

分散協調制御を用いた下水熱利用に基づく 都市内消費電力の最小化

日下部 達哉¹・柳沼 秀樹²・家田 仁³

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: kusakabe@concrete.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院 特任助教 工学系研究科 社会基盤学専攻

E-mail: yaginuma@civil.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学大学院 教授 工学系研究科 社会基盤学専攻

E-mail: ieda@civil.t.u-tokyo.ac.jp

下水熱は都市内に存在する未利用エネルギーの1つで、冷暖房や給湯等の熱源として、省エネ効果が期待されている。現在、下水熱利用に関連した法整備や熱回収装置等の技術開発が進められているが、都市規模での省エネ効果を示した事例は少ない。本研究では、都市圏レベルの下水ネットワークを対象に、最適な下水熱利用方策を検討した。具体的には、都市全体における電力消費量の最小化を目的に、複数の熱回収施設の配置を上位問題、季節変動・時間変動を加味した熱回収量の動的最適制御を下位問題、とするモデルを構築した。下位問題では、計算量や情報収集の難しさを考慮し、ローカル情報のみを用いた分散協調制御をポテンシャルゲームに基づいて定式化した。このモデルを、仮想の下水網および福岡市の下水網に適用し、提案手法の有効性を検証した。

Key Words : waste water heat utilization, distributed cooperative control, potential games

1. 研究の背景と目的

昨今、世界的に地球温暖化の危険性が指摘されており、省エネルギーの必要性が叫ばれるようになっていく。これを実現するうえで、空調や給湯の果たす役割は大きい。具体的には、2011年度の最終エネルギー消費のうち、家庭部門が全体の約14%、業務部門が全体の約20%を占めているが、家庭部門においては最終エネルギー消費量の約57%、業務部門においてはその約43%が、空調や給湯に使用されている¹⁾。空調や給湯においては、電気エネルギーを使用して熱エネルギーを低ポテンシャルから高ポテンシャルへと移動させる、ヒートポンプを使用するケースが多い。

このヒートポンプの熱源として、一般的に利用される空気の代わりに、着目されてきたのが「下水」である。理由は二つある。一つは、下水の持つ未利用熱の豊富さであり、全国の下水中に眠る熱は約1,500万世帯の年間冷暖房量に匹敵する²⁾。もう一つは、下水熱の効率性である。河合ら(2013)³⁾によれば、下水温は気温に比べて年変動が少なく、夏に涼しくて冬に暖かい、という特性を持つ(図-1)。例えば、2月に暖房を20[°C]に設定した場合、平均外気温は約5[°C]であるため、従来ならヒートポンプ内の熱媒体を約15[°C]以上、温める必要がある。この代わりに、平均温度が約18[°C]で

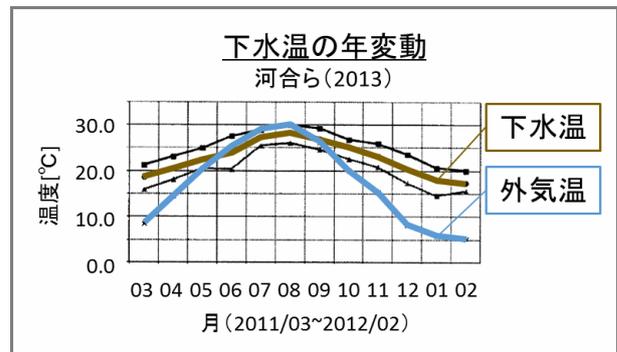


図-1 下水温と気温の年変動 (河合ら(2013)³⁾より作成)

ある下水を熱源とすれば、熱媒体を約2[°C]以上、温めれば十分である。このように、暖房の設定温度と熱源の温度の差が小さい分、下水は外気より効率的な熱源となるのである。下水温が気温より低くなる夏においても、同じようなことが言える。

以上で説明したように、下水は熱源として大きなポテンシャルを持つ。しかし、2013年度の段階で、下水処理施設外で下水熱を利用する事例は全国で12件にとどまる²⁾。中尾(2011)⁴⁾は理由として、2011年10月の段階で合計110地点(計画中含む)の下水熱利用実績のあるドイツやスイスに比べ、小型の採熱設備を使用して下水管路から熱を回収する事例が日本では少な

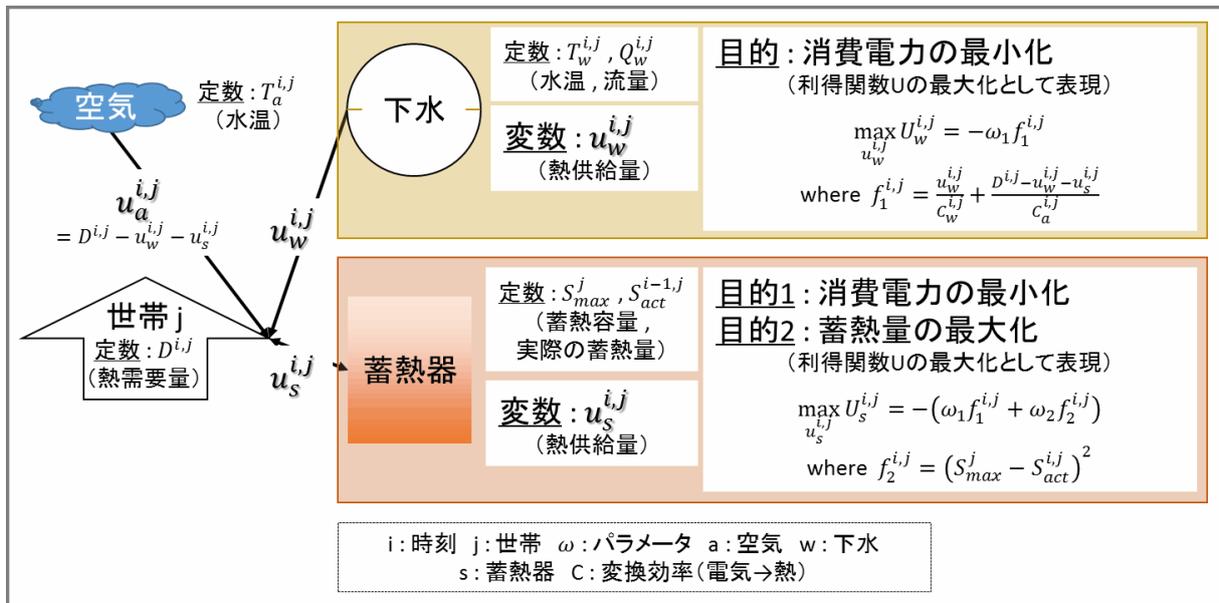


図-2 各世帯に導入するシステム

いこと、を指摘している。この状況を鑑みて、日本においても、民間事業者が下水を活用できるような法整備⁵⁾や、小型の採熱設備の研究⁴⁾が進み始めている。

これに対し、実際に多数の事業者が下水熱を活用することとなった場合の、下水網の制御に関する研究は多くない。これは、小型の発電施設を多数の事業者が運用することを考慮した電力網「スマートグリッド」の研究が進んでいることと、非常に対照的である。下水網に関する既往研究としては、ある都市全体における賦存熱量の概算を行った三好ら(1990)⁶⁾の研究、地区の精度をメッシュ単位へと改善した一ノ瀬ら(1996)⁷⁾の研究、時刻の精度を一時間単位へと改善した池上ら(2005)⁸⁾の研究、などが挙げられる。しかし、これらの研究は運営者が情報を一括的に把握して計算することを前提としており、計算量が増大するおそれや、十分な情報収集を実現できないおそれがある。一方、電力網に関する既往研究としては、運営者が情報を一括的に把握して計算する方式ではなく、電力網を構成する各主体に共通のルールを課して分散的に計算する「分散協調制御」を用いた研究が存在し、注目を集めている⁹⁾¹⁰⁾。

そこで本研究では、この「分散協調制御」を下水網にも適用し、都市圏レベルの下水ネットワークを対象に、最適な下水熱利用方策を検討した。具体的には、都市全体における電力消費量の最小化を目的に、複数の熱回収施設の配置を上位問題、季節変動・時間変動を加味した熱回収量の動的最適制御を下位問題、とするモデルを構築した。なお下位問題は、ポテンシャルゲームに基づいた分散協調制御として定式化している。こ

のモデルを、仮想の下水網および福岡市の下水網に適用し、提案手法の有効性を検証した。

2. 下水熱利用モデルの構築

(1) 各世帯が導入するシステム

時刻を i 、世帯を $j \in \mathcal{H} := \{1, 2, \dots, n\}$ とする。世帯 j は、空気ヒートポンプ、下水ヒートポンプ、および蓄熱器、という3つの熱源を持つ。下水ヒートポンプと蓄熱器が主体的に熱供給量 $u_w^{i,j}$ [kJ/s] および $u_s^{i,j}$ [kJ/s] を決定し、不足した分を空気ヒートポンプの熱供給量 $u_a^{i,j}$ [kJ/s] で補うことで、熱需要量 $D^{i,j}$ [kJ/s] と全体の熱供給量を一致させる。このように、あくまで下水を一つの熱源として位置づけることで、多数の世帯に下水熱を利用する機会を提供することができる。また、熱源として蓄熱器を導入することで、熱需要量の時刻変動を吸収することが期待される。なお、下水ヒートポンプは世帯内の消費電力の最小化(=利得関数 $U_w^{i,j}$ の最大化)を、蓄熱器はそれに自身の蓄熱量の最大化を加えたもの(=利得関数 $U_s^{i,j}$ の最大化)を、それぞれ目的とする(図-2)。

(2) システム間の情報共有

世帯 j の下水ヒートポンプは、一つ上流の世帯群 j_b から流れ込む水温 $\hat{T}_w^{i,j,k}$ [K]、および一つ下流の世帯 j_f へ流れ出す水温の下限值 $\check{T}_w^{i,j,k}$ [K] を用い、自身の熱供給量 $u_w^{i,j,k}$ を確率的に計算する。ここで k は、ある時刻 i を「固定した際の」計算の反復回数である。世帯 j の下水ヒートポンプは、全主体の計算結果が収束するまで、反復回数 k を1ずつ増やしながら計算を繰り返す。そして、計算結果が収束した際の熱供給量 $u_w^{i,j,k}$ を $k = 0$

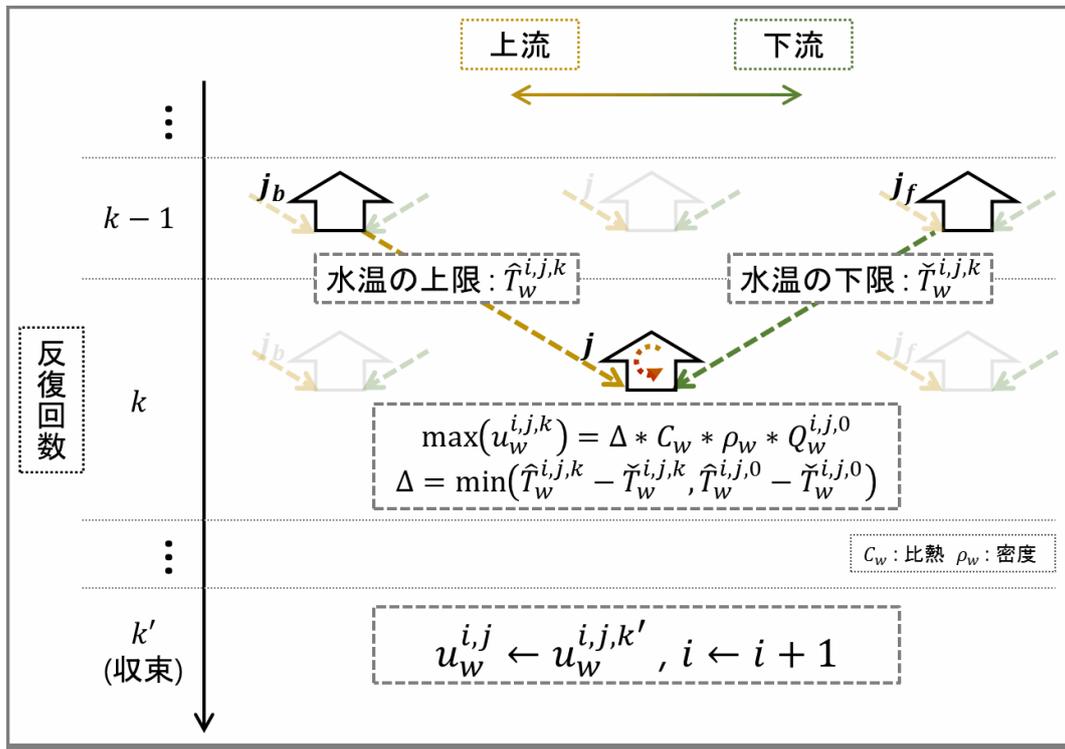


図-3 システム間の情報共有

の下水流に適用し、それを時刻 i における熱供給量 $u_w^{i,j}$ とする (図-3)。

このモデルの利点は、以下のとおりである。

- 局所的な計算ながら、多数の世帯の情報を意思決定に反映できる
- 下流の意思決定を上流が考慮することで、熱利用の (上流への) 偏在を防止できる
- 下水流の持つタイムラグを考慮できる

$\hat{T}_w^{i,j,k}$ からは、ヒートポンプの成績係数 (COP) を計算できる。これは、ヒートポンプにおいて、1[kJ/s] の電力から何 [kJ/s] の熱を取り出せるか、を示す係数である。この成績係数 (COP) を求める回帰式が、Baster and Counsell (2011)¹¹⁾ によって算出されている。室内側の熱媒の入口温度 (JIS-B-8621 に則れば 40[°C])、および室外側の熱源の温度 $\hat{T}_w^{i,j,k}$ を用い、回帰式は式 1 のように表される。

$$COP = 6.70 * \exp(-0.022 * (40 - \hat{T}_w^{i,j,k})) \quad (1)$$

$\check{T}_w^{i,j,k}$ からは、熱供給量の上限値を計算できる。まずは、 $\check{T}_w^{i,j,k}$ を計算する。時刻 $i = 0$ 、あるいは世帯 j が最下流にある場合は、 $\check{T}_w^{i,j,k} = 10$ とする。それ以外では、世帯 j_f において反復回数 $k-1$ で算出された水温の下限値 $\check{T}_w^{i,j_f,k-1}$ [°C]、および熱利用前後の水温変化 $\Delta T_w^{i,j_f,k-1}$ [°C] を用い、 $\check{T}_w^{i,j,k}$ を式 2 のように表す。

$$\check{T}_w^{i,j,k} = \check{T}_w^{i,j_f,k-1} + \Delta T_w^{i,j_f,k-1} \quad (2)$$

下水の比熱を C_w [kJ/(K*kg)]、下水の密度を ρ_w [kg/m³],

一つ上流の世帯群 j_b から流れ込む流量を $Q_w^{i,j,k}$ [m³] とすると、熱供給量の上限値 $\max(u_w^{i,j,k})$ [kJ/s] は、式 3 のように表される。

$$\max(u_w^{i,j,k}) = \Delta * C_w * \rho_w * Q_w^{i,j,0} \quad (3)$$

$$\Delta = \min((\hat{T}_w^{i,j,k} - \check{T}_w^{i,j,k}), (\hat{T}_w^{i,j,0} - \check{T}_w^{i,j,0}))$$

ここで、反復計算による計算結果は最終的に $k = 0$ の下水流に適用されるため、反復回数 $k = 0$ および k の両パターンにおいて、熱供給量が上限値を下回っている必要があること、には留意されたい。

3. 下水熱利用モデルの解法

(1) 学習アルゴリズム"PIPIP"

章 2. では、自身の熱供給量を確率的に計算する、と述べた。今回はその計算のため、和佐ら (2012)¹²⁾ の開発した学習アルゴリズム"PIPIP"を使用した。以下に、その概要を説明する。

簡単のため、時刻を i で固定し、 $u_w^{i,j,k}$ を $u_w^{i,j,k}$ として表現する。世帯 j の下水ヒートポンプが、直近の反復計算 2 回における行動 $u_w^{i,j,k-2}$, $u_w^{i,j,k-1}$ と、それによる自身の利得 $U_w^{i,j,k-2}$, $U_w^{i,j,k-1}$ のみを記憶している、と仮定する。この時、世帯 j のヒートポンプは、反復回数 k における戦略集合 $\mathcal{R}_w^{i,j,k-1}$ の中から、一定の探索度 $\epsilon(k) \in (0, 1)$ 、および選択行動の非合理性を表現するパラメータ κ を用いて、以下のように行動 $u_w^{i,j,k}$ を決定する。

表-1 仮想ネットワークでの問題設定

世帯	熱需要量	気温	世帯内での発生水量	世帯内での発生水温
j	$D^j[\text{kJ/s}]$	$T_a^j[^\circ\text{C}]$	$q_w^j[\text{m}^3/\text{s}]$	$t_w^j[^\circ\text{C}]$
1	100	0	0.0055	15
2	500	0	0.0025	15
3	1000	0	0.005	15

$\Delta := U_w^{j,k-2} - U_w^{i,j,k-1} \leq 0$ の場合、

- 確率 $\epsilon(k)$ で、 $u_w^{i,j,k-1}$ 以外の $u_w^{i,j,k} \in \mathcal{R}_w^{j,k-1}$ を選択
- 確率 $1 - \epsilon(k)$ で、 $u_w^{i,j,k-1}$ を選択

$\Delta := U_w^{j,k-2} - U_w^{j,k-1} > 0$ の場合、

- 確率 $\epsilon(k)$ で、 $u_w^{j,k-2}$, $u_w^{j,k-1}$ 以外の $u_w^{j,k} \in \mathcal{R}_w^{j,k-1}$ を選択
- 確率 $(1 - \epsilon(k))\kappa\epsilon(k)^\Delta$ で、 $u_w^{j,k-1}$ を選択
- 確率 $(1 - \epsilon(k))(1 - \kappa\epsilon(k)^\Delta)$ で、 $u_w^{j,k-2}$ を選択

ただし、パラメータ κ は以下の条件を満たす。

$$\kappa \in \left(\frac{1}{C-1}, \frac{1}{2} \right] \text{ where } C := \max_k \max_{u_w^i} |\mathcal{R}_w^i| \quad (4)$$

なお、世帯 j の蓄熱器も同様に行動 $u_s^{j,k}$ を決定する。

PIPIP は、戦略集合の制約を加味できる、過去の利得のみを用いて戦略を決定できる、全体最適解に高確率で収束する、という利点を有している。本研究で用いた PIPIP には、 $\hat{T}_w^{i,j,k} > \hat{T}_w^{i,j,k}$ の場合には熱供給量を 0 にする、熱供給量の上限値を超えた数値が選択された場合は、それを熱供給量の上限値に置き換える、という 2 つの処理を施している。

(2) ポテンシャルゲーム

章 2. では、システム全体での熱供給量が収束するまで反復計算を繰り返す、とも述べた。今回は収束の判断のため、システム全体での利得を評価するポテンシャル関数 ϕ を設定し、ポテンシャルゲームを構築した。以下に、その概要を説明する。

簡単のため、時刻を i 、反復回数を k で固定し、 $u_w^{i,j,k}$ を u_w^j として表現する。また、世帯 j の下水ヒートポンプを除く全主体の行動を

$$u_w^{-j} = (u_w^1, \dots, u_w^{j-1}, u_w^{j+1}, \dots, u_w^n, u_s^1, \dots, u_s^n)$$

とする。この時、ポテンシャル関数 ϕ は式 5 のように表される。

$$\phi(u_w^j, u_w^{-j}) - \phi(u_w^{j'}, u_w^{-j}) = U_w^{j'} - U_w^j \quad (5)$$

つまり、利得関数の差分がポテンシャル関数の差分と同じになるように、ポテンシャル関数を設定している。

ポテンシャル関数 ϕ は、自身が最大値を取ればナッシュ均衡が成立している、という性質を持つ。ただ、逆は成立するとは限らない¹³⁾。

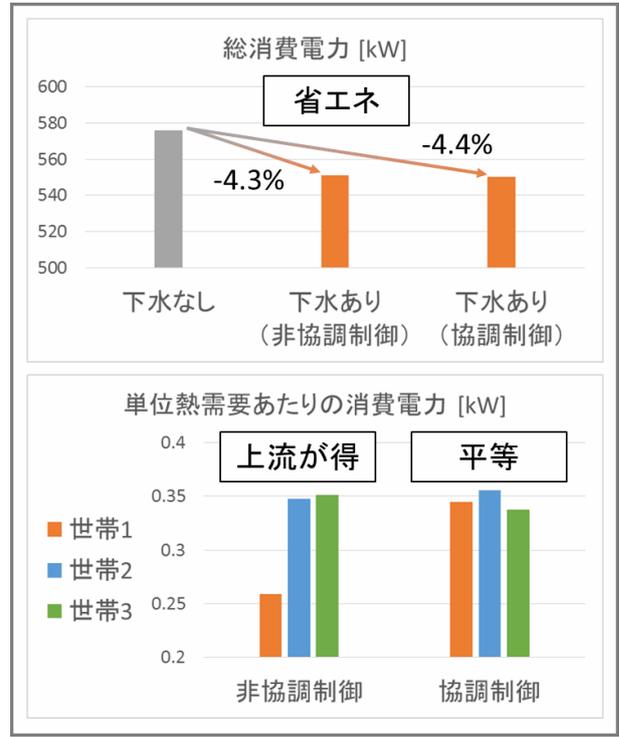


図-4 仮想ネットワークでの計算結果

4. 仮想の下水網でのシミュレーション

本章では、章 2. で構築した下水熱利用モデルを、仮想的で単純なネットワークに適用する。また結果を、下水熱を利用しない場合、および分散協調制御を導入しない場合、の両者と比較する。下水熱を利用しない場合は、必要な熱を空気ヒートポンプのみで供給する。分散協調制御を導入しない場合は、必要な熱を下水ヒートポンプおよび空気ヒートポンプで供給するが、上流の世帯は下流の世帯から制約を受けずに、自身の利得関数を最大化できる。なお、章 2. で構築した下水熱利用モデルを利用する場合においても、蓄熱器は稼働しない。問題設定は、表-1 に示すとおりとする。

シミュレーション結果を、表-2 および図-4 に示す。まず着目すべきは、下水熱を利用しない場合に比べて下水熱を利用する場合の方が、総消費電力を抑えることができる、という点である。これは、下水の方が空気と比べて COP が高く、効率的に熱回収を行うことができるためである。

それ以上に着目すべきは、協調制御を用いない場合に比べ、協調制御を用いる場合の方が、世帯間の単位熱需要あたりの消費電力を平滑化できる、という点である。協調制御を用いない場合は、最上流の世帯 1 が可能な限り下水熱を回収し、熱需要量の大きい下流の世帯は下水熱の恩恵を享受できなくなる。その結果、単位熱需要あたりの消費電力に関して、世帯間に不均一

表-2 仮想ネットワークでの計算結果

世帯 j	下水なし	下水あり（協調制御なし）		下水あり（協調制御あり）	
	消費電力 P^j [kW]	水温 T_w^j [°C]	消費電力 P^j [kW]	水温 T_w^j [°C]	消費電力 P^j [kW]
1	36.0	15.0 → 10.7	25.9	15.0 → 14.8	34.5
2	179.9	12.0 → 10.0	174.1	14.9 → 13.1	177.8
3	359.8	11.9 → 10.0	351.1	13.9 → 10.1	337.9
計	575.7		551.1		550.2

が生じる。その一方で協調制御を用いる場合は、下流の世帯が選択した下水からの熱供給量を、上流の世帯が制約条件として加味するため、全ての世帯が自身の熱需要量に見合った分だけ下水熱を回収している。その結果、単位熱需要あたりの消費電力は、世帯間で平滑化される。

世帯間の単位熱需要あたりの消費電力を平滑化できる、という点に着目する大きな理由は、多数の世帯が下水熱利用の恩恵を受けると示すことにより、結果的に下水熱の普及につながる、と考えているためである。少なくとも、水温が場所によって一定であり、単位熱需要あたりの水量が一定である、このような利用パターンにおいては、全ての世帯が等しく下水熱の恩恵を受けられている、と言える。

なお、着目すべき点はもう一つある。協調制御を用いる場合は最下流の世帯3において、下水熱を回収できるだけ回収するという明示的な命令をしていないものの、結果的に下水熱をほぼ最大限に回収している、という点である。具体的には、「水温は常に10[°C]を下回らない」という制約のもと、最下流の世帯3が、水温が10.1[°C]となるまで下水熱を回収している。

5. 福岡市の下水網でのシミュレーション

本章では、章2.で構築した下水熱利用モデルを、章4.で取り上げたものよりも大規模で複雑な、福岡市の中心部の実ネットワークに適用する。また結果を、下水熱を利用しない場合と比較する。下水熱を利用しない場合は、必要な熱を空気ヒートポンプおよび蓄熱器を用いて供給する。章4.とは異なり蓄熱器を導入したのは、より正確に下水熱を利用した場合の節電効果を確認するためである。適用するネットワークの前提を、下に示す。

- 計算周期：60分とする
- 蓄熱器：蓄熱容量は、各世帯において最大の熱需要が30分間続く場合に相当する熱量とする。初期状態での蓄熱率は、50%とする。蓄熱量の減衰は、60分間で1割とする

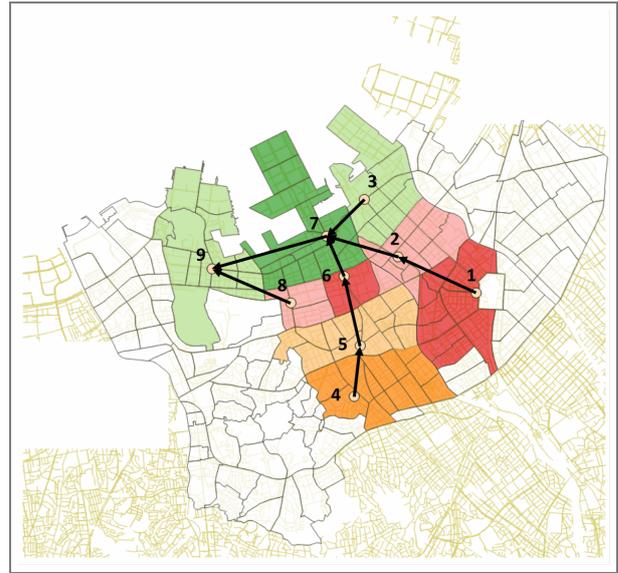


図-5 福岡市での土地利用／下水流

- 時期：1月の晴天日（水温と気温の差が最も大きい
ため節電効果が出やすいため³⁾、また一日を通した
寒暖差が大きく気温変動に対する挙動を観察しやす
いため)

図-5には、対象範囲の地図を載せた。矢印が下水の流れを、丸が熱を回収する施設を示し、施設は色分けされた地区内に熱を供給する。このようなマクロレベルのシミュレーションを行う理由は、様々な土地利用を含む広域的なネットワークにおいて、分散協調制御の挙動を観察するためである。

橙系統で示される地区は、主に住宅が立ち並ぶ。より都心に近い5番の地区の方が、商業施設や業務施設を多く含む。緑系統で示される地区は、主に住宅および倉庫が立ち並ぶ。こちらも同じく、より都心に近い7番の地区が、他より商業施設や業務施設を多く含む。

赤系統で示される地区は、主に商業施設、宿泊施設、および業務施設が立ち並ぶ。この中でも、1番で示した博多地区、および6番で示した天神地区が、福岡を代表する都心である。博多地区には、宿泊施設および業務施設が、天神地区には、商業施設および業務施設が、

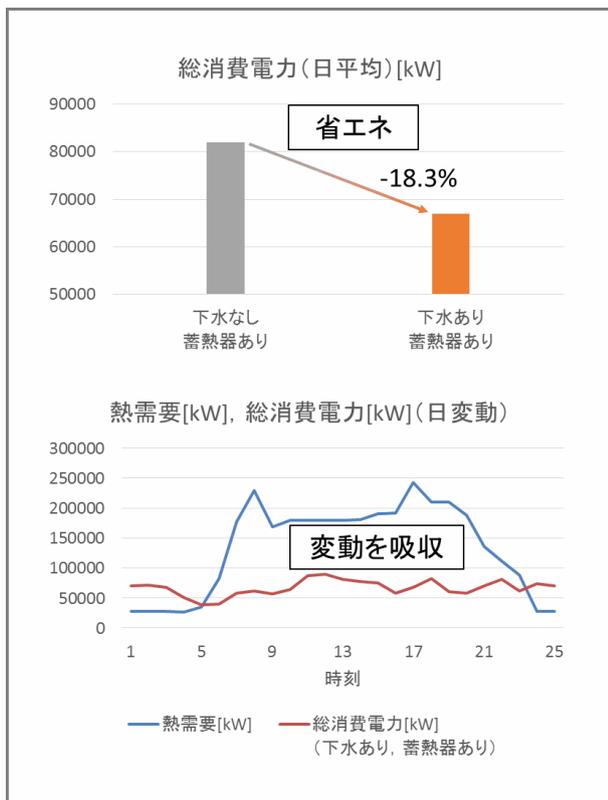


図-6 福岡市での下水／蓄熱器の導入効果

それぞれ集積する。また、2番で示した地区には歓楽街である中洲が含まれ、他と比べて昼夜の熱需要量が平滑化されている。

シミュレーション結果を、図-6に示す。上のグラフより、下水熱の利用が、広域的なシミュレーションにおいても総消費電力の抑制につながる、ということが分かる。また下のグラフより、蓄熱器の併用が、熱需要の時間変動に対して総消費電力を平滑化できることにつながる、ということが分かる。

6. おわりに

本研究では、多数の世帯が下水熱を利用する未来を想定し、そのネットワーク制御に分散協調制御を適用した場合の挙動を観察することを試みた。章2.では、下水熱を利用する際の、各世帯が導入するシステム、およびシステム間での情報共有、に関してモデル化を行った。そして、学習アルゴリズム“PIPIP”、およびポテンシャルゲームを基とした解法を提案した。そして、章2.で構築した下水熱利用モデルを、章4.では仮想的で単純なネットワークに、章5.では福岡市の実ネットワークに、それぞれ適用した。結果として、下水熱の利用が消費電力の抑制に、分散協調制御の導入が世帯間の消費電力の平滑化に、蓄熱器の導入が熱需要の時間変動に対する総消費電力の平滑化に、それぞれ貢献する

ことが確認できた。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁: 「平成 24 年度エネルギーに関する年次報告」(エネルギー白書 2013) 第 2 部第 1 章, 2013a.
- 2) 国土交通省: 下水熱利用の現状とその推進に向けた取り組み, 2014.
- 3) 河合弘樹・三毛正仁・澤部孝一・脇田翔平・中村賢司・鍋島美奈子・中尾正喜・西岡真稔: 下水管路を利用した下水熱利用・熱融通システムの研究(第 3 報) 大阪市内における下水温度実測と地域性を考慮した下水温度推定法について, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集(2013.3.13), pp. 301-304, 2013.
- 4) 中尾正喜: スイス, ドイツにおける下水熱利用技術の動向と NEDO 下水熱利用プロジェクトの研究開発状況, 2011.
- 5) 国土交通省: 下水熱でスマートなエネルギー利用を~まちづくりにおける下水熱活用の提案~, 2013b.
- 6) 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, 環境システム研究, Vol. 18, pp. 118-123, 1990.
- 7) 一ノ瀬俊明・川原博満・花木啓祐・松尾友矩: 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, Vol. 552, pp. 11-21, 1996.
- 8) 池上貴志・荒巻俊也・花木啓祐: 下水熱利用地域冷暖房システムの戦略的導入による環境負荷低減効果の解析, 環境システム論文集, Vol. 33, pp. 343-354, 2005.
- 9) Mohsenian-Rad, A.-H., Wong, V. W. S., Jatskevich, J., Schober, R., and Leon-Garcia, A.: Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, Vol. 1, No. 3, pp. 320-331, 2010.
- 10) 畑中健志・藤田政之: システム科学技術のための分散協調最適化とポテンシャルゲーム, 計測と制御, Vol. 50, No. 1, pp. 49-54, 2012.
- 11) Baster, M. E. and Counsell, J.: Modelling the performance of air source heat pump systems, *Master's Thesis. University of Strathclyde*, pp. 1-82, 2011.
- 12) 和佐泰明・後藤達彦・畑中健志・藤田政之: 被覆ゲームに対する最適均衡解の探索—利得に基づく学習アルゴリズム設計—, システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 9, pp. 247-255, 2012.
- 13) Marden, J. R., Arslan, G., and Shamma, J. S.: Cooperative control and potential games, *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS - PART B: CYBERNETICS*, Vol. 39, No. 6, pp. 1393-1407, 2009.