

事務所ビルにおける冷暖房システムの エネルギー利用過程とエクセルギー消費

平野 勇二郎¹・井村 秀文²・川田 哲郎³・吉田 友紀子⁴

¹正会員 名古屋大学研究員 大学院環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: hirano@urban.env.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学教授 大学院環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³群馬大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

⁴国立環境研究所社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

京都議定書の第一約束期間の2年目に入り、温室効果ガス削減のために省エネルギーはますます重要課題となってきた。本研究では事務所ビルにおける冷暖房エネルギーについて、エネルギー消費量だけでなくエネルギーの質的な浪費についても把握するため、エネルギーとエクセルギーを算定し評価した。この結果、室内に供給されたエクセルギーは化石燃料に対して冷房は1.5~3 %, 暖房は5~6%程度となっており、わずかなエクセルギーしか有していないことが示された。この結果は、冷暖房の分野において今後の技術開発による省エネルギーの余地が非常に大きいことを示唆している。

Key Words : energy saving, exergy efficiency, office building, air-conditioning

1. はじめに

京都議定書の第一約束期間の2年目に入った。従前より省エネルギーは重要課題であったが、いよいよ実効性のある対策が求められる段階となってきた。しかしながら、増え続ける民生部門のエネルギー消費量に歯止めをかける方策は未だに見出せていない。京都議定書による日本の温室効果ガスの削減目標は1990年比で-6%であるが、現状ではこの目標達成は非常に厳しい状況にあると言わざるを得ず、早急に今まで以上に踏み込んだ対策が必要である。さらに気候変動枠組条約締約国会議(COP)ではポスト京都議定書についての交渉も進められており、今後は中長期的な見通しの下に都市・建築スケールでのエネルギー利用の効率化を図ることが急務である。

エネルギー利用を効率化するためには、現状におけるエネルギーの浪費の実態について徹底的に調査・分析した上で改善策を練ることが不可欠である。そのためには、エネルギーの質を考慮することが重要であると著者らは考えている。一般的にエネルギーを利用することを「エネルギー消費」と呼び、熱量単位でのエネルギーの量で計量するが、熱量保存則に従えばエネルギーは失われることはない。実際にはエネルギー消費とは、エネルギーの量ではな

く質の変化であるから、熱量単位でのエネルギーの量で計量することは必ずしも本質的とは言えない。

例えばCO₂排出量の増大が問題となっている民生業務部門について、これまでも数多くの実態調査がなされているが¹⁾、大半はエネルギーの量的な調査に終始しており、質的な浪費については無頓着であったという感がある。例えば、最近の潜熱回収型のガス給湯器のエネルギー効率率は約95%であるからエネルギーの量に基づいた評価ならばほとんどエネルギー損失がないと判断されることになる。これに対し、エネルギー消費の本質がエネルギーの質の変化であることを考慮すれば、40~50℃の温熱を得るために1500℃もの高熱が得られる化石燃料をそのまま燃やすことが非常に大きなエネルギー資源の浪費であることは直感的には理解できる。しかしながら、熱量ベースでのエネルギー効率ではこうした質的な損失を表現することができない。こうしたことから、エネルギーの浪費を的確に評価するための一つの考え方として、エネルギー消費ではなく、エネルギーフローに伴うエネルギーの質の変化という形で把握することに意義があることが理解できる。

エネルギーの質を定量化する方法として、著者らは「エクセルギー」に着目している。エクセルギーとは「理論上取り出し得る力学的仕事の最大値」で

ある²⁾。エクセルギーは機械工学分野などでは古くから用いられてきたが、マクロな地球温暖化対策の研究において十分に議論されてきたとは言い難い。この研究分野では宿谷ほか²⁾による一連の研究成果は貢献が大きい、エネルギー消費量を計量指標とした膨大な研究成果と比較すればエクセルギーでの評価事例は、その重要性のわりに非常に少ないと言える。都市・建築スケールでの評価事例としては家庭用コージェネレーションシステムに対する評価³⁾や太陽光エネルギー利用に対する評価^{4,5)}、地域熱環境の評価⁶⁾などがあるが、今後さらに研究成果の蓄積が必要である。とくに民生部門では重要度が高い事務所ビルにおいて、実建築を対象とした評価事例が見当たらない。そこで本研究は事務所ビルにおける実測データを用いて、冷暖房システムによるエネルギーフローとそれに伴うエクセルギー消費を定量化することを目的とした。

2. エクセルギー評価の意義

本研究はエネルギー消費量の評価では捉えられないエネルギーの質的な浪費をエクセルギーにより定量化することで、今後のエネルギーの効率的利用を検討するための基礎研究と位置づけるものである。

既往研究において建築・街区スケールの省エネルギー評価や熱環境の評価などでエクセルギーを用いた事例はあるが^{3~6)}、エクセルギーを用いることの意義が必ずしも明確ではないものも多いように思われる。これについて著者は、エネルギーとエクセルギーという二つの計量指標は、使い分けることが重要であると考えている。建築環境の分野では過去にエクセルギーにより評価することについて賛否両論があったが^{7~10)}、エネルギーとエクセルギーのどちらの評価が有効かという議論が中心であった。しかしこれらの二つの計量指標は物理的な意味も実際の値も異なるので、実際にはどちらが有効ではなく、どう使い分けるべきかが重要であると著者らは考えている。前述した通り、確かにエネルギー消費とは実際にはエネルギーの量ではなく質の変化であるからエクセルギーを用いる方がより本質的であるという見方ができる。しかしながら、CO₂排出量とより直接的に結びつくのは化石燃料消費量であるから、現状評価のみを目的とするならば一次エネルギー消費量を評価する方がより直接的であると考えられるため、エネルギー消費という概念を根本的に否定することは不適切である。多くの既往研究ではこの点を十分に議論せずにエクセルギーの値を算出して

るため、結果をどう解釈するか、値をどう活用するかという点が不明確であるという印象がある。

これに対し、エネルギーの資源性の損失を定量化し、技術開発による将来的なCO₂削減の余地がどこにあるかを探るといった目的ならば、熱力学第2法則で考えることが不可欠である。例えば火力発電の発電効率やヒートポンプのCOPなどのように、入力エネルギーと出力エネルギーとでエネルギーの質が異なるようなエネルギー変換では、熱量ベースのエネルギー効率では理論上の限界が100%ではないため、技術開発による効率向上のポテンシャルを明らかにすることができない。こうした場合はエネルギーの質を示す指標として、エクセルギーで評価することに意義があると考えている。

とくに環境システム分野では、未利用エネルギー利用やエネルギー多段階利用なども含むより複雑な都市代謝システムの評価や将来シナリオの検討が必要である。こうした場合にはエネルギー消費ではなくエネルギーフローとエクセルギー消費という形で把握することがとくに有益である。また、こうした種々のエネルギー関連技術について、現状の技術的な効率の限界ではなく、熱力学第2法則による理論上の効率の限界を明らかにしておくことには少なからず意義があると考えている。本研究はその基礎研究と位置づけるものである。

3. 計測と解析の概要

本研究における評価対象建物は国立環境研究所地球温暖化研究棟である(図-1)。この建物では多数のセンサーを設置し、エネルギー消費や空調需要の実測を行なっている¹¹⁾。本研究ではこの建物の3階・東ウイングの4室のエリア(図-1参照)を評価対象とする。この対象エリアには研究所特有の特殊な実験設備などはなく、利用状況は一般的な事務所ビルとみなせる。空調設備や断熱なども平均的な事

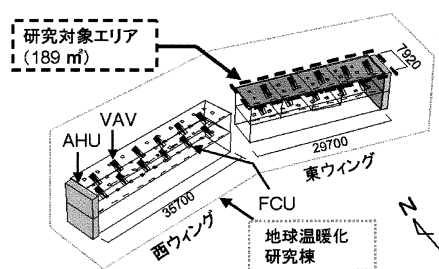


図-1 研究対象建物

務所ビルのサンプルとみなして差し支えないと考えている。解析対象期間は対象室の利用状況や気象条件を参照し、典型的な冷房・暖房の運用がなされたと判断される期間として、冷房は2006/8/21～8/25の5日間、暖房は2006/12/19～12/22の4日間を選択した。

評価対象建物における冷房・暖房のフローについて模式図をそれぞれ図-2、図-3に示す。本研究では、国立環境研究所内のエネルギーセンターにおいて蒸気ボイラにより発生した蒸気が対象建物へ搬送され、一連の空調システムを経由して対象エリアへ給気されるまでのエネルギーおよびエクセルギーについて評価を行う。本研究では蒸気ボイラの熱効率は1.0、エアハンドリングユニット(AHU)とファンコイルユニット(FCU)の熱効率は0.95とした。冷房システム(図-2)の吸収式冷凍機は機器仕様や試験成績書に基づいてCOPを1.1678、冷水温度を7.5℃とした。暖房システム(図-3)の熱交換器の熱効率は0.95とし、温水温度は設計値の55℃を用いて計算した。AHUとFCUは別々にデータを取得しているが、他と比較しやすくするため本研究では両者の合計値のみを用いる。エクセルギーを計算する際の空調の吹き出し温度は、AHUは給気温度、FCUは吹き出し口に設置したサーミスタ温度計で計測した値を用いた。エクセルギーを計算する際に環境温度となる外気温は対象建物屋上に設置した簡易気象計測システムにより計測した。

次の式(1)が一般的な熱エクセルギーの計算式²⁾である。

$$E = c_p V (T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \quad [W] \quad \dots(1)$$

ただし、 E ：熱エクセルギー[W]、 $c_p V$ ：熱容量[J/K]、 T ：対象物の温度[K]、 T_0 ：外気温(環境温度)[K]である。ただし実際に計算する上では文献¹²⁾に従い、次の通りとした。

$$\varepsilon = \frac{1 - \left\{ T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right\}}{T - T_0} \quad \dots(2)$$

$$E = \varepsilon \times Q \quad [W] \quad \dots(3)$$

ただし、 ε ：エクセルギー率[-]、 Q ：エネルギー(熱量)[J/s]である。式(2)は熱エネルギーに対する熱エクセルギーの割合を示すエクセルギー率(有効比)の計算式である。これらの式により冷熱及び温熱エクセルギーを算出した。蒸気のエクセルギーに

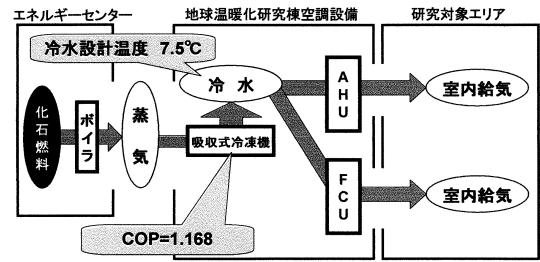


図-2 冷房システムの模式図

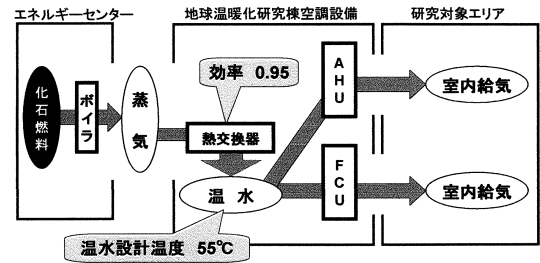


図-3 暖房システムの模式図

ついては、文献^{12, 13)}に示された方法に従い、次式により環境温度と同温の液体水に対するエクセルギーを計算した。

$$Ex = (H - H_0) - T_0(s - s_0) \quad [W] \quad \dots(4)$$

ただし、 Ex ：飽和蒸気を持つ熱エクセルギー、 H ：0℃を基準とした蒸気のエンタルピー、 H_0 ：環境温度と同温の水の0℃を基準としたエンタルピー、 s ：0℃を基準とした蒸気のエン트로ピー、 s_0 ：環境温度と同温の水の0℃を基準としたエン트로ピーである。なお、蒸気圧の計測ができなかったため、本研究では吸収式冷凍機や熱交換器の定格値を参考に0.49 MPa(G)の飽和蒸気として計算した。蒸気ボイラで利用している化石燃料は都市ガス13Aである。本研究では化石燃料のエクセルギーは文献¹⁴⁾を参考にエクセルギー率を0.95と設定した。

4. 結果と考察

まず冷房について対象期間(2006/8/21～8/25)のエネルギーおよびエクセルギーの日積算値を図-4に示した。この図ではエネルギーの形態に関わらず利用可能な熱量をエネルギー量として示した(図-5も同様)。このためCOPが1を超える吸収式冷凍機では見かけ上、エネルギーの量が増えている。もちろ

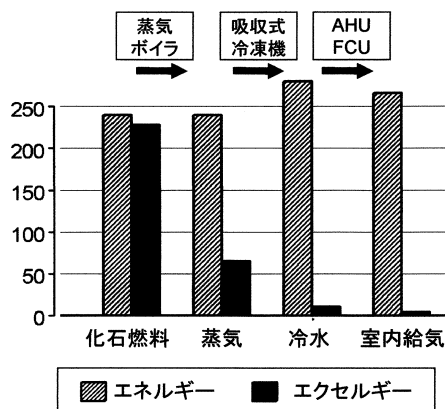


図4 冷房-エネルギー形態別日積算値 [kWh/日]

んこれは冷熱である。図-4においてエネルギーとエクセルギーを比較すると、エネルギーについてはどの形態でも大きな損失が見られず、むしろ若干増えているが、エクセルギーについては化石燃料を蒸気ボイラで燃焼させた時点で大量の損失が生じていることが分かる。エネルギー及びエクセルギーの各形態での概算値は化石燃料、蒸気、冷水、室内給気の順にそれぞれ、エネルギーでは 240, 240, 280, 266 [kWh/日], エクセルギーでは228, 65, 11, 4 [kWh/日] となった。

次に暖房について、冷房と同様に対象期間（2006/12/19～12/22）のエネルギーおよびエクセルギーの日積算値を図-5に示した。この結果、やはりエクセルギーでは蒸気ボイラにおけるエクセルギー損失が非常に大きいことが分かる。エネルギー及びエクセルギーの各形態での概算値は化石燃料、蒸気、温水、室内給気の順にそれぞれ、エネルギーでは175, 175, 166, 158[kWh/日], エクセルギーでは166, 55, 12, 10[kWh/日]となった。

以上の計算結果から冷暖房システムのエクセルギー利用効率を算定すると、室内に供給された時点で化石燃料（1次エネルギー）に対して冷房は1.5～3%, 暖房は5～6%（いずれも日中の概算値）とわずかなエクセルギーしか有していないという結果であった。したがって、現状の冷房と暖房を維持するのに本来必要なエクセルギーの需要に対して、現状の化石燃料の消費量は非常に大きいといえる。このことは、建物の冷暖房の分野では今後の技術開発による省エネルギーの余地が非常に大きいことを示唆している。

ただし本研究で評価対象とした冷暖房システムでは冷房、暖房ともに蒸気ボイラにおいて化石燃料が蒸気になる段階で既に70%程度のエクセルギーを

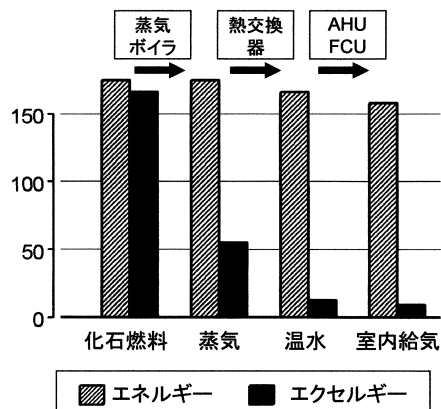


図5 暖房-エネルギー形態別日積算値 [kWh/日]

損失していたという点には注意が必要である。蒸気ボイラでは原理的にCOPが1を超えることはあり得ないので、化石燃料と蒸気のエクセルギー率の差が、そのままエクセルギー損失となる。このエクセルギー損失を回避できない限り、他の各機器の効率を個別に向上しても、全体としては大きな省エネルギー効果が見込めないことが今回の評価結果から分かる。もちろん実際には蒸気のエクセルギーは蒸気圧に依存するため厳密ではないが、仮にこの蒸気ボイラの最高使用圧力（10kgf/cm²）を用いて計算しても、エクセルギー率は環境温度によって30～34%程度であり、大きな差異は生じない。この結果から、冷房については今後、蒸気ボイラの蒸気圧を高めることと吸収式冷凍機のCOPを高めることにより若干の効率向上の可能性があることが推察される。しかしながら暖房については、今回の評価対象設備ではシステム全体としてCOPが1を超えることが原理的にあり得ない。したがって現状のシステムのままでは、上述のエクセルギー損失は不可避であることが理解できる。こうしたことから、今後の技術開発により省エネルギー化を図るならば、現状のシステムでは限界があると言わざるを得ず、将来的には個別機器の効率向上ではなく、大規模なシステムの更新が必要となることが予想される。

5. まとめ

本研究では事務所ビルにおける実測データに基づき、化石燃料から室内へ供給されるまでの空調システムのエネルギーフローについてエクセルギーを算出した。本研究で対象とした空調システムでは、冷房、暖房ともエネルギー効率は概ね100%に近いも

の、エクセルギーの利用効率はせいぜい数%に過ぎないという結果となった。したがってエネルギー効率のみの評価ならばエネルギー損失が少ないと判断されていたが、実際には技術開発による省エネルギーの余地は非常に大きいと考えられる。エネルギー消費の本質がエネルギーの質の変化であることを考えれば、常温付近の冷温水温度でも可能な冷暖房に高エクセルギーの化石燃料を使うことが非常に大きなエネルギーの資源的価値の浪費であることは理解できるが、エネルギー効率による評価ではこうした質的な損失を表現することができなかった。これに対し、本研究で行なったエクセルギー評価ではこうしたエネルギーの質的な価値を定量化することができた。この結果、今後の技術開発の方向性を検討するための示唆的な知見が得られた。

前述した通り、エネルギーとエクセルギーは使い分けることが肝要である。これらの二つの計量指標は意味が全く違うため、どちらが的確か、どちらが重要かといった議論をする必要はなく、当然ながらどちらも重要である。ところが現状では、圧倒的多数の研究ではエネルギーのみで計量されており、重要性との兼ね合いで考えれば、エクセルギーでの研究事例は非常に少ない。したがって今後さらにエクセルギーに基づく研究成果を蓄積する必要がある。また、本研究では基礎研究として建築スケールでの評価を行なったが、さらにマクロな日本の温暖化対策やエネルギー政策の議論の中でエネルギーの質という視点が欠落しているケースが多いと感じている。こうしたことから今後は評価対象を拡大し、例えば太陽エネルギーやバイオマスなどの種々のエネルギーを含めたより複雑なシステムにおけるエネルギーフローとエクセルギー消費について、総合的に評価することが必要であると考えている。

謝辞

本研究を行うにあたり東京電機大学の百田真史氏、独立行政法人国立環境研究所の一ノ瀬俊明氏、株式会社山武の神村一幸氏にご指導、ご協力を頂きました。本研究は環境省石油特別会計地球温暖化対策技術開発事業・省エネ対策技術開発実用化開発「建築物における空調・照明等自動コントロールシステム技術開発」（課題代表者：藤沼康実）および平成21年度環境省地球環境研究総合推進費（課題番号：Hc-086）、「低炭素型都市づくり施策の効果とその評価に関する研究」（課題代表者：井村秀文）の支援により実施されました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平野 勇二郎, 外岡 豊, 伊香賀 俊治, 亀卦川幸浩, 藤沼 康実, 下田 吉之: 民生業務部門エネルギー消費原単位に関する各種資料の比較評価, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, No.633, pp.1331-1339, 2008.
- 2) 宿谷昌則, 西川竜二, 高橋達, 斉藤雅也, 浅田秀男, 伊澤康一: 「エクセルギーと環境の理論」 北斗出版, 2004.
- 3) 藤井康正, 細川智弘, 山本博巳, 山地憲治, 福田桂, 井上貴至: エクセルギーを適用した家庭用コージェネレーションの総合エネルギー効率の評価, 第23回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp.335-338, 2007.
- 4) 平野勇二郎: 住宅における太陽エネルギー利用技術のエクセルギー評価, 環境情報科学論文集, No.22, pp.209-214, 2008.
- 5) 岩脇秀喜, 藤澤 徹, 谷 辰夫: 太陽光・熱ハイブリッドコレクタのエクセルギー評価. 太陽エネルギー, Vol.24, No.3, pp.37-44, 1998.
- 6) 松崎 彩, 敵 網林: 放射エクセルギーの概念に基づいた地域熱環境の評価, 第32回環境システム研究論文発表会講演集, Vol.32, pp.171-176, 2004.
- 7) 松縄堅, 宿谷昌則, 前川哲也: 建築環境システムのエクセルギー評価 (その1: エクセルギー概念の導入), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, p.1163-1164, 1990.
- 8) 中原信生, 唐潔: 空調エネルギーのエクセルギー評価に関する考察(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D.環境工学, pp.985-986, 1991.
- 9) 宿谷昌則: 建築環境システムとエントロピー・エクセルギー: その1 建築環境システムの持続可能性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学分冊, pp.49-50, 1993.
- 10) 長谷川雅一, 中村泰人: 建築環境システム評価へのエクセルギー概念の導入に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学分冊, pp.419-420, 1994.
- 11) Yoshida, Y.: Development of air conditioning technologies to reduce CO₂ emissions in the commercial sector, *Carbon Balance and Management* 2006, 1:12.
- 12) 山田成明, 篠原利光, 宿谷昌則: エネルギーの簡易計算図表の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.493-494, 1997.
- 13) 山口譲治, 日渡賢一, 宿谷昌則: 発電所からの排出蒸気を利用する冷房システムのエクセルギー・エントロピー過程, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.455-456, 1996.
- 14) 田中俊六「省エネルギーシステム概論」 オーム社, 2003.

ENERGY UTILIZATION PROCESS AND EXERGY CONSUMPTION FOR THE AIR-CONDITIONING SYSTEM IN AN OFFICE BUILDING

Yujiro HIRANO, Hidefumi IMURA, Tetsuo KAWATA and Yukiko YOSHIDA

In responding to the Kyoto Protocol, energy saving for CO₂ emissions reduction have been the high-priority issue. This paper presents an exergy evaluation of an air conditioning system based on measurement data of a real office building. The result of this study showed that the exergy efficiencies of the air-conditioning system for space cooling and space heating were only 1.5-3 % and 5-6 %, respectively. Especially, the exergy loss of the steam boiler was approximately 70 %. This result implies that future technical development of the air-conditioning system has a high degree of potential for energy saving.