

建築物環境衛生管理における空気調和設備等の適切な運用管理手法の研究
空調設備の地域性と省エネルギーの影響に関する分析

研究分担者 菊田 弘輝 北海道大学 大学院工学研究院 准教授

研究要旨

空調設備の地域性と省エネルギーの影響に関する分析において、個別熱源、中央熱源、ハイブリッド方式において、データベースに基づく機器選定後の熱源機器容量等（設計時、実態）を分析し、比較した。また、個別熱源方式をベースとした上で、シミュレーションに基づく空調用の一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量（運用時、計算）を計算し、比較した。

得られた知見を以下に示す。1. 空気調和設備のエネルギー消費性能が向上するにつれて冷暖房ごとの熱源機器容量が小さく、個別熱源は中央熱源に比べて熱源機器容量が大きくなる傾向がある。2. 中央熱源方式は個別熱源方式に比べて約 45%の増加に対し、主に搬送系の削減に伴い、ハイブリッド方式は個別熱源方式に比べて約 15%の増加に抑えられる。3. 同じ年間熱負荷の基で、個別熱源方式における APF、省エネルギー手法による削減率を段階的に示し、札幌では特に全熱交換器、東京と那覇では他にも外気冷房システムが省エネルギー化に繋がることが確認された。4. カーボンニュートラルの観点から、個別熱源方式における電力主体とガス主体の一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量を示し、特に札幌は冷熱源に電力、温熱源にガスを選択することで、さらなる省エネルギー効果が期待できる。5. 北海道と沖縄を除く 45 都府県の県庁所在地を対象とした個別熱源方式において、トップランナーの温暖地仕様であれば、空調用で 200MJ/(m²・年)前後に抑えられる。

A. 研究目的

2050 年カーボンニュートラル実現に向けて、2030 年度以降新築される住宅・建築物について、ZEH・ZEB^{注1)}水準の省エネ性能を確保するとの政府目標が掲げられている。それにより、2024 年度以降、適合義務化が先行している大規模非住宅建築物（延床面積 2,000 m²以上）について、各用途の省エネ基準への適合状況等を踏まえ、BEI^{注2)}を 0.75~0.85 に引き上げられる。

BEIm[≒]1.0(23 件)と BEIm[≒]0.8(191 件)を比較した関連資料¹⁾によると、「事務所等(6 地域)の BEIm に与える影響が大きい設備は、空調設備と照明設備。空調の定格熱源能力と定格熱源効率、照明の定格消費電力に差異がある」と示されている。そのため、今後も段階的に引き上げられる基準を達成することと同時に、

多岐にわたるメリットやデメリットを総合的に判断した上で、適切かつ合理的に空調システムを設計しなければならない。

それに関連し、オフィスビルの設計経験がある機械設備設計者を対象に実施した「熱源・空調設備の設計に関するアンケート調査」²⁾の中で、空調システム^{注3)}の決定で重視する項目（上位 5 つまで回答、有効回答 164 件）が示されている。その調査結果（図 1）によると、中央熱源では、環境負荷の低減を重視している設計者が最も多い。一方、個別熱源では、イニシャルコストの削減、メンテナンス・機器更新への配慮を重視している設計者が多く、機器の操作性、省スペース性については、中央熱源に比べて非常に多くなっている。

以上のことから、空調システムの決定要因となりうるコスト、メンテナンスの重要性を考慮する

と、さらなる増加が見込まれる個別熱源において、地域性と省エネルギーの影響に関する分析が必要である。そこで、個別熱源、中央熱源、ハイブリッド方式の傾向の違いとして、データベースに基づく機器選定後の熱源機器容量等（設計時、実態）を分析し、比較することを目的とする。また、個別熱源方式をベースとした上で、シミュレーションに基づく空調用の一次エネルギー消費量とCO₂排出量（運用時、計算）を計算し、比較することを目的とする。

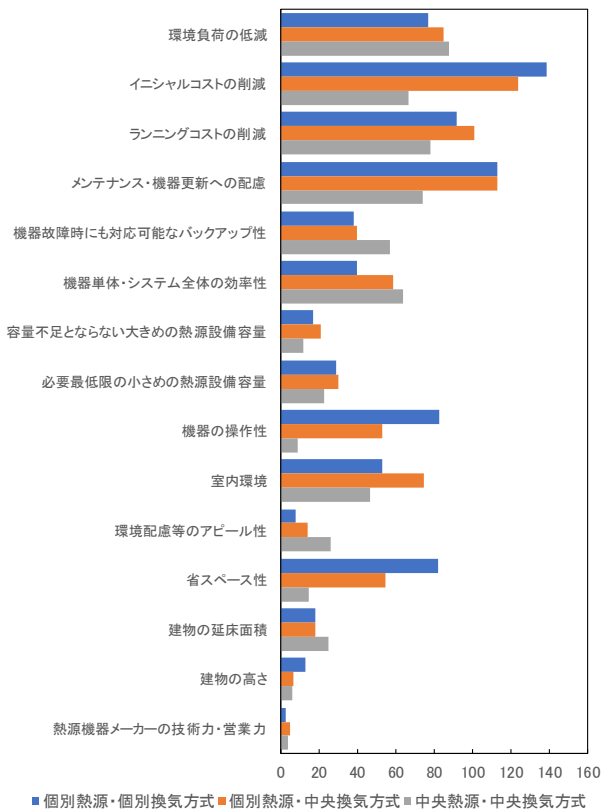


図1 空調システムの決定で重視する項目

B. 研究方法

B1. データベース

最新の竣工設備データとして、2017年9月から2023年2月までの空気調和・衛生工学会のA&Sデータを用いる。その際、新築で主に事務用途に該当する110件を対象とする。

B2. シミュレーション

B2.1. 計算方法

空調用の一次エネルギー消費量を計算するにあたり、その前提となる熱負荷計算は、SHASE-S 112-2019「冷暖房熱負荷簡易計算法」³⁾に準拠する。一次エネルギー消費量計算は、“旧省エネ法”のCEC-ACの計算方法である“全負荷相当運転時間(EFH)法”の計算方法に準拠して、個別熱源方式と中央熱源方式に分けて、計算を行う。本計算法で評価可能な各種省エネルギー手法は、“効果率”に基づき、各項目で評価を行う(表1)。また、APFは地域補正を行う。

表1 計算方法の概要

空調方式	項目	評価対象	計算方法の概要
個別熱源方式	冷房熱源システム消費エネルギー	ビルマルチの室内機及び室外機	評価対象範囲のAPFを入力して、年間熱負荷/APF×(1-効果率)×採用率で計算する。APFは地域により補正を行う。
	暖房熱源システム消費エネルギー	ビルマルチの室内機及び室外機	
中央熱源方式	冷房熱源システム消費エネルギー	熱源機、冷却塔、冷却水ポンプ、1次側冷水ポンプ等	評価対象範囲のシステムCOPを入力して、年間熱負荷/システムCOP×(1-効果率)×採用率で計算する。効果率は空調システム側(外気冷房等)の項目が対象となる。
	暖房熱源システム消費エネルギー	熱源機、1次側温水ポンプなど	
	冷水搬送動力	2次側冷水ポンプ	ポンプ定格容量×EFH×(1-効果率)×採用率
	温水搬送動力	2次側温水ポンプ	採用率
	空調機搬送動力	空調機	ファン定格容量×EFH×(1-効果率)×採用率
	FCU動力	FCU等	動力定格容量×EFH×(1-効果率)×採用率

B2.2. 計算モデル

標準的な中規模事務所のモデルとして、6階建て、基準階は滝沢博「標準問題の提案(オフィス用標準問題)」⁴⁾を参考とする(図2)。



図2 計算モデル

B2.3. 計算条件

B2.3.1. 地域

札幌、東京、那覇を対象とし、札幌は寒冷地仕様、東京は温暖地仕様、那覇は蒸暑地仕様を標準とする。

B2.3.2. 建物条件

延床面積は 4,000 m²、その他エネルギー^{注4)}は 5%とする。外壁 U 値、ガラス仕様（窓タイプ、ガラス種、ブラインド）については、トップランナー相当の高断熱または高遮熱の仕様をそれぞれ設定し、その他に窓面積率やひさしの設定も含めて既往研究⁵⁾を参考とする。

B2.3.3. 室内条件・空調条件

室内温度は冷房 26℃、暖房 22℃とする。内部発熱は照明容量 10W/m²、コンセント容量 15W/m²、在室人員 0.2W/m²とする。暖房予熱時間は 1 時間、外気量は 6 m³/(m²・h) (30 m³/(h・人)想定)、全熱交換効率 は 60%とする。

B2.3.4. ゾーン設計条件

ゾーンは北、東、南、西のペリメータ、中央のインテリアとし、中間階 5 層、最上階 1 層とする。空調方式は個別熱源方式の場合にはペリメータ、インテリアともに PAC とする。一方、中央熱源方式の場合にはペリメータを FCU、インテリアを AHU とし、ハイブリッド方式の場合にはペリメータを PAC、インテリアを AHU とする。

B2.3.5. 省エネルギー手法の設定

個別熱源方式の場合は APF、中央熱源方式の場合は COP（冷熱源、温熱源）を設定する。また、基準とする省エネルギー手法のそれぞれの採用率を以下に示す（表 2）。

表 2 採用率(基準)

省エネルギー手法	定義	採用率
VWV システム	冷房+暖房搬送ポンプへの採用割合	100%
VAV システム	冷房+暖房搬送ファンへの採用割合	100%
外気冷房システム	冷房容量合計における採用割合	0%
予熱時シャットオフ	暖房容量合計における採用割合	100%
最小外気制御システム	冷房+暖房容量合計における採用割合	0%
全熱交換器システム	冷房+暖房容量合計における採用割合	100%

C. 研究結果

C1. 分析結果

建物規模ごとの熱源方式を示す（図 3）。個別熱源が全体の約 7 割を占め、中小規模の建物で多く採用されている。そこで、6 地域で BEI^{注2)}、空調面積、熱源機器容量のデータが全て揃う 65 件を対象とし、BEI/AC, BEIm/AC と機器選定後の空調面積当たりの熱源機器容量を示す（図 4）。

データの件数自体に差があるものの、いずれの熱源方式においても、空気調和設備のエネルギー消費性能が向上するにつれて冷暖房ごとの熱源機器容量が小さくなっていることが傾向として伺える。その上で、熱源方式の違いとしては、個別熱源は中央熱源に比べて熱源機器容量が大きくなる傾向がある。また、冷房優先で機器が選定されることで、特に暖房時の低負荷運転^{注5)}による効率低下が懸念される。しかし、個別熱源では、屋外機の台数分割、複数の圧縮機の搭載等の工夫がなされた熱源機器の採用等、省エネ性能の向上に繋がる高効率な運転が可能となるため、熱源機器容量が全体的に大きくなっている可能性が考えられる。

それに対し、中央熱源では複合用途であることが大きく影響し、冷房と暖房でそれぞれ機器選定が行われる場合、両者間で熱源機器容量に開きがみられる。なお、該当する 2 件で共通する熱源方式は遠心冷凍機、吸収冷凍機または冷温水機である。次にハイブリッド方式をみると、標準入力法の BEI/AC が特に低い 3 件は ZEB に相当する BEI であることから、個別熱源と中央熱源の特徴を踏まえ、徹底的に省エネルギー化が図られていると考えられる。ちなみに、共通する熱源・空調方式は空冷パッケージ及びルームエアコン・パッケージユニット方式の組合せ、空気熱源ヒートポンプチラー・放射空調（天井）の組合せである。

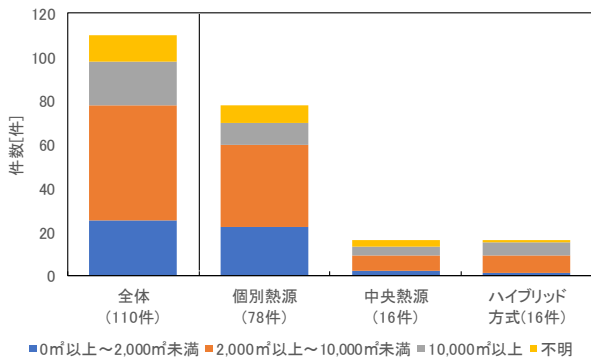
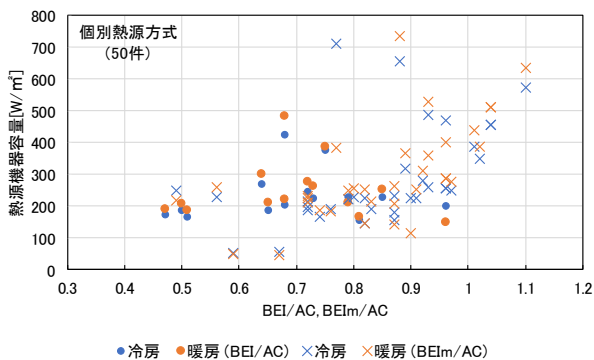
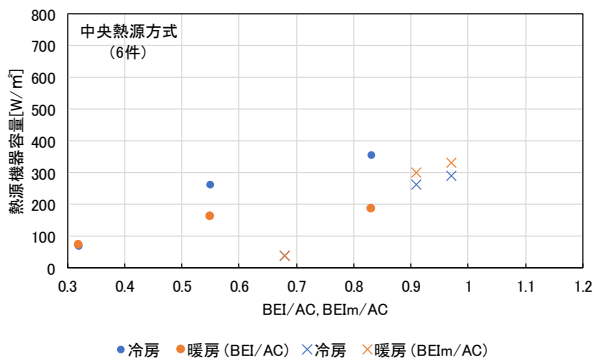


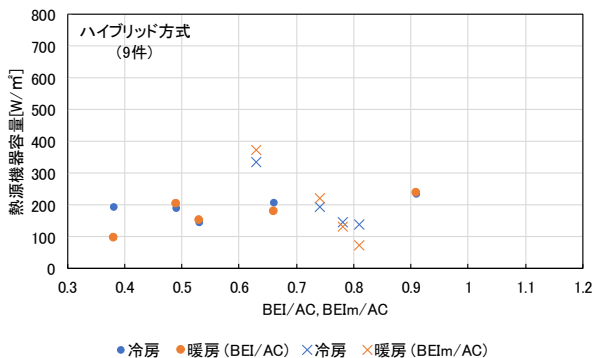
図3 建物規模ごとの熱源方式



a)個別熱源



b)中央熱源



c)ハイブリッド方式

図4 BEI/AC, BEIm/ACと機器選定後の空調面積当たりの熱源機器容量(6地域)

C2. 計算結果

C2.1. 比較項目

計算結果に関する比較項目を示す(表3)。

表3 比較項目

項目	ベース	比較
熱源構成	個別	中央 ハイブリッド
APF	1.0	0.7 1.4
省エネルギー手法	基準	(基準から減) 予熱時シャットオフ 全熱交換器システム (基準から増) 外気冷房システム 最小外気制御システム
エネルギー構成源	電力	ガス (併用)
45都市(参考)	東京	県庁所在地(北海道、沖縄を除く)

C2.2. 熱源構成比較

データベースの研究を踏まえ、個別熱源方式と中央熱源方式に加え、ハイブリッド方式に係る熱源構成比を変更することで、熱源方式ごとの空調の一次エネルギー消費量に与える影響について示す(図5)。なお、特筆ない限りAPF、COPは1.0と仮定する。中央熱源方式の場合、全体の1/3以上を占めることになる搬送系が含まれることで、個別熱源方式よりも一次エネルギー消費量が大幅に増加している。その結果、個別熱源方式は中央熱源方式に比べて省エネルギー効果は約45%削減であることが確認された。

札幌の場合、冷房負荷と暖房負荷が $350\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 前後で概ね一致しているが、APFの地域補正により暖房時の効率低下が影響し、PAC冷房よりもPAC暖房が大きく上回っている。一方、東京や那覇の場合、冷房負荷が主体的であるため、新たに外気冷房システムを採用することで、特に札幌と東京の差は小さくなると考えられる。

一方、個別熱源方式のPACはペリメータ(基準階 787m^2)、中央熱源方式のAHUはインテリア(基準階 428m^2)で、それぞれの対象範囲の規模が異なること、中央熱源方式の搬送系が大幅に削減されること等に伴い、ハイブリッド方式は個別熱源方式に比べて札幌で11%、東京で19%、那覇で18%上回っている程度である。参考までに、空調及び熱源システム全体で評価した効率を示す(表4)。

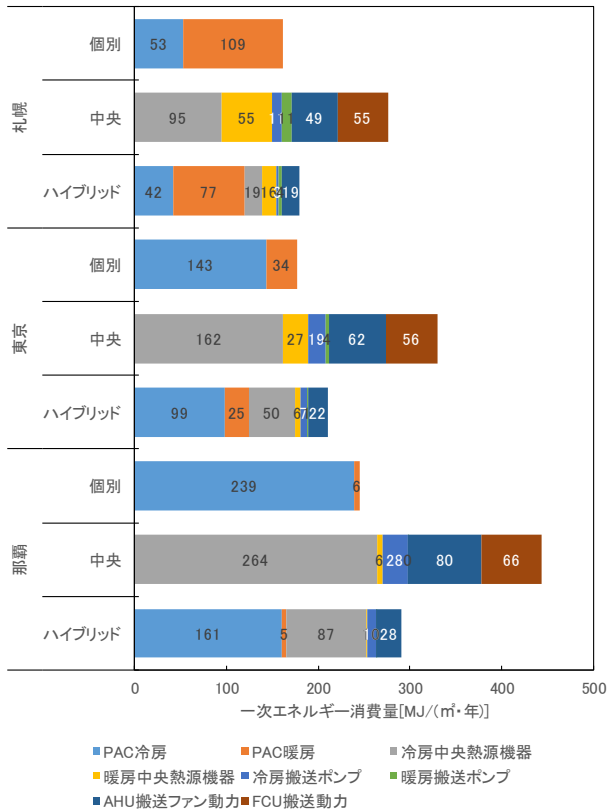


図5 一次エネルギー消費量(熱源構成比較)

表4 SCOP

地域	熱源方式	空調システム全体	熱源システム全体
札幌	個別	1.12	1.12
	中央	0.66	1.22
	ハイブリッド	1.01	1.18
東京	個別	1.32	1.32
	中央	0.71	1.23
	ハイブリッド	1.11	1.29
那覇	個別	1.37	1.37
	中央	0.76	1.25
	ハイブリッド	1.16	1.33

C2.3. APF 比較

個別熱源方式における APF 毎の空調用の一次エネルギー消費量を示す(図6)。APF が 0.7 上昇(0.7→1.4) することで、札幌では PAC 暖房、東京・那覇では PAC 冷房の大幅な削減が期待できることが分かる。また、空調システム全体で評価した場合、SCOP は札幌で 0.79 上昇、東京で 0.92 上昇、那覇で 0.96 上昇し、システムの効率化に繋がることが確認された。

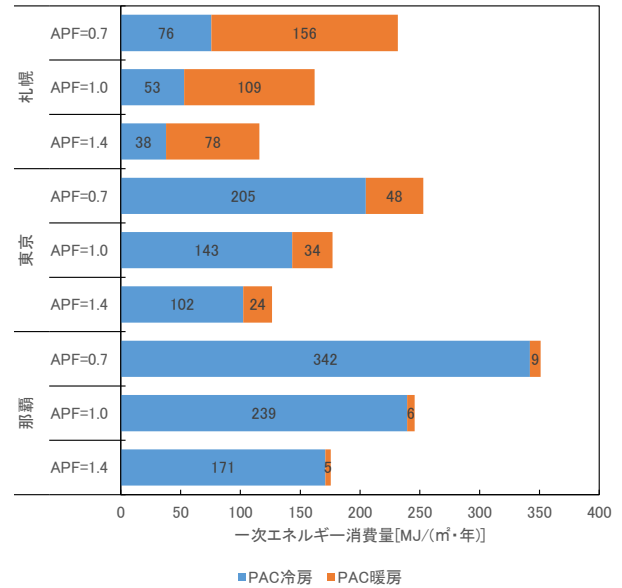


図6 一次エネルギー消費量(APF 比較)

C2.4. 省エネルギー手法比較

同じ年間熱負荷の基で、基準とする省エネルギー手法から外気冷房システム、最小外気制御システムを増やし、合わせて基準から全熱交換器、予熱時シャットオフを減らした際の影響について示す(図7)。

札幌では寒冷地仕様とはいえ、基準における PAC 暖房の割合が主体的である分、仮に熱回収が可能な全熱交換器を導入せず、1 時間にわたる暖房予熱時に外気を取り入れることで、一次エネルギー消費量の大幅な増加に繋がっているため、これらは有効な省エネルギー手法として位置付けられる。一方、基準からの追加による省エネルギー効果は 16%削減に留まっている。

それに対し、一次エネルギー消費量自体は東京と那覇で大きく異なっているが、省エネルギー手法による削減率としては、概ね同様の傾向を示している。特に PAC 冷房の割合が主体的である分、外気冷房システム等により基準に対して 30%削減が期待できることが分かる。

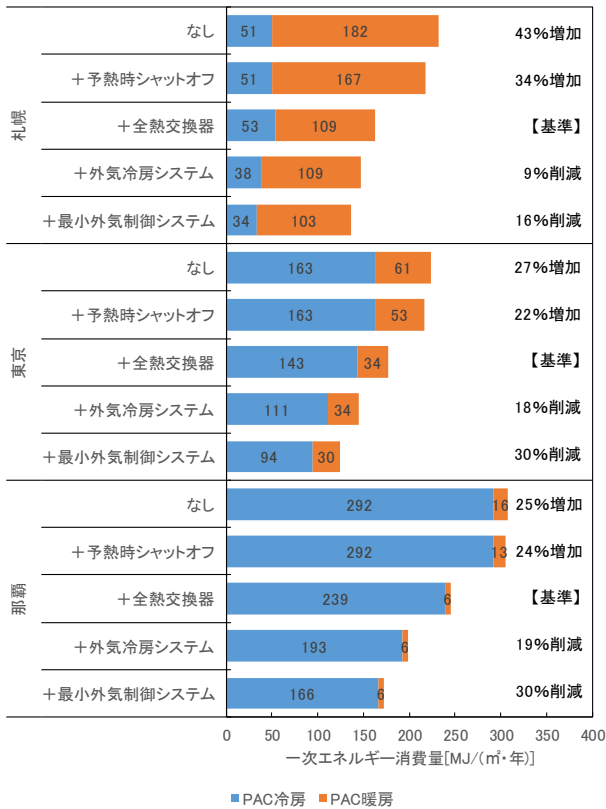


図7 一次エネルギー消費量(省エネルギー手法比較)

C2.5. エネルギー源構成比較

カーボンニュートラルの視点から、電力・都市ガスに係るエネルギー源構成比を変更することで、個別熱源方式における空調用の一次エネルギー消費量とCO₂排出量に与える影響について示す(図8、9)。電力のCO₂排出係数は電力会社^{注6)}によって異なるが、ここでは0.555kg-CO₂/kWhのデフォルト³⁾を使用する。また、ガスの換算係数は0.0506t-CO₂/GJである。

電力主体からガス主体へ変更することで、札幌ではPAC冷房は増加、PAC暖房が減少している。熱源となるEHPは電気モーター、GHPはガスエンジンを使用してコンプレッサーを動かしているため、暖房時に排熱を利用できるGHPの方が一般的に高効率となる。そのため、結果的に一次エネルギー消費量で16%削減、CO₂排出量で24%削減に繋がっている。また、仮に冷熱源を電力、温熱源をガスで併用した場合には113MJ/(m²・年)となるため、さらなる省エネルギー効果が得られる

可能性がある。

一方、東京と那覇ではPAC暖房の割合が少ない分、一次エネルギー消費量では電力主体とガス主体の違いはみられず、PAC冷房が若干増加している程度である。それにより、全体でガスが電力に比べて東京で5%、那覇で3%の増加となるのに対し、CO₂排出量では逆に東京で6%、那覇で7%の減少となることが確認された。

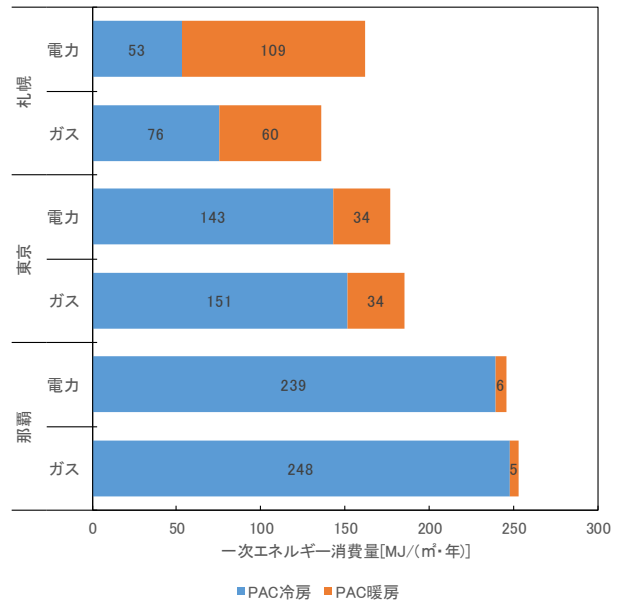


図8 一次エネルギー消費量(エネルギー源構成比較)

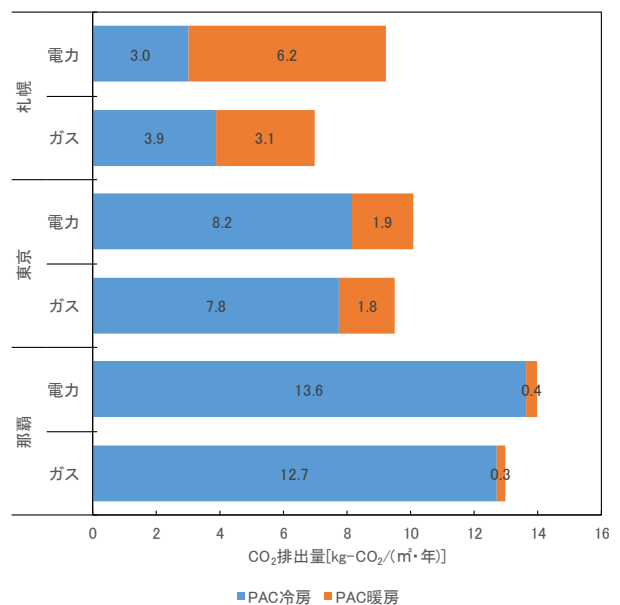


図9 CO₂排出量(エネルギー源構成比較)

C2.6. 45 都市比較

参考までに、東京と同じトップランナーの温暖地仕様とした上で、45 都市の個別熱源方式における空調用の一次エネルギー消費量を示す (図 10)。

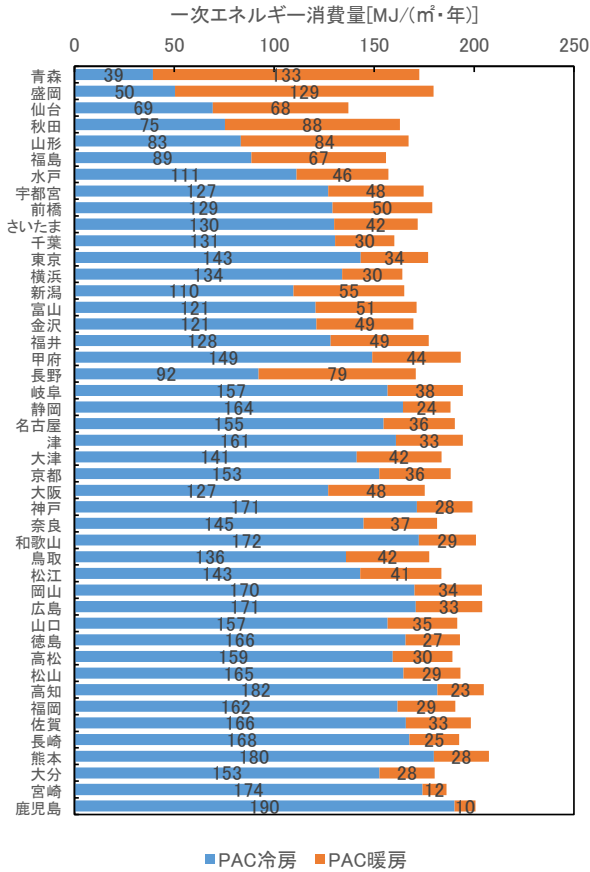


図 10 一次エネルギー消費量(45 都市比較)

D. 結論

空調設備の地域性と省エネルギーの影響に関する分析により得られた知見を以下に示す。

1. 空気調和設備のエネルギー消費性能が向上するにつれて冷暖房ごとの熱源機器容量が小さく、個別熱源は中央熱源に比べて熱源機器容量が大きくなる傾向がある。
2. 中央熱源方式は個別熱源方式に比べて約 45%の増加に対し、主に搬送系の削減に伴い、ハイブリッド方式は個別熱源方式に比べて約 15%の増加に抑えられる。
3. 同じ年間熱負荷の基で、個別熱源方式における APF、省エネルギー手法による削減率を

段階的に示し、札幌では特に全熱交換器、東京と那覇では他にも外気冷房システムが省エネルギー化に繋がることが確認された。

4. カーボンニュートラルの観点から、個別熱源方式における電力主体とガス主体の一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量を示し、特に札幌は冷熱源に電力、温熱源にガスを選択することで、さらなる省エネルギー効果が期待できる。
5. 北海道と沖縄を除く 45 都府県の県庁所在地を対象とした個別熱源方式において、トップランナーの温暖地仕様であれば、空調用で 200MJ/(m²・年)前後に抑えられる。

<注釈>

注1) ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス、ネット・ゼロ・エネルギー・ビルの略称である。

注2) 建築物全体のエネルギー消費性能で、設計一次エネルギー消費量を基準一次エネルギー消費量で除した値である。

計算方法：詳細な評価方法の標準入力法 (BEI)、簡易な評価方法のモデル建物法 (BEIm)

設備別：空気調和設備 (AC)、機械換気設備 (V)、照明設備 (L)、給湯設備 (HW)、昇降機 (EV)

注3) ①個別熱源・個別換気方式 (例：パッケージ型空調機・熱交換換気)、②個別熱源・中央換気方式 (例：パッケージ型空調機・外気処理空調機)、③中央熱源・中央換気方式 (例：吸収式冷温水発生機・外気処理空調機) を対象とする。

注4) ゾーン設計で対象とする室以外のゾーン (廊下やエントランス、社員食堂等) のエネルギー消費量割増しを指す。

注5) 定格能力に対する負荷率が低い状態での運転である。

注6) 温対法に基づく 2021 年度の調整後排出係数は、北海道電力 0.533、東京電力 0.452、沖縄電力 0.706kg-CO₂/kWh である。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

<参考文献>

- 1) 建築物エネルギー消費性能基準等ワーキンググループ・建築物消費性能基準等小委員会：大規模非住宅建築物の省エネ基準の引き上げについて，国土交通省，2022.6.29
- 2) 菊田弘輝，阿部佑平，江藤優太，澤地孝男：熱源機器容量の適正化に向けたオフィスビル設計の実態調査 その1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学，2023.9(投稿済み)
- 3) 標準化委員会 冷暖房熱負荷簡易計算法改定小委員会：SHASE-S 112-2019「冷暖房熱負荷簡易計算法」，空気調和・衛生工学会，2019
- 4) 滝沢博：標準問題の提案（オフィス用標準問題），日本建築学会環境工学委員会熱分科会第15回シンポジウム，1984
- 5) 菊田，石野，郡ら：冷暖房熱負荷の簡易計算法に関する研究（その3）実験計画法による各種熱負荷の推定法，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.9-12，2018.9