

# 冷・温水の建物間カスケード利用システムの省エネ効果に関する研究

## STUDY ON ENERGY CONSERVATION OF INTER - BUILDING HEAT CASCADE USE SYSTEM

地域環境計画分野 浅田 雄樹

Division of Regional Environmental Planning Yuki Asada

業務ビルでのエネルギー消費全体の約四割を占める空調設備の省エネルギー化を目指し、複数建物間で負荷に応じて一次エネルギー消費量を最小化する運転制御を可能とする「建物間カスケード利用システム」を提案する。本研究では、本システムの導入による省エネルギー性について、咲州地区に導入した実証設備を模したシミュレーションモデルによるケーススタディを通じて明らかにする。結果として、熱源特性等の諸条件が本システムに与える影響を明らかにし、本システムの導入により最大 46%の一次エネルギー消費量を削減可能となった。

Inter-Building Heat Cascade Use System allow buildings to reduce primary energy consumption by changing the flow pattern depending on the Air-conditioning load. In this paper, we focused on its energy conservation, we build Inter-Building Heat Cascade Use System simulation model including control system. We do a case study using the simulation to explain its energy saving effect, and it is shown that this system can reduce energy about 21.7% in middle seasons and 34.2% in summer compared to discrete heat source system. Also, it is proved that cascade use is effective under low load because pump have a large effect on its energy consumption. And, Heat interchanging system allow buildings to reduce whole primary energy consumption because it can bring refrigerator down and put in effective action.

### 1. 研究背景・目的

#### 1.1 研究背景

民生業務部門の内、業務ビルで消費されるエネルギー全体の約 4 割を占める空調設備用エネルギーに着目すると、負荷に応じた最適な運転制御により省エネルギー化が期待できる。ここでは、空調設備の省エネルギー策として、建物間熱融通と冷水カスケード利用の二点を挙げる。建物間熱融通では、複数の個別熱源を融通配管で繋ぐことで、複数建物を一括して熱源機の台数制御を行う。さらに、効率の良い熱源機を優先的に選択可能すれば、省エネルギー化が高まるであろう。また、冷水カスケード利用では、熱の供給先である空調機をシリーズ化して、一度利用した冷水を再度利用することで、冷水流量を抑え搬送動力を低減できる。建物間熱融通の事例として、国土交通省の建物間熱融通普及マニュアルでは、「新横浜地区における三施設間熱融通」を紹介しており、施設の設備更新に合わせて三施設を熱導管で接続し、建物間で冷温熱を最適配分することにより、負荷の平準化、負荷率改善によるシステム効率向上が可能となっている。また、単独施設での冷水カスケード利用による省エネルギー効果も既往研究により実証されている。<sup>1)</sup>

以上を踏まえて、本研究では、建物間熱融通を採用し、これに加えてカスケード利用を用いた場合の効果について検討し、新たな双方向熱融通方法として「建物間カスケード利用システム」を提案する。

#### 1.2 建物間カスケード利用システム

建物間カスケード利用システムでは、個別熱源を持つ建物をループ配管に接続し、空調機の熱負荷状況に応じて、熱源及び搬送設備の特性からトータルの一次エネルギー消費量を最小にする熱搬送経路を構成可能とする。本システムにより、建物間熱融通による熱源機の台数削減効果、冷水カスケード利用による搬送動力低減効果が期待できる。しかし、負荷に応じた熱搬送経路の切り替えに伴う熱損失の発生が懸念される。

#### 1.3 研究目的

これまで、我々は熱パケット搬送システムに発生する熱損失に着目して研究を進めてきた。しかし、前システムは蓄熱槽を介した熱搬送を行うため、回路構築の制御が複雑であり、省エネ効果の試算を行えていなかった。そこで、本報告では、制御をより簡易化し、熱交換器を介した間接接続による建物間熱融通を行う本システムの省エネルギー性に着目し、シミュレーションによるケーススタディを通じて、以下の二点を明らかにする。

- ① 熱源特性、負荷条件等の諸条件が本システムの省エネルギー性に与える影響
- ② 空気条件、非定常損失も考慮に入れた本システムの省エネルギー効果

以上の 2 点より、従来の熱搬送システムと比較して本システムの優位性を示す。

## 2. 建物間カスケード利用システムモデルの概要

### 2.1 概要・目的

中央熱源方式で熱源台数制御をしていない二建物を対象として、本システムを導入した際の省エネルギー効果の定量的な把握を目的として、物理モデリングツール Dymola (以下、ツール) 上に制御システムを含めた建物間カスケード利用システムモデルを構築した (図 1)。本モデルは、咲州地区の実証設備を模しており、本システム構築に伴う機器類は全てツール上でモデル化されている。本報告では、LBNL により制作された Modelica Buildings Library 内に実装されている機器モデルを使用した。

### 2.2 本研究で想定する熱搬送パターン

本システムは、熱負荷状況に応じて熱源を選択し、エリアでの一次エネルギー消費量を最小とする熱搬送パターンを決定する。そこで、本研究では、熱搬送方法を個別熱源システム、建物間熱融通、建物間カスケード利用の 3 種類に、熱源や空調機の組み合わせを考慮して 5 種をフローパターンとして想定する。

#### ① N パタン (個別熱源システム 図 2)

N パタンは、各建物の熱源機が各自の空調機へと冷水供給を行う個別熱源システムである。主に、両建物の負荷が大きく一つの熱源機で負荷が賄えない時間帯の運転切替を想定する。

#### ② A パタン (建物間熱融通 図 3)

A-1 パタンは、熱源機 A から建物 A の空調機へと冷水供給すると同時に、ループ配管を通じて建物 W の空調機へと熱搬送する建物間熱融通システムである。主に、負荷が大きく、各空調機の温度差が大きい時間帯の運転切替を想定している。また、A-2 パタンは、A-1 パタンの逆で、建物 W から建物 A へと冷水供給するパターンである。

#### ③ B パタン (建物間カスケード利用 図 4)

B-1 パタンは、熱源機 A から建物 A の空調機へと冷水供給し、その二次冷水を建物 W の空調機へと熱搬送する建物間カスケード利用である。主に、負荷が小さく、各空調機の温度差が小さい時間帯の運転切替を想定している。また、B-2 パタンは、B-1 パタンの逆で、建物 W から建物 A へと冷水供給するパターンである。

本報告では、回路切替時に発生する熱損失を考慮に入れるため、熱搬送配管の内部温度により順次冷水を搬送する仕組みを構築する必要があった。そこで、先に述べたフローパターンを実現するため、図 5 に示すようなシーケンス制御ロジックをモデルに与えた。以下に、フロー図内の記号について示す。

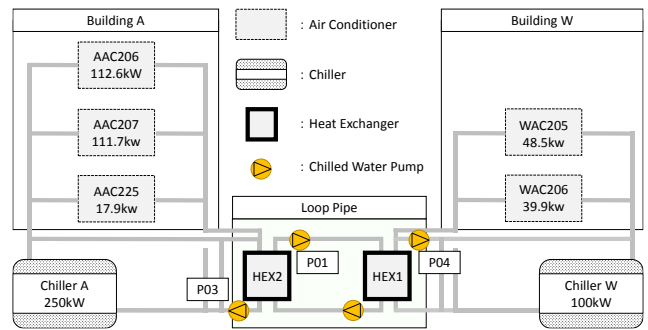


図 1 実証設備概要

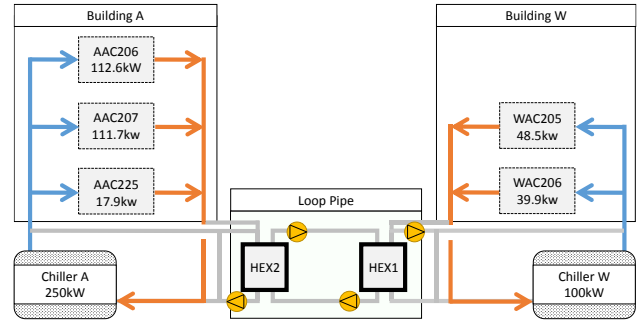


図 2 N パタン

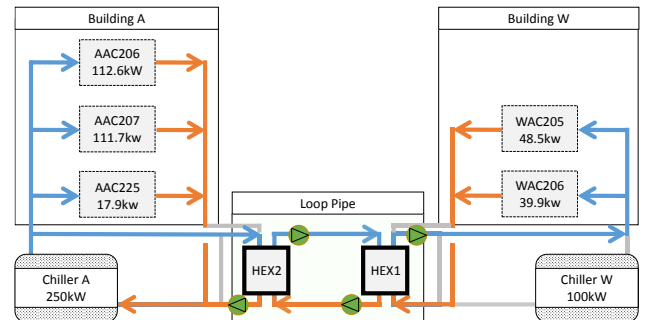


図 3 A パタン

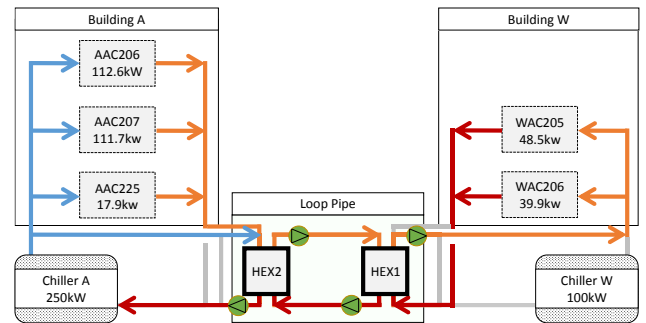


図 4 B パタン

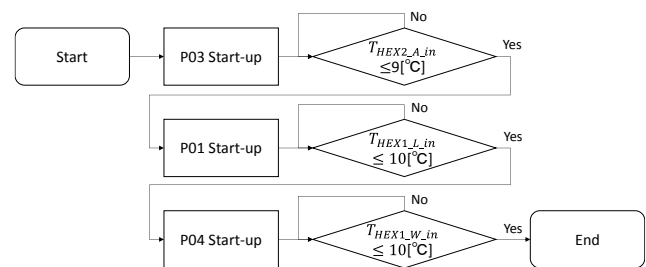


図 5 シーケンス制御ロジック (A-1)

$T_{HEX2\_A\_in}$  : HEX2 建物 A 側入口温度[°C],

$T_{HEX1\_L\_in}$  : HEX1 ループ側入口温度[°C],

$T_{HEX1\_W\_in}$  : HEX1 建物 W 側入口温度[°C]

### 3. 建物間カスケード利用システムの省エネ性

#### 3.1 概要

建物間カスケード利用システムの省エネルギー性と諸条件が本システムに与える影響について明らかにするため、前節で示したフローパタンモデルについてケーススタディを行い（表 1）、個別熱源システム（N パタン）に対して本システムによるエネルギー削減率を算出した。ここで、建物間カスケード利用システムでは前節で想定した 5 種のフローパタンから負荷に応じて最も省エネとなるものを選択する事とし、以下のステップでその決定を行った。

#### 3.2 フローパタン決定ステップ

##### ① 一次エネルギー消費量の算出（図 6）

想定した 5 つのフローパタンにおいて、1 分毎の一次エネルギー消費量を算出する。

##### ② 吹出し空気温度の確認（図 7）

建物間での熱搬送を行う A・B パタンに対して、空調稼働時に表 2 に示す吹出し空気設定温度を全ての空調機が満たす時間帯を抽出する。

##### ③ フローパタンの決定（図 8）

②において抽出した時間帯のうち、エネルギー削減率が最大となるフローパタンを選択する。なお、エネルギー削減率 $R_i$ は式 1 により計算する。

以上のステップから選択したフローパタンでの一次エネルギー消費量の累積値を本システムでの日積算一次エネルギー消費量とし、個別熱源システムでの同値と比較して、本システムの省エネルギー効果を把握する（図 9）。また、ケーススタディの比較を通じて、表 1 に示す三条件が本システムの省エネルギー性に与える影響を把握する。

表 1 ケーススタディ一覧

No.	① 冷房期間	② 熱源容量安全率	③ 熱源特性
case1	中間期	×1.2	ATC:ガス 咲洲庁舎:ターボ
case2	夏期	×1.2	ATC:ガス 咲洲庁舎:ターボ
case3	中間期	×1.0	ATC:ガス 咲洲庁舎:ターボ
case4	夏期	×1.0	ATC:ガス 咲洲庁舎:ターボ
case5	中間期	×1.4	ATC:ガス 咲洲庁舎:ターボ
case6	夏期	×1.4	ATC:ガス 咲洲庁舎:ターボ
case7	中間期	×1.2	ATC:ターボ 咲洲庁舎:ガス
case8	夏期	×1.2	ATC:ターボ 咲洲庁舎:ガス
case9	中間期	×1.2	ATC:ターボ 咲洲庁舎:ターボ
case10	夏期	×1.2	ATC:ターボ 咲洲庁舎:ターボ

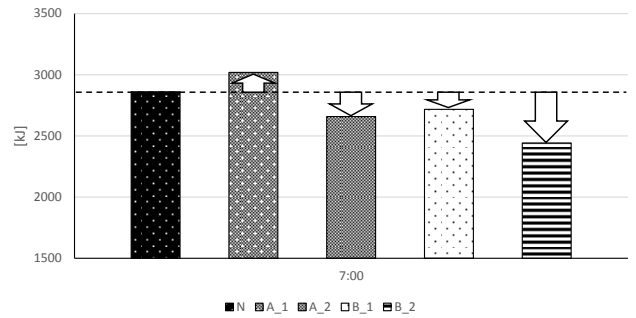


図 6 一次エネルギー消費量の算出 (case1 7:00)

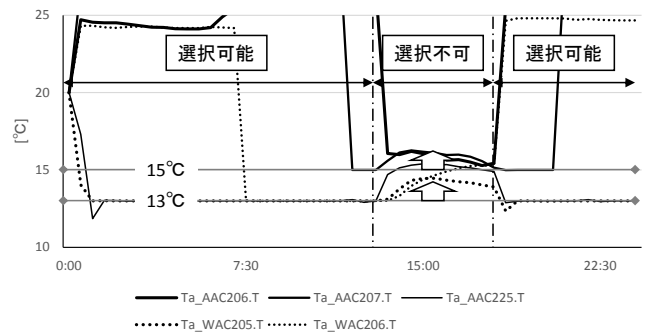


図 7 吹出し空気温度の確認 (case1)

表 2 吹出し空気設定温度

AC No.	冷房期間	吹出し空気設定温度
AAC206 AAC207	中間期	15°C
	夏期	13°C
AAC225 WAC205 WAC206	中間期	13°C
	夏期	11.5°C

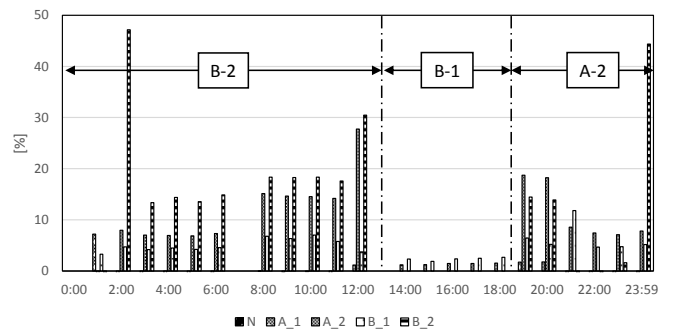


図 8 フローパタンの決定 (case1)

$$R_i = (P_N - P_i) / P_N \times 100 \quad \text{式 1}$$

$P_N$  : 一次エネルギー消費量 (N パタン) [kJ]

$P_i$  : 一次エネルギー消費量 (A・B パタン) [kJ]

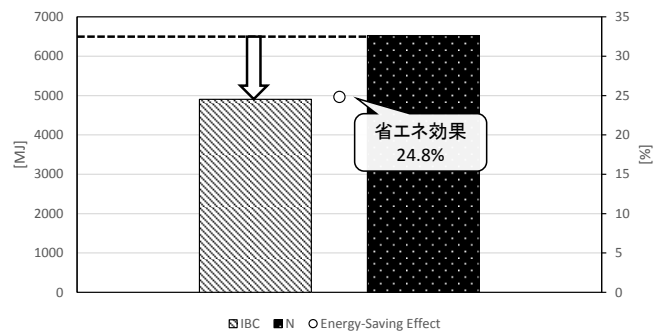


図 9 N パタンに対するエネルギー削減率 (case1)

### 3.3 負荷条件

咲州地区の実証設備での実測データを基に、図1に示した5台の空調機にスケジュールを与え、顕熱・潜熱負荷を区別するため、空気条件（室内温湿度、吹出し空気設定温度、風量）から得た空調負荷との組み合わせにより一日の負荷変動を表現した。すなわち、本研究では、室負荷ではなく、空調機負荷を条件として与えた。

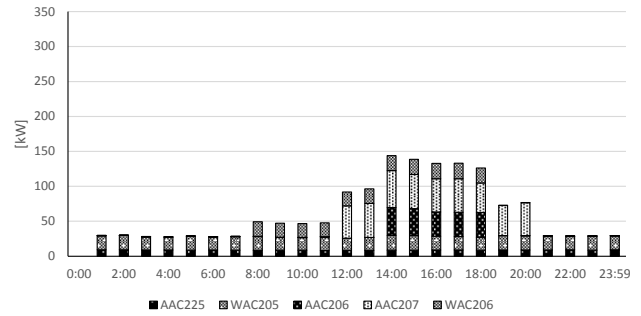


図10 負荷条件（中間期）

### 3.4 熱源特性

本検討での熱源容量は、図1に示すように各空調機の定格容量に合わせ、建物A・Wでそれぞれ250kW、100kWと設定した。また、熱源特性として、スクリー冷却機（水冷式-高効率、RS(CW)-XX2-303H(M)\_113）、吸収冷温水機（二重効用-1.4クラスRH-XX3-303H\_80-500、共に国土交通省官庁営繕開発のLCEMツールVer3.03より引用）の特性を使用した。また、本研究では、各熱源機に最低負荷率を設け、それ以下での部分負荷運転時には運転効率が一定となる条件とした。ここで、図12に示す特性は冷水往温度7℃、冷却水還り温度30℃であり、その条件でシミュレーションを行った。

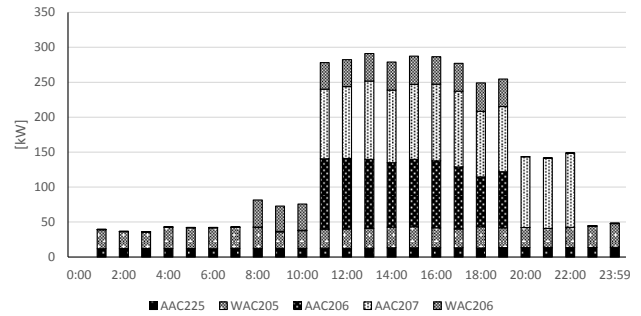


図11 負荷条件（夏期）

### 3.5 その他設備条件

#### ■ 配管

建物間での熱融通量は配管径に依存し、径が太いほど熱融通量が大きくなる。そこで、本研究では、双方向熱融通に対応するため、建物間を繋ぐループ配管は口径80Aとし、建物間距離は150mとした。また、配管材は配管用炭素鋼鋼管の物性値をモデルに与えた。ここで、シミュレーションでは、配管での圧力損失、配管材の熱容量を考慮した配管モデルを使用し、配管初期温度を20℃とした。

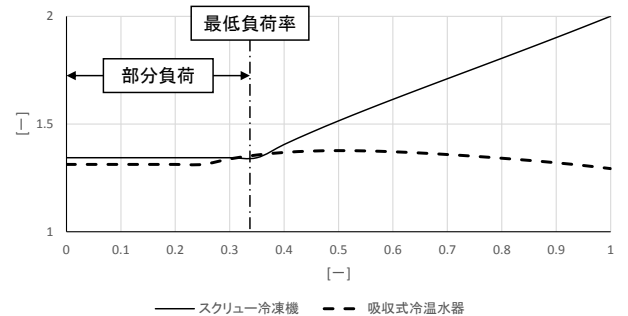


図12 熱源特性（負荷率-COP曲線）

表3 空調機 性能仕様

機器番号	風量 m <sup>3</sup> /h	能力 kW	冷水条件			機器抵抗 kPa
			入口 ℃	出口 ℃	流量 L/min	
AAC206	16800	113	6.5	13.5	230	20
AAC207	16200	112	6.5	13.5	229	20
AAC225	3600	18	6.5	13.5	37	10
WAC205	8200	49	6.5	13.5	99	30
WAC206	9000	40	6.5	13.5	82	30

表4 熱交換器 性能仕様

流体	伝熱面積 m <sup>2</sup>	交換熱量 kW	温度 ℃		流量 L/min	機器抵抗 kPa
			入口	出口		
高温側	59.5	242.2	14.5	7.5	496	31
低温側			6.5	13.5		

#### ■ 冷却コイル

本研究では、表3に示す定格能力をモデルで表現し、機器抵抗は実測値より計算した。

#### ■ 熱交換器

本研究では、建物間での熱融通に際し、建物間での圧力差を解消するため、熱交換器を隔てて熱のやり取りを行う間接接続を選択した。

#### ■ 冷水ポンプ

建物間での熱融通を行うため、熱源機周りの一次冷水ポンプに加え、熱交換器周りに二次冷水ポンプを各所に設置した。また、各冷水ポンプは全て図13に示す特性をモデルに与えた。

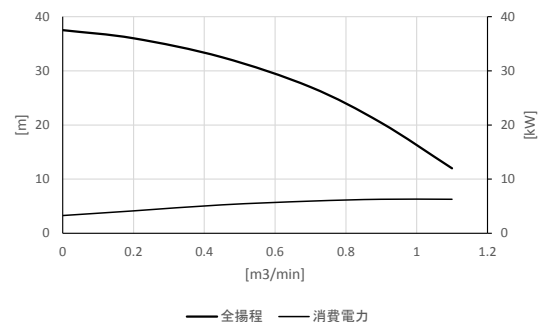


図13 冷水ポンプ特性

#### 4. 建物間カスケード利用システムによる省エネ効果

前節までに示した負荷・機器条件をツール上に構築した建物間カスケード利用システムモデルに与え、シミュレーションによるケーススタディを行った結果について示す。

図 14 より、中間期での省エネルギー効果は、case3 で最大 29.0%, case7 で最小 8.7% となり平均 21.7%、夏期での省エネルギー効果は case6 で最大 46.8%, case4 で最小 9.6% となり平均 34.2% のエネルギー削減が可能と確認した。ここで、中間期での省エネ効果が最大であった case3 について、詳細に分析する。

図に case3 でのフローパタンの推移を示す。右図より、B-2 (0:00 - 12:00) → B-1 (14:00 - 18:00) → A-2 (18:00 - 21:00) → B-2 (21:00 - ) と、負荷の大きさが違う時間帯でフローパターンを変更して、熱搬送を行っているのが分かる。ここで、各時間帯について、省エネルギー化になった要因を考察するため、熱源機及び冷水ポンプでのエネルギー消費を区別して分析を進める。

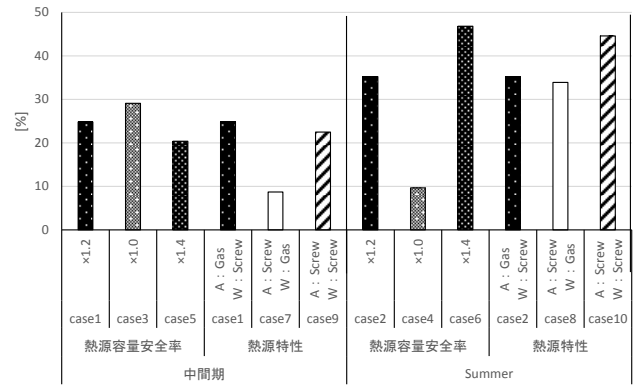


図 14 ケース別エネルギー削減率

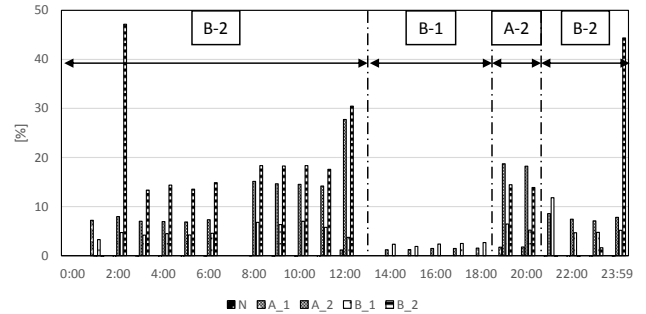


図 15 フローパタンの推移 (case3)

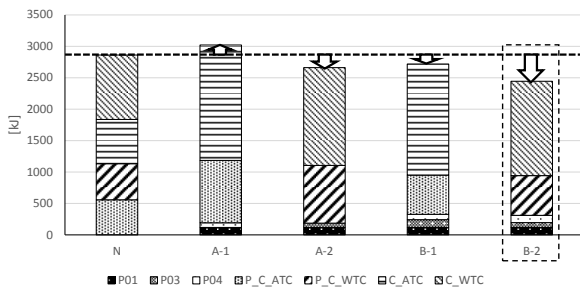


図 16 パタン別 一次エネルギー消費量比較(7:00)

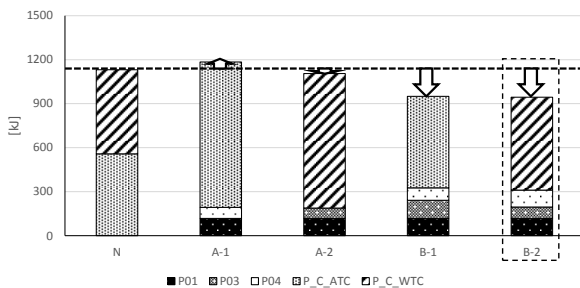


図 17 冷水ポンプ 一次エネルギー消費量比較(7:00)

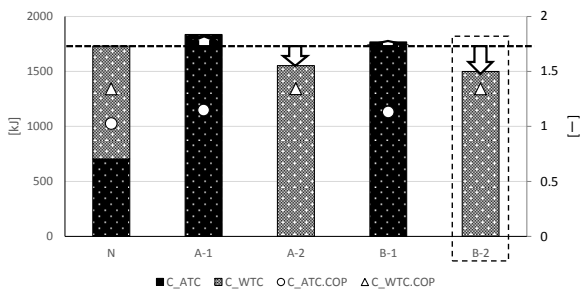


図 18 熱源機 一次エネルギー消費量比較(7:00)

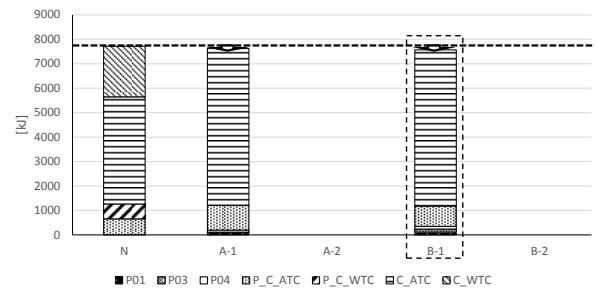


図 19 パタン別一次エネルギー消費量比較(15:00)

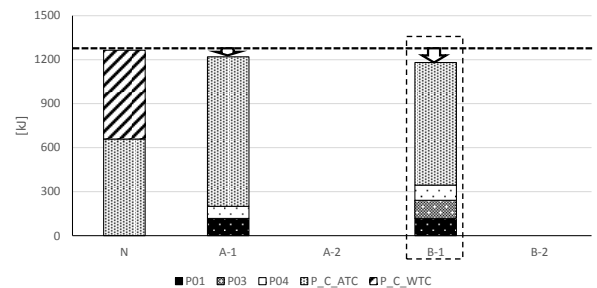


図 20 冷水ポンプ 一次エネルギー消費量比較(15:00)

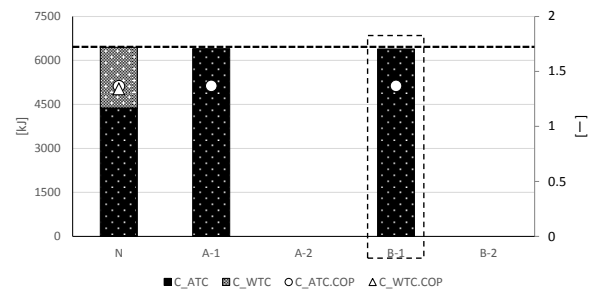


図 21 熱源機 一次エネルギー消費量比較(15:00)

図 16～18 より、低負荷時間帯(0:00 - 12:00, 21:00-)では、どちらの熱源機でも負荷を賄えるため、建物 W に導入している高効率熱源機が選択され、また、冷水カスケード利用により搬送動力が低減されたことから省エネルギーになると確認できた。

図 19～21 より、高負荷時間帯(14:00 - 18:00)では、建物間熱融通による熱源機の台数制御が負荷率向上に繋がり、建物 A・W の熱源機の運転効率が凡そ同値になったため、低負荷時間帯とは異なり熱源機でのエネルギー消費に大きな差はなくなった。また、熱源機の台数制御に伴い、冷水ポンプの台数が削減され、かつ、冷水カスケード利用により搬送動力も低減できたため、省エネルギーとなると確認できた。

図 22～24 より、比較的負荷が大きい時間帯(18:00 - 21:00)では、建物 W に導入している高効率熱源機が選択され、建物間熱融通による熱源機の台数制御が負荷率向上に繋がり、運転効率 2.0 と高い値で高効率熱源機が稼働している。また、建物間カスケード利用では、冷水搬送に二次冷水ポンプを使用しており、その差が A-2 パタンの選択に寄与した。

また、図 25 よりフローパターンが固定していた場合、本システムの一日常たりの一次エネルギー消費量と比較すると、case3 では B-1 パタン固定の場合と比較して 1800MJ の差が生まれ、フローパターンによっては N パタンより増エネになる可能性もあることを確認した。以上より、負荷に応じて回路を切替える本システムの優位性を確認した。

最後に、図 14 よりケース別に比較すると、case1,3,5 の比較により、熱源容量安全率が小さくなると、中間期の比較的負荷が大きい時間帯(18:00 - 21:00)では高効率熱源機が高負荷で稼働し、運転効率が向上するため省エネルギーになる。また、case2,4,6 の比較により、安全率が大きくなると、夏期の高負荷時間帯(10:00 - 19:00)においても建物間熱融通が可能になるため、熱源機の台数削減やそれに伴う補機動力の低減が可能になり省エネルギー化に繋がる。

さらに、建物別の負荷バランスが悪い本検討では、case1,7,9 の比較により空調容量の小さい建物に高効率熱源機を導入する事で、中間期の比較的負荷が大きい時間帯(18:00 - 21:00)では高効率熱源機による建物間熱融通の効果が出やすいと確認した。

## 5. まとめ

(1) 二建物において、本システムを導入した際の省エネルギー効果の定量的な把握を目的として、制御システムを含めた建物間カスケード利用システムモデルを構築した。

(2) 構築モデルを利用したケーススタディにより、フローパターンが固定していた場合より、省エネルギーになることを確認し、負荷に応じて回路を切替える本システムの優位性を確認した。

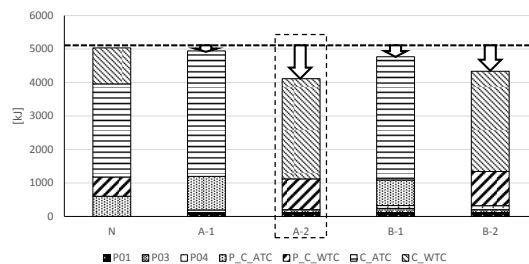


図 22 パタン別 一次エネルギー消費量比較(20:00)

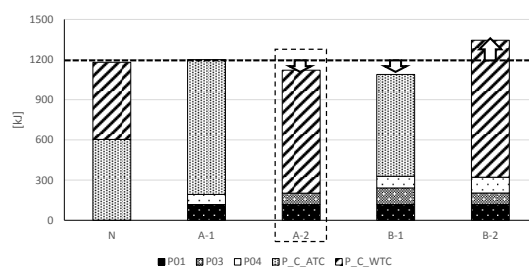


図 23 冷水ポンプ一次エネルギー消費量比較(20:00)

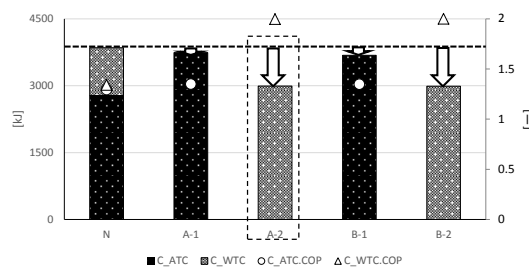


図 24 熱源機 一次エネルギー消費量比較(20:00)

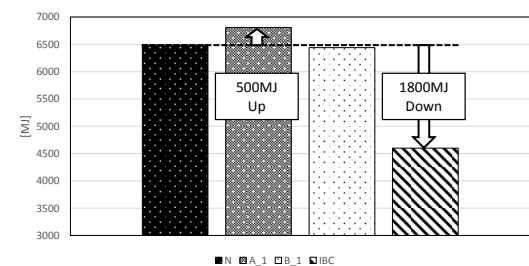


図 25 パタン別日積算一次エネルギー消費量比較

### 【参考文献】

1) 篠島隆司ほか、イオンモール草津の空気調和設備、空気調和・衛生工学第 85 巻、2011 年 7 月

### 【あとがき】

本研究は、平成 26 年度環境省地球温暖化対策技術開発・実証研究事業「既存熱源・電源を自立・分散型エネルギー化し鉄道網を利用した地域融通エネルギーシステムの開発」(代表: 中尾正喜)の一環で行ったものである。

### 【謝辞】

本研究を行うにあたりご協力賜った大阪市立大学都市エネルギー研究開発センターの長廣剛氏に感謝の意を表します。

## 討議

### 討議[西岡真稔教授]

建物間カスケード利用システムでの非定常熱損失は計算上に考慮に入れているのか。また、その大きさは。

#### 回答

回路切り替えに伴う熱損失として、放熱損失、配管材の熱容量由来の熱損失を考慮している。また、その大きさについて、1時間の冷水供給に対して、熱損失が1%未満と非常に小さい。

### 討議[重松孝昌教授]

搬送経路での曲りの影響は考慮しているか？

#### 回答

熱損失については考慮していないが、浅田卒業論文（2013年）において、曲り部分での熱損失は小さく、配管熱容量が最も大きいと明らかにした。また、配管抵抗については考慮しており、継ぎ手比率を100%とし、ダルシーワイズバッハの式から計算できる直管抵抗の2倍と仮定して計算した。

### 討議[鍋島美奈子教授]

建物間カスケード利用だけの効果はなにか？

#### 回答

建物間カスケード利用では、建物間での熱融通に伴う熱源機の台数削減及び高効率熱源機を選択運転とカスケード利用による搬送動力低減の2種の省エネ効果が挙げられる。

図17を見ると、A-2パターンと比較して、冷水ポンプでの一次エネルギー消費量が小さくなっており、これはカスケード利用による搬送動力低減効果である。また、図18を見ると、Nパターンと比較して、熱源機での一次エネルギー消費量は小さくなっており、これは高効率熱源機を選択運転によるものである。