

建物群の熱・電力融通を考慮した
建築・設備システムに関する研究

Research on Building/Equipment Systems in Consideration of
Heat and Power Interchange between Buildings

阿部 佑平¹⁾、月館 司²⁾
Yuhei Abe¹⁾, Tsukasa Tsukidate²⁾

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部
北方建築総合研究所

Northern Regional Building Research Institute
Building Research Department

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

¹⁾ 建築研究部建築システムグループ研究職員 ²⁾ 建築研究部建築システムグループ主任主査

¹⁾ Researcher of Building Engineering System Group ²⁾ Chief of Building Engineering System Group

概要 Abstract

建物群の熱・電力融通を考慮した建築・設備システムに関する研究 Research on Building/Equipment Systems in Consideration of Heat and Power Interchange between Buildings

阿部 佑平¹⁾、月館 司²⁾
Yuhei Abe¹⁾, Tsukasa Tsukidate²⁾

キーワード : 建物群、熱・電力融通、建築・設備システム

Keywords : Buildings, Heat and power interchange, Building/equipment systems

1. 研究概要

1) 研究の背景

- (1) 個々の建物に配置された分散電源・熱源・蓄エネルギー設備をネットワーク化し、建物群で熱・電力を融通させることにより、エネルギー利用の最適化、電力負荷平準化、全体的な機器容量の削減等の効果が期待されている。
- (2) しかし、熱融通では、熱供給可能範囲、配管からの熱損失、搬送動力等が課題であるとともに、電力融通では、需給バランスを取るための協調運転方法等、システムに関する課題がある。
- (3) さらに、熱・電力融通をするために必要となる自由度の高い建築・設備システムについては、十分な検討がされておらず、研究蓄積が乏しい現状にある。

2) 研究の目的

本研究では、建物群の熱・電力融通を可能とするシステムを検討し、それに対応する自由度の高い建築・設備システムを明らかにし、省エネルギー性・経済性を評価することを目的とする。

2. 研究内容

1) 熱・電力融通を可能とするシステムの検討 (H29~30 年度)

- ・ねらい：コージェネレーションシステムや熱供給システム等を対象に、熱・電力融通を可能とするシステムの運転・制御方法や効率を検討する。
- ・試験項目等：文献調査、ヒアリング調査

2) 建物群の熱・電力融通を考慮した解析モデルの開発 (H29~30 年度)

- ・ねらい：1) で検討したシステムを対象に、建物群の熱・電力融通を考慮し、熱・電力負荷、エネルギー消費量、室温変動等が解析できるモデルを開発する。
- ・試験項目等：文献調査、解析モデルの開発、プログラミング

3) 建築・設備システムの検討 (H30 年度)

- ・ねらい：1) で検討したシステムを対象に、2) で開発したモデルを用いて、熱・電力融通をするために必要となる自由度の高い建築・設備システム（熱容量、蓄熱槽等）について検討し、省エネルギー性や経済性を評価する。また、室温変動についても検討し、快適性を評価する。
- ・試験項目等：数値解析、建物性能の検討、設備システムの検討、各種設備機器のコストデータの収集、省エネルギー性・経済性の評価、室温変動の検討

¹⁾ 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ研究職員 ²⁾ 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ主任主査

¹⁾ Researcher of Building Engineering System Group, Northern Regional Building Research Institute ²⁾ Chief of Building Engineering System Group, Northern Regional Building Research Institute

3. 研究成果

1) 熱・電力融通を可能とするシステムの検討 (H29~30年度)

- ・文献調査より、国内における熱・電力融通の事例を整理した。整理した事例のうち、「田町駅東口北地区」及び「柏の葉スマートシティ」については現地視察および事業者ヒアリングを行い、導入されているシステムの運転・制御方法、効率等の情報を得た。
- ・文献調査とヒアリングより、熱・電力融通を行うためには、建物群のエネルギー需給を最適制御するためのエネルギーマネジメントシステム、エネルギー輸送設備、蓄エネルギー設備、コージェネレーションシステム（以下、CGS）の導入が必要であることが分かった。

2) 建物群の熱・電力融通を考慮した解析モデルの開発 (H29~30年度)

- ・建物群の熱・電力融通を考慮した解析モデルを開発し、計算プログラムを作成した。

3) 建築・設備システムの検討 (H30年度)

- ・複数の建物群に対して熱融通を行うモデルを作成し、熱供給プラント内のポンプの制御方法が水動力に及ぼす影響を検討した（図1）。数値解析により、建物内の室温低下がなく、水動力を最も低減できる制御方法は「弁開度・開口率制御」であることを明らかにした（図2）。
- ・複数の建物群に対して電力融通を行うモデルを作成し、系統電源への逆潮流ができない状況において、太陽光発電やCGSを有効活用するための導入設備とその制御の効果について検討した（図3）。CGSの電力を逆潮流した方が系統からの購入電力は減少し、余剰電力もエリア全体で見ると増加しない。また、ヒートポンプの運転時間制御の導入により、エリア全体としては系統からの購入電力、余剰電力が減少することを明らかにした。CGSは、電力融通が行われる場合には、適切な運転制御と組み合わせて逆潮流することが電力量の削減に効果的である（図4）。しかし、ランニングコストを試算すると、コスト的には逆潮流しない方が有利となった。また、ネットワーク（管理センター）に蓄電池があると、系統からの購入電力、余剰電力の削減に有効である。

<具体的データ>

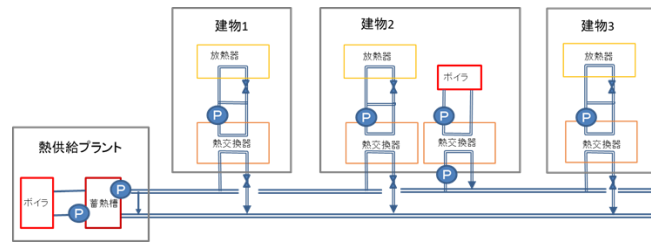


図1 熱融通の解析モデル

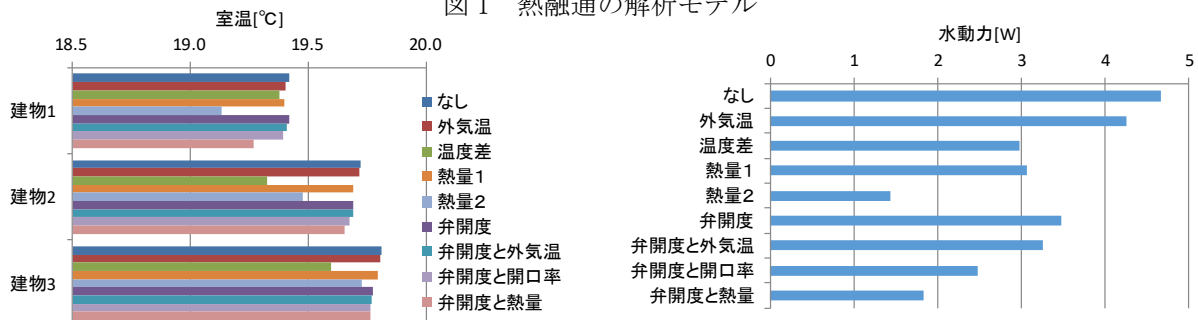


図2 室温および水動力の解析結果

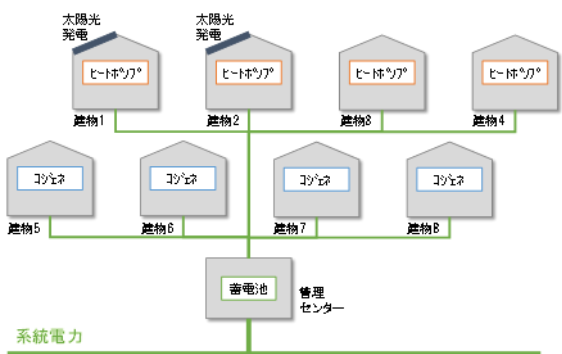


図3 電力融通の解析モデル

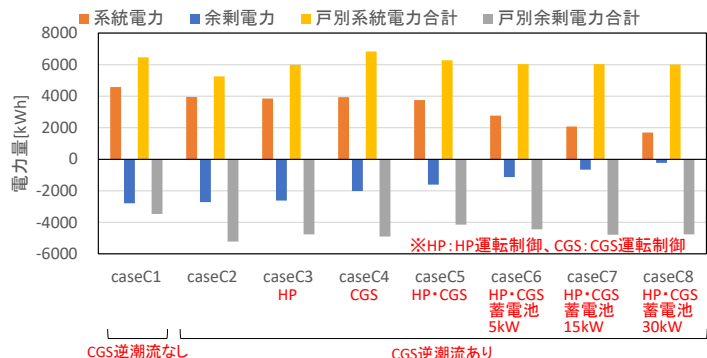


図4 電力量の解析結果

4. 今後の見通し

- ・成果は、熱・電力融通を考慮した建物群の設計における基礎資料として活用される。

目 次

1. 研究の背景と目的	1
2. 熱・電力融通を可能とするシステムの検討	1
(1) 田町駅東口北地区.....	1
(2) 柏の葉スマートシティ.....	1
3. 熱融通の解析モデルの開発とシステム検討	2
(1) はじめに	2
(2) 解析手法	2
(3) 解析対象モデル	3
(4) 解析結果と考察	3
4. 電力融通の解析モデルの開発とシステム検討.....	7
(1) はじめに	7
(2) 解析手法	7
(3) 解析条件	8
(4) 解析結果と考察	9
5. まとめ.....	14

1. 研究の背景・目的

個々の建物に配置された分散電源・熱源・蓄エネルギー設備をネットワーク化し、建物群で熱・電力を融通させることにより、エネルギー利用の最適化、電力負荷平準化、全体的な機器容量の削減等の効果が期待されている。しかし、熱融通では、熱供給可能範囲、配管からの熱損失、搬送動力等が課題であるとともに、電力融通では、需給バランスを取るための協調運転方法等、システムに関する課題がある。さらに、熱・電力融通をするために必要となる自由度の高い建築・設備システムについては、十分な検討がされておらず、研究蓄積が乏しい現状にある。

本研究では、建物群の熱・電力融通を可能とするシステムを検討し、それに対応する自由度の高い建築・設備システムを明らかにし、省エネルギー性・経済性を評価することを目的とする。

2. 熱・電力融通を可能とするシステムの検討

国内における熱融通や電力融通を行っている事例を調査した。代表事例を表 2-1 に示す。以下の事例のうち、「田町駅東口北地区」及び「柏の葉スマートシティ」については現地視察および事業者ヒアリングを行った。得られた情報を以下に示す。

表 2-1 国内における熱・電力融通の代表事例

タイプ	名称	都市	エネルギー融通
新規開発 街区	田町駅東口北地区	東京都港区	熱・電力
	柏の葉スマートシティ	柏市	電力
	あべのハルカス	大阪市	熱
既成市街地	オアーズ芝浦	東京都港区	熱・電力
戸建住宅	セキュレア豊田柿本	豊田市	電力
共同住宅	T-グリッドシステム	静岡県	電力

(1) 田町駅東口北地区

1) エネルギーシステムの概要

コジェネレーションを核に、再生可能エネルギー（太陽熱）・未利用エネルギー（地下トンネル水）を最大限活かしながら街区全体でエネルギーを創り、生み出された熱と電気をネットワーク化し有効活用している。主要機器として、コジェネレーションシステム（ガスエンジン、燃料電池）、各種熱源機（廃熱投入型蒸気吸収冷凍機（蒸気焚ジェネリンク）、インバーターボ冷凍機等）が導入されている。

2) エネルギーマネジメントシステム

エリアのエネルギー需給を一括管理・制御するた

めに、「SENEMS (Smart Energy Network Energy Management System)」が導入されている。SENEMS の主な機能として、①翌日運転計画（熱負荷予測、冷水送水温度計画、等）、②当日運転監視制御（空調機温度制御、熱源機増段抑制制御、等）、③管理分析（エネルギー消費実績、等）、④複数プラント連携がある。

(2) 柏の葉スマートシティ

1) エネルギーシステムの概要

自営線による電力融通を構築しており、発電設備として、非常用発電機、太陽光発電、生ごみバイオガスコジェネレーション、温泉含有メタンガスコジェネレーション、マイクロガスコジェネレーションを導入し、多様な自立分散型エネルギーシステムからの電力供給を行っている。また、電力融通装置を開発し、リアルタイムで電力供給量や電力供給方向を制御している。

2) エネルギーマネジメントシステム

周辺街区建物ごとの地域分散電源や各種監視システムを自営線の情報通信ネットワークと自営線の電力ネットワークでつなぎ、「柏の葉スマートセンター」で一元的に監視制御やエネルギー分析などを行えるよう、柏の葉 AEMS (Area Energy Management System) を構築している。AEMS では、各種施設の受電状態、発電状態、需要状態の情報を収集し、地域全体エネルギー需給状態を監視し、一元管理を行っている。

以上より、熱・電力融通を行うためには、建物群のエネルギー需給を最適制御するためのエネルギーマネジメントシステム (EMS)、エネルギーをネットワーク化するためのインフラ（熱導管、自営線）、蓄エネルギー設備（蓄熱槽、蓄電池）、コジェネレーションの導入が必要である。

3. 熱融通の解析モデルの開発とシステム検討

(1) はじめに

地域熱供給システムでは、熱源プラントと建物を結ぶ熱導管が設置され、それによる熱損失や圧力損失が省エネルギーや経済面での課題となる。ここでは、地域熱供給システムの最適設計を検討するためのシミュレーションツールとして、熱移動と流体移動を同時に解析するプログラムを既存のプログラムをベースに開発し、制御方法がポンプ動力（差圧と流量）に及ぼす影響を検討する。

(2) 解析手法

熱移動に関しては、各部位を節点（ノード）と熱コンダクタンスからなる熱回路網を後退差分法で解く。ある節点における熱収支は次式で表される。

$$C_p (\theta_p - \theta_p') = \{ \sum K_{ip} (\theta_i - \theta_p) + Q_p \} \Delta t$$

ここで、 C_p ：節点 p の熱容量

θ_p ：節点 p の現在の温度

θ_p' ：節点 p の Δt 時間前の温度

θ_i ：節点 i の現在の温度

θ_i' ：節点 i の Δt 時間前の温度

K_{ip} ：節点 i と p の間の熱コンダクタンス

Q_p ：節点 p への供給熱量

Δt ：時間

熱コンダクタンスは、熱伝達、熱伝導、移流に対して次式で表される。

$$K_{ip} = \alpha A \quad (\text{熱伝達})$$

$$K_{ip} = A \lambda / d \quad (\text{熱伝導})$$

$$K_{ip} = CF \quad (\text{移流})$$

ここで、 α ：熱伝達率

λ ：熱伝導率

d：厚さ

A：面積

C：流体の体積比熱

F：流量

熱交換器は向流熱交換とし、熱交換機出口の温度を次式で計算する。

$$S = -(1 - GC_1/GC_2) * KA/GC_1$$

$$E1 = 1 - \text{EXP}(S)$$

$$E2 = 1 - GC_1/GC_2 * \text{EXP}(S)$$

$$EF = E1/E2$$

$$\theta_{1o} = \theta_{1i} - EF * (\theta_{1i} - \theta_{2i})$$

$$\theta_{2o} = \theta_{2i} + EF * GC_1/GC_2 * (\theta_{1i} - \theta_{2i})$$

ここで、KA：熱交換器の熱通過率と伝熱面積の積

GC_1 ：流体 1 の流量と比熱の積

GC_2 ：流体 2 の流量と比熱の積

θ_{1i} ：流体 1 の入口温度

θ_{1o} ：流体 1 の出口温度

θ_{2i} ：流体 2 の入口温度

θ_{2o} ：流体 2 の出口温度

熱導管は地盤と一体として扱い、二次元あるいは三次元非定常熱伝導モデルを用いて解析することも可能であるが、周囲温度を与条件として与える場合には、次の熱交換モデルで計算する。

$$EF = 1 - \text{EXP}(-KA/GC)$$

$$\theta_o = (1 - EF) * \theta_i + EF * \theta_r$$

ここで、KA：パイプの熱通過率と伝熱面積の積

GC：流体の流量と比熱の積

θ_i ：流体の入口温度

θ_o ：流体の出口温度

θ_r ：パイプの周囲温度

パイプおよびその中の流体の熱容量を考慮する場合は、パイプを 2 等分し、その間にパイプ全体の熱容量をもつ節点を設ける。

冷温水の移動は流体管路網を用いて計算する。管路や機器の接合部に節点を設けると節点 ij 間の流量は次式で表される。

$$F_{ij} = A_{ij} (2 \Delta P_{ij} / \xi_{ij} / \rho)^{1/2} = C_{ij} (P_i - P_j)^{1/2}$$

ここで、 F_{ij} ：節点 ij 間の流量

ΔP_{ij} ：節点 ij 間の圧力差

ξ_{ij} ：節点 ij 間の抵抗係数

ρ ：流体の密度

P_i ：節点 i の圧力

P_j ：節点 j の圧力

C_{ij} ：節点 ij 間の係数

各節点において収支をとると、

$$C_{21} (P_2 - P_1)^{1/2} + C_{31} (P_3 - P_1)^{1/2} + \dots + C_{N1} (P_N - P_1)^{1/2} + G_1 = 0$$

$$C_{12} (P_1 - P_2)^{1/2} + C_{32} (P_3 - P_2)^{1/2} + \dots + C_{N2} (P_N - P_2)^{1/2} + G_2 = 0$$

...

$$C_{1N} (P_1 - P_N)^{1/2} + C_{2N} (P_2 - P_N)^{1/2} + \dots + C_{N-1N} (P_{N-1} - P_N)^{1/2} + G_N = 0$$

G_i はポンプなどによる節点 i への流入量であり、ポンプの特性（流量-圧力特性曲線）を考慮して求める。この連立方程式を解くことで、各節点の圧力と節点間の流量が求められる。密度は一定として扱うが、温度依存性を考慮する場合は、収束性の問題から前ステップの温度を用いることにする。

制御の影響を検討する場合、計算時間間隔は十分小さくする必要がある。1 ステップ前の値を用いて弁開度やポンプの運転台数、周波数などを決定して流量を計算し、その値を用いて熱回路網を計算して温度、熱量を求める。

(3) 解析対象モデル

解析例として、制御の影響を検討する。設定したモデルを図 3-1 に示す。ボイラは熱供給プラントにあるほか、熱が不足する際に、熱源設備容量に余裕のある建物からも熱供給することを想定している。各建物には、プラントの熱導管から熱交換器を介して熱が供給される。ここでは、熱交換器の熱供給プラント側を一次側、建物側を二次側と呼ぶことにする。

熱供給プラントのボイラは設定温度 80℃で運転されるが、蓄熱槽温度が 75℃以下になると、建物にあるボイラが運転され、一次側配管に熱が供給される。各建物の空間は単純化し、熱容量のある 1 点で代表し、その温度により各建物の暖房が制御される。暖房は温水暖房であり、放熱器と配管で構成される。暖房条件は、建物 1 が暖房時間 6~18 時で設定室温 22℃、建物 2、3 は 24 時間暖房で設定室温 20℃とした。暖房時間において、室温が維持されるように建物内の温水循環が比例制御される。その循環温水は熱交換器により加熱されるが、その温度を制御する場合には、熱交換器一次側の弁開度を比例制御する。熱源プラントには 5 台のポンプがあり、一次側循環量を制御する場合には運転台数を制御するシステムとする。なお、本解析モデルは、実際のプラントを想定したものではなく、機器容量は住宅レベルの容量としたが、制御の特性を検討するため、その特性を再現するには十分なモデルと考える。

次に、設定した制御方法について述べる。「制御なし」は一次側の制御を行わない定流量のシステムである。「外気温」は熱交換器一次側の弁開度は一定であるが、外気温により一次側の往還圧力差の目標値を設定し、その圧力を達成するようにポンプの運転台数を制御するシステムである。「温度差一定」は熱交換器一次側の弁開度は一定であるが、ポンプの運転台数を往還温度差が一定となるように制御するシステムである。「熱量」は熱交換器一次側の弁開度は一定であるが、前サンプリング時の供給熱量により目標流量を設定し、その流量を達成するようにポンプの運転台数を制御する。「熱量 1」と「熱量 2」では目標流量に違いがある。これらの制御では、一次

側の弁開度を制御していないので、各建物の熱負荷が変化しても熱交換器に流れる流量を建物ごとに調整することはできない。「弁開度」は熱交換器二次側の送水温度が一定となるように一次側の弁開度を制御し、かつ、一次側の往還圧力差が一定となるようにポンプの運転台数を制御する。「弁開度と外気温」は「弁開度」と同様であるが、往還圧力差の設定を外気温により変化させるシステムである。「弁開度と開口率」は熱交換器二次側の送水温度が一定となるように一次側の弁開度を制御し、かつ、その開度が最大となる弁において、開度が 90~99%となるようにポンプの運転台数を制御するシステムである。「弁開度と熱量」は熱交換器二次側の送水温度が一定となるように一次側の弁開度を制御し、かつ、前サンプリング時の供給熱量により目標流量を設定し、その流量を達成するようにポンプの運転台数を制御するシステムである。

計算には拡張アメダス・旭川標準年の気象データを用い、0.01 時間間隔で 1~3 月の 3 か月間の計算を行った。

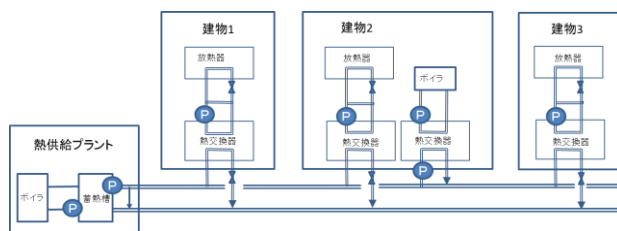


図 3-1 解析対象モデル

(4) 解析結果と考察

計算結果の一例として、「制御なし」について、室温、送水温度、建物供給熱量、プラント供給熱量を図 3-2~3-5 に示す。建物 1 は間欠暖房であるため、夜間に室温が下がり、暖房開始時に多くの熱を消費している。その際、暖房送水温度が 45℃程度まで低下している。建物 2、3 は連続暖房であり、室温は設定値をほぼ維持している。日中、熱需要が減少するが、一次側の制御を行っていないため、送水温度が上昇する傾向がみられる。プラントの供給熱量を見ると、熱が不足した際に建物のボイラが稼働していることがわかる。建物側の熱需要と供給熱量のピークがずれているのは、蓄熱槽などの熱容量の影響である。

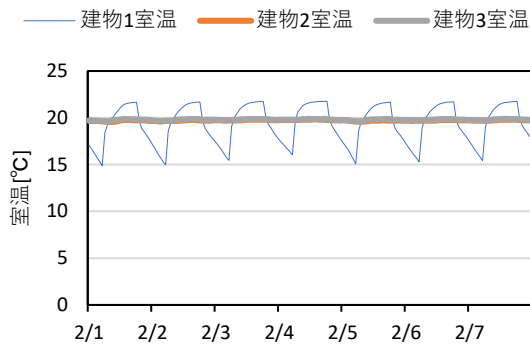


図 3-2 室温

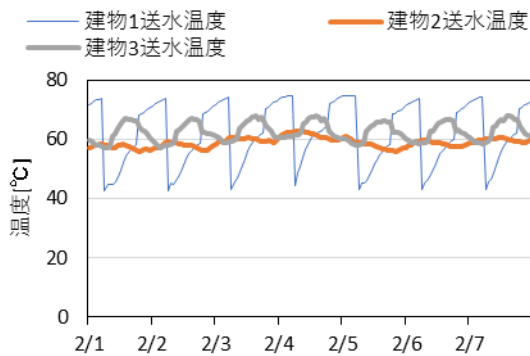


図 3-3 送水温度

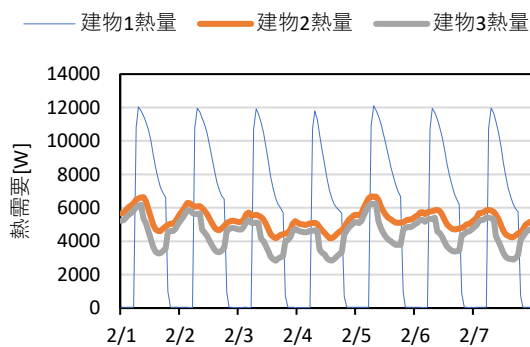


図 3-4 建物供給熱量

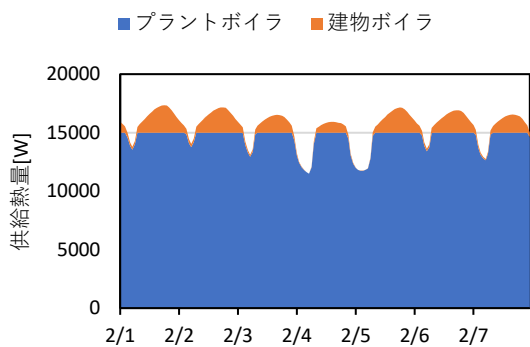


図 3-5 プラント供給熱量

「制御なし」の一次側流量と蓄熱槽出口の差圧の関係を図 3-6 に示す。定流量であるため、流量 984L/h、差圧 1530Pa で一定である。制御「外気温」の一次側流量と差圧を図 3-7 に示す。外気温によりポンプの運転台数が変化し、それに対応する流量と差圧がプロットされている。制御「温度差一定」「熱量」についても同じである。制御「弁開度」による流量と差圧の関係を図 3-8 に示す。建物の熱需要が小さくなると送水温度が上昇するので、それを抑えるため、一次側の弁開度が小さくなる。その結果、差圧が上昇するので、それを抑えるためポンプの運転台数を減らすように制御されている。差圧の設定を 16~20kPa としたため、ポンプ 1 台での運転は選択されなかった。制御「弁開度と開口率」による流量と差圧の関係を図 3-9 に示す。弁開度を全開に近づけるような制御であるため、図 3-7 に近いが、熱需要の小さな建物の弁開度が小さいことにより、同じ運転台数で比較すると差圧が大きくなっている。制御「弁開度と熱量」による流量と差圧の関係を図 3-10 に示す。熱量により流量の目標値を変え運転台数を制御しているが、熱需要の小さな建物では弁開度が小さくなるため、図 3-7 に比べ、差圧が大きくなっている。

各制御方式に対する平均室温を図 3-11 に示す。平均室温が比較的低いのは、制御「熱量 2」の建物 1、2、3、制御「温度差」の建物 2、3、制御「弁開度と熱量」の建物 1 である。制御「熱量」「温度差」は建物別の制御は行われないので、各建物への流量の配分割合はあまり変化しない。熱需要の最も多い建物に対して十分な熱を供給できる必要があるが、制御「熱量 2」および「温度差」ではポンプの運転台数を減らしすぎたと考えられる。どの程度減らすのが適切か設計段階で決めることが難しく、運転実績に基づいてパラメータを決めることとなり、運用当初は安全側の設定（制御「熱量 2」ではなく「熱量 1」）にせざるをえないと思われる。このことは制御「外気温」についても同様である。建物別に一次側弁開度を制御する場合には、このような問題は生じにくい。制御「弁開度と熱量」では熱量により目標流量を低下させる部分のパラメータ設定がやや不適切であったと考えられる。目標差圧や目標流量を設定する制御では、やはり運用当初は安全側の設定にする必要がある。

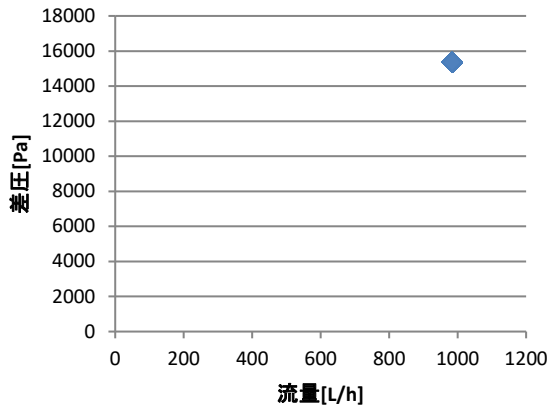


図 3-6 一次側流量と差圧の関係（制御なし）

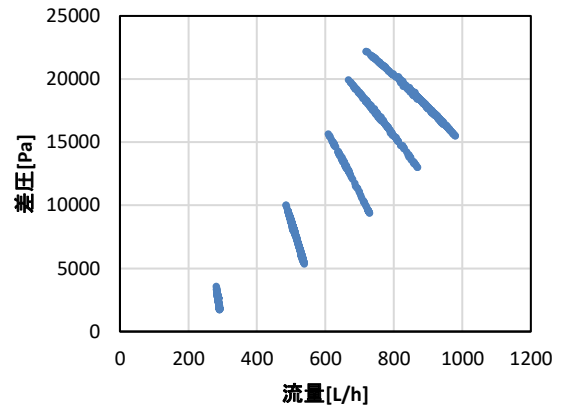


図 3-9 一次側流量と差圧の関係（弁開度と開口率）

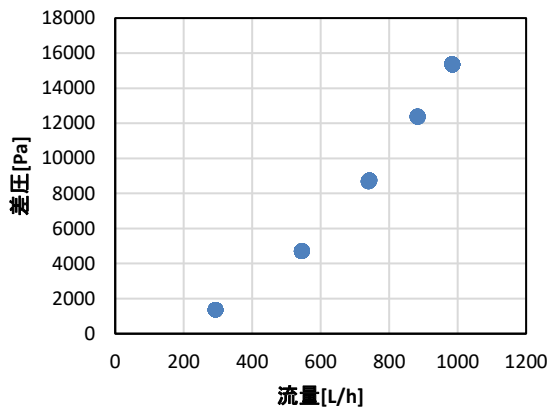


図 3-7 一次側流量と差圧の関係（外気温）

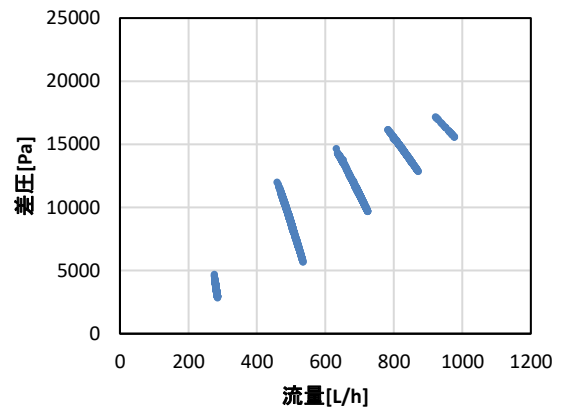


図 3-10 一次側流量と差圧の関係（弁開度と熱量）

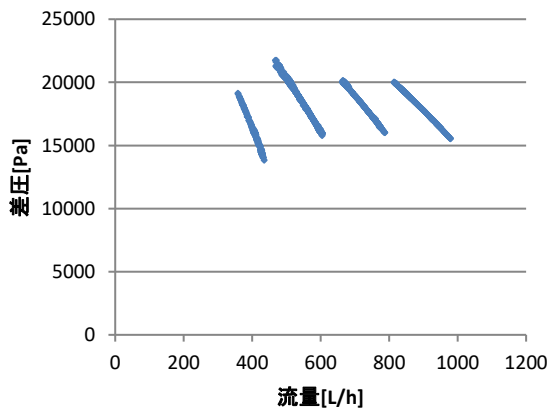


図 3-8 一次側流量と差圧の関係（弁開度）

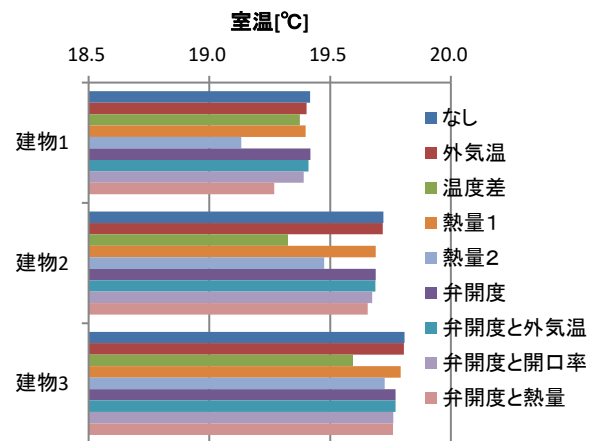


図 3-11 各制御方式に対する平均室温

各建物の一次側平均流量を図 3-12 に、プラントの平均流量を図 3-13 に示す。一次側弁開度を制御しない場合の流量が多いが、制御「熱量 2」の流量は一次側弁開度を制御した場合と同程度となっている。ただし、制御「熱量 2」でも建物別にみると、弁開度を制御した場合と異なっており、流量の分配が不適切であることが室温の低下につながったと考えられる。

ポンプ静圧の平均値を図 3-14 に、流量と静圧の積である水動力の平均値を図 3-15、ポンプ運転台数の平均値を図 3-16 に示す。ポンプ運転台数を削減する制御により、静圧が減少することがわかる。制御「弁開度」は差圧を一定に保っているため最も静圧が大きい。水動力が最小なのは制御「熱量 2」であるが、図 3-11 に示したように平均室温が他の制御よりも低かった。室温の低下がなく、水動力が小さいのは制御「弁開度と開口率」であった。ポンプ運転台数（平均値）は制御「熱量 2」「弁開度と開口率」「弁開度と熱量」で約 2.5 台と「制御なし」の半分であり、消費電力も半減すると考えられる。制御「弁開度と開口率」は熱需要が小さく弁開度が小さい場合にポンプの運転台数を削減し、熱需要が大きく弁開度が全開になったときにポンプの運転台数を増加させる方法であり、目標差圧などの設定が不要である。したがって、運用当初から適切な制御を行える可能性が高いと考えられる。

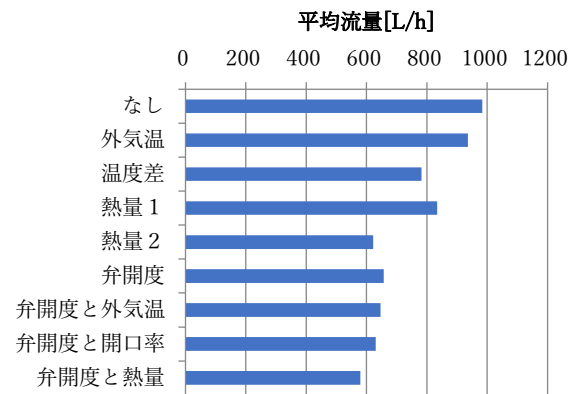


図 3-13 プラントの平均流量

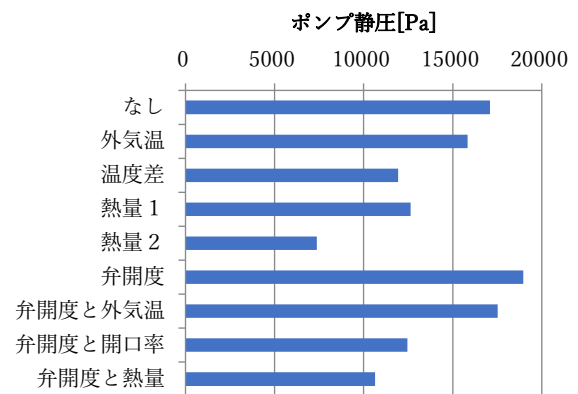


図 3-14 ポンプ静圧の平均値

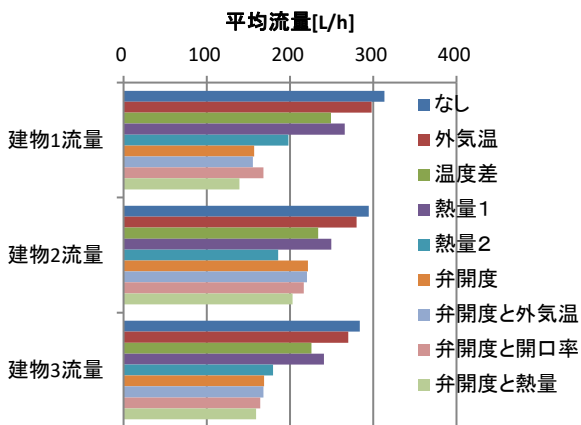


図 3-12 各建物の一次側平均流量

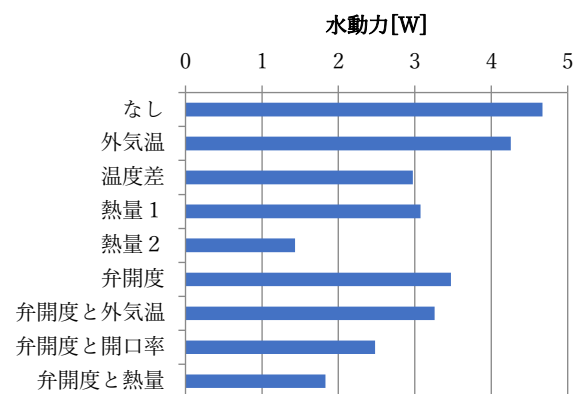


図 3-15 水動力の平均値

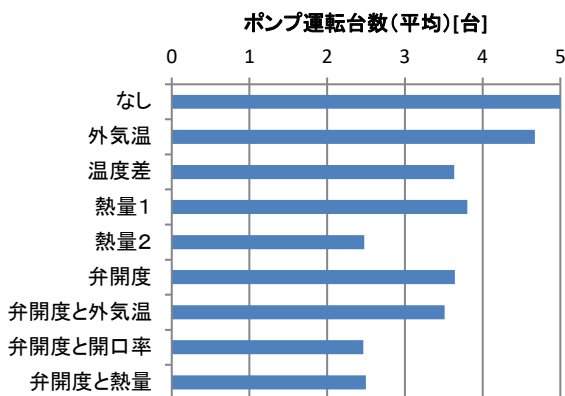


図 3-16 ポンプ運転台数の平均値

4. 電力融通の解析モデルの開発とシステム検討

(1) はじめに

太陽光発電による発電量の増加によって電力の需給バランスが崩れることを防ぐため、九州電力では太陽光発電の抑制を行ったことがある。北海道においてはまだそのような状況は発生していないが、太陽光発電や風力発電の増加により将来的には発生する可能性が考えられる。ここでは、余剰電力が発生し、発電した電力を電力会社の系統電源に逆潮流できない場合を想定した解析を行う。

電力需給を考える場合、電圧や周波数の変化を考慮した瞬間的な解析が重要であるが、それらは適切な制御システムの導入により制御可能と仮定し、ここでは取り扱わない。本論では、30分～1時間スケールの需給を対象とする。蓄電池などを導入した後も余剰電力が発生した場合には、ヒーターで熱に変換して放熱するなど余剰電力を捨てることとし、今回の解析では、そのような状況がなるべく発生しないようなシステムを見出すことが目的となる。

電力の消費パターンが異なる建物や太陽光発電の電力を吸収できる昼間の電力消費が多い建物が、電力網のなかにバランスよく存在すれば需給バランス上有利となる。ここでは、電力の需給バランス上不利と考えられる状況について検討することとし、同じような負荷パターンをもつ住宅から構成されるエリアを想定し、太陽光発電量が多く、電力負荷が小さい夏期(6～9月)を対象に検討を行う。

(2) 解析手法

機器の運転制御を考慮して時刻毎のエネルギー収支に基づいて熱・電力の計算を行う数値解析プログラムを作成した。

1) 照明コンセントの電力負荷および給湯負荷

過去の研究で設定した住宅の負荷パターンをベースに、乱数により、毎時の電力負荷を80～120%の範囲で変動させ、かつ、負荷発生時刻も前後1時間ずらす(30%は前へ、30%は後ろへ)ことで、各住戸の負荷パターンを発生させた。負荷パターンの例を図4-1、4-2に示す。乱数を用いているため、住戸により異なるほか、同じ住戸であっても日によって負荷が異なっている。

2) ヒートポンプ式給湯器

COPは一定と仮定し、貯湯槽などからの熱損失は無視する。基本は0時から7時の間に貯湯槽を加熱し、蓄熱量がその蓄熱容量に達すると運転を停止する。ただし、後述する制御により、運転時間をずらすことも可能である。

3) 燃焼式給湯器

消費電力は無視し、熱効率を一定として給湯負荷に合わせて運転する。

4) コージェネレーション

発電効率・熱回収効率は一定とし、貯湯槽の蓄熱量がその蓄熱容量を維持するように加熱する。ただし、電力負荷の制約から運転できず、給湯負荷を満たせない場合は、バックアップボイラが稼働するものとする。

5) 太陽光発電

発電効率の温度依存性は無視し、発電出力は日射量に比例すると仮定する。日射量は拡張アメダス標準年(旭川)の日射量を用いる。

6) 蓄電池

蓄電容量と定格電力(蓄放電能力)を設定し、その能力の範囲内で理想的に余剰電力の蓄電と購入電力を削減する放電が行われると仮定する。電力損失は放電の際に生じるとする(損失分を含んだ放電が行われる)。

以上の負荷および機器モデルを用いると、熱収支、電力収支は次式で表される。

熱収支(各戸の給湯)

$$Q_e - Q_w - (Q_s - Q_s') / \Delta t = 0, \quad 0 \leq Q_s \leq Q_{smax}$$

ここで、 Q_e : 機器の熱出力

Q_w : 給湯負荷

Q_s : 蓄熱量

Q_s' ; Δt 時間前の蓄熱量

Q_{smax} : 蓄熱容量

電力収支(各戸)

$$E_l + E_g - E_c - E_e - E_s = 0$$

$$Eb - Eb' = Es \Delta t, \quad -Esx \leq Es \leq Esx, \quad 0 \leq Eb \leq Ebmax$$

ここで、 E_l : 購入電力 (負値は逆潮流)

E_g : 機器の発電量

E_c : 電力負荷

E_e : 給湯器の電力消費

E_s : 蓄電電力

E_b : 蓄電量

E_b' : Δt 時間前の蓄電量

Esx : 蓄電池の定格電力

$Ebmax$: 蓄電池容量

Esx : 蓄電池の定格電力

$Ebmax$: 蓄電池容量

(3) 解析条件

需要家は戸建て住宅とし、表 4-1 に示す 8 戸を対象とする。系統電源からの電力は、管理センターで一括受電し、自営線で各戸に供給する。使用する機器の容量、性能等は表 4-1 に示すとおりである。

次に、運転制御について述べる。制御「HP」はヒートポンプ式給湯器の運転を昼間に変更する制御である。これは、0 時の時点で 12 時の天気予測できると仮定し、晴れの場合 (水平面日射量 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上とした) には、運転開始時刻を 0 時から 8 時に変更する。また、「HP(残熱量)」は、貯湯槽の残熱量を参照し、次式の条件を満たす場合に運転する。

$(\text{残熱量}/\text{蓄熱容量}) < (\text{運転開始設定時刻からの経過時間}) / \text{最大運転時間} (7 \text{ 時間})$

たとえば、運転開始設定時刻が 8 時の場合、1 時間経過後の 9 時の残熱量が蓄熱容量の $1/7$ より少なければ運転し、それ以上であれば運転しない。

電力収支 (管理センター)

$$E_n - \sum E_l - E_{sm} = 0$$

$$E_{bm} - E_{bm}' = E_{sm} \Delta t, \quad -Esx \leq E_{sm} \leq Esx, \quad E_{bm} \leq Ebmax$$

ここで、 E_n : 系統電源からの購入電力 (負値は余剰電力)、

$\sum E_l$: 各住戸の購入電力の合計

E_{sm} : 蓄電電力

E_{bm} : 蓄電量

E_{bm}' : Δt 時間前の蓄電量

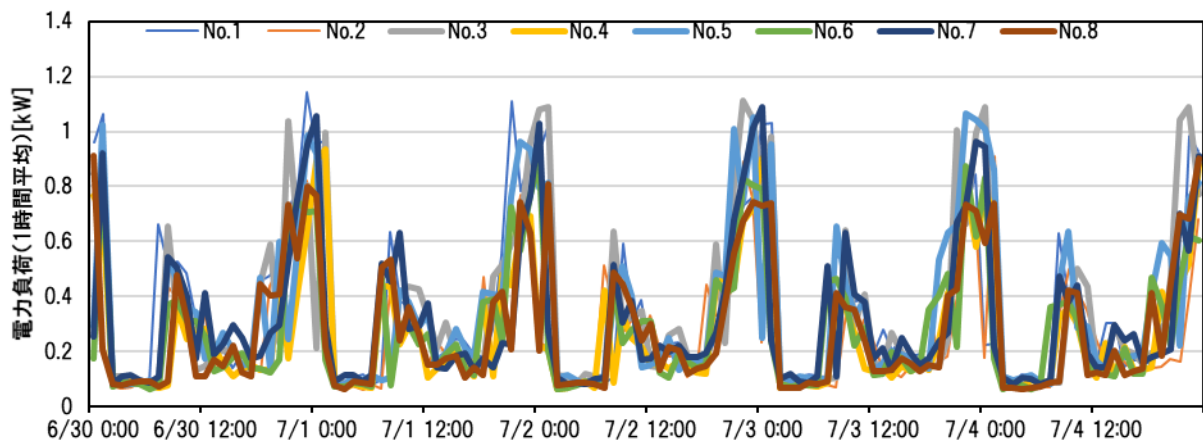


図 4-1 電力負荷パターンの例

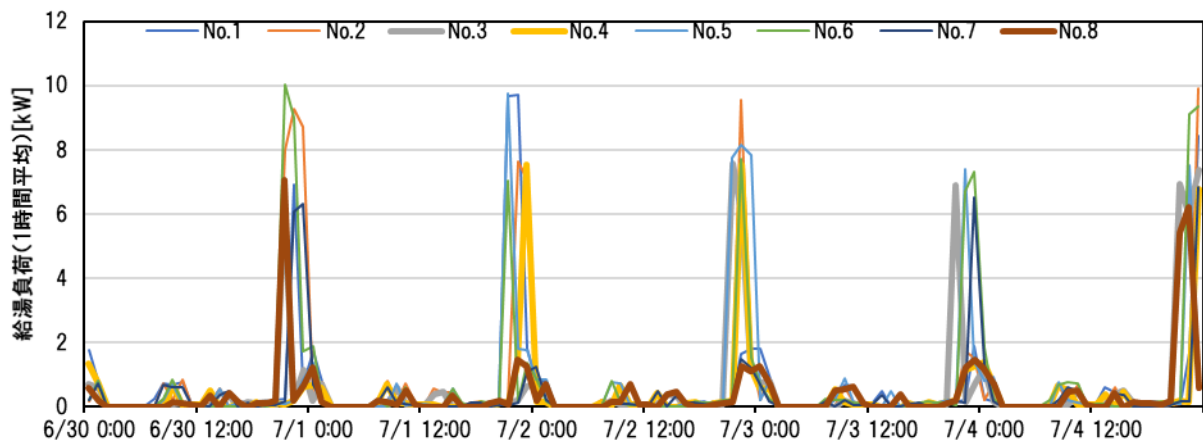


図 4-2 給湯負荷パターンの例

表 4-1 各住戸の機器設定

	建物No.1	建物No.2	建物No.3	建物No.4	建物No.5	建物No.6	建物No.7	建物No.8	管理センター	運転制御
caseB1	HP2.4	HP2.4	HP1.9	HP1.9	B	B	B	B		
caseB2	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	B	B	B	B		
caseB3	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	B	B	B	B		HP
caseB4	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	B	B	B	B		HP(残熱量)
caseB5	HP2.4,PV4,SB7.5	HP2.4,PV4,SB7.5	HP1.9	HP1.9	B	B	B	B		HP
caseB6	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	B	B	B	B	SB15	HP
caseB7	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9,PV4	HP1.9,PV4	B	B	B	B		
caseB8	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9,PV4	HP1.9,PV4	B	B	B	B		HP
caseC1	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	CGS	CGS	CGS	CGS		CGS逆潮流なし
caseC2	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	CGS	CGS	CGS	CGS		
caseC3	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	CGS	CGS	CGS	CGS		HP
caseC4	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	CGS	CGS	CGS	CGS		CGS
caseC5	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	CGS	CGS	CGS	CGS		HP・CGS
caseC6	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	CGS	CGS	CGS	CGS	SB5	HP・CGS
caseC7	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	CGS	CGS	CGS	CGS	SB15	HP・CGS
caseC8	HP2.4,PV4	HP2.4,PV4	HP1.9	HP1.9	CGS	CGS	CGS	CGS	SB30	HP・CGS

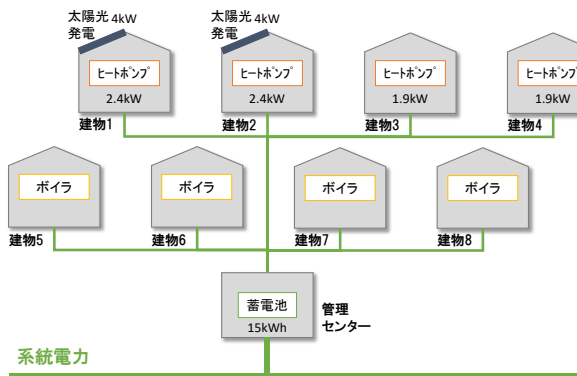
HP1.9、HP2.4：ヒートポンプ式給湯器、定格電力1.9kW、2.4kW、COP3.0

CGS：コジェネレーション、定格電力0.9kW、発電効率35%、熱回収効率40%、ボイラ熱効率85%

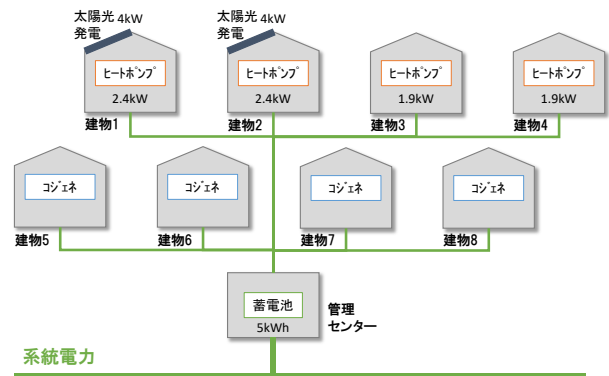
B：ボイラ、熱効率85%

PV4：太陽光発電、定格電力4kW

SB5、SB7.5、SB15、SB30：蓄電池、蓄電容量5、7.5、15、30kWh、定格電力1、1.5、3、6kW



例：caseB6



例：caseC6

制御「CGS 逆潮流なし」は通常のコジェネレーションの運転であり、その住戸から逆潮流しないように制御する。電力負荷が小さい場合（例えば定格出力の30%以下）、実際には運転できないことがあるが、ここでは低負荷でも運転できると仮定した。

制御「CGS」は通常、逆潮流運転ができるが、電力融通エリア全体で余剰電力が生じる場合に運転を停止する制御である。これは、管理センターからの制御となる。

(4) 解析結果と考察

解析結果の一例として、caseB4の建物No.1の電力需給を図4-3に、エリア全体の電力需給を図4-4に示す。ヒートポンプ式給湯器は天気および貯湯槽

の残熱量により運転時間が制御されている。7/1、7/2は朝方の運転であるが、6/30、7/3、7/4は天気の良いため昼間の運転となっており、太陽光発電の発電量の一部を消費している。ただし、給湯負荷がそれほど大きくなかったため、運転時間は短く、発電時間帯全体の逆潮流を防ぐほどの効果はない。エリア全体で見ると、太陽光発電のない住戸の電力消費により、最大余剰電力は5kW程度となっている。

ヒートポンプ式給湯器の電力消費量を図4-5に示す。4台稼働しているが、稼働時間帯は集中しており、余剰電力をうまく吸収できていないことがわかる。各戸の状況に合わせてどのように協調制御するかが今後の課題である。

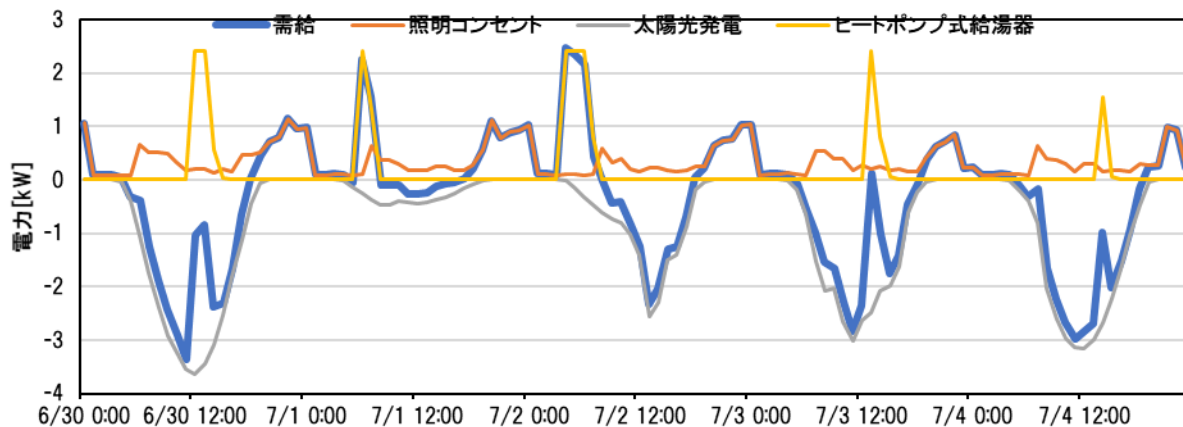


図 4-3 電力収支 (caseB4、建物 No. 1)

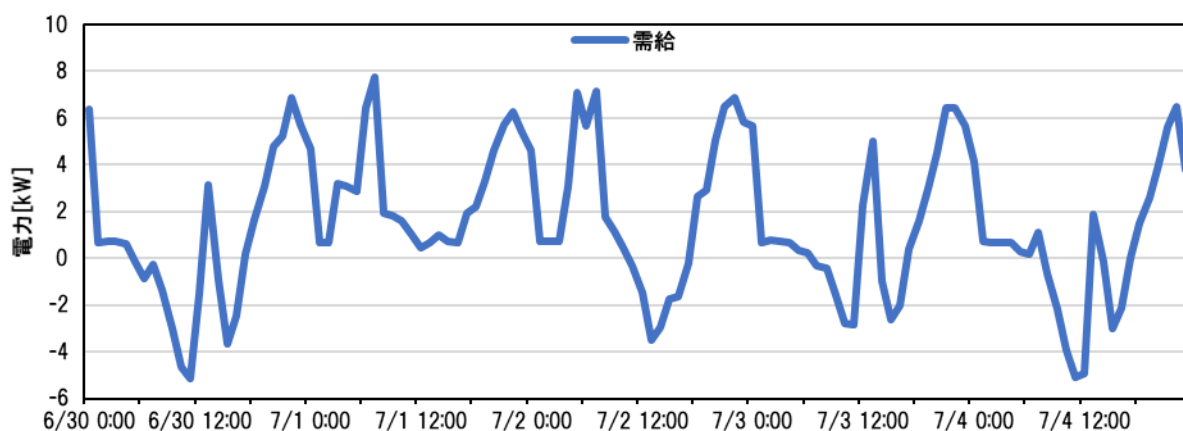


図 4-4 電力収支 (caseB4、エリア全体)

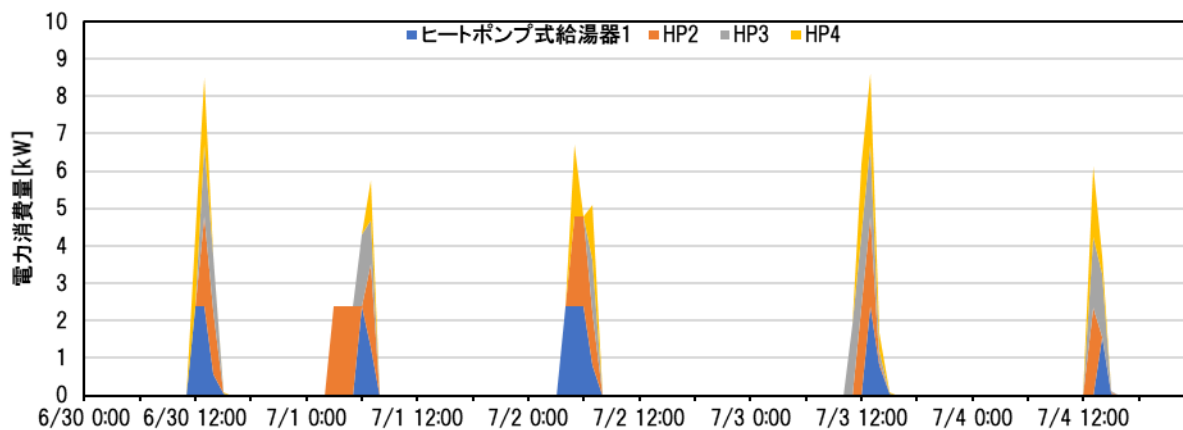


図 4-5 ヒートポンプ式給湯器の運転状況 (caseB4)

4 か月間の電力収支を図 4-6 に示す。ここで、「系統電力」はエリア全体として系統から購入する電力（管理センターでの購入電力）、「余剰電力」はエリア全体としての余剰電力（管理センターで捨てる電力）である。「戸別系統電力合計」は各戸の購入電力の合計、「戸別余剰電力合計」は各戸で生じた余剰電力の合計であり、戸別の合計値は電力融通ができな

い場合の値に相当する。ある住戸で余剰電力が生じても、別の住戸で消費されることがあるので、エリア全体の余剰電力は各戸の余剰電力の合計よりも小さくなる。

caseB1～B6 の比較から、ヒートポンプ式給湯器の運転制御や蓄電池の導入により余剰電力が減少することがわかる。caseB3 と caseB4 の比較からわかる

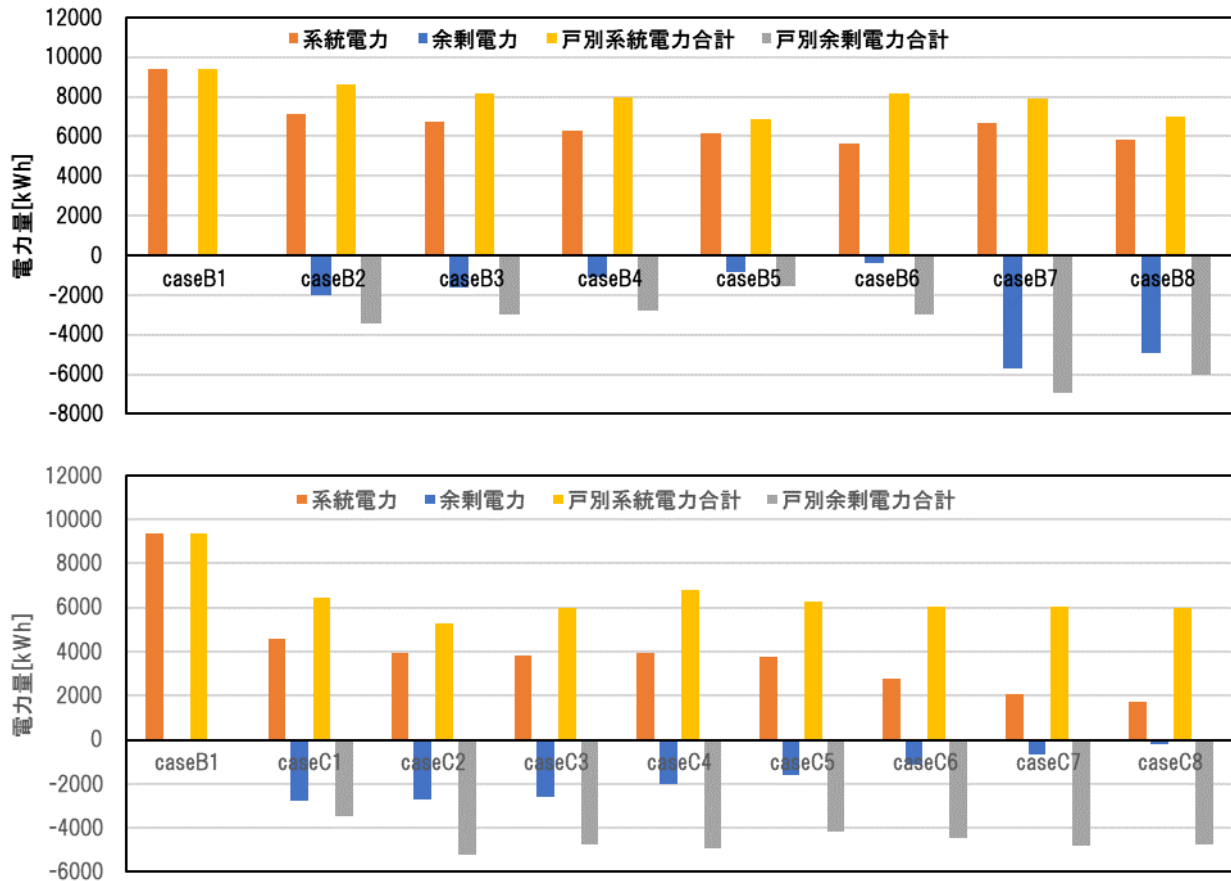


図 4-6 4 か月間の電力収支

ように、残熱量によるヒートポンプ式給湯器の制御は有効であるが、先に述べたように、運転時間の分散方法についてさらなる工夫が必要である。caseB5 と caseB6 は、蓄電池の容量の合計は同じであるが、戸別に設置した caseB5 よりも、管理センターに設置しエリア全体を対象とした caseB6 の方が余剰電力は少ない結果となった。これは余剰電力が発生していない住戸による調整効果が働いたためと考えられる。

太陽光発電容量の大きい caseB7、caseB8 は、システムから購入する電力の削減効果はあまり大きくはなく、余剰電力が大量に発生する結果となった。

caseC1～C8 を見ると、コジェネレーションを導入することでシステムからの購入電力は減少するが、余剰電力は多くなるのがわかる。逆潮流しない caseC1 に比べ、逆潮流する方がシステムからの購入電力は減少し、一方、余剰電力もエリア全体でみると増加していない。caseC5 のように、ヒートポンプ式給湯器の運転時間制御も導入することで、エリア全体としてはシステムからの購入電力、余剰電力が減少している。すなわち、コジェネレーションは、電力融通が行われる場合には、適切な運転制御と組み合わせると逆潮

流することが効果的であると言える。また、caseC6～caseC8 のように、蓄電池の導入がシステムからの購入電力、余剰電力の削減に有効であることがわかる。

各 case の一次エネルギー消費量（システム電力と燃料）を図 4-7 に示す。ここで、逆潮流不可の場合、逆潮流分の電力は捨てられたとし、その分の一次エネルギー削減効果は見込んでいない。逆潮流可能な場合には、逆潮流によりシステム電源の電力消費が削減されるとして、その分の一次エネルギー消費を差し引いている。

システム電源へ逆潮流できる場合、太陽光発電容量の大きい caseB7、caseB8 の一次エネルギー削減効果が大きい。一方、逆潮流できない場合には、ヒートポンプ給湯器の運転制御や蓄電池の導入（caseB3～caseB5）が太陽光発電容量増加と同様な効果があることがわかる。また、caseB5、caseB6 の比較により、電力融通が行われる場合には、戸別に蓄電池を設置するよりもネットワーク（管理センター）に蓄電池がある方が一次エネルギー消費量は少なくなることがわかる。

コジェネレーションの導入（caseC1～caseC8）に

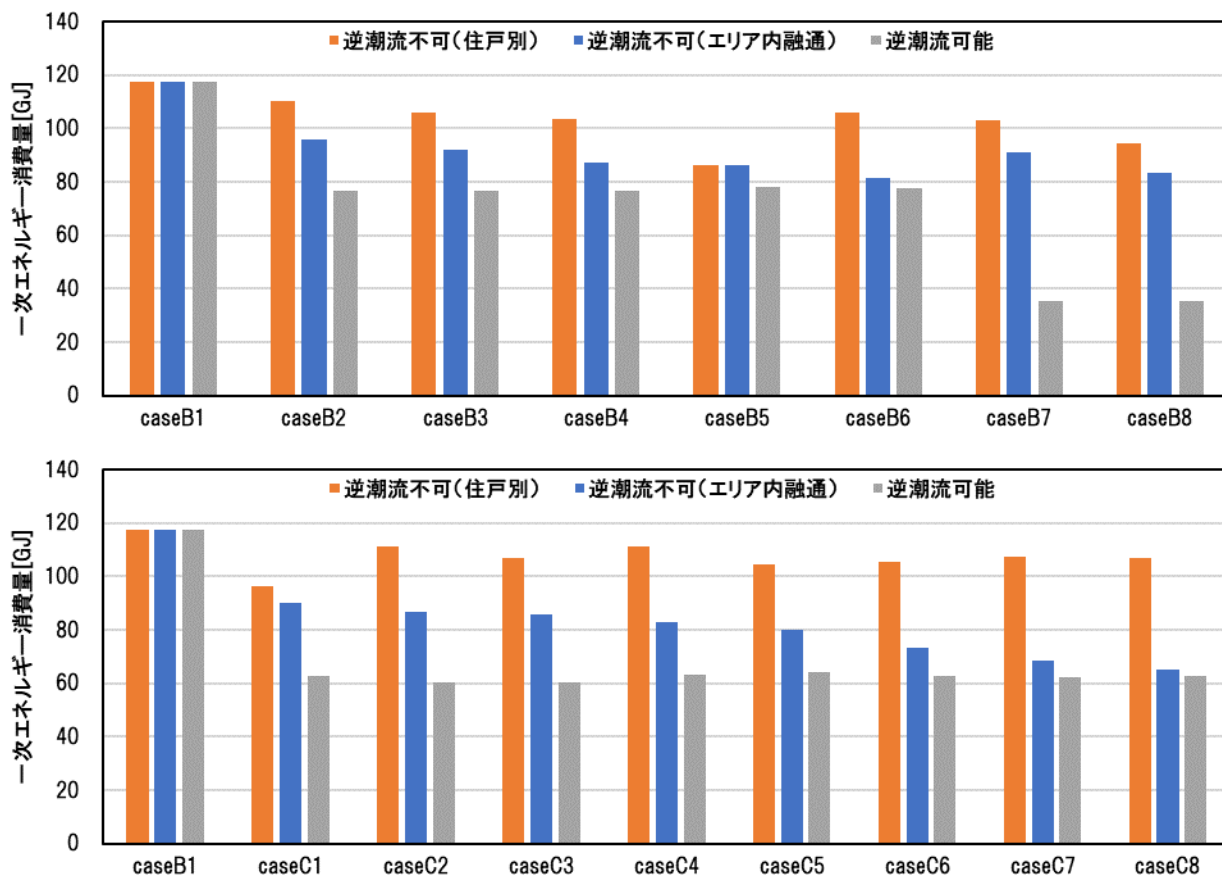


図 4-7 一次エネルギー消費量

より一次エネルギー消費量は削減される。電力融通が行われる場合には、コジェネレーションの電力を逆潮流しない caseC1 より、逆潮流する方が一次エネルギー消費量は少なくなっている。さらに、蓄電池の導入 (caseC6~caseC8) により一次エネルギー消費量は削減される。

次に、ランニングコストの比較を行う。電力融通を行う場合、エリア内の電力料金を設定する必要がある。ここでは、管理センターが系統電源 (電力会社) から電力を一括購入し、各住戸に販売し、各住戸の余剰電力を管理センターが買い取ることにする。系統電源からの購入は業務用電力を想定し、16 円/kWh と仮定する。各住戸への販売価格は、16 円/kWh と 18 円/kWh の 2 条件を想定する。余剰電力の買取価格は管理センターの収支が 0 円となるように決定する。実際には管理費あるいは設備投資分を考慮する必要があるがここでは無視する。また、燃料も管理センターで購入・販売するが、購入・販売とも 8 円/kWh とする。

各 case について、管理センターの収支が 0 円となるように計算された買取価格を図 4-8 に示す。余剰

電力が少ないほど買取価格は高くなる傾向にある。販売価格を系統からの購入価格よりも高い 18 円/kWh とした場合、caseB6 の買取価格が販売価格よりも高くなった。caseB6 は蓄電池を導入しているため、実際にはその設備投資分や管理費を考慮して買取価格を決める必要がある。

各戸の電気・燃料費を図 4-9、4-10 に示す。太陽光発電がある場合には、蓄電池があり、発電分を有効に活用できる caseB6、caseC8 などが最も経済的に有利となっている。また、コジェネレーションがある場合には、逆潮流をしない caseC1、蓄電池容量の大きい caseC8 が有利となっている。caseC1 は一次エネルギー消費量の削減効果はそれほど大きくはない。caseC1 よりも削減効果の大きい caseC2~caseC5 などは、コジェネレーションのある住戸にとっては経済的なメリットは少ないことになる。コジェネレーションを有効に活用するためには、買取価格等の設定方法が課題となると考えられる。

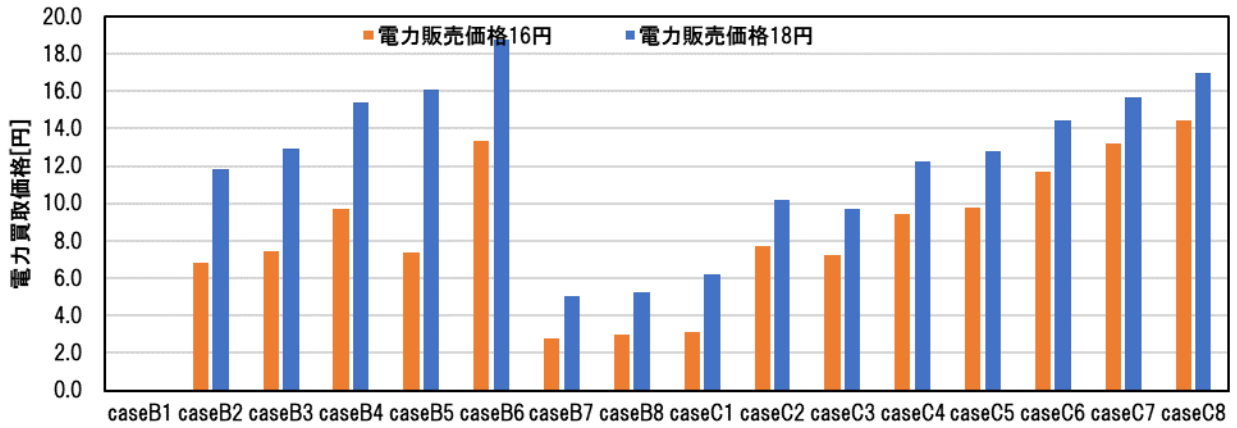


図 4-8 余剰電力の買取価格

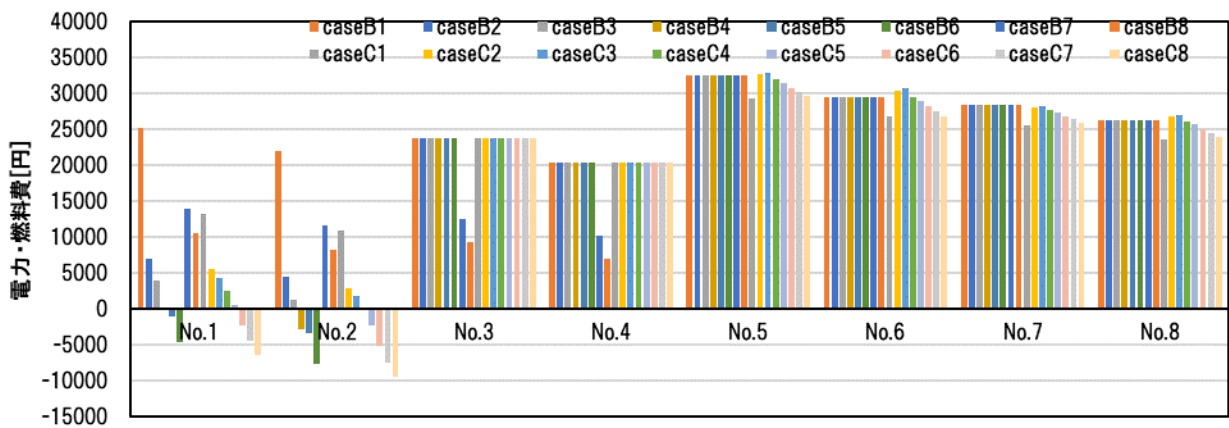


図 4-9 各住戸の電力・燃料費（電力販売価格 16 円/kWh の場合）

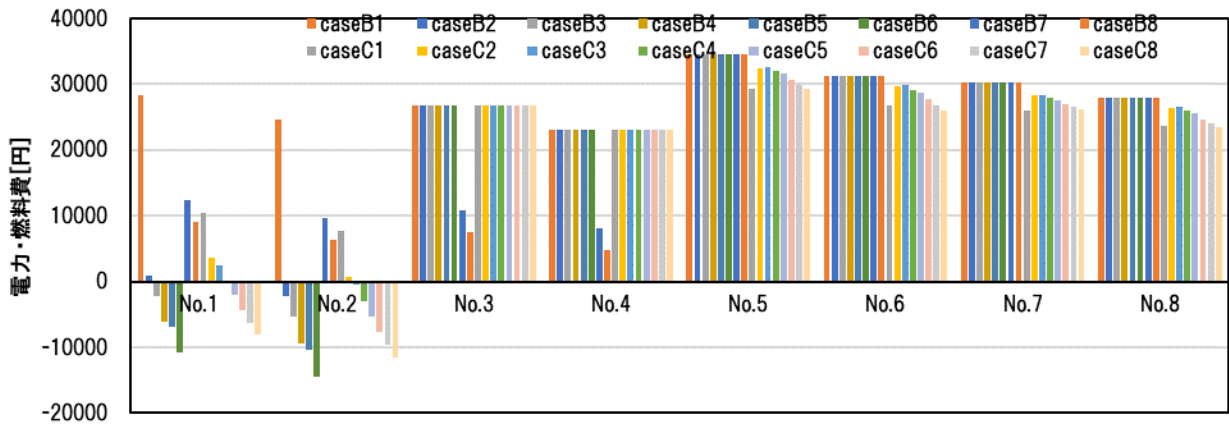


図 4-10 各住戸の電力・燃料費（電力販売価格 18 円/kWh の場合）

5. まとめ

本研究のまとめを以下に記す。

- ・国内における代表的な事例調査より、熱・電力融通を行うために必要となるシステムや設備を整理した。
- ・地域熱供給システムの最適設計を検討するためのシミュレーションツールとして、熱移動と流体移動を同時に解析するプログラムを開発し、制御方法がポンプ動力（差圧と流量）に及ぼす影響を検討した。
- ・複数の建物で構成されるエリア内での電力融通を解析ができる時刻別のエネルギー収支に基づいた数値解析プログラムを作成した。これを用いて、系統電源への逆潮流ができない状況において、太陽光発電やエネルギー効率の高いコジェネレーションを有効活用するための導入設備とその制御の効果などについて検討した。

今後は、本研究で得られた成果を熱・電力融通を考慮した建物群の設計における基礎資料として設計事業者が活用していく。