

# 下水由来の冷熱資源を活用した植物栽培技術の構築

資源エネルギー循環研究室 16334086 樋口志那  
 指導教員 姫野修司 小松俊哉

## 1. 研究背景

下水道からは様々な未利用資源が回収可能であり、下水は外気温に比べ温度変化が少なく、豊富かつ安定した熱源として冷熱、温熱の回収が可能であり、都市部の給湯や融雪利用に活用されている。中でも下水処理場では毎日大量の下水が流入するため、下水を熱源とした熱エネルギーポテンシャルを秘めている。一方で地方の下水処理場での資源がほぼ未利用である現状や、下水温熱に比べ冷熱利用が捗々しくないことが課題とされている。

## 2. 目的

本研究では、地方の一次産業である農業の熱需要に注目し、通年での熱回収の実施、冷熱利用としてワサビ栽培への下水冷熱の活用を目指した。ワサビ栽培は、水温、水質の制御を行い、より実施形態に近い栽培環境の構築を行うと同時に必要なエネルギーを明らかにすることを目的とした。

## 3. 実験方法

研究を行うにあたり、新潟県西川流域下水道西川浄化センター内に実験設備を設置し実験を行った(図1)。夏期に熱源である下水放流水からの採熱を行い、回収した下水冷熱を用いてヒートポンプ(以下、HP)により、冷水を製造する。その後、ワサビに供給する栽培水との熱交換を行うことで栽培水を冷却し年間を通してワサビの生育に必要な 20℃以下に温度を制御した。ワサビ栽培は、栽培面積 60[m<sup>2</sup>]の栽培プラントを設け、2019年3月より600株の栽培を開始した。栽培総水量は3000[L]とし、1株あたり0.3[L/min]の流量で供給した。

使用する栽培水は塩素除去を行った水道水

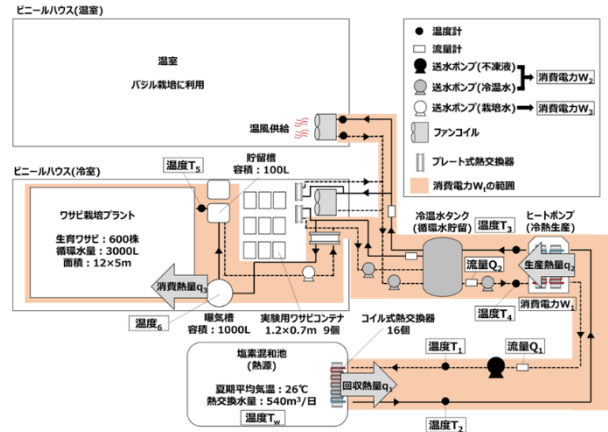


図1 実験設備 概要

を原水として、供給後に再度冷却して利用する循環利用を行った。循環利用により時間経過とともに水質の変化が予想されるため、2週間に一度程度の施肥と1週間に一度1000[L]の換水を実施した。

## 4. 実験結果

### 4.1. 下水放流水からの熱回収

下水放流水からの熱エネルギー回収設備の運転条件を表1に示す。2018年度は1年を夏期と冬期に大別し、夏期は冷熱、冬期は温熱を終日回収した。しかし、春期及び秋期は、日中冷熱、夜間は温熱の需要が発生する。2019年度は5月、10月は日中は冷熱、夜間は温熱の回収・利用を行った。

2019年度の下水熱回収結果を図2に示す。

表1 実験設備運転条件

	期間	条件	熱利用先
2018年度			
	4月1日-4月22日	温熱利用	バジル
	4月21日-10月23日	冷熱利用	ワサビ
	10月24日-3月31日	温熱利用	バジル
2019年度			
①	4月1日-4月31日	温熱利用	バジル
②	5月1日-5月20日	日中：冷熱利用 夜間：温熱利用	ワサビ+バジル
③	5月21日-10月10日	冷熱利用	ワサビ
④	10月11日-10月31日	日中：冷熱利用 夜間：温熱利用	ワサビ+バジル
⑤	11月1日-12月31日	温熱利用	バジル

下水放流水から夏期に冷熱を平均 3675[MJ/日]、冬期に温熱を 3178[MJ/日]回収した。回収した熱エネルギーを HP で冷水、温水製造した割合は冷熱が約 74[%]、温熱は 139[%]の冷温水を製造した。冬期の利用率が 100[%]を上回るのは HP の稼働に必要な外部からの電力エネルギーも熱エネルギーとして利用可能であるためである。

### 4.3. 年間を通した消費電力

2019 年度の設備稼働にかかった電力を示す(図 3)。また、に同期間の年間消費電力量を示す。夏期のワサビ栽培利用だけでなく、バジルのための加温に利用することで、通年で概ね一定の電力量を推移していることが確認できた。また、電力量の内訳のうち HP の稼働にかかる電力が全体の 60[%]程度を占めていた。

### 4.4. ヒートポンプの熱生産効率

次に、HP の熱生産効率を図るため成績係数(以下、COP)の算出を行った。COP は外部からの電力によって HP がどれだけ熱量を生産するかで決定した。

$$COP = \frac{q_2[kW]}{W_1[kW]} \quad \text{式 3}$$

( $q_1$ : 生産熱量[W],  $W_1$ : HP 消費電力[kW])

また同時に COP と同時に下水熱回収設備全体での成績効率(以下、SCOP)を算出した。このとき、設備全体の消費電力は、HP の消費電力に加え、熱源である塩素混和池からワサビ栽培プラントまでを範囲とし、経路内にある送水ポンプの動力を加えたものとする(図 1)。

図 4 に COP 及び SCOP を示す。今年度の夏期冷熱回収時の平均 COP は 2.9(低出力運転時は考慮しない)であり、期間中概ね横ばいに推移しており、安定して熱生産が可能であったといえる。冬期についても COP が 4.6 であり、2018 年度と同等の結果が得られた。

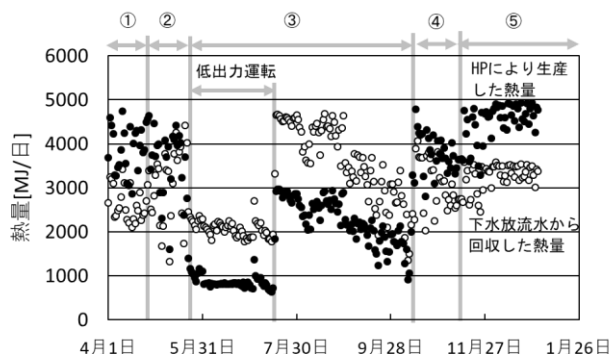


図 2 下水からの熱回収(2019 年度)

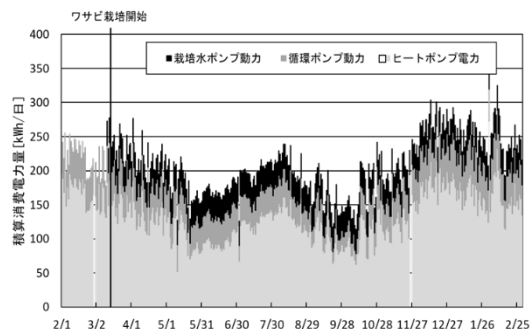


図 3 通年の電力量の推移(2019 年度)

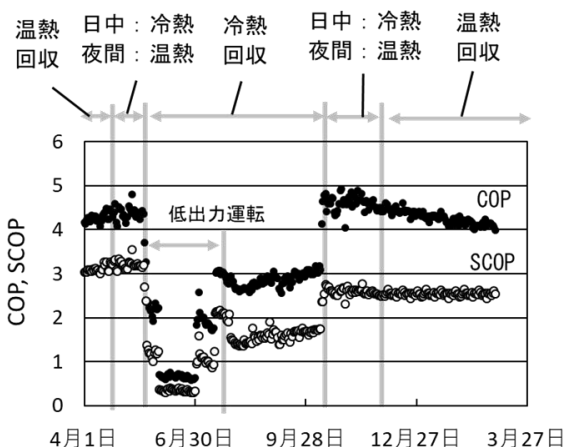


図 4 COP 及び SCOP の推移(2019 年度)

次に SCOP では、今年度夏期の平均 SCOP が 1.7、冬期の平均が 2.6 であった。冬期において COP が春期と概ね一定であるのに対し、SCOP は冬期の結果が春期の 3.0 に比べ低い値を推移していたのは COP の値は春期と冬期で同程度であったため、ヒートポンプ以外の消費電力が影響していると考えられる。2019 年度は一部ワサビへの利用も行ったため、設備全体の消費電力として、ビニールハウスへ冷温水を送る循環ポンプ及び栽培水ポンプの動力分が加

味されたと考えられる。

### 4.3. 冷熱を活用したワサビ栽培の環境構築

冷却させた栽培水循環させ、24時間ワサビへ供給した。図5に2019年度の栽培水温度の推移を示す。栽培水温度はワサビの生育に適している12~13[°C]を維持した。ワサビは水温が20[°C]以下であると生育可能であることを踏まえると、12~13[°C]の栽培水冷却は過度とも考えられ、電力削減が見込める。

栽培水質は、多地点のワサビ栽培と水質を比較し、不足分であるカルシウム、マグネシウム、カリウムを施肥の対象成分としてCa(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>の施肥を行った。施肥量及びその時点で求められたワサビの各成分の吸収速度から決定した。

12月から1週間に一度の水質分析により吸収速度を試算した。施肥成分のうち、窒素以外の成分は成分濃度が高いほど、吸収速度が速くなる傾向があった(図6)。今後、吸収速度と水温や成分濃度の関係性を明らかにし、吸収速度が速い条件で栽培することで、ワサビの成長促進が示唆された。

### 4.3. ワサビの生育状況

ワサビの生育の状態を図るため、糸魚川でのワサビ農園との定期比較を行った。比較に用いた糸魚川のワサビは2019年4月に定植されたものであり、本設備のワサビと同時期に定植されたものとする。

2020年2月末時点で、本設備のワサビが35[cm]程度、糸魚川のワサビが60[cm]程度となり生育の差に違いが生じた(図7)。この要因として、栽培手法による栽培水質の違いがあげられる。糸魚川での栽培は地下水のかけ流しであり常一定の水質の栽培水を供給することができる。一方で、本設備の栽培手法は、前述した様に栽培水を循環利用しているため、ワサビの成分吸収によって常に水質が一致していない点などが考えられる。また、2地点の

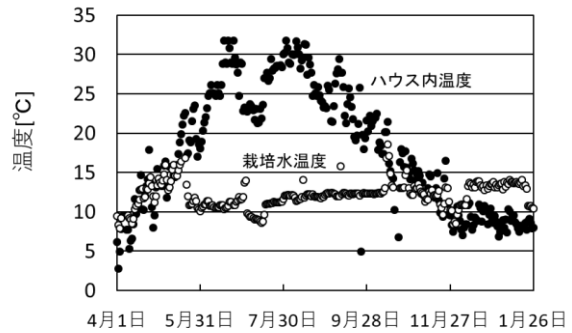
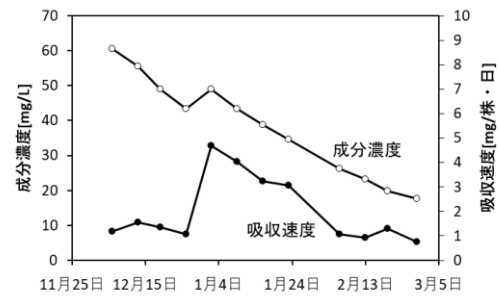
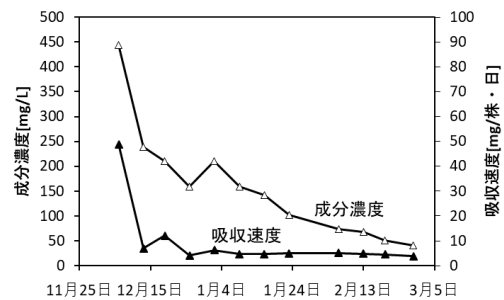


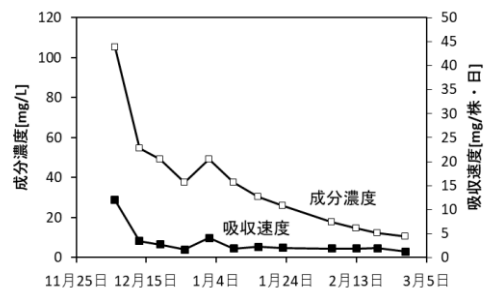
図5 ワサビ栽培水の温度推移(2019年)



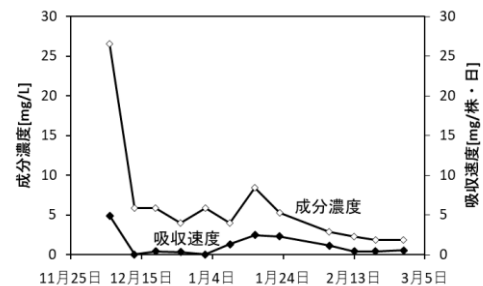
(a). 窒素



(b). カルシウム



(c). マグネシウム



(d). カリウム

図6 成分濃度との吸収速度の推移(2019年度)

水質を比較すると本研究の栽培水はミネラルの施肥により肥料に含まれる窒素分が過剰に添加され、地下水に比べ高い濃度の栽培水となったことも要因の1つとして考えられる。

今後は、硝酸態窒素の過剰施肥を防ぐとともに、ワサビと丈に差がみられたことを考え、これまで添加を行ってこなかったリンの施肥を行うことで生育の促進を図る。

#### 4.4. ワサビ栽培に必要なエネルギー

本年度の電気量から、ワサビ栽培に必要な電気量を示す(表2)。このとき、5月から10月は冷熱利用期間のため全体の電力量を用いて算出し、残りは温熱利用期間として栽培水ポンプの電力量のみを用いて算出した。この結果から、本設備においてワサビ1株を栽培するためには1年で71[kWh/株・年]であった。現在栽培しているワサビの生育期間は1年半及び2年であり、生育期間2年のワサビを定植から収穫まで栽培する場合、必要な電力量は142[kWh]必要である結果となった。

#### 4.5. 条件温度域の変更による省エネルギー化

HPの温度条件を変更することでの電力の削減を検討した。条件の変更として、条件温度差を7~9[°C]に広げた場合にどこまで消費電力を抑えられるか推定した。まず、HPの冷却期間を7月、8月のみとし残りの1月~6月、9月~12月は栽培水ポンプの動力のみとした。また、冷却を行っていない期間は、0.9[kWh/株・月]とする。

推察にあたり、本条件でのHPが生産する熱量と栽培プラントでの消費熱量から、1日のHPの稼働時間を推定した。このとき、条件温度差9[°C]の場合、冷温水タンク内の水を9[°C]低下させるために必要な熱量は52668[kJ]となる。

栽培プラントから発生する消費熱量を考慮し、実測値を用いて前述した条件でのHP稼働を想定した結果、1日の稼働時間は12.9[h]



図7 ワサビの生育比較(右:本設備, 左:糸魚川)

表2 ワサビ一株当たりに必要な電力量

年	2019									
	温熱					冷熱				
下水熱利用										
月	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
必要な電力量 [kWh/株・月]	1.8	1.8	1.8	7.0	9.8	11	11	8.2	6.1	

2019			2020			合計 [kWh/株・年]
温熱						
11	12	1				71
1.8	5.5	5.0				

表3 温度域を変更した条件でのHP消費電力量

	上限温度 [°C]	下限温度 [°C]	温度差 [°C]	1日の稼働時間[h]	HP消費電力 [kWh/株・月]
case1	14	7	7	16.0	6.61
case2	15		8	14.9	5.39
case3	16		9	13.3	4.81

となった。この結果を用いてひと月にかかるHPの消費電力を算出する。このとき、HPの瞬間電力値は夏期の実測値の7[kW]として1日にちのHP積算電力量を示す(式4)。

算出式 (条件温度域9°Cの場合)

$$7[\text{kW}] \times 12.9[\text{h}] \times 31[\text{日}] \div 600[\text{株}] = 90.3[\text{kWh/日}]$$

式4

表3に各条件から推定されるHP消費電力量を示す。この条件でワサビ600株を栽培した時、case3において年間の積算電力を34.2[%]まで抑えることが出来ると示唆された。

#### 4.6. 冷却温度を抑えることでの省エネルギー化

前節では、HPの条件の上限温度を変更し、冷却温度域を広げることで電力の削減を行った。一方で、ワサビ栽培に使用する栽培水温

を考えると、現在の 7[°C]までの冷却は過剰であり、条件の下限温度を上げることで熱源温度との温度差が小さくした時の電力削減を推察した。HPにより製造する冷水の温度は現在の 7[°C]から熱源温度に近づけた 10[°C]までとして試算を行った。このとき条件温度差は 4[°C]と固定した。

生産熱量は 2019 年度の実測値を使用し、電力量を試算する際の COP は、式 5 を用いて実測の各温度から算出した理論 COP の 22.4[%] の値を使用し、瞬間電力量を試算する。

$$COP = \frac{q_c}{|W|} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad \text{式 5}$$

( $q_c$ : 低温源から取り出した熱,  $T_h$ : 高温源の温度,  $T_c$ : 低温源の温度)

条件温度を 14[°C]で冷却、10[°C]で停止した場合では、36.3[%]まで抑えることが出来ると示唆された。

ここで、前節の HP の条件温度を広げた条件で推定した結果と比較すると、製造する冷水の温度を熱源に近づけ、冷却温度を抑えた温度にするよりも、HP の条件温度の範囲を広げる方がより電力削減の見込みがあると考えられる。HP の条件温度域を 4[°C]に固定したまま、下限温度をどこまで熱源に近づけることで case3 の条件以上の電力削減が見込めるか試算すると、下限温度を 12[°C]まで上昇した場合において、電力の削減率が上回る試算結果となった(表 4)。

#### 4.7. 条件を併用することでの省エネルギー化

ここまで電力削減の方法として HP の温度条件を変更した場合と、冷却温度を抑えて熱源との温度差を狭めた場合の推算を行った。本節では 2 つの条件を組み合わせることによってどれだけ電力を削減可能か推察した。

下限温度を熱源温度に近づけたうえで、HP

表 4 冷却を抑えた条件での HP 消費電力

	熱源温度 [°C]	下限温度 [°C]	熱源との温度差 [°C]	COP	HP消費電力 [kWh/株・月]
case4	26	7	19	3.3	6.42
case5		8	18	3.5	6.05
case6		9	17	3.7	5.72
case7		10	16	4.0	5.29
case8		11	15	4.2	5.04
case9		12	14	4.6	4.60

表 5 冷却を抑えた条件での HP 消費電力

	熱源温度 [°C]	上限温度 [°C]	下限温度 [°C]	温度差 [°C]	1日の稼働時間 [h]	HP消費電力 [kWh/株・月]
case10	26	16	12	4	14.2	5.14
case11			11	5	13.9	5.03
case12			10	6	13.7	4.95

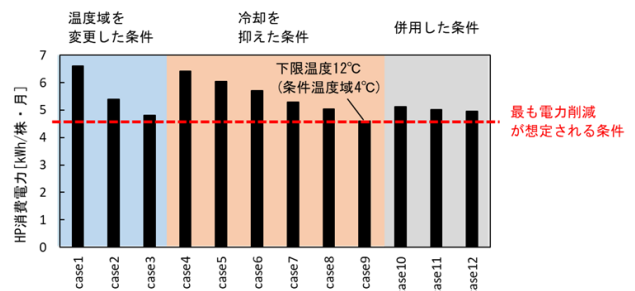


図 8 各条件で想定される HP 消費電力

表 6 想定されるワサビ栽培に必要な年間電力量

年	2019									
下水熱利用	温熱					冷熱				
月	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
必要な電力量 [kWh/株・月]	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	6.97	7.67	0.9	0.9	

2019		2020	合計 [kWh/株・年]
温熱			
11	12	1	23.6
0.9	0.9	0.9	

の温度域を広げた際の電力量を推算した。このときの HP の稼働時間を推察し、消費電力の算出に用いる COP は冷却温度を抑えた際に推定されるものを使用した。消費電力 7[kW]の時に想定される生産熱量から、ヒートポンプの稼働時間を決定し 1 日の積算電力量を示す(式 6)。

算出式 (16°Cで冷却, 10°Cで停止の場合)

$$7[\text{kW}] \times 13.7[\text{h}] \times 31[\text{日}] \div 600[\text{株}]$$

$$= 4.95[\text{kWh/月}]$$

式 6

試算によりヒートポンプ条件を 16[°C]で冷

却、10[°C]で停止した場合では、2つの条件ともに最も削減が想定される case3、case9 の方が電力削減される結果となった。図 8 に、ここまでで示した case1 から case12 までの条件を想定したヒートポンプの消費電力を示す。ヒートポンプの条件が 16[°C]で冷却、12[°C]で停止する条件が最も電力を抑えた条件である結果となった。表 6 にこの条件で想定される年間のワサビに必要な電気量を推察する。これにより、消費電力は 23.6[kWh/株・年]となり削減前に比べると 33.2[%]まで削減可能な試算結果となった。

以上のことから、熱源の温度に近い温度に設定することで、より電力の削減効果が得られると示唆された。

#### 4.8. 下水熱を用いたワサビ栽培におけるコスト収支

本設備を用いてワサビ栽培を行った際に必要なコストの推移を試算する。コスト試算にあたり、ワサビ栽培に必要なコストとして表 6 に示す。コスト収支として、イニシャルコストをヒートポンプの耐用年数である 20 年で回収すると仮定した場合、投資回収が可能であるか検証した。このとき想定するワサビ栽培の規模は別地点で栽培を行っている 9×30m のビニールハウス 12 棟で合計 3 万株のワサビ栽培を推定した。このとき、HP、熱交換器の出力は、今年度の実測値である夏期の最大消費熱量の 28[kW]を用い、ワサビ 1 株当たりに必要な熱量を算出することで、ワサビ 3 万株に必要な熱量を試算し、この熱量を賄えるよう選定した。

図 10 に想定した規模でのワサビ栽培のコスト収支を示す。このとき、条件として①ランニングコストに土地代が含まれる場合、②土地代が含まれない場合、③土地代が含まれずイニシャルコストの機械設備費に補助金が適用される場合の 3 条件を示した。ワサビの売

表 6 ワサビに必要なコスト

イニシャルコスト		ランニングコスト			土地代
機械設備	栽培ハウス	人件費	光熱費	その他	
ヒートポンプ	ビニールハウス		人件費	電気量	ワサビ苗
熱交換器	ワサビ田	水量		肥料・防除	
設備工事費	土木工事費			維持管理費	

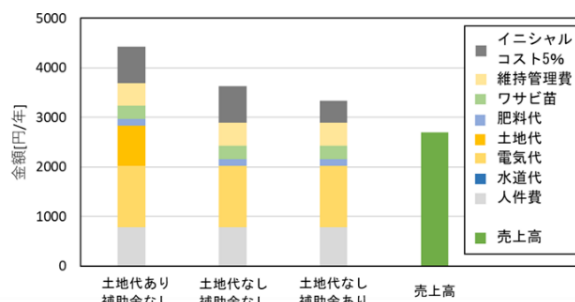


図 10 想定されるワサビのコスト収支

上高はワサビ農家からのヒアリングを参考に、ワサビ 1[kg]あたり 1 万円で取引とし、今回想定する 3 万株では 2700[万円/年]となる。

試算結果から、土地代を含めない場合においてもランニングコストが売上高を上回った。このことから、現時点での想定では、投資回収は困難であり、コスト削減の必要がある。

#### 5. 結論

下水熱から冷熱を製造しワサビ栽培に利用することで、これまで栽培地域が限られていたワサビの栽培を再生可能エネルギーのみで栽培可能であることを示した。一方、栽培水温の条件を見直し、HP の冷却を抑えることで電力を 32.4[%]の削減が可能となった。しかしながら、ワサビの売上高を考慮した場合、ランニングコストが過剰となり、設備の投資回収は困難である結果となり、コスト削減が課題として挙げられた。今後はワサビ田を断熱するなどの改造を考案し、消費熱量を抑えることでさらなる電力削減を図る。