446	人
普及率	90.0	%

(柏市 平成 29 年度版下水道事業年報より)

また老朽化が進んでおり、平成 27 年度において下水管は 1,255km の管路延長となっている。布設後 50 年を経過する管路が増加してきている。管の入替え工事が難しい箇所では長寿命化のための改築更新工事を行なっている。

## 4.2 下水熱ポテンシャルマップ作成

### 4.2.1 概要

下水熱ポテンシャルマップとは、下水熱利用にあたって利用者が計画・設計する際に下水熱の賦存量や存在位置を把握するための情報を整理する地図である。ポテンシャルマップによるポテンシャルの推計精度は検証事例によると、-10~-25%程度の誤差があると実測値から予想されているがいずれもマップで推定した値より大きいため、実際に利用を検討する際に推定値を用いた場合よりも大きな効果が見込まれる可能性がある。(下水熱ポテンシャルマップ)

柏市全域の下水道に流れている水量から、全体の熱総量を推定するためにまず市内における下水熱ポテンシャルマップを作成した。国土交通省が下水熱ポテンシャルマップ作成の手引きを公開しているため、基本的にこれに沿った。(国土交通省,2014)

構想段階に利用可能な広域ポテンシャルマップと事業化段階に利用可能な詳細ポテンシャルマップの2種類が存在するが、今回はデータの関係上、広域ポテンシャルマップを参考にした。

柏市下水道局から電子化された下水道台帳データを提供していただいたため、通常手法を元に一部独自手法を用いた。

マップの種類、使用したデータや手法などを次の表に示す。

表 4 データ一覧

データ項目	概要
マップの種類	広域ポテンシャルマップ
利用データ	下水道台帳電子データ、建物現況データ
ポテンシャルの算出方法	流量既知点における下管流量データ
マップの作成エリア	柏市 位置情報
ポテンシャル算出対象管路	処理区内のすべての合流継続情報管を基本
マップの算出スケール	管路における月別管流量の平均値情報
下水道台帳電子データ	下水管用途情報
建物現況データ	建物図形情報 位置情報 建物の地図上の面積
都市計画データ	土地利用データ
下水流量データ	対象処理区内の下水道施設の日平均下水流量

下水道台帳電子データはシェープファイル形式のものを利用した。建物現況データについては床面積が得られなかったため、建物面積で代用している。これによって実際の使用量とは誤差が大きくなることが考えられるが、都市全体で見ると影響は小さいと考え今回はこのデータで進めた。ソフトウェアは FileMaker Pro と QGIS を用いて作成した。

#### 4.2.2 下水熱ポテンシャルエネルギー

下水熱ポテンシャルエネルギーとは主に下水流量に温度差と容積比熱を乗じて算出されたものである。これによって下水から回収できるポテンシャルエネルギーが推定値としてわかる。

ポテンシャル熱量の計算は下記の式(A)のようになる。

$$Q_h = C_w \times G_h \times \Delta T$$

$Q_h$ : 日平均下水熱ポテンシャル[MJ/日]

$C_w$ : 水の容積比熱(=4.164[MJ/m<sup>3</sup> K])(『JSME テキストシリーズ伝熱工学』より)

$G_h$ : 下水流量[m<sup>3</sup>/日]

$\Delta T$ : 気温と水温の温度差[K]

下水流量、温度差ともに測定可能な場合は、測定値を利用する。測定ができない場合は推定値を用いる。

下水流量は既知点である処理場における下水流量から全下水管に割り当てた。下水熱ポテンシャルマップを考える際には温度差を5度と仮定して考えた。

ポテンシャルの季節変動については、下水流量は各月の日平均流量基準に対して約±10%の範囲内、各月の日平均流量に大きな変化が見られないという報告がある。(三毛ほか、2014)

### 4.2.3 手法と結果

計算フローを下記に示す。

- i. 建物の重心位置を計算した後、最近傍距離のマンホールと結びつける。
  - ii. マンホールごとの建物面積を計算する。
  - iii. 下水の流れに沿って、最終的にマンホールが受け持つ建物面積をそれぞれ集計する。
  - iv. 流量既知点から建物面積に応じて流量を按分する。
  - v. 下水管の上流部分であるマンホールの流量を下水管と結びつける。
- これによって一本の下水管に流れる下水流量が推定できる。

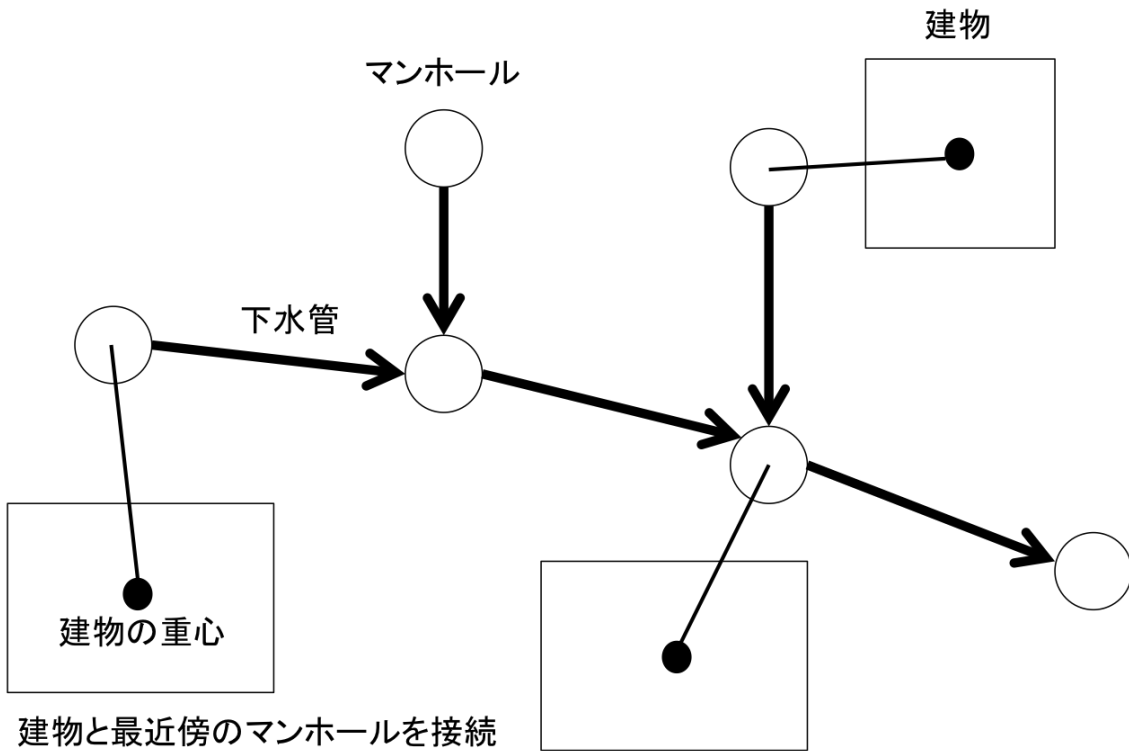


図 7 下水熱計算アルゴリズム

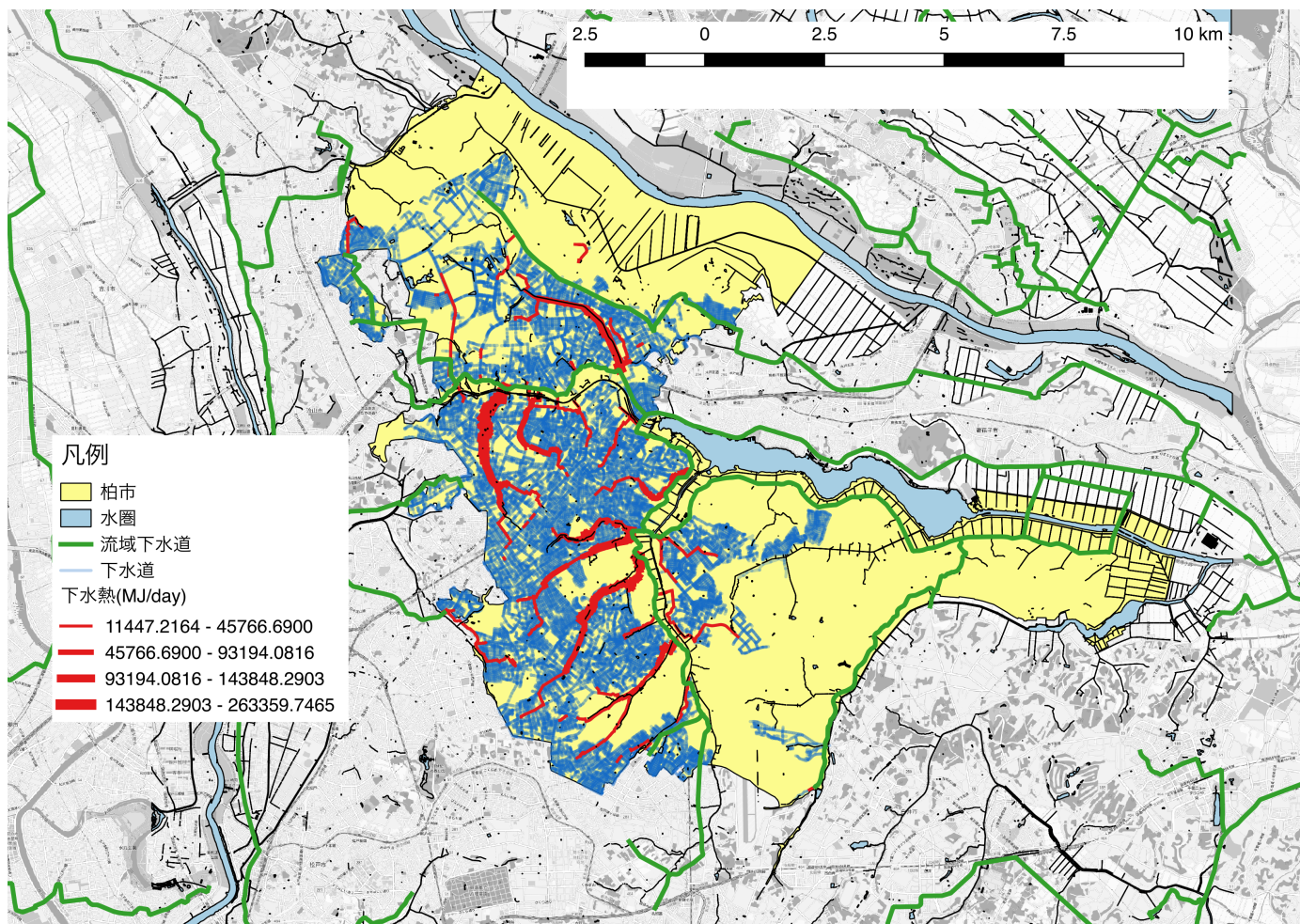


図 8 作成したポテンシャルマップ

上図を見ると、JR 柏駅周辺は下水熱が大量に回収できる場所ではないことがわかる。流域下水道に流れ込むまでの下水管の一定の距離区間において下水熱量が多いことがわかる。

### 4.3 1日における時刻別の下水流量推定

晴天日における一日当たりの流量までは上記の方法で推定ができるが時刻あたりの流量としては一日におけるパターンを知る必要がある。ここで文献から代表的な値を引用する。元の論文では実測値と推定値を比較しており、この手法の推定値は実測値に対して0.7~1.1倍と精度が良いことがわかっている。(三毛ほか、2014)

本来であれば上流の建物用途別延床面積に応じて補正をかけるべきだが、オーダーとして5%以下であることが多いため、今回は無視する。

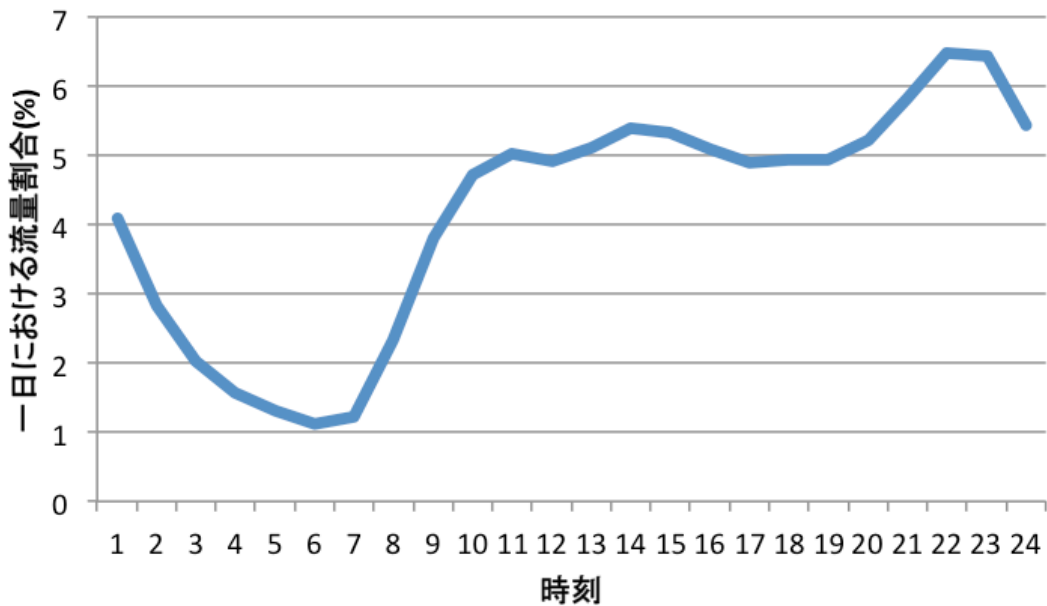


図 9 一日間である下水管を流れる流量の割合

一日の中で午前6時が最も流量割合が小さく、22時が最も流量割合が大きいという結果が出ている。(三毛ほか、2014)

#### 4.4 下水量推定における課題

建物が接続するマンホールが最近傍距離にあるものとは限らない。また実際には建物用途によって排水量が異なることが想定される。実際の下水管の状態としては地下水の流入、漏水などが発生している場合は実際の流量と誤差が大きくなる。また合流式下水道における降水や融雪を考慮していない。流量だけでなく温度変化にも影響する。これらの問題を考慮して推定精度を向上させるには実際の流量測定点を増やす必要がある。

今回は推定手法の中でも簡易的な方法を選択したが、実際に設計を行う際には実際に下水管の流量を計測した上で見積もるべきである。またセンサーを無線で飛ばしてデータを回収することも技術的には可能だったが今回の研究ではコスト面から現地に赴いて手動でデータを回収していた。地理的条件や時間や金銭面でのコスト、手間などを考えると下水熱利用のためにはさらなる推定手法の向上や、水温と流量の検知技術が発展することが望ましいと考える。

ポテンシャルマップ作成事例としては仙台市、福岡市、神戸市、富山市など日本で複数の地域が試みている。このうち富山市の役所で 2017 年 10 月に聞いた限りによると、ポテンシャルマップを作成した後に具体的な下水熱回収の試みは行われていないとのことだった。



#### 4.5 施設における運用を想定した計画

施設排水と施設が使用する熱需要がどのような関係となっているのか検討するため、まず面積当たりの施設排水量と熱需要量を調べて考える。

水量推定方法として、浄化槽の排水量を求める際に使用する人槽算定表を用いる(フジクリーン工業株式会社)。これを用いることで施設が浄化槽を使用して排水を処理していた場合の計画排水量を単なる面積だけで求めるよりも精度が高い結果を得ることができる。基本的には人槽算定表を採用して考える。

別の算定方法として考えられる、施設用途別における面積  $m^2$  当たりの水消費量原単位を下に示す。

表 5 施設用途別の水消費量原単位

種類	加重平均値( $m^3/m^2 \cdot \text{年}$ )	相関係数
事務所	0.7	0.67
スーパー	0.84	0.69
飲食店	1.06	0.76
ホテル	2.47	0.7
病院	1.75	0.36
学校	0.72	0.83
マンション	1.52	-
スポーツ施設	0.75	-0.29
福祉施設	0.89	0.64

(建築物エネルギー消費量調査報告:第 39 報より)

このうち、病院とスポーツ施設は相関係数が小さいため、誤差は大きくなる可能性がある。マンションは戸数によって大きく変化するため誤差が大きくなる可能性が高い。よって今回は参考程度に挙げておくものとする。

建物における消費熱量は次の原単位を用いる。なお元の資料ではカロリーで示されていたが、熱量として MJ に単位を揃えた。

表 6 施設用途別の熱需要量

施設	単位	最大需要(MJ/h)			年間需要単位(MJ/year)		
		冷房	暖房	給湯	冷房	暖房	給湯
集合住宅	戸	16.747	12.560	6.699	3349.4	8373.6	12560.4
業務施設	m <sup>2</sup>	0.335	0.251	0.021	268.0	125.6	10.5
商業施設	m <sup>2</sup>	0.502	0.251	0.042	502.4	75.4	20.9
宿泊施設	m <sup>2</sup>	0.251	0.335	0.105	251.2	401.9	52.3
医療施設	m <sup>2</sup>	0.419	0.544	0.377	209.3	418.7	753.6

(都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価より)

同資料に建物用途別の熱負荷量原単位が電力形式で示されているが、計算すると上記の表と近い値になり、また最大需要量が重要であるために上記の表の値を基本的に用いるが、施設の用途が具体的である場合には下の表を用いる。

表 7 施設用途別の熱需要量 (その 2)

	給湯	暖房	冷房
事務所標準型	16.3	58.1	104.7
事務所 OA 型	16.3	34	123.3
病院	46.5	95.3	104.7
ホテル	116.3	77.9	87.2
店舗	23.3	93	139.5
スポーツ施設	*	122.1	122.1
住宅	18.6	34.9	46.5

単位: W/m<sup>2</sup>

\* スポーツ施設に関しては電力総量 814MWh/year の値のみ。

熱需要に関しては需要に対して即時性が求められるため、たとえ年間需要を上回っていても需要が多いと見込まれる時期に全量を活用できなければ有効利用することが難しいという点が熱供給における課題である。この点を解消するためには別に蓄熱設備を設ける必要がある。

推定の流れは下の図の通りに行う。

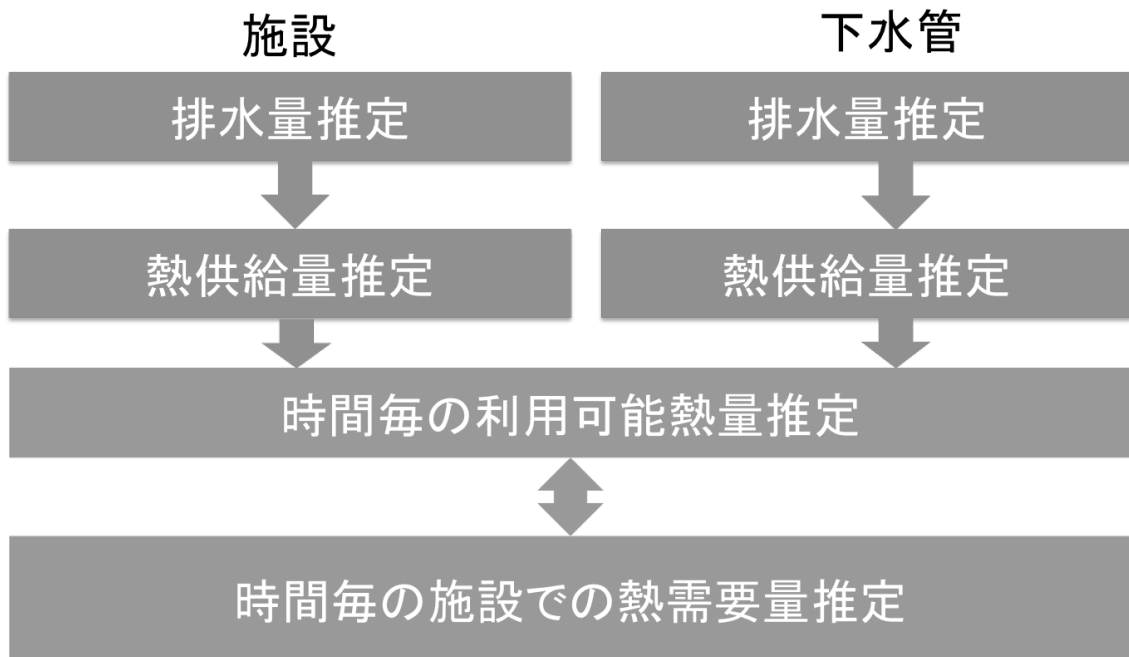


図 10 推定フロー

例1 東京慈恵会医科大学附属柏病院

柏市の病院は664床の一般床を持つ。また業務用の厨房設備を施設内に保有している。



図 11 東京慈恵会医科大学附属柏病院

ここから人槽算定表により、水量の推定値を求めることができる。

表 8 病院の人槽算定表

4	医療 施設 関係	イ	病院療 養所伝 染病院	業務用の厨房設 備又は洗濯設 備を設ける場合	300床 未満の 場合	$n = 8B$	$n$ : 人員(人) $B$ : ベッド数(床)	ベッド数 300 床以下 1,000 (ℓ/床・日)
					300床 以上の 場合	$n = 11.43(B - 300) + 2,400$		
				業務用の厨房設 備又は洗濯設 備を設けない場合	300床 未満の 場合	$n = 5B$		ベッド数 300 床を 超える床数 1,300 (ℓ/床・日)
					300床 以上の 場合	$n = 7.14 (B - 300) + 1,500$		ベッド数 300 床を 超える床数 1,300 (ℓ/床・日)
		ロ	診療所・医院		$n = 0.19A$	$n$ : 人員(人) $A$ : 延べ面積 (m <sup>2</sup> )	25 (ℓ/m <sup>2</sup> ・日)	

ここから排水量が 863.2m<sup>3</sup>/day となり、ポテンシャル熱量としては、17971MJ/day とな

った。一方で近隣を流れている下水量はポテンシャルマップの結果から、12666MJ/day となった。オーダーとして病院は施設排水熱の方が下水熱より多く回収できる場合があるという結果が予想できる。建物面積は約 14000m<sup>2</sup> で、ここから暖房の推定熱需要量は年間需要を 1/365 したものを考えると、冷房では 8029MJ/day、暖房は 16058MJ/day、給湯が 28906MJ/day となる。下水道と施設排水熱の両方から回収できる熱量ポテンシャルを合わせれば 30637MJ/day となって、ポテンシャル量だけで考えると施設全体の冷熱需要は 100%、温熱需要の 68%をカバーすることができる可能性がある。

一方で病院内のコンビニだけであれば、コンビニの面積を 100m<sup>2</sup> と考えると、面積から原単位を用いて計算して最大熱需要が冷房で 50MJ/h、最大熱需要が暖房+給湯で 29MJ/h となるため、完全に熱需要を賄うことができる。値の確認のため資料から(建築の次世代エネルギー源)、コンビニの年間熱需要を調べると 100m<sup>2</sup> に対して暖房が 12600MJ/year, 冷房が 15100MJ/year となっており、上記の原単位概算は多く見積もっており、余裕があることがわかった。

例2 旭小学校



生徒数約 600 人で、排水量は 30m<sup>3</sup>/day となり、ポテンシャル熱量は 624MJ/day となった。一方で近隣を流れている下水から回収できるポテンシャル熱量は 113979MJ/day で、圧倒的に下水道から回収できる熱量の方が大きい。学校に関してはオーダーとして排水熱を利用するメリットは薄く、下水熱を利用した方が良いという結果が予想できる。

表 9 学校の人槽算定表

8	学校施設関係	イ	保育所・幼稚園・小学校・中学校	n = 0.20P	n : 人員 (人) P : 定員 (人)	50 (ℓ/人・日)
		ロ	高等学校・大学・各種学校	n = 0.25P		60 (ℓ/人・日)
		ハ	図書館	n = 0.08A	n : 人員 (人) A : 延べ面積 (m <sup>2</sup> )	16 (ℓ/m <sup>2</sup> ・日)

小学校の面積を 2000m<sup>2</sup> と考えると、冷房の熱需要は年間の値から 1/365 して 1468MJ/day、暖房+給湯の値は 57MJ/day となる。下水熱だけで十分に施設の熱需要を賄うことができる可能性が高い。

## 4.6 施設における回収可能熱量推定の考察

4.5 で見たように施設によって回収できる施設排水熱と近隣の下水熱のバランスが異なることがわかった。例1の病院のように周囲の下水管のみから回収できる熱量に対して、排水熱も用いれば全体で2倍の熱量を回収することができる可能性がある。一方で施設排水を多く出さない施設では、下水からのみの回収と割合としては同じということがわかる。このように場所と施設用途に応じて施設排水熱と下水から回収できる熱のバランスを考えた上で全体として熱量をどの程度保持しているのかといった検討が必要となる。

また今回の簡易的な推定では施設と熱回収地点の距離による影響を考慮していない。よって次のケーススタディの際に距離による熱量減衰がどの程度生じるのかを考える。また、本来熱需要とは時刻によって変動するものであって蓄熱せずに使用すると効率が良いため、時刻別によるマッチングを考える必要がある。よって次のケーススタディでは距離の影響と時刻に応じたマッチングの2点を中心に考える。

## 第5章 ケーススタディ

### 5.1 対象地域

#### 5.1.1 概要

ケーススタディとして柏市公設卸売市場を対象とした。

柏市場は柏市北部に位置しており、国道16号線に面した場所で隣の駅はつくばエクスプレス柏の葉キャンパス駅である。人口135万人を超える東葛飾北部地域を筆頭に首都圏消費地のいずれからも交通の利便性が高い場所となっている。

柏市公設卸売市場は昭和46年から業務開始したため、施設全体が耐震不足であり老朽化も進んでいる。平成17年には市場移転計画も考えられたがその6年後である平成23年度に移転が断念された。平成26年から施設整備計画が始動して10カ年で施設整備を実施する予定となっている。整備対象施設は8ヶ所で、場内排水管改修は平成33年度から予定されている。

柏市公設卸売市場の敷地面積は80,058m<sup>2</sup>で主要施設は青果部、水産物部、花き部、関連食品部と分かれている。そのほかにも管理事務所が施設内に存在する。施設内には一般の人も利用可能なサービス店舗が複数立地していて、そのうちのいくつかは飲食店である。開場時間は午前5時から午後8時までとなっているが、実際には午前中に多くの業者が入りしており、午前12時以降から活発に施設内で取引が行われている。また内部のサービス店舗も13時ごろに店を閉めるため一般人の利用もそこまでというのが実情である。

平成28年度の柏市場の取扱高は下の表のようになっている。

表 10 柏市場の取扱総量と取扱金額

	取扱数量 (トン)	取扱金額 (千円)
青果	15,317	4,324,359
水産物	14,082	15,223,537
花き	*	1,435,461

\*花きは21,726(千本)





## 5.2 データ収集手法

### 5.2.1 概要

施設内における排水から熱回収を行う際には本排水処理施設で行うことが妥当だと考えたため、水産棟から排水処理施設に流れ込む排水を対象に水温と水量を計測した。本排水処理施設で処理する排水に限定した理由としては他の浄化槽へ流れ込む排水は安定した水量を確保することが難しいという点、現状では計測が困難という点がある。

ポテンシャル熱量の計算手法は  $Q_h = C_w \times G_h \times \Delta T$  だが、このうち  $G$  と  $\Delta T$  の部分を推定値ではなく計測値によって推定する。

排水是水産棟から生じたものが、浄化槽の沈砂槽に流れ込む。沈砂槽は大気に触れた状態で存在し、その場所で水温を計測した。

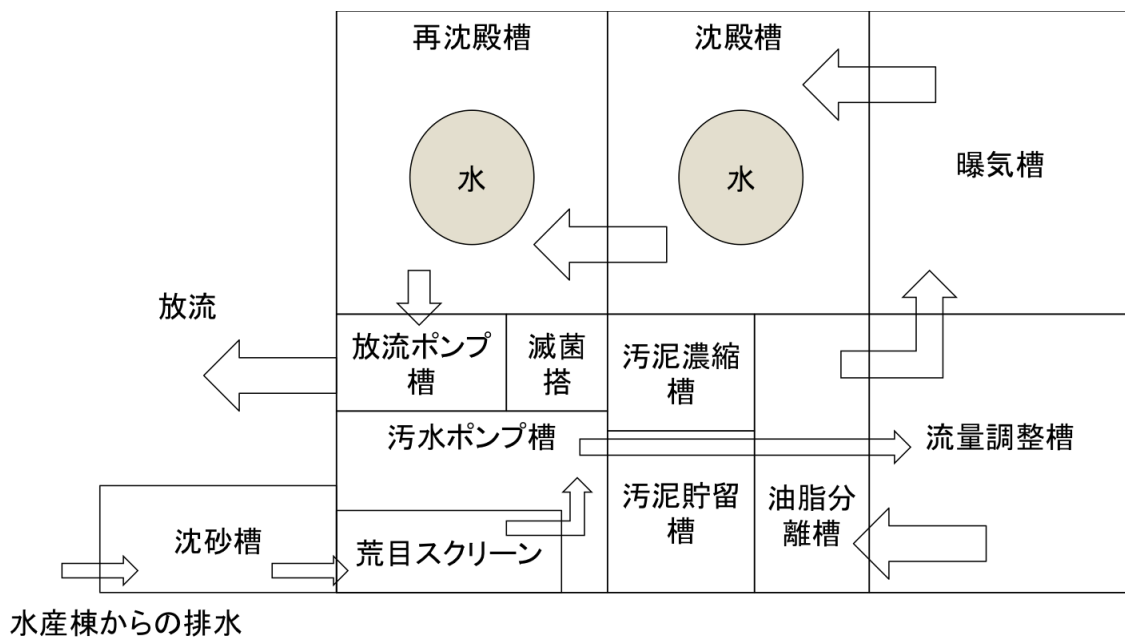


図 13 本排水処理施設簡易概略図（自身で作成）

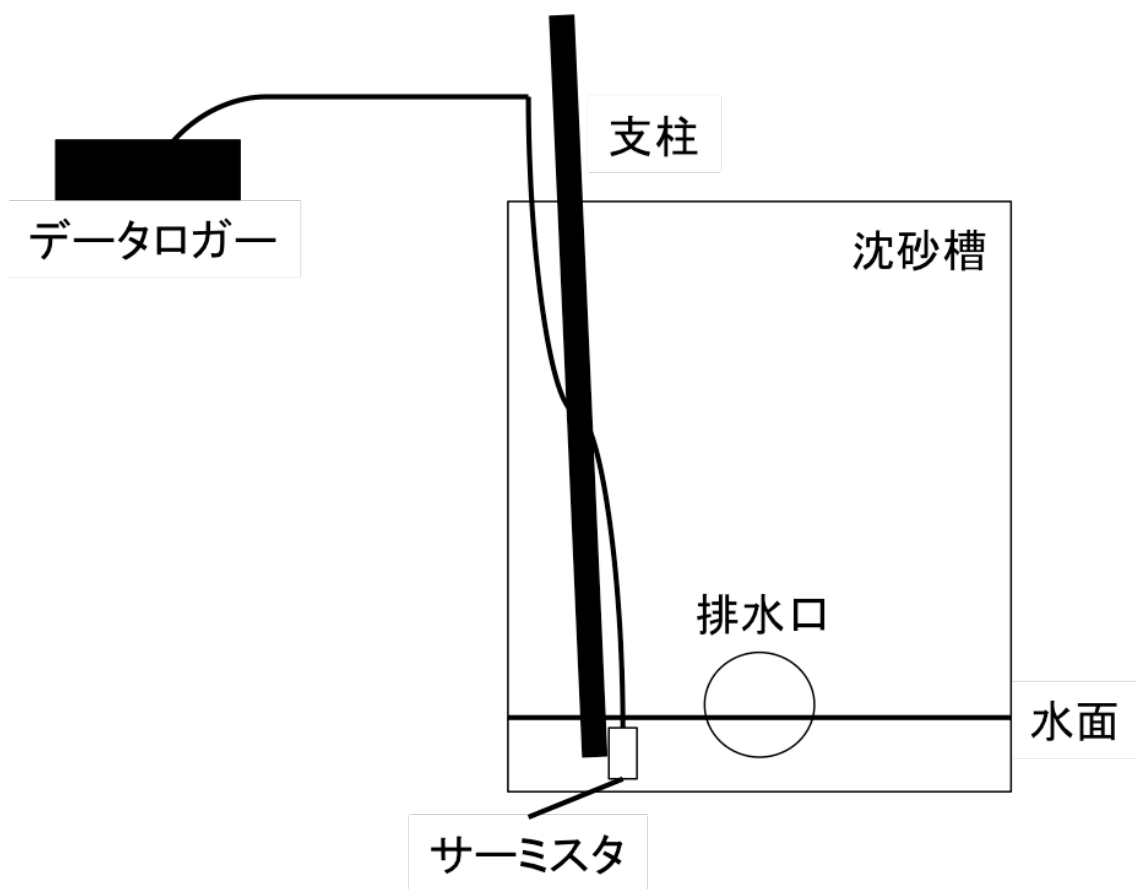


図 14 データ回収地点の断面図



図 15 本排水処理施設の沈砂槽及び設置した温度計の写真

## 5.2.2 気温データ

気温は我孫子市の時刻単位での平均気温のデータを使用した。(気象庁 HP よりデータを入力)

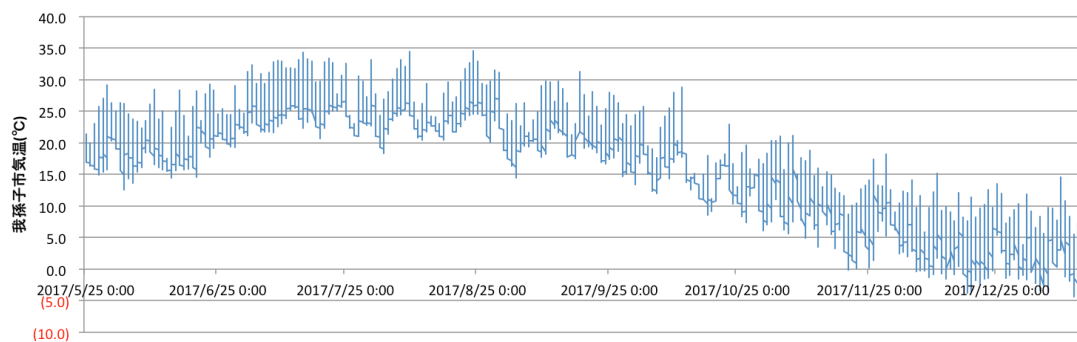


図 16 我孫子市の気温(2017/5/25～2018/1/14)

計測した水温と気温の差を求めるために、気温としてこの値を使用する。

## 5.2.3 排水量データ

排水量の計測は流入水のメーターを動画で 24 時間撮影し、これを 2 日分行なった。日毎の大きなパターン変化は見られなかった。30 分おきに整理し、2 日間の平均値を求めた。最終的に一日の排水総量 300m<sup>3</sup> をポンプのメモリの割合に応じて按分した。

排水量は以下のような結果になった。

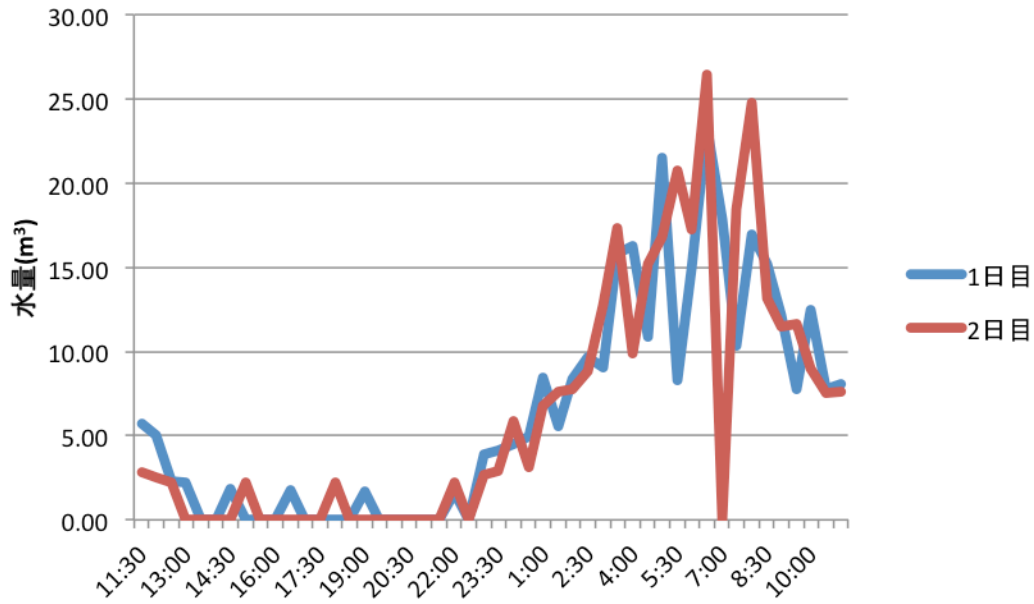


図 17 ある 2 日における排水量

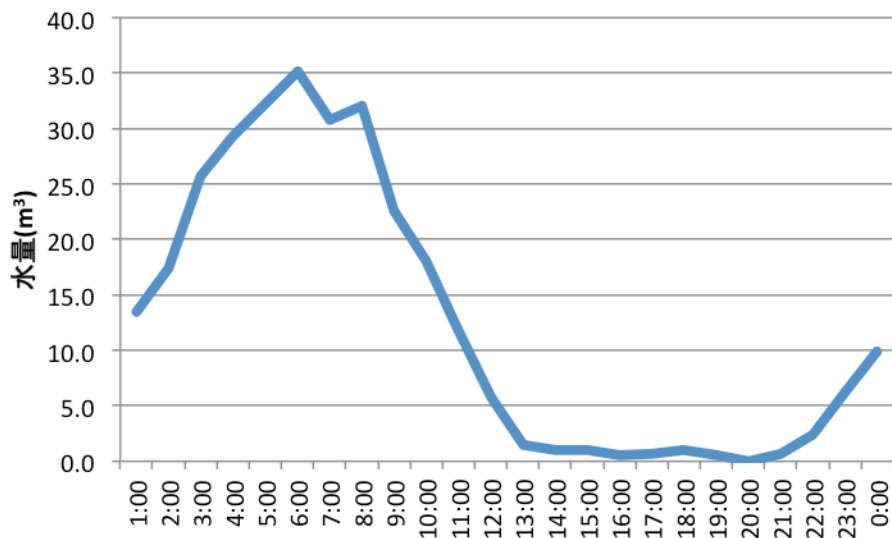


図 18 平均排水量(2 日間を平均した上で午前 1:00～に修正して描画したもの)

23:30～12:00 あたりにかけて排水が発生し、ピークが 6:00 にくることがわかった。ヒアリングによって季節によって排水量と排水パターンに変化がないということがわかったため、この結果を 1 年間通して有効な値として設定した上で使用する。





図 19 撮影した流入ポンプのメモリ

#### 5.2.4 水温データ

水温計測は浄化槽の流入口に温度計を設置して排水温度を計測した。温度計はログを取る必要があったため自身で回路を利用して作成した。事前に研究室で自作の温度ロガーの精度を確かめてから計測地点に設置した。

排水口のすぐ下の部分に接するようにおくことで、排水が出てきた部分からの温度を直接計測できるようにした。こうすることで、浄化槽で処理される最中の温度変化を考慮しなくて済むようになる。

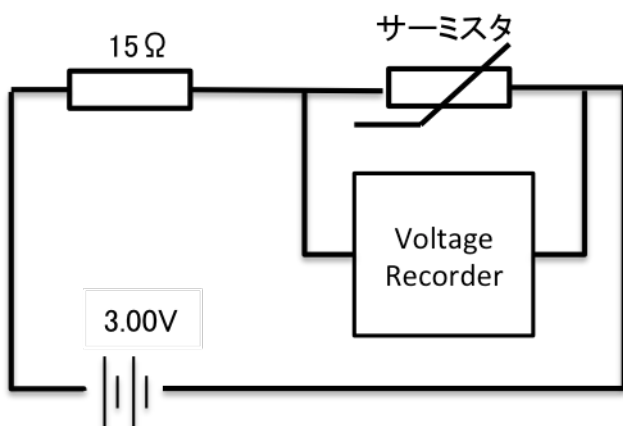


図 20 回路図

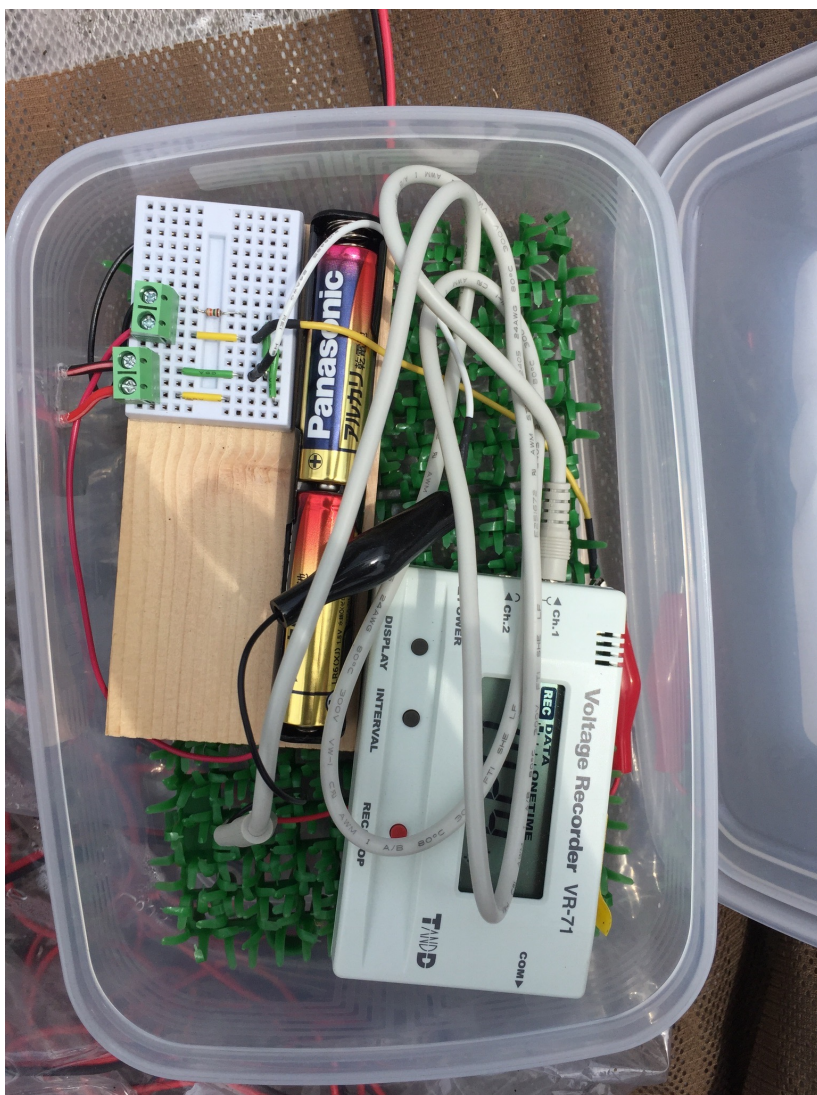


図 21 回路の写真



電池、ブレットボード、サーミスタ、電圧ロガーを使用して簡易的な温度計測装置を作成した。サーミスタとは温度が上がると抵抗値が下がる抵抗のことである。SEMETIC 社の 203AT を使用した。電圧ロガーは T&D 社の Voltage Recorder VR-71 を使用した。電池は単三アルカリ電池を 2 つ直列に繋いで 1 カ月ごとに交換した。

サーミスタの性能は以下のようにになっている。(Semitec)

表 11 サーミスタの温度と抵抗値

温度(°C)	抵抗値(kΩ)
0	64.88
10	39.71
20	24.96
25	20
30	16.12
40	10.65
50	7.181
60	4.943

事前のキャリブレーションの結果を下に示す。回路内の電流と温度の関係を調べて検量線を引いたところ以下のようにになった。

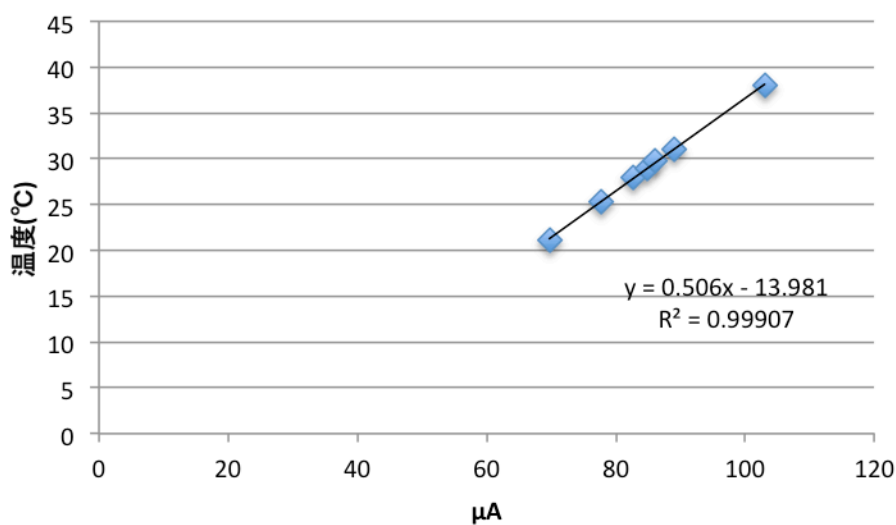


図 22 回路における検量線

$R^2=0.999$  から温度と回路に流れる電流の関係がほぼ比例関係であることがわかる。

$$(V - V_x) = R_1 I$$

$V$  : 電池の電圧

$V_x$  : サーミスタにかかる電圧

$R$  : 抵抗 (15Ω)

$I$  : 電流

電流と電圧の関係から、電圧に対応した温度を求めることができる。

計測した水温データは以下のようになった。

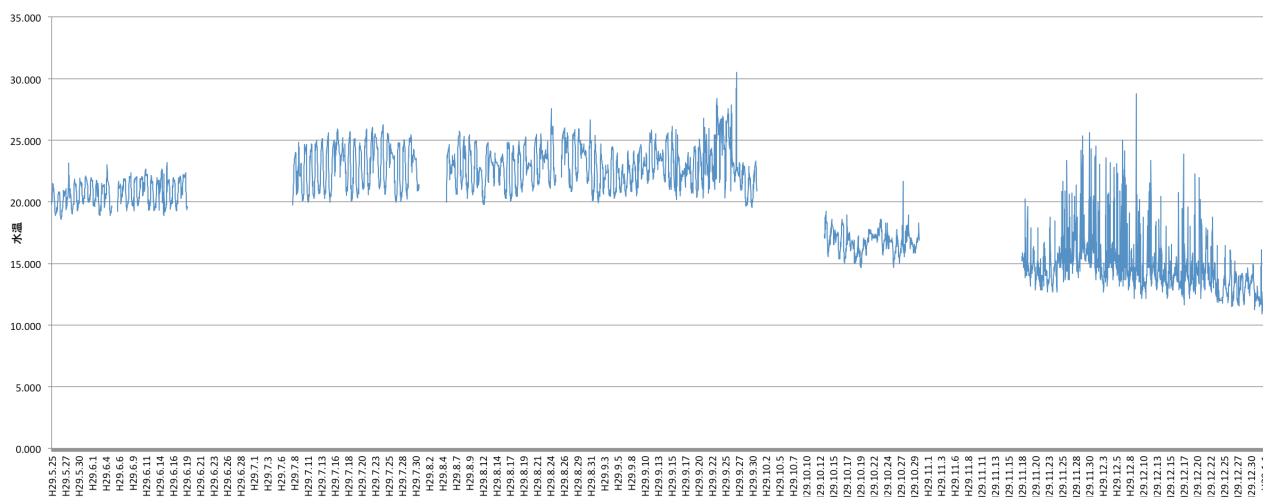


図 23 測定した水温

6/19~7/8, 7/31~8/5, 10/1~10/13 に関しては、市場側の都合によりデータを回収することができなかった。10/30~11/18 の期間は現地で確認のため温度計で実測した値に対して異常値が多く検出されてしまったため、正しく計測できていないものとして除いた。傾向としては夏場にかけては 20~25 度、冬場は 15 度~20 度であることがわかる。

11/18~1/3 の冬場にかけて上下の振幅が大きいのに見えるためある一日を例にとって拡大する。

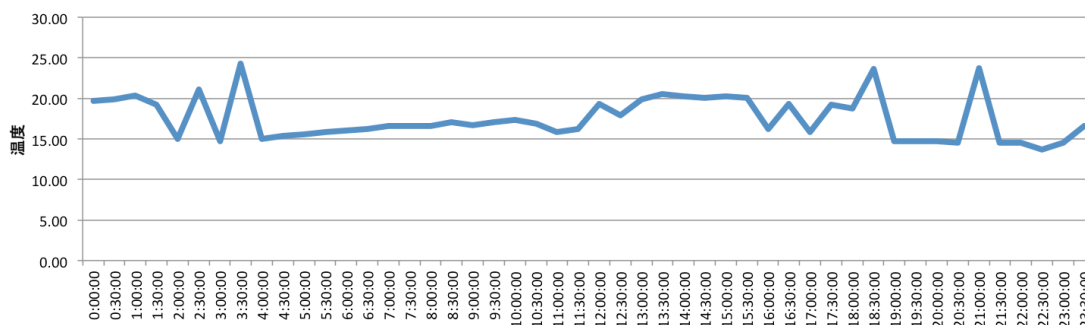


図 24 12/1 における水温

12/1 のデータでは、これは一例だが早朝と夕方から夜にかけて 20 度を超える値が出ている日が複数日存在する。気温を考えると、5 月の場合と大きく変化がないはずだと考えていたが実際の計測では差があるため、原因を考察する。

現地でロガーではない温度計を使って計測した限りでは、10:30 の時刻においては正しい値が回収できていた。早朝にかけて高い温度の排水が生じている原因としては実際に水産棟で使用した水のうちその時間では温水が使われていた可能性などが考えられる。主に夕方から夜にかけて生じている高い温度の異常値の原因としては、排水が 0 L の状態の時に謝って温度を出しているのではないかという可能性がある。これはポテンシャル計算の際に 0 となるため最終的な結果に影響は出ない。他にも 10/30～11/18 に異常値が多く検出された機器の影響が 11/18 日以降も続いている可能性がある。

## 5.3 日別における排水熱ポテンシャル量

### 5.3.1 結果

上記のデータを用いて本排水処理施設で回収できる排水熱ポテンシャルを計算した。

水温のデータが得られた 5/25～6/17、7/8～8/24、8/26～9/29、10/13～10/29、11/19～1/3 までのポテンシャル熱量の結果を下に示す。

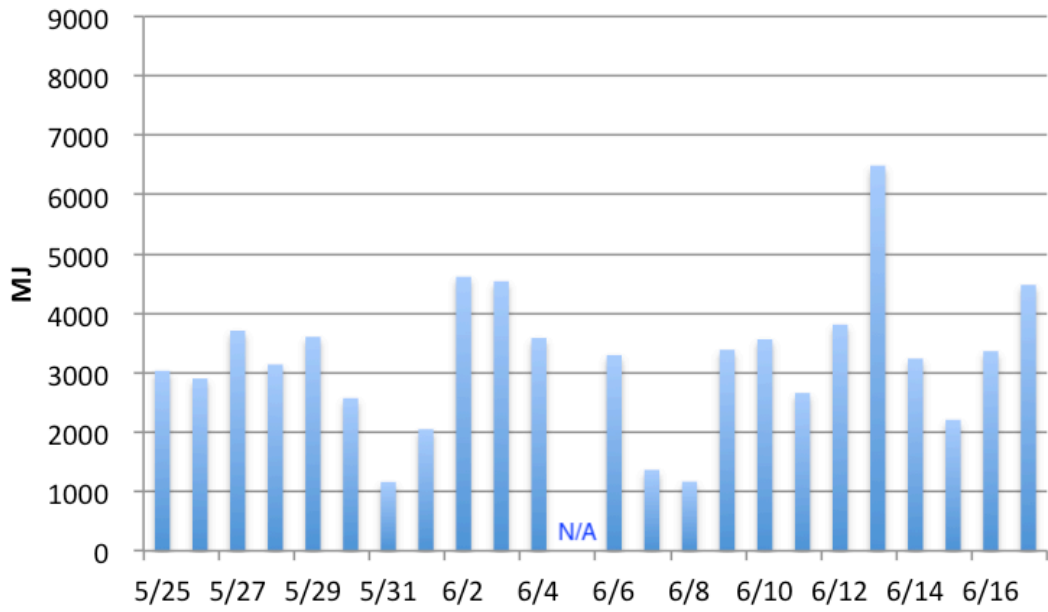


図 25 5/25～6/17 の排水ポテンシャル熱量

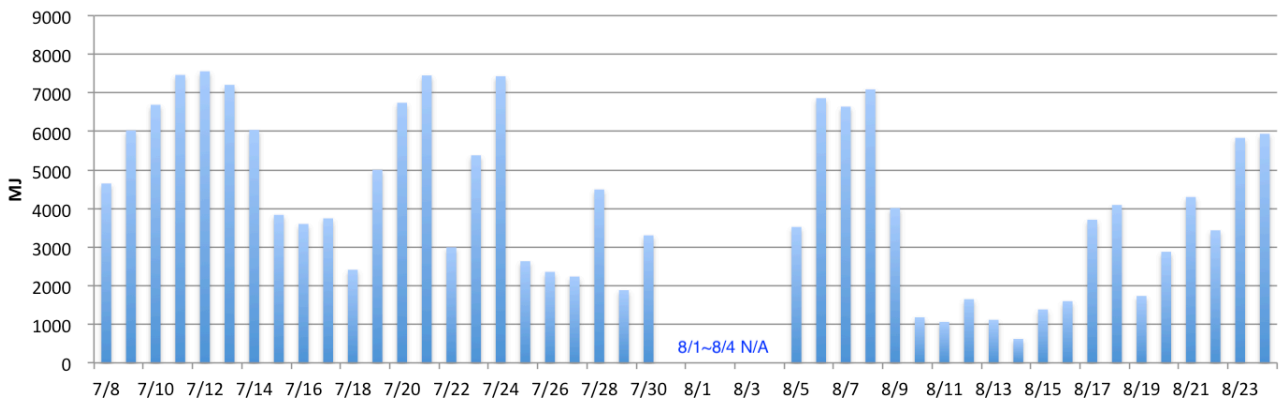


図 26 7/8～8/24 の排水ポテンシャル熱量

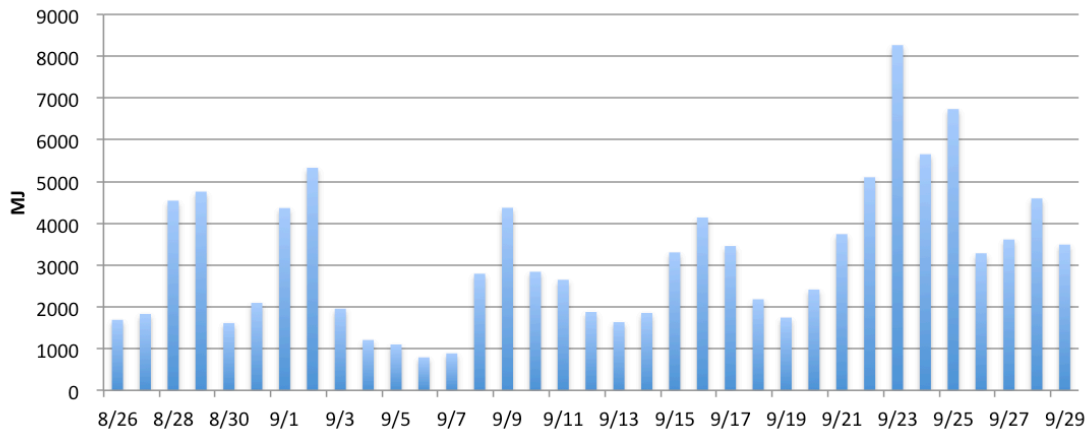


図 27 8/26～9/29 の排水ポテンシャル熱量

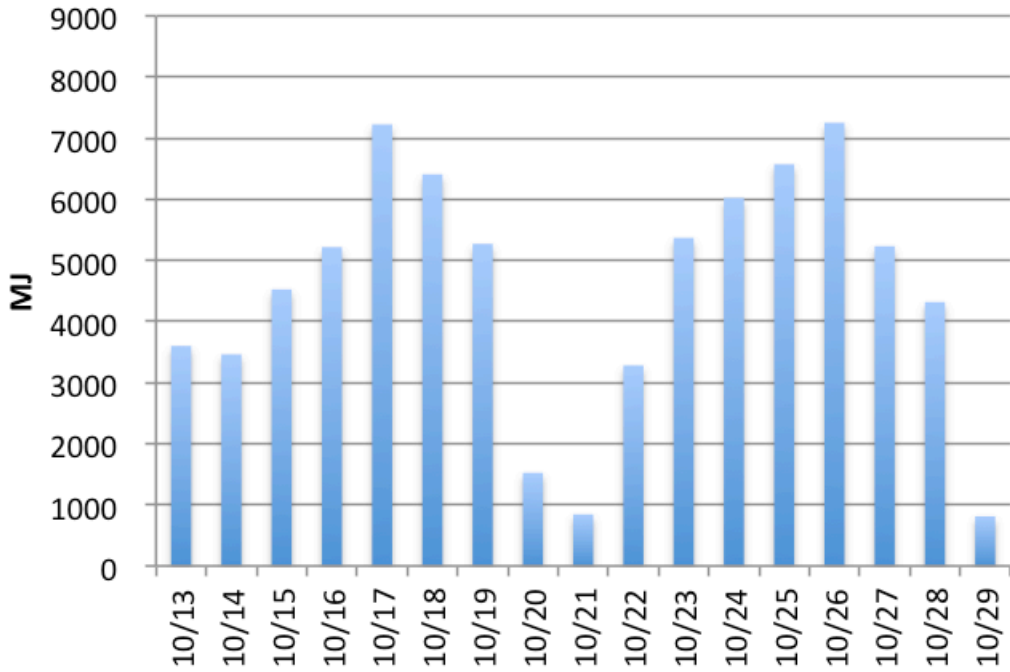


図 28 10/13～10/29 の排水ポテンシャル熱量

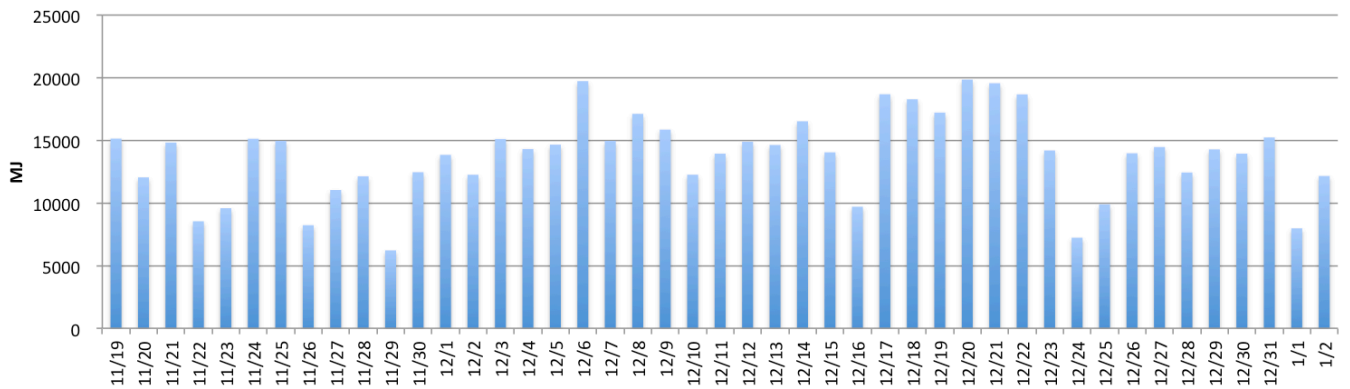


図 29 11/29～1/2 の排水ポテンシャル熱量

5月～10月の期間においては最低で約 620MJ/day、8267MJ/day という結果が出た。平均では約 3000～4000MJ/day 程度の熱量を持つことがわかる。11月～12月における傾向としては最低でも 6220MJ/day で最高値は約 19731MJ/day となった。全体を通じて 10000MJ～15000MJ 程度の熱量が存在するという結果になった。

### 5.3.2 考察

理論値では  $300(\text{m}^3) \times 5(\text{K}) \times 4.164(\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}) = 6246(\text{MJ})$  となるが、それより春から秋にかけては平均的に約 3000MJ という小さい熱量となっており、一方で冬場にかけては平均的に 10000MJ 以上と理論値より大きい値となっている。また冬場の方が熱需要が大きく、冷房より暖房や給湯の方が熱返還効率も高いため、冬場においては活用できる可能性がある。

## 5.4 回収地点と利用地点の距離による熱減衰

### 5.4.1 市場周囲に流れる下水道が持つ熱量ポテンシャル

ポテンシャル熱量の計算方法は第4章にあげた通りである。そこで計算した推定値を用いて市場周囲に流れる下水道が持つポテンシャル熱量推定値を次の図に示す。

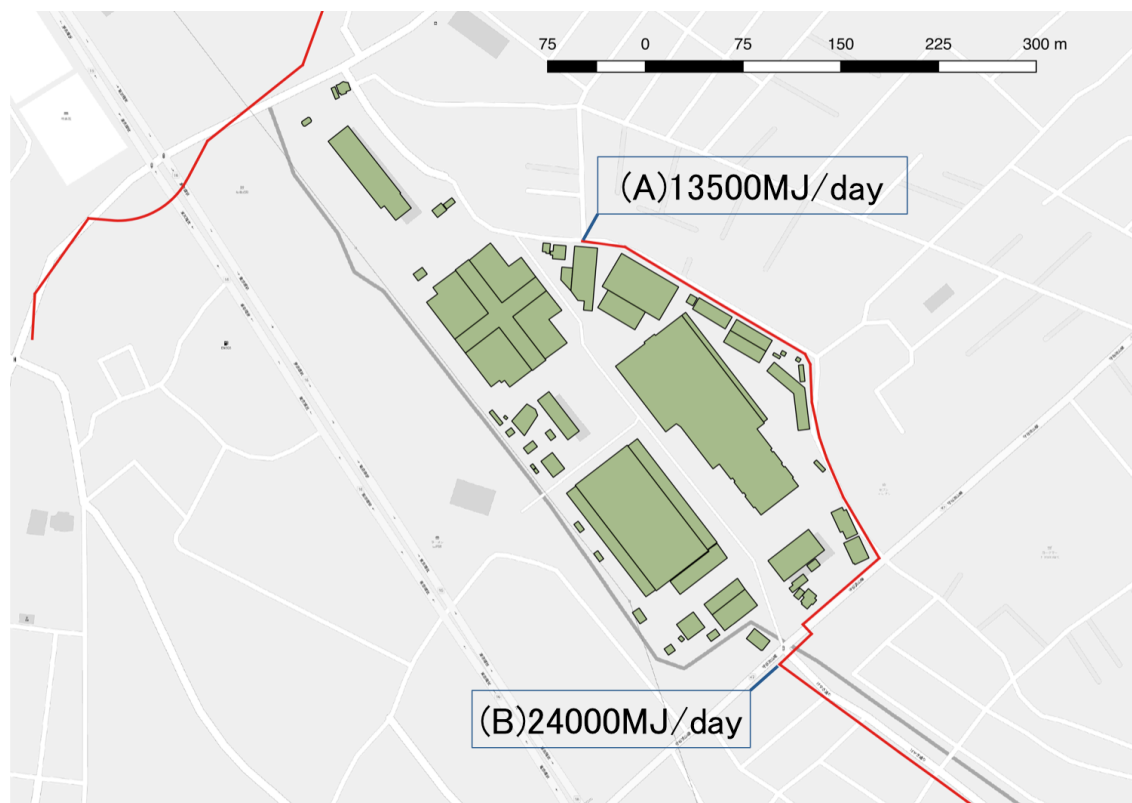
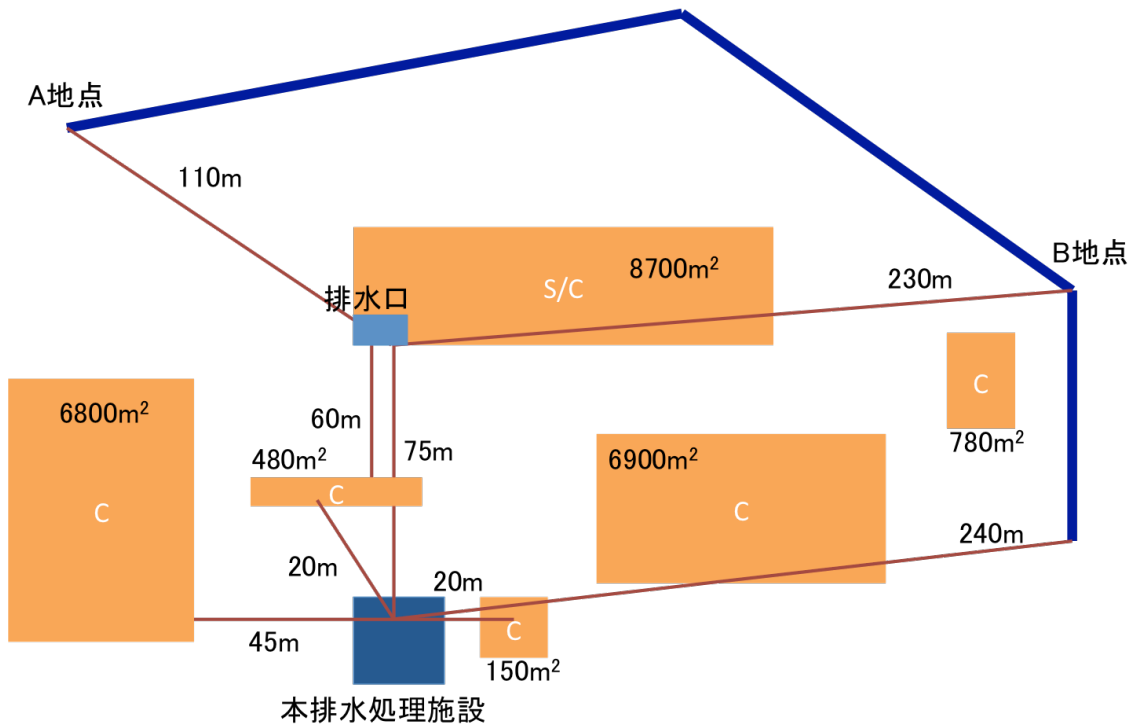


図 30 柏市卸売市場と周囲を流れる下水道

熱回収地点と熱需要家までの距離が実際に熱回収を検討する際の影響因子であることは言及されているが(Elias, 2015、Du, 2014)、どの程度熱量が減衰するのか、ポンプにかかる動力はどの程度の大きさなのかという詳細については述べられていない。よってここで距離に応じた熱減衰や使用エネルギーの増加量を仮想的な熱移送管を設置して検討する。

## 5.4.2 市場内における位置関係

市場における本排水処理施設と下水管、施設における位置関係の図を示す。



青い四角が本排水処理施設、オレンジの四角が施設建物、青い線が下水管、赤い線のみ現在では存在しない仮想的な熱移送管となっている。

頭文字の意味はそれぞれ、

S: 供給地としての建物

C: 需要地としての建物

である。

ここで仮想的な熱移送管を設計して、熱量の減衰とポンプで移送するために必要な動力を求める。

まず仮想状態における熱移送管の条件を設定する。最初に熱交換器に敷設する熱媒管の太さを内径 10mm、外径 20mm とする。

排水口から本排水処理施設に移送される流量  $300\text{m}^3/\text{day}$  という結果から、温度差  $5^\circ\text{C}$  の利用を考慮して輸送熱量は  $1500\text{Mcal}/\text{day}$  ( $= 6280\text{MJ}/\text{day}$ )となる。ここから熱媒体の温



度差は約 20°C前後だと仮定すると、熱媒体に流れる流量は 75m<sup>3</sup>/day 必要になることがわかる。この単位を L/s に変換すると、0.868 (L/s)となる。

上記の流量に対して、熱移送管の内径の大きさに対して流速が変化するために複数の場合を想定する。A,B,C,D それぞれ内径と本数を変えた 4 種類の結果を以下に示す。なお実際の設計で熱交換器に用いられるヒートパイプ内の流速は 0.3 ~ 2.7 という資料 (梅野, 2015)があるためそれに従って流速がその程度になるようにした。

表 12 ヒートパイプを流れる熱媒体の流速とレイノルズ数

種類	内径	本数	断面積	断面平均流速	レイノルズ数
単位	mm	本	m <sup>2</sup>	m/s	-
A	20	1	0.000314	2.763	55042
B	20	2	0.000628	1.382	27521
C	40	1	0.001257	0.691	13760
D	40	2	0.002513	0.345	6880

レイノルズ数とは、流れが層流か乱流かを判断するための無次元量である。2000~4000 を超えると乱流だと判断できる。(今井, 1973)

$$Re = \frac{vD_H}{\nu}$$

記号の説明とパラメータの説明を下に示す。

表 13 レイノルズ数のパラメータ

記号	値	単位	説明
Re		-	レイノルズ数
D <sub>H</sub>	0.02 or 0.04	m	代表長さ (外径 - 内径)
v	求める値	m <sub>3</sub> /s	断面平均流速
ν	1.004×10 <sup>-6</sup>	m <sub>2</sub> /s	動粘性係数

レイノルズ数を計算したところ、どの値も Re>2000 となったため今回の場合は全て乱流であると決定できる。

### 5.4.3 熱移送で減衰する熱量

熱移送管の影響で熱減衰がどの程度生じるかを理論的に求める。円管における保温保冷伝熱計算式は以下の式で示される。(相原, 1994, HEISHIN)

$$Q = \frac{2\pi(\theta_0 - \theta_r)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{2}{\alpha d_1}}$$

記号の説明とパラメータの説明を下に示す。

表 14 保温保冷伝熱計算式のパラメータ

記号	値	単位	説明
Q	求める値	W/m	熱量
λ	0.038	W・m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	保温材の熱伝導率 (ポリエチレン)*
d <sub>0</sub>	0.02	m	内径
d <sub>1</sub>	0.04	m	外径
θ <sub>0</sub>	25	°C	内部温度
θ <sub>r</sub>	15	°C	外気温度
α	→下記参照	W・m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	表面の熱伝達率

\*ポリエチレンの熱伝導率は「建築材料の断熱性に係る性能値の公表について」より

Q を求めるためには表面の熱伝達率を求めることが必要である。

熱伝達率とは流体固有の物性地ではなく、流体の流れの状態や物体形状、種類や表面の粗度で変化する。熱伝導率や流速が大きいほど熱伝達率は上昇する。(望月ほか, 1994) まず熱伝達率を求めるために必要なヌセルト数、プラントル数について説明する。

ヌセルト数とは無次元量であり、対流熱伝達によって運ばれる熱量と熱伝導によって運ばれる熱量の比を表したものである。

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

今回の場合では、ヌセルト数のうち円管における乱流の場合に当てはまる。また Re の値から Gnielinski の式を代表として用いる。オーダーの確認の目的のために、Colburn の式でも計算するが誤差が大きいことが経験則からわかっているため値は参考程度に止める。

プラントル数とは無次元量であり、流体の動粘性係数と温度拡散率の比である。1の場合に温度境界層と速度境界層の厚みが等しくなる。水ではプラントル数は20℃で7.01となり、これは温度境界層より速度境界層の方が厚いことを示している。

$$Pr = \frac{\nu \rho C_p}{k}$$

表 15 プラントル数のパラメータ

記号	値	単位	説明
Pr	7.01	-	プラントル数 (=20℃)
$\rho$	998.2	kg/m <sup>3</sup>	密度
C <sub>p</sub>	4.1818	kJ×kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	比熱

下が Gnielinski の式と Colburn の式である。

Gnielinski の式

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{1/3}-1)}$$

f は摩擦係数、 $f = (1.28 \log_{10} Re - 1.64)^{-2}$

Colburn の式

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^{1/3}$$

表 16 流速に対するレイノルズ数とヌセルト数

v(m/s)	Re	Nu(Gnielinski)	Nu(Colburn)
2.76	55042	358.0	273.0
1.38	27521	175.7	156.8
0.69	13760	84.5	90.1
0.35	6880	39.0	51.7

Gnielinski の式で求めた値を下式の Nu に代入すると熱伝達率 h が求まる。

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

表 17 ヌセルト数と熱伝達率

記号	値	単位	説明
Nu		-	ヌセルト数
h	求めたい値	$W \cdot m^{-2}K^{-1}$	熱伝達率 (= $\alpha$ )
L	0.02	m	代表長さ
k	0.598	$W \cdot m^{-1}K^{-1}$	流体(=水)の熱伝導率

すると最終的に流速、熱伝達率、減衰する熱量は下の関係になる。

表 18 流速に対する熱伝達率と減衰熱量

種類	v	Re	熱伝達率	Q(W/m)
A	2.76	55,042	5,352	3.443
B	1.38	27,521	2,627	3.441
C	0.69	13,760	1,264	3.437
D	0.35	6,880	582	3.428

ここから流速が変化してもこの管径の差では、減衰熱量はほぼ変化せず熱量としても約 3.44W/m となることがわかった。よって一時間間に 12.4kJ/m の熱量が伝達して減衰することがわかる。温度差が 10℃の場合を想定しているが温度差に比例して熱量が減衰する。

#### 5.4.4 熱移送に要求されるポンプ動力

ポンプの動力として消費される電力量を求める。消費される熱量は大部分が摩擦熱として失われるとして考えるとマニング式から摩擦損失水頭 H を計算することができる。

マニングの式

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$$

v: 流速(m/s)

n: マニングの粗度係数(= 0.01)

R: 径深(m) (= 内径/4 = 0.002/4)

I: 勾配 (=摩擦損失水頭 H/管長 10m)

失われた摩擦熱がポンプで消費される熱量に等しいと考えると摩擦損失水頭 H から、消費されるエネルギー  $P_w$ (kW)は、

$$P_w = \rho g H Q / 1000$$

で示すことができる。

なお実際にはポンプ効率が存在するため、軸動力  $P_a$ (kW)は

$$P_a = P_w / \eta_p$$

$\eta_p$ : ポンプ効率 (= 0.7)

で表される。

また熱回収地点と熱使用地点を往復することを考えると2倍する必要がある。摩擦損失水頭 H、 $P_w$  と  $P_a$  の値を以下に示す。なお配管 1m あたりの値である。

表 19 摩擦損失水頭 H と  $P_w, P_a$  の結果

種類	摩擦損失水頭 H	$P_w$	$P_a$
単位	m	kJ/h	kJ/h
A	1.79	55	78
B	0.45	14	20
C	0.04	1	2
D	0.01	0.3	0.5

熱量減衰は 12.4 (kJ/m・h)に対して A,B の設計だとポンプ動力によるエネルギー損失は 78(kJ/m・h)、20(kJ/m・h)となり大きくなることがわかる。一方で C, D の設計だと熱量減衰の影響よりも小さくなる。設計の際にはこの2つの影響を考慮して熱量を考える。

## 5.5 市場における設計

上記の熱移送管を市場の距離に適用すると、下のようになる。

表 20 熱媒管の長さとは減衰熱量

	20m	45m	60m	75m	110m	150m	230m
A	1.8	4.05	5.4	6.75	9.9	13.5	20.7
B	0.648	1.458	1.944	2.43	3.564	4.86	7.452
C	0.288	0.648	0.864	1.08	1.584	2.16	3.312
D	0.258	0.5805	0.774	0.9675	1.419	1.935	2.967

単位 MJ/h

まず本排水処理施設のみで熱回収を行うケースを想定する。その際に考慮することは本排水処理施設で回収できるポテンシャル熱量と熱移送管による熱減衰、建物の熱需要量である。

建物の熱需要を市場の建物面積に適用すると、下の表のようになる。

表 21 建物面積と熱需要

	建物用途	商業	商業	業務	業務	業務
	建物面積 (m <sup>2</sup> )	150	480	780	6800	8700
最大需要(MJ/h)	冷房	75	241	261	2278	2914
	暖房	38	121	196	1708	2186
	給湯	6.3	20.1	16	142	182
年間平均需要単位 (MJ/h)	冷房	8.6	27.5	23.9	208.0	266.1
	暖房	1.3	4.1	11.2	97.5	124.7
	給湯	0.4	1.1	0.9	8.1	10.4

150m<sup>2</sup>、480m<sup>2</sup>の建物は商業施設、780 m<sup>2</sup>、6800 m<sup>2</sup>、8700 m<sup>2</sup>の建物は業務施設である。ただし、市場内の卸売が行われている時間帯、市場内の店舗が営業している時間帯は主に午前中であるため、0時～13時のみの熱需要を考える。

商業施設のみを本排水処理施設からの熱回収で賄おうとした場合を夏と冬の場合で考える。なお消費熱量は最大需要量を用いているため、これを上回っている状態においては完全に賄うことができる可能性が高い。

i 夏

夏場において最大のポテンシャル熱量を持つ 7/12 を選定して、店舗の冷房需要と比較したところ、6:00~10:30 の時間帯のみ賄うことができるという結果になった。冷房はヒートポンプの効率も下がるため、排水熱のみでは夏場に有効利用することは難しいと考える。

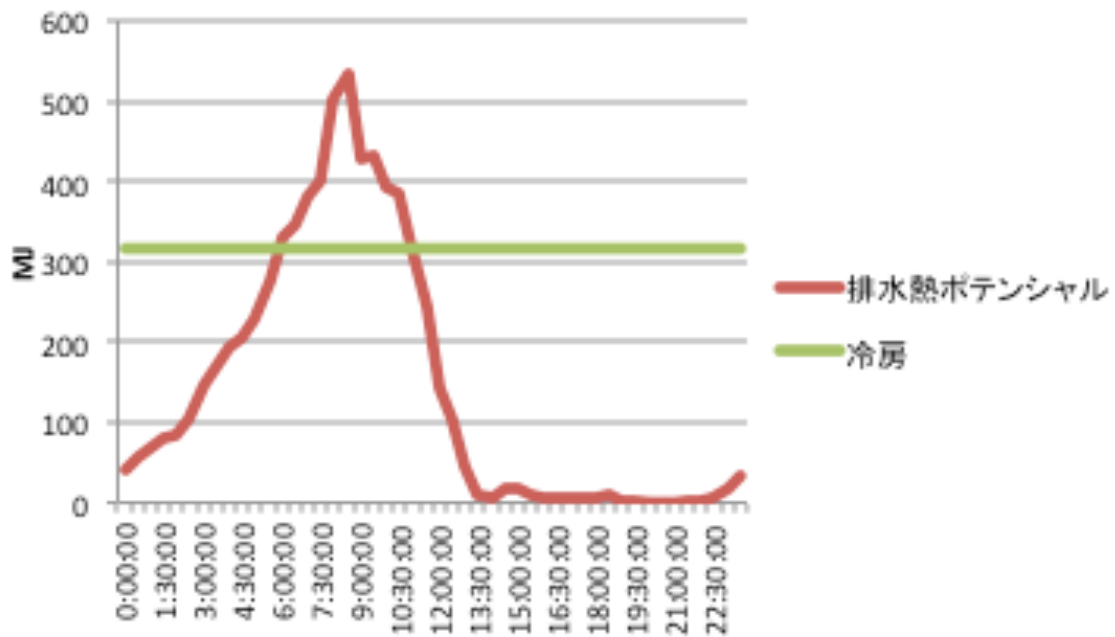


図 31 7/11(夏場最大値)におけるポテンシャル熱量と店舗の冷房需要の比較

ii 冬

排水が持つポテンシャル熱量が最も小さい日は 11/29 となっているため、この日で検討する。

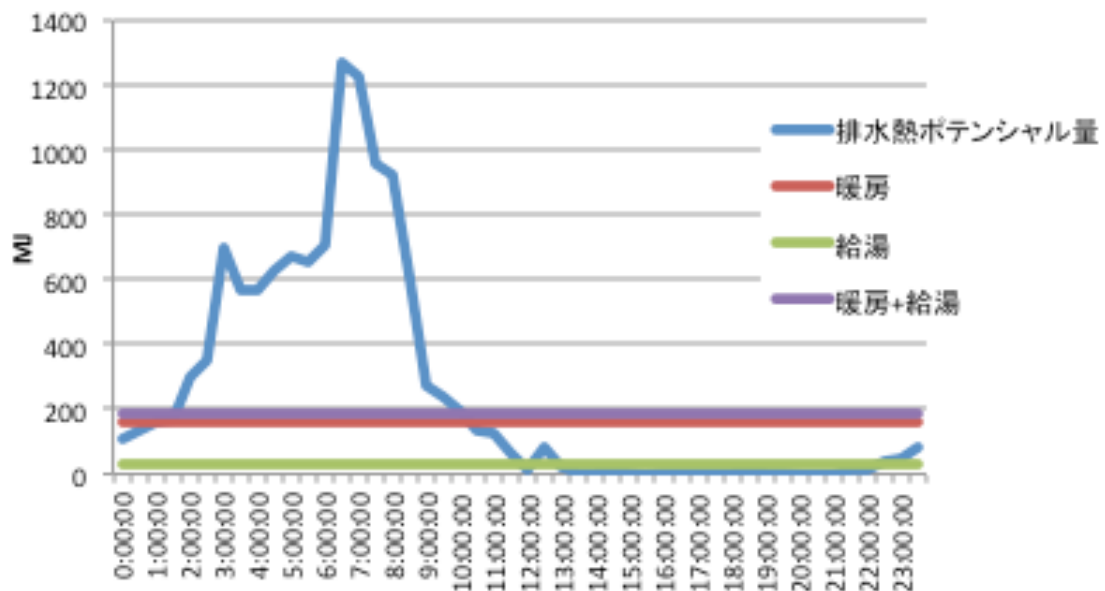


図 32 11/29(冬場最小値)における店舗の暖房+給湯需要の比較

市場内の排水から回収できる熱のみだと主な活動時間帯のうち、2時~10時までの時間帯は熱量を有効活用できる見込みが高いが、それ以外の時間は安定して供給することが難しい。

次に下水管からの熱回収と本排水処理施設からの熱回収を併用する場合について述べる。

作成した下水熱ポテンシャルマップより、A地点でのポテンシャル熱量は 650MJ/day, B地点でのポテンシャル熱量は 1153MJ/day となっている。ここから、一日における時刻別下水熱流量と本排水処理施設による排水量を足し合わせたものを計算すると、時刻別で次の図のようになる。



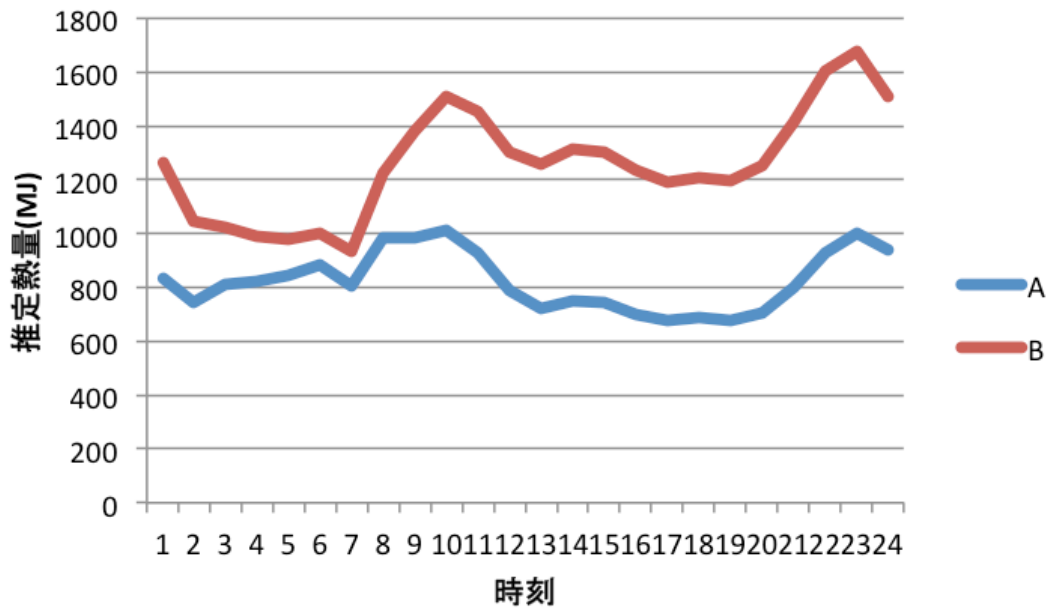


図 33 下水管と施設排水を併用した場合の時刻別推定熱量

一日の間で、平均して A 地点から回収した場合でも 600MJ/h 以上の熱量を回収することができる。B 地点からだと、最低でも約 1000 MJ/h の熱量を回収することができる。この値に対して熱移送管の表の値を比較すると、最も長い距離でも 230m+75m=305m で、A の 33.24MJ/h の熱量減衰となる。よって A 地点からの回収に対して約 5%の熱減衰となるため、ほぼ移送管の距離による熱量減衰の影響は無視できることとなる。

推定熱量を比較すると、A 地点と排水施設で回収できる熱量は店舗における暖房+給湯で使用する熱量のおよそ 4 倍となっている。このように組み合わせることで完全に市場内の店舗の需要熱量を賄うことができる。冷房で使用する熱量にたいしては、A 地点で約 2.7 倍となる。ヒートポンプの熱変換効率が 60%とだとしても  $800 \times 0.6 = 480 \text{MJ/h}$  であるため、十分に賄うことができる。

## 5.6 考察

### 5.6.1 他の卸売市場について

柏市卸売市場で行なった検討結果が他の市場でも適用可能でも可能かどうか確認するため、他の市場にヒアリングを行った。9/7 と 9/8 に千葉市地方卸売市場と船橋市地方卸売市場に訪問した。卸売市場内の水産棟の面積や取扱高を比べたところ、多少の差はあったものの排水量に大きな差はなく、3 つとも約 300t/日前後ということがわかった。市場の利用形態も同じことから深夜から明け方にかけてのみ排水されるということがわかった。このことからポテンシャル熱量もオーダーとして変化しないことが予想される。一方で需要家として施設内の売店や飲食店と処理施設の距離が柏市とは異なり、どちらも離れていた。このことから需要家の対象を新たに検討する必要がある、それ以外に水産棟でそのまま熱利用を行い水産棟の冷暖房に使用するという可能性が考えられる。

### 5.6.2 課題

熱量減衰は全て理論値で計算しているため、実際に設置した際にはそれ以上に熱量が減衰する可能性がある。またポテンシャル熱量を有効に活用するためには熱交換器やヒートポンプの熱変換効率によって回収できる熱量をできるだけ大きくすることが望まれる。

熱伝導とポンプ動力による熱量減衰は距離が大きくなっても全体の回収できる熱量に大きく影響しないことがわかった。一方で配管設備やポンプを設置する際のコストがかかる。また、本排水処理施設からの熱回収のための熱交換器の設備投資コスト、下水管からの熱回収のための設備投資コストがそれぞれかかる。施設からの熱回収において、熱量ポテンシャルの有無よりも設備投資コストが大きな影響因子であることが課題点として残った。

## 第6章 総括

### 6.1 本研究のまとめ

本研究では分散型熱エネルギー回収を進める中で小中規模の施設においても排水熱利用を促進するため、下水管を流れる下水だけでなく施設から生じる排水からも同時に熱回収を行うという手法を検討した。

まず熱回収地点と需要施設の間の距離によって熱伝導やポンプ動力として熱エネルギーが失われるかといった算定については、熱伝達による熱減衰量は全ての場合で約  $3.44(\text{W/m})$ 、ポンプによる摩擦損失水頭は  $0.5\sim 78\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h})$  という結果になり、 $200\text{m}$  程度の配管でもこの市場の規模では全体の下水熱+排水熱の回収量に比べると  $5\%$ 以下と熱量の面で影響が小さいことがわかった。

ケーススタディの柏市卸売市場においては、市場内の店舗では下水と排水を組み合わせることで夏と冬における需要熱量を完全に上回る熱量を回収できるという試算が得られた。

### 6.2 課題

今後の課題としては以下のものが挙げられる。

- ① 熱回収地点と需要施設間の距離による熱減衰とポンプ動力の影響は小さいことがわかったため、残る設備投資コストが熱回収計画策定に対して影響を及ぼす可能性が高い。ヒートポンプと熱交換器の設備投資や維持管理コストを考えると、2地点から回収することは利用者にとって財政的な負担となる。一方で完全に熱需要を賄うことができるのであれば長期的に見てメリットになる可能性がある。費用便益分析を行う必要がある。
- ② 今回はポテンシャル熱量で議論しているが、実際の回収効率を考えると利用可能量の値は減少する。ヒートポンプの回収効率を小さく見積もって6割とした場合でも今回のケースでは熱量を賄うことができるという結果になったが、柏市全体の下水熱ポテンシャルマップについてはあくまでも推定値という結果となっているため、精度を向上させる手法を開発する必要がある。
- ③ 水温や水量の計測方法は施設依存性が高い。下水熱や排水熱回収を促進していく上では水温や水量を簡易的に計測できるような装置や推定手法の制度をあげることが必要である。
- ④ 分散型熱エネルギー回収のうち、下水や排水を利用するもの以外に地中熱利用や河川水利用など他の未利用エネルギーを活用した方が良い条件が存在する可能性がある。未利用エネルギー利用のうち、施設に適したエネルギー回収を検討していく必要がある。

## 参考文献

- Baek, N.C., 2005, A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source, *Solar Energy*(78),427-440.
- Du, David J,2014, A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers,*Water Research*, 48, 548-558
- Elias Maxil, J.A.,2015, Heat modeling of wastewater in sewer networks: Determination of thermal energy content from sewage with modeling tools
- G. Timea, T. Rusu, V. Dan,2010, Technological Variations for Domestic Waste Water Heat Recovery, *ProEnvironment*, 3, 313-317
- HEISHIN,  
[http://ebw.eng-book.com/heishin/HeatTransferCalculation\\_tube\\_q\\_calculation.do?category=tube\\_q](http://ebw.eng-book.com/heishin/HeatTransferCalculation_tube_q_calculation.do?category=tube_q), 2017年12月20日閱覽
- Kretschmer, F., Simperler, L., Ertl, T., 2016, Analysing wastewater temperature development in a sewer system as a basis for the evaluation of wastewater heat recovery potentials, *Energy & Buildings*,128,639-648.
- N.Funamizu, M.Iida, Y.Sakakura, T.Takakuwa, 2001, Reuse of heat energy in wastewater: implementation examples in Japan, *Water Scienced and Technology*, 43,(10)277-285
- Culha, H. Gunerhan, E. Biyik, O. Ekrend, A. Hepbaslic,2015, Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings: A key review, *Energy and Buildings*, 104, 215-232
- Wanner, V. Panagiotidisa, P. Clavadetscher, H. Siegrist, 2005, Effect of heat recovery from raw wastewater on nitrification and nitrogen removal in activated sludge plants, *Water Research*, 39(19), 4725-4734
- R. Schilperoort., H. Hoppe., C. de Haan., J. Langeveld.,2012, in: Searching for storm water inflows in foul sewers using fibre-optic distributed temperature sensing, 9th International Conference on Urban Drainage Modelling, Belgrade
- S. Alnahhal, E.Spremborg, 2016, Contribution to Exemplary In-House Wastewater Heat Recovery in Berlin,Germany., *Procedia CIRP*, 40, 35-40
- S. Chao, J. Yiqiang, Y. Yang, D. Shiming, W. Xinlei, 2012, A field study of a wastewater source heat pump for domestic hot water heating, *Building Services*

Engineering Research and Technology, 34(4) 433-448

- S. Cipolla, M. Maglionico, 2014, Heat recovery from urban wastewater : Analysis of the variability of flow rate and temperature, Energy & Buildings, 69, 122-130
- SEMITEC, semitec サーミスタカタログ  
<http://www.semitec.co.jp/support/download/> 2017年12月20日閲覧
- 相原 利雄, 1994, 伝熱工学 (機械工学選書)
- 一般社団法人 日本エレクトロヒートセンター  
<http://www.jeh-center.org/heatpump.html> 2017年12月20日閲覧
- 一般社団法人 日本ビルエネルギー総合管理技術協会, 2016, 平成28年度建築物エネルギー消費量調査報告:第39報
- 気象庁, 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>  
2018年1月3日閲覧
- 経済産業省, 建築材料の断熱性に係わる性能値の公表について  
<https://www.eccj.or.jp/law/dan.html> 2017年12月20日閲覧
- 公益財団法人 日本下水道新技術機構, 2011, 下水管等を活用した熱利用技術に関する検討調査, 2011年度下水道新技術研究所年報
- 国土交通省 都市の低炭素化の促進に関する法律 (略称: エコまち法)  
[http://www.mlit.go.jp/toshi/city\\_plan/eco-machi.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/eco-machi.html) 2017年12月20日閲覧
- 国土交通省, 2014, 下水熱ポテンシャルマップ作成の手引き
- 国土交通省, 2015, 下水熱利用マニュアル(案)
- 国土交通省, 新潟市の取組 (融雪利用) <http://www.mlit.go.jp/common/001179383.pdf>  
2017年12月20日閲覧
- 三和, エコサーモ・テクノロジー, 2009, 浄化槽温排水熱源式ヒートポンプ給湯システム, 冷凍空調設備 2009年4月15日号
- 大観, 東洋製作所, 2014, 温泉排湯熱を利用した排熱回収ヒートポンプによる高効率熱源供給システム, 冷凍空調設備 2014年5月15日号
- フジクリーン工業株式会社, 人槽算定表,  
<http://www.fujiclean.co.jp/fujiclean/download/calc.html> 2017年12月20日閲覧
- 三菱総合研究所 環境・エネルギー研究本部, 2012, 平成23年度新エネルギー等導入促進基礎調査 熱エネルギーの有効活用の促進に関する調査事業報告書
- 一ノ瀬 俊明, 川原 博満, 2000, GISによる下水熱源地域熱供給事業の地域別適性評価, 土木学会論文集, 643, 29-36
- 一ノ瀬 俊明, 川原 博満, 花木 啓祐, 松尾 友矩, 1996, 下水熱有効利用可能性解析ツ

ールとしての GIS の開発, 土木学会論文集, 552, 11-21

- 空気調和・衛生工学会, 1994, 都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価
- 経済産業省・資源エネルギー庁, 2017, エネルギー白書 2017
- 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 2017, 新下水道ビジョン加速戦略
- 今井 功, 1973, 流体力学(前編)
- 三好 伸浩, 楠田 哲也, 井村 秀文, 都市における下水廃熱の利用性に関する研究, 1990, 環境システム研究, 18, 118-123
- 三毛 正仁, 鍋島 美奈子, 西岡 真稔, 澤部 孝一, 中尾 正喜, 貫上 佳則, 2014, 下水熱利用のための下水管路における晴天日下水流量推定法の提案, 空気調和・衛生工学会論文集 No.204, 47-55
- 山下 孝光, 楠田 哲也, 井村 秀文, 1991, 都市における下水廃熱の利用可能性に関する研究, 環境システム研究, 19, 76-82
- 社団法人 日本機械学会, 2005, JSME テキストシリーズ伝熱工学
- 池上 貴志, 荒巻 俊也, 花木 啓祐, 2008, ライフサイクルインベントリ分析による下水熱利用地域冷暖房システム導入効果の解析, 土木学会論文集 G, 64(2), 107-122
- 池上 貴志, 荒巻 俊也, 花木 啓祐, 2009, 東京都区部への下水熱利用地域冷暖房システム導入による二酸化炭素排出削減可能量の評価, 土木学会論文集 G, 65(2), 114-129
- 中山 有, 神田 学, 木内 豪, 2007, 下水処理場での水温観測に基づく都市下水道での水・熱輸送に関する研究, 水文・水資源学会誌第 20 巻 第 1 号, 25-33
- 長谷川圭佑, 村木美貴, 2013, 下水熱利用地域冷暖房システムと連動した都市開発コントロールの有効性に関する研究, 都市計画論文集 Vol.48 No.3, 573-578
- 梅野 良枝, 長谷川 泰士, 山口 徹, 上田 憲治, 宮本 潤, 澁谷 誠司, 2015, 都市排熱“下水熱”を利用した高効率ヒートポンプシステム, 三菱重工技報 Vol.52 No.4
- 東京都環境局・三菱地所株式会社, 2012, 地域エネルギーマネジメントシステムの構築に係る実現可能性調査事業 調査報告書
- 日本建築学会・日本環境管理学会共編, 2002, 建築の次世代エネルギー源
- 柏市, 2017, 平成 29 年度版下水道事業年報
- 望月 貞成, 村田 章, 1994, 伝熱工学の基礎

## 謝辞

研究を進めるにあたって、懇切丁寧に指導して下さった味埜俊教授、佐藤弘泰准教授にはここに多大なる感謝の意を表します。本論文を作成するにあたり、厳しくも優しい指導を賜りました。味埜先生には毎回の mtg や発表会で研究とは何たるかということや持つべき視点といった抽象的なところから実際の論理形成やデータ確認など具体的なところまで 2 年間お世話になり本当に有難うございました。特に目的、データ、手法の 3 つの話は感銘を受けました。佐藤先生には具体的なマップ生成や現場訪問、熱計算など初歩的な場面から勉強不足な私に対して根気よく研究を気にしてくださりありがとうございました。佐藤先生がいなければ研究が成り立たなかったと感じております。また味埜佐藤研の秘書である服部様には日頃から心遣いをしていただき、研究生活を送ることができました。研究室の皆様には感謝しています。

また本研究を進めるにあたり、多くの方々のご支援ご協力をいただきました。

副指導教員の清家先生には未利用熱の熱回収の知見から私の研究の論点をご指導いただきました。

柏市公設卸売市場では、本排水処理施設の管理をしていらっしゃった西原環境の星野様には現地での排水処理について事細かく教えていただき本当にありがとうございました。水温と排水量のデータは星野さんのご助力あつてのことでした。同じく西原環境の菅谷様には市場全体の排水処理の仕組みについて教えていただきました。ありがとうございました。市場管理担当の吉田様には柏市市場について基本的な事情を教えていただきました。他にも市場の方々には研究の許可をしてくださりありがとうございました。

最後に金銭面の援助をしていただいた両親に感謝の意を捧げます。