九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# 商業地域における蓄エネルギーシステムを備えた地域冷暖房の導入効果の推定

上野，貴広
九州大学大学院人間環境学府空間システム先行専攻 ： 博士後期課程

崔，榮晋
九州大学エネルギー教育研究機構 ： 助教

高橋，賢太朗
九州大学大学院人間環境学府空間システム先行専攻 ： 修士課程

小野，秀光
九州大学大学院人間環境学府空間システム先行専攻 ： 修士課程

他

https://doi.org/10.15017/2344818

出版情報：都市・建築学研究. 36, pp.19-28, 2019-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第36号，2019年７月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.36, pp.19～28, July. 2019

# 商業地域における蓄エネルギーシステムを備えた地域冷暖房の導入効果の推定

# Effect Estimation of District Heating and Cooling with Energy Storage Systems in Commercial Districts

上野貴広*1，崔　榮晋*2，高橋賢太朗*3，小野秀光*3，池田智宏*3，住吉大輔*4
Takahiro UENO, Youngjin CHOI, Kentaro TAKAHASHI,
Hidemitsu ONO, Tomohiro IKEDA, Daisuke SUMIYOSHI

This paper focused on developed simulation models of energy supply systems such as combined heat and power (CHP), district heating and cooling (DHC), storage battery, thermal storage tank, and power system model. This paper estimated energy saving effect by the diffusion of these systems in Japanese commercial districts.
The developed models in this paper calculated each operation at five-minute intervals and used heat supply piping length, transport power, and piping heat loss in DHC calculations. The estimation of the energy saving effect by the energy supply systems based on five-minute energy demand in individual buildings confirmed the energy saving effect of DHC and the energy storage systems in Japanese commercial districts.

***Keywords:*** *Combined heat and power, District heating and cooling, Storage battery, Thermal storage tank, Power system*

## 1.　はじめに

コージェネレーションシステム(以下，CGS)は分散型エネルギーシステムの一つであり，燃料から電力と熱を同時に生産し供給するシステムで，主に非住宅建築物に導入されている[注1)]．日本政府は2018年に策定した新しいエネルギー基本計画[1)]の中で，本システムを，エネルギーを最も効率的に活用することができる方法の一つとしており，さらなる普及推進や，供給エネルギーの面的利用，いわゆる地域冷暖房システム(以下，DHC)の導入拡大を図るとともに，蓄電池などの蓄エネルギー設備とともに活用することで，電力の安定供給のための調整力確保に取り組んでいくとしている．

また，政府はエネルギー基本計画[1)]の中で分散型エネルギーシステム構築の重要性を説き，その推進を発表した．パリ協定を代表とする世界的な省エネ化および脱炭素化の潮流，また東日本大震災や北海道胆振東部地震による電力供給システムの脆弱性の顕在化から，日本のエネルギー需要の相当部分を占める都市部においても，電源構成の多様化や電力供給の高効率化，また災害への強靭化に寄与する分散型エネルギーシステムの構築が求められている．

都市におけるCGSを用いたDHCの導入効果に関しては，これまで様々な既往研究で推定や測定が行われている[2)~8)]．一方で，CGSを用いたDHCを導入する際の，蓄エネルギー設備を併せて導入することによる省エネルギー効果や調整力の向上に関しては十分な知見がない．また，これらの研究では非住宅建築物のエネルギー需要は1時間以上の間隔で測定，推定されている．実際には非住宅建築物の需要は時々刻々と変動しているため，需要に追従して稼働するCGSの導入効果の詳細な把握，および蓄エネルギー設備の導入効果検討は，より細かい時間間隔の非住宅建築物の需要に基づく必要がある．

そこで本報では，CGS，蓄電池，蓄熱槽のモデルを開発し，様々な用途の建物を含む商業地域を対象に，各地域の全非住宅建築物における5分間隔のエネルギー需要推定データとGISデータを基に，CGSによるDHC普及時の省エネルギー効果を推定する．またDHCと併せて蓄エネルギー設備を導入した場合の省エネルギー効果を推定し，上記の推定結果と比較することで，DHCへの蓄エネルギー設備の組込みによる省エネルギー効果の向上に関する知見を得る．

## 2.　CGS，蓄エネルギー設備と系統電力のモデル化

CGS，CGSによるDHC，蓄電池，蓄熱槽の各運転を5分間隔で再現するモデルを構築し，系統電力の時刻別一次エネルギー消費量換算係数を設定した．

*1 空間システム専攻博士後期課程
*2 エネルギー教育研究機構
*3 空間システム専攻修士課程
*4 都市・建築学部門

### 2.1 CGS モデルの作成

CGS の挙動[注2)]を 5 分間隔で再現するモデル(以下，CGS モデル)を構築した．構築には既往プログラム CASCADEⅢ[9)]を参考にした．同プログラムは各月の代表日に1時間間隔でCGSの挙動を再現し，年間一次エネルギー消費量の削減効果を算出するプログラムである．CGS モデルとの計算時間間隔の差や既往研究の成果を考慮して，いくつか同プログラムから計算を変更した．代表的な変更として，需要に対する発電の追従遅れ[10)]を表現するため，追従運転時は5分前の需要を追うように設定した．また，CGS からの供給電力が対象地域外へ逆潮流しない範囲で発電するように設定した[注3, 注4)]．

構築したモデルの計算の妥当性を検証するため，CASCADEⅢおよび本報の CGS モデルを用いて，オフィスビル(ピーク電力需要 93.8 kW)を対象に，台数 2 ケース×運転設定 2 ケース(電力追従，熱追従)の計 4 ケース計算し，両プログラムの計算結果を比較した． CGS モデルには各月代表日の 5 分間隔エネルギー需要を，CASCADEⅢにはその 1 時間積算値を入力し，発電効率などは同一に設定した．

計算結果を表 1 に示す．35 kW のもの 1 台(ピーク電力需要に対して一般的な容量)の場合は，上記変更点から多少の差は生じているが CGS モデルは CASCADEⅢの計算結果とほぼ等しくなった．一方で，35 kW のもの 2 台の場合では CASCADEⅢとの発電量の差が 1 台の場合から増加しており，特に電力需要追従時は CGS モデルと CASCADEⅢとの発電量の差が 7 %になった．これは CGS モデルが 5 分間隔の電力需要の増減を捉えたためである．図 1 に 35 kW のもの 2 台での電力需要追従運転における 9 月代表日の電力需要と両プログラムの発電量計算値の推移を示す．CASCADEⅢの値は 1 時間値を 12 等分したものであり，電力需要が平準化されているために CASCADEⅢの計算では定格で発電したが，実際に電力需要のほとんどを賄える容量の CGS を導入する場合には，部分負荷運転を伴うため，CGS モデルの計算結果のように電力需要の変動を受け，CASCADEⅢの 1 時間間隔での計算結果よりも実際の発電量が小さくなると考えられる．

### 2.2 DHC モデルの作成

DHC として CGS を導入する際の省エネルギー効果の推定に必要な熱供給配管長および熱搬送動力，熱損失の計算方法を設定した．

表 1 CASCADE III と CGS モデルの計算結果の比較

| | | | 電力需要追従 | | | 熱需要追従 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 発電 | 排熱 | ガス | 発電 | 排熱 | ガス |
| 35kW 1台 | CASCADE | [GJ] | 425 | 386 | 1117 | 311 | 283 | 828 |
| | CGSモデル | | 418 | 380 | 1098 | 309 | 273 | 819 |
| | 差 | [%] | −2 | −2 | −2 | −1 | −3 | −1 |
| 35kW 2台 | CASCADE | [GJ] | 704 | 645 | 1883 | 454 | 415 | 1234 |
| | CGSモデル | | 653 | 598 | 1756 | 472 | 417 | 1266 |
| | 差 | [%] | −7 | −7 | −7 | 4 | 1 | 3 |

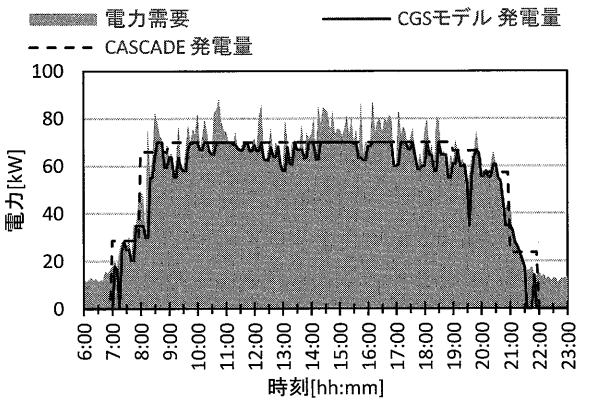



図 1 代表日における電力需要と CGS 発電量

DHC の熱源設置建物から需要家建物までの熱供給配管長は各建物の GIS データにある緯度と経度を用いて計算する．国土地理院は地球の楕円を考慮して 2 地点の経緯度から全地球規模での距離計算が可能な手法を公開している[11)]．しかし本報の計算では 2 地点の距離が 1 街区内と小さいこと，mm 単位の厳密さを必要としていないことから，より簡易に座標間の距離を計算できる理科年表の計算式[12)]を用いた．また，配管が建物間の直線距離を結んで設けられることは少ないため，2 地点の経度差と緯度差それぞれに基づく距離を足し合わせた長さを配管長と設定し，実際の長さに近づくようにした．

熱搬送動力[注5)]については，ポンプ効率を既往研究[13)]に倣い 60 %として設定した．また，既往研究[13)]では配管 1 m あたりの圧力損失が 400 Pa/m 以下になるように管径を設定していたことから，本研究でもそれに倣って流量線図から管径を設定した．流速が 2.5 m/s[14)]程度になるように管径を設定したところ，十分な容量の CGS なら圧力損失を 400 Pa/m 以下にできることを確認した．熱供給配管 1 m あたりの搬送動力 $W_{pump}$[kWh/m]を以下の式(1)に示す．なお，本報の計算式で用いた記号の意味は章末にまとめて記載している．

$$W_{pump} = \frac{P \cdot Q_{pump} \cdot 10^3}{\Delta t \cdot c \cdot \rho \cdot E_{pump} \cdot 3.6 \cdot 10^6} \quad (1)$$

また，熱供給配管からの熱損失については，参考文献[15)]を基に，式(2) および式(3) より管内の流体

から外部への熱損失量 $Q_{loss}$[MJ/m]を算出した．なお，配管内側の表面熱伝達率はヌッセルト数，レイノルズ数の公式(式(4)，式(6))及びディタス・ベルターの式(式(5))[16] を用いて求めた．また冷温水の物性値は参考文献 [17]から設定した．図 2 に想定した熱供給配管の断面図と計算式に用いた変数を示す．

$$Q_{loss} = \frac{t_{in} - t_{out}}{R} \tag{2}$$

$$R = \frac{1}{2\pi}\left\{\frac{1}{r_0\alpha_1} + \frac{1}{\lambda_0} ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{1}{\lambda_1} ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{r_2\,\alpha_2}\right\} \tag{3}$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot k}{d} \tag{4}$$

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{n} \tag{5}$$

$$Re = \frac{V \cdot d}{v} \tag{6}$$

これらの式を用いて管径を変更しながら熱損失を計算した．結果を表 2 に示す．想定した熱供給配管径の範囲内では，熱供給配管 1 m における熱損失は非常に小さくなった．よって熱供給配管 1 m における熱損失をどの管径でも同じ値(冷水：－0.004 MJ/m，温水:0.015 MJ/m)と設定した．

### 2.3 蓄電池モデルの作成

蓄電池のモデルは，蓄電池本体とパワーコンディショナー(以下，PCS)で構成した．充放電時の PCS と蓄電池本体による電力損失を既往論文 [18] [19]を基に設定した以下の式 (7)，(8)を用いて計算した．また，他の機器仕様については表 3 の様に設定した．

$$E_{cha} = -1.3301{L_{pcs}}^4 + 3.5788{L_{pcs}}^3 - 3.52{L_{pcs}}^2 + 1.5153L_{pcs} + 0.6671 \tag{7}$$

$$E_{dch} = -0.6323{L_{pcs}}^4 + 2.0429{L_{pcs}}^3 - 2.4482{L_{pcs}}^2 + 1.2972L_{pcs} + 0.6795 \tag{8}$$

### 2.4 蓄熱槽モデルの作成

蓄熱槽については，温度成層型を想定し，熱量[MJ]ベースで計算するモデルを作成した．設計時における蓄熱槽の熱効率は，一般的には 85 %～95 % で想定される．これを踏まえ，既往研究 [20]での地域冷暖房用蓄熱槽の熱効率が 99 %程度であること，および既往研究 [21]による温度成層型蓄熱槽の熱効率理論値もほぼ 100 %となることから，本報では蓄熱槽の熱効率を 95 %とした(式(9))．また蓄熱槽からの自己放熱損失熱量は既往研究 [22]の設定値から，貯蓄熱量の 0.2 % / h とした(式(10))．本報告における非住宅建築では，冷暖房期間が固定されているため(冷房：4 月～11 月，暖房：12 月～3 月)，蓄熱槽の冷温水切り替えも同様の期間に設定した[注 6]．

$$H_{dch} = 0.95H_{cha} \tag{9}$$

$$H_{sto,t} = \sqrt[12]{100 - 0.2} \cdot H_{sto,t-1} \tag{10}$$

### 2.5 一次エネルギー消費量換算係数の設定

消費電力量に対する系統電力の時刻別の一次エネルギー消費量換算係数[MJ/kWh]を設定した．なお，系統電力は省エネ法と同様に火力(LNG，石炭，石油）発電のみを対象とした．九州電力の需給実績 [23]と各燃料の発電効率 [24] [25]から火力発電における時刻別の平均発電効率を作成し，この発電効率を基に換算係数を作成した[注 7]．図 3 に各代表日における時刻別一次エネルギー消費量換算係数を示す．どの日も 9:00 ごろから太陽光発電の増加を受け，発電効率が低い石油火力発電の抑制による一次エネルギー換算係数の減少を確認できる．

| 変数 | 定義 |
|---|---|
| $r_0$ | 円管の内半径[m] |
| $r_1$ | 円管の外半径[m] |
| $r_2$ | 保温材の外半径[m] |
| $\lambda_0$ | 円管の熱伝導率[W/mK] |
| $\lambda_1$ | 保温材の伝導率[W/mK] |
| $\alpha_1$ | 内側の表面熱伝達率[W/m²K] |
| $\alpha_2$ | 外側の表面熱伝達率[W/m²K] |
| $t_{in}$ | 配管内温度[℃] |
| $t_{out}$ | 周囲温度[℃] |

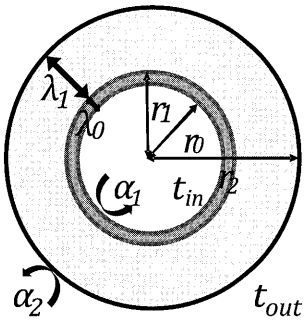



図 2 熱供給配管の断面図

表 2 熱損失の計算結果

| 配管経 | [A] | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|
| 冷水 | [MJ/m] | −0.002 | −0.003 | −0.004 | −0.004 |
| 温水 | | 0.007 | 0.010 | 0.012 | 0.015 |

表 3 蓄電池の設定[-]

| 建物用途 | 値 |
|---|---|
| PCS定格充放電のCレート[注8] | 0.3 |
| 放電停止下限充足率 | 0.5 |
| 充電停止上限充足率 | 1.0 |
| リチウムイオン電池の効率 | 0.957 |
| 1日の自然電率 | 0.05 |

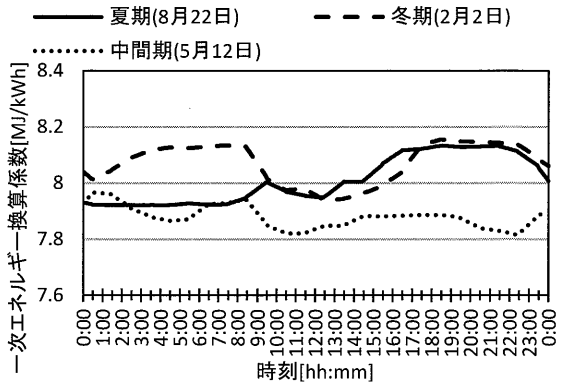



図 3 代表日における時刻別一次エネルギー消費量換算係数

## 3. DHC の最適化および蓄エネルギー設備の導入ポテンシャル検証

ここでは 2 章で説明した各設備および系統電力のモデルを用いて，複数の商業地域を対象に DHC の最適化を行い，最適結果から蓄電池および蓄熱槽の導入可能性を検討した．

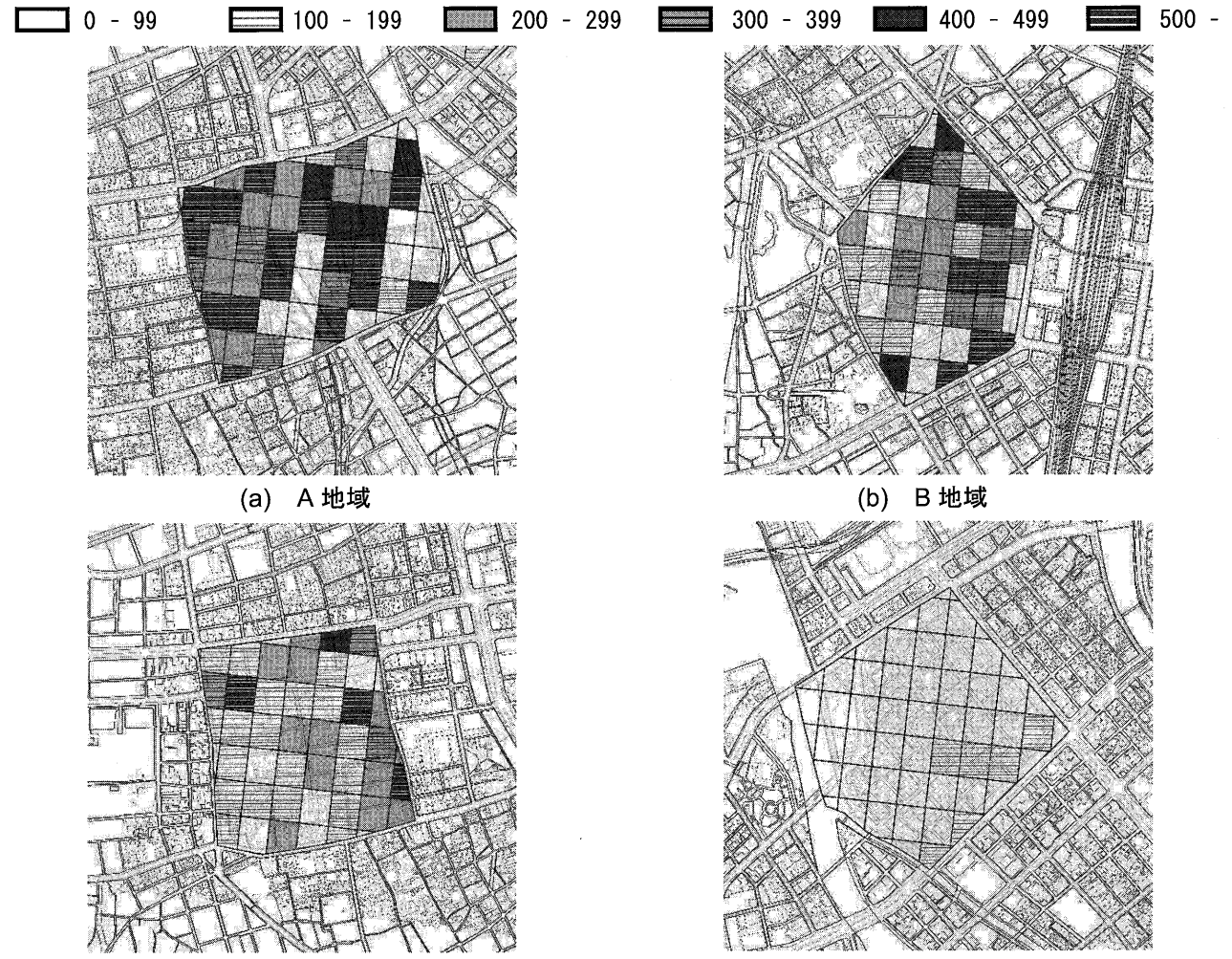
計算対象地域は福岡県福岡市から設定した．同市は九州北部に位置する大都市であるが，九州地方は大規模太陽光発電の出力抑制が行われるなど，地方部の再生可能エネルギー増加が困難になってきており，都市部での省エネ，創エネ推進による需給調整がより一層求められている．そこで同市から様々な特徴を持つ商業・業務地域を選び，各地域の非住宅建築物を対象として DHC の導入効果を推定した．

### 3.1 検証地域概要

DHC の事業成立条件の 1 つに 1 ヘクタール当たりの熱需要密度の高さが挙げられている [14]ことから，CGS を用いた DHC の導入効果にも熱需要密度が大きな影響を与えると考えられる．そこで建物用途構成や建築密度の異なる 4 つの地域 A～D 地域を選び，本報の計算対象地域とした．各地域の非住宅建築物の構成，および建築密度として建築容積率のまとめを表 4 に示す．また，各対象地域の 100 m メッシュ区分における非住宅建築物の建築容積率を図 4(a)～(d)に示す．A 地域は容積率が大きく，また延床面積の割合としては事務と商業用途の建物が大きい．また地域全体に高容積率のメッシュ区分が分布している．B 地域は駅前のため他の地域より宿

表 4　検討対象地域の概要

| | 面積[㎡] | 建物数 [-] | 合計延床面積[㎡]（地域内の合計値に対する割合[%]） 事務 | 医療 | 商業 | 宿泊 | 飲食 | 教育 | 容積率 [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 383,513 | 302 | 646,016 (40) | 28,358 (2) | 935,444 (58) | 0 (0) | 11,336 (1) | 0 (0) | 423 |
| B | 301,566 | 252 | 355,682 (41) | 668 (0) | 323,560 (37) | 167,794 (19) | 3,193 (0) | 27,045 (3) | 291 |
| C | 311,525 | 440 | 209,368 (33) | 7,270 (1) | 315,595 (49) | 89,930 (14) | 13,018 (2) | 5,865 (1) | 206 |
| D | 361,307 | 302 | 116,303 (60) | 8,974 (5) | 41,300 (21) | 9,763 (5) | 3,700 (2) | 13,398 (7) | 54 |




(a)　A 地域　　(b)　B 地域

(c)　C 地域　　(d)　D 地域

図 4　各地域における容積率[%]の 100m メッシュ

泊施設の割合が大きい．C 地域は A 地域と同様に事務と商業用途の建物の延床面積割合が大きいが，低層の建物が多いため建物数の割には容積率が大きくない．D 地域は 4 つの地域の中で最も事務建物の割合が大きく，また容積率が他地域と比べ小さいため，エネルギー需要の集約効果が小さくなると考えられる．

### 3.2 各地域における非住宅建築物のエネルギー需要データの作成

既報で開発した需要推定手法[26]を用いて，各地域の非住宅建築物の 5 分間隔電力需要と暖房，冷房，給湯の各 5 分間隔熱需要データを作成した．この推定手法には乱数と確率分布が含まれているため，1 回 1 回の計算で各需要が変わる．しかし実建物の分析から確率分布を作成しているため，計算結果はどれも現実に起こり得るものと考えられる．そこで乱数によって最も大きく影響を受ける年間エネルギー需要に注目し，以降の検討には各地域の 100 回の計算結果の中から，地域合計年間需要量における 100 回の平均値との差が，4 つのエネルギー用途の平均で最も小さかった計算結果を用いた．

図 5(a)～(d)に各地域における平日代表 3 日間の非住宅建築物 1 ㎡あたりのエネルギー需要密度と，サンプルとして A 地域で平均的な事務所建物(5 階建，延床面積 3,653 ㎡)の 1 ㎡あたりのエネルギー需要密度を示す．どのエネルギー用途も平日は C 地域以外のエネルギー需要密度が同程度であった．C 地域は延床面積が小さい商業施設の割合が多いため，実データを基に既報で開発した需要推定手法では需要密度が高くなった．また平日における需要の変動については，どの地域もサンプル建物と比較すると小さくなった．これは需要の集約により変動が平準化されたからだと考えられる．

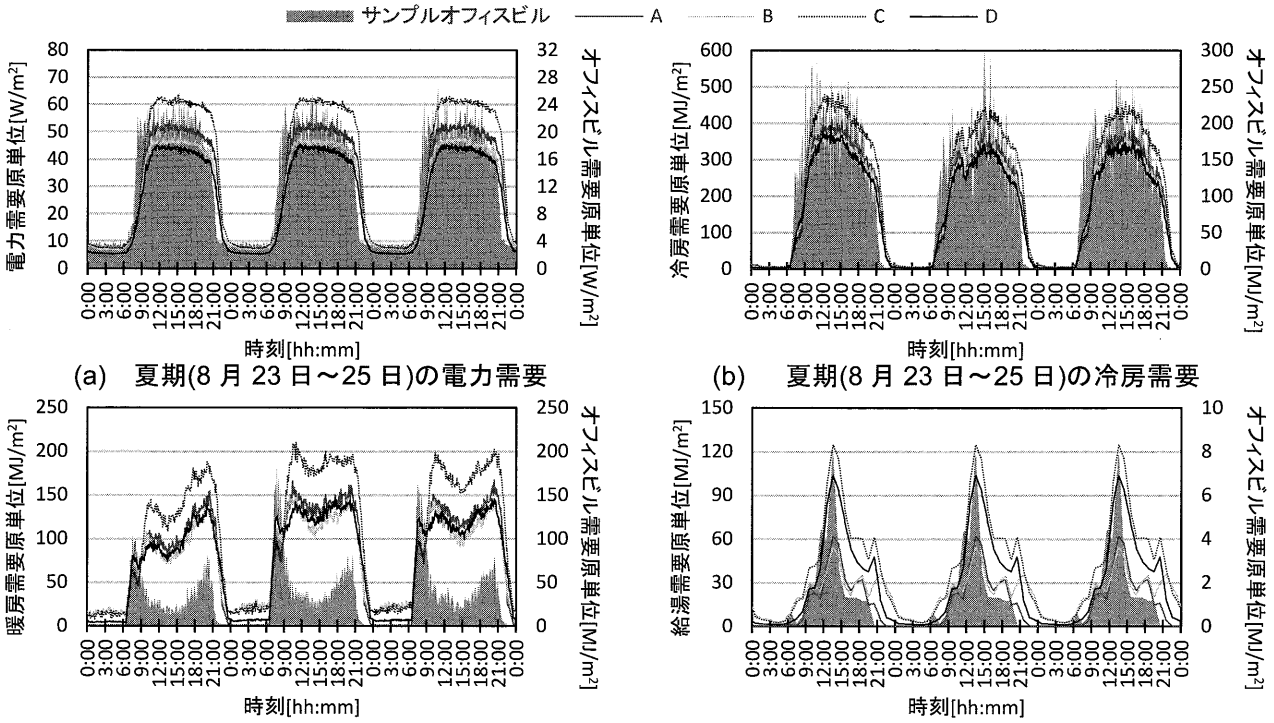
表 5 に各地域の年間エネルギー需要量を示す．建築容積率が大きな地域ほど各エネルギー用途の年間エネルギー需要量が大きくなった．C 地域の給湯需要は建築容積率から考えると大きいが，これは C 地域に給湯のエネルギー需要原単位が大きい飲食用途の建物が多く立地しているためである．

### 3.3 各地域における DHC 導入効果の推定

蓄エネルギー設備を導入せずに DHC として最適な設定で CGS を普及させた際にどれだけの省エネルギー効果が期待できるかを検討した．検討ケースを表 6 に示す．CGS の定格発電容量は 4 ケース設定した．4 地域それぞれで CGS の容量 4 ケース×台数

表 5　地域合計年間エネルギー需要量

| | | | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 年間合計電力需要 | | [GWh] | 365 | 184 | 181 | 37 |
| 年間合計熱需要 | 冷房 | [TJ] | 827 | 414 | 400 | 83 |
| | 暖房 | | 241 | 132 | 137 | 27 |
| | 給湯 | | 203 | 142 | 186 | 40 |




(a)　夏期(8 月 23 日～25 日)の電力需要

(b)　夏期(8 月 23 日～25 日)の冷房需要

(c)　冬期(1 月 19 日～21 日)の暖房需要

(d)　冬期(1 月 19 日～21 日)の給湯需要

図 5　平日代表 3 日間の時刻別地域エネルギー需要原単位

4 ケース×運転モード 2 ケースの計 32 ケースを検討し，計算結果から最も年間一次エネルギー消費量が小さかったケースを地域ごとに最適ケースとしてまとめ，以下の式(11)で最適ケースの年間一次エネルギー消費量削減率[注9)]を計算した．

$$R_{best} = \frac{C_{def} - C_{best}}{C_{def}} \cdot 100 \qquad (11)$$

各地域の最適ケースと削減率を表 7 に示す．地域内の建築密度に応じて最適な CGS の容量は異なるが，最適な台数と運転設定は全地域で共通してそれぞれ 8 台，電力需要追従となった．また削減率は A 地域よりも B，C 地域の方が大きくなった．これは A 地域のエネルギー需要を賄うには大容量の CGS が必要になるが，CGS の容量が大きくなるにつれて細かい需要変動の追従が困難になるためである．

### 3.4 最適ケースにおける蓄エネルギー設備の導入ポテンシャルの推定

続いて各地域の最適ケースにおける CGS の余剰供給エネルギー量や供給後の残り需要量を確認することで，蓄エネルギー設備の導入可能性を検討した．時刻別の CGS 発電量，排熱量の中で使われずに余った量と，CGS によるエネルギー供給後に残っている電力需要，熱需要を推定した．

A 地域の夏期，冬期代表日における余剰供給量とエネルギー供給後に残った需要を図 6(a),(b)に示す．電力，排熱ともに夏期，冬期の日中に需要が残っている．電力需要追従にも関わらず電力需要が残る原因は，前述したように大容量の CGS を設置していることで少量の需要の変動を追えていないためである．このことから，残った電力需要に蓄電池から電力を供給することで，さらなる省エネ効果が期待できる．また，早朝や深夜に CGS から余剰排熱が発生しているため，これらを蓄熱槽で貯めることで日中の排熱需要の削減が期待できる．

表 6　ケース設定

| | 容量 [kW] | 台数[台] | 運転設定 [-] |
|---|---|---|---|
| 1 | 1200 | 1 | 電力需要追従運転 |
| 2 | 3800 | 2 | 熱需要追従運転 |
| 3 | 5200 | 4 | - |
| 4 | 9600 | 8 | - |

表 7　最適ケースの各設定および年間一次エネルギー消費量削減率

| | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| 容量[kW] | 9600 | 5200 | 5200 | 1200 |
| 台数[台] | 8 | | | |
| 運転設定[-] | 電力需要追従運転 | | | |
| 削減率[%] | 17.1 | 18.1 | 18.3 | 16.9 |

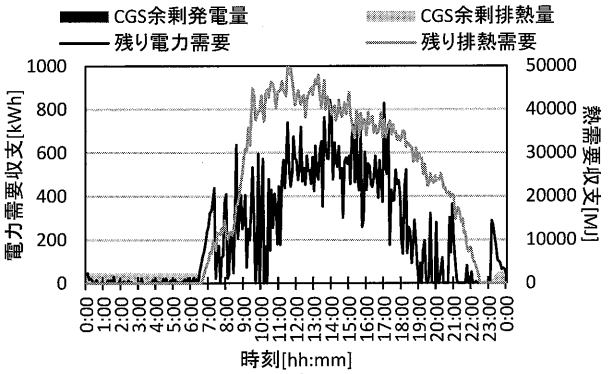
各地域の年間余剰供給量と残り需要を表 8 に示す．どの地域も最適ケースが電力需要追従であったため，余剰発電は発生せず，電力需要の残りも CGS による年間電力供給量の 3 %～4 %になった．一方で排熱需要の残りはどの地域も大きく，CGS による年間排熱供給量の 50 %～60 %になった．

## 4. 蓄エネルギー設備導入による省エネルギー効果の推定

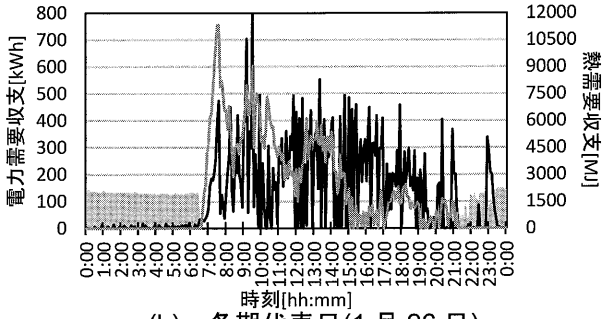
3 章の結果から，商業地域の一次エネルギー消費量に対して CGS を用いた DHC のみを最適化させた場合， CGS からエネルギーの余剰供給や，供給後にエネルギー需要の残りが発生した．そこで蓄エネルギー設備が CGS の余剰エネルギー供給量を貯蔵し，エネルギー需要の残りが発生した際に貯めたエネルギーを供給することで，さらに一次エネルギー消費量を削減できるかを推定した．

### 4.1 年間一次エネルギー消費量の削減効果の推定

表 6 の DHC の検討ケースに加え，更に蓄電池と蓄熱槽の容量のケースをそれぞれ3つ加えて計算し，




(a)　夏期代表日(8 月 26 日)




(b)　冬期代表日(1 月 26 日)

図 6　代表日の余剰供給量および残り需要

表 8　年間余剰供給量および残り需要

| | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| CGS余剰発電量[GWh] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| CGS余剰排熱量[TJ] | 151.4 | 49.6 | 36.2 | 9.6 |
| 残り電力需要[GWH] | 12.5 | 6.7 | 5.5 | 1.2 |
| 残り排熱需要[TJ] | 621.9 | 334.1 | 359.1 | 81.6 |

CGS の 32 ケース×蓄電池 3 ケース×蓄熱槽 3 ケースの計 288 ケース(表 9)の中から地域ごとに最も年間一次エネルギー消費量が小さかったケースを，蓄エネルギー設備を含めた最適ケースとし，この最適ケースと表 7 に示した DHC のみを導入した場合の最適ケースとを比較し，一次エネルギー消費量の削減率や CGS の最適設定の変化の有無を確認した．

各地域の蓄エネルギー設備を含めた最適ケースおよび削減率を表 10 に示す．どの地域も DHC のみを導入した場合の最適ケースから一次エネルギー消費量は 0.3～0.7 ポイント削減されたが，CGS の最適設定は変更されなかった．また，どの地域も最適な蓄電池の容量は 10 MWh，蓄熱槽の容量は 200 GJ とそれぞれ最も小さい容量のケースとなった．これらの設定が最適ケースに選択された原因としては，DHC 導入によるエネルギー需要の集約で既に CGS が安定的に稼働できていること，また本報では CGS や蓄電池から供給する電力の系統電力への逆潮流を認めていないため，残っていた少量の電力需要分(表 8)しか CGS が発電できず，それに伴い蓄熱槽が貯蔵可能な CGS の余剰供給熱量も小さくなっていることが考えられる．

### 4.2 代表日における CGS と蓄エネルギー設備の時刻別供給量の推定

A 地域の最適ケースによる代表日(1 月 26 日)の電力，熱それぞれの CGS，蓄エネルギー設備の供給量を図 7，図 8 に示す．電力需要に追従して CGS が発電しているため，蓄電池は需要の数%程度の調整を行っていた．一方で熱需要に関しては朝の暖房需要の増加を CGS の熱供給が捉え切れていないため，その分を蓄熱槽からの放熱によって補っていた．しかし，10 時から 15 時までの間は熱需要の余りが発生していたが，蓄熱槽に放熱できる熱が残っていなかった．これは，本報の CGS が発電電力を逆潮流しない範囲で運転するように設定しているため，10 時から 15 時までの熱需要の余りに対して，蓄熱槽が放熱するために必要な熱量を CGS から供給できていなかったためである．このことから，CGS の発電単価や電力の買い取り単価から CGS のランニングコスト収支を計算し，計算結果に基づいて DHC 業者が損をしない範囲で系統電力への逆潮流を可能にすれば，さらなる省エネ効果が期待できる．

表 9　蓄エネルギー設備を含めたケース設定

| | CGS 容量[kW] | CGS 台数[台] | CGS 運転設定 [-] | 蓄電池 容量[MWh] | 蓄熱槽 容量[GJ] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1200 | 1 | 電力需要追従運転 | 10 | 200 |
| 2 | 3800 | 2 | 熱需要追従運転 | 40 | 800 |
| 3 | 5200 | 4 | - | 80 | 1600 |
| 4 | 9600 | 8 | - | - | - |

表 10　蓄エネルギー設備を含めた最適ケースの各設定および年間一次エネルギー消費量削減率

| | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| 容量[kW] | 9600 | 5200 | 5200 | 1200 |
| 台数[台] | 8 | | | |
| 運転設定[-] | 電力需要追従運転 | | | |
| 蓄電池容量[MWh] | 10 | | | |
| 蓄熱槽容量[GJ] | 200 | | | |
| 削減率[%] | 17.8 | 18.4 | 18.8 | 17.2 |

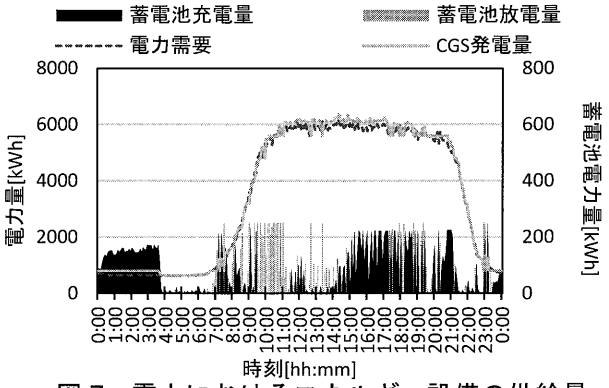



図 7　電力におけるエネルギー設備の供給量

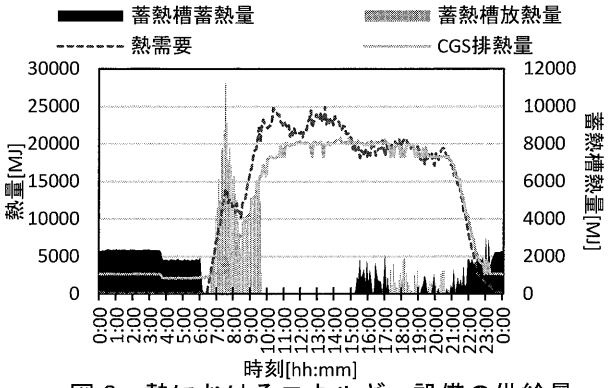



図 8　熱におけるエネルギー設備の供給量

## 5. おわりに

本報では，CGS，蓄電池，蓄熱槽のモデル開発を行い，複数の商業地域を対象に，CGS による DHC や蓄電池，蓄熱槽の導入による省エネルギー効果を推定した．

各地域の全建物における 5 分間隔のエネルギー需要データおよび GIS データを基に，DHC の導入による年間一次エネルギー消費量を計算した結果，それぞれの地域で 17 %～18 %の削減効果を確認した．また DHC の余剰供給およびエネルギー供給後に残った需要を確認したため，蓄エネルギー設備の導入によってこれらを削減し，さらに一次エネルギー消費量を削減できるという計算結果が得られた．

今後はCGSの逆潮流も考慮しながら電力の需給バランス調整を行うバーチャルパワープラント(VPP)の効果検討を行う．また住宅についても5分間隔の需要推定プログラムや供給設備モデルを開発し，組み込むことで都市全体におけるエネルギー供給設備の最適化手法の構築を目指す．

**謝辞**

本研究はJSPS科研費17K14773およびJSPS特別研究員奨励費18J12025の助成を受けた．記して謝意を表す．

**記号**

c：比熱[kJ/kg*K] (=4.217)
$C_{best}$：最適ケースの地域合計年間一次エネルギー消費量[MJ]
$C_{def}$：CGSを設置しなかった場合の地域合計年間一次エネルギー消費量[MJ]
d：円管の直径(＝水力直径)[m] (＝2×$r_0$)
$E_{cha}$：PCS充電効率[-]
$E_{dch}$：PCS放電効率[-]
$E_{pump}$：ポンプ効率[-] (=0.6)
$H_{cha}$：蓄熱槽蓄熱量[MJ]
$H_{dch}$：蓄熱槽放熱量[MJ]
$H_{sto,t}$：時刻tにおける蓄熱槽の貯蓄熱量[MJ]
$H_{sto,t-1}$：時刻tの5分前における蓄熱槽の貯蓄熱量[MJ]
k：熱伝導率 [W/mK]
$L_{pcs}$：PCS充放電負荷率[-]
n：ディタス・ベルターの式におけるプラントル数の乗数[-] (=冷水:0.4，温水:0.3)
Nu：ヌッセルト数[-]
p：密度[kg/m³] (=1000)
P：熱供給配管1mにおける圧力損失 [Pa/m] (=400)
Pr：プラントル数 [-]
$Q_{loss}$：熱供給配管1mにおける熱損失[MJ/m]
$Q_{pump}$：熱損失を含めた搬送熱量[MJ]
R：配管の貫流熱抵抗[mK/W]
$R_{best}$：最適ケースの年間一次エネルギー消費量削減率[%]
Re：レイノルズ数 [-]
$r_0$：円管の内半径[m]
$r_1$：円管の外半径[m]
$r_2$：保温材の外半径[m] (=$r_1$+0.1)
$t_{in}$：配管内温度[℃] (=冷水:10，温水:60)
$t_{out}$：周囲温度[℃] (=24)
V：流速 [m/s] (=2.5)
v：動粘性係数 [m2/s] (=冷水:1.304，温水:0.474)
$W_{pump}$：熱供給配管1mにおける搬送動力[kWh/m]
$\Delta t$：往還温度差[K] (=10)
$\alpha_1$：配管内側の表面熱伝達率[W/m²K]
$\alpha_2$：配管外側の表面熱伝達率[W/m²K] (=9)
$\lambda_0$：円管の熱伝導率[W/mK] (=16)
$\lambda_1$：保温材の熱伝導率[W/mK] (=0.0035)

**注**

注1) 参考文献[27]によると，民生・産業用における直近10年分の設置台数は非住宅建築が5138台，産業用が1014台，集合住宅が111台となっている．

注2) CASCADEⅢでは定格発電効率，定格排熱効率，負荷率に対する発電効率曲線，排熱効率曲線，運転スケジュールなどを入力し，CGSの発電量，排熱量，ガス消費量などを計算する．本報では定格発電効率，定格排熱効率，負荷率に対する発電効率曲線，排熱効率曲線は既往研究[28]の値を用いて，運転スケジュールは平日，休日を問わず24時間需要に追従して運転するように設定した．

注3) CGSによる供給電力の系統電力への逆潮流は，現状ではCGSの発電単価に電力の買い取り単価が見合っていない．そのため，本報ではCGSの発電や，それを貯めた蓄電池からの放電が系統電力へ逆潮流しないように設定した．

注4) 街区規模における系統電力は，三相三線式と単相三線式の2系統あり，それぞれで電圧が異なるが，系統電力会社へのヒアリングから，本報の対象地域が異なる系統を含む街区であったとしても，逆潮流による電力供給は可能であることを確認している．また，系統間における変圧の際には多少の電力損失が発生するが，本報では変圧による電力損失を計算に含めていない．

注5) 本報では，DHCによる建物間の熱供給は供給元と供給先の建物それぞれで熱交換器を介して行われると想定している．また各熱交換器間の熱搬送回路はすべて密閉回路，各熱交換器の位置も同じ深さの地中と想定していることから，実揚程による搬送動力が必要ないため，計算に含めていない．また，建物内での熱搬送による動力は，既に各建物の電力需要に含まれていると考え，DHCの搬送動力に含めていない．

注6) 簡易化のために，本報における蓄熱槽内の水温は常に一定(冷水槽：平均8℃，温水槽：平均56℃)に保たれていると想定し，熱量を単位として計算を行った．

注7) 火力発電における各燃料の時刻別発電割合については，九州電力管内の火力発電所における各燃料の許可出力[29]を合計し，電源組み合わせの考え方[30]を基に石炭火力はベース需要対応として常時稼働とし，火力発電の供給量が許可出力を上回った際にLNG(コンバインド)，LNG(従来)，石油火力の順番で稼働させることとして計算した．

注8) Cレートは定格充放電量の容量に対する割合を指す．蓄電池を1時間で完全充放電させるPCSのCレートは1Cとなる．0.3Cは蓄電池の完全充放電に定格充放電で3.33時間かかることを表している．

注9) 本報で対象とした地域内の非住宅建築はそのほとんどが中小建物であり，その多くはビル用マルチ空調(以下，VRF)を採用していると考えられるため[31]，本報ではCGSを設置しなかった場合の非住宅建築における空調機器をすべてVRFとして検討した．

**参考文献**


1) 資源エネルギー庁：第 5 次エネルギー基本計画, 2018.07
2) 佐土原 聡, 他：東京都区部におけるコージェネレーション導入地区の選定に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 60, No.468, pp.47-54, 1995.2
3) 工月 良太, 他：地域レベルの自立分散型エネルギーネットワークの事業スキームに関する研究:－ステークホルダー間のコベネフィットの配分と社会経済的内部収益率に基づく事業性の評価－, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 80, No.708, pp.169-176, 2015.2
4) 名古田 知志, 他：地域熱供給システムの省エネルギー性評価に関する研究：全国 123 プラントのデータを基にした要因分析とCGS評価手法の検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol.65, No.532, pp.57-64, 2000.6
5) 高 偉俊, 他：分散型エネルギー技術の選択手法及びその利用に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.75, No.650, pp.389-395, 2010.4
6) 加用 現空, 大岡 龍三：複合街区における分散エネルギーシステムの面的活用に関する GA 最適化, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 75, No.649, pp.297-303, 2010.3
7) 大西 裕之, 他：発電電力の自治体諸施設への託送を考慮した地域冷暖房施設へのコージェネレーションシステム導入の有効性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.65, No.532, pp.57-64, 2000.6
8) 海野 洋, 石福 昭：電力逆潮を前提としたコージェネ地域冷暖房のシステム評価に関する研究：ガスタービンコージェネのケーススタディー, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 59, No.456, pp.53-62, 1994.2
9) 空気調和・衛生工学会：都市ガスによるコージェネレーション評価プログラム：CASCADE III, 2013.12
10) 鄭 浙, 他：業務用コージェネレーション設備の性能評価手法の高度化に向けた調査 その 5 起動停止特性と補機動力特性分析, 建築学会 2018 年度大会(東北)学術講演梗概集, pp.1409-1410, 2018.9
11) 国土地理院：国土地理院技術資料, B5-No.19, pp.3-9, 2016.4
12) 国立天文台:理科年表 平成30年, pp.592-593, 2017.11
13) 永井 猛:既存の地域冷暖房と連携したスマートヒートグリッド（SHG）に関する研究～SHGの中心的な技術要素「熱ルータ」の技術確認も含めて～, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 82, No.737, pp.673-683, 2017.7
14) 都市環境エネルギー協会:地域冷暖房技術手引書 改訂第 4 版, pp.31 および pp.97, 2013.11
15) 空気調和・衛生工学会：空気調和設備 計画設計の実務の知識（改訂 3 版）, pp.113, 2010.11
16) Dittus F.W. and Boelter L.M.K.: Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 12, Issue 1, pp.3-22, 1985.2
17) ドイツ技術者協会建築設備部会：空調・暖房・衛生設備の計算図表, pp.16, 1990.12
18) 大峯英太郎, 他：スマートコミュニティの経済的成立条件の検討—蓄電池とコジェネの導入を考慮したコミュニティ利益の試算—, 電力中央研究所報告 研究報告 R14017, 2015.8
19) 朝日啓史, 他：家庭用燃料電池の集合住宅への導入方法に関する研究 その 2 蓄電池との併用と貯湯タンク容量拡大による一次エネルギー削減効果の分析, 日本建築学会九州支部研究報告 第 56 号, pp.181- pp.184, 2017.3
20) 百田真史, 他：大規模蓄熱槽を有する地域冷暖房の環境負荷低減効果に関する研究 竣工後の実測データに基づく検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 68, No.568, pp.83-87, 2003.6
21) 相良和伸, 中原信生：蓄熱槽に関する研究 第 5 報-運転シミュレーションを用いた実験計画法による温度成層型蓄熱槽の蓄熱槽効率の推定, 空気調和・衛生工学論文集, No.35, pp.15-26, 1987.10
22) 池田伸太郎, 大岡龍三：メタヒューリスティクスを用いた CGS 及び複数蓄エネルギー設備を含むエネルギーシステムの多目的非線形最適化手法の開発, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 81, No.719, pp.101-110, 2016.1
23) 九州電力株式会社：エリア需給実績 <http://www.kyuden.co.jp/wheeling_disclosure.html>（参照：2019.5.6）
24) 資源エネルギー庁 発電コスト検証ワーキンググループ：長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告, 2015.5
25) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：火力発電技術（石炭，ガス）の技術開発の現状, 2015.6
26) 上野 貴広, 他：モンテカルロシミュレーションを用いた商業・業務街区における需要変動の推計, 日本建築学会環境系論文集, Vol.84, No.757, pp.291-301, 2019.3
27) コージェネレーション・エネルギー高度利用センター：コージェネレーション白書 2018, pp.213-214, 2018.12
28) 坂口 雄一, 他：業務用コジェネレーションシステムの性能評価手法の開発 - シミュレーションプログ

ラムの開発と感度解析 - , 建築学会九州支部研究報告, Vol.55, pp.345-348, 2016.3
29) 九州電力株式会社：再生可能エネルギーの出力制御見通し（2017 年度算定値）の算定結果について (第 12 回 総合資源エネルギー調査会 系統ワーキンググループプレゼン資料), 2017.10
30) 九州電力株式会社：九州電力データブック 2018, 2018.8
31) 高村 しおり, 他：太陽光発電と省エネルギー技術の大規模導入を考慮した地域電力需要の将来推計, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 77 No. 680, pp.805-811, 2012.10

（受理：令和元年５月30日）